

砷污染土壤的蜈蚣草修复研究进展

潘志明, 邓天龙*

(成都理工大学材料与生物工程学院, 成都 610059)

摘要: 本文评述了 As 污染土壤的蜈蚣草植物修复及其对 As 的解毒机制的研究进展, 内容着重包括蜈蚣草对 As 的富集特征, As 在蜈蚣草中的赋存形态、迁移及其转化, 土壤以及土壤中 P、Ca 和 K 等元素对蜈蚣草吸收、转运 As 的影响等方面。

关键词: 蜈蚣草; 植物修复; 砷污染土壤

中图分类号: X53; O627.52

自 2001 年 Ma 等^[1]和陈同斌等^[2]分别在美国佛罗里达州中部、中国湖南发现了首例 As 的超富集植物蜈蚣草后, 国内外针对蜈蚣草修复土壤重金属 As 污染的研究十分活跃。归纳起来, 主要集中在: ①蜈蚣草对 As 的富集特征; ②As 在蜈蚣草中的存在形态及其转化; ③P、Ca、K 等元素对蜈蚣草吸收、转运 As 的影响; ④蜈蚣草对 As 的耐性机制等方面。

1 土壤中砷的赋存形态及其对蜈蚣草生长、吸收的影响

在土壤中, As 的存在形态决定其生物有效性和毒性^[3], 而土壤中水溶性 As 浓度与植物有效性的相关性极高, 而与总 As 的含量似无相关性^[4-5], 土壤有效 As 的含量可显著影响蜈蚣草对 As 的富集。研究表明: 土壤中的 As 主要以无机形态和少量的有机形态存在^[6-9], 其有机形态的 As 主要以单甲基胂(monomethyl arsenic, MMA)、二甲基胂酸(dimethyl arsenic acid, DMA)等形态存在; 无机形态的 As 有: ①难溶性砷酸盐, 如砷酸铁、砷酸钙、砷酸铝等; ②包蔽在其他金属难溶盐的沉淀中; ③吸附在土壤黏粒和其他金属难溶盐的沉淀界面中; ④存在于土壤颗粒的晶体结构中; ⑤溶解在土壤溶液中。土壤中的无机 As, 主要以 As(V)形态存在^[8], 且其存在形态主要与土壤中 Al、Fe、Ca 的含量有关, 而与有机质和 Si 的含量关系不大^[10]。土壤对 As 的吸附能力随着土壤黏粒含量的减少而减弱^[11]。在土壤中, As 主要通过质体流途径到达根表面^[12], 主要由植物根部通过共质体进入体内^[13]。植物木质部

细胞壁阳离子交换能量高, 能够严重阻碍金属离子向上运输^[14], 但在蜈蚣草中, As 主要以亚砷酸根离子形态存在, 使得蜈蚣草木质部对 As 的阻碍作用较弱, 大部分 As 随木质部质流向地上部转运。

土壤中有效态 As 的含量受土壤 pH, Eh, Fe、Al 含量^[5, 15-17]和根际环境等影响。在较低 pH 范围内, H_2AsO_4^- 、 HAsO_4^{2-} 等被带正电荷的氢氧化铁等迅速吸附, 随着 pH 增加, 土壤对 As 的吸附能力减弱, 土壤溶液中 3 价态 As 和 5 价态 As 增多^[11, 17]。在 Eh 较低条件下, As(V)可被还原成 As(III), 随着 3 价 Fe 还原为亚铁, 含铁氢氧化物的溶解度随之增加, 导致原来被吸附的 As 释放出来, 溶解 As 的浓度增加^[17-18]。升高 pH 或降低 Eh 都将增大可溶态 As 的浓度^[19]。As 与 Fe、Al、Ca 结合的强度为: Fe 型 As > Al 型 As > Ca 型 As, 其中铁、铝氢氧化物吸附 As 起突出作用, 土壤含无定型铁、铝氧化物越多, 吸附能力越强, 增强专一性吸附或共沉淀^[20]。在试验土壤中, 根际 As 各形态都比非根际高, As 在根际呈富集状^[21]。

2 蜈蚣草对砷的富集特征

2.1 蜈蚣草对 As 的富集特点

在自然条件下, 蜈蚣草一般生长在含 As 50 ~ 4030 mg/kg 的土壤中, 甚至能在含 As 量高达 23400 mg/kg 的矿渣中正常生长^[2]; 在实验室盆栽条件下, 能在含 1500 mg/kg 砷酸钠土壤中正常生长^[1]。可见, 蜈蚣草对 As 的耐性极强。

Ma 等^[1]研究发现, 蜈蚣草在含可溶性砷酸盐 50 ~

①基金项目: 国家自然科学基金(40573044)、教育部留学回国人员科研启动基金(2004527)和四川省科技厅应用基础研究基金(05JY029-088-1)共同资助。

* 通讯作者 (dtl@cdu.edu.cn)

作者简介: 潘志明(1980—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事生物技术及其应用方面研究。E-mail: zhmpan@163.com

1500 mg/kg 的土壤中生长期 2 周,其羽叶中的 As 含量随土壤 As 含量的增加而增加,最高达 15861 mg/kg; 生长 6 周,其羽叶中最高 As 含量高达 22630 mg/kg; 其生物富集系数在 15.1 ~ 102.6; 其根部 As 含量 \leq 303 mg/kg。分析 Ma 等^[1]的数据可以发现,在 As 含量 $<$ 50 mg/kg 土壤中,蜈蚣草能很快降低土壤 As 含量。陈同斌等^[2]的研究也表明,在含 As 9 mg/kg 的正常土壤中以及含 As 400 mg/kg 的土壤中,蜈蚣草地上部的富集系数分别为 77.6 和 11.0。这说明,无论是在含 As 的自然土壤还是人为施 As 处理的土壤中,蜈蚣草均能快速、高效地富集大量的 As,并迅速转运到其地上羽叶中;且表现出蜈蚣草内 As 含量随植株生长^[22]以及其生长介质中 As 浓度的增加而^[1,23]增加的趋势。

蜈蚣草不仅可以高效、快速、大量富集可溶态砷酸盐、亚砷酸盐,而且对于相对不溶于水的 FeAsO_4 、 AlAsO_4 、 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 等化合物,也能将其富集于其羽叶中^[1,24],还可以吸收土壤中的 MMA、DMA 等有机态 As^[25],这说明蜈蚣草能富集不同形态的 As。

2.2 As 在蜈蚣草中的分布规律

蜈蚣草中的 As 主要富集在羽叶中,与普通植物完全相反^[2,26]。蜈蚣草不同部位 As 含量的分布规律为:羽叶 $>$ 叶柄 $>$ 根系或羽叶 $>$ 地下茎 $>$ 叶柄 $>$ 根,并且羽叶中 As 含量显著高于其他部位^[2,22-23,27]。李文学等^[28]利用配备 EDX 的扫描电子显微镜研究了蜈蚣草羽叶的微形态及 As 在羽叶中的微区分布,发现羽叶中的 As 主要集中在羽叶毛状体中,其次是表皮细胞中。

3 砷在蜈蚣草中的存在形态及其转化

3.1 As 在蜈蚣草中的存在形态

蜈蚣草中的 As 主要以无机形态的砷酸盐、亚砷酸盐存在。Ma 等^[1]采用 1:1 的甲醇/水萃取蜈蚣草中的 As 后,利用 HPLC-ICP-MS 分离,测定了 As 的形态,结果表明:该植物中的 As 主要以无机态砷酸盐和亚砷酸盐存在,还存在少量的 FeAsO_4 、 AlAsO_4 、 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 等化合物。Tu 等^[24]也证实蜈蚣草含有 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 等不同形态砷酸盐。Zhang 等^[29]采用 1:1 的甲醇/水来萃取植物组织中 As 的复合物,通过 ICP/MS、HPLC-HG-AFS 和 HPLC-ICP-MS 测定了蜈蚣草中的 As 及其形态,亦认为蜈蚣草中的 As 是以无机形态存在。Chen 等^[25]和 Tu 等^[30]的研究也得以进一步证实。

除了砷酸盐、亚砷酸盐及少量其他无机化合物外,蜈蚣草中还存在 MMA、DMA 等有机物。Zhang 等^[31]采用阴离子交换色谱-氢化物发生原子荧光光谱法(AEC-HG-AFS)和体积排阻色谱-氢化物发生原子荧光光谱法(SEC-HG-AFS)测定了蜈蚣草羽叶中 As 的

形态,发现除了有 As(III)和 As(V)外,还存在一种并非 $\text{As}^{\text{III}}\text{-PC}_2$ 的未知名称的有机 As 复合物。

Huang 等^[32]采用同步辐射扩展 X 射线吸收精细结构(SR-EX-AFS)技术研究了蜈蚣草中 As 的化学形态及其在转运过程中的变化,其结果表明:蜈蚣草中的 As 主要以 As(III)与 O 配位的形态存在,在根部和部分叶柄中也存在少量与 As-GSH 相似的 As-S 结合方式,但这种结合方式在 As 含量最高的羽叶中未发现。As 在蜈蚣草中的这种结合方式,在蜈蚣草同属的另一种超富集植物—大叶井口边草(*Pteris cretica* L.)中也得到证实^[33]。

3.2 As 在蜈蚣草中的转化

As 在蜈蚣草根部分主要以 As(V)形态存在,在羽叶中主要以 As(III)形态存在,但 As(V)还原成 As(III)是发生在根部或气生根部位,还是发生在向上转运的过程中的植物体内,还存在一些分歧。Zhang 等^[29]的研究结果表明,As 在根部主要以 As(V)存在,而 As(III)很少,仅占 8.3%;在植物地上部,主要以 As(III)存在;As(V)向 As(III)的转化主要发生在向地上部转运的过程中。Chen 等^[25]、Ma 等^[1]都得到与此一致的结论。但 Huang 等^[32]的研究结果却表明,As(V)被蜈蚣草吸收后,很快转化为 As(III),其转化过程主要发生在根部;As(III)向地上部转运的过程中价态基本不变。Tu 等^[30]研究发现,As 在蜈蚣草的气生根部迅速发生 As 还原反应。

在蜈蚣草中,MMA 可甲基化成 DMA。Chen 等^[25]对蜈蚣草根际分泌物、木质部汁液用离子对反相高效液相色谱、电感耦合等离子体—质谱进行了分离、测定,结果表明:若用 10 mg/kg 或 50 mg/kg 的 MMA 处理蜈蚣草根部分,无论是在根部还是在植物体木质部,尽管 As 还是主要以 MMA 存在,但还均存在少量的 DMA、As(V)、As(III);若用 10 mg/kg 或 50 mg/kg 的 DMA 处理,则在根部和木质部主要以 DMA 存在,还有少量的 As(V)、As(III),而没有 MMA。说明在蜈蚣草体中,MMA 可甲基化成 DMA;尽管没有发现 DMA 转化成 MMA 的去甲基化作用,但 DMA 或 MMA 可以转化成 As(III)、As(V),目前这种转化机制尚不清楚。

值得指出的是,目前还未见蜈蚣草中 As(III)氧化成 As(V)研究的报道。

4 钾、磷、钙及其他元素对蜈蚣草吸收、转运砷的影响

4.1 K 对蜈蚣草中 As 的影响

陈同斌等^[34]采用同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)分析了蜈蚣草羽叶中 As 以及植物必需营养元素的分

布特点,发现 K 在羽叶中的分布与 As 极为相似;并且聚类分析显示, K 和 As 的聚类距离最近,而且 K 和 As 在羽叶中的分布呈极显著的正相关关系。在另一种 As 的超富集植物大叶井口边草中,也存在着 K 和 As 在羽叶中分布呈极显著正相关关系^[35]。Lombi 等^[36]研究也表明, K 和 As 在蜈蚣草中的分布模式相似。另一方面,也有研究表明,施加 As 可以提高蜈蚣草地上部 K 的含量^[37]。K 是植物体内大量存在的阳离子,而 As 在蜈蚣草中主要以阴离子形态大量存在^[32]。陈同斌等^[35]、Lombi 等^[36]和 Tu 等^[38]推测, K 很可能对超富集植物蜈蚣草体内大量存在的亚砷酸根离子起到离子和电荷平衡的作用。

但李文学等^[28]研究结果表明,蜈蚣草羽叶毛状体中 As 含量高于羽叶细胞,而 K 的含量却显著低于表皮细胞和叶肉细胞;毛状体细胞中 As 含量显著低于其节细胞和基细胞,而 K 在节细胞中的相对含量要远远高于节细胞和基细胞。当土壤中 As 浓度在 0 ~ 200mg/kg 范围内,蜈蚣草根部和幼嫩植物体中 K 的浓度并没有受到显著影响^[37]。这说明,在 As 含量最高的蜈蚣草羽叶中, K 和 As 在细胞水平上的分布并不存在相似性, K 在细胞水平上可能并没有对亚砷酸根离子起到离子和电荷平衡作用。

4.2 P 对蜈蚣草富集 As 的影响

由于 P 和 As 在元素周期表中都属于第 V 族,化学性质相似,在土壤中两者都以阴离子存在,化学行为类似;国内外的学者对 P、As 交互作用进行了较为深入的研究。

有些学者认为,与其他植物一样,蜈蚣草是通过磷酸盐转运系统吸收 As, P 抑制蜈蚣草对 As 的吸收, P 与 As 之间存在着拮抗作用。Wang 等^[39]在水培条件下研究了 P、As 的相互作用,发现增加 P 的供给会显著减少蜈蚣草对 As 的吸收,增加砷酸盐的供给会降低根部 P 的浓度,其结果表明,砷酸盐是通过磷酸盐转运系统被吸收的。Tu 等^[30]在水培条件下的研究结果也表明, P 降低了蜈蚣草对 As (V) 的吸收,但促进对 As (III) 的吸收,这说明蜈蚣草对砷酸盐与磷酸盐的吸收呈拮抗关系。Tu 等^[40]在水培条件下研究了 pH、砷酸盐、磷酸盐对蜈蚣草吸收 As、P 及其生长的相互影响,发现 P 抑制蜈蚣草对 As 的吸收,而 As 在低于 25mg/kg 时有利于对 P 的吸收。Poynton 等^[41]用含 ⁷³As 的砷酸盐进行放射性同位素示踪,研究了 As 在根部短期内的单向流入和转运,发现根部 As 的流入量很大,可用 Michaelis-Menten 动力学来描述,其动力学参数 K_m 较小,转运蛋白对砷酸盐的亲性和性很高。经进一步定量分析 K_m ,发现磷酸盐由于直接竞争而抑制砷酸盐

的吸收,表明砷酸盐是通过磷酸盐转运蛋白进入蜈蚣草根部的。

但也有学者认为, P 与 As 之间并不存在拮抗作用,而是表现为协同效应,即 P 促进蜈蚣草对 As 的吸收。陈同斌等^[42]通过盆栽实验,研究 P 对蜈蚣草吸收 As 的影响,发现添加低浓度 P (400 mg/kg 以下)对超富集植物蜈蚣草地上部和地下部总 As 含量没有明显影响;但当 P 的浓度 >400 mg/kg 时,蜈蚣草地上部和地下部含 As 浓度、地上部含 As 总量明显升高,尤其是 P 浓度 >600 mg/kg 时,添加 P 对蜈蚣草富集 As 有明显的促进作用,因而他们认为,无论是在蜈蚣草地上部分还是地下部分, P 与 As 之间并不存在竞争关系,而是表现为一种协同(促进)作用,并推断 As 的超富集植物对 As、P 的累积可能并不是通过同一系统进行的。廖晓勇等^[43]通过田间试验研究施用 P 肥对蜈蚣草生长和 As 污染土壤修复效率的影响。结果表明,随着施 P 量的增加,蜈蚣草地上部的 As 累积量先增加后减少,在施 P 200 kg/hm² 处理达最大。对于过多施用 P 肥导致蜈蚣草地上部 As 含量的下降,他们推测可能磷酸盐与砷酸盐在根部竞争吸附位,抑制砷酸盐的吸收,或根部积累过高的磷酸盐可能会抑制 As 由根部向地上部转运。李文学等^[23]研究结果认为,无论是在组织水平上还是在细胞水平上, P 与 As 都存在类似的分布趋势,两者之间不呈拮抗作用。Cao 等^[44]也证实,无论是在受 Cd、Cu、As 污染的土壤上还是在施 As 处理的土壤上, P 都显著促进蜈蚣草对 As 的吸收。并且,在土壤中, P 和 As 可相互竞争土壤胶体上的吸附位点^[45-46],提高土壤磷酸盐浓度,可解吸部分被土壤吸附的 As,提高土壤溶液中有效态 As 的浓度,利于蜈蚣草对其吸收。同时,也有研究认为 P 对蜈蚣草富集 As 没有明显影响^[47]。

总之,目前关于 P 是否抑制蜈蚣草对 As 的吸收,还存在着分歧,有待深入研究。

4.3 Ca 对蜈蚣草吸收、转运 As 的影响

蜈蚣草是一种钙质土壤的指示植物^[48], Ca 是植物必需的营养元素,并且有研究表明,添加 Ca 可促进植物累积 As^[49]。因此, Ca 对蜈蚣草吸收、转运 As 的影响也成为一研究重点。

Tu 等^[24]在土培条件下研究了蜈蚣草对 $Ca_3(AsO_4)_2$ 、 $AlAsO_4$ 、 $FeAsO_4$ 、 Na_2HAsO_4 和 K_2HAsO_4 等不同形态砷酸盐的吸收和转运,结果表明:添加 $Ca_3(AsO_4)_2$ 时蜈蚣草羽叶中 As 浓度最高,但各处理间生物量差异不明显。Caille 等^[47]也发现,添加 Ca 会降低土壤孔隙水中的 As 含量,但对蜈蚣草富集 As 没有明显影响。但廖晓勇等^[50]的研究结果表明,在一定范围内, Ca 明显

抑制 As 向植物地上部转运; 介质中 Ca 浓度过高还会抑制蜈蚣草的生长, 显著降低其对 As 的吸收能力; 介质中添加 As, 植物体内部 Ca 浓度升高, 可能起缓解 As 毒的作用。

这似乎说明, 低浓度 Ca 对蜈蚣草对 As 的吸收和转运没有明显影响, 而高浓度 Ca 则明显抑制对 As 的富集。到目前为止, 关于 Ca 如何影响蜈蚣草中 As 的转运尚不清楚。

另外, 光照和温度可通过影响植物的生长代谢, 从而影响 As 的吸收和运输。

5 蜈蚣草对砷的解毒机制

5.1 酶、植物螯合素

植物螯合素 (PCs) 由植物体内一系列低分子量、能够结合金属离子的多肽组成。Cao 等^[37]研究表明, 蜈蚣草中过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、愈创木酚过氧化物酶 (GPX) 等抗氧化酶的活性在低 As 浓度下增加, 但在土壤 As 浓度 > 20 mg/kg 时, 这些酶的活性降低或保持不变; 蜈蚣草中的谷胱甘肽 (GSH) 等非酶抗氧化剂尽管在土壤低 As 条件下没有观察到明显变化, 但是在高 As 条件下含量显著增加。他们推测, 低 As 处理时, 酶抗氧化剂是重要的解毒机制; 高 As 处理时, 非酶抗氧化剂在解毒机制中扮演更重要的角色。Srivastava 等^[23]研究也表明, 蜈蚣草中的 CAT、SOD、APX 的活性与 As 的解毒机制有关。Zhang 等^[51]研究发现, 在蜈蚣草中, PCs 扮演着解毒作用, 但酸溶硫醇与 As 的比率很小, 仅仅只有一小部分 As(III) 与 PCs 螯合, 并推测 As 主要贮藏在液泡中, 且液泡中的 As 不与 PCs 螯合。之后, Zhang 等^[52]证实, 蜈蚣草吸收 As 后, 仅在羽叶中诱导产生少量的硫醇。细胞质中的 pH 偏碱性, As^{III}-PC 复合物在微酸性条件下更稳定, 液泡中没有 As-PCs。Zhao 等^[53]也证实 PCs 不是蜈蚣草对 As 的主要解毒机制。可见, PCs 与 As 螯合并不是蜈蚣草主要的解毒机制。

5.2 区室化

尽管最近的研究表明, 区室化作用与超富集植物富集重金属离子的能力密切相关, 但关于蜈蚣草中 As 区室化方面的研究还很少。李文学等^[28]研究发现, 羽叶中的毛状体具有大量富集 As 的特殊能力, 并且蜈蚣草能将吸收的 As 转移和贮存到毛状体中, 使其不对植株产生毒害, 从而起到区隔化作用。Lombi 等^[36]的研究结果表明, 蜈蚣草羽叶细胞中的液泡对 As 也有贮藏作用。

另外, Ma 等^[1]认为 As(V) 还原成 As(III) 是蜈蚣草

解毒机制之一。P 在蜈蚣草中对 As 可能也具有一定的解毒作用^[37]。

6 结束语

尽管蜈蚣草对 As 的富集特征及其影响因素和 As 在蜈蚣草中的形态与转化等方面已取得了重大进展, 但 As 污染土壤的植物修复只是刚刚起步, 仍然还存在一些问题和挑战。目前, As 的超富集植物的品种还很少; 而且, 许多关于蜈蚣草的研究只是从 As 在植物体中的分布、转化, 植物螯合素、硫醇以及 P 等不同侧面去了解蜈蚣草的解毒机制, 直接研究其解毒机制还缺乏有效的研究手段。尤为值得一提的是: 在 As 污染的地区, 往往还含有其他重金属, 而关于蜈蚣草对 As 及其他重金属复合污染土壤的修复报道甚少^[54-55]。同时, 也未见从基因水平上研究蜈蚣草解毒机制的报道。因此, 应进一步加强 As 的超富集植物的筛选, 研究其富集机理及解毒机制, 并进行土壤 As 污染的植物修复试验与示范。

参考文献:

- [1] Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 2001, 409: 579
- [2] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 黄启飞, 鲁全国, 范稚莲. 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
- [3] Pongratz R. Arsenic speciation in environmental samples of contaminated soil. *The Science of the Total Environment*, 1998, 224: 133-141
- [4] 董元华, 张桃林. 基于农产品安全的土壤资源管理与可持续利用. *土壤*, 2003, 35 (3): 182-186
- [5] 张国祥, 杨居荣, 华珞. 土壤环境中的砷及其生态效应. *土壤*, 1996, 38 (2): 64-68
- [6] Garcia MS, Jimenez G, Padro A. Arsenic speciation in contaminated soils. *Talanta*, 2002, 58: 97-109
- [7] 李勋官. 土壤砷的化学形态及其含量. *土壤学报*, 1982, 19 (4): 360-365
- [8] 王春旭, 李生志. 环境中砷的存在形态研究. *环境科学*, 1993, 14 (4): 53-57
- [9] Brannon JM, Patrick JrWH. Fixation, transformation, and mobilization of Arsenic in sediments. *Environ. Technol.*, 1987, 21: 450-459
- [10] Alam MGM, Tokunaga S, Maekawa T. Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate. *Chemosphere*, 2001, 43: 1035-1041
- [11] 雷梅, 陈同斌, 范稚莲, 莫良玉, 黄泽春. 磷对土壤中砷吸附的影响. *应用生态学报*, 2003, 14 (11): 1989-1992

- [12] 陈玉成. 污染环境生物修复工程. 北京: 化学工业出版社, 2003, 39-47
- [13] 张素芹, 杨居荣. 农作物对镉、铅、砷的吸收与运输. 农业环境保护, 1992, 11 (4): 171-175
- [14] 杨肖娥, 龙新究, 倪吾钟. 超累积植物吸收重金属的生理及分子机制. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (1): 8-15
- [15] 李小平, 李勋光. 砷化物及其滞留时间对砷的水稻毒性的影响. 土壤, 1996, 38 (2): 90-93
- [16] Woolson EA, Axely JH, Kearney PC. Correlation methods between available soil Arsenic, estimated by six methods, and response to corn (*Zea mays* L.). Soil Sci. Am. Proc., 1971, 35: 101-105
- [17] 许嘉琳, 杨居荣, 荆红卫. 砷污染土壤的作物效应及其影响因素. 土壤, 1996, 38 (2): 85-89
- [18] Masscheleyn PH, Delaune RD, Patrick JrWH. Arsenic and selenium chemistry as affected by sediment redox potential and pH. Journal of Environmental Quality, 1991, 20 (3): 522-527
- [19] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展. 土壤, 2004, 36 (3): 264-270
- [20] 魏显有, 王秀敏, 刘云惠, 檀建新. 土壤中砷的吸附行为及其形态分布研究. 河北农业大学学报, 1999, 22 (3): 28-30
- [21] 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. 土壤学报, 2002, 39 (1): 23-28
- [22] Tu C, Ma LQ, Bondada B. Arsenic accumulation in the hyperaccumulator Chinese brake and its utilization potential for phytoremediation. Journal of Environmental Quality, 2002, 31 (5): 1671-1675
- [23] Srivastava M, Ma LQ, Singh N, Singh S. Antioxidant responses of hyper-accumulator and sensitive fern species to arsenic. Journal of Experimental Botany, 2005, 56 (415): 1335-1342
- [24] Tu C, Ma LQ. Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator Ladder brake. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 641-647
- [25] Chen R, Smith BW, Winefordner JD, Tu MS, Kertulis G, Ma LQ. Arsenic speciation in Chinese brake fern by ion-pair high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectroscopy. Analytica Chimica Acta, 2004, 504: 199-207
- [26] Liebig GF Fr. Arsenic // Chapman HD. Diagnostic Criteria for Plants and soils. Texas: Quality Printing Company Inc., 1973: 13-23
- [27] Liao XY, Chen TB, Lei M, Huang ZC, Xiao XY, An ZZ. Root distributions and elemental accumulations of Chinese brake (*Pteris vittata* L.) from As-contaminated soils. Plant and Soil, 2004, 261: 109-166
- [28] 李文学, 陈同斌, 陈阳, 雷梅. 蜈蚣草毛状体对砷的富集作用及其意义. 中国科学 (C 辑), 2004, 34 (5): 402-408
- [29] Zhang WH, Cai Y, Tu C, Ma LQ. Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. The Science of the Total Environment, 2002, 300: 167-177
- [30] Tu S, Ma LQ, MacDonald GE, Bondada B. Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of *Pteris vittata* L. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51: 121-131
- [31] Zhang WH, Cai Y, Downum KR, Ma LQ. Arsenic complexes in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* (Chinese brake fern). Journal of Chromatography A, 2004, 1043: 249-254
- [32] Huang ZC, Chen TB, Lei M, Hu TD. Direct determination of arsenic species in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* by EXAFS. Acta Botanica Sinica, 2004, 46 (1): 46-50
- [33] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅, 胡天斗, 黄启飞. 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
- [34] 陈同斌, 黄泽春, 黄宇营, 雷梅. 蜈蚣草羽叶中砷及植物必需营养元素的分布特点. 中国科学 (C 辑), 2004, 34 (4): 304-309
- [35] 陈同斌, 黄泽春, 黄宇营, 谢华, 廖晓勇. 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
- [36] Lombi E, Zhao FJ, Fuhrmann M, Ma LQ, McGrath SP. Arsenic distribution and speciation in the fronds of the hyperaccumulator *Pteris vittata*. New Phytologist, 2002, 156: 195-203
- [37] Cao XD, Ma LQ, Tu C. Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.). Environmental Pollution, 2004, 128: 317-25
- [38] Tu C, Ma LQ. Effects of arsenic on concentration and distribution of nutrients in the fronds of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. Environmental Pollution, 2005, 135: 333-340
- [39] Wang JR, Zhao FJ, Meharg AA, Raab A, Feldmann J, McGrath SP. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*: Uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. Plant Physiology, 2002, 130: 1552-1661
- [40] Tu S, Ma LQ. Interactive effects of pH, arsenic and phosphorus on uptake of As and P and growth of the arsenic hyperaccumulations *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50: 243-251
- [41] Poynton CY, Huang JW, Blaylock MJ, Kochian LV, Elless MP. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris* species: Root As influx and translocation. Planta, 2004, 219 (6): 1080-1088
- [42] 陈同斌, 范稚莲, 雷梅, 黄泽春, 韦朝阳. 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
- [43] 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 肖细元. 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
- [44] Cao XD, Ma LQ, Shiralipour A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator, *Pteris vittata* L.. *Environmental Pollution*, 2003, 126 (2): 157-167
- [45] Peryes FJ. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions. *Hortscience*, 1998, 33 (5): 826-829
- [46] Qafoku NP, Kukier U, Summer ME, Miler WP, Radcliffe DE. Arsenate displacement from fly ash in amended soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, 114 (122): 185-198
- [47] Caille N, Swanwick S, Zhao FJ, McGrath SP. Arsenic hyperaccumulation by *Pteris vittata* from arsenic contaminated soils and the effect of liming and phosphate fertilisation. *Environmental Pollution*, 2004, 132: 113-120
- [48] 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
- [49] Heeraman DA, Classen VP, Zasoski RJ. Interaction of lime, organicmatter and fertilizer on growth and uptake of arsenic and mercury by Zorro fescue (*Vulpamyros* L.). *Plant and Soil*, 2001, 234: 215-231
- [50] 廖晓勇, 肖细元, 陈同斌. 沙培条件下施加钙、砷对蜈蚣草吸收砷、磷和钙的影响. *生态学报*, 2003, 23 (10): 2057-2065
- [51] Zhang WH, Cai Y, Downum KR, Ma LQ. Thiol synthesis and arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata* (Chinese brake fern). *Environmental Pollution*, 2004, 131: 337-345
- [52] Zhang WH, Cai Y. Purification and characterization of thiols in an arsenic hyperaccumulator under arsenic exposure. *Analytical Chemistry*, 2003, 75 (24): 7030-7035
- [53] Zhao FJ, Wang JR, Barker JHA, Schat H, Bleeker PM, McGrath SP. The role of phytochelatins in arsenic tolerance in the hyperaccumulator *Pteris vittata*. *New Phytologist*, 2003, 159: 403-410
- [54] Fayiga AO, Ma LQ, Cao XD, Rathinasabapathi B. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.. *Environmental Pollution*, 2004, 132 (2): 289-296
- [55] 安志装, 陈同斌, 雷梅, 肖细元, 廖晓勇. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力研究. *生态学报*, 2003, 23 (12): 2594-2598

A Review of Researches on *Pteris vittata* Phytoremediation of Arsenic Polluted Soils

PAN Zhi-ming, DENG Tian-long

(College of Materials and Bioengineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A review was presented of researches on *Pteris vittata*, a hyper As accumulating plant, phytoremediating As-polluted soils and mechanism of its absorption and detoxification of arsenic in arsenic polluted soils, addressing issues such as accumulation, forms, transport and transformation of arsenic in the plant, and effects of soil properties and phosphorus, calcium and potassium in the soil on plant absorption and transport on As.

Key words: *Pteris vittata*, Phytoremediation, Arsenic polluted soils