深海多金属硫化物开采作业安全与环境影响分析及对策研究

杜尊峰[1],陈香玉[1],赵羿羽[2]

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室 天津 300354;2. 中国船舶重工集团公司第七一四研究所 北京 100192)

摘要:随着各国对深海多金属硫化物勘探与开发的步伐逐渐加快,为确保并指导承包者在区域内开采多金属硫化物作业安全且符合保护环境规定,首先论述开采深海多金属硫化物的工艺技术,以此为基础结合加拿大鹦鹉螺和美国海王星矿业公司试采多金属硫化物案例,分析其作业过程所涉及的硫矿泄漏、结构失效、机械伤害、火灾爆炸等安全问题和破坏海底动植物群及其栖息地、排放采矿废水尾矿等环境影响,最后就作业安全与环境影响问题分别给出了针对性的对策与建议,可为工程实践提供参考。

关键词:深海多金属硫化物;作业安全;硫矿泄漏;海底动植物群;废水尾矿;环境基线

中图分类号:P744 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-9857(2020)03-0068-07

Analysis and Countermeasures of Operational Safety and Environmental Impact in Deep-sea Polymetallic Sulfide Mining

DU Zunfeng[1], CHEN Xiangyu[1], ZHAO Yiyu[2]

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. The 714 Research Institute of CSIC, Beijing 100192, China)

Abstract: As countries gradually accelerate the exploration and development of deep-sea polymetallic sulfides, in order to ensure and guide contractors to mine polymetallic sulfides in the area safely and in compliance with environmental protection regulations, the process technology of deep-sea polymetallic sulfides was firstly discussed. On this basis, combined with the trials of mining polymetallic sulphides in Nautilus Minerals Company of Canada & Australia and Neptune Mining Company of U. S., the safety issues such as sulfur ore leakage, structural failure, mechanical injury, fire and explosion involved in the operation process, and damage to the sea floor, the environmental impacts of flora and its habitat, discharge of mining wastewater and tailings, etc. were analyzed. Specific countermeasures and suggestions were given on the issues of operational safety and environmental impact, which could provide reference for engineering practice.

收稿日期:2019-08-08;**修订日期**:2020-02-20

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(No. 51621092);天津市自然科学基金(No. 19JCYBJC21900).

作者简介:杜尊峰,副教授,博士,研究方向为海洋工程风险

通信作者:陈香玉,硕士研究生,研究方向为海洋工程风险

Key words：Deep-sea polymetallic sulfide，Operational safety，Sulfide mining leakage，Seabed animals and plants，Mining tailings，Environmental impact baseline

0　引言

近 30 年来，各国陆续开展深海矿物资源勘探与开发活动，已探明具有商业价值的海底矿物资源包括多金属结核、富钴铁锰结核和多金属硫化物等[1]，初步形成了前二者的工业开采工艺，多金属硫化物是这之后人类认识到的又一种新型海底矿物资源，它蕴含多种金属成分，具有较高的开采价值，但目前仍处于勘探与试验开采阶段。

我国大洋矿产资源研究开发协会早在 2011 年就与国际海底管理局签订了西南印度洋的多金属硫化物勘探合同，享有此区域的优先开采权[2]，目前勘探调查内容包括岩石拖网和温盐深仪采水作业，硫化物、深海沉积物、岩石、海水等样品采集工作。由于开采工艺尚不成熟，目前对多金属硫化物开采作业安全问题的分析较少，且对开采过程环境影响的研究较为宽泛，而开采深海多金属硫化物正在不断推进中，研究这些问题迫在眉睫。

多金属硫化物是一种复杂的海底热液矿物，与多金属结核和富钴铁锰结壳不同，它的储藏水深较浅，矿体呈三维大块状，海底开采可借鉴陆上采煤技术。据 2010 年加拿大鹦鹉螺和美国海王星矿业公司试采多金属硫化物方案，整个作业系统主要由海底采矿、提升系统、水面支持 3 部分组成，海底采矿通过海底攫取设备、运输车辆实现；提升系统使用液压水力泵（鹦鹉螺矿业公司）或箱体结构（海王星矿业公司）将矿物运输至水面；水面支持系统指水面支持船，它对从海底采矿的硫矿进行初步脱水和分选，并支持海底采矿与提升系统[3]。

1　作业安全问题及对策

1.1　海上采矿作业安全问题分析

作业安全是深海可持续采矿的一项基本必要条件。即使在无人化、远程操控技术不断发展的今天，也不能忽视海底采矿带来的人员伤害和设备损伤。例如，在一些海底管道维修环节需要专业人员操作，水面支持船上需要作业人员加工硫矿；此外，海底采集及提升系统在严峻的海洋环境下极易发生腐蚀、破损从而产生安全事故。按事故原因可将这些安全问题分为以下几类。

1.1.1　*硫矿泄漏*

提升系统将多金属硫化物运至水面，可以通过管道提升泵输送混合矿浆到水面支持船，或将大块硫矿放入集矿箱提升至水面，但不论采取哪种方式，都有可能出现硫矿泄漏事件，即矿浆在狭小管径内溢出以及因管道破裂喷出，或硫块从箱中掉落，这些可能是由于作业人员更换部件、检查维修时的操作失误引起，或由于设备出现的老化和锈蚀（例如，管线穿孔或密封不严）等现象引起，一些极端恶劣的气候海况和大型海洋生物的碰撞也会导致设备受到损伤，甚至伤及人员生命健康。

1.1.2　*结构失效*

指因为其他危害导致的海底采矿设备（结构）发生局部或整体的损坏甚至是倒塌。由于海底采矿设备处于多变的海洋环境中，强烈的地震和极端气候等灾害会导致设备结构破损及失效；海底移动与变形可能会出现硫矿体非均匀沉降、坍塌、沉陷或快速积累的尾矿沉积层偶发浊流甚至是坡体坍塌导致设备受损[4]；设备自身也会因疲劳而导致应力集中点向外蔓延，最终钢结构设备不能支撑其所承受的荷载，使设备受损、人员受害。

1.1.3　*机械伤害*

在人员经常出没的机械作业区极易发生“设备故障伤人”事件。海底采矿设备可能因机械故障或防护不到位而存在潜在抛射物伤人的风险；硫矿脱水装置可能在运行过程中引起人员的绞、碾伤害[5]；水面支持船上搬运作业时也可能出现人员砸伤、挤伤的情况。尤其是海上起重作业易受风暴潮、海冰、海雾与潮汐变化等海况影响。另外，作业人员违章操作、限位失灵、现场管理不善等因素也会对此产生影响，导致设备受损丢失、船舶搁浅倾覆、人员落水、物体倾斜滑落、坠落物砸伤人员等重大安全事故。

1.1.4　*触电事故与火灾爆炸*

作为采矿作业正常运营的动力之一，电力系统

是海上安全事故一个巨大的风险源。水面支持船加工作业、海底湿法焊接、起重船高空吊运等工作都需要电力支持，一旦出现设备漏电、电线绝缘保护装置失效、电气线路老化等现象就有可能使作业人员触电[6]。此外，加工和生活用电稍不注意还会引发火灾爆炸，例如在高温高压容器周围的可燃物燃烧、用电作业产生的火花飞溅、人员吸烟产生的明火蔓延等都会引发重大火灾事故。

1.1.5 船舶碰撞

水面支持船与一般船舶行驶规则相同，但其活动受制于海底采矿设备，需长时间定位于某一特定位置，在此期间恶劣海况会严重影响水面支持船定位效果，使其与海底采矿设备、提升系统脱离，在不受控制的情况下和其他船舶或结构物相撞。同时也不能排除其他往来船舶在能见度不良的海况下撞击安全运行的水面支持船，造成船舶破损、倾覆等重大海难事故。

1.2 安全对策

毋庸置疑安全作业在海底采矿中的必要性，但采取怎样的对策以保障作业安全还值得深入思考。由于开采深海多金属硫化物是一个复杂的作业系统，包含采矿设备的下水安装、生产运营以及生产结束后设备拆除等子系统，每个子系统又涉及水面与海底不同区域的安全问题，它们来源于自然环境、人的错误行为或设备自身故障等因素，由此造成的对人员生命与设备寿命的威胁程度不一。

目前开展的海底采矿试验与实践较少，需要借鉴海洋油气与陆地煤矿的安全生产管理经验，三者具有共通与相似性。即考虑在项目之初首先进行安全作业预评价，据此制订相应的应急计划，在把握整体的基础上对人和设备进行二次分析，包括设备视情维修与人员培训，当然，在实际作业过程中，还需要高效严格的现场管理模式来保障前期设计的有效性与实时性。

1.2.1 安全预评价

这是对海底采矿可能产生的安全问题及其应对措施的一个首要的全局的把握。在采矿开始前调研采矿项目全寿命周期内的工艺流程，明确各个节点可能出现的安全事故及隐患，并对此做出相应预案。

首先说明采矿的基本工艺流程：包括水面支持船油电设施的布置情况、起重加工的工艺流程、海底采矿设备的承载能力和功率额度等性能、矿区的地质条件和温度风浪等环境荷载以及作业人员水下维修的时间和要求等内容。然后邀请相关领域专家对该作业过程进行安全分析，经过反复评估最终确定安全事故及隐患，赋予每一项事件以匹配权重，初步评估采矿作业的系统安全程度，以此为基础对十分严重、一般严重、轻微等级别的安全事故做出相应的管理措施，这样能够减轻甚至避免由于未知事件或考虑不周而引起的安全事故。

1.2.2 应急计划与演习

据国际海底管理局《“区域”内矿物资源开发规章草案》规定“为防止和应对事故，承包者需要制定应急计划。”可见应急预案在整个安全管理中的重要性。

一般应急计划由安全事件、技术措施与组织措施构成，对每一重大事故建立制度方案。就开采多金属硫化物而言，可能发生的重大安全事故包括水面支持船发生火灾爆炸、起重作业坠落物砸伤人等。针对这些问题，一方面要从技术角度考虑：电器管线是否合规布置并定期检查、大型设备作业前期安全措施是否到位、专业设备是否经过检验认证等；另一方面需从组织措施入手：平时要保障安全逃生器具方便获取、安全避险通道畅通、安全警报有效以及应急医护部署就位，以防事故发生时人员逃生受阻；提前指派应急指挥官和应急工作小组，以避免事故现场人员分配混乱；一旦发生重大安全事故，立即与管理局和附近海域国家联系，协商最佳的处理办法并争取获得最大的伤害救援。

1.2.3 设备视情维修

在未来，开采深海多金属硫化物将实现自动化、远程化，这虽然减少了人力投入量，但同时大大提升了对设备的高要求。在采矿设备高端化、精密化、自动化的发展趋势下，有必要采取基于可靠性分析和在线监测的设备视情维修策略，根据数据分析结果采取合适的维修方案，避免修理不足或过度修理减少设备使用寿命[7]。

可靠性分析为设备视情维修奠定了基础。在

前期设计、试验、调试阶段就可以预知设备的使用寿命及条件、抗腐蚀强度、应急关闭、危险报警等性能,保障其运行状态良好。许多安全故障可以通过前期设计与试验环节来有效避免:考虑在采矿车周围设计一种安全气囊以缓冲矿车与其他障碍物之间的碰撞冲击[8];在钻头旋转部位设计防护罩,以防钻齿脱落飞溅;根据人的行为特征(惯用一侧、捷径反应、躲避行为等)设计良好的人-机操作界面,以提高作业人员在维修设备时的感官体验;对采矿设备(包括改装设备)进行安全评估与鉴定,只有经过专业检查机构检验的设备才能下水作业。

在线监测为设备视情维修保驾护航。水面支持船和岸端通过对海底采矿设备实时远程监测,可以及时发现其运行故障并进行维修作业。此外,还应注意对采矿辅助电力设备进行安全检验与监测,包括漏电保护装置、电线绝缘保护装置等,并设置安全警示信号。

1.2.4　人员培训

采矿前需要对全部作业人员进行安全知识与专业技能培训。安全培训内容包括基本的安全逃生、消防、救援等知识,和对人员安全意识的培养,可通过企业的安全文化渗入,通过大型海难观影、主题讲座等方式进行。专业技能培训是针对具体工种展开的培训项目,例如起重员需明确安全作业规范、电工要具备专业电器技能等。最后还要对培训活动进行定期评审,颁布技能证书,保证培训有效。

1.2.5　海上作业的现场管理

起重作业、水下作业、维修作业、用电作业等作业都需要专业人员进入现场,这些工作环境复杂、人员密集、危险性高,需要制定一份详细的现场管理方案来保障作业安全。

首先,作业人员应向负责人提出书面作业申请并穿戴基本的防护用品才能开始作业。然后针对不同的工种制订不同的管理方案,在大型采矿设备的吊装下水现场,考虑设置水面守护船以便监测预警并处理安全事故;起重作业前要检查刹车、负荷指示仪等装置的灵活可靠;还可以参考《澳大利亚联邦离岸矿产资源法》,在水面支持船附近设置安全区,其他船舶未经批准不得进入该区域。这些管理模式在一定程度上可以降低人、环境与机器设备的交叉作业[9],预防安全事故的发生。

2　环境影响分析及对策

2.1　环境影响分析

保护环境是实现深海多金属硫化物持续开采的一项国际任务与挑战,只有对其充分了解,才可能使环保措施与开采项目并行开展,使人类与海洋世界和谐共处[10]。

鉴于对深海的认知水平远远不够,高端技术也仍需改进,目前尚未明确采矿对海洋环境造成的影响,一些专家学者认为这些影响还具有不可恢复性,一旦发生将造成难以预估的灾难事故[11]。图 1 初步描述了开采深海多金属硫化物的环境影响,从海底到水面,开采会破坏海底动植物群及其生存环境、带来声和光的影响、排放废水和尾矿,除以上特殊影响,还包括与采矿加工有关的一般类型环境污染事件。

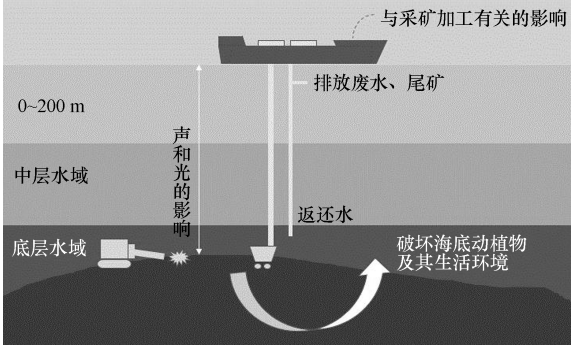

图 1　开采深海多金属硫化物的环境影响

2.1.1　破坏海底动植物群及其生存环境

深海多金属硫化物矿区多位于洋中脊热液喷口,这里聚集有丰富的海底动植物群落、喜硫细菌、无脊椎生物等,它们依靠硫矿生存,开采硫矿必然会对这些海底生物及其底栖环境造成一定的影响。具体包括以下几个方面。

(1)采矿车将动物群压碎、分散。由于大多数底层动物生活在海底沉积物以上数厘米高度内,以上层水域沉积下来的有机碎屑为食,因此在采矿路径上绝大多数生物可能当场被杀死或被翻到轨迹外侧,边沿生物也会受损,目前我们无法预知生物

再迁入的时间[11]。

(2)悬浮颗粒物羽流将动植物淹没。采矿产生的悬浮颗粒羽流和底层水发生化学反应与采矿碎屑重新沉积在海底,这些沉积物会覆盖动植物使其窒息、淹没。此底层羽状流可持续到采矿结束后数日,扩散到数十千米之外,影响范围广泛[12]。

(3)废水、沉积物和矿石碎屑损害动物器官。底层动物可能进食海底开采作业排放出的废水与矿石碎屑,其中食悬浮物动物还可能进食羽流沉积物(其中包括无机颗粒和一些难溶的有机材料)影响其消化器官导致死亡;高负荷的悬浮无机颗粒可能会堵塞动物的鳃部进而影响动物呼吸;此外,化学物质对底层生物作用可能由于沉积物浑浊而降低其传输性能,使其繁殖率下降。

(4)使用周围水体吸入海底生物。泵提升系统会用到吸水装置,用来将矿物与水混合吸入提升泵,这一过程可能吸入海底生物,致使它们丧失生命。抽吸夹带量取决于生物种类和管径与速度,有研究表明,在浅水中开采磷矿时幼虫与卵易受影响被抽吸进作业装置,但没有试验表明深水动物对此亦十分敏感[11]。

2.1.2 *声和光的影响*

一方面海底环境阴暗,一些无脊椎动物和鱼已经适应了低强度光,而采矿设备发出的持续高强度的光可能会遮盖原本的弱光对它们的吸引力,损害其视觉器官;另一方面,海洋动物用声音交流、使用回声定位,这些声音低频,传播距离远,可能会被海底采矿设备发出的噪声干扰,影响底层与海面动物的交流、觅食与繁殖[13]。

2.1.3 *采矿船废水与尾矿的排放*

排放发生在水体中,但影响深度与广度不容小觑。尾矿碎屑遇海水氧化会形成水体的富营养化,致使海藻大量繁殖,通过洋流漂流到其他地区;金属元素在生物体内积累,或在温度、压力的影响下释放潜在的有毒金属,可能对浮游生物物种构成产生一定影响[11];表层水体羽状流会增加水体浑浊程度进而影响鱼类幼体与成年鱼类捕食行为;此外,表层海水与海底富含营养物的海水混合还会造成人工上升流,增加海面生物的生产力[14]。

2.1.4 *与采矿加工有关的影响*

这些环境影响主要发生在水面支持船上。包括油污和化学品泄漏意外溢油事故、采矿船垃圾倾倒、随采矿船而至的物种侵入(动物、微生物和病毒从海底运输至水面)以及二氧化碳和二氧化硫的排放。

2.2 环境保护对策

由于海底采矿仍处于起步阶段,一些保护环境措施来源于试验结果、开采实例与国际海底管理局的规章法案。经大量的整理分析可知,同安全作业对策一致,保护环境也需要由表入里,由始及末:初期调查环境基线、评估环境影响并制定应急预案,在采矿运营过程中展开对环境的监测与管理。

2.2.1 *环境基线调查*

这是在采矿前对未知海域的一个了解过程,是评估环境影响的前提,也是环境管理的依据,在管理局《"区域"内多金属硫化物探矿和勘探规章》《"区域"内矿物资源开发规章草案》和各国的海洋矿产立法中都有所体现。

调查内容包括矿区的物理化学、地质条件、生物构成以及生物扰动等数据。针对多金属硫化物,管理局《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》中特别指出要调查硫化物矿区地貌图、海流、温度-动物变化关系、浊度变化情况、有毒物质溢出情况、底栖及上部水层的金属元素比例特性、硫化物表面覆盖沉积层的力学性质和元素组成、小型底栖生物和微生物的种类与基因联系和生活习性。调查可以使用船载多波束回声探测器、导电率-温度-深度感应器、声学多普勒电流剖面仪、水下自动航行器、摄像机、重力式样本收集器、活塞式收集器等工具。

需要注意,在进行环境基线调查时要保证广度和深度,广度在于基线区域要视具体采矿规模而定,在矿区之外还应该包含一段海域,以研究采矿对外围生物环境的影响;深度在于基线调查的有效性,抓取工具要避免对生物造成伤害,采用摄像、取样等方法观测生物在一段时间内的变化,这段时间应尽可能长,具有季节性,最少在 1～2 年内,鉴于环境基线数据的独特性,获取过程的长期性,可以考

虑与其他海底采矿公司或有关国际组织共享矿区环境数据[15]。

2.2.2　环境影响评估

基于已完成的环境基线调查，需要制定一份环境影响评估，评估时邀请社会公众与相关专家，使用度量或评分指标进行定量或定性评估，包括敏感性、抵抗性、恢复性等指标，以充分考虑环境问题，保证评估的准确性，初步制定相应的环保措施。

针对采矿对底栖生物的破坏，可以考虑在钻头外围加一防护罩，避免微小生物不慎钻入或被卷入快速旋转的钻头部位；尽可能降低钻取速度或采取间歇式采矿安排，保证沉积物羽流和悬浮物浓度小于某一危险临界值；尽量减少海水中的多金属硫化物加工工序，避免过多的生物夹带量；考虑在其他环境类似区域安装人工基质，重新克隆海底生物[16]；在采矿设备上安装降噪装置、强光弱化装置。

对于水面排放的废水与尾矿，建议在采矿船上进行尾矿脱气，从尾矿中去除气泡，以减少它们的浮力，防止其在表层水域停留；建模预测尾矿的排放行程，使排放点位于管道尾矿浆料形成浊流的位置[17]。

2.2.3　应急预案

尽管在整个采矿活动中提倡预防为主的原则，但仍不可避免地出现环境突发事件，这就需要应急预案来提高采矿期间对环境突发事件的处理能力。

对于提升泵硫化物大规模泄漏这类事件，既属于安全问题，也属于环境问题，需要在应急预案中说明应急开关设备情况，以便在泄漏发生后的第一时间关闭设备，或使用远程监测感应系统，一旦监测到提升泵外围硫化物超过某一浓度即刻启动急停系统。对于水面支持船意外漏油事故等其他造成的环境损害，要指定事故现场负责人，指挥各个生产部门关闭生产设备做好防护措施，并将事故即刻通报给管理局。

2.2.4　环境管理办法

环境管理的基本原则是预防为主和采用良好行业做法，通过环境监测与评价来实现。

(1)在矿区附近设置富有代表性的环境对照保留区(该区域与采矿区生物环境类似，但不受采矿的影响)，以保留区的生物、物理、地质、化学指标为基准，监测矿区相应指标，监测机器一旦感应到采矿区环境指标异样，即开启警报。水面支持船附近水域也需要设置二氧化碳与硫元素的监测装置，时刻记录它们较对照保留区的变化情况。

(2)建议在监测过程中采用适应性管理办法[18]，定期评价监测方案的准确性和有效性。包括对监测指标做出修改，调整对某些金属元素浓度的报警阈值，增加对迁入动物的观测记录等。公众参与和专家评审也应体现在适应性管理模式中，通过不断评价以适应不断进行中的采矿作业，且这一监测与评价活动要持续到采矿结束后一段时间，以应对残留的环境影响。

3　结论

安全作业是开展深海多金属硫化物商业开采的基本条件之一。其中海面以下涉及硫矿泄漏、结构失效和机械伤害事故，水面部分涉及机械伤害、触电事故和火灾爆炸以及船舶碰撞事故，这些问题可通过安全预评价、设备的可靠性分析、人员培训等管理办法应对。

破坏海底动植物群及其生存环境和排放废水尾矿相比于声和光产生的影响更为严峻，这些影响可以通过环境基线调查、环境评估与监测等手段加以预防或减轻。

随着深海采矿技术与装备的不断发展，对多金属硫化物的开采将不断深入并逐渐商业化，各国在开采过程中需要十分注意这些作业安全与环境影响问题，以此为基础制定相应对策。鉴于目前国内外试验研究的局限和数据材料的匮乏，这些安全与环境分析还有待于进一步量化，结合不同的开采工艺明确其所占比重及影响程度。

参考文献

[1]　阳宁，陈光国.深海矿产资源开采技术的现状综述[J].矿山机械，2010，38(10)：4－9.

[2]　刘露诗.西南印度洋 49°E－50.25°E 洋脊段多金属硫化物定量预测与评价[D].北京：中国地质大学，2018.

[3]　杜新光，官良清，周伟新.深海采矿发展现状及我国深海采矿船需求分析[J].海峡科学，2016(12)：62－67.

[4]　陶晓杰.海底探矿安全监测监控技术在三山岛金矿的应用[J].

世界有色金属,2016(18):80－81.

[5] 张荷.浅谈采矿工程技术不安全因素及其管理策略[J].技术与市场,2019,26(7):228.

[6] 韩孝辉,陈卫,陈文.海底输油气管线对海洋环境影响性分析[J].海洋开发与管理,2018,35(1):83－87.

[7] 罗璇,丁小军,吕慧权.基于状态监控的视情维修模式探讨[J].航空维修与工程,2019(2):48－51.

[8] JEEVITH H,EIRIK H H,INGRID B U,et al.Development of safety envelopes and subsea traffic rules for autonomous remotely operated vehicles[J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2019,60(7):145－158.

[9] 王玉林,杨玉中.综采工作面人－机－环境系统安全性分析[M].北京:冶金工业出版社,2011.

[10] 朱永灵.关于中国国际海底区域矿区采矿的思考[J].海洋开发与管理,2017,34(8):109－112.

[11] BERND C,ANNEKE D,SABINE C.Potential effects of deep seabed mining on pelagic and benthopelagic biota[J].Marine Policy,2019(2).

[12] 赵羿羽,曾晓光,郎舒妍.深海采矿环境影响不容忽视[J].船舶物资与市场,2017(1):57－59.

[13] TRAVIS W W,PHILLIP J T,JENNIFER M D,et al.Ecological risk assessment for deep-sea mining[J].Ocean and Coastal Management,2019,176(6):24－39.

[14] NELIA C M,THIAGO L R,MIQUEL C,et al.Environmental hazard assessment of a marine mine tailings deposit site and potential implications for deep-sea mining[J].Environmental Pollution,2017,228(9):169－178.

[15] WENBIN M,DINHENAL S,CEES V R,et al.Numerical calculations of environmental impacts for deep sea mining activities[J].Science of the Total Environment,2019,652(2):996－1012.

[16] PATRICK C C,PETER C,JENS C,et al.A primer for the environmental impact assessment of mining at seafloor massive sulfide deposits[J].Marine Policy,2013,42(11):198－209.

[17] Nautilus Minerals Niugini Limited. Environmental impact statement:Solwara 1 Project[EB/OL].[2019－08－01].http://www. nautilusminerals. com/irm/content/pdf/environment-reports/Environmental%20Impact%20Statement%20－%20Main%20Report.pdf.

[18] JOHN S W,FRANCESC V.Ecosystem damage from anthropogenic seabed disturbance: A life cycle impact assessment characterisation model[J].Science of the Total Environment,2019,649(2):1481－1490.