

文章编号: 100F 1498(2002) 03 026F 08

# 雷州桉树人工林下土壤磷肥 活化效果及机理研究

李淑仪<sup>1</sup>, 蓝佩玲<sup>1</sup>, 廖新荣<sup>1</sup>, 徐胜光<sup>1</sup>, 王尚明<sup>2</sup>, 杨国清<sup>2</sup>

(1. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650; 2. 国营雷州林业局, 广东 湛江 524348)

**摘要:** 应用不同活化剂处理不同性质的磷肥, 对其在玄武岩母质的桉树人工林土壤中的生物效应及其作用机理进行了研究。结果显示: (1) 在玄武岩桉树人工林土壤上, 施活化剂处理磷肥均能显著提高桉树生长量, 其中经有机 2 号活化剂处理后的磷矿粉增加生长量最大; 有机活化剂的最适使用浓度为 5%。(2) 玄武岩桉树人工林土壤中的 Fe、Mn 与 P 素有效性关系密切, 且在还原条件下的土壤 Mn 对磷的固定作用更大; Si 有利于土壤中 P 的释放; 适量的 Ca 也有利于提高 P 的活性; (3) 供试活化剂不仅可促进难溶 P 的释放, 还可控释水溶性 P, 使土壤供磷性能平稳。(4) 在玄武岩砖红壤—桉树体系中, 活化剂对 P 的促释和控释机理在于通过对土壤 Fe、Mn、Al 含量的调节而实现对 P 的活化。

**关键词:** 玄武岩人工林土壤; 桉树; 活化剂; 磷; 活化机理

中图分类号: S714.8

文献标识码: A

自 50 年代以来, 我国土壤缺 P 面积不断扩大, 现在我国土壤的缺 P 面积已达 6 700 万  $\text{hm}^2$ , 67% 的耕地缺 P。南方酸性土壤缺 P 更为严重, 有 78% 的土壤缺 P, 且南方土壤淋溶强烈, 土壤 Fe、Al、Mn 含量高, 极易对肥料中有效 P 进行固定, P 肥利用率极低, 只有 10% 左右。而磷矿是不可再生的矿产资源, 况且我国的磷矿资源并不丰富, 由于施肥不当不仅造成浪费, 还引起环境污染。如能部分提高磷肥利用率, 都将带来巨大的社会效益。

磷肥利用率低的主要原因是 P 的土壤固定作用, 水溶性 P 在土壤中容易与 Ca、Mg、Fe、Al、Mn 等结合形成难溶性 P 化合物, 据报道, 大部分 P 作为无效态被土壤所固定, 至少有 70% 90% 的 P 进入土壤而成为难以被植物吸收的固定态 P。土壤中的全 P 量虽较高, 但对作物有效的 P 含量往往很低, 如雷州半岛的桉树人工林土壤, 浅海沉积物发育的砖红壤, 土壤全 P 含量是有效 P 的 1 857 倍, 而玄武岩发育的砖红壤其全 P 含量是有效 P 的 9 571 倍<sup>[1]</sup>, 这些土壤中磷肥有效性低的问题, 已影响到桉树速生丰产造纸材基地林的建设, 已成了该地区林木生产力最重要的限制因子之一, 因此, 提高雷州桉树人工林土壤磷肥的有效性已是迫切需要解决的问题, 而提高土壤磷肥有效性又是国内外土壤科学和肥料学研究中的活跃前沿。

提高磷肥利用率最根本的手段, 是开发出能抵御不同酸性土壤中 Fe、Al、Mn 固定 P 的物质——控释 P 素养分的载体材料。本文在实验室和盆栽生物试验条件下, 研究在玄武岩桉树人工林土壤中有机和无机活化剂对磷肥的活化控释效果及其机理, 旨在为提高林木肥料利用率

收稿日期: 2001-08-27

基金项目: 广东省自然科学基金项目(990741)、广东省科技创新百项工程(2KB05602N、2KB05601N)和广东省农业环境综合治理重点实验室

作者简介: 李淑仪(1957), 女, 广东佛山人, 研究员。

提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤采自雷州半岛玄武岩砖红壤的桉树人工林耕层土壤,风干后过3 mm筛,土壤 pH 为 4.18,有机质、全量 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  分别为 23.64、0.92、0.37、1.60  $g \cdot kg^{-1}$ ;土壤碱解 N、有效 P、有效 K 分别为 91.1、1.50、1.50  $mg \cdot kg^{-1}$ ;交换性 Ca、Mg 分别为 76.1 和 73.0  $cmol \cdot kg^{-1}$ 。

1.1.2 供试活化剂 供试木素由华南农业大学资源与环境学院廖宗文教授提供,其基本性质已有研究<sup>[2,3]</sup>;有机 1 号和 2 号由江西出产;无机活化剂由江苏出产。

1.1.3 供试肥料 氮肥:尿素(分析纯);磷肥:过磷酸钙及磷矿粉。过磷酸钙全 P 量为 203 ( $P_2O_5$ )  $mg \cdot kg^{-1}$ ,有效 P 为 156 ( $P_2O_5$ )  $mg \cdot kg^{-1}$ ;磷矿粉为开阳磷矿粉,其全 P 量为 276 ( $P_2O_5$ )  $mg \cdot kg^{-1}$ ,有效 P 为 58 ( $P_2O_5$ )  $mg \cdot kg^{-1}$ ;磷酸二氢铵(分析纯)。钾肥:硫酸钾(分析纯)。

1.1.4 供试品种 尾叶桉 U<sub>6</sub> 无性系,由国营雷州林业局提供。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 盆栽试验

盆栽试验方案:试验共 12 个处理,重复 4 次(即 4 盆),每盆种 1 株树苗;每盆装土 5 kg, N、K 施用量分别为 N 0.414  $g \cdot kg^{-1}$ 土、K 0.225  $g \cdot kg^{-1}$ 土,磷肥用磷矿粉每盆 7.5 g;活化处理:1、2——均没添加活化剂,分别为 CK1 磷矿粉、CK2 过磷酸钙(每盆 7.5 g);3——CK3 添加 3% 木素;4、5、6——分别添加有机 1 号活化剂 3%、5%、10%;7、8、9——分别添加有机 2 号活化剂 3%、5%、10%;10、11、12——分别添加无机活化剂 15%、25%、35%。各物料与土壤充分混匀后再装进盆中种上树苗。

处理方案有 3 个对照,其中 CK3 的木素是经过多次试验,证明该活化剂和该浓度是有效的<sup>[4,5]</sup>。

栽培管理:盆栽试验在网室内进行,盆栽试验于 2000 年 8 月 28 日每盆种 1 株树苗(出圃苗木),生长至 11 月 9 日止。分别于种植前、种植后 22、43、73 d 量株高和地径,计算净增株高(用每次调查实测值的株高减去种植时的株高,得净株高  $\Delta H$ )。

#### 1.2.2 室内模拟试验

活化剂对防止土壤固磷的作用:试验设 4 个处理,1——不加活化剂;2——0.02 g 木素;3——0.02 g 有机 1 号;4——0.02 g 有机 2 号。每处理 3 重复,分别将各处理与 5 g 土置于离心管中加水 4 mL 摇混后加 50  $mg \cdot kg^{-1}$   $NH_4H_2PO_4$  溶液 25 mL,充分搅拌后,振荡 30 min,离心吸取 5 mL 清液测溶液中 P 含量。

土壤培养条件下活化剂对磷肥有效性影响:用培养皿称 50 g 土培养,试验处理:1——CK1 没有添加磷肥和活化剂;2——CK2 仅添加磷矿粉 1.15 g(此量下同);3——CK3 添加磷矿粉及 3% 木素;4——添加磷矿粉及 3% 有机 1 号;5、6、7——分别添加磷矿粉和 3%、5%、10% 有机 2 号;8——添加磷矿粉和 20% 无机活化剂;9、10、11、12、13——分别添加磷铵及活化剂 0(CK4)、8% 有机 1 号、8% 有机 2 号、13.3% 有机 2 号和 65% 无机活化剂。混匀加水(保持湿润),于 4、14、42、63 d 后取样,测有效 P 和活性 Fe、Al、Mn、Ca、Si。

### 1.3 分析方法

土壤有效 P、活性 Fe、Al、Mn、Si、Ca, 用双酸( $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl} - 0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ 1/2 H}_2\text{SO}_4$ ) 一次性浸提, 钼锑抗比色法测定 P, 其它元素用等离子发射光谱(ICP)测定。

### 1.4 数据统计方法

试验数据用 Excel 和 SAS 计算机统计软件进行处理, 图表中数据均为各处理中各重复之间的平均值, 多重比较用新复极差(SSR)法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 桉树盆栽生长效应

从图 1A 可看出, 在玄武岩砖红壤的桉树人工林土壤上, 桉苗植后 22 d 的净株高超过过磷酸钙处理, 最好是 5 处理(5% 的有机 1 号), 且与各处理间差异极显著( $p = 0.0136$ ); 效果超过过磷酸钙处理但差异不显著的有 9 处理(10% 有机 2 号)和 3 处理(3% 木素); 生长量最差的是 1 处理(施磷矿粉不加活化剂)和 12 处理(35% 无机活化剂)。

图 1B 表明, 桉苗植后 43 d 的净株高超过过磷酸钙处理的有 3 个处理, 最好的仍然是 5 处理, 且与各处理间的差异极显著( $p = 0.0011$ ); 其次是 8(5% 有机 2 号)、9(10% 有机 2 号); 最差的是 4 处理(3% 有机 1 号)和 1 处理(施用磷矿粉不加活化剂)。

从图 1C 可看出, 桉苗植后 73 d, 净株高超过过磷酸钙处理的依次有: 5 处理(5% 有机 1 号)、8 处理(5% 有机 2 号)、11 处理(25% 无机活化剂)、9 处理(10% 有机 2 号)、7 处理(3% 有机 2 号)。

桉树盆栽的试验结果表明, 在玄武岩砖红壤条件下, 用于对磷矿粉的活化是有机 2 号和有机 1 号作活化剂效果较好, 最适使用浓度为 5%。

### 2.2 活化剂对防止土壤固 P 的作用

活化剂对防止土壤固 P 作用的模拟试验结果列于表 1, 试验显示, 在玄武岩砖红壤上加入不同活化剂处理的土壤溶液中 P 浓度均高于不加活化剂的对照处理, 这表明, 加入适量有效的活化剂到

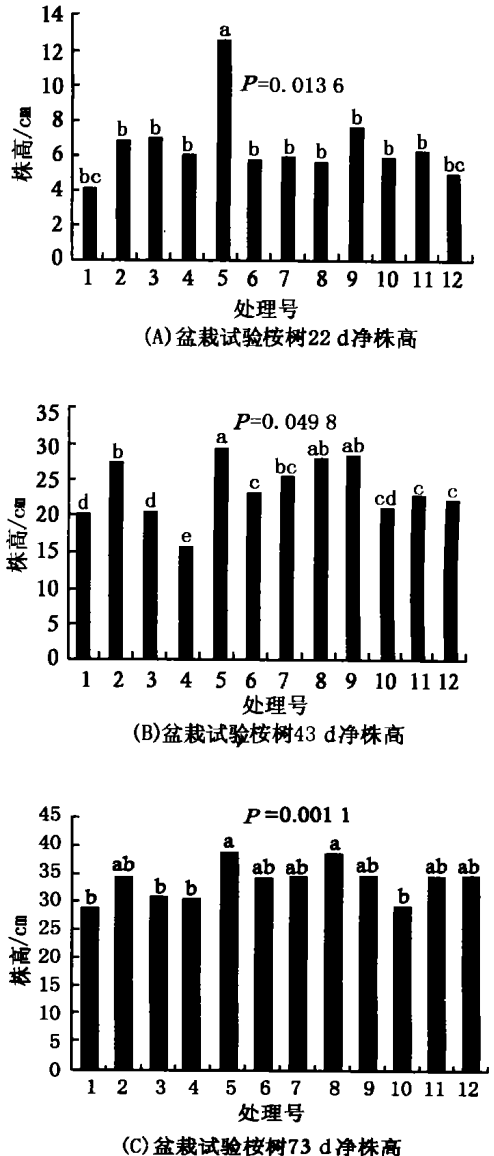


图 1 几种活化剂及其不同浓度处理磷矿粉对桉树生长的影响

土壤中有利于减少土壤对施入土壤中水溶性P的固定作用,使土壤溶液中能保持较高浓度的有效性P。这与 R. J. Xie<sup>[6]</sup> 和肖雄师等<sup>[4]</sup> 的研究结果一致。试验结果同时显示,三种活化剂当中,有机1号对玄武岩砖红壤的作用优于木素,这与盆栽试验中桉树的生长效应相吻合。

### 2.3 不同活化剂及其不同浓度对难溶性磷肥——磷矿粉中P的促释效果

从图2B可知,几种活化剂对土壤中速效P影响也有较大的差异,所应用的几种活化剂当中,4d时测得有效P含量最大的是木素的处理,其它依次是有机1号、有机2号,最差是无机活化剂;在14d时,土壤有效P含量则依次是有机2号、有机1号、木素、无机活化剂;63d时测得风干土壤有效P含量最高是有机1号,其它依次为有机2号、木素和无机活化剂。

4d和14d及63d时测定,用有机2号处理磷矿粉,在加入量为3%、5%、10%均能提高土壤有效P含量,其中加入量为5%时有效P提高的量比3%的高,但加入量达到10%时土壤有效P开始下降,其中原因有待进一步研究。在玄武岩砖红壤条件下,有机活化剂加入量最适为5%,这与盆栽试验桉树的生长效应相吻合。

表1 活化剂对玄武岩砖红壤水溶性P的影响

处理号	淋出液有效P含量/ (mg. kg <sup>-1</sup> )
1: CK	1.237
2: 木素	4.379
3: 有机1号	7.888
4: 有机2号	4.292

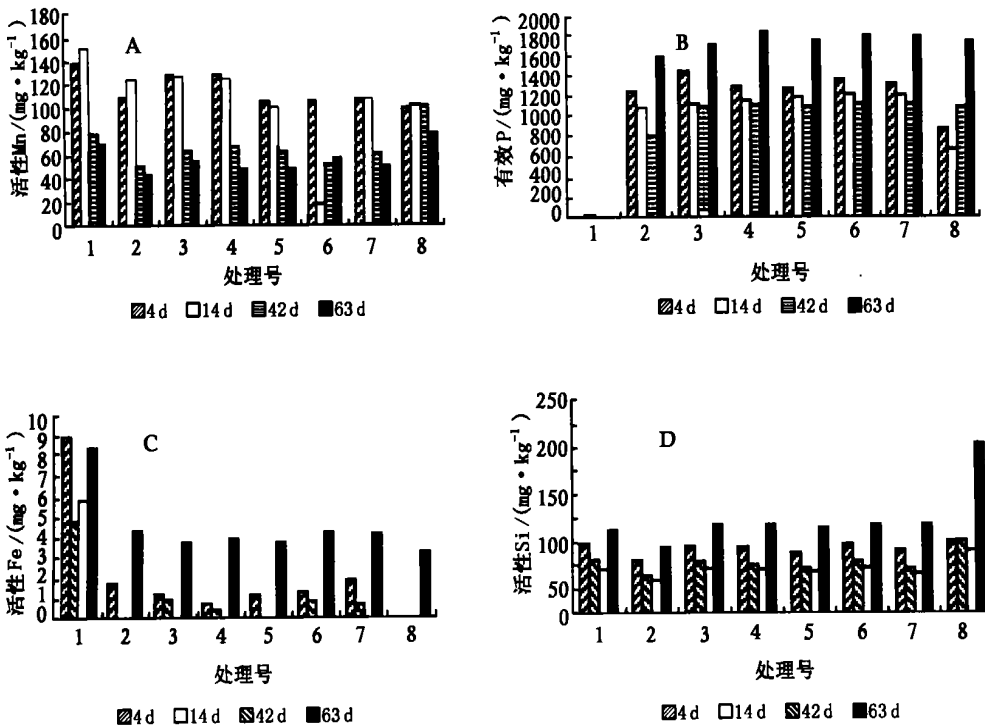


图2 活化剂处理磷矿粉后土壤中有效P及活性Fe、Mn、Si含量

## 2.4 不同活化剂培养磷矿粉后土壤中有有效 P 与各有关元素的相关性

在玄武岩砖红壤中, 施入经不同活化剂处理的磷矿粉后, 土壤有效 P 含量与可能固 P 或与 P 有关的元素含量之间的相关系数列于表 2。从表 2 可知, 土壤在风干状态下与有效 P 含量完全呈负相关的有活性 Fe 和活性 Mn; 有效 P 与活性 Fe 的相关系数大于与活性 Mn 的相关系数; 其中活性 Fe 的相关系数是风干状态下大于湿润状态下的; 而活性 Mn 的相关系数是湿润状态大于风干状态的。

表 2 不同活化剂培养磷矿粉后土壤有效 P 与有关元素的相关系数(r)

	4 d	14 d	42 d	63 d(干)	63 d(湿)
Fe	- 0.86 <sup>**</sup>	- 0.83 <sup>**</sup>	- 0.96 <sup>**</sup>	- 0.95 <sup>**</sup>	- 0.88 <sup>**</sup>
Mn	- 0.45	- 0.46	- 0.52	- 0.56	- 0.79 <sup>**</sup>
Al	0.66	- 0.54	0.72 <sup>*</sup>	0.98 <sup>**</sup>	0.94 <sup>**</sup>
Ca	0.92 <sup>**</sup>	0.91 <sup>**</sup>	0.99 <sup>**</sup>	0.76 <sup>*</sup>	
Si	- 0.40	- 0.47	- 0.24	0.064	

注: 1. 4 d、14 d、42 d 的测定结果均风干土测, 63 d 则分别测定了风干土和湿润土。2.  $r_{0.05} = 0.666$ ,  $r_{0.01} = 0.798$

从表 2 还可知, 活性 Ca 含量与有效 P 含量之间的关系呈正相关, 且相关显著。这可能是由于在酸性土壤中 Ca 可减轻或消除  $Fe^{3+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  过量存在的抑制作用<sup>[9]</sup>, 因而在一定范围内对 P 的活化有促进作用<sup>[10]</sup>, 还有资料表明, 酸性土壤中施适量石灰(Ca)可促进小麦吸收 P。说明在酸性桉树人工林土壤条件下, 适量的 Ca 也有利于提高 P 的活性。

一般说来, 活性 Al 与 P 的固定作用也有密切关系, 而与此相反, Si 对 P 有效性有促进作用, 而表 2 中, 活性 Al、Si 含量与有效 P 含量之间的相关性呈正负混合无规律性, 原因有待进一步研究。

表 2 的结果说明在玄武岩砖红壤条件下, Fe 和 Mn 与 P 素有效性关系较密切, 且成为 P 素有效性的限制因素; Ca 则是提高磷有效性的有利因素, 而 Al、Si 相比之下都不是影响土壤磷肥有效性的主要因素。

## 2.5 相同活化剂在玄武岩砖红壤中与磷矿粉混合后干、湿土有效 P 的差异

活化剂与磷矿粉混合 63 d 后, 分别测定了风干土和湿润土的有效 P (图 3B 所示), 所有处

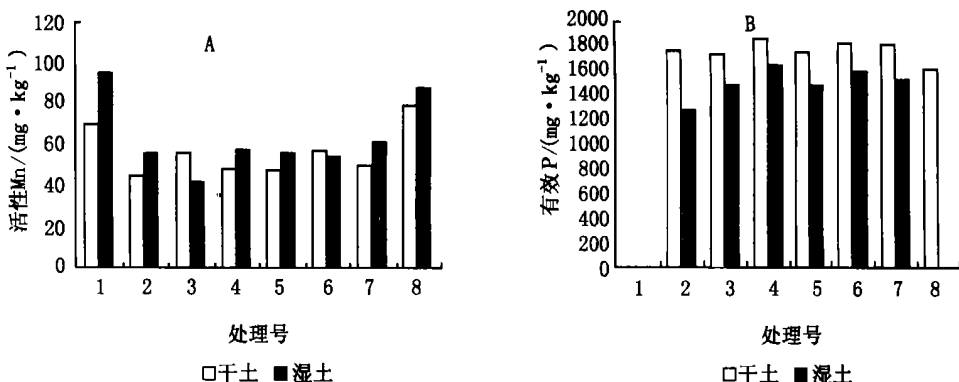


图 3 活化剂与磷矿粉作用培养 63 d 后干、湿土有效 P 和活性 Mn 含量

理的土壤有效 P 含量均为湿润土低于风干土, 而变价元素 Fe、Al、Mn 3 个之中, 只有 Mn 含量与 P 含量相对应呈相反变化, 即体系中 Mn 含量高时则 P 含量低, Mn 含量制约 P 含量。根据分析结果(图 3A 所示), 湿润状态下含量高于风干状态的只有 Mn, 说明在还原条件下的土壤 Mn 对 P 的固定作用大于 Fe、Al。

## 2.6 在玄武岩砖红壤上不同活化剂对磷矿粉释 P 及有关元素的动态效应

从图 2B 可看出, 在土壤中活化剂处理磷矿粉有效 P 含量在不同时间测定结果表明, 4 d 时木素和有机 1 号、有机 2 号已开始起释 P 作用, 14 d 后除无机活化剂外, 所有的有机活化剂的有效 P 含量均超过了对照, 而木素在前期有效 P 比其它活化剂高, 而后期较其它活化剂低, 这可能由于其所用浓度偏低(3%) 所致; 而无机活化剂的有效 P 越往后效果越好, 此外释出活性 Si 的效果比释出有效 P 效果更好, 这可能与 Si 利于促进 P 的释放有关, 很多研究已表明 Si 可促进 P 的吸收<sup>[7-8]</sup>, 这一点解释了为什么桉树盆栽试验中这种活化剂在生长 73 d 后生长量赶上了不同浓度的有机活化剂。

从图 2A、C、D 中还可看出, 在不同时间段中, 与对照相比, 与有效 P 变化方向相反的有 Mn、Fe, 与有效 P 变化方向相同的是 Si, Ca 与 Si 相似(图略), 而 Al 则自身变化不大(图略), 进一步说明有效 P 的变化与 Fe、Mn 的关系比 Al 关系更密切; 在所有时间段中, 施不同活化剂与磷矿粉的处理, 活性 Fe 和 Mn 均比土壤(CK1) 明显降低, 而有效 P 则明显提高, 说明土壤中的活性 Fe、Mn 是与土壤中大量的有效 P 结合, 使其活度下降, 这一点也说明了 Fe、Mn 与 P 关系的密切性。

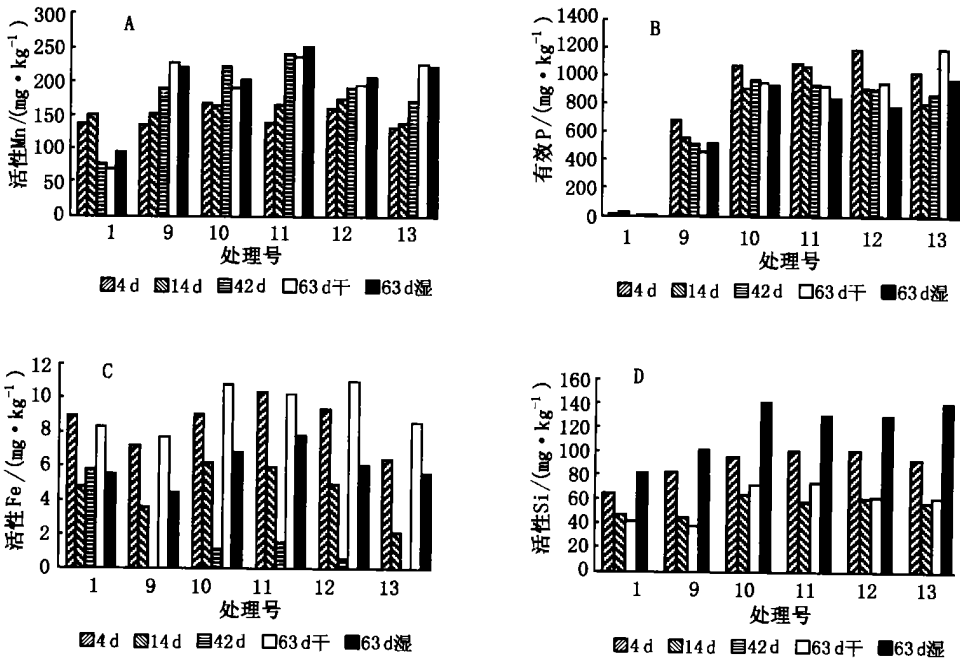


图 4 活化剂处理磷铵后土壤中有效 P 及活性 Si、Fe、Mn 动态变化

## 2.7 不同活化剂对水溶性磷肥——磷酸二氢铵中 P 的控释效果

图 4 的结果显示, 在玄武岩砖红壤中施入磷铵后, 土壤中有效 P 的测出值只有加入活化剂处理的 50% 左右, 而且随着时间的推移而不断降低。而几种活化剂加磷铵的处理, 土壤有效 P 在不同时间段的测出值, 均大幅度高于对照。说明几种活化剂对水溶性 P 均有防固定性能和平稳供肥性能, 但其中也有差异, 如图 4 所示, 供试的三种活化剂均对 P 有保护作用, 多数是湿润土的有效 P 低于风干土, 只有 10 处理(有机 1 号)的土壤有效 P 在不同时间段中所测出的土壤有效 P 量较一致, 而且风干土与湿润土的测定值差异不大, 表明有机 1 号对水溶性 P 的保护效果最好, 使其供 P 性能相对最平稳。而无机活化剂的后劲较足, 在前期它比不上有机活化剂, 但在 63 d 后, 用它处理的磷铵的有效 P 量超过了有机活化剂, 说明这种无机活化剂对水溶性 P 的控释作用良好。

## 2.8 玄武岩砖红壤中施磷铵加活化剂对可能影响 P 有效性的有关元素含量的影响

表 3 和图 4 均显示, 玄武岩砖红壤施磷铵加活化剂对土壤中活性 Si 含量有着与有效 P 同样的效应, 即在提高土壤有效 P 的同时, 也提高了土壤活性 Si 的含量, 由于 Si—P 间存在协同效应, 已有研究证明<sup>[8, 10]</sup> Si 可以使土壤中持正电荷的无定形 $[\text{FeAl}_2\text{O}_3]^{0.5+}$  转变为带负电荷的 $[\text{FeAlSi}(\text{OH})_3]^{0.5-}$ , 从而减少土壤对 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  和 $\text{HPO}_4^{2-}$  的固定。所以提高了活性 Si 的作用等同于提高有效 P 含量。

表 3 玄武岩砖红壤施磷铵加活化剂后土壤有效 P 与有关元素的相关系数(r)

	4 d	14 d	42 d	63 d(干)	63 d(湿)
Fe	0.112	0.236	-0.775	0.565	0.481
Mn	0.465	0.506	0.888	0.765	0.846
Al	0.851	0.003	0.874	0.963	0.975
Ca	0.197	0.069	0.199	0.483	
Si	0.989**	0.785**	0.838*	0.974**	

注: 1. 4、14、42 d 的测定结果均风干土测, 63 d 则分别测定了风干土和湿润土。2.  $r_{0.05} = 0.666, r_{0.01} = 0.798$

图 4 还显示, 施磷铵加活化剂对 Fe、Mn、Al 等的效应与施磷矿粉时所产生的效应不同, 施磷铵时加活化剂后土壤的活性 Fe、Mn、Al 含量均比对照高, 说明施磷铵加活化剂使土壤有效 P 含量平稳, 也是通过对土壤 Fe、Mn、Al 含量的调节而实现对水溶性 P 的控释作用的。

## 参考文献:

- [1] 李淑仪, 廖观荣, 廖新荣, 等. 不同母质砖红壤的磷有效性差异[J]. 土壤与环境, 1999, 8 (3): 227—229
- [2] 乐学义, 卢其明, 何庭玉, 等. 氧化黑液木素—— $\text{Mn}^{2+}$  ( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ ) 螯合物稳定性的研究[J]. 化学研究与应用, 2000, 12 (3): 351—354
- [3] 张珂, 周显毅. 造纸工业蒸煮废液的综合利用与污染防治技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社出版, 1992. 356—369
- [4] 肖雄师. 木素处理磷矿粉和木素锌肥的肥效及其机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 1999
- [5] 李淑仪, 廖观荣, 蓝佩玲, 等. 果树磷肥活化效果研究[J]. 生态科学, 2001, 20(2): 51—55
- [6] Xie R J, Fyles J W, Mackerzie A F. Lignosulphate effects on phosphate reactions in clay soil: Causal modeling[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55: 711—716
- [7] 何念祖, 孟赐福. 植物营养学原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 311—317
- [8] 马同生. 土壤、植物中 Si 与磷的相互关系[A]. 见: 李生秀. 土壤——植物营养研究论文集[C]. 1999. 90—93
- [9] 王家玉. 植物营养元素交互作用研究[J]. 土壤学进展, 1992, (1): 1—10

[10] 廖宗文,林东教,王建林. 红壤磷肥有效性差异及其土壤化学特点的初步研究[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(1): 67-71

## Research on Activation Effects and Mechanisms of Phosphatic Manure in Soil under the Eucalypt Plantation in Leizhou Peninsula

LI Shu-yi<sup>1</sup>, LAN Pei-ling<sup>1</sup>, LIAO Xin-rong<sup>1</sup>, Xu Sheng-guang<sup>1</sup>, WANG Shang-ming<sup>2</sup>, YANG Guo-qing<sup>2</sup>

(1. Guangdong Institute of Ecological and Soil Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

2. Leizhou forestry Bureau, Zhanjiang 524348, Guangdong, China)

**Abstract:** Several activation agents were used to treat various phosphate fertilizers and their biological effect and mechanism in soil under the eucalypt plantation on basalt-latolol were studied. The results are as follows: (1) The growth of eucalypt increased markedly in soil under the eucalypt plantation on basalt-latolol when potted plants were tested by a few activation matters to examine the phosphatic manure. The phosphorus powder treated by activation agent No. 2 can promote the increment of eucalypt trees significantly. The feasible concentration of organic activation agent is 5%. (2) The Fe and Mn elements in the plantation soil are closely correlated to the efficiency of P element, and the soil Mn has greater fixation effect on P under the condition of reduction. Si can benefit the release of P in soil, and proper Ca content can also increase the activity of P element. (3) The activation agents tested can not only promote the release of hard-soluble P, but also control the release of water-soluble P so as to stabilize the P supply from soil. (4) In the basalt-latolol soil-eucalypt system, the promotion and control mechanism of activation agents to P is to adjust the contents of Fe, Mn and Al in soil so as to realize the activation of P.

**Key words:** basalt-latolol soil; eucalypt; activation agent; phosphorus; activation mechanism