应用与环境生物学报 2009, **15** (4): 474~478
*Chin J Appl Environ Biol=ISSN 1006-687X*
2009-08-25
DOI: 10.3724/SP.J.1145.2009.00474

# 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响*

章爱群[1, 2] 贺立源[1**] 赵会娥[1] 吴照辉[1] 郭再华[1] 李淑艳[2]
([1]华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070)
([2]孝感学院生命科学技术学院 孝感 432100)

**摘 要** 土壤有效磷含量低是影响作物生产的重要限制因素之一. 作物根分泌活化难溶性磷的有机酸对改善其磷素营养具有重要意义. 采用张守敬和Jackson无机磷分级方法, 以湖北省武昌土为材料, 加入不同磷源和有机酸, 经室温培养后, 测定速效磷含量和无机磷组分. 结果表明, 有机酸引起速效磷含量增多, 除苹果酸处理的变化较小外, 草酸和柠檬酸的加入使土壤中速效磷显著增加. 供试有机酸均使土壤铝磷(Al-P)含量下降, 钙磷(Ca-P)含量上升, 变幅大小依次为草酸处理>柠檬酸处理>苹果酸处理; 有机酸活化的磷主要来源于土壤中Al-P和铁磷(Fe-P)中的磷, 同时有机酸能够促进土壤中闭蓄态磷(O-P)的形成与积累. 图1 表3 参30

**关键词** 有机酸; 磷源; 无机磷分级; 无机磷形态; 活化; 速效磷
**CLC** S154.2

# Effect of Organic Acids on Inorganic Phosphorus Transformation in Soil with Different Phosphorus Sources*

ZHANG Aiqun[1, 2], HE Liyuan[1**], ZHAO Hui'e[1], WU Zhaohui[1], GUO Zaihua[1] & LI Shuyan[2]
([1]*College of Resource and Environment Sciences, Huazhong Agricultural University*, Wuhan 430070, China)
([2]*College of Plant Science and Technology, Xiaogan University*, Xiaogan 432100, Hubei, China)

**Abstract** Low content of available phosphorus in soil is one of the major limitations to crop production. Mobilization of insoluble phosphates by root exudates plays an important role in improving P nutrition of crops. The soil samples collected from Hubei, China were tested to analyze their inorganic phosphorus fractions and available P after incubated with added various phosphorus sources and organic acids. The results indicated that organic acids, except malic acid, had significant influence on available P. Application of organic acids decreased the content of Al-P and increased that of Ca-P, in the order of oxalic acid > citric acid > malic acid. Phosphorus was activated by organic acids mostly from the fractions of Al-P and Fe-P, and organic acids accelerated formation and accumulation of O-P in soil. Fig 1, Tab 3, Ref 30

**Keywords** organic acid; phosphorus source; inorganic phosphorus fractionation; inorganic phosphorus transformation; activation; readily available phosphate
**CLC** S154.2

土壤有效磷低是全球性问题, 虽然磷总量很高, 一般耕地全磷是有效磷的200~500倍, 土壤中无机磷的2/3和有机磷的1/3为无效态磷[1]. 施入土壤的磷肥至少有70~90%以不同的磷形态积累在土壤中, 难以被作物吸收利用[2]. 如何发挥这部分磷酸盐的潜力, 使土壤中潜在的磷酸盐转化为可供作物吸收利用的有效磷, 为农业高产、稳产作贡献, 已经成为当前土壤和植物营养学家们研究的热点问题之一. 近年来, 由于根际微生态系统研究的不断开展, 植物根系所分泌的低分子有机酸对土壤磷释放的影响已有一些报道. 如Ae等发现木豆在低磷旱地土壤正常生长且大量利用铁磷(Fe-P), 与其根系分泌的番石榴酸关系密切[3]; Shen等研究表明, 象草对铝磷的高量吸收与其根分泌物对铝磷(Al-P)的活化有关[4]; 白羽扇豆在受到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[5, 6]; 缺磷时, 磷效率不同的菜豆和大豆基因型分泌有机酸的种类和数量都有差异, 且不同有机酸对难溶性Fe-P和A1-P的活化能力也不一样[7,8]. 国内外研究者对低分子量有机酸活化土壤磷的机理研究表明, 低分子量有机酸可通过降低土壤对磷的吸附[9], 促进土壤中难溶性磷酸盐的溶解和释放[10, 11]等途径活化土壤中的无机磷. 然而, 关于有机酸对土壤中无机磷形态影响的研究报道很少[12, 13]. 本研究采用第四纪红色粘土发育的低磷土壤, 探讨不同磷源施入后无机磷形态转化及有机酸对提高磷素有效性的作用, 旨在探明有机酸对土壤磷素的活化效应, 并为选育对难溶性磷活化吸收高的作物品种, 提高土壤磷的生物有效性提供理论基础.

收稿日期: 2008-04-22 接受日期: 2008-10-08
*国家自然科学基金项目(No. 40701076)和湖北省教育厅科学技术研究项目(No. Q20092604)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40701076) and the Scientific Research Program of the Department of Education of Hubei, China (No. Q20092604)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: heliyuan@mail.hzau.edu.cn)

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验所用土壤为华中农业大学农场第四纪红色粘土发育的黄壤. pH值(水 : 土=1 : 1)为6.8, 全磷0.228%, 有机质3.33

g kg$^{-1}$，碱解氮50.5 mg kg$^{-1}$，速效钾35.2 mg kg$^{-1}$，速效磷2.9 mg kg$^{-1}$.

以磷酸钙$Ca_3(PO_4)_2$、磷酸铁$FePO_4$、磷酸铝$AlPO_4$(无机磷)和植酸钙$C_6H_6O_{24}P_6Ca_6$(有机磷)作为难溶性磷源，全P含量分别为20.0%、13.9%、25.4%和20.9%. 供试有机酸包括苹果酸(Malic acid)、柠檬酸(Citric acid)和草酸(Oxalic acid)均为分析纯试剂(AR).

### 1.2 试验方法

采用室内无菌培养的方法，研究有机酸对土壤施入不同磷源后速效磷含量及无机磷形态转化的影响.

培养方法：先将土壤在高压灭菌锅内进行灭菌，风干，研碎，过0.85 mm筛. 然后装入塑料碗(每碗装干土250 g)中，按干土中P含量 200 mg kg$^{-1}$分别加入不同形态的磷酸盐，分别为CK (不加磷)、磷酸钙、磷酸铁、磷酸铝和植酸钙. 然后按5 g kg$^{-1}$用量加入有机酸(无有机酸、草酸、柠檬酸和苹果酸)，重复3次，充分混匀后室温下培养95 d [13]. 在塑料碗内滴入少量氯仿以抑制培养过程中微生物活动，并压膜封闭碗口，中央插一根吸管供通气和加水. 用称重法控制土壤水分含量，保持土壤含水量为田间持水量的70%. 土样风干过0.85 mm筛，用钼锑抗比色法测定速效磷含量，同时取土样过0.15 mm筛，进行无机磷分级(张守敬和Jackson法)[14, 15]的分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同磷源和有机酸处理对土壤速效磷含量的影响

由图1可知，不加有机酸和磷肥，土壤中的速效磷含量很低，为4.38 mg kg$^{-1}$. 供试4种磷源、3种有机酸单独处理均可增加土壤速效磷含量，其变化幅度因磷源和有机酸的种类不同而不同. 施磷显著提高了土壤中磷含量，作用能力大小顺序为磷酸铁＞磷酸铝＞磷酸钙＞植酸钙，无机磷处理与有机磷处理速效磷含量差异达显著水平. 单独加入草酸和柠檬酸土壤磷含量亦明显高于无有机酸处理. 磷肥与有机酸一起施入土壤后，有机酸可以提高磷肥的有效性，利于植物吸收，但不同种类的有机酸对各种磷源的作用效果不同. 柠檬酸作用能力最强，使施入磷酸钙、磷酸铁、磷酸铝、植酸钙的土壤速效磷含量分别增加33.95、19.35、20.81、39.06 mg kg$^{-1}$，草酸的作用仅次于柠檬酸，速效磷含量增加16.79、34.92、11.56、22.51 mg kg$^{-1}$，苹果酸的作用能力最弱. 如图1所示，柠檬酸、草酸处理的4种施磷土壤速效磷含量较无有机酸处理时显著提高，其中草酸对磷酸铁的作用能力最大，且强于柠檬酸，而柠檬酸对磷酸钙、磷酸铝、植酸钙的作用能力强于草酸. 施磷土壤是否添加苹果酸，速效磷含量无显著差异.

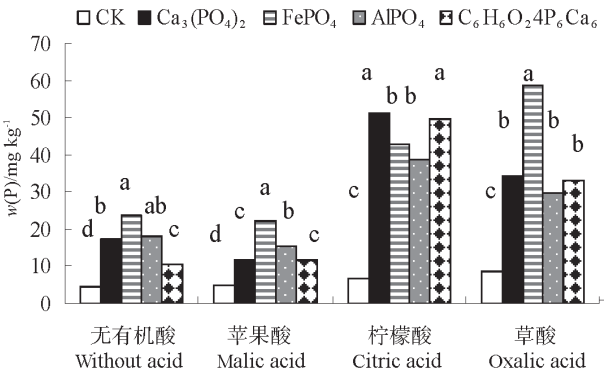



图1 有机酸对土壤速效磷含量的影响

Fig. 1　Effect of organic acids on available P in soil

### 2.2 不同磷源条件下土壤各形态磷含量

按张守敬和Jackson 提出的无机磷分级方法，对各处理土壤进行了无机磷的分级研究. 结果(表1)表明，所有施磷处理土壤的无机磷总量和各形态无机磷含量都比对照处理显著增加. 不同磷源处理使土壤磷素形态构成发生了变化，加磷酸钙和植酸钙，各形态无机磷占无机磷总量的百分比顺序为Fe-P＞O-P＞Al-P＞Ca-P；加磷酸铁和磷酸铝，百分比顺序为Fe-P＞Al-P＞O-P＞Ca-P.

### 2.3 不同磷源在土壤中各形态无机磷的转化

由表2可看出，不施磷，土壤中各形态无机磷含量顺序为Fe-P＞O-P＞Ca-P＞Al-P. 其中Fe-P占51.54%，其次是O-P，占33.58%，而Ca-P和Al-P含量相对较低，分别占11.45%和3.42%. 施磷后土壤中各级无机磷总量和各形态磷含量均相应增加，其增量结果表明，Fe-P最多，占增量的46.85%~60.00%，其次为Al-P和O-P，分别占20.33%~38.03%和10.78%~23.07%，而Ca-P转化量较少，小于总增加量的6%，表明各磷源施入土壤后主要转化为Fe-P和Al-P. 表2还表明，不同性质的磷肥对各形态磷的贡献各异，植酸钙施入土壤后，O-P增量百分比较其它磷源高，磷酸铝处理土壤的Al-P含量变化最大，占总增加量的38.03%，Fe-P和O-P的增量百分比低于其它磷源处理.

### 2.4 有机酸对土壤不同磷源处理后无机磷形态转化的影响

不施磷土壤经有机酸处理后无机磷各组分发生了变化(表3)，但各形态无机磷变化无明显规律. 不同磷源与有机酸一起施入土壤后，在有机酸的作用下，土壤中Al-P含量均低于无有机酸处理. 如施入磷酸钙，Al-P含量由无有机酸时的48.42 mg kg$^{-1}$降至31.94~45.32 mg kg$^{-1}$；施入植酸钙，Al-P含

表1 各形态无机磷含量

Table 1　Content of inorganic P in different forms

| 磷源 Phosphate | 无机磷 Inorganic phosphorus ($w$/mg kg$^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Al-P | Fe-P | Ca-P | O-P | 总量 Total |
| CK | 2.03 (3.41) c | 30.66 (51.55) c | 6.81 (11.45) c | 19.98 (33.59) d | 59.48 b |
| $Ca_3(PO_4)_2$ | 48.42 (18.27) b | 143.79 (54.26) a | 17.42 (6.57) a | 55.35 (20.89) b | 264.98 a |
| $FePO_4$ | 50.13 (19.95) b | 145.75 (58.00) a | 14.17 (5.64) b | 41.24 (16.41) c | 251.28 a |
| $AlPO_4$ | 82.58 (30.44) a | 129.89 (47.88) b | 16.01 (5.90) a | 42.81 (15.78) c | 271.30 a |
| $C_6H_6O_{24}P_6Ca_6$ | 43.38 (16.50) b | 135.06 (51.38) ab | 17.54 (6.67) a | 66.90 (25.45) a | 262.87 a |

括号中数值为相应组分占无机磷总量的百分比，数字后的字母代表方差分析结果

The data in parentheses are the percentages of the fraction in total inorganic phosphorus, and the letters after the data stand for the result of ANOVA

表2 不同磷源在土壤中的无机磷形态转化
Table 2 Conversion of different inorganic phosphorus in soil

| 磷源 Phosphate | 无机磷 Inorganic phosphorus | | | | | | | | 总变化量 Total conversion |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Al-P | | Fe-P | | Ca-P | | O-P | | |
| | V ($w$/mg kg$^{-1}$) | V/T ($P$/%) | V ($w$/mg kg$^{-1}$) | V/T ($P$/%) | V ($w$/mg kg$^{-1}$) | V/T ($P$/%) | V ($w$/mg kg$^{-1}$) | V/T ($P$/%) | T ($w$/mg kg$^{-1}$) |
| CK | 2.03±0.37 | 3.42 | 30.66±5.02 | 51.54 | 6.81±1.02 | 11.45 | 19.98±3.20 | 33.58 | 59.48 |
| $Ca_3(PO_4)_2$ | 46.38±7.11 | 22.57 | 113.13±18.01 | 55.05 | 10.61±2.10 | 5.16 | 35.37±5.13 | 17.21 | 205.50 |
| $FePO_4$ | 48.10±7.07 | 25.08 | 115.09±19.04 | 60.00 | 7.36±1.08 | 3.84 | 21.26±3.06 | 11.09 | 191.80 |
| $AlPO_4$ | 80.55±12.14 | 38.03 | 99.23±15.08 | 46.85 | 9.20±1.84 | 4.34 | 22.84±3.48 | 10.78 | 211.82 |
| $C_6H_6O_{24}P_6Ca_6$ | 41.34±6.09 | 20.33 | 104.40±18.02 | 51.33 | 10.72±1.72 | 5.27 | 46.93±6.13 | 23.07 | 203.39 |

V是施入不同磷源在土壤中各形态无机磷与CK相比较的变化量; V/T表示变化量占总变化量的百分数
V means the conversion of P after adding various Pi compared with CK; and V/ T means each P form conversion as percentage of total P conversion.

表3 有机酸处理后土壤无机磷含量的变化
Table 3 Change in inorganic phosphorus in soil treated with organic acids

| 磷源 Phosphate | 有机酸 Organic acid | 无机磷形态 Component of inorganic phosphorus | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Al-P | | Fe-P | | Ca-P | | O-P | | 总量 Total |
| | | $w$/mg kg$^{-1}$ | $P$/% | $w$/mg kg$^{-1}$ | $P$/% | $w$/mg kg$^{-1}$ | $P$/% | $w$/mg kg$^{-1}$ | $P$/% | ($w$/mg kg$^{-1}$) |
| CK | 无有机酸 Without acid | 2.03 | 3.42 | 30.66 | 51.54 | 6.81 | 11.45 | 19.98 | 33.58 | 59.48 |
| | 草酸 Oxalic acid | 2.94 | 4.90 | 31.34 | 52.24 | 7.06 | 11.76 | 18.66 | 31.1 | 60.00 |
| | 柠檬酸 Citric acid | 3.04 | 5.22 | 31.55 | 54.17 | 6.39 | 10.97 | 17.26 | 29.63 | 58.24 |
| | 苹果酸 Malic acid | 4.05 | 6.15 | 30.53 | 46.34 | 7.42 | 11.27 | 23.88 | 36.24 | 65.88 |
| $Ca_3(PO_4)_2$ | 无有机酸 Without acid | 48.42 | 18.27 | 143.79 | 54.26 | 17.42 | 6.57 | 55.35 | 20.89 | 264.98 |
| | 草酸 Oxalic acid | 31.94 | 11.96 | 130.27 | 48.79 | 24.05 | 9.01 | 80.74 | 30.24 | 267.00 |
| | 柠檬酸 Citric acid | 33.09 | 12.11 | 136.46 | 49.95 | 22.69 | 8.31 | 80.96 | 29.63 | 273.20 |
| | 苹果酸 Malic acid | 45.32 | 16.69 | 142.62 | 52.54 | 19.71 | 7.26 | 63.81 | 23.51 | 271.47 |
| $FePO_4$ | 无有机酸 Without acid | 50.13 | 19.95 | 145.75 | 58.00 | 14.17 | 5.64 | 41.24b | 16.41 | 251.28 |
| | 草酸 Oxalic acid | 36.36 | 13.88 | 128.49 | 49.05 | 19.94 | 7.61 | 77.17 | 29.46 | 261.96 |
| | 柠檬酸 Citric acid | 38.43 | 14.99 | 127.92 | 49.91 | 19.39 | 7.56 | 70.57 | 27.53 | 256.31 |
| | 苹果酸 Malic acid | 50.60 | 19.15 | 137.19 | 51.05 | 15.34 | 5.71 | 61.08 | 22.73 | 268.73 |
| $AlPO_4$ | 无有机酸 Without acid | 82.58 | 30.44 | 129.89 | 47.88 | 16.01 | 5.90 | 42.81 | 15.78 | 271.30 |
| | 草酸 Oxalic acid | 41.40 | 15.36 | 128.54 | 47.68 | 23.30 | 8.64 | 76.37 | 28.33 | 269.61 |
| | 柠檬酸 Citric acid | 50.03 | 19.27 | 131.48 | 50.63 | 19.04 | 7.33 | 59.13 | 22.77 | 259.68 |
| | 苹果酸 Malic acid | 70.16 | 25.95 | 136.68 | 50.55 | 19.00 | 7.03 | 44.55 | 16.48 | 270.38 |
| $C_6H_6O_{24}P_6Ca_6$ | 无有机酸 Without acid | 43.38 | 16.50 | 135.06 | 51.38 | 17.54 | 6.67 | 66.90 | 25.45 | 262.87 |
| | 草酸 Oxalic acid | 27.43 | 10.06 | 140.75 | 51.64 | 25.36 | 9.30 | 79.03 | 28.99 | 272.57 |
| | 柠檬酸 Citric acid | 34.46 | 13.44 | 135.62 | 52.90 | 21.84 | 8.52 | 64.46 | 25.14 | 256.38 |
| | 苹果酸 Malic acid | 35.38 | 13.61 | 137.86 | 53.03 | 22.06 | 8.48 | 64.69 | 24.88 | 259.99 |

$P$为各形态无机磷占无机磷总量的百分数 $P$ means various kinds of Pi as percentage of total P

量由43.38 mg kg$^{-1}$降至27.43~35.38 mg kg$^{-1}$. 与Al-P含量变化的显著不同在于, 土壤中Ca-P含量均高于无有机酸处理. 在施入磷酸钙、磷酸铁、磷酸铝或植酸钙的土壤上, 有机酸处理后, Ca-P含量增幅为8.26%~45.53%, 苹果酸处理增幅只有8.26%~25.77%, 柠檬酸和草酸处理的增幅达18.93%~45.53%. Fe-P和O-P含量变化与施用磷肥种类有关, 在施用磷酸钙或磷酸铁的土壤上加施有机酸, 与单独施磷处理相比, Fe-P含量下降, 如果施入磷酸铝或植酸钙后加施有机酸则土壤中Fe-P含量略有增加; 有机酸处理, O-P含量一般呈增加趋势, 但施入植酸钙和有机酸后反而略有减少. 看来, 有机酸对这两种形态磷的影响是比较复杂的. 加施有机酸处理, 土壤中无机磷组分增加或减少的程度与有机酸种类关系密切. 与单独施磷相比, 3种有机酸减少Al-P和增加Ca-P的强弱顺序均为草酸>柠檬酸>苹果酸.

## 3 讨 论

速效磷含量分析表明, 施磷显著提高了土壤中磷含量, 作用能力大小顺序为磷酸铁>磷酸铝>磷酸钙>植酸钙, 4种磷源水溶性磷含量有差异,故使土壤速效磷含量变化不同. 施无机磷处理较有机磷处理速效磷含量高些, 这是因为所用无机磷是弱酸溶性磷肥, 在中酸性土壤上使用时肥效很高, 而有机磷由于还要进行分解才能被植物吸收, 所以肥效比较缓慢. 有机酸也可以增加对照土壤速效磷含量, 可能是因为减少磷吸附、促进土壤有机磷和无机磷有效化过程等途径活化了土壤中原有的磷的缘故.

从无机磷分级结果(表1, 表2)可见, 施入不同磷源后土壤中无机磷总量显著增加, 并在土壤中通过沉淀作用等很快发生形态转化. 施入磷肥后, Fe-P和Al-P含量上升幅度均较大, 其中Fe-P占总增加量的50%左右, 这是因为土壤中的铁铝

氧化物含量比较高，而中、酸性土中无定形铁铝氧化物和水氧化物是磷的主要吸附基质，因此增强了土壤对磷的吸附[16]. Ca-P的增加量很小，这是由于土壤中钙的含量很低，不能完全提供形成Ca-P所需的含钙吸附位点[17].

植物根系分泌的有机酸可以作为配体与金属离子如$Ca^{2+}$、$Al^{3+}$或$Fe^{3+}$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[18]. Luo等发现，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[19]. Dinkelaker等的研究认为，作物根系分泌的有机酸可以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[20]. 陆文龙等的研究表明，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[21, 22]. 本试验对不同磷源处理土壤加施有机酸，进行无机磷分级研究，结果(表3)表明，由于有机酸的作用，土壤中Al-P含量下降，Fe-P含量变化因磷源不同而不同，Ca-P和O-P含量有所增加. 有机酸作用能力大小顺序为草酸＞柠檬酸＞苹果酸，这一顺序与其对金属离子的络合能力相一致，表明络合溶解是磷素转化的重要途径. 同时说明有机酸所活化的土壤无机磷，主要是源于铁铝所结合的磷酸盐，Fe-P与Al-P是主要的有效磷源.

有研究表明，有机酸能增加土壤中磷的活性[22~24]，主要归因于3个方面：一是有机阴离子与磷酸根的配位交换[25, 26]；二是有机态的含磷化合物在pH值降低时部分水解[27]；三是铁、铝结合态的磷酸盐部分的螯合溶解. 可见，本研究中有机酸增加土壤中磷的活性主要归因于第一和第三方面. 已有大量研究证明，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[28]. 本研究表明，有机酸不仅没有促进土壤中O-P的释放，反而使其固定量加大，促进土壤中O-P的形成与积累，与王艳玲的研究结果[29]和陆海明的研究结果[30]相一致. 有机酸对土壤磷的活化是一个既缓慢又持续的综合动态过程，土壤磷的活化量既受有机酸的种类、浓度和类型的影响，也与磷素固定方式和数量关系密切，有待进一步深入细致的研究.

## References


1 Kou CL (寇长林), Wang QJ (王秋杰), Ren LX (任丽轩), Zhang FS (张福锁). Study on the variety of wheat and peanut in utilization to different phosphorus compound. *Chin J Soil Sci* (土壤通报) , 1999, **30** (4): 181~184

2 Liu JL (刘建玲), Zhang FS (张福锁). Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation Ⅱ. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2000, **11** (3): 360~364

3 Ae N, Arihara J, Okada K, Yoshihara T, Johansen C. Phosphorus uptake by pigeonpea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*, 1990, **248**: 477~480

4 Shen H, Wang XC, Shi WM, Cao ZH, Yan XL. Isolation and identification of specific root exudates in elephant grass (P enn is lium L .) in response to phosphorus deficiency. *J Plant Nutr*, 2001, **24** (7): 1117~1130

5 LI CJ, Liang RX. Root Cluster formation and citrate exudation of white lupin (*Lupinus albus* L.) as related to phosphorus availability. *J Integr Plant Biol*, 2005, **47** (2): 172~177

6 Neumannn G, Massonneau A, Martinoia E, Romheld V. Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin. *Planta*, 1999, **208** (3): 373~382

7 Shen H (沈宏), Kikui S, Yan XL (严小龙), Matsumoto H. Mobilization of insoluble aluminum bound phosphate by soybean root exudates. *J Soil & Water Conserv* (水土保持学报), 2005, **19** (1): 68~83

8 Zhao M (赵明), Shen H (沈宏), Yan XL (严小龙). Mobilization and uptake of insoluble phosphorus by different common bean genotypes. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 2002, **8** (4): 435~440

9 Hu HQ (胡红青), Li Y (李研), He JZ (贺纪正). Interaction of organic acids and phosphorus in soils. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2004, **35** (2): 222~229

10 Lu WL (陆文龙), Zhang FS (张福锁), Chao YP (曹一平), Wang JG (王敬国). Influence of low-molecular- weight organic acids on kinetics of phosphorus adsorption by soils. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1999, **36** (2): 189~197

11 Xu RK, Zhu YG Chittleborough D, Phosphorus release from phosphate rock and iron phosphate by low- molecular-weight organic acids. *J Environ Sci*, 2004, **16** (1): 5~8

12 Zhang YS (章永松), Lin XY (林威永), Luo AC (罗安程). Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms—Ⅱ. Organic acids from decomposition of organic manure (matter) and their effect on activation to different artificial phosphate. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 1998, **4** (2): 145~150

13 Pang RL (庞荣丽), Jie SL (介晓磊) Fang JB (方金豹), Tan JF (谭金芳), Li YT (李有田). Effect of organic acids on transformation of inorganic phosphorus with different phosphate sources in calcic fluvo-aquic soil. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 2007, **13** (1) : 39~43

14 Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci*, 1957, **84** (2): 133~144

15 Lu RK (鲁如坤). Analyse Methods of Soil and Agrochemistry. Beijing, China (北京): Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. 60~73, 175~176

16 Xiong JF (熊俊芬), Shi XJ (石孝均), Mao ZY (毛知耘). Effects of six-year phosphorus fertilization on the distribution of inorganic P forms in surface soil and subsoil. *J Southwest Agric Univ* (西南农业大学学报), 2000, **22** (4) :123~125

17 Lindsay WL, Frazier AW, Stephenson HF. Identification of reaction P roducts from phosphate fertilizers in soils. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1962, **26** (3) : 446~452

18 Garder WK, Barber DA, Parbery DC. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. Ⅲ. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/ root interface is enhanced. *Plant & Soil*, 1983, **70**: 107~114

19 Luo HM, Watanabe T, Shinano T. Comparison of aluminum tolerance and phosphate absorption between rape (*Brassica napus* L.) and tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. ) in relation to organic acid exudation.

*Soil Sci Plant Nutr*, 1999, **45** (4): 897~907

20 Dinkelaker B, Hengeler C, Marschner H. Distribution and function of proteoid roots and other root clusters. *Bot Acta,* 1995, **108**: 183~200

21 Lu WL (陆文龙), Wang JG (王敬国), Cao YP (曹一平), Zhang FS (张福锁). Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low-molecular-weight. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1998, **35** (4): 493~500

22 Lu WL (陆文龙), Cao YP (曹一平), Zhang FS (张福锁). The effect of low-molecular-weight organic acids on phosphorus release from different phosphates. *Acta Agric Bori-Sin* (华北农学报), 2001, **16** (1): 99~104

23 Shen AL (沈阿林), Li XY (李学垣), Wu SR (吴受容). The composition characteristics of low-molecular- weight organic acids in soil and their roles on soil material cycling. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 1997, **3** (4): 363~369

24 He ZL (何振立), Yuan KN (袁可能), Zhu ZX (朱祖祥). Effect of organic ligands on phospate adsorption by hydrous iron and aluminum oxides, kaolinite and red earth. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1990, **27** (4): 377~384

25 Feng K, Lu HM, Sheng HJ, Wang XL, Mao J. Effect of organic ligands on biological availability of inorganic phosphorus in soils. *Pedosphere*, 2004, **14** (1): 85~92

26 He ZL, Yuan KN, Zhu ZX. Effects of organic anions on phosphate adsorption and desorption from variable- charge clay mineral and soil. *Pedosphere*, 1992, **2** (1): 1~11

27 Ding YZ (丁永祯), Li ZA (李志安), Zou B (邹碧). Low-molecular-weight organic acids and their ecological roles in soil. *Soils* (土壤), 2005, **37** (3): 243~250

28 Hu HQ (胡红青), Li XY (李学垣), He JZ (贺纪正). Effects of organic acids on phosphate adsorption by synthetic Al oxides. *Plant Nutr & Fertil Sci* (植物营养与肥料学报), 2000, **6** (1): 35~41

29 Wang YL (王艳玲), He YQ (何园球), Li CL (李成亮). Persistent activating effect of citric acid on phosphorus in red soil and its mechanism. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2007, **44** (1): 130~136

30 Lu HM (陆海明), Sheng HJ (盛海君), Mao J (毛健), Jiang XL (汪晓丽), Feng K (封克). Effects of organic anions on the biological availability of inorganic phosphorus from different fraction in soils. *J Yangzhou Univ Agric & Life Sci Ed* (扬州大学学报农业与生命科学版), 2003, **24** (2): 49~53