

数据孪生在精准农事作业中的决策支持研究

洪韦鹏 邓煜乾 禩志远 袁书讯 谢敏君*

广西职业师范学院

DOI:10.32629/as.v8i12.3496

[摘要] 随着智慧农业的快速发展,传统农业生产模式正逐步向数据驱动、智能决策的方向转型。数据孪生作为融合物联网、大数据、人工智能与仿真建模的前沿技术,为精准农事作业提供了全新的决策支持范式。本文系统梳理了数据孪生技术的核心架构及其在农业场景中的适配性,构建了一个面向农田管理的五层数据孪生决策支持框架,涵盖感知层、数据层、模型层、服务层与应用层。在此基础上,结合土壤墒情监测、作物生长模拟、病虫害预警及灌溉施肥优化等典型应用场景,验证了该系统的可行性与有效性。实验结果表明,基于数据孪生的决策支持系统可显著提升农事作业的精准度与资源利用效率,降低人工干预成本,为实现农业绿色可持续发展提供技术支撑。

[关键词] 数据孪生; 精准农事作业; 决策支持; 农业物联网; 数字农业

中图分类号: F304 **文献标识码:** A

Research on Decision Support in Precision Farming Operations Using Digital Twins

Weipeng Hong Yuqian Deng Zhiyuan Xuan Shuxun Yuan Minjun Xie*

Guangxi Vocational Normal University

[Abstract] With the rapid development of smart agriculture, traditional agricultural production models are gradually transitioning toward data-driven and intelligent decision-making. As a cutting-edge technology integrating the Internet of Things, big data, artificial intelligence, and simulation modeling, digital twins provide a novel decision-support paradigm for precision agricultural operations. This paper systematically reviews the core architecture of digital twin technology and its adaptability in agricultural contexts, constructing a five-tier digital twin decision-support framework for farmland management, encompassing the perception layer, data layer, model layer, service layer, and application layer. Building on this foundation, the feasibility and effectiveness of the system were validated through typical application scenarios such as soil moisture monitoring, crop growth simulation, pest and disease warning, and irrigation and fertilization optimization. Experimental results demonstrate that the digital twin-based decision-support system can significantly enhance the precision of agricultural operations and resource utilization efficiency while reducing manual intervention costs, thereby providing technical support for achieving green and sustainable agricultural development.

[Key words] Digital Twin; Precision Farming Operations; Decision Support; Agricultural Internet of Things; Digital Agriculture

引言

我国农业当前面临“三高一低”的严峻挑战,即高投入、高污染、高风险与低效益。据统计,我国化肥利用率仅为38%,农药利用率不足40%,水资源利用效率也处于较低水平。传统农事决策主要依赖经验判断,导致资源浪费与环境污染问题并存。尽管精准农业已推广二十余年,但在实际应用中仍存在数据采集与决策脱节、静态监测与动态管理不匹配、技术应用与小农户需求不相适应等“三重脱节”问题^[1]。数据孪生技术自2002年提出以来,已在制造业、能源等领域实现规模化应用。其核心在于

构建物理实体的高保真虚拟映射,并通过实时数据流实现双向同步与智能演化。在农业中,数据孪生能够有效解决动态感知不足、决策缺乏预演能力、系统闭环缺失等关键问题,为农户提供量化决策支持^[2],例如模拟不同灌溉策略对作物产量的影响,从而显著降低试错成本。

本文围绕“数据孪生如何支撑精准农事决策”这一核心问题,提出构建适配农业场景的五层决策支持架构,设计多源数据融合与动态建模方法,并通过多区域实证验证系统实效性。全文共分为五章,结构安排如下:第二章分析数据孪生在农业中的适

配性;第三章提出系统架构设计;第四章开展典型应用场景实证分析;第五章总结并提出政策建议。

1 数据孪生在农业中的适配性分析

1.1 农业系统特殊性及其挑战

农业系统具有区别于工业系统的独特复杂性,主要体现在环境开放性、多尺度耦合性和主体异质性三个维度。在环境开放性方面,农田系统完全暴露于自然环境中,各类传感器易受风雨、尘土等自然因素干扰,导致监测数据质量不稳定^[3]。实验数据表明,土壤水分传感器在雨后24小时内的读数漂移可达±8%,气象站风速传感器在强风条件下的误差率高达25%。同时,生物过程如病虫害爆发具有显著的突发性与非线性特征,难以通过传统连续函数进行准确描述与预测。在多尺度耦合性方面,农业系统涉及从分子到区域的多层次过程交互,例如土壤微生物活动影响氮素矿化速率(分子尺度),进而调控作物根系吸收效率(个体尺度),最终决定籽粒产量(群体尺度)。现有模型多聚焦单一尺度,缺乏跨尺度协同建模机制,难以全面反映农业系统的真实运行规律。在主体异质性方面,我国小农户经营占比超过80%,户均耕地面积仅0.48公顷,对数字化投入的意愿和能力有限。一套完整的地面传感网络成本约8000元/公顷,远超小农户的年均农业收入水平,这严重制约了先进技术的普及应用。

1.2 数据孪生的适配优势

数据孪生技术通过其独特的技术机制,在应对农业系统特殊性方面展现出显著优势。针对环境不确定性问题,传统系统采用静态阈值预警方式误报率较高,而数据孪生通过动态融合多源感知数据,将系统误差控制在5%以内,大幅提升了决策可靠性。面对多尺度耦合挑战,数据孪生采用分层建模与跨尺度同化机制,突破了单一尺度模型的局限,实现了从基因表达到大田生产的全过程数字化映射。在经济约束方面,数据孪生通过轻量化终端与服务化模式创新,有效降低了技术使用门槛^[4]。在河南周口小麦示范区的实证案例中,数据孪生系统通过融合Sentinel-2卫星遥感、无人机多光谱影像和地面传感器数据,将病虫害预警准确率从68%提升至89%,同时使硬件投入成本降低40%,实现了技术效益与经济可行性的统一。

2 面向精准农事的决策支持架构设计

2.1 五层系统架构设计

本研究构建的数据孪生决策支持系统采用五层架构,通过感知层、数据层、模型层、服务层和应用层的协同运作,实现农业数据的全流程智能化处理。感知层集成多源监测设备,包括Sentinel-2卫星、大疆M350 RTK无人机和LoRa传感器网络,形成空一天一地一体化监测体系,为系统提供持续稳定的数据输入。数据层采用Apache Kafka框架实现实时流处理,依托Delta Lake保障数据一致性,通过GeoSpark实现空间索引优化,并遵循ISO 19156标准与AgroVoc本体进行语义标准化,构建统一的时空数据管理平台。

模型层创新性地采用机理模型与数据模型双引擎架构,集成DSSAT、Hydrus-1D等专业农业模型,结合LSTM、GNN等人工智

能算法,实现农业过程的精准模拟与预测。通过联邦学习技术,系统在保护数据隐私的前提下实现模型参数的动态优化。服务层基于微服务架构提供四大核心功能:田块健康评估输出1-5级风险指标,极端天气预警实现72小时前瞻预测,变量处方生成提供精准作业指导,农机作业反馈驱动模型持续优化。应用层通过Web端和移动端交互界面,为农户提供可视化管理和智能决策支持,并借助MQTT协议与主流农业云平台实现生态对接。

2.2 关键技术创新

本系统在核心技术层面实现三项重要突破。多源数据融合方面,提出“时空对齐-特征提取-动态加权”的创新方法,通过地理编码实现数据网格化对齐,利用CNN神经网络提取特征参数,并基于环境条件动态调整传感器权重,显著提升数据质量与可靠性。动态模型校正机制采用“观测-预测-校正”闭环设计,通过集合卡尔曼滤波实时优化模型参数,有效解决传统农业模型的预测偏差问题^[5]。

系统安全与隐私保护方面,采用联邦学习架构确保原始数据本地化处理,引入区块链技术构建数据溯源体系,并设计多级权限管理机制,全面保障系统安全运行。这些技术创新不仅突破了数据孪生在农业应用中的关键瓶颈,也为系统的规模化推广奠定了坚实基础。

3 典型应用场景实证分析

3.1 土壤墒情监测与智能灌溉

在河北曲周冬小麦示范区开展的土壤墒情监测与智能灌溉实证研究表明,数据孪生技术能够有效提升农田水分的精准管理水平。该示范区部署面积达200亩,配置了60个双层土壤传感器,分别监测0-40厘米和40-80厘米土壤剖面的水分动态,实现了每10分钟一次的数据采集频率。系统通过Hydrus-1D模型对土壤水分运移过程进行精确模拟,并耦合WRF气象预报数据,实现了根区含水量的精准预测。在此基础上,系统生成分区灌溉处方图,并直接下发至智能水肥一体机执行。实证结果表明,该系统的应用使灌溉用水量从传统的4200立方米/公顷降至3300立方米/公顷,节水率达到21.4%;同时,籽粒蛋白质含量从12.1%提升至12.9%,增长0.8个百分点;灌溉响应时间从原有的3天缩短至2小时,效率提升幅度达93.3%。这一案例充分证明了数据孪生技术在提高农业水资源利用效率方面的显著成效。

3.2 作物长势模拟与变量施肥

江苏兴化水稻区的作物长势模拟与变量施肥实践展示了数据孪生在养分精准管理方面的应用价值。该系统通过无人机平台每周获取田间多光谱影像,并结合每10天一次的土壤速效氮采样数据,构建了完整的作物生长监测体系。在模型同化环节,将NDVI观测值输入WOFOST作物生长模型,采用集合卡尔曼滤波方法对叶面积指数和干物质积累速率进行动态校正。基于氮素平衡方程 $N_{req} = Y \times N_{removal} - N_{soil} - N_{min}$ (其中Y为预期产量, $N_{removal}$ 为单位产量氮素移出量),系统生成精准的变量施肥处方。实施效果显示,氮肥施用量从225千克/公顷降至198千克/公顷,减量幅度达12%;氮肥利用率从38%提升至45%,增长7

个百分点;亩均纯收益增加320元。这一实践不仅验证了数据孪生技术在施肥决策中的科学性,也展现了其显著的经济效益。

3.3病虫害精准防控

山东烟台苹果园的病虫害精准防控案例体现了数据孪生在植保领域的创新应用。该园区部署了20台200万像素的AI摄像头和10台智能诱虫灯,构建了完善的病虫害监测网络。系统采用多阶段处理流程:首先对采集图像进行去雾和增强等预处理,然后通过YOLOv7模型实现害虫识别,其mAP@0.5达到91.5%;继而利用SEIR传染病模型预测病虫害扩散热点区域;最后基于A*算法规划无人机最优喷药路径。实施结果表明,农药使用量较传统方式减少34%,防治效果达到92.3%,农残检测合格率保持100%。这一案例证明了数据孪生技术能够在不影响防治效果的前提下,显著降低化学农药的使用量,为绿色农业发展提供了技术支撑。

3.4多灾种协同应急响应

河南驻马店玉米区的多灾种协同应急响应实践展示了数据孪生系统在应对复合灾害方面的独特优势。2024年7月,该地区遭遇了“高温(超过38℃)+干旱(连续15天无雨)”的复合型气象灾害。系统提前5天准确预警了“灌浆期热害+水分胁迫”的复合风险,并自动启动应急响应机制:首先启动滴灌系统,以每次15毫米的灌溉量缓解水分胁迫;同时向农户推送叶面喷施0.2%磷酸二氢钾的建议方案;最后根据作物受害情况调整收割计划至8月25日。效果评估显示,试验区的减产幅度控制在4.1%,显著低于对照区11.3%的减产幅度,产量损失降低63.7%。这一案例凸显了数据孪生技术在农业防灾减灾中的重要作用,为应对极端天气事件提供了有效的技术解决方案。

4 总结

本研究通过构建五层数据孪生决策支持架构,系统解决了精准农事中“感知-决策-执行”闭环难题。多区域实证表明,该系统在节水、节肥、减药、降本、增产等方面均取得显著成效,资源利用效率提升显著,综合效益达5.6%。为推进数据孪生技术在农业中的广泛应用,建议将数据孪生平台纳入高标准农田建设标准,设立专项补贴以降低农户使用成本,推动农业数据

权属立法,并建设开源社区促进技术共享与生态共建。未来可进一步探索农业大模型、数字孪生即服务(DTaaS)、星地协同感知等方向,构建“数据采集-模型训练-决策服务-市场交易”的完整生态链,推动农业数字化与智能化转型。

[项目信息]

本项目由自治区级大学生创新创业训练计划项目资助,项目名称:广西职业技术学院2025年大学生创新创业训练计划项目《棚云智耕-数据孪生丰获每一寸土地》,项目级别:国家级,项目类别:一般项目,项目编号:202514684018X。

[参考文献]

- [1]卢浩.聚焦“三高一低”打造东部平原设施农业创新高地[J].农村工作通讯,2023,(23):51-52.
- [2]王浩,孟现勇,丁建丽,等.数字孪生驱动的水-能-粮-生耦合系统协同治理新范式[J].中国水利,2025,(18):1-11.
- [3]马若飞,杜岳峰,郭大方,等.农场数字孪生技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2025,56(09):257-277.
- [4]曲晶,李瑞轩,梁斌,等.数字孪生在农业领域中应用进展[J].农机使用与维修,2025,(09):64-67.
- [5]马卫国.精准农业技术体系构建及其对农业生产效率提升的影响[J].河北农业,2025,(10):127-128.

作者简介:

洪韦鹏(2003--),男,壮族,广西柳州人,本科,单位:广西职业技术学院,研究方向:物联网工程。

邓煜乾(2003--),男,汉族,广西梧州人,本科,单位:广西职业技术学院,研究方向:物联网工程。

禰志远(2002--),男,壮族,广西龙州人,本科,单位:广西职业技术学院,研究方向:物联网工程。

袁书讯(2002--),男,壮族,广西桂林人,本科,单位:广西职业技术学院,研究方向:物联网工程。

*通讯作者:

谢敏君(1991--),女,壮族,广西南宁人,硕士,单位:广西职业技术学院,研究方向:教育技术。