

# 不同光强 LED 黄光对滇重楼生长、光合特性和皂苷含量的影响

张勤涛<sup>1</sup>, 梁社往<sup>2</sup>, 曹嘉芮<sup>1</sup>, 何忠俊<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201)(2. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南昆明 650201)

**摘要:** 为探究发光二极管(LED)黄光不同光强对滇重楼生物学特性和品质的影响,同时为LED光源在滇重楼生产上的应用提供理论依据。本研究以3年生滇重楼种苗为试验材料,采用波长为590 nm±5 nm的黄光为照射光源,设置了25、50、75、100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)4个光强梯度处理,对滇重楼生物学鲜重、叶片光合荧光特性及根茎皂苷含量进行了研究。结果表明,75 μmol/(m<sup>2</sup>·s)处理滇重楼叶片净光合速率、荧光指标、气孔导度、蒸腾速率均为最高。25 μmol/(m<sup>2</sup>·s)处理的荧光指标最低。100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)处理下重楼根茎皂苷含量最高,25 μmol/(m<sup>2</sup>·s)处理下皂苷含量最低。综合分析滇重楼叶片光合荧光特性和根茎皂苷含量,黄光75 μmol/(m<sup>2</sup>·s)对促进滇重楼叶片的光合作用最有利,黄光100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)对增加滇重楼根茎皂苷含量最有利。建议在滇重楼栽培上将黄光光强控制在75~100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)为宜。

**关键词:** 滇重楼; 发光二极管; 黄光; 光合特性; 皂苷含量

文章编号: 1673-9078(2018)03-178-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.03.026

## Effects of Different Intensity of LED Yellow Light on the Growth, Photosynthetic Characteristics and Saponins Content of *P. Polyphylla* var. *Yunnanensis*

ZHANG Qin-tao<sup>1</sup>, LIANG She-wang<sup>2</sup>, CAO Jia-rui<sup>1</sup>, HE Zhong-jun<sup>2</sup>

(1. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2. College of Agriculture and biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different intensity of LED yellow light on the biological characteristics and quality of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, and to provide theoretical basis for the application of LED light source in the production of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, 3-year-old seedlings of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were used as experimental materials and 4 light intensity gradients of 25, 50, 75, 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) were set for irradiating the yellow light with a wavelength of 590 nm±5 nm. The fresh weight, photosynthetic fluorescence characteristics of leaves and saponins content of rhizome were studied. The results showed that the net photosynthetic rate, fluorescence index, stomata conductance and transpiration rate were the highest in leaves with 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) treatment and the fluorescence index was the lowest with 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) treatment. The saponins content of rhizome was the highest with 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) treatment and lowest with 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) treatment. Comprehensive analysis of photosynthetic characteristics of leaves and saponins content of rhizome showed that, 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) intensity of LED yellow light was favorable to promote the photosynthesis and 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) intensity could increase the saponins content in rhizome of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. Consequently, the yellow light intensity should be controlled appropriately at 75-100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) on the cultivation of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*.

**Key words:** *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; light-emitting-diode; yellow light; photosynthetic characteristics; saponin content

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(81260613、30873374)

作者简介: 张勤涛(1991-),男,硕士研究生,主要从事药用植物栽培方向的研究

通讯作者: 何忠俊(1962-),男,教授,博士后,主要从事土壤与植物营养、同位素生态和药用植物栽培方面的研究

光是植物生命活动的基本能量来源,也是植物生长发育、开花结实的重要调节因子。植物的生长发育不仅受到光强的制约,而且也受光质即不同波长的光辐射及它们不同组成比例的影响<sup>[1]</sup>。自然环境中太阳光的光质组成及光照强度是不相同的,而且在不断的发生变化<sup>[2]</sup>。其中,不同的光质可以调控不同层次次

生代谢产物的形成与积累。大量的研究表明,光质对农作物幼苗生长发育、种子萌发<sup>[3]</sup>和光合特性<sup>[4]</sup>等均有调控作用<sup>[5]</sup>。许多植物的光合特性和生理生化指标等受光质的影响<sup>[6,7]</sup>,通过改变光质,不仅能促进药用植物的生长,而且也有利于药效成分的合成,是一种安全、高效和环保的手段。

滇重楼 (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*) 是延龄草科 (Trilliaceae) 重楼属 (Paris L.) 多年生草本植物,主要分布于我国西南部的云南、四川和贵州一带,主产于云南,生长于海拔 1400~3100 m 的常绿阔叶林、云南松林、竹林、灌木林下及阴湿山谷中<sup>[8]</sup>。滇重楼具有凉肝定惊、清热解毒和消肿止痛等功效,主治蛇虫咬伤、跌打损伤等症有独特疗效,此外还有抑菌、止血等作用,是“云南白药”和“季胜德蛇药片”等多种中成药的主要原料之一<sup>[9]</sup>。滇重楼根茎生长缓慢,从种子萌发到入药需要 10 年以上的的时间。随着对重楼资源需求的增加,野生重楼遭到掠夺式采挖,致使重楼资源日趋枯竭。重楼资源的短缺已严重制约相关制药企业可持续发展,滇重楼人工种植已成为解决资源匮乏的必要手段。

迄今为止,关于光质的研究绝大多数采用的是高压钠灯、彩色荧光灯、滤光片或有色农膜。由于不能精确定量的调制透光率和光谱能量分布,影响了结果的可靠性和准确性。覆膜的同时降低了光照强度,还存在老化和退色等问题,彩色荧光灯存在光照强度低,高压钠灯存在发热高、耗能高等缺点,影响了其在生产实践中的广泛应用和研究结果的准确性<sup>[10]</sup>。发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 是新一代半导体固态冷光源,具有光质纯、光效高、体积小、光谱能量调制便捷、寿命长、发热低和波长类型丰富等优点<sup>[11]</sup>。可根据植物对光质的不同需求进行精确调控,是 21 世纪最具发展前景的人工光源。滇重楼属于荫生 C<sub>3</sub> 植物,喜冷凉阴湿的环境,生长期间需要适宜的遮荫。近年来,国内外的许多学者对滇重楼的研究主要集中在栽培技术<sup>[12]</sup>和营养调控<sup>[13]</sup>等方面的研究。本课题组前期的研究表明:营养调控可显著提高滇重楼根茎产量和皂苷含量<sup>[13]</sup>,单质光白光和蓝光有利于滇重楼的生长发育<sup>[14]</sup>。目前,LED 光源对植物进行光调控也多为研究不同光质以及组合光源对其生长的调控<sup>[15,16]</sup>,研究最多的属红光、蓝光以及红蓝组合光源<sup>[17,18]</sup>,对黄光的研究甚少。因此,本试验将 LED 单质光黄光作为研究光源,通过不同光强 LED 黄光对滇重楼光合特性、荧光参数和皂苷含量的影响,筛选出最佳光强,为 LED 光源在滇重楼栽培中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与处理

试验光源由杭州汉徽光电科技有限公司提供,黄光灯珠均匀排布,波长波动范围为 590±2 nm,灯板功率为 17.8 W,灯板电流为 0.45 A。实验于 2017 年 3 月 10 日~2017 年 6 月 10 日在光调控箱内进行。选用生长一致、整株鲜重差异<0.1 g 的 3 年生滇重楼种子苗(由云南白药集团中药材优质种源繁育公司提供),将滇重楼种苗定植于 13 cm×10 cm 塑料盒内,每盒装土(腐殖土:蛭石:珍珠岩=3:1:1) 350 g。试验设置 4 个光强处理分别为 25、50、75、100 μmol/(m<sup>2</sup>·s),每个处理设置三次重复,每天光照 10 h(8:00~18:00),其他试验条件保持一致。光照 3 个月后采收整株,用自来水冲洗掉泥土,再用洗洁精清洗,然后用含 1%柠檬酸的蒸馏水清洗去表面附着的矿质元素,最后用蒸馏水冲洗干净,晾去附着水分,茎、叶、根茎和须根分开称鲜重。再将其装入编号的信封中,105 °C 杀青 30 min,再将温度降到 80 °C 烘干至恒重,称各部分干重,将根茎研磨粉碎测定皂苷组分含量。

### 1.2 测定指标与方法

#### 1.2.1 叶绿素荧光参数测定

采用 Li-6400 便携式光合仪测定净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 (Ci)、蒸腾速率 (Tr),并计算 PS II 原初光能转化效率 (Fv/Fm)、反应中心活性 (Fv/F0)。

#### 1.2.2 根茎皂苷含量测定

Agilent1200 高效液相色谱仪 (G1315D 检测器、G1311A 输液泵、G1329A 自动进样器、G1322A 在线脱气机、G1316A 柱温箱); AR2140 电子天平, AS20500A 型超声仪; 供试种苗经云南农业大学何忠俊教授鉴定为 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; 薯蓣皂苷 I、II、V、偏诺皂苷 VI、VII、H、薯蓣皂苷 (dioscin)、纤细薯蓣皂苷 (gracillin) 均为对照品,纯度>98%,购自中国科学院昆明植物研究所; 乙腈和甲醇为色谱纯 (美国 TEDIA 公司),无水乙醇为分析纯,水为娃哈哈纯净水。精密称取重楼粉末 1.0 g,置于具塞锥形瓶内,精密移取无水乙醇 10 mL,称取总质量。放置 20~30 min,超声提取 30 min 后放冷称重,并用无水乙醇补重,摇匀,经 0.45 μm 微孔滤膜滤过,取续滤液进行试验测定。并以皂苷对照品做标准曲线,计算各样品皂苷含量。色谱条件: 色谱柱: Eclipse XDB-C18(150 mm×4.6 mm, 5 μm), 检测波长 203 nm,

柱温 25 ℃, 流速 1.0 mL/min, 进样量 10 μL, 流动相: 乙腈 (B) /水 (A), 梯度洗脱程序 (参照药典、结合仪器、色谱柱条件, 对应计算出实际洗脱梯度值), 见表 1。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution procedure

Time/min	0	38	45	48	50
B/%	35	45.5	60	80	85
A/%	65	55.5	40	20	15

### 1.2.3 数据分析方法

采用 Excel 和 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行单因素方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 LED 黄光不同光强对滇重楼生长状况的影响

影响

光在植物生长中具有特殊作用, 除了能控制植物

的光合作用之外, 它还以环境信号的形式调节植物的生长、发育和形态变化, 使植物更好的适应外界环境<sup>[19]</sup>。有研究表明, 光照强度、光质与植物的生长发育、形态结构和次生代谢产物积累有密切关联<sup>[4,20]</sup>。由表 2 可知, LED 黄光不同光强对滇重楼株高和生长状况有显著的影响。重楼叶片、茎和根茎干鲜重随着黄光光强的增加呈现先增加后减少的趋势, 过强的黄光光照会抑制滇重楼的生长。在黄光光强为 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下植株最高、茎、叶、根茎干鲜重最大, 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下显著低于其他处理。其中, 株高、茎、叶、根茎干鲜重在 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 和 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 间差异不显著。说明在一定范围内增加光强可以促进滇重楼地上部和根茎的生长, 但光强过高会引起一定的抑制作用。与匡双边<sup>[21]</sup>研究的结果一致。樊小雪<sup>[22]</sup>发现的黄光明显降低生菜的干、鲜样质量与本试验结果相反, 其主要原因可能是植物种类不同所致。

总的来说, 在 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下的各个指标的干鲜重显著大于其他光照强度处理, 说明黄光 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理有利于干物质的积累。

表 2 LED 黄光不同光照强度对滇重楼干鲜重的影响

Table 2 Effects of different intensity of LED yellow light on the dryweight, fresh weight of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

处理	25 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	50 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	75 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	100 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)
叶鲜重 (g/株)	0.56±0.05 <sup>b</sup>	1.33±0.14 <sup>a</sup>	1.40±0.19 <sup>a</sup>	0.77±0.06 <sup>b</sup>
茎鲜重 (g/株)	1.61±0.70 <sup>b</sup>	4.52±0.89 <sup>ab</sup>	5.41±1.35 <sup>a</sup>	1.93±0.54 <sup>b</sup>
根茎鲜重 (g/株)	1.94±0.32 <sup>c</sup>	5.62±1.05 <sup>b</sup>	8.53±0.15 <sup>a</sup>	2.86±0.57 <sup>c</sup>
总鲜重 (g/株)	4.11±0.61 <sup>b</sup>	11.47±1.84 <sup>a</sup>	15.34±1.49 <sup>a</sup>	5.56±0.17 <sup>b</sup>
叶干重 (g/株)	0.11±0.01 <sup>c</sup>	0.19±0.02 <sup>b</sup>	0.32±0.01 <sup>a</sup>	0.15±0.02 <sup>bc</sup>
茎干重 (g/株)	0.11±0.03 <sup>c</sup>	0.27±0.04 <sup>b</sup>	0.40±0.05 <sup>a</sup>	0.12±0.04 <sup>c</sup>
根茎干重 (g/株)	0.30±0.04 <sup>c</sup>	1.03±0.17 <sup>b</sup>	1.92±0.15 <sup>a</sup>	0.68±0.14 <sup>bc</sup>
总干重 (g/株)	0.52±0.05 <sup>c</sup>	1.49±0.19 <sup>b</sup>	2.64±0.18 <sup>a</sup>	0.95±0.18 <sup>c</sup>
株高/cm	35.67±0.88 <sup>b</sup>	49.67±1.86 <sup>a</sup>	53.00±3.25 <sup>a</sup>	33.00±2.25 <sup>b</sup>

注: 同行不同小写字母分别表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同。

### 2.2 LED 黄光不同光强对滇重楼叶片光合荧光特性的影响

叶片光合速率受气孔导度影响, 一般呈正相关关系<sup>[23]</sup>, 与本研究结果一致。由表 3 可知, 叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均在黄光光强为 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 时呈最大值。且随着光强的增加, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率出现相同的变化趋势 (先降低后升高再降低), 这与蔡虎铭<sup>[14]</sup>的研究结果相同。气孔导度和蒸腾速率的变化规律一致, 50 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理最低, 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理最高。而胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与光合速率变化趋势相反, 在 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下

达到最高, 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下最低, 具体是什么原因导致这种结果还需要进一步验证。

叶绿素荧光被称为光合作用的探针<sup>[24]</sup>, 能反应植物光合作用的强弱。光化学量子产量 Fv/Fm 可以反映 ΦPS II 光化学效率的高低, 常用来度量植物叶片 ΦPS II 潜在活性和原初光能转化效率<sup>[25]</sup>, Fv/Fo 通常用来度量 ΦPS II 的潜在活性<sup>[26]</sup>。本研究表明, 滇重楼叶片原初光能转化效率 Fv/Fm 和反应中心活性 Fv/Fo 均表现为 75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下最高, 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理下最低, 且随黄光光强增加呈现先升高后降低的趋势。75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理比 25 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 处理的 Fv/Fm 和 Fv/Fo 分别高 71.8% 和 18.5%, 然而蔡虎铭<sup>[14]</sup>等在 LED 光调控对滇重楼叶片光合荧光特性和解剖

结构的影响试验中得出,各处理间的Fv/Fm差异不显著。柴胜丰<sup>[27]</sup>等对濒危植物毛瓣金花茶的研究中,随着光强的增加Fv/Fm、Fv/Fo呈逐渐降低的趋势与本

研究的结果不一致,可能是由于不同种类植物的叶片对不同光质的反应不同。

表3 LED黄光不同光照强度对滇重楼叶片光合荧光特性的影响

Table 3 Effects of different intensity of LED yellow light on leaf photosynthetic fluorescence characteristics of *Paris polyphylla* var.

*yunnanensis*

处理	25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
Pn/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$	0.62±0.01 <sup>b</sup>	0.46±0.04 <sup>c</sup>	1.35±0.01 <sup>a</sup>	0.29±0.03 <sup>d</sup>
Gs/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$	0.09±0.01 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>d</sup>	0.11±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>c</sup>
Ci/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$	289.29±0.34 <sup>a</sup>	256.08±5.37 <sup>b</sup>	214.36±0.31 <sup>c</sup>	296.13±1.09 <sup>a</sup>
Tr/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$	0.41±0.03 <sup>b</sup>	0.13±0.01 <sup>d</sup>	0.44±0.06 <sup>a</sup>	0.29±0.02 <sup>c</sup>
Fv/Fo	1.98±0.10 <sup>c</sup>	2.75±0.20 <sup>b</sup>	3.40±0.11 <sup>a</sup>	2.10±0.06 <sup>c</sup>
Fv/Fm	0.65±0.01 <sup>b</sup>	0.73±0.04 <sup>a</sup>	0.77±0.08 <sup>a</sup>	0.66±0.02 <sup>b</sup>

### 2.3 LED黄光不同光强对滇重楼根茎皂苷含量的影响

滇重楼主要以根茎入药,而皂苷是滇重楼根茎的主要药效成分。光强不仅影响植物的生长发育,还影响次生代谢物的积累与转化<sup>[28]</sup>。有研究表明,不同光照强度对西洋参产量和总皂苷含量积累有显著影响<sup>[29]</sup>。由表4可以看出,不同黄光光强对滇重楼根茎皂苷含量有显著影响。随着黄光光照强度增加,皂苷I、II、VII、D及总皂苷呈逐渐增加的趋势,以100

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理显著高于25  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理,且25  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和75  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理间差异不显著。皂苷H在四个光强处理下差异显著,以100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理显著高于其他处理。皂苷V变化规律不明显,皂苷VI未检出。总体看来,黄光光强为100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理时最有利于滇重楼皂苷的积累,但光强为100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,滇重楼的净光合速率并不是最高。这与罗美佳<sup>[30]</sup>在黄光不同光照条件下三七的净光合速率较高,生长表现较好,根生物量积累及单株总皂苷含量积累较多这个结论不一致,说明有利于滇重楼生长的光强不一定有利于其皂苷的累积。

表4 LED黄光不同光照强度对滇重楼皂苷含量的影响

Table 4 Effects of different intensity of LED yellow light on the saponin content of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

处理	25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
薯蓣皂苷I/(mg/g)	1.79±0.11 <sup>b</sup>	2.62±0.86 <sup>b</sup>	3.15±0.33 <sup>b</sup>	6.76±1.02 <sup>a</sup>
薯蓣皂苷II/(mg/g)	3.16±0.20 <sup>b</sup>	3.82±0.34 <sup>b</sup>	4.99±0.31 <sup>b</sup>	8.20±1.55 <sup>a</sup>
薯蓣皂苷V/(mg/g)	0	0.08±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.02 <sup>a</sup>	0.08±0.01 <sup>a</sup>
偏诺皂苷VI/(mg/g)	0	0	0	0
偏诺皂苷VII/(mg/g)	1.19±0.17 <sup>b</sup>	1.82±0.09 <sup>ab</sup>	1.84±0.13 <sup>ab</sup>	2.51±0.47 <sup>a</sup>
偏诺皂苷H/(mg/g)	0.48±0.01 <sup>d</sup>	0.71±0.02 <sup>b</sup>	0.58±0.04 <sup>c</sup>	1.01±0.01 <sup>a</sup>
薯蓣皂苷D/(mg/g)	0.28±0.05 <sup>b</sup>	0.58±0.17 <sup>b</sup>	0.66±0.19 <sup>b</sup>	2.12±0.50 <sup>a</sup>
总皂苷/(mg/g)	6.91±0.53 <sup>b</sup>	10.16±1.29 <sup>b</sup>	10.75±0.09 <sup>b</sup>	21.33±3.47 <sup>a</sup>

### 3 结论

LED黄光75  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理下滇重楼的生长、叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、Fv/Fm和Fv/Fo值均为最高,25  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理下的各项荧光指标最低。而滇重楼根茎皂苷组分和总的含量在100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理下最大,但与50、75  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理差异不显著,在25  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理下最小。综合分析滇重楼的生长状况、光合荧光特性和根茎皂苷组分含量,建议在滇重楼设施栽培中将黄光光强控制在

75~100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 为宜。

### 参考文献

- [1] 许大全,高伟,阮军.光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015,51(8):1217-1234  
XU Da-quan, GAO Wei, Ruan Jun. Effects of light quality on plant growth and development [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1217-1234
- [2] 黄希,梁社往,何忠俊,等.不同LED橙蓝光质对比对滇重楼叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].中国农学通

- 报,2016,32(22):98-103
- HUANG Xi, LIANG She-wang, HE Zhong-jun, et al. Effects of combination of orange and blue LED on photosynthetic characteristics and fluorescence parameter of *Paris polyphylla* var. *Yunnanensis* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(22): 98-103
- [3] Iacona C, Muleo R. Light quality affects *in vitro* adventitious rooting and *ex vitro* performance of cherry rootstock Colt [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(4): 630-636
- [4] 闻婧,杨其长,魏灵玲,等.不同波峰的LED红蓝光质组合对黄瓜苗生长和光合特性的影响[J].江苏农业学报,2013,29(3):619-625
- WEN Jing, YANG Qi-chang, WEI Ling-ling, et al. Influence of red and blue light-emitting diodes (LEDs) lighting with different wave peaks on growth and photosynthetic characteristics of cucumber seedling [J]. Jiangsu J. of Agr. Sci., 2013, 29(3): 619-625
- [5] 黄枝,林魁,林碧英,等.光质对瓠瓜幼苗光合及若干生理特性的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(2):85-90
- HUANG Zhi, LIN Kui, LIN Bi-ying, et al. Effects of light quality on photosynthetic characteristics and several physiological and biochemical properties of *Lagenaria siceraria* (MOL.) stand [J]. Shanxi Agric. Univ. (Natural Science Edition), 2016, 36(2): 85-90
- [6] 梁宗锁,李倩,徐文晖.不同光质对丹参生长及有效成分积累和相关酶活性的影响[J].中国中药杂志,2012,37(14):2055-2060
- LIANG Zong-suo, LI Qian, XU Wen-hui. Effects of different light quality on the growth and accumulation of effective components of *Salvia miltiorrhiza* and related enzyme activity [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2012, 37(14): 2055-2060
- [7] 王红星,郭翠红,李景原.光质对木立芦荟蒽醌类物质的影响[J].安徽农业科学,2009,37(10):4487-4488
- WANG Hong-xing, GUO Cui-hong, LI Jing-yuan. Effects of light on anthraquinones of *Aloe borescens* [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2009, 37(10): 4487-4488
- [8] 李恒.重楼属植物[M].北京:科学出版社,1998
- LI Heng. Paris plants [M]. Beijing: Science Press, 1998
- [9] 武珊珊,高文远,段宏泉,等.重楼化学成分和药理作用研究进展[J].中草药,2004,35(3):110-113
- WU Shan-shan, GAO Wen-yuan, DUAN Hong-quan, et al. Advances in studies on chemical constituents and pharmacological activities of *Rhizoma Paridis* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2004, 35(3): 110-113
- [10] 谢景,刘厚诚,宋世威,等.光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展[J].中国蔬菜,2012,2:1-7
- XIE Jing, LIU Hou-cheng, SONG Shi-wei, et al. Research progresses in application of artificial supplement light source in greenhouse vegetable production [J]. China Vegetables, 2012, 2: 1-7
- [11] 赵姣姣,杨其长,刘文科.LED光质对水培罂粟麦生长及氮磷吸收的影响[J].照明工程学报,2013,24(S1):146-149
- ZHAO Jiao-jiao, YANG Qi-chang, LIU Wen-ke. Effect of LED light quality on growth and uptake of nitrogen and phosphorus of hydroponic *dianthus superbus* [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(S1): 146-149
- [12] 太光聪,方其仙,李行,等.滇重楼栽培技术及有效成分积累研究综述[J].安徽农业科学,2012,40(16):8881-8883
- TAI Guang-cong, FANG Qi-xian, LI Xing, et al. Research progress on cultivation technique and accumulation of effective components of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2012, 40(16): 8881-8883
- [13] 何忠俊,曾波,梁社往.锌对滇重楼生长、养分含量和总皂甙含量的影响[J].西南农业学报,2012,25(2):665-669
- HE Zhong-jun, ZENG Bo, LIANG She-wang. Effects of different Zn levels on growth, nutrient content and total saponin contents of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(2): 665-669
- [14] 蔡虎铭.LED光调控对滇重楼叶片光合荧光特性和解剖结构的影响[D].昆明:云南农业大学,2016
- CAI Hu-Ming. Effects of LED photoregulation on photosynthetic parameters, fluorescence parameter and anatomical features of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2016
- [15] 王绍辉,孔云,陈青君,等.不同光质补光对日光温室黄瓜产量与品质的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(4):119-121
- WANG Shao-hui, KONG Yun, CHEN Qing-jun, et al. The effects of different light qualities on cucumber fruit quality and yield in greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 119-121
- [16] 刘文科,杨其长,邱志平,等.LED光质对豌豆苗生长、光合色素和营养品质的影响[J].中国农业气象,2012,33(4):500-504
- LIU Wen-ke, YANG Qi-chang, QIU Zhi-ping, et al. Effects of LED light quality on growth, photosynthetic pigments and nutritional quality of pea seedlings [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 500-504

- [17] 何诗行,何堤,许春林,等.不同 LED 光质对番茄幼苗生长特性的影响[J].农业机械学报,2017,11:1-9  
HE Shi-hang, HE Di, XU Chun-lin, et al. Effect of different LED light qualities on growth characteristics of tomato seedlings [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 11: 1-9
- [18] 余意,杨其长,赵姣姣,等.LED 光质对三种叶色生菜光谱吸收特性、生长及品质的影响[J].照明工程学报,2013,24(S1):139-145  
YU Yi, YANG Qi-chang, ZHAO Jiao-jiao, et al. Spectral absorbance, growth and nutritional quality responses of three leaf-color lettuce cultivars to LED light qualities [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(S1): 139-145
- [19] 周亿堂,马红群,梁丽娇,等.不同光照条件下长春花的光合作用和叶绿素荧光动力学特征[J].中国农业科学,2008,41(11):3589-3595  
ZHOU Yi-tang, MA Hong-qun, LIANG Li-jiao, et al. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence in leaves of *Catharanthus roseus* grown under different light intensities [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3589-3595
- [20] 王洋,戴绍军,阎秀峰.光强对喜树幼苗叶片次生代谢产物喜树碱的影响[J].生态学报,2004,24(6):1118-1122  
WANG Yang, DAI Shao-jun, YAN Xiu-feng. Effects of light intensity on secondary metabolite camptothecin production in leaves of *Camptotheca acuminata* seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1118-1122
- [21] 匡双便,徐祥增,孟珍贵,等.不同透光率对三七生长特征及根皂苷含量的影响[J].应用与环境生物学报,2015,21(2):279-286  
KUANG Shuang-bian, XU Xiang-zeng, MENG Zhen-gui, et al. Effects of light transmittance on plant growth and root ginsenoside content of *Panax notoginseng* [J]. Chin. J Appl. Environ. Biol., 2015, 21(2): 279-286
- [22] 樊小雪,宋波,徐海,等.不同 LED 光源对生菜生长和品质的影响[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2015,33(3):330-333  
FAN Xiao-xue, SONG Bo, XU Hai, et al. Effects of different light emitting diodes on growth and quality of lettuce [J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2015, 33(3): 330-333
- [23] 张勇,叶芝兰,杨峰,等.不同光质对比对大豆幼苗形态及光合生理参数的影响[J].中国油料作物学报,2014,36(3):343-348  
ZHANG Yong, YE Zhi-lan, YANG Feng, et al. Effects of different light qualities on morphological and photosynthetic physiological parameters of soybean seedlings [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 343-348
- [24] 储钟稀,童哲,冯丽洁,等.不同光质对黄瓜叶片光合特性的影响[J].植物学报,1999,41(8):867-870  
CHU Zhong-xi, TONG Zhe, FENG Li-jie, et al. Effect of different light quality on photosynthetic characteristics of cucumber leaves [J]. Acta Botanica Sinica, 1999, 41(8): 867-870
- [25] Hong S S, Xu D Q. Light- induced increase in initial fluorescence parameters to strong light between wheat and soybean leaves [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42: 684-688
- [26] 邹伶俐,张明如,刘欣欣,等.不同光强和土壤水分条件对苜蓿光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012,33(1):33-37  
ZOU Ling-li, ZHANG Ming-ru, LIU Xin-xin, et al. Effects of light intensity and soil water on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *dicranopteris dichotoma* [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2012, 33(1): 33-37
- [27] 柴胜丰,庄雪影,韦霄,等.光照强度对濒危植物毛瓣金花茶光合生理特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(3):547-554  
CHAI Sheng-feng, ZHUANG Xue-ying, WEI Xiao, et al. Effects of light intensity on photosynthesis and physiological characteristics in seedlings of *camellia pubipetala* [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin, 2013, 33(3): 547-554
- [28] 董然,冯玉才,刘丽娟,等.光照对野生朝鲜淫羊藿有效成分含量的影响[J].吉林农业大学学报,2003,25(4):413-415  
DONG Ran, FENG Yu-cai, LIU Li-juan, et al. Influence of light on effective chemical components of *epimedium koreanum nakal* [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(4): 413-415
- [29] 于国华,尚辉民,罗文熹.不同光照强度对西洋参光合特性、营养成分和产量的影响[J].应用生态学报,1994,5(1):57-61  
YU Guo-hua, QING Hui-min, LUO Wen-xi. Effect of light intensity on photosynthetic characteristics, nutritive components and yield of American ginseng [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(1): 57-61
- [30] 罗美佳.光照对三七生长、光合特性及有效成分积累的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2014  
LUO Mei-jia. Effect of light on growth, photosynthesis characteristics and effective components of *panax notoginseng* [J]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014