

# 非结构高性能有限体积 二维数值模拟系统\*

文 / 岳志远<sup>1,2</sup> 李有为<sup>3</sup> 蒋波<sup>3</sup> 肖华<sup>1</sup>

(1 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010 ;

2 中国科学院力学研究所, 北京 100190 ;

3 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 平面二维水沙数学模型作为研究浅水流动问题主要手段之一, 数十年以来在水沙动力学领域的科学研究和工程实践活动中发挥了重要作用。但是, 目前国内所广泛应用的数学模型主要基于传统的数值计算方法, 模型适应性低、稳定性差, 且基本仍停留在源代码阶段, 其应用具有一定的局限性。本文介绍了基于全新水沙数学模拟理论与数值离散技术的平面二维水沙数值模拟系统研制方法与取得的研究成果、创新性及应用情况。

**关键词:** 水沙数值模拟系统; 水沙耦合; 可视化界面操作平台; 高性能数值离散技术; 并行化研究

DOI: 10.3772/j.issn.1009-5659.2017.06.034

“非结构高性能有限体积二维数值模拟系统”是针对目前浅水流动数学模型中存在的若干理论与技术问题, 建立理论更为完善、技术更为可靠和应用更为方便快捷的平面二维水沙数值模拟系统。系统按功能分为三大模块(图1): ①水沙耦合数学模型构建; ②并行化研究; ③可视化界面操作平台研发。其中, 水沙耦合数学模型为系统的核心计算模块, 承载着系统核心计算任务; 并行化研究力求提升数学模型计算效率; 可视化界面操作平台用于实现模型前处理的网格绘制与参数设定、模型计算的实时过程监测和后处理的数据处理与结果显示等任务, 可操作界面系统极大地提升了模型应用的便捷性。

系统的核心计算模块——水沙全耦合数学模型, 采用更为完整的二维水动力基本控制方程, 重新考虑了被传统数学模型忽略的若干水沙动力因子与相关项, 结合

严格满足质量守恒律的床沙级配调整方程, 数学模型在物理上能更准确地描述冲积河流过程中非恒定水沙条件下的非均匀沙输沙、床沙级配调整及河床变形过程。采用非结构三角网格剖分计算区域, 以更好地适应复杂的实际边界情况; 同时, 对现有非结构三角网格生成算法进行了改进, 解决了原网格模块适应性差和生成效率低的问题。采用高性能有限体积数值计算技术求解基本控制方程, 具体包括: 采用 HLLC 近似黎曼算子求解界面通量, 结合对界面变量的数据重构和预测-校正步方法, 模型具有二阶精度, 可以有效而准确地捕捉复杂的水流变化过程(图2); 采用单元斜底模型, 基于水量守恒的方法构造水位-水深关系, 保证了模型的守恒性与和谐性; 采用了隐式方法处理阻力项, 进一步保证了模型的稳定性。关于水沙耦合数学模型的相关研究, 累计发表专业期刊学术论文 17 篇<sup>[1-17]</sup>, 软件著作权登记注册 2 项<sup>[19, 20]</sup>。

系统并行化研究分别进行了针对单机多 CPU 的 OpenMP 并行方法、单机 GPU 的 OpenACC 并行方法, 以及基于 OpenMP 和 OpenACC 混合同并行方法进行研究, 并行前后模型计算结果一致, 且经参数调试与实测值符合较好(图3)。在模型计算效率方面, 经典型算例数值模拟测算, 加速比分别为 2.10、10.40 和 10.51, 能大幅提升模型计算效率、减少模型研究周期<sup>[18]</sup>。

系统可视化操作平台基于 Delphi7.0 可视化开发平台, 将数学模型前处理、中处理、后处理三大主要功能集成于一体(图4、图5), 系统经过严格测试, 稳定可靠。在前处理方面本系统对现有网格剖分算法进行了改进,

\* 科研项目“城陵矶附近蓄滞洪区洪水风险及优化调度研究”(201401021)、青年科学基金项目“分汉型明渠非均匀沙输移机理研究”(11602034)资助。

岳志远(1982年~), 博士研究生, 主要研究方向为水沙动力学模型研究与应用。

提高了网格生成的效率和质量；在参数设置方面采取 ini 控制模式，在界面设置和后台处理方面建立实时对接，与 Fortran 可执行文件无缝集成，方便用户观察程序的详细运行过程，及时查错纠偏；在后处理方面，本系统集成了模型数据采集统计、流场绘制、等值线生成、航道断面流速分布、二维演进动画、水沙质点动画和三维可变视角飞行动画等功能。可视化操作平台申请获得软件著作权登记注册 1 项 [20]。

(1) 为航道整治工程领域的前期方案研究提供技术支持

① 弥补原型观测断面数据稀疏的不足，进行不同水文条件下水流数值模拟计算，为分析重点关注区域水流特性提供数据支撑；② 进行不同流量级下水流条件变化、主流平面变化情况，并可依据水流计算成果进行有关河床冲刷的定性分析；③ 认识性实验：针对工程水道若干关注的演变节点，重新设置计算边界条件，对比分析变化前后水流改变情况，为河演分析和航道整治工程方案研究提供参考；④ 河道演变趋势性预测：进行典型水沙和系列年条件下洲滩和航槽演变趋势性数值模拟计算，深入对工程河段河道演变认识；⑤ 工程方案研究：针对不同整治工程措施、力度和平面布置形式等设置边界条件，并进行数值模拟计算，分析工程对水流、泥沙运动及滩槽演变的调整作用，为工程方案的确定提供技术支持。

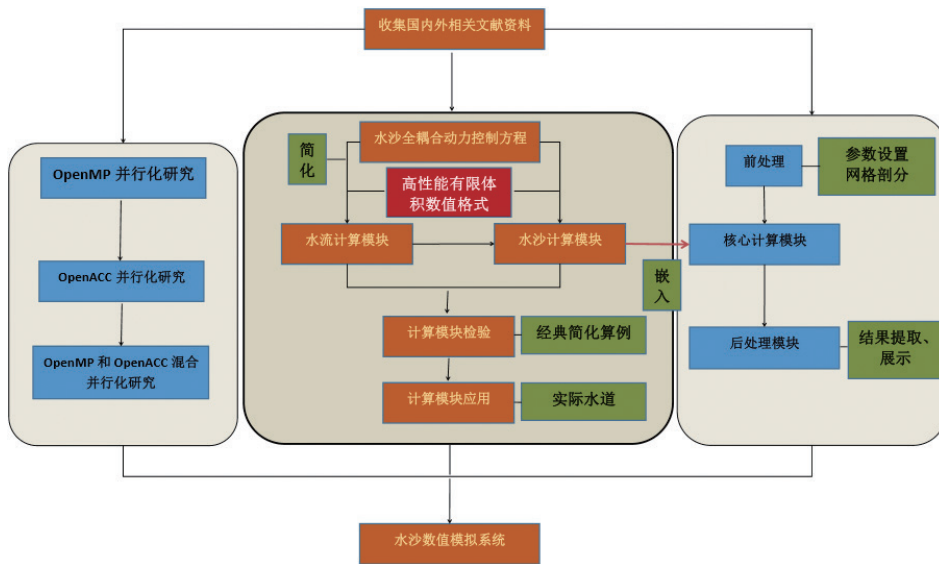


图 1 项目技术路线图

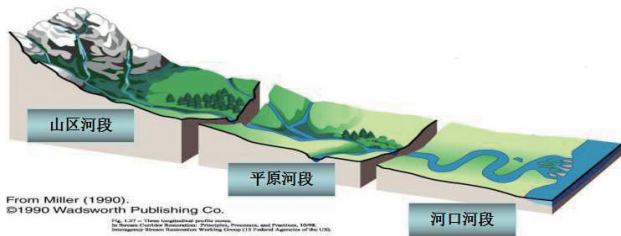


图 2 系统核心模块适用范围：(a) 山区河段，急缓流交替；(b) 平原河段，径流作为为主；(c) 潮汐河段，径流和潮流双重作用

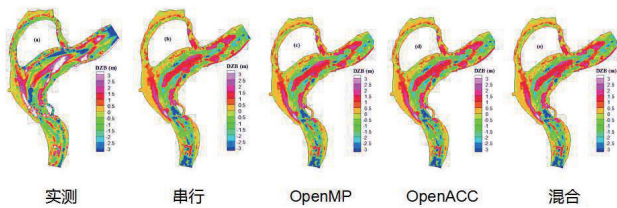


图 3 系统并行化前后典型算例河床冲刷比较

目前已应用本系统完成 10 余项科研生产课题，包括长江干线航道整治工程前期方案研究、河道踩砂论证、南水北调东线工程取水论证、锚地建设论证、航槽维护疏浚回淤分析，以及长江支流——汉江三期航道整治工程等课题。系统可用于完成如下相关研究工作：

(2) 为航道维护提供关键维护性数据

针对不同水沙条件下的航道回淤问题进行数值模拟计算，预测航道出浅部位、时间及维护量，为航道维护部门提供重要参考。

(3) 可进一步推广用于防灾、减灾领域

研究成果可进一步用于进行堤坝溃决洪水灾害、山洪灾害、城市洪水灾害等问题研究，为防灾减灾部门提供重要参考。

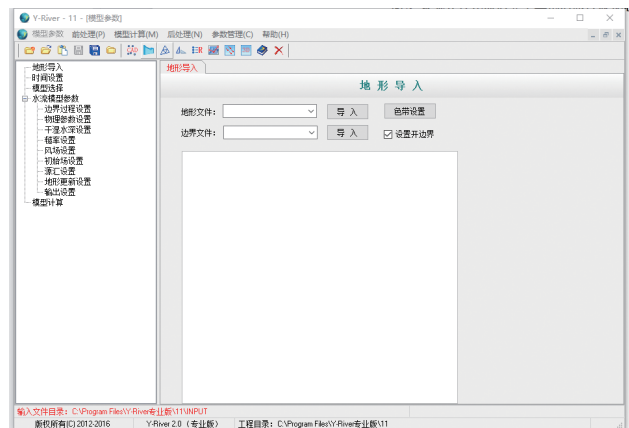


图 4 系统模型参数设置界面

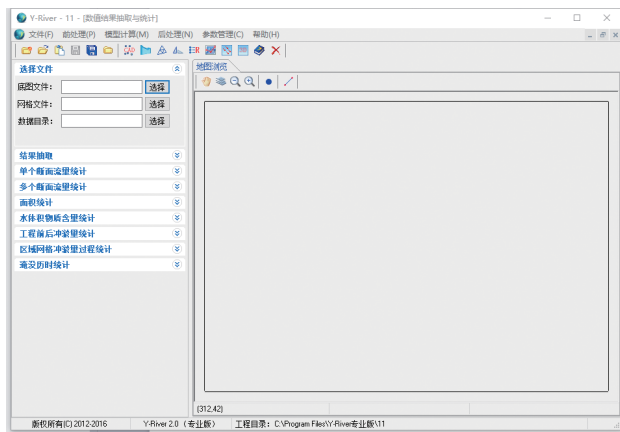


图5 系统后处理界面

研究成果已在长江流域多项航道整治工程中成功应用，在指导工程实践活动中发挥了重要的指导性作用，经济效益和社会效益显著，展现了较为广阔的应用前景。[CSTA](#)

### 参考文献

[1] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定流浅水二维有限体积数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2011, 26(3):359-367.

[2] Cao Z., Yue Z., Pender G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part II: coupled mathematical modelling. *Nat Hazards*, 2011, doi:10.1007/s11069-011-9815-7.

[3] Cao Z., Yue Z., Pender G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part I: experimental investigation. *Nat Hazards*, 2011, doi:10.1007/s11069-011-9814-8.

[4] Cao Z., Yue Z., Pender G. Flood hydraulics due to landslide dam failure. *Journal of Flood Risk Management*, 2011, 18 MAY 2011 DOI: 10.1111/j.1753-318X.2011.01099.x.

[5] 肖庆华, 岳志远, 刘怀汉, 李有为, 谭伦武, 余新明. 长江下游二维浅水非恒定流数值模拟[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5):115-121.

[6] 岳志远, 刘怀汉, 李有为, 闫军, 付中敏. 明渠交汇口水流浅水二维数学模型研究[J]. 水运工程, 2012, 471(10):77-79.

[7] 岳志远, 张妍妍, 李有为, 沈磊. 安庆河段航道整治工程数学模型的建立[J]. 水运工程, 2014, 498(12):59-63.

[8] 闫军, 刘怀汉, 岳志远, 曹志先, 郑力, 付中敏. 心滩守护工程对航道冲淤特性影响的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(5):589-596.

[9] 蒋波, 岳志远, 雷国平, 尹书冉. 基于高性能平面二维水流数学模型的计算效率研究[J]. 水运工程, 2015,

11:115-120.

[10] Peng Hu, Wei Li, Zhiguo He, Thomas Pähtz, Zhiyuan Yue. (2015). Well-balanced and flexible morphological modeling of swash hydrodynamics and sediment transport. *Coastal Engineering*, 96:27-37.

[11] Yue Z., Liu H., Li Y., Hu, P., and Zhang, Y. (2015). A well-balanced and fully coupled non-capacity model for dam-break flooding. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID:613853.

[12] Soares-Frazão S., ... , Cao Z., Huang W., ..., Yue Z., et. al. (2012). Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models. *Journal of Hydraulic Research*, DOI: 10.1080/00221686.2012.689682.

[13] Huang, W., Cao Z., Yue, Z., Pender, G. (2012). Coupled modelling of flood due to natural landslide dam breach. *Water Management*, 165(10):525-542.[SCI 收录].

[14] Huang W., Cao Z., Qi W., Pender G., Zhao K. (2015). Full 2D hydrodynamic modelling of rainfall-induced flash floods. *Journal of Mountain Science*, 12(5):1203-1218.

[15] Huang W., Cao Z., Pender G., Liu Q., and Carling P. (2015). Coupled hydrodynamic and sediment transport modelling with adaptive mesh refinement. *Science China Technological Sciences*, 58(8):1425-1438.

[16] Huang W., Cao Z., Carling P., and Pender G. (2014). Coupled 2D hydrodynamic and sediment transport modeling of megaflood due to Glacier Dam-break in Altai Mountains, Southern Siberia. *Journal of Mountain Science*, 11(6):1442-1453.

[17] Cao Z., Huang W., Pender G., Liu X. (2014). Even more destructive: cascade dam break floods. *Journal of Flood Risk Management*, 7(4):357-373.

[18] 沈磊, 李有为, 岳志远, 王领元. 长江下游太平洲捷水道数学模型方案比较分析[J]. 水运工程, 2014, 498(12):74-78.

[19] 岳志远, 李有为, 刘怀汉, 付中敏. 通用浅水二维水流计算模块 V1.0. 中华人民共和国国家版权局, 登记号: 2013SR018909. 2013.

[20] 李有为, 岳志远, 涂华云. 通用浅水二维水流计算模块 V1.0. 中华人民共和国国家版权局, 登记号: 2013SR098597. 2013.