文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4740 /（中图刊号）：715GL012

数字孪生流域水文仿真及防洪水资源“2+N”应用框架的构建与探讨

周岳琳
河北省秦皇岛市水文勘测研究中心
DOI:10.32629/eep.v9i8.3295

[摘　要] 数字孪生技术与流域水文模型的融合,推动了流域水治理从传统经验调度转向数字化模拟与精细化管控。依托流域地形、气象、水文监测等多源感知数据构建数字孪生底座,能够复现流域水文循环全过程,对径流演变、洪水演进过程开展动态仿真。防洪水资源“2+N”应用框架以防洪安全、水资源调配两大核心业务为基础,延伸覆盖水生态保护、水利工程运维、灾害预警等多项衍生业务,搭建虚实交互的流域管控体系。该体系可提高流域水文过程模拟精度,为水利工程调度、水资源统筹配置提供量化支撑,助力流域治理体系现代化建设。
[关键词] 数字孪生流域；水文仿真；防洪调度；水资源配置；2+N应用框架
中图分类号：TV87　**文献标识码**：A

Digital Twin River Basin Hydrological Simulation and Flood Control Resource "2+N" Application Research

Yueling Zhou
Hydrological Survey and Research Center of Qinhuangdao City, Hebei Province

[Abstract] The integration of digital twin technology with watershed hydrological models drives the transition from traditional empirical water management to digital simulation and precise control. By leveraging multi-source sensing data such as watershed topography, meteorology, and hydrological monitoring, a digital twin foundation can be established to replicate the entire hydrological cycle of a watershed and conduct dynamic simulations of runoff evolution and flood progression. The "2+N" application framework for flood prevention and water resource management is built on two core functions-flood safety and water resource allocation-while extending to cover derivative services like aquatic ecosystem protection, hydraulic engineering operation and maintenance, and disaster early warning, forming an interactive virtual-physical watershed management system. This system enhances the accuracy of watershed hydrological process simulation, provides quantitative support for hydraulic engineering scheduling and water resource allocation, and contributes to the modernization of watershed governance systems.
[Key words] Digital twin watershed; Hydrological simulation; Flood control scheduling; Water resource allocation; 2+N application framework

引言

近年来,全国智慧水利建设全面推进,数字孪生流域作为水利数字化转型的核心载体,依托物联网感知、大数据分析、三维建模、数值仿真等前沿技术,搭建物理流域与虚拟数字流域的实时双向映射关系,实现水文要素全时段、全空间、全要素动态模拟推演。防洪和水资源管控是流域治理的核心板块,覆盖汛期防洪减灾、常年水资源统筹利用等关键民生与安全领域。“2+N”分层应用框架依托水文仿真核心能力,整合基础刚需业务与流域治理业务,打破传统水利业务碎片化、数据孤岛化、决策被动化的发展瓶颈,进一步提升流域水安全保障能力、水资源集约利用水平与河湖生态治理效能,具备一定的工程应用价值与理论研究意义。

1 数字孪生流域水文仿真体系构建基础

1.1多源数据融合底座搭建

数字孪生流域水文仿真体系稳定运行的前提,是构建标准化、一体化、高时效的多源数据融合底座。该底座用于实现流

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4740 /（中图刊号）：715GL012

域各类异构数据的整合清洗、统一适配与动态更新。具体而言，数据底座整合流域的三维地形数字高程模型(DEM)数据、土地利用遥感监测数据、土壤类型空间分布数据、河道断面实测资料等基础地理信息，从空间层面完整刻画流域下垫面结构及地形地貌特征。同时，接入流域长序列水文监测数据，涵盖历年逐小时与逐日水位、流量、泥沙观测资料。鉴于国内大中型流域普遍具备40年以上连续实测序列，可以为模型参数率定、仿真精度校准提供可靠的数据支撑。进一步地，底座同步融合智能气象监测站点、气象预报模式输出的降雨、蒸发、气温等时序信息，实现实况监测与未来气象预判的有效衔接[1]。通过标准化数据接口完成多源数据格式统一、时序对齐、空缺补全与质量校验，可有效缓解数据异构、数据缺失、数据偏差等问题，进而保障水文仿真模型输入数据的完整性与精准性，为全维度水文动态仿真提供坚实的数据基础。

1.2耦合式水文仿真模型架构

适配数字孪生流域运行需求的耦合式水文仿真模型，以分布式物理水文模型为核心主体，融合一维河道水动力模型，实现流域坡面产汇流、土壤水运移、河道洪水演进的全过程联合仿真模拟，可以突破传统集总式模型在空间精度方面不足的问题。模型依托子流域单元网格离散化技术，将全域流域划分为若干均质计算单元，分别演算各单元降雨入渗、植被截留、坡面径流生成、地下水补给等水文环节，精准刻画不同下垫面条件下的水文响应差异。径流汇入河道水系后，通过水动力方程动态推演洪水传播、水位变化、流量演进的全过程。可根据治理需求灵活调整仿真时间步长：分钟级、小时级步长适配汛期精细化洪水模拟；日级、旬级步长适配中长期水资源评估。在秦淮河流域数字孪生模拟研究中，采用同类分布式水文一维水动力耦合架构，验证8场洪水的径流深、洪峰预报合格率达到87.5%，其他多数试点流域模型径流模拟合格率可达85%以上，洪水过程拟合度能够满足一线水利调度的工程应用标准[2]。该流域研究表明，在引入实测水文序列开展数据同化校正后，模型纳什效率系数稳定在0.718~0.975区间，达到《水文情报预报规范》B级预报标准，印证了耦合模型在数字孪生流域“四预”场景下的可靠性。

2 防洪水资源“2+N”应用框架内涵与功能定位

2.1框架核心内涵

防洪水资源“2+N”应用框架是适配数字孪生流域的一体化业务应用体系，以流域水治理为核心，构建两大基础业务与多项拓展配套业务融合的层级化应用模式。其中“2”为流域治理刚需的防洪安全保障、水资源优化调配两大核心业务，是框架体系的主体支撑，直接服务于流域水安全与水资源可持续利用；“N”为依托水文仿真核心能力延伸的多元化拓展业务，覆盖生态治理、工程运维、风险研判、水土保持等细分治理领域。框架遵循虚实联动、数模协同、业务贯通的建设理念，打通数据采集、模型仿真、情景推演、方案优选、成果落地的全业务链条，实现单一仿真成果多场景复用。相较于传统独立业务系统，该框架能够有效缓解水利业务数据壁垒与功能割裂问题，进而构建统一化、系统化、智能化的流域治理应用体系。

2.2防洪安全业务模块功能定位

防洪安全业务模块作为核心基础模块，依托高精度耦合水文仿真模型，实现多降雨情景下的洪水过程动态推演与防洪方案智能优选，从而全面提升流域汛期防洪调度科学化水平。该模块能够接收不同重现期降雨工况、短时强降雨预报数据，进而快速模拟流域全域径流变化、河道水位涨幅、洪水峰值到达时间、洪水持续时长、洪水量级等关键指标，精准识别流域高风险河段与关键防洪控制点。同时，该模块搭载多工程联合调度推演功能，可模拟水库、闸坝、堤防等水利工程不同组合调度模式下的洪水演进差异，量化比对各类调度方案的防洪效益。结合数字孪生可视化场景，可直观呈现全域洪水淹没范围、水深分布与演进路径，有效延长洪水预报预见期，为防汛研判、预案落实、应急处置预留充足时间，从而强化流域汛期安全保障能力。

2.3水资源优化调配业务模块功能定位

水资源优化调配业务模块依托长序列水文仿真成果，精准核算流域地表水、地下水动态水资源总量，从而实现流域水资源供需平衡精细化分析与最优配置。该模块整合流域年度、季度、月度生活、工业、农业及生态四类用水需求数据，结合仿真输出的逐月、逐旬径流来水数据，构建多目标水资源优化配置模型。可精准研判不同水文年型(丰水年、平水年、枯水年)下的水资源供需格局，精准识别区域缺水时段、缺水规模与缺水范围等关键指标。基于水文仿真推演结果，可优化水库蓄水调度、跨区域调水、分时用水管控等调度方案，统筹协调各类用水需求。最终，该模块能够为流域年度水资源调度计划编制、取水总量管控及节水增效治理提供可量化的决策依据，持续提升流域水资源集约利用效率，助力区域水资源可持续、高质量利用。

3 “2+N”框架拓展业务及流域实践应用路径

3.1水生态保护拓展应用

水生态保护作为“N”类核心拓展业务，依托水文仿真模型输出精细化径流过程数据，系统研判流域河道水文节律变化，科学开展生态流量管控与水生态修复评估。模型能够在不同水利工程调度方案及不同来水情景下，模拟河道基流的时空变化过程，量化分析人工调度对天然水文过程的影响程度，精准识别河道生态流量缺口时段与重点河段。结合流域多年水文监测数据与生态监测成果，可核算各河段适宜生态流量阈值与生态补水需求，在防洪、供水安全底线约束下，优化水库下泄流量与生态补水方案，保障河道基本生态用水[3]。此外，还可结合仿真数据评估水生态修复工程实施成效，动态监测河道水文条件改善情况，为流域水生态综合治理及河湖健康评价提供数据支撑，助力流域水生态系统良性循环与可持续发展。

3.2水利工程智能运维拓展应用

水利工程智能运维拓展业务依托数字孪生三维可视化场景与水文仿真动态成果，实现流域各类水利工程运行状态智能研判与精细化运维管理。该孪生场景通过搭载流域水库、闸坝、堤防、泵站等关键水利工程三维模型，实时叠加水位、渗压、位移、

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

沉降等工程安全监测数据，能够直观呈现工程运行工况与周边水文环境的时空演变特征。水文仿真系统能够预判未来洪水过程与径流变化趋势，可提前推演不同水文工况下工程承载负荷与运行状态，精准预判工程运行潜在风险[4]。依托仿真-监测联动机制，可实现工程运行风险前置预警，科学制定工程巡检、检修、养护计划，从根本上改变传统周期性运维、被动式抢修的运维管理模式，使水利工程运行安全性、稳定性与长效运维管理水平进一步提升。

3.3流域灾害风险研判拓展应用

流域灾害风险研判拓展业务以高精度洪水仿真模拟成果为基础，融合全域空间地理信息与社会经济数据，构建系统化的洪水风险研判与预警体系。模型可精准输出5年、10年、20年、50年等不同重现期洪水的淹没范围、淹没水深、淹没时长等关键结果，结合土地利用、居民聚居区、交通路网、基础设施分布数据，完成洪水风险分区、风险等级划定以及受影响范围与损失程度的综合评估。整套仿真成果可常态化支撑流域防洪风险图更新、防洪预案编制、风险管控方案制定等基础工作。汛期可结合实时降雨预报快速开展动态情景推演，提前研判洪水风险态势，辅助管理部门分级发布预警信息、落实防控举措，全面提升流域洪涝灾害前置防控与综合防灾减灾能力。

3.4流域水土保持拓展应用

流域水土保持拓展业务依托水文仿真模型联动泥沙演算模块，实现流域产流-产沙全过程协同模拟，为流域水土流失治理与水土保持管控提供量化支撑。该模型结合流域植被覆盖度、土壤侵蚀强度、地形坡度、降雨强度等关键因子，精准演算不同降雨情景下的坡面土壤流失量、河道输沙量，精准识别水土流失重点防控区域与高发时段。依托长序列仿真结果，系统分析流域水土流失时空演变规律，量化评估退耕还林、植被修复、坡面治理、沟道治理等水土保持措施的减水减沙效益[5]。同时可支撑流域水土保持规划编制、治理项目成效评估、水土流失动态监测等常态化工作，为流域水土保持综合治理提供决策支撑，持续维护流域水土资源安全与生态系统稳定性。

4 结语

数字孪生流域依托多源数据底座与耦合水文仿真模型，可以实现流域水文过程的数字化复现、动态推演与精准预判，从而在技术路径与工作机制层面突破传统流域治理范式。防洪水资源“2+N”应用框架立足流域治理实际需求，以防洪安全、水资源调配两大核心业务为根基，延伸水生态保护、工程智能运维、风险研判、水土保持等多元拓展业务，系统构建起全覆盖、多层次、智能化的流域数字化治理体系。该框架有助于缓解传统流域治理模拟精度不足、业务系统割裂及决策时效滞后等问题，能够全方位提升流域水安全保障、水资源节约集约利用能力与生态治理水平。未来可持续优化水文模型同化算法、提升极端水文情景仿真精度，不断完善“2+N”业务协同机制，推动数字孪生技术在流域智慧治理领域深度落地，助力流域水治理体系与治理能力现代化发展。

[参考文献]

[1]周磊,王继晨,徐文腾.数字孪生技术在流域水文调度与洪水预警中的应用研究[J].新发现,2025,(20):10-12.

[2]王雨洁.基于高光谱数据的大冶湖流域土壤全氮反演研究[D].华中农业大学,2023.

[3]赵韦琛,介立杰.数字孪生技术在流域水文预测中的应用研究[C]//河海大学,江苏省水利学会,浙江省水利学会,上海市水利学会.2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集,2024:649-655.

[4]王东.基于数字孪生流域模型的径流精细化模拟与旱涝预估[D].吉林大学,2023.

[5]王俊,程海云,郭生练,等.智慧流域水文预报技术研究进展与开发前景[J].人民长江,2023,54(8):1-8+59.

作者简介：

周岳琳(1997--),女,汉族,河北衡水人,研究生,技术干部,水文水资源。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.