

# LED 植物光质生物学与植物工厂发展

刘文科, 杨其长

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081

**摘要** 作为设施园艺的最高形式, 基于植物生物学需求特性实施高精度环境智能控制的发光二极管(LED)光源植物工厂发展迅猛。本文简述植物光生物学和植物光质生物学的概念与内涵, 总结半导体光源LED的发展及农用光谱特征, 分析LED光源在植物光质生物学研究和植物工厂栽培中的作用, 讨论了植物光质生物学的研究现状与研究方向, 认为植物光质生物学在植物工厂高效生产中起着基础性作用。

**关键词** 光质生物学; 植物工厂; 发光二极管(LED)

**中图分类号** S626.9

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.003

## Development Status of Plant Photobiology with LED Monochromatic Light and Plant Factory

LIU Wenke, YANG Qichang

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the plant photobiology law, plant factories with intelligently-controlled light environment of LED light sources have developed rapidly, and they are regarded as the top patterns of modern protected horticulture. In this paper, the concepts of plant photobiology and plant light-quality biology and connotation are put forward, the developmental process of LED and its advantages in plant factory are summarized. Also, the fundamental roles of plant light-quality biology in high-efficient plant factory are highlighted. In the end, the current status and future research prospects are discussed.

**Keywords** Photobiology; plant photobiology; light-emitting diode (LED)

光生物学(Photobiology)是研究光与生物(动植物、微生物)相互关系的科学,是生物学、化学、物理学等学科相互交叉、相互渗透形成的学科,旨在阐明光作为一个环境信息如何作用于生物有机体,以及生物产生对光反应的机理。光生物学的研究内容十分广泛,属于生物物理学分支学科,主要包括:1)光合作用;2)生物光谱学;3)光化学;4)环境光生物学;5)光形态建成等方面<sup>[1]</sup>。光生物学研究成果是合理使用太阳光和人工光,维持动物、植物、微生物及其生态系统稳定与生产性能的基础。植物光生物学是光生物学的重要分支学科,旨在研究光和植物的相互作用,重点围绕植物光合作用及太阳能光生物转换的基础理论和技术实践进行科学研究。植物光质生物学以研究单色光及其组合对植物生

物学的影响及其调控光合作用与光形态建成的机理为主要内容,对其相关规律的理解与把握可提高太阳光利用效率与人工光调控效益,有利于实现现代农业“高产、优质、高效、生态、安全”的生产目标。

### 1 设施园艺与植物工厂的内涵

设施园艺指在露地不适于园艺作物生长的季节(寒冷或炎热)或地区,利用特定的设施(保温、增温、降温、防雨、防虫),人为创造适于作物生长的环境,以生产优质、高产、稳产的蔬菜、花卉、水果等园艺产品的一种环控农业。中国设施园艺产业发展迅速,2013年末设施面积已达到400万hm<sup>2</sup>以上,人工光栽培面积也有2000hm<sup>2</sup>左右,设施园艺已经成为

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-02-17

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103001;2011AA03A114);中国农业科学院基本科研业务费项目(BSRF201204)

作者简介:刘文科,研究员,研究方向为设施园艺营养与光生物学,电子信箱:liuwke@163.com

引用格式:刘文科,杨其长.LED植物光质生物学与植物工厂发展[J].科技导报,2014,32(10):25-28.

现代农业的支柱产业。设施园艺产业健康可持续发展在保障国家粮食,提供充足的蔬菜、果品、花卉、食用菌、中药材等农产品的重要保障,在提高农业资源利用效率和保护环境方面具有重要意义。

植物工厂是一种通过设施内高精度环境控制,实现作物周年连续生产的高效农业系统,是由计算机对作物生育过程的温度、湿度、光照、CO<sub>2</sub>浓度以及营养液等环境要素进行自动控制,不受或很少受自然条件制约的全新生产方式<sup>[2]</sup>。由于植物工厂充分运用了现代工业、生物科技、营养液栽培和信息技术等手段,技术高度密集,被国际公认为设施农业的最高级发展阶段,是衡量一个国家农业高技术水平的重要标志之一。同时,由于植物工厂可不占用农用耕地,产品安全无污染,操作省力,机械化程度高,单位土地的利用效率可达露地生产的40~108倍<sup>[3,4]</sup>(表1),被认为是21世纪解决人口、资源、环境问题的重要途径,也是未来航天工程、月球和其他星球探索过程中实现食物自给的重要手段<sup>[2]</sup>。

表1 人工光植物工厂与露地单位面积相对年产能的估算<sup>[4]</sup>

Table 1 Productivity comparison between plant factory with artificial light and field

人工光植物工厂与露地比较优势	累积倍数
10层的栽培面积相当于10倍于露地	10
缩短了从播种、移栽到收获的时间1/2,产能加倍	20
延长了年栽培周期到周年生产,而且收获与下茬播种及移栽操作间无时间浪费,提高效率2倍	40
植物种植密度增加了1.5倍	60
避免了因台风、大雨和干旱及病虫害侵染造成的损失,产能增加1.5倍	90
提高了品质,减少了新鲜产品的损失,增加1.2倍	108

植物工厂的核心技术包括无土栽培技术、光照技术和环境控制技术,3类技术彼此关联,以植物高效生产为目标进行集成。基于植物工厂集约化、智能化的本质特征,高精度管控生产过程中的各种环境因子、营养因素和管理要素是其技术重点研发内容与发展方向。

## 2 植物工厂光环境调控的必要性

植物工厂的生产核心是植物按照需求快速生长,获得优质农产品。因此,一切关系到植物健康和生产效率的环境因子、营养因素和管理要素都需实施控制。光作为环境信号和光合作用能量的唯一来源,是设施植物生长发育和产量品质形成的必需环境要素。自然界中,太阳光照随地理纬度、季节和天气状况的不同而变化,高纬度地区以及其他大多数地区(如中国南方地区)冬春季节因连阴天、雨雪雾和霾天气,以及大气污染和浮尘等因素的影响,光照时间不够、光照强度不足和光质欠缺现象严重,严重影响作物尤其是设施园艺作物的生长发育和优质高效生产。同时,在高纬度地区光照时间不足、低纬度地区因阴雨天气导致弱光寡照等现象致使日光温室、塑料大棚等设施内光环境(光强、光质和光周期)

不能满足设施作物的生长发育与产量品质形成的需求,限制了设施园艺生产潜力。另外,随人工光栽培(植物组织培养、植物种苗繁育、植物工厂蔬菜生产等)规模大幅增加,适宜的人工光环境调控在设施园艺优质、高产、生态、安全生产中具有不可或缺的作用。只有根据设施植物的光生物学需求,设置人工光环境及管理策略,进行动态智能化管理,才能使设施园艺彻底摆脱自然条件的制约,实现人为操控。但是,传统人工光源(如荧光灯和高压钠灯)光谱能量分布固定,无法调控,仅能控制光强和光周期,光合有效辐射比例小,无效热辐射较多,光效低,耗能高,造成设施园艺生产能耗居高不下,亟待解决。

设施农业生产对人工照明的需求逐年提升,人工补光与光环境精准调控已经成为决定设施农业产量品质及生产效率的重要技术。长期以来,由于设施园艺整体环控性能差,光环境调控成为生产短板。植物光生物学,特别是植物光质生物学规律不清晰,无法制定节能高效的光环境调控策略,也阻碍了农业照明的发展。传统电光源可控性差,无法按照植物的需求进行光质、光强和光周期的调控,难以满足农业照明的实践和按需照明的环保理念。农业照明具有领域多、生物原理与调控指标复杂、灯具专业性强、控制系统精准等特点。随着高精度环境控制型设施园艺形式——植物工厂的发展,以及半导体光源——发光二极管(LED)的成熟化进步,为人工光环境调控逐步走向实践提供了契机。按照植物光生物学要求,按需供光,分段管理,智能化管控,最大程度地提高了光环境调控的生物效益,为应对弱光寡照胁迫,调节植物生长发育和产量品质形成提供了新的有效手段。

## 3 设施植物栽培与电光源发展

光合作用是植物生产的基础,高效的光合作用必须为其提供适宜的光照条件(光强、光质和光周期)以及相辅的生长因子(养分供应、温度、CO<sub>2</sub>浓度等)。至今,电光源栽培植物的历史已有150多年。事实上,植物的人工光栽培与人类照明技术的发展及人类对植物光生物学的认识紧密相关,大致经过白炽灯照明(incandescent lighting)、开放电弧照明(open arc lighting)、封闭气体放电(enclosed gaseous discharge)和LED固态照明4个阶段<sup>[5]</sup>。

LED固态照明的应用是过去几十年来设施园艺照明的最大进步之一,其广泛应用具有里程碑式的意义。最早将LED光源用于植物栽培研究的是日本,此后美国NASA将LED用于宇宙基地等闭锁式生命维持系统的照明。Morrow<sup>[6]</sup>总结了LED光源在设施园艺中的应用历程(表2)。20世纪80年代开始,发达国家(如美国、日本、荷兰等)开始了有关LED光源作为植物生长光源的可行性研究,重点开展了LED光质对植物组培苗、蔬菜和粮食作物的生长发育,甚至产量影响的相关研究。20世纪90年代中期,NASA开始筛选和发展LED光源用于植物栽培<sup>[7,8]</sup>,发展出许多专门用于航天飞机和国际太空站使用的光照系统。这些研究结果为LED光源

在设施园艺各生产领域的应用奠定了植物光质生物学基础。

表2 LED植物照明应用的重要时间节点<sup>[6]</sup>

Table 2 Developmental stages of LED lighting for plant production

年份	LED植物照明应用的重要进展
1989—1990	LED植物生长研究;仅有660 nm离散型LED
1993	LED用于太空植物栽培
1994—1995	LED用于植物研究设施中
1995—1996	高输出蓝光LED问世;NASA采用LED作为航天飞机及太空站的植物生产的光源
1999—2000	大功率LED单元(1 W)出现;在日本出现了第一个商业化LEDs植物生产
2000—2001	商业化LED驱动模块出现
2001—2002	高亮度多光谱阵列装置出现
2003	LED商业化室内植物用灯具出现
2004	LED冠层照明出现
2004—2005	大功率LED单元(>1 W)
2005—2006	适应型LED系统的发展
2005—2006	大型LED阵列装置
2006	高光效和性能的实现;温室LED补光原型出现
2008—2013	LED红蓝光植物照明装置成为主流,多种专用设施园艺LED光源装置出现并在植物工厂各生产领域中应用

#### 4 LED植物光质生物学的研究进展

LED是一种半导体固态光源,可提供单色光,可以按照植物的需求调制出更优的光谱,较传统补光光源具有无法比拟的光电优势,是替代传统光源进行高效补光的理想光源。基于植物光合色素的吸光曲线,采用LED特定光谱具有提高植物光合作用,提高植物生产效率的潜力。LED光质生物学是研究单色光及其组合光对生物(植物、动物、微生物、人)生长发育、代谢过程、生殖产量、品质形成等影响规律与调控方法的学科,研究范畴囊括分子到群落等各个层面。一般而言,植物光质需求共识:植物必需光质也是不连续的。红光、蓝光是植物正常生长发育、完成生活史的必需光质,其他为有益光质。在红光的基础上补充适量的蓝光,在光合作用和氮营养上有增益效应<sup>[9]</sup>。

LED光质生物学研究始于20世纪90年代<sup>[10-12]</sup>,目前尚属于起步阶段,重点需要对植物个体水平多角度进行研究,特别是在LED光质与植物光合生理、LED光质与植物营养生理、LED光质与植物代谢生理等生理层面,以及植物分子生物学层面尚有许多未被揭示的规律。在已有研究中,多数集中在植物个体和器官尺度上,有关群落、群体、细胞和分子尺度研究报道较少。在光质范围方面,研究报道涉及到紫外至远红光,尤其是红光、蓝光及其组合等光质。研究中关注产量品质、生长发育和生理生化过程的较多,而分子生物学机理少有报道。研究领域涉及植物工厂育苗、蔬菜生产、温室补光、植物组培等。例如,Bula等<sup>[10]</sup>总结了LED作为唯一光源

培养生菜的可行性。Kim等<sup>[8]</sup>及Folta等<sup>[13]</sup>总结了LED绿光在园艺作物栽培中的作用。2008年,HortScience杂志刊登了美国园艺学会(ASHS)2007年召开的主题为“LEDs in Horticulture”的研讨会的5篇LED相关文章<sup>[14-17]</sup>,集中总结了LED光源在设施园艺中应用的可行性、优势和研究进展。迄今,Yeh等<sup>[18]</sup>综述了LED的发展史,重点总结了1990年以后LED在室内植物生产中的应用。Mitchell等<sup>[19]</sup>论述了LED光源在温室中的应用现状与前景。Bergstrand等<sup>[20]</sup>论述了LED光源在园艺作物生产中的应用新进展。刘文科等<sup>[21]</sup>综述了食用菌光生物学的国内外研究进展。

在众多研究中,具有里程碑意义的报道是关于LED红蓝光组合光可以替代荧光灯等的连续光谱栽培高等植物的研究成果,这些结果奠定了以LED红蓝光质为核心的人工光栽培的基础。其意义在于,将人工栽培从连续光谱简化到红蓝复合光质,为设施园艺用LED光源与灯具的研发提供了理论依据,也极大地降低了灯具的制造成本。Goins等<sup>[22]</sup>研究表明,小麦可在红光LED光源下完成生命周期,但生物量和种子产量与荧光灯相比明显不足,当补充10%的蓝光后显著增加了小麦的生物量和种子产量,效果与荧光灯相似。Goins等<sup>[23]</sup>以拟南芥为试材,得到了类似的结果。红蓝组合光质可替代连续全光谱光源进行植物栽培,这一结论对园艺作物栽培具有普遍适用价值。植物工厂是最适宜LED光源应用的设施园艺形式。21世纪,LED光质生物学研究进入了一个新的阶段,LED光质对园艺植物生长发育、产量品质形成的影响的内在机制已经纳入了当今LED光质生物学的研究范畴。通过系统深入研究,为植物工厂灯具设计和光环境精准调控提供依据,建立植物工厂生产的植物精细调控方法及其光配方。

#### 5 LED光质生物学及其植物工厂应用

LED半导体光源的出现不仅为植物栽培提供了理想的光环境可控的光源,也为植物光质生物学研究提供了试验工具。LED光源具有传统光源无法比拟的光电优势,是植物工厂光环境调控的理想光源。其优势主要表现在:1) LED可按植物生长发育需求调制光谱,按需补光,生物光效高;2) LED为冷光源,贴近植物照射,可提高空间利用率;3) LED为直流电可控性好,可精准调控光强、光质和光周期等,适宜工厂化生产;4) 节能、环保、长寿命、体积小、重量轻;5) LED光源装置多样(灯板、灯带、灯管和灯泡),适宜设施园艺各领域应用。上述优势使得LED光源在人工光植物工厂光环境调控和太阳光植物工厂人工补光方面具有广泛的应用前景。LED光源植物工厂是植物工厂发展的方向,符合现代农业生产高效、高产、优质、生态和安全的总体要求,节能效果明显,推广应用前景广阔。

LED光源是研究植物光生物学的有效工具,借助LED单色光试验系统所揭示出的植物光生物学特性为LED的植物工厂应用奠定了基础,开辟了广阔的前景。首先,光质生物学是植物工厂光环境调控的基础。其次,光质生物学是植物

工厂环境综合调控的重要基础。第三,光质生物学是植物工厂LED灯具研发的依据。第四,光质生物学是植物工厂优质高产的保障。当前需要解决的问题有:1)光质生物学需深入研究,明确植物的生产存在形态、植物种类、品种光环境需求特性与生理生化及分子生物学基础,为LED灯具设计和光环境调控提供科学依据;2)根据植物工厂生产植物对象形态学特征和生产管理需求,设计专用设施园艺各领域LED灯具,并制定光环境管控策略;3)制定分段管理和采光环境控制技术调控植物的生长发育与产量品质的形成;4)优先研究濒危植物、高附加值植物的植物工厂栽培光生物学特性,促进植物工厂产业健康可持续发展。

## 6 结论

LED作为半导体固态冷光源,具有光质纯、光效高、波长类型丰富、光强与光质调制便捷等突出优点及节能、环保、长寿命等优势,是植物工厂生产光环境调控的最佳光源<sup>[24-26]</sup>。2013年,据行业分析机构WinterGreen研究报道,全球植物工厂LED灯具产值高达12亿美元,较2012年增长了27%<sup>[27]</sup>。然而,中国植物工厂专用型LED光源的发展尚存在阻碍,主要表现在LED公司参与农业LED灯具研发的积极性不高,投入较少;虽然LED农业照明技术储备已相当丰富,但知识产权商品化过程缓慢,与国际水平存在差距;LED光源产品及其控制装置价格高,成为推广应用的障碍。最为重要的一点,植物光质生物学微观机理尚不清楚,引发应用潜力和可靠性的疑问,放缓了推广应用步伐。在科学认知方面,中国在农业光生物学规律研究方面严重落后,亟需进一步加强:1)农业生物营养与生长发育规律具有多样性和复杂性,农业生物对光环境的响应机理各不相同,研究方法各异,需要逐一系统研究,揭示其光生物学规律;2)光环境的数量属性(光强和光周期)、质量属性(光质和光谱)和电光源发光特性(占空比、频率)多,需要逐一研究其生物学效应;3)农业生产领域庞杂,农业生物赋存形态各异,对光环境时空需求不同。因此,LED光质生物学是发展LED光源植物工厂的关键,必须加以重视。

### 参考文献(References)

- [1] 农业大词典编委会编. 农业大词典[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. Dictionary Editorial Committee of Agriculture. Dictionary of agriculture [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.
- [2] 杨其长, 魏灵玲, 刘文科. 植物工厂系统与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. Yang Qichang, Wei Lingling, Liu Wenke. System and practice of plant factory[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [3] Kozai T. Plant factory in Japan—current situation and perspectives[J]. *Chronica Horticulturae*, 2013, 53(2): 8–11.
- [4] 刘文科, 杨其长. 设施园艺发展的最高形式——植物工厂[J]. 科技导报, 2013, 31(23): 11. Liu Wenke, Yang Qichang. Top pattern of protected horticulture: Plant factory[J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(23): 11.
- [5] 刘文科, 杨其长, 魏灵玲. LED光源及其设施园艺应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012. Liu Wenke, Yang Qichang, Wei Lingling. LED light sources and their

- applications in protected horticulture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012.
- [6] Morrow R C. LED lighting in horticulture[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1947–1950.
- [7] Goins G D, Yorio N C, Sanwo-Lewandowski M M, et al. Life cycle experiments with Arabidopsis grown under red light emitting diodes (LEDs)[J]. *Life Support and Biosphere Science*, 1998, 5(2): 143–149.
- [8] Kim H H, Wheeler R M, Sager J C, et al. Light-emitting diodes as an illumination source for plants: A review of research at Kennedy Space Center[J]. *Habitation*, 2005, 10(2): 71–78.
- [9] Matsuda R, Ohashi K K, Fujiwara K, et al. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light[J]. *Plant Cell Physiology*, 2004, 45(12): 1870–1874.
- [10] Bula R J, Morrow R C, Tibbits T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. *HortScience*, 1991, 26(2): 203–205.
- [11] Bula R J, Tibbits T W, Morrow R C. Commercial involvement in the development of space based plant growing technology[J]. *Advances in Space Research*, 1992, 12(5): 52–101.
- [12] Bula R J, Tibbits T W. Importance of blue photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes[J]. *HortScience*, 1992, 27(5): 427–430.
- [13] Folt K M, Maruhnich S A. Green light: A signal to slow down or stop [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(12): 3009–3111.
- [14] Wheeler R M. A historical background of plant lighting: An introduction to the workshop[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1942–1943.
- [15] Bourget C M. An introduction to light-emitting diodes[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1944–1946.
- [16] Massa G D, Kim H H, Wheeler R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1951–1956.
- [17] Folta K M, Childers K S. Light as a growth regulator: Controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems[J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1957–1964.
- [18] Yeh N, Chung J P. High-brightness LEDs—energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 2175–2180.
- [19] Mitchell C A, Both A J, Boutget C M. LEDs: The future of greenhouse lighting[J]. *Chronica Horticulturae*, 2012, 52(1): 6–12.
- [20] Bergstrand K J, Schüssler H K. Recent progresses on the application of LEDs in the horticultural production[J]. *Acta Horticulture*, 2012, 927: 529–534.
- [21] 刘文科, 杨其长. 食用菌光生物学及LED应用前景[J]. 科技导报, 2013, 31(18): 73–79. Liu Wenke, Yang Qichang. Photobiology of edible fungi and LED application[J]. *Review in Science & Technology*, 2013, 31(18): 73–79.
- [22] Goins G D, Yorio N C, Sanwo M M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48(312): 1407–1413.
- [23] Goins G D, Yorio N C, Sanwo-Lewandowski M M, et al. Life cycle experiments with Arabidopsis grown under red light emitting diodes (LEDs) [J]. *Life Support and Biosphere Science*, 1998, 5(2): 143–149.
- [24] 杨其长, 徐志刚, 陈弘达, 等. LED光源在现代农业的应用原理与技术进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 37–42. Yang Qichang, Xu Zhigang, Chen Hongda, et al. Principle and technological advances in LED light source application in modern agriculture[J]. *Journal of Review of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(5): 37–42.
- [25] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Quality changes of hydroponic lettuce under pre-harvest short-term continuous light with different intensity[J]. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2012, 87(5): 429–434.
- [26] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Reducing nitrate concentration in lettuce by elongated lighting delivered by red and blue LEDs before harvest[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(3): 481–490.
- [27] The LED plant factory output value may reach \$1.2 billion in 2013 [EB/OL]. [2013-12-30]. <http://www.no1ledlight.com/the-led-plant-factory-output-value-may-reach-1-2-billion-in-2013>.

(责任编辑 吴晓丽)