深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望

王 翠,丁 一,罗 阳,旷芳芳,张继伟* (自然资源部第三海洋研究所,福建 厦门 361005)

摘要:随着经济和科技的发展,陆地资源日趋匮乏,深海采矿业成为世界各国关注的焦点。然而,海 底勘探开采作业会带来一系列环境影响,特别是开采过程产生的沉积物羽流会对深海生态环境产 生影响和破坏,开展深海采矿沉积物羽流研究对深海生态环境的保护具有重要意义。本文对国内 外深海采矿及沉积物羽流的研究现状进行了综述:(1)沉积物羽流主要产生于深海采矿作业对海 底表层沉积物的搅动过程和矿物预处理的尾矿排回海洋的过程,沉积物羽流会携带大量悬浮颗粒 物质,对海洋水环境、海底沉积环境和海洋生物生态环境等产生一定的影响;(2)原位观测、室内实 验和数值模拟是目前国内外沉积物羽流研究的主要方法,由于其各自的优缺点,综合采用3种方法 开展深海采矿区沉积物羽流环境影响评估,探索羽流输运扩张机制和影响控制因素,成为研究的热 点方向;(3)当前沉积物羽流在输运机理研究、原位观测时间尺度、环境影响标准阈值等方面仍存 在短板,未来需要加强多学科合作,运用多种手段,深入开展沉积物羽流输运机理、模型精细化预 测、深海数字孪生系统和物种扰动影响等方面的研究,以期丰富深海勘探开发活动环境影响评价方 法,促进深海矿产资源开发与环境保护可持续发展。

关键词:海洋环境科学;深海采矿;沉积物羽流;数值模拟;环境影响;原位观测

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20230531001

中图分类号:P76

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2024)03-0473-12

海洋面积辽阔,占地球总面积的 70%以上,浩 瀚的海底不仅是生命起源、板块构造和海底扩张等 活动的发源地,也是一个充满资源的宝库,存储着丰 富的多金属结壳、富钴结壳、多金属硫化物等矿产资 源^[1-2]。近年来,随着陆地资源的日趋匮乏以及人类 对海洋资源的日益关注,海洋勘探、海底采矿等海洋 资源的开发利用变得越来越重要,其中海底金属矿产 被认为是深海最具潜力的开发领域之一。深海矿产 资源勘探和开采技术将会成为衡量国家综合国力和 前沿科技水平的关键因素,对于维护国家海洋资源安 全和推进海洋强国建设具有重要的战略意义^[3]。

深海采矿的环境影响一直是国际社会高度关注 的话题。近半个世纪以来,一些国家和科学组织针 对深海采矿可能引起的环境破坏问题,相继开展了 一系列的调查和实验研究工作。根据《联合国海洋 法公约》的规定,为了保护和保全深海生物多样性 和海洋自然环境,防止、减少和控制采矿活动对海洋 环境的破坏、污染及其他危害,参与国际海底区域勘 探和开发活动的国家和组织必须进行深海勘探开发 活动对海洋生态环境影响的监测和评价^[4]。

近年来,包括中国在内的很多国家已开始在深海 进行勘探、开采实验和试采工作的探索^[5],但深海采 矿目前仍存在很多问题和挑战。首先,采矿技术复 杂,成本高昂。其次,深海环境恶劣,开采环境对设备 要求较高。另外,深海采矿活动可能对周围生态系统 和环境产生破坏。采矿作业过程中,底部扰动、噪声、 放射性物质等都会影响深海生态环境,深海矿产的开 采过程中还有可能出现泄漏、废弃物排放等情况,从 而对周围生态系统和环境造成损害^[6]。

沉积物羽流是指海底扰动或矿物开采活动过程 中在海洋底部产生的、悬浮着大量颗粒物质的特殊 水流。深海采矿过程对海底进行矿物收集、冲洗、破 碎和研磨等操作,以及集矿机运动都不可避免地产 生沉积物羽流^[6],导致海底沉积物浊度浓度提高及

收稿日期:2023-07-06

资助项目:厦门市自然科学基金(3502Z20227248);国家重点研发计划(2022YFC2804002,2022YFC2803901)

作者简介:王翠(1982一),女,博士,正高级工程师; E-mail: wangcui@tio.org.cn

^{*} 通讯作者:张继伟(1976—),女,博士,正高级工程师; E-mail: zjwfruit@tio.org.cn

43 卷

水质恶化,直接影响整个海洋生态系统的平衡,对深 海生态系统和环境产生难以逆转的影响。目前,对 深海采矿产生的沉积物羽流扩散范围和影响程度还 不能进行可靠的估算,因此开展深海采矿沉积物羽 流研究,确定沉积物羽流的形成机制、影响程度和范 围,对于深海勘探开发活动的环境影响评估与保护 深海生物资源显得尤为重要。本文通过文献综述, 阐明深海采矿及其产生的沉积物羽流对环境的影 响,从原位观测、实验室实验和数值模拟方面总结沉 积物羽流的研究进展,并对未来的发展趋势进行了 展望,以期丰富深海采矿沉积物羽流研究方法,促进 深海矿产资源开发与生态环境的可持续发展。

1 沉积物羽流对环境的影响

1.1 沉积物羽流的产生过程

自 20 世纪 60 年代开始,各国进行深海矿产资

源的开采技术研发,经历了连续链斗式、自动穿梭艇 式和管道提升式^[7-8]等不同方案的尝试。目前,国 内外研究较多的开采技术为管道提升式深海采矿方 案。管道提升式开采一般由4个部分组成:海底集 矿系统、海中矿物提升系统、海面矿物处理系统和海 中尾矿排放系统^[9-10]。

管道提升式深海采矿方案通常包括 3 个主要阶段:第一阶段是确定采矿目标区域,远程操纵海底矿车进行钻探、切割或挖掘工作,从海底采集矿产资源;第二阶段通过泵和管道将矿物从海底输送至海面,并进行筛选、清洗、浮选等工作去除多余杂质;最后,在采矿过程中产生的废弃物需要经过适当的处理和评估后,通过尾矿排放口输送至合适的位置进行排放^[11-12],以最大程度地减少对海洋环境的影响。深海采矿的基本操作流程如图 1 所示。



图 1 深海多金属结核采矿系统及环境影响示意图^[13-14]

Fig. 1 Schematic diagram of deep-sea polymetallic nodules mining system and potential environmental impacts

根据目前的深海采矿流程,矿物预处理和尾矿 的排放,产生沉积物羽流主要有以下3个阶段,一是 海底作业阶段:海底采矿设备作业时的机械运动对 海底表层沉积物进行搅动,破坏海底沉积物原有的 结构、构造,使得部分沉积物悬浮于水体中产生沉积 物羽流^[15];二是矿物收集阶段:矿物通过管道提升 输送、海面船上选矿过程中部分沉积物扩散到水中, 形成沉积物羽流^[16];三是海面矿物处理阶段:输送 至采矿台或生产船的矿物进行预处理后产生的包括 废水、沉积物和其他细粒固体颗粒物在内的尾矿通 过排放口排回海洋的过程^[17]中,固体物质扩散到水 中,形成沉积物羽流。深海采矿所产生的沉积物羽 流悬浮浓度高,持续时间长,传播范围广,会对海底 底质、深海水环境和生物群落产生重要影响^[13-14]。 因此深海采矿最关键的环境问题之一是沉积物羽流 问题,明确深海采矿沉积物羽流产生变化机制,评估 沉积物羽流对深海环境的影响,是当前深海采矿环 境影响研究的重点和难点问题。

1.2 沉积物羽流对环境的影响

1.2.1 对海洋水环境的影响

海底作业产生的沉积物羽流会携带大量沉积物、矿物碎屑等颗粒物质,持续时间长、扩散范围广,极大地增加了深海水体的浊度,影响海水透光性,进 而影响海水表层的初级生产力。尾矿排放产生的沉 积物羽流混合了粗矿物处理的有害物质,导致采矿 区域及羽流影响的区域重金属等毒性物质浓度上 升。此外尾矿排放的沉积物羽流会随着海流扩散到 附近海域,造成局部海水温度降低,进而影响海水的 生态环境^[13,18]。

1.2.2 对海底底质的影响

深海金属矿区表面通常被多金属结核或岩石覆 盖,这些物质的存在较大提升了海底面的硬度。当 金属矿物被开采时,首先需要将表层金属矿物进行 破碎、搅动,从而造成表层沉积物的扰动和悬浮,这 些扰动产生的沉积物羽流会携卷大量沉积物向采矿 区外围扩散,较重的颗粒物会在采矿区周围迅速沉 降,较轻的悬浮物可能随着海底洋流漂浮至其他区 域,影响范围可能非常大^[19]。根据沉积物羽流影响 的范围,沉积物的粒度可能会向更粗或更细方向变 化,从而导致海底沉积物成分和粒径的改变。一个 非致密表层沉积物的形成可能要经过上百年,因此 长期性的大型深海采矿活动会改变采矿区及其附近 海域的沉积物特征、地形地貌^[20]。

1.2.3 对生物群落的影响

沉积物羽流携带的悬浮颗粒物可能会造成海底 动物的窒息,悬浮颗粒物在运动过程中发生沉降,可 能会掩埋底栖生物,破坏生物栖息地^[20]。羽流会增 加水体浊度,掩盖海洋动物的生物化学信息,影响生 物求偶、觅食和繁衍等行为从而减少再生产率。尾 矿排放沉积物羽流会导致光合作用带浊度增强,从 而降低光的利用率,导致初级生产率显著下降,甚至 影响到高营养等级的生物的生存;在羽流的作用下, 无机悬浮物的浓度上升,导致浮游动物摄入更多无 机颗粒物,导致生长率降低^[6]。

1.2.4 其他影响

大部分海底作业及收集设备都会产生噪声,用 于监测、调查的运载机等设备会发出强光,矿物采集 也需配合光源以便指挥控制作业。深海生物的信息 感知系统较为独特,部分生物可以产生微弱的光 源^[21],而其他一些鱼类和无脊椎动物则可以感觉到 生物发光,深海的生物群落通过生物发光现象获取、 传递信息,达成较为稳定的状态^[22],而人工强光源 可能会在一定程度上破坏这种稳定,甚至直接伤害 一些生物的感光器官。水对声波的吸收和散射作用 更小,采矿产生的噪声在水下传播范围更广,可能会 干扰部分依赖声波信息的生物的感知,使其导航、捕 食等行为紊乱。深海采矿作业和羽流的产生过程 中,可能会导致重金属等有毒物质在水体中扩散,重 金属浓度的提高会产生潜在影响,有毒物质在食物 链中积累,对深海生物造成伤害。

2 沉积物羽流的国外研究进展

为了探索深海扰动与沉积物羽流形成的关系、 沉积物羽流的影响范围和影响程度,学者们不断尝 试和改进调查方法,得到了不同研究区域沉积物羽 流的观测数据;研究人员也进行了若干深海扰动的 模拟实验,以此来探究沉积物羽流的成因及动力特 征。除了观测和实地调查之外,数值模拟也是研究 沉积物羽流的一种常用方法。采用多种不同的数值 模型对深海扰动产生的沉积物羽流进行了模拟研 究。本节将分别从沉积物羽流的观测实测与数值模 拟的研究进展展开。

2.1 原位观测与室内实验

2.1.1 沉积物羽流的原位观测

1970 年 7 月哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球 观测站在北大西洋布莱克海底进行了世界上第一次 深海采矿环境影响实验,研究的主要焦点是海底沉 积物排放产生的表面羽流及其造成的营养盐生态影 响^[4]。此后,多个研究团队进行了实验,表 1 介绍 了深海采矿原位观测实验情况。

1978 年美国监测海洋管理公司(OMI)和海洋 采矿协会(OMA)在 DOMES 的A 区和C 区进行实 验性采矿影响研究。研究结果表明,试采过程中会 在集矿机附近形成离海底约 50 m 高的水体扰动区, 较小的颗粒随底层流扩散形成沉积物羽流,颗粒物 浓度为 15~150 μg/L^[23]。开采实验后 6~7 天,距离 开采地 16 km 的下游(距海底 2 m)的海底颗粒物浓 度增加,底部羽流的水平扩散速度约为 3~4 cm/s^[24]。尾矿废水在表层排放,采矿船周围会形成 数百米宽的表层羽流带,排放 15 min 后表层羽流中 悬浮颗粒浓度高达 900 μg/L^[25]。1979 年春季,在 红海的"亚特兰蒂斯 II 深海"成功进行了金属含泥 浆的预开采实验,约有 1 600 m³的尾矿从管道排入 深度 400 m 的海域。回声测深仪监测数据显示,颗 粒物的最大浓度分布在排放深度以下 300~400 m 水深处^[26]。在洋流的驱动下粒子示踪实验显示颗 粒物最远可以漂流到距离排放点 90 km 处^[27]。此 后,由美国、德国为主的发达国家开展了多项扰动测 试实验。自 1991 年起,多个国家和国际组织采用扰 动器陆续进行了底层影响实验(BIE 实验),实验的 目的是通过人工扰动海底表层沉积物来研究沉积物 的沉降、再悬浮及其混合过程和尾矿在离海底 5 m 高处排放的环境影响^[28],结论显示海底扰动的大小 不仅取决于扰动的时间和距离,还与研究区域的海 底原位沉积特征密切相关^[29]。2001 年, Sharma 等 使用名为"深海底部悬浮物再悬浮系统(DSSRS)" 的底部扰动器进行了海底扰动实验。实验在扰动区 域周围部署了深海观测设备来记录扰动前、中、后的 沉积物通量数据,并通过水下定位系统和高速相机 等来研究模拟扰动的影响。实验结果表明,海底干 扰会导致沉积物再悬浮和再沉降,从而对海洋生态 系统产生各种影响^[30]。2021—2022年,比利时和加 拿大采矿公司分别在各自矿区开展了深海采矿实 验。这些实验研究获取了大量的深海采矿区物理、 化学、生物等基线监测数据和长时间的跟踪监测数 据,但实验主要是集中在短时间、小尺度范围内的原 位扰动实验,与实际大型的商业开采作业程度有较 大差异。

表 1 深海采矿原位观测实验概况

Tab. 1 In situ observation experiments of sediment plui

			-
实验简介	时间	研究焦点	结论/结果
美国监测海洋管理公司 (OMI)和海洋采矿协会 (OMA)进行的实验性采矿 影响研究	1978 年	试采过程中水体及沉积物扰动产生的沉 积物羽流颗粒物浓度及扩散速度	集矿机附近形成离海底约 50 m 高的水体扰动区,颗粒 物浓度为 15~150 μg/L ^[23] 。实验后 6~7 天,开采地下 游(距海底 2 m)的颗粒物浓度增加,底部羽流的水平扩 散速度约为 3~4 cm/s ^[24] 。尾矿废水在表层排放,采矿 船周围会形成数百米宽的表层羽流带,排放 15 min 后 表层羽流中悬浮颗粒浓度高达 900 μg/L ^[25]
位于红海的"亚特兰蒂斯 II 深海"多金属软泥的预开采 实验	1979 年	尾矿排入深海造成的沉积物扩散情况	颗粒物的最大浓度分布在排放深度以下 300~400 m 水 深处 ^[26] ,颗粒物最远可以漂流到距离排放点 90 km 处 ^[27]
美国国家海洋和大气管理局 进行海底影响实验(BIE 实 验)	1991— 1993 年	通过人工扰动海底表层沉积物来研究沉 积物的沉降、再悬浮及其混合过程和尾 矿在离海底 5 m 高处排放的环境影 响 ^[28]	海底扰动的大小与扰动的时间、距离和研究区域的海底 原位沉积特征密切相关。开采9个月后该区域部分小 型底栖动物的丰度下降,大型底栖动物的数量增加 ^[29]
"深海底部悬浮物再悬浮系 统"底部扰动器开展海底扰 动实验	2001 年	在扰动区域周围部署了深海观测设备来 记录扰动前、中、后的沉积物通量数据, 并通过水下定位系统和高速相机等来研 究模拟扰动的影响	海底扰动会导致沉积物再悬浮和再沉降,从而对海洋生态系统产生各种影响 ^[30]
韩国使用"Minero"采矿机器 人"开展采矿实验	2013 年	完成1370m的深海采矿实验	采集多金属结核 28 t
比利时 GSR 深海采矿公司 进行海底开采实验	2021年	在东太平洋克拉里昂-克利珀顿区(Clar- ion-Clipperton Zone,简称 CC 区)矿区完 成 4 500 m 水深海试	成功采集 1 200 t 深海多金属结核,采集效率高达 110~ 120 t/h
加拿大 TMC 深海矿产资源 开发公司开展采矿实验	2022 年 9 —11 月	在 NORI-D 矿区完成采集提升实验	成功采集 4 500 t 矿石,采集效率可达 86.4 t/h

此外,为了理解羽流中粒子的沉降行为、再沉积 颗粒物的侵蚀潜力,以及测试近底层的羽流扩散和 动力学是否符合海洋动力学和沉积物输运模型, Matthias等利用高精度制图、地球化学和生物采样 技术对扰动和未扰动区域进行观测,结果表明深海 矿业挖掘活动产生的沉积物羽流的颗粒沉降行为取 决于颗粒的沉降速度、推动颗粒沉降的水流速度、沉 降颗粒的松散度、悬浮质量浓度等因素^[31]。Haalboom 等在采矿车辆 Apollo II 上安装浊度传感器、声 学记录仪和测沙仪(LISST)等设备,并利用在海底 定点的测量设施,包括多普勒声学剖面仪(ADCP)、 温盐深(CTD)装置、沉积物捕获器、后向散射声学光 谱仪(OBSs)等观测羽流。同时,在采集数据的过程 中采用了采样器采集水样以验证传感器数据。采用 这些技术设备的组合,有效地观测和记录了由采矿 车辆产生的羽流扩散过程中的悬浮颗粒浓度变化和 沉淀等性质^[32]。Muñoz-Royo 等针对深海多金属结 核矿的开采活动进行观测,在研究中使用了声学和 湍流测量仪器来监测和跟踪沉积物羽流,经分析得 出沉积物羽流的影响规模与深海活动沉积物的排放 量成正相关,并受到环境可接受阈值水平的限 制^[33]。

沉积物羽流原位观测的重点是沉积物羽流产生 后海水中悬浮物浓度的变化、羽流的扩散情况以及 海洋水文数据,声学设备和海流观测设备能较好地 收集羽状流的动力参数及附近悬浮物浓度数据,已 成为海底扰动及沉积物观测的常用方法。

2.1.2 沉积物羽流的室内实验

现场原位观测经常会受到海洋环境条件和安全 性等的限制,室内实验成为研究沉积物羽流的常用 方法之一。研究人员通常采用的实验方法有:在工 程区域进行海底扰动实验、实验室模拟工程区域环 境条件并进行悬浮物沉降、再悬浮、絮凝等过程实 验。这类实验可以更加便捷地观测沉积物羽流的性 质及动力特征,并可根据需求修改实验参数来模拟 深海采矿在不同环境下产生的沉积物羽流,是一种 科学、便捷的研究方法。

Oebius 等根据 20 世纪 90 年代在秘鲁海盆的航 次调查,通过实验室模拟了采矿系统的扰动过程,研 穷采矿活动引起的海底沉积物物理侵蚀、再悬浮和 沉积过程,估算了采矿造成的海底沉积物迁移和扩 散,得到不同粒径、不同浓度的颗粒在海底的沉降速 度,以此评估扰动对海底环境影响的空间和时间尺 度^[9]。Choi 等通过太平洋开辟区的调查样品,从沉 降速率、影响范围、扩散过程等方面研究沉积物的扩 散情况,分析了海底沉积物的抗剪切强度,估算了扰 动造成的海底沉积物的环境影响[34]。此后, Spearman 等使用海底沉积物、底栖生物和海水等样 品,在实验室模拟深海环境进行沉降实验,使用高清

数字视频摄像机、浊度测量仪等工具来观测产生的 羽流,测量悬浮泥沙的浓度变化。研究结果表明,沉 积物羽流在海底的影响范围将受到沉积物絮凝和现 场背景浊度的限制^[35]。Mingotti 等设置了 85 cm× 45 cm×45 cm 实验装置,将颗粒和水混合物通过喷 嘴喷入装置中,分别模拟了海床底部扰动及尾矿排 放时产生的沉积物羽流,使用照相机对整个过程进 行间隔拍照获取羽流的形状,探究深海采矿过程中 羽流产生的原理,评估深海采矿期间羽流对环境的 影响^[36]。

室内实验可以根据设定的扰动实验模拟羽流产 生和运动情况,可以研究深海环境下不同沉积物颗 粒的沉降速度、抗剪切强度、絮凝过程等,可为沉积 物羽流的扩散特征和参数化过程提供科学支撑。

2.2 沉积羽状流的数值模拟研究

原位观测和实验室模拟的研究方法成本较高. 在研究沉积物羽流时,数值模拟也是一种常用方法。 自 20 世纪以来,学者们采用多种不同的数值模型, 如 $ROMS^{[37]}$ 、 $MSEAS^{[38]}$ 、 $TELEMAC-3D^{[39]}$ 、HY-COM^[40]等对深海扰动产生的沉积物羽流进行了模 拟研究。其中,基于平流扩散方程的流体力学模型 和基于平滑粒子流体动力学(SPH)方法的模型被广 泛研究和应用。

2.2.1 平流扩散模型

上世纪末,研究人员通过实地实验数据作为输 入,基于 Navier-Stokes 方程和平流-扩散方程进行了 沉积物羽流的数值模拟。不同的模型在模拟方法和 参数诜取上存在差异。

Zielke 等采用拉格朗日模型,评估了深海采矿 活动产生的沉积物羽流的停留时间。该模型针对沉 降速度极小的颗粒物,能模拟海底边界层中的密度 流。结果显示,排放羽流的停留时间不仅取决于泥 沙沉降速度和扩散系数,还取决于周围环境的速度、 密度流和分层情况^[41]。Doi 等的模型通过模拟底层 流场来模拟沉积物羽流,模型考虑了温度和盐度参 数,关注了悬浮颗粒的负浮力流,可以模拟不同释放 速度的颗粒物,并通过设置上升喷流来模拟扰动器 两端的再沉积峰值^[42]。该模型应用于日本深海撞 击实验,结果显示泥沙的负浮力效应对于提高模型 的预测精度起着重要作用。Segschneider 等^[43]和 Rolinski 等^[44]的模型采用大尺度海洋输运模型与拉 格朗日输运模型相结合的方法,对太平洋排放的羽 流进行了数值模拟,重点关注释放沉积物的长时间 输运,但在计算中没有考虑到排放羽流本身的性质。

相比之下, Hess 等^[45]和 Jankowski 等^[39]构建的

模型则更加注重实际情况下深海开采活动产生的沉 积物羽流。Hess 等构建的模型是一个典型的平流-扩散方程,该模型利用 DOMES 项目的实验数据作 为验证。设定水平流速为常数,垂向考虑了沉积物 羽流的排放速率、沉降速度和垂直混合层的影响,但 忽略了垂向的扩散,可应用于大尺度的深海开采工 况。而 Jankowski 等的模型则着重于底部边界层的 准确描述,假定底部边界层具有对数速度剖面,考虑 了临近海底的垂直混合现象,并同时考虑了颗粒清 除、海底侵蚀、颗粒沉降和絮凝等现象,在多种因素 的综合作用下模拟了深海水环境中的沉积物羽流. 并利用 DISCOL 项目的实验数据进行验证。该模型 考虑了底部边界层和深海水环境中颗粒物的实际情 况,提高了模拟精度和实际应用性,可模拟移动源的 沉积物羽流和大尺度深海开采工况,在研究沉积物 羽流方面具有一定的优势。

2.2.2 光滑粒子流体动力学模型

光滑粒子流体动力学(SPH)是一种基于粒子离 散偏微分算法的方法,通常用于拉格朗日方程的离 散化,已成功应用于自由表面流动、复杂流体流动、 流固表面相互作用等多个领域,在模拟泥沙输运问 题方面具有相当大的优势,特别是涉及水下设备操 纵与沉积物底床之间的流体结构相互作用^[46]。

Bian 等团队采用了 SPH 方法对悬浮在流体中 的固体颗粒的多尺度建模进行研究,将宏观的 SPH 法与介观的耗散粒子动力学(DPD)方法相联系,建 立了固体颗粒悬浮液的模型^[47-78]。该模型采用核 函数对流体进行离散化,采用了排斥和黏滞力来进 行扰动修正,成功地模拟了不同密度、不同流速下固 体颗粒悬浮液的流动情况,为深海采矿沉积物羽流 的数值模拟研究提供了参考。

Erwan 等^[49]针对涡流底泥输送和在海底附近 或上方移动设备产生的扰动,基于 SPH 方法建立了 数值模型,该模型将流体-颗粒系统视为等效介质, 采用体积分数、剪切速率相关的参数进行沉积物和 水混合物的复杂流变行为建模,重点关注了湍流、 非牛顿流体行为、底泥输送和流体-结构相互作用 等因素,该模型较好地模拟了水流与沉积物的混 合结构,为沉积物羽流的数值模拟研究提供了技 术支撑。Thien 等^[50]基于 SPH 开发了一种用于研 究与海底采矿作业相关的海底沉积物传输的混合 模型,并通过消息传递接口并行的算法来加速三 维平滑粒子流体动力学的仿真。该研究很好地模 拟了海底采集多金属结核的技术活动导致地沉积 物羽流运动。 SPH 模型可以将流体和沉积物颗粒视做共同 存在且相互渗透的连续介质,具备较好的精度和准 确性,在研究沉积物羽流的动力学过程、羽流射流后 与周围海水的相互作用过程、沉积物初始浓度对羽 状流流动特征的影响方面发挥了巨大的作用,但会 受到计算机内存和 CPU 处理速度的影响。

2.3 综合方法

原位观测可以获得现场监测资料,室内实验可 以获取沉积物羽流的不同运动过程的参数,数值模 拟可以详细给出沉积物羽流的动态变化过程,不同 研究方法各有优劣,3种方法的共同使用成为当前 深海采矿羽流模拟的研究热点。

Spearman 等于 2016 年在加那利群岛海底进行 了深海羽流原位实验,并在实验室对现场沉积物进 行了详细的室内模拟和参数测量工作,同时使用 TELEMAC-3D 模型对羽流扩散过程进行了数值模 拟^[35]。该实验将原位测试、室内实验和数值模拟相 结合,通过控制海底沉积物羽流的形成,在现场使用 着陆器测量沉积物羽流浓度,分析了扰动实验后不 同时间不同高度处的悬浮泥沙浓度情况。结果显 示,在进行的 36 次扰动实验中,原位观测装置捕捉 到了 19 次悬沙浓度的异常。后续需要利用预测模 型修正监测点的布放位置,以期获得更好的监测验 证结果。

2019年,Haalboom等在东太平洋 CC 区 4 200 m 深的海底进行了 12 h 的小规模扰动实验,使用光 学和声学浊度传感器及海流计,对实验中扰动前后 沉积物羽流的扩散行为进行了监测^[51];Purkiani等 使用麻省理工学院总环流模型(MITgcm)对此次人 为扰动产生的沉积物羽流扩散进行了数值模拟,模 拟结果能较好地与现场观测到的悬浮物浓度及再沉 积范围拟合^[52];模型结果说明,沉积物羽流水平扩 散程度与海床的地形及悬浮物的释放高度有较高相 关性,而垂向扩散程度与近底层垂向混合过程的强 弱有较高相关性。

Gillard 等为了更深入的了解工业规模采矿作业 产生的沉积物羽流的影响,通过原位监测、实验室实 验和构建传输模型相结合的方法,来研究影响沉积 物羽流过程的可靠性参数、分析可能降低沉积物羽 流影响的最佳排放条件^[40]。该研究用多芯测井仪 (MUC)从德国位于东太平洋 CC 区多金属结核勘探 许可证区域内的 9 个地点获得了海底沉积物样本, 并在东部部署的 3 个系泊装置获得了水流速度和方 向以及海底附近背景浊度的长期数据,在实验室实 验中测定了颗粒沉降速率、临界剪切速率等参数。 基于 MITgcm 构建了沉积物羽流的三维模型,通过 求解被动示踪剂方程来模拟泥沙输移,并为每种泥 沙类别添加额外的沉降速度和泥沙来源,以评估实 验结果在现实场景中的应用,并预测研究地点的泥 沙输移,结果表明深海流动条件下采矿产生羽流中 较大颗粒会相对快速沉积,在高湍流条件下高含沙 量(大于500 mg/L)的沉积物会快速发生絮凝。

综上,目前深海采矿沉积物羽流研究方法中,现 场实测是目前国际上沉积物羽流研究的广泛采用的 方法,但成本较高,并且容易受到天气、环境等外部 因素的干扰;实验室实验可以获取沉积物动力学的 相关参数,在沉积物羽流动力学机理等方面比较可 靠,但存在实验尺度有限,测量和实验方法受限等问 题。数值模拟作为当前应用方便、成本低廉的方法 逐渐推广,但由于深海环境复杂,精度和准确性还有 待提升。因此综合使用原位观测、实验室实验和数 值模拟的方法对深海采矿区产生的沉积物羽流进行 研究,揭示沉积物羽流动力学过程和对海底环境、生 物物种等影响的研究,探索沉积物羽流影响的控制 因素,减小深海采矿沉积物羽流的环境影响,成为深 海采矿沉积物羽流研究的常用方法。

3 沉积物羽流的国内研究进展

3.1 深海勘探研究

深海环境极为复杂,对海底观测的装备和技术 要求较高^[53]。近年来,我国深海矿产资源勘探评估 工作不断推进,深海矿产开发技术水平不断提高,在 深海资源勘测技术及装备领域实现了多次更新换 代^[54]。传统装备功能少、操控性差、工作时间短,难 以满足深海矿产资源开发需求,现代装备如"蛟龙" 号载人潜水器、"海龙"系列遥控潜水器、全覆盖多 波束测深系统、高精度测深侧扫探测系统等,功能丰 富、操控性强、精度高,续航能力相比于传统设备有 了较大提升^[55]。海底勘探装备的发展可实现大深 度海洋资源勘探任务,可以更准确、便捷地观测海底 开采产生的沉积物羽流,以研究其生成机制、运动特 征,从而研究其对深海环境的影响。

我国在 20 世纪 80 年代开始探索深海金属矿产 资源开发技术和装备。1990 年国务院批准中国大 洋矿产资源研究开发协会(中国大洋协会)申请国 际海底矿区,并将大洋多金属结核资源勘探开发作 为国家长远发展项目,正式拉开了中国系统性进军 深海大洋的序幕。1991 年,中国大洋协会在 5 000 m水深的东太平洋 CC 区获得了 15 万平方千米的 多金属结核资源开辟区,成为在联合国国际海底筹

委会登记的第5个"先驱投资者"。2001年5月中 国大洋协会与国际海底管理局签订多金属结核矿区 《勘探合同》,确定了中国在国际海底区域拥有专属 勘探权和优先开发权的第一块矿区。此后,中国先 后与国际海底管理局签订了多金属结核、富钴结核 和多金属硫化物共5份勘探合同,矿区面积达23.5 万平方千米,使我国具备了全方面开发深海矿产资 源的基础。中国大洋协会使用多波束探测系统、深 海拖曳光学系统、CTD 和 ADCP、多管取样器和箱式 取样器、浮游生物拖网等技术手段,进行了深海环境 基线调查作业,已开展了近3000个站位的地质取 样,获得了大量样本,为我国继续开展采矿环境影响 实验提供了基础^[56]。中国五矿矿区位于东太平洋 CC 区,自 2017 年开始在矿区开展资源勘探工作,完 成了矿区全覆盖多波束测深调查、99个地质取样以 及约760 km 海底摄像测线;北京先驱矿区位于西北 太平洋海山盆地,自2012年开始完成了约40万平 方千米区域的多波束测深调查、154个站位的地质 取样^[57]。这些深海勘探实践有利于使我国的深海 资源从勘探转向开发,为深海的调查和观测提供了 支持。2016年6月12日,长沙矿山研究院研制的 深海富钴结壳采矿头随中国"海洋六号"科考船在 南海成功开展了富钴结壳采掘实验,这是我国首次 开展深海富钴结壳采掘技术海洋实验。2017年,长 沙矿山研究院使用自主研制的海底采矿车在合同区 开展综合采矿实验。2021年7-8月,上海交通大 学研制出履带式深海重载采矿车"开拓一号",并在 我国南海西沙海域成功完成1300m级海底多金属 结核开采实验。2023年5月,由中国科学院深海科 学与工程研究所牵头研制的履带式深海底爬行式移 动作业平台完成 4 000 m 级海试任务。综上所述, 我国在深海采矿装备和技术方面已经取得了突破性 的进展。但由于我国深海采矿研究起步较晚,仍有 多项关键技术还在实验阶段,距离实际商业开采应 用还有较大差距^[58]。

3.2 沉积物羽流的数值模拟

近年来,我国科研人员使用数值模拟的方法对 沉积物羽状流进行了一系列的应用和研究。Shi等 开发了两相 SPH 数值模型,研究了海洋和海岸工程 中的泥沙输移问题^[59]。Yang 等基于 OpenFOAM 建 立了模拟沉积物羽流与结核收集器前方倾斜移动板 块间相互作用的两相混合模型求解器^[60]。通过已 有的实验(沉积物羽流与移动板块的相互作用结 果)和相应的 SPH 数值模拟结果进行验证,并进一 步将移动板块和沉积物羽流间相互作用的研究拓展 到三维数值模拟中。

在国内外沉积物羽流数值模拟研究的基础上, Lin 等建立了基于 SPH 的数值模型, 探讨了深海结 核开采过程中的沉积物扰动对底栖生态系统的环境 影响[61]。该研究对小尺度采矿过程的沉积物扩散 进行了数值模拟,研究了不同沉积物释放速率下的 沉积物羽流运动,以评估深海采矿产生的沉积物羽 流对环境的影响范围,并进行了室内实验对比验证。 该数值模型较好地揭示了沉积物羽流的运动规律. 结果表明随着沉积物释放速率的增加,沉积物羽流 需要更长的时间才能达到稳定状态,并且从释放源 的位置到达更远的距离。Liu 等采用拉格朗日模 型,结合中国南海的现场实验,分析了深海矿车与沉 积物羽流的动态相互作用[62]。该研究得出:矿车尾 部的涡旋结构对沉积物羽流的排放有重要影响,这 类结构能捕获尾部的羽流,抑制其横向扩展,这种抑 制的强度与采矿车的行驶速度有关。刘港慧等采用 欧拉双流体模型,模拟了深海采矿细颗粒羽流,分析 海底排放羽流的演化和发展过程,探究羽流初始排 放质量浓度、排放速度对羽流扩散过程的影响,研究 结果可为深海采矿尾矿排放参数的选择提供参 考^[63]。

目前,国内沉积物羽流数模研究主要集中在模型初步构建、模型参数测试和沉积物羽流影响因素的探索研究中,此类数值模拟研究对于了解沉积物 羽流特性、评估深海沉积物羽流扩散的影响因素、确 定模型参数方面具有重要意义。随着我国深海采矿 事业的发展,沉积物羽流模型在实际商业开采区的 构建和参数化过程模拟等方面还有待深入。

4 存在问题与展望

4.1 存在问题

4.1.1 沉积物羽流的输运机理研究不充分

深海采矿目前的主流方式是射流集矿,其核 心关键问题是水力射流与深海物理、化学、沉积环 境的相互作用,涉及复杂多场合多尺度的耦合作 用机理。目前对深海环境下,多因素的耦合作用 机理研究尚不深入,对沉积物羽流的输运机理的 了解还很有限,尚未完全揭示其形成和发展机制 的详细过程。不同的沉积粒径在深海环境中的起 悬过程、沉降过程、再悬浮和絮凝等研究还有待深 入。悬浮沉积物的影响范围和影响程度取决于沉 积物羽流的颗粒组成、所在海域的扩散和稀释条 件。沉积物羽流如何随时间和空间发生迁移转化 和演变目前知之甚少。

4.1.2 现场实验观测时间尺度有限

尽管人们已经进行了大量关于深海采矿引起的 沉积物羽流影响的研究,但目前深海采矿原位观测 实验是断断续续进行的,因此羽流影响的实验结果 只能描述短期、小范围的影响,而缺乏长期商业采矿 过程中的大区域、长周期、叠加累积影响的研究结 果。准确高精度的海底水文动力、沉积环境、生物化 学环境资料是研究沉积物羽流运动的基础。已有研 究表明,深海海底并不是平静的海域,它也存在一定 的周期变化或季节变化,时常会发生流速达15 cm/s 的海底风暴^[64],需要积累长时间序列的监测资料, 才能准确了解深海采矿区域的环境现状。目前海底 深海观测已有多年历史,但多集中于各国的采矿区, 且沉积环境、生物生态等资料还需要积累和完善。

4.1.3 环境影响标准阈值没有确定

深海矿产资源开采是一项庞大而且复杂的工程,深海采矿通常是在水深达6000m的海域进行, 涉及复杂的海洋环境动力过程。目前商业规模的采 矿系统处于实验过程中,采矿车类型、采矿工艺等仍 在不断更新优化,尾矿排放废水的排放位置仍然存 在诸多争议。目前的影响研究多采用原位实验结果 进行沉积物羽流的影响分析,用于判定深海采矿环 境影响程度的标准阈值没有确定,进而导致沉积物 羽流的影响程度、影响范围和空间尺度均存在较大 差异。

深海采矿沉积物羽流对环境的影响是巨大的, 存在不确定性。目前的研究多通过小规模干扰实验 和其他观察评估其对海底环境的影响。大型商业采 矿活动将会发生更大空间和更长时间尺度的扰动过 程,因此合理确定标准阈值,定量评估沉积物羽流的 环境影响程度成为研究趋势。

4.2 展望

深海海底采矿扰动和预处理尾矿排放形成的沉 积物羽流影响是深海矿产资源开发环境问题的核 心,是开展海底作业区的环境监测、环境保护和生态 修复的基础。尽管国内外海洋研究组织针对深海采 矿装置开展了多次扰动模拟研究,获得了沉积物羽 流的监测数据和模拟结果。但由于原位实验的采矿 时间较短,实验区域较小,与商业矿产资源开采时间 300 d/a,开采面积约 300 km²相差较大。同时,深海 环境复杂多变,沉积物羽流的环境影响受温度、季 节、海底洋流、沉积物类型等多因素扰动影响,目前 研究结果存在较大的误差和不确定性。基于对当前 深海采矿沉积物羽流研究现状的梳理,未来的研究 方向和重点可聚焦在以下几个方面:

(1)加强多学科、多领域合作,通过现场原位实验、室内实验室模拟和数值模拟等手段,研究沉积物 羽流扩散、沉降、再悬浮和絮凝等过程机理,确定不 同沉积物粒径在深海环境中的扩散系数、沉降速率、 絮凝系数等参数,深入深海环境沉积物羽流机理研 究。深海矿产资源开采过程就是采矿设施对海底及 附近海域环境产生扰动的过程。为了更好的保护深 海环境,未来需从羽流产生、运移、扩散、悬浮、絮凝 等过程中获取影响羽流大小的关键过程找出针对性 的抑制沉积物羽流再悬浮的关键因素,在深海采矿 区环境保护政策和措施制定方面进行进一步的 研究。

(2)深海采矿作业引起的沉积物羽流对深海环 境产生一系列的影响,可以通过建立深海采矿羽流 影响预测模型,预测羽流的扩散路径和影响范围,评 估其深海环境的影响。模型需要包括近场和远场两 个过程,考虑深海物理、化学、生物、沉积等环境变 化。目前羽流数值模拟中的许多经验参数和公式来 自近岸海域泥沙输运过程,缺少相应的实验室监测 数据和现场原位实验数据的对比验证,模拟结果准 确性及可行度较低。

未来针对海底采矿悬浮物动态变化过程、近海 水动力环境的长期原位监测技术需要进一步的研究 和加深,通过原位监测数据对建立的模型结果进行 验证,通过实验室模拟实验,优化模型参数和羽流输 运过程公式,实现海底采矿沉积物羽流再悬浮后运 移分布特征的精细化预测,并再经过原位监测数据 进行模型修正,通过反复验证模拟结果,提高模型模 拟精度,为科学评估沉积物羽流模拟结果提供科学 保障。

(3) 深海采矿系统结构复杂、操作难度大, 深海 环境复杂多变, 采矿过程可视化困难。发展深海数 字海洋技术, 建立深海采矿动态数字孪生系统, 构建 采矿区高精度、多尺度数字仿真模型, 集现状评价、 预测模拟、调控管理于一体, 利用物理模型、传感器 监测和历史数据等来反应深海采矿过程的实施状 态、环境影响程度、历史演变趋势等, 助力深海采矿 区的开发和环境保护。

(4)目前沉积物羽流影响研究多集中在羽流产 生的源强计算、沉积物羽流的迁移扩散、底边界层理 论和模拟研究、沉积物羽流动力学参数等,很少关注 沉积物羽流对生物物种的扰动影响。深海生态系统 是一个综合的系统,因此在数学模型中还应该考虑 上升流、季节性变化、生态系统变化等的相互联系。

我国目前在多金属结核收集和开采技术、基线 调查、深海环境管理和保护等方面做了一些研究工 作,但仍未在实验区开展正式的采矿扰动实验,针对 深海采矿的环境影响评价方法尚未建立,沉积物羽 流影响的评价标准和评价阈值还没有确定。对于深 海采矿沉积物羽流产生的影响机制、再悬浮过程机 理、影响程度都有待进一步研究。未来可以在精细 化的深海沉积羽流模型、深海采矿环境影响监测和 深海采矿环境影响评价技术等方面进行进一步的深 入研究。

参考文献:

- [1] 韩同刚,童思友,陈江欣,等.海底羽状流探测方法分析[J].地球物理学进展,2018,33(5):2113-2125.
 HAN T G, TONG S Y, CHEN J X, et al. Analysis of detection methods for submarine plume[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5):2113-2125.
- [2] MEDWIN H, CLAY C S. Fundamentals of Acoustical Oceanography[M]. Irvine: Academic Press, 1999.
- [3] 邹丽,孙佳昭,孙哲,等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 708-716. ZOU L, SUN J Z, SUN Z, et al. Deep-sea mining core technology in China: current situation and prospects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 708-716.
- [4] 王春生,周怀阳,倪建宇. 深海采矿环境影响研究:进展、问题与展望[J]. 东海海洋, 2003, 21(1): 55-64.
 WANG C S, ZHOU H Y, NI J Y. Studies on the environmental effects of deep-sea mining: progress, problems and prospects[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(1): 55-64.
- [5] 陈长林. 深海开发的海洋环境保障需求、现状与发展建议[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(2): 79-84.
 CHEN C L. Research status, problems and suggestions of marine environment support for deep sea[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(2): 79-84.
- [6] 丁忠军,孙永福,高伟,等. 深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(7): 73-82.
 DING Z J, SUN Y F, GAO W, et al. Study on potential environmental impact factors and monitoring technology system of deep-sea mining[J].
 Ocean Development and Management, 2021, 38(7): 73-82.
- [7] 刘少军,刘畅,戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18.
 LIU S J, LIU C, DAI Y. Status and progress of researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 8-18.

- [8] NISHI Y. Determining the grounding length of an axially moving cable in a two-ship continuous line bucket system [J]. Applied Ocean Research, 2013, 40: 42-49.
- [9] OEBIUS H U, BECKER H J, ROLINSKI S, et al. Parametrization and evaluation of marine environmental impacts produced by deep-sea manganese nodule mining[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(17/18): 3 453-3 467.
- [10] 范智涵, 贾永刚, 滕秀英, 等. 深海多金属结核开采潜在工程地质环境影响研究进展[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1 676-1 691.
 FAN Z H, JIA Y G, TENG X Y, et al. Review on potential engineering geological environment impacts of deep-sea polymetallic nodules mining
- [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1 679-1 691.
 [11] MA W B, SCHOTT D, LODEWIJKS G. A new procedure for deep sea mining tailings disposal[J]. Minerals, 2017, 7(4): 47.
- [12] 丁忠军,孙永福,高伟,等. 深海采矿潜在环境影响因素及监测技术体系研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(7): 73-83. DING Z J, SUN Y F, GAO W, et al. Study on potential environmental impact factors and monitoring technology system of deep-sea mining[J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(7): 73-83.
- [13] WEAVER P P E, BILLETT D S M, DOVER R C L V. Handbook on marine environment protection: science, impacts and sustainable management[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 215-245.
- [14] 刘大海,万浏,王春娟,等.基于深海采矿过程的环境影响分析与管理对策建议[J].海洋科学进展,2022,40(3):367-378.
 LIU D H, WAN L, WANG C J, et al. Environmental impact analysis and management countermeasures suggestions based on the whole process of deep-sea mining[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 367-378.
- [15] WEAVER P, AGUZZI J, BOSCHEN-ROSE R E, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles [J]. Marine Policy, 2022, 139: 105011.
- [16] MA W B, VAN RHEE C, SCHOTT D. A numerical calculation method of environmental impacts for the deep sea mining industry: a review [J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2018, 20(3): 454-468.
- [17] KAIKKONEN L, VENESJÄRVI R, NYGÅRD H, et al. Assessing the impacts of seabed mineral extraction in the deep sea and coastal marine environments: current methods and recommendations for environmental risk assessment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 135: 1 183-1 197.
- [18] 苏文湫. 深海多金属结核开采环境影响[C]//中国环境科学学会. 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 海口:中国环境科学学会, 2016: 837-839.
 SU W Q. Environmental impacts of deep-sea polymetallic nodule mining[C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the

50 w Q. Environmental impacts of deep-sea polymetallic nodule mining [C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the 2016 Annual Academic Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences (Vol. 2). Haikou: 2016: 837-839.

- [19] SHARMA R. Deep-sea mining: economic, technical, technological, and environmental considerations for sustainable development [J]. Marine Technology Society Journal, 2011, 45(5): 28-41.
- [20] DIJKSTRAJ A, MELLOK K, SOWERS D, et al. Fine-scale mapping of deep-sea habitat-forming species densities reveals taxonomic specific environmental drivers [J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(6): 1 286-1 298.
- [21] DOUGLAS R H, PARTRIDGE J C, HOPE A J. Visual and lenticular pigments in the eyes of demersal deep-sea fishes [J]. Journal of Comparative Physiology A, 1995, 177(3): 111-122.
- [22] HADDOCK S, MOLONE M, CASE J. Bioluminescence in the sea[J]. Annual Review of Marine Science, 2010, 12(4): 443-493.
- [23] OZTURGUT E, LAVELLE J W, BURNS R E. Chapter 15 impacts of manganese nodule mining on the environment: results from pilot-scale mining tests in the North Equatorial Pacific[J]. Elsevier Oceanography Series, 1981, 27: 437-474.
- [24] YAMAZAKI T, SHARMA R. Estimation of sediment properties during benthic impact experiments [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2001, 19(4): 269-289.
- [25] OZTURGUT E, LAVELLE J W, STEFFIN O, et al. Environmental investigations during manganese nodule mining tests in the North Pacific, November 1978 [R]. Tuscon: Environmental Research Laboratories, 1980.
- [26] NAWAB Z, LUCK K. Test mining of metalliferous mud from the red sea bottom[J]. Meerestechnikmt, 1979, 10(6): 81-187.
- [27] FANGER H U, PEPELNIK R. Nuclear measuring techniques in the mining of ore sludge in the Red Sea[J]. Marine Technology, 1979, 10(6): 189-195.
- [28] TRUEBLLOOD D D. Cruise report for BIE II cruise I[R]. Washington, D. C.: NOAA Technical Memorandum, 1993.
- [29] TRUEBLOOD D D, OZTURGUT E, PILIPCHUK M, et al. The ecological impacts of the joint U.S.: Russian benthic impact experiment [C]// Second ISOPE Ocean Mining Symposium. ISOPE ocean mining symposium. Seoul: Second ISOPE Ocean Mining Symposium, 1997, 24: 139-145.
- [30] SHARMA R, NAGENDER N B, PARTHIBAN G, et al. Sediment redistribution during simulated benthic disturbance and its implications on deep seabed mining[J]. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(16): 3 363-3 380.
- [31] MATTHIAS B, KAVEH P, HENKO S, et al. Tidally driven dispersion of a deep-sea sediment plume originating from seafloor disturbance in the DISCOL Area (SE-Pacific Ocean)[J]. Geosciences, 2022, 12(1): 1-20.
- [32] HAALBOOM S, STIGTER H C D, MOHN C, et al. Monitoring of a sediment plume produced by a deep-sea mining test in shallow water, Múlaga Bight, Alboran Sea (southwestern Mediterranean Sea) [J]. Marine Geology, 2023, 456: 106971.
- [33] MUÑOZ-ROYO C, PEACOCK T, ALFORD M H, et al. Extent of impact of deep-sea nodule mining midwater plumes is influenced by sediment loading, turbulence and thresholds[J]. Communication Earth and Environment, 2021, 2: 148.
- [34] CHOI J S, HONG S, CHI S B, et al. Probability distribution for the shear strength of seafloor sediment in the KR5 area for the development of manganese nodule miner[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17/18): 2 033-2 041.
- [35] SPEARMAN J, TAYLOR J, CROSSOUARD N, et al. Measurement and modelling of deep sea sediment plumes and implications for deep sea

mining[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 5075.

- [36] MINGOTTI N, WOODS A W. Stokes settling and particle-laden plumes: implications for deep-sea mining and volcanic eruption plumes [J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2020, 378(2 179): 20190532.
- [37] LOPES C L, BASTOS L, CAETANO M, et al. Development of physical modelling tools in support of risk scenarios: a new framework focused on deep-sea mining[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(2): 2 294-2 306.
- [38] COULIN J, JR P J H, JANA S, et al. Environmental ocean and plume modeling for deep sea mining in the Bismarck Sea[C]//IEEE Marine Technology Society. OCEANS 2017–Anchorage. Anchorage: OCEANS'17 MTS/IEEE, 2017; 1-10.
- [39] JANKOWSKI J A, MALCHEREK A, ZIELKE W. Numerical modeling of suspended sediment due to deep-sea mining [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C2): 3 545-3 560.
- [40] GILLARD B, PURKIANI K, CHATZIEVANGELOU D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific) [J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2019, 7(1): 5.
- [41] ZIELKE W, JANKOWSKI J A, SÜNDERMANN J, et al. Numerical modeling of sediment transport caused by deep-sea mining [C]//First ISOPE Ocean Mining Symposium. ISOPE ocean mining symposium. Tsukuba: IEEE, 1995, 3: 269-277.
- [42] DOI T, NAKATA K, KUBOTA M, et al. Environmental study on the deep-sea mining of manganese nodules in the northeastern Tropical Pacific: modeling the sediment-laden negative buoyant flow [C]//Third ISOPE Ocean Mining Symposium. ISOPE ocean mining symposium. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 163-168.
- [43] SEGSCHNEIDER J, SÜNDERMANN J. Simulating large scale transport of suspended matter[J]. Journal of Marine Systems, 1998, 14(1/2): 81-97.
- [44] ROLINSKI S, SEGSCHNEIDER J, SNDERMANN J. Long-term propagation of tailings from deep-sea mining under variable conditions by means of numerical simulations[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(17/18): 3 469-3 485.
- [45] HESS W N, HESS W C, An advection-diffusion model of the DOMES turbidity plumes [R]. Colorado: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976: 1-33.
- [46] MOKOS A, ROGERS B D, STANSBY P K. A multi-phase particle shifting algorithm for SPH simulations of violent hydrodynamics with a large number of particles[J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, 55(2): 143-162.
- [47] BIAN X, LITVINOV S, QIAN R, et al. Multiscale modeling of particle in suspension with smoothed dissipative particle dynamics [J]. Physics of Fluids, 2012, 24(1): 12002.
- [48] BIAN X, LITVINOV S, ELLERO M, et al. Hydrodynamic shear thickening of particulate suspension under confinement[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2014, 213; 29-39.
- [49] ERWAN B, THIEN T D, KHOA L C, et al. A smoothed particle hydrodynamics (SPH) formulation of a two-phase mixture model and its application to turbulent sediment transport[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(10): 103303.
- [50] THIEN T D, NHAN P T, CHEONG K B. A three-dimensional smoothed particle hydrodynamics dispersion simulation of polydispersed sediment on the seafloor using a message passing interface algorithm[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(4): 43301.
- [51] HAALBOOM S, SCHOENING T, URBAN P, et al. Monitoring of anthropogenic sediment plumes in the Clarion-Clipperton Zone, NE equatorial Pacific Ocean[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 882155.
- [52] PURKIANI K, GILLARD B, PAUL A, et al. Numerical simulation of deep-sea sediment transport induced by a dredge experiment in the northeastern Pacific Ocean[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 719463.
- [53] 黄博,王健,李友训,等. 深海矿产资源勘探开发产业创新发展短板与对策[J]. 中国矿业, 2021, 30(10): 32-37.
 HUANG B, WANG J, LI Y X, et al. Weakness and solutions of deep-sea mineral resources exploration and development[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 32-37.
- [54] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(6):1-9.
 YANG J M, LIU L, LYU H N, et al. Deep-sea mining equipment in China: current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (6):1-9.
- [55] 李家彪,王叶剑,刘磊,等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 92-102. LI J B, WANG Y J, LIU L, et al. Status and prospects of the development of deep-sea mineral resources development technology[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(2): 92-102.
- [56] 何宗玉. 深海采矿的环境影响[J]. 海洋开发与管理, 2003, 20(1): 61-65.
 HE Z Y. Environmental impacts of deep-sea mining[J]. Marine Development and Management, 2003, 20 (1): 61-65.
- [57] 初凤友,姜静,刘禹维,等. 我国深海多金属结核资源的勘探进展及思考[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2 638-2 648. CHU F Y, JIANG J, LIU Y W, et al. Advance and implication for polymetallic nodules resources exploration in deep-sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2 638-2 648.
- [58] 陈旭光,栾鲁宝,张宁,等. 深海多金属结核采矿车与底质相互作用机制及其环境影响研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52 (6):1173-1190.
 CHEN X G, LUAN L B, ZHANG N, et al. A review on interacting mechanisms of the deep sea mining vehicle-the marine sediment and its envi-

ronmental effects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1 173-1 190.

- [59] SHI H B, YU X P, DALRYMPLE R A. Development of a two-phase SPH model for sediment laden flows [J]. Computer Physics Communications, 2017, 221: 259-272.
- [60] YANG B, YANG F, LIANG B C, et al. Numerical investigation of the interaction between the moving plate and sediment plume[J]. Ocean Engi-

neering, 2022, 248: 110839.

- [61] LIN Y, WENG Z X, GUO J, et al. Simulation study on the sediment dispersion during deep-sea nodule harvesting[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 10.
- [62] LIU S H, YANG J M, LU H N, et al. A numerical investigation of the dynamic interaction between the deep-sea mining vehicle and sediment plumes based on a small-scale analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1458.
- [63] 刘港慧, 刘磊. 深海采矿细颗粒羽状流数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(5): 150-160.
- LIU G H, LIU L. Numerical simulation of fine particle plume flow in deep-sea mining[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(5): 150-160.
- [64] HAYES S P. Benthic current observations at DOM ES sites A, B and C in the tropical north Pacific Ocean[M]//BISCHOFF Y L, PIPER D Z. Marine geology and oceanography of the central Pacific manganese nodule province. Boston: Springer, 1979(9): 83-112.

Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes

WANG Cui, DING Yi, LUO Yang, KUANG Fangfang, ZHANG Jiwei*

(Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

Abstract: With the development of economy and technology and increasing scarcity of terrestrial resources, the deep-sea mining industry has become a focus of countries around the world. However, seabed mining operations will bring about a series of impacts, among which the sediment plume generated by seabed disturbance will affect or damage the deep-sea ecosystems and it is important to carry out research on deep-sea mining sediment plume for deep-sea environmental protection. In this paper, the current status of research on deep-sea mining and sediment plumes home and abroad are reviewed. It includes that firstly the sediment plumes in deep-sea mining activities are mainly generated by the stirring process of seabed surface sediments and the discharge of tailings after mineral pretreatment during the mechanical movement of mining equipment. The sediment plume will carry a large amount of particulate matters impacting marine water environment, submarine sedimentary environment and marine ecological environment. Secondly, in situ observation, laboratory test and numerical simulation are the main methods of sediment plume research home and abroad. Due to their own advantages and disadvantages, it has become hot comprehensive studies in three aspects, *i.e.* the environmental impact assessment of sediment plume in deep-sea mining areas, the mechanism of plume transport expansion and influencing and controlling factors. Thirdly, there are still shortcomings in studies such as sediment plume transport mechanisms, *in-situ* observations in time scale and the threshold of standard environmental impact. In future, multidisciplinary cooperation should be strengthened and multiple means used in the studies of sediment plume transport mechanism, model refinement prediction, deep-sea digital twin system, species disturbance impacts, etc. It is necessary to acquire more enrich environmental impact assessment methods in deep-sea exploration and development activities for promoting the sustainable development of deep-sea mineral resources exploitation and environmental protection.

Key words: marine environment science; deep-sea mining; sediment plumes; numerical simulation; environmental impact; *in situ* observation

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20230531001

* Corresponding author (E-mail: zjwfruit@tio.org.cn)

(责任编辑:肖 静)