

文章编号: 1000-7032(2018)10-1466-12

## 高均匀度 LED 植物光源的设计

靳肖林<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>2\*</sup>, 马丙戌<sup>1</sup>, 付 萌<sup>1</sup>, 蔡明兴<sup>1</sup>, 左 欣<sup>1</sup>, 康丽娟<sup>3\*</sup>

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 华南师范大学 美术学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 针对现有植物灯均匀度差的问题,通过在R(红)、G(绿)、B(蓝)三色LED芯片上加装导光管和光纤透镜,实现了高均匀度的出光效果,通过调节导光管和光纤的尺寸获得了达90%的混色、光谱以及光量子通量密度(PPFD)的均匀性。进一步对光源的热学性能进行表征发现光纤透镜的增加有利于减少光源正面的热量,并且基于光量子学照明参数对该灯的均匀度进行评价,并进一步提出有效光能利用率来更加科学的表征光源性能。结果表明,混色均匀性与PPFD均匀性可达90%,有效光能利用率可达到43%。进一步将该灯用于鲜切玫瑰花保鲜,并通过脉冲宽度调制技术(PWM)实现了光谱的动态可调,通过对玫瑰花鲜重日失重率以及抗氧化物质如黄酮素等物质含量变化的测量,探究鲜切玫瑰花保鲜的最佳光照条件。实验结果表明,最有利于鲜切玫瑰保鲜的光质条件和光照周期为R+G,6 h/24 h。

**关键词:** 植物光源; 现代农业; LED; 光学设计; 玫瑰花保鲜

中图分类号: O432; O439 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183910.1466

## Design of High Uniformity LED Plant Lamp

JIN Xiao-lin<sup>1</sup>, WEN Shang-sheng<sup>2\*</sup>, MA Bing-xu<sup>1</sup>, FU Meng<sup>1</sup>, CAI Ming-xing<sup>1</sup>, ZUO Xin<sup>1</sup>, KANG Li-juan<sup>3\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Fine Arts, South China Normal University, Guangzhou 510641, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: shshwen@scut.edu.cn; 12558995@qq.com

**Abstract:** Aiming at the problem of poor uniformity of the existing plant lights, a high uniformity light was designed by installing light pipes and fiber lenses on R (red), G (green), and B (blue) three-color LED chips. By adjusting the size of the light pipe and the optical fiber, the uniformity of spectra, color mixing and photosynthetic photon flux density (PPFD) reached 90%. The thermal properties character of the light source were measured further. It was found that the increase of the fiber lens favored and reduced the heat at the front of the light source, and the uniformity of the lamp was evaluated based on the light quantum illumination parameters. Besides, effective light energy utilization was proposed to characterize light source performance more scientifically. The results show that the color uniformity and PPFD uniformity can reach 90%, and the effective light energy utilization can reach 43%. The lamp is further used for freshness preservation of fresh cut roses, pulse width modulation technology (PWM) is used to achieve dynamic adjustment of the spectrum, the weight loss rate of rose fresh weight and the content change of antioxidant substances such as

收稿日期: 2018-03-12; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 广东省科技计划(2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004); 广东省应用型科技研发专项(2015B010134001); 广州市科技计划(201604040004, 201604016010); 广东省扬帆计划(2015YT02C093); 中山市科技计划(2016A1009, 2017C1011)资助项目 Supported by Guangdong Science and Technology Project(2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004); Guangdong Applied Science and Technology Research and Development Project(2015B010134001); Key Projects of Guangzhou Science and Technology Program(201604040004, 201604016010); Guangdong Yangfan Plans to Introduce Special Team of Innovation and Entrepreneurship(2015YT02C093); Science and Technology Plan of Zhong Shan(2016A1009, 2017C1011)

flavone and other substances were investigated to explore the best light conditions for fresh-cut roses. The experimental results show that the light conditions and light duration that are most conducive to freshness preservation of fresh-cut roses are R + G and 6 h/24 h.

**Key words:** plant light source; modern agriculture; LED; optical design; freshness preservation

## 1 引 言

人口的急剧增加与耕地面积的日益减少为植物工厂的兴起提供了条件。植物工厂是利用高科技打造的现代农业可持续发展的生产系统<sup>[1]</sup>, 通过控制环境如温度、湿度、光照、无机物与有机物的配比来为植物生长提供必要的条件, 从而达到缩短植物生长周期、提高生产效率的目的, 是未来农业发展的方向。光照环境是植物生长的关键要素之一, 可以直接影响植物生长发育过程和化学物质积累<sup>[2-4]</sup>, 近年来, 荧光粉在 LED 植物照明材料及器件上的应用是一个研究热点<sup>[5-7]</sup>, 张运杰<sup>[8]</sup>探究了硫化物体系、镓酸盐体系几种红色荧光材料在植物照明 LED 上的应用, 发现材料的发光光谱与植物光合作用光谱相匹配, 表明荧光材料在 LED 照明领域有巨大潜能; 此外, 光照在植物保鲜方面应用也越加广泛<sup>[9]</sup>, 这使得植物照明成为研究热点之一, 相应地, 开发性能优良的植物照明光源显得尤为重要。

LED 作为最近几年兴起的第三代照明光源, 在植物照明上具有三大优势。第一, 植物进行光合作用吸收的光主要是波长为 610 ~ 720 nm 的红橙光以及波长为 400 ~ 510 nm 的蓝紫光, LED 可以发出植物所需要的单色光光谱<sup>[10-12]</sup>。在植物保鲜方面, 刘然然<sup>[13]</sup>实验证明, 绿光可以很好地保护植物叶绿素和维生素 C 不被破坏, 保持植物的感官品质与营养成分, 有效减缓植物衰老。阎瑞香<sup>[14]</sup>的研究表明, 白光和绿光可以有效保持芦荟外观特质, 防止蔬菜的褪绿黄化。第二, LED 光谱具有可调性, 可以根据不同植物在不同生长阶段对光的需求, 调节 LED 的光质比, 获得复合光谱<sup>[15]</sup>, 实现精准给光。第三, LED 体积小, 节能, 光电转化效率高, 可以紧凑排列, 提高空间利用率。

但是现有的 LED 植物照明灯有一定的缺陷, 如灯具中一般将红蓝灯珠进行阵列排布, 但没有进行二次光学设计, 由于光线没有足够的距离进

行耦合, 低光照均匀性会导致近距离受照面出现红蓝光斑, 导致同一批次的植物的生长光环境不一, 影响植物的均衡成长。针对这一缺陷, 本文提出了一种新的灯具设计方案, 在 LED 芯片上方加入导光管与光纤透镜的组合结构, 通过调节导光管长度以及光纤透镜的直径获得最佳的光学结构, 研究过程中使用 SPIC-200 光谱彩色照度计对光源进行表征, 通过对光谱、光量子通量密度和色度参量的测试, 计算出混光、混色以及光谱均匀度, 从提高均匀性为出发点找出最佳光学结构。进一步, 为了更加有效科学地表征植物光源的照明效果, 引入有效光能利用率这一新的评价指标, 其核心思想是将用于植物生长的光能与光源发出的总的光能的比来表示灯具的光学设计从能源利用的角度来讲是否合理。最后研究所得的光源被进一步应用于玫瑰花的保鲜中, 进一步验证灯具的先进性并为进一步的实地研究提供科学的参考依据。目前的保鲜实验只是关注单色绿光或红蓝光对果蔬保鲜的影响, 少有将光质可调的照明灯应用到植物保鲜领域。本文通过脉冲宽度调光技术(PWM 调光技术)调节灯具的发光光谱, 研究不同的光谱、光质比对于玫瑰花保鲜的影响。本文从光源的光、电、热性能入手对科学的植物照明灯具进行了全面科学的研究, 并进一步对于植物光源的评价指标提出创新性的评价理念和指标, 并在最后针对光源对玫瑰花保鲜的问题从应用的层面做了进一步研究。

## 2 灯具设计

### 2.1 整灯模型介绍

如图 1 所示, 灯具由散热片、RGB 三色 COB LED 芯片、导光管、玻璃光纤透镜构成。最终得到实际灯具及其照明效果如图 2(a) 所示, 而市面上常见的借鉴了射灯结构的植物照明灯的照明效果如图 2(b) 所示, 相比之下本研究提出的光源设计方案大幅度提高了光源的均匀度。在电源驱动方面, 使用 MPS3003S 可调式直流稳压电源, 结合

脉冲宽度调制技术 (Pulse-width modulation, PWM)<sup>[16-18]</sup>, 实现光谱可控; 此外, 实验测量了灯具工作时的温度, 从热学角度评价灯具的散热性能。



图 1 整灯模型

Fig. 1 Whole lamp model



图 2 植物灯对比图。(a) 实验所用灯具; (b) 传统 LED 植物照明灯。

Fig. 2 Comparison of plant lamps. (a) Plant light used in experiments. (b) Traditional LED plant light.

## 2.2 灯具设计分析

多色 LED 可以不使用混光元件直接混合, 但当混光距离过短时, 会出现不同颜色的亮斑和暗斑, 如图 3(a) 所示; 通常会在灯具结构中加入毛玻璃和扩散板等传统混光元件来增强混光效果, 使光线充分混合均匀出射, 但这类光学器件会使光束发散, 如图 3(b), 不利于光能被植物充分吸收利用。为解决这一问题, 本研究提出使用导光管与光纤透镜, 导光管和透镜可以在改善植物灯混光效果的同时约束光出射角, 光线从 cob 芯片射出后, 经过导光管和光纤透镜的反射和透射, 可以小角度地准直出射, 如图 3(c) 所示。

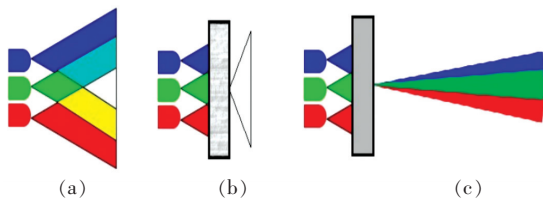


图 3 多色 LED 的混光模型图。(a) 直接混光; (b) 使用传统的混合元件; (c) 使用导光管与光纤透镜。

Fig. 3 Mixed light model of multi-color LED. (a) Mixing directly. (b) Using conventional mixing elements. (c) Using light pipes and fiber optics.

## 3 研究参数

植物对光线感知能力强, 在不同的光质与光强下植物的生理活动大不相同, 这就要求植物照明灯应具有高的照度均匀度与混色均匀度, 以此为依据, 本实验主要探究灯具均匀度。目前评价灯具照明效果多用基于人眼视见函数的光度学量, 如光通量  $P_v$  与光照度  $E_v$ , 但因为人的眼睛和植物对光的敏感度在不同波长处达到峰值, 所以光度学参数  $P_v$ 、 $E_v$  等不再适用于评价植物照明灯, 应使用更加符合植物照明的光量子学参数<sup>[19-20]</sup>来表征植物灯。光量子学中与光度学中的照度相对应、用来表征植物灯照明效果的参数是光量子通量密度 (Photosynthetic photon flux density, PPFD), 即受照面单位时间内单位面积所接收到的光子数目, 单位是  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在植物学领域, 光合有效辐照度  $E_{\text{PRA}}$  可表示为:

$$E_{\text{PRA}} = \int_{400}^{700} E_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中  $E_e(\lambda)$  表示光谱辐照度,  $\lambda$  表示波长。

根据光子理论, 光子能量公式为:

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

公式(1)和(2)结合可以得到照度与 PPFD 之间的换算公式, 且因为光子数量级过大, 所以采用摩尔单位计数, 可得光量子通量密度计算公式:

$$K = \int_{400}^{700} \frac{E_e(\lambda) \lambda d\lambda}{n_A hc}, \quad (3)$$

其中,  $K$  代表 PPFD,  $h$  表示普朗克常量,  $c$  表示光速,  $n_A$  表示阿伏伽德罗常数。

### 3.1 光谱差异性

分析时, 光谱差异性定义为样品点的 RGB 三色光谱的差异, 用  $\Delta S_R S_G S_B$  来表示, 我们用公式(4)计算  $\Delta S_R S_G S_B$ :

$$\Delta S_R S_G S_B = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(S_{R_i} - S_{R_i'})^2 + (S_{G_i} - S_{G_i'})^2 + (S_{B_i} - S_{B_i'})^2]} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

其中  $\Delta S_R S_G S_B$  表示光谱均方差,  $N$  表示样品点数目,  $S_{R_i}$ 、 $S_{G_i}$ 、 $S_{B_i}$  分别表示样品点红绿蓝三色光谱值,  $S_{R_i'}$ 、 $S_{G_i'}$ 、 $S_{B_i'}$  分别表示样品点的红绿蓝三色的绝对光谱值,  $S_{R_i}$ 、 $S_{G_i}$ 、 $S_{B_i}$  越大表示光谱差异性越大。

由于公式(4)计算所得均方差较小,难以比较,通常我们用公式(5)来对光谱均方差进行归一化处理,用公式(5)表示光谱均匀性:

$$U = \frac{1}{1 + k \cdot \Delta\lambda_R \lambda_G \lambda_B} [100\%], \quad (5)$$

其中  $k$  是一个常数。在本实验中,  $k$  的值设置为使光谱均匀度最大值等于 90%。

### 3.2 混色均匀性

植物对不同的光谱反应灵敏且响应差异性大,本实验使用 RGB 三色光源进行三色混光,混色均匀性直接体现了光谱分布的均匀性,是本实验的重要测量参数之一。我们将混色均匀度定义为 CIE1976 色坐标的差异,用  $\Delta uv$  表示色坐标差异性,使用公式(6)来计算色坐标差异:

$$\Delta uv = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(u_i - u_{avg})^2 + (v_i - v_{avg})^2]}, \quad (6)$$

其中  $u_i, v_i$  是 CIE 1976 色彩系统中测量点的色坐标,  $N$  是受照面上的采样点数。采样点的均方差值越小,颜色坐标差异越小,即混色均匀性越高。

公式(6)计算的均方差值通常较小,因此我们使用公式(7)对  $\Delta uv$  进行归一化处理,用  $U_{color}$  表示混色均匀度:

$$U_{color} = \frac{1}{1 + k \cdot \Delta uv} [100\%], \quad (7)$$

其中  $k$  是一个常数。在本实验中,  $k$  的值设置为使混色均匀度最大值等于 90%。

### 3.3 PPFD 均匀度

光照强度直接影响着植物光合作用与呼吸作用,为了使同一批植株均衡生长,植物灯必须实现均匀给光。为了衡量受照面光的强弱分布,探究植物灯能否实现均匀给光,我们测量了受照面上的 PPFd 并使用公式(8)计算其均匀性:

$$\Delta K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(K_i - K_{arg})^2]}, \quad (8)$$

其中  $\Delta K$  表示受照面的光量子通量密度均方差,均方差越小表示光强分布越均匀,和混色均匀度类似,我们同样对  $\Delta K$  进行归一化处理,使用  $\alpha$  来表示 PPFd 均匀度:

$$\alpha = \frac{1}{1 + k \cdot \Delta K} [100\%], \quad (9)$$

其中  $k$  是一个常数。在本实验中,  $k$  的值设置为使 PPFd 均匀度最大值等于 90%。

### 3.4 有效光能利用率

对于大多数植物的光合作用<sup>[21]</sup>,如图 4(a)曲线所示, A 点被定义为光补偿点, B 点被定义为光饱和点,只有植物所接收光照的 PPFd 大于 A 点对应的 PPFd 时,植物才能进行有效的光合作用,当光照 PPFd 达到 B 点对应的 PPFd 值时,植物光合作用才能达到最大速率。表 1 给出了一些植物光补偿点与光饱和点对应的 PPFd 值。

表 1 植物光饱和点与光补偿点对应 PPFd

Tab.1 PPFd of light saturation point and light compensation point

植物种类	光补偿点/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光饱和点/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	植物种类	光补偿点/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光饱和点/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
西红柿	53.1	1 985	多肉景天科	55	617
黄瓜	51	1 421	多肉番杏科	58	719
茄子	50	1 400	多肉百合科	50	523
生菜	59.6	1 320	人参	49	506
草莓	43	320	碗莲	55	657
葡萄	55	484	食虫草	50	526
月季	52	550	室内观叶植物	44	376
兰科	60	620	非洲堇	45	470

从表 1 中可以看出,大多数植物光补偿点对应的 PPFd 值为  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,本次实验中将有效光能利用率定义为  $\eta$ 。  $\eta$  计算方法如图 4(b)所示,测量受照面 PPFd 最大值,当

PPFD 下降到最大值的 5% 时,标记做圆,测得圆半径为  $R_b$ ,在受照面画出  $K = 50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时对应的圆,测得圆半径为  $R_a$ ,  $\eta$  用公式(10)来计算:



$$\eta = \frac{\pi R_a^2}{\pi R_b^2} \quad (10)$$

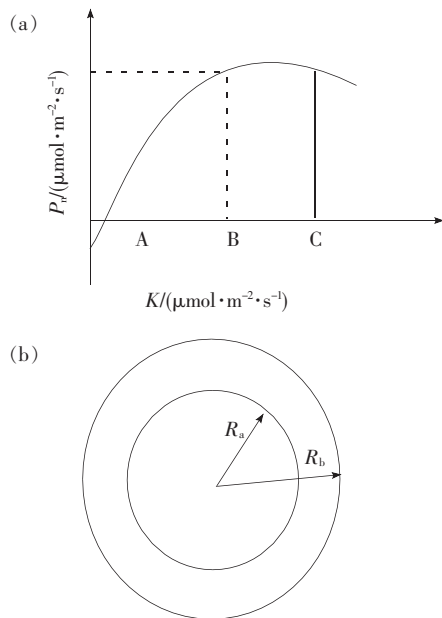


图 4 (a) 植物光合速率曲线; (b) 有效光能利用率说明图。

Fig. 4 (a) Plant photosynthetic rate curve. (b) Description of effective light energy utilization rate.

## 4 实验设计和分析

实验使用的光源为台湾晶元公司生产的 cob RGB LED, 其中封装有 9 个芯片, 由红、绿、蓝  $3 \times 3$  矩阵构成, 且红绿蓝芯片可以独立控制, 以达到光质比可调的目的, 方便研究不同光谱组成对植物生长的影响。实验初用三路电流分别驱动 B、G、B 3 种颜色芯片, 使单色芯片在一定距离的光接收面上可以产生相同 PPDF, 记录不同颜色的驱动电流和电压如表 2 所示。

表 2 芯片对应的驱动电流和电压

Tab. 2 Driving current and voltage of three chips

参数	R	G	B
驱动电流/A	0.34	0.22	0.35
驱动电压/V	7.7	9.9	9.6

在之后的每次测量中, 保持各芯片对应的驱动电流和电压不变。我们在实验中使用具有圆形横截面的导光管和光纤透镜, 其中导光管的长度为  $3.5 \sim 5.5$  cm 不等, 透镜的直径为 1.9 cm 和 2.7 cm。我们组合不同导光管与光纤透镜, 采用 37 点采样法<sup>[22]</sup> 大照度值的 5% 时画出最大圆, 当

$K = 50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时画出最小圆, 以大圆半径和小圆半径的平均值为中间圆的半径, 如图 5(a) 所示; 使用如图 5(b) 所示的 SPIC-200 光谱彩色照度计测量受照面的照度和光谱, 根据测量所得数据计算出每一组的混光均匀性与混色均匀性, 分析不同光学结构和光传输距离对植物灯均匀性以及有效光能利用率的影响, 根据数据对比可找到出光效果最好的光学结构。

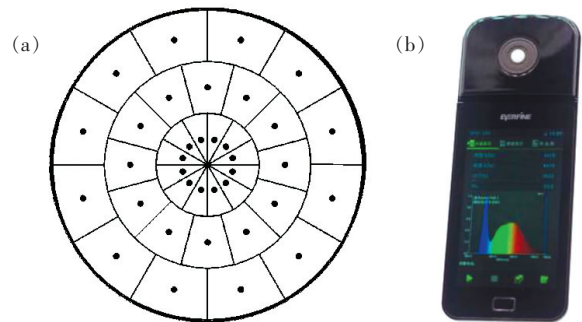


图 5 (a) 37 点采样法示意图; (b) 光谱照度计。

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the 37-point sampling method. (b) Spectral illuminance meter.

在测得最佳光学结构后, 以最佳光学结构为基础, 调节光质比为 R + G + B、G + B、R + G、G, 光谱图如下文图 12 所示, 以自然光照射为对照组, 设置光照周期分别为 6, 9, 12 h, 通过测定在不同光处理下玫瑰花采后日失重率以及抗氧化物质的含量变化, 探究最适合玫瑰花保鲜的光条件。

### 4.1 配光曲线测量

LED 芯片的长度为 2.9 cm, 所以我们以 29 cm 作为测量区域的直径, 调节导光管长度依次为 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 cm, 与不同直径的光纤透镜组合, 每隔  $5^\circ$  测量一个点的照度, 如图 6 所示。通过对测得的照度进行归一化来获得光强分布曲线, 结果如图 7 所示。

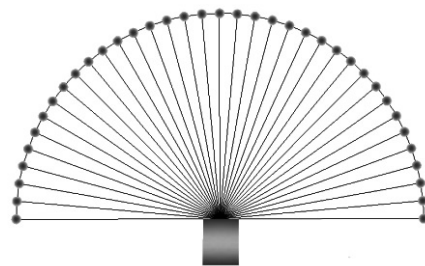


图 6 配光曲线测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test method for light distribution curve measurement

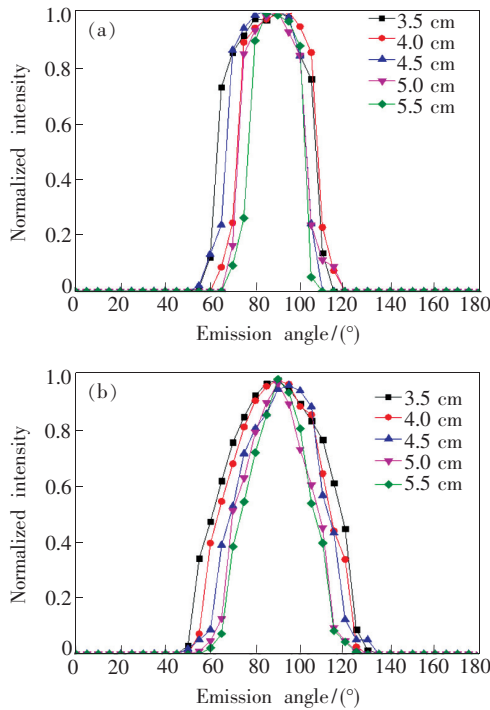


图 7 (a) 2.7 cm 透镜对应的光强分布曲线;(b)1.9 cm 透镜对应的光强分布曲线。

Fig.7 (a) Light intensity distribution curve corresponding to 2.7 cm fiber lens. (b) Light intensity distribution curve corresponding to 1.9 cm fiber lens.

图 7 显示,使用  $D = 2.7$  cm 光纤透镜,灯的光发射角度较小,照明表面上的斑点更小更收敛。而  $D = 1.9$  cm 光纤透镜的灯光发射角度较大,光能较均匀地分布在光接收面。此外,随着导光管长度的增加,发射角度减小,发光能量分布趋于致密。

#### 4.2 光学结构对光谱、混色、PPFD 均匀度的影响

调节导光管长度与透镜的直径,在一定距离的受照面上用照度计测出样品点的光谱值、色坐标与 PPFD,利用公式(4)、(6)、(8)算出各个参

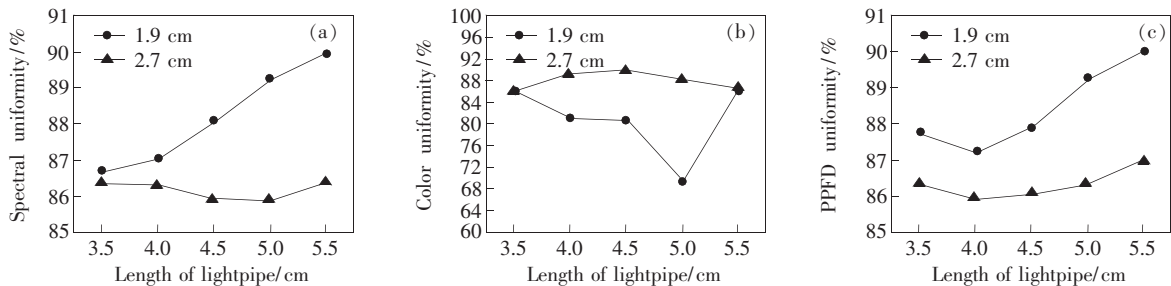


图 8 (a) 不同光学结构对应的光谱均匀度;(b)不同光学结构对应的混色均匀度;(c)不同光学结构对应的 PPFD 均匀度。

Fig.8 (a) Spectral uniformity for different optical structures. (b) Color uniformity for different optical structures. (c) PPFD uniformity for different optical structures.

数的均方差,并用公式(5)、(7)、(9)进行归一化处理,得到表 3、表 4、表 5。

表 3 不同光学结构对应的光谱均匀度

Tab.3 Spectral uniformity corresponding to different optical structures

导光管长度/ cm	直径 1.9 cm 透镜/%	直径 2.7 cm 透镜/ %
3.5	86.72	86.41
4.0	87.04	86.33
4.5	88.08	85.93
5.0	89.25	85.90
5.5	90.00	86.42

表 4 不同光学结构对应的混色均匀度

Tab.4 Color uniformity corresponding to different optical structures

导光管长度/ cm	直径 1.9 cm 透镜/ %	直径 2.7 cm 透镜/ %
3.5	86.23	85.96
4.0	81.17	89.34
4.5	80.72	90.00
5.0	69.35	88.37
5.5	86.10	87.00

表 5 不同光学结构对应的 PPFD 均匀度

Tab.5 PPFD uniformity corresponding to different optical structures

导光管长度/ cm	直径 1.9 cm 透镜/ %	直径 2.7 cm 透镜/ %
3.5	87.86	86.42
4.0	87.25	86.04
4.5	87.94	86.10
5.0	89.27	86.35
5.5	90.00	87.00

为了更直观地比较光学结构对灯具性能的影响,将表 3、4、5 绘制成折线图,得到图 8。

#### 4.2.1 光学结构对光谱差异性的影响

分析图 8(a)可知,随着导光管长度由 3.5 cm 增加到 5.5 cm,透镜直径为 1.9 cm 的灯具光谱均匀度快速上升并在导光管长度为 5.5 cm 时达到最大值 90%;而透镜直径为 2.7 cm 的灯具光谱均匀度在 85.9% ~ 86.42% 缓慢变化,且最小均匀度与最大均匀度差异仅 0.52%。综合比较分析,在不同的导光管长度下,直径为 1.9 cm 的透镜光谱均匀度皆大于直径为 2.7 cm 的透镜,这与测量配光曲线所得数据相符,从另一方面说明了使用小直径透镜与较长导光管会使受照面上的光能更均匀分布。

#### 4.2.2 光学结构对混色均匀性的影响

分析图 8(b)可知,具有  $D=2.7$  cm 透镜的灯具混色均匀度在 85.89% 和 90.00% 之间呈现稳定趋势,随着光管长度从 3.5 cm 增加到 4.5 cm 略有增加,之后随着光管长度从 4.5 cm 增加到 5.5 cm 略微下降;具有  $D=1.9$  cm 透镜的灯具混色均匀度在导光管长度从 3.5 cm 增加到 5.0 cm 时呈现出有利的趋势,当导光管长度为 5.0 cm 时,达到最小值 69.35%,但之后随着导光管增长快速增加至 87.00%。综合比较分析,在不同的导光管长度下,直径为 2.7 cm 的透镜混色均匀度皆大于直径为 1.9 cm 的透镜,所以直径较大的光纤透镜有利于提高颜色均匀度。

#### 4.2.3 光学结构对 PPFD 均匀性的影响

分析图 8(c)可知,具有  $D=1.9$  cm 光纤透镜的灯具和具有  $D=2.7$  cm 光纤透镜的灯具 PPFD 均匀性呈现相同的趋势,均匀度随着导光管长度从 3.5 cm 增加到 4.0 cm 下降,然后随着导光管长度从 4.0 cm 增加到 5.5 cm 而上升,在 5.5 cm 处达到最大值。综合比较分析,在不同的导光管长度下,直径为 1.9 cm 的透镜混光均匀度皆大于直径为 2.7 cm 的透镜,所以小直径光纤透镜有利于提高 PPFD 均匀性。

#### 4.3 光接收距离对混色均匀度、PPFD 均匀度的影响

根据 4.2 实验结果分析,当导管长度为 5.5 cm、透镜直径为 1.9 cm 时,该灯的 PPFD 均匀度和光谱均匀度同时达到最大值 90%,颜色均匀度也达到 87.00%,接近 90%。基于这个最佳的光学结构参数,改变光接收面和发光表面之间的距离,探究光接收距离对混色、PPFD 均匀度的影

响,得到图 9。

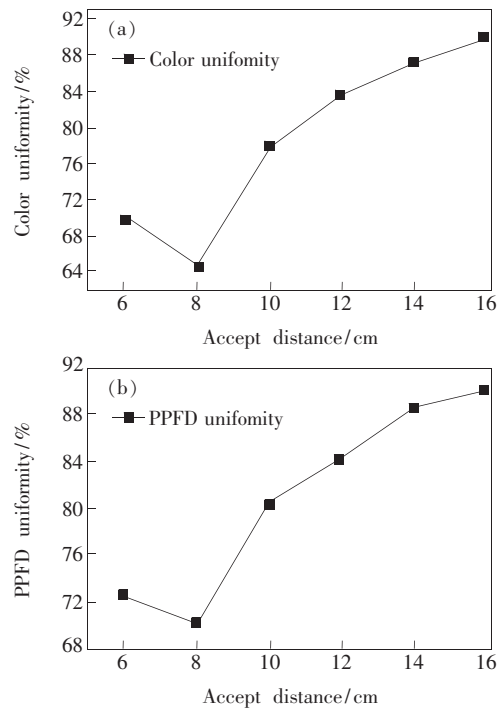


图 9 (a) 光接收距离对混色均匀度的影响;(b) 光接收距离对 PPFD 均匀度的影响。

Fig. 9 (a) Effect of light receiving distance on color uniformity. (b) Effect of light receiving distance on PPFD uniformity.

由图 9 分析可知,混色均匀度与 PPFD 均匀度随光接收距离变化而改变的趋势一致,随着光接收距离从 6 cm 增加到 8 cm,颜色混合均匀性和 PPFD 均匀性略有下降。当光接收距离从 10 cm 变为 16 cm 时,混色均匀性和 PPFD 均匀性均快速增加到 90%。分析可得,较长的光接收距离有助于提高受照面的光照均匀性。

#### 4.4 有效光能利用率

植物的最大有效光能利用率取决于植物类型和外部光环境,由于灯具在受照面上形成的光斑总是中心光强最大,边缘光强最小,在从中心到边缘光强减弱到一定值后,光能就不能再被植物有效吸收,造成光能浪费。基于 4.2 分析的有利于植物照明的最佳的光学结构和一定的光接收距离,改变驱动电流,探究有效光能利用率如何变化。电流从 0.20 A 增加,  $\Delta I/I_0$  是电流增量与初始电流的比值。如图 10 所示,随着驱动电流的增加,有效光能不断增加,但增加速度从  $\Delta I/I_0 = 2$  后开始下降,在  $\Delta I/I_0 = 3$  时达到最大值 43%。

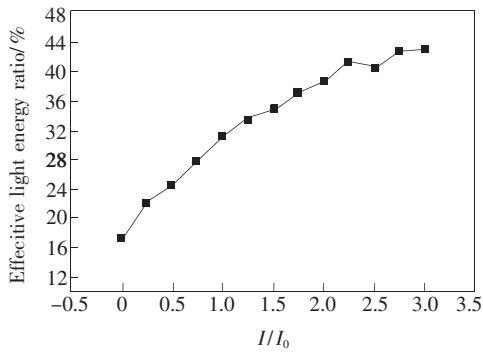


图 10  $\Delta I/I_0$ 对光能利用率的影响

Fig. 10 Effect of  $\Delta I/I_0$  on the utilization of light energy

### 4.5 PWM 调制模块的设计

本实验设计的 PWM 调光模块由 STM32 单片机芯片实现,3 个端口向外部电路输出 3 个不同占空比的方波,分别驱动 RGB LED。

如图 11(a)所示,左边部分是 STM32,其功能是产生驱动电压;中间部分是 IR2110 芯片和场效应晶体管。图 11(b)显示了每个 LED 的驱动电路。PWM 调光产生的方波输入到图 11(b)中的 IR2110 芯片,IR2110 放大电压并提高驱动能力,IRF540n 是一款用于将电压转换为电流的场效应

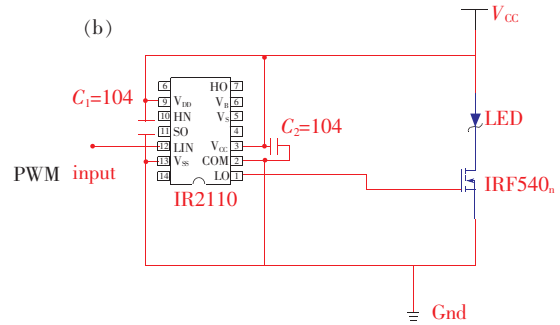
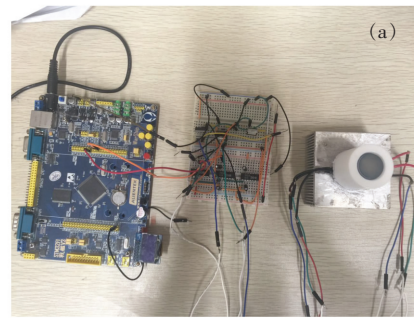


图 11 (a)PWM 调光装置图;(b)LED 驱动电路图。

Fig. 11 (a) PWM dimming device diagram. (b) LED driver circuit diagram.

晶体管。通过改变输出电流的占空比,从而产生不同的光谱成分,利用积分球测得灯的光谱如图 12 所示。

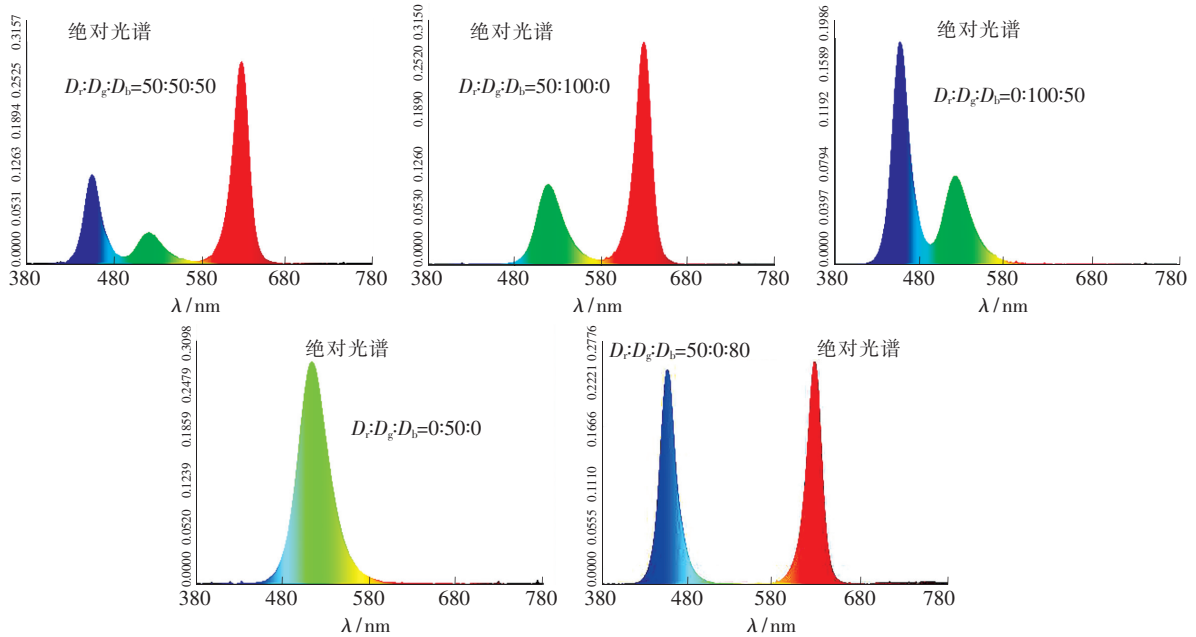


图 12 不同占空比下的光谱图

Fig. 12 Spectra of different duty cycles

### 4.6 光源热学分析

灯具在发光时会产生大量的热,热量散发到空气中会改变环境温度,加速植物蒸腾导致植物缺水从而对植物生理活动造成影响,所以性能良

好的植物照明灯对周围温度环境的影响要尽可能降低,这要求我们要在热学方面对植物灯进行表征。本实验采用 7 cm × 7 cm 铝制散热片,选择距离发光表面 3 cm 的区域作为测量点。这个距离



远小于植物工厂照明中灯具使用的距离,如果灯运行期间产生的热量不会引起该区域温度的大幅上升,则在实际应用中植物灯对环境的影响将会

更小。在室温 24 ℃ 下,使用 FLIR E30 热像仪拍摄发光灯具,可以直接得到光源温度。拍摄图片如图 13 所示。

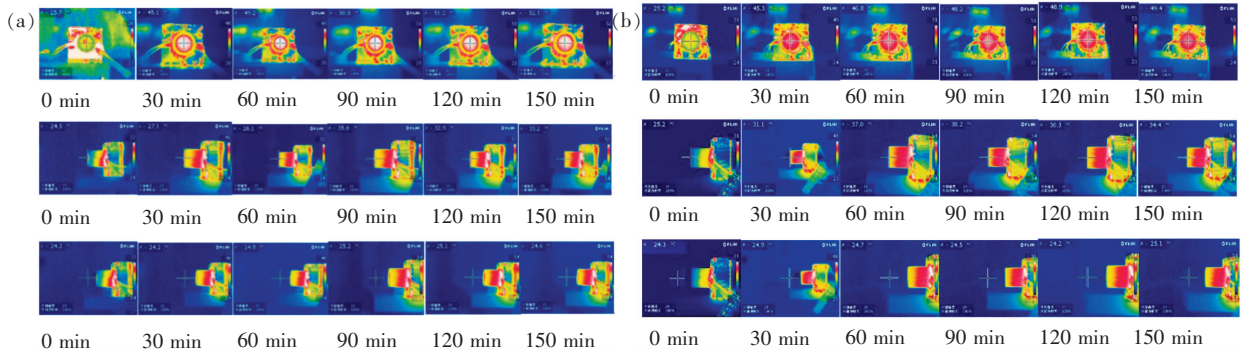


图 13 (a)具有直径为 1.9 cm 透镜的灯具的热图像;(b)具有直径为 2.7 cm 透镜的灯具的热图像。

Fig. 13 (a) Thermal image of a lamp with 1.9 cm diameter lens. (b) Thermal image of a lamp with 2.7 cm diameter lens.

通过比较具有和不具有光学结构的 LED 芯片的热测试结果可知,在加入光学结构后,LED 发光面中心温度下降 6 ~ 10 ℃,距离透镜发光面 3 nm 处的空气温度降低约 2 ℃,因此增加光学结构大大改善了 LED 芯片散热效果。

## 5 灯具保鲜效果分析

### 5.1 玫瑰花保鲜原理

玫瑰花离开母体以后,并不是立即停止一切生命活动的,而是依然进行着呼吸作用和正常的生理代谢,一般认为玫瑰采后的水分代谢、呼吸代谢、糖分变化、蛋白质和氨基酸的变化以及超氧自由基的变化在很大程度上决定其开花与衰老,而抗氧化物质可以抑制过量自由基对机体的过氧化损伤<sup>[23-25]</sup>,比如类黄酮、多酚等。詹丽娟<sup>[26]</sup>的研究表明与黑暗环境对比,植物在合适的光照条件下,和叶绿素分解相关的酶活性被抑制,而抑制氧化作用的黄酮类、多酚类物质含量上升,从而减缓植物离开母体后的衰老速度。

### 5.2 保鲜实验设计与分析

在保鲜实验中使用 PWM 调光技术调节灯具光质比为 R + G + B、G + B、R + G、G,并以此作为光质不同的 4 个实验组,同时设置自然光对照组与红蓝光对照组,在每个组别中再分别设置 6 h/24 h、9 h/24 h、12 h/24 h 3 个不同的光照周期。在实验中,保证实验室温度控制在 25 ℃,环境湿度控制在适合鲜花保鲜的空气湿度即 65%,灯具距离鲜切玫瑰为 10 cm 不变,在该距离下可以保

证玫瑰所接收光的 PPFD 值为  $60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,略高于玫瑰花光饱和点对应的 PPFD 值( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。在早上 8:00 测量  $3 \times 5 = 15$  组实验的玫瑰花鲜重,记录下 6 天实验数据,计算出每组鲜花的失重率,失重率  $\eta_{\text{WL}}$  计算公式如下:

$$\eta_{\text{WL}} = \frac{m_0 - m_i}{m_0}, \quad (11)$$

其中, $m_0$ 、 $m_i$  分别为玫瑰花的初始鲜重与光照  $i$  天后的鲜重。

在实验 6 天之后,统一测试各组玫瑰花的多酚、类黄酮、花色苷<sup>[27-29]</sup>的含量。

通过测试实验组在不同光质不同光照周期下抗氧化物的含量,与自然光对照组对比,得出相比于自然光照射的抗氧化物增长率,如图 14 所示。

由表 6 和图 14 分析可知,从光照周期的影响来看,过长的光照周期不利于玫瑰花鲜重保持,光质相同的条件下,12 h/24 h 组的失重率明显高于其他光照时长组,而抗氧化物质含量却明显低于其他实验组,不利于玫瑰保鲜;从光质的影响来看,R + G 在 4 组实验组中失重率最低,对玫瑰采后鲜重保持效果最好。有利于类黄酮含量增加的最佳光质和光照时长是 R + G(6 h/24 h);有利于多酚含量增加的最佳光质和光照时长是 R + G + B(9 h/24 h),但与 R + G(6 h/24 h) 实验组的多酚含量增长率十分接近;有利于花色苷含量增加的最佳光质和光照时长是 R + G(6 h/24 h)。综合以上因素考虑,R + G(6 h/24 h) 是最有利于玫瑰花采后保鲜的光照条件。

表 6 玫瑰花鲜重失重率计算结果

Tab.6 Rose weight loss rate calculation results

光质	光照周期/h	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天
R + G + B	6	4.79%	12.19%	18.86%	22.10%	28.65%	34.94%
	9	6.81%	14.31%	19.29%	24.29%	30.31%	35.94%
	12	6.52%	15.61%	22.17%	29.84%	35.63%	41.32%
G + B	6	5.38%	12.82%	18.42%	23.09%	29.78%	35.22%
	9	5.80%	13.96%	20.47%	28.20%	33.31%	37.19%
	12	7.59%	14.31%	20.54%	27.57%	31.84%	37.42%
R + G	6	4.55%	9.90%	17.29%	21.61%	29.91%	36.10%
	9	5.26%	11.59%	16.11%	23.74%	27.46%	32.16%
	12	5.65%	12.76%	19.58%	26.37%	31.45%	36.13%
G	6	3.32%	10.37%	14.52%	19.29%	25.30%	30.70%
	9	7.13%	13.23%	18.24%	22.67%	28.12%	32.43%
	12	5.74%	14.10%	20.44%	28.34%	33.70%	37.95%
自然光	6	1.72%	7.93%	13.10%	18.62%	24.83%	28.97%
	9	3.05%	9.83%	14.92%	17.29%	25.42%	28.47%
	12	7.58%	17.42%	24.24%	27.27%	33.71%	39.77%
R + B	6	5.05%	13.64%	20.71%	23.23%	31.31%	37.88%
	9	6.64%	17.70%	23.45%	25.66%	32.30%	38.05%
	12	7.69%	17.00%	23.08%	25.51%	30.77%	36.44%

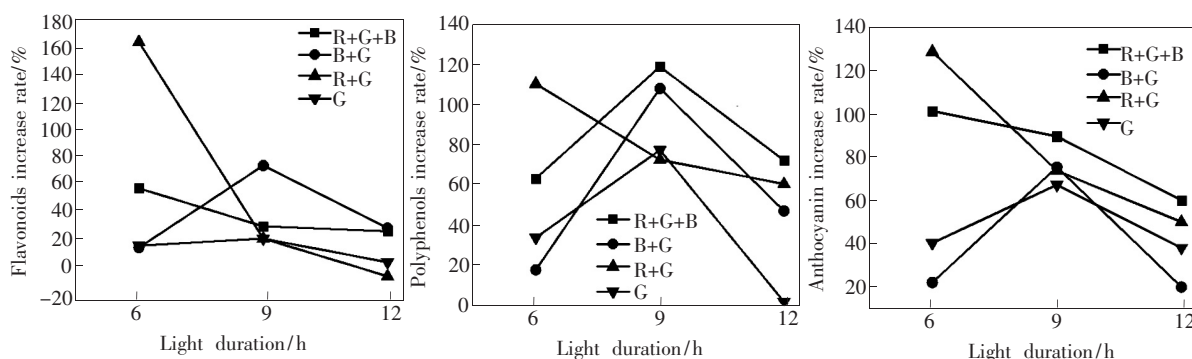


图 14 不同光质和不同光照周期对抗氧化物含量的影响

Fig. 14 Effect of different light qualities and different light cycles on the content of oxides

## 6 结 论

本文从优化植物照明光源的光学结构入手,以设计高混光、混色、光量子通量密度的均匀度为目的,通过改变导光管的长度和光纤透镜的直径研究了不同参数下光源的照明效果对于光谱均匀性、混色均匀性、PPFD 均匀性的影响以及在不同的接收距离下受照面上的均匀性,进一步对提出的有效光能利用率进行研究。研究表明:使用较小直径的光纤透镜以及较长的导光管有利于提高混色均匀性和 PPFD 均匀性,同时,较长的接收距离也有助于提高混色均匀性和 PPFD 均匀性;当导光管长度为 5.5 cm、光纤透镜直径为 1.9

cm 时,混色均匀性和 PPFD 均匀性达到最大值的 90%;随着驱动电流在一定范围内增加,可以获得更高的有效光能利用率,当  $\Delta I/I_0$  为 3 时,达到最大值 43%;此外,加入光纤透镜这种光学结构可以有效改善灯具散热效果,减弱灯具发热对周围环境温度的影响。电学方面设计使用 PWM 调光来驱动该灯具,通过调节占空比  $D_r : D_g : D_b$  获得了多种红绿蓝光质比的发光光谱,进一步应用于玫瑰花保鲜的实验中,以失重率以及多酚、类黄酮、花色苷的含量为指标探究最适合玫瑰花保鲜的光照条件,实验结果表明光质为 R + G、光照周期为 6 h/24 h 时最有利于玫瑰鲜重保持,同时也最有利于抗氧化物质的积累。

## 参 考 文 献:

[ 1 ] 余锡寿, 刘跃萍. 中国植物工厂产业发展现状及展望 [J]. 农业展望, 2014, 10(12):50-55.

- YU X S, LIU Y P. Current situation and prospect of plant factory in China [J]. *Agricult. Outlook*, 2014, 10(12):50-55. (in Chinese)
- [2] 徐永. 温室补光及其发展趋势 [J]. *农业工程技术·温室园艺*, 2015(10):29-32.  
XU Y. Greenhouse light and its developing trend [J]. *Agricult. Eng. Technol. (Greenhouse & Horticulture)*, 2015(10):29-32. (in Chinese)
- [3] 李钊, 蔡婕. LED 植物照明灯具在植物工厂照明领域的应用及展望 [J]. *科技视界*, 2014(26):286.  
LI Z, CAI J. Application and prospect of LED plant lighting in the field of plant factory lighting [J]. *Sci. Technol. Vision*, 2014(26):286. (in Chinese)
- [4] 林魁. 光质及光周期对生菜生长的影响及其推广运用 [D]. 福州:福建农林大学, 2015.  
LIN K. *Effects of Light and Photoperiod on The Growth of Lettuce and Their Application* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [5] ORLOVA A, MALANINA I.  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ : an upconversion phosphor for *in vivo* imaging [J]. *Inorg. Mater.*, 2013, 49(7):696-700.
- [6] 肖华, 吕毅军, 徐云鑫, 等. 传统白光 LED 与远程荧光粉白光 LED 的发光性能比较 [J]. *发光学报*, 2014, 35(1):66-72.  
XIAO H, LV Y J, XU Y X, *et al.*. Comparison of luminescence properties of traditional white LEDs and remote phosphor white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(1):66-72. (in Chinese)
- [7] 王华宇, 闫景辉, 邹明强.  $\text{SO}_2/\text{BO}_3$  掺杂对  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$  荧光粉发光性能影响的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1):139-143.  
WANG H Y, YAN J H, ZOU M Q. Effect of  $\text{SO}_2/\text{BO}_3$  doping on the luminescence properties of  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$  phosphors [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2018, 38(1):139-143. (in Chinese)
- [8] 张运杰. 固态照明用红色荧光材料制备及其发光性质 [D]. 天津:天津理工大学, 2015.  
ZHANG Y J. *Preparation of Red Fluorescent Materials for Solid-state Lighting and Their Luminescent Properties* [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 杨小龙. LED 光照及褪黑素引发对番茄幼苗光抑制的调节 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2016.  
YANG X L. *LED Light and Melatonin Trigger Adjustment to Photoinhibition in Tomato Seedlings* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [10] 范林林, 左进华, 高丽朴, 等. LED 应用于蔬菜保鲜领域的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(8):89-92.  
FAN L L, ZUO J H, GAO L P, *et al.*. Research progress of LED application in the field of vegetable preservation [J]. *J. Anhui Agricult. Sci.*, 2017, 45(8):89-92. (in Chinese)
- [11] 许巧云. LED 植物照明技术及产业状况分析 [J]. *光源与照明*, 2016(2):33-35.  
XU Q Y. LED plant lighting technology and industry analysis [J]. *Lamps & Lighting*, 2016(2):33-35. (in Chinese)
- [12] 代丹, 陈寅生. LED 照明技术应用现状与发展趋势 [J]. *建筑电气*, 2014(12):14-20.  
DAI D, CHEN Y S. Application situation and development trend of LED lighting technology [J]. *Building Electricity*, 2014(12):14-20. (in Chinese)
- [13] 刘然然, 寇莉萍, 阎瑞香. 发光二极管绿光照射对精品蔬菜货架期品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2013(8):5-9.  
LIU R R, KOU L P, YAN R X. Effects of LED green light irradiation on shelf life quality of premium vegetables [J]. *North. Hortic.*, 2013(8):5-9. (in Chinese)
- [14] 阎瑞香, 思希军, 刘然然. 低温条件下不同 LED 光源对芦笋颜色变化的影响 [C]. 中国冷冻冷藏新技术、新设备研讨会, 北京, 2013.  
YAN R X, SI X J, LIU R R. Effects of different LED light sources on the color change of asparagus under low temperature [C]. *New Technology and New Equipment Symposium on Refrigeration and Refrigeration in China, Beijing*, 2013. (in Chinese)
- [15] 陈育明. 农业照明光源的发展 [J]. *中国照明电器*, 2015(8):5-10.  
CHEN Y M. Development of agricultural lighting sources [J]. *China Lighting*, 2015(8):5-10. (in Chinese)
- [16] 宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2):285-292.  
SONG P C, WEN S S, SHANG J, *et al.*. Dimming and color matching of three-primary LEDs based on PWM [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(2):285-292. (in Chinese)
- [17] 赵会平, 崔浩, 颜翠翠. 具有 PWM 调光功能的 LED 驱动电源的设计 [J]. *电子世界*, 2017(13):111-112.  
ZHAO H P, CUI H, YAN C C. Design of LED driver with PWM dimming function [J]. *Electronic World*, 2017(13):111-112. (in Chinese)

- [18] 田会娟, 柳建新, 洪振, 等. 基于云平台的 PWM 智能 LED 补光方法研究 [J]. 照明工程学报, 2017, 28(2):91-96.  
TIAN H J, LIU J X, HONG Z, *et al.*. PWM intelligent light filling method based on cloud platform [J]. *J. Illumin. Eng.*, 2017, 28(2):91-96. (in Chinese)
- [19] 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于光量子学的植物照明用自由曲面底板 LED 光源设计 [J]. 光学学报, 2017, 37(2):199-208.  
CHEN H W, WEN S S, MA B X, *et al.*. Design of free-form surface LED light source for plant lighting based on photon quantum theory [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2017, 37(2):199-208. (in Chinese)
- [20] 梁依倩, 文尚胜, 马丙戌, 等. LED 阵列型植物光源的均匀性研究 [J]. 光学技术, 2017, 43(4):343-347.  
LIANG Y Q, WEN S S, MA B X, *et al.*. Uniformity of LED array light sources [J]. *Opt. Technol.*, 2017, 43(4):343-347. (in Chinese)
- [21] 何博闻. 浅谈光合作用中的补偿点与饱和点 [J]. 农家参谋, 2017(23):13-16.  
HE B W. Talking about the compensation point and saturation point in photosynthesis [J]. *Farm Staff*, 2017(23):13-16. (in Chinese)
- [22] SUN C C, MORENO I, LO Y C, *et al.*. Collimating lamp with well color mixing of red/green/blue LEDs [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(1):75-84.
- [23] 张志国, 姜闪. 食用玫瑰花褪色原因及控制措施研究进展 [J]. 食品科学, 2017, 38(9):322-328.  
ZHANG Z G, JIANG S. Research progress on the causes of discoloration of edible roses and control measures [J]. *Food Sci.*, 2017, 38(9):322-328. (in Chinese)
- [24] 雷静, 张娜, 阎瑞香, 等. LED 红蓝弱光照射保持樱桃番茄冷库贮藏品质 [J]. 农业工程学报, 2016(9):248-254.  
LEI J, ZHANG N, YAN R X, *et al.*. LED red and blue light irradiation to maintain cold storage quality of cherry tomato [J]. *Trans. Chin. Soc. Agricult. Eng.*, 2016(9):248-254. (in Chinese)
- [25] HASPERUÉ J H, RODONI L M, GUARDIANELLI L M, *et al.*. Use of LED light for Brussels sprouts postharvest conservation [J]. *Sci. Horticult.*, 2016, 213:281-286.
- [26] 詹丽娟, 李颖. 光照技术在果蔬采后贮藏保鲜中的应用 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8):268-272.  
ZHAN L J, LI Y. Illumination technology application in fruit and vegetable storage [J]. *Food Ferment. Ind.*, 2016, 42(8):268-272. (in Chinese)
- [27] 赵丽, 顾燕雯, 赵忆菲, 等. 3 种叶菜多酚提取条件的研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2017, 35(5):89-94.  
ZHAO L, GU Y W, ZHAO Y F, *et al.*. Study on the conditions of polyphenol extraction of 3 kinds of leaf vegetables [J]. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Agric. Sci.)*, 2017, 35(5):89-94. (in Chinese)
- [28] 王玉茹, 李楠. 山楂总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究 [J]. 现代食品, 2017, 7(14):65-71.  
WANG Y R, LI N. Optimization of extraction technology of total flavones of hawthorn and study on its antioxidant activity [J]. *Modern Food*, 2017, 7(14):65-71. (in Chinese)
- [29] 黄泰曾. 黑果腺肋花楸花色苷的提取、纯化及种类鉴定 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017.  
HUANG T Z. *Extraction, Purification and Identification of Aronia Melanocarpa Acys* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)



靳肖林(1996 -), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 2018 年于华南理工大学获得学士学位, 主要从事 LED 光学设计及 LED 植物照明相关领域的研究。

E-mail: jxlscut@163.com



康丽娟(1977 -) 女, 河南漯河人, 硕士, 副教授, 2003 年于湖北美术学院获得硕士学位, 主要从事光学设计方面的研究。

E-mail: 12558995@qq.com



文尚胜(1964 -), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 硕士生导师, 2001 年于华南师范大学获得博士学位, 主要从事 LED 光学设计及 LED 植物照明相关领域的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn