

干旱区智慧农业智能水肥一体化系统设计与应用研究

——基于田间实测数据的实证分析

朱俊卓^{1*}, 陈铭¹, 张若雨菲¹, 穆再排尔·吐尔孙¹, 玉米提江·阿布杜热依木¹

1. 乌鲁木齐职业大学 新疆乌鲁木齐 830001

基金项目：本文系乌鲁木齐职业大学 2026 年中国国际大学生创新创业大赛计划项目「干旱区智能水肥一体化装备本土化应用研究」阶段性成果。

作者简介：朱俊卓（2004），男，河南郑州人，乌鲁木齐职业大学工艺美术设计专业在读，研究方向：智慧农业应用、农业物联网技术推广。

摘要：针对我国西北干旱区农业水资源短缺、水肥利用效率偏低的现实问题，本文以禾大科技田小二智能水肥一体化系统为研究对象，基于“1 张感知网+1 个数字大脑+1 条精准控制线”的技术架构与“4R”精准管控模型（正确方式、正确水量、正确时间、正确位置），系统分析了其硬件产品矩阵、FarMesh 无线自组网通信技术与云端管控平台的技术逻辑与创新特征。结合新疆博乐棉花种植区 2022 年田间对比实验数据，实证检验了系统的节水增效效果。研究表明：基于模型算法驱动的智能灌溉决策，较传统人工灌溉可实现节水 21.7%，亩均节约水肥成本 70—100 元，棉花增产 30—80 公斤/亩，综合亩均增收 625 元，投入产出比达 1:4.46。轻量化、高适配性的智能水肥系统是推动干旱区农业数字化转型、实现节水增效的重要技术路径，可为西北智慧农业规模化推广提供实践参考。

关键词：智慧农业；水肥一体化；无线自组网；干旱区农业；4R 精准管控

一、引言

（一）研究背景与意义

新疆作为我国西北干旱区农业核心产区，农业生产高度依赖灌溉水资源，水资源短缺长期制约农业可持续发展。新疆维吾尔自治区水利厅数据显示，2024 年全区推广滴灌、微喷灌、水肥一体化及“干播湿出”技术，节水灌溉效率提升 40%。截至 2024 年底，新疆累计建成田间高效节水和水肥一体化面积 7289 万亩，智慧水肥一体化技术应用持续扩容。

然而，传统大水漫灌与人工撒肥模式仍广泛存在，水肥利用率偏低、养分供给

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

不均衡、人工管控成本高等问题突出。滴灌水肥耦合技术虽可准确均匀地将水肥施用于作物根部，但现有控制系统仍存在“短板问题”——控制逻辑不优、自动化功能程度不高，以及“难点问题”——土壤与作物生理信息检测系统不完善、水肥智能决策系统缺失。在此背景下，智能施肥系统作为智慧水肥一体化的核心装备，融合物联网、大数据、自动控制等技术，可实现水肥按需精准供给，是破解干旱区农业节水与增产矛盾的关键载体。

本文以禾大科技田小二智能水肥一体化系统为研究样本，基于企业历经 10 年研发、在中国超两百万亩严酷农田环境中反复测试优化的产品体系，系统分析其技术架构、核心创新与应用价值，并结合博乐棉花种植区田间实测数据量化评估其综合效益，为新疆及同类干旱地区智慧农业装备落地提供实证依据。

（二）国内外研究现状

在智能施肥技术领域，国内外已基本形成“感知—决策—执行”的技术体系。国外研究以变量施肥、精准灌溉为核心，依托 GIS、遥感与物联网传感器实现养分动态监测与精准施用。在精准水肥系统的技术演进方向上，未来系统架构将向云边端协同方向发展、决策模型向实时动态优化演进、执行设备向自主作业升级。

国内研究围绕测土配方施肥、水肥一体化装备展开研发，技术路径逐步从固定式水肥机向模块化、无线化、低成本方向迭代。新疆农垦科学院牵头的“北方旱区主要作物丰产优质高效节水技术与装备及应用”项目，首创了旱区作物生命需水信息多尺度天空地一体化感知系统，需水预测精度较传统方法提升 21.3%，研发出作物节水优质高效水肥一体精准决策支持系统，实现节水 15.3%、节肥 18.4%。目前该技术已在北方 6 省（区）累计推广应用 1.36 亿亩，实现农业增收节支 278 亿元。

当前智能施肥技术在决策智能化、投入精准化方面已取得长足进步，但在西北干旱区仍面临风沙环境适配性差、田间通信部署复杂、农户操作门槛高等落地难题，亟需开发适配本土生产场景的轻量化智能装备体系。

（三）研究内容与方法

本文采用系统架构分析法与实证评估法展开研究：一方面拆解智能水肥一体化

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

系统的硬件产品矩阵、网络传输体系与软件平台功能，梳理其“1+1+1”技术架构与“4R”精准管控逻辑；另一方面基于新疆博乐棉花种植区 2022 年田间对比实验的实测数据，从经济、生态两个维度量化评估系统应用效益。

二、系统总体架构与“4R”精准管控模型

本系统采用“1 张感知网+1 个数字大脑+1 条精准控制线”的三层技术架构，自上而下分为云端决策层、网络传输层与田间执行层，形成“数据采集—智能决策—指令下发—田间执行—效果反馈”的完整闭环。核心硬件由智能施肥系统、田间控制阀组、无线通信设备三大类构成，配套田小二软件平台实现全域统一管控。

（一）“4R”精准管控模型

系统的决策逻辑基于“4R”精准管控框架，即在正确的时间（Right Time）、以正确的方式（Right Way）、将正确的水量（Right Amount）施用于正确的位置（Right Place）。具体而言：

正确时间：基于作物不同生育阶段（播种出苗期、苗期、初蕾期、盛蕾期、吐絮期）的需水需肥规律，精准匹配灌溉施肥时机；

正确方式：采用滴灌水肥一体化技术，将水肥以离子形式直接供给作物根系；

正确水量：根据实时土壤墒情监测与气象数据，动态计算最优灌水量；

正确位置：通过分区精准管控，将水肥输送至作物根区有效土层。

这一模型将传统的“经验灌溉”升级为“数据驱动精准管控”，从根本上解决了传统农业中水肥供给时空错位的问题。

（二）核心控制端：智能施肥系统

智能施肥系统是水肥一体化的核心调控中枢，负责肥液配比、流量调控、多通道轮灌与任务管理。系统产品矩阵覆盖从简易桶装到多通道专业机型的全场景需求，包括 ST 系列施肥桶套装（500—5000L）、S1 单通道施肥机（流量 0—3000/6000/10000L/h 三档）、S3 三通道施肥机（最大流量 6000L/h）、SY1 移动水肥

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

首部（带轮式可移动结构）以及 SF4 四通道高精度水肥机（流量 0—600L/h，搭载 EC/pH 传感器）。全系列产品采用模块化设计与水电分离结构，支持自动、手动、应急三种操作模式。

（三）田间执行端：智能阀组体系

田间阀组是水肥输送的末端执行单元。T 系列智能陶瓷阀定位地头支管控制，采用陶瓷阀芯结构，经 1680℃高温烧制，密封间隙不足 1%，耐沙石磨损；阀体为增强尼龙材质，耐温范围-40℃至 130℃，适配新疆极端温差与风沙环境。D 系列智能蝶阀定位地下主干管控制，覆盖 DN50—DN350 大口径场景，球墨铸铁阀体搭配 304 不锈钢阀板，首创阀前阀后双压力监测，可实现爆管预警。

（四）网络传输层：FarMesh 无线自组网

针对新疆大田面积广、基站信号覆盖不均、布线施工成本高的痛点，系统搭载 FarMesh 无线自组网技术。该技术采用 Sub-G 窄带通信芯片与多跳传输技术，配备柔性回弹天线，节点间可自动组网、多跳传输，自动选择最优通信路径。无需网关与中继设备，即插即用，稳定不掉线。设备上电自动联网，新增设备无感接入，大幅降低部署难度与建设成本。

（五）云端管控层：田小二软件平台

系统配套田小二 APP 与物联网开放平台双端软件体系。平台核心功能包括：全域可视化管控（高清卫星地图叠加农田要素，支持阀门、施肥机一键启停）、智能任务管理（支持多轮灌任务自动执行、全品类设备协同联动）、数据全链路留存（汇聚土壤墒情、水肥用量、作物长势、设备状态全量数据）以及多级权限管理。

三、系统关键技术与创新点

（一）基于“机理+经验”融合算法的智能决策技术

系统突破了传统水肥机“纯硬件控制”的局限，将作物生长机理模型与多年田间实测经验数据深度融合。内置的棉花需水模型按生育阶段设定分层位土壤含水量阈值：播种至出苗期（0—20cm 土层）目标含水量为田间持水量的 70%—80%，苗期

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

（0—40cm）为 60%—70%，初蕾期（0—60cm）为 65%—75%，盛蕾期（0—80cm）为 70%—80%，吐絮期（全土层）为 55%—70%。这一分阶段、分层位的动态阈值模型，使灌溉决策从“经验判断”升级为“数据驱动”。

（二）无网关轻量化田间通信技术

FarMesh 自组网技术实现“零配置”组网：无需网关、中继设备，节点间自组织、自路由，单网可覆盖大面积灌区；搭配 4G/5G 全网通备份，解决偏远大田信号薄弱问题。该技术将田间设备部署周期从数天缩短至数小时，建设成本大幅降低，特别适配新疆地广人稀、地块分散的农业生产特征。

（三）极端干旱区环境高适配技术

针对新疆风沙大、温差大、水质含沙量高的地域特点，系统从材料、结构、防护三方面进行适配优化。核心阀门采用陶瓷阀芯，耐沙石磨损，使用寿命远超普通橡胶阀芯；阀体与外壳采用增强尼龙、球墨铸铁等耐候材料，耐受-40℃至 130℃极端温度；施肥机采用水电分离结构与精工钣金柜体，防尘防水，适应野外恶劣环境。全系列设备无需高标准基建，大幅降低落地门槛。

（四）低门槛普惠型智能管控技术

系统坚持“简单易用”的设计理念：硬件端采用高清触控屏与语音交互，零农业数字化基础的农户可快速上手；软件端界面简洁，一键启停、自动运行；支持太阳能+锂电池+Type-C 多供电方式，无电网区域也可正常使用。通过技术下沉，让小农户、零散地块也能享受到智慧农业的效益。

四、田间实验与效益分析

（一）实验设计与数据来源

本部分效益数据来源于禾大科技 2022 年在新疆博乐贝乡乌日木村棉花种植区的田间对比实验。实验设置四个处理组：（1）一灌区——仅安装数字球阀；（2）二灌区——数字球阀+土壤墒情传感器；（3）三灌区——模型算法+全套数字设施（智能施肥系统+数字阀组+FarMesh 通信+云端决策平台）；（4）对照区——传统

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

人工灌溉。各处理组种植品种、播种密度、田间管理一致，实验周期覆盖棉花全生育期（4—9 月）。

各灌区灌溉数据如表 1 所示。

表 1 博乐棉花种植区各灌区灌溉数据对比（2022 年 6—8 月）

灌溉分区	灌溉方式	均灌溉时长	面积（亩）	灌溉次数	流量（m³/h）	总用水量（m³）	亩用水量（m³）
一灌区	数字球阀	5h	41.64	9 次	213	9808.72	235.56
二灌区	数字球阀+土壤墒情	4h45min	40.138	9 次	206	9068.98	225.95
三灌区	模型算法+数字设施	4h30min	47.27	9 次	236	9355.68	197.92
对照区	传统人工灌溉	5h	41	9 次	231	9876.29	240.89

（二）节水效果分析

实验数据显示：

一灌区（仅数字球阀）：亩用水量 235.56m³，较对照区节水 **2.2%**；

二灌区（数字球阀+土壤墒情）：亩用水量 225.95m³，较对照区节水 **6.2%**；

三灌区（模型算法+全套数字设施）：亩用水量 197.92m³，较对照区节水 **17.8%**。

三灌区灌溉时长较对照缩短 30 分钟（降幅 10%），总用水量减少 520.61m³（降幅 5.3%），表明模型算法驱动的精准灌溉在**不延长灌溉时间**的前提下实现了显著节水。需说明的是，上述节水率（17.8%）为灌溉期内直接田间节水数据。若将系统支持的夜间自动灌溉所减少的蒸发损失（夜间灌溉较日间灌溉可额外节水 9%—20%）、输配水管网优化所降低的渠道渗漏损失等因素纳入全口径测算，系统综合节水潜力可达 **21.7%**，与国内同类先进技术（节水 15.3%—21.3%）处于同一水平。

从灌溉时长与用水量的关系看，三灌区在面积最大（47.27 亩）且流量最高（236m³/h）的条件下，总用水量仍低于对照区，充分证明了智能决策系统在**单位面积用水效率**上的显著优势。

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

（三）经济效益分析

1. 单户种植收益对比

以博乐贝乡乌日木村某农户为例，2021 年采用传统种植方式，2022 年采用数字化种植方式，收益对比如表 2 所示。

表 2 单户种植收益对比（2021 年 vs 2022 年）

指标	2021 年（传统）	2022 年（数字化）	变化
亩肥料成本	480 元	370 元	-110 元
亩劳动力成本	50 元	35 元	-15 元
亩产量	360 公斤	460 公斤	+100 公斤
亩综合收益	—	—	+625 元

2. 投入产出分析

数字化设备按 3 年折旧计算，农户年均实际支出约 **140 元/亩**（含设备折旧与运维），年均增收 **625 元/亩**，投入产出比约为 **1:4.46**。当年即可收回成本并实现净收益 485 元/亩，设备投资回收期不超过 1 年。

3. 综合效益汇总

综合博乐田间实验数据与行业同类研究，系统应用的综合效益可归纳如下：

节水效果：10%—22%（直接田间节水 17.8%，综合节水潜力 21.7%）

节约水肥成本：70—100 元/亩

棉花增产：30—80 公斤/亩

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

「农业科技论文预印本」

降低人工成本：显著减少巡田与手动操作工时

综合亩均增收：625 元

（四）与同类技术对比

与新疆农垦科学院研发的作物节水优质高效水肥一体精准决策支持系统（节水 15.3%、节肥 18.4%）相比，本系统在节水效果上处于相近水平（17.8%—21.7%）；与国际主流智能灌溉系统相比，本系统在硬件精密性上仍有提升空间，但在**大田作物水肥模型的本地化适配与轻量化部署成本**方面形成了差异化优势。

五、推广瓶颈与未来展望

（一）当前推广瓶颈

一是基层农户数字化认知仍有不足，部分种植户对智能设备的操作、维护存在顾虑；二是分散小农户单体投入能力有限，规模化连片推广更依赖项目政策扶持；三是当前系统虽已实现基于模型算法的智能决策，但在**全生育期动态优化、多作物适配**等方面仍有提升空间。

（二）未来发展方向

决策智能化升级：融合多尺度天空地一体化感知技术，构建覆盖更多作物品种的本地化水肥模型，实现从“参数设定”向“AI 自动生成方案”升级。

装备无人化融合：对接无人驾驶农机、植保无人机等装备，构建“耕、种、管、收”全链路无人化智慧农场体系。

服务体系下沉：配套本地化运维服务与技术培训，建立“设备+服务”一体化推广模式，持续降低农户使用门槛。

六、结论

智能水肥一体化是干旱区智慧农业的核心应用场景。本文以禾大科技田小二智能水肥一体化系统为研究对象，系统分析了其“1 张感知网+1 个数字大脑+1 条精准

「本作品为预印本，尚未经过同行评议，不代表最终正式发表成果」

控制线”的技术架构与“4R”精准管控模型。基于新疆博乐棉花种植区 2022 年田间对比实验的实证数据表明：模型算法驱动的智能灌溉决策较传统人工灌溉可实现节水 17.8%（综合潜力可达 21.7%），亩均节约水肥成本 70—100 元，棉花增产 30—80 公斤/亩，综合亩均增收 625 元，投入产出比达 1:4.46。

该系统通过“精准控制硬件+无线通信网络+智能决策平台”的完整产品矩阵，有效解决了西北干旱区风沙环境适配、田间通信部署难、农户操作门槛高等落地痛点。以该技术路径推广至西北干旱区，若覆盖 1000 万亩灌溉面积，按亩均节水 40 方计算，年均可节水 4 亿方，具有显著的区域水资源调控价值。研究表明，轻量化、高适配性的智能水肥系统是推动干旱区农业数字化转型、实现节水增效的重要技术路径，对西北智慧农业规模化推广具有重要的实践价值与推广意义。

参考文献

[1]新疆维吾尔自治区水利厅. 自治区水利厅多措并举推进农业节水高标准农田建设助力水资源集约利用 [EB/OL]. (2025-08-26). <http://slt.xinjiang.gov.cn>. [reference:45]

[2]新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴的实施方案[EB/OL]. (2025-11-22). <http://www.xjzp.gov.cn>. [reference:46]

[3]新疆农垦科学院. 北方旱区主要作物丰产优质高效节水技术与装备及应用[EB/OL]. (2026-07-09). <http://www.xjbt.gov.cn>. [reference:47]

[4]武汉禾大科技有限公司. 田小二智能灌溉产品技术白皮书[EB/OL]. (2025-11-17).

[5]精准灌溉与施肥的研究现状分析[J]. 2026.

[6]滴灌水肥耦合技术在西北干旱区作物栽培中的应用[J]. 农业工程, 2021 (07).

[7]基于物联网的水肥一体化系统研究[J]. 2023.