

柠檬酸对红壤磷的持续活化效应及其活化机理的探讨*

王艳玲^{1,2} 何园球¹ 李成亮¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用不同浓度的柠檬酸对红壤进行磷的持续活化试验。结果表明:随着浸提次数的增加,磷的活化量逐渐降低,但仍有少量的磷释放出来,且活化强度随着柠檬酸浓度的增大而加强。浸提前后土壤样品的无机磷分级结果表明:被柠檬酸活化的磷主要来源于土壤中 Al-P、Fe-P 及 Ca-P 中的磷,也有部分来自于有机形态的磷,同时柠檬酸能够促进土壤中闭蓄态磷(Oc-P)的形成与积累。Al-P、Fe-P 及 Oc-P 中磷的活化量,受柠檬酸浓度的影响较大。柠檬酸浓度在 5 mmol L⁻¹ 和 10 mmol L⁻¹ 时,其被活化的量大小依次为 Ca-P > Al-P > Fe-P; 而柠檬酸浓度在 100 mmol L⁻¹ 时,其被活化的量为 Fe-P > Al-P > Ca-P。

关键词 柠檬酸;红壤;磷;活化效应;活化机理

中图分类号 S153.6⁺1;S158.3

文献标识码 A

磷是作物生长所必需的营养元素之一,也是不可再生的矿质资源,磷仍然是我国乃至世界农业生产中最主要的限制因素,在各类土壤中以旱地红壤缺磷尤为严重。因此如何利用土壤中难溶态磷是农业科学家面临的一个重要课题。已有大量研究表明,在缺磷的条件下,磷高效植物可通过增加有机酸的分泌来促进根际难溶性磷的活化,以满足生长的需要^[1~5]。那么一定量土壤中的磷能否被有机酸持续活化,被活化的磷的量又是如何变化的,还是瞬间活化后,不再有磷释放出来?因此本文以红壤为供试材料,采用不同浓度的柠檬酸对固定量的红壤进行持续活化,并对活化前后的土壤进行无机磷分级的研究,旨在探明柠檬酸对红壤磷的持续活化效应及其活化机理进行初步的探讨。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为红壤,采自中国科学院红壤生态实验站院内(N28°04' ~ N28°37', E116°41' ~ 117°09')。采用土壤农业化学常规分析方法^[6]分析了供试土壤的基本理化性质:土壤 pH 值为 5.30(水土比为 2.5:1),有机质 15.8 g kg⁻¹,全氮 0.54 g kg⁻¹,全磷 0.70 g kg⁻¹,有效磷(Olsen-P) 19.9 mg kg⁻¹。

1.2 研究方法

称取 4 份过 2 mm 筛的风干土 5.00 g,置于 100 ml 已知重量的离心管中,依次加入浓度为 0、5、10、100 mmol L⁻¹ 的柠檬酸(CA)溶液 50 ml,同时称重,记录“土+溶液+离心管”的重量,每个处理重复 3 次。加塞后,于室温(25℃)下振荡 30 min,离心(3 500 r min⁻¹) 5 min,然后将上清液置于 50 ml 塑料瓶中,连续浸提 10 次。用钼蓝比色法测定浸提液中的磷,用 ICP 法测定浸提液中的铁和铝含量。浸提 10 次后将土壤样品风干,磨细过筛,与供试土壤同时进行无机磷分级(张守敬和 Jackson 法)^[7]及各形态铁铝氧化物^[6]的分析。经浓度为 0、5、10、100 mmol L⁻¹ 的柠檬酸溶液浸提后的土壤依次标记为 S0、S5、S10、S100。

2 结果与分析

2.1 柠檬酸对红壤磷的持续活化效应

从图 1 可以发现,柠檬酸对红壤磷的活化是一个既缓慢又持续的动态过程,活化强度随着柠檬酸浓度的增大而加强,且随着浸提次数的增加,磷的活化释放量逐渐降低但仍有部分磷素释放出来,在柠檬酸的作用下红壤磷大致可分为易释放磷、较易释放磷和难释放磷三个部分。而较易释放磷和难释放磷在某种程度上更加有利于作物在整个生育期内对磷的吸收与利用。这就可以说明,对于能够分泌低分子量有机

* 国家自然科学基金项目(40671108)资助

作者简介:王艳玲(1976~),女,吉林省舒兰市人,博士研究生,主要从事农业生态系统演变机理与调控研究。E-mail: ylwang@issas.ac.cn

收稿日期:2005-09-19;收到修改稿日期:2006-04-25

酸的作物来说,在其整个生育期可以通过持续活化土壤中的磷来满足生育需求。例如白羽扇豆^[8,9]在受磷胁迫时,能够通过根分泌大量的螯合物质如柠檬酸,来活化土壤中磷酸铁盐和磷酸铝盐中的磷。Bolan等^[10]和 Çerke等^[11]的研究也得出相似结论。因此磷素供应不足的土壤可以选种一些能够分泌有机酸的作物,一方面可以提高土壤中的磷素利用率,另一方面可以节约磷素资源。所以有机酸在土壤养分活化、特别是提高磷素有效性中的作用不容忽视。

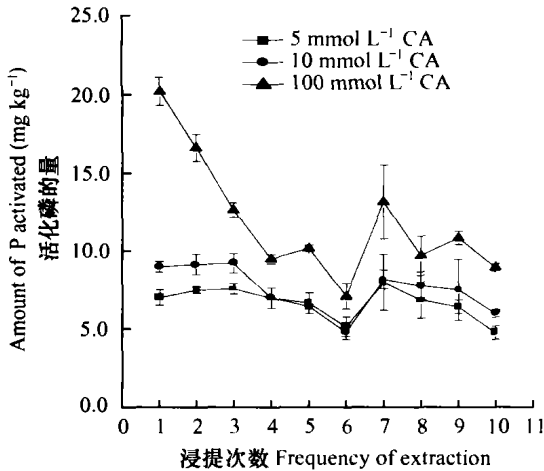


图1 柠檬酸对红壤磷的持续活化效应

Fig. 1 Persistent activating effect of citric acid (CA) on P in red soil

经浓度为 5 mmol L^{-1} 、 10 mmol L^{-1} 及 100 mmol L^{-1} 的柠檬酸对供试土壤连续 10 次的浸提,磷的累积活化量逐渐增加,10 次累积活化量可达全磷量的 9.65%、10.90% 和 17.02% (图 2)。对图 2 中柠檬酸对磷的累积活化量 (y) 与浸提次数 (x) 进行数学方程拟合,得出以下 3 组方程:

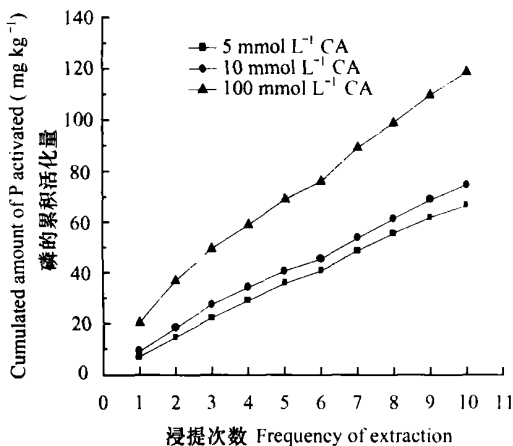


图2 磷的累积活化量随浸提次数的变化

Fig. 2 Change in cumulated amount of P activated with frequency of extraction

$$S5: y = 6.67x + 1.46 \quad r = 0.999$$

$$S10: y = 7.15x + 3.97 \quad r = 0.998$$

$$S100: y = 10.56x + 14.62 \quad r = 0.997$$

由此可以看出,随着浸提次数的增加磷的累积活化量也随之增大,增加幅度也随着柠檬酸浓度的加大而加大。

2.2 柠檬酸对红壤无机磷酸盐中磷的活化

按张守敬和 Jackson 提出的无机磷分级方法,对经不同柠檬酸浸提过的土壤及原土进行了无机磷的分级研究。结果表明 (图 3),柠檬酸对红壤中无机态磷酸盐中的磷有一定的活化作用,而且随着柠檬酸浓度的增加,其活化量增大。但柠檬酸浓度为 5 mmol L^{-1} 与 10 mmol L^{-1} 时,二者对无机磷的活化量差异不显著,而浓度为 100 mmol L^{-1} 时,差异极为显著,且活化量最大。对照原土,经 5 mmol L^{-1} 与 10 mmol L^{-1} 柠檬酸浸提过的土壤,及经 100 mmol L^{-1} 柠檬酸浸提过的土壤中无机磷总量来看,差异极为显著。这足以说明,柠檬酸活化红壤中的磷绝大部分来源于土壤无机态磷酸盐中的磷。由表 1 可以看出,无机磷总量的减少主要是来源于 Al-P、Fe-P、Ca-P 中磷的释放,柠檬酸的浓度对 Al-P 的释放率影响不是很大,但随着柠檬酸浓度的增加,Fe-P 的释放率也随之增大,在柠檬酸浓度为 10 mmol L^{-1} 时,Ca-P 释放率明显高于浓度为 5 mmol L^{-1} 时的 Ca-P 释放率,但柠檬酸浓度增加至 100 mmol L^{-1} 时 Ca-P 的释放率远远小于前两者。由表 1 还可以看出,经柠檬酸浓度为 10 mmol L^{-1} 时浸提后的土壤中的闭蓄态磷 (Oc-P) 含量均有不同程度的增加。但对照各浓度柠檬酸对红壤磷的活化总量与浸提前无机磷总量来看,活化磷的总量明显高于无机磷总量的减少量,这说明柠檬酸在活化土壤中无机磷的同时,也使部分有机形态的磷得到活化,那么有机酸对土壤中有有机磷形态的转化及其有效性有何影响,有待进一步深入细致的研究。

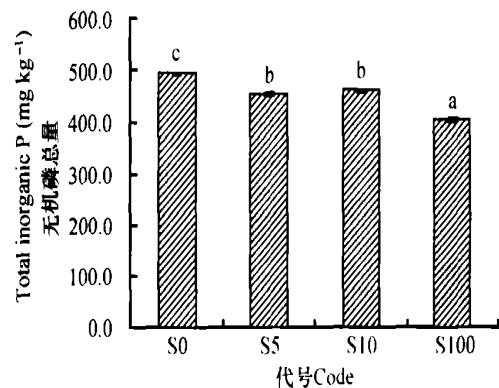


图3 无机磷总量的变化

Fig. 3 Changes in total inorganic phosphorus

表 1 各形态无机磷的变化量占无机磷总量变化的百分数¹⁾

Table 1 Percentage of the change in each fraction of inorganic phosphorus against the change in total inorganic phosphorus (%)

| 处理代号 Treatment code | Al-P | Fe-P | Oc-P | Ca-P |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| S5 | - 35.02 | - 38.82 | + 16.35 | - 42.50 |
| S10 | - 38.41 | - 47.57 | + 43.40 | - 57.42 |
| S100 | - 31.79 | - 83.57 | + 42.23 | - 26.86 |

1) “-”代表减少;“+”代表增加“-”stand for losing;“+”for gaining

2.2.1 Al-P、Fe-P 及 Ca-P 中的磷 Dinkelaker 等^[12]的研究认为,作物根系分泌的柠檬酸主要是通过活化土壤中磷酸钙盐、磷酸铁盐及磷酸铝盐中的磷,来提高矿质态磷的有效性。因此本试验对经不同浓度柠檬酸连续浸提 10 次后的红壤,进行了无机磷的分级研究,也得到了与之相一致的结果。

由图 4 可以看出,柠檬酸对红壤磷酸铝、磷酸铁及磷酸钙盐中的磷都有不同程度的活化,磷的活化量随着柠檬酸浓度的增大而增多。柠檬酸浓度在 5 mmol L⁻¹和 10 mmol L⁻¹时对 Al-P、Fe-P 及 Ca-P 中的磷的活化能力差异不显著,但柠檬酸浓度为 100 mmol L⁻¹时,对 Al-P、Fe-P 及 Ca-P 中的磷的活化能力与浓度在 5 mmol L⁻¹和 10 mmol L⁻¹时相比差异显著。对比 Al-P、Fe-P 及 Ca-P 中的磷的活化量来看,不同浓度的柠檬酸对三者的活化量大小有所不同。柠檬酸浓度在 5 mmol L⁻¹和 10 mmol L⁻¹时,其被活化的量大小依次为:Ca-P > Al-P > Fe-P,而柠檬酸浓度在 100 mmol L⁻¹时,其被活化的顺序为:Fe-P > Al-P > Ca-P。

陆文龙等^[13,14]的研究表明,有机酸对磷酸盐的活化作用与有机酸种类、浓度和类型有关。有机酸对晶形磷酸铝中磷的释放作用也十分明显,但是与磷酸铁相比,在高浓度时,有机酸对磷酸铝的溶解活化作用相对较弱;而在低浓度时,有机酸活化磷酸铁和磷酸铝的作用相差不大。本试验中柠檬酸对红壤中磷酸铝、磷酸铁及磷酸钙的活化与柠檬酸浓度关

系密切,随着柠檬酸浓度的升高,红壤磷酸铝、磷酸铁及磷酸钙中磷的释放量相应增加,两者之间亦呈极显著差异。

Iyamuremye 等^[15]研究了苹果酸、柠檬酸等 7 种有机酸对土壤磷组分的影响,发现只有柠檬酸有显著影响。植物根系分泌的有机酸可以作为配体与金属离子如 Ca²⁺、Al³⁺ 或 Fe³⁺ 形成配合物或螯合物,从而降低阳离子的浓度而释放出无机磷^[16]。Luo 等^[17]发现,柠檬酸和苹果酸的加入增加沉淀态磷酸铝中磷的释放量,油菜较西红柿更耐铝毒和具有更大吸磷量的机理之一是油菜根分泌更高浓度的柠檬酸。Jones 和 Darrah^[18]研究表明,柠檬酸能从很高 Ca-P 含量的土壤中移动磷素,其中主要是柠檬酸根的螯合作用,也有释放出的 H⁺ 的溶解作用。柠檬酸与阳离子的反应是瞬时的,在有机土壤中快速降解,而在亚表层土壤中有较强的抗分解能力。在酸性土壤中,有机酸不仅利于养分吸收,而且也是降低土壤铝毒的一个潜在机理。

2.2.2 柠檬酸对 Oc-P 积累的促进作用 经不同浓度的柠檬酸连续浸提后,土壤中的 Oc-P 含量明显高于未经处理柠檬酸浸提的土壤(图 4)。经 5 mmol L⁻¹的柠檬酸处理过的土壤,其 Oc-P 的含量略高于原土的 Oc-P 含量,二者之间差异不显著。但经 10 mmol L⁻¹和 100 mmol L⁻¹的柠檬酸处理后土壤 Oc-P 较原土有显著的增加。这说明柠檬酸不仅没有促进土壤中 Oc-P 的释放,反而使其固定量加大,与陆海明等^[19]的研究结果相一致。

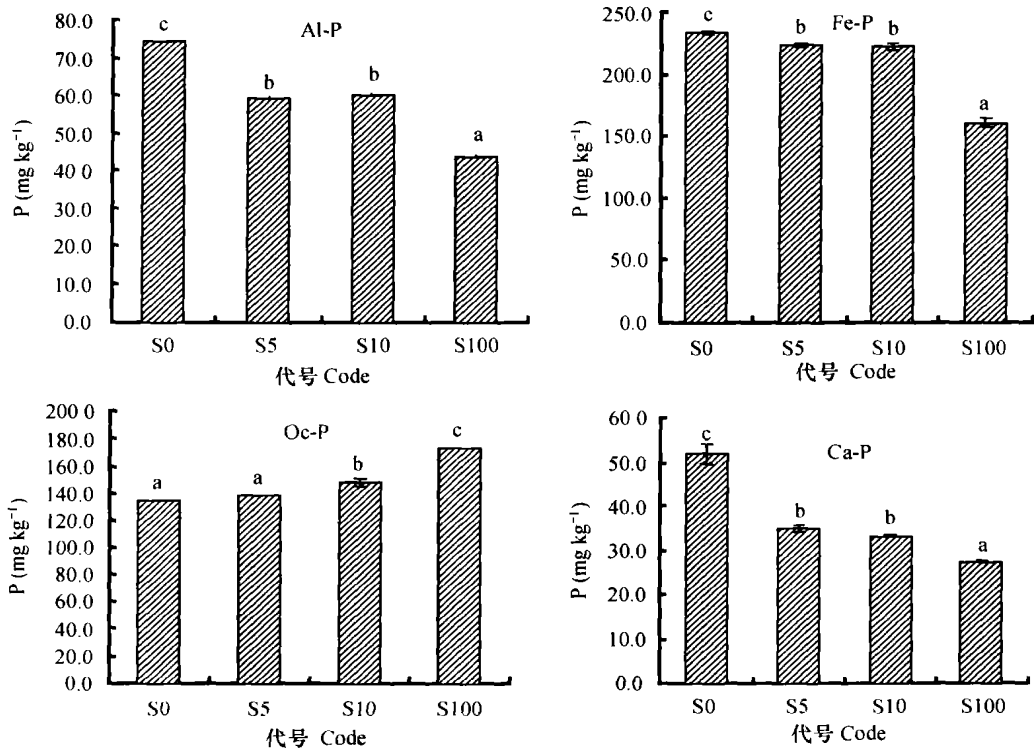


图4 无机磷的形态组成变化

Fig. 4 Changes in fraction composition of inorganic phosphorus

2.3 磷素活化机理的探讨

2.3.1 铁铝的持续释放 从图5和图6可以看出,红壤磷被不同浓度的柠檬酸活化的同时,伴有大量铁铝的释放,其释放规律与磷素的很相似,由相关分析可以得出红壤中被柠檬酸活化释放出磷的量与铁铝的释放量存在着显著的相关关系(图7、图8),相关系数分别达到0.87和0.91,这也证明了柠檬酸所活化的土壤磷,主要

是来源于铁铝所结合的磷酸盐,铁磷与铝磷也是红壤中主要的有效磷源。有研究表明^[14,21,22],有机酸能增加土壤中磷的活性,主要归因于三个方面:一是有机阴离子与磷酸根的配位交换^[23,24];二是有机态的含磷化合物在pH值降低时部分水解^[25];三是铁、铝结合态的磷酸盐部分的螯合溶解。可见,本研究中柠檬酸增加红壤中磷的活性主要归因于第三个方面。

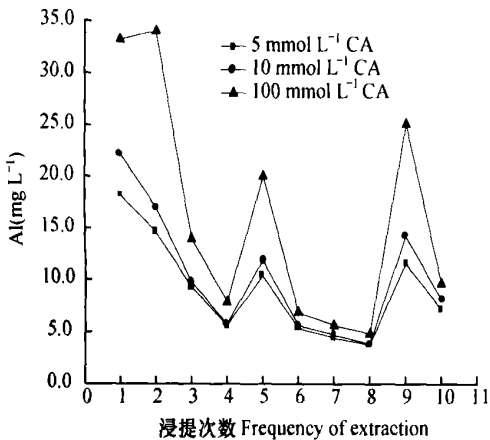


图5 柠檬酸对铝的持续活化效应

Fig. 5 Persistent activating effect of citric acid (CA) on aluminum

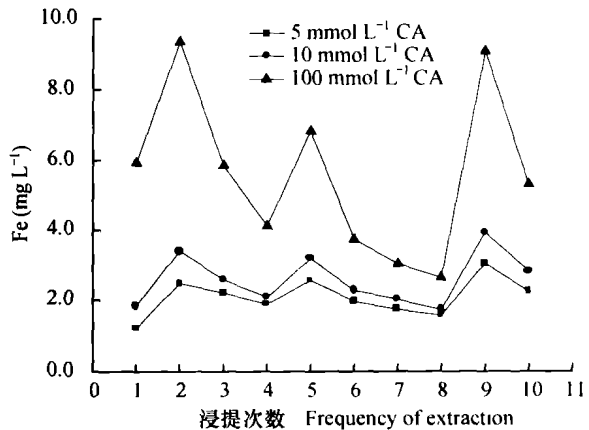


图6 柠檬酸对铁的持续活化效应

Fig. 6 Persistent activating effect of citric acid (CA) on iron

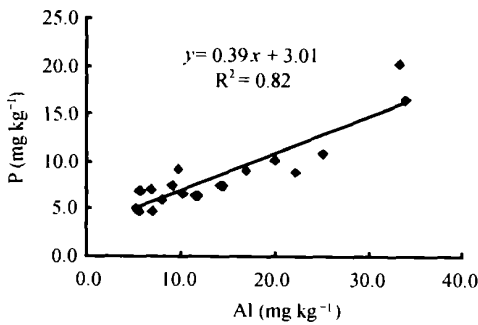


图7 铝释放量与磷释放量的相关关系

Fig. 7 Relativity of Al release and P release

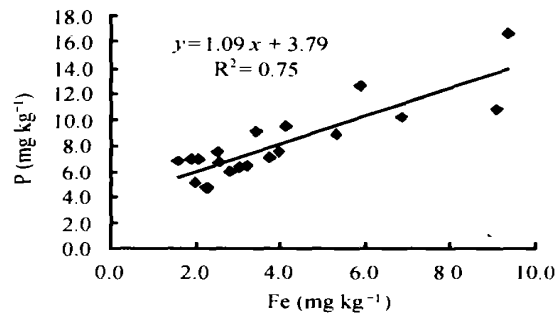


图8 铁释放量与磷释放量的相关关系

Fig. 8 Relativity of Fe release and P release

2.3.2 铁铝氧化物的变化 已有大量研究^[20]证明,有机酸活化土壤中的磷主要是通过溶解土壤中的铁铝氧化物,从而减少磷的吸附点位,使磷素释放出来。由表2可以看出,经不同浓度柠檬酸多次浸提后,土壤中游离氧化物均呈下降趋势,其中以游离 Al_2O_3 变化受柠檬酸浓度影响的差异较为显著,但经 100 mmol L^{-1} 的柠檬酸浸提后,其含量反而增加了,游离 Fe_2O_3 均呈下降趋势,以经 10 mmol L^{-1} 的柠檬酸浸提后的土壤中游离 Fe_2O_3 的变化最为显著。在柠檬酸浓度为 5 mmol L^{-1} 和 10 mmol L^{-1} 时,非晶质氧化物均有不同程度的减少,且变化差异均不显著,但在经高浓度柠檬酸(100 mmol L^{-1})处理后,土壤中非晶质氧化物均有显著增加,以非晶质 Al_2O_3 的增加幅度相对较大。结合态氧化物的变化与大部分游离氧化物及非晶质氧化物的变化趋势恰恰相反,经不

同浓度柠檬酸处理后,均有不同程度的增加,而且随着柠檬酸浓度的增大,结合态氧化物的含量也随之增加,且受柠檬酸浓度的影响差异十分显著。这也说明柠檬酸能够促进土壤中闭蓄态磷(Oc-P)的形成。由此来看,柠檬酸可以通过影响土壤中铁铝氧化物来增加磷素的释放,也就是说有机酸可以减少铁铝氧化物对磷的吸附,从而提高土壤中磷的有效性。

目前认为有机酸影响铁铝氧化物对磷的吸附机理主要有3种^[20]:(1)有机酸引起铁铝氧化物溶解,导致吸磷介质减少;(2)有机酸根离子被吸附到铁铝氧化物表面的某些点位上,通过堵塞点位而减少吸附磷酸根的有效面积,当溶液中有有机阴离子浓度达一定程度时甚至可导致吸附磷的解吸;(3)有机酸根的吸附可改变铁铝氧化物的表面电性,从而增大磷酸根吸附的静电排斥作用。

表2 柠檬酸对不同形态铁铝氧化物的影响

Table 2 Effect of citric acid on different forms of iron-aluminum oxides in red soil

| 处理代号 Treatment code | 游离氧化物 Free oxides (mg kg^{-1}) | | | 非晶质氧化物 Non-crystalline oxides (mg kg^{-1}) | | | 结合态氧化物 Complex oxides (mg kg^{-1}) | | |
|------------------------|--|-------------------------|----------|--|-------------------------|----------|--|-------------------------|----------|
| | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | 总量 Total | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | 总量 Total | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | 总量 Total |
| | S0 | 7.96 | 29.28 | 37.24 | 3.34 | 2.13 | 5.47 | 2.39 | 0.34 |
| S5 | 7.22 | 28.14 | 35.36 | 2.91 | 1.72 | 4.63 | 3.23 | 0.89 | 4.12 |
| S10 | 6.96 | 23.86 | 30.82 | 3.07 | 1.74 | 4.81 | 3.51 | 1.16 | 4.67 |
| S100 | 8.83 | 26.17 | 35.00 | 3.89 | 2.47 | 6.36 | 6.44 | 3.05 | 9.49 |

3 结论

1) 柠檬酸对红壤磷的活化是一个既缓慢又持续

的动态过程,活化强度随着柠檬酸浓度的增加而加强。土壤中能够被柠檬酸活化的磷主要来源于土壤中 Al-P 、 Fe-P 及 Ca-P 中的磷,也有部分来自于有机形态的磷,同时柠檬酸能够促进土壤中 Oc-P 的形成与积累。

2) Al-P、Fe-P 及 Oc-P 中磷的活化量,受柠檬酸浓度的影响较大。柠檬酸浓度在 5 mmol L^{-1} 和 10 mmol L^{-1} 时,其被活化的量大小依次为:Ca-P > Al-P > Fe-P,而柠檬酸浓度在 100 mmol L^{-1} 时,其被活化的量为 Fe-P > Al-P > Ca-P。

3) 柠檬酸能够促进土壤中大部分游离氧化物与非晶质氧化物的释放,促进结合态氧化物的形成。

参考文献

- [1] Strobel B W. Influence of vegetation on low molecular-weight carboxylic acids in soil solution: A review. *Geoderma*, 2001, 99: 169 ~ 198
- [2] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere: A critical review. *Plant and Soil*, 1998, 205: 25 ~ 44
- [3] Gardner W K, Barber D A, Parbery D G. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil root interface is enhanced. *Plant and Soil*, 1983, 70: 107 ~ 124
- [4] Hoffland E, Findenegg G R, Nelms J A. Solubilization of rock phosphate by rape. Evaluation of the role of the nutrient uptake pattern. *Plant and Soil*, 1989, 113: 155 ~ 160
- [5] Ae N, Arihara J, Okada K, et al. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping system of the India subcontinent. *Science*, 1990, 248: 477 ~ 480
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 60 ~ 73, 175 ~ 176. Lu R K. Analyse Methods of Soil and Agrochemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. 60 ~ 73, 175 ~ 176
- [7] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 1957, 84(2): 133 ~ 144
- [8] Neumann G, Massonneau A, Martinoia E, et al. Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin. *Planta*, 1999, 208: 373 ~ 382
- [9] Marschner H, Röhrl V, Horst W J, et al. Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 1986, 149: 441 ~ 456
- [10] Bolan N S, Elliott J, Gregg P E H, et al. Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rhizosphere. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 24: 169 ~ 174
- [11] Gerke J, Röhner W, Jungk A. The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L.: Effects on soil solution concentrations of phosphate, iron, and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples of an oxisol and a luvisol. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 1994, 157: 289 ~ 294
- [12] Dinkelaker B, Hengeler C, Marschner H. Distribution and function of proteoid roots and other root clusters. *Bot. Acta*, 1995, 108: 183 ~ 200
- [13] 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. *土壤学报*, 1998, 35(4): 493 ~ 500. Lu W L, Wang J G, Cao Y P, et al. Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low molecular-weight (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 493 ~ 500
- [14] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 低分子量有机酸对不同磷酸盐的活化作用. *华北农学报*, 2001, 16(1): 99 ~ 104. Lu W L, Cao Y P, Zhang F S. The effect of low-molecular-weight organic acids on phosphorus release from different phosphates (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(1): 99 ~ 104
- [15] Iyamurenye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: Phosphorus speciation. *Soil Science*, 1996, 161(7): 444 ~ 451
- [16] Gardner W K, Barber D A, Parbery D C. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/ root interface is enhanced. *Plant and Soil*, 1983, 70: 107 ~ 114
- [17] Luo H M, Watanabe T, Shinano T, et al. Comparison of aluminum tolerance and phosphate absorption between rape (*Brassica napus* L.) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in relation to organic acid exudation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1999, 45(4): 897 ~ 907
- [18] Jones D L, Darrah P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1994, 112: 19 ~ 30
- [19] 陆海明, 盛海君, 毛健, 等. 有机酸离子对土壤无机磷生物有效性的影响. *扬州大学学报 (农业与生命科学版)*, 2003, 24(2): 49 ~ 53. Lu H M, Sheng H J, Mao J, et al. Effects of organic anions on the biological availability of inorganic phosphorus from different fraction in soils (In Chinese). *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2003, 24(2): 49 ~ 53
- [20] 胡红青, 李学垣, 贺纪正. 有机酸对铝氧化物吸附磷的影响. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 35 ~ 41. Hu H Q, Li X Y, He J Z. Effects of organic acids on phosphate adsorption by synthetic Al oxides (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 35 ~ 41
- [21] 沈阿林, 李学垣, 吴受容. 土壤中低分子量有机酸在物质循环中的作用. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 363 ~ 369. Shen A L, Li X Y, Wu S R. The composition characteristics of low-molecular-weight organic acids in soil and their roles on soil material cycling (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(4): 363 ~ 369
- [22] 何振立, 袁可能, 朱祖祥. 有机阴离子对磷酸根吸附的影响. *土壤学报*, 1990, 27(4): 377 ~ 384. He Z L, Yuan K N, Zhu Z X. Effect of organic ligands on phosphate adsorption by hydrous iron and aluminum oxides, kaolinite and red earth (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(4): 377 ~ 384
- [23] Feng K, Lu H M, Sheng H J, et al. Effect of organic ligands on biological availability of inorganic phosphorus in soils. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 85 ~ 92
- [24] He Z L, Yuan K N, Zhu Z X. Effects of organic anions on phosphate adsorption and desorption from variable-charge clay mineral and soil. *Pedosphere*, 1992, 2(1): 1 ~ 11
- [25] 丁永祯, 李志安, 邹碧. 土壤低分子量有机酸及其生态功能. *土壤*, 2005, 37(3): 243 ~ 250. Ding Y Z, Li Z A, Zou B. Low-molecular-weight organic acids and their ecological roles in soil (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(3): 243 ~ 250
- [26] 徐仁扣, 钱薇, 李九玉. 砖红壤吸附低分子量有机酸的初步研究. *土壤*, 2004, 36(4): 446 ~ 448. Xu R K, Qian W, Li J Y.

PERSISTENT ACTIVATING EFFECT OF CITRIC ACID ON PHOSPHORUS IN RED SOIL AND ITS MECHANISM

Wang Yanling^{1,2} He Yuanqiu¹ Li Chengliang¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract An experiment was carried out of persistent activating effect of citric acid on phosphorus in red soil. Results show that amount of the phosphorus activated decreased gradually with the increase in frequency of extraction, but never down to nil, and the activation intensified with the increasing citric acid concentration. Fractionations of inorganic phosphorus in the soil samples before and after the extraction show that phosphorus was activated by citric acid mostly from the fractions of Al-P, Fe-P and Ca-P, and some from the fraction of organic phosphorus, and that citric acid accelerated formation and accumulation of Oc-P in red soil. Effect of concentration of citric acid on activation of phosphorus from Al-P, Fe-P and Ca-P was very clear. When the concentration of citric acid was 5 mmol L⁻¹ and 10 mmol L⁻¹, the fractions were in the order of Ca-P > Al-P > Fe-P in terms of amount of phosphorus activated, but when it was 100 mmol L⁻¹, the order was: Fe-P > Al-P > Ca-P.

Key words Citric acid; Red soil; Phosphorus; Activating effect; Activation mechanism