

不同光照度对金线莲生长、生理特性和药用成分的影响

牛欢^{1a}, 韦坤华², 徐倩^{1a}, 李明杰^{1a, 1b}, 古力^{1a}, 王建明^{1a}, 张重义^{1a, 1b, ①}

(1. 福建农林大学: a. 农学院, b. 作物遗传育种与综合利用省部共建教育部重点实验室, 福建 福州 350002;
2. 广西壮族自治区药用植物园, 广西 南宁 530023)

摘要:以金线莲品种‘泰宁一号’(*Anoectochilus roxburghii* ‘Taining No. 1’)组培苗为实验材料,在光照度 500、1 500、3 000、4 500 和 6 000 lx 条件下处理 30、60、90、120、150 和 180 d 时分别取样,分析不同光照度对其生长和生理指标以及药用成分含量的影响。结果显示:随处理时间的延长,金线莲的 12 项生长指标、8 项生理指标和 3 类药用成分含量均呈波动的变化趋势。在生长指标中,根长、根直径、株高、茎直径、单株叶片数、叶长、叶宽、单株鲜质量、单株干质量和折干率总体增加,而单株根数和单株茎节数的变化幅度总体较小;在生理指标中,SOD 活性、可溶性总糖含量、叶绿素 a(Chla)含量、叶绿素 b(Chlb)含量和总叶绿素(Chl)含量总体升高,POD 活性总体降低,而 CAT 活性和可溶性蛋白质含量则总体呈“单峰型”变化趋势;在药用成分中,总黄酮和生物碱含量总体升高,且除了光照度 500 lx 处理组外,其他处理组的多糖含量也总体升高。在多数处理组间,根直径、茎直径、单株茎节数、单株叶片数、叶长、叶宽和 SOD 活性总体无显著差异,但 POD 活性和 CAT 活性总体差异显著。在光照度 500 lx 条件下,金线莲的株高、Chla 含量、Chlb 含量和 Chl 含量总体最高,但根长最小;在光照度 6 000 lx 条件下,金线莲的根长、单株鲜质量、单株干质量和折干率总体最高,但 Chla 含量、Chlb 含量和 Chl 含量总体最低;在光照度 3 500 和 4 500 lx 条件下,多糖、总黄酮和生物碱含量均维持在较高水平。处理结束时,各处理组金线莲的根直径、株高、叶长、叶宽、单株鲜质量、单株干质量和总黄酮含量分别增加 100.0%~166.7%、21.6%~33.3%、27.3%~52.6%、12.5%~50.0%、68.5%~134.0%、163.2%~341.2%和 19.7%~50.0%,表明较长时间的光照有利于金线莲这些指标的提升。综合分析结果表明:较低的光照(500 lx)可使金线莲叶片中叶绿素含量增加;较高的光照(6 000 lx)可促进金线莲根伸长和物质积累;而适度的光照(3 000 和 4 500 lx)则可使其药用成分含量增加。综合考虑产量和品质,建议在金线莲栽培过程中采用光照度 3 000~4 500 lx 较为适宜。

关键词: 金线莲; 光照度; 处理时间; 品质; 产量; 药用成分

中图分类号: Q948.112^{+.1}; Q945.78; S682.31 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)01-0026-11
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.01.04

Effects of different illuminances on growth, physiological characteristics, and medicinal components of *Anoectochilus roxburghii* NIU Huan^{1a}, WEI Kunhua², XU Qian^{1a}, LI Mingjie^{1a, 1b}, GU Li^{1a}, WANG Jianming^{1a}, ZHANG Zhongyi^{1a, 1b, ①} (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. Agricultural College, b. Key Laboratory of Crop Genetics and Breeding & Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Medicinal Plants Garden, Nanning 530023, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(1): 26-36, 43

Abstract: Taking tissue culture seedlings of *Anoectochilus roxburghii* ‘Taining No. 1’ as experimental materials, the seedlings treated for 30, 60, 90, 120, 150, and 180 d under illuminances of 500, 1 500, 3 000, 4 500, and 6 000 lx were sampled, effects of different illuminances on its growth and physiological indexes and medicinal component contents were analyzed. The results show that with the extension of treatment time, 12 growth indexes, 8 physiological indexes, and contents of 3 kinds of

收稿日期: 2018-11-12

基金项目: 国家中医药管理局 2015 年行业科研专项(201507002); 国家中药材产业技术体系建设项目(CARS-21-09)

作者简介: 牛欢(1993—),女,蒙古族,河北承德人,硕士研究生,主要从事药用植物生理生态方面的研究。

①通信作者 E-mail: hauzzy@163.com

medicinal components of *A. roxburghii* all show a fluctuation variation tendency. Among growth indexes, root length, root diameter, height, stem diameter, leaf number per plant, leaf length, leaf width, fresh mass per plant, dry mass per plant, and drying rate increase in general, while variation ranges of root number per plant and number of stem node per plant are relatively small in general; among physiological indexes, SOD activity, soluble total sugar content, chlorophyll *a* (Chl*a*) content, chlorophyll *b* (Chl*b*) content, and total chlorophyll (Chl) content increase in general, POD activity decreases in general, while CAT activity and soluble protein content show a “unimodal” variation tendency in general; among medicinal components, contents of total flavonoid and alkaloid increase in general, and polysaccharide content in other treatment groups also increases in general except for illuminance of 500 lx treatment group. There is no significant difference in root diameter, stem diameter, number of stem node per plant, leaf number per plant, leaf length, leaf width, and SOD activity among most treatment groups in general, but POD activity and CAT activity are significantly different among them in general. Under illuminance of 500 lx, height, Chl*a* content, Chl*b* content, and Chl content of *A. roxburghii* are the highest in general, but root length is the smallest; under illuminance of 6 000 lx, root length, fresh mass per plant, dry mass per plant, and drying rate of *A. roxburghii* are the highest in general, but Chl*a* content, Chl*b* content, and Chl content are the lowest in general; under illuminances of 3 500 and 4 500 lx, contents of polysaccharide, total flavonoid, and alkaloid all keep relatively high levels. At the end of treatment, root diameter, height, leaf length, leaf width, fresh mass per plant, dry mass per plant, and total flavonoid content of *A. roxburghii* in each treatment group increase by 100.0%–166.7%, 21.6%–33.3%, 27.3%–52.6%, 12.5%–50.0%, 68.5%–134.0%, 163.2%–341.2%, and 19.7%–50.0%, respectively, indicating relatively long light treatment contributes to the increase of these indexes of *A. roxburghii*. The comprehensive analysis results show that relatively low illumination (500 lx) can increase chlorophyll content in leaf of *A. roxburghii*; relatively high illumination (6 000 lx) promotes the elongation of root and accumulation of substances in *A. roxburghii*; moderate illumination (3 000 and 4 500 lx) can increase its medicinal component contents. Considering yield and quality, it is suggested that illuminance of 3 000–4 500 lx is suitable during the cultivation process of *A. roxburghii*.

Key words: *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl.; illuminance; treatment time; quality; yield; medicinal component

金线莲 [*Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl.] 为典型的阴生植物,在福建各县(市)均有分布,主产于福建武平、明溪、永安和永春等地,这些产地均为福建金线莲药材的道地产区^[1]。金线莲全株入药,具有抗衰老和提高机体免疫等功效^[2];其体内含多糖、黄酮类化合物和生物碱等多种成分,其中多糖和总黄酮含量是金线莲质量技术规范指标^[3]。由于金线莲对生长环境要求严格,种子无胚乳且自然条件下发芽率极低,加之人为过度采收,导致目前金线莲野生资源严重匮乏,为此,研究者对其组织培养和栽培技术进行了研究,且目前金线莲离体保存、炼苗和移栽等全套技术体系已基本建立^[4-5]。但金线莲不同品种、品系及不同类型资源的适宜生境因子尚不明确,相应的配套栽培管理技术尚待进一步完善。

阴生植物的生长对光照变化较为敏感,不同光照强度对金线莲的生长和产量有不同的影响^[4]。陈裕等^[5]的研究结果显示:在金线莲的栽培过程中,若光照过强则叶小、茎短,若光照过弱则根短、茎细长;何

碧珠等^[6]发现,在3 000 lx光照条件下,金线莲的叶面积、茎粗和纤维含量均达到最大,有机物积累量显著增加。目前,有关光照度对金线莲药用活性成分及产量的影响缺乏明确的认识;在金线莲人工栽培中光照强度的调配常依据经验设置,缺乏定性和定量的科学标准。因此,结合形态指标和药用成分含量,明确金线莲栽培过程中适宜的光照条件对于提高金线莲的品质和产量均具有重要意义。

虽然研究者在金线莲光照强度优化方面已经做了大量的研究工作,但由于实际生产中所用的金线莲品种不同以及栽培管理措施和栽培生境条件各异,因此,对金线莲最适光照强度配置没有适宜的参考阈值。此外,对金线莲光照优选是在田间或大棚环境下进行研究^[7],获得的光照参数并不能真实反映金线莲在季节和气候等多重环境因子影响下的最适光照需求,且多数研究仅以金线莲表型性状变化作为筛选其光照强度的依据^[5-6,8],没有综合考虑药用成分和抗逆性等综合指标,获得的金线莲光照参数具有一定

的局限性。

鉴于此,作者以福建广泛种植的金线莲品种‘泰宁一号’(Anoectochilus roxburghii ‘Taining No. 1’)为实验材料,在受控条件下设置不同的光照度,分析光照对金线莲生长状况、生理指标和药用成分含量的影响,以期获取适宜金线莲生产的光照参数,为提高金线莲的产量和品质提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试金线莲品种‘泰宁一号’无菌繁殖苗由福建泰宁县古农堂生物科技有限公司提供。于 2017 年 9 月 6 日,选取生长周期为 6 个月、形态基本一致的组培苗 100 瓶,每瓶约 20 株;培养基为 MS 基本培养基,含有 $7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 琼脂、 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖、 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NAA 和 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 活性炭,pH 5.4。在古农堂泰宁县种植基地大棚内闭瓶炼苗 15 d,之后开瓶炼苗 3 d,使组培苗逐渐适应外界环境。将组培苗取出,用清水洗净根部以去除残存培养基,并用质量分数 0.5% KMnO_4 溶液对根部进行消毒处理,供试。

在福建农林大学中药材 GAP 研究所受控光照室内,挑选长势基本一致、根系无损伤的金线莲幼苗种植于托盘(长 35.5 cm、宽 28.0 cm、高 7.8 cm)中,每个托盘种植 120 株(12 列、10 行,株间距 3 cm),栽培土为林下腐殖土(弱酸性),常规水肥管理。

1.2 方法

1.2.1 光照设置和处理 设置 5 个处理组 T1、T2、T3、T4 和 T5,光照度分别为 500、1 500、3 000、4 500 和 6 000 lx,每处理 3 个托盘(视为 3 个重复);并依据文献[9]设置培养条件,培养温度(24 ± 2) °C,土壤含水量 60%~86%,空气相对湿度 75%~85%。

于 2017 年 9 月 27 日开始,采用可控制光照度的 LED 灯对幼苗进行持续 180 d 的光照处理,处理开始后每隔 30 d 取样 1 次,共取 6 次,用于生长指标、生理指标和药用成分测定。

1.2.2 生长指标测定 每次取样时,采取随机取样法在各处理中挑取 10 株样株,供生长指标测定。

统计各单株的根数、叶片数和茎节数;利用直尺(精度 1 mm)测量株高以及各单株所有根的长度以及所有叶片的长度和宽度;利用游标卡尺(精度 0.1 mm)测量各单株所有根的直径以及距地面 2 cm 处的

茎直径。上述结果均取平均值。

利用电子分析天平[艾德姆衡器(武汉)有限公司,精度 0.1 mg]分别称量各单株的鲜质量以及地上部和地下部的鲜质量。将样株置于电热鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)中,于 105 °C 杀青 30 min,之后于 80 °C 继续干燥 8 h,期间每隔 30 min 称量 1 次,直至达到恒质量;用电子分析天平称量各单株的干质量以及地上部和地下部的干质量。

1.2.3 生理指标测定 每次取样时,采取随机取样法在各处理中挑取 3 株样株,供生理指标测定。

称取完整无损伤叶片 0.5 g,采用比色法^{[10]218-219}测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚比色法^{[10]100-101}测定过氧化物酶(POD)活性;采用分光光度法^[11]测定过氧化氢酶(CAT)活性。

称取完整无损伤叶片 0.5 g,采用考马斯蓝染料结合法^{[10]125-126}测定可溶性蛋白质含量;采用丙酮提取法提取叶绿素,并使用分光光度计比色法^{[10]58-59}测定叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量;采用蒽酮-硫酸比色法^{[10]103-104}测定可溶性总糖含量。

1.2.4 药用成分测定 每次取样时,采取随机取样法在各处理中挑取 10 株样株,将样株放入电热鼓风干燥箱中,于 105 °C 杀青 30 min,之后于 80 °C 烘干至恒质量,冷却后研磨成粉并过 60 目筛,供试。

称取样品粉末 0.05 g,采用苯酚-硫酸法^[12]测定多糖含量;采用超声法^[13]提取总黄酮,并用 T6 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司)测定总黄酮含量;采用超声波法^[14]提取生物碱(45 kHz、80 °C),并用 T6 紫外可见分光光度计测定生物碱含量。

1.3 数据计算和分析

根据公式“根冠比=单株地下部鲜质量/单株地上部鲜质量”计算根冠比;根据公式“折干率=单株干质量/单株鲜质量”计算折干率。

采用 EXCEL 2003 软件对数据进行初步整理,采用 DPS 7.0.5.8 软件进行单因素方差分析。

2 结果和分析

2.1 不同光照度对金线莲生长的影响

2.1.1 根系生长指标的变化 经不同光照度处理 30~180 d 金线莲的单株根数、根长和根直径变化见表 1。结果表明:在不同光照度处理下,金线莲的单

株根数、根长和根直径均呈波动的变化趋势,其中,根长和根直径总体随处理时间的延长而增加,而单株根数的变化幅度总体较小。

从不同处理时间单株根数的变化看,T2(光照度 1 500 lx)处理组的单株根数较多,其次为 T4(光照度 4 500 lx)处理组。其中,在处理 30、150 和 180 d 时,T2 处理组的单株根数显著($P<0.05$)多于其他处理组,且在处理 60~120 d 时其单株根数也较多;在处理 90 和 120 d 时,T4 处理组的单株根数均最多。T1(光

照度 500 lx)处理组的单株根数在处理结束(180 d)时显著少于其他处理组。

从不同处理时间根长的变化看,T5(光照度 6 000 lx)处理组的根长总体最高,其次为 T4 处理组。其中,在处理 90~180 d 时,T5 处理组的根长显著高于其他处理组;在处理 60 d 时,T4 处理组的根长显著高于其他处理组;而在处理 30 d 时,T4 和 T5 处理组的根长显著高于另 3 个处理组。T1 处理组的根长总体低于其他处理组。

表 1 不同光照度处理下金线莲的单株根数、根长和根直径变化($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 1 Changes of root number per plant, root length, and root diameter of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的单株根数 Root number per plant at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 4.4±0.8b | 4.2±0.2ab | 4.3±0.3b | 3.5±0.2c | 4.3±0.6c | 3.8±0.3d |
| T2 | 1 500 | 4.9±0.9a | 4.3±0.7ab | 4.3±0.6b | 4.8±0.3ab | 5.2±0.3a | 6.1±0.6a |
| T3 | 3 000 | 3.5±0.9d | 3.7±0.3c | 4.2±0.3b | 3.8±0.2bc | 4.8±0.3b | 4.6±0.3c |
| T4 | 4 500 | 4.1±0.7bc | 4.2±0.1a | 5.0±0.6a | 5.0±0.3a | 3.8±0.1d | 5.6±0.4b |
| T5 | 6 000 | 4.0±0.6c | 4.0±0.7b | 4.3±0.2b | 4.0±0.1b | 4.0±0.3cd | 4.9±0.2c |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的根长/cm Root length at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 2.5±0.3b | 2.6±0.4c | 2.6±0.3d | 2.9±0.3c | 3.3±0.6c | 3.0±0.3c |
| T2 | 1 500 | 2.6±0.3b | 2.9±0.4b | 2.9±0.3c | 3.0±0.4c | 3.4±0.6c | 3.0±0.4c |
| T3 | 3 000 | 2.6±0.3b | 2.7±0.4c | 3.1±0.4b | 3.2±0.4b | 3.4±0.6c | 3.2±0.4c |
| T4 | 4 500 | 2.9±0.4a | 3.2±0.7a | 3.2±0.4b | 3.3±0.6b | 4.0±0.4b | 3.7±0.4b |
| T5 | 6 000 | 2.9±0.4a | 3.0±0.7b | 3.6±0.5a | 4.3±0.5a | 4.3±0.2a | 4.0±0.5a |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的根直径/mm Root diameter at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.1±0.4a | 2.1±0.4a | 2.5±0.4ab | 1.8±0.2b | 2.2±0.4b | 2.4±0.3a |
| T2 | 1 500 | 0.9±0.1a | 2.1±0.4a | 2.4±0.5ab | 2.2±0.4ab | 2.2±0.3b | 2.4±0.1a |
| T3 | 3 000 | 1.0±0.3a | 2.0±0.4a | 2.3±0.4b | 2.2±0.4ab | 2.3±0.4b | 2.3±0.3a |
| T4 | 4 500 | 1.1±0.3a | 1.9±0.5a | 2.6±0.4a | 2.3±0.3a | 2.3±0.4b | 2.2±0.3a |
| T5 | 6 000 | 1.0±0.4a | 1.8±0.5a | 2.4±0.4ab | 2.2±0.4ab | 2.6±0.3a | 2.3±0.3a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

从不同处理时间根直径的变化看,各处理组的根直径总体无显著差异。其中,在处理 90 d 时,仅 T4 处理组的根直径显著高于 T3(光照度 3 000 lx)处理组;在处理 120 d 时,仅 T4 处理组的根直径显著高于 T1 处理组;在处理 150 d 时,T5 处理组的根直径显著高于其他处理组。

与处理 30 d 时相比,处理结束时各处理组金线莲的根长和根直径分别增加 15.4%~37.9%和 100.0%~166.7%,而单株根数最高增加 36.6%、最低则减少 13.6%,因而,较长时间的光照对金线莲根数和根长的影响总体较小,但有利于根直径的增大。此

外,处理结束时 T4 和 T5 处理组的根长分别较处理 30 d 时增加 27.6%和 37.9%,T3 和 T4 处理组的单株根数分别较处理 30 d 时增加 31.4%和 36.6%,说明较高的光照有利于金线莲根的伸长,而适度的光照则有利于金线莲根数的增加。

2.1.2 株高和茎生长指标的变化 经不同光照度处理 30~180 d 金线莲的株高、茎直径和单株茎节数变化见表 2。结果显示:在不同光照度处理下,金线莲的株高、茎直径和单株茎节数均呈波动的变化趋势,其中,株高和茎直径总体随处理时间的延长而增加,而单株茎节数的变化幅度总体较小。

从不同处理时间株高的变化看, T1 处理组的株高均最高, 且与其他处理组差异显著。从不同处理时间茎直径的变化看, 在处理 60 和 90 d 时, 各处理组的茎直径无显著差异; 在处理 30、150 和 180 d 时, 多数处理组间茎直径无显著差异。其中, 在处理 30 d 时, T1 处理组的茎直径显著低于 T4 和 T5 处理组; 在处理 120 d 时, T5 处理组的茎直径显著高于其他处理组; 在处理 150 d 时, T5 处理组的茎直径显著高于 T2 和 T4 处理组; 在处理 180 d 时, T5 处理组的茎直径显

著高于 T1 和 T4 处理组。从不同处理时间单株茎节数的变化看, 多数处理组间单株茎节数无显著差异, 但在处理 30 d 时, T2 处理组的单株茎节数显著高于 T3、T4 和 T5 处理组; 在处理 60 和 90 d 时, T1 处理组的单株茎节数均显著高于 T3 和 T5 处理组; 在处理 120 d 时, T2 处理组的单株茎节数显著高于 T4 和 T5 处理组; 在处理 150 d 时, T5 处理组的单株茎节数显著低于其他处理组; 在处理 180 d 时, T5 处理组的单株茎节数显著高于其他处理组。

表 2 不同光照度处理下金线莲的株高、茎直径和单株茎节数变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Changes of height, stem diameter, and number of stem node per plant of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treating group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的株高/cm Height at different treatment times | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 14.9±0.2a | 16.8±0.4a | 16.5±0.3a | 18.2±0.1a | 18.6±0.2a | 19.2±0.4a |
| T2 | 1 500 | 12.3±0.4d | 16.0±0.4b | 13.4±0.4c | 16.2±0.2b | 16.2±0.3c | 16.4±0.2c |
| T3 | 3 000 | 12.5±0.4cd | 15.2±0.4d | 14.6±0.4b | 16.1±0.5b | 16.8±0.1b | 15.2±0.2d |
| T4 | 4 500 | 12.7±0.2c | 15.5±0.2c | 14.4±0.2b | 16.3±0.2b | 16.6±0.2b | 16.2±0.3c |
| T5 | 6 000 | 13.2±0.4b | 15.1±0.3d | 12.1±0.2d | 15.1±0.2c | 15.5±0.2d | 17.6±0.3b |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的茎直径/mm Stem diameter at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|----------|----------|----------|-----------|------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 2.1±0.2b | 2.4±0.3a | 2.3±0.1a | 2.2±0.3c | 2.6±0.1ab | 2.4±0.2c |
| T2 | 1 500 | 2.3±0.2ab | 2.6±0.3a | 2.3±0.2a | 2.5±0.3b | 2.4±0.2b | 2.8±0.1ab |
| T3 | 3 000 | 2.3±0.3ab | 2.4±0.3a | 2.5±0.2a | 2.5±0.2b | 2.6±0.4ab | 2.6±0.2abc |
| T4 | 4 500 | 2.5±0.1a | 2.5±0.2a | 2.6±0.3a | 2.5±0.3b | 2.4±0.3b | 2.6±0.1bc |
| T5 | 6 000 | 2.5±0.3a | 2.4±0.2a | 2.4±0.2a | 3.0±0.2a | 2.8±0.1a | 2.9±0.2a |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的单株茎节数 Number of stem node per plant at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 6.3±0.2ab | 6.5±0.3a | 6.2±0.3a | 5.9±0.4ab | 6.6±0.1a | 6.8±0.2b |
| T2 | 1 500 | 6.6±0.2a | 5.9±0.2ab | 5.0±0.1ab | 6.1±0.2a | 6.9±0.1a | 6.8±0.2b |
| T3 | 3 000 | 5.0±0.5c | 5.5±0.4b | 4.4±0.2b | 5.8±0.2ab | 6.7±0.2a | 6.3±0.3c |
| T4 | 4 500 | 5.5±0.4bc | 5.9±0.2ab | 5.8±0.3ab | 5.6±0.3b | 6.9±0.1a | 6.4±0.3c |
| T5 | 6 000 | 5.4±0.5bc | 5.5±0.2b | 4.6±0.2b | 5.7±0.3b | 6.2±0.2b | 7.3±0.4a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

与处理 30 d 时相比, 处理结束时各处理组金线莲的株高、茎直径和单株茎节数分别增加 21.6% ~ 33.3%、4.0% ~ 21.7% 和 3.0% ~ 35.2%, 因而, 较长时间的光照对金线莲株高的影响总体较大。此外, 在处理结束时, T5 处理组的单株茎节数较处理 30 d 时增加 35.2%, 说明较高和较长时间的光照有利于金线莲茎节数的增加。

2.1.3 叶生长指标的变化 经不同光照度处理 30 ~ 180 d 金线莲的单株叶片数、叶长和叶宽变化见表 3。结果显示: 在不同光照度处理下, 金线莲的单株叶片数、叶长和叶宽均呈波动的变化趋势, 且总体随处理

时间的延长而增加。

从不同处理时间单株叶片数、叶长和叶宽的变化看, 各处理组间单株叶片数均无显著差异; 除 T4 处理组的叶长在处理 150 d 时显著高于 T3 处理组外, 各处理组间叶长均无显著差异; 各处理组间叶宽总体也无显著差异, 仅 T3 和 T5 处理组的叶宽在处理 60 d 时显著高于 T4 处理组, T5 处理组的叶宽在处理 120 d 时显著高于 T1 处理组。

与处理 30 d 时相比, 处理结束时各处理组金线莲的单株叶片数、叶长和叶宽分别增加 3.3% ~ 25.9%、27.3% ~ 52.6% 和 12.5% ~ 50.0%, 因而, 较长

表 3 不同光照度处理下金线莲的单株叶片数、叶长和叶宽变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 3 Changes of leaf number per plant, leaf length, and leaf width of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的单株叶片数 Leaf number per plant at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 6.1±0.5a | 5.9±0.4a | 6.4±0.6a | 6.3±0.6a | 6.7±0.5a | 6.3±0.3a |
| T2 | 1 500 | 6.2±0.6a | 6.5±0.4a | 6.6±0.2a | 6.8±0.2a | 6.9±0.5a | 6.9±0.5a |
| T3 | 3 000 | 5.8±0.3a | 6.1±0.6a | 6.3±0.7a | 7.0±0.2a | 7.2±0.5a | 7.3±0.5a |
| T4 | 4 500 | 6.6±0.3a | 6.5±0.2a | 7.2±0.2a | 6.7±0.2a | 7.4±0.2a | 7.2±0.6a |
| T5 | 6 000 | 6.0±0.5a | 6.3±0.3a | 7.3±0.2a | 7.3±0.3a | 6.6±0.6a | 7.4±0.3a |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的叶长/cm Leaf length at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.9±0.3a | 2.3±0.3a | 2.8±0.4a | 2.5±0.5a | 2.5±0.3ab | 2.9±0.3a |
| T2 | 1 500 | 2.1±0.3a | 2.2±0.3a | 2.7±0.6a | 2.6±0.6a | 2.5±0.3ab | 3.1±0.6a |
| T3 | 3 000 | 2.2±0.5a | 2.2±0.5a | 2.5±0.6a | 2.5±0.4a | 2.2±0.5b | 2.8±0.5a |
| T4 | 4 500 | 2.1±0.4a | 2.1±0.4a | 2.4±0.2a | 2.6±0.5a | 2.8±0.5a | 2.9±0.5a |
| T5 | 6 000 | 2.1±0.6a | 2.3±0.6a | 2.5±0.5a | 2.4±0.4a | 2.5±0.4ab | 2.8±0.3a |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的叶宽/cm Leaf width at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.4±0.2a | 1.7±0.3ab | 1.8±0.2a | 1.8±0.3b | 1.8±0.2a | 2.0±0.4a |
| T2 | 1 500 | 1.4±0.3a | 1.7±0.2ab | 1.9±0.3a | 1.9±0.4ab | 2.0±0.3a | 2.1±0.3a |
| T3 | 3 000 | 1.4±0.3a | 1.8±0.3a | 1.8±0.2a | 1.9±0.3ab | 1.8±0.3a | 2.1±0.3a |
| T4 | 4 500 | 1.6±0.2a | 1.5±0.2b | 1.9±0.3a | 1.9±0.2ab | 2.0±0.3a | 1.8±0.2a |
| T5 | 6 000 | 1.6±0.3a | 1.8±0.4a | 1.8±0.3a | 2.1±0.3a | 1.9±0.2a | 2.1±0.3a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

时间的光照对金线莲叶长和叶宽的影响总体较大。此外,在处理结束时,T3处理组的单株叶片数较处理30 d时增加25.9%,说明适度的光照有利于金线莲叶片数的增加。

2.1.4 植株质量和折干率的变化 经不同光照度处理30~180 d金线莲的单株鲜质量、单株干质量和折干率变化见表4。结果显示:在不同光照度处理下,金线莲的单株鲜质量、单株干质量和折干率总体随处理时间的延长而增加,且各处理组间这3项指标总体差异显著,其中,单株鲜质量和单株干质量在处理90 d后增幅加大。

从不同处理时间单株鲜质量和单株干质量的变化看,在处理60~180 d时,T5处理组的这2项指标总体最高且均与T1、T2和T3处理组差异显著,在多数时间与T4处理组也差异显著。从不同处理时间折干率的变化看,T5处理组的折干率总体最高且均与T1、T2和T3处理组差异显著,在处理90、150和180 d时与T4处理组也差异显著。

与处理30 d时相比,处理结束时各处理组金线莲的单株鲜质量、单株干质量和折干率分别增加68.5%~134.0%、163.2%~341.2%和33.3%~80.0%,

说明较长时间的光照有利于金线莲单株鲜质量和单株干质量的增加,其中单株干质量的增幅更大,并因此使其折干率增加。此外,在处理结束时T5处理组的单株鲜质量、单株干质量和折干率的增幅较其他处理组大,说明较高的光照有利于金线莲的物质积累。

2.2 不同光照度对金线莲叶片生理指标的影响

2.2.1 抗氧化酶活性的变化 经不同光照度处理30~180 d金线莲叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化见表5。结果显示:在不同光照度处理下,金线莲叶片中SOD、POD和CAT活性均呈波动的变化趋势,其中,随处理时间的延长,SOD活性总体升高,POD活性总体降低,CAT活性总体呈“单峰型”变化趋势。

从不同处理时间SOD活性的变化看,在处理60 d时,各处理组的SOD活性开始急速升高,其中,T1(光照度500 lx)和T3(光照度3 000 lx)处理组的SOD活性分别在处理120和180 d时最高,其他处理组的SOD活性均在处理150 d时最高;总体上看,多数处理组间SOD活性无显著差异。

从不同处理时间POD活性的变化看,在处理30~90 d时,各处理组的POD活性总体较高,之后则

表 4 不同光照度处理下金钱莲的单株鲜质量和干质量以及折干率变化($\bar{x}\pm SE$)¹⁾Table 4 Changes of fresh mass and dry mass per plant, and drying rate of *Anoetochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{x}\pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的单株鲜质量/g Fresh mass per plant at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|------------|------------|-------------|------------|------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.44±0.07d | 1.44±0.06c | 1.49±0.05d | 2.42±0.11c | 2.71±0.12e | 2.88±0.15b |
| T2 | 1 500 | 1.54±0.05b | 1.57±0.05b | 1.47±0.06e | 2.31±0.13d | 3.12±0.16b | 2.88±0.15b |
| T3 | 3 000 | 1.37±0.06e | 1.40±0.06d | 1.58±0.06c | 2.31±0.12d | 2.89±0.15d | 2.54±0.13d |
| T4 | 4 500 | 1.62±0.05a | 1.62±0.07a | 1.71±0.07b | 2.49±0.11b | 3.03±0.17c | 2.73±0.16c |
| T5 | 6 000 | 1.50±0.05c | 1.61±0.07a | 1.77±0.06a | 2.97±0.13a | 3.25±0.15a | 3.51±0.16a |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的单株干质量/g Dry mass per plant at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 0.13±0.02d | 0.14±0.01c | 0.13±0.00d | 0.22±0.02d | 0.34±0.01d | 0.35±0.01d |
| T2 | 1 500 | 0.17±0.01b | 0.17±0.00b | 0.17±0.01e | 0.30±0.01bc | 0.54±0.02b | 0.50±0.02b |
| T3 | 3 000 | 0.14±0.00c | 0.14±0.00c | 0.22±0.01c | 0.29±0.02c | 0.51±0.02c | 0.47±0.01c |
| T4 | 4 500 | 0.19±0.01a | 0.18±0.01a | 0.23±0.02b | 0.36±0.02b | 0.60±0.02a | 0.50±0.01b |
| T5 | 6 000 | 0.17±0.02b | 0.18±0.01a | 0.26±0.02a | 0.44±0.03a | 0.60±0.02a | 0.75±0.03a |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的折干率 Drying rate at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 0.09±0.00d | 0.10±0.00c | 0.08±0.00d | 0.09±0.00d | 0.12±0.00d | 0.12±0.00d |
| T2 | 1 500 | 0.11±0.00b | 0.11±0.00b | 0.12±0.01c | 0.13±0.01b | 0.17±0.01c | 0.17±0.01c |
| T3 | 3 000 | 0.10±0.00c | 0.10±0.00c | 0.14±0.01b | 0.12±0.00c | 0.18±0.01b | 0.18±0.01b |
| T4 | 4 500 | 0.12±0.01a | 0.12±0.01a | 0.14±0.01b | 0.15±0.02a | 0.18±0.02b | 0.19±0.02b |
| T5 | 6 000 | 0.12±0.01a | 0.12±0.01a | 0.15±0.01a | 0.15±0.01a | 0.20±0.03a | 0.21±0.02a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

表 5 不同光照度处理下金钱莲叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化($\bar{x}\pm SE$)¹⁾Table 5 Changes of activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) in leaf of *Anoetochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{x}\pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的 SOD 活性/(U · mg ⁻¹) SOD activity at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 66.7±8.6bc | 120.4±12.2c | 112.1±7.9ab | 138.0±8.4ab | 134.2±6.1bc | 133.6±11.4a |
| T2 | 1 500 | 54.1±7.1c | 128.5±14.1bc | 96.9±6.1b | 86.0±5.1c | 203.9±17.2ab | 136.6±10.1a |
| T3 | 3 000 | 92.3±5.9a | 161.5±9.1a | 150.3±6.3ab | 128.7±9.2b | 83.7±6.3c | 173.5±11.8a |
| T4 | 4 500 | 94.6±8.3a | 154.1±8.3ab | 171.9±9.2a | 150.2±8.8a | 204.1±18.1ab | 151.5±12.2a |
| T5 | 6 000 | 80.0±7.1ab | 137.6±6.2abc | 120.2±8.0ab | 143.3±8.1ab | 228.1±17.1a | 183.1±13.3a |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的 POD 活性/(U · g ⁻¹ · min ⁻¹) POD activity at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 167.3±14.2c | 164.9±7.5d | 163.2±8.5d | 168.0±6.4b | 258.1±15.9a | 109.4±6.4b |
| T2 | 1 500 | 361.8±16.0a | 201.2±12.9c | 185.5±9.8c | 204.4±9.1a | 107.4±7.2bc | 128.0±9.1b |
| T3 | 3 000 | 274.1±17.1b | 296.7±16.1a | 307.4±15.8a | 77.9±7.4d | 84.6±6.4cd | 251.7±12.4a |
| T4 | 4 500 | 335.0±14.4a | 207.2±14.2c | 198.5±8.4c | 100.2±7.4c | 145.2±4.1b | 233.7±13.0a |
| T5 | 6 000 | 256.7±11.8b | 258.1±12.3b | 265.1±15.1b | 159.2±5.1b | 49.3±7.2d | 39.6±5.0c |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的 CAT 活性/(U · g ⁻¹ · min ⁻¹) CAT activity at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 92.2±6.9bc | 110.6±4.3a | 166.0±5.4a | 114.9±8.8b | 80.2±6.1b | 60.2±4.2ab |
| T2 | 1 500 | 97.4±6.0ab | 92.3±8.2bc | 162.9±6.3a | 106.8±8.4c | 65.0±5.3d | 45.2±6.1c |
| T3 | 3 000 | 80.8±6.4cd | 86.2±3.0bc | 160.8±6.1a | 93.8±6.4e | 67.1±5.1cd | 45.8±4.9c |
| T4 | 4 500 | 68.8±6.3d | 99.6±8.8ab | 132.5±8.9a | 101.8±6.3d | 71.6±6.1c | 52.7±6.2bc |
| T5 | 6 000 | 110.3±7.4a | 83.0±7.1c | 159.8±6.1a | 126.1±7.8a | 87.1±4.3a | 70.3±7.0a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

总体下降。其中, T2(光照度 1 500 lx)和 T4(光照度 4 500 lx)处理组的 POD 活性在处理 30 d 时最高, T3 和 T5(光照度 6 000 lx)处理组的 POD 活性在处理 90 d 时最高, T1 处理组的 POD 活性在处理 150 d 时最高;总体上看,多数处理组间 POD 活性差异显著。

从不同处理时间 CAT 活性的变化看, T1、T2、T3、T4 和 T5 处理组的 CAT 活性均在处理 90 d 时最高, 分别较处理 30 d 时增加 80.0%、67.2%、99.0%、92.6%和 44.9%, 但各处理组间 CAT 活性的差异不显著。在其他时间, 各处理组间 CAT 活性总体差异显著, 其中 T5 处理组的 CAT 活性在处理 30、120、150 和 180 d 时均最高, 且总体与其他处理组差异显著。

与处理 30 d 时相比, 处理结束(180 d)时 T1、T2、T3、T4 和 T5 处理组的 SOD 活性分别增加 100.3%、152.5%、88.0%、60.1%和 128.9%, POD 活性分别减少 34.6%、64.6%、8.2%、30.2%和 84.6%, CAT 活性分别减少 34.7%、53.6%、43.3%、23.4%和 36.3%, 表明金线莲叶片内的不同抗氧化酶对光照度变化的敏感性存在一定差异。

2.2.2 可溶性蛋白质和可溶性总糖含量的变化 经不同光照度处理 30~180 d 金线莲叶片中可溶性蛋白质和可溶性总糖含量的变化见表 6。结果显示:在不同光照度处理下, 金线莲叶片中可溶性蛋白质和可溶性总糖含量均呈波动的变化趋势, 其中, 随处理时间的延长, 可溶性蛋白质含量总体呈“单峰型”变化趋势, 而可溶性总糖含量总体升高。

从不同处理时间可溶性蛋白质含量的变化看, 在

处理 30~90 d 时, 各处理组的可溶性蛋白质含量总体较高, 之后则总体下降; 其中, T1、T2、T3 和 T4 处理组的可溶性蛋白质含量均在处理 90 d 时最高, 分别较处理 30 d 时增加 58.0%、59.0%、12.4%和 20.7%, 但各处理组间无显著差异; 而 T5 处理组的可溶性蛋白质含量则在处理 60 d 时最高, 较处理 30 d 时增加 24.2%, 且显著高于 T1、T2 和 T4 处理组。

从不同处理时间可溶性总糖含量的变化看, 在处理 60 d 时, T1 处理组的可溶性总糖含量显著低于 T3、T4 和 T5 处理组; 在处理 90 d 时, T1 处理组的可溶性总糖含量显著低于 T3 和 T4 处理组; 在处理 150 d 时, T1 处理组的可溶性总糖含量显著低于 T2、T3 和 T4 处理组; 在处理 180 d 时, T1 处理组的可溶性总糖含量显著低于 T3 和 T5 处理组。总体上看, T3、T4 和 T5 处理组的可溶性总糖含量高于 T1 和 T2 处理组。

与处理 30 d 时相比, 处理结束时 T1 和 T5 处理组的可溶性蛋白质含量分别增加 21.8%和 17.1%, T2、T3 和 T4 处理组的可溶性蛋白质含量则分别减少 42.9%、5.4%和 9.5%; T1、T3 和 T5 处理组的可溶性总糖含量分别增加 3.1%、18.1%和 11.5%, T2 和 T4 处理组的可溶性总糖含量则分别减少 3.9%和 4.1%, 说明较长时间的光照对金线莲叶片可溶性蛋白质的合成和积累有较大影响。此外, 处理结束时 T5 处理组的可溶性蛋白质和可溶性总糖含量分别较处理 30 d 时增加 17.1%和 11.5%, 说明较高的光照有利于金线莲叶片中可溶性蛋白质和可溶性总糖的积累。

表 6 不同光照度处理下金线莲叶片中可溶性蛋白质和可溶性总糖含量的变化 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 6 Changes of contents of soluble protein and soluble total sugar in leaf of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的可溶性蛋白质含量/(mg · g ⁻¹) Soluble protein content at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|--------------|---------------|-------------|--------------|--------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 2.38±0.21c | 3.10±0.36b | 3.76±0.43a | 2.37±0.12c | 2.87±0.12b | 2.90±0.17c |
| T2 | 1 500 | 3.10±0.12b | 2.94±0.56b | 4.93±0.30a | 2.69±0.30b | 2.62±0.16b | 1.77±0.18d |
| T3 | 3 000 | 3.70±0.10a | 3.40±0.21ab | 4.16±0.41a | 3.09±0.13a | 2.81±0.10b | 3.50±0.12ab |
| T4 | 4 500 | 3.58±0.13ab | 2.98±0.57b | 4.32±0.20a | 2.81±0.11b | 3.22±0.10a | 3.24±0.10bc |
| T5 | 6 000 | 3.22±0.19bc | 4.00±0.12a | 3.86±0.27a | 3.12±0.30a | 2.68±0.10b | 3.77±0.11a |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的可溶性总糖含量/(mg · g ⁻¹) Soluble total sugar at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 18.67±0.52a | 12.86±0.22b | 17.53±0.49c | 15.93±0.58a | 18.45±0.67b | 19.25±0.62c |
| T2 | 1 500 | 19.58±0.79a | 14.53±0.14ab | 20.25±0.42abc | 17.15±0.31a | 21.14±0.52a | 18.81±0.70c |
| T3 | 3 000 | 19.45±0.54a | 17.41±0.12a | 23.83±0.60a | 19.45±0.66a | 21.89±0.34a | 22.98±0.54ab |
| T4 | 4 500 | 22.44±0.41a | 17.39±0.23a | 21.75±0.34ab | 15.80±0.58a | 21.93±0.60a | 21.51±0.62bc |
| T5 | 6 000 | 22.03±0.40a | 18.00±0.14a | 18.63±0.39bc | 17.81±0.33a | 20.74±0.32ab | 24.56±0.71a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2.2.3 叶绿素含量的变化 经不同光照度处理 30~180 d 金线莲叶片中叶绿素 *a* (Chl*a*)、叶绿素 *b* (Chl*b*) 和总叶绿素 (Chl) 含量的变化见表 7。结果显示:在不同光照度处理下,各处理组的金线莲叶片中 Chl*a*、Chl*b* 和 Chl 含量均呈小幅波动的变化趋势,且随处理时间的延长总体升高,其中,除 T1 处理组外,其他处理组的 Chl*a*、Chl*b* 和 Chl 含量在处理 90 d 时均最低。

从不同处理时间 Chl*a*、Chl*b* 和 Chl 含量的变化看,在处理 60~180 d 时,T1 处理组的这 3 项指标总体均最高,且与多数处理组间差异显著。而 T5 处理组的这 3 项指标在处理 30~180 d 时总体最低。T1、T2 和 T3 处理组的这 3 项指标总体高于 T4 和 T5 处

理组。

与处理 30 d 时相比,处理结束时 T1、T2、T4 和 T5 处理组的 Chl*a* 含量分别增加 92.1%、39.2%、73.8%和 95.6%,Chl*b* 含量分别增加 70.0%、19.4%、34.6%和 43.5%,Chl 含量分别增加 86.8%、35.3%、66.2%和 84.2%,而 T3 处理组的 Chl*a* 和 Chl 含量分别减少 10.1%和 4.0%,其 Chl*b* 含量则增加 23.1%,表明较长时间的光照有利于金线莲叶片叶绿素的合成和积累,尤其对 Chl*a* 含量的提升作用明显。此外,处理结束时 T1 处理组的 Chl*a*、Chl*b* 和 Chl 含量分别较处理 30 d 时增加 92.1%、70.0%和 86.8%,增幅均较大,说明适度的光照有利于金线莲叶片中叶绿素的合成和积累。

表 7 不同光照度条件下金线莲叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 7 Changes of contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and total chlorophyll in leaf of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的叶绿素 <i>a</i> 含量/(mg · g ⁻¹) Chlorophyll <i>a</i> content at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.14±0.04b | 1.80±0.07a | 1.30±0.04a | 1.46±0.01a | 1.75±0.03b | 2.19±0.05a |
| T2 | 1 500 | 1.48±0.03a | 1.25±0.04b | 0.93±0.02b | 1.27±0.01b | 1.76±0.01b | 2.06±0.04ab |
| T3 | 3 000 | 1.58±0.03a | 1.26±0.04b | 0.93±0.03b | 1.15±0.02bc | 1.97±0.01a | 1.42±0.01d |
| T4 | 4 500 | 1.07±0.04bc | 1.14±0.04bc | 0.85±0.01b | 1.10±0.01c | 1.68±0.01b | 1.86±0.02bc |
| T5 | 6 000 | 0.91±0.02c | 1.03±0.02c | 0.76±0.02b | 0.95±0.02d | 1.55±0.02c | 1.78±0.01c |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的叶绿素 <i>b</i> 含量/(mg · g ⁻¹) Chlorophyll <i>b</i> content at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 0.30±0.01b | 0.46±0.03a | 0.36±0.02a | 0.54±0.03a | 0.55±0.02a | 0.51±0.02a |
| T2 | 1 500 | 0.36±0.01a | 0.36±0.02b | 0.27±0.02b | 0.51±0.02ab | 0.40±0.02b | 0.43±0.02b |
| T3 | 3 000 | 0.39±0.02a | 0.37±0.01b | 0.23±0.01bc | 0.47±0.02b | 0.47±0.03ab | 0.48±0.03ab |
| T4 | 4 500 | 0.26±0.01bc | 0.32±0.02bc | 0.22±0.01bc | 0.38±0.03c | 0.48±0.02ab | 0.35±0.02c |
| T5 | 6 000 | 0.23±0.01c | 0.25±0.00c | 0.21±0.01c | 0.32±0.01d | 0.40±0.03b | 0.33±0.02c |
| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的总叶绿素含量/(mg · g ⁻¹) Total chlorophyll content at different treatment times | | | | | |
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 1.44±0.04b | 2.26±0.06a | 1.67±0.04a | 2.01±0.05a | 2.30±0.06ab | 2.69±0.06a |
| T2 | 1 500 | 1.84±0.05a | 1.61±0.04b | 1.20±0.02b | 1.78±0.05b | 2.16±0.04b | 2.49±0.06b |
| T3 | 3 000 | 1.98±0.07a | 1.63±0.04b | 1.16±0.04bc | 1.62±0.03bc | 2.44±0.04a | 1.90±0.05d |
| T4 | 4 500 | 1.33±0.04bc | 1.45±0.04bc | 1.07±0.02bc | 1.47±0.04c | 2.16±0.06b | 2.21±0.05c |
| T5 | 6 000 | 1.14±0.02c | 1.28±0.03c | 0.97±0.02c | 1.27±0.02d | 1.94±0.04c | 2.10±0.04c |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2.3 不同光照度对金线莲药用成分的影响

经不同光照度处理 30~180 d 金线莲中多糖、总黄酮和生物碱含量的变化见表 8。结果显示:在不同光照处理下,金线莲中多糖、总黄酮和生物碱含量均呈波动的变化趋势;其中,随处理时间的延长,总黄酮和生物碱含量总体升高,除 T1 (光照度 500 lx) 处理组外,其他处理组的多糖含量也总体升高。

从不同处理时间多糖含量的变化看,在处理 30 d 时,T1 和 T4 (光照度 4 500 lx) 处理组的多糖含量显著高于其他处理组,但此后 T1 处理组的多糖含量均不同程度降低,在处理 120~180 d 时较低;而其他处理组的多糖含量均不同程度升高,其中 T4 处理组的多糖含量在处理 30、60、90、150 和 180 d 时均最高并与多数处理组间差异显著,在处理 120 d 时也仅低于

T3(光照度 3 000 lx)处理组但无显著差异。总体上看,T4 处理组的多糖含量维持在较高水平。

从不同处理时间总黄酮含量的变化看,在处理 30、90 和 150 d 时,各处理组的总黄酮含量无显著差异;在处理 60 d 时,仅 T1 和 T4 处理组的总黄酮含量

显著高于 T2(光照度 1 500 lx)处理组;在处理 120 d 时,T3 处理组的总黄酮含量显著高于 T1、T2 和 T4 处理组;在处理 180 d 时,T3 处理组的总黄酮含量显著高于 T1、T4 和 T5(光照度 6 000 lx)处理组。总体上看,T3 处理组的总黄酮含量维持在较高水平。

表 8 不同光照度处理下对金线莲中多糖、总黄酮和生物碱含量的变化($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 8 Changes of contents of polysaccharide, total flavonoid, and alkaloid in *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. under different illuminance treatments ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的多糖含量/(mg·g ⁻¹) Polysaccharide content at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 16.2±0.2a | 11.5±0.2c | 12.5±0.2d | 11.3±0.3b | 11.7±0.3c | 13.9±0.2c |
| T2 | 1 500 | 13.7±0.2b | 11.1±0.4c | 14.7±0.3c | 12.1±0.4b | 14.0±0.4b | 15.0±0.3bc |
| T3 | 3 000 | 13.9±0.3b | 12.9±0.3b | 10.7±0.2e | 15.2±0.3a | 14.8±0.4b | 15.9±0.2ab |
| T4 | 4 500 | 16.8±0.3a | 15.0±0.3a | 18.2±0.3a | 14.5±0.2a | 16.7±0.3a | 17.2±0.4a |
| T5 | 6 000 | 13.3±0.2b | 13.3±0.2b | 16.6±0.2b | 12.3±0.3b | 13.9±0.2b | 15.1±0.4bc |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的总黄酮含量/(mg·g ⁻¹) Total flavonoid content at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|---|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 17.8±0.4a | 20.0±0.4a | 19.5±0.3a | 19.3±0.3c | 23.7±0.3a | 21.3±0.2c |
| T2 | 1 500 | 17.4±0.5a | 17.6±0.3b | 19.5±0.5a | 18.8±0.4c | 22.8±0.3a | 24.8±0.2ab |
| T3 | 3 000 | 17.6±0.4a | 18.9±0.2ab | 20.2±0.3a | 24.6±0.5a | 24.7±0.4a | 26.4±0.4a |
| T4 | 4 500 | 17.5±0.3a | 20.1±0.3a | 19.8±0.4a | 21.5±0.4bc | 24.5±0.3a | 24.3±0.4b |
| T5 | 6 000 | 17.9±0.3a | 18.8±0.4ab | 20.0±0.3a | 23.0±0.4ab | 22.3±0.3a | 22.3±0.3c |

| 处理组 Treatment group | 光照度/lx Illuminance | 不同处理时间的生物碱含量/(mg·g ⁻¹) Alkaloid content at different treatment times | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 30 d | 60 d | 90 d | 120 d | 150 d | 180 d |
| T1 | 500 | 15.5±0.2c | 15.3±0.3a | 14.6±0.4bc | 16.9±0.5b | 17.3±0.5b | 18.6±0.3a |
| T2 | 1 500 | 16.2±0.3b | 15.4±0.2a | 14.3±0.2c | 16.5±0.3c | 16.9±0.4b | 18.5±0.4a |
| T3 | 3 000 | 16.3±0.5b | 15.3±0.2a | 14.8±0.3b | 17.5±0.4a | 19.2±0.4a | 18.7±0.5a |
| T4 | 4 500 | 17.0±0.3a | 15.3±0.3a | 15.3±0.3a | 17.6±0.3a | 19.4±0.3a | 18.7±0.3a |
| T5 | 6 000 | 16.8±0.2a | 15.6±0.3a | 14.4±0.5c | 16.6±0.2c | 17.2±0.4b | 18.6±0.3a |

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

从不同处理时间生物碱含量的变化看,在处理 60 和 180 d 时,各处理组的生物碱含量无显著差异;在处理 30 d 时,T4 和 T5 处理组的生物碱含量差异不显著,但显著高于其他处理组;在处理 90 d 时,T4 处理组的生物碱含量最高,且显著高于其他处理组;在处理 120 和 150 d 时,T3 和 T4 处理组的生物碱含量无显著差异,但显著高于其他处理组。总体上看,T3 和 T4 处理组的生物碱含量维持在较高水平。

与处理 30 d 时相比,处理结束(180 d)时各处理组金线莲的总黄酮和生物碱含量分别增加 19.7%~50.0%和 10.0%~20.0%,T2、T3、T4 和 T5 处理组的多糖含量增加 2.4%~14.4%,仅 T1 处理组的多糖含量降低 14.2%,表明较长时间的光照可以使金线莲叶片中总黄酮含量较大幅度增加。此外,处理结束时 T3 处理组的多糖、总黄酮和生物碱含量分别较处理

30 d 时增加 14.4%、50.0%和 14.7%,增幅均较大,说明适度的光照有利于金线莲叶片中各药用成分的合成和积累。

3 讨论和结论

以金线莲为代表的全草类、阴生药用植物生产明显有别于大多数喜光药用植物的生产,其产量构成更多来源于全株的营养器官。金线莲的叶片、茎及地下肉质根是构成其产量的主体部分,特别是其叶片占全株的比例较大,因此,合理调控金线莲株型、促进茎叶长势及增加叶片数量有利于提高金线莲的产量和品质。相关研究结果^[8]表明:光照是影响和调控金线莲产量构成的核心支配因子。陈黎明等^[15]发现,在三七[*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen ex C.

Chow et W. G. Huang]的栽培过程中,随光照强度的增加,其植株茎部矮化、变粗,适宜的光照强度可以显著促进三七地上部干物质的积累。本研究中,经 500 lx 光照处理后金线莲的株高较高,但其他的产量构成因子(如单株干质量)较低;经 4 500 lx 光照处理后金线莲的单株叶片数较多、叶片较长,单株鲜质量、单株干质量和折干率均较高;在 6 000 lx 光照条件下处理 120~180 d,金线莲的根长、茎直径、单株鲜质量和单株干质量均明显高于其他处理组,但其叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和总叶绿素含量均明显低于其他处理组;在实验设置的 5 组光照条件下,金线莲的根直径、茎直径、单株茎节数、单株叶片数、叶长和叶宽总体差异不明显。从上述结果中可以看出:在金线莲的生长过程中,不同器官生长和发育适宜的光照度并不一致,且其各产量构成指标对光照度变化的敏感性存在差异,其中,株高对光照度变化的响应较明显。因此,在进行金线莲生产设施配置时,需要综合考虑光照强度对其不同器官生长发育的影响。

目前,金线莲栽培所用种苗均为组培苗,从组培苗移栽到栽培大棚或林下环境中需要经历长时间、复杂的炼苗过程。特别是林下栽培的环境较为恶劣,环境胁迫因子较多,且金线莲的肉质根系及其生存所需要的过饱和湿度环境往往会使环境中的病原菌大量增殖^[16],导致金线莲幼苗在林下等仿野生环境中难以生存,植株成活率较低。在各类逆境诱导因子中,光照能够有效提升植株体内抗逆生理效应^[17]。在弱光条件下,因抗逆性机制的差异植物体内保护酶等相关抗逆性指标会发生不同程度变化^[18]。本研究结果显示:金线莲体内不同的抗氧化酶对光照度变化的响应时间各异,SOD 和 POD 活性的变幅在处理 150 d 时较大,CAT 活性则在处理 90 d 时大幅度升高;此外,在多数时间各处理组间 POD 和 CAT 活性总体差异显著,在处理 150 和 180 d 时,光照度 6 000 lx 处理组的 SOD 和 CAT 活性高于其他处理组,说明光照度增大可激发金线莲体内的自我保护系统。因此,在阴生植物的栽培过程中,可对光照条件进行合理调控以促进阴生植物抗逆能力的提高。

光照不仅对阴生植物的形态结构塑造具有重要的调控作用,对其内在的生理生化效应和次生代谢产物合成也有明显的诱导效应^[19]。郑连金等^[20]认为,光照强度过高可抑制金线莲总黄酮的积累,说明过高

的光照强度不利于金线莲部分药用成分的积累。本研究结果显示:在光照度 500 lx 的条件下处理 60~180 d,金线莲的多糖含量均较低;而在光照度 3 000 lx 的条件下处理 180 d,金线莲的多糖、总黄酮和生物碱含量分别增加 14.4%、50.0% 和 14.7%,增幅均较大;此外,光照度 4 500 lx 有利于金线莲多糖的积累,光照度 3 000 lx 有利于金线莲总黄酮的积累,光照度 3 000 和 4 500 lx 对金线莲生物碱含量均有一定的提升作用,表明金线莲的不同药用成分对生境中光照强度变化的敏感性存在明显差异,适度的光照有利于金线莲体内多糖、总黄酮和生物碱的积累。因而,在实际生产过程中,应充分考虑光照对各类药用成分代谢的作用机制,以期定向筛选出适宜的光照条件。

综合分析结果表明:光照度 500 lx 有利于金线莲幼苗株高的增加,但不利于其物质积累;光照度 6 000 lx 对金线莲根长等生长指标有促进作用,但对叶片中叶绿素的积累有明显的抑制作用;在光照度 3 000 和 4 500 lx 的条件下,金线莲植株的株高适宜、叶片数较多、叶片较长,且可使其物质积累量增加,并能促进多糖、总黄酮和生物碱的积累,在维持一定生长量的同时能提升金线莲的药用品质,因此,在金线莲实际栽培过程中采用光照度 3 000~4 500 lx 较为适宜。

参考文献:

- [1] 蔡文燕,肖华山,范秀珍.金线莲研究进展(综述)[J].亚热带植物科学,2003,32(3):68-72.
- [2] 韩武章,陈小玲,黄阿凤.金线莲研究现状及展望[J].福建热作科技,2015,40(1):54-59.
- [3] 林平,华碧春,黄智锋.金线莲的质量标准探讨[J].福建中医药大学学报,2012,22(5):40-42.
- [4] 吴江,马桂莲,冯初国,等.不同栽培模式对金线莲产量及有效成分的影响[J].林业科技,2015,40(4):24-25.
- [5] 陈裕,林坤瑞.金线莲生长发育与光照强度关系[J].福建热作科技,1996,21(4):22-23.
- [6] 何碧珠,邹双全,刘江枫,等.光照强度与栽培模式对金线莲生长及品质影响[J].中国现代中药,2015,17(12):1292-1295.
- [7] 陆祖正,唐君海,唐利球,等.低光照对金线莲组培苗生长的影响[J].中国热带农业,2013(2):56-58.
- [8] 魏翠华,谢宇,秦建彬,等.光照强度对金线莲生长及产量的影响[J].北方园艺,2015(12):139-141.
- [9] 甘金佳,蒋水元,毛玲莉,等.金线莲林下栽培基质的筛选[J].北方园艺,2017(8):155-159.
- [10] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].4版.北京:高等教育出版社,2009.

- [23] LI X, ZHAO H, QUAN X, et al. Adsorption of ionizable organic contaminants on multi-walled carbon nanotubes with different oxygen contents [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 407-415.
- [24] YU G, LU Y, GUO J, et al. Carbon nanotubes, graphene, and their derivatives for heavy metal removal [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, 1(1): 56-78.
- [25] RONG H, WANG C, YU X, et al. Carboxylated multi-walled carbon nanotubes exacerbated oxidative damage in roots of *Vicia faba* L. seedlings under combined stress of lead and cadmium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 161: 616-623.
- [26] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 等. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度 [J]. *草业科学*, 2018, 35(8): 1965-1974.
- [27] 张志良, 翟伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [28] 王晨芳. 小麦与条锈菌互作过程中活性氧迸发的组织学和细胞化学研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学植物保护学院, 2008: 48.
- [29] 张栋. 干旱胁迫对苹果光合作用和叶绿素荧光的影响及叶片衰老特性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学园艺学院, 2011: 6-9.
- [30] 杨祥宇. 纳米二氧化钛对人工湿地水处理系统的影响机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2018: 55-56.
- [31] BEGUM P, IKHTIARI R, FUGETSU B. Potential impact of multi-walled carbon nanotubes exposure to the seedling stage of selected plant species [J]. *Nanomaterials*, 2014, 4: 203-221.
- [32] 郭敏, 龚继来, 曾光明. 多壁碳纳米管对水稻幼苗的植物毒性研究 [J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(5): 94-102.
- [33] 尚玉坤, 刘思凯, 陈杨晗, 等. 镉胁迫对东营野生大豆幼苗抗氧化系统及可溶性蛋白的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(1): 15-21.
- [34] 阮志平, 唐源江, 曾美涓. 干旱胁迫对 4 种棕榈植物幼苗光合特性及抗氧化酶活性的影响 [J]. *热带作物学报*, 2016, 37(10): 1914-1919.
- [35] 殷奎德, 黄海. 拟南芥叶片超氧自由基的组织化学定位 [J]. *生物学杂志*, 2003, 20(2): 44, 41.

(责任编辑: 张明霞)



(上接第 36 页 Continued from page 36)

- [11] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 120-121.
- [12] 张锦雀, 吴晓珊, 朱善岚, 等. 金线莲多糖苯酚-硫酸法测定条件的优化 [J]. *中国医院药学杂志*, 2010, 30(2): 113-116.
- [13] 王延峰, 李延清, 郝永红, 等. 超声法提取银杏叶黄酮的研究 [J]. *食品科学*, 2002, 23(8): 166-167.
- [14] 刘树兴, 郭瑞霞, 赵芳. 超声波法提取荷叶生物碱的研究 [J]. *食品科学*, 2009, 30(16): 52-55.
- [15] 陈黎明, 罗美佳, 夏鹏国, 等. 光强对三七生长、光合特性及有效成分积累的影响 [J]. *时珍国医国药*, 2016, 27(12): 3004-3006.
- [16] 廖小强. 金线莲林下仿生栽培技术探析 [J]. *绿色科技*, 2018(1): 194-195.
- [17] 贺彩艳, 李德荣. 求米草的耐阴性研究 [J]. *草业科学*, 2013, 30(10): 1531-1534.
- [18] 邵青松, 周爱存, 黄瑜秋, 等. 不同移栽条件对金线莲组培苗成活率及生长的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2014, 39(6): 955-958.
- [19] 李炎林, 桂克印, 唐前瑞, 等. 地被植物耐阴性研究进展 [J]. *现代园艺*, 2008(5): 4-5.
- [20] 郑连金, 马增强, 肖玉兰. 不同光照强度对台湾金线莲生长发育和次生代谢物合成的影响 [J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(16): 25-27.

(责任编辑: 郭严冬)