深海采矿扰动羽流输运和扩散的数值模拟：进展、挑战与展望①

郝祚千[1,2]，董猛[3]，王涛[3]，边昌伟[1,4]

（1.中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室，山东 青岛 266100；2.中国海洋大学 海洋与大气学院，山东 青岛 266100；3.中国海洋大学 环境科学与工程学院，山东 青岛 266100；4.中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室，山东 青岛 266100）

摘　要：梳理了深海采矿扰动羽流输运和扩散数值模拟的研究进展。从羽流形成机制入手，对比了近底羽流与尾水羽流在排放、浮力驱动及被动输运阶段的动力学差异。通过对比近场、远场主流数值框架在适用尺度、计算效率与物理刻画精度上的优劣，解释了关键物理过程的参数化方法。针对深海环境数据稀缺的瓶颈，深入剖析了现阶段实验室水槽与原位观测在支撑模型验证时的不足与核心挑战。在此基础上，对融合人工智能、先进数据同化技术以及建立标准化模型测试框架等前沿发展方向进行了展望。

关键词：深海采矿；沉积物；羽流；采矿扰动羽流；近底羽流；尾水羽流；环境影响评估；输运；扩散；沉降；数值模拟

中图分类号：TD857　　**文献标志码**：B　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.003

文章编号：0253-6099(2026)03-0026-14

Numerical Simulation of Transport and Dispersion of Plume in Deep-Sea Mining: Progress, Challenges and Prospects

HAO Zuoqian[1,2], DONG Meng[3], WANG Tao[3], BIAN Changwei[1,4]

(1.*Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong, China*; 2.*College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong, China*; 3.*College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong, China*; 4.*Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong, China*)

Abstract: This paper reviews the research progress in numerical simulation of transport and dispersion of plumes generated during deep-sea mining. Based on the formation mechanisms of plumes, the differences between dynamics of collector plumes and midwater plumes are compared in terms of discharge, transport driven by buoyancy and passive advection. By comparing the advantages and disadvantages of widely used near-field and far-field numerical frameworks in terms of applicable scales, computational efficiency, and physical accuracy, the parameterization methods for key physical processes are illustrated. Aiming at the bottleneck of insufficient deep-sea environmental data, the limitations and core challenges in current laboratory flume experiments and in-situ observations for model verification are further analyzed. On this basis, a prospect for the development direction are finally offered, including integration of artificial intelligence and advanced data assimilation techniques with establishment of standardized model evaluation framework.

Key words: deep-sea mining; sediment; plume; mining-induced plume; collector plume; midwater plume; environmental impact assessment; transport; diffusion; sedimentation; numerical simulation

1　深海采矿扰动羽流概述

海洋蕴藏着丰富的战略性金属矿产资源，其中铁锰结核、富钴结壳、多金属硫化物、多金属软泥和磷灰岩结核被认为是极具商业开发前景的深海金属矿产资源[1]。随着陆地资源的枯竭和人类对金属资源需求

① **收稿日期**：2026-05-07
基金项目：山东省重点研发计划(2025SFGC0502)；山东省海洋环境地质工程重点实验室开放基金(MEGE2024009)；山东省博士后创新项目(SDCX-ZG-202400167)
作者简介：郝祚千(1999—)，男，河北石家庄人，博士研究生，主要研究方向为海洋沉积动力学。E-mail：haozuoqian@ stu.ouc.edu.cn
通信作者：边昌伟(1982—)，男，山东淄博人，副教授，主要研究方向为海洋沉积动力学和底边界层动力过程。E-mail：bianchangwei@ ouc.edu.cn

的增长，以及深海勘探技术与装备能力的发展，深海采矿（deep-sea mining，DSM）正从前期的资源勘探与试验性采集，逐步迈向商业化开采[2]。截至 2024 年 1 月，国际海底管理局（International Seabed Authority，ISA）已与包括中国五矿集团有限公司在内的 22 个承包商签订了 31 份勘探合同[3]，涵盖东太平洋克拉里昂-克利珀顿区（Clarion-Clipperton Zone，CCZ）、印度洋中脊等主要成矿区带。目前国际采矿方案普遍采用“海底集矿-管道提升-海面处理”的流程[4-5]，该流程在实现矿物采集与预处理时，不可避免地会向深海海底及中层水体释放大量富含沉积物、矿物碎屑及溶解态组分的混合流体，即采矿扰动羽流。由于环境行为的复杂性与生态影响的不确定性，扰动羽流的生成、扩散与沉降过程已成为制约深海采矿商业化进程的核心挑战[6-8]。

采矿扰动羽流可分为近底羽流（collector plume）与尾水羽流（midwater plume），两者在扩散特征和环境效应上存在显著差异[9-11]。近底羽流产生于海底作业环节，其形成机制主要包括两个方面：一方面源于采矿车行走与采集作业引发的机械扰动，导致海底沉积物再悬浮，另一方面为采矿车在矿物预分选过程中将尾矿废弃物（如矿渣与细颗粒残余物）排回近底层水域，形成局部排放羽流。深海采矿过程及扰动羽流生成示意图如图 1 所示。

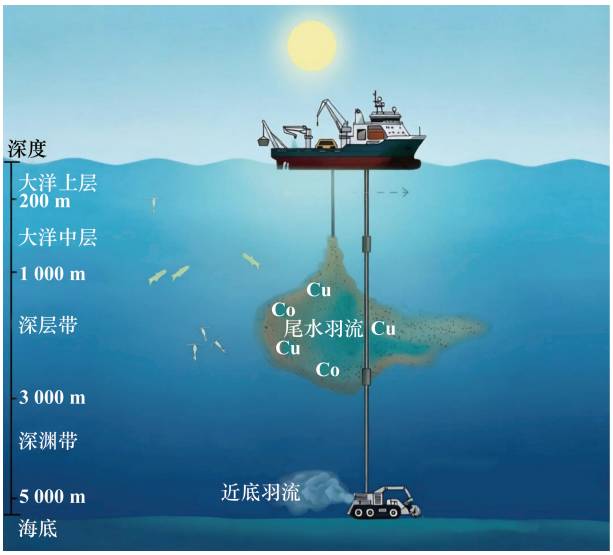


图 1　深海采矿过程及扰动羽流生成示意图

Fig. 1　Schematic diagram of deep-sea mining process and plume generation

鉴于深海生态系统极低的自然恢复速率，此类物理扰动往往会导致生态环境遭受长期乃至不可逆的损害。实证研究显示，在太平洋结核开采实验区，采矿车履带留下的物理痕迹在 26 年后仍清晰可辨，且作为底栖微型生物关键功能类群的线虫（nematoda），其群落多样性与生物量均未恢复至基线水平[12]。进一步的长期监测表明，即便时隔 44 年，实验性采矿造成的物理与生物影响依然显著：矿车轨迹处的大型底栖生物密度持续偏低，虽有孔虫（xenophyophores）呈现逐步恢复的迹象，但整体群落结构已发生根本性改变，难以复原[13]。

尾水羽流主要源自海面作业船在矿物预处理过程中排放的尾水，其中含有细颗粒沉积物、矿物磨损碎屑及溶解性重金属等成分[11,14]。这些物质受重力、浮力与背景流等作用，在水柱中可经历长达数月的沉降过程，并伴随海盆尺度的平流输运[10]。据估算，沉降速度 0.1 mm/s 的颗粒约 3 个月才能到达海底[15]，在此期间尾水羽流可随背景海流输运数百千米[16]。由于尾水羽流可以影响透光层初级生产力、干扰海洋生物的栖息环境并改变中层食物网的能量传递路径[17-18]，尾水排放深度的选择及羽流的扩散范围已成为 ISA 环境管理与环境影响评估（environmental impact assessment，EIA）的关键议题。

针对采矿扰动羽流长时空尺度扩散过程及其环境效应的研究，传统实验与观测手段存在显著局限。实验室水槽实验虽可在受控条件下解析羽流的湍流结构与初始混合过程，但难以满足空间尺度和深海高压、低温等极端环境条件的物理相似性要求，其结果难以外推至大洋尺度的输运演变。现场观测虽能提供最直接的羽流浓度与沉降通量数据，但深海作业成本高昂，且受限于水下机器人的续航能力和传感器精度，监测数据的时空覆盖范围极为有限[19]。在此背景下，数值模拟因具备多物理场耦合求解能力与情景预演的前瞻性，已成为揭示羽流演化机制、开展环境影响评估及支撑采矿减缓措施设计的关键技术手段。通过构建不同时空尺度的数值模型，研究人员能够在给定的海洋环境背景场与采矿作业参数下，定量模拟羽流的扩散轨迹、浓度衰减过程及沉积通量分布，从而弥补实验与观测在空间覆盖与情景拓展能力上的不足。

近年来，深海采矿扰动羽流数值模拟研究发展迅速，涵盖了从近底小尺度湍流到中层大尺度平流的多过程、多尺度建模，形成了欧拉-欧拉双流体模型、离散相模型等多种方法体系，并逐步与 ISA 的 EIA 框架及采矿规章草案形成对接。然而，现有综述多侧重于近底羽流的物理演化特征与实验观测结果[9,20-21]，或聚焦于单一数值方法的适用性分析[17]，缺乏对不同模拟方法在羽流扩散问题中的系统比较，对模型验证中的

数据稀缺性、不确定性量化以及环境管理衔接等关键问题的认识存在局限。为此,本文以深海采矿扰动羽流为研究对象,聚焦羽流在水体环境中的输运和扩散过程,剖析湍流混合、平流输运、颗粒沉降等多物理场耦合机制,并探讨现有数值模拟方法存在的局限。

2 羽流的形成与输运扩散过程

深海采矿活动产生的扰动羽流在海洋中经历复杂的演化过程。根据其动力学特征及主导物理机制,羽流演化通常可划分为三个阶段:排放阶段、浮力驱动阶段与被动输运阶段[10]。三个阶段在时空尺度、动力主控因素及环境效应上存在显著差异,是数值模型构建与尺度选择的物理基础。另外,近底羽流与尾水羽流虽在排放位置、初始浓度与边界条件上有所不同,但其演化均遵循上述阶段过程。

2.1 排放阶段

在深海采矿扰动羽流演化的三个阶段中,排放阶段作为起始环节,对羽流随后的形态演变及扩散规模起着至关重要的主导作用。该阶段的核心在于羽流离开排放源时的初始条件设定,包括初始浓度、动量通量、排放位置等关键参数,这些参数将直接影响后续浮力驱动阶段与被动输运阶段的演化轨迹。近底羽流与尾水羽流虽在排放位置、排放流程与环境影响方面存在差异,但其排放阶段均需经历从动量主导的射流向浮力驱动的羽流的转换,这一转换过程中的湍流混合效率与负浮力启动时机成为决定羽流环境影响范围的关键因素。

近底羽流的排放源于采矿车行进扰动与矿物预分选两个过程[22]。采矿车在海底行进时,履带或行走结构直接与表层沉积物接触,引发机械扰动并导致沉积物再悬浮[21]。产生的羽流沿采矿车行进轨迹呈带状分布,初始浓度在车辆尾流区最高,并随距离增加而逐渐稀释,该过程产生的悬浮物质量相对有限。相比之下,预分选过程是近底羽流的主要来源[23]。矿物预分选的基本流程为:采矿车前端的采集头将结核连同表层沉积物一并吸入采集腔,在采集腔内部,通过筛分、水力分级等方式将结核与细颗粒泥沙进行初步分离,分离后的结核进入垂直提升管道输送至海面,分选出的泥水混合物则通过采矿车尾部的排水管排回近底层水域。根据现有原型机的测试数据,预分选过程的废水排放具有高浓度、大流量的特征:每秒可排放 20~400 kg 含沉积物的废水,排水管出口处的泥沙浓度可达 1~300 kg/m^3,比深海背景浊度高出 4~6 个数量级。排水管出口通常设置在距海床 1~5 m 的高度[11,23]。采矿车的设计方案不同,其羽流排放规模和特征存在显著差别[24]。

尾水羽流源于海面作业船对矿物进行脱水与预处理后,将废水通过排矿管排放至中上层水体(海面预处理过程通常包括脱水、筛分、破碎等工序)。与近底羽流的面源、低速排放特征不同,尾水羽流表现为典型的连续点源射流,排放特征由排矿管的设计参数决定。商业规模采矿作业的尾水排放速率预计为 60~100 kg/s,在排放口附近形成的羽流初始浓度为 5~50 kg/m^3,经初始稀释后在中层水体的典型浓度为 0.01~10 mg/L[25-26]。以典型的排矿管内径(0.2~0.5 m)计算,管口出流速度可达 10~20 m/s。排放深度(通常位于海面至水深 1 500 m[27])是决定环境影响范围的关键设计参数,直接影响羽流在水柱中的输运路径与最终沉积位置[23]。排矿管的出口方向与管口形状对初始射流的动量通量与湍流强度有显著影响[28],出口方向(如水平、向下倾斜或垂直向下)直接决定了羽流的初始动量矢量与运动轨迹;而管口形状(如圆形、扩散式或多孔式)则主要通过改变射流的湍流强度,进而影响其初始混合效率。

基于上述近底羽流与尾水羽流的排放特征分析,尽管两种羽流在排放位置、初始浓度与动量通量等方面存在显著差异,但其在离开排放源后的初始演化均受控于三个关键物理过程:湍流卷挟、射流-浮力转换与负浮力效应。这些过程在排放源附近数十米的空间跨度与数分钟的时间窗口内迅速完成,共同塑造了羽流向浮力驱动阶段过渡的初始条件[23]。下文将阐述这三个核心物理机制的作用原理与环境效应。

湍流卷挟是排放阶段最显著的混合机制。当高浓度羽流从排放源进入环境流体时,两者间的速度剪切与密度梯度引发湍流不稳定性,导致大量周围海水被卷挟入羽流内部,极大地稀释羽流初始浓度。对于尾水羽流,排矿管出口的高速射流(10~20 m/s)与环境水体之间的巨大速度差使得湍流卷挟尤为剧烈,研究表明在排放初期的数十米范围内羽流浓度可被稀释 100~1 000 倍[23,29]。对于近底羽流,虽然排放速度相对较低,但高颗粒浓度导致的密度差异同样引发显著的湍流混合[30]。

射流-浮力转换界定了羽流动力机制的主导权更迭[9]。在离开排放口的瞬间,羽流的运动主要由初始动量驱动,表现为射流特征;随着动量因湍流耗散而逐渐衰减,浮力开始主导羽流的运动。转换位置的远近取决于初始动量通量与负浮力(即羽流密度大于环境海水所产生的向下净力)通量的比值:初始动量越大、

排放浓度越低，射流主导的距离越远[31]；反之，高浓度排放将使负浮力迅速接管羽流运动。由于深海采矿羽流颗粒浓度极高，这一转换通常在排放口附近数米至数十米范围内完成。

负浮力的出现标志着排放阶段向浮力驱动阶段的过渡。含沙羽流的密度显著大于环境海水，受负浮力驱动开始向下运动。对于近底羽流，这表现为羽流贴近海床并开始沿地形坡度向下游流动；对于尾水羽流，这表现为羽流在水柱中开始下沉。负浮力的大小取决于羽流与环境流体的密度差，而密度差由颗粒浓度与颗粒密度共同决定[15]。

2.2　浮力驱动阶段

浮力驱动阶段紧随排放阶段之后，持续时间从数分钟至数小时不等，空间尺度从数十米延伸至数百米。在该阶段，羽流的初始动量已基本耗散，其运动主要受负浮力驱动，同时受到环境海水密度层结与背景流的调制[9]。

负浮力驱动的下沉运动是该阶段最基本的动力学特征。含沙羽流的密度大于环境海水，受负浮力驱动持续向下运动。下沉过程中，羽流不断卷挟周围海水，浓度逐渐稀释，密度差逐渐减小，下沉速度随之减缓。对于尾水羽流，这一过程发生在开放水柱中，羽流可自由下沉至中性浮力深度[15]。对于近底羽流，海床构成下边界约束，羽流表现为紧贴海床的浊流（turbidity current），沿地形坡度向下坡方向流动。浊流具有“头部-主体-尾部”的典型结构，头部因与环境流体的强烈混合而浓度较低、厚度较大，主体部分浓度较高、流动稳定，尾部则因沉积损失而逐渐减薄消散[14]。

密度层结的影响是浮力驱动阶段的关键调控机制。当下沉羽流的密度逐渐减小至与某一深度的环境海水密度相等时，净浮力通量为 0，羽流到达中性浮力深度。由于惯性作用，羽流会继续下冲超越中性浮力深度，形成“穹顶”结构，随后因正浮力作用而反弹，并沿等密度面发生水平入侵，形成横向扩展的羽流层[32-33]。环境层结的强度直接影响中性浮力深度：层结越强，羽流下潜越浅；初始浮力通量越大（排放浓度越高或排放速率越大），羽流下潜越深。对于近底羽流，虽然海床边界限制了其垂向运动，但深海底层水体同样存在微弱的密度层结，这可能影响羽流脱离海床后的再悬浮高度。

背景流的存在显著改变羽流的演化轨迹与混合效率。实际海洋环境中普遍存在背景流，即使在深海环境中，CCZ 区域的底层和中层水体也存在 1～5 cm/s 量级的背景流[34]。背景流通过两种机制影响羽流演化：一是使羽流轨迹发生偏转，从垂直下沉转变为倾斜路径；二是增强羽流与环境流体的混合，加速羽流动量的耗散[35]。

颗粒和羽流水体的解耦是浮力驱动阶段的关键物理过程，这一现象在包含多粒径组分的深海采矿羽流中尤为显著。不同粒径与密度的颗粒具有不同的沉降速度，沉降速度可跨越数个量级。当羽流整体下沉时，沉降速度较大的粗颗粒从羽流主体中脱离并提前沉降，导致羽流剩余部分的颗粒浓度与有效密度发生突变[36]。对于沉降速度远小于羽流下沉速度的细颗粒，其随羽流整体运动，不影响羽流的最大下潜深度；而对于沉降速度与羽流下沉速度相当或更大的粗颗粒，其从羽流主体中剥离并快速沉降至海床，导致羽流可能提前到达中性浮力深度或发生回弹[33]。这一过程对于准确预测尾水羽流的中性浮力深度与沉积通量分布具有重要意义。

近底羽流与尾水羽流在浮力驱动阶段的区别体现在边界条件、环境约束等方面。近底羽流受海床下边界约束，表现为浊流特征，其演化还受到海底地形起伏与底摩擦的影响；尾水羽流在开放水柱中演化，受密度层结的约束更为显著，其最终沉降深度与扩散范围在很大程度上取决于中性浮力深度的准确预测，这是评估其对中层水体生态影响的核心环节。此外，近底羽流的排放浓度通常高于尾水羽流，负浮力效应更为强烈，但其演化受底边界影响，能量损失更快。

2.3　被动输运阶段

被动输运阶段是羽流生命周期最长、空间范围最广的阶段，可持续数天至数年，空间尺度从数十千米延伸至数百千米乃至海盆尺度[10]。在该阶段，羽流浓度大大降低，羽流与环境流体之间的密度差异可忽略不计，羽流输运完全由外部环境动力场控制。被动输运过程主要包括两大类物理机制：水动力引起的输运与扩散和悬浮颗粒的沉降与再悬浮。这两类机制相互耦合，共同决定了羽流的最终环境影响范围与沉积通量分布，同时也是数值模拟中需要准确刻画的关键物理过程。

水动力引起的羽流输运与扩散过程是被动输运阶段的主导机制，羽流颗粒如同示踪剂一般随环境流场运动。深海矿区羽流的输运受多尺度海洋动力过程共同调控，呈现复杂的时空多样性。中上层水体受大尺度环流控制，流速相对较大，通常可达 10～100 cm/s 量级，为尾水羽流的远距离输运提供关键动力。以 CCZ 矿区为例，北赤道流及其季节性变化主导中上层水体输运，仅需 10 cm/s 流速，细颗粒在数月沉降期内

即可被输送数百千米[37]。尽管底层流速仅约为中上层的十分之一,但在细颗粒长达数月的悬浮期内,累计的水平输运距离仍然可达数十千米。此外,海洋中广泛存在的中尺度、亚中尺度涡旋及内波活动通过水平输运与垂向混合机制,显著提高了羽流的扩散效率与滞留时间。

悬浮颗粒的沉降与再悬浮过程决定了羽流的最终归宿,也是制约数值模拟预测准确性的关键过程。颗粒的沉降速度取决于其粒径、密度、形状以及环境流体的黏度,不同粒径颗粒表现出差异化的输运行为:粗颗粒(>63 μm)以沉降为主导,在数天内即可沉降至海床,水平输运距离限于排放源附近数千米;细颗粒(<10 μm)以湍流扩散为主导[38],可在水柱中悬浮数月,在背景流作用下被输运至数百千米外。絮凝作用是影响细颗粒沉降行为的关键机制,可视为沉降过程的一种特殊形式[39]。深海沉积物以黏土矿物为主,具有强黏聚性。在高浓度区域,颗粒间碰撞概率增加,易发生絮凝形成大粒径絮团。研究表明,絮凝可使有效沉降速度比单颗粒高出1~2个数量级,从而大幅缩短羽流在水柱中的悬浮时间,减小水平扩散范围。考虑絮凝效应后,近底羽流的扩散范围可从早期模型预测的100 km缩减至5 km以内[38]。然而,絮凝效率受颗粒浓度、湍流剪切强度与颗粒表面特性等多种因素的影响,导致羽流絮凝现象的现场观测与验证极具挑战性。颗粒再悬浮过程是羽流长期环境效应的核心环节,能够使已沉降颗粒重新返回水柱,显著延长其在环境中的滞留时间并扩大影响范围。这一过程在底边界层动力学中扮演着关键角色,主要由以下机制驱动:① 海底海流能够产生足够的剪切应力,克服颗粒与沉积物间的黏附力,促使沉积物再悬浮;② 内波引起的垂向速度脉动可提供向上的输运动力,将沉降颗粒重新带入水柱;③ 生物扰动活动则通过物理搅动改变沉积物结构,使海底沉积物更容易发生悬浮。这些再悬浮机制不仅决定了沉降颗粒的命运,还可能引发二次污染效应,对羽流的长期扩散行为产生深远影响。在数值模拟中,再悬浮阈值、临界剪切应力等参数的准确性对预测羽流的长期行为具有决定性影响。

综上所述,被动输运阶段的水动力输运与颗粒沉降过程相互耦合、共同作用,决定了采矿羽流的最终环境影响范围与沉积通量分布。尽管该阶段的物理机制相对简单,但由于涉及的时空尺度极大,环境参数存在显著的时空变异性,其对海洋环境的影响仍然不可忽视。在数值模拟中,沉降速度参数(包括絮凝效应)和再悬浮参数(如临界剪切应力)的准确设定是提高预测可靠性的关键,需要结合现场观测数据和实验室实验进行精细化标定。

3 扰动羽流的数值模拟研究进展

深海采矿扰动羽流的演化跨越了巨大的时空尺度。空间上从排放口附近的毫米级延伸至海盆尺度的数百千米,时间上从排放初期的秒级湍流脉动持续至悬浮颗粒沉降的数月乃至数年。这种巨大的尺度跨度决定了单一的数值模型难以覆盖羽流演化的全生命周期。若采用毫米级的高分辨率网格来捕捉排放初期的精细湍流结构,将其扩展至数十千米的远场模拟将消耗大量的计算资源;反之,若采用百米级甚至千米级分辨率的海洋环流模型,则无法刻画排放口附近的高浓度颗粒-流体相互作用与快速射流稀释过程。因此,当前研究通常根据物理主导机制将模拟划分为两大类:一是同时涵盖排放与浮力驱动阶段的近场模型,二是针对被动输运阶段的远场模型。二者在物理假设、网格尺度及计算成本上差异显著,共同构成了完整的数值模拟体系。不同尺度模型典型特点及局限性见表1。

表1 不同尺度模型典型特点及局限性

Table 1 Typical characteristics and limitations of models at different scales

项目	近场模型	远场模型	近场-远场耦合模型
关注阶段	排放和浮力驱动阶段	被动输运阶段	全生命周期
空间尺度	数米~数百米	数千米~数千千米	多尺度
时间尺度	秒~小时	天~年	秒~年
典型模型	CFD(如OpenFOAM、FLUENT、STAR-CCM+)	海洋环流模型(如ROMS、TELEMAC、MITgcm)	嵌套/接力模拟
核心物理过程	射流、湍流卷挟、颗粒-流体耦合负浮力下沉、密度层结效应	平流输运、湍流扩散、沉降	各阶段过程
网格分辨率	毫米~米	百米~千米	多级嵌套
计算成本	高	中~高	极高
主要局限	模拟时长短,边界条件依赖	源项简化,亚格子参数化	衔接复杂,验证困难

3.1 近场模型:排放与浮力驱动阶段

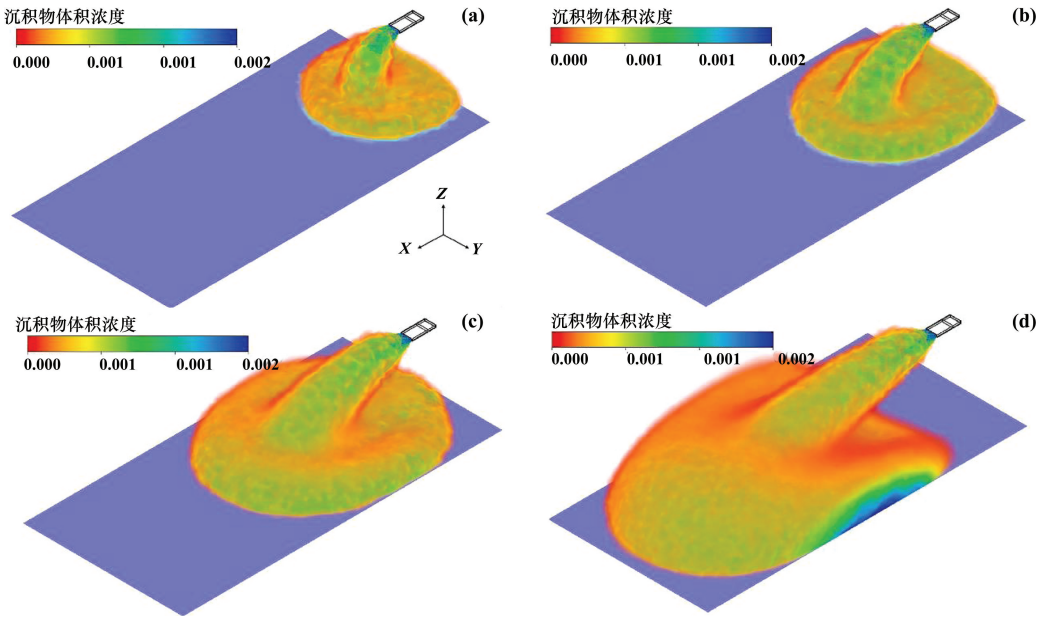
近场模型旨在刻画羽流从离开排放口、经历初始动量耗散、转为浮力驱动,直至到达中性浮力层或形成近底重力流的完整过程。该阶段的空间尺度通常为数米至数百米,时间尺度为秒至小时,其主导机制包括射流卷吸、湍流混合、负浮力下沉、密度层结效应以及颗粒与流体之间的动力学解耦[9-10]。深海采矿产生的近底

羽流和尾水羽流在这一阶段表现出不同的特征，但均遵循“射流主导-浮力主导-中性浮力或触底”的演化路径。

针对这一阶段，计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）模型是主流的模拟工具，其核心在于合理选择多相流计算框架与湍流封闭方法。在多相流框架方面，欧拉-欧拉双流体模型将海水与沉积物均视为相互渗透的连续介质，分别求解其控制方程并计算相间作用力，能够自然刻画高浓度条件下的双向耦合反馈，是模拟初始浓度极高的近底羽流或排矿管口核心区的常用方案[40-41]。离散相模型则将海水视为连续相、颗粒视为离散的拉格朗日质点进行轨迹追踪，计算成本相对较低，且能直观获取不同粒径颗粒的个体运动路径，更适用于浓度已初步稀释的区域[41]。在湍流封闭方法上，雷诺平均纳维-斯托克斯方程通过对全部湍流脉动进行统计平均，实现了计算效率与射流扩展预测精度之间的良好平衡，被广泛应用于工程尺度模拟[17,40]。而大涡模拟能解析大尺度湍流结构，适用于对混合过程有更高精度要求的场景，但计算成本显著增加[42]。

然而，CFD 模型的计算成本较高，难以在大量工况下快速评估。为此，基于 Morton-Taylor-Turner 卷吸理论发展而来的积分羽流模型提供了一种高效的替代方案[23]。该类模型通过对羽流横截面上的速度与浓度进行积分平均，建立沿羽流轨迹演化的常微分方程组，能够高效预测羽流的下沉路径、最大下潜深度、中性浮力深度及初始稀释倍数（通常为 100～1 000 倍）[29]。研究发现，提升管道中的热交换所带来的热浮力可部分抵消颗粒的负浮力，使尾水羽流在更浅的水层达到中性浮力，这一预测后续得到了现场实验的证实[11,30]。对于近底排放的羽流，在初始动量衰减后往往转化为沿海底坡度传播的浊流，其传播距离受到底摩擦、地形坡度和颗粒沉降的共同控制，模拟中需要特别关注底边界层的参数化处理[14,22]。

现有研究已阐明采矿流程关键设计与作业参数对近场羽流演化规律的调控机制。在排放参数方面，排放速度与管径共同主导了羽流初期的射流穿透深度与卷挟稀释率：文献[27]研究指出，通过优化排流管口结构显著降低出口流速，可将羽流的最大水平扩散半径缩减 90%以上；文献[17]的模拟亦证实，排放初速度深刻影响羽流初期的卷挟演化。在采矿车作业参数方面，多排放源之间的涡旋融合不仅增强初始混合，还会改变羽流的沉降衰减时间[41]；采矿车尾迹对近场羽流存在显著的抑制作用，若忽略这一过程，将高估进入远场阶段的初始悬浮浓度。此外，履带式采矿车对海底的扰动深度通常达到 15～30 cm，是羽流产生的直接源头，环境友好型采矿车的研发被认为是从根本上减少羽流影响的有效手段[24]。文献[40]基于欧拉-欧拉双流体模型模拟采矿车初始排放阶段不同排放速度下沉积物扩散特征，排放速度由 0.5 m/s 增至 4 m/s 时，水平扩散距离增加 255%，扩散宽度增加 56%。近底羽流颗粒浓度的三维分布图[40]如图 2 所示，图中 V 为初始排放速度，C_r 为沉积物初始体积浓度。



（a）工况 1（V=0.5 m/s，C_r=3%）；（b）工况 2（V=1.0 m/s，C_r=3%）；（c）工况 3（V=2.0 m/s，C_r=3%）；（d）工况 4（V=4.0 m/s，C_r=3%）

图 2　近底羽流颗粒浓度的三维分布图

Fig. 2　Three-dimensional distribution of particle concentration in collector plume

总体而言,近场模型在揭示羽流与环境海水的初始混合机制、指导采矿设备设计以及评估局地环境影响方面具有不可替代的作用。其主要的局限性在于计算成本高昂,模拟时长严重受限,且模拟结果高度依赖于采矿车设计参数及模型参数(如底摩擦因数、卷挟系数等)的准确输入,这些参数往往需要依赖实验室实验进行标定[40,43]。

3.2 远场模型:被动输运阶段

在被动输运阶段,远场模型普遍依托三维区域海洋环流模型(如 ROMS、MITgcm、FVCOM、Delft3D、TELEMAC 等)提供高精度的水动力背景场,在此基础上耦合欧拉浓度输运方程或拉格朗日粒子追踪方法,以模拟羽流颗粒的扩散路径和输运通量[25,38,44]。近年来,研究者针对不同海域、不同采矿场景开展了大量远场模拟研究,其核心目标可归纳为三类:厘清背景流的主导作用、揭示颗粒沉降行为的控制机制以及评估关键参数对预测结果的影响。

在背景流作用方面,多项研究证实了深海环流对羽流输运的支配性影响。文献[16]采用三维海洋动力模型结合拉格朗日粒子追踪方法,对 CCZ 区域近底羽流进行模拟,在排放高度距海底 5 m 条件下释放 50 万个颗粒。结果表明,超过 50%的颗粒在数千米范围内沉降,而剩余细颗粒可继续悬浮并被背景流输运至更远区域。文献[22]基于现场羽流释放试验资料,利用 TELEMAC 模型对热带海山区羽流输运过程进行模拟,结果显示悬浮泥沙浓度在约 1 km 范围内衰减至背景值(约 10 μg/L)。研究证明在复杂地形及潮流共同作用下,未经校准的简单高斯扩散模型往往低估局地滞留效应,而三维水动力模型具有明显优势。另外,背景流的季节性变化、湍流扩散系数与温盐剖面[43,45]同样会对羽流的输运产生不可忽视的影响。

颗粒沉降行为的控制机制是远场模型物理参数化的核心议题,其主要受三个因素共同调控。

第一,文献[37]和文献[44]研究表明,经过长时间输运后,表层排放的羽流可扩散至海盆尺度,颗粒沉降速度是控制这一过程的关键参数。西太平洋多金属结核矿区沉积物的实测数据进一步给出了定量参考:粗颗粒(>32 μm)的沉降速度范围为 3.33~8.33 mm/s,细颗粒(<32 μm)的沉降速度范围为 0.01~3.33 mm/s[46]。

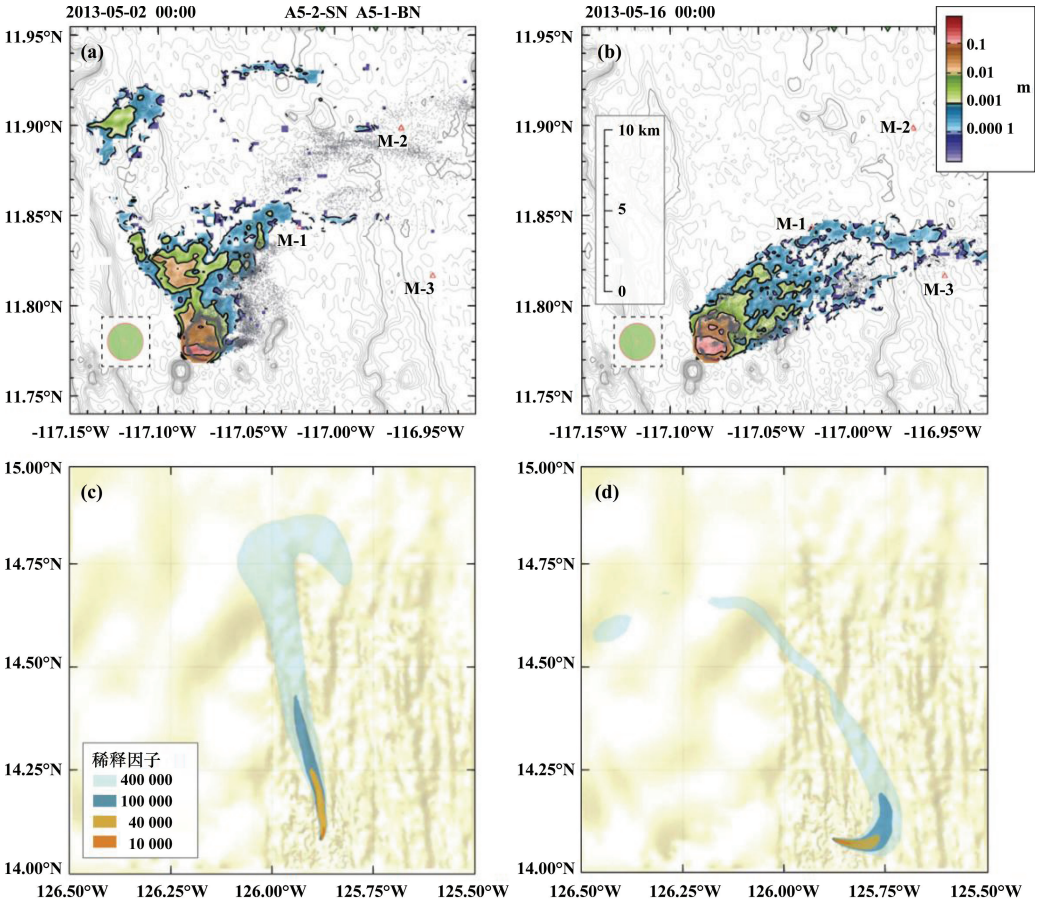
第二,絮凝效应可显著改变细颗粒的沉降行为,但其应用具有明确的场景依赖性。文献[38]在考虑颗粒絮凝与湍流剪切作用的条件下对近底羽流扩散进行了模拟,发现多数颗粒最终沉积于 9 km 范围内,但若忽略絮凝效应,模型会显著高估细颗粒的悬浮时间和扩散距离。然而,在尾水羽流中情况有所不同:初始排放时的高湍流剪切破坏了天然絮体结构,且后续浓度极低,絮凝作用并不显著,这为远场模型将尾水羽流简化为单相被动示踪剂提供了物理依据[11,30]。

第三,多分散体系与不规则颗粒形状进一步增加了沉降参数化的复杂性。真实羽流包含多种沉降速度的颗粒,文献[15]和文献[30]通过理论模型证明,在沉降主导阶段,多分散体系会导致单位体积内的沉积物通量低于单分散体系,这意味着若将颗粒简化为单一特征粒径,会高估环境影响的严重性,属于偏保守的评估策略。此外,文献[47]针对不规则矿物颗粒,提出了一种综合考虑颗粒厚度、投影面积与表面积耦合效应的新型形状因子(γ),并据此修正了阻力系数模型,使得终端沉降速度的计算精度大幅提高,将该修正速度引入高斯羽流模型后,准确地预测出羽流的最大水平扩散距离。

近年来,深海采矿耦合模型(如 TELEMAC-GAIA、ROMS-sediment 及 FVCOM-sediment 等)成为采矿环境影响的主流评估工具。商业勘探承包商已积极将远场模型应用于实际环境影响评估中。例如,中国五矿集团有限公司在其多金属结核合同区 A-5 区块采矿车单体试验的环境影响声明报告中,构建了基于 FVCOM 的深海采矿羽流扩散数值模型,用于评估商业规模采矿车试验的环境影响[4]。模拟中考虑了两种沉积物粒径(0.002 8 mm 和 0.062 5 mm),对应的沉降速度分别为 0.36 mm/s 和 8.33 mm/s,羽流排放口设于离海底 1 m 高度处。模拟结果表明,含高浓度悬浮泥沙(>10 mg/L)的水体主要集中在 5 km 之内,羽流的扩散方向受底层流场控制,最大水平方向影响距离可达 2.1 km,最大垂直方向影响高度为 124 m(以 0.1 mg/L 等值线计),采集试验结束后 1~3.5 d 羽流消失。再沉积厚度最大为 0.33 cm,再沉积厚度大于 0.1 mm 的面积在 0.59~0.64 km^2 之间。文献[48]利用耦合的 ROMS-Agrif 海洋环流模型与 ICHTHYOP 粒子轨迹模型,模拟了北大西洋中脊区域深海采矿尾砂的扩散行为。结果表明,小粒径、低密度的颗粒物扩散距离最远,在 200 m 水深处可达 192 km。而粗颗粒物则迅速沉降在释放点附近,最远扩散 15 km。

沉积物羽流在被动输运阶段的输运与分布特征如图 3 所示。其中图 3(a)~(b)[16]分别是基于 MITgcm 耦合拉格朗日粒子追踪模型模拟的有中尺度涡与无中尺度涡条件下羽流的沉积与悬浮物浓度分布,揭示背

景流对输运路径与沉积格局的影响；图 3(c)～(d)[11]分别是基于 TELEMAC-3D 模型模拟的稳定海流与海流转向条件下羽流的稀释因子等值面分布，体现不同背景流对羽流最大水平扩展范围的调控作用。



(a) 有中尺度涡；(b) 无中尺度涡；(c) 稳定海流；(d) 海流转向

图 3　沉积物羽流在被动输运阶段的输运与分布特征

Fig. 3　Transport and distribution characteristics of sediment plumes in passive transport stage

总体而言，远场模型在评估长期累积影响、沉积覆盖范围及跨合同区输运风险方面具有不可替代的优势，但其可靠性仍面临两大瓶颈。其一，源项条件的过度简化。远场模型通常将复杂的排放源简化为网格点上的理想化点源或体源，忽略了近场阶段复杂的稀释与解耦演化，容易导致初始浓度分布的偏差[49]。研究表明，模型分辨率会通过影响初始稀释度、平流扩散过程的解析能力以及数值混合效应，显著改变远场模拟结果，提高水平与垂直分辨率均有助于提升模拟精度。其二，关键物理过程的参数化问题。区域海洋模型的计算网格通常达数百米至数千米，无法直接解析亚格子尺度的湍流扩散与羽流颗粒动态絮凝过程，使模拟结果对经验参数(如水平涡黏系数、固定沉降速度、再悬浮阈值等)高度敏感。

3.3　近场-远场耦合模型：全生命周期

近场模型能够高精度刻画排放口附近的射流卷吸、湍流混合及负浮力下沉等小尺度物理过程，但其计算成本高昂，模拟时空范围有限。远场模型擅长模拟被动输运阶段的大尺度平流与扩散，但其源项条件往往被过度简化，忽略了羽流排放阶段复杂的稀释与解耦演化。单一尺度模型难以完整刻画羽流从排放源至远场沉积的全生命周期演化过程。因此，近年来研究者逐渐发展多尺度耦合模型，通过在不同尺度模型之间建立合理的衔接机制，实现羽流扩散与输运的全过程模拟[49]。

近场-远场多尺度耦合的核心思路是优势互补、信息传递：将近场 CFD 模型输出的高分辨率浓度场、通量分布及粒径组成等信息，经过尺度转换处理后，作为远场海洋环流模型的输入源项；同时，远场模型提供的大尺度背景环境信息(如温盐分层结构、背景流速剖面、湍流强度等)则作为边界条件施加于近场模型，以反映真实海洋环境对局部羽流演化的调制作用。目

前,主流的耦合框架可分为以下两类。

第一类是近场向远场的单向离线耦合。这是目前应用最为广泛的耦合策略,其基本流程为利用CFD模型(如OpenFOAM、STAR-CCM+、FLUENT等)对排放阶段和浮力驱动阶段进行精细化模拟,获得羽流在近场演化结束时的三维浓度分布、颗粒粒径谱及动量通量等关键信息;然后,通过空间插值、通量平均或等效源项重构等方法,将这些高分辨率数据降尺度匹配至远场模型的粗网格上,作为物质输运方程的初始条件或源项输入。文献[49]的研究是这一模式的典型代表:首先利用STAR-CCM+模拟采矿车运动过程中形成的尾迹流场及其对近场羽流的抑制作用,随后将近场阶段输出的悬浮颗粒浓度及通量空间分布作为源项,输入远场TELEMAC-GAIA模型中,结果表明,若忽略近场尾迹对羽流的压制效应,直接在远场模型中采用理想化点源假设,会导致初始浓度被高估,从而显著放大对远场扩散范围的预测。文献[22]在热带海山的羽流扰动实验中,结合近场CFD模型与远场TELEMAC模型,成功验证了复杂地形和内潮作用下羽流扩散模型的准确性。单向离线耦合的优点是实现难度相对较低、计算资源消耗可控,是目前多尺度模拟的主流技术路径。

第二类是近场和远场的双向在线耦合。与单向耦合不同,双向耦合允许远场模型的大尺度流场变化实时反馈至近场模型,动态调整近场区域的边界条件。例如,当一个中尺度涡旋经过采矿区域时,其诱导的背景流场会显著改变近场射流的初始轨迹与湍流卷挟效率[16,36]。在单向耦合框架下,这种动态反馈被忽略,可能导致模拟失真。双向在线耦合需要在不同尺度模型之间建立动量、质量和能量严格守恒的映射算法,并解决网格分辨率和时间步长的鸿沟。目前,该类方法在深海采矿羽流模拟中尚处于探索阶段,但在其他环境流体力学领域(如河流-河口-海洋连续体模拟、大气-海洋耦合等)已有初步应用。

此外,对于浮力驱动阶段,可采用计算高效的积分羽流模型作为连接近场CFD模型与远场海洋模型的桥梁[30]。积分模型基于Morton-Taylor-Turner卷吸理论,能够快速预测羽流的下沉轨迹、中性浮力深度及初始稀释倍数。其输出的中性浮力深度处的羽流浓度分布和通量信息,可作为远场模型的源项输入。该耦合框架在计算效率与物理精度之间实现了优异的权衡,特别适用于环境评价中涉及大规模敏感性情景分析的任务。

尽管多尺度耦合模拟取得了显著进展,但其在实际应用中仍面临诸多挑战。第一,不同尺度模型之间的物理假设不一致。近场CFD模型通常采用欧拉-欧拉双流体或离散相模型,精细刻画颗粒-流体之间的双向耦合;而远场海洋模型多将羽流视为被动示踪剂,忽略颗粒对流场的反作用以及絮凝动态过程。这种物理一致性的断裂可能导致边界条件传递时引入偏差。第二,空间与时间分辨率的匹配问题。近场模型的网格分辨率可达毫米至米级,时间步长为毫秒至秒级;而远场模型的网格分辨率为百米至千米级,时间步长为秒至分钟级。如何通过合理的空间重构与时间平均算法,在不引入数值伪扩散的前提下实现跨尺度信息传递,是技术实现上的难点[33]。第三,验证数据的极度匮乏。完整覆盖“近场-远场”全过程的原位观测数据极为稀缺,难以对耦合模型的整体预测能力进行全面的校验。现有验证工作多局限于对单一尺度模型的片段式检验,耦合模型引入的额外误差难以量化。

4 羽流模拟的结果验证

深海采矿扰动羽流的演化过程具有显著的多尺度耦合特征,其数值模拟涉及从微观颗粒动力学到宏观流体输运的跨尺度物理机制。在构建数值模型时,研究者通常需要对无法直接解析的物理过程进行合理的参数化处理,例如在水动力模型中采用湍流封闭模型(如k-ε模型或k-ω模型)表征亚网格尺度的湍流输运效应;在羽流输运扩散模型中引入斯托克斯沉降速度或修正沉降公式(引入絮凝效应)描述颗粒在复杂流场中的沉降行为等。这些参数化方案虽然在计算上具备可行性,但也引入了不同程度的模型不确定性。若缺乏充分的实验验证和参数校准,数值模型预测的羽流扩散范围、浓度时空分布、沉降通量等关键指标可能与实际物理过程存在显著偏差,甚至导致环境影响评估结论的系统性误差。因此,基于水槽实验、原位观测或现场试验数据对数值模型进行系统性验证,并采用贝叶斯反演、敏感性分析等方法对关键参数进行优化校准,是确保深海采矿扰动羽流模拟结果科学可靠性的核心环节。

4.1 实验室的物理机制验证

实验室水槽实验是验证近场计算流体力学模型的可靠手段。其核心优势是在受控条件下,可以独立改变单一参数(如排放速度、颗粒粒径、底床坡度等),并利用高速摄像、粒子图像测速(PIV)、浊度计阵列等高分辨率测量手段,获取羽流演化的精细化数据。这些

数据为 CFD 模型中的关键参数（如湍流封闭系数、卷挟系数、底摩擦因数等）提供了直接的标定依据。

文献[50]通过实验室装置研究了盐和有机物质作为絮凝剂对羽流絮凝、沉降的影响，结果表明在有机物存在的情况下，絮凝在 30~60 s 内即可发生，絮凝物尺寸从 20 μm 增长至 1 mm，沉降速度则从 1 mm/s 跃升至 60 mm/s，变化幅度达 1~2 个数量级。文献[51]利用 LabSFLOC-2 视频系统和沉降管对比了泥沙的沉降特性，指出激光衍射法测得的粒径存在片状黏土颗粒的形状效应，会导致沉降速度被严重错估，必须进行形状系数修正。

深海采矿车采集头对沉积物的扰动是近底羽流的直接源头。文献[52]设计矩形试验台研究了不同射流速度、离底高度、行进速度下采集头对沉积物分布的影响，发现沉积物经冲刷后，会以上层羽流和底层重力流形式迁移扩散，扰动深度与射流速度正相关，与喷嘴离底高度和采集头行进速度负相关。文献[53]基于射流冲采式采集头，研究了双排射流参数对流场特性的影响，发现射流具有较强的中心流场并向两侧逐渐衰减，沉积物表层侵蚀孔呈底平侧凹的形态，表明在近场模型中，采集头的射流参数（速度、角度、离底高度）和行进速度是模型的关键输入变量。文献[40]和文献[42]通过实验室水槽搭载移动的采矿车模型，利用高速摄像和浊度仪阵列，验证了欧拉-欧拉双流体模型在刻画双羽流源头涡旋融合、羽流头部形态演化以及沉降衰减过程中的高准确度，弥补了近场 CFD 模型缺乏实测支撑的短板。然而，当前多数 CFD 模型将排放源简化为恒定速率、恒定方向的面源或点源，忽略了采集头行进过程中射流与沉积物相互作用的动态变化。此外，文献[30]的研究揭示了楔形重力流锋面的形成机制，随着收集器移动速度与浮力速度之比的增大，重力流锋面变窄，这一发现对于近场模型中浊流头部结构的参数化具有重要指导意义。

实际深海采矿作业中，近底羽流的产生涉及多个源头：采集头前方的射流扰动、履带行走的机械扰动以及预分选过程的尾水排放。这些源头之间存在复杂的相互作用。文献[54] 通过 5 m × 2.25 m × 2 m 的模块化水箱，以 1∶50 的缩尺模拟了 250 m 长的水下场所形成的羽流，系统研究了不同浓度、喷射高度和池底角度下羽流的形成、扩散和沉积过程，结果表明：喷射高度越低，羽流扩散范围越小；浓度越低，沉降后的淤积量越少。此类实验数据为近场 CFD 模型中多源叠加效应的参数化提供了验证基准。

4.2　深海原位观测的数据验证

尽管水槽实验能够提供高精度的数据帮助认识羽流演化机理，但其空间尺度有限（通常为数米至数十米），无法重现深海环境中的羽流演化过程。相比之下，深海原位观测作为验证数值模型的不可替代手段，能够直接获取真实环境条件下的羽流演化数据。国际上已开展的多项具有里程碑意义的原位观测实验，可依据验证对象的不同归为以下三类。

1）近底羽流的原位验证。此类实验的核心贡献在于定量揭示了近底羽流的浊流本质与近底层聚集特征，为近场模型提供了关键校验基准。具有代表性的工作是文献[23]在 CCZ 区域对采矿车羽流扰动的开创性原位监测。该采矿车宽约 4 m，以 0.2~0.5 m/s 的速度行进，通过水力采集头作业，湿沉积物排放量可达 400~1 000 m^3/h，相当于持续向海底以上约 3 m 处排放约 60 t/h 的泥水混合物。通过对采矿车扰动羽流的观测发现：采矿车近场羽流表现为典型的浊流而非被动悬浮扩散，证实近场模型必须采用重力流物理框架；92%~98%的再悬浮沉积物集中在距海底 2 m 以内的近底层，仅 2%~8%扩散至距海底 2 m 以上水层，模型预测的羽流厚度与这一观测高度吻合；扰动结束后数小时内，距排放源 3 m 外的浊度仍可检测到显著异常，所获得的浓度随距离衰减曲线可直接用于校准模型中的沉降速度参数和卷挟系数。作为补充，文献[55]于 2019 年在同一合同区开展了链式扰动器实验，将 1 m 宽的链式扰动器以平均 0.2 m/s 的速度拖行，形成 11 条长度约 500 m 的轨迹，在扰动区域附近布置 15 个搭载浊度计和流速计的传感器平台进行协同监测，结果表明，100 m 范围内悬浮物再沉积明显，同时悬浮物聚集会引起光照衰减，为模型中再沉积通量与环境效应的耦合提供了验证依据。

2）尾水羽流的原位验证。与近底羽流不同，尾水羽流的验证重点为排放初期的稀释率与长时序扩散行为。文献[11]在南加州海域原位监测了含有 CCZ 沉积物的尾水排放，利用相控阵多普勒声呐和高频湍流剖面仪，证实文献[29]提出的动态羽流模型能够准确预测羽流的下沉最大深度与初始稀释率。文献[56]在东太平洋 DISCOL 区域的观测从更长的时间窗口提供了验证：扰动时悬浮颗粒物浓度可达 10 mg/L，约为未扰动时的 200 倍；粗颗粒快速沉降，而细小颗粒受水深和潮汐影响可持续悬浮上百天、扩散数百千米。

3）近场-远场耦合模型的交叉验证。文献[22]在热带海山利用遥控潜水器人工释放羽流，并通过深海

着陆器和 AUV 进行立体监测,实测发现在距离释放点 1 km 处羽流浓度已降至接近背景值(约 10 μg/L)。该实验同时验证了两个尺度的模型:近场 CFD 模型准确复现了释放初期的稀释过程,远场 TELEMAC/SEDPLUME-RW 模型则成功预测了复杂海山地形和内潮汐作用下的羽流扩散轨迹,为近场-远场耦合模拟的整体验证提供了难得的基准数据集。

综合来看,原位观测从浊流本质验证、浓度衰减曲线校准、远距离输运边界设定等不同层面,为数值模型提供了不可或缺的校验支撑,但各实验均受限于有限的空间覆盖与短期监测时长,尚无法满足覆盖全生命周期的系统性验证需求。

5 挑战与展望

深海采矿扰动羽流的数值模拟虽已取得阶段性进展,但作为高度交叉的研究领域,面对商业化开采的迫切需求与海洋环境保护的严苛标准,当前研究在模型完善度、多尺度耦合机制以及观测数据支撑等方面仍面临巨大的科学挑战。

5.1 当前研究的主要挑战

1)物理过程刻画的完整性与精细化不足。在近场阶段,多数模拟基于平坦海底与恒定排放源的理想假设,未能充分反映采矿车在崎岖地形上行进时排放速率与扰动强度的动态变化;在远场阶段,亚中尺度涡旋、内波破碎引起的垂向混合、底边界层潮汐驱动振荡等对深海物质输运具有重要影响,却往往被简化或忽略。此外,絮凝、再悬浮等关键机制的参数化方案存在显著不确定性,导致模拟结果对输入参数高度敏感,削弱了环境影响评估的可信度。

2)跨尺度耦合的技术瓶颈。现有近场-远场耦合模型以单向离线嵌套为主,将高分辨率 CFD 模型的输出降维处理后作为远场模型的源项输入,二者在网格分辨率、时间步长及湍流封闭假设上存在本质差异,缺乏基于动量、质量与能量严格守恒的映射算法,易引入数值伪扩散,导致长期累积效应的模拟误差被放大。双向在线耦合仍处于探索阶段,近场与远场之间的物理映射问题尚未解决。

3)观测数据对模型验证的支撑严重不足。实验室水槽实验受限于时空尺度,难以满足深海环境的相似性准则;原位海试监测因成本高昂,空间覆盖有限、时间跨度短,无法为覆盖海盆尺度的远场模拟提供系统验证。传感器将光学/声学信号反演为质量浓度的过程中,受颗粒级配动态变化与矿物碎屑形状效应干扰,进一步增加了验证数据本身的误差带宽,模型结果往往难以验证。

上述局限性并非孤立存在,物理过程认知不足限制了耦合模型的精度,而观测数据的匮乏又使参数校准与模型验证无从开展。二者共同构成了制约该领域发展的瓶颈。

5.2 展望

面对上述挑战,未来的深海采矿羽流数值模拟研究有望在以下几个方向取得突破。

1)融合人工智能与先进数据同化技术。基于物理信息神经网络(physics-informed neural network,PINN)的预测框架已展现出在稀疏数据条件下实现高效预测的潜力[57],生成对抗网络(generative adversarial network,GAN)等超分辨率重建技术有望在粗网格模型中推演近场羽流的精细结构,绕开传统网格嵌套的复杂流程。同时,将四维变分同化(four-dimensional variational assimilation,4D-Var)、集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter,EnKF)等数据同化技术引入羽流模拟,可实现有限原位观测与模型背景场的最优融合,动态纠正模拟轨迹,显著提升预测可靠性。

2)构建多平台协同的深海环境数字孪生系统。未来监测体系应以数字孪生为终极形态:协同多平台原位感知网络持续获取多源数据,边缘计算与人工智能在观测端进行特征提取与事件识别,上层数字孪生模型动态耦合观测与模拟,实现过程预测、风险评估与作业参数优化。近期可重点提升多源数据实时处理能力[58],中长期随着数据积累和模型完善,逐步实现采矿扰动的准实时预测与情景分析,为自适应环境管理提供技术支撑。

3)建立标准化测试框架与透明化管理机制。借鉴气候模式比较计划(coupled model intercomparison project,CMIP)的经验,推动构建标准化的羽流模型测试场景库与模型比较框架,对接 ISA 的 DeepData 数据库平台[59]。该平台自 2019 年启动以来,已逐步整合多金属结核勘探区的环境与生物数据,并依托 OBIS-ISA(Ocean Biogeographic Information System - International Seabed Authority)节点实现数据标准化与全球共享。同时,依据最佳可行技术和最佳环境实践要求,建立公开的模拟结果数据库与可视化平台,展示模型的不确定性分析[24]。这不仅是推动技术进步的重要举措,更是建立国际社会对深海采矿环境评估信任的关键。

6 结语

1)羽流演化机制与多尺度建模框架已初步建立。

深海采矿扰动羽流的演化可清晰划分为排放、浮力驱动和被动输运三个阶段。针对不同阶段的主导物理过程,研究者已提出相应的数值模拟方法:近场模型(如CFD)能够精细刻画排放口附近的湍流混合与高浓度颗粒-流体相互作用;远场模型(如区域海洋环流模型耦合粒子追踪)则有效模拟了羽流在大尺度海洋背景场中的平流扩散与沉降过程;而近场-远场耦合模型的发展,为实现从设备尺度到区域尺度的全过程模拟提供了技术路径。

2) 模型验证与关键参数不确定性仍是当前的核心瓶颈。尽管模拟技术体系日趋完善,但其可靠性仍受到严重制约。一方面,深海原位观测数据极度匮乏,且实验室水槽实验受限于时空尺度和环境相似性,难以对模型进行系统性、全生命周期的验证。另一方面,模型中诸多关键羽流演化过程(如湍流卷挟、颗粒絮凝沉降、海床颗粒再悬浮等)的参数化方案存在很大的不确定性,导致模拟结果对输入参数高度敏感,影响了环境影响评估的准确性与可信度。

3) 未来研究需向多学科深度交叉融合与技术创新方向发展。为应对上述挑战,未来的突破点在于:深化单一尺度模型的物理过程刻画,并攻克跨尺度模型的动态耦合与守恒匹配难题;积极融合人工智能、数据同化等前沿技术,以提升计算效率并弥补观测数据的不足;推动建立标准化的模型测试框架与公开透明的模拟结果数据库,以增强环评模型的可追溯性与国际公信力。最终,通过流体力学、海洋学、环境工程、计算科学及海洋生物学等多学科的协同攻关,构建起一套科学、可靠、透明的深海采矿扰动羽流环境影响评估体系,为实现深海资源开发与生态环境保护的平衡提供坚实的科学支撑。

参考文献(References):

[1] 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 Zhongjun, SUN Yongfu, GAO Wei, 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.

[2] 林赟. 国际海底区域深海采矿排放规则:博弈、困境与中国方案[J]. 矿业研究与开发, 2026,46(3):46-57.
LIN Yun. Discharge rules for deep-sea mining in the international seabed areas: Game, dilemma and China's solution[J]. Mining Research and Development, 2026,46(3):46-57.

[3] 中国可持续发展研究会与深海资源开发技术与装备专业委员会. 2024 年深海矿产资源开发利用科技发展报告[R]. 2024.
China Sustainable Development Research Association & Professional Committee of Deep-Sea Resources Development Technology and Equipment. 2024 science and technology development report on deep-sea mineral resources exploration and utilization[R]. 2024.

[4] 中国五矿集团有限公司. 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[R]. 2024.
China Minmetals Corporation. Environmental impact statement: Testing of polymetallic nodule collector vehicle in the block A-5 of the Minmetals contract area[R]. 2024.

[5] 康娅娟,刘少军. 深海多金属结核开采技术发展历程及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(10):2848-2860.
KANG Yajuan, LIU Shaojun. Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(10):2848-2860.

[6] VAN DOVER C L, ARDRON J A, ESCOBAR E, et al. Biodiversity loss from deep-sea mining[J]. Nature Geoscience, 2017,10(7): 464-465.

[7] TUNNICLIFFE V, SÁNCHEZ L E, MUDD G M, et al. Metal mining on land versus the ocean in the context of the current biodiversity crisis[J]. NPJ Ocean Sustainability, 2025,4(1):7.

[8] NAGENDER NATH B, SHAMA R. Environment and deep-sea mining: A perspective[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2000,18(3):285-294.

[9] SHA F, XI M S, WEN Z J, et al. A review on plumes generation and evolution mechanism during deep-sea polymetallic nodules mining[J]. Ocean Engineering, 2024,298:117188.

[10] PEACOCK T, OUILLON R. The fluid mechanics of deep-sea mining[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2023,55:403-430.

[11] 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]. Communications Earth & Environment, 2021,2(1):148.

[12] MILJUTIN D M, MILJUTINA M A, ARBIZU P M, et al. Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, tropical eastern Pacific)[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2011,58(8):885-897.

[13] JONES D O B, ARIAS M B, VAN AUDENHAEGE L, et al. Long-term impact and biological recovery in a deep-sea mining track[J]. Nature, 2025,642(8066):112-118.

[14] EERIAN M, ALHADDAD S, HELMONS R, et al. Near-field analysis of turbidity flows generated by polymetallic nodule mining tools[J]. Mining, 2021,1(3):251-278.

[15] OUILLON R, MUÑOZ-ROYO C, ALFORD M H, et al. Advection-diffusion-settling of deep-sea mining sediment plumes. Part 1: Midwater plumes[J]. Flow, 2022,2:E22.

[16] ALEYNIK D, INALL M E, DALE A, et al. Impact of remotely generated eddies on plume dispersion at abyssal mining sites in the Pacific[J]. Scientific Reports, 2017,7:16959.

[17] BAI T B, ZHAO Y, ZHOU Y Q, et al. Numerical simulation and analysis of initial plume discharge of deep-sea mining[J]. Ocean Engineering, 2024,310:118794.

[18] DRAZEN J C, SMITH C R, GJERDE K M, et al. Midwater ecosys-

tems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(30): 17455-17460.

[19] 王翠,丁一,罗阳,等. 深海采矿沉积物羽流环境影响研究现状与展望[J]. 应用海洋学学报, 2024,43(3):473-484.
WANG Cui, DING Yi, LUO Yang, et al. Status and perspectives of environmental impact studies on deep-sea mining sediment plumes[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024,43(3):473-484.

[20] 陈泽坤,王雪明,夏建新. 深海采矿羽流分析及其环境影响评估研究进展[J]. 船舶, 2024,35(6):110-120.
CHEN Zekun, WANG Xueming, XIA Jianxin. Research progress on deep-sea mining plume analysis and environmental impact assessment[J]. Ship & Boat, 2024,35(6):110-120.

[21] HELMONS R, DE W L, DE S H, et al. Dispersion of benthic plumes in deep-sea mining: What lessons can be learned from dredging? [J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:868701.

[22] 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.

[23] MUÑOZ-ROYO C, OUILLON R, EL MOUSADIK S, et al. Anin situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle[J]. Science Advances, 2022,8(38):eabn1219.

[24] WEAVER P P E, AGUZZI J, BOSCHEN-ROSE R E, et al. Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles[J]. Marine Policy, 2022,139:105011.

[25] 旷芳芳,张俊鹏,靖春生,等. CC区深海采矿羽流扩散的数值模拟研究[J]. 应用海洋学学报, 2024,43(3):462-472.
KUANG Fangfang, ZHANG Junpeng, JING Chunsheng, et al. Modelling of sediment plumes generated by deep-sea mining in CCZ[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024,43(3):462-472.

[26] 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.

[27] 罗时明,焦侬,王琳,等. 深海采矿尾水羽状流扩散的数值模拟[J]. 船舶工程, 2023,45(8):159-163.
LUO Shiming, JIAO Nong, WANG Lin, et al. Numerical simulation of plume diffusion in deep-sea mining tailwater[J]. Ship Engineering, 2023,45(8):159-163.

[28] CHEN W, XU H L, PENG N, et al. Deep-sea mining ore collection model and pipeline system dynamic analysis[J]. Ocean Engineering, 2025,342:122892.

[29] RZEZNIK A J, FLIERL G R, PEACOCK T. Model investigations of discharge plumes generated by deep-sea nodule mining operations[J]. Ocean Engineering, 2019,172:684-696.

[30] OUILLON R, MUÑOZ-ROYO C, ALFORD M H, et al. Advection-diffusion settling of deep-sea mining sediment plumes. Part 2: Collector plumes[J]. Flow, 2022,2:E23.

[31] NORMAN T L, REVANKAR S T. Buoyant jet and two-phase jet-plume modeling for application to large water pools[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011,241(5):1667-1700.

[32] WANG D Y, ADAMS E E, MUNOZ-ROYO C, et al. Effect of crossflow on trapping depths of particle plumes: Laboratory experiments and application to the PLUMEX field experiment[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2021,21(4):741-757.

[33] MINGOTTI N, WOODS A W. Multiphase plumes in a stratified ambient[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019,869:292-312.

[34] CHENS S, OUILLON R, MUÑOZ-ROYO C, et al. Oceanic bottom mixed layer in the Clarion-Clipperton Zone: Potential influence on deep-seabed mining plume dispersal[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2023,23(3):579-602.

[35] LIU L, CHENG Z S, WANG Y J, et al. Effect of cross-flow on vertical and inclined tailwater discharge in deep-sea mining[J]. Physics of Fluids, 2025,37(4):043335.

[36] MINGOTTI N, WOODS A W. Stokes settling and particle-laden plumes: Implications for deep-sea mining and volcanic eruption plumes[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378(2179): 20190532.

[37] ROLINSKI S, SEGSCHNEIDER J, SÜNDERMANN 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):3469-3485.

[38] 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, 2019,7:5.

[39] DENG Z R, HUANG D, HE Q, et al. Review of the action of organic matter on mineral sediment flocculation[J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:965919.

[40] HUANG K, ZHAO Y, XU W J, et al. Research on numerical simulation of initial process of sediment discharge from deep-sea mining vehicle[J]. Ocean Engineering, 2025,327:120973.

[41] 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.

[42] LIU S H, YANG J M, LU H N, et al. Numerical and experimental investigation of the coupling effect of double plume discharge sources in deep-sea mining[J]. Ocean Engineering, 2025,337:121861.

[43] CRAVATTE S, KESSLER W S, MARIN F. Intermediate zonal jets in the tropical Pacific Ocean observed by Argo floats[J]. Journal of Physical Oceanography, 2012,42(9):1475-1485.

[44] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005,9(4):347-404.

[45] JIN S, CHEN X G, LIU X X, et al. Research on benthic plume sedimentation characteristics and temperature effect in deep-sea nodule

mining operation[J]. Marine Geology, 2023,464:107141.

[46] 李秀,徐立新,窦培林,等. 深海采矿羽状流及其监测试验综述[J]. 船舶工程, 2024,46(增刊 1):574-582.
LI Xiu, XU Lixin, DOU Peilin, et al. A review of deep-sea mining plume monitoring and experiments[J]. Ship Engineering, 2024, 46(S1):574-582.

[47] LIU Z L, RAO Q H, YI W, et al. A modified drag coefficient model for calculating the terminal settling velocity and horizontal diffusion distance of irregular plume particles in deep-sea mining[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31(23):33848-33866.

[48] 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, 2019,650:2294-2306.

[49] LIU S H, YANG J M, LYU H N, et al. A numerical investigation of the effects of deep-sea mining vehicles on the evolution of sediment plumes based on the combination of near- and far-field models[J]. Applied Ocean Research, 2024,149:104048.

[50] ALI W, ENTHOVEN D, KIRICHEK A, et al. Effect of flocculation on turbidity currents[J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10: 1014170.

[51] VAN RIJN L, PERK L, VAN MAREN B, et al. Particle size and settling velocity of bed and suspended sediments for mud-sand beds[J]. International Journal of Sediment Research, 2025,40(2): 369-382.

[52] 张东宽,刘美麟,夏建新. 深海多金属结核采集过程对沉积物扰动试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):20-23.
ZHANG Dongkuan, LIU Meilin, XIA Jianxin. Experimental study on sediment disturbance during the collection process of deep-sea polymetallic nodules[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(3):20-23.

[53] LIU X X, CHEN X G, WEI J K, et al. Study on sediment erosion generated by a deep-sea polymetallic-nodule collector based on double-row jet[J]. Ocean Engineering, 2023,285:115220.

[54] BYISHIMO P. Experiments and 3D CFD simulations of deep-sea mining plume dispersion and seabed interactions[D]. Technische Universiteit Delft: Delft, Netherlands, 2018.

[55] 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.

[56] BAEYE M, PURKIANI K, DE STIGTER H, 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.

[57] ZHANG Y X, LI S Y. An incremental physics-informed neural network for rapid prediction of suspended sediment plume for deep-sea mining[J]. Journal of Process Control, 2026,157:103604.

[58] CHEN X, FAN Z H, JIA Y G, et al. In-situ environmental monitoring for deep-sea polymetallic nodule mining: Status, challenges, and future directions[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2026.

[59] RABONE M, HORTON T, JONES D B, et al. A review of the International Seabed Authority database DeepData from a biological perspective: Challenges and opportunities in the UN Ocean Decade[J]. Database, 2023,2023:baad013.

引用本文:郝祚千,董猛,王涛,等. 深海采矿扰动羽流输运和扩散的数值模拟:进展、挑战与展望[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):26-39.

HAO Zuoqian, DONG Meng, WANG Tao, et al. Numerical simulation of transport and dispersion of plume in deep-sea mining: Progress, challenges and prospects[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3): 26-39.