

## 温室植物生产用人工光源研究进展

周国泉<sup>1</sup>, 徐一清<sup>1</sup>, 付顺华<sup>2</sup>, 吴家森<sup>2</sup>, 郑红平<sup>3</sup>

(1. 浙江林学院 理学院, 浙江 临安 311300, 2. 浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300, 3. 浙江林学院 天目学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 光是植物光合作用的能量源。温室植物体中的叶绿素 a 和叶绿素 b 分别吸收 600 ~ 700 nm 的红光和 400 ~ 520 nm 的蓝光进行光合作用。光同时是植物形态形成的信号源。600 ~ 700 nm 的红光能降低植物体内赤霉素的质量分数, 从而减小节间长度和植株高度; 而 700 ~ 800 nm 的远红光能提高体内赤霉素的质量分数, 从而增加节间长度和植株高度。基于温室植物对光的需求, 分析了目前使用的温室传统人工光源的特性和存在的问题。发光二极管(LED)光源较传统人工光源具有明显的优势, 但受限于单颗提供的光照度有限, 必须组合使用才能满足温室植物正常生长发育对光的需求。尽管 LED 光源已成功应用于组培苗栽培, 但组培室中组培苗的受光特性完全不同于温室作物, 所以针对温室应用的 LED 成套光源有必要进一步研制。参 32

**关键词:** 农业工程; 温室植物; 人工光源; 发光二极管光源; 光合作用; 光形态

**中图分类号:** S625.5 +2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2008)06-0798-05

## Artificial light sources for production of greenhouse plants

ZHOU Guo-quan<sup>1</sup>, XU Yi-qing<sup>1</sup>, FU Shun-hua<sup>2</sup>, WU Jia-sen<sup>2</sup>, ZHENG Hong-ping<sup>3</sup>

(1. School of Sciences, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. School of Tianmu, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Light is the energy source for photosynthesis in plants with chlorophyll a absorbing red light (600 - 700 nm) and chlorophyll b absorbing blue light (400 - 520 nm). Light is also the signal source of photomorphogenesis in plants. Red light can also reduce gibberellin(GA) content, which minishes internode length and plant height; however, far red light (700 - 800 nm) can have the opposite affect and enhance GA. Based on the light demand of greenhouse plants, characteristics and problems with traditional artificial light sources presently used in a greenhouse were analyzed and showed that as an artificial light source, the light emitting diode (LED) had superiority over other artificial light sources. Subjected to limited photometric brightness from an LED, an LED light source can be assembled to satisfy light demands for the natural growth of plants. Using an LED light source, plantlet cultivation has been successfully performed in vitro. As to the illuminative circumstances, however, there is a prodigious discrepancy between a plantlet in vitro and a greenhouse plant. Therefore, LED assembled light sources that are specially applied in the greenhouse should be further developed. [Ch, 32 ref.]

**Key words:** agricultural engineering; greenhouse plant; artificial light source; LED light source; photosynthesis; photomorphogenesis

温室由于能充分利用太阳光和热能, 并可保温加温, 打破了生产季节性和低温等气候条件对生产

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-03-18

基金项目: “十一五”浙江省科学技术计划项目(2007C22064)

作者简介: 周国泉, 教授, 博士后, 从事光学、激光及其在农林上应用的研究。E-mail: zhouguoquan178@sohu.com

的约束，创造出适合于植物生长发育的环境条件，从而获得高产、稳产和高经济效益。温室产业为解决城乡居民菜篮子工程，为推进农业结构调整发挥了重要作用，在现代农业生产中占据了重要地位。在温室的基本环境因素中，气象因素是最重要的。而在气象因素中，光环境是核心条件，是温室气候环境的主导因子。光不仅是植物进行光合作用的能量源，也是光形态形成的信号源。在冬季和早春季节的阴雨天，温室内的光照强度一般只有 2 000 lx，而阴性植物需要 500 ~ 2 500 lx 的光照射；中性植物则需要 2 500 ~ 30 000 lx 的光照射。由于植物在光补偿点以下没有净光合作用的积累，从而导致植物生长受抑制。尤其是在商品化育苗中，光照不足会影响幼苗的健壮生长，从而影响商品苗的品质和经济价值。因此，有必要进行合理的补光以调控温室光环境。温室植物生产中光环境的调控有 2 种方式：一种是通过悬挂反光幕和选择温室覆盖材料的塑料膜或玻璃板等手段调节自然光。虽然自然光具备植物生长发育所需要的光谱和光合成有效光量子流密度，可是由于自然光环境随着地理位置、季节和气象条件的不断变化，它的光合成有效光量子流密度、光质和光照时间难于调控，因此，自然光并不是温室植物生产中最理想的光源。另一种就是把人工光源应用于温室植物栽培的照明、补光和植株形态调节等。

## 1 温室植物对光的需求

### 1.1 光合作用

植物的光吸收过程发生于叶绿体，叶绿素是植物执行光合作用的主体。植物并非利用太阳光的全部成分来进行光合作用。在波长 640 ~ 660 nm 的红光区部分，叶绿素 a (chlorophyll a) 有一个较强的吸收峰；叶绿素 b (chlorophyll b) 在 430 ~ 450 nm 的蓝光部分有一个强吸收峰<sup>[1-2]</sup>。红色光谱是光合作用的能量源，红光促使植物的茎生长。蓝光可以促进气孔开放，有助于外界的二氧化碳进入细胞内，从而提高其光合作用速率，蓝光促使植物的叶生长。从植物的光合生理来说，光反应过程分为光反应与暗反应 2 个阶段，叶绿素 a 与叶绿素 b 在接受光照射后，受光子激发而产生电子跃迁，形成电流，这些能量为光合作用提供了大量的三磷酸腺苷(ATP)能量，而这种把二氧化碳和水合成有机物的过程却是在暗反应条件下形成。因此，任何植物都需要恰当的暗期。人工补光的效果除光照强度外，还取决于补光光源的辐射光谱中能被植物叶片有效吸收而进行光合作用的生理辐射特性<sup>[3]</sup>。不同的补光光源，其生理辐射特性不同。在光源的可见光谱 400 ~ 760 nm 中，植物吸收的光能约占生理辐射光能的 60% ~ 65%。其中，主要是波长为 600 ~ 700 nm 的红光辐射，植物吸收的光能约占生理辐射光能的 55%。红光的光合作用最强，用富含红光的光源补光，会引起植物较早开花结实，可促使植物体内干物质的积累，促使鳞茎、块根、叶球以及其他植物器官的形成。其次，是波长为 400 ~ 520 nm 的蓝光辐射，吸收的光能约占生理辐射光能的 8%。用富含蓝光的光源进行人工补光，可延迟开花，使以获取营养器官为目的的植物充分生长。适当的红光(600 ~ 700 nm)与蓝光(400 ~ 520 nm)光通量的比即 R/B 比才能保证培育出形态健全的植物。

### 1.2 光形态调节

温室植物节间长度和植株高度的调节是设施园艺生产中的一项重要技术。光谱中以 660 nm 为中心波长的红光和以 730 nm 为中心波长的远红光两者光通量之比即 R/FR 比对植株高度调节具有重要影响<sup>[4]</sup>。600 ~ 700 nm 的红光能降低植物体内赤霉素的质量分数，从而减小节间长度和植株高度；而 700 ~ 800 nm 的远红光其作用恰好相反，能提高植物体内赤霉素的质量分数，从而增加节间长度和植株高度。根据这一原理，可以通过人工控制温室植物生长环境中的红光或远红光的量，改变 R/FR 的比值来调节植株的形态，R/FR 比已成为控制植株形态的一个重要评价参数。R/FR 比值明显影响马铃薯 *Solanum tuberosum* 组培苗的形态，增加远红光的量，明显促进马铃薯组培苗茎芽的伸长<sup>[5]</sup>。除此以外，R/FR 比还对腋芽分化<sup>[6]</sup>、叶绿素<sup>[7]</sup>、气孔指数<sup>[8]</sup>和叶面积<sup>[9]</sup>等产生不同程度的影响。

## 2 目前主要使用的温室人工光源及其不足

在温室植物生产中普遍使用的人工光源有白炽灯、荧光灯、金属卤化物灯、高压钠灯和日光色镜

灯<sup>[10]</sup>。最早在温室植物生产中应用的是白炽灯,白炽灯提供较少的蓝色光谱,但远红色光较多,使得R/FR的比值变小,因而植株比正常光源下长得高。单位栽培面积上配置白炽灯的功率数为0.50~1.20 kW·m<sup>-2</sup>。因其辐射的大量红外线要转化为热能,为避免植株过热,白炽灯的安装高度应距离植株30~40 cm以上。除白炽灯外,其他人工光源的R/FR比值都比自然光的大<sup>[11]</sup>。荧光灯提供较多的蓝色、黄色和绿色光谱,且比白炽灯节能3~4倍,但红色光谱成分较少,远红色光谱比例很低,因而R/FR的比值普遍偏高,适用于组织培养和种苗生产。由于生理效应要比白炽灯高得多,单位栽培面积上配置的功率数比白炽灯低,如低压日光荧光灯为0.38~0.91 kW·m<sup>-2</sup>。荧光灯的安装高度应距离植株5~10 cm以上,沿植株行间安置。金属卤化物灯的青色成分多且接近于自然光光谱,因金属卤化物的不同其R/FR的比值为1.2~3.5,适用于蓝色光的补光处理。使用最普遍的是高压钠灯。从光谱特征来看,高压钠灯含有较多的红橙光和较少的蓝绿光,一般型和显色改进型的R/FR比值分别为4.4和3.6<sup>[12]</sup>,主要用于光合作用补光。对于管状钠灯,单位栽培面积上配置的功率数为0.05~0.06 kW·m<sup>-2</sup>,安装高度与植株的垂直距离保持100 cm较合适,布置在作物行间的正上方。钠灯为仿日光色,在相同的光照强度下,对于光合作用的促进效果,略低于高压钠灯。单位栽培面积上配置的功率数为0.068~0.070 kW·m<sup>-2</sup>,安装高度与植株的垂直距离保持120 cm,布置在作物的上方。

由于以上这些人工光源发出复合光,其R/B比和R/FR比无法调控。其次,虽然高压钠灯和金属卤化物灯的功率大,发光效率好,但必须与植物栽培面保持100~200 cm的距离才能基本保证植物栽培面的光合成有效光量子流密度分布均匀,由此造成光利用率偏低。最后,这些人工光源是热光源,存在着表面温度较高的缺点,导致温室空调冷却运行成本增加。即使是在冬天,加热往往由其他更经济有效的设备实现。

### 3 LED光源及其优势

发光二极管(LED)从1968年第一批产品问世至今,其技术飞速发展<sup>[13-14]</sup>,不仅亮度平均每年提高20倍,而且价格也降低为最初的1/100,特别是近3 a来下降了近50%。LED可提供各种波长的单色光,常用的有发光谱峰450 nm的蓝光LED,660 nm的红光LED和735 nm的远红光LED,且光谱宽度小于±30 nm。上述发光波长正好与植物光合作用和光形态形成的光谱范围相匹配。普通亮度的LED发光强度小于10 mcd;高亮度的LED发光强度介于10~100 mcd;超高亮度的LED发光强度大于100 mcd。超高亮度高指向性红光LED的最小/一般亮度为22 000/25 000 mcd;超高亮度高指向性蓝光LED的最小/一般亮度为5 000/7 000 mcd。LED的发光强度(法向光强)是表征发光器件发光强弱的重要性能。当偏离正法向不同角度时,光强也随之变化。高指向性的LED其发光强度降低到中心强度的一半时所对应的角度即半值角为5°~20°;标准型的半值角为20°~45°。大于LED的视角,则光强值为零。水平面上任一点与LED的连线与垂直方向所成的角度小于LED的视角时,可依角度-强度回归式计算此角度对应的光强度。角度-强度回归式可由厂家提供的型号参数资料中求得,也可用LED光强角度测试仪测得后进行回归得到。其次,距离LED一定距离的水平面上每一点光照强度值还需依据点光源之倒平方法则。因此,最小/一般亮度为22 000/25 000 mcd的红光LED,其正下方2 cm处的光照强度为58 750 lx,10 cm处的为2 350 lx。而最小/一般亮度5 000/7 000 mcd的蓝光LED,正下方2 cm处的光照强度为15 000 lx,10 cm处的为600 lx。而一般植物2 000 lx下没有净光合作用,再者要达到植物栽培面的光合成有效光量子流密度分布尽可能均匀,选择距离10 cm较合适。由此可见,单颗超高亮度LED还未能提供足够的光照强度以供温室植物正常生长,但多颗LED通过组装设计就能满足温室植物的光需求。

早在1991年Bula等<sup>[15-16]</sup>使用红光LED配上蓝光荧光灯作为组培光源,成功栽培了生菜 *Lettuce sativa* 和天竺葵 *Pelargonium graveolens*。1996年Okamoto等<sup>[17]</sup>使用超高亮度红光LED与蓝光LED,在蓝光与红光光量子数之比为1:2下可正常培育蔬菜。应用LED已成功栽培的组培苗品种还有菠菜 *Spinacia oleracea*<sup>[18]</sup>, 胡椒 *Piper nigrum*<sup>[19]</sup>, 小麦 *Triticum aestivum*<sup>[20-21]</sup>, 草莓 *Fragaria ananassa*<sup>[22]</sup>, 虎头兰 *Cymbidium hybridus*<sup>[23]</sup>, 蝴蝶兰 *Phalaenopsis aphrodite*<sup>[24]</sup>, 香蕉 *Musa sapientum*<sup>[25]</sup> 和马铃薯<sup>[26-28]</sup>等。

在与使用日光灯管的栽培方式比较后,发现 LED 作光源的组培苗生长数月后在湿质量、干质量、叶片数、叶宽、根数和根长上并无差异,证实环控室中使用 LED 为栽培光源来栽培组培苗是可行的,与其他光源栽培下之苗株在出瓶后的后续生长上亦无发现明显差异。2004 年 Tamulaitis 等<sup>[29-30]</sup>开始在温室中运用高功率 LED 栽培植物,使用 640 nm 的红光 LED,660 nm 的红光 LED,455 nm 的蓝光 LED 和 735 nm 的远红光 LED 作温室人工光源成功栽培了萝卜 *Raphanus sativus* 和生菜,但 4 种 LED 没有组合在一起,布置在作物上方的不同位置,LED 的高指向性致使照明区域内的 R/B 和 R/FR 不均匀。

由于 LED 光源安装时可距离植株较近,加上它的光效比荧光灯还要高 2 倍,因此,单位栽培面积上需配置的功率数较低。作为温室植物生产用的人工光源,LED 光源具有以下优点:①体积小,强固,设施小型化,可用于多层栽培立体组合系统;②由于是冷光源,可实现近距离照明,可降低降温成本;③脉冲间歇照射,使植物有足够的暗期合成有机物,从而促进植物生长;④使用期间衰减少,平均寿命长达 1 万 h,使用寿命达 5~10 a;⑤亮度高,能耗低,耗电量低,仅为白炽灯的 1/10;⑥可选择按特定波长,具有针对性,单一波长的 LED 要比波段宽的太阳光更能促进光合作用;⑦使用直流电,可通过调频与调工作比进一步省电。因此,使用 LED 作植物生产的人工光源,只要通过调节红色、蓝色和远红色光源的数量,即可实现 R/B 比和 R/FR 比的调节,从而促进光合作用和控制植株形态。

#### 4 结论

温室人工补光技术的应用对于推进温室产业的发展有着十分重要的作用。与广阔的光谱范围的其他人工光源相比,发射单色光的 LED 光源目前还存在着难以应对更多种类作物的问题。此外,尽管最小/一般亮度为 22 000/25 000 mcd 的红光 LED 价格为 0.8 元·颗<sup>-1</sup>;最小/一般亮度 5 000/7 000 mcd 的蓝光 LED 价格为 0.28 元·颗<sup>-1</sup>,原先限制其运用的价格障碍已不再存在,但是作为植物生长光源应用,LED 光源受制于其单颗提供的光照度有限,必须组合使用才能达到理想的光照强度。而红光 LED、蓝光 LED 和远红光 LED 的驱动电压是不同的,必须设计 3 套电路给其供电。尽管 LED 光源已成功应用于组培苗栽培,但组培室中组培苗的受光特性完全不同于温室作物<sup>[31-32]</sup>,并且组培苗对光的需求相对较低,所以针对温室应用的 LED 成套光源还有待于进一步加快研制。由于较传统人工光源具有明显的优势,LED 光源部分替代甚至完全替代传统人工光源应用于温室补光将为期不远。

#### 参考文献:

- [1] 邵玲. 光对植物光合作用的调节[J]. 西江大学学报, 1999, 18 (3): 72 - 76.
- [2] 潘瑞炽, 董愚德. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 宋亚英, 陆生海. 温室人工补光技术及光源特性与应用研究[J]. 农村实用工程技术: 温室园艺, 2005 (1): 28 - 29.
- [4] 刘再亮, 马承伟, 杨其长. 设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20 (1): 270 - 273.
- [5] MIYASHITA Y, KITAYA Y, KOZAI T. Effects of red and far-red light on the growth and morphology of photo plantlets in vitro: using light emitting diode as a light source for micropropagation[J]. *ISHS Acta Horti*, 1995, 393: 189 - 194.
- [6] ROBIN C, HAYM J M, NEWTON P C D, et al. Effect of light quality (red: far-red ratio) at the apical bud of the main stolon on morphogenesis of trifolium repens[J]. *L Ann Bot*, 1994, 74 (2): 119 - 123.
- [7] HERAUT-BRON V, ROBIN C, VARLET-GRANCHER C, et al. Light quality (red: far-red ratio): does it affect photosynthetic activity, net CO<sub>2</sub> assimilation, and morphology of young white clover leaves?[J]. *Cana J Bot*, 1999, 77: 1 425 - 1 431.
- [8] SCHOCH P G, NAVARRO M, TEISSON C, et al. The significance of microclimatic conditions for in vitro cultures[J]. *Fruits Paris*, 1988, 43 (10): 579 - 583.
- [9] TAKAICHI M, SHIMAJI H, HIGASHIDE T. Effect of red/far-red photo flux ratio of solar radiation on growth of fruit vegetable seedlings [J]. *Acta Horti*, 1998, 3: 147 - 156.
- [10] 胡永光, 李萍萍, 邓庆安, 等. 温室补光效果的研究及补光光源配置设计[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版, 2001,

- 22 (3): 37 – 40.
- [11] 周启芳, 王尔镇. 高效园艺设施与园艺照明光源[J]. 长江蔬菜, 1999 (1): 1 – 4.
- [12] 王尔镇, 周启芳. 园艺照明技术的应用和发展[J]. 照明工程, 1996, 7 (1): 28 – 35.
- [13] 申屠伟进, 胡飞, 韩彦军, 等. GaN 基发光二极管芯片光提取效率的研究[J]. 光电子·激光, 2005, 16 (4): 385 – 389.
- [14] 钟建, 陈文彬, 杨刚, 等. 发光层掺杂蓝色 OLED 的光电性能研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18 (4): 432 – 435.
- [15] BULA R J, MORROW R C, TIBBITS T W, *et al.* Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. *Hortic Sci*, 1991, 26 (2): 203 – 205.
- [16] APPELGREN M. Effects of light quality on stem elongation of pelargonium in vitro[J]. *Sci Hortic*, 1991, 45: 345 – 351.
- [17] OKAMOTO K, YANAGI T, LAKITA S. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source[J]. *Acta Hortic*, 1996, 440: 111 – 116.
- [18] YANAGI T, OKAMOTO K. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth [J]. *Acta Hortic*, 1994, 418: 223 – 228.
- [19] BROWN C S, SCHUERGER A C, SAGER J C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting[J]. *J Amer Soc Hortic Sci*, 1995, 120: 808 – 813.
- [20] TRIPATHY B C, BROWN C S. Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light[J]. *Plant Physiol*, 1995, 107: 407 – 411.
- [21] 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]. *J Exp Bot*, 1997, 48: 1 407 – 1 413.
- [22] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, *et al.* Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under super-bright red and blue light-emitting diodes (LEDs) [J]. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2003, 73: 43 – 52.
- [23] TANAKA M, TAKAMURA T, WATANABE H, *et al.* In vitro growth of Cymbidium plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs)[J]. *J Hortic Sci Biotech*, 1998, 73 (1): 39 – 44.
- [24] 饶瑞佶, 方炜, 蔡田龙. 超高亮度红、蓝光 LED 应用于蝴蝶兰组培苗栽培之研究[J]. 农业机械学报, 2003, 12(4): 93 – 100.
- [25] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, *et al.* Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode (LED)[J]. *Acta Hortic*, 2002, 575: 117 – 124.
- [26] MIYASHITA Y, KIMURA T, KITAYA Y, *et al.* Effects of red light on the growth and morphology of photo plantlets in vitro: using light emitting diodes (LEDs) as light source for micropropagation[J]. *Acta Hortic*, 1994, 418: 169 – 173.
- [27] JAO R C, FANG W. Effects of frequency and duty ratio on the growth of potato plantlets in vitro using light emitting diodes[J]. *Hortic Sci*, 2004, 39: 375 – 379.
- [28] JAO R C, FANG W. Growth of potato plantlets in vitro is different when provided concurrent versus alternating blue and red light photoperiods[J]. *Hortic Sci*, 2004, 39: 380 – 382.
- [29] TAMULAITIS G, DUCHOVSKIS P, BLIZNIKAS Z, *et al.* High-power LEDs for plant cultivation[J]. *Proc SPIE*, 2004, 5 530: 165 – 173.
- [30] TAMULAITIS G, DUCHOVSKIS P, BLIZNIKAS Z, *et al.* High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation[J]. *J Physics D Appl Phys*, 2005, 38: 3 182 – 3 187.
- [31] 徐志刚, 丁为民, 崔瑾, 等. 组培室补光光源应用分析与评价[J]. 农业机械学报, 2001, 32 (5): 62 – 64.
- [32] 吴沿友, 刘建, 胡永光, 等. 发光二极管作为组培光源的特性分析与应用[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28 (2): 93 – 96.