

# 柚木无性系耐酸性和耐铝(Al)毒性的测定\*

潘一峰 邝炳朝 刘文明

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 510520, 广州; 第一作者 36 岁, 男, 助理研究员)

**摘要** 在种源的抗性和速生性状选择的基础上, 再选出具有抗旱、耐酸和速生性状的优树, 以其作为无性系原株, 经组培继代繁殖后的无性系作耐酸、耐 Al 毒性测定。从测定结果中选出 17 个耐酸性和 6 个耐 Al 毒性的柚木无性系, 其聚合遗传增益达 26.2% ~ 106.3%。以后对选出的无性系将安排在中试推广中进一步作大田测定, 以验证其耐酸、耐 Al 毒性能。

**关键词** 柚木无性系; 耐酸性; 耐 Al 毒性

**分类号** S722.36

我国适宜柚木(*Tectona grandis* L.f.)栽培的区域遍及热带和南亚热带, 面积约有 48 万 km<sup>2</sup>, 引种成功的有南方 7 省(区)的 70 多个县(市)。但在此范围内酸性至强酸性的土壤面积约占 2/3。燃煤与工业废气形成的酸雨, 更加重了土壤的酸化过程及其危害性。70 年代中至 80 年代初期, 曾分别在福建龙海、广东增城和广州等地的强酸性赤红壤上营造了几片柚木种源试验林, 连续数年的生长观测表明: 在强酸性的土壤(pH < 4.2)条件下, 不同种源的生长与成活率/死亡率差别大, 一些种源在 2~3 a 内相继死亡, 一些则能保持较高的成活率; 施入石灰之后, 种源间的不同反应亦甚为强烈。由此引发了选育耐酸性土壤的基因型和改良土壤的研究, 以期利用柚木木材的昂贵价值及其优越的改土、保水(通过凋落物的有机质积累)特性, 改变南方山区的树种结构、生态面貌和丰富山区的经济资源。

酸性与强酸性土壤的贫瘠导致植物生长不良甚至死亡的原因虽然复杂, 然而其中的 2 个原因已被公认, 其一是 H、Mn 和 Al 已达到中毒的浓度, 其二是 P、Ca、Mg、Mo 等营养元素的缺乏。Blamey 和 Asher 认为: “培育和筛选耐酸性、特别是耐 Al 的作物品种, 对于克服酸性土壤问题具有一定的前途。然而, 最实惠的将可能是土壤改良和遗传适应相结合的应用”<sup>[1]</sup>。这就是本课题开展研究的主要依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

来自 12 个国家(包括全部原产地国家)的 94 个种源中, 经大田生长和抗旱、抗病性测定后选出 6 个具有速生、抗旱、耐酸性土等多种优良性状的种源(表 1)。在此基础上选出优良单株, 以茎尖为外植体经组培繁殖出 70 个无性系。同一无性系的试验材料其基因型完全一致, 避免在不同处理间可能由于材料中的遗传差异而造成的干扰。

\* 本文为林业部“八五”重点课题“柚木遗传改良”内容之一。  
1998-05-08 收稿。

表 1 参试材料的背景

种源号	种源名称	无性系数/个	地理位置		海拔高 /m	年降水量 /mm	遗传增益 <sup>①</sup> %			聚合遗传 增益累加 值%
			(°)N	(°)E			材积	抗锈病	抗旱	
3070	Sungam, India	20	08 36	77 20	700	-	22.4	47.4	62.7	115.9
3071	Stuart Mt, India	15	10 30	76 47	640	2 032	38.6	48.7	62.0	121.6
3072	Masale, India	15	11 55	76 10	823	1 270	17.4	27.2	56.6	105.6
3074	Virnoli, India	11	15 12	74 28	488	2 030	15.7	31.1	55.3	83.2
3078	Gambarl, Nigeria	5	07 10	03 52	122	1 149	15.2	-	-	24.5
7504 <sup>②</sup> (8204)	尖峰/[缅甸]	4	18 42	108 49	87	1 500	20.0	-	-	20.0

注: ①遗传增益数据为多地点种源选择结果的平均值; ②7504 为家系号属 8204 种源, 其无性系原株是从 pH < 4.5 的大田试验中选出。

## 1.2 方法

1.2.1 耐酸性的测定 参试无性系 40 个。耐酸性测定采用 MS 液体培养基, 设置培养基的 pH 值分别为 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 的 5 个处理。每一处理用 9 株无性系组培无根试管苗, 分 3 瓶, 每瓶 3 株(相当于 3 株 1 小区, 3 重复的随机区组设计)。每一处理的无性系完全相同。培养室温度调控至 23~28℃, 每天 12 h 光照, 光照强度 2 000 lx。开始培养日期为 1993 年 10 月 23 日, 培养过程中, 每 7 d 更换 1 次培养液, 分别培养至 30 d 和 60 d 进行观测。观测指标为苗高生长、根系长度。

1.2.2 耐 Al 毒性测定 无性系耐活性 Al 毒害的试验测定, 采用如下培养液成分(单位:  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>:

KNO <sub>3</sub>	794,	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	500,	MnSO <sub>4</sub>	0.2,	IAA	0.2 mg · L <sup>-1</sup> ,
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	150,	Fe-EDTA	20,	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	8.0,	pH	4.5,
CuSO <sub>4</sub>	0.2,	ZnSO <sub>4</sub>	0.2,	蔗糖	10,		
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> M <sub>0</sub> 7O <sub>24</sub>	0.2,	MgSO <sub>4</sub>	100,	IBA	1 mg · L <sup>-1</sup> ,		

用 AlCl<sub>3</sub> 调配如下 5 个处理<sup>[3]</sup>:

- (1) AlCl<sub>3</sub> 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相应的 Al 离子活度 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (CK)
- (2) AlCl<sub>3</sub> 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相应的 Al 离子活度 4.66  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- (3) AlCl<sub>3</sub> 30  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相应的 Al 离子活度 13.99  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- (4) AlCl<sub>3</sub> 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相应的 Al 离子活度 46.62  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- (5) AlCl<sub>3</sub> 500  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相应的 Al 离子活度 233.2  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

参试无性系 40 个, 每个无性系、每处理为 5 瓶, 每瓶 2 株。其接种用苗、培养条件及培养过程和管理均与 pH 值的试验相同, 分别培养 20 d 与 60 d 后进行观测。观测指标: 苗高生长、萌芽数、成活率/死亡率。

1.2.3 统计分析方法 以瓶内(小区)平均数作方差分析, 成活率的百分数作  $\sin^{-1} \sqrt{\bar{X}}$  转换; 有较多的小区数值为 0 的性状, 则作  $\sqrt{x+1/2}$  转换后进行方差分析。耐 Al 毒性测定, 以苗高生长、萌芽数、成活率作聚合遗传增益的分析。性状的遗传力( $h^2$ )、遗传变异系数(GCV)、遗传增益( $\Delta G$ )和聚合遗传增益( $\Delta AG$ )的计算用如下公式<sup>[4,5]</sup>:

$$h^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + (\sigma_e^2/y)} \quad (1), \quad GCV = \frac{\sigma_g}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta G = R/\bar{x} = (\sigma_{vih}^2)/\bar{x} \quad (3), \quad A \Delta G = \sum_j a_j \Delta G_{ij} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_g^2$ ——性状的遗传方差,  $\sigma_e^2$ ——环境方差(机误方差),  $y$ ——重复数,  $R$ ——选择响应;  $i$ ——选择强度,  $\sigma_p$ ——性状的表型标准差,  $\bar{x}$ ——某性状的总平均值,  $a_j$ ——加权系数,  $a_j = 1$ ,  $\Delta G_{ij}$ ——第  $i$  个无性系第  $j$  个处理的遗传增益估计值。

## 2 结果与分析

由于在试验过程中培养液更换频繁, 导致较多的培养瓶出现污染, 致使耐酸、耐 Al 测定分别仅有 24 个与 10 个无性系达到统计分析的要求。

### 2.1 无性系对 pH、Al 的反应

#### 2.1.1 无性系对 pH 的反应

(1) 组培苗的苗高生长、根系长度在无性系间和 pH 值处理之间均呈显著或极显著的差异(表 2), 但在 pH= 4.0、4.5 与 5.0 的 3 个处理水平, 仅根系长度在无性系间和处理水平间存在显著(0.05 水平)差异, 而苗高生长无显著差异。这说明, 不同的 pH 值水平对柚木无性系的苗高生长与根系生长有不同的影响; pH 值的不同直接影响了根系的生长发育, 当对根的影响严重时, 才对高生长产生较大的影响。pH 值对高生长的影响在无性系之间有显著的差别, 但差异仅存在于强酸性(pH < 4.5)与酸性(pH= 5.5~6.0)之间。试验表明, 柚木的高生长对 pH 值并不十分敏感, 只是在强酸性时表现出差异的显著性。

表 2 不同 pH 值处理柚木无性系苗高生长与根系长度的方差分析

方差来源	自由度	pH 值 4.0~6.0				自由度	pH 值 4.0~5.0			
		苗高生长		根系长度			苗高生长		根系长度	
		均方	F 值	均方	F 值		均方	F 值	均方	F 值
无性系间	23	37.087	1.506*	7.635	3.266***	19	20.140	0.89 <sup>NS</sup>	2.411	2.087**
pH 处理间	4	76.601	3.110**	8.196	3.506***	2	14.127	0.62 <sup>NS</sup>	4.273	3.700**
机 误	87	24.629		2.338		38	22.630		1.155	

注: \* 为  $\alpha=0.10$  水平, \*\* 为  $\alpha=0.05$  水平, \*\*\* 为  $\alpha=0.01$  水平差异显著(下同)。

(2) 成活率/死亡率在无性系间、pH 值处理间均无显著差异(培养过程中未见由 pH 值引起的死亡, 故未予统计), 这与广州、增城金坑试验点的大田试验, 土壤 pH < 4.5 时导致种源的大量死亡不一致。显然大田条件下导致柚木栽后死亡的原因要复杂得多, 说明 pH 值低至 4.0, 并非导致柚木死亡的直接因素。

(3) 新复极差检验结果: 苗高生长、根系长度在无性系之间的极差或相互之间的差异很大, 但同一层次(显著性不明显)的无性系数数量多, 跨度大, 如 10-9 号无性系苗高生长值 14.32 cm, 却与苗高生长值 5.51 cm 的 7-18 无性系处于同一层次; 根系长度为 2.18 cm 的 7-17 无性系与 0 cm 长度的 7504-1 无性系处于同一层次等(表 3), 表明同一无性系内不同植株在各处理之间及同一处理内的反应很不一致, 每一无性系对各种处理水平反应的离均差过大而又不够规则。这显然是无性系的位置效应(继代无根苗的节段位置不同)和继代数不同所引起, 严重地干扰了无性系间与处理水平间的显著差异, 从无性系的变异系数, 也将证明这一点。

表 3 培养基 pH 处理水平和无性系间在苗高生长、根系长度上的平均值和新复极差检验

无性系 编号	种源/家系 编号	苗高生长平均值/cm		无性系 编 号	根系长度平均值/cm	
		pH= 4.0~6.0	pH= 4.0~5.0		pH= 4.0~6.0	pH= 4.0~5.0
( ) 无 性 系 之 间						
7-7	3078	2.778 a	0	7504-1	0 a	0
70-23	3070	3.570 ab	3.550	7-7	0.066 a	0
10-2	3070	5.057 abc	7.555	70-18	0.156 a	2.600
10-7	3070	5.400 abcd	5.037	10-14	0.244 a	0.407
7-18	3078	5.510 abcde	5.110	70-24	0.268 a	0
72-1	3072	5.622 abcde	5.870	10-4	0.356 a	0.187
7-2	3078	5.626 abcde	1.267	70-6	0.542 ab	0.723
70-24	3070	5.778 abcde	7.187	70-79	0.750 ab	0
10-14	3070	6.704 abcde	5.547	10-7	0.868 ab	1.447
59-02	7559	7.124 abcde	7.447	7-18	1.000 abc	0
10-10	3070	7.134 abcde	7.113	70-13	1.012 abc	1.167
10-4	3070	7.442 abcde	4.443	10-9	1.090 abc	0.740
70-15	3070	7.966 abcde	6.370	59-02	1.242 abc	0.960
71-07	3071	8.682 abcde	8.963	71-5	1.378 abc	2.297
7-17	3078	8.690 abcde	7.813	71-2	1.444 abc	1.000
70-6	3070	8.697 abcde	8.263	71-07	1.466 abc	1.610
70-79	3070	8.832 abcde	6.500	70-23	1.472 abc	0.835
70-18	3070	9.378 abcde	6.553	70-15	1.574 abc	1.697
70-13	3070	9.664 abcde	9.387	3-4	1.955 abc	1.800
71-2	3071	9.798 abcde	10.073	10-10	1.956 abc	2.037
3-4	3074	11.112 abcde	8.170	7-17	2.178 abc	1.223
71-5	3071	11.258 abcde	9.373	72-1	3.236 abc	1.947
7504-1	7504	12.356 bcde	8.890	7-2	3.710 bc	1.777
10-9	3070	14.316 e	7.390	10-2	5.892 c	3.020
( ) 培 养 基 pH 处 理 水 平 之 间						
	4.0	5.729 a		4.0	0.411 a	
	4.5	6.772 a		4.5	1.228 ab	
pH 值	5.0	7.391 a	pH 值	5.0	1.410 ab	
	5.5	9.770 a		5.5	1.486 ab	
	6.0	10.400 a		6.0	2.273 b	

注: 不同英文字母间为 0.05 水平差异显著(下同)。

2.1.2 无性系对 Al 的反应 培养 20 d 在苗高生长、萌芽数、保存率 3 项指标中, 除保存率在各个活性铝处理水平间无显著差异外, 其余各指标在处理水平之间和各个无性系之间均呈显著(0.05 水平)至极显著(0.01 水平)的差异; 培养 2 个月, 其显著差异的类别与 20 d 的基本一致, 但差异程度加大(表 4), 有 6 个无性系相继全部死亡, 仅 3 个无性系保持了 96%~100% 的保存率。新复极差检验结果: 在苗高生长、萌芽数指标上, 1 水平( $\text{AlCl}_3$  为  $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )至 4 水平( $\text{AlCl}_3$   $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )同属一个差异层级; 在保存率上, 各个铝浓度水平均无显著差异(表 5)。

上述情况表明: (1) 培养基中活性铝达到  $233.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 对柚木的苗高生长与萌芽数有显著的影响, 而对无性系的保存率/死亡率无显著影响; (2) 培养过程中多数无性系的死亡, 并非由于 Al 的各个处理水平所引起。

表 4 不同活性 Al 浓度处理的柚木无性系苗高生长、萌芽数和保存率的方差

方差来源	苗高生长			萌 芽 数			保 存 率		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
				培 养 20 d 的 结 果					
无性系间	9	1.342	2.843***	9	0.4754	2.121**	9	1633.50	6.132***
处理间	4	2.633	5.578***	4	1.486	6.634***	4	307.31	1.154 <sup>NS</sup>
机 误	34 <sup>①</sup>	0.472		34 <sup>①</sup>	0.224		36	266.38	
				培 养 60 d 的 结 果					
无性系间	3	1.210	8.71***	3	0.253	4.96**	9	97.323	35.02***
处理间	4	0.488	3.51**	4	0.457	8.96***	4	2.101	0.76 <sup>NS</sup>
机 误	12	0.139		12	0.051		36	2.779	

注:①补缺小区自由度减2。

表 5 活性 Al 处理水平和无性系间在苗高生长、萌芽数、保存率上的平均值与新复极差检验

无性系和 处理编号	种源/ 家系号	苗高生长平均值/cm		无性系和 处理编号	萌芽数/株		无性系和 处理编号	保存率%	
		处理:1~5	处理:2~5		处理:1~5	处理:2~5		处理:1~5	处理:2~5
( ) 无 性 系 之 间									
70-18	3070	1.018 a	1.128	71-7	1.280 a	1.350	70-107	38.00 a	22.5
71-7	3071	1.146 ab	1.005	10-4	1.400 a	1.425	7-18	66.00 ab	62.5
10-4	3070	1.358 ab	1.365	7-18	1.440 ab	1.400	71-7	66.00 ab	60.0
70-107	3070	1.850 abc	1.750	70-118	1.460 ab	1.325	70-95	88.00 ab	90.0
71-5	3071	1.962 abc	2.188	70-107	1.466 ab	1.100	10-4	92.00 ab	92.5
70-13	3070	1.984 abc	1.805	70-18	1.548 ab	1.673	70-18	90.00 ab	90.0
70-118	3070	2.026 abc	1.838	70-95	1.640 ab	1.550	72-72	94.00 ab	95.0
7-18	3078	2.048 abc	1.960	70-13	1.680 ab	1.425	71-5	100.00 b	100.0
70-95	3070	2.288 bc	2.235	72-72	1.960 ab	1.825	70-13	100.00 b	100.0
72-72	3072	2.658 c	2.623	71-5	2.280 b	2.250	70-118	100.00 b	100.0
( ) 活 性 Al 浓 度 处 理 水 平 之 间									
5(233.2 μmol·L <sup>-1</sup> )		1.030 a		5	0.933 a		4	84.65 a	
4(46.62 μmol·L <sup>-1</sup> )		1.723 ab		3	1.650 b		3	85.56 a	
3(13.99 μmol·L <sup>-1</sup> )		1.853 ab		4	1.711 b		5	89.74 a	
1(0 μmol·L <sup>-1</sup> )		1.991 b		2	1.873 b		1	95.18 a	
2(4.66 μmol·L <sup>-1</sup> )		2.477 b		1	1.881 b		2	96.40 a	

## 2.2 无性系耐酸、铝的遗传变异

在 pH 值 4.0~6.0, AlCl<sub>3</sub> 为 0~500 μmol·L<sup>-1</sup> 的培养条件下, 柚木无性系苗高生长、根系长度和萌芽数表现的遗传力从低至高变化较大, pH 各水平的为 0.34~0.71; AlCl<sub>3</sub> 各水平为 0.41~0.89, 其中 pH 值较高、AlCl<sub>3</sub> 浓度较低的其遗传力较高, 反之则较低(表 6: >, >); 4 项指标的遗传变异系数与表型变异系数分别从 14.2%~83.5% 与 19.3%~100.3%, 变化甚大, 表现为: 一方面各无性系之间对 pH 和 Al 各处理水平的反应差别很大, 另一方面同一无性系内各植株在 pH、Al 的各个处理水平之间的不同反应, 又很不规律, 其中酸度与 Al 的浓度增强, 则变异程度更大, 尤以根系长度不规则的变异尤甚(表 6)。由此造成前面所述, 无性系间差异的绝对数值(或极差)很大, 但显著性差异水平不高, 这与同一个无性系为同一基因型, 对变化的条件应有较为一致的反应这一公认的规律很不相符。造成这种情况的原因主要是, 无性系组培继代苗的不同节段与继代培养的代数, 对苗高生长与根系生长有强烈的影响(表现为位置效应与熟态效应); 同时不同节段与继代培养的代数造成的试验材料不一致, 同一无性系的遗传基因虽然一致, 但处于不同生理状态的材料会有不同的抗逆性。

表 6 柚木无性系耐酸(pH)、耐 Al 的遗传参数

项 目	耐酸(pH)测定						耐 AlCl <sub>3</sub> 测定					
	苗高生长			根 长			苗高生长			萌 芽 数		
<i>h</i> <sup>2</sup>	0.34	0.70	0.54	0.69	0.71	0.60	0.71	0.89	0.78	0.55	0.47	0.41
<i>GCV</i>	0.162 9	0.414 3	0.424 4	0.835 0	0.347 2	0.744 0	0.142 3	0.277 1	0.504 7	0.252 1	0.162 8	0.147 6
<i>PCV</i>	0.281 2	0.469 4	0.575 7	1.002 5	0.444 7	0.958 6	0.193 0	0.294 1	0.570 9	0.298 4	0.236 8	0.205 2
<i>ECV</i>	0.229 1	0.220 7	0.388 9	0.554 7	0.240 3	0.604 3	0.129 1	0.098 4	0.266 8	0.159 5	0.171 9	0.176 4

注: :pH 4.0~6.0, :pH 5.5~6.0, :pH 4.0~5.5; :AlCl<sub>3</sub>0~500 μmol·L<sup>-1</sup>, :0~10 μmol·L<sup>-1</sup>, :100~500 μmol·L<sup>-1</sup>; *GCV*: 遗传变异系数, *PCV*: 表型变异系数, *ECV*: 环境变异系数。

## 2.3 耐酸与耐 Al 无性系的选择

2.3.1 选择的依据 虽然柚木无性系的位置效应与熟态效应干扰了耐酸、耐 Al 测定,但无性系的苗高生长、萌芽生长与 pH、Al 各处理水平相关分析表明:苗高生长与 pH、苗高生长与 Al 处理、萌芽与 Al 处理均呈显著相关,分别以如下方程表达:

$$\hat{y}_H = 2.2098x - 3.2171 \text{ (苗高生长与 pH)}, \hat{y}_H = 2.0962 - 0.0047x \text{ (苗高生长与 AlCl}_3\text{)}$$

$$\hat{y}_G = 1.814 - 0.0038x \text{ (萌芽与 AlCl}_3\text{)}$$

方程的相关系数 *r* 分别为 0.966 0<sup>\*</sup>、-0.889 0<sup>\*</sup>、-0.971 9<sup>\*</sup>。为无性系的耐酸与耐 Al 的早期选择提供了可靠性。

2.3.2 选择结果 以苗高生长、根系长度、萌芽数作聚合遗传增益评价结果,分别在酸性(pH 5.5~6.0)、强酸性(pH 4.0~4.5)、低浓度 Al 与高浓度 Al 的条件下,选出 17 个耐酸、6 个耐 Al 的无性系,其累加遗传增益为 26.15%~106.34% (表 7、8)。

表 7 耐酸性土的无性系选择——对 pH 值的反应

试验号 参试无性系数	无性系号	种源号	苗高生长指标		根系生长指标		累加遗传 增益 ΣΔG
			Δ <sub>H</sub>	ΔG <sub>H</sub>	Δ <sub>R</sub>	ΔG <sub>R</sub>	
-CPR-1	pH= 4.0~4.5		(1)	(2)	(3)	(4)	(2)+(4)
112 clon	70-10	3070	+ 21.6	+ 11.7	+ 301.8	+ 181.1	+ 192.8
	71-5	3071	+ 11.5	+ 6.2	+ 199.3	+ 119.6	+ 125.8
	70-13	3070	- 0.4	- 0.2	+ 132.8	+ 79.7	+ 79.5
	71-2	3071	+ 106.1	+ 57.3	+ 18.4	+ 11.0	+ 68.3
	70-19	3070	+ 68.9	+ 32.2	+ 47.7	+ 28.6	+ 65.8
	70-15	3070	- 5.4	- 2.9	+ 99.6	+ 59.8	+ 56.9
	70-2	3070	- 15.6	- 8.4	+ 107.5	+ 64.5	+ 56.1
	78-11	3078	+ 52.0	+ 28.1	+ 18.4	+ 11.0	+ 39.1
	71-7	3071	- 15.6	- 8.4	+ 66.3	+ 39.8	+ 31.4
	78-2	3078	- 7.1	- 3.8	+ 47.7	+ 28.6	+ 24.8
	平均		+ 21.6	+ 11.18	+ 103.95	+ 62.37	+ 74.05
	pH= 5.5~6.0						
	70-2	3070	- 72.2	- 50.5	+ 368.8	+ 261.8	+ 211.3
	78-2	3078	+ 257.4	+ 182.7	+ 32.1	+ 22.5	+ 205.2
	70-19	3070	- 12.4	- 8.8	+ 168.4	+ 117.9	+ 109.1
	72-1	3072	+ 179.5	+ 127.5	- 43.0	- 30.1	+ 97.4
	78-17	3078	+ 95.2	+ 67.6	- 10.1	- 7.1	+ 60.5
	74-4	3074	+ 14.1	+ 10.0	+ 52.7	+ 39.5	+ 49.5
	71-2	3071	+ 14.1	+ 10.0	+ 2.0	+ 1.4	+ 11.4
	平均		+ 67.96	+ 48.35	+ 81.56	+ 57.99	+ 106.34
	17个无性系平均		+ 40.69	+ 26.49	+ 94.73	+ 61.39	+ 87.35

注: Δ<sub>H</sub> 为苗高生长的现实增益, ΔG<sub>H</sub> 为苗高生长的遗传增益, Δ<sub>R</sub> 为根生长的现实增益, ΔG<sub>R</sub> 为根生长的遗传增益(下同)。

表8 耐Al无性系选择结果

代号	无性系号	种源号	苗高生长指标		萌芽数指标		(2)和(4)的聚合遗传效益 (5)	适应性(保存率)指标		累加遗传增益 $\Delta G_{(Hg+Su)}$ (5)+(7)
			$\Delta H$ (1)	$\Delta G_H$ (2)	$\Delta G$ (3)	$\Delta G_E$ (4)		$\Delta S_u$ (6)	$\Delta G_{S_u}$ (7)	
( ) $Al^{+3}400 \sim 500 \mu mol$										
(42)	71-5	3070	+ 80.6	+ 62.9	+ 28.2	+ 11.6	+ 45.8	+ 27.4	+ 26.3	+ 72.1
(49)	70-95	3070	+ 76.2	+ 59.5	+ 24.5	+ 10.0	+ 43.0	+ 21.0	+ 20.2	+ 63.2
(50)	70-118	3071	+ 36.3	+ 28.3	- 5.7	- 2.3	+ 18.1	+ 27.4	+ 26.3	+ 44.4
(51)	72-72	3072	+ 30.5	+ 23.8	+ 5.6	+ 2.3	+ 16.1	+ 27.4	+ 26.3	+ 42.9
平均			+ 55.90	+ 43.63	+ 13.15	+ 5.4	+ 30.88	+ 25.8	+ 24.78	+ 55.65
( ) $Al^{+3}100 \sim 200 \mu mol$										
(51)	72-72	3072	+ 43.1	+ 38.4	+ 25.2	+ 11.8	+ 29.5	+ 3.8	+ 1.3	+ 30.8
(8)	70-13	3070	+ 24.3	+ 21.7	+ 25.2	+ 11.8	+ 18.4	+ 9.3	+ 3.1	+ 21.5
平均			+ 33.70	+ 30.05	+ 25.20	+ 11.8	+ 23.95	+ 6.55	+ 2.20	+ 26.15
耐Al 6个无性系平均			+ 48.50	+ 39.10	+ 17.17	+ 7.53	+ 28.57	+ 19.38	+ 17.25	+ 45.82
耐酸 23个无性系总平均			+ 42.72	+ 29.78	+ 74.50	+ 46.73	—	—	—	+ 76.91

注:  $\Delta S_u$ 为保存率的现实增益,  $\Delta G_{S_u}$ 为保存率的遗传增益。

### 3 结 论

(1) 不同 pH 值的培养基对柚木无性系苗高生长与根系生长有显著影响,而对成活率/死亡率无显著差异,低至 4.0 的 pH 值并未能导致柚木的死亡。由此看来,在广东增城、广州等地的赤红壤上作大田试验的柚木种源大量死亡,并不能简单地归结为 pH 值低至 4.0~4.5 所直接引起。

(2) 以不同浓度  $AlCl_3$  培养基对柚木无性系分别培养 20 d 与 60 d 结果,不同无性系的苗高生长、萌芽与保存率/死亡率出现极显著差异,表现在当  $AlCl_3$  浓度高至  $30 \mu mol \cdot L^{-1}$  ( $Al$  活度  $13.99 \mu mol \cdot L^{-1}$ ) 时,对苗高生长出现显著的抑制;浓度提高至  $500 \mu mol \cdot L^{-1}$  ( $Al$  活度  $233.3 \mu mol \cdot L^{-1}$ ) 才出现对萌芽的抑制作用,但对存活/死亡却无显著影响,因此试验设计的最高  $Al$  活度并非培养过程中无性系大量死亡(污染引起的除外)的主要因素。

(3) 在 pH 与  $AlCl_3$  培养基培养下,柚木无性系间在苗高生长、根系长度、萌芽性状上存在显著差异,这种差异又与 pH、 $AlCl_3$  各处理水平呈紧密相关,为耐酸、耐 Al 无性系的早期选择提供了基础。评价结果,选出了 17 个耐酸、6 个耐 Al 无性系,其聚合遗传增益达 26.2%~106.3%。

(4) 大田种植的自然条件远比试验室的培养条件复杂;“实验室中用  $Al$  的毫摩尔浓度所得出的研究结果,与田间的实际情况关系甚微”<sup>[1]</sup>。由于我们所选出的无性系均来自经过测定的抗旱、抗病或耐酸兼具速生的优良种源,并经一轮优树选择,因此其大田的验证工作,可在中试推广中进行,在中试推广中测定,以缩短无性系的育种周期。

## 参 考 文 献

- 1 Blamey F R, Asher C J. 酸性土壤中植物的耐铝机理. 吴文新译. 热带亚热带土壤科学, 1993, 2(1): 50 ~ 53.
- 2 Keltjens W G. Effects of aluminum on growth and nutrient status of douglas-fir seedlings grown in culture solution. Tree Physiology, 1990, 6(2): 165 ~ 175.
- 3 Ren Z, Sucoff E I. Solution aluminum and transpiration in *Picea rubens* and *Gleditsia triacanthos* seedlings. Tree Physiology, 1990, 6(3): 337 ~ 346.
- 4 Keiding H, Wellendorf H, Lauridsen E B. Evaluation of an international series of teak provenance trials. Humlebaek: DANIDA Forest Seed Centre, 1986.
- 5 沈熙环. 林木育种学. 北京: 中国林业出版社, 1990.

## Test of Acid and Aluminum-tolerance of Teak Clones

*Pan Yifeng Kuang Bingchao Liu Wenming*

(The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, 510520, Guangzhou, China)

**Abstract** The drought-resistant, acid-tolerant, and fast-growing trees were selected from the resistant and fast-growing provenances, and their acid- and aluminum-tolerance were tested *in vitro*. The assemble genetic gain of the selected 17 acid-tolerant clones and 6 aluminum-tolerant clones accounted for 26. 2% ~ 106. 3%. The acid- or aluminum-tolerance of these clones will be further tested in field.

**Key words** teak clones; acid-tolerance; aluminum-tolerance