



## 具有曲面反射面的高均匀度LED植物光源

卢允乐, 文尚胜, 马丙戌, 姜昕宇, 吴启保

引用本文:

卢允乐, 文尚胜, 马丙戌, 等. 具有曲面反射面的高均匀度LED植物光源[J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 468–479.

LU Yun-le, WEN Shang-sheng, MA Bing-xu, et al. Highly Uniform LED Plant Light Source with Curved Reflective Surface[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 468–479.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204104.0468>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 高照明均匀度倒置型LED植物光源系统的设计

Design of High Illumination Uniformity Inverted LED Plant Light Source System

发光学报. 2019, 40(9): 1172–1184 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1172>

### 适用于植物照明的高均匀度LED面光源设计

High Uniformity LED Panel-light for Plant Lighting

发光学报. 2018, 39(3): 403–412,413 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183903.0403>

### 高均匀度LED植物光源的设计

Design of High Uniformity LED Plant Lamp

发光学报. 2018, 39(10): 1466–1477 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183910.1466>

### 光量子体系下基于粒子群算法的LED植物照明光源设计

Design of LED Plant Lighting Source Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Under Photons System

发光学报. 2019, 40(3): 340–348 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0340>

### 基于Taguchi方法的曲面LED阵列照度问题研究

Study on Curved Surface LED Array Illumination Problem Based on Taguchi Method

发光学报. 2015(3): 348–354 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153603.0348>

文章编号: 1000-7032(2020)04-0468-12

## 具有曲面反射面的高均匀度 LED 植物光源

卢允乐<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>1,2,3\*</sup>, 马丙戌<sup>1</sup>, 姜昕宇<sup>1</sup>, 吴启保<sup>4\*</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 510631; 4. 深圳信息职业技术学院 智能制造与装备学院, 广东 深圳 518172)

**摘要:** 目前植物工厂培养架所使用的 LED 光源模块光学结构简单, 照度均匀度和混色均匀度难以保证, 导致农作物的品质参差不齐。为了提高种植物品质, 需要优化植物光源的照明效果, 设计高均匀度的植物光源。本文针对这一问题提出并研究了一种倒置光源的植物培养架设计方案。将 LED 灯珠安置在种植面同侧, 并结合曲面反射顶面对 LED 发出的光线进行进一步均匀分配, 在植物培养架有限的种植空间内增加光线耦合距离和耦合程度, 提高了培养架植物光源的均匀度。经过多次结构优化后, 最终获得了一个照度均匀度为 91.64%、混色均匀度为 89.73% 的高均匀度植物照明培养架。然后基于优化得出的植物光源, 研究植物生长过程对照明效果的影响后表明植物在生长过程中均可获得良好的照明环境。最后研究了不同形状和不同配光曲线的灯珠对培养架均匀度和光能利用率的影响。

**关键词:** LED; 植物照明; 光学设计; Taguchi; ANOVA

**中图分类号:** O432; O439

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/fgxb20204104.0468

## Highly Uniform LED Plant Light Source with Curved Reflective Surface

LU Yun-le<sup>1</sup>, WEN Shang-sheng<sup>1,2,3\*</sup>, MA Bing-xu<sup>1</sup>, JIANG Xin-yu<sup>1</sup>, WU Qi-bao<sup>4\*</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

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

3. School of Fine Arts, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

4. School of Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: shshwen@scut.edu.cn; wuqb@szit.edu.cn

**Abstract:** At present, the LED light source module used in the plant factory growing shelf has simple optical structure, so the illumination uniformity and color-mixed uniformity are difficult to ensure, which lead to uneven quality of crops. In order to improve the quality of the plant, it is necessary to optimize the illumination effect of the plant light source, and design a high uniformity plant light source. To this problem, this essay proposes and studies a design scheme of the plant growing shelf with inverted light source. The LED lamp bead is placed on the same side of the planting surface, and the light emitted by the LED is further uniformly distributed in combination with the curved reflecting top. This method increases the coupling distance and coupling degree of the light in the limited planting space of the plant growing shelf, thereby improving the uniformity of the plant light

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2019-12-23

基金项目: 广东省科技计划(2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004, 2019B010130001, 2019B020214003); 广东省应用型科技研发专项(2015B010134001); 广东省扬帆计划(2015YT02C093); 中山市科技计划(2016A1009, 2017C1011); 深圳市科技计划(GJHZ20180929154602092)资助项目

Supported by Guangdong Science and Technology Plan Project (2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004, 2019B010130001, 2019B020214003); Guangdong Province Applied Science and Technology R&D Special (2015B010134001); Guangdong Yangfan Plan (2015YT02C093); Zhongshan Science and Technology Plan Project (2016A1009, 2017C1011); Shenzhen Science and Technology Plan Project (GJHZ20180929154602092)

source. After several structural optimizations, a plant lighting growing shelf is obtained, whose illumination uniformity is 91.64% and color-mixed uniformity is 89.73% finally. Based on the plant light source, studying the influence of plant growth process on the lighting effect shows that the plant can obtain a good lighting environment during the growth process. At last, the effects of different shapes and different light distribution curves on the growing shelf's uniformity and light efficiency are studied.

**Key words:** LED; plant lighting; optical design; Taguchi; ANOVA

## 1 引言

随着农业生产技术的不断发展,以及人们对安全食物、提高植物种植产量和质量、缩短植物种植周期需求的日益强烈,人造光源被越来越多地应用于植物照明领域,从而达到补光甚至代替太阳光等目的。近年来,被誉为“绿色照明”的半导体(LED)照明技术迅速发展。LED因具有光谱半宽窄、节能高效和可近距离照射植物等优点,被现代农业广泛采用<sup>[1-2]</sup>。作为植物工厂重要环节的植物光源,由于植物光合作用时主要吸收光谱范围为640~660 nm的红光和430~450 nm的蓝紫光<sup>[3-4]</sup>,因此可以根据植物所需的实际光谱、光质通过调配LED灯珠内部的荧光粉,进而设计并生产出适用于植物生长的LED光源,如 $\text{Na}_3\text{La}_2(\text{PO}_4)_3:\alpha\text{Eu}$ 磷光体的发射光谱与植物的光合作用光谱(PAS)可很好地匹配,在植物生长LED照明中具有很好的应用<sup>[5]</sup>。然而,为了满足多种植物不同时期的光照需求,需要设计光谱、光质变化更为灵活的LED植物照明光源。为此本文采用两种LED灯珠共同给光,只需调控两种LED的参数即可满足不同植物生长时的光谱需求。

为了满足植物生长的光照要求,需要对植物光源进行严苛的光学设计。然而目前植物光源多沿用传统室内照明光源,其光学构架简单,如常见植物工厂的LED光源多是在种植平面上方安装简单的LED阵列的“上光下植”的模式,虽然这种简单的照明培养架结构短期内节省了大量成本,但其简易的光学结构导致光线难以充分耦合,不能实现均匀出光,致使受照植株表面亮度和光谱分布不均匀<sup>[6]</sup>,进而使受照植株差异化生长,使得同一批次的植株高低不齐,增加了植株后期培养的难度和经费。综上,设计科学并具有高均匀度的植物照明光源依旧任重道远并且意义重大。

针对上述问题,本文设计并研究了一种带有

倒置光源的植物照明培养架,将LED光源贴封在种植平面两侧的凸台上,凸台的设计是为了抬高光源平面以削弱植物生长过程中枝叶的遮挡所带来的照明效果的劣化。为了在节省种植空间的基础上增加光线混合距离,在光源平面与种植平面的正上方增加反射面,LED发出的光线经过顶面反射面后照射到植物上,达到了提高光线耦合程度的目的。为了更进一步提高混光均匀度,将反射面设计为曲面,由此更精准地调控反射光线的分布,达到提高均匀度的效果。在植物照明培养架的设计过程中,为了提高设计效率和灵活性,采用强实用性的Taguchi实验方法代替设计周期长、繁冗复杂的试错法,设计出一种具有基于曲面反射面的高均匀度倒置型植物光源及其培养种植系统。运用Taguchi方法,设定影响因子建立直交表进行实验设计,大大减少了实验次数,可以高效、系统地得出一个高均匀度植物照明培养架<sup>[7-8]</sup>。

## 2 实验测量指标

### 2.1 照度与光量子通量密度的关系

在植物照明领域,常采用光量子通量密度(Photosynthetic photon flux density,PPFD) $P_{\text{fd}}$ 与光量子通量密度均匀度来表示光源的照明效果:

$$P_{\text{fd}} = \int_{380}^{780} \frac{\Phi_{e,\lambda}}{S n_{\lambda} h c} d\lambda = \int_{380}^{780} \frac{E_{e,\lambda}}{n_{\lambda} h c} d\lambda, \quad (1)$$

其中, $\Phi_{e,\lambda}$ 为光源在波长 $\lambda$ 下的辐射通量, $E_{e,\lambda}$ 表示单位面积 $S$ 下的 $\Phi_{e,\lambda}$ , $n_{\lambda}$ 为阿伏伽德罗常数 $6.02 \times 10^{23}$ , $h$ 为普朗克常量, $c$ 为光速。 $P_{\text{fd}}$ 与照度 $E_{\text{v}}$ (lx)之间存在如下关系:

$$k = \frac{E_{\text{v}}}{P_{\text{fd}}} = \frac{\Phi_{\text{v}}/S}{P_{\text{f}}/S} = \frac{\Phi_{\text{v}}}{P_{\text{f}}} = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot \lambda d\lambda}, \quad (2)$$

其中,  $\Phi_V$  为光的视觉通量,  $S$  为受照面面积,  $V(\lambda)$  表示白昼视觉光效率(无量纲),  $k_m = 683 \text{ lm/W}$ 。进一步采用差分离散求和, 在目标平面上某一点  $P$  处产生的  $P_{fd}$  值为:

$$P_{fd} = \frac{1}{k} \cdot E_V = \frac{1}{8.17 \times 10^4} \cdot \frac{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}}{\sum_i V(\lambda_i) N_{\lambda_i}} \cdot E_V, \quad (3)$$

$N_\lambda$  表示归一化光谱分布曲线, 测出 LED 的光谱后可准确计算出  $k$  值, 这里将  $k$  记为  $k_{rb}$ 。  $P_{fd}$  在目标平面的均匀度  $\alpha$  为:

$$\alpha = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N P_{fd} / (X \cdot Y \cdot N)}{P_{fd\max}} = \frac{\frac{1}{k_{rb}} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N E_V / (X \cdot Y \cdot N)}{\frac{1}{k_{rb}} \cdot E_{V\max}}, \quad (4)$$

$X, Y$  表示种植面的长和宽,  $N$  为取点数,  $P_{fd\max}$  和  $E_{V\max}$  分别表示实验取点的最大光量子通量密度和最大照度。由公式(4)可知, 实验过程中难以测量的  $P_{fd}$  均匀度可由易直接测量的照度均匀度表示, 为简化实验步骤和提高实验效率, 该实验用易获得的照度均匀度代替  $P_{fd}$  均匀度。

## 2.2 混色均匀度

色度量学是评价照明效果的另一重要体系, 它表示人眼对不同颜色的响应。由格拉兹曼定律可知对于亮度相同的光源, 只要具有相同的色坐标, 响应就相同; 而植物对光谱的响应比人眼更敏感, 对于亮度相同的光源, 即使具有相同的色坐标, 当光谱组成成分不同时, 植物有不同的响应, 体现为同一批次的植物生长状态存在差异。

经研究表明, 植物光合作用时主要吸收光谱范围为 640 ~ 660 nm 的红光和 430 ~ 450 nm 的蓝紫光, 考虑到植物生长过程中对光谱的特殊需求, 实验中采用红蓝两色的 LED 共同给光, 因此需要考虑红蓝 LED 的混色问题。混色均匀度的计算公式如下<sup>[9-12]</sup>:

$$\Delta u'v'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u'_i - u'_{avg})^2 + (v'_i - v'_{avg})^2]}, \quad (5)$$

样本点色坐标用 CIE1976 色度系统中  $(u, v)$  来表

示,  $\Delta u'v'_{rms}$  表示各个样本点色坐标的均方根值, 其中  $M$  为样本点的数目,  $u'_{avg}$  和  $v'_{avg}$  分别表示  $u'_i, v'_i$  的平均值。

$$U_{color} = \frac{100}{1 + k_1 \Delta u'v'_{rms}} (\%), \quad (6)$$

$U_{color}$  表示混色均匀度,  $k_1$  对应  $\Delta u'v'_{rms}$  取最小值、 $U_{color}$  为 90% 时计算出来的数值。

## 3 植物光源设计

### 3.1 植物光源及植物培养架模型构建

本文提出的带有自由曲面的高均匀度植物光源与培养系统具体模型如图 1 所示, 红蓝色 LED 光源成阵列排列在种植平面两侧的凸台上, 凸台的设置是为了削弱植物生长过程中枝叶的遮挡带来的照明效果的劣化, 在光源平面与种植平面的正上方增加反射面, LED 发出的光线经过顶面反射面后照射到植物上, 从而达到增加光线混合距离的目的。为了更进一步提高混光均匀度, 将反射面设计为曲面, 由此更精准地调控反射光线的分布, 达到提高均匀度的效果。本设计创新性地引入了曲面反射面以及倒置型的光源分布方案, 在有限的空间内极大地提高了光线耦合程度, 理论上具有提高均匀度的效果。

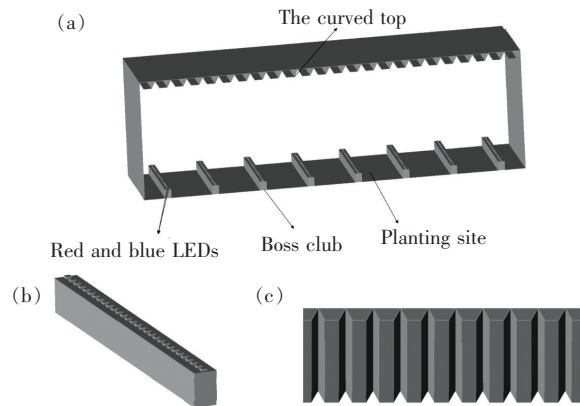


图 1 植物培养架的结构。(a) 植物培养架; (b) 红蓝 LED 灯; (c) 曲面顶部。

Fig. 1 Structure of the plant growing shelf. (a) Plant growing shelf. (b) Red and blue LEDs. (c) Cured top.

### 3.2 理论分析

如图 1 和图 2 所示, 本实验对影响种植面均匀度的 4 个参量进行研究: 种植面宽度  $L$ 、顶部曲面位置  $P$ 、曲面横截面形状  $S$ 、曲面横截面的高  $H$ 。

光源照射至漫反射板上任一点  $P$ ,  $P$  点可看



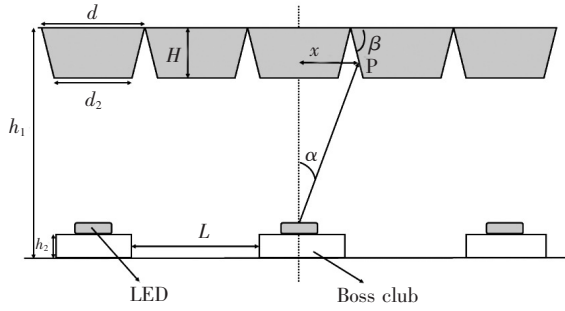


图2 植物培养架局部平面图

Fig. 2 Partial plan of the plant growing shelf

作次朗伯光源<sup>[13-14]</sup>,根据其所在位置可分为两种情况。当 $0 \leq x \leq \frac{d_2}{2}$ 时,P点的照度为:

$$E(x) = \frac{I_0 \cos^3 \alpha}{(h_1 - h_2 - H)^2}, \quad (7)$$

其中 $I_0$ 为朗伯光源中心点的光强, $H$ 表示曲面高度, $\alpha = \arctan \frac{x}{h_1 - h_2 - H}$ ;当 $\frac{d}{2} - \frac{d_2}{2} \leq x \leq d - \frac{d_2}{2}$ 时,P点的照度为:

$$E(x) = \frac{I_0 \cos^3 \alpha}{h_1 - h_2 - \left[ \frac{\left(x - \frac{2}{d}\right)2H}{d - d_2} \right]^2}, \quad (8)$$

其中 $\alpha = \frac{x}{h_1 - h_2 - \left[ \frac{\left(x - \frac{2}{d}\right)2H}{d - d_2} \right]}$ 。照射至种植位点的光强为:

$$E(\alpha) = \int^L \frac{I_f \cos^3 \omega}{H^2} d\bar{x}, \quad (9)$$

其中次朗伯光源法向发光强度 $I_f$ 与 $E(x)$ 成正比, $\omega$ 为次朗伯光源出射光线与法线夹角, $H$ 表示次朗伯光源到种植面的距离。

结合照度-色度转换关系可知,种植面的照度均匀度和混色均匀度与种植面宽度 $L$ 、顶部曲面形状 $S$ 、曲面位置 $P$ 、曲面高度 $H$ 均有关系。

## 4 实验设计与结果

### 4.1 Taguchi 实验设计

如图2所示,实验所涉及的主要参量有顶部到种植面的高度 $h_1$ 、凸台高度 $h_2$ 、两个相邻LED光源的间距 $l$ 、曲面横截面底边 $d$ (若为梯形,则另一底边为 $d_2$ ),其中 $h_1 = 400$  mm、 $h_2 = 30$  mm、 $l = 10$  mm、 $d = 50$  mm、 $d_2 = 25$  mm。该实验对种植

面均匀度的研究设定4个影响因子,分别为种植面宽度 $L$ 、顶部曲面位置 $P$ 、曲面形状 $S$ 、曲面高度 $H$ ,每个影响因子取3个水平。曲面顶部与LED光源的相对位置 $P$ 为:LED与曲面中心横向距离为0 mm、25 mm和12.5 mm;曲面横截面形状 $S$ 分为三角形、梯形和拱形。由于每个影响因子取3个水平,如果采取单一变量法,则需设置 $3^4$ 组实验。为了减少实验组数,提高实验效率,在不影响实验结果的基础上,采用Taguchi方法设计实验,得到 $L_9(3^4)$ 直交矩阵,如表1所示。

表1 植物培养架参数

Tab. 1 Parameters of the plant growing shelf

Code	Factor	Level	Level 1	Level 2	Level 3
A	L	3	130	180	230
B	P	3	0	25	12.5
C	S	3	Triangle	Trapezoid	Arch
D	H	3	12.5	25	50

结合植物生长对光源光谱的特殊要求,实验中使用红、蓝相间分布的LED光源,设置红光LED的波长为640 nm,功率为1 W,每颗芯片光效为90 lm/W;蓝光LED的波长为460 nm,功率为2 W,每颗芯片光效为45 lm/W。

$S/N$ 值是数量化品质特性的方法<sup>[15]</sup>,计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$L_{TB} \left( \frac{S}{N} \right) = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}, \quad (10)$$

$y_i$ 表示第 $i$ 个品质特性, $n$ 为实验次数。将培养架参数代入 $L_9(3^4)$ 直交矩阵,利用TracePro模拟仿真并采用九点取样法测出种植面照度均匀度以及混色均匀度( $k = 8.38$ ),如表2所示。

图3为各因素水准对应的 $S/N$ 值。对图3数据进行分析得出:对于影响因子 $B$ 和 $D$ ,照度均匀度和混色均匀度的 $S/N$ 值均在 $B_1$ 、 $D_1$ 处取得最大值; $A_1$ 对应着照度均匀度 $S/N$ 值最大, $A_3$ 对应着混色均匀度 $S/N$ 值最大,因此需对影响因子 $A$ 的数据进行深入分析,分析得出 $A_1$ 、 $A_3$ 的照度均匀度 $S/N$ 值差异比混色均匀度 $S/N$ 值大,因此选择 $A_1$ 作为最优解因子; $C_2$ 与 $C_3$ 的照度均匀度 $S/N$ 值相近,而 $C_2$ 的混色均匀度 $S/N$ 值优于 $C_3$ ,因此选择 $C_2$ 作为最优解因子。

表 2  $L_9(3^4)$  直交表实验设计  
Tab. 2  $L_9(3^4)$  orthogonal array

Experiment number	A	B	C	D	Illumination uniformity/%	Color-mixed uniformity/%	S/N of illumination uniformity	S/N of color-mixed uniformity
1	1	1	1	1	88.94	88.50	38.98	38.94
2	1	2	2	2	87.93	87.35	38.88	38.83
3	1	3	3	3	63.67	76.45	36.08	37.67
4	2	1	2	3	72.01	89.78	37.15	39.06
5	2	2	3	1	90.91	89.50	39.17	39.04
6	2	3	1	2	54.57	81.89	34.74	38.26
7	3	1	3	2	90.30	90.00	39.11	39.08
8	3	2	1	3	51.98	89.29	34.32	39.02
9	3	3	2	1	66.20	88.83	36.42	38.97

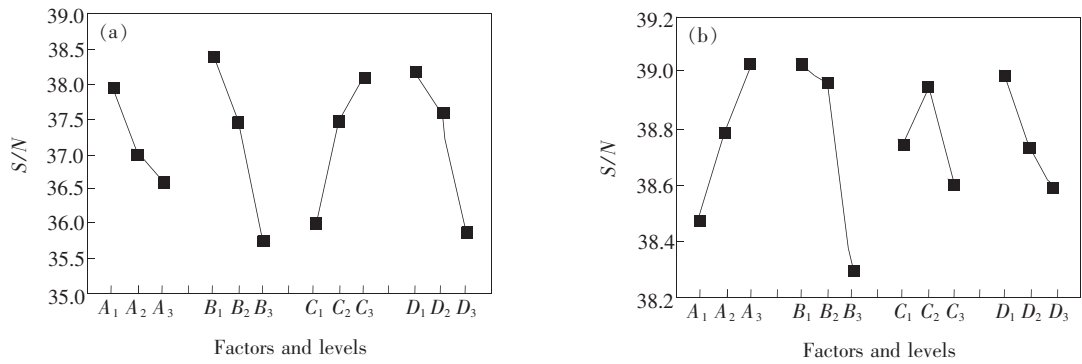


图 3 各因素水准对应的 S/N 值。(a) 照度均匀度的 S/N 值; (b) 混色均匀度的 S/N 值。

Fig. 3 S/N of different levels and different factors. (a) S/N of illumination uniformity. (b) S/N of color-mixed uniformity.

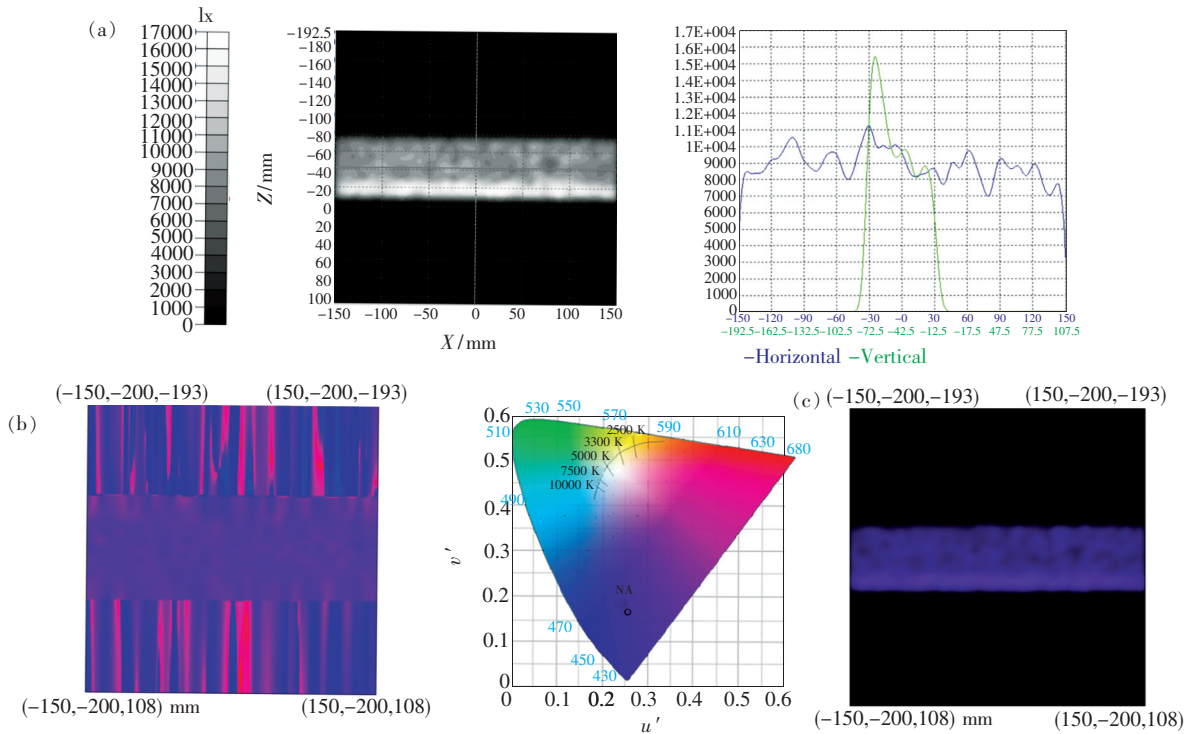


图 4  $A_1B_1C_2D_1$  结构左侧吸收面参数图。(a) 照度图; (b) 色度图; (c) 全彩混色图。

Fig. 4 Parameter maps of the left absorption surface on the  $A_1B_1C_2D_1$  optical structure. (a) Illumination map. (b) Chromaticity map. (c) Full color-mixed map.

综上初步认定  $A_1B_1C_2D_1$  组合为最优解, 利用 TracePro 软件进行模拟仿真后可得到图 4, 组合  $A_1B_1C_2D_1$  的照度均匀度为 69.54%, 混色均匀度为 90.00%。具体结构参数为种植面宽度  $L = 130$  mm、顶部曲面位置  $P$  为 LED 与曲面中心横向距离为 0 mm、曲面横截面形状  $S$  为梯形、曲面高度  $H = 12.5$  mm。最优解的照度均匀度之所以较其混色均匀度相差较大, 主要是因为我们在优化过程中更加倾向于色度的优化。为了进一步在保持色度均匀度较大的同时寻求照度均匀度较大的解, 需要进一步进行变异数分析 (Analysis of variance, ANOVA), 并基于变异数分析的结果做进一步研究。

### 4.2 变异数分析

ANOVA 又称方差分析, 是用来比较多个母群平均数间差异显著性的一种统计分析方法<sup>[17]</sup>, 可根据结果协助分析各影响因子对品质特性的贡献度, 通过参量  $\rho$ <sup>[18-19]</sup> 来表示:

$$\rho = \frac{SS_d}{SS_T}, \quad (11)$$

$$SS_T = SS'_d + SS_e, \quad (12)$$

$$SS_d = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \bar{\eta})^2, \quad (13)$$

其中  $SS_d$  和  $SS'_d$  表示方差和,  $SS_e$  为错误方差和,  $m$  表示实验次数,  $\eta_i$  表示每个因子第  $i$  次实验的  $S/N$  值,  $\bar{\eta}$  表示每个因子  $S/N$  的平均值,  $\eta = L_{TB} (S/N)$ 。

表 3 各因子对照度均匀度和混色均匀度的贡献度

Tab.3 Contribution of different factors to illumination uniformity and color-mixed uniformity

Impact factor	Contribution rate of illumination uniformity/%	Contribution rate of color-mixed uniformity/%
A	9.90	24.28
B	36.83	52.05
C	23.55	10.42
D	29.72	13.24

由表 3 可看出, 顶部曲面与 LED 灯的相对位置对种植面照度均匀度的影响最大, 占 36.83% 的影响地位, 曲面高度的影响次之, 占 29.72%; 对于混色均匀度, 影响最大的仍为顶部曲面与

LED 灯的相对位置, 占 52.05%。因此, 对照度均匀度和混色均匀度贡献大的影响因子为  $B、D$ , 为了保持色度均匀度较大的同时寻求照度均匀度较大的解, 在保持  $A$  取  $A_1$ 、 $C$  取  $C_2$  的情况下, 对  $B、D$  因子进一步进行微调优化。保持  $A_1B_1C_2$  不变, 深入研究  $D$  因子 ( $k = 9.82$ ), 如图 5。

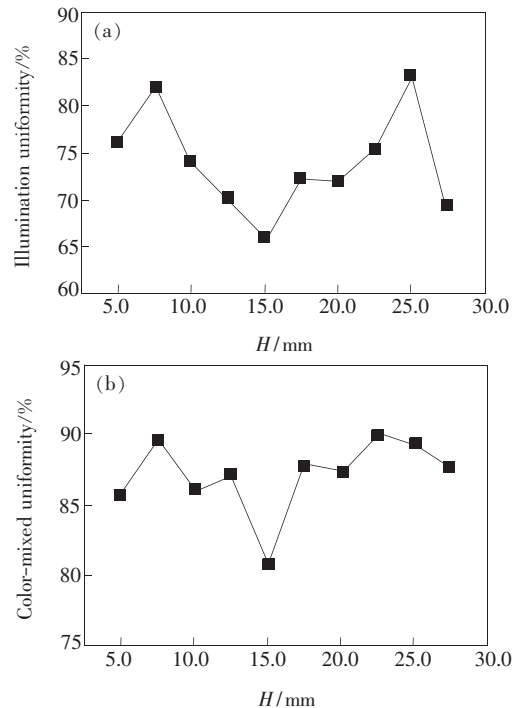


图 5 照度均匀度 (a)、混色均匀度 (b) 随  $D$  因子的变化曲线。

Fig.5 Illumination uniformity (a), color-mixed uniformity (b) curve with  $D$  factor.

由图 5 可知, 当  $H = 25$  mm 时, 种植面的照度均匀度取得最大值 83.25%, 混色均匀度为 89.28%; 当  $H = 22.5$  mm 时, 混色均匀度取得最大值 90%, 种植面的照度均匀度为 75.36%。由于混色均匀度存在较小差异, 而  $H = 25$  mm 时, 照度均匀度有较大提高, 因此选择  $H = 25$  mm 作为  $D$  因子优化得到的最优解。保持  $A_1C_2$  不变,  $D$  取 25 mm, 对  $B$  因子进行细分取 10 个水准, 利用 TracePro 模拟仿真, 测量计算照度均匀度及混色均匀度 ( $k = 11.04$ ), 如图 6。

由图 6 可知,  $P = 5$  mm 时, 照度均匀度取得最大值 91.64%, 混色均匀度为 89.73%;  $P = 12.5$  mm 时, 混色均匀度取得最大值 90%, 照度均匀度为 82.28%。由于两组参数的混色均匀度相差较小, 而  $P = 5$  mm 时照度均匀度有较大提高, 因此选择  $P = 5$  mm 作为  $B$  因子优化得到的最优解。

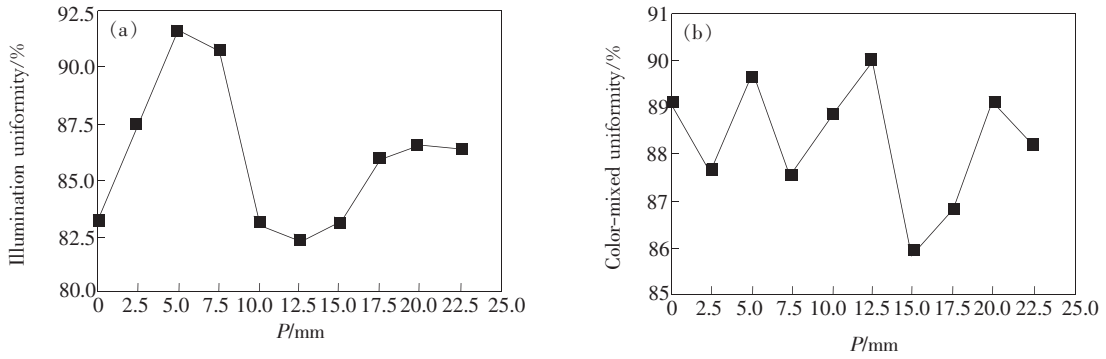


图 6 照度均匀度(a)、混色均匀度(b)随 B 因子的变化曲线。

Fig. 6 Illumination uniformity(a), color-mixed uniformity(b) curve with B factor.

因此,该植物培养架最优解的具体结构为种植面宽度  $L = 130$  mm、顶部曲面位置 P 为 LED 与曲面中心的水平距离  $P = 5$  mm、曲面横截面形状 S 为梯形、曲面高度  $H = 25$  mm,最终得到

照度均匀度为 91.64%、混色均匀度为 89.73% 的植物照明培养架,经过 TracePro 模拟仿真后得到如图 7 所示的照度分布图、混色分布图及全彩混色图。

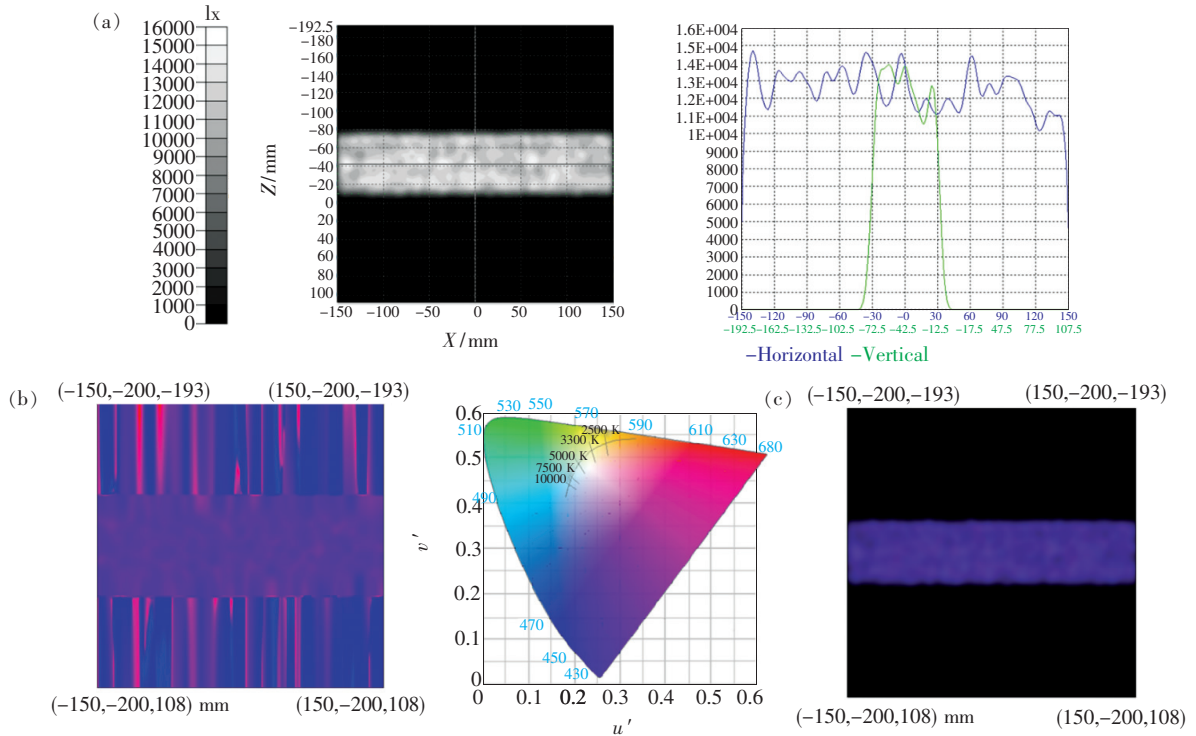


图 7 植物培养架最优解参数图。(a)照度图;(b)色度图;(c)全彩混色图。

Fig. 7 Parameter maps of the final optimization result of plant growing shelf. (a)Illumination map. (b)Chromaticity map. (c) Full color-mixed map.

### 4.3 遮挡检测及分析

经过前面的研究和优化,最终得到照度均匀度为 91.64%、混色均匀度为 89.73% 的植物照明光源及其培养架系统。但是随着植物的生长,叶片必然会引起一定的遮挡,遮挡则会从某种程度上影响光源的照明效果,虽然凸台的增加可以保证植物在育苗期不对照明效果产生影响,但植物

进一步生长过程对于照明效果的影响却不得而知,因此需要研究植株生长对照明效果的影响。图 8 为研究过程的简化模型,植物在种植面中央培育,以倒三棱柱的顶面和侧面分别模拟植物的顶面和侧面,通过改变三棱柱的尺寸模拟植物生长过程,研究不同大小的植株对照明效果的影响。设计实验研究植物高度在 20 ~ 200 mm 生长过程



中种植面(混色均匀度研究过程中  $k = 11.23$ )、植物顶面( $k = 17.77$ )和侧面( $k = 10.76$ )的均匀度。

实验结果显示(图 9),随着植物的生长,种植面的照度均匀度与混色均匀度均在 88% 上下振

荡,即植物的高度对种植面均匀度的影响可以忽略。植物顶部的照度均匀度随植物生长在 85% 上下波动,即可忽略植物生长时植物顶部照度均匀度的变化,而混色均匀度呈现出波动并有略微上升趋势,在植物高度大于 40 mm 后混色均匀度可维持在 82% 以上。而随着植物的生长,植物侧面的照度均匀度迅速下降并逐渐稳定为 60% 的低均匀度水平,在植物高度高于 40 mm 后,混色均匀度维持在 85% 以上,因此植物生长对植物侧面混色均匀度的影响可以忽略。综上,由于植物生长带来的遮挡问题主要存在于植物侧面,随着植物的生长,植物侧面的照度均匀度逐渐变差,将对植物的均匀生长带来一定的影响,但是由于混色均匀度始终保持较高的水平,因此只要在该过

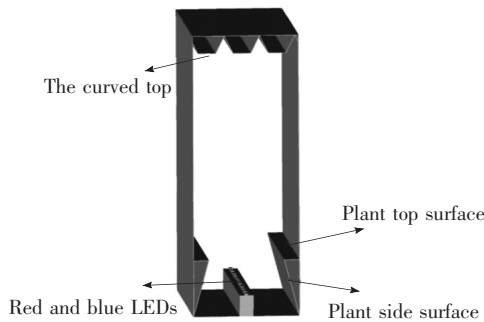


图 8 植物生长模型  
Fig. 8 Plant growth model

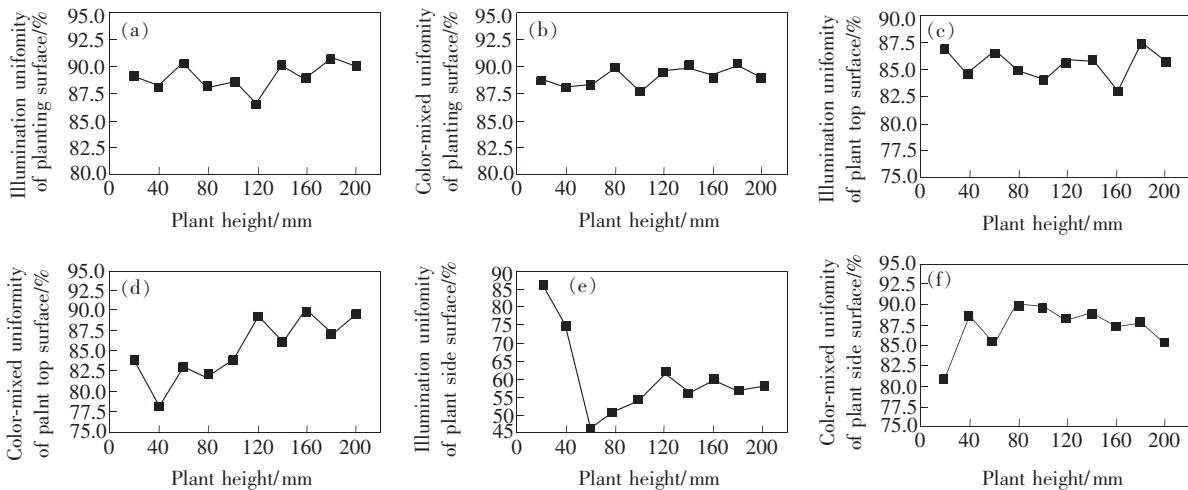


图 9 种植面、植物顶面和侧面在植物不同高度时的照度均匀度和混色均匀度。(a)种植面照度均匀度;(b)种植面混色均匀度;(c)植物顶面照度均匀度;(d)植物顶面混色均匀度;(e)植物侧面照度均匀度;(f)植物侧面混色均匀度。

Fig. 9 Illumination uniformity and color-mixed uniformity of planting surface, plant top surface and side surface at different plant height. (a) Illumination uniformity of planting surface. (b) Color-mixed uniformity of planting surface. (c) Illumination uniformity of plant top surface. (d) Color-mixed uniformity of plant top surface. (e) Illumination uniformity of plant side surface. (f) Color-mixed uniformity of plant side surface.

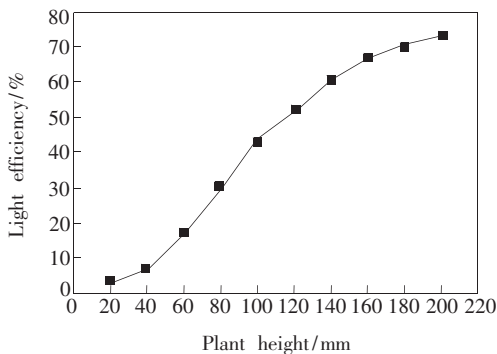


图 10 植物不同高度时的光能利用率

Fig. 10 Light efficiency at different plant height

程中所有的光线都位于植物生长所需的最低照度以上就不会对植物的生长带来较大的影响。种植面和植物顶面在植物生长过程中均拥有较高均匀度,因此,该植物照明培养架在植物生长过程中始终可以提供较好的照明环境。从图 10 看出,随着植物的生长,光能利用率(植物表面光通量与总的光通量之比)逐渐提高。这是因为随着植物的生长,植物表面积增大,照射到植物表面的光通量增大,光能利用率得以提高。

#### 4.4 灯珠形状研究

基于获得的最优解,更换不同形状的灯珠,研

表 4 灯珠发光面的形状和大小

Tab.4 Shape and size of the light-emitting surface of the lamp bead

Shape of the light-emitting surface	Size/mm
Square	5 × 5
Rectangle	5 × 10
Circular	R = 5

究灯珠形状对培养架均匀度的影响。灯珠的形状和结构参数如表 4 所示,用 TracePro 软件对这 3 种不同形状的灯珠模型进行模拟仿真,计算出培养架的照度和混色均匀度,如图 11 所示。

由图 11 可以看出,采用发光面为正方形的灯珠时,培养架的照度均匀度和混色均匀度均为最大值,照度均匀度为 91.64%,混色均匀度为 89.73%,因此该培养架采用发光面为正方形的灯珠更合理。

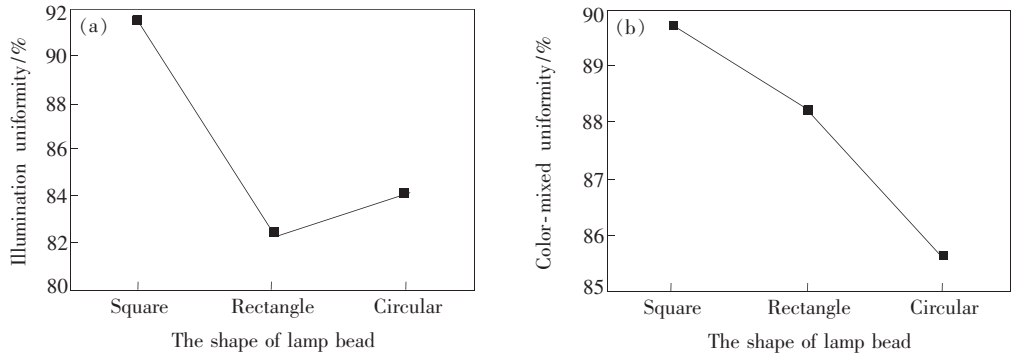


图 11 不同形状灯珠的照度均匀度 (a) 与混色均匀度 (b)

Fig. 11 Illumination uniformity (a) and color-mixed uniformity (b) of lamp beads of different shapes

4.5 配光曲线分析

基于获得的最优解,更换不同配光曲线的 LED 灯珠,研究灯具的配光曲线对植物培养架均匀度和光能利用率的影响。灯具的配光曲线如图 12 所示,图 12(a)是最优解的配光曲线,图 12(b) ~

(f) 分别是灯珠出光角度为 30°、60°、100°、120°、150°的配光曲线。用 TracePro 软件对这 6 种不同配光曲线的模型进行模拟仿真,计算出培养架的均匀度和光能利用率,如图 13 所示。

从图 13 中可看出,当灯珠的出光角度为 30°

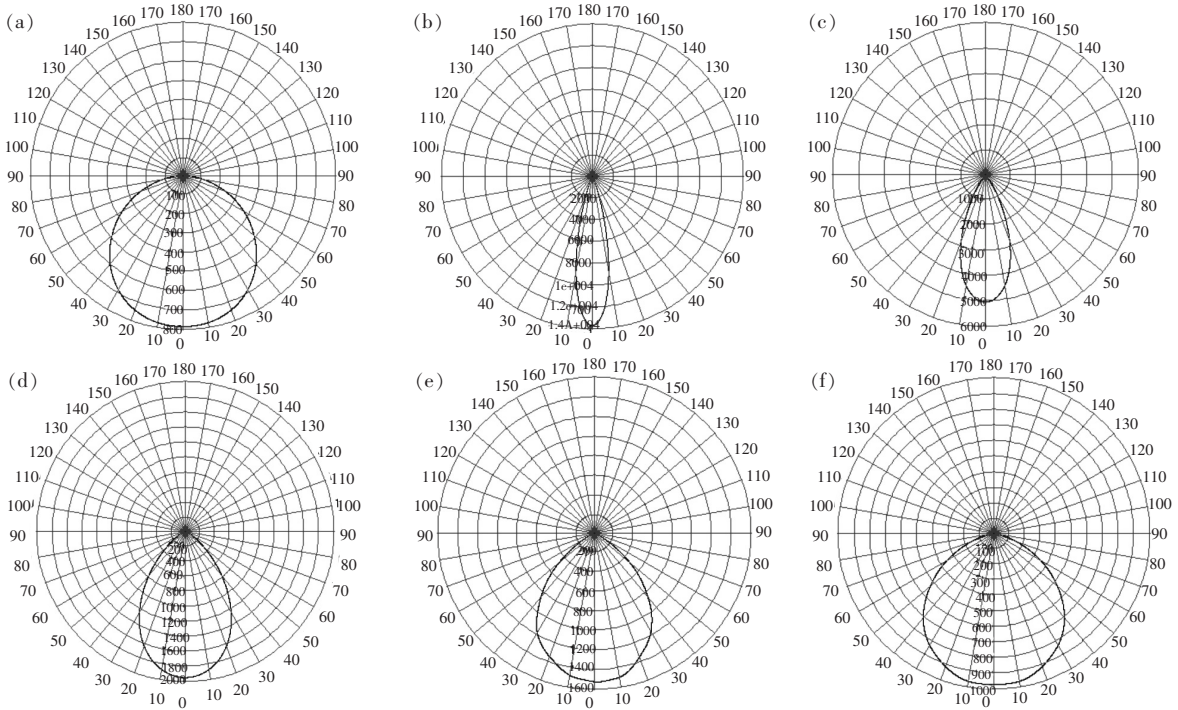


图 12 配光曲线图

Fig. 12 Light distribution curve

时,培养架种植面的均匀度很低,这是因为灯珠的出光角度太小,LED 灯珠发出的光线照射到曲面反射面并反射到种植面的过程中,由反射定律可知反射角较小,虽已采用曲面反射面对光线重新进行分配,但光线仍然集中在小部分区域,导致种植面边缘的照度和混色度与靠近光源部分的照度和混色度差异很大,因此种植面的均匀度非常低。当灯珠的出光角度为  $60^\circ$  时,光线经过反射面的重新分配后,到达种植面各部分的光线已较为均匀,种植面的均匀度得到了很大的提高。当出光角度为  $100^\circ$  甚至更大时,光线的混合距离增大,耦合程度随之提高,培养架的均匀度也进一步提高,但出光角度引起的均匀度变化幅度较小,基本可以忽略出光角度对种植面均匀度的影响。而随着灯珠出光角度的增大,种植面的光能利用率不断减小,这是由于随着出光角度的增加,照射到种植面的光线减少导致的。当选择出光角度为  $100^\circ$

的灯珠时,种植面的照度均匀度为  $86.26\%$ 、混色均匀度为  $87.81\%$  ( $k = 16.11$ ),与最优解无明显差异,而光能利用率却高于最优解模型。因此为了进一步优化模型,采用出光角度为  $100^\circ$  的灯珠替换最优解的灯珠,培养架种植面的光能利用率可达到  $39.71\%$ 。

#### 4.6 实物验证

利用照度计测量,计算得出种植面的照度均匀度为  $88.63\%$ ,混色均匀度为  $86.35\%$  ( $k = 11.04$ ),与模拟实验得出的结果没有太大差异。在培养架内加入植物后,分别检测植物叶片上下表面的照度和混色度,计算得出叶片上表面的照度均匀度为  $84.22\%$ ,混色均匀度为  $83.64\%$ ,下表面的照度均匀度为  $79.46\%$ ,混色均匀度为  $81.38\%$ 。从数据可看出,植物的上表面的均匀度明显优于下表面的均匀度,这是因为入射到植物上表面的光线经过了顶部曲面反射已有了充分的耦合,而入射到植物下表面的光线由于上表面遮光以及下表面所受光线耦合不充分,导致下表面均匀度有所下降,但是植物上下表面的均匀度和种植面的均匀度均保持较高的水平,这说明该培养架具有良好的照明效果,具有很大的实用价值和推广意义。

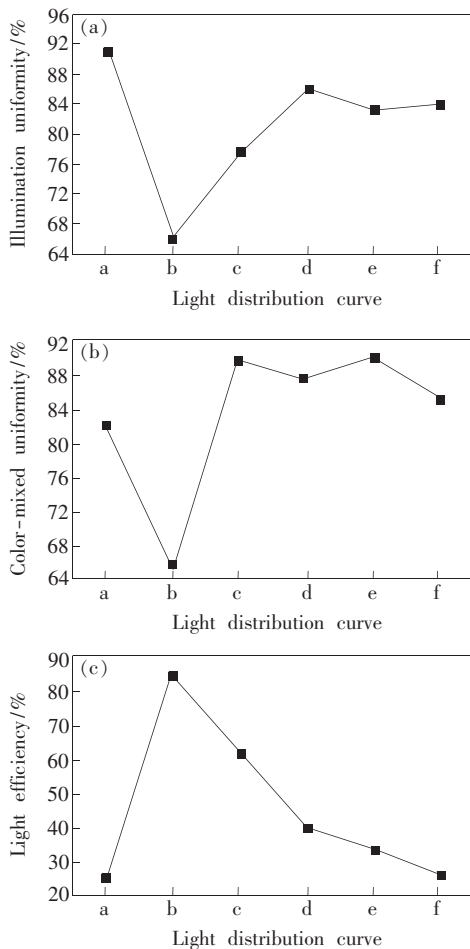


图 13 不同配光曲线对应的均匀度及光能利用率

Fig. 13 Uniformity and light efficiency of different light distribution curves

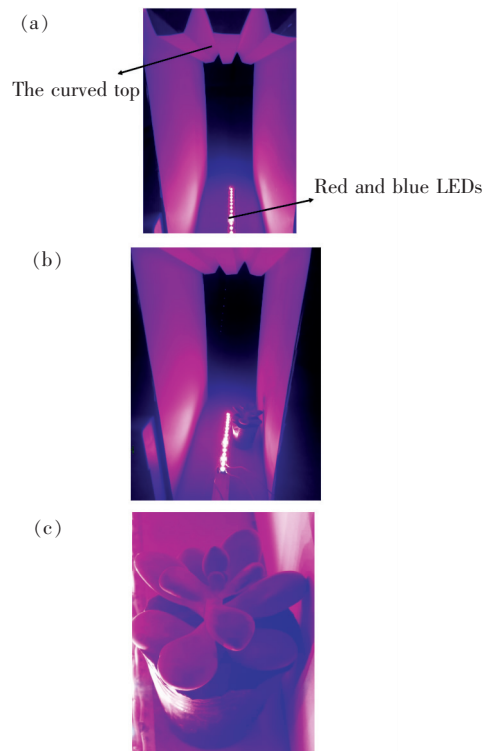


图 14 植物和培养架实物模型

Fig. 14 Physical model of plant and growing shelf

实验值比理论值偏小是因为存在实验误差,误差的来源有以下几个方面:

- (1) 实物模型加工过程存在误差;
- (2) 实验过程中环境光的影响;
- (3) 测量仪器的误差。

## 5 结 论

为了解决植物工厂中植物光源照度和混色均匀度差的问题,本文提出了一种基于曲面反射面的高均匀度倒置型植物光源,采用 Taguchi 实验方法对培养架的种植面宽度、顶部曲面位置、形状、高度等影响均匀度的因子进行设计,针对所选指标采用  $L_9(3^4)$  直交矩阵,利用 TracePro 软件模拟仿真。利用 ANOVA 方法分析各光学结构影响因子对照度均匀度和混色均匀度的影响,得出顶部曲面与 LED 灯的相对位置和顶部曲面的高度对种植面均匀度的影响最大,分别对这两个因子

进行优化后,得到照度均匀度为 91.64%、混色均匀度为 89.73% 的植物光源。所对应的最优结构是长×宽×高为 300 mm×150 mm×400 mm、种植面宽度为 130 mm、LED 与曲面中心横向距离为 5 mm、顶部曲面横截面为梯形、梯形高度为 25 mm 的高均匀度植物照明培养架。然后基于最优解研究植物生长过程中对于照明效果的影响,结果表明所设计的培养架不仅在植物育苗过程中具有良好的照明效果,在植物生长期依然可以对植物本身保持良好的照明。最后研究了不同形状和不同配光曲线的灯珠对培养架均匀度的影响,综合考虑灯珠配光曲线对培养架均匀度和光能利用率的影响后,得到照度均匀度为 86.26%、混色均匀度为 87.81%、光能利用率为 39.71% 的高均匀度和高光能利用率的照明培养架,并通过实物实验对培养架的均匀度进行了验证。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 刘文科. 植物工厂的发展现状与展望 [J]. 中国照明电器, 2016(12):5-9.  
LIU W K. Review on current status and development prospects of plant factory [J]. *China Light Lighting*, 2016(12):5-9. (in Chinese)
- [ 2 ] 刘文科. 植物工厂及其 LED 照明发展新动态 [J]. 农业工程技术, 2017,37(13):16-20.  
LIU W K. New developments of plant factories and its LED lighting [J]. *Agric. Eng. Technol.*, 2017,37(13):16-20. (in Chinese)
- [ 3 ] 潘瑞焜,王小菁,李娘辉. 植物生理学 [M]. 第 7 版. 北京:高等教育出版社, 2012.  
PAN R C, WANG X J, LI N H. *Plant Physiology* [M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)
- [ 4 ] 徐圆圆,章仪,吕蔓芳,等. LED 光源在植物工厂中的应用 [J]. 现代农业科技, 2016(6):161-162.  
XU Y Y, QIN Y, LV M F, *et al.*. Current status and developmental trends of LED light source utilization in plant factory [J]. *Mod. Agric. Sci. Technol.*, 2016(6):161-162. (in Chinese)
- [ 5 ] XIA M, WU X B, ZHONG Y, *et al.*. A novel  $\text{Na}_3\text{La}(\text{PO}_4)_2/\text{LaPO}_4$ : Eu blue-red dual-emitting phosphor with high thermal stability for plant growth lighting [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019,7(8):2385-2393.
- [ 6 ] 张帅,文尚胜,马丙戌,等. 适用于植物照明的高均匀度 LED 面光源设计 [J]. 发光学报, 2018,39(3):403-413.  
ZHANG S, WEN S S, MA B X, *et al.*. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(3):403-413. (in Chinese)
- [ 7 ] 马丙戌,文尚胜,陈颖聪,等. 侧入式无导光板 LED 平板灯设计 [J]. 红外与激光工程, 2016,45(4):0418001-1-8.  
MA B X, WEN S S, CHEN Y C, *et al.*. Design of edge-lighting LED flat panel light without light guide plate [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2016,45(4):0418001-1-8. (in Chinese)
- [ 8 ] 史晨阳,文尚胜,陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照度问题研究 [J]. 发光学报, 2015,36(3):348-354.  
SHI C Y, WEN S S, CHEN Y C. Study on curved surface LED array illumination problem based on Taguchi method [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015,36(3):348-354. (in Chinese)
- [ 9 ] 唐浩洲,文尚胜,符民,等. 光量子体系下基于粒子群算法的 LED 植物照明光源设计 [J]. 发光学报, 2019,40(3):340-348.  
TANG H Z, WEN S S, FU M, *et al.*. Design of LED plant lighting source based on particle swarm optimization algorithm



- under photons system [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(3):340-348. (in Chinese)
- [10] WANG H C, CHIANG Y T, LIN C Y, *et al.*. All-reflective RGB LED flashlight design for effective color mixing [J]. *Opt. Express*, 2016,24(5):4411-4420.
- [11] MORENO I. Illumination uniformity assessment based on human vision [J]. *Opt. Lett.*, 2010,35(23):4030-4032.
- [12] 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(S1):A75-A84.
- [13] ZHU Z M, QU X H, JIA G X, *et al.*. Uniform illumination design by configuration of LED array and diffuse reflection surface for color vision application [J]. *J. Disp. Technol.*, 2011,7(2):84-89.
- [14] 祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(1):0115001-1-6.  
ZHU Z M, QU X H, LIANG H Y, *et al.*. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2011,31(1):0115001-1-6. (in Chinese)
- [15] 姜昕宇, 文尚胜, 马丙戌, 等. 高照明均匀度倒置型LED植物光源系统的设计 [J]. *发光学报*, 2019,40(9): 1172-1184.  
JIANG X Y, WEN S S, MA B X, *et al.*. Design of high illumination uniformity inverted led plant light source system [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(9):1172-1184. (in Chinese)
- [16] FANG Y C, TZENG Y F, LI S X. Multi-objective design and extended optimization for developing a miniature light emitting diode pocket-sized projection display [J]. *Opt. Rev.*, 2008,15(5):241-250.
- [17] 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于 Taguchi 法设计带有圆锥台元件的超薄直下式LED平板灯 [J]. *光子学报*, 2015,44(10):1022003-1-9.  
CHEN H W, WEN S S, MA B X, *et al.*. Design of ultra-thin direct-down LED panel with tapered optical elements based on Taguchi method [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015,44(10):1022003-1-9. (in Chinese)
- [18] 孙智慧, 常军, 赵楠, 等. 一种新的用于直下式LCD背光源的LED [J]. *光学技术*, 2007,33(S1):282-284.  
SUN Z H, CHANG J, ZHAO N, *et al.*. A novel LED for LCD backlight [J]. *Opt. Tech.*, 2007,33(S1):282-284. (in Chinese)
- [19] 陈颖聪, 文尚胜, 罗婉霞, 等. 自由曲面底板的LED光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014,43(9):2947-2953.  
CHEN Y C, WEN S S, LUO W X, *et al.*. Design of LED optical system based on the substrate with freeform surface [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014,43(9):2947-2953. (in Chinese)



卢允乐(1997-),男,广东广州人,在读本科生,主要从事LED光学设计、LED植物照明光源工程的研究。  
E-mail: 437222358@qq.com



吴启保(1971-),男,湖北黄梅人,博士,教授级高级工程师,2000年于华南理工大学获得博士学位,主要从事LED芯片及封装、LED照明系统、机电一体化技术与装备的研究。  
E-mail: wuqb@szit.edu.cn



文尚胜(1964-),男,湖北黄冈人,博士,教授,2001年于华南师范大学获得博士学位,主要从事植物照明技术、可见光通信技术的研究。  
E-mail: shshwen@scut.edu.cn