DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.015

“天—空—地”一体化高水效农业智能管控平台建设研究

张晓涛[1,2], 张宝忠[1,2*], 魏征[1,2], 彭致功[1,2]

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室,北京市,100038;
2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心,北京市,100048)

摘要:利用物联网、大数据、云计算等先进信息技术,对农业用水过程进行多源感知、智能决策和智慧控制,同步监测分析农作物生长状态、生长环境和所需各类资源,进而助力管理人员实现作物灌溉需水和区域水资源优化配置的智慧化模拟、精细化管理与科学化决策。实现农业用水全面、精准、高效的管控,将极大提高农业灌溉用水效率。国内外在高水效农业的数据底板、量化模型、智能决策以及数字场景方面开展了大量研究。国际上已研发多个作物高水效通用模型与平台,但我国在该方面的研究仍为空白。本研究总结并分析我国农业用水相关管理决策平台的研究现状,从平台功能、数据模型等方面指出当前农业用水管理平台建设存在的局限性,并提出建设“天—空—地”一体化高水效农业用水智能管控平台的初步方案及整体架构。针对灌区信息化管理平台数字化场景弱、自动化程度偏低的问题,研发数据、模型、算法与仿真引擎技术的模块化融合技术,拟解决高水效农业关键生产要素的数字化映射、智能化模拟及专题数字化场景搭建的关键技术,实现平台与物理灌区的同步仿真运行、虚实交互、迭代优化,助力推动农业智能化管理和可持续发展。

关键词:高水效农业;“天—空—地”一体化;智能管控;平台架构设计;农业节水;智慧农业

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)01-0145-06

张晓涛, 张宝忠, 魏征, 彭致功. “天—空—地”一体化高水效农业智能管控平台建设研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 145−150

ZHANG Xiaotao, ZHANG Baozhong, WEI Zheng, PENG Zhigong. Research on the construction of an integrated intelligent management and control platform for high water efficiency agriculture with “Sky-Air-Ground” observation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 145−150

0 引言

我国现已建成耕地灌溉面积7.03×10^7 hm^2,以占全国55%的耕地生产了77%的粮食和90%以上的经济作物。数据显示,农业用水量占总用水量的60%以上,面对我国水资源短缺、时空分布极不均匀的现实,大幅度提升农业用水效率,发展高水效农业是保障粮食和特色农产品生产以及生态安全的根本途径。亟须加强多水源配置与高水效农业关键技术和装置研究,解决农业水效率提升的关键技术卡点,创新区域水资源时空格局优化和适水农业种植技术,多要素协同提升作物水效率,创建高水效农业智慧管控系统,集成区域高水效农业综合技术模式,整体提升区域农业用水效率。

智慧化生产决策,信息化平台管控和智能化作业控制的智慧农业是未来农业的发展方向[1]。水利部在《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》中明确提出建设灌区管理信息化平台,实现关键配水口的闸门远程控制、作物需水预估和旱情监测、水资源调度等功能。运用现代信息技术,融合物联网、大数据、3D建模和AI等技术对农业用水进行智能化数字管理,以实现渠道输配水和农田灌溉用水的智慧管控和科学有效利用[2]。

1 国内外研究现状

目前,国内的农业用水管理平台主要分为三类:(1)农业水资源管理信息系统,即运用数据库、网络存储和数据备份等技术,实现区域水信息的汇总、存储、

收稿日期:2024-11-11 修回日期:2025-05-29
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1900500)
第一作者:张晓涛,女,1980年生,山西汾阳人,博士,高级工程师;研究方向为农业用水理论。E-mail: zhangxt@iwhr.com
*通信作者:张宝忠,男,1981年生,山西清徐人,博士,正高级工程师;研究方向为作物用水理论与技术。E-mail: zhangbz@iwhr.com

查询、共享交换和科学分析,可以为区域信息系统的建设管理和相关部门数据共享及决策分析提供服务支撑。如,茨淮新河灌区数字资源管理平台[3],甘肃省高效节水灌溉项目管理系统[4]。(2)农业水资源信息处理系统,该类系统在灌区水信息管理的基础上,开发了信息处理、计算和专家决策支持系统等功能。如,边晓南等[5]设计了黄河流域高效节水灌溉大数据平台,以数据采集、存储、计算、分析及基于聚类分析和人工神经网络的数据挖掘功能为支持,可以实现在农业水资源调度、高标准农田建设、农业灌溉区域节水评价等方面的应用;何绯红和赵磊[6]研究基于云平台的灌溉决策专家系统,以农田采集信息、气象信息等基本信息为基础,开发了灌溉决策和信息管理的专家系统,结合农田水平衡理论和灌溉预报决策模型,实现对灌溉时间和灌溉量相关的推理决策任务。袁舜承[7]设计的基于GIS的灌区智能管理平台,包含了灌区信息遥感监测处理、水稻生长需水量的计算与测定等功能。(3)融合物联网技术的农田灌溉控制系统。借助物联网技术,可以实现田间信息的自动监测和灌溉系统的远程自动控制,但目前大部分基于土壤墒情阈值和水量平衡的灌溉决策模型,多数应用在田间,联合区域输配水调控的智能管理平台少见。王晓丽等[8]借助无线通信、自动控制及传感器等现代技术,开发了集田间信息采集(土壤墒情信息)、远程自动控制、设备运行状态监测及灌溉过程调控等功能于一体的智能化灌溉控制系统。闫海兰和尚坡利[9]提出了根据不同农作物在不同生长阶段对水分的需求、土壤湿度信息及降水量的一种自主决策灌溉的农田智能节水灌溉远程监测系统。许昕[10]综合数据库技术和网站技术设计了基于物联网的柑橘园节水灌溉系统管理平台。通过土壤含水量、有效降水量、水平衡方程和作物需水量等进行柑橘园的灌溉预测与决策。魏兵德[11]规划设计了甘肃武威杂木灌区信息化管理系统,主要包括实时监控(流量、水位)和报警、数据存储和分析,数据通信和调度等功能,以实现灌区水量精准分配,用水动态调控的自动化管理。

美国基于IBM混合云及AI技术建立的智慧灌溉系统iFarming集成了物联网传感器采集农田需水信息,进行实时作物需水预测和精准灌溉后可节水40%,农业水生产力提高30%。BISWAS等[12]提出并开发了“农业节水智能灌溉系统”,该系统设置了一系列测量温度、土壤湿度、大气湿度和水量的传感器,可以预测特定时间段内指定田块的需水量,实现了田间耗水量详细信息的云端存储。应用人工智能机器学习工具,可以实现网络和移动端查询日、月或季作物需水量。当土壤含水量低于设定阈值时,土壤含水量传感器通过微控制器可以触发水泵工作。

另外,国内外在高水效农业的数据底板、量化模型、智能决策以及数字场景方面开展了大量研究。王军[13]构建了黄河流域空天地一体化生态大数据平台架构,分析了平台建设中的数据探测与采集和数据智能处理等关键技术。郭云涛等[14]开发了甘肃省武威市黄花滩灌区信息化平台,实现了三维场景与自动控制、视频监控、安全监测、水雨情、墒情监测的有机融合,搭建的灌区水资源调配、自动控制、视频监控、工程管理等核心业务应用系统,大大提高了灌区运行效率与管理水平。但现有平台系统在信息感知—模型系统—智能决策—数字场景全过程物理与数字场景映射及互馈决策方面较薄弱。因此,亟须攻克基于高水效模型和智能决策算法的高水效农业智能管控平台研发难题,着力提升灌区的预测、预报、预警和预案“四预”能力。

“天—空—地”一体化高水效农业智能管控平台针对灌区信息化管理平台数字化场景弱、自动化程度低的问题,研发数据、模型、算法与仿真引擎技术的模块化融合技术,开发标准规范的高水效农业智能决策知识库,拟解决高水效农业关键生产要素的数字化映射、智能化模拟及专题数字化场景搭建的关键技术,实现与物理灌区的同步仿真运行、虚实交互、迭代优化。

2 相关概念

“天—空—地”一体化高水效农业智能管控平台(integrated high water efficiency agricultural intelligent control platform with “Sky-Air-Ground” observation, IHWEAP)指通过卫星、无人机和各类地面传感器收集数据,运用大数据、物联网、人工智能等现代信息技术,基于农业高水效模型和智能决策技术,对农田、灌区和流域进行数字化映射展示,对农作物及其生长环境和所需资源进行监测和分析,进而助力管理人员实现对作物灌溉需水和区域水资源优化配置的智慧化模拟、精细化管理与科学化决策。

3 关键技术

高水效农业智能管控系统集成了传感器技术、大数据分析技术、无线通讯、AI技术及大尺度数字化场景搭建技术等。

3.1 传感器技术

传感器提供土壤温湿度、盐分、气象、作物长势等实时监测数据,同时,集成农业水效要素多谱段、多类型载荷时—空—谱协同观测数据,并利用边缘计算传感技术,进行实时数据分析和远程监控,是实现高水效智能分析与决策的基础。

3.2　数据分析与决策支持技术

运用大数据分析技术对农业用水过程中通过传感器、无人机和卫星采集的数据及搜集的经验数据和统计资料进行关联分析处理，预测气象条件、土壤状态和作物生长情况，从水资源系统、作物生长系统和生态环境系统三方面建立决策指标体系，分析影响作物生长的主控因子，为作物用水提供科学合理的决策支持，优化资源配置，提升作物产量和品质，提高农业用水效率。

3.3　无线通讯和AI技术

无线通讯主要包括微波通信和卫星通讯，目前主要有 ZigBee/蓝牙/Wi-Fi/RFID/红外等技术，通过 Wi-Fi 可以将距离较近的各类传感器和仪器设备连接，再以蓝牙和 5G 信号将各类传感器信息传输至服务器。基于 AI 算法对作物生长进行实时视频监控，一旦发现水分、肥料等亏缺，可以立即向管理人员发送预警信息。

3.4　大尺度数字化场景搭建技术

以开源三维 WebGIS 框架 Cesium3D 为基础，结合 GeoServer 服务端 GIS 发布技术实现。可叠加展示不同类型的底图（卫星、矢量、地形）、遥感影像、矢量图层（点、线、面）、无人机影像、示范区 3D 模型（倾斜摄影，BIM）等全要素数据，实现试验站、示范区和农场的场景再现。同时，以 SpringCloud 微服务架构为基础，集成 Vue3＋Ant Degisn Pro 前端展示框架和 ECharts 图表库，实现所见即所得的人机交互，以二/三维图表呈现数据趋势、视频监控、预警点位等关键信息。

4　系统整体架构

系统总体架构分为四部分，即多源感知、智慧支撑、智慧管理和平台应用（如图 1 所示）。

“多源感知”为整个平台运行所需的各类数据支撑，主要包括物联网数据、卫星和无人机影像数据以及气象数据等；“智慧支撑”提供整个平台运行的软硬件基础设施；“智慧管理”提供实测和遥感数据接入、数据管理、数据处理、数据共享分发和时空可视化等能力，并集成高水效农业的模型算法，主要包括作物水—产量—品质模型，区域多水源配置调控模型、高水效农业分布式量化模型和多场景智能决策模型等；“平台应用”是整个系统的最高层[15]，为应用进程提供服务，主要包括研究区作物监测管理系统、数据处理系统、高水效智能预测、决策系统等。

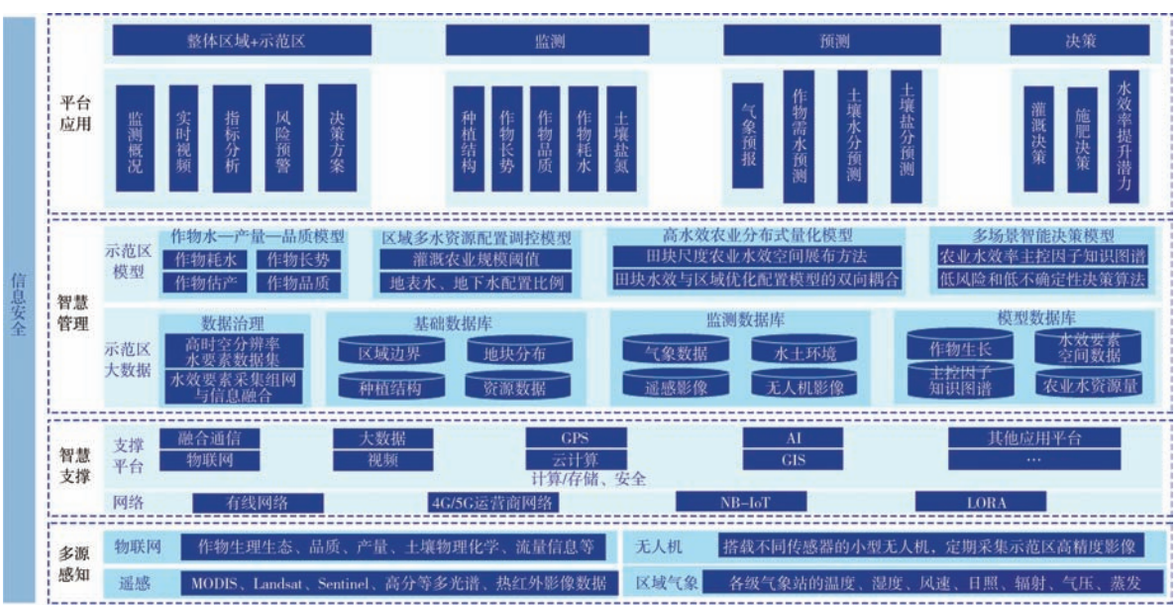


图 1　系统总体架构

Figure 1　Framework and structure of IHWEAP

5　系统功能

管控平台主要功能包括实时数据采集与监测、数据治理（多源数据融合、重构，水效要素计算）和决策分析等功能（如图 2 所示）。图 3 展示系统部分功能界面图。

1）高水效农业关键生产要素数据的采集与监测。采用卫星影像、无人机、地面传感器等天、空、地设备全方位、多维度实时协同监测与采集农田水效要素（包括多深度土壤含水量、土壤温度、地表通量等）、作物生长（吸水根系分布情况、叶面积指数、种植结构）及其气象（空气温湿度、风速、雨量等）数据，并实现实时（及时）传输与收集。同时，存储管理研究区的基本数据（农田、作物、土壤特征等）、历史数据（气象、作物耗水规律、土壤水特征等）和统计数据等。

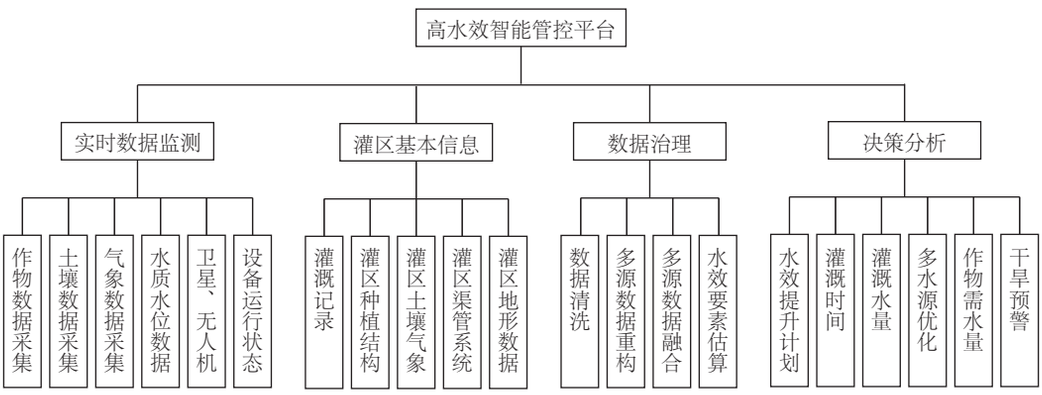


图 2 系统功能图

Figure 2 Function diagram of IHWEAP

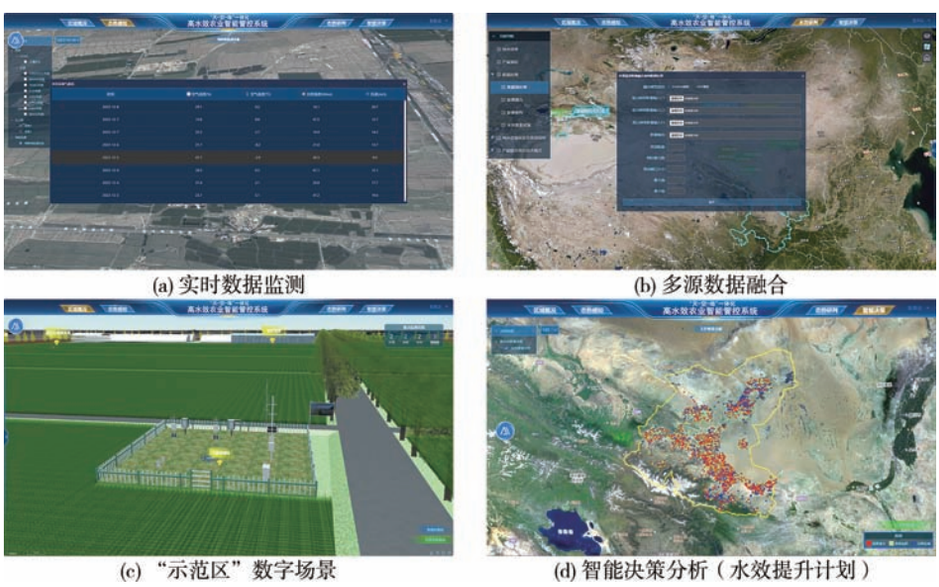


图 3 系统部分界面

Figure 3 System interfaces

2)多源异构数据融合重构和综合分析。开发多源多模态数据(各类遥感影像数据、传感器数据、气象数据、土壤属性数据、生长数据等)全链条自动化智能处理模块,对多源数据进行清洗、融合、挖掘、同化等自动化统一处理:检查多源数据的一致性,处理缺失值和异常值,并进行标准化处理;基于多源异构数据的融合技术,编写数据处理算法,将多传感器获得的农业关键生产要素数据和信息加以联合、相关及组合;根据数据类别,按照特定的时间、空间和光谱分辨率,生成网格化的数据,进行数据同化;形成符合数据库统一标准的数据产品集(种植结构、作物长势、作物估产和需水量等),并进行数据综合分析,提供数据调用和共享。

3)高水效农业模型与智能决策。将数据、模型、决策算法等模块融合协同,融合数据智能处理、农业水效要素智能量化、水效调控智能决策。集成考虑生态健康的分布式多水源水量水质时空配置模型、高水效种植结构优化技术、作物水—产量—品质耦合模型和产量—品质协同提升的作物高水效优化决策方法,对区域农业水效要素进行分布式量化表征,提出系统权衡、时空约束的多目标、多要素的系统优化决策技术。智能计算土壤有效储水量,识别作物缺水胁迫,预测未来降水量,估算作物需水量[16-19],结合渠道、水库、灌溉区域的供水和需水量,考虑供需平衡,对灌溉时间和灌溉水量等进行决策和预测,确定灌区优化调度方案,实现灌区水资源的合理分配和最优调度[20]。

4)不同尺度数字化场景模拟。叠加展示不同类型和不同尺度的底图,如遥感影像、矢量图层(点、线、面)、无人机影像、示范区 3D 模型等时空数据,并集成图表库,模拟农业用水过程,以三维图表呈现数据趋势、视频监控、重要点位等关键信息。研究数字化场景搭建方法与实施途径,构建高水效农业智能管控系统,实现数据场景实时再现、高效人机交互、场景模拟和预演展示等。

6　结论

“天—空—地”一体化高水效农业智能管控平台基于大数据、物联网、人工智能、传感器等现代信息技术，并发展农业高水效模型和决策支持技术，其创新点如下：(1)考虑下垫面空间变异性制约因素，建立分布式农业水效计算模型与水资源优化配置模型双向耦合互馈方法，突破以往田块水效提升模型与区域水配置调控模型之间关联耦合性差的瓶颈；(2)提出考虑多情景、多要素协同的农业高水效—生态安全整体协同匹配的智能决策技术与调控途径，突破以往区域农业水效多要素协同性差、调控范围不明确等问题；(3)提出模型算法与仿真引擎的模块化融合技术，明晰了高水效农业专题数字化场景搭建方法与实施途径，改善以往管控平台数字化场景弱、自动化程度低的问题。

通过建设高水效农业智能管控平台，构建灌区用水全过程仿真模拟，全面提升高标准农田建设的信息化水平，为灌区水资源精准配置与水生态系统的协调发展提供调度和决策方案，为水利、农业部门的管理和决策工作提供技术依据，助力实现灌区智慧预警、智慧调控和智慧决策的全流程智能化管理，为打造“节水、生态、智慧、高效”的现代化高质量发展灌区筑牢技术支撑。

参　考　文　献

[1] 冯敏康，龚智峰，徐璟，等. 无人农场智能管控平台设计与实现[J]. 农业与技术，2022，42(21)：52－55.

[2] 戴玮，李益农，章少辉，等. 智慧灌区建设发展思考[J]. 中国水利，2018(7)：48－49.

[3] 冯伟. 茨淮新河灌区数据资源管理平台建设思路探析[J]. 治淮，2022(6)：58－59.

[4] 马国印. 甘肃省高效节水灌溉项目信息管理系统开发与应用[J]. 中国农村水利水电，2020(1)：17－19，25.

[5] 边晓南，李楠，夏文君，等. 基于大数据技术的高效节水灌溉应用研究[J]. 人民黄河，2022，44(8)：157－162.

[6] 何绯红，赵磊. 基于云平台的灌溉决策专家系统研究[J]. 湖北农业科学，2022，61(11)：133－138.
HE Feihong，ZHAO Lei. Research on irrigation decision expert system based on cloud platform [J]. Hubei Agricultural Sciences，2022，61(11)：133－138.

[7] 袁舜承. 基于GIS的灌区智能管理平台的设计与应用[J]. 水电站机电技术，2015，38(10)：23－25.

[8] 王晓丽，安胜鑫，张国峰，等. 基于云平台的智能灌溉控制系统[J]. 农业工程，2022，12(6)：55－59.
WANG Xiaoli，AN Shengxin，ZHANG Guofeng，et al. Intelligent irrigation control system based on cloud platform [J]. Agricultural Engineering，2022，12(6)：55－59.

[9] 闫海兰，尚坡利. 农田智能节水灌溉远程监测系统的设计与实现[J]. 甘肃科技纵横，2022，51(6)：1－5.

[10] 许昕. 基于物联网的柑橘园节水灌溉与系统管理平台[D]. 广州：华南农业大学，2018.
XU Xin. Research on information acquisition and system management platform in citrus orchard based on Internet of Things [D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2018.

[11] 魏兵德. 杂木灌区信息化管理系统建设规划设计[J]. 农业开发与装备，2016(12)：27.

[12] BISWAS S，SHARMA L K，RANJAN R，et al. Smart farming and water saving-based intelligent irrigation system implementation using the internet of things [M]. Recent Trends in Computational Intelligence Enabled Research. Academic Press，2021：339－354.

[13] 王军. 黄河流域空天地一体化大数据平台架构及关键技术研究[J]. 人民黄河，2021，43(4)：6－12.
WANG Jun. Research on architecture and key technologies of air-space-ground integrated big data platform along the Yellow River basin [J]. Yellow River，2021，43(4)：6－12.

[14] 郭云涛，刘晓彬，于敬舟，等. 黄花滩灌区运行管理平台开发研究[J]. 中国水利，2021(20)：34－37.

[15] 周通，李雯，左小林. 果园喷药机智能管控平台的建设研究[J]. 农业装备与车辆工程，2023，61(1)：23－27.
ZHOU Tong，LI Wen，ZUO Xiaolin. Research on construction of intelligent control platform of orchard sprayer [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering，2023，61(1)：23－27.

[16] 王应海，刘勇兵. 对智能灌溉的几点认识[J]. 节水灌溉，2017(7)：123.

[17] 刘怀利. 农田水利智能灌溉监控系统研究[J]. 水资源开发与管理，2018(5)：67－70.
LIU Huaili. Research on intelligent irrigation monitoring system for farmland water conservancy [J]. Water Resources Development and Management，2018(5)：67－70.

[18] 李伟，宋睿，刘明江，等. 光学遥感在区域灌溉监测中应用的研究进展[J]. 排灌机械工程学报，2024，42(11)：1157－1165.
LI Wei，SONG Rui，LIU Mingjiang，et al. Research progress on application of optical remote sensing in regional irrigation monitoring [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering，2024，42(11)：1157－1165.

[19] 刘少东，张晨曦，衣淑娟，等. 基于DSSAT模型黑龙江庆安不同降水年型水稻灌溉制度[J]. 排灌机械工程学报，2025，43(12)：1262－1271.
LIU Shaodong，ZHANG Chenxi，Y1 Shujuan，et al. Rice irigation regimes in different precipitation patterns in

Qing'an County, Heilongjiang Province, based on DSSAT model [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engincering, 2025, 43(12): 1262－1271.
[20] 李昭辉, 李子阳, 马福恒, 等. 中国大型灌区工程风险分析与安全评价研究[J]. 水利水运工程学, 2023(5): 1－8.
LI Zhaohui, LI Ziyang, MA Fuheng, et al. Analysis and safety evaluation of large-scale irrigation area projects in China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 1－8.

Research on the construction of an integrated intelligent management and control platform for high water efficiency agriculture with "Sky-Air-Ground" observation

ZHANG Xiaotao[1, 2], ZHANG Baozhong[1, 2*], WEI Zheng[1, 2], PENG Zhigong[1, 2]

(1. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing* 100048, *China*)

Abstract: A large amount of research has been conducted on the data base, quantitative models, intelligent decision-making, and digital scenarios of high water efficiency agriculture both domestically and internationally. Multiple crop high water efficiency universal models and platforms have been developed internationally, but this aspect is still blank in China. This article summarizes and analyzes the research status of management decision-making platforms related to agricultural water use in China. It points out the limitations of the current construction of agricultural water management platforms from the aspects of platform functions and data models, and proposes a preliminary plan and overall architecture for building a "Sky-Air-Ground" integrated high water efficiency intelligent control platform. Addressing the issues of weak digital scenarios and low automation levels in irrigation district information management platforms, this study develops modular integration technology for data, models, algorithms, and simulation engines. It also develops a standardized and regulated intelligent decision-making knowledge base for high-efficiency agriculture, aiming to solve key technologies for the digital mapping, intelligent simulation, and construction of specialized digital scenarios for key production factors in high-efficiency agriculture. The goal is to achieve synchronous simulation operation, virtual-real interaction, and iterative optimization with physical irrigation districts, enabling managers to intelligently simulate, refine, and scientifically manage crop irrigation water needs and optimize regional water resource allocation, thereby promoting intelligent management and sustainable development of agriculture.

Keywords: high water efficiency agriculture; integration of "Sky-Air-Ground"; intelligent management and control; platform architecture design; agricultural water-saving; smart agriculture

Foundation items: National Key Research and Development Program of China(2022YFD1900500)

First Author: ZHANG Xiaotao, E-mail: zhangxt@iwhr.com

* **Correspondence Author:** ZHANG Baozhong, E-mail: zhangbz@iwhr.com