

砷、钙对蜈蚣草中金属元素吸收和转运的影响

肖细元^{1,2}, 廖晓勇¹, 陈同斌^{1*}, 张杨珠²

(1 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101; 2 湖南农业大学农业资源系, 长沙 410128)

摘要: 蜈蚣草是砷的超富集植物和钙质土壤的指示植物。本试验在砂培条件下, 研究砷、钙对蜈蚣草吸收和转运必需金属元素 K、Mg、Mn、Fe、Zn 和 Cu 的影响。结果表明, 提高营养液中的砷浓度显著降低根部 Mg 和 Zn 的吸收, 但对根部其它元素的浓度没有明显影响; 叶柄中的 Mn 和地上部的 Fe 浓度因介质中添加砷而显著减少, 其它元素在地上部的分布不受抑制。添加砷限制 Fe 从地下部向地上部转运, 但促进其从叶柄向羽叶中运输; 另外, 还显著促进 Mn 由叶柄向羽叶和 Zn 由根向羽叶的转运。提高钙处理浓度对蜈蚣草吸收 Fe、Zn、Cu 无显著影响, 但显著限制 K、Mg 和 Mn 的吸收。Mn 是研究的 6 种金属元素中惟一一种明显向地上部转运富集的元素。从根部到羽叶中, 金属元素间的相关性增强, 在根部 Ca 与各种金属元素都无相关性; 叶柄中 Ca 和 Fe 浓度呈极显著正相关; 在羽叶中, Ca 与 K、Mg、Mn 和 Zn 浓度呈显著负相关。

关键词: 超富集植物; 蜈蚣草; 砷; 钙; 金属元素; 吸收; 转运

Effects of arsenic and calcium on metal accumulation and translocation in *Pteris vittata* L.

XIAO Xi-Yuan^{1,2}, LIAO Xiao-Yong², CHEN Tong-Bin^{1*}, ZHANG Yang-Zhu² (1 Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 College of Agricultural Resources, Hunan Agricultural University, Hunan 410128, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1477~1487.

Abstract: Soil As contamination, which is dangerous to plants and human and may cause elevation of As concentrations in the surrounding waters, is a widespread and severe environmental problem both in China and in the world. Phytoremediation, which is an emerging plant-based technology for the removal of pollutants, have been successfully applied to remediate heavy metal contaminated soils. *Pteris vittata* L., an indicator plant for calcareous soils, is an As-hyperaccumulator newly discovered by Chen *et al.* in China. This finding may bring a hope to phytoremediate As-contaminated soils. The accumulation and translocation of necessary metals involved have not been elucidated. We investigated the interactions of As and Ca on the concentration and distribution of metals including K, Mg, Mn, Fe, Zn and Cu in *Pteris vittata* L. under sand culture condition. A 3 × 3 complete factorial experiment was designed which contained 9 treatments added with 3 As concentrations: 0, 0.1, 0.2 mmol/L and 3 concentrations of Ca: 0.03, 2.5, 5.0 mmol/L.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(4023022); 国家自然科学基金面上资助项目(40071075); 国家重大基础研究前期专项资助项目(2002CCA 03800)

收稿日期: 2003-01-16; **修订日期:** 2003-04-20

作者简介: 肖细元(1973~), 女, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事污染土壤植物修复研究。

* 通讯联系人 Author for correspondence, E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 4023022, 40071075) and National Programme for Basic Sciences (No. 2002CCA 03800)

Received date: 2003-01-16; **Accepted date:** 2003-04-20

Biography: XIAO Xi-Yuan, Ph.D., candidate, main research field: phytoremediation of contaminated soil

It is shown that the Mg and Zn concentrations in roots were significantly reduced by enhancing the As levels whereas the concentrations of K, Mn, Fe and Cu in the roots were not influenced. There was no significant effect of the added As on the metal concentrations in shoots, and Mn concentration in petioles and Fe concentration in shoots. A decrease of Fe translocation from underground to aboveground and an increase of that from petiole to leaf were found with increasing As concentration in the medium. The applied As was benefit to transport Mn from petiole to leaf and Zn from root to leaf.

The results show that the accumulations of Fe, Zn and Cu were not significantly affected by Ca levels. With increasing Ca concentration in the medium, K concentration in the roots increased gradually in the leaves. Applied 2.5 and 5.0 mmol/L Ca caused to reduce Mg and Mn concentration in the shoots comparing with the treatment of 0.03 mmol Ca/L. Regardless of As and Ca levels, Mn was the only element among the 6 metals studied which accumulated obviously to the shoots.

The interaction of metals was enhanced gradually from the roots to leaves, and the effect of the Ca level on other metal elements was very obvious. There was no significant relationship between the Ca concentration and other metals concentrations in the roots. But the positive correlation between Ca and Fe concentrations in petioles was very significantly. The K, Mg, Mn and Zn concentrations in leaves decreased as the Ca concentration increased.

Key words: hyperaccumulator; *Pteris vittata* L.; arsenic; calcium; metal; accumulation; translocation coefficients

文章编号: 1000-0933(2003)08-1477-11 中图分类号: Q 143 文献标识码: A

蜈蚣草(*Pteris vittata* L.) 是世界上发现的第一种砷超富集植物(hyperaccumulator), 同时也是我国境内发现的第一种重金属超富集植物^[1]。蜈蚣草对生长介质的砷具有极强的耐性和富集能力, 甚至能在含砷 23400 mg/kg 的矿渣上正常生长。在野外生长时, 其地上部生物量可高达 36 t/hm²^[1]。室内栽培时, 其羽叶的含砷浓度可高达 12953 mg/kg (大大超过植物体中大量元素磷的浓度)。在室内栽培条件下配以施用磷肥等各种技术措施大幅度提高其对砷的吸收效率, 磷砷呈现相互协同效应^[2]; 蜈蚣草具有生长迅速、生物量大、高效吸收和转运砷等特点, 因此在砷污染土壤的植物修复中具有重要意义。

蜈蚣草广泛分布于我国秦岭以南的各省, 如湖南、湖北、广西、四川等地。蜈蚣草多生长在石灰性土壤或岩石缝中, 是一种钙质土壤的指示植物^[3]。本课题组在南方各地进行大量的野外调查发现, 它在自然界中也可以分布在酸性土壤中, 但是绝大部分情况下均生长在石灰性土壤、墙壁或岩石的缝隙中。最近有关蜈蚣草的研究报道多集中于其对砷的耐性、砷存在形态及其分布, 而元素交互效应对其影响报道不多。钙是植物必需的中量元素, 而蜈蚣草具有明显的喜钙特性, 钙是否会对蜈蚣草具有某些特殊的生理功能? 钙与蜈蚣草的关系未见研究。廖晓勇等人通过砂培试验研究了砷、钙对超富集植物蜈蚣草生长和吸收砷的影响, 结果表明: 砷、钙对蜈蚣草累积砷有极显著的交互效应, 砷是正效应, 钙是负效应; 高钙处理会增加砷对蜈蚣草的毒性, 植物生长明显受抑制, 显著降低其对砷的吸收能力。本课题组曾从蜈蚣草的超显微结构的角度进行研究, 发现砷对钙的亚细胞分布具有明显的影响。从 Tu 等人添加不同种类砷酸盐的土培盆栽试验可以看出: 与其它几种砷酸盐相比, 添加砷酸钙可以增加蜈蚣草地上部的含砷浓度, 但各处理间生物量差异不明显^[4]。这表明钙在一定程度上影响着蜈蚣草对砷的吸收和转运。因此, 从营养元素角度来研究蜈蚣草中砷、钙的交互作用具有特殊的意义。

Liao Xiao-Yong, Chen Tong-Bin, Xiao Xi-Yuan. Calcium and arsenic interaction on growth and accumulation of arsenic, phosphorus and calcium in Chinese brake (待发表资料)

李文学, 超富集植物蜈蚣草对砷的吸收及两种提高植物修复效率的方法探讨. 中国科学院地理科学与资源研究所 [博士后出站报告], 2003

到目前为止, 究竟砷、钙对蜈蚣草中钾、镁等植物必需元素(养分)的吸收有何影响仍未见报道。本研究拟探索砷和钙对蜈蚣草中金属元素(钾、镁和微量元素)吸收、转运的影响, 为揭示蜈蚣草用于植物修复时主要金属元素的生物地球化学循环过程和制定科学的施肥方案提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与设 计

供试植物为蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)。以缺钙的 Hoagland 为基础营养液进行砂培试验。砂培中各元素的浓度(mmol/L)为: N 4.8、P 0.4、K 2.0、Mg 0.25、Na 0.2、Fe 2.24×10^{-2} 、Mn 2.3×10^{-3} 、B 1.15×10^{-2} 、Zn 1.9×10^{-4} 、Cu 8×10^{-5} 、Mo 5×10^{-5} 、Cl 0.2、S 0.28。试验共设 9 个处理, 采用二因素 3($A \times Ca$)完全设计方案(表 1), 各处理重复 4 次。钙是植物必需营养元素, 本试验最低钙水平参照微量元素 Fe 的浓度, 设为 0.03 mmol/L 。钙源为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 砷源为 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。考虑钙源中 NO_3^- 对蜈蚣草的影响, 以 CaCl_2 为钙源另设一对照, 发现两处理中生物量和钙、砷浓度均无显著差异, 所以本试验不考虑钙源对其它元素的影响。

1.2 室内培养和分析

蜈蚣草孢子(采自湖南)在温室中育苗, 待长出 2 片幼叶后, 移栽至砂培介质中(石英砂于稀盐酸中浸泡 24h 后, 自来水洗净, 再用去离子水冲洗两遍, 将砂装入塑料盆。盆直径 12cm, 高 10cm)。试验处理的蜈蚣草苗在人工气候箱中培养, 每天光照 14h, 白天温度 26°C , 夜间温度为 20°C , 相对湿度 85%, 每周更换一次营养液。3 个月后收获植株。将植株分为根、叶柄和羽叶 3 部分, 先用自来水洗净, 再用去离子水冲洗, 85 $^\circ\text{C}$ 杀青 1h 后, 60 $^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重。粉碎后的样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮, 采用原子吸收光度计(德国 Analytik Jena AG 公司, AAS vario 6 型号)测定 K、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 等元素的浓度^[5]。

1.3 数据处理

试验数据的处理、相关性分析、显著性检验和交互效应分析由 SAS 统计软件完成。

2 结果与讨论

2.1 砷、钙对大量和中量元素吸收和转运的影响

钾和镁在植物体中的浓度一般都较高, 从植物营养学的角度分别将其称为大量元素和中量元素。钾是本研究中蜈蚣草体内含较高的阳离子, 羽叶中钾浓度为 $14.9\sim 25.4 \text{ g/kg}$ 。介质中砷浓度对于蜈蚣草生长(根、叶柄和羽叶的生物量)无显著影响(图 1)。营养液中砷浓度的提高没有显著影响蜈蚣草体内任何部位的钾浓度(表 2)。在耐性植物体内的钾营养不受介质和植物体内砷浓度的影响^[6]。Clarkson 和 Hanson 指出, 钾与砷吸收(以阴离子态吸收时)有相互协同效应, 同时起到电荷和离子平衡的作用^[7]。但在对矮菜豆(bush bean)、菜豆和水稻研究中发现, 提高介质中砷浓度都抑制钾的吸收^[8-10]。这 3 种植物可能是因根功能受砷毒损害而限制植物吸收钾元素。Lombi 等研究发现蜈蚣草羽叶表皮细胞中砷和钾浓度呈显著正相关^[11]。本试验结果显示砷对钾在蜈蚣草各部位的影响似乎没有很明显的规律。提高介质中钙的浓度, 蜈蚣草根生物量逐步减少; 0.03 和 2.5 mmol/L Ca 处理的地上部生物量无显著差异, 但两者的生物量均显著高于 5.0 mmol/L Ca 处理(图 1)。随着介质中钙浓度的升高, 根部钾浓度呈升高的趋势, 但 2.5 和 5.0 mmol/L Ca 处理则显著降低羽叶中钾的浓度。即提高钙处理水平可降低蜈蚣草体内钾向地上部运输的能力。这与其它植物的研究结果一致^[12]。不同钙处理对蜈蚣草体内钾转运情况的影响也同样表明, 随着 Ca 浓度由 0.03 mmol/L 提高到 5.0 mmol/L , 羽叶/根、叶柄/根、羽叶/叶柄的转运系数不断降低, 钾在各部位的转运系数均在 $0.7\sim 1.5$ 之间(表 2)。

表 1 钙砷各处理的试验设计

Table 1 Concentrations of As and Ca treatments in the experiment

处理 Treatment	As 浓度(mmol/L) As concentration	Ca 浓度(mmol/L) Ca concentration
1	0	0.03
2	0	2.5
3	0	5.0
4	0.1	0.03
5	0.1	2.5
6	0.1	5.0
7	0.2	0.03
8	0.2	2.5
9	0.2	5.0

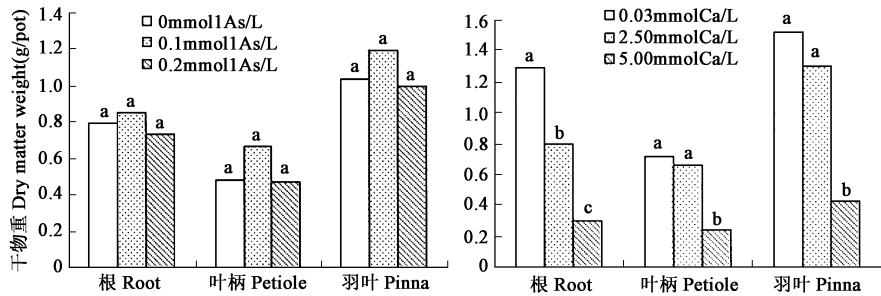


图 1 砷 钙对蜈蚣草生物量的影响

Fig 1 Effects of As and Ca on the biomass of *Pteris vittata* L.

表 2 不同砷 钙处理中蜈蚣草对钾的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 2 Concentrations and translocation coefficients of K in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		K 浓度 K concentration (g/kg)			K 转运系数 K translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	16.7 ± 4.4	21.8 ± 2.8	25.4 ± 3.0	1.60 ± 0.44	1.40 ± 0.46	1.19 ± 0.28
0	2.5	18.9 ± 4.3	31.0 ± 8.4	22.8 ± 2.8	1.58 ± 0.63	1.67 ± 0.40	0.70 ± 0.18
0	5.0	24.1 ± 3.1	22.0 ± 2.9	14.9 ± 4.5	0.64 ± 0.26	0.92 ± 0.15	0.80 ± 0.04
0.1	0.03	16.5 ± 2.0	20.2 ± 2.1	19.9 ± 1.9	1.21 ± 0.15	1.25 ± 0.27	1.06 ± 0.03
0.1	2.5	16.9 ± 1.6	26.0 ± 7.6	16.8 ± 4.4	0.99 ± 0.20	1.56 ± 0.39	0.67 ± 0.16
0.1	5.0	20.0 ± 3.8	28.2 ± 7.4	18.0 ± 2.6	0.93 ± 0.21	1.42 ± 0.30	0.67 ± 0.18
0.2	0.03	18.3 ± 0.8	17.6 ± 1.7	22.5 ± 6.5	1.45 ± 0.39	1.40 ± 0.49	1.13 ± 0.43
0.2	2.5	23.4 ± 6.0	23.2 ± 1.6	17.2 ± 1.6	0.75 ± 0.14	1.22 ± 0.54	0.84 ± 0.21
0.2	5.0	19.9 ± 5.0	15.5 ± 3.1	15.2 ± 7.1	0.85 ± 0.51	1.54 ± 1.44	0.42 ± 0.34
ANOVA test							
As							
	0	19.9a	25.0a	21.0a	1.17a	1.33ab	1.24a
	0.1	17.1a	24.8a	18.3a	1.10a	1.48a	1.56a
	0.2	20.5a	20.1a	18.3a	0.95a	1.04b	1.67a
Ca							
	0.03	17.2b	21.2a	22.6a	1.35a	1.28ab	1.10a
	2.5	19.1ab	26.7a	18.9b	1.06a	1.50a	0.73b
	5.0	21.3a	21.9a	16.0b	0.81a	1.08b	0.76b
F test							
As		NS	NS	NS	NS	*	NS
Ca		NS	NS	**	**	NS	*
As × Ca		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$

镁是叶绿素的重要组成成分,同时 Mg^{2+} 也是催化磷酸化过程酶的关键辅助因子之一,在磷酸盐的代谢过程中起着重要的作用^[12]。提高介质中的砷浓度,蜈蚣草根部的镁浓度逐渐降低,但对叶柄和羽叶中的镁浓度无显著影响,即羽叶/根的转运系数随砷浓度升高而增加(表 3)。普通植物中砷可替代磷酸偶联氧化磷酸化作用^[13],介质中砷可抑制镁的吸收,植物体内砷和镁有明显的拮抗效应^[6]。但本研究中砷对蜈蚣草

中地上部的镁浓度无明显影响, 表明在高砷浓度处理下, 砷的超富集植物蜈蚣草的叶绿素含量可能不受影响。在对大麦、玉米和大豆的钙镁元素吸收研究中发现, 介质中钙和镁浓度之和低于 5mmol/L 时, 钙浓度的变化对于镁的吸收转运影响较小, 只有当两者之和高于 20mmol/L 时, 增大钙与镁比率可大大降低镁的吸收^[14]。但是在对一些蕨类植物的研究发现, 它们适宜生长的 Ca/Mg 浓度比值为 2~ 10 之间^[15]。本试验结果表明, 在钙处理浓度达到 2.5 mmol/L 以上(营养液中钙镁浓度之和大于 2.75mmol/L), 即 Ca/Mg 比值 ≥ 10 时, 提高营养液中钙浓度使得蜈蚣草的镁浓度大幅度降低, 在高钙处理下羽叶中的镁浓度几乎为对照处理的一半。这表明, 蜈蚣草对于钙镁浓度比率与其它蕨类植物相似, 较一般农作物敏感。因此, 将蜈蚣草用于修复砷污染土壤时, 应考虑其适宜生长的 Ca/Mg 浓度比值, 以维持良好生长。从转运系数来看, 介质中钙浓度的变化对镁在蜈蚣草各部位转运系数的影响均达到极显著影响。镁主要分布在蜈蚣草的羽叶中, 在叶柄中的镁浓度最低, 呈现出羽叶> 根> 叶柄的规律。

表 3 不同砷、钙处理中蜈蚣草对镁的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 3 Concentrations and translocation coefficients of Mg in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		Mg 浓度 (g/kg) Mg concentration			Mg 转运系数 Mg translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	1.91 ± 0.24	1.57 ± 0.32	3.98 ± 0.45	2.13 ± 0.46	0.83 ± 0.21	2.60 ± 0.52
0	2.5	2.80 ± 0.25	1.03 ± 0.03	2.47 ± 0.13	0.89 ± 0.10	0.37 ± 0.04	2.40 ± 0.09
0	5.0	2.37 ± 0.45	1.23 ± 0.70	2.08 ± 0.07	0.90 ± 0.17	0.53 ± 0.31	2.19 ± 1.21
0.1	0.03	1.85 ± 0.07	1.16 ± 0.09	3.75 ± 0.02	2.31 ± 0.06	0.62 ± 0.05	3.63 ± 0.58
0.1	2.5	2.43 ± 0.05	0.95 ± 0.16	2.57 ± 0.35	1.19 ± 0.38	0.44 ± 0.14	2.74 ± 0.38
0.1	5.0	1.91 ± 0.18	0.91 ± 0.15	2.01 ± 0.14	1.06 ± 0.15	0.47 ± 0.04	2.27 ± 0.45
0.2	0.03	1.76 ± 0.18	1.22 ± 0.16	4.39 ± 0.64	2.49 ± 0.16	0.70 ± 0.14	3.68 ± 0.89
0.2	2.5	2.19 ± 0.15	1.01 ± 0.19	2.34 ± 0.13	1.07 ± 0.12	0.46 ± 0.09	2.39 ± 0.55
0.2	5.0	1.73 ± 0.16	0.99 ± 0.06	2.07 ± 0.24	1.21 ± 0.24	0.61 ± 0.52	1.33 ± 0.97
ANOVA test							
As							
	0	2.36a	1.27a	2.84a	1.31a	0.58a	2.40a
	0.1	2.07ab	1.00a	2.78a	1.38a	0.50a	2.76a
	0.2	1.89b	0.99a	2.94a	1.59a	0.54a	2.80a
Ca							
	0.03	1.84b	1.31a	4.04a	2.22a	0.72a	3.18a
	2.5	2.47a	0.97b	2.46b	1.01b	0.41b	2.51b
	5.0	2.00b	0.95b	2.06c	1.06b	0.48b	2.21b
F test							
As		**	NS	NS	*	NS	NS
Ca		***	*	***	**	**	**
As × Ca		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** , $p < 0.001$

2.2 砷、钙对微量元素吸收和转运的影响

锰是植物必需营养元素, 与其体内许多酶的活性和氧化还原体系有关, 并直接参与光合作用。介质中砷浓度对蜈蚣草根部和羽叶的锰浓度都无明显影响, 但均显著降低其叶柄中的锰浓度(表 4)。锰与镁相似, 也主要分布在羽叶中, 最高达到 138.3mg/kg, 羽叶/根的平均转运系数为 5.11, 是本研究唯一一种羽叶/根的转运系数大于 1 的微量元素, 即羽叶相对于根部有非常明显的富集效应。这表明羽叶是锰的主要贮存器官, 蜈蚣草转运锰的能力较强。同样, 在对我国南方分布的 30 多种蜈蚣草的野外调查中发现, 蜈蚣草对锰

具有较强的富集和转运能力。这显示出在自然条件和砂培试验中,蜈蚣草对锰均具有较强的富集作用。与对照相比,砷处理明显提高锰的羽叶/叶柄转运系数。提高钙处理浓度明显抑制蜈蚣草地上部的锰浓度,且显著降低锰的转运。在 2.5 mmol/L Ca 处理下,羽叶/根及羽叶/叶柄的转运系数几乎是 0.03 mmol/L Ca 处理的一半。

表 4 不同砷、钙处理中蜈蚣草对锰的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 4 Concentrations and translocation coefficients of Mn in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		Mn 浓度 (mg/kg) Mn concentration			Mn 转运系数 Mn translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	23.4 ± 5.0	30.1 ± 5.5	130.5 ± 32.6	5.94 ± 2.28	1.29 ± 0.08	4.54 ± 1.56
0	2.5	24.5 ± 2.5	16.9 ± 1.2	82.5 ± 12.6	3.36 ± 0.38	0.67 ± 0.04	5.10 ± 0.42
0	5.0	23.1 ± 0.7	29.2 ± 13.4	90.8 ± 2.6	3.95 ± 0.18	1.16 ± 0.50	3.91 ± 1.66
0.1	0.03	13.4 ± 1.7	19.3 ± 3.2	123.7 ± 4.7	8.14 ± 2.26	1.26 ± 0.41	6.56 ± 1.15
0.1	2.5	29.3 ± 18.6	10.0 ± 3.2	72.4 ± 11.4	3.12 ± 1.49	0.41 ± 0.17	7.48 ± 1.17
0.1	5.0	19.0 ± 3.9	11.3 ± 4.0	75.5 ± 27.1	3.99 ± 1.21	0.60 ± 0.18	6.90 ± 1.98
0.2	0.03	18.4 ± 5.6	23.0 ± 1.7	138.3 ± 37.0	8.54 ± 4.90	1.33 ± 0.38	6.05 ± 1.71
0.2	2.5	24.7 ± 5.8	13.4 ± 6.3	86.7 ± 17.9	3.64 ± 0.98	0.56 ± 0.26	7.09 ± 1.84
0.2	5.0	22.7 ± 8.3	27.6 ± 22.6	85.7 ± 12.1	5.47 ± 3.03	1.23 ± 0.17	3.99 ± 3.10
ANOVA test							
As							
	0	23.7a	25.4a	101.3a	4.41a	1.09a	4.38b
	0.1	20.6a	13.5b	90.5a	5.47a	0.82a	6.98a
	0.2	21.9a	19.0b	103.6a	5.47a	0.93a	6.06a
Ca							
	0.03	18.4a	24.1a	130.8a	7.92a	1.36a	5.72a
	2.5	26.2b	13.4b	80.5b	3.37b	0.56b	6.48a
	5.0	21.6b	20.4a	84.0b	4.05b	0.92b	5.14a
F test							
As		NS	*	NS	NS	NS	**
Ca		NS	*	***	**	**	NS
As × Ca		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$

铁是植物体某些酶的组成成分,在氧化还原过程中起着重要的电子传递作用。与对照相比,提高介质中砷浓度显著减少蜈蚣草地上部的铁浓度(表 5)。特别是砷处理的叶柄中的铁浓度远远低于对照,0.2 mmol/L As 处理的叶柄中的铁浓度,相当于对照的 1/4,羽叶中铁浓度也几乎为对照的 2/3。但 Wallace 等发现,提高水溶液砷浓度能促进矮菜豆(bush bean)吸收铁、铜^[11]。砷处理显著降低铁在蜈蚣草中从根部向叶柄的转运能力,但明显促进其从叶柄向羽叶中的转运。钙质土壤中的钙浓度变化对避钙植物吸收铁的影响要远大于对钙指示植物的效应,前者在高钙情况下易出现缺铁症状^[13]。本研究中钙浓度的提高对蜈蚣草铁的吸收无明显影响,这也可能与它是钙的指示植物有关。砷、钙对蜈蚣草体内铁的叶柄/根转运系数有显著的交互效应,其中砷是负效应,而钙是正效应,即提高介质中砷浓度,其转运系数下降,增加钙浓度,转运系数增加。与锰不同的是,铁主要分布在蜈蚣草的根部,最高浓度达 786mg/kg,而地上部浓度明显较低,是本研究的 4 种微量元素中转运系数最小的元素,其叶/根、叶柄/根的转运系数都小于 0.4,最小的仅为 0.08。

黄泽春: 砷超富集植物的筛选及其富集机理的研究 中国科学院地理科学与资源研究所[博士论文], 2003

表 5 不同砷、钙处理中蜈蚣草对铁的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 5 Concentrations and translocation coefficients of Fe in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		Fe 浓度 (mg/kg) Fe concentration			Fe 转运系数 Fe translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	602.8 ± 15.7	113.8 ± 37.6	165.7 ± 51.6	0.24 ± 0.03	0.30 ± 0.22	1.19 ± 0.89
0	2.5	725.2 ± 98.4	162.5 ± 88.0	238.1 ± 25.2	0.36 ± 0.01	0.22 ± 0.10	1.78 ± 0.85
0	5.0	716.5 ± 188.6	304.8 ± 188.3	199.3 ± 75.5	0.28 ± 0.08	0.42 ± 0.22	0.90 ± 0.62
0.1	0.03	774.3 ± 148.9	201.0 ± 30.9	147.1 ± 37.7	0.20 ± 0.08	0.10 ± 0.05	2.28 ± 0.37
0.1	2.5	785.3 ± 396.2	56.3 ± 23.5	142.3 ± 87.6	0.18 ± 0.06	0.08 ± 0.03	2.19 ± 0.09
0.1	5.0	652.5 ± 239.4	63.7 ± 8.4	129.9 ± 30.0	0.21 ± 0.03	0.10 ± 0.03	2.04 ± 0.34
0.2	0.03	580.8 ± 222.3	41.8 ± 9.2	127.5 ± 33.2	0.17 ± 0.01	0.08 ± 0.02	2.49 ± 0.17
0.2	2.5	559.7 ± 83.4	48.1 ± 15.9	114.6 ± 28.1	0.21 ± 0.07	0.09 ± 0.04	2.45 ± 0.26
0.2	5.0	764.8 ± 264.8	48.0 ± 20.4	178.0 ± 35.5	0.25 ± 0.08	0.13 ± 0.02	2.34 ± 0.04
ANOVA test							
As							
	0	681.5a	193.7a	201.0a	0.29a	0.27a	1.43b
	0.1	737.3a	73.5b	139.8b	0.20b	0.09b	2.24a
	0.2	635.1a	45.9b	140.0b	0.24ab	0.08b	2.89a
Ca							
	0.03	652.6a	85.4a	146.8a	0.25a	0.12a	2.38a
	2.5	690.0a	89.0a	165.0a	0.24a	0.13a	2.21a
	5.0	711.2a	138.8a	169.0a	0.24a	0.21a	1.89a
F test							
As		NS	***	**	*	***	*
Ca		NS	NS	NS	NS	***	NS
As × Ca		NS	NS	NS	NS	**	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$

微量元素铜和锌营养与植物蒸腾作用有关,铜、锌浓度影响植物枯萎过程。锌还参与植物生长素的形成,促进光合作用和蛋白质合成。从表 6 中看出,砷处理降低蜈蚣草根部的锌浓度,其影响达极显著水平。在对番茄的研究中有同样类似现象^[16],表明砷和锌之间可能存在拮抗效应。但是从本试验的结果来看,砷处理都有利于蜈蚣草中的锌向地上部转运,其转运系数随砷浓度的提高而呈上升趋势。Liao 等在野外调查发现,在一定范围内随着土壤中的砷浓度升高,羽叶中的锌浓度逐渐增大^[17]。室内盆栽结果表明,蜈蚣草有较强的耐锌能力,植物体内锌浓度随着土壤中锌浓度增加而升高,但大部分锌富集在根部。钙处理对蜈蚣草各部位的锌浓度无显著影响。与砷处理相反,蜈蚣草体内锌的各转运系数随着钙浓度的提高而减少,其对锌由叶柄向羽叶运转的能力显著降低。本研究结果发现,提高介质中砷和钙浓度对蜈蚣草体内铜浓度的影响不显著(表 7)。Tang 等研究表明^[18],向土壤中添加少量的砷能促进水稻对铜的吸收,铜与砷之间表现为协同效应。砷处理对铜的转运系数影响都表现出有利于其向地上部转运的趋势。与其它钙处理水平相比,5.0 mmol/L Ca 处理下铜的叶柄/羽叶的转运系数明显降低。砷、钙处理与叶柄中的铜浓度呈显著负交互作用。锌、铜在蜈蚣草中的浓度分布与铁相似,呈现根>羽叶>叶柄的规律。

对于普通植物(如菜豆、番茄等),在较高砷浓度处理下对元素的吸收表现异常,生长受到明显抑制^[18,16]。本试验中砷处理浓度虽达到 0.2 mmol/L,铁和锌除外,其它元素在蜈蚣草羽片中的浓度受砷处理

的影响不显著。这表明蜈蚣草生理功能正常, 其必需金属营养状况受砷的影响不明显。

表 6 不同砷、钙处理中蜈蚣草对锌的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 6 Concentrations and translocation coefficients of Zn in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		Zn 浓度 (mg/kg) Zn concentration			Zn 转运系数 Zn translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	602.8 ± 15.7	113.8 ± 37.6	165.7 ± 51.6	0.24 ± 0.03	0.30 ± 0.22	1.19 ± 0.89
0	2.5	76.4 ± 24.1	28.0 ± 1.4	42.2 ± 19.1	0.56 ± 0.25	0.36 ± 0.10	1.41 ± 0.79
0	5.0	94.2 ± 22.1	32.3 ± 7.2	33.7 ± 9.4	0.39 ± 0.19	0.55 ± 0.35	0.90 ± 0.45
0.1	0.03	48.8 ± 11.7	28.2 ± 8.6	43.8 ± 10.8	0.74 ± 0.13	0.60 ± 0.23	1.65 ± 0.59
0.1	2.5	45.2 ± 24.9	17.1 ± 9.0	26.4 ± 3.4	0.71 ± 0.34	0.45 ± 0.21	1.85 ± 0.87
0.1	5.0	57.4 ± 12.4	25.8 ± 9.2	28.8 ± 5.7	0.52 ± 0.16	0.47 ± 0.18	1.17 ± 0.23
0.2	0.03	46.9 ± 10.8	19.2 ± 6.8	45.4 ± 15.3	0.98 ± 0.32	0.43 ± 0.19	2.48 ± 0.81
0.2	2.5	53.3 ± 7.8	34.6 ± 7.7	43.7 ± 13.6	0.83 ± 0.27	0.65 ± 0.11	1.35 ± 0.66
0.2	5.0	74.8 ± 34.3	68.7 ± 6.9	46.3 ± 7.0	0.54 ± 0.07	0.87 ± 0.76	0.64 ± 0.57
ANOVA test							
As							
	0	91.1a	33.4a	39.3ab	0.50b	0.44a	1.24a
	0.1	50.5b	23.7a	33.0b	0.73ab	0.51a	1.56a
	0.2	58.3b	29.2a	45.1a	0.85a	0.59a	1.67a
Ca							
	0.03	66.2a	29.1a	43.8a	0.83a	0.53a	1.77a
	2.5	58.3a	26.6a	37.5a	0.70ab	0.50a	1.57ab
	5.0	75.5a	30.6a	36.3a	0.55b	0.48a	1.08b
F test							
As		*	NS	*	*	NS	NS
Ca		NS	NS	NS	NS	NS	**
As × Ca		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$

2.3 钙、钾、镁、锰、铁、锌、铜元素之间的相关性

从表 8 可以看出, 蜈蚣草羽叶中 Ca 浓度与 K、Mg、Mn、Zn 浓度呈极显著或显著的负相关, 但是与 Cu 浓度没有明显的相关性。即植物羽叶的 Ca 浓度越高, 而相应的 K、Mg、Mn、Zn 浓度减少, 羽叶中的 Ca 对 K、Mg、Mn、Zn 表现为拮抗作用。对其他金属元素而言, Mn 与 Mg、K、Zn 之间, Cu 与 Zn、Fe 之间, K 与 Mg 之间均存在显著或极显著的正相关。由于各元素之间表现出强烈相互作用, 因此应用蜈蚣草进行现场植物修复需考虑这些营养元素的平衡施肥问题。

与羽叶中的情况不同, 在叶柄中 Ca 与 Fe 之间存在极显著的正相关性(表 9), 而在根系中 Ca 与其他元素之间均不存在显著的相关性(表 10)。但在叶柄中 Mg 与 K、Mn、Fe、Zn 之间, Mn 与 Fe、Zn 之间存在显著或极显著的正相关性。在根系中仅 Zn 与 Cu 之间, Mn 与 Fe 之间存在显著或极显著的正相关性。也就是说, 从蜈蚣草的地上部到地下部, 这些金属元素之间的相关性减弱。

3 结论

(1) 添加砷对蜈蚣草羽叶中各金属元素(Fe 和 Zn 除外) 浓度均无显著影响。这表明高砷条件下, 蜈蚣草中金属元素营养状况正常, 可维持良好的生理活动。

表 7 不同砷、钙处理中蜈蚣草对铜的吸收和转运 (平均数 ± 标准差)

Table 7 Concentrations and translocation coefficients of Cu in <i>P. vittata</i> L. treated with As and Ca (Mean ± SD)							
处理 Treatment (mmol/L)		Cu 浓度 (mg/kg) Cu concentration			Cu 转运系数 Cu translocation coefficient		
As	Ca	根 Root	叶柄 Petiole	羽叶 Pinna	羽叶/根 Pinna/root	叶柄/根 Petiole/root	羽叶/叶柄 Pinna/petiole
0	0.03	15.6 ± 6.2	6.3 ± 0.6	7.6 ± 0.8	0.60 ± 0.17	0.63 ± 0.26	1.06 ± 0.36
0	2.5	14.0 ± 7.5	3.8 ± 1.1	8.9 ± 3.4	0.47 ± 0.11	0.35 ± 0.23	2.55 ± 1.18
0	5.0	14.3 ± 7.5	3.6 ± 1.7	12.3 ± 12.0	0.45 ± 0.24	0.35 ± 0.14	3.33 ± 2.39
0.1	0.03	9.2 ± 3.8	3.1 ± 1.7	8.0 ± 2.0	0.92 ± 0.13	0.35 ± 0.15	2.22 ± 0.44
0.1	2.5	10.2 ± 6.5	3.9 ± 2.5	6.7 ± 2.8	0.83 ± 0.39	0.40 ± 0.16	2.15 ± 1.04
0.1	5.0	13.7 ± 4.0	4.4 ± 1.2	9.1 ± 0.4	0.66 ± 0.30	0.35 ± 0.18	2.05 ± 0.88
0.2	0.03	10.2 ± 2.2	4.2 ± 0.6	8.9 ± 3.1	0.88 ± 0.22	0.43 ± 0.13	2.26 ± 1.16
0.2	2.5	7.6 ± 2.9	4.7 ± 1.1	7.8 ± 2.1	1.03 ± 0.79	0.40 ± 0.25	1.26 ± 0.73
0.2	5.0	25.8 ± 16.0	2.6 ± 0.4	13.5 ± 3.8	0.65 ± 0.29	0.28 ± 0.23	2.66 ± 2.26
ANOVA test							
As							
	0	14.6a	4.6a	9.6a	0.79a	0.35a	2.28a
	0.1	11.0a	3.8a	7.9a	0.82a	0.37a	2.52a
	0.2	14.5a	3.8a	10.0a	0.90a	0.43a	2.50a
Ca							
	0.03	11.7ab	4.5a	8.2ab	0.78a	0.41ab	2.23a
	2.5	10.6b	4.1a	7.8b	0.97a	0.48a	2.12a
	5.0	17.9a	3.5a	11.6a	0.75a	0.26b	3.01a
F test							
As		NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ca		NS	NS	NS	NS	*	NS
As × Ca		NS	*	NS	NS	NS	NS

NS, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$

表 8 蜈蚣草羽叶中各种金属元素浓度的相关性

Table 8 Correlations between concentrations of each metal in the pinnae of <i>P. vittata</i> L.							
元素 Elements	相关系数 Correlation coefficient						
	K	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe	Ca
K	1	0.513**	0.439**	- 0.118	0.271	0.123	- 0.540**
Mg		1	0.784**	- 0.142	0.274	- 0.128	- 0.854**
Mn			1	0.027	0.456**	- 0.036	- 0.734**
Cu				1	0.374*	0.329*	0.032
Zn					1	0.240	- 0.339*
Fe						1	- 0.029
Ca							1

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

表 9 蜈蚣草叶柄中各种金属元素浓度的相关性

Table 9 Correlationships between concentrations of each metal in the petioles of <i>P. vittata</i> L.							
元素 Elements	相关系数 Correlation coefficient						
	K	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe	Ca
K	1	0.316*	0.067	0.109	0.148	0.061	0.163
Mg		1	0.520**	0.342*	0.332*	0.186	- 0.093
Mn			1	0.210	0.453**	0.502**	0.209
Cu				1	0.274	0.020	- 0.141
Zn					1	0.176	0.163
Fe						1	0.560**
Ca							1

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

表 10 蜈蚣草根中各种金属元素浓度的相关性

Table 10 Correlationships between concentrations of each metal in the roots of <i>P. vittata</i> L.							
元素 Elements	相关系数 Correlation coefficient						
	K	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe	Ca
K	1	0.121	- 0.185	0.211	0.147	- 0.282	0.123
Mg		1	0.232	- 0.163	0.204	- 0.029	0.308
Mn			1	- 0.100	0.296	0.499**	0.273
Cu				1	0.366*	0.246	0.019
Zn					1	0.182	- 0.076
Fe						1	0.196
Ca							1

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

(2)提高介质中钙浓度对蜈蚣草吸收 Fe、Cu 和 Zn 无显著影响,但与 K、Mg 和Mn 的吸收转运均有显著拮抗作用。

(3)从根部到羽叶中,各金属元素之间的相互作用逐渐加强,尤其是植株中的 Ca 作用更明显。在根部中Ca 与各种金属元素都无显著的相关性;叶柄中 Ca 与 Fe 浓度呈极显著正相关;在羽叶内,Ca 浓度的增加明显降低 K、Mg、Mn 和 Zn 浓度。

(4)Mn 是蜈蚣草体内惟一种明显向地上部转运富集的金属元素,其羽叶/根、羽叶/叶柄的转运系数均大于 1。

References:

[1] 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

[2] Chen T B, Fan Z L, Lei M, *et al.* Effect of phosphorus on arsenic accumulation in A s-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(22): 1876~ 1879

[3] Editorial Committee for Flora of Chinese Academy of Sciences *Flora of China* (Vol 3, Section 1). Beijing: Science Press, 1990. 37.

[4] Tu C, Ma L Q. Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator Ladder brake *Journal Environmental Quality*, 2002, **31**: 641~ 647.

[5] Lu R K. Analytical methods of soil agrochemistry. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999

[6] Carbonell A A, Aarabi M A, Delaune R D, *et al.* Arsenic in wetland vegetation: availability, phytotoxicity, uptake and effects on plant growth and nutrition *The Science of the Total Environment*, 1998, **217**: 189~ 199



- [7] Clarkson D T, Hanson J B. The mineral nutrition of higher plants *Ann. Rev. Plant Physiology*, 1980, **31**: 239 ~ 298
- [8] Carbonell A A, Burló F, Mataix-Beneyto J. Effect of sodium arsenic and sodium chloride on bean plant nutrition (macronutrients). *Plant Nutrition*, 1997, **20**(11): 1617~ 1633
- [9] Wallace A, Mueller R T, Wood R A. Arsenic phytotoxicity and interactions in bush bean plants grown in solution culture. *Journal of Plant Nutrition*, 1980, **2**: 111~ 113
- [10] Marin A R. Effect of soil redox potential and pH on nutrient uptake by rice with special reference to arsenic forms and uptake. Ph. D. dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 1992
- [11] Lombi E, Zhao F J, Fuhrmann M, *et al*. Arsenic distribution and speciation in the fronds of the hyperaccumulator *Pteris vittata*. *New Phytologist*, 2002, **156**: 195~ 203
- [12] Mengel K, Kirkby E A. Principles of plant nutrition. International Potash Institute, Worblaufen-Bern, Switzerland, 1978
- [13] Wickes W A, Wiskich J T. Arsenate uncoupling oxidative phosphorylation in isolated plant mitochondria. *Australia Journal of Plant Physiology*, 1976, **3**: 153~ 162
- [14] Barber S A. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley & Sons, Inc New York, 1995. 286 ~ 288
- [15] Handreck K A. Growth of ferns in soil-less media as affected by pH, iron and calcium/magnesium ratio. *Scientia Horticulture*, 1992, **50**: 115~ 126
- [16] Carbonell A, Burlo F and Mataix-Beneyto J. Effect of arsenite on the concentrations of micronutrients in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, **17**(11): 1887~ 1903
- [17] Liao X Y, Chen T B, Lei M, *et al*. A root distribution and element accumulations of *Pteris vittata* L. from As-contaminated Soils. *Plant and Soil*, 2003
- [18] Tang T J, Miller D M. Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel and arsenic. *Communication in Soil Sciences and Plant Analysis*, 1991, **22**(19&20): 2037~ 2045

参考文献:

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第三卷第一分册). 北京: 科学出版社, 1990. 37
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999