

# 农业数字孪生的研究前沿与产业化挑战

杨桂钦 邓煜乾 禡志远 袁书讯 谢敏君 (通讯作者)

广西职业学院, 广西南宁, 530007;

**摘要:** 为系统把握数字孪生技术在智慧农业中的发展动态与前沿趋势, 并深入剖析其从技术验证走向规模化产业化的关键瓶颈, 本文采用文献调研与典型案例分析相结合的研究方法, 围绕高保真模型构建、实时数据采集与融合、智能仿真预测以及人机交互决策等核心维度, 系统梳理了农业数字孪生的研究进展, 并从技术、经济与管理三个层面综合分析其产业化面临的挑战。研究表明, 当前农业数字孪生在模型精度提升、多源数据融合和决策优化等方面取得显著突破, 为实现农业系统全要素数字化映射与动态模拟提供了重要支撑; 然而, 其在技术集成复杂、部署运维成本高、数据标准与安全机制缺失、跨领域人才短缺及商业模式不清晰等方面仍存在突出制约。面向未来, 应通过推动跨学科协同创新、构建开放标准与安全体系、探索普惠型服务模式、加强复合型人才培养等路径, 系统推进农业数字孪生技术落地与产业生态构建, 从而为农业数字化与智能化转型提供持续动力。

**关键词:** 数字孪生; 智慧农业; 研究前沿; 产业化挑战; 智能决策

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.03.013

## 引言

粮食安全作为国家安全的基石, 在人口持续增长、气候变化加剧以及资源约束趋紧的背景下, 面临前所未有的挑战。传统农业模式已难以满足现代粮食安全与可持续发展的双重需求, 以信息技术赋能农业, 推动其向精准化、智能化与高效化转型, 成为全球农业发展的共识与必然趋势。智慧农业作为现代农业的高级形态, 深度融合物联网、大数据、人工智能、云计算等新一代信息技术, 正深刻重塑农业生产与经营的全过程。然而, 当前大多数智慧农业系统仍停留在“感知-分析-部分控制”的初级阶段, 缺乏对农业实体全生命周期、全要素的数字化映射与动态模拟能力。数字孪生作为信息物理系统融合的核心技术, 应运而生。其通过在数字空间中构建与物理实体高度一致的虚拟模型, 实现实体状态的实时映射与未来行为的仿真预测, 为农业系统优化提供前所未有的决策支持<sup>[1]</sup>。在农业场景中, 数字孪生的应用对象涵盖温室、农田、畜牧个体乃至区域农业生态系统, 使管理者能够在虚拟环境中预演不同农艺策略, 评估其对产量、品质及环境的影响, 从而实现从“经验驱动”到“数据与模型驱动”的根本转变。据MarketsandMarkets预测, 至2027年, 全球数字孪生市场规模将达735亿美元, 农业作为新兴应用领域展现出巨大潜力。

尽管前景广阔, 农业数字孪生从概念验证、试点示范走向规模化、商业化应用仍面临多重障碍。本文旨在系统梳理其研究前沿, 深入剖析产业化进程中的关键瓶颈, 为后续技术研发、政策制定与产业实践提供参考。

## 1 农业数字孪生的研究前沿

### 1.1 多维动态建模与高保真仿真

模型是数字孪生的核心与基石, 其保真度与动态性直接决定了系统的可靠性与应用价值。当前, 农业数字孪生的模型构建正从静态、单一属性的描述, 向多物理场、多尺度、多学科耦合的动态模拟方向深化。在作物建模方面, 研究前沿致力于将传统的作物生理生态机理模型(如DSSAT、WOFOST)与数据驱动的深度学习等方法相融合, 利用遥感、无人机及地面传感器获取的多源数据, 实现对作物株高、叶面积指数、生物量等关键参数的三维、动态化精细模拟<sup>[2]</sup>。例如, 通过结合计算机图形学与植物生理学, 已能够构建可逐日可视化反映生长进程的虚拟植株。在环境建模层面, 研究聚焦于构建包含土壤水分、养分、温度及微生物活动等要素的动态土壤模型, 并致力于与气象模型、水文模型进行耦合, 以精确模拟水肥在土体中的运移、转化及其与作物根系的交互过程。对于设施农业, 则需建立其建筑结构、环境调控设备(如卷帘、风机、补光灯)的高精度模型, 以模拟内部光、温、湿、气等环境场的动态分布, 为环境精准调控提供依据。

### 1.2 空-天-地协同感知与数据融合

数字孪生的生命力源于数据的实时性、准确性与全面性。面对农业场景的广阔性与异质性, 构建高效可靠的数据采集与融合体系成为关键前沿。当前, 研究重点在于构建“卫星遥感(宏观、周期性)一无人机遥感(中观、机动性)一物联网传感器(微观、连续性)”相结

合的“空-天-地”一体化协同感知网络。例如，利用高光谱、多光谱卫星影像进行区域尺度的作物长势与胁迫监测；通过无人机搭载激光雷达、多光谱相机获取田间尺度的精细三维信息；并借助部署于田间的各类环境传感器实现秒级至分钟级的数据采集。在此基础之上，如何对由此产生的多源、异构、多尺度农业数据进行有效融合与同化，是核心挑战与技术前沿。研究包括利用数据同化技术将观测数据动态嵌入过程模型，以优化和校准模型状态变量；采用边缘计算技术在数据源头进行初步清洗、特征提取与压缩，以减轻数据传输与存储负担；以及开发专门算法以处理农业数据中常见的噪声、缺失值与时空不一致性问题，从而为上层模型与决策提供高质量、一致性的数据基底。

### 1.3 智能仿真推演与决策优化

数字孪生的核心价值在于其对系统未来状态的预测能力与对管理决策的优化能力，这构成了其从“映射现状”走向“预演未来”的关键跨越。在智能仿真与预测方面，基于构建的高保真模型和持续流入的实时数据，数字孪生系统能够运行前瞻性仿真，预测未来一段时间内的作物产量、病虫害发生风险、灌溉需求等关键指标。机器学习，特别是时间序列预测模型（如 LSTM、Transformer）和强化学习，被广泛用于提升预测的准确性与自适应能力。例如，通过训练 LSTM 模型实现对温室内部温度、湿度的超前预测，为环境控制策略的预先调整提供科学依据<sup>[3]</sup>。在优化决策层面，前沿研究集中于将数字孪生与各类优化算法（如遗传算法、粒子群算法）及强化学习相结合，形成“感知-仿真-优化-执行”的决策闭环。该系统能够在虚拟空间中自动、高效地模拟成千上万种不同的管理方案（如不同的水肥组合、播种密度或收割时间），并综合评估其经济收益、资源利用及环境影响，最终推荐出帕累托最优或近似最优的管理策略，辅助管理者进行科学决策，从而实现从被动响应到主动优化的根本性转变。

### 1.4 沉浸式交互与可视化呈现

为了降低农业数字孪生系统的使用门槛，并充分发挥其辅助决策的潜力，直观、高效且符合用户认知习惯的人机交互与可视化呈现方式至关重要。当前，三维可视化与沉浸式交互是这一领域的重要趋势。利用 Unity3D、UnrealEngine 等高性能游戏引擎开发高真实感、可交互的农业场景三维可视化系统，已成为主流技术路径。用户可通过终端设备，以“上帝视角”或第一人称视角漫游于虚拟农田、温室或畜舍中，直观地审视

作物长势三维形态、土壤墒情空间分布、设备运行状态等信息，极大地增强了数据的空间理解力。更进一步，混合现实技术的研究与应用正推动数字信息与物理世界的深度融合。通过增强现实（AR）眼镜或虚拟现实（VR）设备，现场工作人员可以在实地考察时，实时叠加显示由数字孪生系统提供的作物潜在产量信息、病虫害预警信号或设备维修指导手册，实现“所见即所得”的增强感知与智能指导，显著提升了现场农事操作的精准度与工作效率。

## 2 农业数字孪生的产业化挑战

### 2.1 技术集成复杂度与系统可靠性问题

农业数字孪生系统的构建是一项高度复杂的系统工程，其技术集成难度与对可靠性的严苛要求构成了产业化的首要障碍。该系统需要将物联网感知、大数据处理、人工智能算法、动力学仿真与三维可视化等多种异构技术进行深度融合与无缝衔接，这对系统架构设计和技术团队的跨领域能力提出了极高要求。更为棘手的是，农业模型具有强烈的地域依赖性。一个在特定气候土壤条件下验证成功的作物或环境模型，在跨区域应用时往往表现不佳，需要进行大量耗时费力的本地化数据采集与参数校准工作，这背后需要深厚的农学知识积累作为支撑，显著拉长了部署周期并增加了技术门槛<sup>[4]</sup>。此外，农业生产本身具有连续性与季节性特征，要求数字孪生系统必须具备 7×24 小时的稳定运行能力。然而，田间恶劣的工作环境对传感器、通信设备等硬件设施的耐用性构成了严峻考验，同时云端服务的长时期稳定性与数据链路的可靠性也是保障系统不间断服务必须解决的现实难题。

### 2.2 高投入与运维成本制约规模化应用

成本效益是任何技术能否实现规模化推广的核心考量，而对于农业数字孪生而言，高昂的初始投资与持续的运维成本已成为制约其广泛落地的主要经济壁垒。构建一个功能完整的数字孪生系统，前期需要在硬件和软件上进行大量投入。据初步估算，仅为实现百亩级高标准农田的精细化孪生管理，其硬件成本就可能高达数十万元人民币。beyond 于此，系统的长期运维更是一项持续性支出，包括传感设备的电力供应或电池更换、野外环境下设备的故障维修与更换、数据通信流量费用、云平台服务器租赁费用以及后续的技术支持与模型迭代更新费用。对于普遍利润微薄、抗风险能力较弱的农业生产主体而言，如此高昂的综合成本使其望而却步。加之数字孪生带来的效益往往具有长期性和隐性特征，

难以在短期内进行精确量化和兑现,导致投资回报率存在不确定性,进一步影响了农业经营者的投资决策意愿。

### 2.3 数据标准缺失与安全隐私风险

数据作为驱动数字孪生的“血液”,其采集、流通与使用的过程正面临着标准不统一与安全保障不足的双重困境。当前,农业领域的传感器、农机装备及无人机等设备厂商众多,各自采用不同的数据格式、通信协议与接口标准,形成了严重的“数据孤岛”现象。缺乏统一的数据采集、存储、交换与应用规范,使得跨平台、跨系统的数据融合与互操作变得异常困难,极大地制约了数字孪生开放生态的形成与规模化发展。与此同时,数字孪生系统汇聚了农业生产全过程的核心敏感数据,包括精确的地块位置、种植品种、农事操作记录、投入品使用情况及产量信息等,这些数据直接关系到生产经营者的核心竞争力与隐私安全<sup>[6]</sup>。一旦发生数据泄露、篡改或滥用,可能给经营者带来重大的经济损失。因此,建立健全面向农业数字孪生的数据加密传输与存储、细粒度访问控制、安全审计与隐私计算机制已刻不容缓。

### 2.4 可持续商业模式与产业链协同困境

一个产业能否健康持续发展,最终取决于其是否形成了成熟的商业模式与协同高效的产业生态。目前,农业数字孪生项目大多依赖于政府科研经费或示范工程项目的短期资助,缺乏市场化、可持续的自我造血能力与商业模式。究竟是向终端用户收取软件即服务(SaaS)订阅费,还是将数字孪生服务与种子、化肥、农机等农资农技服务进行捆绑销售,或是通过提升农产品品质与可追溯性来赋能品牌增值并从中分成,这些价值实现路径尚在探索之中,未有成熟范式。然而,当前农业产业链各环节之间信息壁垒森严,上下游企业缺乏有效的数据共享机制与利益分配模式,使得数字孪生难以突破单点应用的局限,实现全链条的资源配置优化与价值提升,限制了其整体效益的显现。

## 3 结束语

数字孪生技术为智慧农业的发展描绘了激动人心的蓝图,它通过构建物理农业与数字空间的实时交互闭环,为实现农业生产的精准化、智能化和可持续发展提供了前所未有的强大工具。本文系统梳理了其在模型构

建、数据融合、智能决策和人机交互等方面的研究前沿,展现了其巨大的应用潜力。然而,我们必须清醒地认识到,其产业化道路上面临着技术集成复杂、成本高昂、标准缺失、人才短缺和商业模式不明等严峻挑战。

### 参考文献

- [1]谭魏欣.数字孪生技术在水利工程中的应用策略研究[J].水上安全,2025,(18):64-66.
- [2]曲晶,李瑞轩,梁斌,等.数字孪生在农业领域中的应用进展[J].农机使用与维修,2025,(09):64-67. DOI:10.14031/j.cnki.njwx.2025.09.014.
- [3]王淑荣,陶钰.数字孪生技术推进果树产业发展:运行机理、主要模式与路径选择[J].内蒙古科技与经济,2025,(16):56-58+66.
- [4]李书德,张亚文,王淳,等.6G网络在数字孪生领域的应用需求及挑战分析[J/OL].电信科学,1-7[2025-11-13].<https://link.cnki.net/urlid/11.2103.TN.20241217.0943.016>.
- [5]王爽.数字孪生赋能乡村治理现代化的现实困境与推进路径[J].广西糖业,2024,44(05):378-382.

作者简介:杨桂钦(2003年-),男,汉族,广西贵港,本科,研究方向:物联网工程。

邓煜乾(2003年-),男,汉族,广西梧州,本科,研究方向:物联网工程。

禩志远(2002年-),男,壮族,广西龙州,本科,研究方向:物联网工程。

袁书讯(2002年-),男,壮族,广西桂林,本科,研究方向:物联网工程。

通讯作者:谢敏君(1991年-),女,壮族,广西南宁,硕士,研究方向:教育技术。

项目信息:本项目由国家级大学生创新创业训练计划项目资助,项目名称:广西职业师范学院2025年大学生创新创业训练计划项目《棚智春耕-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