

柚木种源/家系种子表型变异及其与环境因子的相关性

李昆亮^{1,2}, 黄桂华², 宋希强¹, 梁坤南², 王先棒², 潘栋康², 周文龙², 韩 强^{2*}

1. 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室/海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520

摘 要: 通过研究柚木 (*Tectona grandis* L. F.) 不同种源、家系种子的表型性状, 揭示柚木种子遗传变异规律及其对环境因子变化的响应机制, 促进柚木种质资源保护和遗传改良。以广东、广西、海南和云南 4 个省(区) 13 个种源 81 个柚木家系种子为材料, 测定种子长度、宽度、长宽比、长宽积和百粒重 5 个性状。结果显示: (1) 柚木种子的 5 个表型性状在种源及家系间均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 不同家系各性状变异系数为 10.27%~23.88%, 不同种源各性状变异系数为 4.21%~20.32%。(2) 各表型性状间呈极显著相关关系, 不同环境因子对种子性状的影响程度不同, 经纬度、海拔、年降水量是影响柚木种子性状的主要因子, 其次是年均温, 年均相对湿度的影响相对较小。不同的种子性状对环境因子变化的响应也不相同, 种长、种宽和长宽积对年降水量的响应最为敏感, 而长宽比和百粒重则对纬度的响应最为敏感。(3) 聚类分析将 13 个种源分为 3 类。柚木种子在种源和家系间均存在丰富的表型变异, 种子性状受母本遗传和地理气候因子等多因素影响。研究结果为柚木多样性种质资源保护和利用提供理论基础和科学依据。

关键词: 柚木; 种子; 表型变异; 环境因子; 相关性

中图分类号: S722.5 文献标志码: A

Phenotypic Variation of *Tectona grandis* Provenances/Families Seeds and the Correlation with Environmental Factors.

LI Kunliang^{1,2}, HUANG Guihua², SONG Xiqiang¹, LIANG Kunnan², WANG Xianbang², PAN Dongkang², ZHOU Wenlong², HAN Qiang^{2*}

1. Key Laboratory of Biology of Flower Resources of Hainan Province / College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China

Abstract: Through the examination of the phenotypic traits of teak (*Tectona grandis* L. F.) seeds from diverse provenances and pedigrees, this study elucidated the genetic variability patterns of teak seeds and the mechanisms of response to environmental factor fluctuations, thereby fostering the conservation and genetic improvement of teak germplasm resources. Using seeds from 81 teak pedigrees representing 13 provenances across four provinces (Guangdong, Guangxi, Hainan, and Yunnan) as the experimental material, five traits, namely seed length, width, length-width ratio, length-width product, and hundred-seed weight, were quantified. Significant differences ($P < 0.01$) existed among the five phenotypic traits of teak seeds across provenances and pedigrees, with trait variation coefficients ranging from 10.27% to 23.88% among different pedigrees and from 4.21% to 20.32% among different provenances. Substantial correlations prevailed among various phenotypic traits, with varying degrees of influence on seed traits from different environmental factors. Latitude, altitude, and annual precipitation were the primary determinants affecting teak seed traits, followed by annual average temperature, while the impact of annual average relative humidity was relatively minor. Distinct seed traits also exhibited heterogeneous responses to environmental changes, with seed length, seed width, and

收稿日期 2023-12-22; 修回日期 2024-01-24

基金项目 林业和草原科技成果国家级推广项目 (No. 2020133113); 广东省林业局项目“柚木适生耐寒种质资源收集保存与扩繁利用”。

作者简介 李昆亮 (1995—), 男, 硕士, 研究方向: 热带特色珍稀林木种质创新应用。*通信作者 (Corresponding author): 韩 强 (HAN Qiang), E-mail: qizhouhanqiang@sina.com。

length-width product being particularly sensitive to annual precipitation, whereas length-width ratio and hundred-seed weight manifested heightened sensitivity to latitude. Cluster analysis categorized the 13 provenances into three classes. Teak seeds manifest prolific phenotypic variation across provenances and pedigrees, with seed traits being influenced by various factors, including maternal inheritance and geographical climate. The research would provide a theoretical foundation and scientific basis for the conservation and utilization of diverse teak.

Keywords: teak (*Tectona grandis* L. F.); seed; phenotypic variation; environmental factors; correlation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.008

种子是植物有性生殖最重要的器官,植物主要通过种子的发育生长为生殖成熟的个体。植物在长期的演化过程中,为了适应环境,植物组织器官也相应发生形态变异,包括叶、花、种子及树体形态变异等。其中,种子的形态包含了许多相对稳定的可遗传变异^[1]。种间种子在大小、形状、颜色、表面纹饰等方面呈现差异,种皮外表面的微观形态与属内的种相对应,可用于物种识别和区分^[2]。自 20 世纪 50 年代以来,因种子微观形态特征在科、属、种等不同层次上具有分类学意义^[1],被一些学者应用于植物系统学和分类研究。随着种源试验的发展,学者们开始关注同一树种不同源间表型变异的显著性、变异模式及其与气候、地理等因素之间的关系^[3]。蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 11 个种源种子的长度、宽度和种形指数等性状差异较大,各种源千粒重之间均有显著差异^[4]。闽楠 (*Phoebe bournei*) 14 个种源种实表型性状的研究表明,种子纵径、种子横径和种子质量等 7 个性状在种源间和种源内差异均达到极显著水平,平均表型分化系数高达 70.83%,表型变异主要来源为种源间^[5],从而为闽楠种质资源保存、利用、开发提供参考。表型变异是基因型与环境之间相互作用的结果^[1]。天山花楸 (*Sorbus tianschanica* Rupr.) 的种子发育过程中受到环境因素的调控,种子长度和千粒重与地理位置(经度)之间存在显著正相关关系,即随地理位置东移(经度增大),种子长度和千粒重逐渐增大^[6]。格木 (*Erythrophloeum fordii*) 种子的周长和荚宽等表型性状与纬度呈正相关,与温度呈负相关,随着温度的降低和位置向北移动(纬度增加),果荚和种子往往呈现增大的趋势。并且在降雨量和气温较高的地区,格木通常表现出小果荚和小种子的特征^[7]。海拔梯度的变化对新疆野杏 (*Prunus armeniaca* Lam.) 种子性状产生显著影响。种子大小与海拔呈显著负相关,随着海拔升高而逐渐减小^[8]。

柚木 (*Tectona grandis* L. F.) 为世界珍贵的木材树种之一,其材性佳,用途广,经济效益高。主要分布于热带地区,包括亚洲、非洲、中美洲和南美洲等地。早在 1820 年左右,我国就开始引进柚木,目前已经在国内广泛种植,种植面积达到 3.5 万 hm^2 ,具有很好的经济效益、社会效益和生态效益^[9]。关于柚木种子方面的研究主要集中在种子园建设^[10]、种子吸水及生活力^[11-12]、种子发芽^[13-16]和种子生理生化^[17-18]等方面,郝海坤等^[19]对柚木种子大小变异、小苗生长特征进行了研究,但未分析地理气候因子对柚木种子性状的影响。目前我国柚木存在良种相对缺乏、采种母树未经选择导致生长变异等问题^[20],这严重影响了柚木人工林的发展,并导致其产量和质量的不稳定。因此,需要大规模收集和整理柚木种源,研究性状差异和遗传多样性,选育良种,以丰富遗传资源。本研究对柚木 13 个种源 81 个家系种子性状进行表型变异分析,探究各性状及其与环境因子之间的相关性,以期为促进柚木选种造林和遗传改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

2023 年 1—3 月,采集广东、广西、海南和云南 13 个种源 81 个家系的柚木种子。在成片分布的柚木林中选择生长健壮、无病虫害、树干通直、结实量大的母树进行采种,同时记录每棵采种母株的地理信息和气象资料(如经纬度、海拔、年均温、年均相对湿度和年降水量)。气象资料来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。不同种源的地理信息和气候因子基本情况见表 1。

1.2 方法

用游标卡尺分别测量柚木种子的长和宽,以种子纵轴最大距离为其长度,以腹面横向最大距离为其宽度,测定单位精确到 0.01 cm,每个家系测定 30 粒种子。采用百粒法测定各家系柚木种子

表 1 柚木种源的地理信息及其环境因子
Tab. 1 Geographic information and environmental factors of teak provenance

种源编号 Provenance code	种源名称 Provenance name	家系数 Amounts of families	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m	年均温 Mean annual temperature/℃	年均相对湿度 Mean annual humidit/%	年降水量 Mean annual rainfall/mm
YNBS	云南保山	4	24°56'N	98°50'E	1029	16.2	73	992
YNYJ	云南盈江	3	24°39'N	97°51'E	819	19.7	79	1545
YNLC	云南陇川	2	24°21'N	97°58'E	971	18.8	81	1618
YNRL	云南瑞丽	12	24°20'N	97°56'E	833	21.0	76	1385
YNMS	云南芒市	1	24°11'N	98°11'E	799	19.8	79	1639
YNJH	云南景洪	2	22°00'N	100°47'E	548	22.4	80	1155
YNJD	云南景东	3	24°26'N	100°51'E	1037	18.3	76	1154
YNYX	云南玉溪	4	24°30'N	102°12'E	1104	16.3	73	909
YNLINC	云南临沧	3	23°38'N	99°90'E	467	17.8	70	1149
GDJY	广东揭阳	5	23°31'N	116°30'E	46	22.3	78	1740
GDPY	广东平远	4	24°33'N	115°53'E	204	20.9	77	1678
GXPX	广西凭祥	22	21°57'N	106°39'E	150	21.8	80	1335
HNJF	海南尖峰	16	18°23'N	108°49' E	95	23.0	80	1150

的百粒重，每个家系重复 3 次^[21]。基于所测定的表型性状，计算种子的长宽乘积和长宽比，作为种子的大小指数和形态指数。

采用方差分析线性模型对柚木各种源、家系的表型性状进行方差分析。用变异系数（CV）表示表型性状的离散程度。计算公式分别为：

$$X_{ijk}=\mu+P_i+F_j+e_{ijk},$$

$$CV=(\delta/\bar{x})\times100\%,$$

式中， μ 为总体平均值、 P_i 为种源效应、 F_j 为家系效应、 e_{ijk} 为环境误差、 i 代表第 i 个种源、 j 代表第 j 个家系， δ 为标准差（standard deviation, SD）、 $\bar{x}$ 为种源/家系平均值（Mean）。

1.3 数据处理

采用 SPSS 22 软件对各项指标进行单因素方差分析(One-wayAnova)分析和 Duncan’s 多重比较，其中，采用 Pearson 相关分析双变量相关性，并根据各性状在种源间的欧氏距离进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 柚木不同种源/家系种子表型变异特征

方差分析表明（表 2），柚木不同种源/家系种子表型性状差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ），表明柚木种子性状具有丰富的遗传变异。

表 2 柚木不同种源、家系种子性状方差分析
Tab. 2 Variance analysis of seed characters of teak from different provenances and families

变异来源 Sources of variations	性状 Traits	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance
种源	种长	2.185	12	0.18	17.80	**
	种宽	1.390	12	0.12	12.27	**
	长宽比	0.245	12	0.02	4.01	**
	长宽积	14.048	12	1.17	19.67	**
	百粒重	44 998.005	12	3749.83	1631.43	**
家系	种长	6.483	80	0.08	7.92	**
	种宽	4.443	80	0.06	5.88	**
	长宽比	1.580	80	0.02	3.88	**
	长宽积	38.779	80	0.49	8.15	**
	百粒重	78 589.019	80	982.36	427.39	**

注：**表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: ** indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

种子性状变异参数见表 3。不同种源间，种长平均值是 1.38 cm，变幅为 1.24~1.50 cm；种宽平均值是 1.46 cm，变幅为 1.33~1.56 cm；种子长宽比平均值是 0.95，变幅 0.91~1.03；种子长宽积平均值是 2.02，变幅为 1.65~2.33；种子百粒重平均值是 75.63 g，变幅为 55.36~116.85 g。不同表型性状变异系数在 4.21%~20.32%之间，其中，种子百粒重的变异系数最高，达到 20.32%。

不同家系间，种长平均值是 1.38 cm，变幅为 0.95~1.94 cm；种宽平均值是 1.46 cm，变幅为 1.01~2.00 cm；种子长宽比平均值是 0.95，变幅为 0.58~1.58；种子长宽积平均值是 2.02，变幅为 1.01~3.35；种子百粒重平均值是 75.63 g，变幅为

48.23~122.64 g。各表型性状变异系数为 10.27%~23.88%，其中，百粒重的表型变异系数最高，达到 23.88%。

柚木不同种源种长、种宽、长宽比、长宽积和百粒重邓肯多重比较结果见表 4。云南玉溪种子的长度、宽度、长宽积和百粒重，均表现出最小的平均值，分别为 1.24 cm、1.33 cm、1.65 和 55.36 g。另外，广东揭阳种子的长宽比平均值最小，为 0.91。相比之下，云南景东种子的长度和百粒重均表现出最大的平均值，分别为 1.50 cm 和 116.85 g。云南瑞丽种子的宽度和长宽积均表现出最大的平均值，分别为 1.56 cm 和 2.33。而云南陇川种子的长宽比平均值最大，为 1.03。

表 3 柚木不同种源、家系种子性状变异参数

Tab. 3 Variation parameters of seed characters of teak from different provenances and families

统计量 Statistic	家系 Family					种源 Provenance				
	种长 Seed length/cm	种宽 Seed width/cm	长宽比 Length- width ratio	长宽积 Length- width product	百粒重 Weight of 100 seeds/g	种长 Seed length/cm	种宽 Seed width/cm	长宽比 Length- width ratio	长宽积 Length- width product	百粒重 Weight of 100 seeds/g
均值	1.38	1.46	0.95	2.02	75.63	1.38	1.46	0.95	2.02	75.63
SD	0.17	0.15	0.10	0.40	18.06	0.09	0.07	0.04	0.21	15.37
变幅	0.95~1.94	1.01~2.00	0.58~1.58	1.01~3.35	48.23~122.64	1.24~1.50	1.33~1.56	0.91~1.03	1.65~2.33	55.36~116.85
CV/%	12.32	10.27	10.53	19.80	23.88	6.52	4.79	4.21	10.40	20.32

表 4 柚木不同种源种子表型性状多重比较结果

Tab. 4 Results of multiple comparison of phenotypic characters of teak seeds from different provenances

种源 Provenance	种长 Seed length/cm	种宽 Seed width/cm	长宽比 Length-width ratio	长宽积 Length-width product	百粒重 Weight of 100 seeds/g
YNBS	1.38±0.14 ^c	1.43±0.13 ^c	0.97±0.11 ^{cde}	1.98±0.29 ^e	74.04±9.25 ^{de}
YNYJ	1.47±0.16 ^{ab}	1.53±0.10 ^{ab}	0.96±0.09 ^{def}	2.26±0.35 ^{ab}	77.04±12.39 ^{cde}
YNLC	1.49±0.13 ^a	1.45±0.11 ^c	1.03±0.09 ^a	2.18±0.29 ^{bc}	77.28±0.97 ^{cde}
YNRL	1.49±0.15 ^a	1.56±0.16 ^a	0.96±0.09 ^{def}	2.33±0.40 ^a	93.19±13.14 ^b
YNMS	1.43±0.13 ^b	1.41±0.19 ^c	1.02±0.08 ^{ab}	2.03±0.37 ^{de}	81.19±2.02 ^{bcd}
YNJH	1.36±0.13 ^{cd}	1.44±0.08 ^c	0.95±0.07 ^{efg}	1.96±0.26 ^e	77.16±5.53 ^{cde}
YNJD	1.50±0.14 ^a	1.51±0.15 ^b	1.00±0.08 ^{bc}	2.28±0.40 ^{ab}	116.85±6.20 ^a
YNYX	1.24±0.12 ^e	1.33±0.10 ^d	0.93±0.08 ^{ghi}	1.65±0.25 ^f	55.36±6.65 ^f
YNLINC	1.27±0.09 ^e	1.36±0.11 ^d	0.94±0.07 ^{gh}	1.73±0.23 ^f	65.19±14.94 ^{ef}
GDJY	1.37±0.19 ^{cd}	1.51±0.18 ^b	0.91±0.08 ⁱ	2.09±0.51 ^{cd}	88.50±16.91 ^{bc}
GDPY	1.46±0.16 ^{ab}	1.50±0.15 ^b	0.99±0.14 ^{cd}	2.19±0.30 ^{bc}	84.95±6.05 ^{bcd}
GXPX	1.35±0.15 ^{cd}	1.41±0.15 ^c	0.96±0.10 ^{def}	1.92±0.38 ^e	65.66±12.07 ^{ef}
HNJF	1.33±0.15 ^d	1.45±0.12 ^c	0.92±0.09 ^{hi}	1.94±0.33 ^e	68.50±13.94 ^e

注：不同小写字母表示各指标在不同种源间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference in various indicators among different provenances ($P<0.05$).

2.2 柚木种子性状及其与环境因子的相关性

由表 5 可知，种长、种宽、长宽比、长宽积及百粒重 5 个种子性状之间存在极显著正相关或

负相关关系，说明其中任一性状的变化均会引起其余性状的变化。
种子的长度、宽度、长宽比、长宽积以及百

粒重均与纬度、海拔、年降水量呈极显著正相关，而与经度呈极显著负相关。种子的宽度和长宽积与年均温呈极显著或显著正相关，而种子的长宽比与年均温呈极显著负相关。此外，百粒重与年均相对湿度呈显著负相关。

在 6 个环境因子（经度、纬度、海拔、年均温、年均相对湿度和年降水量）中，经度、纬度、海拔和年降水量对 5 个种子性状均产生了显著的影响，这种影响是极其显著的。其次是年均温，对种宽、长宽比和长宽积的影响也达到了显著水平或极显著水平。然而，年均相对湿度仅对种子百粒重产生了显著影响。

5 个种子性状与 6 个环境因子的相关系数在 -0.201~0.366 之间。种子的长度、宽度和长宽积

与年降水量之间的相关系数，分别为 0.250、0.213 和 0.261。而种子的长宽比和百粒重与纬度之间的相关系数，分别为 0.185 和 0.366。

2.3 柚木不同种源种子性状的聚类分析

利用欧氏平方距离对柚木种源进行聚类，阈值为 12.5 时，将 13 个柚木种源划分为三大类（图 1），第 1 类包括云南保山、云南景洪、广西凭祥、海南尖峰和广东揭阳种源，第 2 类包括云南玉溪和云南临沧种源，第 3 类包括云南陇川、云南芒市、云南盈江、广东平远、云南瑞丽和云南景东种源。除了第 3 类中云南陇川、云南芒市、云南盈江和云南瑞丽之间地理距离较近，其他相邻种源聚类结果较为分散，说明本研究中地理距离的远近和聚类分析没有明显的相关性。

表 5 柚木种子性状与环境因子相关性分析
Tab. 5 Analysis of correlation between teak seed traits and environmental factors

性状 Trait	种长 Seed length	种宽 Seed width	长宽比 Length-width ratio	长宽积 Length-width product	百粒重 Weight of 100 seeds
种长	1.000				
种宽	0.579**	1.000			
长宽比	0.571**	-0.330**	1.000		
长宽积	0.902**	0.870**	0.167**	1.000	
百粒重	0.621**	0.549**	0.209**	0.653**	1.000
纬度	0.240**	0.098**	0.185**	0.198**	0.366**
经度	-0.173**	-0.063**	-0.133**	-0.138**	-0.201**
海拔	0.185**	0.075**	0.135**	0.153**	0.307**
年均温	-0.009	0.109**	-0.120**	0.050*	-0.054
年均相对湿度	0.000	0.023	-0.024	0.008	-0.161*
年降水量	0.250**	0.213**	0.082**	0.261**	0.301**

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicate significant correlation ($P<0.05$), ** indicate extremely significant correlation ($P<0.01$).

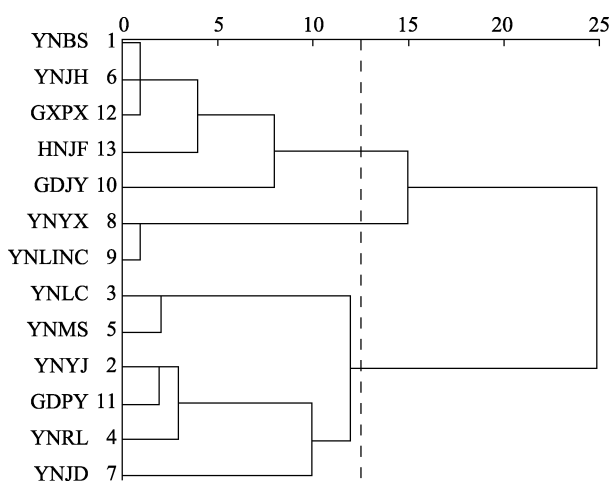


图 1 柚木不同种源种子性状聚类分析
Fig. 1 Clustering analysis of seed characters of teak from different provenances

3 讨论

表型变异是生物遗传变异的直接显现，也是研究遗传多样性的重要组成部分^[22]。通常分布范围广泛的树种具有丰富的表型变异，本研究以柚木不同种源、家系种子为研究对象，对表型性状变异进行分析，从而在一定程度上反映其种源遗传多样性水平。

柚木种子的种长、种宽、长宽比、长宽积及百粒重等 5 个性状指标在种源及家系间均存在着极显著差异，说明其种子在家系间、种源间均存在着丰富的遗传变异，这与秦岭冷杉（*Abies chensiensis*）^[23]、蒙古栎^[24]和铁橡栎（*Quercus coccoferoides* Hand）^[25]等树种研究结果相似。个

体差异是由于家系间遗传差异所引起的，而种源间差异是个体差异与气候、地理等环境因素相互作用的综合产物^[25]。5 个种子性状在种源和家系间的变异幅度及趋势有所不同，种源间的变异要小于家系间的变异，这表明种子形态受到遗传特性和环境因素的共同影响。不同家系间各性状变异系数由小到大的变化趋势为种宽、长宽比、种长、长宽积和百粒重，比常恩福等^[25]对铁橡栎的研究结果偏低。不同种源间种长、种宽及长宽比的变异系数较低，不足 10%，而百粒重的变异系数较高，超过 20%，比井振华等^[26]对苦槠（*Castanopsis sclerophylla*）种子性状的研究结果偏低，无论是种源或家系间种长、种宽及长宽比的变异系数仍然最小，表明种子外在形状稳定性较高^[27]。

环境因子在树木的生长发育过程中起着重要作用，树木生长和结实的差异除了受树种本身遗传特性的控制外，也是与当地生长环境相适应的结果^[28]。本研究表明，在 6 个环境因子中，经纬度、海拔和年降水量对种子性状的影响最大，对所有种子性状都产生了极显著的正相关或负相关影响。这表明经纬度、海拔和年降水量是影响柚木种子性状的主要因素。与乌桕（*Triadica sebifera*）^[29]、三桠乌药（*Lindera obtusiloba*）^[30]、光皮桦（*Betula luminifera*）^[31]和元宝枫（*Acer truncatum*）^[32]等树种的研究结果一致，种子性状受经纬度和海拔等地理因子影响。原因在于树木生长在不同海拔、经纬度、地形和土壤等环境中，光照、热量、水分和矿质营养元素等供应的差异，影响了树木光合产物的生成、运输和积累，从而导致种子性状上的差异。不同种子性状对环境因子的响应程度不同，同一种子性状对不同环境因子的响应也不相同。长宽比和百粒重对纬度的响应最为敏感，随纬度的升高，种子变重，种子形状呈“圆形—长圆形”的变化之势。而种长、种宽和长宽积则对年降水量的响应最为敏感，降水量较高的地区柚木种子相对较大，这与 ZHAO 等^[33]的研究结果一致，该研究发现降水变化是沙蓬（*Agriophyllum squarrosum*）种子大小表型变异的关键驱动力，其中年降雨量与种子大小具有显著的正效应。但李洪果等^[7]发现格木种子在降雨量大的地区往往具有小种子的特征，这可能是不同树种的种子表型性状对环境具有不同的响应机制有关。因此，在柚木种子区划和引种中，除了考

虑经纬度和海拔外，还要考虑年降水量的影响。在柚木开花结实期间，可以通过适当的灌溉以促进种子生长发育。

根据欧氏距离对 13 个柚木种源进行了聚类分析，将其划分为三大类。第 3 类种子的性状表现优于前两类，而第 1 类次之，第 2 类的种子平均表型性状指数最低。在第 3 类中，云南陇川、云南芒市、云南盈江和云南瑞丽的地理距离较近，形态特征也更为相似，这主要是受到当地气候环境的长期影响导致的趋同变异，其中只有广东平远为广东种源，说明最初营建广东平远种源的种子，可能与该类中的云南种源来源相同或相近。而其他相邻种源地的聚类结果相对较为分散，与地域没有明显相关性。我国柚木引种历史悠久，主要通过边民、华侨从缅甸、泰国、老挝等国引进种植^[20]，本研究中，柚木种子性状的聚类结果并没有完全按照地理距离分类，这可能与地域引种、种植方式等因素有关。另外一种可能是柚木种源的地理变异规律遵循随机变异模式，柚木种质资源的遗传多样性为选育不同性状的品种提供了可能。

本研究针对柚木的采种地各母树的种子表型性状进行研究发现：各表型性状间呈极显著相关关系；柚木种子性状在种源间和家系间都达到了极显著的水平；经纬度、海拔、年降水量是影响柚木种子性状的主要因子，其次是年均温，年均相对湿度的影响相对较小；种长、种宽和长宽积对年降水量的响应最为敏感，而长宽比和百粒重则对纬度的响应最为敏感；通过聚类分析将 13 个柚木种源划分为三大类，但与各种源的地理位置分布无显著相关性。由此可见，柚木种子的差异与母本遗传和地理气候因素等多种因素有关，研究结果对于柚木种质资源的利用和优良品种选育有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 吕锋, 解孝满, 韩彪, 乔婕, 董昕, 吴丹, 陆璐, 李文清. 麻栎天然群体种子表型变异分析[J]. 林业科学研究, 2021, 34(2): 174-179.
LYU F, XIE X M, HAN B, QIAO J, DONG X, WU D, LU L, LI W Q. Phenotypic variation analysis of *Quercus acutissima* natural population seeds[J]. Forest Research, 2021, 34(2): 174-179. (in Chinese)
- [2] 钟军, 朱洁文, 王坤, 孙焕良. 中国苧麻属植物种子微形

- 态特征的初步研究[J]. 种子, 2009, 28(10): 30-33.
- ZHONG J, ZHU J W, WANG K, SUN H L. A preliminary study on microstructure features of seed in ramie plant of China[J]. Seed, 2009, 28(10): 30-33. (in Chinese)
- [3] 李长喜. 林木天然群体表型变异研究概述[J]. 林业科学研究, 1988(6): 657-664.
- LI C X. A review of the studies on the phenotypic variation of forest trees in natural stands[J]. Forest Research, 1988(6): 657-664. (in Chinese)
- [4] 任俊杰, 庞新博, 刘昭阳, 李静雅, 张婉莹, 尹书乐, 王利兵, 李迎超. 不同种源蒙古栎种子表型性状的多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(6): 1221-1228.
- REN J J, PANG X B, LIU S Y, LI J Y, ZHANG W Y, YIN S L, WANG L B, LI Y C. Diversity of phenotypic character of *Quercus mongolica* seeds from different provenances[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(6): 1221-1228. (in Chinese)
- [5] 欧汉彪, 董利军, 李娟, 林建勇, 梁瑞龙. 闽楠种实性状表型多样性与环境地理因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(8): 45-50.
- OU H B, DONG L J, LI J, LIN J Y, LIANG R L. Relationship between phenotypic diversity of *Phoebe bournei* seed traits and environmental geographical factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(8): 45-50. (in Chinese)
- [6] 郭来珍, 陈虹, 赵善超, 陈凤, 陈兵权, 陈鑫悦. 天山花楸不同种源种子表型变异分析[J]. 种子, 2022, 41(10): 50-57, 2.
- GUO L Z, CHEN H, ZHAO S C, CHEN F, CHEN B Q, CHEN X Y. Phenotypic variation analysis of seeds from different provenances of *Sorbus tianschanica*[J]. Seed, 2022, 41(10): 50-57, 2. (in Chinese)
- [7] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 刘光金, 庞晓东, 叶金辉, 莫小文, 湛红辉. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 69-83.
- LI H G, CHEN D Z, XU J S, LIU G J, PANG X D, YE J H, MO X W, CHEN H H. Phenotypic diversity and variation in natural populations of *Erythrophloeum fordii*, an endangered plant species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(4): 69-83. (in Chinese)
- [8] 郭传超, 廖康, 石荡, 蒋南林, 唐莹莹, 刁永强, 刘立强. 新疆野杏果实和种子性状与海拔的关系[J]. 果树学报, 2023, 40(2): 316-326.
- GUO C C, LIAO K, SHI D, JIANG N L, TANG Y Y, DIAO Y Q, LIU L Q. Relationship between fruit and seed traits and altitude in wild *Prunus armeniaca*[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(2): 316-326. (in Chinese)
- [9] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 周树平, 杨光, 王西洋. 柚木无性系生长性状的遗传变异与选择效应[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 101-106.
- HUANG G H, LIANG K N, ZHOU Z Z, ZHOU S P, YANG G, WANG X Y. Genetic variation and selective effect of growth traits of teak clones[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 101-106. (in Chinese)
- [10] 黄桂华, 梁坤南, 林明平, 周再知, 马华明. 柚木种子园促花结实技术的初步研究[J]. 种子, 2015, 34(8): 98-101.
- HUANG G H, LAING K N, LIN M P, ZHOU Z Z, MA H M. Study of early flowering and fruiting technology of teak (*Tectona grandis* L. f.) seed orchards[J]. Seed, 2015, 34(8): 98-101. (in Chinese)
- [11] 凌莉芳, 李莲芳, 杨文君, 吴思明, 徐婷婷. 柚木种子品质及其吸水特征初步分析[J]. 种子, 2018, 37(3): 122-126.
- LING L F, LI L F, YANG W J, WU S M, XU T T. Preliminary analysis of the quality and water absorption characteristics of *Tectona grandis* seeds[J]. Seed, 2018, 37(3): 122-126. (in Chinese)
- [12] 张合瑶, 朱存福, 李莲芳, 沈松, 郑川玲, 顾梦, 文国卫, 王帅, 朱庆伟. 柚木种子吸水及生活力对不同溶液浸种的响应[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(5): 596-603.
- ZHANG H Y, ZHU C F, LI L F, SHEN S, ZHENG C L, GU M, WEN G W, WANG S, ZHU Q W. Response of water absorption and viability of teak seeds to soaking with water involved NaOH and GA_3 [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(5): 596-603. (in Chinese)
- [13] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 马华明, 林明平. 不同基质对柚木种子发芽与幼苗生长的影响[J]. 种子, 2009, 28(10): 86-87, 90.
- HUANG G H, LAING K N, ZHOU Z Z, MA H M, LIN M P. The effect of different media on seeds budding and seedlings growth of *Tectona Grandis*[J]. Seed, 2009, 28(10): 86-87, 90. (in Chinese)
- [14] 郝海坤, 莫雅芳, 黄志玲, 彭玉华, 朱积余. 3 个因素对柚木种实发芽及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2014, 33(9): 33-37.
- HAO H K, MO Y F, HUANG Z L, PENG Y H, ZHU J Y. Effects of three factors on the germination and growth of seedlings of teak fruits[J]. Seed, 2014, 33(9): 33-37. (in Chinese)
- [15] 郝海坤, 黄志玲, 彭玉华, 申文辉. 播种时间和处理方法对柚木种子萌发的影响[J]. 福建林业科技, 2015, 42(2): 112-117.
- HAO H K, HUANG Z L, PENG Y H, SHEN W H. Effects of timing and processing on seed germination of *Tectona grandis*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2015, 42(2): 112-117. (in Chinese)
- [16] 刘畅, 李莲芳. 营养液和 IBA 浸种对柚木种子萌发及根系生长的影响[J/OL]. 分子植物育种, [2023-10-11].

- https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gR09I6yibQ7ESoFdMfup348Q5Q_4XtrxiATp5N6mQY5pHHBIEXqHC2kyk6R8kYRXUu9ePbmo81JgxEJu-buSqELWidhYIIX9tT_KG2U3Oh-geCujoIH4gxvCxqRRjqWMfdZbqxIW5g=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- LIU C, LI L F. Effects of seed soaking with nutrient solution and IBA on seed germination and root growth of teak seedlings[J/OL]. Molecular Plant Breeding, [2023-10-11]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=gR09I6yibQ7ESoFdMfup348Q5Q_4XtrxiATp5N6mQY5pHHBIEXqHC2kyk6R8kYRXUu9ePbmo81JgxEJu-buSqELWidhYIIX9tT_KG2U3Oh-geCujoIH4gxvCxqRRjqWMfdZbqxIW5g=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [17] 郝海坤, 黄志玲, 曹艳云, 申文辉, 陈琴. 不同贮藏温度对柚木种子萌发和生理生化的影响[J]. 种子, 2015, 34(4): 37-42.
- HAO H K, HUANG Z L, CAO Y Y, SHEN W H, CHEN Q. Effects of different storage temperatures on teak seeds germination, physiological and biochemical characteristics[J]. Seed, 2015, 34(4): 37-42. (in Chinese)
- [18] 郑川玲, 王慷林, 李莲芳, 张青青, 杨永洁, 杨历雨, 沈松, 吴俊多, 刘进, 杨博. NaOH 和壳聚糖对柚木种子发芽过程营养物质的动态影响[J]. 四川林业科技, 2023, 44(1): 52-58.
- ZHENG C L, WANG K L, LI L F, ZHANG Q Q, YANG Y J, YANG L Y, SHEN S, WU J D, LIU J, YANG B. Dynamic effects of NaOH and chitosan on nutrients of teak seeds during germination[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023, 44(1): 52-58. (in Chinese)
- [19] 郝海坤, 黄志玲, 彭玉华, 申文辉, 候远瑞. 柚木种子大小变异及小苗生长特性[J]. 种子, 2017, 36(1): 104-107.
- HAO H K, HUANG Z L, PENG Y H, SHEN W H, HOU Y R. Size variation and seedling growth characteristic of teak seed[J]. Seed, 2017, 36(1): 104-107. (in Chinese)
- [20] 梁坤南, 周再知, 马华明, 黄桂华, 林明平. 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.
- LIANG K N, ZHOU Z Z, MA H M, HUANG G H, LIN M P. Development status, countermeasures and prospects of the rare tree species teak plantations in China[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2011, 38(4): 173-178. (in Chinese)
- [21] 毕辛华, 戴心维. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
- BI X H, DAI X W. Seed science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993. (in Chinese)
- [22] 乔谦, 丰震, 任红剑, 安凯, 张林, 孙忠奎. 元宝枫天然种群种实表型多样性[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2707-2715.
- QIAO Q, FENG Z, REN H J, AN K, ZHANG L, SUN Z K. Phenotypic diversity of wing fruits and seeds in natural populations of *Acer truncatum* Bunge in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2707-2715. (in Chinese)
- [23] 孙玉玲, 李庆梅, 杨敬元, 谢宗强. 秦岭冷杉球果与种子的形态变异[J]. 生态学报, 2005(1): 176-181.
- SUN Y L, LI Q M, YANG J Y, XIE Z Q. Morphological variation in cones and seeds in *Abies chensiensis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(1): 176-181. (in Chinese)
- [24] 梁德洋, 蒋路平, 张秦徽, 赵曦阳, 郑颖, 于世河, 冯健. 辽宁省 11 个蒙古栎种源及家系种子性状变异[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(11): 1-5.
- LIANG D Y, JIANG L P, ZHANG Q H, ZHAO X Y, ZHENG Y, YU S H, FENG J. Variance analysis of seed traits in provenances and families on *Quercus mongolica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(11): 1-5. (in Chinese)
- [25] 常恩福, 张清, 肖桂英, 李品荣, 李娅, 丁玉雄, 黄春良, 景跃波. 铁橡栎不同种源及家系种子的形态特征及变异[J]. 种子, 2020, 39(6): 53-58.
- CHANG E F, ZHANG Q, XIAO G Y, LI P R, LI Y, DING Y X, HUANG C L, JING Y B. Morphological characteristics and variation analysis of seeds from different provenances and families of *Quercus cocciferoides*[J]. Seed, 2020, 39(6): 53-58. (in Chinese)
- [26] 井振华. 苦槠遗传多样性和种苗性状变异规律初步研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- JING Z H. Preliminary study on the genetic diversity and seeding traits variation of *Castanopsis sclerophylla*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010. (in Chinese)
- [27] 陈芬, 姚小华, 王开良, 任华东, 常君. 33 个薄壳山核桃无性系果(核)性状以及产量的比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(1): 40-45.
- CHEN F, YAO X H, WANG K L, REN H D, CHANG J. Comparative studies on fruit and nut characters of 33 pecan (*Carya illinoensis*) clones and their yields[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(1): 40-45. (in Chinese)
- [28] 李芳, 金志农, 黎祖尧, 曹金城, 张雷, 张艳华. 樟树种子性状及对生境因子的响应[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(1): 92-100.
- LI F, JIN Z N, LI Z Y, CAO J C, ZHANG L, ZHANG Y H. Seeds properties of *Cinnamomum camphora* and their response towards environmental factors[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(1): 92-100. (in Chinese)
- [29] 向珊珊, 杜洋文, 程军勇, 李军章, 陈凤苹, 唐岚, 刘应斌, 邓先珍. 长江流域乌桕优良种质资源种子品质性状评价[J]. 经济林研究, 2023, 41(2): 30-37.

- XIANG S S, DU Y W, CHENG J Y, LI J Z, CHEN F P, TANG L, LIU Y B, DENG X Z. Evaluation on quality traits of the seeds of *Triadica sebifera* in the Yangtze River basin[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(2): 30-37. (in Chinese)
- [30] 赵永军, 鲁仪增, 刘立江, 杨海平, 吴府胜, 翟利. 三桠乌药天然群体种子表型多样性研究[J]. 山东农业科学, 2018, 50(2): 19-23.
- ZHAO Y J, LU Y Z, LIU L J, YANG H P, WU F S, ZHAI L. Seed phenotypic diversity of *Lindera obtusiloba* natural populations[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(2): 19-23. (in Chinese)
- [31] 谢一青, 黄儒珠, 李志真, 黄勇, 杨宗武. 福建光皮桦野生种群遗传变异及其与生境的关系[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 60-65.
- XIE Y Q, HUANG R Z, LI Z Z, HUANG Y, YANG Z W. Genetic variation of natural populations of *Betula luminifera* in Fujian and its relationship with the habitat[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 60-65. (in Chinese)
- [32] 韩旻昊, 任飞, 燕丽萍, 王因花, 梁燕, 仲伟国. 山东元宝枫天然种群种实的表型多样性[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(11): 173-184, 192.
- HAN M H, REN F, YAN L Y, WANG Y H, LIANG Y, ZHONG W G. Fruit and seed phenotypic diversity of natural populations of *Acer truncatum* in Shandong[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(11): 173-184, 192. (in Chinese)
- [33] ZHAO P S, LI X F, RAN R L, SUN H, ZHAO J C, CHEN G X. Precipitation and local environment shape the geographic variation of seed size across sand rice (*Agriophyllum squarrosum*) natural populations[J/OL]. Journal of Experimental Botany, 2022, 13: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.985572>.