

LED 光质对走马胎生长和生理及活性成分含量的影响

李 坤¹, 毛 纯², 刘 军², 吴芳兰¹, 杨 梅^{1*}

(1 广西大学 林学院, 南宁 530004; 2 广西国有七坡林场, 南宁 530225)

摘 要: 该研究以走马胎幼苗为材料, 采用红光(R)、蓝光(B)、红: 蓝=2: 1(R_2B_1)、红: 蓝=4: 1(R_4B_1)、红: 蓝=6: 1(R_6B_1)、红: 蓝=8: 1(R_8B_1)、紫光(P)以及绿光(G)共 8 种不同的光质处理, 并以自然光作为对照(CK), 探究走马胎生长发育对不同光质的响应特征, 为提高走马胎苗木质量和药用成分含量, 以及珍贵药用植物的培育及保护提供依据。结果表明: (1) 走马胎苗高在 R 处理下最高, 地径、鲜重和干重在 R_2B_1 处理下达到最大值。(2) 走马胎幼苗叶片的叶绿素含量在 B 处理下最高, 在 G 处理下最低; 在红蓝复合光处理中, 随着蓝光比例的增大, 叶绿素和类胡萝卜素含量呈现逐渐增加的趋势。(3) 走马胎幼苗叶片丙二醛(MDA)和游离脯氨酸含量在 G 处理下最高, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性在 B 处理及适宜比例的红蓝复合光处理下更有利于得到提升。(4) 走马胎幼苗叶绿素荧光参数在不同光质处理下均受到显著影响, PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和有效光化学效率[Y(II)]均以 R_2B_1 处理最高, 光化学淬灭系数(qP)以 B 处理最高, 但与 R_2B_1 处理差异不显著; 非光化学淬灭系数(NPQ)以 R_8B_1 和 G 处理较高, 但两者间无显著差异。(5) 走马胎幼苗皂苷含量虽然在 B 处理下最高, 但 R_2B_1 处理更有利于提升单株皂苷产量。(6) 综合参考所有指标表现, R_2B_1 、B 和 R_4B_1 处理均优于 CK, 且 R_2B_1 处理最有利于提高走马胎苗木质量及活性成分含量, 并缩短培育周期, 实现其高效生产利用。

关键词: 走马胎; 光质; 抗氧化酶; 叶绿素荧光; 皂苷

中图分类号: Q945.79; Q946.83

文献标志码: A

Effects of LED Light Quality on Growth, Physiology and Active Component Contents of *Ardisia gigantifolia*

LI Kun¹, MAO Chun², LIU Jun², WU Fanglan¹, YANG Mei^{1*}

(1 College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2 Guangxi State-owned Qipo Forest Farm, Nanning, Guangxi 530225, China)

Abstract: In this study, we treated the seedlings of *Ardisia gigantifolia* by 8 different light qualities, red light (R), blue light (B), red: blue=2: 1 (R_2B_1), red: blue=4: 1 (R_4B_1), red: blue=6: 1 (R_6B_1), red: blue=8: 1 (R_8B_1), purple light (P) and green light (G), and with natural light as control (CK), to explore the response of growth and development of *A. gigantifolia* to different light quality, to improve the quality of seedlings and the content of medicinal ingredients, providing reference for the cultivation and protection of precious medicinal plants. The results were as follows: (1) the height of seedling was reached the maximum value under R treatment, while the ground diameter, fresh weight and dry weight were reached the highest maximum values under R_2B_1 treatment. (2) Chlorophyll content in the leaves of

收稿日期: 2021-11-01; 修改稿收到日期: 2022-03-21

基金项目: 广西重点研发计划(2021AB20018)

作者简介: 李 坤(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: 850702382@qq.com

* 通信作者: 杨 梅, 教授, 博士生导师, 主要从事森林培育研究。E-mail: fjiangmei@126.com

A. gigantifolia was the highest under B and the lowest under G treatment. Chlorophyll and carotenoid contents increased gradually with the increase of blue light ratio in red-blue composite light. (3) The contents of malondialdehyde (MDA) and free proline were the highest under G treatment, and the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) were improved under B treatment and appropriate proportion of red and blue combined light treatment. (4) Different treatments had significant effects on chlorophyll fluorescence parameters of *A. gigantifolia*. The highest values of maximum photochemical efficiency(F_v/F_m) and effective photochemical efficiency [$Y(II)$] were in the treatment of R_2B_1 , and the highest value of photochemical quenching coefficient (qP) was in the treatment of B, but there was no significant difference with R_2B_1 . The non-photochemical quenching coefficient (NPQ) was higher in R_3B_1 and G treatment, and there was no significant difference between them. (5) Although the content of saponins was the highest under B treatment, the R_2B_1 treatment was more beneficial to improve saponins yield per plant. (6) It was concluded that R_2B_1 , B and R_4B_1 were significantly better than CK, and R_2B_1 treatment was the best beneficial to improve the quality and content of active components of *A. gigantifolia*, shorten the incubation period, and achieve efficient production and utilization.

Key words: *Ardisia gigantifolia*; light quality; antioxidant enzymes; chlorophyll fluorescence; saponins

光是植物进行光合作用的直接能量来源,是调节生命活动的基础,不同波长的光通过与相关受体发生作用而引起植物的生理生化变化,对植物的生长^[1]、代谢^[2]、光形态建成^[3]等方面产生巨大影响。由于温室效应、洪水以及雾霾等极端天气的影响,室内补光试验及其推广应用逐渐成为研究热点,LED作为高性价比且安全环保的半导体材料,具有光源可控、寿命长、节能等优点,为解决这一难题提供重要保障^[4]。次生代谢物是植物在长期演化过程中与环境相互作用的结果,适合的处理条件能够诱导植物次生代谢过程,提高活性成分含量,通过改变光质环境来调控植物次生代谢物的合成逐渐成为一种有效且安全的手段^[5-6],如蓝光促进灵芝^[7]菌丝体内总三萜的积累,提高滇重楼^[8]的总皂苷含量,绿光则起抑制作用;红光显著降低黄芪^[9]中黄酮和甲苷含量及单株产量;在竹叶兰^[10]中,红光:蓝光(R:B)为1:3处理的花色苷、总酚和类黄酮含量均为最高。由此可见,不同植物对光质的响应不同,其次生代谢物的合成途径和机制也有所变化,研究这种响应及其变化规律可为生产实践提供科学依据。

走马胎(*Ardisia gigantifolia*),又叫走马风、马胎等,主要分布于中国广西、广东、贵州和四川等地,属于紫金牛科(Myrsinaceae)紫金牛属植物,其味苦、偏辛,具有祛风除湿、化瘀消肿的作用,可用于治疗跌打损伤、风湿病和小儿麻痹等疾病,两广民间甚至流传着“两脚迈不开,不离走马胎”的俗语,其主要活性物质皂苷更是具有抗癌功效^[11]。走马胎是林下经济栽培模式的药用植物之一,其偏阴,多生于潮湿低温的地方,研究发现光照强度是走马胎生长发育的主要控制因子之一,20.2%的透光度(光照强度

为 $82.26\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)能显著提高走马胎的生物量和光合作用^[12],而30%~40%的透光度更有利于走马胎茎叶皂苷的积累^[13]。近年来,走马胎的药用价值倍受关注,遭到过度开采,从桂北的猫儿山到桂西南的靖西、那坡等地,天然生长的走马胎种群数量急剧下降^[14],野生资源遭到毁灭性破坏,几乎濒临枯竭,对走马胎的保护及人工培育技术研究迫在眉睫。目前,科研工作者对走马胎的研究主要集中在抗癌机理^[15-16]、离体培养与快繁技术^[17]等方面,本研究利用不同光质及其配比模拟实验,探索不同光质对走马胎苗木品质及皂苷产量的影响规律,为提升走马胎的人工繁殖技术以及提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西大学林学院试验基地苗圃大棚内(22°48'N,108°22'E),属亚热带季风气候,光照充足,降水丰沛,年均气温20.9~21.9℃,年均降雨量1013~1505mm,且降雨多集中在5~9月。

1.2 试验材料

试验材料为1年生走马胎幼苗(苗高 $8.38\pm0.57\text{cm}$,地径 $4.14\pm0.15\text{mm}$),育苗杯规格为9cm(下底直径)×14.5cm(上底直径)×13cm(高),育苗基质为黄心土:泥炭土:椰糠=5:3:2,基质pH为6.27,有机质含量27.12g/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为2.02g/kg、0.73g/kg、8.84g/kg。走马胎幼苗来源于广西玉林市南药康园苗圃基地(22°66'N,110°24'E),生长一致,无病虫害。

1.3 试验设计

本试验采用完全随机区组试验设计,每个处理

3 次重复,每重复 10 株走马胎幼苗;试验共设置 8 种光质处理(表 1),分别为红光(R)、蓝光(B)、R : B = 2 : 1(R₂B₁)、R : B = 4 : 1(R₄B₁)、R : B = 6 : 1(R₆B₁)、R : B = 8 : 1(R₈B₁)、紫光(P)和绿光(G),并以自然光为对照(CK)。每个试验小区在距离地面 0.9 m 高处装设 2 盏 LED 植物生长灯(型号: T52835,生产单位:深圳伟信力光电有限公司),灯的尺寸为 1 200 mm×24 mm,灯珠按照不同颜色配比均匀交叉排布。试验时间从 2019 年 4 月至 2019 年 12 月。试验管理措施:光周期 12 h,处理时间段为 8:00~20:00;水分每日自动喷灌 2 次,分别为 9:00 和 18:00;每月每株幼苗施用等量氮 : 磷 : 钾 = 15 : 15 : 15 的复合肥。在试验过程中,试验材料及装置均用黑色遮阴网遮盖,防止外界自然光以及各光质之间的干扰。试验所用 LED 灯的具体参数如表 1 所示,光照强度使用 Apogee Instruments 公司(美国)生产的 MQ-500 手持式光量子测量仪测定。2019 年 12 月结束试验,测定植株的生长和生理指标。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长指标 苗高为植株地上部基部到顶芽的距离,使用卷尺测量;地径为植株地上部基部直径,使用游标卡尺测量;用电子天平称量植物整株鲜重后,将鲜样放入 80 ℃恒温烘箱烘干至恒重后称量干重。

1.4.2 叶绿素荧光参数 每个重复选取 3 株长势一致、生长健壮的走马胎幼苗,于上午 9:00~11:00 选择幼苗第二轮叶片,使用德国 Walz 公司 PAM 2 000 系列叶绿素荧光仪测定其叶绿素荧光参数。在测定叶绿素荧光参数时,先将植物暗处理 30 min,用弱光(0.05 μmol · m⁻² · s⁻¹)测定初始荧光 F₀,随后用 6 000 μmol · m⁻² · s⁻¹ 的脉冲光测定最

大荧光 F_m,并计算其 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)值;随后开启光化光,待荧光值稳定 3~5 min 后,即可测定其实际光化学效率 Y(II)、光化学淬灭系数 qP 和非光化学淬灭系数 NPQ。

1.4.3 生理指标 取 1.4.2 中相同幼苗顶芽下第二轮叶片测定叶绿素含量及抗逆生理生化指标,叶绿素含量采用丙酮-乙醇混合液提取法测定^[18],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[18],过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[18],超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 光还原法测定^[19],游离脯氨酸含量采用茚三酮显色法测定^[18]。

1.4.4 皂苷含量及单株产量 (1)精准称取齐墩果酸 2 mg,加甲醇溶解并定容于 10 mL 容量瓶,摇匀,得浓度为 200.0 μg/mL 的齐墩果酸对照品溶液。(2)精准吸取齐墩果酸对照品溶液 0、0.1、0.2、0.3、0.35、0.4、0.45 和 0.5 mL,置 10 mL 具塞试管中,70 ℃水浴挥干溶剂;依次加入新配制的 5%香草醛-冰醋酸溶液 0.2 mL,高氯酸 0.8 mL,混匀,密塞;于 60 ℃水浴加热 15 min,取出,冰水浴 2 min,加入冰醋酸 5 mL,混匀,静置 1 h,测定其在 540 nm 时的吸光度,绘制标准曲线。(3)精准称取走马胎整株混合样品 1 g,加 70%乙醇按料液比 1 : 20 于室温下超声提取 1 h,用 70%乙醇补足减失的重量,过滤,滤液转移至 50 mL 容量瓶,70%乙醇定容、摇匀;精密吸取溶液 0.2 mL,按(2)中步骤进行测定,对照标准曲线计算皂苷含量。(4)单株皂苷产量(mg/plant) = 皂苷含量(mg/g)×单株干重(g/plant)。

1.5 数据处理

数据整理用 Excel 2010 软件,T 检验、单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较(Duncan)(α=0.05)SPSS 24.0 软件,用主成分分析方法对各处理进行综合排名,用 Origin 2021b 软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 不同光质对走马胎幼苗生长的影响

走马胎幼苗苗高、地径、鲜重、干重及高径比在不同光质处理间均存在显著差异(表 2)。走马胎苗高在 R、R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著高于 CK,在 R₈B₁ 和 P 处理下显著低于 CK,在其余处理下与 CK 无显著差异;苗高以 R 处理最大(23.38 cm),显著高于除 R₂B₁ 处理以外的其他处理,较 CK 显著增长了 18.5%。地径在 R₂B₁、R₄B₁ 和 R₆B₁ 处理下显著高

表 1 光质处理及参数

Table 1 The light quality treatment and parameters		
光处理 Light treatment	波长 Wave length /nm	光照强度 Light intensity /(μmolm ⁻² · s ⁻¹)
红光 Red light (R)	630	100±10
蓝光 Blue light (B)	460	100±10
R : B=2 : 1(R ₂ B ₁)	630/460	100±10
R : B=4 : 1(R ₄ B ₁)	630/460	100±10
R : B=6 : 1(R ₆ B ₁)	630/460	100±10
R : B=8 : 1(R ₈ B ₁)	630/460	100±10
紫光 Purple light (P)	410	100±10
绿光 Green light (G)	520	100±10
自然光 Natural light(CK)	—	—

于 CK,在 R、P、G 处理下均显著低于 CK,其余处理下与 CK 无显著差异;其中 R₂B₁ 处理最大,且与其余处理均差异显著,较 CK 显著提高了 11.9%。走马胎鲜重仅在 R₂B₁ 处理下显著高于 CK,并达到最大值,且与除 R 和 R₄B₁ 以外的处理差异显著,较 CK 显著提高了 8.8%;在 R₈B₁、P、G 处理下均显著低于 CK,其余处理下与 CK 无显著差异。走马胎干重在 B、R₂B₁、R₄B₁ 和 R₆B₁ 处理下均显著高于 CK,在其余处理下均与 CK 无显著差异,其中以 R₂B₁ 处理最大,且与其余处理均差异显著,较 CK 显著提高了 14.4%。走马胎高径比仅在 R 处理下显著高于 CK,增幅达到 24.8%,在其余处理下均与 CK 无显著差异。可见,紫光和绿光不利于走马胎的生长及生物量的积累,红蓝复合光更有利于走马胎各器官均衡生长,其中又以 R₂B₁ 处理较佳。

2.2 不同光质对走马胎幼苗叶片光合色素含量的影响

如表 3 所示,走马胎幼苗叶片叶绿素 a 含量在 P、G 处理下显著低于 CK,在其余处理下与 CK 均无显著差异,并以 R₂B₁ 处理最高,是 CK 的 1.1 倍;叶绿素 b 含量仅在 B 处理下显著高于 CK,增幅达到 29.1%,在 R、P、G 处理下均显著低于 CK,在其余处理下与 CK 无显著差异;叶绿素 a+b 含量在 B 和 R₂B₁ 处理下显著高于 CK,增幅分别达到 13.9%和 9.1%,在 R₄B₁ 处理下与 CK 相近,在其余处理下显著低于 CK;叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 a+b 含量均在 G 处理下最低,分别是 CK 的 75.2%、67.4%和 73.1%。类胡萝卜素含量在 R 和 R₂B₁ 处理下显著高于 CK,增幅分别达到 27.0%和 13.5%,在 B、R₄B₁、R₆B₁ 处理下均显著低于 CK,在其余处

表 2 不同光质下走马胎幼苗生长状况

Table 2 Growth appearance of *A. gigantifolia* seedling under different light qualities

光质 Light quality	苗高 Plant height/cm	地径 Ground diameter/mm	鲜重 Fresh weight(g/plant)	干重 Dry weight(g/plant)	高径比 High aspect ratio
R	23.38±0.65a	8.14±0.29d	38.49±1.17ab	6.94±0.23cd	2.87±0.18a
B	20.22±0.56c	8.63±0.21c	37.13±0.43b	7.61±0.23b	2.34±0.06bc
R ₂ B ₁	22.90±0.76ab	9.59±0.18a	40.25±0.78a	8.09±0.07a	2.39±0.13b
R ₄ B ₁	21.78±0.75b	8.99±0.19b	38.56±1.25ab	7.72±0.19b	2.42±0.14b
R ₆ B ₁	19.59±0.56c	9.14±0.17b	37.52±1.11b	7.65±0.20b	2.14±0.08c
R ₈ B ₁	18.20±0.69d	8.52±0.24c	34.69±0.70c	7.23±0.14c	2.14±0.14c
P	17.39±0.48d	8.05±0.14d	32.87±0.85c	6.89±0.14d	2.16±0.03c
G	19.44±0.77c	7.96±0.13d	33.50±0.88c	6.99±0.11cd	2.45±0.14b
CK	19.73±0.74c	8.57±0.15c	36.98±1.60b	7.07±0.19cd	2.30±0.09bc

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平;下同
Note: Data were means±SD, Different lowercase letters in a column are significant among treatments at the 5% level. The same as below

表 3 不同光质下走马胎幼苗叶片光合色素含量的变化

Table 3 The photosynthetic pigment contents in leaves of *A. gigantifolia* under different light qualities

光质 Light quality	叶绿素 a Chl a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chl b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a+b Chl a+b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids/(mg·g ⁻¹)
R	1.148±0.07b	0.370±0.03e	1.518±0.04c	3.130±0.45a	0.254±0.01a
B	1.342±0.06a	0.590±0.04a	1.932±0.02a	2.283±0.23b	0.155±0.01e
R ₂ B ₁	1.366±0.08a	0.485±0.04bc	1.851±0.05a	2.838±0.40ab	0.227±0.01b
R ₄ B ₁	1.240±0.09ab	0.508±0.02b	1.748±0.06b	2.449±0.28ab	0.175±0.01de
R ₆ B ₁	1.111±0.08bc	0.479±0.03bc	1.590±0.05c	2.331±0.29b	0.158±0.02e
R ₈ B ₁	1.116±0.07bc	0.430±0.05cd	1.546±0.03c	2.626±0.30ab	0.191±0.02cd
P	0.980±0.10cd	0.377±0.01de	1.357±0.09d	2.606±0.31ab	0.201±0.02c
G	0.932±0.08d	0.308±0.02f	1.240±0.06e	3.043±0.32a	0.207±0.02bc
CK	1.240±0.08ab	0.457±0.04bc	1.697±0.06b	2.735±0.33ab	0.200±0.03c

理下与 CK 无显著差异。叶绿素 a/b 值在各处理下均与对照无显著差异。可见,蓝光能显著提高走马胎幼苗叶片叶绿素含量,特别是叶绿素 b 含量,且有随着红蓝复合光中蓝光比例的降低而降低的趋势,而绿光和紫光均能显著降低叶绿素含量。

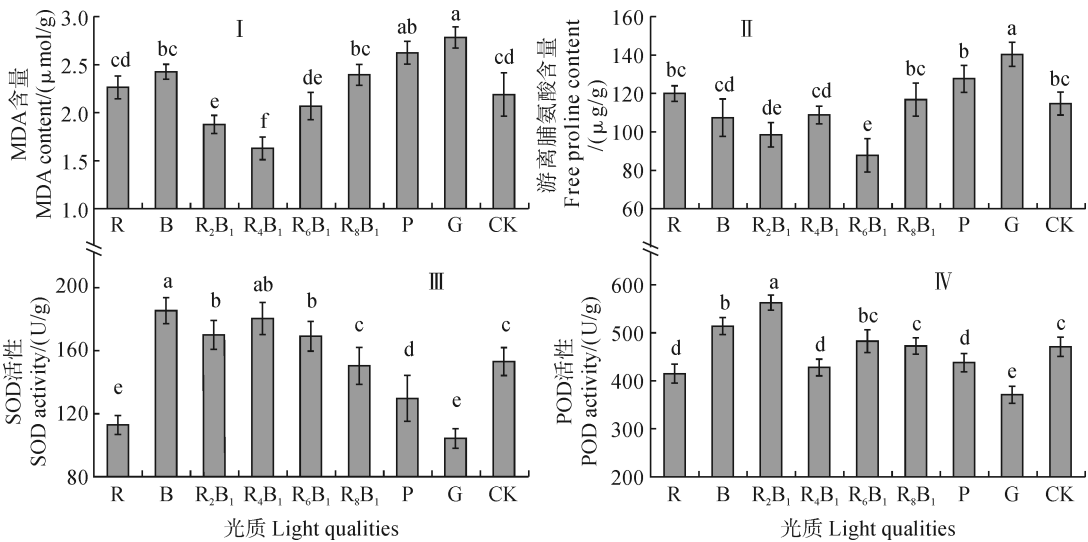
2.3 不同光质对走马胎幼苗叶片抗逆生理指标的影响

走马胎幼苗叶片 MDA 含量在 R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著低于 CK,并以 R₄B₁ 最低(1.63 μmol/g),而在 G、P 单色光处理下显著大于 CK,在其他处理下与 CK 均无显著差异(图 1, I),说明紫色和绿色单色光处理显著提高了走马胎叶片的 MDA 含量,其生长受到了严重过氧化伤害。走马胎幼苗叶片的游离脯氨酸含量以 G 处理最高(140.35 μg/g),是 CK 的 1.22 倍,且与其他处理均差异显著;而在 R₂B₁ 和 R₆B₁ 处理下显著低于 CK,并以 R₆B₁ 处理最低(87.73 μg/g),仅为 CK 的 76.5%;其余处理与对照均无显著差异(图 1, II)。走马胎幼苗叶片 SOD 活性变化范围是 104.28~185.39 U/g,在 B、R₂B₁、R₄B₁ 和 R₆B₁ 处理下显著高于 CK,在 R、P、G 处理下显著低于对照,并且以 B 处理最高,是 CK 的 1.21 倍,G 处理最低,最高与最低处理相差 81.11 U/g(图 1, III);走马胎幼苗叶片 POD 活性变化范围为 370.74~562.44 U/g,在 B、R₂B₁ 处理下显著高于对照,在 R、R₄B₁、P、G 处理下显著低于对照,

并以 R₂B₁ 处理最高,较 CK 显著提高了 19.6%,且显著高于其他处理,而 G 处理最低,最高与最低处理相差 191.70 U/g(图 1, IV);G 处理幼苗叶片的 SOD 和 POD 活性均显著低于 CK 及红蓝复合光处理。

2.4 不同光质对走马胎幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

如表 4 所示,走马胎幼苗叶片最大光化学效率(F_v/F_m)在单色光 R、P、G 处理下均显著低于对照,降幅在 6.7%~8.8%之间,在其余处理下均与对照无显著差异,并以 R₂B₁ 处理最高,G 处理最低;叶片实际光化学效率 Y(II)在 R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著高于对照,增幅分别为 13.3%和 12.7%,在 R、R₈B₁、P、G 处理下均显著低于对照,降幅在 12.7%~26.9%之间,并以 P 处理最低;叶片非光化学淬灭系数(NPQ)在 R₈B₁ 和 G 处理下显著高于对照,增幅分别为 12.9%和 10.1%,而在 R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著低于对照,降幅分别为 7.7%和 10.2%,在其余处理下与对照无显著差异;叶片光化学淬灭系数(qP)在 B、R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著高于对照,增幅在 13.4%~16.2%之间,在 R、R₈B₁、P、G 处理下均显著低于对照,降幅在 19.5%~35.3%之间,并以 B 处理最大,G 处理最低。在单色光处理下,除 NPQ 外,P 处理和 G 处理之间各参数差异不显著,但均显著低于 CK 和 B 处理;在红蓝复合光处理下,随着蓝光比例的降低, F_v/F_m 、Y(II)和 qP 表现



不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平;下同
图 1 不同光质下走马胎幼苗叶片抗逆生理指标的变化
Different lowercase letters are significant among treatments at the 5% level. The same as below
Fig. 1 The physiological index of stress resistance in leaves of *A. gigantifolia* seedling under different light qualities

出逐渐降低的趋势,而 NPQ 则有逐渐上升趋势。

2.5 不同光质对走马胎皂苷含量及产量的影响

走马胎皂苷含量在 B、R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著高于对照,在 R、R₈B₁、G 处理后显著低于对照,其余处理与对照无显著差异;B 和 R₂B₁ 处理皂苷含量(分别为 34.53 和 34.19 mg/g)显著高于其他处理,而两者间无显著差异;而 R 和 R₈B₁ 处理的含量仅为 B 处理的 57.0%~59.8%,为 R₂B₁ 处理的 57.5%~60.4%(图 2,I)。走马胎单株皂苷产量(图 2,II)在不同光质处理下存在显著差异,与皂苷含量的表现相似,单株皂苷产量在 B、R₂B₁ 和 R₄B₁ 处理下显著高于对照,在 R₆B₁ 处理下与对照相近,在其余处理下显著低于对照;R₂B₁ 处理的单株皂苷产量最高(276.68 mg),较 CK 显著增长了 48.9%,蓝光 B 处

理次之,较 CK 显著增长了 41.4%。可见,走马胎皂苷含量和单株产量在单色红光、紫光、绿光处理下明显降低;蓝光有利于皂苷的积累,在红蓝复合光处理下,随着蓝光比例的减少而呈逐渐降低的趋势。

2.6 不同光质对走马胎幼苗影响的主成分分析

对不同光质处理下各指标进行主成分分析,基于特征值大于 1,共提取了 3 个主成分,结果(表 5)显示,其方差贡献率分别为 61.554%、14.218%和 6.568%,累计贡献率达 82.340%,表明这 3 个成分可解释不同光质处理下走马胎生长及生理指标 82.340%的变异度。其中,第一主成分包括 qP、Y(II)、叶绿素含量、F_v/F_m、皂苷含量以及单株皂苷产量等,主要反映走马胎光合生理功能;第二主成分包括苗高和高径比等,主要反映走马胎营养生长情

表 4 不同光质下走马胎叶片叶绿素荧光参数

光质 Light quality	最大光化学效率 F_v/F_m	实际光化学效率 Y(II)	非光化学淬灭系数 NPQ	光化学淬灭系数 qP
R	0.736±0.03c	0.276±0.01c	0.804±0.02b	0.383±0.02c
B	0.806±0.02a	0.323±0.01b	0.732±0.04cd	0.553±0.02a
R ₂ B ₁	0.823±0.03a	0.358±0.01a	0.721±0.03d	0.540±0.04a
R ₄ B ₁	0.793±0.02ab	0.356±0.01a	0.701±0.03d	0.552±0.02a
R ₆ B ₁	0.750±0.03bc	0.309±0.01b	0.777±0.02bc	0.459±0.03b
R ₈ B ₁	0.747±0.03bc	0.259±0.03cd	0.882±0.03a	0.349±0.03cd
P	0.739±0.04c	0.231±0.02d	0.807±0.04b	0.355±0.04cd
G	0.722±0.04c	0.248±0.02cd	0.860±0.02a	0.308±0.02d
CK	0.792±0.02ab	0.316±0.02b	0.781±0.02bc	0.476±0.03b

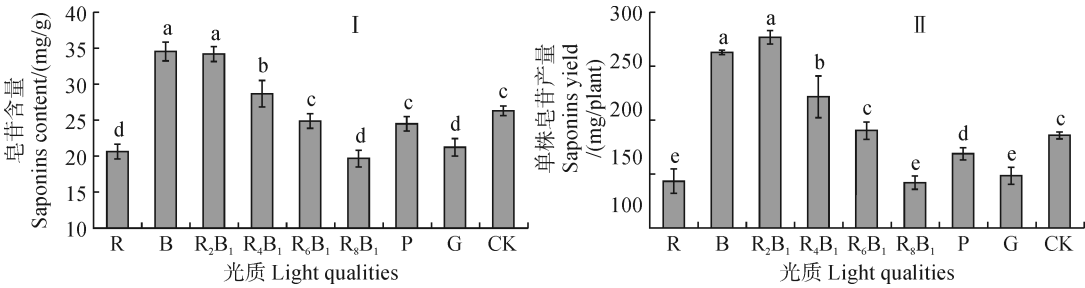


图 2 不同光质下走马胎皂苷含量及产量的变化

Fig. 2 The total saponins content and yield of *A. gigantifolia* under different light qualities

表 5 不同处理下各项指标的主成分分析

成分 Component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	12.311	61.554	61.554
2	2.844	14.218	75.772
3	1.314	6.568	82.340

表 6 不同光质处理的主成分综合得分
Table 6 Comprehensive score of PCA on different light qualities

光质 Light quality	主成分得分 Principal component score				排名 Ranking
	F1	F2	F3	综合得分 Comprehensive score	
R	−0.65	1.95	−0.76	−0.21	6
B	1.02	−0.64	1.13	0.74	2
R ₂ B ₁	1.55	0.64	0.74	1.33	1
R ₄ B ₁	0.89	0.31	−0.99	0.64	3
R ₆ B ₁	0.28	−0.93	−1.54	−0.08	5
R ₈ B ₁	−0.67	−0.85	−0.16	−0.66	7
P	−1.03	−0.84	0.86	−0.84	8
G	−1.53	0.38	0.52	−1.03	9
CK	0.14	−0.03	0.20	0.11	4

况;第三主成分主要包括 MDA 和游离脯氨酸,主要反映走马胎抗氧化系统强弱。同时,由表 6 可知,不同光质处理对走马胎生长、生理及叶绿素荧光的影响综合得分排名以 R₂B₁ 处理最高(1.33),B(0.74)和 R₄B₁(0.64)处理次之,CK 居中(0.11),而以 G 处理(−1.03)最低。

3 讨 论

3.1 走马胎生长指标对不同光质的响应特征

光质是影响植物生长发育的重要因子,植物通过光受体感受和传递光环境的信号变化,并调控相关基因在细胞和分子水平上的表达,从而影响生长和代谢的各个环节^[20-21]。目前,已知的光受体主要包括光敏色素、隐花色素、向光色素和 UV-B 受体^[22],其中光敏色素主要感受红光和远红光并参与调控幼苗生长、光合系统的建立、避荫作用以及逆境生理反应等过程^[23-24];隐花色素和向光色素主要感受蓝紫光并调控茎秆生长、叶绿体发育以及激素的合成和运输等方面^[25-26]。在本研究中,红光处理下走马胎幼苗的苗高最高,但地径和生物量积累较低,可能是红光导致走马胎徒长,高径比显著增大,不利于水分和物质运输;在红蓝复合光处理下,随着蓝光比例的增大,走马胎幼苗地径、鲜重和干重均呈现逐渐升高的趋势,且显著大于单色红光和蓝光。由此可见,红光比例过高对走马胎的生长产生抑制作用,而在红光中补充适量蓝光则具有显著的促进效果,在观光木中也存在生长随蓝光比例增大而加快的现象,这可能与蓝光受体蛋白调控作用有关^[27],也与植物本身特性和起源等因素密不可分^[28]。

3.2 走马胎叶绿素含量和荧光参数对不同光质的响应特征

光合色素能够吸收、传递和转换光能,是植物进行光合作用的物质基础,光受体可以感应不同光质产生的光信号,并通过下游的光信号调节因子 HY5 调控叶绿素和类胡萝卜素的合成,从而影响植物的光合作用过程^[29-30]。蓝光是植物调节叶绿素合成的关键所在,在叶绿素的生物合成过程中,其关键酶谷氨酸-1-半醛转氨酶的编码基因仅由蓝光调节,而红光会减少叶绿素生物合成的前体物质^[31-32]。类胡萝卜素是光合作用中光传导途径和光反应中心的重要结构成分,也是植物体内的非酶类抗氧化剂,参与植物非光化学淬灭过程,保护其在高温、强光下免受破坏^[33-34]。本研究发现,走马胎叶片中叶绿素及类胡萝卜素含量在蓝光及含蓝光比例较高的 R₂B₁ 处理下显著提高,而在红光、紫光和绿光处理下含量较低,可见,蓝光有利于保护走马胎光合器官的功能稳定性,而其余单色光却不利于光保护机制的形成。同样,叶绿素荧光参数也可用于研究环境变化对光系统结构的影响,过量的光吸收对植物叶绿体存在潜在伤害,降低光合速率,发生光抑制现象,主要表现为光合结构的破坏和热耗散的增加,从而导致荧光产额与电子传递活性的大幅度下降,并在此过程中生成如活性氧等中间产物,对植物细胞膜系统造成严重伤害^[35]。在本研究中,蓝光显著提高走马胎幼苗的 F_v/F_m 、Y(II) 和 qP 值,表明蓝光有利于提高走马胎幼苗 PSII 反应中心的电子传递效率,减少热消耗,提高光能利用率;在红蓝复合光处理中,随着红光比例的增大,叶片 F_v/F_m 和 Y(II) 值逐渐减小,NPQ 值逐渐增加,表明增加红光比例导致光能利用率逐渐

降低,光能多以热能的形式耗散,但相比之下,绿光、红光和紫光的光抑制和膜系统破坏程度更严重。

3.3 走马胎抗逆生理指标对不同光质的响应特征

在植物光合作用、呼吸作用、电子传递等生命活动过程中,常伴随着活性氧(ROS)的生成与清除。当植物遭受环境胁迫时,ROS 大量产生,MDA 含量上升,细胞膜透性增大,加速植物衰老甚至死亡^[36]。但是,植物在长期进化过程中,同样演变出一套有效的 ROS 清除体系,该体系中的酶促系统主要以 SOD 作为第一道防线,将 ROS 快速歧化为 H₂O₂,再通过 POD 等酶的作用分解成水,从而有效保护细胞和机体^[37]。此外,游离脯氨酸作为植物体内重要的渗透调节物质,可以调节细胞液的浓度来维持渗透压和细胞膜结构的稳定性,同样可以防止 ROS 对膜脂和蛋白质的过氧化作用^[38]。本研究中,在紫光和绿光诱导下,走马胎幼苗叶片 MDA 含量显著上升,加重叶片膜脂过氧化程度,而 SOD、POD 活性的显著降低更加快活性氧的积累,导致叶绿素降解,降低光合作用、呼吸作用和其他代谢过程,这解释了为什么在紫光和绿光处理下走马胎生长指标均较差。相反,在蓝光比例较大的红蓝复合光处理下,激活了植物体内的酶促抗氧化系统,走马胎幼苗叶片 SOD 和 POD 活性显著上升,MDA 含量显著降低,膜质和蛋白质受到的伤害减小。值得注意的是,在光化学反应过程中,会产生活性氧族分子,若无法及时平衡植物体内活性氧含量,会严重影响电子传递速率以及光能利用率^[39],这也可能是本研究中 R₂B₁ 处理下电子传递速率显著上升的原因。

3.4 走马胎皂苷含量及其产量对不同光质处理的响应特征

皂苷是走马胎重要的次生代谢物,不仅参与植

物的通讯、防御和感觉调控^[40],而且对癌细胞具有较强的抑制作用^[41]。适宜光质处理不仅提高幼苗营养生长能力,还促进其次生代谢物的积累^[28, 42]。本研究中,走马胎皂苷含量以蓝光处理最高,R₂B₁ 处理次之,两者均显著高于对照,但 R 和 R₈B₁ 处理则显著降低;走马胎单株皂苷产量以 R₂B₁ 处理最高,蓝光次之,分别较 CK 显著提高了 48.9% 和 41.4%,而红光和 R₈B₁ 处理的产量均较低,这表明蓝光对走马胎皂苷合成具有显著促进作用,而红光存在不同程度的抑制作用。已有研究发现,皂苷含量与植物活性氧自由基的清除具有显著的相关性,七叶一枝花皂苷含量与其 CAT 活性呈显著正相关,而与 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量间存在极显著的负相关^[43];三七总皂苷可抑制 ROS 和 MDA 的产生,并显著提高 SOD、CAT 活性^[44]。本研究中 R₂B₁ 处理显著提高走马胎皂苷含量,其 SOD 和 POD 活性同样最高,在一定程度上抑制了 ROS 和 MDA 的生成,更有利于走马胎健康稳定的发育。

综上所述,不同 LED 光质对走马胎幼苗的生长和有效成分的积累产生显著影响。单色红光和过高的红光比例会对走马胎生长造成一定的胁迫作用,导致 MDA 含量增加,抗氧化酶活性降低,不利于走马胎的生长发育;在红光基础上增加适当比例蓝光更有利于走马胎光合色素的合成、抗氧化系统的协调以及叶绿素荧光参数的稳定,从而促进走马胎健康稳定的生长,提高活性成分含量。综合所有形态指标和生理指标测定结果,R₂B₁、B 和 R₄B₁ 3 个处理均显著优于 CK,其中 R₂B₁ 处理最有利于走马胎生长及活性成分积累,有效改善植株生长状况,提高走马胎苗木品质和药材产量。

参考文献:

[1] MACEDO A F, LEAL-COSTA M V, TAVARES E S, *et al.* The effect of light quality on leaf production and development of *in vitro*-cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **70**(1): 43-50.

[2] FU Z Z, SHANG H Q, JIANG H, *et al.* Systematic identification of the light-quality responding anthocyanin synthesis-related transcripts in *Petunia* petals [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2020, **6**(6): 428-438.

[3] YANG T, DONG C H. Photo morphogenesis and photo response of the blue-light receptor gene Cmwc-1 in different

strains of *Cordyceps militaris* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2014, **352**(2): 190-197.

[4] 刘文科. LED 植物工厂光质生物学研究与应用现状 [J]. 中国农业科技导报, 2018, **20**(10): 9-14.

LIU W K. Research on spectral biology of plant factory with LED lighting and application status [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, **20**(10): 9-14.

[5] 罗美佳, 夏鹏国, 齐志鸿, 等. 光质对三七生长、光合特性及有效成分积累的影响 [J]. 中国中药杂志, 2014, **39**(4): 610-613.

LUO M J, XIA P G, QI Z H, *et al.* Effect of light quality on growth, photosynthesis and effective components of *Panax notoginseng* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*,

2014, **39**(4): 610-613.

[6] 阎秀峰, 王 洋, 李一蒙. 植物次生代谢及其与环境的关系[J]. 生态学报, 2007, **27**(6): 2 554-2 562.

YAN X F, WANG Y, LI Y M. Plant secondary metabolism and its response to environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2 554-2 562.

[7] 梅锡玲, 陈若芸, 李保明, 等. 光质对灵芝菌丝体生长及三萜酸量影响的研究[J]. 中草药, 2013, **44**(24): 3 546-3 550.

MEI X L, CHEN R Y, LI B M, *et al.* Effect of light quality on growth and triterpenic acid content of *Ganoderma lucidum* mycelium[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2013, **44**(24): 3 546-3 550.

[8] 李 铂, 唐志书, 王 楠, 等. 不同 LED 光质对陕产重楼生理特性和成分积累的影响[J]. 中国现代中药, 2019, **21**(10): 1 386-1 391.

LI B, TANG Z S, WANG N, *et al.* Effects of different LED light quality on physiological characteristics and component accumulation of *Paris Polyphylla* in Shaanxi Province[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2019, **21**(10): 1 386-1 391.

[9] 张鹏飞, 刘亚令, 梁建萍, 等. 不同光质处理对蒙古黄芪幼苗根系生物量及有效成分积累的影响[J]. 草地学报, 2015, **23**(4): 838-843.

ZHANG P F, LIU Y L, LIANG J P, *et al.* Effects of different light quality on growth and the accumulation of active ingredient in *Astragalus membranaceus*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, **23**(4): 838-843.

[10] 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): 1 318-1 323.

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): 1 318-1 323.

[11] 戴卫波, 董鹏鹏, 梅全喜. 走马胎的化学成分、药理作用研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2018, **30**(4): 717-723.

DAI W B, DONG P P, MEI Q X. Review on chemical constituents of *Ardisia gigantifolia* and their pharmacological effects[J]. *Natural Product Research and Development*, 2018, **30**(4): 717-723.

[12] 毛世忠, 赵 博, 蒋小华, 等. 林下不同光照条件对走马胎苗木生长及光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, **31**(1): 21-24, 41.

MAO S Z, ZHAO B, JIANG X H, *et al.* Influences of illumination on the seedling growth and photosynthetic characteristics of understory *Ardisia gigantifolia*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, **31**(1): 21-24, 41.

[13] 魏 蓉. 环境因子对走马胎生物量及皂苷含量的影响[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.

[14] 毛世忠, 唐文秀, 骆文华, 等. 广西紫金牛属药用植物资源及可持续利用初探[J]. 福建林业科技, 2010, **37**(2): 119-126.

MAO S Z, TANG W X, LUO W H, *et al.* Medicinal plant resources and sustainable utilization of *Ardisia* in Guangxi and sustainable utilization[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2010, **37**(2): 119-126.

[15] 贺 珊, 廖长秀, 罗 莹, 等. 走马胎活性组分对肝癌 HepG2 细胞 DUSPs/MAPK 信号通路的影响[J]. 中成药, 2021, **43**(2): 344-349.

HE S, LIAO C X, LUO Y, *et al.* Effects of active components of *Ardisia gigantifolia* on DUSPs/MAPK signaling pathway in HepG2 cells[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2021, **43**(2): 344-349.

[16] MU L H, YAN H, WANG Y N, *et al.* Triterpenoid saponins from *Ardisia gigantifolia* and mechanism on inhibiting proliferation of MDA-MB-231 cells[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2019, **42**(2): 194-200.

[17] 唐凤鸾, 郭丽君, 赵 健, 等. 培养基及接种材料对走马胎瓶苗生根和移栽的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, **48**(19): 30-34.

TANG F L, GUO L J, ZHAO J, *et al.* Effects of culture media and inoculation materials on rooting and transplanting of *Ardisia gigantifolia* Stapf shoots *in vitro*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, **48**(19): 30-34.

[18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[19] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.

[20] 吴 杨, 姚小华, 何正盛, 等. 光对油茶光合作用及生长发育影响的研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, **47**(2): 147-157.

WU Y, YAO X H, HE Z S, *et al.* Research progress of light effects on photosynthesis, growth and development of oil-tea(*Camellia oleifera*)[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, **47**(2): 147-157.

[21] WARD J M, CUFR C A, DENZEL M A, *et al.* The dof transcription factor OBP₃ modulates phytochrome and cryptochrome signaling in *Arabidopsis*[J]. *The Plant Cell*, 2005, **17**(2): 475-485.

[22] 倪俊霞, 严学兵, 王成章, 等. 植物光受体分子生物学研究进展[J]. 草业科学, 2010, **27**(7): 94-104.

NI J X, YAN X B, WANG C Z, *et al.* Research progress of light receptors in plants[J]. *Pratacultural Science*, 2010, **27**(7): 94-104.

[23] TÓTH R, KEVEI E, HALL A, *et al.* Circadian clock-regulated expression of phytochrome and cryptochrome genes in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2001, **127**(4): 1 607-1 616.

[24] QUAIL P H. Phytochrome photosensory signalling networks[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2002, **3**(2): 85-93.

[25] AHMAD M, GRANCHER N, HEIL M, *et al.* Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2002, **129**(2): 774-785.

[26] NAGASHIMA A, HANAOKA M, SHIKANAI T, *et al.* The multiple-stress responsive plastid sigma factor, SIG5, directs activation of the psbD blue light-responsive promoter (BLRP) in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, **45**(4): 357-368.

[27] 刘 涛, 李万年, 王家妍, 等. 红蓝光质对比对观光木苗木生长及内源激素的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, **42**(2): 1-8.
LIU T, LI W N, WANG J Y, *et al.* Effects of red and blue light quality on growth and endogenous hormone synthesis of *Tsoongiodendron odorum* seedlings[J]. *Journal of Southwest Forestry University* (Nat. Sci. Edi.), 2021, **42**(2): 1-8.

[28] 巩 彪, 靳志勇, 刘 娜, 等. 光质对紫背天葵生长、次生代谢和抗氧化胁迫的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(11): 3 577-3 584.
GONG B, JIN Z Y, LIU N, *et al.* Effects of light quality on growth, secondary metabolites, and oxidative stress tolerance of *Gynura bicolor*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(11): 3 577-3 584.

[29] 王军伟, 陈海燕, 梁曼恬, 等. LED 光质对青花菜生长及其生物活性物质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(6): 1 478-1 483.
WANG J W, CHEN H Y, LIANG M T, *et al.* Effects of LED light quality on the growth and bioactive substances of *Broccoli*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, **26**(6): 1 478-1 483.

[30] THOLEN D, PONS T L, VOESENEK L A C J, *et al.* Ethylene insensitivity results in down-regulation of rubisco expression and photosynthetic capacity in tobacco[J]. *Plant Physiology*, 2007, **144**(3): 1 305-1 315.

[31] FAN X X, ZANG J, XU Z G, *et al.* Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(9): 2 721-2 726.

[32] MATTERS G L, BEALE S I. Blue-light-regulated expression of genes for two early steps of chlorophyll biosynthesis in *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Plant Physiology*, 1995, **109**(2): 471-479.

[33] 李湘阳, 曾炳山. 奇楠沉香组培苗在不同光质下的增殖效率及光保护反应[J]. 分子植物育种, 2021, **19**(1): 291-298.
LI X Y, ZENG B S. The proliferative efficiency and the photoprotective response of *Aquilaria crassna* Pierre. plantlets under different light quality[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, **19**(1): 291-298.

[34] 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): 1 619-1 624.
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): 1 619-1 624.

[35] TAKAGI D, TAKUMI S, HASHIGUCHI M, *et al.* Superoxide and singlet oxygen produced within the thylakoid membranes both cause photosystem I photoinhibition[J]. *Plant Physiology*, 2016, **171**(3): 1 626-1 634.

[36] 马旭俊, 朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. 遗传, 2003, **25**(2): 225-231.
MA X J, ZHU D H. Functional roles of the plant superoxide dismutase[J]. *Hereditas* (Beijing), 2003, **25**(2): 225-231.

[37] 魏 婧, 徐 畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. 植物生理学报, 2020, **56**(12): 2 571-2 584.
WEI J, XU C, LI K X, *et al.* Progress on superoxide dismutase and plant stress resistance [J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, **56**(12): 2 571-2 584.

[38] 刘 磊, 陈立波, 李志勇, 等. 晚秋温度对苜蓿地上部游离脯氨酸、可溶性糖和 POD 活性的影响[J]. 草业科学, 2009, **26**(10): 89-93.
LIU L, CHEN L B, LI Z Y, *et al.* Effect of temperature in late autumn on free proline, soluble sugar and POD in *Alfalfa*[J]. *Pratacultural Science*, 2009, **26**(10): 89-93.

[39] 周振翔, 李志康, 陈 颖, 等. 叶绿素含量降低对水稻叶片光抑制与光合电子传递的影响[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(19): 3 709-3 720.
ZHOU Z X, LI Z K, CHEN Y, *et al.* Effects of reduced chlorophyll content on photoinhibition and photosynthetic electron transport in rice leaves[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(19): 3 709-3 720.

[40] 徐圆圆, 周思维, 陈 仲, 等. 无患子不同器官中的总皂苷和总黄酮含量[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, **45**(4): 83-89.
XU Y Y, ZHOU S W, CHEN Z, *et al.* Contents of the total saponins and total flavonoids in different organs of *Sapindus mukorossi* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2021, **45**(4): 83-89.

[41] MU L H, WANG L H, YU T F, *et al.* Triterpenoid saponin AG8 from *Ardisia gigantifolia* Stapf. induces triple negative breast cancer cells apoptosis through oxidative stress pathway[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, (5): 1-11.

[42] 程小燕, 杨志玲, 杨 旭, 等. 不同光质对三叶崖爬藤生长及有效成分含量的影响[J]. 林业科学研究, 2018, **31**(5): 98-103.
CHENG X Y, YANG Z L, YANG X, *et al.* Effects of light quality on the growth and content of active ingredients of *Tetrastigma hemsleyanum* [J]. *Forest Research*, 2018, **31**(5): 98-103.

[43] 陈 文, 刘守赞, 耿东杰, 等. 遮阴对浙北地区七叶一枝花生理生化指标及皂苷含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, **30**(1): 72-81.
CHEN W, LIU S Z, GENG D J, *et al.* Effect of different shading treatments on saponin content and biochemical indexes of *Paris Polyphylla* Smith var. *chinensis* (Franch.) Hara in northern Zhejiang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(1): 72-81.

[44] 赵静宇, 汪梦霞, 赵自明, 等. 基于 Nrf2 信号通路的三七总皂苷对 A β 25-35 诱导 PC12 细胞凋亡的保护作用机制研究[J]. 中国药理学通报, 2016, **32**(3): 343-349.
ZHAO J Y, WANG M X, ZHAO Z M, *et al.* Protective effect of *panax notoginseng* saponins of Nrf2 signaling pathway on apoptosis of PC12 cells induced by A β 25-35[J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2016, **32**(3): 343-349.

(编辑:裴阿卫)