



廖新荣, 梁嘉伟, 梁善, 等. 不同种类小分子有机酸对砖红壤磷素形态转化的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 30-35.

不同种类小分子有机酸对砖红壤磷素形态转化的影响

廖新荣^{1,2}, 梁嘉伟¹, 梁善¹, 王荣萍^{1,2}, 詹振寿¹

(1 广东省生态环境技术研究所/广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650;

2 佛山市环保技术与装备研发专业中心, 广东 佛山 528000)

摘要:【目的】明确有机酸的作用机制, 为提高酸性红壤累积态磷素(P)可利用率提供科学依据。【方法】采用室内模拟试验研究了草酸、柠檬酸、苹果酸为代表的小分子有机酸对砖红壤磷素形态的影响。【结果】柠檬酸处理抑制了树脂交换 P(P₁)的解吸, 而水(对照)、草酸和苹果酸处理促进了 P₁ 的解吸; 在培养前期, 3 种有机酸抑制了 NaHCO₃ 提取态无机 P(P₂) 的活化, 柠檬酸抑制作用最强, 草酸抑制作用最弱; 3 种有机酸处理在整个培养时期均表现为活化 NaHCO₃ 提取态有机 P(P₃)的作用, 其中草酸活化能力最强; 3 种有机酸促进了 NaOH 提取态无机 P(P₄)的活化, 其中草酸活化作用最强; 3 种有机酸抑制 NaOH 提取态有机 P(P₅)的活化; 在整个培养时期, 3 种有机酸都表现为抑制稀盐酸提取态 P(P₆)、浓盐酸提取态无机 P(P₇)、浓盐酸提取态有机 P(P₈)和残留态 P(P₉)活化的作用。【结论】3 种有机酸在不同培养时期对土壤磷形态的作用不同, 草酸活化能力最强, 其次是苹果酸, 最后是柠檬酸。

关键词: 小分子有机酸; 砖红壤; 磷形态; 磷活化
中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2017)05-0030-06

Effects of various low-molecular-weight organic acids on phosphorus transformation in lateritic soil

LIAO Xinrong^{1,2}, LIANG Jiawei¹, LIANG Shan¹, WANG Rongping^{1,2}, ZHAN Zhenshou¹

(1 Guangdong Institute of Eco-Environmental Science and Technology/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangzhou 510650, China; 2 Center of Expertise in Environmental and Protection Technology and Equipment Development in Foshan City, Foshan 528000, China)

Abstract: 【Objective】To reveal the action mechanisms of organic acids, and provide a scientific basis for raising the utilization rate of accumulative phosphorus(P) in acidic red soil. 【Method】Laboratory simulation experiments were conducted to study the effects of low-molecular-weight organic acids, represented by oxalic acid, citric acid and malic acid, on P form in lateritic soil. 【Result】During the whole incubation period, citric acid inhibited resin-P(P₁) desorption, while water (control), oxalic acid and malic acid enhanced resin-P(P₁) desorption. At the earlier stage of incubation, all three organic acids inhibited the activation of NaHCO₃-extractable inorganic P(P₂), with citric acid having the highest inhibition effect and oxalic acid having the lowest. Three organic acids activated NaHCO₃-extractable organic P(P₃) during the whole incubation period, and oxalic acid showed the strongest activating effect. Three organic acids enhanced the activation of NaOH-extractable inorganic P(P₄) and oxalic acid displayed the

strongest activating effect. Three organic acids inhibited the activation of NaOH-extractable organic P(P₅). During the whole incubation period, three organic acids inhibited the activation of dilute HCl-extractable P(P₆), dense HCl-extractable inorganic P(P₇), dense HCl-extractable organic P(P₈) and residual-P(P₉). 【Conclusion】 Three organic acids showed different effects on soil P forms at different times of incubation. Oxalic acid showed the strongest activating effects, followed by malic acid and then citric acid.

Key words: low-molecular-weight organic acid; latosol; phosphorus form; phosphorus activation

砖红壤主要分布于我国雷州半岛、海南岛、云南南部以及台湾南部等热带地区。雷州半岛砖红壤的成土母质主要是浅海沉积物和玄武岩,由于其成土母质和气候条件的影响,砖红壤富含针铁矿和三水铝石等结晶度较高的铁铝氧化物^[1-2],这类土壤对磷具有较强的吸附能力,磷素在该类土壤中极容易与铁铝氧化物结合形成难溶性磷,从而使磷素的生物有效性降低^[3-5]。在低磷胁迫下,有些植物会通过自身的调节,从根系分泌大量的低分子量有机酸(Low molecular weight organic acids, LMWOAs)^[6-9]。分泌的有机酸主要有柠檬酸、草酸、酒石酸和苹果酸等,其总含量可高达 23.73 mmol·kg⁻¹^[10]。低分子量有机酸可以通过氢质子的酸溶作用、有机酸阴离子的络合作用等活化砖红壤难溶性无机磷,使之转化为 HPO₄²⁻或 H₂PO₄⁻^[11-13]。其活化磷酸盐能力顺序一般为:柠檬酸>草酸>酒石酸>苹果酸^[14-17]。

许多研究都证实有机酸能够提高土壤中磷素的活性^[18-20],不同有机酸种类及浓度对土壤磷素影响不同,且不同研究者得出的结论差异较大。适宜种类及浓度的有机酸更加有利于提高土壤磷素的有效性,但可能具有不同的调控机制。而不同低分子量有机酸对砖红壤磷形态转化的问题,还缺乏较深入的研究。本研究采用 Tiessen 等^[21]改进的磷素分级方法,研究以草酸、柠檬酸、苹果酸为代表的小分子有机酸对砖红壤磷形态的影响,以期明确有机酸的作用机制,为提高酸性红壤累积态磷素可利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为玄武岩母质发育的砖红壤,采自广东南部的雷州半岛(20°53'57"N, 109°58'40"E), 0~20 cm 表层土壤,土壤样品经室内自然风干,过 2 mm 筛,备用。土壤理化性质为: pH 4.50,有效磷 7.93 mg·kg⁻¹,全磷 0.5 g·kg⁻¹,有机质 26.62 g·kg⁻¹,游离氧化铁 10.58 g·kg⁻¹,非晶质氧化铁 2.18 g·kg⁻¹,其中 pH、有机质、全磷、碱解氮的测定方法参照 Jackson^[22]的方法,有效磷的测定方法采用 Olsen-

<http://xuebao.scau.edu.cn>

P 法^[23],添加的小分子有机酸为草酸、柠檬酸和苹果酸。

1.2 试验方法及设计

称取 10 目风干土样若干份,每份 20 g 装于 50 mL 塑料瓶中。将水(对照)或不同种类小分子有机酸溶液(50 mmol·kg⁻¹)加入到土壤中,再将土壤含水量调节到适宜(田间持水量的 70%)的水平,充分混匀后,于 25 ℃ 条件下间歇通气培养 42 d,用带孔的塑料薄膜对塑料杯进行表面覆盖,防止水分过度蒸发,每天以称质量差减法补充损失的水分,以保证恒定的湿度条件,每处理 3 次重复。于 0、7、14、21、28、35、42 d 破坏性采集土壤样品,进行磷的形态分析。

1.3 磷的形态分析方法

参考 Tiessen 等^[21]的磷素分级法,将土壤磷素(P)分为 9 大类进行测定:树脂交换 P(P₁)、NaHCO₃ 提取态无机 P(P₂)、NaHCO₃ 提取态有机 P(P₃)、NaOH 提取态无机 P(P₄)、NaOH 提取态有机 P(P₅)、稀盐酸提取态 P(P₆)、浓盐酸提取态无机 P(P₇)、浓盐酸提取态有机 P(P₈)、残留态 P(P₉)。

1.4 数据统计与分析

采用 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析,通过单因素方差分析的 Duncan's 新复极差法进行显著性检验,作图采用 Oringin 8.5.1 软件进行。

2 结果与分析

2.1 小分子有机酸对活性磷含量的影响

树脂交换 P(P₁)、NaHCO₃ 提取态无机 P(P₂)、NaHCO₃ 提取态有机 P(P₃)是活性磷,从图 1A 可以看出,3 种有机酸处理的 P₁ 含量随培养时间呈现波动,在培养初期(0~7 d)均表现为降低的趋势。草酸处理培养 7~35 d 时 P₁ 含量逐渐升高,在 35 d 达到最大值,后期(42 d)P₁ 质量分数降低到 52.07 mg·kg⁻¹,高于对照,但差异不显著(P>0.05);柠檬酸处理培养 7~14 d 时 P₁ 含量缓慢回升,在 14~21 d 时下降,之后逐渐升高,在 35 d 时达到最大值,到后期(42 d)P₁ 质量分数降低到 49.64 mg·kg⁻¹,低于对照,但差异不显著(P>0.05);苹果酸处理的 P₁ 含量变化趋势与草酸处理的一致。从图 1A 还可以看

出, 柠檬酸处理与培养前(0 d)相比, P_1 含量在整个培养期基本都低于培养前, 草酸和苹果酸处理与培养前相比, P_1 含量在整个培养期基本都高于培养前, 对照处理的 P_1 含量在整个培养期基本都高于培养前, 表明在本试验条件下柠檬酸抑制了树脂磷的解吸。

P_2 被吸附在土壤表面, 可以被植物吸收利用。从图 1B 可以看出, 在 0~21 d 培养期间, 柠檬酸处理与培养前相比, P_2 含量呈现显著下降的趋势, 其

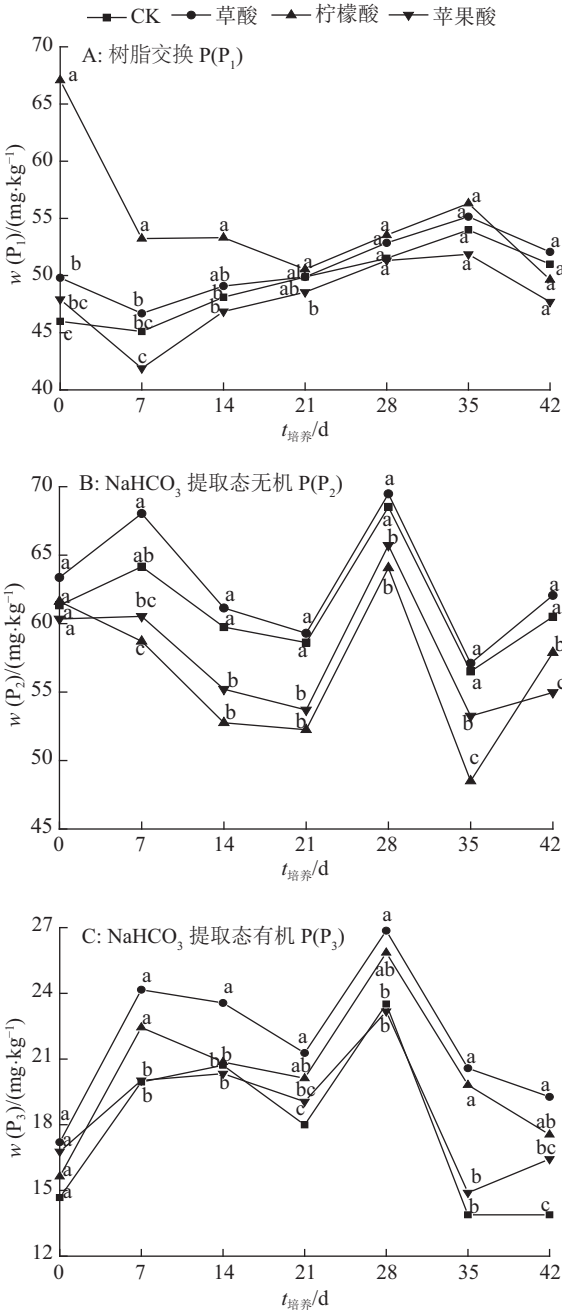
他处理的 P_2 含量均呈现先增加后降低的趋势, 在 21 d 之后, 各处理的表现趋势一致, 均在培养 28 d 时升高到最大值, 培养到 35 d 时降低到最小值。在培养前期有机酸抑制了磷的解吸, 其中柠檬酸处理的抑制作用最强, 草酸处理的抑制作用能力最弱, 在整个培养时期均为草酸处理的 P_2 含量最多, 抑制作用最小。

P_3 是可以被矿化的有机磷, 易被植物吸收利用。从图 1C 可以看出, 各处理 P_3 含量在培养期(28 d)时达到最大值, 有机酸处理均高于对照, 其中草酸处理与对照差异显著($P<0.05$)。在 28~35 d 时各处理 P_3 含量降低, 在 35~42 d 时苹果酸处理 P_3 含量增加, 其他有机酸处理 P_3 含量持续下降。从图 1C 还可以看出, 草酸处理在整个培养期 P_3 含量均比培养前高, 表明草酸活化能力最强。

2.2 小分子有机酸对中等活性磷含量的影响

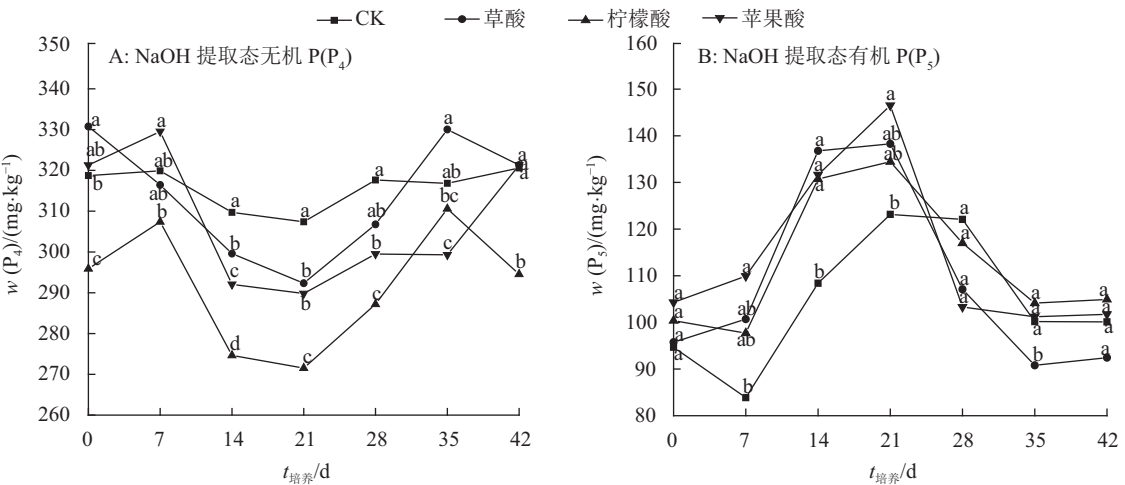
从图 2A 可知, 草酸处理的 NaOH 提取态无机 $P(P_4)$ 含量在 0~21 d 降低, 在 21 d 时达到最小值($292.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 与培养前相比, 降低幅度为 11.6%, 之后又逐渐升高, 在培养 35 d 时质量分数升高到 $330.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 柠檬酸处理在培养初期(0~7 d) P_4 含量缓慢升高, 之后随着培养时间的延长, P_4 含量降低, 在 21 d 时降到最低值, 与培养前相比, 降低幅度为 8.2%, 之后逐渐升高, 在 35 d 时 P_4 质量分数达到最大值($310.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在 42 d 时又降低到 $294.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 苹果酸处理在培养初期(0~7 d) P_4 含量缓慢升高, 之后随培养时间的延长, P_4 含量降低, 在 21 d 时降低到最小值, 与培养前相比, 降低幅度为 9.8%, 之后逐渐升高, 在 42 d 时 P_4 质量分数达到 $321.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而对照处理与培养前相比, P_4 含量呈现先减少, 21 d 以后缓慢增加的趋势。草酸处理与培养前相比, P_4 含量降低的幅度最大, 表明草酸的活化能力最强。

从图 2B 可知, 随着培养时间的延长, 草酸和苹果酸处理的 NaOH 提取态有机 $P(P_5)$ 含量显著升高($P<0.05$), 在 21 d 时质量分数达到最大值, 分别为 138.28 和 $146.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后逐渐降低, 在培养 42 d 时分别降低到 92.45 和 $101.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而对照和柠檬酸处理的 P_5 含量在 0~7 d 表现为缓慢降低, 之后又逐渐升高, 在 21 d 时达到最大值, 之后逐渐降低, 在 42 d 时降到最低。各有机酸处理的 P_5 含量在整个培养期基本高于培养前, 表明 3 种有机酸抑制了 NaOH 提取态有机 $P(P_5)$ 的活化。有机酸处理与对照相比, 有机酸处理的 P_5 含量在 14 d 时显著高于对照($p<0.05$), 在其他时间段差异不显著($P>0.05$),



各图中, 同一时间凡具有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 1 小分子有机酸对砖红壤活性磷的影响
Fig. 1 Effect of low-molecular-weight organic acid on labile phosphorus in lateritic soil



各图中, 同一时间凡具有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 2 小分子有机酸对砖红壤中等活性磷的影响

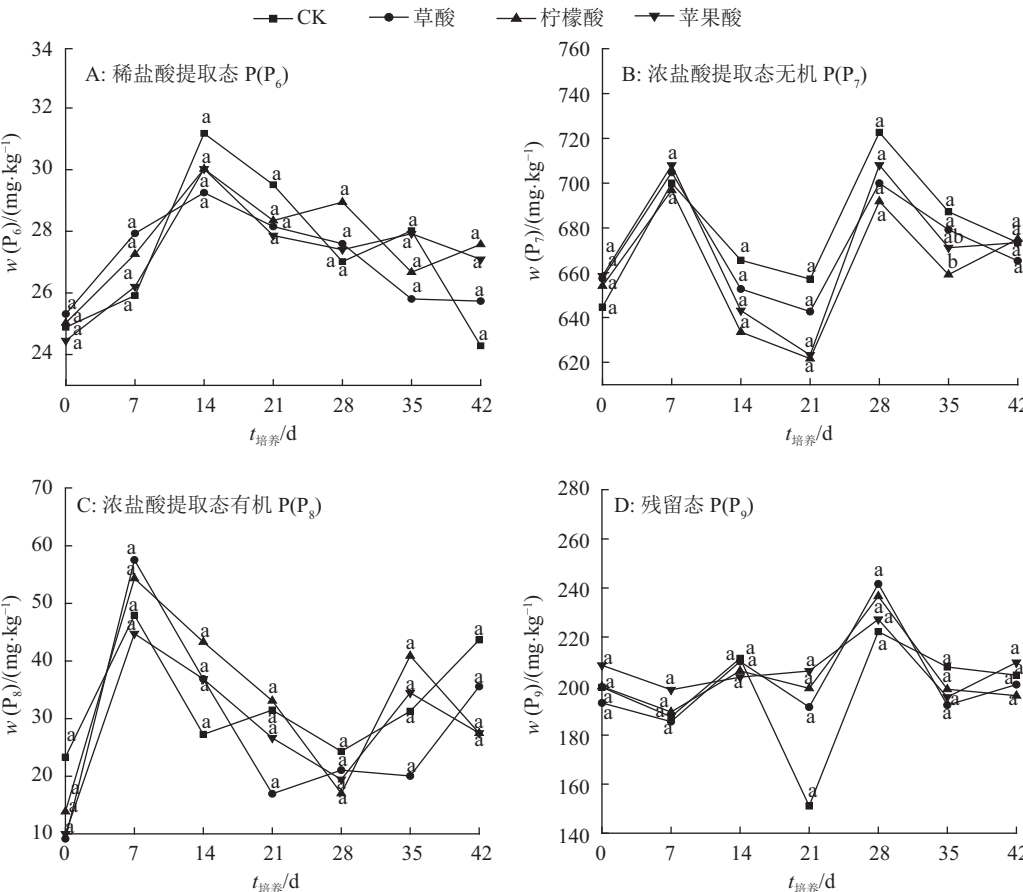
Fig. 2 Effect of low-molecular-weight organic acid on moderately labile phosphorus in lateritic soil

表明 14 d 时有机酸抑制 NaOH 提取态有机 P 活化的作用更大。

2.3 小分子有机酸对稳定态磷含量的影响

从图 3A 可以看出, 随着培养时间的延长, 草酸

处理的稀盐酸提取态 $P(P_6)$ 含量呈现先升高后降低的趋势, 在培养末期 P_6 质量分数降低至 $25.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 柠檬酸处理在整个培养期 P_6 含量呈现“升高-降低-升高-降低-升高”波动变化的趋势; 苹果酸处理



各图中, 同一时间凡具有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 3 小分子有机酸对砖红壤稳定态磷的影响

Fig. 3 Effect of low-molecular-weight organic acid on stable phosphorus in lateritic soil

在培养前期(0~14 d) P_6 含量呈现增加的趋势, 之后基本呈降低趋势。在不同培养时间段, 各处理间的 P_6 含量差异均不显著($P>0.05$)。图 3B 是浓盐酸提取态无机 $P(P_7)$ 含量的变化趋势图, 各处理在整个培养期间的表现趋势基本一致, 均呈现波动变化的趋势, 各有机酸处理与对照相比, 在各个培养时间段(35 d 时的柠檬酸除外) P_7 含量差异不显著($P>0.05$)。从图 3C 可知, 在 0~7 d 时, 各处理的浓盐酸提取态有机 $P(P_8)$ 含量呈现增加的趋势, 之后逐渐下降, 草酸处理的 P_8 含量在 21 d 降到最低值, 之后升高, 在培养 42 d 时升高到 $35.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 柠檬酸和苹果酸处理的 P_8 含量在 28 d 时降到最低, 之后均表现为先升高后降低。在各个培养时间段各处理的 P_8 含量差异不显著($P>0.05$)。图 3D 是残留态磷(P_9)含量的变化趋势图, 培养初期(0~7 d)各处理变化趋势相同, P_9 含量降低, 之后苹果酸处理的 P_9 含量表现趋势与草酸和柠檬酸处理不同。从图 3 还可以看出, 在不同培养时间段有机酸处理与培养前相比, P_6 、 P_8 、 P_9 含量在整个培养期基本都高于培养前, 而且各有机酸处理与对照相比, P_6 、 P_8 、 P_9 含量差异均不显著($P>0.05$), 表明有机酸并未活化稳定态磷。

3 讨论与结论

不同有机酸在各培养时期对土壤各形态磷的作用不同, 原因可能是不同种类的有机酸所含的功能基团和螯合能不同, 对磷的活化能力也不同^[11, 16]。本试验研究发现, 在培养初期(0~7 d), 各处理的树脂磷(P_1)均下降, 其中柠檬酸处理下降幅度最大, 表明有机酸增加了磷的固定, 导致树脂磷含量显著降低, 然而在培养 14 d 时, 各处理的 P_1 含量均有提高, 但与培养前相比, 各处理 P_1 亦显著降低, 培养 21 d 时, 柠檬酸处理的 P_1 含量下降幅度最大, 在 35 d 时除柠檬酸处理外, 其他处理均比培养前显著升高, 表明在这段培养期草酸、苹果酸促进了磷的解吸, 而柠檬酸抑制了磷的解吸或释放, 在 42 d 时 P_1 含量又表现出下降的趋势, 但草酸处理仍比培养前含量高, 表明在后期柠檬酸、苹果酸均抑制了磷的解吸, 而草酸促进了磷的解吸。前人的研究结果表明, 柠檬酸和苹果酸促进有效态无机磷的释放^[24], 而在本试验中柠檬酸抑制了无机磷的解吸, 原因可能与土壤条件、试验条件等因素有关。从 P_1 含量的变化过程可见, 在整个培养时期, 柠檬酸处理均表现为抑制作用, 草酸和苹果酸在前期表现为抑制作用, 而在后期表现为促进作用, 原因可能是在培养后期, 二者减弱了土壤对磷的吸附, 导致树脂磷含量

比培养前提高。在本试验中, 培养初期(0~7 d)除柠檬酸处理外, 草酸和苹果酸处理的 NaHCO_3 提取态无机 $P(P_2)$ 含量均呈现增加的趋势, 其中草酸处理增加最多, 表明在培养初期草酸和苹果酸抑制了土壤磷的固定, 增加了磷的解吸, 而柠檬酸抑制了 P_2 的活化, 刘丽等^[24]在研究低浓度柠檬酸对 P_2 的活化时也得到类似规律。7d 后 P_2 含量呈现下降的趋势, 在 21 d 时各处理的 P_2 含量均比培养前显著降低, 其中柠檬酸处理的降低幅度最大, 其次是苹果酸处理, 草酸处理的降低幅度最小, 表现为抑制土壤磷活化的作用, 之后 P_2 含量逐渐升高, 在 28 d 达到最大值, 草酸作用最大, 其次是苹果酸, 最后是柠檬酸, 表现为促进土壤磷活化的作用, 之后又逐渐降低, 在 35 d 时降到最低, 到培养 42 d 时, 各处理 P_2 含量有所上升, 但仍表现为抑制的作用, 柠檬酸的抑制作用更大。从 P_2 含量的变化过程可见, 在整个培养时期, 除 28 d 之外, 其他时期有机酸均表现为抑制土壤磷活化的作用。 NaHCO_3 提取态有机 $P(P_3)$ 的表现趋势与 P_2 不同, 各有机酸处理在整个培养时期基本表现为活化作用, 在 28 d 时活化作用最大, 其中草酸活化能力最强, 21~35 d 时与 P_2 表现规律一致。总之, 本研究中, 柠檬酸抑制了 P_1 和 P_2 的活化, 促进了 P_3 的活化, 草酸在不同培养期对 P_1 和 P_2 的作用不同, 但在整个培养周期均促进了 P_3 的活化。研究发现, 对于高肥力土壤, 相同浓度下有机酸活化土壤磷的能力为柠檬酸>草酸>苹果酸^[25], 而在本研究中, 柠檬酸的活化能力最弱, 草酸最强, 原因可能与培养条件、有机酸的浓度等因素有关。

有机酸对磷的活化是一个持续的动态过程。 NaOH 提取态无机 $P(P_4)$ 和 NaOH 提取态有机 $P(P_5)$ 是铁铝结合态 P , 在培养初期(0~7 d), P_4 呈现增加的趋势(草酸处理除外), 随着培养时间的延长, 在 7~21 d 时, P_4 含量呈现下降的趋势, 到 21 d 时 P_4 含量降低到最低, 与培养前相比, 草酸处理 P_4 含量降低的幅度最大, 其次是苹果酸处理, 最后是柠檬酸处理, 21 d 之后, 各有机酸处理的 P_4 含量有所回升, 但 P_4 含量仍低于培养前, 表现为活化 P_4 的趋势, 其中草酸的活化能力最强, 本试验的结果表明, 有机酸可以活化 NaOH 提取态无机 $P(P_4)$, 与前人的研究结果一致^[24], 有研究认为, 酸性土壤中溶解性磷增加的原因是铁氧化物的还原与溶解, 以及封闭在氧化物内部的磷的释放^[26], 但在本试验中的原因有待于进一步研究。各有机酸处理的 P_5 含量表现趋势与 P_4 相反, 在 21 d 时各处理的 P_5 含量增加到最大值, 各有机酸处理的 P_5 含量均比培养前高, 表

现为抑制 P_5 活化的作用。在本试验中土壤未灭菌, 在恒温恒湿的条件下培养, 土壤微生物活性增强, P_4 转化为易被植物吸收的无机磷或者更稳定的磷形态, 导致 P_4 含量下降, 有研究结果亦表明柠檬酸和苹果酸可以活化铁、铝结合态磷^[24]。本研究结果表明, 培养 21 d 之后, P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 呈现波动变化, 但含量高于培养前, 有机酸表现为抑制稳定态磷 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 活化的作用。本文研究发现不同小分子有机酸对砖红壤各种磷素形态的影响不同, 但有关影响的机制还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 李淑仪, 廖新荣, 廖观荣, 等. 不同母质砖红壤上的桉树营养差异研究[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 280-283.

[2] 杨杰文, 钟来元, 郭荣发, 等. 有机酸对砖红壤的溶解及固定态磷素的活化[J]. 环境化学, 2010, 29(6): 1063-1067.

[3] VANCE C P, UHDE-STONE C, ALLAN D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytol, 2003, 157(3): 423-447.

[4] RICHARDSON A E, HOCKING P J, SIMPSON R J, et al. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus[J]. Crop Pasture Sci, 2009, 60(2): 124-143.

[5] 马良, 徐仁扣. pH 和添加有机物料对 3 种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 596-599.

[6] GAUME A, MACHLER F, DELEON C, et al. Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation[J]. Plant Soil, 2001, 228(2): 253-264.

[7] GEORGE T S, GREGORY P J, WOOD M, et al. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize[J]. Soil Bio Biochem, 2002, 34(10): 1487-1494.

[8] RADERSMA S, GRIERSON P F. Phosphorus mobilization in agroforestry: Organic anions, phosphatase activity and phosphorus fractions in the rhizosphere[J]. Plant Soil, 2004, 259(1): 209-219.

[9] SHANE M W, LAMBERS H. Cluster roots: A curiosity in context[J]. Plant Soil, 2005, 274(1): 101-125.

[10] WANG X, LI Q, DING J, et al. An improved method for extraction of low molecular weight organic acids in variable charge soils[J]. Anal Sci, 2007, 23(5): 539-543.

[11] KPOMBLEKOU-A K, TABATABAI M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils[J]. Agric Ecosyst Environ, 2003, 100(2/3): 275-284.

[12] FENG K, LU H M, SHENG H J, et al. Effect of organ-

<http://xuebao.scau.edu.cn>

ic ligands on biological availability of inorganic phosphorus in soils[J]. Pedosphere, 2004, 14(1): 85-92.

[13] HU H Q, TANG C X, RENGEL Z. Role of phenolics and organic acids in phosphorus mobilization in calcareous and acidic soils[J]. J Plant Nutri, 2005, 28(8): 1427-1439.

[14] FOX T R, COMERFORD N B, MCFEE W W. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54(6): 1763-1767.

[15] KPOMBLEKOU-A K, TABATABAI M A. Effect of organic-acids on release of phosphorus from phosphate rocks[J]. Soil Sci, 1994, 158(6): 442-453.

[16] 陆文龙, 王敬国, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 493-500.

[17] XU R K, ZHU Y G, CHITTLEBOROUGH D. Phosphorus release from phosphate rock and a iron phosphate by low-molecular-weight[J]. J Environ Sci, 2004, 16(1): 5-8.

[18] 胡红青, 廖丽霞, 王兴林. 低分子量有机酸对红壤无机态磷转化及酸度的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 867-870.

[19] WEI L L, CHEN C R, XU Z H. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils[J]. Biol Fertil Soils, 2010, 46(7): 765-769.

[20] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 692-697.

[21] TIESSEN H, MOIR J O. Characterization of available P by sequential extraction [M]//CARTER M R. Soil sampling and methods of analysis. [S.l.]: Boca Raton CRC Press, 1993: 75-86.

[22] JACKSON M L. Soil chemical analysis [M]. New Delhi, India: Prentice Hall, 1973.

[23] OLSEN S R, COLE C V, WATANABE F S, et al. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate : United States Department of Agriculture Circular No. 939[A]. Washington DC: US Government Printing Office, 1954.

[24] 刘丽, 梁成华, 王琦, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 593-600.

[25] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对不同肥力土壤磷素的活化作用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 60-64.

[26] HOLFORD I C R, PATRICK W H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1979, 43(2): 292-297.