

## 双光源模块高空间照明均匀度植物光源的设计

张 博<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>1,2\*</sup>, 马丙戌<sup>1</sup>, 焦飞宇<sup>1</sup>, 姜昕宇<sup>1</sup>, 卢允乐<sup>1</sup>, 黄玮钊<sup>1</sup>, 吴启保<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. 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:** 在植物照明领域, 由于培养系统受照面随植物的生长不断变化, 植物照明系统的设计需考虑在整个生长周期以及植物生长过程中所占空间的照明情况和效果, 使其提供整个生长空间的高照明均匀度。但是粗放的传统植物照明解决方案结构简单, 并且只针对某一具体参考平面进行优化, 无法达到高空间照明均匀度的效果。为解决这一问题, 以整个植物培养架的照明空间为研究对象, 以空间照明理论为依据, 以最近提出的倒置型光源以及传统顶部阵列光源设计方案为参考提出了一种双光源模块的 LED 植物照明系统。在顶底两面同时设置光源, 通过两部分光源的互补混光实现了高空间照度均匀度及混色均匀度。应用 Taguchi 实验简化实验过程, 变异数分析精细优化关键结构参数, 更深入研究了光源配光曲线对植物照明系统性能的影响。多次优化后, 最终获得水平面和竖直面照度均匀度分别为 93.48% 和 88.54%, 混色均匀度分别为 90% 和 87.13%, 种植面光能利用率为 41.63% 的最优设计方案。

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

**中图分类号:** O432; O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200106

## Design of high spatial lighting uniformity plant light source with dual light source module

Zhang Bo<sup>1</sup>, Wen Shangsheng<sup>1,2\*</sup>, Ma Bingxu<sup>1</sup>, Jiao Feiyu<sup>1</sup>, Jiang Xinyu<sup>1</sup>, Lu Yunle<sup>1</sup>,  
Huang Weizhao<sup>1</sup>, Wu Qibao<sup>3</sup>

(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:** In the field of plant lighting, since the illuminated surface of the cultivation system changes continuously with the growth of the plant, the design of the plant lighting system need to consider the lighting situation and effect in the whole growth cycle and the space occupied by the plant growth

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2020-06-16

基金项目: 广东省科技计划项目(2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004); 省级大学生创新创业训练计划项目(S201910561198); 广东省应用型科技研发专项(2015B010134001); 广东省扬帆计划(2015YT02C093)

作者简介: 张博(1999-), 男, 本科生, 主要从事 LED 照明工程等方面的研究。Email: 17802007557@163.com

导师简介: 文尚胜(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事 LED/OLED 照明技术、OLED/LCD 平板显示技术等方面的研究。

Email: shshwen@scut.edu.cn

process, so that it can provide the high illumination uniformity of the whole growth space. However, the extensive traditional plant lighting solutions are only optimized for a specific reference plane, which can not achieve the effect of high spatial illumination uniformity. Focusing on this issue, the lighting space of the whole plant culturist was taken as the research object, based on the theory of space lighting, and the recently proposed inverted light source and the traditional top array light source design scheme were taken as references to propose a dual light source module LED plant lighting system. The light source was set on both sides of the top and the bottom, and the high spatial uniformity were achieved through the complementary mixing of the two parts of light source. Taguchi method was used to simplify the experimental process, the variation analysis was used to optimize the key structural parameters, and the influence of light source distribution curve on the performance of plant lighting system was further studied. After several times of optimization, the optimal design of illumination uniformity of horizontal and vertical surfaces is 93.48% and 88.54% respectively, color-mixed uniformity is 90% and 87.13% respectively, and light energy utilization rate of planting surface is 41.63%.

**Key words:** optical design; plant light source system; space lighting uniformity; Taguchi; light emitting diode (LED)

## 0 引言

随着城市化的推进,发达地区土地资源日益稀缺,高资源利用率的植物工厂生产模式已经有了相当规模。植物工厂是一种通过调控温度、光照、营养等环境要素来实现农产品周年高效率产出的系统<sup>[1]</sup>。植物生长过程中,光照因素不可或缺,而密集化生产的植物工厂内自然光源十分微弱,因此在现代农业生产中人工光源发挥着越来越重要的作用,光源的性能尤为重要。光谱范围为 640~660 nm 的红光和 430~460 nm 的蓝紫光在光合作用中起主要作用<sup>[2]</sup>,故在植物照明系统中,多将光谱范围窄且精准可调的冷光源 LED 作为照明光源使用<sup>[3]</sup>。

基于室内照明的传统植物照明系统多采用简单粗放的“上光下植”模式<sup>[4-5]</sup>,即在植物培养面上方安装简单的阵列 LED 作为光源。而植物照明相较室内照明对照明均匀度有着更为严苛的要求。设备简易的光学结构使得光线难以充分耦合,导致培养面照明不均匀<sup>[5]</sup>,进而使得不同位置的植物生长状态不一致,严重影响着植物产品的质量。姜昕宇等提出一种将光源放置在植物培养架种植面的倒置型植物照明光源,使培养面的照度均匀度和混色均匀度得到了显著的提高<sup>[4-5]</sup>,为新型植物光源的设计提供了新思路。而在植物照明领域,培养系统受照面随植物的

生长不断变化,单一代表性参考面的照明均匀度显然不足以代表植物培养系统的质量。

为解决上述问题,使植物在整个生长过程中受到均匀的光照,文中提出空间照明理论,针对整个三维照明空间的照明情况进行研究,合理地抽象出水水平种植面和中心竖直面为参考面,以两参考面照明均匀度反映整个三维空间的照明质量。光学构架上以倒置型光源为基础<sup>[4-5]</sup>,提出了一种在顶底两面同时设置光源的双光源模块植物光源系统设计方案。在植物培养架种植面将红、蓝 LED 光源间隔放置在平面两侧的三棱柱凸台上。进一步,在将顶部设计为射面的基础上,采用在反射面添加光源的双光源模块互补混光方案解决培养架顶部远离光源区域光强下降,导致植物培养架竖直面均匀度不高的问题。借助田口算法(Taguchi)设计实验简化实验过程,Taguchi 理论是由田口玄一博士提出的一套分组实验方法<sup>[6]</sup>,其将统计学原理与工程经验相结合,可以在保证实验准确性的前提下极大地简化实验。以 Taguchi 方法得出的初步最优模型为对象,进一步参考变异数分析(ANOVA)理论推导各因子对品质的影响,对影响较大的因子进行精细化调整以减少误差,最后更深入研究了灯珠配光曲线和所育植物遮挡对培养架质量的影响,找出了植物培养架的最优解。

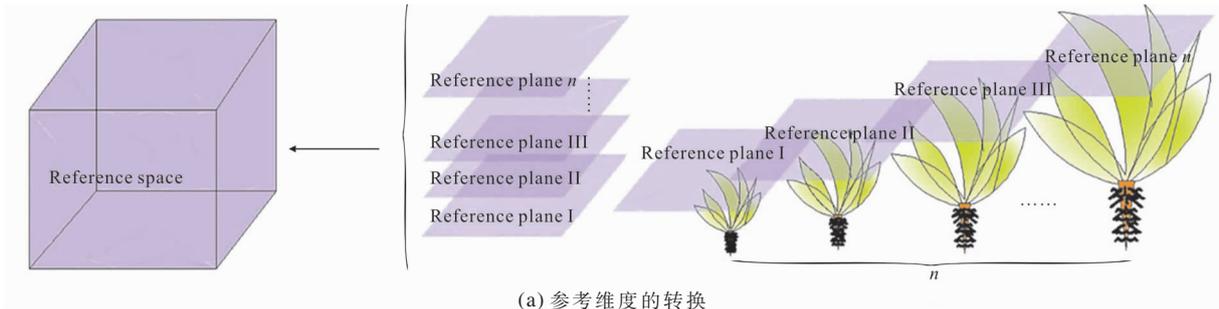
# 1 空间照明理论

## 1.1 基于植物生长过程的参考维度转换

如图 1(a)所示,不同于室内照明以某一参考面为研究对象,仅致力于优化一受照面的照明效果。植物照明需要顾及整个植物生长周期内的照明情况,由此依据传统经典研究方法,伴随植物的生长会派生出若干待研究参考面,进而实际上构成一个参考空间。而对此三维空间的照明情况进行研究,才是植

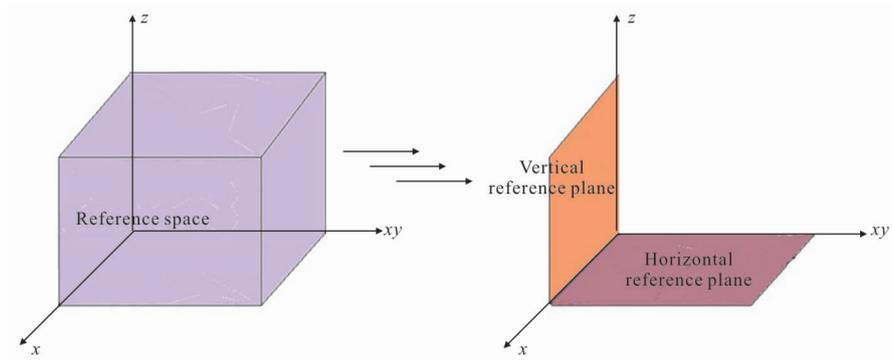
物照明系统的设计与优化需要考虑和解决的问题。

在植物照明领域最关注的两个评价指标为光量子通量密度 (Photosynthetic photon flux density, PPFd)的均匀度与光谱分布的均匀度<sup>[7]</sup>。这两个关键因素反映了受照空间光强分布和光质分布的均匀情况,直接决定着某一批次植物生长的均齐度,对品质和后续人工成本影响重大。而在具体的研究过程中,两个均匀度的优化提升通过研究图 1(b)所示三维照明空间中水平种植面和某一垂直立面的均匀度即可实现。



(a) 参考维度的转换

(a) Conversion of reference dimensions



(b) 空间均匀度的测量

(b) Measurement of spatial uniformity

图 1 空间均匀度理论

Fig.1 Spatial uniformity

## 1.2 光量子通量密度 (PPFD) 与其均匀度

PPFD 指单位时间单位面积所通过的光子数,  $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[7]</sup>, 光量子通量密度  $K_{\text{PPFD}}$  及其在目标平面上的均匀度  $\alpha$  确定于下式<sup>[7]</sup>:

$$K_{\text{PPFD}} = \frac{1}{k} \cdot E_v = \frac{1}{8.17 \times 10^4} \cdot \frac{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}}{\sum_i V(\lambda_i) N_{\lambda_i}} E_v' \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N K_{\text{PPFD}} / (X \cdot Y \cdot Z)}{K_{\text{PPFDmax}}} = \frac{\frac{1}{k_{rb}} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N E_v / (X \cdot Y \cdot Z)'}{\frac{1}{k_{rb}} E_{Vmax}} \quad (2)$$

式中:  $N_{\lambda}$  为归一化光谱分布曲线;  $E_v$  为照度值;  $\lambda$  为波长;  $V(\lambda)$  为白昼视觉光效率;  $k$  为  $E_v$  和 PPFd 之间的关系系数, 是一个可测常数。

由公式(2)可以看出, 难以测量的 PPFd 均匀度可以由照度均匀度进行代替, 这样既保证了准确性, 又极大地简化了实验数值的换算过程。在下面的实验中将采用十五点取样法测量照度值来代替 PPFd。

## 1.3 光谱分布均匀度与混色均匀度

根据光谱学和色度学的转换关系<sup>[8]</sup>, 光谱均匀度的研究可由照明领域常用的混色均匀度替代<sup>[5]</sup>。

归一化的混色均匀度由下式确定<sup>[5]</sup>:

$$\Delta u'v' = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u_i' - u_{\text{avg}}')^2 + (v_i' - v_{\text{avg}}')^2]} \quad (3)$$

$$U_{\text{color}} = \frac{100}{1 + k_1 \Delta u'v'} \% \quad (4)$$

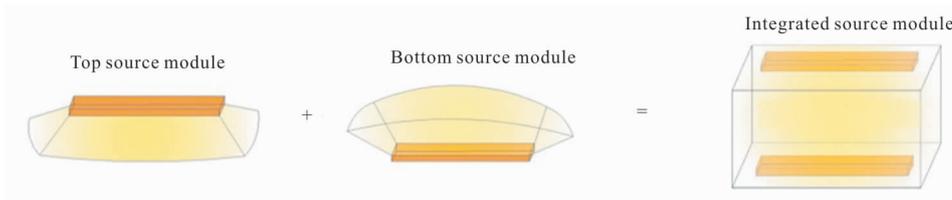
式中:  $M$  为样本点的数目;  $k_1$  设置为  $\Delta u'v'$  取最小而相应的  $U_{\text{color}}$  为 90% 时的计算值。

## 2 植物光源理论分析

### 2.1 双光源模块植物照明系统的设计

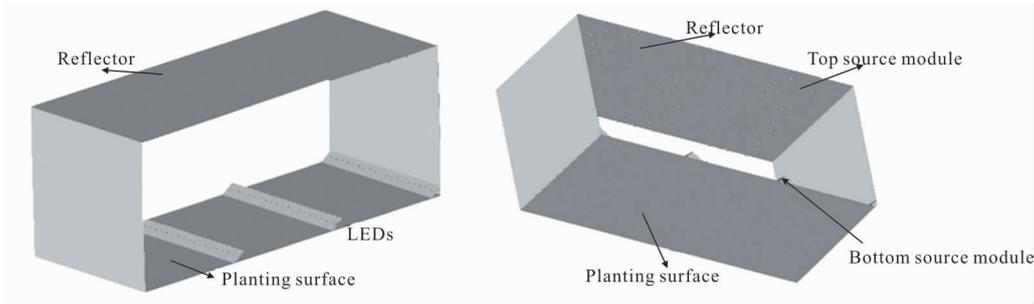
为实现高三维空间均匀度的照明效果, 基于笔者课题组在高均匀度植物生长灯<sup>[9]</sup>以及倒置型植物

照明系统上的研究成果<sup>[4-5]</sup>, 并结合传统的顶部阵列式植物光源系统提出了基于如图 2(a)所示双光源模块混光原理的立体化照明系统, 通过上下光源模块的互补照明模式实现高照明均匀度的植物生长空间。具体培养架结构及原理如图 2(b)、(c)所示, 以植物工厂培养架为整体框架, 底部光源为种植面上分布于种植位孔两侧的三棱柱凸台结构上的红蓝 LED 阵列, 通过调整棱柱面的二面角可以实现对出射光角度的调整。顶部设计为反射面, 借助漫反射板增加光线的传播距离从而使光线充分耦合。与此同时, 在顶部反射面增加红蓝 LED 阵列构成顶部照明模块, 双光源模块提供互补的空间照度以及色度分布, 最



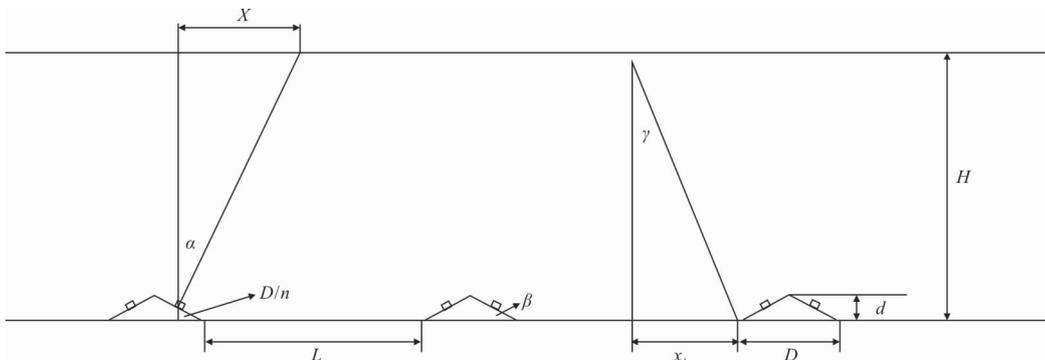
(a) 双光源模块混光原理

(a) Principle of dual light source module



(b) 植物培养架结构

(b) Structure of plant growing shelf



(c) 植物培养架剖面图及相关参数

(c) Local section and involved parameters of the plant growing shelf

图 2 植物光源的设计

Fig.2 Design of plant light source

终可实现系统的高空间照明均匀度。

### 2.2 整体光学构架的理论分析

根据图 2(c)对所设计双光源模块植物光源进行理论分析,实验所涉及的参量主要有种植面宽度  $L$ 、顶部漫反射面到底部水平种植面的距离  $H$ 、底部三棱柱灯架高度  $d$  和宽度  $D$ ( $D$  为固定值 50 mm)的比值  $h$ 。对单个朗伯型光源进行分析,光线主要分为直射和反射两个部分,分别由顶部光源和底部光源主要贡献两部分光线。

由祝振敏等的研究<sup>[10]</sup>得出,入射至高漫反射面的光源可看作次郎伯光源。

对底部光源反射光,光线照射至漫反射板上任一点  $P$ ,  $P$  点的照度为:

$$E(x) = \frac{I_0 \cos^3 \alpha}{(H-y)^2} \quad (5)$$

式中:  $I_0$  为光源中心光强;  $\alpha = \arctan \frac{x}{H-y}$ ,  $y$  为底面光源距离种植面的高度,  $y = \frac{D}{n} \tan \beta$ ,  $\beta = \arctan \frac{2D}{n}$ ,  $n$  为常数。照射至种植位点的光强为:

$$E(\alpha) = \int \frac{I_0 \cos^3 \omega}{(H-y)^2} dx \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为出射光线与法线夹角。

对顶部光源直射光,光线照射至种植面一点  $P_1$ ,  $P_1$  点的照度为:

$$E(x) = \frac{I_0 \cos^3 \alpha}{(H-y_1)^2} \quad (7)$$

式中:  $\alpha = \arctan \frac{x}{H-y_1}$ ,  $y_1$  为顶部出光面到顶部反射面的高度,  $\gamma = \arctan \frac{x_1}{H-y_1}$ 。照射至种植位点的光强为:

$$E(\gamma) = \int \frac{I_0 \cos^3 \omega_0}{(H-y_1)^2} dx \quad (8)$$

式中:  $\omega_0$  为出射光线与法线夹角。

由公式(5)~(8)可知,参量  $H$ 、 $L$ 、 $h$  都会影响种植位点照度,而色度与光度相关<sup>[8]</sup>,受照面的光谱分布和色度分布也受其影响。竖直参考面光分布对应着不同高度水平受照面的光分布,故其同样受这些参量影响。因此将种植面宽度  $L$ 、顶部漫反射面到底部水平种植面的距离  $H$ 、三棱柱高宽比  $h$  以及顶部反

射面 LED 阵列的排布方式作为考察变量进行下一步研究。

## 3 设计实验与结果

### 3.1 Taguchi 实验设计

该实验设定四个影响因子:种植面宽度  $L$ 、顶部反射面到种植面的高度  $H$ 、放置 LED 的三棱柱高宽比  $h$  以及顶部反射面 LED 阵列排布方式  $X$ ,每个影响因子取四个水平,如果采用单一变量法,则需进行  $4^4$  组实验才能找出最优解。利用 Taguchi 方法进行实验,可以在保证实验准确度的情况下简化实验组数。该实验使用  $L_{16}(4^5)$  正交矩阵设计 16 组实验。

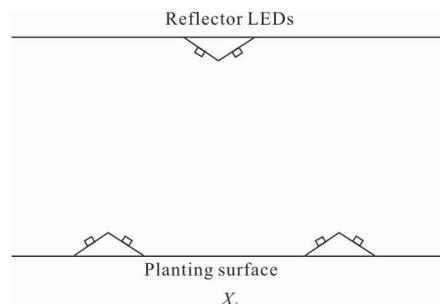
所选定的水平及因子如表 1 所示。

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 the plant growing shelf

Code	Factors	Number of levels	Level1	Level2	Level3	Level4
A	$h$	4	0.25	0.5	0.75	1
B	$L$	4	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
C	$H$	4	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
D	$S$	4	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$

其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  如图 3 所示。 $X_1$  结构将 LED 阵列放置在反射面上的倒三棱柱斜面上,红蓝 LED 灯珠相距 15 mm 间隔排列; $X_2$  结构为列距 40 mm、中心列 LED 间距 20 mm、边列 LED 间距 30 mm 的三列 LED 灯珠; $X_3$  为同行列 LED 间距 50 mm 的等距排布方式; $X_4$  为 LED 间距 10 mm 的一列 LED 灯珠。



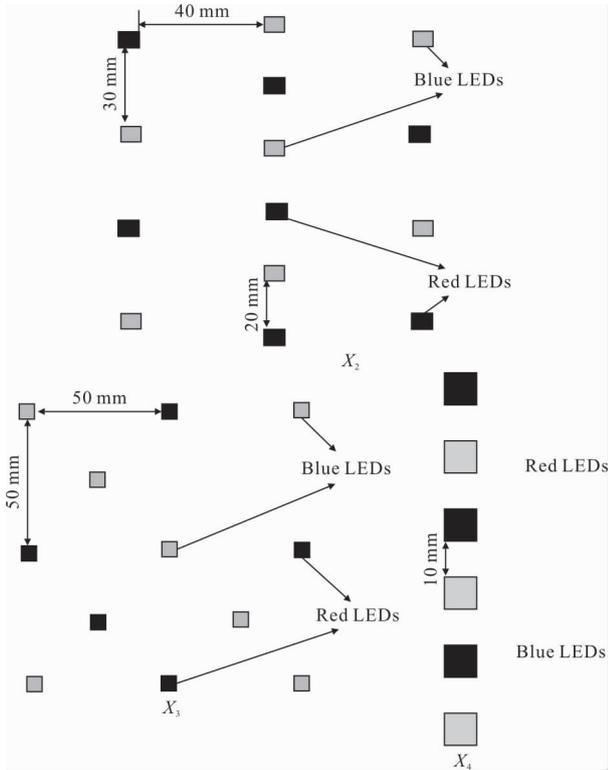


图 3 排列方式 X 示意图

Fig.3 Schematic diagram of arrangement X

实验过程借助 Trace Pro 软件模拟仿真,参照相关研究<sup>[11]</sup>,考虑植物照明系统对光源的要求,在模拟

过程中,设置 640 nm 波长红光 LED 芯片为 90 lm/W, 460 nm 波长蓝光 LED 芯片为 45 lm/W,功率分别设定为 1 W 和 2 W,每个芯片出射 20 000 条光线。

根据模拟结果使用 S/N 值数量化品质特性以找到最优解。该实验研究的均匀度为望大特性,计算 S/N 值的公式为<sup>[12]</sup>:

$$L_{TB} \left( \frac{S}{N} \right) = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (9)$$

式中:  $y_i$  为第  $i$  次实验结果;  $n$  为模拟次数。

将影响因子及水平代入  $L_{16}(4^5)$  正交矩阵,利用 Trace Pro 模拟仿真并计算,采用 15 点取样法测出照度及色度,根据公式(1)~(4)计算出水平种植面、中心竖直面的照度均匀度和混色均匀度 ( $k_1=31.11, k_2=40.48, k_1$  为计算水平参考面混色均匀度时的  $k$  值;  $k_2$  为计算竖直参考面混色均匀度时的  $k$  值)。并根据公式(9)计算出照度均匀度及混色均匀度的 S/N 值,结果见表 2(表中  $L$  表示水平种植面,  $V$  表示中心竖直面,照度均匀度与混色均匀度为三次测量所得平均值)。将各组实验各因子的 S/N 值进行计算统计并绘图,标准偏差在图中使用误差线标出,结果如图 4 所示。

根据图 4,综合第二章节理论进行分析。

表 2 正交表实验设计

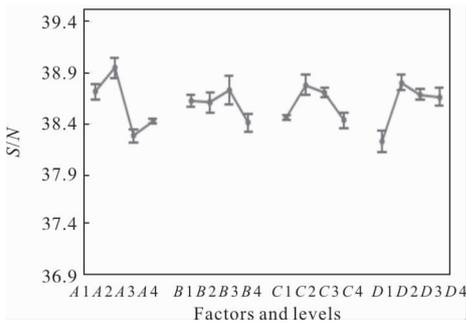
Tab.2 Orthogonal table experimental design

Serial number	A	B	C	D	L/V	Illumination uniformity	Color-mixed uniformity	S/N of illumination	S/N of color-mixed uniformity
1	1	1	1	1	L	78.079	44.327	37.851	32.933
					V	70.889	32.045	37.012	30.115
2	1	2	2	2	L	92.914	84.148	39.361	38.501
					V	84.074	88.743	38.493	38.963
3	1	3	3	3	L	90.329	82.662	39.117	38.346
					V	84.741	84.114	38.562	38.497
4	1	4	4	4	L	84.362	83.282	38.523	38.411
					V	69.534	85.179	36.844	38.607
5	2	1	2	3	L	92.736	90.000	39.345	39.085
					V	80.463	89.367	38.112	39.023
6	2	2	1	4	L	88.716	86.724	38.960	38.761
					V	78.177	83.971	37.862	38.483
7	2	3	4	1	L	86.978	78.874	38.788	37.938
					V	72.959	84.278	37.262	38.514
8	2	4	3	2	L	86.102	84.380	38.700	38.525
					V	76.281	84.738	37.648	38.562

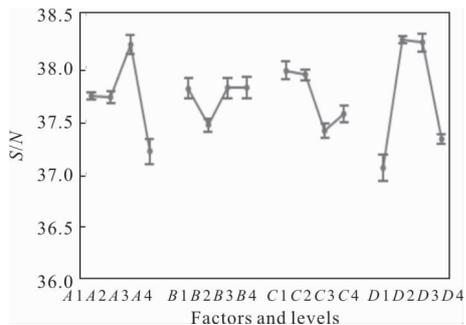
续表 2  
Continued Tab.2

Serial number	A	B	C	D	L/V	Illumination uniformity	Color-mixed uniformity	S/N of illumination	S/N of color-mixed uniformity
9	3	1	3	4	L	86.304	85.107	38.721	38.599
					V	78.193	88.637	37.863	38.952
10	3	2	4	3	L	77.950	87.172	37.836	38.808
					V	78.773	90.000	37.928	39.085
11	3	3	1	2	L	84.920	87.792	38.580	38.869
					V	85.887	83.123	38.679	38.394
12	3	4	2	1	L	79.099	80.047	37.963	38.067
					V	83.179	86.724	38.400	38.763
13	4	1	4	2	L	84.751	81.742	38.563	38.249
					V	81.543	84.314	38.228	38.518
14	4	2	3	1	L	81.960	85.649	38.272	38.654
					V	59.854	86.048	35.542	38.695
15	4	3	2	4	L	83.532	85.521	38.437	38.641
					V	68.597	84.973	36.726	38.585
16	4	4	1	3	L	83.433	84.192	38.427	38.505
					V	82.639	84.457	38.343	38.533

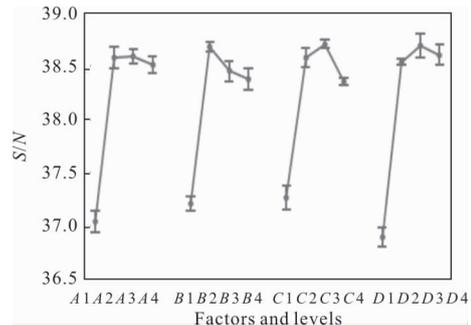
对 A 因子(放置 LED 的三棱柱高宽比  $h$ ), 三棱柱斜面倾角过大或过小均导致光线在空间小范围聚集分布的情况, 所以出现如图所示水平面照度均匀



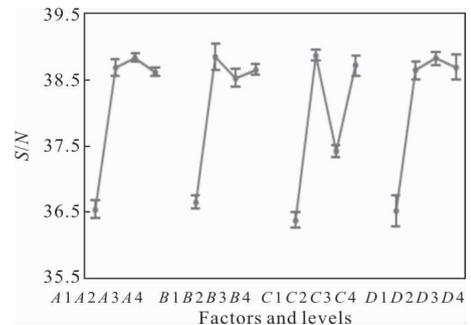
(a) 水平面照度均匀度的 S/N 值  
(a) S/N of illuminance uniformity on horizontal plane



(b) 竖直面照度均匀度的 S/N 值  
(b) S/N of illuminance uniformity on vertical plane



(c) 水平面混色均匀度的 S/N 值  
(c) S/N of color-mixed uniformity on horizontal plane



(d) 竖直面混色均匀度的 S/N 值  
(d) S/N of color-mixed uniformity on 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

度和混色均匀度的 S/N 在 A2 时达到最高, 而 A2 和

A3 时竖直面照度均匀度和混色均匀度的  $S/N$  均较优且差别不大的结果,最终选择 A2( $h=0.5$ )为最优因子水平。

对 B 因子(种植面宽度  $L$ ), $L$  的改变主要影响水平方向的照度分布和光质分布。 $L$  较小时,只有出射光线与法线夹角在一小范围内的光线能够达到受照面,而  $L$  过大时顶部直射光聚集在中间小范围,水平参考面中心照度明显大于边缘,这两种情况都使得光线在空间分布不均匀,所以得到两参考面照度均匀度在 B3 时达到最高、B2 和 B3 时两面混色均匀度的  $S/N$  较优且数值相近的结果,故选择 B3 ( $L=200$  mm)为最优水平。

对 C 因子(顶部反射面倒种植面的距离  $H$ ),种植位点照度与  $H$  的二次方成反比, $H$  取较大值时不同高度受照面的照明情况差异较大,最终反映为竖直方向均匀度不高,所以在 C3、C4 时出现竖直参考面照度均匀度和混色均匀度较差的情况。而  $H$  取过小值时混光距离大大缩短,也很难获得均匀的照明效果,C1 时出现两面混色均匀度很差的情况,根据以上分析,最终选择 C2( $H=300$  mm)为最优水平。

对 D 因子,顶部反射面 LED 排布方式选择 D3 (图 3 中 X3 结构)时两面混色均匀度的  $S/N$  值达到最大,而 D3 相比 D2 在两面照度均匀度的  $S/N$  上差别不大且较优,证实 D3 结构配合所设计植物培养架可以实现更均匀的混光。

综上所述,可初步认定 A2B3C2D3 的组和为最优解,得到初步最优解水平参考面照度均匀度为 91.06%,混色均匀度为 88.65%;竖直参考面照度均匀度为 82.46%,混色均匀度为 87.51%。具体结构 A2 为放置 LED 的三棱柱高宽比, $h$  为 0.5;B3 为种植面宽度, $L$  为 200 mm;C2 为顶部反射面倒种植面的距离, $H$  为 300 mm;D3 为顶部反射面 LED 排布方式,为如图 3 中 X3 结构。

### 3.2 误差分析

ANOVA 方法(Analysis of Variance)通过评估不同变异对总变异的贡献来判断各影响因素对结果的影响力<sup>[13]</sup>。当因子影响程度与实验误差相比足够大时,该影响因子才被认为是显著的。只有足够显著的因子才会考虑在预测中使用。“影响显著性”的强弱

程度通过参量<sup>[13]</sup>来表示:

$$P = \frac{SSA}{SST}, SST = SSA' + SSE \quad (10)$$

式中:SSA 和 SSA' 表示数据间差异,称为组间方差和;SSE 为错误方差和,表示随机误差引起的差异(由于实验的重复性,可近似认为 SSE 为 0)。SSA 由  $S/N$  比的方差和表示<sup>[13]</sup>:

$$SSA = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \bar{\eta})^2 \quad (11)$$

式中: $m$  为模拟次数; $\eta_i$  为其第  $i$  次实验的结果; $\bar{\eta}$  为每个因子  $S/N$  的平均值,在该实验中, $\eta = L_{TB}(S/N)$ 。计算结果如表 3 所示。

表 3 各因子对照度及混色均匀度的贡献率

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

Factors code	Contribution rate of illuminance uniformity of horizontal plane	Contribution rate of illuminance uniformity of vertical plane
A	43.98%	25.47%
B	9.09%	4.61%
C	15.02%	11.71%
D	31.89%	58.20%

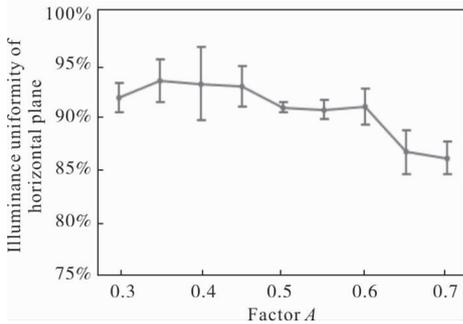
Factors code	Contribution rate of color-mixed uniformity of horizontal plane	Contribution rate of color-mixed uniformity of vertical plane
A	26.41%	24.52%
B	19.86%	21.56%
C	19.76%	28.70%
D	33.96%	25.20%

从表 3 可以看出,对照度均匀度和混色均匀度贡献最大的因子为 A (种植面三棱柱灯架高宽比  $h$ ) 和 D(顶部光源模块结构),底部光源模块出射方向和顶部光源模块排列结构对培养架品质有较大影响,证实了双光源模块精细化设计对实现高照明均匀度空间的重大意义。接下来对 A 因子取 9 个水平,对 D 因子取 5 个水平进行进一步研究,以避免偶然性,确保实验严谨准确。

首先在保持 B 因子取 B3(种植面宽度  $L=200$  mm),

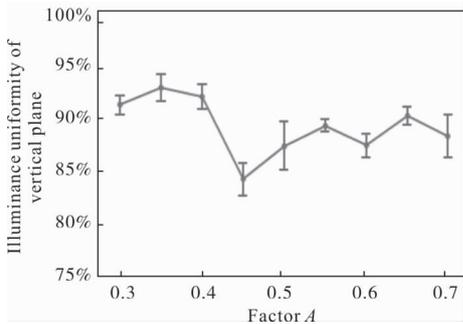
C 因子取 C2(反射面到种植面的距离  $H=300$  mm)、D 因子取 D3(顶部反射面 LED 排布方式为如图 3 中 X3 结构)的情况下,分别取三棱柱高宽比  $h$  为 0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.55、0.6、0.65、0.7 mm 9 个水平,经 Trace Pro 软件仿真,计算两取样面照度均匀度以及混色均匀度( $k_1=42.887, k_2=56.788, k_1$  为计算水平参考面混色均匀度时的  $k$  值; $k_2$  为计算竖直参考面混色均匀度时的  $k$  值),实验结果为三次重复取样获得结果的平均值,标准偏差在图中以误差线的形式给出,如图 5 所示。

分析图 5 可知,两取样面照度均匀度和混色均



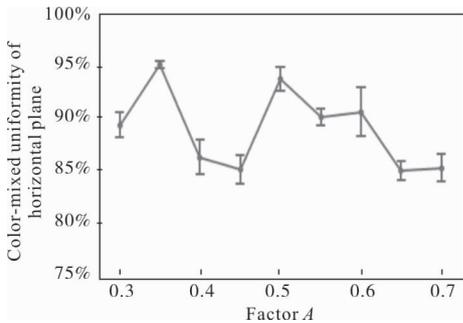
(a) 水平参考面照度均匀度

(a) Illuminance uniformity of horizontal plane



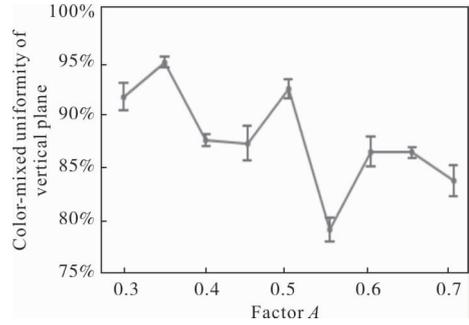
(b) 竖直参考面照度均匀度

(b) Illuminance uniformity of vertical plane



(c) 水平参考面混色均匀度

(c) Color-mixed uniformity of horizontal plane



(d) 竖直参考面混色均匀度

(d) Color-mixed uniformity of vertical plane

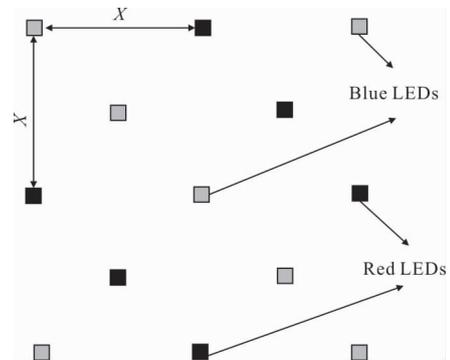
图 5 均匀度随 A 因子的变化曲线

Fig.5 Variation curves of the uniformity with the factor A

匀度均在  $h=0.35$  时达到最大,这是因为光源出光面倾角较小时方向性一致,照度叠加更为充分,易实现高均匀度照明。

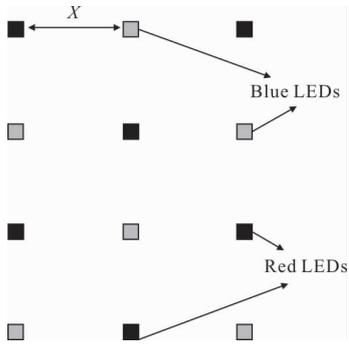
接着,在选择  $h=0.35$ 、B 因子取即种植面宽度  $L=200$  mm、C 因子取即反射面到种植面的距离  $H=300$  mm 的情况下,选择 D 因子为 D31、D32、D33、D34、D35 五种结构,进行下一步研究。其中 D31、D32、D33 为如图 6 所示的 a 结构,结构参数  $x$  分别为: $x_{31}=40, x_{32}=50, x_{33}=60$ ;D34、D35 为如图 6 所示的 b 结构,结构参数  $x$  分别为: $x_{34}=30, x_{35}=40$ 。模拟仿真结果如图 7 ( $k_1=42.887, k_2=56.788, k_1$  为计算水平参考面混色均匀度时的  $k$  值; $k_2$  为计算竖直参考面混色均匀度时的  $k$  值)所示。

由以上分析,A 因子水准选择 0.35、D 因子选择 D32 结构,即选择  $x_{32}=50$  的如图 7 所示的 a 结构时培养架均匀度达到最优,该植物培养架的最优解参数为:种植面宽度  $L=200$  mm、反射面到种植面的距



(a) a 结构

(a) Structure a

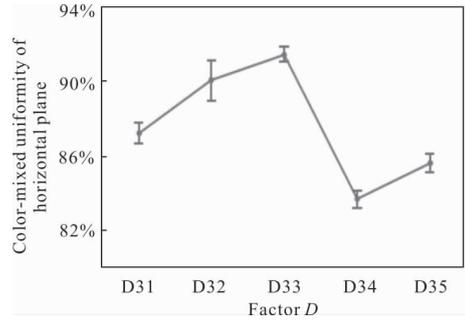


(b) b 结构  
(b) Structure b

图 6 D 因子结构

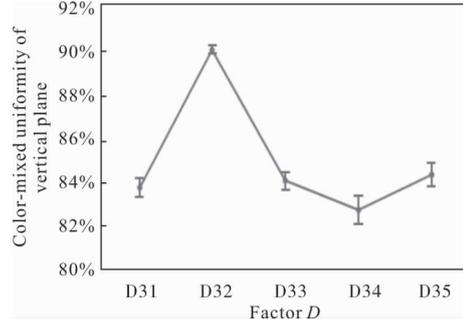
Fig.6 Structure with the factor D

离  $H=300$  mm、种植面放置 LED 灯列的三棱柱高宽比  $h=0.35$ 、顶部反射面 LED 阵列结构为如图 6 所示  $x_{32}=50$  的 a 结构。得到培养架水平取样面的照度均匀度为 93.58%，混色均匀度为 90%；竖直取样面的照度均匀度为 88.02%，混色均匀度为 90%；种植面光能利用率为 28.20%。培养架照度色度分布图如图 8 所示。



(c) 水平参考面混色均匀度

(c) Color-mixed uniformity of horizontal plane

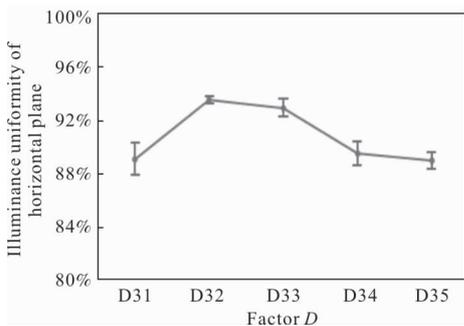


(d) 竖直参考面混色均匀度

(d) Color-mixed uniformity of vertical plane

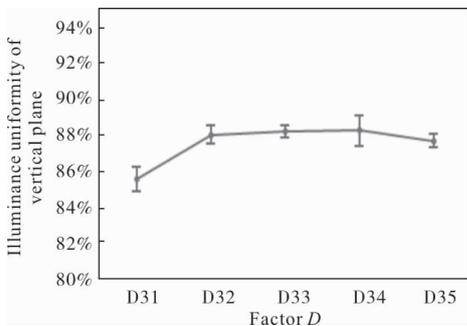
图 7 均匀度随 D 因子的变化曲线

Fig.7 Variation curves of the uniformity with the factor D



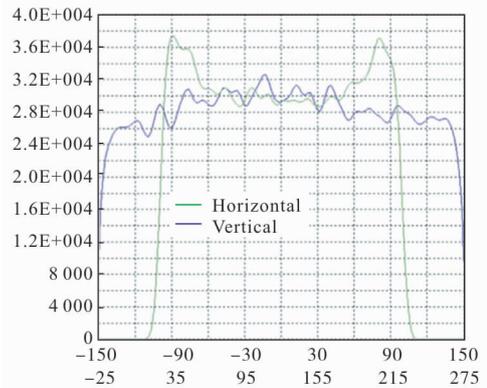
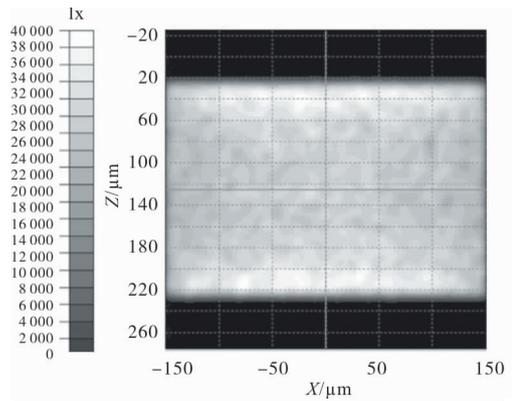
(a) 水平参考面照度均匀度

(a) Illuminance uniformity of horizontal plane



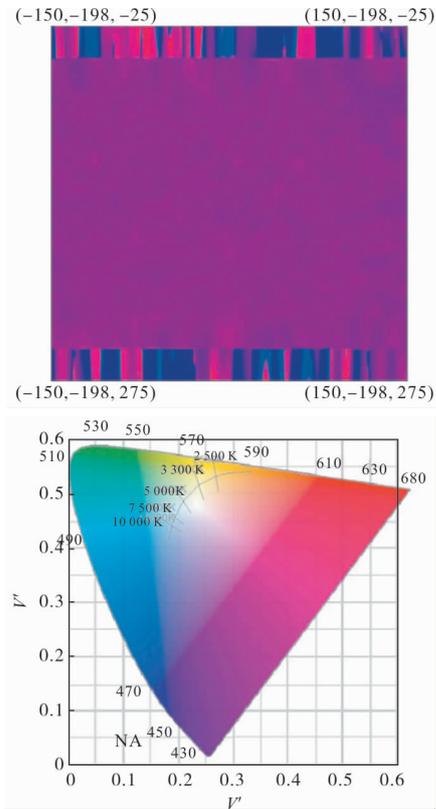
(b) 竖直参考面照度均匀度

(b) Illuminance uniformity of vertical plane



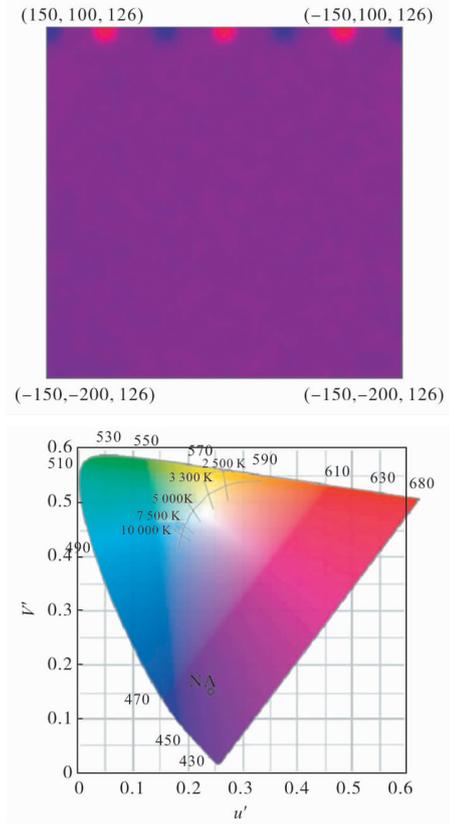
(a) 水平面照度分布图

(a) Illumination map of horizontal plane



(b) 水平面光质分布图

(b) Chromaticity map of horizontal plane

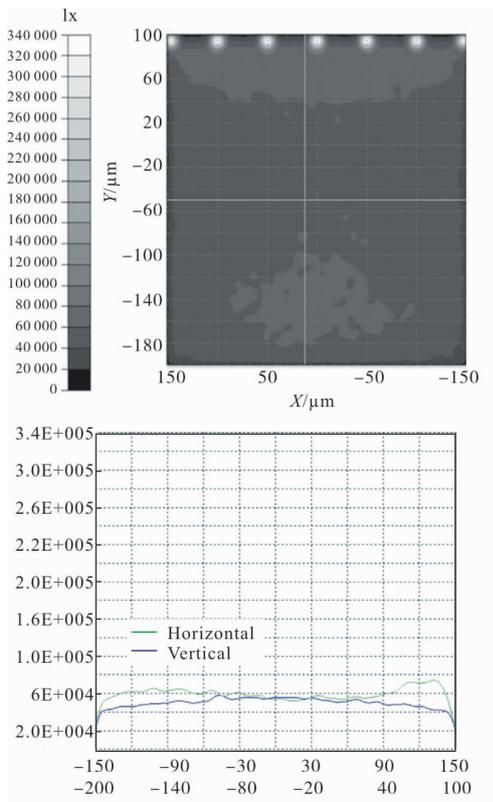


(d) 竖直面光质分布图

(d) Chromaticity map of vertical plane

图 8 最终优化结果

Fig.8 Final optimization result



(c) 竖直面照度分布图

(c) Illumination map of vertical plane

### 3.3 配光曲线

配光曲线作为灯珠的出厂特征参数，用以表征灯珠对应出射角度的光强度，不同配光曲线的光源会带来整体混光效果的差异。在此从最优解出发，针对具有如图 9 所示配光曲线的灯珠，研究灯珠配光曲线对植物光源质量的影响。图 9(a)~(e)所示的灯珠出光角度分别为 30°、60°、100°、120°、150°，图 9(f)为最优解灯珠的配光曲线。用 Trace Pro 软件模拟仿真，计算水平参考面和竖直参考面的受照均匀度和种植面光能利用率。三次重复实验结果的平均值如图 10 所示( $k_1=24.879, k_2=29.914$ ,  $k_1$  为计算水平参考面混色均匀度时的  $k$  值;  $k_2$  为计算竖直参考面混色均匀度时的  $k$  值)，图中误差线表示标准偏差。

从图 11 可以看出，灯珠出光角度为 100°以下时，种植面光能利用率体现出较高水平，而两参考面照明均匀性较差。这是因为灯珠出光角度较小时光强分布较为集中，光线耦合不够充分，导致参考面的

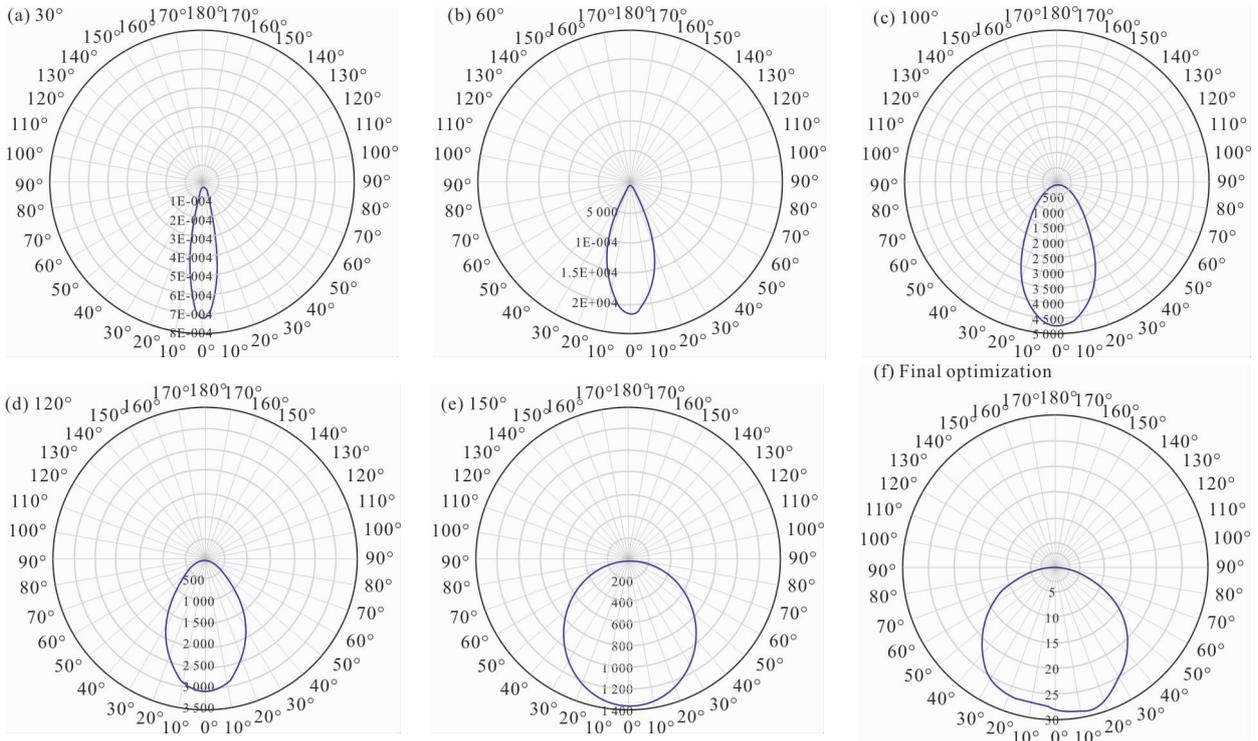
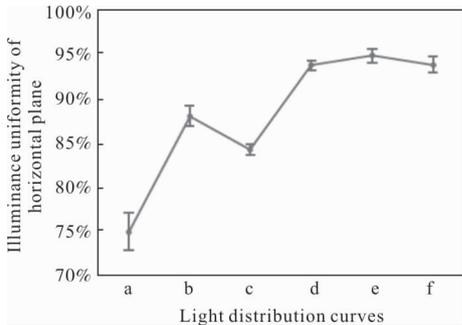


图 9 配光曲线

Fig.9 Light distribution curves

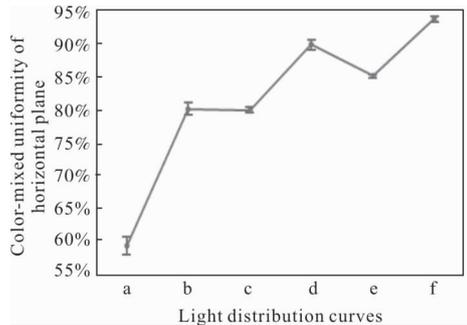
均匀度不高。而在出光角度为 120°和 150°时,较大的出光角度在相同的混光距离内会带来较好的混光

效果,而光线经过漫反射板反射到测试面所经过的距离更长,使光线耦合更为充分,混光更加均匀。但



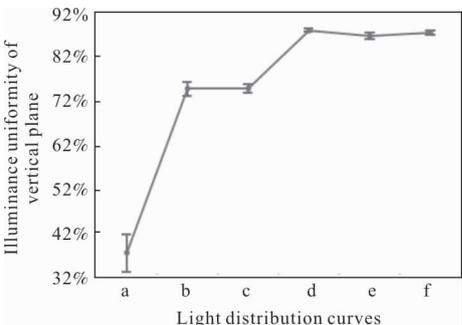
(a) 水平参考面照度均匀度

(a) Illuminance uniformity of horizontal plane



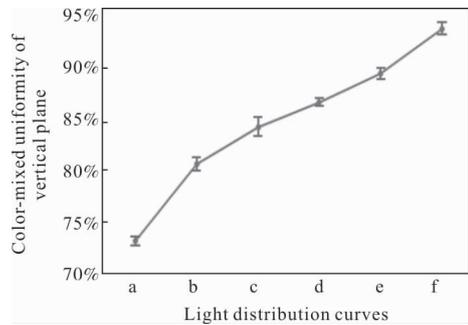
(c) 水平参考面混色均匀度

(c) Color-mixed uniformity of horizontal plane



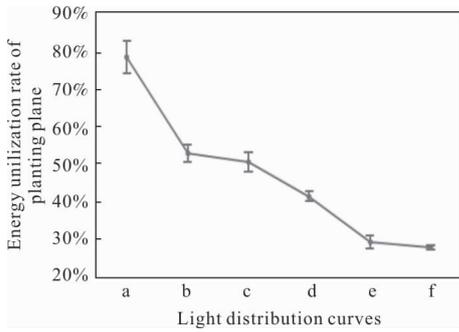
(b) 竖直参考面照度均匀度

(b) Illuminance uniformity of vertical plane



(d) 竖直参考面混色均匀度

(d) Color-mixed uniformity of vertical plane



(e) 种植面能量利用率

(e) Energy utilization rate of planting plane

图 10 各项属性随配光曲线的变化曲线

Fig.10 Variation curves of various attributes with the light distribution curves

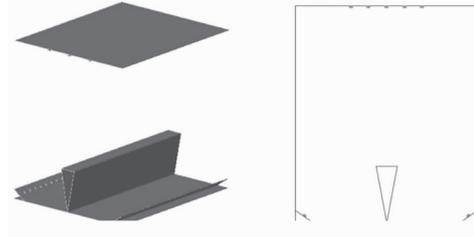
随着出光角度的增大,光线损失变大,种植面光能利用率下降。而且在光线大于 120°时由出光角度引起的各参考面均匀度变化幅度均不大,基本可以忽略出光角度对其的影响,只有选用出光角度较小的灯珠作为光源,才会严重影响培养架的均匀度。植物工厂实际生产中多采用出光角度较大的光源<sup>[11]</sup>,所以基本可以认为光源的配光分布不会对培养架空间照明均匀度产生较大影响。

在选用出光角度为 120°的灯珠时,培养架两取样面照明均匀度达到较优水准,并且种植面能量利用率达到了大幅高于最优解模型(最优解模型种植面光能利用率为 28.2%)的 41.62%。所以将最优解的灯珠换成具有如图 9(d)所示配光曲线的光源,模型被进一步优化,此时培养架种植面照度均匀度为 93.48%,混色均匀度为 90%;竖直参考面照度均匀度为 88.54%,混色均匀度为 87.13%;种植面光能利用率为 41.63%。

### 3.4 模拟植物生长测试

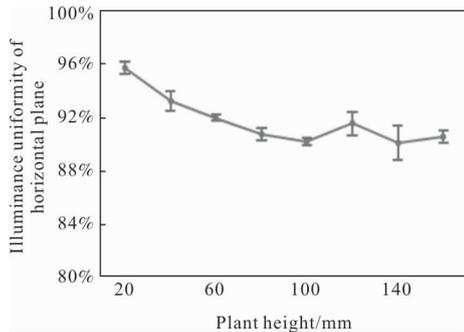
植物光源应当在植物生长到各个高度时都能提供均匀的照明,以能保证所育植物产品质量。在获得具有最优空间照明均匀度的培养架模型后还要进一步研究植物体表面的照度和色度均匀度,检测是否存在因为植物遮挡而使所育植物受照均匀度下降的问题。如图 11(a)所示,用倒三棱柱模拟植物,通过增大倒三棱柱的高度来模拟植物的生长。通过 Trace Pro 软件模拟测试植物高度在 20、40、60、80、100、120、140 mm 时倒三棱柱顶面(代表所育植物正上方

的受照情况)和侧面(代表所育植物侧面叶片的受照情况)的均匀度( $k_1=49.519, k_2=21.228, k_1$ 为计算



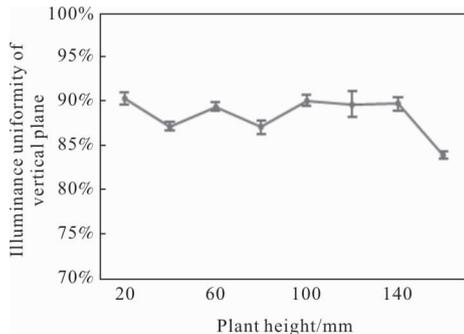
(a) 植物生长模型

(a) Plant growth model



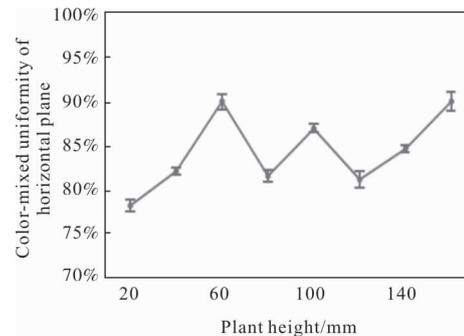
(b) 水平参考面照度均匀度

(b) Illuminance uniformity of horizontal plane



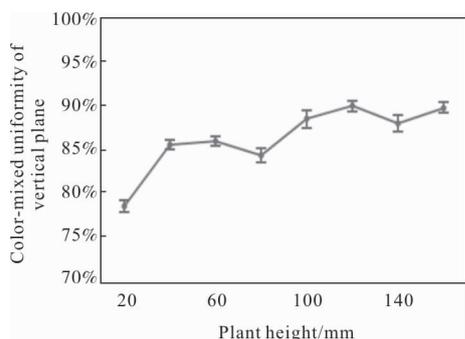
(c) 竖直参考面照度均匀度

(c) Illuminance uniformity of vertical plane



(d) 水平参考面混色均匀度

(d) Color-mixed uniformity of horizontal plane



(e) 竖直参考面混色均匀度

(e) Color-mixed uniformity of vertical plane

图 11 遮挡检测模型及模拟结果

Fig.11 Occlusion detection model and simulation results

顶面混色均匀度时的  $k$  值;  $k_2$  为计算侧面混色均匀度时的  $k$  值)。三次重复实验取得结果的平均值如图 11(b)、(c)所示,图中误差线表示标准偏差。

从图 11 可以看出,植物顶面的照度均匀度随植物高度增加有下降趋势。这是因为随着植物高度的增加,植物侧面对种植面光源发射光的吸收和遮挡更为显著,到达植物顶部的光变少,从而导致植物顶部照度均匀度下降。而植物顶部和侧面的照度均匀度均保持在 90%左右的较高水平,两面混色均匀度保持在 85%左右的较高水平。

综上,植物生长虽会对参考面受照均匀度产生一定影响,但各参考面照明均匀度均保持在较高水平,只要在植物生长各过程培养架内的光强度都能达到植物生长所需的最低照度以上就基本不会对植物的生长带来较大的影响。证实了所设计培养架在植物生长过程中可以提供高均匀度的照明环境。

## 4 结论

该研究提出空间照明均匀度理论,以实现整个种植空间高照度和混色均匀度为目标,以培养架单元结构水平种植面和中心竖直面的 PPFD 均匀度和混色均匀度共同作为研究指标,在设计基于双光源模块混光原理的底部倒置型光源模块和顶部阵列型光源模块的双照明模块植物光源的基础上,具体探讨了底部光源模块三棱柱灯架高宽比  $h$ 、种植面宽度  $L$ 、顶部光源模块反射面到种植面距离  $H$ 、顶部 LED 阵列结构  $X$  四个影响因子对培养架均匀度的影响,应用 Taguchi 方法、ANOVA 理论精细化设计

影响因子,对其中贡献度最大的两因子三棱柱高宽比  $h$  和顶部 LED 阵列结构进行更深入研究得出最优解,进一步研究了光源配光曲线对照明系统质量的影响。最终得到种植面宽度  $L=200$  mm、反射面到种植面的距离  $H=300$  mm、种植面三棱柱高宽比  $h=0.35$ 、顶部反射面 LED 阵列结构为如图 6 所示  $x_{32}=50$  的 a 结构、灯珠配光曲线如图 9(d)的最优解模型。模拟得出最优解培养架水平参考面照度均匀度为 93.48%,混色均匀度为 90%;竖直参考面照度均匀度为 88.54%,混色均匀度为 87.13%;种植面光能利用率为 41.63%。最后用不同高度的倒三棱柱对植物的生长过程进行模拟,检测植物遮挡对受照面均匀度的影响。结果表明:基本可以忽略各个生长阶段所育植物对光线的遮挡和吸收,验证了文中所设计植物光源能在植物生长全过程的整个三维空间提供均匀的光照,能够有效改善植物在生长各阶段的照明环境,对高质量植物光源模块设计具有一定的借鉴指导意义。

## 参考文献:

- [1] Shao Mingjie, Liu Wenke, Zha Lingyan. Differential effects of high light duration on growth, nutritional quality, and oxidative stress of hydroponic lettuce under red and blue LED irradiation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 286: 109366.
- [2] Pan Ruichi, Wang Xiaojing, Li Nianghui. Plant Physiology [M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)  
潘瑞炽,王小菁,李娘辉.植物生理学[M].7版.北京:高等教育出版社,2012.
- [3] Morow R C. LED lighting in horticulture [J]. *Hortscience*, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [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)  
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.
- [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)
- 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.
- [6] 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)
- 向昌明, 文尚胜, 史晨阳, 等. 一种带有曲面底板的直下式 LED 平板灯设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0718004.
- [7] 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)
- 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.
- [8] Lei Yutang. Photoelectric Detection Technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Metrology Press, 2009. (in Chinese)
- 雷玉堂. 光电检测技术[M]. 2 版. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [9] 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)
- 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.
- [10] Zhu Zhenmin, Qu Xinghua, Liang Haiyi, et al. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0115001. (in Chinese)
- 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.
- [11] Zhang Zhiping, Xiao Zhengyi. Overview and analysis of LED plant lighting luminaires standards and technical specifications [J]. *Electrical Appliances*, 2019(11): 31–35, 40. (in Chinese)
- 张志平, 肖正谊. LED 植物照明灯具标准法规/技术规范分析综述[J]. 日用电器, 2019(11): 31–35, 40.
- [12] Pang Peiyuan, Wen Shangsheng, Huang Yaqi, et al. Design and research of the light mixing component for high uniformity and ultra-thin direct-down LED panel light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0523003. (in Chinese)
- 庞培元, 文尚胜, 黄雅琪, 等. 高均匀度超薄直下式 LED 平板灯混光元件的设计与研究[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0523003.
- [13] Thomas P J Linsinger. Evaluation of CRM homogeneity in cases of insufficient method repeatability: Comparison of Bayesian analysis with substitutes for ANOVA based estimates[J]. *Analytica Chimica Acta: X*, 2020, 5: 100049.