

面向流域防洪与生态安全的闽江下游数字孪生平台建设探索

盛 晟¹, 林康聆², 胡朝阳³, 付开雄³, 刘 阳⁴, 陈 华^{4*}

¹福州大学土木工程学院, 福建 福州

²福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州

³福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建 福州

⁴武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月29日; 录用日期: 2026年2月15日; 发布日期: 2026年4月30日

摘 要

闽江下游是福州的重要水源地, 近年来受河床下切影响, 闽江口咸潮上溯现象日益严重, 威胁多地的取水安全。数字孪生流域建设是智慧水利的重点任务, 通过将物理空间进行数字化映射及智慧化模拟, 可实现数字空间与物理流域同步仿真运行、虚实交互及迭代优化。在数字孪生流域建设背景下, 本文以闽江下游河段为研究对象, 提出了面向流域防洪与生态安全的数字孪生闽江下游的总体架构, 探讨了水情监测体系建设、模型平台建设、知识平台建设及应用平台建设等数字孪生建设关键技术, 为应对咸潮上溯及保障流域防洪与生态安全提供技术支持。

关键词

数字孪生, 咸潮, 图像测流, 流域防洪与生态安全, 闽江

An Exploration of Digital Twin Platform Development for the Lower Minjiang River toward Basin Flood Control and Ecological Security

Sheng Sheng¹, Kangling Lin², Zhaoyang Hu³, Kaixiong Fu³, Yang Liu⁴, Hua Chen^{4*}

¹College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian

²College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian

³Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd.,

作者简介: 陈华, 男, 博士, 教授, 主要从事流域智能监测与智慧管理研究。

*通讯作者 Email: chua@whu.edu.cn

文章引用: 盛晟, 林康聆, 胡朝阳, 付开雄, 刘阳, 陈华. 面向流域防洪与生态安全的闽江下游数字孪生平台建设探索[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 160-166. DOI: 10.12677/jwrr.2026.152019

Fuzhou Fujian

⁴State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: January 29, 2026; accepted: February 15, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

The lower reaches of the Minjiang River constitute an important water source for Fuzhou. In recent years, influenced by riverbed incision, saltwater intrusion from the Minjiang estuary has intensified, posing a growing threat to water intake safety in multiple areas. The construction of digital twin river basins is a key task in smart water conservancy. By digitally mapping physical spaces and enabling intelligent simulation, digital twins allow synchronous simulation of digital and physical river basins, virtual-real interaction, and iterative optimization. Within the context of digital twin river basin development, this study takes the lower reaches of the Minjiang River as the research object and proposes an overall architecture for a digital twin of the lower Minjiang River toward flood control and ecological security. Key technologies for digital twin construction are discussed, including hydrological monitoring systems, model platforms, knowledge platforms, and application platforms, providing technical support for addressing saltwater intrusion and ensuring flood control and ecological security in the river basin.

Keywords

Digital Twin, Saltwater Intrusion, Image-Based Flow Measurement, River Basin Flood Control and Ecological Security, Minjiang River

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

闽江是福建省的最大河流，也是中国东南地区重要水源涵养地，其下游为水口水库以下至入海口河段。闽江下游沿岸分布众多生活饮用水与工业用水取水口，年取水总量约占总流域取水总量的 90% 左右。闽江口属强潮陆相河口，处于咸淡水交汇区，潮型为半日潮。在枯水期时大潮为强混合型，小潮为缓混合型，盐度受潮汐强度、径流的影响而变化[1]。历史监测数据显示，在 1994 年和 2003 年的枯水大潮期，闽江口出现了明显的咸潮上溯现象。近年来，受自然因素和人类活动的影响，闽江下游河床逐年下切，闽江口咸潮入侵影响日益严峻，对长乐、福清、福州城区等地的取水安全构成威胁，也对闽江下游防洪及生态安全提出更高的要求[2]。

“十四五”时期，中国进入新发展阶段，国家对水安全保障、智慧水利建设提出了更高要求。数字孪生流域建设作为“十四五”智慧水利建设规划的重要内容，是构建水利智能业务应用体系的重要支撑[3]。以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径建设数字孪生流域，通过对物理流域全要素和水利治理管理活动全过程进行数字化映射、智慧化模拟，支持多方案优选，实现与物理流域的同步仿真运行、虚实交互、迭代优化，支撑精准化决策[4]。

为聚焦闽江下游河段防洪与生态安全的重大需求，突破实时监测与预警、咸潮动态模拟仿真、咸潮治理分析决策的技术瓶颈，本文通过融合图像识别[5]、人工智能、数值模拟等前沿科学技术，开展面向流域防洪与生态安全的数字孪生流域建设探索，实现具有针对咸潮预测-预警-预演-预案“四预”功能的智慧管理应用。

2. 面向流域防洪与生态安全的闽江下游数字孪生建设总体架构

根据数字孪生流域建设要求，结合闽江下游已有建设基础，以流域防洪与生态安全为目标的闽江下游数字孪生建设内容包括：基础设施、数字孪生平台(数据底板、模型平台、知识平台)、“四预”应用服务，总体技术架构见图 1。

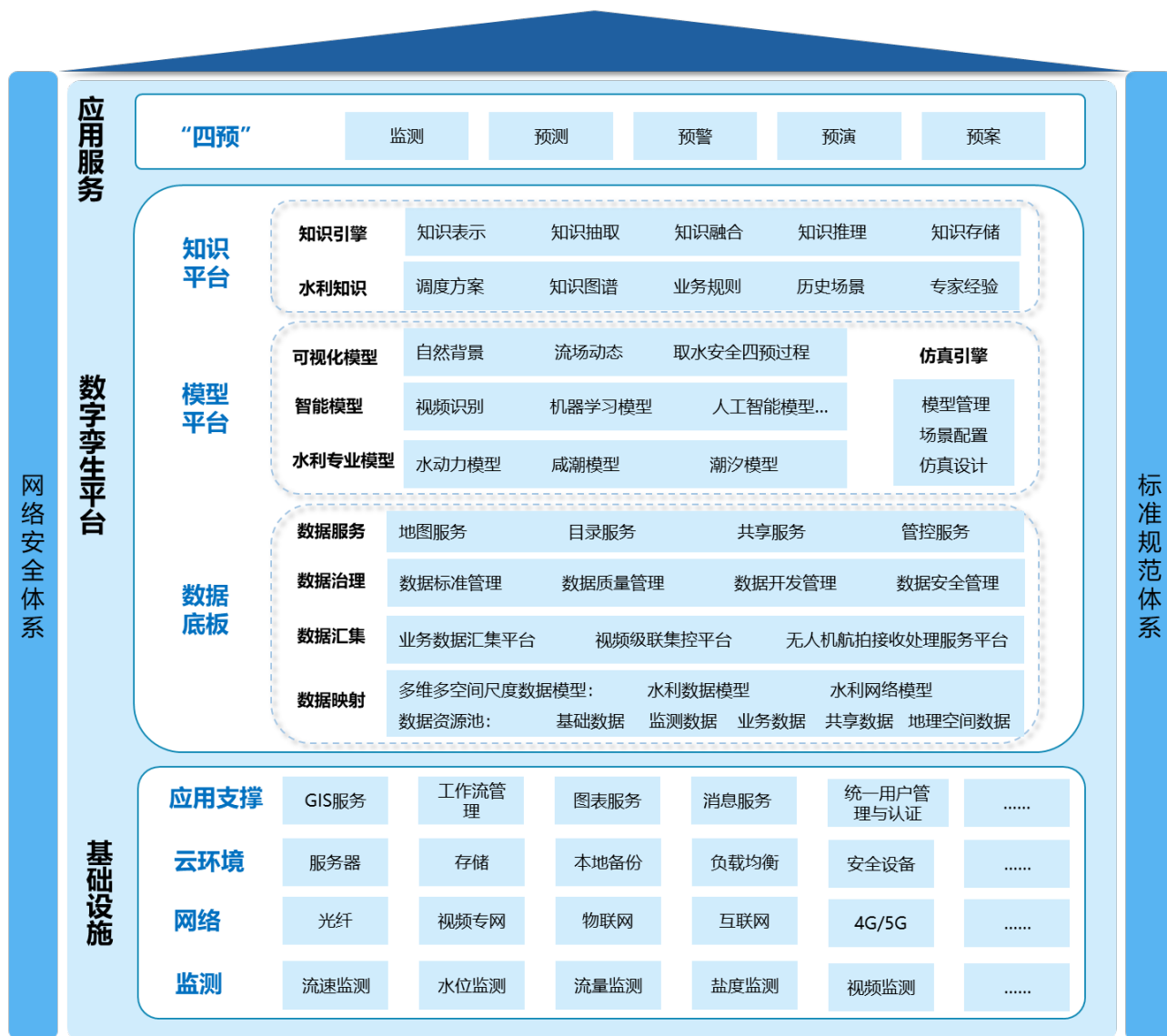


图 1. 面向流域防洪与生态安全的数字孪生闽江下游建设总体框架图

2.1. 基础设施建设

水利基础设施建设内容主要包括水利要素监测设施、水利信息传输网络、水利云建设及应用支撑等的建设。按照“整合已建、统筹在建、规范新建”的要求，加强建设以水情、咸潮监测为重点的水利信息基础设施体系，为数字孪生流域建设、流域防洪与生态安全业务应用提供完善的基础支撑。其中，重点完善水情监测体系是闽江下游基础设施建设的重点内容。现有的水情监测站点密度较低且监测频率较低，难以满足咸潮水动力的全面实时监测的要求。因此需借助图像识别测流等新型监测技术，实现重点断面流速、水位、流量的一体化实时在

线监测，形成覆盖闽江下游干支流交汇处、重点取水口等关键位置的水情监测站网。

2.2. 数字孪生平台

数字孪生平台是数字孪生流域建设的核心，旨在通过数据底板的建设，结合水利业务管理要求，构建支撑业务智能化的水利模型平台及知识平台，为全面推进智慧水利提供强有力的驱动。

2.2.1. 数据底板

数据底板建设需要融合多源数据，包括基础地理数据、监测数据、业务管理数据、其他数据等。其中基础地理数据包括遥感影像、无人机航拍、河道岸线、河道水下地形、沿河水利工程、沿河桥梁、取水口、排污口等；监测数据主要包括水情、咸潮的监测数据，如潮汐、流量、流速、水位、盐度等；业务管理数据主要包括取水管理、潮汐预报、咸潮预报、咸潮预警、咸潮治理等业务数据；其他数据主要包括其他政府部门，如水务部门、企业、取水户等相关数据。

闽江下游已建成了集水文、潮汐、咸潮监测于一体的综合监测站网。截止目前，共布设水文监测站网(见图2)，潮汐监测站点7个(见图3)，取水口7个(见图4)，盐度监测点12个(见图5)。针对水利业务管理，建成了全面覆盖水安全、水资源、水生态、水环境、水工程、水行政、水文化等的业务系统，为闽江下游防洪与生态安全提供了有效的数据底板支撑。

建设数字孪生闽江下游需要进一步完善数据底板，融合水文、气象、环保、水务、海洋等跨部门多源数据，完善水情、咸潮监测站网，借助无人机航拍、5G等现代信息技术，为数字孪生闽江下游的模型平台及知识平台建设提供数据服务。闽江下游的模型平台及知识平台建设提供数据服务。

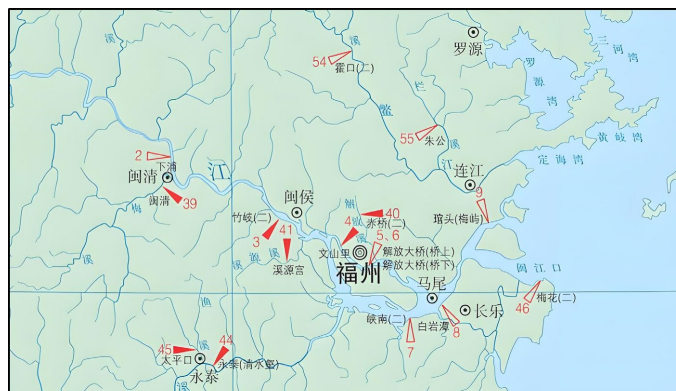


图 2. 闽江下游水文监测站点分布图



图 3. 闽江下游潮汐监测站点分布图

2.2.3. 知识平台

数字孪生闽江下游需要根据实时及未来水雨情、咸潮等数据，在水口水库的调度方案下进行咸潮模拟，并根据模拟结果对调度方案进行优化，分析其调度效果，为流域防洪与生态安全调度决策提供依据。

1) 调度方案规则库

在数字孪生闽江下游的建设中，需要对水口水库调度方案进行规则化、模型化处理。水口水库枢纽工程自1994年蓄水投运以来，经过多年的实践锻炼，积累了丰富的调度经验。在已有的水库调度方案基础上，以防洪、发电调度为主，兼顾压咸补淡、咸潮防治等目标，借鉴已有的调度研究成果和经验知识体系，采用知识图谱等信息化手段，构建水口水库调度规则库，实现水口水库调度方案数字化、规则化、结构化、数字化，支撑数字孪生闽江下游流域防洪与生态安全的智慧应用。

2) 咸潮场景库

在数字孪生闽江下游的建设中，需要对不同洪潮组合下的咸潮上溯场景进行规则化、模型化处理。在对历史同步监测资料进行概化的基础上，同时结合水口水库不同调度方案及闽江口不同潮型的情况，采用三维水动力-盐度模型进行典型工况模拟，包括“以洪为主”“以潮为主”“洪潮交替”等多种洪潮组合，构建咸潮场景库，为分析咸潮上溯影响机制及水口水库调度决策提供方案参考。

3) 水口水库调度运用知识图谱

基于水口水库下泄流量实时预测数据及潮位实时预测数据，通过驱动三维水动力-咸潮机理模型，实现咸潮上溯过程的实时预测模拟。由于预测预见期及模拟效率的限制，在水口水库实时调度决策时，需要对不同调度方案下的咸潮影响进行多工况快速模拟分析。采用机理模型进行计算模拟难以达到实时快速分析决策的需求。为了解决这个问题，本研究基于咸潮场景库模拟构建水口水库调度运用知识图谱，将水口水库调度行为、潮汐潮型等对闽江下游咸潮上溯的影响分析界定为一定的响应关系，为水口水库调度决策提供依据。

4) 咸潮治理方案库

为有效减轻咸潮上溯影响，除了采用优化调度等管理措施外，往往还需要辅以工程措施。为此，本研究提出构建闽江下游咸潮治理方案库。结合国内外咸潮治理经验，将各类工程治理措施进行规则化、模型化。利用三维水动力-盐度模型，对不同工程措施治理前后的咸潮上溯过程进行三维仿真模拟，对比分析工程措施对咸潮防治的效果，依此构建咸潮治理方案库，为闽江下游咸潮治理工程措施的选用实施提供决策支持。

3. 面向流域防洪与生态安全的闽江下游数字孪生初步应用

在构建数字孪生闽江下游的基础上，收集融合闽江下游水文、气象、河道、空间等多源信息，构建数据底板；基于图像识别技术，构建闽江下游流量、水位、流速、流场的实时监测网，实现对水情的全程把控；构建耦合三维水动力-盐度模型、潮汐预测模型、水库行为预测模型的模型平台，实现对闽江下游全河段的水动力、盐度的模拟预测；利用知识图谱、人工智能等信息技术，构建水库调度方案规则库、咸潮场景库及水库调度运用知识图谱。基于以上技术，建立面向流域防洪与生态安全的数字孪生闽江下游应用示范系统，包含了咸潮监测、预测、预警、预演、预案“四预”全过程的智慧管理体系。

1) 监测：根据实时水雨情、盐度监测信息，在一张图上直观展示闽江下游各监测点位的流量、流速、水位、流场及盐度信息。根据监测现状分析水雨情可能的变化趋势，并进一步研判咸潮上溯影响。

2) 预测：基于模型平台，实时预测水口水库下泄流量过程及闽江口潮位过程，结合三维水动力-盐度模型，实现对咸潮过程的预测。结合三维可视化技术，动态呈现咸潮入侵盐水楔的剖面形态、平面分布、垂向分布，分析咸潮入侵强度和深度等。

3) 预警：根据取水口对盐度、防洪对水位与流量的要求等，确定水位、流速、流量等各预警要素的预警级别，并合理确定预警阈值范围。基于实时预测结果，实现水情、盐度等预警在一张图上的综合展示，同时支持

预警信息的对外发布。

4) 预演：基于数字孪生闽江下游，对咸潮上溯场景进行数字化，利用咸潮模型针对已经发生的咸潮上溯情况进行精准复演。针对不同洪潮组合条件、不同治理措施的咸潮上溯情况进行情景模拟，并结合数字化场景进行三维动态推演，模拟仿真不同调度方案、不同潮型、不同治理措施下的咸潮上溯并分析相应的影响，同时支持不同场景的对比分析。通过对比分析，为水口水库调度决策、咸潮治理决策等提供依据。

5) 预案：根据预演决策的调度方案，考虑水口水库工程情况、防洪、发电等综合目标，确定水口水库运用时机、调度规则等，形成咸潮防治预案，有效减缓咸潮上溯的影响。

4. 结论

本文面向流域防洪与生态安全的需求，提出数字孪生闽江下游的总体架构。采用图像识别等新型技术实现流速、水位、流量的实时在线监测，完善河段水情监测设施；在数字底板建设基础上，构建以闽江下游水动力模型、咸潮模型、潮汐模型等为核心的模型平台；围绕闽江下游咸潮防治，建设咸潮知识图谱、调度方案库、专家经验库、调度规则库、治理方案库等知识库，形成咸潮防治知识平台，为实现具有“预报”“预警”“预演”“预案”四预功能的智慧应用体系提供决策支撑。

基金项目

福建省水利科技项目(MSK202546, MSK202602)。

参考文献

- [1] 王世场, 程永隆, 戴枫勇. 闽江下游河床演变咸潮影响数值模拟[J]. 水利科技, 2010(4): 33-35.
- [2] 黄雅丽, 胡朝阳, 刘阳, 等. 潜坝对闽江感潮河段咸潮入侵的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 180-188.
- [3] 周红卫, 程开宇, 王淑英, 等. 数字孪生钱塘江流域建设及应用[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 241-247.
- [4] 水利部. “十四五”智慧水利建设规划[R]. 北京: 水利部, 2021.
- [5] 韩予皖. 基于视频处理的河水流速监测系统设计与实现[D]. [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [6] 陶美, 逢勇. 闽江口不同调水方案对闽江下游咸潮上溯的影响研究[J]. 广东化工, 2015, 42(19): 59-60+31.
- [7] 罗毅桦. 闽江下游河道含氯度时空分布特征分析及指示意义[J]. 水利科技, 2020(1): 11-14.