

功能性蔬菜品质形成的关键农艺调控途径研究

李绍香*, 许靖舸, 吴艳萍, 邢豪杰

昆明学院农学与生命科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

功能性蔬菜因富含生物活性物质且兼具食用与保健功能, 已成为现代农业产业升级的重要方向。本文基于近年来国内外研究成果, 综述了当前功能性蔬菜品质形成的关键农艺调控途径, 主要总结了光环境调控、水肥管理与土壤环境调控、种植模式优化与农艺农机融合以及外源物质应用和分子调控技术对功能性蔬菜营养品质的调控效应。结合产业发展实践, 提出了未来功能性蔬菜品质调控的精准化、智能化、绿色化综合发展方向, 旨在为产业高质量发展提供理论支撑与技术参考。

关键词

功能性蔬菜, 营养品质, 农艺调控

Research on Key Agronomic Regulation Pathways for Quality Formation in Functional Vegetables

Shaoxiang Li*, Jingge Xu, Yanping Wu, Haojie Xing

College of Agriculture and Life Science, Kunming University, Kunming Yunnan

Received: March 18, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

Functional vegetables have become an important direction for the upgrading of modern agricultural industry due to their rich bioactive substances and dual functions of edible and health-care value. Based on domestic and international research achievements in recent years, this paper reviews the key agronomic regulation approaches for the quality formation of functional vegetables. It mainly summarizes the regulatory effects of light environment control, water and fertilizer management

*通讯作者。

as well as soil environment regulation, planting pattern optimization and integration of agronomy and agricultural machinery, exogenous substance application, and molecular regulation technologies on the nutritional quality of functional vegetables. Combined with industrial development practices, this paper proposes the comprehensive development directions of precision, intelligence and greening for the quality regulation of functional vegetables in the future, aiming to provide theoretical support and technical references for the high-quality development of the industry.

Keywords

Functional Vegetables, Nutritional Quality, Agronomic Regulation

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

随着公众健康需求升级与农业产业结构调整,功能性蔬菜凭借其独特的营养保健价值,成为园艺学科与农业产业的研究热点[1]-[3]。功能性蔬菜的营养品质核心在于其富含的生理活性物质,主要包括:多糖类、类黄酮、花青素、矿质元素、含硫化合物以及单萜类物质和生物活性肽等,这些物质具有抗氧化、调节免疫、预防慢性疾病等生理功能[4]-[6]。当前具有明确保健功能的蔬菜,已成为功能性蔬菜研发的重点对象,如十字花科蔬菜富含碳水化合物、蛋白质、维生素及多种矿物质,脂肪含量极低,兼具基础营养与低脂膳食优势,并且该科蔬菜含有丰富的植物化学物质,在慢性病防控中具有重要功能价值[7] [8]。十字花科蔬菜除膳食功能外,还被作为中草药、染料、观赏植物和保健食品被广泛研究利用[9] [10]。此外,南瓜和紫薯因其丰富的营养价值与药用价值,已成为功能性蔬菜制品开发的重要原料,当前以这两种蔬菜为原料的制品种类众多且被广泛认可,市场前景广阔[11]-[13]。值得注意的是,不同功能性蔬菜的活性物质合成路径存在显著差异,例如十字花科蔬菜的萝卜硫素合成依赖于其前体物质一萝卜硫苷(Glucoraphanin, GRA)的酶解反应[14],而南瓜多糖的积累则与碳代谢流向的调控密切相关[15],这一特性决定了蔬菜品质调控技术的针对性与复杂性。

目前一些发达国家已将功能性蔬菜作为现代农业换代升级的核心方向,形成了从品种选育到产品加工的完整产业链[16]。我国也逐步重视功能性蔬菜的研发与推广,如超有机农业理念的提出为功能性蔬菜的绿色生产提供了理论支撑,而功能性修复蔬菜汁等深加工产品的开发,则拓展了产业应用场景,推动了产业向高附加值方向发展[17]。针对一些产量高且具备抗氧化、免疫调节等保健功能的特色蔬菜,如牛蒡、芹菜、山药、芦荟等,建立了专业化的深加工技术体系,创新性地将超声波、酶解、湿法微粉碎等技术集成应用,有效提取蔬菜多酚、膳食纤维等活性成分,并解决了饮料易沉淀、蔬菜口感差等技术瓶颈。这些技术突破不仅显著提高了蔬菜的加工转化率,满足了市场对高附加值保健功能产品的需求,也为功能性蔬菜的规模化推广提供了坚实的理论支撑与技术保障[18]。

当前,我国功能性蔬菜产业仍存在品种单一、品质稳定性差、农艺调控技术粗放等问题,亟需通过农机农艺融合、精准环境调控等技术手段,提升产业规范化与标准化水平。同时,外源物质的添加以及分子调控技术在蔬菜农艺性状改良及活性物质合成及积累中的应用,为其品质定向调控提供了新路径。本文结合近年来相关研究成果,从农艺调控的关键维度,系统梳理功能性蔬菜营养品质形成的调控机制

与技术进展,为产业发展与技术创新提供参考。

2. 关键农艺调控途径及其效应

2.1. 光环境精准调控技术

光环境是影响功能性蔬菜营养品质的核心环境因子,通过人工光源调控光质、光周期与光照强度,实现对功能性蔬菜营养品质的定向调控,已成为功能性蔬菜品质调控技术的重要研究方向[19][20]。

在光质调控方面,研究表明不同波长光质对蔬菜活性物质积累具有显著调控效应,如高红光比例有利于红叶生菜生长和碳水化合物积累,而高蓝光比例则有利于其光合性能及色素和酚类化合物的积累[21]。并且蓝光能显著降低羽衣甘蓝地上部分中导致苦味的主要成分-葡萄糖异硫氰酸丁酯(gluconapin)含量,同时提高根中具有抗癌潜力的萝卜硫苷含量,对组织中总酚、花青素含量的提升也具有显著效果,从营养品质和感官风味角度看,蓝光是羽衣甘蓝栽培的最优光质[22]。

光照强度在调控植物光合作用与物质代谢中具有关键作用,直接影响光合速率、碳同化效率及光合产物的分配方向,进而对功能性蔬菜的生长发育与活性物质积累产生显著的剂量效应[23]。适宜的光强可平衡光合效率与次生代谢强度,在提升生物量积累的同时,有效促进可溶性糖、维生素C、总酚及黄酮类功能性成分的合成与累积,而光强过低或过高均会抑制代谢进程,不利于品质形成[23][24]。并且光强与其他环境因子的调配施用可进一步强化调控效果,如在3/4霍格兰营养液条件下,补充 $150\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝光处理使生菜总Zn含量显著增加[25]。

光周期调控途径通过调节植物生长节律与代谢周期,影响活性物质的合成时序与积累总量,研究发现连续光照与适宜光周期组合是高效调控模式[26],如甜椒在连续荧光灯处理光照下,生长状况良好并且果实产量较高,辣味程度也显著增加[27];采前3天连续补光处理可使芝麻菜VC含量增加约50% [28];在 $10\text{mmol}/\text{L}$ 和 $12\text{mmol}/\text{L}$ 的N浓度条件下,红蓝光4:1连续光照72h有利于生菜营养元素的积累[29]。

2.2. 水肥管理与土壤环境调控

水肥管理与土壤环境是影响功能性蔬菜营养品质的基础因素,精准水肥供给以及土壤理化性质如质地、pH值以及养分有效性等的改良,可以调控蔬菜对养分的吸收进而影响其营养品质与污染物富集水平[30]。

适度的水分限制可以诱导作物产生渗透胁迫效应,进而刺激抗氧化活性物质的合成,如干旱环境能够促进枸杞可溶性糖和可溶性蛋白含量的积累,使其应对干旱胁迫的能力增强[31];番茄种植的研究指出,适度缺水灌溉结合中高水平施肥显著提高了产量和水分利用效率,并且这种水肥组合能够最佳地增强光合作用性能,显著提高果实糖分含量和干物质积累[32][33]。一些有机改良剂的施用能在实现绿色生产的基础上有效促进蔬菜营养品质的提升,如蚯蚓堆肥相较于传统化肥,能兼顾甜菜的产量、品质与食用安全,实现可持续农业生产[34]。

除了直接的水肥投入,土壤理化性质及微生物群落是活性物质积累的间接调控因素,如通过调节土壤pH值,改变锌、铁等微量元素的有效性,从而影响酚酸类物质的合成[35]。新型功能性肥料(如保水缓释肥)通过延长养分供给期,稳定土壤湿度,进而有利于根际微生物的生长[36]。微生物群落可以通过拮抗土传病害、分泌诱导物等方式,增强植物防御机制并促进植物生长和特定活性物质的积累,如促生根际细菌解淀粉芽孢杆菌GB03可以通过激活植物硫同化通路,促进硫吸收并诱导硫代葡萄糖苷合成,进而增强植物抗虫防御能力[37]。

2.3. 种植模式优化与农机农艺融合

种植模式的科学优化是提升功能性蔬菜营养品质的重要途径。植物工厂作为集约化种植的代表,通

过农业机械的精准耦合与环境因子的精确调控, 显著提升蔬菜的维生素 C、可溶性糖及其他功能性成分含量[38][39]。与此同时, 间作、套种与轮作等制度通过优化空间利用率和根系互补, 实现土地资源的高效利用, 并显著提升作物的抗逆性和营养品质[40][41]。将这些种植模式与如精准播种、灌溉以及自动化营养液循环系统等农机技术深度融合, 不仅能显著提高产量和资源利用效率, 还为功能性蔬菜的品质调控提供了多元且高效的实现路径。

种植模式对蔬菜的营养品质的作用机制主要体现在影响根系互作、矿质元素形态转化以及土壤微生物群落多样性, 进而对蔬菜生长和活性物质积累产生影响。如合理的间作或套种系统能够利用作物间的根系深浅差异和分泌物特性, 显著改变根际土壤的微生物群落结构, 改善土壤中矿质元素的可用性以及提高植物营养吸收和转移效率[42]。研究表明, 菜豆和芹菜间作促进了芹菜的生长并显著降低了其硝酸盐含量, 并且菜豆中的可溶性蛋白和维生素 C 显著高于单作, 该模式有效提高菜豆和芹菜的营养价值和口感[43]。轮作制度通过打破连作导致的土壤养分失衡和病原物积累, 能够恢复土壤活性, 促进根系的健壮生长, 有效提升蔬菜中活性物质的合成和积累[44][45]。

农艺农机技术的融合, 提升了种植模式的标准化与规模化水平[46]。例如, 玉米种植生产中所使用的滴灌水肥一体化技术可以智能分析玉米生长发育期间的水肥需求并精准把控施肥和灌溉量, 促进玉米高质量生长, 提高其产量和品质[47]。这种高度一致的水肥供给模式确保了每株植株接收的水肥量基本一致, 从而避免了因供给不均导致的生长发育差异, 是实现蔬菜活性物质含量低变异的关键技术支撑。

2.4. 外源物质与分子调控技术

通过添加外源物质, 如植物激素、矿质元素、生物诱导因子以及其他化学物质等, 可以有效提高植株次生代谢产物的形成与积累, 如在辣椒生长过程中适当添加茉莉酸、水杨酸、细胞分裂素和脱落酸会促进辣椒素的积累[48], 而在水溶肥中添加 1% 镁元素则可以有效促进叶片光合作用和有机物质的积累, 同样可以有效提高植株中辣椒素的含量[49]; 油菜素内酯通过调控作物核心农艺性状提升光合效率, 同时参与冷胁迫、盐胁迫等非生物胁迫响应, 增强作物抗逆性, 进而促进产量与品质提升[50]; 添加矿质营养元素硫、锌、铁等能优化土壤养分有效性, 有利于蔬菜活性物质的合成[51], 并且外源施用可直接推动蔬菜活性物质的积累, 如在植株生长过程中外源添加含氮、含硫化合物, 可有效促进植株中硫苷的合成, 从而提高萝卜硫素含量[52]。并且外源添加物质与其他调控手段相结合, 在蔬菜生物活性成分合成与积累中具有显著交互作用, 如在西兰花植物化学物质提升的探究中发现, 添加硒(100 $\mu\text{mol/L Na}_2\text{SeO}_3$)的处理组西兰花总可溶性糖、总酚类化合物、总黄酮、抗坏血酸、铁和有机硒含量较高, 紫外线 A(UVA) (40 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)处理组则增加了西兰花总叶绿素、总可溶性蛋白质以及总酚类化合物的含量。而 Se + UVA 处理则对总花青素和萝卜硫苷的含量具有显著提升效果[53]。

分子调控技术可以精准靶向调控蔬菜活性物质合成关键基因的表达, 从而显著提升功能性蔬菜的营养品质。目前基因组编辑技术已经成为改变蔬菜代谢通路的核心手段之一, 该技术可以精确敲除或调节特定基因的表达, 从而直接影响关键营养成分的合成[54]。如通过敲除与番茄红素向 β -和 α -胡萝卜素转化的相关基因, 可促进番茄红素的积累[55]。此外, RNA 调控技术也是蔬菜农艺性状改良的有效手段[56], 如 RNAi 介导的 DET1 基因沉默通过解除光信号对类胡萝卜素和类黄酮合成的抑制, 有效实现了番茄果实营养品质的定向改良[57]; 一些特定的 lncRNA 分子作为脂质生物合成的关键调节剂, 形成了与脂质代谢相关的调控网络, 对油菜中油脂的合成具有关键调控作用[58]。

3. 现存问题与挑战

现阶段, 植物工厂在功能性蔬菜种植上已形成相对完善的技术体系, 但其生产应用上仍面临诸多瓶

颈。一方面,环境因子调控的精准度不足并且种植模式单一化问题突出,另一方面,设施运营与生产投入成本较高,严重制约了其规模化推广与产业化应用;当前功能性蔬菜品种选育技术尚不成熟,优质高产且兼具高功能性活性成分的品种匮乏,难以满足规模化高效生产与市场多元化需求;与此同时,外源物质精准添加、分子定向调控等新型核心调控技术在功能性蔬菜种植中的应用仍处于初步研究阶段,尚未形成标准化、系统化的成熟体系,技术落地与规模化应用缺乏可靠支撑;此外,不同蔬菜种类的生长特性、生理代谢规律存在显著差异,各类功能性活性物质的合成积累对环境条件与栽培措施的响应机制各不相同,导致光质、光强、光周期、温度、水肥供给、种植模式及外源物质添加剂量等关键调控参数难以实现统一适配,这也是当前实现功能性蔬菜优质高效生产亟需攻克的核心重难点。

4. 研究展望

功能性蔬菜兼具营养品质与保健功效,是契合国民健康需求、助推蔬菜产业转型升级的核心品类,目前关于功能性蔬菜品质形成的关键农艺措施主要是光环境调控、水肥管理与种植模式优化,并且通过外源物质的添加和分子技术的调控,为功能性蔬菜活性物质的积累提供了全新思路,拓宽了品质定向提升的研究路径。但当前农艺调控仍存在一定不足,未来需聚焦品质提升核心目标,深耕关键调控技术与产业模式创新,推动领域研究纵深发展。整合多元协同调控手段,深挖功能性活性物质合成代谢与积累的分子机制,靶向实现特色活性物质的定向富集与开发;优化适配型种植模式,依据蔬菜生长节律、环境需求推行分类集约栽培;推动农机农艺深度融合创新,研发智能化精准管控设备,实现环境条件以及水肥供给的精细化自动化调控;形成品种选育、高效种植、精深加工以及市场销售全产业链条,同时开发特色功能性产品,延伸产业价值;围绕蔬菜品质、功能性成分含量、栽培效益等核心维度,建立标准化综合评价体系,规范产业发展秩序,助力功能性蔬菜产业实现标准化、规模化、产业化长效发展。

参考文献

- [1] 曾茜茜,雷琳,赵国华,等.花青素加工贮藏稳定性的改善及应用研究进展[J].食品科学,2018,39(11):269-275.
- [2] 赵莹,杨欣宇,赵晓丹,等.植物类黄酮化合物生物合成调控研究进展[J].食品工业技,2021,42(21):454-463.
- [3] Yan, L., Zhou, G., Shahzad, K., Zhang, H., Yu, X., Wang, Y., et al. (2023) Research Progress on the Utilization Technology of Broccoli Stalk, Leaf Resources, and the Mechanism of Action of Its Bioactive Substances. *Frontiers in Plant Science*, **14**, Article 1138700. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138700>
- [4] Septembre-Malaterre, A., Remize, F. and Poucheret, P. (2018) Fruits and Vegetables, as a Source of Nutritional Compounds and Phytochemicals: Changes in Bioactive Compounds during Lactic Fermentation. *Food Research International*, **104**, 86-99. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.031>
- [5] Avato, P. and Argentieri, M.P. (2015) Brassicaceae: A Rich Source of Health Improving Phytochemicals. *Phytochemistry Reviews*, **14**, 1019-1033. <https://doi.org/10.1007/s11101-015-9414-4>
- [6] Hu, W., Sarengaowa, Guan, Y. and Feng, K. (2022) Biosynthesis of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Fresh-Cut Fruits and Vegetables. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article 906069. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.906069>
- [7] Manchali, S., Chidambara Murthy, K.N. and Patil, B.S. (2012) Crucial Facts about Health Benefits of Popular Cruciferous Vegetables. *Journal of Functional Foods*, **4**, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.08.004>
- [8] Li, Z., Lee, H.W., Liang, X., Liang, D., Wang, Q., Huang, D., et al. (2018) Profiling of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of 12 Cruciferous Vegetables. *Molecules*, **23**, Article 1139. <https://doi.org/10.3390/molecules23051139>
- [9] 陈秋芳,贾宏汝.十字花科植物的研究价值及开发利用前景[J].安徽农业科学,2007(34):11183-11185.
- [10] 宋亚,杨静.芸薹属蔬菜功能性成分研究进展[J].浙江农业科学,2014,55(6):837-840.
- [11] 王薇,陈志刚,董晓涛.具有开发前景的功能性蔬菜——南瓜[J].北方园艺,2007(2):44-46.
- [12] 王加龙,孙秋菊,马坤,等.不同品种南瓜品质分析及其加工适性评价[J].上海蔬菜,2025(4):93-99.
- [13] 张婷,陈小伟,张琪,罗洁,张沙沙,姚刚,范玉和,毛旻晨,蔡海莺,毛建卫.紫薯功能性与其食品开发研究进

- 展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 315-319, 324.
- [14] 吴琪, 银慧兰, 赵韬, 等. 十字花科蔬菜中萝卜硫素合成及外源调控研究进展[J]. 中国蔬菜, 2025(2): 34-43.
- [15] Xia, W., Chen, C., Jin, S., Chang, H., Ding, X., Fan, Q., *et al.* (2024) Multi-Omics Analysis Reveals the Distinct Features of Metabolism Pathways Supporting the Fruit Size and Color Variation of Giant Pumpkin. *International Journal of Molecular Sciences*, **25**, Article 3864. <https://doi.org/10.3390/ijms25073864>
- [16] 小鹿. 功能性蔬菜——日本现代农业的换代升级[J]. 农产品市场周刊, 2014(22): 63.
- [17] 李宏涛. 超有机农业与功能性修复蔬菜汁发展背景及价值[J]. 中国科技产业, 2019(2): 30-31.
- [18] 宋慧, 李勇, 唐仕荣, 等. 特色蔬菜深加工关键技术研究及产业化应用[Z]. 徐州工程学院, 2012-02-22. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kMXxFLy7TFWlhZ47ZV5_1279Kgj362ZH5FepelhrTc4R73DzCewSs2UT10BaGEFZ4gzumxgMYw04C6ouzLDeWYtjHW59vUDerECW8midD4-Psz4C7DywjvqEpiKtN1o8wYoJXx74hX72hzUT20JkIJtaD_SE07TnaD4yQQaxyIJGup0Y961SA==&uniplat-form=NZKPT&language=CHS, 2026-03-08.
- [19] 琚俊, 刘厚诚. 植物工厂功能性蔬菜品质调控技术与展望[J]. 长江蔬菜, 2023(20): 19-25.
- [20] 陈永康, 刘厚诚. 植物工厂光环境调控功能性蔬菜生产技术研究进展[J]. 农业工程技术, 2022, 42(4): 29-35.
- [21] Azad, M.O.K., Kjaer, K.H., Adnan, M., Naznin, M.T., Lim, J.D., Sung, I.J., *et al.* (2020) The Evaluation of Growth Performance, Photosynthetic Capacity, and Primary and Secondary Metabolite Content of Leaf Lettuce Grown under Limited Irradiation of Blue and Red LED Light in an Urban Plant Factory. *Agriculture*, **10**, Article 28. <https://doi.org/10.3390/agriculture10020028>
- [22] Qian, H., Liu, T., Deng, M., Miao, H., Cai, C., Shen, W., *et al.* (2016) Effects of Light Quality on Main Health-Promoting Compounds and Antioxidant Capacity of Chinese Kale Sprouts. *Food Chemistry*, **196**, 1232-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.055>
- [23] Dai, M., Tan, X., Ye, Z., Ren, J., Chen, X. and Kong, D. (2024) Optimal Light Intensity for Lettuce Growth, Quality, and Photosynthesis in Plant Factories. *Plants*, **13**, Article 2616. <https://doi.org/10.3390/plants13182616>
- [24] Miao, C., Yang, S., Xu, J., Wang, H., Zhang, Y., Cui, J., *et al.* (2023) Effects of Light Intensity on Growth and Quality of Lettuce and Spinach Cultivars in a Plant Factory. *Plants*, **12**, Article 3337. <https://doi.org/10.3390/plants12183337>
- [25] Song, J., Huang, H., Hao, Y., Song, S., Zhang, Y., Su, W., *et al.* (2020) Nutritional Quality, Mineral and Antioxidant Content in Lettuce Affected by Interaction of Light Intensity and Nutrient Solution Concentration. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 2796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3>
- [26] 查凌雁. LED 红蓝光连续光照调控生菜抗坏血酸代谢的机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [27] Murakami, K., Yamamoto, T., Fujimoto, K., Okabe, K., Masuda, M., Abe, T., *et al.* (2011) Low-Pungent Sweet Pepper Selected Under Continuous Fluorescent Illumination. *Acta Horticulturae*, **907**, 243-246. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2011.907.37>
- [28] Nicole, C.C.S., Krijn, M.P.C.M. and van Slooten, U. (2019) Postharvest Quality of Leafy Greens Growing in a Plant Factory. In: Anpo, M., Fukuda, H. and Wada, T., Eds., *Plant Factory Using Artificial Light*, Elsevier, 33-43. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813973-8.00005-1>
- [29] 刘文科, 张玉彬, 查凌雁, 等. 采收前连续光照光质对三种供氮水平的水培生菜营养元素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3884-3889.
- [30] 任树友, 王科, 张成, 等. 不同农艺调控技术对土壤 pH 值、稻米砷富集和产量差异的研究[J]. 四川农业科技, 2021(6): 54-57.
- [31] 谢英赞, 师贺雄, 马立辉, 等. 干旱胁迫对叶用枸杞“天精 3 号”生长·品质及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(23): 27-33.
- [32] Song, Y., Xu, J., Zhang, S., Xing, J., Wang, X., Wang, L., *et al.* (2025) Regulation of Photosynthetic Performance and Dry Matter Accumulation through Water and Fertilizer Management to Enhance Yield of Tomato Cultivated in Yellow Sand Substrate. *Agricultural Water Management*, **319**, Article ID: 109795. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109795>
- [33] Liu, J., Hu, T., Feng, P., Yao, D., Gao, F. and Hong, X. (2021) Effect of Potassium Fertilization during Fruit Development on Tomato Quality, Potassium Uptake, Water and Potassium Use Efficiency under Deficit Irrigation Regime. *Agricultural Water Management*, **250**, Article ID: 106831. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106831>
- [34] Libutti, A., Russo, D., Lela, L., Ponticelli, M., Milella, L. and Rivelli, A.R. (2023) Enhancement of Yield, Phytochemical Content and Biological Activity of a Leafy Vegetable (*Beta vulgaris* L. var. *Cycla*) by Using Organic Amendments as an Alternative to Chemical Fertilizer. *Plants*, **12**, Article 569. <https://doi.org/10.3390/plants12030569>

- [35] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2359-2370.
- [36] 杜建军, 阚玉景, 黄帮裕, 等. 水肥调控技术及其功能性肥料研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1631-1641.
- [37] Aziz, M., Nadipalli, R.K., Xie, X., Sun, Y., Surowiec, K., Zhang, J., *et al.* (2016) Augmenting Sulfur Metabolism and Herbivore Defense in Arabidopsis by Bacterial Volatile Signaling. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 458. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00458>
- [38] 杨其长, 白音巴特尔, 程瑞锋. 智慧植物工厂发展历程及展望[J/OL]. 农业工程学报: 1-10. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kMXxFLy7TFVGgQE1noFOS5Tsey_bYU1_p1ZmDuBYSXIBf80S0bM0Uvc7q75VI8SmNY2yWo7NLdOi_kW2tzboX7KjeykHI_ucjKwHOUVrotbj7mH9vVYHX20CIJGQg3yTSpZvfChiOgz9dLQUz7hvsEO4-W_tq9WIWOjCpS0SEFQCBfDjKQvmcQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2026-03-09.
- [39] Yuan, X., Zhong, M., Huang, X., Hussain, Z., Ren, M. and Xie, X. (2024) Industrial Production of Functional Foods for Human Health and Sustainability. *Foods*, 13, Article 3546. <https://doi.org/10.3390/foods13223546>
- [40] Nassary, E.K., Baijukya, F. and Ndakidemi, P.A. (2019) Sustainable Intensification of Grain Legumes Optimizes Food Security on Smallholder Farms in Sub-Saharan Africa—A Review. *International Journal of Agriculture and Biology*, 23, 25-41. <https://doi.org/10.17957/ijab/15.1254>
- [41] Homulle, Z., George, T.S. and Karley, A.J. (2022) Root Traits with Team Benefits: Understanding Belowground Interactions in Intercropping Systems. *Plant and Soil*, 471, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05165-8>
- [42] 付学鹏, 吴凤芝, 吴瑕, 等. 间套作改善作物矿质营养的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 525-535.
- [43] 袁涛, 李贤, 龚小雅, 等. 早春大棚菜豆/芹菜间作对其产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(18): 42-47.
- [44] 姜立新, 吴岐山, 黄德强. 农作物轮作制度对土壤健康和生产力的长期影响[J]. 河北农机, 2024(15): 85-87.
- [45] 陈海江, 司伟, 魏丹, 等. 粮豆轮作技术的“减肥增效”效应研究——基于东北地区轮作定位试验和农户调研分析[J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 545-550.
- [46] 全国蔬菜生产农机农艺融合现场会召开[J]. 农机市场, 2024(8): 4.
- [47] 郭利萍. 玉米滴灌水肥一体化技术具体应用策略的科学探讨[J]. 种子世界, 2026(3): 141-143.
- [48] 秦恒山, 王腾起, 张艳, 等. 环境因子、激素和外源化学物质调控辣椒素合成的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(15): 15-22.
- [49] 马存金, 陈剑秋, 李曰鹏, 等. 水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 179-182.
- [50] 王黎明, 杨瑞珍, 孙加强. 油菜素内酯调控作物农艺性状和非生物胁迫响应的研究进展[J]. 生物工程学报, 2022, 38(1): 34-49.
- [51] 姜勇, 李天鹏, 冯雪, 等. 外源硫输入对草地土壤-植物系统养分有效性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1192-1201.
- [52] 李翠, 方胜, 赵忠良, 等. 西兰花苗中萝卜硫素合成的调控手段研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 210-217.
- [53] Gao, M., He, R., Shi, R., Li, Y., Song, S., Zhang, Y., *et al.* (2021) Combination of Selenium and UVA Radiation Affects Growth and Phytochemicals of Broccoli Microgreens. *Molecules*, 26, Article 4646. <https://doi.org/10.3390/molecules26154646>
- [54] 安焯森, 王雁伟, 田文超, 等. 基于 CRISPR/Cas9 技术创制高维生素 C 番茄材料[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2025, 41(3): 460-469.
- [55] Li, X., Wang, Y., Chen, S., Tian, H., Fu, D., Zhu, B., *et al.* (2018) Lycopene Is Enriched in Tomato Fruit by CRISPR/Cas9-Mediated Multiplex Genome Editing. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 559. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00559>
- [56] 何凯, 周晓利, 王玉秋, 等. RNA 调控与作物农艺性状改良[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(4): 618-636.
- [57] Davuluri, G.R., van Tuinen, A., Fraser, P.D., Manfredonia, A., Newman, R., Burgess, D., *et al.* (2005) Fruit-Specific RNAi-Mediated Suppression of DET1 Enhances Carotenoid and Flavonoid Content in Tomatoes. *Nature Biotechnology*, 23, 890-895. <https://doi.org/10.1038/nbt1108>
- [58] Shen, E., Zhu, X., Hua, S., Chen, H., Ye, C., Zhou, L., *et al.* (2018) Genome-Wide Identification of Oil Biosynthesis-Related Long Non-Coding RNAs in Allopolyploid *Brassica napus*. *BMC Genomics*, 19, Article No. 745. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5117-8>