

智慧植物工厂发展历程及展望

杨其长¹，白音巴特尔¹，程瑞锋²

(1. 中国农业科学院都市农业研究所，成都 610213; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081)

摘要：随着现代工业、信息技术与生物技术的交叉融合，现代农业新兴产业形态不断涌现，植物工厂作为新型农业生产模式备受关注。该文系统介绍了国内外植物工厂发展现状与技术进展，回顾了不同国家和地区的发展历程、建设规模、应用领域与产业布局，剖析了半导体光源、节能环境控制、营养液栽培等核心技术的突破与创新，并对植物工厂作物生长机制解析、新型节能方法以及栽培模式创新等热点问题进行了分析，提出了智能化、绿色化、产业化的未来发展方向。针对当前植物工厂商业化应用面临的瓶颈，如建设和运营成本高、技术标准不完善、市场认知度低等问题，从政策支持、技术创新、产业协同等角度提出了战略对策，并对后续研究重点和产业化发展提出了建议：研究方向上要结合基础理论与应用技术，注重跨学科创新，产业发展上需加强规划引导，培育龙头企业，完善产业链配套，以提升产业竞争力，实现可持续发展。该文可为植物工厂领域的科研人员、产业从业者以及政策制定者提供有益的借鉴与参考，助力突破商业化应用瓶颈，加速植物工厂产业化进程，推动现代农业高质量发展。

关键词：设施农业；植物工厂；人工智能；垂直农业；都市农业

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202507145

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-03-0097-10

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]. 农业工程学报, 2026, 42(3): 97-106. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202507145 <http://www.tcsae.org>

YANG Qichang, BAIYIN Bateer, CHENG Ruifeng. Current situation and trend of smart plant factory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(3): 97-106. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202507145 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来,植物工厂在全球范围内迅速崛起,成为备受瞩目的产业热点。国际知名咨询机构 Mordor Intelligence 于 2023 年发布的预测显示,未来 5 a 世界植物工厂产业将进入快速发展的黄金时期,年均增长率将超过 10%,其中,欧洲地区发展尤为迅猛,植物工厂年均增长率将达 22% 以上。至 2029 年,欧洲植物工厂市场规模有望达 41.9 亿美元(约合人民币 303 亿元)^[1];与此同时,美国纽约基金公司 Insight Partners 预测显示,2028 年全球植物工厂市场规模将飙升至 198.64 亿美元(约合人民币 1 438 亿元)^[2]。面对如此广阔的市场前景和巨大的发展潜力,众多国际知名企业纷纷将目光投向植物工厂领域,积极投身技术研发与产业化推广。如西门子(Siemens)^[3]、飞利浦(Philips)^[4]、三菱(Mitsubishi)^[5]等跨国巨头凭借其雄厚的技术实力和丰富的产业经验,在植物工厂的技术创新和产业布局上开展激烈角逐^[6]。而国内的京东^[7]、中科三安^[8]、木林森^[9]、四维生态等企业也不甘示弱,积极参与到这场全球竞争中,为植物工厂的发展注入了新的活力。在这些企业的

共同推动下,全球植物工厂呈现出极为活跃的发展势头。

植物工厂作为一种高度集约化与智能化的农业生产形态,是通过设施内高精度环境控制以达成作物周年连续生产的高效农业系统^[10]。在该系统中,计算机发挥着核心作用,通过智能感知、决策模型与智慧管控系统实现对作物生长过程的温度^[11]、湿度^[12]、光照^[13]、CO₂ 浓度^[14]以及营养液组分与浓度^[15]等关键环境要素的自动控制,从而使作物生产能够摆脱自然条件的束缚,实现不间断生产。植物工厂的建设与运行充分整合了一系列前沿技术,包括新型材料的应用^[16]、半导体光源的开发^[17]、生物技术的结合^[18]、营养液栽培技术的优化以及智慧决策系统的融入,甚至还引入人工智能(AI)与机器人等先进手段^[19],呈现出显著的技术密集型特征。多年来植物工厂凭借其对多学科、多领域前沿技术的融合应用,植物工厂多年来一直被国际学术界和产业界公认为设施农业发展的最高级阶段,并因其技术的引领性和巨大的发展潜力,受到世界各国政府、科研机构及企业的广泛关注与高度重视^[20]。

1 植物工厂的发展驱动因素

植物工厂之所以在世界范围内引发广泛关注,其原因是多元且复杂的。其一,全球人口呈现快速增长态势,与此同时,可用于耕种的土地却在持续缩减。根据联合国粮食及农业组织(FAO)的预测,到 2050 年,全球人口将达 95 亿,食物需求相较于当前水平将增长超过 70%,而人均耕地面积则比现在减少 20% 以上^[21]。如何凭借有限的耕地资源,去满足人们日益增长的食物需求,已然

收稿日期: 2025-07-18 修订日期: 2025-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1001500); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项(S2024001); 四川省科技计划国际科技创新合作项目(2025YFHZ0183); 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP)。

作者简介: 杨其长, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为设施园艺环境工程。Email: yangqichang@caas.cn

成为一个亟待解决的全球性重大难题^[22]；其二，伴随城市化进程的加速以及人们生活品质的稳步提升，公众对于洁净、安全农产品的需求愈发强烈^[23]。这种不断增长的品质需求，有力地推动了健康食物生产方式的重大革新；其三，农业从业人员老龄化问题愈发严峻，年轻人从事农业的意愿持续降低。以中国、日本等国为例，超过 60% 的农业劳动力年龄在 60 岁以上，如何吸引年轻劳动力投身农业，已经成为全球共同关注的焦点议题^[10]。

植物工厂作为一种新兴的产业形态，在解决诸多难题方面展现出独特优势^[24]，主要包括：（1）土地资源利用率高。叶菜一年可收获 15~18 茬，栽培层数可达 20 层以上，单位面积产能达露地栽培的 100 倍以上；（2）机械化与自动化程度高。植物生长的环境和营养等要素能实现智能化控制，定植、移栽、上下架、包装等均可由智能机械甚至机器人辅助完成，舒适的工作环境有助于吸引大量年轻人务农；（3）不施用农药且无重金属污染，产品洁净安全，可满足居民对高品质农产品的迫切需求。植物工厂的这些独特优势为世界各国应对人口增长、资源紧缺、洁净安全食物需求上升以及农业劳动力不足等难题提供了有效的途径，故而受到广泛重视^[10]。

2 植物工厂的发展历程回顾

自 20 世纪 50 年代起，“人工模拟环境与气候控制技术”以及“营养液栽培技术”相继取得关键突破，为植物工厂的发展奠定了坚实基础^[25]。随后，植物工厂率先在欧美等发达国家得以应用。历经一代又一代科研人员的不懈努力，不断推动技术革新与产业化进程。至今，植物工厂已然走过了 70 多个春秋的发展历程（图 1）。

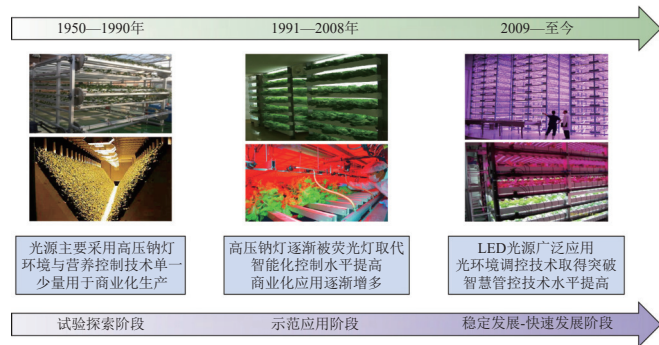


图 1 国际植物工厂发展历程

Fig.1 The international development history of plant factories

2.1 国际植物工厂发展历程

1957 年，丹麦的约克里斯顿农场成功建成了世界上首座植物工厂。这座工厂占地面积 1 000 m²，采用人工光与自然光并用的模式，主要栽培作物为水芹。从播种到收获整个流程，采用全自动的传送带流水作业，实现了高效生产，年产量高达 400 万袋水芹，约 100 万 kg。1960 年，美国通用电气公司率先开启了人工光植物工厂的研发之旅，成为该领域的先驱。1963 年，奥地利的卢斯那公司建成了一座高 30 m 的塔式植物工厂。该工厂采用上下传送带旋转式的立体栽培方式，完全依靠人工光源种植生菜，这种创新的栽培模式为植物工厂的发展提供了新的思路。20 世纪 60、70 年代，植物工厂的研发

领域迎来了众多企业的积极参与。美国的通用食品公司、赛纳拉鲁米勒斯公司、依法德法姆公司，以及荷兰的飞利浦、日本的日立、三菱重工等多家企业纷纷涉足其中，为植物工厂技术的发展注入了强大的动力。1974 年，日本日立制作所中央研究所的高辻正基等人开启了人工光植物工厂的系统研究。经过多年的努力，1983 年，在静冈三浦农场推出了日本第一个真正意义上的人工光植物工厂。该工厂采用了三角板气雾培与平面式水耕培两种方式，展现了多样化的栽培技术。在这一时期，植物工厂主要采用高压钠灯作为人工光源，直到 20 世纪 90 年代，荧光灯才开始取代高压钠灯。然而，这两种光源都存在发热量较大、能耗高的问题，限制了它们的广泛应用。截止到 20 世纪 90 年代末，日本拥有约 20 座人工光植物工厂^[10]。

21 世纪以来，新技术的不断引入为植物工厂产业带来了崭新的变革^[26]。蓝光 LED 的问世以及红蓝 LED 组合光源的成功研制，再加上基于网络的智能化控制技术^[27]，植物工厂实现了关键技术的重大突破。光源能耗显著降低，栽培层间距缩短至约 0.4 m 左右，空间利用率得到显著提高，能效比实现了大幅度提升。至此，植物工厂产业迈入了快速发展阶段。在日本，植物工厂的发展态势十分迅猛。2009 年，日本的植物工厂数量达到 32 座，到 2022 年，增长至约 300 座。其中，位于宫城县多贺市的 LED 植物工厂，占地面积 2 300 m²，配备 15 层立体栽培架，日产叶菜 10 000 棵；大阪府立大学的 LED 植物工厂，占地面积 550 m²，竖向栽培 18 层，日产叶菜 5 300 棵。韩国自 2009 年起，一些科教单位与企业携手开展人工光植物工厂的研发工作。短短几年间，便相继推出了 10 多个型号的植物工厂产品。目前，韩国已建成的植物工厂约有 40 座，其中利用废弃隧道建成的植物生产系统面积达 9 000 m²。近年来，美国借助政府支持和金融资本介入等手段，积极开展种苗、芽苗菜、叶菜、大麻等植物工厂的研发与产业化应用，先后建成了芝加哥大厦农场、Oishii 草莓工厂等多个示范工程。欧洲各国则从节能和降低运行成本的角度出发，积极推进植物工厂的研发和产业化应用。英国琼斯食品公司在布里斯托建成栽培面积达 15 000 m²、年产叶菜 1 000 t 的植物工厂，展现了欧洲在植物工厂领域的前瞻性布局和实践。

2.2 国内植物工厂发展历程

相较于国际上部分起步较早的国家，中国植物工厂的发展虽然起步较晚，但发展势头极为迅猛。目前中国已然跻身世界上规模最大的植物工厂生产国之列^[10]。2006 年 3 月，中国农业科学院建成了国内首座面积为 20 m² 的小型 LED 植物工厂试验系统，开启了中国植物工厂技术研发序幕。经过多年的技术积累与探索，2009 年 9 月，国内第一例商业植物工厂在吉林长春落成，其面积达 200 m²。这一标志性事件，宣告中国植物工厂正式踏入商业化应用新阶段。截至 2023 年底，中国在植物工厂领域已取得了显著的成果，实际运行且具备一定规模的人工光植物工厂数量超过 250 座，广泛分布于广东、北京、上海、福建、浙江、江苏、山东、陕西、成都等

20多个省市自治区。在垂直、无人化植物工厂领域，中国农业科学院都市农业研究所、中科三安以及珠海益品等单位都取得了显著进展。中国农业科学院都市农业研究所着重技术研发与创新，深入研究垂直空间中植物生长特性，构建高效垂直种植架构，提升土地利用率；在无人化方面，运用传感器网络和人工智能算法精准调控环境，研发的机器人可完成多项农事操作，并通过示范基地将成果推广，举办活动传播技术。中科三安凭借光电领域优势，专注植物照明技术，开发适用于不同植物生长阶段的专用LED照明光谱，推动植物健康生长。同时，该公司积极开展大规模产业化布局，打造高度自动化、智能化的大型植物工厂项目，降低成本并提升竞争力。珠海益品通过与华南农业大学等科教单位合作，开发出全产业链无人化植物工厂。近年来，中国植物工厂产业应用场景愈发多元化，不仅用于传统农产品种植，还拓展到快速育种、药用植物等领域，部分植物工厂还与城市景观、休闲农业结合，创造都市农业新业态。

3 智慧植物工厂技术进展

智慧植物工厂是现代设施农业发展的高级形态^[19]，全面彰显了智慧化的魅力。在环境管控智能化方面，它借助智能LED光源实现智慧调光，能根据植物不同生长阶段精准供给特定光谱组合，还可精确控制光照强度与时长，提高光能利用率并缩短生长周期；通过传感器实时监测营养液参数，自动精准调配营养液，避免资源浪费，同时能综合调控温湿度、气体成分等环境因子^[28]，减少病虫害。智慧植物工厂具有生产过程自动化、无人化特征显著，各设备在中央控制系统协调下协同运行，并实现数据共享，为决策提供依据，播种、移栽、传送、收获等作业由机器人辅助完成，保证操作精准性^[29]，全自动生产线结合远程监控管理，实现无人化操作，采用数据融合技术进行智慧化决策，多传感器融合实时采集并传输各类数据^[30]，运用大数据分析和人工智能算法，深入挖掘数据规律，实现智能预测和决策^[31]。植物工厂系统组成如图2所示，采用自适应控制策略和闭环控制系统，根据植物实际生长情况自动调整环境参数和设备运行状态，确保植物始终处于最佳生长环境，实现作物的高效、优质、安全生产。

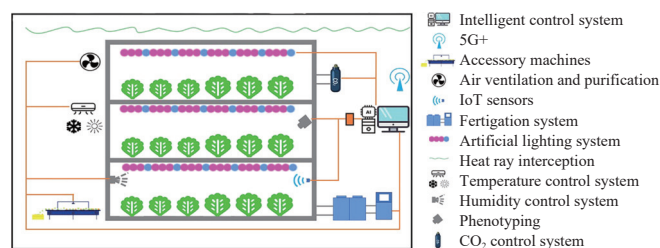


图2 植物工厂系统组成图^[32]

Fig.2 The composition of plant factory system^[32]

3.1 植物工厂光效提升与节能技术

随着半导体新材料技术的持续创新，LED的发光效率逐年攀升。与此同时，有关单色光谱对植物光生物学影响机理的研究，以及光配方大数据的研究进程不断加速，这些进展共同推动植物工厂LED光效提升技术的重

大突破。基于植物体光合叶绿素吸收峰主要集中在红光与蓝光波段这一已知生物学原理，科研人员创制出以红蓝LED为主体的植物照明光源，这一创新成果大幅削减了无效光谱（对光合作用无贡献的光谱）所产生的能耗。并且，随着LED芯片与封装技术的不断改进，LED光源的发光效率显著提高。20年前，其发光效率低于 $1\mu\text{mol/J}$ ，而如今已提升至 $4.1\mu\text{mol/J}$ 的水平^[33]。通过探究单色光质影响植物光合生理的机制，科研人员全面掌握植物工厂环境下不同作物品种、不同生育期的光配方优化参数^[34]，有力地推动了基于光配方的植物LED节能光源技术的进步，并促进其产业化应用。目前，通过探究以植物光合需求为目标的光环境优化控制参数，植物全生育期动态光环境智能调控技术取得突破性进展，“光配方”能够根据植物不同生长阶段的光合需求，精准调控光环境。同时，利用垂直移动LED光源装置，能够构建基于植株高度变化的动态光源系统^[35]，这一系统可根据植株生长过程中的高度变化，动态调整光源位置和光照强度，进一步提高光能利用效率。此外，对激光植物光生物学机理及其光源系统的研发与应用，推动了植物工厂新型光源及节能光环境控制技术的重大突破，有效降低了系统能耗^[36]。如图3^[37]所示，这些技术的综合应用，为植物工厂的高效、节能生产提供了坚实的技术支撑^[38]。

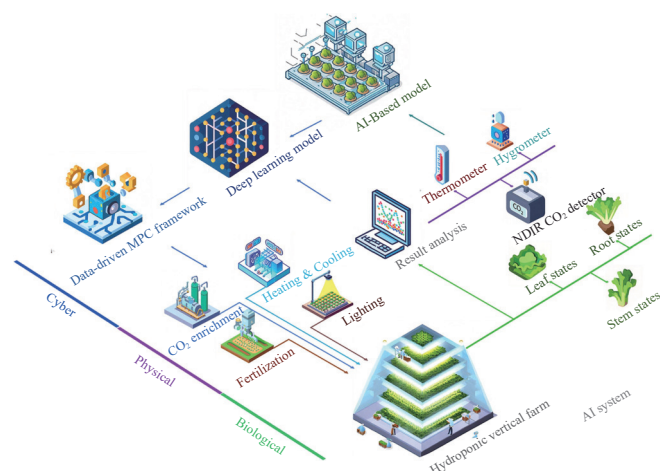


图3 用于植物工厂能源和作物生产管理的新型信息物理生物系统示意图^[37]

Fig.3 A new cyber-physical-biological system for energy and crop production management in plant factories^[37]

此外，随着植物工厂环境精细化管控技术的不断创新，空调系统能耗大幅降低。科研人员开发了一系列节能技术，取得了良好的节能效果，例如，通过引进室外自然冷源调节冠层温度，一定程度上减少了空调系统的运行负荷；再如，根际微环境局部调控技术取得突破，能够精准调控植物根系周围的微环境，避免了对整个植物工厂环境进行大规模调控，从而大大降低了环控系统能耗。凭借上述技术进步，植物工厂综合能耗降低，极大地提高了能源利用效率。与此同时，采用低成本清洁能源和新能源技术，将进一步削减系统能耗与运行成本。这些举措将使植物工厂实现商业化盈利逐渐从理想变为现实，其普及与推广速度也将显著加快，有望在未来的

农业生产中发挥更为重要的作用。

3.2 植物工厂垂直空间拓展与资源高效利用技术

近年来,土地资源的高效利用问题备受社会关注,世界各国纷纷投身于植物工厂向垂直空间拓展的探索中,以期大幅提高土地利用效率。在这一领域,不少国家已取得了显著成果。日本大阪府立大学成功研制出垂直植物工厂,其竖向栽培层多达 18 层;英国埃塞克斯郡(Essex warehouse)建成的垂直草莓工厂,栽培层也达到了 17 层;美国 AeroFarms 公司建成的气雾培植物工厂,栽培层达 12 层。2023 年,中国农业科学院都市农业研究所创造了新的里程碑,建成了全球首例栽培层数达 20 层的垂直植物工厂^[39],该工厂引入了 16 个机器人和机械手辅助操作,实现了垂直空间的无人化生产,土地利用效率达露地的 120 倍以上。然而,要实现这类超高层植物工厂的稳定、高效运行,仍有诸多难题亟待攻克。例如,如何确保气流、温度、湿度、CO₂ 等环境要素在整个空间内的均匀分布,以及开展超高层空间适用的操作机械、辅助机器人与自动化装备的研究,都将是未来科研工作需要重点突破的方向。

随着植物工厂不断向垂直空间的拓展,大厦型垂直农业系统正备受瞩目。相关研究显示,把植物工厂与多层建筑相结合,打造垂直农业综合体能够使全年能源消耗降低 12%~51%^[40],这种创新模式不仅在城市中实现食物工厂化生产,还能为城市环境的改善和可持续发展提供有力支撑。鉴于此,中国农业科学院都市农业研究所提出了摩天大厦作物工厂(skyscraper crop factory)的概念^[41],将植物工厂、物联网、节能与新能源利用、资源循环与可持续发展等先进技术有机融合进摩天大厦型植物生产系统,既能最大程度地节约土地等自然资源,又能稳定供应所需食物,从而有效缓解食物短缺问题。

3.3 植物工厂生产机械化与自动化技术

在植物工厂的运营成本中,劳动力成本占比达 20% 以上^[42],降低人力成本、大力提升机械化与自动化水平,已成为植物工厂技术研发的关键方向。借助生物与环境智能传感器、智慧决策模型以及自动化控制技术,能够对植物工厂的栽培环境、作物生理信息进行实时监控、并实现网络化通讯和多变量协同优化控制。此外,对植物工厂从播种、移栽直至收获的全生育期农艺过程展开研究,剖析各阶段以机械替代人力的技术路径^[43],研发出播种、催芽、育苗、移栽、间苗、收获、包装等成套设备,并引入定植机器人、移栽机器人、收获机器人、超高层操作机械手等智能化装备,可极大地提升植物工厂的机械化与自动化程度,显著提高劳动生产率,有效降低人力成本^[44]。当下,智慧化管控技术正逐渐成为植物工厂发展的重要趋势。通过应用计算机视觉分析、机器学习、光谱分析、智能传感器、大数据、模型预测以及区块链等前沿技术^[45],不仅能够提高植物工厂的生产效率和产品质量,还能赋予产品可追溯功能,为植物工厂向智慧化与无人化方向发展奠定了坚实的技术基础。

未来,随着植物工厂机械化、自动化与智慧化技术的不断进步,其发展前景将更加广阔,但同时也会面临一系列新的挑战与机遇。在挑战方面,尽管智能化装备

和智慧化管控技术能够大幅降低人力成本,提高生产效率,但这些先进技术和设备的研发、引进与维护成本高昂,对于许多中小规模的植物工厂而言,前期的资金投入可能成为其迈向更高水平发展的阻碍,且高度依赖技术的生产模式意味着一旦出现技术故障或网络中断等问题,整个生产流程可能会陷入停滞,给工厂带来巨大经济损失,同时随着自动化程度提高,对操作人员的技术要求大幅提升,培养适应新型植物工厂的专业技术人才将成为行业发展关键问题之一。然而,机遇同样不容忽视,植物工厂的发展契合当下社会对食品安全、高效农业以及可持续发展的需求,随着消费者对高品质、无污染农产品关注度不断提高,其生产的产品凭借稳定质量和可追溯性将在市场占据更大份额,且随着技术进步,设备成本有望降低,吸引更多投资者进入,推动产业规模化发展,还将带动传感器制造、智能装备研发、数据分析服务等相关产业兴起,形成完整产业链,创造更多就业机会和经济增长点。

4 植物工厂发展的主要瓶颈及战略对策

4.1 主要瓶颈

植物工厂具备诸多明显优势,然而,在实际发展过程中,也遭遇不少棘手的“瓶颈”问题。其中,初期建设所需的成本过高,光源和空调运行能耗较大,以及商业盈利水平尚不理想等情况较为突出^[46],成功突破这些阻碍,是确保植物工厂能够实现持续、健康发展的关键。

4.1.1 初期建设成本

植物工厂的生产通常在室内环境开展,需要构建一系列相关工程与配套装备,涵盖外维护结构、空调系统、人工光源系统、多层立体栽培系统、营养液循环系统以及计算机控制系统等。相较于露地、温室大棚等传统生产方式,植物工厂的投资成本相对较高。其中,人工光源在总成本中占据较大比重,约占 40%~50%^[47],尽管近年来植物工厂建设成本呈持续下降趋势,但总体而言仍旧高于常规露地栽培模式。

4.1.2 运行能耗与维护费用

能耗问题始终是制约植物工厂发展的主要“瓶颈”之一,能耗成本约占植物工厂总成本的 25%~30%,植物工厂能耗主要由三部分组成,其中人工光照明系统约占总能耗的 50%~60%、空调系统能耗约占 15%~35%、营养液循环水泵能耗等约占 1%~5%^[47]。近年来,人工光源逐渐被节能 LED 灯替代,使得光源能耗在一定程度上有所降低。然而,植物工厂的综合能耗仍然较高,每生产 1 kg 叶菜,综合能耗可达 7~10 kW·h^[47],这表明尽管在光源节能方面取得了一定进展,但整体能耗问题依旧是植物工厂需要着力解决的难题,过高的能耗不仅增加了生产成本,也不利于植物工厂的大规模推广和可持续发展,未来还需要在空调系统节能、优化整体能源利用效率等方面进一步探索和创新。目前,用于商业生产的垂直农场中,折旧(或初始投资)、劳动力(或工作时长)、电力成本以及利润分别占年销售额的年均百分比为 26%、21%、18% 和 11%;其余部分为消耗品(6%)、物流(5%)、种子(2%)和其他(11%)^[48],

因此,降低三大主要成本构成部分对于降低总生产成本至关重要。

4.1.3 专业化市场

植物工厂运用的是营养液栽培模式,这在一定程度上规避了土壤栽培可能出现的微生物和重金属污染问题,并且因其生产环境相对封闭、不与大气直接接触,空气中灰尘、病原微生物的污染也大幅减少,同时还无需施用农药与化学制剂。在如此洁净、安全环境下产出的高品质蔬菜,生产成本将高于常规露地蔬菜生产模式。若无法与常规蔬菜在价格上形成差异,实现盈利便困难重重。然而,当下市场对植物工厂所产蔬菜的认知和接收程度还比较低,有必要培育出植物工厂蔬菜产品消费专业化的市场。在日、美等国,一部分植物工厂生产的蔬菜已经拥有专门标识和认证^[47],正逐步争取优质优价,其市场售价通常比常规蔬菜高。中国植物工厂起步相对较晚,专业化市场的培育虽然迫在眉睫,但可能还需要一个漫长的过程。

4.1.4 商业化盈利

植物工厂作为一种现代化的农业生产方式,其投入成本相对较高。若要实现商业化盈利,不仅需确保较高的产出,还得千方百计降低投资与运营成本。如前文所述,植物工厂生产投入高,若其产品售价与传统露地、温室生产的产品毫无差别,那么实现盈利将会非常困难。当前,植物工厂在市场培育和品牌推广方面尚处于起步阶段,商业化运营模式还不够成熟,整体盈利状况并不乐观。据日本学者古在丰树教授估计,在日本的植物工厂中,约30%能够实现盈利,50%维持盈亏平衡,仍有20%处于亏损状态^[49-50]。而在中国,目前尚无权威的盈亏统计数据。但考虑到中国蔬菜售价稍低于日本,预计植物工厂的整体盈利比例可能比日本略低。

4.2 战略对策

为突破植物工厂产业化瓶颈,可从三方面发力:一是降低投资与运营成本,优化资源配置,增强经济性^[51];二是提升农产品质量,融入科技创新挖掘附加值,增强市场竞争力;三是探索与都市融合路径,借助都市资源、市场与消费优势,如开展合作与体验活动^[52]。通过这一系列举措,有望提高植物工厂的生产效益,增加产品认知度,扩大盈利空间,从而有力地推动植物工厂产业驶入快速发展的轨道。

4.2.1 合理降低初期建设成本

植物工厂初期建设成本涵盖多个方面,主要有建筑构件、照明设备配备、电器设施安装、空调系统搭建、给排水工程、水耕栽培装置设置、配套机械设备购置以及各类工程费用等,其中,建筑施工、照明设备采购以及栽培设施建设等方面的费用占比较高,超过了总成本的70%^[53]。若要降低建设成本,可从以下几个关键环节着手。在建筑成本控制上,可充分挖掘现有资源,利用废弃厂房、建筑物地下室等闲置空间进行改造建设,这样既能节省土地资源和建设资金,又能实现资源的高效利用。在栽培设备建设方面,应遵循经济实用的原则,尽可能选用标准化民用材料和装备^[54],例如采用标准化货架,不仅能保证栽培设备的质量和稳定性,还能因规

模化生产降低成本。对于照明光源的选择,应紧紧围绕植物生产的实际需求^[55],以满足植物生长的光照条件为首要目标,注重其实用性,减少装饰性投入,从而在保证植物生长效果的同时,有效降低设备成本。

4.2.2 降低运行维护成本,提升盈利能力

植物工厂要实现规模化应用,商业化盈利是不可或缺的前提条件^[10],这意味着生产企业或农户通过销售产品所获得的收益,必须超过投资与运行成本。投资与运行成本主要由两部分构成,一部分是初期建设成本(详见4.2.1节);另一部分是生产运行成本,其中既有电费(用于光源、空调、循环水泵等设备)、各种材料(如营养液、种子、CO₂气肥等)费、工人劳务费、物资运输费、人员管理等可变动费用,也有设备的折旧费。而产品销售收益受多方面因素影响,包括产量与品质、商业化运营模式以及大众对植物工厂产品的认可度等,盈利的关键在于能否实现优质优价,即凭借产品的高品质获得更高的市场价格。目前,中国大多数植物工厂采用了LED光源、立体栽培以及计算机智能控制系统等节能增效的高科技设备,随着技术不断进步和商业模式持续创新,植物工厂将进一步迎来成本降低和效益提升。今后,随着大众对植物工厂蔬菜品质的认知度提高,品牌效应将更加凸显,产品购买人群增加,有望促使植物工厂的经济效益提高,推动其实现规模化应用。

4.2.3 提升系统光效与能效

光效与能效的提升,是大幅削减植物工厂运行费用的重点方向。具体而言,在光源方面,用LED取代传统光源是重要举措,可以依据植物从苗期到收获期不同阶段对光的配方需求,动态调整光环境参数。此外,研发新型光源系统也很有必要,比如设计可上下移动的光源,以及能够调节光斑大小的聚光光源等^[56],这些都能提高光能利用效率,降低光源能耗。在温度调控方面,采用引进室外新风的耦合节能降温方法,并结合智能控制系统,可减少空调能耗。

4.2.4 提高植物工厂产量、品质与经济效益

产量与品质的提升是获得经济效益的关键所在。在提升产量方面,可采取以下两种策略。其一,对环境与营养要素实施精准调控,通过科学且精细地调控温度^[57]、湿度^[58]、光照强度^[59]、养分供给^[60]等环境因素,为植物生长创造适宜的条件,从而充分挖掘植物的生长潜力,实现产量的提升。其二,依据植物的发育特征,进行分阶段、分区域的培育,不同生长阶段的植物对环境和养分的需求各异,按照其生长规律^[61],划分出不同的培育区域并采用针对性的管理措施^[62](如面向不同生长时期的不同作物,进行光配方与营养液配方的针对性调整),能够提高每个生长阶段的生产效率,进而增加整体产量。

在品质提升方面,光与营养协同调控是一种较为有效的手段。合理调配光照的光谱^[63]、强度^[64]和时长^[65],同时精确控制营养液内各类溶质的含量和比例,能够促进植物体内维生素C^[66]、可溶性糖^[67]等成分以及其他功能品质的合成与积累。此外,在提升植物工厂经济效益时,还可选择种植一些功能性蔬菜或药用植物^[68-69]。这类植物往往具有较高的市场价值和需求,能够有效提高植物工

厂的产值,进一步增强其经济收益和市场竞争能力。

4.2.5 植物工厂环境控制理论拓展与技术提升

目前,植物工厂的环境调控主要集中在光配方^[59,63-65]、营养液配方^[60-62]以及温度、湿度^[57-58]等因素,这些经典的调控手段在一定程度上推动了植物工厂技术的发展。然而,随着对植物生长环境研究的不断深入,流场、磁场、电场等物理环境因素对植物生长发育的潜在影响逐渐引起了学术界的关注。目前,相关研究尚处于初步阶段,对于这些物理环境因素如何精确影响植物生长的内在机制、最佳作用参数以及它们与其他环境因素之间的协同效应等方面,仍存在大量未知领域亟待探索。

以流场为例,植物工厂中广泛应用的水培技术,其根际载体具有流动性这一独特特性^[70]。研究表明,在生菜栽培中,适宜的流场条件可使相同栽培周期内的生菜产量提高近 20%^[71]。这一现象暗示了流场在优化植物生长环境方面的巨大潜力。然而,当前对流场的研究还较为有限,不同作物在不同生长阶段所需的最佳流场特征(如流速、流态等)尚未明确^[72],缺乏系统的理论和技术来精确调控流场以实现作物产量的最大化^[73]。深入研究流场与植物生长的相互关系,有助于揭示流场影响植物生理过程的分子机制,为构建植物工厂水耕栽培流场环境精准控制技术体系提供理论基础。

电场和磁场在植物生长中的作用同样不可忽视。已有研究发现,电场能够促进种子萌发,提高发芽率^[74];磁场则有助于增强植物对营养元素的吸收和利用效率^[75]。然而,目前对于电场和磁场的作用机制尚未完全明晰,其作用效果受到场强、频率、作用时间等多种因素的影响^[76],且不同植物种类对电场和磁场的响应存在显著差异。此外,电场和磁场与其他环境因素(如光照、温度、湿度等)之间的耦合效应也有待深入研究。因此,加大对电场和磁场在植物工厂中应用的研究力度,有助于揭示其对植物生长发育的调控机制,开发基于电场和磁场调控的植物生长促进技术。

加大对植物工厂中流场、磁场、电场等物理环境因素的研究探索,是推动植物工厂技术创新和可持续发展的重要手段之一。这不仅有助于深入理解植物生长的环境调控机制,还能为提高植物工厂的生产效率和资源利用效率提供新的技术途径和理论支持。未来,整合多学科资源,加强跨领域合作,深入开展相关基础研究和应用技术开发,将是植物工厂智能化、精准化发展的必由之路。

4.2.6 推动植物工厂与城市生活的结合

城市居民对于洁净安全蔬菜的物质需求与构建“绿色空间”的精神需求日益凸显。植物工厂凭借其独特优势,能与城市的多元场景深度融合,包括家庭、社区、学校、医院、宾馆、餐厅、购物广场和便利店等。针对不同的应用场景,可以量身定制不同规格、不同型式的植物工厂产品,不仅为城市居民就近提供新鲜美味蔬菜,而且还能营造舒缓城市人心情的绿色生态空间。近年来,在北京、成都、上海、广州等城市,基于植物工厂技术的都市家庭与社区蔬菜种植新模式不断涌现,并取得了令人瞩目的成效。可以预见,植物工厂与现代城市的紧密结合^[77],必将在提升经济效益的同时,创造出显著的

社会效益,为城市的可持续发展注入新的活力。此外,对植物工厂产品进行科普工作具有极其重要的意义,从消费者角度看,它能增进大众对植物工厂产品的了解与信任,因其种植方式与传统农业差异大,科普能让消费者知晓从种植到收获的全流程及产品安全性和高品质特点,同时引导健康消费,介绍其丰富的营养价值,促使消费者将其纳入日常饮食,科普可推动市场拓展,提高消费者接受度进而增加需求。

5 战略建议

植物工厂作为现代农业新兴模式,能高效利用资源,提升作物产量与品质,凭借科技属性吸引年轻人投身农业,是中国设施农业当下及未来重要发展方向^[10]。然而,在发展过程中也存在一些突出问题。正如前文所述,初期建设成本高、运行能耗大、商业化盈利难,制约了其规模化推广,成为亟待突破的瓶颈。鉴于此,需从战略层面出发,加大植物工厂研发与产业化推广力度。政府应在政策上给予引导支持,在资金上给予扶持倾斜,同时加强人才培养,构建完备人才体系。多方协同发力,以促进植物工厂推广普及,为中国农业现代化与粮食安全提供有力支撑。

5.1 国家应从战略的高度出发,加大植物工厂创新研发力度

植物工厂作为设施农业的最高级发展形态,在国际上已达成广泛共识。它高度集成并集中体现了一个国家或地区农业领域的高技术水平,正逐渐成为未来国际农业高技术竞争的焦点。鉴于此战略意义,国家需从宏观战略层面出发,进一步强化对植物工厂创新研发的支持力度。中国在植物工厂研发领域已取得一定进展,“十二五”期间的“863 计划”开展了“智能化植物工厂生产技术研究”,“十四五”期间推进了“无人化植物工厂创制”以及“植物工厂育种加速器”等重点研发项目。但当前植物工厂发展仍面临诸多技术瓶颈,亟待突破^[78],国家应基于已有项目基础,启动一批专项研究,聚焦植物工厂效能提升、垂直空间栽培环境控制与辅助机器人、蔬菜品质与功能成分调控、专用品种培育等前沿关键技术。通过攻克这些核心技术,有望提高植物工厂的资源利用效率^[79],全面增强其综合效益,进而加速植物工厂产业化进程,提升中国在国际农业高技术领域的竞争力。

5.2 应从培育新兴产业角度出发,加大对植物工厂政策和资金的扶持力度

植物工厂作为一种集高投入、高技术与高产出于一体的产业形态,在其发展初期面临诸多挑战。投资与运行成本较高、差异化市场培育不足以及商业化盈利困难等问题,使得国家政策扶持成为其发展的关键因素。日本在植物工厂发展方面的经验为此提供了有力佐证。多年来,日本政府通过实施补贴政策,为植物工厂的发展提供了强大助力。这种政策支持有效降低了企业的初期投入成本,使得该植物工厂在运营后取得了良好的经济效益。近年来,日本产业振兴厅进一步推出“扶持植物工厂海外出口”计划,通过项目补贴等方式鼓励企业拓展海外市场,为植物工厂产业的国际化发展创造了有利

条件。参考这一经验，中国应从培育新兴产业的战略高度出发，将植物工厂纳入国家重点扶持的产业项目范畴。在投融资方面，提供多元化的融资渠道和优惠的信贷政策，降低企业的融资门槛和成本；在能源费方面，实施减收政策，减轻企业的运营负担；在设备采购上，给予一定比例的补贴，促进企业采用先进的生产设备；在产品出口时，建议提供出口补助，增强企业在国际市场上的竞争力。通过全方位的政策扶持，积极推动设施蔬菜装备技术创新发展^[80]，使其成为中国农业现代化和经济转型升级的重要力量。

5.3 应有计划有步骤地推动植物工厂产业发展，通过试验示范、科普宣传、政策引导等方式，提高大众的认知度和社会对产品的认可度，加快产业化推进步伐

植物工厂发展与所在地区社会经济环境息息相关，区域发展不平衡及地区内部经济差距会对其产生影响，故而国家需制定长远发展规划与战略部署。在区域布局上，鉴于经济发达地区消费水平高、对新技术接受度强，应优先在北京、上海、深圳、广州、杭州、成都等大都市建设试验示范基地，以此积累经验并向全国普及推广。建设规模方面，要坚持循序渐进、先易后难、先小后大原则，先小规模应用示范，摸索经验后再规模化推广，降低发展风险。农业科技园区、高品质蔬菜生产企业、城市社区等对植物工厂需求迫切，应优先在这些区域建设以满足社会需求。在大众认知和产品认可度层面，要借助移动媒体、平面媒体和新媒体等不同层级渠道加大宣传力度，让公众了解植物工厂生产过程、产品质量与优势等，从而加快推进植物工厂的普及与市场培育步伐。

5.4 应从大食物观的角度加大城市植物工厂产业布局，通过社区和公共服务平台、城市各类场景植物工厂食物生产体系构建，增强城市食物供给弹性

突发疫情、传染病的肆虐扩散，以及随之而来的封闭隔离措施，还有像冰雪封路等各类自然灾害的侵袭，极易造成城市食物供应链的断裂与混乱。在此背景下，在城市中构建具有弹性的食物保障系统显得尤为迫切。植物工厂具有独特优势，它不受耕地资源和气候条件的限制^[81]，能够在城市的任意区域开展食物生产活动，建议在城市中构建以植物工厂为核心的食物供给保障体系。一方面，可以依托楼宇等城市建筑，建设植物工厂与垂直农业等高效生产系统，让城市自身具备一定的食物生产能力，减少对外界食物供应的过度依赖；另一方面，在城市社区、商场或者专门的种植基地打造植物生产服务体系。搭建植物工厂平台，为居民提供涵盖种子、种苗、肥料、植保以及技术指导等全方位的专业化服务，居民可以充分利用自家阳台、屋顶、地下空间、绿地等闲置空间进行食物种植，这不仅能够提高城市食物供应的灵活性和弹性^[82]，还能增强城市应对疫情、灾害性天气等危机状况的能力，保障城市食物供应的稳定与安全。

6 结 语

本文对国内外植物工厂的发展现状与技术进展进行了全面且深入的系统梳理。详细回顾了不同国家和地区植物工厂的发展历程，剖析了其建设规模、应用领域以

及产业布局的特点与趋势。同时，聚焦半导体光源、节能环境控制、营养液栽培等核心技术，深入探讨了其突破与创新进展。针对植物工厂作物生长机制解析、新型节能方法以及栽培模式创新等热点领域展开了细致分析，进而提出了智能化、绿色化、产业化的未来发展方向。然而，不可忽视的是，植物工厂在商业化应用过程中遭遇了诸多瓶颈，如建设运营成本居高不下、技术标准尚不完善、市场认知度相对较低等问题，这些都在一定程度上制约了其大规模推广与发展。为推动植物工厂在现代农业中实现可持续发展，需在研究和产业化两个关键维度协同发力。

在研究层面，应深度融合多学科基础理论。在植物生理学领域，深入探究植物生长发育的内在机制，精准量化不同生长阶段植物对光照、温度、湿度等环境因素的需求特征，运用基因编辑技术探索植物生长周期与形态建成的机理，为植物工厂精准化生产提供理论支撑。在环境科学领域，加强对植物工厂内微环境的研究，结合植物营养学的相关理论，研发高效无土栽培基质和营养液配方，优化植物生长的营养供给与环境条件。大力推进应用技术创新，研发智能可调光LED光源，实现光照强度、光谱成分的精准调控，满足不同植物生长需求。开发自动化水肥一体化系统，提高水资源和肥料的利用效率；利用物联网和传感器技术实现环境参数的实时监测与远程控制，提升生产管理的智能化水平。此外，还应积极开展跨学科创新，加强多学科团队的合作与交流，结合机器人与人工智能技术开发智能采摘和环境监测系统，提高生产效率和环境控制精准度，借鉴建筑与材料科学的先进理念，优化植物工厂的结构设计与选材，降低建设成本和能源消耗。

在产业化层面，政府应充分发挥宏观调控作用，制定科学合理、具有前瞻性的产业发展规划，明确植物工厂产业的发展目标、重点任务和空间布局，引导资源合理配置，并出台财政补贴、税收优惠等扶持政策，降低企业建设运营成本，鼓励社会资本投入植物工厂产业。此外，还应培育具有核心竞争力的龙头企业，鼓励企业与科研院校建立产学研合作机制，加大研发投入，突破关键技术瓶颈，加强技术创新和品牌建设，培养和引进高素质的专业人才，提高产业的自主创新能力和核心竞争力。并且，积极开展和鼓励广泛的国际合作与交流，引进国外先进的技术、管理经验和资金，推动植物工厂产业的国际化发展。

植物工厂作为现代农业科技创新的重要成果，对于实现农业可持续发展具有重要战略意义。通过在研究和产业化两方面的协同推进，有望克服当前面临的诸多挑战，推动植物工厂产业实现高质量、可持续发展，为构建更加稳定、高效、绿色的农业生产体系贡献力量。

【参 考 文 献】

- [1] Mordor Intelligence. Vertical farming market size and share analysis-growth trends and forecasts (2025-2030) source[EB/OL]. [2025-06-12]. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/vertical-farming-market>.
- [2] The Insight Partners. Vertical farming crops market analysis

- and opportunities by 2028[EB/OL]. [2025-06-12]. <https://www.theinsightpartners.com/reports/vertical-farming-crops-market/>.
- [3] Siemens Vertical Farming. Vertical farming is flourishing thanks to digitalization[EB/OL]. [2025-04-05]. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/scaling-vertical-farming-siemens-ensures-perfect-plant-growth>.
 - [4] Philips Lighting. Vertical farming[EB/OL]. [2025-06-12]. <https://www.lighting.philips.com/application-areas/specialist-applications/horticulture/vertical-farming>.
 - [5] Mitsubishi Chemical. Greenhouse plant production system with solar light[EB/OL]. [2025-02-01]. https://www.mcgc.com/news_mcc/2020/1208127_7469.html
 - [6] 杨其长. 植物工厂现状与发展战略[J]. *农业工程技术*, 2016, 36(10): 9-12.
 - [7] JINGDONG. JD cultivates new smart agriculture push in China[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://jdcorporateblog.com/jd-cultivates-new-smart-agriculture-push-in-china/>.
 - [8] SananBio. Vertical farming horticultural lighting[EB/OL]. [2025-06-12]. <https://www.sananbio.com/story>.
 - [9] Mulinsen. Plant factory[EB/OL]. [2025-06-12]. <https://www.mls-co.cn/application/370.html>.
 - [10] 杨其长. 植物工厂[M]. 北京: 清华大学出版社: 2019.
 - [11] LEE J G, CHOI C S, JANG Y A, et al. Effects of air temperature and air flow rate control on the tipburn occurrence of leaf lettuce in a closed-type plant factory system[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2013, 54(4): 303-310.
 - [12] CHOWDHURY M, KIRAGA S, ISLAM M N, et al. Effects of temperature, relative humidity, and carbon dioxide concentration on growth and glucosinolate content of kale grown in a plant factory[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1524.
 - [13] KANG J H, KRISHNAKUMAR S, ATULBA S L S, et al. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2013, 54(6): 501-509.
 - [14] CHEN D, MEI Y, LIU Q, et al. Carbon dioxide enrichment promoted the growth, yield, and light-use efficiency of lettuce in a plant factory with artificial lighting[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 5196-5206.
 - [15] MUNYANONT M, LU N, RUANGSANGARAM T, et al. Effect of far-red light and nutrient solution formulas on calendula production in a plant factory[J]. *Biology*, 2025, 14(6): 716.
 - [16] MERRILL B F. Handbook of Photosynthesis[M]. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2016.
 - [17] MITCHELL C A, SHEIBANI F. LED advancements for plant-factory artificial lighting[M]// Plant Factory. New York: Academic Press, 2020: 167-184.
 - [18] DEMARTINIS D, HITZEROTH I I, MATUDA R, et al. Engineering the plant biofactory for the production of biologics and small-molecule medicines—volume 2[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 942746.
 - [19] DECARDI-NELSON B, You F. Artificial intelligence can regulate light and climate systems to reduce energy use in plant factories and support sustainable food production[J]. *Nature Food*, 2024, 5(10): 869-881.
 - [20] TIAN Z, MA W, YANG Q, et al. Application status and challenges of machine vision in plant factory—A review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2022, 9(2): 195-211.
 - [21] Food and Agriculture Organization. Global agriculture towards 2050[EB/OL]. [2025-06-12]. https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf.
 - [22] AVGOUSTAKI D D, XYDIS G. Plant factories in the water-food-energy nexus era: A systematic bibliographical review[J]. *Food Security*, 2020, 12(2): 253-268.
 - [23] SMED S, DEJGAARD J J. Food safety information and food demand[J]. *British Food Journal*, 2005, 107(3): 173-186.
 - [24] KOZAI T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2013, 89(10): 447-461.
 - [25] KIM J W. Trend and direction for plant factory system[J]. *Journal of Plant Biotechnology*, 2010, 37(4): 442-455.
 - [26] SHARATHKUMAR M, HEUVELINK E, MARCELIS L. Vertical farming: Moving from genetic to environmental modification[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(8): 724-727.
 - [27] GULANDAZ M A, ALI M, KIRAGA S, et al. LED illumination intelligent control system in plant factory: A review[J]. *Precision Agriculture*, 2022, 4(1): 1.
 - [28] SANTITEERAKUL S, SOPADANG A, YAIBUATHET T K, et al. The role of smart technology in sustainable agriculture: A case study of wangree plant factory[J]. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4640.
 - [29] LIU Y, MOUSAVI S, PANG Z, et al. Plant factory: A new playground of industrial communication and computing[J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 147.
 - [30] KIM B H, CHO J H. A study on modular smart plant factory using morphological image processing[J]. *Electronics*, 2020, 9(10): 1661.
 - [31] HYUNJIN C, SAINAN H. A study on the design and operation method of plant factory using artificial intelligence[J]. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2021, 6(3): 41.
 - [32] ZHANG L, YANG X, LI T et al. Plant factory technology lights up urban horticulture in the post-coronavirus world[J]. *Horticulture Research*, 2022, 9: uhac018.
 - [33] KUSUMA P, PATTISON P M, BUGBEE B. From physics to fixtures to food: Current and potential LED efficacy[J]. *Horticulture Research*, 2020, 7: 56.
 - [34] MONTES R M, ESCALANTE-GARCIA N, DENA-AGUILAR J A, et al. Feature selection to predict LED light energy consumption with specific light recipes in closed plant production systems[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(12): 5901.
 - [35] JAEGER S R. Vertical farming (plant factory with artificial lighting) and its produce: Consumer insights[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2024, 56: 101145.
 - [36] MARONDEDZE C, LIU X, HUANG S, et al. Towards a tailored indoor horticulture: A functional genomics guided phenotypic approach[J]. *Horticulture Research*, 2018, 5: 68.
 - [37] HU G, YOU F. AI-enabled cyber-physical-biological systems for smart energy management and sustainable food production in a plant factory[J]. *Applied Energy*, 2024, 356: 122334.
 - [38] CAI W, BU K, ZHA L, et al. Energy consumption of plant factory with artificial light: Challenges and opportunities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 210: 115235.
 - [39] BAIYIN B, YANG Q. Applications of vertical farming in urban agriculture[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2024, 89(4): 1-7.
 - [40] BLOM T, JENKINS A, VAN DEN DOBBELSTEEN A. Synergetic integration of vertical farms and buildings: Reducing the use of energy, water, and nutrients[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1227672.
 - [41] ZHANG L, HUANG L, LI T, et al. The skyscraper crop factory: A potential crop-production system to meet rising urban food demand[J]. *Engineering*, 2023, 31(12): 70-75.
 - [42] KAYA C. Intelligent environmental control in plant factories: Integrating sensors, automation, and AI for optimal crop production[J]. *Food and Energy Security*, 2025, 14(1): e70026.

- [43] LIU W, XU M, JIANG H. Design, integration, and experiment of transplanting robot for early plug tray seedling in a plant factory[J]. *AgriEngineering*, 2024, 6(1): 678-697.
- [44] XIE X, QIN Y, ZHANG Z, et al. GY-SLAM: A dense semantic SLAM system for plant factory transport robots[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1374.
- [45] CHEN K, ZHAO B, ZHOU H, et al. Digital twins in plant factory: A five-dimensional modeling method for plant factory transplanter digital twins[J]. *Agriculture*, 2023, 13(7): 1336.
- [46] VANDELLEN S H, SHARATHKUMAR M, BUTTURINI M, et al. Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems[J]. *Nature Food*, 2021, 2(12): 944-956.
- [47] KOZAI T. Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms[M]. Singapore: Springer, 2018, 238.
- [48] KOZAI T. Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(5): 28-37.
- [49] KOZAI T, NIU G, TAKAGAKI M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production[M/OL]. 2nd ed. London: Academic Press, Elsevier, 2020. [2025-06-12]. <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128166918>.
- [50] 杨其长. 以都市农业为载体, 推动城乡融合发展[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(2): 246-255.
YANG Qichang. Promoting development of urban-rural integration by urban agriculture[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(2): 246-255. (in Chinese with English abstract)
- [51] WANG X, ONYCHKO V, ZUBKO V, et al. Sustainable production systems of urban agriculture in the future: A case study on the investigation and development countermeasures of the plant factory and vertical farm in China[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 973341.
- [52] ARES G, HA B, JAEGER S R. Consumer attitudes to vertical farming (indoor plant factory with artificial lighting) in China, Singapore, UK, and USA: A multi-method study[J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110811.
- [53] OGUNTOYINBO B, SAKA M, UNEMURA Y, et al. Plant factory system construction: Cultivation environment profile optimization[J]. *Environmental Control in Biology*, 2015, 53(2): 77-83.
- [54] RYU D K, CHUNG S O, PARK S U, et al. Construction and operational test of a plant factory[C]//Annual International Meeting of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, July 29-August 1, 2012. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Dallas, Texas: ASABE, 2012: 1.
- [55] SHAMSI R P, MOUSAVI S S R, KALANTARI D, et al. Evaluation of the effects of artificial light on some plant characteristics in the design and construction of a small-scale plant factory[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2023, 13(2): 213-226.
- [56] KIM Y, SHIN H R, OH S, et al. Analysis on the economic feasibility of a plant factory combined with architectural technology for energy performance improvement[J]. *Agriculture*, 2022, 12(5): 684.
- [57] HEBISHIMA H, INAGE S. Development of a new plant factory concept with sustainable water and energy supply[J]. *Energy Nexus*, 2025, 17: 100341.
- [58] GAO H, TAN Z C, YANG M, et al. Microclimate air motion and uniformity of indoor plant factory system: Effects of crop planting density and air change rate[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(8): 4329.
- [59] ROMEO R, GUILLERMO C, JUAN A, CRISTOBAL N. Biocontrol Systems and Plant Physiology in Modern Agriculture[M]. New York: Apple Academic Press, 2022.
- [60] YU W, HUANG Y, JI F, et al. A microfluidic biosensor for microbial quantitative monitoring of air and nutrient solution in the plant factory[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2025, 12(4): 478-486.
- [61] BOROS I F, SZEKELY G, BALAZS L, et al. Effects of LED lighting environments on lettuce (*Lactuca sativa* L.) in PFAL systems—A review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 321: 112351.
- [62] RUANGSANGARAM T, CHULAKA P, MOSALEEYANON K, et al. Effects of light intensity and irrigation method on growth, quality, and anthocyanin content of red oak lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispata* L.) cultivated in a plant factory with artificial lighting[J]. *Horticulturae*, 2025, 11(1): 75.
- [63] CAI W, LI S, ZHA L, et al. Significantly enhanced energy efficiency through reflective materials integration in plant factories with artificial light[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124587.
- [64] ZHANG L, ZHANG Q, ESCALONA CONTRERAS V H, et al. Short-term high-light intensity and low temperature improve the quality and flavor of lettuce grown in plant factory[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(14): 9046-9055.
- [65] YU H, WANG P, ZHU L, et al. Optimizing light intensity and airflow for improved lettuce growth and reduced tip burn disease in a plant factory[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 338: 113693.
- [66] SONJAROON W, TEPKAEW T, KUPIA M, et al. Pre-harvest UV-A supplementation in plant factory with artificial lighting improves growth, photosynthesis, and phytonutrients in kale[J]. *Horticulturae*, 2024, 10(7): 701.
- [67] CHU Q, QIN Y, LI C, et al. Effects of different photoperiods on the growth and nutritional characteristics of two celery cultivars in plant factory[J]. *Agronomy*, 2023, 13(12): 3039.
- [68] XU W, LU N, KIKUCHI M, et al. Continuous lighting and high daily light integral enhance yield and quality of mass-produced nasturtium (*Tropaeolum majus* L.) in plant factories[J]. *Plants*, 2021, 10(6): 1203.
- [69] CHEN X, MARTIN C, CHEN W. Medicinal plant biology: A new era for medicinal plant research[J]. *Medicinal Plant Biology*, 2022, 1(1): 1.
- [70] BAIYIN B, XIANG Y, SHAO Y, et al. Nutrient flow environment as a eustress that promotes root growth by regulating phytohormone synthesis and signal transduction in hydroponics[J]. *Plant Stress*, 2024, 12: 100428.
- [71] BAIYIN B, XIANG Y, SHAO Y, et al. Effect of nutrient solution flow on lettuce root morphology in hydroponics: A multi - omics analysis of hormone synthesis and signal transduction[J]. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(4): e14435.
- [72] BAIYIN B, XIANG Y, SHAO Y, et al. Application of flow field visualization technology in analysing the influence of nutrient solution flow on hydroponic lettuce growth[J]. *Smart Agricultural Technology*, 2025, 11: 100933.
- [73] BAIYIN B, XIANG Y, SHAO Y, et al. How the nutrient flow environment promotes lettuce growth in hydroponics[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2025, 233: 106137.
- [74] LEE S, OH M M. Electric field: A new environmental factor for controlling plant growth and development in agriculture[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2023, 64(6): 955-961.
- [75] MAFFEI M E. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 445.
- [76] NYAKENE N E, MARKUS E D, SEDIBE M M. The effects of magnetic fields on plants growth: A comprehensive review[J].

- International Journal of Food Engineering, 2019, 5(1): 79-87.
- [77] EDMONDSON J L, CUNNINGHAM H, DENSLEY TINGLEY D O, et al. The hidden potential of urban horticulture[J]. *Nature Food*, 2020, 1(3): 155-159.
- [78] 孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 594-604.
SUN Jin, GAO Hongbo, TIAN Jing, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(4): 594-604. (in Chinese with English abstract)
- [79] 周增产, 董微, 李秀刚, 等. 植物工厂产业发展现状与展望[J]. *农业工程技术*, 2022, 42(1): 18-23.
- [80] 李天来. 坚持系统观念推动设施蔬菜装备技术创新[J]. *中国科技产业*, 2025(1): 1.
- [81] 龚化勤, 景海春, 谭鑫, 等. 加强多元化食物生产系统植物工厂的人工智能创新[J]. *中国科学院院刊*, 2025, 40(2): 338-349.
GONG Huaqin, JING Haichun, TAN Xin, et al. Artificial intelligence innovation for smart plant factory to diversify its big food production functions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 40(2): 338-349. (in Chinese with English abstract)
- [82] CSAMBALIK L, GAL I, MADARAS K, et al. Beyond efficiency: The social and ecological costs of plant factories in urban farming—A Review[J]. *Urban Science*, 2024, 8(4): 210.

Current situation and trend of smart plant factory

YANG Qichang¹, BAIYIN Bateer¹, CHENG Ruifeng²

(1. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610213, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Plant factory is a highly intensive, technology-driven agricultural production system that enables year-round, continuous crop cultivation within fully enclosed or semi-enclosed facilities through precise, computer-controlled management of environmental factors such as light, temperature, humidity, carbon dioxide concentration, and nutrient solutions. Regarded as the most advanced stage of facility agriculture, it fundamentally decouples food production from traditional constraints like arable land, climate, and seasonality. The global impetus for its development stems from a confluence of pressing challenges: rapid population growth projected to reach 9.5 billion by 2050, concurrent contraction of per capita arable land, increasing consumer demand for clean, safe, and pesticide-free produce, and a severe aging crisis within the agricultural workforce. In response, the plant factory industry has witnessed explosive growth, with market analysts predicting a compound annual growth rate exceeding ten percent and a market value soaring into tens of billions of United States dollars within the next five to ten years. This article provides a comprehensive systematic review of the global plant factory sector. It traces the historical evolution of the technology over seven decades, from early pioneering systems in Denmark and the United States in the 1950s to the contemporary era of innovation led by light emitting diode lighting and digital automation. The review highlights the distinct development trajectories in different regions: the early technological leadership and sustained policy support in Japan; the rapid scaling and venture capital-driven models in the United States and Europe; and the remarkably swift, large-scale industrialization in China, which, despite a later start, has leveraged significant investment and manufacturing prowess to become a global leader in both the number and scale of operational facilities. The core of the discussion focuses on recent technological advancements that define the modern "smart" plant factory. These include: (1) Light Efficiency Enhancement, primarily through the adoption and optimization of light emitting diode lighting systems, where research into light recipes, meaning spectral composition, intensity, and photoperiod, tailored to specific crops and growth stages has dramatically improved photon efficacy and reduced energy consumption; (2) Vertical Spatial Expansion, involving multi-layer cultivation racking systems that increase land use efficiency by over 100 times, though this introduces complex challenges in maintaining uniform environmental conditions across layers; and (3) Mechanization, Automation, and Intelligent Decision-Making, encompassing robotics for seeding, transplanting, and harvesting, integrated sensor networks for real-time monitoring, and the application of data analysis, artificial intelligence, and predictive models for optimized climate and nutrient management. Despite its promise, the path to widespread commercialization is hindered by significant bottlenecks. The primary constraints are the "high capital expenditure" for infrastructure and specialized equipment, and the substantial "operational expenditure", dominated by electricity costs for lighting and cooling, which can account for 25%-30% of costs. These factors contribute to challenging economics, with many facilities struggling to achieve profitability without premium product pricing. Furthermore, cultivating consumer recognition and a differentiated market for plant factory products remains a protracted endeavor in many regions. To overcome these barriers and unlock sustainable growth, a multi-faceted strategic approach is necessary. In technology, continuous research and development is crucial to further drive down energy consumption, for example through next-generation light emitting diodes and efficient heating, ventilation, and air conditioning designs, and automate labor-intensive tasks. In economic, strategies must focus on reducing both capital expenditure, via standardized modular designs and use of existing urban spaces, and operational expenditure, through energy innovations. In politics, government support in the form of strategic research and development funding, subsidies for energy efficiency, and policies that incentivize urban agriculture integration are vital. In Social, public engagement and education are needed to build market acceptance for the value proposition of locally grown, consistent, and ultra-fresh produce. In conclusion, plant factories represent a transformative model for sustainable and resilient food production. Their future success hinges on synergistic advancements across technology, business models, and supportive policy frameworks. By addressing the current challenges, plant factories have the potential to play an increasingly critical role in enhancing food security, reducing the environmental footprint of agriculture, and creating a stable, high-technology food supply chain for urban.

Keywords: facility agriculture; plant factory; artificial intelligence; vertical farming; urban agriculture