

刈割对蜈蚣草的砷吸收和植物修复效率的影响

李文学, 陈同斌*, 刘颖茹

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101)

摘要:以野生苗移栽的蜈蚣草为试材,通过盆栽试验研究了收获次数对蜈蚣草生长、砷吸收和植物修复效率的影响。结果表明:在 3 次收获中,随着收获次数的增加,不同砷浓度处理之间蜈蚣草生物量的差异逐步缩小;不加砷的对照处理中,每次收获后的砷吸收速率下降趋势,而在 3 个加砷处理中,第 2 次收获和第 3 次收获的蜈蚣草的吸砷速率为 $63\sim 75\ \mu\text{g}/(\text{plant}\cdot\text{d})$ 、 $44\sim 55\ \mu\text{g}/(\text{plant}\cdot\text{d})$,均显著高于第 1 次收获时的吸收速率。表明多次收获并没有降低砷的积累速度。由此可见,通过适当增加蜈蚣草的收获次数是提高砷修复效率的一种策略。

关键词:蜈蚣草;超富集植物;刈割;砷;吸收;植物修复效率

Effects of harvesting on As accumulation and removal efficiency of As by Chinese brake (*Pteris vittata* L.)

LI Wen-Xue, CHEN Tong-Bin, LIU Ying-Ru (Center for Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 538~542.

Abstract: Arsenic (As) contamination of soils is a major environmental problem both in China and in the world. Chinese brake (*Pteris vittata* L.), which has a strong ability to tolerate and hyperaccumulate As, is a good candidate for phytoremediation of arsenic-contaminated soils. To understand the processes of As hyperaccumulation by *P. vittata* and to take *P. vittata* into practice, a growing body of researches has been carried out on understanding the mechanisms of As tolerance and hyperaccumulation, including the As distribution, speciation, transformation and nutrient uptake. After solving some technical difficulties, such as seedling breeding, irrigation and fertilization, the field phytoremediation of As-contaminated soils by *P. vittata* in Chenzhou City, Hu'nan Province has been successfully carried out for the first time by Chen and his colleagues since 2000. However, the improvement of phytoextraction efficiency of As from fields is still a key problem in phytoremediation. *Pteris vittata* belongs to perennial plants, indicating that it can be harvested for several times during growth period. For the practical application, the total amount of As accumulation by *P. vittata* must be considered, which depended on the biomass and As concentration. But it is not clear if the As concentration in *P. vittata* would decrease with the increase times of harvesting. Therefore, the objective of this study is to understand the effects of harvesting on As accumulation and phytoextraction efficiency of *P. vittata* by pot experiment. When 0, 100, 300 and 800 mg/kg of As were added, the total amount of As accumulation by the shoots of *P. vittata* were 2.6, 10.5, 13.4 and 12.1 mg/pot, respectively. The As uptake rates by *P. vittata* in the first harvesting ranged from 20 to 35 $\mu\text{g}/(\text{plant}\cdot\text{d})$, which was significantly lower than those of the second and third harvesting. Therefore, it showed that more harvesting would increase the As accumulation and phytoextraction efficiency of As of *P. vittata*, indicating harvesting was an economical and convenient way for the phytoremediation when utilized *P. vittata* to improve the phytoextraction efficiency of As.

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(40262022);国家重大基础研究前期研究专项资助项目(2002CCA03800)

收稿日期:2004-01-15;**修订日期:**2004-09-25

作者简介:李文学,男,河南人,博士,主要从事植物修复研究。

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

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholar (No. 40325003); National Natural Science Foundation of China (No. 40262022) and China State Program for Basic Research (No. 2002CCA03800)

Received date: 2004-01-15; **Accepted date:** 2004-09-25

Biography: LI Wen-Xue, Ph. D., mainly engaged in phytoremediation.

Key words: Chinese brake (*Pteris vittata* L.); hyperaccumulator; harvesting; arsenic; accumulation; phytoextraction efficiency
文章编号: 1000-0933(2005)03-0538-05 **中图分类号:** S792 **文献标识码:** A

土壤砷污染是一个非常重要的环境问题^[1~4]。近年来,砷污染已经成为环境领域中的热点问题^[5~8]。自从发现蜈蚣草对砷具有富集功能以来^[9~11],其独特的耐砷及富砷机制引起了国内外学者的广泛关注并对其富集砷的过程、养分吸收转运及其在植物修复中应用等理论与实际问题进行了一系列研究^[12~17]。

通过植物组织培养技术解决了其种苗的快速繁殖、施肥等技术问题^[18, 19]后,陈同斌等人已经将蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)和大叶井口边草(*P. cretica* L.)等砷超富集植物应用于砷污染土壤的实地修复^[20, 21],并在湖南省郴州市建立了世界上第一个砷污染土壤的植物修复示范工程^[22]。但是,到目前为止,究竟如何进一步提高蜈蚣草对砷污染土壤的修复效率仍是一个非常重要的关键问题。

蜈蚣草修复污染土壤主要是通过收获其地上部带走砷,从而达到从土壤中大量吸收和去除砷的目的。在实际修复中,蜈蚣草对砷的去除效率主要取决于地上部的含砷总量,即地上部的生物量与含砷浓度的乘积。因此,地上部的生物量与含砷浓度是两项非常关键的指标。蜈蚣草为多年生植物,为了避免光合效率下降、逐渐走向衰老的生育后期的出现,可以在光合效率最高、叶片最多时收获,也就是说在植物修复过程中,可适当的增加收获次数。但是,随着蜈蚣草的生长,在生物量不断提高的同时,其体内的含砷浓度是否会因植物生长的“相对稀释效应”而下降?另一方面,蜈蚣草的修复效率是否会随着和刈割次数的增加而下降?因此本文以野生苗移栽的蜈蚣草为试材,通过土培试验研究刈割对蜈蚣草富集砷能力和植物修复效率的影响,期望找到新的提高蜈蚣草修复效率种策略。

1 材料与方法

1.1 试验处理与蜈蚣草的培养

供试土壤取自中国科学院遗传与发育研究所农场,土壤类型为褐土,有机质含量 14.5 g/kg,全氮 1.1 g/kg,全磷 0.8 g/kg,全砷 9 mg/kg,pH 为 7.9。

每盆装土 1 kg,根据各处理的砷浓度要求,分别添加 NaH₂AsO₄,平衡 2 周后,移栽 1 株蜈蚣草。试验设置 4 个处理:(1)对照,(2)添加砷 100 mg/kg,(3)添加砷 300 mg/kg,(4)添加砷 800 mg/kg。每个处理重复 3 次。

蜈蚣草苗采自湖南省,并在室内预培养一年。为尽量消除移栽苗的差异,移栽到盆内成活后剪去其地上部。生长期间内定期浇去离子水,每隔一周浇营养液。营养液组成为:0.75 mmol/L K₂SO₄、0.25 mmol/L KH₂PO₄、0.1 mmol/L KCl、2.0 mmol/L Ca(NO₃)₂·4H₂O。植物在昼夜温度为 26/15℃、光照强度 300 μE/(m²·s)、平均相对湿度 60%的温室中培养。生长 121、181 d 和 271d 后,分别收割地上部后,测定生物量并进行化学分析;最后一次收割时,也同时收获地下部并进行化学分析。由于在广西、湖南、湖北等地的气候条件下,蜈蚣草的生长期大约为 270~300 d,因此本试验的时间大致相当于野外条件下蜈蚣草的年生长期。

1.2 砷的测定

植物样品中砷的测定根据陈同斌等介绍的方法^[20]:样品总砷采用 HNO₃-HClO₄ 消解,氢化物发生-原子荧光光谱仪(海光 AFS-2202)测定。分析中所用试剂均为优级纯,同时采用国家标准参比物质(GBW-08501)进行分析的质量控制,分析误差均控制在允许的误差范围。

1.3 数据统计分析

采用 SAS 软件中的双因素程序对数据进行方差分析和多重比较^[23]。

2 结果与分析

2.1 刈割对蜈蚣草生物量的影响

图 1 表示各处理的蜈蚣草生长情况,其中地上部是指 3 次生物量之和。图 1 表明,不加砷的对照处理中蜈蚣草地上部干物重达 6.6 g/pot,显著高于 3 个加砷处理,尤其是根系生长对于砷的反应更为敏感。与对照相比,加砷处理中根干重明显降低,随着砷浓度的提高,根干重下降趋势明显。添加 100 mg/kg 砷时,蜈蚣草的根干重为 1.3 g/pot,为添加 800 mg/kg 砷处理的 2.2 倍,差异达到显著水平。

由于第 2 次收获的蜈蚣草生育期较短,仅为 60 d,远低于第 1 次收获的生长期(121 d)和第 3 次收获的生长期(90 d),所以第

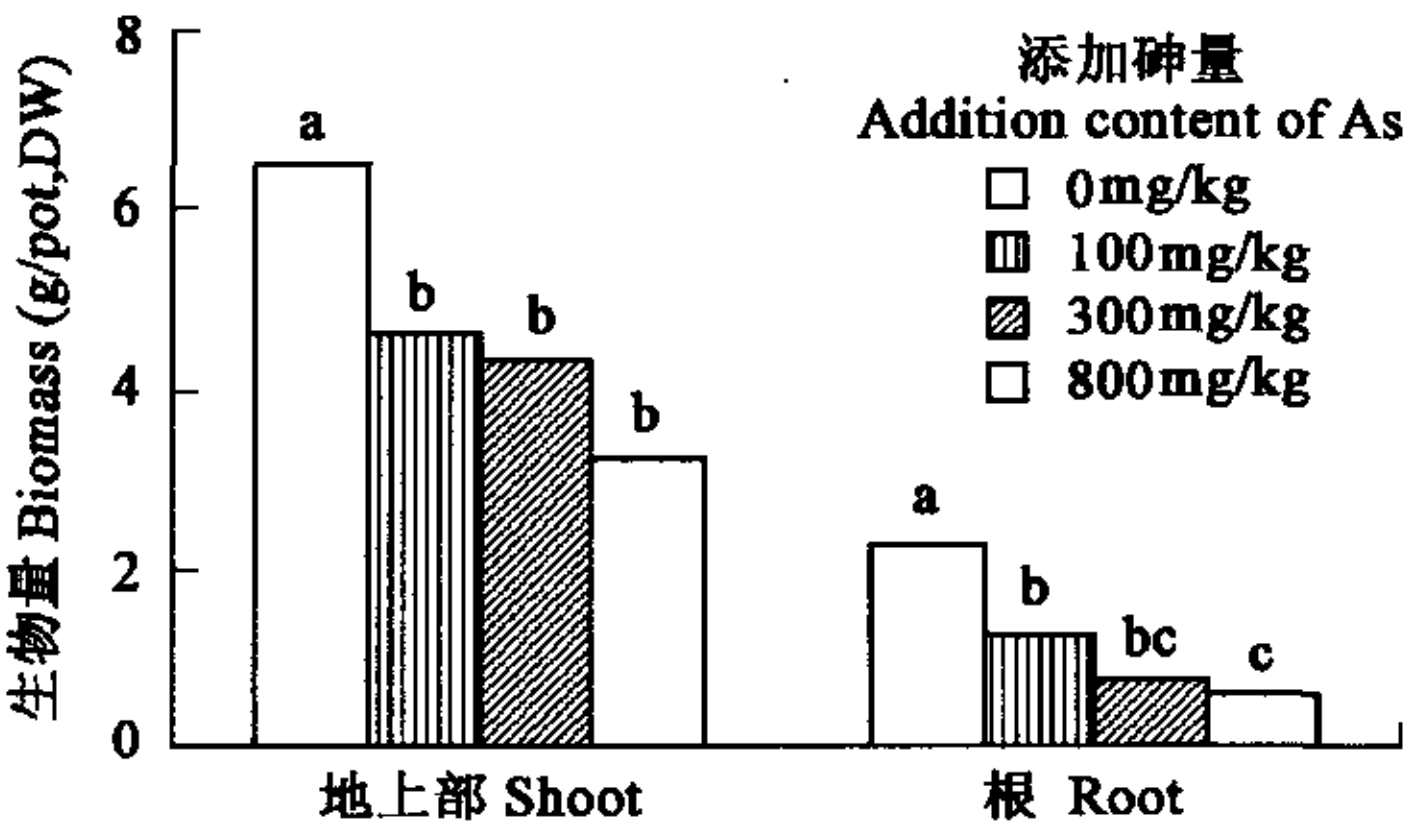


图 1 不同砷浓度处理的蜈蚣草生物量

Fig. 1 Biomass of *P. vittata* L. added with different rates of As

2 次收获时蜈蚣草的生物量最低,较第 1 次收获和第 3 次收获平均生物量分别降低约 37%、27%,差异达到显著水平(表 1)。第 3 次收获蜈蚣草的生物量虽然略低于第 1 次收获,但差异不显著。

表 1 不砷浓度处理下刈割对蜈蚣草地上部生物量的影响

项目 Item	各处理的地上部生物量 Shoot biomass (g/pot)			
	砷处理 As treatment(mg/kg)			
	0	100	300	800
第 1 次收获 First harvesting	3.3±0.46	1.6±0.52	1.6±0.70	0.9±0.40
第 2 次收获 Second harvesting	1.5±0.64	1.2±0.31	1.0±0.13	0.9±0.22
第 3 次收获 Third harvesting	1.7±0.59	1.7±0.05	1.6±0.11	1.4±0.26
ANOVA Test 收获时间			* *	
Harvesting time 加砷			* *	
As treatment 砷×时间			* *	
Harvesting time×As treatment				
Duncan Multiple Range Test				
第 1 次收获 First harvesting			1.87a	
第 2 次收获 Second harvesting			1.18b	
第 3 次收获 Third harvesting			1.61a	

* * $p<0.01$

第 1 次收获时,不加砷处理的蜈蚣草生物量为 3.3 g/pot,显著高于各加砷处理;而在第 2 次收获时,不加砷处理的蜈蚣草生物量显著高于添加 300 mg/kg 和 800 mg/kg 砷的处理,但与添加 100mg/kg 砷处理相比,差异不显著;而第 3 次收获时,尽管各个处理之间蜈蚣草的生物量有微小的波动,但是差异不明显。因此,随着收获次数的增加,不同砷浓度处理的生物量差异逐步缩小。

由于 3 次收获的生长期不同,因此采用单位时间内蜈蚣草的生长量(生长速率)来表征刈割对蜈蚣草生长的影响(表 2)。从表 2 可以看出,第 1 次收获的蜈蚣草地上部平均生长速率仅为 1.5 mg/(plant·d),远低于第 2 次收获时的 19.3 mg/(plant·d)和第 3 次收获时的 17.2 mg/(plant·d),差异达到显著水平,表明对前茬的收割有助于后茬的生长。而在同一收获时间,蜈蚣草生长速率对不同砷浓度处理的响应与生物量的变化完全相同,即加砷抑制蜈蚣草的生长速率,但是随着收获次数的增加,这种影响逐渐减弱。

表 2 刈割次数与加砷对蜈蚣草生长速率的影响

项目 Item	各处理的蜈蚣草生长速率 Growth rate(mg/(plant·d))			
	砷处理 As treatment(mg/kg)			
	0	100	300	800
第 1 次收获 First harvesting	2.7±0.38	1.3±0.43	1.3±0.58	0.8±0.33
第 2 次收获 Second harvesting	27.3±7.91	20.6±5.12	16.8±2.14	14.4±3.63
第 3 次收获 Third harvesting	18.1±6.29	18.2±0.57	17.4±1.14	14.9±2.82
ANOVA Test 收获时间			* *	
Harvesting time 加砷			*	
As treatment 砷×时间			NS	
Harvesting time×As treatment				
Duncan Multiple Range Test				
第 1 次收获 First harvesting			1.5b	
第 2 次收获 Second harvesting			19.3a	
第 3 次收获 Third harvesting			17.2a	

* * $p<0.01$; * $p<0.05$;NS not significant

2.2 刈割对蜈蚣草砷含量的影响

从表 3 可以看出,在不同的收获时间,蜈蚣草地上部含砷量由高到低依次为:第 2 次收获>第 3 次收获>第 1 次收获。第 2 次收获的蜈蚣草地上部含砷量高达 3214 mg/kg,显著高于第 1 次和第 3 次收获。而第 3 次收获的蜈蚣草地上部含砷量也达到 2384 mg/kg,与第 1 次收获的蜈蚣草相比,差异亦达到显著水平。

加砷能够显著提高蜈蚣草地上部含砷量,并且随着添加砷浓度的提高,蜈蚣草体内的含砷量显著提高(表 3)。譬如在第 2 次收获的蜈蚣草中,对照处理蜈蚣草地上部的含砷量仅为 166 mg/kg,显著低于各加砷处理;而在不同的砷处理中,添加 800 mg/kg 砷处理的蜈蚣草地上部含砷量达到 5348 mg/kg,分别为添加 100 mg/kg 与 300 mg/kg 砷处理的 1.6 倍与 1.3 倍,差异达到显著水平。

表 3 刈割次数与加砷对蜈蚣草地上部含砷量的影响

	各处理的蜈蚣草地上部含砷量			
	砷处理 As treatment (mg/kg)			
	0	100	300	800
第 1 次收获 First harvesting	636±5	1748±610	2320±145	2554±481
第 2 次收获 Second harvesting	166±37	3262±1395	4043±507	5348±984
第 3 次收获 Third harvesting	161±28	2409±783	3151±632	3814±930
ANOVA Test 收获时间			* *	
Harvesting time 加砷			* *	
As treatment 砷×时间			* *	
Harvesting time×As treatment				
Duncan Multiple Range Test				
第 1 次收获 First harvesting			1814. 3c	
第 2 次收获 Second harvesting			3213. 8a	
第 3 次收获 Third harvesting			2384. 1b	

^a By ANOVA; * * *p*<0. 01

图 2 表示砷对蜈蚣草地下部以及前两次收获后留下的残茬中含砷量的影响。对于地下部而言,加砷处理显著提高地下部含砷量,但各加砷处理之间未达到显著差异。加砷处理中,蜈蚣草残茬依然含有较高浓度的砷,范围在 1380~2200 mg/kg;但是与收割前相比,其含砷量下降明显。这意味着残茬中的砷可以发生迁移,在体内可以进行再分配。

2. 3 刈割对蜈蚣草吸收砷的影响

要将蜈蚣草成功地用于砷污染的修复,不仅要求其生物量较高,同时也要求其砷含量较高,即要求地上部砷的积累量较多。图 3 显示,不加砷的处理中蜈蚣草的砷积累量仅为 2. 6 mg/pot;添加 100、300、800 mg/kg 砷后,蜈蚣草砷积累量分别达到 10. 5、13. 4、12. 1 mg/pot,显著高于不加砷处理蜈蚣草砷积累量,相应的植物修复效率分别达到 9. 7%、3. 9%与 1. 5%。

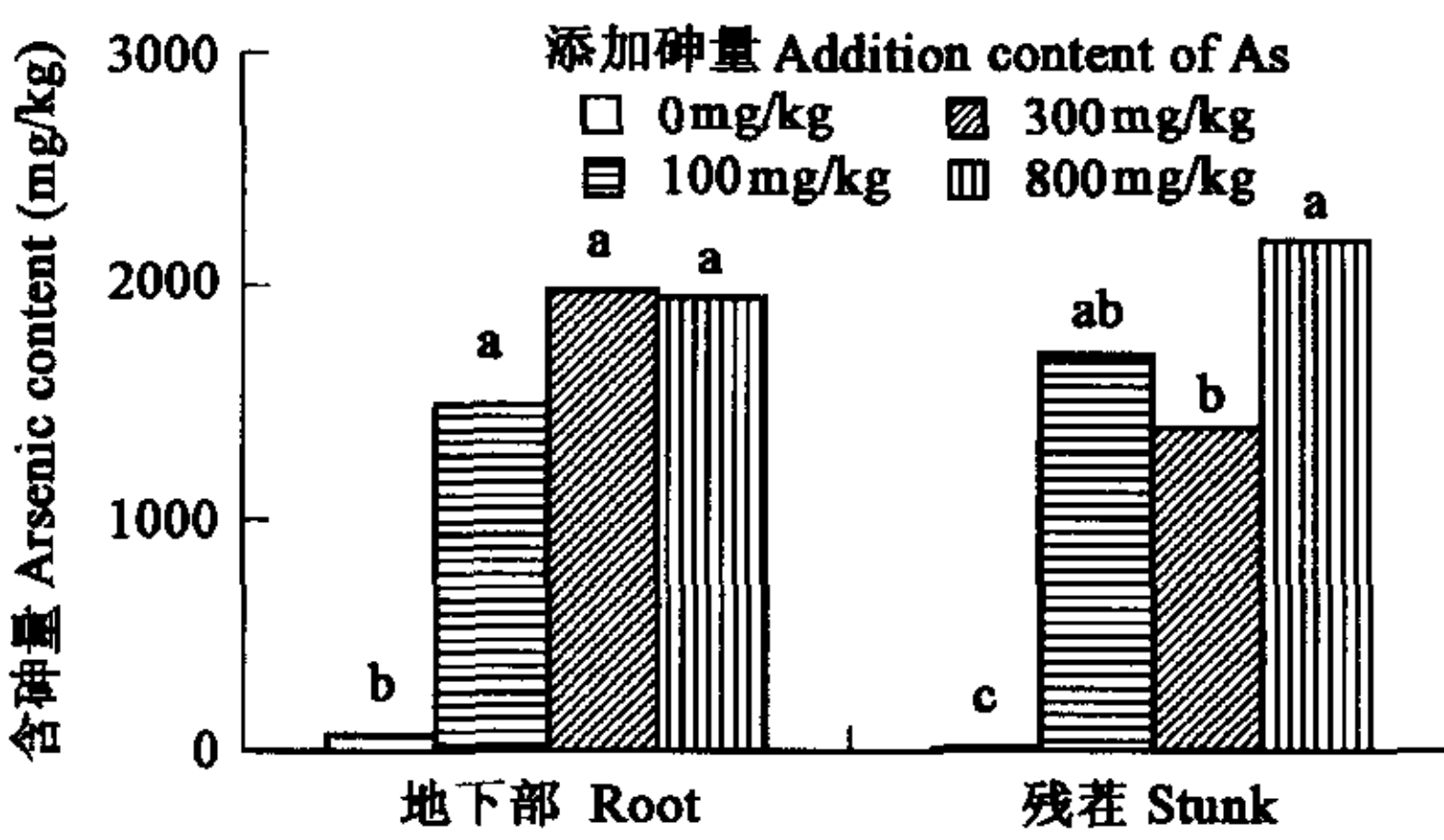


图 2 砷对蜈蚣草地下部(地下茎和根)和残茬含砷量的影响
Fig. 2 Effects of As on As concentrations in stunk and root of *P. vittata* L.

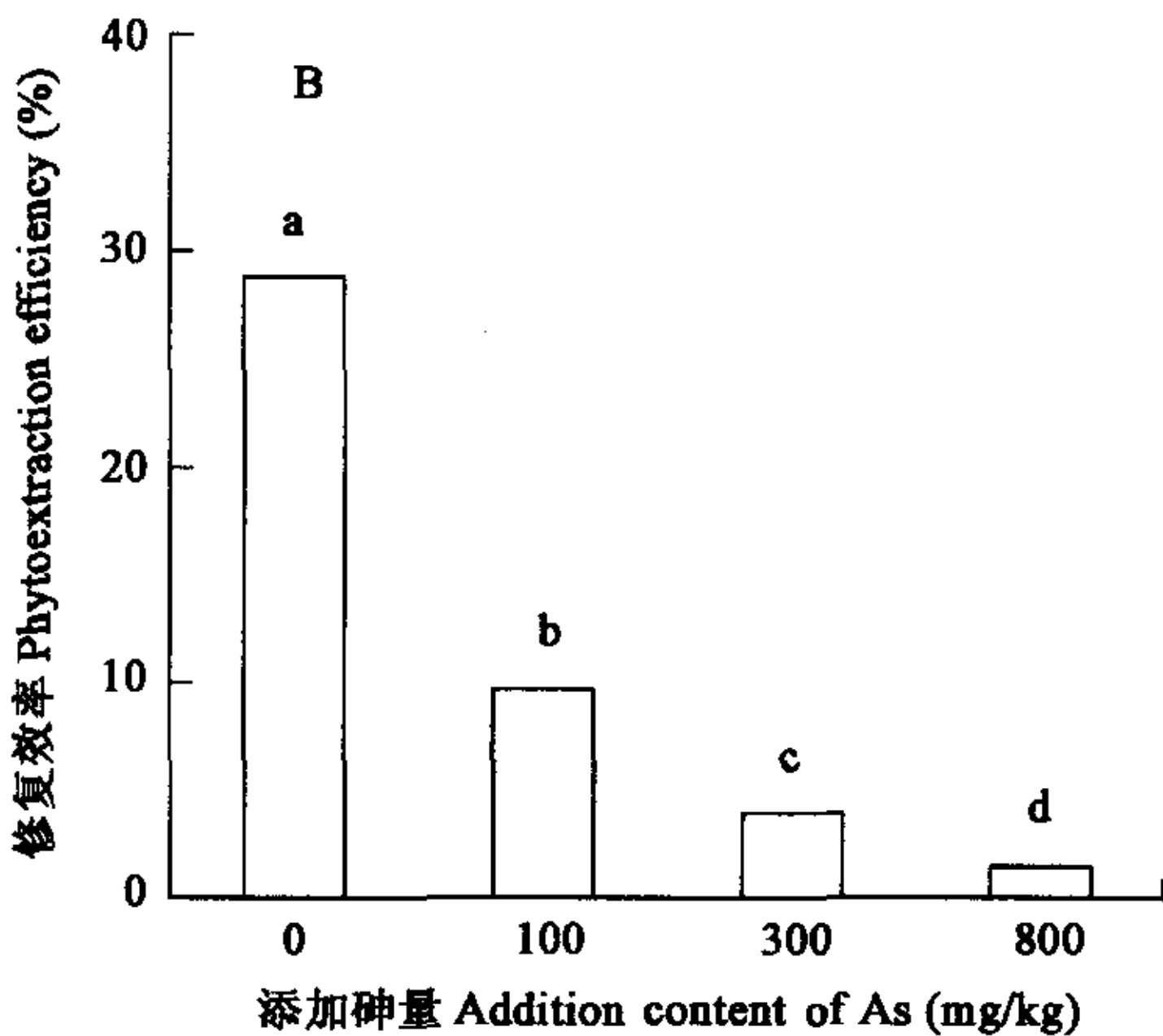
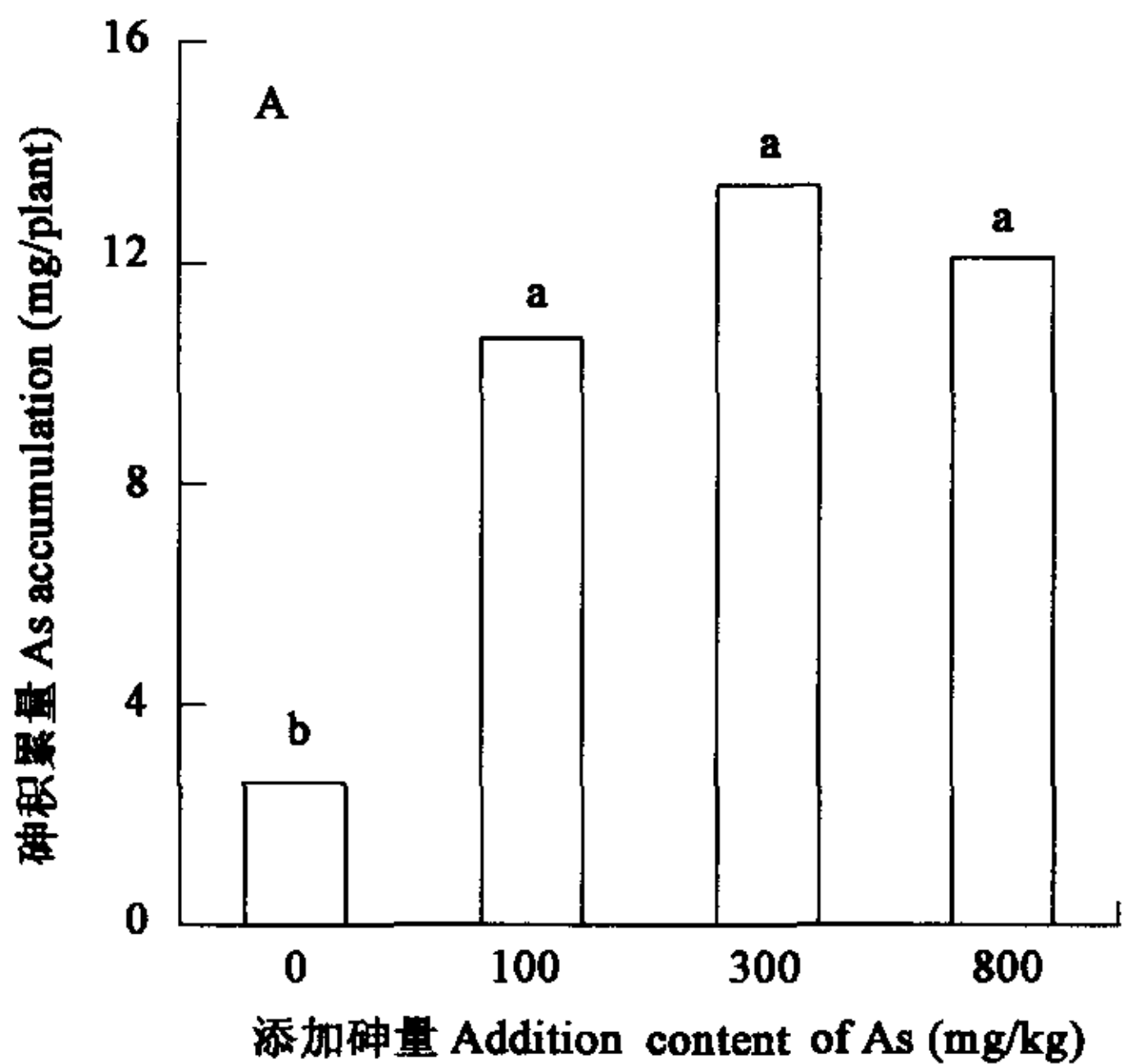


图 3 砷对蜈蚣草地上部砷积累量(A)及修复效率(B)的影响

Fig. 3 Effect of As on As accumulation in shoot of *P. vittata* L. (A) and removal efficiency of As by *P. vittata* L. (B).

为了排除生长时间长短不一所造成的差异,可以采用蜈蚣草的吸砷速率评价不同收获时间对蜈蚣草吸砷量的影响(表 4)。在 3 次收获当中,对照处理的吸收砷速率为 2. 8~17 $\mu\text{g}/(\text{plant} \cdot \text{d})$,3 个加砷处理的吸收砷速率在 22~75 $\mu\text{g}/(\text{plant} \cdot \text{d})$ 范围。对 3 次收获的结果进行比较可以发现,不加砷的对照处理中,每次收获后的砷吸收速率呈下降趋势;而在 3 个加砷处理中,第 1 次收获的砷吸收速率(20~35 $\mu\text{g}/(\text{plant} \cdot \text{d})$)均明显低于第 2 次(63~75 $\mu\text{g}/(\text{plant} \cdot \text{d})$)和第 3 次(44~55 $\mu\text{g}/(\text{plant} \cdot \text{d})$)收获。因此,在土壤含砷量较高的前提下,第 1 次收获时蜈蚣草的吸砷速率最小,第 2 次收获时的吸砷速率最大,第 3 次收获时的

吸砷速率居中。由此可见,在盆栽试验的 3 次收获中,后 2 次收获时蜈蚣草对砷的吸速率并没有降低。这表明,收获并不会降低蜈蚣草的吸收效率,因此通过适当增加蜈蚣草的收获次数是提高其修复效率的一种策略。

表 4 刈割次数与加砷对蜈蚣草吸收速率的影响

Table 4 Effect of harvesting on the rate of As uptake by <i>P. vittata</i> L. added with different rates of As					
		吸砷速率(μg/(plant · d)) Rate of As uptake			
		砷处理 As treatment(mg/kg)			
		0	100	300	800
第 1 次收获	First harvesting	3. 3±0. 46	1. 6±0. 52	1. 6±0. 70	0. 9±0. 40
第 2 次收获	Second harvesting	1. 5±0. 64	1. 2±0. 31	1. 0±0. 13	0. 9±0. 22
第 3 次收获	Third harvesting	1. 7±0. 59	1. 7±0. 05	1. 6±0. 11	1. 4±0. 26
ANOVA Test					
收获时间	Harvesting time	* *			
加砷	As treatment	* *			
砷×时间	Harvesting time×As treatment	* *			
Duncan Multiple Range Test					
第 1 次收获	First harvesting	1. 87a			
第 2 次收获	Second harvesting	1. 18b			
第 3 次收获	Third harvesting	1. 61a			

* * $p<0.01$

References:

[1] Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, *et al.* Spatial distribution of arsenic in contaminated paddy soils. *Geographical Research*, 2003, **22**(5): 635~643.

[2] Cai B S, Chen T B, Liao X Y, *et al.* Arsenic concentration in soils and vegetables and their risk assessment in highly contaminated area in Hu'nan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(4):711~717.

[3] Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al.* Soil As contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, Southern China. *Environmental International*, 2005.

[4] Meharg A A, Rahman M M. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: implications for rice contribution to arsenic consumption. *Environ. Sci. & Technol.*, 2003, **37**(2):229~234.

[5] Nickson R, Mcarthur J, Burgess W, *et al.* Arsenic poisoning of Bangladesh ground water. *Nature*, 1998, **395**:338.

[6] Chowdhury T R, Basu G K, Mandal B K, *et al.* Arsenic poisoning in the Ganges delta. *Nature*, 1999,**401**:545~546.

[7] Oremland R S, Stolz J F. The ecology of arsenic. *Science*, 2003, **300**:939~944.

[8] Senn D B, Hemond H F. Nitrate controls on iron and arsenic in an urban lake. *Science*, 2002, **296**:2373~2376.

[9] Chen T B, Wei C Y. A method to remediate arsenic contaminated soils. China Patent No. CN01120519. 9. 2001.

[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**(22):1876~1879.

[11] Ma L Q, Komar K M M, Tu C, *et al.* A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, **409**:579.

[12] Liao X Y, Chen T B, Lei M, *et al.* Root distributions and elemental accumulations of Chinese brake (*Pteris vittata* L.) from As-contaminated soils. *Plant and Soil*, 2004, **261**:109~116.

[13] Xiao X Y, Liao X Y, Chen T B, *et al.* Effects of arsenic and calcium on metal accumulation and translocation in *Pteris vittata* L. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8):1477~1487.

[14] Liao X Y, Xiao X Y, Chen T B. effects of Ca and As addition on As and Ca uptake by hyperaccumulator *Pteris vittata* L. under sand culture. *Acta Ecologica Sinica*, 2003,**23**(10): 2057~2063.

[15] Huang Z C, Chen T B, Lei M, *et al.* EXAFS study on arsenic species and transformation in arsenic hyperaccumulator. *Science in China Series C*, 2004, **47**(2):124~129.

[16] Zhang W, 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.

[17] Wang J R, Zhao F J, Meharg A A, *et al.* Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in GPteris vittataG. uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. *Plant Physiology*, 2002, **130**:1552~1561.

[18] Chen T B, Mo L Y. An easy method to breed *Pteris vittata* L from spores. China Patent No. CN04222222. 2004.

[19] Chen T B, An Z Z. A method to remediate arsenic contaminated soils. China Patent No. CN02156025. 0. 2002.

[20] 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**(11):902~905.

[21] Wei C Y, Chen T B, Huang Z C, *et al.* Cretan brake (*Pteris cretica* L.): An arsenic-accumulating plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5):777~778.

[22] 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.

[23] SAS Institute. SAS User's Guide; Version 5. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA, 1985.

参考文献:

[1] 廖晓勇,陈同斌,肖细元,等. 污染农田土壤中砷含量的空间变异特征. 地理研究, 2003,**22**(5):635~643.

[2] 蔡保松,陈同斌,廖晓勇,等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响. 生态学报, 2004,**24**(4):711~717.

[9] 陈同斌,韦朝阳. 一种治理砷污染土壤的方法. 中国发明专利申请号:01120519. 9. 2001.

[13] 肖细元,廖晓勇,陈同斌,等. 砷、钙对蜈蚣草中金属元素吸收和转运的影响. 生态学报, 2003,**23**(8):1477~1487.

[14] 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):2057~2063.

[18] 陈同斌,莫良玉. 利用蜈蚣草孢子进行快速繁殖的方法. 中国发明专利申请号:04222222. 2004.

[19] 陈同斌,安志装. 一种修复砷污染土壤的方法. 中国发明专利申请号:02156025. 0. 2002.

[21] 韦朝阳,陈同斌. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物. 生态学报, 2002,**22**(5):777~778.

[22] 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.