

不同种源南方红豆杉幼林生长和紫杉醇含量的研究

张蕊¹, 周志春^{1*}, 余能健², 骆文坚³, 冯建国⁴, 金国庆¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 福建省明溪县绿色生态研究所, 福建 明溪 365200;
3. 浙江省林业种苗管理总站, 浙江 杭州 310020; 4. 浙江省龙泉市林业科学研究所, 浙江 龙泉 323700)

摘要:利用在福建明溪和浙江龙泉农田庇荫设施栽培的24个种源的2年生南方红豆杉种源试验林,研究幼林收获期生长、分枝、生物收获量和枝叶紫杉醇含量的种源差异和地理变异模式,并综合选育出一批药用优良种源。结果表明:南方红豆杉幼树树高、当年抽梢长、地径、冠幅、最长侧枝长、当年侧枝数、侧枝总数和鲜枝叶紫杉醇含量等在种源间差异显著,不存在明显的地理变异模式。来自气候温暖但年降水量较少地区的种源生长快、分枝多、树冠浓密。与生长和分枝性状不同,产地年均温低、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温小的种源其鲜枝叶紫杉醇含量较高,产地年降水量对种源鲜枝叶紫杉醇含量影响较小。南方红豆杉生长和分枝性状不仅存在显著的种源效应,而且存在明显的地点效应和种源 \times 地点互作,栽植地水热资源丰富及适宜栽植密度可显著促进植株的树高和分枝生长及生物收获量的提高。种源生长和分枝性状间呈显著的正相关,而种源鲜枝叶紫杉醇含量与生长、分枝性状和生物收获量则不显著负相关或不显著正相关,有利于生物收获量大、紫杉醇含量高的优良种源选择。依据鲜枝叶紫杉醇含量和产量筛选出安徽黄山、福建柘荣、湖南桑植、贵州黎平、云南石屏5个药用优良种源,其单株鲜枝叶紫杉醇产量大于种源总体平均值的17.65%~25.77%,鲜枝叶紫杉醇含量皆在 $97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上。

关键词:南方红豆杉;生长;紫杉醇含量;地理变异;种源选择

中图分类号:S791.49

文献标识码:A

Growth and Medicinal Content of Different Provenances of *Taxus wallichiana* var. *mairei* at Young Age

ZHANG Rui¹, ZHOU Zhi-chun¹, YU Neng-jian², LUO Wen-jian³, FENG Jian-guo⁴, JIN Guo-qing¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; 2. Green Ecosystem Research Institute of Mingxi County, Fujian Province, Mingxi 365200, Fujian, China; 3. Management General Station of Forest Seedling of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, Zhejiang, China; 4. Forestry Research Institute of Longquan City, Zhejiang Province, Longquan 323700, Zhejiang, China)

Abstract: *Taxus wallichiana* var. *mairei* provenance trials consisting of 24 seed sources were conducted in shaded farmland located at Mingxi of Fujian and Longquan of Zhejiang, aiming at elucidating the provenance differences and geographic variation patterns for growth, branch trait, fresh biomass yield and taxol contents at young harvest stage and selecting the superior medical provenances. The results showed significant differences existed among provenances for tree height, root collar diameter, crown width, the size and number of branches and taxol contents of the fresh branch leaves, whereas obvious geographic variation patterns were not observed. The provenances from warmer and less rainfall areas grew faster and had more branches as well as thicker crown. In comparison, the provenances from the areas with lower annual mean temperature and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature had higher taxol content in branches and leaves, whereas significant effect

收稿日期:2009-10-22

基金项目:国家林业局重点科技推广项目“南方红豆杉短周期药用林高产栽培示范”([2005]71号);浙江省科技厅重大项目“浙江省珍稀濒危林木种质资源收集保存与利用关键技术研究及基因库建设”专题(2006C12059-4)

作者简介:张蕊(1981—),女,河北邯郸人,硕士,主要从事亚热带珍贵树种育种和培育技术研究。

*通讯作者: E-mail: zczhou_risf@163.com

of annual rainfall of the seed sources on the taxol content was not found. Besides significant provenance variation, significant location effect and provenance by location interaction on growth and branch traits were also demonstrated. Better planting site combined with rich water and heat resource and suitable planting density were favorable to accelerate young tree growth and promote fresh biomass harvest yield. Significant positive correlation between young tree growth rate and branch traits was detected; however, the taxol content in branches and leaves was weakly related to the growth rate, branch traits and harvest yield, which were beneficial to the selection of provenances with higher harvest yield and taxol content. Based on the taxol content and the harvest yield, superior medical provenances including Liping of Guizhou, Shiping of Yunnan, Huangshan of Anhui, Zherong of Fujian, Sangzhi of Hu'nan were selected, all of which exhibited higher taxol content ($\geq 97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and taxol yield (17.65% - 25.77% higher than the average) in branches and leaves.

Key words: *Taxus wallichiana* var. *mairei*; growth; taxol content; geographic variation; provenance selection

红豆杉属 (*Taxus* L.) 植物因其体内含有强活性抗癌成分紫杉醇等紫杉烷类物质而引起人们的广泛重视。尽管目前已可人工化学合成紫杉醇^[1-2], 但生产成本很高。当前还是通过人工栽培红豆杉的枝叶中直接提纯紫杉醇及利用红豆杉植株产生的前体物质加工合成为主^[3], 而最关键的则是选用高紫杉醇含量的种和品种进行高产栽培。国内外通过对多种红豆杉属植物针叶和树皮中紫杉醇及衍生物含量的研究, 认为短叶红豆杉 (*T. brevifolia* Nutt.)、喜马拉雅红豆杉 (*T. chinensis* Zucc.) 及曼地亚红豆杉 (*T. × media* cv. *Hicksii*) 几个栽培种等枝叶最适宜提取紫杉醇^[4-6]。Németh-Kiss^[7]利用高效液相色谱法测定了匈牙利不同红豆杉树皮和枝叶中的紫杉醇含量, 发现欧洲红豆杉 (*T. baccata* L.) 最具药用开发价值。程广有等^[8]和苏建荣等^[9]分别研究了东北红豆杉 (*T. cuspidata* Sieb. et Zucc.) 和喜马拉雅红豆杉紫杉醇含量, 发现不同天然种群以及种群内不同个体间紫杉醇含量存在显著差异, 高紫杉醇含量种源和个体的选择潜力很大。

南方红豆杉 (*T. wallichiana* var. *mairei* (Lemée et H. Lévillé) L. K. Fu et Nan Li) 是红豆杉科 (Taxaceae) 红豆杉属喜马拉雅红豆杉的变种, 属国家一级濒危保护树种^[10], 广泛分布于我国亚热带各省区。其紫杉醇含量虽稍低于喜马拉雅红豆杉等, 但因早期速生、生物收获量大、2~3年生即可收获而具有巨大开发利用价值。南方红豆杉遗传多样性丰富, 种内生长和紫杉醇含量差异显著^[11-13]。Ho等^[14]认为我国台湾地区南方红豆杉紫杉醇的变异主要来源于不同天然种群间, 陈毓亨等^[13]结合紫杉烷含量的测定和植物形态分类, 提出我国3个地区存在紫杉烷高含量的南方红豆杉株系的可能性。然而, 上述已有研究皆是利用红豆杉天然林枝叶和树

皮的测定结果, 未涉及红豆杉属植物的种源试验和药用优良种源选择。为了选育速生、高紫杉醇含量的南方红豆杉种源, 本研究组于2001年开始进行南方红豆杉全分布区地理种源试验研究^[12]。本文利用福建明溪和浙江龙泉农田庇荫设施栽培的2年生南方红豆杉种源试验林, 研究其幼林收获期生长和枝叶紫杉醇含量的种源差异和地理变异模式, 旨在为南方红豆杉短周期药用林建设筛选出一批药用优良种源。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与试验设计

试验材料来自设置在福建明溪 (117.15°E, 26.40°N) 和浙江龙泉 (119.13°E, 28.07°N) 农田庇荫设施栽培条件下的2年生南方红豆杉种源试验林, 有10个省区24个产地的种源参试。福建明溪和浙江龙泉种源试验林均于2006年2月利用在福建省明溪县培育的1年生裸根苗造林^[15]。试验按完全随机区组设计, 福建明溪点3次重复, 10株小区 (另还有一个试验观测区, 植株在100株以上); 浙江龙泉点4次重复, 20株小区。2个区试点的农田土壤肥力中等, 种源试验林的株行距为30 cm × 30~40 cm, 并利用透光度为50%的遮阳网形成庇荫生长环境。其它如除草和病虫害防治等经营措施与一般的短周期南方红豆杉药用林相同。

1.2 试验林调查和紫杉醇含量测定

2007年11月中旬对2个区试点2年生南方红豆杉种源试验林进行全林生长和分枝性状调查, 测定树高、当年抽梢长度、地径、冠幅、侧枝总数、当年侧枝数和最长侧枝长等性状; 同时在福建明溪点, 每试验重复各种源选择2株平均生长大小的植株, 分别收获其地上枝叶, 称其鲜质量。枝叶紫杉醇含量

处于高峰期的9月中下旬^[16],在福建明溪点南方红豆杉种源观测区每种源随机采集60株生长正常幼树上部小枝(包括叶片)2根,经混合后及时委托福建南方生物技术股份有限公司化验中心进行种源枝叶紫杉醇含量的测定,具体测定方法详见王昌伟等^[17]研究。

1.3 数据分析

以单株测定值为单元,开展单点和多点联合方差分析,以检验种源、地点和种源×地点互作等效应的显著性。方差分析采用SAS/GLM软件,侧枝数经 \sqrt{X} 数据转换。通过种源性状均值与产地经纬度的相关分析,揭示南方红豆杉种源幼树生长、分枝、干物质积累量和紫杉醇含量等地理变异规律。根据福建明溪点的测定结果,以种源枝叶的紫杉醇含量、鲜枝叶生物收获量和紫杉醇产量(枝叶收获量与其紫杉醇含量的乘积)为综合选择指标,筛选生物收获量和紫杉醇含量皆高的药用优良种源。

2 结果与分析

2.1 幼树生长和紫杉醇含量的种源差异

2.1.1 高径生长和分枝习性 方差分析结果(表1)显示:除福建明溪点2年生南方红豆杉地径外,福建明溪和浙江龙泉2个区试点树高、当年抽梢长、地径、冠幅、当年侧枝数和侧枝总数以及最长侧枝长等性状皆存在显著的种源变异。2个区试点种源树高分别在0.78~1.10 m和0.65~0.97 m间变化,最大种源比最小种源分别提高了41.0%和49.2%。分枝的多少和大小与生物收获量密切相关,福建明溪和浙江龙泉2个区试点的种源侧枝总数变幅分别为21.2~31.5枝和26.1~40.5枝,分枝数最多的种源比最少的种源分别高48.6%和55.2%。南方红豆杉种源幼树生长和分枝数等存在极显著差异,为高生物收获量种源的选择提供了可能。

表1 2个区试点2年生南方红豆杉种源生长和分枝性状方差分析

| 地点 | 性状 | 均值 | 变幅 | 变异来源 | | | |
|----------|---------|-------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------|------|
| | | | | 重复 | 种源 | 种源×重复 | 机误 |
| 福建 明溪 | 树高/m | 0.92 | 0.78~1.10 | 2.66 ⁺ | 6.11 ^{**} | 4.26 ^{**} | 0.03 |
| | 当年抽梢长/m | 0.50 | 0.42~0.67 | 19.31 ^{**} | 9.03 ^{**} | 4.68 ^{**} | 0.01 |
| | 地径/cm | 1.28 | 1.13~1.43 | 0.76 | 1.39 | 1.40 [*] | 0.17 |
| | 冠幅/m | 0.54 | 0.44~0.63 | 14.85 ^{**} | 4.35 ^{**} | 2.80 ^{**} | 0.02 |
| | 最长侧枝长/m | 0.46 | 0.41~0.53 | 0.78 | 2.80 ^{**} | 2.46 ^{**} | 0.01 |
| | 当年侧枝数/枝 | 10.70 | 7.70~14.40 | 4.10 [*] | 7.32 ^{**} | 6.32 ^{**} | 0.22 |
| | 侧枝总数/枝 | 24.80 | 21.20~31.50 | 33.08 ^{**} | 4.73 ^{**} | 4.77 ^{**} | 0.36 |
| 浙江 龙泉 | 树高/m | 0.84 | 0.65~0.97 | 22.36 ^{**} | 10.21 ^{**} | 2.73 ^{**} | 0.03 |
| | 当年抽梢长/m | 0.44 | 0.34~0.53 | 39.26 ^{**} | 10.64 ^{**} | 3.55 ^{**} | 0.01 |
| | 地径/cm | 1.49 | 1.30~1.75 | 9.33 ^{**} | 5.68 [*] | 2.76 ^{**} | 0.14 |
| | 冠幅/m | 0.70 | 0.57~0.84 | 6.46 ^{**} | 6.96 ^{**} | 1.68 ^{**} | 0.04 |
| | 最长侧枝长/m | 0.54 | 0.48~0.64 | 6.95 ^{**} | 5.16 ^{**} | 2.22 ^{**} | 0.02 |
| | 当年侧枝数/枝 | 13.40 | 10.10~19.50 | 47.02 ^{**} | 12.16 ^{**} | 2.81 ^{**} | 0.48 |
| | 侧枝总数/枝 | 32.80 | 26.10~40.50 | 38.10 ^{**} | 12.12 ^{**} | 3.36 ^{**} | 0.53 |

注:福建明溪点的重复、种源、种源×重复和机误自由度分别为2、23、46和648;浙江龙泉点的重复、种源、种源×重复和机误自由度分别为3、23、69和1294。+、*和**分别为0.10、0.05和0.01显著水平,下同。

2.1.2 鲜枝叶生物收获量 表2表明:不同种源幼树鲜枝叶生物收获量存在很大差异,其中贵州梵净山种源的单位生物收获量最高,达377.20 g,江西庐山种源最低,为170.10 g,仅为贵州梵净山种源的45.1%;有14个种源的单株鲜枝叶生物收获量超过总体平均值(282.58 g),贵州梵净山、福建明溪、江西龙南、湖南通道、福建武平和贵州黎平等11个种源的单株鲜枝叶生物收获量超过300 g。

2.1.3 鲜枝叶紫杉醇含量 从图1可见:福建明溪点2年生南方红豆杉种源鲜枝叶的紫杉醇含量也存在较大的差异,其中安徽黄山和福建柘荣两种源鲜枝叶的紫杉醇含量最高,达104.0 mg·kg⁻¹,而福建沙县种源鲜枝叶的紫杉醇含量最低,仅为75.6 mg·kg⁻¹。此外,湖南桑植、贵州黎平、贵州都匀、江西井冈山等种源鲜枝叶的紫杉醇含量也较高,均在100.0 mg·kg⁻¹,适用于药用林栽培。

表 2 福建明溪点南方红豆杉各种源 2 年生单株鲜枝叶生物收获量

| 种源 | 平均单株鲜枝叶生物收获量/g | 种源 | 平均单株鲜枝叶生物收获量/g | 种源 | 平均单株鲜枝叶生物收获量/g |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 江西庐山 | 170.10 | 福建武夷山 | 270.60 | 浙江龙泉 | 315.70 |
| 福建宁化 | 181.22 | 湖南靖州 | 274.50 | 云南石屏 | 322.74 |
| 江西武宁 | 189.30 | 四川峨眉山 | 289.90 | 福建武平 | 324.81 |
| 江西井冈山 | 213.84 | 福建柘荣 | 291.60 | 贵州黎平 | 326.81 |
| 福建沙县 | 242.72 | 湖南绥宁 | 295.20 | 湖南通道 | 330.06 |
| 广西三江 | 244.62 | 安徽黄山 | 304.29 | 江西龙南 | 334.56 |
| 贵州都匀 | 251.10 | 湖南桑植 | 311.60 | 福建明溪 | 345.22 |
| 贵州锦屏 | 261.45 | 湖北恩施 | 312.80 | 贵州梵净山 | 377.20 |

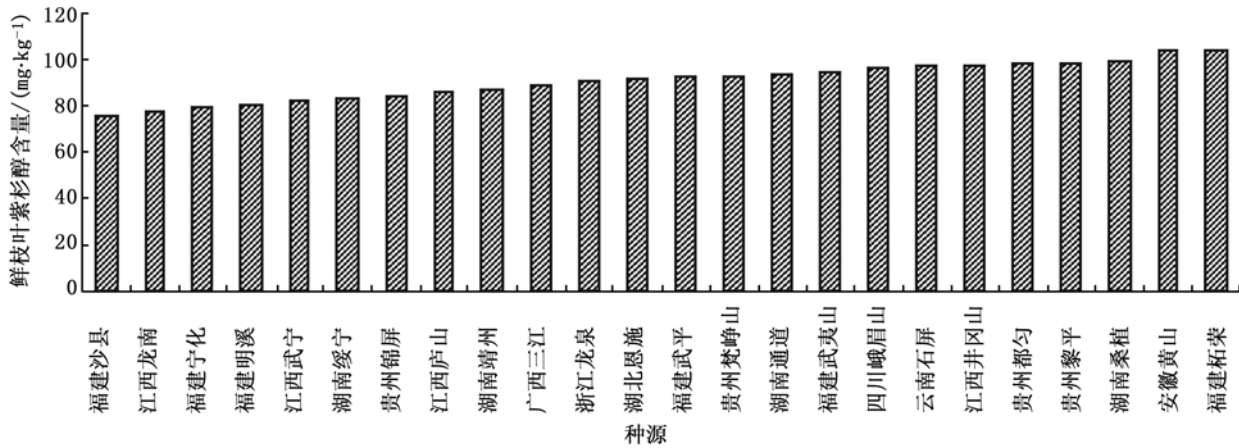


图 1 福建明溪各种源 2 年生幼树鲜枝叶紫杉醇含量

2.2 幼树生长的立地效应及种源与立地互作

福建明溪和浙江龙泉 2 个区试点的联合方差分析结果(表 3)显示:南方红豆杉生长和分枝性状皆存在极显著的地点效应。福建明溪点水热条件相对较好,2 年生种源平均树高和当年抽梢长分别为 0.92 m 和 0.50 m,较浙江龙泉点种源平均树高(0.84 m)和当年抽梢长(0.44 m)分别提高了 9.5% 和 13.6%(表 1);但因福建明溪点种源幼树的高径生长较快,在较大的初植密度下植株的分枝和侧枝生长受到了一定影响,而浙江龙泉点种源幼树的高

径生长较慢,在同样的初植密度下则有利于分枝的发育,浙江龙泉点 2 年生种源平均地径、冠幅、最长侧枝长、侧枝总数和当年侧枝数分别比福建明溪点高 16.40%、29.63%、17.39%、32.26% 和 25.23%。这一结果说明在建立南方红豆杉短周期药用林基地时应科学地确定适宜的栽植密度,以利于植株的树冠生长发育和生物收获量的提高。表 3 还表明:2 年生南方红豆杉生长和分枝性状存在极显著的种源 × 地点互作,不同种源在 2 个区试点上的生长表现差异较大,应分地点推选适用的种源。

表 3 2 个区试点南方红豆杉种源 2 年生长和分枝性状联合方差分析

| 性状 | 变异来源 | | | | | |
|-------|-----------|----------|----------|---------|------------|------|
| | 地点 | 重复/地点 | 种源 | 种源 × 地点 | 种源 × 重复/地点 | 机误 |
| 树高 | 115.65 ** | 14.94 ** | 8.46 ** | 7.76 ** | 3.30 ** | 0.03 |
| 当年抽梢长 | 147.54 ** | 32.02 ** | 11.33 ** | 7.89 ** | 3.92 ** | 0.01 |
| 地径 | 158.96 ** | 5.80 ** | 4.34 ** | 2.52 ** | 2.18 ** | 0.15 |
| 冠幅 | 375.27 ** | 8.05 ** | 6.67 ** | 4.33 ** | 1.88 ** | 0.03 |
| 最长侧枝长 | 178.93 ** | 5.03 ** | 5.21 ** | 2.69 ** | 2.22 ** | 0.02 |
| 当年侧枝数 | 164.07 ** | 36.01 ** | 14.51 ** | 4.29 ** | 3.47 ** | 0.39 |
| 侧枝总数 | 499.98 ** | 36.10 ** | 12.16 ** | 4.92 ** | 3.70 ** | 0.47 |

注:地点、重复/地点、种源、种源 × 地点、种源 × 重复/地点和机误的自由度分别为 1、5、23、23、115 和 1942。

2.3 种源生长和紫杉醇含量的地理变异模式

除福建明溪点种源冠幅与产地经度、浙江龙泉

点种源最长侧枝长和侧枝总数与产地纬度的相关性达到 0.10 显著性水平外(表 4),南方红豆杉种源幼

树生长和分枝性状与产地经纬度多呈微弱的负相关,未显示出明显的地理变异模式;但与产地气候因子的进一步相关分析却发现,2个区试点,尤其是浙江龙泉点2年生种源的生长和分枝性状多与产地年均温、1月均温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和无霜期等温度因子呈显著正相关,与产地年降水量呈不同程度的负相关,说明来自气候温暖但年降水量较少地区的种源生长快、分枝多、树冠浓密。南方红豆杉种源鲜枝叶紫杉醇含量与产地纬度呈微弱的正相关,与产地经度呈

微弱的负相关。产地年降水量对种源鲜枝叶紫杉醇含量影响较小,而产地温度的影响却较大,发现种源鲜枝叶紫杉醇含量与产地年均温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著的负相关关系,产地年均温低、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温小的种源其鲜枝叶紫杉醇含量较高。对比发现,产地年均温在 $15\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 $4\ 000\sim 5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,即处长江流域下游三角洲地带和云贵高原地区的部分种源其鲜枝叶紫杉醇含量较高。

表4 2个区试点南方红豆杉种源生长、分枝和紫杉醇含量等性状与产地地理气候因子的相关性

| 地点 | 性状 | 纬度 | 经度 | 年均温 | 1月均温 | 7月均温 | $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 | 年降水量 | 无霜期 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|
| 福建 明溪 | 树高 | 0.029 | -0.251 | 0.265 | 0.069 | 0.412* | 0.235 | -0.320 ⁺ | 0.305 |
| | 当年抽梢长 | -0.009 | -0.296 | 0.329 | 0.118 | 0.463* | 0.214 | -0.214 | 0.346 ⁺ |
| | 地径 | -0.064 | 0.286 | 0.348 ⁺ | 0.337 ⁺ | 0.247 | 0.403 ⁺ | -0.266 | 0.361 ⁺ |
| | 冠幅 | -0.159 | -0.373 ⁺ | 0.389 ⁺ | 0.240 | 0.333 ⁺ | 0.281 | -0.133 | 0.232 |
| | 最长侧枝长 | -0.153 | -0.139 | 0.240 | 0.253 | 0.124 | 0.138 | -0.189 | 0.305 |
| | 当年侧枝数 | -0.191 | 0.001 | 0.454* | 0.354 ⁺ | 0.379 ⁺ | 0.334 ⁺ | -0.374 ⁺ | 0.495* |
| | 侧枝总数 | -0.134 | 0.154 | 0.168 | 0.178 | 0.108 | 0.096 | -0.324 ⁺ | 0.401 ⁺ |
| 浙江 龙泉 | 鲜枝叶紫杉醇含量 | 0.196 | -0.208 | -0.321 ⁺ | -0.162 | -0.251 | -0.392 ⁺ | 0.005 | -0.164 |
| | 树高 | -0.207 | -0.262 | 0.230 | 0.340 | 0.026 | 0.510* | -0.337 ⁺ | 0.367 ⁺ |
| | 当年抽梢长 | -0.206 | -0.290 | 0.246 | 0.369 ⁺ | 0.027 | 0.438* | -0.236 | 0.326 ⁺ |
| | 地径 | -0.228 | -0.144 | 0.243 | 0.415* | -0.045 | 0.459* | -0.400 ⁺ | 0.229 |
| | 冠幅 | -0.273 | 0.015 | 0.244 | 0.417* | -0.150 | 0.418* | -0.172 | 0.134 |
| | 最长侧枝长 | -0.362 ⁺ | -0.096 | 0.160 | 0.361 ⁺ | -0.254 | 0.196 | -0.104 | 0.184 |
| | 当年侧枝数 | -0.302 | -0.216 | 0.405* | 0.425* | 0.188 | 0.490* | -0.188 | 0.282 |
| 侧枝总数 | -0.361 ⁺ | -0.194 | 0.456* | 0.467* | 0.188 | 0.554** | -0.323 ⁺ | 0.389* | |

2.4 种源生长与紫杉醇含量的关系

表5表明:在农田庇荫设施栽培条件下,龙泉点南方红豆杉种源树高、当年抽梢长、地径、冠幅、最长侧枝长、当年侧枝数和侧枝总数7个性状相互间呈显著正相关,树高和地径生长量大的种源其冠幅较宽、侧枝较长、侧枝数较多,有利于高生物收获量种

源的选择。南方红豆杉种源鲜枝叶的紫杉醇含量与生长和分枝等性状呈负相关关系,与鲜枝叶生物收获量呈正相关关系,但其间相关性皆未达到显著性水平,说明种源的鲜枝叶生物收获量与其紫杉醇含量相关性较小,似互为独立。

表5 两个区试点南方红豆杉种源生长、分枝和鲜枝叶紫杉醇含量性状间的相关系数

| 性状 | 树高 | 当年抽梢长 | 地径 | 冠幅 | 最长侧枝长 | 当年侧枝数 | 侧枝总数 |
|----------|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| 树高 | | 0.892** | 0.762** | 0.732** | 0.672** | 0.771** | 0.787** |
| 当年抽梢长 | 0.458* | | 0.708** | 0.741** | 0.729** | 0.858** | 0.759** |
| 地径 | 0.147 | 0.307 | | 0.799** | 0.782** | 0.673** | 0.739** |
| 冠幅 | 0.775** | 0.340 | 0.137 | | 0.853** | 0.660** | 0.648** |
| 最长侧枝长 | 0.631** | 0.593** | 0.446* | 0.784** | | 0.691** | 0.677** |
| 当年侧枝数 | 0.918** | 0.535** | 0.090 | 0.827** | 0.636** | | 0.920** |
| 侧枝总数 | 0.666** | 0.837** | 0.362 ⁺ | 0.602** | 0.627** | 0.793** | |
| 鲜枝叶紫杉醇含量 | -0.178 | 0.091 | -0.215 | 0.087 | -0.291 | 0.127 | -0.004 |

注:上三角为浙江龙泉点(未测定鲜枝叶紫杉醇含量),下三角为福建明溪点。

2.5 短周期药用林优良种源选择

药用优良种源要求幼树生物收获量大,枝叶紫杉醇含量高,即要求在鲜枝叶紫杉醇含量不低于一定标

准值的前提下选择单株鲜枝叶紫杉醇产量高的种源。从表6列出的福建明溪点24个种源2年生鲜枝叶紫杉醇产量(鲜枝叶生物收获量与其紫杉醇含量的乘

积)可见:南方红豆杉不同种源鲜枝叶紫杉醇产量差异很大,产量最高的贵州梵净山种源(35.192 8 mg)比产量最低的福建宁化种源(14.334 5 mg)高145.51%。贵州黎平、云南石屏、安徽黄山、福建柘

荣、湖南桑植5个种源不仅单株鲜枝叶的紫杉醇产量高(> 30 mg),而且其紫杉醇含量也较高,皆在97 mg·kg⁻¹以上,可作为药用优良种源推广应用。

表6 福建明溪点2年生南方红豆杉种源的鲜枝叶紫杉醇产量

| 种源 | 单株鲜枝叶 紫杉醇产量/mg | 种源 | 单株鲜枝叶 紫杉醇产量/mg | 种源 | 单株鲜枝叶 紫杉醇产量/mg |
|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| 贵州梵净山 | 35.192 8 | 湖北恩施 | 28.777 6 | 湖南靖州 | 23.909 0 |
| 贵州黎平 | 32.419 6 | 浙江龙泉 | 28.728 7 | 贵州锦屏 | 22.014 1 |
| 安徽黄山 | 31.646 2 | 四川峨眉山 | 28.033 3 | 广西三江 | 21.771 2 |
| 云南石屏 | 31.305 8 | 福建明溪 | 27.962 8 | 江西井冈山 | 20.742 5 |
| 湖南桑植 | 31.097 7 | 江西龙南 | 25.761 1 | 福建沙县 | 18.349 6 |
| 湖南通道 | 30.827 6 | 福建武夷山 | 25.571 7 | 江西武宁 | 15.674 0 |
| 福建柘荣 | 30.326 4 | 湖南绥宁 | 24.737 8 | 江西庐山 | 14.594 6 |
| 福建武平 | 30.174 8 | 贵州都匀 | 24.683 1 | 福建宁化 | 14.334 5 |

3 结论与讨论

本文在南方红豆杉种源苗期试验^[15]基础上,报道了福建明溪和浙江龙泉2个区试点农田庇荫设施栽培条件下24个种源幼树收获期(2年生)的试验结果。研究表明:南方红豆杉幼树树高、地径和冠幅生长、分枝性状、单株鲜枝叶生物收获量和紫杉醇含量在种源间差异皆达到显著水平,如2年生幼树单株鲜枝叶生物收获量的种源变幅170.10~377.20 g,最大种源是最小种源的2.22倍,种源鲜枝叶紫杉醇含量变化在75.6~104.0 mg·kg⁻¹,最大种源是最小种源的1.38倍,说明开展以生物收获量和紫杉醇含量为目标的南方红豆杉育种具有很大的潜力。南方红豆杉种源生长和分枝性状间呈显著的正相关,速生的种源分枝多、树冠浓密、生物收获量高。然而种源鲜枝叶紫杉醇的含量却与生长和生物收获量的相关性不显著,这有利于生物收获量大和紫杉醇含量高的优良种源选择。在试验的24个种源中,安徽黄山、福建柘荣、湖南桑植、贵州黎平、云南石屏5个种源不仅鲜枝叶紫杉醇含量高于97 mg·kg⁻¹,而且单株鲜枝叶紫杉醇产量也较高(高于种源总体均值25.776 5 mg),可作为药用优良种源用于南方红豆杉短周期药用林建设。此外,本研究组在南方红豆杉种源试验和药用优良种源选择的同时,还开展了福建武夷山种源不同幼树个体鲜枝叶紫杉醇含量的检测,发现叶片较厚、较窄、较短的幼树紫杉醇含量较高,叶片较薄、较宽、较长的植株紫杉醇含量较低,表明叶片形态可作为高紫杉醇含量优株选择的依据,应加强紫杉醇含量性状的研究及在药用种质选

育中的应用。

与同区域其它广域性分布树种不同^[18-19],南方红豆杉不存在明显的地理变异模式。种源生长和分枝性状与产地纬度呈一定程度的负相关,与产地经度相关性较小;种源鲜枝叶紫杉醇含量与产地纬度呈微弱的正相关,与产地经度呈微弱的负相关。这与程广有等^[8]对东北红豆杉天然林的研究结果不同,随着产地纬度的升高,东北红豆杉天然林的生长量降低而紫杉醇含量呈明显增加的趋势。然而通过与产地气候因子的相关分析却发现,来自气候温暖但年降水量较少地区的种源有生长快、分枝多、树冠浓密的变化趋势。产地温度是影响南方红豆杉种源鲜枝叶紫杉醇含量的重要环境因子,而产地降水量等影响较小,年均温在15~16℃,≥10℃积温在4 000~5 000℃范围内的种源具有相对高的紫杉醇含量。适宜的气候条件,尤其是夏天气候凉爽不仅有利于南方红豆杉的生长发育,而且有利于紫杉醇的生物合成^[15]。苏建荣等^[9]对云南红豆杉的研究也证明了这一点。从东北红豆杉天然林分紫杉醇含量与产地纬度的正相关关系中也间接说明产地温度对紫杉醇合成的重要影响^[8]。

参考文献:

- [1] Holton R A, Somoza C, Kim H B, et al. First total synthesis of taxol 1. Functionalization of the B ring [J]. Journal of the American Chemical Society, 1994, 116(4): 1597-1598
- [2] Nicolau K C, Yang Z, Liu J J, et al. Total synthesis of taxol [J]. Nature, 1994, 367: 630-634
- [3] Collin H A. Secondary product formation in plant tissue cultures [J]. Plant Growth Regulation, 2001, 34(1): 119-134
- [4] Witherup K M, Look S A, Stasko M W, et al. Taxus spp. needles

- contain amounts of taxol comparable to the bark of *Taxus brevifolia*: analysis and isolation[J]. *Journal of Natural Products*, 1990,53(5):1249-1255
- [5] Fett-Neto A G, DiCosmo F. Distribution and amount of taxol in different shoot parts of *Taxus cuspidate*[J]. *Planta Medica*, 1992,58(5):464-466.
- [6] ElSohly H N, Croom E D, Kopycki W J, et al. Concentrations of taxol and related taxanes in the needles of different *Taxus* cultivars[J]. *Phytochemical Analysis*, 1995,6(3):149-156
- [7] Németh-Kiss V, Forgács E, Cserhádi T, et al. Taxol content of various *Taxus* species in Hungary[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 1996, 14(8-10):997-1001
- [8] 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):7-11
- [9] 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
- [10] Fu L G, Li N, Mill R R. *Taxaceae*[M]//Wu Z Y, Raven P H. *Flora of China* 4. Beijing: Science Press & St. Louis: Missouri Botanical Garden, 1999:89-96
- [11] 张 蕊, 周志春, 金国庆, 等. 南方红豆杉种源遗传多样性和遗传分化[J]. *林业科学*, 2009,45(1):50-56
- [12] 焦月玲, 周志春, 金国庆, 等. 6个南方红豆杉种源苗期和幼龄生长差异[J]. *林业科学研究*, 2005,18(5):636-640
- [13] 陈毓亨, 白守梅. 南方红豆杉紫杉烷高含量植株系 RAPD 初步研究[J]. *植物学报*, 1999,41(8):829-832
- [14] Ho C K, Chang S H, Chen Z Z, et al. Variation in content of taxanes in needles and stems of *Taxus mairei* trees naturally distributed in Taiwan[J]. *Taiwan Journal of Forest Science*, 1997, 12(1):23-37
- [15] 焦月玲, 周志春, 余能健, 等. 南方红豆杉苗木性状种源分化和育苗环境对苗木生长的影响[J]. *林业科学研究*, 2007,20(3):363-369
- [16] 周志春, 余能健. 栽培措施对南方红豆杉紫杉醇含量的影响[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(1):120-124
- [17] 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*, 2008,45(2):1269-1273
- [18] 全国马尾松种源试验协作组. 马尾松种源变异及种源区划分的研究[J]. *亚热带林业科技*, 1987(2):81-89
- [19] 张 萍, 金国庆, 周志春, 等. 木荷苗木性状的种源变异和地理模式[J]. *林业科学研究*, 2004,17(2):192-198