

Design and Application of Real-time Monitoring System for Farmland Soil Environment Based on Internet of Things Technology

Lanying Hua Dongyan Yang Mingyue Zhao Xiaoqian Lu Xiaodong Wu

Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing, 100048, China

Abstract

IoT technology has demonstrated significant technical advantages in agricultural informatization, providing real-time, precise, and intelligent means for farmland soil environment monitoring. This study focuses on the system design and application of IoT in farmland soil environment monitoring, constructing a real-time monitoring system composed of the perception layer, transmission layer, and application layer. The system achieves multi-dimensional monitoring of soil temperature and humidity, pH value, salinity, conductivity, and meteorological parameters. Utilizing multi-modal sensing and low-power wide-area communication technology, the system aggregates data, enables dynamic visualization, and triggers threshold alerts through a cloud platform. Combined with algorithm models, it supports decision-making for irrigation and fertilization. Experimental results indicate that this system effectively enhances the precision management of agricultural production, reduces resource waste rates, and promotes green and sustainable agricultural development. The research provides a replicable reference model for smart agriculture construction.

Keywords

Internet of Things (IoT); farmland soil; real-time monitoring; data fusion; smart agriculture

基于物联网技术的农田土壤环境实时监测系统设计与应用研究

华岚英 杨懂艳 赵明月 鲁晓倩 邬晓东

北京市生态环境监测中心, 中国·北京 100048

摘要

物联网技术在农业信息化进程中展现出显著的技术优势,为农田土壤环境监测提供了实时、精准与智能化的手段。本文围绕物联网在农田土壤环境监测中的系统设计与应用展开研究,构建了一套由感知层、传输层和应用层组成的实时监测系统,实现了对土壤温湿度、pH值、盐分、电导率以及气象参数的多维度监测。系统采用多模态传感与低功耗广域通信技术,通过云端平台实现数据汇聚、动态可视化与阈值预警,并结合算法模型实现对灌溉与施肥的决策支持。试验结果表明,该系统能有效提升农业生产的精细化管理水平,降低资源浪费率,促进农业的绿色与可持续发展。研究为智慧农业建设提供了可推广的参考模型。

关键词

物联网; 农田土壤; 实时监测; 数据融合; 智能农业

1 引言

随着我国农业现代化水平的不断提高,传统依赖经验的种植方式逐渐暴露出管理粗放、响应滞后与资源浪费等问题^[1-2]。农田土壤作为作物生长的根本环境,其理化性质的

变化对作物产量与品质具有直接影响,而实时掌握土壤环境状态成为精准农业发展的关键环节。物联网技术通过多源传感器、无线网络与数据平台的融合,为农业环境监测提供了技术支撑,使农业信息化从“数据采集”走向“数据驱动决策”^[3]。与传统监测方式相比,物联网系统能够实现分布式、连续化与远程化的环境数据采集,极大提高了农业生产的可控性与响应速度^[4-8]。本文基于农田实际需求,从系统设计原理、硬件配置、通信架构、数据处理与应用策略等方面系统研究物联网在土壤环境监测中的应用,为农业环境监测管理技术提供参考与工程示范。

【基金项目】国家重点研发计划项目(项目编号: 2025ZD1205502)。

【作者简介】华岚英(1974-),女,硕士,高级工程师,从事土壤环境监测与评价研究。

2 物联网农田监测系统总体设计与架构

2.1 系统结构与功能规划

农田土壤环境实时监测系统以分层体系架构为核心,整体由感知层、网络传输层和应用层构成,形成“采集—传输—分析—服务”的闭环结构。感知层由分布式监测节点组成,负责采集土壤温湿度、pH、电导率、盐分及环境气象等关键数据,实现多维度参数的动态监测。网络传输层利用无线通信技术将数据从农田节点传送至云端数据库,实现远程访问与集中管理。应用层通过数据分析算法与可视化平台实现数据挖掘、趋势预测与阈值预警,并为农业管理者提供智能化决策支持。系统结构遵循模块化与开放式原则,便于针对不同作物与区域特征进行灵活扩展与功能重构,使监测网络具备可扩展性与跨区域适配能力。

2.2 感知层节点设计与采集精度控制

感知层节点设计以高可靠性和低功耗为目标,由微控制单元、传感模块、电源管理模块及通信模块组成。核心控制单元采用 ARM 架构低功耗处理器,具备多通道采样与信号调理功能,可同时采集温度、湿度、电导率及 pH 等多源数据。传感模块选用高灵敏度电容式湿度传感器与离子选择电极式 pH 传感器,并通过多点标定与漂移补偿算法保证数据的长期稳定性。节点外壳采用 IP67 防护标准,具备防尘、防水与耐腐蚀性能,适应长期野外运行环境。系统配置太阳能供电与智能休眠机制,使节点在低功耗状态下保持数据采集的连续性和可靠性,从而显著延长设备寿命并降低维护成本。

2.3 通信与数据传输机制设计

为实现大范围、低功耗与高可靠的数据传输,系统采用 LoRa 与 NB-IoT 双模通信架构。LoRa 用于构建局域网范围内的多节点通信网络,具备远距离传输与强抗干扰能力;NB-IoT 负责将网关数据上传至云平台,实现跨区域数据汇聚与远程监控。通信模块集成自动重传与差错检测机制,以确保在信号衰减或干扰环境下的数据完整性。系统采用时分多址(TDMA)机制调度各节点传输,减少冲突与丢包现象。为防止突发断链导致数据丢失,系统设置分层数据缓存策略,可在恢复通信后自动补发缓存数据,确保数据连续性。该通信设计使系统在复杂农田环境中仍能保持高稳定性与高可靠性,为实时监测与远程控制提供坚实支撑。

3 数据融合与监测算法实现

3.1 多源传感数据预处理方法

在农田环境实时监测系统中,多类型传感器采集的数据受信噪漂移、温湿度变化及外部电磁干扰影响,若不加以处理将导致分析误差与模型偏移。为保证数据质量,系统在采集端嵌入多层数据预处理机制。首先采用低通滤波与滑动均值算法抑制瞬时脉冲噪声,对短周期波动进行平滑化处理,确保信号连续性与稳定性。其次,通过归一化与标准化运算统一不同量纲的物理量,使多源数据在同一尺度下可比较与融合。针对环境温度对传感器输出特性的影响,系统建

立基于历史数据的温度修正系数矩阵,动态调整传感器响应系数,减少温漂误差。为保证数据的时序一致性,各监测节点利用 GPS 授时系统实现全网同步采集,主节点定时广播校正信号,从而使时间戳统一、数据传输精准,为后续的数据融合建模与趋势分析奠定可靠基础。

3.2 数据融合与土壤参数动态建模

由于单一传感器易受环境扰动和参数耦合影响,系统引入数据融合算法提升信息可靠性。通过加权卡尔曼滤波方法整合湿度、电导率与盐分等多维信号,在滤除噪声的同时实现参数动态估算,得到更接近实际的土壤水分与养分分布模型。模型参数的权值依据传感器历史性能自动调整,使数据融合结果兼具精度与稳定性。经实地对比验证,模型输出误差控制在 5% 以内。进一步结合支持向量回归(SVR)算法,对土壤湿度与气温、光照、蒸散量之间的非线性关系进行建模,预测不同气象条件下的土壤含水变化趋势。该模型具备自学习能力,可随监测数据累积不断优化参数,实现灌溉时机的智能判断。实验结果表明,融合建模后系统响应速度提高约 20%,预测准确率显著优于传统单参数模型。

3.3 实时监测与阈值预警机制

为了实现农田环境的主动监管,系统建立了基于作物生长周期的分级阈值预警机制。平台根据不同作物与土壤类型设定多维参数区间,当监测数据超过设定范围时,系统自动触发多通道预警,向用户终端发送短信、APP 提醒及网页弹窗提示。为降低误报警率,预警算法中引入滞后时间与持续超限判断逻辑,只有当异常状态连续存在超过设定周期时才被识别为有效预警事件。系统还与气象数据接口对接,通过未来天气预测模型结合实时土壤湿度趋势,提前识别潜在旱涝风险,并自动优化灌溉计划。例如在预报强降雨前暂停补水指令,以防止土壤过湿造成根系通气受阻。

4 系统平台与软件架构实现

4.1 云端平台设计与数据库管理

云端平台是整个农田土壤环境监测系统的信息核心,承担数据存储、分析与共享的重要任务。平台采用 B/S 架构设计,实现了跨终端的灵活访问与统一管理。数据传输经由安全网关进入云端,通过分布式数据库架构完成存储与调用。系统将 MySQL 用于结构化信息管理,利用 InfluxDB 处理高频时序数据,以支持多节点并发写入与高速查询。平台依据地块、传感器类型与时间维度建立多层索引体系,保证数据检索的高效性与准确性。为提升系统的可靠性,设计了多副本备份与容灾机制,在节点故障时实现自动迁移与数据恢复。安全层面引入加密认证与权限分级管理策略,确保用户访问的合法性与数据隐私的可控性。通过这种体系化的云端架构,系统实现了高并发、大规模农田环境数据的持续接入与稳定运行,为后续的智能分析与可视化提供数据支撑。

4.2 可视化界面与人机交互功能

系统的人机交互界面以数据可读性与操作直观性为核心设计理念,兼顾农户与科研管理者的多层级使用需求。可

可视化模块采用GIS地图叠加技术,将农田空间位置、传感器节点与环境指标动态联动显示,形成直观的地理监测界面。历史数据以折线图、热力图和趋势面等形式呈现,便于用户识别时序变化与异常分布。用户可通过交互面板灵活设置采样周期、参数阈值与报警策略,系统亦可根据设定自动生成监测报告与数据摘要,支持PDF与Excel格式导出。界面采用响应式布局,兼容PC端与移动端访问,并具备多语言切换功能以适应国际化农业管理需求。设计中强化了操作可视反馈与容错机制,使非专业用户亦能快速掌握系统使用方法,实现数据管理的普惠化与便捷化,显著提升了农业信息化系统的易用性与传播价值。

4.3 智能分析与决策支持模块

智能分析模块是系统实现农业决策优化的关键环节,依托机器学习与多变量统计分析算法,对监测数据进行深层挖掘与预测建模。系统利用聚类算法识别不同地块的土壤水分保持特征,形成差异化灌溉分区策略,从而实现精细管理。通过多因素回归模型与支持向量机分析,系统可计算环境参数、气候因素与作物生长指标之间的函数关系,推算出最优的施肥时机与水分补给方案,有效减少肥料流失与环境污染。结合历史数据与气象预测模型,系统具备趋势预测功能,能提前识别潜在的干旱或过湿风险,并自动生成管理建议。

5 系统应用与性能验证

5.1 试验区部署与运行环境

为验证系统的工程可行性与环境适应性,研究团队选择某省农业高产示范区作为试验场地,分别在砂质壤土、黏土及盐碱地三类地块布设监测节点。节点包括土壤温湿度、pH、电导率及光照强度传感单元,埋设深度根据作物根系分布分层配置,以反映不同耕层的水分与离子变化。系统采用太阳能供电与蓄电池双能模式,在夜间与阴雨天气仍可持续运行。数据采集周期设定为10分钟,节点间距约20米,通过LoRa网络实现短距传输,网关经NB-IoT模块将数据实时上传至云平台。系统连续运行180天,数据完整率达到98.7%,表明硬件结构与通信机制在复杂田间环境中具备高稳定性与可靠性。

5.2 数据对比与系统精度验证

为评估监测数据的准确性与模型稳定性,研究组在系统运行周期内定期采集样本进行实验室检测,并将其结果与系统采集数据进行对照分析。对比显示,土壤湿度平均相对误差为3.6%,pH误差为4.2%,电导率偏差控制在5%以内,数据波动与实验值高度一致。进一步分析表明,采用卡尔曼滤波融合算法后,系统在多传感器协同下显著抑制了随机噪声与漂移误差,监测精度较单传感器模式提升约15%。在高盐度与高湿度条件下,系统仍能保持稳定信号输出,验证其抗干扰与环境适应性能。整体结果证明,该系统能够满足农田连续监测的精度与时效性要求,为后续智能分析提供可靠数据基础。

5.3 应用效果与农业管理成效

系统投入应用后,试验区农业管理模式实现了由经

验型向数据驱动型的转变。农户根据平台提供的实时土壤水分与养分信息,调整灌溉与施肥计划,平均节水率达到22%,肥料利用率提高约18%。监测平台的动态预警功能使管理者能在湿度异常或盐分升高时提前干预,显著降低作物因环境胁迫造成的减产风险。通过对比传统人工巡测方式,系统在劳动力投入方面节约约30%,并提升决策的时效性。长周期运行结果显示,作物产量平均增长7%—10%,农田生态环境得到改善。研究表明,该系统在农业资源优化配置与绿色生产中具有良好的推广前景与经济效益。

6 结语

基于物联网的农田土壤环境实时监测系统实现了从环境感知到智能决策的完整闭环,突破了传统农业信息采集滞后与数据孤立的局限。系统以多参数传感、低功耗通信和云端分析为核心,构建了高可靠、可扩展的监测体系。实践证明,该系统不仅提高了农田信息化水平,也显著优化了水肥资源配置与管理决策,为农业绿色化、智能化发展提供技术路径。未来研究可在两方面深化:其一,引入AI预测模型与数字孪生技术,实现对土壤变化的精准模拟与趋势推演;其二,探索与无人农机、智能灌溉系统的协同应用,构建农业生态的全链路智慧管理框架。随着物联网、人工智能与遥感技术的持续发展,基于数据驱动的农业监测与调控将成为推动现代农业可持续发展的关键力量^[9-10]。

参考文献

- [1] 刘映江.基于LoRaWAN物联网技术的农田环境监测系统的设计[D].西南石油大学,2018.
- [2] 曹帅,钱谦,张娅玲,等.基于LoRa的智慧农田土壤环境监测系统研究[J].农业装备与车辆工程,2024,62(01):18-22.
- [3] 徐议博,刘勇,李双喜,郑宪清,吕卫光,王运圣.基于农业物联网的农田土壤环境监测系统的研究与设计[J].中国农学通报,2018,34(23):145-150.
- [4] Alessandro Comegna;Shawkat Basel Mostafa Hassan;Antonio Coppola.Recent Technological Upgrades to the SHYPROM IoT-Based System for Monitoring Soil Water Status[J].Sensors,2025(16).DOI:10.3390/S25164934.
- [5] 李建荣.物联网精准灌溉对人参栽培土壤生态环境及产量质量的影响[D].吉林农业大学,2020.
- [6] 胡跃鑫.基于物联网技术的农业小气候环境中的研究及其应用[D].沈阳建筑大学,2017.
- [7] 吴丹娜.有机蔬菜生长过程的物联网监测和预测模型及碳收支的估算[D].浙江农林大学,2015.
- [8] 张滔,范芸菲,王思嘉,等.面向农田土壤温湿度监测的传感终端[J].物联网技术,2021,11(07):9-11+15.
- [9] 陈程程,吴佳平,于合龙.光智农业数据感知技术的前沿进展与发展趋势——从光学传感器到智能决策系统[J].智慧农业(中英文),2025,7(5):1-16. DOI:10.12133/j.smartag.SA202507049.
- [10] 李玉淋.基于物联网的水稻生长环境智能监测与调控[J].北方水稻,2025,55(4):120-122. DOI:10.3969/j.issn.1673-6737.2025.04.030.