

酸铝胁迫下 4 个速生桉优良无性系的生长反应

杨 梅^{1,2}, 黄寿先², 方升佐¹, 黄晓露²

(1 南京林业大学林学院, 江苏南京 210037; 2 广西大学林学院, 广西南宁 530004)

摘要: 采用砂土培育法研究不同的酸铝处理对几种桉树优良无性系(巨尾桉 9 号、巨尾桉 12 号、尾叶桉 4 号、韦赤桉 3 号)幼苗生长及膜透性等变化的影响。试验设: pH 3.0 + 0 mg/L Al³⁺、pH 3.0 + 120 mg/L Al³⁺、pH 4.0 + 0 mg/L Al³⁺、pH 4.0 + 120 mg/L Al³⁺、pH 4.8 + 0 mg/L Al³⁺ 5 个处理。结果表明, 不同酸铝处理对 4 个桉树优良无性系形态、生长指标、含水率、叶绿素含量、质膜透性和脯氨酸含量等都产生不同的影响。与对照(pH 4.8 + 0 mg/L Al³⁺)相比, pH 3.0 + 120 mg/L Al³⁺ 处理对桉树幼苗的生长产生的抑制作用明显, 叶、芽皱缩、变形, 苗高、地径以及各器官含水率降低, 质膜透性和叶绿素含量下降, 桉树幼苗累积较多的脯氨酸。其中, 巨尾桉广林 9 号对酸铝逆境的抗性优于其它 3 个无性系。4 个桉树优良无性系抗酸铝逆境的能力强弱依次为: 巨尾桉 9 号 > 巨尾桉 12 号 > 韦赤桉 3 号 > 尾叶桉 4 号。因此, 选育耐酸铝桉树无性系品系是改善南方富铝化酸性土壤林地生产力的重要策略之一。

关键词: 酸铝胁迫; 生长; 无性系; 桉树

中图分类号: S792.39; Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)01-0195-07

Response of seedling growth of four *Eucalyptus* clones to acid and aluminum stress

YANG Mei^{1,2}, HUANG Shou-xian², FANG Sheng-zuo¹, HUANG Xiao-lu².

(1 College of Forestry Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Effects of different acid-aluminum treatments on the four Fast-growing *Eucalyptus* clones (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* Guanglin No.9, *E. grandis* × *E. urophylla* No.12, *E. urophylla* No.4, *E. urophylla* × *E. camaldulensis* No.3) were studied using the cultivation method of sand and soil combination. The acid and Al levels were pH 3.0 + 0 mg/L Al³⁺, pH 3.0 + 120 mg/L Al³⁺, pH 4.0 + 0 mg/L Al³⁺, pH 4.0 + 120 mg/L Al³⁺ for each clone, and the pH 4.8 + 0 mg/L Al³⁺ was used as the corresponding control, respectively. The results show that the morphology, growth, water content, chlorophyll content, proline content and membrane permeability in four Fast-growing *Eucalyptus* clones are affected under the different acid-Al treatments. All clones are significantly inhibited under the pH 3.0 + 120 mg/L Al³⁺ treatment, the leaves and buds are distorted, the seedling heights and collar diameters are depressed, the membrane permeability is degraded, and chlorophyll content and water content are decreased. While the proline contents of the clones are accumulated. The four clones respond to the acid-aluminum differently. *E. grandis* × *E. urophylla* No.9 has the best adaptation to the acid-aluminum treatments from the growth and physiological indexes, such as non-significant morphology change, low amplitude variation of membrane permeability, chlorophyll content and water content, and high amplitude variation of proline content. *E. urophylla* No.4 has the weakest intolerance with great damage, even faded leaves and buds. The resistance intensity is in order of No.9 > No.12 > No.4 > No.3. Choosing and culturing *Eucalyptus* clones with resistance to acid-aluminum should be considered one factor to improve the site productivity on the acid soil with enriched aluminum in the south area of China.

Key words: acid and aluminum stress; growth; clone; *Eucalyptus*

收稿日期: 2010-03-23

接受日期: 2010-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070560); 广西教育厅科研基金(200809ms049); 广西大学博士科研基金(X071142)资助。

作者简介: 杨梅(1970—), 女, 吉林省长春人, 博士, 副教授, 主要从事森林培育、人工林地力衰退与维护及林木抗逆性方面的研究工作。

Tel: 0771-3271428, E-mail: fyangmei@126.com

热带、亚热带地区酸性土壤,在 $\text{pH} < 5$ 时难溶性铝被活化为 Al^{3+} ,是影响作物生产力的主要限制因子,已占世界可耕作土壤的 40%^[1-2];酸雨、作物连作及施用肥料等原因更加剧了土壤酸化程度^[3-5]。铝毒害是森林土壤酸化到一定程度的直接后果,同时残余铝的大量存在也会引起土壤酸化恶化,造成严重的森林衰退^[6-7]。在德国、瑞典、挪威、美国、日本、中国等国家和地区均有森林衰退与土壤酸性和活性铝浓度有关的报道。

解决酸性土壤中的铝毒害,一些研究人员从改善土壤环境方面进行了探索。澳大利亚、美国、巴西、西班牙等国采用向酸性土壤施用石灰以中和铝离子;或利用 N、Ca 等营养元素对铝离子的拮抗作用改良施肥配方作为土壤铝毒的一种解决途径。这些措施在一定程度上可改善酸性土壤铝毒害作用,但对于心土却没有改善作用,还会影响土壤结构和微生物组成,可能导致长期地力下降。因此,利用植物抗铝毒的自身潜力、筛选和培育耐铝品种是提高酸性土壤上作物生产力的最佳策略^[8]。

桉树是热带亚热带地区极为重要的速生树种,但是短轮伐期人工林存在着林地生产力下降的现象。一些学者从酸铝环境对桉树的影响方面开展了相关研究,如在西班牙 Santiago de Compostela 和 Lugo 地区发现,桉树林下土壤存在潜在的铝毒危险性,土壤中铝含量与桉树根系铝的积累明显受到土壤酸度的影响^[9-10];也有通过溶液培养试验证明铝胁迫对桉树生长和生理过程受到抑制^[11-14]。但对于不同桉树品系对土壤酸铝的敏感性并未见报道。目前,桉树经营已进入无性系化阶段,因此,研究不同无性系对酸铝胁迫的响应,筛选耐铝优良速生桉无性系具有重要意义。

本研究采用砂土混合的方法,以中国广西的 4 个不同桉树优良无性系(即:巨尾桉 9 号 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* No. 9,巨尾桉 12 号 *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* No. 12,尾叶桉 4 号 *Eucalyptus urophylla* No. 4,韦赤桉 3 号 *Eucalyptus wetarensis* × *E. camaldulensis* No. 3)为研究对象,分析其在酸铝处理下的生长形态和膜透性的变化。并利用耐性指数和适应性指数对各无性系的耐铝性进行初步评价,为选育耐铝型速生桉优良无性系以及建立桉树耐铝性评价标准提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试苗木为 3 个月生桉树优良无性系组培苗,共 4 个桉树无性系,即:巨尾桉 9 号(G9)、巨尾桉 12 号(G12)、尾叶桉 4 号(G4)、韦赤桉 3 号(G3),由广西林科院提供。试验前 20 d 苗木先移栽至花盆中进行适应性培养。

试验采用完全随机设计。每个无性系设活性铝浓度为 0、120 mg/L 和 pH 为 3.0、4.0,组成 4 个处理,即:K1(0 mg/L Al^{3+} , pH 3.0),K2(120 mg/L Al^{3+} , pH 3.0),K3(0 mg/L Al^{3+} , pH 4.0),K4(120 mg/L Al^{3+} , pH 4.0),另以 0 mg/L Al^{3+} + pH 4.8 处理作为对照(CK)。铝毒浓度为 120 mg/L 是根据杨振德^[14]关于铝对桉树幼苗生长影响的研究结果设定的。育苗基质为黄新土 + 珍珠岩 + 河沙(1:1:1)。试验过程中,以 1/6 Hoagland 营养液为培养液,铝以分析纯 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 加入。每盆 5 株桉苗,重复 3 次。每 5 天向花盆浇灌各处理液,用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调整处理液的 pH 值,每隔 15 d 浇一次营养液,其余时间根据植物的生长需要统一浇水,试验处理历时 4 个月。

1.2 测定方法

酸铝处理前后分别测定速生桉无性系幼苗的苗高、地径,试验结束后,取样于 80℃ 下烘至恒重,测定植物各部分含水率,同时记录成活率以及幼苗形态变化。根据桉树苗苗高、地径的变化数据,采用 Howeler^[15]的方法提出土壤酸度耐性指数(Soil acidity tolerance indices, SATI)和酸性土壤适应性指数(Acid soil adaptation indices, ASAI)计算桉树幼苗的酸铝敏感性。质膜透性采用 S-11A 型电导率仪测定,以细胞相对电导率的大小表示;叶绿素含量采用分光光度计法测定。

2 结果与分析

2.1 不同酸铝处理下各培养基质 pH 值的变化

从表 1 的测定值来看,试验结束时,各处理基质的 pH 值,除 G3 的 K4 处理稍低于原处理值外,其他各处理均稍大于或等于原处理值,并且在无铝处理条件下, pH 值偏高。

2.2 不同处理桉树无性系生长形态和存活率的变化

不同处理 4 个桉树无性系的生长形态变化看

出,铝处理的桉树幼苗的生长情况比无铝处理差,随着 pH 值下降,幼苗长势抑制程度更大。其中,以 G9 长势较好,受抑制作用不明显,只有极少量叶片的皱缩;而 G12 和 G3 出现芽变形,叶片变小变窄、皱缩,边缘变形,同时从叶尖开始向叶柄逐渐枯萎;G4 长势最差,1/4 的苗木最终整株枯死。

表 1 试验结束后各处理基质的 pH 值
Table 1 pH value of each treated matrix
when the experiments finished

处理 Treatment	无性系 Clone			
	G3	G4	G9	G12
CK	4.84	4.97	4.90	4.82
K1	3.10	3.16	3.11	3.16
K2	3.02	3.03	3.00	3.06
K3	4.20	4.17	4.19	4.23
K4	3.97	4.00	4.06	4.03

同一酸铝处理后,各无性系幼苗存活率比无铝处理的低($K2 < K1, K4 < K3$);同一铝浓度下,酸度越大则存活率越低($K1 < K3, K2 < K4$)。图 1 看出, K2 处理桉树幼苗的存活率最低, K3 处理存活率最高;各处理下,4 个无性系存活率高低为 $G9 > G12 > G3 > G4$ 。在酸性条件及加入活性铝处理后,桉树幼苗的生长受到明显的抑制。4 个桉树优良无性系在无铝条件下, pH = 4.0 时存活率均比在 pH = 3.0 时高;其中 G4 在 K2 (pH 3.0 + 120 mg/L Al^{3+}) 处理下存活率最低。可见,酸性越大,幼苗受到胁迫程度越大。从存活率的变化幅度来看,与对照(CK)相比,除 G9 和 G12 在 K3 (0 mg/L Al^{3+} , pH 4.0) 时无苗木死亡外,其他处理都表现出存活率下降趋势;在 K2 (120 mg/L Al^{3+} , pH 3.0) 处理下,各无性系的存活率表现为 $G9(92\%) > G12(83\%) > G3(75\%) > G4(58\%)$ 。

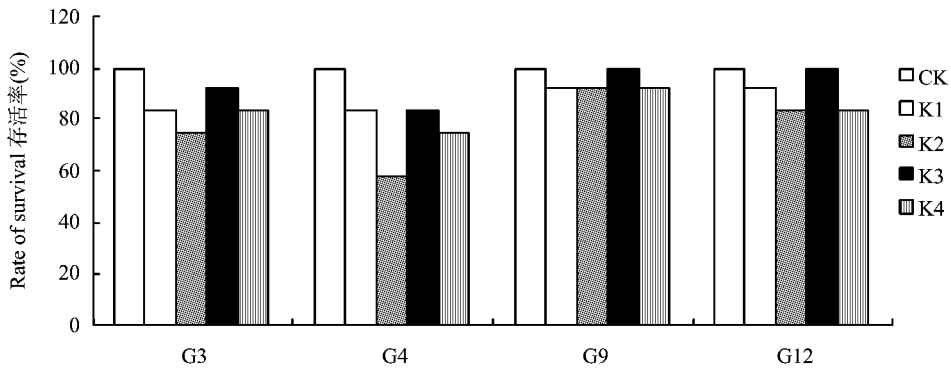


图 1 不同酸铝条件处理下 4 个桉树优良无性系存活率比较

Fig.1 Survival rates of four *Eucalyptus* seedlings under different acid-Al treatments

2.3 不同处理桉树无性系含水率变化

同一酸度铝处理下,各无性系根、茎、叶含水量比无铝处理降低($K2 < K1, K4 < K3$);同一铝浓度下,随着酸度的增大含水率越小($K1 < K3, K2 < K4$)。图 2 表明,在 K2 处理各个无性系的含水率变化差异最明显, K3 处理差异最小;4 个无性系根部和叶片的含水率高低顺序为 $G9 > G12 > G3 > G4$;茎部为 $G9 > G3 > G12 > G4$ 。在 pH = 4.0 时,4 个桉树无性系的含水率与 pH = 3.0、无铝条件下有显著差异,但有铝离子存在时,二者差异达极显著水平;酸度越大,幼苗水分代谢受到干扰越严重,活性铝的存在更加剧了酸性环境对幼苗水分代谢的干扰。与 CK 相比,各无性系含水率均下降。其中, K2 (pH 3.0 + 120 mg/L Al^{3+}) 处理植株的含水率最低,变化幅度也最大,受干扰程度最严

重。无性系中以 G9 根、茎、叶含水率较低,下降幅度分别为 9.5%、9.71%、6.59%,水分代谢受到干扰程度较轻;而根部含水率则以 G12 下降幅度为 24.1%,是 G9 的 2 倍多;茎和叶含水率以 G4 下降幅度最大,分别为 36.5%、25.2%,是 G9 的 3 倍多。

2.4 不同处理桉树无性系生长量变化

图 3 表明,在酸性条件下及加入活性铝处理对桉树幼苗的生长产生抑制作用。各无性系在同一酸度铝处理后,桉树幼苗的苗高、地径皆较无铝处理差($K2 < K1, K4 < K3$);同一铝浓度下,随着酸度的增大幼苗生长越差($K1 < K3, K2 < K4$),酸性越大对幼苗生长影响越大,而铝离子的存在更加剧了伤害程度。总体看出, K2 处理下各无性系的生长增长量最小, K3 处理下最大,幼苗苗高增长量顺序为 $G9 > G12 >$

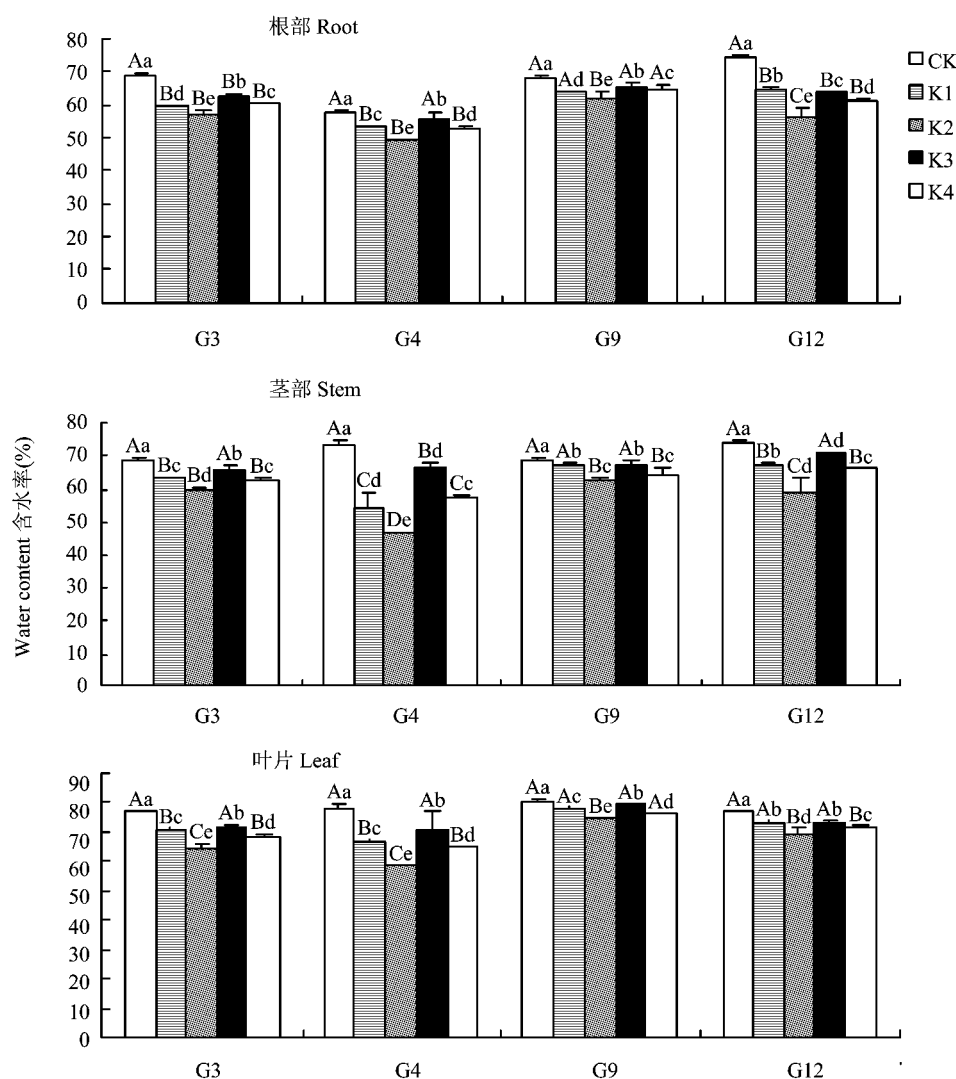


图2 不同酸铝条件处理下4个桉树优良无性系根、茎、叶片含水率变化

Fig. 2 Water contents of roots, stems and leaves of four *Eucalyptus* seedlings under different acid-Al

[注(Notes): 柱子上不同大、小字母表示同一无性系内差异达1%和5%显著水平 Different capital and lowercase letters above the bars in one clone indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.]

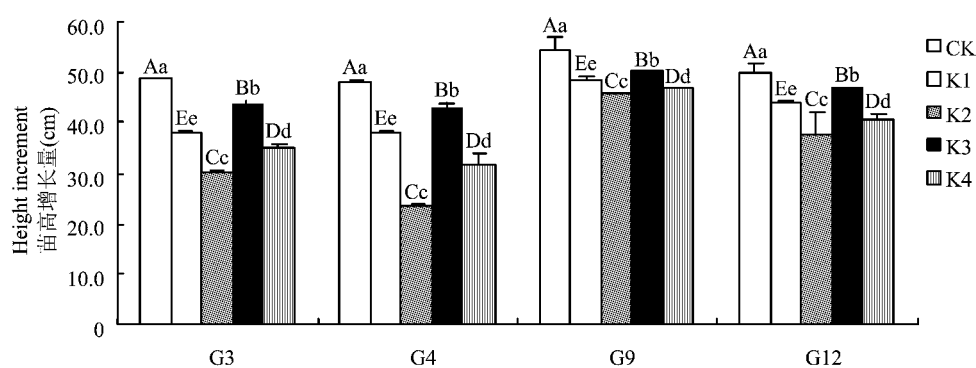


图3 不同酸铝处理下4个桉树优良无性系苗高增长量变化

Fig. 3 Height increments of four *Eucalyptus* seedlings under different acid-Al treatments

[注(Notes): 柱子上不同大、小字母表示同一无性系内差异达1%和5%显著水平 Different capital and lowercase letters above the bars in one clone indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.]

G3 > G4; 地径顺序为 G9 > G12 > G3 > G4。与 CK 相比,K1、K2、K3、K4 处理下各无性系生长指标皆下降,其中 K2(120 mg/g Al³⁺,pH 3.0)处理的下降幅度最大,G9、G12、G3、G4 苗高分别下降 16.13%、24.71%、37.83%、51.27%;地径分别下降 14.82%、19.51%、31.75%、40.91%,G4 降幅是 G9 的 3 倍左右。Howeler^[15]曾提出,两个考察不同植物基因型在酸性土壤上的适应性指标:1)土壤酸度耐性指数(Soil acidity tolerance indices, SATI);2)酸性土壤适应性指数(Acid soil adaptation indices, ASAI)。其计算公式为:

$$\text{SATI} = (X_a/Y_a) \times (X_a/X_b)$$
$$\text{ASAI} = (X_a \times Y_a)/(X \times Y)$$

式中: X_a 和 Y_a 分别为某一品种施用酸铝和不施用酸铝时的指标值; X_b 为所有供试品种施用酸铝的最高指标值; X 和 Y 分别为所有供试品种在施用酸铝和不施用酸铝时的平均指标值。当 ASAI > 1 为适应性品种, ASAI < 1 为非适应性品种。根据 CK 和 K2 处理的苗高、地径及含水率,计算 4 个速生桉无性系对酸铝的耐性和适应性指数(表 2)可以看出,无论按苗高或地径,G9 和 G12 的 SATI 和 ASAI 值都大于 G3、G4;而且 G9 和 G12 的生长指标 ASAI 值均大于 1,为酸铝适应性品种,G4 和 G3 的 ASAI 值均小于 1,为非适应性品种,尤其 G9 苗高 SATI 和 ASAI 值达到 G4 的 2 倍。

2.5 不同处理桉树无性系叶绿素含量变化

在不同的酸铝处理下,由于植物体受到强酸、高

表 2 不同酸铝条件处理下 4 个桉树优良无性系生长指标 SATI 和 ASAI 的差异

Table 2 SATI and ASAI differences of four Eucalyptus seedlings under different acid-Al treatments

无性系 Clone	苗高 Seedling height		地径 Collar diameter	
	SATI	ASAI	SATI	ASAI
G3	0.619	0.857	0.684	0.844
G4	0.465	0.650	0.569	0.813
G9	0.834	1.435	0.867	1.246
G12	0.638	1.100	0.745	1.008

注(Note): SATI—土壤酸度耐性指数 Soil acidity tolerance indices; ASAI—酸性土壤适应性指数 Acid soil adaptation indices.

浓度铝毒害的影响,叶绿体被膜遭到破坏,叶绿素含量下降(图 4)。同一无性系在相同酸度无铝条件下的叶绿素含量都比有铝的高(K1 > K2, K3 > K4);同一铝浓度下酸度越大叶绿素含量越低(K1 < K3, K2 < K4),而且同一无性系的 K1 与 K4 处理差异不显著。总的看来,叶绿素含量的高低顺序是 G9 > G12 > G3 > G4。与 CK 相比,酸铝处理下各无性系叶绿素含量均下降,其中 K3 处理下降幅度最大,G3、G4、G9、G12 分别下降 29.9%、36.7%、23.0%、27.9%;K2 处理下降幅度最小分别为 15.5%、17.2%、6.5%、7.9%。K2 处理下 G9 和 G12 比 G3、G4 下降幅度低 2 倍多,而随胁迫程度加深,G9 和 G12 下降幅度加大,4 个无性间的差距减小。

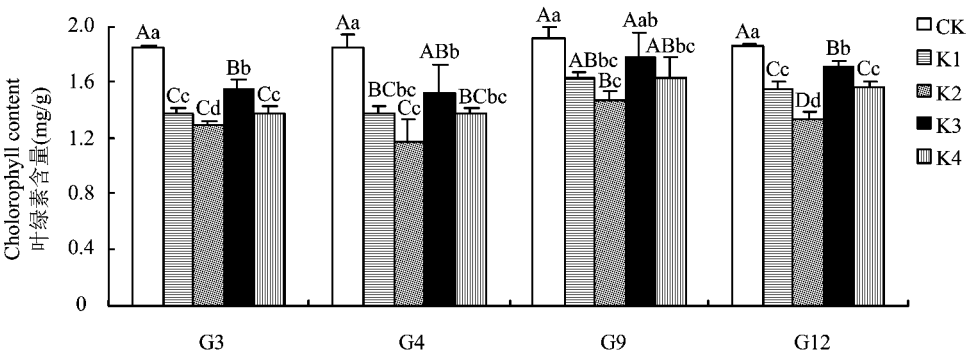


图 4 不同酸铝处理下 4 个桉树无性系幼苗叶绿素含量变化

Fig.4 Changes of chlorophyll content of four Eucalyptus seedling leaves under different acid-Al treatments

[注(Note): 柱子上不同大、小字母表示同一无性系内差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and lowercase letters above the bars in one clone indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.]

2.6 不同处理桉树优良无性系质膜透性和脯氨酸含量的变化

图 5 可知,各无性系在同一酸度铝处理后,叶片质膜透性比无铝的大(K2 > K1, K4 > K3),同一铝浓

度下,酸度越大则质膜透性越大(K1 > K3, K2 > K4)。与对照相比,K1、K2、K3、K4 处理下各无性系相对电导率均增加,且以 K2 处理下最大,K3 处理最低。各处理下其变化幅度为 G4 > G3 > G12 > G9。

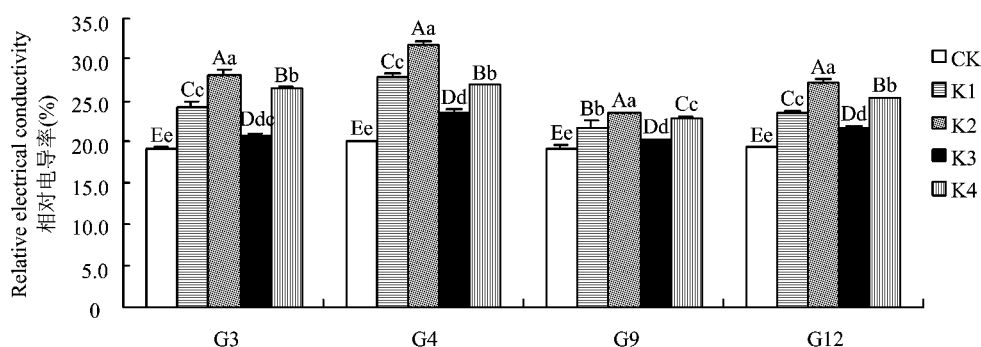


图5 不同酸铝处理下4个桉树无性系幼苗叶片的质膜透性变化

Fig. 5 Changes of membrane permeability of four *Eucalyptus* seedling leaves under different acid-Al treatments

[注(Notes): 柱子上不同大、小字母表示同一无性系内差异达1%和5%显著水平 Different capital and lowercase letters above the bars in one clone indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.]

在酸性条件下及加入活性铝处理后,细胞膜遭到破坏,膜透性增大,从而使细胞内的电解质外渗,相对电导率不断升高。4个桉树优良无性系在无铝条件下,pH=4.0时的相对电导率均比在pH=3.0时的低,其中G9在K3(0 mg/L Al^{3+} , pH 4.0)处理下相对电导率最低。可见,酸性越大,质膜受伤害越大,而铝离子的存在更加剧了伤害程度。4个无性系均以K2处理的质膜透性最高,上升幅度最大,受伤害最严重,分别为59.56%、46.39%、41.28%、21.79%;K3处理的变化幅度最小,分别为5.21%、12.94%、18.03%、7.81%。K4(pH 4.0 + 120 mg/L Al^{3+})处理质膜透性大于K1(pH 3.0 + 0 mg/L Al^{3+}),说明 Al^{3+} 比酸度对速生桉质膜透性的影响更大。G9的质膜透性变化幅度均比其它3个无性系的小,细胞膜伤害程度较轻,离子渗漏量少。

相同无性系在同一铝浓度下,pH值越高则脯氨酸含量越小(K3 > K1, K4 > K2),同一酸度下有铝的脯氨酸含量比无铝的高(K2 > K1, K4 > K3)。图6看出,脯氨酸含量的高低顺序是G9 > G12 > G3 > G4,差异都达到显著水平。其中以K3处理脯氨酸含量最低,K2处理下最高,表明酸性环境、活性铝可诱导桉树产生更多的脯氨酸,以降低细胞渗透势,维持细胞的正常功能。与对照比较,K1、K2、K3、K4处理下各无性系的增加幅度不同,其变化顺序为:G9 > G12 > G4 > G3。各无性系以K2(pH 3.0 + 120 mg/L Al^{3+})处理变幅最大,其中G9上升了54.18%,比G3(23.82%)、G4(24.10%)高2倍多。pH 3.0酸无铝处理比K4(pH 4.0与120 mg/L Al^{3+})处理大,说明酸度比 Al^{3+} 对速生桉脯氨酸含量的影响大。

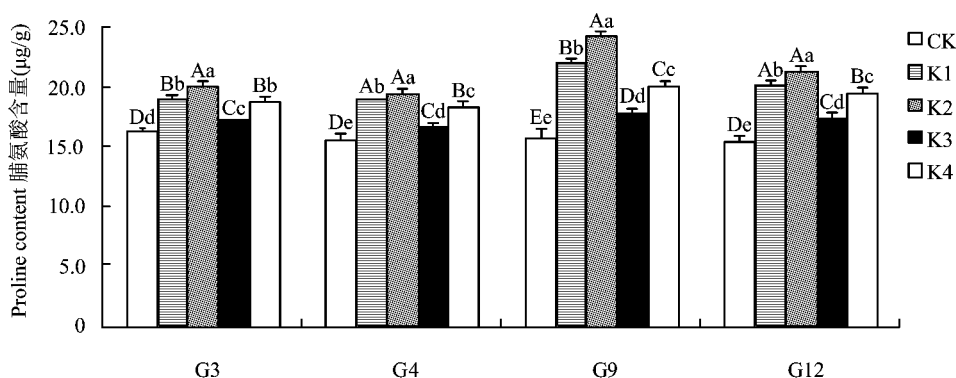


图6 不同酸铝处理下4个桉树无性系幼苗叶片脯氨酸含量变化

Fig. 6 Changes of proline content of four *Eucalyptus* seedling leaves under different acid-Al treatments

[注(Notes): 柱子上不同大、小字母表示同一无性系内差异达1%和5%显著水平 Different capital and lowercase letters above the bars in one clone indicate significant at 1% and 5% levels, respectively.]

3 讨论

一般情况下,土壤中含有的活性铝不对植物生

长构成危害,但若土壤活性铝超出铝毒害阈值,则植物生长衰退甚至死亡。桉树属喜酸植物之一,适宜的酸度条件能促进桉树的生长,但酸度超出了桉树

正常生长的范围就会对其生长产生抑制,且酸性越强抑制作用就越大。

在逆境胁迫下,植物细胞的原生质膜透性增强,电解质外渗量增多,影响了细胞正常的生长和分裂,而游离脯氨酸常产生积累,起到降低叶片的渗透势、防止细胞脱水和维持细胞内膜结构的作用^[16],因此膜透性和脯氨酸含量可作为衡量植物抗逆性大小的指标。本研究中,4 个桉树优良无性系在 120 mg/L Al^{3+} + pH 3.0 处理下生长和生理指标受到明显影响,而 G9 受影响较其它 3 个无性系小,膜伤害程度较轻,叶绿素含量下降幅度小,维持正常的光合作用,而脯氨酸含量增加了 54.18%,比 G4、G3 上升幅度高 2 倍多。

酸铝处理对速生桉无性系幼苗生长影响较大,酸铝处理后,桉树幼苗的生长指标、存活率、各部分含水率都显著低于对照。试验表明,各无性系含水率与脯氨酸和质膜透性呈正相关关系,G9 在酸铝处理后,细胞积累较多的脯氨酸减少细胞失水,受伤害较轻,而且含水率变化幅度较小,即使在 120 mg/L Al^{3+} + pH 3.0 处理下未超过 10%,正常的水分运输保证了植株的良好生长。可见,在酸铝胁迫逆境下,各桉树无性系由于受到酸铝毒害的影响,生长和体内各种生理特性都会发生改变,但其变化量及变化幅度因品系而异,各无性系变化幅度的差异随胁迫程度加深而上升。

桉树属于较耐铝木本植物^[17]。但其适生区位于南方富铝化酸性土壤,酸雨、作物连作及施用肥料等原因加剧了土壤酸化程度,极易产生活性铝积累,从而影响桉树的正常生长。而试验中发现酸铝处理后的桉树培养基质 pH 升高,这与桉树自身调节机制产生根分泌物有关。因此,选育具有高生长量的耐酸铝速生桉无性系,对于实现桉树人工林地的可持续经营具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Meriga B, Reddy B K, Rao K R *et al.* Aluminium-induced production of oxygen radicals, lipid peroxidation and DNA damage in seedlings of rice (*Oryza sativa*) [J]. *J. Plant Physiol.*, 2004, 161(1): 63–68.
- [2] Darkó E, Ambrus H, Stefanovits B E *et al.* Aluminium toxicity, Al tolerance and oxidative stress in an Al-sensitive wheat genotype and in Al-tolerant lines developed by in vitro microspore selection [J]. *Plant Sci.*, 2004, 166: 583–591.
- [3] Rhoades C, Binkley D. Factors influencing decline in soil pH in Hawaiian *Eucalyptus* and *Albizia* plantations [J]. *For. Ecol. Manag.*, 1996, 80: 47–56.
- [4] Rifa S W, Markewitz D, Borders B. Twenty years of intensive fertilization and competing vegetation suppression in loblolly pine plantations: Impacts on soil C, N, and microbial biomass [J]. *Soil Biol. Biochem.*, available on line 2010, 1. Kournal homepage: www.elsevier.com/locate/soilbio.
- [5] 王敬华,张效年,于天仁. 华南红壤对酸雨敏感性的研究 [J]. *土壤学报*, 1994, 31(4): 348–355.
Wang J H, Zhang X N, Yu T R. Study on sensitivity of red soils to rain in South China [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 1994, 31(4): 348–355.
- [6] Ulrich B, Mayer R, Khanna P K. Chemical changes due to acid precipitation in loess-derived soil in central Europe [J]. *Soil Sci.*, 1980, 130(4): 193–199.
- [7] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium/aluminium ratios as indicators of stress in forests ecosystem [J]. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 209–226.
- [8] Guo P G, Bai G H, Li R H *et al.* Molecular characterization of Atlas 66-Derived Wheat Near-Isogenic Lines contrasting in aluminium (Al) tolerance [J]. *Agric. Sci. China*, 2007, 6(5): 552–528.
- [9] Arbestain M C, Mourenza C, A'lvarez E, Mac'as F. Influence of parent material and soil type on the root chemistry of forest species grown on acid soils [J]. *For. Ecol. Manag.*, 2004, 193(3): 307–320.
- [10] Alrarez E, Fernandez-Marcos M L, Monterroso C *et al.* Application of aluminium toxicity indices to soils under various forest species [J]. *For. Ecol. Manag.*, 2005, 211(3): 227–239.
- [11] Neves J C L, Novais R F, Barros N F. Effect of aluminium in nutrient solution on growth and nutrient uptake by *Eucalyptus* spp [J]. *Rev. Arvor*, 1982, 6: 1–16.
- [12] Silva I R, Novais R F, Jham G N *et al.* Responses of eucalypt species to aluminium: the possible involvement of low molecular weight organic acids in the Al tolerance mechanism [J]. *Tree Physiol.*, 2004, 24: 1267–1277.
- [13] Tahara K, Norisada M, Yamanoshita T, Kojima K. Role of aluminium-binding ligands in aluminium resistance of *Eucalyptus camaldulensis* and *Melaleuca cajuputi* [J]. *Plant Soil*, 2008, 302: 175–187.
- [14] 杨振德,方小荣,牟继平. 铝对桉树幼苗生长及某些生理特性的影响 [J]. *广西科学*, 1996, 3(4): 30–33.
Yang Z D, Fang X R, Mou J P. Effect of aluminium on the growth and some physiological characters of eucalyptus seedlings [J]. *Guangxi Sci.*, 1996, 3(4): 30–33.
- [15] Howeler R H. Identifying plants adaptable to low pH conditions [A]. Wright R J, Baligar V C, Murrmann R P (eds.). *Plant-soil interactions at low pH* [C]. The Netherlands: Kluwer Acad. Pub., 1991. 885–904.
- [16] 朱佳,张晓燕,李朝苏,等. 铝胁迫对白银豆幼苗生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 39–42.
Zhu J, Zhang X Y, Li C S *et al.* Effects of physiological characteristics of silvery bean seedling under aluminium stress [J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2006, 25(1): 39–42.
- [17] Chen R F, Shen R F, Gu P *et al.* Investigation of aluminium tolerant species in acid soils of South China [J]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 2008, 39: 1493–1506.