

数字赋能提升农业水价综合改革 成效的探索与实践

——以沙河水库灌区为例

庄杨¹, 彭毓元², 史颖娴³, 周本浩³

(1. 常州市城市防洪工程管理处, 江苏 常州 213165; 2. 溧阳市天目湖水库管理中心, 江苏 常州 213300;

3. 溧阳市水利局, 江苏 常州 213300)

摘要: 农业水价综合改革与数字孪生技术是实现可持续农业节水的两大路径, 基于常州市农业水价综合改革完成的制度体系、感知网络与工程基础, 揭示改革为数字孪生建设奠定的“数字底座”功能; 进而以沙河水库灌区为试验对象, 在改革基础上引入数字孪生技术, 分析两种措施叠加的协同节水效果。结果表明: 数字孪生技术有效破解了改革遗留的用水计划粗放、调度响应滞后等问题, 增强了制度的精准调控能力, 进一步提升了农业水价综合改革成效, 使中干渠农田灌溉水有效利用系数提升至0.6817。建议在改革完成灌区继续推进数字孪生建设, 实现从制度驱动向制度、技术双轮驱动的转型升级。

关键词: 农业水价; 综合改革; 数字孪生; 灌区; 节水

中图分类号: S274 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2026)06-0031-0004

Exploration and practice of enhancing the effectiveness of comprehensive reform of agricultural water pricing through digital empowerment: a case study of the Shahe Reservoir Irrigation District

ZHUANG Yang¹, PENG Yuyuan², SHI Yingxian³, ZHOU Benhao³

(1. Changzhou Urban Flood Control Engineering Management Office, Changzhou 213165, China;

2. Liyang Tianmu Lake Reservoir Management Center, Changzhou 213300, China;

3. Liyang Water Resources Bureau, Changzhou 213300, China)

Abstract: Comprehensive reform of agricultural water pricing and digital twin technology are two major pathways to achieve sustainable agricultural water conservation. Based on the institutional system, sensing network, and engineering foundation established through the comprehensive agricultural water pricing reform in Changzhou City, this paper reveals the “digital foundation” function laid by the reform for digital twin construction. Furthermore, taking the Shahe Reservoir Irrigation District as a test site, digital twin technology is introduced on the basis of the reform to analyze the synergistic water-saving effect resulting from the combination of the two measures. The results show that digital twin technology effectively addresses remaining issues from the reform, such as coarse water use planning and lagging scheduling responses, enhances the precision regulation capability of the system, and further

收稿日期: 2026-03-27

基金项目: 常州市水利科技项目(CZSLKJ(2025)06)

作者简介: 庄杨(1990—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事节水灌溉与水资源生态价值实现研究。E-mail: 331364272@qq.com

com

improves the effectiveness of the comprehensive agricultural water pricing reform, increasing the effective utilization coefficient of farmland irrigation water in the middle main canal to 0.6817. The study suggests that digital twin construction should continue to be promoted in irrigation districts where the reform has been completed, facilitating a transition and upgrade from a institution-driven approach to one driven by both institutional and technological factors.

Key words: agricultural water pricing; comprehensive reform; digital twin; irrigation district; water conservation

为提升农业用水效能,2016年国务院印发《关于推进农业水价综合改革的意见》,历经10年,2025年正式收官,改革工作有效推动了农业灌溉模式由粗放型向制度化、节水型转变。“十四五”期间,大中型灌区续建配套与现代化改造被纳入国家重大农业节水供水工程实施方案^[1-2],重点完善基础设施、计量设施及信息化建设,沙河水库灌区改造提升项目正是在此背景下实施的^[3],这与农业水价综合改革共同为数字孪生灌区建设提供了四方面基础条件:(1)治理体系基础。构建了健全的农业水权分配、水价形成、精准补贴与节水奖励机制^[4],推行“两部制水价”及超定额累进加价等制度,形成“市级监管、区镇主导、村级管护”的管理网络,为数字孪生的制度嵌入奠定了基础。(2)感知网络基础。建成覆盖8.77万hm²的计量监测体系,全市设有2614处计量设施实现灌区取用水全计量,数据接入省级“苏灌通”平台,为数字孪生模型的参数率定与动态仿真提供了连续可靠的数据源。(3)工程设施基础。建成干支斗农四级输配水网络,防渗渠道占比达50%,骨干工程实现斗口以上全计量,为数字孪生技术的物理映射提供了标准化的工程本体。(4)改革成效基础。改革实现农业灌溉用水量下降30.53%,面源污染同步削减,精细化用水管理已成为常态,为用水模拟与智能调控提供了已验证的效能基准。

本文以沙河水库灌区为例,探索数字孪生技术赋能农业水价综合改革的协同路径,重点研究“双轮驱动”下的节水效果,以此证明数字孪生灌区不仅可以推进灌区水灾害预警与农业节水,也是持续深化农业水价综合改革中心任务的重要技术途径。

1 沙河水库灌区数字孪生系统构建与实现

1.1 灌区基本情况

沙河水库灌区改造提升工程将灌区从自流灌溉改为提水灌溉,依托农业水价改革工作,目前灌区水源工程泵站和小型泵站农业灌溉供水成本分别为0.221元/m³和0.104元/m³,增设自动监测14处,

水位计8处,惠泽面积3326.67hm²,涉及有效灌溉面积1093.33hm²。为满足农业水价综合改革控制用水量总量的要求,沙河水库灌区由干渠管理站汇集要水情况,提出灌溉申请,详细说明打水时间、供水流量,管理处接申请后,制定计划并打水。这一制度虽已强化供用水管控,但灌溉仍旧依赖经验判断,在农业节水以及自然灾害防控方面仍有较大的进步空间。

1.2 沙河水库灌区数字孪生研究与实施

1.2.1 总体设计

数字孪生系统通过多源数据收集,以历史水文数据为辅助,构建水文-作物耦合模型,结合实时气象数据、中短期天气预报和长期气候预测,在农业水价综合改革工作基础上,搭建一体化监测网络,优化渠系调度模块,对灌溉水源流量、沿途水量损失、作物不同生育期需水预测等原始数据实现源头把控,系统提升灌区的水情监测与灌溉决策能力,提升水资源集约节约利用成效,预防盲目取水、农业尾水泛滥可能导致的水资源浪费和下游生态破坏,持续深化改革成效。数字化灌区总体架构见图1。

1.2.2 试验监测与控制系统布设

根据农业综合水价改革工作总量控制、定额管理的要求,灌区改造工程新增的5座节制闸和3座分水闸均安装有雷达水位计,3条干渠各选择4个点位安装渠道监控,实现了实时流量监控、水位监控。调查收集沙河水库灌区作物种植分布、渠系、水工建筑物参数等信息,综合土壤、地形、种植结构、灌溉模式、管理水平等因素,选定中干渠古县街道杨树垛村段大户田块作为田间水分监测典型区域。该区域田块地形平整规则,便于水位计安装读数 and 灌溉设施均匀布置;拥有独立标准化农渠进水口,可配套自动化放水闸精准调控灌溉水量,构成了理想的水分监测试验环境。项目组在该区域增设了10座田间水位计、11座农渠自动放水闸和1套田间气象站,实现了田间水位计液位监测分辨率1mm,液位监测准确度±10mm,采集周期1min至24h远程可

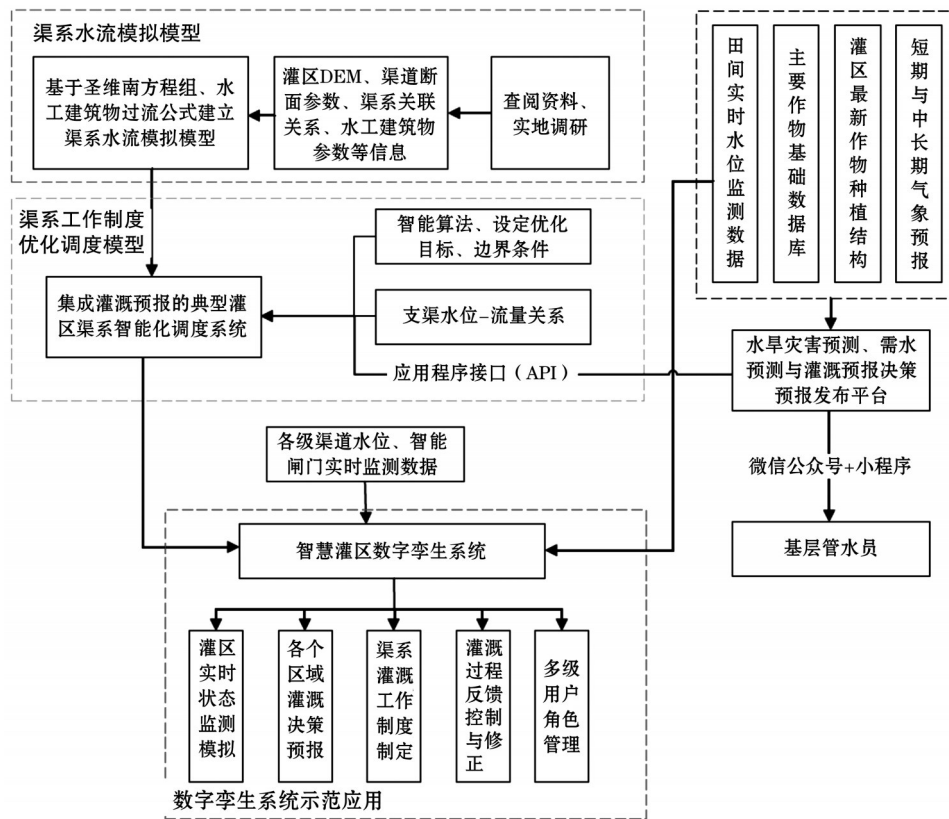


图1 数字化灌区总体架构

调;田间自动放水闸量程 32 cm,分辨率 1 cm,可接收上位机指令自动控制开度;气象站实时监测空气温湿度、气压、风速、风向、雨量、光照总辐射等,再以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)多模式集合气象预报数据为驱动,通过统计降尺度和偏差校正技术显著提升气象预报精度。试验过程中,灌区中干渠覆盖田块根据数字孪生系统灌溉决策实施灌溉,东、西干渠覆盖田块继续执行经验灌溉制度。

1.2.3 专用模型开发

(1)作物需水智能预报技术。采用彭曼公式计算参考作物蒸散量 ET_0 ^[5],利用单作物系数法计算作物蒸散量 ET_c ,实现基于作物生理需水规律的精准需水预报^[6]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量,mm/d; Δ 为饱和水汽压曲线斜率,kPa/°C; R_n 为作物表面净辐射,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); γ 为湿度计常数,kPa/°C; T 为平均气温,°C; u_2 为2 m 高处风速,m/s; e_s 为饱和水汽压,kPa; e_a 为实际水汽压,kPa。

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中: ET_c 为作物实际蒸散量,mm/d; K_c 为作物系数,根据不同生育期取值; ET_0 为参考作物蒸散量,mm/d。

将水稻生理响应机制、需水规律特征与地区有效降水量进行动态平衡分析,得到净灌溉需水量的作物干旱指标,通过时间重采样技术,建立涵盖1~210 d的水旱灾害预测体系。再利用田间水量平衡原理构建未来5~7 d土壤水位逐日变化的精确预测模型,实现7 d、30 d、90 d等不同预报时间间隔的灌溉决策支撑服务,提供从短期精准调度到中长期战略规划的全方位决策依据。

(2)渠系工作制度智能优化与水动力仿真调度技术。基于圣维南方程组构建沙河水库灌区典型干渠输配水高精度水动力模拟模型^[7],获取渠道断面、高程、糙率、设计水位等关键工程参数,以及各支渠控制灌溉面积、用水定额和水工建筑物水力学参数,确保模型的工程适用性和计算精度,并以水资源配置结果最大程度满足实时灌溉预报为目标:

$$W_s = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (W_{ji} - Q_{jt}^d \Delta t_j, 0) \quad (3)$$

式中: W_s 为支渠各时段的缺水总量,m³; Q_{jt}^d 为下级渠道 D_j 渠首第 t 时段的输水流量,m³/s; Δt_j 为第 j 条下级渠道的配水时间,s; t_{1j} 、 t_{2j} 分别为第 j 条下级渠道的

配水开始、配水结束时间; W_{jt} 为第 j 条下级渠道第 t 时段的需水量, m^3 。

(3) 灌溉决策集成与动态智能调控应用。结合前两部分研究成果, 将水旱灾情预测、作物需水预报与干渠输水能力有机结合, 构建集成化的灌溉决策系统, 通过 API 接口与灌区信息化平台数据互通, 使需水预测、降水预报和渠系运行参数在同一平台上驱动调度方案生成, 平台系统由此具备能够根据未来降雨与作物需水的动态变化而制定最优配水调度方案的功能。运行中继续利用水动力仿真与田间实测水位、流量进行比对, 实现对调度决策的再修正, 形成闭环优化, 并结合灌区现有自动化控制系统, 开发智能化灌溉设备调控技术, 包括自动闸门控制、变频水泵调节、精准流量分配等关键装备, 实现基于作物实时生理状态的精准供水服务。

2 数字孪生技术赋能农业水价综合改革的成效分析

沙河水库灌区种植结构多年较为稳定, 主要作物为水稻、小麦、以及各类蔬菜, 种植面积分别为 0.182、0.099、0.044 万 hm^2 , 其中粮食作物面积自灌区建成以来基本未变。蔬菜种植户常年自行灌溉, 蔬菜耗水量本文忽略不计。

(1) 灌区农业水价综合改革节水效果

2016 年为农业水价综合改革初始年, 2020 年为改革工作验收年, 此后为改革深化年, 且沙河灌区 10 月份基本不再发生水稻灌溉, 因此在评价农业水价综合改革效果时, 仅关注改革初与改革初步完成后 3 年的灌区 5—9 月用水情况。各年度灌溉用水量累计见表 1。

表 1 各年度灌溉用水量累计 (单位: 万 m^3)

年份	5月	6月	7月	8月	9月
2016	0.00	178.33	545.67	1 077.94	1 282.59
2020	0.00	248.49	248.49	707.01	996.08
2021	0.00	355.34	427.64	617.37	1 136.36
2022	4.72	465.46	1 130.96	1 403.41	1 565.58

2016 年改革前农业灌溉缺少指标控制, 水资源浪费严重, 降雨对农业灌溉的补充作用不受关注。根据溧阳市官方公布数据, 2016 年作为丰水年, 仅梅雨量就高达 700.5 mm, 是往年的 2.5 倍, 但 2016 年灌溉用水量是 2020 年(丰水年)的 1.29 倍。改革全面

落地后, 灌溉用水总量得到了较好的控制, 逐渐与对应的水文年型相匹配。

鉴于 2022 年是特殊干旱年, 本文仅选用 2023、2024 年作为改革深化代表年, 将其稻期灌溉用水量与水稻生育期耗水量进行对比(图 2)。从图 2 可以发现, 尽管改革工作逐年深化, 灌溉用水量仍高于移栽水稻传统淹灌模式下全生育期耗水量(本文中水稻耗水量为计算所得 ET_c 值与泡田耗水、稻田渗流量的总和), 与节水灌溉模式相比更是差距明显, 提升灌溉用水效率仍大有可为。

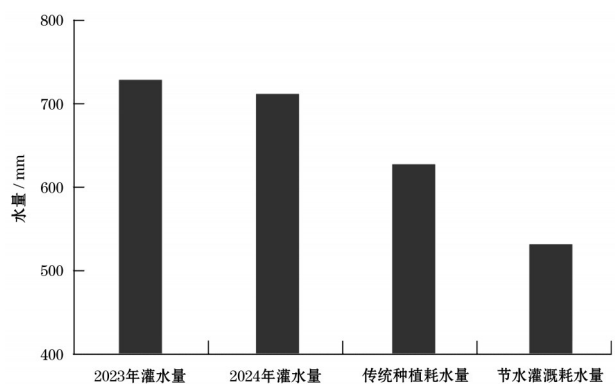


图 2 不同年份灌水量与传统模式、节水灌溉模式耗水量对比

(2) 数字孪生技术与农业水价综合改革叠加效果

2023 年调查数据显示, 沙河水库灌区灌溉水利用系数为 0.63, 渠系水利用系数为 0.70。2025 年大溪水库灌区作为常州市中型样点灌区, 实测农田灌溉水有效利用系数为 0.6627, 同年沙河水库灌区中干渠试验区执行优化后的渠系工作制度, 并且严格遵守数字孪生系统基于作物需水预报、降雨预测结果生成的灌溉决策, 农田灌溉水有效利用系数实测值高达 0.6817, 优于改造前, 也优于样点灌区, 进一步证明了数字孪生技术的引入在改革的基础上有效实现了精细化调控, 节水效果持续增强。

3 结语

本文以常州市农业水价综合改革与沙河水库灌区数字孪生试点为对象, 分析改革为数字孪生奠定“数字底座”的功能, 以及数字孪生反哺改革、破解遗留问题的协同机制。

(1) 农业水价综合改革通过全域计量感知网络、健全的“四项机制”管理体系和标准化输配水设施, 以及“苏灌通”平台数据接入, 为数字孪生提供

(下转第 45 页)

81 439 kWh,对比GA的82 048 kWh、PSO的81 955 kWh,分别降低609 kWh和516 kWh,即单站日节能的百分比约为0.74%和0.63%。在郑集西站23 m³/s工况下,3种算法最终都收敛到了82.9%的效率水平,但MOAHA实现收敛的速度更快。这一对比结果说明,就约束条件复杂、解空间呈现非线性的泵站调度问题而言,MOAHA依靠精细化的多维搜索方法,在解的质量上优于传统算法;而对于相对简单的问题,其优势主要反映在更快的收敛速度上,MOAHA在求解质量与计算效率上的平衡能力,使其更适合去求解实际的、具有多约束的泵站多目标优化调度问题。

4 结 论

本文针对郑集水利枢纽泵站,构建了以运行效率最高、总能耗最低为目标的多目标优化调度模型,并引入多目标人工蜂鸟算法(MOAHA)进行求解。结果表明,相较于常规调度方案,MOAHA优化方案能有效提升系统总运行效率,其中郑集东站各工况效率平均提升约1.0%,郑集西站效率也获得稳定改进。算法对比分析显示,MOAHA在求解精

度与收敛速度上均优于传统遗传算法与粒子群算法,特别是在复杂工况下能更快寻获更优解,验证了其在处理高维、非线性工程调度问题上的优越性与鲁棒性。本研究为泵站实现安全、经济、高效的精细化智能调度提供了切实可行的技术路径与决策支持。

参考文献:

- [1] 蓝旭坤,杨云,朱麟.用地紧缺地区输水泵站建设关键问题及解决措施[J]. 工程技术研究,2025,10(21):149-151.
- [2] 薄琳,李思文.西部地区灌区梯级泵站优化调度模型研究[J]. 水利技术监督,2026(2):236-240.
- [3] 黄秘昌.环北部湾广西水资源配置工程总体布局[J]. 广西水利水电,2025(6):64-68.
- [4] 戚庆军,吕海乐.梯级泵站优化调度模型研究及其应用[J]. 江淮水利科技,2025(5):58-64.
- [5] 张少恺,龙岩,管一,等.基于模型预测控制的泵站群联合调度研究[J]. 海河水利,2023(11):58-62.
- [6] 周迅,刘斌,周伏虎,等.基于改进人工蜂群算法的智能泵组优化研究[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(11):119-123.

(上接第34页)

了全链条支撑,是数字孪生模型参数率定与动态仿真的可靠基础。

(2)数字孪生技术有效破解了改革遗留的“用水计划粗放、调度响应滞后、极端气候应对不足”等瓶颈。在沙河水库灌区中干渠试点,通过作物需水智能预报模型、渠系水动力仿真模型与灌溉决策集成系统,实现从“经验灌溉”向“预报—决策—调控”一体化模式跃升。2025年数字孪生试点区农田灌溉水有效利用系数达0.6817,明显优于同类中型灌区。

(3)制度与技术可以形成“制度嵌入技术、技术激活制度”的双向赋能机制。水权分配、超定额累进加价等规则可以被编码至数字孪生平台,使制度执行从人工监管转向自动触发;同时,数字孪生提供的精准需水预报与动态调度方案,可使“总量控制、定额管理”落地为可追踪指令,显著增强制度精准调控能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘宽,翟家齐,赵勇,等.面向生态健康的农业节水潜力评价框架[J]. 水资源保护,2025,41(6):217-226,258.
- [3] 陈茂山.农业水价综合改革的探索实践与方向重点[J]. 中国水利,2024(19):1-6.
- [4] 王金霞,张丽娟.绿色转型背景下农业节水的政策演进、发展困境及破解对策[J]. 中州学刊,2024(5):24-31.
- [5] 高惠嫣,朱睿,刘宏权,等.白洋淀西部平原参考作物腾发量长期变化趋势及其成因[J]. 中国农村水利水电,2022(3):155-162.
- [6] 武佳乐,李银坤,张钟莉莉,等.基于单作物系数法的温室秋季生菜蒸散量估算及验证[J]. 灌溉排水学报,2024,43(4):9-14.
- [7] 管光华,周致远,陈晓敏,等.输水渠系干支耦合仿真模型构建及控制方式[J]. 农业工程学报,2025,41(14):113-120.