

磷肥施用对土壤中砷生物有效性的影响

耿志席^{1,2}, 刘小虎¹, 李莲芳², 曾希柏²

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110161; 2.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)

摘要:通过盆栽试验,研究了钙镁磷肥和过磷酸钙对土壤砷的生物有效性的影响。结果表明,施用钙镁磷肥和过磷酸钙能显著促进小白菜的生长,与对照相比生物量分别提高了约149%和119%;施磷可显著提高土壤有效态砷含量,其中钙镁磷肥高、低施肥量处理分别比对照增加了52.2%和20.9%,过磷酸钙高、低量施肥处理比对照分别提高了15.0%和5.5%;在同一施磷水平下,钙镁磷肥处理的土壤中有有效态砷含量明显高于过磷酸钙处理,施磷可导致小白菜对砷的吸收总量显著增加($P<0.05$),施用钙镁磷肥处理的小白菜砷吸收量的增加幅度较大。磷肥施用可在一定程度上提高土壤中砷的生物有效性,其中施用钙镁磷肥比过磷酸钙的效果更为明显。

关键词:钙镁磷肥;过磷酸钙;砷;生物有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2338-05

Effects of Phosphorus Fertilization on the Bioavailability of Arsenic in Soils

GENG Zhi-xi^{1,2}, LIU Xiao-hu¹, LI Lian-fang², ZENG Xi-bai²

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The Key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture PRC, Beijing 100081, China)

Abstract: Effects of two kinds of phosphorus fertilizer including superphosphate (SP) and calcium magnesium phosphate (CMP) application on the growth of bok choy (*Brassica chinensis*) and bioavailability of arsenic in soils were studied through a pot experiment. The results indicated that application of SP and CMP could significantly promote the growth of bok choy. Compared with the control (CK) treatment, the biomass of bok choy increased by 149% and 119%, respectively. The biomass of bok choy for the treatments with high P application rates was more than that for the treatment with low P application rate for these two kinds of phosphorus fertilizers. It was more beneficial to increase the biomass of bok choy with the treatment of CMP than that of SP. Application of phosphate fertilizer could increase the amount of available arsenic in soils, the increased percentage reached 52.2% and 20.9% respectively for the treatments of high and low application rates of CMP, while those for the treatments of high and low application rates of SP were 15.0% and 5.5%. At the same level of phosphate application, the available arsenic content in soils was significantly higher for the CMP treatment compared with that of SP treatment. The arsenic amount absorbed in bok choy significantly increased with application of phosphate application ($P<0.05$), and the CMP treatment showed higher increased amount of arsenic absorption in bok choy compared with other treatments. Therefore phosphate application could increase the arsenic bioavailability in soils to certain degree, and it was more obvious for the CMP treatment.

Keywords: calcium magnesium phosphate; superphosphate; arsenic; bioavailability

磷、砷属于同族元素,物理化学性质相似,土壤中的磷和砷之间存在着相互作用关系,两者均可竞争同

一吸附位点^[1]。有研究表明,磷浓度变化可影响土壤中砷的吸持和解吸过程,提高磷浓度可降低土壤对砷的吸持能力^[2]。而磷的施用对植物吸收砷的影响究竟表现为协同作用还是拮抗效应,其说法亦不统一。一些专家从植物对磷、砷的吸收系统的角度进行了阐释并认为,植物对磷和砷的吸收是在同一系统进行的,植物系统中的磷会限制对砷的吸收和积累,且在高磷浓

收稿日期:2009-05-04

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2007BAD89B03);公益性科研院所基本科研业务费

作者简介:耿志席,男,在读硕士,研究方向为农田土壤重金属污染。

E-mail: gengzhixi1219@163.com

通讯作者:曾希柏 E-mail: zengxb@cjac.org.cn

度下, 砷与磷可竞争植株根际细胞间的膜转运蛋白, 从而表现出明显的拮抗作用^[3-5]。但也有研究认为, 在高磷浓度时, 磷砷之间并不表现为拮抗作用而以协同促进作用为主^[6]。土壤中磷、砷之间相互作用往往通过影响土壤中砷的形态从而影响植物吸收, 最终通过食物链影响人体健康。本文以湖南郴州地区典型砷污染的菜地土为试验土壤, 小白菜为供试植物, 开展盆栽试验, 研究施用磷肥(钙镁磷肥和过磷酸钙)对小白菜生长及土壤砷生物有效性的影响, 为该地区通过科学施肥来降低砷污染土壤的环境风险提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为湖南郴州地区砷污染的菜地土, 其基本理化性质为 pH 6.03、全氮 $2.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $16.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总砷 $42.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验采用聚乙烯塑料盆钵(上下直径分别为 25 cm、20 cm, 高 30 cm), 土壤经自然风干过 2 mm 筛, 均匀混合后每盆装土 2.0 kg。

1.2 试验设计

试验处理设计为: ①不施肥处理(CK); ②低量钙镁磷肥; ③高量钙镁磷肥; ④低量过磷酸钙; ⑤高量过磷酸钙。磷肥施用量设置为两个水平: 低量 $0.085 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和高量 $0.170 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 每处理重复 4 次。氮肥和钾肥以 NH_4Cl 和 KCl (均为分析纯)的形式施入, 施肥量参照当地菜地施肥习惯, 维持常规施肥水平, 即 N $0.175 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、K $0.085 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验过程中, 用称重法使土壤含水量保持在田间持水量的 70% 左右。

1.3 样品采集与分析方法

小白菜生长期(本试验为 50 d)结束时测定其生物量, 同时采取植物和土壤样品进行室内分析。

土壤总砷前处理采用美国国家环保局推荐的 USEPA 3050B 方法^[7]消化, 并采用氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定总砷, 仪器检测限为 $0.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 土壤有效态砷含量采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Cl}$ 浸提^[8], 即称取 1.000 0 g 风干土壤, 加入 25 mL 的 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Cl}$ 溶液, 于 25 °C 恒温振荡, 离心($3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)并过滤, 保留上清液并用 HG-AFS 法进行测定; 植物样品总砷的前处理采用修改后的 EPA3010A 方法^[9], 用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1(\text{V/V})$ 进行消化, 氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)法测定。所用试剂均为优级纯。

1.4 数据处理

采用 SAS8.1 软件进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施用过磷酸钙和钙镁磷肥对砷污染土壤中小白菜生长的影响

对钙镁磷肥和过磷酸钙在两种不同施肥水平下的小白菜生物量分别进行测定, 其结果如表 1 所示。

表 1 施用钙镁磷肥和过磷酸钙对小白菜生物量的影响

Table 1 Effects of calcium magnesium phosphate and superphosphate application on biomass of bok choy

施肥处理		生物量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$
钙镁磷肥	低量	$10.25 \pm 1.03(\text{a})^*$
	高量	$10.45 \pm 1.31(\text{a})$
过磷酸钙	低量	$7.74 \pm 1.01(\text{b})$
	高量	$9.18 \pm 0.65(\text{ab})$
CK		$4.19 \pm 0.69(\text{c})$

注: a、b、c 中相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著;
* 表示 $P < 0.05$ 显著性水平, 下同。

Note: The same letter with a, b and c means no significant difference, and different letter means significant difference. * means significant difference at 0.05 level, the same below..

从表 1 可以看出, 磷肥施用可以显著提高小白菜的生物量, 与对照处理 CK 相比, 施磷处理的小白菜生物量均显著提高($P < 0.05$), 而高水平的施磷处理的生物量均高于低水平的施磷处理。其中, 高量钙镁磷肥处理的生物量亦高出低量处理 $0.200 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, 对过磷酸钙处理而言, 高磷处理比低磷处理高出 $1.437 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, 生物量提高了 18.6%。将施磷与不施磷处理进行比较, 施用钙镁磷肥和过磷酸钙处理平均比 CK 处理分别提高了 $6.153 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 、 $4.265 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, 其增幅分别达 146%、101%, 相比而言, 施用钙镁磷肥比过磷酸钙更利于促进小白菜的生长。与此同时, 施用磷肥后生物量的变化趋势与试验过程中不同处理下小白菜的长势状况完全吻合, 即 CK 处理的植株生长弱小, 而施用不同磷肥处理的小白菜长势良好, 其中, 钙镁磷肥高量处理下小白菜植株生长最为茂盛。由此看来, 施用磷肥能明显促进小白菜的生长, 并可显著提高小白菜的生物量, 且在本试验土壤砷含量($42.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)明显超过国家土壤 II 级标准($\text{pH} < 6.5$; $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的情况下, 未发现小白菜的生长受到明显砷毒害作用。

2.2 施用过磷酸钙和钙镁磷肥对土壤有效态砷含量的影响

磷肥施用可以明显影响砷污染土壤中作物的生

长,并对土壤中有效态砷含量构成一定影响。在盆栽试验结束即试验进行至第 50 d 时,对不同磷肥处理下的土壤有效态砷含量进行分析,相关结果如表 2 所示。

表 2 施用钙镁磷肥和过磷酸钙对土壤有效态砷含量的影响

Table 2 Effects of calcium magnesium phosphate and superphosphate application on the available arsenic content in soils

施肥处理		土壤有效态砷含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
钙镁磷肥	低量	30.59±2.44(b)*	6.43±0.13(ab)
	高量	38.48±6.74(a)	6.46±0.20(a)
过磷酸钙	低量	26.71±4.57(b)	5.74±0.13(c)
	高量	29.13±0.23(b)	5.83±0.10(c)
CK		25.25±1.97(b)	6.11±0.04(abc)
原土		28.72±0.58(b)	6.03±0.25(bc)

施用磷肥处理的土壤中有效态砷含量明显高于不施磷肥处理,对同一种磷肥处理而言,高磷处理的土壤有效态砷含量均高于低磷处理,而钙镁磷肥处理相比于过磷酸钙处理,更利于增加土壤中有有效态砷含量。从土壤有效态砷含量的具体情况来看,不同磷肥类型对土壤有效态砷含量的影响不同,低量、高量钙镁磷肥处理分别比 CK 提高了 5.34 和 13.23 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其增加幅度分别达 20.9%和 52.2%;低量、高量过磷酸钙处理分别比 CK 提高了 1.46 和 3.88 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加百分比为 5.5%和 15.0%。在同一施磷水平下,钙镁磷肥处理中土壤有效态砷的含量明显高于过磷酸钙处理,其中,低量钙镁磷肥处理比低量过磷酸钙处理高出 14.6%,而高量钙镁磷肥处理则比高量过磷酸钙处理超出 32.3%。对同一种磷肥的不同施磷水平比较,可以发现随着施磷水平的提高,土壤中有有效态砷含量呈增加趋势,即钙镁磷肥的高磷处理中土壤有效态砷含量高于低磷处理,且其高、低量处理间土壤有效态砷含量差异显著($P<0.05$),过磷酸钙的高量处理亦高于低量处理。另外,与原土比较,CK 处理土壤有效态砷含量有所降低,而施磷处理中,除低量过磷酸钙处理有所降低外(但仍高于 CK 处理),其他 3 个施磷处理均比原土中有有效态砷含量有所提高,其中以高量钙镁磷肥处理提高的幅度最大,增幅为 36.0%,而高量过磷酸钙处理的增加幅度较小,仅为 2.8%。

2.3 施用过磷酸钙和钙镁磷肥对小白菜砷吸收量的影响

通过对试验结束后的小白菜进行取样并测定其

体内砷浓度,结合生物产量计算整个生育期小白菜植株砷吸收量,以此为基础进行统计分析的相关结果如表 3 所示。

表 3 施用钙镁磷肥和过磷酸钙对小白菜吸收砷的影响

Table 3 Effects of calcium magnesium phosphate and superphosphate application on arsenic absorption in bok choy

施肥处理		植株砷吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$	植株砷含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
钙镁磷肥	低量	10.17±2.58(ab)*	984.5±189.2(a)
	高量	16.85±11.48(a)	1 596.8±973.2(a)
过磷酸钙	低量	10.26±6.19(ab)	1 285.6±623.7(a)
	高量	8.08±3.75(ab)	884.8±100.8(a)
CK		5.48±2.24(c)	1 270.3±318.2(a)

在不同的磷肥施用处理下,小白菜植株砷吸收量存在较大差异,且根据施用磷肥类型的不同表现不一。从小白菜植株在整个生育期砷吸收量来看,将施磷与不施磷处理比较,发现向砷污染土壤中施磷可导致小白菜砷吸收量增加,其中,低量、高量钙镁磷肥处理的小白菜砷吸收量比对照处理分别增加了 71.6%和 171.4%,而低量、高量过磷酸钙处理比对照处理的小白菜砷吸收量分别增加了 79.1%和 55.0%。将不同施磷水平比较,施用不同类型磷肥对小白菜砷吸收量的影响各不相同,其中,钙镁磷肥处理的小白菜砷吸收量随着施磷水平提高而增加,高量钙镁磷肥处理比低量处理的小白菜砷吸收量增加了 5.547 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$,增加幅度为 58.1%;而对过磷酸钙处理而言,低量处理更利于小白菜对砷的吸收,高磷处理比低磷处理的小白菜砷吸收量降低了 13.4%,在高施磷水平下的两种磷肥类型比较,钙镁磷肥更利于小白菜从土壤中吸收砷,其中,高量钙镁磷肥处理比高量过磷酸钙处理提高了 75.1%。这与上述结果中施磷可导致土壤中砷的活化,即土壤中有有效态砷含量随着施磷水平的提高而显著升高导致小白菜对砷吸收量增加,尤以钙镁磷肥的趋势更为明显的规律基本一致。

由此可见,两种不同形态磷肥对小白菜吸收砷的影响各异,从不同处理植株砷含量看,虽然施磷肥的各处理与 CK 间无显著差异,但高量钙镁磷肥与低量过磷酸钙处理下小白菜植株的砷含量均有不同程度的提高。从植株吸收砷的总量来看,在施用不同量钙镁磷肥与过磷酸钙 4 种处理下,小白菜植株吸收的砷量均显著高于对照处理,其中以高量钙镁磷肥与低量过磷酸钙处理的增加幅度更为明显,说明施用高量钙镁磷肥和低量过磷酸钙时可能更利于小白菜吸收土壤中的砷。

为了更好地揭示施用磷肥如何影响植物从土壤中吸收砷的科学问题及揭示相关机理,笔者探讨了磷肥施用后土壤中有效态砷的变化与小白菜植株砷吸收量的关系,如图 1 所示。

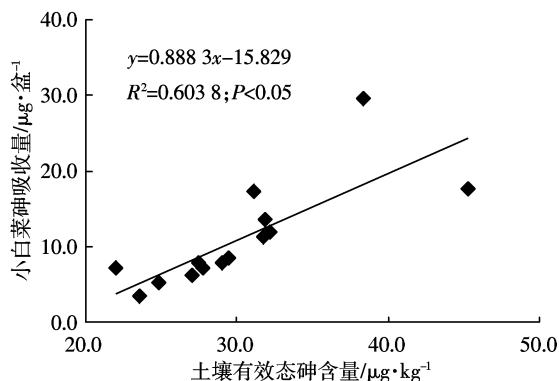


图 1 土壤中有效态砷的含量与小白菜砷吸收量的关系

Figure 1 The relationship between available arsenic in soils and the absorbed arsenic amount by bok choy

结果表明,以 NH_4Cl 提取的土壤有效态砷含量与小白菜植株砷吸收量间表现为显著正相关($P < 0.05$),并可用线性方程 $y = 0.888x - 15.829$ 来表示,其中, y 为植物砷吸收量 ($\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$), x 为土壤有效态砷含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这反映了随着土壤中有效态砷含量的不断升高,小白菜植株砷吸收量亦呈显著增加的趋势($P < 0.05$),使小白菜从土壤中吸收砷的能力不断增强。

3 讨论

土壤中的砷主要以无机砷离子形态存在,易被土壤胶体吸附与 Fe、Al、Ca 等离子结合形成复杂的难溶性砷化物,因此,土壤对砷的吸附受土壤组分、pH 值以及外界引入土壤的竞争离子等因素的影响^[10]。廖晓勇等也提出,蜈蚣草的砷含量或累积量与肥料中磷有效性并不存在明显相关性,这主要是因为除磷元素外,其他因子如陪伴离子、土壤砷和磷、pH 值等都会对蜈蚣草吸收砷有较大影响^[11]。而施用磷肥往往可能会通过磷与土壤 Fe、Al 矿物的相互作用或通过伴随离子的影响、pH 值的变化等过程影响土壤对砷的吸附^[12],从而间接影响土壤中有效态砷含量。

通过对本试验各处理 pH 值的测定结果比较,可以发现,施用钙镁磷肥处理的 pH 值显著($P < 0.05$)高于过磷酸钙的处理。一般而言,土壤中的砷主要以阴离子形式存在,在 pH 值较低的情况下, H_2AsO_4^- 、 HASO_4^- 被带正电荷的氢氧化铁等吸附剂迅速吸附,随着 pH 升高,吸附剂表面负电荷增高,促使含砷阴离子向溶

液中解吸。当体系 $\text{pH} < 6$ 时,解吸量随 pH 值的升高而缓慢增加;当体系 $\text{pH} = 6 \sim 7$ 时,解吸量随着 pH 的升高而锐增,吸附态砷的解吸对体系 pH 的变化在这一区间段异常敏感^[13]。从本次试验结果看,在同一施磷水平下,钙镁磷肥处理下土壤有效态砷含量明显高于过磷酸钙处理(如表 2 所示),其中,低量钙镁磷肥处理比低量过磷酸钙处理高出 14.6%,高量钙镁磷肥处理比高量过磷酸钙处理高出 32.3%。推测其原因可能主要包括三方面:一是本盆栽试验用土为湖南红壤,其 $\text{pH} = 6.03$ 恰好处于吸附态砷的解吸对体系 pH 变化的敏感区间段,而本研究中施用低量和高量钙镁磷肥处理的土壤 pH 分别达到 6.43、6.46,其与对照相比分别提高了 0.32 和 0.35 个单位,pH 值明显升高,这可导致土壤有效态砷含量因土壤中砷的解吸量增加而明显升高。二是过磷酸钙是化学酸性肥料,施用过磷酸钙可导致土壤 pH 值明显下降,本研究中施用低量、高量过磷酸钙的处理土壤 pH 值分别为 5.74 和 5.83,明显低于对照处理,且比同一施磷水平下的低量、高量钙镁磷肥处理分别降低了 0.69 和 0.63 个单位,这种相对低的 pH 值条件(尤其当 $\text{pH} < 6$ 时)可能导致土壤对砷的吸附作用增加,使相应的土壤中有有效态砷含量减少,因而在同一施磷水平下的钙镁磷肥处理的土壤中有有效态砷含量明显高于过磷酸钙处理。三是钙镁磷肥中的 Si、Ca、Mg 等元素和过磷酸钙中的 S、Ca 等元素与砷磷的相互作用可引起土壤有效态砷含量的变化,但相关机制尚需做进一步研究验证。

此外,磷和砷同属于第 V 族元素,化学性质相近,两者在土壤胶体表面和根际都存在竞争吸附关系,而磷又是作物生长所必需的大量元素之一,因此在砷污染土壤上施用磷肥是农业生产必须考虑的因素。国内外专家研究表明,施用磷肥可能会对污染土壤中砷的活化产生显著的影响,增加砷的生物有效性^[2,6,14-15]。另外,磷的施用可以促进植物生长发育,提高根系吸收能力,同时还可使土壤吸附的砷释放出来,提高其有效砷含量^[16]。本研究结果表明,施磷处理比不施磷处理的小白菜砷吸收量均有不同幅度的提高,其中,低量、高量钙镁磷肥处理下小白菜砷吸收量比对照处理分别增加了 71.6% 和 171.4%,而低量、高量过磷酸钙处理则分别比对照处理增加了 79.1% 和 55.0%,这与前人的类似研究结果比较具有较好的相似性^[15]。

从本研究对小白菜收获后的分析结果看,钙镁磷肥和过磷酸钙对小白菜吸收砷均有不同程度的促进作用,而钙镁磷肥作用更为显著,两种肥料怎样更好

的与其他肥料配合施用并在施肥量上更好的细化,以达到在不影响小白菜生长的同时,对砷的吸收量降低到最少,这方面仍需做更深层次的研究。但通过本研究,可以明确的是在砷污染高风险土壤上施用过磷酸钙和钙镁磷肥需适当谨慎,尤其对钙镁磷肥而言更是如此。

4 结论

(1)施用磷肥可显著提高小白菜的生物量($P < 0.05$),高施磷水平下的小白菜生物量均高于低施磷水平处理,两种不同品种的磷肥比较而言,钙镁磷肥比过磷酸钙有利于促进小白菜生长。

(2)施用磷肥可显著提高土壤中有效态砷含量,同一种磷肥高磷水平处理的土壤有效态砷含量均高于低磷处理,钙镁磷肥相对于过磷酸钙更利于提高土壤中砷的生物有效性。

(3)将施磷与不施磷两种情况比较,向砷污染土壤中施磷可导致小白菜对砷的吸收量显著增加($P < 0.05$),在高施磷水平下,钙镁磷肥比过磷酸钙更利于小白菜从土壤中吸收砷。

参考文献:

- [1] 雷 梅, 陈同斌, 范稚莲. 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. Effect of phosphorus on arsenic adsorption by three different soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1989–1992.
- [2] 周娟娟, 高 超, 李忠佩, 等. 磷对土壤 As(V) 固定与活化的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 645–648.
ZHOU Juan-juan, GAO Chao, LI Zhong-pei, et al. Effect of phosphorus addition on soil arsenic adsorption and mobilization[J]. *Soils*, 2005, 37(6): 645–648.
- [3] Meharg A A, Naylor J, MacNair M R. Phosphorus nutrition of arsenate-tolerant and nontolerant phenotypes of velvetgrass[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(2): 234–238.
- [4] Buolo E, Guijarro I, Carbonell-Barrachina A A, et al. Arsenic species: Effects on and accumulation by tomato plants[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(3): 1247–1253.
- [5] Sharpls J M, Meharg A A, Chambers S M, et al. Evolution: Symbiotic solution to arsenic contamination[J]. *Nature*, 2000, 404: 951–952.
- [6] 陈同斌, 范稚莲, 雷 梅, 等. 磷对超富集植物蜈蚣草吸收砷的影响及其科学意义[J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1156–1159.
CHEN Tong-bin, FAN Zhi-lian, LEI Mei, et al. Effect of phosphorus on arsenic adsorption by *Pteris vittata* L and its scientific significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15): 1156–1159.
- [7] EPA 3050B[EB/OL]. www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/testmain.htm. revision2, 1996, 3050B: 1–12.
- [8] 苗金燕, 何 峰, 魏世强, 等. 紫色土外源砷的形态分配与化学、生物有效性[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 899–902.
MIAO Jin-yan, HE Feng, WEI Shi-qiang, et al. Forms and bioavailabilities of exogenous arsenic in purple soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 899–902.
- [9] EPA 3010A[EB/OL]. www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/testmain.htm. revision2, 1996, 3010A: 1–5.
- [10] 陈同斌, 刘更另. 土壤中砷的吸附和砷对水稻的毒害效应与 pH 的关系[J]. 中国农业科学, 1993, 26(1): 63–68.
CHEN Tong-bin, LIU Geng-ling. Effects of soil pH in arsenic adsorption in soil and its toxicity to rice[J]. *Sci Agric Sin*, 1993, 26(1): 63–68.
- [11] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2906–2911.
LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, YAN Xiu-lan, et al. Effects of different forms of P fertilizers on phytoremediation for As-contaminated soils using As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L[J]. *Environmental Sciences*, 2008, 29(10): 2906–2911.
- [12] Goh KH, Lim T T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH and competitive anions on arsenic and selenium adsorption[J]. *Chemosphere*, 2004, 55: 849–859.
- [13] 陈 静, 王学军, 朱立军. pH 对砷在贵州红壤中的吸附的影响[J]. 土壤, 2004, 36(2): 211–214.
CHEN Jing, WANG Xue-jun, ZHU Li-jun. Effect of pH on adsorption and transformation of arsenic in red soil in Guizhou[J]. *Soils*, 2004, 36(2): 211–214.
- [14] 陈同斌. 土壤溶液中的砷及其与水稻生长效应的关系[J]. 生态学报, 1996, 16(2): 147–153.
CHEN Tong-bin. Arsenic in soil solution and its effect on the growth of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2): 147–153.
- [15] 张广莉, 宋光煜, 赵红霞. 磷影响下根际无机砷的形态分布及其对水稻生长的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 23–28.
ZHANG Guang-li, SONG Guang-yu, ZHAO Hong-xia. Effect of phosphorus on distribution of inorganic arsenic fractions in rhizosphere and growth of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 23–28.
- [16] Davenport J R, Peryea F J. Phosphate fertilizers influence leaching of lead and arsenic in a soil contaminated with lead arsenate[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1991, 57: 101–110.