

陈美香, 陈雄, 申宝营, 等. 激光和 LED 补光对番茄幼苗生长、光合作用及生理生化特性的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (3): 335–343.
CHEN M X, CHEN X, SHEN B Y, et al. Effects of Laser and LED on Growth, Photosynthesis, Physiological and Biochemical Characteristics of *Solanum lycopersicum* Seedlings [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (3): 335–343.

激光和 LED 补光对番茄幼苗生长、光合作用及生理生化特性的影响

陈美香^{1,2}, 陈雄^{1,3}, 申宝营^{1,4}, 邱雯婷¹, 王洪¹,
郭建¹, 林火养¹, 刘银春^{1,2*}

(1. 福建信息职业技术学院物联网与人工智能学院, 福建 福州 350001; 2. 福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002; 3. 福建江夏学院电子信息科学学院, 福建 福州 350108;
4. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002)

摘要:【目的】探索激光和 LED 补光对番茄幼苗生长、光合作用及生理生化特性的影响, 为提高番茄幼苗品质提供科学依据。【方法】先采用 CIRAS-3 光合测定系统测定苗龄 30d 的番茄 (*Solanum lycopersicum*) 幼苗在 3 种单色激光和 LED 光 (2 红 1 蓝) 辐照下叶片光合作用的光响应曲线, 再以色温 6000 K LED 白光补少量蓝光和光合能力较强的红光进行番茄补光育苗试验, 以 LED 白光育苗为对照。【结果】峰值波长 650 nm 红光辐照番茄幼苗光合能力最强 (光合光子通量密度 PPFD < 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时), 峰值波长 650 nm 和 450 nm 激光辐照番茄幼苗的光合能力均强于相同波长 LED 光辐照; 白光同时补 650 nm 和 450 nm 激光处理的幼苗所有生长指标、最大净光合速率和水分利用率均显著大于补 LED 光处理 ($P < 0.05$), 且这些指标均大于对照; 所有试验组的光补偿点相同, 白光同时补红蓝激光处理光饱和点最低; 白光补激光比补 LED 光更显著地提高叶绿素 a、类胡萝卜素、丙二醛 (MDA) 含量和过氧化物酶 (POD) 活性, 但补光对超氧化物歧化酶 (SOD) 活性无显著影响。【结论】白光补激光特别是同时补 650 nm 和 450 nm 激光处理比补 LED 光对促进番茄幼苗生长、提高光合能力和抗氧化能力效果更佳。

关键词: 番茄; 激光; LED 光; 补光; 光合作用; 生理生化特性

中图分类号: S 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 03-0335-09

Effects of Laser and LED on Growth, Photosynthesis, Physiological and Biochemical Characteristics of *Solanum lycopersicum* Seedlings

CHEN Meixiang^{1,2}, CHEN Xiong^{1,3}, SHEN Baoying^{1,4}, QIU Wenting¹, WANG Hong¹,
GUO Jian¹, LIN Huoyang¹, LIU Yinchun^{1,2*}

(1. College of Internet of Things and Artificial Intelligence, Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou, Fujian 350001, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. College of Electronics and Information Science, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 4. College of Horticulture, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: 【Objective】Effects of laser and light-emitting diode (LED) exposures on growth, photosynthesis, and physiological and biochemical characteristics of *Solanum lycopersicum* seedlings were investigated. 【Method】A CIRAS-3 system was used to determine the photosynthetic response of 30-d-old tomato seedlings exposed to 2 red and 1 blue monochromatic laser or LED. Then, using a color temperature of 6 000 K white LED as control the seedling growth under the LED white light supplemented with a small amount of blue light along with the photosynthesis-stimulating red light as treatments was compared. 【Result】The photosynthetic capacity of the seedlings exposed to 650nm red light was greater than

收稿日期: 2021-12-28 初稿; 2022-02-20 修改稿

作者简介: 陈美香 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农业光电子工程 (Email: 105456149@qq.com)

* 通信作者: 刘银春 (1954-), 男, 教授, 研究方向: 农业光电子工程 (Email: 907500696@qq.com)

基金项目: 福建省教育厅省级第三批应用技术创新中心建设项目 (闽教科 [2018]105 号); 福建省教育厅科技项目 A 类 (JAT190153)

the other wavelengths of red light when the photosynthetic quantum flux density PPFD was below $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The capacities produced by laser of 650 nm and 450 nm were greater than LED of same wavelengths. The growth indicators, maximum net photosynthetic rate, and water use efficiency of the seedlings exposed to either laser or LED was greater than control, but laser significantly higher than LED ($p < 0.05$). All treatments had a same light compensation point, but the seedlings grown under white LED supplemented with both 650 nm and 450 nm laser had the lowest light saturation point. In addition, laser was significantly more effective than LED in increasing the contents of chlorophyll a, carotenoid, and malondialdehyde (MDA) and the activity of peroxidase (POD), although it did not affect the superoxide dismutase (SOD) activity. 【Conclusion】 The white LED supplemented with laser, especially both 650nm and 450nm, significantly promoted the growth, photosynthetic capacity, and antioxidant activities of the tomato seedlings in comparison to LED supplementation.

Key words: Tomato; laser; LED; supplementary light; photosynthesis; physiology and biochemistry

0 引言

【研究意义】番茄育苗是番茄生产过程中的关键技术环节, 幼苗的品质决定后期果实的产量和质量。传统的设施番茄育苗全靠太阳光照, 光强极不稳定, 特别是我国南方常遇阴雨天气, 幼苗因缺乏光照长势不佳。工厂化育苗是现代农业发展的必然趋势, 它利用人工光源, 在人工控制的最佳环境条件下育苗, 是培育番茄壮苗的有效途径之一。找到最佳的光配方是番茄工厂化育苗的关键。【前人研究进展】光是影响植物生长的最重要的环境因子之一, 它影响植物光合作用、形态建成、生理生化和基因表达^[1-3]。研究表明, 光质和光强作为光合作用的能源影响叶绿体结构、光合色素合成和气孔运动^[4,5]; 同时, 光质还作为信号影响植物的生长和生理生化。例如, 红光可以激发叶绿素分子进行光合作用, 蓝光既可以激发这种作用又可以触发隐花色素和向光素, 进而影响植物的形态建成和其他生理活动^[6-8]。有研究发现, 红光有利于提高草莓叶片的净光合速率与蒸腾速率^[5]; 蓝光有利于增大草莓叶片的气孔导度与胞间 CO_2 浓度^[5]、增加竹叶兰过氧化氢酶与过氧化物酶含量, 增强竹叶兰抗氧化能力^[3]; 红蓝黄复合光有利于提高紫苏叶片的光合速率^[9], 红、蓝和白光的优化组合能促进金线莲的生长和提高黄酮含量^[10]。近年来, 发光二极管 (Light-emitting diode, LED) 因单色性好、光强易调等优点被广泛应用于植物生长、光合作用和生理生化研究^[11-13]。激光是单色性最好的光源, 和 LED 相比, 光谱能量更集中、光辐照距离更远、光能在空气中损失更小。因此, 激光特别适合在大田、温室或植物工厂等大面积种植环境中补光。已有研究表明, 激光促进草莓光合作用使草莓植株的重量指数增加^[14]; 低剂量 He-Ne 激光照射能有效地缓解 UV-B 辐射对小麦、水稻和花生幼苗叶绿体产生的胁迫损伤从而促进光合作用^[15-17];

Nd:YAP 红外激光可刺激亚心形扁藻的叶绿体发育, 改善其光合作用活性^[18]。【本研究切入点】现有对番茄育苗光环境调控的研究大部分使用荧光灯、LED 灯等, 用激光做补光光源鲜有报道。【拟解决的关键问题】本文以番茄幼苗为研究材料, 先探索各 3 种单色激光和 LED 光 (2 红 1 蓝) 辐照下叶片的光合作用特性, 选出幼苗光合能力较强的红光, 再将其和蓝光作为补光光源设计 3 个处理, 进行番茄补光育苗试验, 以未补光的 LED 白光育苗为对照, 探明不同补光方法对番茄幼苗生长、光合作用及生理生化特性的影响, 找到最佳的番茄育苗补光方案, 为提高番茄幼苗品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 测试材料

供试番茄 (*Solanum lycopersicum*) 选用白果强丰品种, 试验分两个阶段。第一阶段: 测定各 3 种激光和 LED 单色光辐照下番茄幼苗叶片的光合响应曲线。2018 年 6 月 1 日播种, 置暗室内 4 d 后幼苗出土, 移至 LED 光下培养。距育苗盘 (32 孔穴) 底部 13.4 cm 处的光合光子通量密度 (PPFD) 为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光照时间 $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, 室内温度 (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 (70 ± 10) %。30 d 后选 30 株一致性好的植株作为供试植株, 10 株为 1 个重复, 共 3 个重复, 每个重复选一株测定光合响应曲线。第二阶段: 色温 6000 K 的 LED 白光补激光和 LED 光育苗试验。选相同的番茄品种, 2020 年 7 月 1 日播种, 置暗室内 4 d 后幼苗出土, 以白光补少量蓝光和第一阶段选出的光合能力较强的红色激光和 LED 光作补光光源, 设计 3 个光处理 (表 1), 以未补光的 LED 白光育苗为对照。光照时间、温度和湿度条件同第一阶段, 距育苗盘 (32 孔穴) 底部 13.4 cm 处的 $\text{PPFD} = 88 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。栽培 30 d 后, 设置 3 个重复 (方法同第一阶段), 测定生长、光合作用和生理生化指标。

表 1 激光和 LED 补光栽培试验光源设计
Table 1 Design of supplementary laser and LED light for tomato cultivation experiment

处理 Treatment	光量子通量密度 PPFD/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)				
	激光 Laser		LED		白光 White light
	R	B	R	B	色温 Color temperature 6000 K
对照	—	—	—	—	88
T1	—	—	12	6	70
T2	12	6	—	—	70
T3	18	—	—	—	70

注：表中“—”表示未补同一列的单色光。
Note: "—" in the table indicates that monochromatic light at the same column was not added.

1.2 测定方法

选择第一阶段培养的植株自上而下第 3 片叶片，使用 CIRAS-3 光合测定系统（美国，PPSYSTEMS 公司），分别测定 3 种激光（波长 450 nm、633 nm、650 nm，半波宽 8~10 nm）和 3 种单色 LED 光（波长 450 nm、630 nm、650 nm，半波宽 18~22 nm）辐照下，光强 PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 分别为 0, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, …, 最大值时，其对应的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r) 和水分利用率 (WUE)。测试环境温度 (26 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ ， CO_2 浓度 (450 ± 30) $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。各光源下 P_n 值稳定后开始测量，测量时每 5 s 记录 1 次，共 5 次，取平均值。

第二阶段栽培结束，同样选择植株自上而下第 3 片叶片，采用光合测定系统自带的光源，调至红光:绿光:蓝光=1:1:1，总 PPFD 的梯度和第一阶段相似，从 0 至 P_n 的饱和光强，依次测定各光合作用参数值。

采用 WinRHIZO 根系分析系统（加拿大 Regent）测定叶面积。定义壮苗指数和根冠比如下：

壮苗指数 = $\frac{\text{茎直径} \times \text{全株干重}}{\text{株高}}$

(1)

根冠比 = $\frac{\text{地下部干重}}{\text{地上部干重}}$

(2)

叶绿素和类胡萝卜素含量测定采用 Arnon^[19] 的方法。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量测定分别采用 WST-1 法、比色法和 TBA 法（试剂盒购于南京建成生物工程研究所）。定义在 37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下，SOD 抑制

率达 50% 时所对应的酶量为一个 SOD 活力单位 (U)，每克叶片样本每分钟催化 1 微克底物的酶量为一个 POD 活力单位 (U)。叶绿素、类胡萝卜素含量和 POD 活性使用 UV-2600 型紫外可见分光光度计（日本，岛津公司）测定，SOD 活性和 MDA 含量使用 DNM-9602 酶标分析仪（北京普朗）测定。

1.3 数据处理

采用 Excel2010 软件进行数据处理和作图分析，采用 SPSS Statistics17.0 统计分析软件进行统计和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 激光和 LED 光辐照对番茄幼苗叶片光合特性的影响

不同激光和 LED 光质辐照番茄幼苗叶片的光合特性参数值存在差异（图 1）。由图 1-A 可以看出，相同光强，激光辐照幼苗的净光合速率 P_n (650 nm) > P_n (450 nm) > P_n (633 nm)；LED 辐照幼苗当 $\text{PPFD} < 250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 P_n (650 nm) > P_n (630 nm) > P_n (450 nm)，当 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} < \text{PPFD} \leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 P_n (650 nm) $\approx$ P_n (630 nm) > P_n (450 nm)，当 $\text{PPFD} > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 P_n (630 nm) > P_n (650 nm) > P_n (450 nm)。激光辐照幼苗的 P_n (650 nm) 和 P_n (450 nm) 均大于相同波长的 LED 辐照，且这两波长激光辐照和 LED 辐照的比值最大分别达到 3.5 和 1.7 倍 ($\text{PPFD} = 300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时)，激光辐照幼苗的 P_n (633 nm) 在 PPFD 大于 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之后小于对应波长的 LED 辐照。不同光质，激光辐照幼苗的光补偿点均低于对应波长的 LED 辐照。所有红光辐照幼苗的光饱和点均为 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，450 nm 激光辐照幼苗的光饱和点为 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，低于同波长 LED 辐照的饱和点 $1100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

激光和 LED 辐照番茄幼苗叶片的胞间 CO_2 浓度 C_i (λ) 随光强增加先快速下降，在 PPFD 达到 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后，所有红光和 450 nm 激光辐照幼苗的 C_i 慢慢趋于稳定，但 450 nm LED 辐照幼苗的 C_i 继续下降（图 1-B）。 $\text{PPFD} \leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，激光辐照幼苗的 C_i (650 nm) > C_i (633 nm) > C_i (450 nm)，但 LED 辐照幼苗的 C_i (450 nm) > C_i (630 nm) > C_i (650 nm)； $\text{PPFD} > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后，激光辐照幼苗的 C_i (633 nm) > C_i (650 nm)，但 LED 辐照幼苗还是 C_i (630 nm) > C_i (650 nm)。

气孔导度 G_s (λ) 均随光强增加而增加，但激光辐照幼苗 G_s (650 nm) 和 G_s (450 nm) 在最高光强

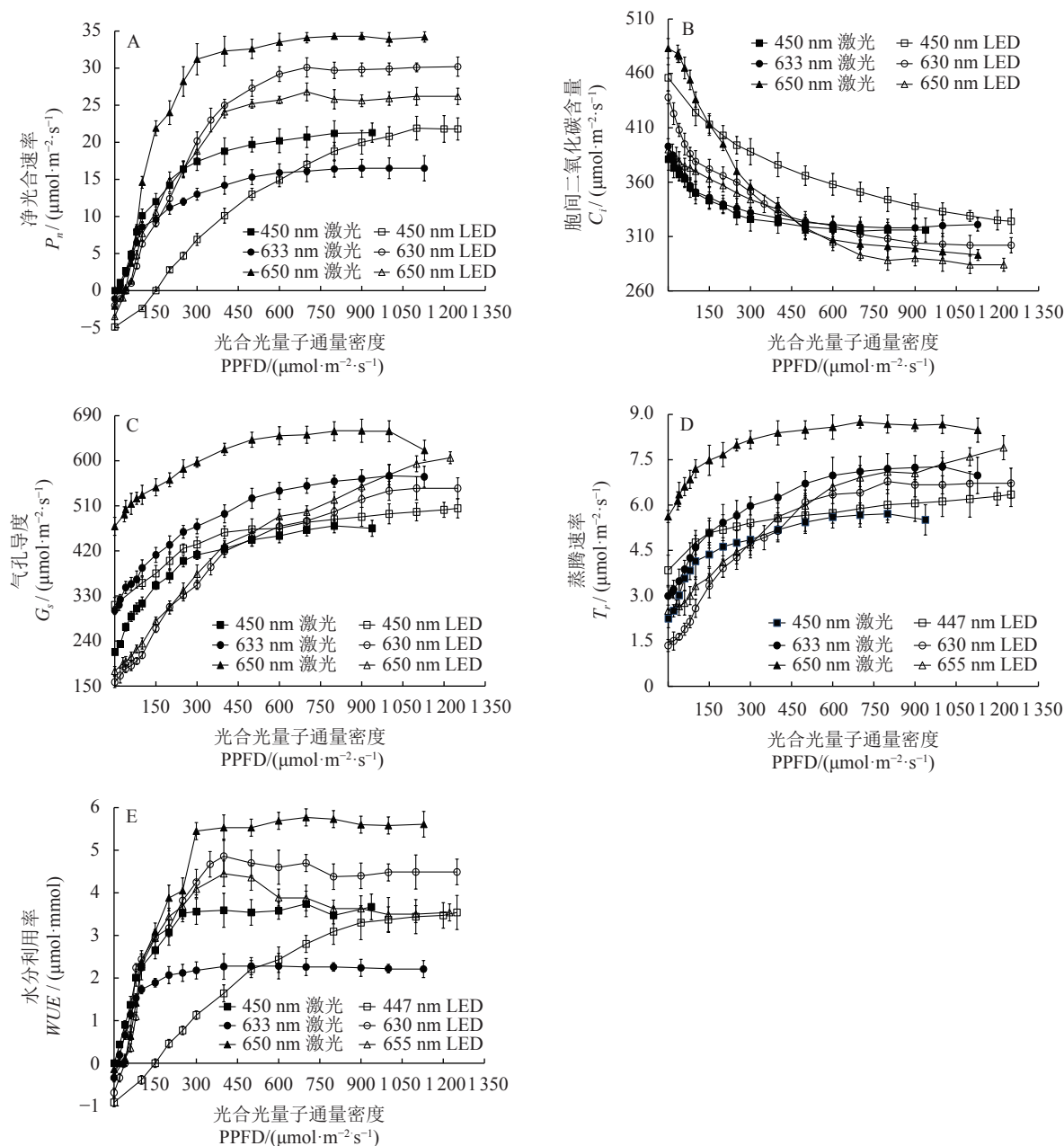


图 1 不同光处理下番茄幼苗叶片光合作用的光响应曲线

Fig. 1 Light response curves on leaf photosynthesis of tomato seedlings

时有所下降 (图 1-C)。相同光强, 除 450 nm 外, 激光辐照幼苗 $G_s(\lambda)$ 均大于对应波长的 LED 辐照, 且激光辐照幼苗 $G_s(650\text{ nm}) > G_s(633\text{ nm}) > G_s(450\text{ nm})$; LED 辐照幼苗在 $\text{PPFD} \leq 500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $G_s(450\text{ nm}) > G_s(630\text{ nm})$ 和 $G_s(650\text{ nm})$, 在 $\text{PPFD} > 600\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $G_s(650\text{ nm}) > G_s(630\text{ nm}) > G_s(450\text{ nm})$ 。幼苗的蒸腾速率 $T_r(\lambda)$ 和水利用效率 $WUE(\lambda)$ 随光质、光强的变化规律分别与气孔导度 $G_s(\lambda)$ 和净光合速率 $P_n(\lambda)$ 非常相似 (图 1-D、E), 可见, $T_r(\lambda)$ 和 $WUE(\lambda)$ 分别与 $G_s(\lambda)$ 和 $P_n(\lambda)$ 呈正相关关系。

综合以上分析, 650 nm 激光辐照番茄幼苗叶片

的光合能力大于 633 nm 辐照, 650 nm LED 辐照番茄幼苗叶片的光合能力大于 ($\text{PPFD} < 250\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和约等于 ($250\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \leq \text{PPFD} \leq 400\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 630 nm 辐照, 故以 650 nm 激光和 LED 光为红光补光光源。

2.2 激光和 LED 补光对番茄幼苗生长的影响

以白光补少量 650 nm 和 450 nm 激光和 LED 光为育苗光源, 设计 3 个光处理培育幼苗, 以 LED 白光培育幼苗为对照 (表 1)。结果表明 (表 2), 各生长指标在处理组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。T2 处理的番茄幼苗除株高和地上部鲜重外, 其余生长指标值都最高; T3 处理的番茄幼苗株高最高但叶面积

最小，幼苗发生徒长；T1 处理的番茄幼苗株高、地下部鲜重和干重最小。对照幼苗茎直径、地下部鲜重和干重最小。壮苗指数和根冠比在处理组间也存在显著差异 ($P<0.05$)，所有试验组的壮苗指数值和根冠

比从大到小排列分别为 T2 (8.8 mg) > T1 (5.5 mg) > T3 (4.0 mg) > 对照 (3.7 mg) 和 T2 (0.13) > T3 (0.09) > 对照 (0.08) > T1 (0.07)。

表 2 西红柿幼苗的生长指标
Table 2 Growth indicators of tomato seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	茎直径 Stem diameter/ mm	叶面积 Leaf area/ cm ²	地上部鲜重 Ground fresh weight/g	地下部鲜重 Underground fresh weight/g	地上部干重 Ground dry weight/g	地下部干重 Underground dry weight/g	壮苗指数 Strong seedling index/mg	根冠比 Root Shoot ratio
对照	17.2±0.68b	2.9±0.12c	97.8±4.8a	2.8±0.38b	0.2±0.08b	0.21±0.049b	0.02±0.006b	3.7±0.21c	0.08±0.01b
T1	16.1±0.78c	3.3±0.15b	95.9±2.5ab	3.1±0.35b	0.2±0.06b	0.25±0.055ab	0.02±0.006b	5.5±0.35b	0.07±0 b
T2	19.7±1.95b	4.3±0.1a	105.8±2.9a	4.0±0.22a	0.5±0.06a	0.35±0.028a	0.05±0.013a	8.8±0.55a	0.13±0.01a
T3	28.7±2.15a	3.1±0.04b	85.5±3.8b	4.4±0.39a	0.4±0.10a	0.34±0.076a	0.03±0.011ab	4.0±0.25c	0.09±0.01b

注：同一列不同小写字母表示不同实验组间存在显著差异 ($P<0.05$)。
Note: The lowercase letters in the same row indicate significant differences among different experience groups ($P<0.05$).

2.3 激光和 LED 补光对番茄幼苗叶片光合参数的影响

3 个处理叶片的净光合速率 P_n 在光强超过光补偿点后快速增大、光强达到 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后缓慢增加到各自的光饱和点后趋于稳定 (图 2-A)。所有试验组光补偿点都是 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，光饱和点 T2 (800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) < 对照、T1 (1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) < T3 (1400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。T2 处理幼苗的最大净光合速率 (光饱和点对应的净光合速率) 分别是对照、T1、T3 处理的 1.5 倍、1.3 倍、1.2 倍。

幼苗叶片胞间 CO_2 浓度 C_i 随光强变化的规律和 P_n 相反 (图 2-B)，先随光强增加快速下降，在光强达到 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后缓慢下降并趋于稳定 (除了 T3 处理的 C_i 缓慢下降后缓慢增加、T2 处理的继续呈下降趋势)。所有试验组 C_i 在各光强下差异较小。

气孔导度 G_s 和蒸腾速率 T_r 随光强的变化规律为在 $\text{PPFD} < 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时相似 (图 2-C, D)，都是随光强增加而增加，当 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} < \text{PPFD} < 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，所有试验组按 G_s 和 T_r 值从大到小排列依次是对照 > T1 > T2 > T3；在强光 ($\text{PPFD} > 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 辐照下，T3 处理的 G_s 和 T_r 继续较快地增加，其他试验组 G_s 缓慢下降、 T_r 缓慢增加后下降，其中 T2 的 G_s 下降最快。

水分利用率 WUE 随光强的变化规律和净光合速率 P_n 相似 (图 2-E)，在较低光强 ($\text{PPFD} < 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 时随光强快速增加、中等光强 (400~800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 时缓慢增加 (除了 T3 处理在 $\text{PPFD} > 600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时开始下降)、高强度光 ($\text{PPFD} > 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 时缓慢下降并趋于稳定 (除了 T2 处理下降后又上升)。T2 处理 WUE 最大值

分别是对照、T1、T3 处理最大值的 1.6、1.4、1.1 倍。

2.4 激光和 LED 补光对番茄幼苗生理生化特性的影响

3 个光处理对番茄幼苗叶片的光合色素含量的影响存在差异 (图 3-A)。白光补激光 (T2、T3) 处理幼苗的叶绿素 a、类胡萝卜素含量显著大于未补激光处理 ($P < 0.01$)，但叶绿素 b 含量则无显著差异 ($P > 0.05$)；白光补 LED 光 (T1) 处理的叶绿素 a 含量也显著大于对照，但其他色素含量无显著差异；T3、T2 处理的叶绿素 a 含量无显著差异 ($P > 0.05$)，分别是对照 (叶绿素 a 含量最低) 的 1.7、1.6 倍；叶绿素 a/b 的比值存在显著差异 ($P < 0.01$)，按比值从高到低依次为 T3 (5.6) > T2 (5.5) > T1 (2.0) > 对照 (1.7)。T2 处理的类胡萝卜素含量最高，分别是对照、T1 和 T3 处理的 7.0 倍、7.7 倍和 2.0 倍。

3 个光处理对番茄幼苗叶片中 SOD、POD 酶活性和 MDA 含量的影响存在差异 (图 3-B)。3 个处理幼苗的 SOD 活性无显著差异 ($P > 0.05$)，但 POD 活性和 MDA 含量有极显著差异 ($P < 0.01$)。所有补激光和 LED 光处理的 POD 活性和 MDA 含量显著大于对照，其中 T2 处理的值最大；T2、T3 和 T1 处理的 POD 活性分别是对照的 1.5 倍、1.4 和 1.3 倍，MDA 含量是对照的 8.6 倍、3.5 倍和 2.4 倍。

3 讨论与结论

植物在不同的光照条件下会调整自身的生理状态以获得最佳的光合作用^[20]。在弱光条件下，植物的光合速率或 CO_2 同化速率较低；当环境光强超过植物光合作用的光补偿点后，光合速率随着光强的

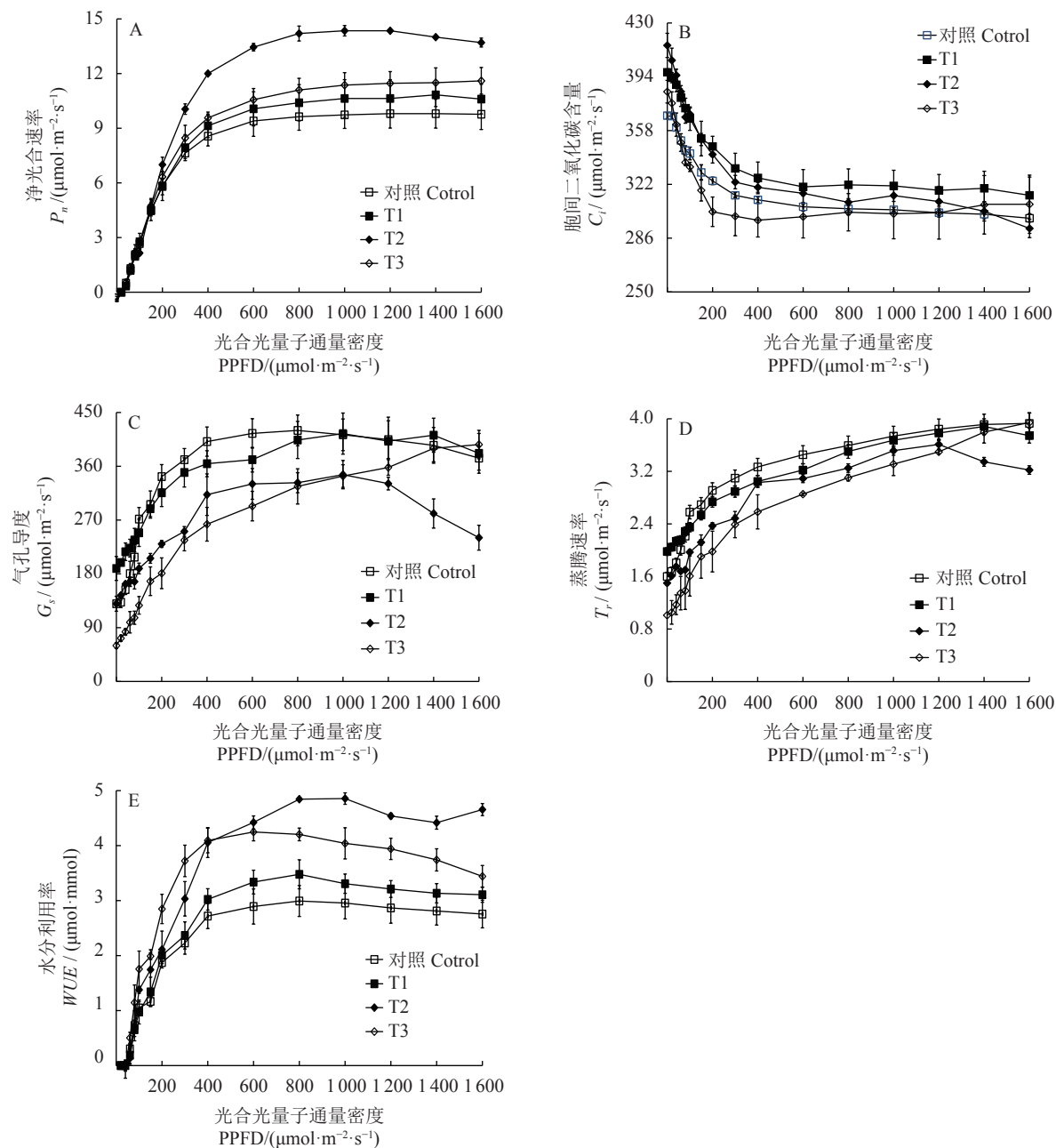


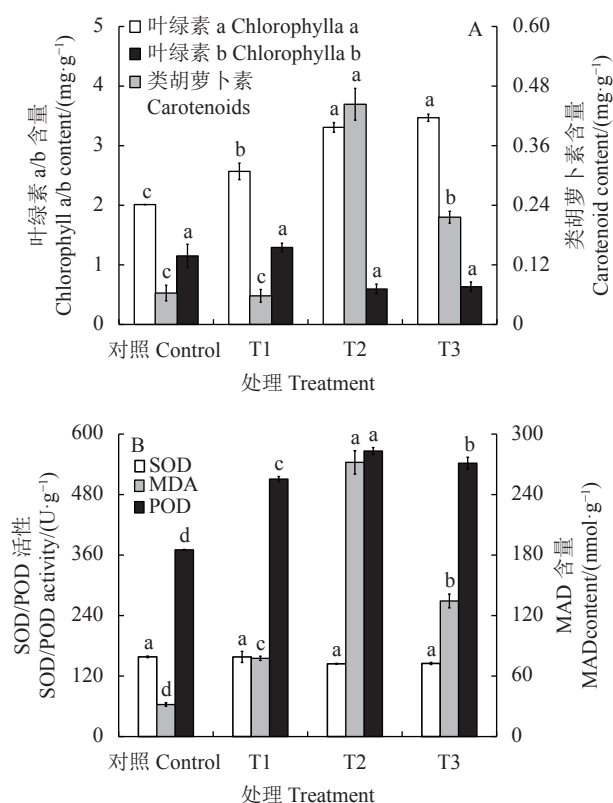
图 2 不同光处理下番茄幼苗叶片光合作用的光响应曲线

Fig. 2 Light response curves on photosynthesis of tomato seedlings under treatments

增加而增加,植物开始积累有机物质并生长;在最佳光质和光强下,植物处于最佳生长和代谢状态,代谢产物含量最高^[21]。

本研究的结果表明 650 nm 和 450 nm 激光是最佳的补光光源,它们优于同波长 LED 光;白光同时补少量这两种波长的激光进行育苗能大大提高幼苗的光合能力。Hall 等^[22]研究表明,叶绿素 a 和叶绿素 b 的吸收光谱在蓝光波段和红光波段各有 2 个吸收峰,蓝光波段峰值波长是 430 nm 和 453 nm,红光波段是 643 nm 和 660 nm。激光单色性比 LED 光好,其光能比 LED 更集中于中心波长,因此,同光强的 450 nm 激光比 LED 光有更多光子处于叶绿素的蓝光

吸收峰,光合作用效率更高。650 nm 处于红光波段叶绿素的 2 个吸收峰之间,同光强的激光和 LED 光,激光有更多光子远离两吸收峰,但它仍能产生比 LED 光高得多的净光合速率,说明 650 nm 激光除了为光合作用提供能量,还有其他作用,如可以提高叶绿体电子传递速率,激活叶绿体酶活性,从而提高光合能力。这和高丽美等^[23]对小麦的研究结果一致。因此,植物生长的最佳光源的光谱,应和植物光合作用的吸收光谱匹配,而这吸收光谱应是光合色素(主要是叶绿素 a/b)的吸收谱和光合作用酶等能促进光合作用的吸收光谱的叠加。本研究还表明白光同时补 650 nm 和 450 nm 激光处理光饱和



注：图中同一列不同小写字母表示不同试验组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: The lowercase letters in the same row indicate significant differences among different experience groups ($P < 0.05$).

图3 不同光处理番茄幼苗的生理生化指标

Fig. 3 Physiological and biochemical indices of tomato seedlings under treatments

点比其他试验组低，而最大净光合速率却比其他试验组高很多，说明同时补 650 nm 和 450 nm 激光能大大提高幼苗的光合作用光能利用率。

本研究还表明，白光补少量激光和 LED 光都能显著提高叶绿素 a 含量和叶绿素 a、叶绿素 b 的比值 a/b，但同时补 650 nm 和 450 nm 激光的效果更佳。光是叶绿体发育和叶绿素合成必不可少的条件，在叶绿素 a 的合成过程中，有 2 个直接需光过程：谷氨酰-tRNA (Glu-tRNA) 在光照的刺激下生成 δ -氨基乙酰丙酸、原叶绿素酸酯经光还原成叶绿酸酯^[24]。此外，一些酶的激活需要光。因此，本文推测激光更能促进这些需光反应，进而促进叶绿素 a 的合成。本研究的第一阶段番茄幼苗叶片在 450 nm 激光辐照下的净光合速率远小于 650 nm 激光辐照，但第二阶段白光同时补这两种波长激光后，叶片净光合速率显著大于白光补 650 nm 激光，这说明单独 450 nm 激光辐照叶片产生了光胁迫，抑制了光合作用，但增加 650 nm 激光后缓解了光抑制，提高了光合能力。这很可能是 650 nm 激光修复了番茄叶片光合系统由于光抑制造成的损伤。这与张美萍等^[16] 研究结果相

似。本文中白光同时补 650 nm 和 450 nm 激光还能显著提高幼苗的生长指标，这正是光合能力提高的结果，和陈晓栋等^[14] 对草莓的研究结果相似。

类胡萝卜素是植物中普遍存在的光合色素，它通过与其他有机物特别是叶绿素 a、叶绿素 b 的直接相互作用，参与光的收集和能量传递，并通过消耗多余能量来防止光合系统的光氧化损伤^[25]。此外，植物在受到干旱等环境胁迫时叶片中的类胡萝卜素含量会升高^[26]。本研究中白光补激光特别是 650 nm 和 450 nm 激光能显著提高类胡萝卜素含量，这与金丽虹^[27] 对大豆幼苗的研究结果一致。说明激光特别是具有高能光子的蓝色激光 (450 nm) 促进了类胡萝卜素的合成，可能是因为番茄幼苗通过合成更多类胡萝卜素来防止激光对光合系统造成光氧化损伤，是其应对激光胁迫的生存策略。

SOD、POD 是植物保护酶体系的关键组成部分，是植物体内主要的抗氧化酶，其中 SOD 能催化超氧化物阴离子自由基发生歧化反应生成 O_2 或 H_2O_2 ，消除自由基保护细胞膜；POD 能清除活性氧，催化过氧化氢的分解，防止膜脂过氧化和过氧化氢毒害细胞；MDA 是反映膜脂过氧化程度的重要指标，其含量高低反映膜脂过氧化程度大小。研究表明，白光补激光和 LED 光都能显著提高番茄幼苗 POD 活性和 MDA 含量，提高其抗氧化能力，但白光同时补 650 nm 和 450 nm 激光效果更显著，说明同时补红蓝两种激光虽加速了膜脂过氧化，但促使番茄幼苗保护酶系统活性升高，加快细胞清除自由基的速度以减轻膜系统的受损程度。这和对大豆幼苗^[27]、青钱柳^[28]、曼地亚红豆杉^[29]、远志^[30] 等的研究结果一致。

综上所述，白光补 650 nm 和 450 nm 的激光能提高番茄幼苗的生长指标、光合能力和抗氧化酶活性，是适合番茄幼苗生长的优质光源，可用于生产中做补光光源。

参考文献：

- [1] PASHKOVSKIY P P, SOSHINKOVA T N, KOROLKOVA D V, et al. The effect of light quality on the pro-/antioxidant balance, activity of photosystem II, and expression of light-dependent genes in *Eutrema salicigineum* callus cells [J]. *Photosynthesis Research*, 2018, 136 (2): 199–214.
- [2] YANG F, FENG L Y, LIU Q L, et al. Effect of interactions between light intensity and red-to- far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 150: 79–87.
- [3] 郭阿瑾, 杨凤玺, 王亚琴, 等. 不同光质LED对竹叶兰酚类物质及抗氧化性的影响 [J]. *热带作物学报*, 2018, 39 (7): 1318–1323.

- GUO A J, YANG F X, WANG Y Q, et al. Effect of different LED light qualities on phenolic substances and oxygen metabolism of *Arundina graminifolia* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39 (7) : 1318–1323. (in Chinese)
- [4] 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.
- 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. (in Chinese)
- [5] 刘庆, 连海峰, 刘世琦, 等. 不同光质LED光源对草莓光合特性、产量及品质的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (6) : 1743–1750.
- LIU Q, LIAN H F, LIU S Q, et al. Effects of different LED light qualities on photosynthetic characteristics, fruit production and quality of strawberry [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (6) : 1743–1750. (in Chinese)
- [6] GALVÃO V C, FANKHAUSER C. Sensing the light environment in plants: Photoreceptors and early signaling steps [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2015, 34: 46–53.
- [7] AGARWAL A, DUTTA GUPTA S, BARMAN M, et al. Photosynthetic apparatus plays a central role in photosensitive physiological acclimations affecting spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in response to blue and red photon flux ratios [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 156: 170–182.
- [8] 林碧英, 张瑜, 林义章. 不同光质对豇豆幼苗光合特性和若干生理生化指标的影响 [J]. 热带作物学报, 2011, 32 (2) : 235–239.
- LIN B Y, ZHANG Y, LIN Y Z. Effects of light quality on photosynthetic characteristics and several physiological and biochemical indices of cowpea seedlings [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32 (2) : 235–239. (in Chinese)
- [9] 张松勇. 不同光质对紫苏光合特性的影响 [J]. 热带作物学报, 2017, 38 (3) : 444–449.
- ZHANG S Y. Effects of different LED light qualities on photosynthetic characteristics of basil [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38 (3) : 444–449. (in Chinese)
- [10] CHEN M X, ZENG X P, LIU Y C, et al. An orthogonal design of light factors to optimize growth, photosynthetic capability and metabolite accumulation of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110272.
- [11] 杨其长, 徐志刚, 陈弘达, 等. LED光源在现代农业的应用原理与技术进展 [J]. 中国农业科技导报, 2011, 13 (5) : 37–43.
- YANG Q C, XU Z G, CHEN H D, et al. Application principle and technology progress in using light-emitting diode(LED) light sources in modern agriculture [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13 (5) : 37–43. (in Chinese)
- [12] 李杰, 王再花, 刘海林, 等. 不同光质的LED对2种金线莲组培苗增殖、生根及生长的影响 [J]. 热带作物学报, 2017, 38 (9) : 1666–1670.
- LI J, WANG Z H, LIU H L, et al. Effect of LED in different light qualities on propagation, rooting and growth of *Anoectochilus roxburghii* plantlets [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38 (9) : 1666–1670. (in Chinese)
- [13] 刘福长, 杨玉凯, 林碧英. 不同光质夜间补光对番茄幼苗耐冷性的影响 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (11) : 1222–1227.
- LIU F C, YANG Y K, LIN B Y. Effect of nighttime exposure to light from color lamps on cold tolerance of tomato seedlings [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (11) : 1222–1227. (in Chinese)
- [14] CHEN X D, CHU Q Q, LAN Y T, et al. Research and application of laser light device for plant growth [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2017, 9 (12) : 2095–2100.
- [15] LI Y F, GAO L M, HAN R. He–Ne laser illumination ameliorates photochemical impairment in ultraviolet-B stressed-wheat seedlings via detoxifying ROS cytotoxicity [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, 64 (5) : 766–775.
- [16] 张美萍, 梁志英, 韩榕, 等. He-Ne激光和增强UV-B辐射对水稻幼苗光合作用的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41 (8) : 114–119.
- ZHANG M P, LIANG Z Y, HAN R, et al. Effects of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on the photosynthesis on rice flags [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (8) : 114–119. (in Chinese)
- [17] 高晓玲, 何应森, 徐晓燕. 激光与增强的紫外-B辐射对花生幼苗光合作用的影响 [J]. 贵州农业科学, 2013, 41 (7) : 36–38.
- GAO X L, HE Y S, XU X Y. Effects of laser and enhanced UV-B radiation on photosynthesis of peanut seedlings [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41 (7) : 36–38. (in Chinese)
- [18] 黄祥英, 方玉宏. 基于激光共聚焦扫描显微技术分析激光对扁藻的影响 [J]. 激光生物学报, 2019, 28 (2) : 131–135.
- HUANG X Y, FANG Y H. Analysis of laser irradiation effect on *Platymonas subcordiformis* using laser confocal scanning microscopy [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2019, 28 (2) : 131–135. (in Chinese)
- [19] ARNON D I, MCSWAIN B D, TSUJIMOTO H Y, et al. Photochemical activity and components of membrane preparations from blue-green algae. I. Coexistence of two photosystems in relation to chlorophyll a and removal of phycocyanin [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1974, 357 (2) : 231–245.
- [20] MA Z Q, LI S S, ZHANG M J, et al. Light intensity affects growth, photosynthetic capability, and total flavonoid accumulation of *Anoectochilus* plants [J]. *HortScience*, 2010, 45 (6) : 863–867.
- [21] LI Q S, DENG M, XIONG Y S, et al. Morphological and photosynthetic response to high and low irradiance of *Aeschynanthus longicaulis* [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 347461.
- [22] HALL D O, RAO K K. 光合作用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1984: 100.
- [23] 高丽美, 李永锋, 韩榕. He-Ne激光对增强UV-B辐射后小麦幼苗光合作用的影响 [J]. 广西植物, 2011, 31 (1) : 117–123.
- GAO L M, LI Y F, HAN R. Effects of He-Ne laser on photosynthesis of wheat seedlings exposed to enhanced UV-B radiation [J]. *Guihaia*, 2011, 31 (1) : 117–123. (in Chinese)
- [24] 杨玉珍, 曾佑炜. 植物生理学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2020: 76–77.
- [25] DYMOVA O V, GOLOVKO T K. Photosynthetic pigments in native plants of the taiga zone at the European northeast Russia [J]. *Russian*

- Journal of Plant Physiology*, 2019, 66 (3) : 384–392.
- [26] 杨喜珍, 杨利, 覃亚, 等. PEG-8000模拟干旱胁迫对马铃薯组培苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2019, 33 (4) : 193–202.
- YANG X Z, YANG L, QIN Y, et al. Effects of PEG-8000 stress on contents of chlorophyll and carotenoid of potato plantlets *in vitro* [J]. *Chinese Potato Journal*, 2019, 33 (4) : 193–202. (in Chinese)
- [27] 金丽虹. 氩离子激光辐照对大豆幼苗生物学性能影响的研究: 生理生化指标、异黄酮代谢、抗氧化性[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- JIN L H. *Some biological effects on soybean seedlings by Ar⁺ laser irradiation —physiological and biochemical index, isoflavone metabolism and antioxidation*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [28] 秦健, 刘洋, 方升佐, 等. 光质和光强对青钱柳生长和抗氧化酶活性的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41 (4) : 13–18.
- QIN J, LIU Y, FANG S Z, et al. Effects of light quality and intensity on growth and antioxidative activities of *Cyclocarya paliurus* seedlings [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41 (4) : 13–18. (in Chinese)
- [29] 芦站根, 赵昌琼, 周文杰, 等. 光强对曼地亚红豆杉膜代谢及保护系统的影响 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2003, 26 (8) : 89–92.
- LU Z G, ZHAO C Q, ZHOU W J, et al. Effect of different light intensity on metabolizing of membrane and inner protective system of *Taxus media* cv. *hicksii* leaves [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2003, 26 (8) : 89–92. (in Chinese)
- [30] 彭亮, 赵停, 杨冰月, 等. 不同光质光强对远志生长和相关酶活性及成分的影响 [J]. *中草药*, 2018, 49 (21) : 5004–5009.
- PENG L, ZHAO T, YANG B Y, et al. Effects of light quality and intensity on growth, related enzymes activity, and components of *Polygala tenuifolia* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, 49 (21) : 5004–5009. (in Chinese)

(责任编辑：于洪杰)