

# 两种景观灯光源对冬青卫矛生长及光合特性的影响

郭卫珍

上海植物园, 上海城市植物资源开发应用工程技术研究中心, 上海  
Email: 669611159@qq.com

收稿日期: 2021年1月29日; 录用日期: 2021年5月12日; 发布日期: 2021年5月24日

## 摘要

采用MHL (金属卤化物灯)和LED (发光二极管)模拟景观灯夜间照射4小时, 以不照光为空白对照, 研究两种景观灯光源对冬青卫矛生长及光合特性的影响。结果表明: MHL为热光源, 光谱能量主要集中在绿光和黄光两处, LED为冷光源, 光谱能量主要集中在红橙光和蓝光两处。MHL夜间照射能显著提高冬青卫矛的叶面温度 $2^{\circ}\text{C}$  ( $P < 0.05$ ), LED照射仅高出对照组 $0.3^{\circ}\text{C}$ ; 两种景观灯夜间照射均显著降低了冬青卫矛的株高、叶面积、叶绿素和类胡萝卜素含量以及叶绿素a/b ( $P < 0.05$ ), 并显著提高了相对电导率和表观量子效率( $P < 0.05$ ), 其中MHL照射还会使其叶片形状趋于圆形。除此之外, MHL和LED夜间照射能显著提高可溶性糖含量、比叶重和最大净光合速率( $P < 0.05$ ), 其中LED相比MHL效果显著; MHL和LED夜间照射能显著降低光补偿点和光饱和点( $P < 0.05$ ), 其中MHL相比LED效果显著。

## 关键词

景观灯, 冬青卫矛, 生长, 光合特性

# Effects of Two Landscape Lights on the Growth and Photosynthetic Characteristics of *Euonymus japonicas*

Weizhen Guo

Shanghai Research Center of Urban Plant Resources Development and Application & Engineering and Technology, Shanghai Botanical Garden, Shanghai  
Email: 669611159@qq.com

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 12<sup>th</sup>, 2021; published: May 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

MHL (metal halide lamp) and LED (light emitting diode) were used to simulate landscape light that illuminated for 4 hours at night. The effects of two landscape lights on the growth and photosynthetic characteristics of *Euonymus japonicas* were studied with no light as blank control. The results showed that the MHL was heat light source, its spectral energy mainly concentrated in the green and yellow, LED was cold light source, and its spectral energy mainly concentrated in the red, orange and blue. The leaf surface temperature could significantly increase 2°C irradiated by MHL at night, and increase only 0.3°C by LED. Plant height, leaf area, chlorophyll and carotenoid content, chlorophyll a/b were significantly reduced, while relative conductance and apparent quantum efficiency were significantly improved under illumination of two landscape light. The shape of leaves tended to be round in the light of MHL. Irradiation of MHL and LED at night could significantly improve soluble sugar content, lamina mass per unit area, and the maximum net photosynthetic rate, among which LED had significant effect compared with MHL. Irradiation of MHL and LED at night could significantly reduce light compensation point and light saturation point, among which MHL had significant effect compared with LED.

## Keywords

Landscape Light, *Euonymus japonicas*, Growth, Photosynthetic Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

奉树成等[1]经过前期调查发现,金属卤化物灯是上海城市绿地中应用较多的光源类型。近年来,LED作为新一代的绿色照明光源,在绿化景观中的应用越来越广泛。两种光源由于发光原理不同,导致它们在光谱分布和散热性等方面存在较大差异。金属卤化物灯(Metal Halide Lamp,简称MHL)是在卤化物混合蒸气中产生电弧放电发光的放电灯[2],发光的同时会释放出一定的热量,MHL会发出连续光谱,并迭加密集的线状光谱,故显色指数特别高。发光二极管(Light Emitting Diode,简称LED)是将电能直接转化为可见光的固态半导体器件,它具有高效节能、绿色环保等优点[3]。LED产生的光谱中没有紫外线和红外线,因而没有热量和热辐射,属于冷光源[4]。

景观灯夜间的开放会改变植物周围的小环境,不同类型的景观灯照射下的光照和温度存在较大差异,对植物也会产生不同的影响。光照主要从光质、光强和光周期3个方面来调节植物的生长发育、生理代谢、光合作用以及基因表达等活动[5][6];温度则影响光合作用、酶的活性以及物质的吸收和运输等过程。前期调查发现当绿地中采用热光源近距离照射植物时,很容易对植物造成灼伤。

冬青卫矛(*Euonymus japonicus*)为卫矛科卫矛属常绿灌木,叶片革质有光泽,倒卵形或椭圆形,原产日本南部,中国引进种植。该树种观赏性高,适应性强,作为最常用的绿篱以及造型植物之一,被我国南北各省广泛应用于公园绿地、道路绿地和园林绿化中[7],也因此成为目前与景观灯结合最多的植物。针对前期调查中发现的问题,本试验以冬青卫矛作为研究材料,选用MHL和LED两种光源模拟景观灯照射,探索两种类型的景观灯对冬青卫矛生长及光合特性的影响,旨在为城市绿地中景观灯光源类型的

选择和管理提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1 试验材料

试验于 2017~2019 年在上海植物园科研基地的生产大棚内进行, 温度保持在 20℃~25℃, 以冬青卫矛的扦插苗为试验材料, 选取生长健壮、高度基本保持在 40 cm 的植株, 移栽于上口径 28 cm、下口径 17 cm、高 20 cm 的花盆中, 每盆 15 株, 每个处理 5 盆, 栽培介质土的比例均为原土:泥炭:珍珠岩 = 2:2:1, 之后进行常规的水肥管理。

### 2.2. 试验设计

根据前期调查的结果, 于 2017 年 10 月开始选用 MHL (白光)和 LED (白光)来模拟景观灯对冬青卫矛进行照射处理, 以不照光处理为空白对照组(CK)。景观灯于每晚 7:00~11:00 开放, 采用由上往下泛光照射, 距离植株 50 cm, 为保障不同类型的光源在植物表面上的光照强度均保持在 5 Klux 左右(根据前期调查得出叶片在绿地景观灯照射下常见的平均照度值), 每个盆栽分别使用 2 个 30 W 的 LED 和 1 个 70 W 的 MHL 来照射。照射 2 年后, 选取植株中上部的功能叶进行各项指标的测定。

### 2.3. 测定指标和方法

#### 2.3.1. 景观灯光谱的测定

光谱分析采用光谱照度计(CL-200F 光谱照度计, 杭州科兴光电有限公司), 在离光源距离 1 m 的正上方测定其光谱。

#### 2.3.2. 生长指标测定

各处理均随机选取 10 株苗, 测定从植株根茎部到顶部之间的距离, 即株高; 每个处理随机选取上部成熟叶片 30 片, 以一元硬币作为参照, 将叶片进行扫描, 使用迅捷 PDF 阅读器得到叶面积(LA), 并同时测量叶长和叶宽, 计算出长宽比, 即叶形指数; 比叶重(LMA)按照冯玉龙[8]的方法进行测定。

#### 2.3.3. 叶面温度测定

照射 2 年后, 于 2019 年 11 月选取 3 天, 在夜晚景观灯开放期间, 采用红外热成像仪(FLIR Systems AB, Sweden)来采集叶面温度, 每个处理采集 7 张图像, 使用 Flir Tools 软件进行图像分析, 每张图像采集 10 个点的温度值。

#### 2.3.4. 生理指标测定

叶绿素含量的测定采用丙酮浸提法[9]; 可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法; 相对电导率采用电导仪法[10]。

#### 2.3.5. 光响应曲线测定

选取冬青卫矛上部枝条的第 3 片功能叶, 做好标记, 每个处理 7 个重复, 于晴天上午用 Li-6400 光合仪(Li-Cor 公司, 美国)进行光响应曲线的测定。测定时红蓝光源设定的光通量密度梯度为 2100, 1800, 1500, 1200, 1000, 800, 600, 400, 200, 150, 100, 50, 20, 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 每个梯度重复 3 次, 样本室  $\text{CO}_2$  密度为  $(400 \pm 5) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 叶片温度为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

## 2.4. 数据统计与分析

采用 Excel 2010 进行数据统计处理, 采用 SPSS 18.0 中的 Duncan 检验进行显著性方差分析( $\alpha = 0.05$ )。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 两种类型景观灯光源的光谱分析

MHL 和 LED 两种光源的白光光谱如图 1, MHL 的白光由多段窄光谱组成, 不仅包含整个可见光 (380~780 nm), 还有部分紫外和红外光线。在可见光谱范围内, 其光谱能量分布相对均匀, 各波段范围均有覆盖[11], 其中绿光和黄光两处的光谱能量相对较高, 而蓝光和红光的光谱较少。LED 发光的波长全部在可见光范围内(380~780 nm), 最大光谱能量主要集中在红橙光和蓝光两处, 其它的波长范围相对辐射强度很低。

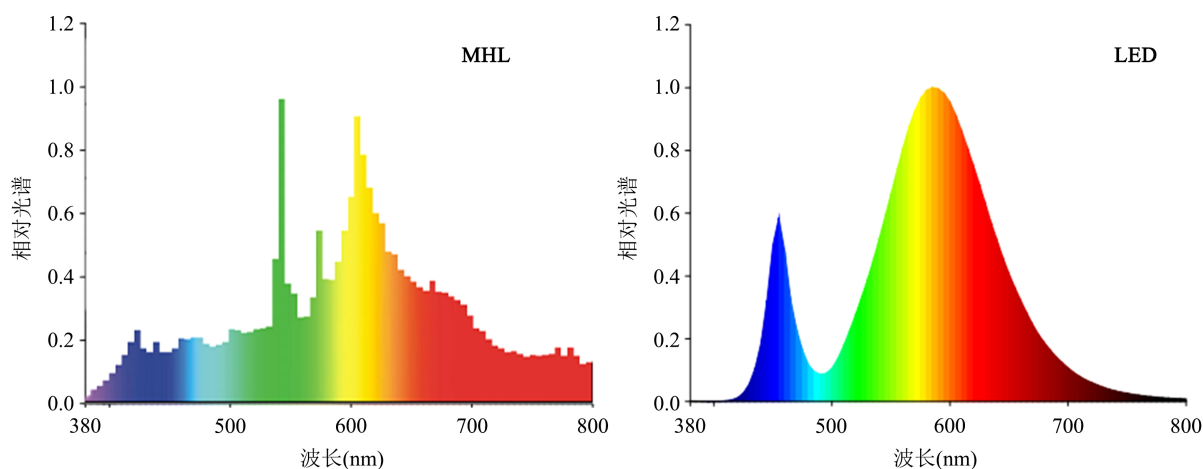


Figure 1. White light spectral analysis of two light sources

图 1. 两种景观灯光源的白光光谱分析

#### 3.2. 两种景观灯光源对冬青卫矛生长的影响

两种景观灯夜间照射 2 年后对冬青卫矛的生长和形态特征均产生了明显的影响(表 1)。与 CK 相比, 2 个处理的株高、叶片长及叶面积均显著降低, 其中 MHL 照射下的叶片长下降了 29.8%, 显著低于 LED; MHL 照射下的叶片宽显著高于 LED 和 CK, 叶形指数显著低于其它 2 个处理, LED 照射下的叶片宽和叶形指数则与 CK 无显著性差异; 比叶重大小依次为 LED > MHL > CK, 且 3 个处理之间存在显著差异。

Table 1. Effects of two landscape lights on growth of *E. japonicas*

表 1. 两种景观灯光源对冬青卫矛生长指标的影响

处理	株高(cm)	叶片长(cm)	叶片宽(cm)	叶形指数	叶面积( $\times 10^{-4} \text{ m}^2$ )	比叶重( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )
MHL	51.57 $\pm$ 5.85b	3.27 $\pm$ 0.70c	3.45 $\pm$ 0.69a	1.01 $\pm$ 0.38b	8.23 $\pm$ 1.46b	153.89 $\pm$ 6.22b
LED	55.37 $\pm$ 10.57ab	4.08 $\pm$ 0.44b	2.76 $\pm$ 0.33b	1.49 $\pm$ 0.18a	8.22 $\pm$ 1.55b	172.23 $\pm$ 7.01a
CK	61.17 $\pm$ 9.07a	4.66 $\pm$ 0.46a	2.89 $\pm$ 0.34b	1.63 $\pm$ 0.19a	9.92 $\pm$ 1.97a	126.71 $\pm$ 4.25c

同列数据后无相同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

#### 3.3. 两种景观灯光源对冬青卫矛叶面温度和生理指标的影响

两种景观灯光源自身的发热情况不同, 在夜晚照射期间也会不同程度的影响植物的叶面温度(表 2)。与 CK 相比, MHL 和 LED 均显著提高了叶面温度, 其中, MHL 照射下叶面温度高出 CK 2 $^{\circ}\text{C}$ , LED 仅

高出 CK 0.3℃。相对电导率和可溶性糖被广泛应用于植物抗性生理研究中, 由表 2 可知, 与 CK 相比, MHL 和 LED 照射均显著提高了可溶性糖含量和相对电导率。其中 LED 照射下的可溶性糖含量显著高于 MHL, 两种光源照射下的相对电导率之间无显著差异。

**Table 2.** Effects of two landscape lights on leaf temperature and growth of *E. japonicas*  
**表 2.** 两种景观灯光源对冬青卫矛叶面温度和生理指标的影响

处理	叶面温度(℃)	相对电导率(%)	可溶性糖(mg·g <sup>-1</sup> )
MHL	17.40 ± 0.22a	0.35 ± 0.02a	2.06 ± 0.02b
LED	15.60 ± 0.30b	0.34 ± 0.04a	2.27 ± 0.08a
CK	15.30 ± 0.32c	0.23 ± 0.03b	1.86 ± 0.02c

### 3.4. 两种景观灯光源对冬青卫矛光合色素含量的影响

叶绿素和类胡萝卜素是光合作用中必不可少的光合色素, 由表 3 可以看出, 两种光源类型照射下叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素和类胡萝卜素含量的大小依次为: CK > MHL > LED, 也就是说 MHL 和 LED 夜间照射均显著降低了叶绿素和类胡萝卜素含量, 其中 LED 照射下降低的程度要显著大于 MHL。与 CK 相比, MHL 和 LED 照射均显著降低了叶绿素 a/b, 而两种光源之间无显著性差异。

**Table 3.** Effects of two landscape lights on photosynthetic pigments content of *E. japonicas*  
**表 3.** 两种景观灯光源对冬青卫矛光合色素含量的影响

处理	叶绿素 a (Chla, mg·g <sup>-1</sup> FM)	叶绿素 b (Chlb, mg·g <sup>-1</sup> FM)	叶绿素 (Chl, mg·g <sup>-1</sup> FM)	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 (Car, mg·g <sup>-1</sup> FM)
MHL	0.36 ± 0.02b	0.11 ± 0.003b	0.48 ± 0.02b	3.23 ± 0.08b	0.09 ± 0.005b
LED	0.28 ± 0.03c	0.08 ± 0.008c	0.36 ± 0.04c	3.27 ± 0.07b	0.07 ± 0.002c
CK	0.58 ± 0.04a	0.16 ± 0.007a	0.73 ± 0.04a	3.73 ± 0.09a	0.13 ± 0.014a

### 3.5. 两种景观灯光源对冬青卫矛光合特性的影响

两种景观灯光源夜间的开放影响了冬青卫矛的光合特性, 使用非直角双曲线模型拟合 Pn-PFD 光响应曲线, 所得的光合参数如表 4。结果显示, MHL 和 LED 照射 2 年后, 冬青卫矛的最大净光合速率和表观量子效率均显著高于 CK, 其中 LED 照射下的最大净光合速率显著高于 MHL。与 CK 相比, MHL 和 LED 照射下植株的光补偿点和光饱和点均显著下降, 且 MHL 的降低程度要显著大于 LED。暗呼吸速率的大小依次为 Rday (LED) > Rday (CK) > Rday (MHL), 3 个处理之间无显著性差异。

**Table 4.** Effects of two landscape lights on photosynthetic parameters of *E. japonicas*  
**表 4.** 两种景观灯光源对冬青卫矛光合参数的影响

处理	最大净光合速率 (Pnmax, μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	光补偿点 (LCP, μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	光饱和点 (LSP, μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	表观量子效率 AQY	暗呼吸速率 (Rday, μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
MHL	5.10 ± 0.94b	27.58 ± 2.34c	260.91 ± 1.74c	0.0127 ± 0.0024a	1.97 ± 0.08a
LED	6.69 ± 0.49a	50.77 ± 2.42b	331.49 ± 1.58b	0.0119 ± 0.0017a	2.08 ± 0.44a
CK	4.28 ± 0.04c	96.28 ± 4.19a	366.38 ± 6.11a	0.0069 ± 0.0007b	2.00 ± 0.04a

## 4. 讨论

景观灯夜间的开放会引起植物发生形态变化, 叶片作为光合和呼吸等生理代谢的主要场所, 对环境变化敏感、且变异性较大[12] [13]。本研究结果显示, MHL 和 LED 夜间照射 2 年后, 均显著降低了冬青卫矛的株高、叶片长和叶面积, 其中 MHL 照射下的叶形指数显著降低, 达到了 1.01 左右, 它的叶片长显著低于 LED 和 CK, 叶片宽显著高于 LED 和 CK, 说明 MHL 照射能够使冬青卫矛的叶面积变小, 且叶片形状趋于圆形。比叶重是指单位叶面积的叶干重, 反映了叶片中物质积累和转移的状况, 是衡量光合性能的形态指标[14], MHL 和 LED 照射均能显著提高冬青卫矛的比叶重, 且相比 CK 分别高出 21.5%、35.9%, 表明两种景观灯夜间照射均能促进冬青卫矛叶片的物质积累, 其中 LED 照射下的物质积累要显著高于 MHL。

两种景观灯光源的发光原理不同, MHL 在发光的同时会释放出一定的热量, LED 则没有热辐射, 因此它们对植物叶面温度的影响也存在差异, 研究表明 MHL 照射下叶面温度高出对照组 2℃, LED 照射仅高出对照组 0.3℃。相对电导率在一定程度上可反映叶片受伤害的程度, 叶片受到的伤害越大, 膜质受损越严重, 相对电导率越高[15]。两种景观灯均显著提高了相对电导率, 表明 MHL 和 LED 夜间照射会对冬青卫矛的叶片膜质造成一定的伤害。叶绿素在光合作用中起着吸收、传递光能的作用[7], 类胡萝卜素则参与光能捕获和光破坏防御两个重要过程[16]。MHL 和 LED 照射 2 年后, 均显著降低了叶绿素和类胡萝卜素含量, 其中 LED 降低的程度要显著大于 MHL。叶绿素 a/b 可作为植物利用弱光能力的判断指标, MHL 和 LED 照射下叶绿素 a/b 显著降低, 也即叶绿素 b 的相对含量增高, 有利于提高植物对弱光的捕获能力, 由此可见 MHL 和 LED 夜间照射能显著提高冬青卫矛对弱光的利用能力[17]。

光响应曲线反映了植物光合速率随光照强度变化的规律[18], 结果表明两种景观灯照射均显著降低了光饱和点、光补偿点, 显著提高了最大净光合速率、表观量子效率, 但对暗呼吸速率没有显著影响。光补偿点的高低直接反映了植物对弱光利用能力的大小, 光补偿点越低, 说明植物对弱光的利用能力越强[19]。试验结果表明 MHL 和 LED 夜间照射均有助于冬青卫矛充分有效地利用弱光并进行较高的光合速率, 这与对叶绿素 a/b 影响的结果一致。相比 LED, MHL 照射能显著提高冬青卫矛对弱光的利用能力。可溶性糖作为植物光合作用的直接产物, 在植物碳代谢中发挥着非常重要的作用[20]。MHL 和 LED 夜间照射均有利于冬青卫矛叶片中可溶性糖的形成, 是光合能力高的表现, 也是造成比叶重显著提高的原因[21], 相比 MHL, LED 能显著提高冬青卫矛的最大净光合速率、可溶性糖含量和比叶重。这可能是因为 LED 的最大光谱能量主要集中在红橙光和蓝光两处, 它们能形成与植物光合作用的形态建成基本相同的光谱, 因此对冬青卫矛的光合能力有显著的提高作用[22] [23]。MHL 光谱能量主要集中在绿光和黄光两处, 而蓝光和红光的光谱较少, 因此在光合有效辐射范围内的能量转化效率较 LED 低[24] [25]。

## 5. 结论

综上所述, MHL 为热光源, 光谱能量主要集中在绿光和黄光两处, LED 为冷光源, 光谱能量主要集中在红橙光和蓝光两处。MHL 夜间照射能显著提高冬青卫矛叶片的叶面温度 2℃, LED 照射仅高出对照组 0.3℃。两种景观灯夜间照射不利于冬青卫矛株高、叶面积的增长以及光合色素的合成, 并对叶片的膜质造成了一定的伤害。MHL 和 LED 照射能显著提高冬青卫矛的可溶性糖含量、比叶重和最大净光合速率, 其中 LED 相比 MHL 效果显著; MHL 和 LED 照射能显著提升冬青卫矛对弱光的利用能力, 其中 MHL 相比 LED 效果显著。不同景观灯对冬青卫矛影响的机理还有待进一步更深入的研究。

## 基金项目

上海市农业农村委员会[沪农科推字(2019)第 1~8 号]; 花博会特色花卉应用关键技术集成与示范。

## 参考文献

- [1] 奉树成, 郭卫珍, 张亚利. 上海城市绿地中景观灯配置对植物的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(1): 57-63.
- [2] 姜言泉, 高尚, 邵新鹏, 杨志强, 王莹. LED、高压钠灯和金属卤化物灯道路照明效果的研究[J]. 照明工程学报, 2015, 26(3): 90-92.
- [3] 吴淑梅, 霍彦明. LED 光源的应用及前景[J]. 灯与照明, 2008, 32(3): 24-26.
- [4] 史滢滢, 石梦雪, 刘峰, 王婷梅, 牟坤. 五个品种北美海棠的生长量与光合特性的比较[J]. 植物学研究, 2020, 9(4): 415-423.
- [5] 龚洪恩. LED 光源对油茶苗生长及其光合相关基因表达的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [6] Naoya, F., Mitsuko, K.Y., Masami, U., Takayanagi, K. and Sase, S. (2002) Effects of Light Quality, Intensity and Duration from Different Artificial Light Sources on the Growth of Petunia (Petunia × hybrida Vilm.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Sciences*, **71**, 509-516. <https://doi.org/10.2503/jshs.71.509>
- [7] 于盈盈, 胡聃, 郭二辉, 肖强, 柳敏, 张小飞. 城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5646-5653.
- [8] 冯玉龙, 曹坤芳, 冯志立, 马玲. 四种热带雨林树种幼苗比叶重、光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 901-910.
- [9] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] Kawaguchi, S., Kitano, T., Ito, K. and Minakata, A. (1991) Sodium Ion Activity and Electrical Conductivity of Poly (Maleic Acid) and Poly(Isobutylene-Alt-Maleic Acid) in Aqueous Salt-Free Solution. *Macromolecules*, **24**, 6335-6339. <https://doi.org/10.1021/ma00023a042>
- [11] 刘利明. 道路照明光源光谱分析与现场检测[J]. 灯与照明, 2015, 39(2): 21-23.
- [12] Vendramini, F., Diaz, S., Gurvich, D.E., Wilson, P.J., Thompson, K. and Hodgson, J.G. (2002) Leaf Traits as Indicators of Resource-Use Strategy in Floras with Succulent Species. *New Phytologist*, **154**, 147-157. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00357.x>
- [13] 吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 李艳锋, 赵红霞, 王媛. 遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6033-6043.
- [14] 王佳淇, 何莹钰, 韦晓桐, 李永强, 杨莉, 陈文荣, 等. LED 补光组合对大棚越橘生长发育的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(6): 1183-1193.
- [15] 韩阳, 邱漫莉, 孟靖, 邢晓琳, 阮亚男. 胁迫对紫花苜蓿抗氧化酶的影响[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 193-199.
- [16] 曹刚, 张国斌, 郁继华, 马彦霞. 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.
- [17] 薛思雷, 王庆成, 孙欣欣, 张命军. 遮荫对水曲柳和蒙古栎光合、生长和生物量分配的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(3): 354-359.
- [18] 吴家森, 宋福强, 陈荣, 卢伟民. 3 种七叶树属植物叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J]. 植物研究, 2008, 28(4): 438-441.
- [19] 吕晓茜, 柴伟国. 低温弱光下不同起源地辣椒幼苗光合特性的比较研究[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(1): 48-53.
- [20] 温佳美. 北京地区典型园林绿化树种幼苗可溶性糖存储机制研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [21] 卫新菊. 施肥对苜蓿开花期叶面积及比叶重的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 50-53.
- [22] 王虹, 王颖, 阎君, 朱为民. 不同比例的红蓝光对黄瓜幼苗生长及光合特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(11): 1879-1885.
- [23] 周成波, 张旭, 崔青青, 李曼, 张文东, 艾希珍, 等. LED 补光光质对小白菜生长及光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1030-1038.
- [24] Hogewoning, S.W., Wientjes, E., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., Croce, R., et al. (2012) Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From Photosystems to Leaves. *Plant Cell*, **24**, 1921-1935. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.097972>
- [25] 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.