

# 基于大模型的数字孪生流域水循环模拟与预测研究

谢玲平 蓝海宇 胡佳怡  
南昌工学院 江西 南昌 330029

**摘要:** 本文聚焦基于大模型的数字孪生流域水循环模拟与预测研究。阐述数字孪生流域理论框架, 涵盖概念模型、多源数据融合预处理、大模型与物理模型耦合等关键技术。介绍基于大模型的降水-径流、土壤水-地下水等建模方法, 以及极端事件模拟预警技术。探讨多模态大模型架构、实时动态推演引擎等创新点, 并说明模拟与预测模块开发情况, 为流域水资源管理和防灾减灾提供技术支撑。

**关键词:** 数字孪生; 大模型; 流域水循环; 深度学习

引言: 在水利行业数字化转型的浪潮下, 流域水循环的精准模拟与科学预测成为关键需求。数字孪生技术凭借其虚实映射、动态推演的优势, 为流域管理提供了新思路, 大模型凭借强大的数据处理与学习能力, 与数字孪生流域深度融合, 展现出巨大潜力。本文聚焦基于大模型的数字孪生流域水循环模拟与预测, 阐述理论框架、关键技术及模块开发, 为流域水资源管理与防灾减灾提供技术支撑。

## 1 数字孪生流域水循环理论框架与关键技术

### 1.1 数字孪生流域概念模型

数字孪生流域概念模型是对流域物理实体的数字化映射与抽象, 构建“物理流域-数字孪生体-应用服务”三位一体架构。其以流域水循环规律和人工调控特性为基础, 整合地形地貌、水文地质等核心要素, 精准刻画流域空间、水文、生态等多维度特征。通过实体与孪生体的实时映射, 动态反映物理流域状态, 支持反演、模拟与预测。模型融入管理需求, 搭建标准化接口与交互规范, 为多源数据接入、模型耦合及应用服务提供统一框架, 确保其实用性与扩展性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 多源数据融合与预处理技术

多源数据融合与预处理技术是数字孪生流域构建的核心支撑, 解决数据分散、格式异构、精度不均问题。数据来源多样, 类型丰富。预处理通过清洗、插值、滤波等去除异常值、弥补缺失数据, 统一数据格式。融合采用分层策略, 底层整合同源数据, 中层提取关键特征, 顶层生成综合评估。建立质量评估与动态更新机制, 保障数据准确性与时效性, 为建模模拟提供高质量支撑。

### 1.3 大模型与物理模型耦合方法

大模型与物理模型耦合方法, 意在融合二者长处, 提高数字孪生流域水循环模拟的精度与效率。物理模型

以水循环动力学方程为根基, 物理意义清晰, 能精准刻画降水、产流、汇流等核心过程, 不过面对复杂下垫面时适应性欠佳, 且计算成本偏高。大模型数据挖掘与非线性拟合能力出众, 可高效处理多源异构数据, 捕捉流域复杂关联, 但因缺乏物理机制约束, 结果易不合理。耦合方法采用“物理约束-数据驱动”双向融合架构, 用物理模型输出校准大模型参数, 以大模型优化物理模型初始场与边界条件; 计算时, 大模型实时预测快速变化的水文要素, 物理模型精细模拟核心物理过程。另外, 构建耦合接口与数据交互协议, 让二者在时间步长、空间尺度上协同, 形成优势互补的模拟体系。

## 2 基于大模型的数字孪生流域水循环建模方法

### 2.1 降水-径流时空预测模型

降水-径流时空预测模型以大模型为核心, 实现对流域降水与径流过程的高精度时空预测。模型输入数据涵盖历史气象观测数据、卫星降水数据、流域下垫面数据、水利工程运行数据等多源信息, 通过时空特征提取模块挖掘降水的时空分布规律、下垫面与径流的响应关系。采用时序注意力机制与空间卷积网络结合的架构, 时序维度捕捉降水与径流的长短期依赖关系, 空间维度刻画流域内地形、土壤、植被等要素的空间异质性对产汇流的影响。模型训练过程中引入物理先验知识约束, 如水量平衡原理、径流系数范围等, 避免预测结果违背物理规律。针对不同时空尺度需求, 构建多尺度预测模块, 实现短时效(小时级)精准预测、中时效(日级)趋势预测、长时效(月级)总量预测, 同时建立模型误差反馈机制, 结合实时观测数据动态更新模型参数, 提升预测稳定性。

### 2.2 土壤水-地下水动态模拟模型

土壤水-地下水动态模拟模型聚焦于流域垂向水循环过程, 利用大模型实现对土壤水含量与地下水位的动态

模拟。模型以土壤水-地下水运动的物理机制为基础,整合土壤质地数据、地下水观测孔数据、灌溉数据、蒸发蒸腾数据等多源输入<sup>[2]</sup>。采用分层模拟策略,将土壤剖面划分为不同土层,通过大模型模拟各土层水分的入渗、蒸发、下渗等过程;对地下水系统,结合水文地质结构数据,利用大模型拟合地下水补给与排泄过程,预测地下水位时空变化。模型创新引入多模态数据融合模块,将遥感反演的土壤湿度数据与地面观测数据融合,提升模型初始状态的准确性。同时构建土壤水与地下水的耦合反馈机制,模拟土壤水下渗对地下水补给量的影响以及地下水位变化对土壤水分布的反作用,实现对流域垂向水循环过程的连续动态模拟。

### 2.3 极端事件模拟与预警技术

极端事件模拟与预警技术针对洪水、干旱等极端水文事件,构建“模拟-评估-预警”一体化体系。基于大模型的极端事件模拟模块,通过历史极端事件数据训练,结合气象模式输出,生成不同重现期的极端降水、径流情景,同时融入流域地形、水利工程防洪能力等数据,模拟极端事件下的洪水演进、干旱蔓延过程。预警技术采用多指标综合预警体系,选取降水量、洪峰流量、地下水位、土壤含水量等关键指标,通过大模型建立指标与极端事件等级的映射关系,实现对极端事件发生概率、强度、影响范围的精准评估。构建实时监测-模拟预测-预警发布的闭环流程,利用物联网技术实时采集流域监测数据,驱动模型动态更新模拟结果,通过阈值判断触发不同等级预警。同时开发预警信息推送模块,结合流域内人口分布、重要设施位置等数据,精准推送预警信息与应急处置建议,为防灾减灾提供技术支撑。

## 3 关键技术与创新点

### 3.1 多模态大模型架构设计

多模态大模型架构设计突破传统单模态模型局限,实现对流域多类型数据的高效处理与融合。架构采用“模态输入-特征提取-融合交互-任务输出”的四层结构,模态输入层支持影像、文本、数值、时序等多种数据类型的并行输入,针对不同模态数据设计专属预处理模块,如影像数据的像素级特征提取、时序数据的趋势分解等。特征提取层为各模态数据配置独立的特征提取网络,通过迁移学习技术引入预训练模型参数,提升特征提取效率。融合交互层采用跨模态注意力机制与门控融合单元,建立不同模态特征间的关联映射,实现模态信息的深度融合,同时通过模态权重自适应调整机制,根据任务需求动态分配各模态数据的权重。任务输出层设计多任务学习模块,可同时支持模拟、预测、评估等

多种下游任务,通过共享特征层与专属任务层的结合,提升模型的泛化能力与执行效率,为数字孪生流域多场景应用提供核心算法支撑。

### 3.2 实时动态推演引擎

实时动态推演引擎是数字孪生流域实现“实时映射、动态模拟”的核心组件,具备高效计算、实时响应与动态更新能力。引擎采用分布式计算架构,整合高性能计算节点与边缘计算节点,通过任务调度模块实现模拟任务的负载均衡与并行计算,大幅提升推演效率。构建“数据接入-模型计算-结果输出”的流水线式处理流程,数据接入层通过标准化接口实时接收流域监测数据、气象预报数据等输入信息,经数据预处理后快速驱动模型计算<sup>[3]</sup>。模型计算层采用模块化设计,集成水循环模拟、水文预测、极端事件评估等多个子模型,支持子模型的灵活组合与动态调用。结果输出层通过实时渲染技术将推演结果以可视化形式展示,同时建立结果缓存与增量更新机制,仅更新变化数据,减少数据传输量。引擎还具备故障自诊断与容错能力,保障推演过程的连续性与稳定性,满足实时决策需求。

### 3.3 不确定性量化与风险评估

不确定性量化与风险评估技术旨在识别数字孪生流域模拟与预测过程中的不确定性来源,精准评估水文风险。不确定性量化采用分层量化策略,针对数据层面(观测误差、数据缺失)、模型层面(参数误差、结构偏差)、情景层面(边界条件波动)等不同来源,采用蒙特卡洛模拟、贝叶斯推断、敏感性分析等方法量化各环节不确定性。通过构建不确定性传递模型,分析各来源不确定性对模拟结果的影响程度,识别关键不确定性因子。风险评估基于量化结果,结合流域防洪标准、供水保障要求、生态阈值等约束条件,建立风险评估指标体系,包括洪水风险率、干旱缺水率、生态风险指数等。利用大模型构建风险等级划分模型,实现对不同情景下流域风险等级、影响范围、损失程度的精准评估,并生成风险评估报告与应对策略建议,为流域风险管理提供科学依据。

## 4 数字孪生流域水循环模拟与预测模块开发

### 4.1 模块总体架构

模块总体架构采用“分层设计、松耦合集成”的理念,构建“数据层-核心层-应用层”的三层架构体系。数据层作为基础支撑,包含数据采集、数据存储、数据服务三个子模块,通过物联网、API接口等方式采集多源数据,采用分布式数据库与数据仓库结合的方式实现数据分类存储,提供数据查询、调用、更新等标准化服务。

核心层是模块的核心计算单元,集成多模态大模型、物理模型、耦合引擎、推演引擎等关键组件,实现数据处理、模型计算、动态推演等核心功能,各组件通过标准化接口实现灵活调用与协同工作。应用层面向用户需求,设计模拟展示、预测分析、决策支持等多个功能模块,通过可视化界面为用户提供直观的结果展示与交互操作。架构还融入安全保障体系与运维管理模块,保障数据安全与系统稳定运行。

#### 4.2 水循环模拟引擎开发

水循环模拟引擎是模块核心计算组件,聚焦于实现流域水循环全过程的精准模拟。引擎集成降水-径流模拟、土壤水-地下水模拟、蒸发蒸腾模拟等多个子模块,覆盖水循环的大气、地表、土壤、地下四大圈层过程。采用“大模型+物理模型”的耦合计算框架,针对不同水文过程的特性选择适宜的计算模型,如地表径流采用物理模型计算,土壤水动态采用大模型模拟。开发高效的计算调度模块,支持串行与并行计算模式,根据模拟尺度与精度需求动态分配计算资源。构建模型参数管理模块,建立参数数据库,支持参数的查询、修改与校准,同时提供参数敏感性分析工具,辅助用户优化参数。引擎还具备模拟结果的校验与评估功能,通过与实测数据对比,计算纳什效率系数、均方根误差等指标,评估模拟精度并反馈优化。

#### 4.3 水文预测引擎开发

水文预测引擎开发以高精度、多尺度预测为目标,构建支撑流域水资源管理的预测核心。引擎整合短、中、长不同时效的预测模型,短期预测(1-3天)采用大模型实时预测,结合实时监测数据动态更新预测结果;中期预测(7-15天)采用大模型与气象模式耦合的方式,提升预测趋势的准确性;长期预测(1-3个月)结合气候模式输出与历史统计数据,实现水资源总量预测。开发预测情景设置模块,支持用户自定义降水情景、工程调度情景等,开展情景预测分析。构建预测结果评估与修正模块,通过历史预测数据与实测数据的对比分析,建立误差修正模型,对预测结果进行动态修正。引擎还具备预测结果的可视化展示与输出功能,支持以图表、报表等多种形式展示预测结果,同时提供数据接口,可与

流域管理信息系统对接,为水资源调度、防洪抗旱等决策提供预测数据支撑。

#### 4.4 虚实交互与决策支持功能

虚实交互与决策支持功能旨在实现数字孪生体与物理流域的实时交互,为流域管理提供智能化决策支撑<sup>[4]</sup>。虚实交互功能通过实时数据采集与传输,实现物理流域状态向数字孪生体的精准映射,用户可通过三维可视化界面直观查看流域地形地貌、水文要素、工程运行状态等信息,支持缩放、旋转、漫游等交互操作。开发数字孪生体的主动控制接口,支持用户在虚拟环境中设置工程调度方案,如水库泄洪、闸门调控等,通过模拟推演预测方案实施效果。决策支持功能基于模拟与预测结果,构建决策分析模型,针对水资源调度、防洪抗旱、生态保护等核心业务,提供方案生成、效果评估、优化推荐等服务。同时开发决策会商模块,支持多用户在线协同分析与方案研讨,通过数据共享与实时沟通,提升决策的科学性与效率,最终实现“监测-模拟-预测-决策”的全流程智能化支撑。

#### 结束语

基于大模型的数字孪生流域水循环模拟与预测研究,融合多学科技术,在理论框架构建、关键技术突破、模块开发应用等方面取得进展。通过多模态大模型等创新技术,提升了模拟预测精度与效率,实现虚实交互与智能决策。未来,随着技术发展,该研究有望在更多流域推广应用,进一步完善功能,为流域可持续发展提供更精准、高效的技术保障,助力水利行业数字化转型。

#### 参考文献

- [1]马强,王浩雯,张珂健,等.基于"23·7"特大洪水的永定河系数字孪生流域防洪模型构建[J].水资源保护,2025,41(3):75-82,92.
- [2]刘家宏,蒋云钟,梅超,等.数字孪生流域研究及建设进展[J].中国水利,2022(20):23-24,44.
- [3]胡春宏,郭庆超,张磊,等.数字孪生流域模型研发若干问题思考[J].中国水利,2022(20):7-10.
- [4]李建新.数字孪生海河建设及关键技术[J].中国水利,2022(9):17-20.