密度分层环境中颗粒沉降特性对羽流扩散的影响研究①

张丽[1,2], 张岩[1,2], 张印瑞[3], 张旭辉[1,2], 鲁晓兵[1,2]
(1.中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2.中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 为探究深海采矿中层排放颗粒羽流的横向扩散规律,基于大涡模拟方法,研究了密度分层环境中颗粒沉降末速度和排放流体浮力占比对羽流扩散过程的影响。模型经水槽实验验证,单相羽流横向扩散半径平均相对误差 2.94%,颗粒羽流稳定阶段横向扩散半径平均误差 5.3%。研究表明:颗粒沉降使羽流剩余浮力减弱,扩散层位置上移;横向扩散半径随沉降末速度增大先增大后趋于稳定,临界沉降末速度对应无量纲参数 $w_s/U_s\approx0.1$;当排放流体密度与背景海水接近($P\approx0$)时,横向扩散半径最小。研究为深海采矿尾水排放参数优化及环境影响控制提供了定量理论依据。

关键词: 海洋环境; 颗粒羽流; 密度分层; 深海采矿; 羽流扩散; 横向扩散半径
中图分类号: TD857; P744 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.012
文章编号: 0253-6099(2026)03-0089-08

Effect of Particle Settling Characteristics on Plume Diffusion in Density-Stratified Environments

ZHANG Li[1,2], ZHANG Yan[1,2], ZHANG Yinrui[3], ZHANG Xuhui[1,2], LU Xiaobing[1,2]
(1.*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*; 2.*School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3.*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To explore the lateral diffusion law of particle plumes resulting from a midwater discharge of sediment during deep-sea mining, effects of terminal velocity of settling particles and seawater-buoyancy-flux ratio of discharged fluid on plume diffusion process in density-stratified environments was studied by adopting large-eddy simulation. The numerical model was validated based on water-tank test, and it is found that the average relative error of the lateral diffusion radius for single-phase plumes is 2.94%, and the average error for particle plumes at stable stage is 5.3%. The results show that particle settling decreases the residual buoyancy of plume and diffusion layer moves upward. The lateral diffusion radius tends to stabilize after an initial increase with the growth of terminal settling velocity, and the corresponding dimensionless parameter at the critical terminal settling velocity is $w_s/U_s\approx0.1$. The lateral diffusion radius reaches its minimum value when the density of discharged fluid is close to that of ambient seawater ($P\approx0$). This study provides theoretical support for quantitatively optimizing parameters and controlling environmental impact of tailings discharge during deepsea mining operation.

Key words: marine environment; particle plume; density stratification; deepsea mining; plume diffusion; lateral diffusion radius

深海海底赋存铜、锰、钴、稀土等高价值矿产资源,深海采矿已成为我国未来海洋资源开发的重要战略方向[1-2]。深海采矿作业中,尾水通常在中层水深(约 1 000~2 000 m)处排放,形成高浓度悬浮颗粒羽流;同时,集矿车对海底沉积物的扰动也会产生近底羽流[3-4]。羽流中的颗粒在沉降过程中随环境水流横向

① **收稿日期**: 2026-05-20
基金项目: 国家自然科学基金(12302516,U2344223,12132018)
作者简介: 张丽(2002—),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为深海采矿环境影响。E-mail:zhangli@ imech.ac.cn
通信作者: 张岩(1993—),男,江苏泰兴人,副研究员,硕士研究生导师,主要研究方向为深海采矿多相流体力学。E-mail:zhangyan162@ imech.ac.cn

扩散,部分颗粒最终沉降于海床,可能对底栖生态系统造成不利影响[2,5]。因此,控制羽流横向扩散范围是深海采矿环境管理的核心问题之一[6-7]。

颗粒沉降末速度是决定羽流横向扩散距离的核心因素:沉降末速度快的颗粒在排放点附近迅速沉底,横向扩散距离短;沉降末速度慢的颗粒可被水流携带至较远区域[8-9]。更重要的是,颗粒沉降会从羽流中带走部分负浮力通量,改变剩余流体的浮力,进而影响羽流横向扩散半径和影响范围[10-11]。

文献[8]提出的经典羽流积分模型奠定了均匀及分层环境中羽流运动分析的基础。此后,研究者围绕气泡羽流和颗粒羽流开展了大量工作。文献[12-13]探讨了气泡羽流在分层环境中的上升与扩散行为,发现气泡滑移速度对扩散高度具有显著影响。针对颗粒羽流,文献[14]研究了上升颗粒羽流中颗粒沉降与羽流的相互作用,指出颗粒沉降可降低羽流浮力并导致扩散高度下降,严重时羽流完全坍塌。文献[15]进一步分析了颗粒沉降末速度对羽流形态的控制作用。在深海采矿背景下,国内学者采用拉格朗日与欧拉方法,探讨了排放参数对颗粒羽流扩散的影响,发现排放速度、质量浓度及排放口形状等参数对羽流影响范围具有显著作用[16-18]。

关于羽流扩散深度,文献[10-11]指出下沉颗粒羽流中颗粒快速沉降会导致扩散层抬升,抬升距离与入口流体浮力占比相关;文献[19]给出了气泡羽流扩散高度的经验预测模型;文献[20]研究了动量主导下颗粒羽流的首次扩散高度,但未涉及颗粒沉降对扩散深度的动态影响;文献[21]发现增大颗粒浓度会削弱浮力通量,降低羽流最大上升高度;文献[22]通过数值模拟与实验研究了富氧水注入过程中羽流深度与扩散特征。

综上所述,当前对颗粒羽流的研究多集中于上升过程(如火山喷发背景),而对下沉颗粒羽流的研究相对较少,且多针对单相情况。深海采矿下沉颗粒羽流中颗粒沉降对横向扩散动态演化的影响机制尚不清楚,扩散深度随时间的演化规律亦无统一结论,亟须开展相关研究。

本文聚焦中层排放形成的颗粒羽流,采用大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)模拟不同颗粒粒径和初始浓度条件下中层排放羽流的沉降与横向扩散过程演化规律。首先通过与实验数据对比,验证数值模型可靠性,随后分析颗粒沉降末速度对横向扩散距离的影响规律,最后基于系列模拟工况确定羽流影响范围的临界沉降末速度,以期为深海采矿中层尾水排放的环境管理提供理论依据与设计指导。

1 数值模型

研究对象为密度分层海水环境下的固液两相颗粒羽流,湍流结构复杂、分层界面间歇性强、多相耦合效应显著。相较于传统雷诺平均 N-S 方程(RANS),LES 可直接解析羽流大尺度含能涡、卷吸剥离结构与分层界面湍流特征,仅对小尺度亚格子涡进行模化,更适配分层浮力多相羽流的精细化模拟[23-24]。本文采用固液两相混合物模型,给出 LES 滤波后两相控制方程、亚格子封闭模型、相间耦合与数值设置。

1.1 固液两相建模假设

本文采用欧拉混合物拟流体模型开展固液两相羽流模拟[25],将离散矿物颗粒等效为连续拟流体,与分层海水构成双组分两相体系,适用于本文低浓度、稀相颗粒羽流工况。建模核心假设如下:

1) 海水与颗粒两相无质量交换,仅存在动量与浮力耦合作用,忽略布朗运动、升力、附加质量,重点刻画颗粒沉降、湍流卷吸、浮力剥离核心物理过程。

2) 因羽流密度与背景海水密度差异较小,引入 Boussinesq 近似[26],仅在浮力项考虑密度扰动,其余项采用恒定参考密度计算,符合分层流浮力羽流模拟通用假设[10,15]。

3) 颗粒沉降运动采用分段斯托克斯沉降公式[27-28]计算,覆盖不同粒径颗粒的沉降规律,通过颗粒浓度输运方程实现颗粒与流场的动态耦合。

1.2 基于 LES 滤波的耦合控制方程组

对混合物连续性方程、动量方程、盐度输运方程、颗粒浓度输运方程统一进行 LES 空间滤波处理[29-30],得到适用于分层海水颗粒羽流的完整耦合控制方程组。滤波后物理量统一采用上划线标识。其连续性方程和动量方程分别为:

$$\nabla\cdot\bar{u}=0 \tag{1}$$

$$\rho\left[\frac{\partial\bar{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{u}\bar{u})\right]=-\nabla\bar{p}+\nabla\cdot(\mu\nabla\bar{u})+\rho g \tag{2}$$

式中:$\bar{u}$ 为滤波后混合物速度;t 为时间;ρ 为混合物密度;$\bar{p}$ 为滤波后混合物压力;g 为重力加速度;μ 为混合物的动力黏度。

在 Boussinesq 假设下,混合物密度 ρ 为常数,为参考密度 ρ_0 和滤波后流体密度扰动量 $\bar{\rho}'$ 之和:

$$\rho=\rho_0+\bar{\rho}',\ \bar{\rho}'\ll\rho_0 \tag{3}$$

将式(3)代入式(2),并且只在浮力项中包含密度差异的影响,可得:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{u}\bar{u})=-\nabla\left(\frac{\bar{p}}{\rho_0}\right)+\nabla\cdot[(\nu+\nu_{sgs})\nabla\bar{u}]+g+\frac{\bar{\rho}'}{\rho_0}g \tag{4}$$

式中:ν 为混合物运动黏度系数,$\nu=\mu/\rho_0$;v_{sgs}为亚格子涡黏性系数。

令:

$$\frac{\bar{\rho}'}{\rho_0}=\beta_y\bar{C}_y+\beta_s\bar{C}_s \tag{5}$$

式中:$\bar{C}_y$ 和 $\bar{C}_s$ 分别为滤波后盐和悬浮颗粒的质量浓度;β_y 和 β_s 为对应的密度膨胀系数。

因此,式(4)可写为:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{u}\bar{u})=-\nabla\left(\frac{\bar{p}}{\rho_0}\right)+\nabla\cdot[(\nu+\nu_{sgs})\nabla\bar{u}]+g+(\beta_y\bar{C}_y+\beta_s\bar{C}_s)g \tag{6}$$

为计算过程中边界条件的定义简便性,本文引入修正压力以消除静水压力影响,令:

$$\bar{p}_{rgh}=\frac{\bar{p}}{\rho_0}-g\cdot\boldsymbol{x} \tag{7}$$

式中:$\bar{p}_{rgh}$为滤波后修正压力;$\boldsymbol{x}$ 为位置矢量。

将式(7)代入式(6),可得:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{u}\bar{u})=-\nabla\bar{p}_{rgh}+\nabla\cdot[(\nu+\nu_{sgs})\nabla\bar{u}]-g\cdot\boldsymbol{x}\nabla\rho+(\beta_y\bar{C}_y+\beta_s\bar{C}_s)g \tag{8}$$

羽流运动过程中流体的盐度输运过程采用对流扩散方程描述:

$$\frac{\partial \bar{C}_y}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{u}\bar{C}_y)=\nabla\cdot\left[\left(\frac{\nu}{S_c}+\frac{\nu_{sgs}}{S_{c_{sgs}}}\right)\nabla\bar{C}_y\right] \tag{9}$$

式中:S_c 为湍流施密特数[25],取值 1.0[26];$S_{c_{sgs}}$为亚格子施密特数,取值 1.0。

颗粒羽流中颗粒运动过程通过颗粒浓度对流扩散方程描述:

$$\frac{\partial \bar{C}_s}{\partial t}+\nabla\cdot(u\bar{C}_s)-\nabla\cdot(w_s e_z\bar{C}_s)=\nabla\cdot\left[\left(\frac{\nu}{S_{c_t}}+\frac{\nu_{sgs}}{S_{c_{sgs}}}\right)\nabla\bar{C}_s\right]+q_s \tag{10}$$

式中:w_s 为颗粒沉降末速度(向下为正);S_{c_t}为考虑颗粒影响的湍流施密特数,取值 1;q_s 为颗粒排放源项。

颗粒沉降末速度根据颗粒粒径分段[27-28]计算:

$$w_s=\begin{cases}\dfrac{gd^2(s-1)}{18\nu} & d<10^{-4}\\ \dfrac{10\nu}{d}\left[\sqrt{1+\dfrac{gd^3(s-1)}{100\nu^2}}-1\right] & 10^{-4}\leqslant d<10^{-3}\\ 1.1\sqrt{(s-1)gd} & d\geqslant 10^{-3}\end{cases} \tag{11}$$

式中:s 为颗粒与流体的密度比,$s=\rho_p/\rho$;d 为颗粒粒径,m。

1.3　LES 亚格子封闭湍流模型

采用 Smagorinsky 亚格子模型,并针对近壁面流动引入 Van Driest 衰减函数修正[29,31]。滤波后亚格子应力张量定义为:

$$\tau_{ij}^{sgs}=\overline{u_iu_j}-\bar{u}_i\bar{u}_j \tag{12}$$

采用涡黏假设进行模化:

$$\tau_{ij}^{sgs}-\frac{1}{3}\tau_{kk}^{sgs}\delta_{ij}=-2\nu_{sgs}\bar{S}_{ij} \tag{13}$$

式中:$\bar{S}_{ij}$为滤波后的应变率张量,$\bar{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)$,$s^{-1}$;$\delta_{ij}$为 Kronecker 符号。

采用经典 Smagorinsky 模型[29-30]计算亚格子涡黏性系数:

$$\nu_{sgs}=(C\Delta)^2|\bar{S}| \tag{14}$$

式中:$|\bar{S}|$为应变率强度,$|\bar{S}|=\sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$,$s^{-1}$;$\Delta$ 为滤波宽度,$\Delta=(\Delta x\Delta y\Delta z)^{1/3}$,m;$C$ 为 Smagorinsky 常数。

1.4　计算主要控制参数

为定量表征排放流体中颗粒与海水的相对贡献,定义无量纲参数 $P=B_{f0}/B_0$[11],表征入口处流体浮力通量占比,其中 B_{f0}为排放入口处海水浮力通量,B_0 为排放入口处总浮力通量(海水与颗粒之和)。B_{f0}计算式为:

$$B_{f0}=g'_{f0}Q_0=\frac{\rho_f-\rho_{a,top}}{\rho_{a,top}}gQ_0 \tag{15}$$

式中:g'_{f0}为入口海水浮力;ρ_f 为海水密度;$\rho_{a,top}$为排放口处环境流体密度;Q_0 为入口体积流量。

颗粒浮力通量 B_{p0}为:

$$B_{p0}=g'_{p0}Q_0=C_0\frac{\rho_p-\rho_{a,top}}{\rho_{a,top}}gQ_0 \tag{16}$$

式中:C_0 为入口混合物中颗粒的体积浓度;ρ_p 为颗粒密度。

则入口处总浮力通量 B_0 为:

$$B_0=B_{f0}+B_{p0} \tag{17}$$

$P=1$ 对应纯海水条件(无颗粒)即单相羽流条件;$P=0$ 对应注入混合物中海水密度与背景海水一致(入口处浮力仅由颗粒贡献);$P<0$ 表示入口处海水密度小于背景海水(正浮力)。后续将着重分析不同 P 值下颗粒含量对羽流扩散的影响规律。

1.5　模型参数及边界条件

参考团队前期沉积物羽流注入实验,本文数值模拟的计算与实验条件相同[32]。模型计算域为长方体,

尺寸为 0.7 m×0.7 m×0.4 m，如图 1 所示。采用结构化网格，总网格数约 70 万。在计算区域顶面设置尺寸为 6.4 mm×6.4 mm 的注入口，与团队前期实验条件相同，划分网格时在排放口附近进行局部加密。计算过程库朗数为 0.3。需要注意的是，考虑 LES 模拟计算量，本文模拟的对象为实验室水槽尺度的颗粒羽流运动过程，但前期研究[32]发现，当模拟过程采用与现场尺度类似材料时，小尺度模拟与现场尺度存在几何相似性。因此，本文基于小尺度研究获得的定量结论可几何放大至现场尺度，获得的定性结论也同样适用于现场尺度。

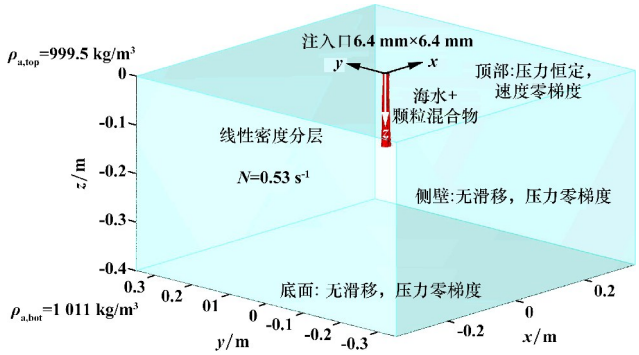


图 1 模型计算域示意图

Fig. 1 Schematic of computational domain

初始时刻，计算域内充满线性密度分层环境流体：在 $z=0$ 处，环境流体密度 $\rho_{a,top}$ 为 999.5 kg/m^3（$\bar{C}_y$ = 1.87 kg/m^3），$z=-0.4$ m 处环境流体密度 $\rho_{a,bot}$ 为 1 011 kg/m^3（$\bar{C}_y$ = 15.3 kg/m^3），依据 TELEMAC-3D 手册中定义的线性密度定律，确定盐度和颗粒的密度膨胀系数 β_y 和 β_s，其取值分别为 7.3×10^{-4} m^3/kg 和 6.22×10^{-4} m^3/kg。初始时刻从顶部到底部的环境水体线性密度梯度为 $\frac{d\rho}{dz}=28.75$ kg/m^4。基于密度梯度计算得到初始环境流体的浮力频率[10]（表征初始环境流体的密度分层强度）为：

$$N=\sqrt{\frac{g}{\rho_{a,top}}\frac{d\rho}{dz}}=0.53(s^{-1}) \tag{18}$$

边界条件设置如下：顶部边界（除注入口外）采用总压条件，速度及标量浓度均设为零梯度；注入口区域给定恒定法向入流速度 $U_{in}=0.13$ m/s，颗粒体积浓度 C_0 按工况取 0.2%～1.5%，并设湍流强度为 5%；侧壁及底部边界采用无滑移固壁条件，压力及标量浓度均为零梯度，颗粒沉降到底部后视为沉积，不再悬浮。

数值离散采用有限体积法：时间项为一阶隐式欧拉格式；梯度项与扩散项为高斯线性格式；动量对流项为 LUST 格式；盐度、颗粒浓度对流项为 van Leer 格式，兼顾精度与数值稳定性。数值模拟主要参数取值见表 1。

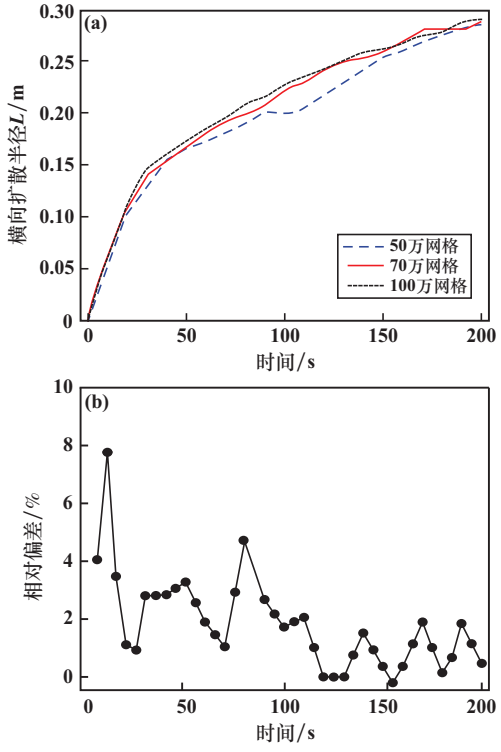
表 1 数值模拟主要参数取值

Table 1 Key parameter values for numerical simulation

参数	单位	数值
颗粒密度 ρ_p	kg·m^{-3}	2 650
海水密度 ρ_f	kg·m^{-3}	999.5
混合物运动黏度系数 ν	m^2·s^{-1}	0.9×10^{-6}
颗粒沉降末速度 w_s	mm·s^{-1}	0.2 ~ 4.8
注入口速度 U_{in}	m·s^{-1}	0.13
C_0	—	0.2%~1.5%
海水膨胀系数 β_y	m^3·kg^{-1}	0.000 73
颗粒膨胀系数 β_s	m^3·kg^{-1}	0.000 622
密度分层浮力频率 N	s^{-1}	0.53
入口处流体浮力通量占比 P	—	−0.5 ~ 1
入口处总浮力通量 B_0	m^4·s^{-3}	6.1×10^{-7}
湍流模型	—	LES Smagorinsky

1.6 LES 数值验证

为评估网格分辨率对计算结果的影响，分别采用 50 万、70 万和 100 万单元三种网格，在相同工况下（$w_s=0.71$ mm/s，$C_0=0.5\%$）进行网格无关性验证。以横向扩散半径 L 随时间的变化作为检验指标。网格无关性验证如图 2 所示。图 2 表明，70 万网格与 100 万



（a）横向扩散半径变化；

（b）70 万网格相对 100 万网格的横向扩散半径相对偏差

图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

网格结果高度吻合，全时段横向扩散半径平均相对偏差仅 2.07%，最大相对偏差约 8%（仅出现在羽流初始发展瞬态阶段），远低于工程 5%精度阈值。综合计算成本与模拟精度，本文最终采用 70 万网格开展模拟。

此外，时间步长分别取 $\Delta t=0.01$、0.001、0.000 5 s 进行试算。监测流动稳定后的湍动能谱与扩散深度。当 $\Delta t=0.001$ s 时，CFL 数最大值约为 0.45；进一步减小步长至 0.000 5 s 对结果影响可忽略。因此本文采用 Δt 为 0.001 s。

2　模型验证

为验证模型对单相羽流（$P=1$）的预测能力，采用团队前期开展的室内水槽实验数据作为验证[32]。与数值模拟相同，水槽为长方体结构，尺寸为 0.7 m×0.7 m×0.7 m，室内水槽实验装置如图 3 所示。初始采用双桶法[33]在水槽中配置线性密度分层的海水环境，环境流体浮力频率为 0.53 s^{-1}，随后通过蠕动泵向水槽中注入海水和沉积物颗粒的混合物，混合物浮力通量 $B_0=6.1\times10^{-7}$ m^4/s^3。通过相机记录羽流的运动演化过程。随后通过图像处理提取不同时刻的羽流横向扩散半径 L_{exp}（取左右两侧平均值）。

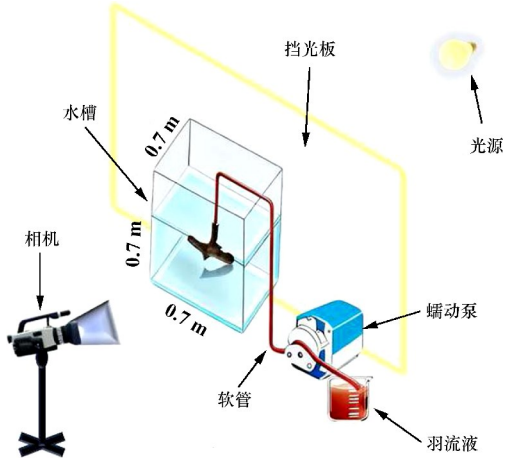
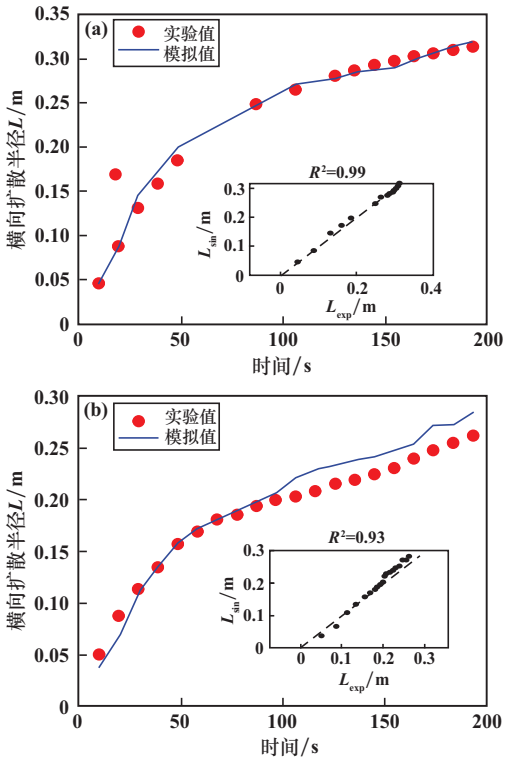


图 3　室内水槽实验装置示意图

Fig. 3　Schematic of laboratory water-tank test setup

图 4(a)对比了单相羽流横向扩散半径模拟值与实验值。两者在全时段吻合良好，横向扩散半径平均相对误差2.94%，最大相对误差 10.73%。数据点紧密分布在 1∶1参考线附近（内嵌散点图，$R^2=0.99$），表明模型能够准确模拟单相羽流的扩散行为。在单相羽流验证基础上，进一步验证颗粒羽流（$P=0.5$）工况。数值模拟采用相同的初始与边界条件，但为简化模型，颗粒设为单一直径，ρ_p 为 2 650 kg/m^3，沉降末速度 w_s 为 0.2 mm/s。初始注入混合物浮力通量 B_0 = 6.1×10^{-7} m^4/s^3。考虑到横向扩散半径是一个宏观积分量，主要受颗粒群体的平均沉降末速度控制，用中值粒径代表多分散体系。提取模拟的横向扩散半径 L_{sim} 与实验值进行对比，结果如图 4(b)所示。颗粒羽流横向扩散半径模拟值与实验值趋势一致，平均相对误差 7.05%，最大相对误差 24.51%（出现在羽流发展初期 $t=5$ s，流场尚未稳定）；$t>50$ s 的稳定阶段，扩散半径平均误差降至5.3%。通过单相羽流及颗粒羽流的对比，可以发现本文采用的基于 Boussinesq 假设的混合物模型适用于颗粒羽流的模拟，准确性较好。



（a）单相羽流（$P=1$）；（b）颗粒羽流（$P=0.5$）

图 4　水槽实验与数值模拟的羽流横向扩散半径对比

Fig. 4　Comparison of lateral diffusion radius of plumes from water-tank test and numerical simulations

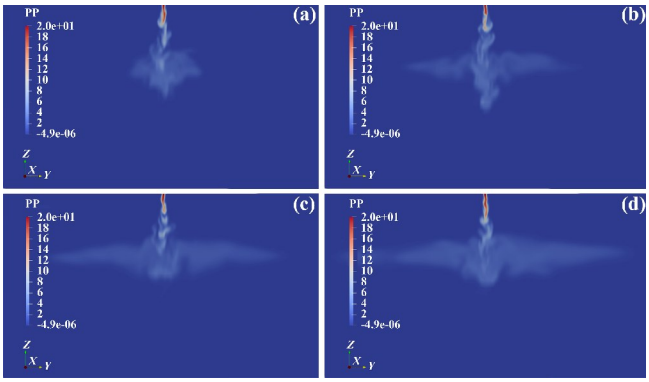
3　颗粒沉降对羽流扩散的影响

3.1　单相羽流扩散规律

为建立基准，首先模拟不含颗粒的单相羽流在密度分层水体中的演化，结果如图 5 所示，图中颜色深浅表示示踪剂的浓度，示踪剂对羽流运动不会产生影响，主要是为了显示羽流的影响边界。

注入初期，下沉羽流在负浮力驱动下垂直向下运动，并不断卷吸周围环境流体，体积通量逐渐增大，而浮力通量则随深度增大而递减。由于初始动量较大，羽流会越过自身瞬时密度与环境密度相等的平衡位置

(中性浮力层)继续下沉。当羽流达到最大下沉深度时,垂向动量衰减为 0,此时羽流内部密度低于周围环境,正浮力促使其发生回弹。回弹过程中,竖向运动逐渐耗散,最终羽流在中性浮力层附近稳定下来,形成横向扩散层,并开始横向扩展。此后,扩散深度基本保持不变,扩散半径随时间延长逐步增长。Morton 提出了线性密度分层环境中纯羽流经典解,即入口处动量通量为 0[8],其发现纯羽流运动最大深度 H 约为 $3.79\times(B_0/N^3)^{1/4}$,其中 $(B_0/N^3)^{1/4}$ 为羽流运动的特征长度。本文计算获得最大深度 H 约为 $4.6\times(B_0/N^3)^{1/4}$,与 Morton 经典解接近,进一步证明了本文数值模型的可靠性。主要差异来源于本文模拟中入口处有一定的入口动量,与经典解的入口假设不同。



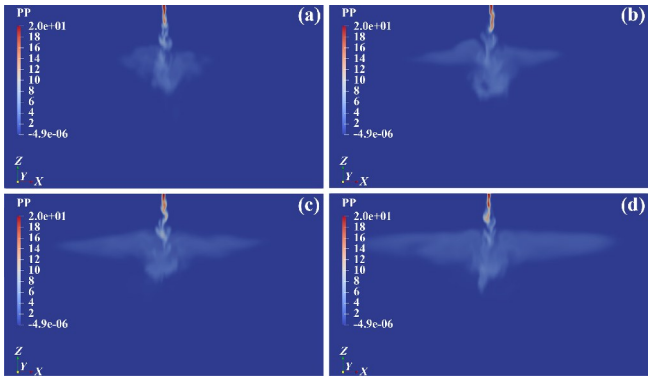
(a) 20 s; (b) 50 s; (c) 100 s; (d) 200 s

图 5 线性密度分层环境中单相羽流演化过程($P=1$)

Fig. 5 Evolution of single-phase plume in linearly density-stratified environment($P=1$)

3.2 颗粒羽流扩散规律

前节主要分析了单相羽流的运动特征,当存在颗粒时,由于沉降颗粒及流体颗粒相互作用,颗粒羽流与单相羽流相比会表现出不同的运动特征。图 6 给出了 $w_s=4.8$ mm/s,入口处流体浮力通量占比 $P=0.5$ 时不同时刻颗粒羽流的运动云图。相比单相羽流,颗粒羽流的演化呈现明显不同的特征。颗粒羽流在初始阶段的扩散行为与单相羽流相似,但随后其横向扩散速度显著减慢,扩散层水平高度明显抬升。与相同入口浮力通量的单相羽流条件相比,颗粒羽流的横向扩散上边界深度约为 $1.55\times(B_0/N^3)^{1/4}$,而单相羽流约为 $2.07\times(B_0/N^3)^{1/4}$。在羽流下沉过程中,颗粒逐渐从羽流主体中沉降,带走了部分浮力通量,使得剩余流体的净浮力减弱。颗粒沉降后,剩余流体无法维持在原有的下沉深度,因此在更浅的位置形成横向扩散层,这一过程与文献[10]的观测结果一致。



(a) 20 s; (b) 50 s; (c) 100 s; (d) 200 s

图 6 不同时刻颗粒羽流的运动云图($P=0.5$)

Fig. 6 Contour plots of particle plume motion at different time($P=0.5$)

3.3 颗粒对羽流扩散的影响

为系统研究颗粒沉降末速度对颗粒羽流演化过程的影响,本文进一步设定了 7 组不同的沉降末速度 w_s,分别为 0.2、0.71、1.2、1.8、2.4、3.6、4.8 mm/s,保持入口处流体浮力通量占比 P 和入口浮力通量 B_0 不变。羽流运动的特征速度一般可表示为 $U_s=(B_0N)^{1/4}$。为定量表征颗粒沉降末速度与羽流运动特征速度的相对大小,图 7 给出了不同 w_s/U_s 时横向扩散平均半径随时间的变化曲线。结果表明,随着沉降末速度的增大,羽流的横向扩散范围逐渐增大;但当 w_s/U_s 超过 0.1 后,扩散范围的变化趋势逐渐趋于一致。这是由于当颗粒沉降末速度与羽流自身的特征速度达到同一量级时,颗粒在羽流横向扩展时快速沉降分离,其后续对羽流浮力及扩展过程的影响显著减弱,因而不同沉降末速度工况下的羽流扩散行为趋于一致。

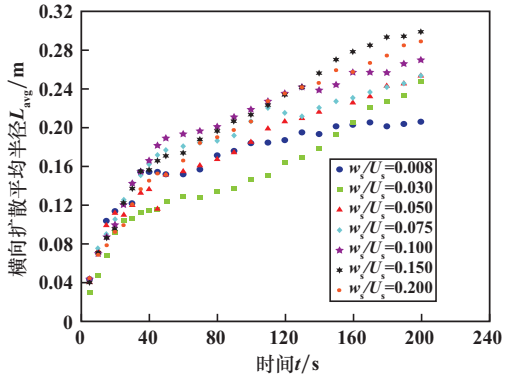


图 7 不同 w_s/U_s 时横向扩散半径随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation of lateral diffusion radius with time for different w_s/U_s

除沉降末速度外,排放流体中颗粒的浮力占比也是关键调控参数。为单独研究颗粒含量的影响,保持沉降末速度为 0.2 mm/s,通过改变初始颗粒体积浓度

C_0 来改变流体浮力占比 P。图 8 为不同流体浮力占比时,羽流横向扩散半径随时间的变化。沉降末速度一定的条件下,P 趋于 0 时横向扩散半径相对较小。这一结果表明,排放流体密度与背景海水一致($P\approx0$)时更有利于抑制羽流横向扩散,引入额外的盐度浮力(无论正负)都会加剧羽流扩散。因此,抑制羽流横向扩散的最优工程参数组合为:采用细颗粒,保持颗粒含量适中,并控制排放流体的密度与背景海水一致。在实际深海采矿中层排放中,建议优先选用微细尾矿颗粒,避免使用高密度或低密度载体水,以最小化羽流对海洋环境的影响范围。

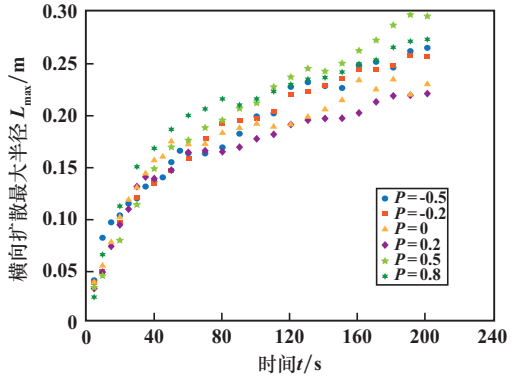


图 8　不同流体浮力占比时横向扩散半径随时间的变化

Fig. 8　Variation of lateral diffusion radius with time for different seawater-buoyancy-flux ratios

4　结论

1) 基于 Boussinesq 假设的混合物模型可精准预测单相羽流与颗粒羽流演化,单相羽流横向扩散半径平均相对误差 2.94%,颗粒羽流稳定阶段横向扩散半径平均误差 5.3%,模型可靠性得到实验验证。

2) 颗粒沉降末速度对横向扩散半径的影响呈非单调特征。当沉降末速度逐渐增大时,羽流扩散半径先显著增大后趋于稳定,且细颗粒(沉降末速度小)对应的横向扩散的影响范围更小。

3) 在颗粒沉降末速度固定的条件下,羽流在排放流体密度与背景海水接近时横向扩散范围相对较小,偏离该状态($P\neq0$)均会使扩散范围进一步扩大。

4) 深海采矿中层尾水排放应优先选用细颗粒尾矿,控制排放流体密度与背景海水一致,并保持适中颗粒含量,以最小化羽流横向扩散范围,降低对深海底栖生态系统的潜在影响。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 贾永刚,张志成,卓晓军,等. 基于专利文献检索的深海采矿环境影响监测与保护技术发展趋势分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):1-7.
Jia Yonggang, Zhang Zhicheng, Zhuo Xiaojun, et al. Analysis of technology trends for environmental monitoring and protection in deep-sea mining based on patent literature retrieval[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):1-7.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Bai M, Dong F, Jia Y G, et al. Impact of sediment plume on benthic microbial community in deep-sea mining[J]. Water, 2025,17(20):3013.

[7] Gilbert N. Complex deep-sea expeditions try to size up seabed mining impacts[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024,121(15):e2404667121.

[8] Morton B R, Taylor G I, Turner J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1956,234(1196):1-23.

[9] Monka A, Chen B Y, Socolofsky S, et al. Effect of stratification and crossflow on the dynamics of bubble plumes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2026,152:04025054.

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

[11] 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.

[12] McDougall T J. Bubble plumes in stratified environments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978,85(4):655-672.

[13] Socolofsky S A, Adams E E. Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002,40(6):661-672.

[14] Apsley D D, Lane-Serff G F. Collapse of particle-laden buoyant plumes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019,865:904-927.

[15] Barnard J M. On the dynamics of stratified particle-laden plumes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021,925:A33.

[16] 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.

[17] 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 Ganghui, Liu Lei. Numerical simulation of fine particle plume flow in deep-sea mining[J]. The Ocean Engineering, 2023,41(5):150-160.

[18] 李世舟,刘磊,杨建民. 基于图像处理的横流中颗粒羽流特性试验研究[J]. 海洋工程, 2025,43(4):47-58.
Li Shizhou, Liu Lei, Yang Jianmin. Image processing-based experimental study on characteristics of particle-laden plumes in a crossflow[J]. The Ocean Engineering, 2025,43(4):47-58.

[19] Socolofsky S A, Adams E E. Role of slip velocity in the behavior of stratified multiphase plumes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,131(4):273-282.

[20] Sutherland B R, Hong Y S D. Sedimentation from particle-bearing plumes in a stratified ambient[J]. Physical Review Fluids, 2016, 1(7):074302.

[21] Mirajkar H N, Tirodkar S, Balasubramanian S. Experimental study on growth and spread of dispersed particle-laden plume in a linearly stratified environment[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2015, 15(6):1241-1262.

[22] Zhao Y G, Zou Z Y, Hu S C, et al. Design and evaluation of artificial downwelling strategies for hypoxia mitigation in linearly stratified environments[J]. Physics of Fluids, 2025,37(7):075196.

[23] Martini S, Cremonesi M. A mixture model for simulating particle-laden flows with the Particle Finite Element Method[J]. Computational Particle Mechanics, 2025,12(6):5507-5527.

[24] Ichihara M, Mininni P D, Ravichandran S, et al. Multiphase turbulent flow explains lightning rings in volcanic plumes[J]. Communications Earth & Environment, 2023,4:417.

[25] Shi Z, Chen J, Chen Q Y. On the turbulence models and turbulent Schmidt number in simulating stratified flows[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2016,9(2):134-148.

[26] Abe S, Studer E, Ishigaki M, et al. Density stratification breakup by a vertical jet: experimental and numerical investigation on the effect of dynamic change of turbulent Schmidt number[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020,368:110785.

[27] Cheng N S. Simplified settling velocity formula for sediment particle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,123(2):149-152.

[28] Wijk J M, Rhee C, Talmon A M. Axial dispersion of suspended sediments in vertical upward pipe flow[J]. Ocean Engineering, 2014, 92:20-30.

[29] 王玲玲. 大涡模拟理论及其应用综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004,32(3):261-265.
Wang Lingling. Large eddy simulation theory and its application[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2004,32(3):261-265.

[30] Bou-Zeid E, Meneveau C, Parlange M. A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows[J]. Physics of Fluids, 2005,17(2):025105.

[31] Yang D, Chen B C, Socolofsky S A, et al. Large-eddy simulation and parameterization of buoyant plume dynamics in stratified flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016,794:798-833.

[32] Zhang Y, Zhang L, Zhang X H, et al. Penetration depth and radial intrusion dynamics of particle-laden plumes in a uniform stratified ambient[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2026,56(7):274711.

[33] Economidou M, Hunt G R. Density stratified environments: the double-tank method[J]. Experiments in Fluids, 2009,46(3):453-466.

引用本文:张丽,张岩,张印瑞,等. 密度分层环境中颗粒沉降特性对羽流扩散的影响研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):89-96.
Zhang Li, Zhang Yan, Zhang Yinrui, et al. Effect of particle settling characteristics on plume diffusion in density-stratified environments[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):89-96.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2026年8月