

湿地松改良种子园无性系的遗传评价及新一轮育种亲本选择*

邓乐平¹ 黄婷¹ 王哲² 吴惠珊² 李晓华¹
廖仿炎² 李义良² 郭文冰² 赵奋成²

(1. 台山市红岭种子园, 广东 台山 529223; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 台山湿地松 (*Pinus elliottii*) 改良种子园营建于1988—1997年, 为评价该种子园无性系的遗传品质, 项目组在种子园内采集无性系的自由授粉种子并营建子代测定林。文章根据1块营建在台山市红岭种子园的湿地松子代测定林4、13、18 a的生长性状数据, 分析了改良种子园的现实增益, 评价建园无性系的选择效果, 选择新一轮的育种亲本, 结果如下: 3个年份数据分析结果均显示, 在生长量方面, 改良种子园子代显著甚至极显著大于湿地松一代种子园子代, 18 a生时, 树高、胸径、单株材积的平均现实增益分别为3.09%、4.70%、15.08%; 根据单株材积育种选择出优良亲本无性系6个, 其育种值介于0.050 5~0.186 1 m³, 其中有5个亲本无性系的遗传品质已得到多次验证, 可以作为新一轮的育种亲本甚至是核心育种亲本; 新选优树15株, 其单株材积育种值介于0.114 9~0.276 9 m³, 可充实到新一轮的育种群体中。

关键词 湿地松; 改良种子园; 现实增益; 育种值; 二代优树选择

中图分类号: S722 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2020) 04-0001-07

Genetic Analysis of Clones and A New Round Breeding Parents Selection in the Improved Slash Pine Seed Orchard

DENG Leping¹ HUANG Ting¹ WANG Zhe² WU Huishan²
LI Xiaohua¹ LIAO Fangyan² LI Yiliang²
GUO Wenbing² ZHAO Fencheng²

(1. Hongling Seed Orchard, Taishan, Guangdong 529223, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The improved slash pine (*Pinus elliottii*) seed orchard in Taishan was built in 1988-1997. In order to evaluate the genetic quality of clones in the seed orchard, the project team collected open pollinated seeds and established progeny test forests. This research was based on the data of the growth traits of 4, 13 and 18 a which collected from one of the progeny test forests located in Taishan Hongling Seed Orchard. The actual gain of the improved seed orchard was analyzed, and the selection effect of the clones for establishing the seed orchard was evaluated. All analyses were used for a new round breeding parent selection. The results were as follows: the data analysis results of the three different years all showed that in terms of growth traits, progeny of the improved

* 基金项目: 广东省科技计划项目 (2017B020205003)。

第一作者: 邓乐平 (1984—), 男, 工程师, 主要从事国外松育种研究, E-mail: dengle1984@126.com。

通信作者: 赵奋成 (1963—), 男, 研究员, 主要从事松树遗传改良研究, E-mail: zhaofc@sinogaf.cn。

seed orchard was significantly or even significantly greater than that of the first-generation seed orchard. At the age of 18, the average actual gains in tree height, breast diameter, and single tree volume were 3.09%, 4.70%, and 15.08% respectively. According to the breeding value of single tree volume, 6 excellent parent clones were selected, which breeding value was between 0.050 5-0.186 1 m³. Among them, 5 parent clones which are good genetic quality have been verified several times. These clones can be used as a new round of breeding parents or even core breeding parents. Fifteen newly selected excellent trees, which breeding value of single plant volume was between 0.114 9-0.276 9 m³, can be enriched into a new round of breeding population.

Key words *Pinus elliottii*; the improved seed orchard; actual gain; breeding value; the second-generation seed orchard

遗传测定是林木改良工作的中心环节,通过开展遗传测定评价亲本的育种价值、选择新一轮的育种亲本、估计遗传参数和验证或预估遗传增益^[1-2]。林木育种中子代测定的交配设计种类多样,每种设计各有利弊,其中,自由授粉交配设计虽然存在父本来源不清、不能估计特殊配合力信息等方面的不足,但该方法具有技术简单易行、成本低等优点,能够提供母本的一般配合力信息,为种子园的去劣疏伐提供依据^[1],因而在多个树种的改良活动中受到广泛应用,我国的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、火炬松(*P. taeda*)等树种均有关于利用自由授粉子代开展遗传测定的研究报道^[3-6]。

湿地松(*P. elliottii*)原产美国东南部,具有适应性强、早期速生、树干通直、松脂产量高质量好等优点,是重要的建筑材、纸浆材和产脂树种,在世界上多个国家和地区均有引种^[7-8]。湿地松于1930年代引入我国,在我国南部低山丘陵、沿海地区表现优良,目前我国南方省区主要的商品林树种。我国开展湿地松良种选育始于1964年^[7,9],经过几代人的努力,在广东省台山县(市)建起国内的第一个湿地松初级种子园、一代种子园、改良种子园、精选种子园和二代种子园。其中,湿地松改良种子园生产区建于1988—1997年,面积52 hm²,建园无性系147个。建园材料来源广泛,包括美国佐治亚州湿地松种子园的优良无性系、台山湿地松初级种子园中经过子代测定后向选择的优良无性系、子代测定林和种源试验林中前向选择的优树无性系。由于多数建园无性系的遗传品质尚未验证,因此,项目组在该种子园中多批次采收无性系的自由授粉种子并开展多地点遗传测定。本文报道早期营建的1块测定

林的测定结果。

1 材料与方法

1.1 材料来源

参试材料为28个湿地松自由授粉家系。其中,9个来自台山湿地松一代种子园,19个来自台山湿地松改良种子园。

1.2 试验地点

试验林营建在台山市红岭种子园试验区内。该园地处22°11'N, 112°49'E,属亚热带海洋性气候,年均温21.8℃,年降水量1940 mm,平均海拔30 m。土壤为花岗岩发育的酸性砖红壤,pH值5.0~5.5,土层80~100 cm。自然条件适合湿地松生长发育、开花结实。该林地前茬为桉树,但土壤肥力较低。

1.3 田间设计

上述家系种子于1999年12月育苗。2000年6月造林,株行距3 m×3 m。测定林采用随机完全区组设计,8次重复,5株单行小区。试验区四周种植2行保护行。

1.4 生长量调查

分别于造林后第2、3、4、13、14、15、18年对测定林开展年度生长量调查,测量每木的树高(ht,单位为m)和胸径(dbh,单位为cm),并计算单株材积(vol,单位为m³)。材积计算式为: $vol=f \times \pi \times ht \times dbh^2/4$ 。式中, π 为圆周率; f 为形数,取0.5。

考虑到本文的主要目的是评价参试家系的遗传品质和选择新一代的育种材料,将仅利用第4、13、18年的调查数据作分析。

1.5 数据统计分析

采用SAS统计分析软件MIXED过程对生长

数据作方差分析^[10]，估计改良种子园和一代种子园子代的生长性状平均值 (lsmean) 并作差异显著性比较。单株数据统计分析的线性模型为： $y_{ijkl}=\mu+b_i+g_j+f(g)_{k(j)}+(bg)_{ij}+(bf(g))_{ik(j)}+e_{ijkl}$ ，式中 y_{ijkl} 为单株观测值， μ 为群体平均值， b_i 为区组效应， g_j 为种子园效应， $f(g)_{k(j)}$ 为种子园内家系效应， $(bg)_{ij}$ 为区组与种子园的互作效应， $(bf(g))_{ik(j)}$ 为区组与种子园内家系的互作效应， e_{ijkl} 为误差效应。其中，种子园、种子园内家系为固定效应，其它因素为随机效应。

采用 Asreml 统计软件 BLUP 方法估计湿地松改良种子园 19 个家系的母本育种值和子代个体育种值^[11-12]。

采用 SAS 统计分析软件 CORR 过程的 pearson 方法计算母本育种值的年度相关系数^[13]。

2 结果与分析

2.1 湿地松子代测定林的总体生长表现

表 1 列出测定林 3 个测定年龄的生长量。由表 1 可见，林分保存率 (sur) 在 4 a 生时为 97.40%，到 13 a 生时仍然高达 92.60%，到 18 a

生时林分的保存率仅为 52.9%。测定林 4 a 生时平均树高 4.20 m，平均胸径 6.76 cm，年平均树高 1.05 m、胸径 1.67 cm；到 13 a 生时，林分平均树高为 10.53 m、平均胸径 14.91 cm，4~13 a 生间的年均树高、胸径分别为 0.70 m、0.91 cm；到 18 a 生时，树高、胸径年生长量下降更为明显，甚至出现单位面积蓄积量小于 13 a 生时的情况。保存率和生长量下降虽然与树种自身的生物学特性有关，但与 2014—2018 年间该测定林作生产性的松脂采割有更大的关系。

2.2 湿地松改良种子园无性系的现实增益

根据参试家系的来源背景，把来自湿地松一代种子园的 9 个自由授粉家系归为一代种子园子代群体，把来自改良种子园的 19 个自由授粉家系归为改良种子园子代群体，对 3 个年份试验数据作方差分析，结果显示 2 个种子园间生长量存在显著甚至极显著的差异 (4、13 a 生时， $F=20.99\sim33.80$ ， $P<0.000\ 1$ ；18 a 生时， $F=5.15\sim7.45$ ， $P=0.006\ 8\sim0.024\ 2$)。改良种子园子代生长量显著大于一代种子园子代 (表 2)，在 4、13、18 a 时，改良种子园子代相对于一代种子园的单株材积现实增益分别为 25.66%、22.68% 和

表 1 湿地松子代测定林 3 个年龄的生长表现
Table 1 The growth performance of progeny test forest of slash pine in three different years

年龄 /a Age	树高 /m ht	胸径 /cm dbh	单株材积 / m ³ vol	保存率 /% sur	单位面积蓄积量 / (m ³ · hm ⁻²) Volume per unit area
4	4.20(0.02)	6.76(0.04)	0.008 2(0.000 1)	97.40	8.87
13	10.53(0.05)	14.91(0.11)	0.100 6(0.018 0)	92.60	103.50
18	13.07(0.06)	17.58(0.15)	0.169 6(0.003 5)	52.90	99.68

注：表中括号内数字为标准误；sur 为林分保存率。
Note: the numbers in parentheses in the table are standard errors; sur is the preservation rate.

表 2 湿地松改良种子园子代与一代种子园子代 3 个年龄的生长差异比较
Table 2 Comparison of growth differences between the progeny of slash pine in the improved seed orchard and the first-generation seed orchard in three different years

年龄 /a Age	种子来源 Seed source	平均值 (标准误) Mean (standard error)			现实增益 /% Actual gain		
		ht/m	dbh/cm	vol/m ³	ht	dbh	vol
4	改良种子园	4.27(0.04)a	6.86(0.06)a	0.008 6(0.000 2)a	6.76	6.95	25.66
	一代种子园	4.00(0.05)b	6.42(0.08)b	0.006 9(0.000 3)b			
13	改良种子园	10.66(0.15)a	15.13(0.16)a	0.105 0(0.003 2)a	5.11	7.52	22.68
	一代种子园	10.14(0.16)b	14.07(0.22)b	0.085 6(0.004 1)b			
18	改良种子园	13.18(0.16)a	17.64(0.17)a	0.172 5(0.004 8)a	3.09	4.70	15.08
	一代种子园	12.79(0.19)b	16.85(0.30)b	0.149 9(0.007 6)b			

注：表中括号内的数据为标准误；数字后的字母不同表示 2 个种子来源在相同测定年龄的生长差异达到显著水平 ($P<0.05$)。
Note: the data in parentheses in the table is the standard error; the different letters after the numbers indicate that the growth difference of the two seed sources at the same age reaches a significant level ($P<0.05$).

15.08%。说明改良种子园子代生长优势的表现是稳定的,也说明建园无性系选择有效。

2.3 湿地松改良种子园 19 个无性系的遗传评价

利用 BLUP 估计了来自改良种子园的 19 个自由授粉参试家系的母本无性系的生长性状育种值(表 3), 19 个无性系的育种值差异明显, 在 4 a 生时, 树高性状的育种值介于 $-0.81 \sim 1.39$ m 之间, 13 a 生时介于 $-2.19 \sim 1.70$ m 之间, 18 a 生时介于 $-1.95 \sim 1.59$ m 之间。胸径、单株材积的育种值也显示出大的变异范围。由表中还可见, 总体上, 母本无性系在 3 个年龄的育种值的排序基本一致。4 a 生树高育种值与 13 a、18 a 生的育种值相关系数分别为 0.835 3、0.740 7, 4 a 生单株材积育种值与 13、18 a 生时的单株材积育种值的相关系数分别为 0.956 9、0.918 5(表 4), 均达到极显著水平。说明湿地松无性系生长性状的育种值在早、中、后期是相对稳定的。

改良种子园中, 7 个从美国引进的无性系的育种值差异很大, 育种值较大的无性系分别为 C09、C12、C13, 其中无性系 C09 的生长表现尤为突出, 在参试的 19 个无性系中育种值最大, 其 18 a

生时的单株材积育种值为 $0.186 1 \text{ m}^3$, 比群体平均值大 107.89%。另外 4 个无性系的育种值较小, 其中无性系 C15 的单株材积育种值为 $-0.092 6 \text{ m}^3$, 在参试的 19 个无性系中最小。说明直接从国外种子园引进无性系有一定的效果, 但也存在一定的风险, 需要作测定、比较。

来自台山湿地松一代种子园的 6 个无性系(后向选择)中, C16 的育种值最大, 其 18 a 生时的单株材积育种值为 $0.116 5 \text{ m}^3$, 比群体平均大 67.55%。其他 5 个处于中等偏小水平。显示选择群体遗传品质不高或选择的准确性偏低。

早期子代测定林中选择 4 个优树无性系(前向选择)中, C16 的子代 C16-4 的单株材积育种值最大, 18 a 生时为 $0.061 9 \text{ m}^3$, 比群体平均大 35.88%; C16-1 的育种值略低于群体平均, C19-2 和 C25 的育种值更小。比较母本无性系 C16、C19 与子代无性系 C16-1、C16-4、C19-2 的育种值可以发现, 育种值大的母本, 其子代的育种值也较大, 此外, 子代的育种值低于母本的育种值。

选自种源试验林的 2 个优树无性系, 其生长性状育种值在参试的 19 个无性系中处于中等或中

表 3 湿地松改良种子园 19 个母本无性系 3 个年龄的生长性状育种值

Table 3 The breeding values of 19 clones of improved slash pine seed orchard at 3 ages in the improved seed orchard

无性系来源 Clone source	无性系 Clone	4 a			13 a			18 a		
		ht/m	dbh/cm	vol/ m^3	ht/m	dbh/cm	vol/ m^3	ht/m	dbh/cm	vol/ m^3
美国种子园 American Seed Orchard	C9	1.39	3.04	0.013 0	1.68	7.89	0.142 7	1.04	8.07	0.186 1
	C10	-0.73	-1.53	-0.004 9	-1.30	-2.95	-0.050 6	-0.92	-2.67	-0.064 0
	C11	-0.40	-1.03	-0.003 0	0.21	-3.09	-0.034 4	0.47	-3.70	-0.052 3
	C12	0.40	1.46	0.005 3	0.92	4.47	0.078 0	0.86	4.56	0.114 1
	C13	0.04	0.70	0.001 3	1.03	2.45	0.041 6	1.15	3.24	0.076 7
	C14	-0.29	-0.37	-0.001 7	-0.44	-1.25	-0.024 6	-0.37	-1.41	-0.035 9
	C15	-0.81	-1.51	-0.004 3	-2.19	-3.22	-0.056 4	-1.95	-4.50	-0.092 6
一代种子园 The first-generation Seed orchard	C16	0.58	0.92	0.003 2	1.70	3.03	0.066 3	1.59	4.41	0.116 5
	C19	-0.29	-0.52	-0.002 3	-0.19	-1.35	-0.024 8	-0.26	-1.60	-0.037 3
	C21	0.04	0.48	0.000 3	-0.76	-0.29	-0.021 1	-0.76	-1.59	-0.049 5
	C22	0.14	-0.37	-0.000 9	-0.22	-1.42	-0.022 6	-0.59	-2.28	-0.061 4
	C23	-0.35	-1.00	-0.003 7	-0.97	-3.11	-0.053 3	-0.94	-2.81	-0.069 8
	C24	-0.10	-0.02	-0.000 5	0.02	-0.41	-0.011 7	-0.22	0.00	-0.010 9
	C16-1	-0.29	-0.44	-0.002 0	-0.05	-0.71	-0.014 0	-0.10	-0.63	-0.018 1
子代测定林 Progeny test forest	C16-4	0.38	0.67	0.002 6	1.49	2.78	0.050 9	0.81	2.67	0.061 9
	C19-2	-0.63	-0.97	-0.004 0	-1.02	-1.88	-0.039 5	-0.26	-1.63	-0.045 6
	C25	-0.41	-0.96	-0.003 5	-0.93	-2.35	-0.047 5	-0.49	-2.55	-0.063 6
种源试验林 Provenance test forest	C26	0.95	0.86	0.003 5	0.84	1.08	0.017 1	1.12	2.22	0.050 5
	C27	0.38	0.59	0.001 7	0.17	0.33	0.004 0	-0.15	0.21	-0.004 9

表 4 湿地松改良种子园 19 个母本无性系 3 个年龄生长性状育种值间的相关系数
Table 4 Correlation coefficient between breeding values of growth traits of 19 maternal clones in 3 observation years

性状 Trait	ht13	ht18	dbh04	dbh13	dbh18	vol04	vol13	vol18
ht04	0.835 3**	0.740 7**	0.936 3**	0.870 8**	0.865 3**	0.942 8**	0.870 2**	0.848 4**
ht13		0.948 4**	0.830 2**	0.847 0**	0.877 4**	0.808 5**	0.881 2**	0.896 2**
ht18			0.734 0**	0.763 9**	0.828 4**	0.703 3**	0.801 3**	0.860 9**
dbh04				0.967 3**	0.939 8**	0.983 6**	0.949 4**	0.919 6**
dbh13					0.981 1**	0.961 8**	0.990 6**	0.971 1**
dbh18						0.928 5**	0.977 4**	0.990 3**
vol04							0.956 9**	0.918 5**
vol13								0.983 1**

注：性状名称中，英文字母 ht、dbh、vol 分别代表树高、胸径、单株材积，英文字母后的数字 04、13、18 代表观测性状时的林分年龄；“**”表示相关性达到极显著水平（ $P<0.01$ ）。

Note: in the trait names, the English letters ht, dbh, and vol represent the tree height, DBH, and volume per plant, respectively, and the numbers 04, 13, and 18 after the English letters represent the stand age when the trait is observed. “**” means that the correlation reaches a very significant level ($P<0.01$).

上水平，其中，无性系 C26 的育种值较大，其在 18 a 生时的单株材积育种值为 $0.050\ 5\ \text{m}^3$ ，比群体平均值大 29.28%。

2.4 新一代育种资源选择

利用 Asreml 软件估计来自湿地松改良种子园 19 个无性系的自由授粉子代的树高、胸径、单株

材积育种值，按入选率为 3% 的比例选择生长表现优良的个体，预期选择优树 15 株。在评选优良单株中，本文采用了 2 种选择模式，模式一：是根据单株育种值排序，选择单株材积育种值最大的 15 株树木；模式二：首先选择生长量大于群体平均值的家系，然后在每个人选家系内选择 2~3

表 5 入选湿地松优树 18 a 生时的生长性状育种值
Table 5 The breeding value of the growth traits of the selected slash pine plus trees at the age of 18

优树 Plus trees	育种值 Breeding value			选择模式 Select mode	
	ht/m	dbh/cm	vol/m ³	模式一 Mode 1	模式二 Mode 2
F09C1	0.80	9.03	0.252 3	✓	✓
F09C2	0.77	8.93	0.247 7	✓	✓
F09C3	0.82	9.34	0.239 5	✓	✓
F09C4	0.53	9.06	0.219 6	✓	
F09C5	0.94	6.97	0.191 2	✓	
F12C1	0.92	6.28	0.161 6	✓	✓
F12C2	0.92	8.42	0.215 7	✓	✓
F12C3	1.11	7.40	0.201 5	✓	✓
F13C1	0.91	9.61	0.253 6	✓	✓
F13C2	1.71	7.41	0.210 3	✓	✓
F16C1	1.43	9.71	0.276 9	✓	✓
F16C2	1.70	7.37	0.211 8	✓	✓
F16C3	1.64	6.38	0.192 9	✓	✓
F16-4C1	0.61	9.76	0.233 0	✓	✓
F16-4C2	0.40	7.10	0.164 9		✓
F26C1	1.33	7.13	0.192 2	✓	✓
F26C2	1.05	4.53	0.114 9		✓
平均值	1.06/1.06	8.01/7.90	0.215 4/0.209 1		

注：平均值中，符号“/”左、右侧数字分别为模式一、二入选优树的育种值平均值。

Note: in the average value, the numbers on the left and right of the symbol “/” are the average breeding values of selected trees of mode one and two respectively.

株育种值最大的个体,共选择优良单株15株。2种选择模式的评选结果列于表5。由表5可见,2种选择模式共选择优树17株,其中有13株优树在2种选择模式中同时入选,均来自6个优良家系。模式一入选的15株优树中,由于对家系内的单株选择数量没有约束,因此,家系F09内入选数量达5株,而家系F16-4、F26的入选优树仅各有1株。模式一入选优树的树高、胸径、单株材积育种值分别介于0.40~1.71 m、6.28~9.71 cm、0.161 6~0.276 9 m³,平均值分别为1.06 m、8.01 cm、0.215 4 m³。模式二入选优树的树高、胸径、单株材积育种值分别介于0.40~1.71 m、4.53~9.76 cm、0.114 9~0.276 9 m³,平均值分别为1.06 m、7.90 cm、0.209 1 m³。显示这2种模式的选择效果近似。考虑到育种群体遗传多样性的需要,采用模式二评选优树比较合适。

3 讨论与结论

本试验结果显示,与一代种子园的子代比较,改良种子园19个无性系的子代在3个测定年龄都表现出明显的生长优势,在4、13、18 a生时的单株材积现实增益介于15.08%~25.66%,该结果与改良种子园的预期材积增益接近^[9],由于这19个无性系的分株数量占了整个湿地松改良种子园的62.79%,其平均表现基本反映了该种子园的总体水平,因此,本结果也表明湿地松改良种子园的遗传品质达到了预期效果。

参试的改良种子园19个家系的母本无性系中,生长性状育种值较大的无性系有6个,其中,3个为直接从美国湿地松种子园引进的无性系C09、C12、C13,1个为台山湿地松初级种子园的优良无性系C16,1个为该优良无性系的自由授粉子代C16-4,1个为1湿地松种源试验林的优树无性系C26。前5个无性系遗传品质在其他试验中同样表现优良^[14-16],因此,可以继续作为新一轮的育种亲本甚至是核心育种亲本。有多个研究表明,火炬松、湿地松、湿加松等树种的子代测定具有良好的早晚相关,开展早期选择是有效的^[17-19]。本研究结果显示,19个无性系的4、13、18 a生的生长性状育种值存在极显著的正相关,尤以13 a生与18 a生的育种值相关性更为密切,再次证实南方松树开展早期选择是可靠的。

林木的多世代轮回选择育种中,优树选择是

重要的育种活动之一,随着林木育种进入高世代,育种群体将主要由来自遗传测定林的优树无性系组成。在高世代育种亲本的选择,要兼顾选择增益与遗传多样性,为了避免出现入选优树仅选自某些优良家系的情况,通常设定入选家系内优良个体的入选比例或数量^[20]。基于这方面的考虑,本文设定了整个测定林中优树入选率为3%、每个入选家系内选择2~3株的限制,根据单株材积育种值从6个家系中共选择出优良个体15株。我国现阶段湿地松的重要经济性状主要是材积、松脂产量、木材密度,本文仅针对生长性状评选优良个体,后期还要评价其松脂产量和木材密度,为不同的育种目标提供合适的育种亲本。由于湿地松生长性状与松脂产量或木材密度的遗传相关性不高^[21-23],甚至负相关^[24],这15个生长优势突出的个体中,一些个体将可能因其他性状未能达标而被淘汰。

普遍认为,林木存在自交或近交不育和衰退的可能性^[1]。因此,在制订林木高世代育种策略中,强调采用双亲谱系清楚的交配设计^[25],而不提倡父系来源不清的自由授粉或多系授粉交配设计。现在,随着分子标记技术的发展和完善,育种亲本间遗传关系的鉴别成为了可能^[26-28],有人提出从自由授粉子代、多系授粉子代中选择优良个体作为育种亲本的设想^[29-30],并付诸实践^[28-31]。本研究从自由授粉子代测定林中根据生长性状育种值选择出一批优良个体,下一步要通过分子标记手段,确定入选优树的谱系关系、遗传距离等,为设计新的交配组合,以及种子园无性系排列提供科学依据。

松材线虫病是全球森林生态系统中最具危险性、毁灭性的病害之一,全国因松材线虫病损失的松树累计仍达数十亿株,造成的直接经济损失和生态服务价值损失上千亿元。危害对象包括马尾松、黑松(*Pinus thunbergii*)、红松(*P. koraiensis*)、落叶松(*Larix olgensis*)等松树种类,疫情直接威胁我国近9亿亩松林资源安全^[32]。据报道,广东发生松材线虫病的情况也不容乐观^[33-34],但湿地松林分感病率相对较低^[34]。同时,研究也发现^[35-36],原产于美国的湿地松、火炬松对松材线虫病具有较高的抗性。因此,可以利用我国现有的湿地松、火炬松育种资源,与国内的其他松树开展杂交育种,选育出抗松材线虫病的新品系,

提升我国松树人工林的综合效益。

参考文献

- [1] 王明庥. 林木遗传育种学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 166-171; 180-182.
- [2] 怀特 TL, 亚当斯 WT, 尼尔 DB.(崔建国, 李火根主译). 森林遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 315-332.
- [3] 钟伟华, 周达, 何昭珩, 等. 149个火炬松自由授粉家系的生长表现[J]. 华南农业大学学报, 1998,19(1): 85-90.
- [4] 阮梓材. 杉木种子园100个自由授粉子代的生长表现分析[J]. 广东林业科技, 1987,3(5): 6-17.
- [5] 冯源恒, 陈虎, 梁远毅, 等. 24年生马尾松种子园自由授粉子代测定及家系选择[J]. 广西林业科学, 2016, 45(1): 1-5.
- [6] 杨秀艳, 张守攻, 孙晓梅, 等. 北亚热带高山区日本落叶松自由授粉家系遗传测定与二代优树选择[J]. 林业科学, 2010, 46(8): 45-50.
- [7] 朱志淞, 丁衍畴. 湿地松[M]. 广州: 广东科技出版社, 1993: 1-4; 29-97; 125-173.
- [8] 潘志刚, 游应天. 中国主要外来树种引种栽培[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994: 126-140.
- [9] 黄永权, 林新, 王华南, 等. 联合国援助我国湿地松火炬松改良种子园项目实施的技术措施及其成果[J]. 广东林业科技, 1998, 14(2): 46-51.
- [10] 高惠璇. SAS系统 SAS/STAT 软件使用手册[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997: 339-363.
- [11] 林元震, 陈晓阳. R与ASReml-R统计分析教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 198-261.
- [12] 艾斯克 F, 霍兰德 J, 蒙特卡 C(林元震、丁俊昌主译). 动植物育种遗传数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 79-107.
- [13] 高惠璇. SAS系统 Base SAS 软件使用手册[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997: 369-381.
- [14] 赵奋成, 李宪政, 黄永达, 等. 湿地松改良种子园部分无性系的早期遗传评价[J]. 广东林业科技, 2001,17(2): 1-6.
- [15] 张应中, 赵奋成, 林军, 等. 湿加松在粤北山区早期生长表现初报[J]. 林业科学研究, 2007,20(4): 556-562.
- [16] 赵奋成, 李宪政, 张应中, 等. 湿地松与洪都拉斯加勒比松的杂交效果分析[J]. 林业科学研究, 2006,19(4): 409-415.
- [17] 钟伟华, 陈炳铨, 黄少伟. 火炬松早期选择研究与应用[G]//白嘉雨, 钟伟华. 南方林木遗传育种研究. 北京: 中国林业出版社, 2006: 128-137.
- [18] 赵奋成, 林昌明, 吴惠珊, 等. 湿地松生长性状遗传参数的年度变化趋势[J]. 广东林业科技, 2015, 31(5): 1-7.
- [19] HODGE G R, WHITE T L. Genetic parameter estimates for growth traits at different ages in slash pine and some implications for breeding[J]. Silvae Genetica, 1992, 41(4-5): 252-262.
- [20] 马常耕. 高世代种子园营建研究的进展[J]. 世界林业研究, 1994,7(1): 32-38.
- [21] 冷春晖, 张露, 易敏, 等. 湿地松产脂量与生长及树冠性状多点遗传相关及通径分析[J]. 核农学报, 2020, 34(7): 1598-1605.
- [22] 赵奋成, 郭文冰, 钟岁英, 等. 基于针刺仪测定技术的湿地松木材密度间接选择效果[J]. 林业科学, 2018, 54(10): 172-179.
- [23] 许业洲, 杜超群, 范邦海, 等. 湿地松高产脂家系产脂量与胸径结构差异及其相关关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(8): 7-13.
- [24] 吴际友, 龙应忠, 余格非, 等. 湿地松半同胞家系主要经济性状的遗传分析及联合选择[J]. 林业科学, 2000(S1): 56-61.
- [25] 沈熙环. 我国林木良种基地建设现状及当前工作重点[J]. 林业科技开发, 2010, 24(2): 1-3.
- [26] 王建忠, 兰俊, 陆珍先, 等. 基于SSR分子标记的桉树父本鉴定技术研究[J]. 桉树科技, 2019, 36(2): 1-8.
- [27] 张含国, 张磊, 朱航勇, 等. 落叶松杂种与亲本ISSR鉴别技术[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(7): 1-4.
- [28] 袁虎威, 王晓飞, 杜清平, 等. 基于BWB的油松初级种子园混合子代优树选择与配置设计[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(11): 28-34.
- [29] Lambeth c, Lee b-c, O'malley d, et al. Polymix breeding with parental analysis of progeny: an alternative to full-sib breeding and testing[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2001, 103(6-7): 930-943.
- [30] Elkassaby y a, Lstibůrek m. Breeding without breeding[J]. Genetics Research, 2009, 91(2): 111-120.
- [31] 董雷鸣, 张守攻, 孙晓梅. 系谱重建在日本落叶松自由授粉子代测定中的应用[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 27-35.
- [32] 耿国彪. 防治松材线虫病, 让森林重回健康[J]. 绿色中国, 2019(4): 49-51.
- [33] 叶燕华, 刘建锋, 秦长生. 广东省林业有害生物防治检疫体系构建[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(1): 85-89.
- [34] 黄焕华, 黄华毅, 黄咏槐, 等. 调控松林树种结构防控松材线虫病技术[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 146-151.
- [35] 徐六一, 章健, 高景斌, 等. 安徽省松材线虫病抗性育种研究进展[J]. 安徽林业科技, 2013, 39(2): 8-10;14.
- [36] 高景斌, 冈村政则. 松树抗病育种研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13632-13635.