

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.06.002

琼西南柚木次生种源/家系多性状综合选择

梁坤南*, 黄桂华, 林明平, 杨光, 王西洋, 周再知

(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)

摘要: [目的] 通过对早期引种的柚木国内次生种源/家系生长、形质性状和适应性的综合评价, 为当地选出最适宜生长的优良种源/家系。[方法] 采用4株小区, 8次重复的完全随机区组设计, 对国内收集的19个柚木次生种源/家系4.5年生和30.5年生保存率、生长、形质性状进行方差分析和相关分析, 根据聚类和多性状坐标综合评定法选出优良种源/家系。[结果] 4.5年生和30.5年生种源/家系间保存率、生长和形质性状, 除4.5年生保存率差异不显著外, 其余均呈显著或极显著差异。4.5年生与30.5年生的各性状相关性不显著, 但4.5年生、30.5年生内生长性状间、生长性状与干形和保存率呈显著或极显著的正相关; 30.5年生生长性状和干形与采种地的纬度呈极显著正相关、与年平均气温呈显著或极显著负相关。聚类分析与多性状坐标综合评定出优良种源和优良家系各2个, 30.5年生优势木单株材积分别比当地种源和当地最优家系提高了261.65%~291.29%和20.18%~26.11%, 种源选择效果极显著。[结论] 广州龙洞种源、云南芒市种源和2个云南畹町家系是最适宜海南西南部柚木生长的次生种源/家系, 尤以对云南畹町林场的家系进一步的选择, 增益更大。

关键词: 柚木; 次生种源/家系; 多性状综合评价

中图分类号: S722.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)06-0013-10

种源试验是最早受到重视的树种改良措施之一, 已有悠久的历史^[1]。柚木(*Tectona grandis* L.f.)是世界上最珍贵的热带硬木树种之一, 印度早在1931年开展了全印度的柚木种源试验^[2-3], 之后, 印度尼西亚和泰国等国也相继开展了种源试验^[4-5]; 国际种源试验合作是由丹麦林木种子中心于1973—1974年组织在亚洲、非洲和拉丁美洲建立了48个地点的国际柚木地理种源试验, 分别在1986年和1995年进行试验结果评估^[6-7]。我国1820年开始引种柚木于云南边境的庙宇作为庭院绿化树种种植^[8-9], 现已遍及我国热带、亚热带地区的云南、台湾、海南、广东、广西、福建等省区50多个县市^[10]。早期通过边民、华侨从缅甸、泰国、老挝等国引进种植的柚木, 在引种地以片林、四旁、行道树生长, 这些早期引种的、已适应新栽培地区气候条件和土壤条件的柚木已成为国内

重要的次生种源。1975—1990年我国通过国内收集的次生种源/家系与原产地引进的种源, 开展了系统种源和家系试验, 这些试验已有部分结果报道^[11-21]。本研究是以国内收集的柚木次生种源/家系为研究对象, 通过30.5年试验综合评定适宜当地生长的优良种源/家系, 为我国柚木人工林的发展提供优良的种植材料。

1 试验地概况

试验设在海南省乐东县尖峰岭(18°42' N, 108°49' E)的中国林业科学研究院热带林业研究所试验站, 海拔20 m; 地处我国热带海洋性季风气候区, 年平均气温24.5℃, 极端高温38.1℃, 极端低温5℃; 年平均降水量1 500 mm, 集中在夏秋季, 年平均相对湿度80%。台风频繁, 年均登陆或影响的台风2.7个, 是我国受台风影响最频繁的地

收稿日期: 2020-05-14 修回日期: 2020-08-14

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题“柚木高效培育技术研究(2016YFD0600602)”

* 通讯作者: 梁坤南. E-mail: chinateak@163.net

区之一。土壤为花岗岩发育的褐色砖红壤，含石砾或石块，腐殖质含量中等，土壤厚度 < 80 cm，坡度 10~15°，pH 值 5.8~6.0。

2 研究方法

2.1 试验设计

参试柚木种源/家系（含对照）共 19 个（表 1），其中，种源 11 个，家系 8 个，均是早期引种国内的次生种源/家系，以当地海南乐东县尖峰岭的次生种源 8456 和 3 个家系（8458[#]、8459[#]和 8460[#]）

为对照。次生种源以片林、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。家系在片林中以 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，年龄 15~20 a。采用完全随机区组设计，8 次重复，单行 4 株小区，株行距 2.5 m × 4.0 m，穴状整地，规格 50 cm × 50 cm × 40 cm，未施肥。1985 年 8 月 6—7 日造林。

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(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔 Altitude/m	年均气温 Temperature/°C	年降水量 Rainfall/mm
8401	勐仑[缅甸]	云南版纳州勐腊县勐仑植物园	21°41'	101°25'	550	21.5	1 500
8408	勐秀[缅甸]	云南德宏州瑞丽市勐秀林场	23°40'	97°05'	1 280	18.9	1 250
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
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
8419	西江[缅甸]	广东肇庆市林科所	23°10'	112°00'	71	21.2	1 555
8440	景东[缅甸]	云南普洱市景东县	24°28'	100°45'	1 162	18.3	1 087
8444	党校[老挝]	云南版纳州景洪市郊党校	21°52'	101°04'	570	21.7	1 217
8453	盈江[缅甸]盈10	云南德宏州盈江县	24°43'	97°56'	827	19.3	1 484
8456	尖峰[老挝]	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	118	24.5	1 500
8461	芒市[缅甸]	云南德宏州芒市市政府门前	24°40'	98°30'	914	19.5	1 643
8463	梅花园[缅甸]	广东广州梅花园	23°04'	113°20'	10	21.9	1 727
8404 [#]	勐棒[缅甸]	云南版纳州勐腊县勐棒镇曼笼村	21°31'	101°20'	550	21.7	1 700
8412 [#]	盈江[缅甸]盈尖	云南德宏州盈江县广播站门前	24°43'	97°56'	827	19.3	1 484
8450 [#]	晚町[缅甸]77101早熟窄	云南德宏州晚町林场院内	24°05'	98°05'	880	20.4	1 550
8451 [#]	晚町[缅甸]77102常绿	云南德宏州晚町林场	24°05'	98°05'	860	20.4	1 550
8452 [#]	晚町[缅甸]晚014	云南德宏州晚町林场	24°05'	98°05'	880	20.4	1 550
8458 [#]	尖峰[缅甸]7517	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
8459 [#]	尖峰[缅甸]7516	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500
8460 [#]	尖峰[印度]3070-10	海南乐东县尖峰岭	18°40'	108°50'	130	24.5	1 500

注：种源/家系名称中的[]表示最初的产地，种源/家系号带[#]为家系，下同。

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

2.2 数据收集

测定 4.5 年生种源/家系试验林的树高、胸径；在 30.5 年生种源/家系林的每个小区内选取优势木 1 株，测定优势木的树高、胸径、干形和无损干材高，以小区优势木评价 30.5 年生的种源/家系。依据树高 (H) 和胸径 (DBH) 按以下公式^[15] 计算单株材积 (V)：

$$V = 0.4787 \times DBH^2 \times H$$

2.3 数据分析

采用 GENSTAT 统计软件^[22]，对 4.5 年生和 30.5 年生的数据（保存率反正弦转换）进行方差分析、Duncan 多重比较与生长性状聚类分析；为综合评价种源/家系生长和形质性状，通过主分量分析计算出 30.5 年生小区优势木的平均树高 (H_{dt})、

平均胸径 (DBH_{dt})、平均单株材积 (V_{dt})、平均干形得分 (SF)、平均无损干材高 (H_{lb}) 和保存率 (SR) 的权重, 采用多性状坐标综合评定法^[23], 按 20% 的入选率选出适宜当地生长的优良国内次生种源或家系。

3 结果与分析

3.1 柚木种源/家系适应性

对 4.5 年生和 30.5 年生柚木种源/家系保存率进行方差分析, 表 2 表明: 4.5 年生柚木种源/家系间保存率差异不显著, 保存率为 59.38%~96.88%,

试验林平均保存率为 80.3%。4.5 年生保存率 > 90% 的种源/家系有 5 个, 其中, 家系有 1 个 (8404[#] 家系, 90.62%); 保存率 ≤ 75.00% 的种源/家系有 7 个, 其中, 家系有 5 个。30.5 年生柚木种源/家系间保存率差异极显著, 保存率为 7.14%~78.57%, 试验林平均保存率为 37.4%; 8460[#] 家系的保存率最高, 达 78.57%, 与大部分种源/家系的保存率差异显著; 其次是 8417 和 8461 种源, 保存率分别为 64.29% 和 60.71%。与 4.5 年生保存率相比, 30.5 年生时种源/家系的保存率下降 5.80~79.91 个百分点, 其中, 8444 种源保存率从 90.62% 下降到 10.71%,

表 2 柚木种源/家系 4.5 年生和 30.5 年生保存率邓肯多重比较

Table 2 Duncan multiple comparisons at 0.05 level for survival rates of provenances and families of 4.5-year-old and 30.5-year-old

4.5年生 4.5-year-old		30.5年生 30.5-year-old		相差Δ Difference/%
种源/家系 Prov./fam.	保存率 Survival rate/%	种源/家系 Prov./fam.	保存率 Survival rate/%	
8461	96.88 ± 3.13 a	8460 [#]	78.57 ± 6.52 a	-5.80
8456	96.87 ± 3.13 a	8417	64.29 ± 9.22 ab	-20.08
8408	93.75 ± 6.25 a	8461	60.71 ± 7.43 abc	-36.17
8404 [#]	90.62 ± 4.57 a	8412 [#]	53.57 ± 6.52 abc	-15.18
8444	90.62 ± 6.58 a	8419	53.57 ± 13.83 abc	-30.80
8411	84.37 ± 6.58 a	8408	46.43 ± 13.83 bcd	-47.32
8417	84.37 ± 9.38 a	8452 [#]	46.43 ± 12.71 bcd	-28.57
8419	84.37 ± 8.10 a	8450 [#]	42.86 ± 14.14 bcde	-32.14
8460 [#]	84.37 ± 14.51 a	8451 [#]	42.86 ± 13.04 bcde	-41.51
8451 [#]	84.37 ± 9.38 a	8453	39.29 ± 12.02 bcdef	-45.08
8453	84.37 ± 8.10 a	8411	35.71 ± 9.22 cdefg	-48.66
8401	78.12 ± 7.38 a	8440	35.71 ± 9.22 cdefg	-39.29
8440	75.00 ± 10.56 a	8456	32.14 ± 8.99 cdefg	-64.73
8450 [#]	75.00 ± 14.17 a	8404 [#]	17.86 ± 7.14 defg	-72.76
8452 [#]	75.00 ± 10.56 a	8459 [#]	17.86 ± 7.14 defg	-41.52
8412 [#]	68.75 ± 11.33 a	8401	14.29 ± 7.43 efg	-63.83
8458 [#]	65.62 ± 12.44 a	8444	10.71 ± 5.05 fg	-79.91
8463	65.62 ± 13.31 a	8458 [#]	10.71 ± 5.05 fg	-54.91
8459 [#]	59.38 ± 15.63 a	8463	7.14 ± 4.61 g	-58.48
平均 Average	80.3 ± 13.51		37.4 ± 12.99	
F值 F value	1.33 ^{ns}		4.86 ^{***}	
F检验 Fpr	0.179		<0.001	

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水平差异极显著。表中数值为平均值 ± 标准差, 同列不同小写字母表示种源/家系间差异显著 ($P < 0.05$), 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. Values were displayed as mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level between provenances or families, the sample below.

保存率下降 79.91 个百分点。

3.2 柚木种源/家系生长与形质性状差异分析

3.2.1 柚木种源/家系 4.5 年生生长差异分析 对 4.5 年生柚木种源/家系生长进行方差分析, 结果 (表 3) 表明: 种源/家系间平均树高、平均胸径和平均单株材积差异极显著, 而小区优势木平均单株材积差异显著; 种源 8456 和 8461 在平均树高、平均胸

径、平均单株材积和小区优势木平均单株材积均位居前 2 位, 是 19 个种源/家系中早期生长最好的种源, 尤其是种源 8456 与大部分种源/家系在平均树高、平均胸径和平均单株材积上差异显著; 而家系 8450[#]是早期生长最好的家系, 其他家系在树高、胸径和材积生长上居于中下水平。

表 3 柚木种源/家系 4.5 年生生长性状及多重比较

Table 3 Duncan multiple comparisons at 0.05 level for growths of teak provenances and families of 4.5-year-old

种源/家系 Prov./fam.	树高 Height/m	种源/家系 Prov./fam.	胸径 DBH/cm	种源/家系 Prov./fam.	单株材积 Individual volume/m ³	种源/家系 Prov./fam.	小区优势木单株材积 Individual volume of plot dominant tree/m ³
8456	4.99 ± 0.17 a	8456	6.07 ± 0.30 a	8456	0.01017 ± 0.00121 a	8461	0.01556 ± 0.00184 a
8461	4.74 ± 0.24 ab	8461	5.67 ± 0.37 ab	8461	0.00956 ± 0.00142 ab	8456	0.01450 ± 0.00230 ab
8453	4.59 ± 0.17 abc	8463	5.35 ± 0.40 bc	8463	0.00878 ± 0.00158 bc	8444	0.01389 ± 0.00265 abc
8444	4.56 ± 0.25 abc	8444	5.32 ± 0.38 bc	8444	0.00847 ± 0.00138 bc	8463	0.01204 ± 0.00265 abcd
8440	4.47 ± 0.15 bcd	8453	5.27 ± 0.26 bcd	8450 [#]	0.00765 ± 0.00131 bcd	8450 [#]	0.01159 ± 0.00161 abcd
8463	4.44 ± 0.24 bcd	8417	5.25 ± 0.32 bcd	8417	0.00738 ± 0.00098 bcd	8453	0.01159 ± 0.00216 abcd
8417	4.43 ± 0.15 bcde	8408	5.09 ± 0.34 bcde	8453	0.00712 ± 0.00084 bcde	8417	0.01151 ± 0.00200 abcd
8419	4.38 ± 0.21 bcde	8452 [#]	4.91 ± 0.31 bcde	8408	0.00706 ± 0.00099 bcde	8404 [#]	0.01016 ± 0.00222 abcd
8450 [#]	4.38 ± 0.24 bcde	8450 [#]	4.87 ± 0.39 cde	8404 [#]	0.00662 ± 0.00116 cde	8408	0.01007 ± 0.00365 abcd
8404 [#]	4.34 ± 0.23 bcde	8419	4.82 ± 0.36 cdef	8419	0.00654 ± 0.00106 cdef	8411	0.00995 ± 0.00277 abcd
8408	4.28 ± 0.20 bcdef	8404 [#]	4.80 ± 0.35 cdef	8451 [#]	0.00643 ± 0.00119 cdef	8458 [#]	0.00983 ± 0.00271 abcd
8452 [#]	4.27 ± 0.18 bcdef	8460*	4.69 ± 0.30 cdef	8411	0.00638 ± 0.00112 cdef	8451 [#]	0.00940 ± 0.00228 abcd
8451 [#]	4.25 ± 0.23 cdef	8440	4.64 ± 0.27 cdef	8452 [#]	0.00627 ± 0.00091 cdef	8452 [#]	0.00917 ± 0.00164 bcd
8411	4.18 ± 0.24 cdef	8411	4.62 ± 0.38 cdef	8440	0.00589 ± 0.00081 cdef	8459 [#]	0.00862 ± 0.00263 bcd
8460 [#]	4.04 ± 0.18 def	8451 [#]	4.62 ± 0.35 cdef	8458 [#]	0.00546 ± 0.00095 cdef	8440	0.00830 ± 0.00223 bcd
8459 [#]	4.00 ± 0.15 def	8459 [#]	4.54 ± 0.32 cdef	8460 [#]	0.00525 ± 0.00075 cdef	8419	0.00789 ± 0.00269 cd
8412 [#]	3.96 ± 0.15 ef	8401	4.49 ± 0.32 def	8459 [#]	0.00521 ± 0.00091 def	8401	0.00759 ± 0.00151 cd
8458 [#]	3.96 ± 0.20 ef	8458 [#]	4.37 ± 0.34 ef	8401	0.00498 ± 0.00081 ef	8460 [#]	0.00753 ± 0.00341 cd
8401	3.85 ± 0.19 f	8412 [#]	4.06 ± 0.27 f	8412 [#]	0.00419 ± 0.00060 f	8412 [#]	0.00626 ± 0.00355 d
平均 Average	4.32 ± 0.20		4.92 ± 0.34		0.00681 ± 0.00116		0.01029 ± 0.00264
F值 F value	4.09***		3.97***		3.73***		1.79*
F检验 Fpr	<0.001		<0.001		<0.001		0.033

3.2.2 柚木种源/家系 30.5 年生的平均优势木生长与形质性状差异性分析 对 30.5 年生海南尖峰岭柚木种源/家系测定林进行方差分析, 表 4 表明: 19 个种源/家系间的小区优势木平均树高、胸径、单株材积、干形和无损干材高的差异达显著或极显著。在生长性状方面, 种源或家系的优势木平均树高、胸径和单株材积生长排前三位的均是种源 8417、8461 和家系 8450[#], 比试验林平均分别大

19.9%~26.0%、15.8%~22.5% 和 45.3%~81.3%; 而家系 8459[#]的生长和干形性状最差。在形质性状方面, 种源 8463 的干形最好, 家系 8451[#]的无损干材高最大; 而家系 8450[#]的生长、干形和无损干材高均排前三位, 说明 8450[#]家系既速生又优质。从表 4 还看出: 无损干材高排前 7 位的种源/家系间差异不显著, 其中, 5 个为家系, 说明单株选择时注重了无损干材高。

表 4 柚木种源/家系 30.5 年生优势木生长和形质性状及邓肯多重比较

Table 4 Duncan multiple comparisons at 0.05 level for growth and form quality characters of dominant trees of teak provenances and families of 30.5-year-old

种源/家系 Prov./fam.	树高 Height/m	种源/家系 Prov./fam.	胸径 DBH/cm	种源/家系 Prov./fam.	单株材积 Individual volume/m ³	种源/家系 Prov./fam.	干形 Stem form score	种源/家系 Prov./fam.	无损干材高 Height of lossless bole/m
8417	18.77 ± 2.78 a	8461	24.97 ± 1.90 a	8417	0.6601 ± 0.1848 a	8463	3.96 ± 0.15 a	8451 [#]	7.99 ± 0.69 a
8450 [#]	18.35 ± 1.83 a	8417	24.73 ± 2.57 ab	8461	0.6101 ± 0.1628 ab	8419	3.88 ± 0.04 ab	8450 [#]	7.89 ± 1.69 ab
8461	17.87 ± 2.30 ab	8450 [#]	23.61 ± 1.45 abc	8450 [#]	0.5288 ± 0.1060 abc	8450 [#]	3.87 ± 0.10 ab	8452 [#]	6.94 ± 0.56 abc
8440	17.62 ± 1.90 abc	8419	22.54 ± 3.25 abc	8452 [#]	0.5039 ± 0.2325 abc	8461	3.84 ± 0.14 abc	8444	6.49 ± 1.46 abcd
8452 [#]	17.45 ± 2.34 abc	8451 [#]	22.41 ± 2.86 abc	8419	0.4409 ± 0.1506 abcd	8451 [#]	3.83 ± 0.14 abc	8412 [#]	6.48 ± 1.11 abcd
8453	16.37 ± 1.95 abcd	8408	22.39 ± 1.86 abc	8451 [#]	0.4390 ± 0.1101 abcd	8440	3.79 ± 0.05 abc	8458 [#]	6.41 ± 0.45 abcd
8460 [#]	16.33 ± 2.04 abcd	8411	22.13 ± 2.37 abc	8412 [#]	0.4279 ± 0.1274 abcd	8417	3.77 ± 0.13 abc	8461	6.18 ± 0.33 abcd
8412 [#]	15.66 ± 1.83 bcde	8412 [#]	21.54 ± 2.59 abc	8460 [#]	0.4193 ± 0.1253 abcd	8458 [#]	3.74 ± 0.17 abc	8419	5.94 ± 0.65 bcde
8408	15.65 ± 1.79 bcde	8452 [#]	21.51 ± 3.11 abc	8411	0.4192 ± 0.1086 abcd	8452 [#]	3.73 ± 0.20 abc	8463	5.48 ± 0.50 cde
8411	15.55 ± 1.52 bcde	8460 [#]	21.39 ± 2.13 abc	8440	0.4090 ± 0.0968 abcd	8408	3.68 ± 0.16 abc	8453	5.30 ± 0.63 cde
8401	15.48 ± 0.96 bcde	8440	20.93 ± 2.33 abcd	8408	0.4070 ± 0.0876 abcd	8444	3.52 ± 0.40 abc	8440	5.28 ± 0.53 cde
8451 [#]	15.40 ± 1.60 bcde	8453	20.44 ± 2.47 abcd	8453	0.3877 ± 0.1071 abcd	8453	3.48 ± 0.22 abc	8459 [#]	5.24 ± 0.56 cde
8419	15.08 ± 1.65 bcde	8458 [#]	20.12 ± 1.12 abcd	8458 [#]	0.2647 ± 0.0341 bcd	8412 [#]	3.47 ± 0.33 abc	8460 [#]	5.14 ± 0.54 cde
8444	12.24 ± 3.63 bcde	8404 [#]	19.11 ± 3.10 bcde	8463	0.2474 ± 0.1707 bcd	8460 [#]	3.47 ± 0.20 abc	8417	5.09 ± 0.46 cde
8458 [#]	12.10 ± 1.39 bcde	8463	18.27 ± 5.25 bcde	8401	0.2315 ± 0.0626 bcd	8401	3.44 ± 0.21 abc	8401	4.95 ± 0.97 cde
8463	11.57 ± 4.00 cde	8401	17.50 ± 1.64 bcde	8404 [#]	0.1908 ± 0.0829 cd	8411	3.42 ± 0.23 abc	8411	4.86 ± 0.54 de
8456	11.01 ± 1.98 de	8456	16.62 ± 2.08 cde	8456	0.1687 ± 0.0510 cd	8456	3.28 ± 0.18 bcd	8408	4.76 ± 0.35 de
8404 [#]	10.82 ± 1.78 de	8444	14.25 ± 3.57 de	8444	0.0952 ± 0.0937 d	8404 [#]	3.22 ± 0.37 cd	8456	4.50 ± 0.66 de
8459 [#]	9.80 ± 2.63 e	8459 [#]	12.71 ± 1.65 e	8459 [#]	0.0615 ± 0.0568 d	8459 [#]	2.80 ± 0.33 d	8404 [#]	3.97 ± 0.44 e
平均 Average	14.90 ± 2.55		20.38 ± 3.02		0.3640 ± 0.1622		3.59 ± 0.26		5.73 ± 0.86
F值 F value	2.39**		2.38**		2.09*		2.39**		3.2***
F检验 Fpr	0.005		0.005		0.015		0.005		<0.001

3.2.3 柚木种源/家系 4.5 年生和 30.5 年生的优势木平均生长次序比较分析 为找出柚木种源/家系 4.5 年生和 30.5 年生的生长变化, 对 4.5 年生和 30.5 年生的优势木树高、胸径和单株材积进行聚类分析, 根据聚类结果分为三类 (表 5): 4.5 年生和 30.5 年生柚木种源/家系的生长变化较大, 在 I 类 4.5 年生最好种源/家系中, 仅种源 8461 在 30.5 年生仍然保存最好, 而种源 8456 和 8444 在 30.5 年生时落入最差的 III 类种源/家系中。由此可

见, 4.5 年生的早期选择柚木种源/家系有很大的风险性, 准确率仅 33.33%; 而在 III 类 4.5 年生最差种源/家系中, 种源 8401 和家系 8459[#]在 30.5 年生仍然是 III 类最差的种源/家系。

3.3 柚木种源/家系生长、形质性状、采种地的地理位置和气候条件相关性分析

对柚木种源/家系生长、形质性状、保存率、采种地地理位置和气候条件进行相关分析, 结果 (表 6) 表明: 4.5 年生的生长性状和保存率与

表 5 柚木种源/家系 4.5 年生和 30.5 年生的生长性状聚类分析

Table 5 Cluster analysis for growth characters of teak provenances and families of 4.5-year-old and 30.5-year-old

年龄 Age/a	I 类(最好) I Type (Best)	II 类(中等) II Type (medium)	III 类(最差) III Type (worst)
4.5	8461, 8456, 8444	8543, 8417, 8463, 8450 [#] , 8404 [#] , 8452 [#] , 8451 [#] , 8458 [#] , 8411, 8408	8412 [#] , 8440, 8419, 8460 [#] , 8459 [#] , 8401
30.5	8417, 8461, 8450 [#]	8452 [#] , 8440, 8453, 8460 [#] , 8412 [#] , 8451 [#] , 8419, 8411, 8408	8459 [#] , 8456, 8444, 8458 [#] , 8463, 8404 [#] , 8401

30.5年生的相关性均不显著,即年份间相关性不显著,但4.5年生和30.5年生内的各生长性状间和各生长性状与保存率间呈显著或极显著正相关;30.5年生的干形与生长性状呈极显著正相关,说明对生长性状的选择也促进了通直的干形选择;4.5年生的生长性状和保存率与采种地的地理位置

和气候条件的关系不显著,但30.5年生的生长性状和干形与采种地的纬度呈极显著正相关,与采种地的年平均温度呈显著或极显著负相关;30.5年生优势木单株材积和干形与采种地的年降水量呈显著正相关。

表6 柚木种源/家系生长、保存率、形质性状与采种地地理位置和气候条件相关分析

Table 6 Correlation coefficients among growths, survival rate, form traits, geographic position and climatic conditions of seed collected of teak provenances and families

年龄 项目 Age/a Item	4.5年生 4.5-year-old							30.5年生 30.5-year-old							LAT	LON	ALT	TEM
	H	DBH	V	H _{dt}	DBH _{dt}	V _{dt}	SR	H _{dt}	DBH _{dt}	V _{dt}	SF	H _{lb}	SR					
H	-																	
DBH	0.88**	-																
V	0.90**	0.94**	-															
4.5 H _{dt}	0.87**	0.86**	0.87**	-														
DBH _{dt}	0.83**	0.93**	0.86**	0.89**	-													
V _{dt}	0.85**	0.90**	0.93**	0.93**	0.94**	-												
SR	0.58**	0.57*	0.59**	0.72**	0.58**	0.58**	-											
30.5 H _{dt}	-0.04	-0.08	-0.06	-0.05	-0.06	-0.10	0.15	-										
DBH _{dt}	0.06	-0.04	0.00	0.09	-0.03	-0.03	0.25	0.81**	-									
V _{dt}	0.05	0.00	0.02	0.05	0.00	-0.01	0.17	0.90**	0.95**	-								
SF	0.22	0.10	0.22	0.21	0.02	0.15	0.11	0.57**	0.68**	0.64**	-							
H _{lb}	-0.10	-0.14	0.01	-0.06	-0.16	0.00	-0.22	0.33	0.27	0.33	0.50*	-						
SR	-0.03	-0.03	-0.09	-0.04	-0.05	-0.14	0.21	0.72**	0.72**	0.79**	0.27	0.13	-					
LAT	0.07	-0.11	0.05	0.10	-0.11	0.02	0.25	0.65**	0.60**	0.62**	0.54**	0.32	0.27	-				
LON	0.08	0.16	0.05	-0.07	0.09	0.14	-0.30	-0.38	-0.23	-0.20	-0.01	-0.29	-0.08	-0.59**	-			
ALT	0.03	-0.18	-0.05	0.08	-0.12	-0.03	0.28	0.48*	0.32	0.31	0.23	0.29	0.16	0.64**	-0.88**	-		
TEM	-0.07	0.18	0.03	-0.08	0.16	0.04	-0.29	-0.62**	-0.52*	-0.52*	-0.46*	-0.23	-0.24	-0.94**	0.67**	-0.82**	-	
RAIN	0.06	0.06	0.08	0.15	0.12	0.15	0.11	0.32	0.41	0.45*	0.49*	0.24	0.17	0.50*	-0.18	0.03	-0.35	

注:表中H、DBH、V、SR、H_{dt}、DBH_{dt}、V_{dt}、SF、H_{lb}、LAT、LON、ALT、TEM和RAIN分别代表平均树高、平均胸径、平均单株材积、保存率、优势木平均树高、优势木平均胸径、优势木平均单株材积、优势木干形、优势木无损干材高以及纬度、经度、海拔高、年平均气温和年平均降水量。

Notes: H, DBH, V, SR, H_{dt}, DBH_{dt}, V_{dt}, SF, H_{lb}, LAT, LON, ALT, TEM and RAIN represented respectively mean height, mean diameter at breast height, mean individual volume, survival rate, mean height of dominant tree, mean diameter at breast height of dominant tree, mean individual volume of dominant tree, stem form of dominant tree, height of lossless bole of dominant tree, latitude, longitude, altitude, mean annual temperatures and mean annual rainfall in the table.

3.4 柚木种源/家系多性状综合选择

对30.5年生种源/家系的优势木树高、胸径、单株材积、干形、无损干材高和保存率进行主分量分析,计算出他们的权重分别为0.191、0.196、0.204、0.153、0.093和0.163,以此权重对生长性状、形质性状和保存率进行多性状坐标综合评定,表7表明:按20%的入选率选出了综合评定排名前4位生长和形质性状均好、保存率较高的2个种源8417、8461和2个家系8450[#]、8452[#],其中,

种源8417生长性状评定排名第1,家系8450[#]形质性状评定排名第1。种源8417和8461的30.5年生优势木单株材积分别是对照种源8456的3.91倍和3.62倍、试验林平均的1.81倍和1.68倍;家系8450[#]和8452[#]的30.5年生优势木单株材积分别是对照最优家系8460[#]的1.26倍和1.20倍、试验林平均的1.45倍和1.38倍。在排前10名种源/家系中,家系有5个(占家系的62.5%),且排名靠前。在19个种源/家系中,4个作对照的当地种源/家系

表7 种源/家系生长、形质性状和保存率综合选择

Table 7 The comprehensive selection of growths, quality traits and survival rates for teak provenances and families

种源/家系 Prov./Fam.	生长得分 Growth score	形质得分 Quality trait score	保存率得分 Survival rate score	综合得分 Comprehensive score	生长排序 Growth order	形质排序 Quality trait order	保存率排序 Survival rate order	综合排序 Comprehensive order
8417	0.004	0.129	0.073	0.207	1	11	2	1
8461	0.055	0.080	0.092	0.227	2	4	3	2
8450 [#]	0.124	0.013	0.183	0.320	3	1	8	3
8452 [#]	0.199	0.063	0.165	0.427	4	3	6	4
8460 [#]	0.285	0.157	0.000	0.442	8	14	1	5
8451 [#]	0.275	0.013	0.183	0.471	6	2	8	6
8419	0.279	0.086	0.128	0.493	7	6	4	7
8412 [#]	0.292	0.106	0.128	0.526	10	9	4	8
8408	0.292	0.150	0.165	0.607	11	13	6	9
8440	0.270	0.120	0.220	0.610	5	10	11	10
8453	0.322	0.150	0.202	0.674	12	12	10	11
8411	0.290	0.173	0.220	0.683	9	16	11	12
8458 [#]	0.512	0.082	0.349	0.943	14	5	17	13
8401	0.502	0.167	0.330	0.999	13	15	16	14
8463	0.569	0.096	0.367	1.032	15	7	19	15
8456	0.665	0.200	0.239	1.103	17	17	13	16
8404 [#]	0.610	0.226	0.312	1.148	16	19	14	17
8444	0.729	0.100	0.349	1.178	18	8	17	18
8459 [#]	0.835	0.220	0.312	1.367	19	18	14	19

(种源 8456 及家系 8458[#]、8459[#]和 8460[#])，除家系 8460[#]生长较好且保存率较高外，其余 3 个均较差，尤其 8459[#]家系生长与干形最差，这是否与当时采种该家系的四周柚木单株生长差有关，已无法考证。

4 讨论

4.1 柚木种源/家系适应性

柚木种源/家系的保存率高低一定程度上反映出他们对自然环境的适应能力，是受其本身与种植环境共同调控^[24]，是评价种源/家系对环境适应程度的具体参数，也是稳定性的重要指标^[25]。在海南尖峰岭，影响柚木保存率的主要因素是台风和干旱，人为盗砍柚木较少^[19]。本地区年均台风 2.7 次和 5~6 个月干旱影响了柚木的保存率，也影响了柚木的生长；保存率高低也与种源或家系的遗传或形态特征有很大关系。30.5 年生家系 8460[#]保存率仍达 78.57%，与 4.5 年生的保存率相比，仅下降了 5.8%，其原因在于该家系种子采自早期引种的印度种源 3070 的优树 3070-1，表明印度种源 3070

适应性强，与该地另一个种源试验结果一致^[19]。印度种源 3070 抗风能力强，其风害指数显著低于其它种源^[12]；其叶片厚而小，形态解剖特性如栅状组织厚度和栅状细胞数目也厚于或多于其它种源，这些性状与旱害指标呈极显著负相关；其单位体积内叶肉细胞组织的表面积远大于其它种源^[14]，而植物对水分利用率又与叶肉细胞表面积成正相关^[26]，因而，3070 种源抗旱能力优于其他种源。表 6 表明，4.5 年生和 30.5 年生的保存率与其生长性状极显著正相关，说明保存率高的种源/家系，生长性状好。从表 5 的聚类结果可看出，生长最差的 III 类中，7 个种源/家系的保存率均是最低的（表 2）。

4.2 柚木种源/家系生长与早期选择

树木生长早晚相关为树木早期选择提供了理论依据，为缩短育种周期，对林木早期选择十分必要^[27]。早期选择成为林木选择育种、缩短育种周期的重要手段，其准确性主要取决于树木的遗传特性，但与环境条件也有很大关系。不同树种早期选择年龄不一，即使同一树种，研究早晚相关的结果不一，这可能与研究试材的遗传性有关。王章荣

等^[28]对马尾松天然林和人工林早晚相关研究,认为早期选择最佳年龄分别为10年和9年;张含国等^[29]对30年生长白落叶松解析木的研究认为,早期选择最佳年龄为10年;刘有利等^[30]研究白桦天然林认为,15年生的胸径可预测40年生的材积生长。梁一池^[31]对30年生轮伐期的杉木研究认为,直径早期选择的最佳年龄为8年;郑仁华^[32]研究38年生采伐的杉木则与15年生优树选择的早晚相关极显著;而余荣卓^[33]对杉木种子园子代的长期观测,7年生决选的家系在终选(25年生)时全部终选,家系数中选率达到91.7%,早期选择效果显著。伍汉斌等^[34]对江西大岗山杉木种源试验林研究5年生、10年生与31年生早晚期选择风险,通过聚类分析与31年生最优种源比较,5年生和10年生的选对率分别为18.18%和33.33%。尽管本试验4.5年生的生长性状与30.5年生的生长性状基本上没有相关,但4.5年生早期选择的选对率达33.33%。因4.5年生至30.5年生之间的年份没有观测数据,所以,无法确定柚木种源/家系早期选择最适年龄,但4.5年生后随着年龄增加,早期选择的选对率相应增加,无疑选择风险比4.5年生时低。从柚木国际地理种源试验结果也说明这一点,中美洲2个种源试验的7年生与17年生的胸高断面面积相关系数达到显著性的0.77和0.67,而巴西1个种源试验9年生与17年生的胸高断面面积相关系数高达0.93^[7]。由此可以推断,为提高柚木种源早期选择的选对率,预测30年生左右的柚木种源试验结果,建议10年生后进行早期选择可能更稳妥。

4.3 柚木种源/家系生长与采种地相关性

本试验除4个种源/家系来自试验点当地的外,其余的均是试验点以北的种源/家系,相关分析表明,30.5年生种源/家系生长性状与纬度呈极显著正相关。本试验结果与该地另一个国家地理种源试验得出的结论刚好相反,即后者的种源生长性状与种源纬度呈极显著负相关,低纬度的种源更适宜在海南尖峰岭的生长^[19];因后者引进的国外种源均位于试验点以南,也即2个试验结果均表明远离试验点的种源/家系更适合海南尖峰岭的生长,也印证了最适种源并不一定满足“就近原则”^[35-36]。本试验30.5年生选出的2个优良国内次生种源和2个优良家系的生长优于早期引种在尖峰岭的对照次生种源/家系的生长,它们的优势木单株材积分别比对照种源8456和对照最优家系8460[#]的提高

261.65%~291.29%和20.18%~26.11%。从选出的4个种源/家系看,适宜海南尖峰岭生长的国内次生种源位于广州龙洞广东省林科院、云南芒市市政府和云南畹町林场,但广东省林科院现存柚木不足30株,每年开花结实株数不足50%,种子量有限,尤其是优株可选择余地较少,四旁种植的云南芒市种源也是如此;而云南畹町林场仍保存有106.7 hm²的柚木人工林(2007年该片人工林以柚木采种基地种子被认定为云南林木良种),作为种源/家系采种选择余地较大,进一步的家系选择效应更大,可获得更高的遗传增益。

5 结论

(1)在台风频繁的海南尖峰岭地区,柚木种源/家系试验早期幼林保存率较高,种源/家系间差异不显著,造林后4.5年生试验林平均保存率达80.3%;30.5年生种源/家系间保存率差异达极显著,来自印度的次生种源家系保存率最高,达78.57%。

(2)种源/家系生长性状与采种地的纬度呈极显著正相关,广州龙洞种源、云南芒市种源和云南畹町家系是最适宜海南柚木生长的次生种源/家系,尤其是对云南畹町林场家系进一步的选择,选择余地大,可获得增益更大。

(3)通过30.5年生种源/家系的生长、形质性状和适应性的综合选择,选出了4个优良种源/家系(8417、8461、8450[#]和8452[#]),优良种源和优良家系的优势木单株材积分别比作为对照的当地种源和当地最优家系提高了261.65%~291.29%和20.18%~26.11%,种源选择效果显著。

参考文献:

- [1] 沈熙环. 林木育种学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [2] Mathauda G S. The all India seed origin sample plots[J]. *Indian Forester*, 1954, 80(1): 10-23.
- [3] Katwal R P S. Teak in India: Status, Prospects and Perspectives[C]//Bhat K M, Nair K K, Bhat K V, et al. Quality timber products of Teak from sustainable forest management. Proceedings of the International Conference on Quality timber products of Teak from sustainable forest management. Peechi, India, 2-5 December, 2003: 1-18.
- [4] Suhaendi H. Teak improvement in Indonesia[C]//Kashio M, White K. Teak for the future. Proceedings of the second regional seminar on teak. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 1998: 179-188.

- [5] Graudal L, Kjær E D, Suangtho V, *et al.* Conservation of forest genetic resources of teak (*Tectona grandis* L. f.) in Thailand[R]. Technical Note No 52. Danida Forest Seed Centre, Humlebæk and Royal Forest Department, Bangkok, 1999.
- [6] Keiding H, Wellendorf H, Lauridsen E B. Evaluation of an International Series of Teak Provenance Trials[R]. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 1986.
- [7] Erik D K, Emlmer B L, Hubert W. Second Evaluation of an International Series of Teak Provenance Trials[R]. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark, 1995.
- [8] 邝炳朝. 我国柚木栽培的回顾和展望[C]. 中国林业科学研究院热带林业研究所建所三十周年纪念文集. 广州: 1992: 69-72.
- [9] 潘志刚, 游应天. 中国主要外引树种引种栽培[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1994.
- [10] 梁坤南, 周再知, 马华明, 等. 我国珍贵树种柚木人工林发展现状、对策与展望[J]. 福建林业科技, 2011, 38(4): 173-178.
- [11] 白嘉雨, 聂淑兰. 柚木子代鉴定的研究[J]. 热带林业科技, 1980, 8(2): 34-40.
- [12] 邝炳朝. 柚木地理种源抗风试验及抗风选择育种[J]. 热带林业科技, 1980, 8(2): 1-8.
- [13] 邝炳朝, 郑淑珍. 抗锈病3070、3072号柚木种源的选择[J]. 林业科学研究, 1992, 5(3): 290-297.
- [14] 郑淑珍, 邝炳朝. 柚木种源抗旱性形态及解剖的研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(2): 124-131.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李运兴, 吕广阳. 柚木家系试验[J]. 广西林业科学, 2001, 30(1): 50-52.
- [18] 刘 莲, 张荣贵. 柚木优良种源、家系选择的经济效益评价[J]. 林业调查规划, 2008, 33(4): 36-41.
- [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, 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.
- [21] 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.
- [22] Payne R W, Lane P W, Ainsley A E, *et al.* The Genstat 5- Reference manual[M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [23] 顾万春. 林业试验设计[M]. 杭州: 浙江省林业出版社, 1986.
- [24] 何 霞, 吕子豪, 廖柏勇, 等. 苦楝不同种源在广东生长适应性表现及早期选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3): 44-50.
- [25] 刘 宇, 徐焕文, 尚福强, 等. 3个地点白桦种源试验生长稳定性分析[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 50-57.
- [26] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性-II. 植物对干旱的反应和适应性[J]. 植物生理学通讯, 1983(4): 1-7.
- [27] 杨秀艳, 季孔庶. 林木育种中的早期选择[J]. 世界林业研究, 2004, 17(2): 6-8.
- [28] 王章荣, 陈天华, 周志春, 等. 福建建安马尾松生长早晚期相关及早期选择[J]. 南京林业大学学报, 1987, 11(3): 41-47.
- [29] 张含国, 李希才, 袁桂华, 等. 长白落叶松生长和材质性状早期相关及早期选择[J]. 东北林业大学学报, 1996, 24(5): 12-18.
- [30] 刘有利, 陈晓波, 宁禄凤, 等. 白桦生长变异与早期选择技术研究[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2014, 15(3): 394-397.
- [31] 梁一池. 杉木幼熟林生长性状相关及早期选择的研究[J]. 林业科技通讯, 1984(2): 1-3.
- [32] 郑仁华. 38年生杉木生长性状早晚相关的研究[J]. 福建林业科技, 1996, 23(增): 42-46.
- [33] 余荣卓. 杉木种子园子代长期测定结果与早晚期选择相关性分析[J]. 福建林学院学报, 1998, 18(4): 362-365.
- [34] 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.
- [35] Mátyás C, Božic G, Gömöry D, *et al.* Transfer analysis of provenances reveals macroclimatic adaptedness of European Beech(*Fagus sylvatica* L.)[J]. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, 2009, 5: 47-62.
- [36] Kóczán-Horváth A. Beech adaptation to climate change according to provenance trials in Europe[M]. Sopron: University of west Hungary faculty of forestry, 2016.

Comprehensive Selection with Multi-characters for Secondary Provenance/Family of *Tectona grandis* in Southwest Hainan

LIANG Kun-nan, HUANG Gui-hua, LIN Ming-ping, YANG Guang, WANG Xi-yang, ZHOU Zai-zhi

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tropical Forestry Research, National Forestry and Grassland Administration, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Comprehensive evaluation on growth traits, quality traits and adaptability of domestic secondary provenance/family introduced previously was conducted to select superior provenance/family most suited to local growth. [Method] Designed by completely randomized blocks with 4 tree-plot and 8 replicates, 19 secondary provenances/families of domestic teak species were analyzed by variance and correlation in survival rate, growth traits and quality traits of 4.5-year-old and 30.5-year-old trees to select superior secondary provenances/families according to clustering method and coordinate composite evaluation with multi-characters. [Result] There were significant or highly significant differences among provenances/families in survival rate, growth traits and quality traits of 4.5-year-old and 30.5-year-old trees except survival rate of 4.5-year-old trees. No significant correlation was found between 4.5-year-old trees and 30.5-year-old trees in all traits, however, there were significant or highly significant positive correlation among growth traits, between growth traits and survival rate, and between growths and stem form of among same aged trees. The growth traits and stem form were highly significant positive correlated with latitude of seed source and significant or high significant negative correlated with annual average temperature. Two secondary provenances and two secondary families were selected by cluster analysis and coordinate composite evaluation method, of which the individual volume of dominant tree of 30.5-year-old trees was higher than that of local provenance and local superior family increased by 261.65%-291.29% and 20.18%-26.11% respectively. Superior provenances had very remarkable effect on selection. [Conclusion] One provenance from Guangdong, one provenance from Yunnan and two families from Yunnan are identified as the teak provenances/family most suitable to be planted in southwest Hainan Province, and a further selection to the family from Yunnan will achieve greater gains.

Keywords: *Tectona grandis*; secondary provenance/family; comprehensive selection

(责任编辑: 徐玉秀)