

灌区工程数智化升级的实践分析与 发展路径思考

和玉璞, 张伟, 黄国倩, 麦紫君, 黄日超, 顾南, 齐伟

(水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院, 210029, 南京)

摘要:数字孪生灌区是数字孪生水利工程的重要组成部分,也是灌区工程数智化升级的核心实践形态,对推动新阶段灌区高质量发展具有重要意义。本文基于49处数字孪生灌区先行先试建设成效跟踪评估结果,围绕数据底板、模型库和业务应用,系统梳理灌区数智化建设的主要做法与实际成效,凝练了“天空地水工”一体化监测感知系统构建、专题模型研发和信息化平台建设三个方面的典型经验。研究表明,先行先试灌区通过整合既有设施、推进数据共享和补充建设监测站点,持续完善多要素感知网络;围绕供水保障、农业节水增效和工程安全运行等核心需求研发应用专业模型,推动模型计算、业务流程与管理决策深度融合。在此基础上,依据灌溉方式、水源类型、地理区位和业务需求,提出自流灌溉、提水灌溉、混合式灌溉、圩坑和管道灌溉五类灌区数字孪生建设技术模式,明确不同类型灌区在业务平台、感知体系和专题模型方面的建设重点。结合当前灌区现代化建设需求,提出坚持需求牵引、夯实数据底板、强化模型适配、融合节水增效、强化AI融合等发展路径建议,以期为“十五五”时期全国灌区工程数智化升级提供参考。

关键词:灌区;数字孪生;数智化升级;建设技术模式;人工智能

Digital and intelligent upgrading of irrigation district engineering: practice analysis and development pathway reflections

HE Yupu, ZHANG Wei, HUANG Guoqing, MAI Zijun, HUANG Richao, GU Nan, QI Wei

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing 210029, China)

Abstract: Digital twin irrigation districts are an important component of digital twin water conservancy projects and a core practical form of the digital and intelligent upgrading of irrigation district engineering, playing an important role in promoting the high-quality development of irrigation districts in the new stage. Based on the tracking and evaluation results of 49 pilot digital twin irrigation districts, this paper systematically reviews their major practices and practical achievements in terms of data foundations, model libraries, and business applications, and summarizes typical experience in three aspects: constructing a sky-space-land-water-project integrated monitoring and perception system, developing specialized models, and establishing information platforms. The results show that the pilot irrigation districts have continuously improved their multi-element sensing networks by integrating existing facilities, promoting data sharing, and adding monitoring stations. Specialized models have been developed and applied to meet the core needs of water-supply security, agricultural water conservation and efficiency improvement, and safe

收稿日期:2026-06-24 修回日期:2026-08-28

作者简介:和玉璞,农村水利研究所副所长,正高级工程师,主要从事现代化灌区建设与管理、农田高效灌溉排水技术及环境效益研究。E-mail: heyupu28@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42501504);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y925015、Y925014);江苏省自然科学基金资助项目(BK20240282)。

engineering operation, facilitating the deep integration of model computation, business processes, and management decision-making. Based on irrigation methods, water source types, geographical locations, and business needs, technical modes for digital twin construction are proposed for five types of irrigation districts: gravity-fed irrigation, pumping irrigation, mixed irrigation, polder irrigation, and pipeline irrigation. The construction priorities for business platforms, sensing systems, and specialized models are identified for each type of irrigation district. Furthermore, in light of the current needs for modernizing irrigation districts, development pathways are proposed, including adhering to demand-driven development, consolidating data foundations, enhancing model adaptability, integrating water conservation and efficiency improvement, and strengthening AI integration, to provide a reference for the digital and intelligent upgrading of irrigation district projects nationwide during the 15th Five-Year Plan period.

Keywords: irrigation district; digital twin; digital and intelligent upgrading; construction technical mode; artificial intelligence

中图分类号: TV+S27+TP39 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)17-0060-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.17.010

党的十八大以来,习近平总书记站在实现中华民族伟大复兴永续发展的战略高度,就治水事业作出一系列重要指示,为保障国家水安全提供了根本遵循。水利部贯彻习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路、关于治水重要论述和保障国家粮食安全重要讲话精神,按照智慧水利建设顶层设计及相关规划部署要求,自2022年开始遴选了49处具有典型示范意义的大中型灌区,开展数字孪生先行先试建设。

数字孪生灌区是智慧水利建设的重要内容,也是灌区工程数智化升级的集中体现和核心路径之一,对提升灌区水资源节约集约利用水平、工程安全运行水平具有重要意义。我国灌区建设与管理技术经历了长期发展,信息化水平持续提升,为以数字孪生为代表的数智化升级奠定了坚实基础。先行先试工作按照“需求牵引、应用至上、数智赋能、提升能力”的总体要求,经过2~3年实践探索,形成了一批可复制、可推广的应用成果。当前,亟待系统梳理数字孪生灌区先行先试的主要做法与建设成效,提炼可复制、可推广的建设模式与应用经验,提出下一步发展建议,以期为“十五五”时期数字孪生水利体系建设与灌区工程数智化升级提供参考。

一、数字孪生灌区先行先试典型做法

为推动数字孪生灌区先行先试建设,水利部强化顶层设计和统筹推进,出台数字孪生灌区建设技术指南,遴选发布13项数字孪生灌区模型推荐清单,组织召开现场会、视频会和专题培训班,依托行业学会协会等平台广泛开展技术交流与经验推广,打造了一批“管用、实用、好用”的数字孪生灌区。

1. 织密“天空地水工”一体化监测感知系统

数据底板是数字孪生灌区的算据基础。先行先试灌区坚持“整合已建、统筹在建、规范新建”的原则,综合应用卫星遥感、无人机、人工智能(AI)等新技术,系统构建灌区“天空地水工”一体化监测感知系统。累计建设共享监测感知设备1.2万余套,对1万多处闸门及泵站实施自动化改造,形成覆盖水情、工情、农情、气象等全要素的信息感知网络,筑牢了满足模型计算高精度、高频率、连续性要求的数据底板。

(1) “利旧”整合,发挥既有设施效能

先行先试灌区最大限度发挥已建设备及数据平台效能,避免重复建设。例如,山东位山灌区依托原有信息化建设基础,全面整合既有视频监控、闸门远程控制及测流设备,同时结合灌区知识图谱,支撑模型构建和应用。

(2) “共享”协同,打通跨部门数据壁垒

先行先试灌区积极推进跨层级、跨部门数据共享,与气象、农业农村等部门建立协同共享机制,提升数据资源利用水平。例如,黑龙江青龙山灌区依托北大荒集团建设的数字北大荒和数字农服App,融合农情、气象及生产管理数据,实现灌区管理服务与农业生产需求深度融合,管理效率提升60%以上。

(3) “新建”补缺,提升全要素感知能力

针对业务应用需求和感知薄弱环节,先行先试灌区加快补齐监测短板,共计新建3100余个水情站点、460余个农情站点、1100余个工情站点、190余个气象站点及3800余个视频监控点位。例如,甘肃疏勒河流域昌马、双塔、花海灌区新建690个计量监测点,升级285孔闸门,改造田间管网并配套206套电磁阀,骨干渠道引水口、分

水口和田间斗口自动化计量监测覆盖率达95%以上。

2. 打造并应用支撑灌区核心业务的模型库

专题模型是数字孪生灌区算法的核心载体，是实现从数据感知到业务决策的关键纽带。先行先试灌区围绕农业节水增效、供水保障、工程安全运行等核心需求，研发建设来水预报、需水预测、水量调配、水动力学模拟、泵站优化调度等模型160余个，通过业务实践持续迭代优化，推动数学模拟过程和物理过程的“高保真”映射。

(1) 构建支撑灌区业务的全流程模型库

围绕灌区水资源优化配置、抗旱保灌、农田排涝、节能降耗和工程安全运行等典型场景，以业务需求为牵引，构建覆盖预报、分析、决策、调度、评价的模型体系，推动灌区管理由经验驱动向模型驱动转变。

(2) 推动模型计算结果支撑业务决策

融合遥感监测、水情、工情、农情及历史运行等多源数据，持续优化模型参数和边界条件，提升需水预测、来水预报、工程调度等模型的适用性与可靠性。将模型预测、模拟与优化能力深度融入灌区供水调度、灌溉决策、防汛排涝和工程运维等业务环节，实现方案智能生成、过程动态推演与效果量化评价，全面提升灌区科学决策水平。

3. 开发以效用为导向的信息化平台

数字孪生灌区建设坚持效用导向，将数据底板、模型库等建设与业务流程深度融合，促进管理服务数字化和用户服务便捷化，不断提升灌区治理能力和服务水平。

(1) 推动业务流程数字化

灌区依托数字孪生平台，实现用水申请、供水调度、工程巡检等业务在线流转和闭环管理，推动传统人工管理向数字化、标准化管理转变。同时积极拓展服务场景，将服务延伸至田间地头，为用水户提供在线申请、灌溉指导、信息查询等便民服务。例如，湖北漳河灌区打造“水超市”模式，农户通过手机即可远程发起用水申请，实现“用户下单、系统派水”的按需供水服务，人工核查工作量减少60%以上。

(2) 促进管理机制完善与治理能力提升

数字孪生平台为水资源精细化管理、管理机制创新提供了重要支撑。例如，陕西交口抽渭灌区依托数字孪生平台打破50余年“一贯制”的线下单一收费模式，落实“分类水价、超定额累进加价、季节丰枯水价”相关要求，全面实现线上收费，水费计收透明度显著增强，计收率达100%，亩均浇地费用下降9元。

二、数字孪生灌区建设技术模式

基于灌溉方式、水源类型、地理区位等关键要素，结合灌区业务需求特点，本文归纳了五类数字孪生灌区建设技术模式（见表1）。其中，自流灌溉灌区、提水灌溉灌区、混合式灌溉灌区为主要类型，圩垸灌区、管道灌溉灌区为区域特色类型。

1. 自流灌溉灌区

自流灌溉灌区是我国大中型灌区的主要类型，骨干渠系较长，工程调度与巡检任务重，工程管理是灌区

表1 数字孪生灌区建设技术模式分类

灌区类型		特点	核心业务需求	业务平台	专题模型	立体感知控制体系
自流灌溉灌区	南方自流灌溉灌区	河流、水库供水，渠系拓扑复杂，节点众多	水资源优化配置与工程调度等	用水计划制定及执行、水量分配、计量收费、闸门控制与工程巡检等	来水预报、需水预测、水资源优化配置等模型	水源水位、渠首及分水口流量、关键闸站及渠道工况等
	北方自流灌溉灌区	水源相对单一，节水需求突出，渠系结构清晰	精准灌溉决策与节水管理等	作物需水分析、灌溉决策、用水计划制定及执行、计量收费等	作物种植结构提取及需水预报、灌溉决策、水量平衡等模型	分水口流量、交接断面水量、土壤墒情、作物种植结构等
提水灌溉灌区		多级泵站输水，能耗高，运行成本高，部分水源含沙量大	节能降耗与泵站群优化运行等	能耗监测、泵站控制、工程安全预警及设备维护管理等	泵站群优化调度、能耗分析、设备健康评估、作物种植结构提取等模型	水位、流量、含沙量、机组工况、能耗参数等
混合式灌溉灌区	多水源引提结合灌区	蓄、引、提、调多水源联合，满足多目标供水	多目标水资源优化配置等	水量调配、工程调度、防汛抗旱等	供需水预报、水资源优化配置、关键渠道防汛调度等模型	取水口流量、输水节点水情、闸门控制状态、农情遥感、水源蓄水等
	引黄井渠结合灌区	地表水与地下水互补协调，复合灌溉	地表水-地下水协同调控等	地下水水位监测、计量收费、旱情监测预警等	考虑非充分灌溉的作物需水预报、地表水-地下水联合调度等模型	地下水水位、机井分布及取水量、土壤墒情等
圩垸灌区		灌排一体化，兼具灌溉与排涝功能	防洪排涝与骨干渠系水位调控等	来水预报、工程巡检、闸泵联控等	来水预报、闸泵联合调度、农田涝渍风险评估等模型	干支渠及低洼区水位、作物根层墒情、闸泵运行状态与水毁情况等
管道灌溉灌区		管网输配水，自动化与数字化程度高	管网安全运行与精准配水等	管网运维、安全预警、用水精准计量等	管网运行安全预警、水力、来水预报等模型	管网压力、流量、阀门状态等

核心业务。业务平台应关注闸门自动控制、工程巡检和维养等功能;专题模型建议结合图像处理技术识别人员入侵、水面漂浮物、渠道破损等;立体感知控制体系建设应在关键工程节点布设视频监控,在险工险段部署无人机巡检系统,在骨干渠系的重要节制闸、主要分水口门等部位进行闸站自动化建设。例如,河南红旗渠灌区经70.6 km傍山总干渠引山西境内浊漳河水至河南林州,巡检任务重,通过配置3套无人机自动巡检系统覆盖干渠险工险段,有效降低了巡检强度。

自流灌溉灌区在工程管理需求上具有相似性,但由于水资源和工程条件差异,南北方灌区用水管理业务侧重点不一。

(1) 南方自流灌溉灌区

南方自流灌溉灌区渠系拓扑复杂,数字孪生灌区建设应以服务骨干工程的水资源优化配置为核心。业务平台突出用水计划制定、水量分配、计量收费等功能。专题模型围绕水资源优化配置展开,常规调度以灌水需求、降雨预报、供水量为输入,以供水满足度、工程运行次数、输水损失为优化目标,生成水量分配方案;精细调度结合渠道水动力学预演水位流量变化过程,生成闸门启闭方案。以水库为水源时,建议构建机理模型开展来水预报,为库渠联合调度提供边界条件;以河流为水源时,建议基于来水趋势预报确定可供水量。立体感知控制体系建设突出水情和工情,重点监测水源水位、渠首及分水口流量、闸站运行状况等。例如,江西赣抚平原灌区考虑灌溉需求优先级,选择闸门操作次数少、渠道输水平稳、输水损失小作为优化目标,生成灌区未来7日灌溉方案与19处关键闸门的联合调度指令,实现跨南昌、宜春、抚州三市九县区的协同配水。

(2) 北方自流灌溉灌区

北方地区的自流灌溉灌区,半湿润区以补充灌溉为主,干旱区以农业灌溉为主,灌区水源单一、节水要求高、渠系空间拓扑相对清晰。数字孪生灌区建设应以农业节水增效为核心,支撑灌区需水预测与灌溉决策。业务平台应突出灌溉决策、用水计划制定、计量收费、工程巡检等功能。专题模型重点围绕灌溉决策展开:简单场景下,提取作物种植结构并结合灌溉制度分片估算灌水量;复杂场景下,可利用作物系数法计算需水量,再结合水量平衡进行灌溉决策。立体感知控制体系建设应突出水情和农情,重点监测分水口和交接断面水量,以及不同土壤质地与管理分区的墒情。例如,内蒙古河套灌区(永济灌域)结合天气预报和当地

作物系数试验,根据水量平衡原理估算旬尺度作物净灌溉需水量,用以协助制定5日、10日供水计划。

2. 提水灌溉灌区

提水灌溉灌区主要分布于黄河上中游、汾渭平原及南方平原河网提水区,具有高能耗、高运行成本特征,部分沿黄灌区还面临水源含沙量高导致的泵站磨损与频繁维护问题。数字孪生灌区建设应以节能降耗为核心,突出泵站群协同调度与多级水量调配需求。业务平台应具备能耗监测、泵站智能控制、工程安全预警及维护管理等功能。专题模型以泵站集群能耗或效率为优化目标,结合泥沙磨损预测模型评估设备寿命,制定维护计划。立体感知控制体系建设突出水情和工情,重点监测渠道水位、流量、含沙量及机组工况与能耗。例如,山西大禹渡灌区针对高扬程、高泥沙、高耗电特性,通过应用泵站机组调度决策模型解决了协同性不足与运行效率偏低问题,实现节能降耗5%以上。

3. 混合式灌溉灌区

混合式灌溉灌区主要包括多水源引提结合灌区、引黄井渠结合灌区。

(1) 多水源引提结合灌区

该类型灌区主要通过“蓄、引、提、调”多源配置满足农业、城乡、生态等多目标供水需求,数字孪生灌区建设应以不同供需情景下水资源优化配置为核心。业务平台突出水量分配、工程调度、防汛抗旱等功能。专题模型围绕供需水预报、水资源优化配置与旱涝灾害预警展开。立体感知控制体系建设重点完善取水口和输水节点的水情监测与闸门自动控制设施,并利用遥感技术获取水源蓄水及作物需水信息。例如,安徽淠史杭灌区通过反演各级渠系水利用系数生成配水预案,配水时间由1~2周缩至分钟级,并构建渠道防汛调度模型,支撑2024年7月9日—14日的科学调度泄洪。

(2) 引黄井渠结合灌区

该类型灌区以渠系地表水与井群地下水互补协调为特征,数字孪生灌区建设应以地表水-地下水联合运用为核心。业务平台突出计量收费、地表水情及地下水水位监测、旱情预警等功能。专题模型需建立考虑非充分灌溉的作物需水预报、地表水-地下水联合调度模型等。立体感知控制体系重点监测地下水水位、机井取水量,并按土壤质地与灌溉水源分区监测土壤墒情、作物种植类型等。例如,山东豆腐窝灌区通过共享已有22处地表水和地下水水位数据以及1780处机井取水数据,构建以地下水可开采量为约束的水资源

优化配置调度模型,量化各灌片喷灌、滴灌、管灌区的灌溉需水量,科学配置地下水供水量和渠道引黄水量。

4. 圩垸灌区

圩垸灌区主要分布于长江中下游圩垸区、里下河流域、杭嘉湖平原及北方滨海区域等,骨干渠系兼具灌溉与排涝功能。数字孪生灌区建设应以骨干渠系水位调控为核心,满足防汛除涝需求。业务平台突出来水预报、工程巡检和闸泵联控等。专题模型应建立来水预报模型,预测预警来水量及水位超限情况,并酌情建设闸泵联合调度与农田涝渍风险评估模型。立体感知控制体系突出水情、农情和工情,重点监测干支渠及低洼区水位、作物根层墒情及闸泵运行状态。例如,浙江上塘河灌区具有“两源四首六排”的灌排体系,通过耦合田间产汇流与排水模型,构建输配水闸群联合调度模型,预演田间淹没灾情,提前识别内涝风险,成功支撑灌区远程自动化调度500余次,平均预排水量占整个暴雨期间排涝量的16.4%。

5. 管道灌溉灌区

管道灌溉灌区主要依托水库、河流自压或加压后经管网输水至田间,主要分布于南方丘陵区 and 北方干旱山区,取水、输水、配水自动化程度较高。数字孪生灌区建设应以管网运行安全为核心。业务平台突出管网安全预警、维护管理与用水计量等功能。专题模型建立管网安全预警模型,模拟不同供需情景下水压与流量状态,同时因多以水库为水源自压输水,建议构建来水预报模型。立体感知控制体系重点监测管网压力、流量及阀门状态,结合闸阀远程控制实现关键节点调控。例如,新疆大河沿子灌区共建83处管道流量计和208处闸阀控制站点,通过对101条管道及197处闸阀压力进行实时监测和远程调控,实现管网安全运行预警。

三、灌区工程数智化升级路径建议

面向“十五五”时期“构建数字孪生水利体系取得决定性进展”的战略目标,灌区工程数智化升级需在现有基础上进一步聚焦问题、精准发力。立足功能定位、数据底板、专题模型和业务平台等建设实际,提出以下五方面路径建议。

1. 坚持需求牵引,精准定位功能

坚持把服务灌区主责主业作为数智化升级的出发点和落脚点,围绕灌区用水及工程管理等核心业务、水旱灾害防御等底线任务,重点引导灌区在谋划信息化建设时深化需求研判,突出问题导向和效益导向,从影响灌区管理效能提升的关键环节入手,因地制宜、量力而行、

系统谋划、分步实施,根据对应类型灌区数字孪生建设技术模式进行适配选择,在破解灌区运行管理、效益发挥堵点难点的基础上,进一步明确灌区工程数智化升级在业务平台、专题模型及感知体系等方面的建设重点。

2. 夯实数据底板,筑牢算据根基

针对灌区工程静态及动态监测数据精度不足、多源数据汇聚口径不一等问题,须按照完善“天空地水工”一体化监测感知系统的要求,充分利用数字孪生流域、数字孪生水网和数字孪生工程等建设成果,统筹灌区渠系建筑物、水源、田间等全域资源开展多维度数据归集汇聚工作。在做好灌区数据汇聚工作的基础上,系统性强化数据标准化治理、数据融合共享,建立覆盖数据采集、传输、清洗、存储、融合、更新与维护的全生命周期管理机制,配套出台灌区数据质量核查、数据治理、数据安全保密、数据共享交换等专项标准规范,从制度层面保障数据的真实性、准确性、完整性、可用性 & 可追溯性。此外,加快轻量化、智能化监测技术装备的研发与规模化落地应用,同时有效统筹卫星遥感、低空无人机、视频监控、传感设备等多类感知手段,推动实现灌区全覆盖、全空间、全要素、全天候监测感知。

3. 强化模型适配,提升算法效能

灌区工程模型库建设要避免“大而全”的模型堆叠,聚焦灌区核心业务需求,持续完善来水预报、需水预测、水量调配、工程安全监测等模型,切实服务灌区“四预”(预报、预警、预演、预案)功能。注重构建模型库的精度验证和应用实效,以机理模型为核心,加强监测数据与数学模型耦合联动,强化“正向—逆向—正向”推演工作,建立“数据更新—再率定—再验证”的螺旋式持续迭代机制。同步建立模型研发、率定、验证、验收、更新的全过程技术标准,确保模型输入输出接口的规范性、计算过程的透明性与成果的可解释性,同时通过实地验证、多方案比选等方式,以用促建、以用促迭代,持续提升模型实用效能,确保数学模拟过程和物理过程实现“高保真”。此外,行业管理单位应围绕模型库研发等,加快创新链、产业链、应用链精准对接、融合发展,积极促进科研院所、高校及企业等与灌区深度合作,依托数据交换、服务调用等实现模型库共建共享,推动形成服务灌区管理的“数据—模型—场景应用”良性闭环。

4. 融合节水增效,支撑机制改革

坚持技术创新与机制改革双轮驱动,深度融合农业节水增效政策制度体系。将数智化技术手段作为落实科学灌溉制度体系、用水计量监测体系、农业水价政策体系、

节水市场制度体系、节水技术及服务体系的有效支撑,重点引导灌区结合数智化升级提升用水计划制定、水量分配及定额管理、科学灌溉指导等服务能力。统筹考虑系统运行维护需求,探索建立稳定可持续的运维保障机制,加强复合型人才培养和队伍建设,提升灌区供水服务能力。

5. 强化AI融合,赋能灌区升级

积极探索AI技术与灌区业务场景的深度融合。在数据层,利用AI提升遥感影像解译等数据处理效率与精度,破解多源异构数据智能同化与时空配准难题,筑牢高质量数据底座;在知识层,发展物理机理与数据驱动的混合模型,以机理模型为AI提供科学边界,以AI为机理模型提升计算效率,突破无资料地区参数率定瓶颈,扩展来水预报与需水预测的时空覆盖范围,提升其可靠性;在决策层,将AI嵌入水量调配、闸泵联控等环节,实现多约束条件下调度方案的智能生成与动态优化。

参考文献:

- [1] 李国英.系统谋划推进数字孪生水利体系建设[N].人民日报,2025-12-26(10).
- [2] 李国英.加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[N].光明日报,2022-08-10(4).
- [3] 水利部.数字孪生灌区建设技术指南(试行)[A].2022.
- [4] 顾涛,王一之,沈莹莹,等.数字孪生灌区先行先试建设成效与发展思考[J].中国水利,2025(13):34-41.
- [5] 蒋云钟,冶运涛.数字孪生灌区内涵解析及建设思路与关键技术[J].中国水利,2025(13):24-33.
- [6] 胡孟,张翔,任亮.问题导向寻方法 试点先行谋实效[N].中国水利报,2023-08-26(3).
- [7] 蔡阳.数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J].水利信息化,2023(3):1-7.
- [8] 谢崇宝,白静,郑世宗,等.数字孪生灌区建设核心要义与关键技术探讨[J].中国农村水利水电,2024(11):179-184+195.
- [9] 郭彪彪,何林华,霍宏旭,等.基于灌区数字孪生数据底板的时空多源多尺度融合框架构建[J].中国水利,2025(1):46-53.
- [10] 高占义,胡亚琼,徐宁,等.山东滨州市三大引黄灌区数字孪生灌区建设与技术应用[J].灌溉排水学报,2024,43(8):1-6+29.
- [11] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等.智慧水利解析[J].水利学报,2021,52(11):1355-1368.
- [12] 蔡阳.数字孪生水利建设进展与发展思考[J].水利信息化,2025(1):1-7+20.
- [13] 李慧婧,王高丹,赖杭,等.数字孪生灌区水资源精细化调配系统实现路径[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心).第十五届防汛抗旱信息化技术交流会议论文集.2025:361-366.
- [14] 唐珖.山西省数字孪生试点灌区建设探讨[J].水利技术监督,2025(8):62-63+140.
- [15] 王鹏翔.建设管用实用好用的数字孪生灌区[N].中国水利报,2023-10-25(1).
- [16] 谢崇宝,白静,张武雄,等.现代化数字灌区建设主体功能及主要应用结构体系探讨[J].中国农村水利水电,2024(4):141-145+151.
- [17] 冯天权,胡小梅,杨攀.数字孪生漳河灌区建设实践研究[J].水利水电快报,2024,45(9):111-116.
- [18] 李梦瑶.灌区现代化进程中数字孪生技术的应用效能与发展路径[J].大众标准化,2025(16):139-141.
- [19] 刘云波.灌区现代化发展实施路径与保障措施[J].中国水利,2024(19):7-11.
- [20] 刘云波.现代化灌区内涵与建设改造思路刍议[J].水利发展研究,2024,24(10):14-18.
- [21] 高占义.我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J].水利学报,2019,50(1):88-96.
- [22] 张雨,边晓南,张洪亮,等.数字孪生技术在大型灌区的应用前景研究[J].灌溉排水学报,2022,41(S2):71-76.
- [23] 傅明亮.基于遗传变邻域搜索算法的平原圩区排涝泵站调度优化研究[J].水利技术监督,2025(8):233-236.
- [24] 李国英.体系化推进、系统性提升水利科技创新能力[N].光明日报,2026-04-14(10).
- [25] 乌仁娜.大河沿子河灌区水资源供需平衡分析[J].陕西水利,2024(2):54-56.
- [26] 郭栋,郭冉昊.实现数字孪生灌区渠道水位变化预测预演[J].内蒙古水利,2024(S1):48-49+57.
- [27] 王莹.数字孪生灌区建设中数据底板运用[J].水科学与工程,2024(3):90-93.
- [28] 赵金鹏.灌区多水源优化配置模型研究与应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2024.
- [29] 张建云,谢康,金君良,等.变化环境下洪水预报方法转变与创新[J].水科学进展,2026,37(3):399-408.
- [30] 黄娟.数字孪生渭史杭灌区建设实践与成效分析[J].中国水利,2025(13):42-49.
- [31] 孙亮,王瑞国,袁瑞,等.人工智能技术在智慧水利中的应用与展望[J].中国水利,2024(3):44-51.

责任编辑 田灵燕