

# LED 光质对乌饭树叶片叶绿素荧光参数的影响

黄 婧,周 鹏,李 飞,张 敏\*

(江苏省林业科学研究院,江苏 南京 211153)

**摘要:**为探讨 LED 光质对乌饭树叶片叶绿素荧光参数的影响,以乌饭树幼苗为试验材料,采用 4 种 LED 单色光质红光(R)、黄光(Y)、蓝光(B)和紫外光(UV)培养幼苗 30 d,以白光(W)为对照,研究 LED 不同光质对乌饭树叶片光合色素和叶绿素荧光参数的影响。结果显示:相比白光对照(W),紫外光(UV)和蓝光(B)能够显著提高叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量( $P<0.05$ );黄光(Y)会显著降低叶绿素 a 的含量( $P<0.05$ ),LED 单色光质都能显著提高类胡萝卜素的含量( $P<0.05$ )。LED 单色光质处理均显著提高了叶 PS II 潜在光化学活性( $F_v/F_o$ )和 PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )( $P<0.05$ ),紫外光(UV)处理的叶片  $F_v/F_m$  值最高,蓝光(B)其次;紫外光(UV)和蓝光(B)处理下叶片的 PS II 有效光化学量子产量( $F'_v/F'_m$ )和 PS II 实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )显著提高( $P<0.05$ );黄光(Y)处理下叶片的光化学猝灭( $q_p$ )显著降低( $P<0.05$ ),而不同光质处理对乌饭树叶片的非光学猝灭(NPQ)无明显影响。结果表明,紫外光(UV)和蓝光(B)处理下叶片光合色素含量显著增加,植物叶片对光能的利用效率更高,叶片较少产生热耗散,试验结果可以为今后乌饭树工厂化生产时光质选择提供依据。

**关键词:**乌饭树;LED;叶绿素;叶绿素荧光成像;PS II 反应中心

中图分类号:Q945.11;S567.1<sup>+</sup>9;S624.4<sup>+</sup>3;S685.21 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2023.03.001

## Effect of different LED light quality on chlorophyll fluorescence parameters of *Vaccinium bracteatum* leaves

Huang Jing, Zhou Peng, Li Fei, Zhang Min\*

(Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of LED light quality on chlorophyll fluorescence parameters in *Vaccinium bracteatum* leaves, using *V. bracteatum* seedlings as experimental materials, seedlings were cultured under four LED monochromatic light qualities: red light (R), yellow light (Y), blue light (B), and ultraviolet light (UV) for 30 days, compared with white light (W) to study the effects of different LED lights on photosynthetic pigments and photosynthetic mechanisms in *V. bracteatum* leaves. The results showed that compared with white light (W), ultraviolet light (UV) and blue light (B) could significantly increase the contents of chlorophyll a and chlorophyll b in leaves ( $P<0.05$ ); yellow light (Y) could significantly reduce the content of chlorophyll a ( $P<0.05$ ), and LED monochromatic lights could significantly increase the content of carotenoid ( $P<0.05$ ). LED monochromatic light treatments significantly improved the potential photochemical activity ( $F_v/F_o$ ) and maximum photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) of PS II ( $P<0.05$ ), while UV treatment had the highest  $F_v/F_m$  value, followed by blue light (B). Under ultraviolet (UV) and blue (B) light treatments, the effective photochemical quantum yield of PS II ( $F'_v/F'_m$ ) and the actual photochemical efficiency of PS II ( $\Phi_{PSII}$ ) in leaves were significantly increased ( $P<0.05$ ); The photochemical quenching ( $q_p$ ) of leaves under yellow light (Y) treatment significantly decreased ( $P<0.05$ ), while different light quality treatments had no significant impact on NPQ. The results showed that ul-

收稿日期:2023-03-21;修回日期:2023-04-11

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目“乌饭树设施栽培光质调控技术研究”[CX(21)3048]

作者简介:黄 婧(1987-),女,江苏镇江人,副研究员,博士。研究方向:观赏植物繁育与种质创新。E-mail:694286338@qq.com

\* 通信作者:张 敏(1980-),女,内蒙古海人,研究员。研究方向:观赏植物繁育与种质创新。E-mail:29157510@qq.com

traviolet (UV) and blue (B) light treatments could increase photosynthetic pigment content of leaves significantly, lead to higher utilization efficiency of light energy in plant leaves and less heat dissipation in leaves. The results of this experiment can improve the selection of light quality for future industrial production of *V. bracteatum*.

**Key words:** *Vaccinium bracteatum*; LED; Chlorophyll; Chlorophyll fluorescence imaging; PS II reaction center

随着光电技术的发展,LED 在农业与生物领域的应用正逐渐受到世界各国的广泛关注。作为新型人工光源,LED 体积小、寿命长、光谱可调节,在设施农业和植物工厂化生产中具有巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。叶绿素荧光成像技术能够测定植物整个叶片的叶绿素荧光<sup>[2]</sup>,为测定植物叶片光系统对光能的吸收、传递、分配过程提供丰富信息<sup>[3]</sup>。近年来,许多研究者利用叶绿素荧光技术在植物增产潜力预测和抗逆性研究等方面进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>,叶绿素荧光分析已经广泛用于植物栽培及逆境生理等方面。

乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)为杜鹃花科越桔属灌木,富含黄酮类化合物,集保健、药用和观赏价值于一身,极具开发应用潜力<sup>[7]</sup>。目前乌饭树规模化开发与利用的主要限制因素是不能够实现周年生产嫩叶,开展设施栽培乌饭树幼苗,可以实施鲜叶的周年生产,但在乌饭树设施栽培方面的研究较少,其中,光质调控设施栽培环境是提高植物产量的主要措施之一<sup>[8]</sup>。

本研究采用 4 种 LED 单色光质,以白光为对照,利用叶绿素荧光成像仪,对不同光质培养下乌饭树叶片叶绿素荧光参数进行测定,探讨乌饭树叶片叶绿素荧光参数对不同光质的响应,为筛选和利用 LED 作为乌饭树设施栽培光源提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验于 2022 年 5 月在江苏省林业科学研究院光质培养室进行。选取乌饭树优良单株(N0.18)的组织培养苗进行扦插培养,待扦插苗长出第 2 片真叶后,移栽至育苗盘内,置于光照培养架培养。设置 5 种光质处理,即红光(R)、黄光(Y)、蓝光(B)、紫外光(UV),以白光(W)作为对照,具体参数见表 1。每个处理幼苗 50 株,每个处理重复 3 次,随机区组排列。培养条件:温度 20—25 ℃、空气相对湿度

70%—80%、光照强度 150  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、光周期 14/10 h。

表 1 试验光质参数

处理	光质	峰值波长/nm	波长半宽/nm
R	红	660	20
Y	黄	590	20
B	蓝	470	20
UV	紫外光	390	20
W	白	460	—

### 1.2 光合色素含量测定

乌饭树幼苗 LED 光照培养 30 d 后,采用 95%乙醇溶液提取法<sup>[9]</sup>测定叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量。选择新鲜叶片的叶肉组织 0.1 g,剪碎后加入 95%乙醇溶液 2—3 mL,研磨成浆,转入 25 mL 容量瓶,加入 95%乙醇溶液定容至 25 mL,避光条件下浸提 24 h。采用紫外分光光度计,在波长 665, 649, 470 nm 处测定色素提取液的吸光度,按照公式计算叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素的质量分数。叶绿素的含量( $\text{mg/g}$ )=(Ca 或 Cb)浓度 $\times$ 提取液体积 $\times$ 稀释倍数/样品鲜质量,  $C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649}$ ,  $C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665}$ ;总叶绿素含量( $\text{mg/g}$ )=叶绿素 a 含量( $\text{mg/g}$ ) + 叶绿素 b 含量( $\text{mg/g}$ );类胡萝卜素的含量( $\text{mg/g}$ )=(Cx)浓度 $\times$ 提取液体积 $\times$ 稀释倍数/样品鲜质量,  $C_x = (1\,000A_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b)/245$ 。

### 1.3 叶绿素荧光参数测定

乌饭树幼苗 LED 光照培养 30 d 后,采用 CF0046 型荧光仪获取整叶叶绿素荧光图像。每个处理组剪取植株中部有代表性的叶片 5 片,测定叶片的  $F_v/F_m$ ,  $F'_v/F'_m$ ,  $q_p$  和  $NPQ$  等参数,采用 FluorImager (Version 2.2) 软件获取参数荧光图像及具体数据。

### 1.4 数据处理

所有测定指标均重复 3 次。采用 FluorImager, Excel 及 SPSS 统计分析软件进行数据处理,采用 Duncan's 新复极差法进行差异性比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 LED 光质对乌饭树叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知,乌饭树叶片叶绿素和类胡萝卜素含量呈现显著差异( $P<0.05$ );叶绿素 a 的含量排序为  $UV>B>R>W>Y$ ,叶绿素 b 的含量排序为  $UV>B>W>R>Y$ ,总叶绿素含量的排序为  $UV>B>W>R>Y$ ,类胡萝卜素含量的排序为  $UV>B>Y>R>W$ 。结果表明,相比对照白光(W),其他单色光都能显著提高

类胡萝卜素的含量;短波长的紫外光(UV)和蓝光(B)能够显著提高叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量;长波长的红光(R)和黄光(Y)对叶绿素 b 无显著影响,黄光(Y)会显著降低叶绿素 a 的含量。一般阳生植物的叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量值较高、阴生植物叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量值较低,本试验中叶绿素 a 含量/叶绿素 b 的含量排序为  $R>B>W>Y>UV$ ,说明短波长的紫外光(UV)和蓝光(B)能够显著提高叶片对漫射光(蓝紫光)的吸收,长波长的红光(R)和黄光(Y)则无此效果。

表 2 LED 不同光质对乌饭树幼苗叶片叶绿素含量的影响

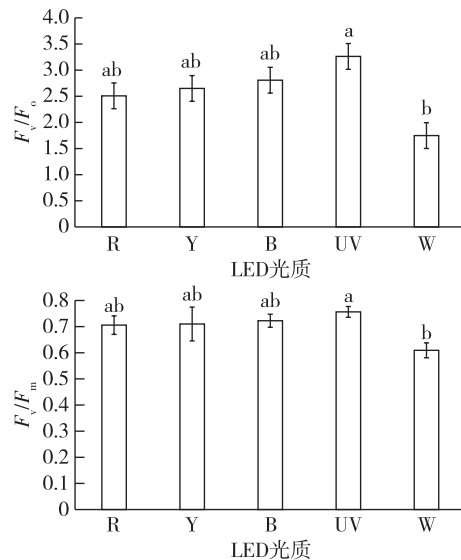
处理	叶绿素/(mg/g FW)			叶绿素 a/叶绿素 b	类胡萝卜素/(mg/g FW)
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素		
R	318.24±3.00 c	50.96±12.68 c	369.19±11.08 c	6.57±1.59 a	100.44±2.81 c
Y	229.20±17.65 d	45.30±8.87 c	274.50±26.35 d	2.91±0.00 c	100.76±5.38 c
B	507.56±23.64 b	174.35±8.46 b	681.91±32.09 b	5.14±0.49 ab	129.76±4.81 b
UV	688.44±8.50 a	299.91±22.01 a	988.35±26.51 a	2.30±0.16 c	206.14±0.77 a
W	315.72±11.29 c	66.04±5.54 c	381.75±16.83 c	4.79±0.20 b	92.34±0.32 d

注:数据为平均值±标准误;数字后的不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )

### 2.2 不同 LED 光质对乌饭树叶片叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 乌饭树叶 PS II 潜在光化学活性和最大光化学效率的情况 与对照白光(W)相比,4 种单色光处理能够显著提高叶片的 PS II 潜在光化学活性( $F_v/F_o$ )和 PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ ) (见图 1)。LED 单色光质能够显著提高叶片  $F_v/F_o$  值,相比对照白光,增幅达到 42.48%—86.64%。 $F_v/F_m$  在胁迫条件下明显下降,被认为是反映光抑制程度的可靠指标,乌饭树叶片在紫外光(UV)处理时  $F_v/F_m$  值最高,相比对照增加了 24.15%,蓝光(B)处理时  $F_v/F_m$  值其次,增幅为 18.60%,红光(R)和黄光(Y)处理时叶片的  $F_v/F_m$  值次之。说明单色光质处理下植物对光能的利用效率更高,生长状态更好。

2.2.2 乌饭树叶 PS II 有效光化学量子产量和实际光化学效率的变化 PS II 有效光化学量子产量( $F'_v/F'_m$ )反映开放的 PS II 反应中心原初光能捕获效率,紫外光(UV)和蓝光(B)处理下  $F'_v/F'_m$  显著高于白光对照(W)、红光(R)和黄光(Y),说明波长较短的光质培养能够显著提高乌饭树叶片的 PS II 光化学活性,波长较长的光质培养则无显著效果。PS II 实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )反映 PS II 反应中心部分关闭情况下的实际光化学效率,不同光质处理后的叶片情况与  $F'_v/F'_m$  结果类似,紫外光(UV)处理能

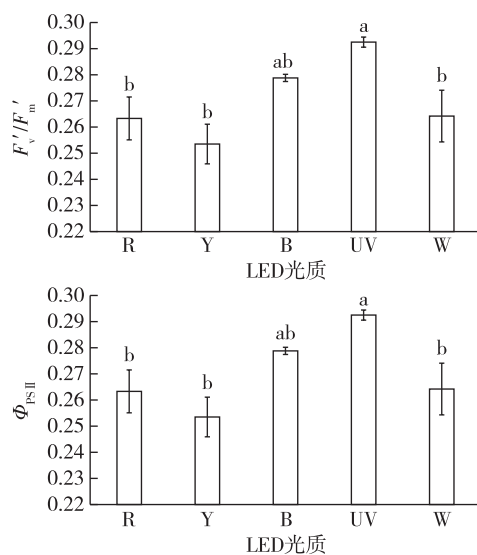


注:数据为平均值±标准误;柱形图上的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

图 1 不同 LED 光质对乌饭树叶片  $F_v/F_o$  和  $F_v/F_m$  的影响

够显著提高 PS II 实际光化学效率,蓝光(B)次之,而长波长的红光(R)和黄光(Y)处理与对照无显著差异,说明短波长的光质培养能够提高叶片 PS II 的光合潜力,而长波长的光质培养则无显著效果。

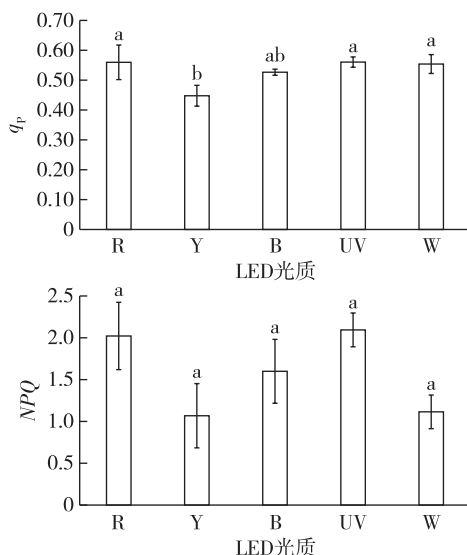
2.2.3 乌饭树叶荧光淬灭的变化 荧光淬灭包括光化学淬灭( $q_p$ )和非光学淬灭(NPQ)。 $q_p$ 反映 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的部



注:数据为平均值±标准误;柱形图上的不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

图2 不同LED光质对乌饭树叶片 $F_v/F_m$ 和 $\Phi_{PSII}$ 的影响

分,可以代表PSⅡ反应中心开放部分的比例,黄光(Y)处理时叶片光化学猝灭显著降低( $P < 0.05$ ),其他LED单色光质与对照无显著差异,说明黄光(Y)处理时植物处于光抑制状态; $NPQ$ 反映的是PSⅡ天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热形式耗散掉的部分,不同LED光质处理下,乌饭树叶片的非光学猝灭无显著差异,说明本试验培养条件下较少产生热耗散。



注:数据为平均值±标准误;柱形图上的不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

图3 不同LED光质对乌饭树叶片 $q_p$ 和 $NPQ$ 的影响

### 3 小结

植物叶绿素荧光信号是一种理想的光系统探针,可以反映植物光化学反应和光化学效率<sup>[10]</sup>。光质对植物的生长发育具有重要的作用,不同光质会显著影响植物的生长发育情况<sup>[11]</sup>。通过测量不同光质培养下植物叶绿素荧光特征,可以评估植物对不同光环境的响应和适应能力,为植物人工光源的应用提供科学依据。

$F_v/F_m$ 可以反映光反应中心PSⅡ的潜在活性,是一种早期检测光合作用受到压力的指标, $F_v/F_m$ 则可以反映PSⅡ的最大化学效率,通常用于检测植物遭受严重胁迫或叶片老化时的叶绿素荧光响应。许多植物<sup>[12-13]</sup>在环境胁迫加强时,植物叶片的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_m$ 值会呈现下降趋势。本试验中,4种LED单色光处理能够显著提高叶片的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_m$ ,说明用4种单色光质处理时叶片PSⅡ反应中心的开放程度较大。其中,紫外光(UV)和蓝光(B)处理的叶片 $F_v/F_m$ 值最高,说明短波长的光质能有效提高乌饭树叶PSⅡ的潜在活性和光能转化效率。

PSⅡ有效光化学量子产量( $F_v/F_m$ )是光合作用最大效率的指标,用于评估PSⅡ光化学活性<sup>[14]</sup>;PSⅡ实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )是PSⅡ实际光化学效率的指标,是用来评估PSⅡ吸收到的光能被利用于光合作用的能力<sup>[15]</sup>。本研究中紫外光(UV)和蓝光(B)处理下 $F_v/F_m$ 和 $\Phi_{PSII}$ 显著高于其他光质处理,表示短波长的光质能有效提高乌饭树叶片PSⅡ电子传递的效率,使得叶片对光的利用效率提高,具有更好的光合作用能力。

对生菜<sup>[14]</sup>和红桔<sup>[15]</sup>的研究结果显示,当光照为波长较长的红光或远红光时,会显著降低PSⅡ的活性,而在波长较短的蓝光等光源处理时,光合能力显著提高;对杨树<sup>[14]</sup>的研究表示,红光处理会降低叶片的 $\Phi_{PSII}$ ,蓝光有助于提高 $\Phi_{PSII}$ ,研究结果与本试验结果一致。对黄瓜和结球甘蓝<sup>[15]</sup>的研究显示,红蓝复合光和红绿蓝复合光的光合作用能力处于红、蓝单色光之间,结果说明不同植物的PSⅡ系统对不同LED光质的响应是不同的,同时复合光质配比能够有效提高PSⅡ的活性,但是不同物种的最适复合光配比存在较大差异,关于乌饭树PSⅡ系统对LED复合光的响应有待进一步研究。

光化学猝灭( $q_p$ )由于PSⅡ中光能被有效地利用而导致的荧光猝灭,本试验中黄光(Y)处理时乌



饭树叶片光化学猝灭显著降低,表明在黄光培养下叶片的光合作用能力下降,可能由于某些原因导致光合色素不能有效地传递电子<sup>[18]</sup>。而非光学猝灭(NPQ)是由于光能不能被有效利用而导致的荧光猝灭,如热耗散等。本研究中不同光质处理下NPQ无显著变化,说明本试验培养条件下没有发生明显的热耗散,可以排除环境因素等外部因素对测量结果的干扰,也说明本试验培养条件可以应用于普通生产中。

叶绿素荧光参数可以反映植物叶片的光合效率和健康状态,而叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量也会影响荧光参数的表现。本试验发现,单色LED光质能够提高类胡萝卜素含量,短波长的紫外光(UV)和蓝光(B)能够显著提高叶片的叶绿素a和叶绿素b的含量;长波长的红光(R)能够显著提高叶绿素a含量、黄光(Y)会显著降低叶绿素a的含量。由于叶绿素a和叶绿素b能够有效地吸收和利用光能进行光合作用<sup>[17]</sup>,所以紫外光(UV)和蓝光(B)培养下乌饭树叶片的PSⅡ系统活性较高,叶片的光合能力较强;而黄光(Y)培养下乌饭树叶片的光化学效率较低,光合作用能力下降,说明此时植物处于光抑制状态。

综上所述,乌饭树叶片PSⅡ系统对不同LED光质响应存在差异,能够通过叶绿素荧光参数反映出来,紫外光(UV)和蓝光(B)处理下叶片光合色素含量显著增加,PSⅡ系统活性较高,植物叶片对光能的利用效率更高,叶片较少产生热耗散,该结果可为乌饭树设施栽培中人工光源选择提供一定依据,其具体作用机制值得进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] GUPTA S D, JATOTHU B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis[J]. Plant Biotechnology Reports, 2013, 7(3):211-220.
- [2] GUIDI L, DEGL' INNOCENTI E. Chlorophyll a fluorescence in abiotic stress [M]. VENKATESWARLU B, SHANKER A, SHANKER C, et al. Crop stress and its management: perspectives and strategies. Pisa, Italy, 2012;359-398.
- [3] SCHANSKER G, TÓTH S Z, HOLZWARTH A R, et al. Chlorophyll a fluorescence: beyond the limits of the Q(A) model[J]. Photosynthesis Research, 2014, 120(1/2):43-58.
- [4] 曹栋,冯凯,陈颖,等.微生物菌肥施对截干银杏林有效成分积累及叶绿素荧光特性的影响[J].经济林研究,2023,41(2):129-136.
- [5] 于思敏,罗永忠,康芳明,等.干旱胁迫对紫花苜蓿生长和叶绿素荧光特性的影响[J].草地学报,2023,31(6):1762-1771.
- [6] 何欣,刘雨颖,邓琳煜,等.钼胁迫对湿地甸灯藓叶绿体及叶绿素荧光特性影响[J/OL].分子植物育种. <http://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230614.0949.002.html>.
- [7] LEE S, JUNG E S, DO S G, et al. Correlation between species-specific metabolite profiles and bioactivities of blueberries (*Vaccinium* spp.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(9):2126-2133.
- [8] TSURUNAGA Y, TAKAHASHI T, KATSUBE T, et al. Effects of UV-B irradiation on the levels of anthocyanin, rutin and radical scavenging activity of buckwheat sprouts. [J]. Food Chemistry, 2013, 141(1):552-556.
- [9] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiology, 1949, 24(1):1-15.
- [10] 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概率[J].植物生理与分子生物学报,2005,31(6):559-566.
- [11] 曹刚,张国斌,郁继华,等.不同光质LED光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响[J].中国农业科学,2013,46(6):1297-1304.
- [12] 刘敏竹,李强,杨超,等.LED光质对红桔幼苗生长发育和叶绿素荧光特性的影响[J].中国南方果树,2021,50(2):1-7.
- [13] SINGH D P, SARKAR R K. Distinction and characterisation of salinity tolerant and sensitive rice cultivars as probed by the chlorophyll fluorescence characteristics and growth parameters[J]. Functional Plant Biology, 2014, 41(7):727-736.
- [14] 孟力力,宋江峰,柏宗春,等.远红光对生菜光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J].江苏农业学报,2022,38(1):181-189.
- [15] 刘敏竹,李强,杨超,等.LED光质对红桔幼苗生长发育和叶绿素荧光特性的影响[J].中国南方果树,2021,50(2):1-7.
- [16] 张文林,任亚超,张益文,等.不同光质LED光源对转基因杨树叶片Bt毒蛋白含量及叶绿素荧光参数的影响[J].核农学报,2016,30(8):1639-1645.
- [17] 曹刚.不同LED光质对黄瓜和结球甘蓝苗期生长、光合特性及内源激素的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [18] 孙哲,范维娟,刘桂玲,等.干旱胁迫下外源ABA对甘薯苗期叶片光合特性及相关生理指标的影响[J].植物生理学报,2017,53(5):873-880.