

光质对不同家系青钱柳生物量和叶三萜类化合物积累的影响

刘 洋¹, 陈 培¹, 周明明¹, 李 娜¹, 方升佐^{1,2}

(1. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 【目的】光质作为影响光合作用的因素, 对植物体内次生代谢物质的积累有一定影响。青钱柳 *Cyclocarya paliurus* 是中国特有的药用及食用多功能植物, 其叶中的活性物质(如三萜)对人体健康具有促进和改善作用。通过开展光质处理对不同家系青钱柳生物量及叶三萜类物质积累影响的研究, 可为青钱柳苗期培育过程中的环境选择及保健产品的进一步开发提供参考。【方法】以1年生青钱柳实生苗为材料, 选择4个家系(四川沐川31号、浙江安吉1号、广西金钟山6号、广西金钟山7号)和设置4个不同光质(白光、蓝光、绿光和红光), 测定不同处理对青钱柳苗期生物量、叶三萜类化合物质量分数及单株产量的影响。【结果】光质和遗传因子对青钱柳生物量、叶三萜质量分数和单株产量均有显著影响($P < 0.05$)。相比白光处理, 其他光质处理显著($P < 0.05$)降低了青钱柳的总生物量积累, 但安吉1号家系的蓝光与白光处理差异不显著($P > 0.05$)。青钱柳叶总三萜质量分数在安吉1号和沐川31号家系的白光处理下最多, 蓝光次之; 红光处理显著($P < 0.05$)增加了青钱柳叶特有单体的质量分数。白光处理下叶生物量积累高的青钱柳植株积累了更多的三萜类化合物, 蓝光和绿光处理下较低。【结论】适当的光质处理可作为提高药用植物目标化合物(如三萜类物质)含量的一种控制措施。图1表8参27

关键词: 森林培育学; 青钱柳; 光质; 家系; 三萜类化合物; 生物量

中图分类号: S722.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2020)06-1097-08

Effects of light quality on biomass and triterpenoid accumulation in leaves of *Cyclocarya paliurus* from different families

LIU Yang¹, CHEN Pei¹, ZHOU Mingming¹, LI Na¹, FANG Shengzuo^{1,2}

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] As a factor affecting photosynthesis, light quality can influence the accumulation of secondary metabolites in plants. *Cyclocarya paliurus* is a medicinal and edible multifunctional plant unique to China, and the active substances (such as triterpenoids) in its leaves can promote and improve human health. The objective of this study is to investigate the effects of light quality on biomass and the accumulation of triterpenoids in *C. paliurus* leaves from different families to provide reference for environmental selection during the seedling stages and further development of health care products. [Method] Taking 1-year-old seedlings of *C. paliurus* as materials, four families (Muchuan 31, Anji 1, Jinzhongshan 6, Jinzhongshan 7) and four different light qualities (white light, blue light, green light and red light) were selected to examine the effects of different treatments on biomass, leaf triterpenoid content and yield per plant. [Result] Light quality and genetic factors had significant effects on biomass, triterpenoid content and yield in *C. paliurus* leaves ($P < 0.05$). Compared with white light treatment, other light quality treatments significantly reduced total

收稿日期: 2020-01-08; 修回日期: 2020-07-25

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)重点项目(BE2019388)

作者简介: 刘洋, 讲师, 博士, 从事林木生长和次生代谢研究。E-mail: taoji.liuyang@qq.com。通信作者: 方升佐, 教授, 博士, 从事人工林定向培育研究。E-mail: fangsz@njfu.edu.cn

biomass accumulation of *C. paliurus* ($P < 0.05$), but there was no significant difference between blue light treatment and white light treatment in Anji 1 family ($P > 0.05$). The total triterpenoid content in *C. paliurus* leaves was the highest under white light treatment in Anji 1 and Muchuan 31 families, followed by blue light. Red light treatment significantly increased the content of unique triterpenoid individuals in *C. paliurus* leaves ($P < 0.05$). Under white light treatment, the plants with higher level of leaf biomass accumulated more triterpenoids than those under blue and green light treatments. [Conclusion] Proper light quality treatment can be used to increase the contents of target compounds (e.g. triterpenoids) in medicinal plants. [Ch, 1 fig. 8 tab. 27 ref.]

Key words: silviculture; *Cyclocarya paliurus*; light quality; family; triterpenoid compounds; biomass

青钱柳 *Cyclocarya paliurus* 又名青钱李、摇钱树、一串钱等, 隶属胡桃科 Juglandaceae 青钱柳属 *Cyclocarya* 植物, 主要分布于江苏、浙江、贵州、广西、江西等亚热带地区, 为特有的单种属多功能树种^[1]。研究表明: 青钱柳叶中含有多种微量元素和黄酮类、三萜类、多糖类等活性物质, 具有降血糖、降血脂、抗氧化和抗衰老等功效^[2-6], 药用开发前景良好。目前, 对于青钱柳的研究主要集中于活性物质的提取与分离, 而有关遗传因子及环境条件对三萜类化合物积累的影响研究较少^[7-8]。遗传因子和环境条件(如水分、温度、光强和光质等)不仅影响植物的生长发育和形态建成, 还对植物的次生代谢物质积累产生重大影响^[9-12]。掌握光强和光质对植物生长和次生代谢类物质积累影响的规律, 不仅有利于提高植物光能利用效率, 还有利于实现现代农林业精准高效的生产要求。邓波等^[13]发现: 遮光、种源及两者的交互作用显著影响了青钱柳总三萜和三萜单体的单株产量。已有研究表明: 光质和遗传因子显著影响了青钱柳叶黄酮类化合物的积累^[14]。然而, 光质条件对青钱柳三萜类化合物积累的影响还不清楚。为了加深遗传因子和光环境对植物三萜类化合物积累影响的认识, 本研究开展了光质对不同家系青钱柳生物量积累、叶三萜类化合物质量分数和三萜单株产量影响的研究, 以期对药用青钱柳叶用林栽培中的环境调控和选育工作提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及试验设计

选择4个地域性、生长及活性成分差异显著^[14](四川沐川31号、浙江安吉1号、广西金钟山6号、广西金钟山7号)的青钱柳家系种子获得实生幼苗, 幼苗在南京市白马教学试验基地培养。2016年5月下旬, 选取1年生、生长状况良好、长势一致的青钱柳幼苗(地径约3.0 mm, 苗高约36.5 cm)移栽于黄心土:珍珠岩:腐熟鸡粪:草炭(体积比为2:2:2:4)的混合土壤中, 选择底部有孔的塑料盆(内径8.5 cm, 深10.0 cm), 每盆1株。基质的有机质为73.3 g·kg⁻¹, 全氮为72.35 g·kg⁻¹, 全磷为2.19 g·kg⁻¹, 全钾为9.55 g·kg⁻¹, pH为6.44。所有幼苗每日浇水, 保持土壤湿润, 昼夜温度自然过渡。4周后, 待植株长出第4对复叶时(2016年7月初), 利用不同颜色LED灯处理: 挑选800盆生长健壮且外形较一致的青钱

表1 二裂式裂区试验设计

Table 1 Split-plot randomized design of the experiment

处理	光质	家系	处理	光质	家系
WM	W(白色LED)	M(沐川31)	GM	G(绿色LED)	M(沐川31)
WA	W(白色LED)	A(安吉1)	GA	G(绿色LED)	A(安吉1)
WJ6	W(白色LED)	J6(金钟山6)	GJ6	G(绿色LED)	J6(金钟山6)
WJ7	W(白色LED)	J7(金钟山7)	GJ7	G(绿色LED)	J7(金钟山7)
RM	R(红色LED)	M(沐川31)	BM	B(蓝色LED)	M(沐川31)
RA	R(红色LED)	A(安吉1)	BA	B(蓝色LED)	A(安吉1)
RJ6	R(红色LED)	J6(金钟山6)	BJ6	B(蓝色LED)	J6(金钟山6)
RJ7	R(红色LED)	J7(金钟山7)	BJ7	B(蓝色LED)	J7(金钟山7)

柳幼苗进行光质处理。光质和家系交互试验按照随机区组试验，共 16 个处理(表 1)，每个处理 5 个重复，每个重复 10 株。实验处理如下：W 为对照白光(波段 400~690 nm，峰值 445 nm/560 nm)，R 为红光处理(波段 600~690 nm，峰值 653 nm)，G 为绿光处理(波段 460~597 nm，峰值 514 nm)，B 为蓝光处理(波段 400~500 nm，峰值 456 nm)。LED 光谱特性由 NIR-VIS 光谱仪(海洋光学，美国)进行测定，各处理下光量子通量控制在 $(800 \pm 50) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 生物量测定 处理第 80 天(观测到显著的生长和形态差异时)测定青钱柳苗高和地径，并从各处理中拔取 3 株接近其平均值的完整植株测定生物量。先将根冲洗干净，然后用剪刀将根部与地上部分分开，并放在标记好的牛皮纸袋中带回实验室，于 105 ℃ 烘箱中杀青 0.5 h，然后 80 ℃ 烘箱内烘干至恒量，称取根部与地上部分干质量。单株总生物量是地上和地下部分生物量干质量之和。

1.2.2 三萜类化合物测定 将生物量测定完成后的样品研磨成粉末，并密封保存在 0~4 ℃ 冷库。每个处理称取约 2 g 干样叶片粉末，用滤纸包好后放入 250 mL 索氏提取器，并用石油醚在 70 ℃ 水浴锅中回流提取 4 h，以去除叶样品中极性较小的脂溶性成分。丢弃提取液将药渣在室温下自然晾干，晾干后的药渣作为三萜类提取的样品。本研究采用超声波辅助提取法^[15]：用体积分数 70% 乙醇水溶液在 70 ℃ 水浴下超声提取 45 min，在同样条件下提取 2 次，并将 2 次提取液合并。合并后的提取液挥发至近干，再以甲醇反复清洗残渣并定容至 10 mL 作为三萜类质量分数测定的样品。

三萜类化合物单体质量分数用 HPLC 法进行测定。分析前，所有待测样品原液用 0.22 μm 有机膜过滤纯化，测定参照 CAO 等^[16]的方法。本研究共检测到 6 个三萜类次生代谢产物单体(阿江榄仁酸、青钱柳酸 B、青钱柳苷 B、青钱柳苷 A、常春藤皂苷元、齐墩果酸)，根据峰面积计算各单体含量。色谱条件：Waters 2695 Alliance 高效液相系统、Empower 3 数据处理系统、UVD 2996 二极管阵列检测器(DAD)、Waters X-Bridge C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250.0 mm，5 μm)。流动相为含有 0.01%(V/V) 甲酸的水溶液(溶液 A)和含 0.01%(V/V) 甲酸的乙腈溶液(溶液 B)。梯度洗脱：A 溶液与 B 溶液(V/V)比值：0~13 min 为 92:8，13~28 min 为 81:19，28~42 min 为 79:21，42~60 min 为 50:50，60~64 min 为 55:45，64~74 min 为 44:56，74~90 min 为 34:66，90~95 min 为 15:85，95~100 min 为 0:100。流动相流速为 1.0 mL·min⁻¹，柱温为 45 ℃，进样量为 10.0 μL ，检测波长为 205 nm。总三萜质量为所检测到的所有三萜单体质量的总和。总三萜(单体)单株产量($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)=总三萜(单体)质量分数($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)×叶生物量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 分析处理数据。光质和家系对青钱柳生物量及叶三萜类化合物积累的影响及其交互作用采用两因素方差分析，多重比较采用 Duncan's 算法。数据为平均值±标准差，用 Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 光质对不同家系青钱柳生物量积累的影响

不同处理下青钱柳根、茎、叶及总生物量干质量积累的变异范围分别为 4.1~7.3、4.3~7.2、4.5~7.7、13.0~21.4 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ (表 2)。在白光下生长的青钱柳植株总干质量和茎、叶片干质量最大。方差分析结果表明：光质、家系及两者的交互作用均对青钱柳各部分生物量的积累产生了显著影响($P < 0.05$)。与白光相比，其他光质处理下的青钱柳总生物量都显著下降($P < 0.05$)；而根、茎及叶生物量的积累在处理间也具有与总生物量相似的变异规律。不同家系青钱柳总生物量的均值在红光、绿光和蓝光下分别降低 17.84%、31.46%、4.69%。然而，安吉家系的青钱柳总生物量在蓝光与白光处理间没有显著差异。

2.2 光质对不同家系青钱柳叶三萜质量分数的影响

总三萜质量分数在处理间的变异范围为 1.2~9.4 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，主要的青钱柳三萜单体为齐墩果酸，变异范围为 0.4~3.8 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 3)。光质和家系及其交互作用对青钱柳叶三萜单体及其总质量分数的影响都十分显著(表 4)。总体来讲，与对照白光相比，单一波段的红光、绿光、蓝光下的青钱柳苷 B、青钱柳苷 A、常春藤皂苷元、齐墩果酸及总三萜均有所下降(表 3)，最高质量分数出现在 WA、WA、WJ6、WM、WJ7 处理；而阿江榄仁酸和青钱柳酸 B 的最高质量分数分别出现在 RJ7 和 RA 处理。不同家系之

表2 不同家系青钱柳生物量积累对光质的响应

Table 2 Response of biomass accumulation of *C. paliurus* from different families to light quality

处理	生物量/(g·株 ⁻¹)			
	根	茎	叶	总生物量
WJ7	6.7 ± 0.1 ab	6.8 ± 0.4 ab	6.5 ± 0.4 bc	20.0 ± 0.9 abc
WJ6	6.2 ± 0.0 bcd	7.2 ± 0.1 a	6.3 ± 0.1 bcd	19.7 ± 0.0 abc
WM	6.1 ± 0.3 bcd	7.0 ± 0.1 a	5.6 ± 0.0 cde	18.7 ± 0.2 be
WA	6.5 ± 0.2 abc	7.2 ± 0.1 a	7.7 ± 0.4 a	21.4 ± 0.7 a
RJ7	5.8 ± 0.1 cde	5.5 ± 0.3 cde	5.9 ± 0.2 be	17.2 ± 0.3 de
RJ6	6.4 ± 0.2 bc	5.2 ± 0.6 def	5.5 ± 0.0 de	17.1 ± 0.3 de
RM	6.8 ± 0.2 ab	5.3 ± 0.2 def	5.5 ± 0.1 def	17.6 ± 0.1 de
RA	6.4 ± 0.1 bc	5.7 ± 0.2 cd	5.4 ± 0.0 dg	17.5 ± 0.2 de
GJ7	4.4 ± 0.5 fg	4.6 ± 0.3 ef	4.6 ± 0.4 g	13.6 ± 1.2 f
GJ6	4.1 ± 0.0 g	4.3 ± 0.0 f	4.6 ± 0.3 fg	13.0 ± 0.4 f
GM	5.2 ± 0.1 ef	5.9 ± 0.0 bcd	5.9 ± 0.0 be	17.0 ± 0.0 e
GA	5.4 ± 0.3 de	4.7 ± 0.1 ef	4.5 ± 0.1 g	14.6 ± 0.1 f
BJ7	6.3 ± 0.3 bc	6.4 ± 0.0 abc	6.2 ± 0.0 be	18.9 ± 0.3 bcd
BJ6	6.9 ± 0.0 ab	5.5 ± 0.3 cde	5.8 ± 0.1 be	18.2 ± 0.5 cde
BM	6.5 ± 0.1 abc	5.5 ± 0.3 cde	5.4 ± 0.2 efg	17.4 ± 0.4 de
BA	7.3 ± 0.2 a	6.4 ± 0.2 abc	6.6 ± 0.3 b	20.3 ± 0.3 ab

说明: 同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

表3 光质和家系对青钱柳叶三萜物质质量分数的影响

Table 3 Effects of light quality and family on triterpenoid contents in *C. paliurus* leaves

处理	叶三萜物质质量分数/(mg·g ⁻¹)					
	阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸
WJ7	1.4 ± 0.1 b	0.18 ± 0.00 ef	1.9 ± 0.3 a	2.2 ± 0.0 b	0.05 ± 0.01 h	3.6 ± 0.4 a
WJ6	0.7 ± 0.1 e	0.21 ± 0.02 cde	1.5 ± 0.1 b	0.1 ± 0.0 i	0.57 ± 0.07 a	1.9 ± 0.2 de
WM	1.0 ± 0.0 c	0.21 ± 0.03 cde	2.3 ± 0.1 a	0.2 ± 0.0 h	0.50 ± 0.01 b	3.8 ± 0.0 a
WA	0.5 ± 0.0 f	0.22 ± 0.00 bcd	2.3 ± 0.1 a	3.1 ± 0.1 a	0.06 ± 0.01 h	1.6 ± 0.0 ef
RJ7	1.5 ± 0.1 a	0.19 ± 0.01 def	0.2 ± 0.0 gh	0.1 ± 0.0 i	0.25 ± 0.01 de	1.0 ± 0.1 g
RJ6	0.5 ± 0.0 f	0.24 ± 0.01 bc	1.2 ± 0.1 bcd	0.7 ± 0.0 f	0.07 ± 0.00 gh	0.9 ± 0.2 g
RM	1.1 ± 0.1 c	0.16 ± 0.01 f	0.4 ± 0.0 fgh	1.3 ± 0.1 d	0.12 ± 0.02 fgh	0.4 ± 0.0 h
RA	0.4 ± 0.0 gh	0.28 ± 0.02 a	2.1 ± 0.3 a	3.1 ± 0.1 a	0.06 ± 0.00 h	0.4 ± 0.0 h
GJ7	0.6 ± 0.0 f	0.16 ± 0.01 f	0.6 ± 0.0 efg	0.8 ± 0.1 e	0.29 ± 0.00 d	1.2 ± 0.2 fg
GJ6	0.8 ± 0.0 d	0.17 ± 0.01 f	1.0 ± 0.0 cde	0.2 ± 0.0 h	0.24 ± 0.05 de	3.8 ± 0.3 a
GM	0.2 ± 0.0 j	0.18 ± 0.01 ef	0.2 ± 0.0 gh	0.2 ± 0.0 h	0.15 ± 0.01 f	2.3 ± 0.0 cd
GA	0.1 ± 0.0 j	0.19 ± 0.02 def	0.1 ± 0.0 h	0.4 ± 0.0 g	0.14 ± 0.00 fg	0.4 ± 0.0 h
BJ7	0.4 ± 0.0 gh	0.19 ± 0.02 def	0.5 ± 0.0 fg	1.8 ± 0.0 c	0.36 ± 0.03 c	1.2 ± 0.0 fg
BJ6	0.4 ± 0.0 gh	0.20 ± 0.00 cde	0.8 ± 0.0 def	0.1 ± 0.0 i	0.27 ± 0.01 de	2.6 ± 0.1 bc
BM	0.3 ± 0.0 i	0.20 ± 0.01 cde	0.5 ± 0.0 fg	0.4 ± 0.0 g	0.36 ± 0.03 c	2.7 ± 0.5 b
BA	0.2 ± 0.0 j	0.25 ± 0.03 b	1.3 ± 0.1 bc	0.4 ± 0.0 g	0.23 ± 0.04 e	0.4 ± 0.1 h

说明: 同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

间的青钱柳叶三萜类化合物的质量分数差异显著 ($P < 0.05$)。总体来看, 金钟山 7 号家系的青钱柳叶总三萜质量分数最高 (表 5)。

2.3 光质对不同家系青钱柳叶三萜单株产量的影响

在叶片生物量与三萜质量分数的基础上得出了单株三萜类化合物组分的产量, 总三萜单株产量的变

表 4 光质、家系及两者的交互作用对青钱柳叶三萜物质质量分数的影响

变异来源	显著水平(P值)						
	阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸	总三萜
光质	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
家系	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.017
交互作用	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表 5 不同处理对青钱柳叶三萜物质质量分数的 Duncan’s 多重比较的影响

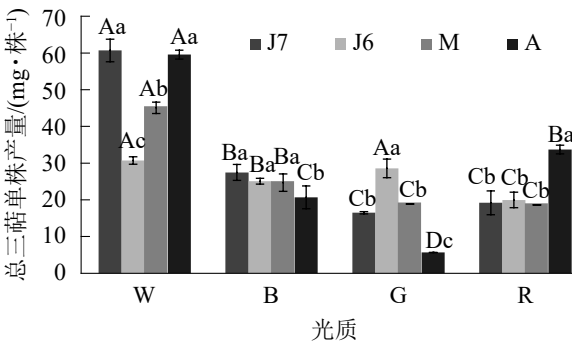
处理	水平	叶三萜物质质量分数/(mg·g ⁻¹)						
		阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸	总三萜
光质	W	0.90 a	0.21 a	2.0 a	1.4 a	0.30 a	2.7 a	7.5 a
	R	0.87 a	0.22 a	1.0 b	1.3 b	0.13 c	0.7 c	4.1 b
	G	0.42 b	0.17 b	0.5 c	0.3 d	0.21 b	1.9 b	3.6 c
	B	0.40 b	0.20 a	0.8 b	0.7 c	0.31 a	1.8 b	4.1 b
家系	J7	0.97 a	0.18 c	0.8 c	1.2 b	0.24 b	1.8 b	5.2 a
	J6	0.59 b	0.20 a	1.1 b	0.3 d	0.29 a	2.3 a	4.8 b
	M	0.63 b	0.19 bc	0.9 c	0.5 c	0.28 a	2.3 a	4.8 b
	A	0.41 c	0.23 a	1.4 a	1.7 a	0.12 c	0.7 c	4.6 b

说明：同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

异范围为 5.6~60.7 mg·株⁻¹(图 1)。本研究表明：光质和家系及其交互作用显著影响(P<0.05)了总三萜及其单体的单株产量；三萜单株产量的最高值都在白光处理下获得(图 1，表 6~8)。从家系层面讲，总三萜单株产量最高值从金钟山 7 号家系获得，安吉 1 号家系次之(表 8，图 1)。

3 讨论

环境和遗传因子对植物的生长和次生代谢产物如三萜类化合物的积累都有影响^[17]。植物体内的光敏色素会感知外界的光质变化，从而影响植物的光合作用、生长发育和形态建成、生理代谢以及结构特征等^[18]。本研究表明：白光和蓝光处理下的青钱柳幼苗生长较好，其根、茎、叶生物量和总生物量均高于绿光和红光处理的青钱柳幼苗。考虑到本研究所用的白光 LED 含有蓝光波段(445 nm)，可推测蓝光对青钱柳苗期生长的作用可能大于其他波段的光。这一结果和肉苁蓉 *Cistanche deserticola*、金线莲 *Anoectochilus roxburghii* 等植物的光质研究结果较为一致^[18-19]。MATLOCK 等^[20]研究表明：不同地区生长的松香藻 *Portieria hornemannii* 主要活性成分卤代单萜烯类(Apakaochtodenenes A 和 B)的含量存在明显差异。李彦等^[21]研究表明：光照强度和遗传因子对青钱柳叶的三萜类化合物积累影响十分显著。而梅锡玲等^[22]研究发现：不同的 LED 蓝光、绿光处理有利于灵芝 *Ganoderma Lucidum* 菌丝体内总三萜的积累。范桂枝等^[23]研究发现：不同光质对白桦 *Betula platyphylla* 愈伤组织三萜的积累从大到小依次为蓝光、红光、黄光、绿光，说明蓝光有利于三萜类物质的积累。但本研究结果显示：青钱柳总三萜质量分数在浙江安吉和四川沐川家系的白光处理下最多，蓝光次之，这说明不同植物体内活性组分的积累对环境的响应存在着显著的种属差异。从光质处理的角度分析，三萜类化合物的积累在生长



不同大写字母表示同一家系在不同光质间差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示不同家系在同一光质下差异显著(P<0.05)

图 1 不同家系青钱柳叶总三萜单株产量对光质的响应

Figure 1 Response of total triterpenoid yields in *C. paliurus* leaves from different families to light quality

表6 光质和家系对青钱柳叶三萜单体产量的影响

Table 6 Effects of light quality and family on yields of individual triterpenoids in *C. paliurus* leaves

处理	叶三萜单体产量/(mg·株 ⁻¹)					
	阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸
WJ7	9.1 ± 0.1 a	1.2 ± 0.1 c	12.2 ± 1.0 b	14.5 ± 1.1 c	0.4 ± 0.0 i	23.3 ± 2.0 a
WJ6	4.2 ± 0.5 c	1.3 ± 0.1 bc	9.3 ± 0.8 cd	0.6 ± 0.0 hi	3.6 ± 0.4 a	11.8 ± 1.3 c
WM	5.6 ± 0.1 b	1.2 ± 0.1 c	12.9 ± 0.5 b	1.3 ± 0.0 hi	2.8 ± 0.0 b	21.3 ± 0.2 a
WA	4.2 ± 0.2 c	1.7 ± 0.1 a	17.3 ± 1.5 a	23.6 ± 1.8 a	0.5 ± 0.0 hi	12.3 ± 0.7 c
RJ7	8.9 ± 0.9 a	1.1 ± 0.1 cd	1.1 ± 0.1 ij	0.6 ± 0.0 hi	1.5 ± 0.1 ef	6.0 ± 0.5 de
RJ6	2.8 ± 0.2 d	1.3 ± 0.1 bc	6.5 ± 0.1 ef	3.8 ± 0.1 f	0.4 ± 0.0 i	5.2 ± 0.0 dg
RM	6.0 ± 0.2 b	0.9 ± 0.0 def	2.0 ± 0.1 hij	7.0 ± 0.5 e	0.7 ± 0.0 hi	2.0 ± 0.0 fg
RA	2.2 ± 0.2 de	1.5 ± 0.1 ab	11.1 ± 1.6 bc	16.6 ± 0.3 b	0.3 ± 0.0 i	1.9 ± 0.0 fg
GJ7	2.6 ± 0.3 d	0.7 ± 0.1 f	2.5 ± 0.2 gj	3.7 ± 0.0 f	1.3 ± 0.1 ef	5.7 ± 0.5 def
GJ6	3.8 ± 0.4 c	0.8 ± 0.1 f	4.4 ± 0.3 fgh	1.1 ± 0.0 hi	1.1 ± 0.2 fg	17.4 ± 0.7 b
GM	0.9 ± 0.0 f	1.1 ± 0.1 cde	1.4 ± 0.3 ij	1.2 ± 0.1 hi	0.9 ± 0.0 gh	13.3 ± 0.0 c
GA	0.6 ± 0.0 f	0.8 ± 0.0 ef	0.3 ± 0.0 j	1.6 ± 0.1 ghi	0.6 ± 0.0 hi	1.7 ± 0.0 g
BJ7	2.4 ± 0.1 d	1.2 ± 0.1 c	2.8 ± 0.2 ghi	11.2 ± 0.8 d	2.2 ± 0.2 c	7.6 ± 0.0 d
BJ6	2.1 ± 0.1 de	1.1 ± 0.0 c	4.5 ± 0.3 fg	0.4 ± 0.0 i	1.6 ± 0.1 de	15.3 ± 0.7 bc
BM	1.5 ± 0.1 e	1.2 ± 0.0 cd	3.3 ± 0.1 ghi	2.0 ± 0.0 gh	2.0 ± 0.3 cd	14.9 ± 1.2 bc
BA	3.6 ± 0.2 c	1.6 ± 0.1 a	8.4 ± 0.8 de	2.7 ± 0.3 fg	1.5 ± 0.4 ef	2.8 ± 0.1 efg

说明：同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

表7 光质、家系及两者的交互作用对青钱柳叶三萜单体单株产量的影响

Table 7 Summary of significance levels for the effects of light quality, family and their interaction on individual triterpenoid yields of *C. paliurus* leaves

变异来源	显著水平(P 值)					
	阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸
光质	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
家系	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
交互作用	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表8 不同处理对青钱柳叶三萜单体单株产量的 Duncan's 多重比较的影响

Table 8 Effects of different treatments on Duncan's multiple-range test for individual triterpenoid yields of *C. paliurus* leaves

处理	水平	三萜单体单株产量/(mg·株 ⁻¹)					
		阿江榄仁酸	青钱柳酸B	青钱柳苷B	青钱柳苷A	常春藤皂苷元	齐墩果酸
光质	W	5.76 a	1.33 a	12.94 a	9.98 a	1.80 a	17.17 a
	R	4.95 a	1.21 b	5.20 b	6.98 b	0.73 c	3.78 c
	G	1.96 d	0.85 c	2.16 c	1.90 d	0.98 b	9.52 b
	B	2.41 c	1.26 ab	4.75 b	4.06 c	1.82 a	10.15 b
家系	J7	5.74 a	1.05 b	4.66 c	7.48 b	1.35 b	10.64 b
	J6	3.21 b	1.12 b	6.19 b	1.45 d	1.67 a	12.41 a
	M	3.50 b	1.06 b	4.90 c	2.87 c	1.58 a	12.89 a
	A	2.63 c	1.42 a	9.29 a	11.13 a	0.73 c	4.68 c

说明：同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

好的白光处理下最高，而在生长差的蓝光和绿光处理下较低；DENG 等^[7]和李彦等^[21]研究也表明：当光照强度降低时，青钱柳的生长会受到抑制，而黄酮类化合物和三萜化合物的积累也明显降低。这一结果和氮素/营养平衡假说^[24]较为一致，即当植物生长受到环境(水、光等)胁迫时，以碳为基础的初生生长及次生代谢产物的积累会受到限制。

柯仲成等^[25]发现: 枇杷 *Eriobotrya japonica* 叶中的三萜酸是主要有效活性成分之一, 其中熊果酸、科罗索酸和山楂酸具有显著的降血糖、抗炎和抗肿瘤等药理作用。彭艳芳等^[26]也发现: 山杏 *Armeniaca sibirica* 叶中所含有的齐墩果酸、熊果酸和桦木酸也对肿瘤具有非常明显的抑制作用。了解三萜单体酸的药理作用和功能, 对于更好、更有针对性地培育获取三萜单体化合物具有重要意义。已有研究表明: 青钱柳的降糖降脂及抗氧化功效和其内含的三萜类物质密切相关, 尤其是其特有的单体组分如青钱柳酸 B、青钱柳苷 A 和青钱柳苷 B 等^[4]。李新宇等^[27]通过对 1 年生白栎幼树叶片进行不同光质处理发现: 绿光可提高齐墩果酸的含量, 蓝光可提高白桦酯醇的含量, 分别为对照白光的 13.280 和 1.959 倍, 这与本研究的结果较为一致, 蓝光和绿光也有利于青钱柳叶片内部分三萜单体 (如齐墩果酸) 的积累。对于青钱柳特有的三萜组分 (青钱柳酸 B、青钱柳苷 A 和青钱柳苷 B) 来说, 红光处理可能效果更好, 但考虑到青钱柳叶三萜产量时, 四川沐川家系的白光处理效果较好。

4 参考文献

- [1] 方升佐, 洪香香. 青钱柳资源培育与开发利用的研究进展[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2007, **31**(1): 95 – 100.
FANG Shengzuo, FU Xiangxiang. Progress and prospects on silviculture and utilization of *Cyclocarya paliurus* resources [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **31**(1): 95 – 100.
- [2] 李磊, 谢明勇, 易醒, 等. 青钱柳多糖组分及其降血糖活性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2001, **23**(4): 484 – 486.
LI Lei, XIE Mingyong, YI Xing, et al. Bioactivity of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinsk. leaves in reducing blood sugar [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2001, **23**(4): 484 – 486.
- [3] 易醒, 谢明勇, 温辉梁, 等. 青钱柳对四氧嘧啶糖尿病小鼠降血糖作用的研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2001, **13**(3): 52 – 54.
YI Xing, XIE Mingyong, WEN Huiliang, et al. Hypoglycemic effects of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinsk. on alloxan diabetic mice [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2001, **13**(3): 52 – 54.
- [4] LIU Yang, CAO Yanni, FANG Shengzuo, et al. Antidiabetic effect of *Cyclocarya paliurus* leaves depends on the contents of antihyperglycemic flavonoids and antihyperlipidemic triterpenoids [J]. *Molecules*, 2018, **23**(5): 1042. doi: 10.3390/molecules23051042.
- [5] 谢明勇, 聂少平. 天然产物活性多糖结构与功能研究进展[J]. *中国食品学报*, 2010, **10**(2): 1 – 11.
XIE Mingyong, NIE Shaoping. A review about the research of structure and function of polysaccharides from natural products [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2010, **10**(2): 1 – 11.
- [6] LIU Yang, QIAN Chenyun, DING Sihui, et al. Effect of light regime and provenance on leaf characteristics growth and flavonoid accumulation in *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja. coppices [J]. *Bot Stud*, 2016, **57**(1): 28 – 41.
- [7] DENG Bo, SHANG Xulan, FANG Shengzuo, et al. Integrated effects of light intensity and fertilization on growth and flavonoid accumulation in *Cyclocarya paliurus* [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, **60**(25): 6286 – 6292.
- [8] 刘文科, 杨其长. LED 植物光质生物学与植物工厂发展[J]. *科技导报*, 2014, **32**(10): 25 – 28.
LIU Wenke, YANG Qichang. Development status of plant photobiology with LED monochromatic light and plant factory [J]. *Sci Technol Rev*, 2014, **32**(10): 25 – 28.
- [9] 吴江, 刘鹏, 吴家胜. 遮光对杨桐生长及叶片色素质量分数的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2010, **27**(5): 786 – 789.
WU Jiang, LIU Peng, WU Jiasheng. Seedling growth and leaf pigments of *Cleyera japonica* with shade treatments [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(5): 786 – 789.
- [10] 徐琳煜, 刘守赞, 白岩, 等. 不同光强处理对三叶青光合特性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(3): 467 – 475.
XU Linyu, LIU Shouzan, BAI Yan, et al. Effects of light intensity treatments on photosynthetic characteristics in *Tetrastigma hemsleyanum* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(3): 467 – 475.
- [11] CARLSEN S C K, FOMSGAARD I S. Biologically active secondary metabolites in white clover (*Trifolium repens* L.)—a review focusing on contents in the plant, plant-pest interactions and transformation [J]. *Chemoecology*, 2008, **18**(3): 129 – 170.
- [12] RADUSIENE J, KARPAVICIENE B, STANIUS Z. Effect of external and internal factors on secondary metabolites accumulation in St. John's wort [J]. *Bot Lith*, 2012, **18**(2): 101 – 108.

- [13] 邓波, 刘桂华, 余云云, 等. 遮荫和种源对青钱柳三萜类化合物积累的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(2): 383 – 390.
DENG Bo, LIU Guihua, YU Yunyun, *et al.* Effects of shading and provenance on triterpenoid accumulation in leaves of *Cyclocarya paliurus* [J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37**(2): 383 – 390.
- [14] 刘洋, 秦健, 周明明, 等. 光质和基因型对青钱柳叶黄酮类化合物积累的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, **42**(3): 99 – 104.
LIU Yang, QIN Jian, ZHOU Mingming, *et al.* Influence of light quality and genotype on flavonoid accumulation in the leaves of *Cyclocarya paliurus* [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2018, **42**(3): 99 – 104.
- [15] HUANG Wen, XUE An, NIU Hai, *et al.* Optimised ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Folium eucommiae* and evaluation of antioxidant activity in multi-test systems in vitro [J]. *Food Chem*, 2009, **114**(3): 1147 – 1154.
- [16] CAO Yanni, FANG Shengzuo, YIN Zhiqi, *et al.* Chemical fingerprint and multicomponent quantitative analysis for the quality evaluation of *Cyclocarya paliurus* leaves by HPLC-Q-TOF-MS [J]. *Molecules*, 2017, **22**(11): 1927.
- [17] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015, **51**(8): 1217 – 1234.
XU Daquan, GAO Wei, RUAN Jun. Effects of light quality on plant growth and development [J]. *Plant Physiol J*, 2015, **51**(8): 1217 – 1234.
- [18] MIRANDA J H, WILLIAMS R. Developmental influence of in vitro light quality and carbon dioxide on photochemical efficiency of PS II of strawberry leaves (*Fragaria × ananassa*) [J]. *J Appl Hortic*, 2007, **9**(1): 13 – 16.
- [19] YE Shenyi, SHAO Qingsong, XU Mengjie, *et al.* Effects of light quality on morphology, enzyme activities, and bioactive compound contents in *Anoectochilus roxburghii* [J]. *Front Plant Sci*, 2017, **8**: 857. doi: 10.3389/fpls.2017.00857.
- [20] MATLOCK D B, GINSBURG D W, PAUL V J. Spatial variability in secondary metabolite production by the tropical red alga *Portieria hornemannii* [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **398/399**: 263 – 273.
- [21] 李彦, 周晓东, 方升佐, 等. 光照和家系对青钱柳叶三萜类化合物积累的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, **39**(5): 52 – 58.
LI Yan, ZHOU Xiaodong, FANG Shengzuo, *et al.* Influence of illumination intensity and provenance on triterpenoid accumulation in the leaves of *Cyclocarya paliurus* seedlings [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **39**(5): 52 – 58.
- [22] 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): 3546 – 3550.
MEI Xiling, CHEN Ruoyun, LI Baoming, *et al.* Effect of light quality on growth and triterpenic acid content of *Ganoderma lucidum* mycelium [J]. *Chin Tradit Herbal Drugs*, 2013, **44**(24): 3546 – 3550.
- [23] 范桂枝, 詹亚光, 王博, 等. 光质、光周期对白桦愈伤组织生长和三萜质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(1): 1 – 3.
FAN Guizhi, ZHAN Yaguang, WANG Bo, *et al.* Effects of light treatment on growth and triterpenoid content in *Betula platyphylla* callus [J]. *J Northeast For Univ*, 2009, **37**(1): 1 – 3.
- [24] van de WAAL D B, VERSPAGEN J M H, LÜRLING M, *et al.* The ecological stoichiometry of toxins produced by harmful cyanobacteria: an experimental test of the carbon-nutrient balance hypothesis [J]. *Ecol Lett*, 2009, **12**: 1326 – 1335.
- [25] 柯仲成, 朱志平, 徐志远, 等. 枇杷叶三萜酸研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报, 2014, **16**(7): 117 – 119.
KE Zhongcheng, ZHU Zhiping, XU Zhiyuan, *et al.* Research progress of triterpene acids of *Eriobotrya japonica* leaf [J]. *J Liaoning Univ Tradit Chin Med*, 2014, **16**(7): 117 – 119.
- [26] 彭艳芳, 李洁, 李旺, 等. 山杏叶桦木酸、齐墩果酸和熊果酸的研究[J]. 河北林果研究, 2012, **27**(2): 157 – 160.
PENG Yanfang, LI Jie, LI Wang, *et al.* Study on the betulinic acid, oleanolic acid and ursolic acid in leaf of *Prunus sibirica* L. [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 2012, **27**(2): 157 – 160.
- [27] 李新宇, 尹静, 詹亚光, 等. 不同光强和光质对白桦幼树体内三萜积累的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2010, **22**(3): 475 – 478.
LI Xinyu, YIN Jing, ZHAN Yaguang, *et al.* Effect of different intensity and quality of light on accumulation of triterpenoid in birch (*Betula platyphylla* suk.) seedlings [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2010, **22**(3): 475 – 478.