

有机酸对菜地土壤磷素活化的影响

梁玉英^{1,2}, 黄益宗¹, 孟凡乔², 朱永官^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 实验室模拟研究两种有机酸(柠檬酸、草酸)对菜地土壤磷素活化的影响。结果表明: 有机酸对菜地土壤磷的活化效果较明显, 且随有机酸浓度的增加, 土壤磷活化效果越显著。两种有机酸的活化效果为草酸 > 柠檬酸。有机酸对磷的活化效果与土壤 Olsen-P 含量、有机质含量呈显著正相关关系。土壤中有效磷的释放随着有机酸浸提时间的延长而逐渐增加。

关键词: 磷素释放; 柠檬酸; 草酸; 菜地土壤

文章编号: 1000-0933(2005)05-1171-07 中图分类号: S154.1 文献标识码: A

Effect of organic acids on the activation of phosphorus in vegetable garden soils

LIANG Yu-Ying^{1,2}, HUANG Yi-Zong¹, MENG Fan-Qiao², ZHU Yong-Guan^{1*} (1. *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*; 2. *College of Resource and Environment, Chinese Agricultural University, Beijing 100094, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1171~1177.

Abstract: The increasing demand for food production throughout the world has been exerting growing pressure on mineral nutrient cycling in agricultural ecosystems. Lack of available phosphorus (P), for plant growth is a widespread limitation to agricultural production. It has been reported that only 8% of 500 soil samples, collected from 42 countries were classified as not deficient in phosphorus. The management of phosphorus nutrition in soil is one of the important agricultural practices. However, excessive application of phosphorus fertilizers may result in not only economic loss but also cause other environmental problems, such as severe eutrophication.

Effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus release have been studied by a series of batch experiments. Many studies reported in the literature are only concerned with the accelerating effects of organic acids on soil phosphorus release in agroecosystems. The aim of this study is to investigate whether low-molecular-weight organic acids can be used to predict the risk of P release in peri-urban areas, such as vegetable garden soils. Two organic acids (oxalic and citric acids) and nine vegetable garden soils were used, and the effects of different concentrations (0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmol/L) of oxalic and citric acids on the release of phosphorus from these soils were carried out by soil incubation in laboratory. the kinetics of phosphorus release from soils was also studied. Results showed that the release of phosphorus by organic acids from vegetable garden soils is significant. The effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus release increased with increasing concentrations of organic acids. The release of soil phosphorus increased from 124.26 mg/kg to 603.37 mg/kg in No. 1 vegetable garden soil, with increasing concentrations of oxalic acid from 0.1 mmol/L to 2.0 mmol/L. Oxalic acid is better than citric acid for the release of soil phosphorus. There were significant correlation between the release of phosphorus by organic acids and soil Olsen-P and organic matter content. The release of soil phosphorus increased with incubation time. Soil phosphorus release increased from 248.32 mg/kg at 0.5 h to 989.45 mg/kg at 8 h for citric acid in No. 1 vegetable garden soil.

Key words: phosphorus; citric acid; oxalic acid; garden soils; release

基金项目: 国家 863 资助项目 (2002AA601022-4)

收稿日期: 2004-11-19; **修订日期:** 2005-03-25

作者简介: 梁玉英 (1979~), 女, 黑龙江绥滨人, 硕士生, 主要从事环境污染化学研究. E-mail: liangyy7323@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ygzhu@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: High Technology Project (863) of China (No. 2002AA601022-4)

Received date: 2004-11-19; **Accepted date:** 2005-03-25

Biography: LIANG Yu-Ying, Master candidate, mainly engaged in environmental chemistry. E-mail: liangyy7323@163.com

长期以来,人们一直在寻求某种行之有效的方法来减少土壤对磷酸盐的固定,从而提高磷肥的利用率。与此同时,由于土壤中含有大量作物难以吸收利用的磷酸盐,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、稳产做贡献,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。多年来,人们主要从土壤改良、磷肥种类、施肥方法、施肥制度、管理措施和轮作制度等方面做了不少研究,但至今仍未能取得根本性的突破。近年来,由于根际微生态系统研究的不断开展,人们在根际土壤中分离和鉴定出一些具有专一性的根分泌物如柠檬酸、草酸、甲酸、苹果酸、醋酸等低分子有机酸^[1,2]。根系所分泌的低分子有机酸^[3]、氢离子^[4]可以溶解部分难溶性无机磷,所分泌的磷酸酶^[5,6]可以分解根际有机磷^[7,8]。因此,有机酸对土壤磷素的活化(其中包括土壤可溶性磷),提高植物对磷素的吸收利用将发挥重要的作用。

有机酸对土壤磷释放的影响已有一些报道^[9~16],但是大多研究仅考虑有机酸在一般农田土壤中的应用,而没有考虑其在菜地土壤的应用情况。菜地是由于人为的耕种、灌溉和培肥等措施使原来的土壤逐步形成一类具有较厚耕作层、以高度熟化和高磷素累积为特点的土壤^[17,18]。近年来,我国蔬菜种植面积不断扩大,复种指数增加,菜农对磷肥的施用量也在成倍、甚至数十倍增加。因此,与一般农田土壤相比,菜地土壤中有机质和磷含量均较高。据王朝辉等报道,露天菜地不同土层(0~200cm)的 Olsen-P 含量介于 15.0~503.1kg/hm² 之间,而农田介于 6.1~34.4kg/hm² 之间。从 200cm 土层速效 P 的累积总量来看,露天菜地为 503.3kg/hm²,农田土壤为 136.2kg/hm²,菜地比农田高出 2.7 倍;在同一深度的土层中,露天菜地有机质累积总量为 269.3mg/hm²,而农田仅为 249.4mg/hm²,前者比后者高出 8.0%^[19]。由于菜地土壤与一般农田土壤具有不同的特性,且菜地土壤中一般有机肥施入量较多^[20,21],而随着有机肥的施入,菜地土壤中有机酸的量将会增加,因此有机酸对这两类土壤磷活化的影响也将不一样。本文主要研究有机酸(柠檬酸和草酸)在不同菜地土壤条件下对磷素活化的影响,指导菜地合理施肥,降低菜地土壤中的磷向水体迁移污染水体的风险,为菜地土壤磷素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤(棕红壤),采自武汉市桃花岛几块试验菜地 0~20cm 的表层土(菜地土壤编号为 1 到 6 号),在第 7 块菜地中根据不同的土壤深度(0~20cm、20~40cm、60~80cm)采集 3 个剖面层次的土壤(编号分别为 7、8 和 9 号)。土样经风干、磨细和过 2mm 筛后,装入封口袋中备用。土壤的基本理化性质见表 1。土壤基本理化性质均根据中国农业科技出版社出版鲁如坤主编的“土壤农业化学分析方法”一书中的方法测定的。其中 pH 值为水土比 2.5:1,pH 电极测定;有效磷为 Olsen-P 法测定。

表 1 供试土壤的部分理化性质
Table 1 Some physico-chemical properties of the tested soils

土壤编号 Soil No.	全磷 Total P (%)	有机质 OM (g/kg)	pH	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	无定形铝 Amorphous Al ₂ O ₃ (%)	碳酸钙 CaCO ₃ (%)	粘粒(<2μm) Clay (%)
1	0.20	23.40	5.70	182.03	0.21	0.30	13.80
2	0.17	17.03	5.42	136.84	0.25	0.29	15.32
3	0.17	13.63	6.47	112.70	0.14	0.34	16.55
4	0.11	10.10	5.17	78.99	0.28	0.20	16.98
5	0.11	10.05	5.93	49.78	0.17	0.27	19.60
6	0.08	9.71	5.62	35.78	0.23	0.24	26.65
7	0.11	8.59	5.76	45.95	0.20	0.28	24.09
8	0.12	8.20	6.50	56.14	0.13	0.30	18.78
9	0.09	6.25	6.57	44.69	0.11	0.29	25.17

1.2 供试有机酸

供试有机酸为柠檬酸和草酸,均为分析纯产品,根据菜地土壤的特性,有机酸的浓度设为 0、0.1、0.5、1.0、1.5 和 2.0mmol/L,其性质见表 2。

1.3 实验方法

1.3.1 有机酸对不同土壤有效磷释放的影响 分别称取上述不同供试土壤 1g(精确到 0.001g)置于 50mL 塑料离心管中,按 1:30 固液比例分别加入一定浓度的柠檬酸和草酸,使溶液有机酸浓度为 1mmol/L,即为 30mmol/kg 土^[23,24]。以不加有机酸而仅用蒸馏水代替的处理为对照(CK)。实验设 3 次重复。在 25℃ 温度条件下振荡 0.5h,离心,过滤,取上清液用钼锑抗比色法测定溶液中的磷浓度。

表 2 供试有机酸的性质^[22]

Table 2 Properties of the two low-molecular-weight organic acids used in this study

有机酸种类 Organic acids	基团形式 Ligand form	解离常数 Dissociation constants			logK _{A1}
		Pk1	Pk2	Pk3	
柠檬酸 Citric acid	H ₃ L	3.14	4.77	6.39	7.98
草酸 Oxalic acid	H ₂ L	1.23	4.19	—	6.16

1.3.2 不同浓度有机酸对土壤有效磷释放的影响 分别称取上述不同供试土壤 1g (精确到 0.001g) 置于 50ml 塑料离心管中,按 1:30 固液比例分别加入不同浓度的柠檬酸和草酸,使溶液中柠檬酸和草酸浓度分别为 0、0.1、0.5、1.0、1.5、2.0mmol/L,即为 0、3、15、30、45、60mmol/kg 土。实验设 3 次重复。在 25℃ 温度条件下振荡 0.5h,离心,过滤,取上清液用钼锑抗比色法测定溶液中的磷浓度。

1.3.3 有机酸对土壤磷释放动力学性质的影响 分别称取上述不同供试土壤 1g (精确到 0.001g) 置于 50ml 塑料离心管中,按 1:30 固液比例分别加入一定浓度的柠檬酸和草酸,使溶液有机酸浓度为 1mmol/L。实验设 3 次重复。振荡、离心等方法同上,分别于 0.5、1、2、4、6、8h 取出上清液测定其磷浓度。

2 结果与讨论

2.1 有机酸对不同土壤有效磷释放的影响

有机酸对不同菜地土壤中磷活化的影响见图 1。从图中可看出,有机酸对土壤磷活化的作用很明显,但是不同菜地土壤对有机酸活化磷的效果不一样。草酸、柠檬酸对土壤磷的活化率都达到了 200% 以上,1 号土壤不添加有机酸(以蒸馏水浸提)处理磷的释放量为 54.05mg/kg,添加 1mmol/L 草酸且振荡 0.5h 后,土壤磷的释放量为 381.21mg/kg,活化率达到 605.27%;3 号和 6 号土不添加有机酸的处理磷的释放量分别为 37.68 和 7.82mg/kg,添加草酸后磷的释放量分别为 266.80 和 86.84 mg/kg,活化率分别达到了 608.08% 和 373.93%。分析其原因,1 号土壤 Olsen-P 含量和有机质含量最高,分别为 182.03mg/kg 和 23.40g/kg,而 6 号土壤 Olsen-P 含量、有机质含量较少,分别为 35.78mg/kg 和 9.71g/kg。在这 6 个菜地土壤中,添加草酸后磷的释放量与土壤 Olsen-P 含量、土壤有机质含量呈正相关,即土壤 Olsen-P 含量、有机质含量越高,添加草酸后磷的释放量就越大。柠檬酸与草酸一样表现出相类似的规律。有机酸能活化土壤磷是因为有机酸加入土壤后,有机酸根离子被吸附在土壤表面,占据了一部分吸附位,使磷的吸附量降低。此外,有机酸可以通过自身的功能基产生螯合和溶解作用,通过与 Ca^{2+} 等离子的螯合,使被束缚的磷释放,减少了磷的固定。但草酸活化效果明显好于柠檬酸,这是因为不同种类的有机酸所含的功能基数目及螯合能力不同,对磷活化的影响也不同^[25]。

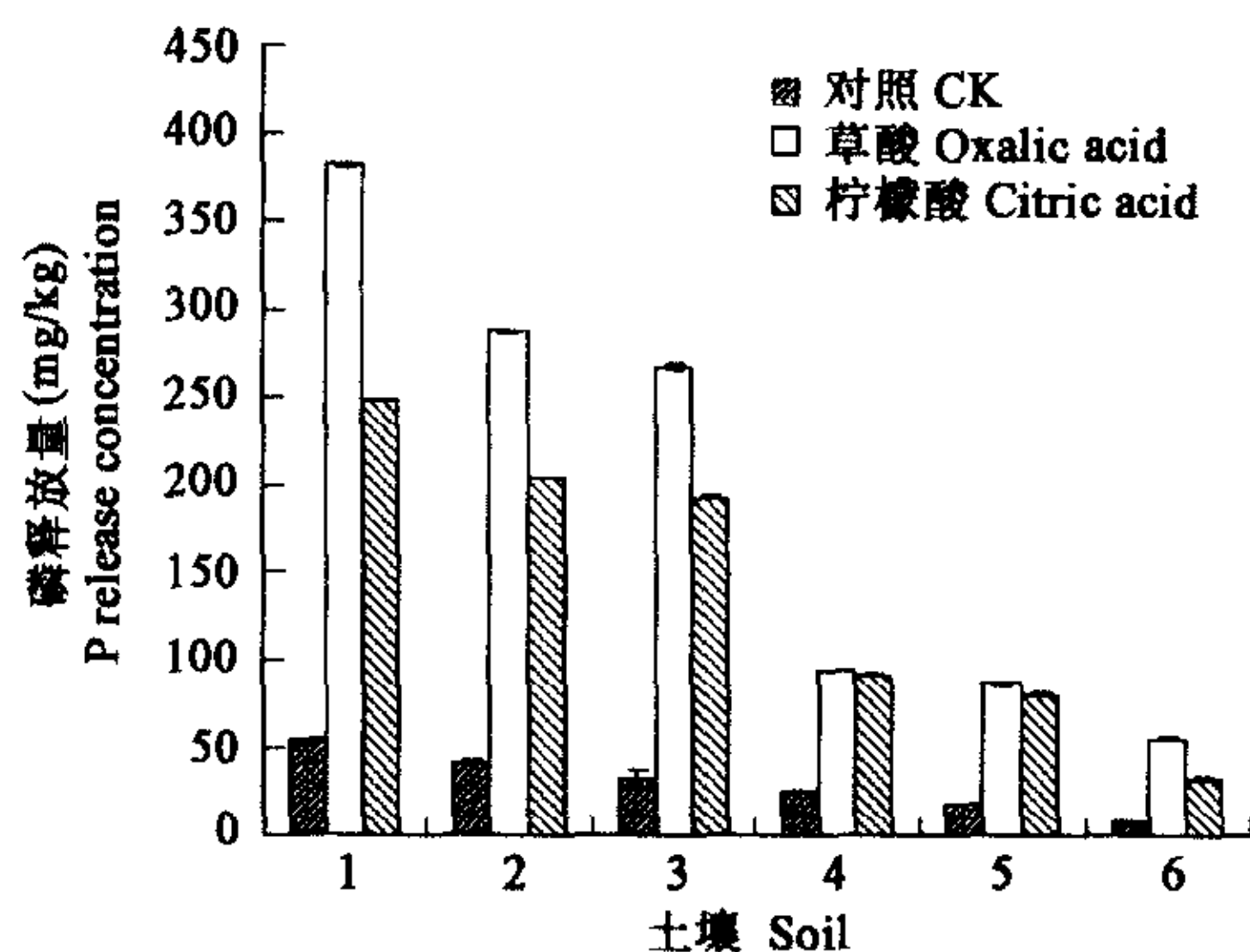


图 1 有机酸对不同菜地土壤有效磷释放的影响

Fig. 1 Effects of organic acids on the release of soil P from different vegetable garden soils

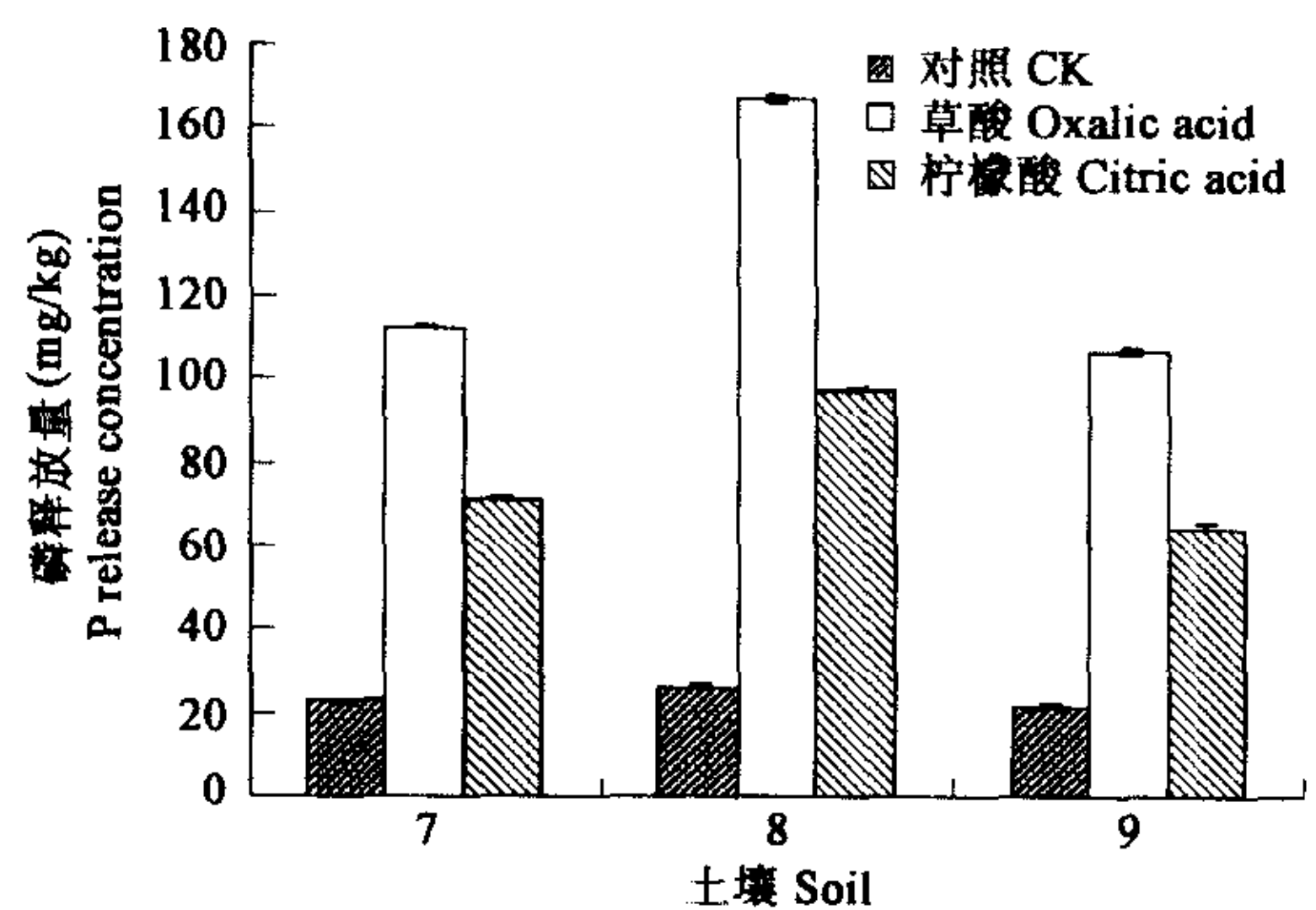


图 2 有机酸对菜地不同剖面土壤有效磷释放的影响

Fig. 2 Effects of organic acids on the release of soil P from different depth of vegetable garden soils

对不同深度的土壤剖面而言,20~40cm(8 号土)的土壤添加有机酸后活化的磷最多,其次为 0~20cm(7 号土)土壤,最后为 60~80cm(9 号土)土壤(图 2)。8 号土壤在不添加有机酸时磷的释放量为 26.41mg/kg,经过草酸处理后土壤磷的释放量达到 166.77mg/kg,活化率为 531.40%;而经过柠檬酸处理后土壤磷的释放量为 97.41mg/kg,活化率为 268.78%。3 个剖面土壤中,8 号土壤 Olsen-P 含量与有机质含量最高,为 56.14mg/kg 和 8.20g/kg,因此可以认为有机酸对土壤磷活化效果与土壤 Olsen-P 含量、土壤有机质含量有关,且草酸活化效果大于柠檬酸。与陆文龙^[26]、晏维金^[27]研究结果一致。

2.2 不同浓度有机酸对土壤有效磷释放的影响

不同有机酸浓度对土壤磷释放的影响见图 3。土壤中无论是添加柠檬酸还是添加草酸,土壤磷的活化均与这两种有机酸的浓度关系密切,有效磷释放量均随着有机酸浓度的升高而增加。1、2、3、4、5 和 6 号菜地土壤中,添加 0.1mmol/L 的草酸后土壤中的有效磷含量分别 124.26、106.14、90.92、60.41、52.59mg/kg 和 11.41mg/kg,而添加草酸的浓度为 2.0mmol/L 时,土壤有效磷含量分别增加到 603.37、484.15、454.78、205.02、147.52mg/kg 和 113.28mg/kg(图 3)。添加柠檬酸后也得到相类似的结果。无论是添加柠檬酸还是添加草酸,1、2 和 3 号土壤比 4、5 和 6 号土壤有效磷释放量大,这是因为 1、2 和 3 号土壤比 4、5 和 6 号土壤 Olsen-P 含量高,而且本实验有机酸浸提的磷量除了包括有机酸活化的磷量以外,还包括土壤本身的可溶性磷部分。

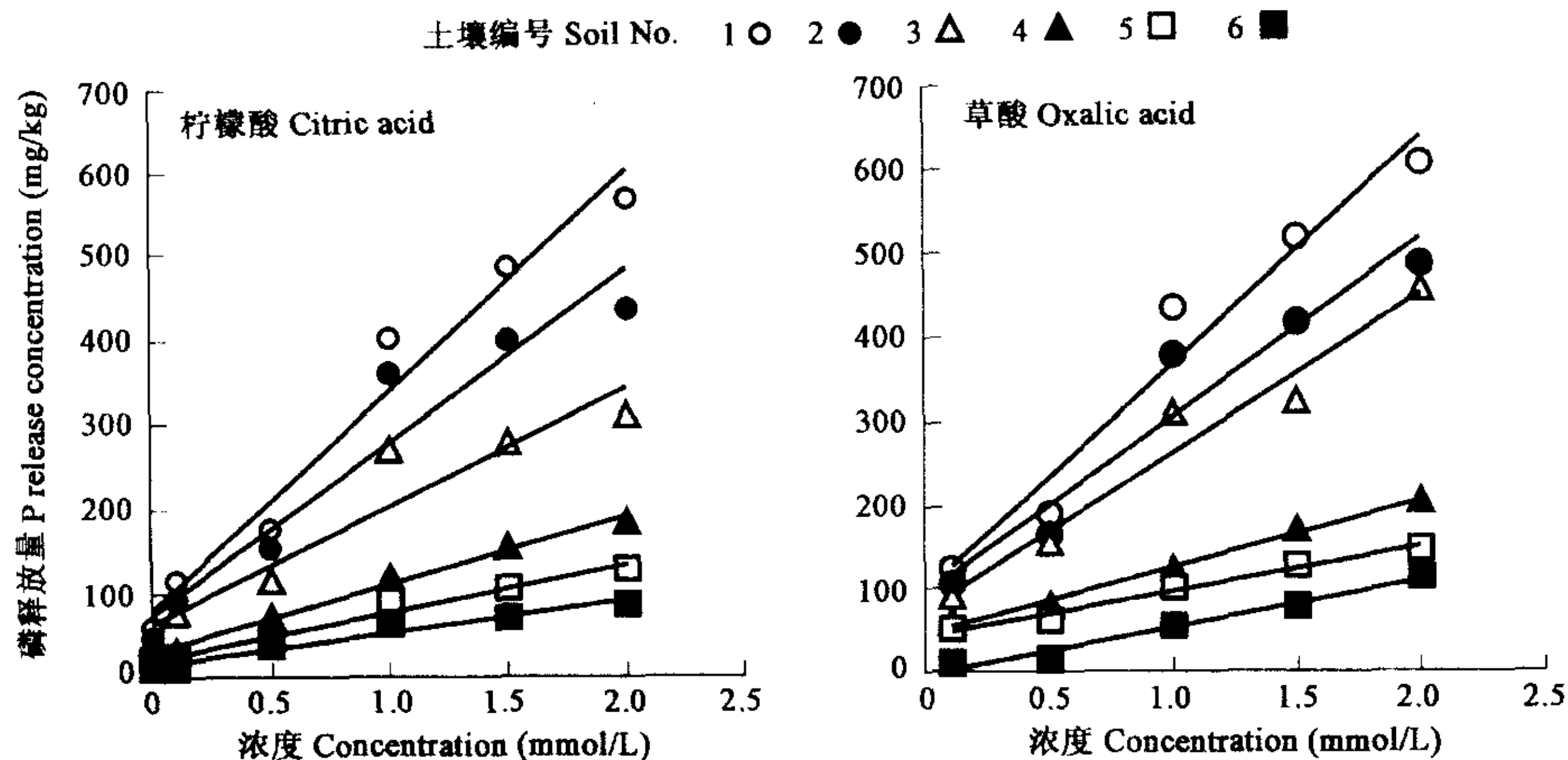


图3 不同浓度有机酸对菜地土壤有效磷释放的影响

Fig. 3 Effects of the concentrations of organic acids on the release of soil P from vegetable garden soils

用不同剖面深度的土壤(7、8和9号)来进行实验,也发现土壤有效磷含量随着有机酸浓度的增加而增加,但是有机酸浓度较高时土壤有效磷含量增加速度较慢(图4)。不同剖面深度土壤导致有效磷释放的规律与1~6号土壤差异较大,这可能是因为不同剖面深度土壤的有机质、全磷、无定形铝等含量以及其它物理化学性质不同而导致的结果。从图中还可以看出,不管是添加柠檬酸还是添加草酸,20~40cm(8号土)土壤中活化的磷比其它两个剖面深度的土壤要多。8号土壤不加有机酸时 Olsen-P 含量为 56.14mg/kg,添加草酸浓度由 0.1mmol/L 提高到 2.0mmol/L 时,有效磷释放量由 95.93mg/kg 提高到 312.59mg/kg,磷释放增加了 216.66mg/kg。9号土壤不加有机酸时 Olsen-P 含量较少,为 44.69mg/kg。当草酸浓度由 0.1mmol/L 提高到 2.0mmol/L 时,有效磷释放量由 47.81mg/kg 提高到 199.84mg/kg,增加 152.0mg/kg。

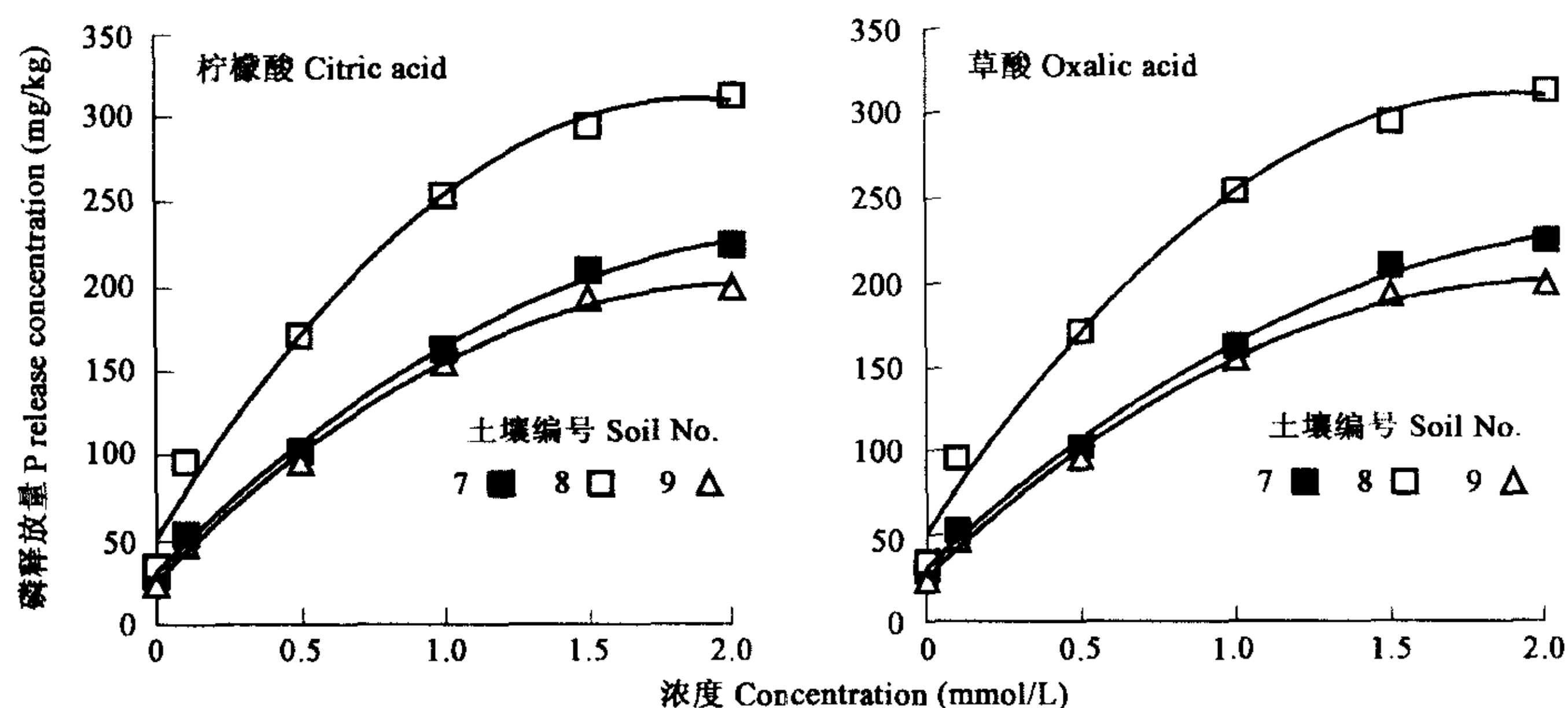


图4 不同浓度有机酸对菜地剖面土壤有效磷释放的影响

Fig. 4 Effects of the organic acid with different concentrations on the release of soil P from vegetable garden soil at different depths

2.3 有机酸对土壤磷释放动力学性质的影响

图5为有机酸对菜地土壤有效磷释放动力学的影响,从图中可以看出,添加有机酸后土壤中的有效磷释放量随着浸提时间的延长而逐渐增加,且随着土壤类型的不同而不同。而且不管是柠檬酸处理还是草酸处理,浸提8h后4、5和6号土壤的有效磷释放量增加速度比1、2和3号土壤快。比如经过柠檬酸处理后,1号土壤的有效磷释放量从浸提0.5h的248.32mg/kg迅速增加到浸提8h的989.45mg/kg,增加了将近3倍;而6号土壤从浸提0.5h的33.09mg/kg增加到浸提8h的164.84mg/kg,增加4倍左右。

图6为有机酸对菜地剖面土壤有效磷释放动力学的影响,图中可以看出,有机酸活化20~40cm(8号土)土壤中的磷最多,活化60~80cm(9号土)土壤中的磷最少。土壤有效磷的释放也随着浸提时间的延长而增加。经过草酸处理后,当浸提时间由0.5h增加到8h时,8号土壤有效磷释放量由166.77mg/kg增加到510.25mg/kg;而9号土壤有效磷释放量由106.45mg/kg增

加到 382.39mg/kg。有机酸对菜地土壤有效磷的释放动力学可用对数方程来拟合,拟合效果很好(表 3)。

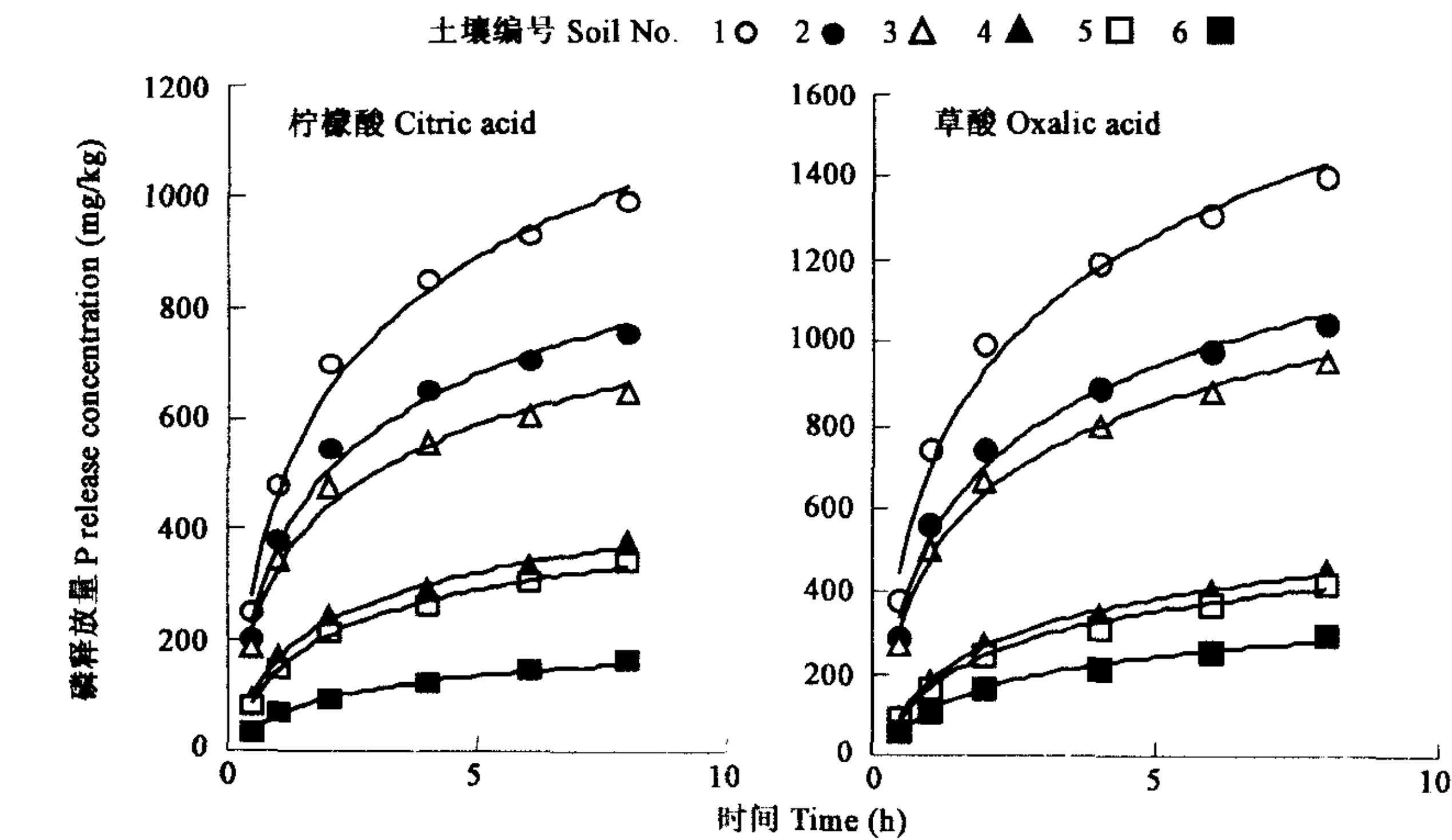


图 5 有机酸对菜地土壤有效磷释放动力学的影响

Fig. 5 Effects of the organic acid on the kinetics of soil P release from vegetable garden soils

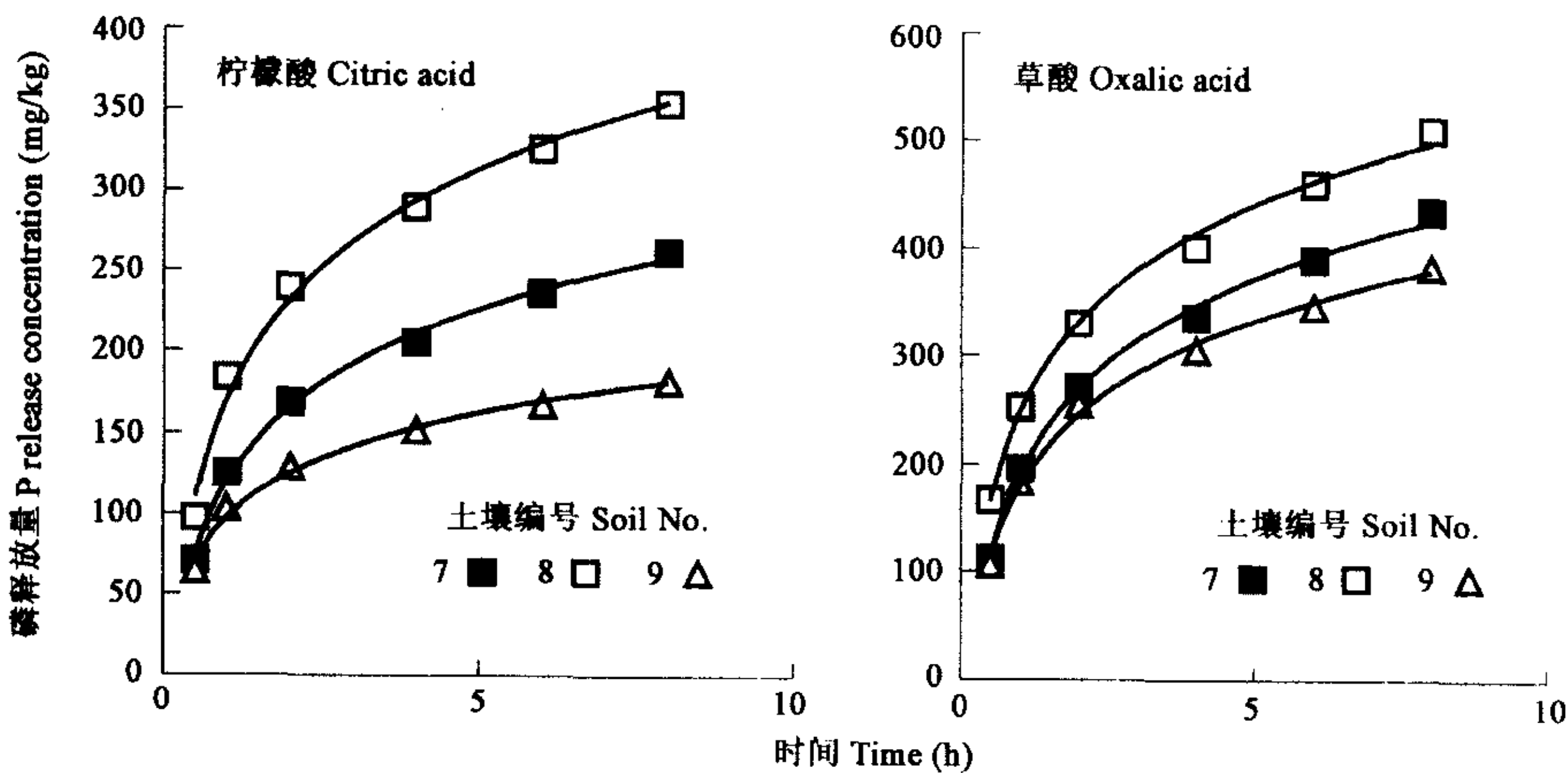


图 6 有机酸对菜地剖面土壤有效磷释放动力学的影响

Fig. 6 Effects of the organic acid on the kinetics of soil P release from vegetable garden soil at different depths

表 3 用对数方程来拟合土壤有效磷释放的决定系数值(R^2)

Table 3 The determinative coefficient(R^2) of the release of soil P fitted logarithmic equation				
土壤编号 Soil No.	柠檬酸 Citric acid	决定系数 R^2 Coefficient	草酸 Oxalic acid	决定系数 R^2 Coefficient
	回归方程 Equation		回归方程 Equation	
1	$y=264.26\ln(x)+465.35$	0.9896	$y=353.28\ln(x)+690.66$	0.9846
2	$y=193.38\ln(x)+367.23$	0.9842	$y=263.7728\ln(x)+517.33$	0.9859
3	$y=159.23\ln(x)+330.41$	0.9818	$y=236.37928\ln(x)+469.79$	0.9880
4	$y=98.279\ln(x)+166.15$	0.9955	$y=125.9528\ln(x)+180.97$	0.9983
5	$y=91.36\ln(x)+146$	0.9971	$y=116.6928\ln(x)+165.66$	0.9954
6	$y=46.063\ln(x)+63.449$	0.9942	$y=83.10428\ln(x)+109.24$	0.9942
7	$y=88.227\ln(x)+171$	0.9908	$y=119.8\ln(x)+248.3$	0.9955
8	$y=66.047\ln(x)+120.19$	0.9959	$y=112.36\ln(x)+191.3$	0.9965
9	$y=40.267\ln(x)+97.56$	0.9915	$y=96.104\ln(x)+178.82$	0.9959

在许多土壤上,磷是限制植物生长的主要因子之一。许多研究已证明,磷高效植物可通过增加有机酸的分泌来促进植物根

际难溶性磷的活化。低分子量有机酸是有机质分解过程的中间产物和动植物体代谢产物的组成部分,在土壤含量较丰富。由于它们具有较强的络合能力,并与阴离子竞争吸附点位,因而对减少 P 素固定、提高 P 素的有效性具有一定作用。总之,有机酸对土壤磷的活化是提高磷素利用效率的重要途径,本研究也证实了这一点。

3 结论

(1)柠檬酸、草酸对菜地土壤磷的释放有明显的促进作用。有机酸对磷的活化与土壤 Olsen-P 含量、土壤有机质含量呈正相关。两种酸活化土壤磷能力的大小次序为:草酸>柠檬酸。

(2)柠檬酸、草酸的浓度对菜地土壤有效磷的释放有很大影响,表现为随着有机酸浓度的增加而增加。

(3)两种酸对菜地土壤有效磷释放动力学影响表现为随有机酸浸提时间的延长,有效磷释放量逐渐增加。有机酸对菜地土壤有效磷的释放可用对数方程来较好拟合。

References:

- [1] Shen H, Yan X L. Exudation and Accumulation of organic acids in the roots of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in response to low phosphorus and aluminum toxicity stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(3): 387~394.
- [2] Fox T, Comerford N, McFee W. Kinetics of phosphorus release from spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **56**: 290~294.
- [3] Nie Y L, Zheng Y, Lin K H. Effect of Root Exudates on Activation of Phosphates in Soils. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2002, **17**(3): 281~286.
- [4] Zhang En H, Huang G B, Huang P, et al. The effects of phosphorus application levels on the root growth and rhizosphere with intercropping system of spring wheat and soybean. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 1999, **8**(3): 35~38, 60.
- [5] Liu S L, Jie X L, Li Y T, et al. Advance of study on phosphorus bioavailability in the soil-plant rhizosphere. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, **11**(2): 178~182.
- [6] Liu J L, Zhang F S, Liao W H. Transformation of phosphorus in rhizosphere of wheat and effect of VAM on phosphorus transformation in rhizosphere of wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(1): 23~30.
- [7] Liu J Z, Li Z S, Li J Y. Utilization of Plant Potentialities to Enhance the Bio-efficiency of Phosphorus in Soil. *Eco-Agriculture Research*, 1994, **2**: 16~23.
- [8] Shen H, Shi W M, Wang X C, et al. Study on adaptation mechanism of different crops to low phosphorus stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(2): 172~177.
- [9] Gerke J. Phosphate, iron, and aluminium in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.*, 1992, **155**: 339~343.
- [10] Fox T R, N B Comerford and W W McFee. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 1763~1767.
- [11] Iyamuremye F, R P Dick and J Baham. Organic amendments and phosphorus dynamics III. Phosphorus speciation. *Soil Science*, 1996, **161**(7): 444~451.
- [12] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere-a critical review. *Plant Soil*, 1998, **205**(1): 25~44.
- [13] Lan M, N B Comerford and T R Fox, Organic anions effect on phosphorus release from spodic horizons. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1995, **59**: 1745~1749.
- [14] Kirk G J D, E E Santos and G R Findenegg. Phosphate solubilization by organic anion excretion from rice (*Oryza sativa* L.) growing in aerobic soil. *Plant and Soil*, 1999, **211**: 11~18.
- [15] Sagoe CI, T Ando, K Kouno, et al. Effects of organic acid treatment of phosphate rocks on the phosphorus availability to Italian ryegrass. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 1997, **43**: 1067~1072.
- [16] Shen H, X Wang, W Shi, et al. Isolation and identification of specific root exudates in elephantgrass in response to mobilization of iron and aluminum phosphates. *J. Plant Nutr.*, 2001, **24**(7): 1117~11130.
- [17] Fang S B, Pan J J, Yang W N, et al. Spatio-temporal distribution of fertility in vegetable soil in nanjing. *Soils*, 2003, **35**(6): 518~521.
- [18] Liu Y J, Lu Y, Chen J L, et al. phosphorus characteristics and loss risk assessment of vegetable garden soils in the suburbs of Guangzhou city. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, **11**(3): 237~240.
- [19] Wang C H, Zong Z Q, Li S X. Difference of several major nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, Sept., 2002, **13**(9): 1091~1094.
- [20] Zhou Y, Luo An C. Effect of organic manure on the quality of vegetables in plastic-sheet-covered sheds. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, **16**(4): 210~212.

- [21] Zheng C, Liao Z W, Liu K X, *et al.* Effects of fertilizer on agriculture and environment. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(1):132~134,150.
- [22] CRC. *Handbook of Chemistry and Physics*. 74th Edition. CRC Press, 1993~1994.
- [23] Yu Q Y, Li X L, Wang C H. Activation of low molecular weight organic-acid on soil phosphate. *Journal of Anhui Agrotechnical Teacher's College*, 2001, **15**(2):13~16.
- [24] Zheng Q R, Zhou X H, Liao B H, *et al.* Activation effects of low-molecular-weight organic acids on Al, F, P, Cu, Zn, Fe and Mn in soils of tea garden. *Journal of Tea Science*, 2001, **21**(1):48~52.
- [25] Chen Y H, Li F M. Effect of prganic acids on soil phosphate absorbing capacities. *Journal of Hubei Agricultural College*, 1998, **18**(2):121~124.
- [26] Lu W L, Wang J G, Chao Y P, *et al.* Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low-molecular-weight. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(4):494~499.
- [27] Yan w J, Kang Y, Zhang S, *et al.* The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China, 2000, **20**(2):97~101.

参考文献:

- [1] 沈宏, 严小龙. 低磷和铝毒胁迫条件下菜豆有机酸的分泌与累积. *生态学报*, 2002, **22**(3):387~394.
- [3] 聂艳丽, 郑毅, 林克惠. 根分泌物对土壤中磷活化的影响. *云南农业大学学报*, 2002, **17**(3):281~286.
- [4] 张恩和, 黄高宝, 黄鹏, 等. 不同供磷水平下粮豆间套种植对根系分布和根际效应的影响. *草业学报*, 1999, **8**(3):35~38,60.
- [5] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 等. 土壤-植物根际磷的生物有效性研究进展. *土壤与环境*, 2002, **11**(2):178~182.
- [6] 刘建玲, 张福锁, 谯文华. 不同品种小麦根际磷转化及 VA 菌根对小麦根际磷转化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(1):23~30.
- [7] 刘建中, 李振声, 李继云. 利用植物自身潜力提高土壤中磷的生物有效性. *生态农业研究*, 1994, **2**:16~23.
- [8] 沈宏, 施卫明, 王校常, 等. 不同作物对低磷胁迫的适应机理研究. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(2):172~177.
- [17] 房世波, 潘剑君, 杨武年, 等. 南京市郊蔬菜地土壤肥力的时空变化规律. *土壤*, 2003, **35**(6):518~521.
- [18] 刘远金, 卢瑛, 陈俊林, 等. 广州城郊菜地土壤磷素特征及流失风险分析. *土壤与环境*, 2002, **11**(3):237~240.
- [19] 王朝辉, 宗志强, 李生秀. 菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异. *应用生态学报*, 2002, **13**(9):1091~1094.
- [20] 周焱, 罗安程. 有机肥对大棚蔬菜品质的影响. *浙江农业学报*, 2004, **16**(4):210~212.
- [21] 郑超, 廖宗文, 刘可星. 试论肥料对农业与环境的影响. *生态环境*, 2004, **13**(1):132~134,150.
- [23] 于群英, 李孝良, 汪春华. 低分子量有机酸对土壤磷素的活化效应. *安徽农业技术师范学院学报*, 2001, **15**(2):13~16.
- [24] 曾清如, 周细红, 廖柏寒, 等. 低分子量有机酸对茶园土壤中 Al、F、P、Cu、Zn、Fe、Mn 的活化效应. *茶叶科学*, 2001, **21**(1):48~52.
- [25] 陈宇晖, 李方敏. 有机酸对土壤磷吸附的影响. *湖北农学院学报*, 1998, **18**(2):121~124.
- [26] 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):494~499.
- [27] 晏维金, 亢宇, 章申, 等. 磷在土壤中的解吸动力学. *中国环境科学*, 2000, **20**(2):97~101.