网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.006

海南14年生柚木无性系生长和形质性状的综合评价

焦润洁[1,2],王先棒[1],梁坤南[1],周文龙[1],周再知[1],韩强[1],陈飞飞[3],何汶椿[1],秦雅琪[1],黄桂华[1]

(1 中国林业科学研究院 热带林业研究所,广东 广州 510520;2 南京林业大学 风景园林学院,江苏 南京 210037;
3 海南省林业科学研究院,海南 海口 751100)

[摘 要] 【目的】对海南柚木无性系进行生长和形质性状评价,从中筛选出优良无性系,为柚木良种的繁育与推广提供参考。【方法】以海南定安14年生25个柚木无性系测定林为研究对象,测定保存率、生长性状(树高、胸径、单株材积)和形质性状(主干材高、干材位置、通直度、分枝模式、主干分枝),进行方差分析、遗传参数估算和相关性分析,基于主成分分析开展柚木无性系综合评价。【结果】参试25个柚木无性系间生长性状和形质性状具有明显差异,保存率为47.22%~97.22%,树高为8.54~12.46 m,胸径为10.67~17.47 cm,单株材积为0.05~0.17 m^3,主干材高为3.94~7.85 m。各性状表型变异系数为18.00%~52.89%,重复力为0.46~0.94。生长性状间、生长性状与形质性状、形质性状间具有不同程度的遗传与表型相关性。基于主成分分析,以15%的入选率,多性状综合评分筛选出4个优良无性系,分别为7514、7219、3078-5和7122。入选无性系单株材积遗传增益平均为42.24%,胸径遗传增益平均为15.43%,树高遗传增益平均为8.98%。【结论】柚木无性系间生长性状和形质性状存在丰富的遗传变异,筛选出了4个兼具生长和干形较优良的无性系,在海南定安地区具有良好的适应性,可在海南地区推广应用。

[关键词] 柚木无性系;生长性状;形质性状;多性状选育

[中图分类号] S792.99 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0049-09

Comprehensive evaluation of growth and morphological traits of 14-year-old *Tectona grandis* clones in Hainan

JIAO Runjie[1,2], WANG Xianbang[1], LIANG Kunnan[1], ZHOU Wenlong[1], ZHOU Zaizhi[1], HAN Qiang[1], CHEN Feifei[3], HE Wenchun[1], QIN Yaqi[1], HUANG Guihua[1]

(1 *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong* 510520, *China*;
2 *College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*;
3 *Hainan Academy of Forestry, Haikou, Hainan* 751100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to evaluate the growth and morphological traits of teak (*Tectona grandis*) clones in Hainan and to select superior clones, to provide a reference for the breeding and promotion of improved teak varieties. 【Method】 This study was conducted on a clonal test plantation of 14-year-old teak (*Tectona grandis*) in Ding'an, Hainan, comprising 25 clones. The survival rate, growth traits (height, DBH, volume) and morphological traits (clear bole height, bole position, straightness, mode of branching, and main stem branching) were measured, followed by analysis of variance, estimation of genetic parameters, and correla-

[收稿日期] 2025-09-08 [修回日期] 2025-10-26
[基金项目] "十四五"国家重点研发计划项目(2024YFD2200102)
[作者简介] 焦润洁(2000—),女,河南安阳人,在读硕士,主要从事柚木育种研究。E-mail:13937238954@163.com
[通信作者] 黄桂华(1979—),男,江西宜春人,研究员,主要从事热带珍贵树种遗传改良研究。E-mail:hghmhx@163.com

tion analysis. A comprehensive evaluation of the teak clones was performed based on principal component analysis.【Result】Significant differences were observed in growth and morphological traits among the 25 teak-clones tested. The survival rate ranged from 47.22% to 97.22%, tree heights from 8.54－12.46 m, diameter at breast heights from 10.67－17.47 cm, timber volume from 0.05－0.17 m^3, and clear bole heights from 3.94－7.85 m. The phenotypic coefficient of variation (PCV) of the traits ranged from 18.00% to 52.89%, and the repeatability ranged from 0.46 to 0.94. Genetic and phenotypic correlations of varying degrees were found among growth traits, between growth traits and morphological traits, and among morphological traits. Based on principal component analysis and a threshold rate of 15%, four superior clones 7514, 7219, 3078-5, and 7122 were identified through multi-trait comprehensive evaluation. The selected clones showed an average genetic gain of 42.24% for volume, 15.43% for DBH, and 8.98% for height.【Conclusion】Substantial genetic variation was observed in growth and morphological traits among the teak (*Tectona grandis*) clones. Four clones with superior growth performance and stem form were selected, showing good adaptability in the Ding'an region of Hainan, and were suitable for promotion and application in Hainan.

Key words: teak clones; growth traits; morphological traits; multi-trait breeding

无性系选育作为现代良种选育的主要方式,在提升人工林遗传质量和经营效率方面具有显著优势。早期的无性系选育主要侧重树高、胸径和单株材积等生长性状,而对主干材高、通直度等与木材品质和生态适应性密切相关的性状关注不足[1]。随着木材加工业的转型升级以及生态林体系建设的推进,单一性状已难以全面评估和反映无性系的综合育种价值。林木育种逐步由以单一经济性状为目标的选育模式,向兼顾高生长性和优良干形结构的多性状协同改良方向发展[2]。无性系的系统性评价和综合选择,对于构建优质高产的良种体系,提升人工林育种效率与质量,具有重要的理论意义与实践价值[1]。目前已对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、白皮松(*Pinus*)和西南桦(*Betula alnoides*)[3-6]等开展了无性系多性状综合评价与优选研究,筛选出一批优良无性系,显著提升了人工林的产量和质量。

柚木(*Tectona grandis* L. f.)属落叶半落叶高大乔木,材质优异,被广泛应用于造船、建筑、雕刻及高档家具制造领域,是世界著名的珍贵用材树种[7-8]。我国自2000年以来已开展了3批次柚木无性系区域试验。黄桂华等[9]对云南景谷柚木23个无性系生长数据进行分析评价,从中筛选出7029、7531、Z408和8301 4个优良无性系。潘栋康等[10]对广西凭祥柚木19个无性系开展综合评价,筛选出3个兼具速生性与良好分枝特性的无性系。然而始终缺乏柚木多无性系、多指标、长林龄综合选择与评价。本研究基于定植于海南省定安县的14年生25个柚木无性系,开展生长性状和形质性状综合评价研究,旨在筛选出多性状优良的柚木无性系,为柚木良种的繁育与推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省定安县海南省林业科学研究院龙州基地(110°15′17″ E,19°38′29″ N),属热带海洋性季风气候,年平均气温24 ℃,年平均降水量2 000 mm。试验地地势平坦,土壤为褐色砖红壤,pH值5.3。

1.2 试验设计

参试无性系25个,采用6株行式小区,随机完全区组排列,6次重复。穴规格60 cm×60 cm×40 cm,穴施基肥1.0 kg钙镁磷肥+1.0 kg石灰。株行距2.5 m ×4 m,2010年7月造林。

1.3 测定指标与方法

于2024年10月对柚木无性系林各指标进行测定。

1.3.1 生长性状 每木检尺,测量树高(H)、胸径(DBH)和主干材高(clear bole height, CBH)。采用测高杆测量树高和主干材高,精度为0.1 m;采用胸径尺测量胸径,精度0.1 cm。保存率(survival rate)计算公式为:保存率$=N/6\times100\%$,其中N为每小区调查存活总数。

单株材积(V)计算公式为:$V=0.478\ 7\times DBH^2\times H$。

1.3.2 形质性状 树干通直度、干材位置、分枝模式与主干分枝采用分级评价法[11-12],具体指标及得分评估标准如下。

（1）通直度（straightness，STR）。根据树干主轴在树高方向的直立程度，通直度分为 5 个等级：树干从基部有大分叉或有 2 段以上明显弯曲，得 1 分；树干有两段以上稍弯曲，得 2 分；树干有 1～2 段稍弯曲，得 3 分；树干无明显弯曲，得 4 分；树干通直，无弯曲，得 5 分。

（2）干材位置（bole position，BP）。从下到上将树的总高度分为 4 个相等的部分，然后据此判断干材位置，可分为 4 个等级：干材位置在树的第 1 个 1/4 处，得 1 分；干材位置在树的第 2 个 1/4 处，得 2 分；干材位置在树的第 3 个 1/4 处，得 3 分；干材位置在树的第 4 个 1/4 处，得 4 分。

（3）分枝模式（mode of branching，MB）。根据树木分枝的特征，将分枝模式分为 5 个等级：树干从下半部分开始分枝，得 1 分；树干从上半部分开始分枝，得 2 分；树干无大分枝且侧枝扩散不规则，得 3 分；树干无大分枝且侧枝扩散较规则，得 4 分；树干无大分枝且侧枝扩散规则，得 5 分。

（4）主干分枝（main stem branching，MSB）。根据主干上小枝的数量和分布情况，将主干分枝分为 4 个等级：主干小枝极密，均匀分布于整个树干，得 1 分；主干小枝较多，约 50% 的部位有分布，得 2 分；主干小枝较少，约 25% 的部位有分布，得 3 分；主干几乎无小枝，得 4 分。

为了减少偏见，以上指标的定性分数均由同一位评估者进行评分并记录。

1.4　数据统计与分析

利用 Excel 软件整理数据，用 SPSS 22 软件进行方差分析和邓肯多重比较。采用 R 语言 sommer 包拟合多性状混合线性模型[13-14]，计算遗传相关系数。方差分析线性模型、表型变异系数、重复力、遗传相关系数、表型相关系数和遗传增益等参数的计算参照文献[15-16]进行。

2　结果与分析

2.1　柚木无性系各性状遗传变异分析

保存率大小反映无性系对环境的适应性水平。表 1 表明，不同柚木无性系间保存率差异明显。参试的 25 个无性系的平均保存率为 80.77%，其中 15 个无性系保存率超过平均值。无性系 8301 和 7549 表现优良，保存率分别高达 97.22% 和 94.44%；而无性系 J730 的保存率最低，仅为 47.22%。

表 1 表明，不同柚木无性系间的树高、胸径和单株材积差异较大。25 个柚木无性系的树高为 8.54～12.46 m，平均树高为 10.85 m，其中无性系 7514 和 7509 树高较大，分别达 12.46 和 12.43 m，较平均值分别增加了 14.84% 和 14.56%；而无性系 7112 的树高最低（8.54 m），较平均值降低了 21.29%。25 个柚木无性系的胸径为 10.67～17.47 cm，平均胸径为 14.02 cm，其中无性系 7122 和 7559 胸径较高，分别达 17.47 和 16.24 cm，较平均值提高了 24.60% 和 15.83%；无性系 7531 的胸径最低（10.67 cm），较平均值降低了 26.03%。25 个柚木无性系的单株材积为 0.05～0.17 m^3，平均单株材积为 0.11 m^3，其中无性系 7122、7514 和 7029 的单株材积较高，分别为 0.17，0.16 和 0.16 m^3，较平均值提高了 45.5%～54.5%；无性系 7531 和 7112 的单株材积均较低（均为 0.05 m^3），均较平均值降低了 54.5%。25 个柚木无性系的主干材高为 3.94～7.85 m，平均主干材高为 5.70 m，其中无性系 7514 和 7219 主干材高较大，分别达 7.85 和 7.30 m，较平均值分别增加了 37.72% 和 28.07%；而无性系 7112 的主干材高最低（3.94 m），较平均值降低了 30.88%。

表 1　不同柚木无性系生长性状比较

Table 1　Comparison of growth traits among different teak clones

无性系 Clones	保存率/% Survival rate	树高/m Height	胸径/cm Diameter at breast height	单株材积/m^3 Volume	主干材高/m Clear bole height
7013	88.89±5.56 abc	9.79±0.33 i	14.66±0.47 bcd	0.11±0.01 ef	4.72±0.35 fghi
7029	86.11±5.12 abc	12.38±0.26 ab	16.11±0.46 ab	0.16±0.01 ab	6.43±0.37 bcde
71-5	63.89±10.02 bcd	10.19±0.46 efghi	13.02±0.56 efgh	0.09±0.01 fgh	5.78±0.46 cdefgh
7112	72.22±3.51 abcd	8.54±0.31 j	10.77±0.49 j	0.05±0.01 i	3.94±0.24 i
7114	91.67±3.73 ab	11.25±0.37 bcdef	15.50±0.47 bc	0.14±0.01 bcd	5.53±0.43 cdefgh
7122	83.33±13.61 abc	11.55±0.27 abcd	17.47±0.45 a	0.17±0.01 a	6.59±0.46 abcde
7138	75.00±10.32 abc	10.73±0.29 cdefghi	12.86±0.41 efgh	0.09±0.01 fgh	6.17±0.40 bcdef
7146	91.67±3.73 ab	11.48±0.24 abcd	15.12±0.68 bc	0.11±0.01 def	6.87±0.58 abc
7210	77.78±11.11 abc	11.10±0.18 cdefg	13.52±0.53 def	0.09±0.01 fg	5.29±0.38 defghi
7219	75.00±15.96 abc	11.84±0.41 abc	15.71±0.51 b	0.15±0.01 abc	7.30±0.53 ab
3078-5	77.78±3.51 abc	11.32±0.49 abcde	15.20±0.46 bc	0.13±0.01 cde	6.74±0.58 abcd

表1(续) Table 1(continued)

无性系 Clones	保存率/% Survival rate	树高/m Height	胸径/cm Diameter at breast height	单株材积/m^3 Volume	主干材高/m Clear bole height
108	91.67±5.69 ab	11.56±0.33 abcd	14.76±0.52 bcd	0.12±0.01 cde	6.41±0.43 bcde
7412	83.33±8.61 abc	9.86±0.28 hi	11.80±0.29 ghij	0.07±0.00 ghi	4.59±0.24 ghi
7509	86.11±10.90 abc	12.43±0.29 a	15.27±0.25 bc	0.14±0.01 bcd	6.34±0.56 bcde
7514	77.78±5.56 abc	12.46±0.31 a	16.00±0.64 ab	0.16±0.01 ab	7.85±0.48 a
7531	61.11±9.30 cd	8.62±0.45 j	10.67±0.73 j	0.05±0.01 i	4.31±0.46 hi
7544	86.11±6.69 abc	10.96±0.35 cdefgh	15.81±0.32 b	0.14±0.01 bcd	5.98±0.47 bcdefg
7549	94.44±3.51 a	10.05±0.44 ghi	10.70±0.44 j	0.06±0.01 hi	5.26±0.39 defghi
7555	88.89±3.51 abc	10.09±0.35 fghi	11.60±0.26 hij	0.07±0.00 ghi	5.4±0.47 defghi
7559	83.33±4.30 abc	11.51±0.33 abcd	16.24±0.27 ab	0.13±0.00 bcde	5.15±0.30 efghi
8301	97.22±2.78 a	10.51±0.33 defghi	13.16±0.39 efg	0.09±0.01 fg	5.25±0.38 defghi
J731	47.22±9.04 d	10.43±0.52 defghi	11.18±0.59 ij	0.07±0.01 ghi	5.13±0.58 efghi
Z408	88.89±7.03 abc	11.00±0.39 cdefgh	12.43±0.50 fghi	0.09±0.01 fgh	5.08±0.40 efghi
7137	88.89±8.24 abc	9.75±0.38 i	14.07±0.57 cde	0.09±0.01 fgh	4.83±0.32 fghi
7542	63.89±11.72 bcd	11.10±0.39 cdefg	14.98±0.55 bcd	0.13±0.01 cde	5.34±0.53 defghi
平均 Average	80.77±21.68	10.85±0.08	14.02±0.12	0.11±0.00	5.70±0.09

注:同列数据后标不同小写字母表示无性系间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column data indicate significant differences among clones($P<0.05$). The same below.

表2表明,各无性系干材位置、通直度、分枝模式和主干分枝等指标均存在明显差异。25个柚木无性系干材位置得分为2.38~3.07,平均干材位置得分为2.66,其中无性系7514、7146和7219干材位置得分较高,分别为3.07,3.00和3.00,较平均值提高了12.78%~15.41%;无性系7112干材位置得分最低(2.38),较平均值降低了10.53%。25个柚木无性系通直度得分为2.16~3.06,平均通直度得分为2.57,其中无性系7029和3078-5通直度得分较高,分别达3.06和2.97,较平均值分别增加了19.07%和15.56%;而无性系Z408通直度得分最低(2.16),较平均值降低了15.95%。25个柚木无性系分枝模式得分为2.00~2.89,平均分枝模式得分为2.49,其中无性系7219和71-5分枝模式得分较高,分别达2.89和2.83,较平均值分别增加了16.06%和13.65%;而无性系J731分枝模式得分最低(2.00),较平均值降低了19.68%。25个柚木无性系主干分枝得分为2.34~2.93,平均主干分枝得分为2.74,其中无性系7122和3078-5主干分枝得分较高,分别达2.93和2.93,均较平均值增加了6.93%;而无性系7137主干分枝得分最低(2.34),较平均值降低了14.60%。

表2 不同柚木无性系的形质性状比较

Table 2 Comparison of morphological traits among different teak clones

无性系 Clone	干材位置 Bole position	通直度 Straightness	分枝模式 Mode of branching	主干分枝 Main stem branching
7013	2.59±0.13 abcd	2.22±0.12 ij	2.47±0.13 abcdefg	2.66±0.10 abcd
7029	2.53±0.13 abcd	3.06±0.10 a	2.63±0.12 abc	2.72±0.10 abcd
71-5	2.96±0.15 abc	2.83±0.16 abcd	2.83±0.13 a	2.83±0.10 abc
7112	2.38±0.14 d	2.35±0.15 abcdefg	2.58±0.15 abcde	2.69±0.09 abcd
7114	2.48±0.15 bcd	2.61±0.11 bcdefghij	2.70±0.13 abc	2.67±0.09 abcd
7122	2.93±0.15 abcd	2.73±0.11 fghij	2.53±0.11 abcdef	2.93±0.08 a
7138	2.79±0.16 abcd	2.39±0.15 defghij	2.54±0.11 abcdef	2.86±0.11 ab
7146	3.00±0.17 ab	2.41±0.13 cdefghij	2.47±0.12 abcdefg	2.71±0.08 abcd
7210	2.50±0.16 bcd	2.67±0.13 abcdefghi	2.57±0.11 abcdef	2.73±0.08 abcd
7219	3.00±0.19 ab	2.81±0.15 abcde	2.89±0.15 a	2.89±0.08 ab
3078-5	2.93±0.16 abcd	2.97±0.13 ab	2.80±0.16 a	2.93±0.05 a
108	2.73±0.16 abcd	2.70±0.09 abcdefgh	2.64±0.10 abc	2.79±0.08 abcd
7412	2.6±0.15 abcd	2.60±0.11 bcdefghij	2.73±0.12 ab	2.90±0.06 ab
7509	2.61±0.18 abcd	2.66±0.15 abcdefghi	2.66±0.15 abc	2.81±0.07 abc
7514	3.07±0.14 a	2.86±0.10 abc	2.46±0.13 abcdefg	2.89±0.06 ab
7531	2.46±0.19 bcd	2.25±0.18 hij	2.18±0.14 defgh	2.54±0.13 cde
7544	2.74±0.17 abcd	2.74±0.14 abcdef	2.61±0.12 abcd	2.77±0.08 abcd

表 2（续）　Table 2(continued)

无性系 Clone	干材位置 Bole position	通直度 Straightness	分枝模式 Mode of branching	主干分枝 Main stem branching
7549	2.76±0.14 abcd	2.32±0.14 fghij	2.26±0.14 cdefgh	2.76±0.09 abcd
7555	2.56±0.16 abcd	2.47±0.11 cdefghij	2.31±0.12 bcdefgh	2.66±0.09 abcd
7559	2.43±0.13 cd	2.53±0.12 bcdefghij	2.67±0.10 abc	2.80±0.07 abcd
8301	2.49±0.15 bcd	2.57±0.15 bcdefghij	2.31±0.14 bcdefgh	2.71±0.08 abcd
J731	2.44±0.20 cd	2.38±0.20 efghij	2.00±0.18 h	2.50±0.13 de
Z408	2.39±0.15 d	2.16±0.12 j	2.13±0.10 fgh	2.59±0.10 bcde
7137	2.47±0.13 bcd	2.28±0.11 ghij	2.16±0.14 efgh	2.34±0.11 e
7542	2.52±0.20 bcd	2.61±0.15 bcdefghij	2.09±0.17 gh	2.87±0.07 ab
平均 Average	2.66±0.03	2.57±0.03	2.49±0.03	2.74±0.02

2.2　柚木无性系遗传参数分析

表 3 表明，不同柚木无性系在生长性状和形质性状方面表现出显著的遗传多样性。

2.2.1　生长性状变异　由表 3 可以看出，树高、胸径和单株材积生长性状表型变异系数分别为 19.53%，22.79% 和 52.89%；遗传变异系数依次为 9.19%，14.10% 和 32.11%。两个变异系数均呈现单株材积＞胸径＞树高的趋势，表明参试无性系具有丰富的生长性状变异。在遗传稳定性上，树高、胸径和单株材积的重复力均在 0.80 以上，具体为胸径（0.94）＝单株材积（0.94）＞树高（0.88），表明生长性状主要受遗传因素控制，且各无性系内个体生长表现高度一致。方差分析进一步表明，参试的 25 个无性系之间、区组之间以及无性系×区组互作效应对生长性状的影响总体均达到极显著水平（$P<0.001$），其中无性系间的变异贡献率最高，凸显了遗传因素在柚木生长性状调控中的主导作用。

2.2.2　形质性状变异　由表 3 可以看出，参试无性系形质性状表现出丰富的表型变异，各性状的表型变异系数由大到小依次为主干材高（43.46%）＞干材位置（32.46%）＞分枝模式（29.58%）＞通直度（29.00%）＞主干分枝（18.00%），可知主干材高变异幅度最大，而主干分枝相对较低。遗传稳定性分析表明，主干材高的重复力最高；除干材位置外，其余性状的重复力均在 0.50 以上。各形质性状重复力由大到小依次为主干材高（0.78）＞通直度（0.71）＞分枝模式（0.69）＞主干分枝（0.61）＞干材位置（0.46）。方差分析结果表明，参试柚木无性系在形质性状上存在显著或极显著差异。对于通直度、分枝模式和主干分枝 3 个指标而言，各效应的影响程度依次为区组效应＞无性系效应＞无性系×区组互作效应，其中区组效应对这些性状的影响最为突出，表明环境因素在决定这些性状表现中起主导作用。主干材高和干材位置同时受到无性系效应和区组效应的显著或极显著影响。

表 3　不同柚木无性系的遗传参数和方差分析结果

Table 3　Genetic parameter analysis and ANOVA results of different teak clones

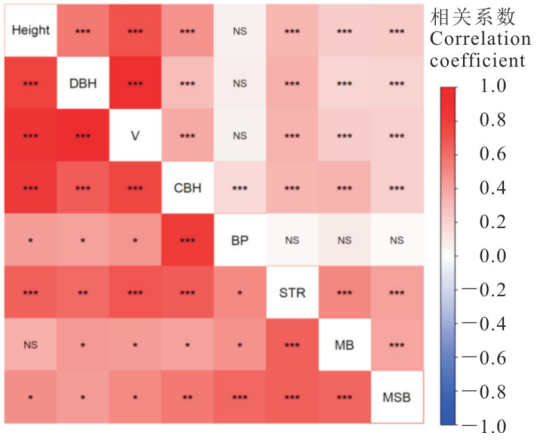
性状 Character	表型变异系数/% PCV	遗传变异系数/% Phenotypic coefficient of variation	重复力 Repeatability	*F*		
				无性系 Clone	区组 Block	无性系×区组 Clone×Block
树高 Height	19.53	9.19	0.88	9.72^{***}	5.38^{***}	1.80^{***}
胸径 Diameter at breast height	22.79	14.10	0.94	18.22^{***}	6.44^{***}	1.77^{***}
单株材积 Volume	52.89	32.11	0.94	17.72^{***}	5.18^{***}	1.80^{***}
主干材高 Clear bole height	43.46	14.80	0.78	4.39^{***}	4.81^{***}	1.24
干材位置 Bole position	32.46	5.28	0.46	1.64^{*}	3.93^{**}	1.10
通直度 Straightness	29.00	8.35	0.71	4.25^{***}	19.27^{***}	1.44^{**}
分枝模式 Mode of branching	29.58	7.97	0.69	3.58^{***}	6.41^{***}	1.59^{***}
主干分枝 Main stem branching	18.00	4.35	0.61	3.55^{***}	13.60^{***}	2.03^{***}

注：*、**、***分别表示在 $P<0.05$，$P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平影响显著。

Note: *, **, and *** indicate significant difference at the $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$ levels, respectively.

2.3　柚木无性系各性状间相关性分析

不同柚木无性系各个性状的相关性分析结果见图 1。



Height、DBH、V、CBH、BP、STR、MB和MSB分别表示树高、胸径、单株材积、主干材高、干材位置、通直度、分枝模式和主干分枝条。左下三角区为遗传相关性,右上三角区为表型相关性。NS表示无显著相关性,*、**、***分别表示在$P<0.05$,$P<0.01$和$P<0.001$水平显著相关。

Height, DBH, V, CBH, BP, STR, MB and MSB represent tree height, diameter at breast height, volume, clear bole height, bole position, straightness, mode of branching and main stem branching, respectively. The lower left triangle represents genetic correlations, and the upper right triangle represents phenotypic correlations. NS indicates no significant correlation, while *, **, and *** indicate significance at the $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$ levels, respectively.

图1 不同柚木无性系各个性状的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis among different traits in teak clones

图1表明,多数性状间在表型和遗传方面均存在显著或极显著相关性,这些性状可能存在共同的遗传基础。在生长性状方面,各指标间表现出较强的相关性,其中树高与胸径在表型水平呈中度正相关($r_p=0.57$),而在遗传水平上相关性较高($r_g=0.78$),表明通过遗传改良提升树高可有效促进胸径增长。单株材积作为综合指标,与树高($r_p=0.71$,$r_g=0.85$)和胸径($r_p=0.90$,$r_g=0.96$)均呈极显著正相关,显示出优异的遗传潜力。表型水平上,树高、胸径和单株材积与除干材位置外的所有形质性状均呈极显著相关。主干材高与其余各形质指标存在显著表型相关性,表明形质性状之间存在协同发育机制,通过选育高主干材高的无性系可同步改良其他形质性状。

2.4 柚木无性系综合评价与筛选

对25个无性系的8个性状(树高、胸径、单株材积、主干材高、干材位置、通直度、分枝模式和主干分枝)进行主成分分析,并计算各主成分得分,结果显示,第一主成分的方差贡献率达65.24%,其主要反映柚木无性系整体生长量,得分较高的无性系如7514和7219在多个生长及形质性状上表现优异。第二主成分方差贡献率为14.01%,主要反映柚木无性系生长与形质性状的平衡特征。前2个主成分的累计方差贡献率为79.18%,以前2个主成分的方差贡献率计算综合得分,结果(表4)显示,在兼顾生长和形质性状的基础上,采用15%作为优良无性系入选率,最终筛选出了4个无性系,分别为7514、7219、3078-5和7122。

表4 基于主成分分析的不同柚木无性系的得分与排序

Table 4 Scores and ranking of different teak clones based on PCA

无性系 Clone	F_1	F_2	综合得分 Score	排序 Ranking	无性系 Clone	F_1	F_2	综合得分 Score	排序 Ranking
7514	3.78	−0.40	2.41	1	7542	0.04	−1.04	−0.12	14
7219	3.45	0.72	2.35	2	7210	−0.31	0.10	−0.19	15
3078-5	2.89	1.15	2.04	3	7412	−1.03	2.15	−0.37	16
7122	3.11	−0.42	1.97	4	8301	−1.11	−0.24	−0.76	17
7029	2.51	−1.27	1.46	5	7013	−1.48	−0.30	−1.01	18
7509	1.82	−0.62	1.10	6	7549	−1.96	1.05	−1.13	19
108	1.46	−0.01	0.95	7	7555	−1.95	0.34	−1.23	20
7544	1.42	−0.13	0.91	8	Z408	−2.43	−1.38	−1.78	21
71-5	0.87	2.19	0.88	9	7112	−3.44	1.54	−2.03	22
7146	1.13	−0.25	0.70	10	J731	−3.02	−1.07	−2.12	23
7559	0.69	−0.75	0.34	11	7137	−2.89	−1.77	−2.13	24
7114	0.58	−0.81	0.26	12	7531	−4.12	0.30	−2.65	25
7138	0.00	0.96	0.14	13					

注:F_1.第一主成分得分;F_2.第二主成分得分。

Note: F_1. Score of the first principal component; F_2. Score of the second principal component.

入选柚木无性系不同性状的遗传增益如表5所示。表5表明,入选的优良无性系在生长性状和形质性状方面整体表现优异,且表现出一定的遗传改良潜力,其中7514在多个性状上具有较高的遗传增

益，特别是在单株材积（49.70%）和主干材高（37.93%）指标上表现突出，在生长与形质性状方面具备较强的育种潜力。

表 5　入选柚木无性系不同性状的遗传增益

Table 5　Genetic gains of different traits in the selected teak clones　　%

无性系 Clones	树高 Height	胸径 Diameter at breast height	单株材积 Volume	主干材高 Clear bole height	干材位置 Bole position	通直度 Straightness	分枝模式 Mode of branching	主干分枝 Main stem branching
7514	15.19	14.75	49.70	37.93	15.68	11.31	−0.96	5.48
7219	9.39	12.66	37.34	28.30	12.99	9.66	16.10	5.33
3078-5	4.63	9.04	21.84	18.38	10.30	15.57	12.53	6.95
7122	6.72	25.29	60.07	15.82	10.48	6.48	1.82	6.95

3　讨　论

本研究发现，柚木不同无性系在保存率、生长性状和形质性状上均存在显著差异和丰富的遗传变异，且多数性状间存在表型和遗传相关性。保存率是衡量林木无性系适应性与稳定性的重要指标[17]。本研究中，海南定安 14 年生 25 个柚木无性系测定林的保存率变幅在 47.22%～97.22%，明显高于梁坤南等[18]对滇西南地区 29 年生柚木种源/家系的保存率。这可能源于两地生态条件、种植密度以及种植材料遗传背景等方面的差异，也反映出基因型与环境条件之间存在的密切互作关系。此外，本研究发现柚木 25 个无性系之间保存率差异明显，说明无性系对环境的适应能力存在较强的遗传分化。因此，在开展无性系试验或推广造林时，应重视保存率的评估，以确保材料在特定环境中的成活率及稳定性。

研究表明，不同树种的无性系群体普遍存在极显著的遗传变异，但变异模式常表现出明显的树种特异性[19]。研究发现，柚木无性系在树高、胸径等性状上具有高遗传力[20]。本研究中，柚木无性系在生长性状（树高、胸径和单株材积）和形质性状（主干通直度和分枝模式）方面均表现出显著的遗传分化，揭示了柚木种质资源丰富的基因型多样性及其巨大的遗传改良潜力，这与前人的研究结果[20]一致。本研究中，无性系 7029、3078-5、7514 和 7122 在多个性状指标上表现优异，其中 7029 的优良特性与黄桂华等[9]对 11 年生柚木无性系的研究结果一致，表明该无性系具有稳定的遗传优势。

遗传变异是选择的基础，只有充分了解林木的遗传变异规律，才能提高林木改良的准确性[21]。本研究发现，柚木单株材积的表型变异系数（52.89%）和重复力（0.94）均最高，这与李运兴等[22]对柚木家系评价研究结论一致，验证了单株材积为林木遗传改良的重点性状。本研究的表型与遗传相关系数分析结果显示，单株材积与树高、胸径等生长性状呈极显著正相关，可综合反映两者的生长特性。单株材积与主干材高和通直度等形质性状的遗传相关性也较高，表明优选形质性状优良的无性系有望同步提升其生长潜力[23-25]。

主成分分析法将不同无性系的性状表现置于统一标准下进行对比分析。本研究筛选出的 4 个优良无性系（7514、7219、3078-5 和 7122）不仅在单个性状上表现突出，且在多性状间发展协调，为柚木无性系在海南的大面积推广利用提供高增益遗传材料支持。优良无性系各性状的遗传增益中，单株材积的遗传增益（21.84%～60.07%）最高，凸显了单株材积在多性状综合选择中的主导地位，反映出其在衡量无性系生长潜力与选育效益方面的重要作用[4,26-27]。本研究仅对海南单一地区柚木进行分析和评价，筛选结果具有一定局限性，尚需要结合多点试验进行全面分析[28]，以完善研究结论。

4　结　论

海南省定安县柚木无性系的生长和形质性状具有丰富的变异，综合评价后从中筛选出 7514、7219、3078-5 和 7122 4 个无性系，其保存率高，在多个目标性状上表现出较大遗传与现实增益，综合表现优异，为海南省柚木良种繁育与推广种植提供了重要的种质材料。

[参考文献]

[1]　康向阳. 我国林木育种与良种应用需重视的问题再思考[J]. 林业科学，2025，61(6)：224-231.
KANG X Y. Rethinking the issues that need to be taken seriously in forest tree breeding，seed production of improved variety and their application in China[J]. Scientia Silvae Sinicae，2025，61(6)：224-231.

[2]　ZHOU X L，ZHANG L，ZHANG M，et al. Genomic selection

for growth and wood properties in multi-generation hybrid populations of *Populus deltoides*[J]. Horticulture Research,2025,12(9):uhaf165.

[3] 赵林峰,高建亮. 杉木无性系不同林龄生长变异与选择效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(1):43-51.
ZHAO L F,GAO J L. Growth variation and selection effect of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2022,50(1):43-51.

[4] 蔡磊,王胤,周家春,等. 桐棉马尾松无性系在贵州南部的生长表现及初步选择[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(9):54-62.
CAI L,WANG Y,ZHOU J C,et al. Growth performance and preliminary selection of *Tongmian Pinus* massoniana clones in southern Guizhou[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(9):54-62.

[5] 祝良,尚旭阳,朱晓梅,等. 北京地区白皮松优良种源与家系的选择[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(9):121-127.
ZHU L,SHANG X Y,ZHU X M,et al. Selection of elite provenances and families of *Pinus bungeana* in Beijing[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2016,44(9):121-127.

[6] 徐明艳,聂艳丽,邓桂香,等. 西南桦优良无性系选育研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2022,42(2):163-167.
XU M Y,NIE Y L,DENG G X,et al. Breeding on superior clones of *Betula alnoides*[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences),2022,42(2):163-167.

[7] YANG B G,JIA H Y,ZHAO Z G,et al. Horizontal and vertical distributions of heartwood for teak plantation[J]. Forests,2020,11(2):225.

[8] 赵威威,周再知,张青青,等. 配比施肥对柚木早期生长及叶片养分含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(1):71-78.
ZHAO W W,ZHOU Z Z,ZHANG Q Q,et al. Effects of proportioning fertilization on early growth and leaf nutrients of teak[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2024,52(1):71-78.

[9] 黄桂华,梁坤南,付强,等. 11年生柚木无性系遗传变异与优良无性系选择[J]. 东北林业大学学报,2023,51(8):18-22,64.
HUANG G H,LIANG K N,FU Q,et al. Genetic variation and superior clone selection of 11-year-old *Tectona grandis* clones[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(8):18-22,64.

[10] 潘栋康,罗蓉霞,杨保国,等. 柚木幼林期生长与分枝性状的无性系变异与选择[J]. 华南农业大学学报,2024,45(4):569-577.
PAN D K,LUO R X,YANG B G,et al. Clonal variation and selection for growth and branch traits in young *Tectona grandis* plantations[J]. Journal of South China Agricultural University,2024,45(4):569-577.

[11] VONGKHAMHO S,IMAYA A,TAKENAKA C,et al. Correlations among tree quality,stand characteristics,and site characteristics in plantation teak in mountainous areas of Lao PDR[J]. Forests,2020,11(7):777.

[12] 姜清彬,孟景祥,李保军,等. 8年生火力楠半同胞家系遗传评价与选育[J]. 林业科学,2025,61(1):104-114.
JIANG Q B,MENG J X,LI B J,et al. Genetic evaluation and selection of 8-year-old semi-sibling family of *Michelia macclurei*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2025,61(1):104-114.

[13] STEJSKAL J,KLÁPŠTĚ J,ČEPL J,et al. Effect of clonal testing on the efficiency of genomic evaluation in forest tree breeding[J]. Scientific Reports,2022,12:3033.

[14] 肖丽娜,魏瑞研,谭芷茵,等. AFEchidna:动植物育种数据遗传评估分析的R程序包[J]. 林业与环境科学,2022,38(5):50-56.
XIAO L N,WEI R Y,TAN Z Y,et al. AFEchidna is a R package for genetic evaluation of plant and animal breeding datasets[J]. Forestry and Environmental Science,2022,38(5):50-56.

[15] TERFA G N,GURMU G N. Genetic variability,heritability and genetic advance in linseed(*Linum usitatissimum* L.) genotypes for seed yield and other agronomic traits[J]. Oil Crop Science,2020,5(3):156-160.

[16] SOLLA A,MORENO G,MALEWSKI T,et al. Phosphite spray for the control of oak decline induced by *Phytophthora* in Europe[J]. Forest Ecology and Management,2021,485:118938.

[17] SINGH A,DHILLON G,DHILLON P S. Survival and growth performance of *Eucalyptus* clones irrigated with effluents from liquor factory[J]. International Journal of Chemical Studies,2020,8(1):2321-2324.

[18] 梁坤南,张荣贵,黄桂华,等. 滇西南29年生柚木种源/家系多性状综合选择[J]. 林业科学研究,2024,37(3):1-12.
LIANG K N,ZHANG R G,HUANG G H,et al. Comprehensive selection of 29-year-old for provenances/families of teak(*Tectona grandis* Linn. f.) in southwestern Yunnan[J]. Forest Research,2024,37(3):1-12.

[19] 韩东花,杨桂娟,肖遥,等. 楸树无性系早期生长变异和优选[J]. 林业科学研究,2019,32(4):96-104.
HAN D H,YANG G J,XIAO Y,et al. Study on early growth variation of *Catalpa bungei* clones and optimization[J]. Forest Research,2019,32(4):96-104.

[20] HIDAYATI F,ISHIGURI F,IIZUKA K,et al. Growth characteristics,stress-wave velocity,and Pilodyn penetration of 15 clones of 12-year-old *Tectona grandis* trees planted at two different sites in Indonesia[J]. Journal of Wood Science,2013,59(3):249-254.

[21] OLUWAJUWON T V,ATTAFUAH R,OFFIAH C J,et al. Genetic variation in tropical tree species and plantations:a review[J]. Open Journal of Forestry,2022,12(3):350-366.

[22] 李运兴,梁坤南,黄桂华,等. 13个柚木种源/家系生长表现研究[J]. 林业科学研究,2024,37(1):1-9.

LI Y X, LIANG K N, HUANG G H, et al. Growth performance of 13 provenances/families of *Tectona grandis*[J]. Forest Research, 2024, 37(1): 1-9.

[23] 申琳琳，胡冰，裘珍飞，等. 黑木相思无性系多性状综合评价及选择[J]. 林业科学研究，2024，37(6)：73-85.
SHEN L L, HU B, QIU Z F, et al. Comprehensive evaluation and selection of multiple characters of *Acacia melanoleuca* clones[J]. Forest Research, 2024, 37(6): 73-85.

[24] 杨铠玮，周莹莹，杜姣，等. 不同辣椒自交系抗疫病能力鉴定与植株功能性状关联分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2026，54(1)：1-8，35.
YANG K W, ZHOU Y Y, DU J, et al. Identification of phytophthora blight resistance of different pepper inbred lines and correlation analysis of plant functional traits[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2026, 54(1): 1-8, 35.

[25] 褚明月，王皓，刘大丽，等. 甜菜农艺性状与产量和产糖量的相关性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(8)：55-65.
CHU M Y, WANG H, LIU D L, et al. Study on the correlation between agronomic characters and yield and sugar yield of sugarbeet[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2025, 53(8): 55-65.

[26] GAO C J, LI Z M, LI J, et al. High genetic gains in wood volume and fecundity can be both achieved by direct selection in half-sib families of *Pinus yunnanensis* Franch[J]. Annals of Forest Science, 2024, 81(1): 51.

[27] DUARTE D, DUTOUR J, JURCIC E J, et al. Genomic selection comes to life: unraveling its potential in an advanced four-generation *Eucalyptus grandis* population[J]. Agrociencia Uruguay, 2023, 27(NE2): e1250.

[28] 陈守一，王红林，罗昌国，等. 贵州晚熟李表型性状分析及优良种质筛选[J]. 经济林研究，2022，40(2)：100-111.
CHEN S Y, WANG H L, LUO C G, et al. Analysis of phenotypic characters and selection of excellent germplasm of late maturity plum in Guizhou[J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(2): 100-111.

（责任编辑：李小平）

（上接第 30 页）

[28] JIMÉNEZ-MARTÍNEZ M, STAMATAKIS K, FRESNO M. The dual-specificity phosphatase 10 (DUSP10): its role in cancer, inflammation, and immunity[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(7): 1574.

[29] TANG X, CAO C, LIANG Y, et al. Adipose-derived stem cell exosomes antagonize the inhibitory effect of dihydrotestosterone on hair follicle growth by activating Wnt/β-catenin pathway[J]. Stem Cells International, 2023, 2023: 5548112.

[30] FU Y, HAN Y T, XIE J L, et al. Mesenchymal stem cell exosomes enhance the development of hair follicle to ameliorate androgenetic alopecia[J]. World Journal of Stem Cells, 2025, 17(3): 102088.

[31] WEN L, FAN Z, HUANG W, et al. Retinoic acid drives hair follicle stem cell activation via Wnt/β-catenin signalling in androgenetic alopecia[J]. Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology, 2025, 39(1): 189-201.

[32] ZHAO B, LI J, ZHANG X, et al. Exosomal miRNA-181a-5p from the cells of the hair follicle dermal papilla promotes the hair follicle growth and development via the Wnt/β-catenin signaling pathway[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 207: 110-120.

[33] RUBIO K, MOLINA-HERRERA A, PÉREZ-GONZÁLEZ A, et al. EP300 as a molecular integrator of fibrotic transcriptional programs[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(15): 12155.

[34] NIKAPITIYA C, WASANA W P, JAYATHILAKA E, et al. Plasma-derived exosomes of Edwardsiella piscicida challenged olive flounder (*Paralichthys olivaceus*): characterization and miRNA profiling for potential biomarkers screening[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2025, 156: 110034.

（责任编辑：马秋明）