

LED 光照技术：从光量子调控到植物生理与作物生产

杨宇星¹, 贺冬仙^{2*}

(1. 北京科技职业大学人工智能学院, 北京 亦庄 100176; 2. 中国农业大学水利与智能工程学院, 北京 海淀 100083)

译文节选自: Pattison P M, J Y Tsao, G C Brainard, B Bugbee. LEDs for Photons, Physiology and Food[J]. Nature, 2018, 563:495.
https://www.nature.com/articles/s41586-018-0706-x.

摘要:发光二极管不仅比传统照明灯具更节能, 还能实现精细化调控与靶向应用。LED 灯具拥有自由调控光质、光照强度及光分布的技术优势, 使人工光源的农业应用不仅仅局限于作为信号来调控植物特定的生理反应, 还能作为高效能量来源替代太阳辐射。该文通过全面解析植物对光的生理响应机制, 旨在优化设施光照环境设计并带来增产增效与实用节能的农业增益应用。

关键词: 生理效应; 光形态建成; 光合作用; 光量子成本; 环境改良生物

中图分类号: S6; TN312.8

光是地球生物演化历程的核心要素, 既是光合作用的能量来源, 也是一种环境信号。作为光合作用的能量供给, 光能生成三磷酸腺苷(Adenosine Triphosphate, ATP), 这是植物体内通用的能量载体。作为信号载体, 光传递着大量信息, 支撑植物适应周围环境。植物拥有多种光受体, 感知光信号能力的不断提升, 推动了诸多进化适应性特征的形成。随着植物工厂和温室补光技术的发展, 发光二极管(light-emitting diodes, LED)替代了荧光灯和高压钠灯等传统人工光源, 成为设施农业领域应用广泛且技术高度集成发展的新兴产业。

1 植物光照应用与重点研究方向

植物属于感光生命体, 在长期演化中对环境里的紫外辐射、光合有效辐射与近红外辐射演化出极其灵敏的应答机制^[1-2]。自近代科学技术体系建立以来, 植物的光响应规律便持续受到科研人员关注。200年前, 研究者利用简易光源配合彩色滤光片, 初步探明不同色光对植物节间伸长的影响。Hoover 于 80 年前发现: 参与光合作用的有效波段与人眼可见光的范围相近, 但植物对蓝光、红光的感光敏感度更高^[3]。时隔 30 年之后, McCree^[4]与 Inada^[5]完善了 Hoover^[3]的早期试验: 借助单色仪与光谱滤片获得窄带光源进行测试证实, 离体单叶片在单色红

光(600~700 nm)下的光量子产率较蓝光(400~500 nm)高出 25%~35%, 较绿光(500~600 nm)高出 5%~30%。目前的学界发现上述经典试验存在局限性: 实验均在弱光条件下采用离体单叶片开展, 且单色光无法体现不同波段间的协同增效作用。依托 LED 光照技术, 科研人员可在高光强、多波段协同的可控环境条件下开展植物群体栽培试验, 进一步细化光谱对光合作用的调控规律。

20 世纪 40 年代末, 荧光灯的出现实现了无自然光条件下的设施栽培^[6], 但以现行标准来看, 其电光转化效率偏低。70 年代后期, 高强度气体放电灯(如高压钠灯、金属卤素灯)实现了类似自然光的栽培光强, 但这类灯具的输出光谱固定不可调。上述传统照明灯具无法对光量子的光照强度、光谱组成、供给时序进行独立调控。植物的光响应类型远多于人类, 依靠十余种感光受体调控自身生长发育。自然条件下, 植物群落还会受周边植株反射光的影响, 上层叶片过滤入射光后, 下层叶片的受光环境随之改变。光量子兼具两大功能: 既是光合作用的能量底物, 又是调控植株形态、叶片着色的信号因子(图 1)。植物的株型变化包含叶片伸展与冠层截光能力, 二者均可提升群体净光合速率, 影响整体光合效率与生长量。LED 光照技术正推动植物光生物学研究迎来颠覆性变革, 以下介绍四大重点研究方向。

2 光谱波长对植株光形态建成的调控规律

现有研究明确, 蓝光占比是影响植物株型的关键因子, 但调控效果存在显著物种差异(图 1), 内在分子机理尚未完全阐明。紫外辐射可多重优化作物生长: 增厚表皮角质层、抑制植株瘤状膨大病^[7]、促进次生代谢产物积累以改善果蔬风味, 同时改变植物与病原真菌、植食性昆虫之间的互作关系^[8]。光形态建成的各类效应同样因品种不同而表现各异。远红光(700~780 nm)显著促进植物的节间伸长与叶片扩展, 尽管其核心感光受体(光敏色素)的理化特性已被探明, 但该波段与其他色光的互作机理仍在持续发掘。

光谱层面的信号介导：

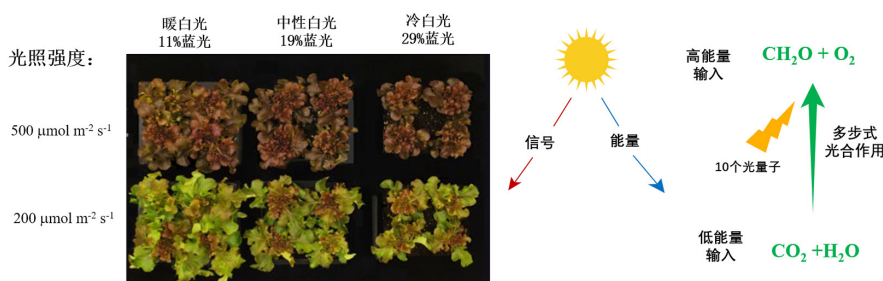


图1 光对植物的直接与间接生理效应

3 绿光的光合利用价值

3.1 光质与光强（光谱组分与光子总量）的交互效应

早期因叶绿素对绿光吸收量极低，学界普遍认为绿光对光合作用贡献微弱^[9]。然而，后续研究证实绿光穿透叶片与作物冠层的深度更优，实际光合贡献与红光、蓝光基本持平^[10-11]。

早期LED相关试验的光合有效光子通量密度（Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD）普遍低于全日照的10% $[200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})]$ ，而弱光诱导的株型变化在高光强环境下可发生逆转。例如，蓝光会与总光合有效光通量协同调控细胞膨大、叶柄、茎秆与叶片伸长，并通过株型改变间接影响冠层光能捕获效率^[2]。

3.2 光谱、光强、照射时段与昼夜节律、作物生育期的耦合规律

精准调控光量子供给时间，有助于解析植物光响应的作用位点与生理机制。借助LED可实现紫外脉冲补光，既能提升农产品风味，又能最大程度降低紫外辐射对作物DNA的损伤^[12]。

3.2.1 间接作用

光形态建成。光作为信号调控植株形态、细胞伸长与叶片显色，示例品种为红沙拉碗生菜。光照强度诱导叶片合成保护性花青素：光照强度（特指PPFD）为 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$ 时（全日照的10%）无法促发花青素合成，提升至 $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$ 后（全日照25%）即可启动合成。光谱组成调控叶片膨大：蓝光占比越高（色温由暖白光→中性白→冷白光），叶片伸展受抑制显著。

3.2.2 直接作用

光子作为光合底物可转化为植株干物质积累。理论上固定1分子二氧化碳以合成碳水化合物最少需要10个 $400 \sim 700 \text{ nm}$ 的可见光光子；光合作用包含约23步生化反应，将低能光能转化为高能有机物。单步反应效率约95%，经23级串联后，光合理论最大能量转化效率约30% $(0.95^{23} \approx 0.3)$ 。

植物光照技术研究尺度需要从离体单叶、短期单色光测试，拓展至大田/设施植物群体的全生育期栽培。该方向研究难度大但意义突出：植物可通过合成新光合色素适应光环境变化，光谱组成改变会重塑株型，且多波段光谱存在协同增益效应。因此，量化LED光质对植物单株及群体光合作用的综合影响十分复杂。

4 LED技术用于生产不同作物的经济核算

在基础研究持续推进的同时，LED光照技术已大范围落地产业化设施园艺生产，人类首次实现按需精准定量供给光子以进行作物栽培。在中纬度地区，100天的作物生长季中，在100天的生长季节中，中纬度地区夏季日照价值为每公顷70万美元，在一年中最黑暗的60天为每公顷7万美元。即便设施补光成本偏高，LED补光栽培的新鲜绿叶蔬菜的收益仍远超投入。太阳辐射搭配LED补光的温室生产模式，能够打破季节限制，实现本地绿叶菜的全年常态化稳定生产。

植物补光存在特有难点：作物所需光照强度为人居照明的30~100倍。高光效LED灯具能够压低光子使用成本，助力高附加值作物实现设施规模化种植。为量化植物光照的生产效率，采用下式计算单位光量子的干物质产出效率（ E_{dry} ，亦称其为光子成本），干重单位可为g或kg，光子单位为mol。

$$E_{\text{dry}} = F_a \times QY \times CUE \times HI \times k$$

式中：

F_a ：光子吸收利用率；

QY ：光合作用的光量子效率；

CUE ：碳利用效率（每摩尔植株总生物量碳中，固定在可食用部位的碳摩尔数）；

HI ：收获指数；

k ：可食用产物中单位碳摩尔对应的质量换算系数。

生产单位干物质的光量子成本（美元 /kg 干重）= 单位摩尔光量子成本（当前高效 LED 电价按照 0.1 美元 /（kW·h），折合为 0.01 美元 /mol 光子）÷ 单位干物质光子需求量 E_{dry} 。各类作物的单位干物质的光量子成本（ E_{dry} ）各不相同，故生产同等干物质的部分作物需要消耗更多光子（表 1）。单位干物质的光量子成本分化明显：芽苗菜最低，约 8 美元 /kg；普通蔬菜、水稻、小麦可达 42 美元 /kg。

农产品售价随含水率差异大幅分化：鲜品售价区间从芽苗菜的 35 美元 /kg，到稻麦的 0.4 美元 /kg；脱水干品价差更为悬殊，芽苗干品约为 700 美元 /kg，而粮食干品仅 0.4 美元 /kg。植物工厂生产不同作物的经济核算表（表 1）的末列为光子成本占干品售价比例（%），即单位干物质的光子成本 / 干品售价（由鲜菜售价与含水率换算得出）。叶菜类作物的 E_{dry} 数值高，单位干物质的光子成本最低，生鲜售价却最高；大宗粮食作物随栽培复杂度提升，光子成本占干品售价的比例急剧攀升。对于鲜食叶菜，LED 植物工厂的经济效益优异；对于收获干品的主粮作物，光子成本远超产品售价。即便 LED 灯具的电光转换效率达到理论的 100%，植物工厂生产稻麦作物的技术模式依然不具备经济性。综上，LED 植物光照的投入对芽苗菜的成本占比低、对普通蔬菜偏高、对大宗主粮作物完全不可行。受生鲜易腐、售价偏高的产业特点驱动，植物工厂的栽培品类以绿叶蔬菜为主，这也是其能够产生盈利的技术内核。

LED 植物工厂另外还具有显著的节水优势。植物工厂的空调系统冷凝空气中水汽，回收水分再进行灌溉可实现水资源循环利用，这在未来水资源价格上涨后将进一步凸显其技术优势。植物工厂的密闭式环境隔绝野外病虫害和病害传播，农药使用量大幅缩减，但最优水肥环境易促使腐霉菌等真菌暴发危害^[11]。可控环境的植物工厂叶菜高密度栽培可落地城郊乃至城市内部，缩短生鲜储运周期、保障果蔬品质，故近 10 年来的商业投资热

度持续走高。

LED 技术还推动作物品种与栽培环境协同改良。定向育种培育适配人工光环境的新品种，反过来倒逼 LED 光源的参数迭代，这种种质-环境协同优化正是近百年全球农业产能稳步提升的核心动因。依托光环境调控挖掘作物遗传潜力，催生了“环境改良生物（Environmentally Modified Organisms, EMO）”的全新品种^[12]。自然演化或进化过程中，植物形成了多重防御机制用于抵御病虫害侵扰、适应光照与温度波动；紫外照射会诱导作物合成遮光色素，清除高能光子诱发的活性氧、规避 DNA 损伤^[13]。人工可控环境彻底隔绝野外虫害与有害紫外胁迫，作物无需消耗养分合成防御物质，光合产物则可更多流向经济产量的生物量积累。依托定向育种选育植物工厂专用新品种，持续拓宽可控环境农业的科研与产业化空间，最终实现高品质生鲜果蔬在全球各地区的周年高效生产与稳定供给。

表 1 列出 5 类作物对应的光量子成本核算参数取值，以及据此算出的实际生产效率，同时测算各参数在理论上限的潜在生产效率。理想条件需要把环境 CO₂ 浓度提升至大气浓度的 4 倍，从而最大程度地抑制光呼吸消耗，并实现最大化植物生长。芽苗菜的实际生产效率已逼近理论潜力值，其余作物的实测效率普遍偏低。生菜栽培常采用偏高光强（全日照的 15%），致使光子效率 QY 由 0.08 降至 0.07；水培生菜在定植后的栽培密度较小，冠层光能捕获率 Fa 从 0.95 下降至 0.65。番茄生长所需光照强度更高（不低于全日照 25%），QY 进一步降至 0.05，且番茄植株的根、茎、叶无法采收食用，收获指数 HI 仅 0.6 左右。西蓝花、草莓等大宗园艺作物以及水稻、小麦等主粮作物的收获指数 HI 更低。从光子效率与产出投入比来综合评估，目前仅有芽苗菜和生菜能在 LED 植物工厂生产中发挥技术效益，而草莓、西蓝花等园艺作物仍存在技术壁垒，水稻、小麦等主粮作物无法通过经济核算评估。

表 1 LED 植物工厂生产不同类型作物的经济核算

	Fa	QY	CUE	HI	k	E_{dry}	光子成本 (美元/kg 干重)	鲜品市场售价 (美元/kg 鲜重)	含水率 (%)	干品市场售价 (美元/kg 干重)	光子成本占 干品售价比例 (%)
理论上的潜在生产效率	0.95	0.08	0.65	0.9	30	1.33	8				
芽苗菜（芽菜 / 超嫩蔬菜）	0.95	0.08	0.65	0.9	30	1.33	8	35	95	700	1
生菜	0.65	0.07	0.65	0.9	30	0.8	13	12	95	240	5
番茄	0.60	0.05	0.65	0.6	30	0.35	29	8	95	160	18
园艺植物（西蓝花、草莓等）	0.50	0.05	0.65	0.5	30	0.24	42	4	90	40	103
主粮作物（水稻、小麦等）	0.50	0.05	0.65	0.5	30	0.24	42	0.4	3	0.4	10000

5 结论与展望

LED 植物光照技术的农业应用虽受益于其高光效优势,但核心价值已不再局限于节电节能。依托光生理领域的前沿研究成果,LED 植物光照技术助力可控环境农业实现农产品品类拓展、品质升级与本地化就近生产。这类农业新兴应用也暴露出人类对光与生命的生理应答规律的认知尚且有限,而 LED 恰好成为探明光生物学机理的关键研究工具。LED 技术带来的多维可调节特性在不断刷新照明科学的研究命题,衍生出光谱配比、照度标准、色彩感知与偏好、生物钟表达等一系列新课题。这些问题并非 LED 本身的技术缺陷,但由于可调参数大幅增多、新问题接连涌现,给 LED 光源或灯具的方案设计、参数选型与落地应用带来诸多挑战。现阶段,LED 光源及其调控技术的应用潜力已领先各场景用光机理的科研认知水平。想要充分释放 LED 技术的全部应用价值、打造最优植物光照场景,需要在深耕器件底层技术的同时,同步推进全领域 LED 应用基础研究。

LED 技术体系带来的各项农业应用利好基本不存在根本性弊端。LED 光源既能大幅削减电力消耗、降低碳排放,还可促进植物生长发育、推动健康食材就近本地化生产、减轻夜间光污染带来的生态危害^[14]。立足上述发展前景,LED 引领的照明技术变革,其深远意义堪比百年前燃气照明向白炽灯为代表的电气照明的历史性跨越,而在植物工厂领域的 LED 光照技术应用,则成为 21 世纪解决食品、能源、环保等全球性问题的技术关键。

参考文献

- [1] Bugbee B. Toward an optimal spectral quality for plant growth and development: the importance of radiation capture[J]. *Acta Hortic*, 2016, 1134: 1-12.
- [2] Snowden M C, Cope K R, Bugbee B. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: interactions with photon flux[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0163121.
- [3] Hoover W H. The dependence of carbon dioxide assimilation in a higher plant on wavelength of radiation[J]. *Smithson. Misc. Collect*, 1937, 95: 1-13.
- [4] McCree K J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants[J].

Agric. Meteorol, 1971, 9: 191-216.

- [5] Inada K. Action spectra for photosynthesis in higher plants[J]. *Plant Cell Physiol*, 1976, 17: 355-365.
- [6] Downs R J. *Controlled Environments of Plant Research*[M]. New York: Columbia Univ. Press, 1975.
- [7] Kubota C, Eguchi T, Kroggel M. UV-B radiation dose requirement for suppressing intumescence injury on tomato plants[J]. *Sci. Hortic*, 2017, 226: 366-371.
- [8] Raviv M, Antignus Y. UV radiation effects on pathogens and insect pests of greenhouse-grown crops[J]. *Photochem. Photobiol*, 2004, 79: 219-226.
- [9] Went F W. *The Experimental Control of Plant Growth*[M]. New York: Chronica Botanica, 1957.
- [10] Höll J, Lindner S, Walter H, et al. Impact of pulsed UV-B stress exposure on plant performance: How recovery periods stimulate secondary metabolism while reducing adaptive growth attenuation[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42: 801-814.
- [11] Bugbee B, Gupta S D (eds.). *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*[M]. Singapore: Springer, 2017.
- [12] Kozai T, Fujiwara K, Runkle E S (eds.). *LED Lighting for Urban Agriculture*[M]. Singapore: Springer, 2016.
- [13] Carvalho S D, Folta K M. Environmentally modified organisms - expanding genetic potential with light[J]. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 2014, 33: 486-508.
- [14] Murchie E H, Niyogi K K. Manipulation of photoprotection to improve plant photosynthesis[J]. *Plant Physiol*, 2011, 155: 86-92.

译者简介: 杨宇星, 大学在读, 研究方向: 人工智能应用。
贺冬仙, 博士, 教授, 研究方向: 生物环境工程。

原著者简介:

P.M. Pattison, 美国固态照明服务公司, 博士, 研究方向: LED 植物光照测试。

J.Y. Tsao, 美国桑迪亚国家实验室, 博士, 研究方向: 半导体材料。

G.C. Brainard, 美国托马斯杰斐逊大学, 博士, 教授, 研究方向: 光生物节律。

译文节选自: Pattison P M, J Y Tsao, G C Brainard, B Bugbee. LEDs for Photons, Physiology and Food[J]. *Nature*, 2018, 563: 495. <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0706-x>.

[引用信息] 杨宇星, 贺冬仙. LED 光照技术: 从光量子调控到植物生理与作物生产[J]. *农业工程技术*, 2026, 46(18): 21-24.