ICS
CCS

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM-2025-70

大洋多金属结核海底集矿器绿色智能开采指南

Guide on green and intelligent exploitation of deep-sea polymetallic nodule collectors

2026－10－13 发布　　2026－10－14 实施

中关村绿色矿山产业联盟　　发 布

目　　次

前　言.....II
1 范围.....1
2 规范性引用文件.....1
3 术语和定义.....2
4 大洋多金属结核集矿器开采流程.....3
5 大洋多金属结核矿区勘探.....4
6 大洋多金属结核开采设备布放及回收.....8
7 大洋多金属结核智能开采作业.....10
8 大洋多金属结核区域采后环境恢复.....16
附 录 A （规范性） 大洋多金属结核勘探指标.....19
附 录 B （资料性） 大洋多金属结核矿区环境评估方法及指标.....21
参考文献.....25

前　言

本文件按照GB/T1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：西安建筑科技大学、南方科技大学、浙江大学、中南大学、上海交通大学、北京大地高科地质勘察有限公司、北京探矿工程研究所、广州海洋地质调查局、深之蓝海洋科技股份有限公司、咸阳师范学院、中国瑞林工程技术股份有限公司。

本文件主要起草人：江松、何润丰、郭梨、瞿逢重、杨丽丽、周志远、杨劭坚、姚贝、司红森、卢猛、刘广治、陈宗恒、魏照宇、魏建仓、张嘉轶、张伟、沈楼燕

大洋多金属结核海底集矿器绿色智能开采指南

1 范围

本文件给出了大洋多金属结核海底集矿器绿色智能开采指南，矿区勘探、开采设备布放与回收、开采过程控制、采后环境恢复等指导内容。

本文件适用于国际海底区域内以海底集矿器开采法实施的大洋多金属结核资源的绿色智能开采作业，其他深海固体矿产资源的绿色智能开采可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；凡不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ISBA/25/LTC/6/Rev.1 指导承包者评估勘探区域内海底矿产资源可能对环境产生影响的建议（Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area）

GB/T 1.1 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

GB/T 12763.1 海洋调查规范 第1部分:总则

GB/T 12763.3 海洋调查规范 第3部分：海洋气象观测

GB/T 12763.5 海洋调查规范 第5部分：海洋调查规范 第5部分: 海洋声、光要素调查

GB/T 12763.6 海洋调查规范 第6部分：海洋生物调查

GB/T 12763.8 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查

GB/T 12763.9 海洋调查规范 第9部分：海洋生态调查指南

GB/T 12763.10 海洋调查规范 第10部分：海底地形地貌调查

GB/T 12763.11 海洋调查规范 第11部分：海洋工程地质调查

GB/T 17229 大洋多金属结核矿产勘查规程

GB/T 20259 大洋多金属结核化学分析方法

GB/T 30269.1 信息技术 传感器网络 第1部分：参考体系结构和通用技术要求

GB/T 30269.304 信息技术 传感器网络 第304部分：通信与信息交换：声波通信系统技术要求

GB/T 30269.1001 信息技术 传感器网络 第1001部分：中间件：传感器网络节点接口

GB/T 35319 物联网 系统接口要求

GB/T 36478.1 物联网 信息交换和共享 第1部分：总体架构

GB/T 35571 大洋多金属结核资源勘查规范

GB/T 42629.4 国际海底区域和公海环境调查规程 第4部分：海洋沉积物物理特性调查

GB/T 44823 绿色矿山评价通则

DZ/T 0130.3 地质矿产实验室测试质量管理规范 第3部分：岩石矿物样品化学成分分析

DZ/T 0130.15 地质矿产实验室测试质量管理规范 第15部分：海洋地质样品测试

DZ/T 0399 矿山资源储量管理规范

DZ/T 0327 海洋地质取样技术规程

T/CAOE 40 海底多金属结核采矿系统技术指南

T/CAOE 41 深海采矿活动环境保护与保全指南

T/CAOE 47 大洋多金属结核资源量估算技术指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多金属结核 polymetallic nodules

赋存于深海海底表层或紧贴表层下，以结核状产出的自生沉积物，其矿物组成主要为铁锰氧化物和氢氧化物，富含锰、钴、镍、铜等有价金属元素。

3.2

大洋多金属结核 oceanic polymetallic nodules

区别于一般多金属结核的定义，特指赋存于公海及国际海底区域的多金属结核资源。

3.3

海底集矿器 seafloor collector

在海底表面自主行走或拖曳行走，配备采集机构、行走机构、动力系统、导航与控制系统，用于采集多金属结核的专用水下作业设备，亦称海底采矿车。

3.4

海底集矿器开采法 seafloor collector mining method

采用海底集矿器在海底表面行进，通过水力式、机械式或复合式采集机构将多金属结核从沉积物中剥离并收集，再通过水下提升系统将矿石输送至水面支持平台的开采方法。

3.5

水面支持平台 surface support platform

为深海采矿作业提供水面支持的船舶或半潜式平台，具备动力定位、设备布放与回收、矿石接收与处理、矿物储存与外输、中央控制与监视等功能。

3.6

深海采矿布放与回收系统 launch and recovery system

用于布放、回收采矿立管、水下扬矿泵、水下中继站和水下采矿车等水下采矿设备及部件的专用系统，包括塔架提升系统、吊放系统及管柱处理系统。

3.7

深海采矿开采境界 mining limit

根据资源禀赋、技术经济条件和环境约束综合确定的开采作业范围，包括平面边界和可采深度范围。区别于陆地矿山以剥采比和经济模型确定最终境界的方法，大洋多金属结核开采境界的圈定宜考虑海底地形坡度、底质力学性质、底层流方向及生态敏感区分布等深海特有因素。

3.8

环境基线 environmental baseline

在未受采矿活动直接影响的情况下，特定时空范围内海洋环境要素的基础值及生物群落的自然特征，包括物理、化学、地质和生物等基线。

3.9

采矿羽流 plume

采矿作业过程中产生的含有悬浮沉积物颗粒的海水扩散体，包括海底集矿器行走和采集作业产生的海底扰动羽流，以及水面支持平台尾水排放产生的中层或底层排放羽流。

3.10

建群种 constructive species

在深海底栖动物群落中起主导作用的优势种，对群落的种类组成、结构和功能具有决定性影响。

4 大洋多金属结核集矿器开采流程

4.1 勘探

4.1.1 预查阶段

在综合研究海洋资料的基础上，通过已有资料~~开展~~类比分析、少量初步海上观测和极少量工程验证，圈定普查区，了解普查区内多金属结核资源远景的阶段。

4.1.2 普查阶段

普查阶段是指在普查区~~内~~开展稀网度测量与取样工作，初步查明矿区开采技术条件，圈定详查区并推断资源量的阶段。

a) 地理调查：初步查明普查区内水深、地形坡度变化、底质类型分区、表层沉积物厚度基本参数，以满足采矿地形适宜性初步评价需求；
b) 矿业调查：初步查明普查区内多金属结核丰度、覆盖率、品位、含水率及密度的空间分布趋势，以评估普查区的资源开发远景。

4.1.3 详查阶段

详查阶段是指在详查区开展加密测量与系统取样工作，基本查明矿区开采技术条件，并通过预可行性研究估算控制资源量的阶段。开采技术条件研究内容宜包括：

a) 地理调查：基本查明微地貌细节、地形起伏变化及障碍物；基本查明表层沉积物物理力学参数、空间非均质性及近底悬浮体含量，为采矿路径规划、导航避障及海底设备平稳布放提供依据；
b) 矿业调查：查明矿区形态、规模与连续性；确定边界品位与综合利用指标，预测矿石开采效率；
c) 生化调查：初步查明详查区内生物群落的物种组成、多样性、垂直与空间变异，建立完整环境基线；查明沉积物表层关键元素、化学剖面与有害组分赋存状态，预测采矿扰动影响与恢复潜力；
d) 水文气象调查：初步查明详查区内风、浪、涌、全水深海流剖面的基本特征；初步查明海水温度、盐度及透明度的剖面结构，为采矿系统布放、作业稳定性提供完整参数。

4.2 设备布放

设备布放是指将采矿立管、水下中继站、水下采矿车等水下采矿设备，从水面支持平台平稳下放至海底预定作业位置的全过程，具体设备布防流程可参考CCS《深海采矿设施指南》执行。

a) 布放准备：作业前提交塔架提升系统、吊放系统详图及计算书等设计文件；完成设备检查、连接、系统测试与定位校准；
b) 下放控制：通过布放回收系统匀速下放，实时监测姿态、深度与位置。系统宜具备有效限制被吊设备晃荡的功能，确保设备在恶劣海况下也能平稳回收到甲板；
c) 就位锁定：设备到达海底后，完成定位、固定与状态确认，进入待命或作业状态。

4.3 开采

以商业或试验目的，在海底对多金属结核、富钴铁锰结壳、多金属硫化物等矿产进行采集、输送、提升至水面的作业活动。具体环节如下：

a) 采集：使用海底集矿设备在海底采集多金属结核；
b) 输送：矿石经水下输送单元送至提升系统入口；
c) 提升：使用海底采矿立管和提升系统将结核或矿浆从海底运输到移动式海上采矿装置；

d) 处理：在平台完成矿石接收、初步处理与存储。

4.4 设备回收

设备回收是指将海底作业后的采矿立管、水下中继站、水下采矿车等水下采矿设备，从海底平稳起吊、回收到水面支持平台供转移及下次布放的全过程；具体环节如下：

a) 回收准备：停止作业、设备排空、脱开与海底连接，启动回收程序；
b) 起吊提升：通过布放回收系统匀速起吊，实时监测姿态、张力与深度；
c) 回收就位：设备回到平台后，完成固定、检查、维护与存放。

4.5 环境恢复

4.5.1 恢复与补偿

闭矿阶段宜根据开发活动造成的实际环境影响制定针对性的环境管理方案，恢复与补偿工作可参考T/CAOE 41执行：

a) 重点关注直接扰动区域的原有生物群落，采取主动复原措施（如底质整平、基底改良）或者被动自然恢复（技术或经济上不可行的区域）；
b) 对于无法进行恢复的，可考虑采取补偿措施，资助建立深海保护区、支持区域生物多样性基因库建设，所产生的生态效益应与受损的生态系统价值相匹配。

4.5.2 长期性监测

闭矿阶段宜开展长期性监测，根据矿产类型、采矿活动的规模和关闭计划制定长期性监测方案。监测工作可参考T/CAOE 41执行：

a）设定监测频率，重点覆盖开采迹地、羽流影响区及邻近未扰动参照区；
b）监测指标宜涵盖物理化学环境参数及生物群落恢复指标；
c）监测数据宜定期纳入数据库管理。

4.5.3 后评价

后评价宜用于评估采矿活动产生的累积影响、残留影响以及生态恢复、补偿措施有效性，重点包括：

a）评估闭矿后环境影响持续时间与恢复时间；
b）评估环境与生态累积效应；
c）判断是否发生区域性环境变化；
d）验证恢复、补偿措施有效性；
e）关注生物回迁和恢复情况。

5 大洋多金属结核矿区勘探

5.1 勘探内容

矿区勘探主要包含地理勘探、矿业勘探、生物勘探、海洋水文气象勘探。

a) 地理勘探：服务于矿区范围确定、矿体边界圈定、采矿地形适宜性评价、集矿机通行性与稳定性分析，主要包括地形勘探和底质勘探；
b) 矿业勘探：主要服务于矿石质量评价、工业矿体圈定、资源量估算与选冶指导，提供结核品位、丰度、覆盖率及开采技术指标；
c) 生物勘探：宜满足国际海底管理局环保要求、建立环境基线、开展环评与生态保护。提供生物群落结构、底栖生物丰度/分布及沉积物环境化学参数；
d) 海洋水文气象勘探：主要服务于保障海上作业稳定开展、评估采矿系统海况适应性、确定环境基线。提供海水海流（底层流）、风浪涌、透明度、温度、盐度、CTD等参数。

5.2 地理勘探

5.2.1 地形勘探

5.2.1.1 单波束测深

单波束测深是通过船载换能器垂直向下发射声脉冲并接收海底回波，获得航线上离散水深点序列的水声测量方法。其主要技术指标可参考GB/T 12763.10执行：

a) 导航定位最大误差小于10 m。
b) 测深准确度：水深小于30 m时，水深测量准确度应优于0.3 m；在水深大于30 m时，水深测量准确度应优于水深值的1%；
c) 换能器波束垂直指向角：不大于30°；
d) 适航性：当船速不小于10节，测量船横摇不大于10°、纵摇不大于5°的条件下，仪器能正常工作。

5.2.1.2 多波束测深

多波束测深是利用发射与接收指向正交的换能器阵列，在一次声脉冲发射中获取垂直于航向的数百个波束水深点，形成连续覆盖的条带式水深数据，实现高分辨率海底地形全覆盖测量及三维地形建模，其主要技术指标可参考GB/T 12763.10执行：

a) 导航定位最大误差小于10 m；
b) 测深准确度：水深小于30 m时，水深测量准确度应优于0.3 m；水深大于30 m时，水深测量准确度应优于水深的1%；
c) 换能器波束角：宜不大于2°；
d) 在扇区开角不大于150°时，波束数宜不少于100个；
e) 姿态传感器横摇、纵摇测量准确度宜不低于0.05°；升沉测量准确度宜不低于0.05 m或实际升沉量的5%，取二者较大值；罗经测量准确度应不低于0.1°。

5.2.1.3 侧扫声纳测量

采用主动声呐探测原理，通过换能器向海底发射宽频声波信号，利用声波在不同介质界面产生的反射、折射和散射等物理现象，获取海底地层结构的空间分布信息，其主要技术指标可参考GB/T 12763.10执行：

a) 导航定位最大误差小于10 m；
b) 拖体位置准确度优于拖缆长度的10%；
c) 换能器船艏方向的波束角：不大于2°；
d) 分辨率：不低于1m；
e) 最大单侧扫幅宽度：不小于400m。

5.2.1.4 浅地层剖面测量

地层剖面测量是利用声波在海底以下介质中的透射与反射作用，获取海底浅部沉积层序、地层结构及特殊地质体分布特征的声学剖面方法。其主要技术指标可参考GB/T 12763.10执行：

a) 导航定位最大误差小于10 m；
b) 探测准确度：探测分辨率不大于1m，探测深度不小于30m；
c) 接收带宽：100Hz～20kHz；
d) 声源级：10dB～100dB；
e) 声源频谱：250Hz～15kHz。

5.2.2 底质勘探

5.2.2.1 底质表层采样

底质表层采样一般采用蚌式、箱式、多管式、自返式或拖网等采样方法，获取表层沉积物的类型、颜色、气味、稠度、粘性、粒度分布、矿物组成、含水率、密度、抗剪强度等参数。采样要点可参照GB/T 42629.4规定执行：

a) 采集沉积物样品质量不宜少于1000g，达不到此数量，该站列为空样；
b) 调查区内空样站位数不宜超过总站位数的10%；
c) 拖网采样尽量增大网具的强度和绞车钢绳的负荷能力，保障样品顺利获取。

5.2.2.2 底质柱状采样

底质柱状采样常使用重力、重力活塞、振动活塞及浅钻等取样设备进行。获取数据为沉积物的垂向序列、地层结构、不同层位的物理力学性质指标等。采样要点可参照GB/T 42629.4规定执行：

a) 柱状采样管配重为300 kg～600 kg，采取的柱状样长度不宜少于150cm；
b) 陆架海区柱状采样站数应占表层样站数的1/10以上，大洋海区占表层样站数的1/15；
c) 采取的样品应及时做好层次标记，上下次序不得颠倒；
d) 分割样品时，应注意断面和剖面上样品的完整性，防止污染或损坏样品。

5.2.2.3 悬浮体采样

悬浮体采集一般使用横式采水器、颠倒采水器或南森采水器等，采水层次根据水深或调查要求确定，该方法主要获取海水中悬浮颗粒物的浓度、粒度分布、矿物和化学成分等数据。采样要点如下可参照GB/T 42629.4规定执行：

a) 悬浮体采水量远海2000 cm^3，近海不少于1000cm^3，含沙量高的河口区为500 cm^3左右；
b) 滤膜应事先烘干、称重和编号，称量天平感量为0.0001g，分析中各步骤称量应采用同一天平；
c) 悬浮体分析要求计算出单位体积海水中泥沙的含量；
d) 进行生物或有机质测定时，取样品的一半作烧失量分析，在500℃下灼烧2h，计算出烧失量。

5.3 矿业勘探

5.3.1 样品采集方法

样品采集宜采用抓斗、箱式采样、拖网、多频探测及海底影像采集等方法，获取多金属结核、沉积物及海底影像等资料，其采样要求可参考GB/T 35571-2017开展执行：

a) 自返式抓斗采样：同一测量站位多次采样时，采样器投放间距宜达到150 m～200 m；
b) 有缆抓斗采样：各设计站位原则上应取得有效样品，否则宜重做或调整站位后补做；
c) 箱式采样：勘探阶段箱式采样应占有缆采样数的20%；
d) 拖网采样:每个航次采集的多金属结核样品量不宜少于500kg；拖网次数根据航次多金属结核样品量确定；
e) 多频探测：要求船速和航向保持稳定，严格按操作规程执行；
f) 海底影像采集：要求照相站位均匀布设，每站位成功获取并储存的海底影像照片不少于50幅。

5.3.2 样品现场测定

样品现场测定主要获取多金属结核的含水率、重量、三要素、覆盖率、丰度及密度（比重）等参数，其测定方法和要求可参考GB/T 35571-2017开展执行：

a) 含水率测定：测定之前，结核样品宜一直处于饱和含水状态下。在（105～110）℃温度下把结核烘至恒重，按附录A式（A.1）计算含水率；
b) 重量测定：测定之前，结核样品宜一直处于饱和含水状态下，然后采用电子天平直接称出结核的重量，单位为克（g）或千克（kg）；
c) 结核三要素测定：粒径大于2.5cm的结核宜用游标卡尺测量每个结核的长轴（a）、短轴（b）和厚度（c）；
d) 结核覆盖率测量：根据采集的结核量和采样器的开口面积估算出结核的覆盖率；或由多频探测、海底摄影技术直接测量出结核的覆盖率；
e) 结核丰度测量：根据采集结核的重量与采样器的开口面积的比值直接算出结核的丰度；或由多频探测直接测量出结核的丰度。丰度单位为千克每平方米（kg/m^2）；
f) 密度（比重）测定：采用排水法测定体积。将同一结核样品按含水率测定方法烘至干重，按附录A式（A.3）计算干结核密度，单位为克每立方厘米（g/cm^3）。

5.3.3 样品实验测定

根据实际情况需求，可使用以下方法对样本组分进行分析，相关内容可参考GB/T 35571-2017执行：

a) 样品加工：采用分步缩分加工或机械联动线加工。在样品加工全过程中样品重量总损失率不宜大于5%，样品的缩分误差宜小于3%；
b) 基本分析：多金属结核基本分析项目宜包括Fe、Mn、Cu、Co、Ni；

c) 光谱全分析：从基本分析样品的副样中抽取。采用等离子光谱仪、等离子质谱仪鉴定矿石中的铜、钴、镍等微量元素及稀土和铂族元素；
d) 组合分析：分析矿石中伴生有益和有害组分的含量及分布状况。依此估算伴生有益组分的资源储量。标定结果的相对误差宜小于0.5%；
e) 化学全分析：在光谱全分析和岩矿测定的基础上测定各种矿石类型中主要元素及其他组分的含量。全分析的总和控制在99%～101%；
f) 物相分析：用以确定矿石中主要组分及伴生有益组分的赋存状态、物相种类、含量等。主要研究多金属结核矿石中伴生的有益组分，如铜、钴、镍、钼、铂族和稀土元素等；
g) 矿物分析：采用X射线衍射、电子探针、扫描电镜、透射电镜、红外光谱分析、穆斯堡尔谱分析方法，以了解矿石矿物及脉石矿物组分；
h) 光薄片鉴定：了解矿石的结构构造、矿石矿物及脉石矿物的宏观分布特征、矿石形成的世代、矿石不同世代微层间的关系、矿石矿物的硬度及反射率；
i) 分析质量检查：现场分析的样品宜全部进行内部检查。检查样品数量为基本分析数量的10%，分析结果的质量检查误差应按DZ/T 0130.3相关条款执行。

5.3.4 开采技术指标

在勘探阶段，根据获取的数据，对以下关键开采技术指标进行初步评估：
a) 回采率：宜不低于85%，按附录A式（A.4）计算；是指在规定的海底矿床条件下，采出的矿石总量占矿床或矿体内地质储量的百分率；
b) 损失率：按附录A式（A.5）计算，可参照陆地采矿行业标准DZ/T 0399的定义与方法；具体指因矿床地质因素、采矿系统性能因素开采过程中未能采出或丢失的矿石量占矿床或矿体储量的百分率；
c) 贫化率：按附录A式（A.6）计算，可参照陆地采矿行业标准DZ/T 0399的定义与方法；具体指在规定的海底矿床条件下，采掘过程中混入沉积物、废石或基岩造成的矿石品位降低的百分率；
d) 采集率：按附录A式（A.7）计算，宜不低于90%；
e) 边界品位与丰度：宜根据技术经济评价确定，可参考T/CAOE 47执行，勘探阶段可采用参考取值：边界丰度不低于5.0 kg/m²，边界品位（Cu+Co+Ni）不低于 1.80%。

5.4 生化勘探

5.4.1 生物勘探

5.4.1.1 大型底栖生物

大型底栖生物是栖息在海洋基底表面或沉积物中，被孔径为0.5 mm（或0.3 mm）套筛网目所阻留的底栖生物，可参考GB/T 12763.6。采用光学断面调查、缩时摄影、现场采样验证、诱捕调查等调查方法获取物种组成、丰度（或覆盖率）及生物量的矩阵等数据。采集要点可参考国际海底管理局ISBA/25/LTC/6/Rev.1执行：
a) 光学照片能识别最小尺寸大于 2cm的生物；
b) 调查宜覆盖合同区内不同地形、沉积物特征及结核覆盖率区域；
c) 采用带有标尺的水下视频及高分辨率照相剖面进行原位定量观测，辅以遥控潜水器或箱式取样器（0.25 m²）定点采集标本以验证物种鉴定结果。

5.4.1.2 小型底栖生物

小型底栖生物是栖息在海洋基底表面或沉积物中，能通过孔径为0.5 mm套筛网目，被孔径为0.042 mm（或0.032 mm）套筛网目所阻留的后生动物。利用箱式取样器（软底质）或多管取样器采集未受扰动的沉积物样品获取物种丰度、生物量及群落结构等参数，采集要求宜符合：
a) 通过分层切片及不同孔径筛网分别处理；
b) 宜确保沉积物-水界面清晰、无冲刷扰动；
c) 将结核表面的生物单独保留并纳入分析。

5.4.1.3 微生物群

使用标准取样设备采集沉积物样本，采用基于环境DNA（eDNA）测序的分子方法进行分析得到包含微生物分类组成、功能基因多样性及群落代谢活性指标。采集要点宜符合：

a） 样本宜在船上切片，并在-20 ℃冷冻，或在适当的DNA储存缓冲液中保存；
b） 采用环境DNA的高通量测序技术，并结合RNA分析区分活体与残留基因信号；
c） 测定沉积物群落耗氧量以反映代谢活性。

5.4.1.4 结核附着生物群

从箱式取样器顶部或由ROV采集的选定结核中获取附着生物的物种鉴定名录、丰度及生物量估算值，并结合基底表面积量化数据提供分布信息。采集要点宜符合：

a） 宜采用遥控潜水器高精度机械臂进行原位定量取样，辅以视频剖面估算覆盖面积；
b） 形态复杂的结核，宜在采集后破碎并拣选内部及表面附着生物，确保获取完整的附着生物样品。

5.4.1.5 底栖鱼类和食腐动物

使用摄影测量、布放带诱饵的着陆器、ROV断面采样等多种技术获取物种相对丰度、组成列表及摄食行为记录以描述基本群落结构及空间变异特征。采集要点宜符合：

a） 采用带有诱饵的深海着陆器进行短周期（24-48小时）部署；
b） 采用遥控潜水器或深拖照相系统进行长距离剖面观测；
c） 调查宜在不同水深梯度及空间范围内重复实施。

5.4.2 沉积物化学勘探

沉积物化学勘探旨在通过分析沉积物及其孔隙水的化学组分，建立地球化学基线。现场测定其pH值、Eh值以及Fe^{3+} /Fe^{2+} 比值。室内测定有机碳、全氮、碳酸盐、主量元素（SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、CaO、K_2O、Na_2O、MnO、TiO_2、P_2O_5）及灼减量等项目的含量，具体可参照GB/T 12763.8执行：

a） 在每批样品分析的同时，宜使用两个或两个以上的标准样品（国内一级或二级）进行质量控制；
b） 室内分析宜随机抽取30%的样品进行重复分析。

5.5 海洋水文气象勘探

海洋水文气象勘探是查明海洋动力要素与气象条件，为作业窗口确定、采矿系统设计与环境基线提供参数的勘探工作。勘探内容宜符合：

a） 海面状况：记录调查期间每日和采样时刻的海洋状况，包括：海浪等级、涌浪方向、海水透明度及漂浮物情况等；
b） 海流：采用声学多普勒流速剖面仪测量全水深海流剖面，重点关注距海底200 m范围内的底层流流速、流向及其时空变化，为羽流扩散模拟与采矿作业窗口确定提供依据；
c） 海面照度、水下向下辐照度和真光层深度：可参考GB/T 12763.5与GB/T 12763.9，测定海面照度及水下向下辐照度垂直分布，取向下辐照度为表层1%处的深度作为真光层下界深度；若该深度大于水深，则取水深作为真光层深度；
d） 气象调查：宜按GB/T 12763.3的规定执行，获取日照时数、气温、风速和风向、天气状况（如阴、晴、雨、雾)等。

6 大洋多金属结核开采设备布放及回收

6.1 关键设备及参数

6.1.1 海底集矿系统关键参数

关键设备为水下采矿车，其关键部件包括行走机构、采集机构、输矿机构、动力与控制系统等，关键参数可参考T/CAOE 40执行：

a） 作业水深：0～6000m；
b） 行走速度：0.5～1.5m/s；

c） 集矿效率：≥50t/h；
d） 采集率：≥90%；
e） 定位精度：±5m；
f） 适应坡度：≤5°；
g） 耐压等级：≥60MPa；
h） 采集能力：商业开采规模下单台车宜达到约250 t/h（干结核）的产能；
i） 扰动控制：应最大限度降低对海底的扰动，行走履带接地比压宜小于海底沉积物的临界承载能力。

6.1.2 水力提升系统关键参数：

水下举升系统关键设备包括采矿立管、水下扬矿泵（多级离心泵）、立管悬挂装置（含张紧系统）、水下中继站（含给料机）、挠性跨接管/软管。关键参数可参考CCS《深海采矿设施指南》，宜满足以下指标：

a） 提升能力：50～200t/h；
b） 提升管径：Φ200～Φ500mm；
c） 工作压力：≤30MPa；
d） 输送浓度：10%～20%；
e） 防堵响应时间：≤10s；
f） 立管安全系数：在设计环境载荷下，立管强度安全系数宜大于1.5。

6.1.3 水面支持平台

水面支持平台关键设备包含采矿船（或半潜式平台）、动力定位系统、矿石脱水与处理系统、矿物储存与外输系统、中央控制与监视系统等。关键参数可参考CCS《深海采矿设施指南》，宜满足以下指标：

a） 作业水深：0～6000m；
b） 动力定位等级：DP3；
c） 起重能力：≥50t；
d） 升沉补偿行程：±4m；
e） 矿石存储量：≥1000t；
f） 排水量：约15万吨级。

6.1.4 布放和回收系统及关键参数

布放和回收系统主要包括以塔架为中心的塔架提升系统和布置于深海采矿设施舷侧或艉侧的吊放系统，以及用于处理采矿立管单根的管柱处理系统。关键参数可参考CCS《深海采矿设施指南》：宜满足以下指标：

a） 作业水深：0～6000m；
b） 起重能力：主吊钩的安全工作负荷宜满足提升最大水下设备重量的要求，并留有足够的安全裕度；
c） 升沉补偿行程：±4m；
d） 止荡能力：吊放系统宜具备有效的止荡功能，以限制被吊设备在水中的晃荡。

6.2 布放流程

水下设备布放可参考T/CAOE 40与T/CAOE 41有序实施，根据设备状态和作业环境做好全过程监测与安全控制。具体流程宜采用：

a） 作业准备：平台完成动力定位，检查设备状态；
b） 系统连接：完成各个系统的机械、电气、液压、通信连接；
c） 低速布放：启动升沉补偿，以0.2～0.5m/s速度下放，全程监测；
d） 水中调试：在500m、1000m、3000m水深分段悬停，校准位置；
e） 近底定位：下放至距海底50～100m处，调整姿态，启动水下定位，校准坐标；
f） 着底作业：缓慢着底，释放张力，确认姿态，进入作业状态。

6.3 回收流程

水下设备回收宜按照停止作业、提升准备、分段回收、上船固定和后期处置等步骤有序实施，并根据设备状态和作业环境做好安全控制。具体流程宜符合：

a) 停止作业：停止作业，关闭水下设备动力；
b) 提升准备：启动回收程序，完成系统锁定、张力加载、姿态调整；
c) 分段回收：以0.2～0.5m/s速度提升，在500m、1000m、3000m分段悬停检查；
d) 上船固定：设备回收至甲板，完成固定、断电、冲洗、干燥、密封存储；
e) 后期处置：开展设备检查、维护、数据下载、环境监测数据整理。

6.4 数据链路与智能控制

6.4.1 通信协议

数据链路宜采用标准化通信协议，提高系统的互操作性和可扩展性，通信协议与接口要求宜符合：

a) 水声通信协议：跨平台水声通信可参考可参考STANAG 4748 (JANUS)；相关声波通信系统技术要求可参考GB/T 30269.304；
b) 水下传感器网络：参考体系结构、节点接口等宜符合GB/T 30269.1和GB/T 30269.1001的相关要求；
c) 水面通信协议：水面通信可采用TCP/IP协议族，应用层可采用MQTT或OPCUA协议；
d) 数据接口标准：各子系统的数据接口和信息交换宜符合GB/T 35319和GB/T 36478.1的相关要求，结构化数据可采用JSON或XML格式。

6.4.2 数据采集与存储

采矿作业数据宜按照实时采集、可靠存储、安全备份和标准化管理的原则进行管理，确保数据的完整性、安全性、可追溯性和长期可用性。具体要求宜符合：

a) 数据采集频率：设备运行参数宜满足实时监控与控制的需求，环境监测数据应满足环境影响评估与异常识别的时效性要求，关键运行参数的采样宜对异常工况做出及时响应，可参考ISO 23731与T/CAOE 41；
b) 本地存储：水面支持平台宜配备满足完整原始数据保存需求的本地数据存储系统，存储容量和保存期限宜覆盖单次采矿作业周期并留有足够冗余；
c) 云端备份：关键运行数据和环境监测数据宜通过卫星链路实时同步至陆基云端数据中心，采用边缘计算与云端备份相结合的双重存储策略，保障数据的安全性和可恢复性；
d) 数据标准化：采集的各类数据宜参照国际海底管理局环境数据与信息标准化指南（ISA/02/02）的要求进行标准化处理，确保数据的可交换性和长期可用性。

6.4.3 智能化应用

数据链路宜支撑以下智能化应用：

a) 数字孪生：利用实时感知数据构建采矿系统数字孪生模型，实现对开采过程的虚拟仿真、状态推演和优化决策；
b) 智能路径规划：集成海底地形数据、结核丰度分布数据及采矿车运动学模型，实时优化开采路径；
c) 环境实时预警：融合羽流监测、化学监测、生物监测等多源数据，构建环境风险评估模型，当监测参数超限时自动触发预警，并推荐调整措施；
d) 远程运维与决策支持：通过陆基控制中心远程监视系统运行状态，基于大数据分析提供设备维护建议和开采方案优化决策支持；
e) 多车协同控制：在多台采矿车同时作业时，通过中央控制站统一协调各车路径和速度，实现多车智能协同作业，避免碰撞和重复开采。

7 大洋多金属结核智能开采作业

7.1 开采境界

7.1.1 一般规定

大洋多金属结核开采境界的确定宜以经国际海底管理局核准的勘探合同区为基础，综合考虑资源禀赋、环境约束和技术经济条件。开采境界的圈定宜满足下列条件：

a) 多金属结核平均丰度不低于5.0 kg/m²；
b) 多金属结核平均品位（Cu+Co+Ni）不低于1.80%；
c) 海底地形坡度不大于5°；
d) 开采区域内无不可通行的障碍物（基岩出露、海山、海丘等）；
e) 开采区域的水文气象条件适宜于开采作业。

7.1.2 境界优化

在初步圈定的开采境界基础上，应结合勘探数据、设备作业能力和环境约束进行境界优化，以确定技术经济合理的最终开采范围。境界优化宜遵循下列原则：

a) 对境界边缘区域，若丰度低于边界丰度或剥采比过高，应收缩境界；若丰度接近边界丰度且地形条件有利，可适度扩展境界；
b) 优先将高丰度、高品位的开采单元纳入开采境界；处于丰度临界值的开采单元，宜结合连通性、地形及底质条件综合确定是否纳入；
c) 境界边界宜采用规则几何形状，便于采矿车路径规划；
d) 对于贫化率过高导致采出品位不达标的区域，不宜纳入开采境界。

7.1.3 开采区块划分

开采境界内宜按采矿车作业能力划分为若干开采区块。每个开采区块的面积宜根据采矿车的单次作业续航能力、水下中继站的服务半径及采矿立管的作业覆盖范围确定。相邻开采区块之间应设置宽度不小于50m的过渡带。

7.1.4 开采顺序

开采作业宜参照空间规划方案确定的顺序进行。可参考T/CAOE 41，开采顺序宜遵循下列原则：

a) 由丰度高区域向丰度低区域推进；
b) 沿底层流方向自上而下开采，减少羽流对未开采区的影响；
c) 当多个开采区块同时作业时，应合理布置采矿车运行路线，避免设备间相互干扰。

7.2 开采规划

7.2.1 基本准则

开采规划可参考T/CAOE 40与T/CAOE 41，宜遵循下列基本准则：

a) 最大化资源回收率：在技术经济合理的前提下，最大限度地回收境界内的多金属结核资源，回采率不应低于85%；
b) 最小化环境影响：合理规划开采顺序和路径，减少重复扰动面积，控制羽流扩散范围；
c) 最优化作业效率：减少采矿车转向次数和空驶距离，提高单位时间产量；
d) 保障作业安全：避开海底障碍物和危险地形，确保采矿车和水下设备稳定运行；
e) 适应环境变化：根据实时监测数据动态调整开采规划，规避环境风险。

7.2.2 开采计划编制

开采规划可参考GB/T 35571，宜形成正式的开采计划文件，内容应包括：

a) 开采境界范围及坐标表；
b) 开采区块划分图；
c) 各区块开采顺序及时间安排；
d) 各区块预估资源量及目标产量；
e) 采矿车路径规划方案；
f) 环境监测方案及应急预案。

7.2.3 路径规划

7.2.3.1 基本方法

开采路径规划宜采用牛耕法（Boustrophedon Path）作为基本全覆盖作业模式。在指定的开采区块内，采矿车应沿预定主方向往复行驶，相邻作业轨迹之间宜保持适当的重叠宽度。

a） 主方向确定：主方向应综合下列因素确定：
   1） 开采区块的长轴方向；
   2） 海底地形等高线的走向（宜沿等高线方向行进，减少爬坡）。
   3） 底层流的主流向（宜与流向保持适当夹角，使羽流向已开采侧扩散）。

b） 轨迹重叠宽度：宜按式(1)确定：

$$W_{overlap} = W_{eff} \times r \quad (1)$$

式中：

$W_{overlap}$——相邻轨迹重叠宽度，m；

W_{eff}——采矿车有效采集宽度，m；

r——重叠率，取 0.05～0.10。

c） 转向方式：采矿车在作业边界处的转向宜采用U型转弯或鱼尾型转弯，转弯半径不宜小于采矿车的最小转弯半径Rmin。

7.2.3.2 障碍物避让规划

当开采区块内存在不可通行区域时，宜采用区域分解法进行路径规划：

a） 区域分解：将开采区块按障碍物分布分解为若干无障碍物的子区域，分解方法采用梯形分解法或Boustrophedon分解法；

b） 子区域内规划：对每个子区域独立采用牛耕法生成全覆盖路径；

c） 子区域间连接：子区域间的转移路径规划转化为广义旅行商问题（GTSP），求解最优连接顺序。

子区域间转移总路径长度宜按式(2)优化：

$$\min L_{trans} = \sum_{i=1}^{m-1} d\left(p_i^{out}, p_{i+1}^{in}\right) \quad (2)$$

式中：

L_{trans}——总转移路径长度，m；

m——子区域数量；

p_i^{out}——第 i 个子区域的出口点；

p_{i+1}^{in}——第 i+1 个子区域的入口点；

$d(\cdot)$——两点间的避障距离，m。

7.2.3.3 路径平滑处理

生成的折线路径应考虑采矿车运动学约束进行平滑处理：

a） 路径转弯处的曲率半径不宜小于采矿车最小转弯半径R_{min}；

b） 路径的纵向坡度不宜超过采矿车最大爬坡角度θ_{max}，一般取5°～10°；

c） 可采用Dubins曲线或贝塞尔曲线对转角处进行平滑处理，保持路径连续性。

7.2.3.4 复杂地形自适应路径规划

当开采区块内存在复杂地形（如陡坡、洼地、软泥区、丰度剧烈变化区）时，采矿车宜具备自适应路径调整能力，在预设牛耕法路径基础上进行动态优化。

a）地形可通行性评估

采矿车应利用地形探测装置（探测臂、角度传感器、探测球）实时感知前方地形的可通行性。可通行性指标可参考 GB/T 12763.11，宜参照式(3)综合评估：

$$P = w_1 \cdot f(\theta) + w_2 \cdot g(s) + w_3 \cdot h(A) \quad (3)$$

式中：

P——可通行性指数，$P \in [0,1]$，值越大表示越适宜通行；

$f(\theta)$——坡度适应度函数，θ为地形坡度，当$\theta \leqslant \theta_{max}$时取 1，超过时递减；

$g(s)$——底质适应度函数，s 为沉积物剪切强度，kPa；

$h(A)$——丰度适应度函数，A 为结核丰度，kg/㎡；

w_1、w_2、w_3——权重系数，$w_1+w_2+w_3=1$。

当P值低于预设阈值（建议取0.6）时，宜启动路径调整程序。

b）坡度自适应调整

当预规划路径穿越坡度超标区域时，可参考GB/T 17229，宜按下列规则进行路径调整：

1） 若坡度方向与路径方向垂直（侧坡），且坡度超过采矿车允许侧倾角，应沿等高线方向调整路径，降低侧倾风险；

2） 若坡度方向与路径方向平行（纵坡），且坡度超过采矿车最大爬坡角，应改用“之”字形路径降低实际爬坡角度；

3） 若坡度超过安全阈值（一般取10°），应将此区域标记为不可通行区，重新规划绕行路径。

c）丰度自适应调整

当实时监测发现前方区域结核丰度显著低于边界丰度（小于5.0 kg/㎡）时，可参考T/CAOE 47，宜按下列规则进行路径调整：

1） 若低丰度区域面积较小（小于采矿车单次转向覆盖面积），可直接穿越，不作调整；

2） 若低丰度区域面积较大，应提前转向，将低丰度区域标记为“暂不开采区”，优先开采相邻高丰度区域；

3） 所有丰度调整决策宜记录在案，供后续资源评估和境界优化参考。

d）能耗最优路径选择

当存在多条可选路径时，可参考 T/CAOE 40，宜选择综合能耗最小的路径。综合能耗应按式(4)计算：

$$E_{total} = E_{travel} + E_{climb} + E_{turn} \quad (4)$$

式中：

E_{total} ——总能耗，kJ；

E_{travel} ——水平行进能耗，与路径长度成正比；

E_{climb} ——爬坡附加能耗，与高差和坡度成正比；

E_{turn} ——转向附加能耗，与转向次数和转向角度成正比。

路径选择宜以E_{total}最小化为目标，同时满足覆盖率约束。

7.2.3.5 多车协同路径规划

当采用多台采矿车同时作业时，可参考T/CAOE 40，宜进行协同路径规划：

a） 各采矿车作业区域应划分明确，避免作业范围重叠；

b） 相邻采矿车之间应保持安全距离，避免碰撞；

c） 多车协同可采用主从式或分布式控制架构。

7.3 开采作业

7.3.1 作业内容

大洋多金属结核开采作业宜包括下列内容：

a） 采集作业：水下采矿车在海底行进，采用水力式、机械式或复合式采集机构，将多金属结核从沉积物表面剥离并收集；

b） 破碎作业（如适用）：对采集的大粒径结核进行初步破碎，以满足提升系统的粒径要求；

c） 输送作业：将采集的结核通过挠性跨接管或软管输送至水下中继站；

d） 提升作业：水下扬矿泵将结核矿浆通过采矿立管提升至水面支持平台；

e） 脱水作业：在水面支持平台上对提升上来的矿浆进行脱水处理，分离矿石和水；

f） 转运作业：将脱水后的矿石转运至矿石运输船舶。

7.3.2 主要作业参数

7.3.2.1 采集作业参数

采集作业宜控制下列参数：

a) 采集宽度：采矿车有效采集宽度宜根据采集头设计和商业开采规模确定，一般在4m～8m；
b) 行进速度：采矿车在海底的行进速度宜根据结核丰度、采集效率和地形条件动态调整，一般为0.2m/s～0.8m/s；
c) 采集效率：采集头对有效采集宽度内结核的收集比例宜不低于90%；
d) 采集扰动深度：采集头对海底沉积物的扰动深度宜控制在10cm以内。

7.3.2.2 提升作业参数

提升作业可参考T/CAOE 40，宜控制下列参数：

a) 矿浆浓度：提升管内矿浆中固体颗粒的体积浓度，宜控制在10%～20%；
b) 提升流速：提升管内矿浆的流速，宜大于临界沉降速度，一般取3 m/s～6 m/s；
c) 扬矿泵功率：根据提升高度和矿浆浓度确定，宜留有适当余量；
d) 紧急排放控制：当提升系统出现故障时，宜可通过紧急排放阀安全排放管内矿浆。

7.3.2.3 脱水作业参数

脱水作业可参考T/CAOE 40，宜控制下列参数：

a) 脱水后含水率：宜满足转运和适运水分极限（TML）要求；
b) 尾水悬浮物浓度：排放尾水中悬浮颗粒物浓度，宜符合相关排放标准；
c) 尾水排放深度：尾水宜在海底以上50m内或近海底排放，避免表层排放。

7.3.3 产量指标

7.3.3.1 单台采矿车产能

单台采矿车的单位时间产量可参考 GB/T 35571 与 T/CAOE 40，宜按式(5)计算：

$$Q_h = W_{eff} \times v \times A \times C_x \times \rho \times 3600 (5)$$

式中：

Q_h——小时产量，t/h；
W_{eff}——有效采集宽度，m；
v——行进速度，m/s；
A——多金属结核丰度，kg/m²；
C_x——采集效率；
ρ——考虑含水率的修正系数。

7.3.3.2 年产量

矿区年产量宜按式(6)计算：

$$Q_y = Q_h \times T_d \times \eta \times N (6)$$

式中：

Q_y ——年产量，t/a；
Q_h ——单台采矿车小时产量，t/h；
T_d ——年有效作业小时数，h；
η ——系统综合作业率；
N ——同时作业采矿车数量。

7.4 开采过程控制

7.4.1 控制架构

a) 设备级控制，各单台设备（采矿车、扬矿泵、脱水设备等）的独立自动控制。
b) 子系统级控制，采集、提升、脱水等子系统的协调控制。
d) 系统级控制，水面支持平台中央控制站对整个采矿系统的集中监控和调度。
c) 通信链路，水面支持平台与水下设备之间通过脐带缆或水声通信保持实时连接。

7.4.2 控制方法

7.4.2.1 采矿车行走控制

采矿车行走控制宜包括：

a) 路径跟踪控制：基于GNSS/声学定位的组合导航，控制采矿车沿规划路径行驶，路径跟踪误差不宜大于0.5 m；
b) 地形自适应控制：通过地形探测装置（探测臂、角度传感器）感知前方地形变化，自动调整采集头高度和姿态；
c) 障碍物紧急避让：通过前视声呐或光学摄像实时检测障碍物，触发紧急避让程序。

7.4.2.2 采集过程控制

采集过程控制宜包括：

a) 采集头高度调节：根据地形变化和结核赋存状态，实时调节采集头距海底的高度，保持最佳采集效果；
b) 采集流量调节：根据结核丰度和行进速度，调节轴流泵转速，控制采集流量；
c) 防堵塞控制：监测采集管路压力，当压力异常升高时启动反冲洗或降低行进速度。

7.4.2.3 提升过程控制

提升过程控制宜包括：

a) 矿浆浓度控制：通过调节水下采矿车采集量和注水量，保持提升管内矿浆浓度稳定在设定范围内；
b) 扬矿泵调速控制：根据提升高度和矿浆浓度变化，调节扬矿泵转速，使管内流速高于临界沉降速度；
c) 紧急排放控制：当检测到提升管路堵塞、泵故障或平台失位时，自动打开紧急排放阀。

7.4.2.4 多设备协同控制

多设备协同控制可参考T/CAOE 40，宜包括：

a) 采矿车-中继站协同：采矿车与水下中继站之间保持相对位置稳定，防止连接软管过度拉伸或缠绕；
b) 采矿车-采矿车协同：多台采矿车同时作业时，通过中央控制站协调各车路径和速度，避免碰撞；
c) 采矿系统-水面平台协同：采矿系统与水面支持平台的动力定位系统协同，使平台与水下采矿车的相对位置保持在允许范围内。

7.4.3 主要控制参数

开采过程宜实时监测和控制下列参数：

a) 采矿车参数：位置坐标、行进速度、航向角、采集头高度、采集流量、能耗；
b) 提升系统参数：矿浆浓度、提升流速、管道压力、扬矿泵转速和功率；
c) 环境参数：浊度、溶解氧、pH、Eh、底层流速流向；
d) 产量参数：瞬时采集量、累计产量、品位。

7.4.4 异常工况控制

当出现下列异常工况时，可参考T/CAOE 40与ISBA/25/LTC/6/Rev.1，宜采取相应控制措施：

a) 采集管路堵塞：停止采集，启动反冲洗程序，如无法排除则回收设备进行检查；
b) 提升管路堵塞：停止提升，启动紧急排放阀排放管内矿浆，排查堵塞原因；
c) 采矿车失联：启动应急定位装置，水面平台移动至最后已知位置进行搜索；
d) 环境参数超限：当浊度、溶解氧等参数超过预警阈值时，应降低作业强度或暂停作业，评估影响后决定是否继续；
e) 恶劣海况预警：收到恶劣海况预报后，宜按应急预案逐步停止作业，必要时回收水下设备。

7.4.5 数据记录与追溯

开采过程宜全程记录下列数据，并建立可追溯的数据档案：

a) 设备运行参数（采样间隔不大于1 s）；
b) 环境监测数据（采样间隔不大于10 s）；
c) 产量统计数据（按班次、日、月统计）；
d) 异常事件和处置记录；
e) 维护保养记录。

数据记录宜满足ISBA/25/LTC/6/Rev.1 第IV节关于数据收集、报告和存档的要求。

8 大洋多金属结核区域采后环境恢复

8.1 主要环境参数

8.1.1 物理环境参数

采后环境恢复监测的主要物理环境参数宜包括：

a) 沉积物粒度分布（砂、粉砂、黏土含量百分比）；
b) 沉积物容重、含水率、孔隙比；
c) 沉积物厚度及分层结构变化；
d) 海底地形变化（坡度、粗糙度、微地貌恢复情况）；
e) 底层流流速、流向。

8.1.2 化学环境参数

采后环境恢复监测的主要化学环境参数宜包括：

a) 沉积物氧化还原电位（Eh）；
b) 沉积物pH值；
c) 孔隙水溶解氧含量；
d) 沉积物有机碳含量；
e) 沉积物中重金属含量（Mn、Fe、Cu、Co、Ni、Zn、Pb、Cd）；
f) 上覆水体溶解氧、pH、浊度。

8.1.3 生物环境参数

采后环境恢复监测的主要生物环境参数宜包括：

a) 大型底栖生物种类组成、丰度、生物量；
b) 小型底栖生物种类组成、丰度；
c) 底栖微生物群落结构和功能；
d) 生物扰动速率；
e) 建群种（优势种）的种群恢复状况；
f) 游泳动物的种类和数量；
g) 生物多样性指数（Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数）。

8.2 环境采样方法

8.2.1 采样站位布设

环境采样站位宜按下列原则布设：

a) 在开采区（影响参照区）内布设不少于3个采样站位，覆盖开采作业核心区；
b) 在开采区外围按距离梯度（100 m、500 m、1000 m、2000 m）布设采样站位，评估羽流影响范围；
c) 在保全参照区内布设与开采区数量和分布相当的对照站位；
d) 采样站位宜覆盖不同地形单元和沉积类型。

8.2.2 沉积物采样

沉积物采样可参考GB/T 42629.4与DZ/T 0327，宜考虑下列要点：

a) 表层沉积物采用箱式取样器或多管取样器采集，每站采集不少于3个平行样；
b) 柱状沉积物采用重力柱状取样器或重力活塞取样器采集，柱状样长度宜不少于30 cm；
c) 用于物理力学性质测试的样品宜保持原状，未扰动、未失水；
d) 用于化学分析的样品宜采用不锈钢或塑料材质工具取样，避免金属污染；
e) 用于生物分析的样品宜按GB/T 42629.4的相关要求进行现场处理和保存。

8.2.3 水体采样

水体采样可参考GB/T 12763.4，宜考虑下列要点：
a) 采用CTD采水器按标准层次采集水样；
b) 海底边界层应加密采样，建议层次为海底以上2 m、5 m、10 m、20 m、50 m；
c) 溶解氧样品应现场固定；
d) 重金属样品宜采用酸洗处理的采样瓶，现场酸化保存。

8.2.4 生物采样

生物采样宜考虑下列要点：
a) 大型底栖生物采用箱式取样器采样，样品用0.5 mm孔径筛网冲洗，保留筛上生物；
b) 小型底栖生物采用多管取样器采样，取表层0 cm～5 cm沉积物，用32 μm孔径筛网进行样品处理；
c) 底栖微生物样品采用无菌采样管采集，现场冷冻保存（-80℃）；
d) 生物样品的现场固定与保存应符合 GB/T 12763.6 相关规定。

8.2.5 采样频次

环境采样频次可参考T/CAOE 41，宜考虑下列要点：
a) 闭矿后第1年：每季度采样1次；
b) 闭矿后第2～3年：每半年采样1次；
c) 闭矿后第4～10年：每年采样1次；
d) 闭矿后第10年以后：每2～3年采样1次，直至生态系统恢复到基线水平或达到稳定状态。

8.3 环境恢复技术

8.3.1 自然恢复监测

在确认环境风险可控的前提下，宜以自然恢复为主，通过长期监测评估生态系统的自我恢复能力。自然恢复过程中应重点监测：
a) 生物扰动速率的恢复情况；生物扰动速率的计算方法见附录B。
b) 建群种的再殖和种群恢复过程；
c) 沉积物地球化学环境的恢复情况；
d) 生物多样性指数的恢复趋势。

8.3.2 羽流絮凝沉降

当羽流再悬浮对周边敏感区域产生影响时，可采用环境友好型絮凝剂促进悬浮颗粒物的沉降。絮凝剂的选择宜满足下列要点：
a) 对海洋生物毒性低，在标准急性毒性试验中，半效应浓度（EC_{50}）不低于100 mg/L；
b) 可生物降解，28天生物降解性不低于60%；
c) 不引起二次污染，不含重金属等有害成分；
d) 使用前宜进行环境影响评估，并经主管部门批准。

8.3.3 人工基质修复

对于恢复缓慢的硬质基底区域，可考虑布设人工基质促进底栖生物的附着和再殖。人工基质的设计宜满足下列要求：

a) 材质应为无毒、稳定的环保材料（如玄武岩、陶瓷等天然或惰性材料）；
b) 表面结构宜模仿自然基底特征，提供生物附着面；
c) 布设位置应避开后续采矿规划区域；
d) 布设后宜进行定期监测，评估修复效果。

8.3.4 生态补偿

对于不可逆的生态环境损害，可实施生态补偿措施，生态补偿措施可参考T/CAOE 41与GB/T 44823执行：

a) 设立生态补偿基金，用于深海生态保护和科学研究；
b) 扩大保全参照区面积，增加保护力度；
c) 支持深海生物多样性保护项目和研究计划；
d) 生态补偿方案应经国际海底管理局及相关利益攸关方审议通过。

8.4 环境恢复指标

8.4.1 沉积物环境恢复指标

沉积物环境恢复宜达到下列指标：

a) 表层沉积物氧化还原电位（Eh）恢复至基线值±20%范围内；
b) 沉积物pH值恢复至基线值±0.5单位；
c) 沉积物有机碳含量恢复至基线值±30%范围内；
d) 沉积物中重金属含量恢复至基线值或低于生态风险阈值；
e) 沉积物粒度分布与保全参照区无显著差异（显著性水平 $\alpha=0.05$）。

8.4.2 生物群落恢复指标

生物群落恢复宜达到下列指标：

a) 大型底栖生物丰度恢复至保全参照区的50%以上（闭矿后5年内）或80%以上（闭矿后10年内）；
b) 大型底栖生物种类数与保全参照区的相似性指数（Jaccard指数）不低于0.5（闭矿后5年内）或0.7（闭矿后10年内）；群落相似性指数（Jaccard指数）的计算方法见附录B。
c) 建群种（优势种）在开采区内重新出现并建立稳定种群；
d) 生物扰动速率恢复至保全参照区水平±30%范围内。

8.4.3 水体环境恢复指标

水体环境恢复宜达到下列指标：

a) 海底边界层浊度恢复至基线值±10%范围内；
b) 海底边界层溶解氧浓度恢复至基线值±10%范围内；
c) 水体中重金属浓度恢复至基线值或满足相关水质标准要求；
d) 羽流影响范围收缩至开采区边界500 m范围内。

8.5 恢复验收要求

采后环境恢复验收可参考T/CAOE 41与 ISBA/25/LTC/6/Rev.1执行：

a) 连续2次监测（间隔不少于6个月）结果均满足恢复指标要求；
b) 监测数据经独立第三方审核确认；
c) 恢复验收报告宜提交国际海底管理局备案；
d) 验收通过后，可进入简化监测阶段，监测频次可适当降低。

附 录 A

（规范性附录）

大洋多金属结核勘探指标

A.1 结核含水率计算：

结核含水率应按公式（1）计算：

$$W = \frac{m_{湿} - m_{干}}{m_{湿}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$m_{湿}$——烘干前结核的湿质量，单位为克（g）；

$m_{干}$——烘干后结核的干质量，g；

A.2 结核丰度计算：

结核丰度应按公式（2）计算：

$$A = \frac{W}{S} \quad (2)$$

式中：

W——采集的结核总湿重，单位为千克（kg）；

S——采样器有效开口面积，单位为平方米（m^2）；

A.3 结核密度计算：

结核密度应按公式（3）计算：

$$D = \frac{W}{V} \quad (3)$$

式中：

W——干结核重量，单位为克（g）；

S——结核体积,单位为立方厘米（cm^3）。

A.4 回采率计算：

回采率应按公式（4）计算：

$$K = \frac{Q_c}{\mathrm{Q}} \times 100\% = (1 - \mathrm{S}) \times 100\% \quad (4)$$

式中：

Q_c——当期采出的矿石资源储量，单位为吨（t）；

Q——当期消耗的矿产资源储量，吨（t）；

S——采集的结核总湿重，kg。

A.5 损失率计算：

损失率应按公式（5）计算：

$$S = \frac{Q_t}{\mathrm{Q}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

Q_t——当期损失的矿产资源储量，单位为吨（t）；

Q——当期消耗的矿产资源储量，单位为吨（t）。

A.6 贫化率计算：

贫化率应按公式（6）下式计算：

$$D = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha} \times 100\% \tag{6}$$

式中：

α——原生工业矿石品位，单位为百分比（%）；

Q——采出矿石品位，单位为百分比（%）。

A.7 采集率计算：

采集率应按公式（7）计算：

$$C = C_x \times C_f = \frac{A_m}{Q_a} \times \frac{A_c}{Q_d} \tag{7}$$

式中：

C_x——采集效率，单位为百分比（%）；

C_f——采集覆盖率,采矿覆盖面积与指定采区面积之比，单位为百分比（%）；

A_m——单位面积采出量，单位为吨每平方米（t/㎡）；

Q_a——单位面积矿石赋存量，单位为吨每平方米（t/㎡）；

A_c——采矿覆盖面积，单位为平方米（㎡）；

Q_d——指定采区面积，单位为平方米（㎡）。

沉积物化学测定允许误差范围

组分	质量分数/%	允许误差/%	组分	质量分数/%	允许误差/%
SiO_2	>50	0.7	P_2O_5	>1	0.3
	<50	0.6		0.5-1	0.2
Al_2O_3	>20	0.7		<0.5	0.1
	<20	0.6	灼减量		0.5
Fe_2O_3	>5	0.5	pH值		±0.3pH单位
	<5	0.3	E_h		10mV
MgO	>10	0.6	Fe^{3+}/Fe^{2+}		0.2
	5-10	0.5	可溶SiO_2	>5	0.5
	<5	0.4		1-5	0.4
CaO	>10	0.6		<1	0.2
	5-10	0.5	碳酸盐 $CaCO_3$	>5	1.00
	<5	0.4		1-5	0.75
K_2O	>10	0.7		<1	0.5
	5-10	0.5	有机碳	>5	0.5
	<5	0.3		1-5	0.4
Na_2O	>10	0.7		<1	0.3
	5-10	0.5	全氮	>0.5	0.1
	<5	0.3		<0.5	0.05
MnO	>1	0.3	TiO_2	>1	0.2
	0.5-1	0.2		<1	0.1
	<0.5	0.1	FeO		0.5
Cl		0.2			
注：含量小于0.1%的组分以$(A-B)/(A+B)\times 100\% \leq 50\%$。A,B分别为重复分析的两个数量。					

A.8 沉积物化学测定允许误差范围：

附 录 B

（资料性附录）

大洋多金属结核矿区环境评估方法及指标

B.1 一般规定

本附录给出了大洋多金属结核开采区域采后环境恢复的评估指标、计算方法及验收要求，适用于开采活动结束后对受影响区域生态环境恢复状况的评估。

环境评估宜以开采活动开展前按ISBA/25/LTC/6/Rev.1第III节要求建立的环境基线数据作为对照基准。当缺乏完整基线数据时，宜以保全参照区的同期监测数据作为替代对照基准。

环境采样方法参见本文件8.2节。

B.2 参照区选划要求

环境评估宜采用影响参照区和保全参照区的对比监测结果进行。参照区选划宜符合下列要点：

a）影响参照区应位于开采作业区内，能够代表矿区环境特征；

b）保全参照区应具有与影响参照区相似的生物种类组成和环境特征，位于开采作业区外且不受采矿羽流影响；

c）保全参照区的面积应足以维持其生态系统的完整性，建议不小于影响参照区面积的50%。

B.3 环境评估指标及计算方法

环境评估指标及计算方法应符合下列规定：

a）群落相似性指数应按公式（8）计算：

$$J = \frac{S_c}{S_1 + S_2 - S_c} \tag{8}$$

式中：

J——Jaccard相似性指数；

S_c——开采区与保全参照区共有种类数；

S_1——开采区种类数；

S_2——保全参照区种类数。

b）生物扰动速率D_b一般情况下应按公式（9）计算：

$$D_b = \frac{\lambda Z^2}{\left(\ln\frac{C_0}{C_Z}\right)^2} \tag{9}$$

式中：

D_b——生物扩散系数，cm²/a；

λ——210_{pb}衰变常数，0.031/a；

Z——沉积物深度，单位为厘米（cm）；

C_0——表层沉积物过剩210_{pb}活度，单位为每分钟衰变次数每克（dpm/g）；

C_Z——深度 Z 处过剩210_{pb}活度，单位为每分钟衰变次数每克（dpm/g）。

B.4 恢复验收要点

采后环境恢复验收宜按下列要求执行：

a）连续2次监测（间隔不少于6个月）结果均满足B.3规定的恢复指标要求；

b）监测数据经独立第三方审核确认；

c）恢复验收报告宜提交国际海底管理局备案。

B.5 环境评估指标汇总

大洋多金属结核矿区采后环境恢复评估指标汇总见表B.1

表B.1 大洋多金属结核矿区采后环境恢复评估指标汇总表

类别	评估指标	恢复要求	监测频次	备注
沉积物	氧化还原电位（Eh）	恢复至基线值±20%范围内	见8.2.5	反映沉积物氧化还原环境，影响重金属赋存形态和生物有效性
沉积物	pH值	恢复至基线值±0.5单位	见8.2.5	影响重金属溶解度和底栖生物代谢，按GB/T 12763.8规定执行
沉积物	有机碳含量	恢复至基线值±30%范围内	见8.2.5	深海沉积物有机碳含量极低，变化反映采矿扰动程度
沉积物	重金属含量	恢复至基线值或低于生态风险阈值	见8.2.5	重点关注Mn、Fe、Cu、Co、Ni、Zn、Pb、Cd，按GB/T 20259规定执行
沉积物	粒度分布	与保全参照区无显著差异（α=0.05）	见8.2.5	细颗粒沉积物（<63μm）的占比变化反映羽流再沉降影响
水体	海底边界层浊度	恢复至基线值±10%范围内	见8.2.5	表征羽流影响范围和强度，监测高度为海底以上2m～50m
水体	海底边界层溶解氧	恢复至基线值±10%范围内	见8.2.5	反映沉积物再悬浮导致的耗氧程度，按GB/T 12763.4规定执行
水体	重金属浓度	恢复至基线值或符合相关水质标准	见8.2.5	重点关注Mn、Fe、Cu、Co、Ni等采矿释放元素
水体	羽流影响范围	收缩至开采区边界500m内	见8.2.5	以浊度超过背景值1.5倍作为影响范围判定标准
生物	大型底栖生物丰度	闭矿后5年≥50%，10年≥80%（相对保全参照区）	见8.2.5	筛网孔径0.5mm，按ISBA/25/LTC/6/Rev.1附件I第31段规定执行
生物	种类相似性（Jaccard指数）	闭矿后5年≥0.5，10年≥0.7	见8.2.5	按式（B.1）计算，需同步调查开采区与保全参照区
生物	建群种	重新出现并建立稳定种群	见8.2.5	建群种指深海底栖动物群落中起主导作用的优势种

B.6 质量保证

环境评估过程中的分析测试质量保证宜符合下列要点：

a）分析测试宜采用经计量检定的仪器设备；

b）每批样品分析时应同步分析标准物质进行质量控制，标准物质宜采用深海沉积物标准物质；

c）室内分析宜随机抽取不少于30%的样品进行重复分析，当75%以上的双样分析结果在允许偏差范围内时，该批样品分析方判定为合格。

参 考 文 献

[1]CCS 中国船级社 深海采矿设施指南

[2]STANAG 4748, Digital Underwater Signalling Standard for Network Node Discovery & Interoperability (JANUS), ANEP-87

[3]ISO 23731:Marine technology — Marine environment impact assessment (MEIA) — Performance specification for in situ image-based surveys in deep seafloor environments

[4]ISA/02/02:Standardization of Environmental Data and Information - Development of Guidelines: Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica, 25 - 29 June 2001