

滑坡堵江过程数值模拟研究进展

钟启明^{1,2,3}, 李宇^{1,4}, 黄健⁵, 刘军⁶, 李思宇⁷, 陈旭东¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 5. 华电昆仑喀什能源开发有限公司, 新疆 喀什 844099; 6. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830052; 7. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 鉴于我国西南高山峡谷地区滑坡堵江事件呈多发频发态势, 从滑坡堵江物理过程出发, 系统综述了连续介质力学方法、非连续介质力学方法及耦合方法在滑坡堵江过程数值模拟中的研究进展, 重点分析了这些方法在计算精度、计算效率、适用范围等方面的优势与不足, 并对其在典型案例中的应用进行了评述。在此基础上, 总结了滑坡堵江过程数值模拟当前面临的关键技术瓶颈, 如高效计算、多尺度建模、参数不确定性处理和耦合稳定性问题, 并提出了高性能计算平台、多尺度耦合建模、智能参数反演和不确定性量化等未来研究方向。

关键词: 滑坡堵江; 数值模拟方法; 连续介质力学方法; 非连续介质力学方法; 耦合方法

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)05-0047-09

Research progress on numerical simulation of landslide-induced river blockage process//ZHONG Qiming^{1,2,3}, LI Yu^{1,4}, HUANG Jian⁵, LIU Jun⁶, LI Siyu⁷, CHEN Xudong¹ (1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Huadian Kunlun Kashgar Energy Development Co., Ltd., Kashgar 844099, China; 6. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830052, China; 7. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: Given the frequent occurrence of landslide-induced river blockages in the alpine and canyon regions of southwestern China and based on the physical process of landslide-induced river blockage, this paper systematically reviews the research progress of continuum mechanics methods, discontinuum mechanics methods, and coupling methods in simulating landslide-induced river blockage processes, with a focus on analyzing the advantages and limitations of these methods in terms of computational accuracy, computational efficiency, and scope of application. The application of these methods in typical engineering cases is also discussed. Furthermore, the paper summarizes current key technical challenges in numerical simulation of landslide-induced river blockage processes, including high-performance computing, multi-scale modeling, parameter uncertainty handling, and coupling stability issues. Finally, future research directions are proposed, such as leveraging high-performance computing platforms, developing multi-scale coupled modeling techniques, advancing intelligent parameter inversion, and enhancing uncertainty quantification.

Key words: landslide-induced river blockage; numerical simulation methods; continuum mechanics methods; discontinuum mechanics methods; coupling methods

我国西南地区地质环境复杂, 地震活动频发, 潜伏滑动体高度发育^[1], 这些潜伏滑动体在强降水或地震等外部因素扰动下一旦触发, 向临空面移动的现象即为滑坡, 为一种常见的地质灾害^[2-3]。西南地

区滑坡具有规模大、机制复杂、危害大、速度快、距离长等特点, 易形成“崩-滑-流”式复合型地质灾害体; 另外, 其深切河谷发育, 谷底和谷顶之间的高差可达数千米^[4], 在全世界范围内具有典型性和代表

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22A20602, U24A20182); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y324006, Yk325002)

作者简介: 钟启明(1981—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事土石(堰塞)坝溃坝灾害预测理论与防控技术研究。E-mail: qmzhong@nhri.cn

通信作者: 李宇(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事滑坡灾害链数值模拟方法研究。E-mail: liyu@nhri.cn

性^[5]。近年来,西南地区开发建设了一系列梯级水电工程,而库水位的动态波动会降低边坡的稳定性,在地震、降水等外荷载作用下,进一步诱发巨型潜伏滑坡体启动入江,形成堰塞湖等地质灾害,堰塞湖溃决导致的次生灾害破坏性往往远超滑坡灾害本身^[6-7]。

2000年4月9日,西藏林芝地区波密县易贡藏布河扎木弄沟发生高速崩塌滑坡,坡体移动约8 km,海拔落差约3 km,最终在山脚形成堰塞湖,溃决洪水造成30人死亡、100多人失踪,并摧毁了多座桥梁^[8-9]。2018年10月10日,西藏自治区江达县波罗乡白格村发生山体滑坡,堵塞金沙江形成堰塞湖,最大蓄水量为2.9亿m³,2天后水位漫溢发生自然溃决;同年11月3日,同一位置发生二次滑坡,形成的堰塞体高出水面58.24 m,蓄满后的最大库容约为7.7亿m³,虽通过人工开挖泄流槽泄洪消除了风险,但上、下游人民财产和重要基础设施遭受了严重损失^[10-13]。2022年9月5日,受泸定地震影响,湾东河流域内出现了大量山体滑坡,造成湾东河主沟断流12 h,形成了8个小型堰塞湖,但由于险情抢救及时并未造成人员伤亡^[14]。可见,深入研究滑坡堵江过程对于评价链生灾害致灾后果具有重大意义。

滑坡堵江过程研究涉及地质学、岩土力学、流体力学等多个学科^[15]。近年来,学者们通过理论分析^[16-18]、模型试验^[19-22]、数值模拟^[23-25]等手段对滑坡堵江过程进行了研究,灾变过程包含滑坡启动、滑坡运动及堆积堵江3个阶段,受土体屈服剪切、滑坡体运动增容及水土交互作用等多重因素影响^[26]。其中,数值模拟技术在滑坡堵江研究中具有不可替代的作用。与传统物理模型试验相比,数值模拟可在不受试验条件限制的情况下,对复杂地形、不同物质组成及极端入河条件进行系统分析,有助于揭示多阶段耦合过程的内在机理,并为防灾减灾提供可重复、可扩展的技术手段。滑坡体宏观尺寸动辄数千米,现有物理模型试验比尺较小,存在比尺效应问题;而理论研究一般基于土体本构理论,针对试验数据提出堵江判别方法,但其受滑坡土力学特性、滑动方向和滑坡类别等多种因素制约,难以形成统一的判据^[27-29];数值模拟因其成本和灵活性等优势,近年来被广泛应用于滑坡堵江过程分析研究,主要包括连续介质力学方法、非连续介质力学方法和耦合方法。本

文基于滑坡堵江过程数值模拟方法的分类,综述当前国内外在该领域的研究进展,评述现有各类数值模拟方法的优缺点,并探讨未来的发展方向。

1 滑坡堵江过程数值模拟方法分类

随着计算机科学与技术的发展,数值模拟方法在分析滑坡堵江过程研究中得到了广泛应用,其本质是使用代数、微分或积分方程来描述或求解诸如滑坡体运动特征在内的众多未知量^[30-31]。从力学机理层面,数值模拟方法可分为连续力学方法、非连续力学方法和耦合方法。其中,连续介质力学方法又可分为网格法和无网格法,网格法包括有限单元法(finite element method, FEM)、有限体积法(finite volume method, FVM)、有限差分法(finite difference method, FDM)等,无网格法包括光滑粒子流法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)、物质点法(material point method, MPM)等;非连续介质力学方法包括离散单元法(discrete element method, DEM)、非连续变形分析法(discontinuous deformation analysis, DDA)等。

各类方法在建模思想、计算精度、适用场景等方面存在显著差异(表1)。在方法选择上,应综合考虑滑坡物质组成、地形特征、是否涉及流固耦合以及计算资源条件。连续介质力学方法(如FEM、FVM、FDM等)在流态特征刻画、整体运动趋势分析方面表现突出,适合细颗粒滑坡或流化程度较高的滑坡过程,但在处理大位移、块体分离时存在局限;非连续介质力学方法(如DEM、DDA等)能够模拟大块体破碎、块体间相互作用,对岩质或结构控制型滑坡尤为适用,但难以直接刻画流体动力学效应;多物理场耦合方法则可同时考虑固体与流体的相互作用,适合再现从失稳启动到入河阻塞及坝体溃决的全过程,计算量较大,对模型构建要求较高。不同方法应根据地形条件、物质组成及研究目的合理选择,必要时采用多方法混合以兼顾精度与效率。

2 连续介质力学方法

连续介质力学方法是一种研究物质力学行为的理论与方法,它基于对连续介质内各点力学性质关系的描述,可以有效地分析和模拟滑坡堵江过程中的力学行为。表2对各种方法的精度、计算效率、流

表 1 滑坡堵江数值模拟方法对比

方法类别	典型方法	优势	局限性	适用场景
连续介质力学方法	FEM、FVM、FDM、SPH、MPM	数学理论成熟、流场模拟精度高	难处理大变形与块体分离	细颗粒为主、流化程度高的滑坡
非连续介质力学方法	DEM、DDA	能处理块体分离、碰撞及接触	难直接描述流体动力学	岩质、块体型滑坡
耦合方法	FVM-DEM、SPH-MPM	同时考虑固体-流体相互作用	建模复杂、计算量大	入河滑坡全过程模拟

表 2 连续介质力学方法对比分析

模拟方法	精度	计算效率	流固耦合能力	适用场景	主要优点	主要局限
FEM	高	中	中	细颗粒滑坡、坝体应力分析	数学理论成熟、可处理复杂边界	大变形计算稳定性不足
FDM	中	高	低	规则网格地形、快速初步分析	实现简单、计算效率高	对复杂地形适应性差
FVM	高	高	高	含水丰富的滑坡、泥石流型堵江	质量守恒好、流体模拟精度高	对固体破坏刻画有限
SPH	高	中	高	高度流化滑坡、入河波浪模拟	无网格、适应大变形	固壁处理复杂、张力不稳定
MPM	高	中	中	大位移滑坡、土石混合流	兼具拉格朗日和欧拉方法的优点	背景网格依赖影响精度

固耦合能力、适用场景及优缺点等进行了综合对比。

2.1 网格法

网格法将材料的物理参数存储于网格单元内,通过对单元之间控制方程的求解获取计算结果,计算效率较高^[32]。FEM 通过在单元内部建立相应数学模型(如解析表达式、积分方程或微分方程)以描述区域特性从而进行求解。然而,传统有限元法在大变形情形下易产生网格畸变,不适用于滑坡等复杂固相大变形问题^[30]。但有限元法在小变形或低应变状态下具有较高的求解精度,通常与其他方法耦合使用以解决大变形问题。例如,Zhou 等^[33]开发了基于图形处理单元(graphics processing unit, GPU)的 FEM-MPM 耦合算法,其结果表明该方法在小应变时具有高精度,且从 FEM 到 MPM 的转化顺畅,有效避免了单纯使用有限元法时因网格单元畸变导致的计算不收敛问题。

FDM 的主要优势在于能够适应计算变量的快速变化,通过调整网格尺寸和差分步长,有效控制求解精度。然而,更密集的网格和更小的差分步长尽管能提高计算精度,却也显著增加了计算成本^[34-35]。Hung^[36]提出的动态分析法(dynamic analysis, DAN)即为有限差分法的一种应用形式,结果表明其可有效模拟动态传播和波动现象;Huang 等^[37-38]采用有限差分法开展滑坡分析,取得了良好的应用效果。值得注意的是,有限差分法在未进行坐标变换的情况下,通常需采用结构化网格,限制了其处理复杂几何形状的能力。

FVM 通过将计算域划分为互不重叠的多个控制体,实现了物理量的严格守恒。通过在控制体上进行积分,可计算相邻控制体边界上的数值通量,从而确定控制体内物理参数随时间的变化^[39]。该方法具有网格划分灵活、计算效率较高、精度较高、物理意义明确等优点,广泛适用于对流扩散方程和 Navier-Stokes 方程等多类偏微分方程的求解,在处理复杂几何形状和非结构化网格问题时优势显著^[40-41]。当前流行的 FLOW-3D 及 HIPIMS-DebrisFlow 程序即基于 FVM 开发而来,黄瑞启等^[42]在此基础上研究了滑坡体厚度、宽度及入水速度下的涌浪传播过程及水体飞溅;Chong 等^[43]在考虑水土物质交换的前提下复现了白龙江滑坡体入水后水

流对固体堆积物的侵蚀搬运效应,其最终堆积形态与实测结果基本一致。在运用过程中,为了提高 FVM 的计算精度,通常需要扩大节点数量和重构格式,这增加了计算的复杂性。例如,Osher 等^[44]提出的本质无振荡(essentially non-oscillatory, ENO)方法及 Zhu 等^[45]建立的加权本质无振荡(weighted essentially non-oscillatory, WENO)方法,尽管有效提高了数值计算精度,但同时增加了计算量,使其在实际工程中的实施变得困难。

此外,研究人员也在持续改进和研发更高效的数值模拟方法,以提升计算结果的准确性与可靠性。例如,Noh^[46]提出了任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法,并结合 FDM 以解决二维流体动力学问题。该方法逐步被扩展至岩土工程领域^[47]。但 ALE 方法的计算效率与精度很大程度上取决于单元生成与网格自适应调整技术^[32]。随后,Hu 等^[48]建立了重网格插值小应变技术(remeshing and interpolation technique with small strain, RITSS),分析了土体相互作用过程中的大应变或变形问题,其结果证明了该方法的有效性。然而,RITSS 方法在处理极端大变形和应变问题时仍存在局限性,且在涉及复杂几何形状的实际工程应用中,数值计算的不稳定性和误差易逐渐积累^[32]。

2.2 无网格法

无网格法自 20 世纪开始逐步受到关注,该方法在大变形建模、移动边界模拟及损伤失效分析等方面具有明显优势,适合复杂几何形状的建模,且易于适应边界条件的变化。由于其计算以粒子为基础,适用于并行计算^[49]。

SPH 方法不依赖网格结构,能够适应复杂几何条件,包括自由表面流动、断裂和碰撞现象,尤其适用于流固耦合、多相流和自由表面流动等复杂问题的模拟^[50]。然而,该方法早期受限于计算能力,仅能处理数量较少的粒子^[51]。此外,SPH 模拟结果的准确性对参数的敏感性较高,在开展大尺度滑坡堵江模拟时,邻域搜索算法的计算成本极大,制约了其应用范围^[39],同时 SPH 方法本身还存在张力不稳定以及高雷诺数下精度和稳定性不足等问题。因此,研究人员持续改进与优化 SPH 方法,以拓展其在岩土工程领域的应用。例如:Maeda 等^[52]首次将

SPH 方法引入岩土工程,用于岩土体三相相互作用的大变形分析;Bui 等^[53]利用 SPH 方法开展了边坡大变形与失稳破坏的研究;Peng 等^[54]借助 GPU 并行技术,开展了白格滑坡堵江过程的高分辨率三维建模与仿真分析;Li 等^[55]利用多相 SPH 方法,将滑坡体视为非牛顿流体,研究了王家山滑坡下行过程中的水-土耦合作用,同时预测了王家山滑坡诱发涌浪的传播过程,结果表明涌浪会危及现有居民区的安全。

MPM 通常被归类为无网格法的原因在于其允许质点自由移动,而变量求解则依赖于背景网格,与纯无网格法相比具有更高的计算效率^[39]。MPM 是结合了拉格朗日粒子法与欧拉网格法的混合法,起源于质点网格法^[56]。MPM 将分析对象离散为具有物理属性的质点,并在背景网格上求解动量方程和计算空间导数,背景网格本身不具备物质特征^[57]。因此,MPM 能够实现滑坡过程中小变形到大变形流动阶段的模拟,同时避免了传统网格法中的网格畸变问题,适用于流固耦合问题^[58-59]。滑坡堵江过程通常涉及复杂的流固耦合行为,需要考虑滑坡体与流体的相互作用、嵌入合适的本构模型并施加特定边界条件,相比 SPH 与网格法,MPM 在这些方面具有显著优势^[60]。近年来,学界广泛开展了基于 MPM 的大变形与流固耦合问题研究,同时对现有方法进行了改进,以减少计算过程中的时间与空间误差。例如,Peng 等^[61]提出了自适应插值物质点法,通过域插值技术有效降低了空间误差;Bardenhagen^[62]采用极限稳定性步长控制了时间误差,提高了计算效率;Bardenhagen 等^[63]提出的广义插值物质点法有效降低了质点跨越网格的数值噪声;Yerro 等^[64]提出了三相单点物质点法,分析了渗流条件下的边坡稳定性;Xu 等^[65]利用 MPM 成功模拟了地震诱发的红石岩滑坡堵江全过程,其模拟结果与实测堆积形态吻合,为滑坡堵江过程模拟提供了有效技术支撑。尽管 MPM 在模拟大变形与流固耦合问题中表现出明显优势,但其仍存在一些局限性,如计算量较大、计算时对背景网格划分和更新存在一定依赖、在大规模模拟过程中存在粒子穿越网格引起的数值噪声和单元交叉误差,进一步优化其计算效率和数值稳定性仍是研究的热点问题。

除 SPH 与 MPM 外,无网格法还包括颗粒有限元法、无网格伽辽金法等方法^[66-68]。

3 非连续介质力学方法

非连续介质力学方法是一类专门研究非均质、非连续介质力学行为的数值理论与方法,广泛用于描述滑坡堵江过程中的复杂断裂、滑动及变形特征。典型的非连续介质力学方法主要包括 DEM 和 DDA 等^[69-72]。非连续介质力学方法将研究对象离散为独立的颗粒或块体,重点关注颗粒或块体之间的作用力,其运动取决于接触作用力及牛顿第二定律。在运动过程中,这些颗粒或块体之间可能发生分离或重新接触,可有效模拟岩土介质在大变形、破碎和滑动等复杂工况下的力学行为^[73-74]。非连续介质力学方法适用于模拟大块体、节理发育及结构控制型滑坡。表 3 给出了相关方法在精度、计算效率、流固耦合能力及工程适用性等方面的综合对比。

DEM 在岩土工程领域应用广泛,能够准确地模拟岩土体的破坏过程及微观机制。Jiang 等^[74]利用 DEM 和改进的黏结接触模型研究了岩质边坡的破坏过程,从宏观与微观两个尺度揭示了边坡破坏的机理和演化规律,为岩质边坡的稳定性分析提供了科学依据。赵川等^[75]基于 DEM 研究了滑坡体运动过程中的速度分层效应和能量转移特征,分析了滑坡体的破坏特征。胡晓波等^[76]采用 PFC3D 软件对三溪村滑坡的运动过程和堆积特征进行了反演分析,成功再现了滑坡过程中的颗粒运动轨迹和最终堆积形态,为滑坡风险评估与防治提供了技术支撑。Lo 等^[77]采用 PFC3D 软件的黏聚力模型,充分考虑孔隙水压力作用,成功模拟了 Hsiaolin 堰塞体的形成与堆积过程,证实了 DEM 在考虑流固耦合作用时的有效性与优势。

DDA 是一种适用于岩体大变形、位移和破坏过程模拟的有效方法,尤其在模拟岩质滑坡过程中发挥着重要作用^[69-70]。Chen 等^[78]利用 DDA 对新磨村滑坡的运动及堆积状态进行了详细模拟,成功再现了滑坡体的运动轨迹和最终堆积形态。Dong 等^[79]采用 DDA 模拟了木竹坪滑坡的运动过程,准确预测了滑坡运动的持续时间、滑动速度和初始涌动高度,并清晰地展示了堵江形态特征,验证了 DDA 的有效性与适用性。Jiao 等^[80]提出了扩展 DDA,通过引入水体作用,成功模拟了三峡库区千将坪滑坡和马家沟潜伏滑动区域在水库蓄水条件下的滑坡过程,研究结果表明该方法能够直观、有效地揭

表 3 非连续介质力学方法对比分析

模拟方法	精度	计算效率	流固耦合能力	适用场景	主要优点	主要局限
DEM	高	中	中	块体型、岩质滑坡	能刻画块体分离、碰撞及摩擦	计算量大、流体动力需额外耦合
DDA	中	高	低	节理发育、岩体结构滑坡	节理面处理自然、能模拟接触滑移	流体作用模拟能力有限

示蓄水或降雨诱发滑坡的发生与演化机制。

综上所述,非连续介质力学方法因其独特的理论优势,在复杂岩土力学问题的模拟中显示出明显的优势,已被广泛应用于各类岩土灾害研究与工程实践中。然而,非连续介质力学方法也存在计算效率相对较低、计算成本高、参数敏感性较大及颗粒或块体尺度效应明显等问题。未来应关注其与其他数值方法的耦合、计算效率的提升、多尺度力学模型的开发以及颗粒尺度效应的有效控制,以实现更加准确的数值模拟与预测。

4 耦合方法

尽管非连续介质力学方法已可模拟上百万颗粒或块体的动力响应与运动行为,其研究能力在近年来取得了显著进展,但尚难以将其作为一种完全宏观尺度的模拟手段。这类方法通常需预设颗粒或块体之间及其接触界面的本构关系,而这些本构模型往往高度依赖于实验结果或研究人员的经验判断,因此其参数设定存在较强的主观性与不确定性^[5,81]。此外,由于该类方法需要对每一个离散单元实施显式动力学计算及相互作用力求解,在处理大规模岩土体灾害时,对计算资源的消耗极为庞大,限制了其广泛工程应用^[60]。值得特别关注的是,滑坡堵江过程通常伴随复杂的流固耦合机制,包括滑坡体破坏与解体、河道阻塞等非线性过程。当前部分研究或忽略滑坡体非连续结构特征,或对流固耦合过程进行简化处理,可能削弱模拟结果对实际灾害情形的解释力与预测能力^[82-83]。耦合方法能够同时考虑固体与流体的相互作用,是再现滑坡堵江全过程及堰塞坝溃决的重要手段。为全面展示各类耦合方法的特点,表 4 对典型组合方式的精度、计算效率、适用场景、优势与局限等方面进行了对比。

为提升模拟精度以及与真实物理过程的一致性,学者们开始尝试开发多物理场耦合方法,以集成不同数值技术的优势。例如:Zhou 等^[33]开发了一种有限元-物质点法 (FEM-MPM) 耦合算法,利用 FEM 处理小变形区域,而采用 MPM 模拟发生大变形或严重畸变的区域,通过多个典型算例验证了该耦合框架在应对复杂边界和大变形问题上的数值稳定性与准确性;李东阳等^[84]提出的扩展型离散元-计算流体动力学 (DEM-CFD) 耦合方法,在模拟滑坡入水后的细节演化中表现出良好的稳定性,为揭示

滑坡堵江物理机制提供了有效的数值模拟工具;Nian 等^[85]基于 DEM-CFD 耦合方法,系统分析了河道水深、流速、滑坡体积与初始速度等因素对阻塞演化行为的影响。另外,针对滑坡体入水后的堵江过程研究,常采用基于流体体积法 (volume of fluid, VOF) 的自由液面追踪方法,该方法可精确捕捉涌浪与水面抬升^[86];而 MPM-SPH 方法在处理滑坡体大变形与堰塞坝形成过程方面表现突出,可有效刻画水土耦合过程^[87]。

在滑坡堵江灾害反演过程中,当河道宽度和河水深度较小时,滑坡体会快速堆积形成阻塞,滑坡堵江过程可以简化为滑坡体的启动、下滑和堆积过程,从而忽略河水的影响,不必再考虑流固耦合作用,且仍可得到较为理想的计算结果,提高了计算效率。尽管耦合方法在模拟多场耦合动力学问题中展现出较大优势,其本身亦存在一定的局限性:一方面,耦合算法在时间步长控制、数值稳定性及边界条件处理上往往较为复杂,难以实现统一的高效框架;另一方面,不同数值方法间的通信与数据映射可能引入误差累积,进而影响整体模拟的物理一致性与精度。此外,大多数耦合框架在工程实用性方面仍面临较高的计算资源需求,对硬件平台提出了更高的要求。因此,未来的发展方向可侧重于耦合方法的结构优化、并行计算框架设计及多尺度建模能力的拓展,以期更好地服务于滑坡堵江过程的高保真模拟与预测。

5 存在问题与挑战

近年来,各种数值模拟方法被广泛应用于边坡劣化失稳、滑坡体运动和堰塞体形成全过程。然而,在实际工程应用中,这些方法仍面临多方面挑战,主要体现在以下 4 个方面:

- a. 高效性。滑坡堵江过程具有显著的多尺度特征,从细观颗粒破碎到千米级山体滑移和河道堵塞,空间跨度大,时间尺度耦合紧密,涉及非线性动力学演化。高精度三维模型(如 CFD、SPH-DEM 耦合)虽能较好地刻画细节,但计算成本高、计算时间长,难以满足应急预测对分钟至小时级快速响应的需求。
- b. 复杂性。滑坡体参数(黏聚力、内摩擦角、孔隙率等)及初始条件(滑动面位置、扰动形式、降水/地震载荷)往往难以准确获取,且具有显著空间异质性与观测误差,这会直接影响模型的可靠性。复杂地形与河道几何条件带来的边界设定困难,也增

表 4 耦合方法对比

模拟方法	典型组合	精度	计算效率	适用场景	主要优点	主要局限
DEM-CFD	固体+流体流动	高	中	滑坡全链条模拟	能刻画颗粒-流体双向作用	耦合算法复杂、计算耗时
MPM-SPH	大位移固体+流体	高	中	土石混合滑坡入河	大变形稳定性好、适应多物质	网格与粒子数据转换耗时

加了模拟的不确定性。

c. 准确性。滑坡启动后的碎屑流表现出强烈的剪切变形、非牛顿流动特性和流固相互作用,同时伴随颗粒破碎、侵蚀-沉积等高度非线性过程,当利用现有模拟技术刻画该过程时,其在稳定性与精度方面会略显不足。同时,传统连续介质假设和简化摩擦模型(如 Coulomb、Voellmy 模型)难以准确描述这些物理机制。尤其在滑坡体入水后,强烈的水-土耦合会引发数值不稳定和物理一致性问题。

d. 统一性。当前多物理场耦合技术尚缺乏统一的理论与算法框架,连续介质力学方法(FVM、FEM)与离散元(DEM)、粒子法(SPH、MPM)之间大多采用简单的信息交换(如边界条件迭代、质量守恒校正),在复杂地形或强相互作用场景中容易出现精度损失、界面滑移甚至数值发散问题,难以兼顾地形适应性与高性能计算需求。

针对上述问题,本文提出以下解决方案:

a. 为提升计算效率,可尝试使用并行计算与 GPU 加速技术、自适应网格加密(adaptive mesh refinement, AMR)等策略,将计算精度集中在关键区域;在应急场景下,采用分级模拟策略,即先用简化模型进行快速预测,再用高精度模型进行重点区域细化计算,以实现效率与精度的平衡。

b. 可逐渐引入高分辨率遥感(激光雷达、干涉合成孔径雷达)、无人机倾斜摄影测量等技术用于获取精确地形与形变数据;贝叶斯反演、机器学习参数估计方法也可被引入数值模拟中,以利用已有观测数据反演关键物理参数;通过对输入条件的敏感性进行分析,可提高模拟结果的可信度。

c. 为提高模拟精度,可引入非牛顿流变模型、可变摩擦系数模型及颗粒破碎本构模型;采用强耦合流固算法(如隐式 DEM-CFD、MPM-CFD)改善耦合稳定性;通过高精度自由液面追踪技术(如 VOF)提升涌浪传播的反演能力。

d. 可尝试构建统一耦合框架,实现固-液相的同域求解;在算法上引入能量守恒一致性修正与多时间步长策略,提升稳定性;在工程应用中,通过区域分解联合多方法混合计算,将不同区域用最合适的数值方法处理,从而提高整体模拟效率与鲁棒性。

6 结 语

本文综述了滑坡堵江过程模拟中常用的连续介质力学方法、非连续介质力学方法及耦合方法。连续介质力学方法在模拟流动过程方面具有高精度优势,但对大变形及块体分离的刻画有限;非连续介质力学方法能够反映块体破裂与相互作用,但对流体

作用的描述不足;耦合方法兼具两者优势,适用于再现滑坡堵江全过程,但计算代价高、算法框架尚不统一。数值模拟将在滑坡堵江过程研究与风险评估中扮演愈发重要的角色。随着高性能计算平台、多物理场耦合理论与智能算法的持续进展,有望构建具有更高鲁棒性和工程实用价值的滑坡灾害全过程模拟体系,为防灾减灾工作提供有力支撑。

参考文献:

[1] 杜镇瀚,陈祥,潘洪月,等. 近坝库岸滑坡涌浪-溃坝链生灾害研究进展[J]. 中国水利,2025(3):50-57. (DU Zhenhan, CHEN Xiang, PAN Hongyue, et al. Research advances on landslide-induced surge and dam-break cascading disasters near dams [J]. China Water Resources, 2025(3):50-57. (in Chinese))

[2] 中国水利百科全书编辑委员会. 中国水利百科全书[M]. 北京:水利电力出版社,1991.

[3] 徐卫亚,周伟杰,闫龙. 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):87-94. (XU Weiya, ZHOU Weijie, YAN Long. Research progress on seepage stability of rainfall-induced accumulation landslide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4):87-94. (in Chinese))

[4] ZHAN Jiewei, CHEN Jianping, ZHANG Wen, et al. Mass movements along a rapidly uplifting river valley: an example from the upper Jinsha River, southeast margin of the Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(18):634.

[5] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3):433-454. (HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3):433-454. (in Chinese))

[6] 陈世壮,徐卫亚,石安池,等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):83-93. (CHEN Shizhuang, XU Weiya, SHI Anchi, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3):83-93. (in Chinese))

[7] 罗辉,邓创,赵高文. 2008—2017 年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):17-24. (in Chinese))

[8] ZHUANG Yu, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Combined numerical investigation of the Yigong rock slide-debris avalanche and subsequent dam-break flood propagation in

- Tibet, China[J]. Landslides, 2020, 17(9): 2217-2229.
- [9] DELANEY K B, EVANS S G. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: review, remote sensing analysis, and process modelling[J]. Geomorphology, 2015, 246: 377-393.
- [10] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, WANG Lin, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam [J]. Landslides, 2020, 17(7): 1681-1692.
- [11] TIAN Shufeng, CHEN Ningsheng, WU Hua, et al. New insights into the occurrence of the Baige landslide along the Jinsha River in Tibet [J]. Landslides, 2020, 17(5): 1207-1216.
- [12] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551. (XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha river in Baige village on October 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534-1551. (in Chinese))
- [13] 陈敏. 金沙江白格堰塞湖处置中水库应急调度经验与启示[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 10-14. (CHEN Min. Experiences and inspirations of reservoir regulation in urgent treatment of Baige barrier lake on Jinsha River [J]. Yangtze River, 2019, 50(3): 10-14. (in Chinese))
- [14] 张宪政, 铁永波, 李光辉, 等. 四川泸定 M_s 6.8 级地震区湾东河流域泥石流活动性预测[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1035-1045. (ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, LI Guanghui, et al. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the M_s 6.8 Luding earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1035-1045. (in Chinese))
- [15] ZHANG Zhen, LIU Min, TAN Y J, et al. Landslide hazard cascades can trigger earthquakes [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2878.
- [16] CHEN C Y, CHANG Junming. Landslide dam formation susceptibility analysis based on geomorphic features[J]. Landslides, 2016, 13(5): 1019-1033.
- [17] PENG Linya, SUN Yangjie, ZHAN Zhao, et al. FR-weighted GeoDetector for landslide susceptibility and driving factors analysis [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023, 14(1): 2205001.
- [18] YANG Fengyuan, ZHUO Li, XIAO Mingli, et al. A statistical risk assessment model of the hazard chain induced by landslides and its application to the Baige Landslide[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3577.
- [19] ZHOU Yuanyuan, SHI Zhenming, QIU Tong, et al. Experimental study on morphological characteristics of landslide dams in different shaped valleys [J]. Geomorphology, 2022, 400: 108081.
- [20] 王峻才, 卢坤林, 朱大勇. 基于室内模型试验的滑坡碎屑流堆积分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1509-1517. (WANG Juncai, LU Kunlin, ZHU Dayong. Indoor modeling test for regularity of deposit position of landslide-debris avalanches [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1509-1517. (in Chinese))
- [21] DU Zhenhan, ZHOU Jiawen, ZHANG Shichen, et al. Experimental analysis on breaching mechanism of earth-rock dam induced by landslide generated waves [J]. Engineering Geology, 2025, 346: 107913.
- [22] 孟珍珠, 胡林生, 沈优, 等. 基于改进 PIV 技术的库区滑坡涌浪试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 30-36. (MENG Zhenzhu, HU Linsheng, SHEN You, et al. Experimental study on landslide generated waves based on improved PIV technique [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 30-36. (in Chinese))
- [23] BABANOURI N, DEGHANI H. Investigating a potential reservoir landslide and suggesting its treatment using limit-equilibrium and numerical methods [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(3): 432-441.
- [24] SUN Y, YANG J, SONG E. Runout analysis of landslides using material point method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2015, 26(1): 012014.
- [25] 靳立周, 王盈, 常文斌, 等. 基于 D-InSAR 和 PFC2D 技术的白格滑坡稳定性分析[J]. 地震地质, 2023, 45(1): 153-171. (JIN Lizhou, WANG Ying, CHANG Wenbin, et al. Stability analysis of the Baige landslide using D-InSAR and PFC2D modeling [J]. Seismology and Geology, 2023, 45(1): 153-171. (in Chinese))
- [26] 苏正洋. 滑坡-堵江-溃决灾害链演化机制与全过程模拟方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2025.
- [27] 匡尚富. 斜面崩塌引起的天然坝形成机理和形状预测[J]. 泥沙研究, 1994(3): 50-59. (KUANG Shangfu. Formation mechanism and shape prediction of natural dam due to slope failure [J]. Journal of Sediment Research, 1994(3): 50-59. (in Chinese))
- [28] 李守定, 李晓, 张军, 等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2908-2915. (LI Shouding, LI Xiao, ZHANG Jun, et al. Study of geological origin mechanism of Tangjiashan landslide and entire stability of landslide dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2908-2915. (in Chinese))
- [29] 阮合春, 陈华勇, 陈剑刚, 等. 滑坡-堵江-溃决灾害链研究进展[J]. 人民黄河, 2022, 44(6): 56-64. (RUAN Hechun, CHEN Huayong, CHEN Jiangang, et al. Review of investigation on hazard chain triggered by landslide, blocking river and dam outburst flood [J]. Yellow River, 2022, 44(6): 56-64. (in Chinese))
- [30] PAN Shaoyuan, YAMAGUCHI Y Y, SUPPASRI A, et al. MPM-FEM hybrid method for granular mass-water

- interaction problems[J]. Computational Mechanics, 2021, 68(1):155-173.
- [31] SENGANI F, MULENGA F. A review on the application of particle finite element methods (PFEM) to cases of landslides [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16(3):367-381.
- [32] LI Chunlei, YU Long, KONG Xianjing. RPIM-RITSS method for large deformation analysis using ABAQUS[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(6):04023067.
- [33] ZHOU Qian, XU Wenjie, FENG Zekang. A coupled FEM-MPM GPU-based algorithm and applications in geomechanics[J]. Computers and geotechnics, 2022, 151:104982.
- [34] CHAMARTHI A S. Efficient high-order gradient-based reconstruction for compressible flows [J]. Journal of Computational Physics, 2023, 486:112119.
- [35] KUHN M B, DESJARDINS O. A numerical study of an atomizing jet in a resonant acoustic field[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2023, 167:104522.
- [36] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4):610-623.
- [37] HUANG Da, MENG Qiujie, SONG Yixiang, et al. Dynamic process analysis of the Niumiangou landslide triggered by the Wenchuan earthquake using the finite difference method and a modified discontinuous deformation analysis [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(4):1034-1048.
- [38] 杨智勇, 吉锋. 大渡河干海子滑坡稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(2):201-206. (YANG Zhiyong, Ji Feng. Research on stability of Ganhaizi landslide in Dadu River basin [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2):201-206. (in Chinese))
- [39] TRUJILLO-VELA M G, RAMOS-Cañón A M, ESCOBAR-VARGAS J A, et al. An overview of debris-flow mathematical modelling [J]. Earth-Science Reviews, 2022, 232:104135.
- [40] 杜娟, 殷坤龙, 王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3):480-488. (DU Juan, YIN Kunlong, WANG Jiajia. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3):480-488. (in Chinese))
- [41] 刘高, 邓建丽, 梁昌玉. 有限体积法在滑坡滑动过程模拟中的应用[J]. 地球科学进展, 2007, 22(11):1129-1133. (LIU Gao, DENG Jianli, LIANG Changyu. The application of finite volume method to modeling landslide motion [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(11):1129-1133. (in Chinese))
- [42] 黄瑞启, 黄筱云, 张少强, 等. 水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1):36-42. (HUANG Ruiqi, HUANG Xiaoyun, ZHANG Shaoqiang, et al. Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by subaerial landslides [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1):36-42. (in Chinese))
- [43] CHONG Yan, CHEN Guan, DIJKSTRA T, et al. A two-layer model for simulating river blockages induced by tributary debris flows [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 179:107046.
- [44] OSHER S, SHU Chiwang. High order essentially non-oscillatory schemes for Hamilton-Jacobi equations [R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1990.
- [45] ZHU Jun, SHU Chiwang. A new type of multi-resolution WENO schemes with increasingly higher order of accuracy on triangular meshes [J]. Journal of Computational Physics, 2019, 392:19-33.
- [46] NOH W F. CEL: a time-dependent, two-space-dimensional, coupled Eulerian-Lagrange code [R]. Livermore: Lawrence Radiation Laboratory, 1963.
- [47] KARDANI M, NAZEM M, CARTER J P, et al. Efficiency of high-order elements in large-deformation problems of geomechanics [J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(6):04014101.
- [48] HU Y, RANDOLPH M F. A practical numerical approach for large deformation problems in soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22(5):327-350.
- [49] WANG Dongdong, WANG Jiarui, WU Junchao, et al. A three-dimensional two-level gradient smoothing meshfree method for rainfall induced landslide simulations [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(2):337-352.
- [50] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method [M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- [51] 李云屹, 王睿, 张建民. 瑞利波作用下缓倾场地流滑大变形的 SPH 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7):1333-1340. (LI Yunyi, WANG Rui, ZHANG Jianmin. Numerical simulation of Rayleigh wave-induced large lateral spreading deformation in gentle sloping ground using SPH [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7):1333-1340. (in Chinese))
- [52] MAEDA K, SAKAI M. Development of seepage failure analysis procedure of granular ground with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method [J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 7:775-786.
- [53] BUI H H, FUKAGAWA R, SAKO K, et al. Slope stability

- analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH) [J]. *Géotechnique*, 2011, 61(7): 565-574.
- [54] PENG Chong, LI Shuai, WU Wei, et al. On three-dimensional SPH modelling of large-scale landslides[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 59(1): 24-39.
- [55] LI Yu, ZHONG Qiming, WU Hao, et al. Numerical simulation of landslide-generated waves based on multiphase smoothed particle hydrodynamics method with a case study of Wangjiashan landslide[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(1): 35.
- [56] HARLOW F H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics[J]. *Methods in Computational Physics*, 1964, 3: 319-343.
- [57] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [58] ALONSO E E, YERRO A, PINYOL N M. Recent developments of the material point method for the simulation of landslides[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, 26(1): 012003.
- [59] 徐小蓉. 颗粒介质流动过程的物质点法模拟及其工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [60] SOGA K, ALONSO E, YERRO A, et al. Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method[J]. *Géotechnique*, 2016, 66(3): 248-273.
- [61] PENG Xuefeng, JI Enyue, FU Zhongzhi, et al. An adaptive interpolation material point method and its application on large-deformation geotechnical problems[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 146: 104709.
- [62] BARDENHAGEN S G. Energy conservation error in the material point method for solid mechanics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2002, 180(1): 383-403.
- [63] BARDENHAGEN S G, KOBER E M. The generalized interpolation material point method[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2004, 5(6): 477-496.
- [64] YERRO A, ALONSO E E, PINYOL N M. The material point method for unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2015, 65(3): 201-217.
- [65] XU Xiaorong, JIN Feng, SUN Qicheng, et al. Three-dimensional material point method modeling of runout behavior of the Hongshiyan landslide[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(9): 1318-1337.
- [66] LI Shaofan, LIU W K. Meshfree particle methods[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [67] NGUYEN V P, RABCZUK T, BORDAS S, et al. Meshless methods: a review and computer implementation aspects[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 79(3): 763-813.
- [68] 张雄, 刘岩, 马上. 无网格法的理论及应用[J]. *力学进展*, 2009, 39(1): 1-36. (ZHANG Xiong, LIU Yan, MA Shang. Meshfree methods and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(1): 1-36. (in Chinese))
- [69] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [70] SHI Genhua, GOODMAN R E. Two dimensional discontinuous deformation analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1985, 9(6): 541-556.
- [71] ITASCA. PFC3D: particle flow code in 3 dimensions, version 4.0[R]. Minneapolis: ICG, 2008.
- [72] BOARD M. UDEC (Universal Distinct Element Code) version ICG1. 5[R]. Washington: Nuclear Regulatory Commission, 1989.
- [73] GHABOUSSI J, BARBOSA R. Three-dimensional discrete element method for granular materials[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1990, 14(7): 451-472.
- [74] JIANG Mingjing, JIANG Tao, CROSTA G B, et al. Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model[J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 79-96.
- [75] 赵川, 付成华, 邹海明, 等. 基于离散单元法的三维滑坡过程数值模拟分析[J]. *人民珠江*, 2015, 36(2): 12-15. (ZHAO Chuan, FU Chenghua, ZOU Haiming, et al. Analysis of numerical simulation of three-dimensional landslide process with discrete element method[J]. *Pearl River*, 2015, 36(2): 12-15. (in Chinese))
- [76] 胡晓波, 樊晓一, 唐俊杰. 基于离散元的高速远程滑坡运动堆积特征及能量转化研究: 以三溪村滑坡为例[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(4): 527-535. (HU Xiaobo, FAN Xiaoyi, TANG Junjie. Accumulation characteristics and energy conversion of high-speed and long-distance landslide on the basis of dem: a case study of Sanxicun landslide[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 527-535. (in Chinese))
- [77] LO C M, LIN Minglang, TANG C L, et al. A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit[J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(1/2): 22-39.
- [78] CHEN Kunting, WU Jianhong. Simulating the failure process of the Xinmo landslide using discontinuous deformation analysis[J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 269-281.

(下转第 140 页)

2022,44(4):25-30. (in Chinese))

[66] SENDROWSKI A, PASSALACQUA P. Process connectivity in a naturally prograding river delta [J]. Water Resources Research,2017,53(3):1841-1863.

[67] 吴晶晶,栗云召,高猛,等. 四种河流水系阻力下的黄河三角洲湿地生态网络构建及对比研究[J]. 湿地科学, 2018,16(4):493-501. (WU Jingjing, LI Yunzhao, GAO Meng, et al. Construction of wetland ecological networks under four kinds of resistance of rivers in the Yellow River Delta and their comparison[J]. Wetland Science,2018,16(4):493-501. (in Chinese))

[68] MITCHELL M G E, BENNETT E M, GONZALEZ A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps [J]. Ecosystems,2013,16(5):894-908.

[69] 吴玉琴,李玉凤,刘红玉,等. 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响综述[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(1):57-65. (WU Yuqin, LI Yufeng, LIU Hongyu, et al. The impact of hydrological connectivity on wetland ecosystem service function: current progresses and research gaps [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition),2020,20(1):57-65. (in Chinese))

[70] 刘佳凯. 黄河三角洲滨海湿地水文连通及其对植被结构的影响[D]. 北京:北京林业大学,2020.

[71] 韩广轩,牛振国,栾兆擎,等. 河口三角洲湿地健康生态圈构建:理论与方法[J]. 应用生态学报,2018,29(8):2787-2796. (HAN Guangxuan, NIU Zhenguo, LUAN Zhaoqin, et al. Construction of healthy wetland ecosphere in estuarine delta: theory and method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (8): 2787-2796. (in Chinese))

[72] 韩沙沙,谈广鸣,赵连军,等. 黄河入海水沙情势变化分析[J]. 中国农村水利水电,2022(2):1-5. (HAN Shasha, TAN Guangming, ZHAO Lianjun, et al. An analysis of the latest variations of incoming water and sediment in the Yellow River Delta [J]. China Rural Water and Hydropower,2022(2):1-5. (in Chinese))

[73] 韩震,宗全利,金凯,等. 黄河三角洲典型潮沟发育演变过程分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):38-44. (HAN Zhen, ZONG Quanli, JIN Kai, et al. Evolution process analysis of typical tidal creeks in the Yellow River Delta [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):38-44. (in Chinese))

[74] 易雨君,徐嘉欣,宋劫,等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. 水资源保护,2022,38(1):133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1):133-140. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-11 编辑:骆超)

+++++

(上接第55页)

[79] DONG Zhihong, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Simulation of whole movement process of Muzhuping landslide with DDA and prediction of surge [J]. Advanced Materials Research,2014,989-994:2254-2257.

[80] JIAO Yuyong, ZHANG Huanqiang, TANG Huiming, et al. Simulating the process of reservoir-impoundment-induced landslide using the extended DDA method [J]. Engineering Geology,2014,182:37-48.

[81] KATZ O, MORGAN J K, AHARONOV E, et al. Controls on the size and geometry of landslides: insights from discrete element numerical simulations [J]. Geomorphology,2014,220:104-113.

[82] LI Ji, CAO Zhixian, CUI Yifei, et al. Barrier lake formation due to landslide impacting a river: a numerical study using a double layer-averaged two-phase flow model [J]. Applied Mathematical Modelling,2020,80:574-601.

[83] 徐文杰. 滑坡涌浪流-固耦合分析方法与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(7):1420-1433. (XU Wenjie. Fluid-solid coupling method of landslide tsunamis and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(7):1420-1433. (in Chinese))

[84] 李东阳,年廷凯,吴昊,等. 滑坡-堵江-涌浪灾害链模拟的DEM-CFD耦合分析方法及其应用[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):141-149. (LI Dongyang, NIAN Tingkai, WU Hao, et al. Coupled DEM-CFD method for landslide-river blockage-impulse wave disaster chain simulation and its application [J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):141-149. (in Chinese))

[85] NIAN Tingkai, WU Hao, TAKARA K, et al. Numerical investigation on the evolution of landslide-induced river blocking using coupled DEM-CFD [J]. Computers and Geotechnics,2021,134:104101.

[86] 司鹏飞,田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6):28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(6):28-32. (in Chinese))

[87] WU Hao, SHI Anchi, NI Weida, et al. Numerical simulation on potential landslide-induced wave hazards by a novel hybrid method [J]. Engineering Geology,2024,331:107429.

(收稿日期:2025-06-30 编辑:俞云利)