



引用格式: 王峥, 王改萍, 赵群, 等. 红蓝光质复配对银杏幼苗光合特性及黄酮醇含量的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(11): 1673-1681.
[WANG Z, WANG G P, ZHAO Q, et al. Effects of light quality with different red and blue ratios on photosynthetic characteristics and flavonol content of *Ginkgo biloba* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(11): 1673-1681.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240330

红蓝光质复配对银杏幼苗光合特性及黄酮醇含量的影响

王 峥¹, 王改萍^{1*}, 赵 群¹, 翟金庭², 余鹏飞³

(1 南京林业大学 林草学院, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 盐城林场, 江苏盐城 224000; 3 睢宁县润企投资有限公司, 江苏徐州 221200)

摘 要 【目的】探究不同红蓝配比光质对银杏生长、光合与黄酮醇积累及抗氧化能力的影响, 筛选适宜银杏生长与黄酮积累的光质, 为调控提高银杏叶药用价值提供理论依据。【方法】以 2 年生银杏实生苗为试材, 设红蓝比例为 1:1 (1R1B)、1:3 (1R3B)、1:5 (1R5B) 和白光 (W, 对照) 4 种光质处理, 分析处理 20 d 后银杏生长、光合生理、黄酮醇含量及抗氧化能力。【结果】与白光相比, 不同比例红蓝光均降低了银杏叶生物量, 不利于株高地径的生长, 却有利于提高叶长、叶宽、叶面积及光合气体交换参数。1R5B 处理可提高叶片总叶绿素含量; 1R1B 处理促进了叶片总生物量积累; 1R3B 处理下叶片叶绿素荧光参数、抗氧化能力以及类胡萝卜素和总黄酮醇含量最大。【结论】适宜比例红蓝光配比光质对银杏生长及光合特性产生明显影响, 并显著提高叶黄酮醇含量与抗氧化能力, 且 1R3B 配比光质最有利于银杏黄酮类物质积累。

关键词 银杏; 光质; 光合特性; 黄酮醇; 抗氧化能力

中图分类号 Q945; S792.95 **文献标志码** A

Effects of light quality with different red and blue ratios on photosynthetic characteristics and flavonol content of *Ginkgo biloba* seedlings

WANG Zheng¹, WANG Gaiping^{1*}, ZHAO Qun¹, ZHAI Jinting², YU Pengfei³

(1 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry and Grassland, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Jiangsu Yancheng Forest Farm, Yancheng, Jiangsu 224000, China; 3 Suining County Run Enterprise Investment Co., Xuzhou, Jiangsu 221200, China)

Abstract [Objective] The study aims to investigate the effects of light quality with different red and blue ratios on the growth, photosynthesis, flavonol accumulation, and antioxidant capacity of *Ginkgo biloba*, select the light quality suitable for the growth and flavonoid accumulation, and provide a theoretical basis for improving the medicinal value of *G. biloba* leaves. [Methods] Two-year-old *G. biloba* seedlings were used, and four light quality treatments with red and blue ratios of 1:1 (1R1B), 1:3 (1R3B), 1:5 (1R5B), and white light (W, control) were set up. The growth, photosynthetic physiology, flavonol content, and antioxidant capacity of *G. biloba* after 20 days of treatment were analyzed. [Results] Different

收稿日期: 2024-06-08; 修改稿收到日期: 2024-06-11

基金项目: 江苏省科技计划(资金)项目(BE2021367); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 王 峥(1999—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事经济林培育研究。E-mail: wangzheng921520@163.com

* 通信作者: 王改萍, 副教授, 硕士生导师, 主要从事经济林栽培与利用研究。E-mail: wanggaiping@njfu.edu.cn

ratios of red and blue light reduced the biomass of *G. biloba* leaves, which was not conducive to the growth of plant height and ground diameter, but was conducive to the improvement of leaf length, width, and area and photosynthetic gas exchange parameters. 1R5B treatment increased the total chlorophyll content of leaves. 1R1B treatment promoted the accumulation of total leaf biomass. The chlorophyll fluorescence parameters, antioxidant capacity, carotenoid, and total flavonol contents of leaves under 1R3B were the highest. [Conclusion] The appropriate proportion of red and blue light had a significant effect on the growth and photosynthetic characteristics of *G. biloba*, and significantly increased the content of flavonols and antioxidant capacity. 1R3B red and blue light quality was the most conducive to the accumulation of flavonoids.

Key words *Ginkgo biloba*; light quality; photosynthetic characteristics; flavonol; oxidation resistance

银杏(*Ginkgo biloba* L.)是中国重要的经济树种^[1]。已有大量研究表明,银杏叶中含有丰富的黄酮类化合物,如黄酮醇类(槲皮素、山奈酚、异鼠李素)是主要的药用活性成分,具有抗氧化、增加免疫力的功效,已被广泛应用于临床胃癌、肝损伤等治疗中^[2-3]。银杏叶还可作为保健品食用,生产饮料和茶饮等,银杏已在“十三五”国家重点基础研发计划中被列为主要工业原料树种之一^[4]。目前,银杏叶药用价值得到了全球科研人员的关注,其应用价值不断被挖掘,发展叶用银杏成为中国银杏产业的主要发展方向之一。

光不仅是植物获取能量的直接源泉,更是对植物生长发育起重要作用的环境因素^[5]。研究表明,不同波长的光对植物的光合作用、基因表达与物质代谢影响不同^[6]。目前,红蓝光质在蔬菜、药用植物栽培中的应用日益广泛。据报道,蓝光有利于银杏黄酮类化合物积累及抗氧化能力的提高,但不利于生物量的积累^[7];蓝光抑制苹果幼苗生长和叶片伸长,提高光合效率,促进类黄酮代谢,而红光促进植株生长和根系发育,诱导激素传导^[7]。也有研究表明,植物长时间处于单色光照射下往往会受到不良影响,组合光通常可解决此类问题,对植物的生长更有利^[8]。高勇等^[9]发现,适宜比例红蓝光可以提高紫叶生菜(*Lactuca sativa* L.)光合效能并增加类黄酮等次生代谢物的积累;Marchant 等^[10]研究发现红蓝复合光照射草本植物姜黄(*Curcuma longa* L.)能够促进姜黄素的合成,提高多酚、黄酮的积累。

迄今,已有研究表明,蓝光可显著提高银杏苗高并有利于光合色素的积累,且显著提高银杏黄酮含量及总还原力,红光则起相反作用^[11],但不同比例红蓝复合光对银杏幼苗生长生理、类黄酮代谢调节机理的研究较少。为此,本研究采用 LED 光源,设置不同红蓝比例光质,探究不同比例红蓝光照射下

叶用银杏幼苗生长、光合特性、黄酮化合物含量及抗氧化能力的变化规律,通过综合分析初步筛选出适合银杏生长的光质环境,为提高银杏药用价值及进行木本植物资源化培育提供参考。

1 材料和方法

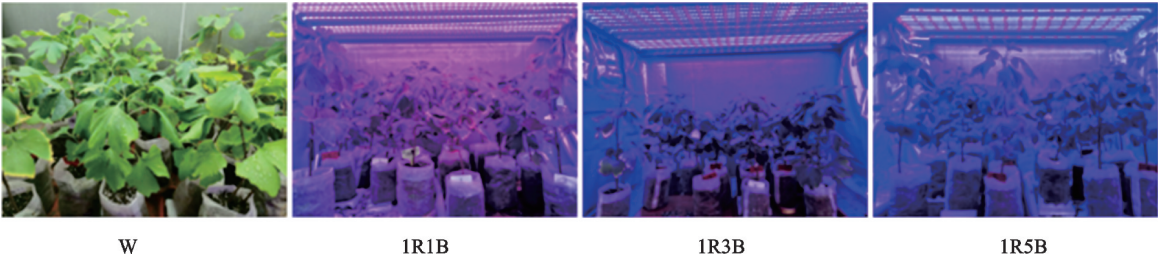
1.1 试验材料

试验材料为 2 年生实生苗。种子于 2021 年 9 月采自南京林业大学下蜀林场 15 年生优良银杏单株。2022 年 3 月播种育苗,种植于直径 10.5 cm、高 20 cm 的无纺布育苗袋中,栽培基质由泥炭土、蛭石、珍珠岩按照 1 : 1 : 1 体积比混合而成。2023 年 5 月中旬选择平均株高 40 cm、茎粗 6 mm、叶片数为 13 且无病虫害、生长相对一致的银杏苗在南京林业大学人工气候室进行光质试验。

1.2 试验设计

试验处理光源采用 LED 植物生长灯(由振安照明植物灯直销店提供),共设 4 个光质处理,红蓝光组合比例分别为 1 : 1(1R1B)、1 : 3(1R3B)、1 : 5(1R5B),以白光(W)为对照(图 1)。每个处理 30 株银杏苗,重复 3 次。不同光质配比通过红、蓝光灯珠数量组合来实现,其中,蓝光波长 460~465 nm,红光波长 660~665 nm。通过调整光源与植株之间的距离,保证光强维持在 $(250 \pm 10) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期为 12 h/d,采用定时器控制。用 OHSP-350UV 光谱仪(杭州虹谱光色科技有限公司)测定各处理 LED 光谱图(图 2)。

试验处理苗木置于植物培养平台上,不同处理之间用内面反光布进行 3 面遮光,避免外部光照干扰。气候室温度为 20~25 ℃,相对湿度为 80%。试验期间,每隔 3~5 d 浇 1 次水,并定期移动植株方向防止边缘效应。处理至 20 d 时测定生长与光合指标,并采样测定相关生理指标。



W 为白光处理(对照),1R1B、1R3B、1R5B 表示红蓝光比例分别为 1 : 1、1 : 3、1 : 5 的光质处理。下同。

图 1 不同光质银杏苗木处理

W is white light treatment (control), 1R1B,1R3B, and 1R5B stand for light quality treatments with red and blue ratios of 1 : 1, 1 : 3, and 1 : 5, respectively. The same as below.

Fig.1 Treatments of *G. biloba* seedlings under different light quality

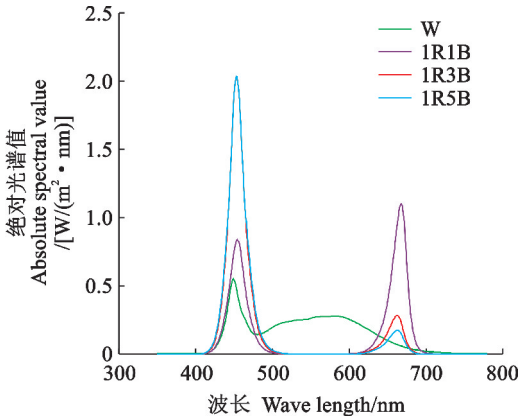


图 2 不同 LED 光质处理的光谱图

Fig.2 Spectra of different LED light treatments

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标

在光质处理开始及处理 20 d 时分别用卷尺测量苗高、游标卡尺测量地径,并计算苗高、地径增量。利用直尺测量叶长、叶宽,叶面积扫描仪对叶片进行 1 : 1 扫描,并用 Photoshop 软件计算叶面积。用电子天平测烘干至恒重后的叶干重与整株干重。

1.3.2 光合特性与光合色素含量

叶片光合气体交换参数使用 Li-6400 便携式光合仪进行活体测定。每个处理 5 株,每株选取苗木生长点下第 3~4 片完整成熟叶,并做好标记,于上午 8:00—11:30 测定叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和气孔导度(G_s),测定时设置温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度为 $250\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。选择标记好的叶片,采用 FMS-2 便携脉冲调制式荧光仪测定叶片初始荧光(F_o)、最大荧光产量(F_m),并计算 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)及光化学淬灭系数 qP ;采用乙醇浸提法测定叶光合色素含量^[12],各处理重复 3 次。

1.3.3 黄酮醇含量及抗氧化能力

银杏叶片总黄酮醇及其组分含量参照《中华人民共和国药典》^[13]中高效液相色谱法测定,总黄酮醇含量为槲皮素、山奈酚、异鼠李素三者含量之和的 2.51 倍。DPPH 自由基清除率参考苏西娅等^[14]方法,并作适当修改,具体为:取 1 mL 稀释 10 倍后的黄酮提取液,加入 2 mL 0.04 mg/mL DPPH 溶液,混匀后避光静置 30 min,在波长 517 nm 处测定样品吸光值 A_1 ,用 70%乙醇分别代替黄酮提取液和 DPPH 溶液测吸光值为 A_0 、 A_2 ,并计算 DPPH 自由基清除率 $\{[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100\%\}$ 。ABTS 自由基清除率参照 Thaipong 等^[15]方法测定,并稍作修改:取 0.4 mL 稀释 10 倍后的黄酮提取液,加入 2.9 mL 的 ABTS 工作液,避光反应 6 min 后,在 734 nm 下测样品吸光值为 B_1 ,以 70%乙醇分别代替黄酮提取液和 ABTS 工作液测吸光值为 B_0 、 B_2 ,并计算 ABTS 自由基清除率 $\{[1-(B_1-B_2)/B_0]\times 100\%\}$ 。

1.4 数据分析

用 Excel 2019 统计数据,并用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和 LSD 多重比较(显著性水平设为 $\alpha=0.05$),用主成分分析对不同处理进行综合排序,用 Origin 2021 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同比例红蓝光对银杏生长的影响

由表 1 可知,银杏苗高和地径增长量在不同光质处理下均存在显著差异($P<0.05$),均以白光对照(W)增量最大,各红蓝光配比光质处理均比 W 处理不同程度降低,但仅 1R5B 处理的苗高增量和 1R3B 的地径增量降幅达到显著水平($P<0.05$),其余红蓝光质处理均与 W 无显著差异。叶片形态在

不同光质处理间也存在显著差异($P<0.05$)。叶长、叶宽、叶面积均表现为 1R5B 处理最大,并均显著高于 W 处理,而其余红蓝光质处理均与 W 处理无显著差异。3 个红蓝光质处理银杏叶片生物量均比 W 处理不同程度降低,但仅 1R5B 处理降幅达到显著水平,显著低于 W 处理的 38.93%。银杏植株总生物量在不同光质处理下也存在显著差异($P<0.05$),并以 1R1B 处理最大(21.73 g),且显著高于 1R5B 和 W 处理,而 1R5B 和 1R3B 处理均与 W 处理无显著差异。

2.2 不同比例红蓝光对银杏叶片光合气体交换参数的影响

图 3 表明,不同比例红蓝光处理银杏叶片净光

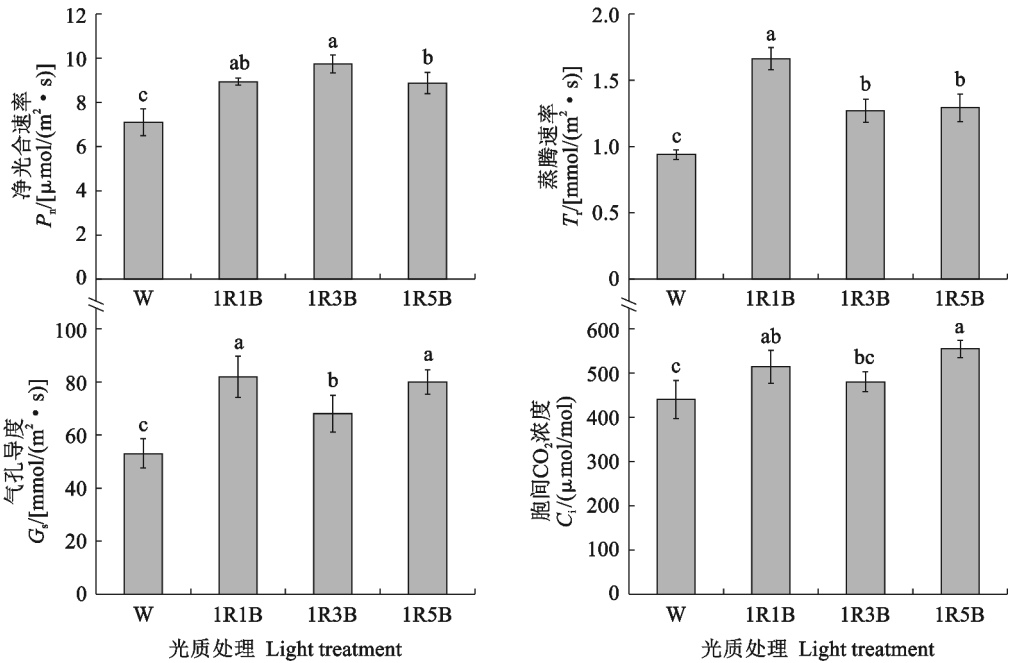
合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)均高于 W 处理,且除 1R3B 处理 C_i 外差异均达显著水平。在 3 个比例红蓝光处理组间比较,银杏叶片 P_n 以 1R3B 处理最高,比 W 处理显著提高 37.0%,也显著高于 1R5B 处理($P<0.05$);银杏叶片 T_r 以 1R1B 处理最高,并与 1R5B、1R3B、W 处理均存在显著差异($P<0.05$),比 W 处理显著增加了 76.6%。银杏叶片 G_s 的表现 1R1B、1R5B 处理显著高于 1R3B 处理,而前两者之间无显著差异,分别比 W 处理显著增加 54.7%和 50.9%。银杏叶片 C_i 在 1R5B 处理下最高,并与 1R3B、W 处理差异显著,比 W 处理显著增加 26.1%($P<0.05$)。

表 1 不同比例红蓝光下银杏幼苗生长状况

Table 1 Growth of *G. biloba* seedlings under different ratios of red and blue light

光质处理 Light treatment	苗高增量 Plant height increment /cm	地径增量 Ground diameter increment /cm	叶长 Leaf length /cm	叶宽 Leaf width /cm	叶面积 Leaf area /cm ²	叶生物量 Leaf biomass /g	总生物量 Total biomass /g
W	0.80±0.20a	0.99±0.18a	7.80±0.17b	9.00±0.92b	38.48±1.71b	4.47±0.56a	19.81±0.47bc
1R1B	0.70±0.10a	0.94±0.25a	8.68±0.48ab	10.16±0.31b	46.96±7.48b	3.65±0.74ab	21.73±0.75a
1R3B	0.55±0.05ab	0.44±0.11b	8.53±0.65b	9.33±0.59b	46.33±1.21b	4.34±0.45a	20.76±0.69ab
1R5B	0.35±0.17b	0.91±0.21a	9.67±0.71a	11.63±0.74a	56.21±4.13a	2.73±0.30b	18.98±0.48c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below.



不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。

图 3 不同比例红蓝光处理下银杏叶片光合气体交换参数

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below.
Fig. 3 The photosynthetic gas exchange parameters of *G. biloba* leaves under different ratios of red and blue light treatments

2.3 不同比例红蓝光对银杏叶片叶绿素荧光参数的影响

由表 2 可知,银杏幼苗叶片的最大荧光产量(F_m)和光化学淬灭系数(qP)在 4 种光质处理间均无显著差异,但均表现为 $1R3B>1R5B>1R1B>W$ 。银杏叶片 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和 PS II 潜在活性(F_v/F_o)都不同程度高于 W 处理,且在 1R3B 和 1R5B 处理下增幅均达到显著水平, F_v/F_m 增幅分别为 5.5%和 4.8%, F_v/F_o 增幅分别为 34.6%和 28.7%,1R3B 处理略高 1R5B 处理。其中,各处理 F_v/F_m 基本维持在 0.8 左右, qP 也保持稳定,表明研究范围内不同比例红蓝光照射没有破坏银杏叶片正常的光合机制。

2.4 不同比例红蓝光对银杏叶片光合色素含量的影响

由表 3 可知,银杏叶片叶绿素 a、b 及总叶绿素含量在 1R3B、1R5B 处理下均显著高于相应 1R1B 和 W 处理($P<0.05$),而 1R3B 与 1R5B 之间,1R1B 处理与 W 处理之间均无显著差异,其中的总叶绿素含量在 1R3B、1R5B 处理下分别比 W 处理显著上升 27.2%、29.6%;银杏叶片类胡萝卜素含量在 1R3B 和 1R5B 处理下也显著高于 1R1B 和 W 处理,而 1R3B 又显著高于 1R5B 处理,1R1B 处理与 W 处理

之间无显著差异,1R3B 和 1R5B 处理分别显著高于 W 处理 15.79%和 7.89%($P<0.05$)。可见,银杏叶片类胡萝卜素含量在蓝光比例增加时先增加后减小,在 1R3B 处理下达到最高,而其总叶绿素含量随着蓝光比例的增加而升高。

2.5 不同比例红蓝光对银杏叶黄酮醇类含量的影响

银杏叶片槲皮素、山奈酚、异鼠李素和总黄酮醇含量在不同红蓝光质处理下均不同程度地高于 W 处理,且在 1R3B 和 1R5B 处理下增幅均达到显著水平,1R1B 处理的槲皮素和总黄酮醇含量增幅也达到了显著水平(图 4)。其中,银杏叶片槲皮素含量以 1R3B 处理最高(1.85 mg/g)且显著高于其余处理,其次是 1R5B、1R1B,三者分别比 W 处理显著提高了 71%, 52%, 49%,而 1R5B 与 1R1B 处理之间无显著差异;山奈酚和异鼠李素含量均以 1R3B 和 1R5B 处理显著较高($P<0.05$),1R1B、W 处理较低,前两者显著高于后两者,但前两者之间及后两者之间均无显著差异;总黄酮醇含量在各比例红蓝光处理下均比 W 处理显著提高,并以 1R3B 处理最高(15 mg/g),1R1B、1R3B、1R5B 处理分别比 W 处理(11.31 mg/g)显著提高了 14%, 33%, 31%($P<0.05$),而 1R1B 与 1R5B 处理间无显著差异。

表 2 不同比例红蓝光处理下银杏叶片叶绿素荧光参数
Table 2 The chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *G. biloba* seedlings under different ratios of red and blue light treatments

光质处理 Light treatment	最大荧光产量 F_m	PSII 最大光化学效率 F_v/F_m	PSII 潜在活性 F_v/F_o	光化学淬灭系数 qP
W	721.333±44.546a	0.796±0.013b	3.918±0.309b	0.153±0.005a
1R1B	739.000±45.574a	0.808±0.014b	4.233±0.393b	0.158±0.009a
1R3B	746.667±56.323a	0.840±0.010a	5.272±0.387a	0.164±0.009a
1R5B	741.667±64.825a	0.834±0.012a	5.043±0.443a	0.160±0.011a

表 3 不同比例红蓝光处理下银杏叶片光合色素含量
Table 3 The photosynthetic pigment content in leaves of *G. biloba* seedlings under different ratios of red and blue light treatments

光质处理 Light treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	总叶绿素 Chlorophyll (a+b)
W	0.94±0.03b	0.31±0.01b	0.38±0.00c	1.25±0.04b
1R1B	1.01±0.03b	0.30±0.01b	0.40±0.01c	1.31±0.04b
1R3B	1.20±0.08a	0.40±0.02a	0.44±0.01a	1.59±0.10a
1R5B	1.19±0.02a	0.43±0.06a	0.41±0.01b	1.62±0.07a

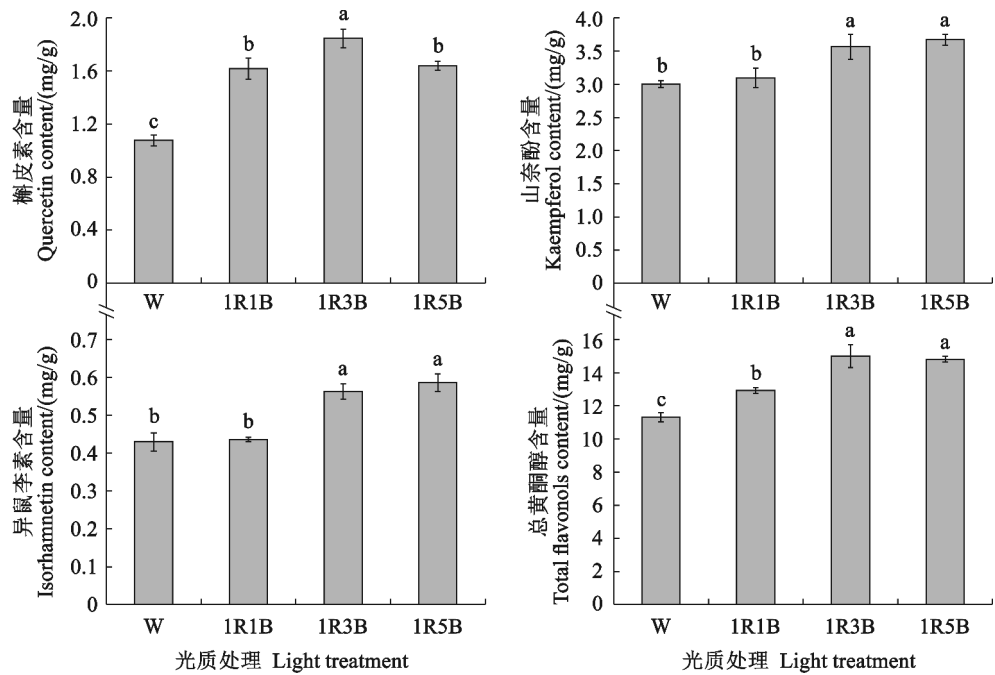


图 4 不同比例红蓝光处理下银杏叶黄酮醇含量

Fig. 4 The flavonol content in leaves of *G. biloba* under treatments with different ratios of red and blue light

2.6 不同比例红蓝光对银杏叶黄酮类提取物抗氧化能力的影响

DPPH 自由基清除率是体现体外抗氧化能力的方法之一,在一定浓度范围内,其值越大说明样品的抗氧化能力越强。由表 4 可知,不同比例红蓝光处理均提高了银杏叶片的抗氧化能力,其中在 1R3B 下银杏叶片黄酮类提取物的 DPPH 自由基清除率最大,相比 W 处理提高了 20.17%,且显著高于其他光质处理($P<0.05$)。ABTS 自由基清除率与 DPPH 自由基清除率在各光质处理下表现出相似的规律,即为 1R3B>1R1B>1R5B>W,其值在 1R3B 处理下最大(68.06%),且显著高于其他光质处理($P<0.05$),此时对自由基清除效果最佳,而其余处理间均无显著差异。

表 4 不同比例红蓝光对银杏叶黄酮类提取物抗氧化能力的影响

Table 4 The effects of different ratios of red and blue light on antioxidant capacity of flavonoid extracts from *G. biloba* leaves %

光质处理 Light treatment	DPPH 清除率 Scavenging rate of DPPH radical	ABTS 清除率 Scavenging rate of ABTS radical
W	39.11±0.00c	56.21±0.04b
1R1B	41.67±0.02b	61.36±0.01b
1R3B	47.00±0.01a	68.06±0.04a
1R5B	40.67±0.01bc	59.64±0.02b

因此,从 DPPH 和 ABTS 自由基清除率随各光质处理的变化趋势可以看出,光质中随蓝光比例的增大,银杏叶片黄酮类提取物的抗氧化能力先增大后减小,并以 1R3B 处理最强。

2.7 不同光质对银杏叶用价值影响的主成分分析与综合评价

银杏作为重要的药用植物,其研究培育的最终目的是获取更多的药用价值。银杏叶面积、叶生物量、光合特性、药用物质含量及抗氧化能力是评价叶用银杏药用价值的重要依据。根据研究目的与培育目标,将叶面积、叶生物量、净光合速率、PS II 最大光化学效率、类胡萝卜素含量、总叶绿素含量、总黄酮醇含量、DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率 9 个指标作为此次试验的核心指标进行主成分分析。依据特征值大于 1 的原则,共提取了 2 个主成分,其累计贡献率达 84.803%(表 5)。其中,第 1 主成分包括净光合速率、PSII 最大光化学效率、类胡萝卜素含量、总叶绿素含量、总黄酮醇含量及 DPPH、ABTS 自由基清除率,主要反映银杏叶光合生理特性;决定第 2 主成分的是叶面积和叶生物量,反映了银杏叶生长表型与生物量状况。根据提取的主成分得分值代入综合得分公式($F=0.627F_1+0.221F_2$),计算出每个光质处理的综合得分,并由大到小排序,结果如表 6 所示。4 个光质处理排名由高到低依次为 1R3B、1R5B、1R1B、W。

表 5 不同比例红蓝光处理下 9 个核心指标的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of nine core indicators under different ratios of red and blue light treatments

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	5.645	62.722	62.722
2	1.987	22.081	84.803

表 6 不同比例红蓝光处理的主成分综合得分及排名
Table 6 Composite scores and rankings of principal components of different ratios of red and blue light treatments

光质处理 Light treatment	主成分得分 Principal component score			排名 Ranking
	F_1	F_2	综合得分(F) Synthesis score (F)	
W	-3.27	0.39	-1.96	4
1R1B	-0.75	-0.08	-0.49	3
1R3B	2.67	1.55	2.02	1
1R5B	1.35	-1.87	0.43	2

3 讨 论

光质影响植物组织与器官的发育速度,对植株形态特征产生调控作用^[16]。本次试验结果表明,不同比例红蓝光质下银杏植株的苗高、地径都有所减小,这与 Zhang 等^[7]的研究结果相似。林婧^[17]发现,樱桃番茄幼苗在不同 LED 红蓝组合光照处理后,随着光质中蓝光比例增大,株高逐渐降低。在本试验中,随着蓝光占比增加,银杏苗高增长量也表现出逐渐降低趋势,这与上述研究结果一致。同时,银杏叶片形态也会受到光质的影响,红蓝组合光质下银杏的叶长、叶宽、叶面积均高于白光处理,这与张文林等^[18]研究结果相似。对于光质对植物生物量积累的影响方面,刘敏竹等^[19]发现,在不同比例红蓝光及单色红、蓝光下,红桔幼苗叶生物量有所下降;而在红蓝组合光下,红光占比越高越有利于山白兰苗木生物量累积^[20]。本试验结果均与这些前人研究结果相符。

光质对植物叶片光合参数的影响会因光照环境条件、试验材料的不同而有所差别^[21]。相关研究显示,不同比例红蓝光均导致‘金秋’砂糖橘新梢叶片 P_n 提高,且对于不同物种的最适红蓝比例存在显著差异^[22]。在本试验中,不同比例红蓝光均能提高银杏幼苗叶片 P_n 、 T_r 和 G_s ,且在 1R3B 处理下 P_n 最

大;同时, G_s 的变化规律与 T_r 相似,都以 1R1B 处理下最高,说明 1R1B 光质处理促进了银杏叶片的气孔开放,从而提高了蒸腾速率,这与王丽伟等^[23]研究结果一致。另外,银杏叶片 P_n 与 G_s 、 C_i 的变化趋势不完全相同,这意味着本试验中光合速率的变化不是气孔因素所致,而是由非气孔因素造成的^[24]。叶绿素荧光参数能够反映植物叶片在不同环境中对光能的吸收、传递、耗散比例及分配等情况^[25]。孙雨^[26]对生菜进行不同比例红蓝光处理发现, F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 变化趋势相同,且白光照射下的值均低于红蓝组合光处理。本试验中银杏叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 在 4 种光质处理下也均表现为 1R3B>1R5B>1R1B>W 的相同趋势,与上述研究结果一致。同时,本研究还发现,红蓝光质中随蓝光占比的增加,银杏叶片 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 值均呈先增加后减小的趋势,并均在 1R3B 处理时最大,此时净光合速率也表现为最大,光合活性最高,这在一定程度上说明了光合作用与叶绿素荧光参数的相关关系^[27]。光合色素不仅能将吸收的光能转化为化学能,为植物生长提高能量,同时其组成与含量对叶片光合速率也有显著影响,进而影响整个植株的生长状况^[28]。本研究发现,LED 红蓝复合光质中蓝光比例越高,银杏叶片叶绿素含量越高,这一点与李坤等^[29]的研究结果相吻合。同时有研究表明,不同比例红蓝光质对红叶石楠试管苗叶绿素合成有促进作用^[30],这也与本研究结果相同。

光质作为一种特殊信号分子,是影响植物次生代谢过程的重要因素。次生代谢物质在植物体内的合成和积累与光质调控密切相关^[31]。本试验结果显示,不同比例红蓝混合光处理对银杏叶黄酮类物质积累均有促进作用,且总黄酮醇含量显著高于对照。姜宗庆^[32]也发现红蓝混合光处理对香椿芽苗菜中抗氧化物质含量有明显促进效果。同时,本研究发现,在红蓝组合光质中,随着蓝光比例的增加,银杏叶总黄酮醇含量先增加后减少,并在 1R3B 处理时最高,这与郭阿瑾等^[33]的研究结果表现一致,但与吕铮^[34]的结果存在一定差异。这一方面可能是不同物种间差异所致,另一方面也可能是试验处理光强及其他试验条件不同所致。植物体内的黄酮类化合物具有较好的抗氧化活性,对 DPPH、ABTS 等自由基具有较强的清除效果^[35]。本试验中各处理黄酮类化合物对 DPPH 和 ABTS 自由基清除效果均以 1R3B 处理最佳,原因可能是 1R3B 光质处理更有利于诱导银杏叶黄酮类物质合成途径中关键

基因的上调,促进黄酮类物质积累,从而引起抗氧化能力增强^[36]。同时,DPPH 和 ABTS 自由基清除率与银杏叶片总黄酮醇含量变化趋势相似,这与唐丽等^[37]的研究结果相符,表明不同红蓝混合光处理增加了黄酮含量且提高了银杏叶的抗氧化能力。

4 结 论

不同比例红蓝光质均对银杏幼苗的生长、光合、

黄酮醇含量及抗氧化能力产生不同程度影响。白光对银杏植株形态的影响较为显著且有助于叶生物量的增加;叶片形态在 1R5B 处理下变化最为明显。1R3B 处理不仅提高了银杏叶片的光合效率和叶绿素含量,还显著促进黄酮类物质的积累及抗氧化能力的增强。综合分析表明,1R1B、1R3B 和 1R5B 处理对银杏叶用价值影响都优于 W 处理,其中 1R3B 处理最有利于银杏黄酮醇含量的积累和药用价值的提高。

参考文献:

- [1] 曹福亮. 中国银杏志[M]. 北京:中国林业出版社,2007:300.
- [2] 高仕宇. 银杏叶黄酮的酶法提取及稳定化和产品开发[D]. 南昌:南昌大学,2023.
- [3] 叶威,李强,陈颖,等. 雌、雄株和金叶银杏光合生理及黄酮成分年动态变化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(4):77-86.
YE W, LI Q, CHEN Y, *et al.* Annual dynamic changes in photosynthetic physiology and flavonoid components in female, male and golden-leaf *Ginkgo biloba* trees[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2022, 46(4): 77-86.
- [4] 阮毅. 银杏发展前景和营林措施初探[J]. 种子科技,2021,39(11):97-98.
RUAN Y. Preliminary study on development prospects and forest management measures of *Ginkgo biloba*[J]. *Seed Technology*, 2021, 39(11): 97-98.
- [5] LI Z Q, CHEN Q J, XIN Y Y, *et al.* Analyses of the photosynthetic characteristics, chloroplast ultrastructure, and transcriptome of apple (*Malus domestica*) grown under red and blue lights[J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 483.
- [6] OLLE M, ALSINA I. Influence of wavelength of light on growth, yield and nutritional quality of greenhouse vegetables[J]. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2019, 73(1): 1-9.
- [7] ZHANG L, WANG G P, WANG G B, *et al.* *Ginkgo biloba* L. responds to red and blue light: Via phenylpropanoid and flavonoid biosynthesis pathway[J]. *Forests*, 2021, 12(8): 1079.
- [8] 李金苗,罗天宇,刘玮,等. LED 光质对猴樟幼苗生长和光合特性的影响[J]. 安徽农业大学学报,2023,50(3):396-401.
LI J M, LUO T Y, LIU W, *et al.* Effects of LED light quality on the growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum bodinieri* seedlings[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(3): 396-401.
- [9] 高勇,李清明,刘彬彬,等. 不同光质配比对紫叶生菜光合特性和品质的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(11):3649-3657.
GAO Y, LI Q M, LIU B B, *et al.* Effects of light quality ratio on photosynthetic characteristics and quality of purple lettuce[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3649-3657.
- [10] MARCHANT M J, MOLINA P, MONTECINOS M, *et al.* Effects of LED light spectra on the development, phytochemical profile, and antioxidant activity of *Curcuma longa* from Eastern Island[J]. *Plants*, 2022, 11(20): 2701.
- [11] 王改萍,章雷,曹福亮,等. 红蓝光质对银杏苗木生长生理特性及黄酮积累的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(2):105-112.
WANG G P, ZHANG L, CAO F L, *et al.* Effect of red and blue light quality on growth physiological and flavonoid content of *Ginkgo biloba* seedlings[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2024, 48(2): 105-112.
- [12] 张敏,王子晴,权兴周,等. 光质对北细辛生长及光合生理特性的影响[J]. 北方园艺,2022(3):107-117.
ZHANG M, WANG Z Q, QUAN X Z, *et al.* Effects of light quality on growth and photosynthetic physiology characteristics of *Asarum heterotropoides* Fr. Schmidt var. *mandshuricum* (Maxim.) Kitag. [J]. *Northern Horticulture*, 2022 (3): 107-117.
- [13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:四部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020.
- [14] 苏西娅,杨晓明,郁万文,等. 截干对银杏类黄酮代谢及其抗氧化性的影响[J]. 分子植物育种,2021,19(3):996-1003.
SU X Y, YANG X M, YU W W, *et al.* Effective of trunk cutting on metabolism and antioxidant activity of *Ginkgo biloba* L. [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(3): 996-1003.
- [15] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, *et al.* Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6/7): 669-675.
- [16] METALLO R M, KOPSELL D A, SAMS C E, *et al.* Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, shoot morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 235: 189-197.
- [17] 林婧. LED 补光对樱桃番茄生长发育、产量及品质的影响[D]. 邯郸:河北工程大学,2018.
- [18] 张文林,任亚超,张益文,等. 不同光质 LED 光源对转基因杨树叶片 Bt 毒蛋白含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 核农学报,2016,30(8):1639-1645.
ZHANG W L, REN Y C, ZHANG Y W, *et al.* Effect of different LED light qualities on Bt toxic protein content and chlorophyll fluorescence of transgenic poplar leaves[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(8): 1639-1645.

- [19] 刘敏竹,李强,杨超,等. LED光质对红桔幼苗生长发育和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国南方果树, 2021, 50(2): 1-7.
LIU M Z, LI Q, YANG C, *et al.* Effects of LED light qualities on growth, development and chlorophyll fluorescence characteristics of *Citrus tangerine* seedlings[J]. *South China Fruits*, 2021, 50(2): 1-7.
- [20] 谢慈江,何福英,刘莉,等. 光质和光周期对山白兰苗木生长、生理的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(12): 2362-2373.
XIE C J, HE F Y, LIU L, *et al.* Effects of light quality and photoperiod on growth and physiology of *Michelia baillonii* seedlings[J]. *Guihaia*, 2023, 43(12): 2362-2373.
- [21] 汪凤林,曹光球,叶义全,等. 不同光质下杉木幼苗叶片光合作用的光响应[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(3): 366-371.
WANG F L, CAO G Q, YE Y Q, *et al.* Light response of photosynthesis in *Cunninghamia lanceolata* under different light qualities [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(3): 366-371.
- [22] 杨超,刘敏竹,李强,等. 发光二极管(LED)光质对‘金秋’砂糖橘幼苗生长发育和光合特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 89-97.
YANG C, LIU M Z, LI Q, *et al.* Effects of different light-emitting diode (LED) light quality on growth, development and photosynthetic characteristics of *Citrus reticulata* Blanco ‘Jinqiu’ seedlings[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(1): 89-97.
- [23] 王丽伟,李岩,辛国凤,等. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1595-1602.
WANG L W, LI Y, XIN G F, *et al.* Effects of different proportions of red and blue light on the growth and photosynthesis of tomato seedlings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1595-1602.
- [24] 汪星星,陈钢,孟芳芳,等. 光质对杉木幼苗光合生理及色素的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 82-90, 111.
WANG X X, CHEN G, MENG F F, *et al.* Effects of light quality on photosynthetic physiology and pigment accumulation of Chinese fir seedlings[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(12): 82-90, 111.
- [25] 李元景,曹兵,万仲武,等. 不同光质对‘灵武长枣’生长与光合特性的影响[J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 77-86.
LI Y J, CAO B, WAN Z W, *et al.* Effect of light quality on growth and photosynthetic characteristics of ‘Lingwu Chang-zao’[J]. *Non-wood Forest Research*, 2022, 40(3): 77-86.
- [26] 孙雨. 不同光质配比、光照强度和 UV-A 强度对生菜生长及品质的调控研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2022.
- [27] 孟畅,赵杨,杨菊,等. 光质对皂荚幼苗生长发育、光合特性及相关生理指标的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(10): 1961-1972.
MENG C, ZHAO Y, YANG J, *et al.* Effects of light quality on growth and chlorophyll fluorescence parameters of *Gleditsia sinensis* seedlings[J]. *Plant Physiology Journal*, 2022, 58(10): 1961-1972.
- [28] LIN J X, WANG Y N, SUN S N, *et al.* Effects of arbuscu-
lar mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis and photosynthetic pigments of *Leymus chinensis* seedlings under salt-alkali stress and nitrogen deposition[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 234-241.
- [29] 李坤,毛纯,刘军,等. LED光质对走马胎生长和生理及活性成分含量的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(5): 819-828.
LI K, MAO C, LIU J, *et al.* Effects of LED light quality on growth, physiology and active component contents of *Ardisia gigantifolia* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(5): 819-828.
- [30] 王政,刘伟超,何松林,等. LED红蓝光质比对红叶石楠试管苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 49-56.
WANG Z, LIU W C, HE S L, *et al.* Effects of different light quality ratios of LED red/blue light on growth and antioxidant enzyme activities of *Photinia fraseri* plantlets *in vitro* [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(10): 49-56.
- [31] 刘建福,王明元,唐源江,等. 光质对姜黄生理特性及根茎次生代谢的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(12): 1871-1879.
LIU J F, WANG M Y, TANG Y J, *et al.* Effects of light qualities on physiological characteristics and accumulation of secondary metabolites in rhizomes of *Curcuma longa* L. [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(12): 1871-1879.
- [32] 姜宗庆. 不同 LED 光质对香椿芽苗菜生长和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(11): 52-55.
JIANG Z Q. Effect of different LED light quality on the growth and quality of *Toona sinensis* sprouts[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33(11): 52-55.
- [33] 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): 1318-1323.
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): 1318-1323.
- [34] 吕铮. 不同 LED 光质对荞麦芽苗菜生长及品质的影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2023.
- [35] 章雷. 不同光质下银杏生长及黄酮醇积累规律探究[D]. 南京:南京林业大学, 2022.
- [36] 莫言玲,罗亚兰,刘义华,等. 不同 LED 光质对芥菜芽苗菜生长、营养品质和抗氧化特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2023, (11): 56-62.
MO Y L, LUO Y L, LIU Y H, *et al.* Effects of different LED light qualities on growth, nutritional quality and antioxidant activity of mustard sprouts [J]. *China Vegetables*, 2023, (11): 56-62.
- [37] 唐丽,鲁燕舞,崔瑾. 光质对苜蓿芽苗菜营养品质和抗氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 32-36.
TANG L, LU Y W, CUI J. Effects of light quality on nutritional quality and antioxidant properties of *Medicago sativa* sprouts[J]. *Food Science*, 2014, 35(13): 32-36.