

立体化高空间照明均匀度 LED 植物光源的设计

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 传统植物照明设计只优化某一参考面的均匀度, 导致植物生长空间内的光环境不均一。为了解决该问题, 对空间照明均匀度评价体系进行了研究。首先, 提出了三种潜在的立体化高空间照明均匀度植物光源设计方案, 并借助 TracePro 光学仿真软件研究了结构参数对照明效果的影响。进一步利用 Taguchi 方法优化实验过程, 并结合 ANOVA 分析, 获得了最佳方案的最优结构参数。然后, 基于所得最优解, 对植物生长过程中的照明效果进行了测试。最后, 介绍了立体化光源系统相对传统阵列式 LED 光源的技术优势。实验结果表明: 最优结构可提供一个均匀照明空间, 该空间内的水平面照明均匀度和垂直面照明均匀度分别为 92.00% 和 83.12%, 并且两个空间参考平面上的红蓝光混色均匀度分别达到 94.19% 和 90.70%。该植物光源系统可为植物提供其生长过程中所需的均匀空间照明环境。

关键词 光学设计; 空间照明均匀度; Taguchi; 植物光源; 发光二极管(LED)

中图分类号 O432; O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1822002

Design of Stereo LED Plant Light Source System with High Spatial Illumination Uniformity

Jiao Feiyu^{1**}, Wen Shangsheng^{1,2*},

Ma Bingxu¹, Zhang Bo¹, Jiang Xinyu¹, Lu Yunle¹, Huang Weizhao¹, Wu Qibao³

¹College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou, Guangdong 510640, China;

²State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology,

Guangzhou, Guangdong 510640, China;

³School of Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology,

Shenzhen, Guangdong 518172, China

Abstract The traditional plant lighting design only optimizes the uniformity of a certain reference surface, which leads to the unevenness of the light environment in the plant growth space. In order to solve this problem, we conduct the research based on the spatial illumination uniformity evaluation system. First, three potential design schemes are proposed for the stereo plant light sources with high spatial illumination uniformity, and the effect of structural parameters on illumination is studied with the help of the TracePro commercial simulation software. Further, the Taguchi method is used to optimize the experimental process and the optimal structural parameters are obtained with the ANOVA analysis. Then, the illumination effect during plant growth is tested based on the obtained optimal solution. Finally, the technical advantages of the stereo light source system compared with the traditional array LED light source are introduced. The experimental results show that the optimal structure can provide a uniform illumination space with illumination uniformity of horizontal planes and illumination uniformity of vertical planes of 92.00% and 83.12%, respectively, and with the red and blue color-mixed uniformity of two

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-06-11

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)、广州市科技计划项目(201604040004, 201604016010)、中山市科技计划项目(2016A1009, 2017C1011)、深圳市科技计划项目(GJHZ20180929154602092)

* E-mail: shshwen@scut.edu; ** E-mail: jiao-feiyu@qq.com

spatial reference planes of 94.19% and 90.70%, respectively. The plant light source system can meet the need of a uniform spatial illumination environment during plant growth.

Key words optical design; spatial illumination uniformity; Taguchi; plant light source; light emitting diode (LED)

OCIS codes 220.2945; 220.4830; 170.2945

1 引 言

植物工厂(Plant Factory)是一种通过精准控制各环境因素,实现产品持续高效产出的农业系统^[1-2],其被公认为是解决人口问题和土地问题的有效手段之一。目前,常见的植物光源普遍采用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)^[3],且传统方法是在种植平面上方安装简单的 LED 阵列,即采用“上光下植”的模式^[4-5]。虽然该方法具有生产成本较低、装配快捷的优点,但无法为植物提供一个均匀的照明环境,进而导致植物工厂的产品良莠不齐。

为了解决这一问题,本课题组先后在 LED 背光源和 LED 面光源的基础上优化了光源构架,进而实现了高照明均匀度的植物光源系统^[6];并设计研究了具有倒置型结构的植物光源系统,进一步提高了种植面照度和光谱分布的均匀度^[7-8]。然而,随着植物高度的增加,需要对不同高度的参考平面进行测试。因此,设计适用于植物整个生长过程的高空间照明均匀度植物光源系统成为植物照明领域需要解决的关键问题。

本文对空间照明均匀度的研究意义及其评价体系进行了深入阐述,并提出了基于悬吊光源模块的三种立体化植物光源设计方案。三种方案均把培养架顶部设计成漫反射面,漫反射面的引入增加了光线耦合距离,从而提高了受照空间内光线混合的均匀程度。借助 TracePro 光学模拟软件,模拟了上述光学结构,并基于照度学与植物光度学的换算关系以及色度学体系,确定了实验评定指标。为了简化实验过程,采用田口(Taguchi)方法代替了复杂低效的全面实验法^[9],并通过比较选出了最优方案。进一步利用变异数分析(ANOVA)^[10],选取对各评定指标影响最大的两个因子进行精细化调整,得到了最优光学设计方案,并基于最优结构进行了植物生长过程中的遮挡测试。结果表明,在植物的不同生长时期,该植物光源系统均能提供均匀的照明环境,具有很高的实用价值。

2 实验评价体系及测量指标

2.1 空间照明均匀度的研究意义及评价体系

光是植物生长过程中最重要的生态因子,提高

植物生长空间内的光均匀性具有重要意义。植物工厂受照空间内光强分布和光质分布的不均匀性会导致同一批次植物生长过程和结构特征出现较大差异^[11-13],使得植物品质参差不齐,增加了后续的营养液配比难度及人工成本。在传统的阵列型 LED 光源系统中,受照面内的光强差异较大,局部光谱成分单一,这些混光问题严重影响植物生长的均齐程度^[14-15]。因此,寻求合理的植物光源系统结构对改善受照空间的照明环境具有重要意义。

在植物照明领域光均匀性优化方面,早期的植物照明设计往往只关注种植面照明效果的均一性。随着植物高度的增加,传统研究方法需考察不同高度下的参考面的照明情况,如图 1 所示。因此,为了配合整个植物生长过程,植物照明工程系统设计应该将整个三维参考空间的照明情况作为参考,针对受照空间中的照明效果均一性进行研究和优化。为了在实验过程中准确研究某一空间内的照明情况,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,对三维参考空间的照明效果进行表征。

2.2 照度与光量子通量密度的关系

在植物光度学领域,常采用光量子通量密度 K_{PPFD} (Photosynthetic photon flux density, PPFD) 来表征植物对光的响应^[16],PPFD 即单位时间单位面积内所通过的光子数,单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外,由于植物敏感曲线与人眼视见函数之间存在差异,故在植物照明领域,需要利用两者之间的换算关系来简化测量过程。根据本课题组之前的研究可得, K_{PPFD} 与照度 E_{V} 之间的关系^[17]为

$$\alpha = \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{c=1}^C K_{\text{PPFD}}(b, c) / (B \cdot C \cdot O)}{K_{\text{PPFDmax}}} = \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{c=1}^C E_{\text{V}}(b, c) / (B \cdot C \cdot O)}{E_{\text{Vmax}}}, \quad (1)$$

式中: α 为目标平面上光量子通量密度的均匀度; B 和 C 分别为待测平面的长和宽; O 为待测平面上单位面积的取点数; $K_{\text{PPFD}}(b, c)$ 为目标平面上第 b 行、第 c 列测试点的光量子通量密度值; $E_{\text{V}}(b, c)$ 为该测试点照度值; K_{PPFDmax} 为测试点中最大的 PPFD

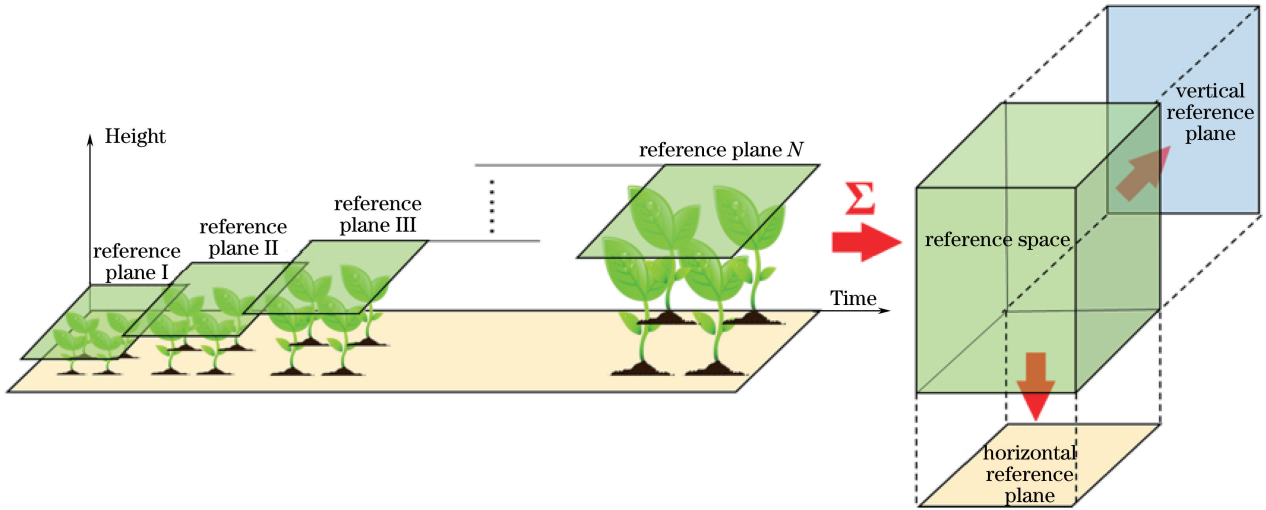


图 1 空间照明均匀度评价体系

Fig. 1 Spatial illumination uniformity evaluation system

值; $E_{V_{max}}$ 为测试点中最大的照度值。由(1)式可以看出, 可以通过测量待测平面的照度值来表征 PPF。本文采用九点取样法测量照度值以表征 PPF。

2.3 混色均匀度

根据植物光合作用光谱(PAS)和植物对光谱的响应特点, 并结合色度学原理和光度-色度转换关系可知, 混色均匀度可用来表征培养架内光谱分布的均匀度^[12]。在 CIE1976 色度体系下, 色坐标用 (u, v) 表示, 混色均匀度定义为样本点色坐标 u, v 的差异。混色均匀度计算公式^[18-19]为

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u_i - u_{avg})^2 + (v_i - v_{avg})^2]}, \quad (2)$$

$$U_{color} = \frac{100}{1 + kR_{rms}}, \quad (3)$$

式中: M 为样本点的数目; u_{avg} 和 v_{avg} 分别为样本点色坐标 u_i, v_i 的平均值; i 为样本点编号; U_{color} 为混色均匀度; R_{rms} 为样本点色坐标的均方根值; k 为描述光谱混合均匀程度的常数。均方根值越小, 则色坐标差异越小。

综上所述, 在后续实验过程中, 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, 对三维受照空间内 PPF 和光谱分布的均匀情况进行表征, 并以两个参照面的照度均匀度和混色均匀度均达到 80% 为优化目标。

3 植物光源理论分析

3.1 植物光源系统模型介绍

本文设计并研究的立体化植物照明结构如图 2

所示, 其以植物工厂培养架为整体框架, 且含有悬吊光源模块。图 2(a) 所示为方案一结构, 中央悬吊光源部分为具有菱形底面的直四棱柱结构, 棱柱侧面贴有红蓝相间的 LED, 培养架的底面为种植位面。借助棱柱面可以实现光源出射光线的调整, 通过调整棱柱面二面角可以调控光线的出射角度, 悬吊光源系统可有效减少植物长高后对光线的遮挡。为了提高空间照明均匀度, 培养架上顶面采用漫反射面。

图 2(b) 所示为方案二结构, 其将菱形底面四棱柱更换为正四边形底面棱柱, 有助于光线分布在水平方向和竖直方向上, 并且有助于对比研究悬吊系统结构参数对整体照明效果的影响。

为了进一步获得高空间照明均匀度光源结构, 设计图 2(c) 所示的立体光源系统, 其结合了倒置结构和悬吊结构。在方案二的基础上, 在悬吊支架上下表面和种植面棱柱突起的两侧贴上红蓝相间的 LED, 并配合漫反射顶面, 该结构有望大幅度提高光源系统的空间照明均匀度。

3.2 植物培养架的理论分析

进一步对上述三种方案进行理论分析, 如图 3 所示, 其中 x 为 P 点与 LED-A 间的水平距离, y 为 LED-A 到中央平面的竖直距离, x_1 为 Q 点与 LED-B 间的水平距离。方案一所涉及的参量主要有相邻结构单元间距 L 、顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 、悬吊支架菱形底面的高-宽比 $a = h/d$ (实验过程保持 d 为 50 mm) 及相邻两 LED 的间距 l 。将设计方案中受照空间的光线来源划分为直射和反射两部分。在方案一中, LED-A 和 LED-B 主要贡献两部分光线。

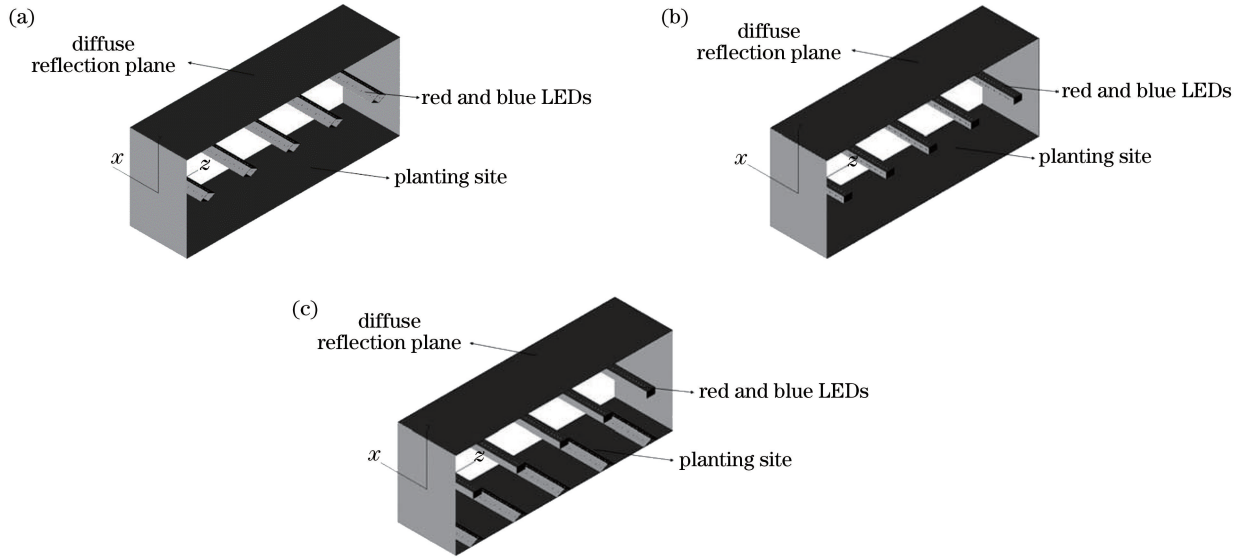


图 2 植物培养架方案的结构。(a)方案一;(b)方案二;(c)方案三

Fig. 2 Scheme structures of plant growth shelves. (a) Scheme I; (b) scheme II; (c) scheme III

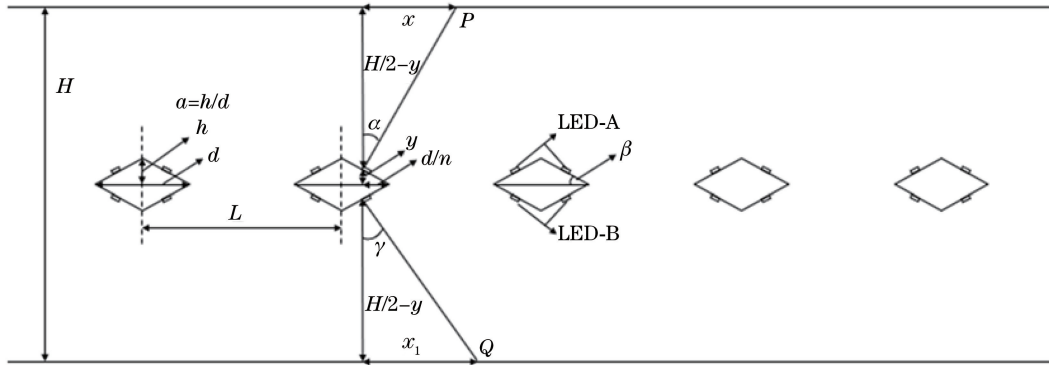


图 3 方案一中植物培养架的局部平面图及相关参数

Fig. 3 Local section of plant growth shelf in scheme I and related parameters

以 LED-A 为研究对象,分析反射光部分。Zhu 等^[20-21]提出,入射至高漫反射面的光源可看作次朗伯光源。光线照射至漫反射板上任一点 P, P 点的照度为

$$E(x) = \frac{I_0 \cos^3 \alpha}{\left(\frac{H}{2} - y\right)^2}, \quad (4)$$

式中: I_0 为朗伯光源的中心光强; $\alpha = \arctan \frac{x}{\frac{H}{2} - y}$; $y = \frac{d}{n} \tan \beta$, n 为常数; $\beta = \arctan \frac{2h}{d}$ 。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

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

式中: ω 为次朗伯光源出射光线与法线夹角。

对于 LED-B,分析其直射部分。光线直接照射到种植面任一点 Q, Q 点照度为

$$E(x_1) = \frac{I_0 \cos^3 \gamma}{\left(\frac{H}{2} - y\right)^2}, \quad (6)$$

式中: $\gamma = \arctan \frac{x_1}{\frac{H}{2} - y}$ 。Q 点照度直接与朗伯光源中心光强 I_0 成正比,则照射到种植位点的光强为

$$E(\gamma) = \int \frac{I_0 \cos^3 \omega_0}{\left(\frac{H}{2} - y\right)^2} dx, \quad (7)$$

式中: ω_0 为次朗伯光源出射光线与法线夹角。

由(5)、(7)式可以看出,种植位点处的照度受植物培养架结构参数 H 、 L 和 a 的影响。由色度光度关系可知,受照面的光谱分布和色度分布也受上述结构参数的影响。对于竖直方向上的照度和色度均

匀度,不同培养架高度对应不同种植面均匀度的变化,竖直方向上的照明均匀度同样受这些因素的影响。此外,红蓝 LED 相间排列,相邻 LED 的距离会影响照度圆和 LED 光色的耦合程度,进而导致照度和混色均匀度的变化,因此 LED 的间距 l 也是方案一实验考察变量。

类比方案一的分析过程可得,方案二的主要参量

如图 4 所示,包括相邻结构单元间距 L 、顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 、悬吊支架高度 h (宽度 d 恒定为 30 mm) 及相邻 LED 的间距 l 。方案三的主要参量如图 5 所示,包括相邻结构单元间距 L 、顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 、悬吊支架高度 h (宽度 d 恒定为 30 mm)、三棱柱底面高-宽比 $a=h_1/d_1$ (宽度 d_1 恒定为 50 mm),以及相邻两 LED 的间距 l 。

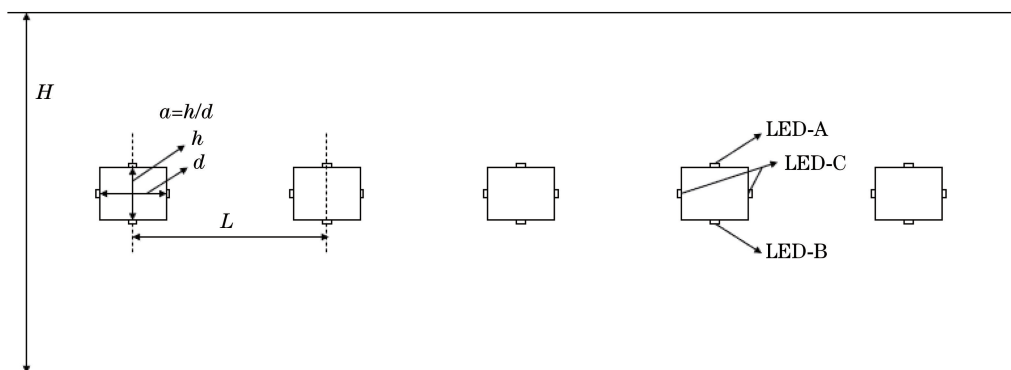


图 4 方案二中植物培养架的局部平面图及相关参数

Fig. 4 Local section of plant growth shelf in scheme II and related parameters

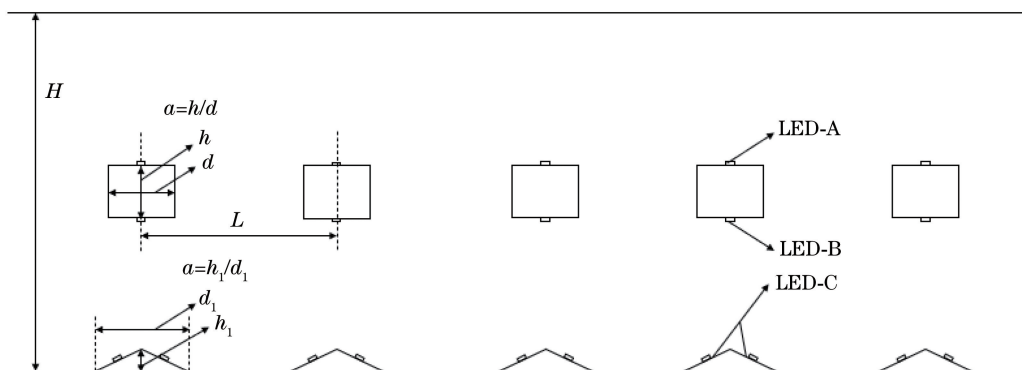


图 5 方案三中植物培养架的局部平面图及相关参数

Fig. 5 Local section of plant growth shelf in scheme III and related parameters

4 实验与讨论

4.1 Taguchi 实验设计

通过 3.2 的理论分析可知,三种方案分别设定了 4 个、4 个和 5 个影响因子,每个影响因子取三个水平,若采取单一变量法,则分别需设置 3^4 、

3^4 和 3^5 组实验。在不影响实验结果的基础上,本文利用 Taguchi 方法和正交表简化了实验过程,通过计算方差值,分别选取 $L_9(3^4)$ 、 $L_9(3^4)$ 和 $L_{18}(3^7)$ 正交矩阵,即分为 9 组、9 组和 18 组实验分别进行研究,每个方案所选定的水平及因子如表 1~3 所示。

表 1 方案一中植物培养架的影响因子及其控制标准

Table 1 Influence factors of plant growth shelf in scheme I and its control levels

Code	Factor	Number of levels	Value		
			1	2	3
A	H	3	300 mm	400 mm	500 mm
B	L	3	150 mm	200 mm	250 mm
C	a	3	0.25	0.50	0.75
D	l	3	10 mm	15 mm	20 mm

表 2 方案二中植物培养架的影响因子及其控制标准

Table 2 Influence factors of plant growth shelf in scheme II and its control levels

Code	Factor	Number of levels	Value		
			1	2	3
A	<i>H</i>	3	300 mm	400 mm	500 mm
B	<i>L</i>	3	150 mm	200 mm	250 mm
C	<i>h</i>	3	20 mm	30 mm	40 mm
D	<i>l</i>	3	10 mm	15 mm	20 mm

表 3 方案三中植物培养架的影响因子及其控制标准

Table 3 Influence factors of plant growth shelf in scheme III and its control levels

Code	Factor	Number of levels	Value		
			1	2	3
A	<i>H</i>	3	300 mm	400 mm	500 mm
B	<i>L</i>	3	150 mm	200 mm	250 mm
C	<i>a</i>	3	0.25	0.50	0.75
D	<i>h</i>	3	20 mm	30 mm	40 mm
E	<i>l</i>	3	10 mm	15 mm	20 mm

在实验过程中,借助 TracePro 进行模拟。根据国际照明委员会(CIE)的基本标准和度量程序^[22],并结合植物生长过程对光源的需求,以及不同波长光线的明视函数差异,在模拟过程中设置 460 nm 蓝光 LED 芯片光效为 45 lm/W,640 nm 红光 LED 芯片光效为 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。信噪比(S_N)用于表征品质特性^[23],且实验过程中照明均匀度为望大特性。望大特性的 S_N ^[5-6]为

$$L_{TB}(S_N) = -10 \lg \frac{\sum_{i'=1}^{n_1} \frac{1}{y_{i'}^2}}{n_1}, \quad (8)$$

表 4 方案一中的 $L_9(3^4)$ 正交实验设计

Table 4 $L_9(3^4)$ orthogonal experimental design in scheme I

Experiment No.	Level				Illumination uniformity of horizontal plane /%	Color-mixed uniformity of horizontal plane /%	Illumination uniformity of vertical plane /%	Color-mixed uniformity of vertical plane /%
	A	B	C	D				
1	1	1	1	1	92.57	88.55	82.08	87.35
2	1	2	2	2	83.71	83.94	71.55	77.58
3	1	3	3	3	91.78	77.88	74.98	86.16
4	2	1	2	3	87.83	87.38	72.07	89.11
5	2	2	3	1	89.09	72.84	68.42	84.86
6	2	3	1	2	91.72	81.53	83.98	81.69
7	3	1	3	2	92.59	81.21	68.81	90.00
8	3	2	1	3	93.56	89.88	83.37	88.36
9	3	3	2	1	88.78	90.00	59.73	85.67

观察对比方案一中各因素水准对应的 S_N 值可知,水平面照度均匀度、竖直面照度均匀度、水平面混色均匀度和竖直面混色均匀度四项测试指

式中: $y_{i'}$ 表示第 i' 个品质特性, n_1 为实验次数。将三种方案的影响因子及水平分别代入 $L_9(3^4)$ 、 $L_9(3^4)$ 和 $L_{18}(3^7)$ 正交矩阵。利用 TracePro 模拟仿真,采用九点取样法测出照度及色度,并计算出种植面的照度均匀度和混色均匀度以表征光源的光量子通量密度均匀度和光谱的均匀度。根据(8)式算出水平面和竖直面照度的 S_N 值及混色均匀度的 S_N 值,如表 4~6 所示。

为了获得最优解,计算统计各方案各因子的 S_N 值,结果如图 6~8 所示。根据望大特性选取各因子中 S_N 值最大的水准组合以形成各方案的初步最优解。

标对应的最优因素组合分别为 A3B3C1D3、A1B2C1D3、A3B1C2D3 和 A3B1C3D3。最优解应使四项测试指标尽可能高,通过比较可初步认定

表 5 方案二中的 $L_9(3^4)$ 正交实验设计

Table 5 $L_9(3^4)$ orthogonal experimental design in scheme II

Experiment No.	Level				Illumination	Color-mixed	Illumination	Color-mixed
	A	B	C	D	uniformity	uniformity	uniformity	uniformity
					of horizontal	of horizontal	of vertical	of vertical
					plane /%	plane /%	plane /%	plane /%
1	1	1	1	1	88.27	76.64	68.17	87.84
2	1	2	2	2	92.96	82.98	71.82	83.94
3	1	3	3	3	91.50	85.97	78.72	74.90
4	2	1	2	3	91.30	90.00	71.35	83.83
5	2	2	3	1	91.76	78.61	70.36	84.55
6	2	3	1	2	93.06	78.66	72.28	84.59
7	3	1	3	2	93.20	77.40	64.53	90.00
8	3	2	1	3	92.80	86.05	71.80	81.73
9	3	3	2	1	94.21	70.44	65.06	88.75

表 6 方案三中的 $L_{18}(3^7)$ 正交实验设计

Table 6 $L_{18}(3^7)$ orthogonal experimental design in scheme III

Experiment No.	Level					Illumination	Color-mixed	Illumination	Color-mixed
	A	B	C	D	E	uniformity	uniformity	uniformity	uniformity
						of horizontal	of horizontal	of vertical	of vertical
						plane /%	plane /%	plane /%	plane /%
1	1	1	1	1	1	82.59	85.66	67.90	75.90
2	1	2	2	2	2	73.37	82.02	63.77	82.48
3	1	3	3	3	3	64.88	76.43	75.97	70.73
4	2	1	1	2	2	82.18	85.86	66.76	85.32
5	2	2	2	3	3	82.01	72.41	64.71	75.36
6	2	3	3	1	1	69.48	68.60	52.88	76.51
7	3	1	2	1	3	81.25	81.55	64.26	86.62
8	3	2	3	2	1	77.85	80.02	45.99	81.97
9	3	3	1	3	2	81.13	78.54	63.91	88.39
10	1	1	3	3	2	83.70	90.00	75.69	88.69
11	1	2	1	1	3	74.80	76.10	67.50	78.07
12	1	3	2	2	1	69.14	82.31	59.75	85.00
13	2	1	2	3	1	80.07	76.25	51.02	90.00
14	2	2	3	1	2	79.86	76.77	63.07	79.62
15	2	3	1	2	3	80.29	79.86	65.99	75.40
16	3	1	3	2	3	83.96	76.90	62.76	81.96
17	3	2	1	3	1	79.32	73.38	48.32	82.72
18	3	3	2	1	2	71.15	66.57	54.24	80.35

方案一中最优解组合为 A3B1C1D3。对应的具体结构参数:顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 为 500 mm,相邻结构单元的间距 L 为 150 mm,中央悬吊支架底面高-宽比 a 为 0.25,相邻两 LED 的间距 l 为 20 mm。模拟仿真后,初步最优解中水平面照度均匀度为 90.62%,混色均匀度为 94.29%,竖直面照度均匀度为 82.38%,混色均匀度为 91.46%。

类比方案一的分析方法,可得方案二最优解组合为 A2B3C2D3。对应具体结构参数:顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 为 400 mm,相邻结构单元的间距 L 为 250 mm,中央悬吊支架高度 h 为 30 mm,相邻两 LED 的间距 l 为 20 mm。模拟仿真后,初步最优解中水平面照度均匀度为 93.15%,混色均匀度为 90.77%,竖直面照度均匀度为 73.49%,混色均匀度为 92.71%。

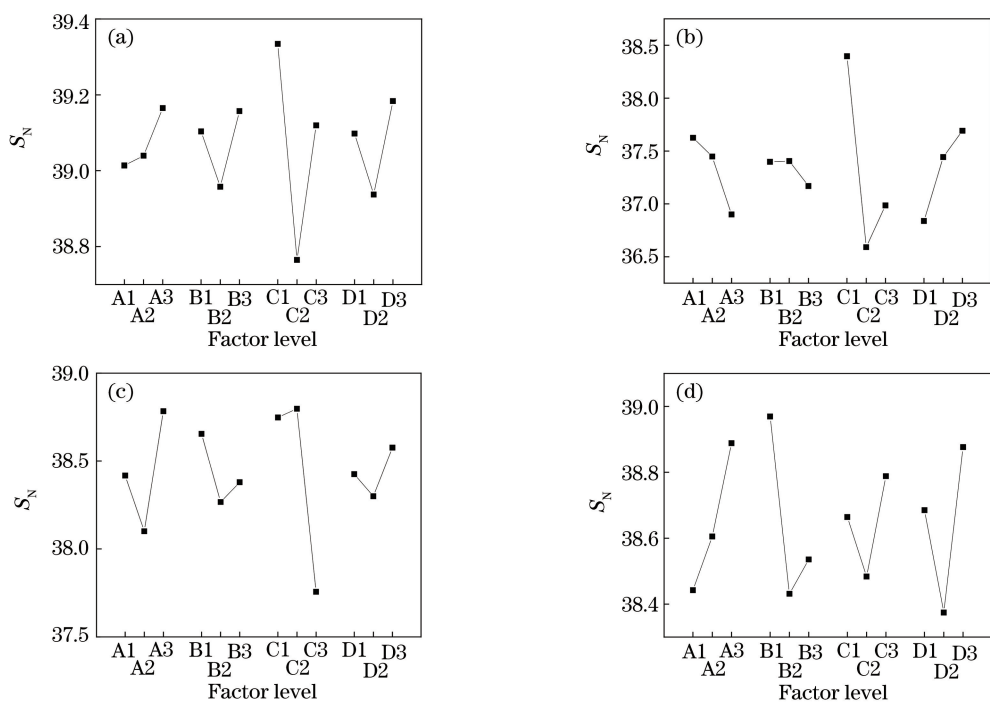


图 6 方案一中各因素水准对应的 S_N 值。(a)水平面照度均匀度;(b)竖直面照度均匀度;
(c)水平面混色均匀度;(d)竖直面混色均匀度

Fig. 6 S_N corresponding to each level of each factor in scheme I. (a) Illumination uniformity of horizontal plane;
(b) illumination uniformity of vertical plane; (c) color-mixed uniformity of horizontal plane; (d) color-mixed
uniformity of vertical plane

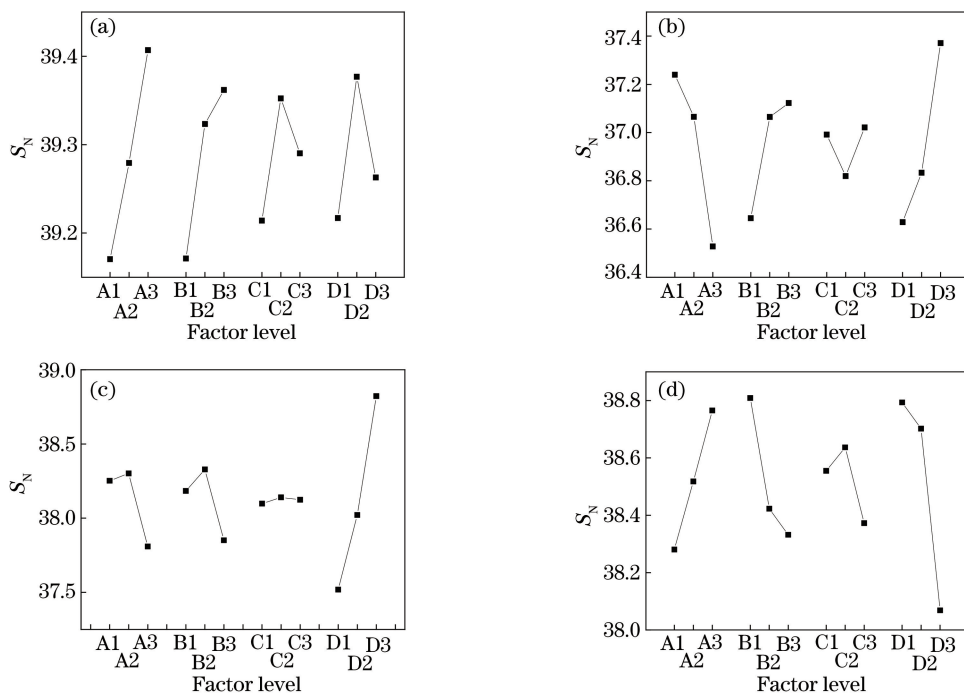


图 7 方案二中各因素水准对应的 S_N 值。(a)水平面照度均匀度;(b)竖直面照度均匀度;
(c)水平面混色均匀度;(d)竖直面混色均匀度

Fig. 7 S_N corresponding to each level of each factor in scheme II. (a) Illumination uniformity of horizontal plane;
(b) illumination uniformity of vertical plane; (c) color-mixed uniformity of horizontal plane; (d) color-mixed
uniformity of vertical plane

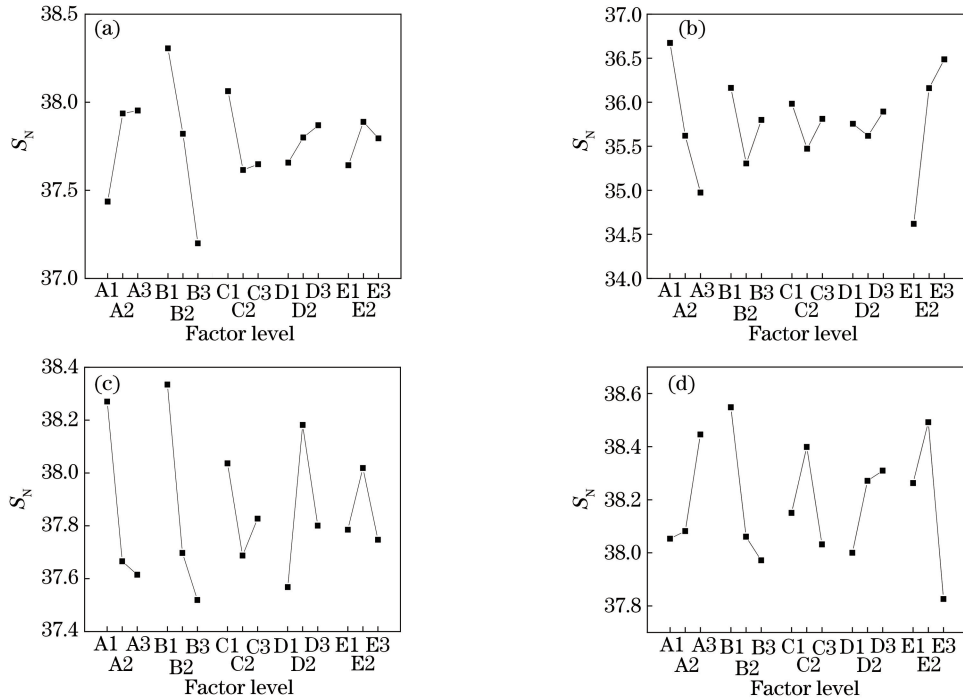


图 8 方案三中各因素水准对应的 S_N 值。(a)水平面照度均匀度;(b)竖直面照度均匀度;
(c)水平面混色均匀度;(d)竖直面混色均匀度

Fig. 8 S_N corresponding to each level of each factor in scheme III. (a) Illumination uniformity of horizontal plane;
(b) illumination uniformity of vertical plane; (c) color-mixed uniformity of horizontal plane;
(d) color-mixed uniformity of vertical plane

类比前文分析方法,可得方案三最优解组合为 A1B1C1D2E2。对应具体结构参数:顶部漫反射板到底部种植面的高度 H 为 300 mm,相邻结构单元的间距 L 为 150 mm,中央悬吊支架高度 h 为 20 mm,底部三棱柱突起的底面高-宽比 a 为 0.25,相邻两 LED 的间距 l 为 15 mm。模拟仿真后,初步最优解中水平面照度均匀度为 82.57%,混色均匀度为 88.71%,竖直面照度均匀度为 64.99%,混色均匀度为 88.75%。

通过比较 Taguchi 方法中各方案的初步最优解可知,方案一中受照空间的各项属性明显优于方案二和方案三,故对方案一进行优化并深入研究。

4.2 变异数分析

ANOVA 法即方差分析法,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行进一步研究,而贡献度较小的因子则被当作偶然事件处理。通过参量 ρ 来表征影响程度的强弱^[7-8]:

$$\rho = \frac{S_{sd}}{S_{sT}}, \quad (9)$$

$$S_{sT} = S_{sd} + S_{se}, \quad (10)$$

式中: S_{sd} 为方差和; 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} 可表示为

$$S_{sd} = \sum_{j=1}^m (S_{N,j} - \overline{S_N})^2, \quad (11)$$

式中: m 是实验次数; $S_{N,j}$ 是每个因子第 j 次实验的 S_N ; $\overline{S_N}$ 是每个因子 S_N 的平均值。计算得出各影响因子对品质的贡献度,如表 7 所示。

由表 7 可得,方案一中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 A、C,对应于培养架结构参数中的高度 H 和中央悬吊光源系统高-宽比 a 。为寻求最优结构,在 B 取 B1、D 取 D3 的情况下,对贡献最大的 A、C 因子进行进一步微调优化。先保持 B1C1D3 不变,对 A 因子进行细分,取 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600 mm 十个水准,依次命名为水准 1 到水准 10。利用 TracePro 模拟仿真,测量计算水平面照度均匀度和混色均匀度($k=26.99$),以及竖直面照度均匀度和混色均匀度($k=21.67$)。

从图 9 中分析比较得出, A 因子在等于 440 mm 时综合属性最优,所以取 $H=440$ mm, $L=150$ mm, $l=20$ mm。然后继续细分 C 因子,分别取 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.32,

表 7 各因子对照度均匀度和混色均匀度的贡献率

Table 7 Contribution of each factor to illumination uniformity and mixed-color uniformity

Influence factor	Contribution to illumination uniformity of horizontal plane /%	Contribution to illumination uniformity of vertical plane /%	Contribution to color-mixed uniformity of horizontal plane /%	Contribution to color-mixed uniformity of vertical plane /%
A	84.5605	11.4112	22.4169	24.5248
B	1.5093	1.4374	7.6414	28.1085
C	11.7121	71.7911	66.2481	21.2896
D	2.2181	15.3603	3.6936	26.0771

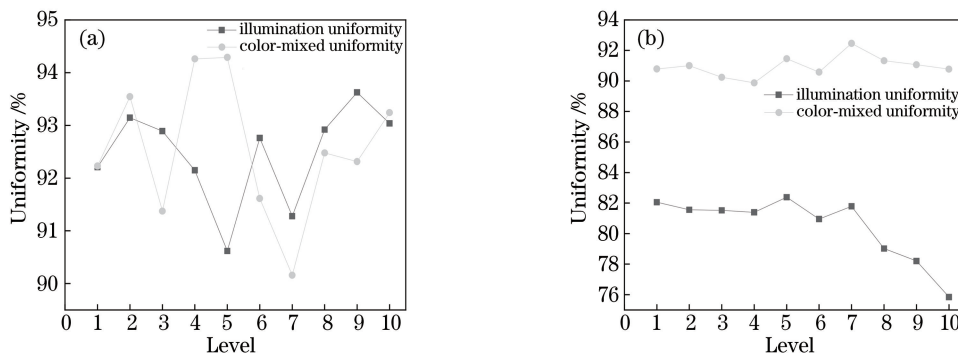


图 9 各项属性随 A 因子的变化曲线。(a)水平面照度均匀度和混色均匀度;(b)竖直面照度均匀度和混色均匀度

Fig. 9 Variation of each attribute with factor A. (a) Illumination uniformity and color-mixed uniformity of horizontal plane; (b) illumination uniformity and color-mixed uniformity of vertical plane

0.34, 0.36, 0.38 十个水准并进行实验。

分析比较图 10 培养架的各项属性,可知 C 因子在取 0.28 时综合属性最优,因此该植物培养架的最优解组合为 $H=440\text{ mm}$, $L=150\text{ mm}$, $a=0.28$,

$l=20\text{ mm}$ 。测得水平面照度均匀度为 92.00%,混色均匀度为 94.19%;竖直面照度均匀度 83.12%,混色均匀度 90.69%。植物培养架的最终优化结果如图 11 所示。

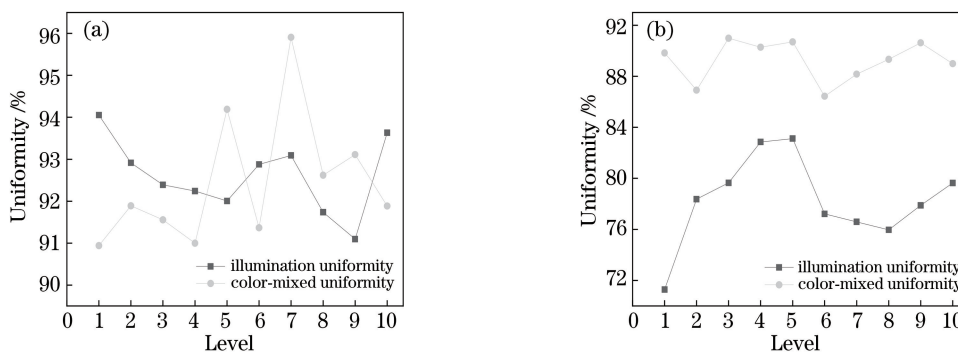


图 10 各项属性随 C 因子的变化曲线。(a)水平面照度均匀度和混色均匀度;(b)竖直面照度均匀度和混色均匀度

Fig. 10 Variation of each attribute with factor C. (a) Illumination uniformity and color-mixed uniformity of horizontal plane; (b) illumination uniformity and color-mixed uniformity of vertical plane

4.3 遮挡检测及分析

随着植物的生长,植株对光线的遮挡作用不断增强,因此,在评价培养架照明质量时,需要对不同高度植株表面的受照效果进行测试。植物生长模型如图 12 所示,通过增加模型的高度来模拟植株的生长过

程。基于最优解,测试植物高度为 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 mm 时种植面 ($k=26.99$)、倒三棱柱顶面(代表植物体正上方的受照情况, $k=29.60$)、侧面(代表植物体侧面叶片的受照情况, $k=30.77$)的照明均匀度,测量结果如图 13(a)~(f)所示。

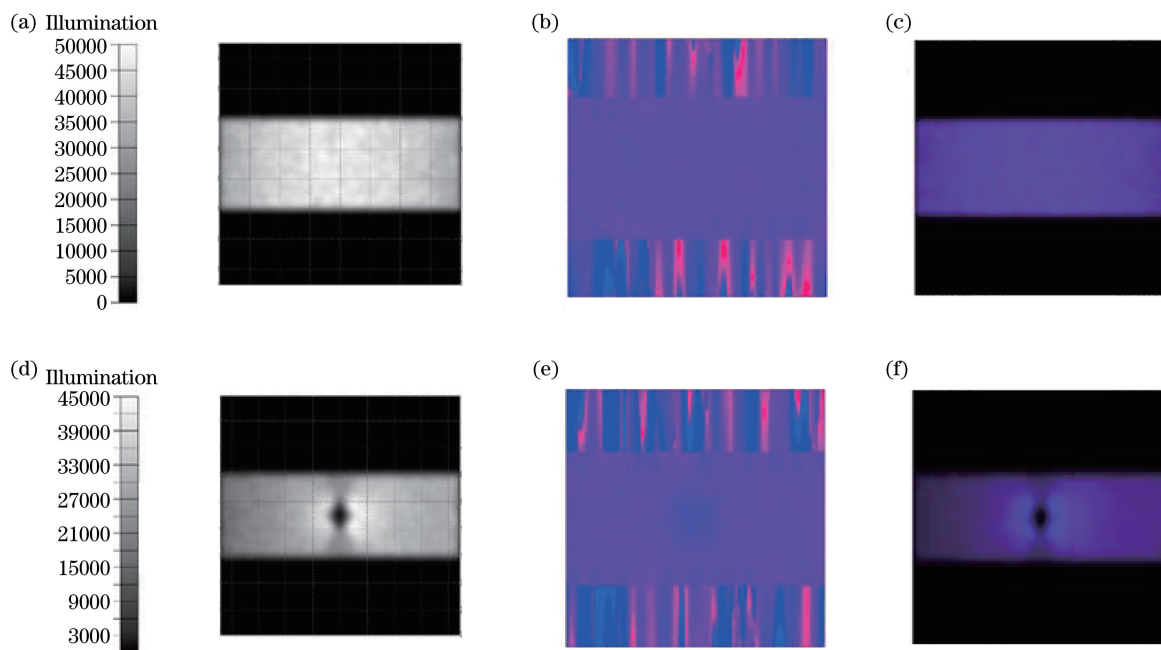


图 11 植物培养架的最终优化结果。(a)水平面照度分布图;(b)水平面色度分布图;(c)水平面全彩混色图;
(d)竖直面照度分布图;(e)竖直面色度分布图;(f)竖直面全彩混色图

Fig. 11 Optimal result of plant growth shelf. (a) Illumination map of horizontal plane; (b) chromaticity map of horizontal plane; (c) full color-mixed map of horizontal plane; (d) illumination map of vertical plane; (e) chromaticity map of vertical plane; (f) full color-mixed map of vertical plane

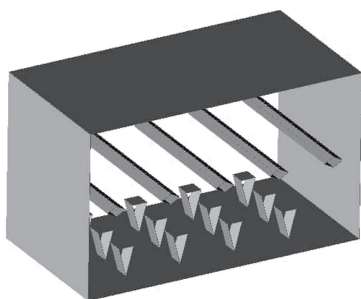


图 12 植物生长模型

Fig. 12 Plant growth model

从图 13 中分析可得,种植面的照度均匀度和混色均匀度基本不受植株高度影响,总体上维持在较高水平。当植株高度在 175 mm 以下时,植株顶部的照度均匀度和色度均匀度均能保持较高水平。当植株高度在 175 mm 以上时,植株顶部的照度均匀度和色度均匀度明显减小。这是因为植株长到一定高度后,距离发光部分过近,光线耦合距离大大缩短,混光效果变差。植株侧面的照度均匀度整体呈下降趋势。当植株高度在 150 mm 以下时,侧面的照度均匀度缓慢下降,可以维持在较高水准;当植株

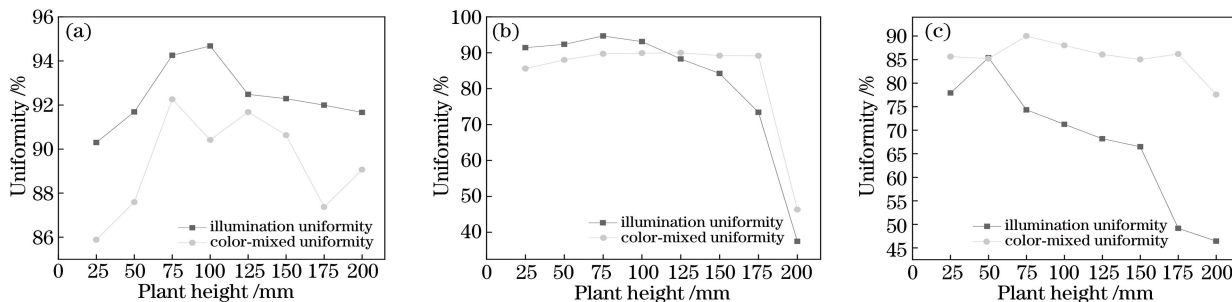


图 13 不同植物高度下的照度均匀度和混色均匀度。(a)种植面的照度均匀度和混色均匀度;
(b)植株顶面的照度均匀度和混色均匀度;(c)植株侧面的照度均匀度和混色均匀度

Fig. 13 Illumination uniformity and color-mixed uniformity at each plant height. (a) Illumination uniformity and color-mixed uniformity of planting plane; (b) illumination uniformity and color-mixed uniformity of plant top plane; (c) illumination uniformity and color-mixed uniformity of plant side plane

高度在 150 mm 以上时,侧面的照度均匀度明显下降,但侧面的混色均匀度始终保持较高的水平,且侧面对光照的需求明显低于顶面,因此植物侧面照度均匀度的下降不会对植物的生长带来较大的影响。综上可知,该立体化植物光源系统在植物高度为 0~150 mm 时可以提供高均匀度的空间照明环境,具有较高的实用价值。

4.4 立体化植物光源结构的技术优势

现有的植物培养架多采用顶部安装 LED 阵列、底部种植的架构,图 14(a)为一种典型的植物光源系统 LED 阵列。基于该阵列的光学设计沿用了传

统室内照明的经验,以种植面作为参考平面进行优化。在不同植株高度下,该阵列式植物光源的水平参考面照度均匀度如图 14(b)所示,可以看出,传统 LED 阵列式植物光源在种植面上可以达到良好的照明效果,种植面照度均匀度可达 94.03%,但随着植株高度的增加,水平参考面的照度均匀度迅速下降。随着植株顶部对应的水平参考面高度的增加,光线耦合距离明显减小,受光面出现局部过亮或过暗的现象,因此植物生长到一定阶段后,受照面光谱及光照强度分布不均匀,导致植物品质参差不齐。

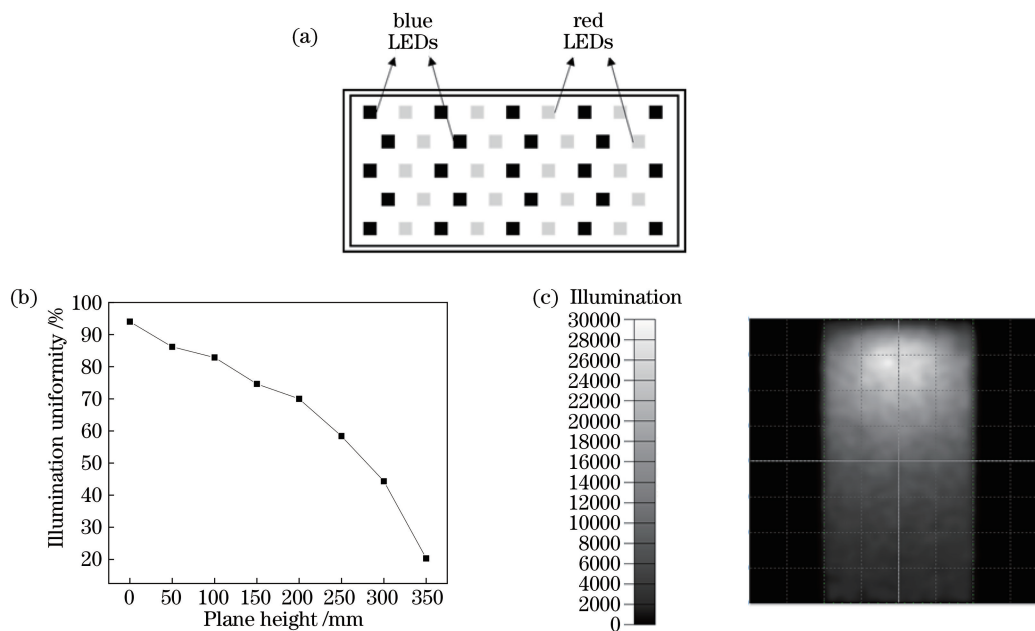


图 14 阵列式 LED 结构及均匀度属性。(a)阵列式 LED 结构;(b)不同植株高度下的参考面照度均匀度;(c)竖直参考面的照度分布图

Fig. 14 Array LED structure and uniformity properties. (a) Array LED structure; (b) illuminance uniformity of reference surface at each plant height; (c) illuminance distribution of vertical reference plane

此外,根据植物的净光合作用曲线可知,当植物长期生长在光合作用光饱和点处的光强下时,可获得最大的净生长速率和较高的积累量^[24]。为顺应这一生理特性,阵列式 LED 植物光源系统通常通过调控种植面附近的光强以维持目标植物在光饱和点附近,但这种设计忽视了竖直方向光强分布的特点。图 14(c)所示为阵列式 LED 光源系统的竖直参照面照度分布图,可以看出,在这种结构下,光强集中分布在靠近灯具的培养架上部,而光线传播到种植面附近时已经出现明显的衰减和逸散现象。因此,随着植株高度的增加,系统内的光照强度将远高于光饱和点处的光强,一方面这将造成植物生长出现严重的光抑制和光合中心损伤,使得植物生长周期延长及品质下

降;另一方面,系统整体光效降低,大量能量损耗,这也是制约植物工厂发展的问题之一^[5-25]。

本文所设计的立体化光源系统通过对三维空间照明效果的优化调控,实现了空间内光强的均匀分布,便于将整个受照空间的光照强度调整至目标植物光饱和点光强附近,同时提高了系统的有效光能利用率和空间利用率,适用于多层多段紧凑式的精细化栽培模式。

5 结 论

针对现有植物工厂光源设计不合理导致植物品质参差不齐的问题,提出了三种基于悬吊光源结构的立体化光源系统设计。首先,利用 Taguchi

方法设计实验,并对各方案的初步最优解进行比选分析,选出菱形底面悬吊光源结构作为最佳方案。然后,对最佳方案进行 ANOVA 分析,优化得到水平面照度均匀度为 92.00%,混色均匀度为 94.19%,竖直面照度均匀度为 83.12%,混色均匀度为 90.70%的最优模型。进一步,对植物生长过程中光源遮挡情况进行仿真检测,结果显示,该光源系统在植物整个生长阶段均能提供均匀的照明环境。最后,通过深入对比立体化光源系统和传统阵列式光源照明效果的差异,可知所设计光源系统有效改善了传统植物光源空间内光线混合不均匀、有效光能利用率不高的现象。所提出的植物光源的空间照明均匀度评价体系和立体化植物光源系统对未来植物照明领域的照明质量评价标准及光源系统结构设计具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Wei L L, Yang Q C, Liu S L. Review on research and developing trends of light-emitting diode in plant factory[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11): 408-411.
魏灵玲, 杨其长, 刘水丽. LED 在植物工厂中的研究现状与应用前景[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 408-411.
- [2] Matsuda R, Yamano T, Murakami K, et al. Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for overnight LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198: 363-369.
- [3] Zhang L, Yu X P, Huang Y T, et al. Application and development trend of LED artificial light for plant lighting[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2019, 37(1): 50-55.
张莉, 喻晓鹏, 黄依婷, 等. LED 人工补光在植物照明中的应用及发展趋势[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2019, 37(1): 50-55.
- [4] Fu M, Wen S S, Zhong H T, et al. Optimum design of LED plant light source based on Taguchi method [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(7): 953-959.
符民, 文尚胜, 钟惠婷, 等. 基于 Taguchi 方法的 LED 植物光源优化设计[J]. 发光学报, 2017, 38(7): 953-959.
- [5] Jin X L, Wen S S, Ma B X, et al. Design of high uniformity LED plant lamp [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(10): 1466-1477.
靳肖林, 文尚胜, 马丙戌, 等. 高均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 发光学报, 2018, 39(10): 1466-1477.
- [6] Zhang S, Wen S S, Ma B X, et al. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(3): 403-413.
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.
- [7] Jiang X Y, Wen S S, Ma B X, et al. Design of high illumination uniformity inverted LED plant light source system [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(9): 1172-1184.
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.
- [8] Jiang X Y, Wen S S, Zuo X, et al. High illumination uniformity inverted plant light source design with bulge structure [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(3): 339-349.
姜昕宇, 文尚胜, 左欣, 等. 具有凸台结构的高照明均匀度倒置型植物光源设计[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 339-349.
- [9] Zeng F Z, Zhao X. Taguchi methods and its standardization design [J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2003(11): 7-9.
曾凤章, 赵霞. 田口方法及其标准化设计[J]. 机械工业标准化与质量, 2003(11): 7-9.
- [10] Parchami A, Nourbakhsh M, Mashinchi M. Analysis of variance in uncertain environments [J]. Complex & Intelligent Systems, 2017, 3(3): 189-196.
- [11] Hu Y, Jiang S, Li J, et al. Effects of the light intensity and quality on plant growth and development [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 296-303.
胡阳, 江莎, 李洁, 等. 光强和光质对植物生长发育的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 296-303.
- [12] Chen S, Yin G F, Zhao N J, et al. Measurement of primary productivity of phytoplankton based on photosynthetic electron transport rate [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1126001.
陈双, 殷高方, 赵南京, 等. 基于光合电子传递速率的浮游植物初级生产力测量[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1126001.
- [13] Xu R J, Dou Y F, Chen W T, et al. Effects of LED monochromatic light quality of different colors on fucoxanthin content and expression levels of related genes in phaeodactylum tricornutum [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0917001.
徐润洁, 龚一富, 陈文婷, 等. 不同发光二极管单色光质对三角褐指藻中岩藻黄素含量及相关基因表达

- 的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0917001.
- [14] Gao S Y. Development and prospect analysis of plant illumination[J]. Journal of Huanghe S&T College, 2019, 21(2): 110-112.
高申悦. LED植物照明的发展及前景分析[J]. 黄河科技学院学报, 2019, 21(2): 110-112.
- [15] Zheng J, Hu M J, Guo Y P. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1619-1624.
郑洁, 胡美君, 郭延平. 光质对植物光合作用的调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1619-1624.
- [16] Gao D, Han Q Y, Zhang S D. Value conversion between plant photometry and luminous photometry [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015, 26(2): 28-36.
高丹, 韩秋漪, 张善端. 植物光度学与人眼光度学的量值换算[J]. 照明工程学报, 2015, 26(2): 28-36.
- [17] 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]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(3): 340-348.
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.
- [18] Zhu Z M, Yuan J, Sun X, et al. LED diffused transmission freeform surface design for uniform illumination[J]. Journal of Optics, 2019, 48(2): 232-239.
- [19] Yang Y M, Li Y, Zhou T L, 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.
杨宇铭, 李燕, 周天亮, 等. 高显色指数 LED 光谱配比与色度参数的关系[J]. 照明工程学报, 2019, 30(5): 82-87, 98.
- [20] 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.
- [21] 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 Optica Sinica, 2011, 31(1): 0115001.
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.
- [22] Liu H X. The application of CIE uniform color space and its color difference formula[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2003, 11(3): 3-8, 12.
刘浩学. CIE 均匀颜色空间与色差公式的应用[J]. 北京印刷学院学报, 2003, 11(3): 3-8, 12.
- [23] Guo H X. Method for the fuzzy robust optimal design of the design objective with small-the-best or large-the-best characteristic[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(5): 532-535, 540.
郭惠昕. 望大望小特性设计目标的模糊稳健优化设计方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 532-535, 540.
- [24] Zhong P F, Chen N L. Research progress of the influence of light intensity on photosynthesis of horticultural plants[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2008, 43(5): 104-109.
种培芳, 陈年来. 光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5): 104-109.
- [25] Yang Q C. Developmental strategy of plant factory [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(10): 20-24.
杨其长. 植物工厂的发展策略[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 20-24.