

柠檬酸存在下施硅对土壤磷吸附和解吸特性影响

张广才¹, 王佼¹, 张昀¹, 燕香梅^{1,2}, 关连珠¹

(1. 沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 沈阳市农业检测中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:以棕壤为研究对象,采用室内培养的方法,通过加硅酸钙处理、硅酸钙+1 mmol/L 柠檬酸处理和硅酸钙+2 mmol/L 柠檬酸处理,研究了柠檬酸存在下施硅对棕壤中磷素吸附和解吸特性的影响,并用 Langmuir 方程、Freundlich 方程与 Temkin 方程对其进行拟合分析,其中磷吸附解吸试验采用恒温批处理平衡法。结果表明,Langmuir 与 Temkin 模型对处理后棕壤磷的吸附拟合效果最好。硅酸钙+1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的吸附量最大,为 500 mg/kg;硅酸钙+2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的解吸量及解吸率最大,最大解吸率可达 45.2%。因此,硅酸钙+1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷肥的储存能力最强,硅酸钙+2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷活化能力最强,即供磷能力最强。

关键词:柠檬酸; 硅; 土壤磷; 吸附; 解吸

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0049-04

中图分类号: S151

Characteristics of Phosphorus Adsorption and Desorption in Brown Soil with Presence of Citric Acid and Silicon Fertilizer

ZHANG Guang-cai¹, WANG Jiao¹, ZHANG Yun¹, YAN Xiang-mei^{1,2}, GUAN Lian-zhu¹

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China; 2. Shenyang Centre for Agriculture Detection, Shenyang, Liaoning 110034, China)

Abstract: Laboratory experiment with different kinds of treatments on textured brown soil, namely original soil + calcium silicate(CaSiO₃), original soil + 1 mmol/L citric acid+CaSiO₃ and original soil+2 mmol/L citric acid+CaSiO₃, was conducted to investigate the characteristics of soil phosphorus(P) adsorption and desorption in the presence of citric acid and silicon fertilizer by Langmuir, Freundlich and Temkin equation fittings. The OECD Guideline106 batch equilibrium method was used for adsorption and desorption experiments. Results showed that the brown soil P adsorption fitted Langmuir and Temkin models better. The soil added calcium silicate and 1 mmol/L citric acid treatment had the maximum adsorbed P, with the maximum adsorption capacity of 500 mg/kg. The soil with calcium silicate and 2 mmol/L citric acid treatment had the greatest desorption rate of P, with the maximum desorption rate of 45.2%. Therefore, the soil added calcium silicate and 1 mmol/L citric acid treatment had the strongest storage capacity for P, and the soil added calcium silicate and 2 mmol/L citric acid treatment had the strongest activation ability and supply capacity of P.

Keywords: citric acid; silicon; soil phosphorus; adsorption; desorption

磷是植物生长发育所必需的大量元素,我国磷肥产量与施用量均居世界首位^[1],但当季植物利用率一般不超过 20%^[2],如何提高磷肥利用率一直是农田土壤养分研究的热点之一,而有机酸及其相应的阴离子在根际中具有重要化学意义也已得到证实^[3],因此,柠檬酸对磷吸附解吸的研究也倍受关注。对于缺磷土壤,我国学者主要致力于解决因土壤吸附而造成磷素有效性降低的风险和由于土壤磷解吸而造成磷养分流失以及可能带来的水环境污染等问题^[4]。针

对以上热点问题,本试验采用室内培养的方法在土壤中加入柠檬酸和硅酸钙,研究加柠檬酸和硅酸钙处理后土壤对磷吸附与解吸特性,旨在阐明柠檬酸存在下施硅对土壤磷素吸附与解吸特性方面的影响,为农田土壤磷素管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试棕壤采自沈阳农业大学天柱山,采集时间为

收稿日期:2012-10-12

修回日期:2012-12-03

作者简介:张广才(1972—),男(汉族),黑龙江省密山市人,博士,副教授,主要从事土壤肥力、农业环境与生态、植物营养诊断与优化配方施肥研究。E-mail:guangcaizhang@163.com。

通信作者:关连珠(1960—),男(锡伯族),教授,博士生导师,主要研究方向为土壤肥力、土壤化学和农业环境与生态。E-mail:glz1960@163.com。

2011 年 10 月,耕层深度为 0—20 cm,风干,过 1 mm 筛备用。

供试土壤的化学性质如表 1 所示。供试药品柠檬酸、硅酸钙均为分析纯试剂。

1.2 试验方法

1.2.1 培养方法 试验采用室内培养方法,培养共

设以下 4 个处理,分别加水调节至田间持水量的 65%,于 25 °C 培养箱中培养,定期称重、补水,2 周后风干、取样。处理 1:600 g 原土(空白);处理 2:600 g 原土+0.6 g/kg CaSiO₃;处理 3:600 g 原土+柠檬酸(1 mmol/L)+0.6 g/kg CaSiO₃;处理 4:600 g 原土+柠檬酸(2 mmol/L)+0.6 g/kg CaSiO₃。

表 1 供试土壤的化学性质

有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效硅/ (mg·kg ⁻¹)	有效氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
15.45	1.10	0.55	32.79	97.40	12.12	129.00	6.50

1.2.2 测试方法 磷吸附解吸试验采用恒温批处理平衡法:称取 1 mm 风干土 2.00 g 于 100 ml 离心管中,分别准确加入含磷为 0, 10, 20, 30, 40, 50 mg/kg 的溶液(以 0.01 mol/L KCl 为平衡电解质, pH 值 7) 50 ml。每管加甲苯 3 滴,以抑制微生物活动,密封后于 25 °C 下连续振荡 24 h,以 4 000 r/min 离心 10 min 后取出上清液并测定清液中磷浓度,此为平衡浓度。初始浓度与平衡液浓度差即为磷吸附浓度,以此计算土壤磷吸附量,并作等温吸附曲线。弃去离心管中上清液,并用饱和 NaCl 溶液洗涤已做过等温吸附试验后的土样 2 次,加入 pH 值 7 的 0.01 mol/L KCl 溶液 50 ml,同时加 2 滴甲苯以抑制微生物的活动,在 25 °C 下震荡 24 h,离心后取出上清液并测定清液中磷浓度,此平衡浓度即为土壤磷解吸浓度,以此来计算土壤磷解吸量,平衡溶液中磷浓度采用钼蓝比色法测定^[5]。以平衡溶液中磷的浓度为横坐标,以土壤磷的吸附量(解吸量)为纵坐标绘制磷的等温吸附(解吸)曲线。根据试验结果拟合等温吸附方程。

1.3 数据处理

等温吸附方程反映了在一定温度条件下吸附反应达到平衡时,吸附液中吸附溶质的浓度和吸附溶质在吸附剂上的吸附量的对应关系。一般常用方程有 Langmuir 方程、Freundlich 方程与 Temkin 方程 3 种经验式^[6-8]:

Langmuir 方程式:

$$c/Q = 1/(kQ_m) + c/Q_m \quad (1)$$

式中:Q——单位土壤吸磷量(mg/kg); c——平衡液中磷的浓度(mg/l); Q_m——最大吸磷量(mg/kg); k——吸附结合能常数。下同。

Freundlich 方程式:

$$\lg Q = \lg K_f + 1/n \lg c \quad (2)$$

式中:K_f——吸附容量,但不代表最大吸附量,其值

越大,则表示吸附速率越快; 1/n——吸附的非线性程度以及吸附机理的差异。

Temkin 方程式:

$$Q = a + blnc \quad (3)$$

式中:a——c 为 1 mg/L 时的磷吸附量(mg/kg); b——吸附曲线斜率。

土壤最大缓冲容量 MBC(mg/kg) 为 Langmuir 方程中 k 与 Q_m 的乘积,即 MBC = kQ_m^[9]。

2 结果与讨论

2.1 磷的等温吸附曲线

吸附等温线是指在温度恒定的条件下,土壤从溶液中吸附离子的量与平衡溶液离子浓度之间的关系曲线,它是吸附过程本质的反映^[10]。不同处理棕壤磷的等温吸附曲线见图 1。

由图 1 可看出,不同处理棕壤对磷吸附量的变化趋势基本一致,即随着平衡浓度的增加磷吸附量逐渐增大。当加入磷浓度为 10~20 mg/L 时,等温吸附线的斜率较大,即曲线较陡的部分,此时为土壤对磷的快速吸附阶段,其原因可能在于土壤中无定形铁、铝对磷的化学吸附及黏粒上盐基离子对磷的共价吸附。当加入磷浓度达到 20 mg/L 时,等温吸附曲线趋于平缓但尚未达到饱和,吸附量增加较慢,这一阶段为土壤的慢速吸附阶段,可能由土壤对磷的物理化学吸附和物理吸附所引起^[10-13],由等温吸附曲线具有快速反应阶段及慢速反应阶段这种现象可说明该土壤各不同处理磷的吸附均存在着不同的结合能吸附点位和区域。从图 1 中各处理等温吸附线之间的比较可以看出加入磷浓度为 10~40 mg/L 时,磷的吸附量为处理 3>处理 2>处理 1>处理 4,而当加入磷浓度达到 40 mg/L 时,磷的吸附量为处理 3>处理 2>处理 4>处理 1。

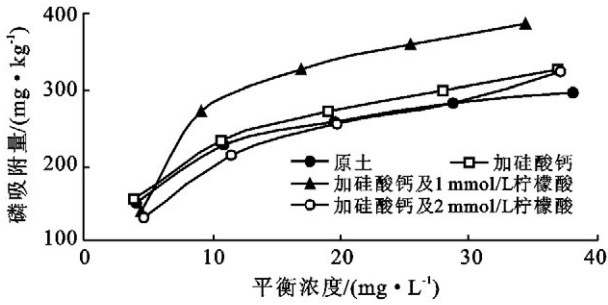


图 1 不同处理棕壤的磷吸附等温曲线

2.2 柠檬酸及硅酸钙处理棕壤对磷的吸附特性

Langmuir 方程中的吸附常数 k 在一定程度上反映了土壤吸附磷的能级。 k 为正值,说明反应在常温下能自发进行; k 值的大小反映该吸附反应的自发程度, k 值越大,反应的自发程度愈强,生成物愈稳定,对磷的吸附能力较强,而供磷能力较弱。最大缓冲容量 MBC 是磷吸附的强度与容量 2 个因子的综合参数,一般认为它能较好地表征土壤的吸磷特征,该值越大,说明土壤贮存磷的能力越强^[14]。供试土壤对磷的吸附特性采用 Langmuir, Freundlich 与 Temkin 这 3 种经验方程式进行拟合。由表 2 可看出,4 种处

理方式中供试土壤磷等温吸附曲线与 3 种吸附方程均能很好的吻合,其决定系数 r^2 在 0.893 8~0.999 4,均达到显著或极显著水平,其中 Langmuir 和 Temkin 拟合效果最好。因此,用这 3 种方程来描述土壤磷素在固相与液相之间的分配特征并由此计算其他的一些相关参数是完全可行的。由表 2 可知,4 种处理棕壤对磷的吸附反应均可在常温下自发进行。由 Langmuir 方程拟合参数 Q_m 可知最大吸附量为处理 3>处理 4>处理 2>处理 1,即加硅酸钙和 1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的吸附量最大,为 500 mg/kg;由吸附结合能 k 值和 MBC 值也可看出,处理 3 的吸附能力和储存能力最强,即加硅酸钙和 1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的吸附能力和储存能力最强。这一结果与处理 3 的吸附量最大相一致,且此结果与胡红青等^[15]的研究结果也一致,即有机酸浓度减小,土壤的吸磷量增加。由 Freundlich 拟合参数中 K_f 可知吸附速率为处理 1>处理 2>处理 3>处理 4,即原土对磷的吸附速率最快。由于各处理 $1/n$ 值均小于 1,因此各处理的吸附等温曲线均属于 L 型曲线。

表 2 不同处理棕壤的磷吸附等温拟合参数

处理	Langmuir ($c/Q=1/(kQ_m)+c/Q_m$)				Freundlich ($\lg Q=\lg K_f+1/n\lg c$)			Temkin ($Q=a+b\ln c$)		
	Q_m	k	MBC	r^2	K_f	$1/n$	r^2	a	b	r^2
处理 1	333.33	0.022	7.31	0.999 4**	122.74	0.321	0.963 1**	-0.908	0.012	0.988 9**
处理 2	370.37	0.023	8.36	0.995 8**	103.68	0.324	0.987 2**	-0.756	0.0134	0.997 6**
处理 3	500.00	0.026	13.02	0.985 1**	78.70	0.478	0.893 8*	0.233	0.008 2	0.958 8**
处理 4	400.00	0.016	6.30	0.989 9**	71.96	0.420	0.981 4**	0.089	0.011 1	0.990 0**

注: * 和 ** 分别表示拟合决定系数达到显著和极显著水平 ($n=5, r_{0.05}^2=0.770 9, r_{0.01}^2=0.919 7$)。

2.3 柠檬酸及硅酸钙处理棕壤对磷的吸附量及吸附率的影响

由表 3 可知,随着吸附量的增加,吸附率逐渐降低。处理 1 的吸附率在 23.8%~60.2%,处理 2 的吸附率在 26.3%~62.3%,处理 3 的吸附率在 31.1%~55.5%,处理 4 的吸附率在 26.1%~53%。由此可看出处理 1 的吸附率变化范围最大,处理 3 的吸附率

变化范围最小,因此处理 3 的吸附量随加入磷浓度的增加增长幅度最大,处理 1 的吸附量随加入磷浓度的增加增长幅度最小。

各处理之间进行比较可知在加入磷浓度为 10 mg/L 时,处理 2 的吸附率最大,为 62.3%;在加入磷浓度为 50 mg/L 时,处理 1 的吸附率最小,为 23.8%。

表 3 不同处理棕壤的磷吸附量及吸附率

加入磷浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	处理 1		处理 2		处理 3		处理 4	
	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	吸附率/ %	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	吸附率/ %	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	吸附率/ %	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	吸附率/ %
10	149.99	60.20	154.63	62.30	138.60	55.5	132.26	53.00
20	229.89	46.10	234.53	47.00	272.91	54.70	214.55	43.00
30	259.99	34.70	273.79	36.70	327.56	43.70	257.58	34.40
40	282.37	28.30	299.42	30.00	360.94	36.20	282.58	28.30
50	297.19	23.80	328.12	26.30	388.15	31.10	325.11	26.10

2.4 磷的解吸率曲线变化

由图 2 可看出,4 个处理磷解吸率曲线变化趋势基本一致,即随着平衡浓度的增加磷解吸率逐渐增大。其中处理 1 和处理 2 在加入磷浓度为 10~20 mg/L 时,磷解吸率增长幅度较小;当加入磷浓度达到 20 mg/L 时,磷解吸率增长幅度加大;而处理 3 和处理 4 磷解吸率随加入磷浓度的增加迅速增大。从整体上看,加硅酸钙及 2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的解吸效果最好;而加硅酸钙及 1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的解吸率最低。

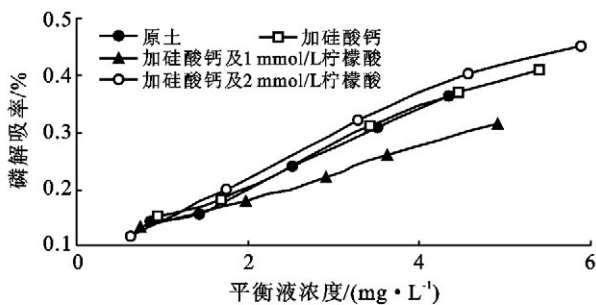


图 2 不同处理棕壤的磷解吸率曲线比较

2.5 柠檬酸及硅酸钙处理棕壤对磷的解吸量及解吸率的影响

土壤磷解吸过程关系到被吸附磷的再利用问题。

解吸率的增大是有效提高土壤磷有效性、解决磷污染环境等问题的一个重要途径^[16]。从表 4 可看出,被吸附的磷均能在一定条件下被解吸下来,且随着加入磷浓度的增加,解吸量也有增加的趋势。从整体上看,随着加入磷浓度的增加,磷解吸量表现为处理 4 > 处理 2 > 处理 3 > 处理 1。土壤磷解吸率为解吸磷量占解吸前吸附磷量的百分数,可用于指示土壤的保肥能力。解吸率越小,土壤解吸的磷量越少,对于植物来说可利用的磷也越少^[11]。由表 4 可知,解吸量随着加入磷浓度的增加逐渐增大,其中处理 4 对磷的解吸率在加入磷浓度为 50 mg/L 时最大为 45.2%,在加入磷浓度为 10 mg/kg 时最小为 11.7%。从整体上来看,随着加入磷浓度的增加,磷解吸率表现为处理 4 > 处理 2 > 处理 1 > 处理 3,因此加硅酸钙及 2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的活化能力最强。这一结果的产生可能与不同浓度柠檬酸的加入对硅酸钙的活化效果不同有关。其中 2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对硅酸钙的活化作用大于 1 mmol/L 柠檬酸处理棕壤对硅酸钙的活化,又因土壤硅素和磷素化学性质和结构的相似性而存在着相互促进肥效的关系^[17],因此硅酸钙进入土壤后的活化效果与其对磷素的活化能力存在着必然的联系,且对硅酸钙活化效果强的土壤对磷素的活化能力也增强。

表 4 不同处理棕壤的磷解吸量及解吸率变化

加入磷浓度/ (mg·L ⁻¹)	处理 1		处理 2		处理 3		处理 4	
	解吸量/ (mg·kg ⁻¹)	解吸率/ %	解吸量/ (mg·kg ⁻¹)	解吸率/ %	解吸量/ (mg·kg ⁻¹)	解吸率/ %	解吸量/ (mg·kg ⁻¹)	解吸率/ %
10	21.13	14.10	23.36	15.10	18.50	13.40	15.51	11.70
20	35.84	15.60	42.05	17.90	50.56	18.50	43.09	20.10
30	62.69	24.10	85.68	31.30	74.27	22.70	82.80	32.10
40	87.71	31.10	111.43	37.20	90.78	26.20	114.32	40.50
50	108.32	36.40	134.44	41.00	122.81	31.60	146.79	45.20

3 结论

加硅酸钙处理的棕壤可以促进磷的活化,增加对磷肥的储存能力,这一研究结果与前人的研究成果相一致。

由吸附试验可知 Langmuir 与 Temkin 模型拟合效果最好。该土壤各不同处理磷的吸附均存在着不同的结合能吸附点位和区域,各处理吸附等温曲线均属于 L 型曲线。硅酸钙及 1 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的吸附量最大,为 500 mg/kg,且对磷的吸附能力最强,对磷的储存能力也最强;这一结果与胡红青等^[15]的研究结果相一致,即在相同磷浓度下,有机酸浓度减小,土壤的吸磷量增加;有机酸与磷的浓度比是有机酸影响磷吸附量的重要因素。由本试验

还可知,加入硅酸钙的土壤仍适用有机酸与磷浓度比对磷吸附量影响之间的关系。

由解吸试验可知,硅酸钙及 2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的解吸量及解吸率最大,原土对磷的解吸量最小,硅酸钙及 1 mmol/L 柠檬酸处理棕壤对磷的解吸率最小,因此,加硅酸钙和 2 mmol/L 柠檬酸处理的棕壤对磷的活化能力最强。这一结果的产生可能与不同浓度柠檬酸的加入对硅酸钙的活化效果不同有关。土壤硅素和磷素化学性质和结构的相似性使两者存在着相互促进肥效的关系,因此硅酸钙进入土壤后的活化效果与其对磷素的活化能力存在着必然的联系,但柠檬酸浓度是否是影响这一结果的主要因素仍需进一步探讨。

(下转第 134 页)

酸混施不仅不影响各自的增产效果,还能够产生交互作用,增产效果更加明显。结果与 Wallace 等^[12]和符云鹏^[13]等结果一致。

作物水分利用效率是由耗水量和作物产量共同决定的。通过增加产量可以提高作物水分利用效率,降低土壤及作物水分的无效蒸发和蒸腾也能达到同样的目的。亢秀丽等^[14]认为自然降水中有 60%~70%会形成无效蒸发,将这 60%~70%的无效降水变为作物可利用水是提高水分利用率的关键。本试验表明各土壤改良剂处理水分利用效率均显著高于对照,其变化趋势与产量变化趋势一致,聚丙烯酸钾、聚丙烯酸钾+腐殖酸钾、聚丙烯酰胺、聚丙烯酰胺+腐殖酸钾和腐殖酸钾分别较对照提高了 15.61%, 27.12%, 10.31%, 17.76%和 6.38%,其中复配处理燕麦水分利用效率效果最佳,说明复配能够更好地降低燕麦全生育期耗水,使土壤水分得到更多的补充。

[参 考 文 献]

- [1] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1996:126-130.
- [2] Buttery B R, Tan C C, Drury C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean[J]. Can. J. Plant Sci., 1998, 78(4):571-576.
- [3] 王久志. 土壤结构改良剂覆盖改土作用的研究[J]. 干旱

地区农业研究, 1991(2):48-56.

- [4] 叶协锋, 凌爱芬, 张斌, 等. 腐殖酸对烤烟土壤性状及烟叶品质的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(5):170-173.
- [5] 吴增芳. 土壤结构改良剂[M]. 北京:科学出版社, 1976: 24-34.
- [6] 刘洋, 张玉焯, 王学华, 等. 覆盖方式对旱作水稻干物质积累的影响[J]. 作物研究, 2010, 24(1):83-86.
- [7] 张燕, 冯浩, 吴普特, 等. 新型土壤改良剂对夏玉米生理生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5):110-112.
- [8] 杨永辉, 武继承, 李宗军, 等. 保水剂对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3):173-178.
- [9] 廖佳丽, 徐福利, 赵世伟. 不同保水剂对宁南山区马铃薯生长发育和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(1): 238-242.
- [10] 黄占斌, 朱元骏, 李茂松, 等. 保水剂聚丙烯酸钠不同施用方法对玉米生长和水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5/6):576-579.
- [11] 徐和德. 腐殖酸类肥料的刺激作用[J]. 化学通报, 1978(6):38-42.
- [12] Wallace A, Abouzamam A M. Interactions of soil conditioner with other limiting factors to achieve high crop yields[J]. Soil Soc., 1986, 141(5):343-345.
- [13] 符云鹏. 腐殖酸和生物钾对烤烟的效应研究[J]. 河南农业科学, 1999(8):14-15.
- [14] 亢秀丽, 王娟玲, 马爱平, 等. 冬小麦田间集雨模式对土壤水分动态和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):167-170.

(上接第 52 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5):1158-1165.
- [2] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社, 1998:112-119.
- [3] Fox T R, Comerford N B. Influence of oxalate loading on phosphorus and aluminum solubility in spodosols [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(1):290-294.
- [4] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤, 2003, 35(4):298-303.
- [5] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 6(6):1034-1038.
- [6] 于群英, 李孝良. 土壤对硅的吸附与解吸特性研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999, 13(3):1-6.
- [7] 刘新程, 董元华. 金霉素在不同耕作土壤中的吸附-解吸行为[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):861-868.
- [8] 钱多, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融作用对棕壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):279-283.
- [9] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2009, 15(6):1303-1310.

- [10] 熊毅. 土壤胶体:土壤胶体研究法(第 2 册)[M]. 北京:科学出版社, 1985:515-528.
- [11] 曹志洪, 李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3):218-226.
- [12] Holford I C R, Mattingly G E G. The high- and low-energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils [J]. J. of Soil Sci., 1975, 26(4):407-417.
- [13] Brennan R F, Bolland M D A, Jeffery R C, et al. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25(15/16):2785-2795.
- [14] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11):1369-1374.
- [15] 胡红青, 贺纪正, 李学垣, 等. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(1):37-42.
- [16] 郭晓东, 张雪琴, 杨玲. 甘肃省主要农业区土壤对磷的吸附与解吸特性[J]. 西北农业学报, 1997, 6(2):7-12.
- [17] Anderson D L, Snyder G H, Warren J D. Availability of phosphorus in calcium silicate slag[J]. Commun. in Soil Sci. and Plant Anal., 1992, 23(9/10):907-918.