

砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征

陈同斌 韦朝阳 黄泽春 黄启飞 鲁全国 范稚莲

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101. E-mail: chentb@igsnr.ac.cn)

摘要 通过野外调查和栽培实验, 在中国境内发现砷超富集植物——蜈蚣草(*Pteris vittata* L.). 野外调查表明, 蜈蚣草对砷具有很强的富集作用, 其砷的分布规律与普通植物也明显不同. 蜈蚣草不同部位的含砷量为: 羽片>叶柄>根系; 蜈蚣草地上部的生物富集系数随着土壤含砷量的增加而呈幂函数下降. 在含砷 9 mg/kg 的正常土壤中, 蜈蚣草地下部和地上部对砷的生物富集系数分别高达 71 和 80. 从矿区采集砷污染土壤进行室内栽培实验发现, 室内栽培时蜈蚣草羽片的含砷量比野外生长条件下(同一种土壤)增加 1 倍多, 其羽片含砷量可高达 5070 mg/kg; 随着种植时间的延长, 蜈蚣草羽片含砷量不断增加. 蜈蚣草不仅对砷有很强的忍耐能力和富集能力, 而且生长快、生物量大、地理分布广、适应性强, 因此在砷污染环境的修复方面具有良好的应用前景, 对于研究植物中砷的吸收、运转和解毒机理等生理生化特性也具有重要学术价值.

关键词 超富集植物 蜈蚣草 砷 生物富集系数

土壤重金属污染是国内外普遍关注的环境问题. 目前, 治理土壤重金属污染的方法主要有沉淀法、淋洗法、拮抗法、电化法和磁化法等^[1]. 1983 年, 美国科学家提出利用“超富集植物(hyperaccumulator)”清除土壤污染的设想, 即利用超富集植物从土壤中大量富集重金属, 通过收割植物后从土壤中带走重金属, 以达到清除土壤污染的目的. 与传统方法相比, 这种技术具有投入成本低、工程量小、没有二次污染, 能减少土壤侵蚀、美化景观、提高土壤有机质和培肥地力等优点, 因此被称为廉价的“绿色修复技术”^[2].

超富集植物是植物修复的基础. 国际上已报道 400 多种超富集植物, 但绝大部分都是关于镍的超富集植物(318 种), 如香薷菜属(*Alyssum*)植物的叶片含镍量可以高达 3%^[3]. 关于其他重金属超富集植物的报道较少, 且没有一种是在我国首先发现的^[4,5]. 1997 年, 陈同斌¹⁾提出世界上存在砷超富集植物的可能性, 并开始进行砷超富集植物的筛选研究. 1999 年, 陈同斌等人²⁾在中国境内找到砷的超富集植物, 并于 2000 年 10 月的“土壤修复国际会议”上介绍这一发现. 2001 年 3 月, Ma 等人^[6]也报道发现了砷超富集植物. 本文报道在我国境内发现蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)大量富集砷的研究结果.

1 材料与方法

(i) 野外调查和采样. 调查区域为湖南省石门县石门雄黄矿矿区, 位于石门县西北 42 km, 与慈利县交界. 该矿以蕴含丰富的雄黄(As_4S_4)资源而闻名世界, 为亚洲最大的雄黄矿, 已有 1500 多年开采历史, 但 1958 年以后才开始大规模开采和冶炼. 雄黄矿开采冶炼排放的废气、废渣对当地大气、水体、土壤、牲畜、蔬菜和农作物等造成了长期、严重的污染.

1999 年 6 月, 在石门县雄黄矿高砷区采集土壤和植物样品. 调查区域的面积约 4 km². 调查时选取不同砷污染程度的调查点(含砷矿渣、砷污染土壤和正常土壤), 分别采取蜈蚣草的不同部位(羽片、叶柄、根)和相应的土壤或矿渣样品. 土壤和矿渣样品经过风干、粉碎、过 100 目筛后进行化学分析. 先用大量自来水洗净附着在样品植物表面的尘土, 然后再用无离子水清洗. 通过室内的初步分析发现, 蜈蚣草羽片的含砷量超过 1000 mg/kg. 1999 年 11 月, 再次进行实地考察, 并采集蜈蚣草活体植物进行室内栽培实验, 以便在室内条件下进一步确认上述发现.

(ii) 温室栽培实验. 为了研究在室内生长条件下蜈蚣草对砷的吸收和富集特点, 分别采用砷污染土壤和没有受到砷污染的正常土壤进行栽培实验.

(1) 砷污染土壤的栽培实验. 从石门雄黄矿高砷区采

1) 陈同斌. 植物耐砷毒能力基因型差异的生态机理(国家自然科学基金项目申请书). 1997

2) Chen T B, Wei C Y. Arsenic hyperaccumulation in some plant species in south China. In: Proceedings of International Conference of Soil Remediation. Hangzhou, 2000. 194 ~ 195

集蜈蚣草活体植物和当地的砷污染土壤，带回实验室后将植物种植在原来的砷污染土壤中。为了尽量保持土壤原有的特性，室内栽培实验所用的土壤从野外采回以后没有进行风干、粉碎、施肥等任何物理或化学处理。该土壤的含砷量为 660 mg/kg, pH 7.38. 栽培植物的容器为 42 cm×60 cm×30 cm 的大塑料筐。当移栽的植物成活后剪去地上部，待长出新叶后分别于 2000 年 2 月、3 月和 4 月采集植物样品进行分析。栽培时间共 6 个月，每天光照时间约为 10 h, 栽培期间定期浇无离子水。(2) 正常土壤的栽培实验。为了研究蜈蚣草在没有受到砷污染的正常土壤中对砷的富集作用，用取自北京昌平的褐土(含砷 9 mg/kg, pH 7.82)进行盆栽实验。盆栽实验设置 2 个处理：不加砷的对照和加 400 mg/kg 砷处理(NaH_2AsO_4 , 施砷后平衡 2 周)，用新苗移栽，每盆移栽 2 株蜈蚣草苗。种植 2 个月后收获地上部和地下部，洗净，测定其含砷量。各处理重复 3 次。

(iii) 分析方法。土壤或矿渣样品经风干、研磨、过 100 目筛后供分析用。植物样品先用自来水冲洗附着在叶或根表面的土壤，然后用无离子水洗净，将根、叶柄、羽片分开，杀青、烘干、粉碎后备用。土壤和植物样品采用干灰化法消解^[7]、原子荧光光谱仪(海光 AFS-2202)测定待测液中砷的浓度。分析中所用试剂均为优级纯，而且采用国家标准参比物质(土壤：GBW-07401, 植物：BW-07603)进行土壤和植物分析的质量控制，分析误差均控制在允许的误差范围。

2 结果

2.1 野外条件下蜈蚣草对砷的富集

蜈蚣草属凤尾蕨科凤尾蕨属，生长在石灰岩、钙

质土、石缝或墙壁上，分布在海拔 2000 m 以下，为钙土及石灰岩的指示植物。从植物形态来看，主要分为羽片、叶柄和根系等部分。野外调查结果表明，蜈蚣草羽片、叶柄和根的含砷量分别为 120~1540, 70~900 和 80~900 mg/kg (干物量，下同)。其中 SM04, SM01, SM06 和 SM09 调查点的蜈蚣草羽片含砷量超过 1000 mg/kg (表 1)。从羽片对砷的生物富集系数来看，除含砷量非常高的 SM01, SM06, SM09 和 SM13 四个调查点(主要是砷矿渣)外，其余地点的生物富集系数均大于 1。因此，在一般的污染土壤中，蜈蚣草对砷的生物富集系数均大于 1，砷容易在该植物中富集。

在普通植物中，砷的分布规律为根系最高，茎叶较少^[8]。然而，从蜈蚣草不同部位的含砷量来看，砷的分布情况完全相反，在各植物样品中砷的含量均为：羽片 > 叶柄 > 根系。这说明，砷在该植物体中容易向上运输和富集，显示出蜈蚣草对砷有极强的耐性和独特的富集能力。从植物体中的含砷量、生物富集系数和地上/地下部含砷量的比值来看，蜈蚣草符合目前国际上公认的“超富集植物”定义^[4]。Ma 等人^[6]与我们同时得到类似的发现。他们的研究指出，欧洲蕨对砷具有很强的超富集能力，种植在受木材防护剂(CCA)污染的土壤(含砷 97 mg/kg)中，其叶片最大含砷量达 1442~7526 mg/kg，生物富集系数可达 14.9~77.6^[6]。

在野外自然生长条件下，蜈蚣草一般生长在含砷 50~4030 mg/kg 的土壤中，但在含砷量高达 23400 mg/kg 的含砷矿渣中也能正常生长(表 1)，显示其对砷毒具有极强的耐性。随着土壤或矿渣中含砷量的

表 1 野外条件下土壤和蜈蚣草的含砷量

野外编号	采样地点	蜈蚣草生长介质		植物含砷量/mg·kg ⁻¹			羽片对砷的生物富集系数 ^{a)}
		类型	含砷量/mg·kg ⁻¹	羽片	叶柄	根	
SM17	石门县白云乡鹤山村 9 组	土壤	50	120	100		2.40
SM08	石门县雄黄矿水泥厂后山	土壤	90	668	200	170	7.42
SM24	慈利县国太桥乡星明村 1 组	土壤	100	144	70	80	1.44
SM26	慈利县国太桥乡星明村 3 组	土壤	130	310	140	120	2.38
SM20	石门县雄黄矿水泥厂公路旁	土壤	160	700	460		4.38
SM03	石门县白云乡鹤山村茶泥垭	土壤	260	700	310		2.69
SM07	石门县雄黄矿区公路旁	土壤	560	835	397		1.49
SM04	石门县雄黄矿招待所附近	土壤	610	1110	670		1.82
SM03	石门县雄黄矿招待所河床边	土壤	660	850	410	220	1.29
SM01	石门县雄黄矿尾矿坝	矿渣	3400	1540	680		0.45
SM13	石门县雄黄矿磷肥厂东	土壤	4030	740	600		0.18
SM09	石门县雄黄选矿厂附近公路旁	矿渣	8500	1400	900		0.16
SM06	石门县雄黄矿区公路旁	矿渣	23400	1530	820	900	0.07

a) 植物羽片含砷量与土壤含砷量之比

增加, 尽管蜈蚣草羽片的含砷量也不断增加, 但其生物富集系数呈幂函数下降(图 1). 这说明, “生物富集系数” 虽然是评价超富集植物的一项重要指标, 但由于受土壤或矿渣中全砷含量及植物形态差异等因素的影响, 在实际使用中往往存在一定的局限.

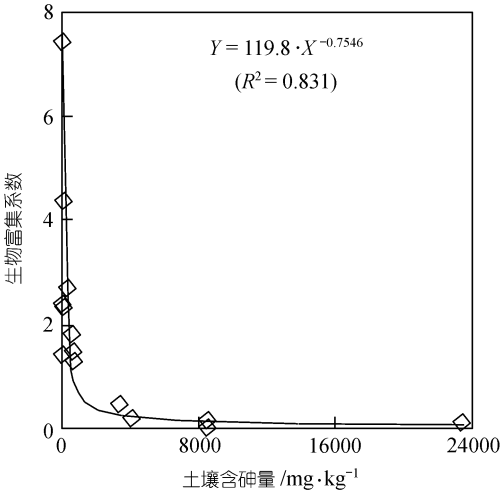


图 1 土壤含砷量与蜈蚣草对砷的生物富集系数的关系

2.2 矿区砷污染土壤中蜈蚣草对砷的富集动态

为了研究蜈蚣草对砷的富集动态, 从石门雄黄矿区采集砷污染土壤(含砷 660 mg/kg)进行室内人工栽培实验. 实验表明: 种植前(即 1999 年 11 月野外采集的样品), 蜈蚣草羽片的含砷量为 1850 mg/kg ; 种植 6 个月后, 其羽片的含砷量升高到 5070 mg/kg (图 2). 随着种植时间的延长, 蜈蚣草羽片的含砷量不断增长. 经过统计分析表明, 羽片的含砷量与叶柄含砷量之间存在显著正相关($R^2 = 0.867, n = 14$).

对人工栽培与野外自然条件下的对比研究表明(图 2): 虽然人工栽培时所采用的土壤与野外调查时的土壤均来自同一地点, 但是在室内栽培时蜈蚣草羽片的含砷量高达 4384 mg/kg , 而野外自然生长条件下羽片的含砷量仅为 1850 mg/kg , 即室内栽培时比野外生长时的含砷量提高 1 倍多. 在 6 个月的人工栽培过程中, 蜈蚣草羽片的含砷量随种植时间的延长而呈线性增长($R^2 = 0.999, P < 0.01$). 这表明, 人工栽培会使羽片的含砷量增加, 且随着种植时间的延长而增加. 这些特点有利于利用蜈蚣草进行砷污染土壤的修复.

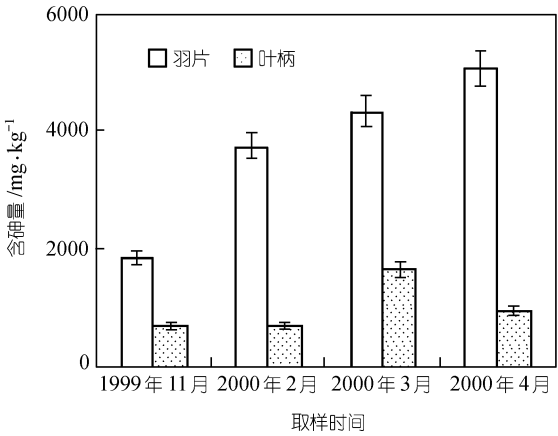


图 2 人工栽培过程中蜈蚣草地上部含砷量的动态变化

2.3 正常土壤中蜈蚣草对砷的富集

图 3 列出正常土壤(北京褐土, 含砷 9 mg/kg)中蜈蚣草从土壤中富集砷的实验结果. 在该土壤中, 不施砷时蜈蚣草地上部和地下部的含砷量分别为 699 和 785 mg/kg , 其相应的生物富集系数分别为 71 和 80 . 而从施 400 mg/kg 砷的处理来看, 其地上部和地下部含砷量分别高达 4384 和 4022 mg/kg , 相应的富集系数为 10.7 和 9.8 . 同样, 在人工栽培条件下, 蜈蚣草地上部的最高含砷量(4384 mg/kg , 施砷处理)也明显高于野外污染条件下蜈蚣草地上部的最高含砷量(1540 mg/kg , 表 1). 从生物量来看, 施 400 mg/kg 砷的处理中, 地上部和地下部生物量分别为 5.04 和 2.21 mg/盆 , 与对照处理的地上部(5.01 mg/盆)和地下部生物量(2.34 mg/盆)没有显著差异. 由此可见, 土壤含砷量增加到 400 mg/kg 时, 砷对蜈蚣草没有造成毒害.

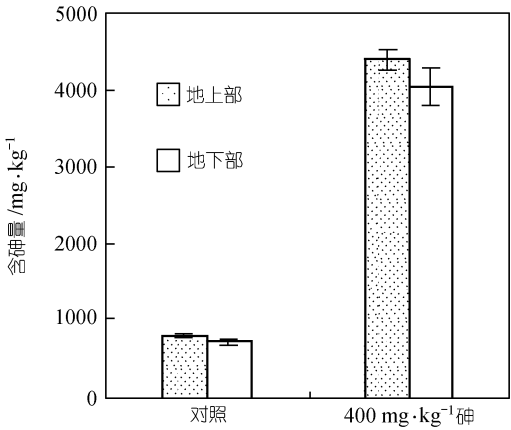


图 3 正常土壤(含砷 9 mg/kg)中蜈蚣草对砷的吸收

2.4 研究结果的意义

超富集植物对污染土壤的修复效果主要取决于植物地上部生物量、植物生长速度、植物地上部对污染元素的生物富集系数及植物对土壤中污染元素的耐性等因素。尽管目前发现的多数超富集植物对重金属的富集能力很强,但其地上部生物量小、生长慢、繁殖困难,因此目前还难以大规模工程化应用^[9]。蜈蚣草地上部不仅能够富集大量的砷,且生长速度快、生物量大,株高可达 2 m。野外调查表明,地上部鲜重可达 36 t/ha。而蜈蚣草在含砷量 < 1000 μg/g 的土壤上的生物富集系数可达 7~80,尤其是在人工栽培环境中砷更容易富集到地上部。即使在含砷量很低的正常土壤中,蜈蚣草也能大量富集砷,因此它也可以用于修复轻度砷污染的土壤。

蜈蚣草在我国热带、亚热带地区分布很广,在欧美大陆等均有分布,因此对气候的适应性较广。《中国植物志》^[10]指出:蜈蚣草是钙质土及石灰岩的指示植物,从不生长在酸性土壤上。但是,我们的盆栽实验发现:它在 pH 4.5~8.5 的土壤范围内均能正常生长;无论是在南方的红壤中,还是北方的褐土中,生长状态都非常好(详细数据略)。因此,蜈蚣草对土壤的适应范围较广。这些都表明蜈蚣草在植物修复方面有巨大的应用潜力。

砷污染是一个非常普遍和非常严重的环境问题。我国湖南郴州地区等许多矿区和内蒙古、贵州等西部高砷地区存在大面积的砷污染和砷中毒问题。蜈蚣草超富集功能的发现,无疑为解决我国砷污染的修复问题提供了一条良好的技术途径。

据国际上的报道,在正常土壤中普通植物的含砷量一般不超过 3 mg/kg^[11]。我国谷类作物的含砷背景值为 0.07~0.83 mg/kg,豆类为 0.02~0.56 mg/kg,蔬菜类为 0.001~0.039 mg/kg,木本植物 < 0.78 mg/kg^[12]。因此,蜈蚣草的最大含砷量约相当于普通植物体中大量元素磷的含量,比普通植物的含砷量高数万倍、甚至数十万倍。从生物学角度考虑,砷并非植物生长的必需元素,而且砷过量时对植物的毒性极强,但蜈蚣草却能够吸收并忍耐如此高浓度的砷。蜈蚣草的这一特性,对于研究植物中砷的吸收、运转、耐性和解毒机理等生理、生化特点均有重要的学术价值。

3 结论

本研究发现并证明蜈蚣草是一种砷的超富集植物。蜈蚣草对砷的耐性和富集能力极强(尤其是人工栽培时其富集能力更强),而且所吸收的砷很容易转移到地上部,同时它还具有生长快、生物量大、地理分布广和适应性强等特点,因此在砷污染土壤的修复和植物学研究中具有重要价值。

致谢 中国科学院植物研究所张宪春研究员和湖南师范大学杨一光教授协助植物鉴定工作,在此表示感谢。本工作作为国家自然科学基金(批准号:49941003,40071075)、中国科学院知识创新工程重要方向(专题号:KZCX2-401-02)和国家重点基础研究发展规划(批准号:G1999011808)资助项目。

参 考 文 献

1 吴启堂,陈同斌. 陆地生态系统中重金属的迁移转化及其模拟软件. 北京:中国农业科学技术出版社,1997. 189

2 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报,2001,21(7): 1196~1203

3 Kramer U, Cotter-Howells J D, Charnock J M, et al. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature*, 1996, 379(6566): 635~638

4 Tang S R, Wilke B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People's Republic of China. *Plant and Soil*, 1999, 209: 225~232

5 Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J & C. Presl (*Brassicaceae*). *New Phytol*, 1994, 127: 61~68

6 Ma L Q, Kenneth M K, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409(6820): 579

7 Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of Soil Analysis. Part 2—Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. ASA-SSSA Pub, 1982. 385~402

8 Liebig G F Fr. Arsenic. In: Chapman H D, ed. *Diagnostic Criteria for Plants and Soils*. Texas: Quality Printing Company Inc, 1973. 13~23

9 Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1: 81~126

10 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

11 Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton: CRC Press, 1991. 203~209

12 廖自基. 环境中微量重金属元素的污染与危害. 北京:科学出版社,1989. 101~138

(2001-11-08 收稿, 2001-12-18 收修改稿)