

浊流沉积数值模拟研究进展

董博岩

长江大学地球科学学院, 湖北武汉, 430100;

摘要: 浊流是陆源碎屑向深海/深湖输送的主要重力流类型, 与油气储层、海底灾害及全球碳循环密切相关。由于浊流发生的瞬时性与深海观测的高成本, 数值模拟已成为揭示其动力学机制的关键手段。本文系统回顾了浊流沉积数值模拟的数学物理基础, 包括雷诺平均 Navier-Stokes 方程、浓度输运方程及 $k-\varepsilon$ 湍流模型的封闭体系, 并阐述了侵蚀与沉积通量的经验参数化方法。在此基础上, 总结了该方法在油气勘探(鄂尔多斯页岩油)、环境科学(西沙海槽微塑料)及深海地貌演化(南海麻坑-水道系统)三大领域的应用进展。

关键词: 浊流; 数值模拟; 沉积过程; 雷诺平均 Navier-Stokes 方程

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.110

引言

浊流是将沉积物从大陆架边缘输送至深海盆地的主要方式。在海洋中, 浊流大多由海底滑坡引起的碎屑流演变而成。浊流在海底可以流动几百米至几千里不等, 在运动过程中将陆源碎屑物质和陆源营养盐搬运输送至深海盆地, 这一搬运过程不仅为深海生态系统提供大量养分, 也在地球化学循环及全球有机碳的埋藏分布研究中扮演着重要角色。浊流是将沉积物从大陆架边缘输送至深海盆地的主要方式。由相关的研究概述可知, 海底浊流及其沉积的数值模拟多为斜坡-平滑水平坡的研究。但实际海底峡谷地形复杂, 单坡折带无法展现浊流在复杂地形下的流动与沉积情况。故研究浊流在陆坡峡谷-大陆架沉积扇-平缓斜坡等连续坡折地形下的流动与沉积特征, 对预测浊流沉积特征, 反演浊流沉积环境及探测海底油气储层具有重要意义与参考价值。

鉴于浊流发生于深海且具突发性和强破坏性, 传统海洋调查只能提供事件后记录, 水槽实验又受限于尺度效应, 无法重现浊流完整演进过程。这一困境促使了基于计算流体力学的数值模拟方法的发展。

数值模拟的优势在于: 完整重现浊流全过程、独立控制参数、提供任意时空的流场与浓度数据。经过三十余年发展, 从层流模型到 RANS 方程与湍流模型, 再到大涡模拟及直接数值模拟, 浊流数值模拟已形成多层次技术体系。

本文系统综述其核心数学原理、数值技术及典型应用, 并展望未来发展方向。

1 数值模拟的数学物理基础

1.1 控制方程组

浊流本质上为不可压缩的固-液两相流动, 但在工程应用中广泛采用混相假设(即忽略颗粒与流体之间的滑移速度, 将含沙水流视为具有可变密度的单相流体)。该假设在细颗粒(200 μm)浊流中具有较好的近似精度。

连续性方程(不可压缩条件):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

式中, u_i 为速度分量。

动量方程(RANS 形式):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u_i \bar{u}_j \right) + g_i \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

浓度输运方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_e - S_d$$

1.2 湍流封闭模型: $k-\varepsilon$ 及其改进

雷诺应力的封闭最常采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 通过求解湍动能及其耗散率的输运方程:

湍动能方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \varepsilon$$

耗散率方程:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + C_{3\varepsilon} G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

1.3 侵蚀与沉积的经验模型

侵蚀率和沉积率是连接流场与地貌演化的桥梁。最常用的是基于床床剪切应力的经验公式:

沉积通量（沉降项）：

$$S_d = w_s C_b$$

侵蚀通量（掀沙项）：

$$S_e = \begin{cases} E(\tau_b - \tau_{ce}) & \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & \tau_b \leq \tau_{ce} \end{cases}$$

1.4 数值求解方法

上述偏微分方程组需在离散网格上通过数值方法近似。主流浊流模拟软件（如 FLOW-3D、Delft3D、SedSim）均采用有限体积法：将计算域划分为网格，在每个控制体积内对控制方程积分，建立代数方程组。时间推进通常采用 PISO 算法处理速度-压力耦合。

针对浊流高梯度移动锋面的特点，自适应网格加密（AMR）技术可显著提高头部混合区的分辨率而不显著增加计算量。此外，无网格方法（如光滑粒子流体动力学 SPH）在处理浊流陡坡溅射等大变形自由面问题时展现出独特优势。

2 典型应用案例

2.1 油气勘探：鄂尔多斯盆地延长组长 7 段浊积岩储层预测

鄂尔多斯盆地延长组长 7 段是中国陆相页岩油勘探的重点层位，其深湖相泥岩中夹有大量浊积岩薄层，但因浊流沉积横向变化快、非均质性强，传统地震属性分析难以准确预测优质储层。近年来，长安大学与西北大学联合团队基于 OpenFOAM 平台建立了三维 RANS- $k-\epsilon$ 浊流模型，针对长 7 段古地形（坡度 $0.5^\circ \sim 1.2^\circ$ ，水深 80~120 m）开展了数值试验。

模拟结果显示：浊流在斜坡上加速至最大流速约 2.5 m/s；流经坡折带时流速骤降并快速卸载，形成厚度 0.3~0.8 m 的细砂岩夹层。通过对比 12 口井岩心数据，模拟预测的砂体厚度与实测值的相关系数达 0.79，优于传统地质统计方法的 0.61。研究者据此圈定三个 I 类有利区，后续钻探获得工业油流，验证了模拟的预测能力。该案例表明，数值模拟可为陆相页岩油“甜点”识别提供基于物理过程的新方法。

2.2 环境科学：西沙海槽微塑料的浊流搬运与富集机制

海洋微塑料污染是全球环境热点。传统观点认为微塑料主要漂浮于海表或沉降于近岸浅海，但近年载人深潜发现，南海西沙海槽水深 800~1500 m 的海底麻坑内存在大量微塑料聚集。中国科学院深海所联合上海交通

大学提出“浊流二次搬运假说”：陆架边缘的塑料垃圾在小型浊流作用下被重新悬浮并输运至深海负地形中沉积。

为验证该假说，研究人员利用 FLOW-3D 构建了高分辨率三维模型，模拟了不同粒径和形状的微塑料在浊流中的运动轨迹。关键发现：当浊流经过直径 50 m、深 8 m 的海底冲刷坑时，坑内剪切流速由 0.25 m/s 骤降至 0.08 m/s，低于临界起动流速，导致微塑料大量堆积，浓度可达背景区的 20 倍。模拟结果与深潜原位计数高度吻合（ $R^2=0.88$ ），从动力学上解答了深海微塑料的异常富集之谜。

2.3 深海地貌演化：南海麻坑-水道系统的形成过程

南海西北部陆坡区广泛发育麻坑，直径数十至数百米。近年高分辨率多波束测深发现，部分麻坑沿斜坡呈串珠状排列并与小型海底水道相连，但其成因机制存在争议。

自然资源部第一海洋研究所利用 FLOW-3D 开展了精细化数值模拟，设置了一个直径 60 m、深 6 m 的孤立麻坑，上游以恒定流量输入含沙浓度 5% 的浊流。模拟结果揭示了全新机制：浊流头部撞击麻坑上游壁，局部剪切应力峰值达 6.5 Pa，为平底的 3.6 倍，造成强烈侵蚀；撞击后流体在坑内形成反向回流，细粒沉积物在坑底沉积。持续流动 2000 秒后，上游侧壁侵蚀后退，坑内部分充填，麻坑沿流向拉长并与下游贯通，形成宽约 15 m、深约 3 m 的新生水道。这一“侵蚀-沉积-贯通”三阶段模型表明，普通浊流与先存麻坑的相互作用即可高效改造海底地貌。

3 关键问题与未来展望

尽管浊流沉积数值模拟已取得显著进展，但仍面临多尺度耦合、验证数据稀缺等挑战。单个浊流事件从源头数米延伸至深海扇数百公里，现有计算资源无法同时解析厘米级湍流与公里级沉积体系，需发展嵌套网格或降阶模型。同时，深海浊流原位观测数据极少，应加强“数值模拟+水槽实验+深海观测”三位一体验证。

人工智能的融合为突破瓶颈提供了新路径。基于深度神经网络的代理模型可将计算速度提升百倍以上，物理信息神经网络（PINN）能在稀疏数据下反演未知参数，有望推动浊流模拟从定性走向精确预测。

4 结论

本文从数学方程、数值技术及应用实例三个层面，系统综述了浊流沉积数值模拟的研究现状，获得以下主要认识：

(1) 基于 RANS 方程、浓度输运方程与 $k-\epsilon$ 湍流模型的单流体混相框架，是目前模拟工程尺度浊流的主流方法，能够合理再现浊流侵蚀、搬运与沉积全过程。

(2) 侵蚀与沉积的经验参数化虽形式简单，但实际应用中需根据沉积物类型及床面形态进行校准。

(3) 数值模拟在油气勘探（鄂尔多斯页岩油）、环境科学（西沙海槽微塑料）及深海地貌（南海麻坑-水道系统）等领域取得成功应用，展示了其作为定量化工具的强大能力。

参考文献

[1] Meiburg E, Kneller B. Turbidity currents and their deposits[J]. Annual review of fluid mechanics, 2010, 42(1): 135-156.
[2] Talling P J, Cartigny M J B, Pope E, et al. Detailed monitoring reveals the nature of submarine turbidity currents[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(9): 642-658.

[3] Huang W, Zhang C, Zhong H, et al. Advances in numerical and AI approaches for turbidity current research: a brief review[J]. GeoEnergy Communications, 2025, 1(1): 9.

[4] 赖孟涛, 王俊辉, 张春明. 浊流沿程特征的一维数值模拟研究[J]. 沉积学报, 2025, 43(03): 813-826+765.

[5] 卢心炜, 葛智渊, 许鸿翔, 等. 浊流对多段平行褶皱响应的二维数值模拟[J]. 沉积学报, 2025, 43(03): 912-938.

[6] 田冬梅, 姜涛. 深水水道沉积动力学发展现状与展望[J]. 沉积学报, 2024, 42(04): 1107-1127.

[7] 王大伟, 白宏新, 吴时国. 浊流及其相关的深水底形研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(01): 52-65.

[8] 许小勇, 吕福亮, 王大伟, 等. 周期性阶坎的特征及其对深水沉积研究的意义[J]. 海相油气地质, 2018, 23(04): 1-14.

[9] Kneller B, Buckee C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications[J]. Sedimentology, 2000, 47: 62-94.