

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230324

滇西南 29 年生柚木种源/家系多性状 综合选择

梁坤南¹, 张荣贵², 黄桂华¹, 楚永兴², 王先棒¹, 石文革²

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 热带林业研究国家林业和草原局重点实验室, 广东 广州 510520; 2. 云南省红河哈尼族彝族自治州林业和草原科学研究所, 云南 蒙自 661199)

摘要: [目的] 通过对滇西南柚木种源/家系试验林早期与 29 年生的适应性、生长和形质性状进行综合评价, 旨为当地选出适应性强、速生、形质优良的柚木种源/家系。[方法] 从国内外收集了 34 个柚木种源和家系, 采用完全随机区组设计, (2 × 2) 株小区, 8 次重复, 调查、分析和比较试验林早期 2~8 年生与 29 年生的保存率和生长差异, 对 29 年生种源/家系的保存率和优势木生长与形质性状采用主分量分析, 综合评价出优良种源/家系。[结果] 早期 2~8 年生柚木种源/家系间的保存率差异均不显著, 而 29 年生保存率种源/家系间差异呈极显著; 但 2~8 年生和 29 年生种源/家系间生长和形质性状的差异均达到极显著, 2~8 年生最好种源/家系的平均树高、平均胸径和平均单株材积分别是生长最差的 1.38~1.91 倍、1.63~2.18 倍和 3.82~5.17 倍, 而 29 年生最好种源优势木的平均树高、平均胸径、平均单株材积、树干通直度和主干材高分别是最差种源的 1.81 倍、1.87 倍、4.84 倍、2.18 倍和 12.89 倍, 通过优良种源/家系选择可获得较大的增产效益。29 年生种源/家系的保存率和优势木生长性状与 4~8 年生优势木的生长性状均呈显著至极显著相关; 29 年生种源/家系的优势木树干通直度与优势木各生长性状、优势木主干材高与优势木的平均树高和单株材积生长相关显著至极显著。29 年生种源/家系保存率、生长和形质性状主成分分析的前三个主分量累积贡献率达 97.63%, 根据种源/家系在前三个主分量的综合得分, 按 20% 的入选率评选出 7 个优良种源/家系: 种源 8410、8603、8407、8602、85131、1007 和家系 7564[#]。[结论] 29 年生入选的 7 个种源/家系的优势木树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高的遗传增益分别为 7.92%、9.39%、14.74%、7.06% 和 12.29%, 其中来自云南陇川林场种源 8410 和海南尖峰岭种源 8603 更适宜当地生长。

关键词: 柚木; 种源/家系; 适应性; 生长和形质性状; 多性状综合选择

中图分类号: S722.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)03-0001-12

柚木 (*Tectona grandis* Linn.f.) 是我国外引的热带珍贵用材树种, 早在 1842 年就由云南边境的寺庙作为庭院绿化引种栽培^[1-2], 现在已成为我国热带、亚热带地区主要造林的珍贵用材树种之一, 台湾、云南、海南、广东、广西、福建、四川、贵州等省区 70 多个县市均有引种四旁或规模种植^[3]。1960 年前后, 云南省在德宏州建立了畹

町、勐秀、陇川和盈江 4 个柚木林场, 先后造林 780 hm²^[4], 其中畹町林场依然保存有上个世纪 60 年代柚木人工林 133.33 hm², 被作为种质资源保存和母树林经营。云南省河口县 1961 年开始零星种植, 1980 年开始规模种植^[5]。据不完全统计, 河口县现有柚木人工林面积已达 3 333.33 hm², 整个红河州发展了柚木人工林共 4 666.67 hm²,

收稿日期: 2023-08-18 修回日期: 2024-03-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目课题 (2016YFD0600602)

作者简介: 梁坤南, 硕士, 研究员。主要研究方向: 林木遗传育种和森林培育, Email: chinateak@163.net

是云南省柚木人工林面积最多的地区之一。但早期引种植的种源因来源不清,植后 5~6 a 许多个体树干顶端开花,造成顶端分叉早,主干材低,树木高生长和木材出材率均受影响^[6]。种源试验及种源选择是林木育种中最基本的、重要工作内容之一^[7-9],而林木良种是营造速生、丰产、优质人工林的物质基础,使用良种是提高林业生产力最有效、最经济的一种科学技术措施^[2]。因此,通过优良种源的选择,做到适地适树适种源,在提高木材产量和质量的同时,也为林木长期的选育提供丰富的育种材料。“七五”国家科技攻关-“柚木种源选择”子课题,收集了国内外柚木种源/家系,在河口县开展了多个种源/家系试验,本文对其中的一个柚木种源/家系试验林 29 年生的保存率、生长性状和形质性状进行种源/家系间差异分析和综合选择,旨在为当地选出适宜的、速生和主干材高的优良种源或家系,以推动当地柚木人工林的发展。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验点位于云南省河口县南溪镇安家河村委会马场村白鹤冲(22°41' N, 103°56' E)。海拔 370~395 m,坡度 10°~15°。年均气温 22.6 °C,极端最低温 1.9 °C,极端最高温 40.9 °C; 年降雨量 1 789 mm,干湿季明显,雨季 5—10 月,旱季 11 月至翌年 4 月;年均相对湿度 85%。土壤为石灰岩发育的中壤质黄红壤,pH 值 6.0。主要植被为中平树(*Macaranga deniculata* (Bl.) Muell. Arg.)、木瓜榕(*Ficus auriculata* Lour.)、绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa* (Bl.) Teysm. et Binn)、任木(*Zenia insignis* Chin.) 大叶紫珠(*Callicarpa macrophylla* Vahl)、柔枝莠竹(*Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus) 等。

1.2 试验材料与试验设计

参试种源/家系 34 个(表 1),其中种源 25 个,家系 9 个,除 6 个种源来自原产地外,其余种源/家系均从我国早期引种栽培、已适应引种地气候和土壤条件的片林或四旁树中,选 9~20 株优树采种混合作为该引种地的种源,以河口县当地引种的柚木人工林作为对照种源。试验采用完全随机区组设计,双行小区(4 株/小区),8 次重复,株行距 3 m × 3 m。1987 年 5 月 20~22 日种植。种

植前后未施肥,仅第 1~2 a 每年人工除草松土 3 次,第 3~4 a 用除草剂除草。

1.3 数据收集与统计分析

于造林后的 2、4、6 和 8 a,每木调查试验林种源/家系的树高和胸径;鉴于 29 年生种源/家系的保存率均不高,仅调查了种源/家系各小区的保存率、小区优势木树高、胸径、主干材高与树干通直度,来综合评价种源和家系。树干通直度按 5 级(1 级最差,有 3 段以上严重弯曲;5 级最好,无弯曲通直圆满)进行评分^[10]。单株材积计算公式^[11]为:

$$V=0.4787 \times DBH^2 \times H/10\ 000$$

采用 GENSTAT 统计分析软件^[12]进行方差分析(保存率反正弦转换)、邓肯多重比较和相关分析。以 29 年生种源/家系的保存率(SR)、优势木的树高(H_{dt})、胸径(DBH_{dt})、单株材积(V_{dt})、树干通直度得分(ST)和主干材高(H_b)等 6 个性状进行主分量分析,根据累积贡献率大于 85% 的原则^[13],选取主分量,以种源/家系在选取的每个主分量得分,按各主分量贡献率在累积贡献率的权重计算综合评价,以 20% 的入选率评定优良种源/家系。

主成分分析的主分量得分方程^[14-15]为,

$$Y_{\alpha} = \mu_{\alpha 1} \bar{X}_1 + \mu_{\alpha 2} \bar{X}_2 + \mu_{\alpha 3} \bar{X}_3 + \mu_{\alpha 4} \bar{X}_4 + \mu_{\alpha 5} \bar{X}_5 + \mu_{\alpha 6} \bar{X}_6 = \mu_{\alpha 1} \frac{X_1 - \bar{X}_1}{S_1} + \mu_{\alpha 2} \frac{X_2 - \bar{X}_2}{S_2} + \mu_{\alpha 3} \frac{X_3 - \bar{X}_3}{S_3} + \mu_{\alpha 4} \frac{X_4 - \bar{X}_4}{S_4} + \mu_{\alpha 5} \frac{X_5 - \bar{X}_5}{S_5} + \mu_{\alpha 6} \frac{X_6 - \bar{X}_6}{S_6}$$

式中 Y_{α} 为某一种源/家系在第 α 主分量得分值($\alpha = 1, 2, 3$), $\mu_{\alpha 1}$ 、 $\mu_{\alpha 2}$ 和 $\mu_{\alpha 3}$ 分别为性状 1、2.....6 在第 α 主分量的特征向量, X_1 、 X_2 X_6 分别为性状 1、2.....6 的原数据, \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 \bar{X}_6 为性状 1、2.....6 的原数据总平均值, S_1 、 S_2 S_6 为性状 1、2.....6 的原数据标准差。

种源/家系遗传力和遗传增益^[16]由以下公式得出:

$$\text{遗传力: } h^2 = 1 - 1/F$$

$$\text{遗传增益: } \Delta G = S \cdot h^2 \cdot \bar{X}^{-1}$$

式中: F 为方差分析的 F 值; S 为某一性状入选种源/家系均值与该性状全体种源/家系均值(\bar{X})的选择差。

2 结果与分析

表 1 参试种源/家系概况

Table 1 The basic information of provenances and families tested

种源/家系号 No. of prov./fam.	种源/家系名称 Name of prov./fam.	种子采集地 Place of seed collected	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔高 Altitude/m	年均温 Temperature/°C	年降雨量 Rainfall/mm
1007	达府/泰国	泰国达府	16°49'	98°36'	220	27.0	1 644
1008	帕府/泰国	泰国帕府	18°13'	99°59'	200	27.0	1 100
1306	南邦/泰国	泰国南邦	18°40'	99°55'	350	26.0	1 260
1307	南邦/泰国	泰国南邦	18°40'	99°55'	350	26.0	1 260
1308	帕府/泰国	泰国帕府	18°00'	99°45'	175	27.0	1 100
7564 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	150	24.5	1 500
83317	石牌/缅甸	广东广州华南农业大学	23°05'	113°20'	63	21.9	1 728
2167	陇川/缅甸	云南德宏州陇川县	24°16'	97°52'	920	19.0	1 653
8417	龙洞/缅甸	广东广州龙洞广东省林科院	23°05'	113°20'	20	21.9	1 728
8463	梅花园/缅甸	广东广州梅花园	23°04'	113°20'	10	21.9	1 728
8508	平远/[新加坡]	广东梅州市平远	24°35'	115°54'	148	20.7	1 636
7500 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
7506 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
7516 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
7517 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
7521 [#]	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
8601	曼德勒/缅甸	缅甸曼德勒	22°10'	96°15'	230	26.5	870
8604	普文/缅甸	云南版纳州景洪市普文试验林场	22°25'	100°58'	980	20.1	1 655
8602	瑞丽/缅甸	云南德宏州瑞丽市政府大院内	24°01'	97°55'	800	20.1	1 402
8410	城子营/缅甸	云南德宏州陇川林场城子营	24°16'	97°51'	980	19.0	1 653
8407	姐勒/缅甸	云南德宏州瑞丽市姐勒乡贷门寨	24°01'	97°50'	775	20.0	1 006
8450 [#]	畹町/缅甸]早熟窄	云南德宏州畹町林场院内	24°05'	98°05'	880	20.4	1 550
8451 [#]	畹町/缅甸]常绿	云南德宏州畹町林场	24°05'	98°05'	860	20.4	1 550
77103 [#]	畹町/缅甸]	云南德宏州畹町林场	24°05'	98°05'	820	20.4	1 550
8411	邦巴/缅甸	云南德宏州盈江县邦巴林场	24°30'	97°55'	350	20.8	1 055
8402	勐仑/缅甸	云南版纳州勐腊县勐仑植物园	21°41'	101°25'	550	21.4	1 500
8605	景洪/缅甸	云南版纳州景洪市果木场	22°01'	101°05'	600	21.9	1 196
8620	小寨/缅甸	云南版纳州景洪市郊小寨	22°01'	101°05'	590	21.9	1 196
7787	热作所/泰国]	云南版纳州景洪市热作所	22°01'	101°05'	580	21.9	1 196
8443	林管所/老挝]	云南版纳州勐腊县勐棒村	21°29'	101°34'	640	20.9	1 525
8444	党校/老挝]	云南版纳州景洪市郊	21°52'	101°04'	570	21.7	1 217
8603	尖峰/缅甸	海南乐东县尖峰岭12KM	18°40'	108°50'	160	24.5	1 500
85131(CK)	河口/缅甸]	云南红河州河口县城关镇	22°30'	103°57'	137	22.6	1 789
8507	松口/印尼]	广东梅州市梅县松口	24°18'	116°07'	127	21.5	1 644

注: 种源/家系名称中的[]表示最初引种的原产国, 种源/家系号带#为家系, 下同

Notes: Square brackets [] means original provenance in the column of name for provenance and family, and the number marked with # is family. The same below

2.1 柚木种源/家系多年保存率差异分析

各年份的柚木种源/家系保存率的方差分析结果表明：除29年生种源/家系的保存率种源/家系间差异呈极显著外，其它年份的差异不显著。2年

生试验林保存率为61.73%，至8年生时变化不大，保存率为55.05%，仅下降了6.68%（表2）；但随着年份增加，低于50%保存率的种源/家系数也在增加，2、4、6和8年生分别有4、7、7和8个。

表2 不同年份种源/家系保存率及方差分析结果（F值）

Table 2 The survival rates and variation analysis of provenances and families at different ages

年份 Year	2年生 2-year-old	4年生 4-year-old	6年生 6-year-old	8年生 8-year-old	29年生 29-year-old
保存率 Survival rate /%	34.4~81.2	31.2~78.1	31.2~78.1	28.1~78.1	4.2~62.5
平均 Mean /%	61.73 ± 10.29	57.49 ± 12.20	56.11 ± 11.17	55.05 ± 10.39	28.96 ± 8.91
F值 F value	1.27 ^{ns}	1.33 ^{ns}	1.30 ^{ns}	1.38 ^{ns}	2.49 ^{***}
F检验 Fpr	0.160	0.118	0.141	0.091	<.001

8年生到29年生的保存率下降幅度比较大（表3），降了49.23%，仅有2个种源保存率高于50%。其中降幅最大的是家系7517[#]，降了

85.18%，29年生保存率仅为4.17%；降幅最小的是种源8410，仅降了4.75%，为保存率最高的种源；即使是当地对照种源85131，其保存率从

表3 柚木种源/家系8年生和29年生保存率及邓肯多重比较

Table 3 Duncan multiple comparison at 0.05 level for survival rates of provenances and families in 8-year-old and 29-year-old

种源/家系 Prov./fam.	8年生保存率/% Survival rate in 8 year-old	29年生保存率/% Survival rate in 29 year-old	与8年生差值Δ/% difference	种源/家系 Prov./fam.	8年生保存率/% Survival rate in 8 year-old	29年生保存率/% Survival rate in 29 year-old	与8年生差值Δ/% difference
8410	65.62 ± 9.38 a	62.50 ± 14.07a	-3.12	77103 [#]	50.00 ± 12.50 a	25.00 ± 9.13 bcdef	-25.00
8407	78.12 ± 5.66 a	54.17 ± 7.68ab	-23.95	7787	62.50 ± 11.57 a	25.00 ± 6.45 bcdef	-37.50
7500 [#]	55.12 ± 6.51 a	45.83 ± 7.68abc	-9.29	1007	50.00 ± 17.03 a	20.83 ± 10.03 bcdef	-29.17
8411	62.50 ± 4.72 a	45.83 ± 11.93abc	-16.67	1306	50.00 ± 9.45 a	20.83 ± 10.03 bcdef	-29.17
85131(CK)	65.62 ± 9.38 a	45.83 ± 11.93abc	-19.79	8417	59.38 ± 9.38 a	20.83 ± 7.68 bcdef	-38.55
7564 [#]	68.75 ± 9.15 a	41.67 ± 8.33abcd	-27.08	8463	56.25 ± 11.33 a	20.83 ± 7.68 bcdef	-35.42
8602	59.38 ± 8.10 a	41.67 ± 8.33 abcd	-17.71	8450 [#]	53.12 ± 11.02 a	16.67 ± 12.36 cdef	-36.45
8402	71.88 ± 8.76 a	41.67 ± 8.33 abcd	-30.21	8605	65.62 ± 12.44 a	16.67 ± 12.36 cdef	-48.95
8603	65.62 ± 11.51 a	41.67 ± 13.94 abcd	-23.95	8620	43.75 ± 12.27 a	16.67 ± 5.27 cdef	-27.08
2167	59.38 ± 12.44 a	37.50 ± 14.07 abcde	-21.88	8444	40.62 ± 15.63 a	16.67 ± 12.36 cdef	-23.95
8508	50.00 ± 11.57 a	37.50 ± 8.54 abcde	-12.50	1008	34.38 ± 10.50 a	12.50 ± 8.54 def	-21.88
7506 [#]	56.25 ± 9.15 a	37.50 ± 5.59 abcde	-18.75	83317	56.25 ± 13.15 a	12.50 ± 8.54 def	-43.75
7521 [#]	62.50 ± 10.56 a	37.50 ± 5.59 abcde	-25.00	8601	40.62 ± 9.38 a	8.33 ± 5.27 ef	-32.29
1307	46.88 ± 11.02 a	29.17 ± 10.03 bcdef	-17.71	8443	31.25 ± 9.15 a	8.33 ± 5.27 ef	-22.92
1308	62.50 ± 9.45 a	29.17 ± 4.17 bcdef	-33.33	7517 [#]	28.13 ± 11.02 a	4.17 ± 4.17 f	-23.96
7516 [#]	56.25 ± 11.33 a	29.17 ± 7.68 bcdef	-27.08	平均 Average	55.05 ± 10.39	28.96 ± 8.91	-26.09
8604	59.38 ± 12.44 a	29.17 ± 10.03 bcdef	-30.21	F值 F value	1.38 ^{ns}	2.49 ^{***}	
8507	38.44 ± 8.22 a	26.31 ± 6.82 bcdef	-12.13	F检验 Fpr	0.091	<.001	
8451 [#]	65.62 ± 8.10 a	25.00 ± 12.91 bcdef	-40.62				

注：ns表示差异不显著；*、**、***分别表示在0.05水平差异显著、0.01水平和<0.001差异极显著。下同

Notes: ns was no significant difference; *, ** and *** were respectively significant difference at 0.05 level, high significant difference at 0.01 level and at <0.001 level. The sample below

65.62% 降到 45.83%, 降了 30.16%。29 年生保存率有 4 个种源/家系 (8410、8407、7500#和 8411) 高于或等于对照种源。

2.2 柚木种源/家系不同年份生长性状和形质性状差异性分析

不同年份柚木种源/家系生长和形质方差分析结果 (表 4) 表明: 2~8 年生种源/家系间平均树高、平均胸径和单株材积生长的差异均达极显著 ($p < 0.001$), 而小区优势木差异由 2 和 4 年生的不显著或显著到 6 和 8 年生的极显著; 29 年生种

表 4 不同年份种源/家系间生长和形质性状及方差分析结果 (F 值)

Table 4 Value and variation analysis of different traits at different age for teak provenances or families

性状 Triats	2 年生 2-year-old	4 年生 4-year-old	6 年生 6-year-old	8 年生 8-year-old	29 年生 29-year-old	
平均树高 H	变幅 Range /m	1.60~3.05	3.91~6.50	7.02~11.17	9.42~12.99	17.35~28.20
	均值 Mean /m	2.22 ± 0.04	5.16 ± 0.09	8.75 ± 0.11	11.09 ± 0.12	23.33 ± 1.30
	F 值 F value	3.86***	3.40***	4.71***	4.13***	7.48***
	F 检验 F test	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
平均胸径 DBH	变幅 Range /cm	2.02~4.40	4.34~7.22	7.35~12.00	9.37~15.86	20.62~36.44
	均值 Mean /cm	3.20 ± 0.07	5.41 ± 0.09	9.66 ± 0.14	12.37 ± 0.18	30.13 ± 2.46
	F 值 F value	3.19***	3.90***	3.99***	4.10***	5.59***
	F 检验 F test	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
平均单株材积 V	变幅 Range /m ³	0.000 6~0.003 1	0.005 0~0.019 1	0.019 5~0.081 8	0.044 0~0.180 7	0.390~1.908
	均值 Mean /m ³	0.001 8 ± 0.000 1	0.010 8 ± 0.000 5	0.051 0 ± 0.001 8	0.102 9 ± 0.003 5	1.203 ± 0.244
	F 值 F value	3.01***	3.73***	4.08***	4.10***	4.77***
	F 检验 F test	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
优势木树高 H_{dt}	变幅 Range /m	1.86~3.54	3.99~7.71	6.64~12.30	8.22~14.36	16.14~29.28
	均值 Mean /m	2.72 ± 0.06	5.98 ± 0.14	9.90 ± 0.17	12.28 ± 0.17	24.59 ± 0.37
	F 值 F value	1.39 ^{ns}	1.40 ^{ns}	2.07**	1.97**	4.07***
	F 检验 F test	0.090	0.086	0.001	0.003	<0.001
优势木胸径 DBH_{dt}	变幅 Range /cm	2.72~5.18	4.16~8.13	7.97~13.95	10.60~18.63	21.96~41.14
	均值 Mean/cm	4.07 ± 0.09	6.43 ± 0.15	11.33 ± 0.22	14.60 ± 0.27	32.50 ± 0.73
	F 值 F value	1.16 ^{ns}	1.44 ^{ns}	1.90**	2.37***	2.74***
	F 检验 F test	0.262	0.067	0.004	<0.001	<0.001
优势木单株材积 V_{dt}	变幅 Range /m ³	0.000 9~0.005 3	0.003 6~0.028 5	0.025 9~0.115 8	0.059 3~0.252 3	0.485~2.348
	均值 Mean /m ³	0.002 9 ± 0.000 2	0.015 9 ± 0.000 9	0.074 1 ± 0.003 4	0.147 0 ± 0.006 2	1.370 ± 0.080
	F 值 F value	1.49*	1.60*	1.79**	2.02**	1.93**
	F 检验 F test	0.050	0.027	0.009	0.002	0.007
优势木树干通直度 ST	变幅 Range /m					2.19~4.77
	均值 Mean /m					3.91 ± 0.07
	F 值 F value					3.51***
	F 检验 F test					<0.001
优势木主干材高 H_b	变幅 Range /m					1.44~18.56
	均值 Mean /m					12.02 ± 0.46
	F 值 F value					4.31***
	F 检验 F test					<0.001

注: H , DBH , V , H_{dt} , DBH_{dt} , V_{dt} , ST 和 H_b 分别为平均树高、平均胸径、平均单株材积、优势木树高、优势木胸径、优势木单株材积、优势木树干通直度和优势木主干材高

Notes: H , DBH , V , H_{dt} , DBH_{dt} , V_{dt} , ST and H_b represented respectively mean height, mean diameter at breast height, mean individual volume, mean height of dominant tree, mean diameter at breast height of dominant tree, mean individual volume of dominant tree, stem form of dominant tree and height of lossless bole of dominant tree. The same below

源/家系间优势木生长和形质性状的差异极显著,尤其是树高、胸径、树干通直度和主干材高的差异在 $p < 0.001$ 水平极显著。2~8 年生最好的种源/家系平均树高、平均胸径和平均单株材积分别是生长最差的 1.38~1.91 倍、1.63~2.18 倍和 3.82~5.17 倍。29 年生最好种源优势木的树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高分别是最差种源的 1.81 倍、1.87 倍、4.84 倍、2.18 倍和 12.89 倍,由此可见通过种源/家系间选择可获较大增益。

2.3 柚木种源/家系不同性状相关分析

相关分析结果(表 5)表明,29 年生优势木树高与 2~8 年生优势木树高和单株材积的显著或极显著正相关;与优势木胸径相关性由 2 年生的不显著相关到 4~8 年生的显著或极显著相关;但与

2~8 年生的保存率相关不显著。29 年生优势木胸径与保存率相关性由 2 年生的显著相关到之后的 4~8 年生极显著相关。29 年生优势木单株材积与保存率的相关性除 2 年生不显著相关外,4~8 年生均显著相关。29 年生保存率与 2~8 年生优势木树高、胸径、单株材积和保存率除 2 年生树高外,其余均达到显著或极显著相关,尤其是在 6~8 年生的相关性达 $p < 0.001$ 的极显著。29 年生优势木主干材高与树高仅从 4 年生显著到 6~8 年生极显著正相关,与 2~8 年生的优势木胸径、单株材积和保存率相关性不显著;29 年生树干通直度与 4~8 年生的优势木树高达极显著正相关。而同一年的 29 年生种源/家系各性状间的相关性,除树高与保存率、胸径与主干材高、保存率与主干材高

表 5 柚木/家系不同年龄不同性状相关分析

Table 5 Correlation analysis of different traits between different ages and 29-year-old for teak provenances or families

林龄/性状 Ages/Traits	29年生 29-year-old						
	H_{dt}	D_{dt}	V_{dt}	SR	H_b	ST	
2 年生 2-year-old	优势木树高 H_{dt}	0.438**	0.535**	0.478**	0.321 ^{ns}	0.331 ^{ns}	0.248 ^{ns}
	优势木胸径 DBH_{dt}	0.337 ^{ns}	0.575***	0.459**	0.513**	0.205 ^{ns}	0.264 ^{ns}
	优势木单株材积 V_{dt}	0.397*	0.543***	0.477**	0.373*	0.255 ^{ns}	0.245
	保存率SR	0.235 ^{ns}	0.408*	0.337 ^{ns}	0.526**	0.251 ^{ns}	0.212 ^{ns}
4 年生 4-year-old	优势木树高 H_{dt}	0.444**	0.606***	0.484**	0.575***	0.391*	0.489**
	优势木胸径 DBH_{dt}	0.404*	0.693***	0.555***	0.551***	0.285 ^{ns}	0.429*
	优势木单株材积 V_{dt}	0.362*	0.602***	0.473**	0.520**	0.294 ^{ns}	0.371*
	保存率SR	0.302 ^{ns}	0.477**	0.416*	0.625***	0.256 ^{ns}	0.247 ^{ns}
6 年生 6-year-old	优势木树高 H_{dt}	0.426*	0.578***	0.481**	0.550***	0.448**	0.492**
	优势木胸径 DBH_{dt}	0.450**	0.741***	0.621***	0.596***	0.271 ^{ns}	0.352*
	优势木单株材积 V_{dt}	0.397*	0.688***	0.578***	0.579***	0.232 ^{ns}	0.295 ^{ns}
	保存率SR	0.249 ^{ns}	0.448**	0.378*	0.658***	0.265 ^{ns}	0.266 ^{ns}
8 年生 8-year-old	优势木树高 H_{dt}	0.531**	0.608***	0.548***	0.654***	0.576***	0.629***
	优势木胸径 DBH_{dt}	0.510**	0.773***	0.690***	0.579***	0.315 ^{ns}	0.359 ^{ns}
	优势木单株材积 V_{dt}	0.507**	0.762***	0.698***	0.594***	0.330 ^{ns}	0.373*
	保存率SR	0.230 ^{ns}	0.459**	0.368*	0.694***	0.275 ^{ns}	0.307 ^{ns}
29 年生 29-year-old	优势木树高 H_{dt}	—	0.741***	0.817***	0.275 ^{ns}	0.586***	0.633***
	优势木胸径 DBH_{dt}	0.741***	—	0.953***	0.557***	0.322 ^{ns}	0.441**
	优势木单株材积 V_{dt}	0.817***	0.953***	—	0.482**	0.342*	0.424*
	保存率SR	0.275 ^{ns}	0.557***	0.482**	—	0.226 ^{ns}	0.296 ^{ns}
	优势木主干材高 H_b	0.586***	0.322 ^{ns}	0.342*	0.226 ^{ns}	—	0.765***
	优势木树干通直度ST	0.633***	0.441**	0.424*	0.296 ^{ns}	0.765***	—

注: Sr 代表种源或家族的存活率

Notes: SR represented survival rate of provenance or family

和树干通直度间相关性不显著外, 各性状相互间显著或极显著正相关, 尤其是优势木树高分别与优势木的胸径、单株材积、主干材高和树干通直度在 $p < 0.001$ 水平上极显著正相关, 而保存率与优势木的胸径和单株材积达极显著正相关。

2.4 柚木种源/家系不同年份生长与适应性的变化

5 个年份种源/家系优势木的生长性状和保存率的主成分分析结果 (表 6) 表明, 5 个年份前两个主分量累积贡献率为 96.13%~98.46%, 说明前两个主分量包括了种源/家系生长和保存率的绝大部分信息, 其综合得分值能反映出种源/家系在生长

和保存率上的综合表现。以各年份得分排序的前 10 名和倒数 10 名的种源/家系来评判它们的变化。从表 6 可以看出, 2~8 年生前 10 名种源/家系排序与 29 年生的比较相同率, 从 6 年生开始就保持了 50% 的相同率, 也就是说, 6 年生开始选择优良种源/家系, 早期选择有 50% 的选准率, 其中种源 8402、8602 和 8603 一直在前 5 名内, 这 3 个种源/家系选准率在前 5 位的选准率达 100%; 同样最差的后 10 名, 2~8 年生的种源/家系与 29 年生的相同率达 70%~80%, 因此, 早期选择时, 淘汰最差的种源/家系选准率至少能达到 70%。

表 6 柚木种源/家系前两个主分量综合得分值和排名

Table 6 The first two principal component score values and ranking of teak provenances and families

排名 Ranking	2年生 2-year-old		4年生 4-year-old		6年生 6-year-old		8年生 8-year-old		29年生 29-year-old	
	种源/家系 Prov./fam.	得分 Scores	种源/家系 Prov./fam.	得分 Scores	种源/家系 Prov./fam.	得分 Scores	种源/家系 Prov./fam.	得分 Scores	种源/家系 Prov./fam.	得分 Scores
1	2167	0.140 4	8603	0.136 5	8603	0.094 1	8603	0.115 9	8410	0.166 7
2	8402	0.128 3	2167	0.129 8	2167	0.093 1	8402	0.056 2	8407	0.110 9
3	8602	0.105 5	8402	0.128 7	8402	0.066 7	8602	0.055 5	8603	0.110 3
4	8507	0.071 4	8602	0.075 9	8602	0.061 3	2167	0.047 4	7564	0.065 7
5	8603	0.048 8	85131	0.073 2	8507	0.048 7	8407	0.047 1	85131	0.061 1
6	8417	0.043 8	8411	0.066 1	85131	0.047 7	8508	0.039 0	8602	0.054 7
7	85131	0.043 4	8620	0.038 5	8407	0.045 5	8620	0.037 0	7506	0.049 6
8	1306	0.041 0	8451 [#]	0.037 3	1307	0.042 9	8604	0.034 8	8402	0.038 8
9	1007	0.036 7	1307	0.031 3	8604	0.039 5	1307	0.032 6	7500	0.031 6
10	8620	0.032 4	8507	0.028 4	8417	0.025 6	8507	0.032 4	8508	0.027 5
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
25	7506 [#]	-0.033 9	83317	-0.028 6	7506 [#]	-0.015 1	8605	-0.025 1	1306	-0.027 2
26	7787	-0.036 5	1306	-0.037 0	1306	-0.029 7	83317	-0.027 6	7787	-0.032 6
27	7564 [#]	-0.038 2	1308	-0.043 6	83317	-0.036 2	1306	-0.038 7	8417	-0.057 3
28	8605	-0.043 2	8601	-0.060 3	8444	-0.044 9	8444	-0.039 5	8605	-0.059 8
29	1308	-0.053 4	7521	-0.061 2	1308	-0.061 1	1308	-0.052 0	1008	-0.061 4
30	8450 [#]	-0.056 7	8450 [#]	-0.071 4	8450 [#]	-0.065 4	8443	-0.072 3	8444	-0.072 1
31	8601	-0.066 5	8444	-0.072 7	8601	-0.077 2	8601	-0.073 8	8450 [#]	-0.084 0
32	8443	-0.099 4	1008	-0.088 1	8443	-0.084 8	8450 [#]	-0.087 3	8443	-0.109 3
33	1008	-0.103 2	8443	-0.097 6	1008	-0.101 2	1008	-0.090 6	8601	-0.132 0
34	7517 [#]	-0.140 8	7517 [#]	-0.181 4	7517 [#]	-0.134 4	7517 [#]	-0.134 9	7517 [#]	-0.137 9
累积贡献率/% Accumulative contribution rate	96.13		97.34		97.17		97.54		98.46	
前10相同率/% The top ten same rates	40.00		40.00		50.00		50.00		100.00	
后10相同率/% The last ten same rates	70.00		70.00		70.00		80.00		100.00	

2.5 柚木种源/家系多性状综合选择

29 年生柚木种源/家系的优势木生长性状、形

质性状和保存率的主成分分析结果 (表 7) 表明, 前三个主分量累积贡献率达 97.63%, 根据累积贡献率大于 85% 的原则^[13], 取前三个主分量已包含了种源/家系不同性状的绝大部分信息, 可满足分析要求。第一主分量以保存率对该主分量贡献最大, 其次是单株材积, 反映了第一主分量是以种源/家系适应性为主, 兼顾了生长性状, 且第一主分

量各性状均为正值, 具正向效应; 第二主分量则以反映出材率的主干材高最大, 其次是保存率, 除保存率外, 其它均是正值, 反映了形质性状的正向贡献, 适应性则为负向贡献; 第三主分量以生长性状的单株材积最大, 其次为主干材高, 除生长性状为正值外, 其它为负值, 第三主分量则代表了种源/家系的生长性状。

表 7 柚木种源/家系 29 年生多性状主成分分析

Table 7 Principal component analysis of multiple traits of teak provenances and families in 29-year-old

项目 Item	PC1	PC2	PC3
特征向量 Latent vectors			
优势木树高 H_{dt}	0.133 08	0.191 43	0.162 80
优势木胸径 D_{dt}	0.217 90	0.071 61	0.296 38
优势木单株材积 V_{dt}	0.452 44	0.231 79	0.731 23
优势木树干通直度 ST	0.151 70	0.262 81	-0.115 23
优势木主干材高 H_b	0.308 26	0.744 15	-0.485 37
保存率 SR	0.782 35	-0.530 73	-0.319 54
特征根 Latent roots	0.007 895	0.003 167	0.001 888
贡献率 Percentage variation/%	59.52	23.88	14.23
累积贡献率 Cumulative percentage variation/%	59.52	83.40	97.63

以表 7 的各性状主分量矩阵, 求得 3 个主分量方程:

$$Y_1 = 0.133\ 08\tilde{x}_1 + 0.217\ 90\tilde{x}_2 + 0.452\ 44\tilde{x}_3 + 0.782\ 35\tilde{x}_4 + 0.151\ 70\tilde{x}_5 + 0.308\ 26\tilde{x}_6$$

$$Y_2 = 0.191\ 43\tilde{x}_1 + 0.071\ 61\tilde{x}_2 + 0.231\ 79\tilde{x}_3 - 0.530\ 73\tilde{x}_4 + 0.262\ 81\tilde{x}_5 + 0.744\ 15\tilde{x}_6$$

$$Y_3 = 0.162\ 80\tilde{x}_1 + 0.296\ 38\tilde{x}_2 + 0.731\ 23\tilde{x}_3 - 0.319\ 54\tilde{x}_4 - 0.115\ 23\tilde{x}_5 - 0.485\ 37\tilde{x}_6$$

式中, $\tilde{x}_1 \sim \tilde{x}_6$ 分别代表了树高、胸径、单株材积、保存率、通直度和主干材高, 为标准化变量, $\tilde{x} = (\text{某性状原始数据} - \text{该性状平均值}) / \text{该性状标准差}$ 。由上述方程计算出每个种源/家系在各主分量中的得分值, 综合评价得分 (表 8) 则由各主分量贡献率在累积贡献率中的权重得出综合评价函数 F 求得:

$$F = 0.609\ 65\ Y_1 + 0.244\ 60\ Y_2 + 0.145\ 75\ Y_3$$

根据各种源/家系在表 8 中综合得分 F 值排名, 以 20% 的入选率选出了 7 个优良种源/家系: 8410、8603、8407、8602、85131(CK)、7564[#] 和 1007, 其中前 4 个种源大于对照种源 85131, 尤其是种源 8410 和 8603, 它们的综合得分显著

高于对照种源, 分别是对照种源的 1.90 倍和 1.69 倍。若以 10% 的入选率则选出 3 个大于对照的优良种源: 8410、8603 和 8407。

从表 9 可以看出, 29 年生优势木各生长性状和形质性状的遗传力以主干材高、树高和树干通直度的遗传力最高, 在 0.71~0.77 之间, 单株材积生长的遗传力最低, 为 0.48。按 20% 入选率选出 7 个种源/家系的树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高的遗传增益分别为 7.92%、9.39%、14.74%、7.06% 和 12.29%, 而按 10% 入选率选出 3 个种源/家系的树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高的遗传增益分别为 9.08%、13.78%、18.35%、4.60% 和 1.43% (表 9), 显而按 10% 入选率, 提高了种源/家系的生长性状的遗传增益, 但降低了形质性状的遗传增益。

3 讨论

(1) 29 年生试验林的种源/家系保存率总体上均不高, 与早期试验林的保存率呈极显著正相关, 2 年生时的试验林保存率也才 61.73%。但该试验林密度未进行过人为干预, 是自然适应选择和淘汰的结果。本试验初始造林密度为 1 111

表 8 柚木种源/家系主成分得分值和排名

Table 8 Principal component score values and ranking of teak provenances and families

种源/家系 Prov./Fam.	得分 Scores				排名 Ranking	种源/家系 Prov./Fam.	得分 Scores				排名 Ranking
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	F			Y ₁	Y ₂	Y ₃	F	
8410	0.122 6	-0.019 0	0.005 5	0.109 1	1	8451 [#]	0.002 2	0.016 6	-0.007 6	0.011 2	18
8603	0.082 4	0.007 8	0.007 2	0.097 4	2	7500	0.034 0	-0.016 8	-0.007 6	0.009 6	19
8407	0.083 5	-0.017 5	0.001 7	0.067 7	3	8507	-0.018 9	0.015 9	0.012 1	0.009 1	20
8602	0.039 4	0.012 3	0.006 4	0.058 1	4	8604	0.005 8	-0.004 4	0.005 5	0.006 9	21
85131(CK)	0.063 9	0.000 7	-0.007 1	0.057 5	5	7516	0.001 6	-0.001 6	0.000 1	0.000 1	22
7564 [#]	0.050 9	-0.005 4	0.001 4	0.046 9	6	8463	-0.012 6	0.006 6	0.004 6	-0.001 4	23
1007	0.008 2	0.023 5	-0.000 3	0.031 3	7	7787	-0.013 2	0.006 4	-0.006 3	-0.013 0	24
8508	0.032 2	0.000 7	-0.004 9	0.027 9	8	1008	-0.035 2	0.022 6	-0.003 9	-0.016 5	25
8402	0.037 0	-0.007 5	-0.004 1	0.025 5	9	2167	-0.000 3	-0.024 0	0.000 2	-0.024 2	26
8411	0.040 3	-0.008 5	-0.011 9	0.019 9	10	77103 [#]	-0.021 9	-0.010 4	0.005 5	-0.026 8	27
1307	0.014 0	0.007 4	-0.001 5	0.019 9	11	8605	-0.042 7	0.006 3	-0.002 5	-0.038 9	28
7521	0.026 8	-0.003 1	-0.004 2	0.019 5	12	8444	-0.044 5	0.009 8	-0.006 9	-0.041 5	29
1308	0.012 0	0.010 7	-0.005 8	0.016 8	13	8417	-0.049 9	-0.010 3	-0.001 1	-0.061 3	30
8620	-0.008 0	0.016 9	0.006 8	0.015 7	14	8443	-0.090 9	-0.003 0	-0.000 7	-0.094 6	31
7506 [#]	0.023 6	-0.016 3	0.006 7	0.014 0	15	8450 [#]	-0.078 9	-0.018 6	0.000 9	-0.096 7	32
83317	-0.017 3	0.012 0	0.017 3	0.012 1	16	8601	-0.108 5	-0.010 1	-0.003 7	-0.122 3	33
1306	-0.005 1	0.022 2	-0.005 8	0.011 3	17	7517 [#]	-0.132 6	-0.022 1	0.004 3	-0.150 4	34

表 9 入选柚木种源/家系 29 年生遗传力和遗传增益

Table 9 Heritability and genetic gain of teak provenances and families selected in 29-year-old

入选率 Selection proportion/ %	种源/家系 Provenances/ families	树高H _{dt}		胸径D _{dt}		单株材积V _{dt}		树干通直度ST		主干材高H _b	
		遗传力 Heritability	遗传增益 ΔG/%	遗传力 Heritability	遗传增益 ΔG/%	遗传力 Heritability	遗传增益 ΔG/%	遗传力 Heritability	遗传增益 ΔG/%	遗传力 Heritability	遗传增益 ΔG/%
10	8410、8603、8407	0.754 4	9.08	0.635 6	13.78	0.481 0	18.35	0.715 3	4.60	0.768 2	1.43
20	8410、8603、8407、8602、 85131(CK)、7564 [#] 、1007	0.754 4	7.92	0.635 6	9.39	0.481 0	14.74	0.715 3	7.06	0.768 2	12.29

株·hm⁻², 即使 29 年生保存率仅 20%~30%, 也可达到林业行业标准培育柚木大径材的最终保留 220 株·hm⁻²~370 株·hm⁻²[17] 的密度控制要求。本试验的大部分种源/家系 29 年生保存率在 30% 以上, 而相关分析结果也表明, 胸径、单株材积与保存率呈极显著正相关, 也即生长好的种源/家系, 其保存率也高, 琼西南种源/家系试验结果也证实了这一点[18]。从本试验选出的 7 个优良种源/家系来看, 除 1 个种源外, 其他 6 个种源 29 年生保存率均在 40% 以上, 如进行更早的密度控制, 可达到培育大径材柚木的目的。该试验林测定区内 29 年生胸径大于 35 cm 的林木 68 株, 单位面积大径级柚木达 92 株·hm⁻², 其中, 最大胸径达到 57.0

cm。此外, 胸径在 25~35 cm 间的柚木为 122 株·hm⁻²。因此, 只要在适宜立地, 选择优良种源或家系, 再加以高效培育技术, 如早期加强施肥, 郁闭前后进行适当抹芽修枝与抚育间伐, 可以缩短柚木轮伐期, 在云南河口或类似地区采用 25~30 a 轮伐期培育出柚木大径材是切实可行的, 而国外采用无性系和集约栽培技术, 轮伐期可以缩短到 20~30 a[19]。

(2) 林木生长周期长, 尤其是珍贵用材树种, 早期选择是缩短育种周期的一种有效途径, 但存在一定风险, 确定选择年龄太早, 选准率太低, 如琼西南 30.5 年生柚木种源/家系试验, 4.5 年生优良种源早期选择的选准率仅 33.33%[18], 其它树

种也存在这种情况,江西大岗山 31 年生杉木种源试验,5 和 10 年生的早期选择选准率分别为 18.18% 和 33.33%^[9],但随着选择年龄的增加,选准率随之提高,本研究也说明这一点,与 29 年生相比,2 和 4 年生排前 10 位优良种源/家系选准率均为 40%,而 6 和 8 年生的选准率为 50%,反之,对排后 10 位的种源/家系来说,选准率则远高于排前 10 位的种源/家系,2、4 和 6 年生的选准率均为 70%,8 年生的选准率则为 80%,因此,早期选择生长差的种源/家系的选准率会较高。本研究缺乏 8 年生以后的观测数据,难以确定优良种源/家系选准率达到 70%~80% 的早期选择年龄。

(3) 柚木为圆锥花序顶生或腋生^[1,20],第一次开花往往是主干顶端分生组织转变顶端花芽,主干花序下面的腋生分生组织会继续营养生长,从而导致主干的分叉^[21]。因此,柚木第一次开花年龄决定了通直未分叉主干的高度^[22],这种特性主要受遗传因素的影响^[23]。在海南尖峰岭引种的多个缅甸和印度种源中,发现早花的 3 a,迟花的至 15 a 尚未见开花^[24]。柚木早花形成过早分叉,降低了主干材高,间接减少了木材的材积^[25];开花后顶端生长受抑制,下部潜伏芽萌发,形成枝条,也会造成主干材高降低。因此,推迟开花被认为是一个潜在的重要育种目标^[26-27]。本研究结果表明,主干材高与生长性状的树高生长呈极显著的正相关,与材积生长呈显著的正相关,也与形质性状的树干通直度呈极显著的正相关;而树干通直度与生长性状的树高、胸径和材积生长呈显著或极显著的正相关,且随着树龄增加,29 年生主干材高和树干通直度与树高生长的相关性更紧密。因此,选择树高和材积生长表现优异的种源/家系,提高了这些种源/家系的主干材高和树干通直度,有利于对迟花柚木种源/家系的间接选择。

4 结论

29 年生柚木种源/家系间保存率、优势木的树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高差异极显著,种源/家系间变异极大,通过种源/家系的选择,可获得较大的遗传增益。树高、主干材高和树干通直度具较高的遗传力,在 0.71~0.77 间,单株材积生长遗传力较低,为 0.48。优势木的平均树高与其平均胸径、单株材积、主干材高和树干

通直度呈极显著正相关,保存率与优势木的平均胸径和单株材积呈极显著正相关。对生长、适应性和形质性状的径向主成分分析综合选择优良种源/家系,按 20% 的入选率评选出了 7 个优良种源/家系(8410、8603、8407、8602、85131、7564#和 1007),它们的树高、胸径、单株材积、树干通直度和主干材高的遗传增益分别为 7.92%、9.39%、14.74%、7.06% 和 12.29%,其中来自云南陇川林场种源 8410 和海南尖峰岭种源 8603 更适宜当地生长。

参考文献:

- [1] 潘志刚,游应天.中国主要外来树种引种栽培[M].北京:北京科学技术出版社,1994.
- [2] 白嘉雨,周铁峰,侯云萍.中国热带主要外来树种[M].昆明:云南科技出版社,2011.
- [3] 徐大平.热带南亚热带主要造林树种遗传改良与高效栽培[M].北京:中国林业出版社,2022.
- [4] 王达明,杨绍增.云南柚木的引种和发展[C].//云南省林业科学院.热区造林树种研究论文集.昆明:云南科技出版社,1996.
- [5] 张树芬,张荣贵.河口县立地条件对柚木生长影响的调查研究[J].林业调查规划,2005,30(3):111-114.
- [6] 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.
- [7] 毛爱华,李建祥,张超英,等.19年生侧柏种源变异及选择研究[J].北京林业大学学报,2010,32(1):63-68.
- [8] 刘青华,张蕊,金国庆,等.马尾松年轮宽度和木材基本密度的种源变异及早期选择[J].林业科学,2010,46(5):49-54.
- [9] 伍汉斌,段爱国,张建国,等.杉木地理种源长期选择效果研究[J].林业科学研究,2019,32(3):9-17.
- [10] KJAER E D, LAURIDSEN E B, WELLENDORF H. Second evaluation of an international series of teak provenance trials[R]. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 1995.
- [11] 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.
- [12] PAYNE R W, LANE P W, AINSLEY A E, et al. The Genstat 5 - reference manual [M]. Oxford: Oxford University Press, 1989.
- [13] 李善文,姜岳忠,王桂岩,等.黑杨派无性系多性状遗传分析及综合评选研究[J].北京林业大学学报,2004,26(3):36-40.
- [14] 唐守正.多元统计分析方法[M].北京:中国林业出版社,1989:20-33.
- [15] 付强,黄桂华,周强,等.柚木无性系早期选择年龄的研究[J].中南林业科技大学学报,2022,42(10):30-38.
- [16] 王明麻.林木育种学概论[M].北京:中国林业出版社,1989.
- [17] LY/T 1900-2010.柚木培育技术规程[S].北京:中国标准出版社,2010.

- [18] 梁坤南, 黄桂华, 林明平, 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.
- [19] UGALDE L A. Teak: new trends in silviculture, commercialization and wood utilization [M]. Cartago, Costa Rica: International Forestry and Agroforestry, 2013: 552.
- [20] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志第65卷第1分册[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [21] CALLISTER A N. Genetic parameters and correlations between stem size, forking, and flowering in teak (*Tectona grandis*)[J]. Can. J. For. Res., 2013, 43(12): 1145-1150.
- [22] LARSEN C S. Genetics in teak (*Tectona grandis* Linn. f.)[R]. Arsskrift Veterinary and Agriculture High School, Kobenhavn, 1966: 234-245.
- [23] HEDEGART T. Breeding systems, variation and genetic improvement of teak (*Tectona grandis* Linn. f.)[A]. //BURLEY J and STYLES B T. Tropical Trees: Variation, Breeding And Conservation. Linnean Society Symposium Series 2[C]. New York: Academic Press, 1976, 109-121.
- [24] 邝炳朝. 柚木基因资源的特点和我国柚木遗传改良途径[J]. 热带林业科技, 1982, 9 (1): 40-47.
- [25] BASKARAN, K. Silviculture and Management of Teak plantation[J]. Unasyuva, 2000, 51(201): 14-21.
- [26] WHITE K J. Teak: some aspects of research and development[R]. FAO/RAPA publication: 1991/17.
- [27] KJAER E D, LAURIDSEN E B. Results from a second evaluation of DFSC coordinated teak (*Tectona grandis*) provenance trials: has new information been obtained?[A]// Dieters M J, Matheson A C, Nikles D G, et al. Tree Improvement for Sustainable Tropical Forestry. Proceedings of the QFRI-IUFRO Conference[C]. Caloundra, Australia, 27 October – 1 November, 1996: 154-157.

Comprehensive Selection of 29-year-old for Provenances/ Families of Teak (*Tectona grandis* Linn.f.) in Southwestern Yunnan

LIANG Kun-nan¹, ZHANG Rong-gui², HUANG Gui-hua¹, CHU Yong-xing²,
WANG Xian-bang¹, SHI Wen-ge²

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tropical Forestry Research, National Forestry and Grassland Administration, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. Institute of Forestry and Grassland Science of Honghe Hani and Yi Autonomous Prefecture, Mengzi 661199, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] Through the comprehensive evaluation of the adaptability, growth and form quality traits of teak (*Tectona grandis* Linn.f.) forests (provenance / family) of early and 29-year-old established in southwestern Yunnan, the purpose is to select the superior provenances / families of teak with strong adaptability, fast growth and excellent form quality for the local region. [Method] Thirty-four provenances and families of teak were collected from China and abroad. Using a completely random block design with (2 × 2) plant plots and 8 replicates to establish trial plantation, the conservation rate and growth difference of the early 2-8 year old and 29-year old trees were investigated, analyzed and compared. The conservation rate, the growth and quality traits of dominant trees of 29-year old provenances/families were analyzed by principal component analysis, and excellent provenances/families were evaluated comprehensively. [Result] There was no significant difference in the preservation rate between the 2-8-year-old teak provenances/families in the early stage, while the difference in the preservation rate between the 29-year-old provenances/ families was extremely significant. However, the differences in growths and quality traits between 2-8-year-old or 29-year-old provenances / families were extremely significant. The average tree height, average DBH and average tree volume of 2-8-year-old best provenances / families were 1.38-1.91 times, 1.63-2.18 times and 3.82-5.17 times of the worst growing ones, respectively. The average tree height, average DBH, average tree volume, stem straightness and trunk height of 29-year-old dominant trees from the best provenances were 1.84 times, 1.87 times, 4.84 times, 2.18 times and 12.89 times of those from the worst provenances, respectively. Greater yield-increasing benefits can be obtained through the selection of excellent provenance / family. The preservation rate and growth traits of dominant trees of 29-year-old provenances/families were significantly correlated with the growth traits of 4-8-year-old dominant trees. The stem straightness of dominant trees of 29-year-old provenances / families was significantly correlated with the growth traits of dominant trees, and the tree height of dominant trees was significantly correlated with the average tree height and individual volume growth of dominant trees. The cumulative contribution rate of the first three principal components of 29-year-old provenances / families preservation rate, growth and form quality traits was 97.63%. According to the comprehensive score in the first three principal components of the provenances / families, seven excellent provenances / families (8410、8603、8407、8602、85131、1007 and 7564[#]) were selected according to the selection rate of 20%. [Conclusion] The genetic gains of dominant tree height, DBH, individual volume, stem straightness and trunk height of the seven provenances / families selected at 29 years old are 7.92%, 9.39%, 14.74%, 7.06% and 12.29%, respectively. Among them, provenance 8410 from Yunnan Longchuan Forest Farm and provenance 8603 from Hainan Jianfengling are more suitable for local growth.

Keywords: *Tectona grandis*; provenance/family; adaptability; growth and quality traits; comprehensive selection of multi-traits