

基于多技术融合实践的黄浦江堤防智能巡查 管理体系构建

姜 浩

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海市 200086)

摘 要: 为响应水利部河湖库一体化监测感知体系对平原河网城市堤防管理提出的“空天地”一体化、数字孪生赋能要求, 针对黄浦江堤防传统人工巡查的效率低、数据差等痛点, 以水利部相关行动方案为政策依据, 对标上海新版堤防技术标准, 提出“1+3+3+N”智能巡查架构。通过整合卫星遥感、无人机巡检等多技术, 初步探索构建“空天地”一体化智能巡查体系与数据全流程闭环管理机制, 并分析其实施可行性。研究表明, 该体系可提供超大城市堤防数字化运行的可复制范式, 为上海市“量子城市”建设提供数据支撑, 同时赋能城市体征垂类大模型建设。

关键词: 黄浦江; 堤防; 河湖库一体化; 无人机; 船载高清摄像头; 智能巡查; 病害; AI 识别

中图分类号: TV871

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0305-06

Construction of Intelligent Inspection and Management System for Huangpu River Embankment Based on Multi-Technology Integration Practice

JIANG Hao

(Shanghai Levee, Pump and Sluice Construction and Operation Center, Shanghai 200086, China)

Abstract: To respond to the requirements of “space-air-ground” integration and digital twin empowerment for embankment management in plain river network cities proposed by the integrated monitoring and perception system of the Ministry of Water Resources for rivers, lakes and reservoirs, addressing the pain points such as low efficiency and poor data quality of traditional manual inspection of the Huangpu River embankment, and taking the relevant action schemes of the Ministry of Water Resources as the policy basis and aligning with the new version of embankment technical standards of Shanghai, a “1+3+3+N” intelligent inspection framework is proposed. By integrating multiple technologies including satellite remote sensing and UAV inspection, a “space-air-ground” integrated intelligent inspection system and a full-process closed-loop data management mechanism are explored and constructed, and the implementation feasibility is analyzed. The research result shows that the system can provide a replicable paradigm for the digital operation of embankments in megacities, offer the data support for the construction of “Quantum City” in Shanghai, and simultaneously empower the construction of large vertical models for urban vital signs.

Keywords: Huangpu River; embankment; integration of rivers, lakes and reservoirs; unmanned aerial vehicle (UAV); shipborne high-definition camera; intelligent inspection; disease; AI recognition

0 引 言

黄浦江与苏州河作为上海最重要的两条河流, 是城市空间格局的骨架, 也是城市历史记忆与未来发展的交汇点^[1]。黄浦江自明代“黄浦夺淞”以来, 由太湖尾闾演变为城市主干航道, 现两岸一级~二级堤防总长 605 km, 直接护卫中心城区约 1 100 万常

住人口与 60% 以上的地区生产总值, 是城市防洪安全、经济运行与公共安全的生命线^[2]。苏州河曾是中国近代民族工业的发祥地, 经历“工业锈带”到“生活秀带”的转型, 与黄浦江共同构成“一江一河”世界级滨水区, 承担着金融、科创、文化、生态等复合功能, 在国家长江经济带与长三角一体化战略中具有不可替代的节点地位^[3]。

然而, 面对极端天气频发、洪潮遭遇概率增大、滨水空间高强度利用等新形势^[4], 传统“载人船舶+

收稿日期: 2025-12-30

作者简介: 姜浩(1981—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事水利工程建设管理、设施运行管理等工作。

船载无人机+人工登岸”的堤防巡查模式已难以满足超大城市精细化管理要求^[5]。现有模式存在以下结构性缺陷:(1)效率瓶颈——巡查船舶平均航速15 km/h,单次人工巡查平均里程27.8 km/日,难以实现高频次覆盖;(2)数据缺陷——依赖个人经验,隐患描述主观性强,缺乏统一坐标基准与可量化的结构化数据^[6];(3)时空盲区——夜间、大雾、大潮及台风期间停航率高,平均有效作业时间不足40%;(4)成本外部性——需投入巡查船舶4艘、专业人员24余名,年运行费用超570万元,且高风险作业带来潜在安全责任^[7]。

2025年7月,水利部印发《河湖库一体化监测感知体系建设三年行动方案》,明确提出“2027年基本建成以卫星遥感为主、视频监控和无人机为补充的监测感知网”,为堤防智慧化升级提供了顶层设计^[8-9]。同年4月,上海市发布《堤防工程安全评价及养护技术标准》,首次将巡查频次、隐患阈值、数据格式、接口协议等全流程数字化要求纳入地方强制标准,标志着黄浦江堤防巡查进入“政策—标准—技术”协同驱动的窗口期^[10]。

伴随计算机视觉、边缘计算、低空航空器与数字孪生流域技术的快速成熟^[11-14],构建“空—天—地—水”一体化智能巡查体系已成为可能^[15]。高清视频可实现毫米级形变测量;无人机集群具备30 min内抵达任意岸段的能力;AI算法对裂缝、渗漏、错台等12类典型隐患的识别准确率已超过92%^[16];5G/北斗融合网络则保证了多源数据的实时回传与厘米级定位^[17]。上述技术的耦合应用,为突破传统人工巡查的效率瓶颈、数据孤岛与决策滞后提供了系统化解决方案^[18]。

基于此,本文以黄浦江605 km堤防为研究对象,面向“发现—研判—预警—处置—反馈”全生命周期管理需求,提出一套多技术融合的智能巡查管理体系框架,重点解决:(1)多源异构数据的高精度配准与时空对齐;(2)复杂城市场景下隐患目标的弱监督学习与增量训练;(3)智能巡查成果与现有水务一体化平台的业务流耦合机制。研究成果可为超大城市河堤安全管理提供可复制的技术路径与标准范式,对提升我国滨海高密度城市防洪减灾能力具有重要示范意义。

1 国内外研究现状分析

国内在河湖智能巡检领域已呈现出流域级试

点、区域级实践与标准制定三线并进的格局^[19]。在流域层面,长江水利委员会、珠江水利委员会等机构已尝试运用无人机与高分辨率卫星遥感进行岸线巡查与水域监测^[20],但在数据跨行政区共享、业务跨部门协同方面仍存在机制性障碍,尚未形成“监测—研判—处置—反馈”的系统化闭环管理^[21]。在区域层面,雄安新区通过布设密集的物联网传感器网络对水位与堤防形变进行实时监测^[22],体现了“数字孪生城市”的先进理念,但其应用范围相对局部,且缺乏对全流域复杂水工设施联调联控的考量^[23]。上海市于2025年发布的新版《堤防工程安全评价及养护技术标准》,首次将巡查频次、隐患阈值、数据格式等全流程数字化要求纳入地方强制性标准,为智能巡查的标准化、规范化提供了关键的政策依据^[10]。

国际上,河湖智能管理同样积累了丰富经验^[24]。荷兰在莱茵河流域构建了“卫星遥感(宏观形变)+地面传感器(微观渗流)+无人机(应急详查)”的协同监测体系,并将其监测数据无缝接入“Digital Twin Rhine”水动力模型,实现了洪水的超前预警与闸坝的精准调度^[23]。美国陆军工程兵团在密西西比河管理中,广泛应用AI视频分析技术自动识别非法采砂与岸线侵占行为,并联动无人机进行现场取证与执法,提升了监管效率^[25]。日本国土交通省在利根川流域铺设了长达数百公里的光纤光栅传感网络,能够对堤防管涌等隐蔽性险情实现厘米级定位与早期预警^[26]。

然而,综合审视国内外现状可知,现有模式均存在一定局限性。国内实践在技术的全面性、管理的系统性和机制的协同性上仍有欠缺;而国际上的部分先进技术方案则因集成度低、成本高昂,难以在我国大江大河体系中全面推广复制。因此,本方案旨在汲取各方所长,紧密结合黄浦江特大型城市核心河段的复杂管理需求,构建一个技术融合、业务协同、经济可行的智能巡查体系,力求在系统性、闭环性和可推广性上实现突破。

2 黄浦江堤防智能巡查技术体系设计

2.1 指导思想与总体架构

作为上海市堤防泵闸建设运行的管理部门,中心深刻认识到黄浦江堤防安全对于城市防汛安全、经济社会稳定运行的重要性。为适应新时代堤防管理精细化、智能化要求,中心以“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”为指导思想,聚焦堤防巡查业务实际需求,以解决传统巡查方式效率低、覆盖不

全、响应滞后等痛点为导向,通过数字技术深度赋能,推动巡查模式从“人工经验驱动”向“数据智能驱动”转变,全面提升堤防隐患发现、风险预警和应急处置能力。

基于此,中心构建“1+3+3+N”黄浦江堤防智能巡查技术体系总体框架,如图1所示。

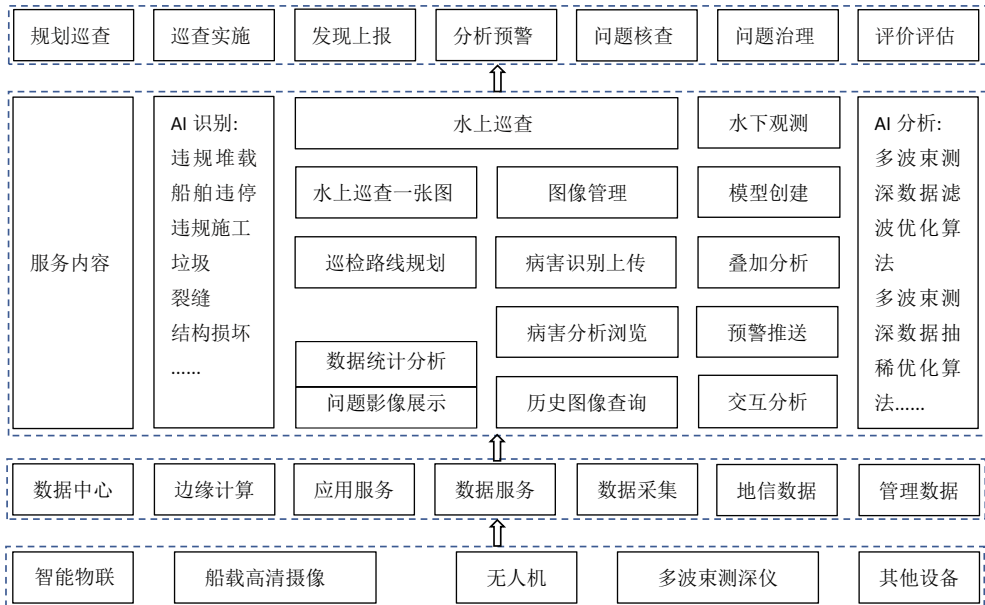


图1 黄浦江堤防智能巡查技术体系总体框架图

“1”个数字孪生底座:以黄浦江全流域为对象,集成实景三维模型、水下地形数据、堤防工程结构信息等,构建高精度、动态更新的数字孪生平台,为巡查提供空间定位、场景模拟和决策分析的基础支撑。

“3”层感知网络:构建“空—天—地”一体化监测体系,通过卫星遥感实现大范围宏观监测,无人机巡查完成重点区域细节捕捉,地表部署视频监控、地面传感器等设备进行24 h实时感知,形成“远中近”结合、“面上覆盖+点上聚焦”的立体化监测能力。

“3”级平台架构:搭建“边缘智能节点—区级中台—市级孪生流域”三级平台,边缘节点实现现场数据快速处理与初步预警,区级中台完成区域数据汇聚、分析与任务调度,市级平台统筹全局资源、模拟推演风险态势,形成“现场—区域—全局”协同联动的管理闭环。

“N”类应用场景:围绕堤防全生命周期管理需求,覆盖日常巡查、潮期专项监测、汛前/汛后隐患排查、突发事件应急响应、专项维修核验等场景,通过场景化配置感知设备和算法模型,实现“一网统管、多场景适配”的智能化巡查模式,全面提升堤防管理的精准性、时效性和科学性。

2.2 关键技术实施路径

基于“感知→传输→融合→分析→预警→处置→评估”的技术闭环路线,围绕“1+3+3+N”总体框架,构建覆盖数据采集、传输、分析、应用与评估的全链条技术体系,同步强化技术实施与业务管理的深度融合,确保智能巡查系统“能感知、会思考、快响应、可追溯”。各技术环节技术实施与管理路径设计如下:

2.2.1 数据采集层:多源感知,精准覆盖

建立“感知设备—责任区域—巡查任务”三张清单,实现设备状态在线监控、数据质量自动核查,确保采集覆盖率≥98%。多源感知设备主要包括:卫星遥感、无人机巡检、视频监控、北斗定位等。

2.2.2 数据传输层:稳定高效,全域覆盖

堤防沿岸全线,三大运营商已经部署4G/5G基站,针对已有4G/5G网络基础,沿江陆上进行RTK、边缘数据通信专项测试。保障感知数据的稳定回传,针对卫星信号薄弱区域设计优化信号增强方案。

2.2.3 数据分析层:智能融合,风险预判

建立“巡查要素识别—训练数据—整体风险模型—风险分析”全生命周期管理机制,通过市级平台定期更新算法参数,确保分析结果与实际工况匹配度。

基于AI识别模型,训练深度学习模型实现视频中巡查要素检测、违规行为分类,支持历史影像对比与自动标注。构建黄浦江三维数字孪生体,集成水动力模型与风险预警算法,模拟台风、暴雨等极端工况下的堤防稳定性,输出风险热力图。

2.2.4 应用层:场景驱动,闭环处置

推行预警—处置联动机制,自动触发预警并推送至管理人员,同步生成处置任务单,闭环管理处置进度(响应—处置—反馈—验收)。

2.2.5 闭环评估层:量化考核,持续优化

建立“月评估—季复盘—年优化”机制,针对薄弱环节定向投入资源,确保系统效能持续提升,建立关键性能评价指标。

2.2.6 安全与运维保障体系

构建“云—边—端”一体化网络安全防护体系,搭建异构容灾备份中心,确保极端情况下核心业务数据不丢失。明确数据采集、传输、存储、使用、销毁全流程的安全责任。

3 试验阶段

为推动智能巡查体系有序落地,改善“重建设、轻运营”的问题,建议采用“试点验证、迭代推广、全面深化”的三阶段实施策略,并明确各阶段的标志性成果。本文基于试点验证阶段开展的相关工作进行梳理总结。

依据“1+3+3+N”黄浦江堤防智能巡查技术体系总体框架,以无人机巡检和船载视频巡查为切入点,选取黄浦江中上游堤防作为综合应用示范区,完成空中、水上两类感知设备的部署与联调联试,应用范围如图2所示。



图2 黄浦江中上游综合示范区

无人机低空巡查试验段,面积共计约3 km²,沿江岸线长度约16 km,东至金汇港向西800 m处,西至南竹港、北竹港。船载智能巡查河段,面积共计约6 km²,沿江岸线长度26 km,东至松卫北路桥,西至辰塔路桥。上述巡查段涵盖直立式、斜坡式等多种堤防结构,且人群活动密集,具有典型代表性。

在黄浦江堤防数智化巡查体系的试验阶段,初步建立了无人机+船载高清摄像头模式的水上巡查模式。水上巡查平台已完成核心设备部署与功能验证,初步实现了技术参数与业务需求的适配。

设备部署层面,配置高清摄像头及增稳陀螺仪的巡查船,如图3所示。大疆机场3与Matrice 4TD无人机系统1套,同时集成北斗高精度定位终端1台,构建了“船载+低空”协同的立体化感知硬件基础。

智能巡查性能指标已达到预期测试目标:巡查船5 h可完成60 km岸线覆盖,无人机单次30 min巡查覆盖范围达8 km,全区域感知覆盖率≥95%;针对堤防病害识别任务,每类病害训练样本量达1 000张,试验期隐患识别准确率≥70%(稳定期目标>85%),病害识别响应时间≤1 s,隐患人工核准时间≤10 min,满足实时性与精准性的初步要求。

预警处置闭环效率方面,平台实现了预警信息自动推送,处置任务响应时间≤10 min,隐患闭环处置率>95%,初步形成了“感知—识别—预警—处置”的业务闭环,为后续全流域推广奠定了技术与运行基础。

针对堤防常见病害,开发并部署针对结构类、设施类、保洁类、违规行为4类典型隐患12种病害的AI识别算法。目前,试验阶段实现了浆砌块石挡墙掏空、破损,护坡结构勾缝脱落、开裂、破损,拍门丢失、附属设施损坏,滩地垃圾、墙前垃圾、墙前水葫芦、墙身涂鸦,墙后违规堆载、墙身违规搭靠异物,违章搭建,临河施工未穿救生衣等病害的识别,病害识别结果如图4所示。

4 预期效益与挑战

4.1 预期效益

数智化巡查相较传统人工巡查,在经济效益、管理效能、安全保障与治理示范四大维度实现质的飞跃,核心优势集中体现为:

在经济效益上,数智化巡查展现出显著的成本管控与价值放大效应。以本次试验段范围作为对比,初期建设总投资(含无人机、船载摄像头、服务器及对应的处理平台)约150万元,按5年折算后,年均分摊成本仅30万元,5年后将全面释放长期效益;年运维成本仅需21万元,较本试验段范围传统人工巡查的39.96万元成本下降47%,且无人机等核心设备为一次性投入,后续3年仅产生维护费用,长期效益实现翻倍。同时,设备更新与算法迭代的年均预算



图3 船载高清摄像头多角度画面

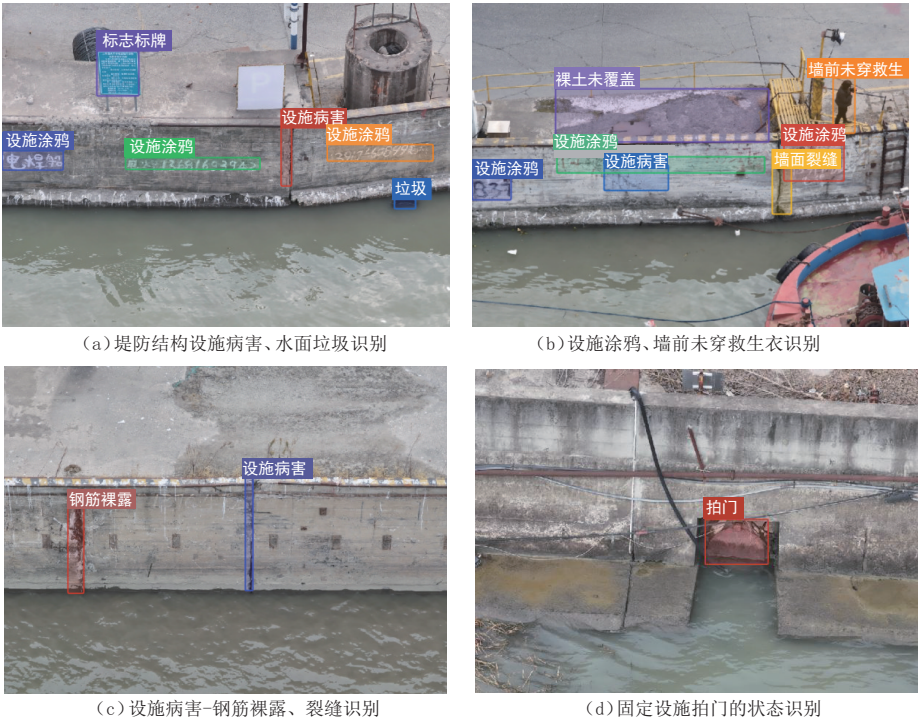


图4 堤防及其附属设施病害识别

仅8万元,成本可控性强,加之隐患早期发现比例从30%提升至80%,有效减少因隐患延误处置引发的额外经济损失,形成“低成本投入+高效率产出+低风险管控”的良性经济循环。

在管理效能上,其一实现责任追溯闭环化,依托数字孪生平台固化巡查轨迹与处置全流程,每个环节责任清晰可查,有效规避管理漏洞与潜在风险;其二推动决策模式科学化,摆脱传统“经验主导”的局限,以精准量化数据为核心支撑,为堤防工程长远规划、精准养护及资金优化配置提供可靠依据;其三促进队伍能力现代化,倒逼管理团队更新知识结构,培养出兼具水利专业素养与数字技术能力的“数字堤

防”复合型人才,夯实管理根基。

在安全保障上,数智化巡查凭借分钟级主动预警能力,大幅提升黄浦江对设施病害、潜在违规行为的快速响应与应急恢复效率,进一步筑牢城市防洪安全与公共安全底线,增强城市韧性。

在治理示范上,该体系的成功构建不仅形成技术先进、运行高效的数智化解决方案,更打造了一套可复制、可推广的数字智慧治理模式,为全国乃至全球高密度城市的水利管理提供兼具实操性与创新性的“上海方案”,助力行业治理水平整体提升。

4.2 挑战

数智化巡查在起步阶段面临多重突出困难,严

重制约体系建设质量与推进效率。其一,特定场景巡查精准度不足,水下拍门巡查受水下复杂环境干扰,堤防裂缝等隐蔽性隐患的准确识别难度较大,尚未形成成熟高效的技术解决方案;其二,数据融合存在显著壁垒,水务、规资、住建等相关部门的数据标准缺乏统一规范,跨部门数据共享机制不畅通,“数据孤岛”现象突出,导致数字孪生体构建所需的多源异构数据难以高效整合,直接影响数字孪生模型的完整性与精准度,为后续巡查分析、决策支撑埋下隐患;其三,与上海“量子城市”建设的衔接存在障碍,未能实现技术体系、数据标准与应用场景的有效对接,难以充分借力城市数字化发展红利,也制约了数智化巡查体系的整体价值释放。

5 结论与展望

本文系统构建了以“1+3+3+N”为总体架构、以“空天地”一体化技术融合为特征的黄浦江堤防智能巡查管理体系。该体系不仅是对传统巡查模式的技术性替代,更是迈向堤防治理体系和治理能力数智化的一次深刻变革。其通过实现从“人工被动巡查”到“智能主动预警”的根本性转变,全方位提升了堤防管理的精准性、时效性和科学性。

展望未来,随着技术的不断演进,本体系具有广阔的深化空间:一方面,可探索量子加密传输确保关键指令的绝对安全,集成水利垂直领域大模型用于挖掘隐患关联规律、预测中长期风险,从而实现从“态势感知”到“态势预见”的跨越;另一方面,应致力于将黄浦江的成功实践标准化、模块化,形成一套涵盖技术、管理、制度的完整输出方案,服务于长三角一体化发展战略下的流域协同治理,为我国水利事业的数字化转型贡献上海智慧。

参考文献:

- [1] 吴志强,干靓.上海“一江一河”滨水区空间治理转型与实践[J].城市规划学刊,2022(3):23-30.
- [2] 上海市水务局.黄浦江堤防保护规划(2021—2035年)[Z].上海:上海市水务局,2021.
- [3] 长江经济带发展研究院.长江经济带与长三角一体化协同发展研究报告[R].荆州:长江经济带发展研究院,2023.
- [4] IPCC. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: IPCC, 2023.
- [5] 周建中,张勇传,李超顺.智慧水利关键技术与发展趋势[J].水利学报,2022,53(5):521-533.
- [6] 陈军,王东华,李成名.数字孪生城市建设中的数据标准化问题[J].地理学报,2023,78(2):312-325.
- [7] 中国水利经济研究会.水利工程运行成本核算规范研究[R].北京:中国水利经济研究会,2024.
- [8] 水利部.河湖库一体化监测感知体系建设三年行动方案(2025—2027年)[Z].北京:水利部,2025.
- [9] 水利部信息中心.水利数字化转型技术指南(2025版)[Z].北京:水利部信息中心,2025.
- [10] DG/TJ 08—2471—2025 堤防工程安全评价及养护技术标准[S].
- [11] 李德仁,王密,胡庆武.空天地一体化遥感技术发展与应用[J].测绘学报,2022,51(1):1-15.
- [12] 王飞跃,王晓,王涛.数字孪生与平行系统:理论、方法与应用[J].自动化学报,2021,47(1):1-14.
- [13] 李飞飞,李佳,贾磊.深度学习在计算机视觉中的应用进展[J].中国科学:信息科学,2023,53(3):456-478.
- [14] 边缘计算产业联盟.边缘计算在水利行业的应用指南[Z].北京:边缘计算产业联盟,2024.
- [15] 张永生,刘军,王艳.低空经济与水利巡查融合发展技术路径[J].人民长江,2023,54(8):167-173.
- [16] 黄凯奇,王蕴红,王亮.视频目标检测算法研究进展[J].计算机学报,2022,45(7):1567-1598.
- [17] 刘经南,张小红.北斗三号全球卫星导航系统应用进展与展望[J].中国科学:地球科学,2023,53(7):1234-1256.
- [18] 水利部水利水电规划设计总院.智慧堤防建设技术导则(试行)[Z].北京:水利部水利水电规划设计总院,2024.
- [19] 罗立辉,陈白丽,段群滔.基于无人机热红外成像与深度学习的堤防渗漏检测[J]. Water Resources Research, 2025, 61(2): e2024WR037896.
- [20] Chen B L, Duan Q T, Luo L H. Real-time levee hazard detection using UAV-based thermal imaging and edge computing [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 118: 104028.
- [21] 廖志伟,王威,徐照明.数字孪生长江建设顶层设计与实施保障[J].人民长江,2026,57(2):1-6.
- [22] 雄安新区管理委员会.数字孪生雄安水利建设规划[Z].河北雄安新区:雄安新区管理委员会,2023.
- [23] Van der Meer J, Vries M, Bakker M. Digital Twin Rhine: A novel approach for integrated flood risk management[J]. Journal of Hydrology, 2023, 615: 128765.
- [24] 国际水利与环境工程学会.全球智慧水利发展报告(2024)[R].北京:国际水利与环境工程学会,2024.
- [25] Smith J, Williams R, Johnson L. AI-powered video analytics for real-time monitoring of illegal activities in river basins[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(8): 567.
- [26] Tanaka Y, Suzuki K, Yamamoto H. Fiber Bragg Grating sensor network for levee piping detection and localization[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5432.