doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.028

面向植物合成生物学的植物工厂生产关键技术与装备研究进展及应用展望

吴尘萱[1,2]　栗君谊[1]　韩亚芬[1,2]　赵学东[1]　贺　刚[1]　周海燕[2]　吴海华[2]
(1.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083)

摘要:植物工厂作为设施农业的高级发展阶段和形态,可实现作物高度可控的周年无间断工业化生产,随着植物合成生物学、农业人工智能等技术发展应用,通过工程化手段对植物基因、代谢通路和生理功能进行系统性设计与改造,逐步在植物次生代谢天然产物、分子农业制品、资源利用效率、碳汇植物创制等方面与植物工厂结合应用,正从实验室走向产业化。本文围绕植物工厂的高价值可持续发展、产业与技术的协同创新,详细论述植物合成生物学及植物工厂生产技术在生物制造、药物开发、濒危植物保护、未来空间站等领域的结合应用,以及未来延伸的方向及挑战,为拓展农业生产的可能性边界,实现高价值农产品有效供给和农业资源多元化开发,提供全新解决思路。

关键词:植物合成生物学;植物工厂;智能控制系统;环境及能源系统
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0300-16　　**OSID**:

Research Progress and Application Prospects of Key Technologies and Equipment for Plant Factory Production in Plant Synthetic Biology

WU Chenxuan[1,2]　LI Junyi[1]　HAN Yafen[1,2]　ZHAO Xuedong[1]　HE Gang[1]　ZHOU Haiyan[2]　WU Haihua[2]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: As an advanced stage and manifestation of facility agriculture, plant factories facilitate highly controllable and uninterrupted industrial production of crops throughout the year. With advancements and applications in plant synthetic biology, systematic design and modification of plant genes, metabolic pathways, and physiological functions through engineering approaches are now being integrated with plant factories in various areas, including the production of plant secondary metabolites, molecular agricultural products, enhancing resource utilization efficiency, and the creation of carbon sink plants. This integration is transitioning from the laboratory to industrialization. The high-value sustainable development of plant factories and the collaborative innovation between industry and technology was delved. It elaborated on the combined applications of plant synthetic biology and plant factory production technology in fields such as bio-manufacturing, drug development, endangered plant conservation, and future space stations. Furthermore, it explored the future directions and challenges of this integration, offering novel solutions to expand the boundaries of agricultural production possibilities, achieve efficient supply of high-value agricultural products, and foster diversified development of agricultural resources.

Key words: plant synthetic biology; plant factories; intelligent control systems; environmental and energy systems

0　引言

践行大农业观、大食物观,有必要树立与之呼应的“大农业机械观”,为推进中国农业现代化提供坚实的装备支撑。现有的农业生产体系下,我国设施蔬菜、食用菌年生产面积超 2.3×10^6 hm^2[1],既要保

收稿日期:2025-05-10　修回日期:2025-05-20
基金项目:中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目(QNJJ-PY-2023-03)
作者简介:吴尘萱(1994—),女,工程师,博士,主要从事食品生物技术研究,E-mail:wuchenxuan0511@163.com
通信作者:吴海华(1981—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:caamswhh@163.com

障肉类、蔬菜、水果、水产品等各类食物有效供给，同时也面临着全方位、多元化开发农业资源以满足人民更美好生活需要的建设挑战，亟待加快发展现代设施农业、拓展食物开发新空间。植物工厂是综合运用现代生物技术、信息技术、自动化技术，以高度可控的工业化生产方式，实现作物周年无间断生产的高效农业系统[2]。从生产、研究对象的组织尺度上，可分为叶菜植物工厂、药用植物工厂、茄果类蔬菜植物工厂、果树植物工厂、育苗植物工厂、组培植物工厂和生物反应器等[3-4]，其最大优势是能够为植物的生长提供适宜的生长环境，具有独特的育种加速器功能。与传统农业相比，植物工厂可使单位面积产量提升 10 ~ 20 倍，被认为是设施农业的高级发展阶段和形态，也是解决未来世界各国粮食安全问题的重要途径之一[5]。

近年来，随着合成生物学技术发展应用，有望解决传统农业面临的资源限制和生产瓶颈，极大拓展了农业生产的可能性边界。植物合成生物学是合成生物学在植物领域的延伸，通过工程化手段对植物基因、代谢通路和生理功能进行系统性设计与改造，在植物次生代谢天然产物、分子农业制品、资源利用效率、碳汇植物创制等方面已开始与组培植物工厂和生物反应器等植物工厂结合应用[4]，从实验室走向产业化，提升植株抗逆能力、高效表达目标产物、工厂化育苗，突破传统农业的时空限制，将成为推动农业生产变革的核心力量，为濒危植物保护、高产优质新品种育种、植物源药物规模化开发、未来空间站营养供给、增强碳汇等领域提供全新解决方案，培育和推动细胞农业、低碳农业和智能农业等新业态发展[6]。

本文围绕植物合成生物学在植物工厂生产系统的研究进展，从关键技术革新、应用领域延伸、面临问题挑战以及未来展望等方面进行分析论述，对植物工厂的高价值可持续发展以及产业技术的协同创新应用展开思考。

1　基于植物合成生物学的植物工厂适生品种开发技术革新

植物合成生物学依据对植物全方位生命活动的定量模拟和设计，指导植物改造优化目标信号调控途径的基因靶点，实现理论预测的新型优良性状，甚至创造植物理想株形，包括提升光能利用效率、增强抗逆境能力、抵御多种病虫害和生产高附加值产物等，广泛用于作物的育种实践。植物工厂在全要素的精细化控制和有限面积的最大化产方面优势突出，展现出独特的加速育种功能，已成为最新的合成生物学应用概念[7]。然而植物合成生物学体系依然处于早期发展阶段，植物工厂适生的优质高产作物种类仍十分匮乏，亟需加强适生品种的育种研究。

尽管如此，近年许多学者在构建植物基因元件标准化体系、底盘植物系统改造体系以及作物光合作用合成生物学改造等方面都取得了突破性进展，尤其是对种质资源进行筛选，对品种的环境适应性进行评估，加快作物育种进程，培育适应于植物工厂生产的专用品种。

1.1　元件库标准化构建

植物合成生物学的基础是将不同基因经过定量表征测试整合成模块化的工程生物元件，再开展标准化的规范设计与组装[8]。合成生物学开放语言（Synthetic biology open language，SBOL）是用于表达遗传设计结构和功能的代表性标准化框架[9]，实现了计算机语言式的合成生物学元件管理和流程，并发布了兼容植物的克隆体系 Plant Mo Clo Syntax[10]。已有学者整理了多种按 SBOL 体系构建的标准化植物元件库[11]，以及光控元件等功能元件数据库 Opto Base，原始单细胞绿色植物莱茵衣藻是合成生物学底盘开发的重要模式物种[12]，促进叶绿体工程学克隆工具和“设计-构建-测试-学习”工作流程的标准化发展[13-14]。据报道，迄今为止最大的莱茵衣藻突变体资源库已确定 58 101 个突变体在超过 121 种不同环境生长条件下的表型[15]。植物工厂通过精准的光照营养环境条件控制，显著提高浮萍、藻类的生长速度和产量，不仅在螺旋藻和小球藻生产中实现商业化应用，也为衣藻元件和底盘标准化提供了有力支撑。

此外，目前已成立的标准生物元件登记库 Registry of standard biological parts 已经收录了启动子、核糖体结合序列、蛋白结合域、蛋白编码序列、转座子、终止元件等 100 多个基因元件，可用于单细胞藻类、多细胞苔藓、地钱、拟南芥和烟草等植物，显著提升了植物代谢通路设计与基因调控的精准度[16]，如开展“催化元件-代谢物-物种”网络快速筛选目标元件，已经被报道用于紫杉二烯合成基因的筛选与优化，实现了紫杉醇前体巴卡亭Ⅲ分子在烟草上的异源合成[17]，也为植物工厂适生品种开发奠定了基础。

1.2　底盘植物系统改造

近年来，利用植物底盘构建分子农场并生产医药健康领域所需的产物，已成为植物合成生物学的一个新研究方向（表 1），如在植物愈伤组织中，用含有重组载体的根茎农杆菌共培养可诱导生成转基因毛根[26]；开发羽叶丁香属的稳转基因和高效遗传转

表 1 植物合成生物学底盘及工具

Tab. 1 Plant synthetic biology chassis and tools

应用类型	合成生物学工具	底盘植物
标准化克隆元件	衣藻元件工具库	衣藻[14]
	衣藻叶绿体转化载体	衣藻[13]
合成生物学底盘细胞	衣藻突变体表型库	衣藻[15]
	酵母内融合蓝细菌内共生	衣藻[18]
植物基因线路设计	叶绿体内乳糖操纵子控制系统、硫胺素核糖体开关	衣藻[19-20]
	叶绿体 D1 蛋白编码基因热诱导开光	拟南芥[21]
	毒素抗毒素系统细胞周期关键调节因子	红花烟草[22]
	布尔计算遗传回路	烟草[23]
定向进化	双碱基编辑系统靶向内源诱变编辑器	水稻[24]、番茄[25]

化系统,改变半萜类化合物积累特征,提供新的底盘工具[27];在红花烟草中改造 BY-2 细胞,去除植物特异性木糖修饰生产生物治疗蛋白[28]。目前,辉瑞公司上市的全世界第一款以植物为底盘生产的蛋白药物用于戈谢病治疗[29],但是植物底盘开发的生产周期和产量还不能和优化的微生物底盘相比,存在较长的繁殖周期和受环境所致不稳定转化的"瓶颈"。

随着人工智能信息技术和照明工程技术在植物工厂中的应用,植物快速表达重组蛋白的生产周期已缩短至 3 周内,为大规模生产提供了必要条件[30]。美国 Calyxt 公司利用植物细胞基质技术开发了 PlantSpring 平台,结合 AI 与基因组测序,在 3 个月内完成濒危植物毛状根培养系统的代谢通路解析,使大麻素前体化合物产量提升。借助不同波长的光质调控处理本氏烟草,发现红光-远红光处理后的烟草免疫抵抗下降,促进了农杆菌在叶片中的生长,紫杉二烯积累量相比白光处理提高 76.5%,外源基因的表达效率显著增强,提高了药物分子的产量,也将加速来源于植物工厂的高附加值生物制品在医药产业中的应用[31]。

1.3 作物光合作用合成生物学改造

植物系统生物学与合成生物学的深度融合,通过构建覆盖基因组、代谢组到表型组的数字植物模型,可量化解析植物光合固氮、固碳、物质分配与环境响应的动态过程,利用植物工厂精准控制光照、温湿度、CO_2 浓度等环境参数的核心优势[32],以及叶绿素快速无损检测等技术的进步[33],实现作物高效生长和连续高质生产,尤其是数字植物(ePlant)模型的构建与应用,为植物生产的智能化设计提供了方法论基础[34-35]。

植物工厂适生作物创制路径通过多尺度建模、整合光合作用调控网络模型、代谢产物源-库流动力学模型及冠层光合群体模型[35-36],可精准预测作物光能利用效率与物质分配模式,依据这一改造策略,使得科学家能够系统性优化光合同化、抗逆基因表达及碳沉积等通路,从而设计出理想植株,如兼具 C4 光合模块整合、抗病信号回路及耐盐基因簇移植的"超级碳汇植物"[7,37-39],可具有高固碳效率、抗病虫害及耐盐碱等理想性状[40]。在植物工厂适生植物的表型设计领域,传统理想株形研究聚焦于地上冠层结构(如叶片倾角、分蘖数)与地下根系构型(如根毛密度、分支模式)的协同设计,而现代合成生物学进一步将这一概念从基因组拓展至代谢组再到表型组串联贯通层面[41]。例如,通过 CRISPR-Cas9 编辑水稻分蘖调控基因 IPA1,结合冠层三维光分布模型,可使光截获效率提升,同步增强光合碳捕获与地下碳封存能力[42-43]。

值得关注的是,单一性状优化模型的简单叠加无法实现整体性能突破,亟需建立贯穿"基因编辑靶点预测-代谢网络动态模拟-表型输出验证"的全链条模型体系。目前已有作物表型组学技术平台结合植物工厂育种加速器,采用了高频次、高通量表型获取技术[44],通过设计合成昆虫性信息素释放系统,可使玉米自主驱避鳞翅目害虫,减少化肥农药使用以及农业过程碳排放[45];通过光质和光周期配合温湿度调整,可使水稻实现 1 年 5 代的繁育,大豆生长周期从 18 周缩短到 10 周[46]。植物-环境互作体系的人工设计重构能够充分发挥植物工厂环境高度可控的优势,有利于提高资源利用效率。

2 面向植物合成生物学的植物工厂生产关键技术革新

植物工厂的结构、建筑、设施设备是一个高效综合农业系统,综合运用现代生物技术、信息技术、自动化技术,可利用模型模拟操控,根据植物生长发育各个阶段的情况选择最佳培养模式,最终实现工业化大规模生产所需的作物及其高附加值产物,并满足环境友好和经济效益的最大化[4],被视为最新的植物合成生物学应用概念。

2.1 新型生物反应器在底盘植物生产中的适应性改良

2.1.1 间歇浸没培养系统优化

传统植物组织培养玻璃化发生率高达 30%,年运营成本超 7 500 万元/hm^2,存在成本高、成活低等问题。间歇浸没培养系统(Intermittent submersion system, ISS)可通过周期性浸润与通气交替实现高

效培养，在植物微繁殖、微生物发酵及水产保活等领域展现出显著优势[47]。但是 ISS 技术现存系统设计的复杂性与成本“瓶颈”，其智能控制系统与定制化设备的研发使得初始投资增加，限制了中小型企业的应用。例如，法国 RITA 系统的多容器协同控制需配套精密气泵与歧管，单套设备成本超过 10 万美元。此外，其规模化生产中存在放大效应、物种特异性、污染控制、能源效率等诸多技术难点，直接影响培养效果和长期稳定性、可持续性生产[48]。如杜鹃、椰子体细胞胚需要的浸没频率分别为 5、30 min/次，且液体添加组分不同，高度定制化要求增加了技术推广难度[48-49]；设备老化故障或传感器漂移可导致培养参数失控，影响批次一致性[50]。

在组培型植物工厂中，ISS 系统采用透明高压灭菌塑料材质提升透光率与抗冲击性，有效解决了污染与能耗问题。在设备与控制策略等方面进行智能化升级，通过集成传感器与自动化控制模块，实现了对浸没频率、持续时间及营养液成分的精准调控，如通过低压无菌空气泵驱动培养基循环，结合定时器与电磁阀实现多容器协同操作，提升植物微繁殖的增殖系数[51]。此外，控制系统引入机器学习算法，如通过分析历史数据优化浸润周期，显著降低能耗并提升培养稳定性；自动化控制浸没频率和通风条件，结合固体培养的气体交换优势和液体培养的营养吸收特性，提升半夏种苗移栽成活率和营养利用率，缩短增殖周期，有效解决了组培苗玻璃化问题[52]。

2.1.2　液体生物反应器应用

液体生物反应器在植物工厂中的应用涵盖植物细胞培养、次生代谢产物生产及规模化育苗等领域，展示了技术的多样性与产业化潜力。在植株繁育方面，液体生物反应器采用临时浸没式生物反应器，通过液体培养基与周期性浸润，解决了传统固体培养繁殖系数低、病毒污染率高的问题，实现了草莓脱毒苗的高效繁殖[51]。在植物合成重组蛋白或次生代谢物提取方面，液体生物反应器培养悬浮细胞系，在水稻种子胚乳中特异性表达生产重组人血清白蛋白，采用搅拌式生物反应器细胞悬浮培养，成本可比血浆提取法降低一半[53]；利用气升式生物反应器，比传统搅拌式反应器重复性好、工艺合理、操作简单，实现了红豆杉细胞培养生产紫杉醇[8]、布朗葡萄藻[54]等工业化突破。此外，结合液体生物反应器原理创制的高效水培系统，在植物工厂生菜种植中开发了模块化浅液流栽培床，可实现营养液深度调控、离子检测[55]，通过水泵实现定时循环，自动补充硝酸钾与磷酸二氢铵，维持适宜酸碱度，生菜生长周期缩短至 28 d，通过营养液循环与精准调控，解决了传统土培占地面积大、水资源浪费的问题，有效控制微生物、农药、虫害污染，达到农产品免洗即食[56-57]。

值得注意的是，液体生物反应器结合光照调节展现了碳中和方面的潜力。如平板光生物反应器是布朗葡萄藻规模化培养尝试较多的方式之一，经常会与膜固定技术结合，在平板内增加过滤膜固定藻细胞，以实现高营养负荷，保持高浓度微藻产量；而在气泡柱生物反应器中，小球藻（ACUF 058）和嗜糖小球藻（ACUF 050）分别成为碳水化合物和蛋白质生产的有力候选株[40]。目前通过膜固定方式使用 Chu 13 培养基培养布朗葡萄藻，SAG 807-1 转化二氧化碳后生物量可达 65 g/m^2，碳氢化合物含量为 46%，在氮缺乏情况下生物量为 20 g/m^2，碳氢化合物含量可达 57%[54]。水生植物工厂中，利用液体生物反应器培养浮萍，生产高蛋白饲料与生物肥料通过计算机视觉及自动化系统监测浮萍生长，自动补充含氮磷钾与微量元素营养液，利用奶牛粪便发酵液作为氮源，每立方米反应器可固碳并生产高蛋白饲料，解决了传统大豆作为饲料占地大、碳足迹高的问题[58]。

2.2　植物工厂环境及能源系统精准稳定调控

2.2.1　人工光环境监测与调控影响作物性状稳定表达

光作为控制植物生长发育的重要环境因子，人工光源的性能和供光策略对其作物生产和经济效益具有重要影响。通过调节光质、光强、光周期等，分析评估植物工厂种植作物的生长发育、光合作用、营养和代谢水平、品质等[59]。

（1）光质。促进生长与提升抗逆性之间存在平衡关系，影响叶片形态指数、生物量、抗氧化能力[60]、光合速率[61]、冠层结构[62]、次生代谢物含量、苯丙烷代谢[63-64]、氮代谢[65]等，进一步将红蓝光技术拓展至药用植物贯叶连翘，证实红光促进开花与次生代谢物积累，扩展了植物工厂的多作物适配潜力[66-67]。值得注意的是，室内设施不同照明条件影响烟草属植物异源表达血凝素的含量，其中，相同生产环境中单光源照射下的叶片血凝集素含量是太阳光源照射叶片的 2 倍，造成靶重组蛋白生产力批间变异[68]，植物合成生物学创制的植株需要结合精准、稳定的光谱条件。

（2）光强。每种植物都有适合的光照强度，如果光照过强，超过光饱和点，光合作用和生长速度则不会再加快。光合光子通量密度（Photosynthetic photon flux density，PPFD）和每日光照积分（Daily

light integral, DLI)是表征光照强度的重要指标[69],红蓝光比例2.2的LED光源在250 μmol/(m²·s)的PPFD与16 h光周期下,能最大化生菜产量与品质[70-71];最佳参数因作物而异,红紫苏的次生代谢物积累更依赖高PPFD,绿紫苏则对营养液电导率更敏感[70]。借助植物合成生物手段,培育的改良水稻株系光合速率提升18%[38]。

(3)光周期。生物量、植株不同部位或可食部位的干质量/湿质量、株高、叶面积、生长形态等指标反映生长发育情况和光合作用水平,为了达到所需的某种作物形态、产量、健康水平、特定营养物质的含量等目标,光质效应、PPFD与光周期需结合作物生长发育进行系统优化,以取得需要的高产、抗病或特殊植物营养素[69]。LED光周期影响维生素C、叶绿素、黄酮类、胡萝卜素、抗氧化剂、可溶性蛋白和糖类等植物化学成分积累,使植物展现出不同的抗氧化能力、光合作用水平,以及能源和资源利用效率[72-73]。基于ePlant模型设计的拟南芥改造株系生长更快,可产生更多的地上部和根系生物量,可溶性糖含量上升,C3光合作物的生产力得到提升[74]。

随着信息技术和生物技术进步,光源与植株关系的研究不断深入,传统静态单一光质配比逐渐向动态多环境因素协同调控转变,环境参数的特征点及时空变化规律研究也指导温室、植物工厂中传感器的高效部署[75]。物联网系统通过实时监测并反馈气温与根区温度优化,动态调节LED光谱、光强及光周期,交替红蓝光连续照射以及高光强与低氮协同,不仅可以促进生长,还能提高生菜维生素C含量并降低硝酸盐含量,延长货架期[33,73]。通过协同控制高强度光、CO_2富集与温度调控,在10层室内设施中可实现小麦单产达传统农田的220~600倍[76],LED光源允许调节其波长与植物光感受器匹配,调节作物的不同解剖学、形态学、生理学、光合作用、发育和代谢参数,以便使植物具有更佳的产量并影响植物的形态和新陈代谢,在减少电力消耗的同时生产高质量产品,未来研究应进一步探索动态光环境调控、能效优化及代谢网络解析,以支撑培育新品种的稳定性状。

2.2.2 植物工厂小气候监测调控技术结合植物合成生物学设计

在植物合成生物学中,植物各层级的功能研究逐步向系统化、定量化迈进,促进了假说驱动与数据驱动研究范式的深度融合,加深了对生命系统复杂性的理解。随着人工智能与自动化平台的结合,极大地增强了理性设计的能力,针对多参数交互作用对作物代谢的协同效应,将作物代谢模型嵌入气候控制回路,实现“植物需求驱动”的按需调控。近年来,全球学者围绕环境参数动态调控、能源系统集成创新及多因子协同效应等方向开展了系列高影响力研究,推动该领域向智能化、精细化方向发展,以期加速植物育种和植物次生代谢物精准化生产,同时减少能源消耗[77]。气候监测与能源管理技术通过对温度、相对湿度和CO_2浓度监测和调控,重视利用小气候模型模拟风速、温湿度和能源消耗等实现指导室内环境设计最佳化[78-79]。如通过建立光-温-根区温度响应曲面模型,发现在PPFD为300 μmol/(m²·s)、气温为22℃、根温为18℃组合时,干物质积累速率达峰值(1.2 g/d)[69];通过机器学习融合鲁棒优化模型提升温度、相对湿度、CO_2浓度的协同控制精度[80];采用毛细管电泳-质谱联用技术揭示,1 000 μmol/mol CO_2浓度与LED高红光光谱协同作用可使莴苣叶片中14种氨基酸含量提升,同时降低无机氮残留[81]。

在技术驱动向数据驱动发展阶段,物理环境建模在微气候均质化中发挥关键作用,从离散参数组合向生物-物理耦合系统升级,需精准平衡作物生理需求与系统能耗,是提升生产效能与实现低碳化的核心。如构建机械通风温室动态模型[82]、基于GP-SMPC克里金随机模型[83]、三维计算流体动力学模型[84]等,从静态经验公式向动态数字孪生演进,预测控制框架跟踪误差在冬季大幅减少67%,优化种植架气流均匀热环境的空气循环系统,支撑作物按照精准可控的标准化条件生产。此外,整合多领域工程系统,能源系统从独立设备创新转向植物光合作用全周期结合,能源供给正从单一电网依赖转向光伏-地热多能互补模式。目前已借助水稻、烟草、拟南芥等植物底盘创制了碳汇植物,结合混合光伏系统在封闭工厂中实现能源自给率提升40%[85],土地利用率及农业机械通过性提高[86],制冷系统效率提高14.3%[87],未来植物合成生物学将指导碳中和模式的植物工厂建设,发展成为具有最优碳效益的植物生产体系。

2.2.3 植物工厂智慧管理系统支撑理想植株精准实现

植物合成生物学采用“设计-构建-测试-学习”的研究思路,定量理性设计工程化的理想作物株型,亟需定量理性、标准化的可控生产环境。而植物工厂智慧管理系统包含了从环境模拟到智能决策的完整技术链条,其核心在于通过数字孪生、物联网与人工智能的深度融合,逐步实现精准可控、时延缩短、预测窗口加长[88],未来将支撑植物合成生物技术实现“从创造到理解”的植物生产体系。

控制算法从经验驱动转向数据-模型混合驱动，算法模型运行预测精准度提升，系统自主决策能力、精准调控能力显著提升[89]，光-肥-气多因子协同调控成为提升作物品质和稳定遗传性状的关键路径。如在垂直植物工厂中融合 5G 传输与机器学习的 DDRMPC 框架，缩短温室气候控制响应时间，温度波动范围控制在 1℃以内[80]；动态模型预测控制系统引入作物光响应函数，结合 NSGA－Ⅱ算法，提升 CO_2 利用率并降低光照能耗[82]。

此外，在水培系统中营养液调控与水肥管理在未来需要借助代谢组学、表观遗传学等技术，精准控制营养配方、离子浓度、pH 值及电导率等核心参数，显著提升水培植物的生长效率与代谢物品质[90]；建立逆系统模型通过构建小麦生长状态空间方程，推导出光强与 7 种离子浓度的最优组合方案，使生物量产出提升的同时降低营养液消耗[91]，参数寻优确定轻简化的生产调控策略，物联网架构从集中式向边缘计算过渡，将智能控制与分子生物学结合，有利于解析植物工厂条件下遗传发育学基础和农艺性状建成的分子规律，利用底盘植物实现治疗性蛋白的规模化合成，精准设计与快速创制高产优质作物品种，以及建立代谢物定向合成的闭环控制体系。

植物工厂智慧管理系统从单物理场向光-热-湿-气-养多维耦合发展，各国植物工厂引入适宜的智慧模型，对其作物生产和经济效益产生积极影响[92]。在引入“舒适率模型”通过部署 24 类无线传感器实时采集温度、相对湿度、CO_2 浓度等 12 项参数，结合番茄生长阶段特性构建动态评分体系，在温室验证中，使能源消耗降低 22%，产量提升 17%[93]；各植物工厂试验项目纷纷引入系统动力学模型，优化照明和气候调节系统，整合太阳辐射、能源消耗等耦合模型，集成农业决策系统，可显著减少能源使用[77]，较传统温室节水，蔬菜年产量提升[94-95]，年产量最高达 1.1×10^5 t[96]。随着上述技术的突破，植物工厂有望实现对“理想植株”的规模化栽培，不仅服务于农产品生产，更可能在高价值生物制品、次生代谢物高效合成、种苗工业化生产、碳中和等领域发挥核心作用。

3　植物工厂应用领域拓展

植物工厂的优势主要表现在可控环境和立体种植两大方面，如在大中型城市周边建设植物工厂，利用有限土地，部分城市可借助风能或太阳能等，安全、稳定、高效地生产优质蔬果和功能保健性食材，具有运输距离短、便捷供应的优势，可降低碳排放和物流成本[78,92,97]（表 2）。美国垂直农业公司 Plenty 在美国旧金山等城市建设植物工厂，生产无农药绿叶蔬菜，直供餐厅和生鲜平台。目前，植物工厂根据植物生长发育各个阶段选择最佳培养模式，最终实现工业化大规模生产所需的作物和附加产物，实现环境友好和经济效益的最大化，这已成为最新的植物合成生物学应用概念。研究趋势表明，随着人类对空间探索和极端环境生存需求的增长，研发重点正从传统农业生产向特殊环境适应转移。新型栽培系统集成智能环控、光配方优化和封闭式循环技术优势，在提升作物产量的同时，关注环境适应性和资源利用效率，垂直种植技术的成熟为解决城市耕地短缺提供了可行方案，地外基地生命保障系统的技术突破有望在深空探测、极地科考等领域发挥关键作用[97]。

表 2　部分植物合成生物学相关企业应用

Tab. 2　Application cases of some plant synthetic biology-related enterprises

企业名称	国家	企业简介
Aplantex	加拿大	利用光合植物生产植物生物质
Hexafarms	德国	利用 AI 实时监控植物光合作用及生长状况
Perlumi	美国	开发碳固定途径，提高作物光合效率
Plastomics	美国	利用叶绿体工程调控光合作用或代谢途径，改良作物性状
Microphyt	法国	开发通用光生物反应器，工业化生产微型藻类
Phytonix	美国	通过合成生物学改造的蓝藻，CO_2 生产高级醇
Provectus Algae	澳大利亚	通过光合作用合成生物学改造藻类产生分子生物制品
Pure Biomass	美国	生产用于藻类生长的光生物反应器培养系统
Solix Algredient	美国	利用光生物反应器的生产基于藻类生产的原料
光玥生物	中国	编辑光合微生物蓝藻，开发“负碳”细胞工厂
普利博康	中国	构建负碳光合自养细胞工厂，生产蛋白产品
Renewable Energy Group	美国	利用光生物反应器系统生产生物柴油
Prolific Machines	美国	利用光敏蛋白控制生物制造中使用的细胞

3.1 合成种子及其次生代谢物合成

植物工厂在叶菜生产种植领域应用最为广泛。随着技术不断进步和成熟,越来越多高经济价值、高质量要求的作物在植物工厂中得以应用。植物工厂作为环境可控的精准农业系统,已在白菜、番茄、草莓、连翘、紫苏、罗勒、烟草等作物的集约化生产中实现突破,植物工厂的应用植株正在不断扩大,逐步拓展到药用植物、珍稀植物中[5]。

合成种子技术与植物工厂的融合,为合成种子选育和利用开辟新路径。不同光强、光周期、光质均能对种子的萌发产生影响,具有休眠特性和需光性的贯叶连翘种子,植物工厂结合 LED 光谱调控发现,光量超过 14.904 mol/m^{2}后光照具有抑制效应,光敏感期在 12 h 以内光受体为光敏色素[66]。在前期研究中结合可控环境和多层立体栽培,加速合成种子制备,已成功选育出生长周期短、株型紧凑的水稻,株高小于等于 30 cm,生育周期缩短至 25 d,单位体积产量较传统水培的大幅提升[98]。未来将挖掘更多的植物生长发育与环境响应深层次规律,研究特定植物种类与品种在植物工厂环境下的适宜性,如采用海藻酸钠包埋法制备的龙胆目夹竹桃科药用植物合成种子,在 4℃储存 36 个月后仍保持高再生率和遗传稳定性,配合机器学习构建的萌发预测模型,准确率为 92%,使濒危植物繁殖效率较传统组培提升 2.3 倍[99]。这种“合成种子-环境控制”体系已形成标准化流程:种质库保存-工厂化扩繁-代谢物定向培育,构建起从保育到商业化开发的全链条。

在遗传资源挖掘方面,全球对药用植物的需求正在增加,萜类、生物碱等植物次生代谢物是药物开发的重要来源。由于户外种植质量难控制,各种环境因素都可能影响植物生长并直接影响生物合成途径,从而影响生物活性化合物的次生代谢。当前,植物工厂技术体系已从单一生产场景向生物多样性保护、种质创新等多维度延伸。已知全球最大植物代谢物数据库收录 50 万种化合物,这为合成生物学元件设计提供了基础[100]。各类植物工厂栽培试验验证了代谢工程与环控技术联动的可行性[101],植物工厂利用烟草悬浮培养系统、毛状根培养系统、红豆杉细胞培养系统等,结合 CO_2 脉冲供给、糖基转移酶改造、微流控芯片等技术,使萜类化合物合成效率提升,实现规模化生产大麻素前体化合物,过表达紫穗槐-4,11-二烯合酶提升青蒿素产量,商品化次生代谢物紫杉醇等,发挥了烟草等植物底盘在药用成分生产中的潜力[102],也为抗癌药物开发提供新路径,替代野生资源采伐[4,8]。例如紫檀芪等白藜芦醇类抗癌活性成分很少由珍稀植物紫檀直接生产,研究发现类 O-甲基转移酶 SbSOMT 对于高粱中病原体诱导的 3,5-双 O-甲基化白藜芦醇生物合成至关重要,并揭示了 2 种甘蔗属草本植物能够区域选择性地生产 O-甲基化芪类化合物[103]。然而,目前仅有少量的高经济价值作物完成工厂化适配测试,亟需拓展如高黄酮含量果蔬等新品种的开发。

未来需重点突破覆盖上万种植物的工厂化适配数据库,开发代谢流实时监测-环境参数联动的智能控制系统,构建合成种子全球分布式保存网络。这些突破将推动植物工厂成为维系粮食安全与生态平衡的核心基础设施。

3.2 高附加值生物制品生产

植物工厂与合成生物学的深度融合,正推动传统农业向高附加值生物制造转型。通过基因编辑、生物反应器优化及封闭式环境调控,植物成为药物、疫苗、工业酶和化妆品原料的绿色生产平台。目前,植物细胞的研究应用日渐成熟,在日化、食品原料生产上迎来技术革新。美国 Ginkgo Bioworks 公司开发的植物细胞工厂可高效合成香兰素、没药烯等香料,替代传统植物提取工艺。在工业酶领域,利用烟草叶片生产胶原蛋白和抗体,已实现数百万元销售额,并计划向农业生物制剂领域拓展。在食品领域,利用本生烟合成母乳低聚糖,可作为食品添加剂、膳食营养补充剂应用于婴幼儿配方奶粉等功能性食品或者特医食品中[104-105]。

随着基因编辑、代谢通路调控等技术的持续突破,植物有望成为最具潜力的“分子农场”,为人类健康、环境保护和工业升级提供可持续解决方案,口服疫苗等蛋白制剂取得突破性进展,在植物中生产重组蛋白在成本效益、可扩展性、安全性和可持续性方面比在微生物、昆虫或哺乳动物细胞基础表达系统中更有用[106]。通过核基因组遗传转化、瞬时转化、叶绿体遗传转化等方法,已开发烟草、水稻、番茄、拟南芥等多种底盘植物,用于快速安全的开发和生产大部分重组蛋白如药物、疫苗、激素、生长调节剂和天然产物等,并成为研究新热点[72,107]。其中,以烟草作为抗体、重组疫苗等蛋白质生物制剂的制造平台成熟,已有流感和 2019 冠状病毒(COVID-19)2 种候选疫苗进入临床试验的四级阶段[108-109]。利用烟草瞬时表达系统,组装包含病毒样颗粒的中和抗体,能检测到新冠病毒原始毒株和 Delta 突变株的刺突蛋白[102]。葛兰素史克和 Medicago 公司基于烟草瞬时表达系统生产了植物源新冠疫苗 Covifenz,并于 2022 年 2 月获加拿大卫生部批准成为全世界第一款上市的植物源新冠疫苗[108]。此外,水稻胚乳表达系统也已被开发,应用于新冠病毒

疫苗 CoVLP 的中试生产。不仅如此，在动物试验阶段，玉米、水稻、生菜、番茄等植物表达的重组蛋白可用于霍乱[110]、乙肝[111]、疟疾等疫病疫苗或血糖调节相关多肽及酶前体的合成[112]，未来这些底盘植物引入植物工厂适宜作物，可充分发挥植物工厂可控、稳定、高效、精准的工厂化生产特点，满足植物基口服疫苗的规模化供给需求[113-114]（表 3）。

表 3　底盘植物大规模生产实例

Tab. 3　Commercial cases of mass production of plant

产品	底盘植物	应用	制造商
紫杉醇	红豆杉	药物，抗癌	Phyton Biotech
黄烷醇	可可树	医药、保健品成分	AyanaBio
Elelyso	烟草	戈谢病治疗性蛋白	Protalix BioThera
OPRX－100	烟草	溃疡性结肠炎治疗性蛋白	Protalix BioThera
PRX－102	烟草	法布里病治疗性蛋白	Protalix BioThera
新城疫病毒疫苗	烟草	新城疫病毒疫苗	Dow AgroSciences

尽管许多植物物种已经被测试用于生产各种候选药物。然而植物分子培养系统通常缺乏体系化、流畅且无缝的工作流程，目前无法在常规、吞吐量和水平集成方面与现有平台竞争[115]。以整株植物为底盘的作物种类有限，其中，转基因烟草因其生长周期短、生物量大，成为药用蛋白生产的常见载体[116]。英国厄勒姆研究所通过基因编辑技术，将本氏烟草改造为“环保工厂”，合成用于害虫防治的飞蛾性信息素，替代传统化学合成工艺后，生产成本降低 70%，且无有毒溶剂残留。在疫苗领域，转基因烟草中表达的单克隆抗体（如抗疱疹病毒抗体）成本可低至动物细胞培养的 1/10，通过引入 KDEL 信号肽优化糖基化过程，免疫原性降低。因此，植物生物反应器有望成为药物与疫苗的绿色工厂。

3.3　碳汇植物创制与环境保护

全球农业正面临耕地减少、气候变化和人口增长的多重挑战。设施植物工厂通过精准环境控制，可使单位面积产量提升 10～20 倍，同时减少 90% 以上的水资源消耗。例如，跨气候区比较研究建立的多目标优化模型显示，在北纬 52°地区，植物工厂单位产量耗水量仅为传统温室的 1/9，能源利用效率提升[117]；日本三菱重工的植物工厂每平方米年产量可达传统农田的 40 倍；而中国合肥的智能植物工厂已实现叶菜类作物 365 d 连续生产。但世界各国建设的植物工厂示范项目基本还处于小型产业化阶段，相较于传统农业生产，其研发和运营成本依然高昂，培养的作物品种有限，在植物工厂的碳汇交易成为新的关注点。

建造技术和生产品种培育向绿色化发展，以期实现生态、经济双增益运营。北欧 NordAqua 科学中心开发了新型光合作用细胞工厂，该工厂生物产品以太阳能驱动，直接靶向捕获二氧化碳，促进北欧蓝藻和藻类的多样性，使其成为丰富且具有韧性的森林生物量替代品，为新型藻类植物工厂提供全新策略[118]。能源系统创新方面，喷雾冷却系统与浅层地热能交换器耦合，建立的数学模型显示该集成系统可使光伏板转换效率稳定在 18.7%，基于 GP－SMPC 框架的温室气候控制系统将冬季能源和二氧化碳成本降低 51.4%，春季降低 40%，最大限度地减少了资源浪费，提高了运营效率[83]。

光照等设备方面，LED 光源材料创新成为提升光效的关键突破口。研究预测，到 2030 年 LED 光效突破 3.0 μmol/J，将使植物工厂能耗占比由 62% 降至 41%，推动生产成本下降 34%[2]。Mn^{4+} 掺杂荧光粉/玻璃复合材料实现 27.5% 的量子效率，热导率达 1.671 W/（m·K），使生菜生物量提升 58%[119]；采用 Eu^{3+} 活化 $Sr_4La_6(SiO_4)_6Cl_2$ 荧光材料，在 394 nm 激发条件有位点替代触发发光特性，可调节提高边沁草植物的病毒抗性[120]。不仅如此，发光材料如量子点在优化光管理中也将发挥作用，量子点通过将紫外线辐射转化为可见光合作用有效辐射（PAR），改善植物光合作用和在受控环境中的生长条件，从而增强太阳能吸收[121]。

植物工厂与光伏产业结合，有望为碳达峰碳中和贡献重要解决方案。利用建设光伏加植物工厂思路，有望创造大型的人工高效植物碳汇系统，不同波长光质配比的照明阵列组成智能化光照系统，不同植物按生长周期和形态特征分区栽培，精准配比植物所需营养液供给密度最大化的立体种植，实现植物全生命周期的高效利用，净增碳汇和经济效益。当前国内一些植物工厂试点项目正在建设中，例如江苏盐城阜宁的高效植物碳汇系统原型将尝试包含光伏农场、组培植物工厂、生物碳生态基地的有机整合[7]；集成合成生物技术、微生物菌种和环境精准调控的大型“生物反应器”，控制每吨饲草电力成本，显著减少土地与水资源消耗，同时可监测 CO_2 交换量，探索新型碳汇交易模式[7]。

3.4　抗逆性优化与多场景应用

合成生物学技术可增强植物对设施环境的适应性，结合植物工厂栽培技术推动垂直种植在更多场景创新应用[122]。已开发的耐盐水稻品种，在高盐胁迫下基本保持产量，相关基因已导入番茄和生菜。另一方面，封闭式植物生产系统通过多层架设与人工光源配置，半强度的 Hoagland 营养液，实现生菜培养周期缩短，单位面积产量达传统栽培的 100 倍，

水肥利用效率提升70%[96,123-124],更为城市农业的光环境调控提供了新策略。智能植物疫苗工厂,通过PLC与机器视觉集成控制,使治疗蛋白表达量稳定表达,批间差异小于5%,为太空农业和极端环境下的可持续生产提供技术储备。

美国国家航空航天局(NASA)结合植物工厂水培法开发的Veggie蔬菜生产系统在2017年通过在国际空间站部署了2种生菜和百日草等3套栽培装置,首次系统验证了微重力环境下植物栽培的可行性,明确了太空种植系统在硬件性能、微生物环境、营养元素保持等方面的关键参数,为后续地外生命保障系统提供了重要数据支撑[125]。我国对比了生物再生生命支持系统、植物工厂、温室及传统农田等不同环境下小麦生长表现,发现生物再生生命保障系统在生物量产量和千粒质量等指标上展现出独特优势,但在收获指数方面略低于植物工厂环境,为未来深空探测任务中的封闭式生态系统构建提供了重要参考[126]。

4 基于合成生物学的植物工厂面临的挑战和机遇

合成生物学与植物工厂的结合,正在重塑现代农业与生物制造的面貌。通过基因编辑、代谢工程和智能控制等技术的融合,植物工厂在药物生产、粮食安全、碳中和等领域展现出巨大潜力。然而,这一新兴领域仍面临多重技术瓶颈、规模化生产挑战以及安全伦理争议,需要相应的标准政策加以规范,并通过跨学科协同创新以实现突破。

4.1 技术瓶颈

植物合成生物和人工智能的研究起步晚,对于二者在植物工厂中的交叉研究和商业化应用尚未成型,当前的成本和规模相比于工业生产不占优势,且植物工厂的建设多局限于都市农业生产场景,缺乏面向"大食物观"的农业生产场景研发拓展[4]。例如,适生作物缺乏深度发掘与品种匮乏,大多以莴苣类蔬菜生产为主,尚未形成真正的智慧植物工厂粮食生产体系。

作物方面,复杂代谢通路调控中的多基因协同表达仍是技术难点。底盘植物系统表达不稳定,底盘植物有限,不足以进入规模化生产阶段。以固氮酶合成基因的精准调控,现有共表达系统效率不足,如已开发的CRISPR-Cas12a系统实现了8个基因的同步编辑,但脱靶率仍需优化[11];而针对原核蛋白(如NifH)在植物细胞质中的降解问题,自切割肽标签技术使蛋白半衰期延长至24 h,为跨物种蛋白表达提供新的思路。

植物工厂智能化中的数据融合与模型构建刚刚起步,以半自动化和自动化机械为主,相关植物生长-环境感知、调控的模型算法、自主作业机器人等研发不足,管控决策的精准程度有待提升,面临多源异构数据处理延迟和机器视觉识别误差等瓶颈。如烤烟数字孪生模型依托数字孪生技术,能够实时、精准地模拟烤烟生长状态,并根据反馈信息做出相应的分析、决策,从而提高烤烟产量和品质[89]。不同作物对红蓝光的需求差异巨大,而动态光环境与植物生理节律的匹配机制仍不明确[59],难以形成精准的数字表征。未来亟待借助高通量元件测试平台,加快筛选千级基因组合,加速光合模块(非光呼吸旁路)和碳分配开关等专用元件开发,建立基因-表型-环境关联模型[36],量化植物生长全周期的光合作用数据,将有利于解决光能利用效率与电能经济性的矛盾问题[59]。

4.2 规模化生产成本

目前,面向植物合成生物学的植物工厂处于研发阶段,初期设备投资与能耗是其未来产业化的障碍。如植物工厂初期建设成本高达5 000元/m^2,其中LED光源占运营成本的近一半;研发植物口服疫苗的规模化制备装置、临床试验成本将是高额投入。不仅如此,植物工厂作为大型"生物反应器"、生物育种加速器的核心挑战在于外源蛋白表达效率,目前用于重组蛋白商业化生产的植物细胞系少,仅限于烟草BY-2、水稻和胡萝卜等愈伤组织细胞,且药用蛋白(如人血清白蛋白)在植物中的表达量有限,未来还需要不断优化合成途径和种植条件,增加数十倍才能达到商业化水平。在未来建设中不得不考虑经济性与可持续性平衡,例如结合城市发展,选址结合屋顶植物工厂可使建筑空调负荷减少,农产品运输碳排放下降,城市建筑农业可将粮食自给率提升等;结合适生作物选育,饲草的规模化生产可将单位成本压缩至传统农业的1/50[4],高附加值农产品及其次生代谢物生产也可带来可观的回报;探究植物-环境机制,结合植物需求提升装备性能,按照植物需求精准功能达到压缩能耗的目的。

4.3 安全性与伦理争议

合成生物学的"造物"特性引发伦理争议,转基因植物的生态风险与遗传稳定性备受关注,引发了安全性与伦理层面的广泛争议,涉及生态风险、生命伦理、社会公平等多维挑战。欧盟《人工智能法案》将基因编辑植物列为高风险技术,要求进行生态系统级风险评估。研究发现,合成种子保存10年后突变率增至0.3%,需建立定期更新机制。中国《生物

安全法》建立“负面清单 + 分层审查”体系，要求合成生物产品进行 10 年以上遗传监测。

一方面，从实验室到生态系统的安全性存在潜在风险。由于转基因植物可能通过花粉传播或基因水平转移影响野生近缘种，基因扩散导致不可逆的生态扰动失衡。目前无法完全避免植物工厂中优化的固氮基因扩散至杂草，可能改变自然群落结构的风险。合成种子的遗传突变率随时间上升，研究显示保存 10 年后突变率增至 0.3%，可能影响产品一致性。中国《生物安全法》要求对合成生物产品实施 10 年以上遗传监测，但全球尚未建立统一标准。另一方面，技术边界与社会责任的引发伦理争议。合成生物学打破了自然进化与人工创造的界限，在解决粮食、医疗等全球问题中具有不可替代性。但同时，从合成人工生命细胞问世后，关于“扮演上帝”的伦理争议持续发酵。中国《关于加强科技伦理治理的意见》强调“公开透明”原则，但实践中公众对转基因作物的接受度仍偏低。植物合成生物学在植物工厂中的发展，本质是技术创新与伦理约束的动态平衡，未来需通过完善风险评估模型、推动公众参与、构建全球治理网络。

5　未来展望

5.1　理想植株数字化发展

植物合成生物学“从头设计”的思路有望颠覆未来农业生产体系，信息技术与生物技术结合将支撑理想植株创制。当前亟待结合 AI 模型和基因组-代谢组-表型组数据，提升跨尺度环境调控模型精度，实时监测基因组、代谢组和表型组数据，实现环境参数的动态优化，有望实现植物工厂的全生命周期的智能化管理。此外，还可以通过结合涵盖多样性植物物种的参考代谢组数据库，由基因组数据可预测最佳培养条件，使次生代谢物产量提升，例如在数字植物模型指导下，提升遗传转化和基因编辑的效率，优化抗逆胁迫位点，建立光呼吸支路等合成生物学改造途径，有望大幅提升作物光能利用效率，增加植株抗逆性，提高粮食以及多元化天然产物的产量。最终的理想状态为综合各方面技术形成完备的植物工厂体系，让植物按照预设的最优生长轨迹生长，在植物群体层面符合人工设计。

5.2　绿色可持续发展

利用植物工厂生物质封闭循环特性，结合合成生物学减少碳排放，如通过固氮工程降低化肥使用，现广西设施农业规划已提到减少化肥使用量。嘉善县沉水植物碳汇交易单价 100 元/t，1.5 × 10^4 m^2 年固碳超 40 t，推动生态价值转化。日本三菱重工的植物工厂通过太阳能供电，实现碳足迹净零排放。新加坡国立大学开发的藻类-植物共生系统，可将废水处理与生物质生产结合，水资源循环利用率达 95%。榆林化学的煤化工-植物工厂耦合系统，利用 CO_2 合成燃料减排，同时生产高附加值植物提取物，以期达到种养循环，实现绿色产业链延伸。

随着 LED 等更高光效的光源与低能耗环境调控系统开发，一方面，光谱工程向“植物需求”定制化发展，结合量子点、钙钛矿等新材料，推动 LED 光效突破；另一方面，数字孪生技术深度应用，与能源模型的多维耦合使设施设计从经验驱动转向数据驱动。目前已衍生出植物工厂碳汇交易、药用植物-饲草种养循环等新模式，实现资源高效利用，推动农业与生物制造的碳中和目标。

5.3　交叉领域应用拓展

合成生物学与植物工厂技术的融合，正在为人类拓展生存空间和革新医疗模式提供革命性解决方案，植物工厂的适生作物、生产技术将实现跨越。植物工厂设施设备的材料、部件、结构研发不断深化，通风设施、冷却设施、光伏设备及栽培系统也不断改造。医疗应用需要糖基化精确调控和代谢通路隔离技术。太空植物工厂不仅需要抗辐射、耐低重力等基因改造，更依赖光合电子传递链优化和碳氮代谢重编程。新环境或场景中的植物工厂及相关设施和成套技术体系将越来越受到关注，如荒漠、戈壁、海岛、水面等植物工厂，以及航天工程、地外星球探索中用于食物自给的植物工厂系统。

在太空探索领域，植物工厂凭借其封闭可控的环境特性，加速育种完成适生品种开发，成为解决深空任务中粮食自给与生命支持系统的关键模式。NASA 的“Veggie”项目在国际空间站成功实现生菜种植，中国科学家突破性地培育出适合空间站种植的矮化“小薇水稻”，并实现年产稻谷 10 kg/m^3。天宫二号空间站完成的水稻全生命周期培养实验更具里程碑意义，研究发现微重力环境下水稻叶尖吐水活性增强，为利用植物蒸腾作用实现太空水循环开辟新路径。

在精准医疗领域，植物工厂展现出生物医药定制化生产的独特优势。阿法纳生物研发的呼吸道合胞病毒 mRNA 疫苗已进入 I 期临床试验，其核心质粒合成技术由生工生物提供，采用植物瞬时表达系统将抗原蛋白产量大幅提升。合成生物学通过模块化基因线路设计，使植物能够快速切换生产不同靶点的生物制剂：从肿瘤新抗原疫苗到罕见病酶替代疗法，个性化药物生产周期可缩短至 4 ~ 6 周。更值得关注的是，植物细胞壁天然屏障可避免哺乳动物

细胞培养潜在的病原体污染风险,配合脂质体包裹技术,使口服疫苗的胃肠降解率降低,极大提升了生物制剂的安全性。

生产条件高度可控的植物工厂深度契合了植物合成生物学的“设计驱动”理念,正以前所未有的速度重塑现代农业与生物制造体系,深度融合基因编辑、代谢工程与智能控制等技术。目前,全球超过20%的生物医药企业已布局植物工厂生产体系,预计未来太空农业将支撑起地月经济食物供给。这些领域的交汇凸显出合成生物学的跨界创新能力,未来系统将实现生长过程的数字孪生,模块化植物工厂将提供设计-构建-测试-学习闭环生命支持,甚至向智能生态设计转型。实现这些愿景,需在技术创新与伦理约束间寻求平衡,通过生物×工程×信息科学跨学科协作与良性引导,最终达成“自然生态设计”与“敬畏生命”的和谐统一。

参 考 文 献

[1] 齐飞, 魏晓明, 张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1-9.
QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 1-9. (in Chinese)

[2] 李宗耕, 周成波, 胡江涛, 等. 人工光植物工厂节能技术研究进展[J]. 照明工程学报, 2024,35(5):41-46.
LI Zonggeng, ZHOU Chengbo, HU Jiangtao, et al. Research progress on energy-saving technology in plant factories with artificial light[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2024,35(5):41-46. (in Chinese)

[3] 孙朝华, 李开, 徐海军, 等. 集装箱植物工厂技术的应用[J]. 农业工程技术, 2019,39(4):55-59.
SUN Chaohua, LI Kai, XU Haijun, et al. Application of container plant factory technology[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019,39(4):55-59. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 程方平, 杨昌敏, 梅林森, 等. 我国植物工厂技术装备研究进展[J]. 农业工程, 2025,15(2):67-73.
CHENG Fangping, YANG Changmin, MEI Linsen, et al. Research progress on technology and equipment of plant factory in China[J]. Agricultural Engineering , 2025,15(2):67-73. (in Chinese)

[6] YUAN X, HU J, MARCELIS LEO F M, et al. Advanced technologies in plant factories: exploring current and future economic and environmental benefits in urban horticulture[J]. Horticulture Research, 2025,12(5): 24.

[7] 杨健钊, 朱新广. 面向碳达峰与碳中和的植物合成生物学[J]. 合成生物学, 2022,3(5):847-869.
YANG Jianzhao, ZHU Xinguang. Plant synthetic biology for carbon peak and carbon neutrality[J]. Synthetic Biology Journal, 2022,3(5):847-869. (in Chinese)

[8] 颜钊涛, 周鹏飞, 汪阳忠, 等. 植物合成生物学:植物细胞大规模培养的新机遇[J/OL]. 合成生物学. DOI: 10.12211/2096-8280.2024-095.
YAN Zhaotao, ZHOU Pengfei, WANG Yangzhong, et al. Plant synthetic biology: new opportunities for large-scale culture of plant cells[J]. Synthetic Biology Journal. DOI: 10.12211/2096-8280.2024-095. (in Chinese)

[9] BAIG H, FONTANARROSA P, KULKARNI V, et al. Synthetic biology open language visual (SBOL visual) version 2.3[J]. Journal of Integrative Bioinformatics, 2021, 18(3):20200045.

[10] HUSSEY S G, GRIMA-PETTENATI J , MYBURG A A, et al. A standardized synthetic eucalyptus transcription factor and promoter panel for re-engineering secondary cell wall regulation in biomass and bioenergy crops[J]. ACS Synthetic Biology, 2019,8(2):463-465.

[11] 田晨菲, 李建华, 王勇. 植物合成生物学调控元件的研究进展[J]. 植物生理学报, 2020,56(11):2261-2274.
TIAN Chenfei, LI Jianhua, WANG Yong. Research advances of regulatory elements in plant synthetic biology[J]. Plant Physiology Journal, 2020,56(11):2261-2274. (in Chinese)

[12] ESLAND L, LARREA-ALVAREZ M, PURTON S. Selectable markers and reporter genes for engineering the chloroplast of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Biology-BASEL, 2018,7(4):46.

[13] MELERO-COBO X, GALLEMÍ M, CARNICER M, et al. MoCloro: an extension of the *Chlamydomonas reinhardtii* modular cloning toolkit for microalgal chloroplast engineering[J]. Physiologia Plantarum, 2025,177(1): e70088.

[14] CROZET P, NAVARRO F J, WILLMUND F, et al. Birth of a photosynthetic chassis: a MoClo toolkit enabling synthetic biology in the microalga *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. ACS Synthetic Biology, 2018,7(9):2074-2086.

[15] FAUSER F, VILARRASA-BLASI J, ONISHI M, et al. Systematic characterization of gene function in the photosynthetic alga *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Nature Genetics, 2022,54(5):705.

[16] BOEHM C R, BOCK R. Recent advances and current challenges in synthetic biology of the plastid genetic system and metabolism[J]. Plant Physiology, 2019,179(3):794-802.

[17] JIANG B, GAO L, WANG H J, et al. Characterization and heterologous reconstitution of Taxus biosynthetic enzymes leading

to baccatin Ⅲ[J]. Science, 2024,383(6683):622 – 629.
[18] COURNOYER J E, ALTMAN S D, GAO Y L, et al. Engineering artificial photosynthetic life-forms through endosymbiosis [J]. Nature Communications, 2022,13(1):2254.
[19] MORDAKA P M, CLOUSTON K, GORCHS-ROVIRA A, et al. Regulation of nucleus-encoded trans acting factors allows orthogonal fine-tuning of multiple transgenes in the chloroplast of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Plant Biotechnology Journal, 2025,23(3):1005 – 1018.
[20] KATO K, MARUI T, KASAI S, et al. Artificial control of transgene expression in *Chlamydomonas reinhardtii* chloroplast using the lac regulation system from Escherichia coli[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007,104(3):207 – 213.
[21] CHEN J H, CHEN S T, HE N Y, et al. Nuclear-encoded synthesis of the D1 subunit of photosystem Ⅱ increases photosynthetic efficiency and crop yield[J]. Nature Plants, 2020,6(5):570.
[22] RODAMILANS B, CHENG X F, SIMÓN-MATEO C, et al. Use of bacterial toxin-antitoxin systems as biotechnological tools in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024,25(19):10449.
[23] CORDERO T, ROSADO A, MAJER E, et al. Boolean computation in plants using post-translational genetic control and a visual output signal[J]. ACS Synthetic Biology, 2018,7(10):2322 – 2330.
[24] LI C, ZHANG R, MENG X B, et al. Targeted, random mutagenesis of plant genes with dual cytosine and adenine base editors [J]. Nature Biotechnology, 2020,38(7):866 – 875.
[25] FAN T T, CHENG Y H, WU Y C, et al. High performance TadA – 8e derived cytosine and dual base editors with undetectable off-target effects in plants[J]. Nature Communications, 2024,15(1):5103.
[26] LU Y, LIU Z Y, LYU M L, et al. Characterization of *JsWOX*1 and *JsWOX*4 during callus and root induction in the shrub species *Jasminum sambac*[J]. Plants-BASEL, 2019,8(4):79.
[27] GAO J Q, ZHANG L F, HUANG L Q, et al. Establishment of an efficient genetic transformation system and characterization of metabolic and transcriptomic landscapes of hairy roots in *Syringa pinnatifolia*[J]. Scientia Horticulturae, 2025,342:114039.
[28] HANANIA U, ARIEL T, TEKOAH Y, et al. Establishment of a tobacco BY2 cell line devoid of plant-specific xylose and fucose as a platform for the production of biotherapeutic proteins[J]. Plant Biotechnology Journal, 2017,15(9):1120 – 1129.
[29] RATNER M. Genzyme resumes shipping as Sanofi-aventis hovers[J]. Nature Biotechnology, 2010,28(10):994.
[30] FAUSTHER-BOVENDO H, KOBINGER G. Plant-made vaccines and therapeutics[J]. Science, 2021,373(6556):740 – 741.
[31] ZHANG Y, WANG F, DU R, et al. Multi-omics analyses reveal the red and far-red light combination enhancing heterologous protein and metabolite production in nicotiana benthamiana[J/OL]. Plant, Cell & Environment, 2025. DOI:10.1111/pce.15573.
[32] 孙扬, 陈立超, 石艳云, 等. 作物光合作用合成生物学的策略与展望[J/OL]. 合成生物学, 2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1687.Q.20250321.1312.002.html.
SUN Yang, CHEN Lichao, SHI Yanyun, et al. Strategies and prospects of synthetic biology in crop photosynthesis[J/OL]. Synthetic Biology Journal, 2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1687.Q.20250321.1312.002.html. (in Chinese)
[33] 张春琪, 刘梦姝, 晁金阳, 等. 基于特征波长的接触式作物叶绿素检测系统[J]. 农业机械学报, 2024,55(增刊 2):255 – 262.
ZHANG Chunqi, LIU Mengshu, CHAO Jinyang, et al. Contact-based crop chlorophyll detection system based on feature wavelengths[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp.2):255 – 262. (in Chinese)
[34] XIAO Y, CHANG T, SONG Q, et al. ePlant for quantitative and predictive plant science research in the big data era Lay the foundation for the future model guided crop breeding,engineering and agronomy[J]. Quantitative Biology, 2017,5(3):260 – 271.
[35] GUO W, CHEN L M, HERRERA-ESTRELLA L, et al. Altering plant architecture to improve performance and resistance[J]. Trends in Plant Science, 2020,25(11):1154 – 1170.
[36] 刘扶桑, 宋青峰, 于桂朝, 等. 光合作用系统模型与作物高光效改良[J]. 生命科学, 2024,36(9):1123 – 1140.
LIU Fusang, SONG Qingfeng, YU Guichao, et al. Photosynthetic system model and improvement of crop photosynthetic efficiency[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2024,36(9):1123 – 1140. (in Chinese)
[37] CHEN S, SONG X, QI Z, et al. The genetic basis of plant shoot branching and the hormonal, metabolic and environmental regulation[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024,36(3):690 – 703.
[38] LONG S P, MARSHALL-COLON A, ZHU X G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential[J]. Cell, 2015,161(1):56 – 66.
[39] SILVA J C F, MACHADO K L D, SILVA A F D, et al. Challenges and opportunities for new frontiers and technologies to guarantee food production[J]. Sustainability, 2025,17(9):3792.
[40] VEERABADHRAN M, NATESAN S, MUBARAKALI D, et al. Using different cultivation strategies and methods for the production of microalgal biomass as a raw material for the generation of bioproducts[J]. Chemosphere, 2021,285: 131436.
[41] WING R A, PURUGGANAN M D, ZHANG Q F. The rice genome revolution: from an ancient grain to Green Super Rice[J]. Nature Reviews Genetics, 2018,19(8):505 – 517.
[42] CHEN F M, ZHENG G Y, QU M N, et al. Knocking out negative regulator of photosynthesis I increases rice leaf photosynthesis and biomass production in the field[J]. Journal of Experimental Botany, 2021,72(5):1836 – 1849.

[43] CHIDAMBARANATHAN P, SAHU S, SELVARAJ S, et al. Identification of novel marker-trait associations and candidate genes for combined low phosphorus and nitrogen-deficient conditions in rice at seedling stage[J]. Tropical Plant Biology, 2024,17(4):249 – 268.

[44] 宋鹏, 李正达, 杨蒙, 等. 作物表型机器人研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025,56(3):1 – 17.
SONG Peng, LI Zhengda, YANG Meng, et al. Current status and prospects of crop phenotyping robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(3):1 – 17. (in Chinese)

[45] ZHU Q L, WANG B, TAN J T, et al. Plant synthetic metabolic engineering for enhancing crop nutritional quality[J]. Plant Communications, 2020,1(1):100017.

[46] JÄHNE F, HAHN V, WÜRSCHUM T, et al. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2020, 133(8):2335 – 2342.

[47] 赵望锋, 王力华. 间歇浸没式生物反应器在大规模组织培养中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2007(2):317 – 320.
ZHAO Wangfeng, WANG Lihua. Study on temporary immersion bioreactor in tissue culture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007(2):317 – 320. (in Chinese)

[48] 李淑雅, 陈健妙, 张骐飞, 等. 三种培养方式对橡胶树花药胚性悬浮细胞团再生体系构建的影响[J]. 植物生理学报, 2022,58(7):1236 – 1244.
LI Shuya, CHEN Jianmiao, ZHANG Qifei, et al. Efects of three culture methods on the establishment of anther embryogenic suspension cell masses regeneration system of *Hevea brasiliensis*[J]. Plant Physiology Journal, 2022,58(7):1236 – 1244. (in Chinese)

[49] 彭绿春, 张春华, 解玮佳, 等. 利用间歇浸没式生物反应器建立高山杜鹃高效繁殖体系[J]. 北方园艺,2025(11):48 – 55.
PENG Lüchun, ZHANG Chunhua, XIE Weijia, et al. Establishment of an efficient propagation system for rhododendron by utilizing temproary immersion bioreactor[J]. Northern Horticulture, 2025(11):48 – 55. (in Chinese)

[50] MAO C Q, MAO Y C, ZHU X L, et al. Synthetic biology-based bioreactor and its application in biochemical analysis[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2024,54(7):2467 – 2484.

[51] 石琨, 郑彩霞, 张运涛, 等. 间歇浸没式液体培养技术及其在莓类果实植物微扩繁中的应用[J]. 植物生理学报, 2017,53(4):513 – 520.
SHI Kun, ZHENG Caixia, ZHANG Yuntao, et al. The technology of temporary immersion in liquid culture and its application in micropropagation of berry plants[J]. Plant Physiology Journal, 2017,53(4):513 – 520. (in Chinese)

[52] 张杰, 张本厚, 贾明良,等. 利用间歇浸没植物生物反应器进行半夏组培快繁的研究[J]. 科技通报, 2018,34(1):95 – 100.
ZHANG Jie, ZHANG Benhou, JIA Mingliang, et al. Rapid propagation of *Pinellia ternata* using temporary immersion bioreactors[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018,34(1):95 – 100. (in Chinese)

[53] CHUNG N, KIM N, GIAP D V, et al. Production of functional human vascular endothelial growth factor165 in transgenic rice cell suspension cultures[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2014,63:58 – 63.

[54] 于博涵, 高保燕, 张虎, 等. 布朗葡萄藻:从二氧化碳固定到烷烃,烯烃与萜烯的生物合成[J]. 中国生物工程杂志, 2024,44(增刊):164 – 175.
YU Bohan, GAO Baoyan, ZHANG Hu, et al. *Botryococcus braunii*: from carbon dioxide fixation to the biosynthesis of alkanes, alkenes and terpenes[J]. China Biotechnology, 2024,44(Supp.):164 – 175. (in Chinese)

[55] 阳清亮, 李浩榛, 刘刚, 等. 基于水杨醛荧光探针的营养液镁离子检测方法[J]. 农业机械学报, 2021,52(增刊):344 – 350.
YANG Qingliang, LI Haozhen, LIU Gang, et al. Salicylaldehyde fluorescent probe based on detection of magnesium ions in nutrient solutions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(Supp.):344 – 350. (in Chinese)

[56] 崔佳维, 张红梅, 丁小涛, 等. 不同营养液配方对浅液流栽培青菜生长及品质的影响[J]. 上海农业学报, 2020,36(4):53 – 59.
CUI Jiawei, ZHANG Hongmei, DING Xiaotao, et al. Effects of different nutrient solutions on the growth and quality of pakchoi in nutrient film technique(NFT)[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020,36(4):53 – 59. (in Chinese)

[57] PADHI P, MEHTA S K, AGARWAL K, et al. Intermittent flow influences plant root growth: a phytofluidics approach[J]. Physics of Fluids, 2024,36(4): 043602.

[58] LIU G M, QIAO L N, ZHANG H, et al. The capacity of bicarbonate capture of a continuous microalgae photo-bioreactor system[J]. Energy Procedia, 2014, 61:361 – 364.

[59] 代绿叶, 顾益银, 韩莹琰. LED 光环境调控对植物影响的研究进展[J]. 分子植物育种, 2024,22(22):7535 – 7545.
DAI Lüye, GU Yiyin, HAN Yingyan. Research progress on the effects of LED light environmental control on plants[J]. Molecular Plant Breeding, 2024,22(22):7535 – 7545. (in Chinese)

[60] SON K H, OH M M. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes[J]. Hortscience, 2013,48(8):988 – 995.

[61] KANG W H, PARK J S, PARK K S, et al. Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue, and green light from light-emitting diodes (LEDs)[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2016,57(6):573 – 579.

[62] KELLY N, RUNKLE E S. Dependence of far-red light on red and green light at increasing growth of lettuce[J]. PLoS One, 2024,19(11): e0313084.

[63] VASHISHT P, SANGEETHA K, RAMESH B, et al. Harnessing light: the role of semiconductor technology in boosting phenolic compounds in fruit and vegetable[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 19:1 – 18.

[64] KITAZAKI K, FUKUSHIMA A, NAKABAYASHI R, et al. Metabolic reprogramming in leaf lettuce grown under different light quality and intensity conditions using narrow-band LEDs[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):7914.

[65] LIU B B, MAO P P, YANG Q, et al. Appropriate nitrogen form ratio and UV-A supplementation increased quality and production in purple lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(23):16791.

[66] 李惠民. 贯叶连翘种子休眠特性及光对种子萌发的影响[J]. 西安工程大学学报, 2012,26(6):788 – 790.
LI Huimin. The dormant property of *Hypericum perforatum* seed and effect of light on germination[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2012,26(6):788 – 790. (in Chinese)

[67] KARIMI M, AHMADI N, EBRAHIMI M. Red LED light promotes biomass, flowering and secondary metabolites accumulation in hydroponically grown *Hypericum perforatum* L. (cv. Topas)[J]. Industrial Crops and Products, 2022,175: 114239.

[68] MATSUDA R. Inter-batch variability of hemagglutinin content transiently expressed in *Nicotiana benthamiana* plants grown under sole-source lighting and sunlight conditions before gene transfer[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2022,78(4): 164 – 173.

[69] CAROTTI L, GRAAMANS L, PUKSIC F, et al. Plant factories are heating up: hunting for the best combination of light intensity, air temperature and root-zone temperature in lettuce production[J]. Frontiers in Plant Science, 2021,11:592171.

[70] LU N, BERNARDO E L, TIPPAYADARAPANICH C, et al. Growth and accumulation of secondary metabolites in perilla as affected by photosynthetic photon flux density and electrical conductivity of the nutrient solution[J]. Frontiers in Plant Science, 2017,8:708.

[71] ZHANG X, HE D X, NIU G H, et al. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(2):33 – 40.

[72] MOURO V, FISCHER A. Dealing with a mucosal viral pandemic: lessons from COVID – 19 vaccines[J]. Mucosal Immunology, 2022,15(4):584 – 594.

[73] MIN Q X X, MARCELIS L F M, NICOLE C C S, et al. High light intensity applied shortly before harvest improves lettuce nutritional quality and extends the shelf life[J]. Frontiers in Plant Science, 2021,12:615355.

[74] KEBEISH R, NIESSEN M, THIRUVEEDHI K, et al. Chloroplastic photorespiratory bypass increases photosynthesis and biomass production in *Arabidopsis thaliana*[J]. Nature Biotechnology, 2007,25(5):593 – 599.

[75] 吕欢欢, 牛源艺, 韩雨晓, 等. 日光温室作物冠层夏季光照强度与空气温湿度时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(5):368 – 378.
LÜ Huanhuan, NIU Yuanyi, HAN Yuxiao, et al. Spatiotemporal variation of crop-canopy light intensity and air temperature and humidity in summer solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 368 – 378. (in Chinese)

[76] ASSENG S, GUARIN J R, RAMAN M, et al. Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020,117(32):19131 – 19135.

[77] DECARDI-NELSON B, YOU F Q. 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.

[78] CHOI E J, LEE D, LEE S M. Comparative analysis of the performance and energy consumption of air-conditioning systems in a plant factory during a cooling season[J]. Energy & Buildings, 2025, 335:115483.

[79] PLAS W, DEMEESTER T, AHMED Z Y, et al. A detailed plant model in CFD that resolves the microclimate around individual leaves[J]. Biosystems Engineering, 2025, 254: 104144.

[80] CHEN W H, YOU F Q. Semiclosed greenhouse climate control under uncertainty via machine learning and data-driven robust model predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(3):1186 – 1197.

[81] MIYAGI A, UCHIMIYA H, KAWAI-YAMADA M. Synergistic effects of light quality, carbon dioxide and nutrients on metabolite compositions of head lettuce under artificial growth conditions mimicking a plant factory[J]. Food Chemistry, 2017, 218:561 – 568.

[82] COSTANTINO A, COMBA L, SICARDI G, et al. Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: a dynamic modelling-based assessment and investigation[J]. Applied Energy, 2021, 288:116583.

[83] KIM J, YOU F Q. Energy-efficient greenhouse climate control using Gaussian process-based stochastic model predictive control [J]. Applied Energy, 2025, 391: 125841.

[84] ZHANG Y, KACIRA M, AN L L. A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system[J]. Biosystems Engineering, 2016,147:193 – 205.

[85] JIANG J A, SU Y L, SHIEH J C, et al. On application of a new hybrid maximum power point tracking (MPPT) based photovoltaic system to the closed plant factory[J]. Applied Energy, 2014,124:309 – 324.

[86] RIAZ M H, IMRAN H, YOUNAS R, et al. Module technology for agrivoltaics: vertical bifacial versus tilted monofacial farms [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2021,11(2):469 – 477.

[87] YANG L H, LIANG J D, HSU C Y, et al. Enhanced efficiency of photovoltaic panels by integrating a spray cooling system with shallow geothermal energy heat exchanger[J]. Renewable Energy, 2019, 134:970 – 981.

[88] HARUN A N, MOHAMED N, AHMAD R, et al. Improved internet of things (IoT) monitoring system for growth optimization of Brassica chinensis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,11:164.

[89] 杨睿, 商晓剑, 王静. 基于数字孪生技术的烤烟植物工厂种植模型构建与应用[J]. 湖北农业科学, 2024,63(8):104 – 108.
YANG Rui, SHANG Xiaojian, WANG Jing. Construction and application of a flue-cured tobacco plant factory planting model based on digital twin technology[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2024,63(8):104 – 108. (in Chinese)

[90] CHO W J, KIM H J, JUNG D H, et al. On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,146:51 – 58.

[91] DONG C, HU D W, FU Y M, et al. Analysis and optimization of the effect of light and nutrient solution on wheat growth and development using an inverse system model strategy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,109:221 – 231.

[92] KARPE M, LACHMAN J, WANG L L, et al. Potential for urban agriculture: expert insights on sustainable development goals and future challenges[J]. Sustainable Production and Consumption, 2025,57:16 – 34.

[93] SHAMSHIRI R R, BOJIC I, VAN H E, et al. Model-based evaluation of greenhouse microclimate using IoT-sensor data fusion for energy efficient crop production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,263:121303.

[94] CECCANTI F, DI LORENZO G, BISCHI A, et al. A transient energy-agriculture model to predict energy footprint of vertical farms[J]. Energy Conversion and Management, 2025,332:119740.

[95] BENIS K, REINHART C, FERRAO P. Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,147:589 – 602.

[96] SONG S, HOU Y J, LIM R B H, et al. Comparison of vegetable production, resource-use efficiency and environmental performance of high-technology and conventional farming systems for urban agriculture in the tropical city of Singapore[J]. Science of the Total Environment, 2022,807:150621.

[97] XYDIS G. Using wind resource assessment to optimize plant factory locations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2025,95:191 – 199.

[98] LIU Y, LI Z G, CHENG H, et al. Plant factory speed breeding significantly shortens rice generation time and enhances metabolic diversity[J/OL]. Engineering, 2024. DOI: 10.1016/j.eng.2024.09.019.

[99] AHMAD Z, BABICH O, SUKHIKH S, et al. Unlocking the biotechnological potential of *Decalepis arayalpathra*: exploring synthetic seed production, metabolic profiling, genetic stability, and the impact of photosynthetic photon flux density on acclimatization[J]. BMC Plant Biology, 2025,25(1):189.

[100] ISWANTO A B B, KANG H, PARK S, et al. Recent advances in improving yield and immunity through transcription factor engineering[J/OL]. Journal of Integrative Plant Biology, 2025. DOI: 10.1111/jipb.13932.

[101] SAMTANI J B, ROM C R, FRIEDRICH H, et al. The status and future of the strawberry industry in the United States[J]. Horttechnology, 2019,29(1):11 – 24.

[102] 吴荣荣, 汪阳忠, 潘晓璐, 等. 烟草瞬时表达技术的多途径应用研究进展[J]. 中国烟草科学, 2024,45(5):114 – 120.
WU Rongrong, WANG Yangzhong, PAN Xiaolu, et al. Advances and prospects of research on multi-pathway applications of tobacco transient expression technology[J]. Chinese Tobacco Science, 2024,45(5):114 – 120. (in Chinese)

[103] LUI A C W. POW K C, LIN N, et al. Regioselective stilbene O-methylations in Saccharinae grasses[J]. Nature Communications, 2023,14(1):3462.

[104] 于文文, 吕雪芹, 李兆丰, 等. 植物合成生物学与母乳低聚糖生物制造[J/OL]. 合成生物学. DOI: 10.12211/2096-8280.2024-89.
YU Wenwen, LÜ Xueqin, LI Zhaofeng, et al. Plant synthetic biology and bioproduction of human milk oligosaccharides[J]. Synthetic Biology Journal. DOI: 10.12211/2096-8280.2024-89. (in Chinese)

[105] BARNUM C R, PAVIANI B, COUTURE G, et al. Engineered plants provide a photosynthetic platform for the production of diverse human milk oligosaccharides[J]. Nature Food, 2024, 5(6):480 – 490.

[106] WASHIDA H, YOSHINAKA K, YAMADA O, et al. Toward the commercialization of recombinant pharmaceuticals expressed in plants[J]. Plant Biotechnology, 2025, 42(1):1 – 7.

[107] JUNG J W, ZAHMANOVA G, MINKOV I, et al. Plant-based expression and characterization of SARS – CoV – 2 virus-like particles presenting a native spike protein[J]. Plant Biotechnology Journal, 2022, 20(7):1363 – 1372.

[108] WARD B J, MAKARKOV A, SÉGUIN A, et al. Efficacy, immunogenicity, and safety of a plant-derived, quadrivalent, virus-like particle influenza vaccine in adults (18 – 64 years) and older adults (≥65 years): two multicentre, randomised phase 3 trials[J]. The Lancet, 2020, 396:1491 – 1503.

[109] LIU C Y, CHEN Q, QU Y, et al. The plant platform for natural products synthesis: tobacco[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 225:120605.

[110] KARAMAN S, CUNNICK J, WANG K. Expression of the cholera toxin B subunit (CT-B) in maize seeds and a combined mucosal treatment against cholera and traveler's diarrhea[J]. Plant Cell Reports, 2012, 31(3):527-537.

[111] HAYDEN C A, FISCHER M E, ANDREWS B L, et al. Oral delivery of wafers made from HBsAg-expressing maize germ induces long-term immunological systemic and mucosal responses[J]. Vaccine, 2015, 33(25):2881-2886.

[112] DU Y P, TIAN L X, WANG Y, et al. Chemodiversity, pharmacological activity, and biosynthesis of specialized metabolites from medicinal model fungi *Ganoderma lucidum*[J]. Chinese Medicine, 2024,19(1):1-11.

[113] DING S W, ALEXANDER E, LIANG H Y, et al. Synthetic and biogenic materials for oral delivery of biologics: from bench to bedside[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(8):4009-4068.

[114] MIRZAEE M, OSMANI Z, FRÉBORTOVÁ J, et al. Recent advances in molecular farming using monocot plants[J]. Biotechnology Advances, 2022, 58:107913.

[115] BUYEL J F. Towards a seamless product and process development workflow for recombinant proteins produced by plant molecular farming[J]. Biotechnology Advances, 2024,75: 108403.

[116] WIRZ H, SAUER-BUDGE A F, BRIGGS J, et al. Automated production of plant-based vaccines and pharmaceuticals[J]. Jala, 2012, 17(6):449-457.

[117] GRAAMANS L, BAEZA E, VAN DEN DOBBELSTEEN A, et al. Plant factories versus greenhouses: comparison of resource use efficiency[J]. Agricultural Systems, 2018,160:31-43.

[118] ALLAHVERDIYEVA Y, ARO E M, VAN BAVEL B, et al. NordAqua, a nordic center of excellence to develop an algae-based photosynthetic production platform[J]. Physiologia Plantarum, 2021, 173(2):507-513.

[119] DENG J K, ZHANG H R, ZHANG X J, et al. Ultrastable red-emitting phosphor-in-glass for superior high-power artificial plant growth LEDs[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018,6(7):1738-1745.

[120] WANG Y H, SHEN M J, ZHENG H Y, et al. Site substitution triggered luminescence characteristics modulation in $Eu3^{+}$-Activated $Sr4La6(SiO_4)_6Cl_2$ phosphors for boosting viral resistance and plant growth[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(12):1-12.

[121] KHAN Q, WANG A G, LI P D, et al. Quantum dots illuminating the future of greenhouse agriculture[J]. Advanced Sustainable Systems, 2025,9(3):1-15.

[122] MCNULTY M J, XIONG Y G, YATES K, et al. Molecular pharming to support human life on the moon, mars, and beyond [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2021,41(6):849-864.

[123] KOZAI T. Sustainable plant factory: closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce: international symposium on soilless cultivation[J]. Acta Horticulturae, 2013, 1004: 27-40.

[124] TOULIATOS D, DODD I C, MCAINSH M. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics[J]. Food and Energy Security, 2016,5(3):184-191.

[125] MASSA G D, DUFOUR N F, CARVER J A, et al. VEG-01: veggie hardware validation testing on the International Space Station[J]. Open Agriculture, 2017,2(1):33-41.

[126] DONG C, SHAO L Z, FU Y M, et al. Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, green house and field systems[J]. Acta Astronautica, 2015,111:102-109.