



中国五矿集团有限公司
CHINA MINMETALS CORPORATION

**中国五矿多金属结核合同区 A-5 区块
采矿车单体试验环境影响声明报告
(Environmental Impact Statement)**



中国五矿集团有限公司

2024 年 3 月



执行摘要.....	I
项目背景.....	I
拟议活动区域.....	II
拟议试验系统.....	II
拟议采矿车试验计划.....	III
环境基线研究.....	III
地质环境特征.....	IV
物理海洋特征.....	V
海水化学特征.....	V
生物群落特征.....	VI
影响评估.....	VII
缓解措施.....	VIII
环境管理和监测计划.....	IX
报告.....	X
向 ISA 报告突发事件和处理结果	X
年度报告.....	X
利益攸关方协商.....	X
结论.....	XI
1 引言.....	1
1.1 目标.....	1
1.2 背景.....	1
1.3 项目可行性.....	2
1.4 项目历史.....	3
1.4.1 合同区概况.....	3
1.4.2 合同区勘探和环境义务履行的历史情况.....	4

1.4.3 采矿车及部件的试验与发展情况.....	6
1.5 项目提议者情况.....	10
1.5.1 中国五矿简介.....	10
1.5.2 勘探合同基本情况.....	12
1.5.3 本项目组织框架.....	12
2 政策、法律和行政背景.....	15
2.1 相关的国家和国际立法、政策与程序.....	15
2.1.1 国际立法、政策、程序和准则.....	15
2.1.2 国家立法、程序和标准及准则.....	20
2.2 其他相关的国家立法、政策和条例.....	23
2.3 其他相关的国际公约和协议.....	24
2.4 其他相关的标准、原则和政策.....	26
2.4.1 ISA 其他相关政策和建议	26
2.4.2 其他机构或行业相关标准、原则和守则.....	27
2.5 勘探活动管理相关国内程序.....	27
2.6 相关划区管理工具.....	28
3 说明拟议的开发活动.....	29
3.1 项目区的定义.....	29
3.1.1 地点.....	29
3.1.2 相关活动.....	34
3.2 矿产资源情况.....	34
3.3 项目构成.....	35
3.3.1 项目规模.....	35
3.3.2 试验系统及方案.....	35
3.3.3 转运.....	50
3.3.4 现场处理.....	50
3.3.5 辅助设备.....	50

4 说明现有的物理化学环境.....	52
4.1 关键信息.....	52
4.2 区域概述.....	52
4.2.1 区域地质背景.....	52
4.2.2 区域物理海洋背景.....	56
4.2.3 区域海水化学背景.....	58
4.3 完成的研究.....	59
4.3.1 CTD 剖面观测及采样站位.....	60
4.3.2 锚系定点观测站位.....	61
4.3.3 结核资源调查站位.....	63
4.3.4 沉积物调查站位.....	64
4.3.5 原位土工调查站位.....	64
4.4 气象学和空气质量.....	65
4.4.1 气象学.....	65
4.4.2 空气质量.....	68
4.5 地质特征.....	70
4.5.1 地形特征.....	70
4.5.2 结核特征.....	75
4.5.3 沉积特征.....	78
4.6 物理海洋特征.....	97
4.6.1 潮流特征.....	97
4.6.2 温盐剖面特征.....	98
4.6.3 海流特征.....	102
4.6.4 长期观测特征.....	104
4.7 海水化学特征.....	118
4.7.1 pH.....	118
4.7.2 溶解氧 (DO)	119
4.7.3 营养盐 (Nutrients)	120

4.7.4 总悬浮颗粒物 (TSM)	121
4.7.5 颗粒有机碳 (POC)	121
4.7.6 溶解无机碳 (DIC) 和总有机碳 (TOC)	122
4.7.7 沉积物通量特征.....	123
4.8 自然灾害.....	125
4.9 噪音和光.....	125
4.10 现有物理化学环境总结.....	128
4.11 参考文献.....	130
5 说明现有的生物环境.....	132
5.1 关键信息.....	132
5.2 区域概述.....	132
5.3 完成的研究.....	134
5.4 生物环境特征.....	134
5.4.1 表层.....	134
5.4.2 中层.....	147
5.4.3 底层.....	149
5.5 现有生物环境的总结.....	177
5.6 参考文献.....	178
6 说明现有的社会经济环境.....	180
6.1 关键信息.....	180
6.2 现有的利用情况.....	180
6.2.1 渔业.....	180
6.2.2 海上运输.....	182
6.2.3 旅游情况.....	183
6.2.4 海洋科学研究.....	183
6.2.5 划区管理工具.....	185
6.2.6 其他.....	187

6.3 具有考古或历史意义的遗址.....	188
6.4 小结.....	188
6.5 参考文献.....	188
7 对物理化学环境的影响评估和拟议的缓解措施.....	189
7.1 关键信息.....	189
7.2 说明潜在影响的类别.....	189
7.3 空气质量.....	191
7.3.1 潜在影响和需要解决的问题.....	191
7.3.2 减轻影响的环境管理措施.....	191
7.3.3 残留影响.....	191
7.4 地质环境.....	192
7.4.1 潜在影响和需要解决的问题.....	192
7.4.2 减轻影响的环境管理措施.....	192
7.4.3 残留影响.....	193
7.5 物理海洋环境.....	193
7.5.1 潜在影响和需要解决的问题.....	193
7.5.2 减轻影响的环境管理措施.....	204
7.5.3 残留影响.....	205
7.6 海洋化学环境.....	205
7.6.1 潜在影响和需要解决的问题.....	205
7.6.2 减轻影响的环境管理措施.....	207
7.6.3 残留影响.....	207
7.7 海床沉积物环境.....	207
7.8 自然灾害.....	208
7.9 噪音和光.....	208
7.9.1 噪音.....	208
7.9.2 光.....	209

7.10 温室气体排放和气候变化.....	211
7.10.1 船舶的温室气体排放.....	211
7.10.2 采矿车对海床沉积物扰动造成的潜在温室气体排放风险.....	212
7.11 海上安全和试验与现有航运的相互影响.....	212
7.12 废物管理.....	213
7.13 累积影响.....	213
7.14 采矿车设计方面的环境影响缓解措施.....	215
7.15 参考文献.....	216
8 对生物环境的影响评估和拟议的缓解措施.....	219
8.1 关键信息.....	219
8.2 说明潜在影响的类别.....	219
8.3 表层.....	221
8.3.1 潜在影响和需要解决的问题.....	221
8.3.2 减轻影响的环境管理措施.....	225
8.3.3 残留影响.....	226
8.4 中层.....	226
8.5 底层.....	227
8.5.1 潜在影响和需要解决的问题.....	227
8.5.2 减轻影响的环境管理措施.....	233
8.5.3 残留影响.....	234
8.6 累积影响.....	234
8.7 参考文献.....	235
9 自然危害和意外事件.....	241
9.1 极端天气.....	241
9.1.1 热带气旋.....	241
9.1.2 非飓风的不利天气情况.....	245

9.2 自然灾害.....	246
9.3 意外事件.....	247
9.3.1 船舶意外事件及应急措施.....	247
9.3.2 采矿车意外事件及应急措施.....	249
9.4 参考文献.....	251
10 环境管理、监测和报告.....	252
10.1 组织结构和责任.....	252
10.1.1 项目组的组织管理及人员责任.....	252
10.1.2 海上现场调查组织管理及人员责任.....	253
10.2 环境管理系统.....	254
10.2.1 试验阶段划分.....	254
10.2.2 数据管理.....	255
10.2.3 样品管理.....	256
10.3 环境管理和监测计划.....	256
10.3.1 缓解和管理.....	256
10.3.2 监测计划.....	257
10.3.3 环境影响评估方案.....	275
10.4 报告.....	280
10.4.1 向 ISA 报告监测结果	280
10.4.2 向 ISA 报告突发事故和处理结果	280
11 产品监管.....	282
12 协商.....	283
13 术语和缩略语.....	284
14 研究小组.....	288
15 参考资料.....	290
16 附录.....	291
附录 1 底层扰动沉积物羽流模型研究报告.....	292

1 模型构建.....	299
2 模型验证.....	303
3 羽流模型结果.....	304
3.1 悬浮泥沙浓度水平分布.....	304
3.2 悬浮泥沙浓度垂向分布.....	336
3.3 再沉积厚度分布.....	341
4 小结.....	347
附录 2 环境基线参数调查方法和质量评估.....	348
1 地质基线.....	348
1.1 地形地貌.....	348
1.2 沉积物参数.....	352
2 物理海洋基线.....	358
2.1 锚系潜标.....	358
2.2 温盐结构.....	361
2.3 表层海流.....	363
3 化学基线.....	366
3.1 采样和分析方法.....	366
3.2 数据处理方法和质量控制.....	367
4 生物基线.....	371
4.1 叶绿素 <i>a</i> 和光合色素.....	371
4.2 微生物.....	373
4.3 微微型浮游生物.....	376
4.4 浮游植物.....	376
4.5 浮游动物.....	377
4.6 小型底栖生物.....	377
4.7 大型底栖生物.....	378
4.8 食腐生物.....	378
4.9 海鸟、海龟和哺乳动物.....	378

4.10 初级生产力.....	379
-----------------	-----

图目录

图 1.2-1 中国五矿合同区 8 个区块位置分布示意图	2
图 1.4-1 中国五矿多金属结核采矿车试验与发展情况	7
图 1.4-2 多金属结核水力式集矿原理样机	7
图 1.4-3 多金属结核湖试工程样机	8
图 1.4-4 “鲲龙 500”多金属结核采矿车 500 m 级海试.....	9
图 1.4-5 多金属结核采矿车 1000 m 级系统海试	9
图 1.5-1 中国五矿“价值创造型”社会责任推进模式.....	11
图 1.5-2 中国五矿 2013-2022 年环保数据对比图	12
图 3.1-1 中国五矿合同区 A-5 区块重点工作区、采矿活动区、IRZ、PRZ1 和 PRZ2 位置图	30
图 3.1-2 A-5 区块 CTA 位置图	31
图 3.3-1 本次采矿试验系统的系统组成	36
图 3.3-2 采矿车的结构总体设计与系统组成	37
图 3.3-3 多金属结核采集系统设计与采集的基本流程	37
图 3.3-4 “张謇号”多用途调查作业船.....	39
图 3.3-5 “大洋”号科学考察船.....	40
图 3.3-6 采矿车单体试验两次水下作业路径规划图	49
图 3.3-7 “海龙 4”ROV	50
图 3.3-8 “潜龙 4”AUV	51
图 4.2-1 太平洋区域地质及磁条带分布图	53
图 4.2-2 东太平洋 CC 区沉积物类型分布图	54
图 4.2-3 东太平洋 CC 区沉积物厚度分布等值线图	55
图 4.2-4 太平洋结核出现频率分布图	56

图 4.2-5 热带太平洋洋流分布及其气候影响	57
图 4.3-1 2021 年航次回收锚系 DY70II-A5-MX01 结构图	62
图 4.3-2 2022 年回收锚系 DY73I-A5-MX02 结构图	62
图 4.3-3 2023 年航次回收的锚系 DY79I-A5-MX01 结构图	63
图 4.3-4 A-5 区块箱式、重力柱和多管取样站位及原位土工站位分布图 ...	64
图 4.4-1 A-5 区块平均风速的日变化	65
图 4.4-2 A-5 区块各月份的矢量风场（2012-2023）	67
图 4.4-3 A-5 区块各月份的矢量风场（2012-2023）（续前）	68
图 4.4-4 A-5 区块大气氮氧化物的排放情况（2015-2018）	69
图 4.4-5 A-5 区块大气二氧化硫的排放情况（2015-2018）	70
图 4.5-1 A-5 区块地形地貌特征	71
图 4.5-2 A-5 区块地形分类	72
图 4.5-3 A-5 区块采矿活动区 AUV 测深地形图	74
图 4.5-4 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核丰度频率分布图	75
图 4.5-5 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核甲板覆盖率频率分布图	76
图 4.5-6 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核丰度-甲板覆盖率关系图	76
图 4.5-7 A-5 区块采矿活动区结核丰度等值线图	77
图 4.5-8 A-5 区块采矿活动区结核 NEG 等值线图	77
图 4.5-9 A-5 区块采矿活动区 AUV 光学调查结核覆盖率分布特征	78
图 4.5-10 A-5 区块重点工作区沉积物粒级百分含量	79
图 4.5-11 A-5 区块重点工作区沉积物不同粒级参数空间分布图	80
图 4.5-12 A-5 区块柱状沉积物粒级组分垂向变化图	80
图 4.5-13 A-5 区块重点工作区沉积物重金属含量分布图	82
图 4.5-14 A-5 区块重点工作区柱状沉积物重金属元素垂向变化图	83

图 4.5-15 A-5 区块重点工作区表层沉积物有机碳含量分布图	84
图 4.5-16 A-5 区块重点工作区柱状沉积物有机质垂向变化图	84
图 4.5-17 A-5 区块各测站单位干重沉积物叶绿素 <i>a</i> 含量 ($\mu\text{g/g}$)垂直分布...	86
图 4.5-18 A-5 区块重点工作区沉积物上覆水和孔隙水重金属含量垂向分布	89
图 4.5-19 沉积物上覆水和孔隙水营养盐含量垂向分布	91
图 4.5-20 中国五矿合同区 A-5 区块贯入强度统计分析	93
图 4.5-21 中国五矿合同区 A-5 区块剪切强度统计分析	94
图 4.5-22 DY73II-A5-GC01 柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度分布图.....	95
图 4.5-23 DY73II-A5-GC04 柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度分布图.....	97
图 4.6-1 DY70II-A5-MX01 锚系观测点海水流场潮汐周期分布图	98
图 4.6-2 A-5 区块 CTD、锚系潜标观测站位置示意图	99
图 4.6-3 2017-2022 年 CTD 温度随深度变化图	100
图 4.6-4 2017-2022 年 CTD 盐度随深度变化图	102
图 4.6-5 2017 年航次 A-5 区域海流图	103
图 4.6-6 2019 年航次 A-5 区域海流图	103
图 4.6-7 2021 年航次 A-5 区域海流图	104
图 4.6-8 2022 年航次 A-5 区域海流图	104
图 4.6-9 A-5 区块底层海水温度特征	106
图 4.6-10 A-5 区块底层海水盐度特征	108
图 4.6-11 A-5 区块离底 20m（上）和 100m（下）流速和浊度对应关系 .	109
图 4.6-12 A-5 区块单点海流计观测的年均流场特征玫瑰图	111
图 4.6-13 A-5 区块近底层极值流速及其方向	112
图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布	113

图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布 (续前)	114
图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布 (续前)	115
图 4.7-1 A-5 区块 IRZ 和 PRZ1 位置及历次 CTD 采样站位分布	118
图 4.7-2 A-5 区块海水 pH、DO 含量和营养盐垂直分布特征	119
图 4.7-3 A-5 区块海水总悬浮颗粒物 (TSM) 含量分布特征	121
图 4.7-4 A-5 区块海水颗粒有机碳 (POC) 含量分布特征	122
图 4.7-5 A-5 区块海水溶解无机碳 (DIC) 含量分布特征	123
图 4.7-6 A-5 区块海水总有机碳 (TOC) 含量分布特征	123
图 4.7-7 DY70II-A5-MX01 站沉降颗粒物通量变化 (2019 年 8 月至 2020 年 8 月)	124
图 4.9-1 深水区 (1000 m 深度) 广义海洋环境噪声谱级	125
图 4.9-2 300 m 深度的水听器在 20-1000 Hz 频率中记录的功率谱密度(PSD) 和声压级(SPL)	127
图 4.9-3 300 m 深度的水听器记录的 20-1000 Hz 频率范围内的月平均声压谱 级	127
图 4.9-4 300 m 深度的水听器记录的七月声压谱百分位频率分布	128
图 5.2-1 全球尺度上层海洋生物地理分区(Spalding et al., 2012)	132
图 5.2-2 全球尺度深海海洋底层生物地理分区 (Watling et al., 2013)	133
图 5.2-3 CC 区 POC 通量分布图	133
图 5.2-4 全球海洋初级生产力分布图	134
图 5.4-1 A-5 区块表层叶绿素的周年变化 (1997-2019) 和 A-5 区块内的 IRZ、 PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素的周年变化 (1997-2019)	136
图 5.4-2 A-5 区块内及邻域表层叶绿素浓度空间格局的周年变化 (1997-2019)	137
图 5.4-3 A-5 区块 DY50I-A5-S06-CTD11 站 (上左) 和 A-8 区块 DY50II-A8-	

S03-CTD01 站（上右）初级生产力剖面分布，并展示两个站位的各水层初级生产力对比（下）	138
图 5.4-4 A-5 和 A-8 区块两测站水柱积分初级生产力比较	139
图 5.4-5 A-5 区块 DY73I-A5-CTD-01 和 DY73I-A5-CTD-02 叶绿素 <i>a</i> 浓度剖面分布	140
图 5.4-6 A-5 区块 DY50I-A5-S06-CTD11 站主要光合色素浓度剖面分布（单位：ng/L）	140
图 5.4-7 A-8 区块 DY50II-A8-S03-CTD01 站主要光合色素浓度剖面分布（单位：ng/L）	141
图 5.4-8 A-5 和 A-8 区块两测站水柱积分色素浓度比较	141
图 5.4-9 各调查站点浮游植物种类数	142
图 5.4-10 A-5 区块浮游植物群落结构	142
图 5.4-11 各调查站点浮游植物丰度	143
图 5.4-12 A-5 区块浮游动物群落结构组成	144
图 5.4-13 基于水样 eDNA 的鱼类多样性	146
图 5.4-14 鱼类 eDNA 分析水样采样点站位图	147
图 5.4-15 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物生物量的垂直分布	147
图 5.4-16 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物丰度的垂直分布	148
图 5.4-17 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物物种多样性随着水深的变化	149
图 5.4-18 DY70I-A5-MC01 站位多管分层沉积物样品原核微生物种群测序的稀释度曲线	150
图 5.4-19 中国五矿 2021 年航次 DY70I-A5-BC03 箱式表层沉积物及 DY70I-A5-MC01 站位多管分层沉积物样品不同层次原核微生物种群在目水平的组成分析	151
图 5.4-20 IRZ 小型底栖生物群落结构	153

图 5.4-21 IRZ 各站位小型底栖生物丰度垂直分布特征（单位为 10 ind./cm^2 ）	153
图 5.4-22 IRZ 小型底栖生物垂直分布	154
图 5.4-23 PRZ1 调查区小型底栖生物群落结构	155
图 5.4-24 PRZ1 各站位小型底栖生物丰度垂直分布特征（单位为 10 ind./cm^2 ）	155
图 5.4-25 PRZ1 小型底栖生物垂直分布	156
图 5.4-26 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物群落结构对比	157
图 5.4-27 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物丰度对比（单位为 ind./10cm^2 ）	157
图 5.4-28 IRZ 与 PRZ1 小型底栖垂直分布对比	158
图 5.4-29 IRZ 大型底栖生物群落结构	159
图 5.4-30 IRZ 大型底栖生物垂直分布	160
图 5.4-31 PRZ1 大型底栖生物群落结构	160
图 5.4-32 PRZ1 大型底栖生物垂直分布	161
图 5.4-33 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物群落结构对比	162
图 5.4-34 IRZ 与 PRZ1 小型底栖垂直分布对比	162
图 5.4-35 中国五矿合同区 A-5 区块海底摄像测线及分区图	163
图 5.4-36 巨型底栖生物门水平丰度分布	164
图 5.4-37 巨型底栖生物纲/目等大类水平丰度分布	164
图 5.4-38 A-5 区块与 CC 区西部 APEI 区巨型底栖无脊椎动物平均丰度比较 （单位为 ind./ha ）	165
图 5.4-39 巨型底栖生物按生活方式分类的比例图	165
图 5.4-40 PRZ1 与 IRZ 巨型底栖生物丰度比较（单位为 ind./ha ）	166
图 5.4-41 PRZ1 与 IRZ 巨型底栖生物群落结构比较	167
图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物	168

图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物（续前）	169
图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物（续前）	170
图 5.4-43 上覆水完整的箱式取样站位图（A-5 区块西侧为 PRZ1，东侧为 PRZ2）	171
图 5.4-44 A-5 区块结核附着生物群落结构	172
图 5.4-45 采集的部分结核附着生物照片（标尺为 1 cm）	173
图 5.4-46 A-5 区块 Lander 诱捕的食腐生物	174
图 5.4-47 鼠尾鳕 <i>C. yaquinae</i> 的 COI 系统发育树	175
图 5.4-48 鼠尾鳕 <i>C. yaquinae</i> 采集地位置示意图	176
图 6.2-1 中国五矿 A-5 区块所在区域的渔业捕捞强度	181
图 6.2-2 全球公海渔场的分布（基于捕捞努力量）（Sala et al., 2018）	182
图 6.2-3 未来气候变化情景下 CC 区金枪鱼资源变化情况（Amon et al., 2023）	182
图 6.2-4 中国五矿 A-5 区块所在区域的海上运输强度（白框为项目所在区域）	183
图 6.2-5 TPOS 观测系统与中国五矿 A-5 区块所在区域的位置关系（黑框为项目所在区域）	184
图 6.2-6 Argo 观测系统与中国五矿 A-5 区块所在区域的位置关系（红框为项目所在区域）	185
图 6.2-7 CC 区环境管理计划	186
图 6.2-8 美国的太平洋海洋保护区网络	187
图 6.2-9 A-5 区块内光缆位置示意图	188
图 7.5.1 模型水平网格（上图）、垂直网格（中图）及水深图（下图）	196
图 7.5-2 模拟的采矿车采集路径示意图	197
图 7.5-3 模型结果（红色）和实测流速（蓝色）比较	198

图 7.5-4 Case3 第二次采集试验结束时悬浮泥沙浓度分布图.....	200
图 7.5-5 Case4 第二次采集试验结束时悬浮泥沙浓度分布图.....	200
图 7.5-6 Case3 悬浮泥沙浓度垂向分布图.....	201
图 7.5-7 Case4 悬浮泥沙浓度垂向分布图.....	202
图 7.5-8 Case3 再沉积厚度分布图.....	203
图 7.5-9 Case4 再沉积厚度分布图.....	203
图 7.6-1 对结核区沉积物扰动后重金属释放的模拟试验结果 (Shi et al. 2023)	206
图 7.11-1 全球航运的主要航线热力图 (March et al. 2021)	213
图 8.3-1 太平洋的“生物多样性关键区域” (Key Biodiversity Areas, KBAs)	222
图 8.3-2 太平洋的“重要海洋哺乳动物区域” (Important Marine Mammal Areas, IMMAs)	223
图 8.3-3 太平洋 23 种顶级海洋捕食者的分布 (Block et al. 2011).....	223
图 8.3-4 模拟深海采矿噪音的传播距离 (Williams et al. 2022b)	224
图 9.1-1 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 4 月份热带气旋路径图	242
图 9.1-2 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 5 月份热带气旋路径图	242
图 9.1-3 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 6 月份热带气旋路径图	243
图 9.1-4 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 7 月份热带气旋路径图	243
图 9.1-5 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 8 月份热带气旋路径图	244
图 9.1-6 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 9 月份热带气旋路径图	244
图 9.1-7 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 10 月份热带气旋路径图 ...	245
图 9.1-8 调查区域过去 42 年 (1980-2022 年) 11 月份热带气旋路径图....	245
图 9.1-9 A-5 区块 2019-2022 年期间海表面日均风速情况 (超过 6 级风的天气 采用红色标注)	246

图 10.1-1 项目组的组织管理架构	252
图 10.1-2 海上现场调查组织管理架构	253
图 10.3-1 采矿车的多参数在线环境监测系统设计图	259
图 10.3-2 采矿车的多参数在线环境监测系统的主要分系统构成示意图 ..	259
图 10.3-3 分布式环境监测阵列	262
图 10.3-4 海流羽流特征近底监测平台	263
图 10.3-5 再沉积厚度测量系统	263
图 10.3-6 锚系潜标的设计图（I 型和 II 型）	264
图 10.3-7 锚系潜标的设计图（III 型和 IV 型）	265
图 10.3-8 锚系潜标的设计图（V 型和 VI 型）	265
图 10.3-9 监测阵列的设计	266
图 10.3-10 AUV 近底监测拟采用的“潜龙 4”AUV	267

表目录

表 1.4-1 中国五矿合同区主要资源调查工作信息统计表	4
表 1.4-2 中国五矿合同区主要环境调查工作量信息表	6
表 2.1-1 相关国家标准和准则	22
表 2.3-1 相关国际公约和协议	25
表 2.4-1 其他相关标准、原则和守则	27
表 3.1-1 采矿试验区 CTA 参数特征	32
表 3.1-2 中国五矿合同区重点工作区、采矿活动区、IRZ、PRZ1 和 PRZ2 角 点坐标信息	33
表 3.2-1 A-5 区块采矿活动区探明资源量估算结果	34
表 3.3-1 采矿车相关技术参数	38
表 3.3-2 “张謇号”船舶参数	39
表 3.3-3 “大洋”号船舶参数	40
表 3.3-4 采矿车第 1 次水下试验内容	41
表 3.3-5 采矿车第 2 次水下试验内容	44
表 4.3-1 中国五矿合同区外业调查航次情况表	59
表 4.3-2 CTD 观测站位统计	60
表 4.3-3 2019 年航次 A-5 区块锚系站位信息表	61
表 4.4-1 A-5 区块各月份的平均风向	66
表 4.5-1 A-5 区块各层次沉积物样芯叶绿素 <i>a</i> 含量和含水率平均值	85
表 4.5-2 A-5 区块单位湿重沉积物叶绿素 <i>a</i> 含量 (μg/g) 测定结果	87
表 4.5-3 A-5 区块单位干重沉积物叶绿素 <i>a</i> 含量 (μg/g) 测定结果	87
表 4.5-4 A-5 区块重点工作区沉积物上覆水和孔隙水营养盐含量测试结果	90
表 4.5-5 DY73II-A5-GC01 柱状沉积物 γ 谱仪数据表	94

表 4.5-6 DY73II-A5-GC04 柱状沉积物 γ 谱仪数据表	96
表 4.6-1 锚系观测点主要分潮信息表	98
表 4.6-2 锚系搭载 CTD 信息表	105
表 4.6-3 锚系搭载海流计信息表	110
表 4.6-4 不同深度海水流速流向年平均统计表	111
表 4.6-5 锚系点各观测水层月平均最大流速和对应流向	116
表 5.4-1 A-5 区块浮游植物优势种及其优势度	143
表 5.4-2 A-5 区块浮游动物群落结构组成	144
表 5.4-3 中国五矿合同区食腐生物名录	174
表 5.4-4 生物体微量元素测定结果	176
表 7.2-1 本次单体试验潜在影响的类别、空间范围	190
表 7.5-1 羽流模型各种案例参数表	199
表 7.5-2 羽流最大扩散范围和最大再沉积厚度	204
表 7.5-3 羽流再沉积面积统计表	204
表 7.10-1 温室气体排放估计	211
表 8.2-1 潜在影响的生物群落组分	220
表 10.3-1 采矿车的多参数在线环境监测系统的主要分系统构成	260
表 10.3-2 环境监测阵列的监测节点数量与构成	261
表 10.3-3 环境监测与影响评估的主要指标	278

执行摘要

项目背景

中国五矿集团有限公司（China Minmetals Corporation, Minmetals, 中国五矿）计划 2025 年 7-10 月在其与国际海底管理局（International Seabed Authority, ISA）签订有多金属结核专属勘探合同的国际海底合同区 A-5 区块进行多金属结核采矿车单体功能测试。本项目将对深海多金属结核采矿车的采集行走性能、装备的可靠性、经济性等进行验证，其结果将用于指导采矿车的优化设计。试验全程将同步开展环境影响监测，获取采矿车试验对环境影响的数据和样品，评估采矿车试验活动对环境的影响程度，建立深海采矿环境影响监测和评价技术方法体系，为商业化开采的环境影响评价提供技术和数据支撑。



图 1 中国五矿多金属结核采矿车概念图

根据《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》（ISBA/25/LTC/6/Rev.3）第六(B)(33)的规定，测试采矿组件这类活动需要进行事前环境影响评估，并需要依照第 33 和 38 条的建议在特定活动期间和其后实施环境监测计划。为此，中国五矿组织编制了这份环境影响声明报告（Environmental Impact Statement, EIS）和环境管理和监测计划（Environmental

Management and Monitoring Plan, EMMP)。

本报告遵循《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》(ISBA/25/LTC/6/Rev.3)附件三《报告勘探期间所进行环境影响评估的 EIS 模板》编写,同时一定程度参考了 ISA 正在制定的《“区域”内矿物资源开发规章草案》(ISBA/25/C/WP.1)附件四《环境影响报告》的部分要求。

拟议活动区域

如图 3.1-1 所示, A-5 区块西部海盆为“重点工作区”(勘探网度 $7\text{ km} \times 7\text{ km}$, 面积约为 4590 km^2), 此次试验的区域位于 A-5 区块西部海盆的详细勘探区内(勘探网度 $3.5\text{ km} \times 3.5\text{ km}$, 面积约为 500 km^2), 将该区域定义为采矿活动区。依据地形地貌、矿床地质特征和环境基线的相似性, 在采矿活动区内选取了面积约 20 km^2 ($4\text{ km} \times 5\text{ km}$) 的环境影响参照区 (Impact Reference Zone, 简称 IRZ) 和环境保全参照区 1 (Preservation Reference Zone, 简称 PRZ1), 作为此次单体采矿车试验前、试验中和试验后环境影响评估的两个对照区。在 IRZ 内选划一个 5 km^2 ($2\text{ km} \times 2.5\text{ km}$) 的区域作为采矿试验区 (Collector Test Area, 简称 CTA)。在 A-5 区块东部选划了约 400 km^2 面积的区域作为环境保全参照区 2 (简称 PRZ2), 将作为未来全系统采矿试验的 PRZ。

根据国际上已开展的试采试验结果和本报告的模拟结果(附件 1), 本次试验沉积物羽状流最大水平影响距离为 2.1 km , 最大垂向影响距离为 124 m , 且沉积物羽状流导致的 0.1 mm 沉积厚度面积不超过 1 km^2 。因此, PRZ1 位于 IRZ 上游 15 km 处, 采矿车试验活动不会对 PRZ1 造成环境影响。基于对环境基线特征研究, PRZ1 与 IRZ 满足 ISA 关于环境相似性的要求。

拟议试验系统

本次试验活动拟定测试的采矿车是中国五矿深海采矿长期技术发展计划的一部分。在此之前, 中国五矿已经对深海多金属结核采矿车开展了长期研究, 1995 年中国五矿研制了多金属结核开采原理样机完成实验室测试。2001 年成功研制中国第一台多金属结核湖试工程样机并完成了湖泊试验。2016-2018 年, 中国五矿自主研发了“鲲龙 500”采矿车, 并于 2018 年 6 月在中国南海完成了 514 m 海试。基于“鲲龙 500”采矿车的研发基础, 中国五矿开展了 1000 m 级多金属结

核集矿系统的研制，并于 2021 年 6-7 月完成了深海多金属结核采矿千米级系统试验。在上述研发基础上，中国五矿研制了新一代深海采矿车，将在采矿试验区内开展关键技术验证。

此次拟开展的单体采矿车试验系统由采矿车、声学定位系统、脐带缆及水面支持母船组成。采矿车负责海底结核的采集；声学定位系统为采矿车提供定位信息；脐带缆负责采矿车的动力和通信传输；水面支持母船为水面操控作业平台，作为采矿车试验的监控和指挥中心。

此次试验的采矿车由行走机构、采集机构、主体结构、巡检机构、水下控制系统、液压系统等组成。设计外形尺寸长 9 m，宽 5 m，高度为 4 m，空气中质量 40 t，水下质量 20 t，设计功率 500 kW，采集头宽度 5 m，水下行驶最大速度 1 m/s，产能为 125 t/h（结核丰度按 12 kg/m² 计算）。

此外，根据拟定的环境管理和监测计划，将利用环境监测船完成采矿车试验过程中的环境监测和评估。

拟议采矿车试验计划

采矿车试验计划分为两次独立的水下试验。第 1 次主要进行采矿车的各项基本功能测试，包括设备着底后静态试验、巡检试验、温升及噪声试验、直线行驶试验、转弯半径试验、不同参数下采集性能试验、连续采集作业试验、采样作业、回收前设备状态检查等内容（详见表 3.3-4）。第 1 次试验海底作业时长 70 h，水下作业行走距离 4840 m，采集扰动面积估算为 24200 m²；

第 2 次主要进行采矿车的行走和采集等各项性能测试，包括设备着底后静态试验、巡检试验、温升及噪声试验、区域采集扰动作业、采样作业、回收前设备状态检查等内容（详见表 3.3-5）。第 2 次试验海底作业时长 60 h，水下作业行走距离 15160 m，采集扰动面积估算为 75800 m²。

本次采矿车试验共计扰动面积约为 0.1 km²，采集湿结核总质量估算约 1300 t，随采矿车提升至水面平台的湿结核质量不超过 10 t。

环境基线研究

中国五矿于 2017 年、2018 年、2019 年、2021 年、2022 年和 2023 年分别使

用“向阳红 06”船、“向阳红 03”船、“向阳红 10”船、“大洋一号”船、“大洋号”船和“大洋一号”船，执行了海上调查 99 天、61 天、113 天、104 天、75 天和 85 天，共计 537 天。截至 2023 年底，在合同区 A-5 区块开展了 316 个站位及若干测线的环境调查作业项目，主要包括 200m CTD 调查 8 站、全水深 CTD 调查 13 站、多管取样 25 站、箱式取样 208 站、重力柱 8 站、浮游生物垂直拖网 9 站、浮游生物分层拖网 3 站、沉积物土工原位测试 27 站、锚系观测 4 站、Lander 诱捕观测 6 站、原位大体积过滤 2 站、水听器监测 3 站及 13 条海底光学调查测线（其中 AUV 测线 2 条）。基于上述调查的样品和数据，结合收集整理的公开环境资料，开展了合同区 A-5 区块环境基线研究，取得了以下主要认识：

地质环境特征

A-5 区块地形总体较为平坦，区内发育海丘、海丘群、海山和山间盆地等地形地貌，海盆区面积占比为 70.8 %。AUV 近底声学调查结果显示，采矿活动区范围内起伏度整体较小，无明显陡坎。IRZ 和 PRZ1 均位于海盆区，地形平缓，高程差小于 20 m。

采矿活动区结核丰度变化范围为 0.59-25.92 kg/m²，平均值为 14.04±4.69 kg/m²；甲板覆盖率变化范围为 2-85 %，平均值为 43±15 %；甲板覆盖率与丰度具有良好的正相关性（R²=0.82），采矿活动区的结核以暴露型为主。IRZ 和 PRZ1 区域内结核丰度相似，变化范围为 10-15 kg/m²，镍当量品位（NEG）相近，表明两区资源情况具有相似性。

A-5 区块表层沉积物粉砂粒级含量最高（平均约 53 %），其次是粘土粒级含量（平均约 35 %），而砂的粒级含量相对较低；沉积物的 Cd、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 等重金属含量分布较为不均匀，重点工作区的东北角和西南角重金属含量较高以外，其它区域的重金属含量整体较低。相反，重点工作区的东北角和西南角总有机碳（TOC）较低（<0.25 %），而其它区域 TOC 含量介于 0.25-0.45 %之间。研究表明，IRZ 和 PRZ1 内沉积物的粒径、重金属和有机碳含量都较为接近。

IRZ 和 PRZ1 沉积物 30 cm 以内孔隙水重金属含量整体较低，Cr，Cd，Zn，Ni 和 Pb 等重金属含量与箱式上覆水接近；两区内孔隙水营养盐的总体含量比较

接近，各营养盐含量随深度变化的规律也比较类似；30 cm 以内孔隙水总碱度稳定，基本保持在 2.4 mmol/L。

A-5 区块内多管沉积物 10 cm 内叶绿素 *a* 单位湿重含量为 0-0.0239 $\mu\text{g/g}$ ，单位干重含量为 0.0001-0.1058 $\mu\text{g/g}$ 。受埋藏降解作用的影响，叶绿素 *a* 含量呈现逐渐下降趋势。

原位土工力学测试结果显示，A-5 区块沉积物 1 m 深度内贯入强度和剪切强度随深度增加，分别呈非线性和线性增长趋势。

物理海洋特征

温盐剖面观测结果显示，A-5 区块全水深温度年际变化趋势相似。在不同年份，上层 200 m 温度垂向变化趋势基本相似，但跃层位置略有差异，变动幅度为约 40 m；深层温度变化趋势相似，量值差异约为 0.03 $^{\circ}\text{C}$ 。A-5 区块全水深盐度在 2019、2021 和 2022 年年际变化趋势相似。

走航声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)实测流场分析结果显示该区域不同年份海流的流速与流向变化均较显著。2017 年航次与 2021 年航次观测到的海流速度较大，局部可超过 1 m/s，而 2019 年与 2022 年的观测海流通常小于 0.5 m/s。区块内海流流向均体现出显著的赤道逆流，表明赤道逆流在该海域的主导地位。

利用锚系潜标获取该区域深海长期海流监测结果显示，深层流（5150 m，5250 m 和 5350 m）流速年平均为 4.56-4.83 cm/s，平均流向为偏东向流。中层（1930 m）的海水流场以东向流为主，流速集中在 6-12 cm/s，平均流速为 7.34 cm/s。

搭载于锚系的浊度计监测结果显示，大部分时间底层（离底 20 m）和近底层（离底 100 m）海水浊度临界设备检测限，整体浊度处于 0.4 FTU 以下。

海水化学特征

A-5 区块海水 pH 值呈现明显层化分布特征，表层水体 pH 值最高，在表层至 100 m，pH 值快速下降，在 300 m 左右的水层中 pH 值达到最低；之后，随着深度的增加，pH 值缓慢上升，在 2000 m 至底层水体中 pH 值趋于稳定，在 7.6-7.8 之间。

海水溶解氧 (Dissolved Oxygen, DO) 含量最高值出现在表层, 随后水体中 DO 含量急剧减少, 100-200 m 之间不同站位的 DO 含量均持续降低至小于 3.0 mg/L, 出现缺氧的现象。在 1000 m 以下, 随着深度继续增大, DO 含量开始缓慢回升至 4.0-6.0 mg/L。

A-5 区块无机氮 (含铵盐、硝酸盐和亚硝酸盐)、硅酸盐和活性磷酸盐含量表现为: 硅酸盐>无机氮>活性磷酸盐。水体中颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 含量与总悬浮颗粒物 (Total Suspended Matter, TSM) 含量存在显著性相关, POC 含量随深度的变化可能与水体的叶绿素 (浮游生物) 垂直分布有关, 在次表层较强的浮游生物活动可能会产生较高的 POC 含量。

生物群落特征

A-5 区块表层海洋叶绿素与生产力均比克拉里昂-克里帕顿区域 (Clarion-Clipperton Zone, 简称 CC 区) 东部低, 表层叶绿素浓度的周年变化小, IRZ、PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素浓度差异不显著, 且周年变化规律一致。在各个季节, 表层叶绿素浓度等值线均大致呈现纬向分布, 因此 A-5 区块内的 IRZ、PRZ1 和 PRZ2 在初级生产力的时空变化方面具有高度的一致性和可对比性。

初级生产力的剖面最大值位于次表层 50 m。水柱积分初级生产力显示 DY50I-A5-S06-CTD11 站位水柱总初级生产力为 $51.44 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。PRZ1 和 IRZ 两区域叶绿素 *a* 浓度垂向变化一致, 最大值均位于约 50 m 处, 分别为 0.2 mg/m^3 和 0.28 mg/m^3 。

浮游植物平均丰度为 338 cells/L, 群落组成以硅藻为主, 其次甲藻, 优势种主要以透明辐杆藻、琼氏圆筛藻等硅藻种类以及圆柱角藻等甲藻种类为主。

浮游动物群落含 6 门 193 种, 其中桡足类为最优势类群, 较优势类群还包括刺胞动物、介形类、毛颚动物和被囊类等, 生物量呈现由表层到深海逐渐降低的趋势。

微生物群落以 Gammaproteobacteria 均为优势种群, 其中以 Burkholderiales、Pseudomonadales 目占优势, 古菌 Nitrosopumilales 目为古菌优势类群。微生物群落结构随着深度呈现明显变化, 10 cm 以深逐渐稳定。细菌及古菌优势类群与位于 CC 区东部的德国合同区一致, 反映 CC 区深海沉积物微生物生态学功能在大

尺度上有稳定性。

小型底栖生物调查结果显示，A-5 区块 IRZ 与 PRZ1 的小型底栖生物群落组成相似，优势类群均为线虫，占比均超过 90 %，其次为猛水蚤，再次为多毛类；小型底栖生物丰度变化范围在 50-66 ind./m² 之间，与 CC 区西部相似但小于 CC 区东部，但类群组成与 CC 区西部和东部较为接近或一致。

大型底栖生物调查结果显示，A-5 区块 IRZ 与 PRZ1 的大型底栖生物群落组成相似，均包括多毛类，介形类，等足类，原足类等，优势类群均为多毛类，丰度超过 40%；大型底栖生物丰度变化范围在 32-52 ind./m² 之间，丰度均小于 CC 区东部，但群落组成有一定相似性。

巨型底栖生物分析显示，主要类群包括原生动物、海绵动物、刺胞动物、棘皮动物、环节动物、节肢动物、软体动物和脊索动物等 8 个门。巨型底栖生物平均丰度约为 452.6 ind./ha，PRZ1 与 IRZ 巨型底栖生物丰度没有显著差异（431.0 ind./ha vs 510.6 ind./ha）。PRZ1 与 IRZ 的巨型底栖动物物种组成和群落结构都非常相似。

A-5 区块的结核附着生物丰度约为 3.9 ind./m²，主要包括原生动物、苔藓动物、刺胞动物、海绵动物和环节动物等。

食腐生物主要为鼠尾鳕、鲷、*Alicella* 钩虾以及片脚钩虾，其中分子生物学研究证实鼠尾鳕在较大尺度上有一定连通性。

影响评估

采矿活动可能对周围环境产生的影响包括以下几个方面：a) 采矿车的试验活动对原位栖息地的改变，包括结核移除、沉积物移除和沉积物扰动，对底栖微生物、小型底栖生物、大型底栖生物、巨型底栖生物和结核附着生物的丰度和多样性都存在影响；b) 采矿车的试验活动造成沉积物羽状流，并进一步可能导致的底层水柱理化环境变化和因沉积物再沉积而引发的栖息地地质环境和化学环境的变化，由此可能引发的对底栖生物的掩埋影响和生态毒理效应；c) 采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人的光照，对具有趋光性的浮游生物、游泳动物等产生影响；d) 采矿车、水面支撑母船/环境监测船的噪音，对周围生物特别是对鲸类等大型海洋哺乳动物产生潜在影响；e) 水面支撑母船/环境

监测船的内燃机尾气排放；f)采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人发生有毒物质（如燃油、润滑油和液压油类）的潜在泄露影响，可能导致对浮游生物的急性毒性作用；g)自然灾害导致的潜在风险。

针对羽状流的影响，我们构建了 CTA 的深海采矿羽流扩散数值模型用以评估此次试采活动引起的羽流扩散和再沉积的时空分布特征。模拟计算结果显示，悬浮泥沙浓度高于 10 mg/L 的水体均位于 CTA 之内。羽流的扩散方向受底层流场的控制，比如 7 月份扩散方向为西北向，9 月份扩散方向为东向。羽流最大影响距离为 2.1 km。以 0.1 mg/L 等值线作为羽流垂向的影响范围，其羽流垂向影响高度最大为 124 m。采矿试验结束 3.5 天后羽流消失。再沉积厚度最大为 0.33 cm。从再沉积厚度面积分布上看，再沉积厚度大于 1 mm 的面积为 0.06-0.12 km²，再沉积厚度大于 0.1 mm 的面积为 0.59-0.64 km²。

考虑到本次试验只有约 0.1 km² 的直接采集面积，而 A-5 区块的面积为 22821 km²，本次直接扰动的面积为 A-5 区块总面积的 0.000438 %，直接影响规模极小。

缓解措施

本项目将采用当前最佳的科学认知和具有可行性的技术方案以缓解试验所造成的潜在环境影响，并在试验全程遵循影响缓解措施，以保证环境影响的最小化。具体包括以下措施：

（1）进一步优化设计采矿车系统设备，采用地形自适应的采集机构，避免出现过深的沉积物扰动；采用宽幅的履带和全车的减重设计，避免出现过深的沉积物扰动；安装履带的沉积物扰动遮挡和减缓装置，降低履带造成的沉积物扰动强度。

（2）通过数值模拟选择合理的集矿行走方式和速度降低环境影响，选择适当的时机作为采矿试验窗口期，减小羽流的扩散等。

（3）在船舶航行和在试验期间，将配备专业人员瞭望和监测船舶周围海龟、鲸类等大型海洋生物的活动情况。如有必要，将采取主动避碰措施，通过远离这些生物从而避免对其造成损伤。

(4) 在船舶航行和试验期间，将最大可能减少非必须的照明。

(5) 活动期间，严格按照《防治船舶污染海洋环境管理条例》（MARPOL）和国际海事组织的相关规定指南，采取避免/防止措施，保障活动期间船舶垃圾、生活污水、含油污水、含有毒有害物质污水、废气等污染物合法处治。

(6) 按照制定的 EMMP 开展环境监测活动，根据跟踪监测结果，对实际影响超出预测影响的活动，应立即停止现场作业，并按规定报告。

环境管理和监测计划

考虑到本次试验仅开展采矿车单体试验，经环境影响分析，此项活动可能产生的环境影响主要聚焦于海床及近底层海水部分，故本监测计划的重点为对底层环境、底栖生态系统和近底层生态系统的监测，弱化对表层水域和中深层的监测。

为了能够有效评估本次试验带来的环境影响，中国五矿采取 4 个方面的环境监测措施：

(1) 在采矿车本体上设置环境监测与原位采样系统，包括安装了一个以伴随式环境监测和作业安全风险评估为主要目的的小型 ROV；

(2) 在 CTA 及周边部署环境监测阵列；

(3) 采用环境监测船载采样监测、ROV 和 AUV 等开展监测和采样调查；

(4) 在 CTA 将部署一套近底长期环境观测设备，并在后续的勘探航次期间开展年度回访采样，以获得 CTA 受扰动后的自然恢复数据。

本监测方案的重点环境参数是：

(1) 底层的温、盐、DO、pH、浊度和氧化还原电位等关键环境参数；

(2) 海底沉积物羽状流的颗粒物浓度、浊度、排放量以羽状流扩散轨迹和再沉积范围及厚度等参数；

(3) 底层海水营养盐（硝酸盐、碳酸盐、硅酸盐）、关键重金属元素（铜、锌、铅、镍、镉等）、有机污染物、油类等化学要素参数；

(4) 底栖生物群落的多样性、群落结构和数量变化。

为了获取试验后环境自然变化的长期观测数据，试验结束后将在区域内布设长期观测系统并进行年际回访，具备对浊度、海流、pH、噪声等环境参数和近底视像的长期监测能力。

在本报告中简要描述了监测系统的布设方案、沉积物和海水的采样方案和分析方法，在后续的环境管理和监测计划报告（Environmental Management and Monitoring Plan, EMMP）中将会详细阐述该部分内容。

报告

向 ISA 报告突发事件和处理结果

中国五矿将严格执行 ISBA/19/C/17 条例第 33 条所规定“任何进入海洋环境的溢出、事故或未受控制的释放，都将在规定报告时间内作为突发事件向国际海底管理局进行通报”。中国五矿将利用最有效的手段，迅速向秘书长书面报告已经、正在或可能对海洋环境造成严重损害的活动引起的任何事件。

向国际海底管理局的报告将包括以下内容：

- 事件以及当时已知的有关该事件的所有重要事实和情况；
- 为避免或减轻任何不利环境影响而采取的任何行动；
- 已采取或可能采取的任何纠正措施，以防止类似事件再次发生。

此外，根据 MARPOL OPRC-HNS 2000 议定书，中国五矿也将按要求通知任何相关的第三方机构。

年度报告

根据 ISBA/19/C/17 第 32 条规定：承包者应每年向秘书长书面报告监测方案的执行情况和结果，并应提交数据和资料，同时考虑到法律和技术委员会提出的任何建议。这些报告将说明对环境管理计划的遵守情况，以及对任何纠正行动提出的建议。

中国五矿将按照上述要求定期向 ISA 披露本次活动监测和评估的结果。

此外，中国五矿计划举办公共利益相关者活动，介绍采矿车测试和环境监测的结果。

利益攸关方协商

中国五矿在完成本项目国内行政审批手续后，按照中国和 ISA 的相关要求开展利益攸关方咨询，并将利益攸关方意见、本报告修改及意见回复公开发布。

结论

本环境影响声明报告中提供的信息支持以下结论，即：采取特定的采矿车设计、实施环境监测计划和拟议的缓解措施、严格的报告和监管程序，可使小规模采矿车单体试验对物理化学环境和生物环境的影响降至非显著水平。在没有重大事件发生的情况下，本次试验在区域范围内对海洋环境造成“严重损害”的风险很低。

1 引言

1.1 目标

中国五矿集团有限公司（China Minmetals Corporation, Minmetals, 中国五矿），计划 2025 年 7-10 月在其与国际海底管理局（International Seabed Authority, ISA）签订有多金属结核专属勘探合同的国际海底合同区 A-5 区块，对海底多金属结核采矿车进行功能测试。本项目主要达成以下两个方面目标：

（1）测试和改进采矿车技术性能：开展采矿车功能和技术验证试验，包括验证采矿车采集功能、行走功能、导航定位功能、布放回收功能、环境监测和采样功能等，验证其可操作性、可靠性和结核收集效率，为采矿系统设计提供信息。

（2）监测和评估采矿车试验环境影响：开展采矿车试验前、中、后全流程，点线面全区域，远中近全空间相结合的环境监测，获取采矿车试验对环境的影响系列数据和样品，评估采矿车试验造成的环境影响，为系统联动试验和商业开采提供信息。

1.2 背景

2017 年中国五矿和 ISA 签订了为期十五年的多金属结核勘探合同。合同区位于东太平洋克拉里昂-克里帕顿区（Clarion-Clipperton Zone, CCZ, 简称 CC 区），由 8 个区块组成。此次活动区域位于 A-5 区块（图 1.2-1）。

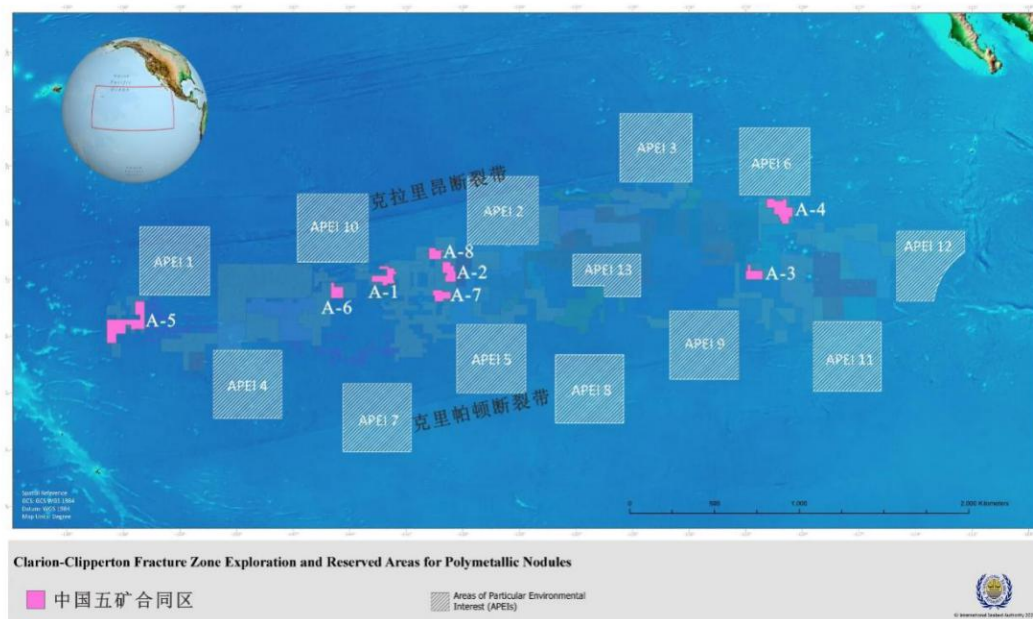


图 1.2-1 中国五矿合同区 8 个区块位置分布示意图

(来自于 <http://www.isa.org.jm>)

勘探合同签署后，中国五矿在该合同下属的 8 个区块开展了 6 个航次调查。自 2021 年开始，中国五矿在 A-5 区块重点工作区（图 3.1-1）持续 3 年开展了资源与环境调查。

本次试验活动拟定测试的采矿车是中国五矿深海采矿长期技术发展计划的一部分。在此之前，中国五矿已经对深海多金属结核采矿车开展了长期研究，1995 年中国五矿研制了多金属结核开采原理样机完成实验室测试。2001 年研制了中国第一台多金属结核湖试工程样机并完成了湖泊试验。2016-2018 年，中国五矿自主研发了“鲲龙 500”采矿车，并于 2018 年 6 月在中国南海完成了 514 m 海试。基于“鲲龙 500”采矿车的研发基础，中国五矿开展了 1000 m 级多金属结核集矿系统的研制，并于 2021 年 6-7 月完成了深海多金属结核采矿千米级系统试验。在上述研发基础上，中国五矿研制了新一代深海采矿车在合同区内开展深海关键技术验证。

1.3 项目可行性

技术可行：本次活动拟采用的采矿车是在前期研制的小型深海多金属结核采集原理样机的基础上进行优化设计而成，该装备更具有低扰动、环保、智能、安全、可靠等特性。

环保可行：本次活动对海底环境的影响是小规模的时空尺度，与 80、90 年代在 CC 区进行的海底扰动实验（Benthic Impact Experience, BIE）类似（JET-BIE、IOM-BIE、NOAA-BIE），将遵守最新的《关于指导承包者对“区域”内海洋矿物勘探可能产生的环境影响评估指南的建议》（ISBA/25/LTC/6/Rev.3）相关内容，并制定试采前、中、后全流程，点线面全区域，远中近全空间相结合的环境监测计划。同时，中国五矿已开展了 6 个航次合同区资源勘探和环境基线调查，获取了 A-5 试验区域的环境数据和样品，为本次环境影响评估提供了基础支撑。

产业可行：随着当前人们对新能源材料钴、镍、铜等需求的增加，金属价格的快速上涨，以及现有陆地矿产资源存储的减少。国际海底区域因其蕴藏着丰富的多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、富稀土沉积物等资源，具有很高的经济价值，开发潜力巨大。国际海底合同区内的矿产资源属于全人类，开发深海矿产资源符合全人类的利益，深海矿产资源是陆地金属资源的重要接续，开展深海矿产资源勘查和环境监测，不仅有助于应对陆地矿产资源危机，推动深海探测技术和装备能力的发展，也有助于推动和促进全球深海治理体系建设和人类深海开发利用活动的公平、有序和可持续发展。

1.4 项目历史

1.4.1 合同区概况

中国五矿多金属结核合同区位于 CC 区内（8°N-15°N、158°W-138°W，图 1.2-1），由 8 个区块组成，总面积为 72745 km²，其中 A-5 区块是中国大洋矿产资源研究开发协会（China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, COMRA, 中国大洋协会）向 ISA 提交的多金属结核保留区，面积为 22821 km²；A-1、A-2、A-6、A-7 和 A-8 区块是俄罗斯提交的保留区，5 个区块总面积 31049 km²；A-3 和 A-4 区块是海金联提交的保留区，总面积为 18875 km²。

A-5 区块与中国大洋协会合同区的西部区块（KW1）邻近，A-6 区块的西部和南部分别为日本 DORD 合同区和中国大洋协会东部区块，A-1 区块南部毗邻俄罗斯 Yuzhmorgeologiya 承包者区块，A-2、A-7 和 A-8 区块东部邻近德国 GSR

和英国 UKSRL 承包者的合同区块，A-3 和 A-4 区块周边的其他承包者合同区块较多，主要包括瑙鲁的 NORI、汤加的 TOML、比利时的 BGR 和基里巴斯的 MRE 等。

1.4.2 合同区勘探和环境义务履行的历史情况

中国五矿在 2017 年、2018 年、2019 年、2021 年、2022 年和 2023 年分别使用“向阳红 06”船、“向阳红 03”船、“向阳红 10”船、“大洋一号”船、“大洋号”船和“大洋一号”船，在合同区执行了海上调查 99 天、61 天、113 天、104 天、75 天和 85 天，共计 537 天，主要内容包括多波束测深、地质取样、海底摄像、AUV 近底声学调查以及环境基线调查等相关工作。

资源调查与研究：在外业海上调查方面，截至 2023 年航次，中国五矿已完成合同区 8 个区块约 7.27 万 km² 的全覆盖多波束测深调查，测线共计 11302 km；完成 269 个箱式取样站位和重力柱 11 站，获得丰度、覆盖率等数据以及多金属结核、表层沉积物等地质样品。完成 957.2 km 海底光学调查测线（其中 AUV 测线长度 109 km），提取了覆盖率等数据。在 A-5 区块的采矿活动区完成近底声学调查测线 688 km。资源调查主要工作量统计见表 1.4-1。**内业研究方面，**初步掌握了合同区地形地貌特征（局部区域微地形地貌特征）、多金属结核丰度、覆盖率和主要金属元素含量特征、多金属结核连续性特征以及多金属结核采矿环境条件，完成了合同区 8 个区块多金属结核矿体圈划及推断资源量估算，并在 A-5 区块西部重点勘探区域完成了控制资源量、探明资源量的估算。

表 1.4-1 中国五矿合同区主要资源调查工作信息统计表

区块	面积（km ² ）	箱式测站（站）		光学摄像	多波束（km）	AUV 声学
		历史数	2017-2023	2017-2023	2017-2023	2017-2023
A-1	8661	52	6	46.2	1065	
A-2	6935	36	6	38.9	993	
A-3	5747	21	8	39.5	1660	
A-4	13128	58	21	150.9	2351	
A-5	22821	29	208	552.5	3391	688
A-6	5346	13	8	41.1	644	
A-7	5537	35	4	36.4	662	

区块	面积 (km ²)	箱式测站 (站)		光学摄像	多波束 (km)	AUV 声学
		历史数	2017-2023	2017-2023	2017-2023	2017-2023
A-8	4570	33	8	51.1	536	
合计	72745	277	269	957.2	11302	688

环境调查与研究：外业海上调查方面，截至 2023 年航次，在合同区 8 个区块开展了不同程度的环境基线调查，完成 200m CTD 调查 17 站、全水深 CTD 调查 22 站、多管取样 30 站、箱式取样 35 站（与资源共享）、浮游生物垂直拖网 16 站、浮游生物分层拖网 5 站、沉积物土工原位测试 29 站、锚系观测 5 站、Lander 诱捕观测 8 站、原位大体积过滤 3 站、水听器监测 3 站。环境调查工作量统计见表 1.4-2。**内业研究方面**，在合同区 8 个区块开展了物理海洋、海洋化学、海洋生物、沉积作用和沉积通量等基础环境基线研究工作。采集获取了 727 种生物样品（含 86 种可培养微生物），隶属于 20 门，395 个属，其中节肢动物门种类最多，种类数占总数 15.5 %。浮游植物和浮游动物主要为大洋暖水类群。小型底栖生物以线虫为最优势类群，所占比例超过 80 %。大型底栖生物以甲壳动物为主。现有分析结果表明，合同区 8 个区块空间跨度较大（东西距离约 4000 km）、地质背景存在显著差异，环境参数在各区块之间亦充分表现出这一差异，如上层海流特征、混合层及温跃层深度，海水叶绿素 *a* 浓度以及溶解氧（Dissolved Oxygen，简称 DO）、pH 值、生物多样性及其丰度等参数。例如，西部的 A-5 区块的初级生产力和底栖生物密度上显著低于东部其它区块，且在其它水体环境方面也表现出与相邻的中国大洋协会合同区西部区块的总体一致性，可代表东太平洋 CC 区西部的环境总体特征。

此外，在 A-5 区块重点勘探区布设了长期观测系统，采集获得了部分长时间序列环境数据，该数据进一步处理分析后，将用于基线自然变化和环境影响评价研究工作。

表 1.4-2 中国五矿合同区主要环境调查工作量信息表

区块	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	合 计
200mCTD 调查/站	1	1	1	2	8	1	1	2	17
全水深 CTD 采水/站	1	1	1	2	13	1	1	2	22
多管/站	/	/	2	2	25	/	/	1	30
箱式/站	2	/	4	4	22	2	/	1	35
浮游生物垂直拖网/站	1	1	1	/	9	1	1	2	16
土工力学/站	/	/	1	1	27	/	/	/	29
锚系/站	/	/	/	/	4	1	/	/	5
生物诱捕/站	/	/	1	/	6	/	/	1	8
原位大体积过滤/站	/	/	/	/	2	/	/	1	3
浮游生物分层拖网/站	/	/	1	/	3	/	/	1	5
水听器/站	/	/	/	/	3	/	/	/	3
合计	5	3	12	11	122	6	3	11	173

1.4.3 采矿车及部件的试验与发展情况

中国五矿积极开展深海勘探、采矿等领域的技术研究和装备研发，是中国最早从事深海矿产资源开采和加工利用技术研究的公司。本次试验活动拟定测试的采矿车是其长期技术发展计划的一部分。同时是勘探合同中附录一多金属结核勘探工作计划中第二个五年阶段（2022-2026 年）工作内容之一，即中国五矿需组织开展采矿系统子系统海上试验。在此之前，中国五矿已经对深海多金属结核采矿车开展了长期研究，因此本次试验的采矿车具有良好的前期技术基础。

在前期的技术研发过程中，我们的采集技术已经在实验室、深水湖、近海和国家管辖内的深海开展了技术验证和相关测试（图 1.4-1），均取得成功。这些测试数据和现场操作经验，提高了本次试验的可靠性。



图 1.4-1 中国五矿多金属结核采矿车试验与发展情况

第一阶段（1991-1995年）：实验室试验

开展了各种采矿车工作原理、矿泥分离和破碎方法与机构、行走机构等技术研究，成功研制了多金属结核开采原理样机（图1.4-2）。原理样机多金属结核采集率 $>80\%$ ，集矿能力 5 t/h ，完成了实验室功能及性能测试，验证了水力采集技术的可行性。



图 1.4-2 多金属结核水力式集矿原理样机

第二阶段（1996-2001年）：深水湖试验

受中国大洋协会的委托，中国五矿成功研制中国第一台多金属结核湖试工程样机（图1.4-3），并在中国云南抚仙湖开展了 135 m 水深的部分采矿系统的采矿试

验，多金属结核采集率 $>85\%$ ，集矿能力 30 t/h ，采集到模拟结核 900 kg ，实现了中国深海多金属结核采矿技术从无到有的跨越，为后续浅海试验积累了宝贵经验和奠定了技术基础。



图 1.4-3 多金属结核湖试工程样机

第三阶段（2016-2021年）：500 m级和1000m级海试

2016-2018年，受中国大洋协会的委托，中国五矿自主研发了“鲲龙500”采矿车（图1.4-4），并于2018年6月在中国南海完成了514 m海试，多金属结核采集能力 10 t/h ，单次最长行驶 2881 m ，定位精度 0.72 m ，按规划路径驶出单边长度 120 m 星形路线，突破了稀软底质行驶技术、自适应采集技术、综合导航定位及智能控制技术。本次海试的成功标志着中国深海采矿系统研发由陆上试验全面转入海上试验。

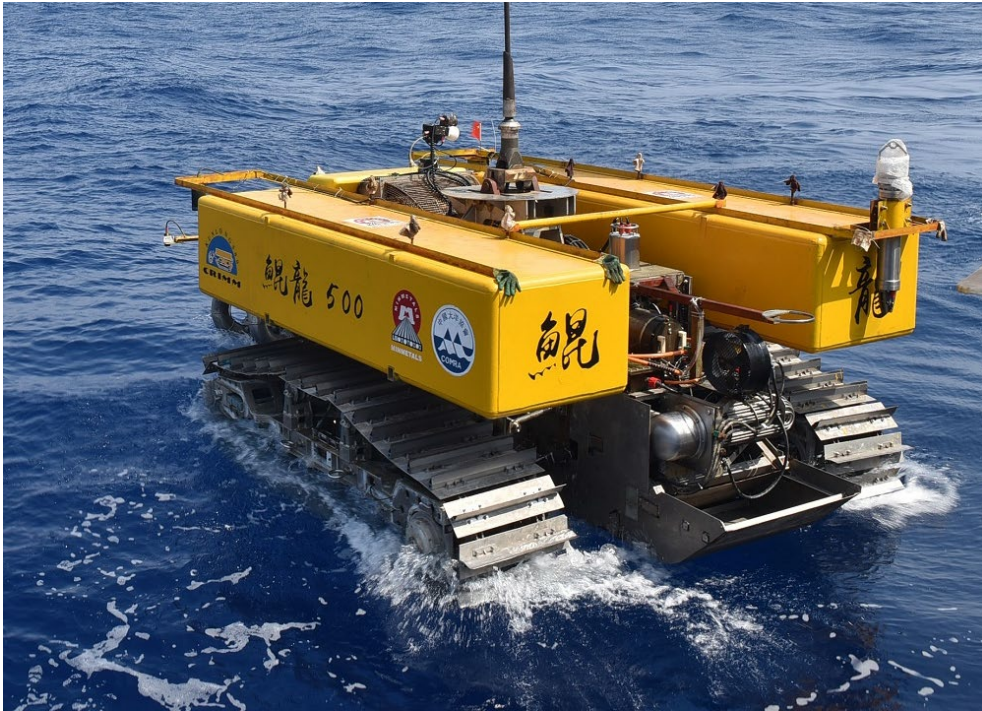


图 1.4-4 “鲲龙 500”多金属结核采矿车 500 m 级海试

基于“鲲龙500”采矿车的研发基础，中国五矿开展了1000 m级多金属结核集矿系统（图1.4-5）的研制，并于2021年6-7月完成了深海多金属结核采矿千米级系统试验。海试的成功实现了中国深海多金属结核采矿从浅海向深海、从单体设备到整体联动的技术跨越，为后续在合同区开展试验奠定了技术基础。

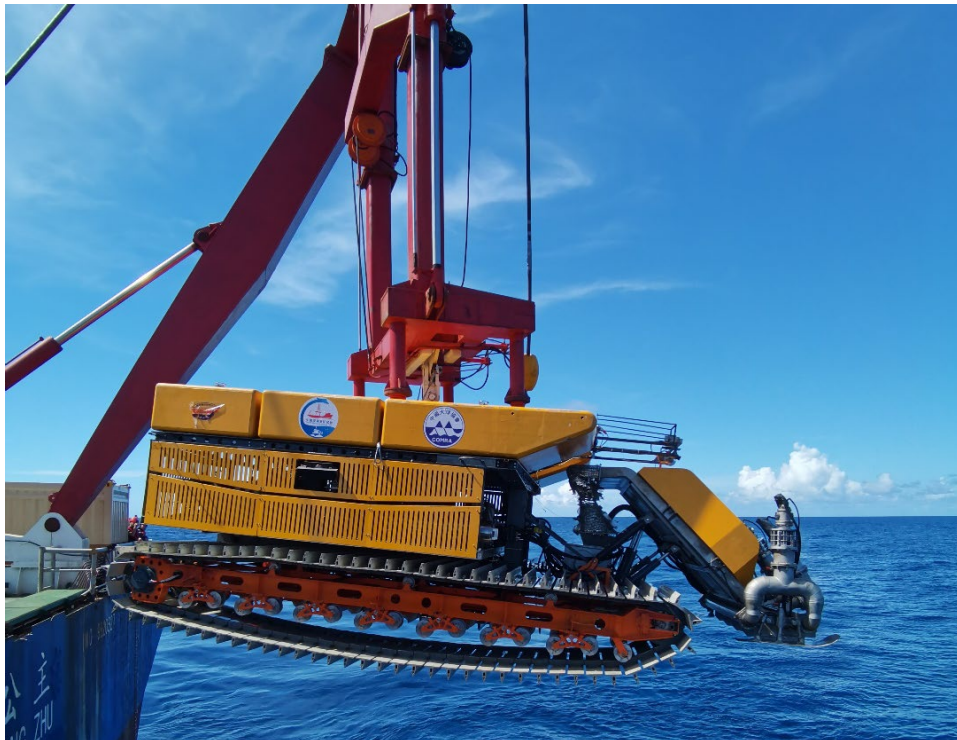


图 1.4-5 多金属结核采矿车 1000 m 级系统海试

第四阶段（2021-今）：合同区内关键技术验证

基于前期的采矿技术积累，中国五矿以安全可靠、低碳环保和智能高效为基本原则，致力于研发更安全、更绿色、更智能的采矿系统。2022年，中国五矿启动5000 m级采矿车设计、研发和试验项目，为本次采矿车试验和后续系统联动试验的研制和改进提供技术支撑。

1.5 项目提议者情况

1.5.1 中国五矿简介

项目提议者—中国五矿成立于 1950 年，是以金属矿产为核心主业的大型企业，以成为“具有全球竞争力的世界一流金属矿产企业集团”为战略愿景。中国五矿拥有以金属矿产、冶金建设、贸易物流、金融地产为“四梁”，以矿产开发、金属材料、新能源材料、冶金工程、基本建设、贸易物流、金融服务、房地产开发为“八柱”组成的“四梁八柱”业务体系。截至 2023 年底，中国五矿资产总额超 1 万亿元，拥有 8 家上市公司，2023 年营业收入约为 9400 亿元，居《财富》世界 500 强排名第 65 位。

截至 2023 年底，中国五矿共拥有成建制的研究设计机构 14 家，国家重点实验室等各类国家级科技研发平台 46 个，科技活动人员 3 万人，累计有效专利达到 5.6 万件，主编/参编国际国家标准 1900 余项，科技创新能力突出。

中国五矿积极参与国内外可持续发展事务，加快推进联合国《2030 年可持续发展议程》与中国五矿“价值创造型”社会责任推进模式的融合，打造新时代可持续发展模型，助力联合国 2030 年可持续发展目标的实现。

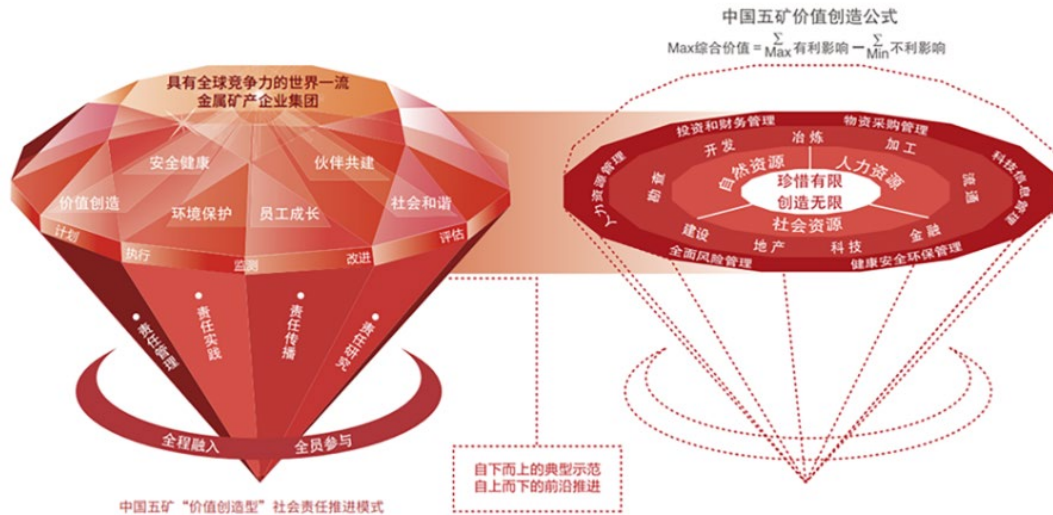


图 1.5-1 中国五矿“价值创造型”社会责任推进模式

中国五矿通过年度可持续发展报告全面披露公司在价值创造、创新发展、安全健康、环境保护、员工成长、伙伴共建、社会和谐等方面的行动和绩效。在报告中，中国五矿将利益相关方视作公司可持续发展最重要的资源，以“珍惜利益相关方、努力为利益相关方创造无限价值”为主线，力图翔实、真实、客观地向利益相关方披露公司履责实践与绩效，最大限度地与利益相关方实现平等、全面、深层的沟通，增强同利益相关方的信任与合作，实现与利益相关方共同进步、共同发展。

中国五矿始终将安全生产和低碳环保事业放在优先发展的地位，真正将安全发展、绿色发展理念贯穿渗透到企业发展各领域和全过程。聚焦碳达峰、碳中和及“双循环”新发展格局，积极拓展新标准、新技术、新能源、绿色化、数智化等领域，持续推动多行业向智能、高效、绿色、低碳发展，创造更优化的生活方式，为全球实现高质量、可持续发展贡献力量。



图 1.5-2 中国五矿 2013-2022 年环保数据对比图

1.5.2 勘探合同基本情况

中国五矿于 2014 年 8 月 8 日正式向 ISA 提交了“中国五矿集团公司请求核准‘区域’内多金属结核勘探工作计划以取得合同”的申请书，并于 2015 年 2 月 18 日组团赴牙买加完成了 ISA 法律与技术委员会（简称“法技委”）组织的申请答辩。依据法律程序，ISA 第 21 届理事会于 7 月 20 日上午讨论并核准了中国五矿提交的国际海底区域多金属结核保留区合同区勘探权的申请，2017 年 5 月 12 日，中国五矿与 ISA 签订为期 15 年的勘探合同，正式获得 72745 km² 多金属结核合同区的专属勘探权。截至 2023 年底，中国五矿已履约 7 年，提交履约年度报告 6 份，阶段报告 1 份，同时随年度报告提交调查数据。

1.5.3 本项目组织框架

1.5.3.1 EIS 报告编写

本报告由中国五矿、自然资源部等相关科研院所共同编制，各章节编写人员如下：

第 1 章 引言（刘禹维、孙栋、陈时平）；

第 2 章 政策、法律和行政背景（姜玉环）；

第 3 章 说明拟议的开发活动（程阳锐、李俊、郝祥礼、李正刚）；

第 4 章 说明现有的物理化学环境（李正刚、杨成浩、李伟文、许冬、李小花、章伟艳、林施泉）；

第 5 章 说明现有的生物环境（孙栋、鹿博、林施泉、张文谦）；

第 6 章 说明现有的社会经济环境（孙栋）；

第 7 章 对物理化学环境的影响评估和拟议的缓解措施（杨成浩、王俊、孙栋、程阳锐）；

第 8 章 对生物环境的影响评估和拟议的缓解措施（孙栋、鹿博）；

第 9 章 自然危害和意外事件（李满红、李俊、双志、丁涵）；

第 10 章 环境管理、监测和报告（刘禹维、陈时平、孙栋、杨成浩、张文谦）；

第 11 章 产品监管（孙栋）

第 12 章 协商（刘禹维）

第 13 章 术语和缩略语（孙栋、李正刚、鹿博）

第 14 章 研究小组（刘禹维、张文谦）

附录 1 底层扰动沉积物羽流模型研究报告（王俊）

附录 2 环境基线参数调查方法和质量评估（林施泉）

本报告由孙栋、刘禹维领衔编写，全文由孙栋、刘禹维、张文谦统稿排版，毛桂庭审定。

1.5.3.2 试验团队

本项目试验团队来自 12 家企业、科研院所和高校，具体任务分工如下：

1) 采集装备总体设计、集成及海试

中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司

2) 采集、行走关键技术与装备

中国五矿长沙矿山研究院有限责任公司、中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司、大连理工大学、中南大学

3) 定位导航、动力传输及智能控制技术与装备

哈尔滨工程大学、中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司、上海中车艾森迪海洋装备有限公司、中南大学

4) 布放回收系统研制及海试船舶支持

中国舰船研究设计中心、上海茗和船务有限公司、中国五矿长沙矿冶研究

院有限责任公司

5) 环境扰动监测及影响评估

自然资源部第二海洋研究所、自然资源部第三海洋研究所、中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司

2 政策、法律和行政背景

2.1 相关的国家和国际立法、政策与程序

2.1.1 国际立法、政策、程序和准则

2.1.1.1 《联合国海洋法公约》相关规定

1982 年《联合国海洋法公约》（United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS）是关于各类海洋和海事活动的国际框架公约。UNCLOS 第 1 条将“区域”内活动”界定为指勘探和开发“区域”的资源的一切活动；第 133 条将“资源”定义为“区域”内在海床及其下原来位置的一切固体、液体或气体矿物资源，其中包括多金属结核；第 209 条为防止来自“区域”内活动的污染，要求制定国际规则、规章和程序，以及国家法律和规章。中国于 1996 年 5 月 15 日成为 UNCLOS 缔约国，也是 1994 年《关于执行 1982 年 12 月 10 日〈联合国海洋法公约〉第十一部分的协定》（《执行协定》）的缔约国。本环境影响评估涉及的对多金属结核的勘探活动在 UNCLOS 第 1 条定义的“区域”进行，即在国家管辖范围以外的海床和洋底及其底土范围内（UNCLOS 第 1 (1) (1)条）。因此，本项目将受 UNCLOS 和《执行协定》管辖，遵守活动实施和环境相关的可适用的国际法要求。

2.1.1.2 ISA 相关规则、规章、程序与政策

ISA 是根据 UNCLOS 成立的自治国际组织，负责组织、管理和控制“区域”内活动。根据 UNCLOS 第十一部分及其《执行协定》（1994）相关规定，ISA 有责任制定适当的规则、规章和程序，以确保切实保护海洋环境，使其免受有关活动可能产生的有害影响（UNCLOS 第 145 条）。ISA 由欧盟和 167 个成员国组成，中国是拥有常驻代表团的成员国之一，也是理事会成员，于 2004 年 5 月成功当选为理事会 A 组成员并一直延续至今。2017 年，中国五矿与 ISA 签署了多金属结核勘探合同。本项目采矿车试验将在该勘探合同区的 A-5 区块进行。根据该勘探合同条款及书面承诺，本项目将在 ISA 的监管下，根据 UNCLOS 和《执行协定》以及 ISA 采矿与环境相关规则、规章和程序（见 2.1.1.3）进行，

同时，考虑相关的 ISA 环境准则和政策（见 2.1.1.4）。

2.1.1.3 ISA 采矿守则

ISA 采矿守则（Mining Code）由一系列在 UNCLOS（如第十一部分）和 1994 年《执行协定》所建立的一般法律框架内发布的规则、规章和程序组成，以规范“区域”内海洋资源的探矿、勘探和开采。

2.1.1.3.1 多金属结核勘探规章

迄今，ISA 已发布了三项勘探规章，包括 2000 年通过并于 2013 年修订的《“区域”内多金属结核探矿和勘探规章》（ISBA/19/C/17，附件），其中与本项目最相关的内容包括：

第五部分（保护和保全海洋环境）涉及：

- (1) 采用预防性办法和最佳环境做法，在合理可行范围内采取必要措施防止、减少和控制活动对海洋环境造成的污染和其他危害（第 31 条）；
- (2) 关于影响参照区和保全参照区划设的提议（第 31 条）；
- (3) 环境基线数据收集并建立基线（第 32 条）；
- (4) 对活动环境影响的监测方案制订及监测要求（第 32 条）；
- (5) 报告已经、正在或可能对海洋环境造成严重损害的事故，并采取必要措施，包括在风险需要时暂停或调整作业（第 33 条）；
- (6) 不从事任何可能对沿海国管辖或主权范围内的海洋环境造成严重损害的活动（第 34 条）；
- (7) 报告并保护任何具有考古和历史意义的遗骸、文物和遗址（第 35 条）。

上述要求涵盖了本承包者在合同规定的“区域”勘探活动方面对 ISA 的义务。为本采矿车试验项目有关活动的环境影响报告及其他规定文件的编写而开展的相关工作均符合上述要求。同时，承包者具有足够的财政和技术能力，可确保满足紧急情况下采取必要措施的需要（第 33.8 条）。

规章附件四（勘探合同标准条款）第 5 至 7 节详细说明了第五部分所涉上述事项，并具体规定：

5.2 在开始勘探活动之前，承包者应向管理局提交：

- (a) 关于拟议活动对海洋环境潜在影响的评估；

(b) 为确定拟议活动对海洋环境潜在影响的监测方案的建议；

(c) 可用于建立环境基线以评估拟议活动影响的数据。

根据该要求，本报告拟提交日期为 XXXX 年 XX 月 XX 日，即在计划开始勘探活动的日期（XXXX 年 XX 月 XX 日）提前一年之前。本次采矿车试验所获得数据将为环境基线建立、影响评估和采矿设备设计提供信息，并有助于影响监测方案的设计和最终编制环境影响报告。

2.1.1.3.2 开发规章和标准及准则草案

《“区域”内矿物资源开发规章草案》及相关环境标准和准则草案正在磋商和制定进程当中。规章和准则草案中关于为开发阶段编制的环境影响报告书内容建议、基线环境数据确定，以及环境管理和监测计划编制等环境相关准则的提案及相关讨论，为承包者提供了与后续开发阶段可能需要履行之义务要求相关的有用信息。考虑到勘探阶段试采活动与后续拟进行的商业化开发活动之间的关联，本环境影响声明报告的编制阶段酌情考虑了开发规章草案和相关准则草案中与勘探规章要求相符合、具有指导性意义的内容，以促进本项目更有效履行勘探合同规定的有关要求。我们相信对有关最新立法背景的全面认识对于完善勘探阶段试采活动的设计和实施，以及更有效开展环境现状及影响的研究、监测、评估和管理等工作也将有所帮助。

2.1.1.3.3 环境影响评估建议

2002 年 ISA 法技委发布《指导承包者评估“区域”多金属结核勘探活动可能对环境造成的影响的建议》（ISBA/7/LTC/1/Rev.1），并于 2010 年进行修订（载于 ISBA/16/LTC/7）。2013 年 3 月法技委发布了一套合并环境准则《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》（ISBA/19/LTC/8），后于 2020 年 3 月及 6 月（ISBA/25/LTC/6/Rev.1 和 ISBA/25/LTC/6/Rev.1/Corr.1）、2022 年 7 月（ISBA/25/LTC/6/Rev.2）和 2023 年 8 月（ISBA/25/LTC/6/Rev.3）分别发布了三份修订版。该建议确定了需要进行事前环评的勘探活动、环境影响评估的形式和内容，提供了关于基线研究、监测和报告等相关的指南。

《建议》（ISBA/25/LTC/6/Rev.3）中最相关的内容具体如下：

(1) 需要在勘探期间进行环境影响评估的活动

第六(B)(33)规定：下列活动需要进行事前环境影响评估，并需要依照第 33 和 38 段的建议在特定活动期间和其后实施环境监测计划。必须强调，这些基线、监测和影响评估研究可能是为商业采矿进行的环境影响评估的主要投入。这些活动包括：

- (a) 利用沉积物扰动系统在海底造成人为扰动和羽流；
- (b) 测试采矿组件；
- (c) 试采；
- (d) 测试排放系统和设备；
- (e) 利用船载钻机进行钻探活动；
- (f) 在结核矿区超过 10000 m² 的区域使用海底拖橇、挖掘机或拖网或类似技术进行采样。
- (g) 为测试陆上流程提取大样本。

因此，本次试验拟开展的 1/4 规模的原型采矿车测试（包括测试其行走、采集、避障等功能）需要事先进行环境影响评估，并实施环境监测计划，以作为后续商业规模采矿活动环境影响评估的主要依据。

(2) 相关程序步骤

第六(B)(34)规定：第 38 段所载建议中的环境影响报告和资料应由承包者不迟于活动开始前一年提交给秘书长。

第六(E)节概述了审查与试采试验有关环评报告的程序。

据此，本报告将遵循上述时间表和程序步骤要求提交相关文件和资料。

(3) 环境基线数据相关要求

《建议》**第三节和第四节**详细规定了环境基线研究要求、基线数据的收集要求，以及数据收集和分析、报告和归档程序等要求；附件一的解释性评注也提供了基线数据要求的补充说明。

第六(C)和(D)节分别明确了承包者如在勘探期间开展一种必须进行环境影响评估的活动所应提供的资料和测量要求，以及在活动之后应做出的观测和测

量要求。

基线数据对于监测活动带来的变化和预测未来商业采矿活动的影响至关重要。因此，本项目自 2017 年以来，通过地理信息系统设计和规划制定了环境基线调查的采样策略，开展长期的数据收集，从勘探区域获取并记录了原型采矿车测试前自然状况的足够信息，并收集海面、中层水域、近海底和海床群落等其他数据，以建立环境影响评估的基线数据。因此，本报告符合上述建议相关要求。

（4）环境影响报告模板

《建议》附件三提供了环境影响报告的模板。同时，也注意到关于开发阶段环境影响报告更详细的编写模板载于《开发规章草案》（ISBA/25/C/WP.1）附件四。因此，本报告编写时主要依据《建议》关于环境影响报告的内容安排，并针对与勘探规章和《建议》中与本项采矿车试验活动相关方面基本要求一致或符合的内容，酌情参考了开发规章草案附件四（环境影响报告）的框架安排，以便支持以合乎逻辑和连贯的方式说明情况。

（5）利益攸关方协商相关进程

《建议》第六(E)(41)(a)节明确提出“承包者应根据本建议附件一所述，在提交的报告中说明已进行的利益攸关方协商的情况”，附件一提供了支持执行协商进程相关建议的方法指导，包括协商时间、方法和进度，以及对利益攸关方相关关切的处理情况。本报告有关活动的利益攸关方协商进程按照建议和 ISA 相关要求开展（见本报告第 12 章）。利益攸关方协商工作的产出有助于最终环境影响报告的编制和报告，对承包方有效履行相关环境义务有积极作用。

2.1.1.4 ISA 相关环境管理政策

制定和实施区域环境管理计划(Regional Environmental Management Plan, REMP)是 ISA 环境管理政策框架的一部分（ISBA/24/C/3，第 7 段）。区域一级的环境管理计划是根据 UNCLOS 第一四五条确保切实保护“区域”的海洋环境不受“区域”内活动可能产生的有害影响的适当和必要措施之一。虽然 REMP 不具有法律约束力，不对承包者形成法律义务（ISBA/25/C/4，第 7 段），但仍然可

以为“区域”内活动环境管理目标和措施的设计提供指引。本项目合同区所在 CC 区于 2012 年由 ISA 理事会核准了法技委提出的区域环境管理计划 (ISBA/17/LTC/7)，该计划要点是指定 9 个不应进行勘探或开采活动的特别环境利益区（根据 ISBA/18/C/22 决议），后于 2021 年新增 4 个特别环境利益区（根据 ISBA/26/C/58 决议）。该 REMP 中列明了该区域的环境管理的愿景、目标和战略目的，包括更好地了解区域内环境状况，促进以对环境负责的方式开发海底矿物资源，维持区域生物多样性和生态系统结构与功能等。

因此，本项目承包方在申请有关勘探活动时、环境研究和评估、环境管理和监测计划制定以至活动开展到结束的整个范围内均考虑了上述 REMP 中的相关目标，为完成本报告而开展的有关工作有助于上述目标/措施的执行，也会为今后确定和执行进一步合作行动提供数据支持。

2.1.2 国家立法、程序和标准及准则

2.1.2.1 深海采矿及环境相关国家立法和程序

根据《联合国海洋法公约》第 209 条第 2 款“各国应制定法律和规章，以防止、减少和控制由悬挂其旗帜或在其国内登记或在其权力下经营的船只、设施、结构和其他装置所进行的“区域”内活动造成对海洋环境的污染”。中国于 2016 年 2 月颁布了《深海海底区域资源勘探开发法》（以下简称《深海法》）。该法目的是“规范深海海底区域资源勘探、开发活动，推进深海科学技术研究、资源调查，保护海洋环境，促进深海海底区域资源可持续利用，维护人类共同利益（第 1 条）”；适用于“中华人民共和国的公民、法人或者其他组织从事深海海底区域资源勘探、开发和相关环境保护、科学技术研究、资源调查活动”（第 2 条）。根据第 5 条，国务院海洋主管部门（目前为自然资源部（国家海洋局））负责对深海海底区域资源勘探、开发和资源调查活动的监督管理，国务院其他有关部门按照国务院规定的职责负责相关管理工作。中国自然资源部直属的中国大洋事务管理局承办深海海底区域资源勘探开发许可具体管理事项。

2.1.2.1.1 勘探活动管理制度

《深海法》将勘探定义为：在深海海底区域探寻资源，分析资源，使用和

测试资源采集系统和设备、加工设施及运输系统，以及对开发时应当考虑的环境、技术、经济、商业和其他有关因素的研究（第 27（一）条）。

本项目属于本法适用的勘探活动，该法明确规定了承包者勘探作业直接相关的法律义务：

- 应当履行勘探、开发合同义务，保障从事勘探、开发作业人员的人身安全，保护海洋环境（第 9 条）。
- 从事勘探、开发作业应当保护作业区域内的文物、铺设物等（第 9 条）。
- 从事勘探、开发作业还应当遵守中华人民共和国有关安全生产、劳动保护方面的法律、行政法规（第 9 条）。
- 发生或者可能发生严重损害海洋环境等事故情况下，启动应急预案并采取 措施（第 11 条）。

因此，本承包方将依法履行勘探合同义务，严格遵守上述可适用的作业相关要求，接受国家主管部门的监管。

2.1.2.1.2 环境保护制度

《深海法》第三章具体规定了勘探者防止、减少、控制活动对海洋环境造成的污染和其他危害，采取必要措施保护和保全稀有或者脆弱的生态系统等环境义务，以下具体要求直接相关：

- 按照勘探合同要求，调查研究勘探开发区域海洋状况，确定环境基线，评估活动可能对海洋环境的影响；
- 制定和执行环境监测计划，监测活动对项目区域海洋环境的影响，并保证监测设备正常运行，保存原始监测记录，以便为检查提供依据。

上述条款要求与 ISA 相关规则、规章和程序要求相一致，本项目已经和计划开展的活动将严格遵守相关规定。

2.1.2.1.3 科学研究与资料管理

《深海法》第四章对科学技术研究与资源调查能力建设做出专门规定，明确了加强深海科学技术研究资料汇交与共享的相关内容，与本项目相关研究活动相关。其中，第 18 条提供了承包者通过开展勘探开发活动获取的有关资料、实物样本等的汇交、登记、保管和向社会提供利用等方面要求。在这方面，原

国家海洋局 2017 年出台了规范性文件——《深海海底区域资源勘探开发样品管理暂行办法》和《深海海底区域资源勘探开发资料管理暂行办法》（正在研究修订过程中，以衔接 ISA 规章要求的新变化），为本项目有关活动取得的样品和资料数据上报和管理提供了国内法律义务的具体指导。从本项目获取的深海资料的国际交换将在国家主管部门统一管理下，并按照 ISA 相关要求和程序进行。

2.1.2.2 相关国家标准和准则

除了遵守《深海法》相关法律及配套规范性文件的义务要求和管理程序，本项目活动实施过程中还遵守了一系列相关标准和准则的要求或指引。

下表 2.1-1 列出了为本项目活动开展提供技术方法和工作指引的最为相关的国家标准和准则。

表 2.1-1 相关国家标准和准则

标准、指南	相关内容说明
国家标准《大洋多金属结核资源勘查规范》（GB/T 35571-2017）（Specification for oceanic polymetallic nodules exploration）	提供资源勘查规范指导。
国家标准《大洋样品管理分类代码》（GB/T 42330-2023）	提供获取的大洋样品的信息化、规范化管理标准参考。
国家标准《大洋资源调查术语》（GB/T 34908-2017）（Terminology for oceanic resources survey）	提供资源调查标准术语指导。
国家标准《深海微生物样品前处理技术规范》（GB/T 30744-2014）（The technology specification for the pre-treatment of deep-sea microorganism samples）	提供深海微生物样品处理技术指导。
国家标准《大洋多金属结核化学分析方法》（GB/T 20259-2006）（Chemical analysis methods for marine polymetallic nodules）	提供多金属结核化学分析方法指引。
国家标准《海洋调查规范》（GB/T 12763.1 - GB/T 12763.11）（Specifications for oceanographic survey）第 1-11	提供海洋水文、气象、化学、声和光、生态、地质

部分	地球物理、生物、海底地形地貌、海洋工程地质调查，以及调查数据交换等指南。
国家标准《国际海底区域和公海环境调查规程 第 1 部分：总 则》（GB/T 42629.1-2023）（Code of practice for international seabed area and high seas environmental survey—Part 1: General）	提供公海和国际海底区域环境调查与评估的方法与指南
国家标准《国际海底区域和公海环境调查规程 第 2 部分：海洋化学调查》（GB/T 42629.2-2023）（Code of practice for international seabed area and high seas environmental survey—Part 2: Marine chemical survey）	提供公海和国际海底区域海洋化学调查与评估的方法与指南
国家标准《国际海底区域和公海环境调查规程 第 3 部分：海洋生物调查》（GB/T 42629.3-2023）（Code of practice for international seabed area and high seas environmental survey—Part 3: Marine biological survey）	提供公海和国际海底区域海洋生物调查与评估的方法与指南

2.2 其他相关的国家立法、政策和条例

除了上述深海采矿活动及其环境保护相关的国家法律、程序和技术守则，其他涉及海事航行、船舶及作业活动污染防治、海上交通安全、安全生产及劳动保护等法律法规和标准也为本承包方提供了相关工作的规范指引，主要遵守或参考的相关法律规定包括：

《中华人民共和国海洋环境保护法》（2023 年，经修订）是适用于中国管辖海域的关于海洋生态环境保护的“基本法”。《中华人民共和国海洋环境保护法》虽然适用范围是中国管辖海域，但毕竟是中国海洋环境保护的基本法，对海洋保护的理念原则、制度和方法都是可以为中国五矿开展国际海域相关工作提供借鉴。第 9 条规定了一切单位和个人都有保护海洋环境的义务。第 124 条规定：中华人民共和国缔结或者参加的与海洋环境保护有关的国际条约与本法有不同规定的，适用国际条约的规定；但是，中华人民共和国声明保留的条款除外。因此，本项目承包方将在本报告所涉相关活动实施过程中依该法及相关政策的

指引，遵照相关环境国际条约的规定开展，并接受国家有关部门和机构监督，确保在“区域”内相关活动的实施不对国家管辖海域造成污染或潜在风险。

《防治船舶污染海洋环境管理条例》（2018年，经修订）是根据《海洋环境保护法》制定的条例，其第 10 条规定：“船舶的结构、设备、器材应当符合国家有关防治船舶污染海洋环境的技术规范以及中华人民共和国缔结或者参加的国际条约的要求。船舶应当依照法律、行政法规、国务院交通运输主管部门的规定以及中华人民共和国缔结或者参加的国际条约的要求，取得并随船携带相应的防治船舶污染海洋环境的证书、文书。”第 73 条规定：“中华人民共和国缔结或者参加的国际条约对防治船舶及其有关作业活动污染海洋环境有规定的，适用国际条约的规定。但是，中华人民共和国声明保留的条款除外。”因此，本项目勘探及后续活动所使用的船舶及相关设备符合国家相关资质要求，并尽最大努力以符合上述条款和相关国际条约规定的方式开展有关作业活动。

《中华人民共和国海上交通安全法》（2021年，经修订）适用于在中国管辖海域内从事航行、停泊、作业及其他与海上交通安全相关的活动。该法规定了中国籍船舶及其他重要船用设备、部件和材料须遵守的国家有关法律、行政法规和标准及技术规范要求，包括船舶检验、安全管理、海事劳工资质许可、境外突发事件预警和应急处置等。如第 86 条规定“中国籍船舶在中华人民共和国管辖海域外发生海上交通事故的，应当及时向海事管理机构报告事故情况并接受调查。”因此，本项目活动作业船舶资质、海事劳工证书、海上安全管理和保障等方面“符合国家相关法规和强制性标准及适用的相关国际条约。”

2.3 其他相关的国际公约和协议

除了《联合国海洋法公约》第十一部分关于深海采矿的规定，第十二部分规定了海洋环境保护和保全的一般义务，以及防止、减少和控制海洋环境污染的措施要求，适用于“来自在用于勘探或开发海床和底土的自然资源的设施装置的污染”（第 194(3)(c)条）。UNCLOS 第 143 条规定了促进在国际海底区域发展和进行海洋科学研究，出版和传播研究和分析结果方面，本项目所开展的研究工作和相关数据成果产出与这一规定相符合。

表 2.3-1 提供了本项目活动有关的海事、环境和海上安全等方面其它适用的

国际公约和协定。其中：

▪ **国际海事组织有关保护环境、海上安全等公约**适用于本项目船只的作业活动。用于在“区域”内进行活动的每一船只持有按照这些国际规则 and 标准颁发的有效证件（根据勘探规章附件四勘探合同标准条款 15.1），符合相关文书环境规则 and 措施要求。

表 2.3-1 相关国际公约和协议

公约和协定	相关内容说明
海事航行	
《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL 73/78）及其附件	公约规定了适用船舶的环境规则和措施，旨在防止船舶排放有害物质或含有这种物质的废液而污染海洋环境。
2004 年《国际船舶压载水和沉积物控制与管理公约》（BWMC）	公约对船舶压载水和沉积物的排放控制提出了具体技术要求，以预防、减少并最终消除压载水排放对海洋环境和公众安全带来危害。
2001 年《控制船舶有害防污底系统国际公约》（AFS）	公约规定了船舶防污底系统的控制措施，以减少或消除防污底系统对海洋环境和人体健康造成的不利影响。
1972 年《防止倾倒废物及其他物质污染海洋的公约》及其 1996 年议定书	公约及议定书规定海洋倾倒许可制度，旨在保护海洋环境不受倾废活动的危害。 第 1(4)(3)条规定：本议定书的规定不包括处置或储存由海底矿物资源的勘探、开发和相关的近海加工直接产生的或与之有关的废物或其他物质。
海上安全	
1974 年《国际海上人命安全公约》（SOLAS）	公约对船舶建造、载客数量、安全设施等作了详细规定，以增进海上人命安全。
劳工	
国际劳工组织 2006 年《海事劳工公约》（MLC）	公约详细规定了海员的最低从业要求、就业条件、船上生活设施标准、职业健康安全保障等内容，明确了海员的权利和成员国的义务。

	国际劳工组织现行船员培训和劳工权益保障等要求适用于海上船员。
生物多样性	
1992 年《生物多样性公约》（CBD）	公约第 3、4 条明确了各国具有确保在其管辖或控制下的活动和过程不对国家管辖范围以外区域的环境造成损害的责任。第 14 条规定了关于影响评估和尽量减少不利影响，以及发生严重危险或损害情况下的通知义务要求。2022 年达成的《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》中海洋生物多样性保护相关目标，以及公约框架下描述 EBSAs 相关工作，具有全球性科学参考意义。
气候	
1992 年《联合国气候变化框架公约》及其《京都议定书》和《巴黎协定》	公约体系规定了管控温室气体排放措施，为解决全球范围内的气候变化问题提供指导方针和框架。
1985 年《保护臭氧层维也纳公约》及 1987 年《蒙特利尔议定书》	公约确定了国际合作保护臭氧层的原则，议定书确定了全球保护臭氧层国际合作的框架。为全球消耗臭氧层物质管理和臭氧层保护提供指导方针。

2.4 其他相关的标准、原则和政策

2.4.1 ISA 其他相关政策和建议

ISA 实施数据管理战略。2019 年 ISA 启动的 DeepData 数据库，是承包者提交并在其勘探活动中在“区域”收集的所有深海海底相关数据的全球储存库。承包者在“区域”内开展海洋科学研究所得的知识分享是这一管理工具的内容。本项目在依照 ISA 相关准则和建议收集的数据和资料类型、收集频率和分析技术，遵循了可以获得的最佳方法，并使用国际公认或通行的操作程序和实验室。ISA《就年度报告内容、格式、结构向承包者提供的指导建议》（ISBA/21/LTC/15）为承包者提交报告和数字数据提供指导。

ISA 支持 UN 海洋十年行动计划。“海洋十年”的目标是 ISA 任务的核心，即促进和鼓励在国际海底区域进行海洋科学研究，并促进发展中国家参与深海

勘探和研究方案。本项目环评相关工作与《国际海底管理局支持联合国海洋科学促进可持续发展十年的行动计划》（ISBA/26/A/4）所确定的战略研究优先事项相关，尤其是与本活动环境影响有关的科学研究工作，预期的短期和长期产出将有助于增进关于区域自然状况和变化的科学知识，并支持 ISA 的相关中短期战略计划或高级别行动计划。

2.4.2 其他机构或行业相关标准、原则和守则

本报告考虑了适用于海洋采矿环境影响评估和管理的国际公认标准或行业最佳做法指南（表 2.4-1），将在本项目以及后续采矿活动中充分考虑这些标准、原则和守则的参考价值，并在缺乏 ISA 更加详细的操作指南情况下寻求具体的指引。

表 2.4-1 其他相关标准、原则和守则

标准、原则和守则	相关内容说明
赤道原则	该原则包含的社会和环境评估及管理相关原则在本项目及后续活动中的应用，有助于实现保护社会和环境的目的。
国际标准化组织《环境管理标准》（ISO 14001）	承包者将参考 ISO 1400133 的原则制订本项目区域采矿活动的环境管理计划，并按照 ISA 规定的时间节点和相关要求提交。
国际海洋矿物学会《海洋采矿环境管理守则》（2001 年，2011 年修正）	《准则》为承包者制定和实施环境方案以及利益攸关方参与提供了一个框架和基准，为本项目相关的研究和勘探活动提供补充性的最佳做法指南。
国际金融公司《环境和社会可持续性的绩效标准》	为本项目整个周期内识别风险及其影响、管理环境和社会风险等提供可持续性相关标准的指引。

2.5 勘探活动管理相关国内程序

按照上文 2.1.2.1 所述担保国《深海法》关于勘探活动的相关国内监管制度及具体程序要求，本环境影响报告属于应向国家主管部门提交备案的材料之一。因此，承包者按照相关规定于 XX 年 XX 月 XX 日将环境影响报告、环境管理与监测计划等材料公开发布，并启动利益攸关方协商咨询程序，承包者按照协商

意见进一步修改和补充报告，形成报告提交 XXXX 部门。该部门于 XX 年 XX 月 XX 日经合规性审查程序后，提出了 XXX 修改/补充建议，并于 XX 年 XX 月 XX 日获得批复文件。承包者按照审查意见进一步修改和补充报告，形成最终报告提交 XXXX 部门备案。

2.6 相关划区管理工具

（1）国际组织或机构描述的具有生态或生物学重要性的区域

本试验活动所在区域不存在 CBD 描述的 EBSAs、IUCN 重要海洋哺乳动物区域（Important Marine Mammal Areas, IMMAs）、FAO 脆弱海洋生态系统（Vulnerable Marine Ecosystems, VMEs）、国际鸟盟 KBAs（Key Biodiversity Areas）等特殊区域。

（2）邻近国家管辖海域相关划区管理工具

本试验活动所在区域以西和西北方向有美国国家管辖范围内海域的海洋保护区。A-5 区域距离上述 Papahānaumokuākea 国家海洋保护区和 Johnston Atoll 保护区的距离超过 500 海里，距离 Kingman Reef and Palmyra Atoll 保护区的距离超过 200 海里。周边其他毗邻区域内不存在其他国家管辖海域及划区管理措施。

3 说明拟议的开发活动

3.1 项目区的定义

3.1.1 地点

本次采矿车单体试验位于 A-5 区块内，区域地形较为平坦，结核丰度高，连续性强，是目前资源和环境调查程度最高的区块。A-5 区块西部海盆为“重点工作区”（图 3.1-1 黄色多边形，面积约为 4590 km^2 ），其资源勘探网度达到 $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ （也称为一般勘探区），而一般勘探区内部分区域的资源勘探网度达到 $3.5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km}$ （称为详细勘探区，面积约为 500 km^2 ）。综合考虑地形、结核丰度和环境调查程度，初步将详细勘探区作为采矿活动区（图 3.1-1）。

环境影响参照区（Impact Reference Zone, IRZ）选定在采矿活动区内（图 3.1-1），面积约 20 km^2 （范围 $4 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ ），在其内部初步选划了 1 块采矿试验区（Collector Test Area，简称 CTA，图 3.1-2），面积约 5 km^2 （范围 $2 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ ），地形坡度、结核丰度和沉积物土工力学性质等参数信息见表 3.1-1。环境保全参照区 1（Preservation Reference Zone, PRZ1）选划在 IRZ 上游 15 km 处，面积与 IRZ 相当（约 20 km^2 ），地质环境特征与 IRZ 相似。

根据国际上已开展的试采试验结果，沉积物羽状流导致的 0.1 mm 沉积厚度边界在 5 km 左右。根据本报告的模拟结果（附件 1），沉积物羽状流导致的 0.1 mm 再沉积厚度面积不超过 1 km^2 。因此，本项目设定的 PRZ1 距离 IRZ 的 15 km 间距可以保证采矿车试验活动不影响 PRZ1 的底质环境。基于对环境基线特征研究，PRZ1 与 IRZ 满足 ISA 关于环境相似性的要求。

此外，在 A-5 区块东部选取了环境保全参照区 2（简称 PRZ2），其面积约为 400 km^2 ，将作为未来全系统采矿试验的 PRZ。未来将重点对 PRZ2 和 IRZ 开展环境比较研究，构建 PRZ2 的环境基线。此区域远离 A-5 区的勘探活动重点工作区，不受后续详细勘探活动、试采活动或未来商业开发活动的影响，将更加有效的保全深海环境与生物多样性。

中国五矿合同区重点工作区、采矿活动区、IRZ、PRZ1 和 PRZ2 的角点坐

标见表 3.1-2。

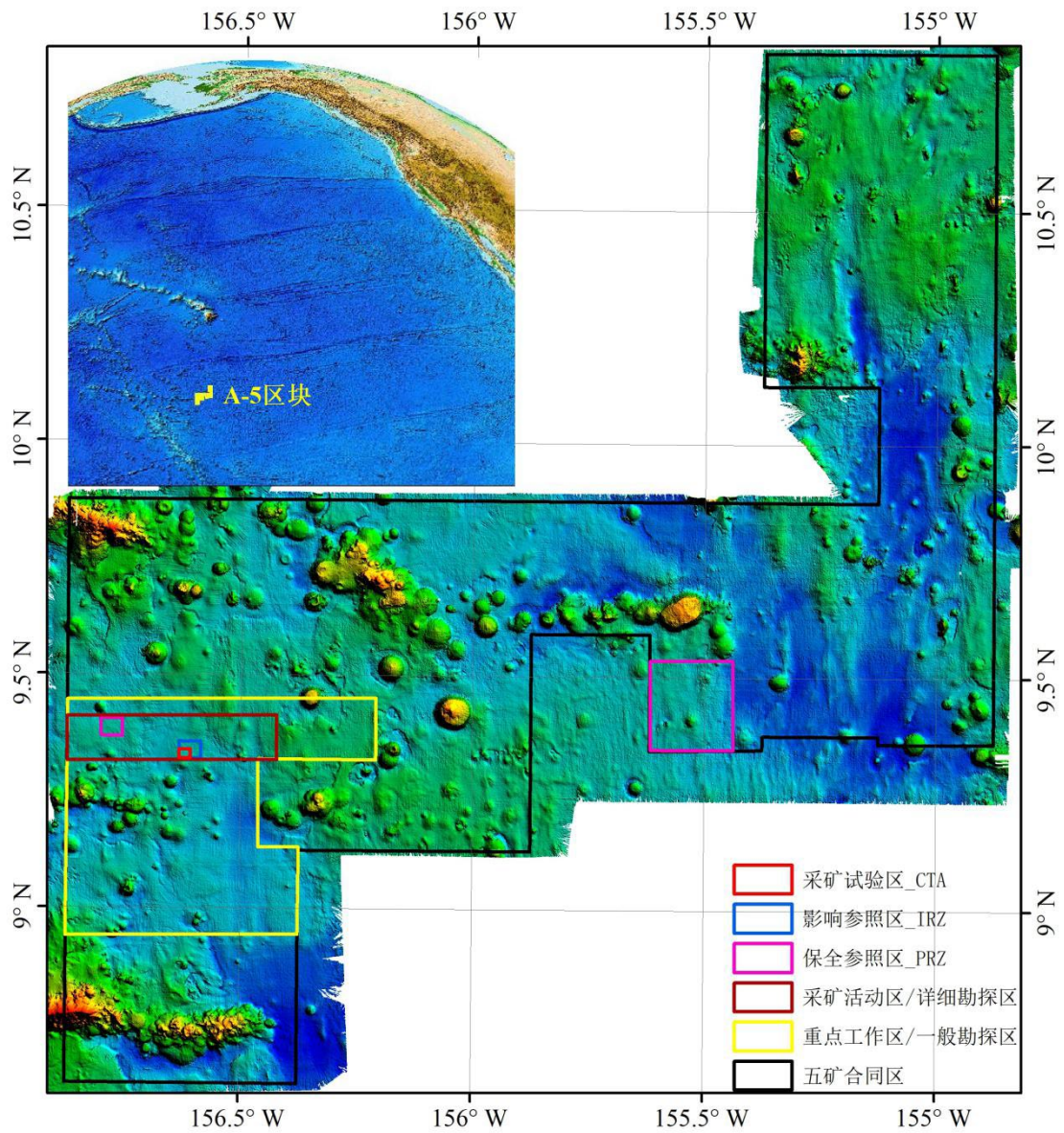


图 3.1-1 中国五矿合同区 A-5 区块重点工作区、采矿活动区、IRZ、PRZ1 和 PRZ2 位置图

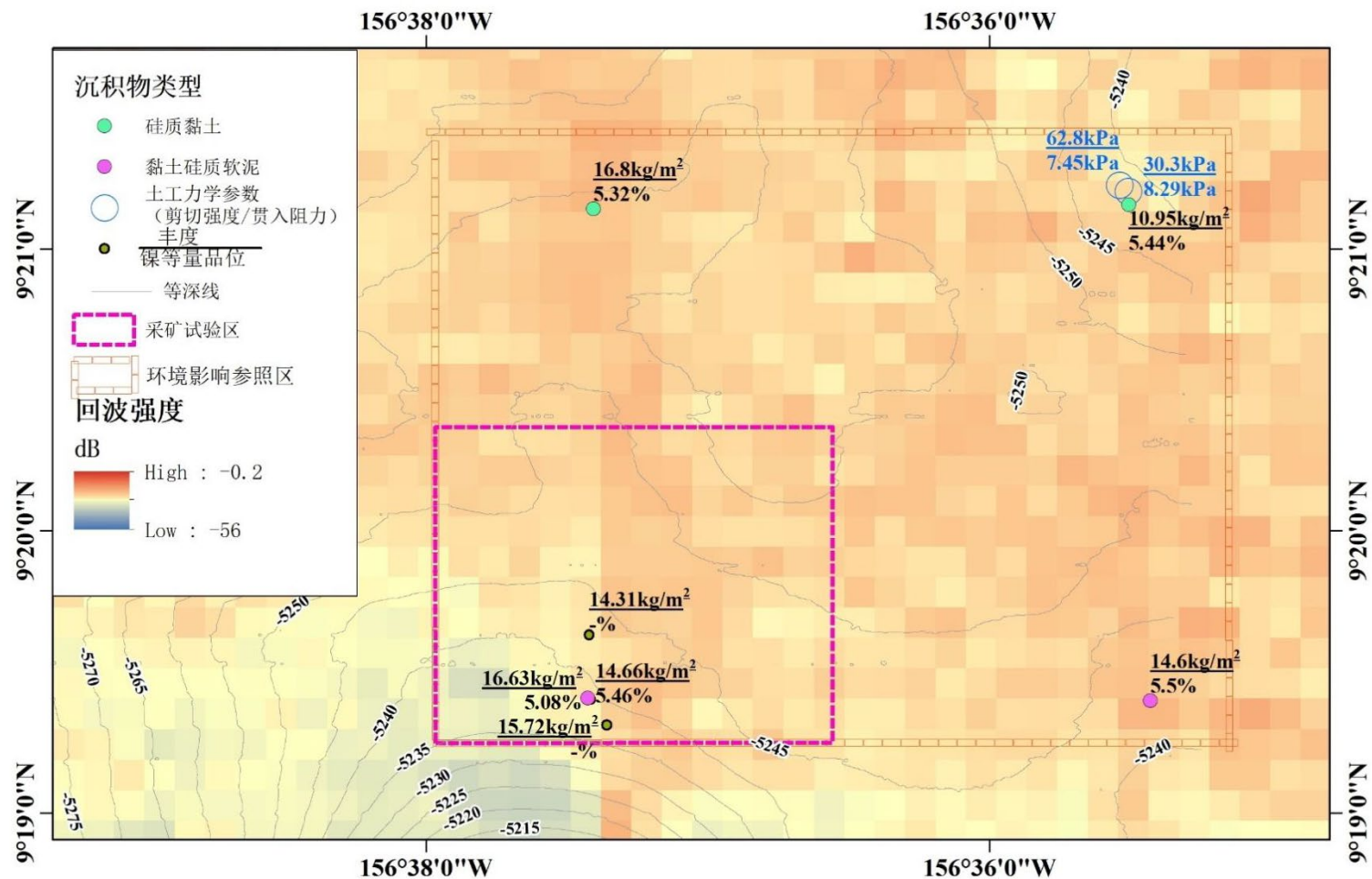


图 3.1-2 A-5 区块 CTA 位置图

表 3.1-1 采矿试验区 CTA 参数特征

采矿试验区	
面积(km ²)	5
长度(km)	2.5(东西向)
宽度(km)	2(南北向)
测站数	3
丰度(kg/m ²)	15.20
NEG(%)	5.26
水深/m	-5247~-5237
坡度/°	0.40~1.34
回波强度/dB	-25.95~-22.99
沉积物类型	黏土硅质软泥
粘土 (<4μm) 含量/%	36.16

表 3.1-2 中国五矿合同区重点工作区、采矿活动区、IRZ、PRZ1 和 PRZ2 角点坐标信息

角点	经度/°	纬度/°	区域名称
点位 1	-156.42200	9.31870	采矿活动区/ 详细勘探区
点位 2	-156.87300	9.31407	
点位 3	-156.87399	9.40904	
点位 4	-156.42300	9.41371	
点位 1	-156.20900	9.32000	重点勘探区/ 一般勘探区
点位 2	-156.46300	9.32000	
点位 3	-156.46100	9.13100	
点位 4	-156.37399	9.13200	
点位 5	-156.37500	8.94500	
点位 6	-156.87500	8.94000	
点位 7	-156.87399	9.44500	
点位 8	-156.20900	9.45200	
点位 1	-156.58583	9.32081	IRZ
点位 2	-156.63278	9.32077	
点位 3	-156.63280	9.35690	
点位 4	-156.58585	9.35694	
点位 1	-156.75600	9.40535	PRZ1
点位 2	-156.75600	9.36756	
点位 3	-156.80177	9.36756	
点位 4	-156.80177	9.40535	
点位 1	-155.61752	9.53553	PRZ2
点位 2	-155.43893	9.53669	

点位 3	-155.43774	9.34547	
点位 4	-155.61623	9.34433	

3.1.2 相关活动

本次试验不涉及采矿试验现场以外的辅助活动和所需基础设施。

3.2 矿产资源情况

中国五矿 A-5 区块重点工作区结核资源勘探网度为 $7\text{ km} \times 7\text{ km}$ ，达到了控制资源量等级；而重点工作区内部采矿活动区的结核资源勘探网度为 $3.5\text{ km} \times 3.5\text{ km}$ ，达到了探明资源量等级。

采用丰度 $\geq 5\text{ kg/m}^2$ 、镍当量（NEG） $\geq 4.46\%$ 、坡度 $\leq 5^\circ$ 等指标圈划矿体，利用多边形法（以调查站位为基础形成的泰森多边形区块作为资源量估算单元）对 A-5 区块采矿活动区资源量进行了估算，结果显示该区域探明的资源量面积约为 500 km^2 ，干结核约 $5.14 \times 10^6\text{ t}$ ，Cu、Co、Ni 和 NEG 总金属量见表 3.2-1。该区域满足采矿试验的资源条件。

表 3.2-1 A-5 区块采矿活动区探明资源量估算结果

矿体面积 (km^2)	湿结核 (万吨)	干结核 (万吨)	Mn 资源 量(万吨)	Cu 资源量 (万吨)	Co 资源量 (万吨)	Ni 资源量 (万吨)	NEG 资源量 (万吨)
505.76	734.02	513.82	128.15	3.71	1.46	5.02	27.09

$$\text{NEG} = 0.13 \times \text{Mn}\% + 0.42 \times \text{Cu}\% + 2.64 \times \text{Co}\% + \text{Ni}\%$$

3.3 项目构成

3.3.1 项目规模

本次试验预计在 2025 年 7-10 月开展。采矿车在海底的作业区域大小为：长 1000 m，宽 600 m，面积 0.6 km^2 （图 3.3-6）。本次试验计划分为两次独立的水下验证。其中，第 1 次水下作业行走、采集扰动面积： 24200 m^2 。第 2 次水下作业行走、采集扰动面积为 75800 m^2 。共计行走、采集扰动面积为 0.1 km^2 。整个试验中，作业中涉及的结核湿重估计为： $13 \text{ kg/m}^2 \times 0.1 \text{ km}^2 = 1300 \text{ t}$ 。

基于本报告 3.3 节的数据，在下文的第 7 章和第 8 章对本次试验对深海的物理化学环境和生物环境的影响进行了估算，评估其潜在的环境影响。本次活动引起的羽流最大影响距离为 2.1 km，垂向影响高度最大为 124 m。采矿试验结束 1-1.5 天后羽流消失。本次试验的沉积物羽状流再沉积厚度大于 0.1 mm 的范围不超过 1 km^2 。

3.3.2 试验系统及方案

（1） 系统组成

此次拟开展的单体采矿车试验系统由采矿车、声学定位系统、脐带缆及水面支持母船组成。采矿车负责海底结核的采集；声学定位系统为采矿车提供定位信息；脐带缆负责采矿车的动力和通信传输；水面支持母船为水面操控作业平台，作为采矿车试验的监控和指挥中心。（图 3.3-1）。

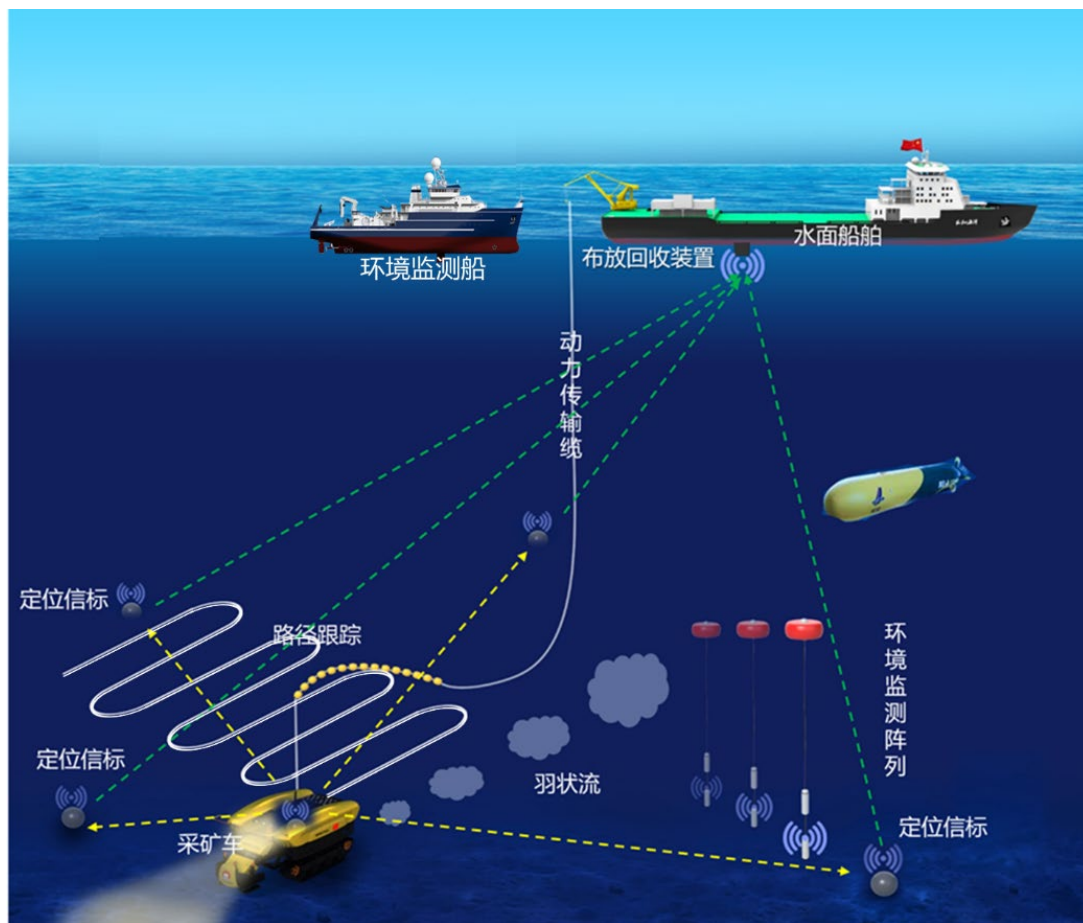


图 3.3-1 本次采矿试验系统的系统组成

1) 采矿车

采矿车是海上采矿试验系统海底作业的核心装备，其主要功能是开展海底多金属结核的采集，并作为执行机构为环境影响监测提供扰动源。采矿车由行走机构、采集机构、主体结构、巡检机构、水下控制系统、液压系统等组成（图 3.3-2），相关技术参数如表 3.3-1 所示。采矿车的各个关键部分均进行了充分的实验室试验和验证，采集机构、行走机构、液压动力系统、控制系统及主体结构通过了实验室试验、135 m 湖试，并在 2018 年通过 500 m 级水深海上试验，2021 年完成 1300 m 级水深海上试验，充分验证了相关关键技术和装备的可靠性。巡检机构的作业功能基于当前水下机器人技术，目前相关技术已完全可满足本项目的需求。

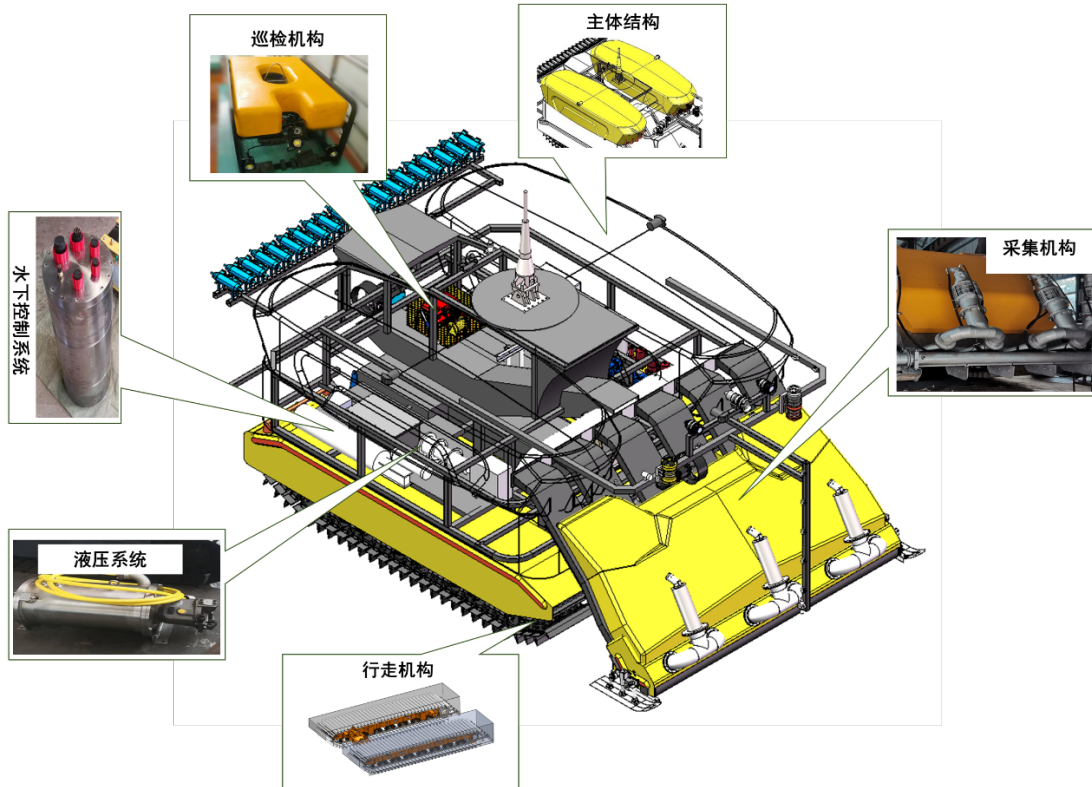


图 3.3-2 采矿车的结构总体设计与系统组成

采矿作业过程中履带行走机构为整个采矿车提供稳定的移动平台，按照预定路径开展作业；采集机构将采集到的多金属结核经过脱泥、破碎后储存在车体尾部的料仓中（图 3.3-3）。

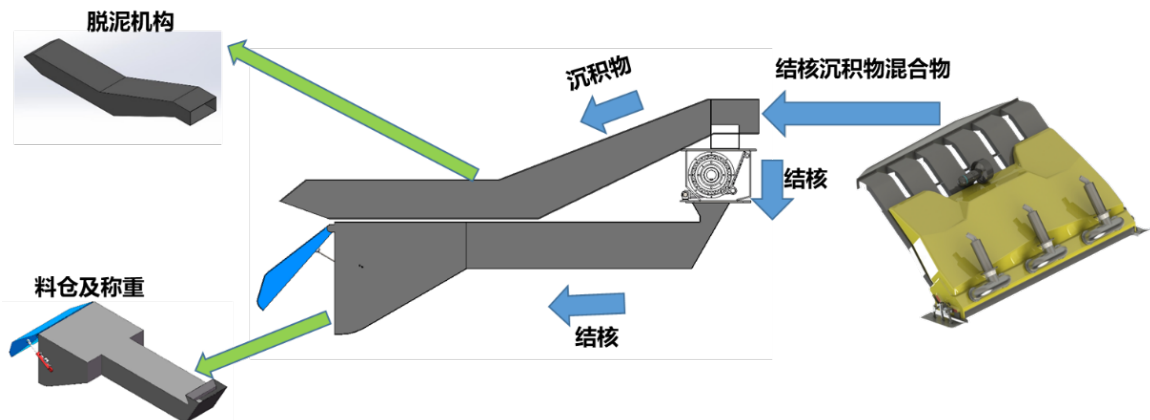


图 3.3-3 多金属结核采集系统设计与采集的基本流程

表 3.3-1 采矿车相关技术参数

序号	项目	参数	备注
1	适应水深	6000 m	设计水深
2	产能	125 t/h	丰度 12 kg/m ²
3	功率	500 kW	
4	行驶速度	1 m/s	最大
5	采集宽度	5 m	
6	采集深度	50 mm-120 mm	
7	外形尺寸	9 m×5 m×4 m	长×宽×高
8	空气中重量	40 t	
9	水中重量	20	

2) 声学定位系统

海上试验过程中，采用长基线声学定位系统为采矿车提供位置信息。采矿车布放前，将长基线的信标布放到海底作业区域附近，完成布放后开始布放采矿车。

3) 脐带缆

脐带缆采用非金属材质的铠装缆，在采矿车布放回收过程中，用于承担采矿车的重量载荷；采矿车布放到海底后，通过其内部的电缆和光纤分别给采矿车提供动力和通讯。

4) 水面支持母船

水面支持母船为整个海上试验提供作业平台和控制、能源、后勤保障等的支撑。

本次试验拟使用“张謇号”（图 3.3-4）作为采矿车水面支持母船。“张謇号”是泰和海洋科技集团和上海彩虹鱼海洋科技股份有限公司合作建造的一艘多学科、多功能、多技术手段为一体的现代化海洋科学综合考察船，满足此次采矿车试验需求。



图 3.3-4 “张謇号”多用途调查作业船

“张謇号”船舶具体参数如表 3.3-2 所示：

表 3.3-2 “张謇号”船舶参数

指标	参数
船长	97.55 m
船宽	17.80 m
型深	8.40 m
吃水	5.70 m
动力定位	DP-1
排水量	4800 t
设计最高航速	14 kn
设计经济航速	12 kn
设计抗风能力	10 级
续航力	15000 海里
船舶定员	60 人（船员 20，调查人员 40）
区域	无限航区
自持力	60 天以上

本次试验的环境监测船舶拟使用“大洋号”科学考察船（图 3.3-5）或其他同类型科考船。“大洋号”科考船在试验中作为环境调查装备布放与回收的水面支撑母船。



图 3.3-5 “大洋”号科学考察船

“大洋号”船舶具体参数如表 3.3-3 所示：

表 3.3-3 “大洋”号船舶参数

指标	参数
总长	98 m
型宽	17 m
设计吃水	5.4 m
设计排水量	4780 t
人员	60 人(其中船员 22 人)
续航力	14000 海里/12 kn
自持力	60 天
最大航速	16 kn
推进方式	全电力推进
噪声标准	参考 DNV Silent-R
实验室总面积	>360 m ²
后甲板作业面积	>400 m ²
船级符号	CSA SPS/Research ShipPSPC, Ice Class B3, COMF (NOISE) 3, COMF (VIB) 3 CSM AUT-0, OMBO, DP-1, Loading Computer (I, D), Lifting Appliance, Clean, FTP, BWMP, BWMS, GPR

(2) 海上试验流程

整个海上试验分 2 次布放回收开展，第 1 次海底作业时长 70 h，第 2 次海底作业时长 60 h。第 1 次海底作业主要进行采矿车的各项基本功能和性能测试，第 2 次海底作业主要对其采集和行走能力进行测试，同时开展环境扰动试验，为环境影响研究提供数据。2 次水下作业路径规划如图 3.3-6 所示，环境监测将完整覆盖整个实验的全周期。

1) 采矿车第 1 次水下试验

采矿车第 1 次水下试验主要开展设备着底后静态试验、巡检试验、温升及噪声试验、直线行驶试验、转弯半径试验、不同参数下采集性能试验、连续采集作业试验、采样作业、回收前设备状态检查等内容，具体见表 3.3-4。

表 3.3-4 采矿车第 1 次水下试验内容

序号	项目内容	时间 (min)		料仓中储存的结 核量 (kg)	行驶距离 (m)
		单次	累计		
a	设备着底后静态试验	240	240	-	-
b	巡检试验	300	300	-	-
c	温升、噪声试验	300	300	-	-
d	直线行驶试验	70	700	-	1000
e	转弯半径试验	40	800	-	1000
f	不同参数下采集性能试验	30	900	0	300
g	连续采集作业试验	30	300	8100	2540
h	采样作业	480	480	-	0
i	回收前设备状态检查	180	180	-	-
	合计	-	4200	8100	4840

a. 设备着底后静态自检 (240 min)

设备着底后，开启全部监测部件（声学定位、水深传感器、浊度计、ADCP、摄像头、灯、压力传感器、流量传感器、漏水传感器、电压、电流、

温度传感器等)。

获取并记录着底后的位置、深度、浊度、海流、图像、压力、流量、漏水、电压、电流、温度等信息。每隔 5 min 记录 1 次，共计连续记录 240 min。

b. 巡检试验 (300 min)

完成设备静态试验后，检查巡检装置状况，操作巡检装置离开母体，对采矿车本体及周边环境进行检测。针对采矿车沉陷、羽状流扩散等每 20 min 检测一次，连续检测 300 min。

c. 温升、噪声试验 (300 min)

开启液压泵站并加载，记录系统温度及噪声等信息。每隔 10 min 记录 1 次，连续记录 300 min。

d. 直线行驶试验 (700 min)

分别给定不同直线行驶输入参数，测试采矿车直线行走性能。测试过程中修正和优化输入参数，获得深海环境下可直线行驶的输入与输出参数关系。

行驶速度分别为：0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s、0.6 m/s、0.7 m/s、0.8 m/s、0.9 m/s、1.0 m/s，共计 10 组数据。每组数据测试距离为 20m，每组测试 5 次，每次的时间估计平均为 10 min。每次行走完成后通过巡检装置进行作业检测，每次 20 min。预计累计行驶距离 1000 m，共需时间 700 min。

e. 转弯半径试验 (800 min)

给定两条履带不同的驱动参数，测试不同参数下的转弯半径。测试过程中让采矿车直线行驶 20 m 后进行转弯行驶，转弯结束后直线行驶 20 m 停止，对转弯半径进行测量。预计共需测试 20 次，每次测试时间 20 min。每次测试结束后通过巡检装置进行作业情况检测，每次作业时间 20 min。共计行驶距离 1000 m，试验时间 800 min。

f. 不同参数下采集性能试验 (900 min)

分别在不同行驶速度下，测试不同采集参数下的采集能力。行驶速度分别为：0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s、0.6 m/s、0.7 m/s、0.8 m/s、0.9 m/s、1.0 m/s。

采集参数预计 3 组，测试结束后通过称重传感器测量采集重量，测量后抛料，然后通过巡检装置对采集后的区域进行检测，累计采集的结核约为 16200 kg。

预计测试 30 组数据，单次采集测试距离 10 m，单次采集测试时间预计 10 min，单次巡检检测预计 20 min。共计行驶距离 300 m，试验时间 900 min。

g. 连续采集作业试验（300 min）

获得最佳行走采集作业参数后，进行全系统状态检测，并设置连续采集作业参数。连续作业直线行驶距离 150 m，完成直线行驶后 180° 转向到相邻路径，转向过程中将采集的结核卸在转弯路径上，然后继续开展下一个直线作业。试验中完成 10 个直线段采集作业。最后一个直线段采集的矿石留在料仓中，料仓中储存的结核量为 8100 kg。

设转弯半径为 15 m，转弯速度为 0.3 m/s，转弯路径约 104 m，则转弯行驶时间为 347 s；直线段行驶速度 0.6 m/s，行驶时间 250 s。完成一个直线段及转弯作业预计 597 s，即 10 min。完成一个直线段及转弯作业后，通过巡检装置进行作业检测，每次检测用时 20 min。完成全部连续采集作业试验需要 300 min。

h. 采样作业（480 min）

采后区域巡检观察、定点采样等，预计 480 min。

i. 回收前设备状态检查（180 min）

完成全部作业后，开展设备状态检查，预计 180 min。

j. 水下作业总计

行走距离： $1000+1000+300+10\times(150+104)=4840$ m。

行走面积： $4840\times5=24200$ m²。

2) 采矿车第 2 次水下试验

采矿车第 2 次水下试验主要开展设备着底后静态试验、巡检试验、温升及噪声试验、区域采集扰动作业、采样作业、回收前设备状态检查等内容，具体见表 3.3-5。

表 3.3-5 采矿车第 2 次水下试验内容

序号	项目内容	时间 (min)		料仓中储存的 结核量 (kg)	行驶距离 (m)
		单次	累计		
a	设备着底后静态试验	120	120	-	-
b	巡检试验	120	120	-	-
c	温升、噪声试验	120	120	-	-
d	区域采集扰动作业	2203	2203	8100	15160
	路径间距 0m	842	842	-	5080
	路径间距 15m	454	454	-	3276
	路径间距 25m	473	473	-	3960
	路径间距 50m	434	434	8100	2844
e	采样作业	720	720	-	-
f	回收前设备状态检查	300	300	-	-
	合计	-	3583	8100	15160

a. 设备着底后静态自检 (120 min)

设备着底后，开启全部监测部件（声学定位、水深传感器、浊度计、ADCP、摄像头、灯、压力传感器、流量传感器、漏水传感器、电压、电流、温度传感器等）。

获取并记录着底后的位置、深度、浊度、海流、图像、压力、流量、漏水、电压、电流、温度等信息。每隔 5 min 记录 1 次，共计连续记录 120 min。

b. 巡检试验 (120 min)

完成设备静态试验后，检查巡检装置状况，操作巡检装置离开母体，对采矿车本体及周边环境进行检测。针对采矿车沉陷、羽状流扩散等进行检测，检测 20 min，共计连续检测 120 min。

c. 温升、噪声试验 (120 min)

开启液压泵站并加载，记录系统温度及噪声等信息。每隔 10 min 记录 1 次，连续记录 120 min。

d. 区域采集扰动作业 (2203 min)

在 CTA 开展连续采集扰动作业，连续作业直线行驶距离 150 m，完成直线行驶后 180° 转向到相邻路径，转向过程中将采集的结核卸在转弯路径上，然后继续开展下一个直线作业。作业过程中，设置不同的路径间距及行驶采集速度，测试采矿工艺及方法。

采集路径间距分别为 0 m、15 m、25 m、50 m，行驶速度分别为 0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s。

在不同间距路径采集行走过程中，第 1-2 个直线段行驶速度为 0.2 m/s，第 3-4 个直线段行驶速度为 0.4 m/s，第 5-6 个直线段行驶速度为 0.6 m/s，第 7-8 个直线段行驶速度为 0.8 m/s，第 9-10 个直线段行驶速度为 1.0 m/s。间距为 0 m 时的转弯半径为 15 m，间距为 15m 时的转弯半径为 10 m，间距为 25 m 时的转弯半径为 15 m，间距为 50 m 时的转弯半径为 27.5 m。

➤ 路径间距0m (842 min)

转弯路径长度 104 m，直线路径 150 m，20 个直线段行程。两个 10 个直线段行程间间距 50 m。

行驶速度 0.2 m/s 时，行驶时间为： $2 \times (104 + 150) / 0.2 = 2540$ s

行驶速度 0.4m/s 时，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为： $2 \times 104 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.4 = 1444$ s

行驶速度 0.6 m/s 时，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为： $2 \times 104 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.6 = 1194$ s

行驶速度 0.8 m/s 时，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为： $2 \times 104 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.8 = 1068$ s

行驶速度 1.0 m/s 时，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为： $2 \times (104 + 150) / 1.0 = 994$ s

巡检检查：60 min

累计用时： $2 \times ((2540 + 1444 + 1194 + 1068 + 994) / 60 + 5 \times 60) = 842$ min

累计行走： $20 \times 150 + 20 \times 104 = 5080$ m

➤ 路径间距15m (454 min)

转弯路径长度 32 m，直线路径 150 m，18 个直线段行程。

行驶速度 0.2 m/s 时，5 个直线段，行驶时间为： $5 \times (32 + 150) / 0.2 = 4550$ s

行驶速度 0.4 m/s 时，4 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $4 \times 32 / 0.3 + 4 \times 150 / 0.4 = 1927$ s

行驶速度 0.6 m/s 时，3 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $3 \times 32 / 0.3 + 3 \times 150 / 0.6 = 1070$ s

行驶速度 0.8 m/s 时，3 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $3 \times 32 / 0.3 + 3 \times 150 / 0.8 = 883$ s

行驶速度 1.0 m/s 时，3 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $3 \times 32 / 0.3 + 3 \times 150 / 1 = 770$ s

巡检检查：60 min

累计用时： $(4550 + 1927 + 1070 + 883 + 770) / 60 + 5 \times 60 = 454$ min。

累计行走： $18 \times 150 + 18 \times 32 = 3276$ m

➤ 路径间距25 m (473 min)

转弯路径长度 48 m，直线路径 150 m，20 个直线段行程。

行驶速度 0.2 m/s 时，4 个直线段，行驶时间为： $4 \times (48 + 150) / 0.2 = 3960$ s

行驶速度 0.4 m/s 时，4 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $4 \times 48 / 0.3 + 4 \times 150 / 0.4 = 2140$ s

行驶速度 0.6 m/s 时，4 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $4 \times 48 / 0.3 + 4 \times 150 / 0.6 = 1640$ s

行驶速度 0.8 m/s 时，4 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $4 \times 48 / 0.3 + 4 \times 150 / 0.8 = 1390$ s

行驶速度 1.0 m/s 时，4 个直线段，转向速度 0.3 m/s，行驶时间为：
 $4 \times 48 / 0.3 + 4 \times 150 / 1 = 1240$ s

巡检检查：60 min

累计用时： $(3960 + 2140 + 1640 + 1390 + 1240) / 60 + 5 \times 60 = 473$ min

累计行走： $20 \times (150 + 48) = 3960$ m

➤ **路径间距50m (434 min)**

转弯路径长度 87 m, 直线路径 150 m, 12 个直线段行程。

行驶速度 0.2 m/s 时, 4 个直线段, 行驶时间为: $4 \times (87 + 150) / 0.2 = 4740$ s

行驶速度 0.4 m/s 时, 2 个直线段, 转向速度 0.3 m/s, 行驶时间为:
 $2 \times 87 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.4 = 1330$ s

行驶速度 0.6 m/s 时, 2 个直线段, 转向速度 0.3 m/s, 行驶时间为:
 $2 \times 87 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.6 = 1080$ s

行驶速度 0.8 m/s 时, 2 个直线段, 转向速度 0.3 m/s, 行驶时间为:
 $2 \times 87 / 0.3 + 2 \times 150 / 0.8 = 955$ s

行驶速度 1.0 m/s 时, 2 个直线段, 转向速度 0.3 m/s, 行驶时间为:
 $2 \times 87 / 0.3 + 2 \times 150 / 1 = 880$ s

巡检检查: 60 min

累计用时: $(4740 + 1330 + 1080 + 955 + 880) / 60 + 5 \times 60 = 434$ min

累计行走: $12 \times (150 + 87) = 2844$ m

➤ **作业总时间**

作业总时间: $842 + 454 + 473 + 434 = 2203$ min ≈ 37 h

➤ **作业区域**

作业长度: $5080 + 3276 + 3960 + 2844 = 15160$ m

采集面积: $15160 \times 5 = 75800$ m²

e. 采样作业 (720 min)

采后区域巡检观察、定点采样等; 预计 12 小时。

f. 回收前设备状态检查 (300 min)

完成全部作业后, 开展设备状态检查, 预计 5 小时。

(3) 试验扰动区域

边界区域大小: 长 1000 m, 宽 600 m, 面积 0.6 km²

行走、采集扰动面积: 24200 m² (第 1 次水下作业) + 75800 m² (第 2 次水

下作业) =0.1 km²。

作业中涉及湿结核总重量: 13 kg/m²×0.1 km²=1300 t。

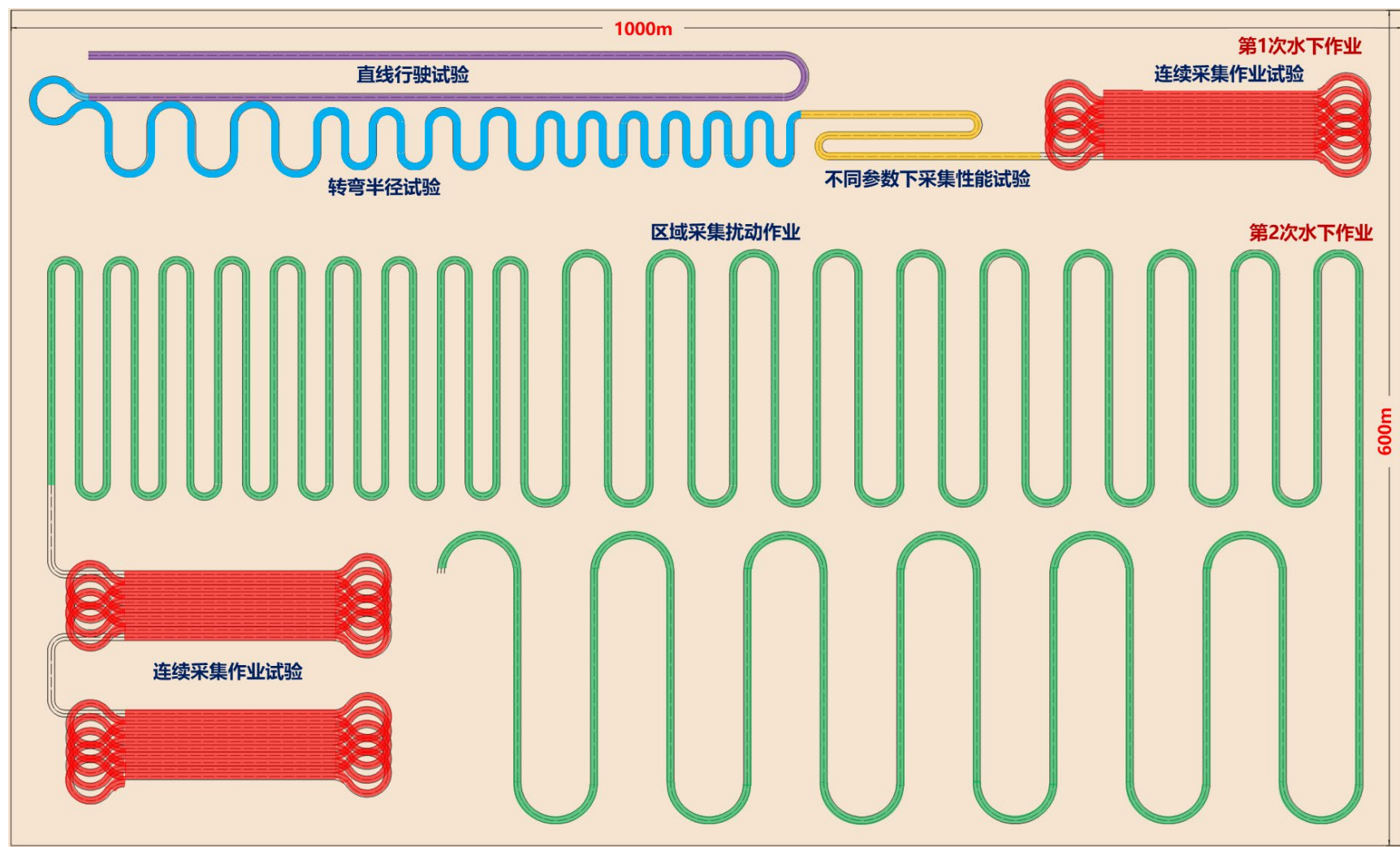


图 3.3-6 采矿车单体试验两次水下作业路径规划图

3.3.3 转运

本次试验仅包括采矿车的海床试验，不涉及矿石的管道提升和矿物的水面运输。

3.3.4 现场处理

本次试验不涉及矿物的甲板处理。

3.3.5 辅助设备

本次试验的主要辅助设备包括可用于 6000 m 作业的深水型无人遥控潜器（Remote Operated Vehicle, ROV）和自主式水下潜器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）。ROV 和 AUV 主要负责环境监测数据和样品的获取。

（1）“海龙 4” ROV

“海龙 4” ROV 是上海交通大学研制的一套 6000 m 作业能力深海 ROV 系统，其采用电动驱动方式，具有较强的水下机动性和作业能力，配置了 7 功能机械手，高清摄像机、照相机和 LED 水下灯光，具备良好的水下精细观测能力，配置了惯导系统，具备自动化的水下悬停和巡线控制系统，这大大提高了 ROV 导航定位精度和作业效率。此外，“海龙 4” ROV 还具备高清高速光学探测设备的搭载能力。

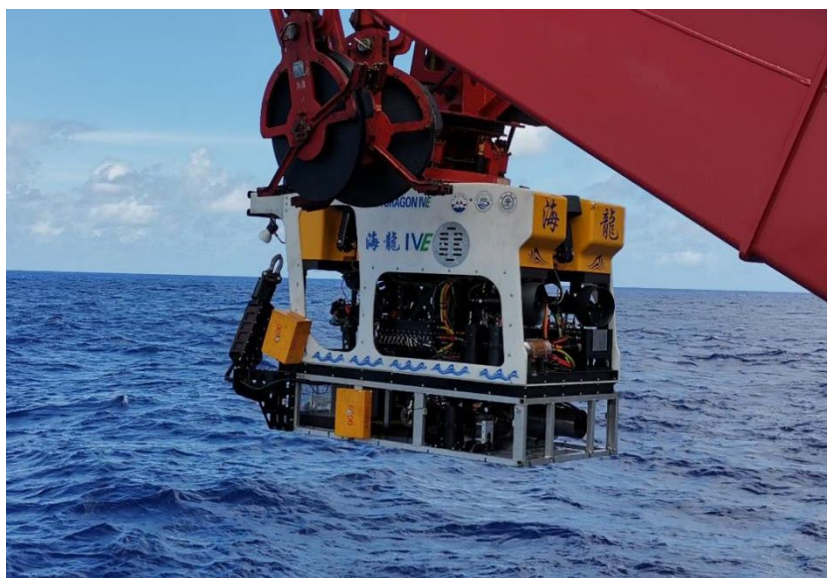


图 3.3-7 “海龙 4” ROV

(2) “潜龙四号” AUV

“潜龙四号” AUV 是中国科学院沈阳自动化研究所研制的一套 6000 m 作业能力深海 AUV 系统，配置了惯导系统，高清摄像机、照相机和 LED 水下灯光，并携带有深水多波束系统、浅地层剖面探测系统等，具备长续航能力的近底光学、声学和水文环境探测能力。

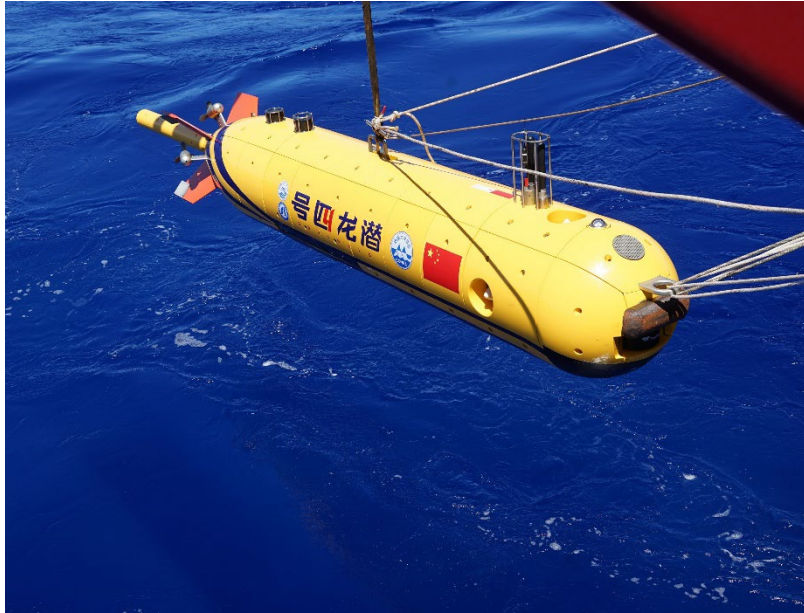


图 3.3-8 “潜龙 4” AUV

4 说明现有的物理化学环境

4.1 关键信息

本章节主要介绍合同区的物理化学环境条件，回顾了中国五矿在 A-5 区块开展的物理化学环境基线调查情况和特征研究。

先根据已有公开资料获取的信息，综述了中国五矿合同区所在 CC 区的区域地质背景、物理海洋背景和海水化学背景，说明合同区的总体环境背景条件。

其次介绍了中国五矿自合同签署后开展的外业调查情况和物理化学相关环境工作量完成情况，这也是本报告分析资料的主要来源。

根据航次调查成果，分别分析了 A-5 区块的气象特征、地质特征、物理海洋特征、海水化学特征、自然灾害情况以及噪音和光等。上述分析内容为第 7 章的影响评估提供了评估基础。

4.2 区域概述

4.2.1 区域地质背景

(1) 构造特征

A-5 区块位于东太平洋 CC 区西侧。CC 区位于东太平洋海盆，南北边界分别以克里帕顿断裂带（Clarion Fracture Zone）和克拉里昂断裂带（Clipperton Fracture Zone）两条转换断层而得名，属于太平洋板块的一个中间块体。CC 区的构造特征与太平洋地区的板块演化活动历史密切相关，由中生代晚期至新生代的海底扩张形成。根据大量测深资料，CC 区平均水深 5000 m 左右（图 4.2-1），水深自西向东有逐渐减少的趋势。区内海底地形起伏变化较大，呈现海底平原、海山、海丘、海隆、洼地、沟、槽等相间排列的特征。

CC 区内断裂构造主要有克拉里昂和克里帕顿断裂带（图 4.2-1）。这些断裂带呈北东东向，主要形成于新生代太平洋板块扩张期。除上述规模巨大的断裂带外，区内还发育有与之平行的次一级或规模较小的转换断层。在 CC 区西部，由于区域隆起而导致断裂作用，或改造叠加作用，区内断层不论是数量或规模均明显强于东部，并成为西部火山活动的通道或场所，形成规模较大的火山链

和山间盆地构造。

根据地球物理特征和构造格局的差异，大致以 145°W 、 125°W 为界，可将 CC 区分为西、中、东三个构造单元，基底洋壳主要由大洋拉斑玄武岩构成。西部基底形成的地质时代为晚白垩世（距今约为 100 Ma - 70 Ma ），区内重力异常的低正值重力背景显示高密度地幔异常及海底区域隆起，中国五矿合同区 A-5 区块位于该单元；中部基底的地质时代为始新世-渐新世（距今约为 70 Ma - 40 Ma ），中国五矿的 A-1、A-2、A-6、A-7 和 A-8 区块均位于该构造单元；东部基底的地质时代为渐新世-上新世（距今约为 40 Ma - 5 Ma ），是比较年轻的洋壳区，中国五矿的 A-3 和 A-4 区块位于该构造单元（图 4.2-1）。

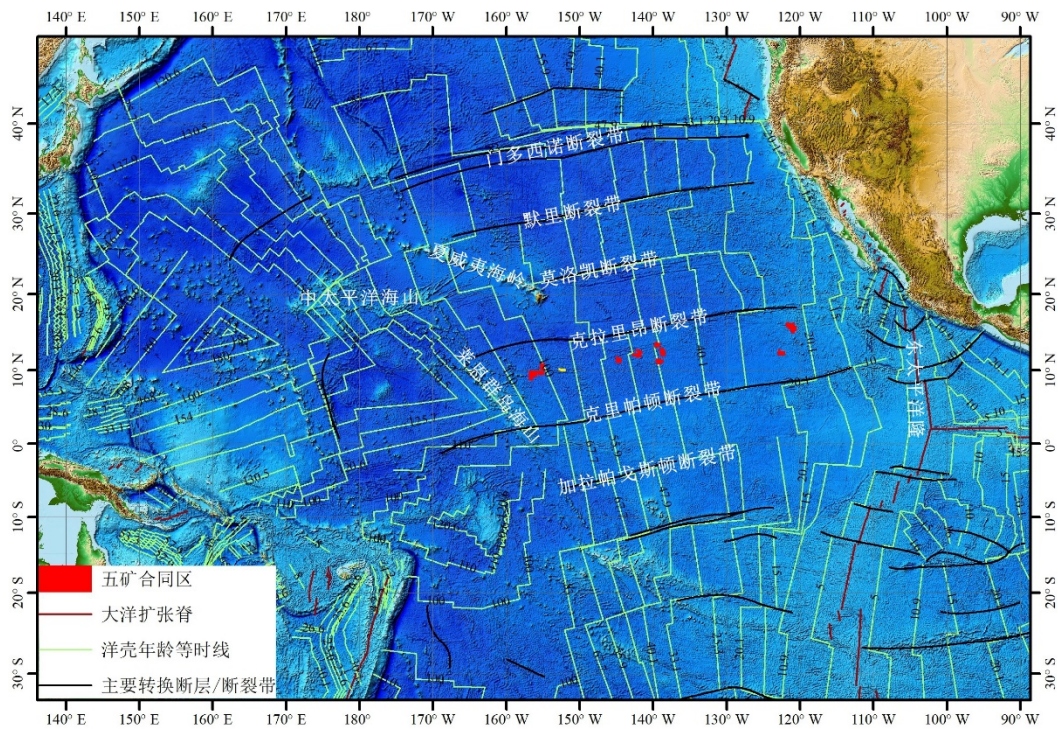


图 4.2-1 太平洋区域地质及磁条带分布图

（太平洋壳等时线年龄数据来源于 Müller et al. (2016)）

（2）沉积特征

东太平洋赤道区域生产力高，沉积物类型主要为钙质软泥；海山区域由于水深浅于碳酸盐补偿深度（CCD: $\sim 4500\text{ m}$ ），沉积物类型也主要为钙质软泥。CC 区沉积物类型主要以深海粘土为主，其次为放射虫软泥和硅质粘土。中国五矿合同区除西部 A-5 区块东北部存在放射虫软泥以外，其余区块主要为深海粘

土（图 4.2-2）。

沉积物厚度主要受沉积时间和沉积速率影响，钙质软泥区域沉积速率较快，沉积物厚度较深。从东太平洋沉积物厚度分布等值线图可以看出（图 4.2-3），海山区域沉积物厚度最大，最高达 800 m，其次为赤道高生产力区域，沉积物厚度最高达 500 m。CC 区沉积物厚度受洋壳形成时间影响，由东向西逐渐增加由东向西逐渐增加（Dutkiewicz et al., 2017）。中国五矿合同区东部的 A-3 和 A-4 区块距离洋脊较近，地壳年龄小，因此沉积物厚度小于 100 m；中国五矿中部区块沉积物厚度介于 100-200 m 之间，而位于 CC 区最西部的 A-5 区块板块年龄较大（~100 Ma），因此沉积物厚度最大（介于 200-300 m）（图 4.2-3）。

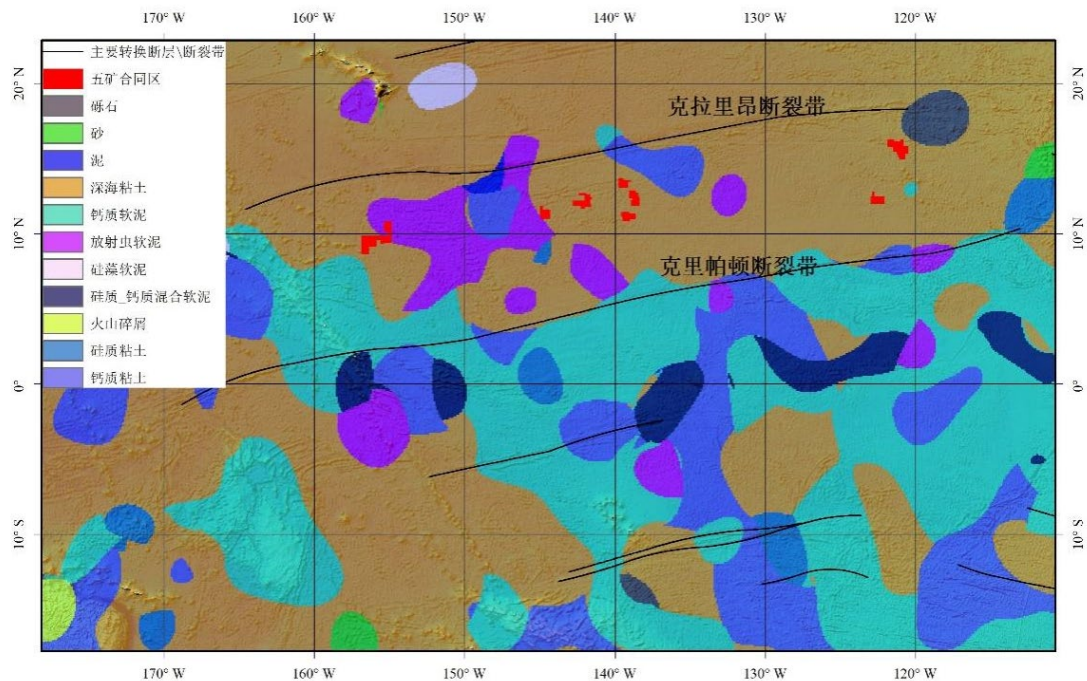


图 4.2-2 东太平洋 CC 区沉积物类型分布图

（沉积物类型数据来源于 Dutkiewicz et al. (2015)）

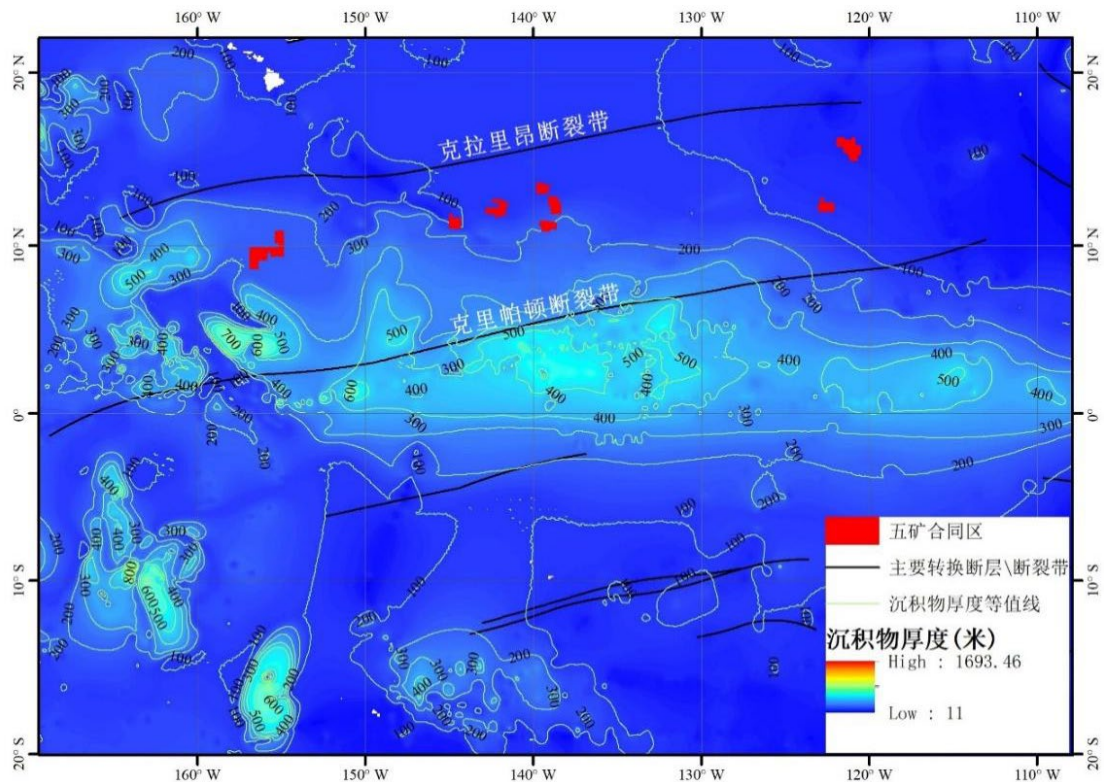


图 4.2-3 东太平洋 CC 区沉积物厚度分布等值线图

(沉积物厚度数据来源于 Straume et al. (2019))

(3) 结核成矿特征

从全球海底公开的历史调查站位来看，大部分站位都分布在南北半球的低纬度带，而赤道附近和中高纬度地区的结核分布相对较少（图 4.2-4）。全球海底多金属结核分布在地理纬度上具有典型的分带性，全球几大多金属结核成矿带主要分布在赤道以北和以南的低纬度带。例如东太平洋 CC 区结核成矿带位于北纬 5-15°之间，中印度洋海盆结核成矿带位于南纬 10-20°之间，库克群岛-彭林海盆结核成矿带位于南纬 5-35°之间。从太平洋结核出现概率预测图中可以看出（图 4.2-4），结核出现概率高的区域主要分布在赤道南北两侧的海盆区。北半球高概率区域主要包括 CC 区、中太平洋海盆和西太平洋海盆区，南半球高概率区域主要为彭林海盆，与历史航次调查结果一致。

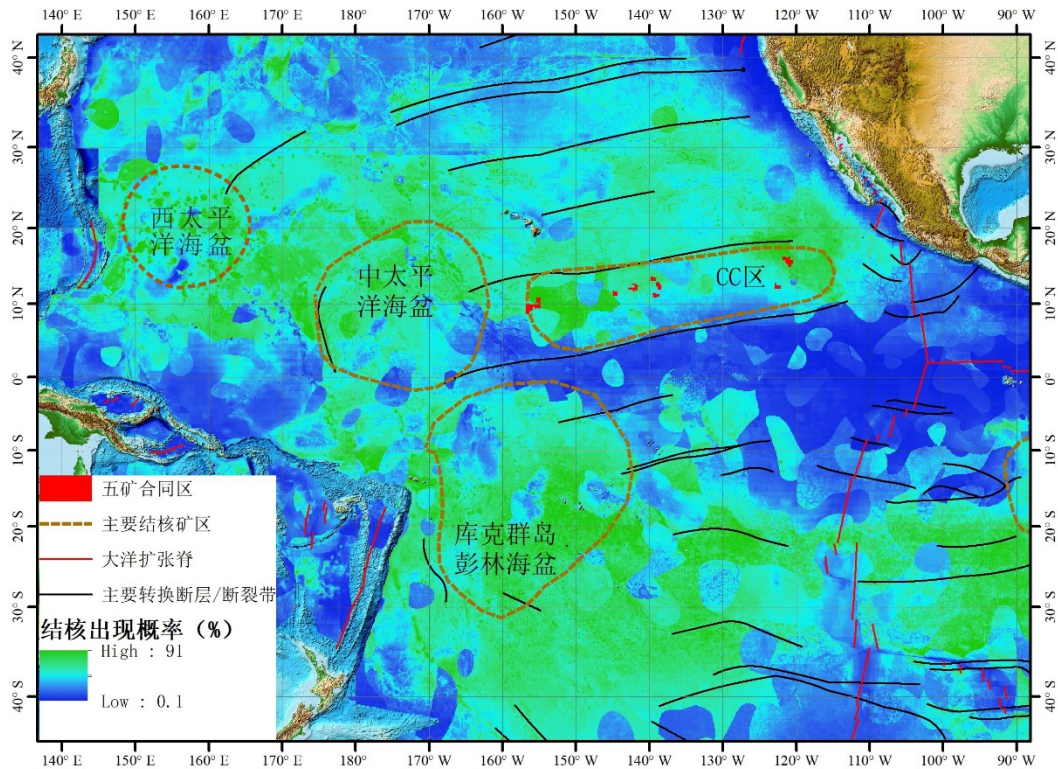


图 4.2-4 太平洋结核出现频率分布图

(结核概率数据来源 Dutkiewicz et al. (2020))

4.2.2 区域物理海洋背景

CC 区位于太平洋中部、东北信风带南端和热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 北部的中间地区。气候分为一年两季，即冬半年和夏半年。冬半年区内主要受到副热带高压 (简称副高) 南端的东北信风控制，盛行东北大风和信风涌浪，风向、风力稳定，以 5 级风频率最高，占 41.1%，最大风速大于 15 m/s，最大浪高大于 5 m。天气状况和海面能见度良好，呈现信风带的气候特征。夏半年区内由于副高和热带辐合带的季节性北跳，勘探区东北风减小，但 7-9 月会出现热带风暴，最大风速 > 50 m/s，频繁遭受热带低压和热带气旋的影响，气温高、湿度大、降水多，具有热带海洋性气候特征。

中国五矿合同区位于太平洋中东部的热带海洋区域，表层海流分布主要为北赤道流 (North Equatorial Current, NEC)、北赤道逆流 (North Equatorial Countercurrent, NECC) 和南赤道流 (South Equatorial Current SEC) 及其分支新几内亚沿岸流 (New Guinea Coastal Current, NGCC)。表层洋流之下分布着北赤

道潜流 (North Equatorial Undercurrent, NEUC)、北赤道次表层流 (North Equatorial Subsurface Current, NESC) 和赤道潜流 (Equatorial Undercurrent, EUC) (图 4.2-5)。该海区是太平洋暖池区域, 表层水温超过 28 °C, 对东亚季风、大气环流都有显著影响 (Hu et al., 2011)。

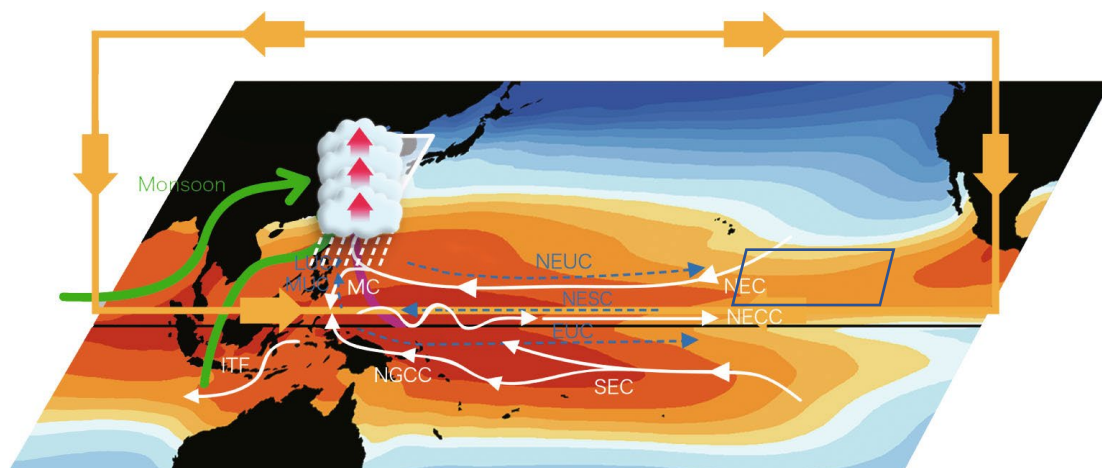


图 4.2-5 热带太平洋洋流分布及其气候影响

(蓝色实线框为 CC 区示意位置, Hu et al., 2011)

North/South Equatorial Current (NEC/SEC), New Guinea Coastal Current (NGCC), Mindanao Current (MC), North Equatorial Countercurrent (NECC), Indonesian Throughflow (ITF), Mindanao Undercurrent (MUC), Luzon Undercurrent (LUC), North Equatorial Undercurrent (NEUC), New Guinea Coastal Undercurrent (NGCUC), North Equatorial Subsurface Current (NESC) and Equatorial Undercurrent (EUC).

根据深层海水的温度和盐度, 全球海洋的深层海水主要来自两类水体: 较暖且盐度较高 (2.5 °C 和 35 PSU) 的北大西洋深层水和温度、盐度较低、但密度较高 (1 °C 和 34.6 PSU) 形成于威德尔海的南极底层水。太平洋的深层海水来源于南极绕极流海区, 其流动分为上层分支 (U-PMOC) 和下层分支 (L-PMOC, 下文称为“底层分支”)。在东北太平洋海盆, 特别是在 CC 区, 其深层和近底层海水的结构是由南极底层水 (AABW) 的流入和在海盆内的蓄积和再分布所决定, 因为在这里海水没有通道可以流出来, 而 CC 区位于一个南极底层水 (AABW) 向东北稳定伸展的区域内。

受中国大洋协会的委托, 1997-1999 年自然资源部第二海洋研究所在中国大洋协会多金属结核合同区的东区、西区分别进行了离底 600 m 以内的流场变化观测第一次观测海流计离底高度设置为 8 m、200 m 和 600 m, 第二次则集中在近底层, 观测层位调整为离底 5 m、15 m 和 50 m (梁楚进, 2004)。在西区观测站位 (10°02' N, 154°03' W, 该区域毗邻 A-5 区块), 布放两套近底潜标, 获

得了离底 8 m、50 m 和 600 m 的长期海流观测资料。观测结果表明离底 600 m 以内的低频流动的时间周期为 25-120 天，其中周期 51 天左右的低频振动是主要成分。地形对离底 50 m 以内的低频流动有明显影响。

1997 年至 1998 年在西区开展了近底 8 m 和 200 m 的海流观测（张国祯，1999）。2019 年-2021 年在中国五矿 A-5 区块获得了离底 20 m、100 m，200 m 和离海表 2010 m 的海流计测流结果（2021 年中国五矿年度报告）。2022 年 9 月 20 日成功回收了 2021 年 10 月布放的一套近底锚系，获得离底 8 m 和 100 m 的流速观测数据。

上述这些观测结果表明，该区域近底层的海流以低的平均速度和在速度和方向上具有高变化性为特征。研究表明，深海底流的主要变化和气象尺度的变化一样，与惯性和潮汐振荡相关。倪建宇等（2002）根据流速大小和变化快慢将 CC 区底层流分为 3 种水动力学状况：

（1）平静期：以最小的水流速度（0-3 cm/s），中等到低的变化性和低潮汐活动为特征。事实上，底层流甚至存在“不活动”期。底层流不活动期间，流速最小的只有 1.2 cm/s 左右。离底 200 m 层，海流“不活动”期最短时间为 1 天，而最长时间为 6 天，“不活动”期的时间间隔最短的为 1 天，而最长的时间间隔长达 186 天；离底 8 m 层，海流“不活动”期最短时间为 1 天，而最长的时间为 8 天，“不活动”期的时间间隔最短的为 1 天，而最长的时间间隔达 89 天。

（2）中等尺度的惯性潮汐期：以水流速度的改变（0 至 5-6 cm/s）和相应增加的速率为特征。

（3）活跃期：最初与水流速度的急剧增加相联系。这种水流速度的增加可维持一个相对稳定的时期，水流流速 24 h 内的平均值可达 8 cm/s 或更高，且某一小时的平均值可达 13-15 cm/s。这些事件被称为“海底风暴”。这种变化通常具规律性，其持续时间在 1-6 周，与海面典型的水文、气象变化的时间尺度相一致（Aller, 1997; Xie, 2022）。与深海海底风暴相伴随的另一个特点是海流方向也发生显著的变化。

4.2.3 区域海水化学背景

CC 区位于北赤道流和北赤道逆流的交界处，营养盐可以得到北赤道流带来的赤道高营养盐水的补充，上层海水营养盐高于一般寡营养海区，而且东部高

于西部。该区域上层海水的营养盐等化学要素存在一定的年度和空间变化特性，不同要素的表现形式不同，营养盐亏损层受到厄尔尼诺等全球气候事件影响。

10° N 附近次表层海温距平向西传播是 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)事件的重要一环，拉尼娜年硝酸盐、磷酸盐均显著增加，且亏损层下移；厄尔尼诺年则相反；而且在拉尼娜年发现在北赤道流和北赤道逆流的交界处，硝酸盐含量突增，而在厄尔尼诺年这种现象就消失。表层海水 N/P/Si 的比值在时间和空间上有明显波动，而且比值严重偏离 Redfield 比值。对深层和底层海水营养盐和 DO 的分析发现，其年际变化表现出对 ENSO 事件的响应，且变化规律与上层海水相反。

该区域海水 DO 分布规律符合大洋水体的典型特征，表层 DO 含量在整个水柱中最高，达到饱和甚至过饱和。随着水深的增加光照强度减弱，光合作用减弱、呼吸作用增强，同时生物生理过程和死亡产生的有机质不断被分解，消耗大量氧气，100 m 以下 DO 浓度不断减小，在 140-800 m 左右的水层，有机质分解最为强烈，从而使得海水 DO 的含量最低，为缺氧层，氧含量值在 45-80 $\mu\text{mol/L}$ 之间，再往下由于底层高氧水的补充，DO 浓度又开始升高，在 4000 m 左右趋于稳定。

4.3 完成的研究

中国五矿履行“勘探合同”在 2017 年至 2023 年期间共执行了 6 个航次开展了合同区及其邻近海域的物理、化学环境基线调查（表 4.3-1），已初步了解合同区环境基本状况，构建合同区环境基线，提交环境基线研究报告和基础数据资料。

表 4.3-1 中国五矿合同区外业调查航次情况表

航次	编号	起始时间	调查区块	调查船
2017 年航次	DY47	2017.08.29—2017.11.30	A-1, A-2, A-5, A-6, A-7, A-8	向阳红 06
2018 年航次	DY50	2018.08.31—2018.10.19	A-1, A-2, A-6, A-7, A-8	向阳红 03
2019 年航次	DY54	2019.07.20—2019.12.29	A-3、A-4, A-5	向阳红 10

2021 年航次	DY70	2021.09.30—2022.01.18	A-5	大洋一号
2022 年航次	DY73	2022.08.11—2022.11.23	A-5	大洋号
2023 年航次	DY79	2023.08.09—2023.12.18	A-5	大洋一号

截至 2023 年底，在合同区 A-5 区块开展约 316 个站位及若干测线的物理化学环境调查作业项目，主要包括完成海底摄像测线 13 条（其中 AUV 光学测线 2 条），箱式取样 208 站、多管取样 25 站、重力柱 8 站、原位土工力学测试 27 站、200m CTD 调查 8 站、全水深 CTD 调查 13 站、锚系观测 4 站，已成功回收 3 站）、原位大体积过滤 2 站、水听器监测 3 站等。在此基础上开展了物理海洋结构（温盐、海流）、海水化学（DO、pH、营养盐）、沉积物化学（孔隙水和沉积物化学等）、沉积通量等环境基线数据分析，构建了地质、物理和化学数据集。

4.3.1 CTD 剖面观测及采样站位

中国五矿自 2017 年开始执行勘探任务航次，2017 年、2018 年、2019 年、2021 年、2022 年和 2023 年累计在 A-5 区块的采矿活动区完成全水柱 CTD 调查（含采水）13 次，200 m 以浅 CTD 调查 8 次。CTD 调查站位信息参见表 4.3-2。

表 4.3-2 CTD 观测站位统计

序号	站名	年份	经度 (°W)	纬度 (°N)	采样 深度 (m)	区域 位置
1	DY47I-A5-CTD02	2017	155°54'54"	9°46'48.40"	5302	-
2	DY50I-A5-S06-CTD10	2018	156°24'3.60"	9°29'56.40"	5189	-
3	DY50I-A5-S06-CTD11	2018	156°25'1.20"	9°30'0.00"	200	-
4	DY54IV-A5-CTD01-Q	2019	156°46'12.00"	9°23'56.40"	5185	PRZ1
5	DY54IV-A5-CTD01(200m)	2019	156°46'12.00"	9°23'56.40"	200	PRZ1
6	DY54IV-A5-CTD02-Q	2019	155°33'28.80"	9°27'21.60"	5183	-
7	DY54IV-A5-CTD02(200m)	2019	155°33'28.80"	9°27'3.60"	200	-
8	DY70I-A5-CTD01-Q	2021	156°37'25.80"	9°19'24.73"	5239	IRZ
9	DY70I-A5-CTD02-200m	2021	156°46'11.53"	9°23'47.86"	200	PRZ1
10	DY70I-A5-CTD02-Q	2021	156°46'6.77"	9°24'41.72"	5272	-
11	DY70I-A5-CTD03-Q	2021	156°37'27.74"	9°19'32.98"	5240	IRZ
12	DY73I-A5-CTD01-Q	2022	156°46'10.65"	9°23'48.34"	5245	PRZ1

13	DY73I-A5-CTD02-Q	2022	156°3725.10"	9°1923.75"	5246	IRZ
14	DY79I-A5-CTD01-Q	2023	156°4610.31"	9°2350.02"	5244	PRZ1
15	DY79I-A5-CTD02-200	2023	156°4610.27"	9°2350.00"	200	PRZ1
16	DY79I-A5-CTD03-200	2023	156°4141.17"	9°219.46"	200	IRZ
17	DY79I-A5-CTD04-200	2023	156°3724.02"	9°1923.01"	200	IRZ
18	DY79I-A5-CTD05-Q	2023	156°3714.57"	9°1958.83"	5253	IRZ
19	DY79I-A5-CTD06-Q	2023	156°4140.91"	9°2112.24"	5278	IRZ
20	DY79I-A5-CTD07-Q	2023	155°3115.48"	9°3146.01"	5289	-
21	DY79I-A5-CTD08-200	2023	155°3051.57"	9°3133.85"	200	-

4.3.2 锚系定点观测站位

自中国五矿 2019 年航次以来，2021 年、2022 年和 2023 年航次分别成功回收 1 套锚系，此外 2023 年航次还布放 1 套锚系，待回收。回收的 3 套锚系信息如表 4.3-3，锚系结构图见图 4.3-1 至图 4.3-3。

表 4.3-3 2019 年航次 A-5 区块锚系站位信息表

站位	年份	经度 (°W)	纬度 (°N)	水深 (m)	区域 位置
DY70II-A5-MX01	2021	156°4451.06"	9°2551.18"	5272	-
DY73I-A5-MX02	2022	156°3732.11"	9°1922.15"	5242	IRZ
DY79I-A5-MX01	2023	156°3823.22"	9°1750.11"	5246	-

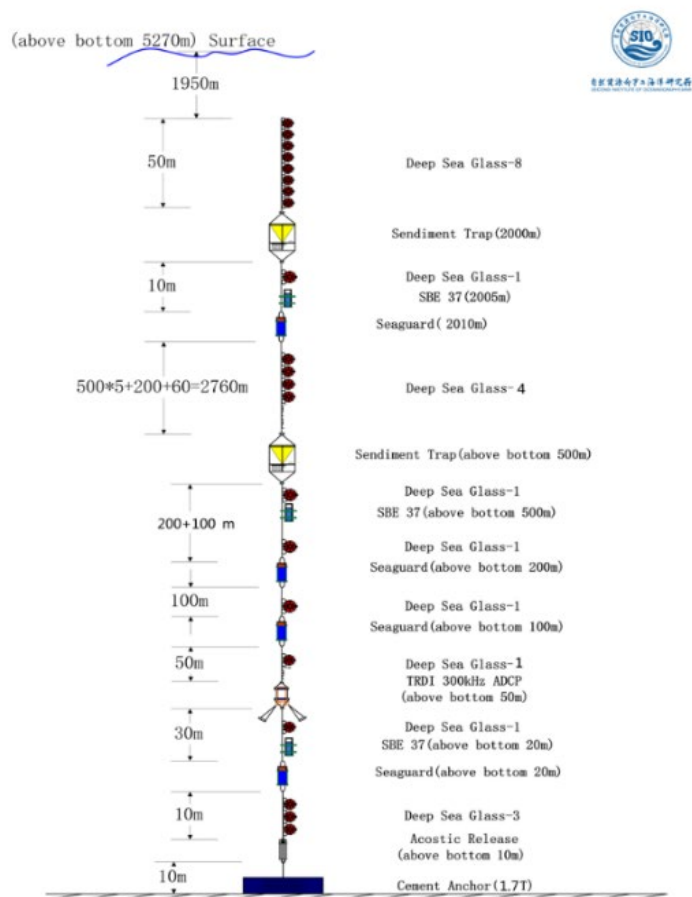


图 4.3-1 2021 年航次回收锚系 DY70II-A5-MX01 结构图

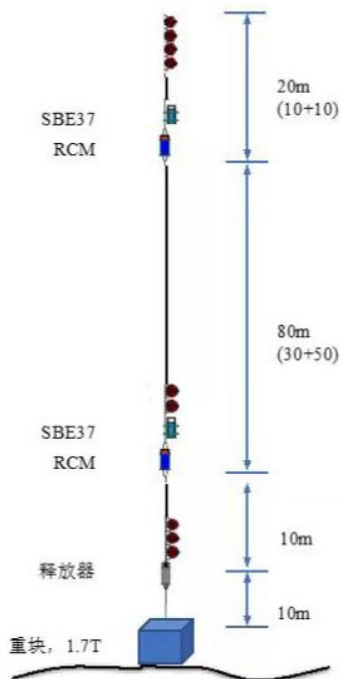


图 4.3-2 2022 年回收锚系 DY73I-A5-MX02 结构图

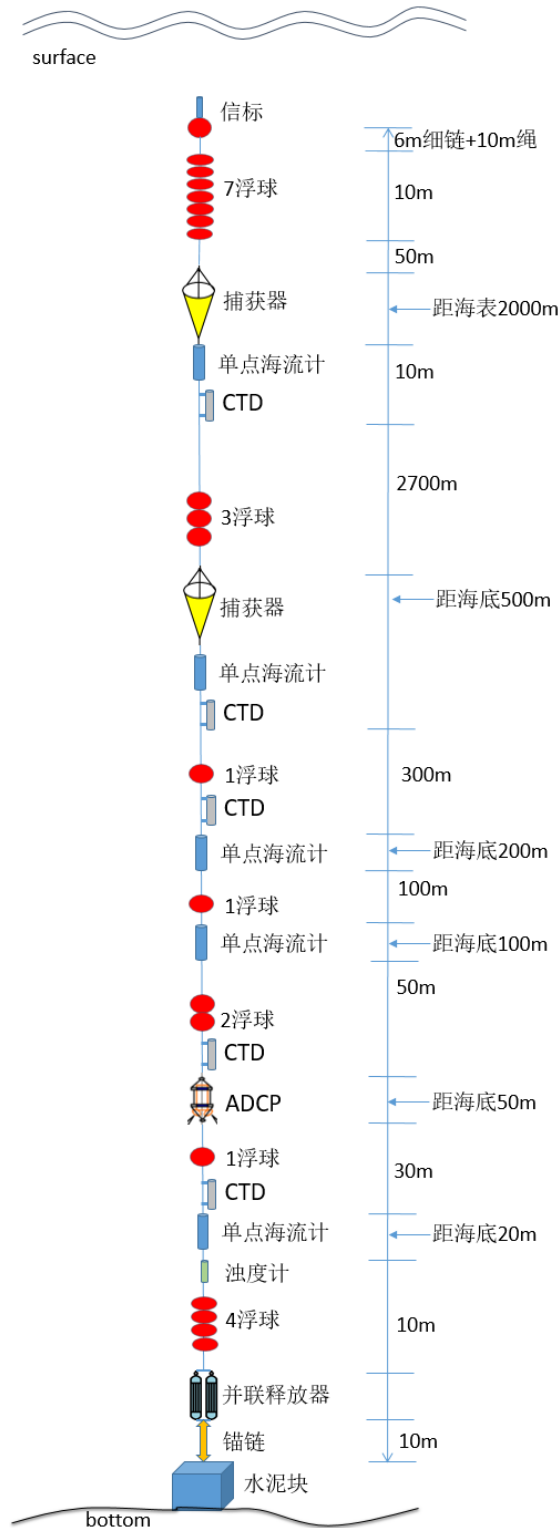


图 4.3-3 2023 年航次回收的锚系 DY79I-A5-MX01 结构图

4.3.3 结核资源调查站位

利用箱式对 A-5 区块重点工作区进行了多金属结核丰度和覆盖率调查，重点工作区内箱式取样 109 站，其内部的采矿活动区内箱式取样 50 站。具体站位

分布见图 4.3-4。

4.3.4 沉积物调查站位

利用箱式、重力柱和多管对 A-5 区块进行了沉积物取样。其中利用箱式获取了 109 站的表层沉积物，另外重力柱取样 4 站、多管取样 9 站，获取了不同深度的柱状沉积物。具体站位分布见图 4.3-4。

4.3.5 原位土工调查站位

利用土工原位测试仪对 A-5 区块 1 m 深度范围的沉积物的物理性质进行了测量，具体站位分布见图 4.3-4。

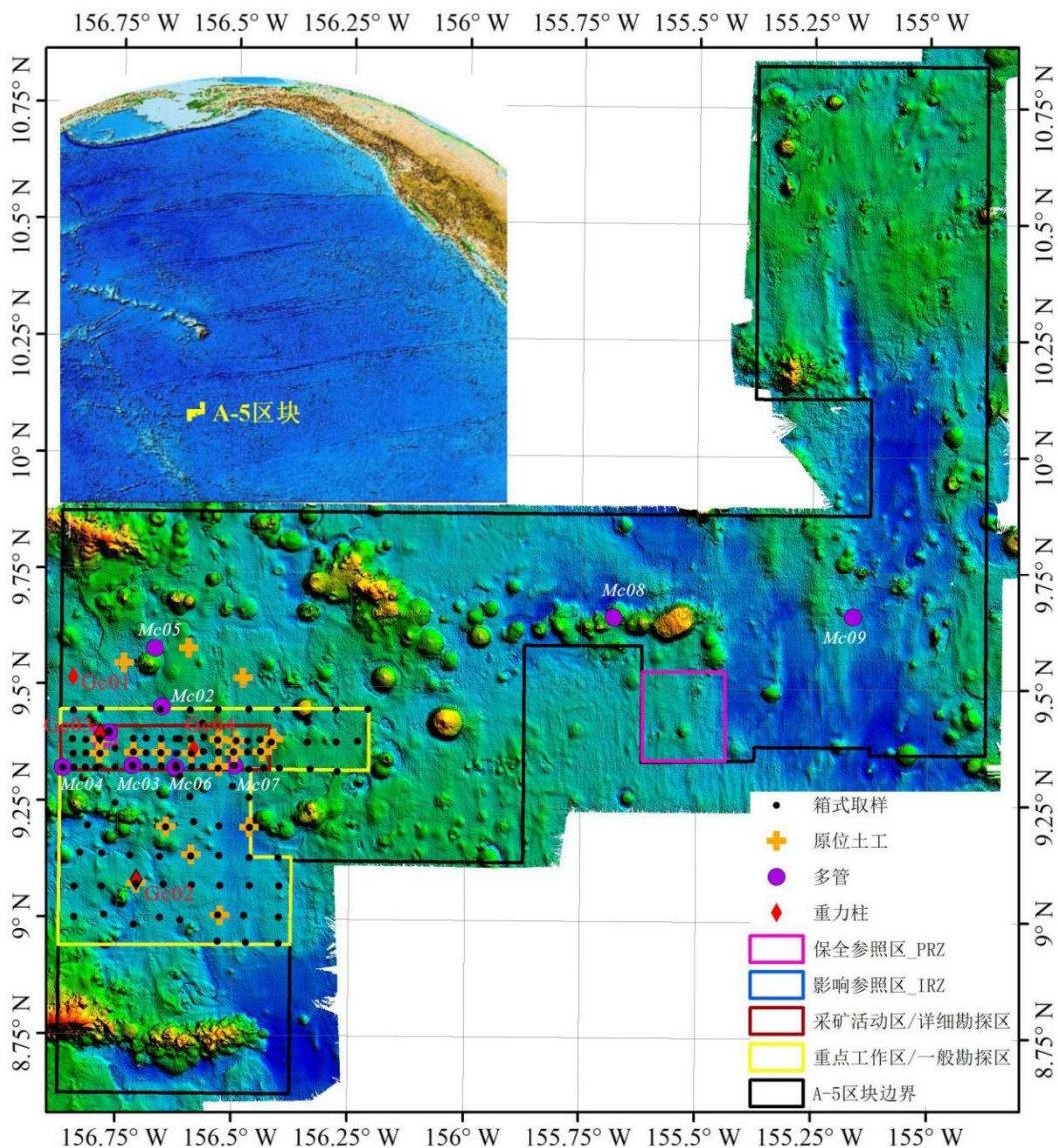


图 4.3-4 A-5 区块箱式、重力柱和多管取样站位及原位土工站位分布图

4.4 气象学和空气质量

4.4.1 气象学

基于 ECWMF ERA5 网格数据 (<https://cds.climate.copernicus>) 对 2013-2023 年期间 A-5 区块月平均风速进行了分析。分析选取了 3 个水平层 ($p=1000$ hPa、 $p=950$ hPa 和 $p=900$ hPa)，分别对应的海拔高度约为 100 m、500 m 和 1000 m (压力等级与海拔等级的换算公式可参考:<https://www.mide.com/air-pressure-at-altitude-calculator>, 假设海面温度为 30 °C)。

结果表明, 该区域每年 8-10 月的月均风速最低, 低于 4 m/s; 相比而言, 春季 3-4 月的月均风速最高, 超过 10 m/s (图 4.4-1)。另外, 该区域的风场还具有显著的日模式, 午后 (12pm-03pm) 和午夜 (00am-02am) 的海面风速小于 7 m/s, 但具有不确定性较大的时间窗口 (STD = 0.27); 而海面高度上, 在每天的清晨与傍晚会很稳定的出现最高风速。在 3 个高度中, $p=950$ hPa 的风力最为强劲 (图 4.4-1)。

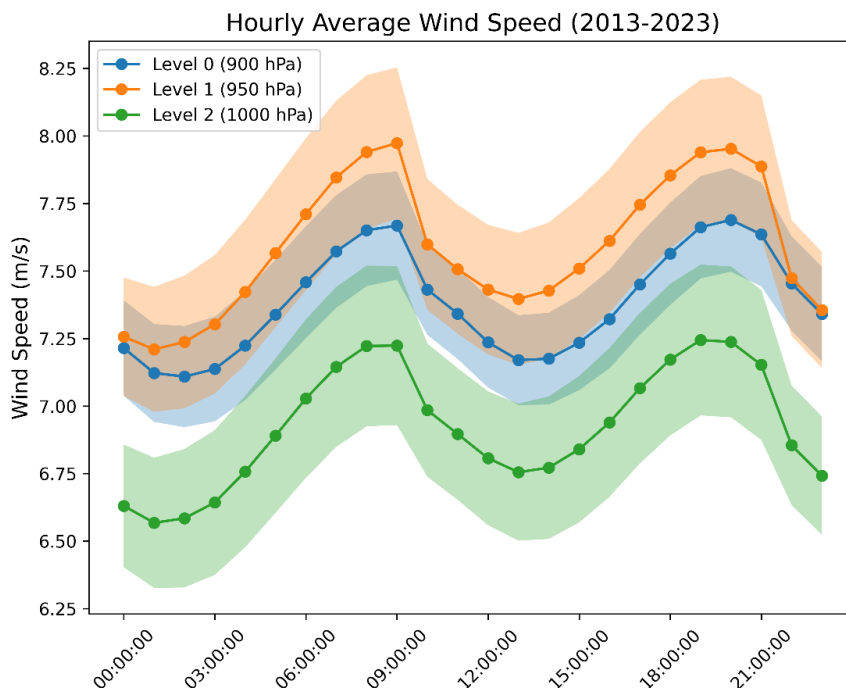


图 4.4-1 A-5 区块平均风速的日变化

($p=1000$ hPa, $p=950$ hPa 和 $p=900$ hPa 分别对应的海拔高度约为 100 m, 500 m 和 1000 m)

基于 ECWMF ERA5 网格数据 (<https://cds.climate.copernicus>) 对 2013-2023

年期间 A-5 区块月平均风场（ $p=900\text{ hpa}$ ）进行了分析。结果表明，该区域的总体风场在空间上相对稳定，但存在显著的季节变化。各月份的平均风向如表 4.4-1，图 4.4-2 和图 4.4-3 所示。由图可见，在每年的 7 月-10 月，A-5 区块的风力较小，适合开展采矿车试验。

表 4.4-1 A-5 区块各月份的平均风向

月份	平均风向
1 月	东南
2 月	西北
3 月	南
4 月	东
5 月	西南
6 月	西
7 月	西南
8 月	东北
9 月	北
10 月	东
11 月	西
12 月	东南

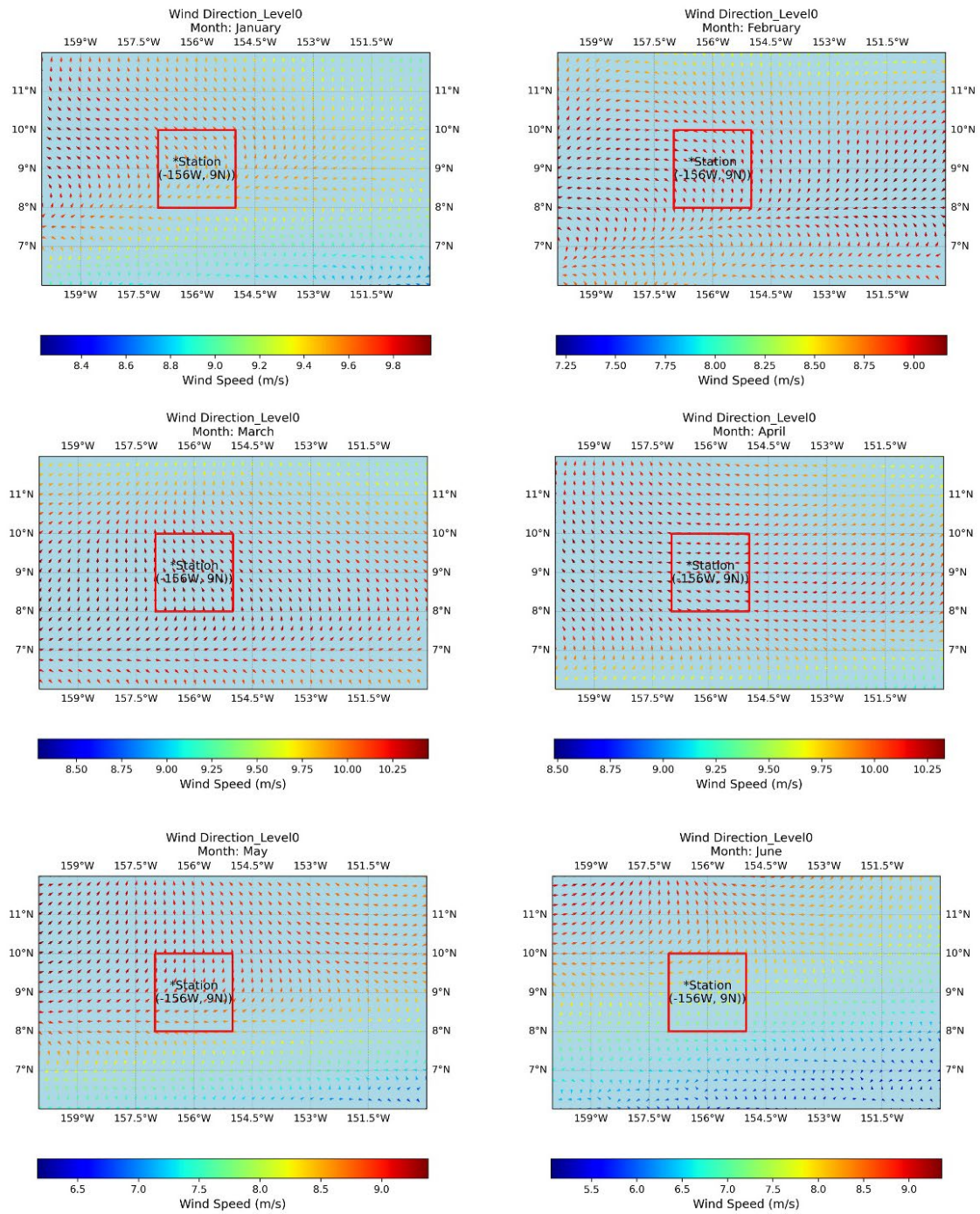


图 4.4-2 A-5 区块各月份的矢量风场 (2012-2023)

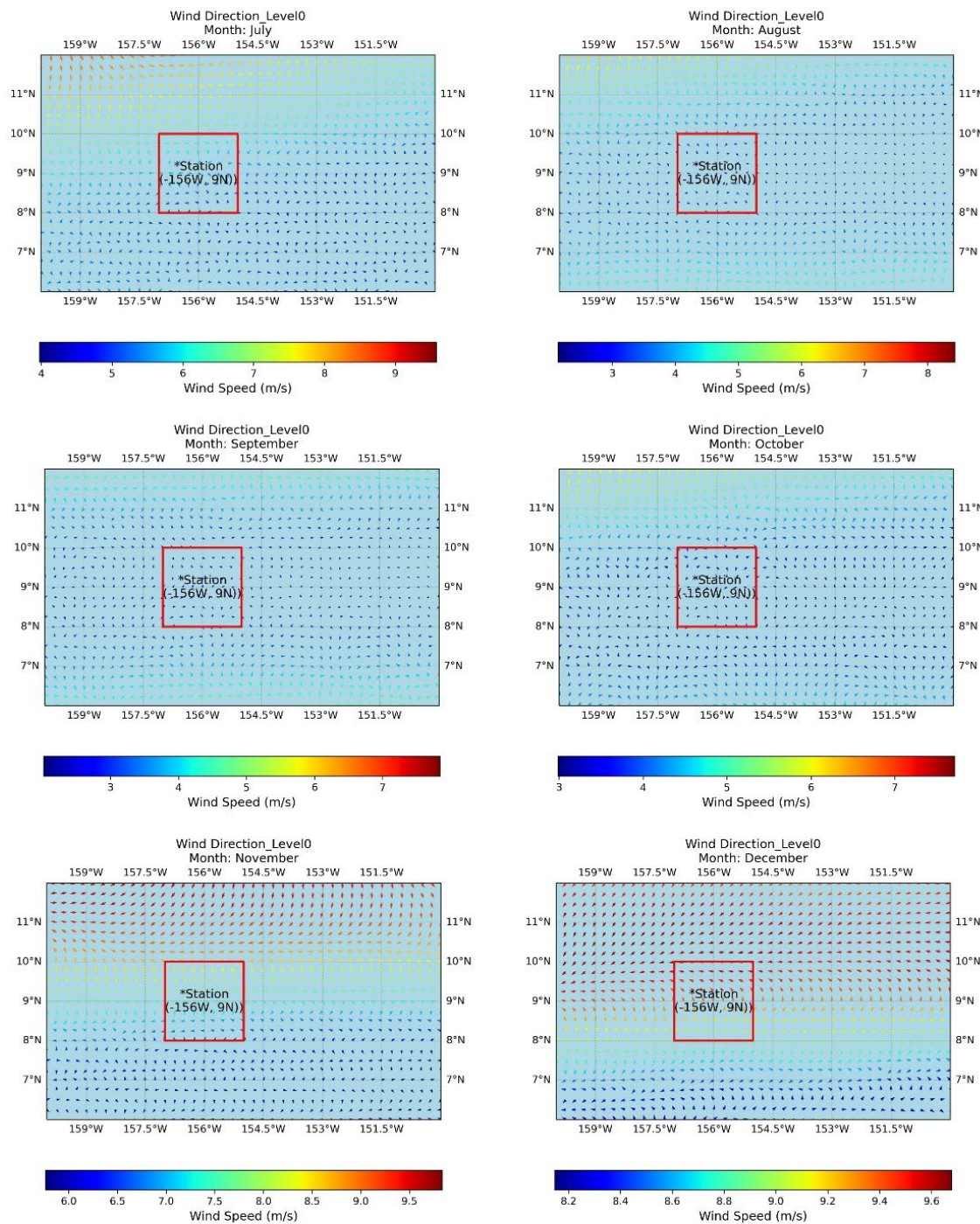


图 4.4-3 A-5 区块各月份的矢量风场（2012-2023）（续前）

4.4.2 空气质量

基于 EDGAR 网格数据 (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ap61#p2) 对 2015-2018 年期间 A-5 区块的氮氧化物和二氧化硫年度数据进行了分析。结果显

示，穿越太平洋的商业船只（特别是那些使用高硫燃料的船只）向大气排放氮氧化物和二氧化硫。这些排放物造成了空气污染，并会影响海洋上的空气质量（图 4.4-4 和图 4.4-5）。总体而言，A-5 区块所在的位置远离大陆，也距离北太平洋的海上航运繁忙区很远。因此，尽管航运是 A-5 区块氮氧化物和二氧化硫污染物的主要来源，但这两类污染物在该区域的排放率很低，氮氧化物约为 $2\text{e}^{-13} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ ，而二氧化硫的排放率更低，约为 $5\text{e}^{-14} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

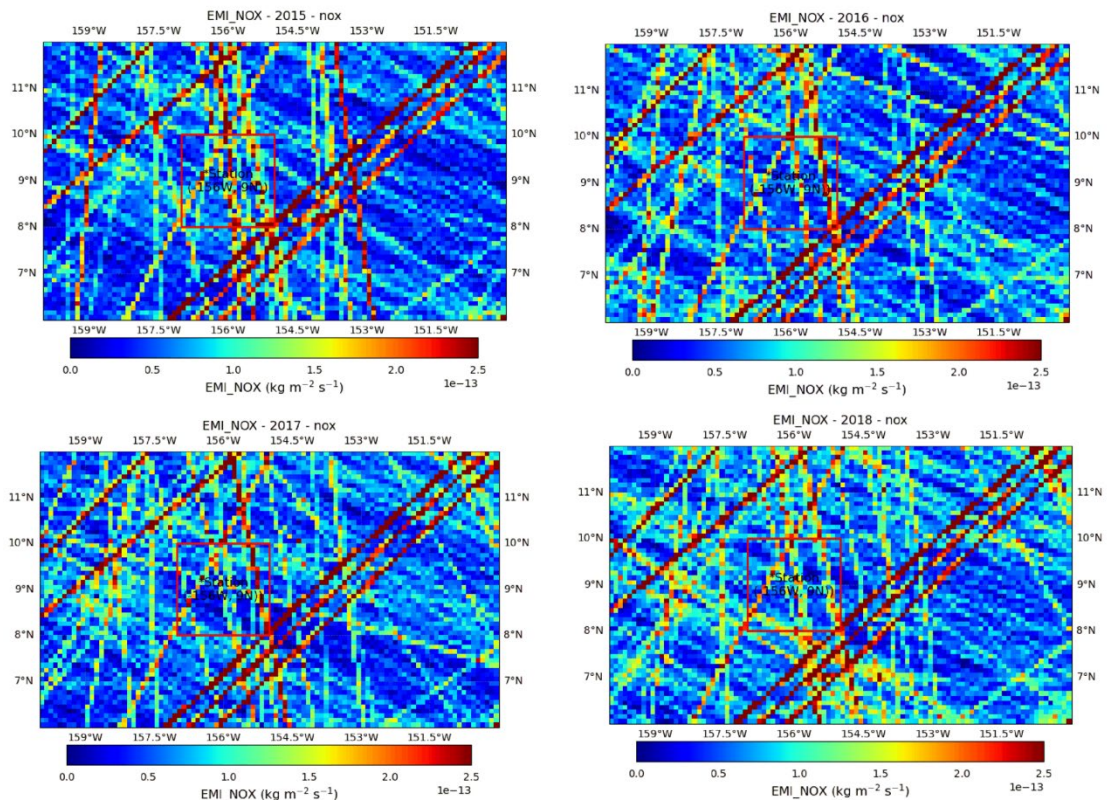


图 4.4-4 A-5 区块大气氮氧化物的排放情况（2015-2018）

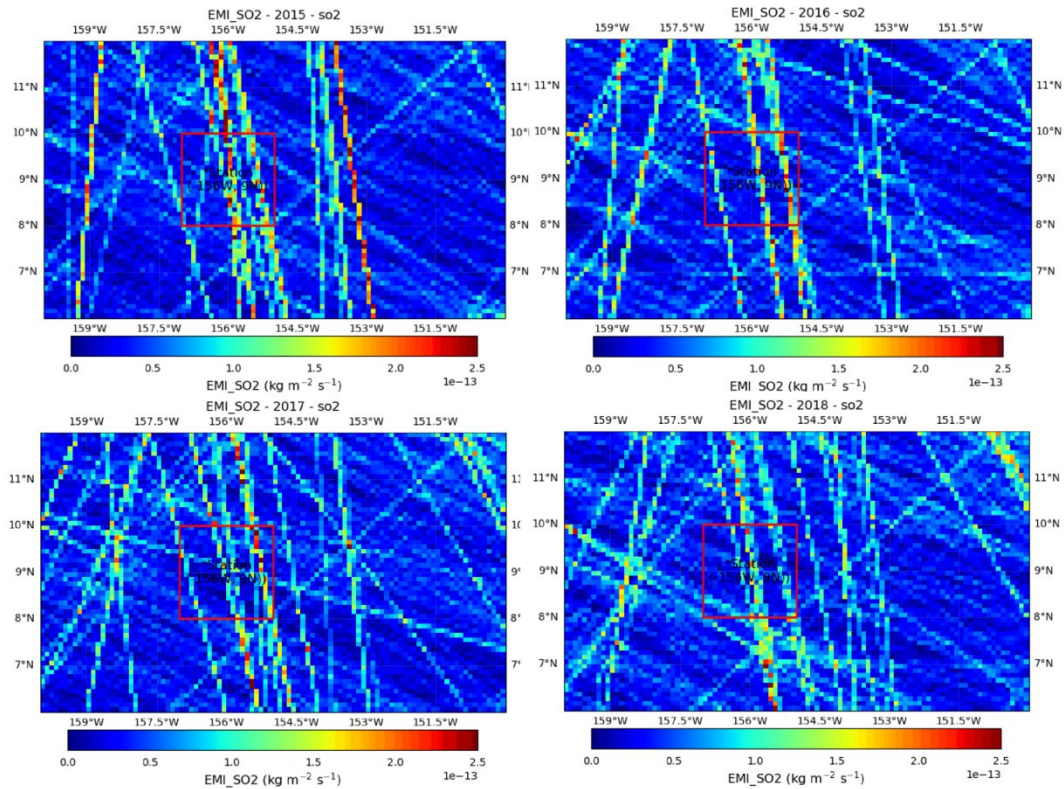


图 4.4-5 A-5 区块大气二氧化硫的排放情况（2015-2018）

4.5 地质特征

4.5.1 地形特征

A-5 区块内主要发育海丘、海丘群、山间盆地和海山等地形地貌（图 4.5-1）。区块中部和南部各发育一条近东西走向的海丘链。区块的西部发育分布较为凌乱的海丘群，海丘群的两侧发育地形较为平坦的山间盆地。在区块的西北侧主要为丘陵地形，海丘零星分布，地形较为平坦。

以地形起伏度（Bathymetric Position Index, 简称 BPI）值和坡度值两个参数为基础，利用迭代自组织聚类分析法（ISODATA），对 A-5 区块地形进行了分类（图 4.5-2）。起伏度 BPI 是刻画的地形凹凸情况的重要参数，数值为 0 时表示绝对平坦的区域，正、负值分别表示地形向上凸和向下凹，且数值越大表示地形的凹凸程度约大。坡度值高低是刻画地形陡峻程度的重要参数，结合 BPI 值将可以有效区分平坦地形、斜坡地形、凹陷海洼地形和陡峻海山地形等。ISODATA 分类结果显示：A-5 区块绝大部分区域为平坦的海盆区（占比 70.8 %），其次是山麓斜坡区域（占比 14.0 %），陡峻隆起的海山面积占比 9.8 %，而凹陷

的海洼（主要由海山重力压载形成）面积占比约 5.3 %。与整个 A-5 区块相比，重点工作区平坦海盆区的面积占比更大（79.9 %），陡峻隆起海山（6.6 %）和凹陷海洼（2.8 %）面积占比更低。

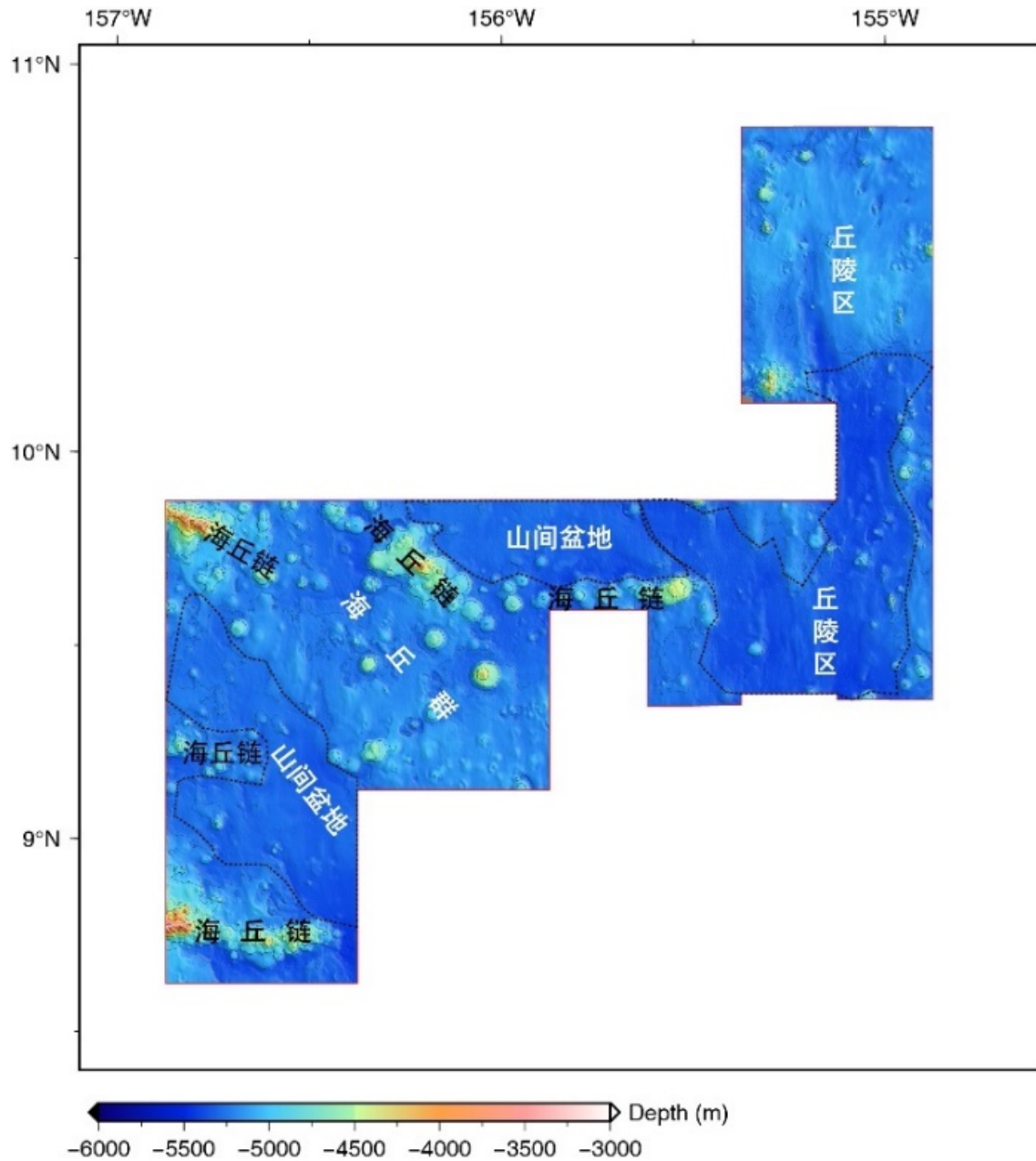


图 4.5-1 A-5 区块地形地貌特征

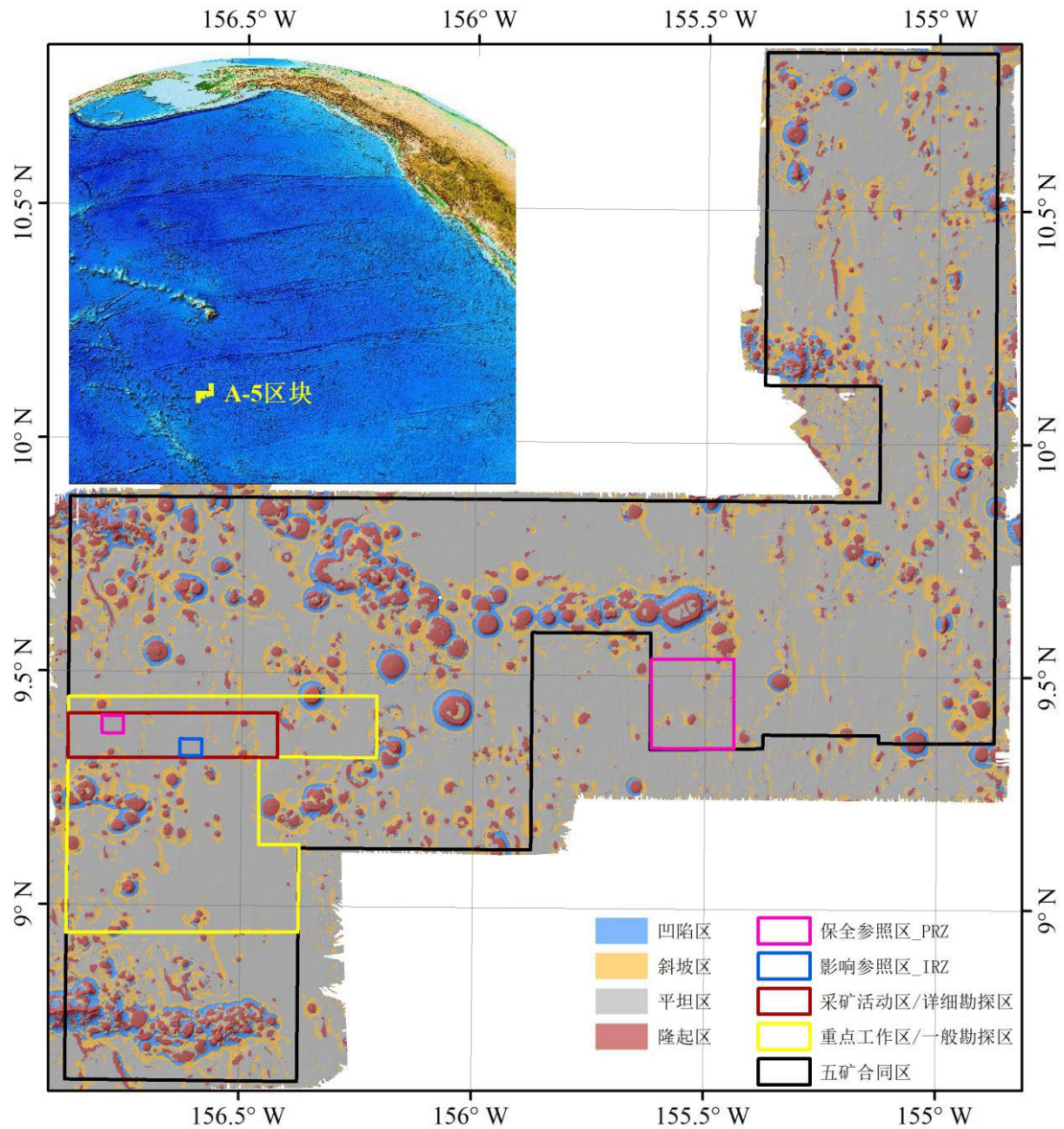


图 4.5-2 A-5 区块地形分类

中国五矿在 A-5 区块采矿活动区内开展了 AUV 近底声学调查，获取了分辨率为 2 m 的高精度海底地形（图 4.5-3）。

AUV 调查区的水深介于 5290-5130 m，起伏度整体较小。调查区东西两侧为海底高地，中部为南北向展布的小型洼地。西部高地的西南部上存在一锥形海丘，净高度约 100 m，是全区的最高点；东部高地发育两座海丘，其顶部相对较为平缓，净高度均低于 100 m。海底高地与海盆接触带地形平缓，无明显陡坎地貌，但局部存在小型深坑（图 4.5-3）。

IRZ（蓝色方框）和 PRZ1（A-5 区块西部粉色方框）位于 AUV 调查区内。

两者分别位于 AUV 调查区东部和西部高地之上，地形整体都较为平缓，无小型突起或深坑地貌，水深变化小于 20 m。整体而言，IRZ 和 PRZ1 的地形具有较强的相似性。

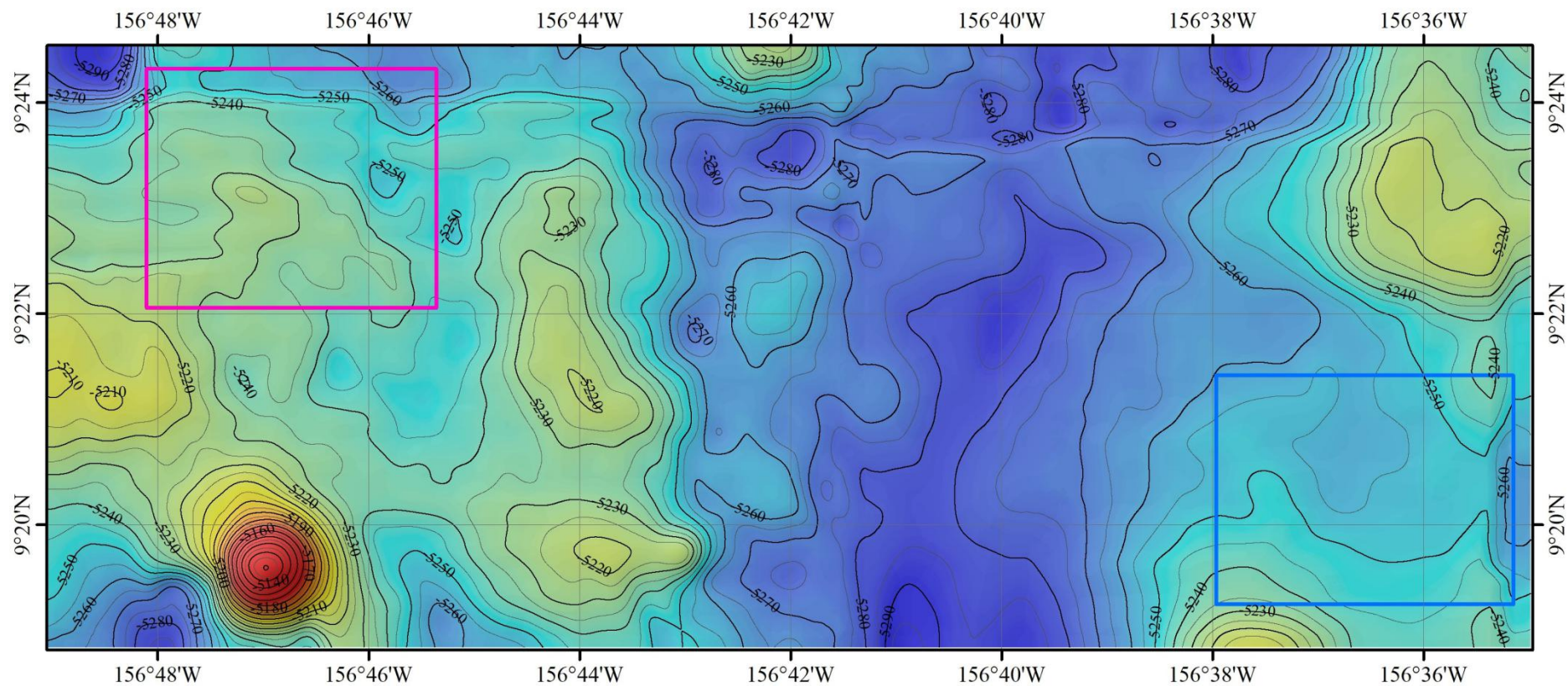


图 4.5-3 A-5 区块采矿活动区 AUV 测深地形图

4.5.2 结核特征

A-5 区块采矿活动区 50 个箱式测站的结核丰度变化范围为 $0.5\text{--}25.92\text{ kg/m}^2$ ，平均值为 $14.04\pm 4.69\text{ kg/m}^2$ 。结核丰度具有负偏态分布特征，峰值介于 $15\text{--}16\text{ kg/m}^2$ 区间，与平均值较为接近（图 4.5-4）。50 个箱式测站甲板覆盖率变化范围为 $2\text{--}85\%$ ，平均值为 $43.34\pm 15.0924\%$ 。甲板覆盖率具有负偏态分布特征，峰值介于 $40\text{--}45\%$ 区间，与平均值接近（图 4.5-5）。此外，甲板覆盖率与丰度具有良好的正相关性（图 4.5-6），相关系数 R^2 高达 0.82 ，这反映该区域结核的粒径分布总体较为均匀。

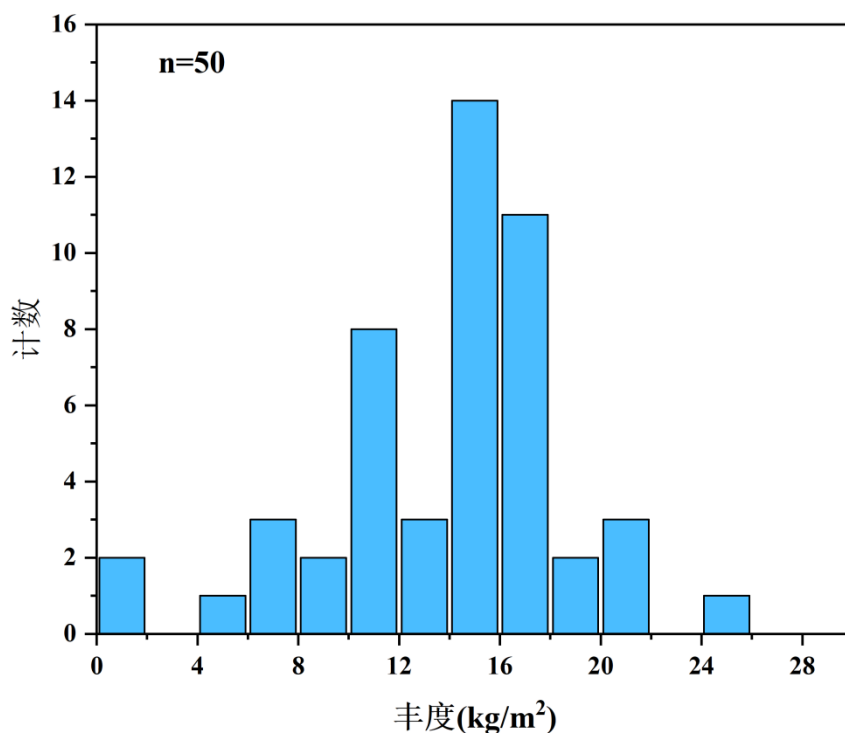


图 4.5-4 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核丰度频率分布图

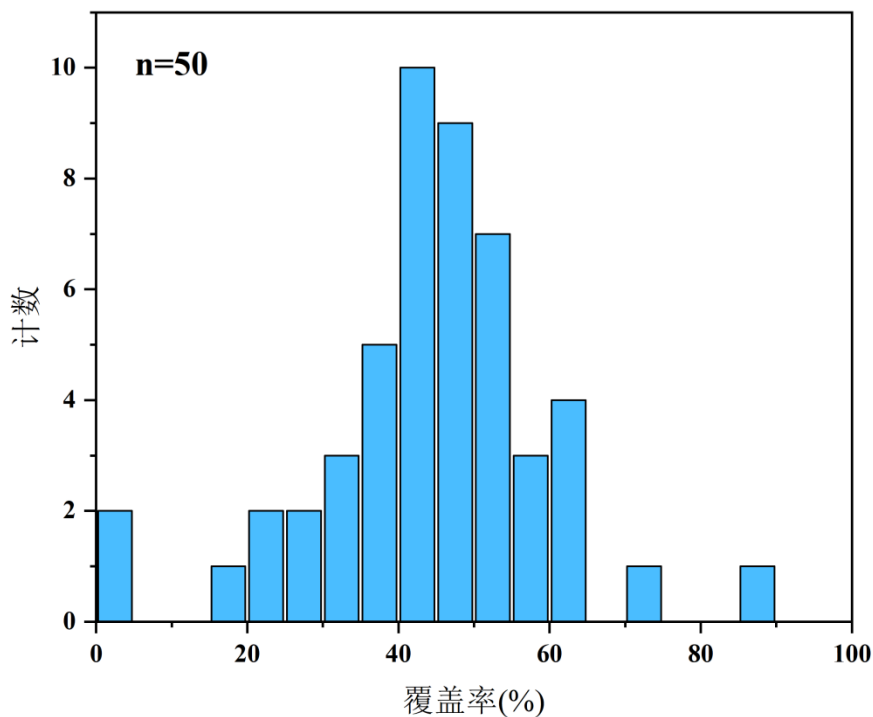


图 4.5-5 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核甲板覆盖率频率分布图

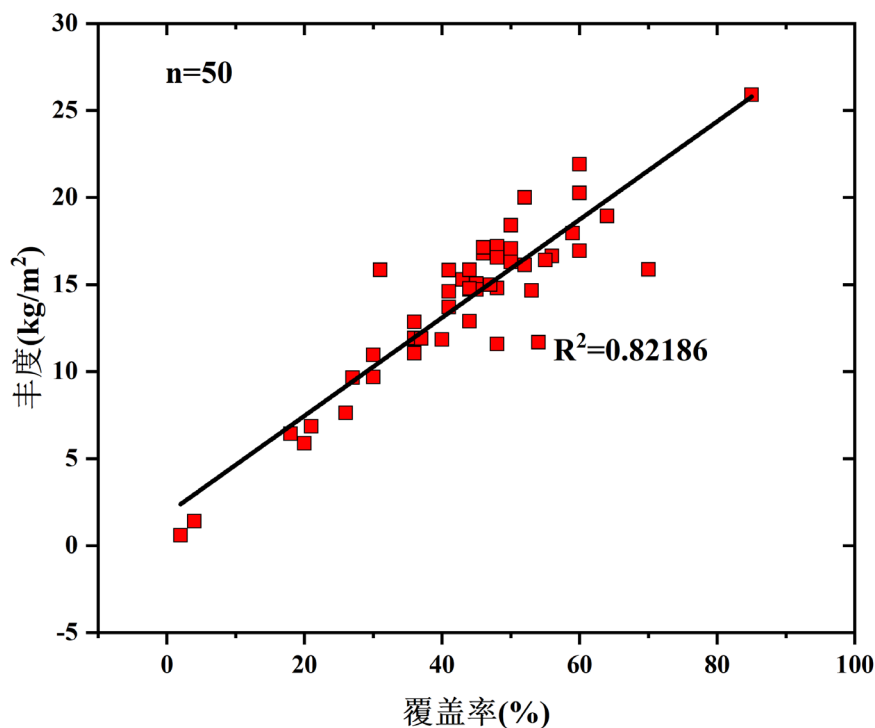


图 4.5-6 A-5 区块采矿活动区箱式测站结核丰度-甲板覆盖率关系图

基于反距离加权插值法，对 A-5 区块采矿活动区结核丰度和镍当量品位（NEG）进行了空间插值，获取了两者的空间分布特征（图 4.5-7 和图 4.5-8）。

结果显示采矿活动区高丰度 ($>15 \text{ kg/m}^2$) 的区域主要分布在西部, 中部和东部大部分区域丰度介于 $10\text{-}15 \text{ kg/m}^2$ 之间, 而 IRZ 和 PRZ1 的结核丰度也主要介于这个区间; 结核镍当量品位 (NEG) 具有东部和西部高, 而中部低的特征, 且低值区主要位于 IRZ 和 PRZ1 附近。总体而言, IRZ 和 PRZ1 的结核丰度和镍当量品位 (NEG) 具有较强的相似性。

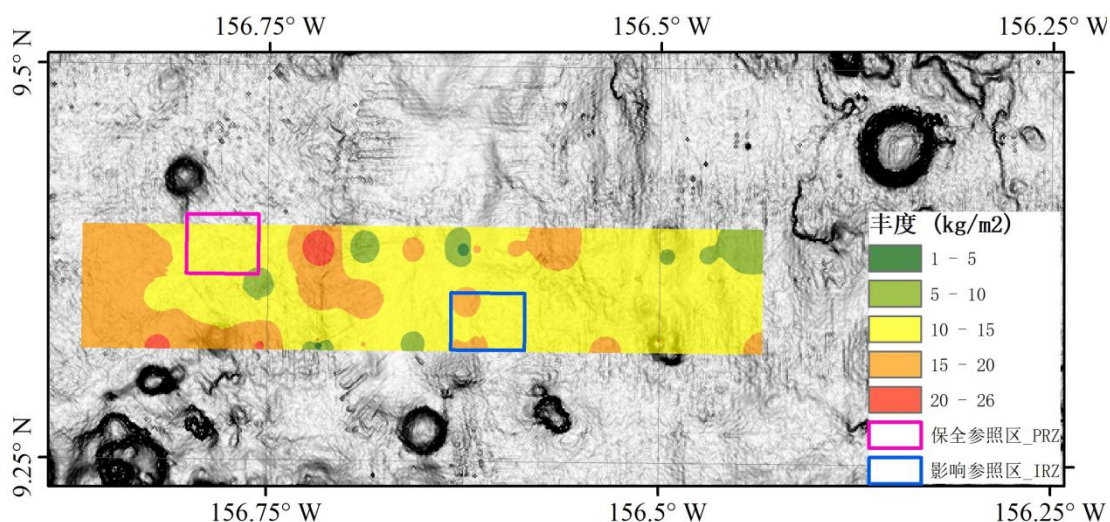


图 4.5-7 A-5 区块采矿活动区结核丰度等值线图

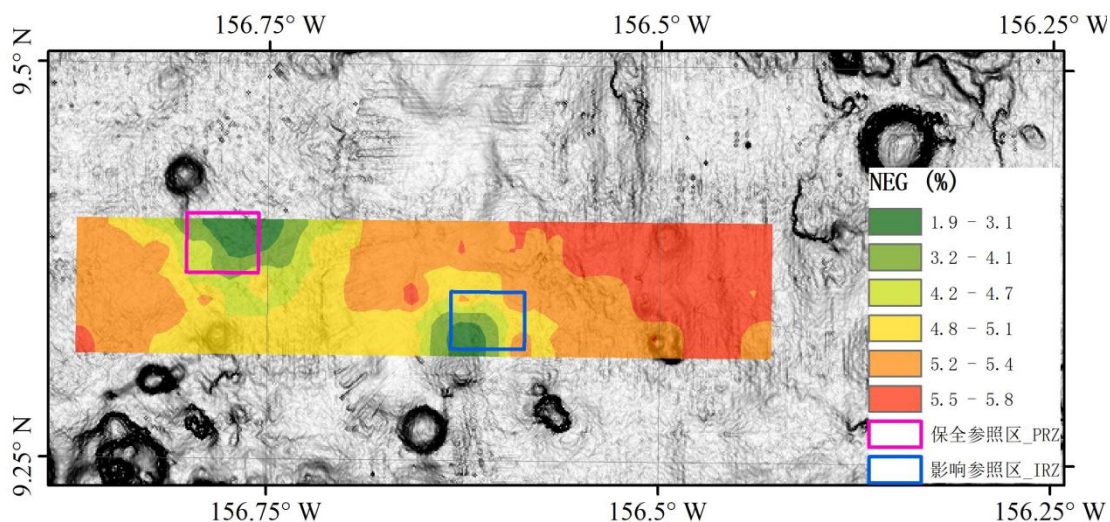


图 4.5-8 A-5 区块采矿活动区结核 NEG 等值线图

$$\text{NEG} = 0.13 \times \text{Mn}\% + 0.42 \times \text{Cu}\% + 2.64 \times \text{Co}\% + \text{Ni}\%$$

此外, A-5 区块采矿活动区结核具有较高的覆盖率。AUV 近底光学观测结果显示, 结核覆盖率主要介于 $40\text{-}70\%$ 之间, 与箱式取样的结果较为一致 (图 4.5-9), 说明采矿活动区的结核以暴露型为主。AUV 光学测线存在 400 m 、 200 m 和 50 m 三种间距, 单条测线长度通常不超过 8 km , 且在该距离范围内结核覆

盖率发生了较大的变化，垂直于测线方向结核的连续性通常也不超过 2 km。这说明采矿活动区结核在小尺度上分布不均匀，不同覆盖率结核呈片状分布。

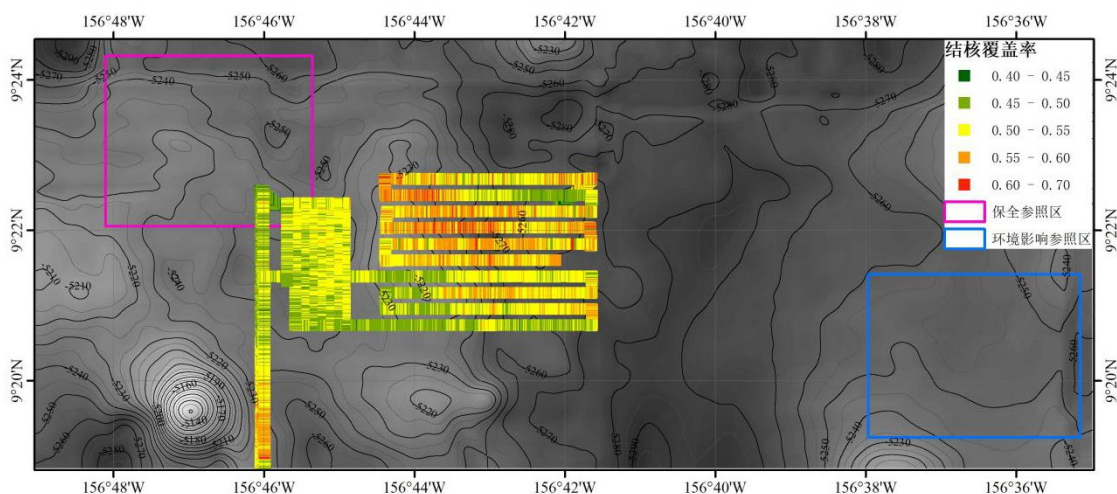


图 4.5-9 A-5 区块采矿活动区 AUV 光学调查结核覆盖率分布特征

4.5.3 沉积特征

4.5.3.1 沉积特征

本节对 A-5 区块重点工作区内 109 站箱式取样获取的表层沉积物样品以及 2 站柱状沉积物样品（DY70I-A5-GC02 和 DY70I-A5-GC03）进行粒度、重金属含量以及有机质分析（站位见图 4.3-4）。

（1）沉积物粒度特征

按照 Folk 分类标准，以粒径 $D=3.9\mu\text{m}$ 和 $63\mu\text{m}$ 作为粘土、粉砂、砂的边界值，对 A-5 区块表层沉积物进行了粒级分类。全区沉积物粉砂粒级含量最高，平均含量约 53 %；其次是粘土粒级含量，平均含量约 35 %，砂的粒级含量相对较低，平均含量约为 15 %。由频率分布曲线可知，A-5 区块内粒度分布有单峰和双峰两种不同的峰态，绝大部分样品存在 $\sim 3\mu\text{m}$ 和 $\sim 60\mu\text{m}$ 两个峰，少量样品存在粒径介于 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 的单峰（图 4.5-10）。由于 A-5 区块远离大陆，砂级和粉砂级颗粒绝大部分为生物来源，以放射虫为主，其次是硅藻。此外，一些鱼牙化石和铁锰氧化物颗粒等对粗组分的含量变化也有一定的贡献。

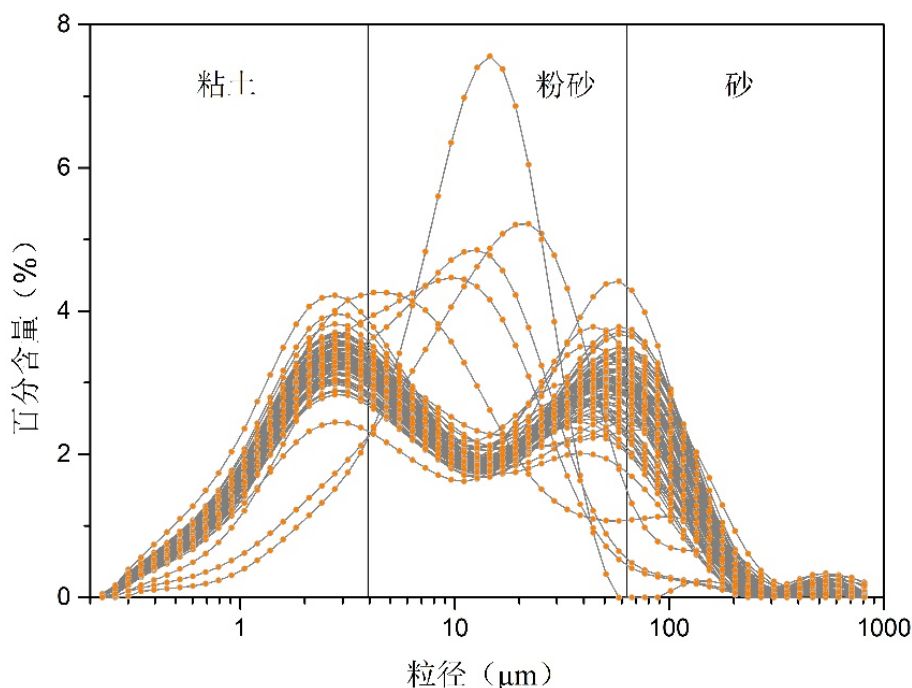


图 4.5-10 A-5 区块重点工作区沉积物粒级百分含量

表层沉积物平均粒径 (Mz_{Φ} , $\Phi = -\log_2 D$) 和中值粒径 ($Md_{\mu m}$) 空间分布特征显示 (图 4.5-11), 重点工作区中部海丘链附近的沉积物颗粒最细, 粘土粒级组分占比较高, 分选性较差 ($\delta > 2$); 而海丘链两侧海盆区颗粒更粗, 粉砂粒级组分占比更高, 分选性更差 ($\delta = 2.2-2.5$), 这反映海丘链附近沉积物中的生物碎屑含量比其两侧的海盆低。

中部海丘链北部海盆和南部海盆的历史沉积环境存在较大差异。位于南部海盆 DY70I-A5-GC02 柱状沉积物中以粉砂和砂级组分为主, 粘土组份较少; 位于北部海盆 DY70I-A5-GC03 柱状沉积物中则以粉砂和粘土组分为主, 砂级组份较少 (图 4.5-12)。垂向变化上, DY70I-A5-GC02 柱状沉积物各组分含量随深度变化较大, 没有明显规律; DY70I-A5-GC03 柱状沉积物粉砂和粘土组分含量随深度增加而逐渐升高, 而砂级组份含量则逐渐降低。

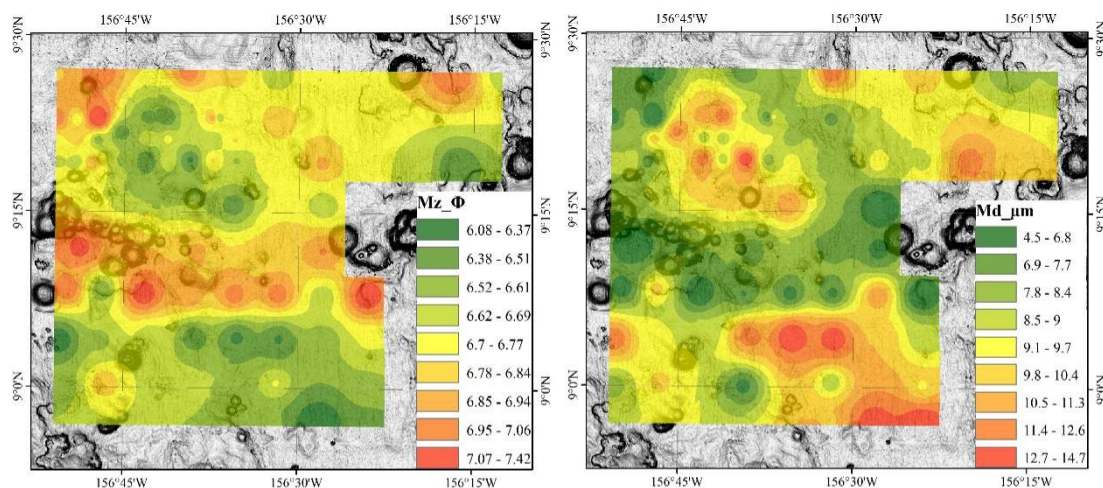


图 4.5-11 A-5 区块重点工作区沉积物不同粒级参数空间分布图

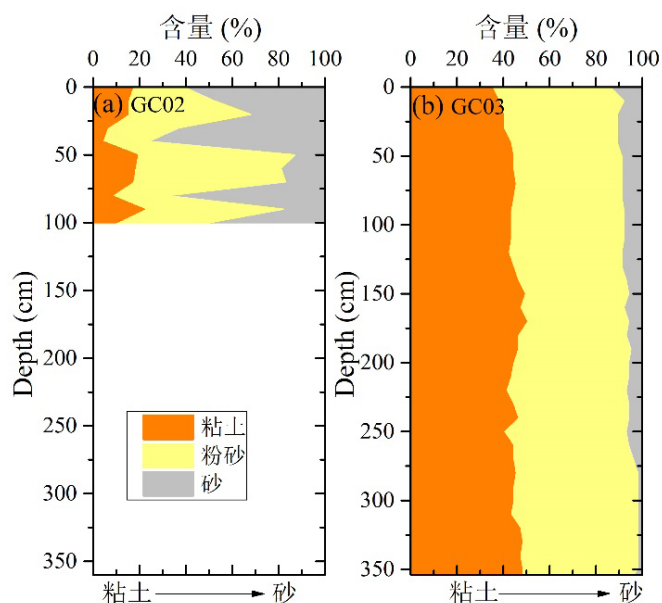


图 4.5-12 A-5 区块柱状沉积物粒级组分垂向变化图

(2) 沉积物重金属含量

重点工作区表层沉积物的 Cd、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 等重金属含量分布较为不均匀（图 4.5-13），变异系数（标准差/平均值）分别为 0.2、0.18、0.23、0.13、0.13 和 0.06。空间分布上，Cd 含量高值主要分布在重点工作区北部中央海盆和南部海盆东南部；Ni、Cu、Zn 和 Pb 具有较强的相似性，即工作区的东北角和西南角重金属含量较高，而其余区域的重金属含量整体较低。不过，Cr 与 Ni、Cu、Zn 和 Pb 的分布特征正好相反，除了东北和西南角 Cr 含量较低外，工作区绝大部分区域的 Cr 含量均较高。与 NORI-D 区域的沉积物重金属空间分布对比，Ni、Cu 和 Zn 分布情况也具有较强的相似性，但 Cr 和 Pb 分布与其他重

金属分布没有明显规律 (NORI 2022)。

重点工作区北部和南部海盆柱状沉积物的重金属含量存在较大差异。南部海盆 DY70I-A5-GC02 柱状沉积物的 Ni、Cd、Cu、Zn 和 Pb 等重金属含量整体都高于北部海盆 DY70I-A5-GC03 柱状沉积物，但前者的 Cr 含量低于后者（图 4.5-14）。从重金属元素含量随深度变化来看，DY70I-A5-GC03 柱状沉积物中的重金属元素含量变化整体较小，而 DY70I-A5-GC02 柱状沉积物中的重金属元素含量具有随深度增加逐渐降低的趋势（除了表层和 100cm 层外）。NORI-D 区域中探究了 0-1 cm、1-5 cm 和 5-10 cm 三层沉积物重金属含量的垂直变化，其结果表明 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 含量最大值均出现在 0-1 cm。相较而言，A-5 区块沉积物取样深度更深，变化更复杂 (NORI 2022)。

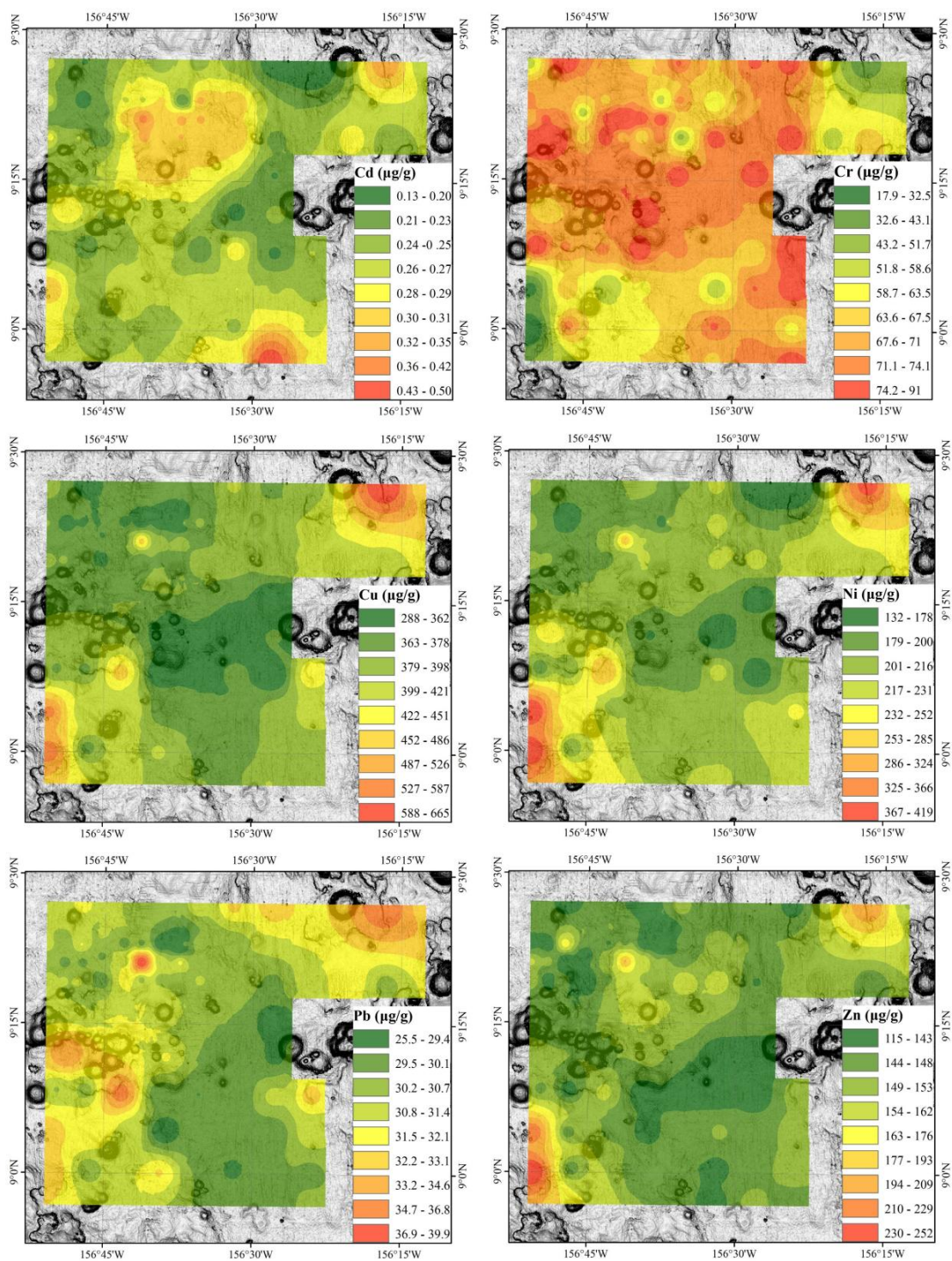


图 4.5-13 A-5 区块重点工作区沉积物重金属含量分布图

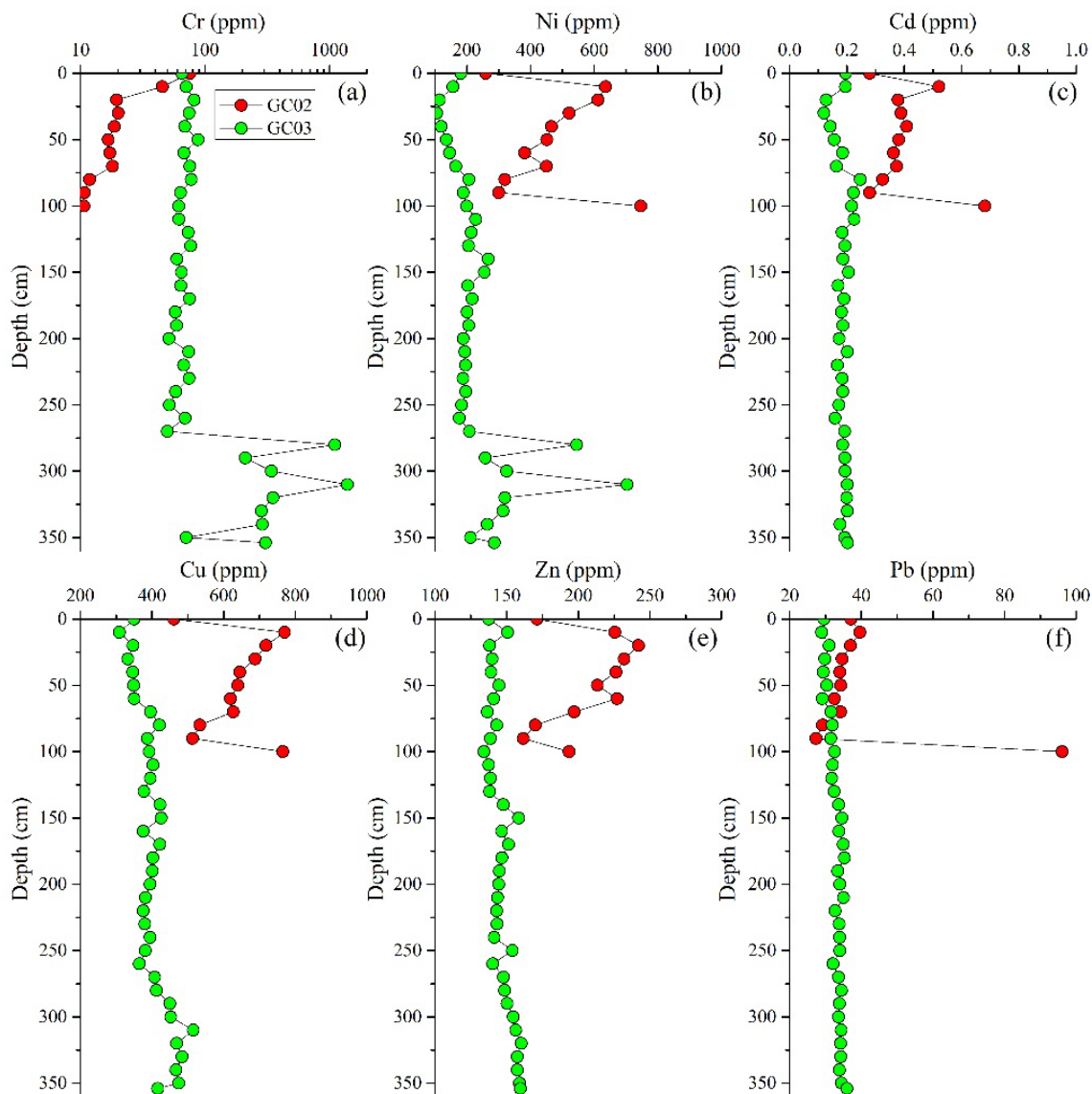


图 4.5-14 A-5 区块重点工作区柱状沉积物重金属元素垂向变化图

(3) 沉积物总有机碳和总氮含量

一般勘探区内总有机碳含量分布较为不均匀（图 4.5-15），区块的东北角和西南角有机碳含量低于 0.25 %，中部海丘链附近有机碳含量介于 0.25-0.35 % 之间，而海丘链北部和南部海盆有机质含量介于 0.35-0.45 % 之间。

DY70I-A5-GC02 柱状样总有机碳（TOC）含量介于 0.13-0.31 % 之间，总氮（TN）含量介于 0.02-0.08 % 之间，总体要高于 DY70I-A5-GC03 柱状样的总有机碳（0.16-0.38 %）和总氮（0.06-0.09 %）含量。此外，总有机碳和总氮含量均有随着深度增加而逐渐降低的趋势（图 4.5-16）。

在 NORI-D 区域的表层沉积物（0-30 cm）TOC 的含量随着深度增加而降低，

TOC 含量介于 0.1-0.7 %，与 A-5 区块剖面变化趋势一致，但变化范围更大，下降更迅速 (NORI 2022)。

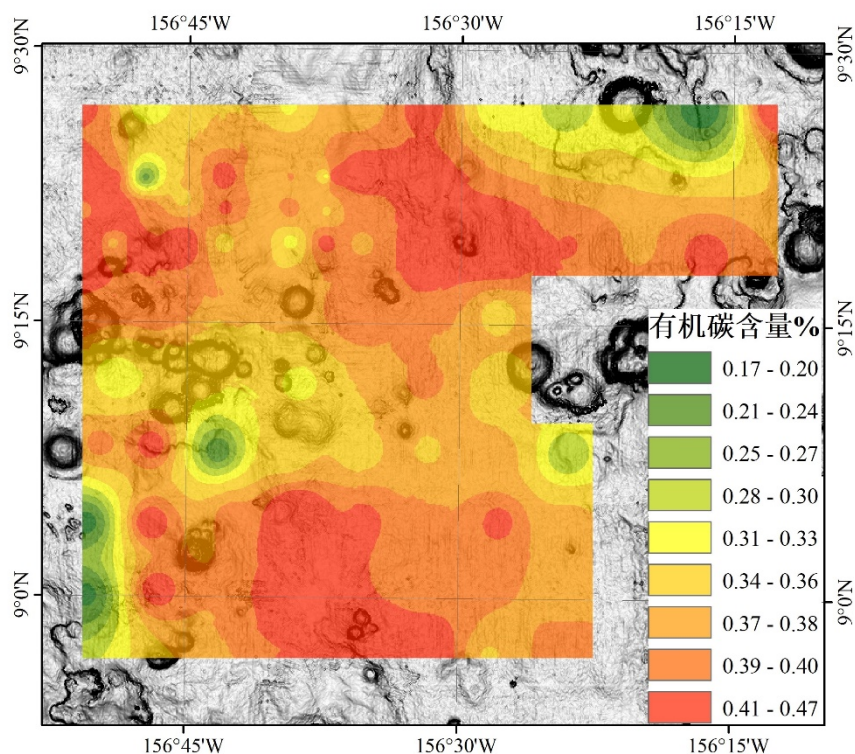


图 4.5-15 A-5 区块重点工作区表层沉积物有机碳含量分布图

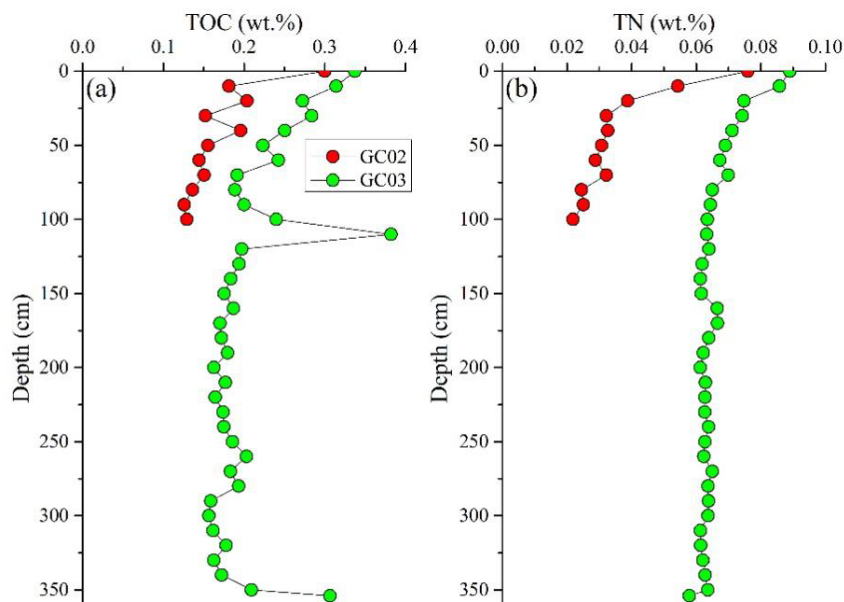


图 4.5-16 A-5 区块重点工作区柱状沉积物有机质垂向变化图

(4) 沉积物叶绿素 *a*

2022 年航次沉积物叶绿素 *a* 采样观测均在东太平洋 A-5 区块进行，共完成

9 站次沉积物叶绿素 *a* 观测（图 4.3-4），获取分层沉积物叶绿素 *a* 样品 90 个。

沉积物叶绿素 *a* 测定结果按照规程要求可计算得到单位湿重沉积物叶绿素 *a* 含量（叶绿素含量 1）和单位干重沉积物叶绿素 *a* 含量（叶绿素含量 2），单位均为微克每克（ $\mu\text{g/g}$ ）。此次调查 9 站位 90 个分层沉积物样品含水率范围为 58.14-87.32 %，平均为 (74.04 ± 4.65) %，样芯上层样品的含水率明显高于下层样品，其中表层沉积物样品含水率最高，平均为 82.59 %（表 4.5-1）。

单位湿重沉积物叶绿素 *a* 含量测值范围为 0-0.0239 $\mu\text{g/g}$ ，平均为 0.0042 ± 0.0043 $\mu\text{g/g}$ 。单位干重沉积物叶绿素 *a* 含量测值范围为 0.0001-0.1058 $\mu\text{g/g}$ ，平均为 0.0183 ± 0.0217 $\mu\text{g/g}$ 。其中 DY73I-A5-MC08 站和 DY73I-A5-MC01 站各采样层次平均叶绿素含量显著高于其余站位（表 4.5-2，表 4.5-3）

各站位不同采样层次样品湿重叶绿素 *a* 含量和干重叶绿素 *a* 含量平均值对比可见，湿重和干重叶绿素 *a* 含量均以表层沉积物含量最高，且随着采样层次加深，叶绿素含量呈现逐渐下降趋势（表 4.5-1）。这主要是由于下层沉积物中的叶绿素在经过更长时间的埋藏降解后含量逐渐减少。

各测站单位干重沉积物叶绿素 *a* 含量垂直分布同样（图 4.5-17）显示了以上平均值垂直分布特征。除 DY73I-A5-MC08 外，其余站位叶绿素 *a* 含量最高值均出现在表层沉积物，下层沉积物叶绿素 *a* 含量相对较低。

NORI-D 区域的叶绿素 *a* 含量在空间变化很大，含量从不可检测到 132.7 mg/kg 不等 (NORI 2022)。

表 4.5-1 A-5 区块各层次沉积物样芯叶绿素 *a* 含量和含水率平均值

采样层次	叶绿素 <i>a</i> 含量 1	叶绿素 <i>a</i> 含量 2	沉积物含水率
cm	(湿重) $\mu\text{g/g}$	(干重) $\mu\text{g/g}$	%
0-1	0.0096 ± 0.0043	0.0547 ± 0.0245	82.59 ± 3.24
1-2	0.0063 ± 0.0046	0.0293 ± 0.0217	78.21 ± 3.33
2-3	0.0060 ± 0.0066	0.0241 ± 0.0254	75.52 ± 1.87
3-4	0.0039 ± 0.0029	0.0145 ± 0.0094	73.79 ± 2.06
4-5	0.0033 ± 0.0024	0.0116 ± 0.0090	71.79 ± 1.73

5-6	0.0019±0.0010	0.0068±0.0036	72.15±2.26
6-7	0.0015±0.0028	0.0052±0.0120	71.69±2.16
7-8	0.0019±0.0018	0.0064±0.0067	70.75±2.24
8-9	0.0022±0.0033	0.0075±0.0119	69.77±4.45
9-10	0.0017±0.0014	0.0060±0.0052	70.61±1.69
总平均	0.0042±0.0043	0.0183±0.0217	74.04±4.65

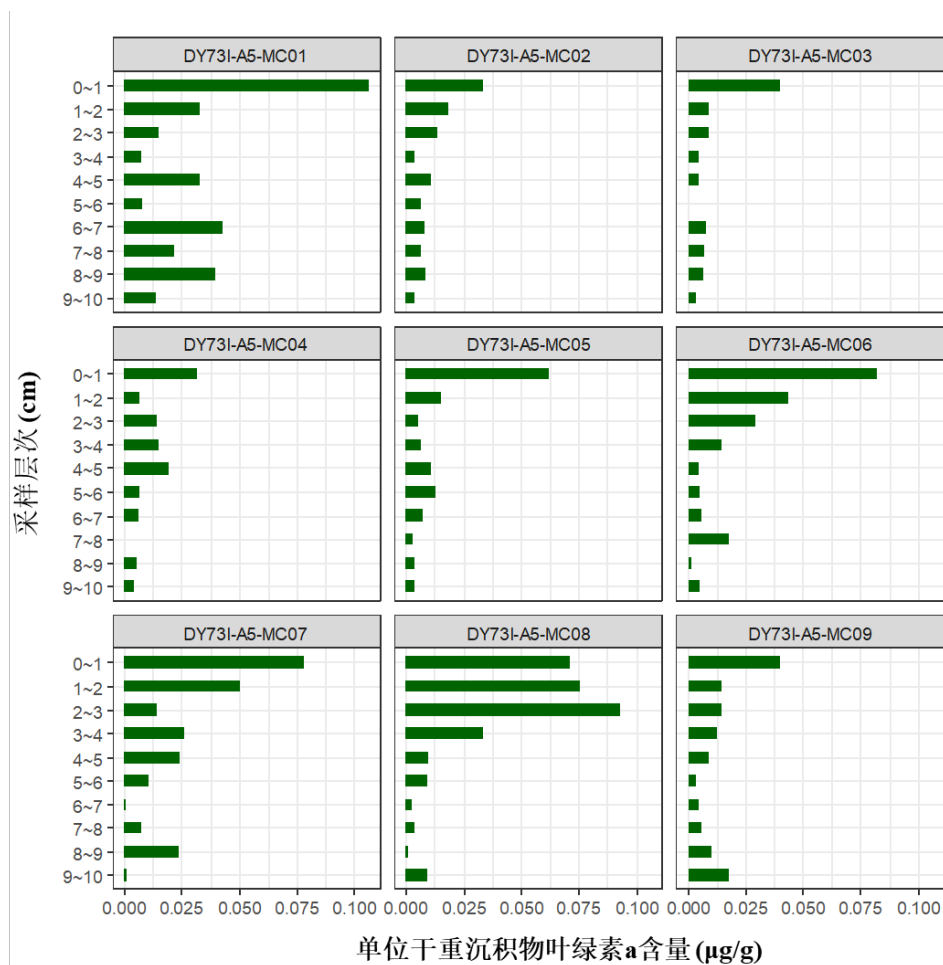


图 4.5-17 A-5 区块各测站单位干重沉积物叶绿素 a 含量 (µg/g)垂直分布

表 4.5-2 A-5 区块单位湿重沉积物叶绿素 a 含量 ($\mu\text{g/g}$) 测定结果

采样层次 (cm)	MC01	MC02	MC03	MC04	MC05	MC06	MC07	MC08	MC09
0-1	0.0162	0.0051	0.0055	0.0069	0.0079	0.0134	0.0142	0.0162	0.0073
1-2	0.0057	0.0029	0.0023	0.0014	0.0040	0.0091	0.0120	0.0156	0.0032
2-3	0.0032	0.0033	0.0021	0.0037	0.0013	0.0066	0.0039	0.0239	0.0031
3-4	0.0017	0.0008	0.0012	0.0036	0.0017	0.0037	0.0071	0.0101	0.0032
4-5	0.0087	0.0030	0.0013	0.0053	0.0031	0.0011	0.0071	0.0028	0.0028
5-6	0.0019	0.0017	0.0000	0.0018	0.0037	0.0015	0.0031	0.0027	0.0010
6-7	0.0101	0.0025	0.0021	0.0015	0.0020	0.0017	0.0002	0.0006	0.0012
7-8	0.0056	0.0022	0.0018	0.0000	0.0008	0.0051	0.0021	0.0010	0.0018
8-9	0.0109	0.0025	0.0017	0.0016	0.0016	0.0005	0.0069	0.0003	0.0026
9-10	0.0037	0.0010	0.0011	0.0012	0.0010	0.0015	0.0003	0.0029	0.0049
平均	0.0068	0.0025	0.0019	0.0027	0.0027	0.0044	0.0057	0.0076	0.0031

表 4.5-3 A-5 区块单位干重沉积物叶绿素 a 含量 ($\mu\text{g/g}$) 测定结果

采样层次 (cm)	MC01	MC02	MC03	MC04	MC05	MC06	MC07	MC08	MC09
0-1	0.1058	0.0331	0.0398	0.0314	0.0620	0.0822	0.0783	0.0710	0.0400
1-2	0.0329	0.0186	0.0090	0.0070	0.0156	0.0439	0.0502	0.0758	0.0143
2-3	0.0148	0.0135	0.0088	0.0141	0.0052	0.0297	0.0145	0.0927	0.0143
3-4	0.0073	0.0034	0.0046	0.0149	0.0069	0.0144	0.0257	0.0332	0.0127
4-5	0.0329	0.0108	0.0046	0.0191	0.0111	0.0044	0.0242	0.0097	0.0090
5-6	0.0082	0.0068	0.0002	0.0065	0.0131	0.0054	0.0106	0.0088	0.0034
6-7	0.0426	0.0078	0.0076	0.0060	0.0071	0.0061	0.0008	0.0022	0.0044
7-8	0.0217	0.0065	0.0069	0.0001	0.0029	0.0177	0.0076	0.0033	0.0061
8-9	0.0398	0.0082	0.0063	0.0054	0.0038	0.0018	0.0233	0.0009	0.0103
9-10	0.0137	0.0034	0.0036	0.0044	0.0034	0.0049	0.0011	0.0092	0.0176

平均	0.0320	0.0112	0.0091	0.0109	0.0131	0.0211	0.0236	0.0307	0.0132
----	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

4.5.3.2 沉积物孔隙水化学

对 2022 年航次在 A-5 区块 PRZ1 (DY73I-A5-MC02) 和 IRZ (DY73I-A5-MC06) 的多管沉积物 (厚约 31 cm), 进行了底层海水/沉积物孔隙水的重金属、营养盐和总碱度含量分析。站位分布见图 4.3-4。沉积物孔隙水用鲁尔头 (RHIZON) 配合针筒进行采集, 5 cm 厚的沉积物样品可采得水样量为 15-25 mL。

(1) 孔隙水重金属含量

孔隙水重金属含量按 5 cm 间距取样, 采用电感耦合等离子体质谱法进行分析。测试结果见图 4.5-18。

在分析的 9 种重金属中, Zn 和 V 含量相对较高, Pb 含量相对最低。2 站上覆水中的重金属含量总体比较接近, DY73I-A5-MC02 站具有相对略高的 Cr, Co, Ni, Cd 含量和相对略低的 V, Cu, Zn, As 和 Pb 含量。

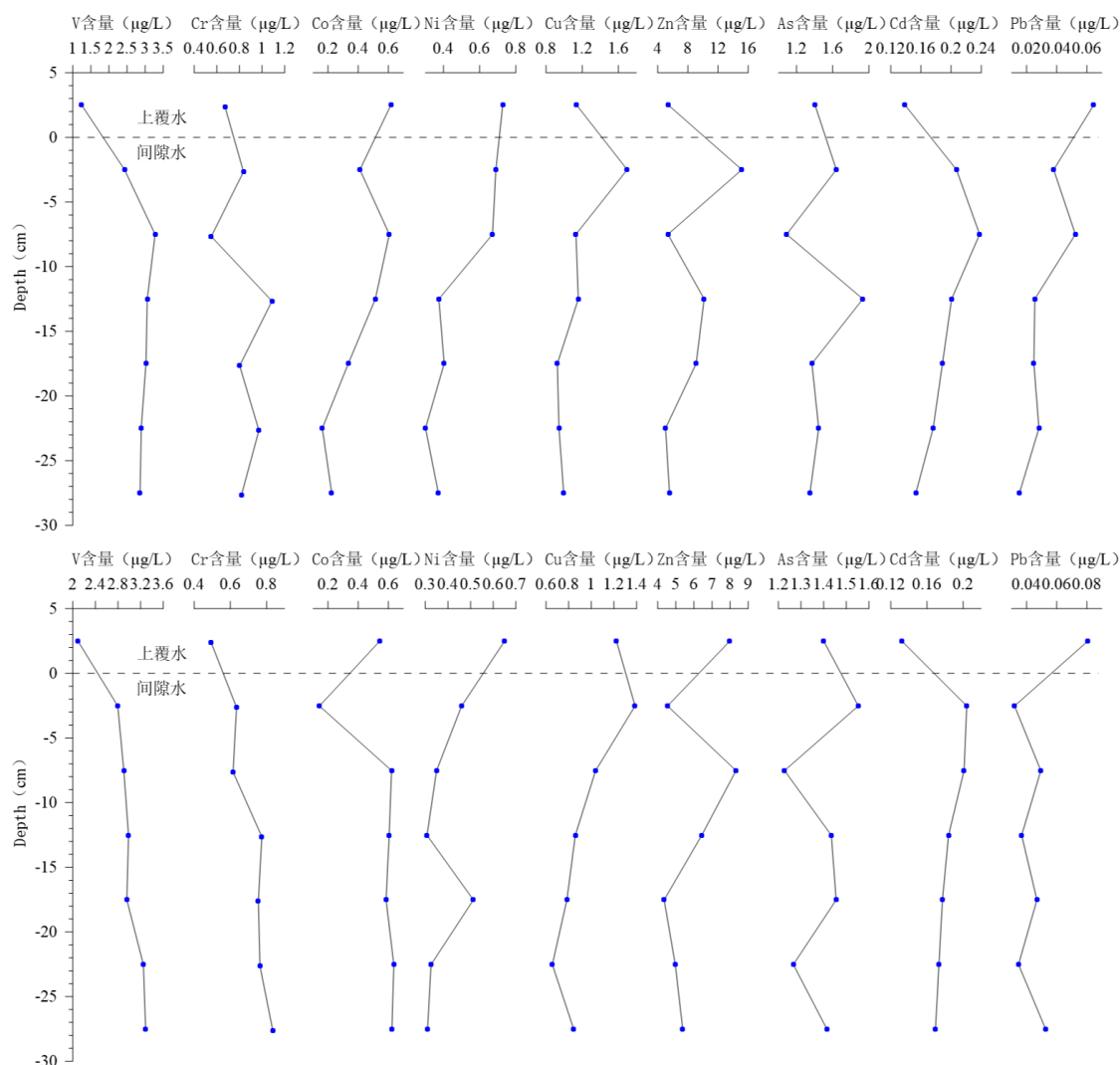


图 4.5-18 A-5 区块重点工作区沉积物上覆水和孔隙水重金属含量垂向分布

(上: DY73I-A5-MC02, 下: DY73I-A5-MC06)

在 DY73I-A5-MC02 站, 根据深度剖面变化, 可将重金属分为 3 类。第一类是上覆水中含量显著低于孔隙水中含量, 代表性重金属是 V, Cr 和 Cd。第二类是上覆水中含量显著高于孔隙水中含量, 代表性重金属是 Co, Ni 和 Pb。第三类是 Cu, Zn 和 As, 在孔隙水的上部 (0-15 cm 层) 具有最高含量。

在 DY73I-A5-MC06 站, 根据深度剖面变化, 也可将重金属分为 3 类, 分类与 DY73I-A5-MC02 站类似, 仅 Co 略有不同, 其最高含量不是在上覆水中而是在深层孔隙水中。

(2) 孔隙水营养盐

孔隙水营养盐 (硅酸盐、活性磷酸盐、亚硝酸盐和硝酸盐) 含量按 5 cm 间距取样, 采用分光光度法进行分析。测试结果见表 4.5-4 和图 4.5-19。

表 4.5-4 A-5 区块重点工作区沉积物上覆水和孔隙水营养盐含量测试结果

站位号	样品号	层位	硅酸盐 ($\mu\text{mol/L}$)	活性磷酸盐 ($\mu\text{mol/L}$)	亚硝酸盐 ($\mu\text{mol/L}$)	硝酸盐 ($\mu\text{mol/L}$)
DY73I-A5-MC02	M02-0	上覆水	213.09	1.58	0.14	40.95
	M02-1	0-5cm	296.92	1.25	0.13	41.39
	M02-2	5-10cm	333.33	1.38	0.12	39.78
	M02-3	10-15cm	373.76	1.61	0.15	38.74
	M02-4	15-20cm	393.31	1.22	0.14	38.92
	M02-5	20-25cm	409.91	1.67	0.10	38.92
	M02-6	25-30cm	440.10	1.81	0.10	37.06
DY73I-A5-MC06	M06-0	上覆水	199.22	1.53	0.13	43.75
	M06-1	0-5cm	307.69	1.22	0.12	44.53
	M06-2	5-10cm	346.00	1.19	0.18	45.44
	M06-3	10-15cm	373.27	1.34	0.25	43.86
	M06-4	15-20cm	398.92	1.54	0.22	42.17
	M06-5	20-25cm	419.52	1.22	0.16	41.10
	M06-6	25-30cm	440.61	1.79	0.22	36.58

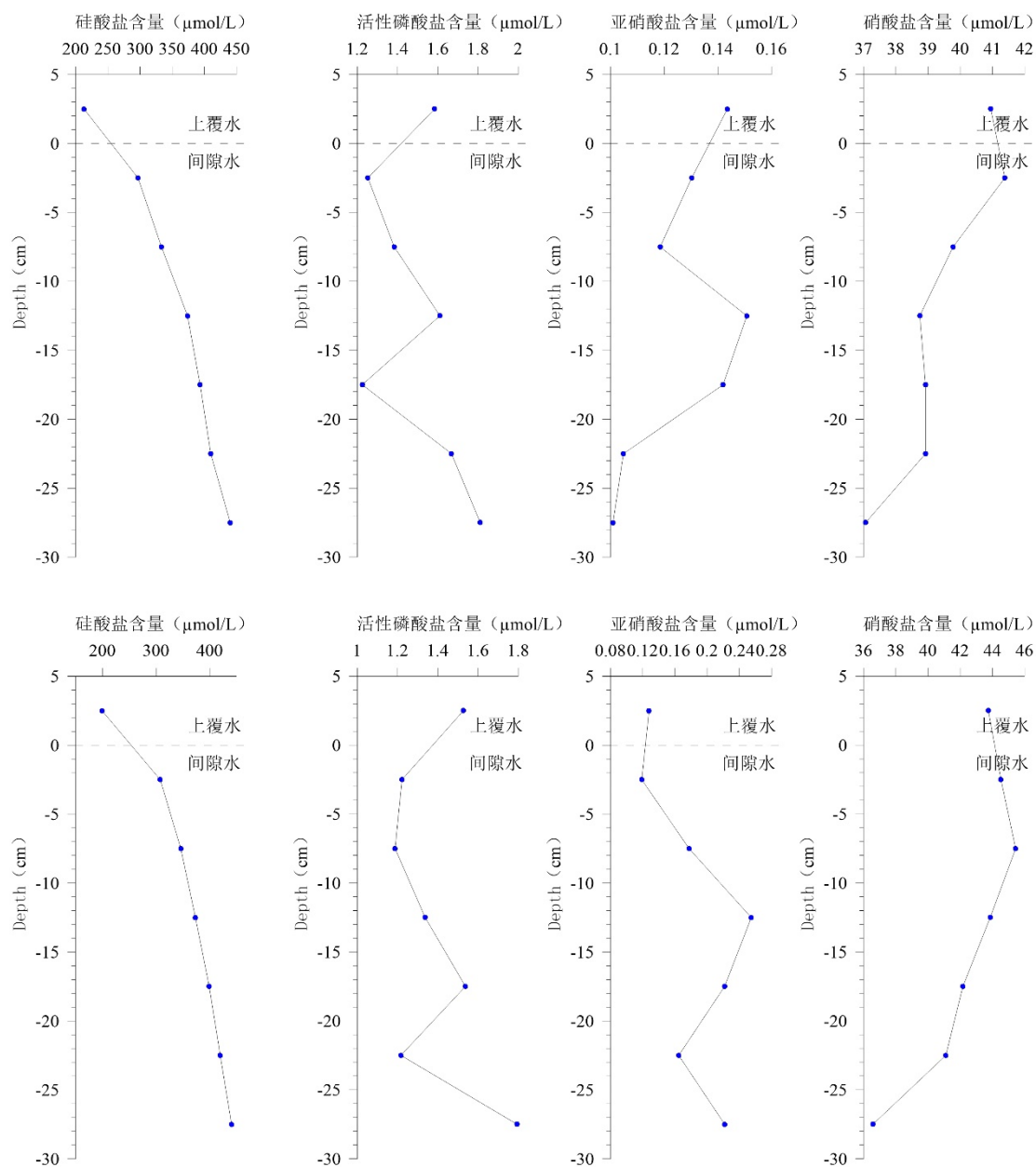


图 4.5-19 沉积物上覆水和孔隙水营养盐含量垂向分布

(上: DY73I-A5-MC02, 下: DY73I-A5-MC06)

DY73I-A5-MC02 站沉积物孔隙水中硅酸盐、活性磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐的含量范围分别为 296.92-440.10 $\mu\text{mol/L}$ (平均 374.56 $\mu\text{mol/L}$), 1.22-1.81 $\mu\text{mol/L}$ (平均 1.49 $\mu\text{mol/L}$), 0.10-0.15 $\mu\text{mol/L}$ (平均 0.12 $\mu\text{mol/L}$) 和 37.06-41.39 $\mu\text{mol/L}$ (平均 39.14 $\mu\text{mol/L}$)。硅酸盐在沉积物孔隙水中的含量要高于上覆水中的含量, 但活性磷酸盐、亚硝酸盐和硝酸盐在沉积物孔隙水中的含量一般接近或略低于上覆水中的含量。随着深度加深, 沉积物孔隙水硅酸盐和活性磷酸盐的含量逐渐升高, 在底部 (25-30 cm 层) 达到最大, 但亚硝酸盐和硝酸盐

的含量则有相反变化趋势。硅酸盐在沉积物孔隙水中的含量随深度增加主要与硅酸盐的不饱和溶解有关。亚硝酸盐和硝酸盐含量随深度的分布主要与有机质的矿化降解和氧化还原条件有关。

DY73I-A5-MC06 站沉积物孔隙水中硅酸盐、活性磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐的含量范围分别为 307.69-440.61 $\mu\text{mol/L}$ (平均 381.00 $\mu\text{mol/L}$), 1.19-1.79 $\mu\text{mol/L}$ (平均 1.38 $\mu\text{mol/L}$), 0.12-0.25 $\mu\text{mol/L}$ (平均 0.19 $\mu\text{mol/L}$) 和 36.58-45.44 $\mu\text{mol/L}$ (平均 42.28 $\mu\text{mol/L}$)。硅酸盐在沉积物孔隙水中的含量要高于上覆水中的含量, 但活性磷酸盐、亚硝酸盐和硝酸盐在沉积物孔隙水中的含量则无此规律。随着深度加深, 沉积物孔隙水硅酸盐和活性磷酸盐的含量逐渐升高, 在底部 (25-30 cm 层) 达到最大, 但硝酸盐含量则有相反变化趋势, 亚硝酸盐含量变化规律性不明显。

在调查的 2 个沉积物孔隙水站位中, 孔隙水营养盐的总体含量在 2 站比较接近, 各营养盐含量随深度变化的规律在 2 站中也比较类似, 因此调查结果表明 IRZ 和 PRZ1 的沉积物孔隙水营养盐变化基本一致。

A-5 区块沉积物孔隙水硅酸盐和硝酸盐含量与 NORI-D 区块结果较为相似 (NORI 2022), 但亚硝酸盐和活性磷酸盐结果都较低。

(3) 孔隙水总碱度

对多管样品中 0-15 cm 层和 15-30 cm 层的孔隙水进行总碱度分析, 分析方法为电位滴定法。DY73I-A5-MC02 站 0-15 cm 层和 15-30 cm 层的孔隙水总碱度均为 2.410 mmol/L。DY73I-A5-MC06 站 0-15 cm 层和 15-30 cm 层的孔隙水总碱度分别为 2.401 mmol/L 和 2.406 mmol/L。这一结果说明这 IRZ 和 PRZ1 的总碱度很接近, 而且在 0-30 cm 范围内总碱度变化不大。NORI-D 区域孔隙水碱度研究结果与 A-5 区块相似, 碱度范围在 2.8 ± 0.2 mM, 并且 0-22 cm 深度内基本保持不变 (NORI 2022)。

4.5.3.3 土工力学特征

利用 300 型和 1000 型土工原位测试仪, 中国五矿 2021 年、2022 年和 2023 年航次在 A-5 区块开展了原位土工力学性质测试, 共获取 51 组贯入强度原位测试数据和 35 组剪切强度原位测试数据。站位分布图见 4.3-4。

贯入深度从 0-900 mm，每隔 50 mm 进行 1 个测量贯入强度数据进行记录，得到 A-5 区块不同深度情况下的贯入强度统计数据如图 4.5-20 所示。前 300 mm 贯入深度所对应的贯入强度均值随深度增加变化速率小于后 300 mm 贯入深度所对应的贯入强度增加变化速率，可能原因为随深度的增加，海底沉积物贯入强度增大的幅度更加明显，底质表现为更硬的特性。

对 150 mm、300 mm、450 mm 和 600 mm 层进行了剪切强度测量剪切强度的最大值和沉积物剪切破坏后的均值进行了统计分析（图 4.5-21）。结果显示，最大剪切应力和残余剪切应力的各组数据的均值与中位线相差较小；从不同深度的最大剪切应力均值分析，剪切应力最大值与剪切深度存在较好的线性关系（直线状态）；从不同深度沉积物破坏后的残余剪切应力进行分析，其与测量深度也存在一定的线性关系，但其总体变化幅度较小；从同一层最大剪切强度与破坏后的残余剪切应力值比较可知，沉积物底质破坏后，其残余剪切应力急剧下降，随深度增加，两者间差值增大。

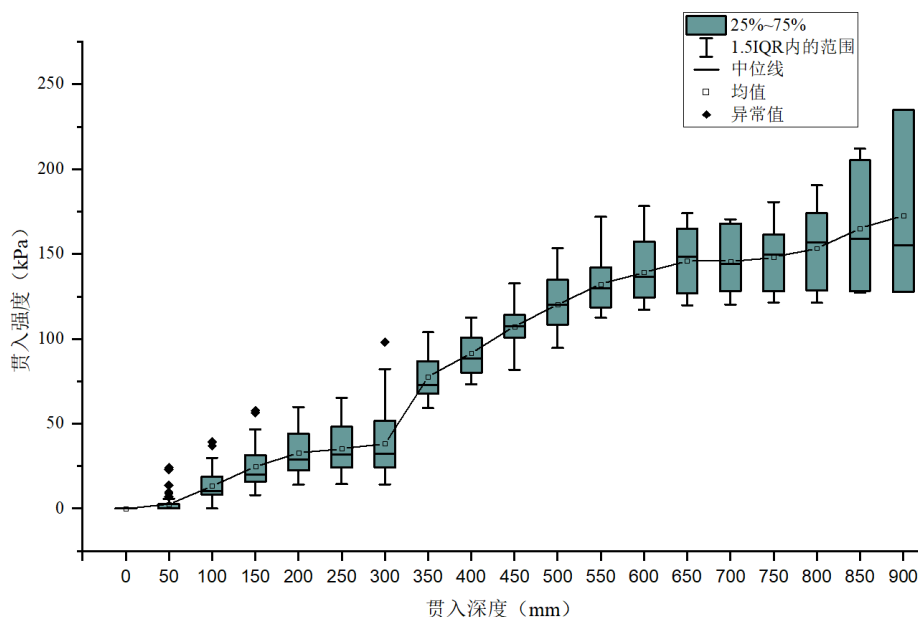


图 4.5-20 中国五矿合同区 A-5 区块贯入强度统计分析

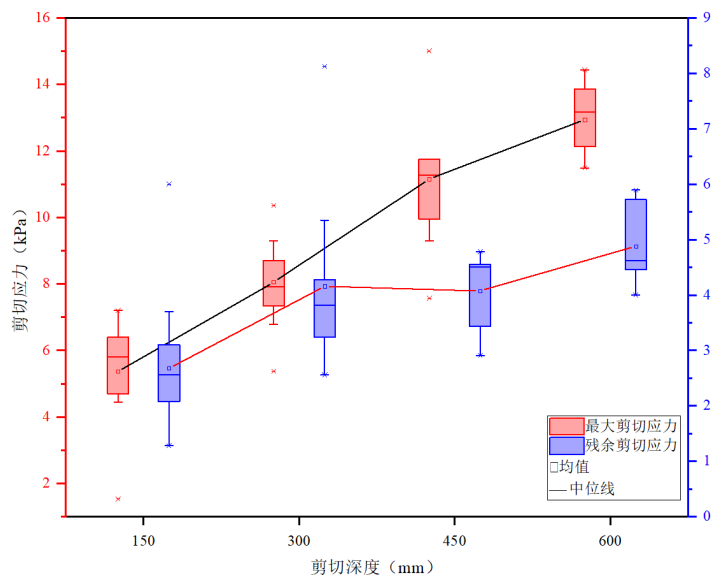


图 4.5-21 中国五矿合同区 A-5 区块剪切强度统计分析

4.5.3.4 生物扰动

对中国五矿 2022 年航次 2 站重力柱样品（DY73II-A5-GC01 和 DY73II-A5-GC04）用 γ 谱仪测试了 ^{210}Pb 比活度和 ^{226}Ra 比活度，由二者的差值计算得到 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度。 ^{210}Pb 测试结果用于评估生物扰动情况，具体站位见图 4.3-4。

从 GC01 柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面分布来看（表 4.5-5 和图 4.5-22），从表层到 20 cm 层， $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 变化曲线呈“S”型，并没有呈现随深度衰减趋势，这可能是由于受到生物对沉积物扰动的影响，表层沉积物吸附的现代 ^{210}Pb 信号被混入到了下层沉积物中。20 cm 以深， $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 波动较小，但 27 cm 层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 仍有 575.6 Bq/kg，可能反映还存在未完全衰变的 ^{210}Pb 。这可能说明 DY73-A5-GC01 站生物扰动最大深度能达到 27 cm。

表 4.5-5 DY73II-A5-GC01 柱状沉积物 γ 谱仪数据表

序号	样品编号	样品深度 cm	^{210}Pb 比活度		^{226}Ra 比活度		$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度	
			Bq/kg		Bq/kg		Bq/kg	
			测量值	U(k=2)	测量值	U(k=2)	测量值	相对误差
1	DY73II-A5-GC01	1	1842.5	43.1	954.4	31.1	888.1	74.2
2	DY73II-A5-GC01	3	1923.5	29.7	829.5	22.1	1094.0	51.8
3	DY73II-A5-GC01	5	1915.2	26.8	734.0	16.8	1181.2	43.6

4	DY73II-A5-GC01	7	1754.0	28.4	1022.7	24.2	731.3	52.6
5	DY73II-A5-GC01	9	1813.5	28.7	978.2	23.6	835.3	52.3
6	DY73II-A5-GC01	11	1607.5	59.7	839.4	43.2	768.1	102.9
7	DY73II-A5-GC01	13	1584.7	27.1	1009.7	23.7	575.0	50.8
8	DY73II-A5-GC01	15	1647.8	27.3	805.2	21.9	842.6	49.2
9	DY73II-A5-GC01	17	1707.7	27.4	625.8	19.9	1081.9	47.3
10	DY73II-A5-GC01	19	1607.1	24.2	704.2	15.6	902.9	39.8
11	DY73II-A5-GC01	21	1411.6	27.1	758.3	19.7	653.3	46.8
12	DY73II-A5-GC01	23	1349.4	22.3	664.4	15.3	685.0	37.6
13	DY73II-A5-GC01	25	1209.5	25.9	578.3	16.9	631.2	42.8
14	DY73II-A5-GC01	27	951.4	31.9	375.8	20.6	575.6	52.5

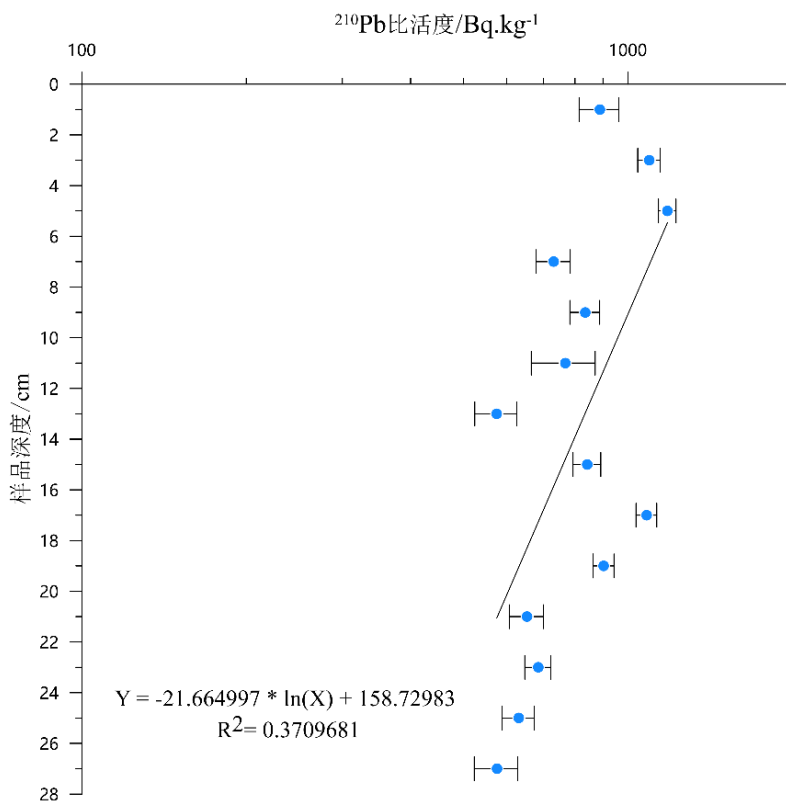


图 4.5-22 DY73II-A5-GC01 柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度分布图

从 DY73II-A5-GC04 柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂向分布剖面来看（表 4.5-6 和图 4.5-23），3-17 cm 段各层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 都高于最表层（1 cm 层） $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ，且 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 未呈现

随深度降低趋势，这体现了生物活动对沉积物的扰动。19-27 cm 段 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 有随深度降低趋势，在 25 cm 层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 仍接近 400 Bq/kg，说明生物活动能将沉积物表层 ^{210}Pb 信号传递到 25 cm 深处，即反映 DY73II-A5-GC04 站沉积物中生物扰动深度可达 25 cm。

表 4.5-6 DY73II-A5-GC04 柱状沉积物 γ 谱仪数据表

序号	样品编号	样品深度 cm	^{210}Pb 比活度		^{226}Ra 比活度		$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度	
			Bq/kg		Bq/kg		Bq/kg	
			测量值	U(k=2)	测量值 (295.2keV)	U(k=2)	测量值	相对误差
1	DY73II-A5-GC04	1	1523.8	34.0	823.9	21.6	699.9	55.6
2	DY73II-A5-GC04	3	1791.9	25.3	691.9	17.2	1100.0	42.5
3	DY73II-A5-GC04	5	1738.7	25.1	822.8	18.4	915.9	43.5
4	DY73II-A5-GC04	7	1723.3	26.9	654.1	18.1	1069.2	45.0
5	DY73II-A5-GC04	9	1702.9	26.6	711.9	18.6	991.0	45.2
6	DY73II-A5-GC04	11	1910.2	47.8	680.0	31.6	1230.2	79.4
7	DY73II-A5-GC04	13	1836.1	26.2	826.1	19.0	1010.0	45.2
8	DY73II-A5-GC04	15	1748.7	26.0	891.7	19.7	857.0	45.7
9	DY73II-A5-GC04	17	1591.2	22.7	587.2	15.0	1004.0	37.7
10	DY73II-A5-GC04	19	1206.6	19.0	669.0	14.3	537.6	33.3
11	DY73II-A5-GC04	21	1064.1	43.6	535.0	32.8	529.1	76.4
12	DY73II-A5-GC04	23	937.3	18.8	434.6	13.8	502.7	32.6
13	DY73II-A5-GC04	25	714.7	17.1	318.1	12.2	396.6	29.3
14	DY73II-A5-GC04	27	646.1	17.1	379.1	13.1	267.0	30.2

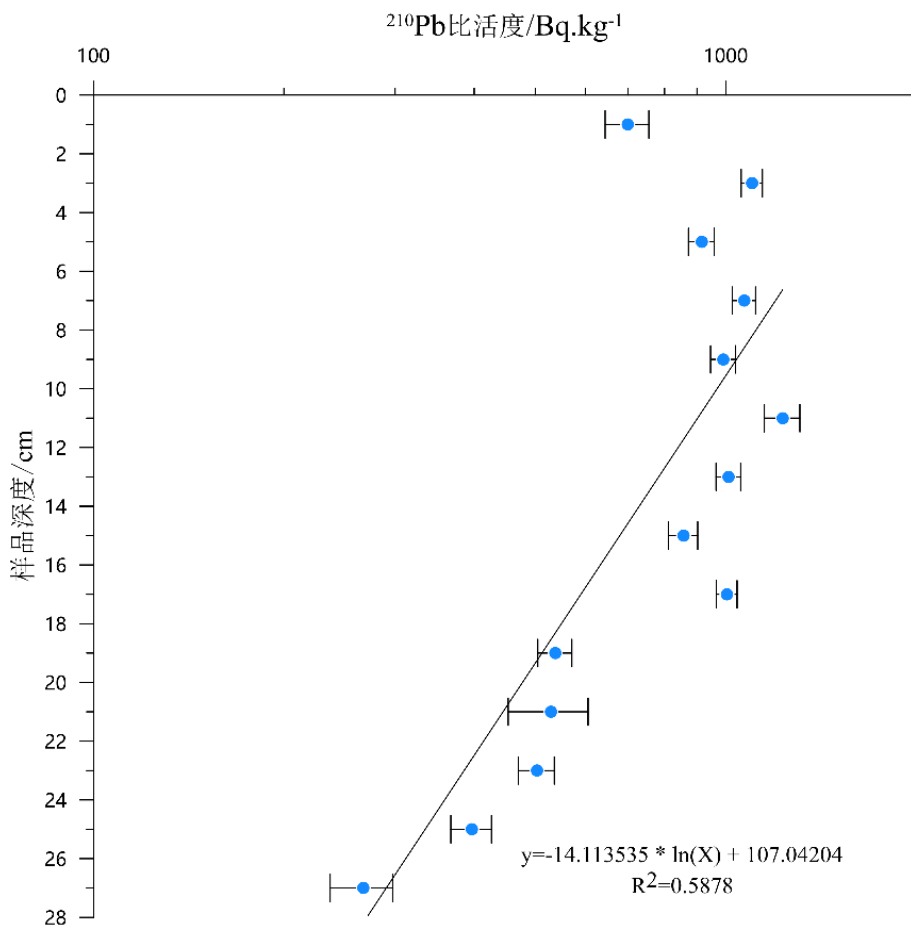


图 4.5-23 DY73II-A5-GC04 柱状沉积物 ²¹⁰Pb_{ex} 随深度分布图

NORI-D 区域 ²¹⁰Pb 剖面变化与 A-5 区块较为类似，但相比之下 NORI-D 区域在沉积物表层有更高的 ²¹⁰Pb 比活度 (NORI 2022)。

4.6 物理海洋特征

4.6.1 潮流特征

CC 区的潮汐为混合半日潮，潮不等现象显著。中国五矿 2021 年航次成功回收了 2019 年布放在 A-5 区块的锚系一套，获得了 1930 m、5150 m、5250 m 和 5350 m 水层海水流速，谱分析（置信区间 95 %）结果表明，锚系观测点海水流场存在明显的潮汐周期变化（图 4.6-1），无论是深层还是中层海水流场，都以半日潮（Semi-diurnal）和全日潮（Diurnal）为主。

对流场进行调和分析（表 4.6-1，其中短轴负值表示顺时针，正值表示逆时针），结果表明，锚系观测点所在位置主要的分潮为 M2 分潮，K1 次之。旋转方

向上，除 O1 和 H1 分潮为逆时针旋转外，其余各主要分潮均为顺时针旋转。根据潮流类型判断公式计算可得 F 值为 0.51，因此该站潮流类型为混合潮。

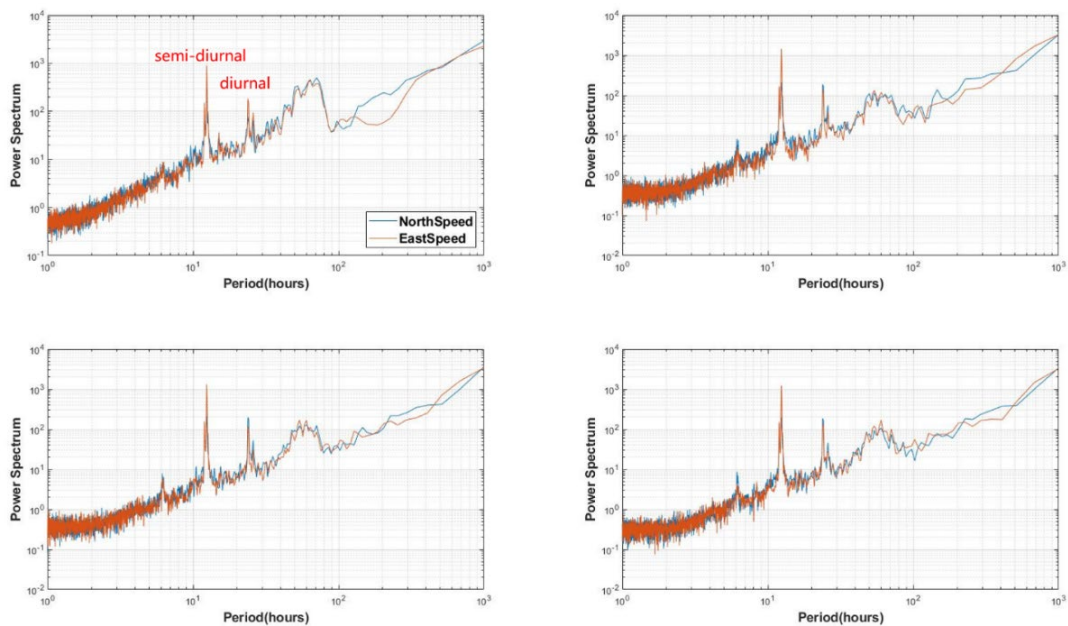


图 4.6-1 DY70II-A5-MX01 锚系观测点海水流场潮汐周期分布图

表 4.6-1 锚系观测点主要分潮信息表

分潮	频率 (cph)	长轴 (cm/s)	短轴 (cm/s)	倾角 (°)	相位 (°)
*M2	0.08051	1.354	-0.413	6.23	296.89
*K1	0.04178	0.684	-0.093	48.46	175.71
*S2	0.08333	0.465	-0.214	16.60	308.15
*N2	0.07900	0.275	-0.086	23.04	281.18
*H2	0.08063	0.246	-0.149	178.98	255.55
*O1	0.03873	0.243	0.125	59.75	156.44
*H1	0.08040	0.220	0.033	107.13	252.80
*S1	0.04167	0.208	-0.056	100.09	119.08

4.6.2 温盐剖面特征

基于中国五矿 2017-2022 年在 A-5 区块内获取的共 10 次 CTD 垂向观测剖面，分析了 A-5 区块垂向水文剖面的时间变化特征，CTD 观测的站位分布见图 4.6-2。

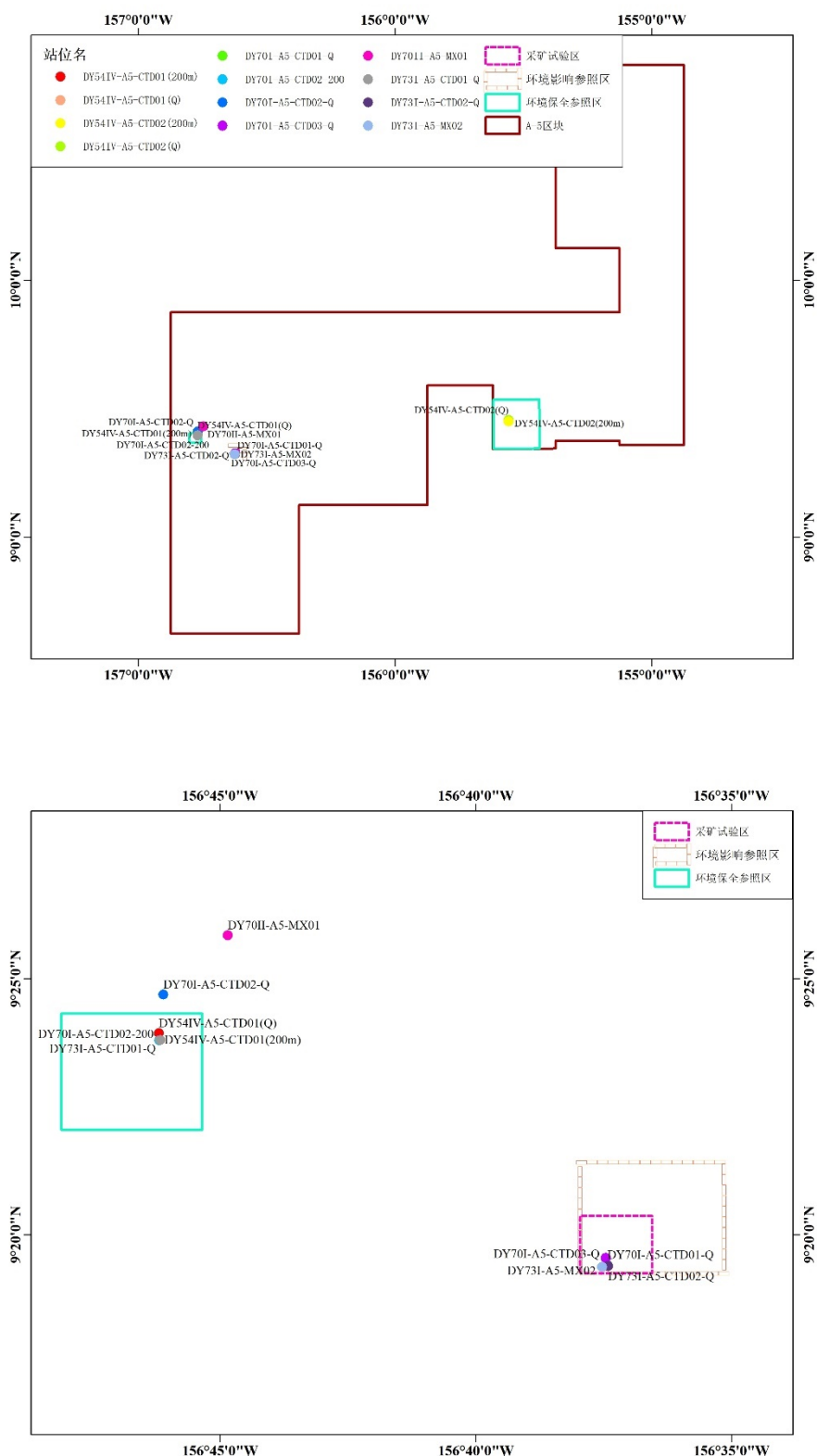


图 4.6-2 A-5 区块 CTD、锚系潜标观测站位置示意图

全水深温度垂向变化趋势相似，表层较高，约 28.5℃，至约 40 m 深度上下出现强烈的温跃层，温度在 100 m 深度范围内快速减小至 12℃以下，向下温度

继续减小但变化率变小，呈现缓慢渐变状态，至 4000 m 以深趋于稳定（图 4.6-3）。在不同年份，上层 200 m 温度垂向变化趋势基本相似，但跃层位置略有差异，变动幅度为约 40 m；深层温度变化趋势相似，量值差异为约 0.03 °C，2021 与 2022 年略高于 2019 年温度。以上差异可能是因为受到气候变化、观测时段差异等多种因素的综合影响。

NORI-D 区域的三次调查全水深温度垂向变化结果与 A-5 区块基本一致，在表层 100 m 内温度从约 29 °C 快速下降至 15 °C，并在后续 2000 m 海水中下降至 2 °C，后续水柱保持相对稳定和低温（1.5-2 °C）的特征 (NORI 2022)。

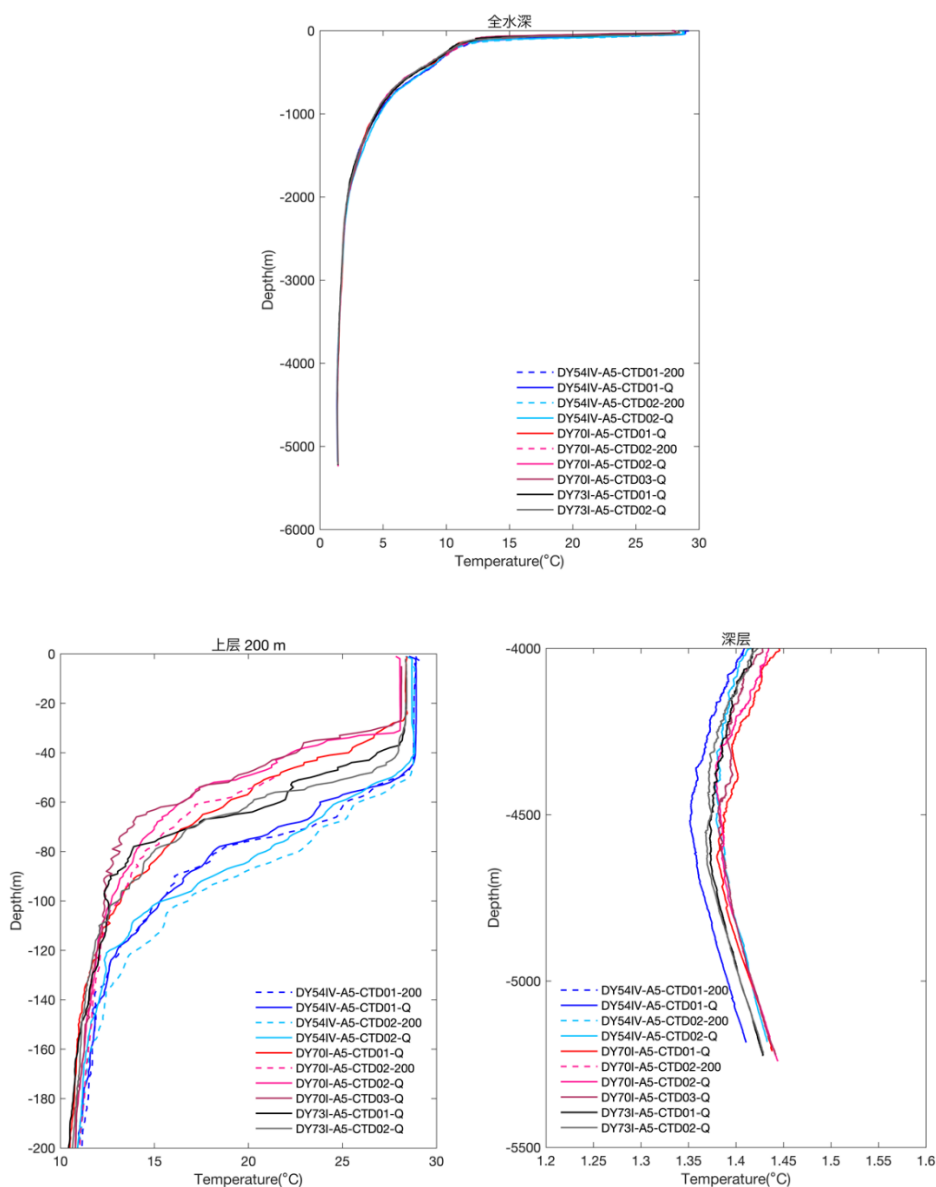


图 4.6-3 2017-2022 年 CTD 温度随深度变化图

全水深盐度变化规律趋势相似，在表层较高且稳定，在跃层开始降低，到深层为最低且数值稳定；在 2019、2021 和 2022 年，上层 200 m 盐度 0-50 m 表现为随深度增大数值增大；在水深 60-200 m，2019 年与 2021 年呈现相反的变化趋势，2021 年在 60-70 m 盐度随深度增大减小，在 70 m 位置达到最小值后增高趋于稳定，2019 年盐度随深度增大而增大，在 70 m 处达到一个极值后随深度增大而减小，在 120 m 达到另一个极值后逐渐增大趋于稳定；深层盐度大体变化趋势相似，均为随深度增大而增大后趋于稳定，但极值在 2021 年变小，在 2022 年有明显增大（图 4.6-4）。这样的变化可能是由大气降水和蒸发、淡水输入、海洋循环、物质运载和地质活动等多种因素影响的结果。

NORI-D 区域调查结果显示，水柱盐度范围从表层 33.5 PSU 到近底层 34.5 PSU；盐跃层处于水柱的表层 100 m 内，最大盐度处于大约 100 m。A-5 区块与 NORI-D 区域盐度变化范围（33.7-34.8 PSU）和垂向剖面变化基本一致（NORI 2022）。

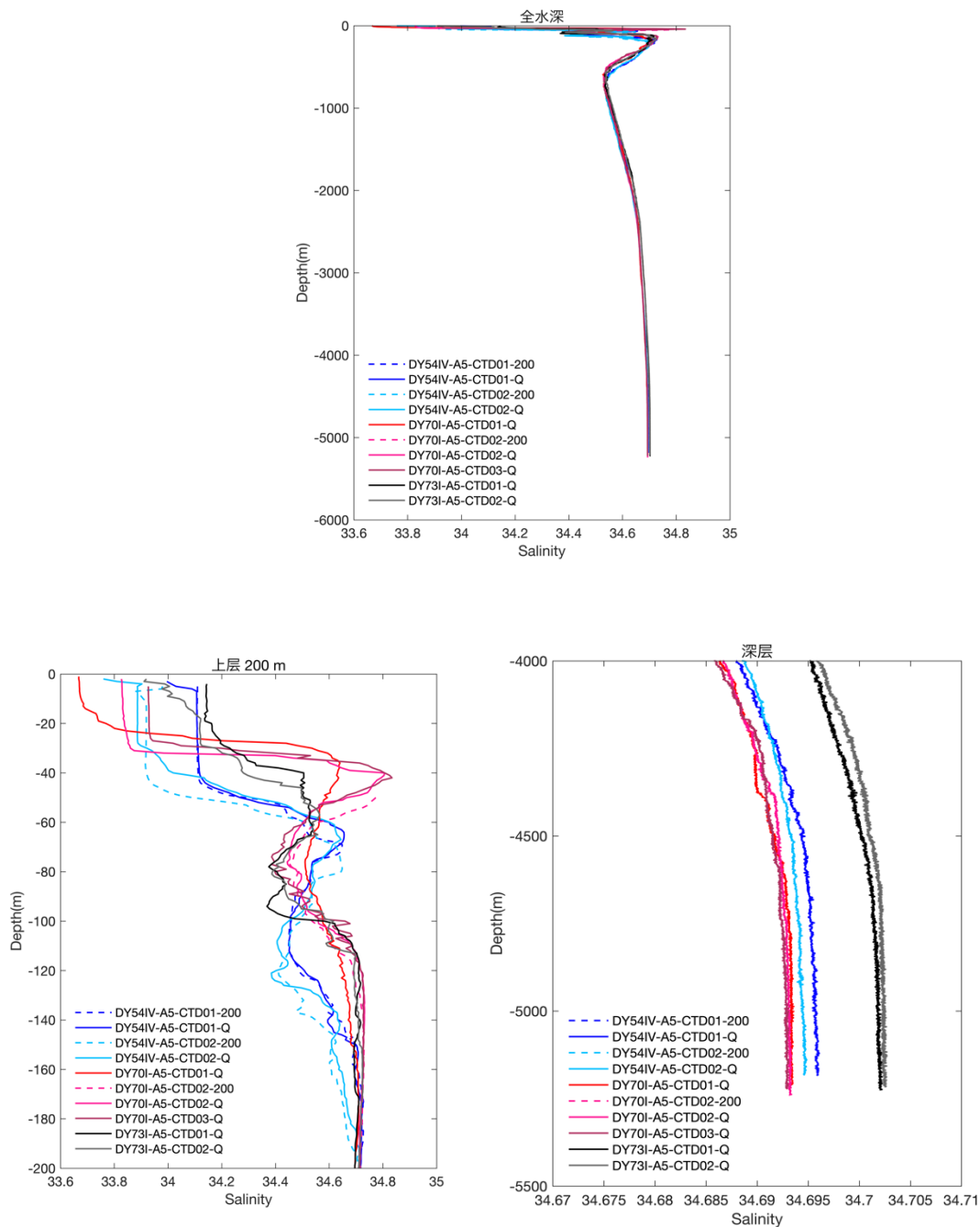


图 4.6-4 2017-2022 年 CTD 盐度随深度变化图

4.6.3 海流特征

基于中国五矿 2017-2022 年航次在 A-5 区块内获取的 4 次走航 ADCP 观测数据，对比分析了 A-5 区块上层海流的时间变化特征（图 4.6-5-图 4.6-8）。结果显示该区域不同年份海流的流速与流向变化均较显著。2017 年航次与 2021 年航次观测到的海流速度较大，局部可超过 1 m/s，而 2019 年与 2022 年的观测海流通

常小于 0.5 m/s。就海流流向而言，在 2017 年和 2019 年 A-5 区块西南部、2021 年和 2022 年 A-5 区块南部，均有体现出显著的赤道逆流，显示出赤道逆流在该海域的主导地位。在不同年份，整个调查区域不同位置也有观测到较大的北向流与南向流交替出现的现象，推测可能是受到中尺度涡、显著天气过程的影响。

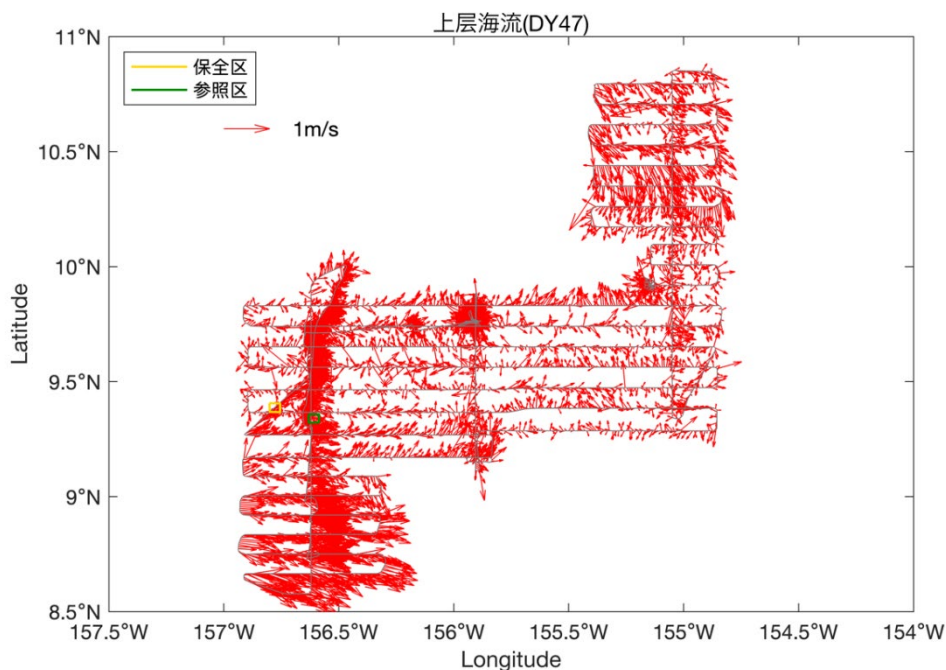


图 4.6-5 2017 年航次 A-5 区域海流图

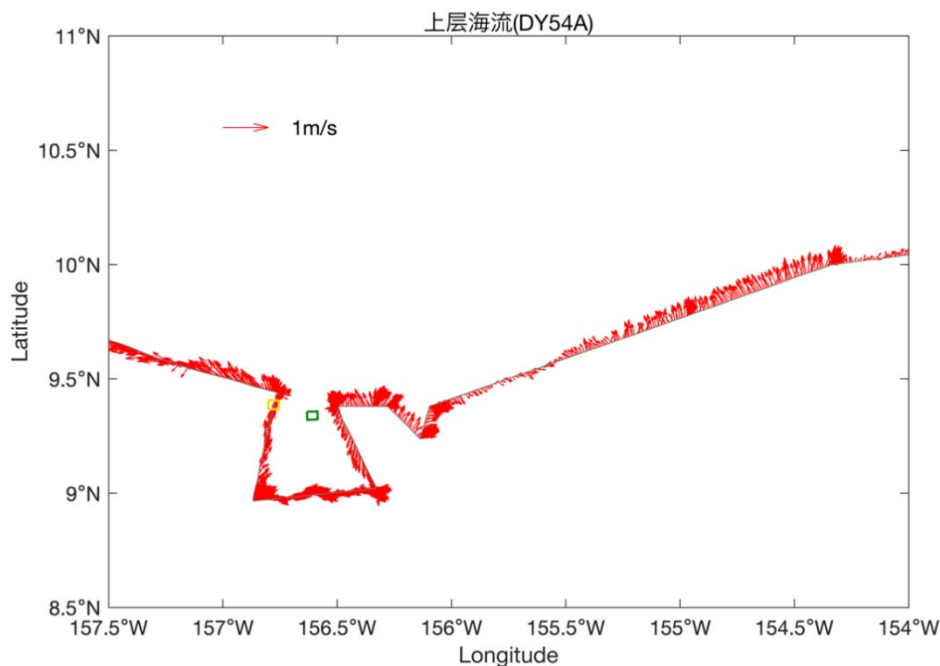


图 4.6-6 2019 年航次 A-5 区域海流图

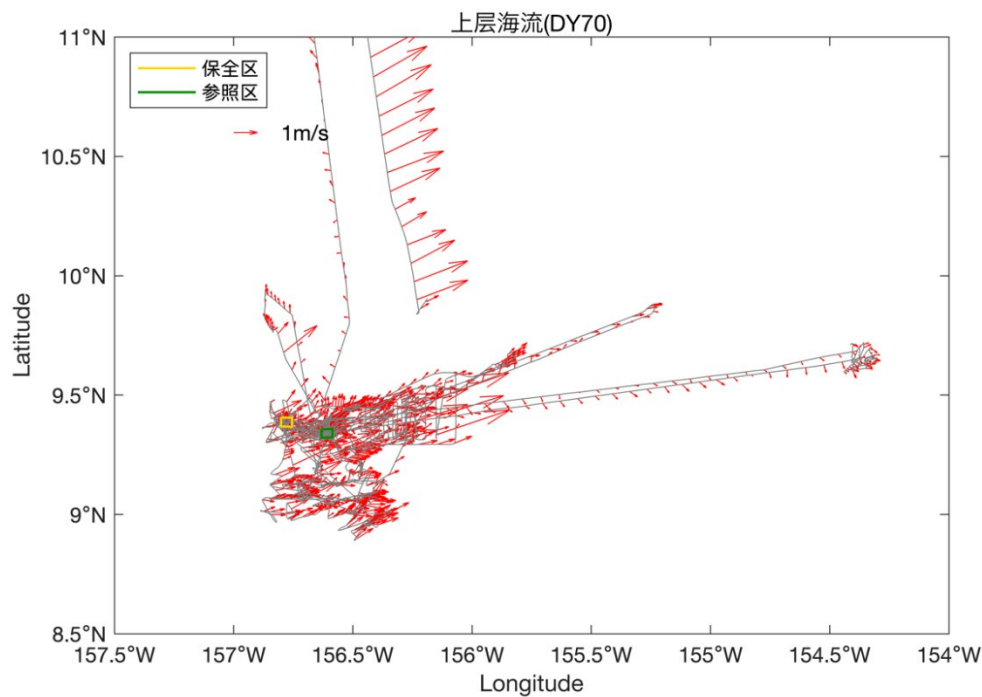


图 4.6-7 2021 年航次 A-5 区域海流图

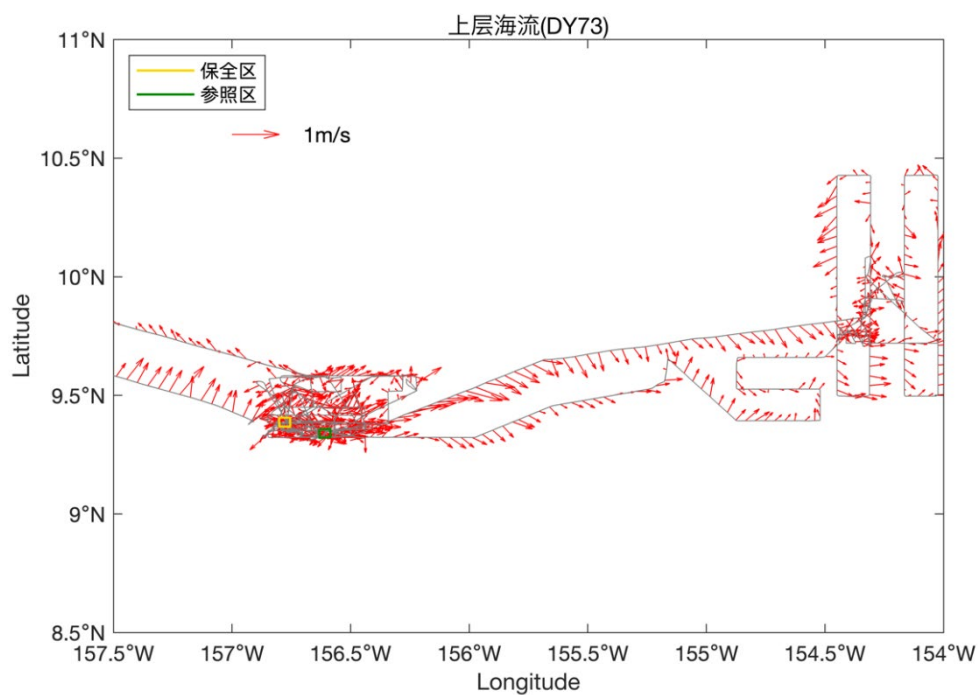


图 4.6-8 2022 年航次 A-5 区域海流图

4.6.4 长期观测特征

4.6.4.1 温度

中国五矿 2021 年航次成功回收了 1 套长锚系 (DY70II-A5-MX01), 3 台温

盐深仪分别布设在离底 20 m、离底 500 m 和离海面 1925 m，观测数据时长如下表 4.6-2。

表 4.6-2 锚系搭载 CTD 信息表

设备名称	设备所在水深	有效测量起止时间	测量时长（天）
CTD（037-20416）	5256m	2019-08-13 至 2021-12-25	865
CTD（037-20415）	4782m	2019-08-13 至 2021-12-25	865
CTD（037-20414）	1925m	2019-08-13 至 2021-12-25	865

离底 20m 的温深分布图（图 4.6-9，上图）上，蓝色实线是 SBE37 的压强记录，红色实线是温度记录。可以看出锚系投放着底以后，沉块存在逐渐陷落的过程，压强记录显示，前期陷落相对较快，约 2 m，后期的陷落基本可以忽略。整个观测期间压强记录在 5349.1 dbar 至 5352.8 dbar 之间，潮汐周期对底层的压强影响约为 1 dbar。底层水特性较为一致，潮流对设备的离地高度影响也可以忽略不计，温度变化周期中，潮汐不是显著影响因素，温度变化范围在 1.4148℃ 至 1.4514℃ 之间，平均 1.4307℃，温度基线相对稳定，存在一些非周期性的波动。在 NORI-D 区域中由锚系记录的数据表明近底温度始终稳定在约 1.5℃，因此 A-5 区块与 NORI-D 区域近底温度变化相似 (NORI 2022)。

离底 500 m 的温深分布图（图 4.6-9，下图）上，压强记录在 4861.7 dbar 至 4870.0 dbar 之间，变化区间是离底 20 m 的 8 倍。除潮周期外，还存在一些偶发事件，致使压强值持续偏高。部分深度变化可能与流速加强导致锚系倾斜有关，500 m 处设备变化 8 m，对应的锚系倾斜角度为 10.3°。结合底层流速分布（图 4.6-11）所示和离底 500m SBE37 的温深观测记录，2020 年 2-3 月，7 月和 9-10 月的三次压强记录增高都同步对应着底层流速增大。

离底 500 m 的温度变化范围在 1.3600℃ 至 1.4004℃ 之间，平均值 1.3809℃，略低于近底 20 m 的温度，变化基本与离底 20 m 同步，但离底 20 m 和离底 500 m 的温度变化并不反应压强记录的变化，2020 年 2-3 月，由于流速增大，导致潜标系统倾斜加大，压强记录增高。但相应的温度记录并不完全随着深度增加而温度增高。2019 年 9 月中下旬、2020 年 8-9 月的温度升高对应着压强记录减

小。2020 年 7-8 月的两次压强增高，并未对应温度升高。底层温度变化的影响因素除流速增大导致锚系倾斜，可能还有上层海洋的影响，以及底层水体的性质变化等因素。同时，NORI-D 区域中记录的离底 20 m 和离底 500 m 的温度变化基本同步，且基本保持稳定，因此 A-5 区块与 NORI-D 区域在离底 500 m 的温度变化情况表现一致 (NORI 2022)。

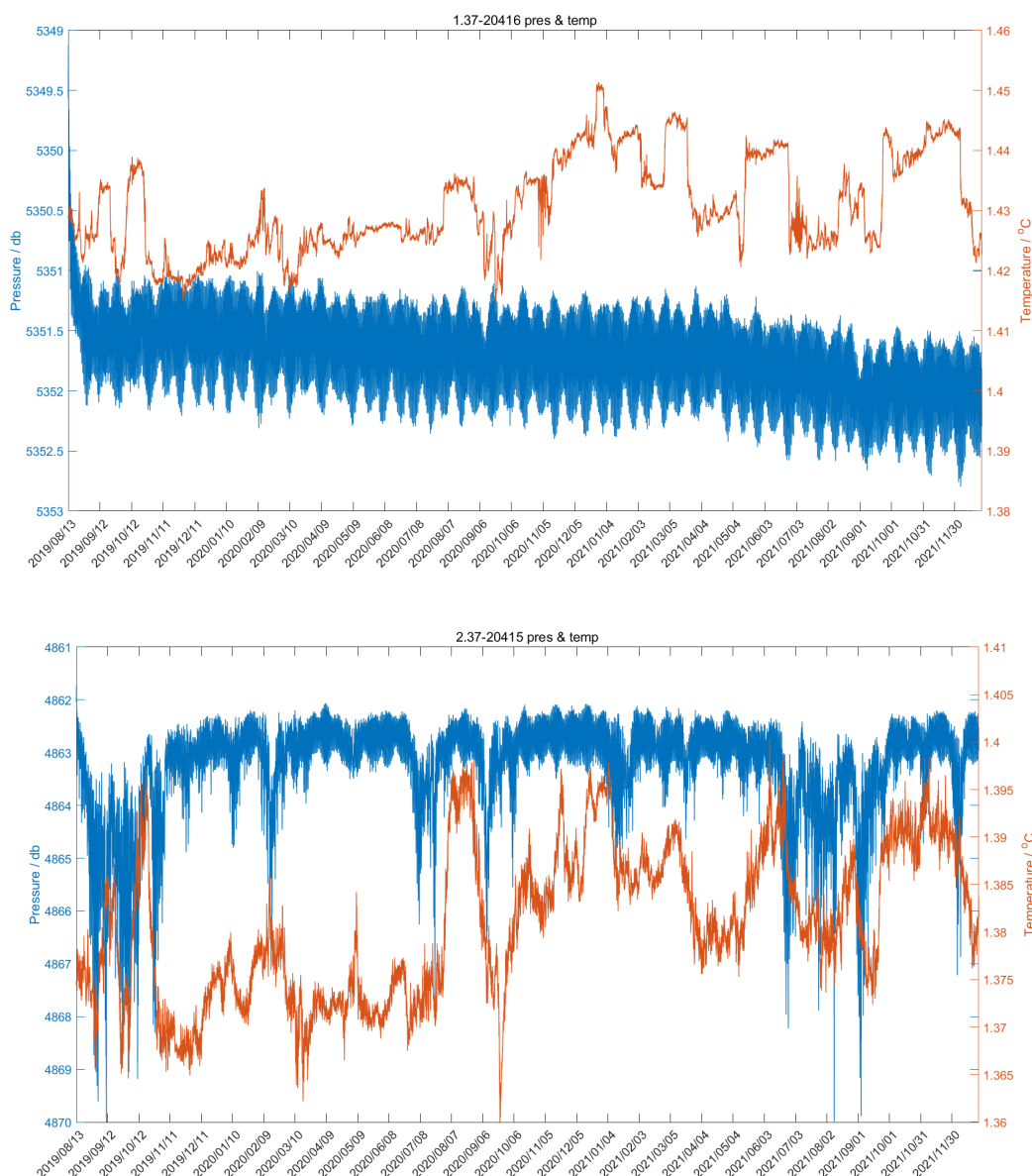


图 4.6-9 A-5 区块底层海水温度特征

(上：离底 20 m；下：离底 500 m)

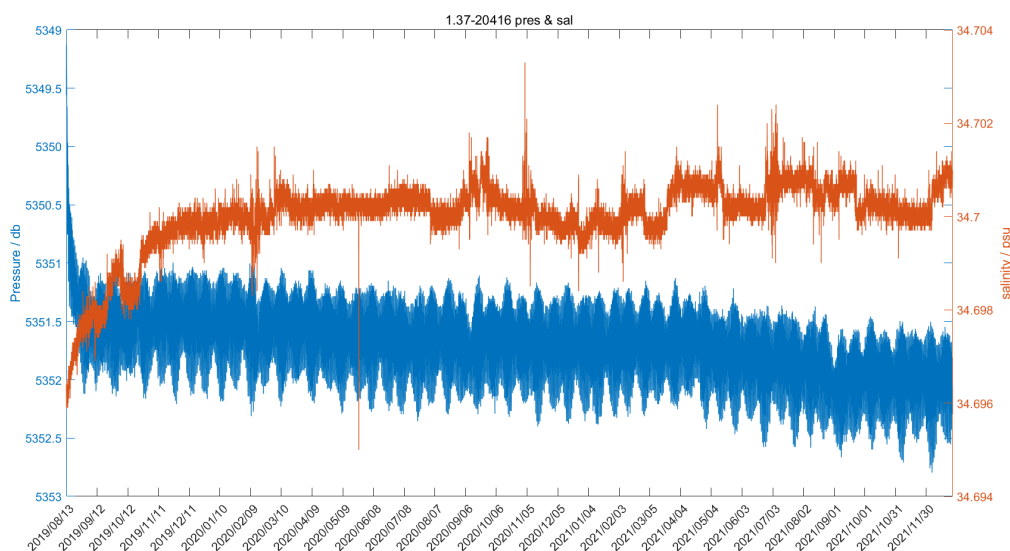
4.6.4.2 盐度

底层盐度的分布如图 4.6-10 所示，蓝色实线是 SBE37 的压强记录，红色实

线是盐度记录。离底 20 m 的盐度的最大值为 34.7033 PSU，盐度的最小值为 34.6950 PSU，盐度的平均值为 34.7000 PSU，温盐特征表明水体来源于南极地区的太平洋深层经向翻转环流的下层分支。

离底 500 m 盐度最大值为 34.6975 PSU，最小值为 34.6868 PSU，平均值为 34.6934 PSU。

在 NORI-D 区域，锚系记录 248 m、1999 m、3828 m 和 4325 m 处的盐度均稳定在 34.7 PSU，因此 A-5 区块与 NORI-D 区域离底 20 m 和离底 500 m 的盐度值表现基本一致。在锚系投放以后至 2019 年 12 月，近底层盐度和离底 500 m 盐度逐渐升高了 0.004 PSU。离底 500 m 底层盐度变化总体趋势和离底 20 m 相似，2020 年以后 500 m 层盐度存在逐渐下降的趋势 (NORI 2022)。



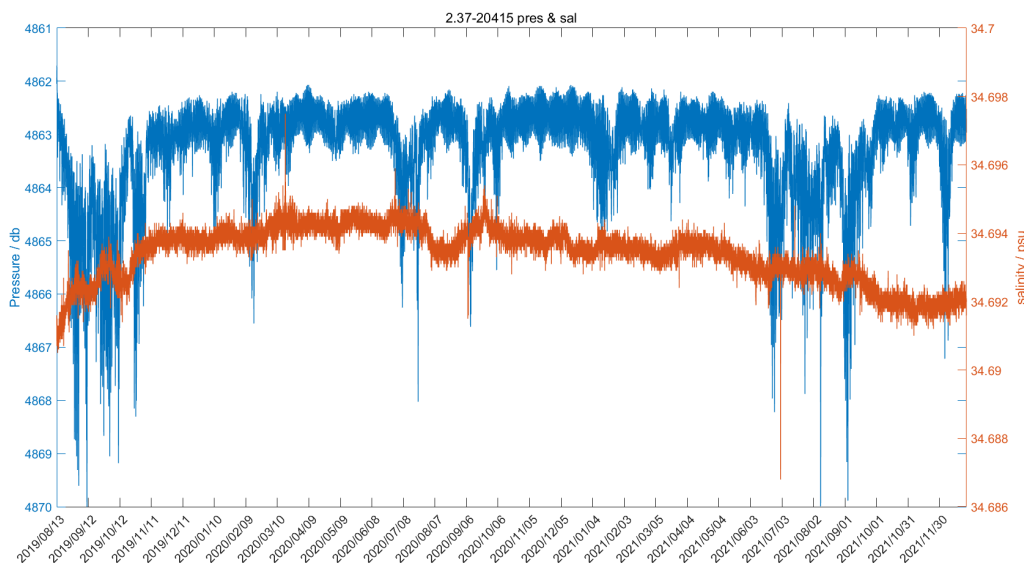


图 4.6-10 A-5 区块底层海水盐度特征

(上：离底 20 m；下：离底 500 m)

4.6.4.3 浊度

2021 年回收的锚系搭载了 4 台海流计，其中离底高度 20 m、100 m 和 200 m 的海流计都安装有浊度传感器，离底高度 20 m、100 m 的浊度观测值见图 4.6-11。A-5 区域底层浊度存在显著的异常变化，这些异常值似乎与近底海流速度大小没有直接的对应关系，不是再悬浮造成的，应为外部输运而来，譬如 2019 年 9 月的浊度异常超过 4.0 FTU。自 2021 年 12 月至 2022 年 3 月，底层流速相对较小，而此段时间浊度存在缓慢增加的趋势，浊度可以达到 1.4 FTU。个别不连续的异常值可能来自生物干扰，除此之外，浊度极低，背景值大约是 0.2-0.4 FTU。

离底 100 m 流速极值与离底 20 m 流速同步，流速大小与浊度大小没有对应的正相关关系。大部分时间，浊度值接近设备检测限，个别不连续的异常观测值可能是生物经过传感器的缘故，整体浊度处于 0.4 FTU 以下，浊度稳定在背景值以内。

TMC 的环境影响声明报告中描述了 IRZ 区域和 PRZ 区域锚系记录的背景浊度。位于 IRZ 区域的海床上 3.5 m 处浊度范围在 0.5-0.84 FTU，平均值为 0.67 FTU；海床上 12.5 m 处浊度范围在 0.46-0.72 FTU，平均值为 0.57 FTU；位于 PRZ 区域海床上 3.4 m 浊度变化范围 0.15-0.84 FTU，平均值为 0.3 FTU；海床上 9.6 m 浊度变化范围 0.42-3.7 FTU，平均值为 0.54 FTU。A-5 区块近底层浊度含

量基本与 NORI-D 区域保持一致 (NORI 2022)。

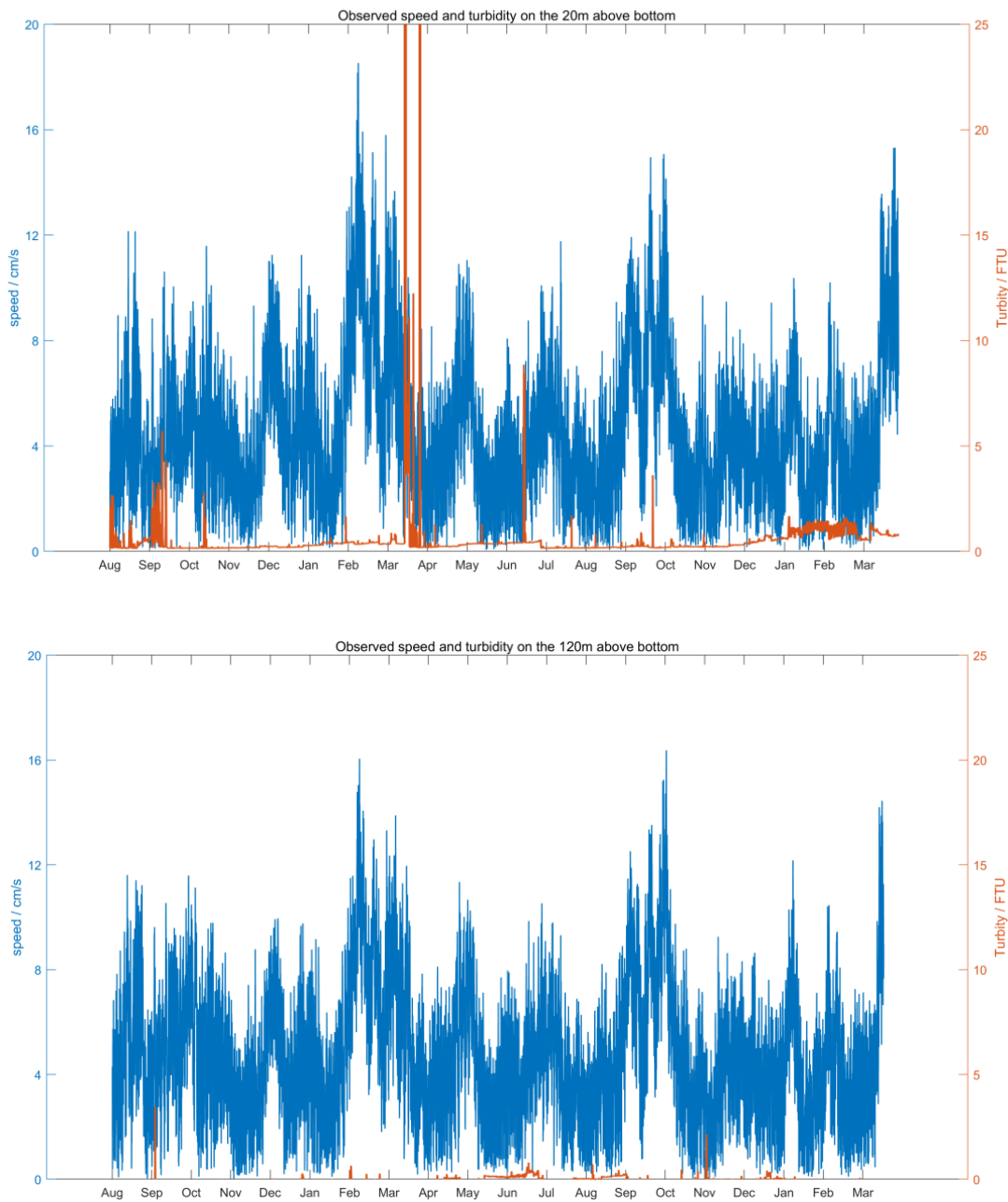


图 4.6-11 A-5 区块离底 20m（上）和 100m（下）流速和浊度对应关系
(DY70II-A5-MX01 站)

4.6.4.4 海流

2021 年回收锚系搭载 4 台单点海流计，测量信息见表 4.6-3。根据海流计所在深度不同，我们按其相对位置分为中层（1930 m）和深层（5150 m，5250 m，5350 m）两类。为了能直观看到海流在时间推移下流速和流向的变化，数据可

视化分析的潮流玫瑰图对数据（如图 4.6-12）显示，近底层流速多变，最集中的流速方向是东南向，其次为西北向，流速大于 8 cm/s 的发生概率也是这两个方向上最高。极值流速发生在 2020 年 2 月，流向东南向。2020 年 2 月前，极值流速相对较小，方向主要是偏东南向。2022 年 2 月以后，极值流速变大，方向主要为偏北向（图 4.6-13）。

如图 4.6-12 和图 4.6-13，离底 100 m 流速极值与离底 20 m 流速同步，在玫瑰图上分布极其相似。统计月极值流速发生时间，绝大部分也是同步发生的，除 2020 年 8 月、9 月和 2021 年 2 月外，近底 20 m 流速极值高于近底 100 m 层流速极值，流速在底部有略微强化的特征。

表 4.6-3 锚系搭载海流计信息表

设备名称	设备所在水深	有效测量起止时间	测量时长（天）
单点海流计（314）	1930 m	2019-08-13 至 2021-10-21	800
单点海流计（1016）	5150 m	2019-08-13 至 2021-04-12	608
单点海流计（1018）	5250 m	2019-08-13 至 2021-04-12	608
单点海流计（1049）	5350 m	2019-08-13 至 2021-04-12	608

锚系点中层（1930 m）的海水流场以东向流为主，流速集中在 6-12 cm/s，最大流速可超过 20 cm/s；在深层，随着海流计深度增加，海水流速和流向还是有一定程度的变化，流速随着深度增加而逐渐减弱，9 cm/s 的流速占比降低，海水流向变化幅度很小。整体来看，深层（5150 m，5250 m 和 5350 m）的海水流速较弱，不超过 9 cm/s，以西北-东南向的流为主（图 4.6-12、4.6-13）。

年平均分析结果显示（表 4.6-4），~2000 m 水深年平均流速较大，为 7.34 cm/s，流向为偏东向；深层流（5150 m，5250 m 和 5350 m）流速年平均为 4.56-4.83 cm/s，平均流向为偏东向流。

NORI-D 区域在水深约 2000 m 和近底层年均流速均小于 A-5 区块。TMC 研究报告表明，~2000 m 水深年均流速 2.6 ± 1.4 cm/s，最高平均水流速度记录在 7 月，最低平均水流速度记录在 9-11 月，流向为偏西南向流；~4321 m 水深年均流速 2.6 ± 1.6 cm/s，最高平均水流速度记录在 6 月，最低平均水流速度记录

在 10 月，流向为偏西北向 (NORI 2022)。

表 4.6-4 不同深度海水流速流向年平均统计表

设备编号	设备所在水深 (m)	年平均绝对流速 (cm/s)	年平均矢量流速 (cm/s)	年平均流向 (°)
单点海流计 (314)	1930	7.34	3.95	83.4
单点海流计 (1016)	5150	4.82	0.89	84.9
单点海流计 (1018)	5250	4.83	0.78	75.4
单点海流计 (1049)	5350	4.56	0.96	93.7

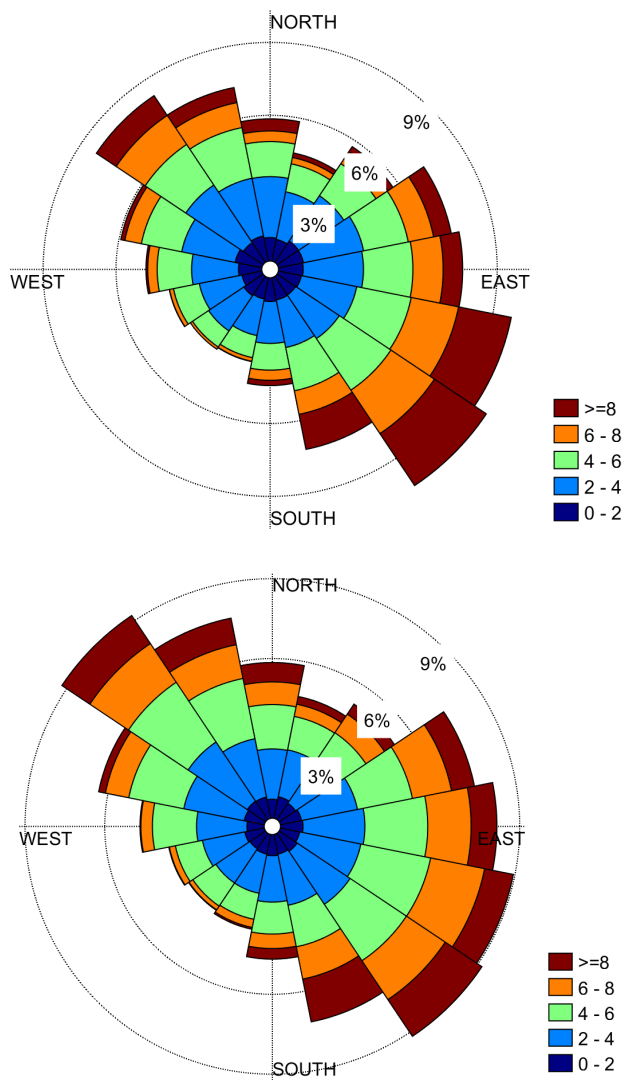


图 4.6-12 A-5 区块单点海流计观测的年均流场特征玫瑰图

(上: 5350 m; 下: 5250 m)

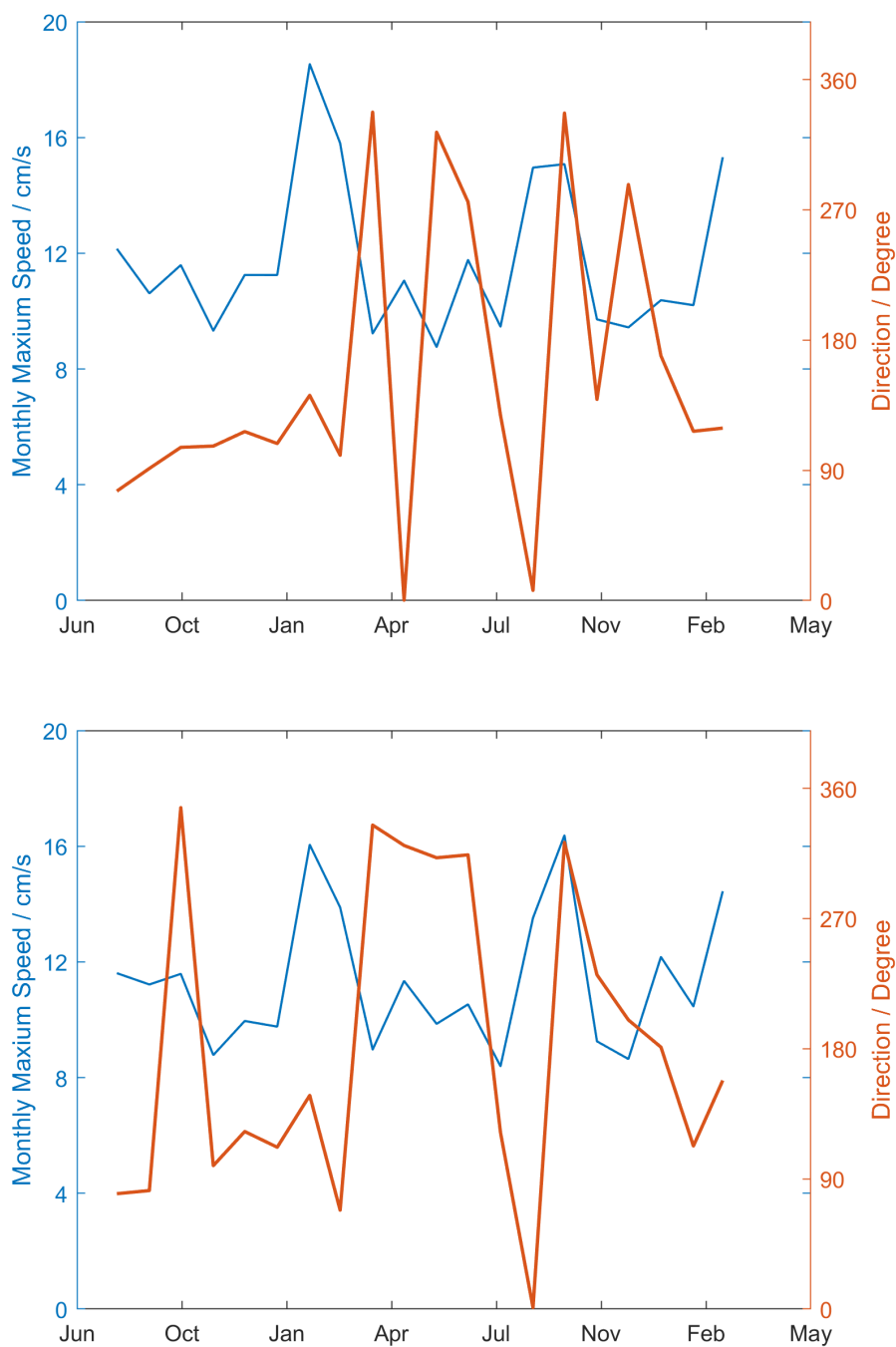


图 4.6-13 A-5 区块近底层极值流速及其方向

(上: 5350 m; 下: 5250 m)

水深 5350 m, 每个月的流速和流向分布的玫瑰图如图 4.6-14 所示。锚系点各观测水层月平均最大流速和对应流向见表 4.6-5。

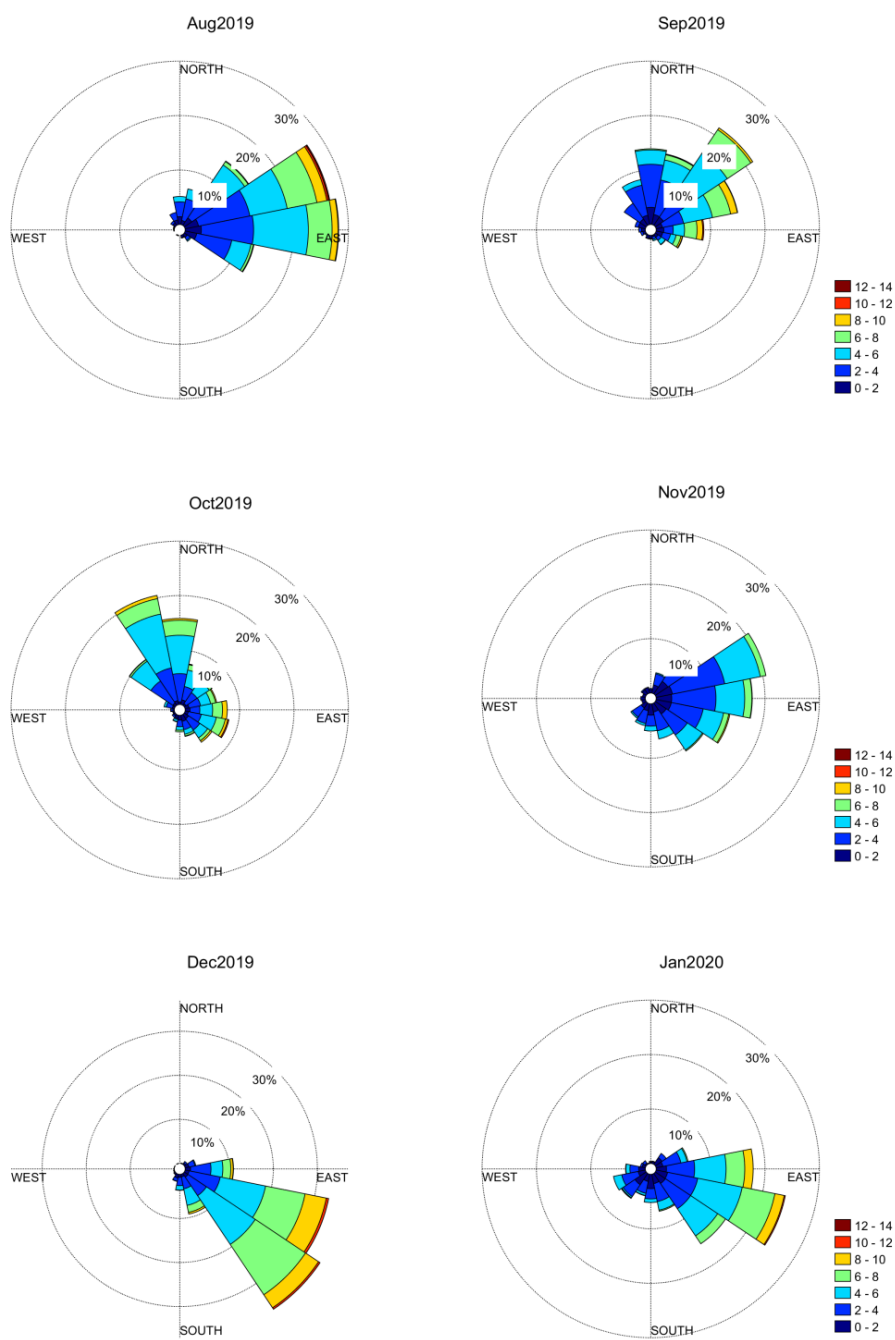


图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布

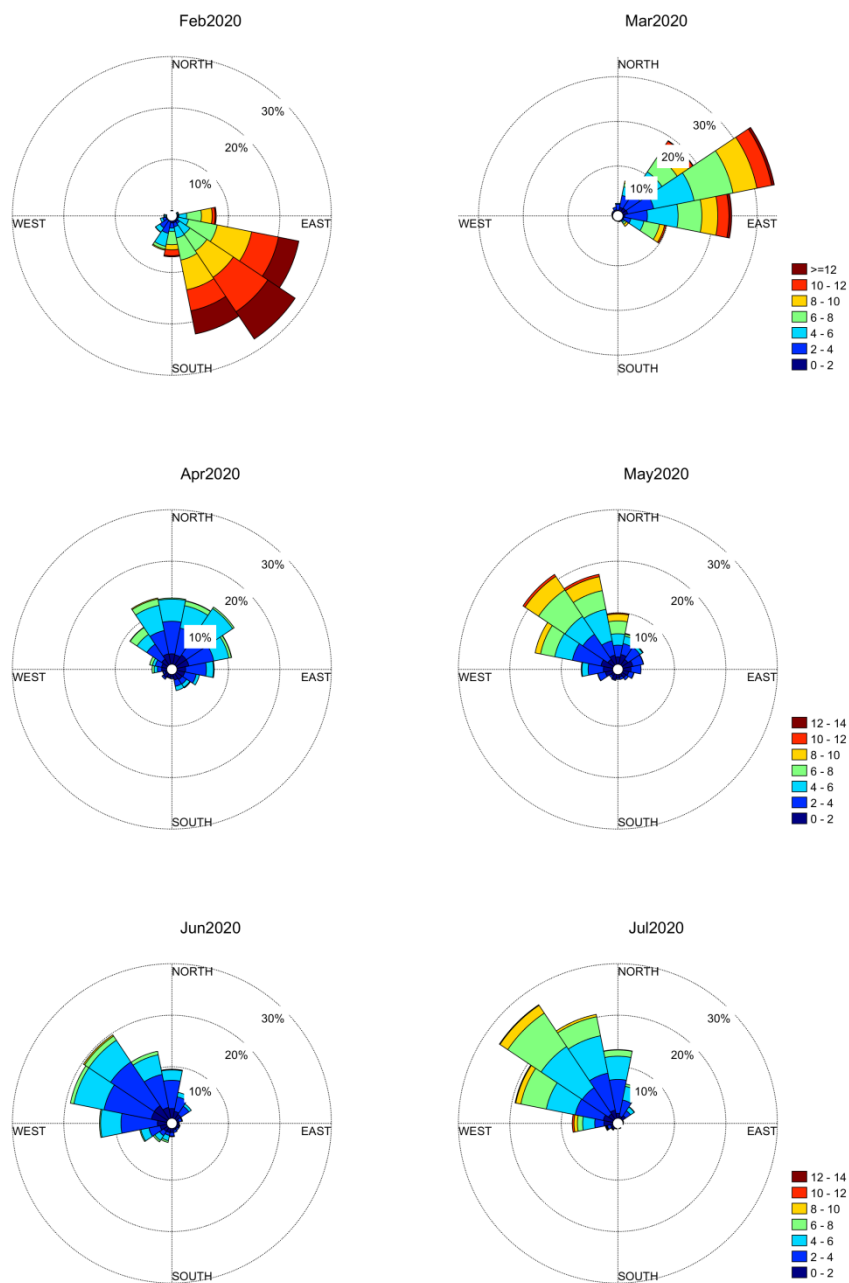


图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布（续前）

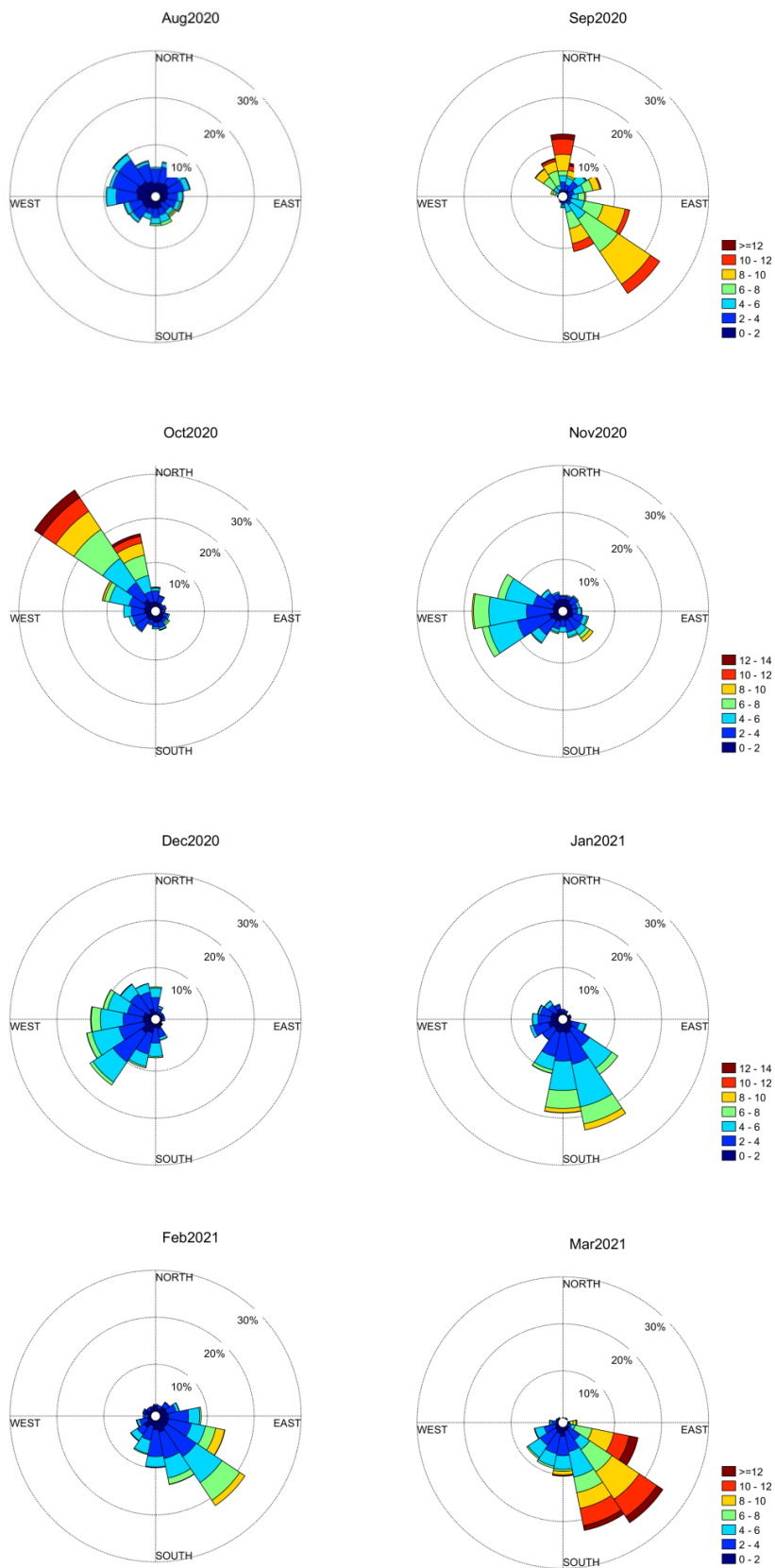


图 4.6-14 水深 5350 m 月流速及其方向分布（续前）

表 4.6-5 锚系点各观测水层月平均最大流速和对应流向

海流计 编号	水深 (m)	2019 年 8 月		2019 年 9 月		2019 年 10 月		2019 年 11 月		2019 年 12 月		2020 年 1 月	
		最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)
314	1930	16.451	79.674	18.045	93.959	16.877	90.786	19.419	99.705	16.850	71.602	19.481	100.149
1016	5150	4.488	79.355	3.256	50.401	1.297	92.726	2.316	83.903	3.167	158.404	1.704	124.233
1018	5250	11.611	79.766	11.220	81.930	11.587	346.697	8.779	99.127	9.958	122.744	9.763	111.871
1049	5350	12.154	75.636	10.613	91.278	11.591	105.864	9.324	106.747	11.25	116.755	11.248	108.503
海流计 编号	水深 (m)	2020 年 2 月		2020 年 3 月		2020 年 4 月		2020 年 5 月		2020 年 6 月		2020 年 7 月	
		最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)
314	1930	14.950	140.652	11.040	56.609	11.307	125.991	14.987	14.765	15.023	62.421	19.695	44.894
1016	5150	3.783	145.235	5.361	78.011	0.784	61.860	-1.695	356.671	-2.601	318.745	-2.452	325.065
1018	5250	16.051	147.727	13.884	68.334	8.969	334.610	11.344	320.500	9.859	312.014	10.533	314.010
1049	5350	18.534	141.818	15.801	100.402	9.227	337.519	11.053	0.21	8.76	323.645	11.769	275.427
海流计 编号	水深 (m)	2020 年 8 月		2020 年 9 月		2020 年 10 月		2020 年 11 月		2020 年 12 月		2021 年 1 月	
		最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)
314	1930	13.510	44.238	21.047	120.856	14.722	142.537	13.492	140.864	13.341	283.765	16.451	252.118

1016	5150	-0.356	21.516	2.454	148.725	-2.937	326.278	-2.062	269.635	-2.437	199.942	0.532	179.435
1018	5250	8.395	121.995	13.521	1.026	16.374	322.661	9.254	231.070	8.643	199.862	12.171	181.074
1049	5350	9.464	127.935	14.959	7.003	15.078	336.909	9.714	138.955	9.438	287.507	10.377	169.166
海流计 编号	水深 (m)	2021 年 2 月		2021 年 3 月									
		最大流速 (cm/s)	流向 (°)	最大流速 (cm/s)	流向 (°)								
314	1930	13.852	256.528	16.069	241.104								
1016	5150	1.354	139.804	2.250	152.857								
1018	5250	10.462	112.723	14.444	158.072								
1049	5350	10.205	116.969	15.319	119.17								

4.7 海水化学特征

中国五矿多个航次对 A-5 区块的海水化学基线特征开展了调查，本节数据主要来源于中国五矿 2019 年、2021 年和 2022 年航次。航次期间使用 CTD 采水器采集了全水深的海水样品。海水化学调查项目主要包括海水中 pH、溶解氧（DO）、硝酸盐（ NO_3^- ）、硅酸盐（ SiO_3^{2-} ）、活性磷酸盐（ PO_4^{3-} ）、亚硝酸盐（ NO_2^- ）、铵盐（ NH_4^+ ）、总悬浮颗粒物（TSM）、颗粒有机碳（POC）等。

其中有 3 个 CTD 站（另有一个邻近）位于 A-5 区块的 PRZ1（图 4.7-1 浅绿色矩形），有 3 个 CTD 站位于 A-5 区块的 IRZ（图 4.7-1 红色矩形）。

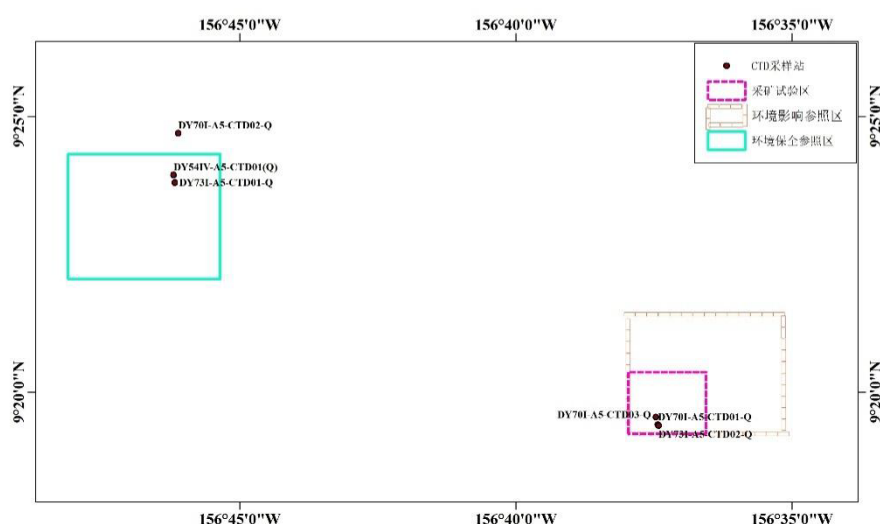


图 4.7-1 A-5 区块 IRZ 和 PRZ1 位置及历次 CTD 采样站位分布

4.7.1 pH

A-5 区块 IRZ 和 PRZ1 历次 CTD 调查站位的 pH 值变化范围为 7.55-8.37（图 4.7-2a），平均值为 7.78。整个水柱中海水 pH 值呈现明显层化分布特征，pH 值在表层水体最高，在表层至 100 m 左右出现跃层，pH 值一般在 300 m 的水层中达到最低。随着深度继续增加，pH 值缓慢上升，在 2000 m 至底层水体中 pH 值保持稳定，在 7.6-7.8 之间。

在 CC 区东部，NORI-D 区域 pH 值变化范围为 7.61-8.04 (NORI 2022)，数值上与 A-5 区块相似；在 pH 值剖面变化特征上，A-5 区块和 NORI-D 区域也基本一致，但 A-5 区块 pH 最小值水层高于 NORI-D 区域。

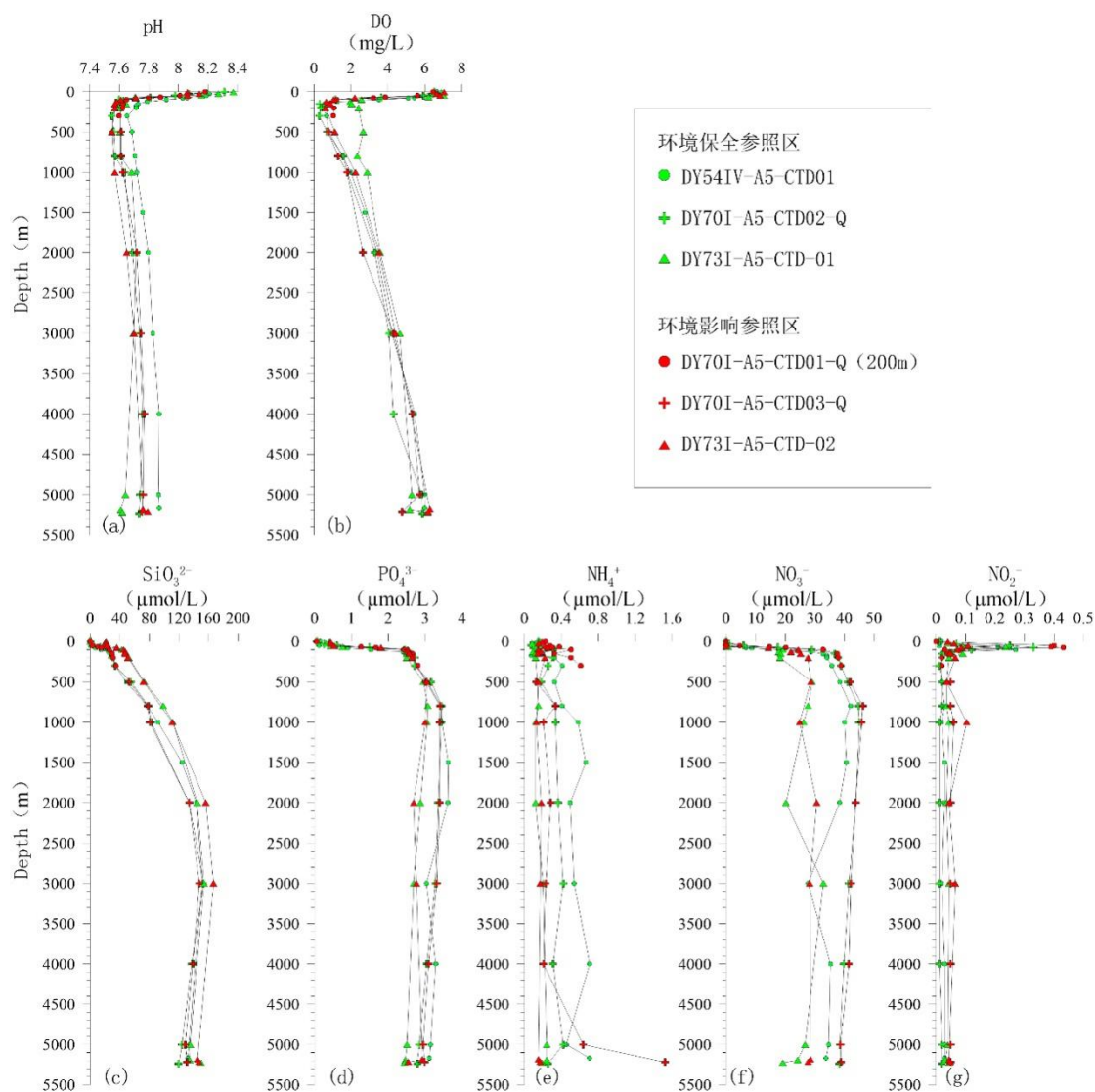


图 4.7-2 A-5 区块海水 pH、DO 含量和营养盐垂直分布特征

4.7.2 溶解氧 (DO)

A-5 区块 IRZ 和 PRZ1 历次 CTD 调查站位的 DO 测量结果如图 4.7-2b 所示。DO 含量变化范围为 0.29-7.04 mg/L，平均值为 3.53 mg/L。水柱中 DO 含量的变化趋势与 pH 值的变化趋势较为相似，呈现明显层化分布。DO 含量最高值出现在表层，表层由于海水中大量浮游植物的光合作用以及海气交换作用，导致海水 DO 含量较高。随着深度的增加，水体中 DO 含量急剧减少，在 50-100 m 间出现跃层，而 100-1000 m 之间不同站位的 DO 含量持续降低至小于 2.0 mg/L，呈现太平洋海域典型的 DO 极小值层特征，表现为显著的缺氧现象。在 1000 m 以下，随着深度继续增大，DO 含量开始缓慢上升，底层海水 DO 含量又回到

4.0-6.0 mg/L。

NORI-D 区域 DO 含量变化范围约为 0-7.6 mg/L, DO 含量在表层最高, 然后在 100 m 内快速下降, 在水深 80-1500 m 间 DO 含量小于 2 mg/L, 从水深 1500 m 至近底层 DO 含量逐渐增加至 4.5 mg/L。A-5 区块 DO 含量剖面变化与 NORI-D 区域基本一致, 但 DO 含量极小值层比 NORI-D 区域浅, 且 A-5 区块近底层 DO 含量高于 NORI-D 区域近底层 DO 含量 (NORI 2022)。

4.7.3 营养盐 (Nutrients)

A-5 区块的营养盐测量结果如图 4.7-2 所示。

NH_4^+ 含量都较低, 变化范围为 0.07-1.52 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 0.28 $\mu\text{mol/L}$ 。水体中的 NH_4^+ 含量变化较为不稳定, 在 1000 m 以上呈现较大波动, 在 1000-5000 m 变化相对较小但站间有一定差异, 在近底层站间 NH_4^+ 含量差异略有扩大。

NO_2^- 含量的变化范围为 0.00-0.43 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 0.07 $\mu\text{mol/L}$ 。 NO_2^- 含量在最表层很低, 一般在 75 m 左右出现极大值, 而后迅速降低; 在 100 m 以深, NO_2^- 含量保持相对稳定, 无明显变化趋势。

NO_3^- 含量变化范围为 0.00-46.22 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 25.83 $\mu\text{mol/L}$ 。 NO_3^- 含量在表层都很低, 在表层至 800 m 逐渐增加, 一般在 800 m 水深左右 NO_3^- 含量达到最大值, 然后 NO_3^- 含量缓慢降低。

PO_4^{3-} 含量变化范围为 0.06-3.62 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 2.30 $\mu\text{mol/L}$ 。 PO_4^{3-} 含量的垂直分布特征与 NO_3^- 含量的分布特征相似, 表层 PO_4^{3-} 含量相对较低, 随着深度的增加, PO_4^{3-} 含量逐渐增加, 在 800 m 水深左右 PO_4^{3-} 含量达到最大值, 然后 PO_4^{3-} 含量缓慢降低。

SiO_3^{2-} 含量范围为 0.00-166.89 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 68.79 $\mu\text{mol/L}$ 。 SiO_3^{2-} 含量在表层相对较低, 随着深度的增加, SiO_3^{2-} 含量逐渐增加, 在 3000 m 水深左右 SiO_3^{2-} 含量达到最大值, 然后 SiO_3^{2-} 含量随深度增加又缓慢降低。

综上所述, A-5 区块中选划的 PRZ1 和 IRZ 内的营养盐含量剖面变化基本相似。

CC 区东部 NORI-D 合同区 NO_3^- 和 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 含量均在表层 0-50 m

出现最低值，在 50-100 m 转为富营养水域，在水深 950-1500 m 处，大部分营养盐含量均在 DO 极小值层底部出现最大值， SiO_3^{2-} 含量则在取样深度 2500-3000 m 具有最大值。A-5 区块 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 含量剖面基本与 NORI-D 区域一致 (NORI 2022)。

4.7.4 总悬浮颗粒物 (TSM)

本节总悬浮颗粒物 (TSM) 数据来源于中国五矿 2021 年航次 CTD 调查。

A-5 区块的 TSM 含量测量结果如图 4.7-3 所示。其中 DY70I-A5-CTD01&03 与 DY70I-A5-CTD02 的 TSM 含量变化范围分别为 0.08-1.71 mg/L，0.14-2.05 mg/L，平均值分别为 0.89 mg/L，0.90 mg/L。这两个站位的 TSM 含量的垂直变化趋势较为相近，在上层 300 m 以内的 TSM 含量相对较高。在 300 m 到 4000 m 水深，TSM 含量较低且变化不大；而在 5000 m 以下，TSM 含量出现极大值，可能是受底层沉积物再悬浮作用的影响。

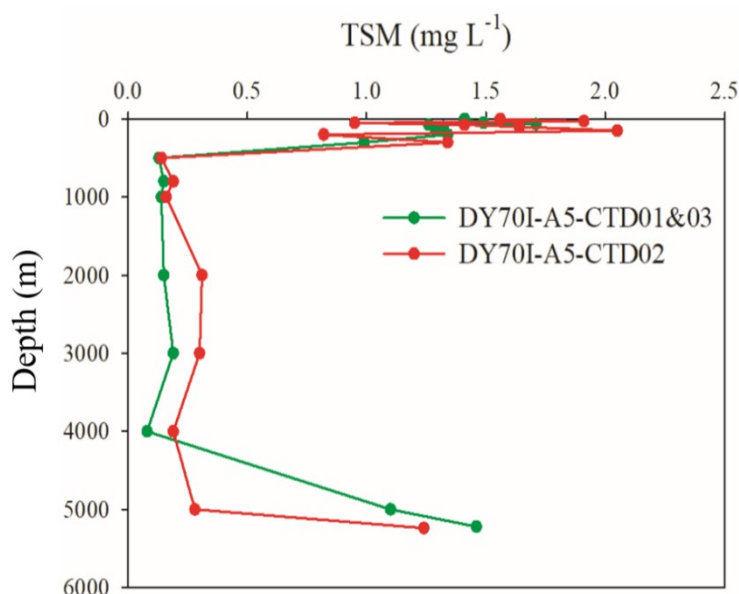


图 4.7-3 A-5 区块海水总悬浮颗粒物 (TSM) 含量分布特征

4.7.5 颗粒有机碳 (POC)

A-5 区块的颗粒有机碳 (POC) 测量结果如图 4.7-4 所示。其中 DY70I-A5-CTD01-Q&03-Q 站位与 DY70I-A5-CTD02-Q 站位的 POC 含量分别为 0.006-0.045 mg/L，0.008-0.043 mg/L，平均值分别为 0.019 mg/L，0.022 mg/L。POC 含量在

表层至 300 m 水体中相对较高，而后随着水深的增加，POC 含量逐渐减少，在 2000 m 的水深 POC 含量达到稳定。在 2000 m 以深，POC 含量稳定在较低水平。

CC 区东部 NORI-D 区域 POC 含量在 0-50 m 层位相对较高，随深度的增加呈现指数性下降的特征 (NORI 2022)，总体上与 A-5 区块 POC 含量剖面变化特征一致。

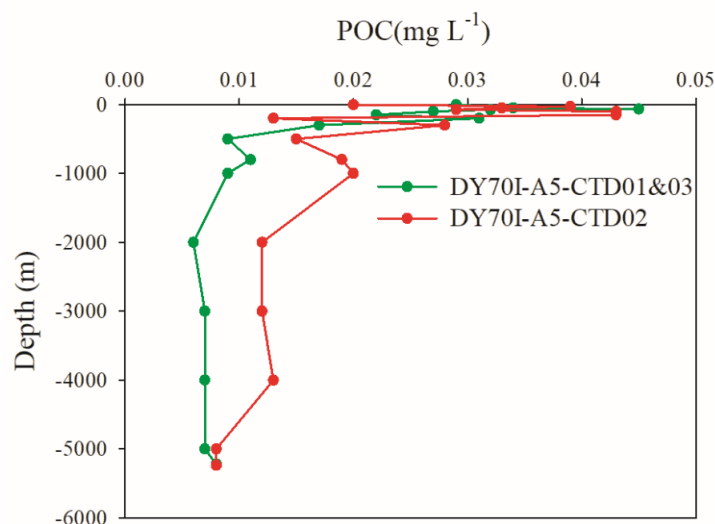


图 4.7-4 A-5 区块海水颗粒有机碳 (POC) 含量分布特征

4.7.6 溶解无机碳 (DIC) 和总有机碳 (TOC)

A-5 区块的溶解无机碳 (DIC) 测量结果如图 4.7-5 所示。DY50I-A5-S06-CTD10 站位的 DIC 含量在 1979.2-2416.4 $\mu\text{mol/L}$ 之间，平均值为 2293.9 $\mu\text{mol/L}$ 。在表层 100 m 以浅的水体，DIC 含量随着水深的增加快速增加，在 100-2500 m，DIC 含量随着水深的增加而缓慢增加到最大值，水深超过 2500 m，DIC 含量随着水深增加而缓慢减少。

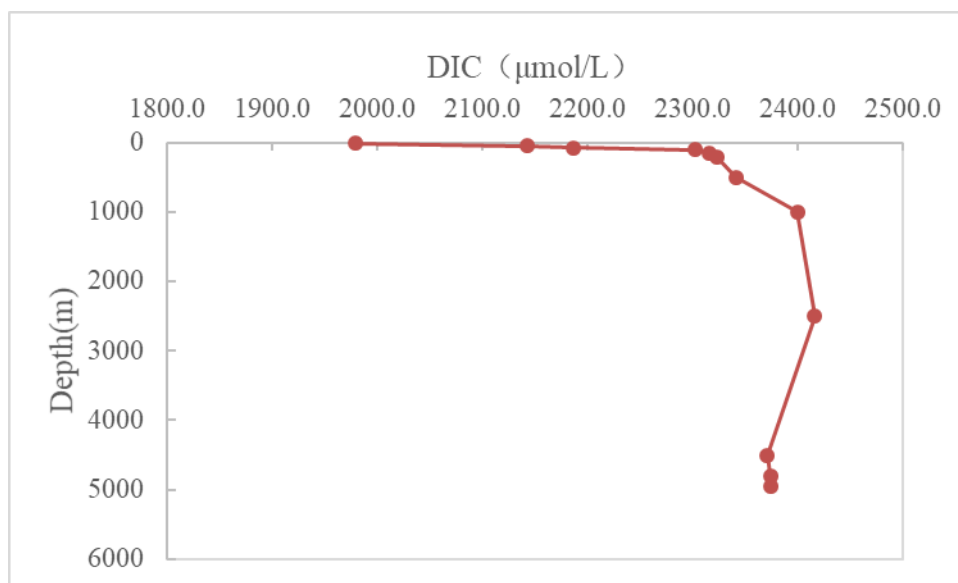


图 4.7-5 A-5 区块海水溶解无机碳 (DIC) 含量分布特征

A-5 区块的总有机碳 (TOC) 测量结果如图 4.7-6 所示。DY50I-A5-S06-CTD10 站位的 TOC 含量在 0.56-1.13 mg/L 之间, 平均值为 0.71 mg/L。在 1000 m 以浅的水体, TOC 含量随着水深的增加快速减少, 1000-4800 m, TOC 含量随着水深的增加出现较大的波动, 水深在 1000 m 和 4800 m 处出现最低值, 仅为 0.56 mg/L。水深超过 4800 m, TOC 含量随着水深增加又出现快速增加的趋势。

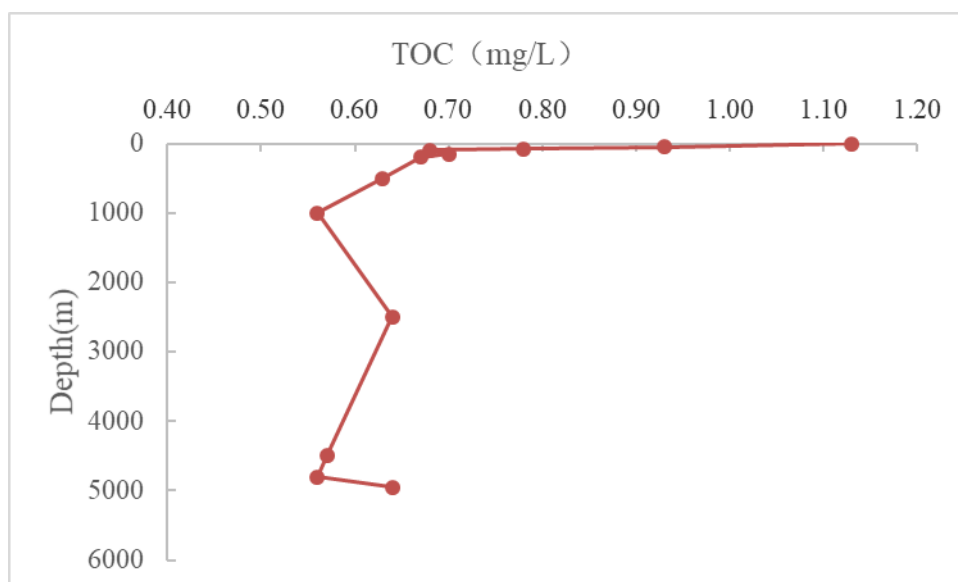


图 4.7-6 A-5 区块海水总有机碳 (TOC) 含量分布特征

4.7.7 沉积物通量特征

图 4.7-7a 显示了 2019 年 8 月至 2020 年 8 月期间锚系 DY70II-A5-MX01 站在

2000 m 水深处捕获的沉降颗粒物样品的总通量时间序列变化情况。结果显示，2019 年 8 月至 2020 年 8 月期间，该沉积物捕获器在 2000 m 水深处捕获的沉降颗粒物年平均总通量为 $6.98 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，并在季节尺度上存在明显的差异，相对较高的通量出现在 2020 年 3 月至 6 月，较低的通量则出现在 2019 年 8 月至 2020 年 2 月。

图 4.7-7b 显示了 2019 年 8 月至 2020 年 8 月期间锚系 DY70II-A5-MX01 站约 4685 m 水深处沉降颗粒物样品通量的变化情况。结果显示，2019 年 8 月至 2020 年 8 月，该沉积物捕获器在 4685 m 水深处捕获的沉降颗粒物年平均总通量为 $4.37 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。相较于上层（2000 m 水深处），该层的沉降颗粒物总通量相对较低；同时，该层沉降颗粒物通量在季节尺度上同样存在明显的差异，相对较高的通量出现在 2020 年上半年，较低的通量则出现在 2019 年下半年。在 2019 年 8 月至 2020 年 8 月期间，2000 m 与 4685 m 处的沉降颗粒物通量峰值出现的时间十分相近，均在 2020 年 4 月至 5 月期间。

在 CC 区东部 NORI-D 区域，2000 m 水层的沉降颗粒物总通量变化范围约为 $20\text{-}88 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，离底 500 m 水层的沉降颗粒物总通量变化范围约为 $4\text{-}68 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，最大值均出现于 2021 年 4 月初 (NORI 2022)，这与 A-5 区块出现高通量的月份一致。总体来看，NORI-D 区域两个水深的沉降颗粒物总通量均大于 A-5 区块。

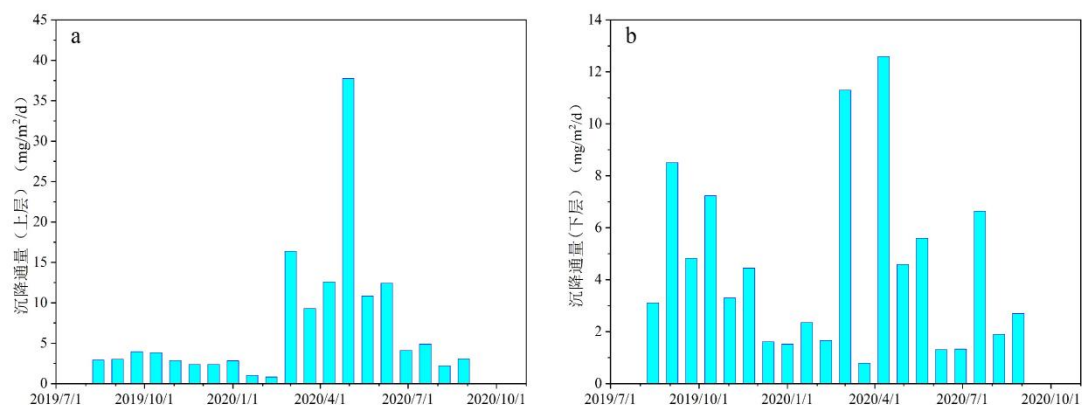


图 4.7-7 DY70II-A5-MX01 站沉降颗粒物通量变化（2019 年 8 月至 2020 年 8 月）

a: 上层（2000m 水深处）；b: 下层（4685m 水深处）

4.8 自然灾害

本节见 10.1 和 10.2。

4.9 噪音和光

海洋中的环境噪声通常根据其来源进行分类，这些来源可能包括自然过程，如风力驱动的波浪、降雨、地震活动和海洋生物。海洋噪音的主要来源在频率和时间上各不相同。次声频段（1-20 Hz）的海洋噪声是由地震活动和地表相互作用产生的。深海中 20-200 Hz 的噪音则主要是由商船产生。在海上交通繁忙的地区，噪音水平较高。此外，风驱动的表面波是 200 Hz-20 kHz 频段噪声的主要来源（图 4.9-1），而上述这些与军用声纳和地震勘测等其他人为来源产生的噪声构成了海洋总噪声 (Hildebrand, 2009)。这些人为噪音现在被认为会对海洋生物有广泛的潜在影响 (Hawkins et al., 2020)。

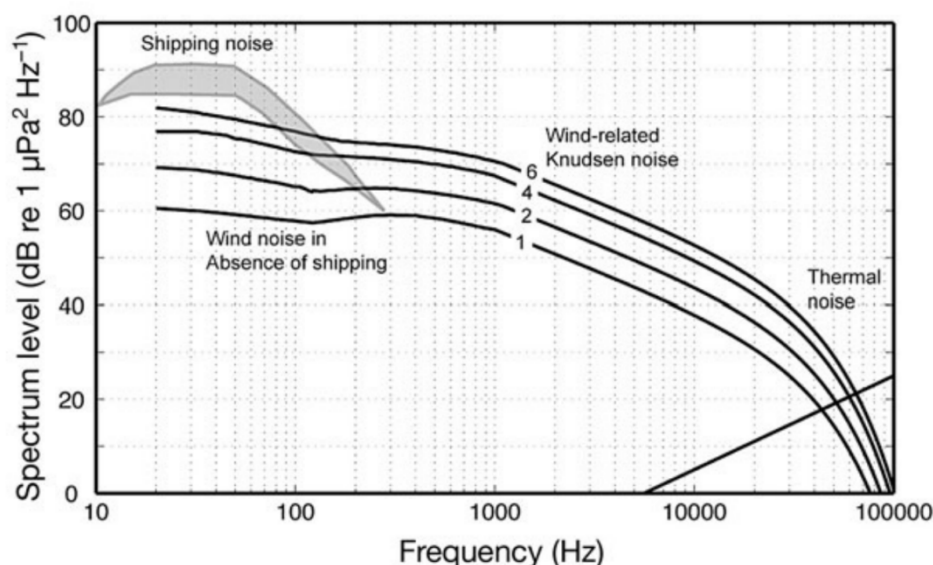


图 4.9-1 深水区（1000 m 深度）广义海洋环境噪声谱级

(Generalized ocean ambient noise spectral levels for a deep-water site with the receiver located at 1000 m depth) (Hildebrand, 2009)

CC 区西部的水下噪音数据极为缺乏，在与 A-5 区块临近的中国大洋协会多金属结核合同区，Niu et al. (2021)利用部署在水下 300 m 的水听器对海洋噪音基线开展了长期监测（图 4.9-2 至图 4.9-4）。监测结果表明，远距离的船舶和鲸类发声产生的低频高噪声级分别在 70-100 dB（<100 Hz）和 64-93 dB（100-200 Hz）

之间。高频(>200 Hz)的噪音水平较低,在 53-75db 之间,通常由风主导。同时,这一频率下的冬季噪音水平比夏季高出约 5 dB,这与风速的季节性变化一致。CC 区东部的水下噪音数据主要来自 NORI-D 合同区,利用搭载在长锚系上的水听器记录浅层(200-1000 m)和深层(近底层)水下噪声,研究结果表明浅层均方根声压级范围 95-118 dB re 1 μ Pa, 平均值 106 dB re 1 μ Pa; 浅层峰值声压级范围 108-125 dB re 1 μ Pa。深层均方根声压级范围 89-112 dB re 1 μ Pa, 平均值 100 dB re 1 μ Pa; 深层峰值声压级范围 102-118 dB re 1 μ Pa, 平均值 111 dB re 1 μ Pa (NORI 2022)。

地震产生的低频噪声(<50 Hz)的最大范围为 80-94 dB /Hz。由于远处船只的噪音和鲸的发声,所有月份频率都以低于 100 Hz 的频率为主。以风浪为主频率(>200 Hz)的频谱水平较低(<65 dB / 1 μ Pa²/ Hz)。在 50-300 Hz 频率范围内,月变化较大(200 Hz 时约为 13 dB re 1 μ Pa²/Hz),而在 50 Hz 以下和 300 Hz 以上频率范围内,月变化较小(40 Hz 和 500 Hz 时约为 6 dB re 1 μ Pa²/Hz)。须鲸发出的声音的基本频率低于 1 kHz,而在这项研究中记录了两条不同种类鲸的发声。长须鲸(*Balaenoptera physalus*)在 20-30 Hz 频率范围内产生的脉冲导致噪声增加(5-8 dB),这在大多数月份的平均频谱中都可以看到。东北太平洋蓝鲸(*Balaenoptera musculus*)在 9-12 月和 4-5 月期间产生的信号明显,环境噪声水平在 44-48 Hz 范围内增加了约 2 dB。由于鱼类的发声,在 5 月至 7 月期间,200 Hz 至 500 Hz 频率的噪声频谱水平增加到约 10 dB / 1 μ Pa²/Hz。

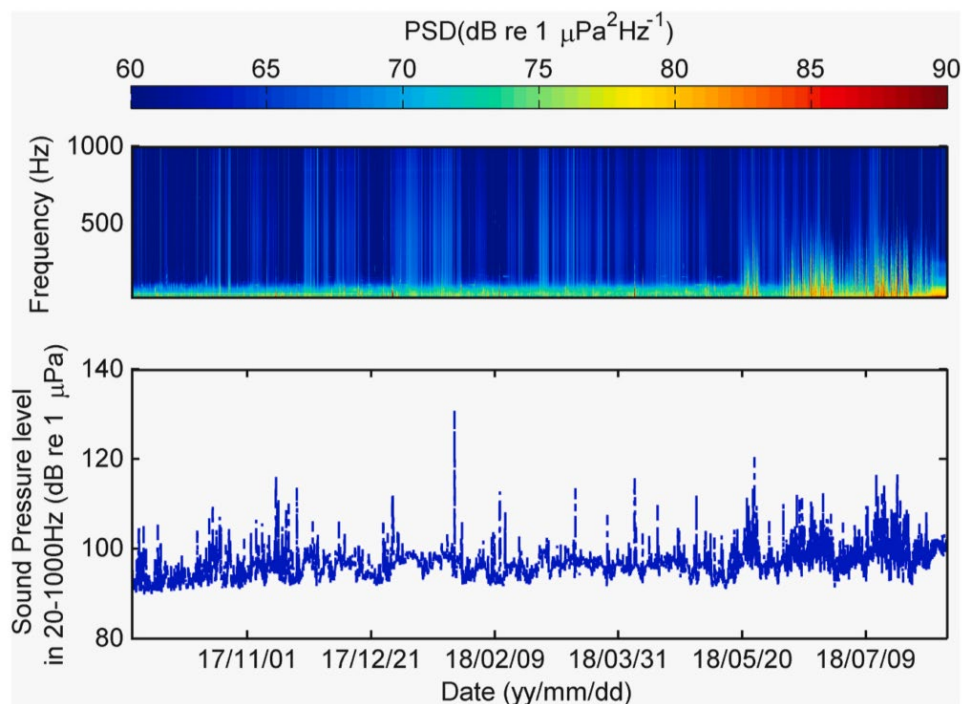


图 4.9-2 300 m 深度的水听器在 20-1000 Hz 频率中记录的功率谱密度(PSD)和声压级(SPL)
(PSD and SPL in 20–1000 Hz of acoustic data acquired with an autonomous acoustic recorder
installed at depth of 300 m) (Niu et al., 2021)

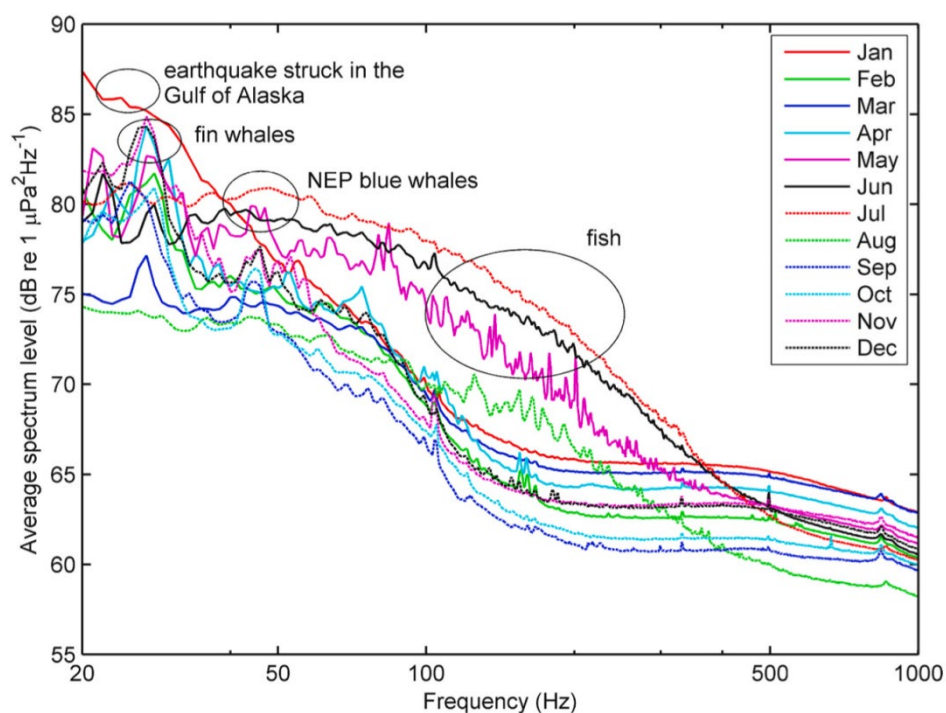


图 4.9-3 300 m 深度的水听器记录的 20-1000 Hz 频率范围内的月平均声压谱级
(不同的线条类型和颜色表示不同的月份, 圈出的区域分别表示代表地震活动、长须
鲸叫声、东北太平洋蓝鲸叫声和鱼类的频段)

(Average monthly sound pressure spectrum levels from 20 Hz to 1000 Hz. Different line types

and colors indicate individual months. Circled areas indicate frequency bands representative of seismicity, fin whale calls, northeast Pacific (NEP) blue whale calls, and fish, respectively, with an autonomous acoustic recorder installed at depth of 300 m) (Niu et al., 2021)

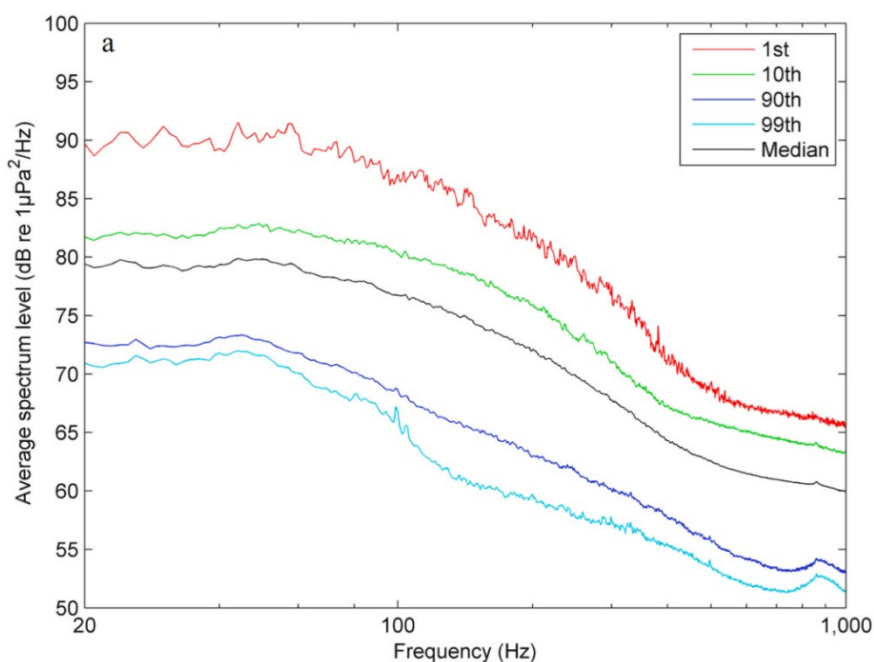


图 4.9-4 300 m 深度的水听器记录的七月声压谱百分位频率分布

(不同的颜色表示不同的百分位数) (Niu et al., 2021)

在环境基线调查过程中，我们在 A-5 区块的锚系潜标上安装了水听器，用于监测 A-5 区块噪声水平。目前搭载了水听器的深海锚系潜标系统尚未回收。

在本次试验中，我们将对采矿车的机械部件产生的噪声和采集、行走过程中产生的噪声开展详细测量。

A-5 区块距离人类居住地非常远，上层海洋一般不存在人工照明，只有一些船只偶尔经过。在本次试验中，我们将对采矿车在海底试验时的光线及衰减情况开展测量。

4.10 现有物理化学环境总结

A-5 区块地形总体较为平坦，区内发育海丘、海丘群、海山和山间盆地等地形地貌，海盆区面积占比为 70.8 %。AUV 近底声学调查结果显示，采矿活动区范围内起伏度整体较小，无明显陡坎。IRZ 和 PRZ1 均位于海盆区，地形平缓，高程差小于 20 m。

采矿活动区结核丰度变化范围为 0.59-25.92 kg/m²，平均值为 14.04±4.69

kg/m^2 ；甲板覆盖率变化范围为 2-85%，平均值为 $43 \pm 15\%$ ；甲板覆盖率与丰度具有良好的正相关性 ($R^2=0.82$)，采矿活动区的结核以暴露型为主。IRZ 和 PRZ1 区域内结核丰度相似，变化范围为 $10-15 \text{ kg/m}^2$ ，镍当量品位 (NEG) 相近，表明两区资源情况具有相似性。

A-5 区块表层沉积物粉砂粒级含量最高 (平均约 53%)，其次是粘土粒级含量 (平均约 35%)，而砂的粒级含量相对较低；沉积物的 Cd、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 等重金属含量分布较为不均匀，重点工作区的东北角和西南角重金属含量较高以外，其它区域的重金属含量整体较低。相反，重点工作区的东北角和西南角 TOC 较低 ($<0.25\%$)，而其它区域 TOC 含量介于 0.2-0.45% 之间。研究表明，IRZ 和 PRZ1 内沉积物的粒径、重金属和有机碳含量都较为接近。

IRZ 和 PRZ1 沉积物 30 cm 以内孔隙水重金属含量整体较低，Cr 和 Cd, Zn, Ni 和 Pb 等重金属含量与箱式上覆水接近；两区内孔隙水营养盐的总体含量比较接近，各营养盐含量随深度变化的规律也比较类似；30 cm 以内孔隙水总碱度稳定，基本保持在 2.4 mmol/L 。

A-5 区块内多管沉积物 10 cm 内叶绿素 *a* 单位湿重含量为 $0-0.0239 \mu\text{g/g}$ ，单位干重含量为 $0.0001-0.1058 \mu\text{g/g}$ 。受埋藏降解作用的影响，叶绿素 *a* 含量呈现逐渐下降趋势，且表层 3 cm 以内叶绿素含量占比超过 80%。

原位土工力学测试结果显示，A-5 区块沉积物 1 m 深度内贯入强度和剪切强度随深度增加，分别呈非线性和线性增长趋势。

温盐剖面观测结果显示，A-5 区块全水深温度年际变化趋势相似。在不同年份，上层 200 m 温度垂向变化趋势基本相似，但跃层位置略有差异，变动幅度为约 40 m；深层温度变化趋势相似，量值差异约为 $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ 。A-5 区块全水深盐度在 2019、2021 和 2022 年年际变化趋势相似。

走航 ADCP 实测流场分析结果显示该区域不同年份海流的流速与流向变化均较显著。2017 年航次与 2021 年航次观测到的海流速度较大，局部可超过 1 m/s ，而 2019 年与 2022 年的观测海流通常小于 0.5 m/s 。区块内海流流向均体现出显著的赤道逆流，表明赤道逆流在该海域的主导地位。

利用锚系潜标获取该区域深海长期海流监测结果显示，深层流 (5150 m, 5250 m 和 5350 m) 流速年平均为 $4.56-4.83 \text{ cm/s}$ ，平均流向为偏东向流。中层

(1930 m) 的海水流场以东向流为主, 流速集中在 6-12 cm/s, 平均流速为 7.34 cm/s。

搭载于锚系的浊度计监测结果显示, 大部分时间底层(离底 20m)和近底层(离底 100 m)海水浊度临界设备检测限, 整体浊度处于 0.4 FTU 以下。

A-5 区块海水 pH 值呈现明显层化分布特征, 表层水体 pH 值最高, 在表层至 100 m, pH 值快速下降, 在 300 m 左右的水层中 pH 值达到最低; 之后, 随着深度的增加, pH 值缓慢上升, 在 2000 m 至底层水体中 pH 值趋于稳定, 在 7.6-7.8 之间。

海水溶解氧(DO)含量最高值出现在表层, 随后水体中 DO 含量急剧减少, 100-200 m 之间不同站位的 DO 含量均持续降低至小于 3.0 mg/L, 出现缺氧的现象。在 1000 m 以下, 随着深度继续增大, DO 含量开始缓慢上升, 回到 4.0-6.0 mg/L。

A-5 区块无机氮(含铵盐、硝酸盐和亚硝酸盐)、硅酸盐和活性磷酸盐含量表现为: 硅酸盐>无机氮>活性磷酸盐。水体中 POC 含量与总悬浮颗粒物(TSM)含量存在显著性相关, POC 含量随深度的变化可能与水体的叶绿素(浮游生物)垂直分布有关, 在次表层较强的浮游生物活动可能会产生较高的 POC 含量。

4.11 参考文献

梁楚进. 中国多金属结核开辟区海域的内部混合和近底层低频波动[D].中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.

倪建宇, 周怀阳, 彭晓彤, 梁楚进. 中国多金属结核开辟区的深海环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, (01): 43-47.

张国祯, 曾瑞坚, 张学华. 东太平洋我国开辟区底层海流锚泊观测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, (03): 118-123.

Aller, J. Y. (1997). "Benthic community response to temporal and spatial gradients in physical disturbance within a deep-sea western boundary region." *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(1): 39-69.

Dutkiewicz, A., Müller, R. D., O'Callaghan, S., & Jónasson, H.. Census of seafloor sediments in the world's ocean. *Geology*, G36883-1. doi: 10.1130/G36883.1 (2015).

Dutkiewicz, A., Müller, R. D., Wang, X., O'Callaghan, S., Cannon, J., & Wright, N. M. Predicting sediment thickness on vanished ocean crust since 200 Ma. *Geochemistry*,

- Geophysics, Geosystems, 18, 4586–4603 (2017).
- Dutkiewicz, A., et al.. "Environmental predictors of deep-sea polymetallic nodule occurrence in the global ocean." *Geology* 48: 293-297 (2020).
- International Seabed Authority (ISA). A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. Technical Study 6, Kingston, p. 211 (2010).
- Hawkins, Anthony D.. "The Potential Impact of Offshore Wind Farms on Fishes and Invertebrates." *Advances in Oceanography & Marine Biology* (2020): n. pag.
- Hildebrand, J. A. (2009). "Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean." *Marine Ecology Progress Series* 395: 5-20.
- Macdonald, K.C., Fox, P.J., Alexander, R.T., Pockalny, R., Gente, P. Volcanic growth faults and the origin of Pacific abyssal hills. *Nature*, 380, 125-129 (1996).
- Müller, R. D., Seton, M., Zahirovic, S., et al. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 44, 107-138 (2016).
- NORI. 2022. Collector Test Study – Environmental Impact Statement – Testing of polymetallic collector system components in the NORI-D contract area, Clarion Clipperton Zone, Pacific Ocean. Jamaica.
- Straume, E.O., Gaina, C., Medvedev, S., Hochmuth, K., Gohl, K., Whittaker, J. M., et al.. GlobSed: Updated total sediment thickness in the worlds oceans. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20. DOI: 10.1029/2018GC008115 (2019).

5 说明现有的生物环境

5.1 关键信息

本章主要说明中国五矿合同区现有的生物环境特征，首先根据文献和公开资料开展区域生物环境分析，显示该区域呈现低生物量高多样性特征。

中国五矿在 A-5 区块开展了初级生产力、叶绿素 *a*、微生物、浮游植物、浮游动物、小型底栖生物、大型底栖生物、巨型底栖生物、食腐生物等生物多样性调查。本章介绍了生物基线调查的结果，包括表层、中层、底层环境不同类群生物的数量分布和多样性特征，评估认为此次试验的 IRZ 与 PRZ1 生物环境特征特别是底层生物特征相似，与 CC 区其他区域特别是 CC 区西部有一定相似性。

5.2 区域概述

根据全球尺度的生物地理分区来看，东太 CC 区上层生物群落有 3 个生物地理省，分别为中北太平洋区和赤道太平洋区和热带东太平洋区（图 5.2-1）。从底层生物分区来看，东太 CC 区主要分布有 2 个生物地理省，分别为中北太平洋区和赤道太平洋区（图 5.2-2）。但 CC 区尺度的生物地理分区目前尚没有相关研究。

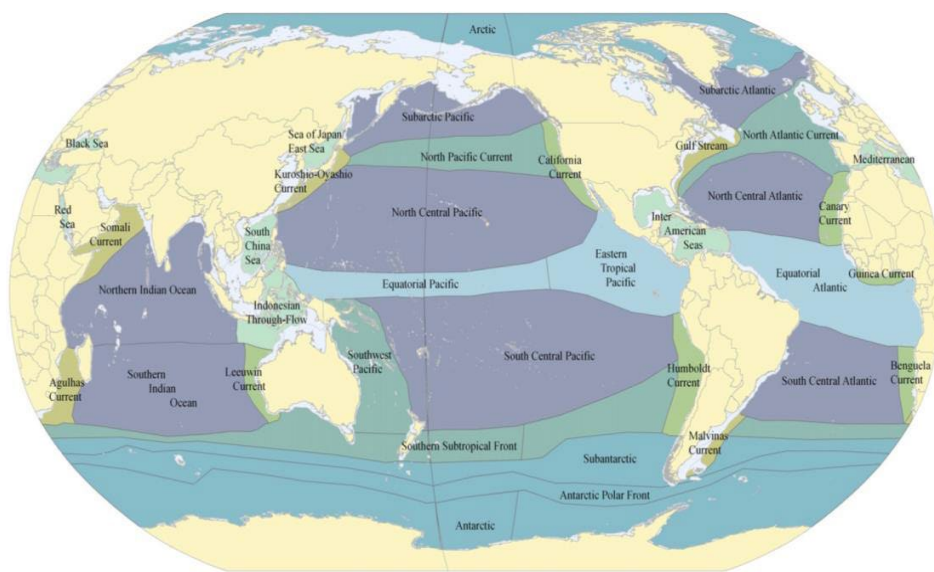


图 5.2-1 全球尺度上层海洋生物地理分区(Spalding et al., 2012)

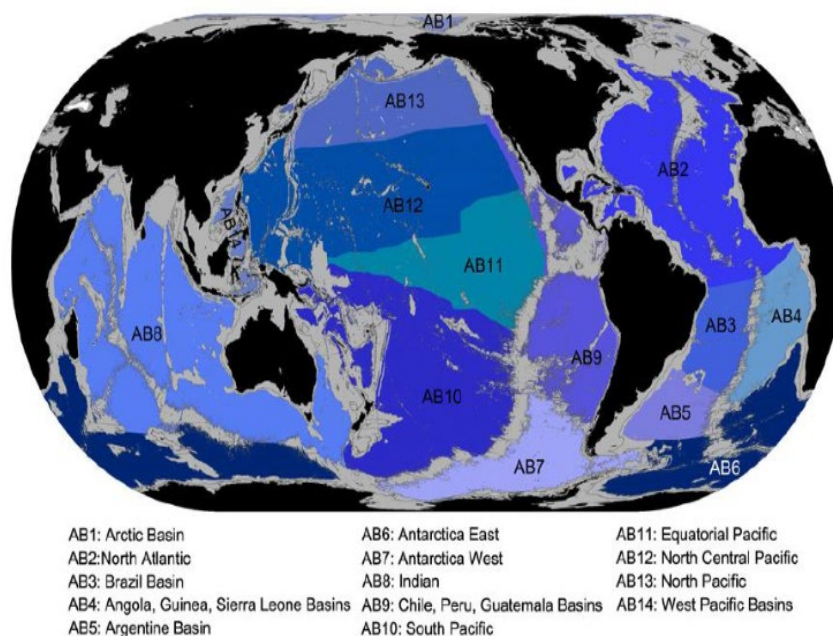


图 5.2-2 全球尺度深海海洋底层生物地理分区 (Watling et al., 2013)

Kaplan 计划和 CeDAMar 计划的研究成果表明 CC 区生物环境参数具有明显的纬向和经向梯度变化，总体呈现东高西低、南高北低。主要表现要素包括上层海洋叶绿素含量、初级生产力分布和海底颗粒有机碳通量等。相关研究结果显示区域间 POC 通量变化范围较大，为 $0.8-2.9 \text{ g C}_{\text{org}} \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ （图 5.2-3）。初级生产力从北到南和从东到西变化，较高的初级生产发生在东边和南近赤道上升流附近（图 5.2-4）。

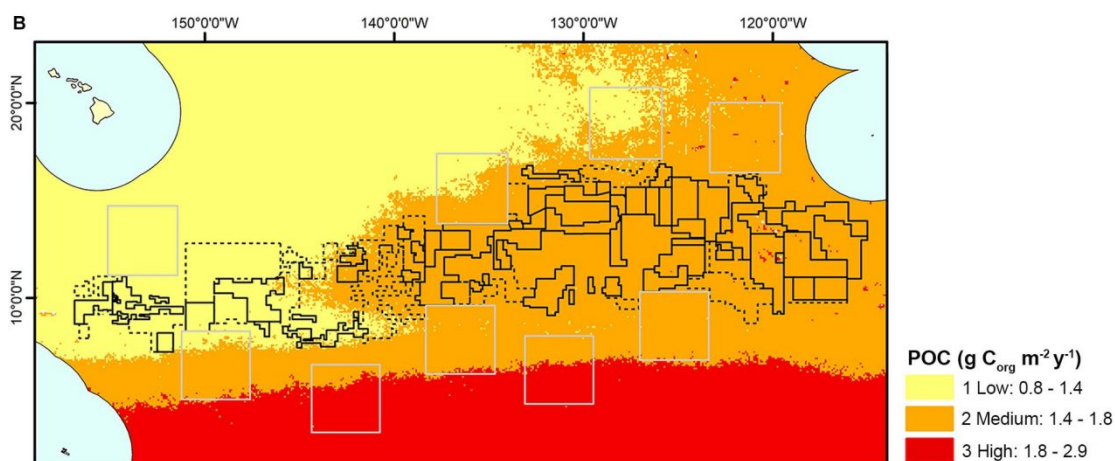


图 5.2-3 CC 区 POC 通量分布图

（来源：McQuaid et al., 2020）

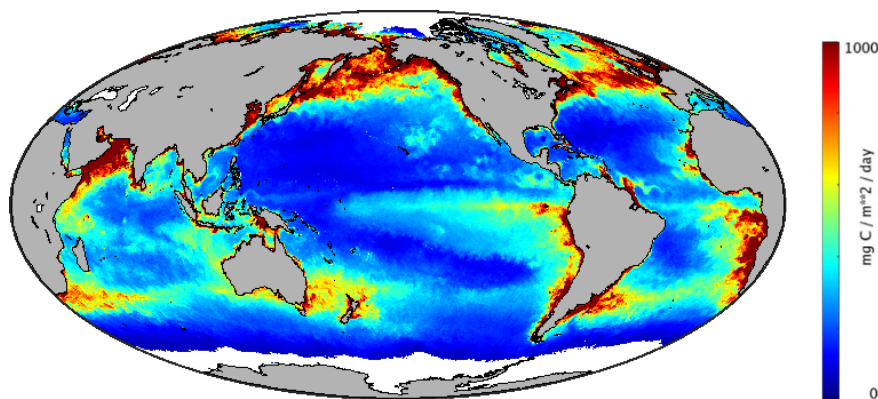


图 5.2-4 全球海洋初级生产力分布图

(来源: www.sites.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php)

英国等欧盟国家联合航次在 UK1 合同区的 12-24 个箱式取样分析发现区域个体数仅有 1-2 个生物种类占全部种类的 60 %，稀有种在区域占有重要地位；分子和形态研究结果显示区域 90 %大型底栖生物均为新种；且随着采样强度增加新种类数量持续增加。Rabone 等人统计 CC 区发现的生物种类，发现从 CC 区中鉴定出的物种有 92 %是新物种，记录的 5578 个物种中仅有 436 个是已命名物种 (Rabone et al., 2023)。总体来说该区域呈现低生物量高多样性特征。

5.3 完成的研究

截至 2023 年底，在合同区 A-5 区块开展约 122 个站位的环境相关调查作业项目，主要包括完成海底摄像测线 13 条（其中 AUV 光学测线 2 条），箱式取样 22 站、多管取样 25 站、全水深 CTD 调查 13 站、200m CTD 调查 8 站、浮游生物分层拖网 3 站、浮游生物垂直拖网 9 站、Lander 诱捕观测 6 站等。在此基础上开展了初级生产力、叶绿素 *a*、微生物、浮游植物、浮游动物、小型底栖生物、大型底栖生物、巨型底栖生物、食腐生物等生物多样性测试和分析。

5.4 生物环境特征

5.4.1 表层

5.4.1.1 海鸟和海洋哺乳动物

迄今为止，在以往航次中没有对 A-5 区块开展系统详细的海鸟和海洋哺乳动物调查以及分布评估，仅在航次期间开展了一般性瞭望和拍照记录。通常来说，这些物种的分布可能反映了猎物的丰度（如浮游植物、浮游动物、小型游

泳动物和鱼类的密度), 因此可以由上层海洋的生产力状况来反演海鸟和海洋哺乳动物的分布与密度。在 CC 区, 由于存在强烈的初级生产力空间梯度, 即在 CC 区的东部具有显著高于西部 (如 A-5 区块) 的初级生产力水平, 因此一般意义上说, 海鸟和海洋哺乳动物的密度也呈现与此类似的空间分布趋势。

中国五矿 2022 年航次走航期间, 在 A-5 区块共观测到 6 种海鸟, 其中大多数仅偶尔出现, 优势种类为各类鲣鸟。

中国五矿合同区 A-5 区块的各个调查航次期间均没有鲸豚类的直接目击记录。

在 CC 区东部 NORI-D 合同区中, 通过 PelagOS 项目观测和三个航次的观测共记录了 323 次生物学观察, 结果显示以鸟类为主, 其次是鱼类、海洋哺乳动物和爬行动物 (NORI 2022)。鸟类中以各类鲣鸟为最常见记录对象, 与 A-5 区块相似。

5.4.1.2 叶绿素与初级生产力

(1) 叶绿素遥感观测

A-5 区块所在的 CC 区西部总体上属于寡营养海域, 由于 CC 区显著的东西向初级生产力梯度, 这里的表层叶绿素浓度比 CC 区东部的 NORI-D 区域更低 (NORI 2022)。基于 1997-2019 年期间的卫星遥感数据 (图 5.4-1), A-5 区块表层叶绿素浓度的年均值为 $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g/L}$ 。叶绿素浓度的周年变化小, 其中每年 4-6 月出现叶绿素浓度高值, $0.10 \pm 0.04 \mu\text{g/L}$, 9-12 月出现叶绿素浓度低值, $0.07 \pm 0.02 \mu\text{g/L}$ 。

基于 1997-2019 年期间的卫星遥感数据, 估算了 A-5 区块内的 IRZ、PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素浓度的周年变化 (图 5.4-1)。其中, IRZ 表层叶绿素浓度的年均值为 $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g/L}$ 。叶绿素浓度的周年变化小, 其中每年 4-6 月出现叶绿素浓度高值, $0.09 \pm 0.05 \mu\text{g/L}$, 10 月出现叶绿素浓度低值, $0.06 \pm 0.02 \mu\text{g/L}$ 。PRZ1 表层叶绿素浓度的年均值为 $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g/L}$ 。叶绿素浓度的周年变化小, 其中每年 4-5 月出现叶绿素浓度高值, $0.09 \pm 0.05 \mu\text{g/L}$, 10-11 月出现叶绿素浓度低值, $0.06 \pm 0.01 \mu\text{g/L}$ 。PRZ2 表层叶绿素浓度的年均值为 $0.08 \pm 0.03 \mu\text{g/L}$ 。叶绿素浓度的周年变化小, 其中每年 4-6 月出现叶绿素浓度高值, $0.10 \pm 0.05 \mu\text{g/L}$,

9-12 月出现叶绿素浓度低值, $0.07 \pm 0.02 \mu\text{g/L}$ 。IRZ、PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素浓度差异不显著, 且周年变化规律一致。

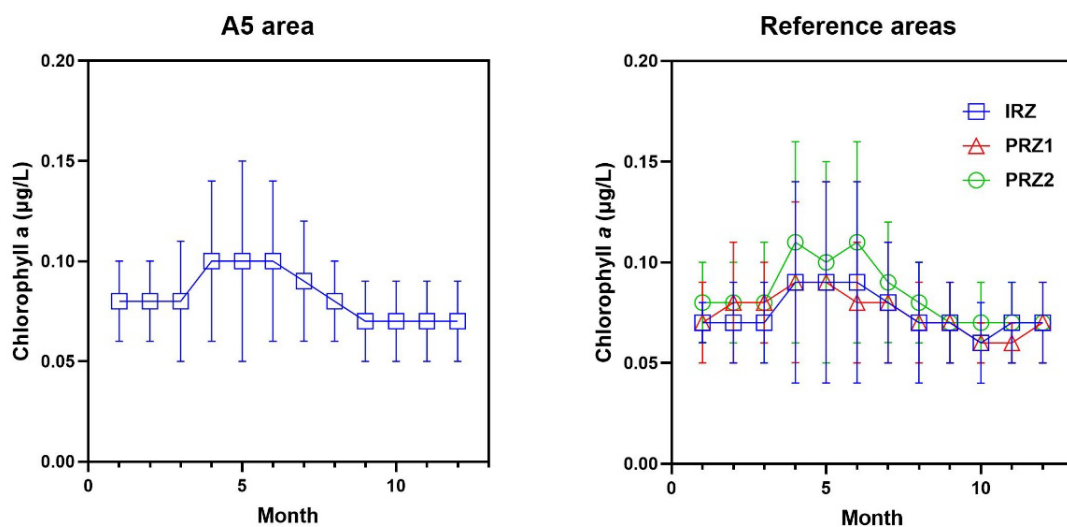


图 5.4-1 A-5 区块表层叶绿素的周年变化（1997-2019）和 A-5 区块内的 IRZ、PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素的周年变化（1997-2019）

基于 1997-2019 年期间的卫星遥感数据, 估算了 A-5 区块内及邻域表层叶绿素浓度空间格局的周年变化情况 (图 5.4-2)。总体而言, 该区域的表层叶绿素呈现自东南至西北逐渐降低的空间梯度, 这反映了热带东太平洋以北赤道流为主要驱动力的表层海洋初级生产力大尺度空间梯度规律。在叶绿素浓度较高的 3-6 月, $0.1 \mu\text{g/L}$ 表层叶绿素浓度等值线大致北移至 A-5 区块, 而在其他季节, $0.1 \mu\text{g/L}$ 表层叶绿素浓度等值线则向南移至 A-5 区块以南。在各个季节, 表层叶绿素浓度等值线均大致呈现纬向分布, 因此 A-5 区块内的 IRZ、PRZ1 和 PRZ2 在初级生产力的时空变化方面具有高度的一致性和可对比性。

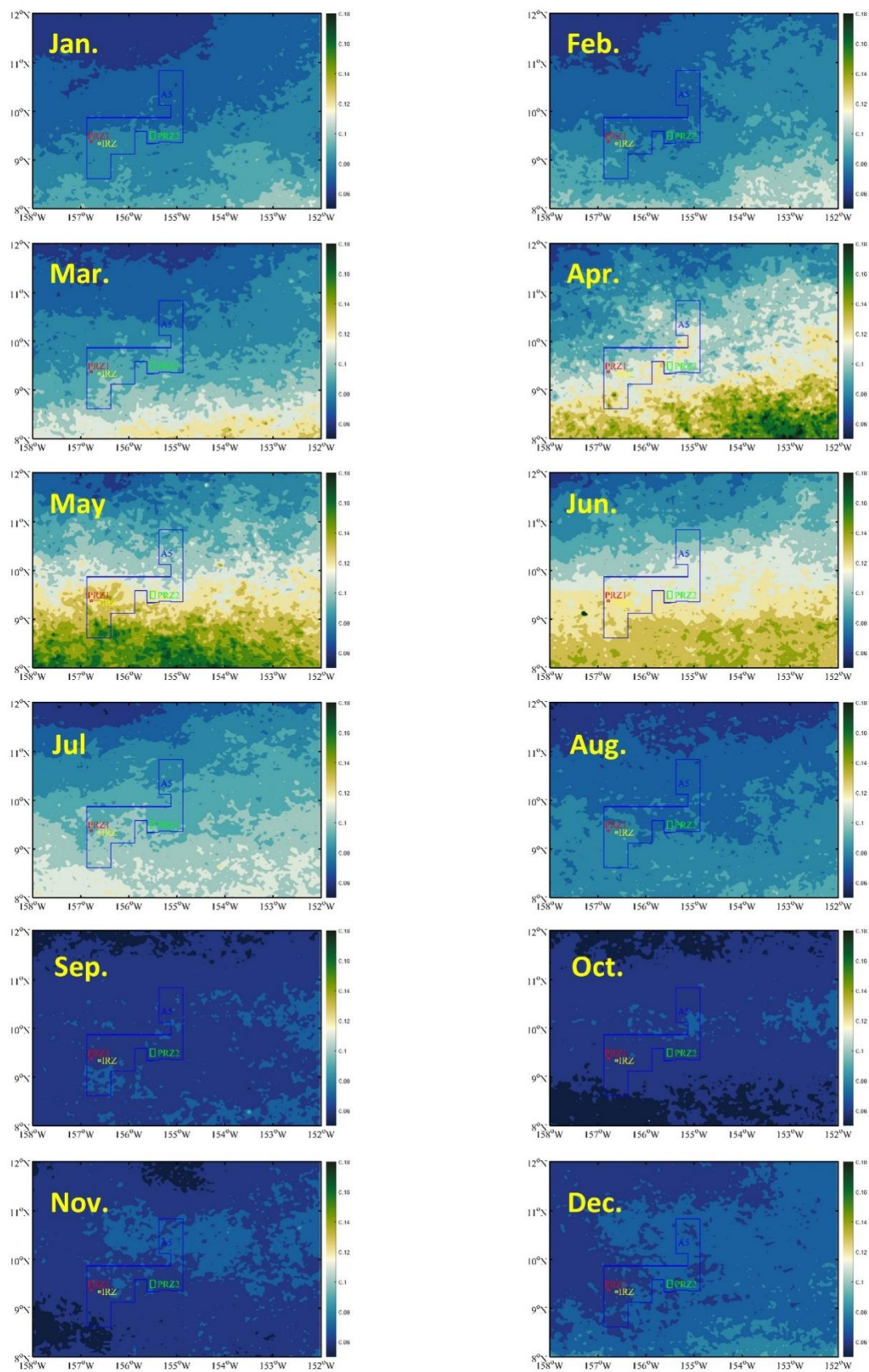


图 5.4-2 A-5 区块内及邻域表层叶绿素浓度空间格局的周年变化（1997-2019）

(2) 初级生产力

中国五矿 2018 年航次期间在 A-5 区块的 DY50I-A5-S06-CTD11 站和 A-8 区块的 DY50II-A8-S03-CTD01 进行了 CTD 采样，测定了初级生产力和叶绿素 *a* 及其他光合色素。

两个站位初级生产力的剖面分布由图 5.4-3 所示。两个站位初级生产力的剖面分布较为一致，最大值都位于次表层，DY50I-A5-S06-CTD11 站在 50 m，数值为 $1.07 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ，DY50II-A8-S03-CTD01 站同样在 50 m 达到最大值，为 $2.52 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 。通过比较两个站位初级生产力的浓度值可以看出，DY50II-A8-S03-CTD01 站各层位均高于 DY50I-A5-S06-CTD11 站。两个站位水柱积分初级生产力如图 5.4-4 所示，DY50I-A5-S06-CTD11 站为 $51.44 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ，DY50II-A8-S03-CTD01 为 $112.27 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ，A-8 区块约为 A-5 区块的 2.2 倍。这可能与 A8 区块更靠近东太平洋上升流区，具有较高的营养盐浓度所导致。

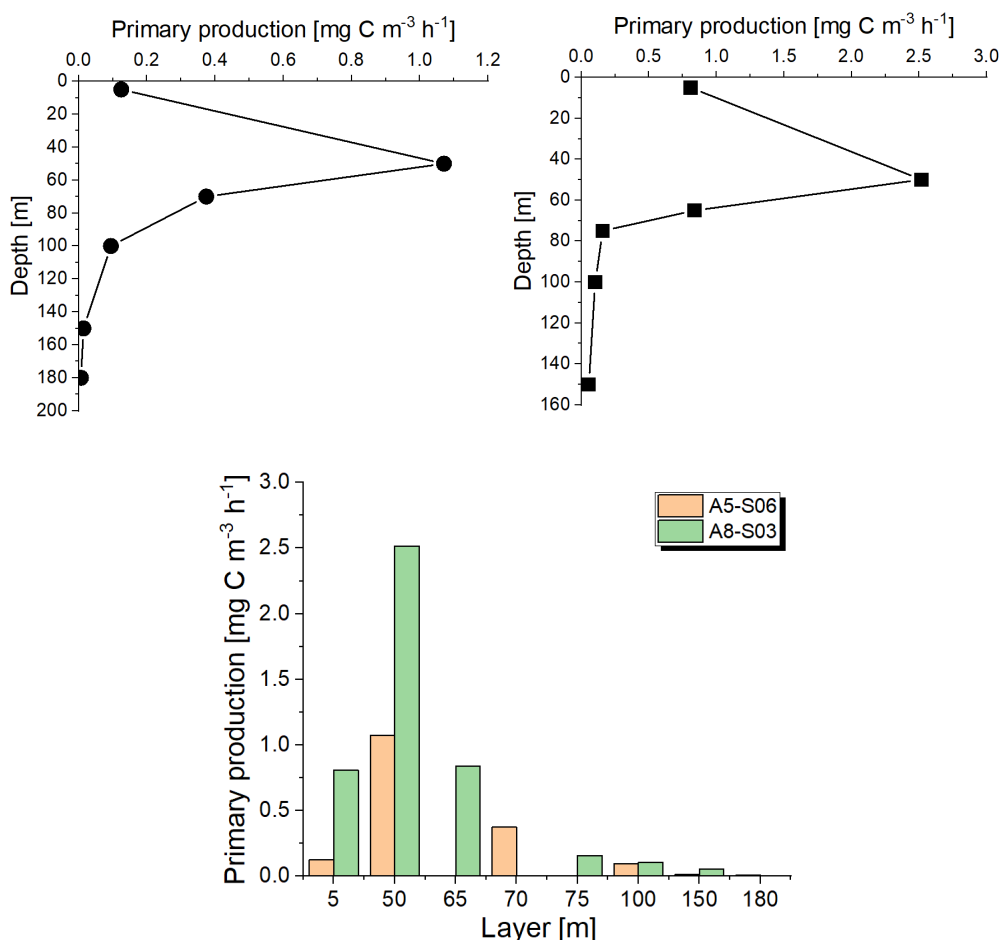


图 5.4-3 A-5 区块 DY50I-A5-S06-CTD11 站（上左）和 A-8 区块 DY50II-A8-S03-CTD01 站

(上右) 初级生产力剖面分布, 并展示两个站位的各水层初级生产力对比 (下)

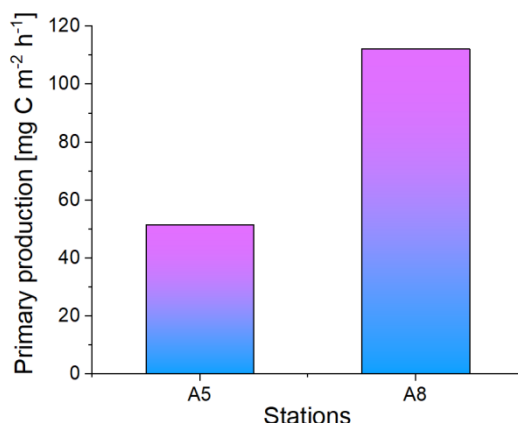


图 5.4-4 A-5 和 A-8 区块两测站水柱积分初级生产力比较

(3) 叶绿素 *a* 和光合色素

A-5 区块叶绿素 *a* 含量测定来自于中国五矿 2022 年航次 DY73I-A5-CTD-01 和 DY73I-A5-CTD-02, 其中前者位于选定的 PRZ1, 后者位于 IRZ, 两站位的叶绿素 *a* 剖面分布见图 5.4-5。结果表明, 两个站位的叶绿素 *a* 的垂向变化较为一致, 最大值都位于次表层约 50 m 处, DY73I-A5-CTD-01 数值为 0.2 mg/m³, DY73I-A5-CTD-02 数值为 0.28 mg/m³, 然后随深度的增加逐渐降低。两站在垂向变化上基本一致, 表明 IRZ 和 PRZ1 区域在叶绿素 *a* 含量上具有相似性。

在 TMC-CSA 项目中, NORI-D 区域叶绿素 *a* 浓度极大值出现在 40-50 m, 在表层范围 0.1-0.8 mg/m³; 在 TMC-UOH 项目中, NORI-D 区域叶绿素 *a* 浓度极大值位于 50-100 m 间, 值为 1.5-2 mg/m³ (NORI 2022)。结果表明 A-5 区块的叶绿素 *a* 含量小于 NORI-D 区域测定的值, 基本符合 CC 区初级生产力变化特征。

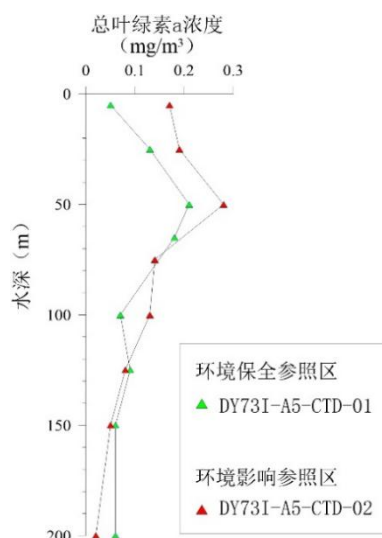


图 5.4-5 A-5 区块 DY73I-A5-CTD-01 和 DY73I-A5-CTD-02 叶绿素 *a* 浓度剖面分布

浮游植物光合色素分别在中国五矿 2018 年航次 A-5 区块 DY50I-A5-S06-CTD11 站和 A-8 区块的 DY50II-A8-S03-CTD01 进行了取样测定，两个站位的主要浮游植物光合色素浓度剖面分布由图 5.4-6 和图 5.4-7 所示。两个测站主要光合色素均由 Dv-Chl *a*、Mv-Chl *a*、zeaxanthin、19'hex-fucoanthin、diadinoxanthin、Chl *c*₂ 和 Chl *c*₃ 等组成，且色素浓度最大值与叶绿素最大值层分布较为一致，一般位于 50-100 m 的深度范围内。DY50I-A5-S06-CTD11 站在 75 m 具有较高的 zeaxanthin 和 Dv-Chl *a* 浓度，分别为 84.45 ng/L 和 112.61 ng/L，另外 Mv-Chl *a* 浓度也较高，为 62.82 ng/L，其他光合色素浓度均低于 20 ng/L；DY50II-A8-S03-CTD01 略有不同，各主要色素均在叶绿素最大值层有较高值，但 zeaxanthin 高值分布更浅，而 Dv-Chl *a* 呈现双峰型分布，同时 19'hex-fucoanthin 也具有较高浓度。通过比较两个站位光合色素水柱积分浓度值可以看出，两站位主要浮游植物类群均为超微型原核的原绿球藻和聚球藻，但不同的是在 A-8 区块具有更高的定鞭藻-8 型的生物量，而在 A-5 区块则较低（图 5.4-8）。

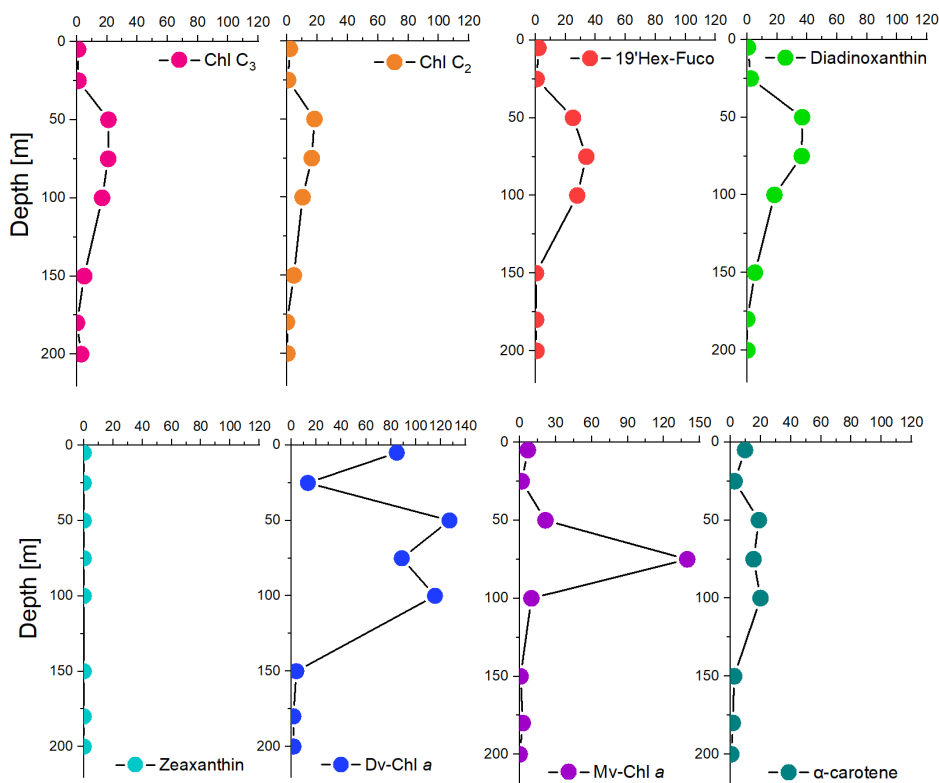


图 5.4-6 A-5 区块 DY50I-A5-S06-CTD11 站主要光合色素浓度剖面分布（单位：ng/L）

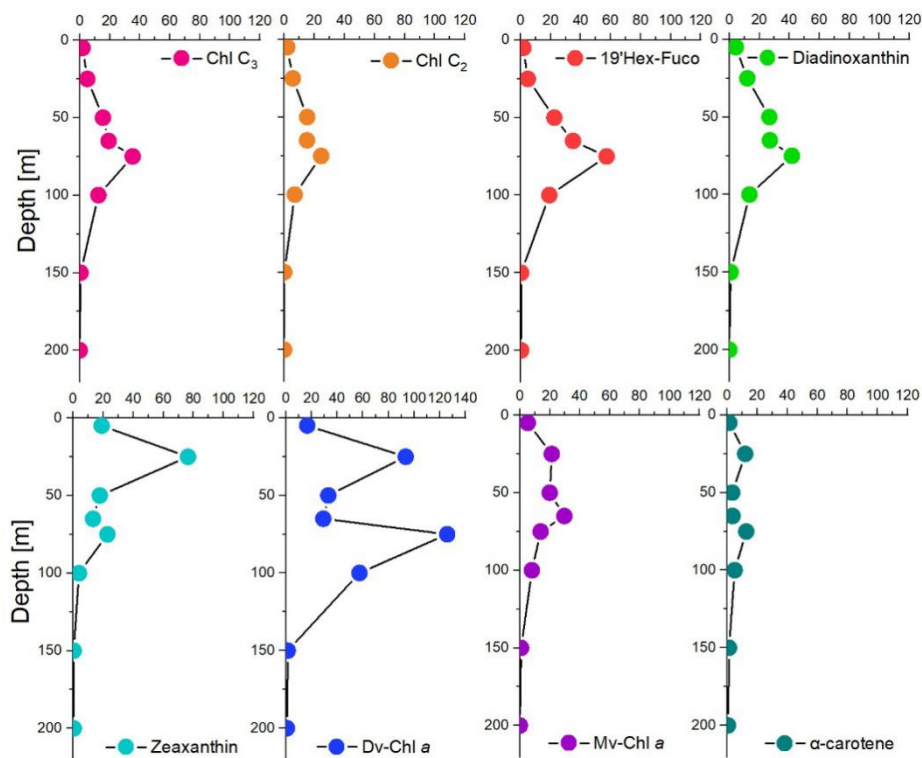


图 5.4-7 A-8 区块 DY50II-A8-S03-CTD01 站主要光合色素浓度剖面分布 (单位: ng/L)

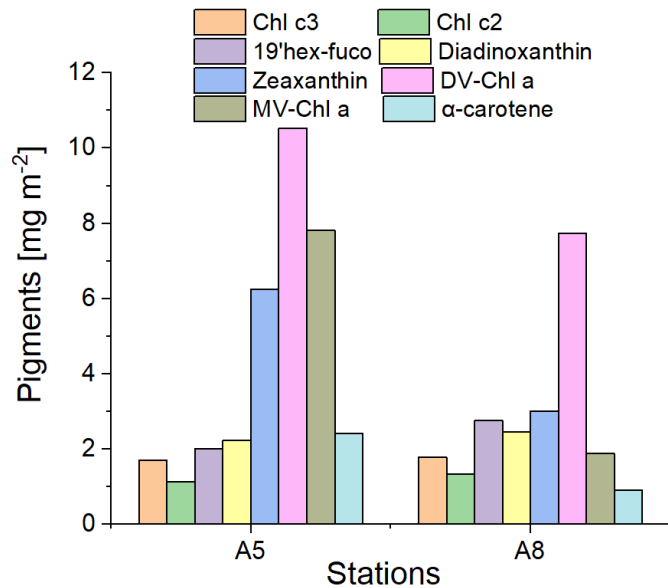


图 5.4-8 A-5 和 A-8 区块两测站水柱积分色素浓度比较

5.4.1.3 浮游植物

(1) 浮游植物群落组成

中国五矿 2021 年航次在 A-5 区块共进行了 4 站浮游植物拖网（20 μm 网孔）采样，共鉴定出浮游植物 59 种，隶属于 2 门，3 纲，11 目，19 科，26 属。其中甲藻 21 种，硅藻 38 种。

4 个调查站位中，DY70I-A5-BP01 站浮游植物种数最多（图 5.4-9），达到 27 种，DY70I-A5-BP02 站种类最少，仅有 14 种。

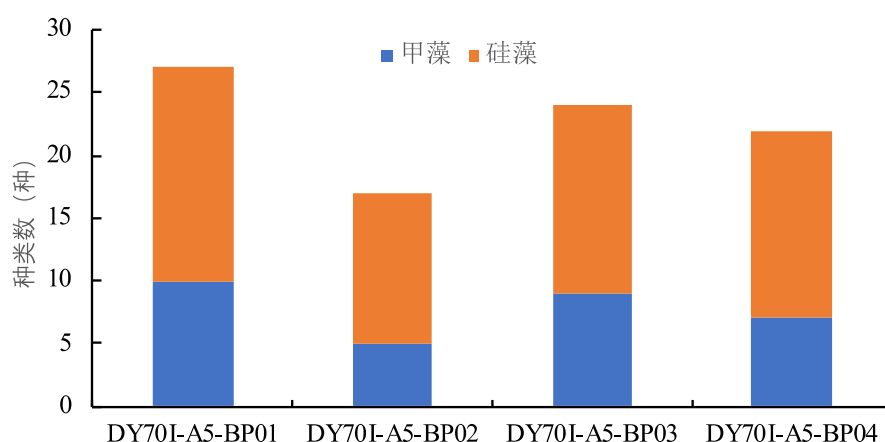


图 5.4-9 各调查站点浮游植物种类数

(2) 浮游植物丰度分布

丰度计算结果显示，调查区域浮游植物平均丰度为 338.0 cells/L，其中硅藻平均丰度占 73 %，甲藻占 27 %（图 5.4-10）。4 个调查站点丰度略有差异，在 256.7-441.8 cells/L 之间（图 5.4-11）。

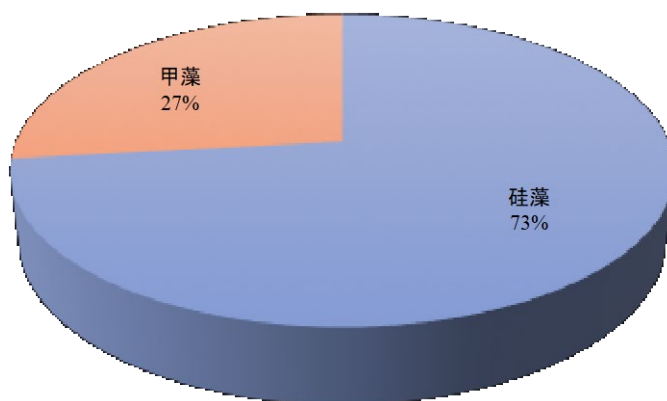


图 5.4-10 A-5 区块浮游植物群落结构

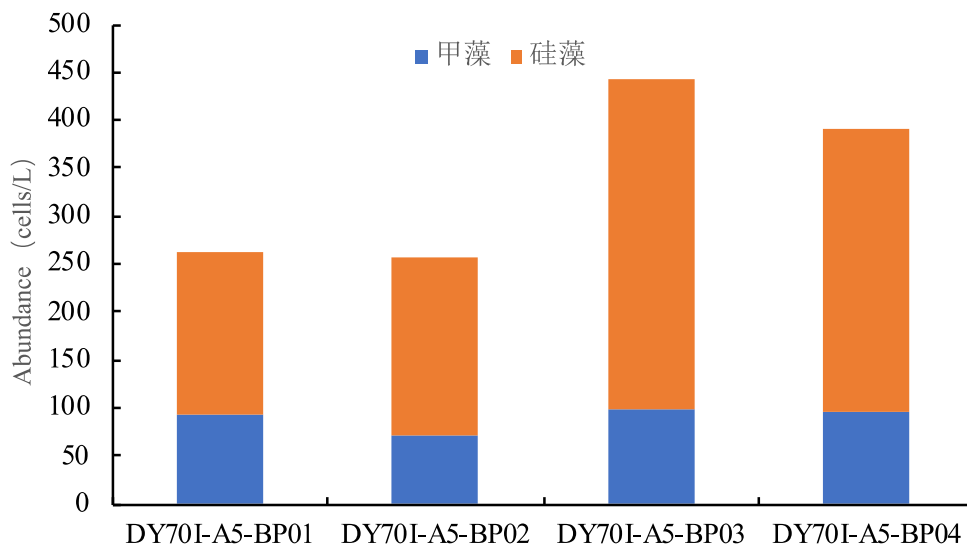


图 5.4-11 各调查站点浮游植物丰度

(3) 浮游植物物种多样性分析

根据上述调查结果分析，显示 A-5 区块浮游植物优势种主要以透明辐杆藻、琼氏圆筛藻等硅藻种类以及圆柱角藻等甲藻种类为主，由表 5.4-1 可知优势度超过 0.02 的共有 6 种，包括透明辐杆藻、琼氏圆筛藻、粗刺角藻棒槌变种、圆柱角藻、扁面角毛藻和鼓形拟脆杆藻。

表 5.4-1 A-5 区块浮游植物优势种及其优势度

种名	拉丁名	出现频率(%)	Y
透明辐杆藻	<i>Bacteriastrium hyalinum</i> var. <i>hyalinum</i>	50	0.095
琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	75	0.028
粗刺角藻棒槌变种	<i>Ceratium horridum</i> var. <i>claviger</i>	75	0.027
圆柱角藻	<i>Ceratium teres</i>	50	0.022
扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i>	75	0.022
鼓形拟脆杆藻	<i>Fragilariopsis doliolus</i>	75	0.021

5.4.1.4 浮游动物

中国五矿合同区 A-5 区块共进行浮游生物垂直拖网 9 站，浮游生物分层拖

网 3 站。

(1) 浮游动物群落结构

共鉴定出浮游动物 193 种，隶属 6 个门，此外记录有 11 类浮游幼体。浮游动物群落由桡足类、刺胞动物、介形类、端足类、毛颚动物、被囊类、磷虾类、软体动物和多毛类等类群组成。其中桡足类为最优势类群，包括 121 种，占总物种数的 59.3 %；前几位的较优势类群还包括刺胞动物、介形类、毛颚动物和被囊类等，分别记录有 19 种、11 种、9 种和 10 种；其他类群在总物种多样性中所占的比例均低于 4 %（表 5.4-2，图 5.4-12）。

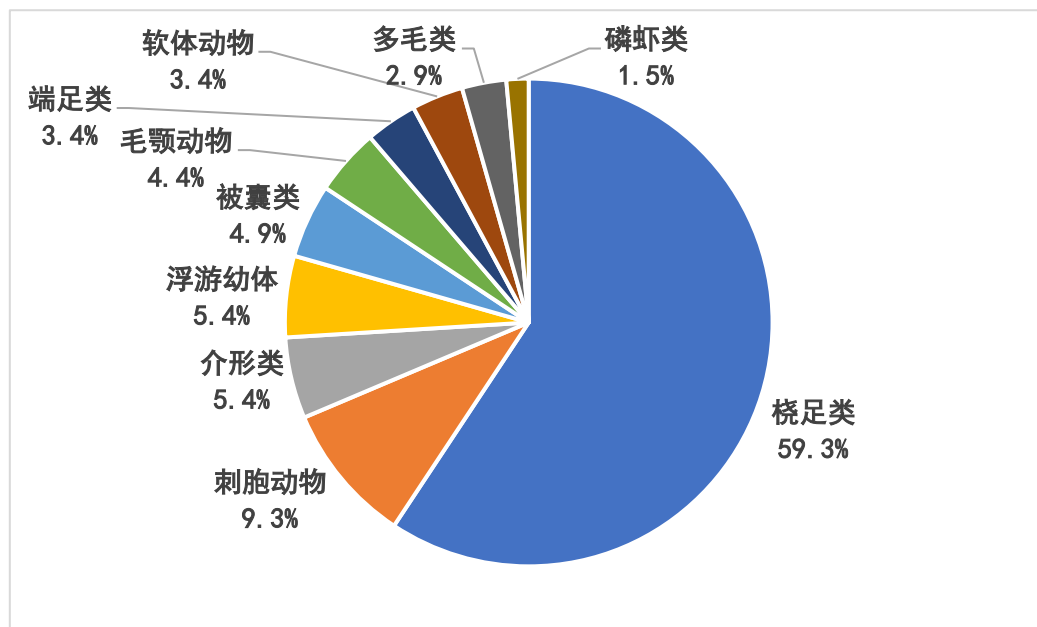


图 5.4-12 A-5 区块浮游动物群落结构组成

表 5.4-2 A-5 区块浮游动物群落结构组成

门	类群	物种数	%
刺胞动物门	刺胞动物	19	9.31
环节动物门	多毛类	6	2.94
软体动物门	浮游软体动物	7	3.43
节肢动物门	桡足类	121	59.31
	介形类	11	5.39
	端足类	7	3.43
	磷虾类	3	1.47

毛颚动物门	毛颚动物（箭虫）	9	4.41
尾索动物门	被囊类	10	4.90
合计		193	
浮游幼体		11	

(2) 生物量与丰度垂直分布

对于 A-5 区块周边 0-200 m 垂直拖网采集样品的分析表明生物量在 0-200 m 层的水平分布存在一定的空间变化，浮游动物生物量变化不大，平均值为 39.13 mg/m³。

整体上，A-5 区块浮游动物生物量呈现由表层向下逐渐降低的趋势，0-200 m 的海洋上层生物量平均为 76.23 mg/m³；夜间全部站位的最高值均出现在 0-50 m 的表层，昼间站位绝大多数均出现在 0-50 m 的表层；A-5 区块浮游动物丰度呈现由表层到向下逐渐降低的趋势，0-200 m 的海洋上层丰度平均为 58.27 ind./m³。

(3) 优势种和物种多样性的垂直分布

随着水深的变化，物种多样性呈降低趋势，同时，浮游动物的群落结构出现了明显的变化。在 0-100 m 层，主要优势种为精致羽刺大眼剑水蚤 *Farranula concinna*、小纺锤水蚤 *Acartia negligens*、丽隆剑水蚤 *Oncaea venusta*、羽长腹剑水蚤 *Oithona plumifera* 和弓角基齿哲水蚤 *Clausocalanus arcuicornis* 等；在 100-200 m 层，主要优势种为角锚哲水蚤 *Rhincalanus cornutus*、丽隆剑水蚤 *O. venusta* 和黄角光水蚤 *Lucicutia flavicornis* 等。

5.4.1.5 鱼类环境 DNA 检测

在中国五矿 2022 年航次调查中，采用甲板采水以及 CTD 采水等方法对航迹线表层海水及 A-5 区块真光层海水采样，对水样进行 eDNA 分析以评估表层鱼类的多样性，OTU 类群多样性分析结果如图 5.4-13。真光层鱼类以辐鳍鱼占绝大多数，此外有少量鲨鱼（真鲨 *Carcharhinus* sp.）。辐鳍鱼中以巨口鱼目（Phosichthyidae）为主，其中长体颌光鱼和黑圆罩鱼较占优势；其次为灯笼鱼目（Myctophidae），代表物种朗明灯鱼和金焰灯笼鱼；再次为水珍鱼目

(Argentiniformes) 的光舌鲑；此外还有鲱鳅、鲚鱼等。



图 5.4-13 基于水样 eDNA 的鱼类多样性

对 A-5 区块内与航线上采集的水样的鱼类 eDNA 结果进行 Cluster 聚类分析，结果如图 5.4-14，可见 A-5 区块站位与航线中其他站点样本并无明显地理分化规律，表明表层游泳动物在热带太平洋较大地理距离上并无显著地理隔离，连通性较好。

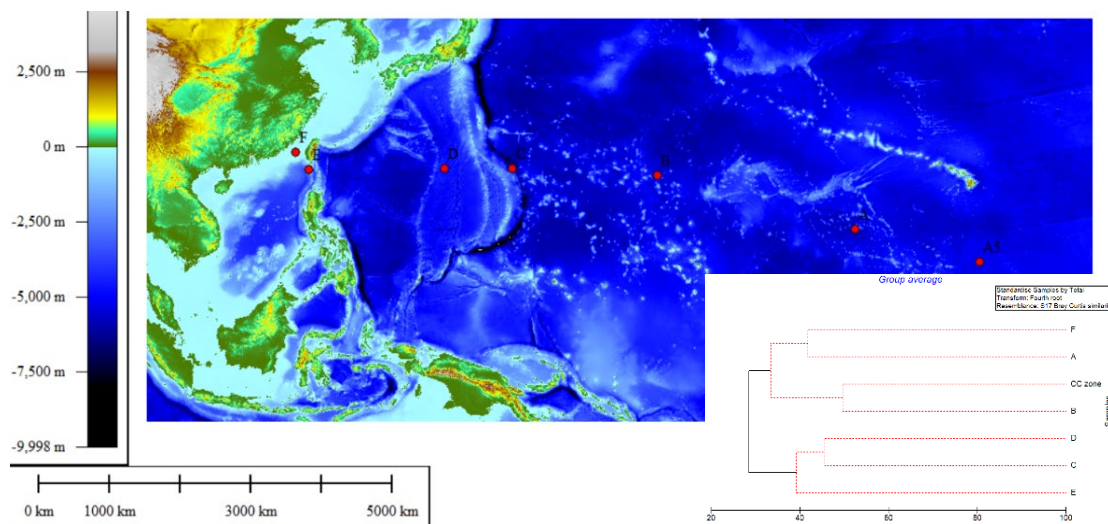


图 5.4-14 鱼类 eDNA 分析水样采样点站位图

5.4.2 中层

5.4.2.1 中层浮游动物

(1) 生物量分布

整体上，A-5 区块浮游动物生物量呈现由表层到深海逐渐降低的趋势，200-450 m 的海洋中层上部（OMZ 层）生物量平均 11.27 mg/m^3 ，450-1000 m 的海洋中层下部生物量下降为平均 6.08 mg/m^3 （图 5.4-15）。

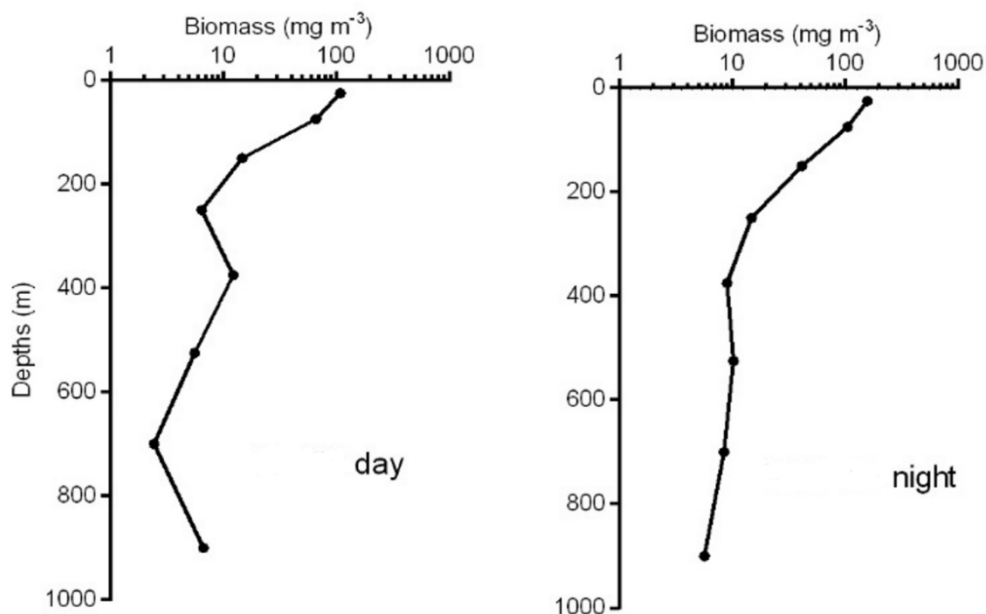


图 5.4-15 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物生物量的垂直分布

(2) 丰度分布

整体上，A-5 区块浮游动物丰度呈现由表层到深海逐渐降低的趋势，200-450 m 的海洋中层上部（OMZ 层）生物量为平均 5.26 ind./m^3 ，450-1000 m 的海洋中层下部生物量下降为平均 1.19 ind./m^3 （图 5.4-16）。

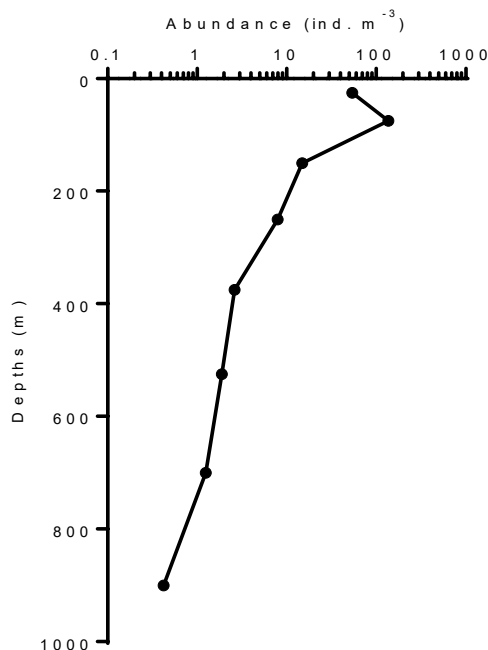


图 5.4-16 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物丰度的垂直分布

(3) 优势种和物种多样性的垂直分布

随着水深的变化，物种多样性出现了降低的趋势（图 5.4-17），同时，浮游动物的群落结构出现了明显的变化。在 200-450 m 层，主要优势种为角锚哲水蚤 *R. cornutus*、粗乳点水蚤 *Pleuromamma robust* 和瘦乳点水蚤 *P. gracilis* 等；在 450-600 m 层，主要优势种为粗乳点水蚤 *P. robusta*；在 600-1000 m 层，主要优势种为丽隆剑水蚤 *O. venusta*、中隆剑水蚤 *O. media*、拟长须全羽水蚤 *Haloptilus paralongicirrus* 和小枪水蚤 *Gaetanus minor* 等。

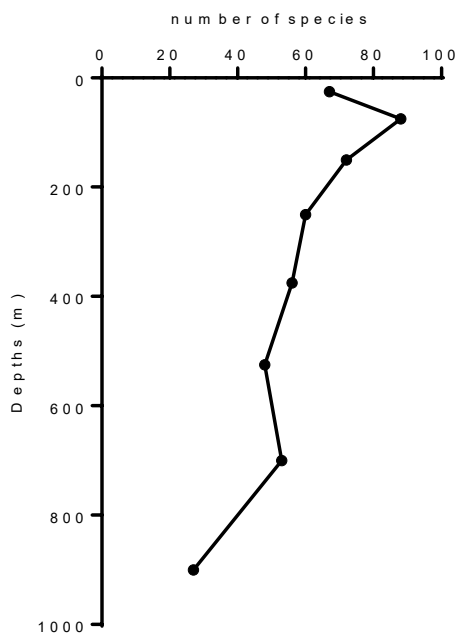


图 5.4-17 A-5 区块 0-1000 m 浮游动物物种多样性随着水深的变化

5.4.3 底层

5.4.3.1 微生物

中国五矿 2021 年航次在 A-5 区块采集用于微生物多样性分析沉积物样品 2 站，其中多管 1 站 (DY70I-A5-MC01)，箱式 1 站 (DY70I-A5-BC03)，箱式为表层沉积物，多管沉积物样品前 21 cm 每 1 cm 为一层，21 cm 之后每 3 cm 为一层，共分为 29 层。

5.4.3.1.1 质量评估

MC01 站位多管分层沉积物样品的 Good's coverage 值介于 0.959-0.999 之间 (图 5.4-18)，说明目前的测序深度能覆盖绝大多数原核微生物类群。各样品的 OTU (97 %) 数量介于 379-1855 个。样品的 Shannon 指数皆处于 2.05-7.89 之间，说明这些深海沉积物中原核微生物种群具有很高的多样性。且深度较浅的沉积物 OTU 高于深层沉积物，说明随深度增加，在统计学上微生物种群多样性间具备一定差异性，深度较浅的沉积物中含有更高的物种多样性及物种丰度。

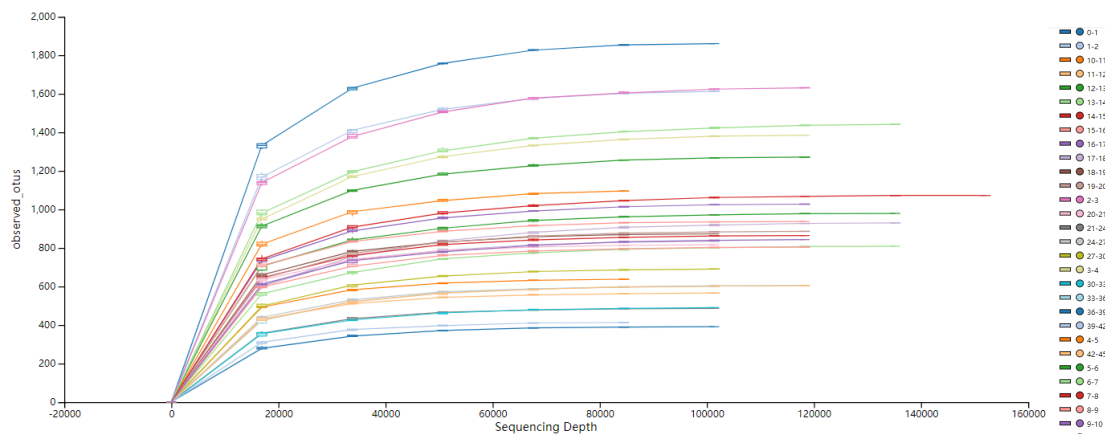


图 5.4-18 DY70I-A5-MC01 站位多管分层沉积物样品原核微生物种群测序的稀释度曲线

5.4.3.1.2 微生物多样性随着沉积物深度的变化

通过对 DY70I-A5-MC01 多管分层沉积物样品的扩增子结果分析，探讨垂直方向微生物物种组成及群落结构。将 DY70I-A5-MC01 站位沉积物与上覆水样品按深度分组，按目水平绘制物种堆积图并可视化，并与 DY70I-A5-BC03 箱式表层沉积物对比，结果见图 5.4-19。

结果表明：DY70I-A5-BC03 表层沉积物和 DY70I-A5-MC01 站位的各层沉积物中 Gammaproteobacteria 均为优势种群。而 Gammaproteobacteria 类群中均以 Burkholderiales、Pseudomonadales 目为主，在 DY70I-A5-MC01 站该类群整体呈现随深度增加，物种丰度增加的趋势。Alphaproteobacteria 较少，最高仅占 5.004 %。

在所有站位中，古菌 Nitrosopumilales 目为古菌优势类群，同时，该类群呈现随深度增加，物种丰度降低的趋势，可能由于该类群为好氧古菌，随深度增加，界面氧气含量逐渐降低，该群落的生长逐渐受限。

微生物群落结构随深度呈现明显变化，10 cm 以深逐渐稳定。

本区域沉积物微生物中细菌及古菌优势类群与位于 CC 区东部的德国合同区一致，证明 CC 区深海沉积物微生物生态学功能在大尺度上具有稳定性。

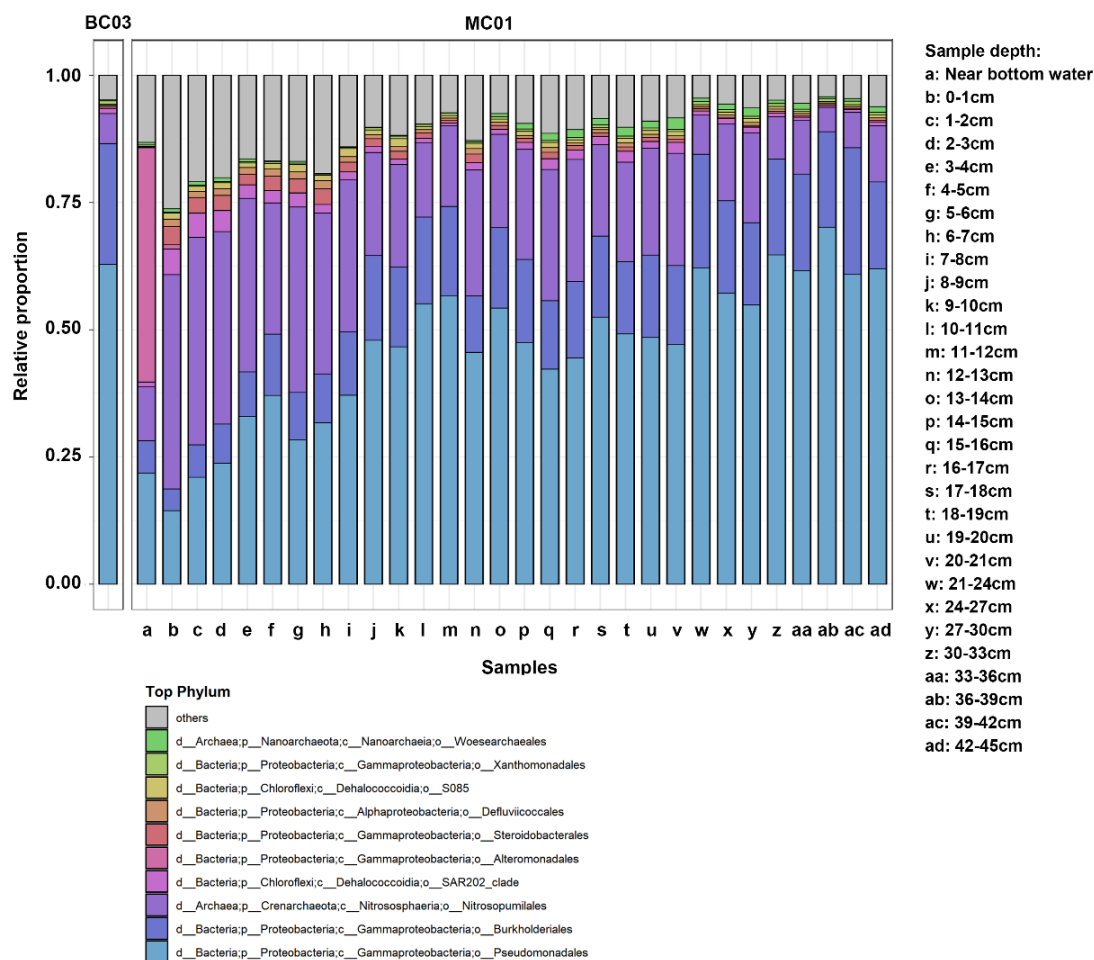


图 5.4-19 中国五矿 2021 年航次 DY70I-A5-BC03 箱式表层沉积物及 DY70I-A5-MC01 站位多管分层沉积物样品不同层次原核微生物种群在目水平的组成分析

(BC 为箱式采集的表层沉积物样品, MC 从左至右分别为多管采集的上覆水、0-1cm、1-2cm、2-3cm、3-4cm、4-5cm、5-6cm、6-7cm、7-8cm、8-9cm、9-10cm、10-11cm、11-12cm、12-13cm、13-14cm、14-15cm、15-16cm、16-17cm、17-18cm、18-19cm、19-20cm、20-21cm、21-24cm、24-27cm、27-30cm、30-33cm、33-36cm、36-39cm、39-42cm、42-45cm 沉积物样品)

5.4.3.2 小型底栖生物

目前 CC 区的小型底栖生物的研究主要集中于 CC 区东部 (BGR 区 EIS 报告, Uhlenkott, 2020), BGR 报告显示, 德国合同区小型底栖生物丰度在 96-602 ind./10cm², 其中优势类群为线虫, 丰度所占比例可达 82-95 %, 其次为无节幼体和桡足类; TMC 研究结果表明 NORI-D 合同区小型底栖生物平均密度为 42.1167 ind./10cm², 其中以线虫为优势类群, 占 67.4 %, 平均密度达到 28.3931 ind./10cm², 其次为桡足类和无节幼体。平均 68.8 % 的小型动物丰度分布在 0-1

cm 的表层(51.0 ± 33.9 ind./ 10cm^2), 23.3 %分布在 1-3 cm 的表层(17.3 ± 12.4 ind./ 10cm^2), 7.9 %分布在 3-5 cm 的表层(5.9 ± 4.1 ind./ 10cm^2) (NORI 2022); CC 区西部小型底栖生物相对丰度较少, 根据王小谷等 (王小谷, 2013) 在中国大洋协会合同区的研究显示, 小型底栖生物丰度在 40-104 ind./ 10cm^2 , 优势类群同样为线虫, 丰度可占 91-93 %。这表明 CC 区小型底栖生物丰度的大尺度梯度变化与上层海洋的初级生产力梯度存在很好的一致性。

5.4.3.2.1 影响参照区

中国五矿 2021 年航次利用多管取样器采集沉积物样品用于小型底栖生物调查, 在中国五矿合同区 A-5 区块的 IRZ 进行 2 个站点完成 4 站次取样 (DY70I-A5-MC01、DY70I-A5-MC02、DY70I-A5-MC03 和 DY70I-A5-MC04) (按照 ISA 的要求开展平行站采样)。

(a) 群落组成与丰度

调查区沉积物中共发现自由生活海洋线虫 (Nematoda)、底栖猛水蚤 (Harpacticoida)、多毛类 (Polychaeta)、寡毛类 (Oligochaeta)、介形类 (Ostracoda)、缓步类 (Tardigrada)、蜱螨类 (Acari)、无节幼体 (Nauplius)、等足类 (Isopoda)、腹毛类 (Gastrotricha)、动吻类 (Kinorhyncha) 和其他未定种等 11 个类群小型底栖生物 (图 5.4-20), 平均丰度为 64.05 ind./ 10cm^2 。其中线虫是最占优势的类群, 平均丰度达 58.78 ind./ 10cm^2 , 占小型底栖生物总丰度 91.8%; 其次为猛水蚤, 平均丰度为 2.43 ind./ 10cm^2 , 占比为 3.8 %, 再次为多毛类, 平均丰度为 0.76 ind./ 10cm^2 , 占比为 1.2 %, 其余类群丰度均不超过 1 %, 总和也仅占全部小型底栖生物丰度的 3.2 %。

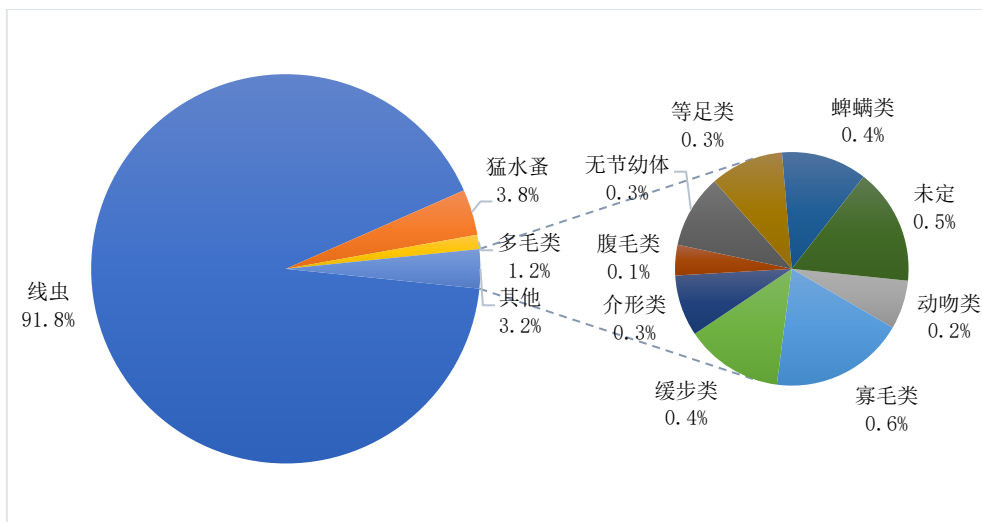


图 5.4-20 IRZ 小型底栖生物群落结构

(b) 垂直分布

小型底栖生物在沉积物中的垂直分布特征如图 5.4-21 和图 5.4-22 所示，约有一半丰度的小型底栖生物分布在最上层（0-1 cm）沉积物中，在 4 cm 以深的沉积物丰度仅占总丰度约 3 %。

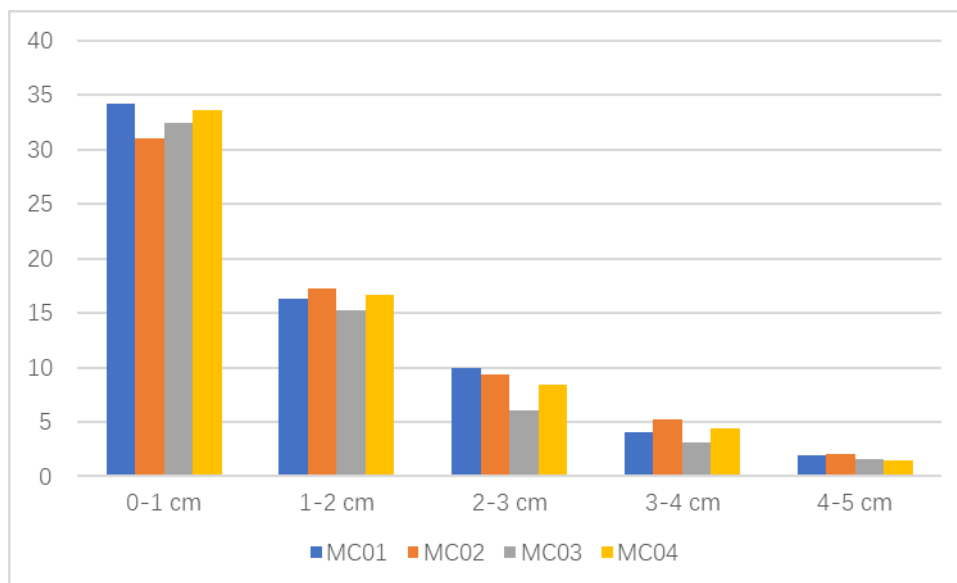


图 5.4-21 IRZ 各站位小型底栖生物丰度垂直分布特征（单位为 10 ind./cm²）

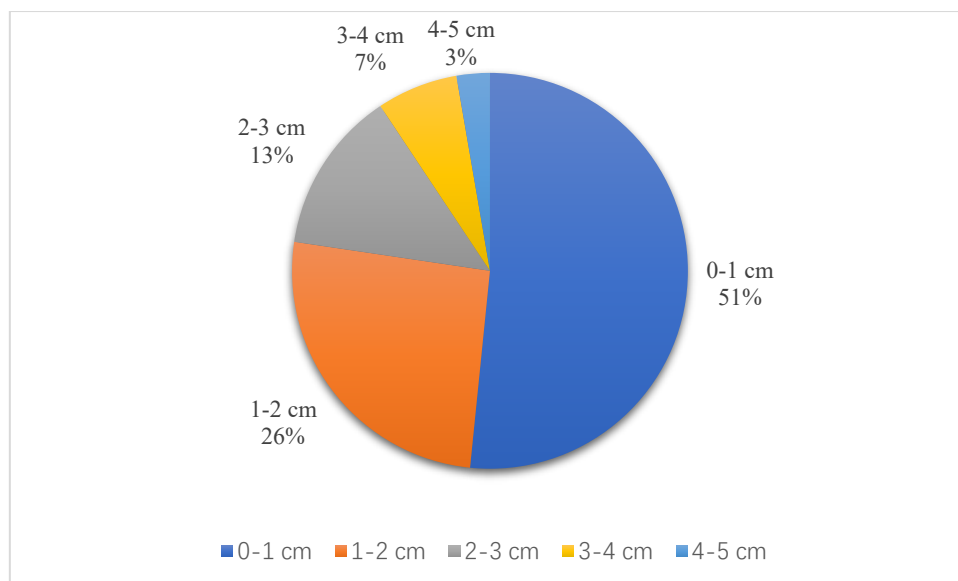


图 5.4-22 IRZ 小型底栖生物垂直分布

5.4.3.2.2 保全参照区

中国五矿 2019 年航次利用多管取样器采集沉积物样品用于小型底栖生物调查，在 A-5 区块 PRZ1 进行 1 个站点完成 2 站次取样（DY54IV-A5-MC01 和 DY54IV-A5-MC02）。

(a) 群落组成与丰度

结果显示，调查区沉积物中共发现自由生活海洋线虫（Nematoda）、多毛类（Polychaeta）、寡毛类（Oligochaeta）、底栖猛水蚤（Harpacticoida）、等足类（Isopoda）、枝角类（Cladocera）、缓步类（Tardigrada）、介形类（Ostracoda）8 个类群小型底栖生物（图 5.4-23），平均丰度为 52.13 ind./10cm²。其中线虫是最占优势的类群，平均丰度达 45.53 ind./10cm²，其丰度占总小型底栖生物丰度 90 % 以上；其次为底栖猛水蚤，平均丰度为 3.35 ind./10cm²，占比 6.63%，多毛类平均丰度 0.60 ind./10cm²，占比 1.19 %，其余类群仅占全部小型底栖生物丰度的约 2 %。

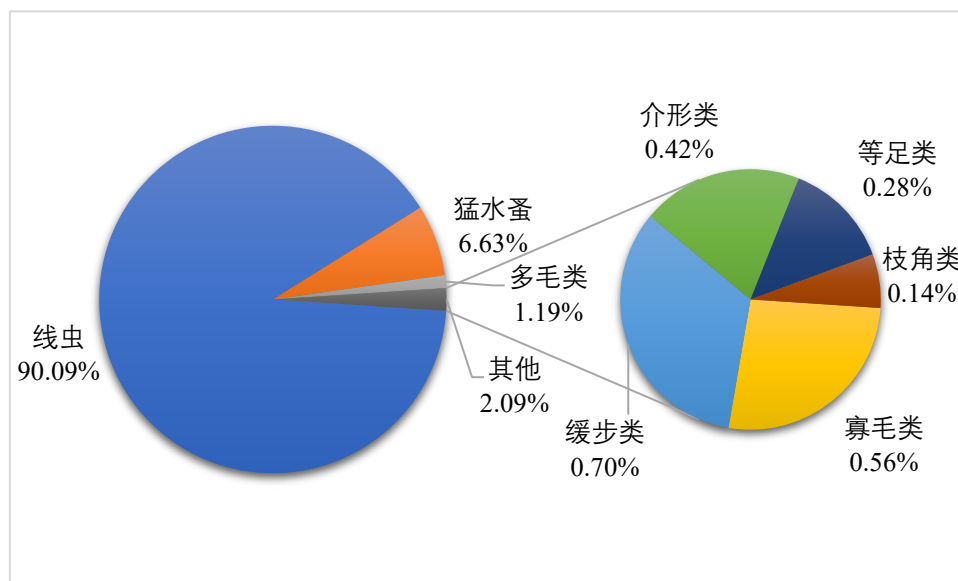


图 5.4-23 PRZ1 调查区小型底栖生物群落结构

(b) 垂直分布

小型底栖生物在沉积物中的垂直分布特征如图 5.4-24 和图 5.4-25，A-5 区块小型底栖生物半数以上分布在 0-1 cm 表层沉积物中，在 4 cm 以深的沉积物所占比例不到 5 %。

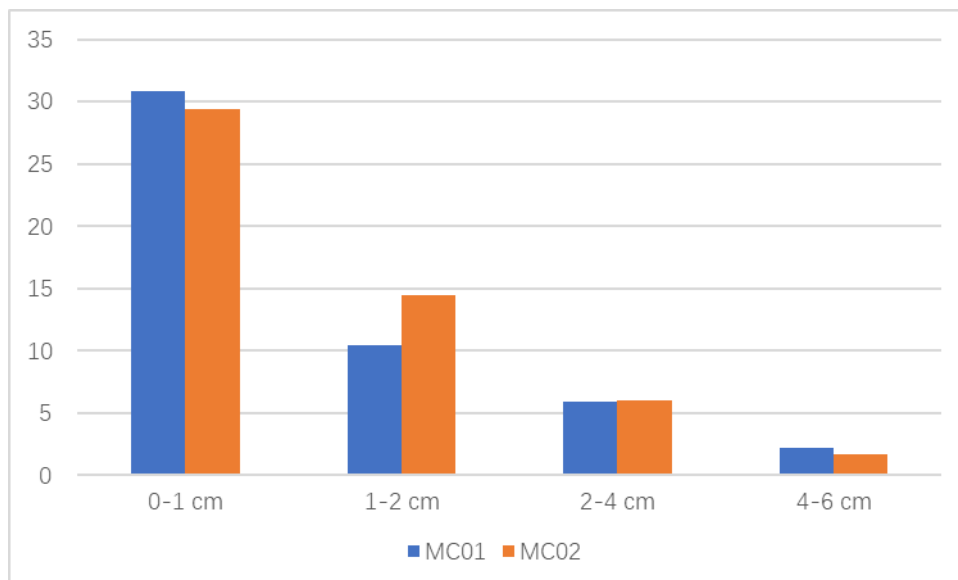


图 5.4-24 PRZ1 各站位小型底栖生物丰度垂直分布特征（单位为 10 ind./cm²）

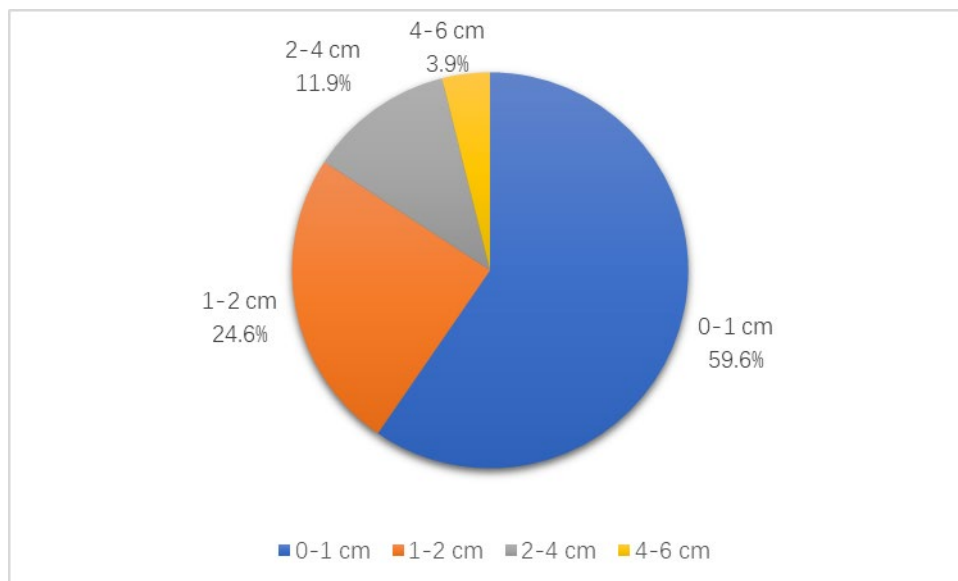


图 5.4-25 PRZ1 小型底栖生物垂直分布

5.4.3.2.3 影响参照区与保全参照区对比

(a) 群落组成

PRZ1 和 IRZ 在前期调查中共发现有 12 类小型底栖生物，其中两区域共有 7 类，包括线虫类、猛水蚤、多毛类，寡毛类、缓步类、介形类，等足类等。IRZ 特有 4 类，PRZ1 特有 1 类。两区域生物类群多样性相似，优势类群均为线虫，占比均超过 90 %，其次为猛水蚤，再次为多毛类。IRZ 特有类群较多可能是由于 PRZ1 调查站位较少，未能涵盖所有类群所致。两区域小型底栖生物类群组成和优势类群均与中国大洋协会合同区相同（图 5.4-26）。

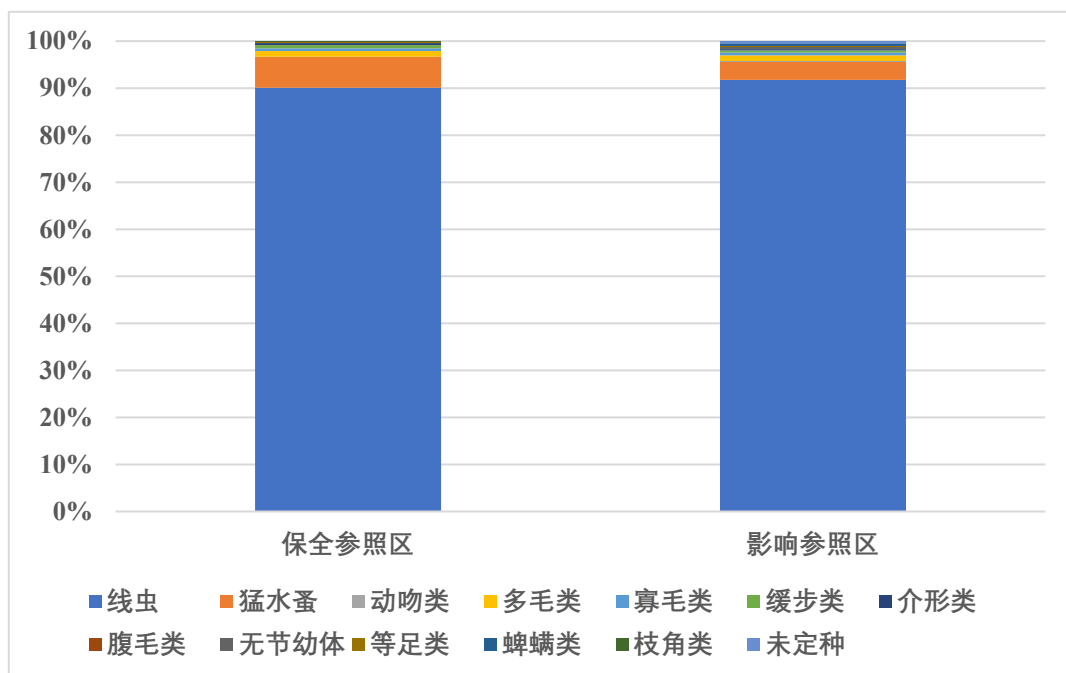


图 5.4-26 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物群落结构对比

(a) 丰度分布

两区域小型底栖生物丰度较为接近（图 5.4-27）；IRZ 区平均丰度在 64.05 ind./10cm²，而 PRZ1 区平均丰度 52.13 ind./10cm²，较 IRZ 区略低。两区域丰度均与同在 CC 区西部的中国大洋协会合同区接近（40-104 ind./10cm²）

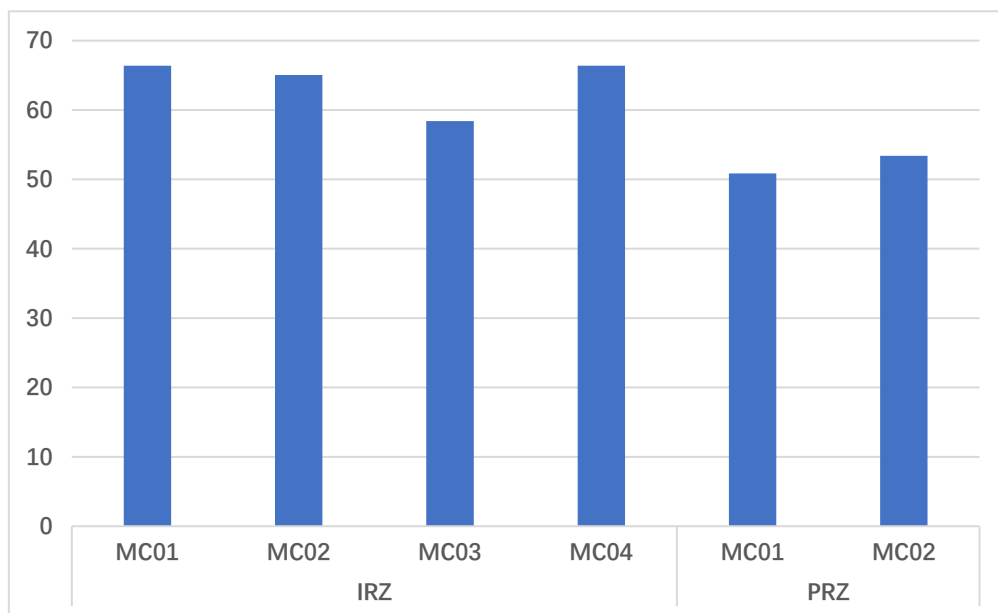


图 5.4-27 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物丰度对比（单位为 ind./10cm²）

(b) 垂直分布

比较 4 cm 以浅的小型底栖生物垂直分布可得，IRZ 与 PRZ1 垂直分布较为类似，一半以上丰度集中在表层 0-1 cm，2 cm 以下丰度在总丰度 20 %及以下（图 5.4-28）。

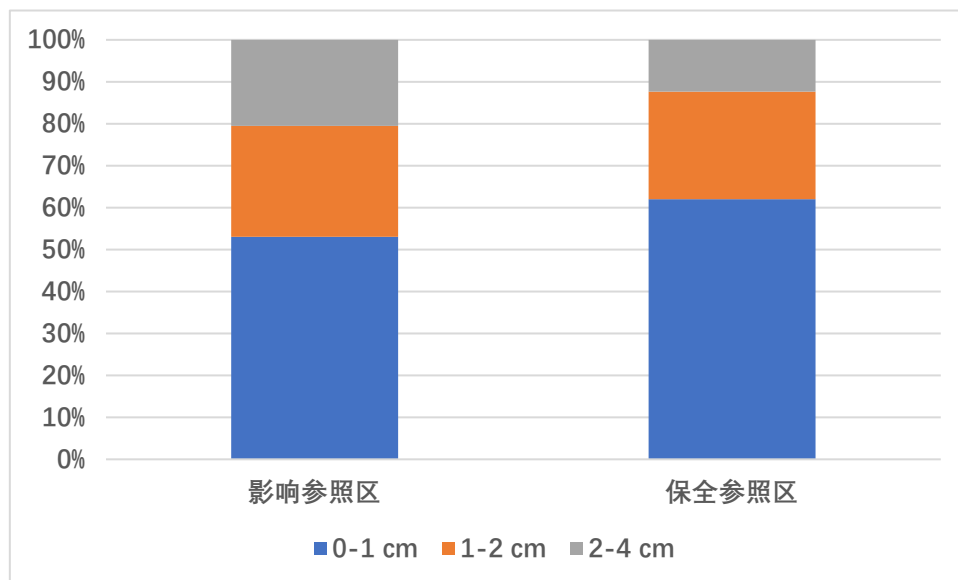


图 5.4-28 IRZ 与 PRZ1 小型底栖垂直分布对比

5.4.3.3 大型底栖生物

目前 CC 区的大型底栖生物的研究主要集中在集中于 CC 区东部（BGR 2018；De Smet, 2017）。BGR 报告显示，德国合同区大型底栖生物丰度在 148-808 ind./m²，其中优势类群为桡足类、其次为多毛类、再次为原足类和等足类，其余类群极少。TMC 报告显示，NORI 合同区大型底栖生物平均丰度在项目 5A 和项目 5D 中分别为 166±60.7 ind./m² 和 278.8±34.3 ind./m²，项目 5A 已鉴定的物种中优势类群为环节动物、棘皮动物和软体动物，项目 5D 中的优势类群包括节肢动物、环节动物和软体动物 (NORI 2022)。

5.4.3.3.1 影响参照区

中国五矿 2021 年航次利用箱式取样器在 A-5 区块采集了 2 站大型底栖生物样品（DY70I-A5-BC02 和 DY70I-A5-BC04），现场参照 ISA 的要求按 0-3 cm，3-5 cm，5-10 cm 间隔分层取样。

(a) 群落组成与丰度

分析结果显示，调查区共发现 6 类大型底栖生物，包括多毛类，寡毛类，介形类，等足类，端足类，原足类等。其丰度变化范围 32-52 ind./m²，平均丰度为 44 ind./m²，其中以多毛类丰度最高的，占比达 47 %，其次是寡毛类和介形类，分别占 24 %和 14 %；等足类、端足类和原足类所占比例均为 5 %（图 5.4-29）。

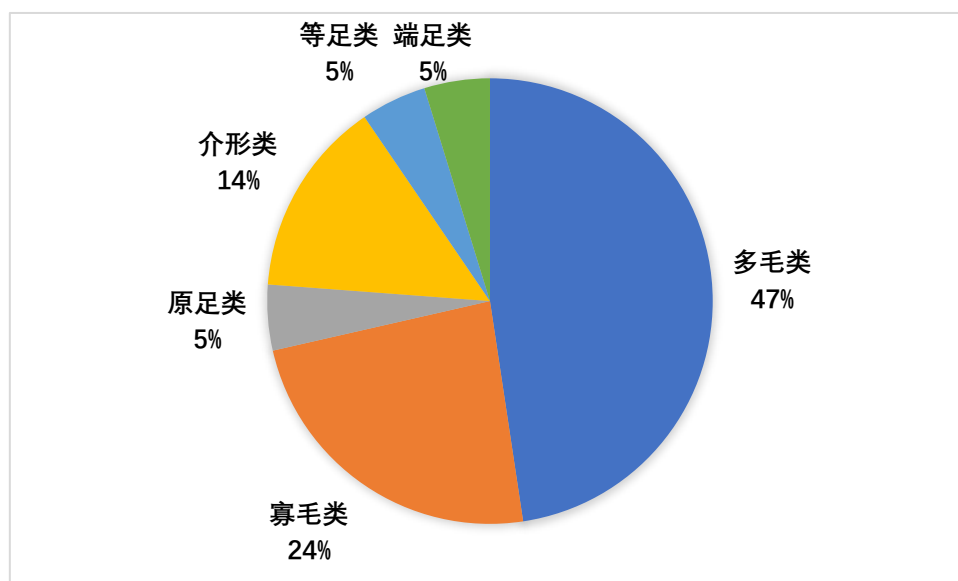


图 5.4-29 IRZ 大型底栖生物群落结构

(b) 垂直分布

分析大型底栖生物在沉积物中的垂直分布特征，结果如图 5.4-30 所示，大型底栖生物丰度从表层向下随层位增加而明显减少，占 2/3 以上丰度的大型底栖生物分布在最上层（0-3 cm）沉积物中，在 5-10 cm 以深的沉积物所占比例仅 5 %。

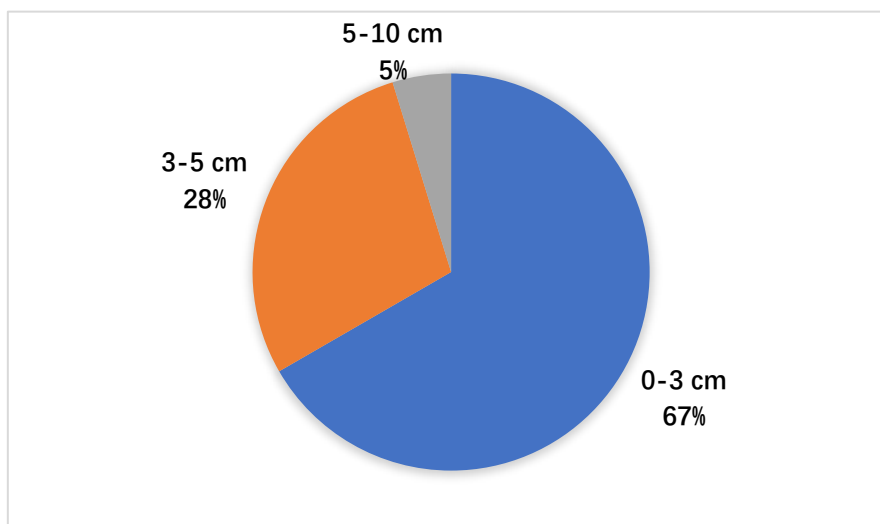


图 5.4-30 IRZ 大型底栖生物垂直分布

5.4.3.3.2 保全参照区

中国五矿 2019 年航次利用箱式取样器在 A-5 区块 PRZ1 采集了 1 站大型底栖生物样品 (DY54IV-A5-BC16)，现场按 0-2 cm，2-5 cm，5-10 cm 间隔分层取样。

(a) 群落组成与丰度

分析结果显示，调查区共发现 5 类大型底栖生物，包括多毛类，双壳类，介形类，等足类，原足类等。丰度为 56 ind./m²，其中以多毛类丰度最高的，占比达 43%，等足类、端足类和原足类所占比例均为 14-15% 之间（图 5.4-31）。

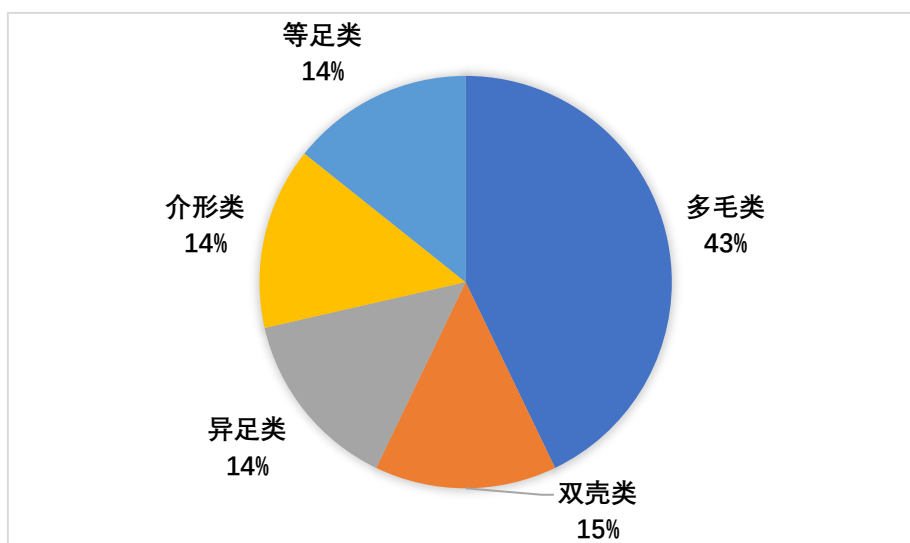


图 5.4-31 PRZ1 大型底栖生物群落结构

(b) 垂直分布

大型底栖生物在沉积物中的垂直分布特征如图 5.4-32 所示，丰度从表层向下随层位增加而明显减少，占接近一半的丰度的大型底栖生物分布在最上层（0-2 cm）沉积物中，在 5 cm 以深的沉积物所占比例为 28 %。

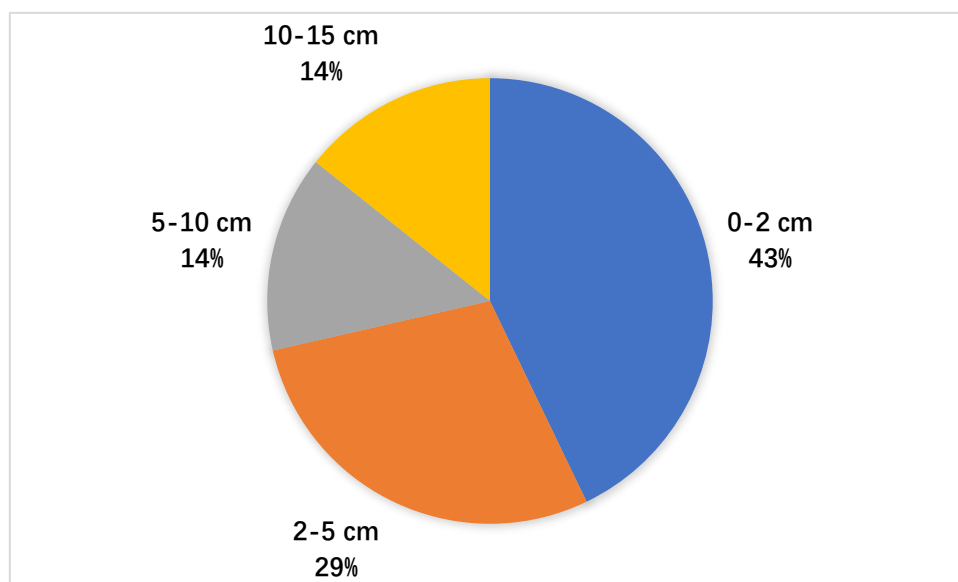


图 5.4-32 PRZ1 大型底栖生物垂直分布

5.4.3.3.3 影响参照区与保全参照区对比

(a) 群落组成与丰度

PRZ1 和 IRZ 在前期调查中共发现有 7 类大型底栖生物，其中两区域共有 4 类，包括多毛类、介形类、等足类和原足类。IRZ 特有 2 类，PRZ1 特有 1 类。两区域大型底栖生物总丰度均在 32-52 ind./m²；其中多毛类在两区域均为第一优势类群，丰度均超过 40 %。IRZ 与 PRZ1 区大型底栖生物群落组成与丰度相似，两区域丰度均小于位于 CC 区东部的德国合同区（148-808 ind./m²）及 NORI 合同区（166-278 ind./m²）但上述区域之间的群落优势类群和群落结构均相似（图 5.4-33）（NORI 2022）。

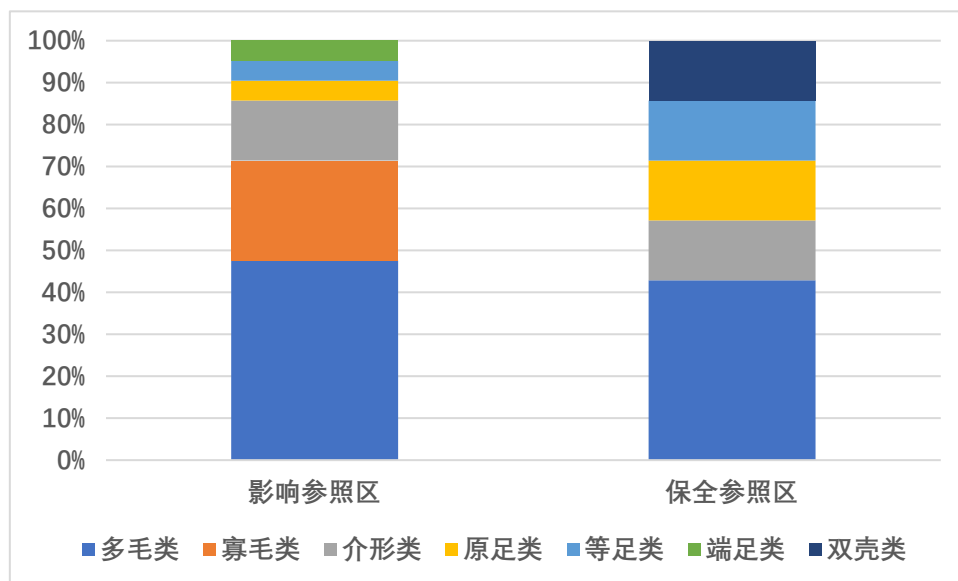


图 5.4-33 IRZ 与 PRZ1 小型底栖生物群落结构对比

(a) 垂直分布

IRZ 与 PRZ1 垂直分布较为类似，均集中在表层 0-5 cm，丰度占比超过 80%，5-10 cm 很少（图 5.4-34）。

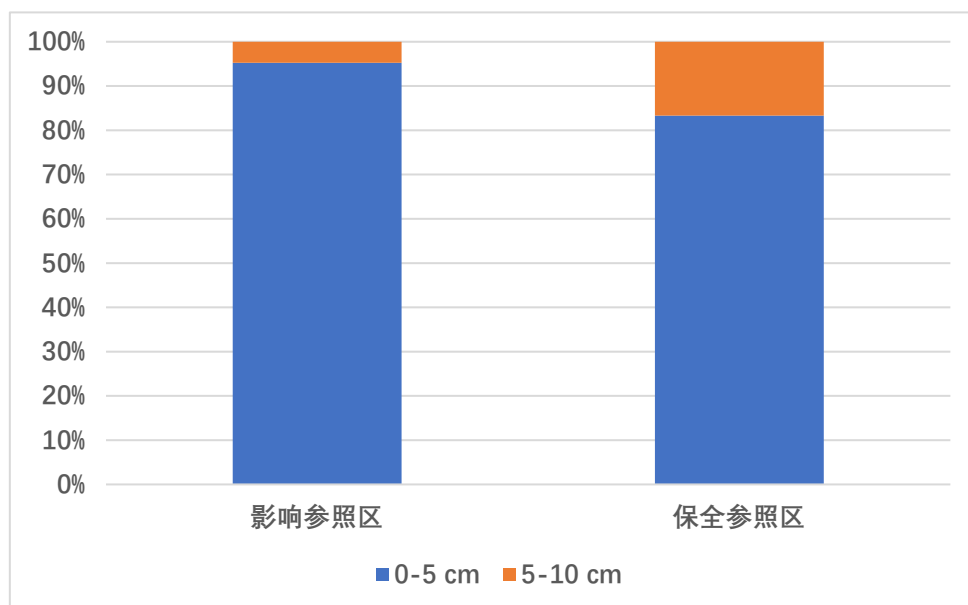


图 5.4-34 IRZ 与 PRZ1 小型底栖垂直分布对比

5.4.3.4 巨型底栖生物

通过对摄像拖体搭载的照相机获得的海底视像数据进行照片鉴定，我们对巨型底栖动物的组成和丰富度进行了分析。视像数据由中国五矿 2023 年航次在 A-5 区块进行的摄像拖体调查获得。我们在中国五矿合同区 A-5 区块共进行了 4

站摄像拖体测线(DY79I-A5-BVP01、DY79I-A5-BVP02、DY79I-A5-BVP03 和 DY79I-A5-BVP04)，超短基线水下定位系统确定的拖体实际轨迹如图 5.4-35。其中 2 条位于 PRZ1 及其周边，2 条位于 IRZ 及其周边；DY79I-A5-BVP01 测线长度约 24.5 km，其余三条测线长度约 20 km，每条测线有 5 km 位于区块内，其余部分位于相应区块两侧。将摄像测线按照地理位置分成 6 个区块，位于 PRZ1 及其周边的标注为 zone-1-3，IRZ 及其周边的标记为 zone-4-6。

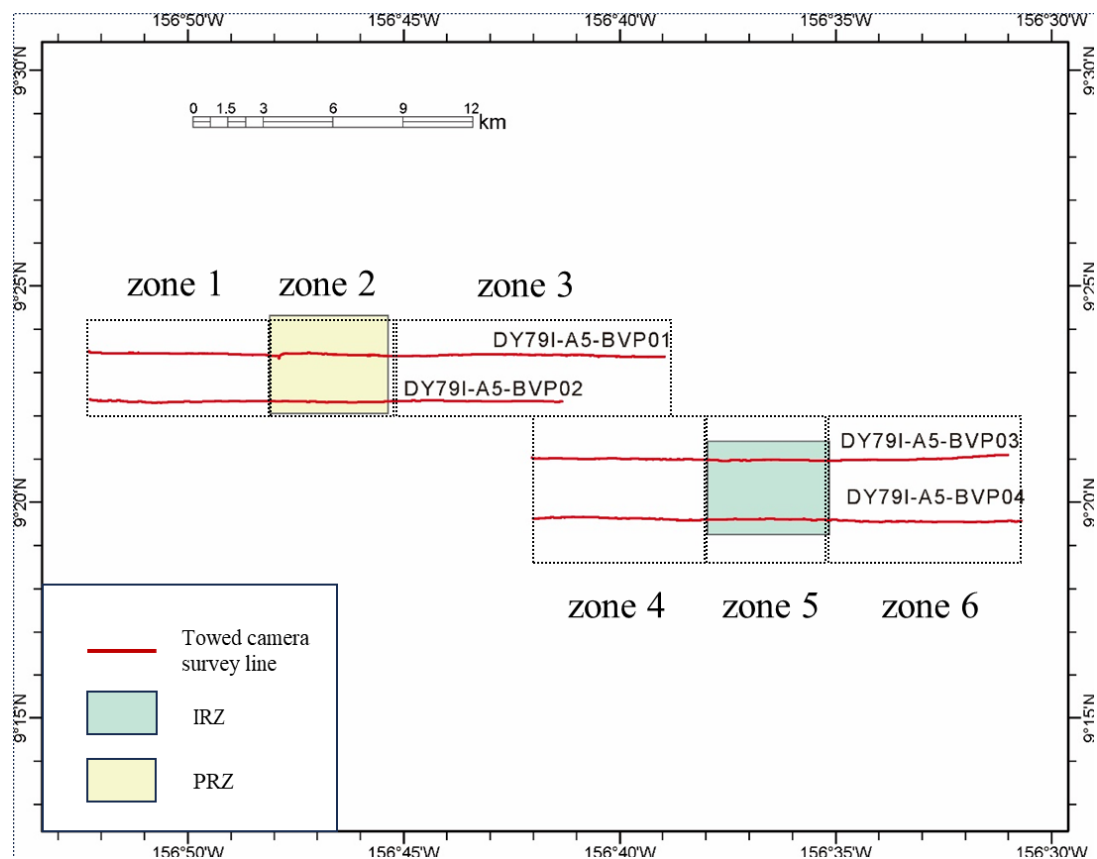


图 5.4-35 中国五矿合同区 A-5 区块海底摄像测线及分区图

摄像拖体共获得 22757 张照片，从中识别出巨型底栖生物 13858 个。经计算，巨型底栖动物的平均丰度约为 452.6 ind./ha，包括原生动物、海绵动物、刺胞动物、棘皮动物、环节动物、节肢动物、软体动物和脊索动物等 8 个门。其中后生底栖无脊椎动物平均丰度为 386.1 ind./ha，与 Durden 等 2021 年发表的在 CC 区西部 APEI 1、APEI 4 及 APEI 7 的研究相比丰度数值较接近（图 5.4-38），门/纲水平生物大类也基本一致，仅巨型原生动物（有孔虫）在 A-5 区块的丰度较低。这些结果表明巨型底栖生物群落的丰度与生物类群在 CC 区西部的较大地理尺度上具有较高相似性。本区巨型底栖生物以棘皮动物为主（44.3 %），主要

由海参纲（27.3 %）和蛇尾纲（12.0 %）组成，此外还有少量海星（3.3 %）以及极少量的海胆与海百合（1.3 %，0.4 %）；其次为海绵动物（18.0 %），以有孔虫 Xenophyophores 为主的原生动物（14.1 %）以及以珊瑚和海葵为主的刺胞动物（12.3 %）；环节动物、软体动物、节肢动物以及脊索动物较少见（图 5.4-36, 37）。

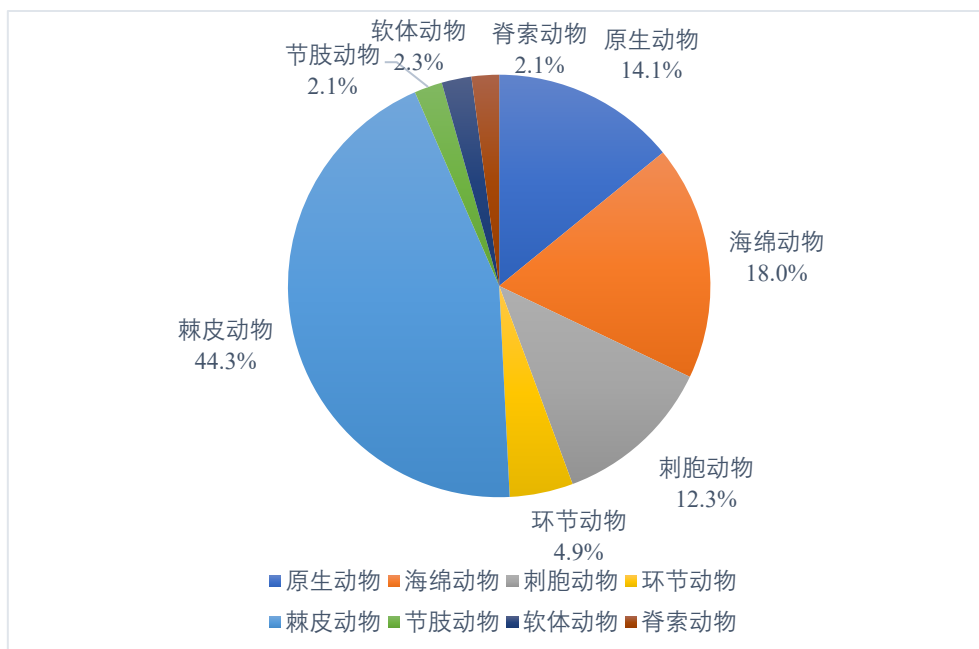


图 5.4-36 巨型底栖生物门水平丰度分布

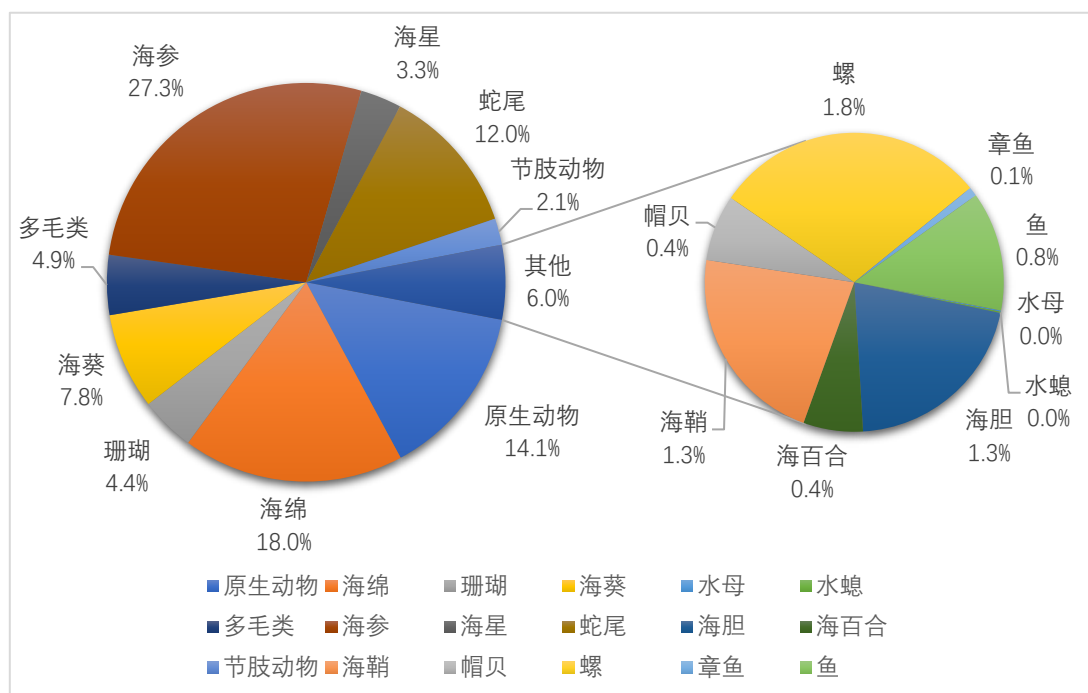


图 5.4-37 巨型底栖生物纲/目等大类水平丰度分布

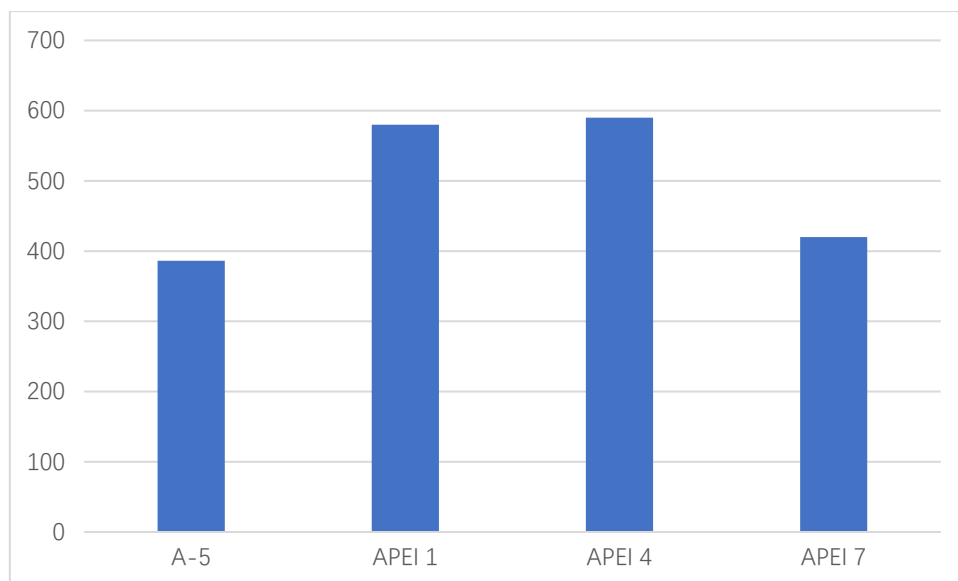


图 5.4-38 A-5 区块与 CC 区西部 APEI 区巨型底栖无脊椎动物平均丰度比较（单位为 ind./ha）

按生活方式可将底栖生物区分为漫游生物、游泳生物、固着生物三大类，其中本区域占优势的漫游生物和固着生物占优势分别占总丰度 47 %和 46 %。漫游生物主要为棘皮动物门，最多的是海参纲（27.3 %），其次为蛇尾（12.0 %），海星、螺、帽贝以及以等足类为代表的底栖节肢动物很少；固着生物中以原生动物和海绵动物占绝大多数（18 %，14 %），其次为海葵与珊瑚（7.8 %，4.4 %），海鞘、海百合、水螅等很少，丰度占比均少于 2 %；游泳生物最少，约占总丰度 7 %，其中多毛类较多（4.9 %），其次为以虾为代表的游泳节肢动物，鱼类、章鱼及水母很少（图 5.4-37，39）。

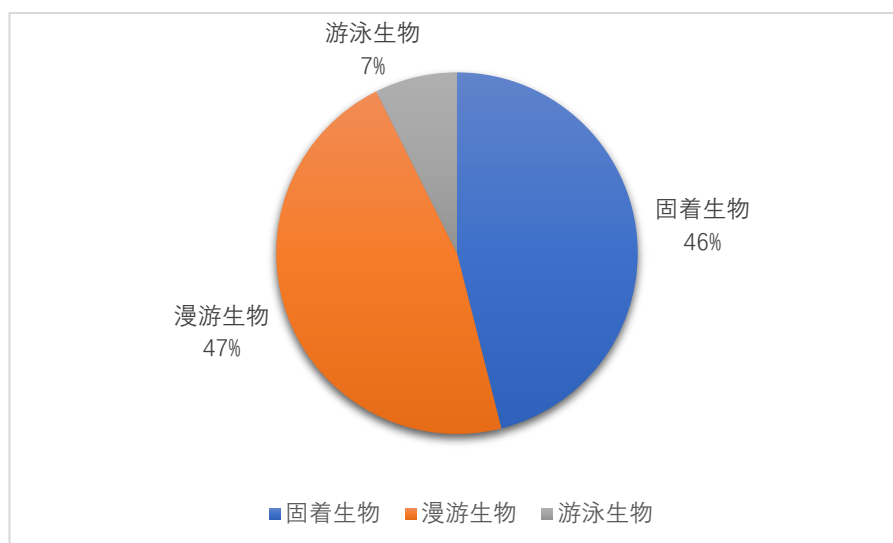


图 5.4-39 巨型底栖生物按生活方式分类的比例图

空间分析指示了 6 个区块之间巨型底栖生物丰度的差异，其中丰度最高和最低值分别出现在 zone 4 和 zone 6，分别为 528.3 ind./ha 和 325.8 ind./ha。分析表明分别位于 PRZ1 与 IRZ 的 zone 2 和 zone 5 巨型底栖生物丰度没有显著差异（431.0 ind./ha vs 510.6 ind./ha）（图 5.4-40）。除少数丰度小于 0.1% 的罕见类群（如水母、水螅和章鱼）以外，PRZ1 与 IRZ 的巨型底栖动物物种组成和群落结构都非常相似（图 5.4-41）。

在 NORI-D 区域研究结果中，在其所调查的 597 m² 的海底面积中确定了 605 个后生巨型动物标本和 2657 个有孔虫，共包括 72 种后生巨型动物的形态，其中以刺胞动物为最为丰富。在整个 NORI-D 区域，巨型底栖生物分布较为均匀，丰度范围在 0.93-1.08 ind./m² (NORI 2022)。A-5 区块的巨型底栖生物丰度低于 NORI-D 区块。

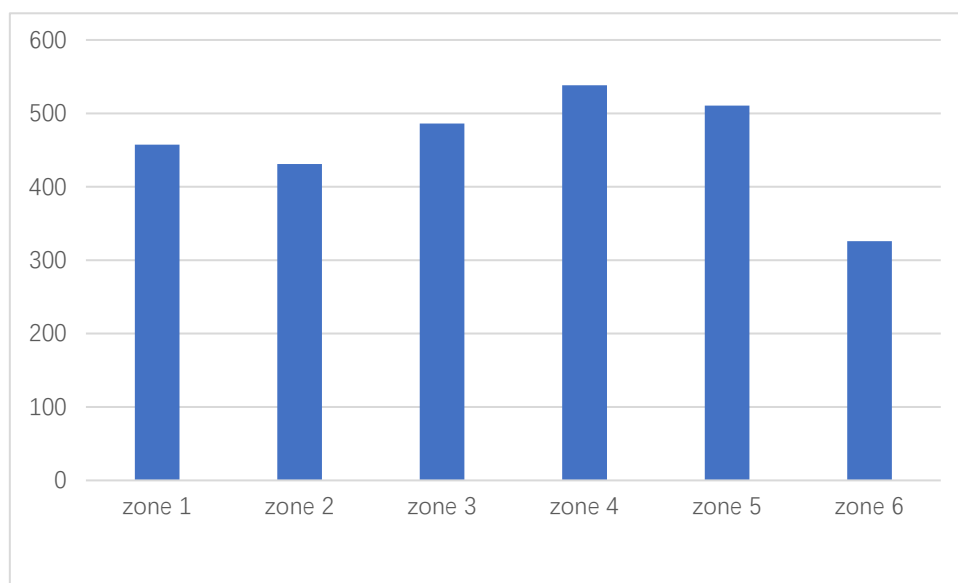


图 5.4-40 PRZ1 与 IRZ 巨型底栖生物丰度比较（单位为 ind./ha）

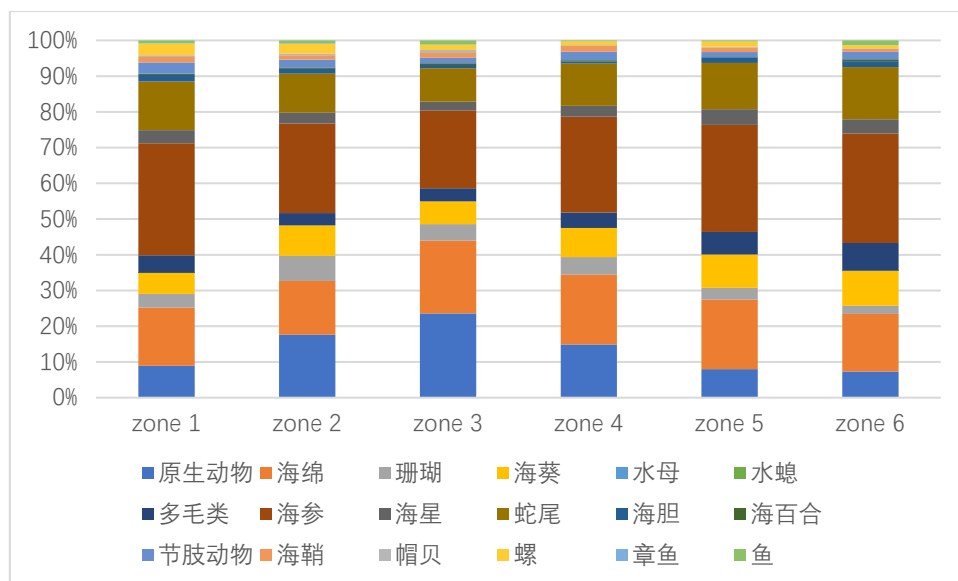


图 5.4-41 PRZ1 与 IRZ 巨型底栖生物群落结构比较



深海参 (*Psychronaetes harseni*)
CC 区东部, Simon-Lledó, 2020



蝶参 (*Psychropotes semperiana*)
CC 区东部, NIXO 45 site



蝶参 (*Psychropotes verrucicaudatus*)
CC 区西部, Bribiesca-Contreras, 2022



芋参 (*Molpadiodemas* sp.)
CC 区西部, Bribiesca-Contreras, 2022



叶疣参 (*Peniagone leander*)
CC 区东部, NIXO 45 site



叶疣参 (*Peniagone vitrea*)
CC 区西部, Bribiesca-Contreras, 2022



辛那参 (*Synallactidae* sp.)
CC 区西部, Durden, 2021



海参 (cf. *Galatheathuria* sp.)
CC 区西部, Durden, 2021

图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物



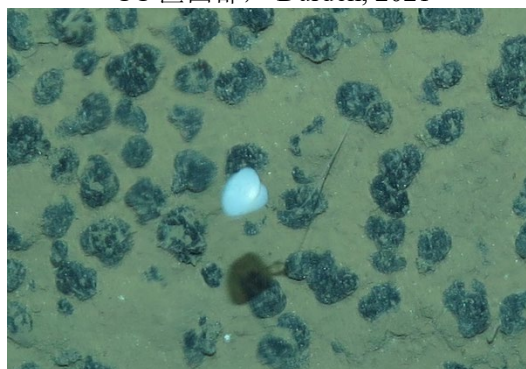
长茎海绵 (*Caulophacus* sp.)
CC 区西部, Durden, 2021



偕老同穴海绵 (*Cobitella* sp.)
CC 区西部, Durden, 2021



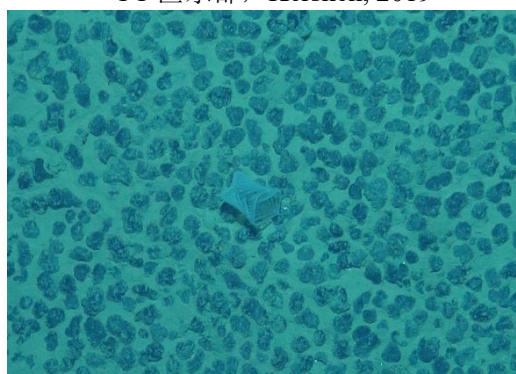
拂子介海绵(*Hyalonema* sp.)
CC 区西部, Bribiesca-Contreras, 2022



茎球海绵 (*Hyalostylus* sp.)
CC 区东部, Kersken, 2019



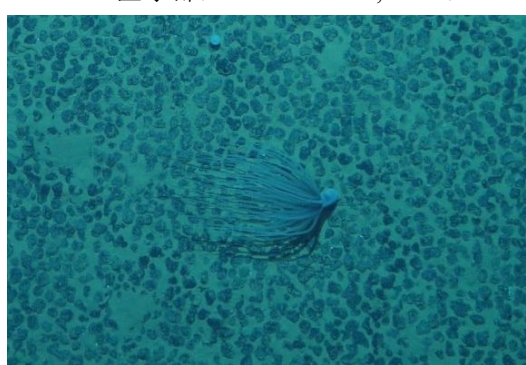
竹珊瑚 (*Isididae* sp.)
CC 区西部, Durden, 2021



渊黑珊瑚 (*Abyssopathes lyra*)
CC 区东部, Simon-Lledó, 2020,



海葵 (*Hormathiidae*)
CC 区东部, NIXO 45 site



角海葵 (cf. *Cerianthus* sp.)
CC 区东部, NIXO 45 site

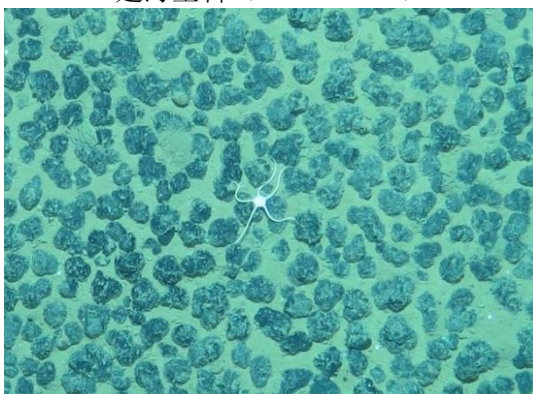
图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物 (续前)



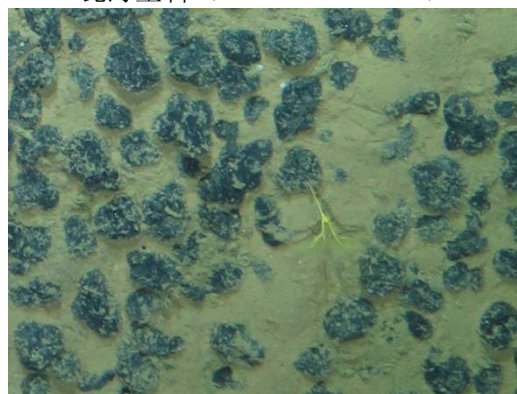
翅海星科 (Pterasteridae)



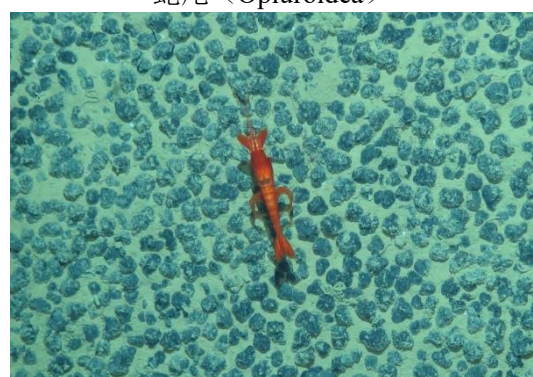
瓷海星科 (Porcellanasteridae)



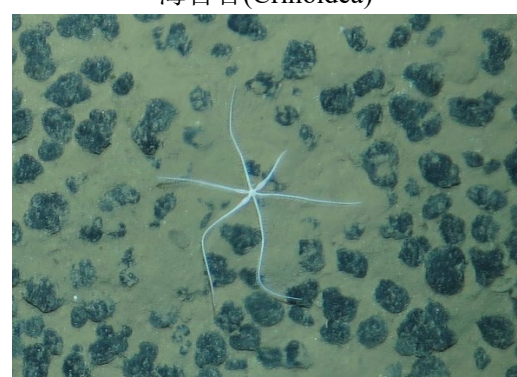
蛇尾 (Ophiuroidea)



海百合 (Crinoidea)



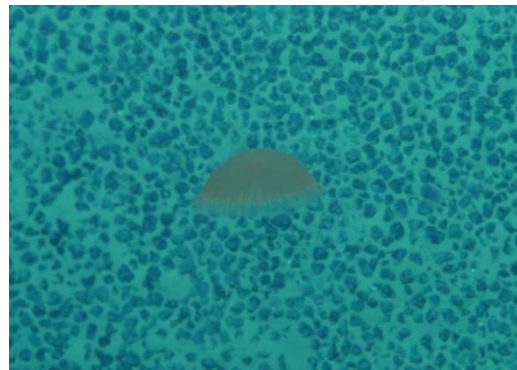
虾 (*Cerataspis monstrosus*)
CC 区东部, Simon-Lledó, 2020



长板海星 (*Freyestera* sp.)
CC 区西部, Bribiesca-Contreras, 2022



Fish



水母 (cf. *scyphomedusa* sp.)

图 5.4-42 A-5 区块的代表性巨型底栖生物 (续前)

5.4.3.5 结核附着生物

在中国五矿 2023 年航次期间，对 A-5 区块内 40 站箱式取样器采集的样品开展了现场调查，这些样品均保留有完整的上覆海水、且沉积物未出现泄露，站点位置如图 5.4-43。现场调查共采集到结核附着生物 39 个。结核附着生物的群落结构见图 5.4-44。初步结果表明结核附着生物优势类群为原生动物（28.2 %），和苔藓动物（17.9 %），其他类群还包括刺胞动物、海绵动物、环节动物、脊索动物、软体动物、棘皮动物以及甲壳动物等，另有 18 % 未鉴定种类。每个箱式面积为 0.25 m²，基于箱式采样器调查估计可得 A-5 区块的结核附着生物丰度约为 3.9 ind./m²。

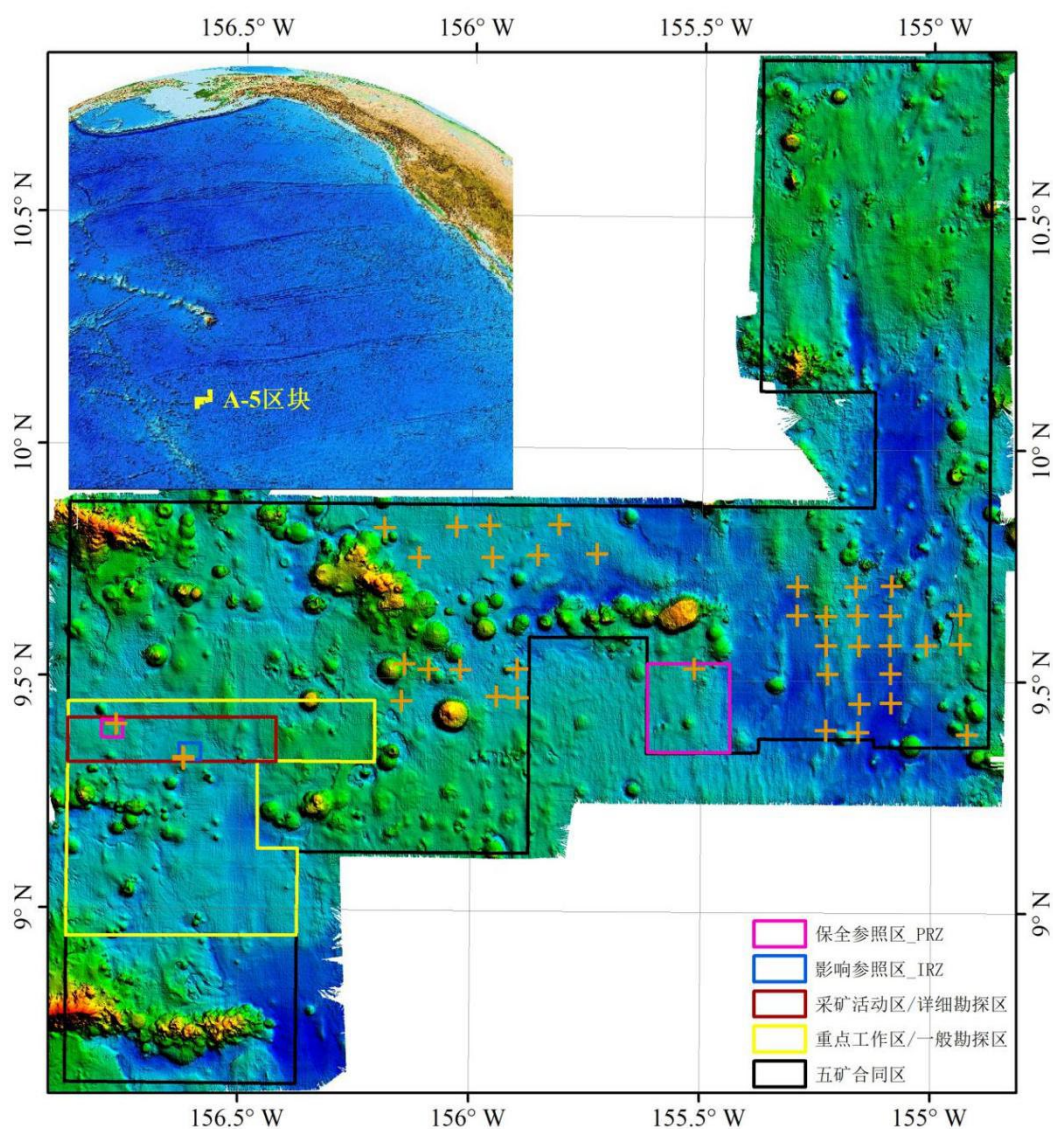


图 5.4-43 上覆水完整的箱式取样站位图（A-5 区块西侧为 PRZ1，东侧为 PRZ2）

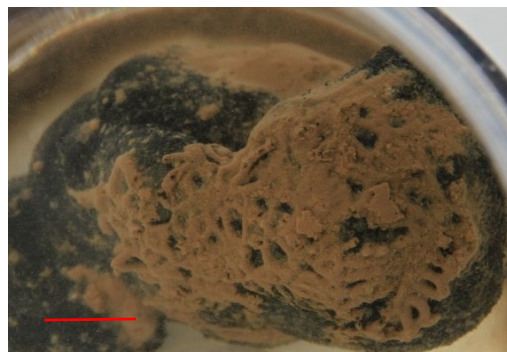
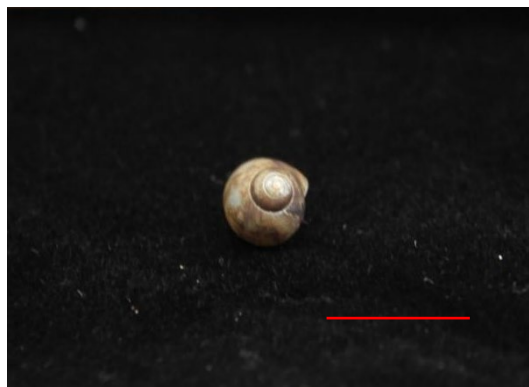
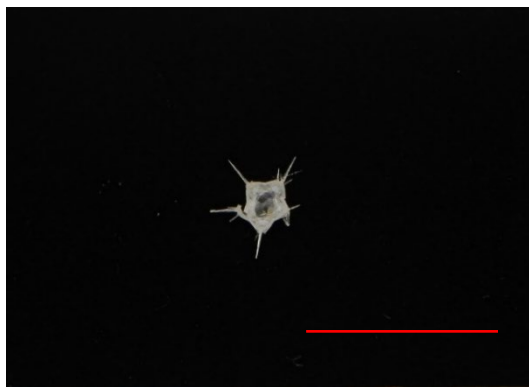
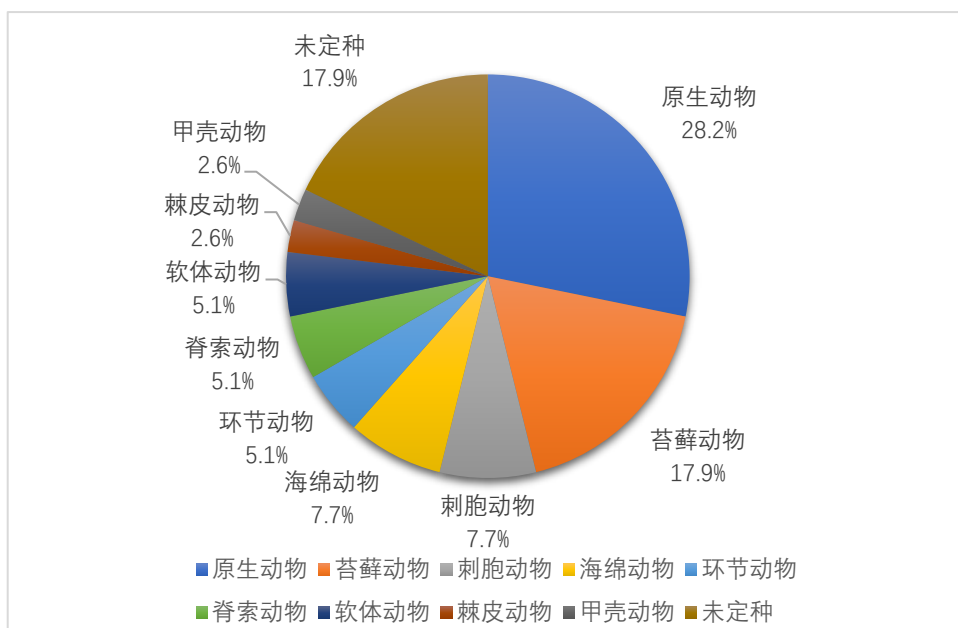




图 5.4-45 采集的部分结核附着生物照片（标尺为 1 cm）

CC 区东部 GSR 德国合同区中调查发现，结核附着生物中原生动物主要是有孔虫占主导地位，而结核相关的小型底栖生物，主要以线虫为主(GSR 2018)。

5.4.3.6 食腐生物

（1）食腐生物多样性与 DNA 测序

在中国五矿 2021 年航次与 2022 年航次在 IRZ 和 PRZ1（含其周边）各进行 2 次 Lander 诱捕采样，获得鱼类和钩虾等食腐生物样品(图 5.4-46)，其中两区域共有物种 3 种，PRZ1 独有 2 种，IRZ 独有物种 5 种（表 5.4-4）。食腐生物种类多样性较相似，考虑到食腐生物大多为广布种，因此存在的差异可能与采样站位相对较少有关。其中诱捕到最多的为 *Alicella* 属钩虾，该属共发现 1 种。目前世界上已发现的 *Alicella* 属钩虾主要分布在太平洋 4000-8000 m 水深海底（Ocean Biodiversity Information System, OBIS）。此外，片脚钩虾科的片脚钩虾属（*Eurythenes*）诱捕的数量也较多，A-5 区块该属共诱捕到两个种类，包括马氏片脚钩虾和另一个片脚钩虾未定种。片脚钩虾属钩虾分布非常广泛，在东太平洋 CC 区的东部、中部和西部均有调查记录。

表 5.4-3 中国五矿合同区食腐生物名录

区域	种	类群
PRZ1	<i>Barathritis</i> sp.	鱼
	<i>Alicella</i> sp.	钩虾
	<i>Paralicella tenuipes</i>	钩虾
	<i>Eurythenes</i> sp.	钩虾
	<i>Eurythenes maldoror</i>	钩虾
IRZ	<i>Barathritis</i> sp.	鱼
	<i>Coryphaenoides yaquinae</i>	鱼
	<i>Coryphaenoides lecointei</i>	鱼
	<i>Alicella</i> sp.	钩虾
	<i>Eurythenes</i> sp.	钩虾
	<i>Acanthonotozoma</i> sp.	钩虾
	<i>Ichnopus</i> sp.	钩虾
	Hyperiidea	钩虾



图 5.4-46 A-5 区块 Lander 诱捕的食腐生物

我们获得了鼠尾鳕 *Coryphaenoides yaquinae* 样本的细胞色素 c 氧化酶 I 亚基 (Cytochrome c Oxidase subunit I, COI) 分子条形码片段，并从 NCBI 和 BOLD 等数据库中查找其他采集地该物种的 COI 序列数据及地理信息。结果如图 5.4-47, 48 所示，可见在 A-5 区块 IRZ 获得的样本 COI 单倍型与来自 CC 区东部的绝大多数样本相同。这表明鼠尾鳕 *C. yaquinae* 在 CC 区范围内种群可能没有明显隔离与分化，有较好的连通性。

NORI-D 区域中共进行了 10 次 Lander 作业，获得了 15 个食腐生物，其中 *Coryphaenoides* sp. 是最丰富的物种，其次是 *Pachycara nazca* 和 *Barathritis iris* (NORI 2022)，其中 *Coryphaenoides* sp. 和 *Barathritis* sp. 在 A-5 区块中被发现。

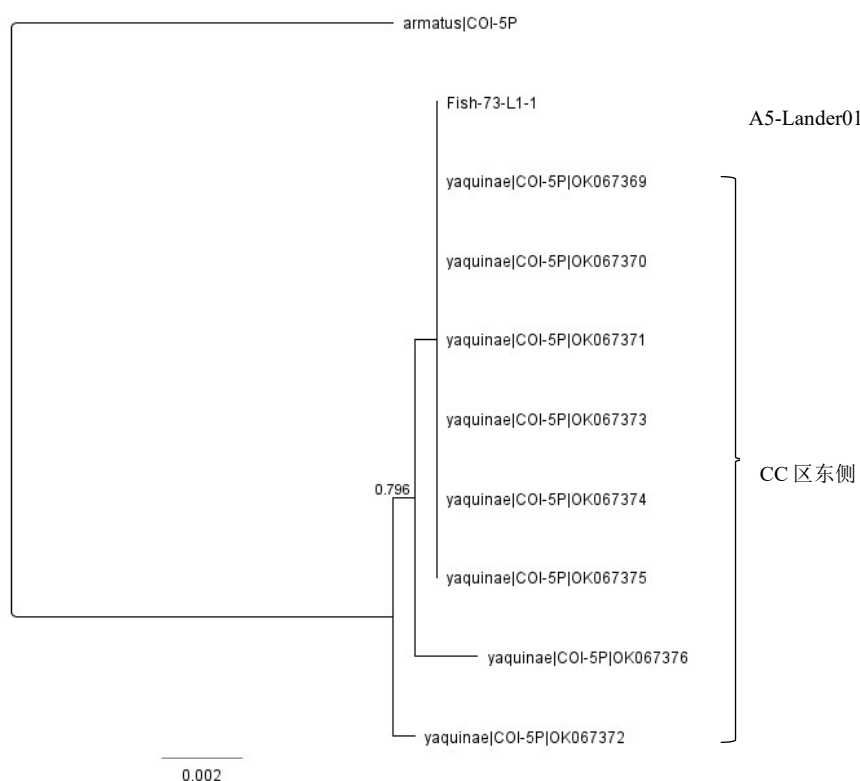


图 5.4-47 鼠尾鳕 *C. yaquinae* 的 COI 系统发育树

DY73I-A5-Lander01 为本研究 IRZ 附近采样站位，其余 *C. yaquinae* 序列数据来自 NCBI 等数据库，采集地在 CC 区东侧，具体采集地见下图

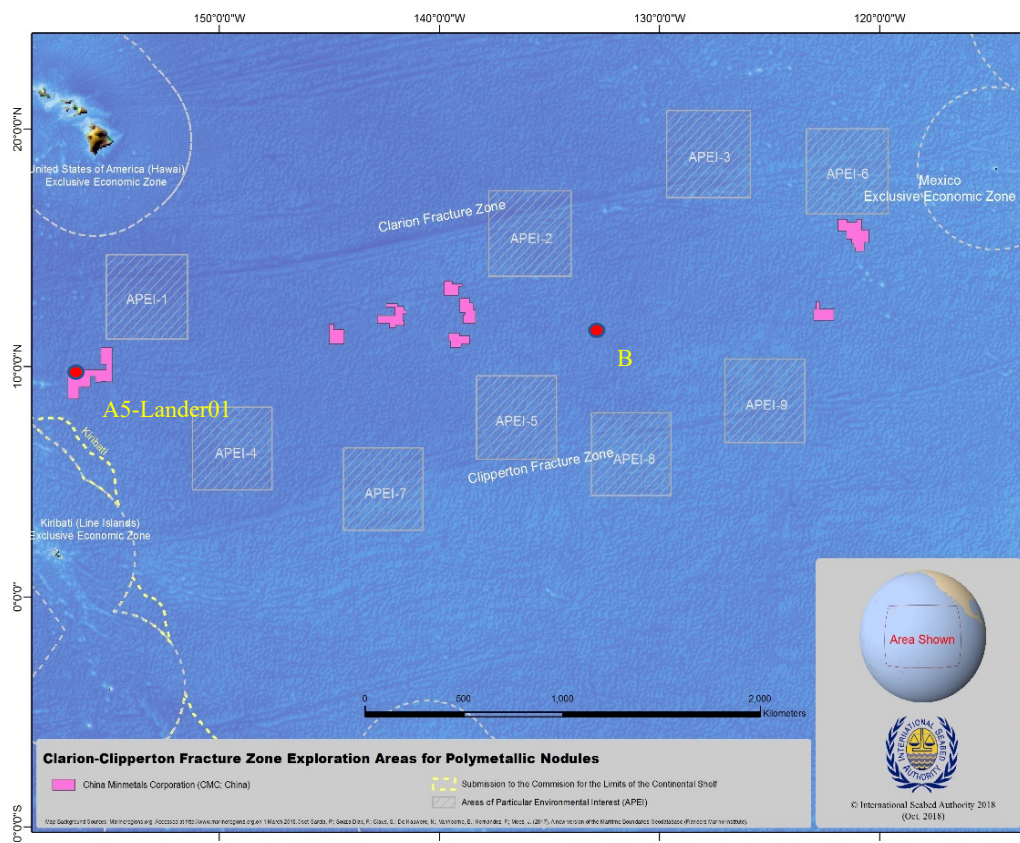


图 5.4-48 鼠尾鳕 *C. yaquinae* 采集地位置示意图

其中 DY73I-A5-Lander01 为本研究样本采集地，B 为 NCBI、BOLD 等公开数据库中获
得序列信息样本采集地

(2) 生物体微量元素

利用中国五矿 2022 年航次 DY73I-A5-Lander01-01 和 DY73I-A5-Lander02-04 站
位样品分析获得了生物体微量元素结果。测定结果见表 5.4-5。

表 5.4-4 生物体微量元素测定结果

样品号	As	Cd	Co	Cr	Ni	Cu	Pb	Hg	Mo	Mn
	μg/g	ng/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	ng/g	μg/g	μg/g
73I-A5-lander01-01	9.20	28.4	0.55	3.28	0.97	1.17	0.14	3186	0.03	2.80
73I-A5-lander02-04	3.60	50.0	0.20	2.17	0.93	6.76	0.35	4336	0.07	7.86
样品号	Zn	Fe	Rb	Cs	Li	Mg	Na	P	Ca	K
	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	%	%	%	%	%
73I-A5-lander01-01	18.0	56.7	1.35	0.08	0.22	0.09	1.89	0.57	0.18	0.96
73I-A5-lander02-04	42.8	117	1.71	0.08	1.18	0.20	8.32	0.78	0.36	1.01

测定结果显示，在自然状态下，五矿合同区的 A-5 区块的 2 种底游鱼类体
内，多种重金属元素均有检出，且不同种类鱼的重金属含量存在明显差异。其

中砷钴铬元素在鼠尾鳕肌肉中含量较高，而镉铜铅锌铁锰钼等元素在鲷鲷中含量较高，汞和镍在两种鱼中含量接近。除铁元素与锌元素外，鼠尾鳕中砷元素含量最高，鲷鲷中锰和铜元素含量最高，镉元素与钼元素在两种鱼中均最少。

5.5 现有生物环境的总结

本区域海鸟主要为鳶鸟，无鲸豚类观测记录。

中国五矿 A-5 区块整体处于 CC 区西部，属于寡营养海域，受热带东太平洋以北赤道流影响。表层海洋叶绿素与生产力均比 CC 区东部低，表层叶绿素浓度的周年变化小，IRZ、PRZ1 和 PRZ2 表层叶绿素浓度差异不显著，且周年变化规律一致。

在各个季节，表层叶绿素浓度等值线均大致呈现纬向分布，因此 A-5 区块内的 IRZ、PRZ1 和 PRZ2 在初级生产力的时空变化方面具有高度的一致性和可对比性。

初级生产力的剖面最大值位于次表层 50 m。水柱积分初级生产力显示 DY50I-A5-S06-CTD11 站位水柱总初级生产力为 $51.44 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。PRZ1 和 IRZ 两区域叶绿素 *a* 浓度垂向变化一致，最大值均位于约 50 m 处，分别为 0.2 mg/m^3 和 0.28 mg/m^3 。

浮游植物平均丰度为 338 cells/L，群落组成以硅藻为主，其次甲藻，优势种主要以透明辐杆藻、琼氏圆筛藻等硅藻种类以及圆柱角藻等甲藻种类为主。

浮游动物群落含 6 门 193 种，其中桡足类为最优势类群，较优势类群还包括刺胞动物、介形类、毛颚动物和被囊类等，生物量呈现由表层到深海逐渐降低的趋势。

微生物群落以 Gammaproteobacteria 均为优势种群，其中以 Burkholderiales、Pseudomonadales 目占优势，古菌 Nitrosopumilales 目为古菌优势类群。微生物群落结构随着深度呈现明显变化，10 cm 以深逐渐稳定。细菌及古菌优势类群与位于 CC 区东部的德国合同区一致，反映 CC 区深海沉积物微生物生态学功能在大尺度上具有稳定性。

小型底栖生物调查结果显示，A-5 区块的 IRZ 与 PRZ1 的小型底栖生物群落组成相似，优势类群均为线虫，占比均超过 90 %，其次为猛水蚤，再次为多毛

类；小型底栖生物丰度变化范围在 50-66 ind./m² 之间，与 CC 区西部相似但小于 CC 区东部，但类群组成与 CC 区西部和东部均较为接近或一致。

大型底栖生物调查结果显示，A-5 区块的 IRZ 与 PRZ1 的大型底栖生物群落组成相似，均包括多毛类，介形类，等足类，原足类等，优势类群均为多毛类，丰度超过 40 %。大型底栖生物丰度变化范围在 32-52 ind./m² 之间，丰度均小于位于 CC 区东部，但群落组成有一定相似性。

巨型底栖生物分析显示本区域主要类群包括原生动物、海绵动物、刺胞动物、棘皮动物、环节动物、节肢动物、软体动物和脊索动物等 8 个门。巨型底栖生物平均丰度约为 452.6 ind./ha，PRZ1 与 IRZ 的巨型底栖生物丰度没有显著差异（431.0 ind./ha vs 510.6 ind./ha）。PRZ1 和 IRZ 的巨型底栖动物物种组成和群落结构都非常相似

A-5 区块的结核附着生物丰度约为 3.9 ind./m²，主要包括原生动物、苔藓动物、刺胞动物、海绵动物和环节动物等。

食腐生物类群主要为鼠尾鳕、鲷、*Alicella* 钩虾以及片脚钩虾，其中分子生物学研究证实鼠尾鳕在较大尺度上有一定连通性，而片脚钩虾广泛分布于包括 CC 区在内的太平洋。

综上，中国五矿 A-5 区块内的 IRZ 与 PRZ1 之间的生物特征特别是底栖生物特征十分相似，而 A-5 区块与 CC 区其他区域特别是 CC 区西部有较高相似性。

5.6 参考文献

王小谷, 周亚东, 张东声, 洪丽莎, & 王春生. (2013). 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究. 生态学报, 33(2), 492-500.

BGR. 2018. Environmental Impact Assessment for the testing of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle in the Eastern German license area (Clarion-Clipperton Zone) in the framework of the European JPI-O MiningImpact 2 research project. [place unknown].

Bribiesca-Contreras, G., Dahlgren, T. G., Amon, D. J., Cairns, S., Drennan, R., Durden, J. M., ... & Glover, A. G. (2022). Benthic megafauna of the western Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. ZooKeys, 1113, 1.

De Smet, B., Pape, E., Riehl, T., Bonifácio, P., Colson, L., & Vanreusel, A. (2017). The community structure of deep-sea macrofauna associated with polymetallic

- nodules in the eastern part of the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Frontiers in Marine Science*, 4, 103.
- Durden, J. M., Putts, M., Bingo, S., Leitner, A. B., Drazen, J. C., Gooday, A. J., Smith, C. R. (2021). Megafaunal ecology of the western Clarion Clipperton Zone. *Frontiers in Marine Science*, 8, 671062.
- GSR. 2018. Environmental Impact Statement - Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact. [place unknown].
- Kersken, D., Janussen, D., & Arbizu, P. M. (2019). Deep-sea glass sponges (Hexactinellida) from polymetallic nodule fields in the Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCFZ), northeastern Pacific: Part II—Hexasterophora. *Marine Biodiversity*, 49, 947-987.
- McQuaid, K. A., Attrill, M. J., Clark, M. R., Cobley, A., Glover, A. G., Smith, C. R., & Howell, K. L. (2020). Using habitat classification to assess representativity of a protected area network in a large, data-poor area targeted for deep-sea mining. *Frontiers in Marine Science*, 7, 558860.
- NORI. 2022. Collector Test Study – Environmental Impact Statement – Testing of polymetallic collector system components in the NORI-D contract area, Clarion Clipperton Zone, Pacific Ocean. Jamaica.
- Rabone, M., Horton, T., Jones, D. O. B., Simon-Lledó, E., & Glover, A. G. (2023). A review of the International Seabed Authority database DeepData from a biological perspective: challenges and opportunities in the UN Ocean Decade. *Database*, 2023, baad013.
- Simon-Lledó, E., Pomee, C., Ahokava, A., Drazen, J. C., Leitner, A. B., Flynn, A., ... & Jones, D. O. (2020). Multi-scale variations in invertebrate and fish megafauna in the mid-eastern Clarion Clipperton Zone. *Progress in Oceanography*, 187, 102405.
- Tilot, V. (2006). Biodiversity and distribution of the megafauna. *Unesco*.
- Spalding, M. D., Agostini, V. N., Rice, J., & Grant, S. M. (2012). Pelagic provinces of the world: a biogeographic classification of the world's surface pelagic waters. *Ocean & Coastal Management*, 60, 19-30.
- Watling, L., Guinotte, J., Clark, M. R., & Smith, C. R. (2013). A proposed biogeography of the deep ocean floor. *Progress in Oceanography*, 111, 91-112.
- Uhlenkott, K., Vink, A., Kuhn, T., & Martinez Arbizu, P. (2020). Predicting meiofauna abundance to define preservation and impact zones in a deep - sea mining context using random forest modelling. *Journal of Applied Ecology*, 57(7), 1210-1221.

6 说明现有的社会经济环境

6.1 关键信息

通过公开资料收集整理分析，对 A-5 区块现有的社会经济环境有以下几点认识：

- (1) 拟议活动区域不是东太平洋的重要渔场；
- (2) 该区域不是东太平洋的主要海上运输通道；
- (3) 该区域不存在包括垂钓、观鲸和一般性旅游观光在内的各种旅游业；
- (4) 该区域开展的海洋科学研究活动主要包括 ISA 框架下各个合同承包者在合同区和 APEI 区域开展的资源勘探和环境调查工作，“热带太平洋观测系统”（Tropical Pacific Observation System, TPOS）和 Argo 观测系统（Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo）；
- (5) CTA 距离最近的海底电缆超过 100 km；
- (6) 该区域不存在具有考古或历史意义的遗址。

6.2 现有的利用情况

6.2.1 渔业

受限于该区域较为低下的初级生产力水平，CC 区西部不是东太平洋的重要渔场。依据 Global Fishing Watch 组织的数据，中国五矿 A-5 区块所在区域的公海渔业捕捞强度在 500-1000 hours/500 km 的水平，显著低于该区域以西的夏威夷群岛附近区域和以南的赤道太平洋区域（图 6.2-1）。

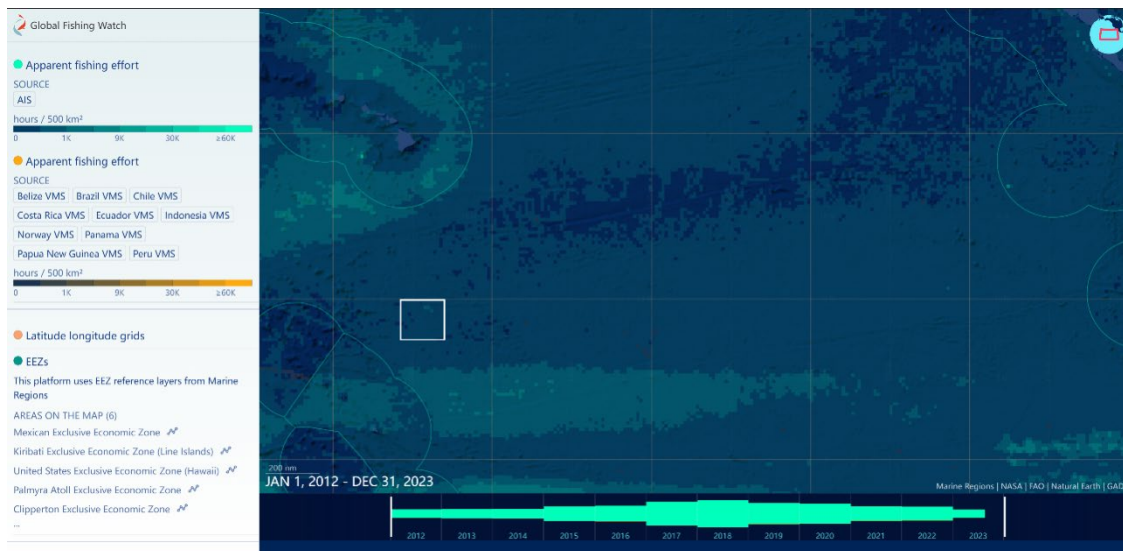


图 6.2-1 中国五矿 A-5 区块所在区域的渔业捕捞强度

(白框为项目所在区域) (数据来源: Global Fishing Watch)

尽管存在金枪鱼渔业等,但对于任何一种公海渔业的主要捕捞目标来说,CC区的西部,特别是A-5区块附近的CC区西部都不是主要的捕捞区域(图6.2-2)(Sala et al., 2018)。近期的一个整合了气候变化模型的公海金枪鱼渔业资源分布研究表明,在未来气候变化条件下,到本世纪中叶(2044-2053年),CC区对于未来公海金枪鱼渔业的重要性可能会显著升高。例如,鲣鱼(skipjack)生物量可能会提高30%,从而在未来成为一个更加重要的公海渔场(图6.2-3)(Amon et al., 2023)。但是,这种上升是高度不均与的,只有在不太可能的出现的温室气体排放场景下(RCP 8.5),CC区西部才可能成为重要的潜在渔场,而在更接近现实情况的温室气体排放场景下(RCP 4.5),主要的金枪鱼生物量升高发生在CC区东部和中部。

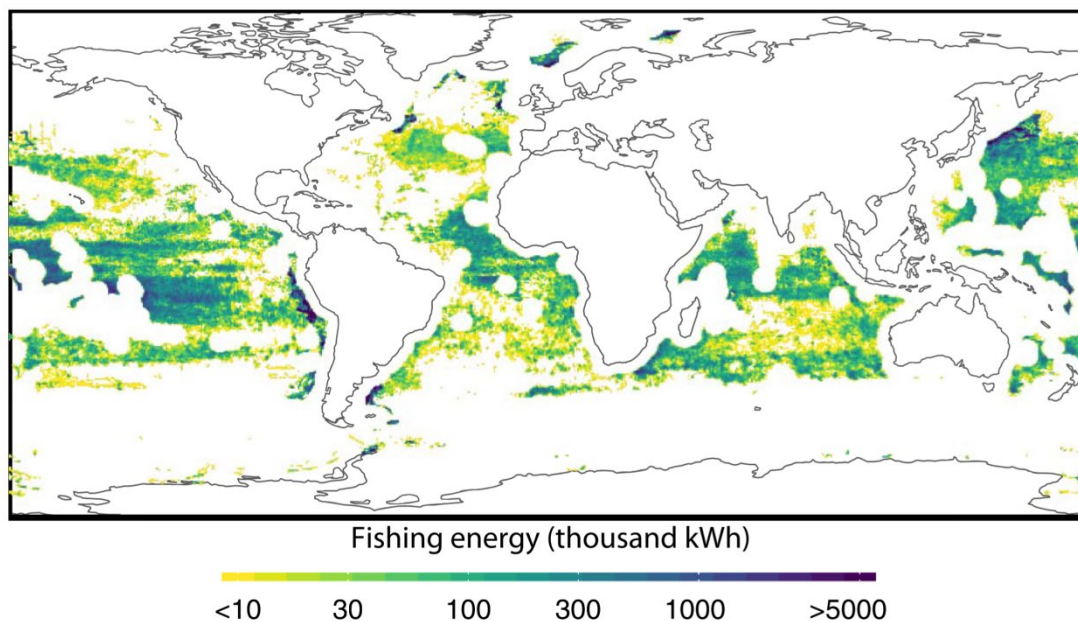


图 6.2-2 全球公海渔场的分布（基于捕捞努力量）（Sala et al., 2018）

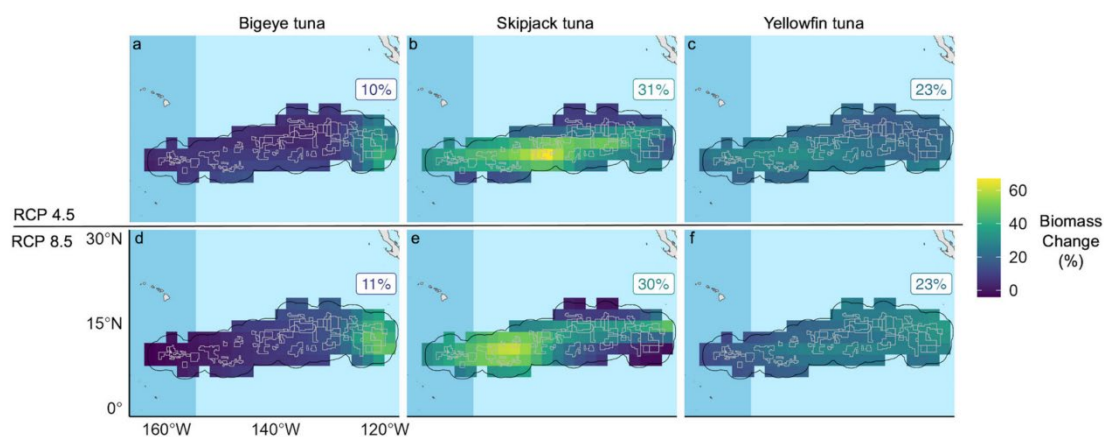


图 6.2-3 未来气候变化情景下 CC 区金枪鱼资源变化情况（Amon et al., 2023）

6.2.2 海上运输

涉及东太平洋的主要海上运输为以下 2 条：（1）东亚——北美西海岸航线，该航线是联系东北亚和北美这两大全球性经济中心的重要通路；（2）东亚——巴拿马——加勒比、北美东海岸航线，该航线经夏威夷群岛的火奴鲁鲁港或绕经夏威夷群岛以南，穿越巴拿马运河后到达大西洋西海岸各港口。

这两条主要航线中，东亚——北美西海岸航线远离 CC 区；东亚——巴拿马——加勒比、北美东海岸航线经过中国五矿 A-5 区块的北部，不进入 A-5 区块。



图 6.2-4 中国五矿 A-5 区块所在区域的海上运输强度（白框为项目所在区域）

（数据来源：IMF Working Paper, WP/20/57）

6.2.3 旅游情况

目前该区域不存在包括垂钓、观鲸和一般性旅游观光在内的各种旅游业。

6.2.4 海洋科学研究

目前该区域开展的海洋科学研究活动主要包括 ISA 框架下各个合同承包者在合同区和 APEI 区域开展的资源勘探和环境调查工作，TPOS 和 Argo 观测系统等。

（1）热带太平洋观测系统（TPOS）

TPOS 是联合国教科文组织政府间海洋学委员会负责的全球海洋观测系统（Global Ocean Observing System, GOOS）的重要组成部分，是继太平洋 TAO/TRITON 浮标观测网之后的新一代业务化观测体系，旨在测量从大约 10°S 到 10°N 的热带太平洋的水下和表层海洋与大气。热带西太平洋的海洋观测加强了对海气热通量、海洋上混合层以及海洋生态要素的针对性观测，不仅对支撑台风、季风和 ENSO 等影响中国和周边国家的天气和气候系统变化的研究意义重大，也对深入了解海洋生态过程对天气或气候变化的响应很有价值。

尽管中国五矿 A-5 区块位于 TPOS 关注的热带太平洋（南北纬 10° 之间）范围，但 A-5 区块内没有 TPOS 浮标，未来也没有部署观测浮标的计划。

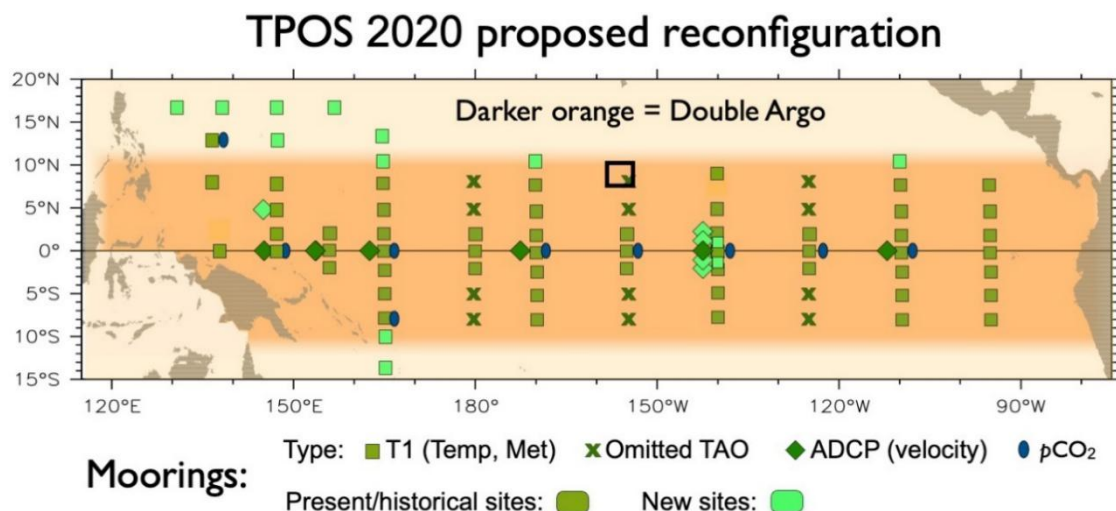


图 6.2-5 TPOS 观测系统与中国五矿 A-5 区块所在区域的位置关系（黑框为项目所在区域）

（数据来源：<https://tropicalpacific.org/>）

（2）Argo 观测系统

由美国、法国、澳大利亚等国家海洋与大气科学家于 1998 年提出的 Argo 计划，是目前实施最为成功的全球海洋观测系统之一，已获取了大量全球海洋内部物理、生物和化学要素观测数据。该计划 2000 年正式启动实施，在 30 多个沿海国家的共同努力下，已在全球海洋建成并长期维持一个由近 4000 个活跃浮标组成的实时观测网，并且从起初仅观测全球无冰覆盖区域 0-2000 m 水深范围温盐度（核心 Argo）已拓展到极地、深海（2000-6000 m）和生物地球化领域。长时间序列、高质量的 Argo 数据，不仅提高了科学家对海洋在全球气候变化中所起作用的认知能力，而且提升了全球变暖、海洋碳循环、缺氧、酸化等科学问题的研究水平。

中国五矿 A-5 区块位于北赤道流的影响区域，因此大量的 Argo 浮标会随着洋流自然漂流经过该区域。采矿试验等海洋活动一般不会对 Argo 浮标探测造成不利影响。

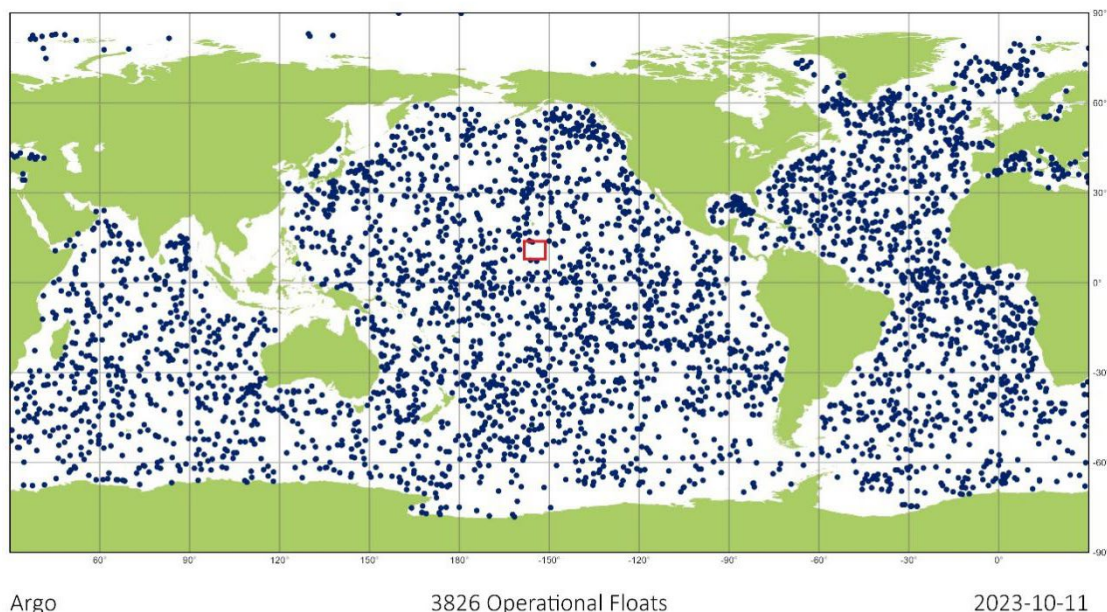


图 6.2-6 Argo 观测系统与中国五矿 A-5 区块所在区域的位置关系（红框为项目所在区域）

（数据来源：<https://www.ocean-ops.org>）

6.2.5 划区管理工具

CC 区及邻近区域已经存在一些划区管理工具，包括 ISA 的 CC 区的 REMP、美国的太平洋海洋保护区网络等。

（1）CC 区环境管理计划（Regional Environmental Management Plan for the CCZ）

在 2007 年由夏威夷大学主办的“太平洋公海区域之深海海山和深海结核区的海洋保护区设计研讨会”（“Pew Workshop on Design of Marine Protected Areas for Seamounts and the Abyssal Nodule Province in Pacific High Sea”）中，以 Craig Smith 博士为首的科学家团体向 ISA 提出应当在太平洋公海区域设立一个关于深海海山和结核区域（生物地理省）的海洋保护区以来保障该区域的生物多样性和生态系统功能。ISA 法技委随后评估了这一建议，并在 2011 年召开了起草环境管理计划的会议，旨在设计一个东太平洋 CC 区的环境管理计划并建立一个包括 9 个 APEIs 的网络。2012 年，ISA 理事会根据《联合国海洋法公约》第 145 条、第 162 条、第 165 条以及《联合国海洋法公约》所要求的由 ISA 履行海洋环境保护义务的条款，通过了《有关克拉里昂-克利伯顿区环境管理计划的决定》（简称“决定”），至此，CC 区环境管理计划正式实施。此后，基于该计划制定

后 10 年期间的科学研究新认识，科学家们提出了新的补充方案。ISA 理事会于 2021 年通过了一份新的修订计划，将 APEIs 增加为 14 个（图 6.2-7）。

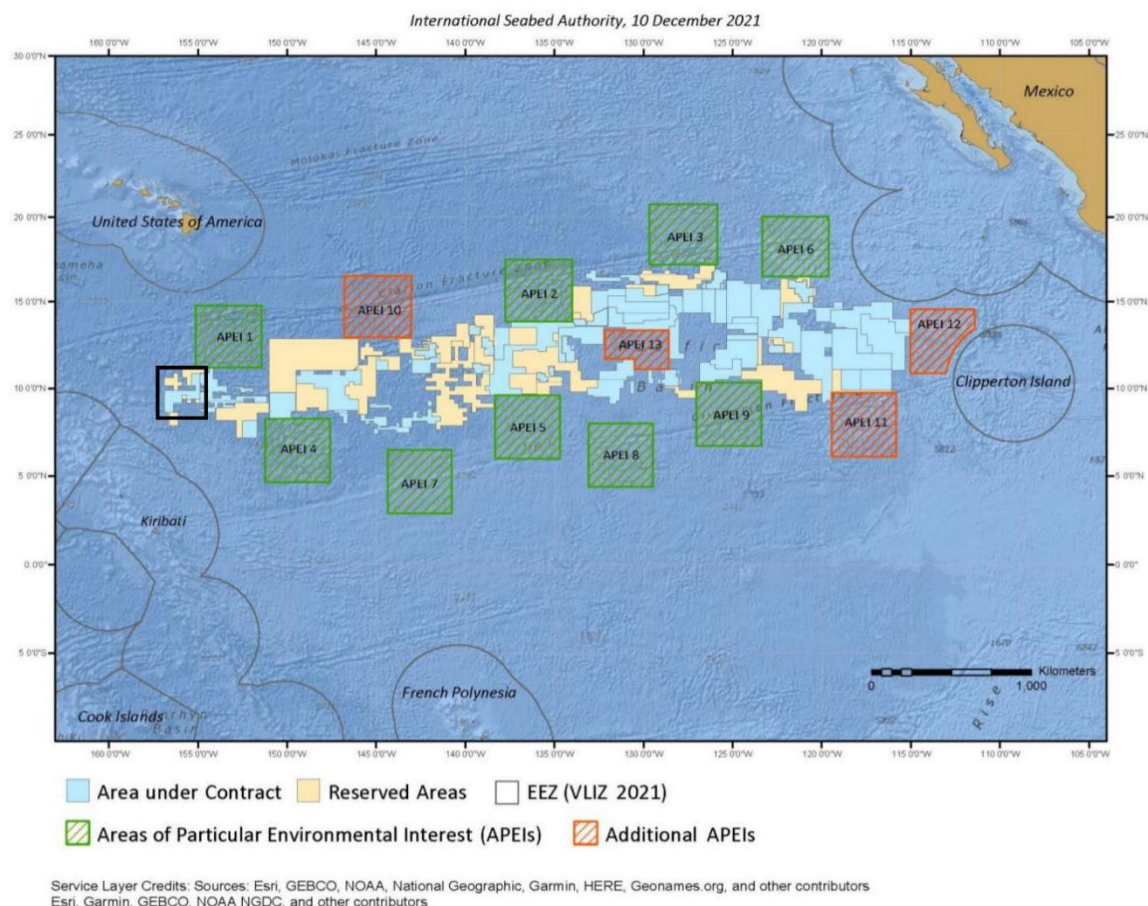


图 6.2-7 CC 区环境管理计划

（黑框为项目所在区域，数据来源：ISBA/26/C/58）

中国五矿 A-5 区块毗邻环境 REMP 的 APEI-1 区域。该区域的底栖生物多样性和沉积环境在近期得到了初步研究（Durdan et al., 2021），此 APEI 将有效保全 CC 区西部的底栖生物多样性。另外，在本报告的第 7 章和第 8 章中，我们评估了本次试验的潜在影响范围，其并不会对 APEI-1 区域或其他 APEIs 造成潜在环境影响。

（2）美国的太平洋海洋保护区网络（Marine protected areas in the US Pacific EEZ）

距离中国五矿 A-5 区块最近的海洋保护区为美国帕帕哈瑙莫夸基亚国家海洋保护区（Papahānaumokuākea Marine National Monument）、美国太平洋偏远岛

屿海洋国家保护区网络（U.S. Pacific Remote Islands Marine National Monument）的 Johnston Atoll 保护区和 Kingman Reef and Palmyra Atoll 保护区。A-5 区块距离上述帕帕哈瑙莫夸基亚国家海洋保护区和 Johnston Atoll 保护区的距离超过 500 海里，距离 Kingman Reef and Palmyra Atoll 保护区的距离超过 200 海里，因此本次试验对上述保护区不会产生环境影响。

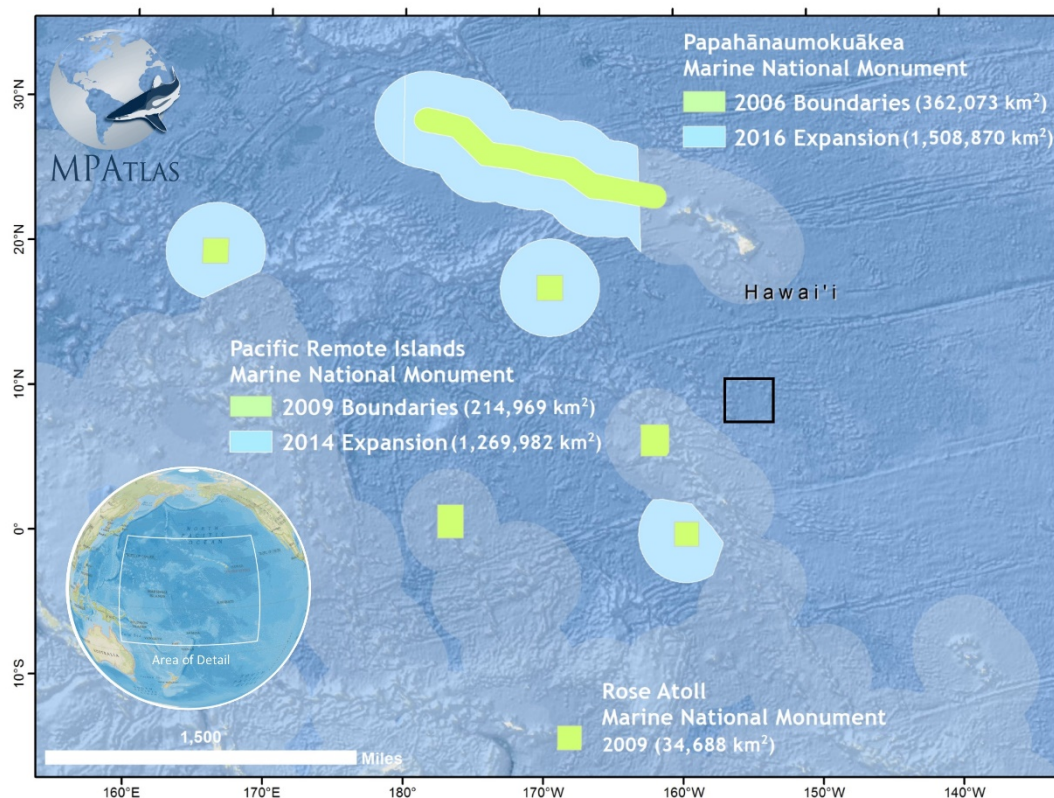


图 6.2-8 美国的太平洋海洋保护区网络

（黑框为项目所在区域，数据来源：<https://mpatlas.org/>）

6.2.6 其他

中国五矿多金属结核合同区 A-5 区块东部有一条国际海底电缆穿过，为法属波利尼西亚邮电局所有的霍努图阿电缆，电缆在中国五矿合同区 A-5 区块内分布长度约 20 km，具体位置见下图 6.2-9。

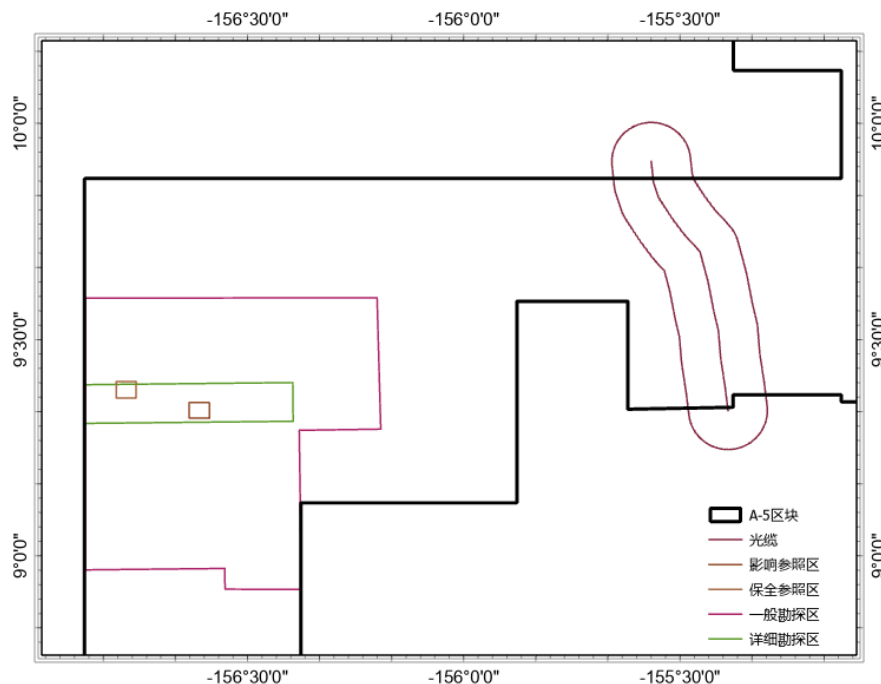


图 6.2-9 A-5 区块内光缆位置示意图

OPT French Polynesia 的电缆为 2008 年铺设，根据 ICPC 推荐标准，海底电缆左右 10 km（20 km）为安全距离。本次活动涉及的位置与霍努图阿电缆之间的距离超过 100 km，满足电缆的安全需求，不受本次活动的影响。

6.3 具有考古或历史意义的遗址

经调查，本项目区域不涉及考古或历史意义的遗址。

6.4 小结

根据上述分析结果，本项目活动区域远离人类社会活动频繁的区域，鉴于项目规模和持续时间较短，评估认为本项目拟开展的活动对社会经济环境产生显著影响的可能性极低。

6.5 参考文献

Amon, D.J., Palacios-Abrantes, J., Drazen, J.C. et al. Climate change to drive increasing overlap between Pacific tuna fisheries and emerging deep-sea mining industry. npj Ocean Sustain 2, 9 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00016-8>

Sala E, Mayorga J, Costello C, Kroodsma D, Palomares MLD, Pauly D, Sumaila UR, Zeller D. 2018. The economics of fishing the high seas. Sci Adv. 4(6): eaat2504. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2504>

7 对物理化学环境的影响评估和拟议的缓解措施

7.1 关键信息

本章节分类分析了本次多金属结核采矿车试验对物理化学环境的各类潜在影响，并介绍了拟采取的各种环境影响缓解措施。

本次的采矿车试验目的是为了验证采集装置的技术可行性和可靠性，并收集采矿车作业时，不同工况下的环境扰动数据，从而为进一步发展技术上可靠、经济上可行、环境扰动可接受的多金属结核采矿车提供关键数据。本报告的第四章中已经对 A-5 区块和周边的物理化学环境基线进行了描述，本章的评估是在上述内容的基础上，基于来自于文献或者报告的数据、构建的沉积物羽状流扩散和再沉积模型等开展的。

为了评估这种影响，一方面，我们首先按水柱深度识别了采矿车对大气和4个不同的深度/生境的潜在影响，包括：（1）大气、（2）海表和真光层（0-200 m 深度范围）、（3）暮光层（200-1000 m 深度范围）、（4）深层（1000 m-离底 200 m 深度范围）和（5）底层（离底 200 m 内的水柱和海床）。在下文的表 7.2-1 中，我们对不同水层深度中的这些潜在影响类别的具体内容进行了说明。识别的目的是为了在全面描述本次试验环境影响的基础上，聚焦最重要的环境影响。另一方面，我们对按照空气质量、地质环境、物理海洋环境、海洋化学环境、海床沉积环境、自然灾害、噪音和光、温室气体排放和气候变化、海上安全问题、废物管理、累积影响和残留影响的顺序对这些潜在影响进行了描述。

由于本次试验不涉及大规模的矿石/沉积物提升和尾水排放，试验总时长也控制在尽可能短的范围，因此本次试验的潜在环境影响主要集中在底层，对其他深度/生境的环境影响轻微。

7.2 说明潜在影响的类别

本次试验的全部潜在环境影响来源包括以下两类空间上不重叠的活动，分别位于 A-5 区块外和 A-5 区块内。

（1）在 A-5 区块外，主要是试验保障船和环境监测船往返中国舟山母港和

CC 区的中国五矿 A-5 区块的航路期间，两条船产生的噪音、内燃机尾气排放等。

(2) 在 A-5 区块内，主要包括以下潜在环境扰动类别：

- a 采矿车的试验活动对原位栖息地的改变，包括结核移除、沉积物移除和沉积物扰动；
- b 采矿车的试验活动造成沉积物羽状流，并进一步可能导致的底层水柱理化环境变化和因沉积物再沉积而引发的栖息地地质环境和化学环境的变化；
- c 采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人的光照；
- d 采矿车、水面支撑母船/环境监测船的噪音；
- e 水面支撑母船/环境监测船的内燃机尾气排放；
- f 采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人发生有毒物质（如燃油、润滑油和液压油类）的潜在泄露风险；
- g 自然灾害导致的潜在风险。

表 7.2-1 本次单体试验潜在影响的类别、空间范围

潜在影响的类别	潜在影响的空间范围				
	大气	海表和真光层	暮光层	深层	底层
1	●	●	●	●	●
2a	-	-	-	-	●
2b	-	-	-	●	●
2c	●	●	●	-	●
2d	●	●	●	●	●
2e	●	-	-	-	-
2f	-	●	-	-	●
2g	●	-	-	-	-

注：“潜在影响的类别”的定义和详细描述见上文。

7.3 空气质量

7.3.1 潜在影响和需要解决的问题

在从中国本土港口到 A-5 区块往返途中及在 A-5 区块作业期间，2 条船舶的主机、辅机和额外发电机系统会消耗柴油燃料，并排放二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物和颗粒物等。这些污染物排放可能降低航路和 A-5 区块的空气质量水平。因此，为了降低这种潜在影响，我们选择使用满足 IMO 和中国法律规定的船舶，同时使用清洁燃料，以降低这种环境影响。

关于温室气体排放的潜在影响，见下文的 7.10。

7.3.2 减轻影响的环境管理措施

(1) 本次试验的两条船舶日常工作期间均不使用消耗臭氧层物质作为设备工作介质。消耗臭氧层物质系指《国际防止船舶污染公约》MARPOL 73/78 附则 VI 第 1 章第 2 条第 16 款所述的物质。

(2) 本次试验期间，工作和人员生活而产生的全部塑料垃圾均现场分类保存，不在船上焚烧。

(3) 两条船舶的氮氧化物、硫氧化物、颗粒物排放水平均严格满足《国际防止船舶污染公约》MARPOL 73/78 第二阶段氮氧化物排放限值的要求。

(4) 航次期间，按预定航路不经过公约规定的硫氧化物排放控制区域。在公海作业期间，两条船舶使用的燃油将严格满足《国际防止船舶污染公约》MARPOL 73/78 的要求，最大含硫量不超过 0.50 %m/m。

7.3.3 残留影响

按照海上运输行业的一般惯例，在规定的区域范围内，通过正确使用船载的尾气排放污染控制装置和使用合规燃料，通常不认为存在对环境有明确危害的残留影响。

7.4 地质环境

7.4.1 潜在影响和需要解决的问题

本次试验中, 采矿车在海底的作业区域大小为: 长 1000 m, 宽 600 m, 面积 0.6 km²。本次试验计划分为两次独立的水下验证。其中, 第 1 次水下作业行走、采集扰动面积: 24200 m²。第 2 次水下作业行走、采集扰动面积为 75800 m²。本次采矿车单体试验共计扰动面积约 0.1 km²。采集结核总质量估算约 1300 t, 随采矿车提升至水面平台的湿结核不超过 10 t。

尽管整个 CC 区存在显著的环境梯度, 包括水深、沉积物沉降通量、地形地貌、多金属结核的丰度等, 但这种梯度并未导致 CC 区的某一个较小局部成为在地质环境方面独特的生境 (McQuaid et al. 2020)。A-5 区块位于 CC 区的西部, 而本次试验的 CTA 则位于 A-5 区块的西部。CTA 的地形平坦, 不含任何海山或海丘, 坡度小于 2%。沉积物特性、结核覆盖率和地形地貌特征在 A-5 区块内和在更广泛的空间水平上均不具有独特性 (见第 4 章)。

采矿车采集头的沉积物扰动深度约 4-6 cm (这取决于结核的埋藏深度, 并可以做自适应的调节, 以在有效采集多金属结核的前提下实现最浅的沉积物扰动), 采矿车履带的直接扰动深度约 10 cm, 但不可避免会对更深层的沉积物也存在一定程度的压陷影响。考虑到本次试验只有约 0.1 km² 的直接采集面积, 而 A-5 区块的面积为 22821 km², 本次直接扰动的面积为 A-5 区块总面积的 0.000438 %, 因此我们推断直接的结核移除和沉积物移除不会对海床产生较大的扰动。

根据我们构建的沉积物羽状流扩散模型和沉积物再沉积模型, 本次试验的沉积物再沉积范围按照 0.1 mm 再沉积厚度的阈值衡量, 最大面积不超过 1 km² (见本章 7.5 节)。这个面积仅占据 A-5 区块总面积 0.0044 %, 因此我们推断沉积物再沉积也不会对海床产生较大的扰动。

7.4.2 减轻影响的环境管理措施

采矿车测试采用的主要缓解方法包括采矿车系统设备的优化设计和测试操作阶段优化的测试方案, 从而以将环境影响降至最低。

(1) 采矿车系统设备的优化设计:

- 采用地形自适应的采集机构, 避免不必要或过深的沉积物扰动
- 宽幅的履带和全车的减重设计, 避免不必要或过深的沉积物扰动
- 履带的沉积物扰动遮挡和减缓装置, 降低履带造成的沉积物扰动强度

(2) 测试操作阶段优化的测试方案:

- 采用集中和紧凑的试验路线设计, 从而尽可能减少 CTA 的总面积
- 在保证测试的最低需求前提下, 压缩 100% 功率采集测试的时间

7.4.3 残留影响

在 DISCOL 试验中, 试验后 26 年的重访发现犁耙扰动导致的微地形地貌改变仍然清晰可见(Stratmann et al. 2018)。这给出了为数不多的在寡营养深海环境中地质环境自然恢复速率的例子。由于 CC 区中西部的沉积速率只有 3-5 mm/kyr (Pälike et al. 2014), 因此在只考虑到重力沉降的情况下本次扰动产生的 10 cm 左右的微地貌改变可能需要 2-3 万年才能填埋。但由于东太平洋近底层周期性的高流速事件如“海底风暴”的存在(Kontar and Sokov 1994), 这种再沉积的自然修复过程可能会加速。但目前长时间序列的有效观测数据不足, 因此尚无更加准确的估算。

7.5 物理海洋环境

7.5.1 潜在影响和需要解决的问题

由于采矿车的采集头会扰动表层 4-6 cm 厚度的沉积物, 因此采矿车造成的沉积物羽状流主要成分源自这些表层沉积物(黏土级和粉砂级颗粒)。其中粉砂级和粉砂级颗粒大部分为生物来源, 以放射虫为主, 其次是硅藻。在本次试验中, 主要沉积物羽流都在底层, 主要是采矿车行走扰动和集矿过程中产生的沉积物羽流, 其环境影响可以分为近场和远场。

在近场, 在深海采矿过程中产生的沉积物快速重新沉积在合同区附近, 可能带来覆盖底栖生物和堵塞滤食器, 耗氧增加(不稳定的有机物质或还原的金属耗氧), 以及毒性物质释放等风险。这些过程将影响深海生态系统的结构和功

能，但目前其定量的影响仍然是未知。本项目计划加强近场和远场的监测，评估环境影响的程度和范围。采矿车将配置环境巡检监测 ROV（缆长约 20 m），动态监测采矿车周围的羽流产生和扩散情况。在 CTA 附近布置含有远、中、近三层的监测网络，监测羽流的扩散过程。

在远场，采用数值模式模拟集矿过程产生的沉积物羽流的扩散过程、采矿羽流的扬起高度、影响范围。迄今为止，类似的研究工作只有极少数，本报告采用的数值模拟将综合沉积物的物理和化学性质、流体动力学的特征、底部地形、采矿设备类型和采矿率与排放率等因素，模拟不同情况下的羽状流扩散过程。

7.5.1.1 模型构建

构建了 A-5 区块 CTA 的深海采矿羽流扩散数值模型。羽流扩散模型采用 FVCOM (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 模型，该模式基于三角形网格，采用有限体积法、三维原始方程组的海洋模式。采用了体积通量的积分方法来求解流体动力学原始控制方程组，从而保证了在单一网格和整个计算区域上都能同时满足动量、能量和质量的守恒，解决了海洋数值计算中的关键问题。垂直方向上采用了 s 坐标系，能很好地处理复杂地形变化，更好的模拟底层动力过程；水平方向上采用无结构化的三角形网格，可以对重点关心区域（如 CTA）进行局部加密处理，提高计算效率。

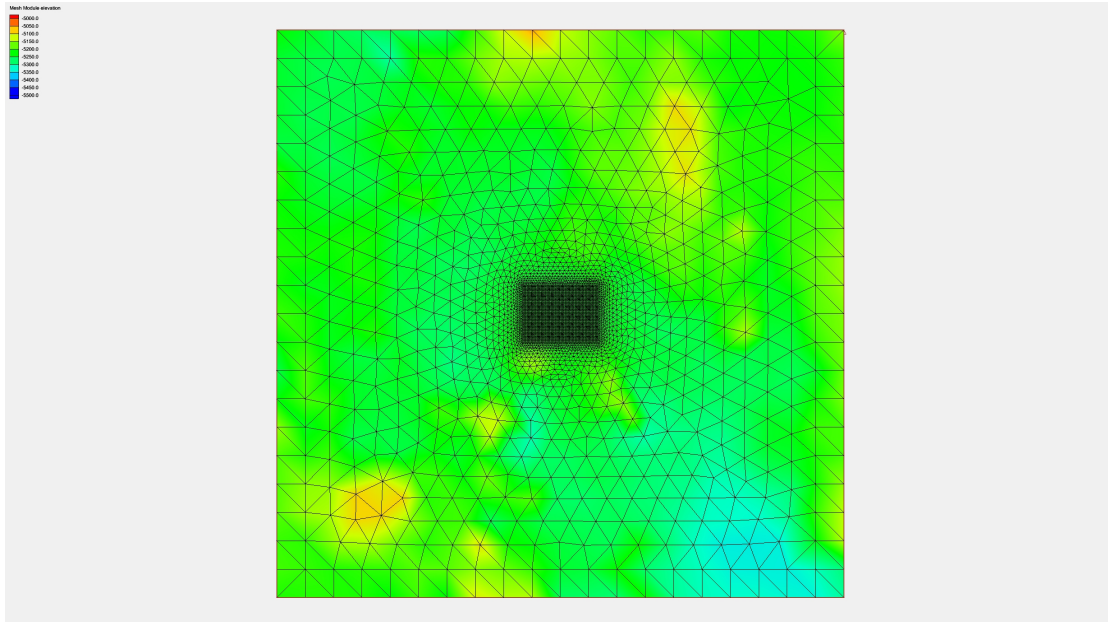
FVCOM 的控制方程组如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - fvD \\ &= -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + DF_u \\ \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial \sigma} + fuD \\ &= -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial y} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + DF_v \\ \frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta u D}{\partial x} + \frac{\partial \theta v D}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial \sigma} &= \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}) + DH + DF_{\theta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SuD}{\partial x} + \frac{\partial SvD}{\partial y} + \frac{\partial Sw}{\partial \sigma} &= \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial S}{\partial \sigma}) + DH + DF_s \\ \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 uD}{\partial x} + \frac{\partial q^2 vD}{\partial y} + \frac{\partial q^2 w}{\partial \sigma} &= 2D(P_s + P_b - \varepsilon) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_q \frac{\partial q^2}{\partial \sigma}) + DE_q \\ \frac{\partial q^2 lD}{\partial t} + \frac{\partial q^2 luD}{\partial x} + \frac{\partial q^2 lvD}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial q^2 lw}{\partial \sigma} \\ &= lE_l D(P_s + P_b - \frac{\bar{w}}{E_l} \varepsilon) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma}) + DF_l \\ \rho &= \rho(\theta, S) \end{aligned}$$

其中， x, y, σ 分别为笛卡尔坐标系中东、北和垂直方向的坐标； u, v, w 分别是 x, y, σ 三个方向上的速度分量； T 是温度； S 是盐度； ρ 是密度； P 是压力； f 是科氏力参数； g 是重力加速度； K_m 是垂向涡动黏性系数； K_h 是热力垂向涡动摩擦系数； F_u, F_v, F_θ, F_S 分别代表水平动量、温度和盐度扩散项。

针对本次采矿车试验，设置该模型模拟范围为 $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ ，开边界处网格分辨率为 2000 m ，试验中心 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 网格分辨率为 100 m 。垂向采用广义随底坐标系，在近底加密网格，共分为 61 层，其中近底 10 m 分辨率为 1 m （图 7.5-1）。



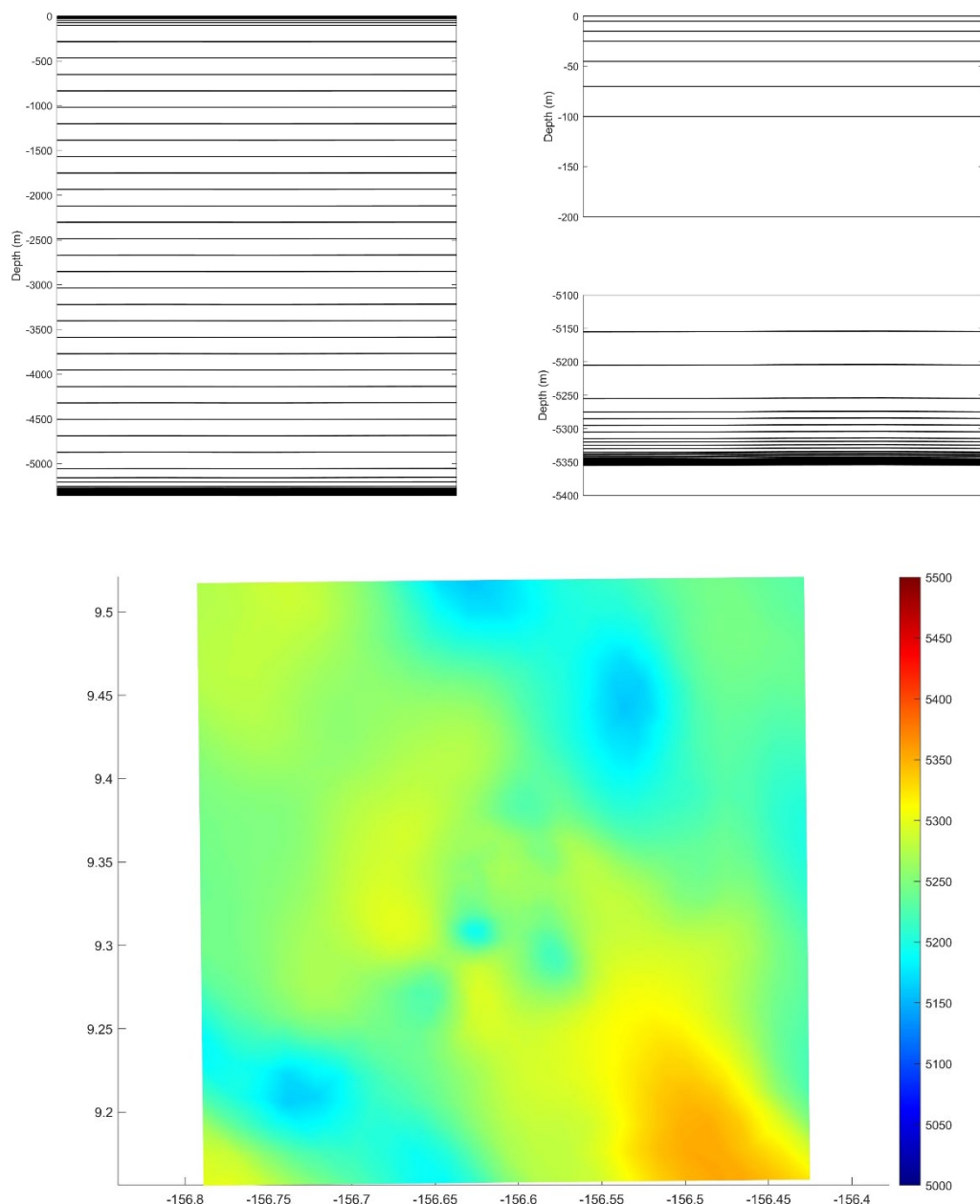


图 7.5.1 模型水平网格（上图）、垂直网格（中图）及水深图（下图）

模式设置及开边界条件：

从温盐剖面结构可以看出，底层温盐无明显变化。试验区域位于底层，且无表层及中层排放等，因此羽流模型采用正压模型计算。

开边界潮位采用全球潮汐模型 TPXO 模型结果。假定模拟区域底层背景流场一致，根据实测流场滤掉潮流等高频变化后获得的羽流场作为模型的流场开边界条件。

羽流悬沙参数设置：

根据有关航次研究报告，底层沉积物粒径为双峰型，因此设置悬浮泥沙粒径为 0.0028 mm 和 0.0625 mm。参考詹琳等（2023）的文章，粒径 0.0028 mm 的沉降速度设为 0.36 mm/s，粒径 0.0625 mm 的沉降速度设为 8.33 mm/s。

模拟羽流排放口离底高度 1m。

采矿车行驶路径参考 3.3 节，由于采矿车行走时扰动较小，因此模式只模拟采矿车采集作业过程的羽状流，具体模拟采集路径示意图如图 7.5-2 所示。扰动强度由采矿车相关技术参数给出，其中 0.2 m/s 时扰动强度为 7.2 kg/s，0.4 m/s 时扰动强度为 14.4 kg/s，0.6 m/s 时扰动强度为 18.0 kg/s，0.8 m/s 时扰动强度为 19.2 kg/s，1.0 m/s 时扰动强度为 24.0 kg/s。

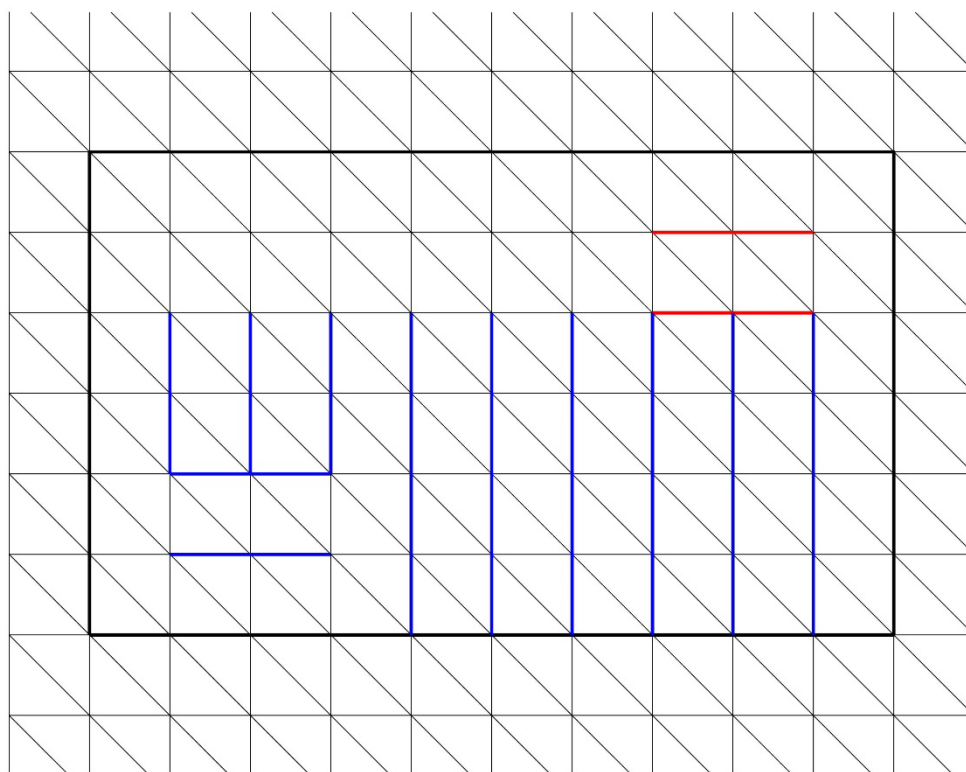


图 7.5-2 模拟的采矿车采集路径示意图

（黑色细线为模式网格线，黑色粗线为 CTA，红线为第一次采集试验路径，蓝线为第二次采集试验路径）

7.5.1.2 模型验证

比较 2020 年 7-8 月份模型流场结果与实测流场，如图 7.5-2 所示，模拟流速与实测流速比较吻合。

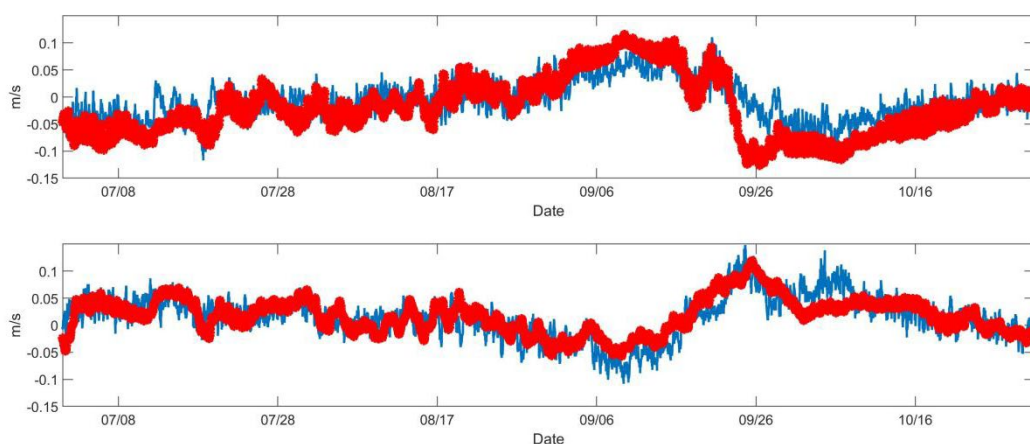


图 7.5-3 模型结果（红色）和实测流速（蓝色）比较

（上图为流速东西分量，下图为流速南北分量）

为量化数值模式计算精度，采用 Warner 等的方法，其计算公式如下：

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\sum_{i=1}^N (|X_{mod} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2}$$

式中： X 表示比较的参数，

$\bar{X}$ 表示平均，

mod 表示模型计算结果，

obs 表示实测结果。

计算结果从 0-1.0，其中 1.0 表示模型计算结果与实测一致，0 表示两者不一致，其值越接近 1 表示模型模拟精度越高。

计算模拟流速与实测流速的 Skill 值，在 U 分量上，两者大小和变化趋势基本一致，Skill 值为 0.85；在 V 分量上，两者大小和变化趋势也基本一致，平均 Skill 值为 0.86。流速平均 Skill 达到了 0.855，说明模型模拟精度很高，水动力数值模型结果可信。

7.5.1.3 羽流模型结果

由于暂时无法确定作业时间，因此开展 7 月、8 月、9 月和 10 月流场条件下的羽流模拟。均假定第一次试验开始时间为各月 10 日 0 时，采集试验共持续约

5 小时；第二次试验开始时间为各月 11 日 0 时，采集试验共持续约 36 小时。同时，开展 2 种粒径条件下的羽流扩散分布模拟，具体案例见表 7.5-1。

表 7.5-1 羽流模型各种案例参数表

案例	沉积物粒径(mm)	开始时间
Case1	0.0625	07/10
Case2	0.0028	07/10
Case3	0.0625	08/10
Case4	0.0028	08/10
Case5	0.0625	09/10
Case6	0.0028	09/10
Case7	0.0625	10/10
Case8	0.0028	10/10

7.5.1.3.1 悬浮泥沙浓度水平分布

第一次采集试验时，由于扰动时间较短，离底 1 m 层悬浮泥沙浓度高于 10 mg/L 的水体均位于 CTA 之内。第二次采集试验时，由于采矿车路径靠近 CTA 边缘，因此悬浮泥沙浓度高于 10 mg/L 的水体在 CTA 南部稍微超过了 CTA。底层悬浮泥沙浓度最大为采集试验期间，随着采集试验的停止，浓度逐渐降低。羽流的扩散范围受底层流速大小的控制，比如 8 月份流速较小，采矿羽状流影响范围较小。Case3 的羽状流在采集试验开始 4 天后（即采集试验结束后 2.5 天）消失，其它各案例羽状流均在采集试验开始 5 天后（即采集试验结束后 3.5 天）消失。羽流的扩散方向受底层流场流向的控制，比如 7 月份扩散方向为西北向，9 月份扩散方向为东向。羽流最大影响距离上，各月份也不相同，其中 8 月份最大影响距离最小，9 月份最大。细颗粒沉积物扩散分布范围较粗颗粒大，案例最大影响距离为 2.1 km（Case2）。

综合海表海况情况，8 月份是最适合采矿车测试试验的，8 月份不同案例条件下的底层羽流扩散范围如下图（图 7.5-4 至图 7.5-5）所示。

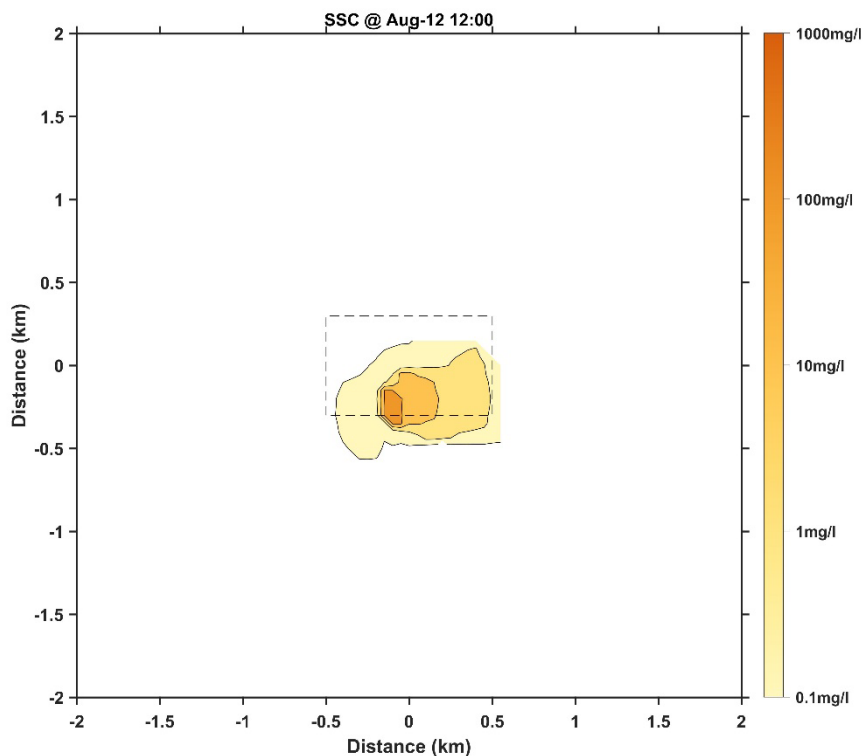


图 7.5-4 Case3 第二次采集试验结束时悬浮泥沙浓度分布图

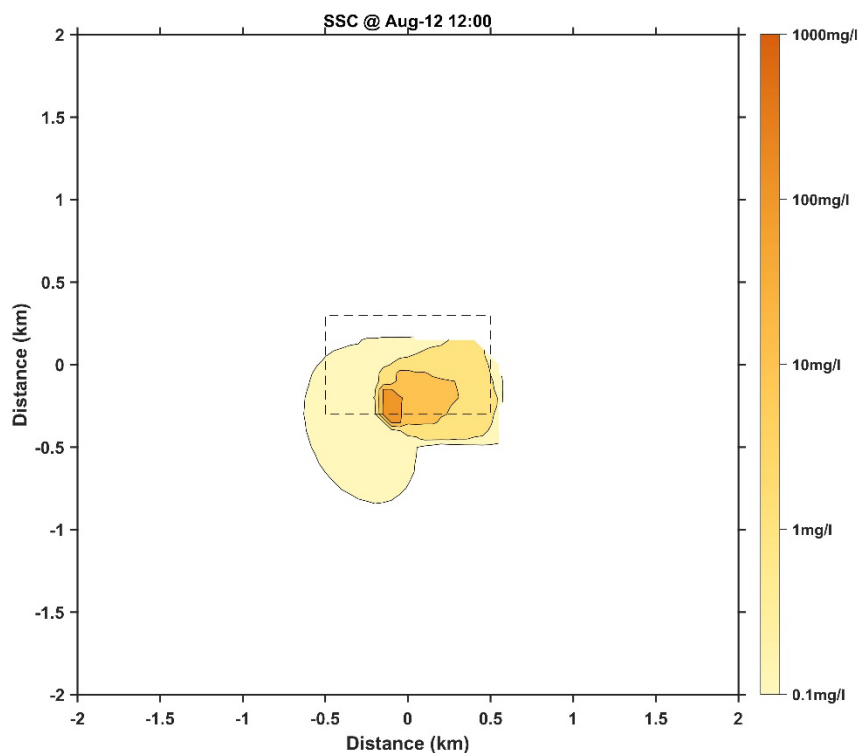


图 7.5-5 Case4 第二次采集试验结束时悬浮泥沙浓度分布图

7.5.1.3.2 悬浮泥沙浓度垂向分布

参考 CTA 西边界上站点的悬浮泥沙浓度垂向分布特征，若以 0.1 mg/L 等值

线作为羽流垂向的影响范围，则羽流垂向影响高度最大为 124 m。若以 1 mg/L（该值高于背景浊度的检测限）等值线作为影响范围，则羽流垂向扩散范围最大高度约 80 m。采矿试验结束 1-1.5 天羽流消失。细颗粒沉积物较粗颗粒影响高度高。图 7.5-6-图 7.5-7 是 8 月不同案例条件下悬浮泥沙垂向分布的数值模拟结果。

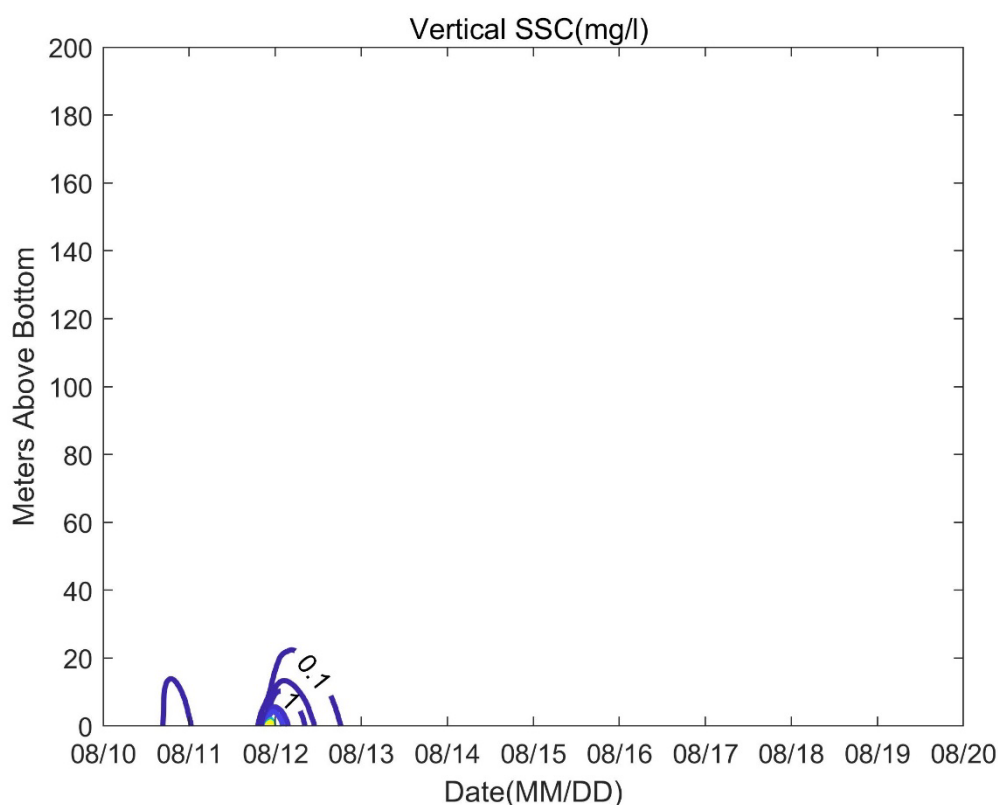


图 7.5-6 Case3 悬浮泥沙浓度垂向分布图

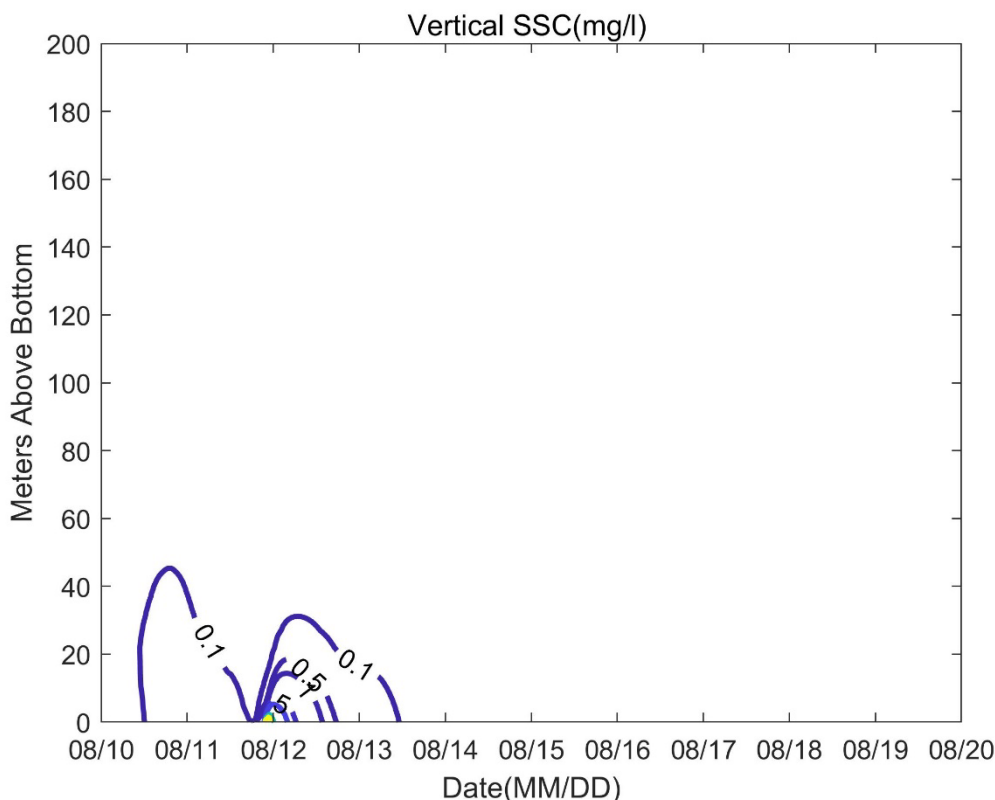


图 7.5-7 Case4 悬浮泥沙浓度垂向分布图

7.5.1.3.3 再沉积厚度分布

集矿产生的沉积物羽流大部分在集矿区周围沉降，由近及远逐渐变薄，最大沉积厚度为 0.33 cm (Case3)。图 7.5-8-图 7.5-9 是 8 月不同案例条件下再沉积厚度的数值模拟结果。

羽流最大扩散范围、最大再沉积厚度和再沉积面积统计见表 7.5-2 和表 7.5-3。再沉积厚度大于 0.1 mm 的范围均位于 CTA 外侧 100 m 内，再沉积厚度大于 1 mm 的区域主要位于第一次连续采集区域和第二次连续采集区域间距 0 m 的区域。

从再沉积厚度面积分布上看，再沉积厚度大于 1 mm 的面积为 0.06-0.12 km²，再沉积厚度大于 0.1 mm 的面积为 0.59-0.64 km²。

月际分布上，最大再沉积厚度 8 月最大，9 月最小；再沉积厚度大于 1 mm 的面积上 9 月最大，8 月最小，反应了相应月份的流场变化特征。

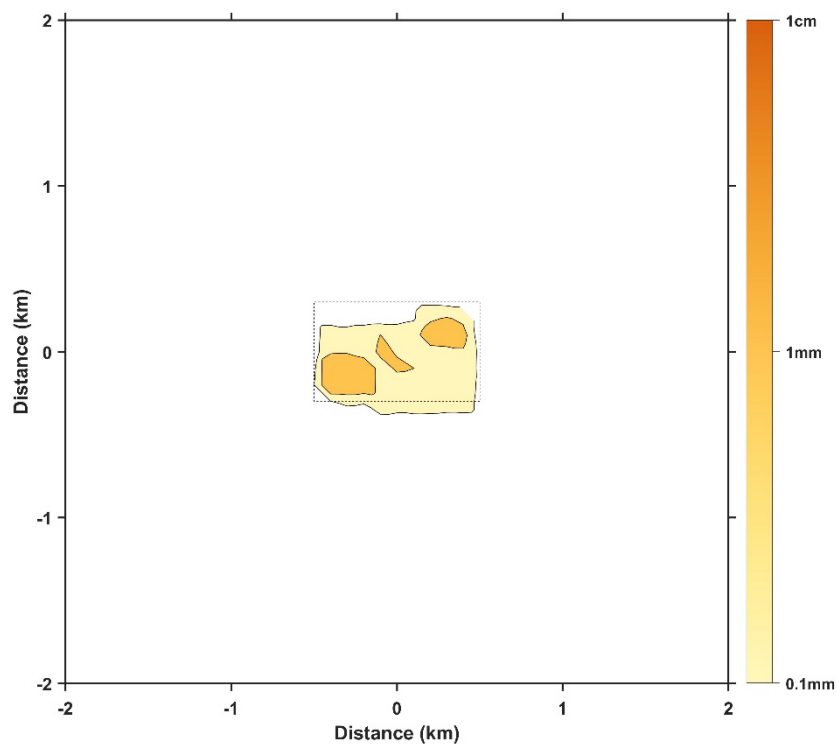


图 7.5-8 Case3 再沉积厚度分布图

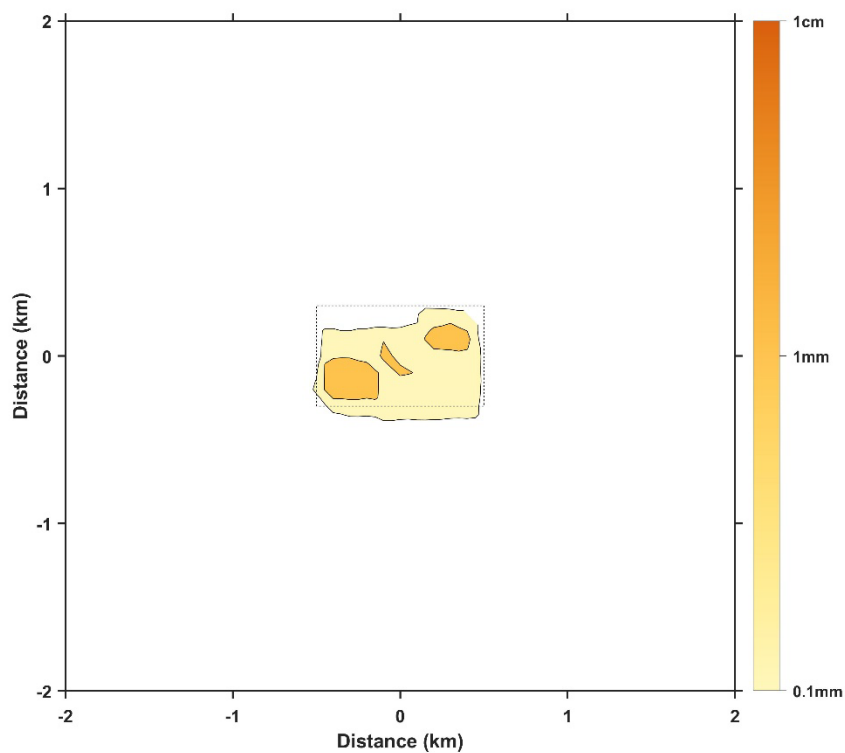


图 7.5-9 Case4 再沉积厚度分布图

表 7.5-2 羽流最大扩散范围和最大再沉积厚度

案例	羽流最大扩散范围 (km)	最大再沉积厚度 (cm)	垂向最大影响高度 (m)
Case1	1.5	0.28	70
Case2	2.1	0.24	79
Case3	0.6	0.33	22
Case4	0.9	0.30	45
Case5	1.7	0.23	121
Case6	2.1	0.19	124
Case7	1.1	0.30	67
Case8	1.7	0.26	75

表 7.5-3 羽流再沉积面积统计表

案例	再沉积厚度大于 1cm 的面积 (km ²)	再沉积厚度大于 1mm 的面积 (km ²)	再沉积厚度大于 0.1mm 的面积 (km ²)
Case1	0	0.10	0.62
Case2	0	0.09	0.64
Case3	0	0.12	0.59
Case4	0	0.11	0.60
Case5	0	0.09	0.60
Case6	0	0.06	0.60
Case7	0	0.11	0.61
Case8	0	0.09	0.63

7.5.1.4 小结

构建了深海采矿羽流模型，并模拟了 7 月、8 月、9 月和 10 月不同流场条件下不同沉积物粒径的深海采矿羽流扩散分布及再沉积过程。结果显示，高浓度悬浮泥沙水体和再沉积均主要位于 CTA 内。羽流水平最大可影响到 2.1 km，垂向最大影响高度为 124 m。不同月份流场条件下，羽流扩散分布存在着明显不同。细颗粒的沉积物水平影响范围和垂直影响范围都较粗颗粒大。

7.5.2 减轻影响的环境管理措施

最有效减轻环境影响的措施是采矿车的针对性设计，使其在行走和采集过程中减轻扰动。同时，通过数值模拟选择合理的集矿行走方式和速度降低环境

影响，选择适当的时机作为采矿试验窗口期，减小羽流的扩散等。关于采矿车设计方面的环境影响缓解措施，参见 7.14 节。

7.5.3 残留影响

正如羽状流模型的模拟分析结果，羽状流在试验结束后不超过 4 天的时间内就会消失（按照 0.1 mg/L 悬浮体浓度的标准）。因此，本次试验对物理海洋环境的残留影响轻微。

7.6 海洋化学环境

7.6.1 潜在影响和需要解决的问题

由于本次试验不涉及尾水排放，对海水环境的影响主要发生在底层，而对海水水柱化学环境广泛的影响较小。尽管重金属对生物的毒性被广泛认为是深海采矿的潜在环境影响的重要组成部分(Hauton et al. 2017)，但在 CC 区底层广泛的氧化环境中，简单的机械扰动造成氧化矿物性质改变从而发生大规模重金属释放的可能性不大(BGR 2018)。结核区的表层沉积物孔隙水中赋存了大量的营养盐和重金属，对沉积物的模拟扰动实验表明重金属的释放存在显著的元素特异性(图 7.6-1, Shi et al. 2023)，仅钒、铷、钼和镉四类重金属存在显著稳定的析出行为。类似的结果在其他人的研究中也发现 (Koschinsky et al. 2001)。已有的一些深海原位重金属毒性试验的证据表明，重金属毒性对深海生物的生命活动可以产生显著的影响(Kwan et al. 2019)，但这些试验的显著不足是都采用了远高于真实可能发生的重金属析出浓度和不太可能出现的重金属类型（如 Cu）。因此，目前开展对底层化学环境影响的评估，在重金属浓度阈值方面还存在很大难度。

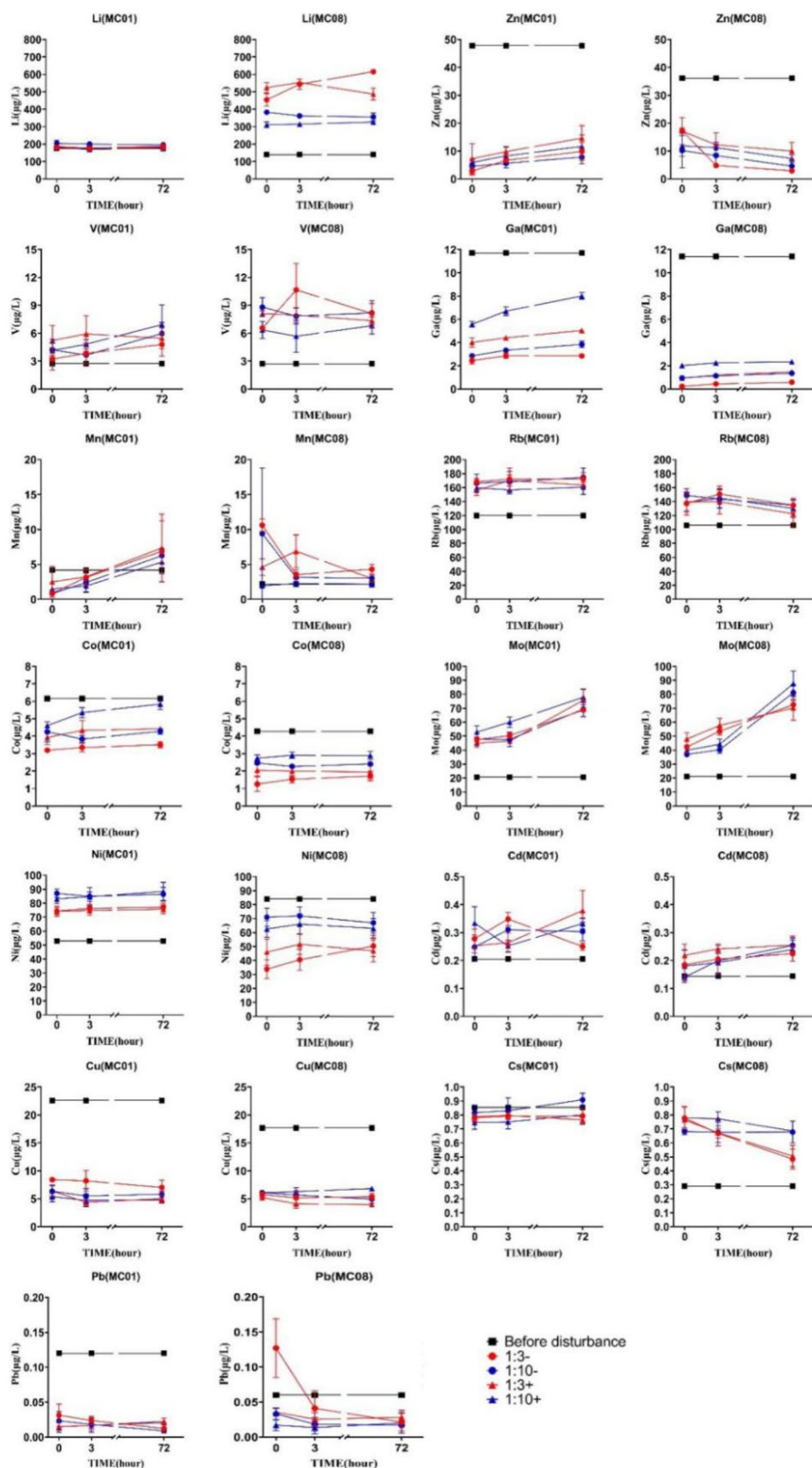


图 7.6-1 对结核区沉积物扰动后重金属释放的模拟试验结果 (Shi et al. 2023)

(结果表明, 仅钒、铷、钼和镉四类重金属存在显著稳定的析出行为)

除了重金属的潜在释放之外, 羽状流中的活性有机碳被生物活动消耗和金

属离子被进一步氧化等也可能造成近底层水柱中的 DO 被消耗(GSR 2018)。由于 CTA 的表层沉积物有机碳含量低于 0.5 % (图 4.5-15), 而深海沉积物中的总有机碳中大量又为惰性有机碳(Arndt et al. 2013), 同时考虑到本次试验较小的总扰动规模和底层海水的流动性, 对底层 DO 的改变预计轻微。

7.6.2 减轻影响的环境管理措施

由于本次试验不开展矿石的提升和尾水排放, 因此主要环境扰动减缓措施与减轻羽状流产生的环境措施一致。参见 7.5.2 节。

7.6.3 残留影响

由于本次试验对沉积物和海水的扰动规模较小 (参见 7.4, 7.5, 7.7), 我们预计不会产生显著的残留影响。

7.7 海床沉积物环境

由于本次试验不涉及表层/中层/深层的尾水排放, 因此对海洋浮游生态系统和水柱生物地球化学环境的扰动极其轻微。在目前的科学框架下(Honjo et al. 2014), 没有证据表明这类扰动会直接导致从海洋上层到海床的沉积通量可能发生变化。

采矿试验对沉积物环境的扰动是直接和明显的。这一过程会通过至少两个不同的途径发生: 1. 采矿车的履带行驶在松软的海床沉积物表面会导致一定深度范围内的沉积物被挤压; 2. 采矿车将沉积物扰动后形成羽状流散播, 最终发生面域的再沉积。在本次试验所采取的技术条件下, 这两类扰动是难以完全避免的。本报告的 7.5 节对羽状流导致的再沉积范围进行了分析, 这里简要讨论采矿车行走对沉积物的挤压作用。

基于本报告 4.8 节的分析, 表层沉积物的原位贯入强度在 CTA 及周边为 25.1-30.3 kPa 范围。基于这一数值设计的采矿车行走系统将保证履带压陷的深度在 10 cm 以内。近期的证据表明在太平洋深海海盆的浅表层 (0-20 cm 深度) 沉积物孔隙水中的重金属含量具有广泛的垂向均匀性 (Yang et al. 2023), 因此这一挤压和扰动对孔隙水中重金属含量的影响可能较为轻微。迄今为止, 这方面的

直接证据还很不充分。在本次试验中，我们计划在采矿车采集扰动后的轨迹中以及在只行走而不开展采集扰动后的轨迹中分别采集 0-40 cm 深度的沉积物柱状样品，并与试验前的沉积物柱状样品进行对比分析。后续的分析数据将有助于我们对采矿车碾压造成海床沉积物环境的扰动做出更客观评估。

7.8 自然灾害

根据目前已知的科学证据，本区域的地质结构稳定，地形平坦，因此本次试验不存在诱发滑坡、滑塌、深海浊流、火山、地震等地质灾害的风险。

CC 区的存在台风和其他恶劣天气过程，特别是在每年的 7 月-9 月。目前的历史记录表明，极少量气旋（中心风力可以达到 30 m/s）会跨越 A-5 区块，这将会显著影响采矿车试验活动，造成潜在风险（这部分详细内容见 10.1）。由于热带气旋的运动速度快，可预报性强，因此可以依据 48 h 和 96 h 的预报数据，现场决定回收试验设备甚至将船舶转移至台风影响范围以外区域。因此，台风类自然灾害对本次试验的影响可以规避。

7.9 噪音和光

7.9.1 噪音

在公海区域，船舶是人为噪音的主要来源。在本次试验中，环境监测船、试验保障船和采矿车是主要的噪音来源。强烈的人为噪音可能会对海洋生物造成一系列不良影响，受到噪音影响的生物至少包括鲸类、鱼类、底栖生物幼体等。但由于数据的不充分，关于噪音对海洋动物的影响阈值存在较大的变异范围。例如，有研究认为 120 dB re 1 μ Pa 以上的噪音强度就会对鲸类造成影响 (Williams et al. 2022b)，但另外的研究则认为不超过 150 dB re 1 μ Pa 的噪音源在距离鲸类 500 m 时就是安全的 (Arranz et al. 2021)。另外，近期的研究还发现海洋背景噪音构成的声景 (Soundscapes) 可能对于低等的无脊椎动物幼体定殖存在重要意义 (Williams et al. 2022a)，因而采矿活动对声景的改变可能也会造成这方面的风险。

环境监测船是中国的“大洋号”科学调查船。“大洋号”科学调查船拥有中

国船级社颁发的入级证书（证书编号：GZ17NB00014，有效期：2024年6月27日）。在入级证书明确标出了船舶水下辐射噪声：Underwater Noise (3, 10-1000Hz); Underwater Noise (1, 1000-100000Hz)。其中等级是1，表示降噪等级最高、噪声最低。

试验保障船是中国的“张謇号”科学调查船，拥有中国船级社颁发的入级证书（证书编号：BJ18SS05145，有效期：2024年7月12日）。“张謇号”科学调查船通过了上海先秦船舶科技有限公司对全船噪音情况的检测，检测结果表明全船最高噪音位置为尾侧推间，在标准工作航速下的峰值噪音为107 dB，满足中国船级社和IMO对该级别和用途船舶的要求。

根据NORI对水面船只的噪音影响范围的估计，以140 dB re 1 μ Pa rms 阈值来衡量（超过该距离可能会对须鲸产生破坏性行为影响），水面船只的影响范围为0.62 km²；如果以更严格的标准，在130 dB re 1 μ Pa rms 和120 dB re 1 μ Pa rms 的阈值下，噪音的影响范围分别可达19.5 km²和62.7 km²。在本次试验中，环境监测船与NORI试验中的船在同等吨位量级，而在试验保障船为4800 t级，要远远小于NORI试验中使用的Hidden Gem船（60000 tons）。因此，本次试验中，水面噪音的影响要小于NORI试验。

采矿车的详细工程学描述见3.3.2。目前没有在深海环境中对该设备的噪音水平进行测试。考虑到采矿车的采集能力和功率相似，因此该部分的估计参照NORI的测试结果(NORI 2022)，即按照120 dB re 1 μ Pa rms 的阈值，影响的水平范围可达562 m半径，即约0.99 km²。

在现场试验中，我们将部署水听器列阵，对采矿车的噪音源强和距离衰减情况进行实际测量。

7.9.2 光

环境中的人工光源会对生物群落和生态系统产生不利影响，并且已经成为一个广泛的环境问题(Davies et al. 2016)。尽管当前的研究还十分不充分，但有观点认为人工光源的环境影响是广泛的，甚至可以从一个生物个体的细胞层面一直跨越到宏观的生态系统层面(Gaston et al. 2013)。目前，人工光源的光照对海洋生态系统的已知和潜在影响包括：(a)抑制或改变浮游动物垂直迁移；(b)吸

引海鸟撞击灯火通明的船只或海上工程平台；(c)沿海涉禽类依赖视觉觅食行为从正常的白天延伸至夜间；(d)阻碍和改变一些无脊椎动物幼虫的定殖；(e)引发鱼群并聚集导致捕食加剧；(f)导致珊瑚等受月相控制的繁殖行为受到干扰；(g)干扰海龟成体的导航从而影响其繁殖和海龟幼体的导航从而影响其成活率等方面 (Davies et al. 2014)。关于 LED 灯和卤素灯这两类人工光源对浅海端足类 (Amphipods) 行为影响的研究表明，两类光源都能吸引端足类聚集，并且 LED 灯具的影响更加剧烈 (Navarro-Barranco and Hughes 2015)。但在数千米的深海环境中，目前还没有科学证据能够证实人为的光照会在生物群落或生态系统层面直接导致不利影响。而关于这一点，另外的一个证据是，利用 Lander 诱捕系统开展海床食腐生物调查时，闪光灯并未对食腐鱼类、甲壳类的行为造成任何可识别的干扰（在 CC 区开展的调查，未发表数据）。

从技术角度和工程角度，深海采矿水面支撑母船和采矿车必然要采取恰当的照明措施以保证设备和人员的安全。

在表层，环境监测船和试验保障船都不得不在夜间使用必要的照明措施以保障正常作业的安全，特别是当采矿车在水下开展试验时，试验保障船夜间将在整个甲板开启照明设施。在没有绝对必要开展照明或者允许降低照明亮度时，环境监测船和试验保障船都将降低甲板照明的光照水平。由于 A-5 区块的海上运输并不繁忙，也不是集中的远洋捕捞区域，因此本次试验的光照的累积影响较小。

在海底，采矿车需要保持对前方、后方和车辆本身的照明。其中对前方的照明将有助于判断结核覆盖情况和微地形情况，从而自适应的采用环境扰动最低的采集作业模式。对后方的照明将有助于判断采矿车在不同工况下对结核的采集效率以及对沉积物环境的扰动情况。对车辆本身的照明是为了监控车辆的控制舱、液压管道、电气插口、线缆和连接件，从而保证试验设备的安全，并监控可能的液压油等有毒物质意外泄露情况。除了这些必要的照明外，采矿车的其他照明设备仅在有必要时启动，其他时间不使用。

此外，从环境影响的角度，本次试验的水面照明和水下照明将可能的情况下尽量使用卤素灯作为主要照明光源。

7.10 温室气体排放和气候变化

本次试验的温室气体排放主要包括两个部分，分别是两条船的排放和采矿车对海床沉积物的扰动造成的潜在温室气体排放风险。

7.10.1 船舶的温室气体排放

试验前，两条船从中国舟山港出发，按最短航路前往 A-5 区块，航路距离为 8900 km，往返距离为 17800 km (9611 nautical mile)。试验保障船“张謇号”的标准航速为 10 节，环境监测船“大洋号”的标准航速为 12 节。按标准航速计算，两船往返航渡时间分别为 40 d 和 33.4 d。两船在标准航速下的柴油消耗率分别为 8 t/d (“张謇号”) 和 13 t/d (“大洋号”)。

在 CTA 内测试的总时间预计为 15 d，考虑到必要的机动和动力定位作业，两船均按照 50 % 的折合航速计算。此状态下的柴油消耗率分别为 4.8 t/d (“张謇号”) 和 8 t/d (“大洋号”)。

在采矿车水下测试期间，试验保障船额外开启一套功率为 3000 kW 的发电机系统保障采矿车和船载其他辅助设备的动力需求，每小时柴油消耗量为 0.78 t，累计需要开启 1 d。

使用这些指标，使用 EPA 温室气体当量计算器来估计采矿车测试的排放量（表 7.10-1）。

表 7.10-1 温室气体排放估计

区域范围	温室气体排放原因/试验阶段	柴油消耗量（吨）	各部分温室气体排放当量（吨）	阶段温室气体排放当量（吨）
在 A-5 区块外的排放 (非测试阶段)	“张謇号”往返航渡	320.0	1024.5	2414.6
	“大洋号”往返航渡	434.2	1390.1	
在 A-5 区块内的排放 (测试阶段)	“张謇号”在 A-5 区块内作业	72.0	230.5	1214.0
	辅助发电机（为采矿车和水面支持系统提供全部动力）	187.2	599.3	

	“大洋号”在 A-5 区块内作业	120.0	384.2	
合计				3628.6

7.10.2 采矿车对海床沉积物扰动造成的潜在温室气体排放风险

由于对沉积物中占绝对主体的惰性有机碳在受到扰动后的稳定性方面的相关研究缺乏，因此对该部分缺乏科学上有效的估算手段。本研究不估算这部分温室气体排放情况。本次试验中，将收集相关数据，特别是底层 DO、DIC 等数据，为评估该数据提供参考依据。

7.11 海上安全和试验与现有航运的相互影响

经过东太平洋 CC 区的主要航线为巴拿马运河-夏威夷专属经济区（200 海里）南侧边缘，经过 CC 区的北部边缘（约 15°N 附近）(March et al. 2021)。本次试验所在中国五矿 A-5 区块约为 9°N，远离主航线（图 7.11-1）。因此，本次试验预计对现有航运不会产生明显干扰。

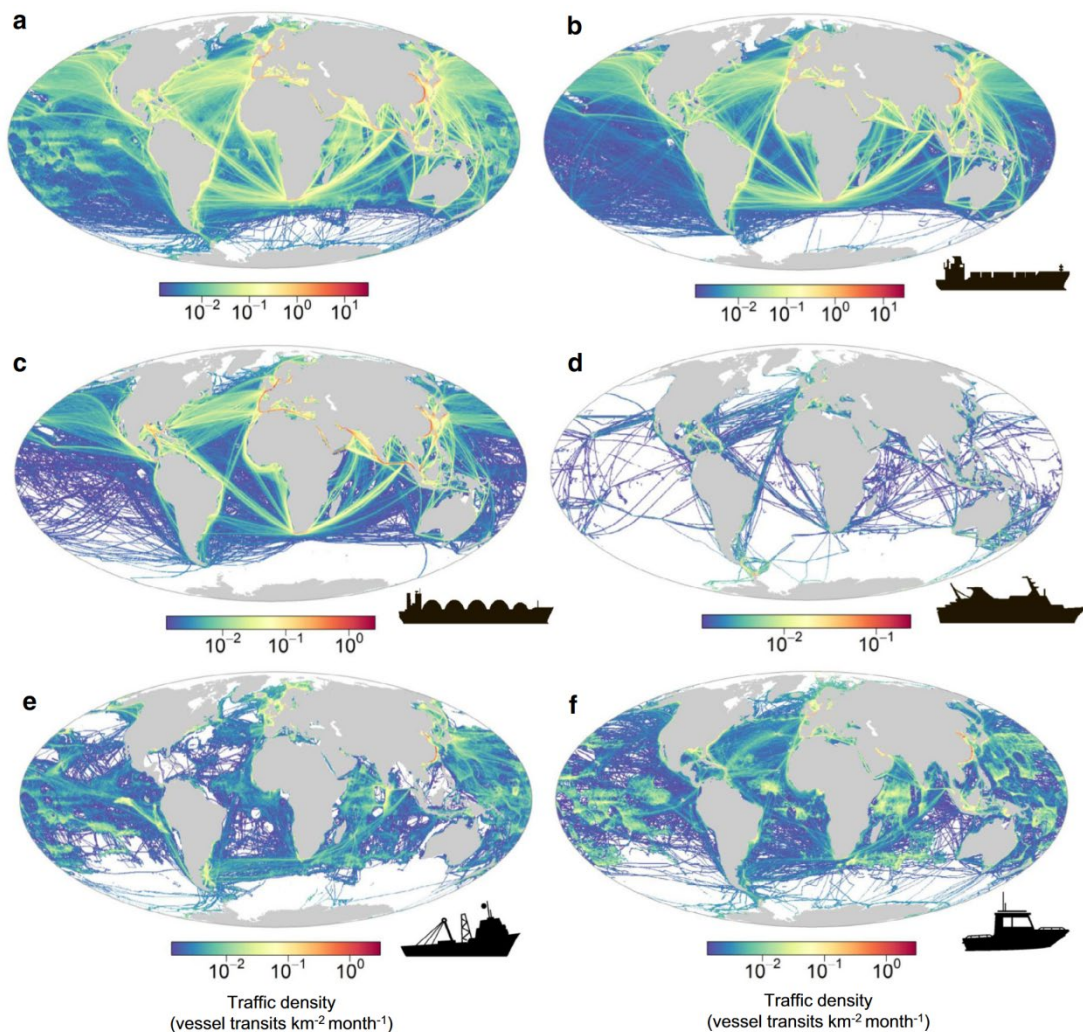


图 7.11-1 全球航运的主要航线热力图 (March et al. 2021)

7.12 废物管理

本次试验所使用的两条船舶均满足《国际船舶安全营运和防止污染管理规则》(ISM Code - 1993) 和《国际防止船舶造成污染公约》附则 1 的要求, 不在海洋排放和丢弃对海洋环境造成污染或潜在危害的物质, 并在试验期间严格遵守上述规定。

7.13 累积影响

深海采矿的影响可能是多方面的, 多重来源的压力源或同一压力源在不同时刻的反复强化均可以在一个生境或区域造成累积影响, 其中多个压力源的影响可能比单独压力源的影响更大, 从而产生显著的累积影响(Levin et al. 2016)。对累积影响的了解将有助于确定跨多个部门的严重危害, 对制定战略环境评估

和管理计划至关重要。

在空间尺度上，累积影响可以在许多层面上发生，例如：一个或多个承包者在特定区域的多次试验或者开采活动；不同类型的深海资源开发活动在一个区域的重叠；与深海采矿无关、但空间上重叠的其他人类活动（如渔业捕捞）与深海采矿对特定物种或者生态系统的多次影响等。对深海采矿活动累积影响的评估应包括过去、现在和合理可预见的未来影响。但由于目前对深海生态系统和生物多样性认知的缺乏，特别是幼体迁移扩散的源汇关系、幼体迁移能力和定殖的存活率、关键生态毒理学阈值、完整的食物网结构和能流途径、生态系统韧性等方面的缺乏，目前对于深海采矿活动累积影响的评估还具有很大挑战性(Clark et al. 2020)。

（1）结核移除、沉积物扰动和底层水体的物理化学环境

目前 CC 区的底层环境没有受到其他人类活动的扰动，因此不存在试采活动之外的压力源。试采过程中的结核移除会在地质时间尺度上长期改变底栖生境，沉积物移除和再沉积过程也会在至少数十年尺度上改变底栖生境。从规模来说，本次试验直接造成的多金属结核移除和表层沉积物移除只涉及约 0.1 km² 的采集面积，而 A-5 区块的面积为 22821 km²，即直接扰动面积为 A-5 区块总面积的 0.000438 %，因此我们推断多金属结核移除和表层沉积物移除的累积影响规模有限。本次试验的沉积物再沉积范围按照 0.1 mm 再沉积厚度的阈值衡量，最大面积不超过 1 km²。这个面积仅占据 A-5 区块总面积 0.0044 %，因此我们推断沉积物再沉积累积影响规模有限的累积影响规模有限。

采矿车试采活动导致的羽流扩散会影响底层物理化学环境，然而由于底层海流的存在和海水具有良好的扩散能力，底层物理化学环境的恢复要快得多。考虑到本次实验的空间范围小、持续时间短，这方面的累积影响有限。

（2）噪音和光

目前 CC 区的主要人类活动，如航运和远洋捕捞均可能产生噪音和光污染。然而，如上文所述（6.2.1 和 6.2.2），A-5 区块所在区域不是重要渔场和远洋航线，CC 区的大面积属于人类活动极少的“公海的荒野”（Marine Wilderness outside EEZ）(Jones et al. 2018)，因此本次试采试验产生的噪音和光不会与试采活动之

外的其他压力源产生累积效应。

(3) 温室气体排放

目前 CC 区的温室气体排放主要是由少量的航运和远洋捕捞活动等产生，由于上述活动的频次很低，因此温室气体排放量很少。本次试验活动的温室气体排放来源包括船舶的直接排放和采矿车对海床扰动造成的间接排放两类。本报告在 7.10.1 章节中估算了前者来源的排放量（在 A-5 区块内的二氧化碳总排放量为 1214 t），而由于后者来源的排放量目前尚无有效估算技术方法，因此未考虑。相比较而言，以经过 CC 区附近的“东亚——巴拿马——加勒比、北美东海岸航线”的主要船舶（2 万标箱级别集装箱船）为例，该型船舶正常航速日耗油量约 200 t，二氧化碳排放约 640 t。即，本次试验的总温室气体排放（仅船舶来源）约为途径 CC 区的大型集装箱船 2 d 的排放量。另外，考虑到该区域良好的空气扩散条件，温室气体排放的累积效应不显著。

在时间尺度上，在本次试验所在的 A-5 区块，主要的人类活动类型包括极少量的商船航行和极少量的渔业捕捞活动。除此之外，主要的人类活动为中国五矿每年度执行 2-3 个月的资源勘探和环境基线调查航次。在目前已有的科学认识范围内，这些活动对海洋环境的扰动程度轻微，因此本次试验与区域内已有的其他活动不会发生明显的累积效应。

7.14 采矿车设计方面的环境影响缓解措施

为了在获得充足有效的试验数据和尽可能减轻本次试验的环境影响之间取得平衡，我们在采矿车设计方面采取了一系列措施，尽力减缓试验采集活动对物理和化学环境的潜在影响程度。主要的如下：

1) 原型采矿车车辆为通常商业采矿车的 50 %（采集能力为商业规模的大约 1/4），被认为足以满足测试目标，同时将环境干扰足迹降至最低。

2) 采矿车的采集机构计划采用机械扰动与水力输送组合的方式，以最大限度地减少结核拾取过程中的沉积物扰动。

3) 采矿车的工作高度可根据微地形的变化进行调节，改变机械扰动齿插入底质中的深度，减少对稀软底质的扰动，将沉积物扰动降至最低。

4) 后驱式履带行走机构，在指向驱动轮端履带的合适距离配置了成组高压

射流喷头，喷头射流将在底部履齿离开地面并开始向上滚动时，清除履齿之间的附着沉积物，从而减少带至履带上表面的海底沉积物量。

5) 履带外部配置包围箱罩，其将在履带行驶过程中聚拢行驶扰动形成的沉积物羽流，减低其扩散幅度。

6) 结核脱泥处理系统将采矿车采集的结核与沉积物进行分离。采用水泵提供动力、螺旋流道结构，尽可能在海底将沉积物与结核完全分离，并降低分离后的排放高度与速度，减少沉积物在海底的扩散范围。

7.15 参考文献

- Arndt S, Jørgensen BB, LaRowe DE, Middelburg JJ, Pancost RD, Regnier P. 2013. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: A review and synthesis. *Earth-Sci Rev.* 123:53–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.008>
- Arranz P, de Soto NA, Madsen PT, Sprogis KR. 2021. Whale-watch vessel noise levels with applications to whale-watching guidelines and conservation. *Marine Policy.* 134:104776. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104776>
- BGR. 2018. Environmental Impact Assessment for the testing of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle in the Eastern German license area (Clarion-Clipperton Zone) in the framework of the European JPI-O MiningImpact 2 research project. [place unknown].
- Clark MR, Durden JM, Christiansen S. 2020. Environmental Impact Assessments for deep-sea mining: Can we improve their future effectiveness? *Marine Policy.* 114:103363. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.026>
- Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. 2014. The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Front Ecol Environ.* 12(6):347–355. <https://doi.org/10.1890/130281>
- Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. 2016. Stemming the Tide of Light Pollution Encroaching into Marine Protected Areas: Light pollution in marine protected areas. *Conserv Lett.* 9(3):164–171. <https://doi.org/10.1111/conl.12191>
- Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J. 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal: Nighttime light pollution. *Biol Rev.* 88(4):912–927. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- GSR. 2018. Environmental Impact Statement - Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact. [place unknown].
- Hauton C, Brown A, Thatje S, Mestre NC, Bebianno MJ, Martins I, Bettencourt R, Canals M, Sanchez-Vidal A, Shillito B, et al. 2017. Identifying Toxic Impacts of Metals Potentially Released during Deep-Sea Mining—A Synthesis of the Challenges to Quantifying Risk.

- Front Mar Sci [Internet]. [accessed 2023 Jul 18] 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2017.00368>
- Honjo S, Eglinton T, Taylor C, Ulmer K, Sievert S, Bracher A, German C, Edgcomb V, Francois R, Iglesias-Rodriguez MD, et al. 2014. Understanding the Role of the Biological Pump in the Global Carbon Cycle: An Imperative for Ocean Science. *oceanog.* 27(3):10–16. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.78>
- Jones KR, Klein CJ, Halpern BS, Venter O, Grantham H, Kuempel CD, Shumway N, Friedlander AM, Possingham HP, Watson JEM. 2018. The Location and Protection Status of Earth's Diminishing Marine Wilderness. *Curr Biol.* 28(15):2506–2512.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
- Kontar EA, Sokov AV. 1994. A benthic storm in the northeastern tropical Pacific over the fields of manganese nodules. *Deep Sea Res Part I.* 41(7):1069–1089. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90019-1)
- Koschinsky A, Gaye-Haake B, Arndt C, Maue G, Spitz A, Winkler A, Halbach P. 2001. Experiments on the influence of sediment disturbances on the biogeochemistry of the deep-sea environment. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 48(17):3629–3651. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00060-1)
- Kwan YH, Zhang D, Mestre NC, Wong WC, Wang X, Lu B, Wang C, Qian P-Y, Sun J. 2019. Comparative Proteomics on Deep-Sea Amphipods after in Situ Copper Exposure. *Environ Sci Technol.* 53:13981–13991.
- Levin LA, Mengerink K, Gjerde KM, Rowden AA, Van Dover CL, Clark MR, Ramirez-Llodra E, Currie B, Smith CR, Sato KN, et al. 2016. Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining. *Marine Policy.* 74:245–259. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.09.032>
- March D, Metcalfe K, Tintoré J, Godley BJ. 2021. Tracking the global reduction of marine traffic during the COVID-19 pandemic. *Nat Commun.* 12(1):2415. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22423-6>
- McQuaid KA, Attrill MJ, Clark MR, Cobley A, Glover AG, Smith CR, Howell KL. 2020. Using Habitat Classification to Assess Representativity of a Protected Area Network in a Large, Data-Poor Area Targeted for Deep-Sea Mining. *Front Mar Sci.* 7:558860. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.558860>
- Navarro-Barranco C, Hughes LE. 2015. Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study. *Mar Pollut Bull.* 94(1–2):235–240. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.023>
- NORI. 2022. Collector Test Study – Environmental Impact Statement – Testing of polymetallic collector system components in the NORI-D contract area, Clarion Clipperton Zone, Pacific Ocean. Jamaica.
- Pälike H, Lyle MW, Nishi H, Raffi I. 2014. The Pacific Equatorial Age Transect. In: *Developments in Marine Geology [Internet].* Vol. 7. [place unknown]: Elsevier; [accessed 2023 Jul 22]; p. 329–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62617-2.00013-X>

- Shi P, Yang J, Sun D, Wang C. 2023. A simulation from offsite disturbance experiments on the metal resuspension process in the seafloor of the Western Pacific. *Chemosphere*. 311:137042. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137042>
- Stratmann T, Mevenkamp L, Sweetman AK, Vanreusel A, Van Oevelen D. 2018. Has Phytodetritus Processing by an Abyssal Soft-Sediment Community Recovered 26 Years after an Experimental Disturbance? *Front Mar Sci*. 5:59. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00059>
- Williams B, McAfee D, Connell S. 2022a. Oyster larvae swim along gradients of sound. *J Appl Ecol*. 59(7):1815–1824. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14188>
- Williams R, Erbe C, Duncan A, Nielsen K, Washburn T, Smith C. 2022b. Noise from deep-sea mining may span vast ocean areas. *Science*. 377(6602):157–158. <https://doi.org/10.1126/science.abo2804>
- Yang J, Nie H, Sun D, Wang C. 2023. Environmental controls on the distribution of metals in porewater and their diffusion fluxes at the sediment-water interface of the western Pacific. *Appl Geochem*. 148:105520. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105520>

8 对生物环境的影响评估和拟议的缓解措施

8.1 关键信息

本章节分类分析了本次多金属结核采矿车试验对生物环境的各类潜在影响，并介绍了拟采取的各种环境影响缓解措施。

本次的采矿车试验目的是为了验证采集装置的技术可行性和可靠性，并收集采矿车作业时，不同工况下的环境扰动数据，从而为进一步发展技术上可靠、经济上可行、环境扰动可接受的多金属结核采矿车提供关键数据。本报告的第5章中已经对 A-5 区块和周边的生物基线进行了描述，本章的评估是在上述内容的基础上，基于来自于文献或者报告的数据、构建的沉积物羽状流扩散和再沉积模型等开展的。

为了评估这种影响，一方面，我们首先按水柱深度识别了采矿车对四个不同的深度/生境的潜在影响，这包括：（1）大气、（2）海表和真光层（0-200 m 深度范围）、（3）暮光层（200-1000 m 深度范围）、（4）深层（1000 m-离底 200 m 深度范围）和（5）底层（离底 200 m 内的水柱和海床）。在下文的表 8.2-1 中，我们对不同水层深度中的这些潜在影响类别的具体内容进行了说明。识别的目的是为了在全面描述本次试验环境影响的基础上，聚焦对该区域生物群落和生态系统最重要的环境影响。另一方面，我们对按照表层、中层、底层、群落/生态系统层面和累积影响的顺序对这些潜在影响进行了描述。

由于本次试验不涉及大规模的矿石/沉积物提升和尾水排放，试验总时长也控制在尽可能短的范围，因此本次试验的潜在环境影响主要集中在底层，对其他深度/生境栖息的生物群落的环境影响较为轻微。

8.2 说明潜在影响的类别

本次试验的全部潜在环境影响来源包括以下两类空间上不重叠的活动，分别位于 A-5 区域外和 A-5 区域内。

（1）在 A-5 区域外，主要是试验保障船和环境监测船往返中国舟山母港和 CC 区的中国五矿 A-5 区域的航路期间，两条船产生的噪音和直接碰撞对鲸类、

海龟等大型海洋生物的潜在风险等。另外，由于远洋船舶正常航行期间并不会对开启高亮度的照明设施，因此人工照明对海洋生物的光照在此阶段不存在。

(2) 在 A-5 区域内，主要包括以下潜在环境扰动类别：

- a 采矿车的试验活动对原位栖息地的改变，包括结核移除、沉积物移除和沉积物扰动，这对于底栖微生物、小型底栖生物、大型底栖生物、巨型底栖生物和结核附着生物都存在影响。
- b 采矿车的试验活动造成沉积物羽状流扩散，并进一步可能导致的因沉积物再沉积而引发的对底栖生物的掩埋影响；
- c 采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人的光照，特别是对具有趋光性的浮游生物、游泳动物等；
- d 采矿车、水面支撑母船/环境监测船的噪音，特别是对鲸类等大型海洋哺乳动物；
- e 采矿车、水面支撑母船/环境监测船和水下机器人发生有毒物质（如燃油、润滑油和液压油类）的潜在泄露可能导致对浮游生物的急性毒性作用。

表 8.2-1 潜在影响的生物群落组分

潜在影响的类别	潜在影响的生物群落组分								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	-	-	-	●	●	-	-	-	-
2a	-	-	-	-	-	-	●	●	●
2b	-	-	-	-	-	-	●	●	●
2c	-	●	●	●	●	●	●	-	-
2d	-	-	●	●	●	-	●	-	-
2e	●	●	●	-	-	-	●	●	●

注 1：“潜在影响的类别”的定义和详细描述见上文。

注 2：生物群落组分的类别如下：

- A. 浮游植物和其他初级生产者

- B. 浮游动物
- C. 表层和中深层的鱼类和头足类等游泳动物（不包含底层游泳动物）
- D. 鲸
- E. 海龟
- F. 海鸟
- G. 底层游泳动物和食腐生物
- H. 底栖生物
- I. 结核附着生物

8.3 表层

8.3.1 潜在影响和需要解决的问题

本次试验中，两条试验船从中国舟山港出发抵达 CC 区的中国五矿合同区 A-5 区块。两条船舶在航行期间均会严格遵守 IMO 的各项规章，特别是尾气排放、垃圾丢弃等方面的要求。船舶航行途中和中国五矿 A-5 区块的 CTA 均不涉及任何“生物多样性关键区域”（Key Biodiversity Areas, KBAs）（图 8.3-1）和“重要海洋哺乳动物区域”（Important Marine Mammal Areas, IMMAs）（图 8.3-2）。此外，基于对北太平洋 23 种海龟、鲸类、鲨鱼和海鸟等顶级/大型海洋生物的定位信标追踪数据，CTA 不是大多数这类顶级捕食者的重要栖息地（图 8.3-3）（Block et al. 2011）。仅有棱皮龟（Leatherback turtle）在该区域较为常见，但该物种为全球性分布，其主要产卵区域为加勒比海和西非海岸（<https://www.fisheries.noaa.gov/species/leatherback-turtle>），即 CC 区也不是棱皮龟的产卵区、育幼区等生活史关键阶段区域。因此，整体上对于海洋哺乳动物、海鸟、海龟等等大型、珍稀、濒危的海洋动物产生的潜在风险很低。

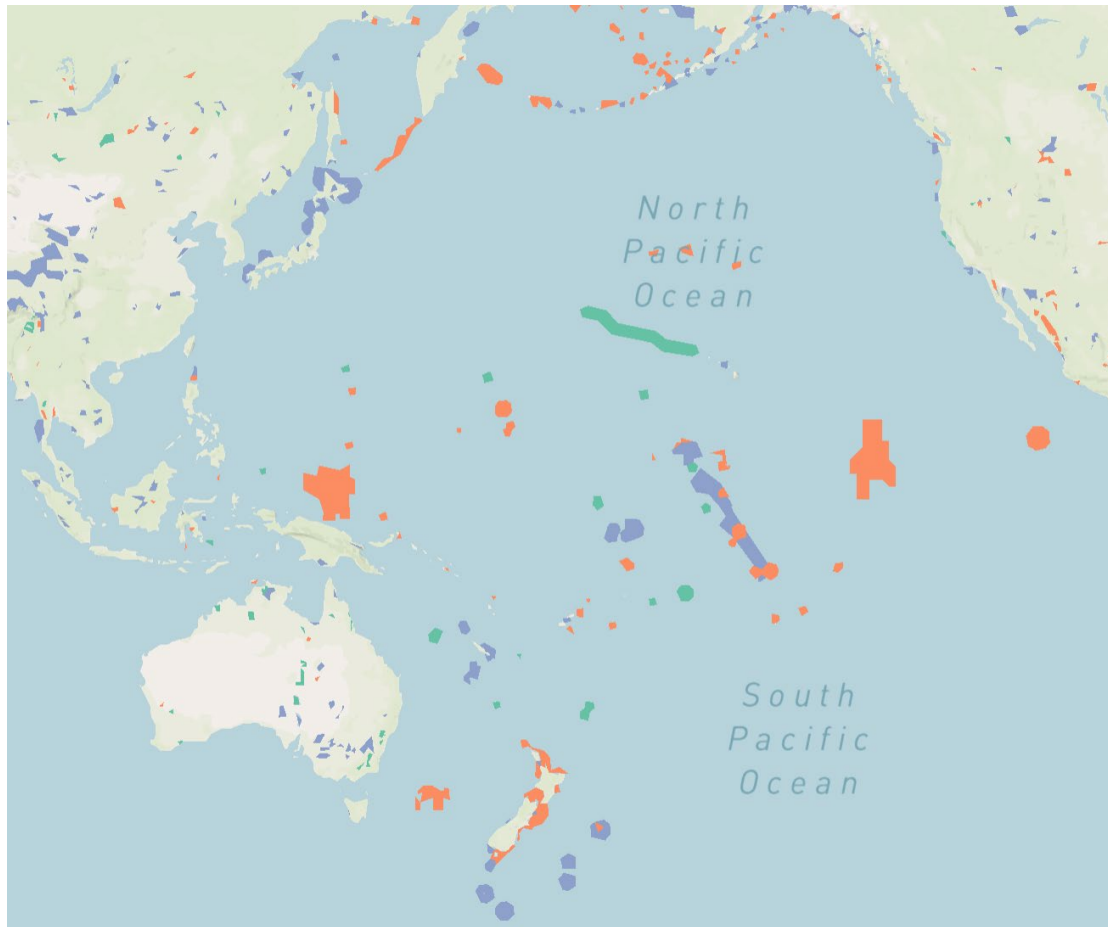


图 8.3-1 太平洋的“生物多样性关键区域”（Key Biodiversity Areas, KBAs）

(Map from: Protected Planet Report 2020)

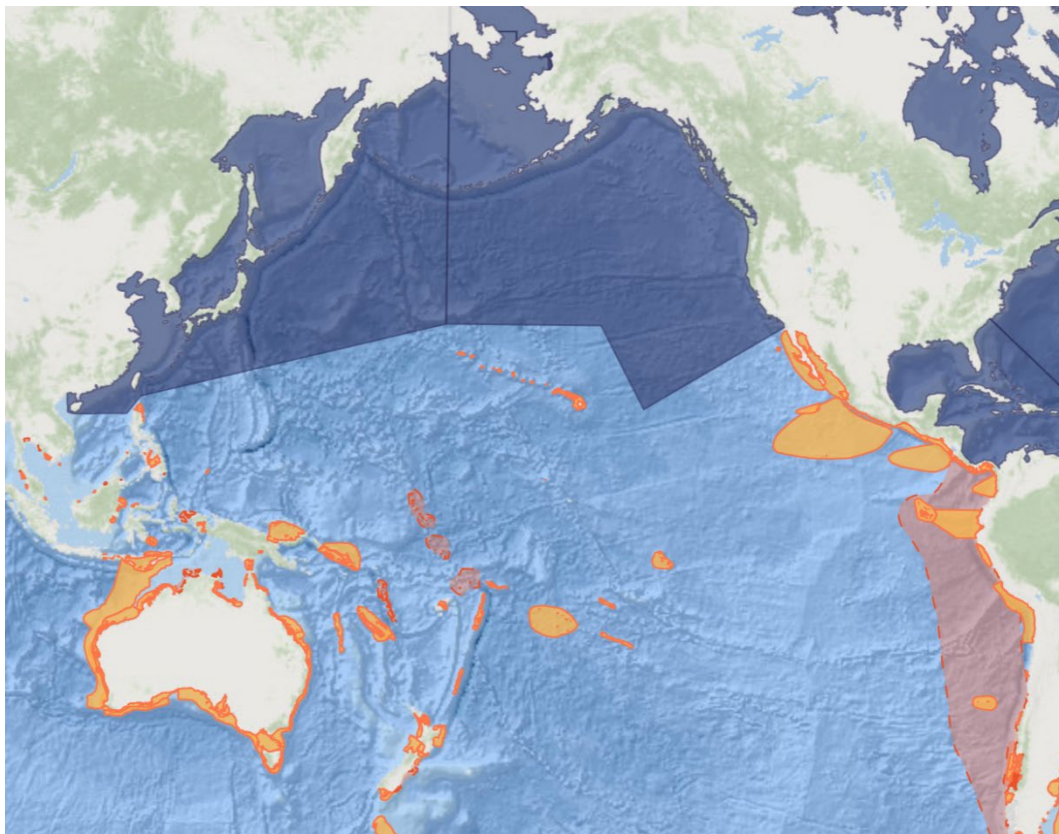


图 8.3-2 太平洋的“重要海洋哺乳动物区域” (Important Marine Mammal Areas, IMMAs)

(Map from: <https://www.marinemammalhabitat.org/>)

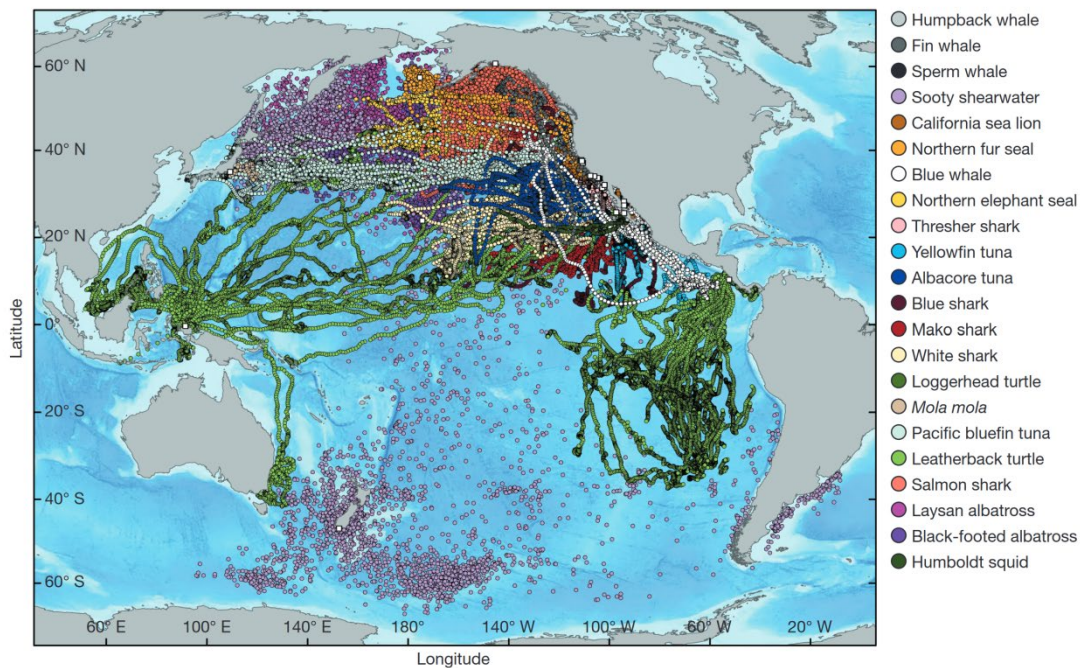


图 8.3-3 太平洋 23 种顶级海洋捕食者的分布 (Block et al. 2011)

8.3.1.1 噪音

虽然船舶航行产生的噪音可能会对海鸟、海龟、海洋哺乳动物等产生不利影响，包括对其摄食、繁殖、迁徙等行为学方面的影响甚至直接致死等 (Hawkins et al. 2020; Duarte et al. 2021)，但一般认为鲸类在距离水下噪音 150 dB re 1 μ Pa 的船舶 500 m 以外即可免受噪音的严重不利影响 (Arranz et al. 2021)。不过需要注意的是，对这一影响程度的量化评估很大程度上受到鲸类对水下噪音的耐受阈值的限制。例如，如果将这一阈值限定为 130 dB re 1 μ Pa，则显然会有更远范围内的海洋生物会受到噪音的威胁 (Williams et al. 2014)。近期的研究更加严格的阈值 (120 dB re 1 μ Pa) 开展的评估表明，采矿活动对海洋哺乳动物的直接影响范围约 4-5 km (Williams et al. 2022b)。但是在这方面的评估中，当前主要的困难之一是缺乏在人类活动频次和强度很低的深海大洋区域，如东太平洋 CC 区等，对主要鲸类受到人类活动噪音影响的直接观测数据。大量类似的研究是在近海或者人类活动十分频繁、各类人为来源的水下噪音影响严重的区域开展的 (Rolland et al. 2012)，这些研究的目标物种和种群会受到多重来源的累积影响。另外，有研究表明强烈的噪音还可能对无脊椎动物的幼体产生影响 (Williams et al. 2022a)，但这类研究同样缺乏在深海环境和针对深海物种的参考数据。考虑到本次试验所使用的船舶吨位要显著小于 NORI 在 2022 年试验中所采用船舶，参考其 EIS 报告的结果 (NORI 2022)，我们认为本次试验所产生的水面噪音对海洋生物的影响较低，范围较小。

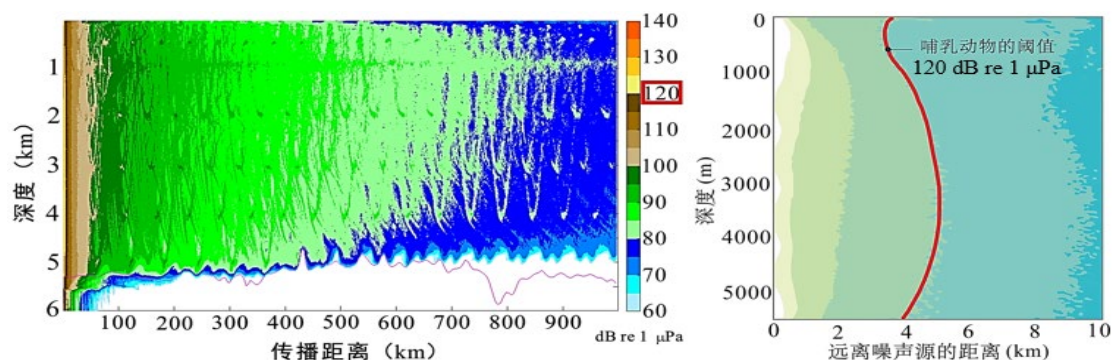


图 8.3-4 模拟深海采矿噪音的传播距离 (Williams et al. 2022b)

8.3.1.2 光

尽管灯光诱捕很早就海洋渔业中得到广泛使用 (Nguyen and Winger 2019)，

但人类活动导致的光照影响在近二十年来才被广泛认为是一种对海洋生物有着显著不利影响的环境问题 (Longcore and Rich 2004)。例如，夜间的龙虾捕捞船会发出明亮的光照，这些人工光照导致了海燕等海鸟迷失方向，甚至撞击到船上而死亡 (Ryan et al. 2021)。近海强烈的人工光照也被认为会显著影响海龟幼体破壳而出之后正确定位海洋方向从而尽快进入海水的导航能力，这种干扰对于海龟种群的延续和维持会造成显著影响 (Kamrowski et al. 2015)。人工光照更为显著的影响可能是对于上层和中层之间垂直迁移的物种，例如小型鱿鱼、某些浮游动物等 (Song et al. 2022)。由于这些生物通常采用白天下沉到暮光层，黄昏和夜间上浮至真光层的方式保证其在最大化躲避依赖视觉的捕食者的同时满足摄食需求，而夜间长时间的人工光源会诱使这些生物的捕食者聚集和捕食，从而对正常的种间关系造成一定干扰 (Gaston et al. 2013; Davies et al. 2014)。但考虑到本次试验的时间有限（总时长不超过数周），光源强度也要显著弱于在东太平洋常见的鱿钓船，我们认为本次试验所产生的水面光照对海洋生物的影响较低。

8.3.1.3 对浮游生态系统的潜在影响

本次试验的目标仅涉及采矿车的海床试验，正常情况下不会产生包括尾水在内的表层排放，因此对海洋表层的浮游生态系统无影响。

8.3.2 减轻影响的环境管理措施

8.3.2.1 噪音

在船舶航行和在 A-5 区块试验期间，将配备专业人员瞭望和监测船舶周围海龟、鲸类等大型海洋生物的活动情况。如有必要，将采取主动避碰措施，通过远离这些生物从而避免对其造成损伤。

两条船舶的水下噪音水平满足 IMO 和中国对同等级船舶的水下噪声要求，从而尽最大可能减轻对海洋生物的噪音影响。

8.3.2.2 光

在船舶航行和在 A-5 区块试验期间，将最大可能避免不必须的照明。试验期间，环境监测船和试验保障船都仅使用必要的照明措施以保障正常作业的安全，特别是当采矿车在水下开展试验时，试验保障船夜间将在整个甲板开启照

明设施。

8.3.2.3 其他

本次试验所使用的两条船舶均满足《国际船舶安全营运和防止污染管理规则》(ISM Code - 1993) 和《国际防止船舶造成污染公约》附则 1 的要求, 不在海洋排放和丢弃对海洋环境造成污染或潜在危害的物质, 并在试验期间严格遵守上述规定。

本次试验的采矿车在甲板准备期间, 将不会造成有毒有害的物质的不可控排放。设备试验所需要的液压油等必要的化学品将妥善管控, 包括使用后的废弃物, 避免直接入海。

8.3.3 残留影响

与其他影响源不同, 人为噪声和光都可以被视为非持久性的点源影响, 即一旦源头被移除, 其影响就会迅速下降 (Parsons et al. 2020)。因此, 在表层无残留影响。

8.4 中层

CTA 内海洋中层分布有浮游动物、小型游泳动物等海洋生物类群, 这些生物类群大多对光照敏感。在采矿车由甲板下放到海床的过程中, 采矿车无需开启照明设施, 因此对中层生物群落不存在光照影响。另外, 在下放过程中, 为了维持采矿车的姿态以保证下放过程中采矿车本体和承重钢缆的安全, 采矿车的小型螺旋桨将在必要时启动。这种小型的螺旋桨类似于 ROV 上的同类产品, 其噪音水平较低, 预期对中层生物群落的噪音影响轻微。

与全系统试验不同, 本次试验只开展采矿车的海床试验, 因此不涉及中层的排放或影响。此外, 在中层除必要的钢缆和电缆外也没有产生光照和噪音的设施。因此, 我们认为本次试验对海洋中层生物群落的影响轻微。

8.5 底层

8.5.1 潜在影响和需要解决的问题

8.5.1.1 直接影响

在中国五矿的 A-5 区块, 小型底栖生物主要分布于沉积物表层的 0-4 cm (这一深度超过 95% 的总生物量), 其中有约一半生物量的小型底栖生物分布在沉积物最上层 (0-1 cm)。在 CC 区的其他区域, 小型底栖生物的垂向分布也呈现类似特征 (Tong et al. 2022)。另外, 我们的研究发现在 A-5 区内, 小型底栖生物的空间分布相对均匀 (图 5.4-30)。这种在中小尺度上空间分布的均匀性与 NORI-D 区域的研究结果类似 (NORI 2022), 类似的结果在中印度洋海盆中也有发现 (Singh et al. 2019)。上述小型底栖生物群落密度在中小尺度上的均匀性与其在大尺度 (例如整个 CC 区的空间尺度) 上的强烈梯度性并不矛盾 (Tong et al. 2022), 在大尺度上小型底栖生物群落密度自西向东逐渐升高的趋势与该区域强烈的初级生产力梯度相一致 (McQuaid et al. 2020)。

采矿车采集头的沉积物扰动深度约 4-6 cm (这取决于结核的埋藏深度, 并可以做自适应的调节以实现在有效采集多金属结核的前提下实现最浅的沉积物扰动), 采矿车履带的直接扰动深度约 10 cm, 但不可避免会对更深层的沉积物也存在一定程度的压陷影响。结核周围沉积物被采集头吸走后, 沉积物内的生物也不可避免被卷入采集头内, 而后随海流飘散开或再沉降, 这一过程可能会导致部分底内生活生物直接死亡, 或者被较大生物捕食, 从而降低生物密度。上世纪八九十年代 DISCOL 扰动试验和 BIE 底栖生物影响实验揭示了模拟扰动移除沉积物后对底内生物的长期影响。1988-1998 年德国 DISCOL 实验中, 在模拟扰动前后 (6 个月、3 年和 7 年) 跟踪调查环境变化情况, 结果显示, 扰动后除细菌外, 所有动物类群的丰度都显著下降, 半年后没有达到原状沉积物的值。7 年后, 虽然大型底栖生物密度恢复到原有水平, 但多毛类种类组成与未扰动前有显著差异 (Schriever et al. 1997)。在实验 26 年后的进一步研究中发现, 线虫群落仍未恢复到初始状态: 扰动轨迹内的线虫群落总密度和生物量明显低于轨迹外, 生物多样性指数显示轨迹内的线虫多样性明显较低, 而且轨迹内的线虫群

落结构与轨迹外两个未受干扰地点的线虫群落结构相比有显著差异 (Miljutin et al. 2011)。因此, 采矿车行驶经过的区域会对小型底栖生物群落造成严重的直接影响。

考虑到本次试验只有约 0.1 km^2 的直接采集面积, 而 A-5 区块的面积为 22821 km^2 , 本次直接扰动的面积为 A-5 区总面积的 0.000438% , 因此我们推断直接影响的总体规模较小, 对面积辽阔的 CC 区深海生态系统的总体影响较小。

8.5.1.2 结核移除

从全球范围来看, 深海平原总体上是一个软基质的环境, 可供固着生物所需的硬基底比例很低 (Riehl et al. 2020)。在 CC 区, 多金属结核提供了珊瑚、海绵、管状蠕虫、海百合等生存所依赖的硬基底, 构成了独特而重要的微生境 (Simon-Lledó et al. 2019)。在 CC 区利用 ROV 调查结果显示, 结核覆盖率高的区域底表附生类群 (epifauna) 的密度高出无结核区两倍以上, 而且在无结核区几乎没有发现软珊瑚和黑珊瑚等关键的固着生物类群 (Vanreusel et al. 2016)。此类群生物将直接受到采矿车作业的影响。本次采矿车试验活动将移除集矿轨迹上的绝大部分结核, 显而易见这会使附着在这些结核上的海绵、珊瑚、海葵、海百合等底表生活型生物几乎都遭到毁灭性破坏。此外, 该研究还回访了 37 年前结核试采试验扰动过的一条轨迹, 发现结核开采轨迹上几乎没有发现上述巨型底栖动物的重新分布, 这表明采矿会永久破坏结核栖息地导致此类结核固着生物恢复极其缓慢 (Vanreusel et al. 2016)。

随着采矿车的移动, 那些运动能力较弱的生物如海星、海胆和海参等因来不及逃避而被压死或被吸入采矿车内搅碎。此外, 由于移除结核这一硬质附着基, 从合同区外迁入的底栖附着动物群落的幼体会因找不到所需的硬基质固着下来, 不久就会死亡。

除了最为引人关注的附着在结核上生存的海绵、珊瑚等巨型底栖生物之外, 多金属结核上还附生有多种诸如微生物、原生动物和其他较为低等的后生动物 (如线虫等), 构成了结核生物群落 (Thiel et al. 1993)。结核裂缝中的生物与周围沉积物中的小型底栖生物群落结构有显著差异, 前者个体较小, 密度较低, *Camacolaimus*, *Leptolaimus* 和 *Acantholaimus* 属的丰度较高, 其中 *Camacolaimus*

属可能是结核裂缝中线虫的优势属。有研究发现 CC 区法国合同区内有结核区和无结核区域的线虫物种组成存在显著差异，且无结核区域的线虫密度达到结核区的 2 倍 (Miljutina et al. 2010)。而在中印度洋盆地结核区的研究结果表明多金属结核缝隙中分布的线虫多样性较低，但结核的存在可能有助于增加 *Leptolaimus* 属和 *Camacolaimus* 属的密度，这暗示这两个属可能是多金属结核微生物境的特有类群 (Singh et al. 2019)。这些证据可以推断移除结核后，这种微生物境的消失或干扰活动将不可避免地导致生活在结核缝隙中的小型底栖生物多样性的局部程度上的降低，但目前量化的研究还十分缺乏。

考虑到本次试验只有约 0.1 km² 的直接采集面积，而 A-5 区块的面积为 22821 km²，本次直接扰动的面积为 A-5 区总面积的 0.000438 %，因此我们推断直接影响的总体规模较小，对面积辽阔的 CC 区深海生态系统的总体影响较小。

8.5.1.3 沉积物羽状流和沉积物的覆盖

深海沉积物中有机碳的含量要比上层沉降的颗粒物中的有机碳含量低约 2 个数量 (Kim et al. 2015)，因此再悬浮导致的沉积物羽状流中尽管含有大量的颗粒物，但这些颗粒物并不是一种很好的食物资源，也就是说不大可能为海底生物提供额外的食物来源。

羽状流中较大颗粒的沉积物很快降到底部，预期会对深海生物产生直接影响，例如，物理掩埋/窒息效应、阻塞呼吸和过滤器进食器官，或释放潜在的有毒或耗氧物质。羽流中较细的颗粒沉降速度较慢，将在较长时间内滞留在水中，在底层流的作用下扩散并在海底较大范围内发生再沉积，如果这些羽流扩散区的生物长期受到低水平沉积干扰也会产生潜在的慢性影响。具体可能存在以下几个方面机制：

- (1) **物理掩埋/窒息效应：**物理掩埋/窒息效应是羽状流和再沉积的生物影响问题的焦点之一。对于游动能力较强的生物，面临规模有限的采矿车导致的羽流时，可通过主动快速逃逸规避此类影响。对于靠近扰动源、移动能力较差或完全不具备移动能力的底栖动物，例如海蛇尾、海绵和珊瑚等，可能会出现产生负面影响。例如，已有的深海研究测试和观察了珊瑚和海绵暴露于各种类型的颗粒物后的不同反应：一种冷水石珊瑚 (*Lophelia pertusa*) 在暴露于细小悬浮颗粒物

中时的骨骼生长速率显著降低，呼吸作用和组织的脂肪酸比例等并未受到显著负面影响，但同时该研究也发现珊瑚幼虫可能特别容易受到高浓度颗粒的影响 (Larsson et al. 2013)。一种钵海绵 (*Geodia baretii*) 在面临短期 (4 小时) 的高浓度颗粒物胁迫时代谢耗氧率会显著降低 50 %，但一旦悬浮颗粒物负荷恢复到背景水平，耗氧量又会迅速恢复到接触前的水平；而经历连续 29 d 的持续高浓度悬浮颗粒物 (50 mg/L) 暴露后，海绵的代谢耗氧率将永久性下降 60 %，这表明海绵对持续性物理胁迫的耐受能力较低 (Kutti et al. 2015)。

- (2) **阻塞呼吸和滤食：**对于近底层的浮游动物或其他以腮呼吸的动物来说，高浓度的悬浮颗粒物可能会堵塞鳃或其他过滤器官而损害呼吸作用和摄食能力，从而造成桡足类和磷虾等浮游动物的死亡 (Anderson and Mackas 1986)。此外，尽管有观点认为底层沉积物被释放到水体中后，可能因微生物的耗氧分解作用消耗水体中的 DO，从而造成近底层海水的脱氧，但在底层水体交换良好的深海区域，这一问题可以忽略 (Christiansen et al. 2020)。
- (3) **降低食物的质量：**在被沉积物羽状流覆盖后，生物被动摄入低营养价值的颗粒物将导致进食的能量消耗增加，进而造成摄入的能量降低并最终引发事实上的饥饿。在食物网水平上，这将进一步通过营养级联效应影响至高营养级生物 (Christiansen et al. 2020)。使用不同食性的桡足类开展的研究表明植食性、杂食性的桡足类 (*Undinula vulgaris*、*Euchaeta rimana*、*Labidocera acutifrons* 和) 会摄入采矿尾水中的悬浮颗粒物，但以食碎屑 (海雪) 为主的 *Oncaea venusta* 则不太容易摄入这些采矿尾水中的悬浮颗粒物 (Hu 1981)。不过，迄今为止这类研究的数据均在近海和上层海洋中获得，针对深海生物的研究数据还十分缺乏。
- (4) **嗅觉干扰：**嗅觉可能是吸引和引导底栖食腐动物捕食食物的主要机制 (Sainte-Marie 1992)。采矿活动产生的沉积物羽流会干扰食物释放的气味羽流，降低发现食物的概率，可能会导致食腐动物的食物供应普遍减少，进而进一步通过营养级联而影响食物网中的其他高营养级生物。

- (5) **视觉干扰:** 尽管太阳光无法穿透厚厚的海水到达 1000 m 以深的海域, 但视觉在深海生物中并非普遍退化, 而是在其捕食与逃避敌害、寻找配偶等种内和种间交流中起到重要作用 (Warrant and Adam Locket 2004)。此外, 许多深海生物也会自发光, 这种生物发光对于其生命活动也具有重要意义 (Haddock et al. 2010)。采矿活动导致的沉积物羽状流中浊度/悬浮颗粒物浓度的增大会减弱透光率, 因此可能会具有视觉的生物和可以发光的生物造成不利影响。

根据我们构建的沉积物羽状流扩散模型和沉积物再沉积模型, 本次试验的沉积物再沉积范围按照 0.1 mm 再沉积厚度的阈值衡量, 最大面积不超过 1 km² (见本章的 7.5 节)。这个面积仅占据 A-5 区块总面 0.0044 %, 因此我们推断沉积物再沉积也不会对底栖生物群落产生较大的扰动。另外, 需要指出的是, 关于沉积物掩埋对深海底栖生物直接效应的研究目前尚不充分, 使用浅海物种开展的类似沉积物掩埋实验中发现大型底栖生物可以耐受不超过 3 mm 的原位沉积物掩埋 (Schaanning et al. 2008)。如果深海底栖生物群落也有类似的耐受能力, 本评估也可能会高估羽状流再沉积覆盖导致的潜在环境影响。

8.5.1.4 重金属释放

深海采矿活动导致的有毒物质释放被认为是重要的环境影响之一 (Levin et al. 2016)。在 CC 区底层广泛的氧化环境中, 简单的机械扰动造成氧化矿物性质改变从而发生大规模重金属释放的可能性不大 (BGR 2018)。结核区的表层沉积物孔隙水中赋存了大量的营养盐和重金属, 对沉积物的模拟扰动实验表明重金属的释放存在显著的元素特异性 (Shi et al. 2023), 仅钒、铷、钼和镉四类重金属存在显著稳定的析出行为。类似的结果在其他人的研究中也有发现 (Koschinsky et al. 2001)。这部分的结果详见 7.6 节。

对上述重金属释放行为的环境影响开展评估要依赖毒理学研究数据, 但事实上, 大多数以深海采矿环境影响评估为目标的毒理学研究受到各种条件的限制而不得不使用浅水和近海的生物种类作为测试生物 (Yamagishi et al. 2019)。在 MIDAS 项目开始前的 2013 年, 美国 EPA 的数据库中尚未有任何以深海生物作为受试动物的毒理学评估记录 (Hauton et al. 2017)。由于当前采矿工艺流程与技术已经不涉及海洋表层和中层排放, 因此使用浅水和近海物种开展毒理学评估

的数据就无法直接作为深海采矿活动环境影响评价的依据。有研究利用高压低温培养装置比较了深海的低温和高压环境对于多种重金属毒性评估结果的影响,发现在高静水压力下,铜的毒性显著增加,而镉的毒性没有显著增加 (Brown et al. 2017a)。有研究提出了“温度校正因子”的方法,试图将大量常温常压下的毒理学测试数据转换用于评估不同温度背景下的实际毒性 (Wang et al. 2014),但该方法可能无助于解决深海采矿环境下的毒理学评估问题,因为,在高静水压力下,对所述每种金属的任何“温度校正因子”的确定都不一致,必须根据经验确定和实际物种来确定 (Hauton et al. 2017)。因此,在现有数据下,关于深海采矿对底层生态系统毒性的精确评估尚有较大困难。

除了上述以半致死浓度 (LC₅₀) 为关键参数的毒理评估之外,还有大量的研究发现生物在面临重金属威胁时可以做出主动逃逸行为以规避或减轻重金属胁迫的行为学响应 (Hauton et al. 2017)。Brown 等比较了浅水和深海物种对重金属毒性的行为学响应,在实验室内 4 °C 环境的毒理实验中观测到海参通过爬到实验池侧面来避免受到浓度为 5 mg/L 的铜污染沉积物,而在秘鲁海盆 4167 m 深处原位开展的铜污染沉积物暴露实验也观测到深海海参有类似躲避行为 (Brown et al. 2017b)。这一研究结果暗示深海生物面临重金属胁迫时在行为学上的逃逸效应可能是广泛的。在面临伴随沉积物羽流的重金属胁迫时,多金属结核区域的底栖生物可以做出类似逃避反应。

8.5.1.5 噪音

深海采矿活动的主要噪音源包括水面支持船、立管/提升系统和采矿车等。本次试验中,不涉及立管/提升系统,因此这里对底层的影响主要是采矿车产生。此外,水面支持船的噪音也能垂向传播到深海海床 (NORI 2022)。

采矿车作业过程不可避免产生大量噪音,这些噪音对深海底层和水体生物也有潜在影响,但目前此方面的研究较少。在 CC 区西部的深海底层还没有更多关于背景噪音的监测数据,仅有的长时间序列数据采集自水深 300 m 处 (参见 4.10)。有研究发现地中海深海环境背景噪音在 10-45 kHz 频率范围内不超过 50 dB,在更低频的 2-10 kHz 范围内不超过 60 dB,可以推测大部分深海生物可能都生活在低噪音的环境中 (Riccobene 2009)。齿鲸类和须鲸类的发声频率差异显著,前者往往达到 3-5 kHz,后者则可以低至 30 kHz 以下,而底层鱼类则通常会

用低频 (<1.2 kHz) 声音进行沟通 (Rountree et al. 2012)。一般来说, 机械噪音中的敲击机制产生的声音主要频率在 1000 Hz 以下, 摩擦发音机制发声的主要频率为 3000-5000 Hz。这些声音的持续时间、脉冲间隔以及其他特性的差异极大, 这就可能会影响信息交换并且会产生物种特异性的反应。有证据表明鱼类会对同类交配期的叫声、潜在捕食者叫声、猎物叫声以及回声定位时从物体上反弹回来的声音做出反应。

采矿车的详细工程学描述见 3.3.2。目前没有深海环境中对该设备的噪音水平进行完成测试。考虑到采矿车的采集能力和功率相似, 因此该部分的估计参照 NORI 的测试结果 (NORI 2022), 即按照 120 dB re $1\mu\text{Pa rms}$ 的阈值, 影响的水平范围可达 562 m 半径, 即约 0.99 km^2 。如按照最新的估计, 采矿车底层噪音的水平按方向扰动范围约 4 km 半径 (图 8.3-4) (Williams et al. 2022b)。

8.5.1.6 光

采矿车需配备光源沿着采矿路径照亮海底, 以便精确控制作业规避风险。同时, 用于调查、监测和维护的 ROV、AUV 和深海着陆器 (Lander) 等也会根据需求发出强光。阳光无法穿透 1000 m 水深进入深海, 许多深海生物部分或者完全没有眼睛或感光器官, 但是许多鱼类和无脊椎动物并未完全丧失感光能力。关于人工光源在深海造成生物直接胁迫的例子很少。有研究发现生活在热液口的一些深海虾类当被载人潜器上带的泛光灯照射时, 其视网膜会遭到永久性损伤 (Herring et al. 1999)。考虑到本次试验的规模较小、持续时间较短, 我们认为这类影响的风险较低。

8.5.2 减轻影响的环境管理措施

试验期间将采取多种手段以尽量减少或减轻环境影响。

(1) 采矿车的底层沉积物扰动方面

在试验期间, 采用多种手段减轻底层沉积物扰动, 包括: 合理安排试验计划, 在完成必要试验内容的条件下, 尽量减少采矿车行走距离和扰动的面积; 基于前期的实验室试验结果, 优化集矿头、履带设计, 并加装抑制履带沉积物扰动的单体等方案来减缓沉积物扰动深度; 开发多金属结核密度识别装置, 从

而在结核密度较低的区域停止采矿车采集头的采集扰动等。该部分内容，详见 3.3 节和 7.14 节。

(2) 采矿车的噪音影响方面

在试验期间，采用多种手段减轻采矿车的噪音影响，包括：合理安排试验计划，在完成必要试验内容的条件下，减少全功率运行的时间；对关键的噪音源（如破碎装置、液压泵等），增加简易的噪音遮挡装置，减缓噪音的传播；合理安排试验计划，从而减少水下定位装置的工作时间，减少水下定位产生的噪音等。

(3) 采矿车和 ROV、AUV 等辅助设备的光照影响方面

在试验期间，将尽量避免非必须的照明，包括：在采矿车、ROV 和 AUV 等设备下放经过生物相对密集的暮光层（200-1000 m）水层时，将不开启水下照明灯等设施。AUV 水下工作期间，不开启侧向和前向照明设备，只在近底层光学调查期间开启对下方海床的照明，以避免对更广泛的区域造成人工光源干扰。采矿车作业期间，控制照明设施的照度（Illuminance），以满足安全操作的最低水平为标准，避免无序和过度的照明。

8.5.3 残留影响

对底层生物群落的残留影响主要体现在两个方面，一是多金属结核被采集和移除后，结核附生生物失去了赖以生存的硬基底而无法定殖，这将导致本次试验中采矿车行走、采集直接扰动的范围（ 0.1 km^2 ）内不具备后续这些生物生长的必要条件，从而导致这一小区域内的底栖生物群落中失去结核附生生物种类；二是沉积物羽状流覆盖影响的范围内（以 0.1 mm 再沉积厚度的阈值衡量，最大面积不超过 1 km^2 ），生物将受到栖息地被沉积物掩埋的影响。依据 DISCOL 实验的数据，这种影响依据不同生物类别的响应不同而将持续数年至数十年。

8.6 累积影响

人类活动对海洋生态系统的累积影响十分复杂，不同压力源对生态系统中

特定组分的累积影响可以表现出相加效应、协同效应或拮抗效应，同时累积影响中不同压力源的交互作用类型也会随着在生态系统中的组织层级、营养级等而发生变化 (Crain et al. 2008)。本次采矿试验的扰动主要在底层。如上文所述，对底栖生物群落中的微生物、小型底栖生物、大型底栖生物、巨型底栖生物、结核附生生物、底层游泳动物等类群的压力源包括结核移除、沉积物扰动（移除、压实、再沉积等）、含有高浓度悬浮颗粒物的羽状流、重金属释放、噪音、光等直接因素以及由此带来的 DO 浓度变化、电导率变化等潜在因素。目前，在区域尺度上对深海生态系统受扰动后的累积影响问题的定量研究十分缺乏。例如，利用食物网定量分析方法（Ecosim with Ecopath）对地中海深海生态系统在气候变化和人类活动压力下的累积影响研究发现拖网渔场造成的影响可能比气候变化导致的海雪减少更严重 (Tecchio et al. 2015)。在东南太平洋的秘鲁海盆，基于 1989 年实施的 DISCOL 试验对海床的扰动，研究团队在 2015 年重访试验区，并根据多来源的数据构建了相对完善的食物网模型以评估深海生态系统功能在 26 年之后的恢复情况 (De Jonge et al. 2020)。但遗憾的是，CC 区尚缺乏类似的食物网模型，也缺乏不同扰动压力源对食物网中不同关键组分影响的观测数据，因此类似的定量方法无法用于本项目区域。

在 NORI 的 EIS 报告中，其对累积影响的压力源进行了分类：类型 I 是已经、正在或可能对生态系统产生影响的压力源的总和；类型 II 是随着时间的推移，同一类型的压力源对生态系统的重复作用；类型 III 是对迁徙物种的影响，这些物种在迁徙路径的其它部分可能会遇到相同或不同类型的压力源。由于本项目的扰动主要集中在底层，且持续时间短，因此对深海生物多样性、生态系统功能及生物系统服务的潜在累积影响压力源主要是 I 类。

综合上述，由于本项目采矿车测试的时间和范围有限，可以合理地假设，对深海生物多样性、生态系统功能及生物系统服务的累积影响风险较低。

8.7 参考文献

Anderson EP, Mackas DL. 1986. Lethal and sublethal effects of a molybdenum mine tailing on marine zooplankton: Mortality, respiration, feeding and swimming behavior in *Calanus marshallae*, *Metridia pacifica* and *Euphausia pacifica*. *Mar Environ Res.* 19(2):131–155. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(86\)90043-7](https://doi.org/10.1016/0141-1136(86)90043-7)

- Arranz P, de Soto NA, Madsen PT, Sprogis KR. 2021. Whale-watch vessel noise levels with applications to whale-watching guidelines and conservation. *Marine Policy*. 134:104776. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104776>
- BGR. 2018. Environmental Impact Assessment for the testing of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle in the Eastern German license area (Clarion-Clipperton Zone) in the framework of the European JPI-O MiningImpact 2 research project. [place unknown].
- Block BA, Jonsen ID, Jorgensen SJ, Winship AJ, Shaffer SA, Bograd SJ, Hazen EL, Foley DG, Breed GA, Harrison A-L, et al. 2011. Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature*. 475(7354):86–90. <https://doi.org/10.1038/nature10082>
- Brown A, Thatje S, Hauton C. 2017a. The Effects of Temperature and Hydrostatic Pressure on Metal Toxicity: Insights into Toxicity in the Deep Sea. *Environ Sci Technol*. 51(17):10222–10231. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02988>
- Brown A, Wright R, Mevenkamp L, Hauton C. 2017b. A comparative experimental approach to ecotoxicology in shallow-water and deep-sea holothurians suggests similar behavioural responses. *Aquatic Toxicology*. 191:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.06.028>
- Christiansen B, Denda A, Christiansen S. 2020. Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota. *Mar Policy*. 114:103442. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.014>
- Crain CM, Kroeker K, Halpern BS. 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecol Lett*. 11(12):1304–1315. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01253.x>
- Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. 2014. The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Front Ecol Environ*. 12(6):347–355. <https://doi.org/10.1890/130281>
- De Jonge DSW, Stratmann T, Lins L, Vanreusel A, Purser A, Marcon Y, Rodrigues CF, Ravara A, Esquete P, Cunha MR, et al. 2020. Abyssal food-web model indicates faunal carbon flow recovery and impaired microbial loop 26 years after a sediment disturbance experiment. *Prog Oceanogr*. 189:102446. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102446>
- Duarte CM, Chapuis L, Collin SP, Costa DP, Devassy RP, Eguiluz VM, Erbe C, Gordon TAC, Halpern BS, Harding HR, et al. 2021. The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*. 371(6529):eaba4658. <https://doi.org/10.1126/science.aba4658>
- Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J. 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal: Nighttime light pollution. *Biol Rev*. 88(4):912–927. <https://doi.org/10.1111/brev.12036>
- Haddock SHD, Moline MA, Case JF. 2010. Bioluminescence in the Sea. *Annu Rev Mar Sci*. 2(1):443–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081028>
- Hauton C, Brown A, Thatje S, Mestre NC, Bebianno MJ, Martins I, Bettencourt R, Canals M, Sanchez-Vidal A, Shillito B, et al. 2017. Identifying Toxic Impacts of Metals Potentially

- Released during Deep-Sea Mining—A Synthesis of the Challenges to Quantifying Risk. *Front Mar Sci.* 4:368. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00368>
- Hawkins AD, Johnson C, Popper AN. 2020. How to set sound exposure criteria for fishes. *J Acoust Soc Am.* 147(3):1762–1777. <https://doi.org/10.1121/10.0000907>
- Herring PJ, Gaten E, Shelton PMJ. 1999. Are vent shrimps blinded by science? *Nature.* 398(6723):116–116. <https://doi.org/10.1038/18142>
- Hu VJH. 1981. Ingestion of deep-sea mining discharge by five species of tropical copepods. *Water Air Soil Pollut.* 15(4):433–440. <https://doi.org/10.1007/BF00279425>
- Jones KR, Klein CJ, Halpern BS, Venter O, Grantham H, Kuempel CD, Shumway N, Friedlander AM, Possingham HP, Watson JEM. 2018. The Location and Protection Status of Earth's Diminishing Marine Wilderness. *Curr Biol.* 28(15):2506–2512.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
- Kamrowski RL, Limpus C, Pendoley K, Hamann M, Kamrowski RL, Limpus C, Pendoley K, Hamann M. 2015. Influence of industrial light pollution on the sea-finding behaviour of flatback turtle hatchlings. *Wildl Res.* 41(5):421–434. <https://doi.org/10.1071/WR14155>
- Kim HJ, Kim D, Hyeong K, Hwang J, Yoo CM, Ham DJ, Seo I. 2015. Evaluation of Resuspended Sediments to Sinking Particles by Benthic Disturbance in the Clarion-Clipperton Nodule Fields. *Mar Georesour Geotec.* 33(2):160–166. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.815675>
- Koschinsky A, Gaye-Haake B, Arndt C, Maue G, Spitzky A, Winkler A, Halbach P. 2001. Experiments on the influence of sediment disturbances on the biogeochemistry of the deep-sea environment. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 48(17):3629–3651. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00060-1)
- Kutti T, Bannister RJ, Fosså JH, Krogness CM, Tjensvoll I, Søvik G. 2015. Metabolic responses of the deep-water sponge *Geodia barretti* to suspended bottom sediment, simulated mine tailings and drill cuttings. *J Exp Mar Biol Ecol.* 473:64–72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.07.017>
- Larsson AI, van Oevelen D, Purser A, Thomsen L. 2013. Tolerance to long-term exposure of suspended benthic sediments and drill cuttings in the cold-water coral *Lophelia pertusa*. *Mar Pollut Bull.* 70(1):176–188. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.02.033>
- Levin LA, Mengerink K, Gjerde KM, Rowden AA, Van Dover CL, Clark MR, Ramirez-Llodra E, Currie B, Smith CR, Sato KN, et al. 2016. Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining. *Marine Policy.* 74:245–259. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.09.032>
- Longcore T, Rich C. 2004. Ecological light pollution. *Front Ecol Environ.* 2(4):191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- McQuaid KA, Attrill MJ, Clark MR, Cobley A, Glover AG, Smith CR, Howell KL. 2020. Using Habitat Classification to Assess Representativity of a Protected Area Network in a Large, Data-Poor Area Targeted for Deep-Sea Mining. *Front Mar Sci.* 7:558860. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.558860>

- rg/10.3389/fmars.2020.558860
- Miljutin DM, Miljutina MA, Arbizu PM, Galéron J. 2011. Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 58(8):885–897. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.003>
- Miljutina MA, Miljutin DM, Mahatma R, Galéron J. 2010. Deep-sea nematode assemblages of the Clarion-Clipperton Nodule Province (tropical north-eastern Pacific). *Mar Biol*. 40:1–15.
- Nguyen KQ, Winger PD. 2019. Artificial Light in Commercial Industrialized Fishing Applications: A Review. *Rev Fish Sci Aquac*. 27(1):106–126. <https://doi.org/10.1080/23308249.2018.1496065>
- NORI. 2022. Collector Test Study – Environmental Impact Statement – Testing of polymetallic collector system components in the NORI-D contract area, Clarion Clipperton Zone, Pacific Ocean. Jamaica.
- Parsons MJ, Duncan AJ, Parsons SK, Erbe C. 2020. Reducing vessel noise: An example of a solar-electric passenger ferry. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 147(5):3575–3583.
- Riccobene G. 2009. Long-term measurements of acoustic background noise in very deep sea. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 604(1, Supplement):S149–S157. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.195>
- Riehl T, Wölfl A-C, Augustin N, Devey CW, Brandt A. 2020. Discovery of widely available abyssal rock patches reveals overlooked habitat type and prompts rethinking deep-sea biodiversity. *Proc Natl Acad Sci USA*. 117(27):15450–15459. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920706117>
- Rolland RM, Parks SE, Hunt KE, Castellote M, Corkeron PJ, Nowacek DP, Wasser SK, Kraus SD. 2012. Evidence that ship noise increases stress in right whales. *P Roy Soc B-Biol Sci*. 279(1737):2363–2368. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2429>
- Rountree RA, Juanes F, Goudey CA, Ekstrom KE. 2012. Is Biological Sound Production Important in the Deep Sea? In: Popper AN, Hawkins A, editors. *The Effects of Noise on Aquatic Life*. New York, NY: Springer; p. 181–183. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7311-5_41
- Ryan PG, Ryan EM, Glass JP. 2021. Dazzled by the light: the impact of light pollution from ships on seabirds at Tristan da Cunha. *Ostrich*. 92(3):218–224. <https://doi.org/10.2989/00306525.2021.1984998>
- Sainte-Marie B. 1992. Foraging of Scavenging Deep-Sea Lysianassoid Amphipods. In: Rowe GT, Pariente V, editors. *Deep-Sea Food Chains and the Global Carbon Cycle* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; [accessed 2023 Oct 7]; p. 105–124. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2452-2_7

- Schaanning MT, Trannum HC, Øxnevad S, Carroll J, Bakke T. 2008. Effects of drill cuttings on biogeochemical fluxes and macrobenthos of marine sediments. *J Exp Mar Biol Ecol.* 361(1):49–57. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.04.014>
- Schriever C, Ahnert A, Bluhm H, Borowski C, Thiel H. 1997. Results of the large scale deep-sea environmental impact study DISCOL during eight years of investigation. In: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference [Internet]. Hawaii: ISOPE; [accessed 2023 Oct 6]; p. ISOPE-I. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOP E97/All-ISOPE97/23760>
- Shi P, Yang J, Sun D, Wang C. 2023. A simulation from offsite disturbance experiments on the metal resuspension process in the seafloor of the Western Pacific. *Chemosphere.* 311:137042. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137042>
- Simon-Lledó E, Bett BJ, Huvenne VAI, Schoening T, Benoist NMA, Jones DOB. 2019. Ecology of a polymetallic nodule occurrence gradient: Implications for deep-sea mining. *Limnol Oceanogr.* 64(5):1883–1894. <https://doi.org/10.1002/lno.11157>
- Singh R, Sautya S, Ingole BS. 2019. The community structure of the deep-sea nematode community associated with polymetallic nodules in the Central Indian Ocean Basin. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 161:16–28. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.07.009>
- Song Y, Wang C, Sun D. 2022. Both Dissolved Oxygen and Chlorophyll Explain the Large-Scale Longitudinal Variation of Deep Scattering Layers in the Tropical Pacific Ocean. *Front Mar Sci.* 9:782032. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.782032>
- Tecchio S, Coll M, Sardà F. 2015. Structure, functioning, and cumulative stressors of Mediterranean deep-sea ecosystems. *Prog Oceanogr.* 135:156–167. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.018>
- Thiel H, Schriever G, Bussau C, Borowski C. 1993. Manganese nodule crevice fauna. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 40(2):419–423. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90012-R](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90012-R)
- Tong SJW, Gan BQ, Tan KS. 2022. Community structure of deep-sea benthic metazoan meiofauna in the polymetallic nodule fields in the eastern Clarion-Clipperton Fracture Zone, Pacific Ocean. *Deep Sea Res Part I.* 188:103847. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103847>
- Vanreusel A, Hilario A, Ribeiro PA, Menot L, Arbizu PM. 2016. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Sci Rep.* 6(1):26808.
- Wang Z, Kwok KWH, Lui GCS, Zhou G-J, Lee J-S, Lam MHW, Leung KMY. 2014. The difference between temperate and tropical saltwater species' acute sensitivity to chemicals is relatively small. *Chemosphere.* 105:31–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.066>
- Warrant EJ, Adam Locket N. 2004. Vision in the deep sea. *Biol Rev.* 79(3):671–712. <https://doi.org/10.1017/S1464793103006420>
- Williams B, McAfee D, Connell S. 2022a. Oyster larvae swim along gradients of sound. *J App*

- l Ecol. 59(7):1815–1824. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14188>
- Williams R, Erbe C, Ashe E, Beerman A, Smith J. 2014. Severity of killer whale behavioral responses to ship noise: A dose–response study. *Mar Pollut Bull.* 79(1):254–260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.004>
- Williams R, Erbe C, Duncan A, Nielsen K, Washburn T, Smith C. 2022b. Noise from deep-sea mining may span vast ocean areas. *Science.* 377(6602):157–158. <https://doi.org/10.1126/science.abo2804>
- Yamagishi T, Ota S, Yamaguchi H, Koshikawa H, Tatarazako N, Yamamoto H, Kawachi M. 2019. Ecotoxicological Bioassay Using Marine Algae for Deep-Sea Mining. In: *Environmental Issues of Deep-Sea Mining: Impacts, Consequences and Policy Perspectives*. [place unknown]: Springer; p. 255–271.

9 自然灾害和意外事件

9.1 极端天气

9.1.1 热带气旋

中国五矿合同区所处的东太平洋是全球热带气旋发生、发展最频繁的区域之一，仅次于全球热带气旋活动最为活跃的西北太平洋海域，平均每年约有 17 个热带气旋生成，约占全球热带气旋总频数的 20 % (Schreck et al., 2014)。

关于东太平洋热带气旋生成位置变化及其可能原因，Zhao 等 (2021) 指出哈德利 (Hadley) 环流和 ITCZ 位置的变化为东太平洋热带气旋生成位置经向移动的关键环流系统。在年代际或更长时间尺度上，1979-2018 年东太平洋热带气旋位置显著北移，主要是由于半球温差导致的 ITCZ 和 Hadley 环流的向北扩展所致。不同于年代际或更长时间尺度，东太平洋热带气旋生成位置南北移动的年际变化主要是 ENSO 和半球温差两者共同导致的 Hadley 和 ITCZ 位置经向变化所致。

基于 International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) 第 4 版本的全球历史数据集 (Knapp et al., 2010)，1980 年至 2022 年，过去 42 年北太平洋上热带气旋最佳路径和中心最大风力分布如图 9.1-1 至图 9.1-8 所示，其中黄色填充区域为 CTA 所在的 A-5 区块，线上填充的颜色代表中心最大风力，这里的中心最大风力选用世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 给定的观测值。西太平洋是暖池所在海区，4、5 月已经有很强的台风在西北太平洋上发生，6 月台风路径西移，登录中国华南地区的概率明显增加。受副热带高压的影响，7-9 月西北太平洋热带气旋发生和登陆的概率增高，对亚洲东部国家的破坏性相应增加。10 月，除华南地区，台风登陆的影响概率显著降低。

可能是由于东太平洋海表温度低于西太平洋，东北太平洋的热带气旋发生时间比西太平洋晚，其主要发生时间为每年 6-10 月，7-9 月发生概率最高，5 月和 11 月少量发生，4 月、12 月和 1 月仅零星发生，2 月和 3 月东太平洋未见热带气旋生成。IRZ 的热带气旋最可能发生在每年的 7-9 月，个别气旋跨越 A-5 区块

时，中心风力可以达到 30 m/s，将会显著影响采矿车试验活动，造成潜在风险。

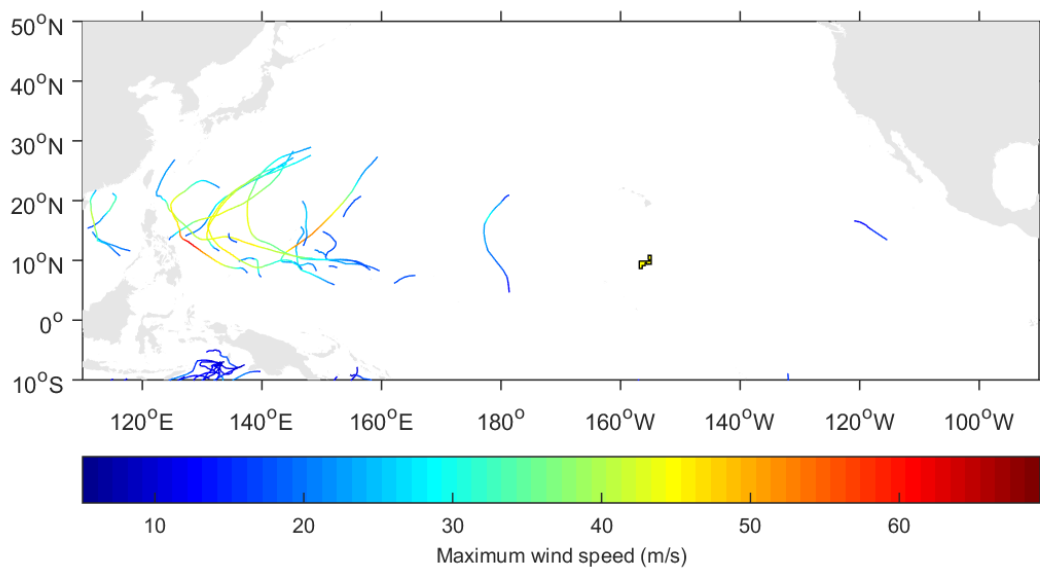


图 9.1-1 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）4 月份热带气旋路径图

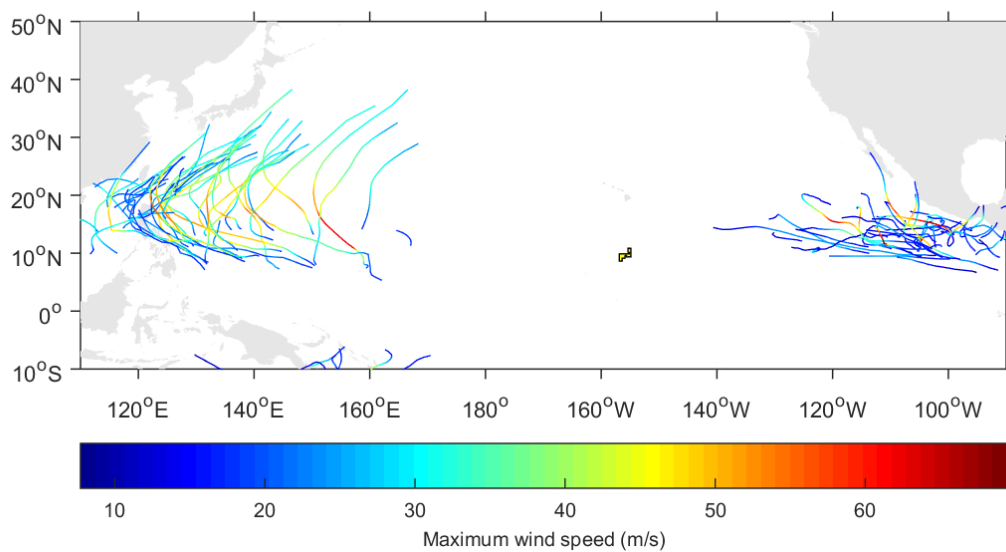


图 9.1-2 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）5 月份热带气旋路径图

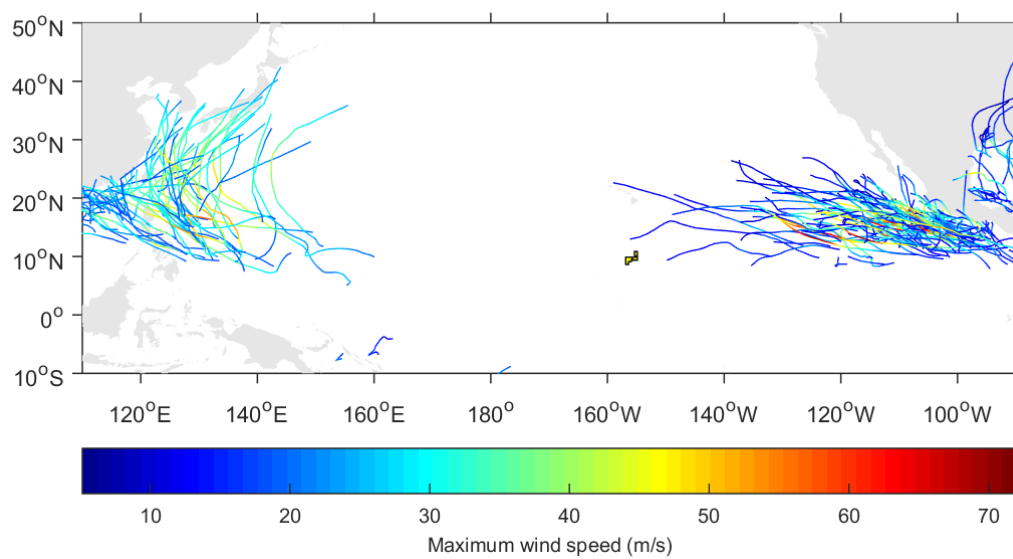


图 9.1-3 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）6 月份热带气旋路径图

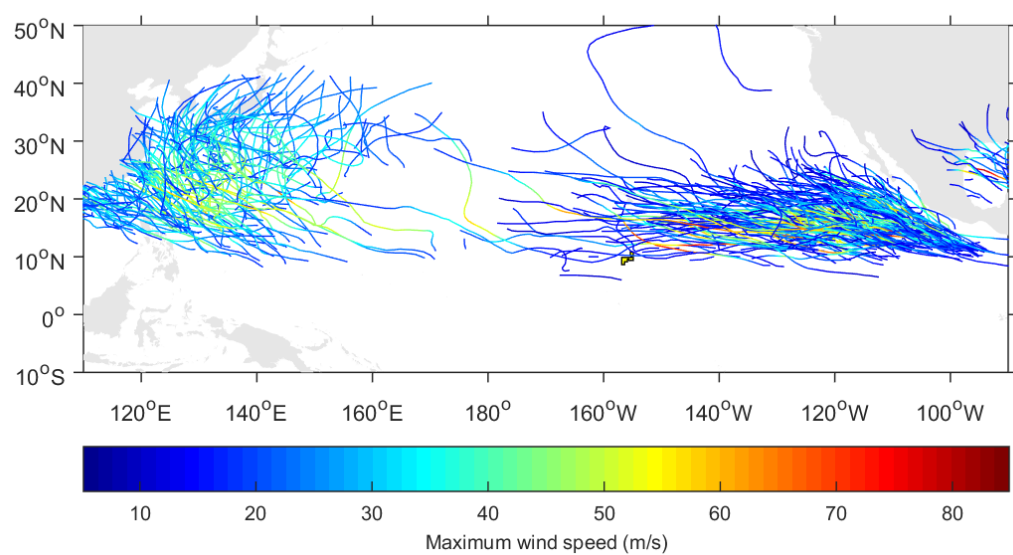


图 9.1-4 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）7 月份热带气旋路径图

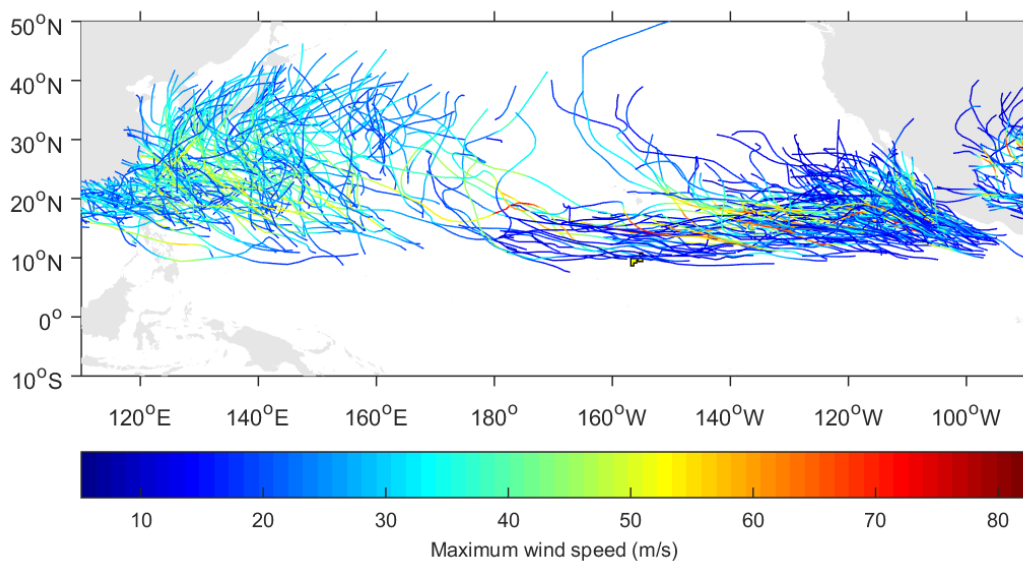


图 9.1-5 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）8 月份热带气旋路径图

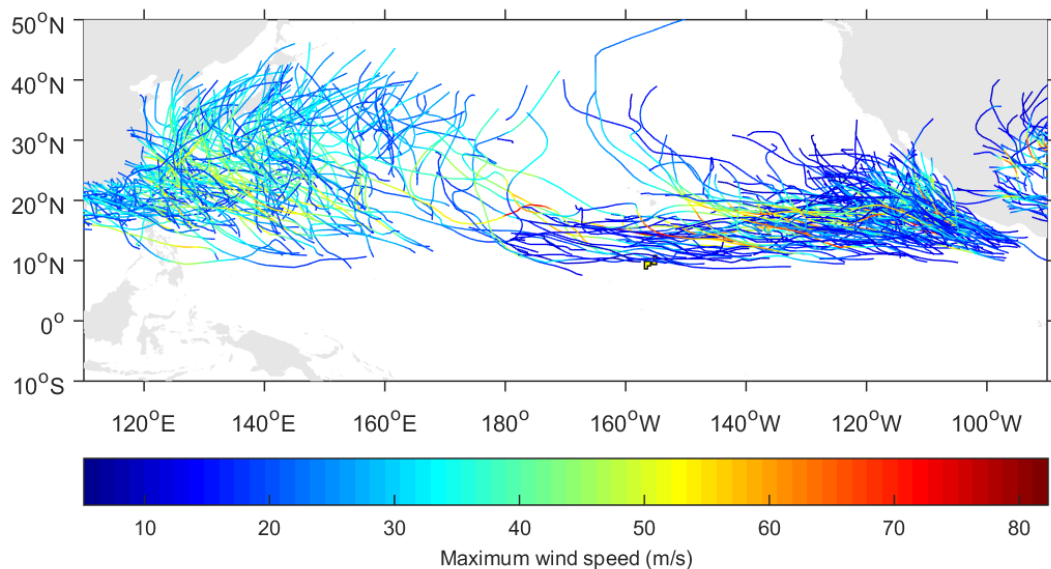


图 9.1-6 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）9 月份热带气旋路径图

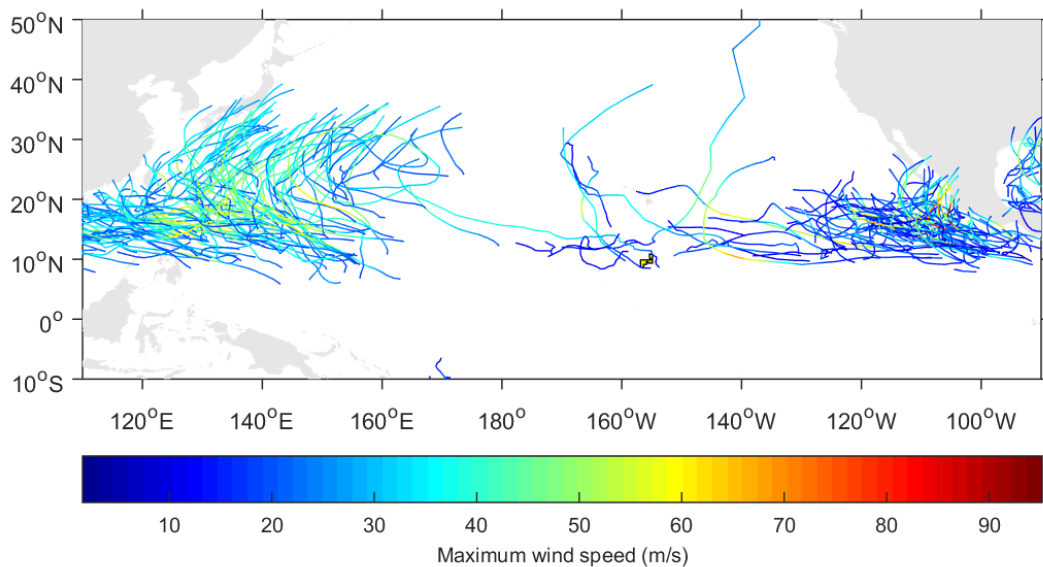


图 9.1-7 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）10 月份热带气旋路径图

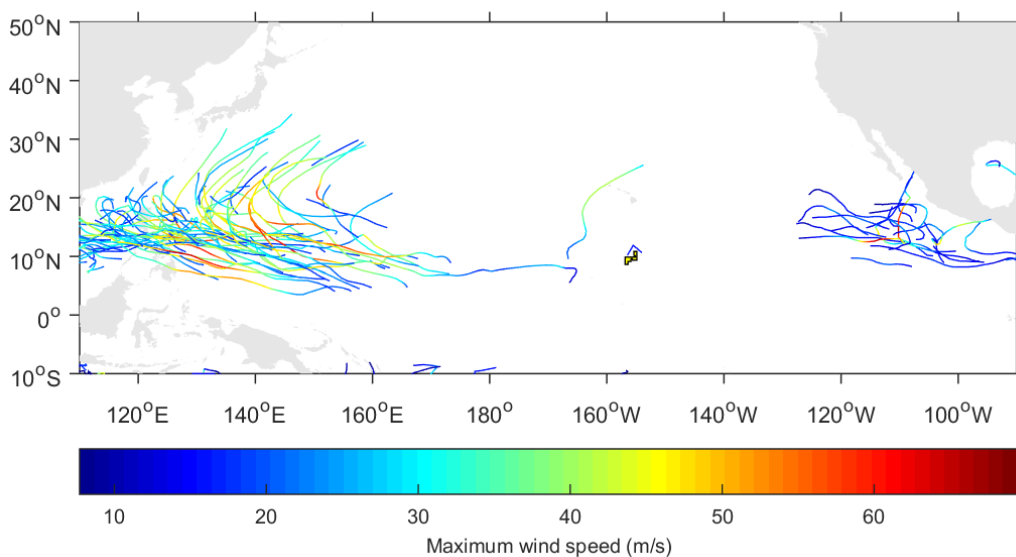


图 9.1-8 调查区域过去 42 年（1980-2022 年）11 月份热带气旋路径图

9.1.2 非飓风的不利天气情况

考虑到现场作业施工的船舶和装备安全，我们设定日均风力不超过 6 级为安全作业窗口，我们分析了 2019-2022 年期间海表面日均风速情况（图 9.1-9）。超过 6 级的大风天气主要出现在春季（1 月-4 月），极端风速可以达到 20 m/s。每年的夏季和秋季极端风速出现的概率很低，特别是 7 月-10 月期间，日平均极端风速也不超过 12 m/s，即不超过 5 级风。

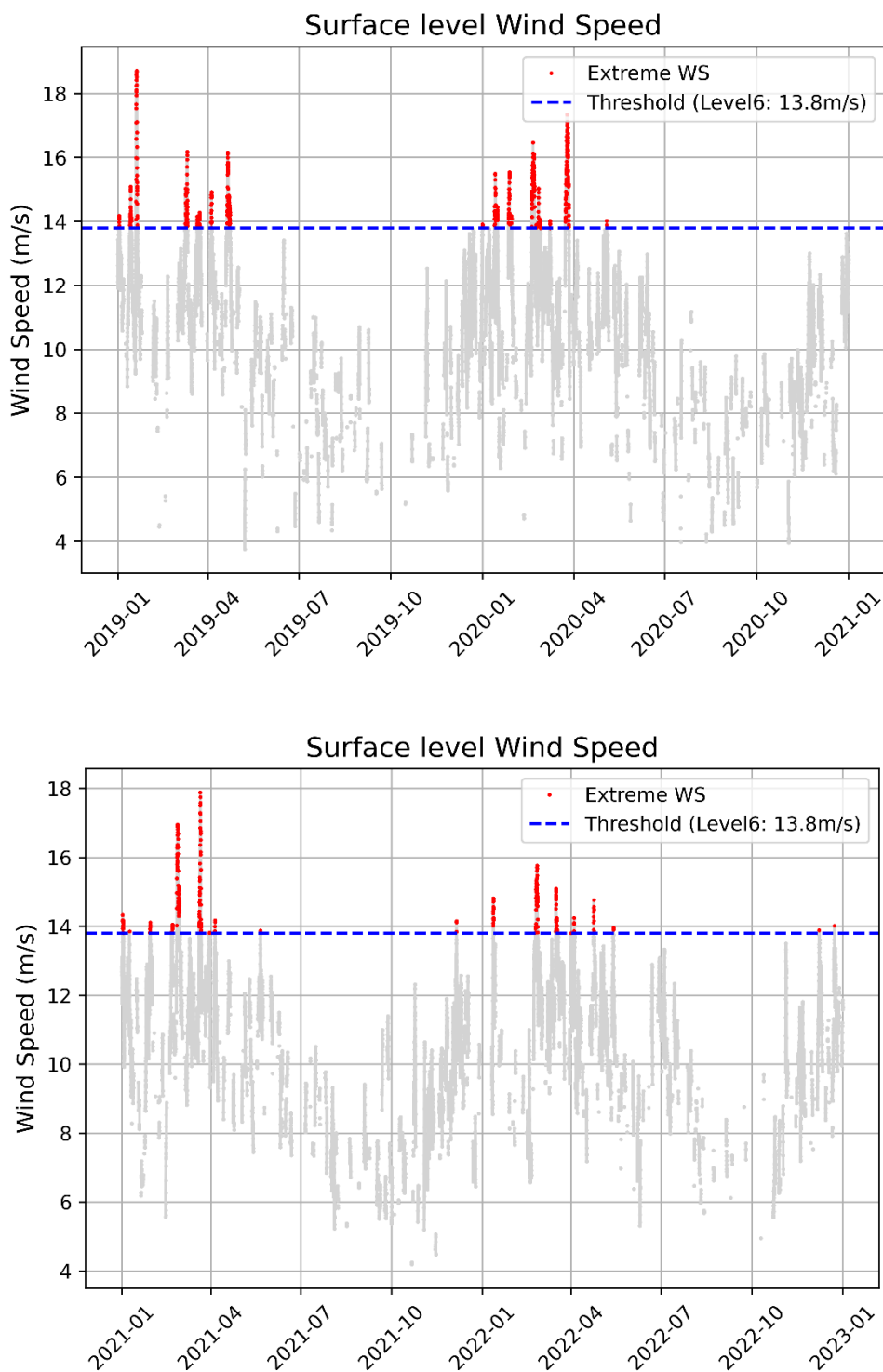


图 9.1-9 A-5 区块 2019-2022 年期间海表面日均风速情况（超过 6 级风的天气采用红色标注）

9.2 自然灾害

本区域无显著的地震活动和有明确记录的水下火山活动。

9.3 意外事件

意外事故和极端自然事件导致的环境危害排放与正常操作下的排放有着本质区别。这些事件基本上是计划外事件，预计可能发生，需要采取预防措施或被动应对措施，或两者兼而有之。与采矿车测试和船舶操作相关的危险已被确认，下文将对此进行讨论。在近海，此类事件通常与导致燃料或化学品泄漏、火灾、爆炸或危险排放的事故有关。

由于项目组成部分的设计和承包者的选择都符合相关技术规范、操作程序和控制措施的要求，旨在最大限度地降低事故发生的可能性，因此发生事故的概率很低。同样，足以造成严重后果的自然事件发生的概率也很低，在这种情况下，将制定和实施具体的操作程序。

事故和极端事件虽然很少发生，但也有可能造成生命损失、环境损害、资产损失和声誉损害。

一旦发生事故，中国五矿将根据既定的应急计划调动资源。对此类事件的危害和风险评估是项目不可分割的一部分，将从项目设计到执行一直进行。这一过程包括：

9.3.1 船舶意外事件及应急措施

（1）化学品泄漏或溢出

由于泄漏、设备故障或极端事件（如船只碰撞或失控），可能会发生化学品或燃料泄漏。泄漏可能会对水质造成有害影响，并对海洋生态系统产生不利影响。

在完成最终项目设计后，将进行泄漏风险评估。这将确定可能发生溢出的具体活动，并说明将风险降至最低的缓解措施。

将根据泄漏风险评估的结果，对缓解措施和操作程序进行必要的审查和修订。将采取主动和被动措施，最大限度地降低燃料和其他危险材料的风险及其潜在影响。主动措施可包括：

- 对设备和储罐进行适当的材料选择和腐蚀控制；
- 维护和监控计划，以确保设备的完整性并检测密封性的丧失；

- 紧急关闭和密封系统;
- 提供和维护与风险程度和类型相适应的泄漏应对和遏制设备,并将其安装在所有可能发生泄漏的区域;
- 确保化学品储存区有足够的围护结构,以防止受到雨水/排水污染;
- 开展泄漏预防、遏制和应对方面的人员培训和实地演练;
- 报告所有泄漏和险情,然后进行根本原因分析并制定纠正行动计划,以防止再次发生;
- 实施废物(固体和液体)管理计划;
- 实施容器水管理计划,将清洁的径流与可能受污染的水分开,以最大限度地减少受污染水排放的可能性。

发生事故时将严格按照船舶溢漏应急须知采取应急措施,避免或减少对海洋环境造成污染。应急措施将取决于溢出的程度,与国际政府和行业的溢出反应管理方法一致。与项目实施相关的所有活动都将遵守《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL)的要求,其中包括旨在防止意外污染和日常船舶作业污染的规定。《国际防止船舶造成污染公约》包括六个技术附件,整个项目都将遵守这些附件的要求。船舶发生溢漏紧急情况时应采取应急措施,避免或减少对海洋环境造成污染。

(2) 火灾和爆炸

项目实施将涉及易燃和可燃物质的储存和处理,可能导致潜在爆炸和/或易燃气体的排放,从而引发火灾或爆炸。虽然该项目不需要使用爆炸物,但与使用其他易燃和可燃物质(如燃料)相关的潜在环境影响可能会导致火灾、向空气中释放大量有害烟雾和污染海水。

初步缓解措施包括:

- 上岗培训,包括火灾风险和火灾类型、火灾事件报告、应对行动、消防设备的位置/使用等所有方面;
- 限制进入高火灾风险区域;
- 储存和处理所有易燃和可燃物质(包括废物)的条件应能最大限度地降低火灾或有毒气体排放的风险。例如,在潜在火源和易燃材料之间保持足够的隔

离距离，并对危险区域进行分类：

- 明确火灾预防、检测、控制和人员安全的具体标准；
- 确保不在易燃材料附近进行"热加工"；
- 针对每个危险区域实施被动和主动防火及灭火技术；
- 确定并定期维护和测试与风险程度相适应的消防设备，以确保良好的工作状态。

船舶发生火灾/爆炸时所采取应急措施将取决于事故严重程度，各级船员和特殊人员将严格按照火灾、爆炸应急须知开展应急操作，最大限度减少损失。

（3）船舶碰撞

过境航线将与多条国际航线相交，其中一些航线的使用率较高。船只将遵守国际海事惯例，并配备通讯和导航辅助设备。

在极端天气条件下或由于人为失误，如与第三方船只协调和沟通不畅、机械故障、能见度低和海况恶劣，可能会发生船只碰撞。由此造成的影响包括人员受伤、压舱水泄漏、燃料和其他有害物质泄漏，这些都有可能影响水质、沉积物质量和生态系统。

将采取一系列缓解措施，最大限度地降低与船舶碰撞相关的潜在影响：

- 按要求将计划进行的采矿车测试活动通知相关海事部门；
- 通知可能在采矿车测试地点附近作业的第三方，包括采矿车测试的时间和任何安全禁区。
- 使用船舶定位设备，包括海洋雷达和全球导航卫星系统（即美国政府的NAVSTAR 全球定位系统）；

船舶发生碰撞事故时，将严格按照船舶碰撞应急须知规定采取应急措施，最大限度减少人员伤亡、环境污染和财产损失。

9.3.2 采矿车意外事件及应急措施

（1）采矿车与脐带缆分离

如果因为特殊情况，采矿车在海底工作时脐带断裂或被切断，那么与大多数 ROV 不同，由于其固有的浮力，采矿车不可能通过信标控制漂浮到水面。采

矿车无法工作或者移动，将在海床上保持静止，短时间内不会对海底环境造成污染的风险。

采矿车上装有声学信标，可根据声学信标获得采矿车的准确位置信息。为应对这种特殊情况，采矿车在设计时，预留有对接提升缆绳的机构。海上试验，船舶搭载有 6000 m 水深工作级 ROV。通过 ROV 携带提升缆绳运动至车辆顶部，将提升缆绳与采矿车的对接机构相连，通过缆绳回收采矿车。

（2）采矿车溢油

液压系统由于其高效、可靠、远程可操作等特性，是采矿车的重要驱动和控制系统。液压系统的正常运行直接关系到整个海底作业装备的性能和安全性。其中，液压油的泄露是一个不可忽视的问题。一旦发生液压油泄露，可能导致设备性能下降、设备失控等严重后果。导致采矿车液压油泄露的原因可能有：

- 1) 密封件老化或磨损；
- 2) 液压油压力过高；
- 3) 液压油管路连接不良或松动；
- 4) 液压油箱或油管路有裂缝或损伤。

采矿车液压油总用量约 600-700 L，将选用 Shell Tellus S2 V 系列或相近性能的品牌液压油。Shell Tellus S2 V 系列液压油是一种高性能的矿物液压油，具有优良的保护能力、良好的耐磨性、优异的低温性能以及延长液压油使用寿命等诸多优点。根据化学品全球分类及标识协调制度（Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals, GHS）标准，该系列液压油未被识别为物理性危害物质、健康危害物质以及环境危害物质。

为防止液压油的泄露，将采取如下措施：

- 1) 采矿车液压系统在设计 and 制造过程中，严格遵循相关标准，保证液压系统系统密封良好；
- 2) 保证正常运行过程中液压油的温度和压力均在可承受范围内；
- 3) 定期对液压系统进行检查和维护，及时发现并排除隐患；
- 4) 通过位移传感器监测液压系统压力补偿器液位变化，通过车载摄像头观察采矿车重点部位；

5) 制定液压油泄露应急处置预案，进行应急处置能力培训和演练，提高人员应对突发事件的综合素质；

在泄漏应急处置过程中，采取有效措施，确保人身和环境安全，并符合相关法律和条例要求。

9.4 参考文献

- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J. & Neumann, C. J. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Unifying Tropical Cyclone Data. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 91, 363–376.
- Schreck, C. J., Knapp, K. R., & Kossin, J. P. (2014). The impact of best track discrepancies on global tropical cyclone climatologies using IBTrACS. *Monthly Weather Review*, 142(10), 3881–3899.
- Zhao, H., Zhao, K., Cao, J., Klotzbach, P. J., Raga, G. B., & Ma, Z. (2021). Meridional migration of eastern north pacific tropical cyclogenesis: Joint contribution of interhemispheric temperature differential and ENSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034504.

10 环境管理、监测和报告

10.1 组织结构和责任

10.1.1 项目组的组织管理及人员责任

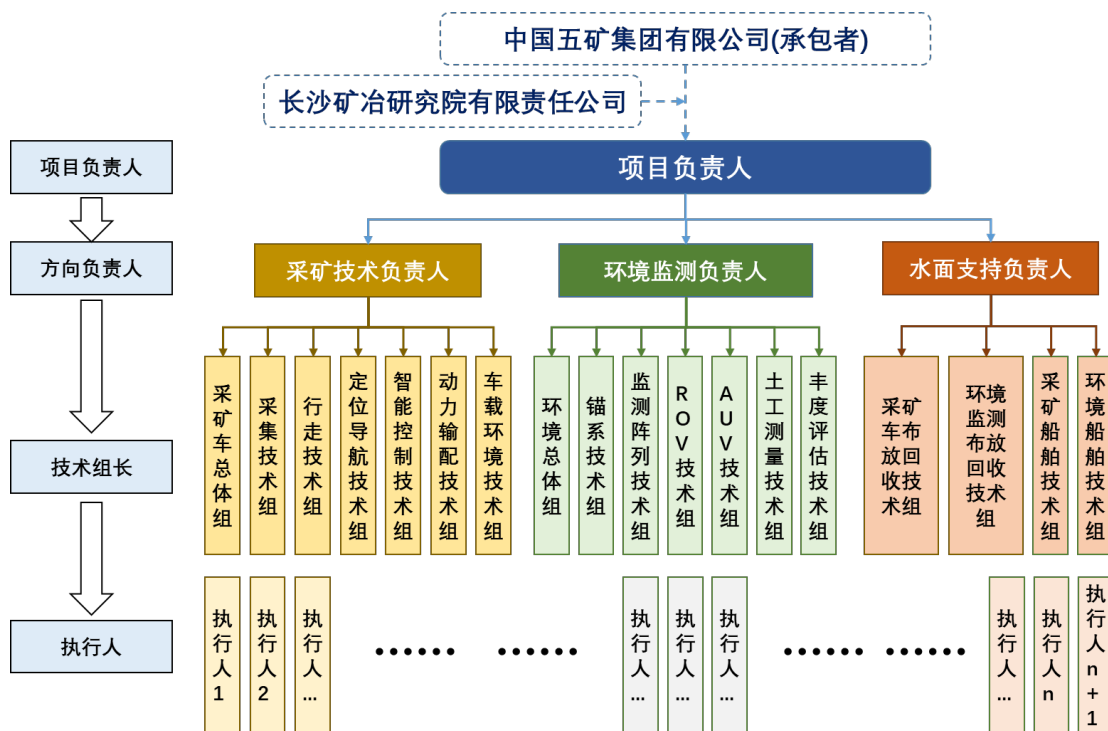


图 10.1-1 项目组的组织管理架构

项目组采用项目负责人负责制，整个组织管理架构分为四级，分别为项目负责人、方向负责人、技术组长和执行人。

(1) 项目负责人

项目负责人由承包者任命，负责整个项目的组织、实施，技术把关、进度管理等工作。本项目项目负责人为毛桂庭。

(2) 方向负责人

本项目在实施中，分设采矿技术负责人、环境监测负责人、水面支持负责人。采矿技术负责人负责海底采集作业装备的研究、设计、制造及海上试验等内容。环境监测负责人负责整个项目的环境方案制定、环境装备研制、海上环境监测等内容。水面支持负责人负责采矿车、监测装备的布放回收技术研发、海上装备布放回收作业、水面船舶支持等内容。

采矿技术负责人为程阳锐，环境监测负责人为孙栋/刘禹维，水面支持负责人为李满红。

(3) 技术组长

技术组长分别负责各自对应的专项技术、装备、作业的相关工作。其工作受方向负责人的统筹安排。

(4) 执行人

执行人负责具体技术研发、装备研制、海上作业等具体任务的实施。

10.1.2 海上现场调查组织管理及人员责任

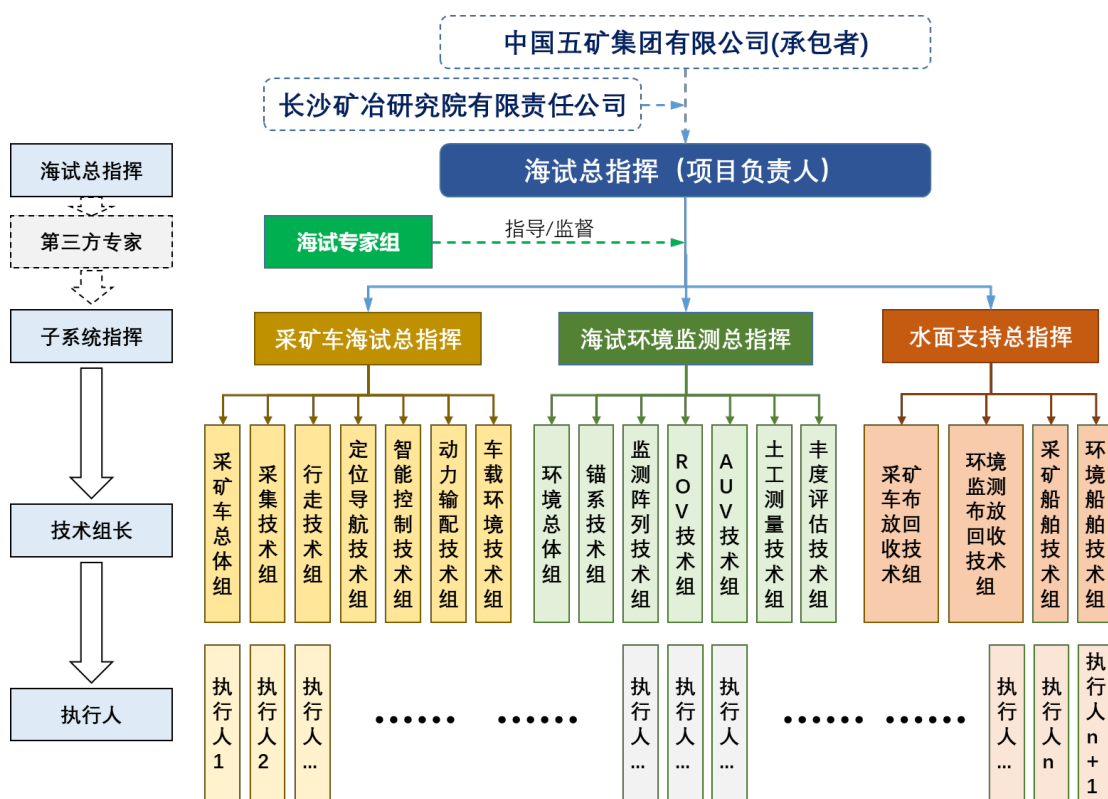


图 10.1-2 海上现场调查组织管理架构

项目海上试验期间采用海试总指挥负责制，整个海上试验组织管理架构分为四级，分别为海试总指挥、子系统指挥、技术组长和执行人，并增加第三方专家。

(1) 海试总指挥

海试总指挥由承包者任命，负责整个项目海上试验中的组织、实施、技术把关、进度管理等工作。本项目海试总指挥为项目负责人毛桂庭。

(2) 第三方专家

第三方专家由担保国相关管理机构指定的技术专家和环境专家组成，负责海上试验过程中的技术指导、咨询和环境监测作业监督。

(3) 子系统指挥

在海上试验中，分设采矿车海试总指挥、海试环境监测总指挥、水面支持总指挥。采矿车海试总指挥负责海底采集作业装备的试验规划、试验实施等内容。海试环境监测总指挥负责整个项目的环境监测计划制定、海试环境监测数据采集、海上环境监测数据初步分析等内容。水面支持总指挥负责采矿车、监测装备的布放回收作业、海上试验船舶保障等内容。

采矿车海试总指挥为程阳锐，海试环境监测总指挥为孙栋/刘禹维，水面支持总指挥为李满红。

(4) 技术组长

技术组长分别负责各自对应的技术及装备的海上试验作业、数据采集、维护保养等工作。其工作受子系统指挥的统筹安排。

(5) 执行人

执行人负责具体技术及装备海上操作、维护、数据采集等具体任务的实施。

10.2 环境管理系统

采矿车试验是 ISA 要求的基线研究组成部分，也是支撑商业开发环境影响评估的关键步骤(ISBA/25/LTC/6/Rev.1(s. VI(B)(33))。本次试验可以为科学认知的提升和工程技术的进步提供更好的应用场景，以更好的了解采矿车的运行机理、对底层海洋生态系统影响程度以及采集后生态系统的自然恢复情况。所有获得的数据和信息将用于优化联合采矿系统的设计、环境监测与管理计划(EMMP)。

10.2.1 试验阶段划分

本次装备试验和环境监测将分为以下阶段进行：

(1) 采矿车实验前基线特征调查

- a. 2017-2024 年基线特征调查及研究；
- b. 2025 年开展试验前 1-2 周基线特征调查及研究。

(2) 采矿车性能试验及监测

- a. 采矿车状态监控；
- b. 试验期间采矿车近场和远场环境监测（包括固定监测和巡回监测）。

（3）试验后监测

- a. 采矿车直接扰动区域环境监测；
- b. 羽流影响区域环境监测；
- c. 环境保全参照区环境监测。

2017 年至 2023 年，中国五矿委托近 10 家科研机构和高校的科学家，持续在 A-5 区块开展环境基线研究计划，2024-2025 年，中国五矿将继续开展环境基线研究。经过连续 7 年的环境基线调查和研究，具备了全面描述和比较 IRZ 和 PRZ1 的基线的条件。在 2025 年第三季度开展试验前，中国五矿会持续开展试验前的环境基线调查。IRZ 和 PRZ1 的试验前基线数据将作为本次采矿车试验的环境影响研究基准，用于比较试验后近底环境生态系统状态的变化和长期恢复情况。

本次采矿车试验和监测计划在 2025 年第三季度进行，将重点测试采矿车的功能、性能以及采矿活动对环境影响的监测。

本次试验的监测将包括采矿试验前-中-后三个阶段，在短时间内（数小时、数天、数周）主要侧重于采矿车的技术功能、性能验证和对环境的直接影响监测。本次采矿车将为采矿系统设计和羽流模型验证提供良好的支撑。

试验后监测将在试验活动结束后的几小时、几天、几周或几个月内进行。该监测计划的目的是量化采矿对底层海洋环境的直接影响，其结果将为商业环境影响评估提供信息。

（4）长期环境研究

长期环境恢复研究将在试验后数年至数十年内进行，详细情况将纳入商业环境管理和监测计划。长期研究的目的是监测底栖生物群落在受到干扰后的恢复情况。监测结果将以试验前的 IRZ 基线和 PRZ1 正在进行的基线研究为基准。

10.2.2 数据管理

本项目所有监测数据将输入“合同区综合分析数据管理系统”，该数据管理系统由中国五矿为开展环境影响评估研究期间获取的数据而开发设计。

数据管理系统目标：

- 实现各种监测活动相关的元数据分类存储、查询、展现；
- 登记样本采集平台和流程；
- 登记采样事件；
- 登记采样事件生成的数据和样本对象，如图像、物理样本、数据文件、传感器读数、观测数据、制图文件（如光栅、空间数据）等；
- 跟踪输入数据对象的完整性和回溯信息的完整性。

为实现上述目标，合同区综合分析数据管理系统将配备专业的海上数据管理系统操作人员、必要的硬件和软件以及互联网链接支持。同时，基于履行向 ISA 报告和向 ISA DeepData 数据库提供数据的义务，数据管理系统在数据管理上将采用标准化的、符合 ISA 上传数据结构要求的数据格式。

10.2.3 样品管理

本项目获取的所有样品，包括但不限于多金属结核、生物等样品，中国五矿将认真履行《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》规定的有关义务，向中国大洋样品馆进行样品汇交。中国大洋样品馆具备完善的样品保存条件和管理制度，可确保项目获取的样品得到专业化、规范化管理。

10.3 环境管理和监测计划

10.3.1 缓解和管理

本计划将采用当前最佳的科学认知和具有可行性的技术方案以缓解试验所造成的潜在环境影响，并在试验全程遵循环境影响措施，以保证环境影响的最小化。

在试验前、试验期间和试验后，中国五矿承诺将开展完善的底层环境监测。试验相关的数据和环境监测数据将由专业团队研究和分析后，形成科学报告提交 ISA，作为全人类的共同科学遗产。研究期间获得的生物和环境样品将按照中国法律存放于中国境内的国家级样品管理机构，任何对此有科学需求的科学家将可以按照《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》（2016）和《中

国大洋样品管理规定》(2009)的要求向中国大洋事务管理局申请使用。

10.3.2 监测计划

10.3.2.1 概述

考虑到本次试验仅开展采矿车单体试验,经上述各章节的环境影响分析,此项活动可能产生的环境影响主要聚焦于海床及近底层海水部分,故本监测计划的重点为对底层环境、底栖生态系统和近底层生态系统的监测,弱化对表层和中深层水域的监测。

根据 ISA《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》,本次监测的重点是:(1)底层的温、盐、DO、pH、浊度和氧化还原电位等关键环境参数;(2)海底沉积物羽状流的颗粒物浓度、浊度、排放量以及羽状流扩散轨迹和再沉积范围及厚度等参数;(3)底层海水营养盐(硝酸盐、碳酸盐、硅酸盐)、关键重金属元素(铜、锌、铅、镍、镉等)、有机污染物、油类等化学要素参数;(4)底栖生物群落的多样性、群落结构和数量变化。

为了能够有效获得本次试验的各种环境监测数据,我们采取了4个方面的环境监测措施:(1)在采矿车本体上设置环境监测与原位采样系统,包括安装了一个以伴随式环境监测和作业安全风险评估为主要目的小型ROV;(2)在CTA的及周边部署环境监测阵列;(3)采用调查船船载采样监测、ROV和AUV等开展监测和采样调查;(4)在CTA将部署一套近底长期环境观测设备,并在后续的勘探航次期间开展年度回访采样,以获得CTA受扰动后的自然恢复数据。

按试验的时间流程,监测计划按如下顺序执行:

- a) 采矿车试验前:在CTA和PRZ1布设深海环境观测锚系潜标,高精度布设分布式环境监测阵列、再沉积厚度监测装置等。使用船载采样设备开展采矿车试验前的环境基线样品和数据采集,使用AUV开展近底层环境数据采集和底栖生物调查;
- b) 采矿车试验期间:(1)利用预置的环境监测系统、车载和伴随式监测系统开展点线面结合的环境监测,采集多工况下采矿车附近及影响区域的时间

序列环境样品和数据；使用船载采样设备，沿羽状流扩散梯度开展近底层水样采集。（2）采矿车试验期间对采矿车海底作业的各项性能参数进行实时监测，如温度、压力、流量等，确保采矿车处在正常作业状态。如出现异常情况，可以及时的进行人为干预和操作，确保不会出现采矿车异常而影响海上作业；

- c) 采矿车试验后：利用船载采样设备开展重返采样与观测，获取采矿车试验后底质环境及结核残留情况；使用 AUV 沿采矿车试验前航迹开展近底层环境数据采集和底栖生物重返调查；并在 CTA 布设底层环境长时间序列观测装置，获取未来多年际的底层环境和生物群落的自然恢复监测数据。

10.3.2.2 采矿车的环境监测与原位采样系统

针对采矿车试验过程中采矿车工作模式与工况、海底水文、化学环境参数的变化等方面的监测需求，在采矿车搭载安装一套环境监测与样品采集系统，实时获取采矿车试验期间排放的泥沙浓度、排放流量与压力、温度、盐度、浊度、pH 值、DO 等关键环境影响参数，并可以采集原位的海水、沉积物、食腐生物样品，为后续的环境影响评估采集扰动源区域的数据与样品。

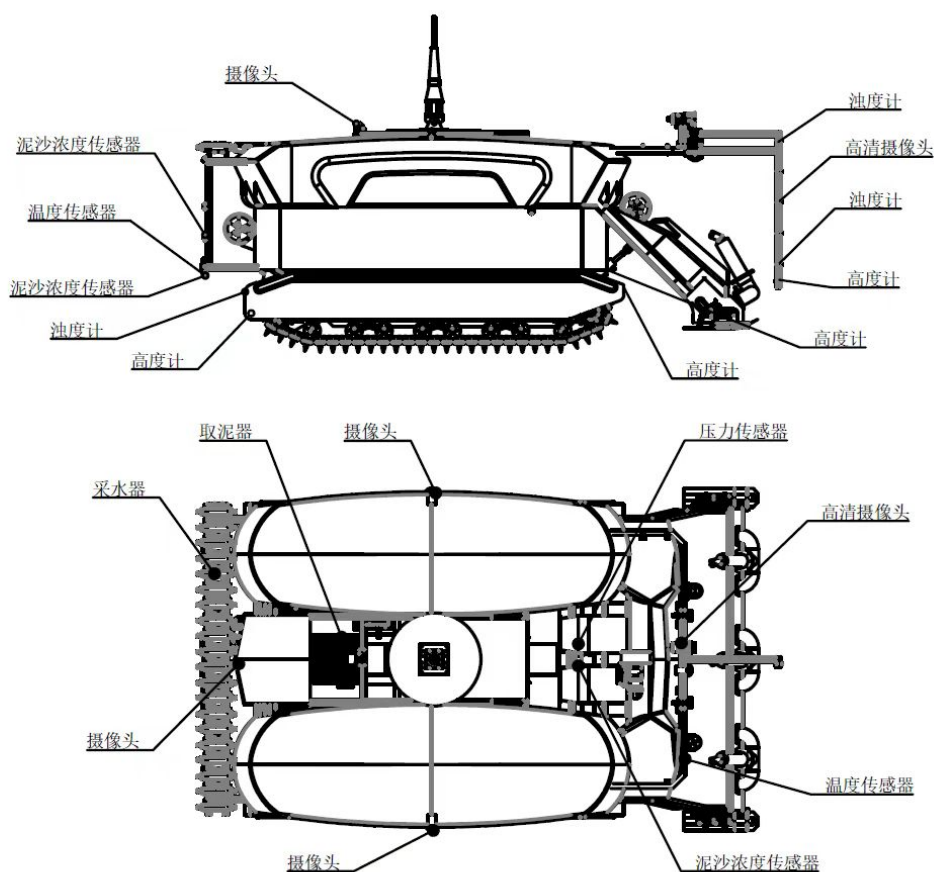


图 10.3-1 采矿车的多参数在线环境监测系统设计图



图 10.3-2 采矿车的多参数在线环境监测系统的主要分系统构成示意图

表 10.3-1 采矿车的多参数在线环境监测系统的主要分系统构成

序号	监测仪器名称	数量	监测目的
1	ADCP	1 套	用于监测采矿车附近海流剖面和水柱泥沙浓度
2	CTD	1 套	用于监测采矿车附近区域温度、盐度、深度等参数变化
3	水下高清摄像机	1 个	用于观测采矿车行驶过程底层地面环境
4	水下灯	5 个	用于观测采矿车行驶过程底层地面环境
5	泥沙浓度传感器	4 个	用于监测采矿车尾部排放泥沙浓度变化、料舱口泥沙浓度
6	温度传感器	4 个	用于监测排放污泥对水体温度影响
7	采水瓶	10 套	用于布设采集采矿车附近的水样
8	箱式取泥装置	2 套	用于布设采集采矿车附近的泥样
9	浊度计	8 个	用于监测采矿车不同位置、高度处浊度
10	压力传感器	1 个	用于监测料舱口水压

10.3.2.3 环境监测阵列

试验期间的主要环境扰动在底层。在这里，受到采矿活动的扰动，水体与沉积物可能进行强烈的物质、能量交换。受近底层海流的影响，沉积物会发生侵蚀再悬浮、搬运以及海底化学物质输运。尤其是在进行集矿试验作业时，采矿车在海底排放出的沉积物羽状流会较长距离地扩散至周边海域，因此有必要针对该过程布设海底边界层观测装置来监测海底水体中化学、生物等关键参数的变化。

为此，我们在试验期间部署一个环境监测阵列，主要包括下列三大类监测装置：

（1）分布式环境监测阵列（节点）

- a) 底层海流+浊度监测平台；
- b) ADCP 监测平台；
- c) 底层温盐+浊度监测平台；
- d) 底层海流+泥沙浓度监测平台；
- e) 浊度监测平台；

f) 海流羽流特征近底监测平台；

(2) 再沉积厚度测量系统

(3) 锚系潜标

表 10.3-2 环境监测阵列的监测节点数量与构成

序号	名称	数量	每套设备的监测仪器构成	监测目的
1	底层海流+浊度监测平台	2	海流计×1, 浊度传感器×1	用于监测采矿试验区内的海流和浊度变化
2	ADCP 监测平台	2	300K ADCP×1	采矿试验区近底水层海流和泥沙垂直剖面
3	底层温盐+浊度监测平台	3	CTD×1, 浊度传感器×1	用于监测采矿试验区外温盐深和浊度变化
4	底层海流+泥沙浓度监测平台	2	海流计×1, 泥沙浓度传感器×1	采矿试验区近底水层海流和泥沙垂直剖面
5	浊度监测平台	5	浊度传感器×1	用于监测采矿试验区控制线上的浊度变化
6	海流羽流特征近底监测平台	1	激光全息成像设备, 再沉积厚度测量设备, 双目成像设备多参数 CTD(配置叶绿素、浊度、溶解氧传感器), 电化学监测传感器, 海流计	羽流粒子成像, 羽流再沉积物收集与测量, 沉积过程图像监测, 近底层环境参数(海流、温度、盐度、浊度、叶绿素、溶解氧、电导率、pH 和氧化还原电位)变化
7	再沉积厚度测量装置	14	再沉积厚度测量装置(经过优化设计的 SLIC 箱)×1	用于监测采矿试验区控制线上的再沉积厚度
8	锚系潜标-I 型	3	CTD×1, 海流计×1, 浊度传感器×2, 溶解氧传感器×1, 水听器×1, 声学释放装置×1(含声学定位功能)	用于监测底层水柱的温盐、海流、浊度和噪声数据
9	锚系潜标-II 型	4	CTD×1, 浊度传感器×2, 声学释放装置×1 套(声学含定位功能)	用于监测底层水柱内的温盐变化及采矿影响下的水体浊度数据
10	锚系潜标-III 型	2	CTD×1 套, 海流计×1, 浊度传感器×4, 声学释放装置×1(含声学定位功能), 沉积物捕获器×1, 水听器×1	用于长期监测采矿影响区海流、浊度和羽状流扩散高度、悬浮颗粒物再沉降、噪声等
11	锚系潜标-IV 型	1	CTD×4, 海流计×5, 浊度	用于长期监测采矿保全参

			传感器×2, 75K 或 150K ADCP×2, 声学释放装置×1, 沉积物捕获器×2, 溶解氧传感器×2, 水听器×1	照区的海流垂直剖面、背景浊度变化、悬浮颗粒物再沉降、噪声等
12	锚系潜标-V 型	3	沉积物捕获器×1, 电化学监测节点×30, 声学释放器, 声学通信机	用于沉积物的捕获, 常规电化学参数的影响监测 (电导率、pH 和氧化还原电位), 通过建立浊度-电学参数反演模型, 实现羽流垂向分布反演
13	锚系潜标-VI 型	4	电化学监测, 生物诱捕器, 声学释放器	用于常规电化学参数电导率、pH 和氧化还原电位) 和监测和生物诱捕

10.3.2.3.1 分布式环境监测阵列 (节点)

分布式环境监测阵列 (节点) 的目的是监测近底层海流、温度、盐度、泥沙浓度和浊度数据等。由于分布式环境监测阵列各节点的高度一般不超过 2m, 因此可以相比于锚系潜标部署于更接近 CTA 的位置 (CTA 外缘), 构成内层监测节点。

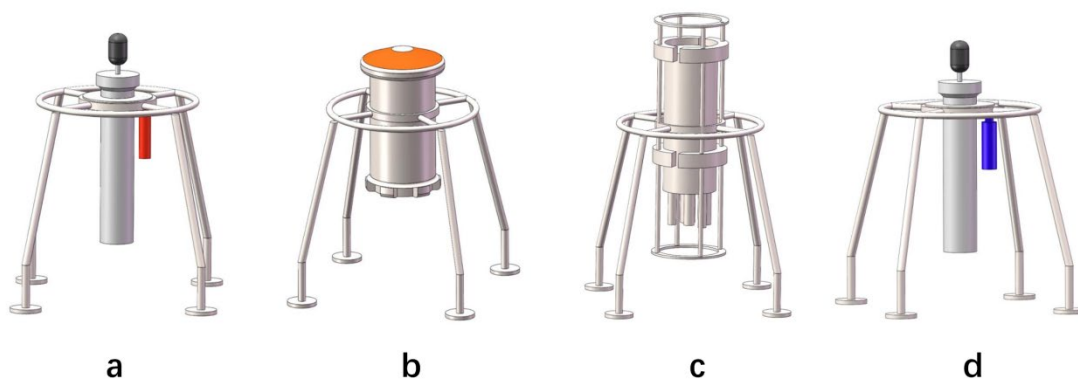


图 10.3-3 分布式环境监测阵列

(a. 底层海流+浊度监测平台; b. ADCP 监测平台; c. 底层温盐+浊度监测平台; d. 底层海流+泥沙浓度监测平台)

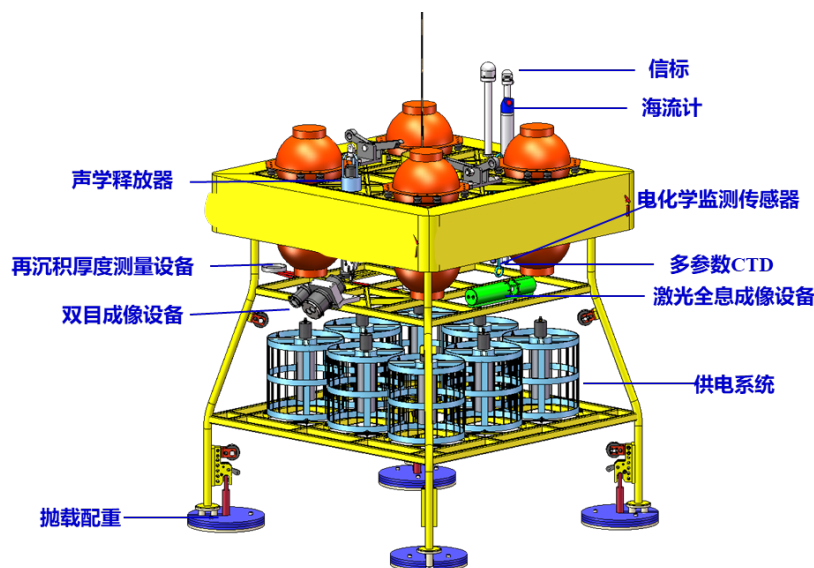


图 10.3-4 海流羽流特征近底监测平台

10.3.2.3.2 再沉积厚度测量系统

德国 GEOMAR 亥姆霍兹基尔海洋研究中心在东太平洋 CC 区的深海采矿试验环境影响监测中研发了一种简单再沉淀沉积物监测装置——SLIC 箱，配合现有技术即基于 AUV/ROV 的声学 and 光学测量，可以较为精确的获得再沉积厚度监测数据。这些数据对于评估羽状流模型的模拟结果并进一步提高模型模拟的精确度十分关键。在本次试验中，我们也采用了类似的设备，但对此进行了改进：(i) 采用锯齿形代替正弦波形作为监测盒的底板。增加斜坡斜率，减小波峰面积的同时简化宽度-厚度换算过程。(ii) 另一半波形改为黑白棋盘格平板。黑白棋盘格可通过颜色变化监测 1 mm 以下的沉积物厚度，同时还可通过棋盘格标定进行相机校准。

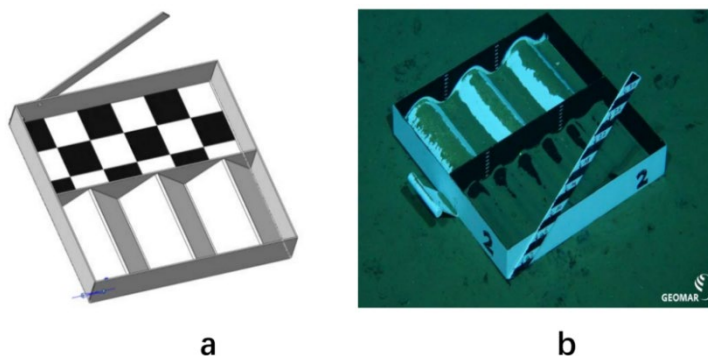


图 10.3-5 再沉积厚度测量系统

(a. 本次实验拟采用的再沉积厚度测量系统；b. GEOMAR 使用的类似系统)

10.3.2.3.3 锚系潜标

依据不同的监测目的，将本次 CTA 附近拟布设的全部锚系潜标分为短锚系和长锚系。其中，短锚系用于监测海流垂直剖面、水柱层泥沙浓度和浊度数据、噪声数据等。长锚系用于长期监测采矿 CTA、PRZ1 以及两者中间区域的海流垂直剖面、浊度和羽状流扩散、悬浮颗粒物再沉降、噪声等。

锚系潜标系统的监测重点为沉积物羽状流的源强及扩散。其中源强的监测主要依据车载监测系统和环境影响巡检监测系统的全流程监测，从而获得较为准确和可靠的羽状流源强数据。锚系潜标和分布式环境监测阵列、再沉积厚度测量系统获得的监测数据将为羽状流扩散路径、范围和规律的量化分析提供基础。

CTA 内监测站的浊度监测主要监测位置为离底高度 2 m 和 6 m，根据 GSR 试验的近场和本计划的远场数值模拟结果，采矿车试验形成的底层雾状层，其浊度在离底 2 m 之上迅速衰减，因此在离底 2 m 和 6 m 设置近底的浊度计，观测本次试验的近底层悬浮物浓度（GSR, 2018）。悬浮物浓度监测高度设置为离底 20 m，高度位于本计划模拟悬浮物垂直分布浓度值 1.0 mg/L 以内，方便和背景浊度值进行比较，从而确认采矿影响。

其中 I 型-III 型锚系潜标用于 CTA 的环境监测，IV 型锚系潜标用于 PRZ1 的环境监测。

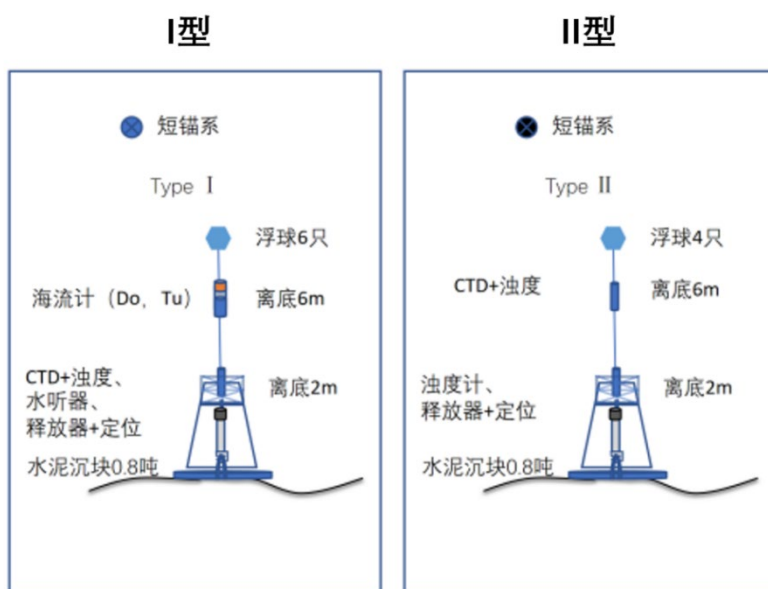


图 10.3-6 锚系潜标的设计图（I 型和 II 型）

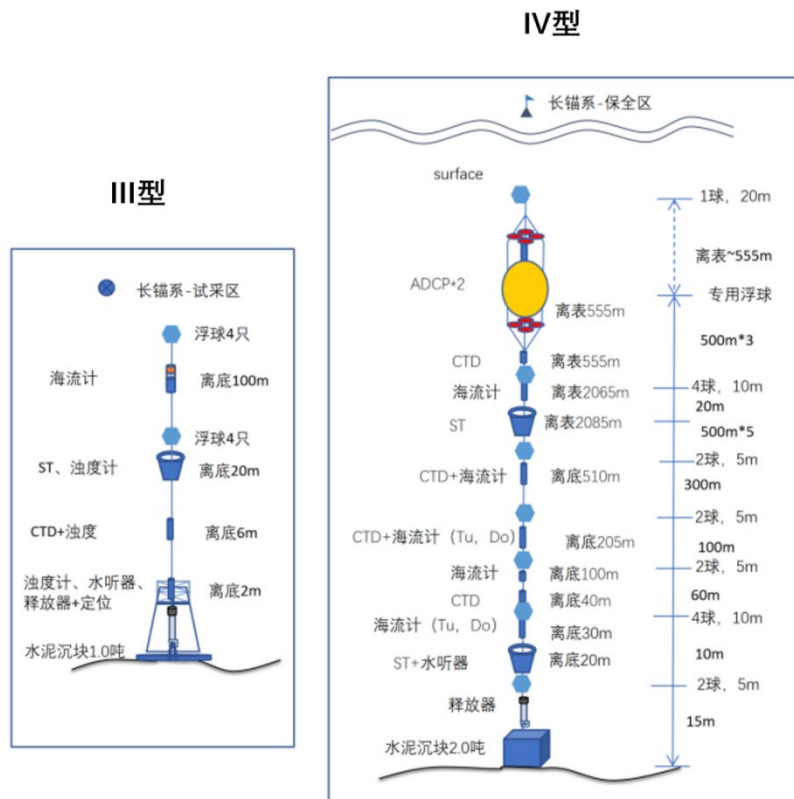


图 10.3-7 锚系潜标的设计图（III 型和 IV 型）

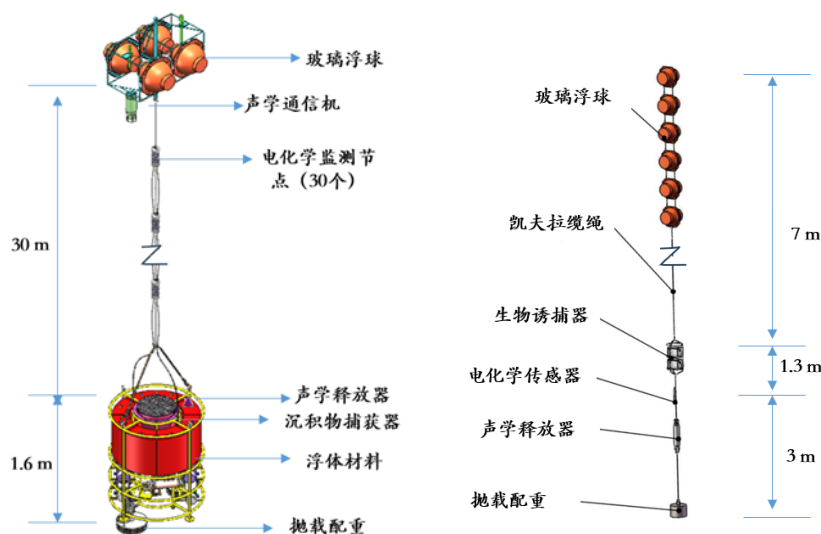


图 10.3-8 锚系潜标的设计图（V 型和 VI 型）

10.3.2.3.4 监测阵列的设计

按照沉积物羽状流扩散的基本规律，结合数值模拟结果，布设三层环绕式监测阵列。底层流的方向和大小对于羽流扩散影响至关重要，决定了羽流的扩散方向和扩散范围，需要在投放监测站之前通过现场观测掌握底流方向，合理增加下游的监测站分布。

基于上述原则，监测阵列的初始设计如下：

- a) 第一监测圈：CTA 外缘，采用近底分布式环境监测阵列监测 CTA 内的海流和泥沙浓度/浊度变化；采用再沉积厚度测量系统获得再沉积厚度的直接测量数据；
- b) 第二、三监测圈：锚系潜标布放在第二、三监测圈，第二监测圈尽可能靠近 CTA，位于 1 mg/L 羽状流浊度的范围内（初始半径约 600 m）。第三监测圈位于 0.1-1 mg/L 羽状流浊度的区间内（初始半径约 2000 m）。第二、三监测圈半径将根据近底层沉积物羽状流数值模拟结果，参考历史文献和在 CC 区开展的其他采矿试验资料确定；
- c) 外围和 PRZ 监测：视地形变化，选择距离 CTA 上游约 6-8 km 或 PRZ1，具有相同水深的站位布设 1 套长潜标（IV 型），获得羽流影响范围之外的监测数据；
- d) 初始设计基于 7-10 月的历史监测数据和基于该数据的羽流扩散数值模拟结果（附件 1）。在上述设备布放前，将利用下方式 ADCP（LADCP）和短期 Lander 系统重新观测近底层流场情况，并视情况调整监测阵列的设计。

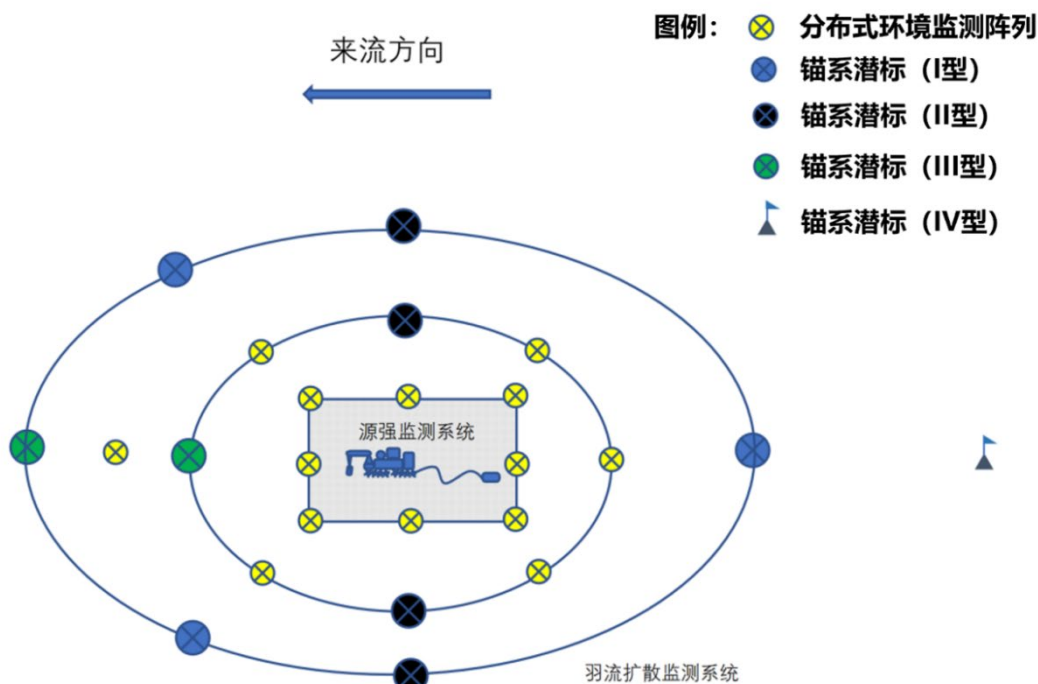


图 10.3-9 监测阵列的设计

10.3.2.4 试验期间的其他环境监测措施

10.3.2.4.1 AUV 近底监测

在采矿试验前和采矿试验后，使用“潜龙 4” AUV 系统，对 CTA、PRZ 和羽流扩散主流向方向开展近底层摄像调查，AUV 近底调查时离底高度 3-5 m，并利用激光标尺确定照片的覆盖面积，从而获得定量数据。AUV 行进速度为 0.8-1.0 节，同步记录水体中的温度、盐度、浊度等环境参数。对获取的照片进行判读，识别其中的巨型底栖生物，并获得形态种的数量、分布和多样性等信息。对于视像调查获得的底栖生物群落数据，利用多元统计分析对采矿试验前后的底栖生物群落指标（物种数、丰度、生物量、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数）的空间变化及主要影响因子进行识别，从而判断采矿活动对底栖生物群落的影响。

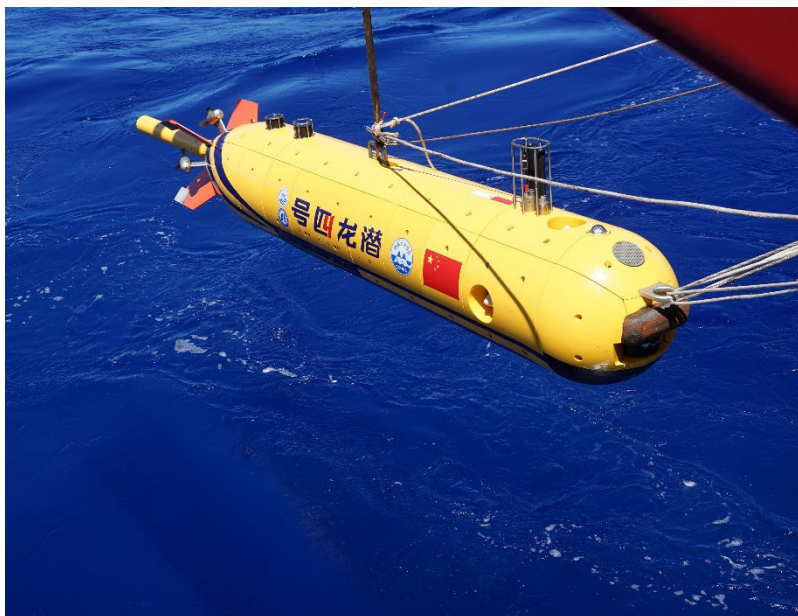


图 10.3-10 AUV 近底监测拟采用的“潜龙 4” AUV

10.3.2.4.2 沉积物样品采集与底栖生物群落监测

a. 监测方案设计

浅表层沉积物取样：

基于船载的箱式/多管取样器，在采矿前和后对 CTA 及周边的浅表层沉积物进行取样，分析其中的小型底栖生物和大型底栖生物。

采矿前，在 CTA 和 PRZ1 内分别设置 2 个站位开展环境基线调查采样（与合同区勘探任务的环境基线任务结合），获取沉积物样品。沿着羽流扩散主流向设置 6 个站点（距离采矿点 100 m，250 m，500 m，1000 m，3000 m 和 5000 m），获取沉积物样品。

采矿后，对上述站位进行回访采样。

b. 具体分析方法

小型底栖生物（线虫等）利用多管取样器取样，分层后保存于 4 % 甲醛溶液和 -80 °C 冰箱；大型底栖生物（多毛类、小型甲壳动物等）利用箱式取样器取样，现场使用 250 μm 筛网筛选后保存于无水乙醇中用于后续的形态鉴定和 DNA 条形码提取。

对于沉积物调查获得的底栖生物群落数据，利用多元统计分析对采矿试验前后的底栖生物群落指标（物种数、丰度、生物量、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数）的空间变化及主要影响因子进行识别，从而判断采矿活动对底栖生物群落的影响。

10.3.2.4.3 海水样品采集与水环境监测

水化学监测的目的是对比研究采矿车采矿活动前、中、后水体中悬浮颗粒物、营养盐、可溶性有机碳（DOC）、DIC、POC 和 DO 浓度的变化及其影响范围，评估采矿活动对环境变化的影响及强度。

a. 监测方案设计

本研究在 CTA 和 PRZ1 分别取 1 个距离底部 200 m 范围内分 12 层（距底 5 m，10 m，15 m，20 m，25 m，30 m，40 m，50 m，75 m，100 m，150 m，200 m）的站点的悬浮颗粒物、营养盐、DOC、DIC、POC 和 DO 浓度，作为环境基准值。

在采矿试验期间，沿着羽流扩散主流向设置 6 个站点（距离采矿点 100 m，250 m，500 m，1000 m，3000 m 和 5000 m）分 12 层（距底 5 m，10 m，15 m，20 m，25 m，30 m，40 m，50 m，75 m，100 m，150 m，200 m）取悬浮颗粒物、营养盐、DOC、DIC、POC 和 DO 浓度水样，作为扰动活动中的环境污染样本

值。

在采矿试验结束后，沿着羽流扩散主流向设置 6 个站点（距离采矿点 100 m，250 m，500 m，1000 m，3000 m 和 5000 m）分 12 层（距底 5 m，10 m，15 m，20 m，25 m，30 m，40 m，50 m，75 m，100 m，150 m，200 m）取悬浮颗粒物、营养盐、DOC、DIC、POC 和 DO 浓度水样，作为扰动活动后的环境污染样本值。综合分析扰动活动前、中、后的环境污染变化，评估扰动活动的环境影响及强度。

b. 具体分析方法

（a）DOC

水样采集后立即用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜（预先 450 °C 灼烧 4 小时）过滤，收集 50 mL 滤液于 550 °C 灼烧 2 小时过的棕色玻璃瓶中，滴入优级纯浓磷酸使水样酸化到 pH 值约为 2，震荡数分钟后加塞、封口并放入冰柜冷冻保存。回到实验室后，采用德国耶拿公司生产的 Multi C/N 3100 测定，数据精度为 0.01 mg/L。

（b）POC

采集的海水样品经 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜（预先 450 °C 灼烧 2 小时）过滤，滤膜在 -20 °C 下保存带回实验室分析。分析前用浓 HCl 熏蒸 12 小时以上去除无机碳，然后蒸馏水洗、烘干后使用总有机碳分析仪-SSM（TOC-5000A 型，日本岛津公司产品）测定颗粒有机碳含量，数据精度为 0.01 mg/L。

（c）DIC

现场水样需优先采集，用洁净的硅胶管取样，先将硅胶管内少量的气泡排掉，再润洗 150 mL 采样瓶 3 次。硅胶管插到底，水样溢出超过 100 mL 后取出，加入 1.5 mL 的饱和氯化汞溶液混匀并固定，于 4 °C 低温保存。

工作曲线绘制参照 HY/T 196-2015 行标中 8.2 执行，样品采用总无机碳分析仪测定。

将海水样本连接至数字泵样品进样端，设置进样体积，使得样品测定的仪器响应值落在工作曲线的中间位置，运行分析程序，将样品和磷酸溶液泵入反

应池，以高纯氮气为载体将生成的二氧化碳吹入干燥系统干燥后，进入检测器测定，记录对应的仪器响应值，根据工作曲线计算样品总溶解无机碳的含量。

$$DIC_v = \frac{A - a}{(b \times V) \times 1000}$$

DIC_v 表示样本总溶解无机碳含量，单位为微摩尔每升（ $\mu\text{mol/L}$ ）； A 表示仪器响应值； a 表示工作曲线截距； b 表示工作曲线斜率； V 表示测定时水样进样体积，单位为毫升（ mL ）。

$$DIC = \frac{\frac{DIC_v}{(1 - x)}}{\rho}$$

DIC 表示海水样品中总溶解无机碳含量，单位为微摩尔每千克（ $\mu\text{mol/kg}$ ）； ρ 表示测样温度下海水密度，单位为千克每立方分米（ kg/dm^3 ）； x 表示饱和氯化汞溶液的添加体积占样品瓶体积的比例。

（d）DO

参照 GB/T 12763-2007 国家标准使用碘量滴定法测定，使用 125 mL 的棕色玻璃瓶，水样由底逐渐注满玻璃瓶，直至水样溢出后用瓶盖盖上。

加 1 mL 氯化锰溶液和 1 mL 碱性碘化钾溶液后，摇匀，固定。

用 1 mL 硫酸溶液将沉淀全部溶解后用硫代硫酸钠滴定。

计算水样中 DO 浓度：

$$\rho_{O_2} = \frac{c \times V \times 8}{V_0} \times 1000$$

ρ_{O_2} 表示水样中溶解氧浓度，单位为毫克每升（ mg/L ）， c 表示硫代硫酸钠的浓度，单位为摩尔每升（ mol/L ）， V 表示滴定过程中消耗的硫代硫酸钠的体积，单位为毫升（ mL ）， V_0 表示滴定用的实际水样体积（=水样瓶的容积-固定水样的固定剂的体积）单位为毫升（ mL ）。

全部 DO 样本均现场测定。

（e）无机营养盐

营养盐测定参照 GB/T 12763-2007 国家标准方法测定，水样经 Whatman

GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后使用 7230 型分光光度计测定，主要包含亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐。

亚硝酸盐：取 500 mL 水样，经 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后，量取 50 mL 加入到具塞比色管中，参照 GB/T 12763-2007 中 37.5.1 关于绘制标准曲线的方法，使用 7230 型分光光度计测定水样的吸光度 A_w ；量取 50 mL 二次去离子水加入到的具塞比色管中，参照 GB/T 12763-2007 中 37.5.1 关于绘制标准曲线的方法，使用 7230 型分光光度计测定分析空白的吸光值 A_h 。

计算 A_n

$$A_n = A_w - A_h$$

计算水样中亚硝酸盐氮的浓度：

$$\rho(\text{NO}_2\text{-N}) = \frac{A_n - a}{b}$$

$\rho(\text{NO}_2\text{-N})$ 表示亚硝酸盐氮的浓度，单位为毫克每升（mg/L）； A_n 表示水样中亚硝酸盐氮的吸光值； a 表示标准曲线的截距； b 表示标准曲线的斜率。

硝酸盐（镉柱还原法）：取 500 mL 水样，经 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后，量取 50 mL 加入到 125 mL 塞锥形瓶中，加入 50 mL 氯化铵缓冲溶液，混匀；参照 GB/T 12763-2007 中 38.1.5.2 关于绘制标准曲线的方法，使用 7230 型分光光度计测定水样的吸光度 A_w ；量取 50 mL 次去离子水加入到 125 mL 塞锥形瓶中，加入 50 mL 化铵缓冲溶液，混匀；参照 GB/T 12763-2007 中 38.1.5.2 关于绘制标准曲线的方法，使用 7230 型分光光度计测定分析空白的吸光值 A_h ；由 $A_w - A_h$ 查标准工作曲线或者线性回归方程计算硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度 $c_{\text{总}}$ （mg/L）。

计算水样中硝酸盐氮的浓度：

$$c(\text{NO}_3 - \text{N}) = c_{\text{总}} - c(\text{NO}_2 - \text{N})$$

磷酸盐（抗坏血酸还原磷钼蓝法）：取 500 mL 水样，经 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后，封盖备用。

量取 25 mL 水样（每份水样取两份平行）至 50 mL 反应瓶混匀；参照 GB/T 12763-2007 中 9.6.1.2-9.6.1.3 测定水样吸光值；同时测定空白组（25 mL 水），测

定吸光值。

计算磷酸盐磷的浓度

$$c(\text{PO}_4 - \text{Si}) = \frac{(\bar{A}_w - A_b) - a}{b}$$

$c(\text{PO}_4 - \text{Si})$ 水样中活性磷酸盐磷的浓度，单位为微摩尔每毫升 ($\mu\text{mol/mL}$)； $\bar{A}_w$ 为水样测得的平均吸光值； A_b 为空白吸光值； a 为标准曲线的截距； b 标准曲线的斜率。

硅酸盐（硅钼黄法）：取 500 mL 样，经 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后，封口备用。

量取 3 mL 钼酸铵溶液至 50 mL 塞比色管中，移入 25 mL 样（每份水样取两份平行）混匀；参照 GB/T 12763-2007 中 8.6.1.2-8.6.1.3 测定水样吸光值 A_w ；同时测定空白组（25 mL 水），测定吸光值 A_b 。

计算硅酸盐硅的浓度

$$c(\text{SiO}_3 - \text{Si}) = \frac{(\bar{A}_w - A_b) - a}{b}$$

$c(\text{SiO}_3 - \text{Si})$ 水样中活性硅酸盐硅的浓度，单位为微摩尔每毫升 ($\mu\text{mol/mL}$)； $\bar{A}_w$ 为水样测得的平均吸光值； A_b 为空白吸光值； a 为标准曲线的截距； b 标准曲线的斜率。

（f）悬浮颗粒物

悬浮颗粒物的测定参照中国国家标准方法（GB/T 17378.4-2007）测定。

用抽滤泵（压力 $5 \times 10^4 - 6 \times 10^4 \text{ Pa}$ ）在预先称好重量 W_2 的 0.45 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜抽滤 8 L 水样（由于采矿扰动可引起较高浓度的悬浮颗粒，扰动中和扰动后取水样体积为 1 L），操作参见 GB 17378.4-2007 国家标准中 27.4.3.2-27.4.3.5 后，将滤膜带回实验室分析。

将滤膜放入到电热恒温干燥箱（40-50 $^{\circ}\text{C}$ ），恒温脱水 6-8 h，取出放入硅胶干燥器，6-8 h 后采用十万分之一天平称重，获得 W_1 。

计算悬浮物的重量：

$$\rho = \frac{W_1 - W_2}{V}$$

ρ 为悬浮物质的浓度，单位为毫克每升（mg/L）； W_1 为过滤完悬浮物滤膜的干重，单位为毫克（mg）； W_2 为滤膜的干重，单位为毫克（mg）； V 为水样体积，单位为升（L）。

10.3.2.4.4 微生物群落与生态系统服务功能监测

微生物群落与生态系统服务功能监测的目的是对比研究采矿活动前、中、后水体和浅表层沉积物中的微生物群落结构、多样性与功能基因的变化情况，评估采矿活动对深海微生物群落的影响和对深海生态系统服务功能的影响。

a. 监测方案设计

船载 CTD 取水的站位设计与水化学监测的站位设计一致。此外，还将增加对采矿车搭载的深海车载原位环境取样器获取的时间序列海水样品中微生物和功能基因的分析。对于每份水样，采用 0.2 μm 的 PC 滤膜现场过滤水样 4 L，分样保存于 -80°C 冰箱或液氮中，供后续分析使用。

基于船载的箱式/多管取样器，在采矿前、后对 CTA 及周边的浅表层沉积物进行取样，分析其中的微生物。

采矿前，在 CTA 和 PRZ1 分别设置 2 个站位开展环境基线调查采样（与合同区勘探任务的环境基线任务结合），获取沉积物样品。沿着羽流扩散主流向设置 6 个站点（距离采矿点 100 m，250 m，500 m，1000 m，3000 m 和 5000 m），获取沉积物样品。

采矿后，对上述站位进行回访采样。

现场对样品分 3 层（0-2 cm、2-5 cm、5-10 cm）分样保存于 -80°C 冰箱或液氮中，供后续分析使用。同时保存相应样品用于沉积环境参数分析。

b. 具体分析方法

（a）微生物群落分析

DNA 提取和 PCR 扩增均按标准方法进行，细菌 16S rRNA 基因 V4-V5 可变区扩增采用地球微生物组计划推荐的古菌—细菌通用引物 515F-Y(5'-GTGYCAGCMGCCGCGGTAA-3')和 926R(5'-CCGYCAATTYMTTTRAGTTT-3')，

该引物对古菌和细菌均有较高的覆盖度。最后将每个样本的扩增产物混合，纯化 PCR 产物，构建文库并统一利用 Illumina NovaSeq 高通量测序平台进行双端（2×300 bp）测序。测序时运用 FLASH 合并双端序列；运用 Qiime 对序列进行质量过滤、去噪、拼接和嵌合体去除等处理，得到优质序列；运用 UCLUST 方法对优质序列按 100% 的序列相似度进行聚类，生成特征性序列（Amplicon Sequence Variants, ASVs）以及丰度数据表格；之后运用 Blast 方法比对序列注释数据库，获得每个 ASV 的物种注释，形成后续分析的总数据表。

进一步采用非参数多元方差分析、相似性分析、SIMPER 分析和 LEfSe 分析等统计学方法，分析采矿前后细菌群落的差异程度和差异物种。采用共现网络分析采矿过程中细菌物种间的共现模式，运用分子生态网络分析细菌群落中生物间相互作用，包括网络构建和网络分析两部分。基于模块的特征因子分析寻找维持细菌群落稳定性的核心物种。采用环境因子关联分析识别采矿前后细菌群落变化的环境驱动因子。采用零模型等生态学机制分析方法，分析采矿前后细菌群落生态学过程的变化。上述研究将系统和全面的评估深海采矿车的试验扰动对深海微生物群落的扰动及微生物群落对这种扰动的响应机制。

（b）微生物生态系统服务功能分析

DNA 提取和 PCR 扩增均按标准方法进行。构建宏基因组文库并采用 Illumina HiSeq 平台进行 2×150 bp 双端测序。对于宏转录组文库，需去除核糖体 RNA、合成 cDNA 后构建，并采用 Illumina HiSeq 平台进行 2×150 bp 双端测序。宏基因组和宏转录组测序得到的 rawreads 均使用完整的 MetaWRAP 处理流程和推荐的数据库进行生物信息学的处理。运用 MetaWRAP 中的 Read_qc 模块对单个样本的原始 reads 进行质控，随后调用 FASTQC 和 MultiQC 生成 raw reads 和 clean reads 的质量报告，以评估质控结果。每个样本的 clean reads 分别运用 MetaWRAP Assembly 模块进行组装，运用 MetaWRAP Binning 模块进行分箱，同时将 clean reads 分成两半作为差异覆盖度信息。然后使用 MetaWRAP 的 Bin_refinement 模块将生成的 bins 优化为最终的 bins 基因组集。运用 CheckM 软件评估每个 MAG 的完整度和污染率。运用 METABOLIC 预测深海微生物基因组的代谢特征和参与生物地球化学主要循环的通路，得到深海微生物在碳循环、

氮循环等其他生物地球化学循环的作用，并根据基因组的丰度信息计算各循环路径的总丰度信息。将环境 mRNA 序列读取映射到重建基因组箱的代谢途径基因，以评估原位活性，结合宏转录组分析重建基因组中功能基因的表达。进一步地，通过组间差异检验等统计学方法探索采矿前后碳、氮循环功能基因丰度、功能基因表达丰度和循环路径丰度等变化。运用非参数检验和排序分析等统计学方法分析采矿前后参与碳、氮循环微生物群落多样性的变化。将碳、氮循环相关微生物群落、功能基因和循环路径与碳、氮固定速率进行关联，分析微生物功能变化对于碳、氮固定速率的影响。通过上述研究可以系统和全面的评估深海采矿车的试验扰动对深海微生物碳、氮循环功能的扰动，并从微生物层面分析碳、氮固定速率对于这种扰动的响应机制。

10.3.2.5 试验后的长期监测计划

为了获得采矿试验后环境自然变化的长期观测数据，采矿试验结束后我们将在该区域内布设一套长期观测系统，具备对浊度、海流、pH 值、噪声等环境参数和近底视像的长期监测能力。

在之后数年内，通过 CTD、箱式和多管取样等方式采集 CTA 和 PRZ1 的海水样品和沉积物样品，用于本次试验的环境影响评估。

10.3.3 环境影响评估方案

利用合同区勘探任务构建的 IRZ 和 PRZ1 环境基线和采矿试验前、采矿试验期间及采矿实验后的环境调查监测数据，完善沉积物羽状流模型和环境影响评估模型，通过采用预建的环境影响评价指标（阈值）和对比评价法，对试验前、后的 IRZ 和 PRZ1 生物群落和底层环境特征开展对比研究，评估本次采矿试验对底栖生物群落、底栖生态系统功能和底层理化环境的影响，并向 ISA 报告结果。

10.3.3.1 羽状流影响范围和强度评估

采矿车在海底行走和集矿产生的悬浮颗粒物在底层流的作用下形成近底层沉积物羽状流，其对近底层水体环境、浅表层沉积环境、底表生存的底栖生物群落和底栖生态系统功能都将产生直接影响。基于锚系潜标、分布式监测阵列和跟随式监测系统的监测数据，对预建的羽状流模型进行修正和完善，从而计

算羽状流的影响范围、强度和持续时间以及再沉积强度等关键指标，评估羽状流的环境影响。

10.3.3.2 采矿扰动对底栖生物群落的影响评估

采矿车在海底行走时的直接碾压、集矿产生的羽状流再沉积和直接的结核移除都会对底栖生物群落产生影响。基于多管取样器和箱式取样器的样品分析数据、AUV 的视像调查数据，对采矿试验前后小型底栖生物、大型底栖生物和巨型底栖生物的丰度、物种多样性和群落结构开展对比分析，并基于 CTA 在采矿试验前和 PRZ1 的基线数据，评估采矿车扰动对底栖生物群落的影响。

10.3.3.3 采矿扰动对底栖生态系统功能的影响评估

采矿车在海底行走时的直接碾压、集矿产生的羽状流再沉积和直接的结核移除都会对底栖生态系统功能产生影响。基于多管取样器、近底层 CTD 采水和车载时间序列采水器的样品，对其中的微生物群落开展宏基因组分析，比较采矿前后碳、氮循环功能基因丰度、功能基因表达丰度和循环路径丰度等变化，评估深海采矿车的采矿试验扰动对深海微生物碳、氮循环功能的扰动，从而评估采矿扰动对底栖生态系统功能的影响。

10.3.3.4 采矿扰动对底层水化学环境的影响评估

采矿车产生的羽状流会剧烈改变底层水化学环境特征。基于近底层 CTD 采水和车载时间序列采水器样品的分析数据，对比研究采矿试验前后短期内化学参数的变化，结合生物群落和生态系统功能的变化，评估采矿扰动对底层水化学环境的影响。

10.3.3.5 采矿扰动对沉积环境的影响评估

采矿车在海底行走时的直接碾压、集矿产生的羽状流再沉积会对局域的沉积环境产生一定影响。基于多管取样器的样品、AUV 视像调查和分布式再沉积厚度监测阵列获得的监测数据，对比研究采矿试验前后再沉积厚度和再沉积作用影响范围内浅表层沉积物理化性质的变化情况，结合生物群落和生态系统功能的变化，评估采矿扰动对沉积环境的影响。

10.3.3.6 采矿扰动的噪声及光照影响评估

采矿车在海底作业时的噪音会对底层环境造成扰动，试验船在夜间的照明也会对海鸟等造成一定影响。基于车载和跟随式监测系统的水听器、光照计以及船载光照计的监测数据，并查阅东太 CC 区主要珍稀濒危海洋生物的时空分布规模及其对噪音和夜间光照的耐受情况，评估采矿扰动的噪声及光照影响。

表 10.3-3 环境监测与影响评估的主要指标

序号	具体影响评估内容	现场数据与样品采集指标	现场数据与样品采集手段	最终评估指标
1	羽状流影响范围和强度	数据：底层和近底层温度、盐度、浊度、溶解氧浓度、泥沙浓度、海流流速与流向 样品：无	锚系潜标（包括三种深度类型：底层、近底层和全水深）、分布式监测阵列、车载跟随式监测系统；上述系统内包括 CTD、单点海流计、多普勒海流计（ADCP）、溶解氧传感器、浊度传感器、泥沙传感器等	沉积物羽状流的影响范围、强度和持续时间 再沉积厚度和范围
2	采矿扰动对底栖生物群落的影响	数据：海床视频和照片资料 样品：浅表层沉积物	AUV 系统、多管取样器、箱式取样器	微生物群落结构； 小型底栖生物与大型底栖生物的密度和群落结构； 巨型底栖生物的密度和群落结构
3	采矿扰动对底栖生态系统功能的影响	数据：无 样品：浅表层沉积物、底层和近底层海水	多管取样器、箱式取样器、CTD 采水器、采矿车搭载的原位采水系统	碳、氮循环功能基因丰度 功能基因表达丰度和循环路径丰度 底层海水溶解氧浓度 底层海水 pH
4	采矿扰动对底层水化学环境的影响	数据：溶解氧浓度、浊度、水体荧光 样品：底层和近底层海水	CTD 采水器、采矿车搭载的原位采水系统	底层海水 POC、DOC、DIC 浓度 底层海水溶解态无机盐浓度 底层海水悬浮颗粒物浓度
5	采矿扰动对沉积环境的影响	数据：海床视频和照片资料；近底探测的高精度浅地层剖面数据；原位再沉积厚度照片资料 样品：浅表层沉积物、孔隙水	AUV 系统、多管取样器、箱式取样器、分布式监测阵列（再沉积厚度监测系统）	浅表层沉积物剖面粒度分布 浅表层沉积物活性有机碳和总有机碳 孔隙水重金属离子浓度、

6	采矿扰动的噪声及光污染影响	数据：噪声；光照强度 样品：无	深海水听器、光照计	氧化还原电位、pH
				再沉积厚度 噪声强度、频率 光照强度

10.4 报告

10.4.1 向 ISA 报告监测结果

监测活动的结果将被记录下来，并编制监测报告，其中包含用于评估以下内容的的数据：采矿车的性能以及设计和管理措施的有效性。调查结果将用于验证本环境影响声明报告中的羽流模型和影响预测，并为商业开采规模的环境影响报告和环境管理和监测计划提供支撑。监测报告的大致结构将是：

- 引言；
- 立法框架和标准；
- 监测标准；
- 监测方法；
- 监测结果；
- 审计；
- 建议和纠正行动。

中国五矿将每年向 ISA 提交监测报告。根据 ISBA/19/C/17 第 32 条规定：

承包者应每年向秘书长书面报告监测方案的执行情况和结果，并应提交数据和资料，同时考虑到法律和技术委员会提出的任何建议。

这些报告将说明对环境管理和监测计划的遵守情况，以及对任何纠正行动提出的建议。

本公司还将每年向 ISA 披露其他评估和监测活动的结果。

本公司计划举办一次公共利益相关者活动，介绍采矿车测试的结果。

10.4.2 向 ISA 报告突发事件和处理结果

任何进入海洋环境的溢出、事故或未受控制的释放，都将在规定报告时间内作为突发事件向 ISA 进行通报。ISBA/19/C/17 条例第 33 条指出：

承包者应利用最有效的手段，迅速向秘书长书面报告已经、正在或可能对海洋环境造成严重损害的活动引起的任何事件。

给国际海底管理局的通报将包括以下内容：

- 事件以及当时已知的有关该事件的所有重要事实和情况；
- 为避免或减轻任何不利环境影响而采取的任何行动；
- 已采取或可能采取的任何纠正措施，以防止类似事件再次发生。

根据 MARPOL OPRC-HNS 2000 议定书，也将按要求通知任何相关的第三方机构。

11 产品监管

本次试验，预计将采集不超过 10 t 的湿结核到甲板，这些结核预计用于科研用途，特别是用于研究冶炼的方法。中国五矿在金属选冶方面具有全球先进的技术水平，并且在中国国内开展的全部冶炼实验活动均受到中国国内法律和法规的严格监管，预计不会造成进一步的不利环境影响。

12 协商

中国五矿计划在完成本报告书国内行政审批手续后，按照《中华人民共和国海洋环境保护法》和《中华人民共和国环境影响评价法》的相关规定，并参照 ISA 目前正在制定的环境标准，开展利益攸关方协商，并将利益攸关方意见、本报告修改及意见回复公开发布，并随本报告一并提交给 ISA 审议。

13 术语和缩略语

术语

术语	解释
合同区	承包者与国际海底管理局签署勘探合同的可勘探区域。
多金属结核	“区域”的一种资源，包括在深海床表层上或紧贴表层下含有锰、镍、钴和铜的任何结核矿床或积层
一般勘探区	探矿区内有进一步勘查价值的地区。勘探工作主要通过系统取样进行。在勘探工作完成后，应估算控制的资源量。是探矿区的一部分。
重点工作区	本项目中，重点工作区位于 A-5 区块西部海盆，面积约为 4590 km ² ，其资源勘探网度达到 7km×7km，也称为一般勘探区。
详细勘探区	一般勘探区内计划首采的地区。勘探工作主要通过加密取样进行。在勘探工作完成后，应估算探明的资源量。是一般勘探区的一部分。
采矿活动区	本项目中，采矿活动区即为详细勘探区
影响参照区	“区域”内试验性采矿及受其直接影响的区域，位于承包者的合同区内，用于评估“区域”内采矿试验对海洋环境的影响。
采矿试验区	位于采矿活动内，本项目特指开展采矿车试验的区域
保全参照区	尽可能位于承包者的合同区内，物种组成和环境特征与影响参照区具有相似性，远离影响参照区且不受试验性采矿工作影响的对照区域。
特别环境利益区	国际海底管理局用于区域环境管理计划而设立的区域。
累积影响	过去、目前或可预见的其他作用逐渐造成的变化所产生的影响。
羽状流	含有大量悬浮沉积物颗粒物、矿物和底栖生物碎屑，呈弥散状扩散的水流。
巨型底栖生物	栖息于水—沉积物界面，并能在海底照片上清楚分辨的底上动物，大小通常大于 1 cm。
大型底栖生物	栖息于沉积物表面和底内，并在沉积物样品分选时被 250 μm 孔径网筛所阻留的动物。
小型底栖生物	栖息于沉积物表面和底内、并在沉积物样品分选时被 32 μm 孔径网筛所阻留的后生动物以及它们的幼体等。

缩略语

AABW	Antarctic Bottom Water
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler

AFS	International Convention for the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships
APEI	Areas of Particular Environmental Interest
Argo	Array for Real-time Geostrophic Oceanography
As	Arsenic
ASVs	Amplicon Sequence Variants
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BC	Box Corer
BIE	Benthic Impact Experiment
BPI	Bathymetric Position Index
BWMC	Ballast Water Management Convention
CBD	Convention on Biological Diversity
CCD	Carbonate Compensation Depth
CCZ	Clarion-Clipperton Zone
Cd	Cadmium
cDNA	complementary Deoxyribonucleic acid
Chl <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>
Co	Cobalt
COI	Cytochrome c oxidase subunit I
COMRA	China Ocean Mineral Resources Research and Development Association
Cr	Chromium
CTA	Collector Test Area
CTD	Conductivity Temperature Depth
Cu	Copper
Minmetals	China Minmetals Group Co., Ltd.
MLC	Maritime Labour Convention
DIC	Dissolved Inorganic Carbon
DISCOL	Disturbance and recolonization experiment in a manganese nodule area of the deep South Pacific
DNA	Deoxyribonucleic acid
DO	Dissolved Oxygen
DOC	Dissolved Organic Carbon
ECWMF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDGAR	Emissions Database for Global Atmospheric Research
eDNA	Environmental Deoxyribonucleic Acid
EEZ	Exclusive Economic Zone
EIS	Environmental Impact Statement
EMMP	Environmental Management and Monitoring Plan
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
EUC	Equatorial Undercurrent
Fe	Iron
FTU	Formazan Turbidity Units
FVCOM	An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model
GC	Gravity Core
GEOMAR	GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel
GOOS	Global Ocean Observing System
GSR	Global Sea Mineral Resources
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship

IMMAs	Important Marine Mammal Areas
IMO	International Maritime Organization
IMO-BIE	International Maritime Organization- Benthic Impact Experiment
Ind.	Individual
IOM-BIE	Interoceanmetal Joint Organization- Benthic Impact Experiment
IRZ	Impact Reference Zone
ISA	International Seabed Authority
ISM	The International Safety Management
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
JET	Japan Deep-Sea Impact Experiment
KBAs	Key Biodiversity Areas
LADCP	Lowered Acoustic Doppler Current Profiler
LC50	Lethal Concentration 50
L-PMOC	The lower deep branch of the Pacific Meridional Overturning Circulation
MARPOL	The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MC	Multicore
MEOW	Marine Ecoregions Of the World
MIDAS	Managing impacts of deep-sea resources exploitation
Mn	Manganese
MX	Mooring
NEC	North Equatorial Current
NECC	North Equatorial Countercurrent
NEG	Nickel equivalent grade
NEP	Northeast Pacific
NESC	North Equatorial Subsurface Current
NEUC	North Equatorial Undercurrent
NGCC	New Guinea Coastal Current
Ni	Nickel
NOAA-BIE	National Oceanic and Atmospheric Administration- Benthic Impact Experiment
NUC	Equatorial Undercurrent
OBIS	Ocean Biodiversity Information System
OMZ	Oxygen minimum zone
OTU	Operational Taxonomic Unit
Pb	Lead
PCR	Polymerase Chain Reaction
POC	Particulate Organic Carbon
PPOW	Pelagic Provinces Of the World
PRZ	Preservation Reference Zone
PSD	Power Spectral Density
Ra	Radium
RCP	Representative Concentration Pathway
REMP	Regional Environmental Management Plan
ROV	Remote Operated Vehicle
rRNA	Ribosomal ribonucleic acid
SEC	South Equatorial Current
SNP	Single Nucleotide Polymorphisms
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
SPL	Sound Pressure Level

SPM	Suspended Particulate Matter
TAO	Tropical Atmosphere Ocean
TMC	The Metals Company
TN	Total Nitrogen
TOC	Total Organic Carbon
TPOS	Tropical Pacific Observation System
TRITON	Triangle Trans-Ocean Buoy Network
TSM	Total Suspended Matter
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
U-PMOC	The upper deep branch of the Pacific Meridional Overturning Circulation
V	Vanadium
VMEs	Vulnerable Marine Ecosystems
WMO	World Meteorological Organization
Zn	Zinc

14 研究小组

表 14.1-1 研究小组名单

姓名	职称	单位	研究内容
孙栋	研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生态
刘禹维	高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	羽流影响
毛桂庭	正高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	采矿技术
程阳锐	高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	采矿技术
鹿博	副研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生物
王俊	副研究员	自然资源部第二海洋研究所	羽流影响
林施泉	副研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生物
陈时平	工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	羽流影响
郝祥礼	工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	海洋地质
张文谦	工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	海洋生物
李正刚	副研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋地质
李伟文	副研究员	自然资源部第三海洋研究所	海洋化学
姜玉环	助理研究员	自然资源部第三海洋研究所	环境管理
李小虎	研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋地质
章伟艳	研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋地质
杨成浩	研究员	自然资源部第二海洋研究所	物理海洋
丁涵	研究员	卡内基梅隆大学	气象条件
贾永刚	教授	中国海洋大学	羽流影响
拾兵	教授	中国海洋大学	数值模拟
丁海兵	教授	中国海洋大学	羽流影响
邹立	副教授	中国海洋大学	羽流影响
张学庆	副教授	中国海洋大学	羽流影响
权永铮	高级工程师	中国海洋大学	羽流影响
范智涵	博士后	中国海洋大学	羽流影响
类彦丽	教授	中国科学院海洋研究所	海洋生态
赵峰	研究员	中国科学院海洋研究所	海洋生物
詹子锋	副研究员	中国科学院海洋研究所	海洋生物
李浩天	博士后	中国科学院海洋研究所	海洋生物

孙承君	研究员	自然资源部第一海洋研究所	羽流影响
迟万清	研究员	自然资源部第一海洋研究所	羽流影响
周玉斌	副研究员	国家深海基地管理中心	环境评价
李俊	高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	采矿技术
双志	高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	采矿技术
李满红	正高级工程师	中国五矿长沙矿冶研究院有限责任公司	采矿技术
陈秉正	高级工程师	中国五矿长沙矿山研究院有限责任公司	采矿技术
初凤友	研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋地质
林志兰	副研究员	自然资源部第三海洋研究所	海洋生态
林瑞娟	助理研究员	自然资源部第三海洋研究所	政策法规
陈斯婷	助理研究员	自然资源部第三海洋研究所	海洋化学
袁征	助理研究员	自然资源部第三海洋研究所	环境工程
何韦宜	助理研究员	自然资源部第三海洋研究所	海洋生物
许学伟	研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生物
邵倩文	助理研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生态
冯芸芝	助理研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生态
唐琴琴	助理研究员	自然资源部第二海洋研究所	海洋生态
李卿	助理工程师	中国五矿中冶武勘工程技术有限公司	物理海洋
刘暖	助理研究员	自然资源部第二海洋研究所	物理海洋
江南	工程师	自然资源部第二海洋研究所	潜器技术保障
刘威	工程师	自然资源部第二海洋研究所	潜器技术保障
陈利	工程师	自然资源部第二海洋研究所	潜器技术保障
楼眺华	工程师	自然资源部第二海洋研究所	潜器技术保障

15 参考资料

见各章节。

16 附录

附录 1 底层扰动沉积物羽流模型研究报告。

附录 2 环境基线调查方法和质量评价

附录 1 底层扰动沉积物羽流模型研究报告



长沙矿冶院

中国五矿多金属结核合同区 A-5 区块

1/4 商业规模采矿车单体试验

底层扰动沉积物羽流模型研究报告

编写人：王俊 杨成浩 孙栋

自然资源部第二海洋研究所

2024 年 3 月

目录

1 模型构建.....	299
2 模型验证.....	303
3 羽流模型结果.....	304
3.1 悬浮泥沙浓度水平分布.....	304
3.2 悬浮泥沙浓度垂向分布.....	336
3.3 再沉积厚度分布.....	341
4 小结.....	347

图目录

图 1 模型水平网格（上图）、垂直网格（中图）及水深图（下图）	301
图 2 模拟的采矿车采集路径示意图.....	302
图 3 模型结果（红色）和实测流速（蓝色）比较.....	303
图 4 Case1 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	305
图 5 Case1 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	306
图 6 Case1 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	306
图 7 Case1 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	307
图 8 Case1 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	307
图 9 Case1 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	308
图 10 Case1 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	308
图 11 Case1 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	309
图 12 Case2 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	309
图 13 Case2 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	310
图 14 Case2 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	310
图 15 Case2 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	311
图 16 Case2 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	311
图 17 Case2 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	312
图 18 Case2 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	312
图 19 Case2 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	313
图 20 Case3 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	313
图 21 Case3 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	314
图 22 Case3 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	314
图 23 Case3 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	315

图 24 Case3 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	315
图 25 Case3 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	316
图 26 Case3 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	316
图 27 Case4 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	317
图 28 Case4 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	317
图 29 Case4 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	318
图 30 Case4 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	318
图 31 Case4 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	319
图 32 Case4 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	319
图 33 Case4 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	320
图 34 Case4 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	320
图 35 Case5 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	321
图 36 Case5 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	321
图 37 Case5 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	322
图 38 Case5 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	322
图 39 Case5 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	323
图 40 Case5 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	323
图 41 Case5 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	324
图 42 Case5 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	324
图 43 Case6 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	325
图 44 Case6 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	325
图 45 Case6 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	326
图 46 Case6 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	326
图 47 Case6 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	327

图 48 Case6 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	327
图 49 Case6 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	328
图 50 Case6 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	328
图 51 Case7 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	329
图 52 Case7 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	329
图 53 Case7 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	330
图 54 Case7 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	330
图 55 Case7 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	331
图 56 Case7 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	331
图 57 Case7 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	332
图 58 Case7 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	332
图 59 Case8 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	333
图 60 Case8 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	333
图 61 Case8 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图	334
图 62 Case8 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	334
图 63 Case8 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图	335
图 64 Case8 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	335
图 65 Case8 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	336
图 66 Case8 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图	336
图 67 Case1 悬浮泥沙浓度垂向分布图	337
图 68 Case2 悬浮泥沙浓度垂向分布图	338
图 69 Case3 悬浮泥沙浓度垂向分布图	338
图 70 Case4 悬浮泥沙浓度垂向分布图	339
图 71 Case5 悬浮泥沙浓度垂向分布图	339

图 72 Case6 悬浮泥沙浓度垂向分布图	340
图 73 Case7 悬浮泥沙浓度垂向分布图	340
图 74 Case8 悬浮泥沙浓度垂向分布图	341
图 75 Case1 再沉积厚度分布图	342
图 76 Case2 再沉积厚度分布图	342
图 77 Case3 再沉积厚度分布图	343
图 78 Case4 再沉积厚度分布图	343
图 79 Case5 再沉积厚度分布图	344
图 80 Case6 再沉积厚度分布图	344
图 81 Case7 再沉积厚度分布图	345
图 82 Case8 再沉积厚度分布图	345

表目录

表 1 羽流模型各种案例参数表.....	304
表 2 羽流最大扩散范围和最大再沉积厚度.....	346
表 3 羽流再沉积面积统计表.....	346

1 模型构建

构建了 A-5 区块 CTA 的深海采矿羽流扩散数值模型。羽流扩散模型采用 FVCOM (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 模型, 该模式基于三角形网格, 采用有限体积法、三维原始方程组的海洋模式。采用了体积通量的积分方法来求解流体动力学原始控制方程组, 从而保证了在单一网格和整个计算区域上都能同时满足动量、能量和质量的守恒, 解决了海洋数值计算中的关键问题。垂直方向上采用了 s 坐标系, 能很好地处理复杂地形变化, 更好的模拟底层动力过程; 水平方向上采用无结构化的三角形网格, 可以对重点关心区域 (如 CTA) 进行局部加密处理, 提高计算效率。

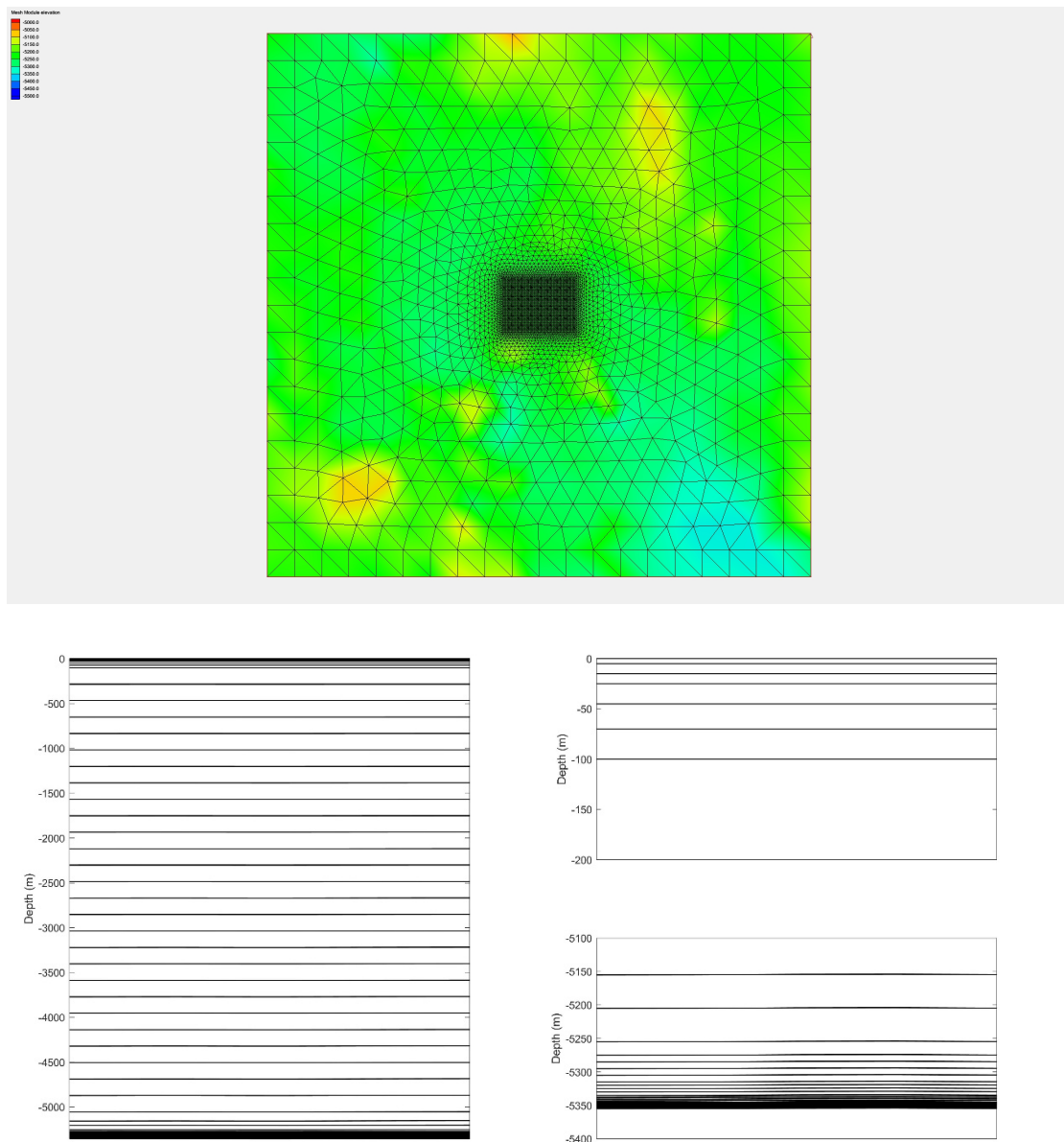
FVCOM 的控制方程组如下:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial Dw}{\partial \sigma} = 0 \\
 & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - fvD \\
 & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + DF_u \\
 & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial \sigma} + fuD \\
 & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial y} (D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma') + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + DF_v \\
 & \frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta u D}{\partial x} + \frac{\partial \theta v D}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}) + DH + DF_{\theta} \\
 & \frac{\partial S D}{\partial t} + \frac{\partial S u D}{\partial x} + \frac{\partial S v D}{\partial y} + \frac{\partial S w}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial S}{\partial \sigma}) + DH + DF_S \\
 & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 w}{\partial \sigma} = 2D(P_s + P_b - \varepsilon) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_q \frac{\partial q^2}{\partial \sigma}) + DE_q \\
 & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 l u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 l v D}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial q^2 l w}{\partial \sigma} \\
 & = l E_l D (P_s + P_b - \frac{\tilde{W}}{E_l} \varepsilon) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma}) + DF_l \\
 & \rho = \rho(\theta, S)
 \end{aligned}$$

其中, x, y, σ 分别为笛卡尔坐标系中东、北和垂直方向的坐标; u, v, w 分别是 x, y, σ 三个方向上的速度分量; T 是温度; S 是盐度; ρ 是密度; P 是压力; f

是科氏力参数； g 是重力加速度； K_m 是垂向涡动黏性系数； K_h 是热力垂向涡动摩擦系数； F_u 、 F_v 、 F_θ 、 F_S 分别代表水平动量、温度和盐度扩散项。

针对本次试采试验，设置模型模拟范围为 40 km * 40 km，模型地形采用多波束实测数据（图 1），开边界处网格分辨率为 2000 m，试采中心 5 km*5 km 网格分辨率为 100 m。垂向采用广义随底坐标系统，在近底加密网格，共分为 61 层，其中近底 10 m 分辨率为 1 m（图 1）。



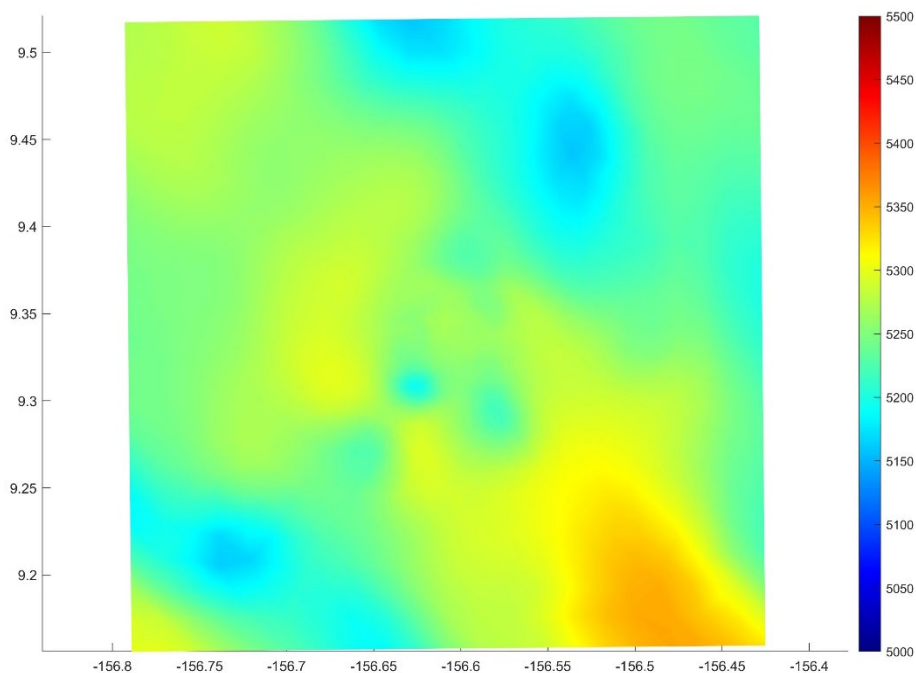


图 1 模型水平网格（上图）、垂直网格（中图）及水深图（下图）

模式设置及开边界条件：

从温盐剖面结构可以看出，底层温盐无明显变化。试验区域位于底层，且无表层及中层排放等，因此羽流模型采用正压模型计算。

开边界潮位采用全球潮汐模型 TPXO 模型结果。假定模拟区域底层背景流场一致，根据实测流场滤掉潮流等高频变化后获得的羽流场作为模型的流场开边界条件。

羽流悬沙参数设置：

根据有关航次研究报告，底层沉积物粒径为双峰型，因此设置悬浮泥沙粒径为 0.0028 mm 和 0.0625 mm。参考詹琳等（2023）的文章，粒径 0.0028 mm 的沉降速度设为 0.36 mm/s，粒径 0.0625 mm 的沉降速度设为 8.33 mm/s。

模拟羽流排放口离底高度 1m。

采矿车行驶路径参考 3.3 节，由于采矿车行走时扰动较小，因此模式只模拟采矿车采集作业过程的羽状流，具体模拟采集路径示意图如图 2 所示。扰动强度由采矿车相关技术参数给出，其中 0.2 m/s 时扰动强度为 7.2 kg/s，0.4 m/s 时扰动强度为 14.4 kg/s，0.6m/s 时扰动强度为 18.0 kg/s，0.8m/s 时扰动强度为 19.2

kg/s, 1.0 m/s 时扰动强度为 24.0 kg/s。

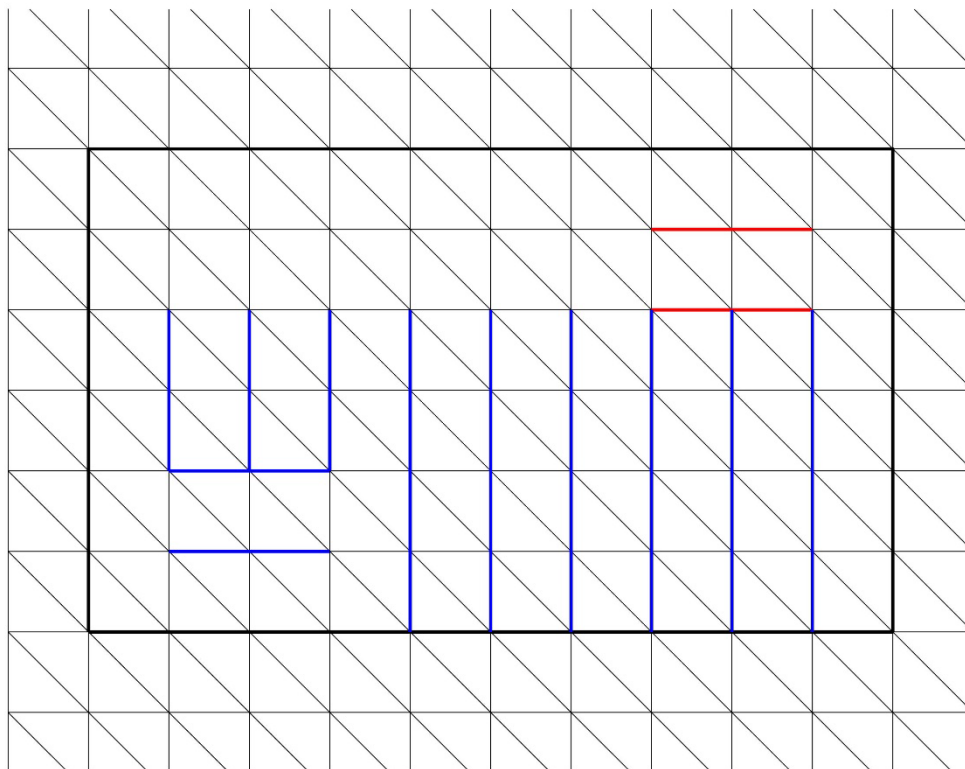


图 2 模拟的采矿车采集路径示意图

(黑色细线为模式网格线, 黑色粗线为 CTA, 红线为第一次采集试验路径, 蓝线为第二次采集试验路径)

2 模型验证

比较 2020 年 7-10 月份模型流场结果与实测流场，如图 3 所示，模拟流速与实测流速比较吻合。

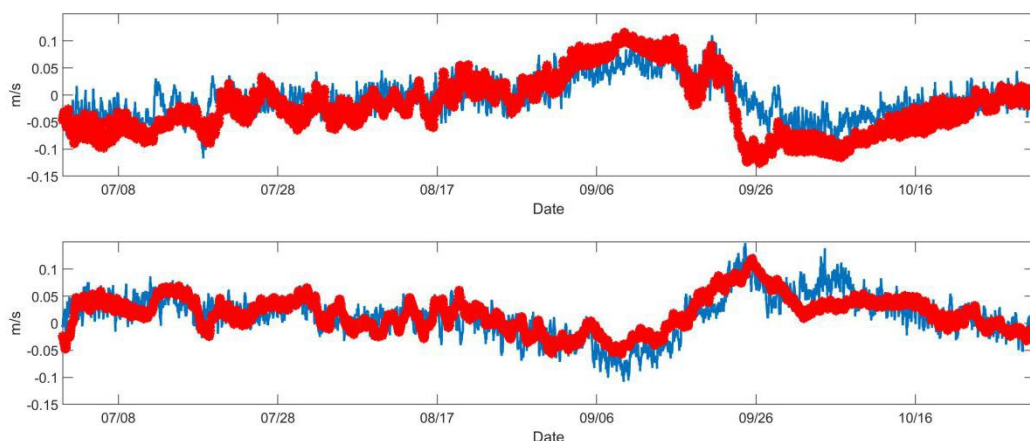


图 3 模型结果（红色）和实测流速（蓝色）比较

（上图为流速东西分量，下图为流速南北分量）

为量化模型计算精度，采用 Warner 等的方法，其计算公式如下：

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\sum_{i=1}^N (|X_{mod} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2}$$

式中：X 表示比较的参数，

$\bar{X}$ 表示平均，

mod 表示模型计算结果，

obs 表示实测结果。

计算结果从 0-1.0，其中 1.0 表示模型计算结果与实测一致，0 表示两者不一致，其值越接近 1 表示模型模拟精度越高。

计算模拟流速与实测流速的 Skill 值，在 U 分量上，两者大小和变化趋势基本一致，Skill 值为 0.85；在 V 分量上，两者大小和变化趋势也基本一致，平均 Skill 值为 0.86。流速平均 Skill 达到了 0.855，说明模型模拟精度很高，水动力数值模型结果可信。

3 羽流模型结果

由于暂时无法确定作业时间，因此开展 7 月、8 月、9 月和 10 月流场条件下的羽流模拟。均假定第一次试验开始时间为各月 10 日 0 时，采集试验共持续约 5 小时；第二次试验开始时间为各月 11 日 0 时，采集试验共持续约 36 小时。同时，开展 2 种粒径条件下的羽流扩散分布模拟，具体案例见表 1。

表 1 羽流模型各种案例参数表

案例	沉积物粒径(mm)	开始时间
Case1	0.0625	07/10
Case2	0.0028	07/10
Case3	0.0625	08/10
Case4	0.0028	08/10
Case5	0.0625	09/10
Case6	0.0028	09/10
Case7	0.0625	10/10
Case8	0.0028	10/10

3.1 悬浮泥沙浓度水平分布

图 4-图 66 是各个案例离底 1 m 的悬浮泥沙浓度水平分布变化过程图，从第一次采集试验开始直到羽状流消失（以 0.1 mg/L 为限）。由图可知，第一次采集试验时，由于扰动时间较短，悬浮泥沙浓度高于 10 mg/L 的水体均位于 CTA 之内。第二次采集试验时，由于采矿车路径靠近 CTA 边缘，因此悬浮泥沙浓度高于 10 mg/L 的水体在 CTA 南部稍微超过了 CTA。底层悬浮泥沙浓度最大为采集试验期间，随着采集试验的停止，浓度逐渐降低。羽流的扩散范围受底层流速大小的控制，比如 8 月份流速较小，采矿羽状流影响范围较小。Case3 的羽状流在采集试验开始 4 天后（即采集试验结束后 2.5 天）消失，其它各案例羽状流均在采集试验开始 5 天后（即采集试验结束后 3.5 天）消失。羽流的扩散方向受底层流场流向的控制，比如 7 月份扩散方向为西北向，9 月份扩散方向为东向。羽流最大影响距离上，各月份也不相同，其中 8 月份最大影响距离最小，9 月份最大。细颗粒沉积物扩散分布范围较粗颗粒大，案例最大影响距离为 2.1 km

(Case2)。

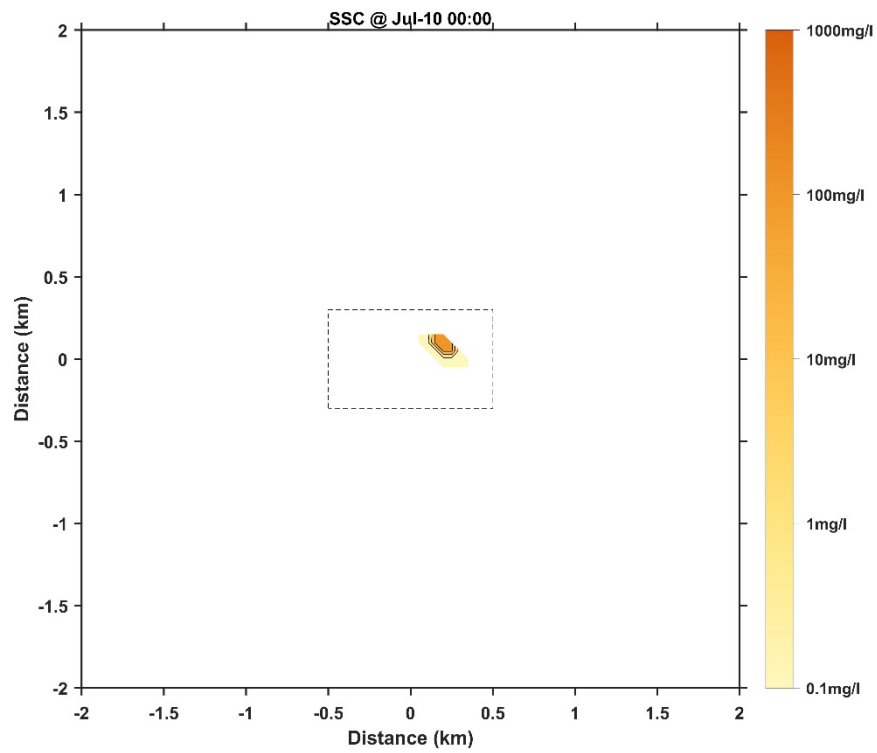


图 4 Case1 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

(黑色虚线表示 CTA，下同)

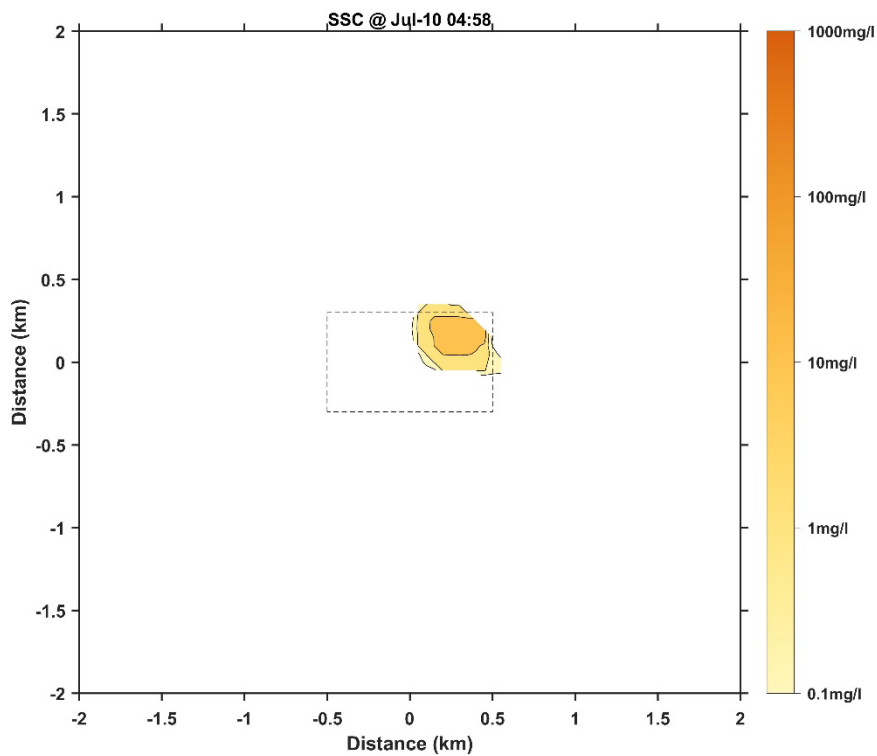


图 5 Case1 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

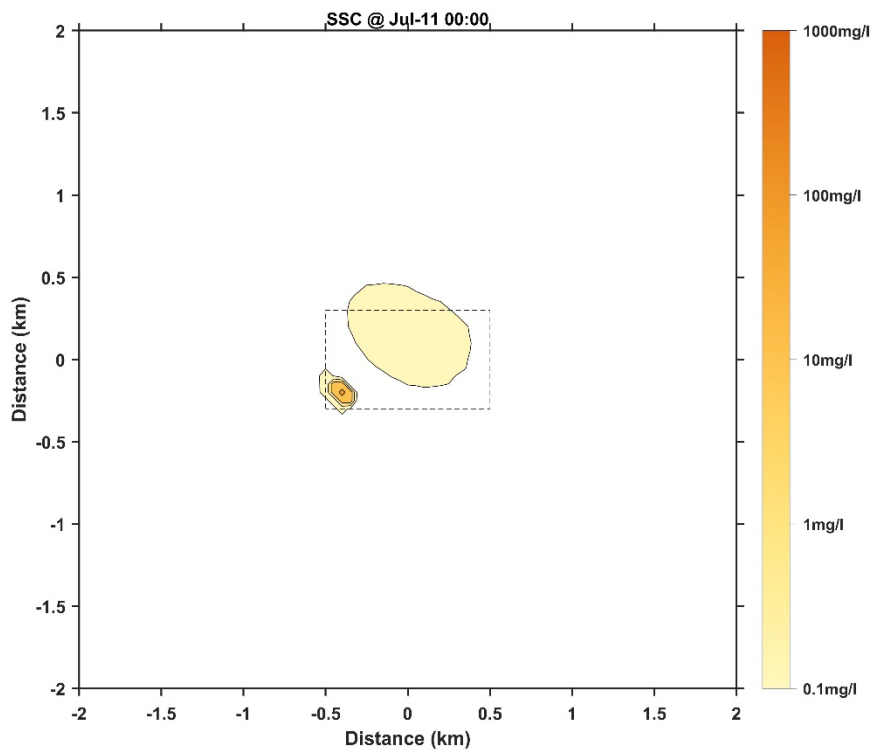


图 6 Case1 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

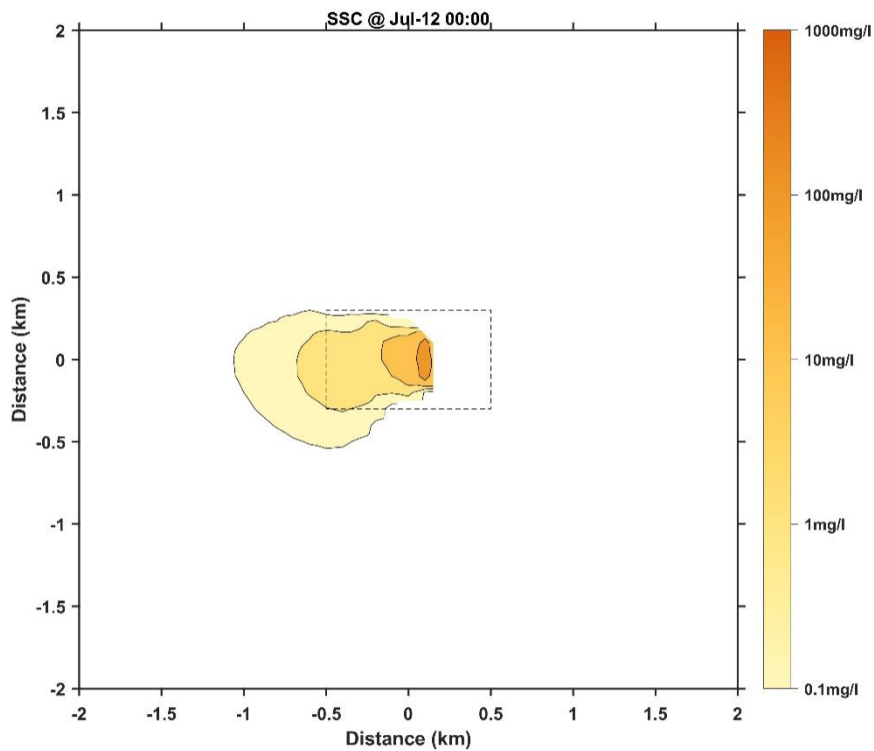


图 7 Case1 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

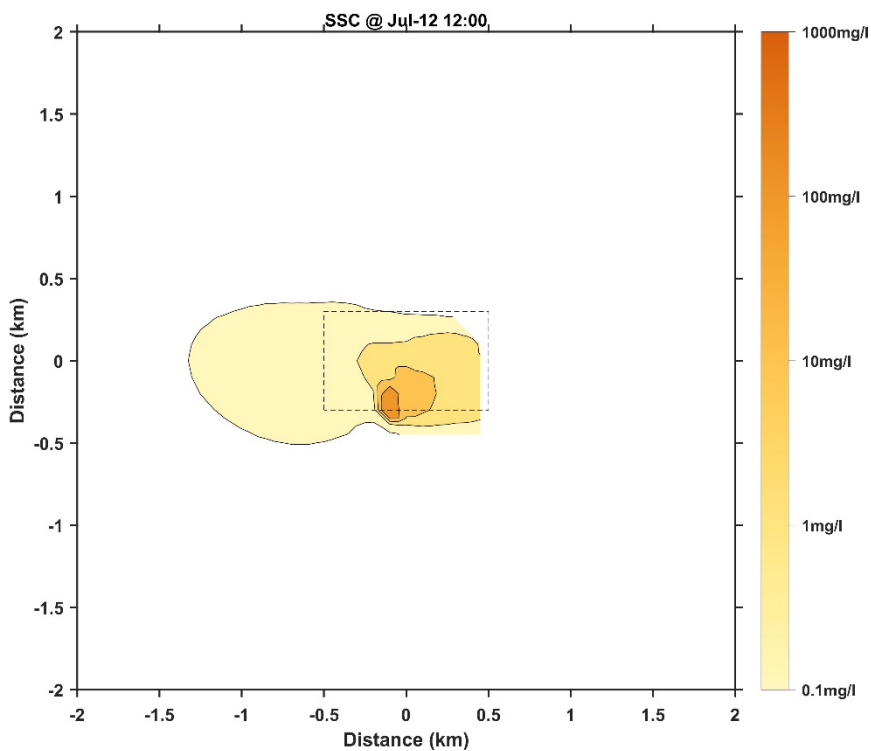


图 8 Case1 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

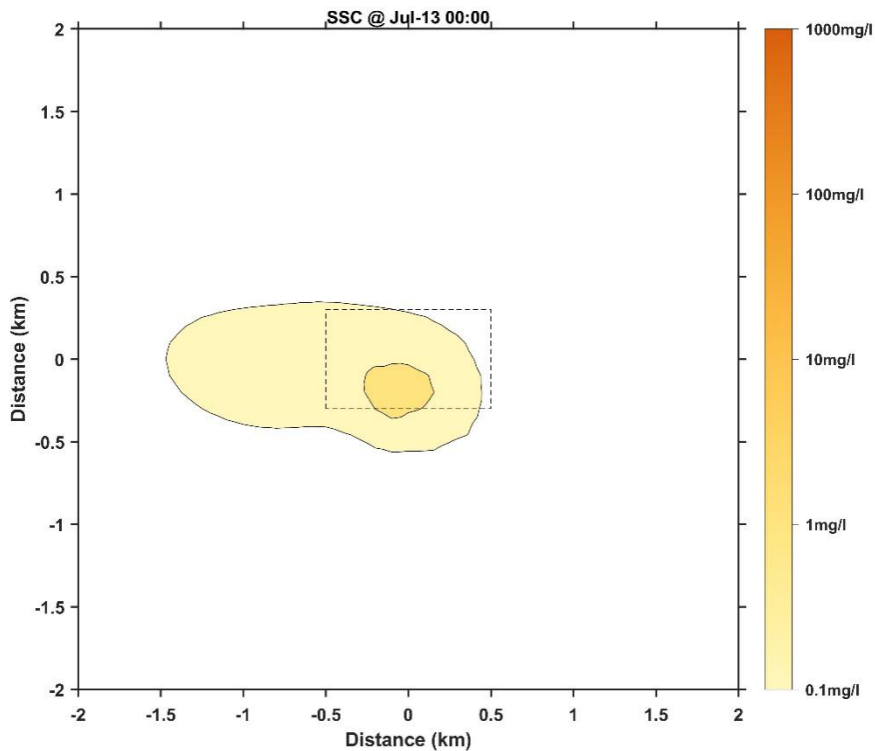


图 9 Case1 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

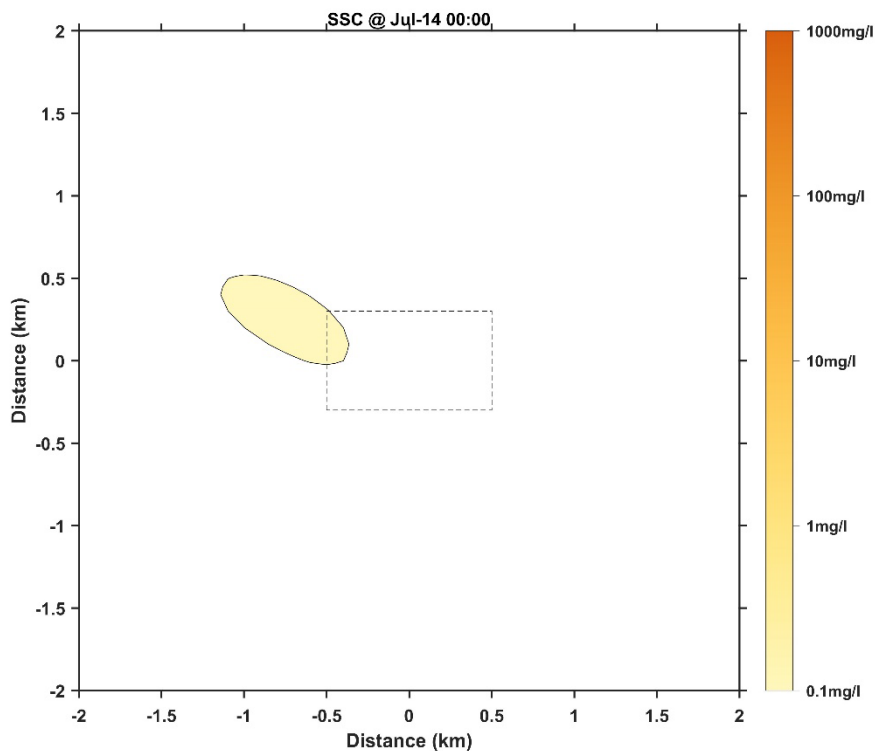


图 10 Case1 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

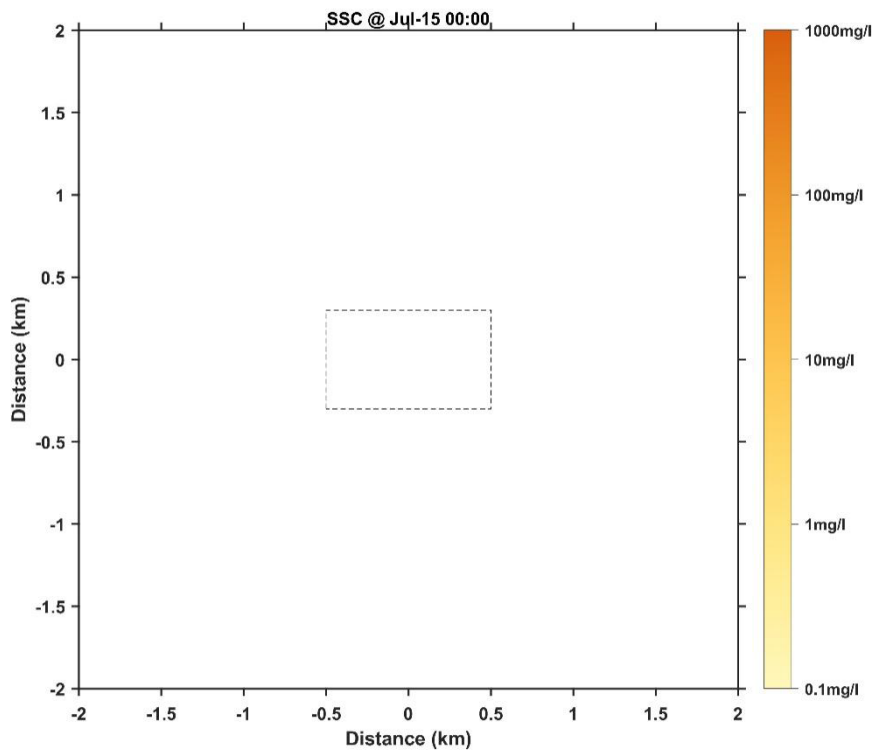


图 11 Case1 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

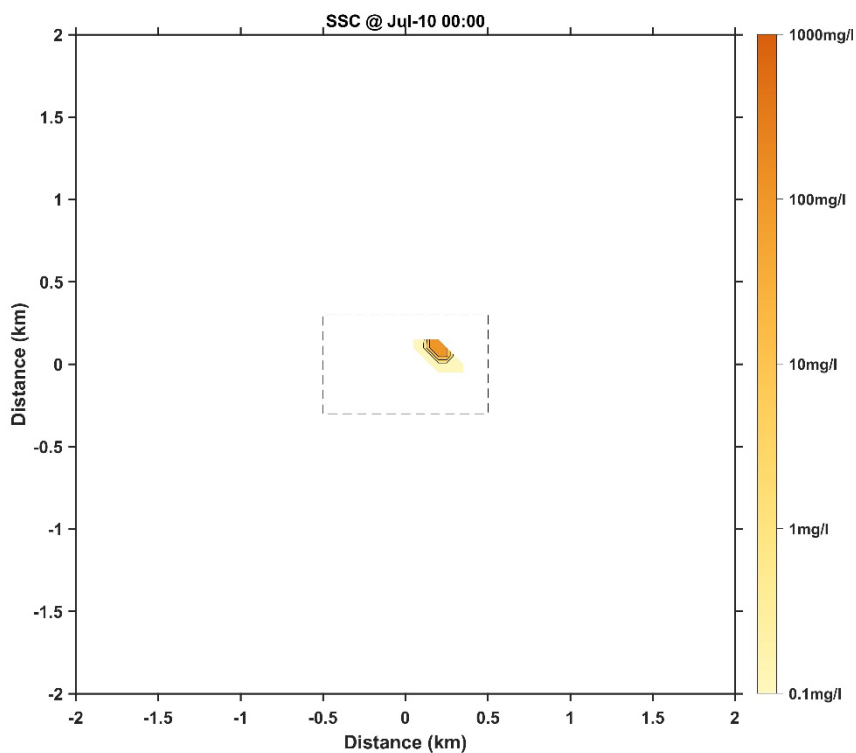


图 12 Case2 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

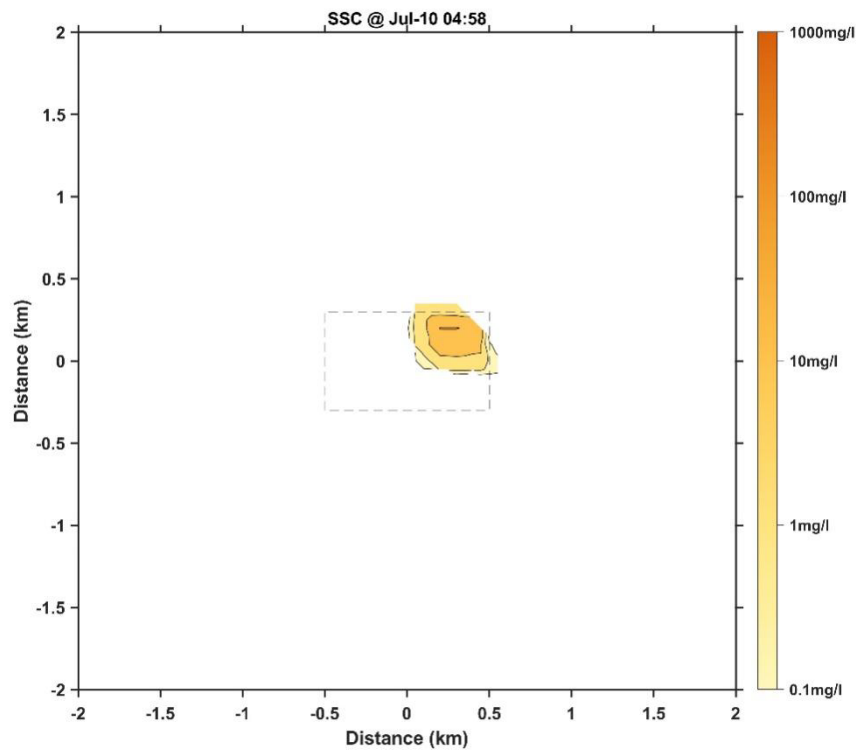


图 13 Case2 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

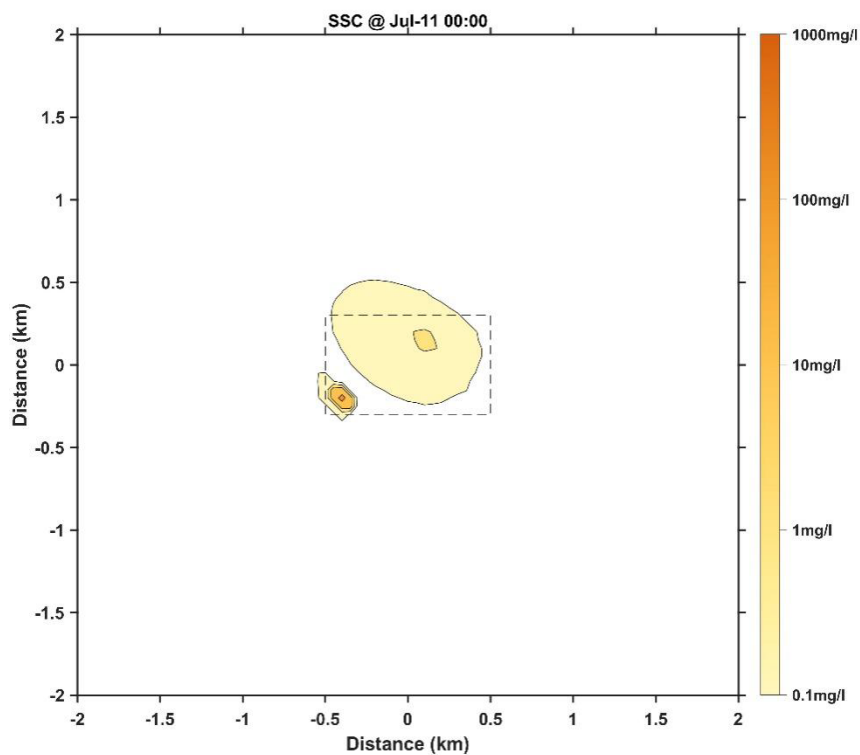


图 14 Case2 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

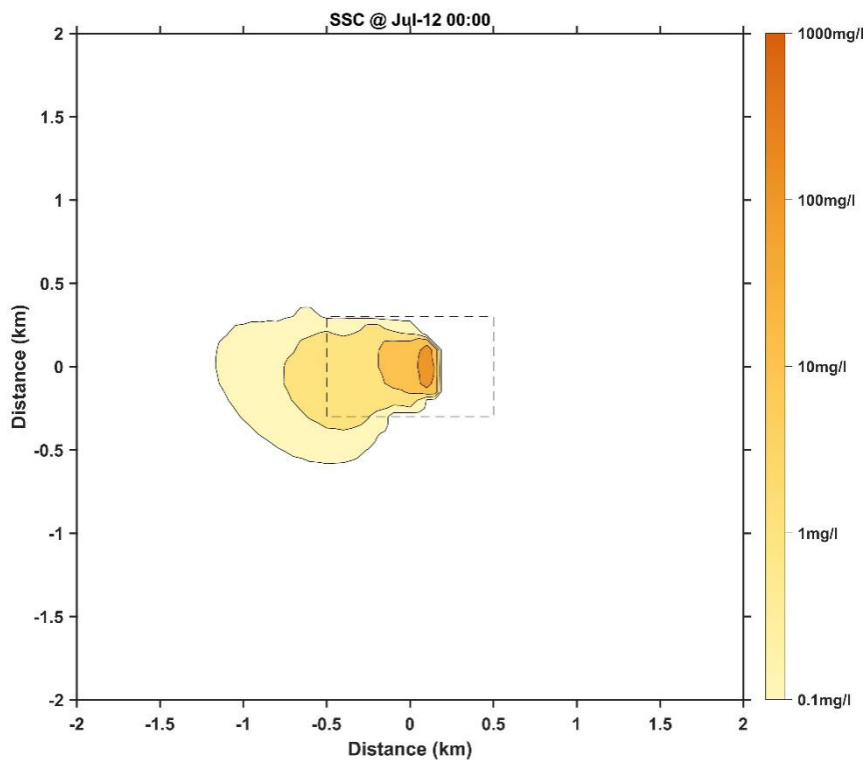


图 15 Case2 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

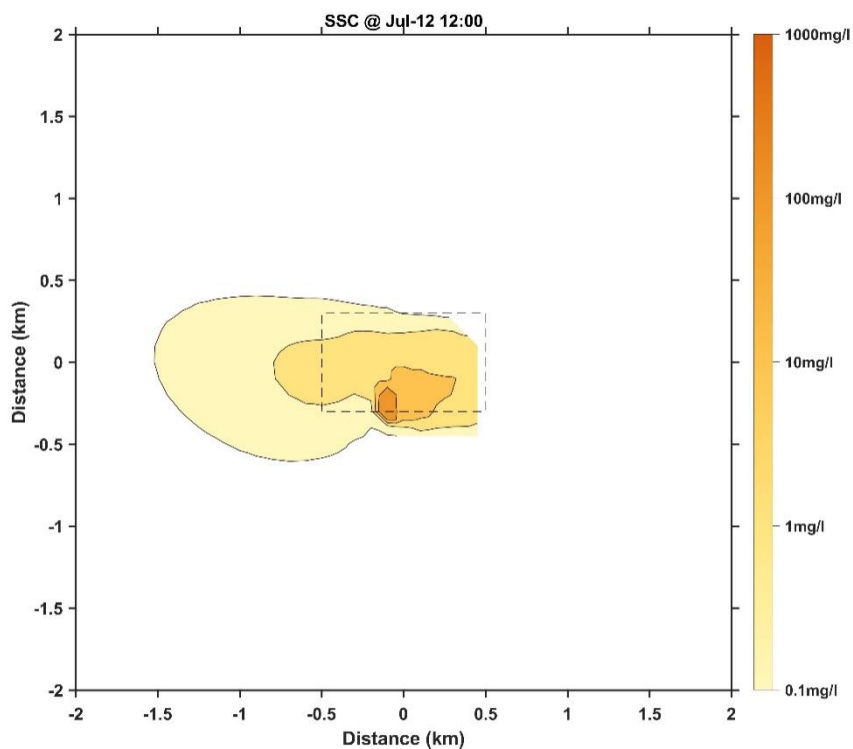


图 16 Case2 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

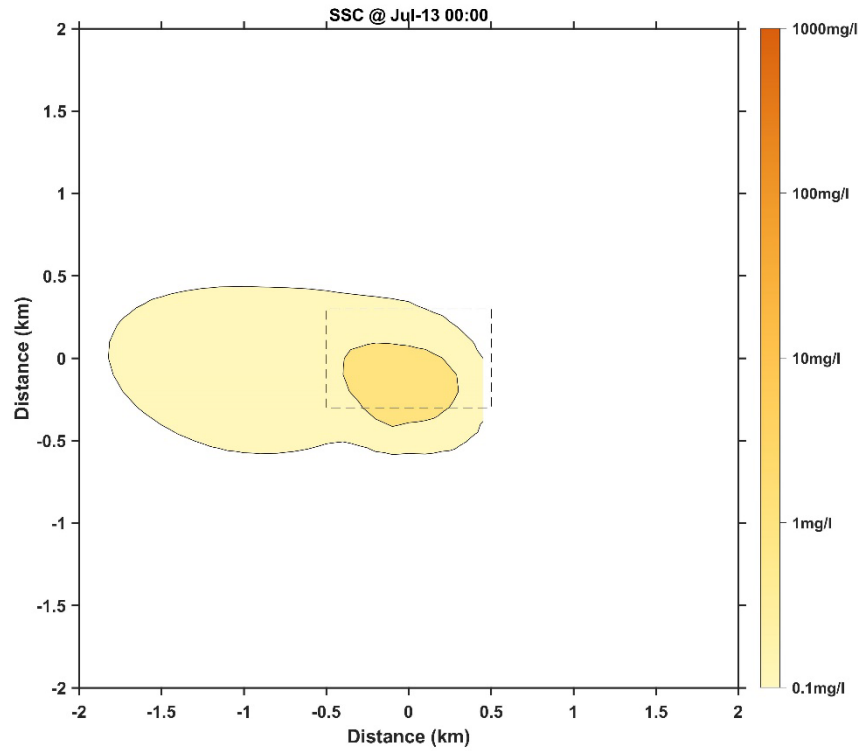


图 17 Case2 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

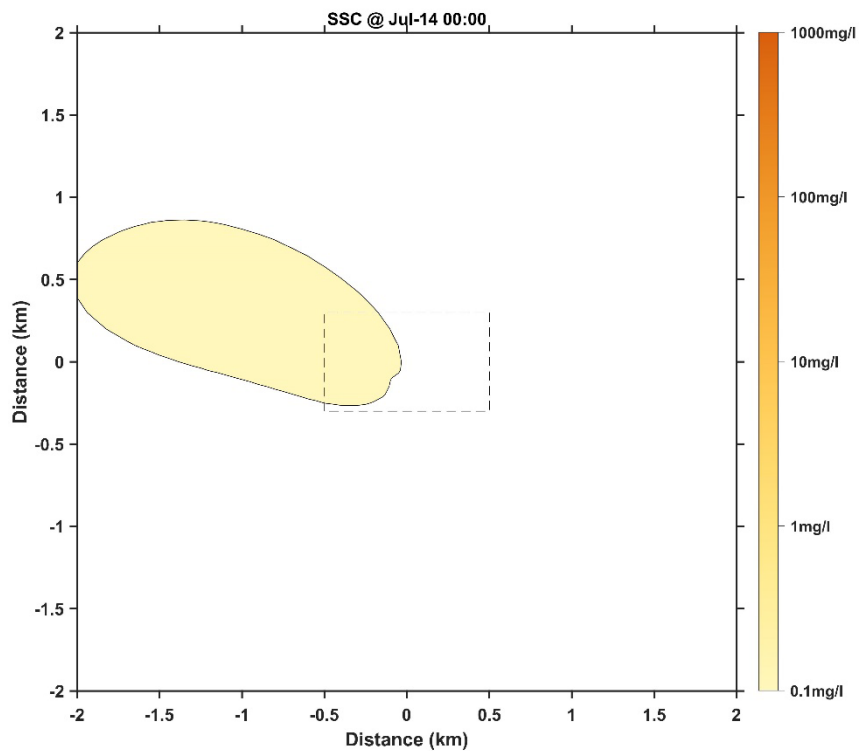


图 18 Case2 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

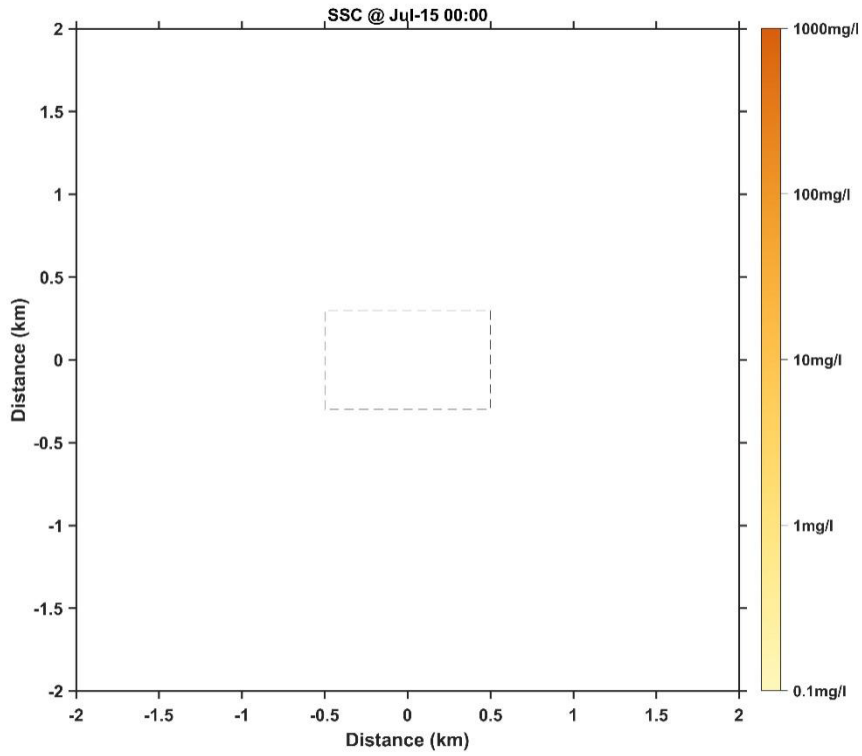


图 19 Case2 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

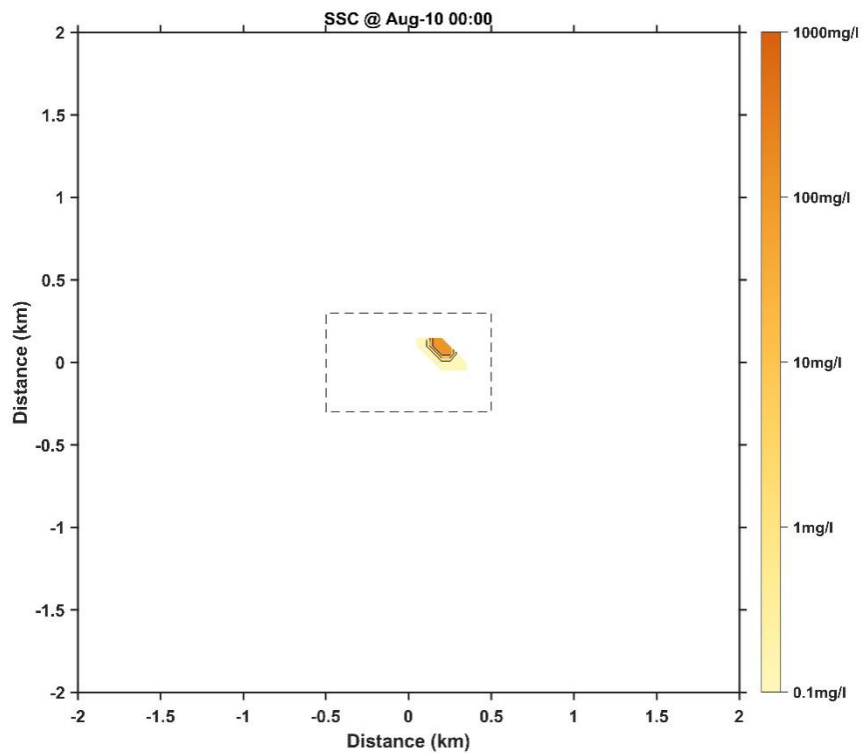


图 20 Case3 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

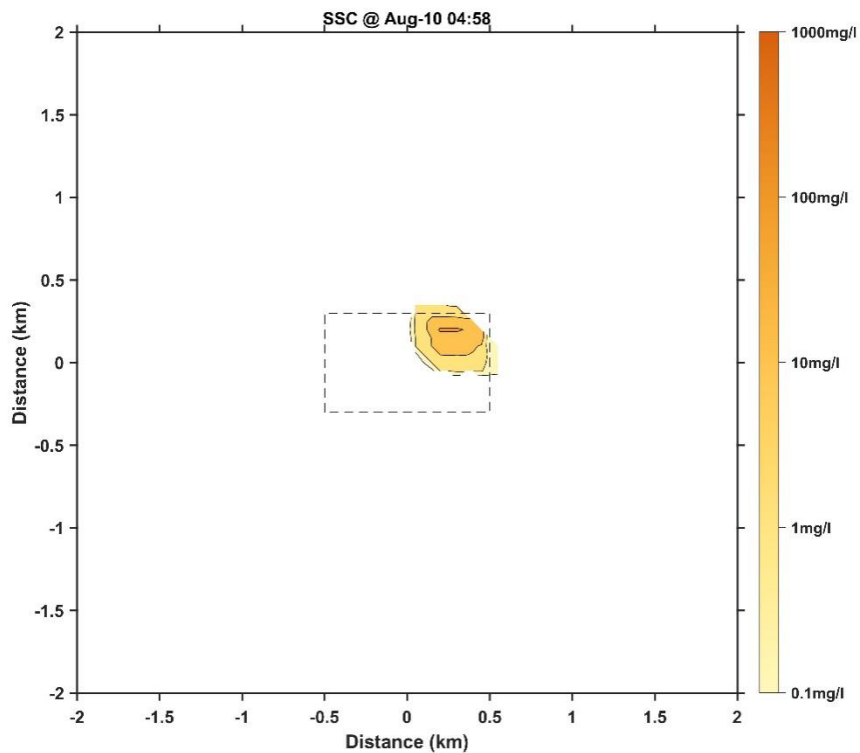


图 21 Case3 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

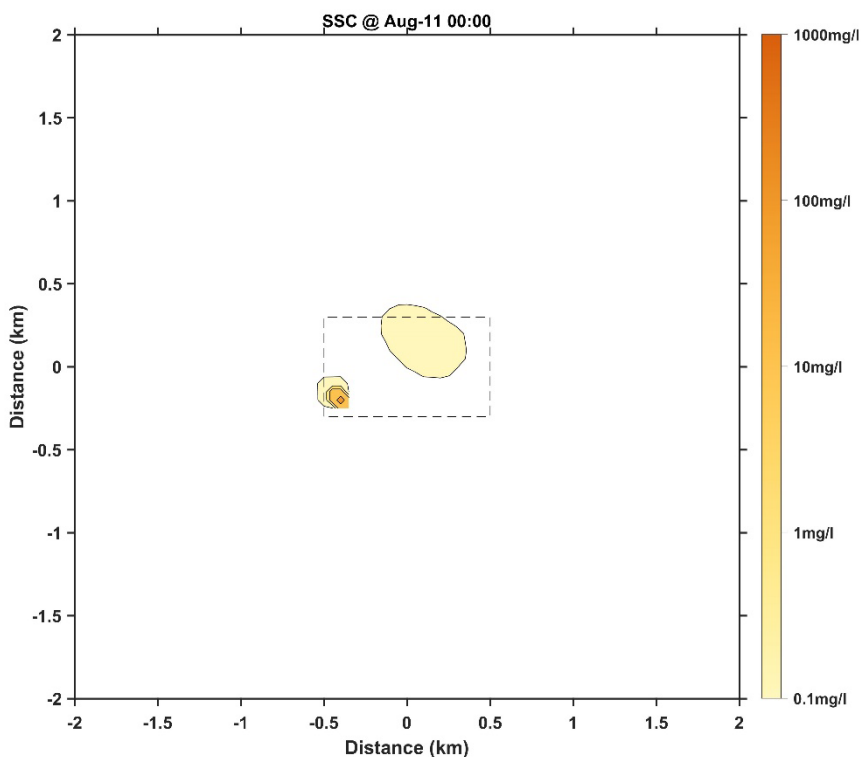


图 22 Case3 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

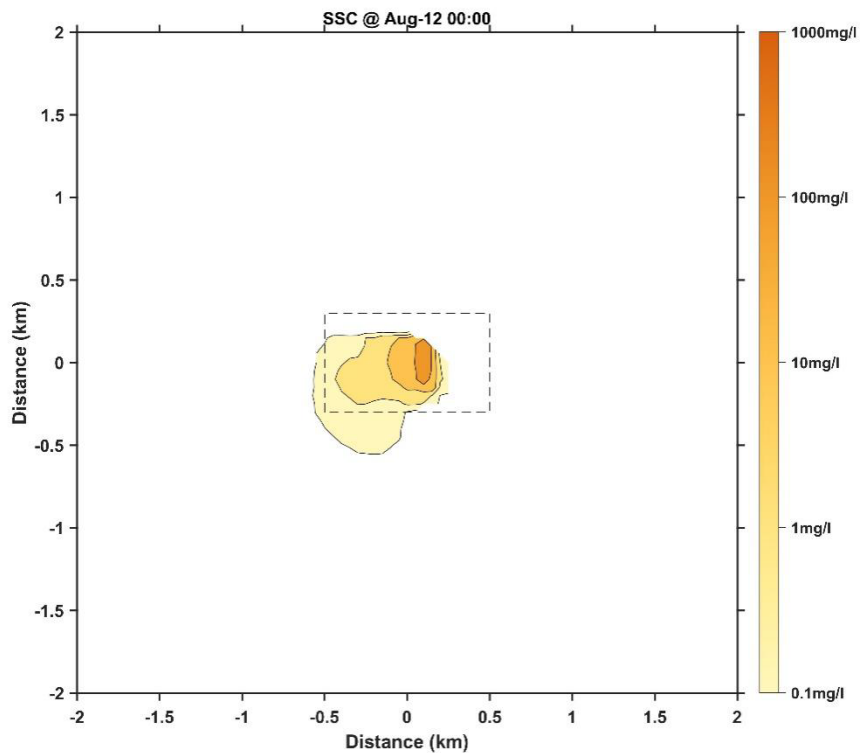


图 23 Case3 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

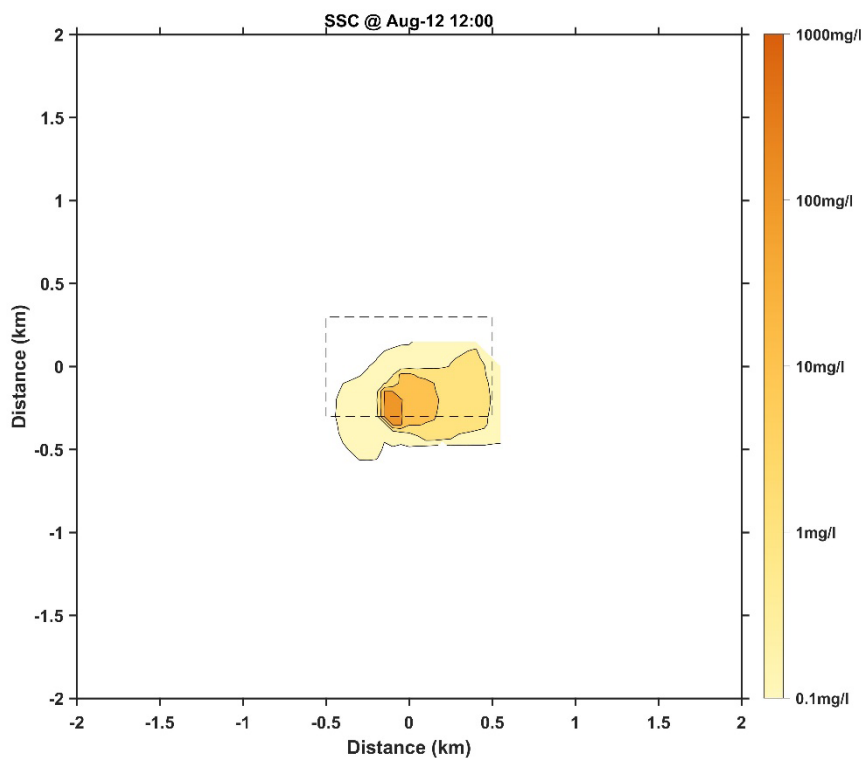


图 24 Case3 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

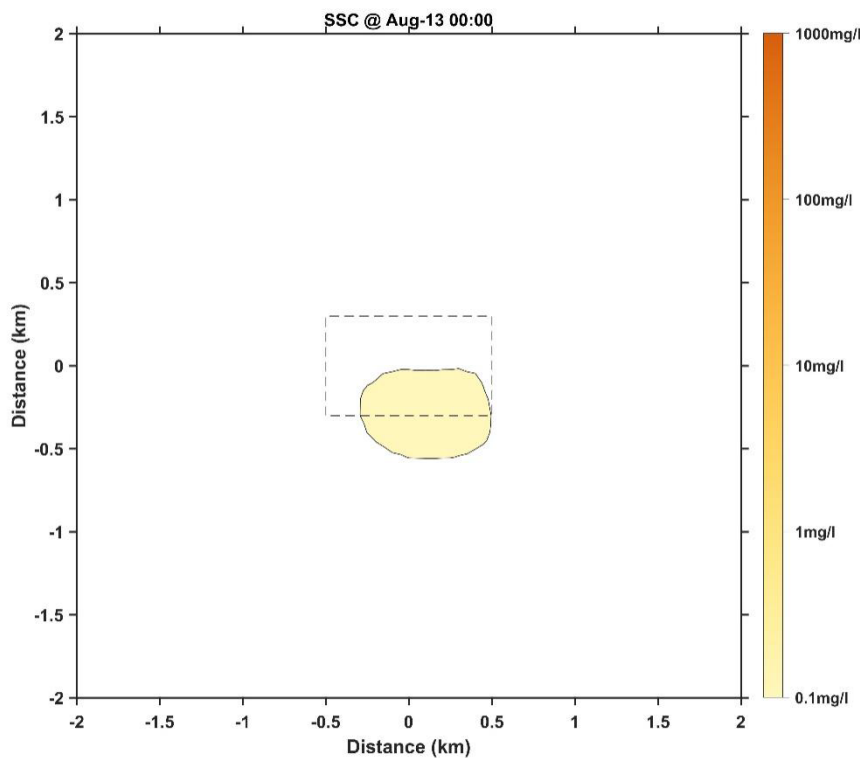


图 25 Case3 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

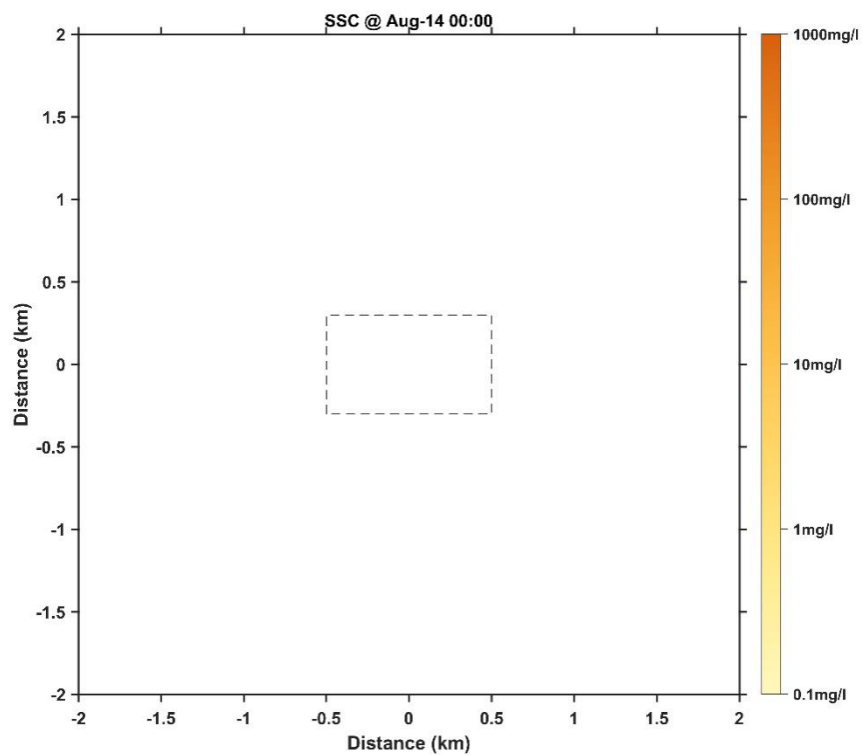


图 26 Case3 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

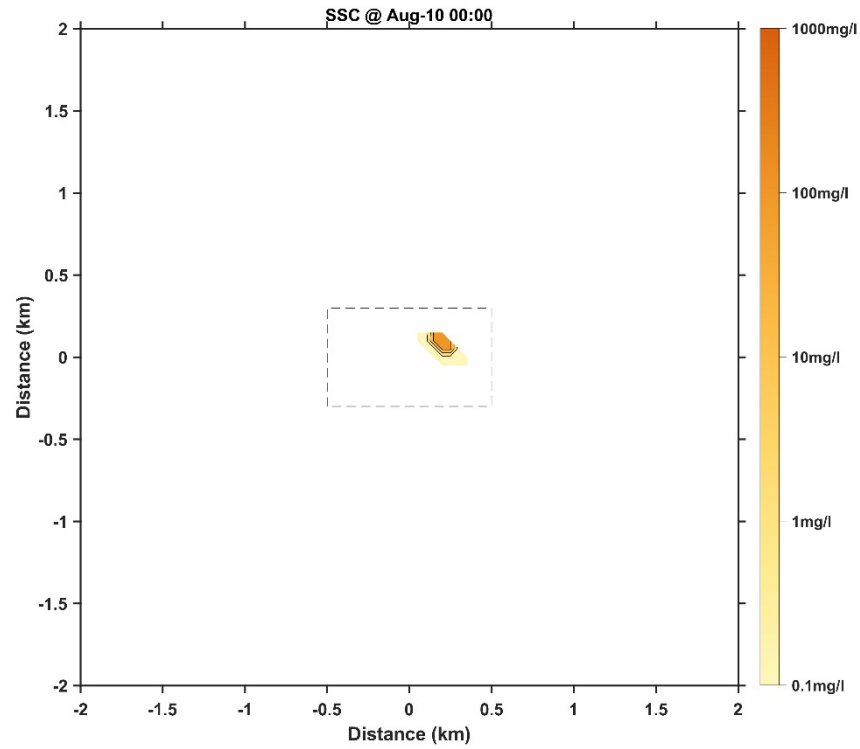


图 27 Case4 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

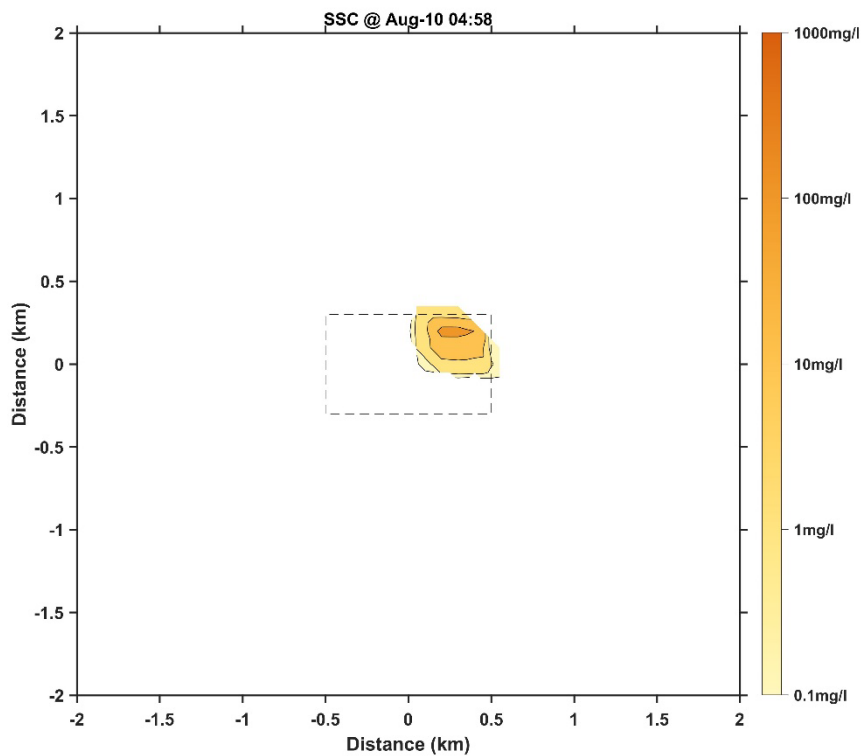


图 28 Case4 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

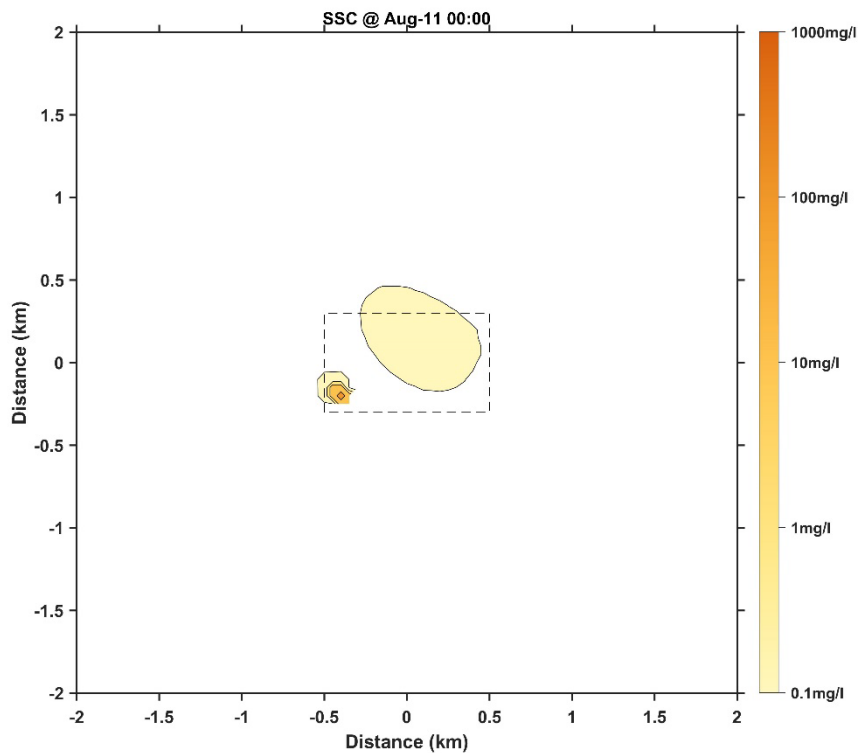


图 29 Case4 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

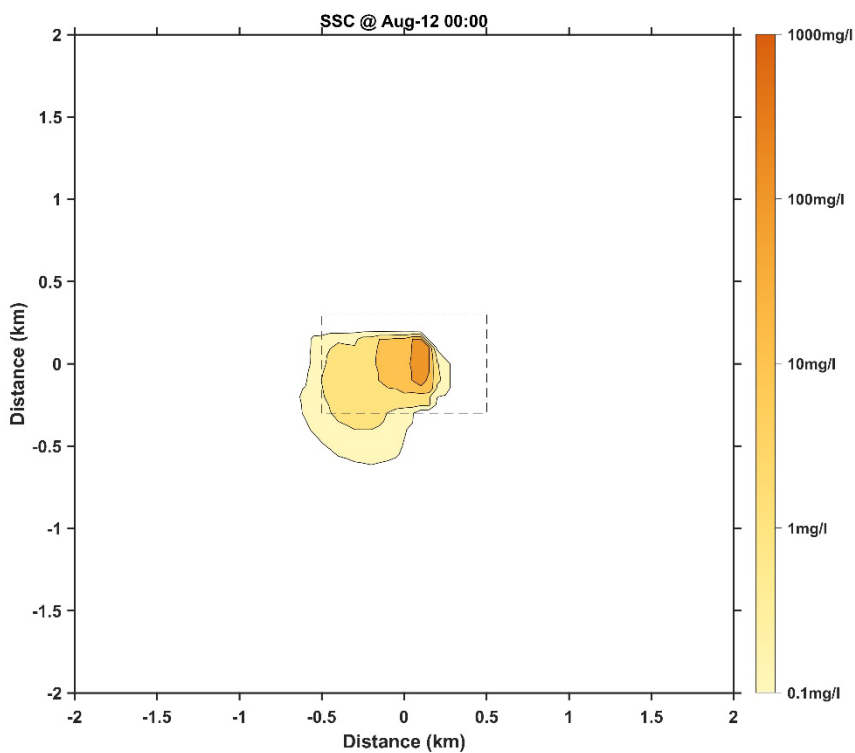


图 30 Case4 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

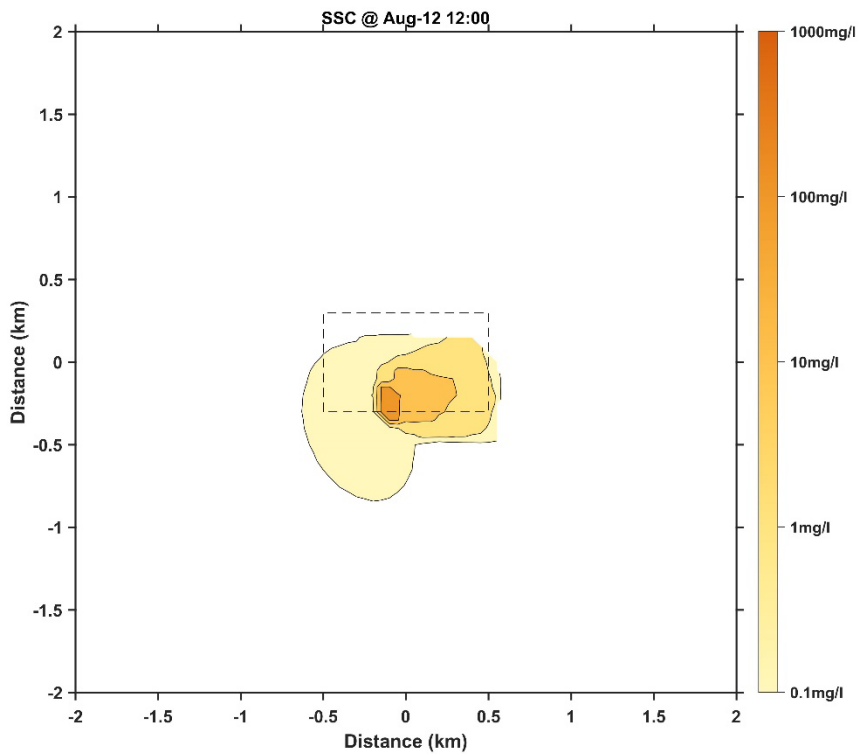


图 31 Case4 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

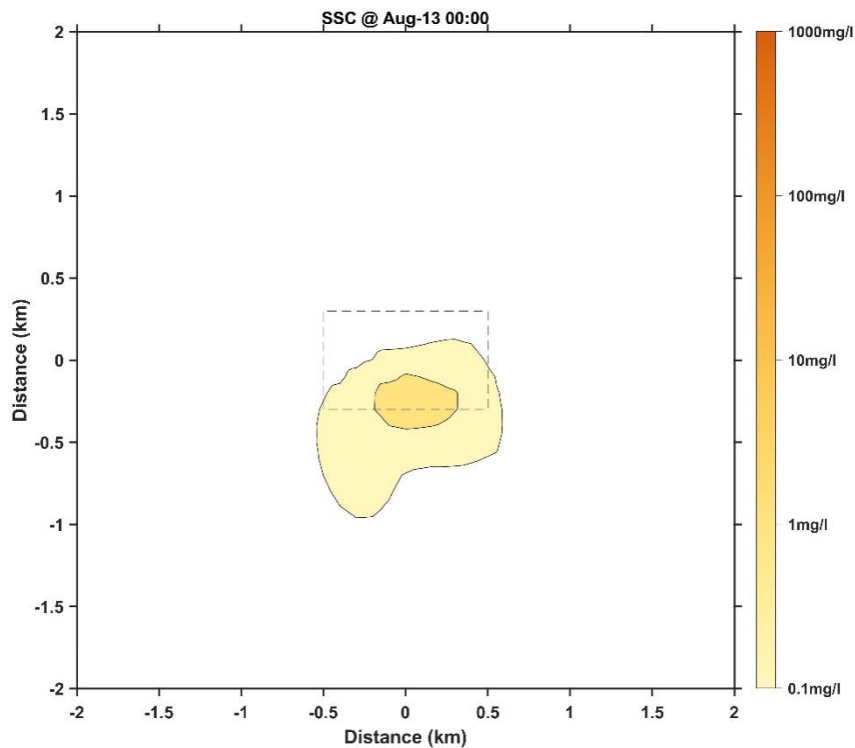


图 32 Case4 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

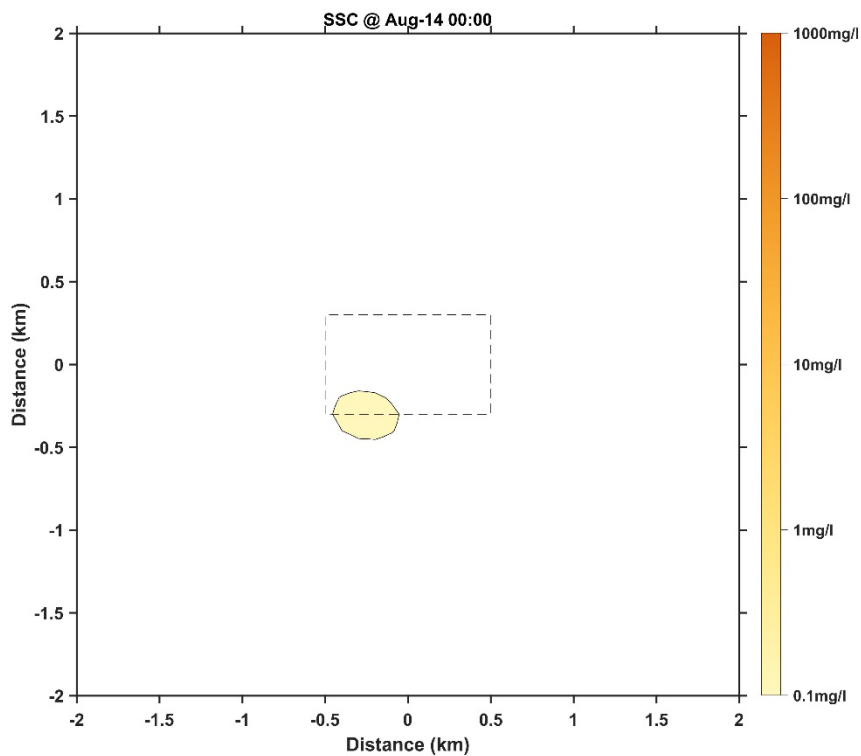


图 33 Case4 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

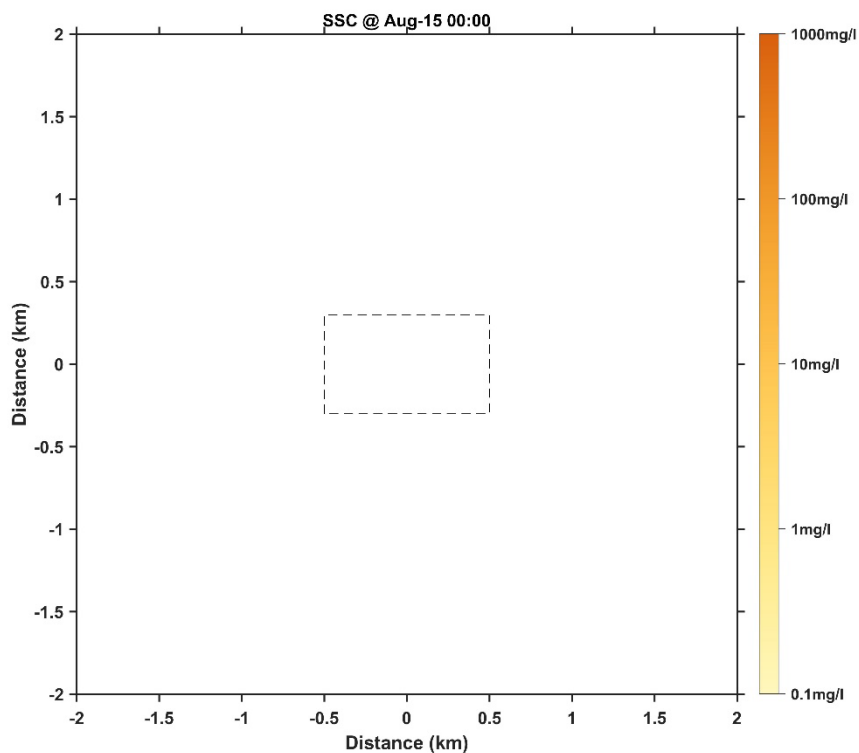


图 34 Case4 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

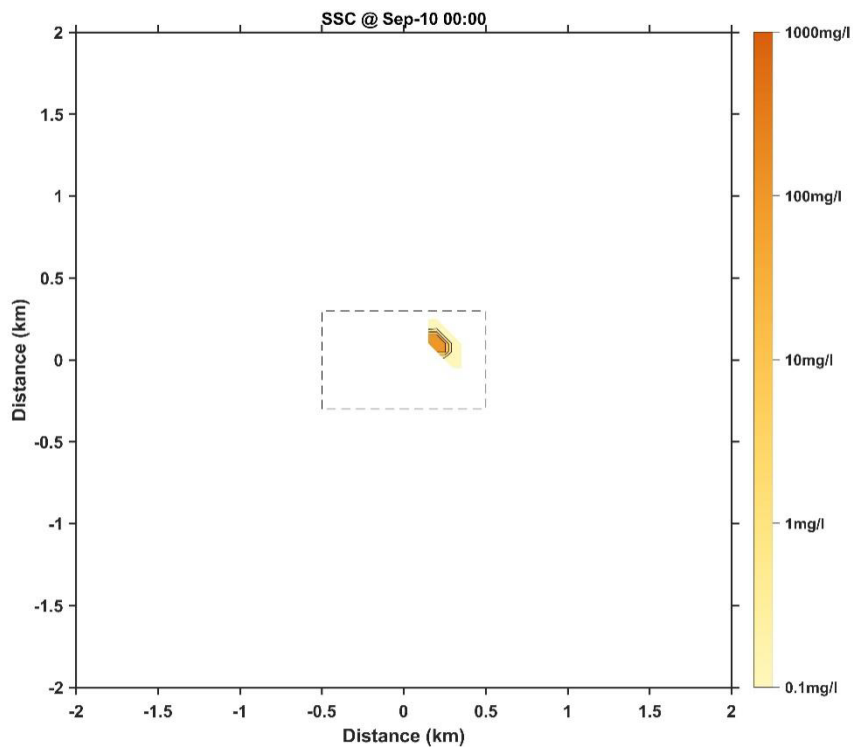


图 35 Case5 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

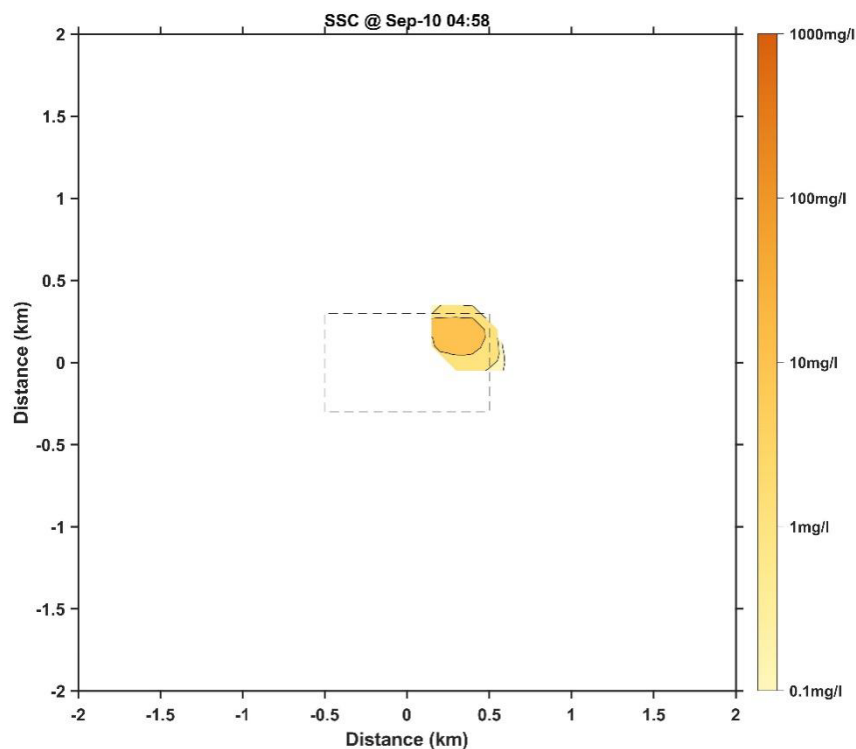


图 36 Case5 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

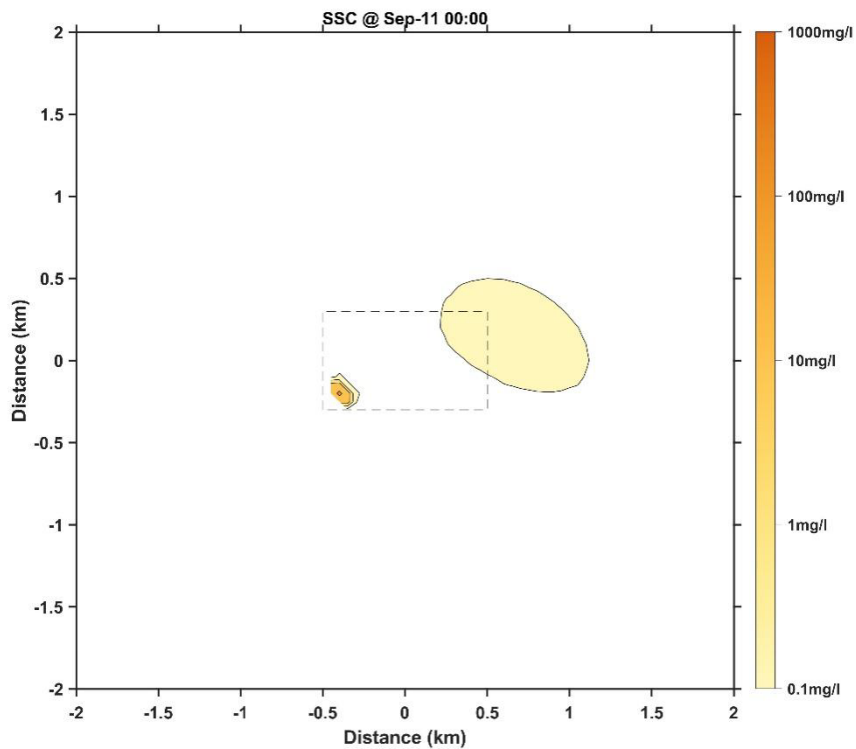


图 37 Case5 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

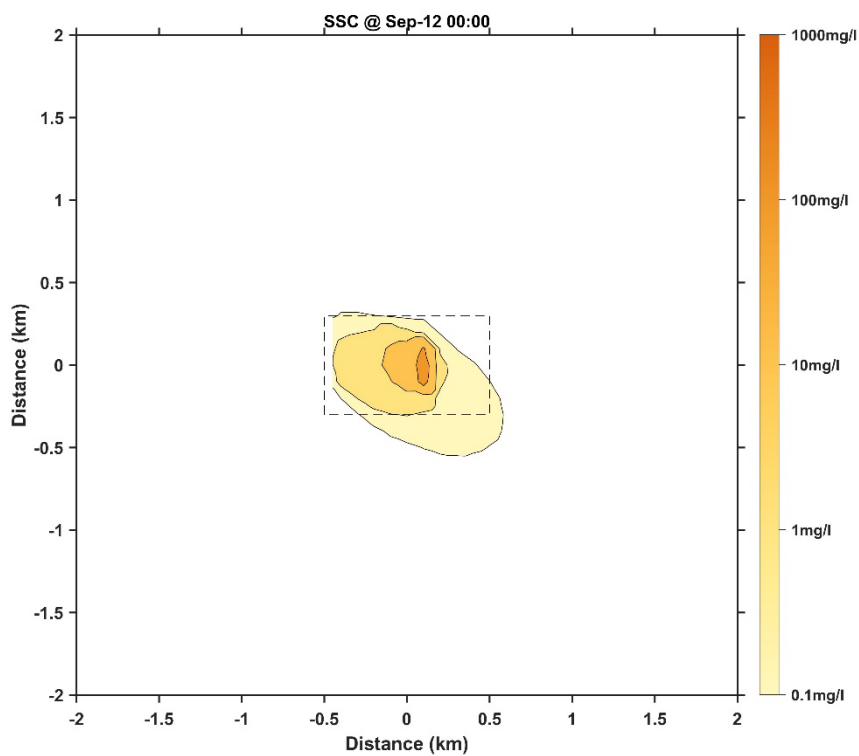


图 38 Case5 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

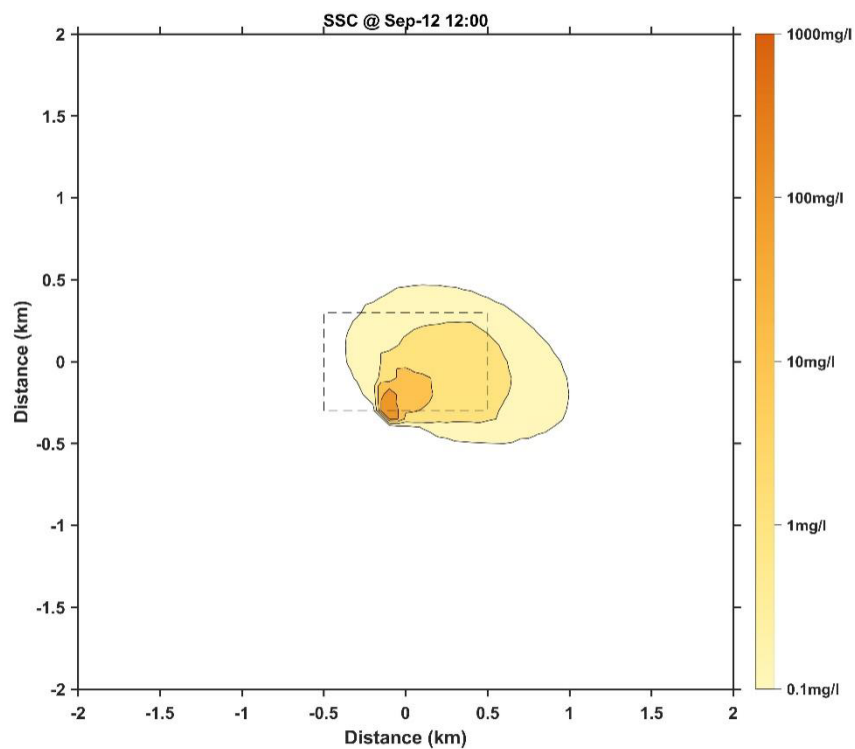


图 39 Case5 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

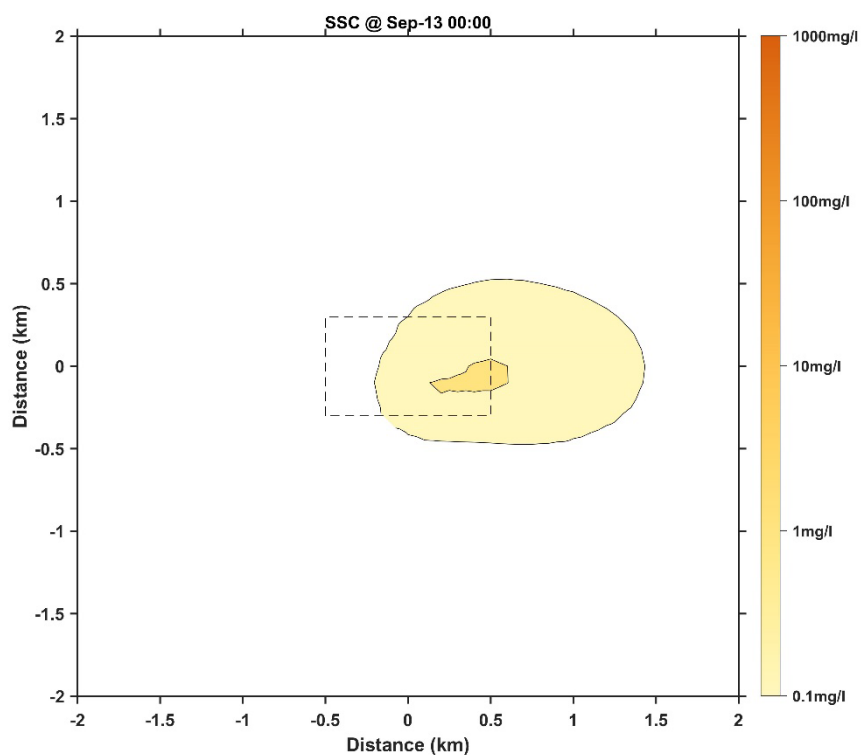


图 40 Case5 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

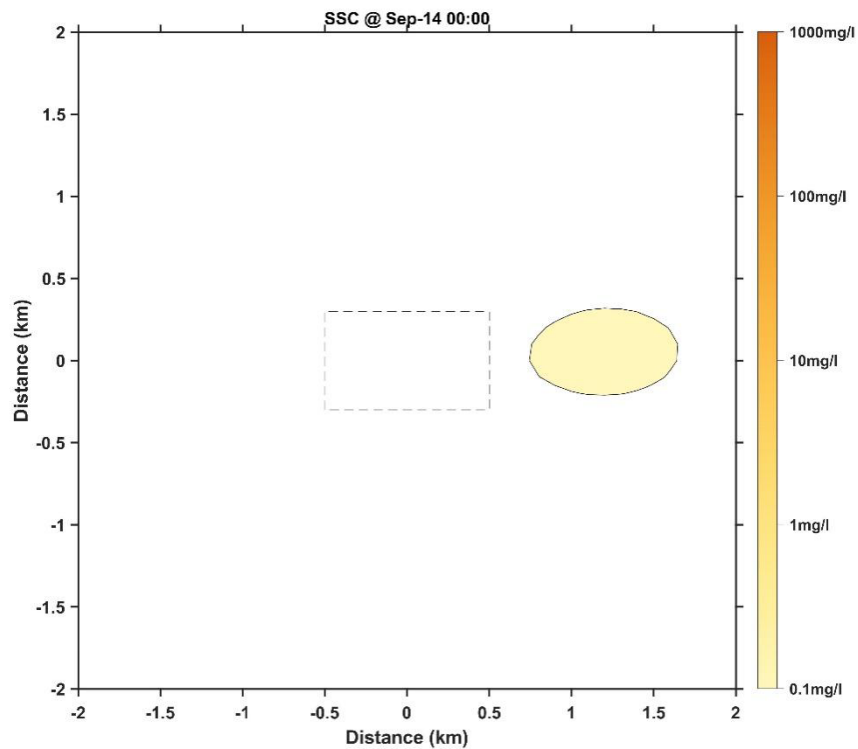


图 41 Case5 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

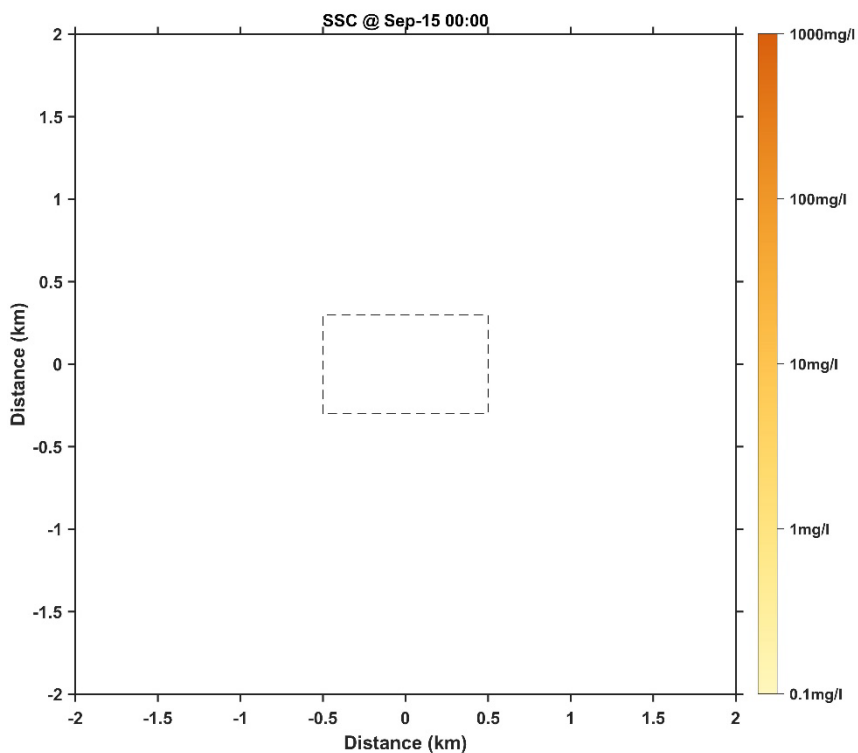


图 42 Case5 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

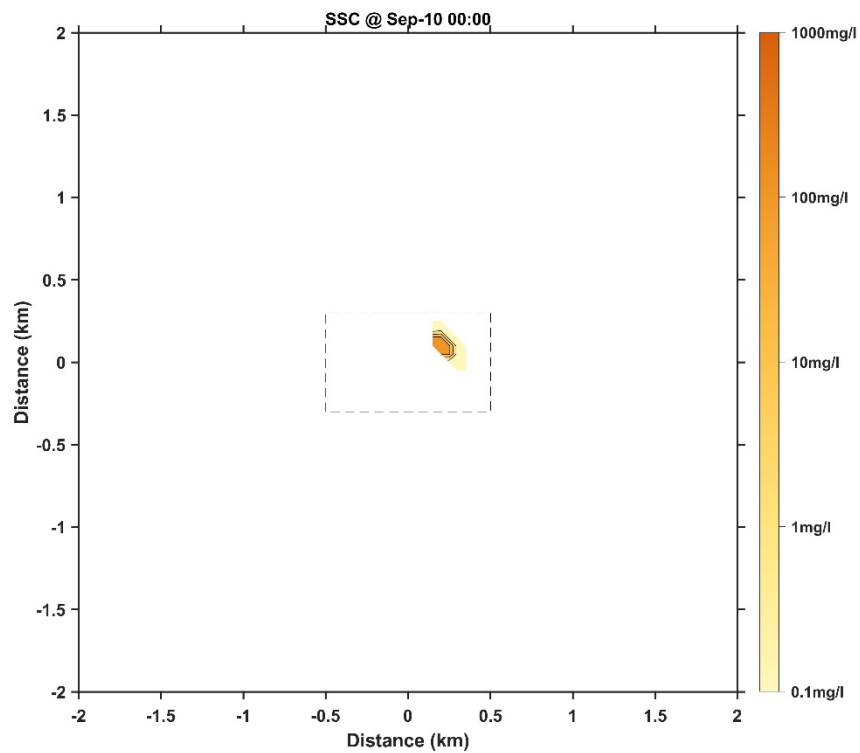


图 43 Case6 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

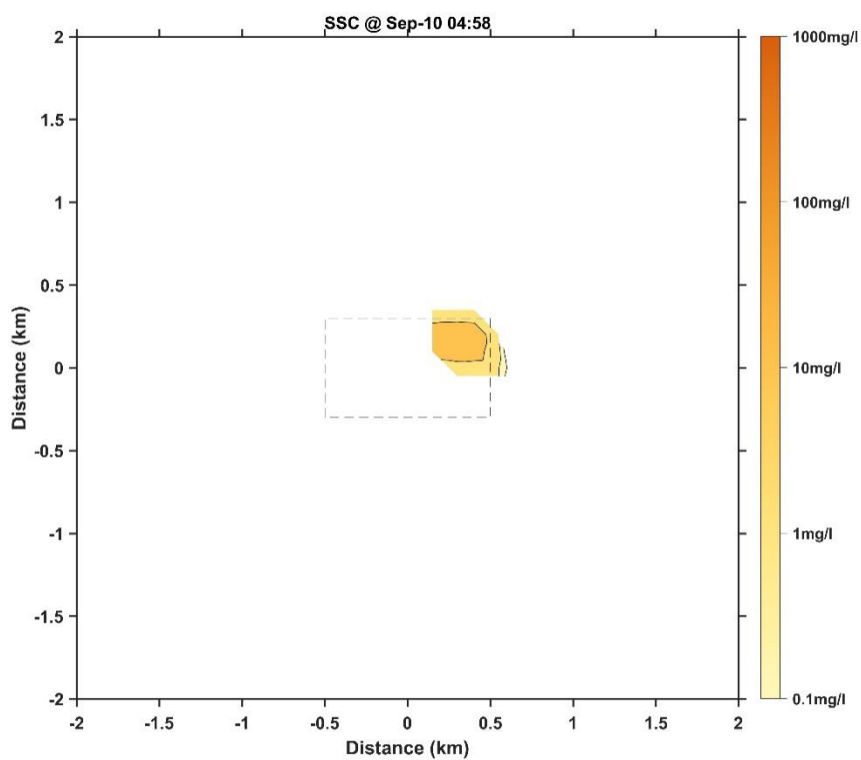


图 44 Case6 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

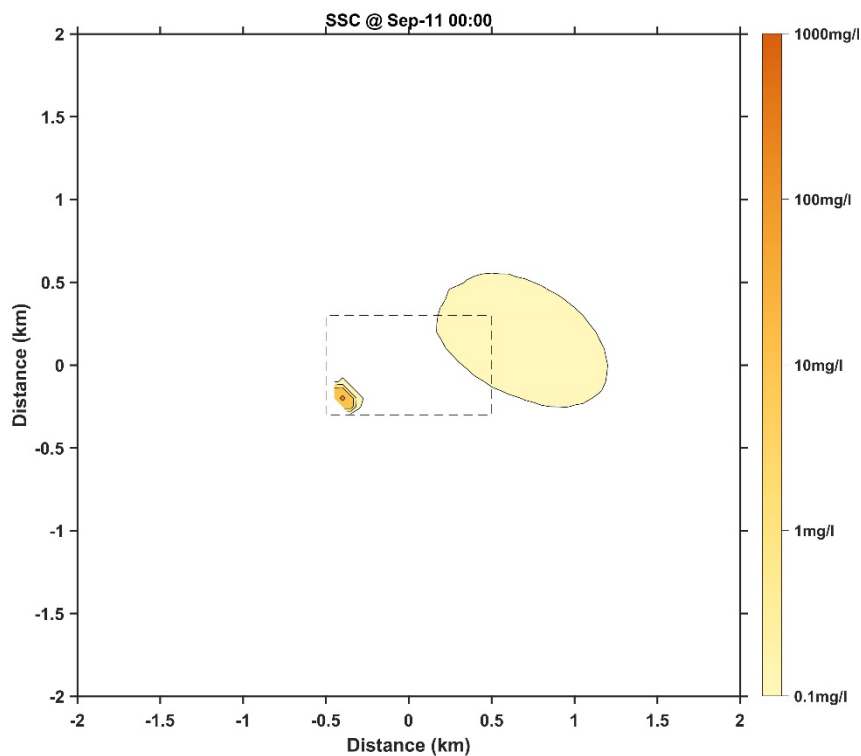


图 45 Case6 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

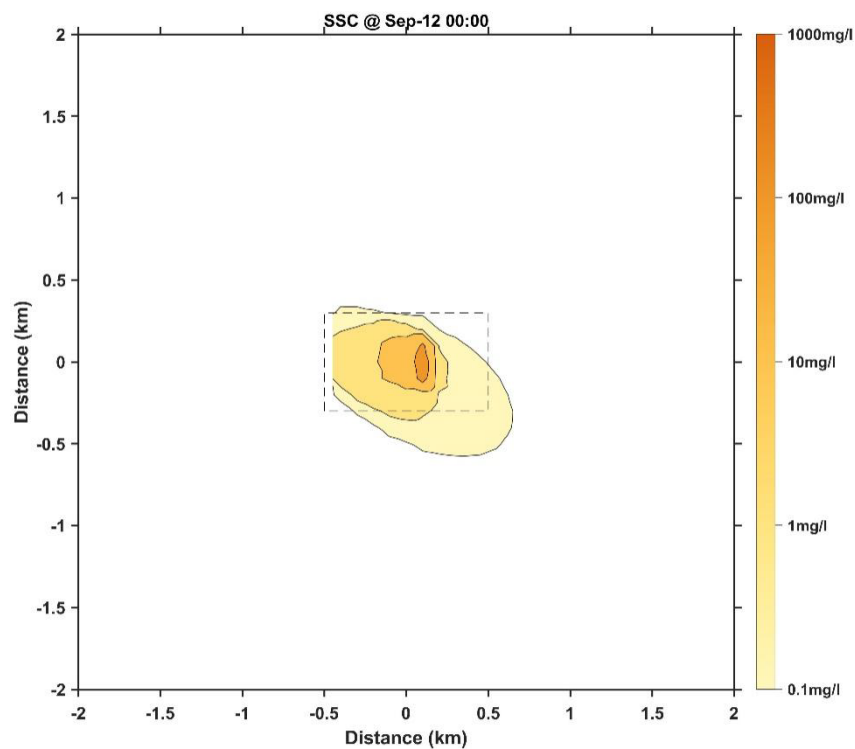


图 46 Case6 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

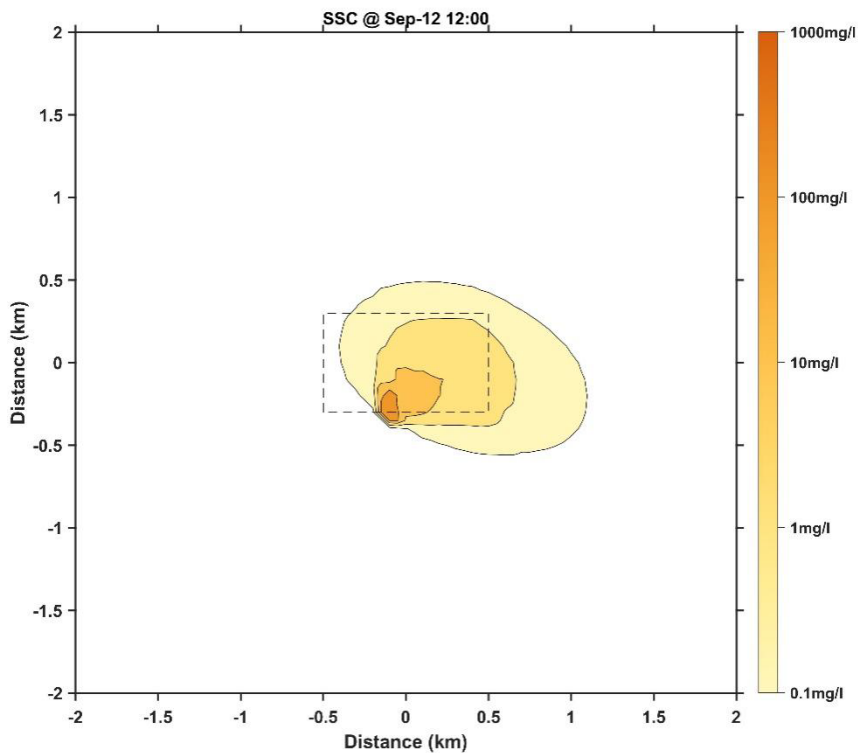


图 47 Case6 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

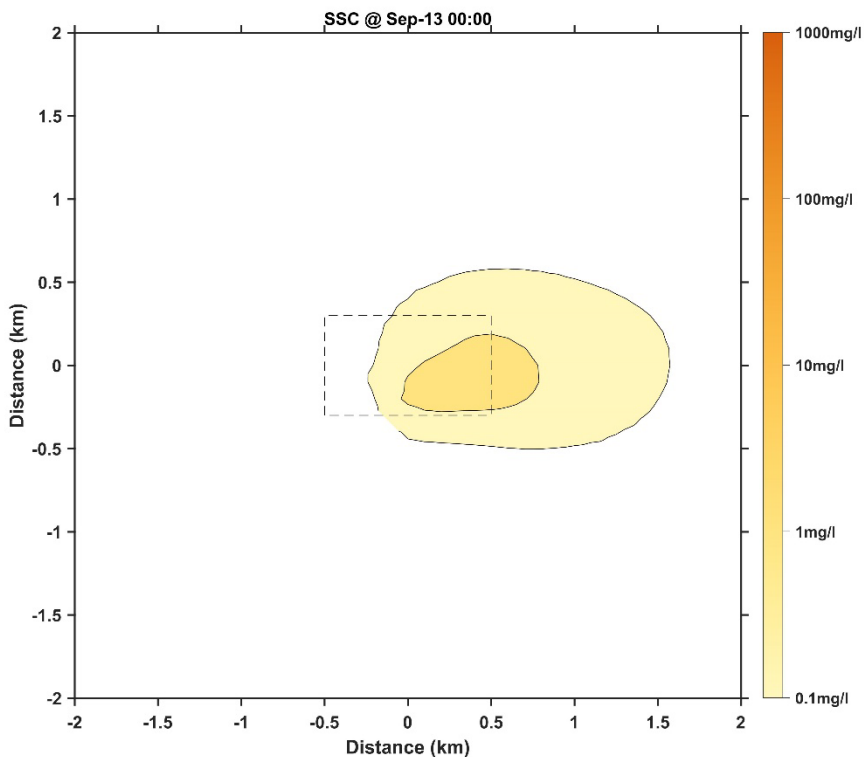


图 48 Case6 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

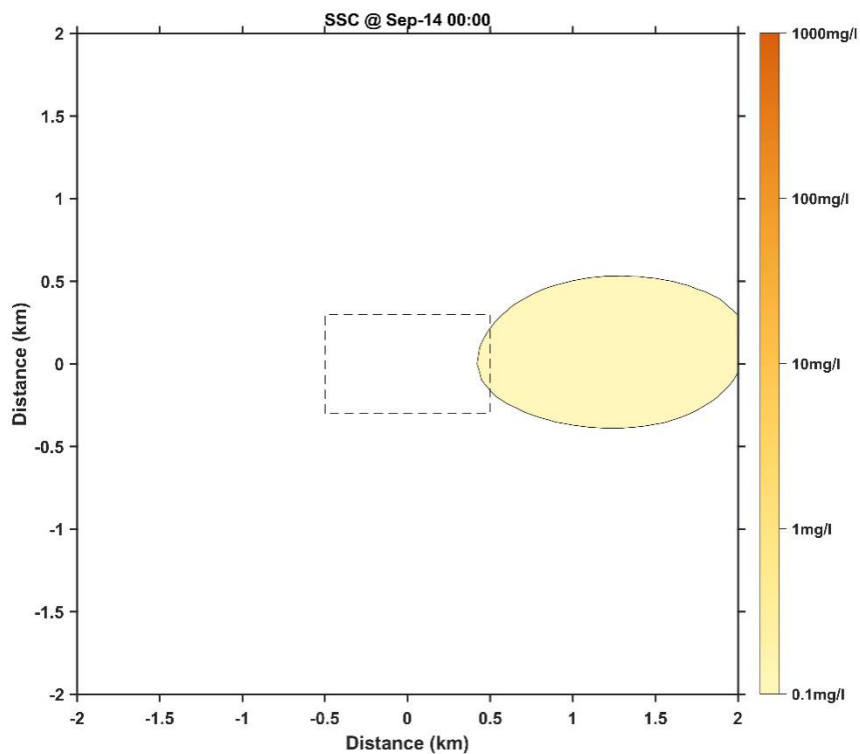


图 49 Case6 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

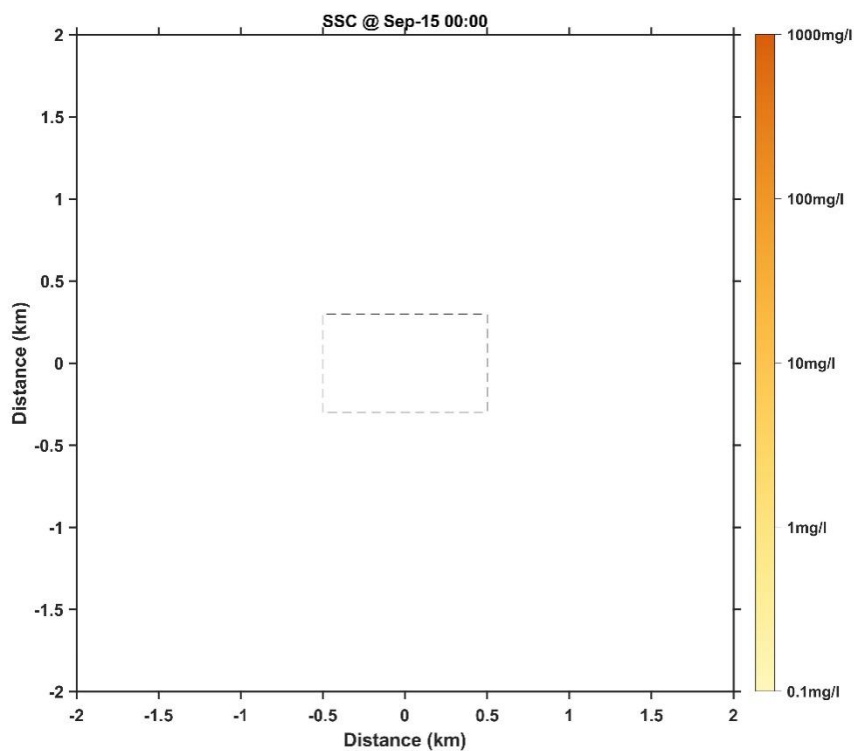


图 50 Case6 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

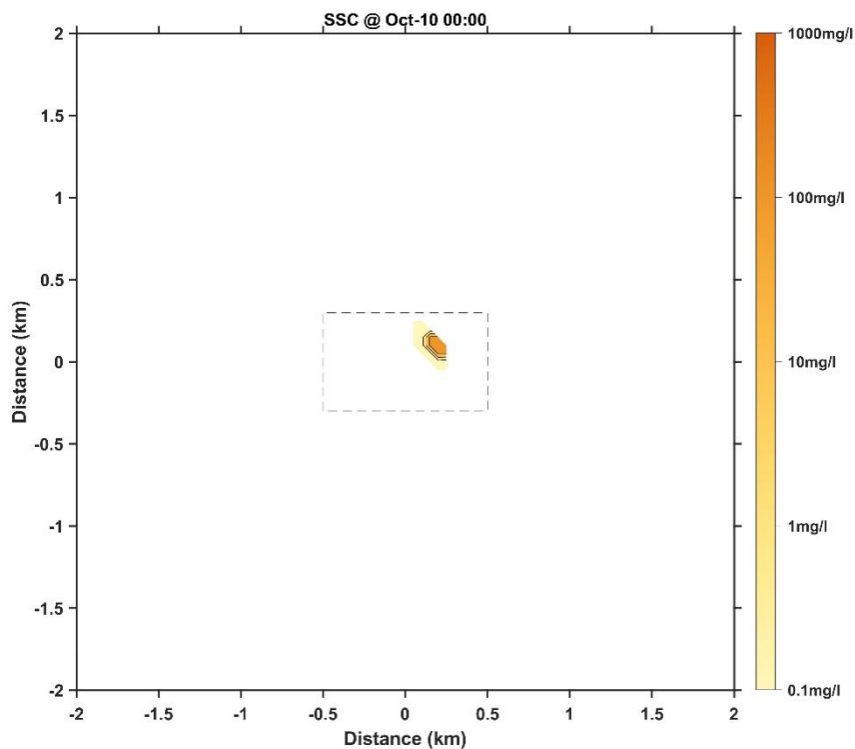


图 51 Case7 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

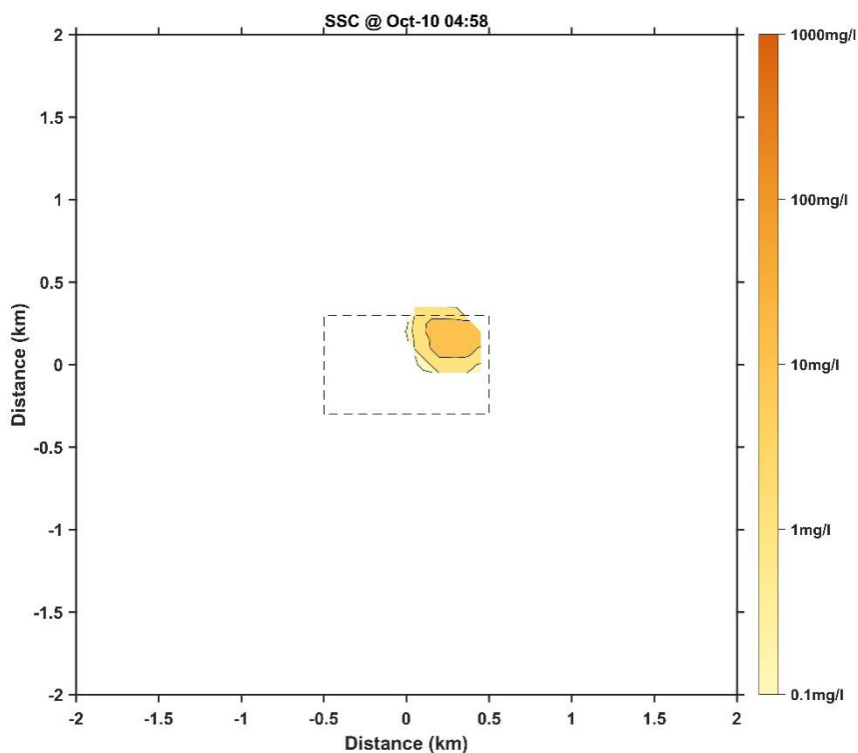


图 52 Case7 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

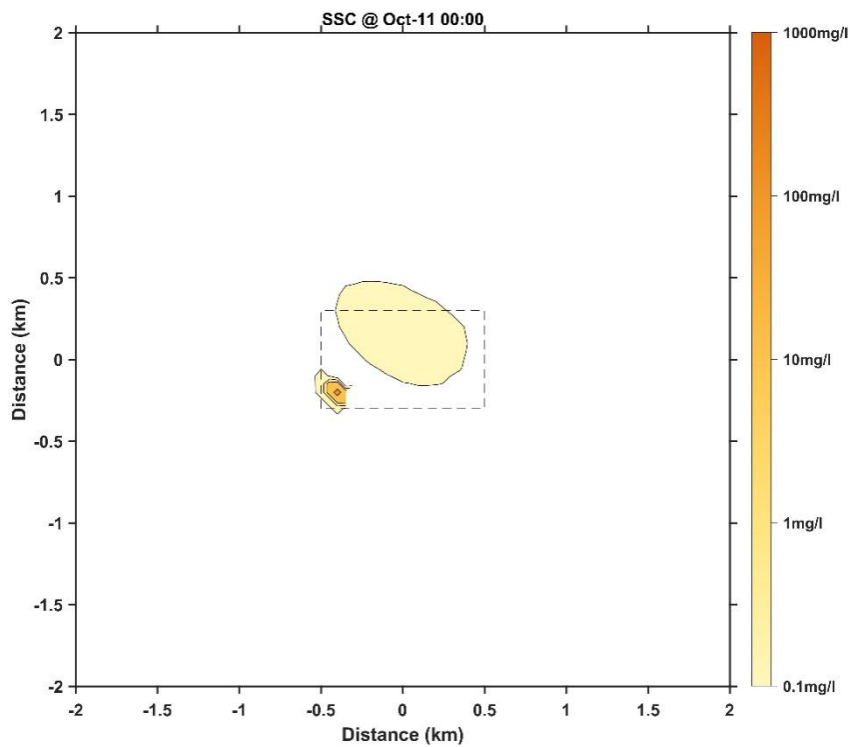


图 53 Case7 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

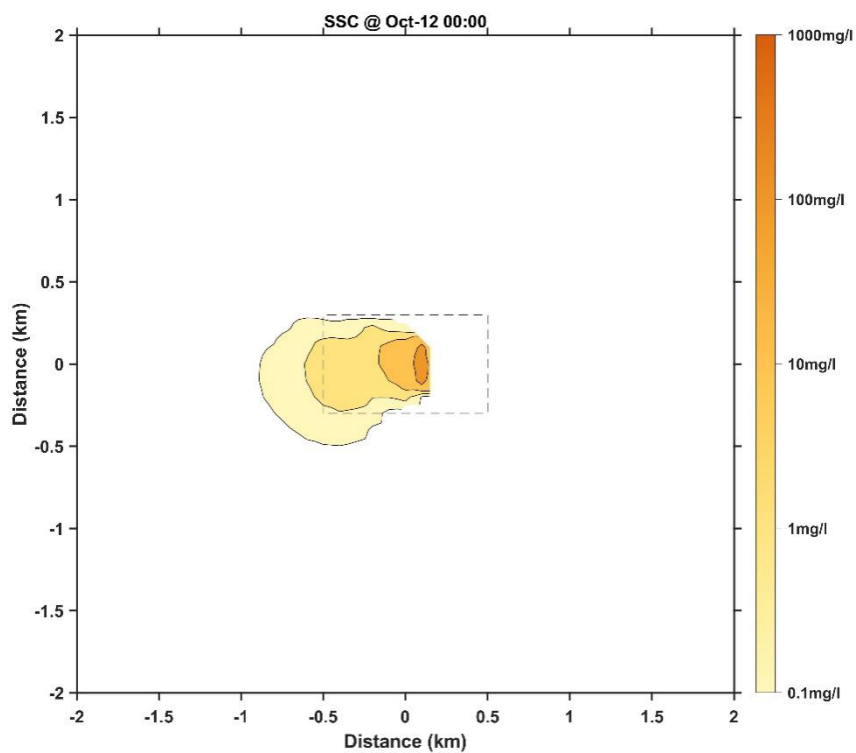


图 54 Case7 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

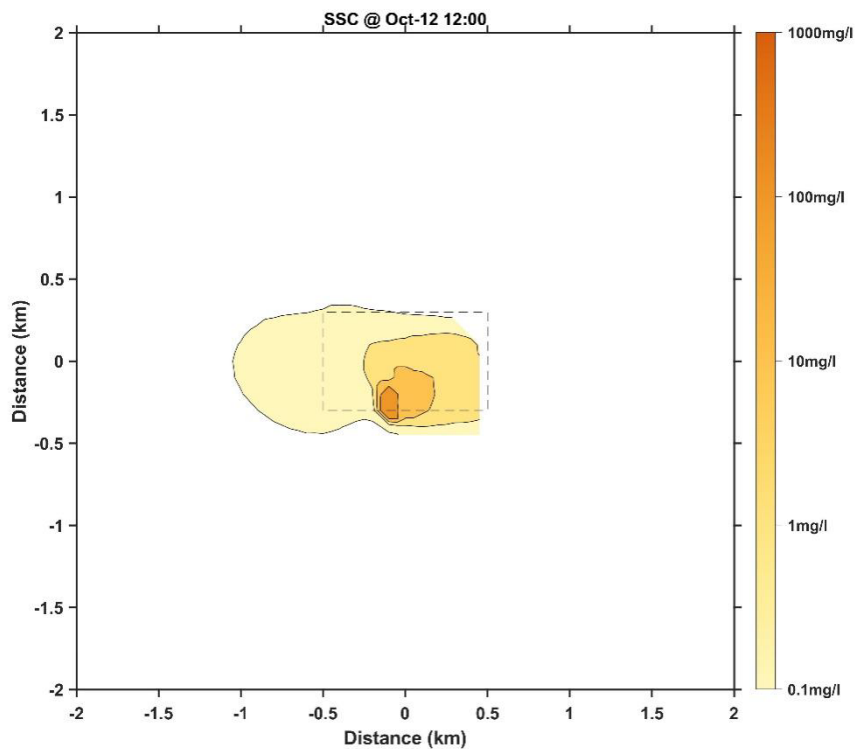


图 55 Case7 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

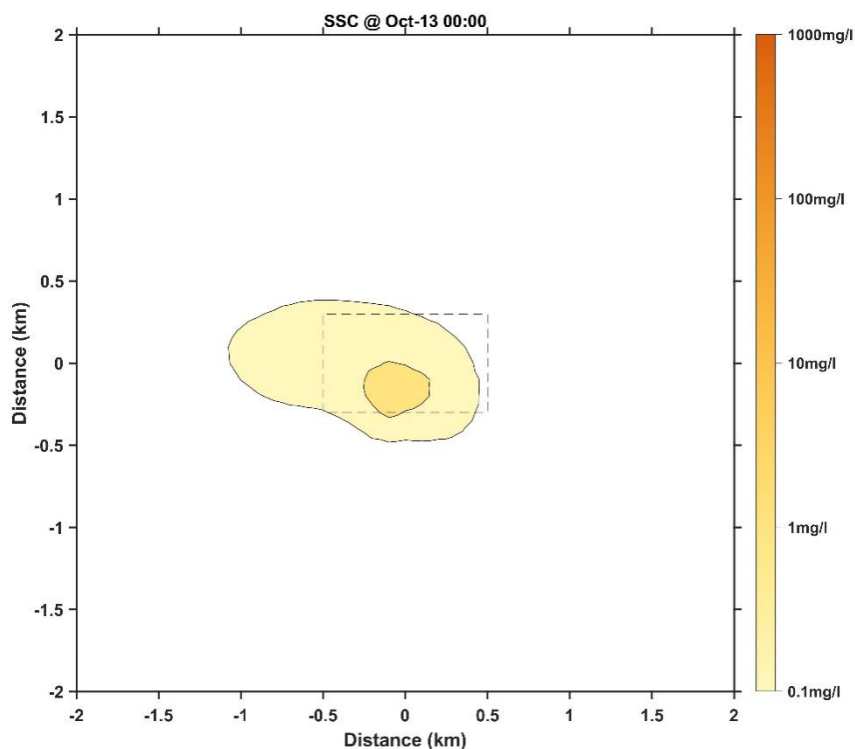


图 56 Case7 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

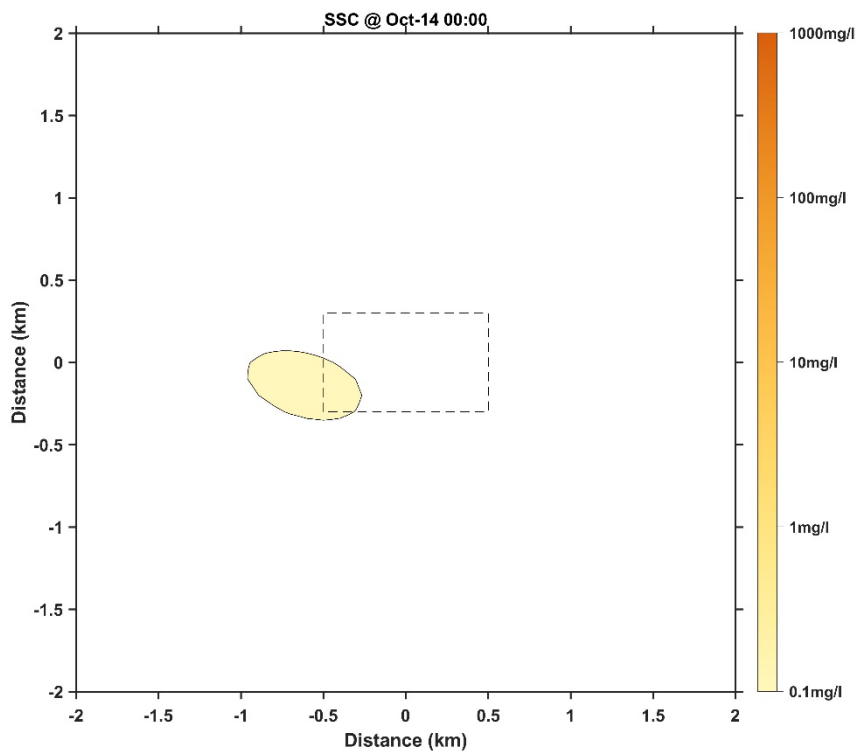


图 57 Case7 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

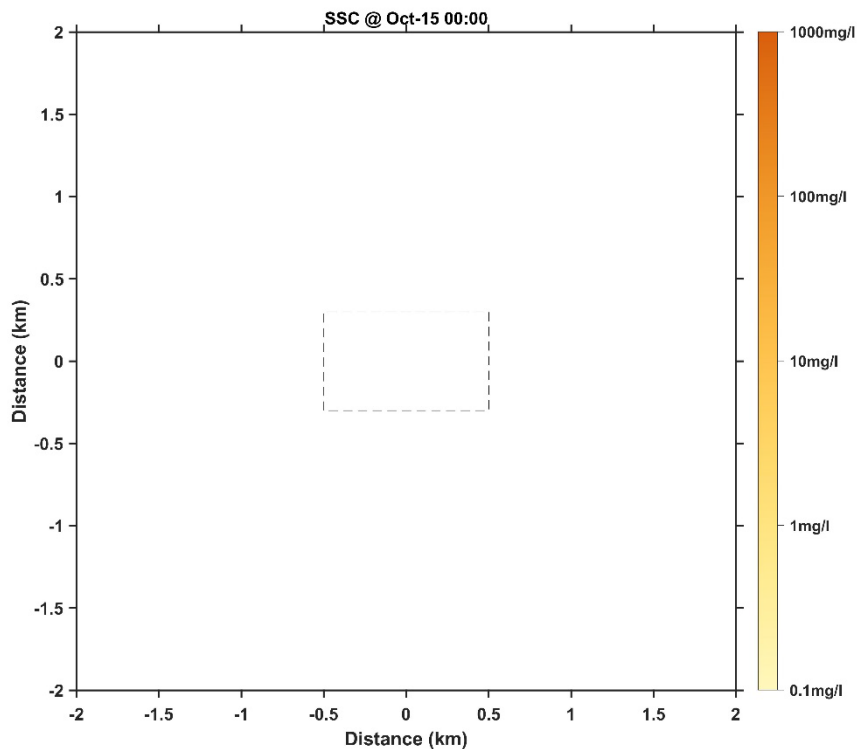


图 58 Case7 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

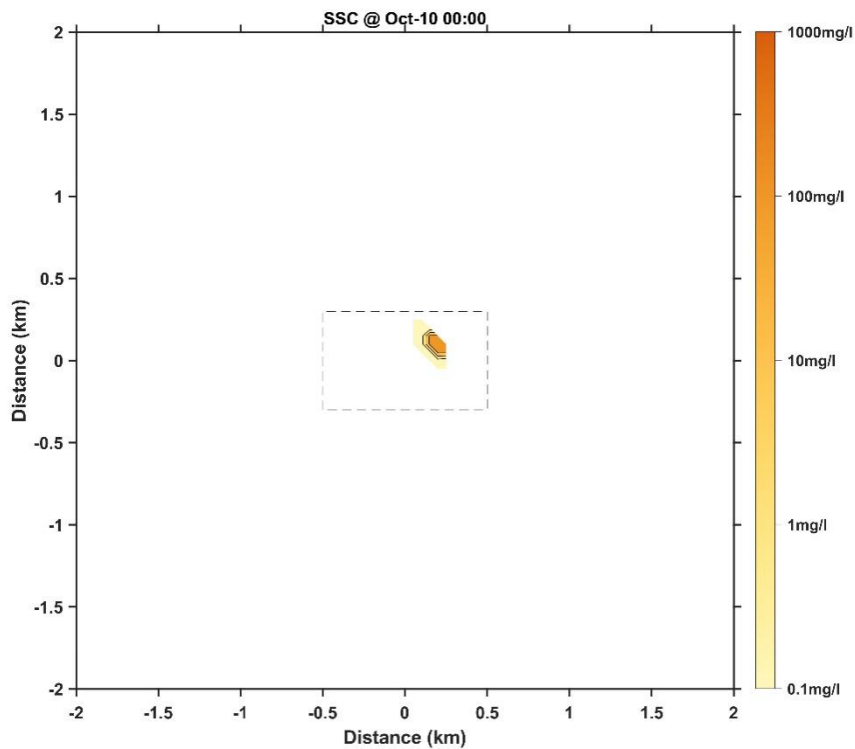


图 59 Case8 第一次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

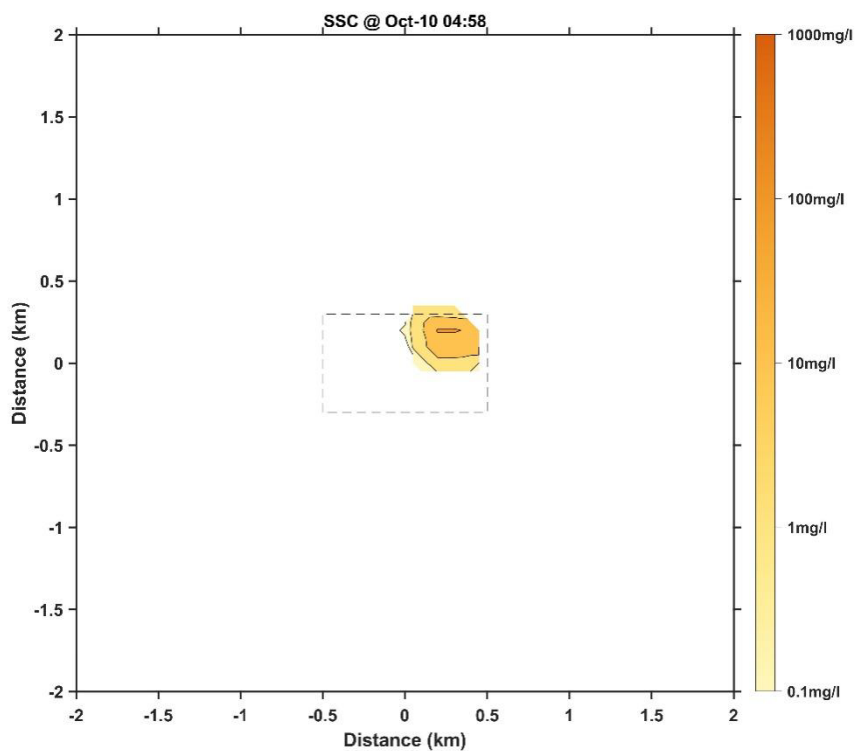


图 60 Case8 第一次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

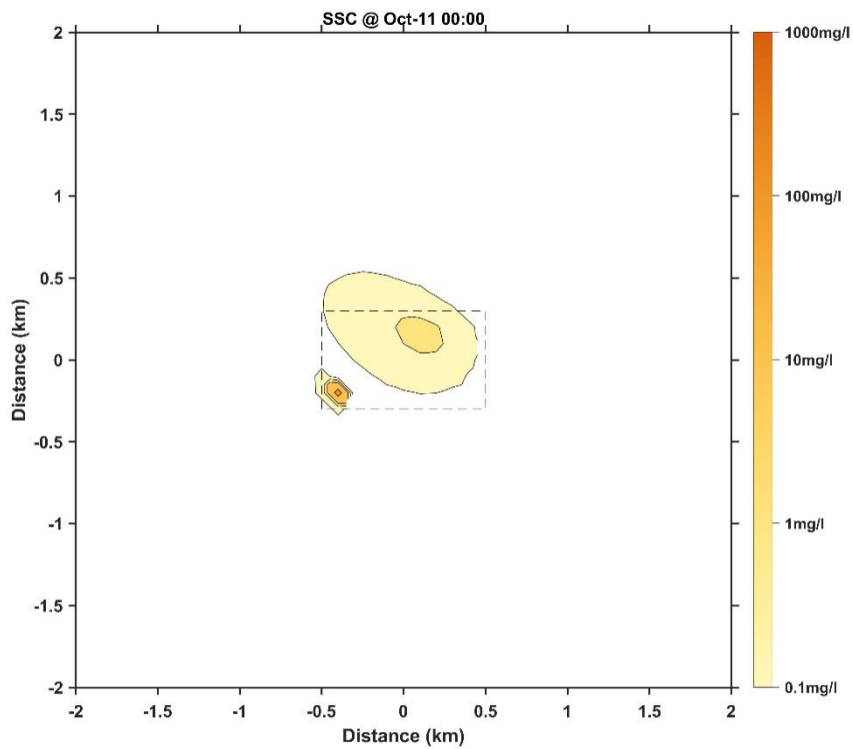


图 61 Case8 第二次采集试验开始时底层悬浮泥沙浓度分布图

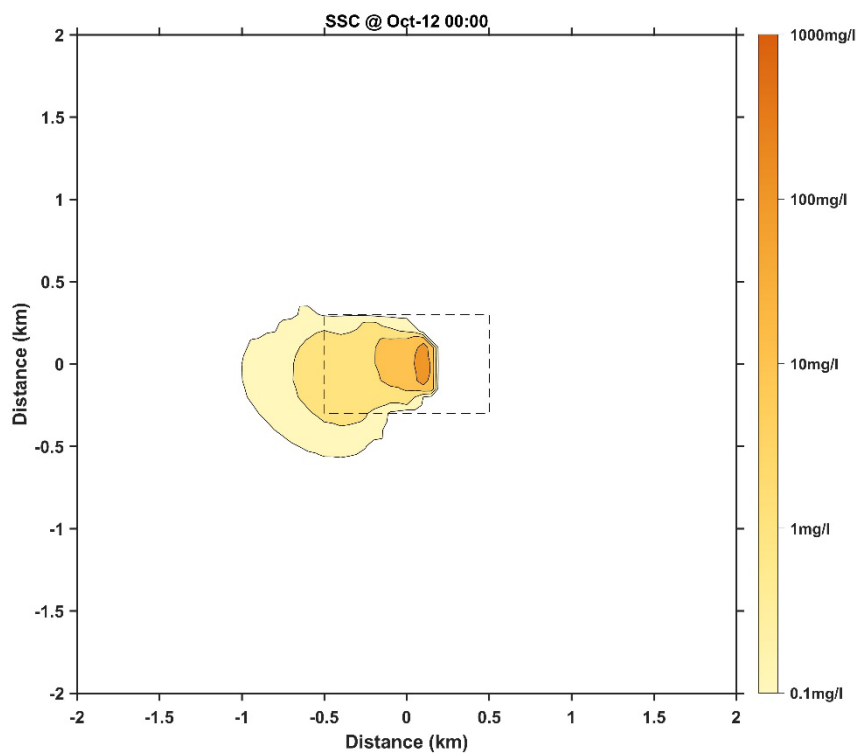


图 62 Case8 开始采集试验后第 2 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

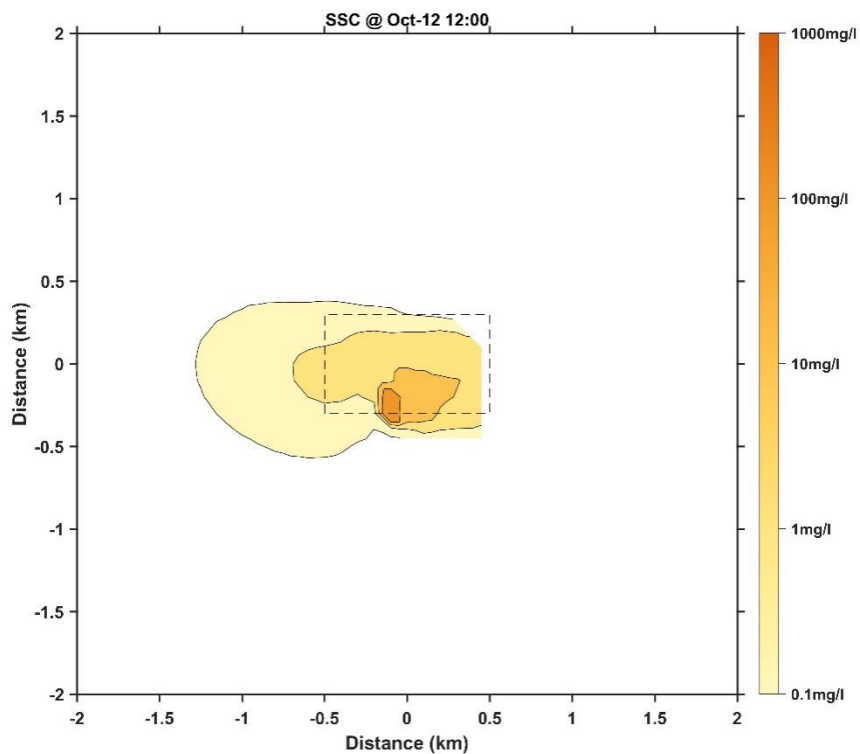


图 63 Case8 第二次采集试验结束时底层悬浮泥沙浓度分布图

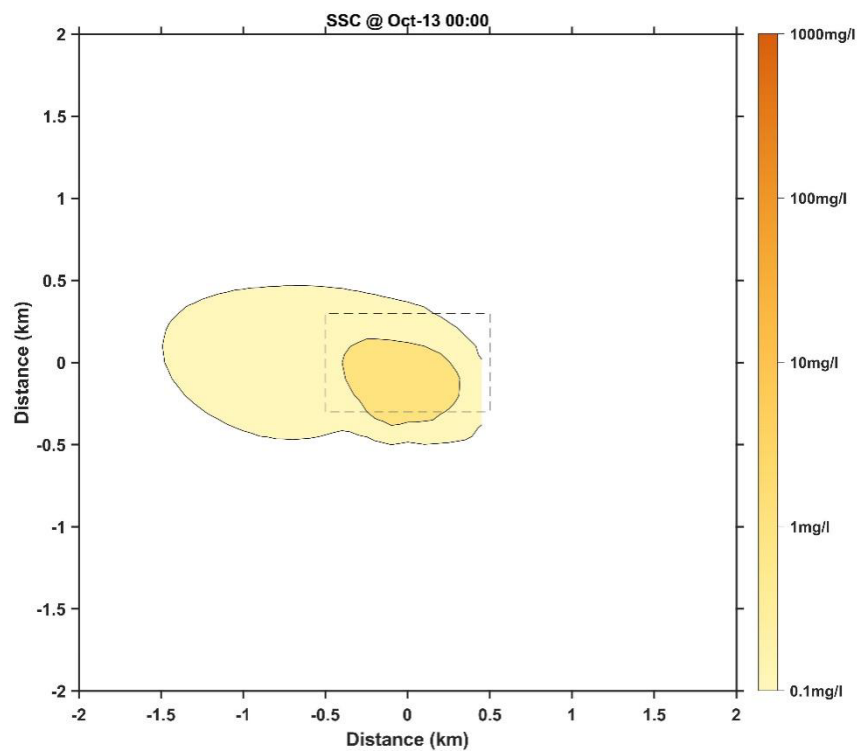


图 64 Case8 开始采集试验后第 3 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

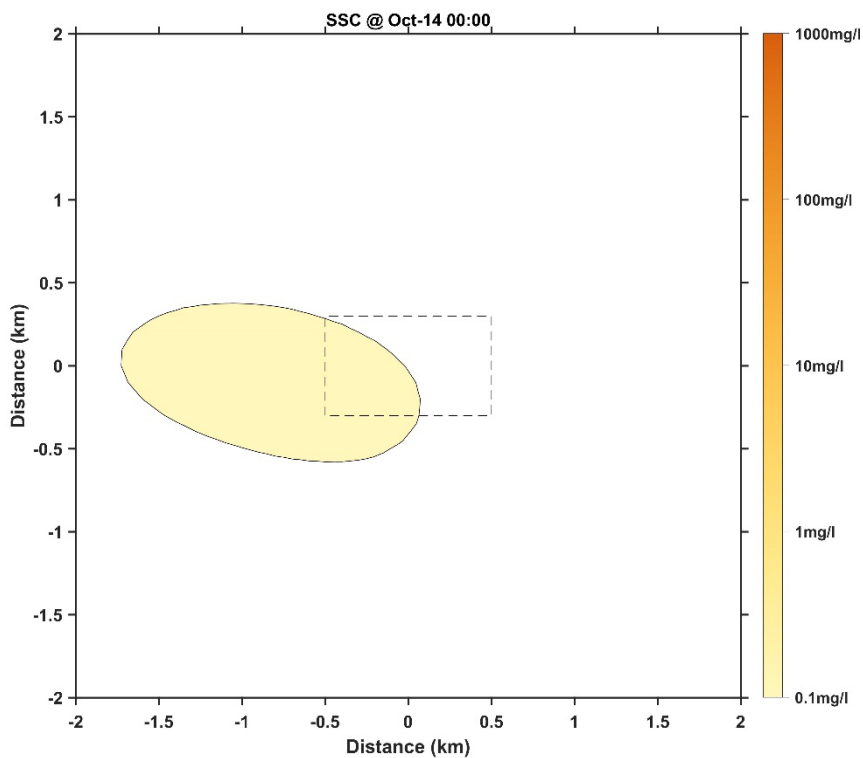


图 65 Case8 开始采集试验后第 4 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

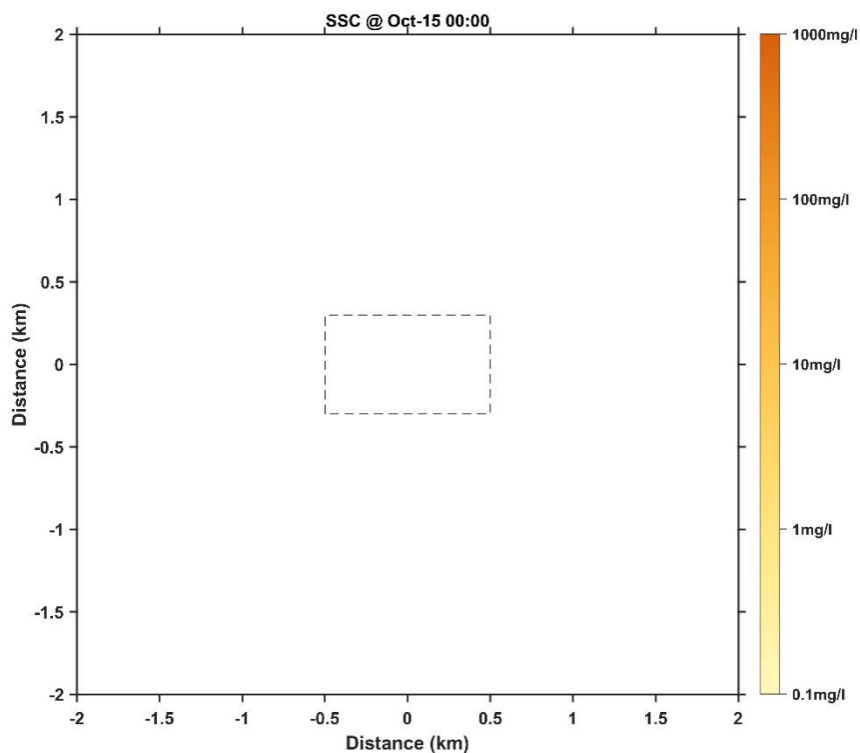


图 66 Case8 开始采集试验后第 5 天时底层悬浮泥沙浓度分布图

3.2 悬浮泥沙浓度垂向分布

图 67-图 74 为位于 CTA 中心点的悬浮泥沙浓度垂向分布特征。由图可知，

图 67 Case1 悬浮泥沙浓度垂向分布图

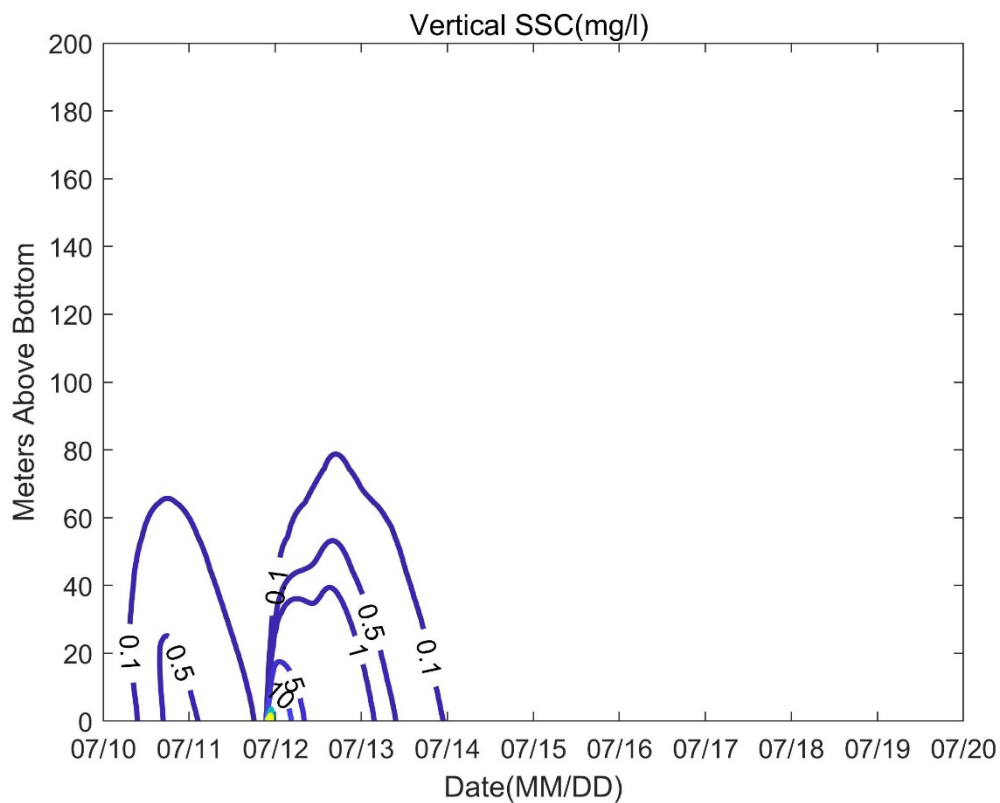


图 68 Case2 悬浮泥沙浓度垂向分布图

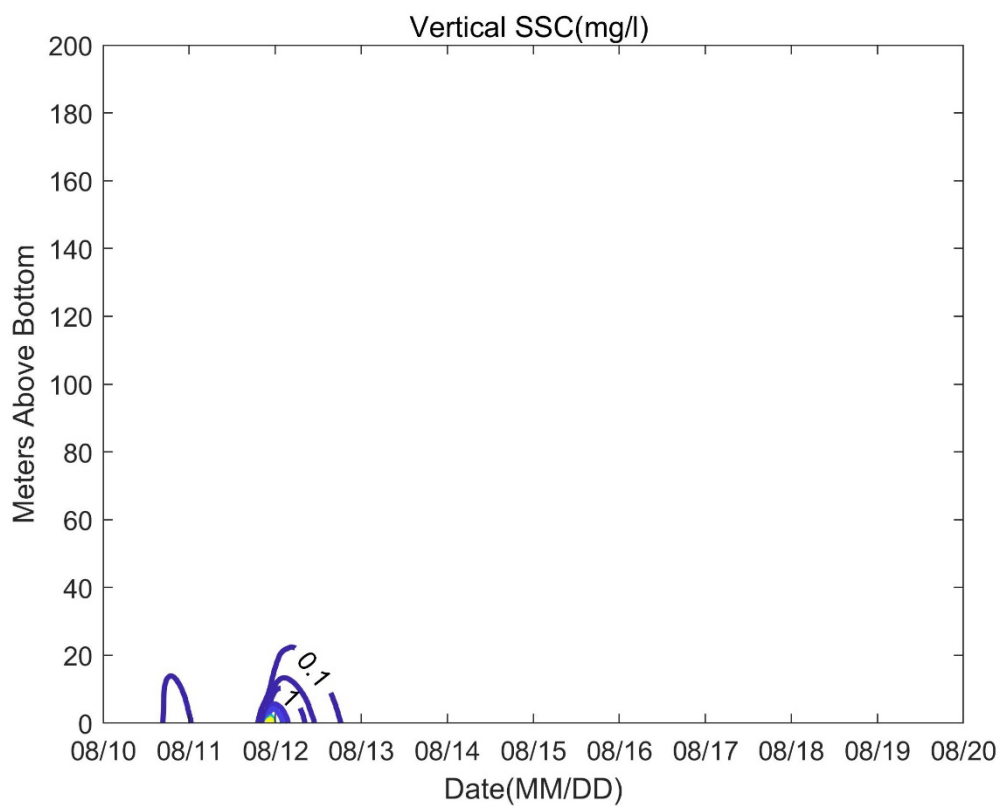


图 69 Case3 悬浮泥沙浓度垂向分布图

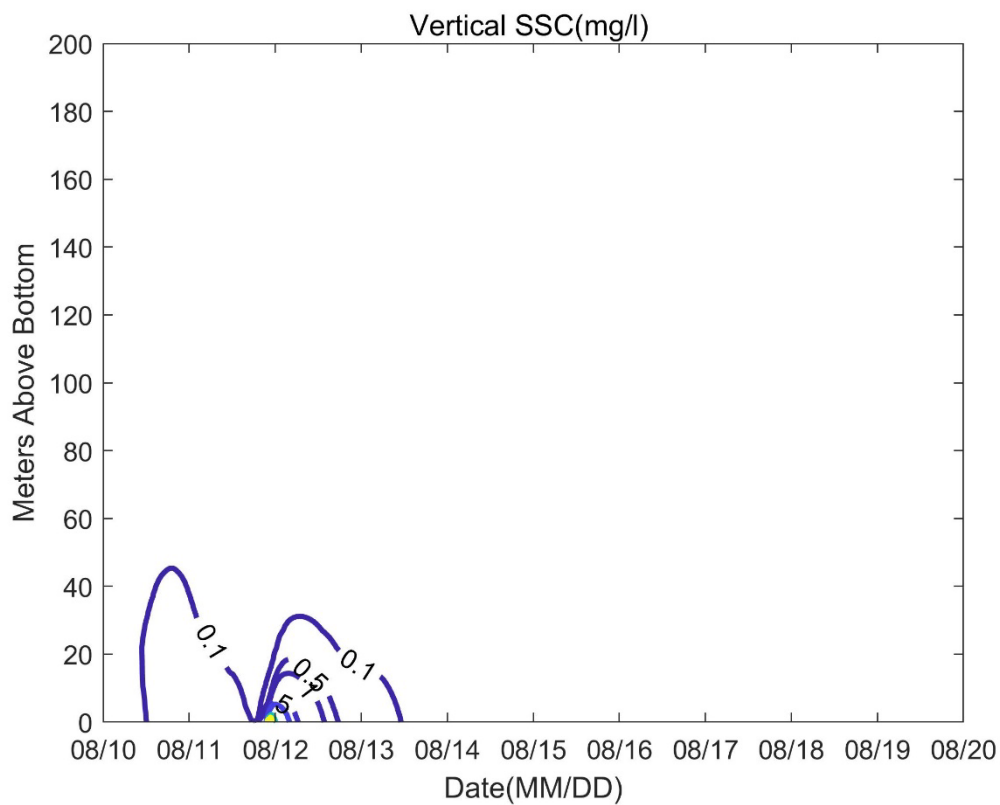


图 70 Case4 悬浮泥沙浓度垂向分布图

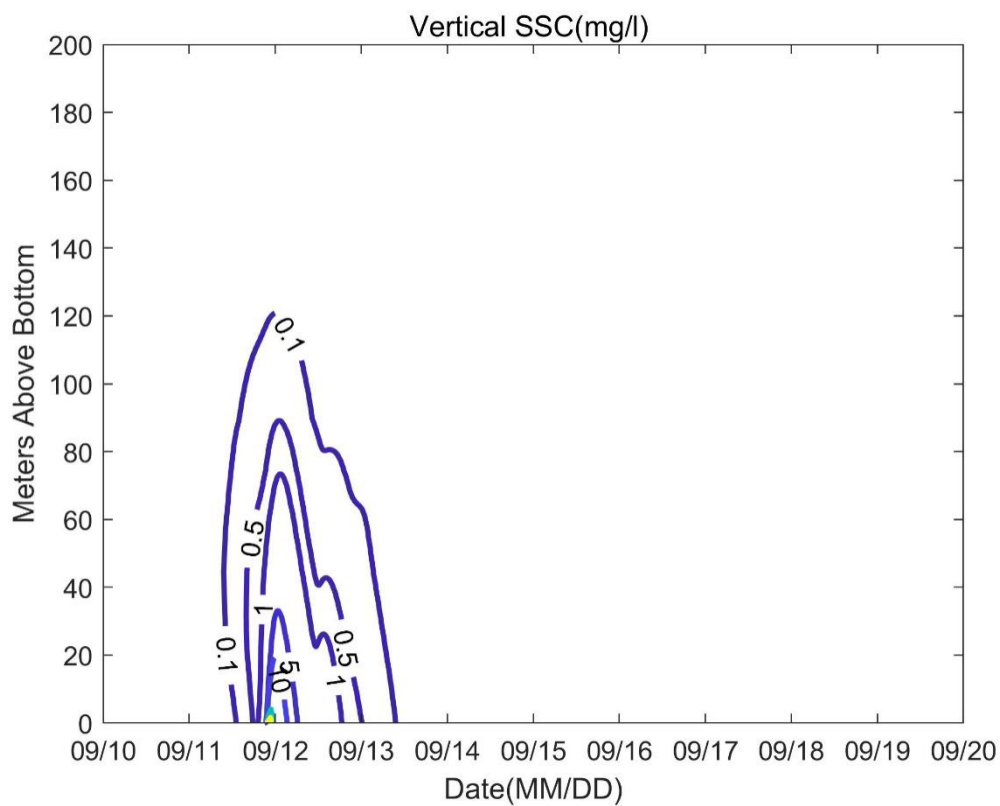


图 71 Case5 悬浮泥沙浓度垂向分布图

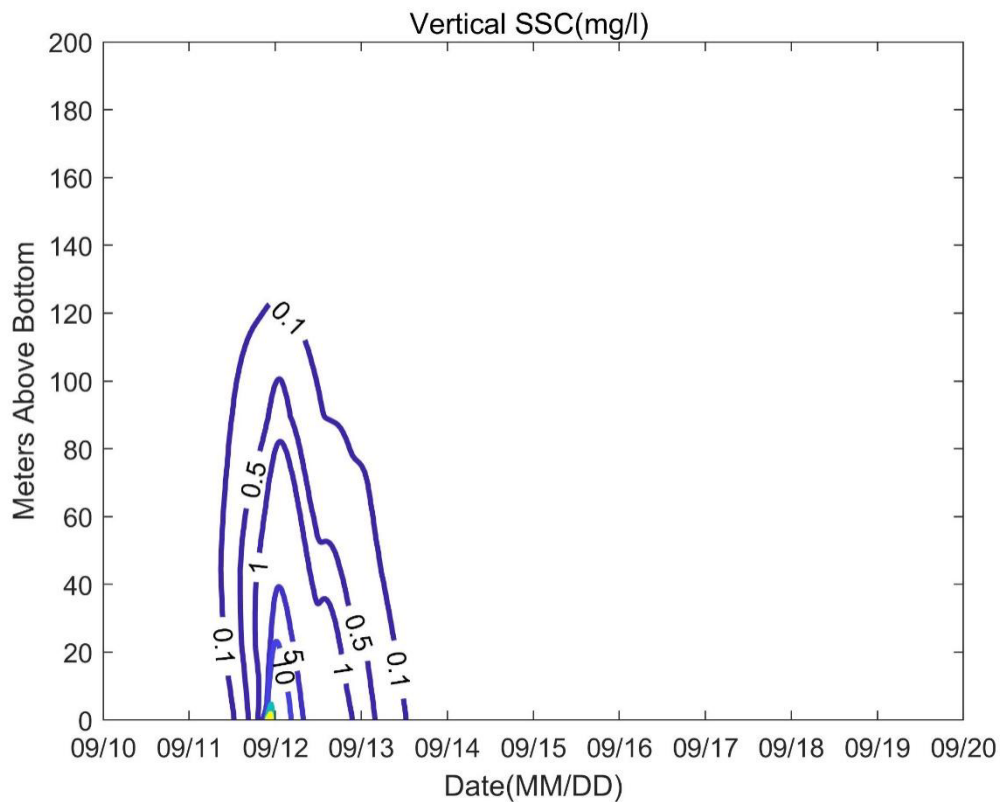


图 72 Case6 悬浮泥沙浓度垂向分布图

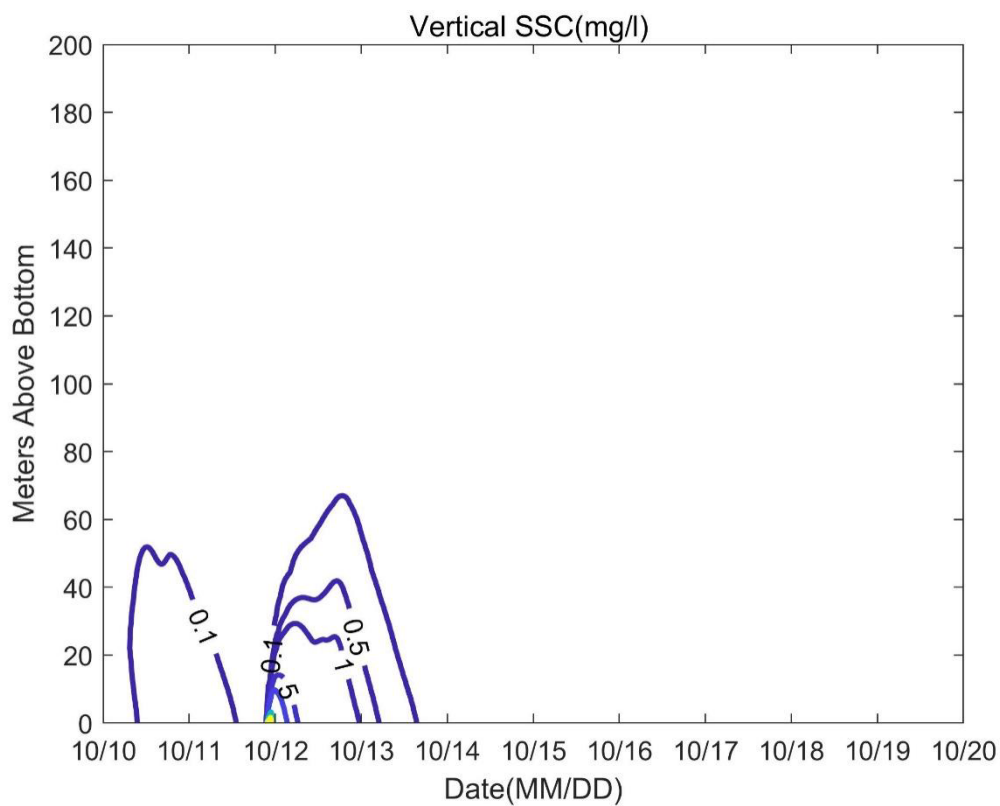


图 73 Case7 悬浮泥沙浓度垂向分布图

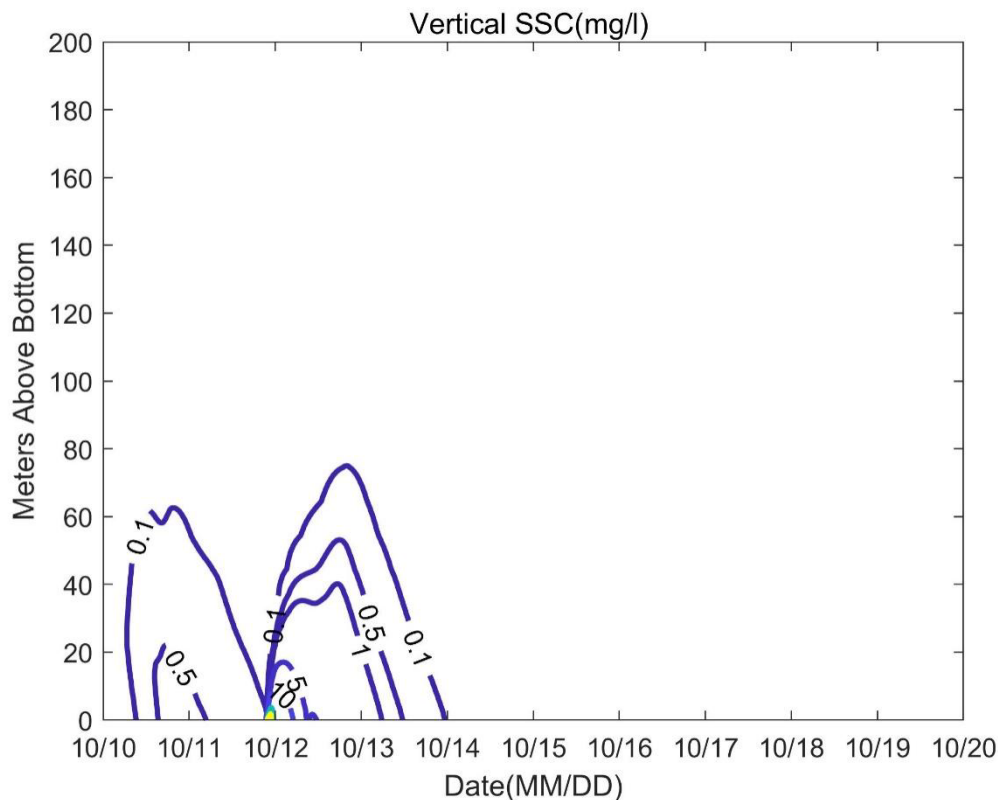


图 74 Case8 悬浮泥沙浓度垂向分布图

3.3 再沉积厚度分布

图 75-图 82 为各案例再沉积厚度分布图。由图可知，各案例再沉积厚度均小于 1 cm，最大沉积厚度为 0.33 cm（Case3）。再沉积厚度大于 0.1 mm 的范围均位于 CTA 外侧 100 m 内，再沉积厚度大于 1 mm 的区域主要位于第一次连续采集作业和第二次连续采集作业间距 0 m 的试验区域（见图 3.3-6 红色作业区域）。

从再沉积厚度面积分布上看，再沉积厚度大于 1 mm 的面积为 0.06-0.12 km²，再沉积厚度大于 0.1 mm 的面积为 0.59-0.64 km²。

月际分布上，最大再沉积厚度 8 月最大，9 月最小；再沉积厚度大于 1 mm 的面积上 9 月最大，8 月最小，反应了相应月份的流场变化特征。

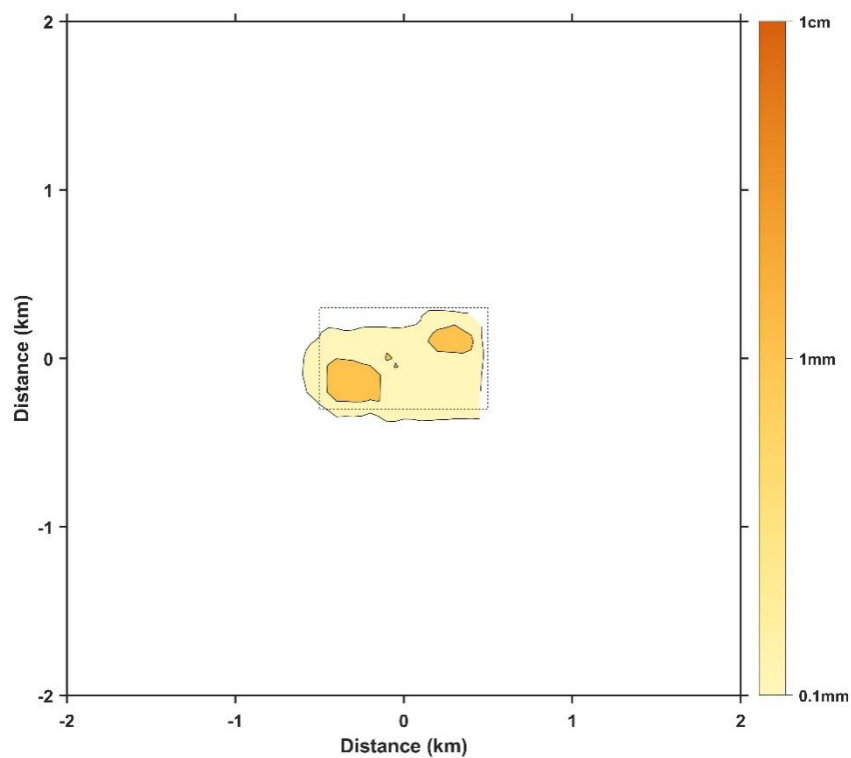


图 75 Case1 再沉积厚度分布图

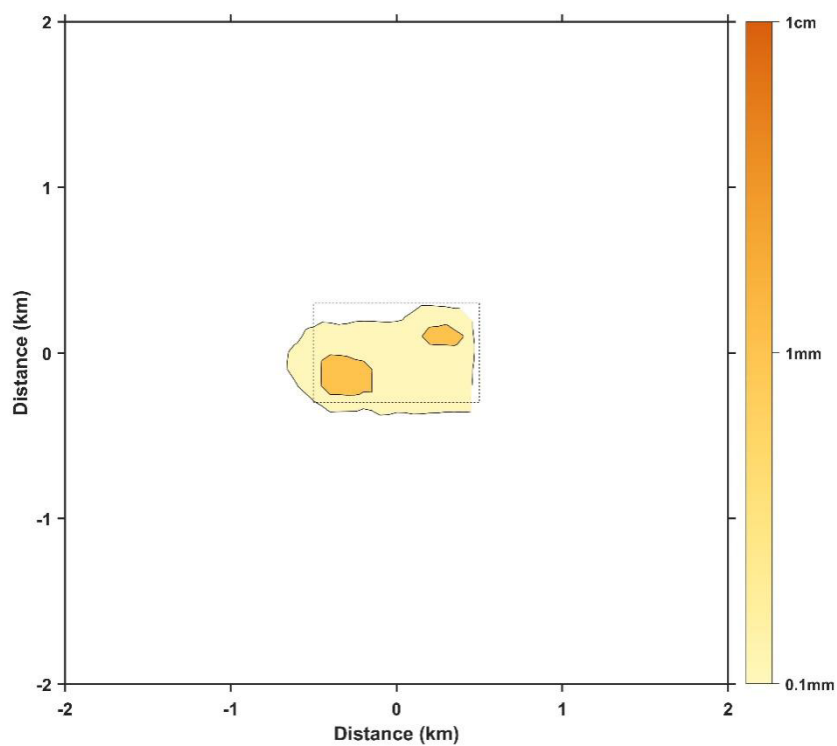


图 76 Case2 再沉积厚度分布图

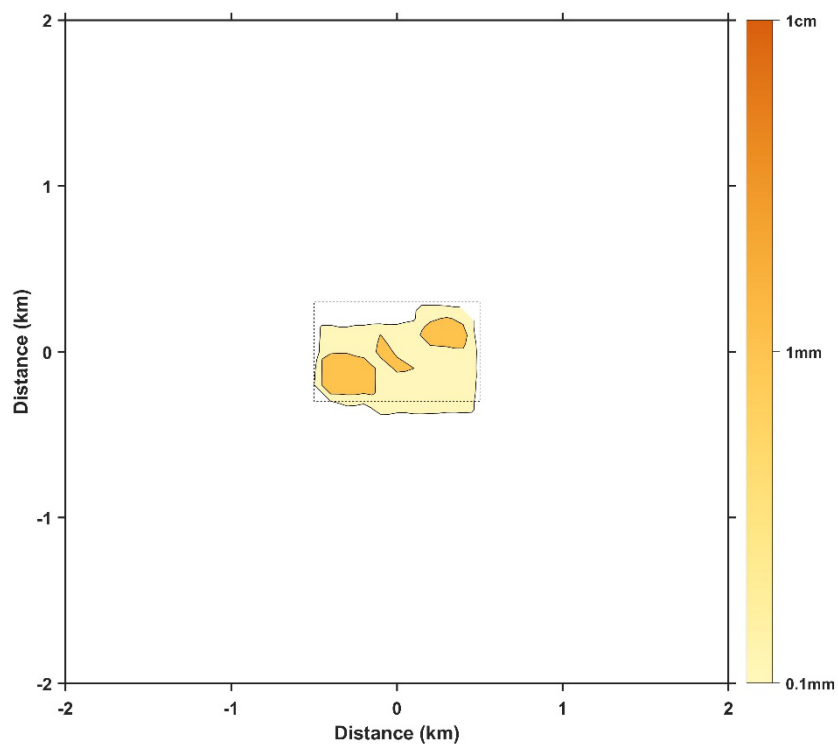


图 77 Case3 再沉积厚度分布图

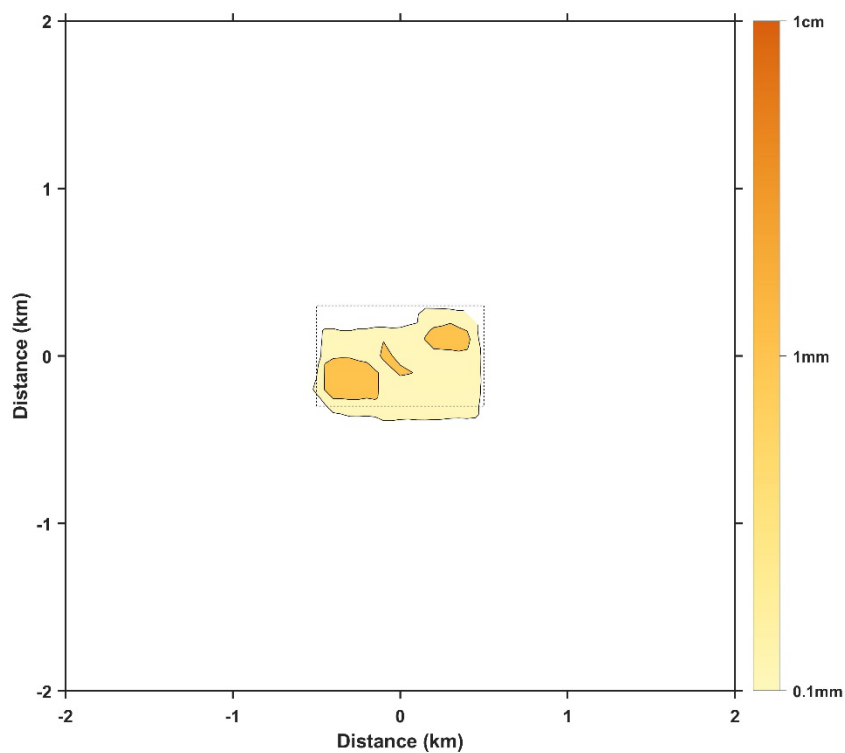


图 78 Case4 再沉积厚度分布图

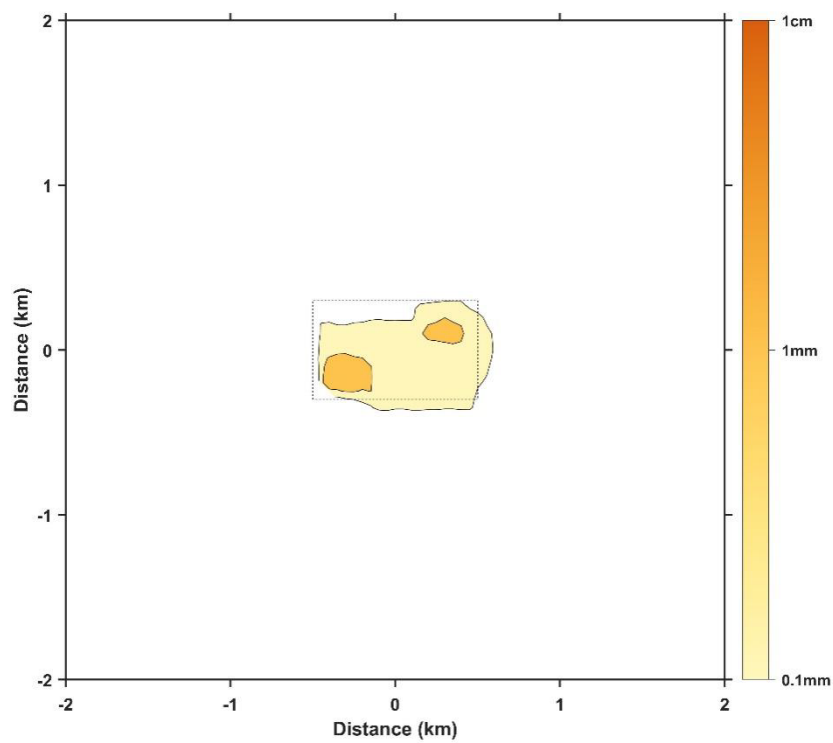


图 79 Case5 再沉积厚度分布图

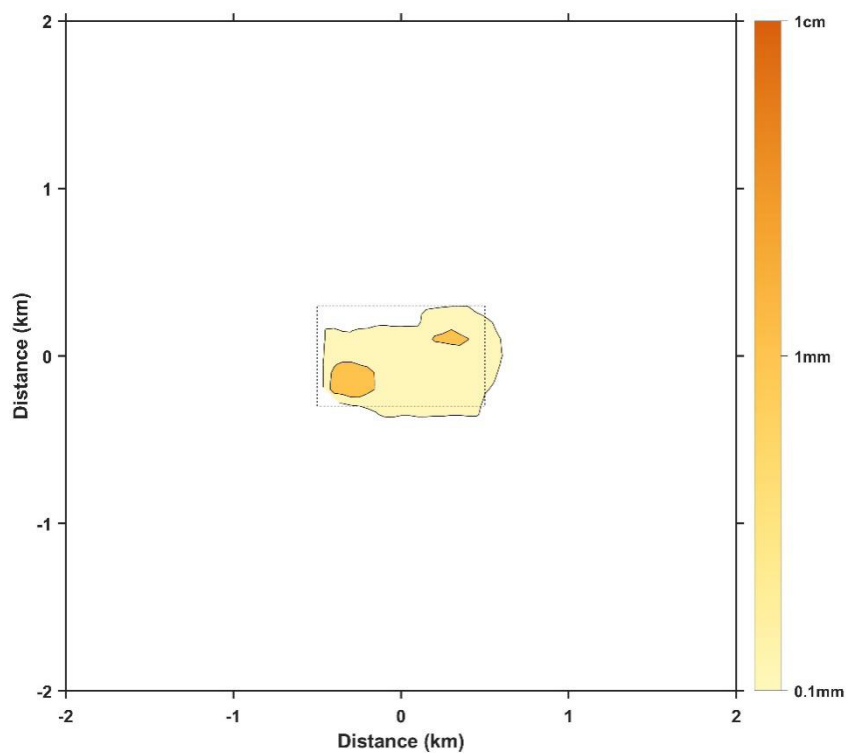


图 80 Case6 再沉积厚度分布图

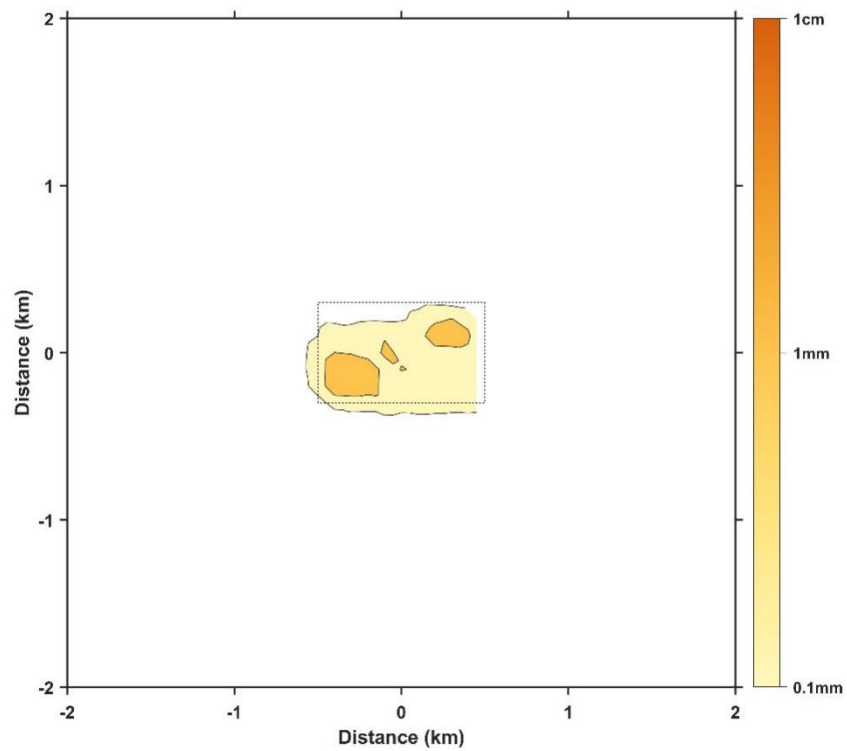


图 81 Case7 再沉积厚度分布图

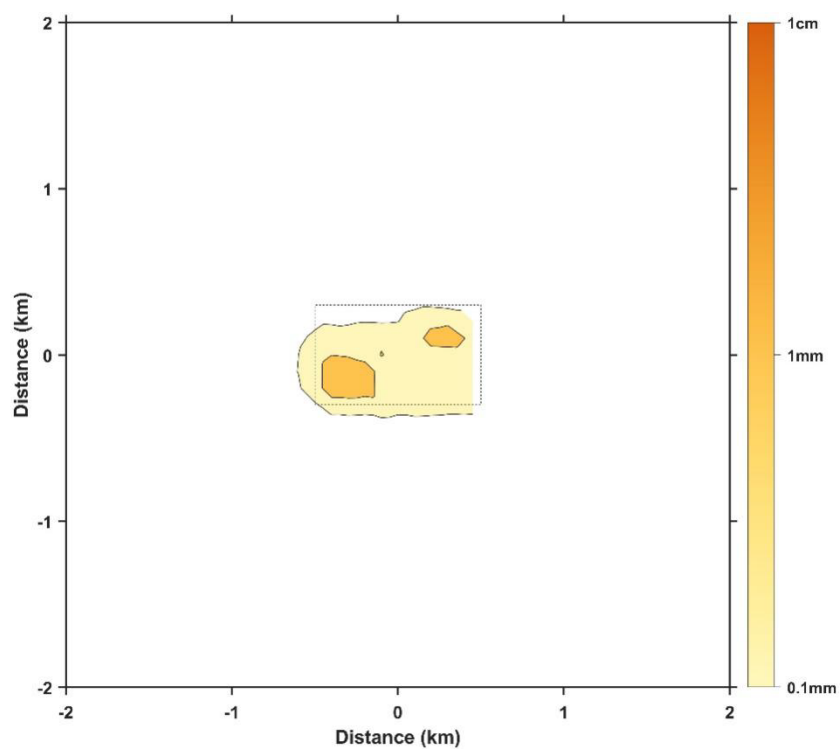


图 82 Case8 再沉积厚度分布图

表 2 羽流最大扩散范围和最大再沉积厚度

案例	羽流最大扩散范围 (km)	最大再沉积厚度 (cm)	垂向最大影响高 度 (m)
Case1	1.5	0.28	70
Case2	2.1	0.24	79
Case3	0.6	0.33	22
Case4	0.9	0.30	45
Case5	1.7	0.23	121
Case6	2.1	0.19	124
Case7	1.1	0.30	67
Case8	1.7	0.26	75

表 3 羽流再沉积面积统计表

案例	再沉积厚度大于 1cm 的面积 (km ²)	再沉积厚度大于 1mm 的面积 (km ²)	再沉积厚度大于 0.1mm 的面积 (km ²)
Case1	0	0.10	0.62
Case2	0	0.09	0.64
Case3	0	0.12	0.59
Case4	0	0.11	0.60
Case5	0	0.09	0.60
Case6	0	0.06	0.60
Case7	0	0.11	0.61
Case8	0	0.09	0.63

4 小结

构建了深海采矿羽流模型，并模拟了 7 月、8 月、9 月和 10 月不同流场条件下不同沉积物粒径的深海采矿羽流扩散分布及再沉积过程。结果显示，高浓度悬浮泥沙水体和再沉积均主要位于 CTA 内。羽流水平最大可影响到 2.1 km，垂向最大影响高度为 124 m。不同月份流场条件下，羽流扩散分布存在着明显不同。细颗粒的沉积物水平影响范围和垂直影响范围都较粗颗粒大。

附录 2 环境基线参数调查方法和质量评估

1 地质基线

1.1 地形地貌

1.1.1 多波束测深数据

工作区地形数据和回波强度数据主要来自于中国“向阳红 6 号”船和“向阳红 10 号”船于 2017 年和 2018 年在东太平洋调查航次多波束水深调查的实测资料，外业调查使用的多波束测深系统包括 EM122 多波束系统和 SeaBeam3012 多波束系统。

EM122 系统和 SeaBeam3012 采集的多波束水深数据用加拿大研发的成熟处理软件 CARIS Hips/Sips(版本为 11.0)进行处理。数据处理方法和过程均遵循国家规范—《DZ/T 0292-2016 中华人民共和国地质矿产标准海洋多波束水深测量规程》。

测深数据精度评价：水深后处理数据进行了精度评价，采用评价方法遵循《DZ/T 0292-2016 中华人民共和国地质矿产标准海洋多波束水深测量规程》。

现场测量时每个发射脉冲接收到的有效波束数大多大于总波束数的 75 %；多波束为全覆盖测量，且相邻测线重叠率超过 10 %。水深地形测量要求定位、测深在动态条件下同步工作。为了避免产生偶然或系统误差，依据规范规定垂直主测线布设不少于 5 %的检查线，以便全面检查水深成果的质量。规范规定：

(1) 深度测量成果准确度依据主测线和检查线的交叉点深度不符值统计特征来进行评定；(2) 对交叉点深度不符值进行系统误差及粗差检验，剔除系统误差和粗差后，水深小于 30 m 时不符值限差为 0.6 m；水深大于 30 m 时不符值限差为水深的 2 %；(3) 超限点数不得超过参加比对总点数的 10 %。根据规范要求，分别在第一航段和第二航段进行同一位置检查线和主测线对比计算。第一航段累计统计点数 34508 个，符合率为 98.3 %，符合规范要求，水深中误差 40.7 m，满足规范要求。第二航段累计统计点数 68116 个，符合率为 99.9 %，符合规范要求，水深中误差 12.1 m，满足规范要求。

1.1.2 多波束回波强度数据

对于 EM122 和 SeaBeam3012 系统采集回波强度数据利用自主研发的多波束回波强度后处理软件 MbPPP 对回波数据进行了精细化后处理。

(1) 数据异常值与噪声点剔除

考虑到现场多波束勘测数据处理时未对数据进行精细化编辑，强度数据中仍存在部分异常值与噪声点。因此，首先对回波强度数据进行滤波处理，可有效滤除强度数据异常值与噪声点，进一步提高强度数据质量。

(2) 声传播损失改正

SeaBeam3012 型多波束记录的 xse 格式原始数据中定义其所得回波强度已消除各项声呐系统增益，因此首先对区域回波强度进行声传播损失改正。声传播损失为声呐发射声信号在海水中传播与水体相互作用造成的声能损失，其主要包含两部分，即声扩展损失和声吸收损失。深水环境中，声信号的往返传播距离最长可达十余公里，声能损失往往要远大于浅水环境（图 1-1）。因此，须对回波强度的声传播损失进行精确计算和改正，以保证回波强度水平的准确性。

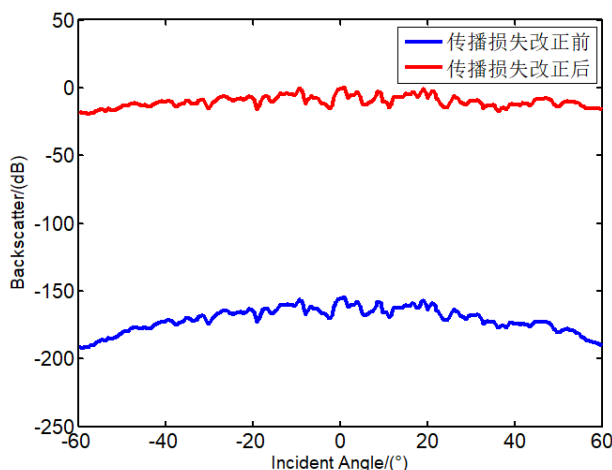


图 1-1 回波强度传播损失改正前后强度水平对比

波束在传播过程中，随着球形扩展和海水的吸收，能量的减少量 TL （传播损失）为：

$$TL = 20 \lg R + \alpha R (dB \text{ re } 1m), (R(m), \alpha (dB/m))$$

式中， α 为吸收参数，是声波频率、水浊度等参数的函数。区域声呐图像经过声

传播损失改正后，声能损失得到精确补偿，图像纹理更加清晰（图 1-2）。

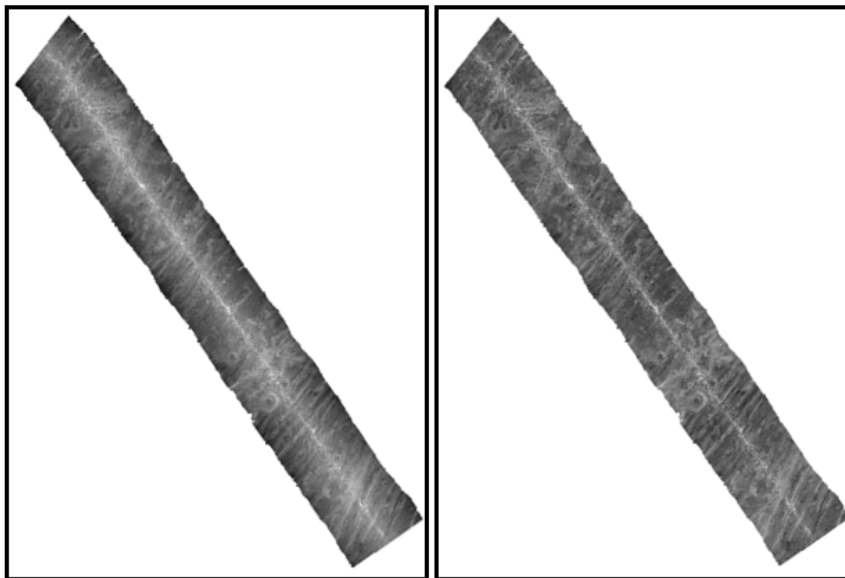


图 1-2 声呐条带图像传播损失改正前后对比
(左：改正前；右：改正后)

(3) 角度响应改正

多波束回波强度受到散射模型机理影响，在不同的角度下会得到不同的回波强度，角度响应对回波数据的影响会降低声呐图像的质量，影响对图像的准确判读。为了得到仅反映海底底质特征的海底固有回波强度，需要进行角度响应改正。前期现场处理时采用二次微分模型作为角度响应模型，改正后声呐图像仍存在与条带上的“条纹”痕迹（图 1-3），改正效果仍需提高。

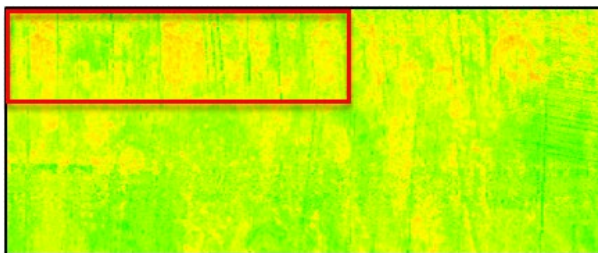


图 1-3 二次微分模型改正后仍存在“条纹”痕迹

因此，强度后处理中采用 bpt 模型进行角度响应改正。bpt 模型为选取区块内的多部分底质相似且均匀的区域，据此类区域提取角度响应曲线（图 1-4），对区域进行整体改正。

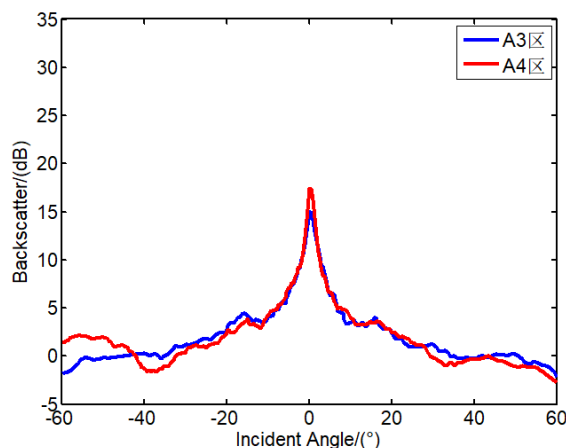


图 1-4 bpt 模型角度响应曲线

改正后对比两种模型改正后声呐图像效果，可以看出 bpt 模型改正后“条纹”痕迹有所改善（图 1-5），纹理更加清晰。同时对于区块内底质变化复杂区域的改正效果亦有所提高。

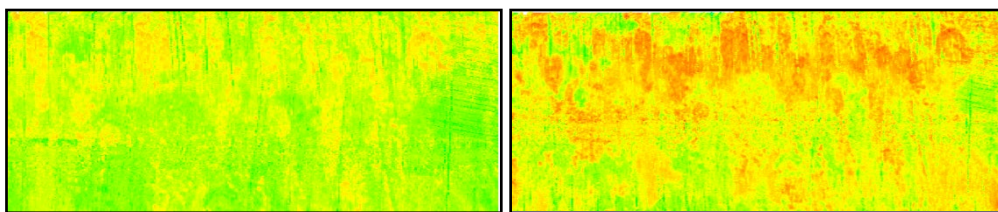


图 1-5 两种角度响应模型改正效果对比
(左:二次微分模型；右:bpt 模型)

(4) 中央镜面反射异常改正

由于受船底正下方镜面强反射的影响，多波束声呐图像中央波束区域回波强度较大，即使经过入射角效应改正，但由于声波与海底交互的复杂性，多波束声学散射模型并不完善，改正后仍存在较大的系统残差，表现为沿航迹方向出现窄条带状假象。针对中央波束镜面反射的影响，利用等均值方差拟合模型的改正方法。首先利用连续数 ping 正常区域的回波强度拟合出趋势线，据此计算船底正下方区域及两侧一定范围内回波强度的均值和方差，通过比较正常区域与异常区域的方差求得改正系数，压缩和移动船底正下方区域的回波数据，使得异常区域与两侧正常区域的均值、方差趋于一致。最后进行航向均衡化处理，改正固定入射角位置处存在的回波残差，达到改正船底正下方数据异常的目的（图 1-6）。

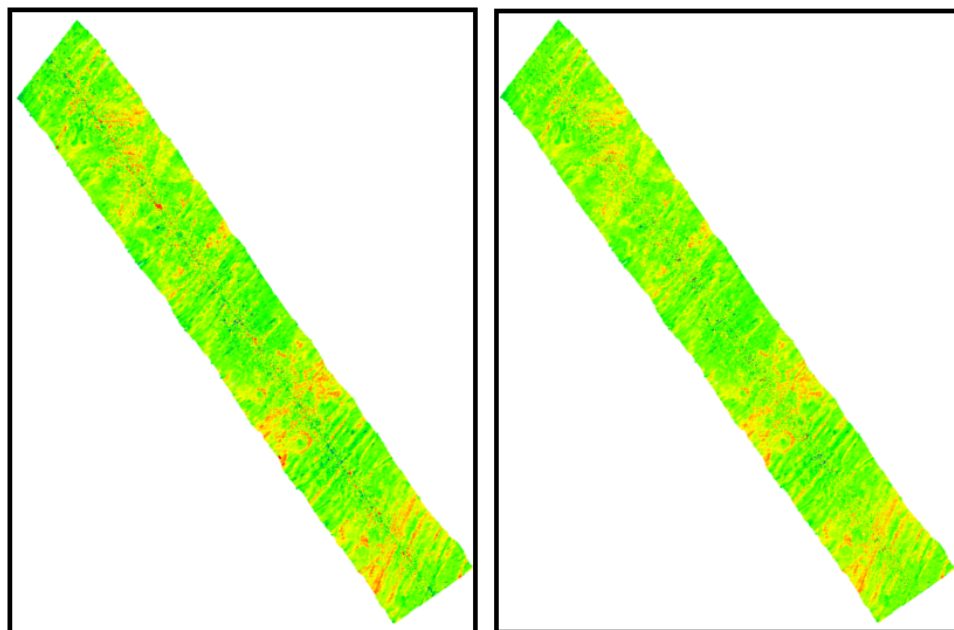


图 1-6 中央镜面反射异常改正效果前后对比
(左:改正前; 右:改正后)

1.2 沉积物参数

1.2.1 沉积物主微量元素

沉积物样品的化学成分分析在自然资源部第二海洋研究所海底科学实验室完成。其中，主量元素分析采用熔片法，使用 X 荧光光谱分析仪（型号为帕纳克 Axios^{MAX}），参考国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分：16 个主量成分测定》（GB/T14506.28-2010）进行；微量元素分析采用湿化学酸溶法，使用电感耦合等离子质谱仪（型号为 PE Elan DRC-e），参考国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分：44 个元素量测定》（GB/T 14506.30-2010）进行。

沉积物化学成分分析中采用 2 个沉积物国家一级标准物质（GBW07103、GBW07316）和 6 个岩石标样 AGV-2（安山岩）、GSP-2（花岗闪长岩）、W-2a（辉绿岩）、BHVO-2（玄武岩）、DTS-2b（橄榄岩）、BCR-2（玄武岩）作为内控样进行监控。

各标样的主微量元素相对误差分别见图 1-7 和 1-8，沉积物主量元素的分析误差大都在 3 % 以内，微量元素的误差大多控制在 10 % 以内。

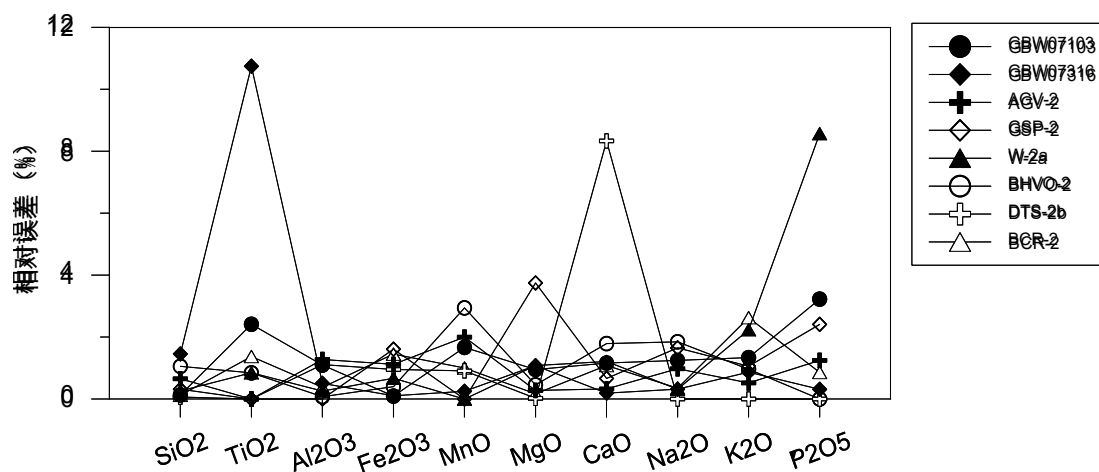


图 1-7 沉积物标样主量元素相对误差

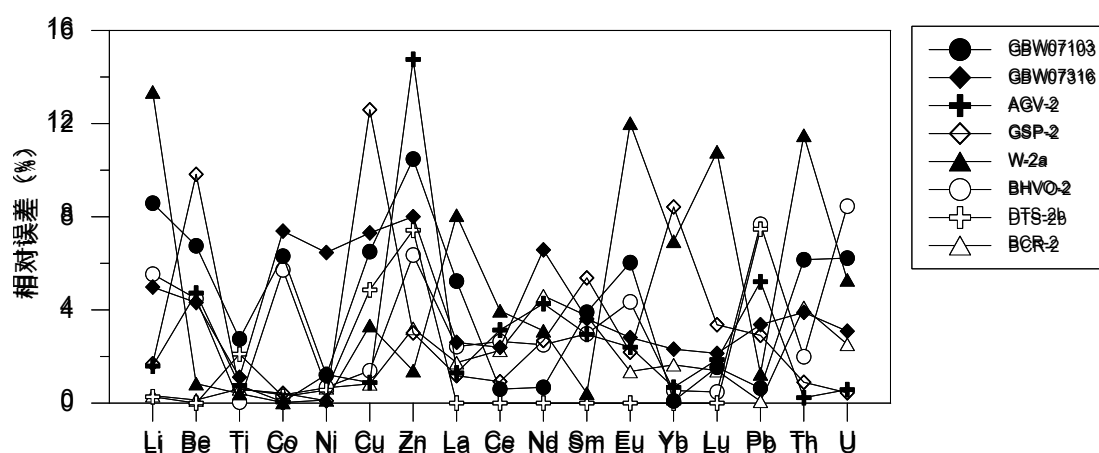


图 1-8 沉积物标样微量元素相对误差

沉积物平行样的主微量元素相对偏差见图 1-9。从重现性结果来看，除个别样品 MnO 偏差较大外，主量元素的相对偏差大多优于 $\pm 1\%$ （图 1-9a），MnO 含量偏差较大可能与其含量较低有关（平均含量 $\text{MnO} = 0.69 \text{ wt\%}$ ）。微量元素除 Be 外，其他元素相对偏差大多优于 $\pm 2\%$ （图 1-9b），表明本次测试结果具有良好的重现性。微量元素中 Be 的相对偏差较大，可能与沉积物中 Be 含量较低有关（ $\sim 2 \text{ ppm}$ ）。

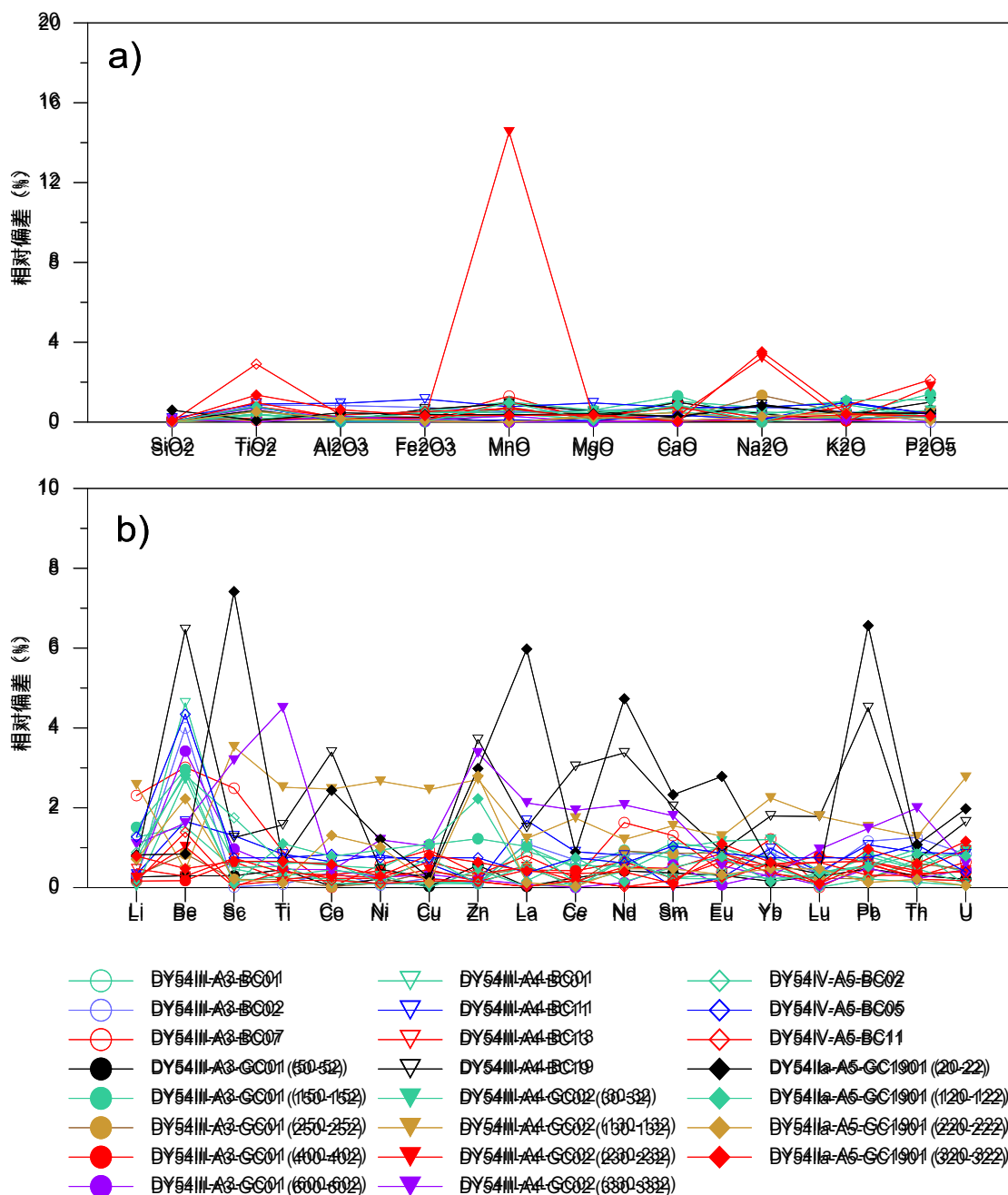


图 1-9 沉积物平行样主微量元素相对偏差

1.2.2 粒度分析

粒度分析在自然资源部第二海洋研究所海底科学实验室完成，采用激光粒度分析仪（英国马尔文 2000 型）进行分析。

取样前，首先要将待测样品混合均匀。然后根据样品的颗粒大小确定取样数量，黏土质粉砂或粉砂质黏土等细粒沉积物取样量一般为 0.1-0.2 g，以粉砂和细砂为主的沉积物取样量一般为 0.3-0.4 g，以中粗砂为主的沉积物取样量一

一般为 0.5-0.6 g。将取好的样品用过量的过氧化氢（ H_2O_2 ）溶液溶解，在装有样品的烧杯中加入 30 % 的 H_2O_2 少许，稍后会产生大量气泡，待气泡不再产生时，再加少量过氧化氢，没有气泡产生即说明有机质已全部氧化了，有气泡产生则还需重复上述步骤，至不再起泡为止；向盛样品的烧杯中加入蒸馏水，用玻璃棒搅拌后静置 24 h，然后将杯中上层清液吸去，再加入蒸馏水，用玻璃棒搅拌，再静置 24 h，然后吸去杯中上层清液；在烧杯中加入数滴 0.5 N 的六偏磷酸钠，用玻璃棒搅拌或超声波振荡使样品充分分散；将处理好的样品进行上机测试。测试时将前处理后烧杯中的样品全部倒入样品池，并用洗瓶将残留在烧杯壁上的样品也冲入样品池。

粒度分析参数计算方法依据《GB/T 12763.8-2007-T 海洋调查规范 第 8 部分：海洋地质地球物理调查》规定进行，粒度参数主要包括平均粒径（ Mz ）、分选系数（ σ_i ）、偏态（ Sk_i ）、峰态（ Kg ）四种，粒度参数采用福克和沃德公式计算。

样品分析测试中，抽取部分样品进行了重复样检测，结果如表 1-1。由表看出，18 个重复样品中，所有样品的平均粒径的误差 $< 0.15 \phi$ ，17 个样品的分选系数误差 $< 0.1 \phi$ ，基本符合 GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范的误差检测要求，数据质量合格。

表 1.1 粒度测试分析重复样分析误差

样品名称	原始样		重复样		误差	
	平均粒	分选系	平均粒	分选系	平均粒	分选系
	径/ ϕ	数/ ϕ	径/ ϕ	数/ ϕ	径/ ϕ	数/ ϕ
54III-A3-BC01-5-6	6.60	2.42	6.65	2.45	0.05	0.03
54III-A3-BC02-0-2	6.44	2.44	6.38	2.46	0.06	0.02
54III-A3-GC01-50-52	7.58	1.96	7.64	1.91	0.06	-0.05
54III-A3-GC01-250-252	7.39	1.85	7.32	1.82	0.07	-0.03
54III-A3-GC01-400-402	7.35	1.78	7.43	1.88	0.08	0.1
54III-A3-GC01-600-602	7.57	1.45	7.57	1.48	0.00	0.03
54III-A4-BC01-35-36	8.02	1.47	8.05	1.49	0.03	0.02
54III-A4-BC19-35-36	8.11	1.39	8.06	1.37	-0.05	-0.02
54III-A4-BC14-0-2	7.99	1.86	7.91	1.86	-0.08	0
54III-A4-GC02-30-32	8.36	1.35	8.36	1.35	0.00	0
54III-A4-GC02-230-232	8.31	1.42	8.29	1.48	-0.02	0.06

样品名称	原始样		重复样		误差	
	平均粒	分选系	平均粒	分选系	平均粒	分选系
	径/ ϕ	数/ ϕ	径/ ϕ	数/ ϕ	径/ ϕ	数/ ϕ
54III-A4-GC02-330-332	8.10	1.54	8.08	1.55	-0.02	0.01
54IV-A5-BC02-0-2	6.00	2.49	5.94	2.47	-0.06	-0.02
54IV-A5-BC05-0-2	6.42	1.84	6.29	1.89	-0.13	0.05
54IV-A5-BC11-25-26	6.34	1.40	6.27	1.35	-0.07	-0.05
54IIa-A5-GC1901-220-222	6.91	1.88	7.00	1.82	0.09	-0.06
54IIa-A5-GC1901-320-322	7.38	1.73	7.50	1.73	0.12	0
54IIa-A5-GC1901-398-400	6.25	1.27	6.14	1.25	-0.11	-0.02

1.2.3 土力学特征

海上现场土工测试内容主要包括贯入阻力和十字板抗剪强度测试分析。其中贯入阻力测试采用微型贯入仪，抗剪强度测试采用微型十字板剪切仪完成。

(1) 测试依据与规范

表层沉积物的土工力学性质测试分析工作主要依据以下规范与标准：

- 《大洋多金属结核矿产勘查规程 GB/T17229—1998》
- 《土工试验方法标准 GB/T50123—1999》
- 《公路土工试验规程 2007》
- 中国工程建设标准化协会《袖珍贯入仪试验规程》

(2) 贯入强度

贯入阻力测试分别使用 TT-MP1 型微型贯入仪完成，微型贯入仪由贯入测头、连接杆、测力计等部件构成。可选用 20 N、40 N 或 60 N 不同规格的测力计和圆锥、小圆柱或大圆柱型的贯入测头。

(3) 抗剪强度

抗剪强度测试使用 TT-MVS1 型微型十字板剪切仪完成，十字板剪切仪由十字板头、扭力弹簧、施力圆筒和滑动指针等部件构成。

1.2.3.1 室内土工试验

室内测试分析完成了物理性质指标包括天然含水率、比重、天然湿密度、

天然孔隙比、塑限、液限、塑性指数、液性指数和力学性质参数压缩系数、压缩模量、粘聚力和内摩擦系数的测试。

天然含水率：采用烘干法测试，利用制作环刀试样剩余的土样，将土样在温度 100-105 °C 下烘到恒重时失去水的质量与恒重土质量的比值即为天然含水率，以百分数表示。试验设备为电热恒温干燥箱。试验设备有恒温烘箱、电子天平。

天然湿密度：采用环刀法测试，对柱状样以 5 cm 为间距进行分样，制作成高度为 2 cm、横截面积为 30 cm² 的环刀试样，进行土样称重后可计算得出沉积物的天然湿密度，以 g/cm³ 为单位。试验设备有环刀、电子天平。

比重：采用比重瓶法，将土样烘干研磨后，用容量为 50 mL 的比重瓶测试得出。试验设备有 50 mL 比重瓶、电子天平、真空泵等。

1.2.4 数据处理方法及质量情况

工作区获取的样品符合《GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第 8 部分：海洋地质地球物理调查》规范中沉积物物理力学性质测试的技术指标。

沉积物物理力学性质测试的主要技术要求：

- 土样必须是原状土样，未失水；
- 一组测试样品，长度约 25-30 cm，直径 6-8 cm；
- 含水量、状土相对密度、十字板抗剪强度和天然粘着力等尽量在现场测定。

土工测试过程中，设备状态良好，仪器使用正确，试验操作符合《国际海底区域环境调查技术规范 第 4 部分 海洋地质（沉积物物理力学性质测试）》要求和《土工试验方法标准 GB/T 50123—1999》和中国工程建设标准化协会《袖珍贯入仪试验规程》(CECS 54:93)的要求。班报记录清晰、准确、整洁，测试数据准确可靠，自检合格。测量层次满足《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》(ISBA/19/LTC/8) 和《Standardization of Environmental Data and Information: development of guidelines》(ISA/02/02) 第 23 章中的要求。沉积物土工力学测试记录齐全、完整，经专业组自检和现场质量

管理员检查，合格率 100 %。

2 物理海洋基线

2.1 锚系潜标

2.1.1 调查设备及参数

布放和回收的锚系观测设备主要由 CTD、ADCP、单点海流计、沉积物捕获器、声学释放器和浮球等主要设备组成。各类设备主要技术指标要求如下：

CTD 使用美国海鸟公司的 SBE16plus 和 SBE37，观测压力、温度、电导率等要素，可同步获取以上几项参数。其技术要求如表 2-1 所示。

表 2-1 温度、电导率和压力指标观测要求

参数	分辨率	准确度	稳定性
温度	0.0001 °C	±0.002 °C	0.0002 °C/月
电导率（盐度）	0.00001 S/m	±0.0003 S/m	0.0003 S/m/月
压力	0.002 %×量程	±0.1 %×量程	量程的 0.1 %/年

单点海流计使用安德拉公司的单点海流计 Seaguard RCM（简称 RCM）。其利用声学多普勒效应来测量设备周围的流速分布，内置倾斜、罗经传感器。同时，它还可以作为平台扩展增加其他测量参数，如温度、电导率、深度、溶解氧等。其技术要求如表 2-2 所示。

沉积物捕获器主要用于收集海洋中固定深度的沉淀微粒，可以根据需要设定采样时间，在水下采样数天到数周或长达一年半，采样瓶至少每 1 个月自动采集沉积物样品，设定采样 1 周年至少 12 瓶。

释放器使用法国 IXSEA 公司的 Oceano 2500s，其利用集成的换能器来接收甲板单元发出的指令并执行。安全工作荷载为 2500 kg，耐压 6000 m。

锚系结构图见图 2-1 和图 2-2。

表 2-2 海流要素监测技术指标

海流计	流速分辨率	流速准确度	流向分辨率	流向准确度
RCM	0.1 mm/s	±0.15 cm/s	0.01°	±2°

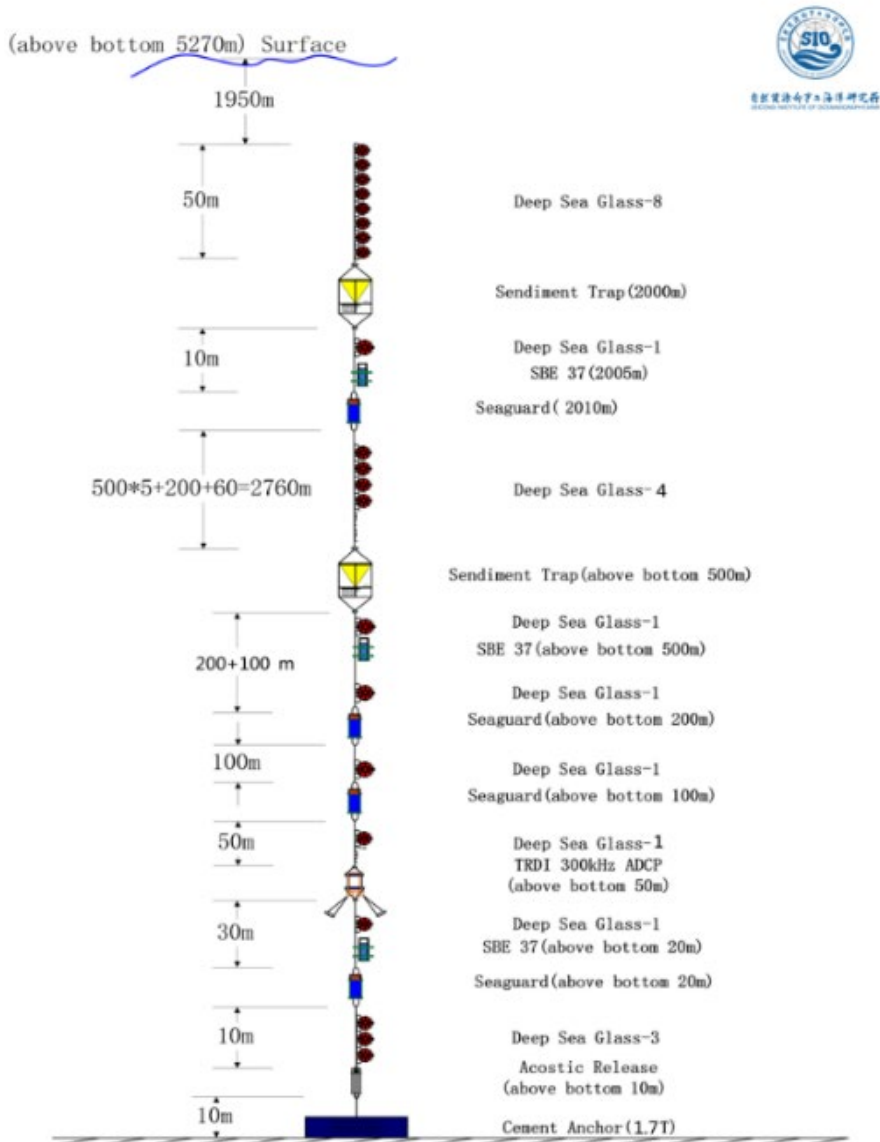


图 2-1 2021 年航次回收锚系 DY70II-A5-MX01 结构图

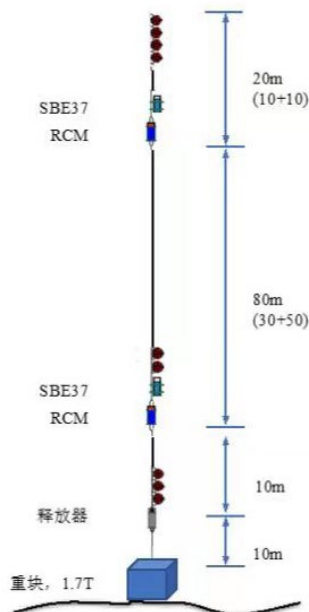


图 2-2 2022 年回收锚系 DY73I-A5-MX02 结构图

2.1.2 分析方法及质量控制

2.1.2.1 温盐数据

数据预处理：潜标 CTD 数据使用海鸟公司 SBEDataProcessing-Win32 软件进行处理，将温深传感器和温盐传感器的原始观测数据（十六进制）转换成 ASCII 码格式的数据。

数据质量控制：

- 删除空气中的数据，剔除下放和回收过程中的数据。
- 范围检查：根据潜标系统布放海域温盐要素的历史资料极值对数据进行检查。剔除在极值区间之外的数据，并用相邻的正常数据通过线性插值补齐。
- 趋势检查：观测数据在一定时间内不应超出相应的变化幅度。进行分段检验，每段为 15 天，数据变化幅度超过 2.5 倍标准差视为异常数据。对异常数据予以剔除，然后用相邻的正常数据通过线性插值补齐。
- 时间序列图检验：通过绘制水温及盐度的时间序列图，进行人工判断审核。

2.1.2.2 海流数据

1) 数据预处理：

潜标获取的海流数据 ADCP 由 WINADCP 软件将 ADCP 的十六进制的原始数据转换为 ASCII 码数据,按 1 h 间隔的数据中提取流速、流向、完好率等要素。安德拉海流计获取的单层海流数据利用 Seaguard Studio 软件进行数据导出,按照 0.5 h 时间间隔提取流速、流向等要素。

2) 数据质量控制

- 数据处理首先进行数据检验,了解观测获取数据的基本信息,如:仪器型号、安装深度、仪器盲区、测层厚度设置、层数设置、采样间隔等基本信息,以及观测过程中的海况,为进一步的数据处理做准备。
- 根据观测仪器的相关参数,进行初步控制,删除缺测数据、信号中断数据及未满足重要参数要求的数据,形成基本的按时间序列顺序的潜标观测数据。
- 对经过上述初步质控的数据进行合理性检验与仪器误差修正。合理性检验包括数据文件中出现乱码与不合理字符、观测数据如流速和流向超出正常范围、相邻两层数据突变过大等。仪器误差修正包括罗经数值、仪器倾角修正、仪器位置变动修正等,检查这些数据是否合理,对误差进行修正。
- 采用范围检验、离散性检查、统计分析等方法,滤去资料中较显著异常。最后绘制潜标数据的时间序列图等相关图件,结合对海区认识的历史经验,人工判别潜标数据的合理性,然后对存在问题的数据进行必要的修正。

锚系使用 CTD 出航前经过标定,其他设备如海流计经过自检,观测获得的温度、盐度、压力和海流数据质量好、精度高,充分如实地反映了调查水域的水文状况,符合《海洋调查规范第 2 部分海洋水文观测》(GB/T 12763.2-2007)中提出的技术要求。

2.2 温盐结构

2.2.1 采样设备

直读式温盐深测量系统采用美国 SeaBird 公司的 SBE911plus CTD 测量仪。

该系统由 SBE9plus 水下 CTD 设备和 SBE11plus 甲板设备及铠装电缆和采集计算机组成。通过铠装电缆 911plus 系统可以实时地采集和存贮数据。在投放 911plus CTD 系统时，水下单元的电源是由甲板单元通过铠装电缆提供的。铠装电缆同时用于将数据传输到 SBE11plus 甲板单元中。甲板单元将 911plus CTD 数据解码，然后将它们传输给数据采集计算机，计算机实时显示数据并将数据记录到磁盘上。本系统可观测压力、温度、电导率等水文要素，另配有 24 个由水下单元控制、具有自动激发功能的 10 L 采水瓶，可为海水化学、生物分析提供水样。911plus CTD 系统主要技术参数见表 2-3。

表 2-3 SBE911plus CTD 系统主要技术参数

技术参数	测量范围	精确度	稳定度（每月）	响应时间（s）
电导率（s/m）	0~7	0.0003	0.0003	0.065
温度（℃）	-5~+35	0.001	.0002	0.065
压力（psia）	10000	0.015%FS	0.0015%FS	0.015

2.2.2 数据处理

应用美国海鸟公司提供的 SBE Data Processing 软件处理 CTD 数据，数据处理步骤如下：

1) 数据转换

将原始观测数据（十六进制）转换成 ASCII 码形式数据，具体数据要素包括压力、水温、电导率、泵状态等。

2) 压力订正及删除空气中的记录

取 CTD 入水前、出水后的压力数据进行平均，然后将观测的压力值减去该平均值。根据压力、电导率、泵状态人工剔除入水前、出水后以及 CTD 感温阶段的数据。

3) 滤波（filter）

采用美国海鸟公司提供的 Filter 低通滤波器对一项或几项数据进行滤波，以达到平滑高频（快速变化）数据噪声的目的。压力滤波时间常数取 0.15 s，其他取 0.0 s。

4) 滞后校准 (align CTD)

为了以压力为标准的各要素在时间上一致, 保证数据处理中对电导率等其他要素的计算是针对同一水样, 采用 Align CTD 进行滞后校准。应用 Align CTD 程序对电导率进行滞后校准, 其中电导率参数取+0.073。

5) 热通量订正 (Cell Thermal Mass)

为消除温度梯度较大时导致的电导率测量误差, 运行 Cell Thermal Mass 程序进行热通量订正。热通量订正参数 Amplitude Alpha 及 Lag time Tau 分别取 0.03 和 7。

6) 逆压消除 (Loop Edit)

为消除因船舶摆动引起的水深逆向抖动, 应用 Loop Edit 程序对数据进行逆压消除, 其中 CTD 最小下放速度取 0.25 m/s。

7) 计算水深 (derive)

应用 Derive 程序计算水深。

8) 数据平均 (bin average)

按照深度 1m 进行平均, 表层选择 0 均 0.5 m, 值为 0。

9) 计算盐度 (derive)

应用 Derive 程序计算盐度。

10) 数据质量检查和修正

绘制各要素的垂直分布图, 根据垂直分布图并结合经验分析进行必要的人工修正。本航次全水柱及 1500 m CTD 观测数据质量较好无需修正。

11) 分离上行和下行数据 (Split)

分离 CTD 下放和上升的数据。

12) 输出数据 (ASCII Out)

去除表头信息, 只留下数据。

2.3 表层海流

2.3.1 调查设备

走航声学多普勒海洋测流系统为 OS38K ADCP, 由美国 RD Instruments 公

司生产。ADCP 由船体安装式换能器（Transducer）、甲板单元（Deck Unit）、外接罗经、GPS 和操作计算机等单元组成。主要技术指标见表 2-4。

表 2-4 OS38K ADCP 主要技术指标

型号名称	OS38K
中心频率	38 kHz
波束数	由波束形成器产生 4 个波束
波束角	与垂线夹角 30°
长期精度	1%V±0.5 cm/s（V 为流速值）
最大剖面深度	宽带模式： 730-780 m 窄带模式： 800-1000 m
盲区	16 m
深度单元数	1-128 个
深度单元长度	16, 24m 或自选
最大脉冲发射率	0.4 Hz
精度	<2 cm/s
速度量程	10 m/s

根据仪器技术参数，OS38K ADCP 的实际观测水深约为 38m 至 800m。走航 ADCP 调查中采用的参数设置如表 2-5 所示。

表 2-5 走航 ADCP 运行参数设置表

参数	OS38K
层厚（BINSIZE）	8 m
层数（NUMBER OF BINS）	128
盲区（BLANK）	16 m
换能器水深（TRANSDUCER DEPTH）	5 m
换能器偏角	45°
短期平均时间	60 s
长期平均时间	300 s

2.3.2 分析方法

在水深未超过 ADCP 底跟踪深度的情况下，用 RDI 公司提供的软件程序 WINADCP，将船载 ADCP 的十六进制的原始数据转换为 ASCII 码数据，提取 5

min 的平均数据中由底跟踪船速修正的各观测层的水平流速、水平流向、垂直流速、流速误差、数据完好率、GPS、水深、船速、船向、换能器处的水温数据。在水深超过 ADCP 底跟踪深度的情况下，提取由 GPS 船速修正的各种资料进行处理。

船载 ADCP 依据声学多普勒原理进行工作，海洋中存在的多种环境状况会对其测量产生影响，出现观测误差。根据水体调查的资料处理要求，在数据处理中需要对海流数据进行质量控制。

1) 数据处理首先进行数据检验，了解数据的基本信息，如：仪器型号、安装深度、仪器盲区、测层厚度设置、层数设置、采样间隔等基本信息，为进一步的数据处理做准备。

2) 通过平面图中航线拐角处海流方向是否随调查船的航向变化而变化来判断走航 ADCP 海流流向的稳定性，由图可以看出海流方向没有随航向变化而变化，证明船载走航 ADCP 仪器工作稳定，无异常现象出现。

3) 根据完好率（大于 50 %）和相关系数（大于 0.8），进行初步控制，删除质量不好的数据。

4) 删除 GPS 信号中断时的资料。

5) 删除船速或船向缺失的数据。

6) 删除表层异常数据。仪器表层数据由于受船体的扰动，容易造成数据质量差，需要对表层数据进行判断分析，删除异常值。

7) 删除底层异常数据。对于测层深度大于水深的数据进行删除。海底对声束的反射影响底层几个 bin 的数据质量，要分析判断出异常值予以删除，通常相邻两层流速突变大于 50 cm/s 认为异常。

8) 由于天气、海况、船只的摇摆、以及其他不明原因，ADCP 在个别观测时段获得的数据明显偏大（大于 250 cm/s）以及流向变化明显不符合海域实际潮流变化规律，在处理中将根据实际情况酌情删除。

经过上述数据处理与质量控制，表明船载 ADCP 观测数据的质量是可靠的。

3 化学基线

3.1 采样和分析方法

海水化学调查按照《国际海底区域环境调查技术规程—海水化学调查》（GB/T 42629.2-2023）及相关技术规程和文件的要求执行。

海水化学调查所需海水样品利用 SBE 911 plus CTD 系统分层采集海水样品。通过 CTD 获得的水样，进行海水中 pH、溶解氧、硝酸盐、硅酸盐、磷酸盐、亚硝酸盐、溶解无机碳（DIC）和悬浮物（SPM）等项目调查，各要素分析方法见表 3-1。

表 3-1 海水化学要素分析方法

监测要素	监测方法名称	仪器名称	检出限	准确度	精确度
pH	pH 计法	Orion Star pH 计	/	0.01 级	±0.01
DO	碘量滴定法	瓶口分液器	5.3μmol/L	/	/
硝酸盐	锌镉还原法	723C 分光 光度计	0.05μmol/L	浓度为 10.0μmol/L 时，相对误 差为±4.0%	浓度为 10.0μmol/L 时，相对偏 差为±3.0%
亚硝酸盐	重氮偶氮法	723C 分光 光度计	0.02μmol/L	浓度为 1.0μmol/L 时，相对误 差为±3.0%	浓度为 1.0μmol/L 时，相对偏 差为±2.0%
磷酸盐	磷钼蓝法	7230 分光 光度计	0.02μmol/L	浓度为 2.0μmol/L 时，相对误 差为±3.5%	浓度为 2.0μmol/L 时，相对偏 差为±3.0%
硅酸盐	硅钼蓝法	7230 分光 光度计	0.10μmol/L	/	/
铵盐	次溴酸钠氧化法	723C 分光	0.03μmol/L	浓度为	浓度为

监测要素	监测方法名称	仪器名称	检出限	准确度	精确度
		光度计		7.0 μ mol/L 时，相对误差为 $\pm 4.0\%$	7.0 μ mol/L 时，相对偏差为 $\pm 3.0\%$
悬浮物	重量法	天平 AL204	0.1 mg	/	/
溶解无机碳	非分散红外光度法	溶解无机碳 分析仪	/	$<\pm 0.2\%$	$<\pm 0.2\%$

3.2 数据处理方法和质量控制

海水化学使用测试分析仪器均在检定有效期内，无法检定或校准的，亦经过自检。使用的标准物质均由具备资质的供方提供，并在有效期内使用。海水化学各要素分析质量控制要求如表 3-1 所示。

(1) 海水 pH

海水 pH 在航次现场测定。测定采用美国 Thermo 公司生产 Orion Star A 系列 pH 计。设备由主机和 pH 电极两个部分组成。pH/温度模块参数如下：pH 分辨率 0.01，测量范围：-2.00-20.00 mV/RmV，使用环境：环境温度：5-35 $^{\circ}$ C 相对湿度： $\leq 85\%$ 。pH 在分析测定过程中，事先利用 pH 标准液进行定标，以保证分析过程的质量可控。

(2) 海水溶解氧

海水溶解氧在航次现场测定，测定采用碘量滴定法。溶解氧参数利用平行样控制分析质量，现场平行样测定比例达 100 %；其现场平行样相对偏差在 0.0-3.88 %之间，平均为 0.81 %；溶解氧现场平行样相对偏差均符合相关规范规定的容许偏差范围的要求。

(3) 海水营养盐

海水五项营养盐分析方法如表 3-1 所示。分析过程进行标准样测定结果以控制数据质量，亚硝酸盐、硝酸盐、铵盐、硅酸盐和磷酸盐分别进行 2 次标样测定，其相对误差范围分别为 0.4-6.4 %，2.6-3.6 %，0.1-3.4 %，1.0-4.3 %和 0.3-3.2 %；相对误差均符合《海洋调查规范》（GB17378-2007）规定的允许偏差范

围内表。营养盐标准工作曲线见图 3-1。

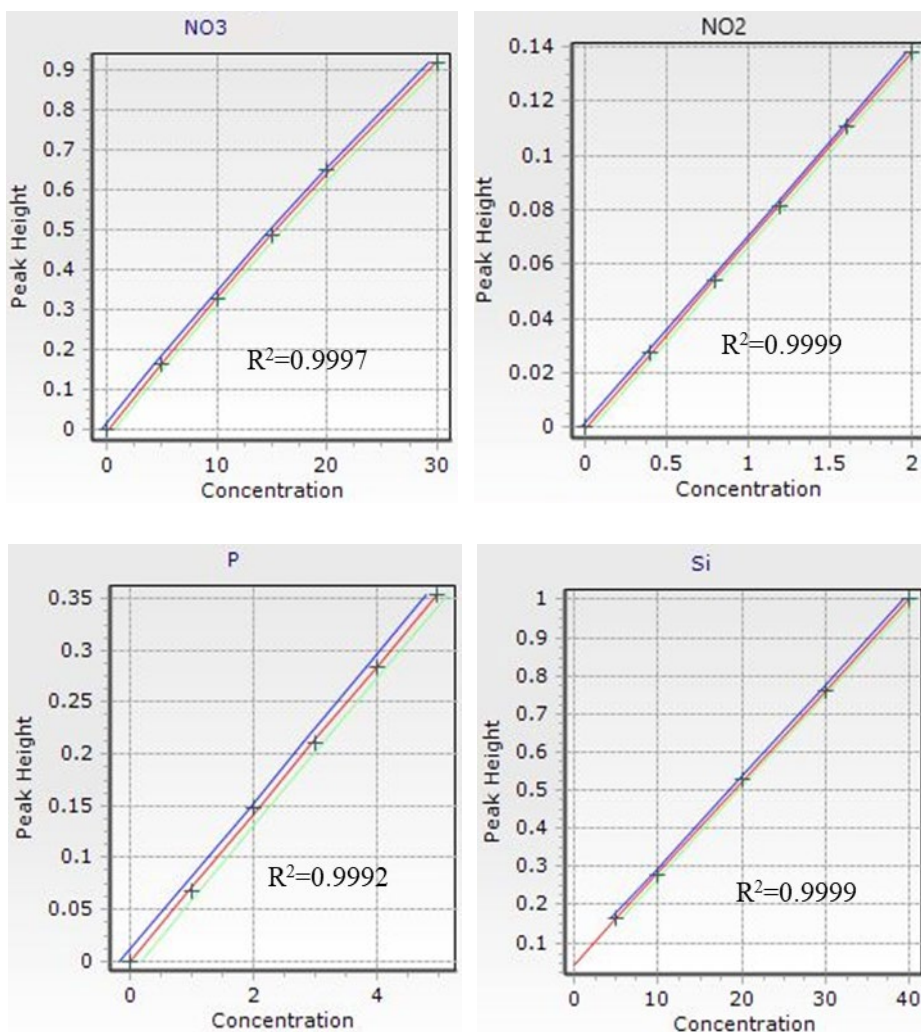


图 3-1 各项型营养盐的标准工作曲线

其中硝酸盐（用 NO₃-表示）、亚硝酸盐（用 NO₂-表示）、磷酸盐（用 P 表示）和硅酸盐（用 Si 表示）的标准工作曲线（横坐标轴为浓度，单位为 μmol/L，纵坐标轴为校正峰高）

测定过程中通过标准溶液的多次测量（每 20 个样品左右插入一个标准溶液，称为 Drift，该标准溶液一般选择与该批次大多数样品含量近似且稍高于样品的浓度，Drift 在 Skalar 分析过程中作用是校准物质峰的漂移）来计算单批次样品的相对误差和相对标准偏差，以评估和控制分析测试结果的准确度和精密度。相对误差和相对标准偏差的具体计算公式（1）（2）如下所示：

$$\text{相对误差 } d_r(\%) = \frac{|\text{单次测量值 } x_i - \text{多次测量平均值 } \bar{x}|}{\text{多次测量平均值 } \bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{相对标准偏差 } S_r(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\text{单次测量值 } x_i - \text{多次测量平均值 } \bar{x}|^2}{n-1}} \times 100\% \quad (2)$$

现将硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐各批次分析结果的相对误差和相对标准偏差列于表 3-2 和表 3-3 之中，同时显示于图 3-2 和图 3-3 之中。

表 3-2 各项营养盐参数分析测定结果的相对误差 (%) (准确度)

批次	参数			
	NO ₂ ⁻	Si	P	NO ₃ ⁻
1	0.87	1.76	0.45	0.56
2	1.77	1.30	0.70	0.56
3	1.12	0.94	0.96	0.43
4	1.10	0.10	0.40	0.70
5	0.00	0.90	0.70	0.50
6	—	—	—	0.40

注：—代表该批次没有分析此参数

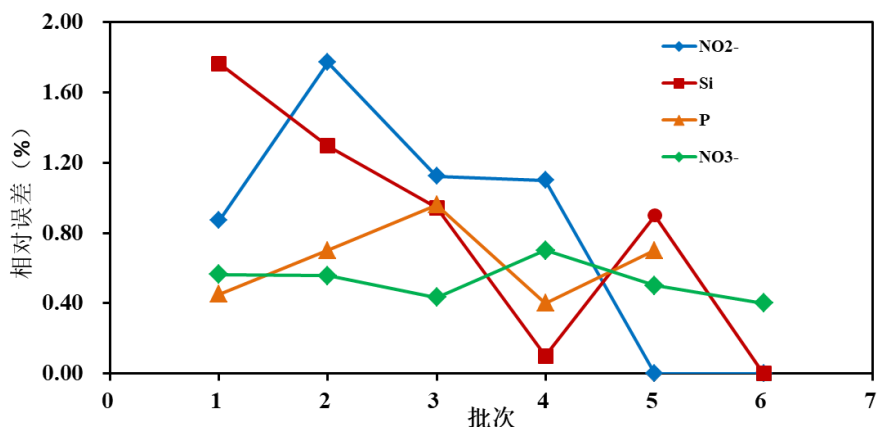


图 3-2 各项营养盐参数分析测定结果的相对误差 (%) (准确度)

由表 3-3 和图 3-3 可以看出，硝酸盐不同批次分析测定结果的相对误差均控制在 0.7 % 以内；亚硝酸盐不同批次分析测定结果的相对误差均控制在 1.8 % 以内；磷酸盐不同批次分析测定结果的相对误差均控制在 1.0 % 以内；硅酸盐不同批次分析测定结果的相对误差均控制在 1.8 % 以内，表明测定结果有较高的准确度。

表 3-3 各项营养盐参数分析测定结果的相对标准偏差 (%) (精密度)

批次	参数			
	NO ₂ ⁻	Si	P	NO ₃ ⁻
1	0.56	2.04	0.37	0.63
2	1.04	1.40	0.54	0.50
3	0.93	0.86	0.98	0.36
4	0.90	0.20	0.40	0.70
5	0.00	0.80	0.60	0.40
6	—	—	—	0.50

注：—代表该批次没有分析此参数

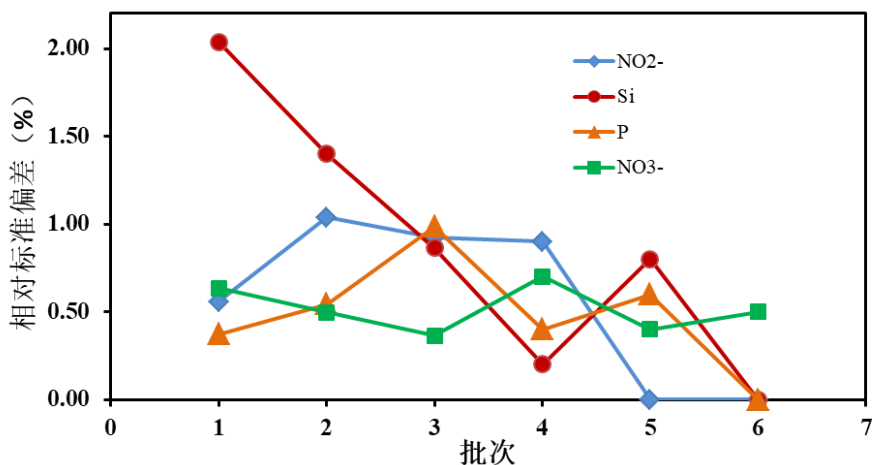


图 3-3 各项营养盐参数分析测定结果的相对标准偏差 (%) (精密度)

(4) 悬浮物

悬浮物分析过程采用空白膜校正、控制温湿度以及将烘干的滤膜放入硅胶干燥器中恒温干燥等过程进行质量控制。随机取 1 %左右烘干备用的滤膜各用 1 L 蒸馏水过滤 (取 50 张), 烘干之后, 放入硅胶干燥器恒温 6-8 h, 并控制前后两次称重的温湿度基本一致, 然后计算空白滤膜的失重值, 取其平均值作为本项目空白滤膜校正值, 结果显示本项目空白滤膜校正值为 0.3 mg/L。室内分析过程中采用实验室平行样分析、标准样品测定等方法对分析过程进行质量控制。

(5) 海水溶解无机碳

海水溶解无机碳测定仪器为溶解无机碳分析仪 (AS-C3)。主要技术指标:

重现性： $\pm 0.1\%$ （DIC浓度： $\sim 2000\ \mu\text{mol/L}$ ）；样品体积量：每次测量 0.2-1.5 mL。溶解无机碳分析过程中大约每 5-10 个样进行标线测定，共计 12 条标线，相邻标线测定相对偏差为 $0.10\pm 0.09\%$ 。

4 生物基线

生物群落采用的调查方法主要按照《国际海底区域环境调查技术规程》（GB/T 42629.3-2023）和《深海微生物样品前处理技术规范》（GB/T 30744—2014）及相关技术规程和文件的要求采集获取。本报告分析的生物群落要素主要包括叶绿素 *a*、光合色素、微生物、浮游植物、浮游动物、小型底栖生物、大型底栖生物、食腐动物、海鸟和哺乳动物种类多样性和丰度。

4.1 叶绿素 *a* 和光合色素

4.1.1 调查方法

叶绿素 *a* 分析水样使用 SBE911 plus CTD 采水器，采集的水样按照设定的采样层次，将各层位采水（0.6 L）经过装置有 25 mm 直径的 Whatman GF/F 滤膜的六联过滤器上过滤，由津腾隔膜真空泵在 0.02 MPa 负压下过滤。收集好的样品用铝箔纸带包裹保存于超低温冰箱中带回实验室分析。叶绿素 *a* 的提取须在 4 °C 环境下进行，测定前在黑暗处室温存放 0.5 h，酸化过程为 30 s 后用 TURNER-10-AU-005-CE 荧光仪测定。

光合色素分析水样利用多联倒置过滤装置过滤收集到滤膜上，过滤负压控制在 $<100\ \text{mmHg}$ 的压力范围内，并可保证滤膜与外界隔离。经过装置有 25 mm 直径的 Merck GF/D 滤膜的 Millipore Swinnex® 换膜过滤器中过滤，由 SHB-III 型循环水式真空泵在 0.02 MPa 负压下过滤，抽气量 10 L/min，频率 50 Hz。收集好的样品放入 2 mL 冻存管保存于超低温冰箱（-80 °C）中带回实验室分析。在对光合色素样品进行提取的操作中，首先将滤膜外的残余海水吸干，之后将滤膜剪碎；加入 3 mL N,N-二甲基甲酰胺（N,N-dimethylformamide, DMF），于 -20 °C 避光提取一小时（Furuya, et al., 1998）。然后在暗室条件下将提取液振荡数十秒后取上清液。再将上清液以 13 mm 直径的 Whatman® GF/F 滤膜（Swinnex Filter Holder）过滤。取 0.6 mL 滤过的上清液与 0.6 mL 浓度为 $1\ \text{mol L}^{-1}$ 的乙酸铵混合于体积为

1.5 mL 的棕色色谱瓶中，然后避光保存于-20 °C冰箱中，待 HPLC 分析。本研究采用 DMF 作为光合色素的有机提取溶剂。

光合色素分析系统为 Agilent 1100 Series 液相色谱工作站，采用二极管阵列检测器（DAD）检测洗脱峰，扫描波段为 300-700 nm，以固定波长 440 nm 和 663 nm 记录峰谱特征。采用 3.5 μm 粒径的 Eclipse XDB C8 分离柱 (100 $\times$ 4.6 mm; Agilent Technologies, Germany)。流动相 A 为体积比 4:1 的甲醇: 1 mol L⁻¹ 乙酸铵缓冲溶液，流动相 B 为甲醇。梯度洗脱程序如表 4-1 所示，流动相流速为 1 mL min⁻¹。每两次样品注射至程序启动间的时间间隔~10 min，使色谱柱的极性状态充分平衡 (Mendes, et al., 2007)。

表 4-1 光合色素 HPLC 分离分析梯度洗脱程序

时间(min)	流动相 A(%)	流动相 B(%)	梯度系统
0	100	0	进样
2	100	0	线性梯度
16	55	45	线性梯度
27	0	100	线性梯度
32	0	100	线性梯度
36	100	0	平衡

4.1.2 数据处理方法和质量控制

叶绿素 *a* 和光合色素样品的采集、预处理、贮存、运输等环节按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007) 的要求操作。叶绿素 *a* 的质控，主要是实验室平行样的测定，检验叶绿素 *a* 测定过程中样品重复性的相对误差。具体质控措施为，挑选一定比例能够在一定程度上覆盖整个调查海域的站位，对样品进行双样测定，平行样的个数为 26，占总样品数的 33.3 %。对叶绿素 *a* 进行重复性样品测定的质控结果表明，其样品重复性误差为 0.20-8.00%，小于 $\pm 10\%$ ，测定精度符合《国际海底区域环境调查技术规程》(GB/T 42629.3-2023) 规范的要求。

光合色素浓度质量控制和评价方案参照 Roy et al. (2011)进行。内容包括：每天进行标准品的进样以确定色谱峰的分辨率和保留时间；根据标准品峰谱图每天确定色谱峰吸收值和保留时间的改变值；每天校正 Chl *a* 浓度；每天进行样品提取效率的检验分析；每天对标准样品的 HPLC 光谱进行分析确认吸收波长

变动；当更换色谱柱时确认 Chl *a* 的工作曲线不会产生大的变化；检测器噪音值的分析控制。

4.2 微生物

4.2.1 调查技术

根据《海洋调查规范 第 6 部分：海洋生物调查》开展了海水和沉积物微生物多样性分析和可培养微生物调查。

微生物样品采集按《深海微生物样品前处理技术规范》（GB/T 30744-2014）进行了样品处理。现场沉积物样品均采用 4 °C 冷藏、-20 °C 冷冻和-80 °C 冷冻三种保藏方式保藏。

微生物分析数据通过提取海水和沉积物样品中的 DNA，并特异性扩增某个或两个连续的高变区，采用高通量测序平台对高变区序列进行测序。随后，通过生物信息学分析方法，对测序数据进行处理和分析，获得样品中微生物群落的组成情况和物种注释信息。

深海沉积物 DNA 提取试剂盒采用 FastDNA®SPIN Kit for Soil，水体滤膜 DNA 提取试剂盒为 PowerWater DNA Isolation Kit。16S rRNA 基因扩增引物：

27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'

1492R: 5'-ACGGCTACCTTGTTACGACT-3'

PCR 扩增及产物电泳检测以基因组 DNA 为模板，使用带 barcode 的引物及 PremixTaq (TaKaRa) 进行 PCR 扩增。通过 Gene Tools Analysis Software (Version4.03.05.0, SynGene) 对 PCR 产物进行浓度对比后，按照等质量原则计算各样品所需体积，将各 PCR 产物进行混合。分析过程中使用 E.Z.N.A.®GelExtractionKit 凝胶回收试剂盒回收 PCR 混合产物，使用 TE 缓冲液洗脱回收目标 DNA 片段。随后将回收的 DNA 样本进行建库操作，按照 NEBNext®Ultra™DNA Library Prep Kit for Illumina®标准流程进行建库操作，以确保测序的准确性和可靠性。建库完成后，使用高通量测序平台 Hiseq 或 Miseq 对样本进行上机测序。

测序得到的原始图像数据文件会经过碱基识别 (BaseCalling) 分析，将其

转化为原始测序序列（RawReads）。测序结果以 FASTQ（简称为 fq）文件格式存储，其中包含测序序列（Reads）的序列信息以及其对应的测序质量信息。这些数据可以进一步进行生物信息学分析，如序列比对、物种注释、SNP 检测等，以了解样本的基因组组成和遗传变异等特征。

4.2.2 数据处理方法和质量控制

微生物多样性数据分析流程如图 4-1 所示。

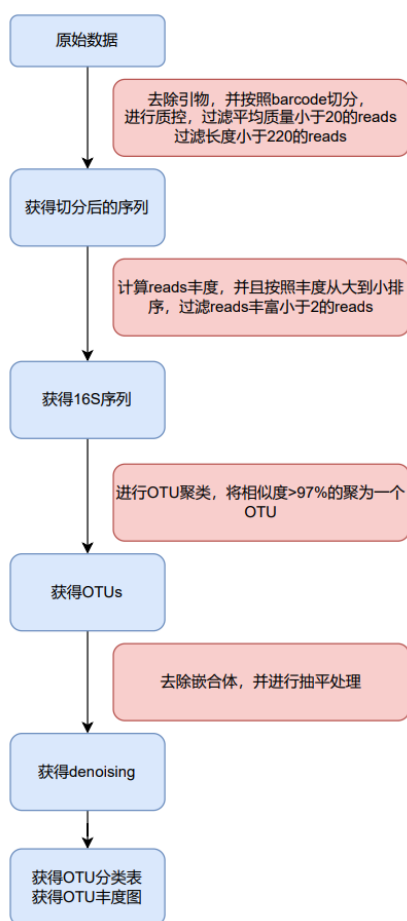


图 4-1 微生物多样性分析流程

（1）QC 操作：数据质量控制（Quality Control）是生物信息学研究中至关重要的一环。这个步骤通常涉及到检查原始数据的测序质量、去除低质量 reads 和去除污染等，以确保下一步的分析结果的准确性和可靠性。

（2）去嵌合体和聚类操作：Qiime 软件是一种用于处理高通量测序数据的软件，它可以帮助去除测序数据中的嵌合体(chimras)，并对 reads 进行聚类。在聚类过程中，将 reads 按照其丰度从大到小排序，并利用 97%相似度的标准进行

聚类，得到 OTU。每个 OTU 被认为可以代表一个物种。

(3) 随机抽平操作：对每个样品的 tags 进行随机抽平处理，并提取对应的 OTU 序列。这个步骤旨在降低样品之间的差异，使得样品之间的比较更加准确和可靠。

(4) 多样性指数的稀释曲线：Qiime 软件是一种广泛使用的用于微生物群落分析的软件。在这个步骤中，使用 Qiime 软件绘制 α 、 β 多样性指数的稀释曲线，以帮助选择合适的抽平参数。

(5) OTU 分类：在这个步骤中，利用代表序列和 16S 数据库进行比对，从而对每个 OTU 进行物种分类。

(6) 得到 OTU 丰度表：根据每个 OTU 中序列的条数，得到 OTU 丰度表。这个表格将被用于后续的分析，例如物种多样性分析、群落结构分析、功能分析等。

由于不同样本对应的 reads 数量差距较大，为了保证后期分析结果合理，对每个样本的数据进行随机抽平处理。这种方法可以消除不同样本中 reads 数量的差异对分析结果造成的影响，使得分析结果更加可靠和可比较。抽平参数的选择非常重要，我们根据 α 多样性指数的稀释曲线来确定抽平参数。

对富集菌群和环境样品微生物种群结构的分析方法，主要是使用 SMRT Link Analysis 软件 6.0 版处理 PacBio 原始 reads，以获得环形一致性序列 (CCS) reads：参数设置最小通过次数=3，最小预测准确度=0.99。原始 reads 通过 SMRT Portal 处理，以筛选序列的长度 (1300-1500 bp) 和质量。通过去除 barcode、引物序列、嵌合体和包含 10 个连续的相同碱基的序列进行进一步过滤。使用 UPARSE (7.1 版，<http://drive5.com/uparse/>) 将 OTU 按照 98.65 % 的相似性阈值聚类，并使用 UCHIME 鉴定并去除嵌合序列。RDPClassifier (<http://rdp.cme.msu.edu/>) 针对 Silva (SSU132) 16S rRNA 数据库，使用 70 % 的置信度阈值分析每个 16S rRNA 基因序列的系统发育关系。

4.3 微型浮游生物

4.3.1 调查技术

微型浮游植物种类和丰度测定采用流式细胞术 (Olson et al., 1993)。使用 SBE 911 plus CTD 采水器采集水样, 用 500 μL 20 %多聚甲醛固定后置于液氮中保存。至实验室后水浴解冻, 然后用流式细胞仪 (BD FACSCalibur) 鉴定微型浮游植物种类和测定丰度。流式细胞仪检测时按照仪器厂商提供的方法检查仪器的灵敏度和准确度 (用 CV 值表示, 一般 CV 值应小于 2.0), 确保仪器状态良好。

4.3.2 数据处理方法和质量控制

微型浮游生物的质控, 主要是实验室平行样的测定, 检验微型浮游植物测定过程中样品重复性的相对误差。平行样的个数为 26, 占总样品数的 33.3%。对微型浮游植物重复样品进行测定的质控结果表明, 其样品重复性误差为 0.20-9.50 %, 小于 $\pm 10\%$, 测定精度符合《国际海底区域环境调查技术规程》(GB/T 42629.3-2023) 规范的要求。

4.4 浮游植物

4.4.1 调查技术

浮游植物调查采用浮游生物垂直拖网和 CTD 采集。浮游植物网网目为 20 μm , 由水下 200 m 垂直拖曳至水面后, 使用连续海水供水系统冲洗收集于样品瓶中, 用 5 %甲醛溶液进行固定, 室温保存。滤水量数据由固定在网口的 Hydro-Bios No.438115 型网口流量计测定。

室内分析中, 先将浮游植物样品进行静置沉降 >48 h 后, 用虹吸法抽出上清液, 将样品浓缩, 然后置于显微镜下进行物种鉴定与计数, 尽可能鉴定到种或者最低的分类阶元。

4.4.2 数据处理方法和质量控制

浮游生物采样网具、采样程序、所获样品的处理与保存以及室内分析方法均按照《海洋调查规范》及国际认可方法进行以保证样品质量。

多样性指数采用以 2 为底的对数计算公式，表达式为：

$$H' = -\sum (p_i \ln p_i)$$

均匀度计算公式为：

$$J' = H' / \ln S$$

将鉴定分析获得的数据结果用 SPSS 软件进行统计与处理，并绘制图件。

4.5 浮游动物

4.5.1 调查技术

大中型浮游生物调查采用浮游生物 WP2 网，网目为 200 μm ，由水下 200 m 垂直拖曳至水面后，使用连续海水供水系统冲洗收集于样品瓶中，用 5 % 甲醛溶液进行固定，室温保存。滤水量数据由固定在网口的 Hydro-Bios 网口流量计测定。

浮游生物分层分布特征调查采用使用浮游生物分层拖网（HydroBios Multinet System Maxi，网口面积 0.5 m^2 ，网筛孔径 200 μm ），对 0-50 m、50-100 m、100-200 m、200-500 m、500-1000 m 进行层垂直拖曳后，使用连续海水供水系统冲洗收集于样品瓶中，用 5 % 甲醛溶液进行固定，室温保存。滤水量及其他环境参数由仪器自带传感器采集。

4.5.2 数据处理方法和质量控制

浮游动物多样性分析计算方法和质量控制如 4.4.2 所示。

4.6 小型底栖生物

小型底栖生物样品利用多管取样器采集，从多管取样器采集未受扰动芯样，芯样按 0-1 cm，1-2 cm，2-3 cm，3-4 cm 和 4-5 cm 分割成 5 层；每管上覆水中的生物经过 32 μm 网筛截留与 0-1 cm 层的沉积物样装在一起，其余各层沉积物样分别装瓶；加入 5 % 甲醛固定沉积物样品带回实验室，利用 Ludox 离心法分离出小型底栖生物样品，按照《国际海底区域环境调查技术规程》（GB/T 42629.3-2023）的要求处理和分析小型底栖生物。

4.7 大型底栖生物

大型底栖生物使用箱式取样器采样，样品预处理按照《国际海底区域环境调查技术规程》（GB/T 42629.3-2023）及 ISA 推荐性规范——《环境数据与资料的标准化》（2001）进行。采样器为边长 50 cm 的箱式取样器，按照 0-3 cm，3-5 cm，5-10 cm 间距采集各层位沉积物，现场利用 250 μm 网筛淘洗沉积物样品以获得大型底栖生物样品，加入 5 % 甲醛固定保存。大型底栖生物样品带回实验室后经类群分选后，交由对应类群的分类专家开展相应的形态学鉴定并计数，样品称重采用感量为 0.0001 g 的分析天平，称重时吸干样品表面水份。

大型底栖生物选取采样效果较好的站位进行分层定量取样，采样效果一般的站位采集表层沉积物进行定性取样，取样和样品预处理均按照《国际海底区域环境调查技术规程》（GB/T 42629.3-2023）进行，样品分析鉴定由具有海洋调查相关专业资质证书的人员完成，并由第二人进行核对，确保获取数据可靠。

4.8 食腐生物

利用深海生物诱捕观测系统（Lander）开展深海底食腐生物采样和视像调查。调查方法如下：Lander 抵达海底后，设置影像记录系统定时启动，照相机拍照频率设置为 1 张/分钟，摄像机每连续录制 30 分钟后休眠 30 分钟。设备降落海底观测大约 48 h 后，回收设备。设备返回甲板后，立即收集诱捕笼中生物样品至 4 $^{\circ}\text{C}$ 海水中，现场拍照后，选取部分样品置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 保存，剩余样品保存于 100 % 酒精。

根据生物形态、游动轨迹等特征判断短时间内连续出现的相似个体是否为同一个体，观察记录该站位所有底栖生物的类型以及个体数量，并对数据进行汇总处理和作图分析。

4.9 海鸟、海龟和哺乳动物

以走航观测结合公开数据开展海龟、海洋哺乳动物和海鸟多样性调查，主要调查鳍足类和鲸类等海洋哺乳动物和海鸟的种类组成。

海鸟调查主要参考依据为《生物多样性观测技术导则——鸟类》（HJ710.42

014) 和 ISA 发布的《“区域”内矿物资源开发规章草案环境基线数据确定准则草案》(ISBA/27/C/11)。走航调查通常选择能见度较高 (≥ 500 m)、风浪较小 (海况 ≤ 4 级) 的天气情况下进行。在观测平台上使用望远镜并结合肉眼进行观测进行。左、右观测范围为各自一侧 100° 的范围, 即以航线方向为 0° , 从各自一侧 90° 到越过中线 10° 的水域。发现动物后记录信息包括发现的准确时间和位点位置。

4.10 初级生产力

4.10.1 调查技术

初级生产力采用 ^{14}C 黑白瓶法测定。先用透明度盘测定海水的透明度, 确定采样的光学深度, 利用 SBE 911 plus CTD 采集各层位海水分装于 175 mL 的窄口方形瓶中, 每个深度设置两个白瓶一个黑瓶, 并向其中加去 ^{14}C 标记物。之后分别将不同水层样品瓶分装至所对应的光衰减膜套中, 分别为表层光强的 100 %、50 %、30 %、10 %、5 % 和 1 % 共 6 个梯度。将膜套盒置于表层流水控温的甲板培养水槽内培养 4-6 h。待培养结束将水样收集回同位素集装箱实验室于同位素 6 联负压过滤装置进行过滤, 经过装置有 25 mm 直径的 $0.22\ \mu\text{m}$ 孔径的聚碳酸酯滤膜的过滤漏斗下进行过滤, 由隔膜真空泵在 0.02 MPa 负压下过滤, 将滤膜放入闪烁瓶后经浓盐酸雾熏处理后置于 $-20\ ^\circ\text{C}$ 冰箱保存。样品带回陆基实验室后向装有滤膜的闪烁瓶中加入闪烁液, 振荡后把闪烁瓶置于液体闪烁计数仪 Tricarb-3110TR 内, 待样品暗适应完全达到测定标准后进行测定。

此外在《全球变化数据仓储电子杂志》下载了 2003 年以来全球海洋初级生产力 9 km 分辨率月度空间分布数据。该数据利用 MODIS 卫星月度产品数据中的浮游植物吸收系数, 叶绿素浓度, 真光层深度, 490 nm 漫衰减系数, 光合有效辐射和海表温度 6 类 MODIS 产品数据, 采用 SABPM 模型计算出全球海洋初级生产力遥感监测数据。本数据集为该数据集为时间序列数据 (以月为频率), 存储为 .hdf 格式 (陶醉等, 2019)。

4.10.2 数据处理方法和质量控制

初级生产力的质量控制, 主要是实验室白瓶和黑瓶平行样的测定, 检验初

级生产力测定过程中样品重复性的相对误差。具体质控措施为对所有黑白瓶样品进行平行样的测定。平行样的个数为 108 个，占总样品数的 100 %。对初级生产力重复样品进行测定的质控结果表明，其样品重复性误差为 0.12-7.50 %，小于 ± 10 %，测定精度符合《国际海底区域环境调查技术规程—海洋生物调查》（GB/T 42629.3-2023）规范的要求。