

三峡库区消落带土壤中施用磷肥对环境 激素铅吸附-解吸的影响

方卢秋, 田 足

(长江师范学院 化学化工学院, 重庆 涪陵 408100)

摘 要:采用室内模拟施肥、恒温振荡平衡法研究了磷肥种类、磷肥浓度、铅离子浓度、离子强度和酸度影响三峡库区消落带土壤对铅离子的吸附量和解吸量。结果表明:(1)磷肥种类与铅离子的吸附量和解吸量显著相关,施用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 使铅离子的吸附量和解吸量相对较小;(2)土壤铅离子的吸附量和解吸量与施用磷肥浓度呈显著相关,建议选用磷酸二氢钙、磷酸二氢铵、磷酸二氢钾 3 种磷肥,施用量在 $3.406\ 6\sim 8.516\ 4\ \text{kg P}_2\text{O}_5\cdot 666.6\ \text{m}^{-2}$ 之间较为合适;(3)铅离子浓度极显著地影响土壤吸附和解吸铅离子,随着铅离子浓度的增加,吸附量和解吸量都呈逐渐增加的趋势;(4)离子强度和酸度都极显著地影响土壤吸附和解吸铅离子,建议选用磷酸二氢钙盐、钾盐和铵盐作为磷肥,可以减小土壤铅离子的环境风险。

关键词:三峡库区;消落带;磷肥;铅离子;吸附量;解吸量

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0923-07

Effects of Phosphate Fertilizer on Environmental Hormone Pb Adsorption-Desorption in Soil of the Water-Level-Fluctuating Region of Three Gorges Reservoir, China

FANG Lu-qiu, TIAN Zu

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: The type of phosphate fertilizer, concentration of phosphate fertilizer, concentration of Pb ion, ionic strength, acidity on soil's Pb ion adsorption capacity and desorption capacity in water-level-fluctuating of Three-Gorge reservoir region were investigated by using constant temperature oscillation balance and simulation of indoor fertilization method. The results were as following: (1) The type of phosphate fertilizer had a significant related to adsorption capacity and desorption capacity of Pb ion, application of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ made Pb ion's adsorption capacity and desorption capacity relatively small. (2) Pb ion's adsorption capacity and desorption capacity had a close relation with phosphate fertilizer's concentration. Selecting three kinds of phosphate fertilizer $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KH_2PO_4 was advised. $3.406\ 6\sim 8.516\ 4\ \text{kg P}_2\text{O}_5\cdot 666.6\ \text{m}^{-2}$ as the best fertilization capacity of phosphate fertilizer was more appropriate. (3) Soil adsorption and desorption Pb ion had a close relation with Pb ion's concentration. With increasing of Pb ion's concentration, adsorption capacity and desorption capacity assumed an uptrend. (4) The influence of ionic strength and acidity on soil adsorption and desorption Pb was extremely significant. Selection of salt of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KH_2PO_4 as a phosphate fertilizer to the soil to reduce the environmental risks was recommended. In short, the conventional application of the type of phosphate calcium dihydrogen phosphate, at the national scope of recommended fertilizer is safe.

Keywords: Three-Gorge reservoir region; water-level-fluctuating; phosphate fertilizer; Pb ion; adsorption capacity; desorption capacity

铅是重金属类环境激素之一,铅离子会直接被作物吸收,残留在作物的各个部位,其含量随着土壤中铅离子含量的增加而提高,可通过食物链进入人体,

危害人类健康,具有长期性、隐蔽性和不可逆性的特点^[1]。三峡库区消落带是库区陆域与水域之间的生态过渡带与缓冲带,消落带(145~175 m)总面积 348.93 km²,其中,重庆段消落带面积 306.28 km²,占库区消落带总面积的 87.78%。三峡库区消落带包含有多种功能的土地资源类型,在人地矛盾突出的今天,对它的利用是十分必要的^[2-4]。要安全利用三峡库区消落带

收稿日期:2009-09-12

基金项目:重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ071304)

作者简介:方卢秋(1965—),男,四川遂宁人,副教授,主要研究方向为化学发光分析和环境化学。E-mail:flq51021519@163.com

的土地资源,重金属铅污染的程度至关重要。施用化肥是促进农业生产的重要技术措施,大量的化肥进入土壤会改变土壤的 pH 值、表面电荷和离子强度等性质,土壤性质的改变将会直接影响到土壤对重金属元素的吸附-解吸行为^[5]。陈世宝等^[6]研究了添加羟基磷灰石对土壤吸附-解吸铅的影响,结果表明:土壤中加入羟基磷灰石明显增加了土壤对铅的吸附量和吸附亲和力,同时降低了土壤中铅的解吸百分数。而施用磷肥对三峡库区消落带土壤吸附和解吸铅离子的影响研究,尚未见文献报道。

研究环境污染物在土水两相介质中吸附与解吸过程的方法主要有:静态振荡平衡法和动态土壤柱法^[7]。本文以三峡库区小江流域消落带的紫色土为研究对象,参考相关研究资料^[8],采用室内模拟施肥、恒温振荡平衡法研究了施用磷肥对三峡库区消落带土壤中环境激素铅吸附和解吸的影响,研究结果可为三峡库区消落带土壤中重金属铅污染的风险评价和预测、防治提供一定的理论依据;同时,从土壤环境保护与农产品安全生产角度,对消落带土壤利用中磷肥最佳施用量的研究,在土壤治理、恢复生态和绿色农业种植等工作上具有重要的现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试剂与仪器

主要试剂:硝酸铅(分析纯,重庆北碚化学试剂厂);磷酸二氢钾(分析纯,成都市科龙化工试剂厂);磷酸氢二钾(分析纯,上海试剂二厂);磷酸氢钙(分析纯,重庆北碚化学试剂厂);磷酸二氢钙(化学纯,上海化学试剂总厂);磷酸氢二铵(分析纯,重庆南岸应用化学研究所);磷酸二氢铵(化学纯,重庆化学试剂厂);其他试剂均为分析纯,实验所用水为重蒸馏水。

主要仪器:台式恒温振荡器(型号 THZ-D,太合市实验设备厂);生化培养箱(型号 SHH-250L,重庆市永生实验仪器厂);台式离心机(型号 TDL80-2B,上海安亭科学仪器厂);电子天平(型号 EL104,梅特勒托利多仪器(上海)有限公司);火焰原子吸收分光光度计(型号 Z-5000,日本日立高新技术有限公司)。

1.1.2 土壤

土壤为紫色土,采自重庆市开县澎溪河(小江流域)丰乐街道原乌杨村 4 社,水位调节坝下游 1 000 m 左右的消落带内,多点随机采样,采集深度为 0~20 cm 的耕作层。土壤样品经去杂、自然风干后碾细,过 0.25 mm 筛,贮存于广口瓶中,在 104~105 ℃烘干 8 h 后冷却备用。按常规方法测定土壤样品的基本理化性质,结果见表 1。土壤中铅的含量低于国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的一级标准。

1.2 试验方法

Pb²⁺储备液的配制:称取硝酸铅 0.322 9 g,用 0.02 mol·L⁻¹ 的硝酸溶解定容于 100 mL 棕色容量瓶中,配成 2.0 g·L⁻¹ 的储备液。

磷肥储备液的配制:以 P₂O₅ 为计算依据,配制不同浓度的磷肥溶液。称磷酸二氢钙固体 0.274 0 g,加水溶解定容于 100 mL,配成含 P₂O₅ 为 0.01 mol·L⁻¹ 的储备液;称取 0.351 2 g 磷酸氢钙,用 1.111 1 mol·L⁻¹ 的硝酸溶解定容于 100 mL,配成含 P₂O₅ 为 0.01 mol·L⁻¹ 的储备液;称磷酸二氢铵固体 23.121 6 g,加水溶解定容至 100 mL,配成含 P₂O₅ 为 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液;称磷酸氢二铵固体 26.951 2 g,加水溶解定容于 100 mL 容量瓶中,配成含 P₂O₅ 为 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液;称磷酸二氢钾固体 27.354 8 g,用水溶解定容于 100 mL,配成含 P₂O₅ 为 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液;称磷酸氢二钾固体 46.105 0 g,用水溶解定容于 100 mL,配成含 P₂O₅ 为 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液。

支持电解质储备液的配制:称 8.499 0 g 硝酸钠固体,用水溶解定容到 100 mL,配成 1 mol·L⁻¹ 的储备液。

酸碱储备液的配制:吸取浓硝酸 68.19 mL,用水稀释至 1 L,配成 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液。称取氢氧化钠固体 20.0 g,加水溶解定容于 500 mL 容量瓶中,配成 1.0 mol·L⁻¹ 的储备液。在 1 000 mL 的烧杯中加入 800 mL 重蒸馏水,用酸度计精确测定 pH 值,滴加硝酸或氢氧化钠溶液,准确配制 pH 值为:1、2、3、4、5、6、7 的系列酸度溶液。

吸附试验:按照试验设计方案(表 2),每个试验处理:称取 0.500 0 g 土样于 15 mL 塑料离心管中,加

表 1 土壤样品的理化性质

Table 1 Physic-chemical characteristics of the tested soils

pH 值/ (土:水=1:1)	有机质	CEC/ cmol·kg ⁻¹	碱解氮 N/ mg·kg ⁻¹	有效磷 P ₂ O ₅ / mg·kg ⁻¹	有效钾 K ₂ O/ mg·kg ⁻¹	总磷 P ₂ O ₅ / g·kg ⁻¹	总铅 Pb ²⁺ / mg·kg ⁻¹	有效铅 Pb ²⁺ / mg·kg ⁻¹
7.36	2.07%	22.72	69.68	20.18	144.74	1.72	31.86	1.03

入支持电解质 NaNO_3 、相应浓度的磷肥溶液、铅离子溶液、一定酸度的水溶液以及重蒸馏水,试验混合溶液总体积为 10.0 mL,混合溶液在 25 ℃和 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下振荡 2 h,25 ℃恒温培养 22 h,以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,倾尽离心上清液用于分析吸附平衡溶液中铅离子浓度。

解吸试验:吸附试验完成后,在余下的土样中加入相应浓度的磷肥溶液、支持电解质 NaNO_3 、一定酸度的水溶液和重蒸馏水使溶液总体积为 10.0 mL,再以 25 ℃和 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件振荡 2 h,在 25 ℃恒温培养 22 h,以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,倾出上清液用于分析解吸平衡溶液中铅离子含量,采用原子吸收火焰法测定铅离子的含量。

试验混合溶液中磷肥施用浓度与实际磷肥施用量的关系见表 3。

表 3 溶液中磷肥施用浓度与实际磷肥施用量的关系							
Table 3 Relationship of phosphate fertilizer concentration							
磷肥施用浓度/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	CK	4×10^{-6}	6×10^{-6}	8×10^{-6}	2×10^{-5}	4×10^{-5}	
磷肥施用量 P_2O_5 / $\text{kg}\cdot 666.6\text{ m}^{-2}$	0	1.703 3	2.554 9	3.406 6	8.516 4	17.032 8	

2 结果与讨论

2.1 磷肥种类对铅的吸附解吸影响

磷肥溶液试验浓度参考田间推荐施肥量进行确定,以 P_2O_5 计算,在相同有效养分条件下,选用常见的磷肥种类进行试验,结果如图 1。

在吸附试验中,土壤对铅离子的吸附量大小顺序为:磷酸氢二铵>磷酸氢二钾>磷酸二氢钾>对照>磷酸二氢钙>磷酸二氢铵>磷酸氢钙,差异性显著 ($P<0.05$)。磷酸氢二铵的影响下,土壤对铅离子的吸附量最大值为 $7.358\,6\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照增加 3.566%。磷酸氢

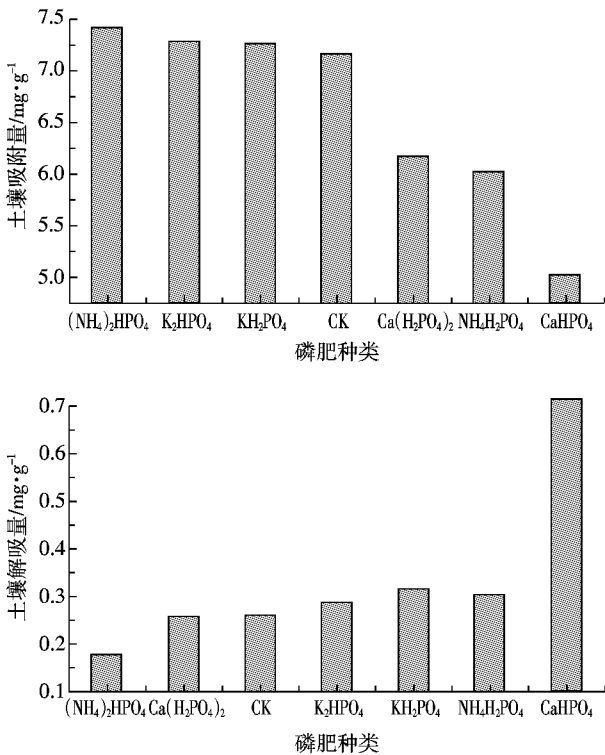


图 1 磷肥种类对铅的吸附-解吸影响
Figure 1 Effect of the type of phosphate fertilizer on Pb^{2+} adsorption-desorption

钙的影响下,土壤对铅离子的吸附量最小值为 $4.965\,4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照减少 30.116%。磷酸钾盐和铵盐高于对照,提高了土壤对铅离子的吸附能力,而磷酸钙盐抑制土壤对铅离子的吸附,对防止土壤铅污染有利。这可能是一价的铵离子、钾离子比二价的钙离子、铅离子的阳离子交换能力弱,在磷酸铵盐、钾盐混合溶液中铅离子易被土壤胶体吸附,土壤吸附量较大,而钙离子的阳离子交换力大于铅离子,所以,磷酸的钙盐存在时,土壤吸附铅离子减小。

在铅离子吸附试验中,整体上含 Ca^{2+} 的磷肥影响

表 2 试验设计方案			
Table 2 Experimental protocols			
项目	试验方案	备注	
磷肥种类的影响	每 666.6 m^2 土壤重量模数为 15 万 kg,施用 P_2O_5 纯养分量为 5.0 kg,各种磷肥中 P_2O_5 的试验浓度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	支持电解质 NaNO_3 为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb^{2+} 浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
磷肥浓度的影响	磷肥浓度设为 7 个: $0, 2\times 10^{-6}, 4\times 10^{-6}, 6\times 10^{-6}, 8\times 10^{-6}, 2\times 10^{-5}, 4\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	支持电解质 NaNO_3 为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb^{2+} 浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
铅离子浓度的影响	铅离子浓度设 7 个: $0, 100, 200, 300, 400, 500, 600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	磷肥中 P_2O_5 的试验浓度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 支持电解质 NaNO_3 为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	
离子强度的影响	离子强度设 7 个: $0, 0.002, 0.004, 0.04, 0.06, 0.08, 1.00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$	磷肥中 P_2O_5 的试验浓度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb^{2+} 浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
酸度的影响	pH 值设 7 个: $1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$	磷肥中 P_2O_5 的试验浓度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 支持电解质 NaNO_3 为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, Pb^{2+} 浓度为 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	

下吸附量较小,而在解吸试验中,土壤解吸量较大,土壤解吸量顺序为:磷酸氢二铵<磷酸二氢钙<对照<磷酸氢二钾<磷酸二氢钾<磷酸二氢铵<磷酸氢钙,差异性检验达极显著水平($P<0.01$)。磷酸氢钙影响下,土壤解吸量铅离子最大值 $0.7009 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 比对照增加 181.712%,磷酸氢二铵最小为 $0.1645 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照减少 33.883%,磷酸二氢钙比对照减少 1.045%。从试验结果分析,尽量减少施肥对土壤吸附和解吸铅离子量,建议在施用磷肥时,选用吸附量和解吸量较小的磷肥,使潜在和现实的重金属污染土壤环境的风险较小。因此,选用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 作为常规磷肥进行施用较为适宜。

2.2 磷肥浓度对铅的吸附解吸影响

选取施用磷肥中最常见的 4 种肥料,即磷酸氢钙、磷酸二氢钙、磷酸二氢铵和磷酸二氢钾进行以下试验研究。在磷肥浓度的影响下,土壤吸附铅离子结果见图 2,反映出两种磷酸钙盐变化趋势基本一致。随着磷酸钙盐浓度的递增,铅离子吸附量的变化先下降再升高后又降低,磷酸氢钙降到最低,土壤吸附量差异性显著($P<0.05$)。当磷肥施用浓度为 $8\times 10^{-6} \text{ mol P}_2\text{O}_5\cdot\text{L}^{-1}$ 时,磷酸氢钙和磷酸二氢钙影响下,土壤铅离子吸附量分别为 7.1864 和 $7.4342 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照略有增减。可能是低浓度的钙离子有利于铅离子易被土壤吸附,钙离子浓度增加,电荷量增加,竞争吸附能力增强,从而使铅离子的吸附量减少,但总体呈下降趋势。

磷酸钾盐和铵盐,在低浓度时因阳离子交换力小于铅离子,有利于铅离子竞争吸附,高浓度时钾离子、铵离子占据土壤胶体上的结合位点,抑制铅离子在土壤胶体上的吸附,因此,土壤吸附量先升高再下降后又缓慢上升。对于磷酸二氢铵,当磷肥施用浓度为 $6\times$

$10^{-6} \text{ mol P}_2\text{O}_5\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤铅离子吸附量最大值 $9.7484 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;而磷酸二氢钾,当磷肥施用浓度为 $2\times 10^{-5} \text{ mol P}_2\text{O}_5\cdot\text{L}^{-1}$ 时,吸附量最大值为 $7.5118 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,都高于对照的吸附量。

在解吸试验中,磷酸氢钙呈急剧上升趋势,随着磷酸氢钙浓度的增加,铅离子的解吸量呈直线上升,达差异极显著水平($P<0.01$)。磷酸二氢根的钙盐、钾盐、铵盐,土壤的铅离子解吸量呈下降趋势,图形曲线上几乎重合。因为钙离子浓度增加,产生大量可交换吸附的阳离子,同时磷酸氢根阴离子较磷酸二氢根阴离子对铅离子的溶度积小,促使铅离子解吸出来,这与其他类似研究的结果基本一致:土壤重金属吸附量较小的解吸量反而较大^[9]。

结合磷肥浓度影响下的吸附和解吸曲线变化趋势,尽可能减少铅离子的吸附量和解吸量,建议施用磷肥选择除磷酸氢钙外的其他 3 种磷肥较为适宜。考虑植物生长发育对磷素营养的需要,磷肥施用浓度在 $8\times 10^{-6}\sim 2\times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,相应磷肥施用量在 $3.4066\sim 8.5164 \text{ kg P}_2\text{O}_5/666.6 \text{ m}^2$ 之间较为合适。

2.3 铅离子浓度对铅的吸附解吸影响

从铅离子浓度影响土壤中铅离子吸附和解吸试验结果图 3 中可以看出,随着铅离子浓度增加,土壤铅离子的吸附量增加,以磷酸二氢钾增加最快,磷酸二氢铵增加最慢,当试验混合溶液中铅离子浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤铅离子的吸附量达到最高值而趋于恒定。在解吸试验中,随着铅离子浓度增加,磷酸二氢钾解吸出的铅离子量最多,几乎成直线上升而磷酸氢钙解吸出的铅离子最少。差异性检验表明:铅离子浓度影响下,土壤中铅离子的吸附和解吸都达差异极显著水平($P<0.01$)。说明在土壤环境遭受铅离子污染

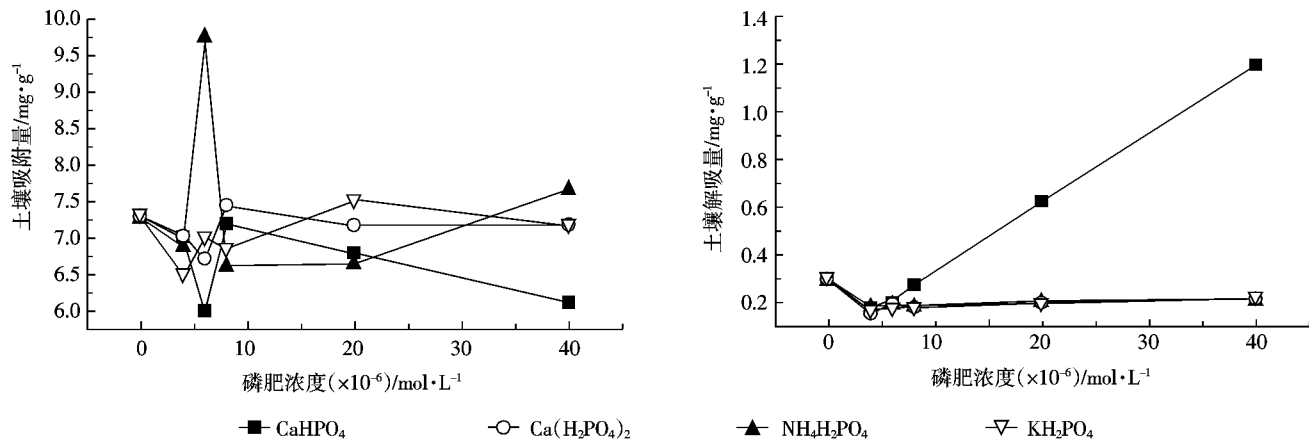


图 2 磷肥浓度对铅的吸附-解吸影响

Figure 2 Effect of phosphate fertilizer concentrations on Pb adsorption-desorption

时,施用磷酸二氢钾能促进土壤吸附和解吸铅离子,增加生态环境风险。磷酸氢钙和磷酸二氢铵的施用,能减少土壤吸附和解吸铅离子,减轻生态环境危害。

2.4 离子强度对铅的吸附解吸影响

在模拟施用磷肥的条件下,溶液中离子强度对土壤中铅离子的吸附和解吸结果如图4。从图中可以得出,在吸附试验中,随着支持电解质硝酸钠浓度的增高,4种常见磷肥影响下,土壤的铅离子吸附量急剧下降,硝酸钠浓度为 $0.08\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时出现转折,以磷酸二氢盐下降最快,磷酸钙盐下降缓慢。总体上在相同离子强度下,磷酸二氢盐的吸附量高于磷酸钙盐,差异性检验达极显著水平($P<0.01$)。可能是钠离子浓度增高占据土壤胶体上的结合位点,抑制了铅离子的交换吸附,因此吸附量随着离子强度增加而减少。但在解吸试验结果则刚好相反,以磷酸钙盐的解吸量高于磷酸二氢盐,其中磷酸氢钙远比其他3种肥料高,磷酸二氢盐的解吸基本相同,土壤解吸铅离子的数量随着离子强度的增加先升高后下降,在硝酸钠浓度为

$0.08\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时4种磷肥达到最高点,呈抛物线型,差异分析表明达极显著($P<0.01$)。这可能与硝酸钠浓度增加提供了大量可交换的钠离子使土壤吸附的铅离子交换下来有关。因此,解吸随着离子强度增高而增加。从离子强度影响土壤吸附和解吸铅离子的特性考查磷肥选用,除磷酸氢钙肥料,其他3种都可施用。

2.5 酸度对铅的吸附解吸的影响

在施用磷肥条件下,酸度影响土壤吸附和解吸铅离子结果如图5,土壤吸附和解吸铅离子随着酸度升高而增加。吸附试验中,pH值升高到4时,吸附量增加最快,达到最高吸附量,而后下降,其中以磷酸氢钙下降最快,但差异分析表明不显著;其他3种磷酸盐均达一恒定值,磷酸二氢钙盐和铵盐达到差异显著性水平,磷酸二氢钾达差异显著水平,这可能与较低pH值时,溶液中的铅离子呈阳离子状态交换力强于氢离子,有利于铅离子在土壤胶体上的吸附。当pH值进一步升高时,铅离子发生水解,形成 $\text{Pb}(\text{OH})^+$ 离子,加速氢氧化物沉淀物的沉降,吸附量下降^[10]。

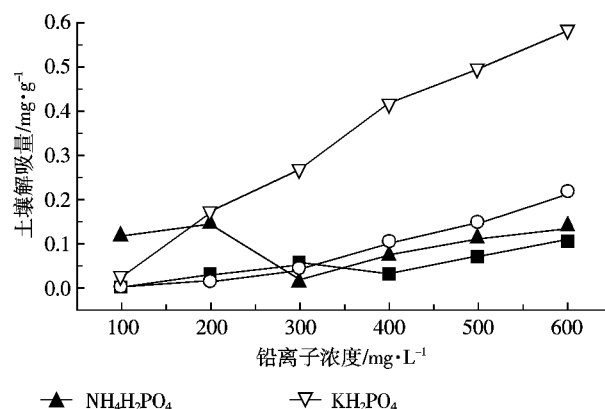
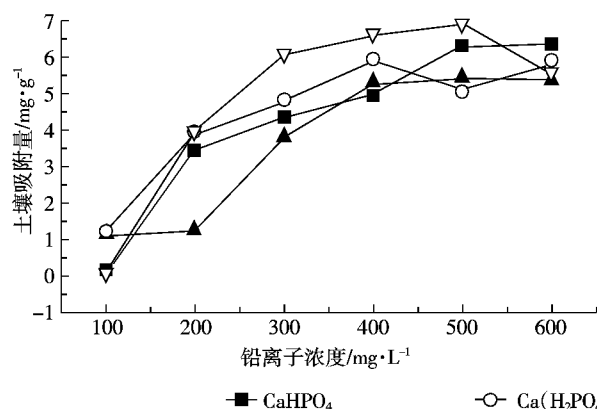


图3 铅离子浓度对铅的吸附-解吸影响

Figure 3 Effect of Pb concentrations on Pb adsorption-desorption

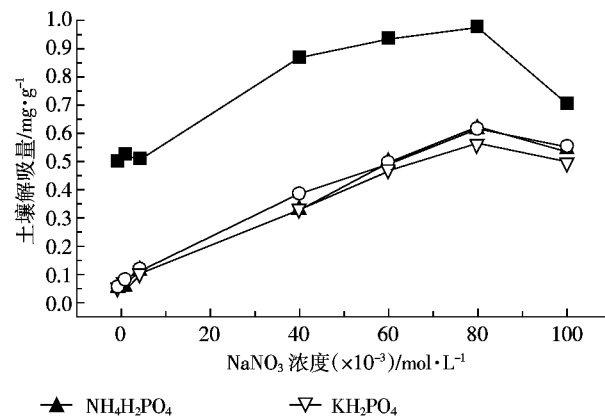
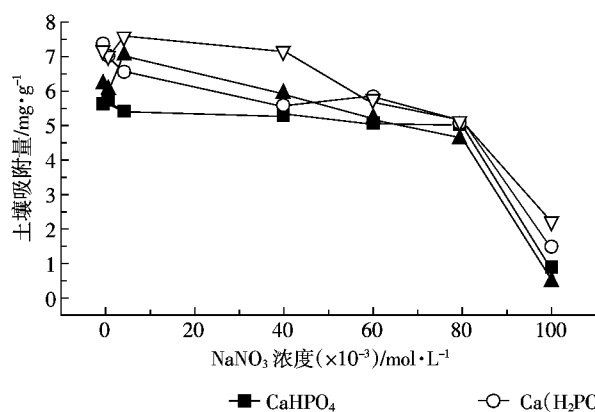


图4 离子强度对铅的吸附-解吸影响

Figure 4 Effect of ionic strength on Pb adsorption-desorption

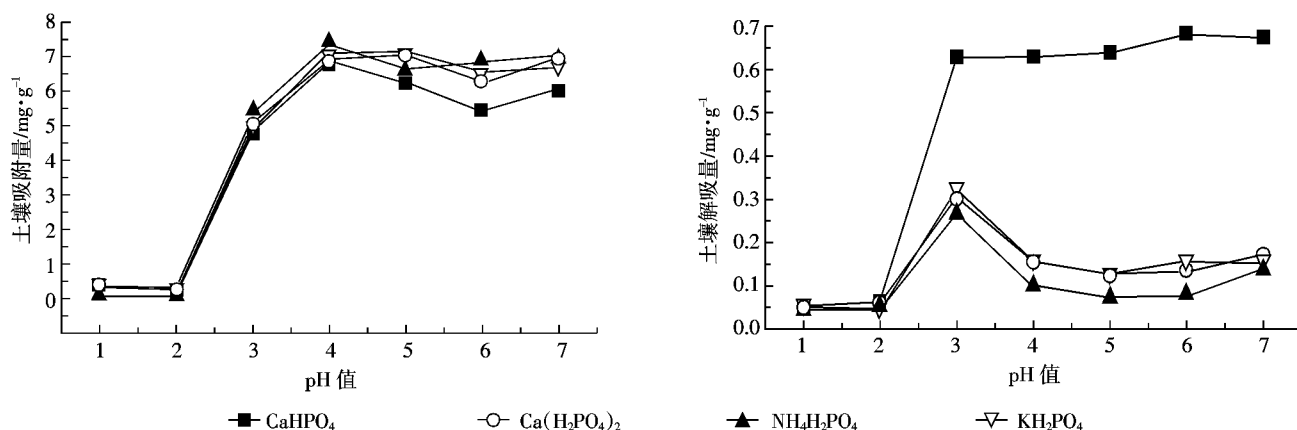


图5 酸度对铅的吸附-解吸影响

Figure 5 Affect of acidity on Pb adsorption-desorption

在解吸试验中,当 pH 值上升到 3 时,土壤的铅离子解吸量均达到最大值,其中,磷酸氢钙的解吸量在相同酸度时最大,呈缓慢上升趋势,其他 3 种磷肥在 pH 达到 3 以后逐渐下降至趋于恒定值,以磷酸二氢铵下降最大,酸度影响下差异性达极显著水平($P < 0.01$)。其原因可能是在强酸度下,较高浓度的氢离子利于交换土壤吸附的铅离子,因此,解吸量先升高后下降。从酸度影响磷肥施用角度考虑,选用除磷酸氢钙以外的磷肥较为合适,且要求土壤酸碱度在 pH 值为 4 以上,可以最大限度地降低土壤铅离子的数量,减少潜在危害性。

3 结论

(1)三峡库区消落带土壤中铅离子的吸附量和解吸量与施用磷肥种类显著相关。含钙磷肥影响下吸附量较小,解吸量以磷酸二氢钙较小。建议施用吸附量和解吸量都相对较小的 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$,以降低现实和潜在的生态环境风险。

(2)铅离子的吸附量和解吸量与磷肥施用浓度变化呈显著相关。建议施用磷肥选择磷酸二氢钙、磷酸二氢铵、磷酸二氢钾三种磷肥较为适宜。考虑植物生长发育对磷素营养的需要,磷肥施用量在 $3.406 \sim 8.516 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot 666.6 \text{ m}^{-2}$ 之间为宜。

(3)在施用磷肥的影响下,铅离子浓度极显著地影响土壤吸附和解吸铅离子,随着铅离子浓度的增加,吸附量和解吸量都呈逐渐增加的趋势。磷酸氢钙和磷酸二氢铵的施用,土壤吸附和解吸铅离子量较少,土壤重金属污染和生态环境危害较轻。

(4)在施用磷肥的影响下,离子强度和酸度都极显著地影响土壤吸附和解吸铅离子。随着离子强度增

加,土壤铅离子的吸附量呈下降趋势,而解吸量呈上升趋势。随着 pH 值增加,土壤铅离子的吸附量和解吸量先逐渐上升到最高点后缓慢下降。建议选用磷酸二氢钙盐、钾盐和铵盐作为磷肥较为合适,以减少土壤铅离子的环境风险。

综上所述,合理施用磷肥对具有环境激素效应的铅离子在土壤中的吸附量和解吸量是有影响的。施用常见的磷肥种类、磷肥浓度、土壤环境的铅离子污染状况、土壤盐分所产生的离子强度和土壤酸碱性对土壤吸附和解吸铅离子有显著影响。常规施用的磷酸二氢钙类磷肥,在国家推荐施用量范围内是安全的。因此,在三峡库区消落带土地的农业种植利用上,要综合考虑磷肥种类、用量、重金属污染水平、酸雨对土壤 pH 值的影响等情况来确定磷肥施用,确保农产品生产安全。

参考文献:

- [1] 匡少平, 张书圣. 环境激素污染研究进展及污染防治[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(6): 8-12.
KUANG S P, ZHANG S S. Research advances and pollution control of environmental hormones [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(6): 8-12.
- [2] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 46-49.
ZHANG H. Characteristic analyses of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges reservoir[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 46-49.
- [3] 杨清伟, 刘睿, 秦诚. 三峡水利工程对库区消落带土地资源的影响及可持续利用探讨[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(6): 147-149, 164.
YANG Q W, LIU R, QIN C. Effects of the Three Gorges project on water-level-fluctuating zone on land resource of the reservoir and its sus-

- tainability[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2006, 25(6): 147-149, 164.
- [4] 龙良碧, 秦志英. 三峡库区消落带土地开发利用探讨[J]. 重庆教育学院学报, 2005, 18(6): 42-45.
- LONG L B, QIN Z Y. Approach to land exploitation of water-level-fluctuating zone in Three Gorges area [J]. *Journal of Chongqing College of Education*, 2005, 18(6): 42-45.
- [5] 刘杰, 王成贤, 朱义年, 等. 化肥对土壤中 Cr(Ⅲ) 吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2277-2280.
- LIU J, WANG C X, ZHU Y N, et al. Effects of fertilizers on the Cr(Ⅲ) adsorption on paddy soil [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(6): 2277-2280.
- [6] 陈世宝, 朱永官, 马义兵. 添加羟基磷灰石对土壤铅吸附与解吸特性的影响[J]. 环境化学, 2006, 25(4): 409-413.
- CHEN S B, ZHU Y G, MA Y B. Effects of hydroxylapatite on the sorption and desorption of lead in various Chinese soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(4): 409-413.
- [7] 戴树桂, 刘广良, 钱芸, 等. 土壤多介质环境污染研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 1-5.
- DAI S G, LIU G L, QIAN Y, et al. Development of research on soil multimedia environmental pollution[J]. *Soil and Environmental Science*, 2001, 10(1): 1-5.
- [8] 李艳艳, 王亚平, 周继华, 等. 土壤中 Pb 离子地球化学行为模拟实验——以山西的典型土壤为例[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 230-239.
- LI Y Y, WANG Y P, ZHOU J H, et al. Simulation experiment of the geochemical behavior of Pb in soils—A case study of typical soils in Shanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2): 230-239.
- [9] 汪洪, 周卫, 林葆. 碳酸钙对土壤镉吸附及解吸的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 932-937.
- WANG H, ZHOU W, LIN B. Effect of calcium carbonate on adsorption and desorption of cadmium in soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(6): 932-937.
- [10] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立, 等. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 102-107.
- YANG J Y, YANG X E, HE Z L, et al. Advance in the studies of Pb adsorption and desorption in soils[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 102-107.