

光质对云南红豆杉生长及紫杉烷含量影响的研究

苏建荣¹, 臧传富², 刘万德¹, 李帅锋¹, 张志钧¹

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要:将2年生云南红豆杉置于用滤光膜营造白光、黄光、红光和蓝光4种光环境中栽培1 a。栽培期间,测定光合作用,试验期末取样测定植株大小、枝叶特性、生物量和紫杉醇含量等,以揭示不同光质对云南红豆杉形态、光合作用和紫杉烷类物质含量的影响。结果表明:红光能提高最大净光合速率(P_{max})、表光量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)、光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP),抑制叶生长,增加第一级枝枝条总数,促进株高生长,提高茎和植株生物量;黄光使 P_{max} 、AQY降低、使LCP和LSP提高,抑制叶生长,提高茎、叶和植株总生物量;蓝光降低 P_{max} 、AQY,提高LSP、LCP、 R_d ,抑制叶和地径的生长,促进高的生长。不同光质处理下,根、茎、叶中紫杉烷的含量无显著差异,但是对叶中巴卡亭Ⅲ,根中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ和7-差向紫杉醇含量的影响差异显著。红光显著抑制叶中巴卡亭Ⅲ合成和积累,提高根中7-差向紫杉醇的含量;黄光显著提高了根中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ、7-差向紫杉醇的含量;蓝光显著提高根中紫杉醇的含量,但降低叶中巴卡亭Ⅲ的含量。

关键词:光质;云南红豆杉;生长;光合作用;紫杉烷

中图分类号:S791.49

文献标识码:A

Effect of Light Quality on Growth and Taxanes Contents of *Taxus yunnanensis*

SU Jian-rong¹, ZANG Chuan-fu², LIU Wan-de, LI Shuai-feng, ZHANG Zhi-jun¹

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the effect of light quality on the growth, photosynthesis and Taxanes accumulation of *Taxus yunnanensis*, 2-years old young *T. yunnanensis* were planted under various color films for 1 year. Their size, biomass, architectural parameters, leaf feature, and photosynthetic parameters such as the maximal net photosynthesis rate (P_{max}), apparent quantum yield (AQY), dark respiration rate (R_d), light saturation point (LSP), light compensation point (LCP) and Taxol content etc. were determined. The results showed that the P_{max} , AQY, R_d , LSP, LCP, height, leaf and total biomass of the plants under red films increased. The P_{max} , AQY of the plants under yellow films decreased, and the LSP, LCP, leaf, branch, root and total biomass increased. The P_{max} and AQY, and ground diameter of the plants under blue films decreased, while the R_d , LSP, LCP and height increased. Under different color films, the difference of taxanes content in the plants were not significant. The content of baccatin Ⅲ in leaf and 7-*epi*-taxol in root of the plants under red films increased. The content of Taxol, 10-deacetyl baccatin Ⅲ and 7-*epi*-taxol in root of the plants under yellow films increased. The content of Taxol in root of the plant under blue films increased, but the content of baccatin Ⅲ in leaf decreased.

Key Words: light quality; *Taxus yunnanensis*; growth; photosynthesis; Taxanes

光是植物光合作用的能量来源和生长发育的信号来源^[1],影响着植物的生长发育、形态结构和生理生化等方面^[2]。光影响植物的生长与初生代谢,也影响植物的次生代谢^[3-6]。植物次生代谢产物是药物、香料和工业原料的重要来源,对人类的生产、生活有重要的影响。光对植物次生代谢的影响越来越受重视,有关研究涉及光对银杏(*Ginkgo biloba* L.)、高山红景天(*Rhodiola sachalinensis* A. Bor)和喜树(*Camptotheca acuminata* Decne)的黄酮苷、红景天苷、喜树碱等次生代谢的影响等^[7]。目前,研究光强、光质对植物生长发育影响的居多,对次生代谢影响的研究较为有限^[8];而後者的研究多以组织培养材料为对象,以植株为对象的研究较少^[7],对木本植物的研究则更少^[9]。探索光质对植物生长、代谢的影响可为次生代谢产物的高效生产提供理论依据和实践指导,因而具有重要的意义^[10]。紫杉醇是最具抗癌活性的天然化合物^[11],已被 40 多个国家用于多种癌症的治疗。紫杉醇系红豆杉属(*Taxus*)植物的次生代谢产物,人工培育红豆杉是目前获取紫杉醇最有效、可行的途径^[12-14]。随着半合成紫杉醇和多烯紫杉醇的成功,对红豆杉药用成分的关注也从紫杉醇扩大到紫杉烷类物质^[15-16]。云南红豆杉(*T. yunnanensis* Cheng et L. K. Fu)主要分布在滇、川、藏等地,是生产紫杉醇的主要树种,广泛用于原料基地的建设^[12,14]。关于云南红豆杉的研究主要集中在紫杉醇含量变异、良种选育、种苗培育、采穗圃营建、人工林营建及紫杉醇含量分析等方面^[17-18],鲜有生态因子对其生长和紫杉烷含量影响的研究报道,更未见对光因子影响方面的报道,相关工作亟待开展。光对红豆杉其它树种影响的研究也不多,且以遮阴和 UV-B 对药用成分含量的影响为主^[19-26],尚需加深、加强。

本研究旨在通过人工控制栽培对比试验,揭示不同光质对云南红豆杉植株大小、形态、光合作用、生物量以及对紫杉醇等紫杉烷类物质含量的影响,以期为云南红豆杉高效药用原料林培育提供理论依据和实践指导,为构建林源活性物质原料林培育技术体系提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究在中国林科院资源昆虫研究所景东试验站完成。它位于 100°21'~101°15' E, 23°56'~24°50' N,海拔 1 200 m,有无量山、哀牢山环绕。年平

均气温(18.3 ± 0.5)℃,极端最高气温(37 ± 1.5)℃,极端最低气温(-2 ± 1)℃;年平均降水量(1 100 ± 50) mm,多集中于 7—8 月;年平均日照天数(205 ± 5) d;年均太阳辐射总量(131.7 ± 2.5) kcal · cm⁻²。

1.2 试验材料和试验设计

1.2.1 试验材料 所用苗木为 2 年生腾冲种源云南红豆杉实生苗,根系发达、生长健康、大小和长势基本一致。2008 年 11 月 15 日苗木定植于高 23.5 cm,直径 21.5 cm,盆底具小孔的塑料盆内。基质用河沙、生土和腐殖土按 2:5:3 比例配制,并用 50% 的多菌灵和敌克松粉末消毒。定植时,每盆施入 30 g 复合肥(N、P、K 含量分别为 46.3%、14.2% 和 7.8%)。试验期内,保证水分供给,及时拔除杂草,防止人、畜干扰和病、虫危害。

1.2.2 试验设计 搭建 4 个 2 m 高的种植棚框架,分别设置无色(对照)、黄色、红色和蓝色 4 种滤光膜遮盖处理^[3,9],从而获得白光、黄光、红光和蓝光 4 种不同的光质环境。每棚内随机放置参试苗木 50 盆,栽培措施和其它环境调控措施相同。试验过程中,定期随机更换苗木放置位置,注意膜的维护、保养和更换,防止风、雨、人及动物等对滤光膜的损坏。试验期为 2008 年 12 月 15 日—2009 年 9 月 15 日。

1.3 试验数据的收集

1.3.1 植株生长状况调查 控光试验结束时,每处理随机选取 5 株植株,测量株高、地径、冠幅、枝条总体分枝、叶形态和生物量干质量等指标。株高和树冠的长轴和短轴用卷尺测量,用椭圆面积公式计算树冠冠幅^[27]。用游标卡尺测量距基质 2.5 cm 处幼苗主干的直径作为地径。枝序按 Strahler 法确定,即由外及内,外第 1 层的第 1 小枝为第 1 级枝,2 个第 1 级枝相遇即为第 2 级枝,以此类推。统计各级小枝数,总体分枝率(R_b)用 $R_b = (N_T - N_s) / (N_T - N_1)$ 计算(N_T 为所有枝级的枝条总数, N_1 为最高枝级的枝条数, N_s 为第 1 级的枝条总数)。每株随机采集 30 个叶片,在白纸上粘平扫描后用 photoshop 测量叶长、叶宽和叶面积。全株挖取植株,分解为根、茎枝和叶三部分后置入烘箱,在 70 °C 下烘干至恒质量后称质量测定生物量,并计算根/冠生物量比。测量、计算方法参照文献 [28]、[29]。

1.3.2 光合测定 光合测定采用 LI-COR 公司的 Li-6400 便携式光合系统仪在天气晴朗的 6 月初进行。在每处理中,随机抽取 5 株植株为样株。测定叶片选

取植株中上部 1 a 叶龄叶片,每次测量时均放入 4 个叶片,测量时输入测好的叶面积,每次测定 5 组。光合作用日进程测定在晴朗的 8:00 - 18:00 间进行,测量间隔时间 2 h,共测定 6 次 $\cdot d^{-1}$,连续测定 3 d。测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)等生理指标,并记录光合有效辐射(PAR)、叶片光合有效辐射(PAR_i)、空气温度(T_a)、大气相对湿度(RH)、空气 CO_2 浓度(Ca)等环境因子。光响应曲线在天气晴朗的上午 9:00 - 11:00 间测定。用红蓝光源叶室测定光合指标,测量光照梯度为 1 500、1 200、1 000、800、600、400、300、200、150、100、50、30 和 0 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 光强下的光合指标。测定前,在 1 500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 饱和光强下诱导 15 min 左右至稳态。测定时,空气流速 400 $mmol \cdot s^{-1}$,设定叶温 20 $^{\circ}C$,开放式气路,外界平均温度 24.7 ± 2 $^{\circ}C$,外界 CO_2 浓度(C_a) (394 ± 14) $\mu mol \cdot mol^{-1}$ 。光响应曲线拟合及特征参数计算方法参见文献[29]。

1.3.3 紫杉烷含量的测定 控光试验结束时,随机选取实生苗各 5 株,分根、茎、叶采样。样品置干燥、通风处、无阳光照射处阴干。粉碎阴干样品,干燥处理至恒质量后称质量。样品在索式提取器中以乙醚为溶剂提取回流 6 h,提取液浓缩后用甲醇定容。采用 HPLC 测定紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭 III (10-deacetylbaicatin III)、巴卡亭 III (baicatin III)、10-去乙酰-7-差向紫杉醇 (10-deacety-7-*epi*-taxol)、7-木糖-10-去乙酰-紫杉醇 (7-xylosyl-10-deacetyltaol) 和 7-差向紫杉醇 (7-*epi*-taxol) 等紫杉烷类物质的含量。仪器系美国惠普公司 HP1100,主要试剂有重蒸甲醇、乙腈、二次重蒸水。色谱柱为美国 VARIAN 公司的 MI-CROSRB-MVTM4.6 \times 250.0 mm C18 100A,检测波长 227 nm;流动相,甲醇:乙腈:水 = 20:41:39,流速 0.6 $mL \cdot min^{-1}$,进样体积 10 μL 。标准样品由云南汉德生

物技术有限公司提供,样品由昆明五益生物技术有限公司测定,紫杉烷含量采用面积外标法计算。

1.4 统计分析

用单因素方差分析 (ANOVA) 揭示不同光质对云南红豆杉植株大小、枝条特征、叶特征、生物量、光合参数和紫杉烷类物质含量的影响。对处理间差异显著 ($P < 0.05$) 者,用 Duncan 法进行多重比较,字母法标记。所有数据的处理和统计计算均采用 SPSS 和 Excel 完成,试验数据表示为平均数 \pm 标准差 (Mean \pm SD, $n \geq 5$)。

2 结果与分析

2.1 光质对光合参数的影响

不同光质处理显著地影响了云南红豆杉的最大净光合速率 (P_{max})、表光量子效率 (AQY)、暗呼吸速率 (R_d)、光饱和点 (LSP) 和光补偿点 (LCP) (F 值分别为 727.93、122.80、176.781、256.86、402.34, $P < 0.001$) 等光合参数 (表 1)。

与对照相比,红光处理下云南红豆杉的 P_{max} 显著提高了 8.04%;黄光和蓝光使 P_{max} 显著降低了 10.00%、25.00%。红光处理使 AQY 比对照显著提高了 22.73%,没有出现光抑制;黄光和蓝光处理使 AQY 降低了 11.36% 和 45.46%,光抑制现象明显。红光处理增加了植株的低光利用效率,黄光和蓝光处理则削弱了植株的低光利用能力。色光处理增加了叶片的弱光利用能力,其 LCP 比对照分别提高了 295.48%、127.20% 和 499.257%。色光处理也增强了叶片的强光利用能力,其 LSP 比对照分别提高了 10.31%、27.94% 和 16.70%。黄光处理下,云南红豆杉的 R_d 与对照无显著差异,但红光和蓝光使 R_d 分别比对照增加了 56.00% 和 28.00%,呼吸作用对光合产物的消耗加大。

表 1 光质对云南红豆杉光合参数的影响

处理	最大净光合速率(P_{max})/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	表光量子效率 (AQY)	暗呼吸速率(R_d)/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光饱和点(LSP)/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光补偿点(LCP)/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
红膜	6.05 \pm 0.154a	0.054 \pm 0.008a	1.56 \pm 0.112a	345.29 \pm 5.81c	47.26 \pm 2.03b
黄膜	5.04 \pm 0.230c	0.039 \pm 0.011c	1.00 \pm 0.149c	400.48 \pm 2.07a	27.15 \pm 1.69c
蓝膜	4.20 \pm 0.179d	0.024 \pm 0.004d	1.28 \pm 0.129b	365.31 \pm 3.48b	71.61 \pm 3.58a
对照	5.60 \pm 0.222b	0.044 \pm 0.008b	1.00 \pm 0.171c	313.03 \pm 3.59d	11.95 \pm 0.33d

注:同列中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

2.2 光质对枝叶特性的影响

不同处理下,光质对云南红豆杉分枝特征的影响并不明显 (表 2)。植株枝条总数 (N_T)、最高级枝枝条

数 (N_1) 和总体分枝率 (R_b) 分别在 146.2、109.8 和 3.07 上下,各处理间的差异均不显著 (F 值分别为 0.40、0.53 和 2.14, $P \geq 0.05$),仅第 1 级枝枝条总数

(N_s) 的差异显著 ($F=4.404, P<0.05$)。在红光处理下, 植株第1级枝枝条总数显著增加, 比对照高出36.81%; 而黄光、蓝光处理却与对照无显著差异。

云南红豆杉针叶对不同的光质十分敏感(表2)。不同色光处理下, 植株的叶长、叶宽、叶周长和叶面积均达极显著水平 (F 值分别为34.41、14.01、30.87和31.50, $P<0.001$)。红光、黄光和蓝光均显著抑制叶面积和叶周长的生长(表2)。红光、黄光和

蓝光处理下的叶面积分别比对照减小了14.12%、9.41%和22.35%; 叶周长分别比对照减小了10.71%、4.35%和15.22%。红光、黄光和蓝光对叶面积和叶周长影响的大小顺序均为蓝光 > 红光 > 黄光。红光对叶宽的影响与对照没有显著差异; 黄光和蓝光使叶宽显著减小, 作用大小相近。蓝光和红光处理下叶长显著小于对照, 蓝光的抑制作用是红光的2倍; 黄光处理的叶长与对照无显著差异。

表2 光质对云南红豆杉枝叶特性的影响

处理	分枝特征				针叶特性			
	N_T	N_s	N_1	R_b	宽/cm	长/cm	周长/cm	面积/cm ²
红膜	146.2 ± 30.91	49.8 ± 6.46a	96.4 ± 28.79	1.95 ± 0.55	0.47 ± 0.11a	2.61 ± 0.45b	5.75 ± 0.97c	0.73 ± 0.18c
黄膜	156.4 ± 14.69	44.2 ± 7.29ab	112.0 ± 10.05	2.57 ± 0.39	0.42 ± 0.09b	2.86 ± 0.45a	6.16 ± 0.92b	0.77 ± 0.16b
蓝膜	139.8 ± 25.13	39.8 ± 5.72b	100.0 ± 25.96	2.58 ± 0.94	0.41 ± 0.10b	2.51 ± 0.42c	5.46 ± 0.86d	0.66 ± 0.16d
对照	146.2 ± 23.48	36.4 ± 4.98b	109.8 ± 23.72	3.07 ± 0.80	0.48 ± 0.13a	2.92 ± 0.32a	6.44 ± 1.06a	0.85 ± 0.19a

2.3 光质对植株大小的影响

不同色光对云南红豆杉地径 ($F=8.52, P<0.05$) 和株高 ($F=4.85, P<0.05$) 生长的影响显著, 但对冠幅 ($F=1.16, P=0.35$) 的处理差异不显著(表3)。

表3 光质对云南红豆杉株高、地径和冠幅的影响

处理	地径/cm	株高/m	冠幅/m ²
红膜	1.34 ± 0.15a	1.16 ± 0.08a	0.35 ± 0.03
黄膜	1.24 ± 0.08a	1.09 ± 0.03b	0.37 ± 0.02
蓝膜	1.02 ± 0.11b	1.23 ± 0.05a	0.33 ± 0.03
对照	1.27 ± 0.06a	1.11 ± 0.08b	0.35 ± 0.03

不同色光对株高和地径生长的作用不尽相同。蓝光显著抑制地径的生长, 植株地径仅1.02 cm, 比对照减小了19.69%; 红光和黄光对植株径向生长的影响不显著。从株高看, 蓝光和红光促进了云南红豆杉的高生长。在蓝光和红光处理下, 植株的高度分为1.23、1.16 m, 分别比对照高10.81%和4.50%; 黄光对株高的影响不显著, 其株高与对照接近。

同一色光对云南红豆杉株高和地径生长的作用并不相同, 有的甚至相反(表3), 如, 蓝光能促进高生长, 却抑制地径的生长; 红光对地径的影响不大, 却能促进株高的生长; 而黄光对地径和株高生长的影响都不显著。

2.4 光质对生物量的影响

表4表明: 不同色光处理下云南红豆杉的根生物量、根冠比的差异不显著 (F 值为0.99和0.878, $P \geq 0.05$), 但光质对茎、叶及植株总生物量的影响达到了显著水平 (F 值分别为4.595、4.538和5.064, $P<0.05$)。

红光和黄光处理下, 云南红豆杉的茎生物量为24.05、26.22 g, 二者比对照显著提高了40.48%和53.15%; 但蓝光对茎生物量的影响不显著。叶生物量在黄光处理下比对照显著提高了50.91%, 达20.10 g, 而红光和蓝光的影响并不显著。在红光和黄光处理下, 植株总生物量为58.42 g和53.96 g, 比对照显著高出33.17%和43.72%; 但是蓝光对植株总生物量的影响不显著。

表4 光质对云南红豆杉生物量干质量的影响

处理	根生物量/g	茎生物量/g	叶生物量/g	总生物量/g	根冠比
红膜	17.16 ± 4.59	24.05 ± 5.14a	17.21 ± 4.60ab	58.42 ± 11.45a	0.42 ± 0.08
黄膜	16.74 ± 1.68	26.22 ± 2.34a	20.10 ± 3.11a	63.05 ± 4.83a	0.36 ± 0.05
蓝膜	16.31 ± 5.73	21.44 ± 4.44ab	16.22 ± 1.65ab	53.96 ± 9.60ab	0.43 ± 0.12
对照	13.43 ± 0.96	17.12 ± 3.89b	13.32 ± 0.91b	43.87 ± 4.31b	0.45 ± 0.08

2.5 光质对紫杉醇含量的影响

红光、黄光和蓝光处理下, 云南红豆杉根、茎、叶内紫杉醇含量差异不大, 不同色光对紫杉醇含量没

有显著的影响(表5)。不同光质对根、茎、叶中不同紫杉醇类物质含量的影响并不相同(表5):

(1) 红光、黄光和蓝光对云南红豆杉根、茎、叶

中的10-去乙酰-7-差向紫杉醇、10-去乙酰-7-木糖紫杉醇含量的影响均不显著。

(2)在红光、黄光和蓝光处理下,云南红豆杉茎、叶中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ含量差异不显著,但对根中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ含量的影响达显著水平(F 值为3.25、3.02, $P \leq 0.05$)。经黄光和蓝光处理后,云南红豆杉根中紫杉醇的含量显著提高到3.240和2.234 $\text{mg} \cdot (10 \text{ g})^{-1}$,比对照提高了116.58%和49.33%。在黄光处理下,根中10-去乙酰巴卡亭Ⅲ的含量增加到1.238 $\text{mg} \cdot (10 \text{ g})^{-1}$,比对照显著提高了4.42倍。

(3)红光、黄光和蓝光显著地抑制了云南红豆

杉叶中巴卡亭Ⅲ的合成和积累($F = 3.80, P = 0.03$)。红光和蓝光使叶中巴卡亭Ⅲ的含量显著下降到0.091、0.069 $\text{mg} \cdot (10 \text{ g})^{-1}$,比对照降低了69.86%和77.15%;黄光处理下中巴卡亭Ⅲ的含量与对照无显著差异。

(4)本研究中,云南红豆杉的茎和叶部位没有检测到7-差向紫杉醇,但是在根中含有较高的7-差向紫杉醇,其含量高于0.384 $\text{mg} \cdot (10 \text{ g})^{-1}$ 。不同光质对根部7-差向紫杉醇含量的影响达到显著水平($F = 3.51, P = 0.04$)。红光和黄光处理下,根中7-差向紫杉醇含量为0.706、0.772 $\text{mg} \cdot (10 \text{ g})^{-1}$,分别比对照提高了83.85%和101.04%,与对照的差异显著。

表5 光质对云南红豆杉紫杉烷含量的影响

器官	处理	紫杉烷	紫杉醇	10-去乙酰巴卡亭Ⅲ	巴卡亭Ⅲ	10-去乙酰-7-差向紫杉醇	10-去乙酰-7-木糖紫杉醇	7-差向紫杉醇
根	红膜	7.836 ± 1.525	1.824 ± 0.459b	0.170 ± 0.219b	0.348 ± 0.136	2.222 ± 1.361	2.566 ± 0.853	0.706 ± 0.126a
	黄膜	9.522 ± 2.420	3.240 ± 1.469a	1.238 ± 1.209a	0.310 ± 0.147	0.996 ± 0.415	2.966 ± 1.039	0.772 ± 0.276a
	蓝膜	6.520 ± 1.669	2.234 ± 0.894a	0.274 ± 0.233b	0.280 ± 0.127	0.828 ± 0.555	2.294 ± 0.636	0.610 ± 0.233ab
	对照	7.180 ± 2.778	1.496 ± 0.597b	0.228 ± 0.388b	0.696 ± 0.870	1.804 ± 0.820	2.572 ± 1.180	0.384 ± 0.133b
茎	红膜	1.363 ± 0.433	0.132 ± 0.102	0.108 ± 0.133	0.054 ± 0.037	0.100 ± 0.035	0.970 ± 0.324	-
	黄膜	1.755 ± 0.349	0.152 ± 0.108	0.230 ± 0.157	0.132 ± 0.070	0.156 ± 0.087	1.084 ± 0.240	-
	蓝膜	1.393 ± 0.367	0.140 ± 0.086	0.304 ± 0.204	0.052 ± 0.025	0.164 ± 0.042	0.734 ± 0.379	-
	对照	1.918 ± 0.869	0.157 ± 0.100	0.228 ± 0.138	0.088 ± 0.072	0.138 ± 0.052	1.306 ± 0.702	-
叶	红膜	5.119 ± 1.694	0.210 ± 0.373	2.174 ± 1.526	0.091 ± 0.088b	0.422 ± 0.207	2.222 ± 0.890	-
	黄膜	8.119 ± 3.590	0.183 ± 0.184	3.328 ± 2.138	0.244 ± 0.154ab	0.788 ± 0.396	3.576 ± 1.695	-
	蓝膜	7.339 ± 3.708	0.338 ± 0.463	3.356 ± 2.578	0.069 ± 0.126b	0.880 ± 0.542	2.696 ± 1.348	-
	对照	7.766 ± 2.372	0.418 ± 0.316	3.958 ± 1.152	0.302 ± 0.146a	0.584 ± 0.307	2.504 ± 1.533	-

注:“-”表示未检出或含量低于0.005‰。

3 结论与讨论

(1)不同光质对云南红豆杉植株大小、枝叶特性和光合作用的影响各不相同。红光处理下, P_{max} 、 AQY 、 R_d 、 LSP 和 LCP 大幅提高;针叶的长、周长和叶面积减小;第1级枝枝条总数增加;高生长加快;茎和植株生物量提高。黄光使 P_{max} 、 AQY 降低, LCP 和 LSP 提高;针叶的宽、周长和叶面积减小;对分枝、植株大小无显著影响;但使茎、叶和总生物量显著提高。在蓝光处理下, P_{max} 、 AQY 显著降低, LSP 、 LCP 、 R_d 显著提高;针叶的长、宽、周长和叶面积减小;径向生长减缓,高生长加快;对生物量无显著影响。

(2)不同光质处理下,云南红豆杉根、茎、叶中紫杉烷含量无显著差异。红光、黄光和蓝光处理对茎中所测紫杉烷类物质都无显著影响;对根、茎、叶

中的10-去乙酰-7-差向紫杉醇、10-去乙酰-7-木糖紫杉醇含量也没有显著影响,但是,不同光质对叶中巴卡亭Ⅲ,根中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ和7-差向紫杉醇含量的影响差异显著。红光显著抑制叶中巴卡亭Ⅲ合成和积累,提高根中7-差向紫杉醇的含量;黄光显著提高了根中紫杉醇、10-去乙酰巴卡亭Ⅲ、7-差向紫杉醇的含量;蓝光显著提高了根中紫杉醇,降低了叶中巴卡亭Ⅲ的含量。

(3)不同光质对植物次生代谢会产生不同程度的影响。用不同颜色的薄膜处理,茶树(*Camellia sinensis* Mast.)的次生代谢物含量显著提高^[30];银杏叶黄酮苷含量显著减少,对萜类内脂的含量也有影响^[31];喜树叶片中喜树碱含量明显提高,且蓝膜处理最为显著^[32]。白膜显著提高元宝枫(*Acer truncatum* Bunge)叶内黄酮的含量;绿膜提高绿原酸的含量,但抑制了SOD酶的含量^[33]。红色、黄色、蓝色和

绿色滤光膜使黄槿(*Phellodendron amuranse* Rupr.)的小檗碱、药根碱和掌叶防己碱含量均降低^[3]。尽管光质对次生代谢影响的研究不多,但许多方面尚未得出明确一致的结论^[9]。光质对云南红豆杉紫杉醇等含量的影响与上述结果也不尽一致。这可能是光质对次生代谢的影响复杂,不同植物的反应不同所致。此外,用有色膜控制光质存在光强不一致^[3],掺杂有波长相差甚远的异色光^[34]等突出的问题;所以,在光质对植物影响的研究中,迫切需要改进现有方法或探索新方法以消除或降低光强与异色光的干扰,以增加试验的精度和数据的可比性。

(4)近年的研究表明,发光二极管(Light Emitting Diode,LED)具有可按需获得纯正单色光与复合光谱;波谱宽度小于 ± 30 nm,波长与植物光合成和光形态建成的光谱范围吻合;能单独控制光质和光强度等优点^[35]。今后,可尝试将LED光源用于光对林木生长发育、形态结构和代谢影响等方面的研究。

参考文献:

[1] Hong-Li Lian, Sheng-Bo He, Yan-Chun Zhang, *et al.* Blue-light-dependent interaction of cryptochrome 1 with SPA1 defines a dynamic signaling mechanism [J]. *Genes & Development*. 2011, 25(4): 1023 - 1028

[2] 姜汉侨,段昌群,杨树华,等. 植物生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2010:252 - 262

[3] 李霞,阎秀峰. 滤光膜对黄槿(*Phellodendron amuranse*)幼苗三种生物碱含量的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1292 - 1299

[4] 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): 2554 - 2562

[5] 阎秀峰. 植物次生代谢生态学[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 639 - 640

[6] 张永清,高庆新. 药用植物次生代谢与中药材 GAP [J]. *世界科学技术*, 2005, 7(2): 67 - 73

[7] 李霞,王洋,阎秀峰. 光强对黄槿幼苗三种生物碱含量的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1655 - 1660

[8] 苏文华,张光飞,李秀华,等. 光强和光质对灯盏花生长与总黄酮量影响的研究[J]. *中草药*, 2006, 37(8): 1244 - 1247

[9] 李霞,阎秀峰,于涛. 滤光膜对黄槿幼苗生物量及初级氮同化酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2020 - 2023

[10] 阎秀峰,王洋,郭盛磊,等. 遮荫和红膜处理对高山红景天根生物量及红景天甙含量季节变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 382 - 386

[11] Crag G M, Scheparat S A, Suffness M, *et al.* The taxol supply crisis. New NCI policies for handling the large-scale production of novel natural product anticancer and anti-HIV agents[J]. *J Nat Prod*, 1993, 56: 1657 - 1668

[12] 苏建荣,张志钧,邓疆. 不同树龄、不同地理种源云南红豆

杉紫杉醇含量变化的研究[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(4): 369 - 374

[13] 王伟昌,彭少麟,李鸣光,等. 红豆杉中紫杉醇及其衍生物含量影响因子研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1583 - 1590

[14] 苏建荣,缪迎春,张志钧. 云南红豆杉紫杉醇含量变异及其相关的 RAPD 分子标记[J]. *林业科学*, 2009, 45(7): 26 - 28

[15] 苏建荣,张志钧,陈智勇. 藏东南云南红豆杉的药用成分含量研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(1): 15 - 20

[16] 王达明,周云,张裕农,等. 不同生长类型云南红豆杉林木枝叶的紫杉烷含量测定[J]. *西部林业科学*, 2007, 36(3): 7 - 10

[17] 王卫斌,姜远标,王达明,等. 云南红豆杉及其药用原料林培育技术[J]. *林业科技*, 2008, 33(1): 19 - 23

[18] 周志春,苏建荣,程广有. 红豆杉药用林高效栽培实用技术[M]. 北京:中国林业出版社,2010

[19] 芦站根,赵昌琼,周文杰,等. 光强对曼地亚红豆杉膜代谢及保护系统的影响[J]. *重庆大学学报*, 2003, 26(8): 89 - 92

[20] Brzezinska E, Kozłowska M, Stachowiak J. Response of Three Conifer Species to Enhanced UV-B Radiation: Consequences for Photosynthesis [J]. *Polish J of Environ Stud*, 2006, 15(4): 531 - 536

[21] 李双明,孙蕊,骆浩. 紫外辐射对东北红豆杉鲜叶中紫杉醇及三尖杉宁碱含量的影响[J]. *植物研究*, 2007, 27(4): 500 - 503

[22] 孙佳音,杨逢建,祖元刚. 遮荫对南方红豆杉光合特性和生活史型的影响[J]. *植物研究*, 2007, 27(4): 439 - 444

[23] 杨逢建,庞海河,张学科,等. 光胁迫对南方红豆杉叶片中叶绿体色素和紫杉醇含量的影响[J]. *植物研究*, 2007, 27(5): 556 - 558

[24] 杨逢建,周瑞,庞海河,等. 不同遮荫强度下南方红豆杉枝叶紫杉醇产量的季节变化[J]. *植物研究*, 2009, 29(4): 471 - 474

[25] 王昌伟,全川,李文建,等. 遮光对南方红豆杉生长及紫杉醇含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1267 - 1273

[26] 于景华,李德文,庞海河,等. UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 75 - 81

[27] 陈波,宋永昌,达良俊. 木本植物的构型及其在植物生态学研究的进展[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(3): 52 - 56

[28] 苏建荣,邓疆,罗香,等. 元宝槭幼树施肥研究 I. 不同施肥处理对生长与构型的影响[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(2): 147 - 152

[29] 臧传富,苏建荣,张志钧. 云南红豆杉扦插苗和实生苗的生长及光合特性研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(3): 411 - 416

[30] 陶汉之,王新长. 茶树光合作用与光质的关系[J]. *植物生理学通讯*, 1989, 12(1): 19 - 23

[31] 冷平生,苏淑叔,王天华,等. 光强与光质对银杏光合作用及黄酮苷与萜类内酯含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(1): 1 - 4

[32] 戴绍军,王洋,阎秀峰,等. 滤光膜对喜树幼苗叶片生长和喜树碱含量的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 869 - 875

[33] 樊艳平,赵全保,姚延涛. 不同覆盖处理对元宝枫叶生物活性物质含量的影响[J]. *林业科学*, 2007, 43(1): 50 - 54

[34] 张立伟,刘世琦,张自坤,等. 不同光质下香椿苗的生长动态[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(6): 115 - 119

[35] 崔瑾,徐志刚,邸秀茹. LED 在植物设施栽培中的应用和前景[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 249 - 253