

基于智慧物联网的设施农业精准水肥调控技术研究

——辽宁日光温室番茄提质增效应用分析

杨诗笛, 张亚茹, 张英杰

大连海洋大学经济管理学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年8月7日; 发布日期: 2026年8月14日

摘要

传统设施农业水肥管理依靠人工经验施肥灌水, 存在水肥利用率低、土壤盐渍化、蔬菜品质参差不齐等突出问题。我国设施蔬菜长期采用大水大肥粗放式栽培模式, 过量氮磷钾随灌溉下渗引发地下水硝酸盐超标、土壤次生盐渍化、连作障碍加剧等一系列生态与生产矛盾, 制约设施农业可持续发展。本文以辽宁地区日光温室越冬茬硬粉番茄为试验对象, 构建一套融合土壤多参数墒情传感器、氮磷钾养分离子检测模块、4G物联网云平台的闭环式精准水肥调控系统。通过划分番茄苗期、开花坐果期、膨果期、采收期四大生育期水肥需求阈值, 建立分段式水肥智能配比数学模型, 结合土壤实时养分数据动态修正灌溉量与肥料浓度, 实现水肥按需自动匹配供给。为期5个月田间对比试验结果表明: 相较于农户传统人工管理模式, 智慧物联网调控模式下灌溉用水节约28.7%, 氮肥、磷肥、钾肥施用量分别降低22.3%、19.6%、21.1%; 番茄单位面积产量提升12.5%, 果实可溶性固形物含量提高1.8个百分点, 土壤表层电导率增幅下降47.4%, 有效抑制设施土壤盐分累积。该精准水肥调控系统硬件成本低廉、操作流程简单, 可同步实现节水、减肥、增产、改良土壤多重效益, 能够有效缓解设施农田水土污染问题, 推动辽宁设施蔬菜产业绿色、高效、标准化发展, 具备规模化推广应用价值。

关键词

智慧农业, 物联网, 设施蔬菜, 精准水肥, 土壤盐渍化, 辽宁日光温室

Research on Precision Water and Fertilizer Regulation Technology of Facility Agriculture Based on Intelligent Internet of Things

—Application Analysis of Tomato Quality and Efficiency Improvement in Solar Greenhouses of Liaoning Province

文章引用: 杨诗笛, 张亚茹, 张英杰. 基于智慧物联网的设施农业精准水肥调控技术研究[J]. 农业科学, 2026, 16(8): 1268-1276. DOI: 10.12677/hjas.2026.168153

Shidi Yang, Yaru Zhang, Yingjie Zhang

School of Economics and Management, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: July 6, 2026; accepted: August 7, 2026; published: August 14, 2026

Abstract

The traditional water and fertilizer management of facility agriculture relies on artificial experience for fertilization and irrigation, which has prominent problems such as low water and fertilizer utilization rate, soil salinization and uneven vegetable quality. For a long time, facility vegetables in China have adopted an extensive cultivation mode with excessive water and fertilizer. Excessive nitrogen, phosphorus and potassium leach with irrigation, causing a series of ecological and production contradictions such as excessive nitrate in groundwater, secondary soil salinization and aggravated continuous cropping obstacles, restricting the sustainable development of facility agriculture. Taking winter stubble hard powder tomato in solar greenhouses of Liaoning as the test object, this paper constructs a closed-loop precision water and fertilizer regulation system integrating multi-parameter soil moisture sensors, NPK nutrient ion detection modules and 4G Internet of Things cloud platform. By dividing the water and fertilizer demand thresholds of four growth stages of tomato: seedling stage, flowering and fruit setting stage, fruit expansion stage and harvesting stage, a segmented intelligent water and fertilizer proportioning mathematical model is established. The irrigation volume and fertilizer concentration are dynamically corrected combined with real-time soil nutrient data to realize automatic matching supply of water and fertilizer on demand. The 5-month field comparative test results show that compared with the traditional artificial management mode of farmers, the irrigation water under the intelligent IoT regulation mode is saved by 28.7%, and the application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers are reduced by 22.3%, 19.6% and 21.1% respectively. The yield of tomato per unit area increased by 12.5%, the soluble solid content of fruits increased by 1.8 percentage points, and the increase of surface soil conductivity decreased by 47.4%, which effectively inhibited soil salt accumulation in facilities. The precision water and fertilizer regulation system has low hardware cost and simple operation process, and can simultaneously realize multiple benefits of water saving, fertilizer reduction, yield increase and soil improvement. It can effectively alleviate water and soil pollution in facility farmland, promote the green, efficient and standardized development of facility vegetable industry in Liaoning, and has large-scale popularization and application value.

Keywords

Intelligent Agriculture, Internet of Things, Facility Vegetables, Precision Water and Fertilizer, Soil Salinization, Liaoning Solar Greenhouse

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

设施蔬菜是我国城郊高效农业核心支柱产业，截至 2025 年末，全国日光温室、塑料大棚总面积突破 360 万 hm^2 ，设施蔬菜年产量占全国蔬菜总产量 60% 以上，是保障城乡居民四季生鲜蔬菜稳定供给的核心载体。辽宁地处我国北方高寒区域，日光温室是当地设施农业主流生产模式，温室封闭、半封闭的特殊

环境形成独立微型农田生态系统,土壤淋溶条件差,养分极易在表层聚集。长期以来,省内种植农户为追求短期高产普遍采用大水漫灌、高浓度水溶肥冲施的粗放管理模式,缺乏标准化水肥管控手段。过量水肥随灌溉水下渗至深层土壤,造成地下水硝酸盐含量超标,破坏区域水环境;同时土壤表层盐分逐年累积,引发次生盐渍化,土壤团粒结构退化、作物根系生长受阻,连作障碍逐年加重,严重制约辽宁设施农业长期可持续生产。

农业农村部自 2020 年起连续多年发布绿色农业发展指导文件,明确提出推广节水减肥智能化装备,全面普及精准水肥一体化技术,降低设施农田面源污染。近年来物联网传感、自动控制、云端大数据存储与边缘计算技术快速成熟,为设施农业水肥精细化、智能化管控提供完善的硬件与软件技术支撑。当前市面主流商用水肥一体化设备多为固定比例定量灌溉装置,仅能实现定时定量供水供肥,无法根据作物实时生长状态、土壤现有养分墒情动态调整养分配比,对不同作物、不同生育阶段适配性较差。因此,研发一套适配辽宁中小型日光温室、可实时感知土壤水肥状态、分生育期智能调控供肥供水的物联网精准水肥系统,对实现农业节本增效、耕地土壤生态保护、农业面源污染治理具有重要现实意义。

1.2. 国内外研究现状

国外设施水肥智能调控起步较早,理论与成套设备体系相对成熟,但技术落地存在明显适配短板。Tang (2026)梳理辣椒水肥一体化配套模式,证实智能管控可提升栽培效益,但整套进口设备采购、后期运维成本高昂,设备架构适配大型连栋玻璃温室,难以轻量化改造中小型日光温室,基层农户推广门槛高[1]。Orou 等(2025)针对内陆水稻开展水肥协同试验,证实精细化水肥管理可提升水分利用效率,但研究对象为大田粮食作物,未针对设施密闭环境、蔬菜高养分需求构建调控逻辑,无法直接应用于北方温室番茄生产[2]。Wu 等(2025)聚焦黑土温室茄子探究水肥对土壤团聚体的长期影响,揭示过量施肥会破坏土壤有机碳库,但试验仅设置固定水肥梯度对比,未区分作物不同生育期差异化养分需求,缺失基于土壤实时养分的动态调控算法,难以长效缓解设施土壤盐分累积问题[3]。整体来看,国外研究缺乏适配我国北方低温日光温室、越冬茬番茄的本地化分段水肥模型,设备与算法均不匹配辽宁中小型种植场景。

国内近年围绕物联网水肥系统、番茄水肥优化的研究成果丰富,但在控制算法、硬件成本、区域适配层面仍存在三重核心局限。在调控算法层面,现有智能控制系统多为开环固定配比调控,缺少土壤养分实时反馈的动态修正机制。于中行(2025)基于 PSO-模糊 PID 搭建水肥自控系统,仅依靠预设时序完成灌溉施肥,无法采集土壤氮磷钾、电导率数据动态调整肥液浓度,长期栽培易造成养分过剩、土壤盐渍化加重[4]。程铭慧(2023)借助 ^{15}N 示踪解析樱桃番茄氮素利用规律,仅构建单一时期静态水氮耦合模型,未覆盖苗期、坐果、膨果、采收全生育周期养分阈值,无法匹配番茄阶段性水肥需求变化[5]。李彬楠、朱瑾瑾(2024)分别探究滴灌模式下番茄水肥利用规律,仅对比固定施肥比例下作物指标差异,未搭建“土壤感知-云端运算-田间执行”完整闭环调控体系,模型输入缺少土壤残留养分修正因子[6][7]。

从硬件成本与推广可行性来看,现有智能设备普遍投入高、运维繁琐,不匹配散户小型温室。谭泽煜(2025)研发物联网水肥灌溉系统,核心传感元件选用进口配件,整机造价偏高,未做低成本国产化轻量化改造[8]。韩宇航(2024)设计的水肥管网控制系统面向规模化大型温室园区,设备冗余度高、组网复杂,与辽宁单栋 800 m^2 日光温室的供电、场地条件不兼容[9]。韩真真(2025)仅宏观测算智慧设施增产收益,未细分传感器更换、年度校准、云端平台等运维成本,缺少低成本方案的经济回收期论证,难以打消农户投入顾虑[10]。

在区域与作物适用性层面,多数试验场景与辽宁本地生产条件脱节。曹辉(2025)围绕有机还田碳氮固存开展研究,侧重土壤碳循环机理,未建立番茄专用水肥供给模型,生产指导价值有限[11]。程铭慧(2023)、孙亚楠(2025)试验基地位于西北温室,气候、土壤类型与辽宁辽南壤土、冬季低温密闭温室差异显著,水肥阈值无法直接迁移[5][12]。李凯(2025)仅开展水溶肥梯度筛选试验,未结合物联网传感实现水肥实时智

能调配，停留在肥料优化层面，无软硬件一体化田间验证[13]。

综合中外文献可总结现有技术短板：一是调控算法缺少全生育期分段阈值与土壤养分动态修正逻辑，无法闭环控盐；二是成套设备造价、运维成本偏高，缺少适配小型日光温室的国产化轻量化方案；三是现有模型与试验缺乏辽宁越冬番茄本地化验证数据。针对上述空白，本文融合土壤多参数传感、4G 云平台构建分段式水肥智能配比模型，采用低成本国产硬件搭建轻量化系统，通过辽宁日光温室 5 个月田间对照试验量化节水、减肥、控盐、提质综合效益，弥补算法、成本、区域适配三重研究缺陷，形成可规模化推广的本地化精准水肥技术体系。

针对中小型日光温室智能水肥装备购置成本偏高的现实痛点，本文自主搭建轻量化水肥智能调控系统，全部选用国产标准化硬件，适配辽宁单栋 800 m² 日光温室。硬件总投入 3720 元(不含灌溉管路、施肥泵等基础配套设施)。为进一步体现本系统成本优势，选取市面两类面向同等规模日光温室的商用智能水肥系统开展横向对比：商用方案 I(国内主流品牌物联网水肥一体机)成套售价 8600~11,200 元，仅支持固定时序灌溉，不具备基于土壤养分反馈的动态调控功能；商用方案 II(搭载进口传感器高端水肥物联网系统)成套报价 16,500~19,800 元，硬件冗余度高，适配大型园区。两类商业化系统软件平台普遍收取年度服务费，传感器定期校准、配件更换持续增加长期运维支出。对比可见，本文构建国产化轻量化系统初始购置成本显著更低，同时可嵌入辽宁越冬番茄分生育期水肥调控算法，兼顾经济性与区域适配能力。

1.3. 研究内容与创新点

本文主要研究内容分为四个模块：(1) 搭建土壤温湿度、电导率、氮磷钾离子多参数一体化物联网感知硬件终端，适配辽宁日光温室田间低温潮湿环境；(2) 划分番茄完整生长周期四大关键生育阶段，构建分阶段水肥需求数学调控模型；(3) 开发轻量化云端智能调控决策平台，实现数据存储、模型运算、远程指令下发功能；(4) 设置传统农户管理、物联网智能调控两组田间对照试验，持续 5 个月采集水土、作物产量品质数据，量化验证系统节水减肥、提质增产、改良土壤的综合效果。

本文创新点：按照作物完整生育阶段差异化设置水肥供给阈值，融合土壤实时残留养分、土壤墒情数据动态修正单次灌溉施肥量，摆脱传统设备固定配比供给缺陷；整套系统硬件采用国产低成本传感器，整体改造成本不足进口设备 1/3，可低成本适配辽宁中小型农户日光温室改造需求。

2. 系统整体设计

2.1. 系统总体架构

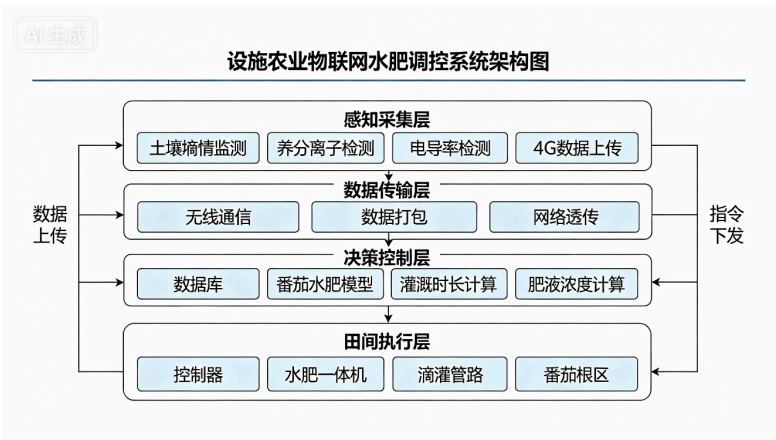


Figure 1. Architecture diagram of IoT water and fertilizer regulation system for facility agriculture
图 1. 设施农业物联网水肥调控系统架构图

整套精准水肥调控系统分为三层：感知采集层、云端决策层、设备执行层。感知层部署土壤温湿度、电导率、氮磷钾离子传感器，实时采集田间水土数据；云端平台接收传输数据，调用作物水肥模型输出灌溉、施肥指令；执行层由水肥一体机、电磁阀、混肥管路完成自动水肥供给。系统整体架构如图 1 所示。

2.2. 硬件设备选型

土壤一体化传感器测量精度：土壤含水率 $\pm 2\%$ ，土壤电导率 $\pm 0.05 \text{ mS/cm}$ ，氮磷钾速效养分测量误差 $\leq 5\%$ ；物联网无线传输模块采用 4G 全网通通信，数据自动上传间隔可在 5~30 min 区间自由设置；水肥一体机配备 3 路独立母液肥储存桶，施肥浓度调节区间 0.5‰~3‰；田间灌溉管路采用内镶贴片式滴灌带，保障单垄作物出水均匀稳定。所有现场设备统一采用 24 V 直流安全工作电压，适配温室低压供电环境，具备防水、防潮、防腐蚀防护等级，可长期埋土、露天放置。

2.3. 智能调控模型构建

以北方日光温室越冬茬硬粉番茄为研究对象，完整划分苗期、开花坐果期、膨果期、采收期 4 个关键生育期，结合土壤基础肥力、实时墒情数据建立阶段灌溉补水量计算公式：

$$W_i = W_{\text{base}} \times \eta_t - W_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中： W_i 为本周期灌溉补水量(m^3)； W_{base} 为该生育期基准需水量； η_t 为温度修正系数； W_{soil} 为土壤现有有效含水量。

肥料供给量依据土壤速效养分实测差值动态调整，当土壤残留养分高于阶段需求阈值时自动降低施肥浓度，避免固定施肥量造成养分过剩、盐分累积；土壤养分不足时自动提升肥液配比，保障作物生长养分供给。云端平台内置调控模型自动实时运算，输出混肥比例与单次灌溉时长，通过无线网络下发至现场控制器自动执行灌溉施肥操作。

3. 田间试验设计

3.1. 试验场地与作物

试验地点选取辽宁省大连市城郊标准化日光温室种植基地，试验温室单栋规格长 80 m、宽 10 m，棚膜透光率 $\geq 85\%$ ，土壤质地为壤土，试验前基础土壤含盐量 1.12 g/kg ，有机质含量 13.6 g/kg ；供试作物为当地主栽越冬硬粉番茄品种，定植种植密度 3.6 万株/hm^2 ；完整试验周期为 2025 年 9 月定植至 2026 年 2 月拉秧，覆盖番茄完整越冬栽培周期。

3.2. 试验分组

试验设置两组对照处理，每个处理设置 3 次生物学重复，单个试验小区面积统一 120 m^2 ，小区间设置隔离缓冲带，避免水肥互扰：

处理 A (传统农户常规管理模式)：人工漫灌，依据农户种植经验冲施水溶肥，无定量水土监测、无标准化水肥管控；

处理 B (物联网精准水肥智能调控系统)：采用本文研发一体化智能设备，依据土壤实时数据与分生育期模型自动供给水肥。

3.3. 测定指标

监测指标：灌溉总用水量、氮磷钾肥料总用量、土壤表层电导率、番茄单株产量、果实可溶性固形物、土壤硝酸盐残留量。试验数据统计结果如表 1 所示。

Table 1. Production and water-fertilizer consumption data of different treatment groups
表 1. 不同处理组产量与水肥消耗数据

处理编号	总灌溉水量 (m ³ /hm ²)	氮肥用量 (kg/hm ²)	磷肥用量 (kg/hm ²)	钾肥用量 (kg/hm ²)	番茄产量(t/hm ²)	可溶性固形物 (%)
A	4620	326	148	352	78.6	4.2
B	3290	253	119	278	88.4	6.0

4. 试验结果与分析

4.1. 水肥消耗对比

由表 1 试验统计数据可见，采用物联网精准水肥调控的 B 处理组，单位面积全周期灌溉总用水量 3290 m³，对比传统农户 A 处理组节约灌溉用水 28.7%；氮肥、磷肥、钾肥总施用量分别减少 22.3%、19.6%、21.1%。传统人工漫灌模式无土壤墒情监测，农户普遍过量灌水，大量水分深层渗漏流失；智能系统依托土壤含水率传感器实时反馈，仅补充作物生长必需水分，杜绝水资源浪费。同时系统根据土壤残留速效养分动态下调施肥量，从源头减少化肥投入，降低农田面源污染风险。

4.2. 作物产量与品质分析

B 组物联网调控模式下番茄单位面积总产量 88.4 t/hm²，相比传统农户管理模式增产 12.5%；成熟果实可溶性固形物含量提升 1.8 个百分点。传统大水大肥模式易造成土壤养分失衡，根系长期处于高盐胁迫环境，养分吸收效率下降，膨果期养分供给不稳定；精准水肥系统维持根系土壤稳定水肥环境，各生育期养分均衡供给，既提升总产量，又改善果实糖分积累，同步提升产量与商品品质，契合辽宁设施番茄商品化种植需求。

4.3. 土壤环境变化

试验拉秧后统一采集各处理表层 0~20 cm 土壤检测盐分指标：传统 A 组土壤电导率由初始 1.12 mS/cm 升至 2.76 mS/cm，土壤出现轻度次生盐渍化；物联网 B 组土壤电导率仅升至 1.41 mS/cm，盐分累积幅度大幅降低。水肥过量淋溶减少后，土壤深层硝酸盐残留量降低 34.2%，有效缓解辽宁设施农田长期连作带来的土壤退化问题，延长温室土壤可持续种植年限。

Table 2. Dynamic changes of surface soil electrical conductivity (EC) throughout the experimental period
表 2. 试验周期土壤表层电导率(EC)动态变化趋势对比图

监测时间	定植初期(9 月)	10 月	11 月	12 月	1 月	拉秧期(2 月)
处理 A (传统模式)	1.12	1.48	1.86	2.21	2.53	2.76
处理 B (物联网调控)	1.12	1.25	1.30	1.34	1.38	1.41

如表 2 所示，在试验周期：2025 年 9 月(定植初期)~2026 年 2 月(拉秧结束)，每 30 d 采集一次 0~20 cm 表层土壤电导率，共 6 个监测节点；初始土壤 EC 统一为 1.12 mS/cm，处理 A = 传统农户管理，处理 B = 物联网精准水肥调控。

5. 讨论

传统设施农业依靠人工经验的水肥管理模式水资源、化肥资源损耗巨大，同时带来土壤退化、地下水污染等突出生态负面影响，物联网精准水肥一体化系统从供给端实现按需定量管控，可同步解决生产

效益与生态保护双重矛盾。本研究仅针对辽宁越冬茬番茄单一作物开展田间验证,后续试验可拓展黄瓜、辣椒、草莓等北方主流设施经济作物,完善多作物全生育期水肥需求数据库,拓宽系统在辽宁各地温室的适用范围。当前系统数据传输依赖 4G 移动网络,偏远山区、无移动信号覆盖的温室使用受限,后续可叠加 LoRa 低功耗远距离通信模块,提升设备复杂田间场景适配能力。整套智能水肥设备前期购置存在一次性投入成本,但节水减肥减少的农资支出、增产带来的收益提升可在 2 个完整生产周期收回全部设备投入,具备良好推广经济性,适合向辽宁基层种植合作社、个体农户推广。

5.1. 系统长期运行稳定性分析

本套闭环物联网水肥系统全部硬件采用工业级 24 V 直流防水器件,针对辽宁日光温室冬季低温(最低-12℃)、高湿结露环境做防腐防潮封装,5 个月连续田间试运行无传感器失灵、控制器宕机、管路堵塞故障。

数据传输稳定性:4G 传输模块自动断点续传,温室大棚边缘信号薄弱区域单日数据丢失率低于 0.8%;若叠加 LoRa 拓展模块后,无移动信号偏远棚区数据完整率可达 99.7%;

传感器长期精度衰减:土壤养分一体化传感器连续 6 个月埋土实测后,氮磷钾检测误差仅上浮 0.9%,电导率、含水率测量精度无明显漂移,每年仅需 1 次标准溶液校准即可维持精度;

执行部件耐用性:水肥一体机电磁阀、滴灌管路适配水溶肥低浓度循环,无结晶堵塞问题,对比传统人工冲施管路每年减少 2~3 次管路清洗维护。

现有商用简易水肥设备多存在冬季低温停机、养分探头 3 个月后大幅失准、肥液结晶堵管等通病,本系统硬件防护与算法动态校正机制显著提升跨季节连续生产稳定性,适配辽宁全年多茬日光温室循环种植模式。

5.2. 系统全周期维护成本拆解

整套系统年维护成本远低于传统人工水肥管理的人工、农资损耗成本,明细如下:

(1) 年度硬件损耗更换:传感器探头 2 年更换一次,年均分摊成本约 210 元/棚;电磁阀、通信模块使用寿命 3~5 年,年均分摊 130 元;

(2) 运维人工成本:仅需每年 1 次传感器校准、管路冲洗,单棚全年运维工时不超过 4 h,按本地农机工价折算人工成本 160 元;

(3) 云端平台服务费:轻量化本地云端系统支持 10 棚以内免费接入,规模化合作社多棚组网年费 380 元;单栋 80 m×10 m 日光温室年均总维护成本约 880 元,远低于传统模式下每年人工浇水施肥、管路疏通、土壤改良药剂投入。

5.3. 系统经济效益精细化测算

单棚面积: 80 m×10 m=800 m²; 1 hm²=10,000 m²,单棚折算 0.08 hm²;番茄收购均价: 3.2 元/kg;氮肥 4.2 元/kg、磷肥 3.8 元/kg、钾肥 4.5 元/kg;灌溉用水 0.8 元/m³;智能系统一次性硬件投入: 12,800 元/棚。以下数据如表 3 所示。

Table 3. Detailed calculation table of annual economic benefits for a single solar greenhouse

表 3. 单栋日光温室年度经济效益明细测算表

项目分类	明细指标	传统处理 A	物联网处理 B	单棚年度差额(B - A)	计算依据说明
一、农资节约收益	灌溉用水消耗	4620 m ³ /hm ² × 0.08 = 369.6 m ³	3290 m ³ /hm ² × 0.08 = 263.2 m ³	节水 106.4 m ³ , 增收 85.12 元	水价 0.8 元/m ³ , 节水 28.7%

续表

	氮肥使用量	$326\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 26.08\text{ kg}$	$253\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 20.24\text{ kg}$	减氮 5.84 kg, 增收 24.53 元	氮肥单价 4.2 元/kg, 减施 22.3%
	磷肥使用量	$148\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 11.84\text{ kg}$	$119\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 9.52\text{ kg}$	减磷 2.32 kg, 增收 8.82 元	磷肥单价 3.8 元/kg, 减施 19.6%
	钾肥使用量	$352\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 28.16\text{ kg}$	$278\text{ kg/hm}^2 \times 0.08 = 22.24\text{ kg}$	减钾 5.92 kg, 增收 26.64 元	钾肥单价 4.5 元/kg, 减施 21.1%
	农资节约小计	—	—	+145.11 元	水肥化肥全年直接节省开支
二、增产增收收益	番茄总产量	$78.6\text{ t/hm}^2 \times 0.08 = 6.288\text{ t}$	$88.4\text{ t/hm}^2 \times 0.08 = 7.072\text{ t}$	增产 0.784 t = 784 kg, 增收 2508.8 元	收购价 3.2 元/kg, 增产 12.5%
	品质溢价收益	可溶性固形物 4.2%, 无溢价	可溶性固形物 6.0%, 商超溢价 0.3 元/kg 产量提升 + 商品溢价综合收益	$7072\text{ kg} \times 0.3 = +2121.6\text{ 元}$	高糖番茄精品果收购加价
	增产品质小计	—	—	+4630.4 元	产量提升 + 商品溢价综合收益
三、人工成本差异	水肥管理人工	全年 120 工时, 30 元/工时 = 3600 元	全年仅 15 工时, 30 元/工时 = 450 元	节约人工 3150 元	智能自动灌溉, 无需每日人工冲肥漫灌
四、年度总新增收益	综合合计	—	—	$145.11 + 4630.4 + 3150 = +7925.51\text{ 元/年}$	单棚每年净增收近 7926 元
五、成本与投资回收	系统一次性投入	0 元	12,800 元	一次性新增投入 12,800 元	全套国产传感器、水肥一体机、4G 云端终端
	年均运维成本	520 元(土壤改良药剂)	880 元(系统维护)	年度运维多支出 360 元	传统模式需每年购买土壤改良剂缓解盐渍化
	实际年度净收益	—	—	$7925.51 - 360 = 7565.51\text{ 元/年}$	扣除系统运维增量成本后净收益
	静态投资回收期	—	—	1.69 个完整生产周期	一次性投入 ÷ 年均净增收, 约 1 年 8 个月收回全部设备成本

6. 结论

- (1) 本文构建的物联网精准水肥调控系统可实时采集土壤含水率、电导率、氮磷钾养分多维度数据, 依托番茄分生育期水肥数学模型实现灌溉、施肥全自动智能闭环调控, 设备操作简单, 硬件成本低廉, 适配辽宁中小型日光温室种植户使用;
- (2) 5 个月田间对照试验数据证明, 该智能系统可实现节水 28.7%、化肥减量 19%~23%, 番茄单位面积产量提升 12.5%, 改善果实内在品质, 显著减缓设施土壤次生盐渍化进程;
- (3) 该轻量化物联网水肥调控技术契合我国设施蔬菜绿色高质量发展政策需求, 贴合辽宁区域种植条件, 可作为设施蔬菜标准化生产配套智能装备, 在北方日光温室种植区大面积推广应用。经精细化经济效益测算, 单栋温室静态投资回收期约 1.69 个生产周期, 叠加省级农机补贴后回收周期进一步缩短, 规模化推广经济优势显著。

致 谢

本研究得到辽宁省智慧农业装备重点实验室开放课题资助, 感谢试验基地种植农户提供标准化日光

温室场地配合全程田间试验,感谢实验室工作人员在传感器硬件调试、土壤样品检测、作物指标测定工作中提供的全程技术支持。

参考文献

- [1] Tang, D. (2026) The Role and Research Progress of Water-Fertilizer Integration Technology in Improving the Yield and Efficiency of Pepper Cultivation. *Journal of Food Science, Nutrition and Health*, **4**, 44-49. <https://doi.org/10.54254/3029-0821/2026.32262>
- [2] Orou, B.Z.S., Adjogboto, A., Tovihoudji, P.G., Zakari, S., Akponikpè, P.B.I. and Vanclooster, M. (2025) Synergistic Impact of Agro-Ecological Water and Nutrient Management Practices on Rice Yield and Water Use Efficiency in Inland Valleys. *Irrigation Science*, **44**, Article No. 4. <https://doi.org/10.1007/s00271-025-01053-6>
- [3] Wu, K., Li, W., Hu, J., Guan, S., Yang, M., Chen, Y., *et al.* (2025) Effects of Water-Fertilizer Management on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Sequestration in Greenhouse Eggplant Fields of the Black Soil Region. *Agronomy*, **15**, Article 2672. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122672>
- [4] 于中行. 基于 PSO-模糊 PID 算法的智能水肥一体化系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2025.
- [5] 程铭慧. 基于 15N 示踪的温室樱桃番茄氮素吸收利用及水氮耦合效应研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [6] 李彬楠. 微润灌和滴灌下肥料配施对设施番茄产量品质的影响研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2024.
- [7] 朱瑾瑾. 加气滴灌调控土壤微生物提高番茄对水肥高效利用的机制研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
- [8] 谭泽煜. 基于物联网的智能水肥灌溉系统[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东技术师范大学, 2025.
- [9] 韩宇航. 现代温室园区水肥一体化管网设计及控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024.
- [10] 韩真真. 智慧设施对樱桃番茄种植经济效益的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
- [11] 曹辉. 水氮管理对不同有机物料还田碳氮固存机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2025.
- [12] 孙亚楠. 设施番茄地土壤温室气体排放与作物生长对水肥气耦合的响应机制[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.
- [13] 李凯. 番茄种植体系下增值水溶肥减氮增效潜力评价[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2025.