

砷对土壤-蜈蚣草系统中磷生物有效性的影响

范稚莲^{1,2}, 雷 梅¹, 陈同斌^{1*}, 黄泽春¹, 莫良玉^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究中心, 北京 100101; 2. 广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 磷是植物必需的大量营养元素, 而其同族元素砷却不是植物生长发育所必需的。通过等温吸附平衡实验发现土壤中存在砷可以降低褐土对磷的吸附, 褐土对砷的吸附率大于等于褐土对磷的吸附率。对砷超富集植物蜈蚣草而言, 土壤中砷的添加量不超过 800mg/kg 时, 蜈蚣草地上部和地下部磷含量显著提高, 结果初步表明, 砷可以提高土壤中磷的生物有效性。

关键词: 磷; 砷; 蜈蚣草; 土壤; 吸附作用; 生物有效性

文章编号: 1000-0933(2006)02-0536-06 **中图分类号:** Q948, X131.3 **文献标识码:** A

Phosphorus availability in soil- *Pteris vittata* L. system affected by arsenic

FAN Zhi-Lian^{1,2}, LEI Mei¹, CHEN Tong-Bin^{1*}, HUANG Ze-Chun¹, MO Liang-Yu^{1,2} (1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530005). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 536 ~ 541.

Abstract: Both phosphorus and arsenic belong to the V family on the periodic table of chemical elements. Phosphorus is an essential nutrient element to plant while arsenic is an unessential nutrient to plant. Batch experiment and pot experiment were conducted to understand the effects of arsenic on phosphorus sorption in cinnamon soil and phosphorus uptake by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. The results indicated that phosphorus sorption was mediated by arsenic addition. The capacity of phosphorus sorption in cinnamon soil was not greater than that of arsenic sorption. Moreover the arsenic addition was less than 800 mg/kg in pot experiment, the concentrations of phosphorus in shoot and underground part of *P. vittata* were all increased with increasing of arsenic addition. The results represented that bio-availability of phosphorus to *P. vittata* L. can be improved by arsenic addition in cinnamon soil.

Key words: adsorption; arsenic; availability; phosphorus; *Pteris vittata* L.; soil

矿山开采、矿石冶炼和含砷化合物的工农业应用, 已使土壤中砷污染成为一个世界性的环境问题。孟加拉和印度两国近 1 亿人口生活在受砷毒威胁的地区, 高砷水灌溉导致该地区大面积的农田土壤受到砷污染^[1,2]。我国内蒙古、新疆、陕西等地也存在大面积的砷污染区^[3], 给当地居民的身体健康带来的严重的危害, 解决砷污染问题已经迫在眉睫。由于土壤砷污染存在量大面广的特点^[4], 应用传统的污染土壤修复技术治理, 存在技术难度较大、成本较高等问题。近年来发展起来的植物修复技术, 能够有效地降低土壤中砷污染。在国家高技术发展研究计划和中国科学院知识创新工程重要方向项目等项目的重点支持下, 陈同斌研究小组利用砷超富集植物——蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.)^[5] 在湖南建立了第一个砷污染土壤的植物修复基地, 并进行了大面积 (约 1hm²) 的现场修复实验。根据初步研究结果, 在种植蜈蚣草的 6 个月时间内, 砷污染土壤的植物

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (40325003); 国家自然科学基金重点资助项目 (40232022); 北京市科技新星计划资助项目 (2003A48)

收稿日期: 2004-09-10; **修订日期:** 2005-11-24

作者简介: 范稚莲 (1970~), 女, 广西人, 硕士, 主要从事污染环境修复研究。

通讯作者 Author for correspondence. E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

Foundation item: The project was supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 40325003) and the National Basic Science Research Program of China (No. 2002CCA03800), and Nova Programmer of Beijing Municipal Science & Technology Commission (No. 2003A48)

Received date: 2004-09-10; **Accepted date:** 2005-11-24

Biography: FAN Zhi-Lian, Master, mainly engaged in remediation of contaminated environment.

修复效率可高达 2.19 % ~ 7.84 %^[6]。

砷与磷为同族元素,前者是一种对植物毒性极强的元素,而磷是一种植物必需的大量营养元素。由于磷与砷具有相似的化学性质,磷可能会影响植物对砷的吸收?早期的研究表明,对于砷的耐性植物和大多数非耐性植物而言,磷和砷的植物吸收表现出拮抗作用^[7,8]。后来的研究结果表明,砷超富集植物蜈蚣草对 As(V) 的吸收也是通过磷吸收系统而进行的^[9]。然而,陈同斌等人^[10]通过盆栽实验发现,土培试验中添加低浓度的磷(400mg/kg 以下)对蜈蚣草地上部和地下部的含砷浓度没有明显影响,但添加大量磷(400mg/kg 以上)则会使蜈蚣草地上部和地下部的含砷浓度和地上部总含砷量明显升高,因此在蜈蚣草中,磷与砷之间并不存在拮抗效应,在高浓度时甚至表现出明显的协同效应。但是,在种植蜈蚣草修复砷污染土壤的过程中,大量砷的存在是否会影响土壤中磷的有效性和植物(蜈蚣草)对磷的吸收?本文从砷对土壤吸附磷的影响入手,探讨砷污染土壤中蜈蚣草对磷的吸收利用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为取自北京昌平的褐土,其基本特性见表 1。用 1mol L⁻¹ H₄Ac₄ 代换法测定 CEC,机械组成用岛津 RS-1000 自动仪测定。土壤的基础理化性质采用常规方法测定。

1.2 等温吸附实验

称取过 20 目筛的供试土壤 2.50g 于 50ml 塑料瓶中,根据表 2 中的比例和浓度加入的 NaH₂AsO₄ 或 NaH₂PO₄ 溶液,用去离子水补充到总体积为 30ml。在 25 条件下恒温振荡 5h,将平衡溶液转入 50ml 离心管,在 4000r/min 下冷冻离心 30min,取 5ml 澄清液测定其中磷和砷浓度。根据平衡前后溶液浓度之差,计算土壤对磷和砷的吸附量。各处理重复 2 次。

表 1 供试土壤的基本特性

Table 1 Characteristics of soil tested		
性质 Characteristics		褐土 Cinnamon soil
pH (1:2.5)		8.07
CEC (cmol/kg)	总量 total	14.2
	Ca	46.5
	Mg	5.09
	K	0.42
	Na	0.95
	全磷 Total P (mg/kg)	880
有效磷 Olsen-P (mg/kg)		19.0
砷 As (mg/kg)		10
机械组成 (%)	> 0.02mm	52
	0.02 ~ 0.002mm	22
	< 0.002mm	26

表 2 等温吸附实验中 P 和 As 的添加量

Table 2 Addition of P and As in the sorption isotherm												
处理 Treatment	P 和 As 的添加浓度 Added concentration of P and As (mg/kg)											
	P	As	P	As	P	As	P	As	P	As	P	As
As = 0	4	0	6	0	16	0	20	0	24	0	32	0
P = 0	0	4	0	6	0	16	0	20	0	24	0	32
P As = 1 1	2	2	4	4	8	8	12	12	16	16	20	20
As = 20 (mg/kg)	4	20	8	20	12	20	16	20	20	20	24	20
P = 20 (mg/kg)	20	4	20	8	20	12	20	16	20	20	20	24

1.3 盆栽实验

盆栽实验所用的土壤与等温吸附实验所用的土壤相同。每盆称取过 2mm 筛的土壤 0.7kg,施尿素 0.42g 和氯化钾 0.34g。试验设 6 个处理:各处理加磷(NaH₂PO₄,分析纯)400mg/kg 土,添加砷的浓度(NaH₂AsO₄,分析纯)分别为 0、100、200、400、600 和 800mg/kg 土,平衡两星期,各处理重复 4 次。从野外采集蜈蚣草幼苗,在温室内以无 As 污染的土壤培养 1a,之后去除地上部,用分根法将其根状茎分成小段,将切分的根状茎移栽到各处理的钵中,每钵移栽一段根状茎,种植 4 个月之后收获。生长期定期浇无离子水。收获后将植物样品进行清洗、杀青、烘干,粉碎后备用。

1.4 测定方法和数据统计

吸附试验中,平衡溶液的磷用钼锑抗显色法测定^[11],砷用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法测定。植物样品用硝酸-硫酸法消煮,磷含量用磷钼蓝比色法测定^[12]。在样品测定中,磷对砷测定的干扰和砷对磷测定

的干扰分别用相应的标准曲线法进行校正^[10]。

数据统计采用 SPSS10.01 软件分析。

2 结果

2.1 砷对褐土中磷等温吸附的影响

当等温吸附实验的平衡溶液中磷的浓度较低时(不超过 1.2mg/L),褐土对磷的等温吸附曲线可用直线方程拟合(图 1)。在 $As = 0$ 、 $P/As = 1$ 和 $As = 20$ 的 3 个处理系列中,采用直线方程拟合的等温吸附曲线均达到 $p < 0.01$ 的极显著水平(表 3)。这表明,在实验浓度范围内,土壤对磷的吸附量随平衡溶液中磷浓度的增加而呈线性增加。从直线方程的斜率可以看出,在 $As = 0$ 处理系列中,土壤对磷的吸附能力最强,其直线方程的斜率达到 30.41,远远高于 $P/As = 1$ 处理系列和 $As = 20$ 3 个处理系列。这也就是说,添加 As 之后,土壤对磷的吸附能力降低。当砷的添加量为 20mg/kg 时($As = 20$ 系列),土壤对磷的吸附能力降至不加砷处理系列的 1/3。平衡溶液中磷的浓度越高,不同处理系列之间土壤对磷的吸附能力差异越显著。

比较各处理系列中磷和砷的吸附率(图 2 ~ 图 4)可以看出:土壤对磷和砷的吸附能力存在差异。总体而言,土壤对磷和砷的吸附率随磷和砷的添加量增加而降低。当土壤中添加砷、只添加 4 ~ 32 mg/kg 磷时($As = 0$ 处理系列),磷的吸附率由 86.3 % 降至 59.4 %;与之相应,不添加磷、只添加 4 ~ 32mg/kg 砷时($P = 0$ 处理系列),砷的吸附率由 91.3 % 降至 68.1 % (图 2)。相同添加浓度下,土壤对砷的吸附率始终高于对磷的吸附率。

在 $P/As = 1$ 处理系列中,磷和砷的添加浓度同时由 2mg/kg 增加至 20mg/kg,土壤对磷和砷的吸附率均由 83 % 降至 62.4 %,并且土壤对砷的吸附率始终大于或等于磷的吸附率(图 3)。

当土壤中砷的添加量固定为 20mg/kg、磷的添加量由 4mg/kg 增加至 24mg/kg 时,土壤对磷的吸附率由 62.5 % 降至 56.5 %。在 $P = 20$ 处理系列中,土壤中磷的添加量始终为 20mg/kg,砷的添加量为 4mg/kg 时,土壤对砷的吸附率较低,仅为 54.0 %;当砷的添加量为 8 ~ 20mg/kg 时,土壤对砷的吸附率在 60.6 % ~ 65.3 % 之间变化,始终高于 $As = 20$ 处理系列中相应的磷吸附率;当砷的添加量为 24mg/kg 时,土壤对砷的吸附率略低于 $As = 20$ 处理系列中相应的磷吸附率,前者为 55.5 %,后者为 56.5 %。

上述结果均表明,在不同的处理系列中,土壤对砷的吸附率均高于或接近于土壤对磷的吸附率。因此,供试土壤对砷的吸附能力高于土壤对磷的吸附能力。

2.2 砷对蜈蚣草吸收磷的影响

不添加砷时,蜈蚣草地上部和地下部中磷的含量没有显著差异(图 5)。添加砷之后,蜈蚣草体内磷含量高于对照处理,地上部和地下部的磷浓度均随砷的添加量增加而增加。对其用直线方程拟合,其相关性均可达到 $p < 0.01$ ($n = 6$) 的极显著水平。当砷添加浓度达到 800mg/kg 时,蜈蚣草地上部和地下部的含磷量分别为不添加砷时的 1.59 倍和 1.47 倍。添加砷之后,蜈蚣草地上部磷含量的增加幅度高于地下部的增幅。如果用直线方程进行拟合,其地上部和地下部的斜率分别为 3.03 和 2.58(图 5)。各处理中蜈蚣草地上部生物量在 4.87 ~ 5.85g(干重)/盆之间变化(图 5),砷的添加对蜈蚣草的生物量没有明显影响。

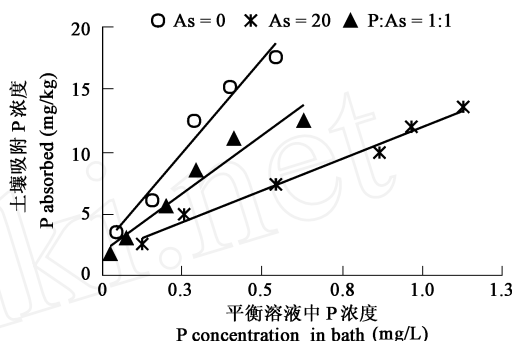


图 1 褐土对磷的等温吸附曲线

Fig. 1 Sorption isotherm of P in cinnamon soil

表 3 褐土对磷的等温吸附直线拟合参数

Table 3 Isotherm result of P in cinnamon soil fitted by linear equation

处理 Treatment	直线方程 Linear equation ($S = a \cdot C + b$)		
	a	b	R^2
$As = 0$	30.41	2.28	0.965 **
$P/As = 1$	18.81	1.98	0.944 **
$As = 20$ (mg/kg)	10.39	1.69	0.984 **

** $p < 0.01$

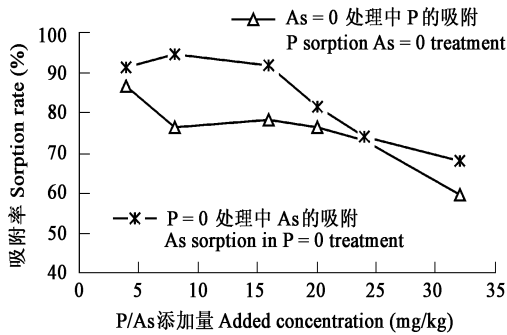


图2 P=0 和 As=0 处理系列中褐土对 P/As 的吸附率

Fig. 2 Sorption rate of P/As in cinnamon soil in P=0 or As=0 treatment

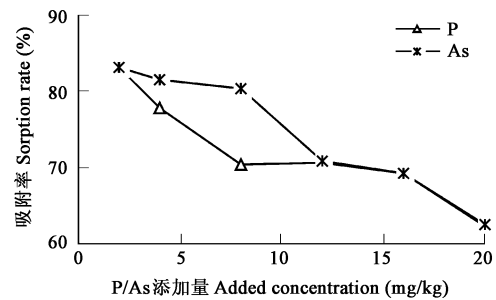


图3 P=As=1 处理系列中褐土对 P/As 的吸附率

Fig. 3 Sorption rate of P/As in cinnamon soil in P=As=1 treatment

3 讨论

3.1 土壤中砷对磷吸附的抑制作用

砷和磷在土壤中均以阴离子的形式存在,化学性质较为相似。研究表明,与铜、镉和镍等以阳离子形态存在的金属不同,砷和磷在土壤中主要以含氧酸根形态存在,在土壤剖面中主要存在于富含 Fe、Al 氧化物和粘粒的 B2 层。因此,土壤中存在的磷和砷可能被土壤中存在的 Fe、Al 氧化物和粘粒所吸附^[13, 14]。

早期的研究发现,磷和砷可以相互竞争土壤胶体上的吸附位点^[15]。砷在砖红壤中的吸附对土壤电动性的影响方式与磷的影响方式相同,且影响程度大于后者,因此,至少有一部分砷可以被土壤胶体专性吸附^[16]。

后来的研究结果也发现,在土壤固相中,磷可以与砷竞争专性吸附和非专性吸附位点^[17, 18]。对于褐土而言,添加单一元素磷或砷,土壤对砷的吸附效率始终高于对磷的吸附效率(图 2)。从表 3 中也可以看出,用直线方程拟合褐土对磷的等温吸附曲线,不添加砷(As=0 处理系列)时,直线方程的斜率大于添加砷的处理(P/As =

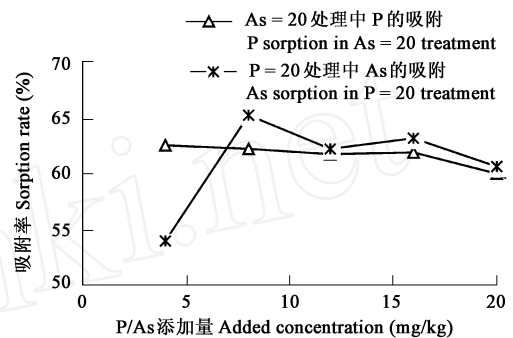


图4 As=20 处理系列中 P 的吸附率和 P=20 处理中 As 的吸附率

Fig. 4 Sorption rate of P in As=20 treatment and that of As in P=20 treatment

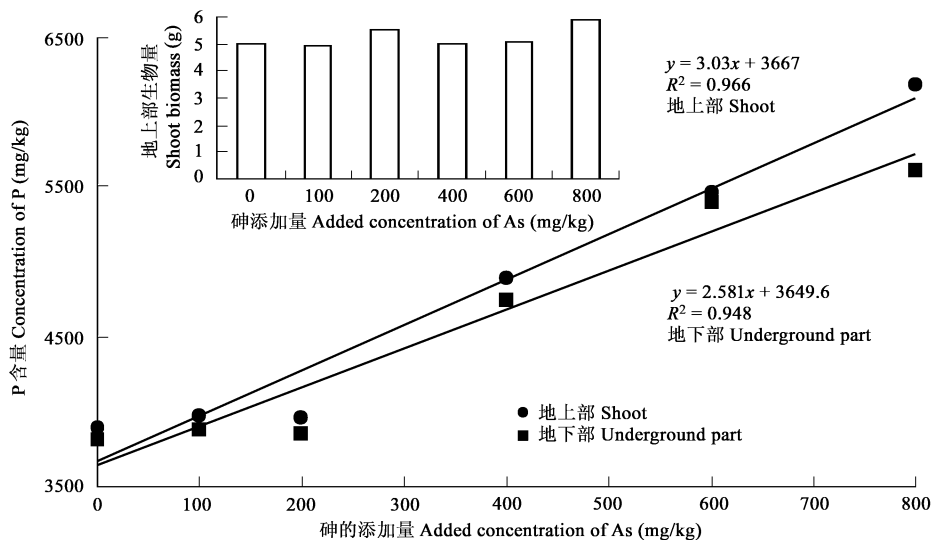


图5 添加不同浓度砷对蜈蚣草生物量及含磷量影响

Fig. 5 Shoot biomass and P concentration in *Pteris vittata* influenced by As addition

1 1处理系列和 $As = 20$ 处理系列),表明不添加砷的情况下,褐土对磷的吸附趋势最大。随着砷添加浓度的增加,褐土对磷的吸附趋势减弱, $P/As = 1$ 1 处理系列的直线方程斜率高于 $As = 20$ 处理系列(图 3)。这些结果表明,褐土对砷的吸附能力高于对磷的吸附能力,砷的存在可以减弱磷在土壤中的吸附能力,提高土壤中磷的活性和有效性。

3.2 砷提高超富集植物对磷的吸收

由于磷和砷的化学性质相似,因此,一些学者认为,植物对磷和砷的吸收行为也非常相似,即:砷的吸收也是通过根细胞中的原生质膜上磷的转运通道来进行的^[7,8,20]。这些研究结果所采用的研究对象都是砷耐性植物和普通的非耐性植物。最近,有人对砷超富集植物蜈蚣草进行实验,认为 $As(V)$ 的吸收也是通过磷吸收系统进行的^[9]。但是陈同斌等人^[10]通过土培试验发现,在砷超富集植物蜈蚣草中,添加低浓度磷(400mg/kg以下)对植物地下部砷含量没有明显影响,但是添加高浓度磷(800mg/kg 以上)能够显著提高蜈蚣草地下部砷含量,即蜈蚣草对砷和磷的吸收是协同作用,而不是拮抗作用。随后,陈同斌等人^[21]、陈阳 利用 XRF 技术从细胞水平上进一步证实,在砷超富集植物蜈蚣草和大叶井口边草(*P. nervosa* L.)的根、叶柄和羽叶不同组织的细胞中磷和砷的浓度呈现较好的正相关关系,表明在砷超富集植物中,磷和砷的转运也不存在拮抗作用。

本研究从植株个体水平研究时发现:在磷的添加量为 400mg/kg 时,蜈蚣草地下部的磷浓度均随砷的添加量增加而增加;当砷添加浓度达到 800mg/kg 时,蜈蚣草地下部的含磷量为不添加砷的对照处理的 1.47 倍(图 5)。这表明,在土培试验中,蜈蚣草对磷和砷的吸收表现为协同作用,再次从砷对蜈蚣草吸收磷影响的角度又进一步证实:蜈蚣草对砷和磷的吸收并不存在拮抗作用。在 Tu 和 Ma ^[22]的蜈蚣草土培试验中也可以发现,当土壤中添加的砷浓度不超过 2670 μ mol/kg 时,蜈蚣草地下部磷的浓度高于对照。因此,他们的数据也支持本文的结论。刘颖茹 用 13 个生态型蜈蚣草通过水培试验证实,当培养液中砷的添加浓度为 1mg/L 时不会降低植物地下部的磷浓度,其中 1 个生态型蜈蚣草根部分磷浓度甚至显著高于不添加砷的对照。其试验结果从水培试验角度再次证明:蜈蚣草对磷和砷的吸收不存在拮抗作用。

本研究还发现蜈蚣草地上部的磷浓度同地下部的磷浓度一样,均随砷的添加量增加而增加;当砷添加浓度达到 800mg/kg 时,蜈蚣草地上部含磷量为不添加砷的对照处理 1.59 倍(图 5)。在 Tu 和 Ma ^[22]砷的土培试验结果也表明,蜈蚣草地上部磷的浓度均高于不添加砷的对照。之后他们通过水培试验发现,当培养液中砷的浓度不超过 334 μ mol/L 时,蜈蚣草体内磷的浓度会随着培养液中砷浓度的增加而增加^[24]。尽管廖晓勇等人^[23]通过砂培试验曾发现,砷能够限制蜈蚣草根对磷的吸收,但并不影响蜈蚣草地上部磷的浓度。但是土培试验不同于水培和砂培试验,由于存在土壤吸附问题的干扰,因此会进一步干扰植物对磷的吸收。在土壤-蜈蚣草系统中,磷、砷之所以会表现为协同作用,其原因可能有两个方面:一方面,土壤中存在砷能够降低土壤对磷的吸附,进而提高磷对蜈蚣草的有效性;另一方面,蜈蚣草体内砷主要以亚砷酸根向地上部运输^[25,26],而磷以磷酸根形式向地上部运输,砷和磷并非通过相同机制向地上部运转,两者并不存在拮抗关系。这两方面的原因使得蜈蚣草在含砷土壤中对磷依然具有较高的吸收能力。但是本文所报道的砷、磷协同作用的机理还有待进一步探索。

References:

- [1] Meharg A A, Rahman M M. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: implications for rice contribution to arsenic consumption. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(1): 229 ~ 234.
- [2] Roychowdhury T, Uchino T, Tokunaga H, et al. Arsenic and other heavy metals in soils from an arsenic-affected area of West Bengal, India. *Chemosphere*, 2002, 49: 605 ~ 618.
- [3] Xu H N, Xu J L. Cause of formation and distribution of arsenic in abnormal area of China. *Soil*, 1996, 28: 80 ~ 84.
- [4] Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, et al. Spatial distributions of arsenic in contaminated paddy soils. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 635 ~ 643.

陈阳:中国科学院地理科学与资源研究所博士后出站报告. 2004

刘颖茹:中国科学院地理科学与资源研究所博士论文. 2005

- [5] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al.* Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3) : 207 ~ 210.
- [6] Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al.* Effect of application of P fertilizer on efficiency of As removal from As-contaminated soil using phytoremediation: Field Study. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3) : 455 ~ 462.
- [7] Meharg A A, Macnair M R. An altered phosphate uptake system in arsenate-tolerant *Holcus lanatus* L. *New Phytologist*, 1990, 116(1) : 29 ~ 35.
- [8] Meharg A A, Naylor J, Macnair M R. Phosphorus nutrition of arsenate-tolerant and nontolerant phenotypes of velvet grass. *Journal of Environment Quality*, 1994, 23(2) : 234 ~ 238.
- [9] Wang J R, Zhao F J, Meharg A A, *et al.* Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*: uptake kinetics, interactions with phosphate and arsenic speciation. *Plant physiology*, 2002, 130 : 1552 ~ 1561.
- [10] Chen T B, Fan Z L, Lei M, *et al.* Effect of phosphorus on arsenic accumulation in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15) : 1156 ~ 1159.
- [11] Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of Soil Analysis —Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (2nd Edition). American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1982. 385 ~ 430.
- [12] Nanjing Agriculture University. *Agricultural Chemistry Analysis of Soil* (2nd Edition). Beijing: China Agriculture Press, 1990. 216 ~ 217.
- [13] Barry G A, Chudek P J, Best E K, *et al.* Estimating sludge application rates to land based on heavy metal and phosphorus sorption characteristics of soil. *Water Research*, 1995, 29(9) : 2031 ~ 2034.
- [14] Xie Z M, Huang C Y, He Z L. Chemical equilibria of arsenic in soils. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(1) : 22 ~ 37.
- [15] Peryea F J. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions. *Hortscience*, 1998, 33(5) : 826 ~ 829.
- [16] Chen T B, Zhang X N, Zhang H. Effect of phosphate and arsenate adsorption on zeta-potential of laterite colloid. *Journal of South China Agriculture University*, 1993, 14(1) : 24 ~ 27.
- [17] Jackson B P, Miller W P. Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 : 1616 ~ 1622.
- [18] Lei M, Chen T B, Fan Z L, *et al.* The effect of phosphorus on arsenic sorption on three different soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11) : 1989 ~ 1992.
- [19] Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. New York: Academic Press, 1995. 889.
- [20] Abedin M J, Feldmann J, and Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants. *Plant Physiology*, 2002, 128(3) : 1120 ~ 1128.
- [21] Chen T B, Huang Z C, Huang Y Y, *et al.* Cellular distribution of arsenic and other elements in hyperaccumulator *Pteris nervosa* and their relations to arsenic accumulation. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11) : 1163 ~ 1168.
- [22] Tu C and Ma L Q. Effects of arsenate and phosphate on their accumulation by an arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Plant and Soil*, 2003, 249 : 373 ~ 382.
- [23] Liao X Y, Xiao X Y, Chen T B. Effects of Ca and As additions on As, P and Ca uptake by hyperaccumulator *Pteris vittata* L. under sand culture. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10) : 2057 ~ 2065.
- [24] Tu S and Ma L Q. Interactive effects of pH, As and P on growth and As/P uptake in hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50 : 243 ~ 251.
- [25] Huang Z C, Chen T B, Lei M, *et al.* EXAFS study on arsenic species and its transformation in arsenic hyperaccumulator. *Science in China (Ser. C)*, 2004, 33(6) : 488 ~ 494.
- [26] Zhang W H, Cai Y, Tu C, *et al.* Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300 : 167 ~ 177.

参考文献:

- [3] 徐红宁, 许嘉琳. 我国砷异常区的成因及分布. *土壤*, 1996, 28 : 80 ~ 84.
- [4] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 等. 污染水稻田中土壤砷含量的空间变异特征. *地理研究*, 2003, 22(5) : 635 ~ 643.
- [5] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. *科学通报*, 2002, 47(3) : 207 ~ 210.
- [6] 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 等. 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响: 田间实例研究. *环境科学学报*, 2004, 24(3) : 455 ~ 462.
- [10] 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. *科学通报*, 2002, 47(15) : 1156 ~ 1159.
- [12] 南京农业大学. *土壤农化分析* (第二版). 农业出版社, 北京, 1990. 216 ~ 217.
- [14] 谢正苗, 黄昌勇, 何振立. 土壤中砷的化学平衡. *环境科学进展*, 1998, 6(1) : 22 ~ 37.
- [15] 陈同斌, 张效年, 张宏. 磷和砷的专性吸附对砖红壤胶体电动电位的影响. *华南农业大学学报*, 1993, 14(1) : 24 ~ 27.
- [18] 雷梅, 陈同斌, 范稚莲, 等. 磷对土壤中砷吸附的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(11) : 1989 ~ 1992.
- [21] 陈同斌, 黄泽春, 黄宇营, 等. 砷超富集植物中元素的微区分布及其与砷富集的关系. *科学通报*, 2003, 48(11) : 1163 ~ 1168.
- [23] 廖晓勇, 肖细元, 陈同斌. 砂培条件下施加钙、砷对蜈蚣草吸收砷、磷和钙的影响. *生态学报*, 2003, 23(10) : 2057 ~ 2065.
- [25] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅, 等. 砷超富集植物中砷化学形态及其转化的 EXAFS 研究. *中国科学(C 辑)*, 2003, 33(6) : 488 ~ 494.