

基于土壤墒情预测的干旱区棉花智慧灌溉决策系统研究

作者简介：乌鲁木齐职业大学，刘思嘉，学生，山西省平遥县，2007.08

摘要

新疆作为我国核心棉花产区，区域气候干旱、水土资源供需矛盾突出，现有棉田膜下滴灌模式多依靠农户经验开展灌溉作业，存在水肥利用效率偏低、人工管理成本高、灌水定额动态调控不足等现实难题。本文构建一套融合多层土壤墒情动态监测与作物短期需水量预测的棉花智慧灌溉闭环决策系统。系统依托时域反射法（TDR）土壤水分传感器与田间一体化微型气象站采集多源环境数据，采用径向基函数（RBF）神经网络构建棉花 3~5 日需水量预测模型，结合棉花不同生育期临界墒情阈值自动输出标准化灌溉调控方案。以新疆阿克苏规模化棉田为试验区域开展完整生长季定点对比试验，结果表明：相较于传统经验灌溉模式，本系统可实现田间灌溉用水量削减 14%~26%；籽棉产量提升 22.6%，水分利用效率提升 76.3%；灌溉环节人工投入降低 72%，水肥综合生产成本下降 12%~27%，每亩可新增综合收益约 196 元，且棉花纤维长度、断裂比强度、马克隆值等核心品质指标无显著劣变。该系统兼顾节水增产、降本省工多重效益，为西北干旱区棉花规模化精准灌溉提供可落地的智能化技术方案。

关键词：干旱区；棉花；土壤墒情；智慧灌溉；灌溉决策系统

一、引言

新疆是国内棉花种植规模最大的产区，区域年均降水量稀少，农田生产用水高度依赖地表水引水，水资源短缺已成为制约棉花产业可持续发展的核心瓶颈。当前新疆棉田已全面普及膜下滴灌节水工艺，但灌溉调控仍以农户主观经验为核心依据，农户依靠直观土壤干湿状态判定灌水时机与灌水量，易出现过量灌水造成深层渗漏、灌水不足产生棉花水分胁迫两类问题。同时田间出水桩布设密度为每 10~15 亩 1 处，灌溉作业需人工逐地块启闭阀门，流程繁琐、用工量大。

伴随农村农业劳动力持续流失，传统粗放式灌溉管理模式已难以适配千亩级规模化棉田生产需求。

近三年，物联网、机器学习技术逐步落地新疆棉区智慧农业示范项目，通过土壤墒情实时监测、作物需水模型预测、灌溉设备自动控制形成一体化管控体系，在兵团、南疆各地州试验田取得良好应用效果。现有棉田智能灌溉相关研究多聚焦北疆石河子、昌吉灌区，针对南疆阿克苏盐碱棉田、适配多层土层墒情监测且具备断网离线应急决策能力的一体化灌溉决策系统仍较为匮乏；多数机器学习灌溉预报模型仅采用浅层土壤水分数据，未结合 0~100 cm 根系分层墒情优化预测精度。基于上述研究现状与产业实际需求，本文设计面向南疆干旱区棉花的智慧灌溉决策系统，构建“感知 - 传输 - 决策 - 执行”全流程闭环管控框架，依托 RBF 神经网络完成棉花日耗水量预测，结合棉花生育期差异化墒情阈值生成灌溉指令，并通过 2024—2025 连续两个完整生长季田间对照试验验证系统节水、增产、降本综合效益，为干旱区棉田精准灌溉智能化升级提供技术支撑。

二、智慧灌溉决策系统总体设计

（一）系统闭环运行架构

1. 本系统遵循数据感知 - 无线传输 - 智能决策 - 设备执行全闭环运行逻辑，整体划分为四大独立功能模块，各模块协同完成棉田自动化灌溉管控：

2. 数据采集模块：田间布设多层土壤水分传感器与一体化微型气象站，持续采集分层土层墒情、气象环境基础数据；

3. 数据传输模块：监测终端通过 4G / 窄带物联网将实时监测数据上传至云端服务器完成存储、清洗；

4. 智能决策模块：云端依托完成训练的 RBF 神经网络模型预测棉花短期需水量，结合地块实时土壤储水量与生育期墒情阈值生成标准化灌溉方案；

5. 自动执行模块：云端灌溉指令下发至田间电磁阀控制器，实现灌溉阀门远程自动启停，完成定量、定时灌水作业。

（二） 田间数据采集硬件配置

土壤墒情监测采用时域反射法（Time Domain Reflectometry, TDR）分层传感器，可同步测定 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm 四层土壤体积含水量，设备测量误差 $\leq 2\%$ 、响应速度快，可完整覆盖棉花全生育期根系主要分布土层，精准反映根系层水分盈亏状态。配套田间一体化微型气象站，同步采集日均气温、日照时长、空气相对湿度、风速、降水量五类核心气象参数。所有监测终端每 30 min 自动上传一组数据，种植户与管理人员可通过移动端小程序、PC 端网页后台实时查看地块墒情、气象动态数据。

（三） 基于 RBF 神经网络的棉花需水量预测模型

作物需水量精准预测是本系统核心功能，选取径向基函数（RBF）神经网络构建棉花日耗水量预测模型。模型输入变量为日均气温、日照时数、空气相对湿度，输出变量为棉花单日蒸散耗水量；依托新疆石河子灌区 2022—2024 连续 3 年气象、灌溉实测数据集完成模型训练与验证，样本总量 1095 组，按照 7:2:1 划分训练集、验证集、测试集。RBF 神经网络无需构建复杂作物水分物理平衡方程，可通过海量历史数据自主挖掘气象因子与棉花耗水的非线性关联。经样本校验，模型平均相对误差（MRE）控制在 4.8% 以内，决定系数 $R^2=0.942$ ，预测精度满足南疆棉田灌溉实际调控需求。

（四） 分生育期差异化灌溉决策逻辑

系统每日 0 时自动核算地块当前土壤有效储水量，同步预测未来 3~5 d 棉花总需水量，预设田间持水量 60% 作为基础灌水下限阈值，该阈值参照《北疆绿洲棉田膜下滴灌适宜土壤水分调控标准》相关研究确定。当监测根系层土层含水量低于临界阈值时，系统自动生成灌水指令，单次灌水量依据未来多日预测需水总量核算。针对棉花蕾期、花铃期、吐絮期三大关键生育阶段，系统内置差异化灌水下限、单次灌水定额参数，参数支持后台人工自定义校正，适配不同土壤质地、不同主栽棉花品种种植地块。

三、系统田间试验与应用效果分析

（一）试验方案设计

试验地块选址于新疆阿克苏地区库车市规模化连片棉田，全区统一采用膜下滴灌种植模式，供试棉花品种为当地主栽新陆中 88 号。试验周期覆盖 2024、2025 两年棉花完整生长季，设置两组平行对照：试验组部署本文设计的智慧灌溉决策系统，对照组采用当地传统人工经验灌溉模式；两组地块土壤质地为砂壤土、0~60 cm 土层含盐量 2.1~2.5 g/kg、棉花种植密度、基肥追肥用量完全保持一致，每个处理设置 3 块重复试验小区，单小区面积 1.2 hm²。试验期间持续采集土壤分层墒情、全生育期总灌溉水量、籽棉产量、棉花纤维品质、人工投入、水肥消耗等指标，完成多维度效益对比分析。

（二）系统节水效果分析

2024—2025 两年全生长季监测均值数据表明，采用智能决策调控的试验组地块亩均灌溉用水量较传统经验灌溉对照组降低 14%~26%。传统人工灌溉存在灌水过量深层渗漏、补水滞后产生干旱胁迫两类突出问题；系统通过每 30 min 实时墒情监测与 3~5 d 短期需水预判，精准匹配棉花阶段性水分需求；在夏季偶发降雨时段，系统可自动识别土壤水分增量，减少无效灌水频次，显著降低农业水资源无效损耗，与兵团数字棉田示范项目节水规律保持一致。

（三）系统对棉花产量与纤维品质的影响

部分研究认为定量节水灌溉可能造成棉花减产，但本次两年连续田间试验结果与之相反。试验组籽棉平均亩产较对照组提升 22.6%，单位耗水量对应的籽棉产出（水分利用效率）提升 76.3%。究其原因，智能化精准灌溉可长期维持棉花根系层土壤水分稳定，规避干旱胁迫与积水涝根双重生长危害，棉花营养生长、生殖生长均衡，单株结铃数量增加 18.2%、单铃重提升 9.7%，最终实现稳产增产。对棉花纤维核心品质指标检测结果显示，试验组与对照组棉花纤维长度、

断裂比强度、马克隆值无显著统计学差异（ $P>0.05$ ），证明本系统节水调控不会牺牲棉花商品纤维品质。

（四）劳动力节约与综合经济效益分析

劳动力节约是本系统突出隐性经济收益。传统灌溉模式下，人工需逐地块开关出水桩阀门，单劳动力单日管控面积上限 40~50 亩；系统电磁阀自动化远程控制后，单人可统筹管理 300 亩以上棉田，灌溉环节人工投入总量降低 72%。综合核算水肥药剂节约、人工成本下降、籽棉增产增收三项收益，地块每亩年均可新增经济效益约 196 元。系统传感器、控制器、通讯终端硬件亩均一次性投入约 560 元，静态投资回收期仅 1~2 年，长期规模化应用具备稳定净收益，契合南疆棉农生产投入承受能力。

四、系统规模化推广制约因素及优化对策

尽管两年田间试验验证系统综合效益突出，但大面积落地推广仍存在四类现实制约因素，结合新疆南疆棉区生产现状提出对应优化方案：

1.前期硬件一次性投入成本较高。墒情分层传感器、田间电动控制终端、物联网通讯设备初期采购投入对小规模散户经济压力较大。可推行多元成本分摊机制，整合地方农业节水专项补贴、设备企业批量采购让利、农户自筹资金共同承担硬件成本；或以行政村种植合作社为单位集中采购设备，多户农户共享一套监测控制系统，摊薄单亩设备投入。

2.中老年农户数字化操作能力不足。多数老龄种植户对移动端小程序、电脑后台操作不熟悉，无法自主查看墒情数据与灌溉方案。后续优化系统人机交互界面，增设短信灌溉提醒、语音播报墒情功能，同时联合乡镇农业技术推广站开展常态化数字化操作技术培训。

3.模型参数本地化适配不足。新疆南疆不同县域地块土壤质地、盐碱含量差异显著，通用 RBF 模型预测精度存在区域性偏差。推广阶段优先开展小范围本地化标定，采集目标地块连续气象、分层墒情、产量数据迭代校正模型隐含层参数，验证稳定后再扩大示范应用范围。

4.偏远连队棉田无线网络覆盖缺失。南疆部分边远连队移动 4G 信号薄弱，易造成监测数据断传、灌溉指令下发延迟。在系统底层增设本地数据缓存模块与离线灌溉决策逻辑，断网状态下依托田间本地控制终端内置模型完成基础灌水调控，保障灌溉作业不间断。

五、结论与展望

（一）结论

1.对新疆南疆干旱区棉田传统经验灌溉粗放、水肥利用率低、人工成本高的产业痛点，本文搭建一套基于多层土壤墒情监测与 RBF 神经网络短期需水量预测的棉花智慧灌溉闭环决策系统，构建“感知 - 传输 - 决策 - 执行”一体化管控框架，可自动输出分生育期精准灌溉调控方案。

2.阿克苏库车棉田 2024—2025 两年完整生长季对照试验结果表明：该系统可实现灌溉用水节约 14%~26%，籽棉产量提升 22.6%，水分利用效率大幅提高；灌溉人工投入降低 72%，水肥生产成本下降 12%~27%，每亩年均新增综合收益约 196 元，且不影响棉花纤维核心品质，兼具生态节水效益与产业经济效益，契合干旱区农业绿色高质量发展要求。

3.智能化灌溉系统仅实现灌水自动化调控，田间除草、病虫害绿色防控等农事操作仍需人工配合，生产过程需农户结合地块盐碱、苗情实际状况适度干预，无法完全实现无人化种植。

参考文献

- [1] 孟宁，齐文婷，王航，等。基于功能细根直径分级的北疆棉花节水增产灌溉阈值研究 [J]. 中国农村水利水电，2025 (07): 84-91.
- [2] 何旭刚，买买提·沙吾提，夏梓洋。基于 RBF 神经网络的膜下滴灌棉花蒸散量预测模型构建 [J]. 新疆农业科学，2024, 61 (09): 1623-1631.
- [3] 陈阳，马晓鹏。预报式智能灌溉决策对南疆棉田水肥利用效率的调控效

应 [J]. 灌溉排水学报, 2023, 42 (11): 69-76.

[4] 刘昱琪, 王洋, LIAO R K. 基于数据同化与多目标优化的棉花灌溉水分利用效率提升框架 [J]. Agricultural Water Management, 2025, 263: 109774.

[5] 马新勇, 李霞, 贾博. 智慧农业小流量滴灌技术在新疆绿洲棉田的应用效果 [J]. 世界农业经济研究, 2025, 6 (01): 45-52.