

红壤和褐土中磷的吸附及其对镉离子吸附-解吸的影响

宫春艳^{1,2}, 吴 英^{1,3}, 徐明岗², 周世伟², 吕粉桃², 陈苗苗²

(1.东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 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; 3.黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要:采用等温吸附法研究了红壤和褐土磷的吸附特性,并分析了磷吸附后镉离子的吸附-解吸特征。结果表明,在外源磷浓度 0~64 mg·L⁻¹ 范围内,供试土壤磷吸附量均随平衡液中磷浓度的升高而增加,吸附等温线符合 Langmuir 方程,红壤对磷的最大吸附量及吸附反应常数(*K*)均高于褐土。吸附磷后在镉添加 0~5 mg·L⁻¹ 范围内对镉离子吸附的影响两种土壤表现一致,即镉离子的吸附量随平衡溶液中镉的浓度的升高而增加,二者呈极显著线性相关。但磷吸附量的不同对镉离子的吸附产生一定的影响,表现为低磷抑制、高磷促进镉离子的吸附。当吸附磷的量红壤小于 40 mg·kg⁻¹、褐土小于 37 mg·kg⁻¹ 时,镉离子的吸附量随磷吸附量的增加而降低,与不施磷处理相比吸附率平均降低了 16%和 10%左右;当吸附磷的量红壤大于 79 mg·kg⁻¹、褐土大于 70 mg·kg⁻¹ 时,镉离子的吸附量随磷吸附量的增加而升高,与对照相比吸附率平均升高了 11%和 6%左右。吸附磷酸根后,在镉离子的吸附量小于 10 mg·kg⁻¹ 时,红壤镉离子的解吸率表现为低磷促进、高磷抑制解吸,而褐土磷的吸附对镉离子解吸率的影响不显著。

关键词:磷酸盐;镉;红壤;褐土;吸附-解吸

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2258-07

Phosphate Adsorption and Its Effect on Adsorption-Desorption of Cadmium in Red Soil and Cinnamon Soil

GONG Chun-yan^{1,2}, WU Ying^{1,3}, XU Ming-gang², ZHOU Shi-wei², LV Fen-tao², CHEN Miao-miao²

(1. Resources and Environmental Sciences College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Key Laboratory of Plant Nutrition Cycling, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: A batch experiment by using isotherm adsorption method was conducted to study phosphate adsorption and its effect on adsorption-desorption of cadmium in red soil and cinnamon soil. The results indicated that adsorption the amount of phosphate increased with increasing concentration of phosphate in equilibrium solution with phosphate application levels ranging from 0 to 64 mg·L⁻¹ in two soils. The relationship could be described by Langmuir or Freundlich equation. The maximum amount of adsorbed phosphate and constants of adsorption(*K*) in red soil were higher than those in cinnamon soil. After phosphate adsorption, the adsorption amount of cadmium ion increased with increasing concentration of cadmium ion in equilibrium solution in two soils after adding cadmium ion from 0 to 5 mg·L⁻¹, which fitted a linear equation with significantly correlation at *P*<0.01. However, the changes of phosphate adsorption resulted in difference of adsorption of cadmium ion, showing that the adsorption of cadmium ion was enhanced by higher phosphate and inhibited by lower phosphate concentration. The cadmium ion sorption decreased with an increase of phosphate sorption when adsorbed phosphate was less than 40 mg·kg⁻¹ in red soil and 37 mg·kg⁻¹ in cinnamon soil, the average of adsorption ratio declined by 16% and 10%, respectively, as compared to no phosphate application. Moreover, cadmium ion sorption increased with increasing phosphate sorption when adsorbed phosphate was higher than 79 mg·kg⁻¹ in red soil and 70 mg·kg⁻¹ in cinnamon soil. The adsorption ratio increased by 11% and 6% on an average, respectively as compared with control. Desorption of cadmium ion from red soil and cinnamon soil increased with increasing adsorption of cadmium ion, however, the desorption amount of cadmium ion showed different dynamics for the two soils after phosphate adsorption. When adsorption amount of cadmium ion was less than 10 mg·kg⁻¹, the desorption ratio of cadmium ion was reduced at higher phosphate concentration in red soil, but no significant difference was observed within experiment concentrations of phosphate in cinnamon soil.

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

收稿日期:2008-02-14

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:宫春艳(1980—),女,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤修复与植物营养。E-mail:gongchunyan608@163.com

通讯作者:徐明岗 E-mail:mgxu@caas.ac.cn

磷是植物必需的大量元素之一，在土壤溶液中主要以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 的形式存在,但由于受土壤粘粒和其他土壤组分如无定型氧化物（酸性土壤）和 CaCO_3 （石灰性土壤）的影响,磷极易被吸附与固定^[1]。磷酸盐在土壤中的吸附特性充分反映了磷在土壤固相与液相分配的状况,而且可以利用等温吸附方程得到磷酸盐的最大吸附量及其他重要参数^[2]。镉是植物非必需元素,其在环境中的积累和富集严重影响着植物的生长发育,并可以通过食物链对人和动物产生毒害^[3-4]。

近年来,一些研究者发现磷酸盐在稳定重金属方面有非常明显的效果,可以成为重金属污染土壤修复的一种廉价的、行之有效的重要措施^[5-8]。镉在土壤中的化学行为以及镉污染土壤修复的研究已有很多报道^[9-12],其中磷-镉交互作用的研究比较活跃。由于两种元素在土壤中发生反应和转化的复杂性,不同研究者所得结论不同。Karblane^[13]和 He 等^[14]指出增施磷肥能抑制镉在土壤中的转化,降低植物体内镉的积累,而 Maier 等^[15]研究却指出,施用磷肥可以增加土壤中镉的活性,提高植株体内镉的含量,但也有一些研究者却指出磷与镉不存在明显的相关性^[16-17]。另外,不同性质土壤中的磷酸根对镉的影响也不同。Pardo^[18]研究指出,含高岭石的淋溶土(Alfisol)对磷酸根(含水 NaH_2PO_4)和镉离子的吸附能力相近,磷酸根浓度的增加对镉离子的吸附没有显著影响,而含水铝英石的暗色土(Andisol)对磷酸根的吸附能力超出镉离子的好几倍,磷酸根的存在增加了镉的吸附。目前的研究将磷-镉交互作用的机理分为三类^[1]:(1)磷酸盐诱导重金属吸附:通常发生在热带、亚热带的可变电荷土壤上,因其富含氧化铁、氧化铝及高岭石,能够专性吸附磷酸盐,引起土壤表面负电荷增加和/或溶液 pH 升高,从而诱导重金属吸附增加;(2)磷酸盐与重金属生成沉淀或矿物:发生在大多数土壤上,尤其是重金属含量很高的矿区土壤;(3)磷酸盐表面直接吸附重金属,该反应机理只发生在难溶性的磷灰石、磷矿石表面上。可见,土壤中磷与镉的关系比较复杂,其作用机理仍不十分明确。因此,对磷与镉交互作用有必要进

一步深入研究。

本文选用我国两种典型土壤(红壤和褐土),在研究其吸附磷酸盐特性的基础上,重点研究其吸附磷酸盐后对镉吸附-解吸的影响,以探讨吸附不同量磷酸盐条件下磷-镉的交互作用,为磷肥修复重金属污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为红壤（中国土壤系统分类名为铁铝土）和褐土（中国土壤系统分类名为硅铝土）。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,采自湖南祁阳中国农业科学院红壤试验站(N 26°45',E 111°52');褐土为恒电荷土壤,粘粒矿物以伊利石和蒙脱石为主,采自北京昌平区(N 40°13',E 116°114')。土壤采自表层(0~20 cm),风干磨碎后过 1 mm 筛备用。按照鲁如坤^[19]方法,测定土壤基本化学性质,见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 磷吸附

采用等温平衡法,以 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaNO}_3$ 为支持电解质,初始磷的浓度分别为 0、4、8、16、32、64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (KH_2PO_4 配制)。其基本操作步骤如下:称取土样 12.00 g,置于 100 mL 塑料离心管中,加入含系列磷浓度的 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaNO}_3$ 溶液 60 mL,加入氯仿 3 滴。在(25+1)℃下等温间歇振荡 3 d,离心过滤。用紫外分光光度计测定上清液中磷的浓度,差减法计算土壤磷的吸附量。将吸附磷后的残渣用 95%酒精清洗后风干过 1 mm 筛备用。试验重复 4 次。

1.2.2 镉吸附-解吸

支持电解质为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaNO}_3$,初始镉离子浓度分别为 0、0.25、0.5、1、2、3、4、5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 配制)。具体操作步骤:称取上述风干的吸附不同磷量的土壤样品 2.000 g 于 50 mL 塑料离心管中,加入含系列镉浓度的 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaNO}_3$ 20 mL,加入氯仿 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中镉的浓度,差

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basical physical and chemical properties of soils used

土壤	pH	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{CaCO}_3/\%$	粘粒(<2 μm)/%	游离 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	游离 $\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	全镉/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
红壤	4.95	0.4	14.8	0.06	38.27	10.10	24.50	5.9	0.119
褐土	8.08	1.6	19.6	3.30	26.00	4.30	12.46	14.2	0.630

注:pH测定水土比为2.5:1。

减法计算镉的吸附量。试验重复2次。

残渣用95%酒精清洗后加入 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性醋酸铵($\text{pH}=7$)溶液20 mL,在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 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。

1.3 分析方法

平衡液中磷浓度的测定采用钼锑抗比色法(751型紫外分光光度计),镉的浓度采用SP-3530APC型石墨炉原子吸收分光光度计测定。其他项目的测定采用鲁如坤^[19]方法测定。本文图中及表中的数据均使用平均值,数据采用OriginPro7.5及SPSS11.5统计软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 磷的吸附特性

图1显示,供试土壤磷的吸附量随平衡液中磷浓度的增加而增大,红壤显著高于褐土。对两个土壤中磷吸附等温线拟合结果(表2),无论是红壤还是褐土磷吸附等温线均符合Langmuir方程和Freundlich方

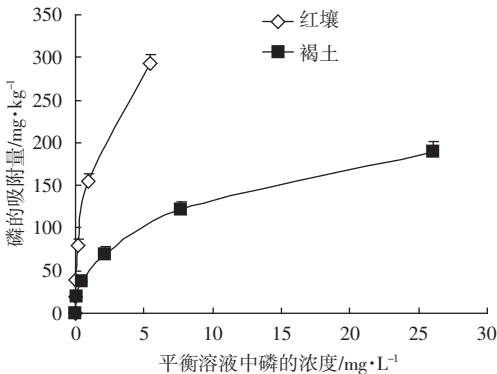


图1 红壤和褐土中磷的等温吸附曲线

Figure 1 Adsorption isotherms of phosphate in red soil and cinnamon soil

表2 红壤和褐土磷吸附方程拟合参数

土壤	Langmuir 方程 $C/X=1/(X_m\times K)+C/X_m$			Freundlich 方程 $X=AC^B$		
	R^2	X_m	K	R^2	A	B
红壤	0.976**	310.6	2.350	0.980**	146.8	0.469
褐土	0.968**	199.6	0.443	0.998**	49.1	0.429

注: X_m 为土壤中磷的最大吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; X 为土壤对磷的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C 代表吸附平衡时土壤溶液中磷的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; K 为与吸附结合能相关的常数, $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}$; A 代表 $C=1$ (单位平衡浓度)时土壤磷吸附量; B 是Freundlich方程线性化后的线性方程的斜率; R^2 为决定系数; **表示在1%水平下显著相关。

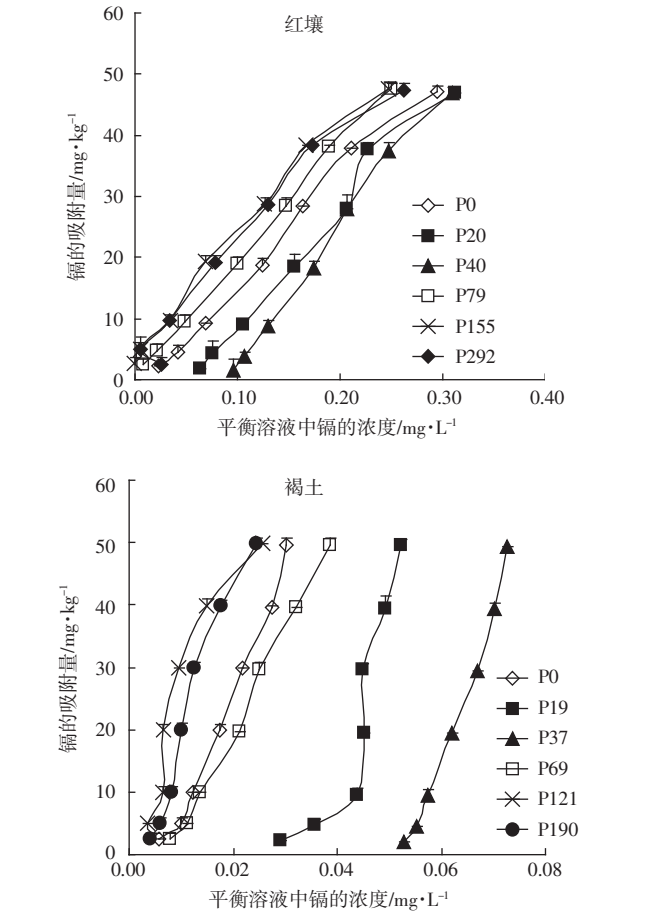
程,相关系数均在0.96以上,达极显著水平,这和其他研究结果一致^[2,20]。

Langmuir方程中红壤对磷的最大吸附量 X_m 和吸附结合能分别是褐土的1.6倍和6倍。Freundlich方程中的 A 值代表平衡液磷浓度 $C=1$ 时的土壤磷吸附量, A 值越大,土壤磷吸附能力越强^[21]。表2中,红壤 A 值是褐土的3倍,这与Langmuir方程所反映的结论一致,说明红壤对磷的吸附能力显著强于褐土。这主要是由土壤本身理化性质所决定的,褐土为恒电荷土壤,表面电荷以负电荷为主,相似性质的电荷限制了褐土对磷酸根的吸附,另外,褐土粘粒矿物主要为伊利石和蒙脱石,吸附磷能力也相对较弱。红壤是可变电荷土壤, pH 值偏酸性,低 pH 时有较大量的可变正电荷,因此增加了红壤对磷酸根的电荷吸引,并且红壤含有大量的铁、铝氧化物,吸附磷能力较强。于天仁等^[22]研究表明,磷的吸附主要发生在可变电荷土壤上,由于它们含有大量的铁、铝氧化物及高岭石等矿物成分,能够专性吸附磷酸根,而以蒙脱石、伊利石为主的恒负电荷土壤上却非这样,罗厚庭等^[23]的研究也证实了这一点。

2.2 磷酸盐吸附后对镉离子吸附的影响

图2显示,红壤和褐土在不同磷吸附量下,对镉的吸附量均随平衡液中镉离子浓度的升高而增加,二者呈极显著的线性关系。但土壤磷的吸附量不同,对镉离子吸附的影响不同。当磷的吸附量红壤小于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,褐土小于 $37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,镉离子的吸附量随磷吸附量的增加而降低;当磷的吸附量红壤大于 $79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,褐土大于 $69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,镉离子的吸附量随磷吸附量的增加而增加,即两种土壤均表现出低磷抑制、高磷促进镉离子吸附的相同趋势。表3中,相同磷吸附量下镉的分配系数 K_d (土壤对镉的平衡吸附量与平衡液中镉浓度的比值^[24])褐土显著高于红壤,褐土对镉离子的亲和力远大于红壤。另外,对比同一土壤不同处理下镉离子的分配系数可以发现,各添加磷的处理 K_d 值总体上均略大于不加磷的处理,这说明土壤自身的理化性质对镉离子的吸附起着决定性的作用,而磷酸盐的加入只是通过影响土壤表面性质而影响镉离子的吸附。

图3结果表明,当红壤吸附磷的量小于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、褐土小于 $37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,镉离子的吸附百分率(镉离子的吸附量占添加镉离子总量的百分数)小于对照(P_0 处理),平均分别减少了16%和10%;但是,当吸附磷的量红壤大于 $79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、褐土大于 $60\text{ mg}\cdot$



(图中 P0、P19、P37 等均代表土壤磷的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图 2 不同磷吸附量下镉离子的吸附等温线

Figure 2 Adsorption isotherms of cadmium ion in red soil and cinnamon soil with different phosphate adsorbed

kg^{-1} 时, 镉离子的吸附百分率分别较 P0 平均增加了 11%和 6%。这与镉离子的吸附等温线结果一致。从图 3 还可以看出, 无论是低磷还是高磷处理, 当外源镉离子的加入量较小时, 磷吸附后对镉离子的吸附的影

响较大, 吸附百分率的变化范围为 60%~100%; 而当镉离子的加入量大于 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 磷的吸附对镉离子的吸附百分率影响变小。随着镉离子加入量的增加, 红壤对镉离子的吸附率基本稳定在 90%左右, 褐土维持在 95%左右。

从以上分析可以看出, 红壤和褐土吸附磷后, 对镉离子的吸附产生一定的影响。表现为低磷抑制, 高磷促进镉离子的吸附。宗良刚和徐晓炎^[25]指出, 支持电解质会与重金属竞争土壤上的吸附点位而对土壤吸附重金属产生影响。本文中磷的吸附量较低时, 支持电解质中相对较高浓度的 Na^+ , 竞争土壤上的负电荷吸附点位, 使低磷时镉离子的吸附量降低。但是, 当土壤吸附较多的磷酸根后, 土壤的表面正电荷减少, 负电荷增加, 增强了土壤表面对重金属阳离子的吸附能力^[26-27], 镉离子吸附量明显增加。另外, 磷吸附量的增加, 减弱了土壤表面正电荷对镉离子的静电排斥作用, 使土壤表面吸附镉离子的能力增强, 这可能也是本文高磷处理下镉离子吸附量增加的一个主要原因。

2.3 磷酸盐吸附后对镉离子解吸的影响

表 4 表明, 相同镉加入量、不同磷处理下镉离子的解吸量红壤和褐土上差异几乎不显著, 但镉加入量不同、相同磷处理下, 土壤镉离子的解吸量随吸附量的增加显著增加, 两者基本成线性关系, 这与前人的结果类似^[28]。但两种土壤镉离子的解吸率(解吸量占吸附量的百分数)略有不同(图 4), 随着镉离子吸附量的增加, 红壤镉离子的解吸率呈先增加后放缓的趋势, 而褐土相同处理之间镉的解吸率变化不明显。对比不同处理之间镉离子的解吸率可以看出, 当镉离子的吸附量小于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 红壤低磷吸附(P20、P40) 下镉离子的解吸率显著大于高磷吸附(P79、P155、P292)。这可能是由于低磷吸附时镉离子主要以

表 3 红壤和褐土不同磷吸附下镉离子吸附线性方程 $X_1=K_cC_1+a$ 拟合参数

Table 3 Parameters of cadmium ion adsorption linear equation under different amount of phosphate adsorption in red soil and cinnamon soil

磷添加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	磷吸附量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	红壤			磷添加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	磷吸附量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	褐土		
		K_c	R^2	n			K_c	R^2	n
0	P0	175.2	0.989**	7	0	P0	1 978.8	0.983**	7
20	P20	188.7	0.983**	7	20	P19	2 005.3	0.783**	7
40	P40	219.9	0.993**	7	40	P37	2 332.3	0.985**	7
80	P79	191.3	0.998**	7	80	P69	1 584.9	0.994**	7
160	P155	186.1	0.986**	7	160	P121	2 164.8	0.848*	7
320	P292	181.7	0.966**	7	320	P190	2 495.5	0.960**	7

注: P0、P20、P40 等均代表土壤磷的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; X_1 代表镉的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_c 为直线的斜率, 代表镉的分配系数; C_1 为平衡液中镉离子的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; a 为拟合参数; R^2 是直线方程的决定系数; ** 表示在 1%水平下显著相关。

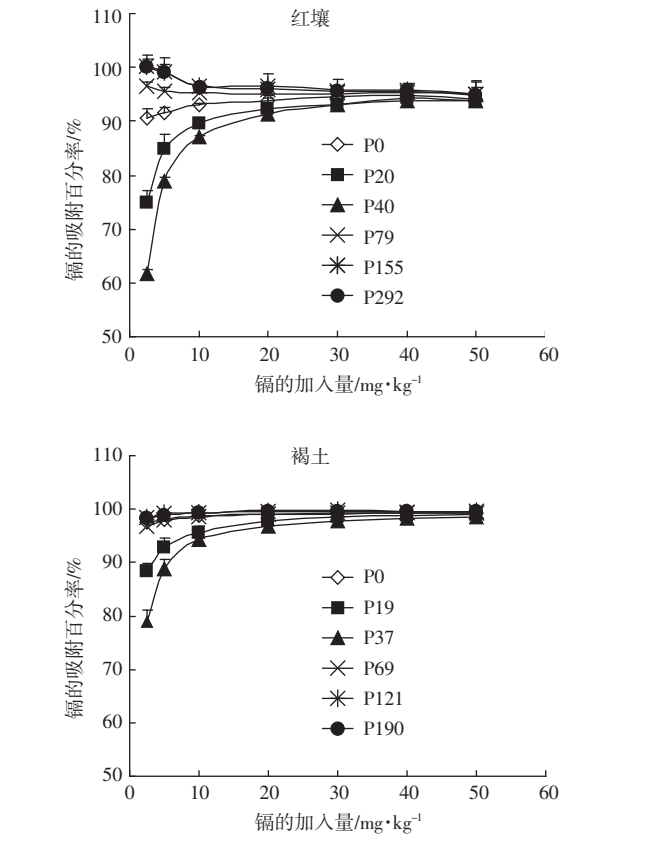


图 3 不同磷吸附量下镉离子的吸附百分数

Figure 3 Adsorbed ratio of cadmium ion in red soil and cinnamon soil with various adsorbed phosphate

离子交换吸附的形式被土壤弱吸附,加之土壤表面的正电荷以及支持电解质中的 Na⁺对镉离子产生的排斥作用,使红壤对镉的吸持能力减弱,解吸增加;但是,

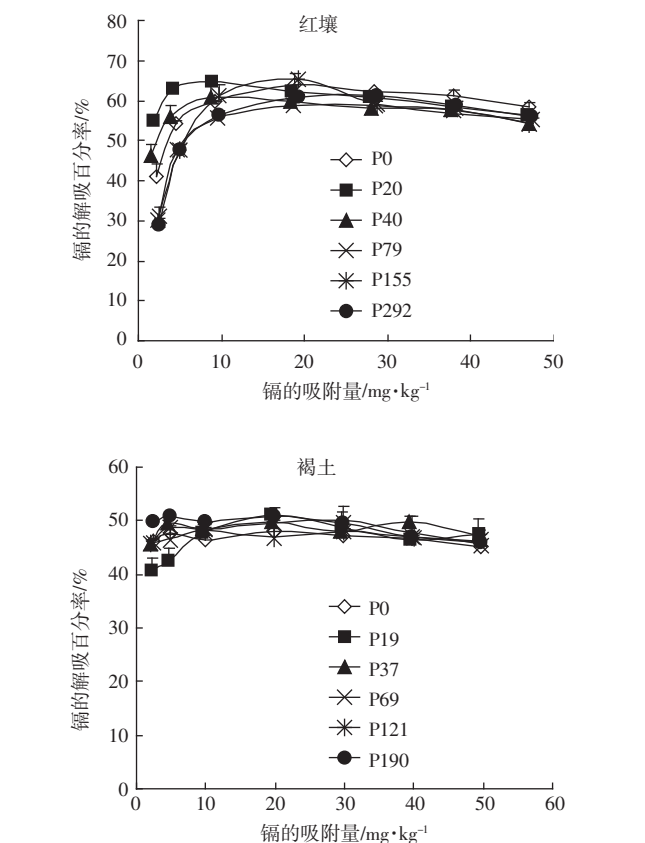


图 4 不同磷吸附量下镉的解吸百分率

Figure 4 Desorptive ratio of cadmium in red soil and cinnamon soil with various adsorbed phosphate

随着土壤磷吸附量的增加,磷酸根对镉的专性吸附增加,从而使高磷吸附下的土壤镉的解吸明显降低。

图 4 结果同时表明,红壤上无论是高磷吸附还是

		表 4 红壤和褐土不同磷吸附量下镉的解吸量						
		Table 4 Amount of desorptive cadmium in red soil and cinnamon soil under different adsorbed phosphate						
土壤	磷的吸附量	镉解吸量/mg·kg ⁻¹						
		Cd 2.5	Cd 5	Cd 10	Cd 20	Cd 30	Cd 40	Cd 50
红壤	P0	0.93 b	2.49 b	5.58 a	12.00 b	17.64 a	23.21 a	27.57 a
	P20	1.03 a	2.67 a	5.78 a	11.46 cd	17.00 b	22.06 ab	26.37 b
	P40	0.71 c	2.21 d	5.30 a	10.91 e	16.21 c	21.69 b	25.40 c
	P79	0.73 c	2.30 cd	5.30 a	11.17 de	16.76 b	21.64 b	26.29 bc
	P155	0.79 c	2.36 bc	5.90 a	12.63 a	16.98 b	22.10 ab	25.73 bc
	P292	0.72 c	2.36 bcd	5.46 a	11.69 bc	17.55 a	22.44 ab	26.47 b
褐土	P0	0.73 E	1.93 D	4.33 C	9.53 AB	14.06 A	18.52 A	22.37 A
	P19	0.80 D	1.97 D	4.58 B	9.99 AB	14.43 A	18.38 A	23.50 A
	P37	0.90 C	2.20 C	4.57 B	9.64 AB	14.11 A	19.56 A	23.29 A
	P69	1.11 B	2.28 BC	4.77 AB	9.97 AB	14.91 A	18.92 A	22.63 A
	P121	1.34 A	2.42 AB	4.80 AB	9.34 B	14.38 A	18.72 A	22.90 A
	P190	1.38 A	2.61 A	4.95 A	10.13 A	14.77 A	18.72 A	22.85 A

注: Cd2.5、Cd10 等为镉的加入量, mg·kg⁻¹; 表中纵向相同大写或者小写字母表示在 0.05 水平下差异不显著。

低磷吸附条件下,当镉离子的吸附量大于 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其解吸率变化不明显,维持在 60%左右。而褐土中镉离子的解吸率变化不明显,基本保持在 45%左右,褐土对镉离子的固持能力明显大于红壤。这主要是土壤本身的理化性质决定的。研究指出,影响土壤吸附-解吸镉离子的因子很多,各个因子的影响程度也因土壤类型而异^[27]。土壤中活性铁、铝会竞争土壤的交换点位,减少土壤对镉离子的吸附量;粘粒含量的增加能提高镉离子的吸附量;CEC 越高,负电荷量越高,通过静电吸引而吸附的镉离子也越多;土壤对镉离子的吸附随 pH 值升高而增加^[29-30]。本试验中,褐土 pH 值、碳酸钙含量、有机质、CEC 都明显的高于红壤,因此对镉离子的吸附能力强于红壤,解吸量相对较低。虽然红壤在吸附磷酸根后对镉离子的专性吸附增强,但红壤较低的 pH 值,含有较多的铁、铝氧化物^[31,32],以及表面正电荷的排斥,均降低了红壤对镉离子的吸持能力,因此解吸率较高。

3 结论

红壤和褐土对磷的吸附可用 Langmuir、Freundlich 方程进行拟合,红壤对磷的吸附大于褐土;在试验浓度范围内,红壤和褐土吸附磷后,均表现低磷抑制、高磷促进镉离子的吸附。

红壤和褐土镉离子的解吸量均随镉吸附量的增加而增加,但吸附磷后对镉解吸率的影响在两种土壤上有所不同。

参考文献:

- [1] 周世伟,徐明岗. 磷酸盐修复重金属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 soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3043-3050.
- [2] 张新明,李华兴,刘远金. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 77-80.
ZHANG Xin-ming, LI Hua-xing, LIU Yuan-jin. Study progress of phosphate adsorption and desorption in soils[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1): 77-80.
- [3] 吴双桃. 镉污染土壤治理的研究进展[J]. 广东化工, 2005(4): 40-42.
WU Shuang-tao. The latest development about the remedy of Cd-contaminated soil[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2005(4): 40-42.
- [4] 王新民,魏志华,介晓磊,等. 干湿交替条件下磷镉交互作用在油菜上的生物学效应研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 275-278.
WANG Xin-min, WEI Zhi-hua, JIE Xiao-lei, et al. Study on the bio-effect of cadmium and phosphorus interaction on oilseed rape under alternate wetting and drying cycles condition in an artificial contaminated

- calcareous soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 275-278.
- [5] 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.
 - [6] 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.
 - [7] Zwonitzer J C, Pierzynski G M, Hettiarachchi G M. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailabilities in a metal-contaminated[J]. *Soil Water Air and Soil Pollution*, 2003(143): 193-209.
 - [8] Basta N T, McGowen S L. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2004(127): 73-82.
 - [9] 刘芳,介晓磊,孙巍峰,等. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 116-120.
LIU Fang, JIE Xiao-lei, SUN Wei-feng, et al. Influence of P and Cd interaction on their accumulation in tobacco growth and uptake P and Cd[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 116-120.
 - [10] 张增强,张一平,朱兆华,等. 镉在土壤中释放的动力学特征研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(1): 63-67.
ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yi-ping, ZHU Zhao-hua. Study on kinetics characteristics of cadmium release in the soil[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2001, 29(1): 63-67.
 - [11] 赵中秋,朱永官,蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 282-286.
ZHAO Zhong-qiu, ZHU Yong-guan, CAI Yun-long. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 282-286.
 - [12] 铁梅,梁彦秋,臧树良,等. 工业污染土壤中镉的化学形态及植物修复研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 348-350.
TIE Mei, LIANG Yan-qiu, ZANG Shu-liang, et al. Chemical forms of cadmium in industrial contaminated soil and its phytoremediation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 348-350.
 - [13] Karblane H. The effect of organic, lime, and phosphorus fertilizers on Pb, Cs and Hg content in plants[J]. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Ecology*, 1996, 6(1): 52-56.
 - [14] He Q B, Singh B R. Crop uptake of cadmium from phosphorus[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1994(74): 251-265.
 - [15] Maier N A, McLaughlin M J, Heap M, et al. Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, dry matter content, and cadmium concentration[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(13-14): 2145-2165.
 - [16] 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.
 - [17] 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.
- [18] Pardo M T. Cadmium sorption-desorption by soils in the absence and presence of phosphate[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2004(35): 1553-1568.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science Publisher, 2000.
- [20] 李程峰, 刘云国, 曾光明, 等. pH 值影响 Cd 在红壤中吸附行为的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):84-88.
- LI Cheng-feng, LIU Yun-guo, ZENG Guang-ming, et al. Experimental study on pH affecting Cd absorption behavior in red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):84-88.
- [21] 徐明岗, 孙本华. 陕西土壤磷等温吸附特性及其测定条件的研究[J]. 土壤, 1997(2):109-110.
- XU Ming-gang, SUN Ben-hua. Study on characteristics of phosphorus adsorption isotherms and its determination conditions[J]. *Pedosphere*, 1997(2):109-110.
- [22] 于天仁, 季国亮, 丁昌璞, 等. 可变电荷土壤的电化学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- YU Tian-ren, JI Guo-liang, DING Chang-pu, et al. Electrochemical of variable charge soil[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [23] 罗厚庭, 董元彦, 李学垣. 可变电荷土壤吸附磷酸根后对 Cu、Zn、Cd 次级吸附的影响[J]. 华中农业大学学报, 1992, 11(4):358-363.
- LUO Hou-ting, DONG Yuan-yan, LI Xue-yuan. Effect of phosphate adsorption on the secondary adsorption of Cu、Zn、Cd in variable charge soils[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1992, 11(4): 358-363.
- [24] Gray C W, Mc Laren R G, Roberts A H C, et al. Solubility, sorption and desorption of native and added cadmium in relation to properties of soils in New Zealand[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999(50): 127-137.
- [25] 宋正国, 徐明岗, 刘平, 等. 钙、锌、钾共存对赤红壤镉吸附的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5):993-996.
- SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, LIU Ping, et al. Effects of co-exist-ing cations, Ca, K and Zn on adsorption of cadmium in lateritic red soil[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5):993-996.
- [26] Li X Y, Ding Y Y, Luo H T. Effects of phosphate adsorption on adsorp-tion-desorpton and availability of Cu and Zn ions in Ultisols and Afisols[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(4):355-362.
- [27] 熊礼明. 石灰对土壤吸附镉行为及有效性的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(1):35-38.
- XIONG Li-ming. Cadmium adsorption and availability as affected by soil liming[J]. *Research of Environmental Science*, 1994, 7(1):35-38.
- [28] 刘平, 徐明岗, 宋正国. 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.
- [29] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):510-515.
- LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effects of pH, or-ganic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 510-515.
- [30] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH 对土壤及其组分吸附和解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):320-324.
- ZHANG Hui-min, XU Ming-gang, LU Jia-long, et al. A Review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Sci*, 2005, 24(Supplement):320-324.
- [31] 谢晓梅, 翁棣. 有机酸对红壤等温吸附镉的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学), 2003, 29(5):485-489.
- XIE Xiao-mei, WENG Di. Effects of organic acids on adsorption isotherms of cadmium in red soils[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. and life sci)*, 2003, 29(5):485-489.
- [32] 邱少敏, 薛家骅. 红壤中镉的竞争吸附动力学[J]. 环境化学, 1990, 9(2):1-5.
- QIU Shao-min, XUE Jia-hua. Kinetics of Cd competitive sorption in red soil[J]. *Environmental Chemistry*, 1990, 9(2):1-5.