数字孪生技术在水质保护中的应用研究

雷 浩
河南省水利勘测设计研究有限公司，河南 郑州 450000

[摘要]数字孪生技术通过构建水体高保真虚拟镜像，为水质保护提供全链条技术支撑。梳理其理论基础与关键技术，重点分析多源数据融合、模型构建与动态更新，从实时监测、污染溯源、风险预警和全过程管理阐述典型应用。当前进展体现于观测多样化与模型融合化，但尺度不一致和域移位削弱跨水体泛化能力，不确定度尚未与政策阈值对接。据此提出完善感知体系、提升模型精度、推进多平台协同及健全保障机制等策略。

[关键词]数字孪生；水质保护；智慧水环境；水质监测；数据融合
DOI：10.33142/hst.v9i9.20653 中图分类号：TV213.4 文献标识码：A

Research on the Application of Digital Twin Technology in Water Quality Protection

LEI Hao
He'nan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: Digital twin technology provides full chain technical support for water quality protection by constructing high fidelity virtual images of water bodies. Sort out its theoretical basis and key technologies, focus on analyzing multi-source data fusion, model construction, and dynamic updates, and explain typical applications from real-time monitoring, pollution tracing, risk warning, and whole process management. The current progress is reflected in the diversification of observations and model fusion, but inconsistent scales and domain shifts weaken the ability to generalize across water bodies, and uncertainty has not yet been aligned with policy thresholds. Based on this, strategies such as improving the perception system, enhancing model accuracy, promoting multi platform collaboration, and establishing sound guarantee mechanisms are proposed.

Keywords: digital twin; water quality protection; smart water environment; water quality monitoring; data fusion

引言

随着工业化和城市化的进程加快，水环境系统受到污染排放复杂化、生态退化严重等各方面压力的影响。传统的水质保护依靠定时取样并进行离线分析，存在时效性差、空间覆盖面不足以及预测能力弱等问题。数字孪生（DigitalTwin）技术通过创建物理水体的动态虚拟映射，将实时感知数据和机理模型结合起来，可以实现水质监测指标可视化展示、变化趋势预测和提升决策支撑能力。当前全球水污染日益严重，水资源管理的需求不断上升，传统的水质监测方法由于时空分辨率低、实时性差，难以满足智慧水利高效、动态决策的要求。数字孪生技术在水质监测、预测、模拟预演等诸多应用场景都具有较大潜力，是水环境管理由经验决策向智慧化转变的主要技术途径，但是它的深度应用还存在数据治理不足、模型可信度低、业务协同难等诸多瓶颈，需要系统的理论梳理和实践总结。

1 数字孪生技术与水质保护的理论基础

数字孪生的核心思想是运用数字化的方法创建出物理实体的高保真虚拟镜像，从而达到物理空间和信息空间的实时映射以及交互的目的。水质保护领域的数字孪生理论基础可从水环境系统理论、信息物理系统理论和数据驱动建模理论三个层面加以梳理。水环境系统理论认为水体是开放复杂的系统，水质的变化是由水文、气象、生态和人类活动等因素相互作用而引起的。传统的单个维度监测和分析难以完整刻画水质变化的全部过程，数字孪生技术为此提供了全面整合的架构。信息物理系统理论给水质数字孪生赋予了“感知-传输-计算-控制”的技术架构逻辑，重视物理实体和虚拟模型之间双向的闭环反馈。数据驱动建模理论研究的是如何利用实时监测数据来动态修正和更新模型参数，使得虚拟模型可以一直逼近物理实体真实状态。从功能定位上看，水质数字孪生应该具有监测、模拟、预测、决策四个层级的能力递进，与水利行业普遍推

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

行的预报、预警、预演、预案四个预的功能体系不谋而合。数字孪生南水北调中线水质保护工程从预报、预警、预演、预案四个方面，对数字孪生技术在水质保护中起到的核心作用及优势进行了系统的探究，并且给类似的应用提供了一个工程范本。其理论依据可以归纳为，用高密度感知网络做“感官”，用多模型耦合的数字孪生体做“大脑”，用业务应用系统做“手脚”，对水质保护对象实施全生命周期的智慧管理。

2 数字孪生技术在水质保护中的关键技术支撑

2.1 水环境多源数据采集与融合技术

数据属于数字孪生的基础资源，水质保护领域数据来源具有明显的多源异构特点。根据获取方式可分为：基于物联网的固定站点在线监测数据、移动巡检和无人机遥感数据、卫星遥感反演数据、水文气象观测数据和人工采样检测数据等。多源数据融合的主要难题在于时空尺度不一样，数据格式不统一，质量参差不齐等。目前的融合技术路线大致是从数据级融合向特征级和决策级融合发展，机器学习方法在异构数据关联建模方面发挥越来越重要的作用。

数字孪生系统建立过程中，各种数据源互相补充，发挥各自的优势——在线监测保证了实时性，遥感、无人机填补了空间上的缺失，人工采样对其他数据源的误差进行校正和验证，共同形成了水环境数字孪生的数据基础。软传感器（SoftSensor）是用机器学习技术，通过浊度、电导率、溶解氧等可在线连续获取的变量，间接估计营养盐浓度、生化需氧量等需专用传感器测定或依赖模型推断、难以实时直接获取的指标的一种数据驱动方法，大大拓宽了可测参数的范围，并提高了数据采集的频率。把物理传感器、软传感器和遥感技术融合到数字孪生体系当中，已经成为改善水环境监测时空分辨率的有效手段。

2.2 水质数字孪生模型构建与动态更新技术

水质数字孪生模型是虚拟水体的主要组成，一般包含水动力模型、水质演化模型以及数据驱动模型等。水动力模型模拟水流运动和污染物迁移的过程，常用的模拟软件包括 MIKE 系列、EFDC、HEC-RAS 等。HEC-RAS 在数字孪生黄河的应用包括水流运动模拟、污染物迁移扩散模拟和水质预警等，证明了水动力-水质耦合模型在数字孪生框架下的技术可行性。模型动态更新是数字孪生与传统静态模型的区别之一，它是用数据同化技术实现的。采用卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波或者变分同化等方法，把实时监测数据不断地注入到模型中，使模型的状态变量越来越接近物理水体真实的状况。数字孪生技术依靠健全的监测体系以及数字孪生模型，达成对物理水体的即时数字化映射。目前该领域仍存在着一些共性的技术难点[1]。多源融合正从更准的监测走向可审计的治理支持，但是尺度不一致、域移位降低了跨水体、跨季节的泛化能力，不确定度大多停留在模型内部，没有和政策阈值、监管口径有效对接。由此可以看出，模型建立既要提高精度，又要对不确定度进行全面量化并转换成可以和监管阈值、管理口径对接的业务形式，以此来提高数字孪生结果的决策可用性。

3 数字孪生技术在水质保护中的应用实践

3.1 水质实时监测与变化趋势分析

在数字孪生技术支撑下，水质的实时监测打破了传统断面监测的点状约束，达成从“点”到“面”，再到“体”的监测层次的飞跃。利用数字孪生平台对各个监测点位的实时数据进行采集，管理者可以清楚地看到任何一个监测点位的多个参数时序变化情况，并且可以和历史数据相结合来做出趋势判断。物联网传感器网络同数字孪生平台相融合之后，水质参数（pH、高锰酸盐指数、温度等）的即时采集和虚拟镜像得以实现，依靠传感器和数据处理器的网络，系统对关键参数展开监测，并将数据顺利地传送到数字孪生模型当中，从而创建起水体内在状态的动态高精度虚拟仿真。数字孪生智能水质预测框架正在借助大模型、多源数据融合、深度学习等能力，持续提高水质预测的准确性。长期趋势分析依靠数字孪生平台对于历史数据的保存和挖掘功能，通过识别季节性规律、年际变化以及突变点来给水质管理策略的制订赋予数据支撑。

表 1 水质数字孪生多源数据采集方式对比

数据来源	数据类型	时空分辨率	主要优势
固定站点在线监测	常规水质参数（溶解氧、pH、氨氮等）	时间分辨率高（分钟至小时级），空间分辨率低（点状）	数据连续稳定，精度较高，易于实时传输
无人机/航测遥感	高光谱/多光谱影像、热红外	空间分辨率高（亚米至米级），时间分辨率视任务频次而定	灵活机动，可快速获取重点区域高精度数据
卫星遥感	卫星遥感	空间分辨率中等（数米至千米级），时间分辨率数天	覆盖范围广，可获取历史存档数据，适宜大范围监测
移动巡测/无人船	多参数剖面数据、底泥采样	空间分辨率视航迹而定，时间分辨率视任务频次而定	可到达固定站点难以覆盖的水域，获取垂向分布信息
人工采样检测	全参数实验室分析（含重金属、有机污染物等）	时空分辨率均低（离散点、月度/季度频次）	检测精度最高，可覆盖非常规污染指标

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

3.2 污染源识别与污染扩散模拟

污染源精准识别属于水质保护的基础性难题。数字孪生技术把污染源清单、排污口监测和水质监测数据融合起来，创建起“源-径-汇”联系模型，从而达成对污染贡献的定量追溯。系统用断面水质超标信号作为触发条件，利用水动力模型给出的流场信息，使用伴随方程或者优化反演的方法，把浓度异常沿时间和空间方向反推到可能的排放点和时间段上，然后与污染源清单进行空间匹配，从而确定排放主体。污染扩散模拟依靠水动力和水质耦合模型，对将来各种情景下的污染物输移路径、到达时间和浓度分布做可视化预演。数字孪生推动黄河水环境保护创新路径的探索显示，用高分辨率水动力水质模拟可以达到对污染物迁移扩散过程的动态可视化。模拟能力对突发性水污染事件的迅速反应有重大意义，可以很快产生污染扩散态势图，给应急决策提供直观的参照。

3.3 水环境风险预警与应急决策支持

预警属于数字孪生在水质保护中应用最广的功能之一。不同于传统的依靠固定阈值的简单报警，数字孪生驱动的预警系统把实时监测的数据同模型预测的结果融合起来，从而达成趋势型预警和事件型预警的双重目的[2]。数字孪生技术在水质保护方面最突出的优势体现在预报、预警、预演、预案这四个方面的应用，预警功能依靠实时的数据以及模型模拟的结果，在污染事件出现之前发出警报，应急决策支持功能体现为“预演”。预警触发之后，在虚拟空间里可以模拟出各种处置方案（加大生态流量、关闭排污闸门、投加药剂等）的效果，从而帮助决策者做出最好的选择。数字孪生的总体目标就是用数字化场景、智慧化模拟来实现精准化决策，同样也适用于水质保护的应急管理场景，有利于将被动应对转变为主动干预。

3.4 水质保护全过程智能化管理应用

数字孪生技术实现对水质保护的全过程赋能，即源头减排、过程监管、末端治理。源头减排环节依靠排污许可管理以及排污总量动态分配，在过程管控环节用污水处理厂、人工湿地这些治理设施的运行仿真来优化工艺参数和调度，在末端治理环节支撑治理效果评价和策略更新[3]。数字孪生驱动的黄河流域面源污染动态管控机制研究发现，把数字孪生技术应用到农业面源污染的产生、迁移、入河全过程模拟中，可以实现对污染负荷时空动态的评价以及管控策略的改进。另外数字孪生平台可以与水资源调配、水生态修复等业务系统联动起来，使水环境管理业务协同、信息共享，逐步形成数字孪生赋能水资源智能管理的系统能力。

4 数字孪生技术在水质保护中的优化策略

4.1 完善水环境监测感知体系建设

感知体系是数字孪生的数据源，它所覆盖的密度、数据质量及传输是否稳定直接影响模型的准确性以及应用的效果。目前水质监测网络仍存在监测断面布设不足、高频自动监测站点数量较少、农村和中小河流覆盖不够等问题。优化策略包括：加密重点水域的在线监测站点，推广使用基于无人机的多光谱、高光谱遥感监测技术，发挥其获取实时、高分辨率时空数据的优势，探索低功耗广域网（LoRaWAN）在偏远水域监测中的应用，AI 赋能的 LoRaWAN 智能水质监测系统可以解决农村和偏远地区监测资源不足的问题，推进环境 DNA 等新型生物监测技术的业务化应用，丰富水质评价的生物学维度。

4.2 提升数字孪生模型精度与数据质量

模型精度是数字孪生可信度的保证。优化路径应该从数据质量控制和模型结构改善两个维度推进。数据质量上要创建起包含数据采集、传输、清洗、校验全部环节的质量把控体系，同时采用物理传感器与软传感器相结合的方式，借助机器学习模型依靠容易测量的变量来推测难以测量的参数，为解决传感器布设成本高、维护频繁等问题提供了有效途径。模型结构上要重视水动力、水质和生态等多过程的耦合，采用物理约束和因果结构来提高模型的泛化能力，克服跨水体、跨季节的域移位问题。同时要重视不确定度全链路量化以及政策化表达，使模型输出可以和监管阈值、管理口径有效对接，提高数字孪生结果的决策可用性。

4.3 推进多平台协同与业务深度融合

数字孪生要嵌入到现有的水质保护管理业务体系中，目前存在着重平台建设、轻业务融合的倾向，孪生成果和实际的管理流程相脱离。优化路径主要包含三个方面：第一，推进数字孪生平台同河湖长制、排污许可等业务平台接口互通、数据共享，打通跨部门、跨层级的数据壁垒，使孪生成果在现有的管理流程中无缝调用；第二，建立统一的量化评价标准，把预警提前量、溯源可信度、成本效益改善等指标纳入考核体系，给数字孪生应用效果提供可以比较、可以复现的评判依据；第三，确定系统运维责任主体和业务流程嵌入方式，把孪生平台的功能模块与日常监管、应急处置等环节一一对应起来，保证系统建成后真正投入使用，防止建而不用。

5 结语

数字孪生技术给水质保护提供了一种从“被动应对”

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

到“主动预知”的技术支撑结构。建立水体高保真的虚拟镜像，结合实时监测、数值模拟和智能分析，数字孪生在水质实时监测、污染溯源、风险预警、全过程管理等方面有明显的应用价值。目前该领域正处在技术探索向业务落地转变的关键时期，存在感知覆盖不全面、模型泛化程度不高、平台业务脱节、保障体系不健全等诸多问题。未来的研究要集中于多源数据的高效融合同化、模型不确定度的业务化表达、数字孪生与水环境管理业务的双向适配，使数字孪生技术由“能用”迈向“好用”“管用”，真正成为智慧水环境管理的关键能力。

[参考文献]

[1]沈良燕.人工智能在水环境监测中多源信息融合技术进展[J].实验室检测,2025,3(22):206-208.
[2]靖争,曹慧群,林莉,等.数字孪生丹江口水质模型关键技术与应用[J].人民长江,2024,55(8):222-230.
[3]刘成堃,张航,靖争,等.面向数字孪生场景的三维水质推演仿真方法[J].长江科学院院报,2024,41(8):189-196.

作者简介：雷浩（1988—），男，汉族，河南信阳人，大数据中级职称，本科，毕业于河南城建学院地理信息系统专业，现从事水利信息化研究，智慧水利系统研发。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.