

高空间照明均匀度植物光源系统的设计

焦飞宇¹, 文尚胜^{1,2}, 马丙戌¹, 张 博¹, 姜昕宇¹, 卢允乐¹, 黄玮钊¹, 吴启保³

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. 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: 传统的植物照明设计只针对单一参考面均匀度进行评价, 难以满足植物在整个生长过程中对均匀光照环境的需求。针对这一问题, 首先提出了空间照明均匀度评价体系, 并基于该体系设计了一种复合光源模块的立体化照明系统, 以期构建照明均匀的植物生长空间。进一步利用 Taguchi 方法优化实验过程, 在结合 ANOVA 分析的基础上, 获得了最优结构参数。最后对所得最优解进行灯珠形状分析和植物生长过程中的照明效果测试。实验结果表明: 最优结构可提供一个水平参考面照度均匀度为 87.22%, 混色均匀度为 90.11%; 竖直参考面照度均匀度 93.02%, 混色均匀度 91.43% 的均匀照明空间。该植物光源系统可满足植物生长过程中对均匀空间照明环境的需求。

关键词: 应用光学; 空间照明均匀度; Taguchi; 植物光源; 光学设计

中图分类号: O432; O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200119

Design of LED plant light source system with high spatial illumination uniformity

Jiao Feiyu¹, Wen Shangsheng^{1,2}, Ma Bingxu¹, Zhang Bo¹, Jiang Xinyu¹,
Lu Yunle¹, Huang Weizhao¹, Wu Qibao³

1. College of Materials 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 Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China)

Abstract: The traditional plant lighting design only evaluates the uniformity of a single reference surface, and it is difficult to meet the light intensity and light quality requirements of different stages of plant growth. Aiming at this problem, first, a space lighting uniformity evaluation system was proposed, and based on this system, a three-dimensional lighting system with a composite light source module was proposed, in order to construct a plant lighting space with uniform lighting. Further, the Taguchi method was used to optimize the experimental process, and the optimal structural parameters were obtained on the basis of ANOVA analysis. Finally, the lamp beads shape analysis and the lighting effect test during the plant growth process were performed on the obtained optimal solution. The experimental results show that the optimal structure can provide a uniform illumination space with horizontal reference plane illumination uniformity of 87.22%, color mixing uniformity of 90.11%; vertical reference plane illumination uniformity of 93.02%, and color mixing uniformity of 91.43%. The plant light source system can meet the requirement of a uniform space lighting environment during plant growth.

Key words: applied optics; spatial illumination uniformity; Taguchi; plant light source; optics design

收稿日期: 2020-04-09; 修订日期: 2020-06-05

基金项目: 广东省科技计划项目 (2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004); 广东省应用型科技研发专项 (2015B010134001); 广东省扬帆计划 (2015YT02C093)

0 引言

植物工厂 (Plant Factory) 是一种通过设施内高精度环境控制, 实现周年连续生产的高效农业系统^[1]。多年来, 植物工厂被国内外公认为解决人口和耕地问题的关键手段。LED(Light Emitting Diode) 作为一种新型光源, 凭借其光谱半宽窄、节能高效、可近距离照射植物以及便于设计和调控等优势, 现已在植物照明领域得到广泛应用^[2]。

目前常见的植物光源普遍借鉴室内照明的经验, 即采用在种植平面上方安装简单的 LED 阵列的“上光下植”的模式^[3], 虽然该模式具有成本低、装配快捷等优势, 但存在受照面照明均匀度差影响的弊端。对此, 笔者此前通过设计具倒置型结构的植物培养架解决了种植面照度和光谱分布不均匀的问题^[4-5]。与此同时, 目前对植物光源照明效果的评价多针对单一参考平面, 而一个合理的植物光源应考虑到植物生长周期内整个受照空间的照明效果。这一问题始终被忽视而没有得到有效解决, 因此进一步制约了植物光源的规范化设计以及相关评判标准的制定。综上, 设计适于植物整个生长过程的高空间照明均匀度的植物光源系统具有重要意义。

对此, 笔者对空间照明均匀度的研究意义及评价手段进行了深入阐述, 并提出了一种复合光源模块的立体化高空间照明均匀度的光源系统, 具体设计方案为: 将红、蓝 LED 阵列光源安装在植物培养架种植面中央倒置光源支架和侧壁的侧置光源支架上, 通过在两个方向上设置 LED 灯列和调整棱柱二面角, 可实现对光线分布的初步调控。此外, 培养架顶部和侧壁采用漫反射面的设计可增加光线耦合距离, 从而在受照空间内达到了光量子通量密度和光谱的高度均匀分布效果。进一步借助 Trace Pro 光学模拟软件模拟实现上述光学结构, 并结合照度学与植物光度学的换

算关系以及 CIE1976 色度学体系确定了实验照明效果的评定指标, 研究光源系统在不同结构参数下对应的照明效果。在不影响实验结果的前提下采用田口 (Taguchi) 方法简化实验过程^[6-7]。进一步利用变异数分析 (Analysis of Variance, ANOVA), 选取对光源系统各评定指标影响程度最大的两个因子进行精细化调整, 得到最优光学设计结构。结果表明该植物光源系统在植物不同生长时期均能实现均匀的照明效果, 具有一定的实用价值。

1 植物光源评价体系及理论分析

1.1 空间照明均匀度研究意义及评价手段

光作为植物生长发育过程中最重要的生态因子, 对提高植物生长空间内光均匀度具有重要意义。传统植物工厂采用的阵列型 LED 光源结构未能与 LED 发光单色性强和方向性强的特点相适应, 造成受照空间内光强差异较大、局部光谱成分单一等混光不均匀问题, 导致同一批次植物在主要生理过程和形态建成上差异较大, 严重影响了植物工厂的生产效益。因此, 寻求合理的植物光源系统结构对提高受照空间照明均匀度具有重要意义。

在植物照明领域光均匀度优化方面, 早期的植物照明设计往往借鉴传统室内照明经验, 只关注培养架底部种植面照明效果的均匀性。而随着植物生长过程的推进, 依据传统经典研究方法则需研究若干不同高度下的参考面的照明情况, 如图 1 所示。因此, 为与植物整个生长过程相适应, 在植物照明设计中应将整个三维参考空间的照明效果作为参考并进行优化。实验过程中可通过测量培养架种植面和竖直方向参考面的光强和光谱分布均匀度对三维参考空间内照明效果进行表征。

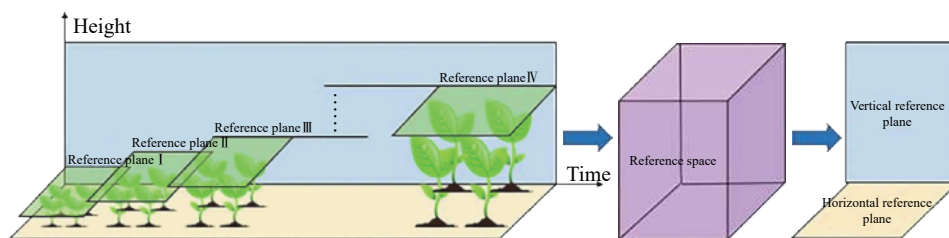


图 1 空间照明均匀度评价体系

Fig.1 Space lighting uniformity evaluation system

1.2 植物光源系统介绍

所设计并研究的立体化植物光源结构如图 2 所示,以植物工厂培养架为整体框架,采用倒置光源模块与侧置光源模块相结合的立体照明结构。如图 1 所示,培养架的底面为种植位面,培养架底部设置梯形底面直四棱柱的光源支架,培养架侧壁装有直三棱柱光源支架,光源支架侧面贴附有红蓝相间的 LED,培养架上顶面和侧壁光源支架两侧装有漫反射板。通过调整棱柱二面角可实现对光线出射角度的初步调整,并且顶面和侧壁的漫反射板可以很好地与倒置和侧置光源相配合,在平行于种植面和垂直于种植面两个方向上均能提高光线的耦合程度,进一步提高了受照空间的空间照明均匀度。此外,倒置光源和侧置光源相结合的设计可以减少植物生长过程中对光线的遮挡,有望在植物整个生长阶段提供均匀的照明环境。

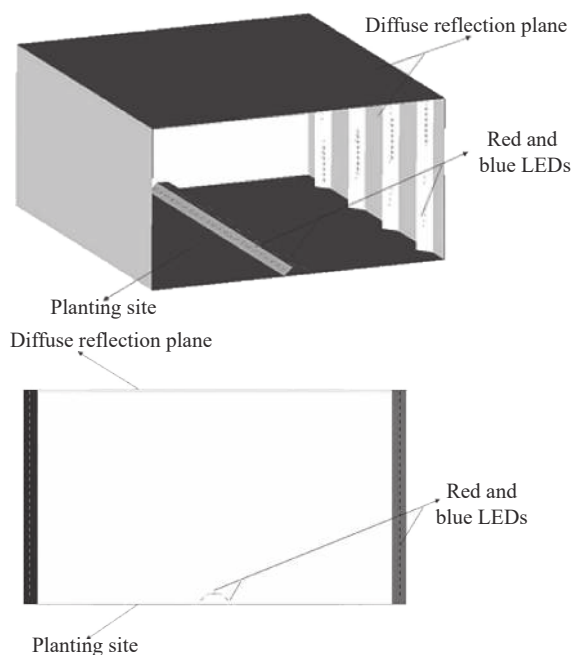


图 2 植物培养架方案的结构立体图及剖视图

Fig.2 Three-dimensional view and cross-sectional view of the plant cultivation rack scheme

1.3 实验测量指标

在植物光度学领域,植物对光的响应主要包括光量子通量密度 (PPFD) 和光谱组成两部分^[8]。因此,若培养架内不同位置 PPFD 或光谱分布差异较大,会导致同批次植物品质上的参差不齐。

根据笔者课题组之前的报道,可知 PPFD 与照度 $E_V(x)$ 之间有如下关系^[9]:

$$\alpha = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N K_{PPFD} / (X \cdot Y \cdot N)}{K_{PPFDmax}} = \frac{\frac{1}{k_{rb}} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N E_V / (X \cdot Y \cdot N)}{\frac{1}{k_{rb}} \cdot E_{Vmax}} \quad (1)$$

式中: α 为目标平面上的均匀度; X 和 Y 分别为待测平面的长和宽; N 为待测平面上单位面积的取点数; k_{rb} 为反映 E_V 和 PPFD 之间关系的常量。由公式 (1) 可以看出,为简化实验过程,PPFD 的测量可以由测量照度值代替。

此外,由光度-色度转换关系可知,混色均匀度可以用来表征培养架内光谱分布均匀度。在 CIE1976 色度体系下,混色均匀度计算公式如下^[10]:

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

$$U_{color} = \frac{100}{1 + k \Delta u' v'_{rms}} (\%) \quad (3)$$

式中: M 为样本点的数目; k 对应 $\Delta u' v'_{rms}$ 取最小; U_{color} 为 90% 时算出来的数值。

综上,后续实验过程中可通过测量培养架种植面和竖直方向参照面的照度均匀度和混色均匀度来反映三维受照空间内 PPFD 和光谱分布的均匀情况,并以两个参照面照度均匀度和混色均匀度均达到 75% 为优化目标。

1.4 理论分析

进一步对上述方案进行理论分析,如图 3 所示,该方案所涉及的参量主要有:顶部漫反射板到底部种植面的高度 H (实验过程中保持 H 恒定值 300 mm),种植面宽度 D ,梯形底面直四棱柱光源支架高为 h ,下底 d_1 恒为 50 mm,上底 d_2 恒为 20 mm,倒置光源部分相邻 LED 间距 l_2 恒为 10 mm,长度方向上,每个培养架结构单元长 L ,直三棱柱光源支架底面高宽比 $a = h_2/d_3$ (实验过程保持 d_3 恒定值 50 mm),侧置光源相邻 LED 间距 l 。

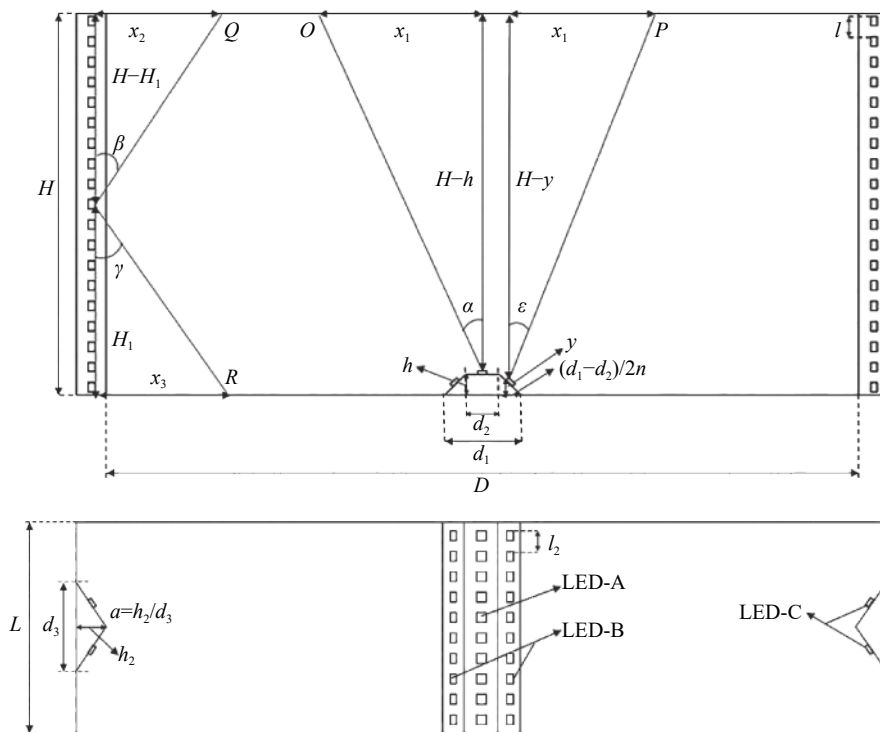


图 3 植物培养架局部平面图、俯视图及涉及参数

Fig.3 Local section and parameters involved of plant growing shelf

根据光源系统中 LED 位置和对受照空间的主要贡献光线类型, 可将系统内 LED 分为三类, 分别为图 3 中 LED-A、LED-B 和 LED-C。

LED-A 和 LED-B 贡献以反射光为主, 两者的分析过程类似, 祝振敏等^[11-12]得出, 入射至高漫反射面的光源可看作次朗伯光源, 现以 LED-B 在顶部反射面的次朗伯光源为例进行分析。光线照射至漫反射板上任一点 P, P 点的照度为:

$$E(x_1) = \frac{I_0 \cos^3 \varepsilon}{(H-y)^2} \quad (4)$$

式中: I_0 为朗伯光源的中心光强; $\varepsilon = \arctan \frac{x_1}{H-y}$; $y = \frac{d_1-d_2}{2n} \tan \varphi$, $\varphi = \arctan \frac{2h}{d_1-d_2}$, n 为常数。P 点的照度与次朗伯光源法向发光强度 I_f 成正比, 照射至种植位点的光强为:

$$E(\varepsilon) = \int^D \frac{I_f \cos^3 \omega}{H^2} dx \quad (5)$$

式中: ω 为次朗伯光源出射光线与法线夹角。

对于 LED-C, 反射光和直射光贡献相当, 分析其直射部分, 光线直接照射到种植面任一点 R, R 点照度为:

$$E(x_3) = \frac{I_0 \cos^3 \gamma}{H_1^2} \quad (6)$$

式中: $\gamma = \arctan \frac{x_2}{H_1}$ 。R 点照度直接与朗伯光源中心光强 I_0 成正比, 则照射到种植位点光强为:

$$E(\gamma) = \int^D \frac{I_0 \cos^3 \omega_0}{H_1^2} dx \quad (7)$$

式中: ω_0 为次朗伯光源出射光线与法线夹角。

对于 LED-C 的反射部分, 与 LED-B 的分析过程类似, 光线照射至漫反射板上任一点 Q, Q 点的照度为:

$$E(x_2) = \frac{I_0 \cos^3 \beta}{(H-H_1)^2} \quad (8)$$

式中: I_0 为朗伯光源的中心光强; $\beta = \arctan \frac{x_2}{H-H_1}$ 。Q 点的照度与次朗伯光源法向发光强度 I_{f1} 成正比, 照射至种植位点的光强为:

$$E(\alpha) = \int^D \frac{I_{f1} \cos^3 \omega_1}{H^2} dx \quad (9)$$

式中: ω_1 为次朗伯光源出射光线与法线夹角。

由公式 (5)、(7)、(9) 可以看出, 植物培养架结构参数 D 、 h 、 L 和 a 均对种植位点所受照度有所影响, 而

由色度光度关系可知,受照面的光谱分布和色度分布也将受到上述结构参数的影响。对于竖直方向上的均匀度,则可以认为是不同培养架高度对应不同参考面均匀度的变化,同样主要受这些因素影响。此外,光源支架上红蓝 LED 间距将影响照度圆和 LED 光色的耦合程度,从而导致照度和混色均匀度的变化,因此侧置光源 LED 的间距*l*也被纳入实验考察变量中。

2 实验与讨论

2.1 Taguchi 实验设计

通过 1.4 的理论分析可知,实验中设定了五个影响因子,每个影响因子在实际照明工程合理取值范围内各取四个水准值,若采取单一变量法,则需设置 4⁵组实验,为在不影响实验结果的基础上简化实验过程,采用 Taguchi 方法,通过正交表和计算方差值,选取 L₁₆(4⁵)正交矩阵,即分为 16 组实验进行研究。每个方案所选定的水平及因子如表 1 所示。

在各种波长的光中,红光(610~720 nm)和蓝光(400~510 nm)在植物的生长发育和形态构建过程中占有显著影响地位,具体影响到植物的光合作用、代谢酶的含量和活性、细胞分化表达和生物节律等众多方面^[13]。因此,红光和蓝光在人工补光和植物照明设计中得到了广泛应用。同样地,实验过程中选用 640 nm 的红光 LED 和 460 nm 的蓝光 LED 作为系统光源进行研究。

实验过程借助 Trace Pro 进行模拟,根据 CIE 的基本标准和度量程序^[14],并结合不同波长光线明视函数差异,在模拟过程中,设置 460 nm 蓝光 LED 芯片

表 1 植物培养架影响因子及其控制标准

Tab.1 Effect of factors and its control levels of plant culture shelf

Code name	Factor name	Number of levels	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	<i>D</i> /mm	4	400	450	500	550
B	<i>h</i> /mm	4	10	15	20	25
C	<i>L</i> /mm	4	100	150	200	250
D	<i>a</i>	4	0.2	0.4	0.6	0.8
E	<i>l</i> /mm	4	10	15	20	25

为 45 lm/W, 640 nm 红光 LED 芯片为 90 lm/W。功率均分别设定为 2 W 和 1 W,每个芯片发出 10000 条光线。

S/N 值(信噪比)用于表征品质特性^[6],且实验中照明均匀度为望大特性,对应 S/N 值的公式为^[5]:

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

式中: *y_i*表示第*i*个品质特性;*n*为实验次数。将实验的影响因子及水平代入 L₁₆(4⁵)正交矩阵。利用 Trace Pro 模拟仿真并计算,采用九点取样法测出照度及色度,计算出水平和竖直方向参考面照度均匀度以及混色均匀度,并根据公式(10)计算出参考面照度均匀度的 S/N 值及色度均匀度的 S/N 值,如表 2 所示。

为了获得最优解,将各因子的 S/N 值进行计算统计并绘图,结果如图 4 所示,并根据望大特性选取各因子中 S/N 值最大的水准组合形成初步最优解。

观察对比图 4 各因素水准对应的 S/N 值可知,水平面照度均匀度、竖直面照度均匀度、水平面混色均匀

表 2 L₁₆(4⁵)直角表实验设计

Tab.2 L₁₆(4⁵) orthogonal array

Experiment number	A	B	C	D	E	Horizontal/Vertical	Illumination uniformity	Color-mixed uniformity	S/N of illumination uniformity	S/N of color-mixed uniformity
1	1	1	1	1	1	Horizontal	76.9008%	74.6193%	37.7186	37.4570
						Vertical	91.3002%	71.8227%	39.2094	37.1252
2	1	2	2	2	2	Horizontal	87.6265%	86.6183%	38.8527	38.7522
						Vertical	90.2956%	90.0000%	39.1133	39.0849
3	1	3	3	3	3	Horizontal	73.3094%	74.4289%	37.3032	37.4348
						Vertical	76.5618%	80.6504%	37.6802	38.1321
4	1	4	4	4	4	Horizontal	59.3363%	90.0000%	35.4664	39.0849
						Vertical	70.6207%	81.5623%	36.9786	38.2298
5	2	1	2	3	4	Horizontal	75.7509%	76.8971%	37.5878	37.7182
						Vertical	79.1110%	81.4826%	37.9647	38.2213

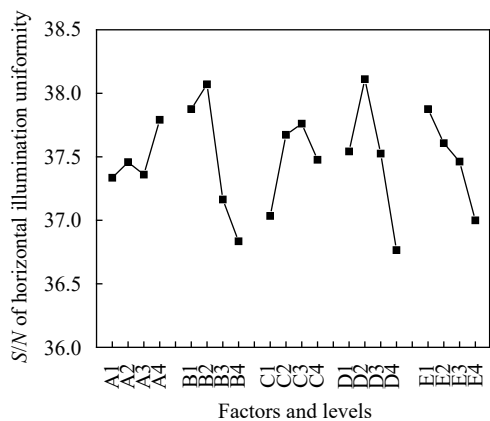
续表 2

Continued Tab.2

Experiment number	A	B	C	D	E	Horizontal/Vertical	Illumination uniformity	Color-mixed uniformity	S/N of illumination uniformity	S/N of color-mixed uniformity
6	2	2	1	4	3	Horizontal	69.5528%	68.8260%	36.8463	36.7551
						Vertical	84.8666%	80.6880%	38.5747	38.1362
7	2	3	4	1	2	Horizontal	73.3071%	79.2486%	37.3029	37.9798
						Vertical	90.4582%	87.8421%	39.1290	38.8741
8	2	4	3	2	1	Horizontal	80.3125%	61.3495%	38.0957	35.7562
						Vertical	93.6031%	76.3883%	39.4258	37.6605
9	3	1	3	4	2	Horizontal	74.3324%	87.2168%	37.4236	38.8120
						Vertical	83.2272%	84.2542%	38.4053	38.5118
10	3	2	4	3	1	Horizontal	82.8161%	72.4249%	38.3623	37.1978
						Vertical	91.6616%	81.2238%	39.2437	38.1937
11	3	3	1	2	4	Horizontal	68.5804%	88.9663%	36.7240	38.9845
						Vertical	93.1065%	80.3089%	39.3796	38.0953
12	3	4	2	1	3	Horizontal	70.2089%	86.0483%	36.9278	38.6948
						Vertical	93.1065%	84.9398%	39.3796	38.5822
13	4	1	4	2	3	Horizontal	86.8233%	80.8601%	38.7727	38.1547
						Vertical	93.4749%	76.9877%	39.4139	37.7284
14	4	2	3	1	4	Horizontal	81.4725%	83.0723%	38.2202	38.3891
						Vertical	94.5569%	84.9398%	39.5139	38.5822
15	4	3	2	4	1	Horizontal	73.4857%	61.5852%	37.3241	35.7895
						Vertical	90.9310%	80.8429%	39.1742	38.1528
16	4	4	1	3	2	Horizontal	69.5711%	79.7158%	36.8486	38.0309
						Vertical	80.0277%	75.6580%	38.0648	37.5771

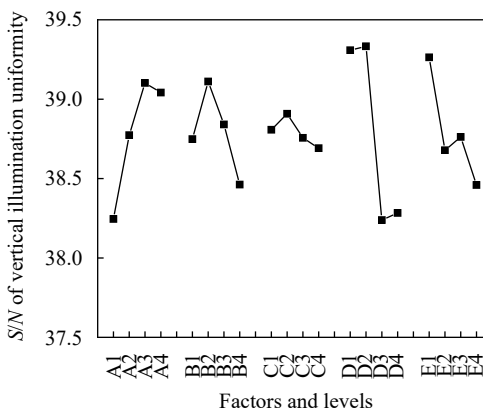
度和竖直面混色均匀度四项测试指标对应的最优因素组合分别为 A4B2C3D2E1、A3B2C2D2E1、A3B1C4-D1E4、A3B2C2D1E2, 而最优解应使四项属性尽可能多地取高。权衡方案一每个因子在水平面竖直面的照度均匀度和混色均匀度上 S/N 值的变化, 可初步认定系统最优解组合为 A3B2C2D2E1, 对应培养架具体

结构参数: 培养架宽度 D 为 500 mm, 倒置光源支架底面高 h 为 15 mm, 长度方向相邻结构单元距离 L 为 150 mm, 侧置光源支架高宽比 a 为 0.40, 相邻 LED 间距 l 为 10 mm。模拟仿真后结果如图 5 所示, 水平面照度均匀度为 88.25%, 混色均匀度为 85.90%, 竖直面照度均匀度为 92.23%, 混色均匀度为 87.71%。



(a) 水平面照度均匀度的 S/N 值

(a) S/N value of illumination uniformity on horizontal plane



(b) 竖直面照度均匀度的 S/N 值

(b) S/N value of illumination uniformity of vertical plane

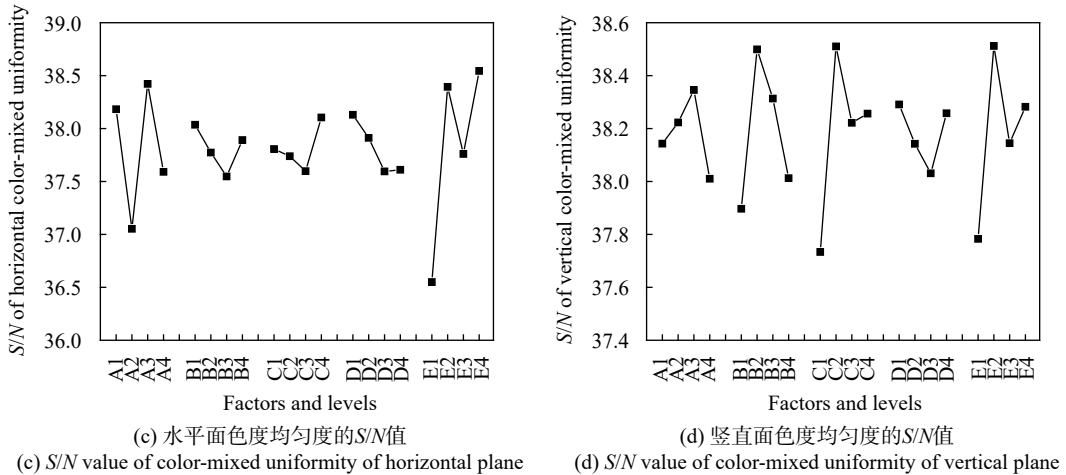


图 4 各因素水准对应的 S/N 值

Fig.4 S/N of different levels of different factors

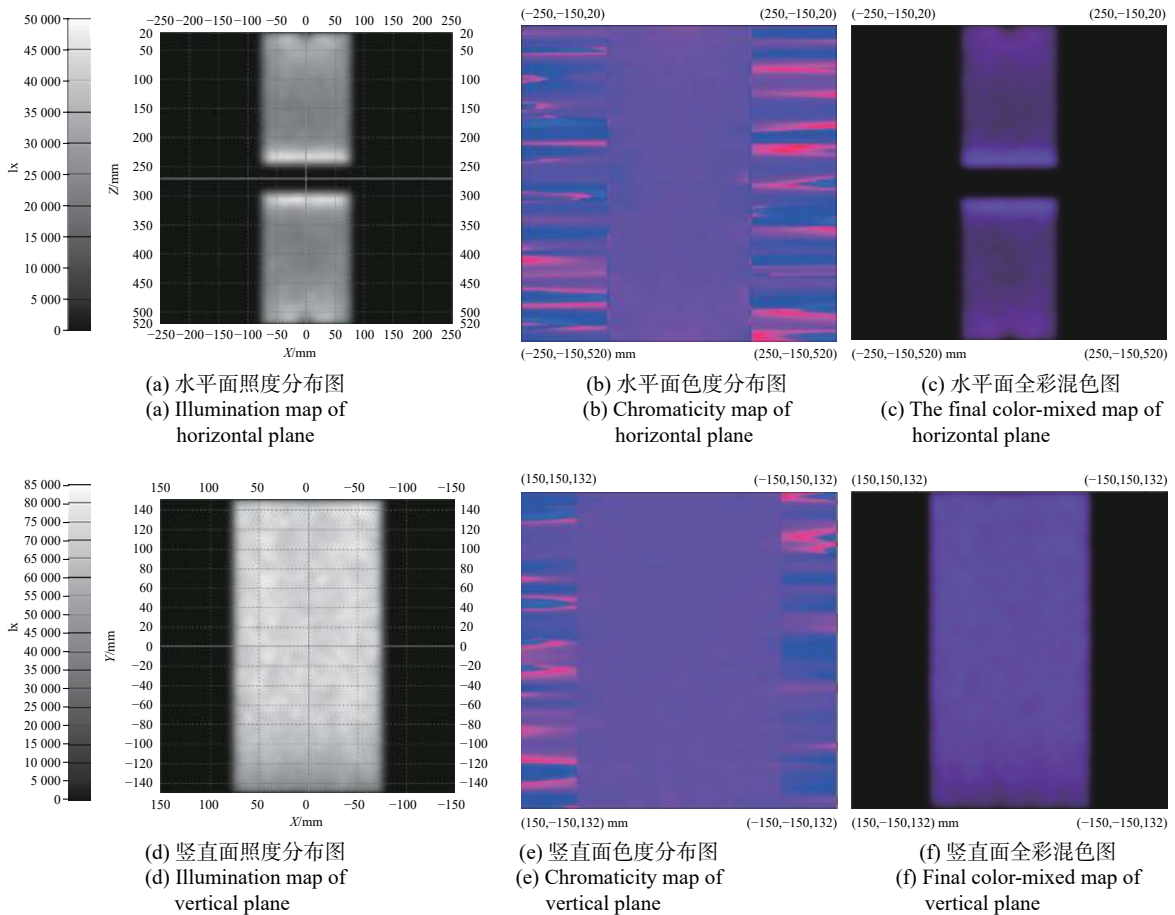


图 5 Taguchi 最优结构水平面和竖直面所对应的照度、色度、全彩混色分布图

Fig.5 Illumination, chromaticity, and full-color mixing distribution map of the horizontal and vertical planes of the best optimal structure based on Taguchi method

2.2 变异数分析 (Analysis of Variance, ANOVA)

ANOVA 法即方差分析法, 即通过比较各影响因子在实验偏差中的占比来评估各影响因子的贡献率,

即对实验结果的影响程度。贡献率大的因子被选出进一步研究, 而贡献度较小的因子则被当作偶然事件处理, 影响程度的强弱程度通过参量 ρ 来表示^[4]:

$$\rho = \frac{S_{sd}}{S_{st}}, S_{st} = S'_{sd} + S_{se} \quad (11)$$

式中： S_{sd} 和 S'_{sd} 表示方差和； S_{se} 为错误方差和（由于实验的重复性，可近似认为 S_{se} 为 0）。 S_{sd} 由 S/N 比的方差和可表示为^[15-16]：

$$S_{sd} = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \bar{\eta})^2 \quad (12)$$

式中： m 为实验次数； η_i 为每个因子第 i 次实验的 S/N 比； $\bar{\eta}$ 为每个因子 S/N 的平均值，实验中， $\eta = L_{TB}(S/N)$ 。计算得出各影响因子对品质的贡献度如表 3 所示。

对水平面和竖直面的照度、混色均匀度贡献大的影响因子为 D、E，在保持 A 取 A3、B 取 B2、C 取 C2 的情况下，对 D、E 因子进一步进行微调优化。先保持 A、B、C、E 的值为 A3B2C2E1 不变，对 D 因子进行细分取 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50 八个水准，依次命名为水准 1~水准 8。利用 Trace Pro 模拟仿真，测量计算水平面照度均匀度和混色均

匀度 ($k=53.4167$)，以及竖直面照度均匀度和混色均匀度 ($k=44.7583$)。

从图 6 中得出 D 因子在取 0.35 时系统综合属性最优，具体为水平面照度均匀度 87.01%，竖直面照度均匀度 91.82%，水平面混色均匀度 87.59%，竖直面混色均匀度 89.29%。所以取 A=500 mm、B=15 mm、C=150 mm、D=0.35，然后继续细分 E 因子。分别取 8、10、12、14、16、18、20 mm 七个水准，依次命名为水准 1~水准 7 并进行测试。

分析比较图 7 培养架各项属性，可知 E 因子在取 12 mm 时系统综合属性最优，因此该植物培养架的最优组合为 A=500 mm、B=15 mm、C=150 mm、D=0.35、E=12 mm，对应培养架具体结构参数为培养架宽度 D 为 500 mm，倒置光源支架底面高 h 为 15 mm，长度方向相邻结构单元距离 L 为 150 mm，侧置光源支架高宽比 a 为 0.35，相邻 LED 间距 l 为 12 mm。仿真结果如图 8 所示，测得其各属性为水平面照度均匀度为 87.22%，混色均匀度为 90.11%；竖直面照度均匀度

表 3 各因子对照度均匀度和混色均匀度的贡献率

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

Impact factor	Contribution to horizontal plane illumination uniformity	Contribution to vertical plane illumination uniformity	Contribution to horizontal plane color-mixed uniformity	Contribution to vertical plane color-mixed uniformity
A	4.763 8%	21.097 6%	27.909 5%	6.436 1%
B	36.649 1%	9.915 9%	3.144 0%	24.656 4%
C	11.282 6%	1.156 6%	3.357 9%	34.168 5%
D	32.839 8%	51.842 9%	4.886 7%	4.534 2%
E	14.464 7%	15.987 0%	60.702 0%	30.204 9%

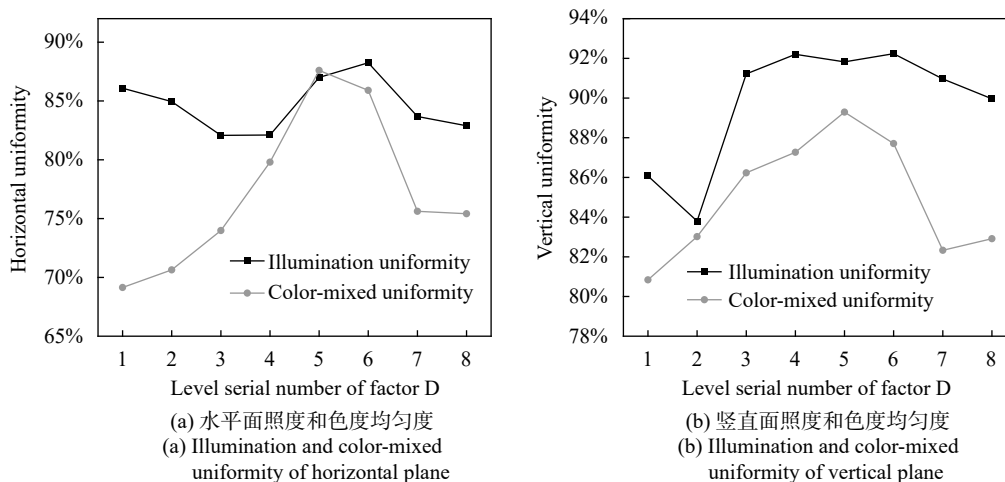


图 6 各项属性随 D 因子的变化曲线

Fig.6 Variation curves of various attributes with factor D

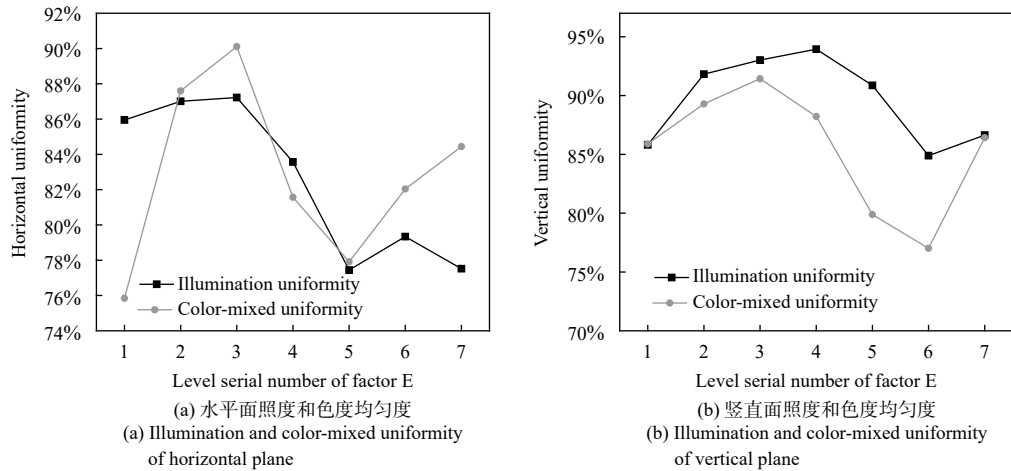


图 7 各项属性随 E 因子的变化曲线

Fig.7 Variation curves of various attributes with factor E

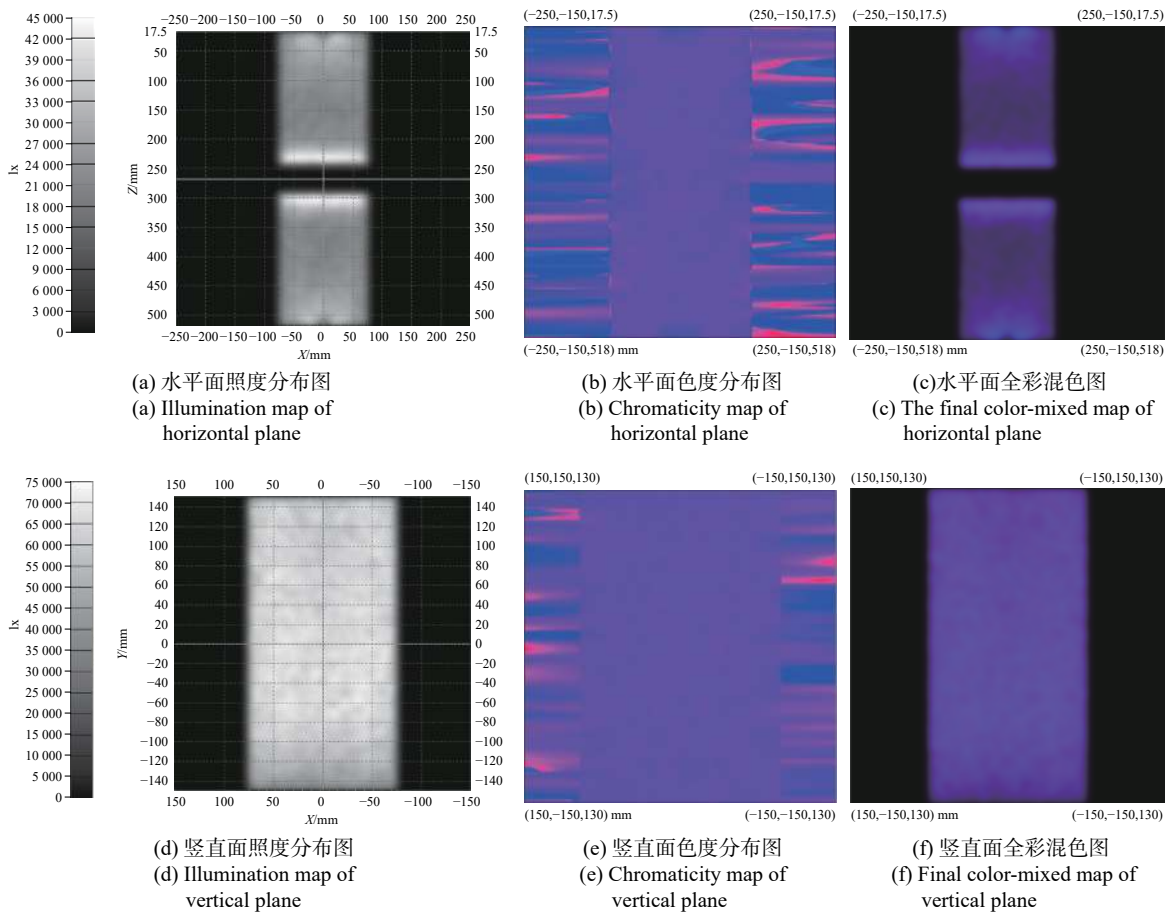


图 8 植物培养架最终优化结果所对应的照度、色度、全彩图

Fig.8 Illumination map, chromaticity map, and the final mixed-color map of the final optimization result of plant growing shelf

93.02%, 混色均匀度 91.43%。

2.3 灯珠形状研究

进一步, 在最优解的基础上研究培养架各均匀度属性受灯珠形状的影响情况。灯珠的形状和尺寸

($n \times m$, 其中 n 为与 LED 灯列平行方向长度, m 为与 LED 灯列垂直方向长度) 为: 5×5 正方形、4×6 矩形-1、6×4 矩形-2、 $R=2.5$ 圆形。用 Trace Pro 软件对这四种不同形状的灯珠模型进行模拟仿真, 测得培养架的

水平面和竖直面照度和色度均匀度,如图 9 所示。

可以看出,采用发光面为正方形的灯珠时,培养架水平面的照度均匀度和混色均匀度为最大值,在竖直面照度均匀度方面 4×6 的矩形 LED 灯珠最佳,在

竖直面混色均匀度方面则是圆形 LED 灯珠最佳,正方形灯珠稍次之。综合考虑四项属性,该培养架采用发光面为正方形的灯珠更合理。

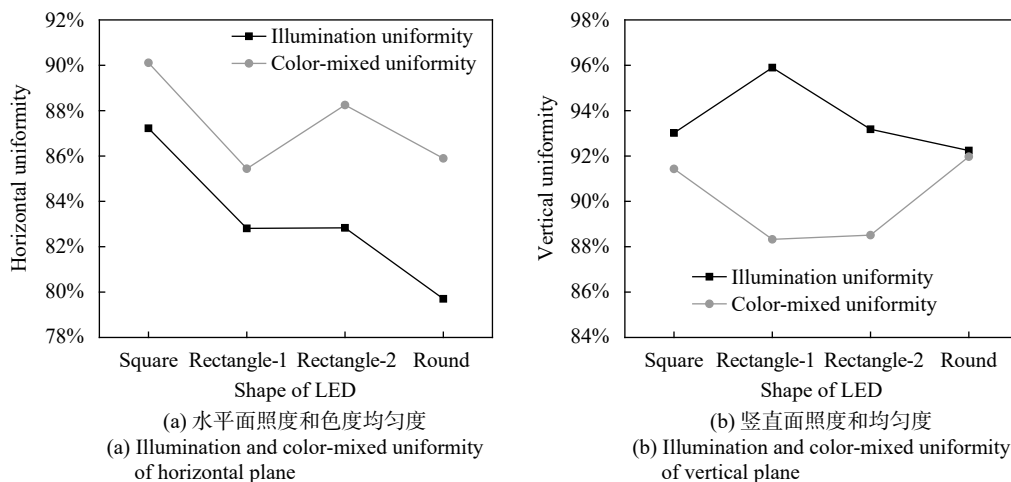


图 9 各项属性随灯珠发光面形状和尺寸的变化曲线

Fig.9 Variation curves of various attributes with the shape and size of light-emitting surface of the lamp bead

2.4 遮挡检测及分析

在培养架照明质量评价过程中,在植株育苗期,由于植株矮小,对光源系统遮挡很弱,可将种植面照明均匀度作为培养架内照明效果的主要评价标准。但随着植物生长,植株对光线的遮挡作用增强,需考虑植物在各个高度下培养架内照明情况,即需要在最优模型的基础上对植物生长过程中的植物表面的照度和光谱分布进行测试,研究植物不同生长阶段的照明效果。研究过程的简化模型如图 10 所示。通过倒三棱柱的顶面和侧面分别模拟植物的顶面和侧面,通

过增加模型的高度来模拟植株的生长过程。并测试植物高度在 25、50、75、100、125、150、175 mm 时种植面 ($k=53.4167$)、倒三棱柱顶面(代表植物体正上方的受照情况, $k=31.3263$)、侧面(代表植物体侧面叶片的受照情况, $k=31.6157$)的照明均匀度,测量结果如图 11(a)~(c) 所示。

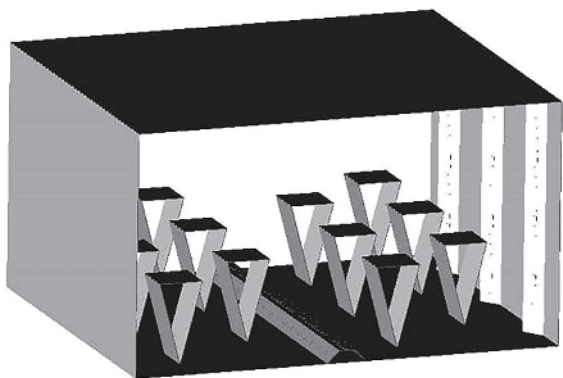


图 10 植物生长模型

Fig.10 Plant growth model

从图 11 中分析可得,三个参考面的色度均匀度基本不随植株高度的增加而明显变化,总体上维持在较高水准。在照度均匀度方面,种植面和植株顶面照度始终处于较高水平,只在小范围内波动,植株侧面的照度均匀度则整体呈下降趋势,并在 150 mm 后明显下降。这是由于随植株高度的增加,植株顶部面积变大,培养架内光线主要被植株顶部吸收,导致侧面吸收光线较少,无法得到很充分的混合,故均匀度有所下降。但侧面的混色均匀度始终保持较高的水平,且侧面对光照需求较低,因而不会对植物的生长带来较大的影响。

综上,在植株高度 0~150 mm 范围内植株顶部、植株侧面和种植面的照度均匀度和混色均匀度均可保持在较高的水准。因此,该植物光源系统在植株的育苗阶段和生长阶段均能提供均匀的空间照明环境,

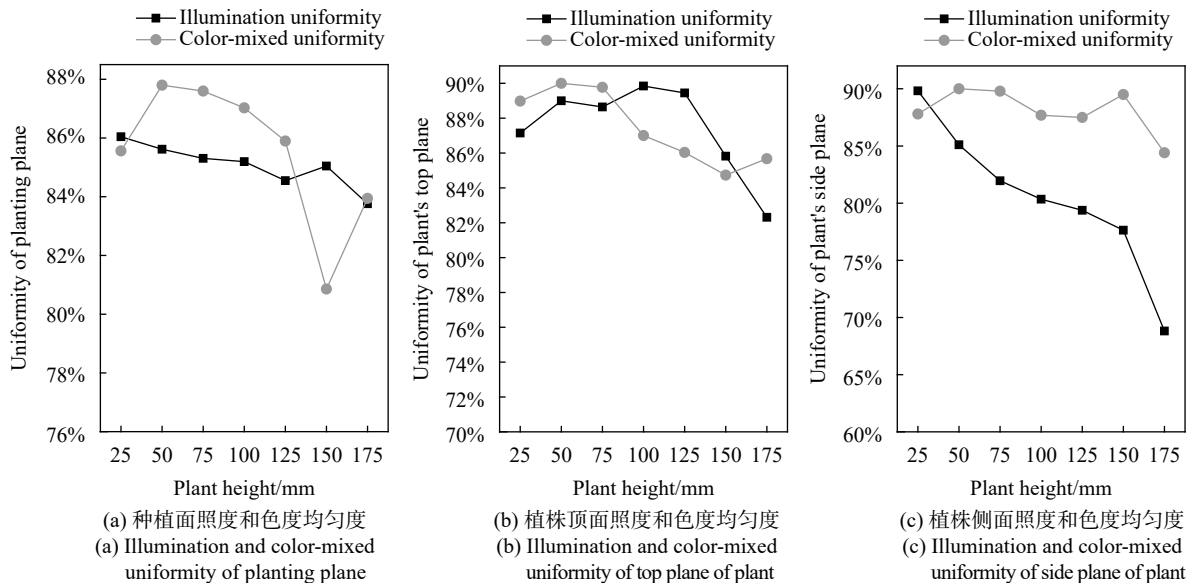


图 11 植物不同高度时的照度均匀度、混色均匀度

Fig.11 Illumination uniformity, color uniformity at different heights of plants

具有较高的实用价值。

3 结 论

针对现有植物工厂光源系统结构粗放导致植物品质参差不齐,以及传统植物光源设计只关注单一受照面均匀度的问题,对植物光源系统的空间照明均匀度理论研究的重要性和评价手段进行了系统的阐述,并提出了一种复合光源模块的高空间均匀度光源系统设计方案。利用侧置、倒置光源结果与顶部和侧壁漫反射面的设计提高了光线的耦合程度和分布均匀性。文中利用 Taguchi 方法设计实验,并基于所得初步最优解进行 ANOVA 分析和进一步优化,得到水平面照度均匀度 87.22%,混色均匀度 90.11%;竖直面照度均匀度 93.02%,混色均匀度 91.43%的最优模型。然后在最优解的基础上继续研究了灯珠形状对均匀度的影响。最后对植物生长过程中光源遮挡情况进行仿真检测,得出的结果显示文中光源系统在植物整个生长周期内均能提供均匀的照明环境,可有效改善传统植物光源受照空间内照明不均匀的弊端。所提出的复合光源模块立体化植物光源系统对未来植物光源设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] Wang Weili. A brief analysis of the current situation of plant

factory development at home and abroad [J]. *Woodworking Machinery*, 2018(4): 31-34. (in Chinese)

[2] Zhang Li, Yu Xiaopeng, Huang Yiting, et al. Application and development trend of LED artificial light for plant lighting [J]. *Journal of Foshan University(Natural Science Edition)*, 2019, 32(1): 50-55. (in Chinese)

[3] Jin Xiaolin, Wen Shangsheng, Ma Bingxu, et al. Design of high uniformity LED plant lamp [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(10): 1466-1477. (in Chinese)

[4] Jiang Xinyu, Wen Shangsheng, Ma Bingxu, et al. Design of high illumination uniformity inverted LED plant light source system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(9): 1172-1184. (in Chinese)

[5] Jiang Xinyu, Wen Shangsheng, Zuo Xin, et al. High illumination uniformity inverted plant light source design with bulge structure [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(3): 339-349. (in Chinese)

[6] Zeng Fengzhang, Zhao Xia. Taguchi method and its standardized design [J]. *Machinery Industry Standardization & Quality*, 2003, 28(11): 7-9. (in Chinese)

[7] Li Zhuolin, Li Rongbin. Study on removal characteristic of silicon carbide surface in precision mechanical polishing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0220003. (in Chinese)

[8] Gao Dan, Han Qiuyi, Zhang Shanrui. Value conversion between plant photometry and luminous photometry [J]. *Agricultural*

- Engineering Technology*, 2015, 26(2): 28-36. (in Chinese)
- [9] Tang Haozhou, Wen Shangsheng, Fu Min, et al. Design of LED plant lighting source based on particle swarm optimization algorithm under photons system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(3): 340-348. (in Chinese)
- [10] Zhang Shuai, Wen Shangsheng, Ma Bingxu, et al. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(3): 403-413. (in Chinese)
- [11] Zheng Jie, Hu Meijun, Guo Yanping. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(7): 1619-1624. (in Chinese)
- [12] Yang Yuming, Li Yan, Zhou Tianliang, et al. The relationship between spectral ratio and chromaticity parameters of high color rendering index LED [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2019, 30(5): 82-87, 98. (in Chinese)
- [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]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(2): 84-89.
- [14] Zhu Zhenmin, Qu Xinghua, Liang Haiyu, et al. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 178-183. (in Chinese)
- [15] Xiang Changming, Wen Shangsheng, Shi Chenyang, et al. Design of direct-down type LED panel light with curved surface plate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718004. (in Chinese)
- [16] Ma Bingxu, Wen Shangsheng, Chen Yingcong, et al. Design of edge-lighting LED flat panel light without light guide plate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418001. (in Chinese)



第一作者简介：焦飞宇 (1999-)，男，本科生，主要从事 LED 光学设计、LED 植物照明工程的研究工作。Email: jiao-feiyu@qq.com



导师简介：文尚胜 (1964-)，男，教授，博士生导师，博士，主要从事 LED/OLED 照明技术、OLED/LCD 平板显示技术的研究工作。Email: shshwen@scut.edu (通讯联系人)