深海采矿中尺度羽流演化规律数值模拟及分析①

徐维佳[1], 赵勇[1], 郑皓[2], 张晓瑞[1]
(1.大连海事大学 船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026; 2.长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘 要: 针对深海采矿扰动引起的沉积物羽流生态风险,构建了一个集成高分辨率三维地形、海水密度分层、非恒定潮汐动力及多尺度环流约束的 Navier-Stokes 方程高保真数值模拟框架。以大西洋加那利群岛西南海域典型海山矿区为研究对象,经 Spearman 数据校验,揭示了羽流从初始扰动到洋流长程输运的多阶段耦合演化机理。研究发现,受复杂海山地形与地转偏向力约束,羽流水平路径发生显著偏转并呈现旋转扩散态势,延长了颗粒物在局部水体中的滞留时间。受海山绕流动力场与旋转剪切机制调制,羽流由近场点源排放演变为远场各向异性的拉伸结构。由于深海稳定密度层结的抑制作用,羽流在空间上表现出层级化稀释规律。

关键词: 深海采矿; 沉积物羽流; 中尺度数值模拟; 多因素耦合; TELEMAC-3D; 中层羽流; 底层羽流; 地转偏向力
中图分类号: TD857 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.011
文章编号: 0253-6099(2026)03-0091-06

Numerical Simulation and Analysis on Mesoscale Plume Evolution in Deep-Sea Mining

XU Weijia[1], ZHAO Yong[1], ZHENG Hao[2], ZHANG Xiaorui[1]
(1. *College of Naval Architecture and Ocean Engineering*, *Dalian Maritime University*, *Dalian* 116026, *Liaoning*, *China*; 2. *Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: For the ecological risks of sediment plumes induced by deep-sea mining disturbances, a high-fidelity numerical simulation framework was developed based on the Navier-Stokes equations, integrating high-resolution 3D topography, seawater density stratification, unsteady tidal dynamics, and multi-scale circulation constraints. A typical seamount mining area southwest of the Canary Islands in the Atlantic Ocean was taken as the research subject, and the multi-stage coupled evolution mechanism of the plume from initial disturbance to long-range ocean current transport was revealed after Spearman data validation. The study found that, constrained by the complex seamount topography and the geostrophic deflection effect, the horizontal path of the plume deflects significantly and exhibits a rotational diffusion pattern, which prolongs the residence time of particulate matter in the local water body. Modulated by the flow-around dynamic field of the seamount and the rotational shear mechanism, the plume evolves from a near-field point source discharge into a far-field anisotropic stretching structure. Due to the inhibitory effect of the stable deep-sea density stratification, the plume spatially exhibits a hierarchical dilution pattern.

Key words: deep-sea mining; sediment plume; mesoscale numerical simulation; multi-factor coupling; TELEMAC-3D; mid-water plume; bottom plume; Coriolis force

深海海底富含镍、钴、铜、锰等关键战略金属,深海采矿已得到世界多国的高度重视[1]。然而,深海采矿作业伴随的大规模沉积物羽流扩散问题,是国际海底管理局及全球学术界高度关注的环保焦点[2]。在深海采矿系统运行过程中,集矿机在海底蠕行产生的物理扰动以及通过扬矿系统排出的尾矿流不可避免地会导致沉积物再悬浮并形成扩散羽流[3]。这种含有大量微细颗粒的混浊流体,不仅会改变受影响海域的光学特性与浊度场,更会通过覆盖底栖生物、干扰碳氮磷等生源要素循环,对极端脆弱的深海生态系统产生长

① **收稿日期**: 2026-05-08
基金项目: 国家自然科学基金(51679021)
作者简介: 徐维佳(2002—),女,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为大尺度深海采矿水力输运。E-mail:weijia@dlmu.edu.cn
通信作者: 赵勇(1981—),男,江西宜春人,博士,教授,主要研究方向为深海采矿流体动力学分析。E-mail:yongzhao@dlmu.edu.cn

期级联效应[4]。因此,揭示深海采矿羽流在时空维度下的输运机制与演化规律,已成为评估环境影响及制定矿区环境管理计划的先决条件[5]。

从物理属性与产生源头界定,深海采矿羽流可分为底层羽流与中层羽流两类典型形态[6]。底层羽流主要来源于集矿机在海床表层的机械剥离与履带扰动,其演化过程受控于底栖边界层的动力约束,具有颗粒浓度高、沉降速度相对较快的特点[7]。中层羽流则源于矿石提升后的尾矿回注排放,通常在离底数百米乃至上千米的水层释放,其扩散行为受到洋流场、海水密度分层及次中尺度涡旋的调制作用更为显著[8]。这两类羽流本质上均属于受重力与惯性力共同支配的复杂两相流,其在输运过程中涉及复杂的非线性动力学过程。

目前,研究深海羽流扩散行为的方法主要为现场原位监测、实验室物理模型实验及数值模拟解析[9]。现场原位监测通过布设声学多普勒流速剖面仪、浊度传感器及自主水下航行器,获取特定时刻与空间点位的实测数据[10]。然而,深海环境的极端压力与高昂的设备维护成本,使得此类监测难以在空间覆盖范围与时间连续性上满足商业化规模开采的环评需求。实验室物理模型实验虽然在颗粒沉降速率及絮凝机理研究方面取得了重要进展,但受制于缩尺效应及难以复现深海真实的温盐梯度场与多尺度环流动力,其研究结果在向真实海域外演推求时存在较大的不确定性。

相比之下,数值模拟凭借其对多动力因素耦合的高效处理能力,已成为刻画羽流远场扩散规律的主流方法[11]。早期研究多聚焦于近场区域的细观动力解析,文献[12-14]证实了动量通量与浮力通量是调控羽流初始演化的主导因子。文献[15]关注沉积物颗粒的粒径分布特征,阐明了黏性泥沙在深海动力环境下的絮凝沉降机理,为羽流浓度的衰减预测提供了理论依据。然而,商业开采规模下的羽流影响范围往往延展至数十至数百公里,中尺度扩散通常界定为空间上10~100 km范围。这一尺度是羽流由近场动力扩散向远场被动扩散演化的关键转折期,对于沉积物羽流在矿区周边的输运规律与环境影响评估有极大影响。且受地形起伏、复杂潮汐流及大尺度洋流的共同驱动,现有的局部微观模型由于计算域受限及边界动力条件简化,难以捕捉羽流在中尺度迁移过程中的时空拓扑演化。另外,深海海山地形产生的动力屏障与导流作用会对远场羽流的迁移路径产生显著的拓扑约束[16]。在长期模拟周期内,羽流受旋转洋流与潮汐周期的共同调控,其浓度衰减规律以及路径偏转机制与平原矿区存在本质差异[17]。目前,能够在统一的地球物理坐标系下,整合高解析度地形、非恒定动力场以及多源持续排放模式,并实现长时间尺度稳定求解的研究仍较为匮乏[18]。多数模型在模拟长周期扩散时,往往面临数值扩散严重或边界条件失真等问题,导致对羽流远场边界与累积沉降区的预测精度不足。

鉴于此,迫切需要开展针对商业开采工况的大范围、多物理场耦合数值模拟研究。本文以大西洋加那利群岛西南海域典型海山矿区为背景,利用基于有限元与有限体积融合算法的TELEMAC-3D数值计算平台,构建了一个能够兼容高分辨率三维地形、海水密度分层、非恒定潮汐流及颗粒输运特性的系统化评估框架[19],通过引入Navier-Stokes方程、流体静压假设及Boussinesq近似,旨在精确刻画采矿羽流在复杂海山地形约束下的输运全过程,揭示深海羽流的扩散机理,量化评估深海采矿的环境风险。

1 理论基础

1.1 流体运动方程

1.1.1 质量守恒与动量方程

在笛卡尔坐标系下,不可压缩流体的连续性方程与动量守恒方程组如下:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U}{\partial x}+\dfrac{\partial V}{\partial y}+\dfrac{\partial W}{\partial z}=0\\ \dfrac{\partial U}{\partial t}+U\dfrac{\partial U}{\partial x}+V\dfrac{\partial U}{\partial y}+W\dfrac{\partial U}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x}+v\nabla^2(U)+F_x\\ \dfrac{\partial V}{\partial t}+U\dfrac{\partial V}{\partial x}+V\dfrac{\partial V}{\partial y}+W\dfrac{\partial V}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial y}+v\nabla^2(V)+F_y\\ \dfrac{\partial W}{\partial t}+U\dfrac{\partial W}{\partial x}+V\dfrac{\partial W}{\partial y}+W\dfrac{\partial W}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial z}-g+v\nabla^2(W)+F_z\end{cases} \tag{1}$$

式中:U、V、W分别为x、y、z方向的三维瞬时流速;ρ为流体密度;p为流体压强;v为分子运动黏度;g为重力加速度;∇为拉普拉斯算子;F_x,F_y,F_z代表科氏力及外部动量源项。

1.1.2 静水压假设与压力简化

在深海模拟中,忽略垂向加速度对压力场的微扰,垂向动量方程简化为重力水柱平衡。给定深度z处的静水压力p可表述为自由表面气压与覆盖水重之和:

$$p=p_a+\rho_0 g(Z_s-z)+\rho_0 g\int_z^{z_1}\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\mathrm{d}z \tag{2}$$

式中:p_a为大气压;ρ_0为海水密度;Z_s为自由表面高程。该假设有效地将三维压力求解转化为二维自由面演化问题。

动量的 Boussinesq 近似方程(密度变化仅作为浮力考虑)为:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+U\frac{\partial T}{\partial x}+V\frac{\partial T}{\partial y}+W\frac{\partial T}{\partial z}=\mathrm{div}(\nu\mathrm{grad}T)+Q \quad (3)$$

式中:T 为被动或主动(作用于密度)示踪剂,可为温度(℃)、盐度或浓度(g/L)等;ν 为黏度或示踪剂扩散系数;Q 为示踪剂源项,单位为℃、g/L 等。

1.2　湍流闭合模型

TELEMAC-3D 基本算法可以分为三个计算步骤:第一步,通过求解动量方程中的平流项找出平流速度分量;第二步,根据平流速度计算新的速度分量,同时考虑动量方程中的扩散项和源项,这两步计算方案能够获得速度场分布;第三步,采用连续性方程和动量方程的垂直积分计算水深,仅包括压力-连续项(所有其他项在前两个步骤中已经考虑在内)。

代码中湍流模型的湍流黏度可以自定义,由混合长度模型或 k-ε 模型确定,其方程为:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial k}{\partial t}+U\dfrac{\partial k}{\partial x}+V\dfrac{\partial k}{\partial y}+W\dfrac{\partial k}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial k}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial k}{\partial y}\right)+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial k}{\partial z}\right)+P-G-\varepsilon\\ \dfrac{\partial \varepsilon}{\partial t}+U\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x}+V\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}+W\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+C_{1\varepsilon}\dfrac{\varepsilon}{k}[P+(1-C_{3\varepsilon})G]-C_{2\varepsilon}\dfrac{\varepsilon^2}{k}\end{cases} \quad (4)$$

式中:k 为流体的湍流动能;ε 为湍流动能的耗散率;$C_{1\varepsilon}$,$C_{2\varepsilon}$,$C_{3\varepsilon}$,σ_k,σ_ε 均为模型中的常数;P 为湍流能量产生项;G 为由引力而产生的源项;v_t用来验证方程守恒性。

1.3　示踪剂演化方程与混合密度本构关系

1.3.1　示踪剂演化方程

采矿羽流演化本质上是活性示踪剂在动力场中的输运过程。温度、盐度及沉积物质量浓度 C,统一遵循对流-扩散守恒定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U\frac{\partial C}{\partial x}+V\frac{\partial C}{\partial \mathrm{y}}+W\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_T\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_T\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_T\frac{\partial C}{\partial z}\right)+Q \quad (5)$$

式中 ν_T 为示踪剂扩散系数。

1.3.2　耦合状态方程

针对深海采矿羽流排放引发的异重流效应,本文构建了集成背景动力场与物质扰动场的双层耦合状态方程。该体系首先遵循非线性状态法则,精确表征温度 T 与盐度 S 对海域背景密度的非对称调制作用。基于体积排布理论建立固液混合本构关系,各组分示踪剂对流体密度的反馈机制为:

$$\rho=\rho_{\mathrm{ref}}\left[1-\sum_i\beta_i\left(T_i-T_i^0\right)_i\right] \quad (6)$$

式中:ρ_{ref}为参考密度;T_i 为当前流场中第 i 种示踪剂的质量浓度;T_i^0 为第 i 种示踪剂的参考质量浓度;β_i 为体积膨胀系数。

2　数值模型构建与验证

2.1　模型建立与离散策略

本文选取的仿真海域位于大西洋加那利群岛西南侧的 Tropic 海山。该区域具有典型的海山地形特征及复杂的深海环境参数,是开展深海采矿羽流演化规律研究的理想场所。

基于文献[20]在热带海山开展的现场羽流排放实验,本文建立了三维数值模型以复现其观测结果。该模型耦合了水动力过程、大气强迫作用以及环境水体的温盐结构,通过与实验期间获得的流场及浓度实测数据进行系统比对,评估模型在该特定海洋环境下的模拟精度、数值稳定性和对复杂地形条件的适用能力。构建了 20 km × 20 km 的中尺度计算域,以刻画羽流在海山局部地形约束下的演化形态。模型的三维计算域如图 1 所示。

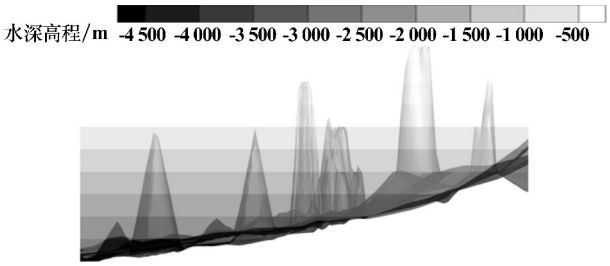


图 1　模型的三维计算域

Fig. 1　3D computational domain of model

2.2　驱动数据源与模拟配置

为提升羽流远场输运预测的可靠性,本文严格控制模型输入参数。模型信息来源如表 1 所示。其中,水深地形提取自 ETOPO 2022 高精度数据集;潮汐强迫由 TPXO 9 全球潮汐模型驱动;大气边界层动态特征源于 ERA5 再分析数据;非潮汐背景流场采用 Mercator ocean 环流数据进行映射,从而构建起多源环境约束下的开采区动态动力场。

2.3　模型验证

为验证数值框架对深海复杂环境的解析精度,本

表 1 模型信息来源

Table 1 Sources of model information

数据	数据来源	分辨率	使用格式
水深地形	ETOPO 2022	(1/240)°×(1/240)°	.xyz
潮汐强迫	TPXO 9	(1/6)°×(1/6)°	.nc
大气边界层	ERA5	(1/10)°×(1/10)°	.nc
非潮汐背景流场	Mercator ocean	(1/12)°×(1/12)°	.nc

文利用文献[20]在 Tropic Seamount 开展的现场原位监测数据(Spearman 真实数据)进行验证。点源释放模拟坐标设定为(531 544 m,2 641 915 m),释放高度控制在离底 500 m 水层。

校验过程聚焦于 6 d 连续观测周期内的质量浓度特征。对比释放点附近关键观测位的模拟值与实测值,结果显示两者在相位变动与振幅强度上保持了高度的物理自洽。模型误差与拟合曲线如图 2 所示。结果显示,模拟数据可以精准捕获深海环流的周期性脉动特征,误差统计指标维持在低阈值区间。这种数值吻合性不仅验证了模型对深海海山绕流效应的刻画能力,更为后续深入探讨羽流多源释放的非线性干涉效应提供了坚实的物理基础。

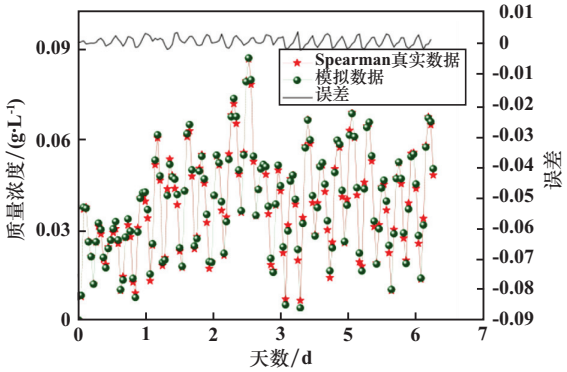


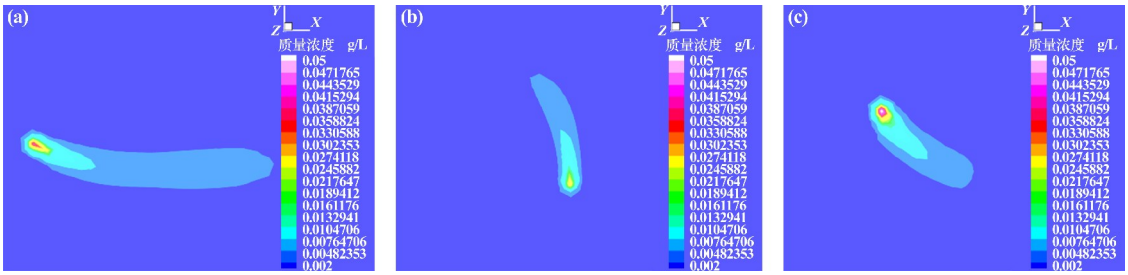
图 2 模型误差与拟合曲线

Fig. 2 Model errors and fitting curves

3 结果与讨论

3.1 羽流水平漂移路径的旋转、偏转特征

在深海沉积物羽流的水平动力演化过程中,羽流释放源展现出显著的路径旋转、偏转与非线性拓扑特征。羽流水平输运质量浓度演化如图 3 所示。



(a) T=1 d; (b) T=3 d; (c) T=6 d

图 3 羽流水平输运质量浓度演化

Fig. 3 Evolution of plume horizontal transport mass concentration

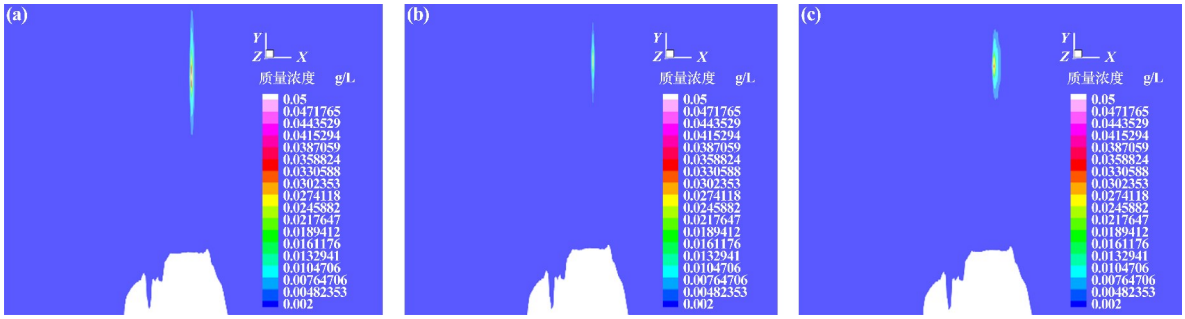
羽流在水平维度的输运并非沿单一方向的线性扩散,而是在释放初期(T=1 d)向东向延伸后,于中期(T=3 d)发生近 90°的北向偏转,并最终在远场(T=6 d)演变为向东南方向弯曲的弧形轨迹。这种路径的剧烈重构本质上归因于深海尺度下的科氏力调制作用。受地转偏向力影响,羽流颗粒在拉格朗日框架下产生了明显的惯性螺旋运动,这不仅改变了物质输运的几何中心,更导致羽流在目标海域的输运路径由直线向复杂的曲线拓扑演变,显著延长了颗粒物在局地水体中的实际滞留时间。

不同于底层羽流受地形和高浓度沉降制约,中层羽流具有更强的随流性,其输运轨迹主要受科氏力驱动的惯性螺旋运动控制。随着路径偏转的加剧,羽流的几何形态经历了从各向同性扩散向远场丝状拉伸结构的转变。在图 3(c)中,受背景流场旋转剪切的持续作用,羽流末端的横向浓度梯度被大幅拉伸,同时出现局部破碎现象。这种形态演变揭示了深海动力环境对被动示踪剂的各向异性调制,即高浓度核心区在偏转过程中受向心力作用维持相对集中,而边缘低浓度区则随流场旋转呈扇形弥散。这种旋转剪切机制加速了羽流边缘与环境水体的质量交换,是导致远场浓度梯度变缓、包络面非对称扩张的核心动力学诱因。

3.2 羽流垂向结构的层级化稀释与指数衰减规律

羽流垂向输运质量浓度演化如图 4 所示。羽流在垂向空间上会保持清晰的层级结构。释放初期(T=1 d),羽流在垂向轴线上呈现为高宽比较大的丝状柱体,核心浓度(>0.04 g/L)被高度压缩在极窄的垂直带宽内。这种垂向的几何约束表明,在深海层结流场中,垂向湍流扩散受到稳定密度跃层的强烈抑制。随着输运过程的推进(T=3~6 d),羽流表现出明显的层级稀

释。高浓度核心不断收缩,而中低浓度包络面则在剪切流作用下发生垂向展宽。这种从核心向边缘逐层递减的浓度拓扑结构,揭示了沉积物质量浓度在垂直方向上具有尺度依赖的分布规律。



(a) T=1 d; (b) T=3 d; (c) T=6 d

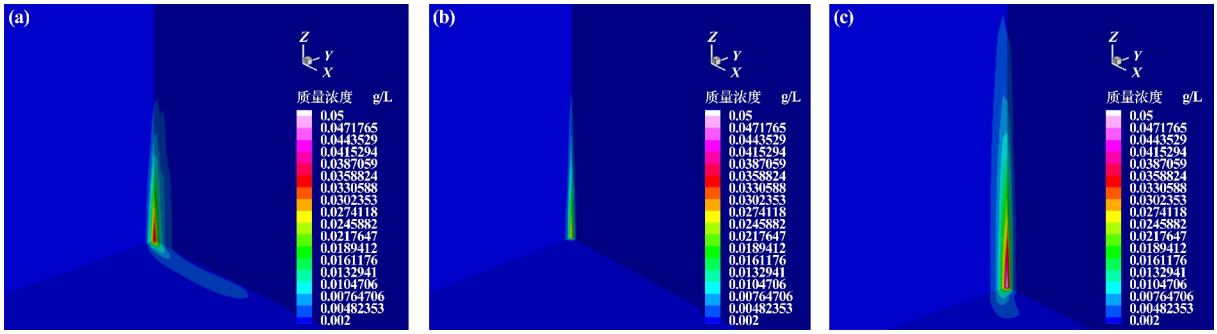
图 4　羽流垂向输运质量浓度演化

Fig. 4　Evolution of plume vertical transport mass concentration

从羽流垂直中心向两侧边缘,浓度梯度的下降符合典型的指数衰减模型。中层羽流在水平方向上受背景流场剪切力与平流输运共同驱动,而在垂直方向上,颗粒自身的微弱沉降效应与层结流场约束下的湍流扩散共同形成了其准高斯分布特征,且颗粒峰值浓度随时间呈现非线性衰减。至 T=6 d,单源羽流的核心区已显著稀释,垂直结构的完整性开始受环境湍流脉动的调制而发生形变。

3.3　羽流全时空演化与形态特征分析

羽流全时空输运质量浓度演化如图 5 所示。羽流在复杂流场作用下展现出显著的空间拓扑演变规律。在释放初期,羽流受海山绕流动力场调制,浓度核心集中在释放源上方,在垂直轴线上呈现为长径比极大的丝状柱体形态。此时,由于深层海水的静稳环境及密度跃层的初期抑制作用,垂向的湍流扩散尚不显著,羽流边界清晰且结构完整。



(a) T=1 d; (b) T=3 d; (c) T=6 d

图 5　羽流全时空输运质量浓度演化

Fig. 5　Spatiotemporal evolution of plume transport mass concentration

随着输运过程的推进,羽流呈现由核心向外围逐层递减的层级化稀释特征。高浓度核心区随时间推移不断收缩,形态演变主要受背景流场剪切力的驱动,而中低浓度的包络面在背景流场剪切力与重力沉降的耦合作用下,沿垂直方向发生显著展宽,并伴随微弱的水平向偏移。这种浓度从轴心向边缘梯度下降的过程契合准高斯分布特征,揭示了中层羽流在强随流背景下的稀释扩散机理。模拟后期,羽流的垂直结构开始受到环境湍流脉动的调制,核心区发生显著稀释并呈现非线性衰减趋势,整体形态由丝状柱体向弥散状的层级结构演化,这一过程反映了中层羽流在输运中,由初始的平流输运主导逐渐过渡到平流-剪切-扩散多因子协同调制的动力学机制。这种演化规律与底层羽流受重力沉降主导的特征存在显著差异,更符合深海中层水体的动力学环境。

4　结论

1) 针对羽流输运过程,构建了集成多源环境约束的高保真数值模拟框架,研究表明,地转偏向力与羽流动力场的耦合作用是控制羽流空间分布的核心机制,地转偏向力会使羽流轨迹由直线平流演变为惯性螺旋结构,并延长羽流在局域水体中的滞留时间。

2）中层羽流在垂向维度受密度层抑制，有层级化稀释规律，在水平方向上其空间演化主要受平流输运与流场剪切主导，浓度自核心轴线向外呈现衰减特征。

参考文献(References)：

[1] HEIN J R, MIZELL K, KOSCHINSKY A, et al. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources [J]. Ore Geology Reviews, 2013,51:1-14.

[2] 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.

[3] 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 Jianmin, LIU Lei, LYU Haining, et al. Deep-sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020,22(6):1-9.

[4] TABATABAEI M M, OKBAZ A, OLCAY A B. Numerical investigation of a longfin inshore squid's flow characteristics[J]. Ocean Engineering, 2015,108:462-470.

[5] 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.

[6] 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, 2021,2:148.

[7] 刘成军,李满红,郑皓,等. 国际海底矿区竞争格局与应对策略[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):8-13.
LIU Chengjun, LI Manhong, ZHENG Hao, et al. Competitive landscape and coping strategies for international seabed exploration areas[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):8-13.

[8] 许明,徐江敏,卢道华,等. 深海采矿垂直管道内异形粗颗粒运动状况研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):42-46.
XU Ming, XU Jiangmin, LU Daohua, et al. Motion of irregular coarse particles in vertical pipelines during deep sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):42-46.

[9] 关英杰,郑皓,宿向辉,等. 垂直管道内粗颗粒运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):10-14.
GUAN Yingjie, ZHENG Hao, SU Xianghui, et al. Numerical simulation of trajectory of coarse particle motion in vertical pipeline [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(2):10-14.

[10] PEACOCK T, ALFORD M H. Is deep-sea mining worth it? [J]. Scientific American, 2018,318(5):72-77.

[11] STANTON T. Acoustic characterization and discrimination of marine zooplankton and turbulence [J]. ICES Journal of Marine Science, 1994,51(4):469-479.

[12] 刘泽霖,陈时平,郑皓,等. 深海采矿沉积物羽流静水扩散特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):63-68.
LIU Zelin, CHEN Shiping, ZHENG Hao, et al. Experimental study on diffusion characteristics of sediment plumes in still water during deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):63-68.

[13] 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.

[14] 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.

[15] KANG E J, LEE H T, KIM D G, et al. Grouping pilots' maneuvering types according to berthing velocity using agglomerative clustering algorithm [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,10(10):1452.

[16] PU X, SHI J Z, HU G D. Analyses of intermittent mixing and stratification within the north passage of the Changjiang (Yangtze) River estuary, China: A three-dimensional model study [J]. Journal of Marine Systems, 2016,158:140-164.

[17] 陈时平,欧阳邓培,刘禹维,等. 深海采矿悬浮颗粒物沉降特性研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2025,51(7):87-90.
CHEN Shiping, OUYANG Dengpei, LIU Yuwei, et al. Research on the sedimentation characteristics of suspended particulate matter in deep-sea mining[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2025,51(7):87-90.

[18] 程建平. 黏弹性流体 Rayleigh-Bénard 对流和羽流中流动与换热数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
CHENG Jianping. Numerical study on flow and heat transport in Rayleigh Bénard convection and plume with viscoelastic fluids[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[19] 韩子强,刘磊,杨建民. 海底采矿车羽流远场流动数值模拟研究[J/OL]. 海洋工程, 1-14(2026-01-30)[2026-04-03]. https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20260130.1240.002.
HAN Ziqiang, LIU Lei, YANG Jianmin. Numerical simulation of far-field plume flow from seafloor mining vehicles [J]. The Ocean Engineering, 1-14(2026-01-30)[2026-04-03]. https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20260130.1240.002.

[20] 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, 2020,10:5075.

引用本文：徐维佳,赵勇,郑皓,等. 深海采矿中尺度羽流演化规律数值模拟及分析[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):91-96.

XU Weijia, ZHAO Yong, ZHENG Hao, et al. Numerical simulation and analysis on mesoscale plume evolution in deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):91-96.