

离子强度和磷酸盐对铁铝矿物及土壤吸附 As(V) 的影响

吴萍萍^{1,2}, 曾希柏^{1*}, 李莲芳¹, 白玲玉¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081; 2. 安徽农业科学院土壤肥料研究所/安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230031)

摘要: 选用针铁矿、赤铁矿、水铁矿、水铝矿 4 种铁铝矿物以及性质差异较大的黑土、紫色土和红壤 3 种土壤, 研究离子强度和磷酸盐对其吸附 As(V) 的影响。结果表明, 在 0.01、0.1、1 mol·L⁻¹ 3 种离子强度下, 矿物和土壤对 As(V) 的吸附量无明显差异或随离子强度增大而增大, 其对砷的吸附以专性吸附为主。磷酸盐对矿物和土壤吸附砷的影响与其添加顺序及摩尔浓度比有关。水铝矿和水铁矿在这 3 种添加顺序下的砷吸附量无明显差异, 仅在 P/As 摩尔比较大时表现出下降趋势; 而在针铁矿和赤铁矿两种矿物上, 先添加砷时的砷吸附量高于先添加磷时或两者同时添加时, 且砷吸附量随 P/As 摩尔比的增加而逐渐下降。在黑土、紫色土和红壤上, 先添加砷比先添加磷或两者同时添加时的砷吸附量均要高, 尤其是在紫色土上。随 P/As 摩尔比升高, 土壤对砷的吸附量表现出下降趋势。

关键词: 土壤; 铁铝矿物; As(V); 离子强度; 磷酸盐

中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)03-0498-06

The Effect of Ionic Strength and Phosphate on As(V) Adsorption on Different Iron/Aluminum Minerals and Soils

WU Ping-ping^{1,2}, ZENG Xi-bai^{1*}, LI Lian-fang¹, BAI Ling-yu¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Soil and Fertilizer Institute/Provincial Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Four iron/aluminum minerals and three soils were chosen to study the effect of ionic strength and phosphate on As(V) adsorption. The results showed that, As(V) adsorption quantities by minerals and soils showed no significant differences or increased with the increase of ionic strength at the ionic strength of 0.01 mol·L⁻¹, 0.1 mol·L⁻¹ and 1 mol·L⁻¹ respectively, suggesting As(V) specific adsorption. The effect of phosphate on As(V) adsorption by minerals and soils depended on P/As molar ratio and addition sequence. There was no significant differences of As(V) adsorption among three addition sequences on gibbsite and ferrihydrite, and As(V) adsorption decreased significantly when P/As molar ratio was higher. On goethite and hematite, As(V) adsorption were higher when arsenate was added first than that when phosphate was added first or phosphate and arsenate were added at the same time, and As(V) adsorption decreased gradually with the increase of P/As molar ratio. As(V) adsorption quantities of black soil, purple soil and red soil were the highest when arsenate was added first, especially in purple soil. With the increase of P/As molar ratio, As(V) adsorption decreased gradually on three soils.

Keywords: soils; iron / aluminum minerals; As(V); ionic strength; phosphate

土壤和矿物对砷的吸附-解吸行为受很多因素影响, 如 pH、Eh、共存离子的种类和浓度及土壤理化性质等, 它们共同作用影响土壤中砷的形态和迁移转

化, 这进一步决定了砷的生物有效性及对动植物和人的毒性^[1]。在研究砷与土壤/矿物结合的机理上, 以往研究者采用了很多方法, 较早的多应用间接的化学方法, 即根据离子强度或零电点等对吸附的影响来间接判断结合类型。如 Pierce & Moore^[2]根据无定形铁氧化物表面零电点下降认为, As(Ⅲ) 在铁氧化物表面的反应属专性吸附。Hsin 等^[3]和 Manning & Goldberg^[4]的研

收稿日期: 2011-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871102)

作者简介: 吴萍萍(1982—), 女, 安徽贵池人, 博士, 主要从事土壤生态与污染土壤修复研究。E-mail: pingpingwu1982@126.com

* 通讯作者: 曾希柏 E-mail: zengxb@ieda.org.cn

究表明,As(V)在无定形铁、铝氧化物上的吸附受离子强度影响极小,表明形成了内层配合物。共存离子对砷吸附的影响也有较多报道,如 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 等,其中以磷酸盐的研究为主,因为磷酸根与砷酸根间存在相似的化学行为,对砷吸附的竞争效应较其他阴离子强,添加大量磷酸盐能够置换出土壤中的砷酸盐^[5]。此外,土壤有机质含量、粘粒含量及矿物组成等均是影响砷吸附的重要因素。由于试验条件及供试材料不同,以往研究者得出的影响 As(V)吸附的规律不尽相同,因此有必要对不同土壤和矿物吸附 As(V)的影响因素进行深入研究。

本研究采用化学方法合成纯度较高的针铁矿、赤铁矿、水铁矿和水铝矿,并选取理化性质差异较大的黑土、紫色土和红壤,研究离子强度和磷酸盐对 As(V)吸附的影响,以期进一步了解不同类型矿物和土壤对 As(V)吸附的规律,为研究砷在自然土壤中的结合转化机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的矿物类型包括人工合成的针铁矿、赤铁矿、水铁矿和水铝矿。采用化学方法合成^[6-7],将 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液或 AlCl_3 溶液与 KOH 溶液混合,在不同温度下经过不同时间老化后,离心透析得纯矿物,烘干后磨碎过 200 目筛。矿物的电荷零点和比表面积分别采用电势滴定法和 BET- N_2 吸附法测定,结果见表 1。

供试土壤选取黑土、紫色土和红壤。其中黑土采自黑龙江哈尔滨,母质为粘质沉积物;紫色土采自四川成都,为蓬莱镇组岩发育而成;红壤采自湖南衡阳,

表 1 不同类型矿物的电荷零点和比表面积

Table 1 The point of zero charge (PZC) and specific surface area (SSA) of different minerals

测定项目	水铁矿	针铁矿	赤铁矿	水铝矿
PZC	7.2	8.3	8.2	7.8
SSA/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	126.6	37.4	32.7	57.3

由第四纪红色粘土发育而成。采样深度均为 0~20 cm,风干后分别过 20 目筛和 100 目筛。供试土壤的基本理化性状根据《土壤农化分析》测定,土壤矿物组成采用 X 射线衍射光谱仪(Rigaku D/Max-RC)测定,结果分别见表 2 和表 3。

1.2 试验方法

1.2.1 离子强度对矿物和土壤吸附砷的影响

称取铁、铝矿物粉末 0.050 0 g 或土样 1.000 0 g 于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 初始浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ As(V)的 Na_3AsO_4 溶液,溶液离子强度事先调节至 0.01、0.1、1.0 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 3 种水平,室温下振荡 24 h 后取出离心,采用氢化物发生-原子荧光法(北京吉天,AFS-9120)测定上清液中的砷含量,根据与初始浓度的差值计算砷吸附量,各处理重复 3 次,同时做空白试验。

1.2.2 磷酸盐对矿物和土壤吸附砷的影响

称取铁、铝矿物粉末 0.050 0 g 或土样 1.000 0 g 于 50 mL 离心管中,按不同的先后顺序加入 As(V)溶液($\text{Na}_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)和磷酸盐溶液($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。顺序 1:加入 20 mL As(V)溶液,振荡 24 h 后离心,弃去上清液,往残渣中分别加入 20 mL 不同浓度的磷酸盐溶液;顺序 2:分别加入 20 mL 不同浓度的磷酸盐溶液,振荡 24 h 后离心,弃去上清液,往残渣中加入 20

表 2 供试土壤的主要理化性状

Table 2 The physico-chemical properties of experimental soils

土壤类型	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总 As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	游离 Fe_2O_3 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	游离 Al_2O_3 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH*
黑土	77.0	0.914	42.59	7.18	0.143	10.59	0.76	7.62
紫色土	13.2	0.840	4.99	7.64	0.062	13.14	0.61	7.89
红壤	20.8	0.655	15.46	18.71	0.027	32.63	0.50	4.60

注:* 土壤 pH 测定时的土水比为 1:2.5。

表 3 供试土壤的矿物组成(%)

Table 3 The mineral composing of experimental soils(%)

土壤类型	高岭石	蒙脱石	伊利石	绿泥石	石英	白云石	方解石	长石	闪石	铁矿
黑土	—	—	5	5	60	—	10	15	5	—
紫色土	—	—	10	5	60	5	10	10	—	—
红壤	—	—	10	5	80	—	—	—	—	5

注:—表示未测定出含此组分。

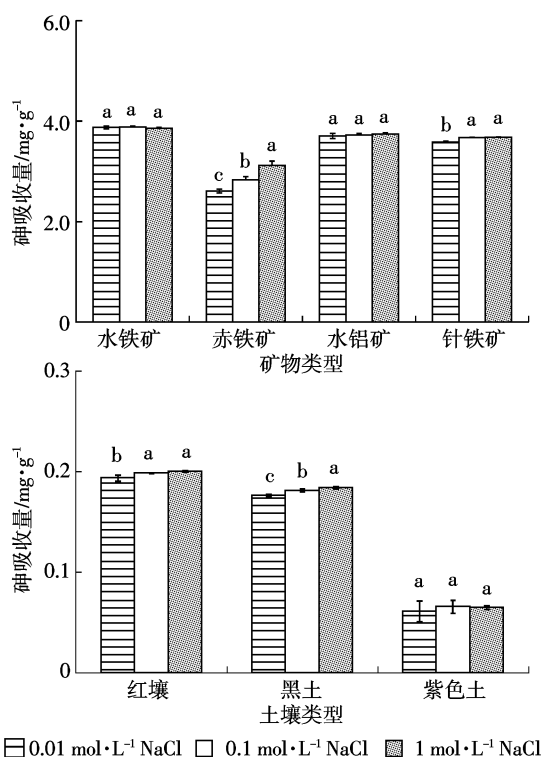
mL As(V)溶液;顺序 3:加入含不同摩尔浓度砷与磷的混合溶液。

As(V)的初始浓度固定为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷酸盐溶液分别配制为 0.01 、 0.05 、 0.1 、 0.5 、 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 种浓度, 使得 P/As 摩尔浓度比分别为 10 、 5 、 1 、 0.5 、 0.1 , 室温下振荡 24 h 后离心, 测定上清液中砷的浓度并计算砷吸附量, 各处理重复 3 次, 同时做空白试验。

2 结果与分析

2.1 离子强度的影响

由图 1 可见, 离子强度对水铁矿、水铝矿和针铁矿的影响较小, 3 种离子强度下几种矿物对 As(V) 的吸附量间没有明显差异, 变化幅度分别为 0.3% 、 1.0% 和 2.6% , 可见这 3 种矿物对砷的吸附受离子强度的影响较小, 其吸附作用以专性吸附为主, 主要以表面络合作用形成内层配合物。赤铁矿则表现出吸附量随离子强度增大而增大的情况, $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 离子强度时的吸附量比 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时上升 19.6% , 吸附量随离子强度增加而增大也是内层配位及专性吸附的一种表现, 因此可判断赤铁矿对 As(V) 的吸附也以内层配位为主。



图中不同字母表示不同离子强度下差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 离子强度对矿物和土壤吸附砷的影响

Figure 1 The effect of ionic strength on As(V) adsorption by different minerals and soils

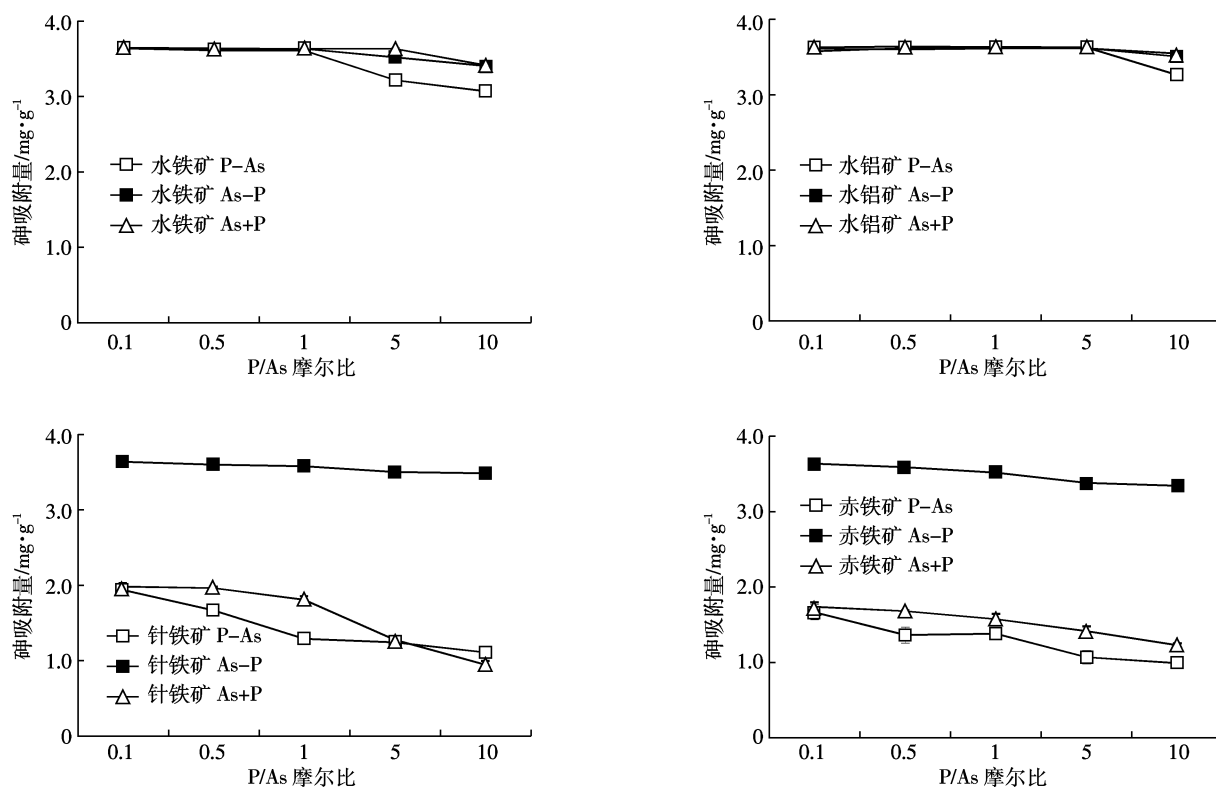
不同离子强度下, 红壤和紫色土的砷吸附量间差异不显著, 红壤、黑土和紫色土均表现出吸附量随离子强度增大而增大的趋势, 但增加幅度较小, 分别为 3.4% 、 4.4% 和 6.1% 。可见, 土壤对砷的吸附也以专性吸附为主, 土壤粘粒与砷之间主要形成内层配合物。

2.2 磷酸盐的影响

磷酸盐对 4 种铁、铝矿吸附砷的影响有明显不同 (图 2), 水铁矿和水铝矿中 3 种添加顺序下的吸附量间差异不显著, 仅在 P/As 摩尔比较高时才表现出一定差异, 而针铁矿和赤铁矿的吸附量则存在显著差异。当 P/As 摩尔比在 $0.1 \sim 1$ 时, 水铁矿的吸附量在 3 种添加顺序下几乎相同, 砷吸附量在 $3.61 \sim 3.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 变化幅度较小; 当 P/As 摩尔比大于 1 时, 先加砷后加磷与先加磷后加砷时的砷吸附量开始表现出下降趋势, 下降幅度分别为 6.6% 和 15.7% 。磷与砷同时添加时, 水铁矿对砷的吸附量降低程度较小, 仅当 P/As 摩尔比为 10 时才显著下降, 下降幅度为 6.0% 。水铝矿的变化趋势与水铁矿相似, 先加砷后加磷、先加磷后加砷与两者同时添加时的吸附量分别处于 $3.50 \sim 3.63$ 、 $3.25 \sim 3.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 及 $3.54 \sim 3.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 几种添加顺序下的砷吸附量没有表现出明显的随 P/As 摩尔比升高而下降的趋势, 仅在 P/As 摩尔比 > 5 时显著降低, 下降幅度分别为 8.7% 、 3.4% 和 1.8% 。

针铁矿和赤铁矿表现出不同规律, 先加砷后加磷时的砷吸附量显著高于其他两种情况, 砷吸附量分别为 $3.48 \sim 3.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $3.34 \sim 3.64 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各 P/As 摩尔比下, 磷与砷同时加时的吸附量要略高于先加磷后加砷, 差异未达显著水平, 针铁矿和赤铁矿在前种添加顺序下的吸附量分别为 $0.95 \sim 1.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.23 \sim 1.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 而在后种添加顺序下的吸附量则为 $1.11 \sim 1.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.99 \sim 1.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 随 P/As 摩尔比的升高, 几种添加顺序下的砷吸附量都表现出下降趋势, 下降幅度为 $4.1\% \sim 52.1\%$ 之间。

总体而言, 先加砷后加磷时 4 种矿物对砷的吸附量间差异较小, 而在其他两种添加顺序下水铁矿和水铝矿的吸附量明显较针铁矿和赤铁矿高, 这与 4 种矿物对砷的吸附能力有关。水铁矿是一种无定形铁氧化物, 属不稳定态, 表面存在大量四面体结构单元, 且结晶度差、比表面积大, 因此对砷具有较强的吸附能力^[8], 而赤铁矿和针铁矿是水铁矿进一步老化的产物, 结晶程度较高, 三者吸附砷的能力表现为水铁矿 $>$ 针铁矿 $>$ 赤铁矿。本研究合成的水铝矿为三水铝石 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 它对砷也有较强的吸附能力, 其吸附量接近于水铁



图中 As-P 表示添加顺序为先砷后磷;P-As 表示添加顺序为先磷后砷;As+P 表示添加顺序为砷与磷同时添加。下同

In figure 2, As-P represent As added before P, P-As represent P added before As, and As+P represent As and P added at the same time. The same below.

图2 磷酸盐对4种矿物吸附砷的影响

Figure 2 The effect of phosphate on As(V) adsorption on different minerals

矿,高于针铁矿和赤铁矿。

由图3可见,3种土壤中均是先添加砷后添加磷处理下砷的吸附量最高,达显著水平。红壤、黑土和紫色土的吸附量分别为0.14~0.18、0.14~0.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和0.16~0.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;砷与磷同时添加处理的砷吸附量与先加磷后加砷处理相比略高,尤其是在P/As摩尔比较高的情况下。3种土壤中,本身有效磷含量较低的紫色土受磷酸盐添加顺序影响较大,砷与磷同时加处理和先加磷后加砷处理的砷吸附量分别为0.01~0.04 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和0.03~0.04 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,显著低于先加砷后加磷处理下的砷吸附量,而红壤和黑土在3种添加顺序下吸附量间的差距相对较小,这与3种土壤的理化性质和矿物组成等有关,黑土的有机质和速效磷含量较高,红壤的游离铁含量较高且pH值较低,两者可以提供较多的吸附位点,因此对砷的吸附能力较强,而紫色土吸附的砷相对较少。随P/As摩尔比的升高,黑土、红壤和紫色土的砷吸附量均表现出缓慢下降趋势,且当P/As摩尔比>1后差异表现出显著水平,尤其是在磷和砷同时添加的情况下,P/As摩尔比为10时的吸附量较0.1时分别下降47.2%、49.4%和80.7%,而先

添加磷或先添加砷情况下的吸附量下降幅度较小,在3.8%~25.9%之间。

3 讨论

离子强度对吸附的影响是判断吸附为专性吸附还是非专性吸附的重要依据。一般把吸附行为不受离子强度影响或吸附量随离子强度增大而增大作为是内层配位及专性吸附的判断证据,而把吸附量随着溶液离子强度增加而趋于减少作为形成外层络合物的表现,即简单的作为相反电荷被静电吸附在扩散层^[9]。通常认为,离子强度可通过3种途径影响土壤对重金属离子的吸附:①由于生成离子对或者影响介质的pH,使游离金属离子的活度发生变化;②支持电解质的阳离子与重金属离子发生竞争吸附;③使土壤吸附平面的静电电位发生变化^[10]。

本研究中,在3种离子强度下,几种土壤和矿物对砷的吸附均未表现出明显差异,这与以往研究结果相似,如Echeverría等^[11]的研究表明,伊利石对Ni的吸附量受离子强度变化的影响很小,表现为专性吸附。而O'Day等^[12]发现随离子强度增大吸附量降低,

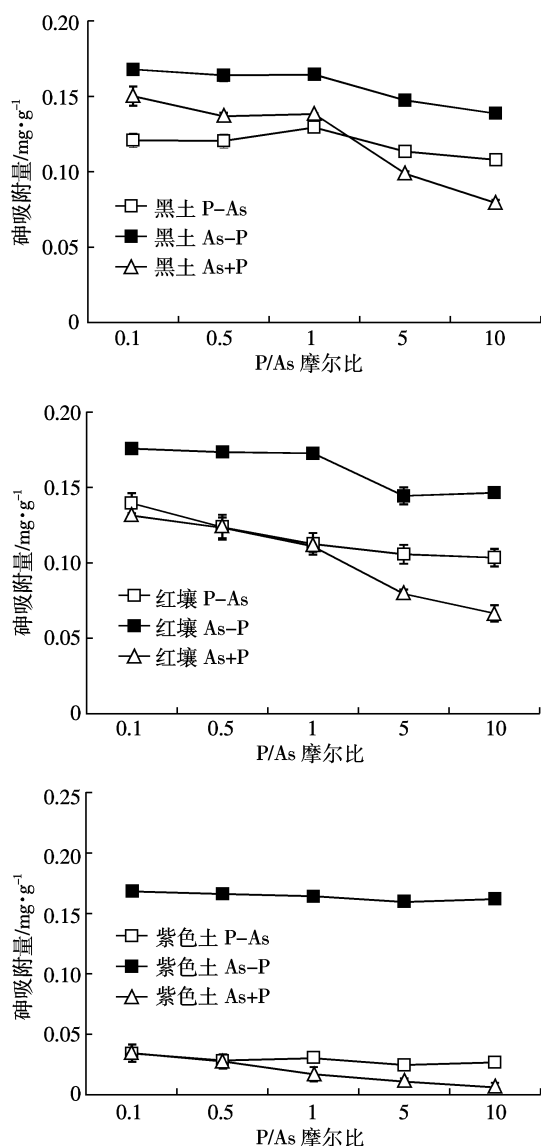


图3 磷酸盐对3种土壤吸附砷的影响

Figure 3 The effect of phosphate on As(V) adsorption on different soils

这可能与离子强度的大小有一定关系,低离子强度范围内常表现出较小影响。Goldberg & Johnston^[13]研究指出,在无定形铁铝氧化物上离子强度为 0.02~0.1 mol·L⁻¹ 时与砷吸附间的关系不明显,在 0.1~1.0 mol·L⁻¹ 才表现出显著影响,且 As(Ⅲ)的吸附受离子强度影响较大,表现出随离子强度增加而下降的趋势,并由此推论出铁、铝氧化物与 As(Ⅲ)的结合要比与 As(V)的结合弱。

磷与砷同属第 V 族元素,磷酸盐与砷酸盐在土壤中有相似的化学行为,在土壤中形成的化合物也相似,因此两者会竞争吸附点位。有研究表明,添加大量 PO₄³⁻能置换出土壤中的 AsO₄³⁻,但这种竞争效应一般

发生在吸附位点饱和的情况下,Hingston 等^[14]在针铁矿和三水铝石上位点饱和时观测到砷和磷的竞争吸附,且磷酸根的吸附较高。Manning & Goldberg^[15]研究也发现,砷酸盐吸附略低于磷酸盐,特别是在中性或碱性介质中。Roy 等^[16]以 3 种土样为吸附剂时发现 PO₄³⁻对 AsO₄³⁻吸附的竞争效应大于 AsO₄³⁻对 PO₄³⁻的竞争效应。类似的研究指出,土壤对磷的亲和力远大于对砷的亲和力,当二者浓度相当时,土壤主要吸附磷酸根,砷酸根被置换下来^[17-18]。但也有一些报道提出不同观点,如范稚莲等^[19]研究发现,褐土对砷的吸附能力高于对磷的吸附能力,当土壤中砷的添加量不超过 800 mg·kg⁻¹ 时,砷可以提高土壤中磷的生物有效性。Lumsdon 等^[20]研究发现,与磷酸根相比,砷酸根吸附能力更强,因为砷酸根离子较大,且与表面某些 OH 功能团的结合更紧密。Gao & Mucci^[21]在针铁矿上的研究也表明,砷酸根的亲和力要高于磷酸根。

本研究中,磷酸盐的存在对砷吸附有明显作用,先加砷时土壤和矿物表面的吸附点位较多地被砷占据,即使再添加磷,也仅能转换出小部分砷,而两者同时添加时,砷与磷要竞争有限的吸附点位,不同的土壤和矿物对磷与砷表现出不同的吸附亲和力,吸附量存在明显不同;先加磷后加砷时的砷吸附量最低,此种情况下土壤和矿物较多地吸附磷,对砷的吸附较少。磷酸盐对砷吸附的影响与土壤和矿物类型也有关,如水铁矿和水铝矿两种吸附能力较强的矿物上 3 种添加顺序间砷吸附量差异较小,这与它们表面含有较多的吸附点位有关,当 P/As 摩尔比较小时,有足够的吸附点位供给磷与砷,只有在磷、砷较多时吸附量才显著降低;而针铁矿和赤铁矿的表面吸附点位较少,因此随 P/As 摩尔比的升高砷吸附量表现出逐渐下降趋势。

4 小结

(1) 在 0.01、0.1、1.0 mol·L⁻¹ 3 种离子强度下,红壤、紫色土和水铁矿、水铝矿及针铁矿对砷的吸附量随离子强度增大无明显变化,黑土和赤铁矿的吸附量随离子强度增大而增大,几种土壤和矿物对砷的吸附均以内层配位为主。

(2) 磷酸盐对土壤吸附砷的影响与其添加顺序与摩尔浓度比有关,先添加砷比先添加磷或两者同时添加时的吸附量均要高,且随 P/As 摩尔比的升高,吸附量逐渐下降。3 种磷、砷添加顺序下,几种矿物对砷的吸附表现出不同规律。水铝矿和水铁矿上,3 种磷、砷

添加顺序下的吸附量无明显差异, 仅在 P/As 摩尔比较高时表现出下降趋势; 而在针铁矿和赤铁矿上, 先添加砷后加磷时的吸附量高于先加磷后加砷及两者同时添加时, 且砷吸附量随 P/As 摩尔比的增加而逐渐下降。

参考文献:

- [1] Nicholas D R, Ramamoorthy S, Palace V, et al. Biogeochemical transformations of arsenic in circumneutral freshwater sediments[J]. *Biodegradation*, 2003, 14: 123–137.
- [2] Pierce M Z, Moore C B. Adsorption of arsenite on amorphous iron hydroxide from dilute aqueous solution[J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, 14(2): 214–216.
- [3] Hsia T H, Lo S L, Lin C F, et al. Characterization of arsenate adsorption on hydrous iron oxide using chemical and physical methods[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1994, 85(1): 1–7.
- [4] Manning B A, Goldberg S. Adsorption and stability of Arsenic(Ⅲ) at the clay mineral–water interface[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997b, 31: 2005–2011.
- [5] Woolson E A, Axley J H, Kearney P C. The chemistry and phytotoxicity of arsenic in soils: II. Effects of time and phosphorus[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1973, 37: 254–259.
- [6] Schwertmann U, Cornell R M. Iron oxides in the laboratory: Preparation and characterization[M]. VCH, Weinheim, Germany, 2000.
- [7] Sims J R, Bingham F T. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides, and soil materials: II. Sesquioxides[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1968, 32: 364–369.
- [8] Jambor J L, Dutrizac J E. Occurrence and constitution of natural and synthetic ferrihydrite, a widespread iron oxyhydroxide[J]. *Chemical Reviews*, 1998, 98: 2549–2585.
- [9] Mohapatra D, Mishra D, Chaudhury G R, et al. Arsenic adsorption mechanism on clay minerals and its dependence on temperature[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, 24(3): 426–430.
- [10] 邹献中, 徐建民, 赵安珍, 等. 离子强度和 pH 对可变电荷土壤与铜离子相互作用的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 845–851.
- ZOU Xian-zhong, XU Jian-min, ZHAO An-zhen, et al. Effects of ionic strength and pH on interaction between Cu^{2+} and variable charge soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 845–851.
- [11] Echeverría J, Indurain J, Churio E, et al. Simultaneous effect of pH, temperature, ionic strength, and initial concentration on the retention of Ni on illite[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2003, 218: 175–187.
- [12] O'Day P A, Parks G A, Brown G E. Molecular structure and binding sites of cobalt(Ⅱ) surface complexes on kaolinite from X-ray absorptions spectroscopy[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1994, 42(3): 337–355.
- [13] Goldberg S, Johnston C T. Mechanisms of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 234: 204–216.
- [14] Hingston F J, Posner A M, Quirk J P. Competitive adsorption of negatively charged ligands on oxide surfaces[J]. *Discussions of Faraday Society*, 1971, 52: 334–342.
- [15] Manning B A, Goldberg S. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996b, 60: 121–131.
- [16] Roy W R, Hassett J J, Griffin R A. Competitive coefficient for the adsorption of arsenate, molybdate, and phosphate mixtures by soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 1176–1182.
- [17] 雷梅, 陈同斌, 范稚连, 等. 磷对土壤中砷吸附的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1989–1992.
- LEI Mei, CHEN Tong-bin, FAN Zhi-lian, et al. Effect of phosphorus on arsenic adsorption by three different soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1989–1992.
- [18] 魏显有, 王秀敏, 刘云惠, 等. 土壤中砷的吸附行为及其形态分布研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(3): 28–30, 55.
- WEI Xian-you, WANG Xiu-min, LIU Yun-hui, et al. The study of the adsorptive behaviour of arsenic in soil and its form distribution[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1999, 22(3): 28–30, 55.
- [19] 范稚连, 雷梅, 陈同斌, 等. 砷对土壤-蜈蚣草系统中磷生物有效性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 536–541.
- FAN Zhi-lian, LEI Mei, CHEN Tong-bin, et al. Phosphorus availability in soil-*Pteris vittata* L. system affected by arsenic[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 536–541.
- [20] Lumsdon D G, Fraser A R, Russell J D, et al. New infrared band assignments for the arsenate ion adsorbed on synthetic goethite(α -FeOOH) [J]. *Journal of Soil Science*, 1984, 35: 381–386.
- [21] Gao Y, Mucci A. Acid base reactions, phosphate and arsenate complexation and their competitive adsorption at the surface of goethite in 0.7 M NaCl solution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 2361–2378.