

檀香紫檀优树及其嫁接无性系间种子形态和萌发特征变异

林鸣亮^{1,2}, 陈仁利^{2*}, 王春胜², 陈金辉¹, 曾 杰², 林培群³

1. 海南大学林学院, 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; 3. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南海口 571101

摘 要: 檀香紫檀是世界上最为名贵的红木树种之一, 其在我国的规模发展受制于种子生产。最近中国林业科学研究院热带林业研究所利用优树材料在海南岛尖峰岭营建了檀香紫檀嫁接无性系采种园, 目前已开花结实, 其种子品质及其与优树间差异尚待研究。以海南岛尖峰岭中国林业科学研究院热带林业研究所试验站引种园檀香紫檀 6 株优树及其在采种园内的嫁接无性系为对象, 采集种子测定其形态性状, 并采用双层滤纸法开展种子萌发试验。结果表明: (1) 无论是优树还是其嫁接无性系, 其种子形态性状的变异系数远小于芽苗生长性状, 种子千粒重的变异系数最小, 说明其芽苗生长变异较种子形态变异更丰富; (2) 檀香紫檀优树间种子长度差异显著 ($P < 0.05$), 以 7 号优树为最大, 嫁接无性系间种子长度、宽度和厚度均差异显著, 其长度和宽度以 9 号无性系为最大, 厚度以 7 号无性系为最大; (3) 优树间和无性系间种子发芽率、发芽势差异显著, 优树中发芽率和发芽势分别以 3 号和 9 号为最高, 无性系则均以 5 号为最高, 优树间上胚轴、下胚轴和胚根长度以及芽苗总长度均差异显著, 均以 3 号优树为最大, 无性系间胚根长度和芽苗总长度差异显著, 均以 7 号无性系为最大, 说明优树间和无性系间种子萌发和芽苗生长均存在丰富变异; (4) 优树与其对应无性系间种子形态、萌发和芽苗生长性状差异显著性因基因型而异, 整体而言, 无性系的种子长度和宽度大于其对应优树, 其种子发芽和芽苗生长表现优于其对应优树; (5) 相关性分析表明, 种子千粒重与发芽率极显著 ($P < 0.01$), 种子越饱满, 发芽率越高。总而言之, 檀香紫檀采种园的种子在形态和萌发上整体优于引种园的优树; 而且种子千粒重在优树间、嫁接无性系间以及优树与其对应无性系间均差异不显著 ($P \geq 0.05$), 采种园种子较为饱满, 其总体均值接近 100 g, 超过早期散生嫁接植株 (92.9 g)。研究结果为檀香紫檀良种选育、种子园营建和壮苗培育提供科学依据。

关键词: 檀香紫檀; 优树; 嫁接无性系; 种子形态; 种子萌发

中图分类号: S722.3 文献标志码: A

Variation in Seed Morphology and Germination Characteristics Between Superior Trees of *Pterocarpus santalinus* and Its Grafted Clones

LIN Mingliang^{1,2}, CHEN Renli^{2*}, WANG Chunsheng², CHEN Jinhui¹, ZENG Jie², LIN Peiqun³

1. College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: *Pterocarpus santalinus* is one of the most famous rosewood (Hongmu) species in the world. Its large-scale development is restricted due to limited seed production in China. A grafted clone seed orchard was established recently using superior tree materials by Experiment Station of Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry in Jianfengling, Hainan Island, and most trees in the orchard have flowered and fruited. The differences in seed quality among superior trees in the introduction garden and the grafted clones need to be studied. Here the morphological traits were measured, and germination tests were conducted for the seeds of *P. santalinus* collected from six superior trees in the introduction garden and the grafted clones in the seed orchard at the experiment station. The coefficients of

收稿日期 2023-01-11; 修回日期 2023-04-06

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“檀香紫檀采种园营建”(No. RITFKYYW201405)。

作者简介 林鸣亮(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 风景园林植物与应用。*通信作者(Corresponding author): 陈仁利(CHEN Renli), E-mail: 603115206781@qq.com。

variance for the seed morphological traits were much lower than those for seedling growth traits among superior trees or the grafted clones, and the coefficients of variance was the lowest for the weight of 1000-grain seeds, indicating that the variations of seedling growth were more abundant than those of seed morphorlogy Seed length was significantly different at 0.05 level among the superior trees with No. 7 performing the best, and seed length, width and thickness differed remarkably among the grafted clones, in which No. 9[#] performed the best in seed length and width, and No. 7[#] did the best in seed thickness. The germination rate and potential differed significantly among superior trees (No. 3 and No. 9 performed the best, respectively) or the clones (No. 5[#] did the best), and significant difference occurred in the length of epicotyl, hypocotyl, radicle and total seedling among the superior trees (No. 3 did the best), and in the length of radicle and total seedling among the grafted clones (No. 7[#] did the best), demonstrating that abundant variation in seed germination and seedling growth existed among superior trees and among the grafted clones. Significance of difference between each superior tree and its clone varied with gene type, and clones performed as a whole, better than relevant superior trees in seed length and width, seed germination and seedling growth. It was indicated from relationship analysis that seed weight was significantly correlated with germination rate at 0.01 level, the germination rate of the plumper seeds was higher. In conclusion, seeds from the grafted clone seed orchard performed better in the seed morphorlogy and germination than those from the superior trees in the introduction garden, and significant difference was absent in seed weight among the superior trees or the grafted clones, and between each superior tree and its clone ($P \geq 0.05$), the seeds developed fully in the seed orchard with 1000-grain weight near 100 g, more than that for scattered individuals early grafted (92.9 g). The findings would provide scientific evidences for elite variety selection, seed orchard establishment and robust seedling cultivation.

Keywords: *Pterocarpus santalinus*; superior tree; grafted clone; seed morphology; seed germination

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.05.011

檀香紫檀 (*Pterocarpus santalinus* L. f.) 又名小叶紫檀, 为蝶形花科 (Papilionaceae) 紫檀属 (*Pterocarpus* L.) 落叶乔木, 分布于印度 Andhra 邦的 Cuddapah、Chittoor 和 Nellore 地区以及 Tamil Nadu 邦的 Chengalput 和北 Arcot 地区, 我国海南以及云南、广西、广东和福建四省区的南部有小规模引种^[1]。檀香紫檀木材属极珍贵红木, 被《红木》国家标准 (GB/T 18107—2017) 列为紫檀木类唯一一种^[2], 一般应用于高级家具制作、工艺品雕刻等。其种子、树皮及心材的提取物在降低血糖、抗糖尿病、护肝等方面具有极高的药用价值^[3-5]。檀香紫檀树体优美, 花色鲜艳、气味清香, 是极具观赏性的景观树种之一。

我国檀香紫檀的引种始于 1957 年, 由华南热带作物科学研究院从印度引进并在海南儋州进行小片试种^[6]; 此后中国林业科学研究院热带林业研究所和西双版纳植物园也相继从印度引进檀香紫檀进行小规模种植^[7]。进入 21 世纪以来, 随着我国珍贵树种产业的蓬勃发展, 檀香紫檀的推广也出现了热潮。早期引种的檀香紫檀成为了采种母树。由于早期种植面积小, 采种母树少, 目前在海南能够正常开花结实的母树不到 50 株^[1], 制约了檀香紫檀的规模发展^[7]。尽管一些学者尝试了高空压条^[8]、组培快繁^[9]以及以降香黄檀、囊状

紫檀为砧木的嫁接育苗^[10-11]等无性繁殖方法, 仍难以形成檀香紫檀苗木的规模化生产。为了满足日益增长的檀香紫檀种子需求, 陈仁利等^[12]研发了以印度紫檀大树作为砧木嫁接檀香紫檀枝条促进其提早开花结实的新技术, 并从早期引种的檀香紫檀片林或散生木中选择优树采集枝条, 应用该技术建立了檀香紫檀采种园^[13], 目前部分优树无性系已开始开花结实。

种子品质是培育壮苗进而决定人工林营建成败的关键因素^[14-15], 影响植物幼苗的建成、个体适合度及性状表现^[16]。目前国内外关于檀香紫檀种苗方面的研究主要集中在种实贮藏和催芽处理、幼苗生长和耐寒性等方面^[13, 17-20], 而有关优树间或无性系间种子品质差异研究鲜见报道, 仅见 KARTHICK 等^[21]研究了檀香紫檀优树间荚果的形态及萌发特性变异。尽管目前已利用优树材料营建了檀香紫檀嫁接采种园, 而优树间、嫁接无性系间以及优树与对应无性系间在种子品质上是否存在差异, 有待深入研究。因此, 本研究以檀香紫檀优树及其嫁接无性系的种子为材料, 通过形态测定和萌发试验, 揭示檀香紫檀优树及嫁接无性系间种子形态和萌发性状的变异, 为檀香紫檀良种选育、种子园营建和壮苗培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

檀香紫檀种子采自中国林业科学研究院热带林业研究所试验站（18°42'N，108°49'E）的引种园和檀香紫檀嫁接采种园。引种园营建于 1975 年；嫁接采种园营建于 2018 年，其砧木主要为印度紫檀大树，接穗来自中国林业科学研究院热带林业研究所试验站引种园、海南大学儋州校区、海南热带植物园及中国医学科学院药用植物研究

所海南分所兴隆南药园的 15 株檀香紫檀优树。引种园选取生长快、干形通直的檀香紫檀优树 6 株，包括 1 号、3 号、5 号、7 号、9 号和 11 号优树（图 1），优树编号详见参考文献[13]。从嫁接采种园选取这些优树无性系的结实树 18 株，开展花期物候、生殖构件以及种子特性变异研究。其生长状况见表 1。

于 2022 年 4—5 月采集上述 24 株檀香紫檀的荚果（图 2），分单株剪开荚果剥取种子，每株选



图 1 檀香紫檀采种优树
Fig. 1 *P. santalinus* superior trees with seeds collected

表 1 檀香紫檀优树及其无性系的生长表现
Tab. 1 Growth performance of *P. santalinus* superior trees and their clones

优树（引种园） Superior trees (introduction garden)			无性系（嫁接采种园） Clones (grafted seed orchard)			
编号 Code	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	编号 Code	结实分株数 No. of fruited clones	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm
1	18	44.5	1 [#]	0		
3	17	34.3	3 [#]	1	10.7	28.2
5	17	34.6	5 [#]	2	10.5±0.0	22.1±2.5
7	18	31.8	7 [#]	9	9.6±1.4	22.6±4.0
9	18	33.4	9 [#]	4	8.3±1.0	22.8±5.3
11	18	37.5	11 [#]	2	9.2±2.0	19.3±1.3

注：1 号优树的嫁接无性系未见开花结实。
Note: No. 1 has not flowered and fruited yet.

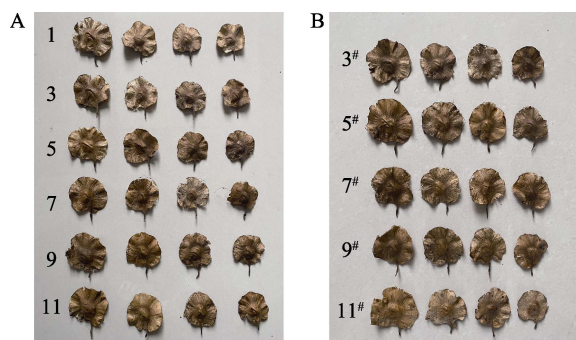


图2 檀香紫檀优树和嫁接无性系的荚果

Fig. 2 Pods of *P. santalinus* superior trees and relevant grafted clones

取健康饱满种子 500 粒以上, 若不足 500 粒则全部选取, 置于冰箱内冷藏备用。

1.2 方法

1.2.1 种子形态测定 对于每个单株, 采用四分法随机选取 4 份檀香紫檀种子, 每份 50 粒, 用千分之一电子天平称量, 计算种子千粒重。用数显游标卡尺逐粒测定上述种子的长度、宽度及厚度。

1.2.2 种子萌发试验 2022 年 9—10 月在中国林业科学研究院热带林业研究所组培室内开展种子萌发试验, 室内气温为 $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度为 80%, 光照强度为 1000 lx, 光周期为 12 h 光照/12 h 黑暗。

种子萌发试验采用双层滤纸法, 将经过 KMnO_4 消毒 25 min 后的种子, 反复冲洗干净后均匀置于铺有两层湿润滤纸的培养皿内, 每皿 50 粒种子, 每个单株重复 6 次 (皿), 每天用蒸馏水喷水一次, 确保培养皿内无流动水且保持湿润。以胚根突破种皮为萌发标志, 连续 5 d 无萌发视为萌发结束。计算以下指标:

$$\text{发芽率} = (\text{发芽种子总数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = (\text{发芽高峰时发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数}(G_i) = \sum(G_t/D_t)$$

$$\text{发芽速度} = \sum(D \times n) / \sum n$$

式中, G_t 为第 t 日的正常发芽数, D_t 为相应发芽试验天数; D 为从种子置于培养皿开始的天数, n 为相应各天的发芽粒数。

按照《林木种子检验规程》, 种子发芽第 21 天时, 每个培养皿随机选取 30 株芽苗, 测量其上胚轴、下胚轴和胚根长度, 数量不足 30 株, 则全部测量。

1.3 数据处理

应用 SPSS 13.0 软件进行方差分析和 Duncan's 多重比较、独立 t 检验以及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 种子形态性状变异

檀香紫檀优树及其嫁接无性系间种子形态变异情况见表 2。6 株檀香紫檀优树的种子长度、宽度、厚度和千粒重的变异系数分别为 6.36%~14.32%、3.83%~17.27%、5.70%~22.86%和 1.11%~5.56%; 嫁接无性系的种子长度、宽度、厚度和千粒重的变异系数分别为 5.26%~8.98%、8.52%~18.43%、7.11%~13.15%和 3.12%~5.56%。整体来看, 优树和嫁接无性系种子形态性状的变异系数均以种子千粒重为最低, 分别以种子厚度和种子宽度为最高; 优树除了种子千粒重的变异系数低于其嫁接无性系之外, 其种子长度、宽度和厚度的变异系数均高于嫁接无性系。

方差分析结果表明: 优树间种子宽度、厚度和千粒重差异不显著, 种子长度则差异显著; 优树无性系间除了种子千粒重差异不显著之外, 种子长度、宽度和厚度均差异显著。6 株优树中, 以 7 号优树的种子长度为最大, 显著高于最低的 9 号优树。嫁接无性系的种子长度和宽度均以 9 号无性系为最大, 3 号无性系为最小, 9 号无性系的种子长度显著大于其他无性系, 其种子宽度显著大于 3 号、5 号和 11 号无性系, 与 7 号无性系差异不显著; 种子厚度以 7 号无性系为最大, 显著大于其他无性系, 3 号无性系为最小; 7 号无性系的种子宽度是 3 号无性系的 1.18 倍。

优树和对应无性系比较, 除 3 号优树种子长度大于对应无性系, 其余优树的种子长度和宽度均小于对应无性系; 除 5 号优树种子厚度低于对应无性系, 11 号优树种子千粒重大于对应无性系, 其余优树种子厚度和千粒重均大于对应无性系。独立 t 检验结果表明, 9 号和 11 号优树的种子长度分别显著小于其对应无性系; 5 号、7 号、9 号和 11 号优树的种子宽度显著小于其对应的无性系; 5 号优树的种子厚度显著大于其对应优树无性系。所有优树的平均种子长度和宽度比其无性系低 0.80 mm 和 0.74 mm, 而厚度、千粒重较为接近。

2.2 种子萌发性状变异

2.2.1 种子萌发 檀香紫檀优树及其嫁接无性系间种子萌发变异情况见表 3。在 $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$ 气温和

表 2 檀香紫檀优树及其嫁接无性系间种子形态变异
Tab. 2 Seed morphological variation among *P. santalinus* superior trees and their grafted clones

编号 Code	种子长度 Seed length		种子宽度 Seed width		种子厚度 Seed thickness		千粒重 1000 grains weigh	
	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/g	CV/%
1	11.02±0.80 ^{ab}	7.26	5.45±0.42	7.71	2.22±0.18	8.11	102.77±3.20	3.00
3	10.46±0.97 ^{bc}	9.27	5.49±0.21	3.83	2.10±0.48	22.86	98.58±4.22	4.44
5	10.85±0.69 ^{abc}	6.36	5.60±0.88	15.71	2.28±0.13	5.70	99.76±4.97	5.56
7	11.24±1.61 ^a	14.32	5.87±0.45	7.67	2.16±0.27	12.50	97.62±1.93	1.11
9	10.21±1.38 ^c	13.52	5.56±0.96	17.27	2.15±0.34	15.81	99.40±4.61	4.44
11	10.72±0.90 ^{abc}	8.40	5.55±0.76	13.69	2.09±0.39	18.66	101.31±4.48	4.00
Mean	10.75±1.14	10.60	5.59±0.76	13.60	2.17±0.32	14.75	99.90±1.86	4.00
3 [#]	10.36±0.93 ^d	8.98	5.59±1.03 ^c	18.43	2.04±0.21 ^b	10.29	98.63±0.03	3.12
5 [#]	11.22±0.59 ^c	5.26	6.39±0.63 ^{b**}	9.86	2.11±0.15 ^{b**}	7.11	101.83±4.90	4.00
7 [#]	11.81±0.84 ^b	7.56	6.57±0.56 ^{ab**}	8.52	2.28±0.24 ^a	10.53	99.91±5.68	5.56
9 [#]	12.43±0.88 ^{a**}	7.08	6.99±0.74 ^{a**}	10.59	2.13±0.28 ^b	13.15	100.66±4.92	4.00
11 [#]	11.91±0.73 ^{b**}	6.13	6.34±0.85 ^{b**}	8.96	2.06±0.25 ^b	12.14	97.84±6.47	5.00
Mean	11.55±1.06	9.18	6.33±0.85	13.41	2.12±0.24	11.32	99.84±5.51	5.00

注：字母为优树间或嫁接无性系间的 Duncan’s 多重比较结果，不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。*和**为独立 t 检验结果，分别表示优树与对应无性系间差异显著（ $P<0.05$ ）和差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Notes: The letters present results of Duncan’s multiple range test between superior trees or grafted clones, different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). * and ** are results of independent t -test, * indicates significant difference between the superior tree and the relevant clone ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference between the superior tree and the relevant clone ($P<0.01$).

表 3 檀香紫檀优树及其嫁接无性系间种子发芽性状变异
Tab. 3 Variation in seed germination among *P. santalinus* superior trees and their grafted clones

编号 Code	始发时间 Initiation/d	高峰期 Peak/d	结束时间 End/d	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index	发芽速度 Germination speed
1	1	3	5	70.00±7.04 ^{bc}	40.00±11.38 ^{ab}	14.52±3.70	2.82±0.21 ^a
3	1	3	4	81.00±5.62 ^a	42.00±3.67 ^{ab}	16.64±1.50	2.53±0.09 ^{bc}
5	1	2	4	76.00±7.48 ^{abc}	40.00±4.65 ^{ab}	15.42±1.24	2.67±0.10 ^{ab}
7	1	3	4	66.00±6.69 ^c	41.00±8.27 ^{ab}	15.29±3.97	2.59±0.14 ^{bc}
9	1	2	4	78.33±8.04 ^{ab}	46.67±9.61 ^a	17.79±0.78	2.42±0.16 ^c
11	1	3	4	79.00±12.05 ^{ab}	36.33±5.28 ^b	15.99±1.99	2.61±0.14 ^b
Mean	1	3	4	75.06±9.22	41.06±7.76	15.94±2.56	2.61±0.18
3 [#]	2	2	3				
5 [#]	2	3	3	96.67±1.15 ^{a**}	74.67±20.53 ^a	19.00±1.02 ^{**}	2.47±0.40 ^b
7 [#]	2	3	4	86.37±9.22 ^{a**}	50.88±9.91 ^b	11.37±5.97	2.80±0.12 ^{a*}
9 [#]	2	2	4	84.50±15.26 ^a	54.00±11.20 ^b	14.96±4.98	2.64±0.24 ^b
11 [#]	1	3	4	64.00±12.96 ^b	37.50±3.42 ^b	12.06±3.25 [*]	2.93±0.17 ^{a*}
Mean	2	3	4	77.00±0.24	52.47±15.54	13.48±5.28	2.71±0.25

注：字母为优树间或嫁接无性系间的 Duncan’s 多重比较结果，不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。*和**为独立 t 检验结果，分别表示优树与对应无性系间差异显著（ $P<0.05$ ）和差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Notes: The letters present results of Duncan’s multiple range test between superior trees or grafted clones, different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). * and ** are results of independent t -test, * indicates significant difference between the superior tree and the relevant clone ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference between the superior tree and the relevant clone ($P<0.01$).

12 h 光照/12 h 黑暗的条件下，优树种子在播种后第 2 天达到发芽高峰，其余 4 株优树在第 3 天达到发芽高峰，大部分优树在第 4 天发芽结束（1 d 内即开始发芽，除了 5 号和 9 号优树的种子在

号无性系在第 5 天结束)。嫁接无性系种子除了 11[#]号在播种后 1 d 内开始发芽,其余无性系均在第 2 天开始发芽,3[#]号和 9[#]号无性系的种子在第 2 天达到发芽高峰,5[#]号、7[#]号和 11[#]号种子的发芽高峰在第 3 天,3[#]号和 5[#]号无性系第 3 天即发芽结束,而 7[#]号、9[#]号和 11[#]号在第 4 天结束。优树和对应无性系比较,11 号优树与其无性系的发芽时间,包括始发时间、高峰期和结束时间基本一致;其他优树与其对应无性系比较,发芽稍早或结束较晚,发芽过程有差异。整体而言,优树的种子发芽时间比其嫁接无性系长。无论如何,去除果荚的檀香紫檀种子容易发芽,发芽早、结束快,发芽较集中(由于 3 号优树的嫁接无性系种子数量较少,试验无重复,仅观察其发芽过程,未做发芽指标的统计分析)。

优树和嫁接无性系间种子发芽率、发芽势、发芽指数和发芽速度均差异显著。6 株优树间比较,种子发芽率以 3 号优树为最高,显著比 1 号和 7 号分别高 15.71%和 22.73%;发芽势以 9 号优树为最高,其发芽势比 11 号优树显著高 28.46%,与其他优树差异不显著;发芽速度以 1 号优树为最高,与 5 号优树差异不显著,而显著高于其他优树,比 9 号优树高 16.53%。嫁接无性

系间比较,种子发芽率和发芽势均以 5[#]号嫁接无性系为最高;5[#]号无性系的种子发芽率与 7[#]号和 9[#]号差异不显著,三者均显著高于 11[#]号无性系,5[#]号无性系比 11[#]号高 51.05%;5[#]号无性系的发芽势显著高于其他 3 个无性系,比 11[#]号无性系高约 1 倍;发芽速度以 11[#]号无性系为最高,与 7[#]号无性系差异不显著,二者显著高于其他无性系,11[#]号无性系比 5[#]号无性系高 18.62%。优树与其对应嫁接无性系比较,5 号和 7 号优树的发芽率极显著小于其对应无性系;5 号优树的发芽指数极显著小于其对应无性系,11 号优树的发芽指数分别显著大于其对应无性系;7 号和 11 号优树的发芽速度均显著小于其对应的无性系。

2.2.2 芽苗生长 檀香紫檀优树及其嫁接无性系的芽苗生长变异情况见表 4。6 株优树间上胚轴、下胚轴和胚根长度以及芽苗总长度的变异系数分别为 25.86%~33.59%、19.40%~34.79%、38.23%~48.00%和 25.34%~31.71%;优树嫁接无性系间对应性状的变异系数为 25.80%~61.98%、18.53%~27.87%、34.40%~86.33%和 19.51%~51.10%。总体来看,优树上胚轴长度和胚根长度的变异程度低于嫁接无性系,而下胚轴长度的变异程度则高于嫁接无性系,优树芽苗总长度的变异程度(7

表 4 檀香紫檀优树及其嫁接无性系间芽苗生长变异
Tab. 4 Variation in seedling growth among *P. santalinus* superior trees and their grafted clones

编号 Code	上胚轴长度 Epicotyl length		下胚轴长度 Hypocotyl length		胚根长度 Radicle length		芽苗总长度 Total seedling length	
	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/mm	CV/%	均值 Mean/mm	CV/%
1	9.73±2.73 ^c	28.06	8.58±1.95 ^b	22.73	22.49±10.17 ^{bc}	45.22	40.80±12.41 ^c	30.42
3	13.11±3.39 ^a	25.86	10.09±3.51 ^a	34.79	26.91±10.80 ^a	43.13	50.12±13.01 ^a	25.96
5	11.39±3.76 ^b	33.01	8.24±2.42 ^{bc}	29.37	20.99±8.50 ^c	40.50	40.63±11.38 ^c	28.01
7	10.30±3.46 ^c	33.59	8.31±2.09 ^{bc}	25.15	18.75±9.00 ^d	48.00	37.37±11.85 ^d	31.71
9	11.47±3.45 ^b	30.08	8.31±1.88 ^{bc}	22.62	23.91±9.14 ^b	38.23	43.69±11.51 ^b	26.34
11	12.80±4.17 ^a	32.58	7.94±1.54 ^c	19.40	23.02±8.88 ^{bc}	38.58	43.77±11.09 ^b	25.34
Mean	11.47±1.33	30.53	8.58±0.77	25.68	22.68±2.75	42.28	42.73±4.32	27.96
3 [#]	13.23±8.20	61.98	7.77±1.44	18.53	8.65±3.32 ^{b*}	38.38	30.03±5.86 ^{b*}	19.51
5 [#]	12.87±3.32 ^{**}	25.80	9.22±2.57 [*]	27.87	30.84±10.61 ^{a**}	34.40	53.45±11.39 ^{a**}	21.31
7 [#]	13.35±3.75 ^{**}	28.09	9.34±1.91 ^{**}	20.45	32.69±28.22 ^{a**}	86.33	55.89±28.56 ^{a**}	51.10
9 [#]	11.41±3.62	31.73	9.32±2.08 ^{**}	22.32	27.64±10.80 ^{a**}	39.07	48.83±11.64 ^{ab**}	23.84
11 [#]	11.06±3.49 ^{**}	31.56	7.34±1.76 [*]	23.98	15.34±6.43 ^{ab**}	41.92	34.15±8.19 ^{b**}	23.98
Mean	12.38±1.07	35.83	8.60±0.97	22.63	23.03±10.51	48.02	44.47±11.67	27.95

注:字母为优树间或嫁接无性系间的 Duncan's 多重比较结果,不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。*和**为独立 t 检验结果,分别表示优树与对应无性系间差异显著(P<0.05)和差异极显著(P<0.01)。

Notes: The letters present results of Duncan's multiple range test between superior trees or grafted clones, different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05). * and ** are results of independent t-test, * indicates significant difference between the superior tree and the relevant clone (P<0.05), ** indicates extremely significant difference between the superior tree and the relevant clone (P<0.01).

号除外)均高于对应嫁接无性系。

方差分析结果表明,6株优树间比较,4个性状均以3号优树为最大,显著大于其他优树(仅1个例外:3号优树的上胚轴长度与11号优树差异不显著),3号优树上胚轴长度比1号优树大34.74%,下胚轴长度比11号优树大27.08%,胚根长度和芽苗总长度比7号优树分别大43.52%和34.12%。嫁接无性系间的胚根长度和芽苗总长度均以7号无性系为最大;7号无性系的胚根长度与5号和9号无性系差异不显著,三者显著高于3号和11号无性系,7号无性系的胚根长度比3号无性系大2.78倍;7号和5号无性系的芽苗总长度与9号无性系差异不显著,而显著高于3号和11号无性系,7号无性系的芽苗总长度比3号无性系大86.11%。

优树与其对应无性系比较,5号、7号和9号

优树的4个芽苗生长性状表现均显著比其对应无性系差,仅9号优树的上胚轴长度与其对应无性系差异不显著;11号优树的4个性状表现均优于其对应无性系;3号优树的上胚轴和下胚轴长度与其对应无性系差异不显著,而胚根长度和芽苗总长度显著大于其对应无性系。

2.3 种子形态和萌发性状间的相关性

相关性分析结果表明,种子形态性状中,种子长度与种子宽度呈极显著正相关,二者与种子厚度相关性低;种子萌发性状中,发芽率与4个芽苗生长性状均呈显著或极显著正相关,发芽指数与发芽速度呈极显著负相关,胚根长度与上胚轴、下胚轴长度均呈显著或极显著正相关;种子形态与萌发性状间,仅千粒重与种子发芽率呈极显著正相关(表5)。

表 5 种子形态和萌发性状间的 Pearson 相关系数
Tab. 5 Pearson correlation coefficient between seed morphology and germination traits

性状 Trait	SL	SW	ST	TGW	GR	GP	GI	GS	EL	HL	RL
SW	0.931**										
ST	0.023	0.020									
TGW	0.033	0.235	0.040								
GR	0.012	0.309	0.137	0.826**							
GP	0.543	0.582	0.007	0.418	0.521						
GI	-0.619	-0.410	-0.293	0.406	0.426	-0.031					
GS	0.647	0.415	0.122	-0.335	-0.445	0.157	-0.929**				
EL	-0.173	-0.003	0.055	0.557	0.728*	0.343	0.088	-0.125			
HL	0.013	0.203	0.156	0.245	0.684*	0.428	0.233	-0.384	0.583		
RL	0.091	0.365	0.288	0.636	0.923**	0.455	0.183	-0.326	0.764*	0.810**	
TSL	0.073	0.336	0.248	0.612	0.914**	0.473	0.170	-0.300	0.813**	0.835**	0.995**

注: SL、SW、ST 和 TGW 为种子长度、宽度、厚度和千粒重; GR、GP、GI 和 GS 为发芽率、发芽势、发芽指数和发芽速度; EL、HL、RL 和 TSL 为上胚轴、下胚轴、胚根长度和芽苗总长度。*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Notes: SL, SW, ST and TGW refer to seed length, width, thickness and weight of one thousand grains; GR, GP, GI and GS refer to germination rate, potential, index and speed; EL, HL, RL and TSL refer to lengths of epicotyl, hypocotyl, radicle and total seedling length. * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 种子形态差异

在种子形态和芽苗生长性状中,无论对于优树还是其嫁接无性系而言,种子形态性状的变异系数远小于芽苗生长性状,种子千粒重的变异系数最小,这与上述有关种子千粒重在优树间、嫁接无性系间以及优树与其对应无性系间均差异不显著的结果是一致的,其总体均值接近 100 g,超过了早期嫁接植株的 92.9 g^[12],这种差异可能与砧木差异有关,采种园所用的砧木为印度紫檀大树,能够保证其种实正常发育所需营养;亦可能

与采种园内遗传多样性较丰富有关,采种园内的无性系除了来自引种园,还有来自儋州等地的;还可能与年度气候条件较适宜檀香紫檀种实发育有关。无论如何,这充分说明檀香紫檀采种园种子较为饱满,从其种子萌发特性亦可以得到反映,说明采种园的营建是合理的。尽管如此,引种园和采种园的檀香紫檀种子千粒重与发芽率极显著相关,这与罗水兴等^[22]对降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)的研究结果一致。

3.2 种子萌发性状差异

檀香紫檀优树间种子发芽率、发芽势、发芽

速度, 芽苗上胚轴、下胚轴和胚根长度以及总长度存在显著差异, 以3号优树种子表现最佳; 各优树的嫁接无性系间种子发芽率、发芽势和发芽速度以及胚根长度和芽苗总长度差异显著, 5[#]号、7[#]号和9[#]号种子无性系总体上表现最佳。在采种育苗选择上, 3号优树和5[#]号、7[#]号和9[#]号宜作为采种母树。檀香紫檀优树与其对应无性系间在种子形态、萌发和芽苗生长性状上的差异因优树而异。9号和11号优树的种子长度, 5号、7号、9号和11号优树的种子宽度显著小于其对应无性系, 而5号优树的种子厚度显著大于对应无性系; 5号和7号优树的发芽率以及5号、7号和9号无性系的芽苗总长度显著低于其对应无性系。整体而言, 嫁接无性系的种子长度和宽度大于其对应优树, 发芽和芽苗生长表现优于其对应优树。

檀香紫檀优树与其嫁接无性系在种子萌发特性上的不一致, 可能与其所处的群体不一致有关, 嫁接种子园内收集了海南岛早期引种的檀香紫檀优树材料, 来自海南大学儋州校区、南热带植物园及中国医学科学院药用植物研究所海南分所兴隆南药园等地的优树嫁接无性系亦有开花结实, 其遗传基础更为广泛。3[#]号无性系的结实分株相对较少, 也可能存在抽样误差, 影响试验结果。随着采种园逐渐进入盛果期, 将对采种园内所有无性系的嫁接分株开展研究, 揭示各无性系在种子形态和萌发特征上的变异规律, 更好地为扩大檀香紫檀采种园建设服务。

参考文献

- [1] 陈仁利, 曾杰. 檀香紫檀资源培育与利用研究进展[J]. 热带作物学报, 2018, 39(7): 1462-1470.
CHEN R L, ZENG J. Research progress in cultivation and utilization for *Pterocarpus santalinus*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(7): 1462-1470. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 红木: GB/T 18107—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of China. Redwood: GB/T 18107—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [3] NAVADA K K, VITTAL R R. Ethnomedicinal value of *Pterocarpus santalinus* (Linn. f.), a Fabaceae member[J]. Oriental Pharmacy and Experimental Medicine, 2014, 14(4): 313-317.
- [4] PRAKASH O, KUMAR R, SRIVASTAVA R, TRIPATHI P, MISHRA S, AJEET A. Plants explored with anti-diabetic properties: a review[J]. American Journal of Pharmacological Sciences, 2015, 3(3): 55-66.
- [5] BULLE S, REDDYVARI H, NALLANCHAKRAVARTHULA V, VADDI D R. Therapeutic potential of *Pterocarpus santalinus* L.: an update[J]. Pharmacognosy Review, 2016, 10(19): 43-49.
- [6] 陈有义. 几种外引的速生珍贵用材树种试种报告[J]. 热带作物研究, 1980(3): 48-60.
CHEN Y Y. Preliminary report on trial planting of several externally introduced fast-growing precious timber species[J]. Tropical Crop Research, 1980(3): 48-60. (in Chinese)
- [7] 陈青度, 李小梅, 曾杰, 李朝文. 紫檀属树种在我国的引种概况及发展前景[J]. 广东林业科技, 2004, 20(2): 38-41.
CHEN Q D, LI X M, ZENG J, LI C W. Introduction status and perspectives of *Pterocarpus* in China[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2004, 20(2): 38-41. (in Chinese)
- [8] 杜丽敏, 梁居红, 麦有专, 黄小谦, 张一民. 檀香紫檀高压育苗技术总结[J]. 热带林业, 2016, 44(1): 35-36.
DU L M, LIANG J H, MAI Y Z, HUANG X Q, ZHANG Y M. Propagation of *Pterocarpus santalinus* L. f. by air-layering[J]. Tropical Forestry, 2016, 44(1): 35-36. (in Chinese)
- [9] 徐呈祥, 马艳萍, 彭碧琳, 潘建芳, 廖苑蓓. 珍贵红木树种檀香紫檀组培快繁体系的建立[J]. 南方农业学报, 2019, 50(12): 2741-2748.
XU C X, MA Y P, PENG B L, PAN J F, LIAO Y B. Tissue culture and rapid propagation of red sandalwood plantlets[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(12): 2741-2748. (in Chinese)
- [10] 李洪果, 马跃, 湛红辉, 贾宏炎, 刘光金, 刘福妹. 檀香紫檀嫁接育苗技术[J]. 湖南林业科技, 2014, 41(4): 55-57.
LI H G, MA Y, CHEN H H, JIA H Y, LIU G J, LIU F M. The grafting techniques of none self-specie stock in *Pterocarpus santalinus*[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2014, 41(4): 55-57. (in Chinese)
- [11] 农寿千, 黄川腾, 陈飞飞, 曾祥全, 林玲, 杨枝林. 檀香紫檀和大果紫檀的嫁接比较研究[J]. 热带林业, 2018, 46(1): 7-9.
NONG S Q, HAUNG C T, CHEN F F, ZENG X Q, LIN L, YANG Z L. The grafting comparative of *Pterocarpus santalinus* and *Pterocarpus macarocarpus*[J]. Tropical Forestry, 2018, 46(1): 7-9. (in Chinese)
- [12] 陈仁利, 郭俊杰, 王佳永, 曾杰, 罗水兴, 赵志刚, 刘建春. 一种促进檀香紫檀提早结实的嫁接方法: ZL201310247404.6[P]. 2014-09-10.
CHEN R L, GUO J J, WANG J Y, ZENG J, LUO S X,

- ZHAO Z G, LIU J C. A grafting method that promotes early fruiting of *Pterocarpus santalinus*: ZL201310247404.6[P]. 2014-09-10. (in Chinese)
- [13] 陈仁利, 曾杰. 檀香紫檀嫁接采种园营建及无性系生长差异研究[J]. 经济林研究, 2018, 36(3): 57-61.
- CHEN R L, ZENG J. Grafted seed orchard establishment and growth difference of *Pterocarpus santalinus* clones[J]. Non-wood Forest Research, 2018, 36(3): 57-61. (in Chinese)
- [14] 朱江华, 甘伟涛, 欧斌, 王建皓, 刘华新. 不同杉木半同胞家系种子品质比较分析研究[J]. 浙江林业科技, 2020, 40(1): 17-22.
- ZHU J H, GAN W T, OU B, WANG J H, LIU H X. Comparison on seed quality of different half-sib families of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2020, 40(1): 17-22. (in Chinese)
- [15] 程琳, 陈琴, 陈仕昌, 戴俊, 董利军, 陈晓明, 谭文婧, 陈代喜, 黄开勇, 李魁鹏, 蓝肖, 杨科明. 不同无性系杉木球果及种子质量研究[J]. 广西林业科学, 2021, 50(1): 1-7.
- CHENG L, CHEN Q, CHEN S C, DAI J, DONG L J, CHEN X M, TAN W J, CHEN D X, HUANG K Y, LI K P, LAN X, YANG K M. Study on cone and seed qualities among different *Cunninghamia lanceolata* clones[J]. Guangxi Forestry Science, 2021, 50(1): 1-7. (in Chinese)
- [16] DONOHUE K, DORN L, GRIFFITH C, KIM E, AGUILERA A, POLISETTY C R, SCHMITT J. The evolutionary ecology of seed germination of *Arabidopsis thaliana*: variable natural selection on germination timing[J]. Evolution, 2005, 59(4): 758-770.
- [17] DAYANAND T, LOHIDAS T. Effect of different treatments on pod germination of red sanders (*Pterocarpus santalinus* Linn. f.)[J]. Indian Journal of Forestry, 1988, 11(1): 87-88.
- [18] VIJAYALAKSHMI K P, RENGANAYAKI P R. Effect of pre-sowing treatment on germination of red sanders[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6(4): 168-173.
- [19] 陈青度, 李小梅, 曾杰. 紫檀属树种实生苗培育技术的研究[J]. 广东林业科技, 2004, 20(1): 47-50.
- CHEN Q D, LI X M, ZENG J. A note on seedling growth of some *Pterocarpus* species[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2004, 20(1): 47-50. (in Chinese)
- [20] 陈文宗, 湛振, 杨光穗, 黄素荣. 机械处理和酸处理对檀香紫檀发芽率和幼苗生长的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(12): 6-11.
- CHEN W Z, CHEN Z, YANG G S, HAUNG S R. Effects of different seeding treatments on germination rate and seedling growth of *Pterocarpus santalinus*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(12): 6-11. (in Chinese)
- [21] KARTHICK M, PARTHIBAN K T. Variation studies in seed physical and germination attributes of red sanders (*Pterocarpus santalinus*) genetic resources[J]. International Journal of Chemical Studies, 2019, 7(3): 3785-3789.
- [22] 罗水兴, 郭俊誉, 孙冰, 裴男才, 林明平, 李小飞. 降香黄檀不同种源/家系种质差异研究[J]. 种子, 2022, 41(7): 27-34, 41.
- LUO S X, GUO J Y, SUN B, PEI N C, LIN M P, LI X F. Study on the differences of germplasm resources of *Dalbergia odorifera* from different families[J]. Seed, 2022, 41(7): 27-34, 41. (in Chinese)