

Research on Quality Enhancement Mechanism of Precision Water-Fertilizer Integrated Cultivation Technology for Protected Vegetable Production

Fanwang Han

Zoucheng Shiqiang Town Agricultural Service Center, Zoucheng, Shandong, 273518, China

Abstract

Protected vegetable production serves as a crucial pillar for ensuring vegetable supply and promoting rural revitalization. However, traditional fertilization and irrigation methods suffer from low water and fertilizer utilization rates and severe environmental pollution. The precision water-fertilizer integrated cultivation technology, centered on “scientific supply, quantitative regulation, and synchronized irrigation-fertilization,” achieves efficient integration and precise delivery of water and nutrients through irrigation systems, demonstrating significant advantages in resource utilization efficiency and crop quality improvement. This paper analyzes the application effects of this technology in protected vegetable production from aspects such as technical principles, system design, and application models. The study reveals that this technology can enhance fertilizer utilization by 15%-30%, achieve water conservation exceeding 35%, and significantly promote stable high-quality production while reducing emissions and improving efficiency. Future efforts should focus on strengthening intelligent sensing and regional differentiation strategies to drive the digital and sustainable development of protected vegetable production.

Keywords

facility vegetables; integrated water and fertilizer management; precision farming

设施蔬菜水肥一体化精准种植技术的提质增效机制研究

韩繁旺

邹城市石墙镇为农服务中心, 中国·山东 邹城 273518

摘要

设施蔬菜生产是保障蔬菜供给和促进乡村振兴的重要支撑, 但传统施肥与灌溉方式存在水肥利用率低、环境污染重等问题。水肥一体化精准种植技术以“科学供给、定量调控、同步灌施”为核心, 通过灌溉系统实现水分与养分的高效融合与精准输送, 在提高资源利用率和作物品质方面优势显著。本文从技术原理、系统设计与应用模式等方面分析其在设施蔬菜生产中的应用效果。研究表明, 该技术可提升肥料利用率15%~30%, 节水率超过35%, 显著促进稳产优质与减排增效。未来应强化智能感知与区域差异化策略, 推动设施蔬菜生产向数字化、可持续化方向发展。

关键词

设施蔬菜; 水肥一体化; 精准种植

1 引言

在农业现代化进程中, 设施蔬菜种植以其高产、稳产、周年供应的特性, 成为我国农业结构优化的重要方向。然而, 传统施肥与灌溉方式普遍存在“多、粗、散”的问题, 过量施肥导致土壤盐渍化、水体富营养化, 过度灌溉则造成根系缺氧和资源浪费。水肥一体化技术的出现, 为解决这些瓶颈提供了科学路径。通过将灌溉与施肥结合, 实现水分与养分的同步供应, 可在保障蔬菜生长需求的同时降低投入、提升品质与产量。当前我国设施蔬菜种植面积持续扩大, 种植结

构由经验型向数据驱动型转变。本文通过对水肥一体化精准种植技术的系统分析, 探讨其提质增效机制与实践路径, 为设施农业的高质量发展提供理论依据与技术支撑。

2 设施蔬菜水肥一体化技术的原理与体系构建

2.1 水肥一体化的基本原理

水肥一体化技术是一种将灌溉与施肥过程有机结合的精准农业管理模式, 其核心原理在于通过压力管道系统将可溶性肥料溶解于灌溉水中, 并定量、定时输送至作物根区, 实现“水随肥走、以水带肥、均匀供给”。该系统通常由水源、过滤装置、施肥装置、输配管网和灌溉末端等部分组成, 通过滴灌、微喷或渗灌等形式进行精准控制。其运行机制依托于水量与肥液浓度的动态调节, 使根区保持适宜

【作者简介】韩繁旺(1972-), 男, 中国山东邹城人, 本科, 农艺师, 从事农学研究。

湿度与养分浓度，从而优化作物吸收环境。该技术通过减少灌溉水量与肥料施用量，降低地表蒸发与深层渗漏损失，实现水肥资源的协同高效利用。实践表明，水肥一体化可节水 35%~50%，节肥 25%~40%，显著提升资源利用效率与生态可持续性，为设施农业的高效、绿色生产提供了重要技术支撑。

2.2 设施蔬菜水肥一体化系统构成

设施蔬菜水肥一体化系统由“供水—施肥—控制—管理”四个核心模块构成，形成一个集感知、决策与执行为一体的智能化体系。第一部分为水源与过滤装置，包括砂石过滤器、网式过滤器等，用以去除悬浮物和杂质，确保系统畅通运行；第二部分为施肥系统，利用比例施肥器、文丘里施肥器或电磁阀实现肥液的定量混配与均匀输送；第三部分为控制系统，配置流量计、压力传感器、土壤水分监测仪及 EC/pH 传感器，用于实时监控灌溉与施肥参数；第四部分为信息管理平台，通过物联网与云计算实现远程监测、自动调控与数据可视化。系统运行依托“传感—执行—反馈”闭环机制，实现精准灌溉与按需施肥，提升了设施农业的智能化与精细化管理水平。

2.3 水肥协同作用机理

水分与养分在作物根际的耦合关系是水肥一体化技术实现提质增效的核心机理。水分为肥料离子的扩散与吸收提供载体，而适宜的肥料浓度又能促进根系生长与水分吸收。当灌溉与施肥同步进行时，根际溶液浓度维持稳定，根系吸收势能增强，从而实现水肥协同吸收效应。生理研究表明，水肥协同条件下，作物氮、磷、钾等主要养分的吸收效率分别提高 15%~25%，根系活力提升约 20%，同时促进光合作用与干物质积累。适度的水肥配比还能改善果实品质，提高蔬菜中维生素 C、可溶性糖及蛋白质含量。长期应用结果显示，水肥同步施用可减少土壤盐分积累与养分淋失，维持土壤微生物生态平衡，实现“高产、高效、生态”的综合效益。

3 水肥一体化在设施蔬菜种植中的应用路径

3.1 不同灌溉模式下的技术适配

在设施蔬菜生产中，灌溉方式的合理选择直接影响水肥一体化系统的效率与作物生长效果。滴灌与微喷灌是目前应用最广的两种模式。滴灌系统通过管网将肥液定向输送至作物根系区域，实现水肥同步精准供应，特别适用于番茄、黄瓜、茄子等深根型果菜作物。微喷灌则通过喷头形成雾化水流，在满足作物水分需求的同时，改善空气湿度、降低叶温，适用于生菜、菠菜等浅根型叶菜。实地研究表明，采用滴灌结合可溶性复合肥的精准施用，可使水分利用率提升 40% 以上，肥料利用率提升约 25%，且果实均匀度与商品率显著提高。不同作物类型和生育阶段需通过调节滴头流量、灌溉频率与施肥浓度，实现根区环境的动态平衡，从而达到“水随需供、肥随量施”的高效管理目标。

3.2 基于作物生理需求的施肥精准调控

精准施肥的科学性体现在其对作物营养需求动态变化的精准匹配。设施蔬菜在不同生育阶段对氮、磷、钾等养分的吸收比例差异显著。例如，番茄在结果期对钾元素需求明显增加，而苗期则以氮素供给为主。水肥一体化系统可依托 EC（电导率）与 pH 传感器实时监测养分浓度，并结合作物生长模型自动调整肥液配比，实现阶段性精准施肥。通过叶片营养诊断、土壤速测及环境参数采集，系统可识别作物营养胁迫状态，适时优化施肥策略，防止因过量施肥引发根系盐害或肥害。实验表明，该智能调控机制可使作物产量提高 10%~15%，并显著改善果实品质。此模式实现了“以作物为中心”的动态决策，使水肥供应真正服务于作物生理需求，提升资源利用效率与生态安全性。

3.3 信息化控制与智能决策系统的集成

随着农业信息化与智能化技术的深入发展，水肥一体化系统正由经验驱动向数据驱动与算法优化方向转型。系统通过布设在田间的传感器网络，实时采集土壤湿度、温度、光照、蒸散量及气象数据，经 AI 模型分析后生成最优灌溉与施肥方案。基于物联网（IoT）架构的智能控制平台可实现远程监控与自动调节，云端数据库对历年生产数据进行存储与分析，为作物管理提供预测性支持与可视化决策依据。部分地区已建立自动化控制系统，能根据天气预报与作物生长模型自动调整灌溉计划，实现无人值守、动态管理。信息化与智能化的深度融合，不仅提高了系统运行的稳定性与响应速度，还实现了水肥一体化由“精准控制”向“智慧决策”的跨越，为设施农业的高质量发展提供了坚实技术支撑。

4 水肥一体化提质增效的作用机制分析

4.1 节水节肥效应的量化机制

水肥一体化技术的核心在于通过精准控制灌溉时间、流量及肥料浓度，实现作物根区水分与养分的高效协同供应。系统利用滴灌或微喷灌形式，将肥液直接输送至根层，减少了地表蒸发和深层渗漏损失。实测结果表明，设施蔬菜推广水肥一体化后，肥料利用率由传统施肥方式的 35% 提高至 55%~60%，水分利用率提高至 80% 以上。精准供给使根系分布更集中、吸收效率更高，减少了氮、磷等元素的流失量。通过分阶段供肥与变量控制，实现养分动态调节与作物需肥规律的匹配，避免了因一次性施肥造成的浪费与污染。该系统还通过实时监测土壤湿度与电导率数据，自动调整灌溉量与施肥频率，使水肥利用实现“按需供给”，形成高效、闭环的资源循环机制。

4.2 产量与品质提升机制

水肥一体化不仅提升资源利用效率，还显著促进了设施蔬菜的产量与品质优化。同步供水供肥维持了根际环境的稳定性，使根系活力增强、养分吸收更充分。研究表明，在均衡供给条件下，番茄、黄瓜、辣椒等果菜类蔬菜的单位面

积产量平均提高12%~18%，果实含糖量提升6%~10%，维生素C含量增加约12%。均衡施肥抑制了硝酸盐在组织中的积累，使产品更符合绿色食品标准。灌溉精度的提升促进了光合作用和干物质积累，使果实形成期水分与营养分配更加协调，从而提高了商品率与经济收益。系统化管理还减少了人工施肥的不确定性，实现了高产、高质与高效的协同统一，体现出精准农业在设施种植中的显著优势。

4.3 生态环境与土壤健康改善机制

传统施肥与漫灌方式长期导致的盐分积聚、养分流失和水体污染，是制约设施农业可持续发展的重要因素。水肥一体化通过“少量多次”的精准灌溉模式，有效防止了盐分随水分蒸发向表层迁移，抑制了盐害发生。系统依据作物生长阶段实施差异化施肥，减少了化学肥料累积，提高了土壤有机质和微生物多样性。实践数据显示，推广水肥一体化后，化肥施用总量平均减少30%，地下水硝态氮浓度下降约25%，显著降低了农业面源污染风险。土壤团粒结构改善、通气性增强，微生物群落趋于平衡，为根系提供了更健康的生长环境。该技术在实现资源节约与生态修复的同时，促进了农业生产的绿色化与生态化转型，为设施农业可持续发展提供了科学路径与技术支持。

5 推广应用中的问题与优化对策

5.1 设施建设成本与技术门槛偏高

水肥一体化技术的推广应用在设施蔬菜生产中具有显著的节水增效优势，但其建设成本与技术门槛仍是制约普及的重要因素。系统初期投入较大，主要包括过滤装置、施肥系统、管路网络、传感节点及智能控制平台等硬件设施，单套系统投资可占总种植成本的15%~25%。对于中小农户而言，资金压力较为突出。此外，部分使用者缺乏水肥系统运行维护知识，容易出现设备堵塞、施肥比例失衡或控制参数设置不当等问题，影响系统稳定性和作物生长效果。为此，应通过财政补贴、合作社共建及“企业+农户”联合运营等模式，降低单户投入门槛。同时建立区域性技术服务中心，提供系统设计、调试、运行监测与维修培训等配套服务，实现从“建得起”到“用得好”的可持续发展路径。

5.2 配方肥料与水质管理的匹配不足

水肥一体化系统中，肥料溶液与灌溉水质的适配性直接影响系统运行效率与作物吸收效果。我国不同地区水源矿化度差异明显，如北方部分地区含钙镁离子浓度较高，易引发滴灌管路结垢与喷头堵塞；南方水体酸碱度波动较大，

可能导致肥料养分沉淀或失活。当前部分农户未进行水质监测便直接使用普通肥料，降低了系统稳定性与肥效利用率。应在推广中强化标准化肥料溶解系统建设，制定区域水质检测标准与肥料适配指南。通过在线水质监测、自动过滤与pH调节装置的配套应用，确保肥料养分充分溶解与均匀分布。同时完善水源净化、过滤与定期管道冲洗机制，从源头保障系统的高效运行与作物养分吸收安全。

5.3 智能化控制系统的本地化适应问题

水肥一体化系统的智能化升级是未来发展的核心方向，但目前存在算法模型“水土不服”现象。部分引进的国外系统在设计上以温带气候与标准作物模型为基础，未充分考虑我国复杂多样的气候条件与作物差异，导致灌溉参数设定不合理，精准控制效果受限。为此，应加强区域数据采集与本地化模型优化，构建面向不同气候带与作物类型的区域化灌溉模型库。通过引入AI自学习与动态修正算法，使系统能根据实时气象、土壤湿度与作物生理指标自动优化灌溉策略。同时，需强化农业物联网的数据安全防护与运维体系建设，确保系统长期稳定运行与数据可靠传输。通过“智能+本地化”的协同优化，可显著提升设施蔬菜水肥一体化的精准度与可持续性，推动农业生产向数字化、智慧化迈进。

6 结语

设施蔬菜水肥一体化精准种植技术代表着农业生产方式由粗放走向精细的转折点。通过实现水肥同步、按需供给，不仅显著提高了水肥利用率与作物产量，也改善了生态环境，推动农业可持续发展。从机制上看，其提质增效源于精准控制、生态协同与信息决策的有机融合。未来发展应重点强化智能监测、模型预测与区域差异化管理，推动从经验施肥向数字决策转型。政策层面需完善标准体系，建立财政激励与示范推广机制；科研层面应深化传感技术与植物生理模型研究，形成“设备—算法—作物”协同优化的智能化体系。通过多方协同与持续创新，水肥一体化将成为我国设施蔬菜高质量发展的核心技术支撑，为现代农业的绿色化、智慧化转型提供坚实基础。

参考文献

- [1] 钱芳芳,姜艺.南昌市设施蔬菜水肥一体化技术推广模式优化措施[J].吉林蔬菜,2025,(03):174-176.
- [2] 周长星.设施蔬菜种植中水肥一体化技术应用推广[J].农业工程技术,2024,44(15):66-67.
- [3] 胡灵云,张晓晶,张圣微,等.设施蔬菜水肥一体化智能控制系统研究与应用[J].农业技术与装备,2022,(11):29-32.