

于鹏澎, 宋金修, 蔡 玮, 等. 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄种苗质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1917-1926.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.014

# 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄种苗质量的影响

于鹏澎<sup>1,2,3</sup>, 宋金修<sup>1,2</sup>, 蔡 玮<sup>2</sup>, 李闫祥<sup>2</sup>, 范玉龙<sup>2</sup>, 沈朝萍<sup>4</sup>, 曲开军<sup>5</sup>, 毛罕平<sup>1,2</sup>  
(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 安徽省林下作物智能装备工程研究中心, 安徽 六安 237012; 4. 江苏航空职业技术学院航空工程学院, 江苏 镇江 212134; 5. 句容市农业资源开发科技服务中心, 江苏 句容 212400)

**摘要:** 本研究以番茄(*Solanum lycopersicum* L.)为试验材料,以夜间未进行补光为对照,分析了夜间发光二极管(Light emitting diode, LED)补光光照度[100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]和补光时间(1 h 和 2 h)对穴盘番茄幼苗质量的影响。结果表明,补光时间相同条件下,随着补光光照度的增加,番茄幼苗的株高和地下部干质量逐渐增加,但叶片总叶绿素含量和 PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )无显著变化。相同补光时间下,补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理与补光光照度为 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理之间的番茄幼苗叶片 SPAD 值、地上部干质量、地下部干质量均没有显著差异。补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,延长补光时间可以提高番茄幼苗的茎粗、叶片数、叶面积、总叶绿素含量、SPAD 值、净光合速率、生物量积累量和壮苗指数。补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 处理的番茄育苗电能利用效率和光能利用效率最高,分别达到 0.267 和 0.145。因此,根据番茄幼苗质量和育苗能耗量分析结果,建议选择补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 的 LED 补光参数进行番茄育苗期间的夜间补光。

**关键词:** 番茄; 工厂化育苗; 补光; 光能利用效率; 壮苗指数

**中图分类号:** S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)09-1917-10

## Effects of LED supplementary light intensity and supplementary light time at night on seedling quality of tomato in the controlled environment

YU Peng-peng<sup>1,2,3</sup>, SONG Jin-xiu<sup>1,2</sup>, CAI Wei<sup>2</sup>, LI Yan-xiang<sup>2</sup>, FAN Yu-long<sup>2</sup>, SHEN Chao-ping<sup>4</sup>,  
QU Kai-jun<sup>5</sup>, MAO Han-ping<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Anhui Undergrowth Crop Intelligent Equipment Engineering Research Center, Lu'an 237012, China; 4. Institute of Aviation Engineering, Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang 212134, China; 5. Science and Technology Service Center of Agricultural Resources Development of Jurong, Jurong 212400, China)

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z308); 现代农业装备与技术教育部重点实验室开放基金项目(JNZ201909); 安徽省林下作物智能装备工程研究中心科研项目(AUCIEERC-2022-07)

作者简介: 于鹏澎(1988-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 主要从事植物工厂节能技术研究。(E-mail) yupp@ujs.edu.cn

通讯作者: 宋金修, (E-mail) songjx@ujs.edu.cn

**Abstract:** Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) was used as the experimental material, and no supplementary light at night was used as the control. The effects of light emitting diode (LED) supplementary light at night with the light intensity of 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , and the light time of 1 h, 2 h on the seedling quality were analyzed in this study. The results showed that the plant height and underground dry weight of tomato seedlings increased gradually

with the increase of supplementary light intensity under the same light supplementary time, but the total chlorophyll content and the maximum photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ) of leaves did not change significantly. Under the same supplementary light time, there was no significant difference in SPAD value, dry weight of aboveground and underground parts of tomato seedlings between  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  supplementary light intensity treatments. When the supplementary light intensity was  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , the stem diameter, leaf number, leaf area, total chlorophyll content, SPAD value, net photosynthetic rate, biomass accumulation and healthy index of tomato seedlings could be increased by prolonging the supplementary light time. At the same time, the energy use efficiency and light use efficiency of tomato seedlings were the highest when the light intensity was  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the light time was two hours, which reached 0.267 and 0.145, respectively. Therefore, considering the seedling quality and energy consumption of tomato seedlings in the controlled environment, it was recommended to apply a LED lighting with the light intensity of  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and the light time of two hours for supplementary light at night during tomato seedling period.

**Key words:** tomato; factory seedling; supplementary light; light use efficiency; healthy index

番茄作为全球范围内广泛种植的园艺蔬菜,具有非常高的营养价值和经济效益。2022 年中国番茄种植面积超过  $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 其中 2/3 以上采用育苗移栽的生产方式<sup>[1]</sup>。目前,中国番茄种苗年需求量超过  $6 \times 10^{10}$  株<sup>[2]</sup>, 可控环境下的番茄设施育苗已经成为满足种苗市场需求、改善育苗环境、提高自动化水平的重要手段。光是植物生长发育的能量来源与信号来源,光环境的优劣直接影响到番茄育苗质量和后期产量的高低<sup>[3]</sup>。喜光型作物在大田育苗时常遇到冬春季的低温寡日照或夏秋季的高温强日照环境,导致幼苗生长缓慢、营养生长过旺或幼苗质量劣化等问题<sup>[4-5]</sup>。在可控环境下,改善番茄育苗的光环境对提高种苗质量、缩短育苗周期、降低育苗能耗具有重要意义。

发光二极管 (Light emitting diode, LED) 作为新型、高效、节能、环保的光源,具有发光效率高、光质单一、散热量低等突出优势<sup>[6]</sup>, 已成为设施番茄育苗过程中进行人工补光或立体栽培的主要人工补光光源。有研究结果表明,不同蔬菜作物在不同生育期适当进行 LED 补光后,其质量均有所提升<sup>[7]</sup>。设施番茄育苗期间,尽管 LED 在补充光照、调节光照周期、诱导光形态建成等方面发挥了重要作用<sup>[8]</sup>,但是,现在对不同 LED 光环境参数的研究结果还存在差异。设施番茄育苗过程中的电能消耗量占到育苗成本的 80% 左右,如何降低设施番茄育苗的能耗,提高设施番茄育苗过程中的光能利用效率是当前研究的热点。

目前,在可控环境条件下,育苗光环境调控的研究主要集中在 LED 光照度、光照时间和光质上<sup>[8-10]</sup>,对于夜间 LED 补光的研究也仅限于延长光照时间<sup>[11]</sup>、夜间光照打断<sup>[12-13]</sup>、补光光质配比<sup>[14-15]</sup>

等方面。例如,马肖静等<sup>[16]</sup>研究发现,适当提高夜间 LED 补光光照度有利于番茄幼苗植株的生物质积累,提高根系活力和壮苗指数。Cao 等<sup>[17]</sup>研究发现,利用  $20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的红光对番茄进行夜间打断会显著抑制株高的增加,且打断频率越高,抑制效果越显著。Wang 等<sup>[14]</sup>研究发现,蓝光可以显著增加黄瓜幼苗的叶面积,促进茎秆伸长。但是,关于夜间 LED 补光光照度和补光时间交互作用、夜间补充光能总量、LED 夜间补光能耗等方面的研究较少。本研究拟针对目前番茄种苗需求量大、育苗质量差以及 LED 补光能耗量较高等问题,在可控环境下探究夜间 LED 补光光照度和补光时间对穴盘番茄幼苗质量的影响,提出适宜的夜间 LED 补光参数,以期在可控环境下培育优质番茄种苗和提高能源利用效率提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 品种为中杂 9 号 [购自中蔬种业科技 (北京) 有限公司]。试验于 2023 年 3-6 月在江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室的人工气候室内开展。番茄的育苗穴盘采用 72 孔标准穴盘,基质采用珍珠岩、蛭石和草炭的混合基质 (1:1:3, 体积比)。种子催芽后播于用混合基质填充的穴盘中,种子发芽期间的温度为  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $75\% \pm 10\%$ ,  $\text{CO}_2$  浓度不进行控制。黑暗环境下培养 3 d,待种子发芽后进行光照处理。育苗期间的明期温度为  $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $60\% \pm 10\%$ ,  $\text{CO}_2$  浓度为  $(600 \pm 50) \mu\text{mol}/\text{mol}$ ; 暗期温度为  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为

70%±10%, CO<sub>2</sub> 浓度不进行控制。

## 1.2 试验设计

番茄幼苗采用红蓝光配比为 1.2 : 1.0、发光效率为 2.8 μmol/(s · W) 的 LED 植物生长灯(W-LED5/1-T5-16W, 北京盛阳谷科技有限公司产品)进行处理, 用智能定时器进行光照时间循环控制。明期时, 光照度统一控制为 200 μmol/(m<sup>2</sup> · s), 光照时间统一控制为 12 h/d。暗期时, 补光处理利用 LED 植物生长灯设置 3 个补光光照度 [100 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、200 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、300 μmol/(m<sup>2</sup> · s)] 和 2 个补光时间 (1 h 和 2 h, 即在 0:00–1:00 和 0:00–2:00 时间段内补光) 进行组合, 对照组为夜间未进行补光的处理, 共计 7 个试验处理, 分别为 P100-H1 [补光光照度 100 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 1 h]、P100-H2 [补光光照度 100 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 2 h]、P200-H1 [补光光照度 200 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 1 h]、P200-H2 [补光光照度 200 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 2 h]、P300-H1 [补光光照度 300 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 1 h]、P300-H2 [补光光照度 300 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、补光时间 2 h]、CK (对照)。种子出芽后采用 1/3 标准浓度的山崎 (番茄) 营养液进行底面灌溉, 待子叶展平后使用 2/3 标准浓度的山崎 (番茄) 营养液进行灌溉, 当第一片真叶展开后使用标准浓度的山崎 (番茄) 营养液进行灌溉。

## 1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长形态 待番茄幼苗长至四叶一心时, 随机选取 8 株长势一致的番茄幼苗测量其生长形态。其中, 株高为幼苗茎秆基部至顶部生长点的长度, 利用直尺测量 (cm); 茎粗为幼苗子叶下方 1 cm 处茎秆的直径, 利用游标卡尺测量 (mm); 叶片数为幼苗已成型的真叶数量 (未完全展开的叶片记为 0.5 片); 叶面积使用智能叶面积测量系统 (YMJ-CH, 浙江托普云农科技股份有限公司产品) 扫描样本所有真叶, 记录每株幼苗的总叶面积 (cm<sup>2</sup>), 具体参照 Song 等<sup>[3]</sup> 的测量与计算方法。

1.3.2 叶绿素含量与光合特性 随机选取各试验处理不同株番茄相同部位的 6 片完全展开叶, 采用 80% 丙酮提取法<sup>[18]</sup> 测定番茄叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量等。随机选取各试验处理 6 株番茄幼苗, 利用手持式叶绿素仪 (SPAD-502, 柯尼卡美能达公司产品) 测量同株番茄幼苗不同部位的 3 片完全展开叶片的 SPAD 值, 取均值作为该株幼苗的

SPAD 值。随机选取各试验处理不同番茄植株的 8 片完全展开叶, 测定叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率。测量仪器为便携式光合测量系统 (LI-6400XT, LI-COR 公司产品), 利用标准红蓝光源叶室 (6400-02B) 进行测量。光合特性测量选择明期光照后 4 h, 每片叶片测量时间不少于 3 min, 待数据稳定后开始记录。叶室的测量参数设定为: 光照度 250 μmol/(m<sup>2</sup> · s)、CO<sub>2</sub> 浓度 800 μmol/mol、叶室温度 24 °C、气流速度 500 μmol/s<sup>[4]</sup>。

1.3.3 叶绿素荧光特性 测量开始前, 将 6 片待测的不同株番茄幼苗叶片用便携式光合荧光仪夹 (Yaxin-1102G, 北京雅欣理仪科技有限公司产品) 暗适应处理 30 min 以上, 测量叶片的快速叶绿素荧光诱导动力学 (OJIP) 曲线, 并利用 JIP-test 方法计算 PSII 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、捕获的激子将电子传递到电子传递链中超过醌 A 的其他电子受体的概率 ( $\psi_o$ )、用于电子传递的量子产额 ( $\phi E_o$ )、以吸收光能为基础的性能指数 ( $PI_{ABS}$ ) 等叶绿素荧光参数。

1.3.4 生物质积累量 随机选取各试验处理 8 株长势一致的番茄幼苗, 测量其生物质积累量。地上部鲜质量和地下部鲜质量的测量: 用万分之一电子天平 (ME204E, 梅特勒-托利多国际有限公司产品) 分别测量幼苗地上部和地下部鲜质量 (g)。总鲜质量即番茄幼苗地上部鲜质量与地下部鲜质量之和 (g)。地上部干质量和地下部干质量的测量: 将上述样本用报纸完全包裹后放入烘箱, 105 °C 杀青 3 h 后, 60 °C 烘干至恒质量, 用万分之一电子天平测量烘干后幼苗地上部和地下部干质量 (mg)。总干质量即番茄幼苗地上部干质量与地下部干质量之和 (mg)。

1.3.5 壮苗指数 番茄幼苗质量采用壮苗指数来衡量, 按公式 (1) 计算:

$$\text{壮苗指数} = \text{茎粗} / \text{株高} \times \text{全株干质量} \quad (1)$$

1.3.6 能源利用效率 番茄育苗的能源利用效率包括光能利用效率 (LUE)、电能利用效率 (EUE), 分别按照公式 (2) 和公式 (3)<sup>[3]</sup> 计算:

$$LUE = k \times W_D / PAR \quad (2)$$

$$EUE = k \times W_D / E_t \quad (3)$$

式中,  $k$  为幼苗单位干质量所含化学能, 取值 20 MJ/kg;  $W_D$  为单位面积幼苗的干质量增加量, kg/m<sup>2</sup>;  $PAR$  为光合有效辐射量, W/m<sup>2</sup>;  $E_t$  为光源消耗的总电量, kW · h。



## 1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019、DPS9.01 以及 Graphpad Prism 6.01 进行试验数据分析及图表绘制,方差分析采用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄幼苗生长形态的影响

双因素方差分析结果(表 1)表明,补光光照度和补光时间均对番茄幼苗的生长形态有显著影响,补光光照度和补光时间的交互作用对番茄幼苗的茎粗、叶面积有显著影响。表 2 显示,与对照相比,夜间进行适当的 LED 补光处理可以提高番茄幼苗的株高、茎粗、叶片数和叶面积。补光时间相同时,随着补光光照度的增加,番茄幼苗的株高呈显著增加趋势,补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的番茄幼苗株高比对照番茄幼苗高 55.8%。补光时间为 2 h 的番茄幼苗茎粗和叶面积随着补光光照度的增加呈先增加后下降趋势。其中,补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 的番茄幼苗茎粗和叶面积达到最大,分别比对照组番茄幼苗高 47.2% 和 263.6%。补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  条件下,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗茎粗、叶片数和叶面积显著高于补光时间为 1 h 处理。

表 1 补光光照度和补光时间对番茄幼苗生长形态影响的双因素方差分析

Table 1 Two-factor variance of effects of supplementary light intensity and supplementary light time on growth morphology of tomato seedlings

项目	株高	茎粗	叶片数	叶面积
补光光照度	*	*	*	*
补光时间	*	*	*	*
补光光照度×补光时间	NS	*	NS	*

\* 表示影响显著( $P<0.05$ );NS 表示影响不显著。

### 2.2 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片光合能力的影响

2.2.1 叶绿素含量 双因素方差分析结果(表 3)表明,补光光照度和补光时间的交互作用对番茄叶片的总叶绿素含量和叶绿素 a/b 具有显著影响。表 4 显示,经过夜间 LED 补光处理的番茄叶片叶绿素 a 含量、类胡萝卜素含量和总叶绿素含量显著高于对照。相同补光

时间不同补光光照度处理之间的番茄叶片叶绿素 b 含量和总叶绿素含量没有显著性差异,即补光光照度对番茄幼苗叶片的叶绿素 b 含量和总叶绿素含量没有产生显著影响。相同补光光照度[ $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]下,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗叶片叶绿素 a 含量、总叶绿素含量显著高于补光时间为 1 h 处理,但是叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量和叶绿素 a/b 没有显著性差异。值得提出的是,番茄幼苗叶片总叶绿素含量和叶绿素 a/b 是影响叶片光合能力的重要指标。因此,P100-H2、P200-H2 处理的番茄叶片光合能力相对较高。

表 2 补光光照度和补光时间对番茄幼苗生长形态的影响

Table 2 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on growth morphology of tomato seedlings

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶片数 (片)	叶面积 ( $\text{cm}^2$ )
CK	6.9±0.8cd	3.09±0.23d	3.5±0.3d	51.4±11.2d
P100-H1	6.1±0.4d	3.40±0.53c	3.6±0.4cd	62.3±10.7cd
P100-H2	7.3±0.5c	3.33±0.17cd	3.7±0.4c	72.0±8.9c
P200-H1	9.3±0.8b	3.69±0.30b	4.1±0.2bc	119.1±24.6b
P200-H2	9.6±0.8b	4.55±0.62a	4.6±0.4a	186.9±73.4a
P300-H1	10.6±1.2a	3.65±0.47bc	4.2±0.6b	104.0±40.8b
P300-H2	10.9±0.8a	3.74±0.31b	4.9±0.2a	107.4±22.6b

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK:夜间未进行补光,对照;P100-H1:补光光照度为  $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–1:00;P100-H2:补光光照度为  $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–2:00;P200-H1:补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–1:00;P200-H2:补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–2:00;P300-H1:补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–1:00;P300-H2:补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,补光时间为 0:00–2:00。

表 3 LED 夜间补光条件下番茄幼苗叶片叶绿素含量的双因素方差分析

Table 3 Two-factor variance analysis of chlorophyll content in tomato seedling leaves under LED supplemental lighting at night

项目	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	类胡萝卜素 含量	总叶绿素 含量	叶绿素 a/b
补光光照度	NS	NS	NS	NS	NS
补光时间	*	NS	NS	*	NS
补光光照度×补光时间	*	NS	NS	*	*

\* 表示影响显著( $P<0.05$ );NS 表示影响不显著。

叶片 SPAD 值是直观反映植物叶片相对叶绿素含量的无损检测指标。图 1 显示,与对照相比,夜间 LED 补光处理可以显著提高番茄幼苗叶片的相对叶绿素含量。相同补光时间下,补光光照度为 200

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理和补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理之间的番茄幼苗 SPAD 值没有显著性差异。相同补光光照度下,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗 SPAD 值比补光时间为 1 h 处理的番茄幼苗平

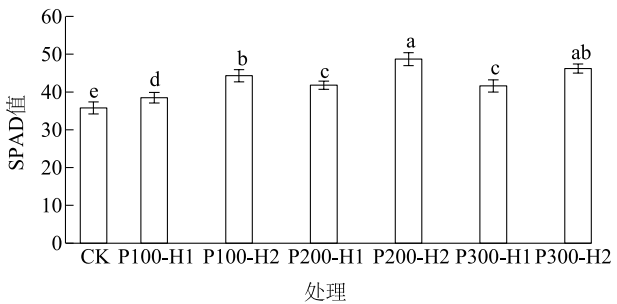
均高 14.2%以上。P200-H2 处理与 P300-H2 处理之间的番茄幼苗 SPAD 值没有显著性差异,分别比对照高 32.3%和 25.5%。

表 4 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on chlorophyll content of tomato leaves

处理	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g)	叶绿素 a/b
CK	1.53±0.09d	0.63±0.04a	0.28±0.02c	2.44±0.16c	2.43±0.13b
P100-H1	1.66±0.11c	0.66±0.13a	0.32±0.04ab	2.64±0.22b	2.52±0.16b
P100-H2	1.88±0.17ab	0.68±0.09a	0.34±0.06a	2.90±0.31a	2.76±0.23ab
P200-H1	1.74±0.20bc	0.63±0.08a	0.34±0.06a	2.71±0.19b	2.76±0.17ab
P200-H2	1.98±0.13a	0.67±0.14a	0.38±0.07a	3.03±0.24a	2.96±0.21a
P300-H1	1.87±0.08ab	0.68±0.15a	0.30±0.05b	2.85±0.22ab	2.75±0.19ab
P300-H2	1.84±0.12ab	0.72±0.11a	0.33±0.03ab	2.89±0.16ab	2.56±0.11b

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。

图 1 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片 SPAD 值的影响  
Fig.1 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on SPAD value of tomato leaves

2.2.2 光合特性 双因素方差分析结果(表 5)表明,补光光照度和补光时间均对番茄叶片净光合速率产生了显著影响,但两者的交互作用对番茄叶片净光合速率没有显著影响。补光时间、补光光照度×补光时间对叶片的气孔导度也有显著影响。表 6 显示,与对照相比,夜间 LED 补光处理能显著提高番茄幼苗叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。补光时间为 1 h 时,番茄叶片的气孔导度随着补光光照度的增加呈先增加后降低的趋势,不同补光光照度处理之间的叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度和蒸腾速率没有显著性差异;补光时间为 2 h 时,番茄叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度随着补光光照度的增加呈先降低后增加的趋势,不同补光光照度处理之间的叶片蒸腾速率没有显著性差异。相同补光光照度下,补光时间为 2 h

处理的番茄幼苗叶片净光合速率和气孔导度显著高于补光时间为 1 h 处理。其中,P200-H2 处理的番茄幼苗叶片净光合速率最高,较对照高出 59.6%,胞间  $\text{CO}_2$  浓度最低。

表 5 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片光合特性影响的双因素方差分析

Table 5 Two-factor variance of the effects of supplementary light intensity and supplementary light time on photosynthetic characteristics of tomato seedling leaves

项目	净光合速率	气孔导度	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度	蒸腾速率
补光光照度	*	NS	NS	NS
补光时间	*	*	NS	*
补光光照度×补光时间	NS	*	NS	NS

\* 表示影响显著( $P<0.05$ );NS 表示影响不显著。

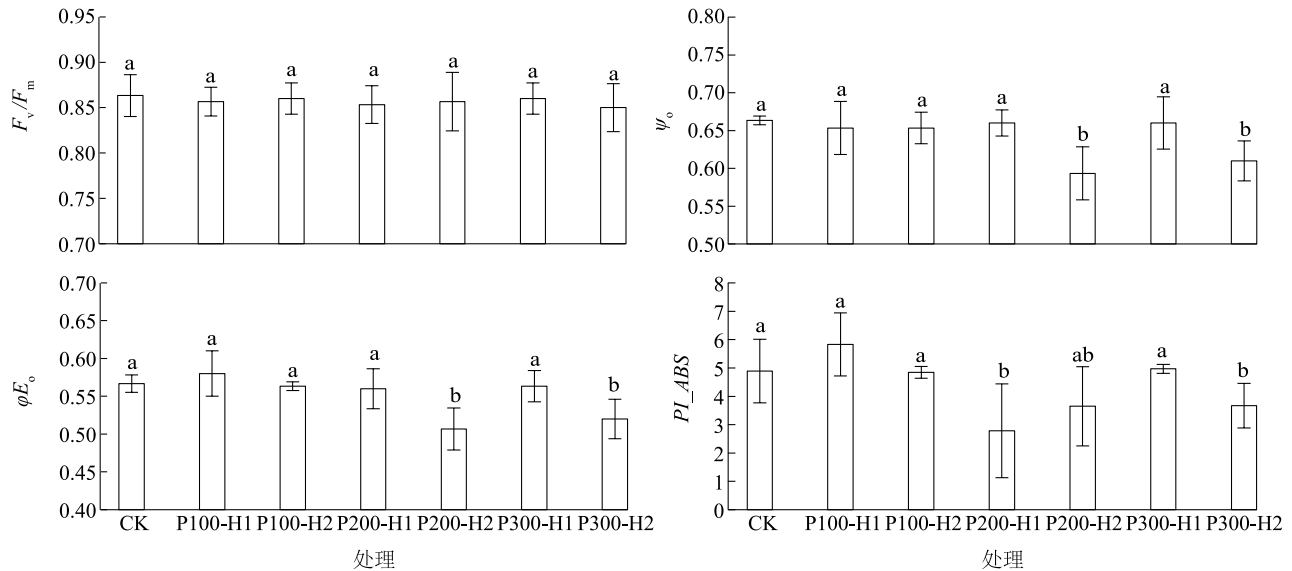
表 6 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片光合特性的影响  
Table 6 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on photosynthetic characteristics of tomato seedling leaves

处理	净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
CK	15.6±0.4e	0.295±0.036d	722±20a	2.12±0.19c
P100-H1	18.2±1.2d	0.321±0.042c	702±16ab	2.39±0.07b
P100-H2	20.6±0.8bc	0.404±0.043b	676±19b	2.52±0.26ab
P200-H1	19.5±0.7c	0.382±0.054b	688±22b	2.38±0.16b
P200-H2	24.9±1.3a	0.449±0.028a	657±14c	2.69±0.14a
P300-H1	18.8±0.4cd	0.336±0.039c	701±36ab	2.36±0.22b
P300-H2	22.7±0.9b	0.424±0.022ab	672±18b	2.67±0.18a

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。

**2.2.3 叶绿素荧光特性** 由番茄幼苗叶片的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线和 JIP-test 分析发现,与对照相比,夜间 LED 补光处理并未引起番茄叶片  $F_v/F_m$  的显著下降,但对番茄叶片的  $\psi_o$ 、 $\phi E_o$  和  $PI_{ABS}$  存在显著影响(图 2)。在补光时间为 1 h 的条件下,不同补光光照度处理之间的  $F_v/F_m$ 、 $\psi_o$ 、 $\phi E_o$  并未出现显著差异。在相同补光光照度 [200

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 条件下,补光时间为 2 h 处理的  $\psi_o$  和  $\phi E_o$  显著低于补光时间为 1 h 的处理。P300-H1 处理的番茄幼苗叶片  $PI_{ABS}$  显著高于 P300-H2 处理。说明夜间 LED 补光在一定程度上造成了番茄幼苗的光环境胁迫,但未引起 PS II 最大光化学效率显著下降。



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。 $F_v/F_m$ : PS II 最大光化学效率;  $\psi_o$ : 捕获的激子将电子传递到电子传递链中超过醌 A 的其他电子受体的概率;  $\phi E_o$ : 用于电子传递的量子产额;  $PI_{ABS}$ : 以吸收光能为基础的性能指数。

图 2 补光光照度和补光时间对番茄幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响

Fig.2 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on chlorophyll fluorescence characteristics of tomato seedling leaves

## 2.3 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄幼苗生物物质积累量和种苗质量的影响

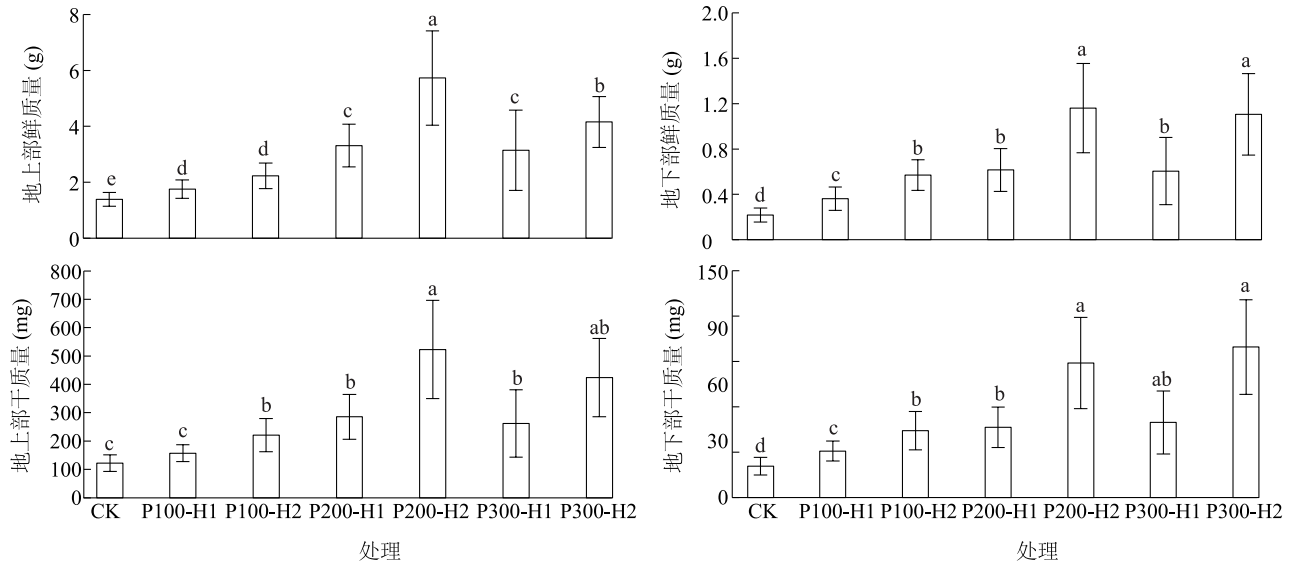
**2.3.1 生物物质积累量** 图 3 显示,与对照相比,夜间 LED 补光处理的番茄幼苗植株地上部鲜质量、地下部鲜质量、地下部干质量显著提高。P200-H2 处理和 P300-H2 处理的番茄幼苗地上部鲜质量和地下部鲜质量均显著高于其他处理。相同补光时间下,随着补光光照度的增加,番茄幼苗的地下部干质量增加。补光时间为 1 h 条件下,补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理与补光光照度为 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理之间的番茄幼苗地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量没有显著性差异。补光光照度为 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗地下部鲜质量、地上部干质量和地下部干质量均显著高

于补光时间为 1 h 处理。补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量和地下部干质量均显著高于补光时间为 1 h 处理。补光光照度为 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗地上部鲜质量和地下部鲜质量显著高于补光时间为 1 h 的处理,但地上部干质量和地下部干质量没有显著差异。相比较而言,补光时间为 2 h 时,补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理与补光光照度为 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理之间的番茄幼苗地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量没有显著差异,而补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理的番茄幼苗地上部鲜质量显著高于补光光照度为 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的处理。

**2.3.2 种苗质量** 由番茄幼苗的光合特性和生物

质积累量分析结果可知,夜间 LED 补光有助于提高番茄幼苗叶片的光合能力。图 4 显示,补光时间为 1 h 各补光光照度处理间的壮苗指数没有显著性差异;补光时间为 2 h 各补光光照度处理间的壮苗指数随着补光光照度的增加呈先增加后下降的趋势,

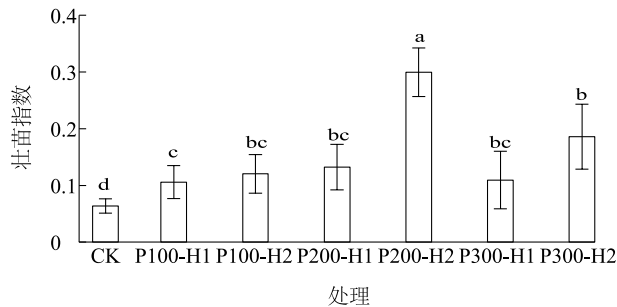
其中补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的番茄幼苗壮苗指数最高。相同补光光照度下,只有补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时延长补光时间能显著提高番茄幼苗的壮苗指数。



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。

图 3 补光光照度和补光时间对番茄幼苗生物质积累的影响

Fig.3 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on biomass accumulation of tomato seedlings



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表 2 注。

图 4 补光光照度和补光时间对番茄幼苗壮苗指数的影响

Fig.4 Effects of supplementary light intensity and supplementary light time on healthy index of tomato seedlings

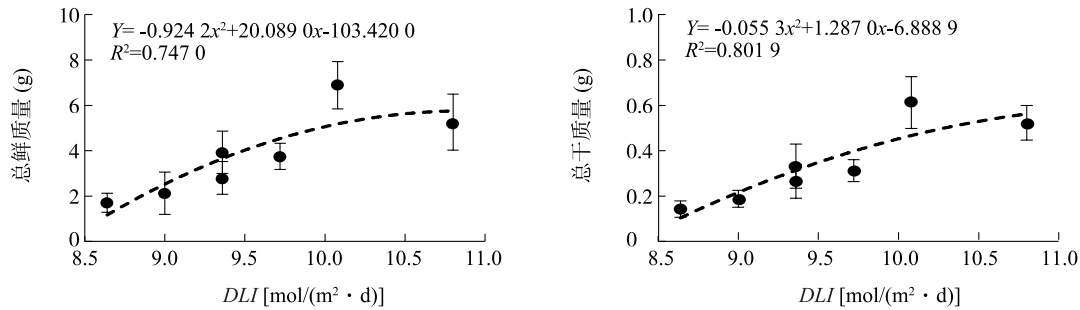
## 2.4 夜间 LED 补充光能总量对番茄幼苗生物质积累量的影响

夜间 LED 补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗壮苗指数最高,但尚无法确定该补光条件是否为番茄幼苗培养的最佳条件。夜间 LED 补光增加了番茄幼苗叶片接受到的光能总量,延

长了叶片进行光合作用的时间。通过分析 LED 补充光能总量与番茄幼苗总干质量、总鲜质量的关系(图 5)可知,番茄幼苗的总鲜质量和总干质量总体随着叶片接受光能总量的增加而增加。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 处理的 LED 全天补充光能总量 ( $DLI$ ) 分别为  $8.64 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.00 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.36 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.36 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $10.08 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.72 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $10.80 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,LED 夜间补充光能总量分别为  $0 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.36 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.72 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.72 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.44 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.08 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.16 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

## 2.5 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄育苗能源利用效率的影响

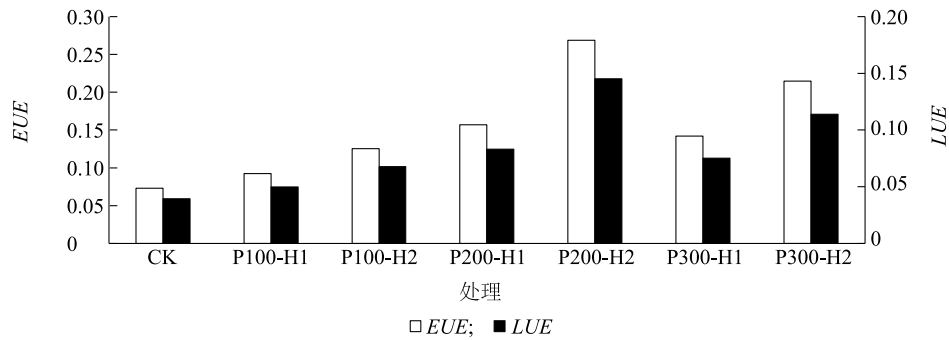
图 6 显示,与对照相比,夜间 LED 补光处理提高了番茄育苗的电能利用效率和光能利用效率。补光光照度  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间 2 h 处理的  $EUE$  和  $LUE$  最高,分别达到 0.267 和 0.145,其次为补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 处理。



DLI:发光二极管(LED)全天补充光能总量。

图5 全天补充光能总量与番茄幼苗总干质量、总鲜质量的关系

Fig.5 The relationships between the total amount of light energy supplemented throughout the day and the total dry weight and total fresh weight of tomato seedlings



LUE:光能利用效率;EUE:电能利用效率。CK、P100-H1、P100-H2、P200-H1、P200-H2、P300-H1、P300-H2 见表2注。

图6 不同处理下的能源利用效率

Fig.6 Energy utilization efficiency of tomato seedlings under different treatments

### 3 讨论

设施育苗是番茄高效生产的关键环节。中国番茄育苗常集中在冬春季节或夏秋季节,由于冬春季节常遇到低温寡日照或梅雨、夏秋季节常遇到高温强光照或台风,番茄幼苗不可避免地出现生长缓慢或者徒长现象,种苗质量较差<sup>[4]</sup>。LED 人工补光是设施生产中促进作物生长发育的重要手段。有研究发现,LED 补光可以提高甜瓜幼苗叶片的光合速率,增加光合有效面积,提高幼苗壮苗指数和质量<sup>[19]</sup>。LED 光环境调控可以引起作物幼苗的生长形态变化,过高或过低的补光光照度以及过长或过短的补光时间都不利于培育优质壮苗<sup>[16]</sup>。本研究结果表明,补光时间相同条件下,番茄幼苗的株高随着补光光照度的增加而逐渐增加,茎粗和叶面积呈先增加后下降的趋势,该结果与丁娟娟等<sup>[20]</sup>的研究结果类似,这说明夜间 LED 补光光照度过高容易造成光合产物在叶片内堆积,限制了叶片的光合能力<sup>[21]</sup>。在补光光照度为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时延

长补光时间提高了番茄的叶面积,反过来又增加了叶片捕获的光能总量,这与崔瑾等<sup>[22]</sup>的研究结果相近。因此,在一定补光光照度下,适当延长补光时间有利于培育番茄壮苗<sup>[23-24]</sup>。

叶片中叶绿素与类胡萝卜素作为绿色植物体内的重要色素,有利于提高叶片的光合能力,进而促进生物质的积累<sup>[25]</sup>。本研究结果表明,相同补光时间下,不同补光光照度处理之间的总叶绿素含量并没有出现显著性差异。这与一些研究结果<sup>[26-27]</sup>不一致,但与马肖静等<sup>[16]</sup>的研究结果一致,出现这种差异的原因可能是夜间补光的时间不同。与对照相比,夜间 LED 补光处理可以提高番茄叶片的叶绿素 a 含量和总叶绿素含量,这是因为 LED 中拥有较多的蓝光,促进了叶片叶绿素 a 的合成<sup>[28]</sup>,研究结果与 Hogewoning 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。本研究还发现,适当提高 LED 补光光照度或延长补光时间均可以提高叶片 SPAD 值,但是补光时间较补光光照度对 SPAD 值的影响更大,这也与本研究相同补光时间下补光光照度对叶片总叶绿素含量没



有显著影响,相同补光光照度下补光时间对叶片总叶绿素含量存在显著影响的结论一致。光合作用是植物生长发育的基础。有研究发现,夜间进行 LED 补光会延长光合启动时间,但可以提高叶片的净光合速率<sup>[30-31]</sup>。在本研究中,夜间适当提高补光光照度和补光时间都可以增加番茄叶片的净光合速率,其中以 P200-H2 处理的番茄叶片净光合速率最高,这与多数研究人员的结果<sup>[16,32]</sup>相近,但本研究结果与黄丹丹等<sup>[33]</sup>的研究结果不一致,其原因主要是黄丹丹等人采用了单色 LED 进行夜间补光,降低了叶片气孔开度,导致单色光下叶片净光合速率低于组合光。对番茄叶片的叶绿素荧光特性进行分析可知,夜间补光并未引起叶片  $F_v/F_m$  的显著下降,但在补光时间为 2 h 的各试验处理的番茄幼苗中,提高补光光照度可以显著降低番茄叶片的  $\psi_o$ 、 $\varphi E_o$ ,这与刘志强等<sup>[34]</sup>、文莲莲等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。这充分说明,夜间补光在一定程度上引起了番茄叶片的光胁迫。另外,苗龄较大和光合产物过度积累引起番茄幼苗叶片老化,也可能是导致叶片受到光胁迫的重要原因。

番茄幼苗的生物物质积累量是叶片进行光合作用、积累光合产物的结果。本研究发现,在补光时间为 2 h 时,补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理与补光光照度为  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  处理之间的番茄幼苗总干质量没有显著性差异,这可能是因为补光光照度的提高有利于叶片净光合速率的提升,补光时间的延长增加了光合作用的时间<sup>[35]</sup>,进而影响到作物体内的碳代谢过程和营养物质的吸收转化<sup>[23,36]</sup>,但是夜间补光光照度过高会导致光呼吸增加,限制了光合产物的持续积累<sup>[37-38]</sup>。壮苗指数是评价番茄种苗质量和生长状态的重要指标之一。本研究发现,补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,番茄幼苗较长时间补光有利于提高其壮苗指数,这与前人研究结果<sup>[39]</sup>相似。其原因主要是夜间 LED 补光提高了番茄植株的生物物质积累量,同时 LED 中的红蓝光抑制了茎秆徒长<sup>[13,23,26]</sup>。

夜间补充光能总量结合夜间 LED 补光光照度和补光时间,表征番茄幼苗夜间进行光合作用的强度与时间。Song 等<sup>[3]</sup>和 Zhang 等<sup>[40]</sup>研究发现的作物植株干质量、鲜质量与夜间 LED 补充光能总量之间的相关关系与本研究结果一致。本研究发现,适当提高光能总量有助于番茄幼苗的干物质积累。补充光能总量过高不利于番茄幼苗叶片夜间的光合产物转运和光合能力恢复,也会增加育苗系统的能源消耗量<sup>[3]</sup>。由番茄

育苗的 *EUE* 和 *LUE* 分析结果可知,补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 处理的番茄幼苗的能源利用效率最高。

## 4 结 论

本研究结果表明,在可控环境条件下,夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄幼苗的质量具有重要影响。综合分析番茄幼苗的生长形态、光合能力、生物物质积累量和能源利用效率,即可得到可控环境下番茄育苗的夜间 LED 适宜补光参数。本研究认为夜间 LED 补光光照度为  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、补光时间为 2 h 有助于培育优质番茄壮苗,同时降低育苗系统的能耗量。夜间 LED 补光会引起叶片中光合产物积累,影响叶片光合能力恢复,今后应进一步对夜间补光时段与补光的光色配方开展深入研究。

## 参考文献:

- [1] 孙永珍,贺靖,魏芳,等. “十三五”我国番茄产业发展及其国际竞争力评价[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(1): 112-116.
- [2] 刘明池,季延海,武占会,等. 我国蔬菜育苗产业现状与发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2018(11): 1-7.
- [3] SONG J X, FAN Y L, LI X Q, et al. Effects of daily light integral on tomato (*Solanum lycopersicon* L.) grafting and quality in a controlled environment[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 44-50.
- [4] 季方,甘佩典,刘男,等. LED 光质和日累积光照量对番茄种苗生长及能量利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 231-238.
- [5] LI Q, KUBOTA C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59-64.
- [6] MORROW R C. LED lighting in horticulture[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [7] 段青青,张禄祺,张自坤. 不同生育期补光对温室甜椒生长、产量及品质的影响[J]. 植物生理学报, 2021, 57(4): 950-962.
- [8] 崔瑾,徐志刚,邸秀茹. LED 在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253.
- [9] WANG S Y, FANG H, XIE J M, et al. Physiological responses of cucumber seedlings to different supplemental light duration of red and blue LED[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 709313.
- [10] YAN Z N, WANG C L, WANG L, et al. The combinations of white, blue, and UV-A light provided by supplementary light-emitting diodes promoted the quality of greenhouse-grown cucumber seedlings[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1-14.
- [11] ZHANG Y H, LI J D, WU Z X, et al. Effects of different prolonged light durations on survival, growth and physiology of the Eelgrass *Zostera marina*[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 893377.

- [12] WHIPKER B E, COCKSON P, SMITH J T. Night interruption lighting equally effective as daylength extension in retaining the vegetative state of *Cannabis* mother plants[J]. *Crop, Forage and Turfgrass Management*, 2020, 6(1). DOI:10.1002/cft.2.20001.
- [13] 余新, 杨振超, 曹凯, 等. 红光暗期多点打断对黄瓜和番茄幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 121-126.
- [14] WANG X Y, XU X M, CUI J. The importance of blue light for leaf area expansion, development of photosynthetic apparatus, and chloroplast ultrastructure of *Cucumis sativus* grown under weak light[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(2): 213-222.
- [15] 胡莉, 李建设, 高艳明, 等. 夜间补照绿光对设施番茄光合特性及品质产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(3): 429-436.
- [16] 马肖静, 刘勇鹏, 黄松, 等. 不同LED光照强度夜间补光对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(12): 2411-2420.
- [17] CAO K, CUI L R, YE L, et al. Effects of red light night break treatment on growth and flowering of tomato plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7. DOI:10.3389/fpls.2016.00527.
- [18] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 110-114.
- [19] 崔晓辉, 郭小鸥, 孙天宇, 等. LED补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(4): 657-667.
- [20] 丁娟娟, 杨振超, 王鹏勃. LED光强对不结球小白菜生长与光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 40(3): 113-118.
- [21] 张欢, 徐志刚, 崔瑾. 光质对番茄和莴苣幼苗生长及叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 959-965.
- [22] 崔瑾, 马志虎, 徐志刚, 等. 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(5): 663-670.
- [23] 文莲莲, 李岩, 张聘丘, 等. 冬季温室补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(9): 1490-1498.
- [24] 郑亮, 邢文鑫, 董海泉, 等. LED苗期暗期补光对茄果类蔬菜发育和生理的影响[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 111-115.
- [25] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [26] 肖苏琪, 王冰华, 曲梅, 等. 冬春季育苗温室补光光强对黄瓜幼苗质量的影响[J]. 中国蔬菜, 2018(10): 40-45.
- [27] 刘振威, 高佳, 孙丽, 等. 南瓜叶片叶绿素含量与净光合速率的关系[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2008, 36(4): 27-29.
- [28] LI H M, TANG C M, XU Z G, et al. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 4(4): 262-273.
- [29] HOGEWONING S W, WIENIJES E, DOUWSTRA P, et al. Photosynthetic quantum yield dynamics: from photosystems to leaves[J]. *Plant Cell*, 2012, 24(5): 1921-1935.
- [30] 程瑞峰, 邹志荣, 王军. 外源补光状态下温室黄瓜光合作用的研究[J]. 陕西农业科学, 2004(3): 17-18.
- [31] SONG J X, HE D X, WANG J F, et al. How to diagnose potassium abundance and deficiency in tomato leaves at the early cultivation stage[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(11): 1225.
- [32] WAHIDIN S, IDRIS A, SHALEH S R M. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp.[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 7-11.
- [33] 黄丹丹, 张士秀, 贾淑霞, 等. LED补光对番茄光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(22): 102-108.
- [34] 刘志强, 朱新红, 刘勇鹏, 等. 夜间不同LED补光时段对番茄幼苗生长生理指标的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(8): 79-85.
- [35] 刘娅, 陈艳丽, 朱国鹏, 等. 夜间复合光质LED不同光照时间对水培切割再生生菜生长和品质的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(4): 646-650.
- [36] 宁宇, 邓惠惠, 李清明, 等. 红蓝光质对芹菜碳氮代谢及其关键酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(1): 112-118.
- [37] HERNÁNDEZ R, KUBOTA C. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratio under varied solar daily light integrals[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 173: 92-99.
- [38] 彭志慧, 申丽霞, 李艳丽, 等. 夜间补光时长和光强对空心菜生长的影响[J]. 北方园艺, 2023(9): 7-14.
- [39] LI H M, TANG C M, XU Z G. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 150: 117-124.
- [40] ZHANG X, HE D X, NIU G H, et al. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(2): 33-40.

(责任编辑:王妮)