

# 间歇供光模式下光照度和光周期对 水培臭菜生长和品质的影响

刘 赫<sup>1</sup>, 赵 静<sup>2</sup>, 李天宇<sup>1</sup>, 周福君<sup>3</sup>

(1. 东北农业大学 哈尔滨 150030; 2. 华北水利水电大学 郑州 450045; 3. 北部湾大学 广西钦州 535011)

**摘要:**为了探究间歇供光模式下, LED红蓝光光照度与光周期对水培臭菜生长特性及营养品质的影响, 设置了4种光照度(幼苗期/生长期):  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和3种光周期梯度5 h/7 h、6 h/6 h、7 h/5 h, 采用双因素完全随机试验对臭菜进行水培, 共12组处理。结果表明, 水培臭菜在光周期7 h/5 h, 光照度(幼苗期/生长期)为 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下可溶性蛋白含量最高。但综合考虑能源消耗与经济价值, 水培臭菜在光暗周期7 h/5 h, 以及光照度(幼苗期/生长期) $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下鲜质量最大, 维生素C含量高( $0.43 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 且30 d总耗能仅为 $47.0 \text{kW} \cdot \text{h}$ , 因此可以作为综合最优生产方案。研究结果对水培臭菜的智能植物工厂化生产具有一定的参考意义。

**关键词:**臭菜; LED; 间歇供光; 光照度; 光周期

中图分类号: S649

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)06-98-08

## Effects of light intensity and photoperiod on growth and quality of hydroponically grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) under intermittent light supply mode

LIU He<sup>1</sup>; ZHAO Jing<sup>2</sup>; LI Tianyu<sup>1</sup>; ZHOU Fujun<sup>3</sup>

(1. Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 3. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, Guangxi, China)

**Abstract:** To investigate the effects of LED red and blue light intensity and photoperiod on the growth characteristics and nutritional quality of hydroponically grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) under intermittent light supply mode. Four light intensities (seedling/growing stage) were set:  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and three photoperiod gradients: 5 h/7 h, 6 h/6 h, and 7 h/5 h, and 12 groups of treatments were obtained by using a two-factor completely randomized experiment for hydroponics of arugula. The results showed that the soluble protein content of the hydroponically grown arugula were higher than those of other groups under the photoperiod 7 h/5 h and light intensity (seedling/growing stage) of  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . However, considering the energy consumption and economic value, hydroponic arugula had the highest fresh mass at 7 h/5 h photoperiod and  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}/250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  light level (seedling stage/growing stage), with vitamin C content of  $0.43 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and total energy consumption of only  $47.0 \text{kW} \cdot \text{h}$  for 30 days. It can be used as an integrated optimal production scheme. The results of the study have some reference significance for the smart plant production of hydroponically grown arugula.

**Key words:** Arugula; LED; Intermittent for light; Lighting intensity; Photoperiod

臭菜(*Eruca sativa* Mill.)为十字花科植物,也是生长在中国东北和华北地区的一种一年生草本植物<sup>[1]</sup>,原产于欧洲南部,近几年作为一种新兴蔬菜被推广种植。臭菜具有浓烈的芝麻香味,不仅营养丰

富,而且叶片和根部还具有极高的药用价值,有健脾利尿和缓解胃部不适以及止咳功效,也有较强的防癌、抗癌作用,在中医学中也是作为治疗尿频的一味药材<sup>[2]</sup>。臭菜生长周期短、生长环境简单、且市

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-05-04

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2016YFD0701905)

作者简介: 刘 赫,女,在读硕士研究生,研究方向为植物工厂化与现代农业设施。E-mail: liuhe\_1996@foxmail.com

通信作者: 周福君,男,教授,博士生导师,研究方向为粮食作物收获与植物工厂化。E-mail: fjzhou@163.com

场需求量巨大,臭菜的生产逐渐工业化<sup>[3]</sup>,臭菜生产带来的经济价值也决定了其未来的市场前景比较可观。

近年来,随着发光二极管(LED)技术的发展,人们对LED照明进行了深入的探究,追求更加高效节能的动态LED供光模式<sup>[4]</sup>,并试图将这些新型供光模式应用在植物工厂中,从而提高植物工厂内的蔬菜生长效率<sup>[5]</sup>。光照度和光周期均为影响植株光合作用以及干物质累积的重要因素,光照度和光周期所决定的每日光照积分(DLI)也与LED光源的电能输入密切相关<sup>[6]</sup>,因此有必要确定光照度和光周期的最佳组合,以便于在植物工厂中高效生产出优质的水培臭菜。

低光照度环境下,叶菜类植株会通过增大叶片面积以及增加根系长度来减缓弱光胁迫作用,不断增加光照度后,植株产量会有所增加,但若超过光饱和点,反而会产生抑制作用<sup>[7]</sup>。王奇等<sup>[8]</sup>比较了不同LED红蓝组合光照度对水培生菜生长的影响,发现幼苗期 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光照度处理下生菜地上部鲜质量明显高于 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照度处理,而生长期 $350\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光照度处理下生菜产量和品质明显高于 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照度处理。光周期则直接影响植株的光化学反应时间,光照时间如果过长,植株叶片会出现脱水、枯黄等现象,同时还会造成能源浪费<sup>[9]</sup>。黄碧阳等<sup>[10]</sup>比较了不同LED红蓝组合光周期变化对菠菜的影响,发现光照时长大于 $12\ \text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 的光照处理下,菠菜中可溶性糖和可溶性蛋白含量相对于其他试验组有明显增高。因此,植物工厂中确实可以通过调节光照度和光周期来提高叶菜类植株的产量和品质。

植物在细胞水平上具有内源性生物钟功能,昼夜节律约为24 h周期。利用植物工厂内的光环境调控进行间歇供光,改变植株的光照节律可以调节植株体内的生物钟节律,从而在一定程度上提高植株的光能利用率<sup>[11]</sup>。与此同时,LED光源的光照度和光照时间也会对设备消耗和电能损耗造成影响,产生经济损失。

目前国内外学者对臭菜的研究内容较少,仍然停留在大棚臭菜的种植与营养研究阶段,加强智能工厂化水培臭菜的研究迫在眉睫。与此同时,大多数研究仍选择连续供光模式进行试验,间歇式供光在水培蔬菜种植中的应用实例较少,需要填补这一供光模式下的研究空白。因此,笔者探究在间歇供光模式下,光照度和光周期对水培臭菜生长特性和

营养品质的影响规律,旨在为水培臭菜的智能植物工厂化生产提供一定价值的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与生长条件

试验于2020年12月至2022年5月在东北农业大学北方寒地现代农业装备重点实验室设施园艺研究室和华北水利水电大学设施园艺研究室进行。以产地为黑龙江、哈尔滨金龙农业有限公司提供的大叶臭菜(*Eruca sativa* Mill.)作为供试材料。

将大叶臭菜种子在 $40\ ^\circ\text{C}$ 水浴条件下进行12 h的浸种处理,育苗盘上层为潮湿洁净纱布,下层注入清水,处理后的种子平铺在育苗盘上方,在恒温箱中进行 $30\ ^\circ\text{C}$ 恒温催芽<sup>[12]</sup>。待幼苗生长至2叶1心时,将幼苗根系用离子水冲洗3次后移栽进入垂直水培植物培养架(图1)。

单个培养架由4个栽培床和1个溶液槽组成,每

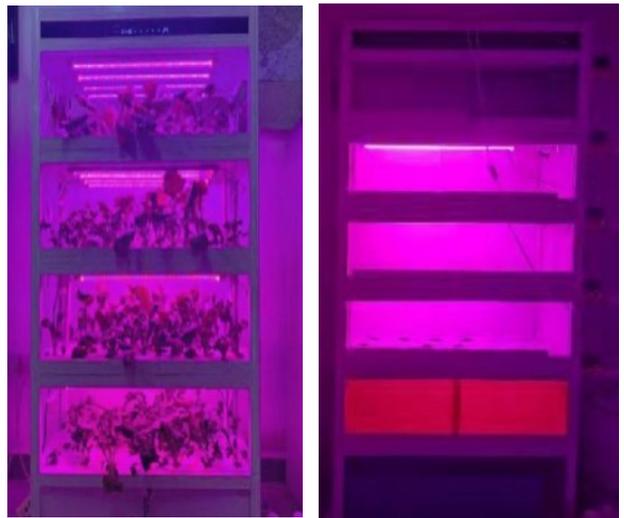


图1 水培臭菜智能培养架

个栽培床( $1200\ \text{mm}\times 900\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}$ )含有20个种植孔(直径为20 mm)。试验过程中,移栽后的臭菜幼苗被置于湿润海绵块( $25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$ )中,5 d内,臭菜幼苗的根系生长至逐渐穿透海绵,接触到营养液。

试验在封闭环境中进行,为保证试验过程中培养架各层光照互不影响,且试验环境整体不受到外界因素干扰,每层培养架均采用PET材质的膜纸进行遮光隔热处理。移栽30 d后,臭菜植株成熟,进入采收期进行收获。

试验过程中使用的营养液由奥玛农业科技有限公司提供,营养液采用霍格兰配方<sup>[13]</sup>,其成分组成及含量参见表1。营养液通过水泵和导管在4个栽

表1 营养液成分

成分	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	493.00
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	115.00
[-CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COONa)CH <sub>2</sub> COO] <sub>2</sub> Fe	35.00
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22
MnSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2.13
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.08
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.02
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	945.00
KNO <sub>3</sub>	607.00

培床和溶液槽之间实现连续循环,循环流速为 5.5 L·min<sup>-1</sup>。营养液的 pH 值始终维持在 6.0~6.5。

臭菜处于幼苗期时,EC 值维持在 500~600  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,臭菜进入生长期后,EC 值维持在 1000~1200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

试验期间营养液每 5 d 更新 1 次,水培架恒温控制在(25±1)°C,空气相对湿度维持在 70%~75%,CO<sub>2</sub> 浓度维持在(800±50) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

1.2 试验设计与光照处理

试验采用光质为红、蓝光(数量比为 7:1)的管状 LED 灯<sup>[4]</sup>(RB-LED7/1-16W,天津光之韵照明电器有限公司,中国),将其安装在栽培床上方 35 cm 处。LED 光源的光谱分布使用光纤光谱仪(S2000-VIS,杭州赛曼有限公司,中国)在距离光源 15 cm 处进行测量,有效波长范围为 350~900 nm。光源由 0.1% 紫外光(350~399 nm)、12.7% 蓝光

(400~500 nm)、83.9% 红光(610~709 nm)和 3.3% 远红光(710~800 nm)组成,其主要红蓝光波峰分别为 660 和 455 nm,光谱分布如图 2 所示。

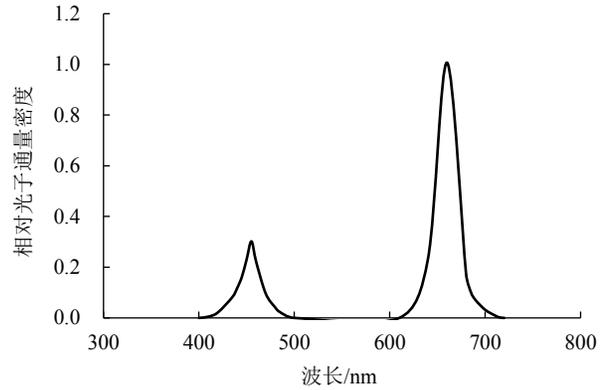


图2 LED 红蓝组合灯板光谱分布

试验中将臭菜生长分为幼苗期和生长期 2 个阶段,移栽后 0~10 d 为臭菜的幼苗期,移栽后 11~30 d 为臭菜的生长期。在臭菜 2 个不同的生长阶段,为其提供不同的光照度,设置 4 个光照度梯度 L1、L2、L3、L4(幼苗期/生长期)分别为 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ /300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、150  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ /300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ /250  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、250  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ /250  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。试验对臭菜进行间歇式供光,设置 3 种光周期梯度(光照/黑暗) 5 h/7 h(T1)、6 h/6 h(T2)、7 h/5 h(T3)。在这 3 种梯度的处理下,24 h 内光照总时长分别为 10、12、14 h·d<sup>-1</sup>。采用双因素完全随机试验,共计得到 12 组组合处理(表 2)。

表2 4 种光照度(L)和 3 种光周期(T)组合得到的光照处理

组别	幼苗期光照度/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	生长期光照度/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	光暗周期/ h	光周期(M/N)/ (h·d <sup>-1</sup> )	幼苗期 DLI/ ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	生长期 DLI/ ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	LED 灯 30 d 总耗能/ (kW·h)
L1T1	100	300	5/7	10	3.6	10.8	33.6
L2T1	150	300	5/7	10	5.4	10.8	36.0
L3T1	200	250	5/7	10	7.2	9.0	33.6
L4T1	250	250	5/7	10	9.0	9.0	36.0
L1T2	100	300	6/6	12	4.3	12.9	40.3
L2T2	150	300	6/6	12	6.5	12.9	43.2
L3T2	200	250	6/6	12	8.6	10.8	40.3
L4T2	250	250	6/6	12	10.8	10.8	43.2
L1T3	100	300	7/5	14	5.0	15.1	47.0
L2T3	150	300	7/5	14	7.5	15.1	50.4
L3T3	200	250	7/5	14	10.0	12.6	47.0
L4T3	250	250	7/5	14	12.6	12.6	50.4

注:DLI 代表每日光照积分,其计算公式为  $\text{DLI}(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=\text{光照度}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\times\text{日光照时长}(\text{h}\cdot\text{d}^{-1})\times 3600(\text{s}\cdot\text{h}^{-1})\times 10^{-6}$ ;光暗周期 M/N 表示 LED 常亮 M h 后常暗 N h,循环往复。LED 灯日耗能(kW·h)=灯管数量×灯管瓦数(W)×照明时长(h)×10<sup>-3</sup> LED 灯 30 d 总耗能(kW·h)=幼苗期时间×幼苗期日耗能+生长期时间×生长期日耗能。

1.3 测量与计算

1.3.1 形态学和生物量的测量 生长期间每 2 d 对臭菜形态学进行测量,每种处理下随机选取 5 株臭菜样本,使用游标卡尺测量其株高增长量、茎粗、叶宽,并使用精度为 0.001 g 的电子天平(ZG-TP203,杭州松净有限公司,中国)测量臭菜可食用部分鲜质量,测量后取其均值,以此来观测臭菜在不同阶段的生长状况。

臭菜移栽后 30 d 进行采收,然后将臭菜可食用部分放入 105 °C 的烘箱中干燥 3 h,随后在 75 °C 条件下烘干,直至恒质量,从而测定其可食用部分干质量。

1.3.2 叶绿素荧光参数与叶绿素含量 使用多功能植物效率仪(M-PEA-2)测定叶绿素荧光参数,采用分光光度法检测叶绿素含量,选取植株中心叶中第 3 片展开的叶子,利用 80%丙酮提取出叶片内的叶绿素,用分光光度计(UV-3150)在波长 645 nm 和 663 nm 处测得溶液的吸光度,再计算叶绿素含量。

1.3.3 维生素 C 含量 采用液相色谱法<sup>[15]</sup>测得维生素 C 含量,称取混合均匀的适量样品于 50 mL 容量瓶中,加入 20 g · L<sup>-1</sup> 偏磷酸溶液 40 mL,超声 30 min,定容至 50 mL,过 0.22 μm 滤膜,上机测定。

1.3.4 可溶性蛋白含量 采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量,参照蔡永萍等<sup>[16]</sup>的方法,测量溶液在波长 595 nm 处的吸光度,得到可溶性蛋白质含量。

1.3.5 硝酸盐含量 采用水杨酸浓硫酸比色法<sup>[17]</sup>测定硝酸盐含量。取 3 g 新鲜臭菜样品,加入 1 mL 的 4%醋酸锌溶液进行充分研磨,将所得研磨液置入离心管中 70 °C 水浴加热 30 min,冷却至室温后离心。取 0.4 mL 上层清液置入 10 mL 比色管中,加入 5%水杨酸浓硫酸溶液,显色后用 8%氢氧化钠溶液定容至 10 mL,冷却后测量溶液在波长 410 nm 处的吸光度,得到硝酸盐含量<sup>[18]</sup>。

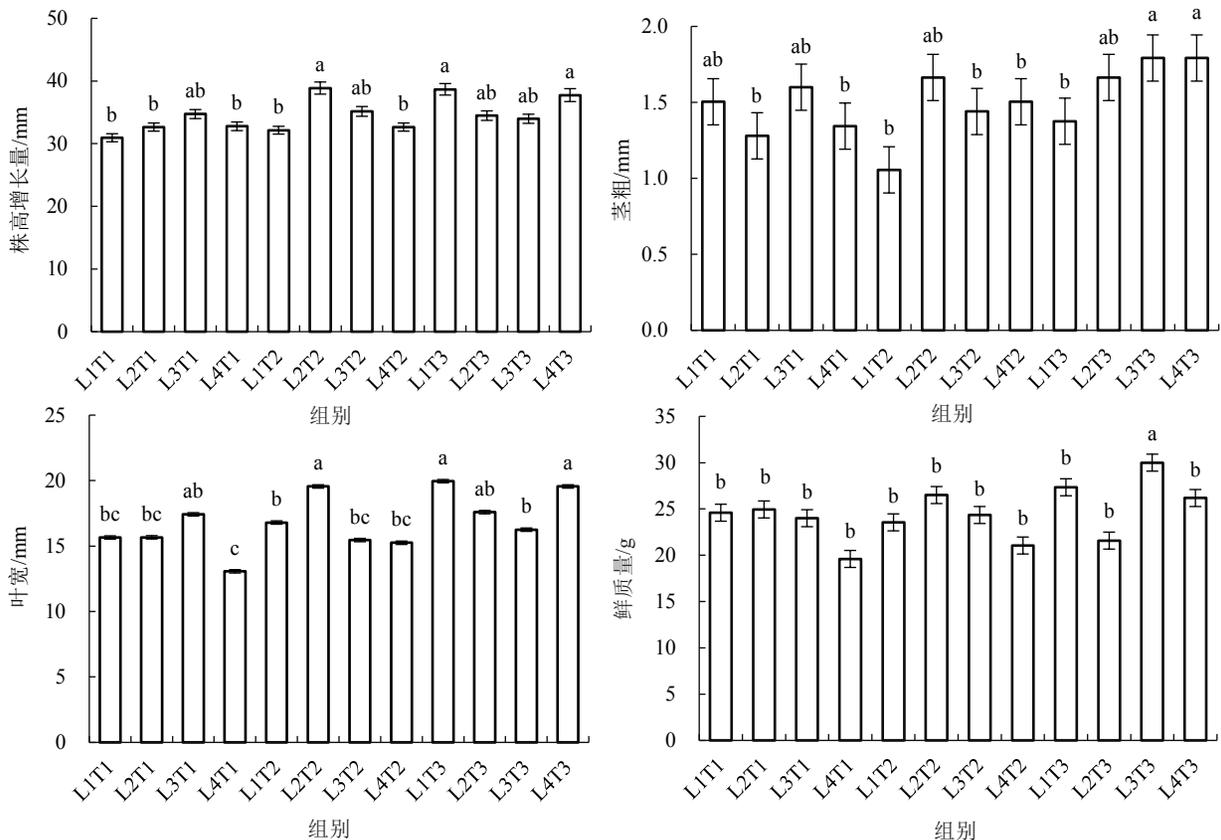
1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2018 和 Origin pro 9.0 软件进行数据处理和制图。采用 SPSS 21.0 软件(IBM, Inc, Chicago, IL, USA)对数据进行方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 光照度和光周期对臭菜幼苗期生长量的影响

由图 3 可知,臭菜在移栽后 0~10 d 的幼苗期阶段,T1 和 T2 条件下随着光照度逐渐递增,株高增



注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

图 3 光照度和光周期对臭菜幼苗期生长量的影响

长量呈先增加后减少的趋势,T3条件下株高增长量呈先减少后增加的趋势。在株高增长量方面,L2T2、L1T3、L4T3 3组株高增长量高于其他处理组,分别为38.88、38.68、37.75 mm。相较株高增长量最低的L1T1组,L2T2、L1T3、L4T3的株高增长量分别显著提高了25.62%、24.98%、21.97%。结果表明,在一定范围内,光照度增加对株高增长量有促进作用。

臭菜在移栽后0~10 d的幼苗期阶段,L3T3组和L4T3组茎粗均为1.79 mm,这2组处理茎粗相比较来说大于其他处理组,比茎粗最低的L1T2处理组显著提高了69.70%。光周期为T3时,一定范围内,光照度增加能够促进茎粗生长,但当光照度超过L3后,光照度的增加不再促进茎粗生长。结果表明,光周期对臭菜幼苗期茎粗生长指标的影响无明显规律。

在T1和T2光周期处理下,随着光照度增加,臭菜幼苗期叶宽呈先增加后减少的趋势。在T3光周期处理下,随着光照度增加,臭菜幼苗期叶宽呈先减少后增加的趋势。这是由于光周期超过一定范围后,叶片通过减小叶面积降低光吸收率抑制生长。L1T3、L2T2、L4T3 3组叶宽优于其他处理组,叶宽分别为19.96、19.55、19.55 mm。对比叶宽最小的L4T1组,L1T3、L2T2、L4T3组,叶宽分别显著提高了52.72%、49.58%、49.58%。结果表明,在T1和T2短周期供光条件下,一定范围内提高光照度能够促进叶宽生长,但超过这个范围后,增加光照度反而会对臭菜幼苗期叶宽增长产生抑制作用。

由图3可知,在T1和T2光周期处理下,随着光照度增加,臭菜幼苗期鲜质量呈先增加后减少的趋势。在T3光周期处理下,光照度对臭菜幼苗期鲜质量的影响无明显规律。L3T3组鲜质量为30.00 g,显著高于其他处理组。相较鲜质量最小的L4T1组,L3T3组鲜质量提高了53.06%。结果表明,短周期供光的条件下,一定范围内提高光照度能够促进臭菜幼苗期的生长,但超过这个范围后,增加光照度反而会对臭菜生长产生抑制作用,在长周期供光的条件下,光照度对臭菜的生长并不会产生较大影响。

## 2.2 光照度和光周期对臭菜生长期生长量的影响

2.2.1 对生长期株高的影响 由表3可知,光照度对臭菜株高增长量有一定影响,在相同光周期条件下,随着光照度的增加,臭菜的株高增长量呈现上

升趋势。L4T2和L4T3株高增长量高于其他处理组。相较株高增长量最低的L1T1,L4T2的株高增长量显著提高了25.55%,L4T3的株高增长量显著提高了28.60%。*F*检验结果表明,光照度和光周期处理之间的交互影响不显著。

2.2.2 对生长期茎粗的影响 由表3可知,在L2、L3、L4处理下,臭菜茎粗随光照度的增加呈升高的趋势。L3T3和L4T3处理组茎粗优于其他处理组。相较茎粗最低的L1T1组,这2组的茎粗均显著提高了33.33%。*F*检验结果表明,光照度和光周期对茎粗的影响均呈显著性差异,但二者之间的交互作用不显著。结果表明,提高光照度和延长光周期均有利于臭菜的茎秆增粗。

2.2.3 对生长期叶宽的影响 由表3可知,在短周期光照下,臭菜的叶宽随光照度的增加呈增加的趋势,随着光周期的延长呈先增加后减少的趋势。L4T2处理组叶宽高于其他处理组。相较叶宽最低的L1T3组,L4T2组叶宽显著提高了20.26%。*F*检验结果表明,光照度和光周期对臭菜叶宽的影响均呈显著性差异,但其与二者的交互作用不显著。

表3 光照度和光周期对臭菜生长期增长量的影响

光照度	光周期	株高增长量/ mm	茎粗/ mm	叶宽/ mm	鲜质量/ g
L1	T1	45.8 b	1.5 c	39.2 bc	49.02 b
	T2	48.5 b	1.9 ab	40.8 bc	47.04 b
	T3	52.0 ab	1.9 ab	39.0 c	48.44 b
L2	T1	51.0 b	1.5 c	42.8 ab	49.10 b
	T2	48.8 b	1.6 b	42.9 bc	49.88 b
	T3	52.6 ab	1.8 ab	42.4 ab	46.23 b
L3	T1	51.8 b	1.6 b	42.9 bc	60.52 b
	T2	50.3 ab	1.8 ab	43.6 ab	62.71 b
	T3	53.7 ab	2.0 a	40.8 bc	65.25 a
L4	T1	57.4 ab	1.6 b	43.6 ab	62.53 b
	T2	57.5 a	1.9 ab	46.9 a	63.18 b
	T3	58.9 a	2.0 a	43.7 ab	63.24 b
<i>F</i> 检验	L	*	*	*	*
	T	NS	*	*	NS
	L×T	NS	NS	NS	NS

注:T.光周期;L.光照度;L×T.光照度和光周期的交互作用; \*表示在0.05水平差异显著;NS代表在0.05水平差异不显著,不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。下同。

2.2.4 对生长期鲜质量的影响 由表3可知,光照度对臭菜的鲜质量影响显著。臭菜的鲜质量在短周期光照下随光照度的增加而呈升高的趋势。L3T3处理组鲜质量显著高于其他处理组。相较鲜质量最低的L2T3组,L3T3组鲜质量显著提高了41.14%。*F*检验结果表明,光照度和光周期对臭菜

鲜质量的交互作用不显著。

### 2.3 光照度和光周期对叶绿素含量的影响

由表 4 可知,当光周期相同光照度由 L1 增加至 L3 时,叶绿素含量随之增加,但随着光照度继续增加,叶绿素含量不增反减,L4 处理下各组叶绿素含量低于 L3 处理。这表明当生长期光照度超过 L3 以后,叶绿素含量开始逐步降低,光照度过低或过高都不利于叶绿素的合成。在相同光照度处理下,随着光周期的延长,叶绿素含量呈上升趋势。在 L3T3 处理下的叶绿素含量最高,高于其他处理组,相较于 L1T1 处理组,L3T3 处理组的叶绿素含量显著提高了 86.59%。*F* 检验结果表明,光照度和光周期对叶绿素含量的影响均差异显著,但其与二者的交互作用差异不显著。

表 4 光照度和光周期对臭菜营养品质的影响

光照度	光周期	w(叶绿素)/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(可溶性蛋白)/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(维生素 C)/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(硝酸盐)/ (μg·g <sup>-1</sup> )
L1	T1	0.82 b	4.58 b	0.42 a	3 746.28 a
	T2	0.93 b	4.85 ab	0.33 a	2 733.36 a
	T3	1.02 ab	5.20 ab	0.29 a	2 862.74 a
L2	T1	0.98 b	4.70 ab	0.32 a	2 950.46 a
	T2	1.24 ab	4.88 ab	0.37 a	3 177.16 a
	T3	1.42 ab	5.15 ab	0.27 a	1 628.74 b
L3	T1	1.44 ab	4.75 ab	0.28 a	1 968.17 ab
	T2	1.52 ab	5.02 ab	0.33 a	2 029.86 ab
	T3	1.53 a	5.21 ab	0.43 a	1 641.20 b
L4	T1	1.01 b	5.61 ab	0.39 a	2 361.69 ab
	T2	1.26 ab	5.75 a	0.30 a	2 420.31 a
	T3	1.35 ab	5.89 a	0.41 a	2 360.33 a
<i>F</i> 检验	L	*	*	NS	NS
	T	*	NS	NS	NS
	L×T	NS	NS	*	*

### 2.4 光照度和光周期对可溶性蛋白含量的影响

由表 4 可知,光照度对于可溶性蛋白含量的影响呈显著差异,光照度增加有利于可溶性蛋白的合成。光周期对可溶性蛋白含量的影响差异不显著,在光照度相同的条件下,T3 组处理下可溶性蛋白含量较高。在 L4T3 和 L4T2 处理下的可溶性蛋白含量较高,相较可溶性蛋白含量最低的 L1T1 处理组,L4T3、L4T2 处理组的可溶性蛋白含量分别显著提高了 28.60%、25.55%。*F* 检验结果表明,光照度对可溶性蛋白含量的影响显著,但和光周期及二者的交互作用差异不显著。

### 2.5 光照度和光周期对维生素 C 含量的影响

由表 4 可知,光照度和光周期对维生素 C 含量

的影响并未表现出特定的趋势。在 L3T3 处理下的维生素 C 含量高于其他处理组,相较维生素 C 含量较低的 L2T3 处理组,L3T3 处理组的维生素 C 含量提高了 59.26%。*F* 检验结果表明,光照度和光周期对臭菜维生素 C 含量的影响均不显著,但其与二者的交互作用差异显著。

### 2.6 光照度和光周期对硝酸盐含量的影响

由表 4 可知,光照度和光周期对硝酸盐含量的影响也未表现出特定的趋势。在 L2T3 处理下的硝酸盐含量最低,对比硝酸盐含量较高的 L1T1 处理组,L2T3 处理组的硝酸盐含量显著降低了 56.52%。*F* 检验结果表明,光照度和光周期对臭菜硝酸盐含量的影响差异均不显著,但其与二者的交互作用差异显著。

### 2.7 光照度和光周期对叶绿素荧光的影响

由图 4 可以看出,在 T1 和 T2 周期供光下,提高光照度后最大光化学效率( $F_v/F_m$ )无论在幼苗期还是生长期,均呈先增高后降低的趋势。不同的是,幼苗期最大光化学效率在 L3T3 组处理下为最高值,成熟期最大光化学效率在 L2T2 组处理下为最高值,表明在一定范围内,光照度偏弱或者偏高都会对臭菜产生光抑制作用。非光化学荧光猝灭系数(NPQ)的值在幼苗期和生长期均随光照度的增加和光周期的延长而呈上升的趋势,在 L4T3 组处理下臭菜 NPQ 达到最大值。

这表明长时间的强光照射可能会增加 PSII 天线色素将吸收的光能转化为热能的比例,而弱光短期照射则提高了臭菜的光能利用率。随着光周期的延长,幼苗期和生长期臭菜光化学猝灭系数( $qP$ )的值呈下降的趋势。但在 T1 和 T2 处理下,幼苗期  $qP$  的值随光照度增加呈先减少后增加再减少的趋势。幼苗期和成熟期的  $qP$  均在 L4T3 组处理下达到最小值,这表明在中长光周期处理下,光照度对 PSII 天线色素将吸收光能用于光化学电子传递的效率产生了负面作用,但在弱光短周期的处理中,这种效率却不断提升。

## 3 讨论与结论

从生长分析的结果来看,一定时间内强光照射可以促进叶片生长提高叶宽,Adams 等<sup>[19]</sup>的研究表明 80%以上的作物,光周期的延长会导致一定范围内的叶面积增加,本研究结果与此相符。严宗山等<sup>[20]</sup>、周福君等<sup>[21]</sup>研究表明,光周期能够促进叶菜类茎秆粗壮,本研究结果与此相符。

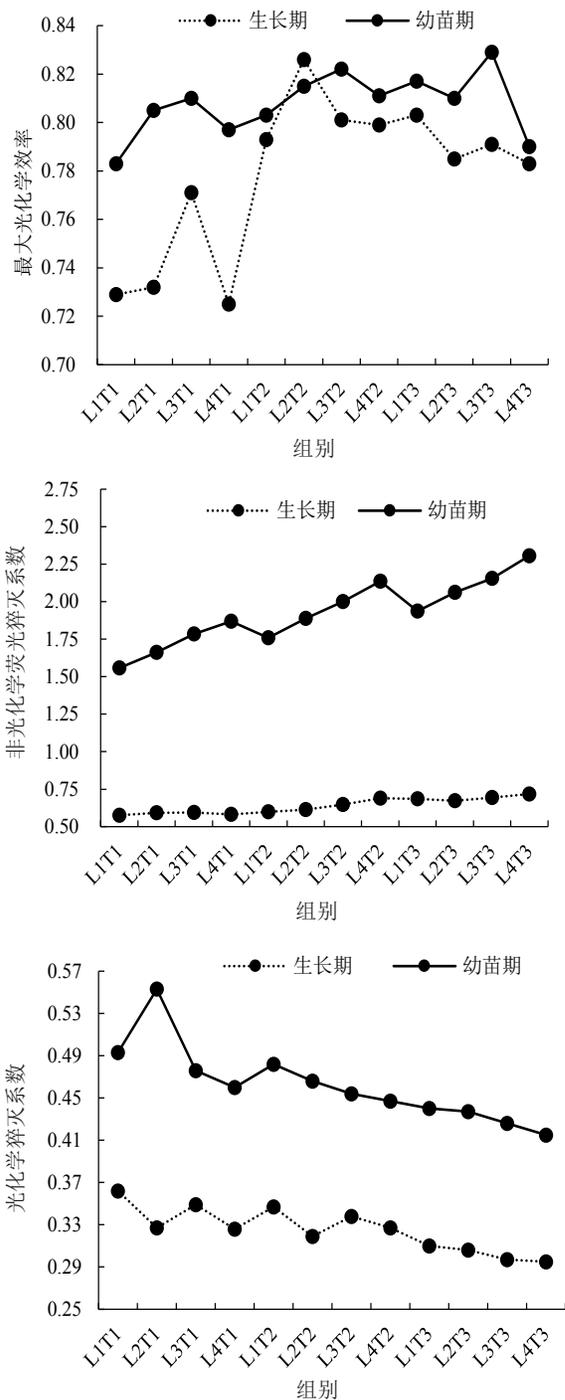


图4 光照度和光周期对水培臭菜荧光参数的影响

从品质分析的结果来看,叶绿素含量随着光照度的增加而升高,这是由于低光照度条件使得叶绿素合成受阻<sup>[22]</sup>,同时叶片会显现出发黄或发白的现象,光照度过高后叶绿素合成反而减弱,这可能是由于光照度过高导致叶片灼伤<sup>[23]</sup>。由此可见,适当的降低光照度能够对叶片起到一定的保护作用。研究表明,适当延长光周期有助于促进叶片的色素积累,但会有一个阈值,如果超过阈值反而会降低色素含量,提高光照度有利于可溶性蛋白的合成,

这一结果与王君等<sup>[24]</sup>研究结果一致。维生素C和硝酸盐的含量则随光周期和光照度的变化无明显变化规律。刘杰等<sup>[25]</sup>研究表明,光照度和光周期对叶菜中硝酸盐的累积交互作用显著,本研究结果与其相符。

在臭菜的生长期中,光周期为14 h·d<sup>-1</sup>处理下,可以选取200~250 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>的光照度用来提升水培臭菜中维生素C含量的同时降低硝酸盐含量。王振等<sup>[26]</sup>发现了植物中的维生素C可消除自由基,保护植物细胞,减弱由于环境对植物细胞造成的损害,同时该研究也表明,光照度较低而光周期较长时,维生素C含量更高,本研究的结论与其基本相符。光诱导可以通过影响基因表达以及蛋白质的合成从而影响硝酸还原酶活性<sup>[27]</sup>,并且硝酸盐的还原反应是在叶绿体中完成的,因此光环境对硝酸盐的合成具有一定程度的影响。

从叶绿素荧光参数<sup>[28]</sup>的分析结果来看,光照度和光周期能够在一定范围内提高最大光化学效率,这一结果与Yang等<sup>[29]</sup>探究光照度对烟草叶光能利用率的试验中所得结果相符,且当光照度超过一定值以后,反而使光化学效率降低,对臭菜生长产生抑制作用。提高光照度能够提高非光化学荧光猝灭系数,这一结果与胡彦波<sup>[30]</sup>对低温和盐碱胁迫下桑树光合作用的适应性研究结果相符。适当提高光照度延长光周期能有效降低臭菜的光化学猝灭系数,这一结果与夏丽等<sup>[31]</sup>对盐藻叶绿素荧光化学猝灭产生的条件和主要组分的检测研究结果相符。

近些年来,臭菜因极高的营养价值已经成为备受青睐的新型蔬菜。在笔者的研究中,通过改变臭菜的光照度和供光模式,能够生产出产量高、品质优、高营养、低毒害的臭菜。

水培臭菜在光周期14 h·d<sup>-1</sup>、光照度超过200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>的条件下生长量更高,且在光照度250 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>/250 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>时可溶性蛋白含量达到最高,但在这一条件下LED灯30 d耗能为50.4 kW·h,能耗过高。水培臭菜在光暗周期7 h/5 h,光周期14 h·d<sup>-1</sup>,以及光照度(幼苗期/生长期)200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>/250 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>的条件下鲜质量最大,可溶性蛋白含量较高,维生素C和叶绿素含量最高,且30 d总耗能仅为47.0 kW·h,基于食用价值和能源损耗的综合考虑,这一条件优于其他试验组。在此处理下采收的成熟臭菜平均鲜质量65.25 g、叶绿素含量1.53 mg·g<sup>-1</sup>、可溶性

蛋白含量  $5.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、维生素 C 含量  $0.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、硝酸盐含量  $1\ 641.20 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

因此,综合考虑能耗和经济损失,采用幼苗期  $200 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、生长期  $250 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  且光周期为 7 h/5 h L3T3,能够大幅提高臭菜产量,丰富臭菜叶片内的营养物质,尤其是可溶性蛋白和维生素 C 含量,且降低有害硝酸盐含量。研究结果不仅有利于促进未来臭菜在植物工厂内的工业化生产,且弥补了国内目前对于臭菜的部分研究空白,具有一定价值的参考意义。

### 参考文献

- [1] 许又凯,刘宏茂,刀祥生,等.臭菜营养成分分析及作为特色蔬菜的评价[J].广西植物,2004,24(1):12-16.
- [2] 冯均科.芳香保健特菜芝麻菜栽培技术[J].上海农业科技,2007(1):80.
- [3] 杨银娟,王伟群,施颖红,等.珍稀蔬菜:芝麻菜的栽培技术及营养价值[J].上海蔬菜,2011(3):76-77.
- [4] 吕艳.国家“863”课题“植物工厂 LED 节能光源及光环境智能控制技术”在京启动[J].农业工程技术(温室园艺),2013(6):1.
- [5] 魏灵玲,杨其长,刘水利.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.
- [6] 钟路明,廖白月,郝思怡,等.不同光强和光质对黄瓜嫁接愈合及生长的影响[J].中国瓜菜,2022,35(1):54-59.
- [7] 李义博,宋贺,周莉,等.C<sub>4</sub>植物玉米的光合-光响应曲线模拟研究[J].植物生态学报,2017,41(12):1289-1300.
- [8] 王奇,刘家源,刘文科.LED 红蓝光光强模式对水培生菜生长与产量的影响[J].照明工程学报,2021,32(2):1-5.
- [9] 刘文科.LED 短时强光照射提升植物工厂叶菜品质的应用策略[J].中国照明电器,2021(8):11-14.
- [10] 黄碧阳,林碧英,李彩霞,等.LED 红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):131-135.
- [11] 邵明杰,刘文科,周成波,等.采前光照节律对 LED 红蓝光下水培生菜生长及营养元素吸收的影响[J].照明工程学报,2020,31(6):126-130.
- [12] 郝微丽,孙桂丽.三种引进叶菜的栽培技术[J].新疆农业科技,2002(5):18.
- [13] PETER K, MOHR H. Control of phenylalanine ammonia-lyase and ascorbate oxidase in the mustard seedling by light and hoagland's nutrient solution[J]. Zeitschrift Für Naturforschung C, 2014,29(5/6):222-228.
- [14] 吴昊.LED 光质对臭菜生长特性及营养品质影响规律研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [15] 王艳颖,姜国斌,胡文忠,等.高效液相色谱法测定草莓中维生素 C 含量[J].大连大学学报,2006,27(2):21-22.
- [16] 蔡永萍,李合生,骆炳山,等.霍山 3 种石斛的生长节律及其与生态因子关系的研究[J].武汉植物学研究,2003,21(4):351-355.
- [17] WISEMAN H G, JACOBSON W C. Nitrate in plant material, determination of nitrate in silages and forages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1965,13(1):36-39.
- [18] 陈雅妮,任顺成,辛亚楠.蔬菜加工保藏过程中亚硝酸盐含量的变化[J].中国瓜菜,2013,26(2):18-20.
- [19] ADAMS S, LANGTON F A. Photoperiod and plant growth: a review[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2005,80(1):2-10.
- [20] 严宗山,张想平,王蕾,等.不同光强和光质对管道水培生菜生长发育的影响[J].北方园艺,2020(21):15-20.
- [21] 周福君,翟莹,魏源,等.不同光质对韭菜各茬生长及营养品质的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(11):52-62.
- [22] 张红梅,金海军,丁小涛,等.低温弱光下不同苦瓜杂交 F<sub>1</sub> 代的生长及叶绿素荧光特性[J].中国瓜菜,2014,27(6):11-14.
- [23] 朱世杨,张小玲,罗天宽,等.不同基因型花椰菜幼苗生长和叶片光合色素及质膜透性对盐胁迫的反应[J].西南农业学报,2011,24(5):1722-1727.
- [24] 王君,戴尧仁,汤佩松.日本牵牛光周期诱导过程中蛋白质的免疫化学研究[J].生物化学杂志,1988,4(3):269-273.
- [25] 刘杰,胡笑涛,王文娥,等.光强与光周期交互作用对水培生菜生长的影响[J].北方园艺,2019(5):70-78.
- [26] 王振,张齐凤,胡亚军,等.抗坏血酸与植物抗逆性关系[J].现代化农业,2013(12):31-32.
- [27] KANG J H, KRISHNAKUMAR S, ATULBA S L S, et al. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2014,54(6):501-509.
- [28] 李鹏民,高辉远,STRASSER R J.快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(6):559-566.
- [29] 贺国强,张鹏飞,张会慧,等.弱光烟草幼苗低温后不同光强下叶片的光能利用特点[J].核农学报,2016(6):1234-1239.
- [30] 胡彦波.低温和盐碱胁迫下桑树光合作用的适应性研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [31] 夏丽,陈贻竹.盐藻叶绿素荧光非光化学猝灭产生的条件和主要组分的检测[J].海洋与湖沼,2000,31(5):498-505.