

不同生境及采样部位对南方红豆杉活性成分含量的影响

于少帅¹, 孙启武^{2,①}, 田胜尼³, 柏培磊¹, 邵剑文¹, 张小平^{1,①}

(1. 安徽师范大学 安徽省重要生物资源保护与利用研究重点实验室 生物环境与生态安全安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241000;
2. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 安徽农业大学生命科学学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 采用 HPLC 法, 对采自浙江、福建和江西 7 个产地以及不同坡向(阴坡和阳坡)、不同坡位(高、中、低坡位)的野生南方红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li) 枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量进行了分析, 并比较了南方红豆杉不同部位(茎皮和枝叶)和不同冠层中 3 种成分的含量; 在此基础上对 3 种成分含量与环境因子(包括地理、气候及土壤因子)的相关性进行了分析。结果表明: 采自阳坡的枝叶中 3 种成分的含量明显高于阴坡, 不同坡向间紫杉醇和 7-木糖紫杉醇含量差异显著($P < 0.05$)。采自不同坡位的枝叶中 3 种成分的含量均有一定差异, 其中采自低坡位的枝叶中 3 种成分的含量均最高。不同产地间紫杉醇含量有极显著差异($P < 0.01$), 7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量则有显著差异($P < 0.05$); 总体上看, 采自福建建阳和江西景德镇的枝叶中 3 种成分的含量相对较高。南方红豆杉茎皮中 3 种成分的含量显著高于其枝叶; 高冠层枝叶中 3 种成分的含量均高于低冠层枝叶, 不同冠层间紫杉醇和 7-木糖紫杉醇含量差异显著($P < 0.05$)。相关性分析结果表明: 南方红豆杉中三尖杉宁碱含量与土壤中全 N 和土壤有机质含量呈极显著或显著的负相关性, 与其他因子的相关性均不显著; 而紫杉醇和 7-木糖紫杉醇含量与所有因子均无显著的相关性; 海拔与 3 种成分的含量均呈不显著的负相关性, 提示低海拔可能有利于南方红豆杉中 3 种成分的合成及积累。

关键词: 南方红豆杉; 紫杉醇; 生境因子; 采样部位; 相关性

中图分类号: S791.49; Q946.889 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)01-0050-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.01.08

Effects of different habitats and sampling parts on active compound content in *Taxus wallichiana*

var. *mairei* YU Shaoshuai¹, SUN Qiwu^{2,①}, TIAN Shengni³, BO Peilei¹, SHAO Jianwen¹, ZHANG Xiaoping^{1,①} (1. Key Laboratory for the Conservation and Utilization of Important Biological Resources of Anhui Province, Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Security of Anhui Province, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Key Laboratory of Forestry Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. College of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(1): 50-56

Abstract: Using HPLC method, contents of taxol, 7-xylosyltaxol and cephalomannine in branch and leaf of *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li collected from seven locations in Zhejiang, Fujian and Jiangxi provinces, or from different slope aspects (shady and sunny aspects) and different slope positions (high, middle and low slope positions) were analyzed, and also, those in different parts (bark or branch and leaf) and in different canopy layers of *T. wallichiana* var. *mairei* were compared. On these bases, correlation between three compound contents and environmental factors (including geographical, climatic and soil factors) was analyzed. The results show that three compounds contents in branch and leaf from sunny slope are obviously higher than those from shady slope, and

收稿日期: 2012-03-26

基金项目: 国家林业局珍稀濒危物种野外救护与繁育项目(2130211); 国家自然科学基金资助项目(30840020; 30970292)

作者简介: 于少帅(1987—), 男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 主要从事植物资源开发利用的相关研究。

①通信作者 E-mail: sqw@caf.ac.cn; pinghengxu@sina.com.cn

contents of taxol and 7-xylosyltaxol have significant differences between different slope aspects ($P < 0.05$); and three compound contents in branch and leaf from different slope positions all have a certain difference, in which, those from low slope position are the highest. Among different locations, taxol content has extremely significant difference ($P < 0.01$), and contents of 7-xylosyltaxol and cephalomannine have significant difference ($P < 0.05$); generally, three compound contents in branch and leaf from Jianyang of Fujian Province and Jingdezhen of Jiangxi Province are relatively higher. Three compound contents in bark are significantly higher than those in branch and leaf; those in branch and leaf of high layer of tree canopy are all higher than those of low layer of tree canopy, and contents of taxol and 7-xylosyltaxol have significant difference among different canopy layers ($P < 0.05$). Correlation analysis result shows that cephalomannine content in *T. wallichiana* var. *mairei* has extremely significant or significant negative correlation with total nitrogen content or organic matter content in soil, its correlation with other factors is un-significant; contents of taxol and 7-xylosyltaxol have no significant correlation with all factors; and the altitude has un-significant negative correlation with three compound contents, suggesting lower altitude is helpful to synthesis and accumulation of three compounds in *T. wallichiana* var. *mairei*.

Key words: *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li; taxol; habitat factor; sampling part; correlation

植物次生代谢产物与人类生活关系密切,在医药、食品、轻化工等领域应用广泛,因而次生代谢物的种类、代谢途径及代谢机制等问题的探讨越来越受到研究者关注。植物的次生代谢是植物在长期进化中与环境(生物和非生物)相互作用的结果,次生产物在植物提高自身保护和生存竞争力、协调与环境的关系等方面有重要作用,其产生和变化比初生代谢产物与环境有着更强的相关性和对应性^[1-2]。此外,植物次生代谢产物的产生和分布通常具有产地、生长期和器官组织等方面的特异性^[3-4]。因此,对植物次生物质与环境的关系及其在植物体内分布规律的研究对于植物资源合理、有效的利用具有重要的意义。

紫杉醇及其类似物是红豆杉属(*Taxus* Linn.)植物的次生代谢产物,具有独特的抗癌特性,已成为国内外研究热点。红豆杉属植物中紫杉醇含量变异较大,相关的研究也较多。柏培磊等^[3]认为:不同产地南方红豆杉[*Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li]枝叶中紫杉醇含量的差异与其生长环境的差异有关;苏建荣等^[5]的研究结果表明:温度和光照等因子对云南红豆杉(*T. yunnanensis* W. C. Cheng et L. K. Fu)中紫杉醇含量的影响较大;程广有等^[6]对东北红豆杉(*T. cuspidate* Sieb. et Zucc.)的研究结果表明:东北红豆杉不同群体的紫杉醇含量差异显著,与环境因子存在相关性;常醉等^[7]认为:东北红豆杉中紫杉醇及其类似物含量在植株中有明显的分布规律;柯春婷等^[8]的研究结果显示:在福建产南方红豆杉中,紫杉醇含量与气候因子的相关

性不显著;杨逢建等^[9]认为:栽培南方红豆杉的生长发育及其紫杉醇含量与环境因子存在相关性。尽管有不少研究者对紫杉醇含量的变异机制进行了研究,但由于采样的局限性及人为管理的影响,难以获得紫杉醇含量变异与生境因子相关性的明确研究结论。

南方红豆杉是中国特有植物,探究不同生境对南方红豆杉中紫杉醇等次生产物含量的影响及其在不同组织部位的分布规律,对于全面了解红豆杉属植物中抗癌成分的分布规律及其与生境因子的关系、合理开发红豆杉资源等具有重要意义。为明确生境因子(坡向、海拔、气候和土壤等)对南方红豆杉活性成分含量的影响,作者对不同生境南方红豆杉枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量进行分析,探讨其与生境因子的关系;并对南方红豆杉植株不同部位及冠层中3种成分的含量进行了比较,以阐明它们在不同器官中的分布规律,为南方红豆杉资源的合理开发应用及栽培管理提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 材料

根据实验要求于2011年4月对浙江、福建和江西的7个南方红豆杉天然种群生境进行调查,记录群落内的物种种类、数量及相关生态学参数并采集样品;采集部位为枝头部位的枝叶及距地面约1.5 m处的树皮,每一样地选择32株样株;每个样地随机采集0~40 cm深土样3份。各样地的基本概况见表1。

表 1 供试南方红豆杉产地基本概况¹⁾Table 1 Basic status of location of *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lév.) L. K. Fu et Nan Li tested¹⁾

编号 Code	产地 Location	H/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	Ta/°C	T1/°C	T7/°C	AT/°C	P/mm	S/h	F/d	RH/%
ZW	浙江武义 Wuyi, Zhejiang	465	E119°49'39"	N28°44'25"	16.9	4.7	28.8	5 500.0	1 477.0	1 964.0	228	80
ZL	浙江龙泉 Longquan, Zhejiang	358	E119°02'43"	N28°04'10"	17.6	6.5	27.9	5 572.6	1 669.0	1 850.0	263	69
FJ	福建建阳 Jianyang, Fujian	540	E117°40'28"	N27°25'56"	18.1	7.4	28.0	5 534.0	1 846.2	1 802.0	280	82
FM	福建明溪 Mingxi, Fujian	570	E117°08'40"	N26°22'26"	18.0	7.4	27.1	5 539.6	1 750.0	1 798.6	261	84
FZ	福建漳平 Zhangping, Fujian	805	E117°15'14"	N25°33'23"	20.3	11.0	28.1	5 281.1	1 496.0	1 853.0	317	78
JY	江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	504	E114°56'08"	N28°36'52"	17.3	5.0	28.8	5 050.0	1 720.0	1 737.1	260	85
JJ	江西景德镇 Jingdezhen, Jiangxi	333	E117°28'33"	N29°34'20"	17.4	5.3	28.7	5 323.0	2 000.0	2 009.8	248	78

¹⁾ H: 海拔 Altitude; Ta: 年平均气温 Annual mean temperature; T1: 1 月平均气温 Mean temperature in January; T7: 7 月平均气温 Mean temperature in July; AT: $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 $\geq 10^\circ\text{C}$ annual accumulated temperature; P: 年均降水量 Annual mean precipitation; S: 年均日照时数 Annual mean sunshine duration; F: 无霜期 Frost free period; RH: 年均相对湿度 Annual mean relative humidity.

依据研究目的的不同,在 7 个产地中分别选择特殊样地和部位进行样品采集。在福建建阳和漳平以及江西景德镇分别选择不同坡向(阴坡和阳坡)采集枝叶样品,每一样地选择 15 株样株,株龄均超过 100 a;在浙江龙泉及江西宜丰和景德镇分别选择不同坡位(高、中、低)采集南方红豆杉枝叶样品,每一样地选择 14 株样株,株龄均超过 100 a;在福建建阳和浙江武义分别采集茎皮和枝叶样品,每一样地选择株龄相近的样株 10 株;在福建明溪选择同一植株分别采集不同冠层(高、低)的枝叶样品,每一样地选择株龄相近的样株 6 株。

仪器:美国安捷伦 1200 高效液相色谱系统(包括 G1322A 型脱气机、G1312A 型二元泵、G1329A-ALS 型自动进样器、G1316A-TCC 型柱温箱和 G1365D-MWD 型紫外检测器);KQ-250E 型超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司);DHG-9246A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);SENCO-R 型旋转蒸发仪(上海申生科技有限公司);DFY-250 型摇摆式高速粉碎机(温岭市林大机械有限公司);MILLI-Q 超纯水纯化系统(美国 Millipore 公司)。

试剂:紫杉醇对照品购自桂林晖昂生化药业有限责任公司(产品编号 JF20090301,纯度 99.9%);7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱对照品由中国林业科学研究院林业研究所提供;甲醇和乙腈为色谱纯,水为超纯水,其他试剂均为分析纯。

1.2 方法

1.2.1 HPLC 色谱分析条件 采用 Ultimate C₁₈ 色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm)。流动相为 V(甲醇):V(乙腈):V(水)=23:36:41,流速 1.0 mL · min⁻¹,检测波长 227 nm,进样量 10 μL,柱温箱温度 30 °C。

1.2.2 标准曲线绘制 分别精确称取紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱对照品 2.500 0、4.687 5 和 3.125 0 mg,分别用甲醇溶解并定容,配制成质量浓度分别为 0.100 0、0.187 5 和 0.125 0 mg · mL⁻¹的对照品母液;取各对照品母液适量,用甲醇分别稀释为原质量浓度的 1/2、1/4、1/8、1/16 和 1/32,按上述 HPLC 色谱条件进样分析。以峰面积为纵坐标 Y、对照品质量浓度为横坐标 X 绘制标准曲线,获得 3 个对照品的线性回归方程。紫杉醇对照品的回归方程为 $Y = 38\,554.432X - 6.138$ ($r = 0.999\,6$),线性范围 3.1 ~ 100.0 μg · mL⁻¹;7-木糖紫杉醇对照品的回归方程为 $Y = 4\,892.879X + 5.407$ ($r = 0.999\,9$),线性范围 5.9 ~ 187.5 μg · mL⁻¹;三尖杉宁碱对照品的回归方程为 $Y = 11\,066.200X + 17.434$ ($r = 0.999\,5$),线性范围 3.9 ~ 125.0 μg · mL⁻¹。

1.2.3 供试液的制备和色谱分析 将样品于 40 °C 烘干并粉碎,精确称取 2.0 g 粉末,加入 V(丙酮):V(乙酸乙酯)=1:1 混合液 30 mL,超声提取 1 h,过滤,残渣按同法再提取 1 次,过滤;合并滤液,于 40 °C 减压蒸干;残渣加 20 mL 二氯甲烷和 20 mL 水,萃取 3 次;合并二氯甲烷相,40 °C 减压蒸干,所得浸膏用 10 mL 甲醇溶解,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤,所得供试液按照上述方法进行 HPLC 色谱分析。每份样品重复测 3 次,以紫杉醇对照品为外标确定 3 种成分峰,紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的保留时间分别为 23.380、14.334 和 20.631 min。

1.2.4 方法学考察

1.2.4.1 精密度实验 精确称取取自福建明溪的枝叶样品粉末 2.0 g,按上述方法制成供试液,采用上述色谱条件连续进样测定 5 次。紫杉醇、7-木糖紫杉醇

和三尖杉宁碱含量的 *RSD* 分别为 1.87%、0.26% 和 0.26%,表明本实验方法精密度良好。

1.2.4.2 稳定性实验 精确称取采自福建明溪的枝叶样品粉末 2.0 g,按上述方法制成供试液,采用上述色谱条件每隔 2 h 进样测定 1 次(供试液低温避光保存),共进样测定 6 次。紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量的 *RSD* 分别为 1.99%、0.50% 和 0.36%,表明样品供试液在低温避光条件下保存 12 h 基本稳定。

1.2.4.3 重现性实验 精确称取采自福建明溪的枝叶样品粉末 5 份,每份 2.0 g,按上述方法制成供试液,在上述色谱条件下进样检测,紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量的 *RSD* 分别为 1.32%、2.49% 和 2.16%,表明本研究方法重现性良好。

1.2.5 土壤理化指标测定 参照文献[10-11]的方

法对土壤电导率、pH 值、全 N 含量、硝态 N 含量、全 P 含量、速效 P 含量、速效 K 含量及土壤有机质含量进行测定。土壤各项理化指标的测定由安徽农业大学生命科学学院完成。

1.3 数据分析

采用 SPSS 13.0 软件对实验数据进行单因素方差分析、多重比较和 Pearson 相关性分析($P=0.05$)。

2 结果和分析

2.1 采自不同坡向的南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量的分析

对采自福建建阳和漳平以及江西景德镇不同坡向样地的南方红豆杉枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量的分析结果见表 2。总体上看,生长

表 2 采自不同坡向的南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量的比较($\bar{X}\pm SE$)

Table 2 Content comparison of three compounds in branch and leaf of *Taxus wallichiana* var. *maireri* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li collected from different slope aspects ($\bar{X}\pm SE$)

产地 Location	坡向 Slope aspect	3 种成分的含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Content of three compounds		
		紫杉醇 Taxol	7-木糖紫杉醇 7-xylosyltaxol	三尖杉宁碱 Cephalomannine
福建建阳 Jianyang, Fujian	阴坡 Shady aspect	0.048 2±0.000 4	0.180 5±0.003 3	0.064 8±0.001 4
	阳坡 Sunny aspect	0.073 7±0.000 4	0.441 2±0.003 2	0.098 2±0.001 5
福建漳平 Zhangping, Fujian	阴坡 Shady aspect	0.032 8±0.000 4	0.106 7±0.002 6	0.064 7±0.001 1
	阳坡 Sunny aspect	0.068 5±0.000 5	0.292 5±0.003 7	0.069 2±0.001 6
江西景德镇 Jingdezhen, Jiangxi	阴坡 Shady aspect	0.048 8±0.000 3	0.237 1±0.002 6	0.094 3±0.004 2
	阳坡 Sunny aspect	0.111 6±0.000 4	0.446 2±0.002 7	0.220 0±0.001 1

于阳坡的南方红豆杉枝叶中 3 种成分的含量明显高于生长于阴坡的植株。其中,生长于阳坡的植株中紫杉醇和 7-木糖紫杉醇含量分别为阴坡的 1.5~2.3 倍和 1.9~2.7 倍,在不同坡向间差异显著($P<0.05$);生长于阳坡的植株中三尖杉宁碱含量为阴坡的 1.1~2.3 倍,差异不显著($P>0.05$)。由于不同坡向间光照条件的差异最为明显,因而推测南方红豆杉枝叶中紫杉醇等成分的积累对光照条件较为敏感。

2.2 采自不同坡位的南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量的分析

对采自浙江龙泉及江西宜丰和景德镇不同坡位样地的南方红豆杉枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量的分析结果见表 3。由表 3 可见:在不同坡位生长的南方红豆杉枝叶中 3 种成分的含量均有一定差异,但差异不显著($P>0.05$)。在浙江龙泉,

表 3 采自不同坡位的南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量的比较

Table 3 Content comparison of three compounds in branch and leaf of *Taxus wallichiana* var. *maireri* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li collected from different slope positions

产地 Location	坡位 Slope position	3 种成分的含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ Content of three compounds		
		紫杉醇 Taxol	7-木糖紫杉醇 7-xylosyltaxol	三尖杉宁碱 Cephalomannine
浙江龙泉 Longquan, Zhejiang	高 High	0.053 3	0.090 1	0.063 8
	中 Middle	0.035 9	0.078 7	0.042 0
	低 Low	0.090 1	0.142 5	0.088 9
江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	高 High	0.025 7	0.157 5	0.057 6
	中 Middle	0.030 8	0.331 1	0.055 2
	低 Low	0.046 5	0.360 7	0.064 3
江西景德镇 Jingdezhen, Jiangxi	高 High	0.021 5	0.094 2	0.059 2
	中 Middle	0.048 8	0.237 1	0.094 3
	低 Low	0.111 6	0.446 2	0.220 0

生长于低坡位的南方红豆杉中 3 种成分的含量均最高,生长于中坡位的南方红豆杉中 3 种成分的含量均最低;而在江西宜丰及景德镇,南方红豆杉中 3 种成分的含量总体上随坡位降低逐渐提高。由于不同坡位主要体现为海拔的差异,因而推测南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量随海拔升高呈一定程度的递减趋势。

2.3 不同产地南方红豆杉枝叶中 3 种成分的含量及其与环境因子的相关性分析

对来源于不同产地的南方红豆杉枝叶中紫杉醇、

7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量的比较结果见表 4, 3 种成分的含量与产地环境因子的相关性分析结果见表 5。

由表 4 可见:在 7 个样地中,福建建阳和江西景德镇产南方红豆杉枝叶中紫杉醇含量较高,江西宜丰和浙江武义产的枝叶中紫杉醇含量较低;浙江武义和福建建阳产南方红豆杉枝叶中 7-木糖紫杉醇含量较高,浙江龙泉产的枝叶中 7-木糖紫杉醇含量较低;福建明溪和江西景德镇产枝叶中三尖杉宁碱含量较高,

表 4 不同产地南方红豆杉枝叶中 3 种成分含量的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 4 Content comparison of three compounds in branch and leaf of *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li from different locations ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

产地 Location	3 种成分的含量/mg · g ⁻¹ Content of three compounds		
	紫杉醇 Taxol	7-木糖紫杉醇 7-xylosyltaxol	三尖杉宁碱 Cephalomannine
浙江武义 Wuyi, Zhejiang	0.042 1±0.001 5bc	0.372 5±0.003 2a	0.065 7±0.001 4d
浙江龙泉 Longquan, Zhejiang	0.051 0±0.002 6ab	0.103 8±0.019 6b	0.064 9±0.002 1d
福建建阳 Jianyang, Fujian	0.061 0±0.001 2a	0.310 9±0.003 3ab	0.081 5±0.001 4c
福建明溪 Mingxi, Fujian	0.053 9±0.001 7a	0.207 6±0.004 8ab	0.133 0±0.002 1a
福建漳平 Zhangping, Fujian	0.050 7±0.001 5ab	0.199 6±0.003 1ab	0.066 9±0.001 4d
江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	0.034 4±0.006 3c	0.283 1±0.013 4ab	0.059 0±0.002 7d
江西景德镇 Jingdezhen, Jiangxi	0.060 6±0.001 1a	0.259 2±0.012 2ab	0.124 5±0.002 7b

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

表 5 南方红豆杉枝叶中 3 种成分的含量与环境因子的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis between three compound contents in branch and leaf of *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li and environmental factors¹⁾

因子 Factor	紫杉醇 Taxol		7-木糖紫杉醇 7-xylosyltaxol		三尖杉宁碱 Cephalomannine	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
经度 Longitude	0.312	0.547	0.428	0.397	0.091	0.864
纬度 Latitude	-0.133	0.802	0.629	0.181	0.046	0.932
海拔 Altitude	-0.089	0.867	-0.521	0.290	-0.363	0.480
年平均气温 Annual mean temperature	0.250	0.633	-0.690	0.129	-0.134	0.800
1 月平均气温 Mean temperature in January	0.325	0.530	-0.685	0.133	-0.056	0.917
7 月平均气温 Mean temperature in July	-0.442	0.380	0.602	0.206	-0.548	0.260
≥10℃ 年积温 ≥10℃ annual accumulated temperature	0.580	0.228	0.191	0.717	0.423	0.403
年均降水量 Annual mean precipitation	0.588	0.220	-0.134	0.801	0.643	0.169
年均日照时数 Annual mean sunshine duration	0.324	0.530	0.273	0.601	0.264	0.614
无霜期 Frost free period	0.234	0.656	-0.653	0.160	-0.210	0.690
年均相对湿度 Annual mean relative humidity	-0.420	0.407	0.046	0.931	-0.025	0.963
土壤电导率 Electric conductivity in soil	-0.174	0.742	-0.072	0.892	-0.537	0.272
土壤 pH 值 pH value in soil	0.222	0.673	0.752	0.085	0.114	0.830
土壤全 N 含量 Total N content in soil	-0.781	0.067	0.368	0.473	-0.952 **	0.003
土壤硝态 N 含量 Nitrate N content in soil	-0.204	0.699	-0.413	0.415	-0.039	0.942
土壤全 P 含量 Total P content in soil	0.007	0.989	-0.350	0.496	0.668	0.147
速效 P 含量 Available P content in soil	0.582	0.225	-0.267	0.609	0.740	0.093
土壤速效 K 含量 Available K content in soil	0.578	0.230	0.479	0.336	-0.005	0.993
土壤有机质含量 Organic matter content in soil	-0.471	0.345	0.030	0.956	-0.849 *	0.032

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

福建建阳产枝叶中三尖杉宁碱含量次之,江西宜丰产枝叶中三尖杉宁碱含量最低;总体上看,来源于福建建阳和江西景德镇的南方红豆杉枝叶中3种成分的含量相对较高,产自浙江龙泉和江西宜丰的枝叶中3种成分的含量相对较低(表4)。单因素方差分析结果表明:来源于不同产地的南方红豆杉枝叶中3种成分的含量差异显著($P < 0.05$),其中紫杉醇含量的差异达到极显著水平($P < 0.01$)。

相关性分析结果表明:三尖杉宁碱含量与土壤中含N含量呈极显著的负相关性($P < 0.01$),与土壤有机质含量呈显著的负相关性($P < 0.05$),与其他因子的相关性均不显著;而紫杉醇和7-木糖紫杉醇含量与所有因子的相关性均未达到显著水平。

2.4 南方红豆杉不同部位及不同冠层中3种成分含量的分析

南方红豆杉茎皮和枝叶以及高冠层枝叶和低冠层枝叶中3种成分的含量分析结果见表6。结果表明:茎皮中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的含量明显高于枝叶,分别约为枝叶的1.4、2.5和2.1倍,茎皮与枝叶中3种成分含量的差异达到显著水平($P < 0.05$)。高冠层枝叶中3种成分的含量均高于低冠层枝叶,其中高冠层枝叶中紫杉醇含量为低冠层枝叶的2.0倍;不同冠层枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇含量差异显著($P < 0.05$),而三尖杉宁碱含量差异不显著($P > 0.05$)。

表6 南方红豆杉不同部位及不同冠层中3种成分含量的比较($\bar{X} \pm SE$)

Table 6 Content comparison of three compounds in different parts and in different tree canopy layers of *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et Lévl.) L. K. Fu et Nan Li ($\bar{X} \pm SE$)

样号 ¹⁾ No. ¹⁾	3种成分的含量/mg·g ⁻¹ Content of three compounds		
	紫杉醇 Taxol	7-木糖紫杉醇 7-xylosyltaxol	三尖杉宁碱 Cephalomannine
1	0.081 9±0.000 5	0.460 2±0.003 9	0.134 3±0.001 6
2	0.058 2±0.000 4	0.180 5±0.003 3	0.064 8±0.001 4
3	0.048 8±0.000 3	0.237 1±0.002 6	0.094 3±0.004 2
4	0.024 7±0.000 6	0.217 6±0.003 5	0.087 6±0.001 6

¹⁾ 1: 茎皮 Bark; 2: 枝叶 Branch and leaf; 3: 高冠层枝叶 Branch and leaf in high layer of canopy; 4: 低冠层枝叶 Branch and leaf in low layer of canopy.

野外调查发现:南方红豆杉天然植株的株高一般约为20 m,其高冠层处于群落空间的第2层或第3层,林隙较大、遮光率较小;而其低冠层处于群落空间的较低层次,林隙较小、遮光率较大,加之其他伴生植

物的影响,其低冠层枝叶所接受的光照明显低于高冠层枝叶。王昌伟等^[12]认为:全光照条件下南方红豆杉中次生产物的含量高于30%遮光条件,全光照条件下南方红豆杉多年生植株中次生产物含量增加。由此可见,光照因素可能是导致南方红豆杉低冠层枝叶中次生产物含量低于高冠层枝叶的原因之一。

3 讨论和结论

上述实验结果表明:生境条件对南方红豆杉枝叶中次生代谢产物的含量有明显的影响;生长在阳坡的南方红豆杉枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的含量明显高于阴坡,表明南方红豆杉中次生代谢物的含量与光照条件呈一定程度的正相关。常醉等^[7]的研究结果表明:东北红豆杉冠层阴面枝中的紫杉醇和三尖杉宁碱含量低于阳面枝;鲍思伟等^[13]认为:光照强度对紫杉醇含量有明显影响,较强的光照(全日照或适度遮阳)有利于紫杉醇积累,光照强度过低则会产生抑制作用;但Kelsey等^[14]的研究结果显示:生长于阴坡的短叶红豆杉(*Taxus brevifolia* Nutt.)针叶和树皮中紫杉醇和三尖杉宁碱含量显著高于阳坡,约为阳坡的1.8倍。贺利中等^[15]的研究结果表明:南方红豆杉1年生幼苗喜阴,其生长需要适度荫蔽,在全光照条件下容易造成苗木灼伤;Pridnya等^[16]认为:红豆杉虽为耐阴植物,但在林隙或稀疏的冠层下生长更佳,过于荫蔽的环境则会抑制其幼苗生长并增加成树死亡率,最终导致其种群衰退。由此可见,较强的光照虽然有利于南方红豆杉次生产物的合成和积累,但对其植株的生长发育则有一定的抑制作用,因而,针对红豆杉属不同种类应进一步摸索出适宜的光照栽培条件。

海拔对植物的生长及产品品质均有一定的影响^[17]。本研究结果显示:来源于不同产地不同坡位的南方红豆杉枝叶中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的含量随坡位升高呈现一定的递减趋势,而产地的海拔高度与紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的含量呈微弱的负相关性,相关系数分别为-0.089、-0.521和-0.363,表明低海拔有利于南方红豆杉枝叶中3种成分的合成及积累。程广有等^[6]的研究结果表明:东北红豆杉中紫杉醇含量与海拔呈负相关($r = -0.028$),与本研究结论基本一致。海拔的变化导致生境中温度、降水及光照等因子发生相应改变,

从而影响植株中次生产物的代谢。

相关性分析结果表明:土壤中全N及有机质含量与南方红豆杉枝叶中三尖杉宁碱的含量有极显著或显著的负相关性,也证实了“全N及有机质含量对植物的生长有重要作用^[18]”这一结论。

此外,在南方红豆杉植株的不同部位(不同冠层以及茎皮和枝叶)紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱的含量有明显差异。提示在进行南方红豆杉活性成分含量分析时应注意采样部位的统一。

综上所述,南方红豆杉中紫杉醇、7-木糖紫杉醇和三尖杉宁碱含量与环境因子均有一定的相关性,但相关性不显著。由此无法归纳出某一环境因子对南方红豆杉活性成分含量影响程度的大小,而环境因子也可能仅是影响其次生代谢物含量的因素之一,因此,有必要结合分子生物学继续进行更深层次的研究。此外,根据上述研究结果,为保证南方红豆杉植株的正常生长及其有效成分的积累,建议可在其幼苗栽培过程中进行适度遮阳处理,且随幼苗生长逐渐缩短遮阳时间,同时适当降低栽培土壤中全N和有机质含量。对于南方红豆杉天然种群,如果群落空间低层次的植物过于稀疏,可以通过人工种植一些占据群落空间较低层次的灌木或草本植物来增加群落较低层的荫蔽程度以促进红豆杉幼苗的生长;对于郁闭度较大的乔木林,如华东地区常见的毛竹-南方红豆杉(*Phyllostachys edulis*-*Taxus wallichiana* var. *mairei*)群落,可以采取适度砍伐毛竹等措施减少群落郁闭度、提高透光率,有利于成年南方红豆杉植株的生长及有效成分的合成及积累。

参考文献:

- [1] 杜玮炜,黄宏文. 雷公藤次生代谢产物雷公藤红素含量与环境因子相关性分析[J]. 植物学通报, 2008, 25(6): 707-713.
- [2] 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.
- [3] 柏培磊,孙启武,蒋继宏,等. 不同产地南方红豆杉枝叶的紫杉醇含量及其指纹图谱的比较分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(1): 64-69.

- [4] 刘芬,崔浪军,何刚,等. 不同生长季节丹参营养器官中有效成分的动态变化[J]. 植物科学学报, 2011, 29(1): 93-98.
- [5] 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.
- [6] 程广有,高峰,葛春华,等. 中国境内东北红豆杉天然群体紫杉醇含量变异规律[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 7-10.
- [7] 常醉,郭娜,刘彤,等. 天然东北红豆杉中紫杉醇和三尖杉宁碱含量的分布及变化规律[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(3): 294-298.
- [8] 柯春婷,全川,王玉震,等. 不同地理种源南方红豆杉中紫杉醇和10-DAB含量及影响因子[J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 231-236.
- [9] 杨逢建,庞海河,祖元刚,等. 南方红豆杉生长发育及其紫杉醇含量与环境因子的关系[J]. 植物研究, 2010, 30(6): 742-746.
- [10] 中国科学院土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1997.
- [11] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [12] 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): 1269-1273.
- [13] 鲍思伟,谈锋. 不同光强对曼地亚红豆杉生长及生理代谢的影响[J]. 防护林科技, 2009(2): 6-8.
- [14] KELSEY R G, VANCE N C. Taxol and cephalomannine concentrations in the foliage and bark of shade grown and sun exposed *Taxus brevifolia* trees [J]. Journal of Natural Production, 1992, 55: 912-917.
- [15] 贺利中,肖小辉,谭坚,等. 遮阴强度对南方红豆杉苗木质量影响的研究[J]. 湖南农业科学, 2010(5): 134-135.
- [16] PRIDNYA M V. Phytocenotic status and structure of the Khosta common-yew population in the Caucasus Biosphere Reserve [J]. Soviet Journal of Ecology, 1984, 15(1): 1-6.
- [17] 曾勇,蔡传涛,刘贵周,等. 不同海拔两种天麻仿野生栽培下产量和品质变化[J]. 植物科学学报, 2011, 29(5): 637-643.
- [18] HOGBERG M N, BRIONES M J I, KEEL S G, et al. Quantification of effects of season and nitrogen supply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine forest [J]. New Phytologist, 2010, 187: 485-493.

(责任编辑:惠红)