

# 磷胁迫对不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的影响

梁霞<sup>1</sup> 刘爱琴<sup>1</sup> 马祥庆<sup>1\*</sup> 冯丽贞<sup>1</sup> 陈友力<sup>2</sup>

(1 福建农林大学林学院, 福州 350002) (2 福建漳平五一国有林场, 漳平 364400)

**摘要** 缺磷是限制目前农林业产量的一个重要因子,传统的农林业生产主要通过施肥和土壤改良来满足植物对磷的需求,近年来人们开始发掘磷高效利用植物来替代传统方法提高磷的利用效率。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国亚热带地区最重要的造林树种之一,生长快、材质好、产量高,在中国人工林经营中占有重要地位。为揭示磷素胁迫条件下杉木无性系酸性磷酸酶的变化规律和筛选磷高效利用杉木无性系,通过土培试验,设计4种磷素处理水平(正常供磷  $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、轻度磷胁迫  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、中度磷胁迫  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、重度磷胁迫  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),进行磷素胁迫条件下不同杉木无性系酸性磷酸酶(APA)活性的比较研究。结果表明:缺磷条件下1年生杉木叶片和根际的APA活性明显高于正常供磷处理。随缺磷时间的延长、不同杉木无性系酸性磷酸酶的变化规律不同,其中8号、24号、37号无性系叶片和根际的APA活性明显高于正常供磷处理;5号、9号无性系根际APA活性虽然增幅较大,但其叶片酶活性变化较小;3号、23号、34号无性系整体而言对磷胁迫不敏感,缺磷条件不对其叶片APA及根系APA活性造成显著影响。在磷胁迫条件下,杉木无性系可通过叶片及根际酸性磷酸酶活性的增强来适应环境磷缺乏,但不同杉木无性系对磷缺乏的适应性存在明显差异,因此能否将APA活性作为杉木无性系磷效率的评价指标之一仍需作进一步研究。

**关键词** 磷胁迫 杉木 无性系 酸性磷酸酶

## THE EFFECT OF PHOSPHORUS DEFICIENCY STRESS ON ACTIVITIES OF ACID PHOSPHATASE IN DIFFERENT CLONES OF CHINESE FIR

LIANG Xia<sup>1</sup> LIU Ai-Qin<sup>1</sup> MA Xiang-Qing<sup>1\*</sup> FENG Li-Zhen<sup>1</sup> and CHEN You-Li<sup>2</sup>

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 Wuyi State-owned Forest Farm, Zhangping, Fujian 364400, China)

**Abstract** Phosphorus (P) deficiency is one of the main factors that influences plant productivity in agricultural and forestry systems. Fertilization and soil improvement are the primary measures used to meet the P demands of crops in traditional agriculture and trees in forestry management. Recently, plants with high phosphorus use efficiency have been discovered and used to replace traditional measures for improving phosphorus use efficiency of crops. Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), a fast-growing, evergreen conifer tree with high yield and excellent wood quality, is the most important tree species of timber plantations in subtropical China. In order to understand the P demands of Chinese fir clones, levels of acid phosphatase (APA) activity were studied in the leaves and rhizosphere soil of different potted Chinese fir clones under different levels of phosphorus additions. The potted Chinese fir clones were subjected to four P supply levels: normal P supply ( $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), slight P deficiency ( $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), medium phosphorus deficiency ( $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and heavy phosphorus deficiency ( $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The results showed that the activities of APA in the leaves and rhizosphere soil under the P-deficiency treatment were higher than those under normal P treatment, and there were significant differences in the levels of APA activity among the 8 Chinese fir clones. The activities of APA in the leaves and rhizosphere soil of clones 8, 24 and 37 under the P-deficiency treatment were much higher than those under normal P treatment. Compared with the APA levels in leaves, the activities of APA in the rhizosphere soil of clones 5 and 9 under the P-deficiency treatment had higher amplitudes than those under normal P treatment. The clones 3, 23 and 34 were insensitive to P stress, and there were no significant treatment effects on APA levels for these clones. Under the P-deficiency treatment, the activities of APA in the leaves and rhizosphere soil of different Chinese fir clones increased in response to the P stressed environment, and there were significant differences in the abilities of the different Chinese fir clones to adapt to low P levels. Therefore, more research is needed in order to determine whether APA level is an important index for evaluating and se-

lecting Chinese fir clones with high phosphorus use efficiency.

**Key words** Phosphorus stress, Chinese fir, Clones, Acid phosphatase activity

磷作为植物生长发育的必需元素之一,在人类赖以生存的生态系统中起着不可替代的作用,磷素不足是限制目前世界农林业生产的重要因素(王庆仁和李继云,1998)。在长期的遗传变异过程中,植物体内形成了许多对低磷胁迫的适应性反应,并能在植物的生理生化过程中表现出来,这为人们合理筛选磷素营养利用效率基因型提供了可能。目前关于植物对低磷胁迫的适应性反应已有不少研究,其中根系酸性磷酸酶的分泌是该研究的热点之一(樊明寿和张福锁,2001)。植株体内的酸性磷酸酶被认为对聚磷酸盐及有机磷的运转有益,从而与磷的再利用有关,而根尖外层细胞的酸性磷酸酶以及分泌到土壤根际的酶则参与了土壤中磷的分解(Duff *et al.*, 1994)。当环境缺磷时,叶片中酸性磷酸酶活性增强和根系分泌酸性磷酸酶量增加是植物适应环境缺磷的表现(王庆仁和李继云,1998)。但也有研究表明:有些植物并不随介质中磷浓度的降低而分泌酸性磷酸酶,或其活性并未随磷浓度的降低而增高(樊明寿和张福锁,2001; Fernandes & Aacencio, 1994)。目前这方面的研究主要涉及玉米(樊明寿和张福锁,2001)、花生(魏志强等,2002)、大豆(丁洪等,1997)、小麦(孙国海和张福锁,2002)等农作物,对林业木本植物的研究较少(Fox, 1991; Gillespie & Pope, 1991),杉木这方面的研究尚未见到报道。

杉木作为遍及我国南方 16 个省区的重要造林树种在长期的系统发育过程中形成了对林地肥力不同要求的遗传变异,特别是在长期的地理生态隔离及突变选择过程中,形成了不同的地理生态类型,这些不同的地理生态类型具有不同的营养遗传性状(俞新妥,2003),这就为筛选磷营养高效杉木类型提供了可能。因此本文在模拟不同磷素胁迫条件下进行了不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的比较测定,研究磷素胁迫条件下杉木无性系酸性磷酸酶变化规律,为筛选磷高效利用杉木无性系提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

在对福建省漳平五一国有林场杉木无性系采穗圃 100 多个无性系生长及适应性调查基础上,初选 8 个杉木无性系 1 年生苗为供试材料。试验于 2002 年在福建农林大学南平校区玻璃温室内进行。盆栽

土壤由黄心土、粗砂土按 1:3 比例混合组成,盆栽土壤有机质  $0.417 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $0.037 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷  $0.175 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾  $2.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

鉴于在正常生长时不同杉木无性系对磷素的吸收利用特性差异较难判断的现实,本试验通过磷胁迫条件下进行不同杉木无性系耐低磷胁迫的比较研究。在盆栽杉木生长 1 年后,利用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  施肥进行 4 个磷素胁迫等级处理:正常供磷(Control)  $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、轻度磷素胁迫(L)  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、中度磷素胁迫(M)  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和重度磷素胁迫(H)  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。定期对各试验处理施氮肥和钾肥,满足无性系对其它营养元素的要求,每个无性系重复 3 株,每株样品重复测 3 次。

### 1.3 分析方法

磷素胁迫从 2002 年 9 月开始,到 12 月结束,共计 4 个月。在以上不同胁迫处理 30 d 后(10 月初)开始测定各无性系叶片酸性磷酸酶活性,以后每月的同一天取样进行叶片酸性磷酸酶活性测定。为减少取样误差,每次均取杉木新生侧枝上相同位置的叶片,每个植株样品重复 3 次测定,取平均值作为该植株的酸性磷酸酶活性值。胁迫试验结束后,分别取样测定不同无性系根际土和非根土的酸性磷酸酶活性。叶片的酸性磷酸酶活性测定采用林启美和黄德明(1991)的叶饼法,即取植株鲜叶用蒸馏水洗净吸干后,用直径 6 mm 的打孔器取 6 个叶饼,立即放入含 5 mL pH 5.8 的醋酸-醋酸钠缓冲液和 5 mL  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对硝基苯磷酸二钠溶液的小烧杯中,用玻璃盖盖上。置于 30 °C 恒温培养箱中保持 30 min,取出后加入 1 mL  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 的溶液终止反应,于 405 nm 下进行比色,叶片酸性磷酸酶活性的单位为  $\mu\text{g} \cdot \text{FW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。土壤酸性磷酸酶活性测定按关松荫(1987)的方法,即称 5 g 风干土,置于 50 mL 三角瓶中,加 5 滴甲苯后,再加 20 mL 0.5% 磷酸苯二钠,充分振荡后于 37 °C 恒温箱中培养 2 h。取培养后的滤液 5 mL 于 50 mL 容量瓶中,加入 20 mL 蒸馏水,再加入 0.25 mL 缓冲液、0.5 mL 4-氨基氨基替比林液和 0.5 mL 铁氰化钾液,定容后 15 min 内在分光光度计 510 nm 处比色,土壤酸性磷酸酶活性以 2 h 后 100 g 土壤中  $\text{P}_2\text{O}_5$  微克数表示。

2 结果与分析

2.1 磷素胁迫对不同杉木无性系叶片 APA 活性的影响

从不同杉木无性系在不同磷胁迫条件下叶片酸性磷酸酶的 10~12 月平均值可看出(图 1): 缺磷处理(L、M、H)叶片 APA 活性均明显高于正常供磷处理(Control), 且随胁迫程度的加重, 酶活性逐渐增强。由表 1 可知, 随胁迫时间的延长, 不同缺磷处理对杉木无性系酶活性的影响达到显著水平, 而且同一处理条件下不同杉木无性系 APA 酶活性差异也达到显著水平, 可见缺磷胁迫促使杉木叶片 APA 活性提高。随胁迫时间延长和胁迫程度的加重, 其酶活性进一步增强, 也说明磷胁迫条件下杉木无性系可通过自身调节提高 APA 活性, 从而增加对自身叶片中有机磷的分解, 提高磷的利用效率, 以适应缺磷环境, 且不同杉木无性系间的磷素再利用能力明显不同。

从不同杉木无性系叶片酸性磷酸酶活性的动态变化可看出(表 1): 正常供磷条件下, 随胁迫时间的延长, 酶活性呈增强趋势, 但无性系间差异不显著。轻度胁迫条件下, 随胁迫时间的延长, 37 号无性系 APA 活性呈线性增加, 而 5 号、23 号无性系在胁迫前期 APA 活性较高, 后期趋于稳定, 8 号、24 号无性系与之相反, 胁迫前期 APA 活性较低, 后期相对较高, 3 号、34 号、9 号无性系酶活性无明显变化。中

度胁迫和重度胁迫条件下不同无性系表现出与轻度胁迫条件下相似的变化规律, 即 37 号、8 号、24 号无性系随胁迫时间延长, APA 活性呈直线增长趋势; 5 号、23 号、3 号、9 号无性系在胁迫前期活性较高, 随后增长趋于稳定; 34 号无明显变化。

综上所述, 37 号、8 号、24 号无性系的 APA 活性随缺磷胁迫程度和时间的增加而迅速增强, 说明这 3 种无性系对缺磷反应灵敏, 在中、低磷水平的林地上可促使杉木叶片 APA 活性增加, 从而提高其体内的磷素再利用能力。而 34 号无性系在正常供磷和缺磷条件下 APA 活性均较低, 说明该无性系叶片的 APA 活性较低, 对环境的磷素变化反应不敏感。3 号、5 号、9 号和 23 号无性系对环境的磷素反应能力介于以上两类无性系之间, 其中 5 号、23 号无性系在正常供磷条件下 APA 活性较高, 但随胁迫时间的延长和程度的加重, 酶活性出现了缓慢增长趋势, 说明这两个无性系在磷素充足的林地上能保持较高的 APA 活性, 而在胁迫条件下不能通过增强 APA 活性而适应低磷环境。3 号、9 号无性系在轻度胁迫下可随胁迫时间的延长和程度的加重出现较快增长, 但随缺磷胁迫的进一步加重, APA 活性则不再明显增长, 说明这两个无性系能适应磷素充足或轻度缺磷环境中。

2.2 磷素胁迫对不同杉木无性系根际土酸性磷酸酶的影响

在低磷水平下有些植物根系会向土壤中分泌

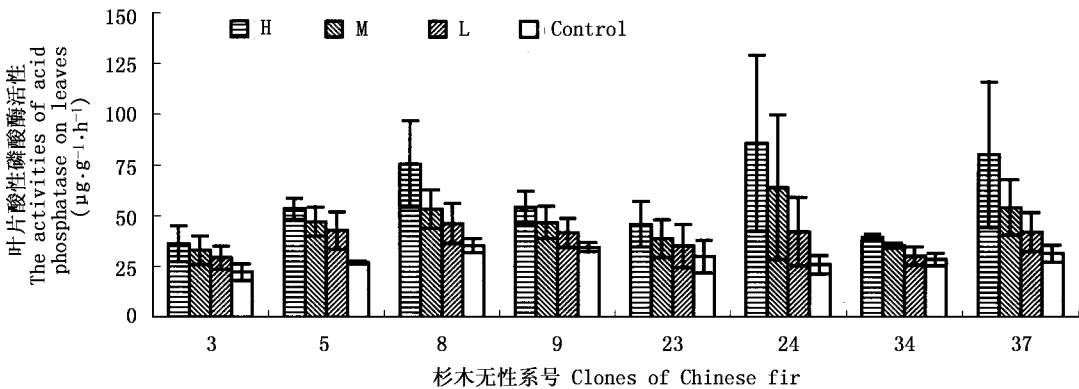


图 1 缺磷对不同杉木无性系叶片 APA 活性的影响  
Fig.1 Effect of phosphorus deficiency on leaf activities of acid phosphatase of Chinese fir clones  
Control: 正常供磷 Normal phosphorus supply L: 轻度磷胁迫 Light phosphorus deficiency M: 中度磷胁迫 Medium phosphorus deficiency H: 重度磷胁迫 Heavy phosphorus deficiency  
图中所表数值为 3 个月的平均数 Data in figure are the average values of three months

表 1  磷素胁迫对杉木无性系叶片酸性磷酸酶活性影响  
Table 1  Effect of phosphorus deficiency stress on leaves activities of acid phosphatase of Chinese fir clones

无性系号 Clone No.	2003 年 10 月 5 日 Oct. 5, 2003			
	Control	L	M	H
3	15.52 ± 8.50 <sup>Abc</sup>	19.66 ± 0.69 <sup>Accl</sup>	19.98 ± 0.44 <sup>Ac</sup>	21.62 ± 1.47 <sup>Ad</sup>
5	25.64 ± 4.84 <sup>Bab</sup>	25.55 ± 0.013 <sup>Babc</sup>	35.10 ± 2.51 <sup>ABa</sup>	44.41 ± 0.84 <sup>Aa</sup>
8	29.95 ± 0.01 <sup>Ba</sup>	32.85 ± 1.20 <sup>ABa</sup>	35.05 ± 0.90 <sup>ABa</sup>	41.00 ± 1.66 <sup>Aab</sup>
9	31.14 ± 0.01 <sup>Aa</sup>	31.27 ± 0.01 <sup>Aab</sup>	34.06 ± 3.59 <sup>Aa</sup>	39.63 ± 8.32 <sup>Aab</sup>
23	14.38 ± 0.01 <sup>Bc</sup>	14.89 ± 0.01 <sup>Bd</sup>	21.41 ± 0.01 <sup>Ac</sup>	24.33 ± 3.17 <sup>Accl</sup>
24	17.01 ± 1.91 <sup>Bbc</sup>	18.04 ± 1.60 <sup>Bd</sup>	23.32 ± 0.01 <sup>ABbc</sup>	29.00 ± 2.31 <sup>Accl</sup>
34	24.81 ± 0.60 <sup>Babc</sup>	24.98 ± 5.16 <sup>Bbc</sup>	33.71 ± 3.43 <sup>ABa</sup>	38.12 ± 0.01 <sup>Aab</sup>
37	24.01 ± 0.57 <sup>Babc</sup>	25.32 ± 3.02 <sup>Bbc</sup>	29.59 ± 2.00 <sup>ABab</sup>	33.30 ± 0.36 <sup>Abc</sup>
无性系号 Clone No.	2003 年 11 月 5 日 Nov. 5, 2003			
	Control	L	M	H
3	21.57 ± 0.01 <sup>Cb</sup>	28.73 ± 0.01 <sup>Bc</sup>	34.58 ± 2.12 <sup>Ac</sup>	34.90 ± 0.01 <sup>Ac</sup>
5	26.86 ± 2.76 <sup>Cab</sup>	45.51 ± 0.01 <sup>Ba</sup>	46.66 ± 0.01 <sup>Bb</sup>	54.74 ± 0.27 <sup>Ab</sup>
8	34.20 ± 3.18 <sup>Ba</sup>	40.78 ± 3.33 <sup>Bab</sup>	59.88 ± 5.06 <sup>Aa</sup>	72.35 ± 0.01 <sup>Aa</sup>
9	34.13 ± 2.99 <sup>Ca</sup>	38.83 ± 1.61 <sup>BCab</sup>	45.84 ± 0.71 <sup>Bb</sup>	56.74 ± 2.88 <sup>Ab</sup>
23	34.00 ± 0.01 <sup>Da</sup>	39.85 ± 0.01 <sup>Cab</sup>	42.10 ± 0.01 <sup>Bbc</sup>	52.60 ± 0.76 <sup>Ab</sup>
24	31.51 ± 5.11 <sup>Ba</sup>	34.56 ± 0.12 <sup>Bbc</sup>	34.31 ± 0.76 <sup>Bc</sup>	57.99 ± 0.83 <sup>Ab</sup>
34	26.89 ± 0.01 <sup>Cab</sup>	26.94 ± 1.23 <sup>Cc</sup>	35.25 ± 0.01 <sup>Bc</sup>	38.44 ± 0.01 <sup>Ac</sup>
37	33.02 ± 0.05 <sup>Ba</sup>	42.98 ± 5.56 <sup>ABa</sup>	57.07 ± 5.54 <sup>Aa</sup>	57.34 ± 3.53 <sup>Ab</sup>
无性系号 Clone No.	2003 年 12 月 5 日 Dec. 5, 2003			
	Control	L	M	H
3	29.45 ± 3.44 <sup>Cb</sup>	39.88 ± 0.01 <sup>Bc</sup>	44.35 ± 2.16 <sup>ABd</sup>	52.36 ± 2.05 <sup>Accl</sup>
5	28.29 ± 0.34 <sup>Bb</sup>	57.68 ± 4.20 <sup>Aab</sup>	60.18 ± 4.64 <sup>Abc</sup>	62.08 ± 2.22 <sup>Accl</sup>
8	42.29 ± 4.47 <sup>Cab</sup>	65.68 ± 1.43 <sup>Ba</sup>	65.69 ± 0.01 <sup>Bb</sup>	113.98 ± 7.01 <sup>Ab</sup>
9	38.82 ± 4.34 <sup>Cab</sup>	55.43 ± 1.67 <sup>Bab</sup>	61.28 ± 2.28 <sup>ABbc</sup>	67.05 ± 0.01 <sup>Ac</sup>
23	41.97 ± 0.53 <sup>Aab</sup>	51.42 ± 2.80 <sup>Abc</sup>	53.59 ± 0.01 <sup>Ac</sup>	61.50 ± 1.03 <sup>Accl</sup>
24	29.80 ± 4.84 <sup>Bb</sup>	135.41 ± 6.42 <sup>Aab</sup>	75.24 ± 2.42 <sup>Aa</sup>	171.20 ± 13.28 <sup>Ac</sup>
34	34.74 ± 0.02 <sup>Bab</sup>	39.11 ± 0.01 <sup>ABc</sup>	38.15 ± 2.26 <sup>ABd</sup>	43.09 ± 2.59 <sup>Ad</sup>
37	38.42 ± 0.09 <sup>Ca</sup>	59.07 ± 1.85 <sup>BCab</sup>	76.96 ± 4.24 <sup>Ba</sup>	151.12 ± 13.26 <sup>Aa</sup>

Control、L、M、H: 同图 1 See Fig.1 APA 活性单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{FW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  The unit of APA activity is  $\mu\text{g}\cdot\text{FW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  表中所列数字为同一无性系三个样品测定结果的平均值,同一列中不同小写字母表示不同无性系间有显著差异( $p < 0.05$ ),同一行中不同大写字母表示不同处理水平间有显著差异 Data in tables are average values from three samples(mean  $\pm$  SE,  $n = 3$ ), the different small letters in same column indicate significant difference between the different clones ( $p < 0.05$ ), and the different capital letters in same row indicate significant difference between the different treatments 表中所列日期为测定日期 The date in Table 1 is the measure date

APA,根际土壤的 APA 活性可在一定程度上代表根系分泌 APA 能力的大小(冯锋等,2000)。因此本试验对不同磷水平下杉木无性系根际土壤 APA 活性进行比较。

由表 2 可知,在正常供磷条件下,不同杉木无性系根际土壤的 APA 活性有明显差异。各无性系根际土壤 APA 活性表现为:24 号 > 9 号 > 37 号 > 8 号 > 34 号 > 23 号 > 5 号 > 3 号,其中以 24 号无性系 APA 活性最高,是最低 3 号无性系的 9.63 倍。在磷素胁迫条件下,各无性系根际土的 APA 活性上升,随胁迫加剧,APA 活性上升幅度增大,不同无性系间

APA 活性差异日趋明显,其中 8 号、9 号、24 号、37 号无性系在 3 种胁迫条件下 APA 活性增加较快,增幅均处于较大值,5 号无性系虽然在正常供磷条件下 APA 活性较低,但在胁迫时其 APA 活性增加较快,说明 24 号、9 号、37 号、8 号、5 号无性系在土壤磷素供应不足时根际土壤的 APA 增强,从而提高了对根际土壤中磷素的吸收。3 号、23 号无性系在磷素胁迫时根际 APA 活性增加较缓慢,增幅明显低于其它无性系,说明这两个无性系在低磷林地中无法通过根际 APA 活性增强来提高根际土壤中磷素的吸收效率,34 号无性系则介于以上两类无性系之间。

表 2 磷素胁迫对杉木无性系根系土壤酸性磷酸酶活性的影响  
Table 2 Effect of phosphorus deficiency stress on activities of acid phosphatase in rhizosphere soil of Chinese fir clones

无性系号 Clone No.	Control	L	M	H
3	32.86 ± 2.35 <sup>Be</sup>	54.62 ± 1.58 <sup>Bd</sup>	99.71 ± 4.66 <sup>Ae</sup>	136.50 ± 26.06 <sup>Ae</sup>
5	67.58 ± 3.63 <sup>Dde</sup>	330.83 ± 2.59 <sup>Ch</sup>	400.79 ± 5.18 <sup>Bbcd</sup>	509.62 ± 9.14 <sup>Ac</sup>
8	134.95 ± 12.65 <sup>Bcd</sup>	411.68 ± 47.16 <sup>Ab</sup>	470.75 ± 12.96 <sup>Aab</sup>	680.63 ± 15.54 <sup>Ab</sup>
9	172.78 ± 15.55 <sup>Db</sup>	316.84 ± 4.15 <sup>Ch</sup>	535.53 ± 15.55 <sup>Babc</sup>	758.37 ± 10.36 <sup>Aab</sup>
23	91.93 ± 9.33 <sup>Bede</sup>	162.41 ± 5.18 <sup>Ac</sup>	177.96 ± 10.00 <sup>Ade</sup>	162.41 ± 15.55 <sup>Ac</sup>
24	315.29 ± 23.32 <sup>Ca</sup>	571.81 ± 40.73 <sup>Ba</sup>	682.36 ± 27.64 <sup>ABa</sup>	784.28 ± 17.73 <sup>Aa</sup>
34	101.26 ± 1.04 <sup>Cede</sup>	104.37 ± 10.23 <sup>Ccd</sup>	261.91 ± 32.12 <sup>Bde</sup>	358.25 ± 12.44 <sup>Ad</sup>
37	141.68 ± 2.99 <sup>Cc</sup>	326.51 ± 21.01 <sup>Bb</sup>	353.46 ± 37.88 <sup>Bcd</sup>	481.98 ± 24.91 <sup>Ac</sup>

Control、L、M、H: 同图 1 See Fig. 1 APA 活性单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{h}^{-1}$  The unit of APA activity is  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{h}^{-1}$

3 讨论与结论

酸性磷酸酶是一种诱导酶,可水解植物体内的磷脂化物,促进有机磷的重复利用,同时还可通过根系酸性磷酸酶的分泌,促进土壤中有有机磷的矿化分解。磷酸酶活性受植物供磷状况的影响,在缺磷条件下不同植物表现出不同的酶活性规律,一些植物可使体内以及根系分泌的磷酸酶活性明显增强,从而促进对土壤中磷素的吸收利用,而有些植物则无此规律(樊明寿等, 2001; Fernandes & Aacencio, 1994),因此酸性磷酸酶是否与植物的磷效率有关还没有确切结论。本研究看到:在缺磷胁迫条件下 1 年生杉木叶片和根际土壤的 APA 活性均高于正常供磷处理。随缺磷程度的加重,不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的变化规律不同,其中 8 号、24 号、37 号无性系叶片及根际 APA 活性明显增强,5 号、9 号无性系根际土壤 APA 活性虽然增幅较大,但叶片酶活性增幅较小;3 号、23 号、34 号无性系整体而言对磷胁迫不敏感,叶片及根系 APA 活性的增加程度均较小。不同杉木无性系叶片的酸性磷酸酶和根际土壤的酸性磷酸酶活性变化规律存在一定差异,这可能与不同杉木无性系营养遗传特性的差异有关。

有研究表明:植物在生长过程中会受到环境养分的胁迫,并在长期的进化过程中形成不同的养分胁迫适应机制,植物能在胁迫条件下明显感受到环境养分逆境,并引起一系列生理生化过程的改变,以适应环境的养分胁迫。由于植物遗传变异的复杂多样性,植物对养分胁迫适应机制的差异不仅表现在种间,同一植物的不同品种对养分胁迫的适应机制也存在显著差异(严小龙和张福锁, 1997; 张福锁, 1993)。本研究表明:在磷胁迫条件下,杉木无性系可通过叶片及根际酸性磷酸酶活性的增强来适应环

境磷缺乏,不同杉木无性系对磷缺乏的适应性存在明显差异,这说明杉木作为遍及我国南方 16 个省区的造林树种,在长期的系统发育过程中形成了适应不同磷缺乏胁迫的机制,因此进行杉木磷高效利用基因型的选育是可能的,但能将 APA 活性作为杉木无性系磷效率的评价指标之一仍需作进一步研究。

参 考 文 献

Ding H (丁洪), Li SX (李生秀), Guo QY (郭庆元) (1997). Study on correlation between acid phosphatase activity and low phosphorus tolerance of soybean. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences* (植物营养与肥料学报), 3, 123 – 128. (in Chinese with English abstract)

Duff SMG, Sarath G, Plaxton WC (1994). The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism. *Physiologia Plantarum*, 90, 791 – 800.

Fan MS (樊明寿), Xu B (徐冰), Wang Y (王艳) (2001). Acid phosphatase activities of intact roots and ground root tissues of maize grown in high P or low P nutrient solution. *Review of China Agricultural Science Technology* (中国农业科技导报), 3, 33 – 36. (in Chinese with English abstract)

Fan MS (樊明寿), Zhang FS (张福锁) (2001). The variation in plant phosphorus acquisition efficiency and its physiological mechanism. *Chinese Bulletin of Life Sciences* (生命科学), 13, 129 – 131. (in Chinese with English abstract)

Fernandes B, Aacencio J (1994). Acid phosphates activity in bean and cowpea plants grown under phosphorus stress. *Journal of Plant Nutrition*, 17, 229 – 241.

Feng F (冯锋), Zhang FS (张福锁), Yang XQ (杨新泉) (2000). *Advances in Study on the Nutrition of Plant* (植物营养研究—进展与展望). China Agriculture Press, Beijing, 12 – 24. (in Chinese)

Fox TR (1991). Rhizosphere phosphorus activity and phosphatase hydrozable organic phosphorus in two forested spodosols. *Soil Biology and Biochemistry*, 24, 579 – 583.

Gillespie AR, Pope PE (1991). Rhizosphere acidification increases phosphorus recovery of locust. II. Model predictions and measured recovery. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 537 – 541.

Guan SY (关松荫) (1987). *The Research Methods in Soil Enzyme*

(土壤酶及其研究法). China Agriculture Press, Beijing, 309 – 313. (in Chinese)

Lin QM (林启美), Huang DM (黄德明) (1991). Evaluation of an acid phosphatase assay for detection of phosphorus deficiency in tomato leaves. *Acta Agriculture Boreali-Sinica* (华北农学报), 6, 78 – 83. (in Chinese with English abstract)

Sun GH (孙国海), Zhang FS (张福锁) (2002). Effect of phosphorus deficiency on activity of acid phosphatase exuded by wheat roots. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 13, 379 – 381. (in Chinese with English abstract)

Wang QR (王庆仁), Li JY (李继云) (1998). Dynamics and prospect on studies of high acquisition of soil unavailable phosphorus by plants. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences* (植物营养与肥料学报), 4, 107 – 116. (in Chinese with English abstract)

tract)

Wei ZQ (魏志强), Shi YX (史衍玺), Kong FM (孔凡美) (2002). The effect of phosphorus deficiency stress on acid phosphatase in peanut. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (油料作物学报), 24, 44 – 46. (in Chinese with English abstract)

Yan XL (严小龙), Zhang FS (张福锁) (1997). *Genetics of Plant Nutrition* (植物营养遗传学). China Agriculture Press, Beijing, 1 – 30. (in Chinese)

Yu XT (俞新妥) (2003). *The Anthology of Yu Xin Tuo* (俞新妥文选). China Forestry Publishing House, Beijing, 7 – 10. (in Chinese)

Zhang FS (张福锁) (1993). *Circumstance Stress and Plant Nutrition* (环境胁迫与植物营养). China Agriculture Press, Beijing, 1 – 142. (in Chinese)

责任编辑：林植芳 责任编辑：刘丽娟