

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230005

13 个柚木种源/家系生长表现研究

李运兴^{1,4}, 梁坤南², 黄桂华², 邝炳朝², 郝建^{1,4},
杨保国^{1,4}, 潘丽琴³, 黄日逸^{1,4}

(1. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西 凭祥 532699; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 3. 广西民族师范学院, 广西 崇左 532200; 4. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 凭祥 532699)

摘要: [目的] 了解国内柚木种源/家系的遗传变异特征, 选育更多适应性强的优良种质。[方法] 对采集自海南尖峰岭等地的 13 个种源/家系进行造林试验, 在 5、10、37 a 时测定树高、胸径, 应用方差分析方法进行差异性分析和重复力估算, 运用偏相关分析揭示生长因子与地理及气候因子的相关性, 进而筛选优良种质。[结果] ①不同种源/家系间 37 a 生时保存率、树高、胸径、单株材积差异显著, 其变化范围分别为 68.81%~94.29%、11.72~16.03 m、11.33~17.92 cm、0.084 4~0.329 1 m³。②树高、胸径、材积重复力分别为 0.607 7、0.513 1、0.634 4。③保存率、树高与地理坐标、气候因子相关不显著; 胸径和单株材积与海拔 ($r=0.938^{**}$, $r=0.868^{**}$)、年均温 ($r=0.914^{**}$, $r=0.844^{**}$) 显著正相关, 与经度 ($r=-0.913^{**}$, $r=-0.735^{**}$)、距离 ($r=-0.923^{**}$, $r=-0.832^{**}$) 显著负相关。④聚类分析结果表明, 37 a 生时, 种源/家系 7514 的保存率、树高、胸径和单株材积表现最好, 8440 表现最差, 其次是 75129。[结论] 不同种源/家系间保存率、树高、胸径、单株材积差异显著, 树高、单株材积有较高的重复力。柚木引种宜选择年均气温相近且距离较近的种源/家系以获得较好的遗传表现, 对于凭祥当地而言, 种源/家系 7514 适宜广泛推广种植。

关键词: 柚木; 种源/家系; 生长表现; 相关因子

中图分类号: S722

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0001-09

柚木 (*Tectona grandis* Linn) 为马鞭草科落叶半落叶性大乔木, 原产缅甸、印度、泰国、老挝等国家的热带地区^[1-5], 是世界著名的一个珍贵用材树种, 广泛应用于军工、家具制造等产业。为选育更具经济价值的良种, 一些国际组织和国家相继开展了多批次的种质收集和测定试验^[6-11], 表明不同地理来源的柚木种质间生长性状变异明显^[12-14]。柚木在我国无天然分布, 为丰富珍贵树种及其种质资源, 发展社会经济, 摆脱对外进口依赖, 1964 年前后, 我国云南、广东、广西、福建和台湾等省(区)开展了最早的引种试验^[15-16], 其中在海南乐东

县尖峰岭引种了包含有缅甸、印度、泰国、老挝 4 个国家的多个种源/家系^[17], 1982 年中国林业科学研究院热带林业研究所在适生区内以县份为单位进行了种源/家系收集和多点引种试验。目前为止, 已对布设在海南^[18-21]、云南^[22]、广西^[23]的部分批次的种源/家系试验进行了研究总结, 热带林业研究所选育出 3070 耐旱种源和 7029 无性系国家良种, 云南红河州林业研究所在云南选出 8507 (印尼/梅县)、8602 (缅甸/瑞丽)、8603 (缅甸/尖峰)、6615 (缅甸/尖峰)、8411 (缅甸/盈江) 5 个省级种源良种。为进一步选育在东南亚

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-11-09

基金项目: 广西林业科技示范推广项目“柚木种质区域试验及多模式造林研究示范”(2023GXLLK41); 广西林业科技推广项目“柚木种质测定及高效培育技术集成示范”(gl2018kt18); “十三五”国家重点研发计划项目“柚木高效培育技术研究”(2016YFD0600602)

作者简介: 李运兴, 高级工程师, 主要研究方向: 柚木等珍贵树种培育技术研究。E-mail: lyx8526351@163.com

带适应性强、生长快、材质优良的种质,促进我国柚木种植业发展,本研究对 37 年生 13 个国内种源/家系适应性与生长性状变异进行分析,并探索其生长与种子来源地地理、气候因子的相关关系。

1 材料与方 法

1.1 材料来源

供试种源/家系共 13 个,其中缅甸 9 个,泰

国 3 个,老挝 1 个。1979 年 12 月至 1980 年 2 月采种,家系在林分中以 5 株优势木法选择,并兼顾四旁中具特异性状的单株,如常绿、冠窄等。种源以片林、四旁和行道树为主,面积、株数不等,少的 25~40 株,多的 33.3 hm²,年龄 15~20 a,采种株数视结种情况 10~20 株。各种源/家系概况见表 1。

表 1 13 个种源/家系采种的地理与气候因子

Table 1 Geographical and climate factors of the introduced sites of 13 provenances/families

代号 Code	编号 Number	原产地 Country of origin	采种地 Seed collection site	东经/ (°) East longitude	北纬/ (°) North latitude	海拔/m Elevation	年均气温/°C Mean annual temperature	年降水/mm Mean annual precipitation	与种植地 距离/km Distance
1	7501*	缅甸 Myanmar	海南尖峰南线 Jianfeng south line, Hainan	108.81	18.70	112	24.5	1 500	435.83
2	7514*	缅甸 Myanmar	海南尖峰二桥 Jianfeng Erqiao, Hainan	108.33	18.70	152	24.5	1 500	413.91
3	7523*	缅甸 Myanmar	海南尖峰二桥 Jianfeng Erqiao, Hainan	108.83	18.71	151	24.5	1 500	435.87
4	7551*	缅甸 Myanmar	海南尖峰中学对面 Opposite of Jianfeng middle school, Hainan	108.81	18.70	86	24.5	1 500	435.83
5	7564*	缅甸 Myanmar	海南尖峰电 厂后 Behind Jianfeng power station, Hainan	108.79	18.69	74	24.5	1 500	435.80
6	7787	泰国 Thailand	云南西双版纳热作所 Tropical crops institute of Xishuangbanna, Yunnan	101.07	21.87	580	21.9	1 196	588.98
7	7907*	缅甸 Myanmar	海南尖峰二桥 Jianfeng Erqiao, Hainan	108.82	18.71	148	24.5	1 500	435.36
8	8014	泰国 Thailand	海南尖峰电厂后 Behind Jianfeng power station, Hainan	108.82	18.70	99	24.5	1 500	436.34
9	8022	缅甸 Myanmar	云南勐仑植物所 Menglun institute of botany, Yunnan	101.42	21.68	550	21.7	1 500	554.84
10	8408	缅甸 Myanmar	云南德宏州瑞丽市勐秀林场 Mengxiu forest farm of Ruili, Yunnan	97.08	23.67	1 280	18.9	1 250	1 005.60
11	8440	缅甸 Myanmar	云南景东县紫胶所 Shellac institute of Jingdong county, Yunnan	100.75	24.47	1 162	18.3	1 087	668.00
12	8443	老挝 Laos	云南勐腊县 Mengla county, Yunan	101.57	21.50	640	20.9	1 525	542.04
13	75129*	泰国 Thailand	海南尖峰电厂后 Behind Jianfeng power station, Hainan	108.79	18.70	79	24.5	1 500	434.83

注: 标注有“*”号的为家系,其它为种源

Notes: Numbers with * indicate family, the others are provenances

1.2 试验地概况

试验地位于中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场那花林区, 106°47' E, 22°08' N, 海拔 225~242 m。年均气温 21.0 °C, 极端最高气温 40 °C, 极端最低气温 -1 °C; 年降水量 1 380 mm, 属南亚热带季风气候; 每年有台风 1~2 次, 但危害小。造林地为杉木采伐迹地, 土壤为砂页岩发育的砖红壤性红壤, 砂质轻粘土, pH 值 4.8~5.2。

1.3 试验设计与铺设

1980 年 4 月在热带林业实验中心夏石苗圃育苗, 1982 年 3 月用 2 年生切杆苗造林。试验采用完全随机区组设计, 13 个种源/家系, 6 个重复, 每小区 5 株, 垂直于等高线单列小区排列。株行距 3 m × 2 m, 四周设保护行。

1.4 生长调查与数据分析

1986 年 12 月 (5 a)、1991 年 11 月 (10 a)、2018 年 12 月 (37 a) 分别对参试验种源/家

系进行树高、胸径调查, 材积采用 $V=0.4787 \times H \times D^2$ 公式^[18]。参照文献^[24] 计算如下参数:

表型变异系数 $CVP = \sigma_p / X$, (式中: σ_p 为表型标准差, X 为群体平均值)。

重复力 $R = (MS_f - MS_e) / MS_f = 1 - 1/F$, (式中: MS_f 为种源均方, MS_e 为误差均方, F 为方差分析中 F 值)。

遗传增益: $\Delta G = (S \times R) / X \times 100\%$ (式中: S 为选择差, R 为重复力, X 为某一性状的均值)。

采用 SPSS 14.0 软件进行方差分析和 LSD 多重比较、偏相关性以及 K 均值聚类分析。

2 结果与分析

2.1 林分保存率

由表 2 和表 3 可知:柚木种源/家系试验林 5 年生时平均保存率为 96.54%; 10 年生时平均保存率 94.70%, 较 5 年生时降低 1.84%; 37 年生时平均保存率为 81.13%, 较 10 年生时下降 13.57%。保存率下降主要出现在 10 年生之后, 其变异系数随着年龄的增长逐渐增大。5 年生与 10 年生时的保存率显著相关 ($r_{5,10}=0.967^{**}$), 但两者均与 37 年生时的保存率相关不显著 ($r_{5,37}=0.331$, $r_{10,37}=0.362$)。方差分析结果显示, 5、10、37 年生时种源/家系间、重复间保存率存在显著差异, 且两者互作效应极显著; 多重比较结果显示, 37 年生时与保存率最高 (94.29%) 的 7551 种源/家系属同一水平的有 7514、7523、8408、75129 四个; 最低的有 7501、7564、7787、7907、8014、8440、8443; 不同原产国间保存率呈现缅甸 (82.17%) > 泰国 (79.17%) > 老挝 (77.61%); 对于采种地间的差异, 云南 (81.70%) > 海南 (80.78%); 此外, 保存率与地理、气候因子相关性不显著 (表 4)。

2.2 生长表现

表 2 显示, 种源/家系 5、10、37 年生时树高均值分别为 3.89、7.15 和 13.83 m; 种源/家系间的 (分化) 变异系数随树龄增加明显减小, 由 5 年生时的 14.46% 减少到 37 年生时的 8.39%; 5 年生与 10 年生时树高显著相关 ($r_{5,10}=0.891^{**}$), 而 37 年生时树高与 5 年生和 10 年生时树高无显著相关性 ($r_{5,37}=0.325$, $r_{10,37}=0.180$); 方差分析结果 (表 3): 5、10、37 年生时, 种源/家系间、重复间、种源/家系与重复间互作效应差异均极显

著 ($P < 0.01$), 37 年生时 7514 种源/家系树高最高, 达到 16.03 m, 显著高于 7501、7564、8440、75129; 就种源/家系原产国间表现而言, 37 年生时树高平均值: 泰国 (13.98 m) > 缅甸 (13.81 m) > 老挝 (13.62 m)。而就采种地而言: 海南 (14.14 m) > 云南 (13.33 m)。从偏相关分析结果 (表 4) 可知, 引种地气候因子与树高相关不显著, 表明在南亚热带低海拔地区引种柚木, 气候不是影响其树高生长的主要因子。

13 个种源/家系 5、10、37 年生时胸径均值 (表 2) 分别为 6.11、8.38、15.00 cm; 其变异系数分别为 9.92%、8.87% 和 10.01%; 5 年生与 10 年生时胸径显著相关 ($r_{5,10}=0.881^{**}$), 两者与 37 年生时相关不显著 ($r_{5,37}=0.433$, $r_{10,37}=0.313$)。方差分析结果表明, 5、10、37 年生时, 种源/家系间、重复间差异极显著, 且两者互作效应亦极显著。多重比较结果显示, 37 年生时, 与胸径最大 (17.92 cm) 的 7514 种源/家系属同一水平的有 7523、7551、7787、7907、8014、8022 六个, 处于低值水平的有 7501、7564、8408、8440、8443、75129。37 年生时原产国间胸径平均值比较, 缅甸 (15.01 cm) > 泰国 (15.00 cm) > 老挝 (14.88 cm); 采种地比较, 海南 (15.25 cm) > 云南 (14.60 cm)。偏相关分析结果表明 (表 4), 胸径与引种地气候和地理因子相关极显著, 复相关系数达 0.978^{**}, 与经度、海拔、均温、种植距离的偏相关系数的绝对值均在 0.9 以上, 说明不同柚木种源/家系胸径生长具有相对于特定环境的选优潜力。

13 个种源/家系 5、10、37 年生时单株材积均值 (表 2) 分别为 0.008 8、0.028 7 和 0.201 4 m³; 其变异系数分别为 35.48%、27.12% 和 28.09%; 5 年生与 10、37 年生时显著相关 ($r_{5,10}=0.870^{**}$, $r_{5,37}=0.560^{*}$), 而 10 年生与 37 年生时相关不显著 ($r_{10,37}=0.516$)。方差分析结果表明, 5、10 和 37 年生时, 种源/家系间、重复间差异极显著, 两者间、互作效应亦极显著; 多重比较结果显示, 37 年生时与单株材积最大 (0.3291 m³) 的 7514 种源/家系属同一水平的有 8022、7787、7907 三个, 处于低值水平的有 7523、8014、7501、8408、7551、8443、75129、7564、8440 九个, 37 年生时原产国间胸径平均值

表 2 13 个种源/家系适应、生长指标多重比较与遗传参数
Table 2 Multiple range tests among families/provenances for adaptation and growth traits and genetic parameters

林龄 Age/a	种源/家系编号与 重复力 Code or Repeatability	保存率/% Preservation rate	树高 H/m		胸径 DBH/cm		材积 V/m ³	
			均值 mean value	遗传增益/% Genetic gain	均值 mean value	遗传增益/% Genetic gain	均值 mean value	遗传增益/% Genetic gain
5	7501	100.00 ± 0.00 a*	3.62 ± 0.91 b	-4.89	5.54 ± 0.90 b	-6.25	0.005 6 ± 0.002 6 b	-24.44
	7514	100.00 ± 0.00 a	4.79 ± 1.73 a	16.30	6.94 ± 1.95 a	9.10	0.013 8 ± 0.012 7 a	38.98
	7523	91.67 ± 30.33 a	4.13 ± 1.83 ab	4.35	6.34 ± 2.14 ab	2.52	0.011 0 ± 0.010 7 ab	17.32
	7551	100.00 ± 0.00 a	4.40 ± 1.77 a	9.24	6.41 ± 1.59 ab	3.29	0.010 6 ± 0.007 9 ab	14.23
	7564	83.33 ± 24.68 b	4.31 ± 1.75 a	7.61	6.48 ± 1.67 ab	4.05	0.010 9 ± 0.010 1 ab	16.55
	7787	90.00 ± 15.54 b	4.08 ± 1.19 ab	3.44	6.45 ± 1.24 b	3.73	0.009 1 ± 0.005 4 b	2.63
	7907	93.33 ± 9.76 b	3.42 ± 1.08 b	-8.51	5.51 ± 1.42 b	-6.58	0.006 0 ± 0.004 8 b	-21.34
	8014	100.00 ± 0.00 a	3.17 ± 1.39 b	-13.04	5.11 ± 1.67 b	-10.96	0.005 4 ± 0.005 5 b	-25.98
	8022	100.00 ± 0.00 a	4.67 ± 1.78 a	14.13	7.05 ± 1.86 a	10.30	0.013 9 ± 0.011 1 a	39.75
	8408	96.67 ± 9.76 a	3.81 ± 0.95 ab	-1.45	6.25 ± 1.09 ab	1.53	0.007 9 ± 0.004 4 b	-6.65
	8440	100.00 ± 0.00 ab	3.24 ± 0.476 b	-11.77	5.74 ± 0.67 b	-4.05	0.005 2 ± 0.001 6 b	-27.53
	8443	100.00 ± 0.00 a	3.84 ± 1.36 b	-0.91	6.26 ± 1.56 ab	1.64	0.008 7 ± 0.007 5 b	-0.46
	75 129	100.00 ± 0.00 a	3.11 ± 1.34 b	-14.13	5.35 ± 1.83 b	-8.33	0.005 8 ± 0.006 2 b	-22.89
重复力 Repeatability			0.705 7		0.669 6		0.677 5	
10	7501	96.67 ± 7.58 a	7.39 ± 2.05 b	2.49	8.43 ± 1.94 a	0.33	0.028 6 ± 0.020 5 abc	-0.27
	7514	100.00 ± 0.00 a	8.26 ± 2.45 a	11.51	9.43 ± 2.55 a	6.95	0.042 1 ± 0.035 4 a	29.65
	7523	90.00 ± 22.74 a	7.11 ± 2.23 b	-0.41	8.48 ± 2.57 a	0.66	0.030 4 ± 0.024 0 abc	3.72
	7551	100.00 ± 0.00 a	7.93 ± 2.25 ab	8.09	8.78 ± 1.82 a	2.65	0.033 3 ± 0.020 4 ab	10.15
	7564	76.67 ± 24.68 c	7.40 ± 2.10 ab	2.59	8.65 ± 2.28 a	1.79	0.031 4 ± 0.023 2 abc	5.94
	7787	86.67 ± 15.16 b	7.58 ± 1.90 ab	4.46	8.81 ± 1.97 a	2.85	0.031 6 ± 0.016 7 ab	6.38
	7907	93.33 ± 9.76 ab	6.27 ± 1.43 cb	-9.13	7.28 ± 2.09 b	-7.28	0.018 9 ± 0.014 6 bc	-21.76
	8014	96.67 ± 7.58 a	5.92 ± 1.77 cb	-12.76	7.18 ± 2.06 b	-7.94	0.017 5 ± 0.014 4 bc	-24.86
	8022	96.00 ± 8.16 a	7.80 ± 2.58 ab	6.74	8.95 ± 2.78 a	3.77	0.038 0 ± 0.029 8 a	20.56
	8408	95.13 ± 2.57 a	7.65 ± 1.68 ab	5.19	9.12 ± 1.76 a	4.90	0.033 6 ± 0.017 8 abc	10.81
	8440	100.00 ± 0.00 a	6.67 ± 1.03 cb	-4.98	8.17 ± 1.09 ab	-1.39	0.022 1 ± 0.007 9 bc	-14.67
	8443	100.00 ± 0.01 a	7.00 ± 1.99 b	-1.56	8.50 ± 2.21 a	0.79	0.028 9 ± 0.022 7 bc	0.40
	75 129	100.00 ± 0.02 a	5.94 ± 1.52 c	-12.55	7.15 ± 2.00 b	-8.14	0.017 1 ± 0.012 3 c	-25.97
重复力 Repeatability			0.741 6		0.554 8		0.636 4	
37	7501	71.56 ± 12.57 d	13.75 ± 3.80 b	-0.35	14.76 ± 6.47 b	-0.82	0.200 4 ± 0.209 5 b	-0.31
	7514	87.38 ± 16.71 ab	16.03 ± 4.89 a	9.67	17.92 ± 7.08 a	9.99	0.329 1 ± 0.272 9 a	40.22
	7523	84.93 ± 8.15 ab	13.96 ± 4.27 ab	0.57	15.56 ± 6.02 ab	1.92	0.218 0 ± 0.221 8 b	5.23
	7551	94.29 ± 9.38 a	14.45 ± 4.70 ab	2.72	14.48 ± 4.33 ab	-1.78	0.181 2 ± 0.174 3 b	-6.36
	7564	75.60 ± 15.92 bcd	11.82 ± 3.70 b	-8.83	14.06 ± 5.15 b	-3.22	0.145 5 ± 0.116 8 b	-17.61
	7787	73.89 ± 16.77 bcd	13.81 ± 4.12 ab	-0.13	15.87 ± 6.34 ab	2.98	0.228 6 ± 0.215 5 ab	8.57
	7907	68.81 ± 29.04 bcd	14.97 ± 3.08 ab	5.01	16.07 ± 5.41 ab	3.66	0.222 3 ± 0.174 0 ab	6.58
	8014	73.63 ± 10.37 bcd	14.13 ± 4.34 ab	1.32	14.98 ± 6.20 ab	-0.07	0.211 5 ± 0.201 1 b	3.18
	8022	87.22 ± 23.16 b	14.45 ± 5.43 ab	2.72	15.95 ± 6.35 ab	3.25	0.247 0 ± 0.245 5 ab	14.36
	8408	91.60 ± 5.48 a	13.07 ± 4.05 ab	-3.34	14.97 ± 6.26 b	-0.10	0.195 2 ± 0.191 9 b	-1.95
	8440	78.18 ± 20.89 bcd	11.72 ± 3.37 b	-9.27	11.33 ± 2.82 b	-12.55	0.084 4 ± 0.069 5 b	-36.85
	8443	77.61 ± 17.20 bcd	13.62 ± 3.58 ab	-0.92	14.88 ± 4.91 b	-0.41	0.179 9 ± 0.158 4 b	-6.77
	75 129	90.00 ± 10.54 ab	13.99 ± 3.76 b	0.70	14.15 ± 5.47 b	-2.91	0.174 5 ± 0.151 6 b	-8.47
重复力 Repeatability			0.607 7		0.513 1		0.634 4	

注：同列不同小写字母表示种源/家系间差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level between provenances or families, the sample below

表 3 13 个种源/家系适应性与生长性状的方差分析

Table 3 Variance analysis of adaptation and growth traits for 13 provenances/families

林龄 Age/a	来源 Source	因变量 Dependent variable	第 III 类平方和 Sum of squares	DF	均方 Mean square	F	显著性 (p) Significance	
5	种源/家系 Family/provenance	保存率 Preservation rate	0.361	12	0.03	3.102	0.000	
		H	63.483	12	5.29	3.398	0.000	
		DBH	85.156	12	7.096	3.027	0.001	
		V	0.002	12	0	3.101	0.000	
	重复 Replicate	保存率 Preservation rate	0.311	5	0.062	6.426	0.000	
		H	158.1	5	31.62	20.309	0.000	
		DBH	83.07	5	16.614	7.088	0.000	
		V	0.003	5	0.001	9.517	0.000	
	重复 * 种源/家系 Replicate* Family/provenance	保存率 Preservation rate	3.205	57	0.056	5.206	0.000	
		H	405.783	57	7.119	6.71	0.000	
		DBH	429.368	57	7.533	4.659	0.000	
		V	0.011	57	0	5.236	0.000	
	10	种源/家系 Family/provenance	保存率 Preservation rate	0.772	12	0.064	7.416	0.000
			H	129.135	12	10.761	3.87	0.000
			DBH	118.815	12	9.901	2.246	0.010
V			0.014	12	0.001	2.75	0.002	
重复 Replicate		保存率 Preservation rate	0.497	5	0.099	11.457	0.000	
		H	371.528	5	74.306	26.725	0.000	
		DBH	120.975	5	24.195	5.489	0.000	
		V	0.02	5	0.004	9.685	0.000	
重复 * 种源/家系 Replicate* Family/provenance		保存率 Preservation rate	3.706	60	0.062	5.320	0.005	
		H	822.669	60	13.711	7.103	0.000	
		DBH	755.406	60	12.59	4.183	0.000	
		V	0.085	60	0.001	5.068	0.000	
37	种源/家系 Family/provenance	保存率 Preservation rate	1.973	12	0.164	1.303 99E + 27	0.000	
		H	420.091	12	35.008	2.549	0.004	
		DBH	710.473	12	59.206	2.054	0.021	
		V	1.083	12	0.09	2.735	0.002	
	重复 Replicate	保存率 Preservation rate	2.31	5	0.462	3.663 92E + 27	0.000	
		H	336.856	5	67.371	4.905	0.000	
		D	397.349	5	79.47	2.757	0.019	
		V	0.328	5	0.066	1.987	0.081	
	重复 * 种源/家系 Replicate* Family/provenance	保存率 Preservation rate	5.063	44	0.115	9.125 84E + 26	0.000	
		H	1571.931	44	35.726	2.601	0.000	
		DBH	2749.359	44	62.485	2.168	0.000	
		V	3.264	44	0.074	2.248	0.000	

表 4 生长性状与种子来源地地理、气象因子的偏相关分析

Table 4 Partial correlation between growth traits and geographical and climate factors of seed sources

生长指标 Growth factors	偏相关系数 Coefficient of partial correlation						复相关系数 Multiple correlation coefficient
	东经 East longitude	北纬 North latitude	海拔 Elevation	年均气温 Mean annual temperature	年降水 Mean annual precipitation	距离 Distance	
保存率 Preservation rate	0.204	0.196	-0.044	0.100	0.280	0.256	0.458
H	-0.454	0.022	0.702	0.632	0.311	-0.668	0.837
DBH	-0.913**	-0.364	0.938**	0.914**	0.483	-0.923**	0.978**
V	-0.735*	0.020	0.868**	0.844**	0.447	-0.832**	0.937*

比较, 泰国 (0.2049 m^3) > 缅甸 (0.2026 m^3) > 老挝 (0.1799 m^3), 就种子来源地间比较, 海南 (0.2103 m^3) > 云南 (0.1870 m^3)。种源/家系单株材积平均值与引种地地理、气候因子显著相关 (表 4), 与海拔 (0.868^{**})、年均气温 (0.844^{**}) 极显著正相关, 与经度 (-0.735^*) 和引种距离: -0.832^{**} 显著负相关。

2.3 优良种源/家系综合选择

以重复力高的性状进行优良种质选择, 可在子代获得高的遗传增益, 从表 2 可见, 本试验 5 和 10 年生时树高重复力最大, 7514 为树高生长量最大种源/家系, 遗传增益最高; 37 年生时单株材积重复力最大, 单株材积居前 2 位的有 7514 和 8022

种源/家系, 7514 种源/家系的保存率、树高、胸径、材积分别为 87.38%、16.03 m、17.92 cm、 0.3291 m^3 , 8022 种源/家系为 87.22%、14.45 m、15.95 cm、 0.2470 m^3 , 两者单株材积差异明显, 因此选 7514 为优良种源/家系, 7514 种源/家系的树高、胸径、单株材积遗传增益分别达 9.67%、9.99%、40.22%。依据试验林 5、10、37 年生时保存率、树高、胸径、单株材积指标按好、中、差三类进行 K 均值聚类分析得表 5, 从表中可以看出 7514 (2 号) 种源/家系除保存率外, 其树高、胸径、单株材积指标在所有观测年度都居 I 类, 可见其生长优势突出, 不论在生长早期、中期和后期都表现良好。

表 5 3 个调查林龄按指标值种源/家系分类

Table 5 Classification of provenances/Families by characteristics and ages

分类指标 Classification characteristics	林龄 Age / a	I 类 (好) I Type (Best)	II 类 (中) II Type (medium)	III 类 (差) III Type (worst)
保存率/Preservation rate	5	1~13*	1~13	1~13
	10	4, 11, 13	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 12	5
	37	2, 4	3, 9, 10	1, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13
H	5	5, 3, 1, 2, 6, 12, 10, 4	7, 9	8, 11, 13
	10	9, 2, 4	1, 3, 5, 6, 10, 11, 12	7, 8, 13
	37	2	1, 3, 4, 7, 8, 9	5, 6, 10, 11, 12, 13
DBH	5	2, 9	1, 3, 4, 5, 6, 10, 12	7, 8, 11, 13
	10	9, 2	1, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12	7, 8, 13
	37	2	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12	11, 13
V	5	3, 2, 9, 5	1, 4, 6, 10, 12	7, 8, 11, 13
	10	9, 4, 2, 5, 3, 6, 10, 1, 12	11	7, 8, 13
	37	2	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13	11

注: 种源/家系编号见表 1

Note: Codes of provenances/families are listed in Table 1

3 讨论

柚木原分布广,不同区域立地条件异质性较高^[25],遗传差异明显^[12-14]。本研究中,种源/家系间树高、胸径、材积也存在显著差异,我国邝炳朝等^[18]、张荣贵等^[22]以及梁坤南等^[19]对于柚木种源试验的结果同样表明,种源/家系间树高、胸径、材积差异显著。因此,柚木的生长性状受到强的遗传控制^[26],具有选择潜力。

梁坤南等^[19]对于海南岛27年生柚木种源试验林的研究发现,不同种源间适应性指标——保存率差异显著,本研究与之结果一致,但两地保存率降低的原因与两种植地气候有关,海南台风多发,是保存率降低的主要原因,而桂西南凭祥地处内陆,虽偶遇低等级台风,但危害程度极小,保存率降低的主要原因是由种质本身对极端气候和季节性干旱的耐受力差异引起^[27],保存率减少出现在10 a后(10 a前平均降低5.6%,10 a后平均降低23.7%),造成这一现象的根本原因一方面是:随林龄增加林分竞争强度升高^[28],另一方面是:本地区2008年(17 a)3月出现长时间低温阴雨天气,对低温敏感种质造成毁灭性损害^[29]。

梁坤南等^[19]在27年生柚木种源试验研究中认为,种源树高、胸径、单株材积与纬度呈显著负相关;Ohn L等^[11]对7年生种源试验结果:低海拔、降水量大的种源生长更快。而本试验中,胸径、单株材积与海拔及年均气温正相关,与上述研究不一致,据此可见,种源生长效果受种子来源地气候等多因子而非单一因子的综合影响。

就引种距离而言,Ohn等^[11]、Lauridsen等^[9]认为靠近试验地点的种源比远离试验地点的种源具有更好的生长表现,这在本试验中同样得到验证,在距试验点较近的多数海南尖峰种源/家系生长优于其它距离较远的种源/家系。通常而言,距离越近,气候条件越相似,海南属热带季风气候,而凭祥属南亚热带季风气候,两地具有相似的气候环境:夏季湿热多雨、干湿季节明显。这可以从以采种地与种植地纬度、经度、海拔、年均气温、年降水为指标将试验地(凭祥)与尖峰分为同一类的结果得到验证^[30]。由此可见,柚木对采种区气温和热量等因子的适应习性在引种种植区会得到重现,也体现了在柚木种源/家系的地理变异中存在获得性

遗传现象。另外,本研究还发现缅甸、泰国种源的保存率及树高、胸径、单株材积生长量大于老挝种源,说明缅甸、泰国种源在凭祥的适应性优于老挝种源,这也给我国在柚木的引种方面提供了指导。

优良种源/家系的早期选择一直广受关注,国内外优良种源/家系选择一般有早、中、晚3个时期选择^[31-32],早期选择在第10年前进行,而中期选择在半个轮伐期前后。从现有柚木种质试验来看,在第10年以前进行早期选择并不可靠^[33-34]。保存率系反映适应性的重要指标,最好种源/家系7514与其他部分种源/家系的差异在第10年后才表现出来,树高、胸径、材积生长指标亦表现相同趋势。国外柚木种源试验也发现第17年前单株材积与30年生不相关^[34],因此建议种源/家系选优适宜期在半个轮伐期(20 a)之后。

4 结论与建议

(1)柚木不同种源/家系间保存率、树高、胸径、单株材积存在显著遗传差异,其中单株材积重复力最高,37年生时达到0.6344,可作为柚木选优指标;种源/家系早期生长与后期生长相关性不高,因此选优不宜过早,建议在半个轮伐期(20 a)之后。

(2)种源/家系生长效果受来源地气候等因子的综合影响,所有参试种源/家系中,缅甸、泰国种源在桂西南的适应性优于老挝种源,种子来源于海南的生长表现好于云南,其中7514种源/家系适应性强、生长表现最好,可在广西凭祥等气候土壤相似地区发展种植。另外,在南亚热带地区引种柚木,建议就近选择年均气温较高、降水量较大的种源/家系进行推广种植。

(3)由于参与本试验柚木不同种源/家系数量较少,不同种源/家系生长与重复间互作效应极显著,但并未进行土壤养分需求方面的差异性分析,建议在不同柚木适生地区引入更多种源/家系进行土壤养分等适应性方面研究。

参考文献:

- [1] 广西林业局,广西林学会.阔叶树种造林技术[M].南宁:广西人民出版社,1980.
- [2] 中国树木志编委会.中国主要造林树种造林技术[M].北京:中国林业出版社,1981.

- [3] WHITE K J. Teak: some aspects of research and development [A]. Publication 1991/ 17[C]. FAO Regional Office for Asia and the Pacific (RAPA). Bangkok, 1991.
- [4] LAURIE M V. Branching and seed origin in Coorg teak plantation[J]. Indian Forester, 1938, 64(10): 596-600.
- [5] KATWAL R P S. Teak in India: status, prospects and perspectives[A]. in: Bhat K M, Nair K K, Bhat K V, *et al*, Eds. Quality timber products of teak from sustainable forest management [C] // Proceedings of the International Conference on Quality timber products of Teak from sustainable forest management. Peechi, India, 2003: 1-18.
- [6] KADAMBL K. Teak seed origin experiments in Mysore[J]. Indian Forester, 1945, 71(8): 265-269.
- [7] KEIDING H W. Aims and prospects of teak breeding in Thailand: a program of work for the Thai/Danish Teak Improvement Centre at Mae Huad Teak Plantation[J]. Natural History Bulletin in Siam Society, 1966, 21: 45-62.
- [8] KEIDING H W, LAURIDSEN E B. Evaluation of an international series of teak provenance trials[M]. Humlebaek: Danida Forest Seed Centre, 1986.
- [9] LAURIDSEN E B, OLESEN K. Identification, establishment and management of seed source[M]. Humlebaek: Lecture Note B2. DANIDA Forest Seed Centre, 1994.
- [10] ERIK D K, LAURIDSEN E B, HUBERT W. Second evaluation of an international series of teak provenance trials[M]. Humlebaek: Danida Forest Seed Centre, 1995.
- [11] OHN L, JUNG O H, ANDI F Y. Assessment of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) provenance test in the Bago Yoma Region, Myanmar[J]. Journal of Korean Forest Society, 2010, 99(5): 686-692.
- [12] INZA J F, DANIEL O, MIREILLE P. Diversity and genetic structure of teak (*Tectona grandis* L. f) in its natural range using DNA microsatellite markers[J]. New Forests, 2009, 37(2): 175-195.
- [13] GILLES C, OLIVIER M. Genetic variation in major phenotypic traits among diverse genetic origins of teak (*Tectona grandis* L. f.) planted in Taliwas, Sabah. East Malaysia[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(5): 1015-1026.
- [14] HUANG G H, LIANG K N, ZHOU Z Z, *et al*. Genetic variation and origin of teak (*Tectona grandis* L. f.) native and introduced provenances[J]. Silvae Genetica, 2015, 64(1-2): 33-46.
- [15] 吴琼辉, 古定球, 曾庆圣. 广东发展柚木人工林的探讨[J]. 广东林业科技, 2004, 20(2): 60-62.
- [16] 张荣贵. 红河州柚木引种栽培及发展前景[J]. 林业调查规划, 2014, 39(1): 118-122 + 133.
- [17] 马华明, 梁坤南, 周再知. 我国柚木的研究与发展[J]. 林业科学研究, 2003, 16(6): 768-773.
- [18] 邝炳朝, 郑淑珍, 罗明雄, 等. 柚木种源主要性状聚合遗传值的评价[J]. 林业科学研究, 1996, 9(1): 7-14.
- [19] 梁坤南, 赖 猛, 黄桂华, 等. 10个柚木种源27年生长与适应性[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 8-12.
- [20] 赖 猛. 柚木种源/家系多性状选育研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [21] 赖 猛, 梁坤南, 黄桂华, 等. 柚木种源生长和与材质有关特性的遗传变异及综合评价[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2): 234-238.
- [22] 张荣贵, 蓝 猛, 乔光明, 等. 红河州柚木种源试验五年评价[J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 190-196.
- [23] 李运兴, 吕广阳. 柚木家系试验[J]. 广西林业科学, 2001, 30(1): 50-52.
- [24] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [25] APICHAART K A. Teak (*Tectona grandis* Linn. f) its natural distribution and related factors[J]. Natural History Bulletin of the Siam Society, 1989, 29: 55-74.
- [26] HUANG G H, LIANG K N, ZHOU Z Z, *et al*. Variation in photosynthetic traits and correlation with growth in teak (*Tectona grandis* Linn.) clones[J]. Forests, 2019, 10(1): 44.
- [27] 何剑强, 肖利军, 彭智华, 等. 季节性干旱条件下不同杉木品系的早期生长分析[J]. 现代农业科技, 2022(9): 97-99 + 108.
- [28] 湛红辉, 方升佐, 丁贵杰, 等. 马尾松人工同龄纯林自然稀疏规律研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(1): 13-17.
- [29] 李运兴, 梁坤南, 马华明, 等. 柚木寒害调查与防护措施[J]. 林业实用技术, 2010(3): 27-30.
- [30] 吕永成. 广西热带作物栽培农业气候条件的Fuzzy评价与区划[J]. 热带作物学报, 1984(1): 15-27.
- [31] 金国庆, 秦国峰, 刘伟宏, 等. 不同林龄马尾松的种源选择效果[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 39-45.
- [32] 伍汉斌, 段爱国, 张建国. 杉木地理种源不同林龄生长变异及选择[J]. 林业科学, 2019, 55(10): 181-192.
- [33] 梁坤南, 黄桂华, 等. 琼西南柚木次生种源/家系多性状综合选择[J]. 林业科学研究, 2020, 33(6): 13-22.
- [34] PEDERSEN A P, HANSEN J K, MTIKA J M. Growth, stem quality and age-age correlations in a teak provenance trial in Tanzania[J]. Silvae Genetica, 2007, 56(3/4): 142-148.

Growth Performance of 13 Provenances/Families of *Tectona grandis*

LI Yun-xing^{1,4}, LIANG Kun-nan², HUANG Gui-Hua², KUANG Bing-chao², HAO Jian^{1,4},
YANG Bao-guo^{1,4}, PAN Li-qin³, HUANG Ri-yi^{1,4}

(1. The Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532699, Guangxi, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 3. Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, Guangxi, China; 4. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Pingxiang 532699, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] In order to select more good varieties with wide adaptability for *Tectona grandis*, [Method] The experimental plantation was established with 13 provenances/families collected from Jianfengling and other places in Hainan province. Tree height and diameter at breast height (DBH) were measured at 5, 10 and 37 years old. ANOVA analysis and repeatability assessment were performed to select superior provenances/families. Partial correlation analysis was used to reveal the correlation between tree growth and geographical and climatic factors. [Result] ① Significant differences among provenances/families were found at 37 years old for survival rate, tree height, DBH and individual volume. The variation ranges were 68.81%~94.29%, 11.72~16.03 m, 11.33~17.92 cm, 0.0844~0.3291 m³, respectively. ② The repeatability of tree height, DBH and individual volume were 0.6077, 0.5131 and 0.6344, respectively. ③ The survival rate and tree height were not significantly correlated with geographic coordinates and climate factors; while DBH and individual volume were significantly positively correlated with elevation ($r=0.938^{**}$, $r=0.868^{**}$) and mean annual temperature ($r=0.914^{**}$, $r=0.844^{**}$), and negatively correlated with longitude ($r=-0.913^{**}$, $r=-0.735^{*}$) and distance ($r=-0.923^{**}$, $r=-0.832^{**}$). ④ The results of cluster analysis indicated that provenance/family 7514 performed the best on the survival rate, tree height, DBH and individual volume, while 8440 performed the worst, and followed by 75129 at the 37 years old. [Conclusion] There are significant differences among provenances/families for the survival rate, tree height, DBH and individual volume. Both tree height and individual volume present a relatively high repeatability. For the introduction of teak, it is advisable to choose a source/family with similar annual temperatures and close distances to obtain better genetic performance. For the local area of Pingxiang, source/family 7514 is suitable for widespread planting.

Keywords: *Tectona grandis*; Provenances/Families; growth performance; related factors

(责任编辑: 张 研)