

不同磷酸盐下红壤对镉离子的吸附-解吸特征

陈苗苗^{1,2}, 张桂银¹, 徐明岗², 张文菊², 张 茜²

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:采用等温吸附法研究了红壤对镉离子的吸附特性, 分析加入不同形态的磷酸二氢盐(磷酸二氢铵、磷酸二氢钾和磷酸二氢钙)对镉离子吸附-解吸特征的影响。结果表明, 在加入镉浓度 $0\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 红壤对镉离子的吸附量随平衡液中镉离子浓度的升高而增加, 吸附等温线符合 Freundlich 方程。土壤吸附镉离子后, 在磷添加浓度为 $0\sim 160\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下, 土壤对镉离子的等温吸附仍然符合 Freundlich 方程($R^2>0.94$), 但磷酸盐对镉离子吸附具有明显影响; 磷酸二氢钙使镉离子的最大吸附量降低了 2.5%~7.9%, 使镉离子的吸附率降低 10%~20%, 而磷酸二氢铵和磷酸二氢钾对镉离子的吸附特征无明显影响。随加入磷量的增加, 3 种磷酸盐下镉离子解吸量和解吸率均显著降低, 解吸量降幅为 15.8%~27.8%, 解吸率降低了 3.7%~9.5%; 但在低镉时磷酸二氢钙对红壤镉离子的解吸率显著高于磷酸二氢铵和磷酸二氢钾。由于 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 之间存在较强的竞争吸附, 使得磷酸二氢钙对红壤镉离子吸附-解吸的影响大于磷酸二氢铵和磷酸二氢钾。

关键词:磷酸盐; 镉; 红壤; 吸附; 解吸

中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)08-1578-07

Effect of Different Phosphate on Adsorption-Desorption of Cadmium in Red Soil

CHEN Miao-miao^{1,2}, ZHANG Gui-yin¹, XU Ming-gang², ZHANG Wen-ju², ZHANG Qian²

(1. College of Resource and Environment Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Lab of Plant Nutrient and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The characteristics of cadmium adsorption and the effects of different kinds of phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) on the adsorption-desorption of cadmium in red soil were investigated by a batch experiment. The results showed that the adsorption amount of cadmium increased with the concentration of cadmium in the equilibrium solution under the range of initial concentration of cadmium from 0 to $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The relationship between the adsorption amount of cadmium and the concentration of cadmium in the equilibrium solution could be described by the Freundlich equation. After the red soil adsorbed cadmium, the adsorption isotherms of cadmium in red soil could also be described by the Freundlich equation ($R^2>0.94$) in the presence of phosphate from 0 to $160\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. But the added phosphate markedly affected on the adsorption of cadmium. The maximum amount of adsorbed cadmium by the red soil decreased by 2.5%~7.9% after adding $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. The adsorption percentage of cadmium substantially declined by 10%~20% with the increasing concentration of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Whereas, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and KH_2PO_4 didn't influence on the adsorption amount of cadmium in red soil. The desorption amount and desorption rate of cadmium from the red soil significantly decreased by 15.8%~27.8% and 3.7%~9.5% with the increasing concentration of phosphates. The desorption rate of cadmium by $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ was higher than $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and KH_2PO_4 when the cadmium adsorption was lower. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ had more significant effect on adsorption-desorption of cadmium in red soil than $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and KH_2PO_4 because of competitive adsorption between Ca^{2+} and Cd^{2+} .

Keywords: phosphate; cadmium; red soil; adsorption; desorption

收稿日期: 2009-01-07

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6062026); 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2002CB410809); 国家科技支撑计划课题(2008BADA7B03)

作者简介: 陈苗苗(1982—), 女, 河北邯郸人, 在读硕士, 主要从事土壤环境化学方面研究。E-mail: chenmiaohappy@yahoo.com.cn

通讯作者: 徐明岗 E-mail: mgxu@caas.ac.cn

镉是毒性很强的重金属元素之一。截至1998年,我国受镉污染的农业土壤面积已经达到 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,并且这个面积还在迅速扩大^[1]。被镉污染的土壤不仅影响作物的产量和品质,甚至通过食物链危害人类的健康^[2],因此采取有效的措施来修复镉污染的土壤已成为当今国内外研究的热点。

研究表明,含磷化合物在稳定重金属方面有非常明显的效果,可作为一种廉价有效的化学固定剂用于镉污染土壤的修复^[3-5]。据前人研究总结,磷酸盐主要是通过诱导重金属吸附、与重金属生成沉淀或矿物或者磷酸盐表面直接吸附重金属等这些复杂的反应来达到稳定重金属的目的^[6],而有关磷镉交互作用的研究结果表明,施磷可降低植物体内镉的含量^[7-8]。另有报道表明,增加磷反而促进了植物对镉的吸收^[9-10];Bogdanovic等认为磷与镉不存在明显的相关性^[11-12]。由于土壤镉的移动性及其植物毒害性主要取决于土壤吸附反应^[13],从磷酸盐影响土壤镉吸附与解吸的角度来研究镉污染土壤的防治具有重要的理论和现实意义。如Bolan等^[14]研究表明,加入 KH_2PO_4 时,磷酸根吸附后所增加的负电荷,其中29%被镉吸附平衡;加入 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 时,仅8%被镉吸附平衡。但Mustafa等^[15]认为 Ca^{2+} 和 Na^+ 对 Cd^{2+} 吸附-解吸竞争的影响差异随pH的升高而消失。可见,对伴随阳离子与镉离子的相互作用研究,有利于揭示磷酸盐影响土壤镉吸附-解吸反应的机理以及指导修复镉污染土壤时磷肥种类的选择。目前,在磷镉交互中有关伴随阳离子对Cd吸附解吸作用的研究还鲜见报道。因此,本文探讨不同磷酸盐对红壤镉吸附解吸的影响,应用Freundlich方程拟合Cd吸附等温线,进而分析红壤镉的吸附和解吸特性。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为第四纪红土发育的红壤,采自湖南祁阳中国农业科学院红壤试验站(N 26°45'36", E 111°52'12")。红壤为可变电荷土壤,粘粒矿物以高岭石为主,含有较多的氧化铁和氧化铝,土壤采自农田表层(0~20 cm),风干后磨细过1 mm筛,混匀备用。供试土壤的基本理化性质为:pH(水土比2.5:1)4.95,有机质含量 $14.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,粘粒含量(<2 μm)38.3%,游离 Fe_2O_3 含量10.1%,游离 Al_2O_3 含量24.5%, $\text{CEC} 5.9 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,全铜含量 $0.119 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤对镉离子的等温吸附

土壤对镉离子的等温吸附采用一次平衡法。称风干土样5.00 g,置于100 mL塑料离心管中,以 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaNO}_3$ 为支持电解质,向每个离心管中加入 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液50 mL,镉的浓度分别为0、1、5、10、20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以下表示为Cd0、Cd1、Cd5、Cd10、Cd20),将离心管摇匀密封后水平放置,在(25±1)℃下振荡4 h,恒温平衡20 h,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心15 min,滤出上清液,采用原子吸收分光光度计法测定其中的Cd浓度,差减法计算土壤对镉的吸附量。将吸附镉后的残渣用95%酒精洗涤3次,风干后磨细过1 mm筛,混匀备用。试验重复进行4次。

1.2.2 磷酸盐对土壤吸附镉离子的影响

称取上述风干的吸附不同镉量的土壤样品2.000 g于50 mL塑料离心管中,以 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaNO}_3$ 为支持电解质,分别加入含系列磷浓度的磷酸二氢铵、磷酸二氢钾、磷酸二氢钙溶液20 mL,磷的浓度分别为0、20、40、80、160 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以下表示为P0、P20、P40、P80、P160),加氯仿3滴,在(25±1)℃下间歇振荡3 d,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心15 min,滤出上清液后测Cd浓度,差减法计算加入不同磷酸盐后土壤镉吸附量。同时计算镉离子的吸附率(镉离子的吸附量占镉离子添加量的百分数),残渣用95%酒精清洗后加入 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸镁溶液20 mL,加氯仿3滴,在(25±1)℃下等温间歇振荡3 d,离心过滤,原子吸收分光光度法测定上清液镉离子浓度,计算镉的解吸量。同时计算镉离子的解吸率(镉离子的解吸量占吸附量的百分数),试验重复进行2次。

1.3 吸附结果的模拟及分析方法

采用Freundlich方程对吸附等温线进行拟合。Freundlich方程的一般形式为:

$$\lg[C_s] = \lg K_f + n \lg[C_e]$$

式中: C_s 为平衡时固相中镉的质量分数, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_e 为平衡时液相中镉的质量分数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 指数 n 表示土壤吸附溶质时的自由能; K_f 是Freundlich的分配系数,表示土壤的总吸附容量。

平衡液中镉的浓度采用SP-3530AAPC型原子吸收分光光度计测定。以下图表中的数据均使用平均值,应用统计软件SPSS11.5对结果进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤对镉离子的等温吸附

随着平衡溶液中镉浓度的升高,红壤对镉吸附量

迅速增加,在最大镉添加浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,土壤镉吸附量为 $170.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1)。红壤对镉的吸附量与平衡液中镉浓度的关系可以用 Freundlich 程拟合,相关系数为 0.979 6,达到 1% 的显著水平。

2.2 不同磷酸盐对土壤镉吸附的影响

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 KH_2PO_4 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 加入吸附镉后的土壤,其伴随的阳离子与镉竞争土壤吸附点位,影响土壤镉的吸附,但不同磷酸盐改变土壤吸附镉的能力不同(图 2)。在最大镉添加浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷酸盐加

入浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时(图 2a),加 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 KH_2PO_4 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 较不加磷酸盐处理使体系平衡液中镉的浓度分别增加了 7.1%、9.1%、35.9%,说明 3 种磷酸盐均在不同程度上降低了土壤镉的吸附量,其中 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的影响效果较为明显,降低土壤镉吸附的能力较强,不同磷用量的处理影响效果相似。当 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 处理磷用量分别为 20、40、80 和 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,镉的最大吸附量分别为 155.2、151.7、147.1 和 $146.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较不加磷酸盐($159.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理分别降低了 2.5%、4.7%、7.6%和 7.9%。

不同磷酸盐对土壤镉吸附影响的差异主要是基于陪伴阳离子的影响差异所致。其中, NH_4^+ 主要是通过降低土壤的 pH 值或者与镉形成配合物来降低土壤对镉的吸附; K^+ 则通过与镉离子竞争土壤的吸附点位影响土壤对镉的吸附,但由于 K^+ 为一价离子,其对二价离子的竞争作用较弱;而 Ca^{2+} 作为土壤主要的盐基饱和离子之一,其对镉吸附影响的机制一方面是 Ca^{2+} 与土壤有一定程度的专性吸附,将改变可变电荷土壤的表面正电荷,另一方面, Ca^{2+} 可以与镉离子竞争土壤中的粘土矿物、氧化物及有机质上的阳离子交换

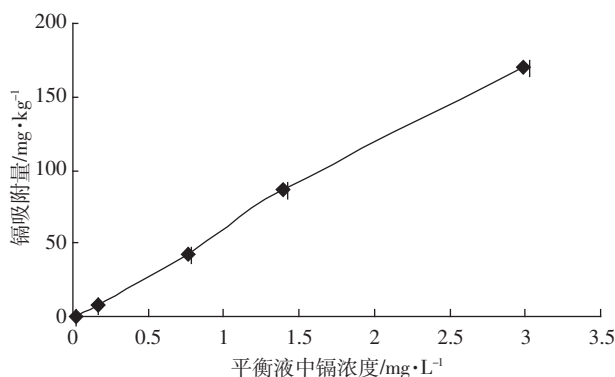


图 1 红壤镉的等温吸附曲线

Figure 1 Adsorption isotherms of cadmium in red soil

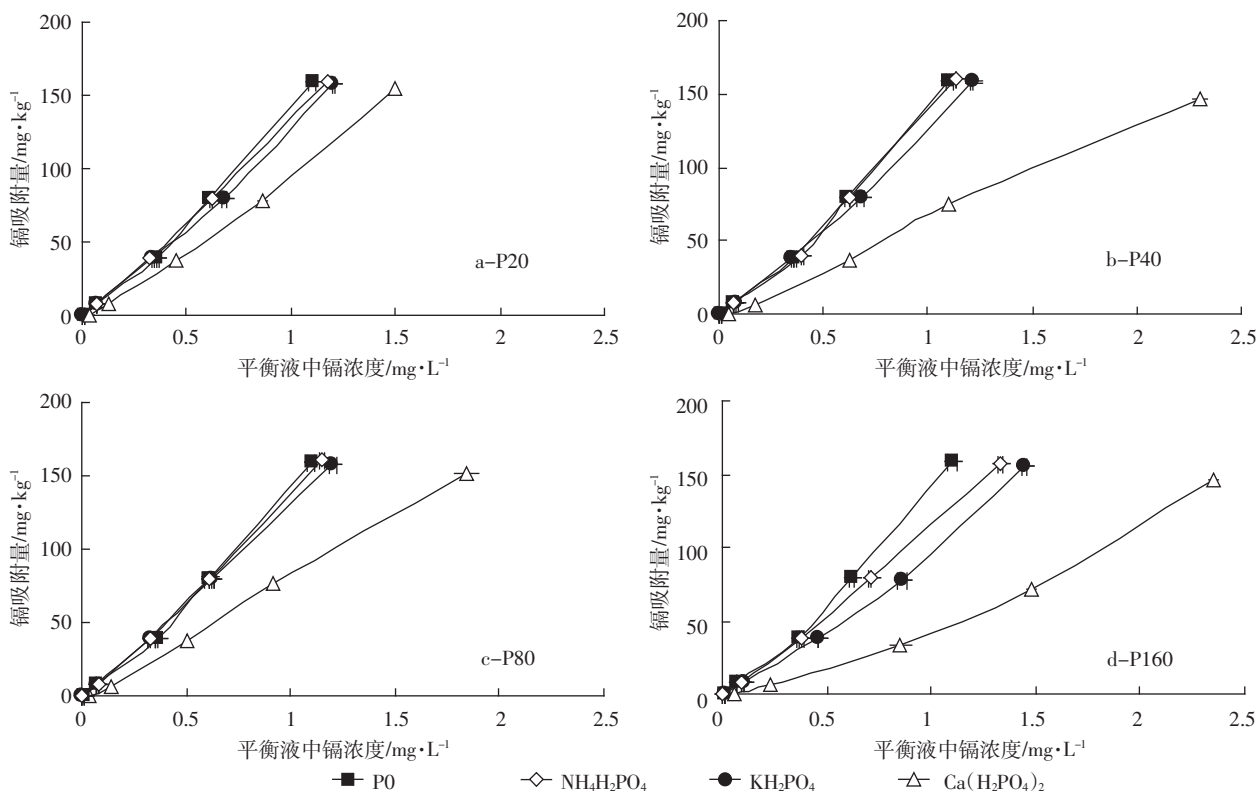


图 2 不同磷酸盐下红壤镉的吸附曲线

Figure 2 Adsorption of cadmium under different phosphate in red soil

吸附点位^[15],从而降低土壤对镉离子的吸附。

在不同磷酸盐下,平衡溶液中镉浓度与镉吸附量之间存在较强的相关关系(图 2),用 Freundlich 方程进行拟合,决定系数 R^2 值均在 0.94 以上(表 1),达极显著水平。表明用 Freundlich 吸附等温线可以较好地拟合磷酸盐影响下土壤镉的吸附。有研究^[16]认为,分配系数 K_f 越大,土壤对镉的吸附越强,反之则越弱。由表 1 看出,在 P20 处理中,不加磷酸盐,加入 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 KH_2PO_4 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的 K_f 值分别为 0.345、

0.343、0.330 和 0.314,同样还是 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的影响较为明显,这与吸附等温线的结果一致。随着磷酸盐用量的增加, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 降低土壤镉吸附能力增强,当磷用量增加到 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, K_f 值较 P20 降低了 33.4%,可见不同磷酸盐影响镉吸附的情况与磷酸盐的用量密切相关,而磷酸盐的用量可能通过影响土壤表面电荷而影响土壤镉吸附^[17]。

由图 3 可见,3 种磷酸盐对红壤镉吸附率的影响规律与效果也存在差异。随着磷用量的增加,

表 1 磷酸盐种类及用量不同时红壤镉吸附的 Freundlich 拟合方程参数

Table 1 Parameters of Freundlich equation for Cd adsorption by red soil under different phosphate and different dosage

磷酸盐	Freundlich 方程 $\lg[C_e]=\lg K_f+n\lg[C_e]$			磷酸盐	Freundlich 方程 $\lg[C_e]=\lg K_f+n\lg[C_e]$		
	K_f	n	R^2		K_f	n	R^2
P0	0.345	1.363	0.988**	P80($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	0.314	0.940	0.995**
P20($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	0.343	1.325	0.989**	P80(KH_2PO_4)	0.326	1.202	0.999**
P20(KH_2PO_4)	0.330	1.191	0.997**	P80($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	0.250	1.630	0.963**
P20($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	0.314	1.817	0.946**	P160($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	0.302	0.939	0.994**
P40($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	0.318	0.955	0.995**	P160(KH_2PO_4)	0.307	1.379	0.992**
P40(KH_2PO_4)	0.320	1.015	0.999**	P160($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	0.209	1.593	0.991**
P40($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	0.289	1.720	0.947**				

注:样本数为 5 个, R^2 为决定系数;** 表示在 1% 水平下极显著相关。

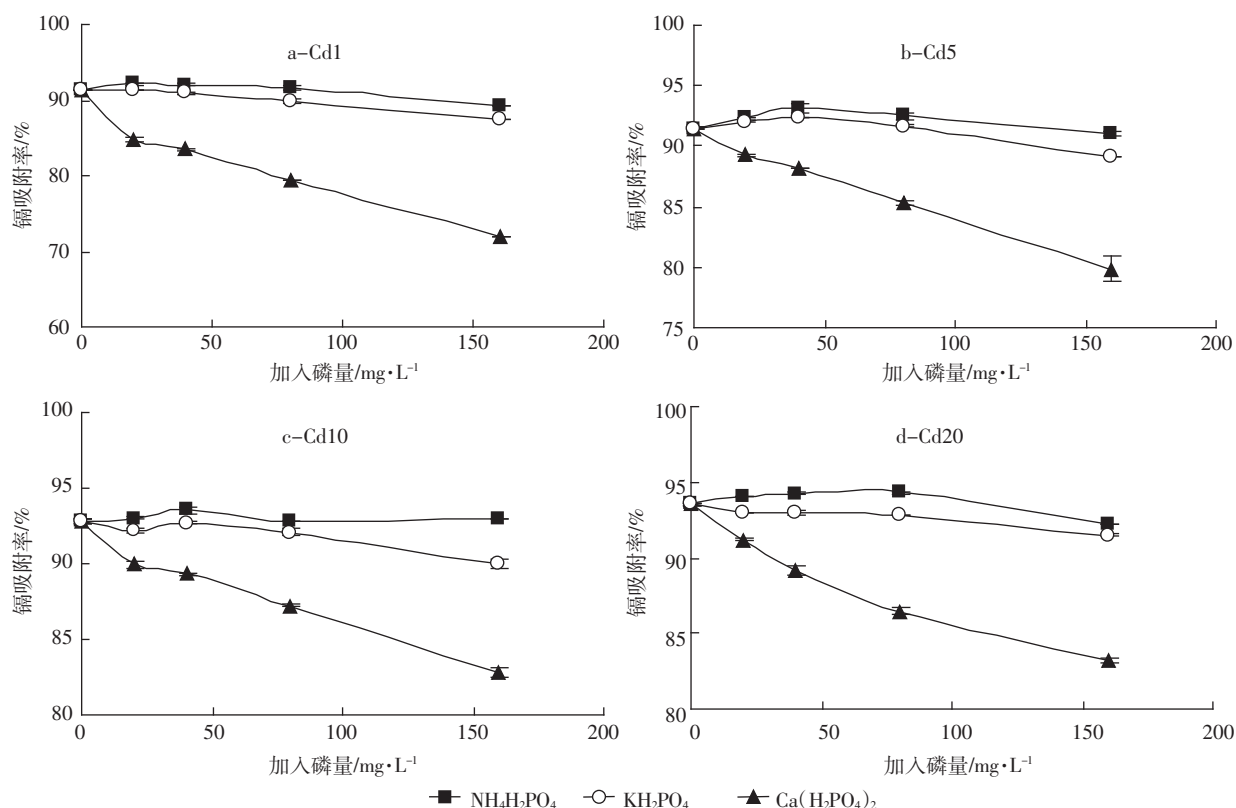


图 3 不同磷酸盐下红壤镉的吸附率

Figure 3 Adsorption rate of cadmium under different phosphate in red soil

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 处理中, 镉的吸附率没有明显变化, 基本持平; 而 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 体系下镉的吸附率则显著下降, 这一结果在所有镉处理中表现的效果一致。这可能是因为土壤对钙离子的吸附主要为非专性吸附, 在与镉离子竞争土壤的吸附位点时, 将占据土壤的弱吸附点位, 从而降低土壤对镉的非专性吸附^[15]。在 Cd1、Cd5、Cd10、Cd20 处理中, 与不加磷酸盐相比, 加入含磷量为 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 时, 红壤镉的吸附率分别降低了 21.3%、12.7%、10.9% 和 11.1%。可见 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 抑制红壤对镉的吸附, 且吸附率随磷加入量的增加而降低。这与吸附等温线结果及方程拟合结果一致。

2.3 不同磷酸盐对土壤镉解吸的影响

随镉吸附量的增加, 其解吸量也在迅速增加, 两者基本呈线性关系, 这与前人的研究结果类似^[18-19]。红壤镉离子的解吸量随加入磷量的增加而显著降低(图4), 可能主要是因为随磷用量的增加, 土壤磷吸附量增加, 磷酸根对镉的专性吸附增加所致。镉吸附量不同时, 磷酸盐对镉解吸量的影响存在差异。在 Cd1、Cd5 和 Cd10 处理下, 3 种磷酸盐使土壤镉解吸量降低的趋势一致, 3 种磷酸盐之间没有显著差异。而在

Cd20 处理下, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 使红壤镉最大解吸量比未加磷酸盐下降了 $9.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 下降量显著高于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 。可见, 只有在高镉处理下, 由于吸附镉量较大, 3 种磷酸盐对镉解吸量的影响差异才较为显著。

对 3 种磷酸盐而言, 随加入磷量的增加, 红壤镉离子的解吸率均显著降低(图 5)。3 种磷酸盐之间比较, 只有在低镉吸附量处理中(Cd1), $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 使红壤镉的解吸率显著高于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 , 这可能是由于低镉吸附下 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 的竞争作用更为强烈所致, 因为阳离子之间的竞争吸附与它们的比例有关^[20]。

有研究表明, 施用 KH_2PO_4 降低了酸性土壤中 Cd 的水溶性和可交换态的量, Cd 的碳酸盐结合态却增加了^[12]。曹仁林等研究证明, 钙镁磷肥可使交换态的 Cd 降低, 使碳酸盐结合态和铁锰氧化结合态的 Cd 增加^[21]。由此可见, 加入磷酸盐后, 镉在土壤表面的存在形态发生变化, 从而影响了镉的解吸。

3 结论

(1) 红壤对镉的吸附随着平衡溶液中镉浓度的升

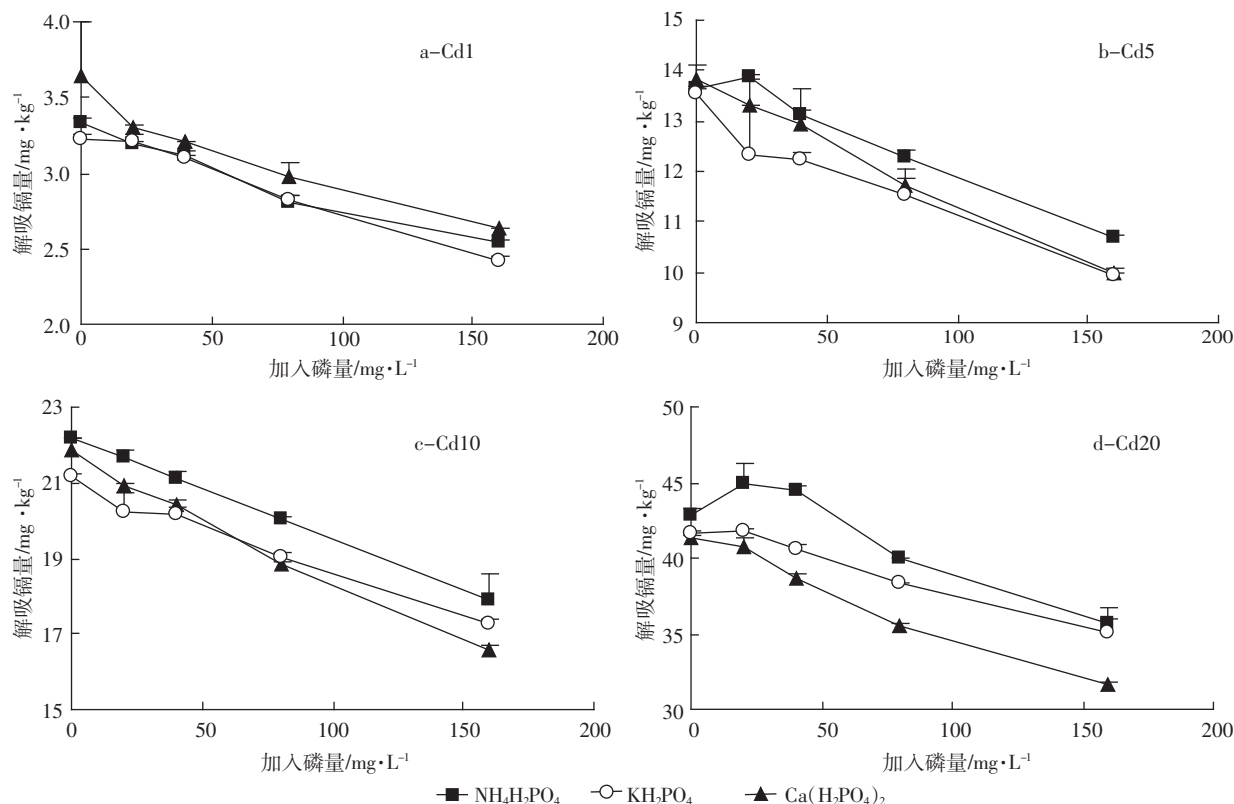


图 4 不同磷酸盐下红壤镉的解吸量

Figure 4 Desorption amount of cadmium under different phosphate in red soil

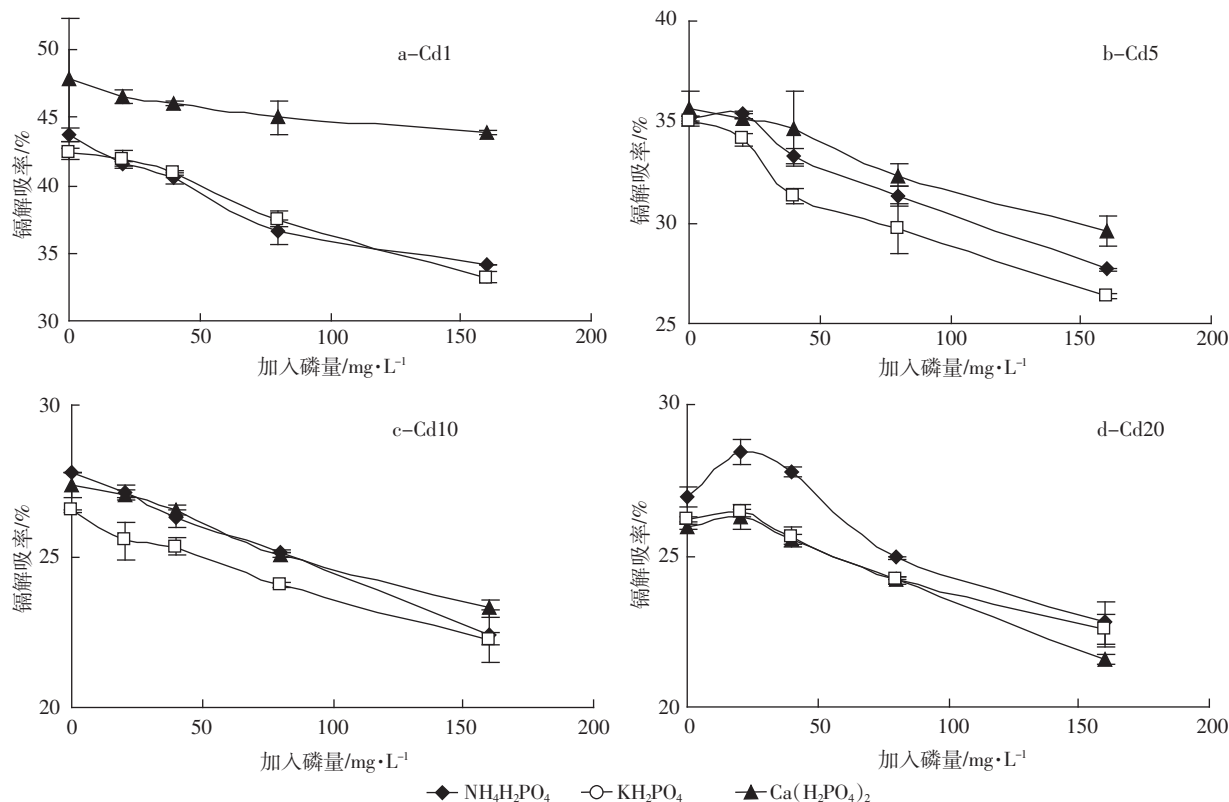


图5 不同磷酸盐下红壤镉的解吸率

Figure 5 Desorption rate of cadmium under different phosphate in red soil

高而增加,可以用 Freundlich 方程很好的拟合。加入不同磷酸盐后,镉吸附仍符合 Freundlich 吸附等温方程。

(2)不同磷酸盐下红壤镉吸附量不同,磷酸二氢钙使镉离子的最大吸附量降低了 2.5%~7.9%,镉吸附率降低 10%~20%,而 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 对镉离子的吸附没有明显影响。

(3)随加入磷量的增加,3 种磷酸盐均使红壤镉解吸量和解吸率显著降低,解吸量降幅为 15.8%~27.8%,解吸率降低了 3.7%~9.6%。但由于 Ca^{2+} 与 Cd^{2+} 之间存在较强的竞争吸附,在高镉时, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 降低红壤镉离子的解吸量显著高于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 ;低镉时, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 对红壤镉离子的解吸率显著高于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KH_2PO_4 。

参考文献:

- [1] Zhou D M, Wang Y J, Cang L, et al. Adsorption and cosorption of cadmium and glyphosate on two soils with different characteristics[J]. *Chemosphere*, 2004, 57: 1237-1244.
- [2] 张会民, 吕家珑, 徐明岗, 等. 土壤镉吸附的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2006, 6: 8-11.
ZHANG Hui-min, LU Jia-long, XU Ming-gang, et al. Review of studies on cadmium adsorption by soils[J]. *China Soil and Fertilizer*, 2006, 6: 8-

11.

- [3] Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates; theoretical prediction and experimental verification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, (B117): 41-53.
- [4] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 493-500.
- [5] Zwonitzer J C, Pierzynski G M, Hettiarachchi G M. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailabilities in a metal-contaminated soil[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2003, 143: 193-209.
- [6] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属物污染土壤的研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3043-3050.
ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang. The progress in phosphate remediation of heavy metal-contaminated soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3043-3050.
- [7] 杨志敏, 郑绍建, 胡霁堂, 等. 镉磷在小麦细胞内的积累和分布特性及其交互作用[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(2): 54-58.
YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang, et al. Accumulation and distribution of cadmium and phosphorus and their interaction in wheat suspension-cultured cells[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1998, 21(2): 54-58.
- [8] HE Q S, SINGH B R. Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizers: I Yield and cadmium content [J]. *Water Air Soil Pollution*, 1994, 74: 251-265.

- [9] SINGH B P. Cadmium and fluoride uptake by oats and rape from phosphorus fertilizers in two different soils[J]. *Norwegian J Agric Sci*, 1990, 4:239-250.
- [10] Sparrow LA, Salardini I A A, Boshop AC, et al. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Response of II cvv. Russet and Kennebec to two double superphosphates of different cadmium concentration[J]. *Aust J Agric Res*, 1993, 44:855-861.
- [11] Bogdanovic D, Ubavic M, Cuvardic M. Effect of phosphorus fertilization on Zn and Cd contents in soil and corn plants[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(1):49-56.
- [12] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41:133-138.
- [13] 宋正国, 徐明岗, 刘平, 等. 钙钾共存对赤红壤吸附镉的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(5):993-996.
- SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, LIU Ping, et al. Effects of co-existing cations, Ca, K, Zn on adsorption of cadmium in lateritic red soil[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5):993-996.
- [14] Bolan N S, Naidu R, Khan M A R, et al. The effects of anion sorption on sorption and leaching of cadmium[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1999, 37:445-460.
- [15] Mustafa G, Singh B, Kookana R S. Cadmium adsorption and desorption behaviour on goethite at low equilibrium concentrations: effects of pH and index cations[J]. *Chemosphere*, 2004, 57:1325-1333.
- [16] Cheistensen T H. Cadmium soil sorption at low concentrations. I. Effect of time, cadmium load, pH and calcium[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1984, 21:105-114.
- [17] Barrow N J. The effects of phosphate on zinc sorption by a soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1987, 38:453-459.
- [18] 刘平, 徐明岗, 宋正国, 等. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1):252-256.
- LIU Ping, XU Ming-gang, SONG Zheng-guo. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):252-256.
- [19] 宫春艳, 吴英, 徐明岗, 等. 红壤和褐土中磷的吸附及其对镉离子吸附-解吸的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):1-7.
- GONG Chun-yan, WU Ying, XU Ming-gang, et al. Phosphate adsorption its effect on adsorption-desorption of cadmium in red soil and cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):1-7.
- [20] 徐明岗, 李菊梅, 陈世宝. 共存离子对土壤吸附 Cu^{2+} 的影响特征[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5):935-938.
- XU Ming-gang, LI Ju-mei, CHEN Shi-bao. Adsorption of Cu^{2+} by soils under different co-existing cations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):935-938.
- [21] 曹仁林, 霍文瑞, 何宗兰, 等. 钙镁磷肥对土壤中的 Cd 形态的转化与水稻吸收 Cd 影响[J]. *重庆环境科学*, 1993, 15(16):6-9.
- CAO Ren-lin, HUO Wen-rui, HE Zong-lan, et al. Effect of calcium magnesium phosphate fertilizer on chemical forms and translocations of cadmium and cadmium up-taking by rice in soil [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1993, 15(16):6-9.