

# 土壤重金属污染的植物修复\*

屈冉<sup>1,2</sup> 孟伟<sup>1</sup> 李俊生<sup>1,\*</sup> 丁爱中<sup>2</sup> 金亚波<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国环境科学研究院, 北京 100012; <sup>2</sup>北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; <sup>3</sup>广西大学农学院, 南宁 530005)

**摘要** 土壤重金属污染的危害范围广泛,使用传统的物理和化学修复方法成本高,对环境扰动大,而利用植物修复的效果较为明显,易于操作。本文论述了土壤重金属污染的单一植物、植物与微生物联合、植物与化学方法相结合的修复方法,着重介绍了重金属超富集植物的研究和植物体内螯合肽(PCs)的合成。生物螯合剂的应用及土壤重金属污染的动物、植物和微生物的联合修复将是未来研究的热点。

**关键词** 土壤污染; 重金属; 植物修复

**中图分类号** X131.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2008)04-0626-06

**Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil.** QU Ran<sup>1,2</sup>, MENG Wei<sup>1</sup>, LI Jun-sheng<sup>1</sup>, DING Ai-zhong<sup>2</sup>, JIN Ya-bo<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; <sup>2</sup>College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; <sup>3</sup>Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530005, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 626-631.

**Abstract:** The contamination ham by soil heavy metals is extensive. The cost of traditional physical and chemical remediation methods is expensive. Moreover, the disturbance of traditional methods on environment is severe. It has been proven that phytoremediation is more effective than other methods and easily operated. This paper discussed the phytoremediation technique of single plants, combination of plants and microbes, as well as combination of plants and chemical treatment, and emphatically introduced the research of hyperaccumulation plant and the synthesis of phytochelatin (PCs). It is forecasted that future disquisitive emphases are the application of bio-chelator along with combination remediation of animals, plants and microbes.

**Key words:** soil contamination; heavy metal; phytoremediation

土壤是人类及众多生物赖以生存繁衍发展的物质基础之一。污染物通过水体、大气间接或直接进入土壤中,当其积累到一定程度,超过土壤自净化能力时,土壤的生态服务功能将降低,进而对土壤动物、植物以及微生物产生影响。重金属是土壤重要污染物之一。粗略统计,在过去的50年中,排放到全球环境中的Cr  $2.2 \times 10^4$  t, Cu  $9.39 \times 10^5$  t, Pb  $7.83 \times 10^5$  t和 Zn  $1.35 \times 10^6$  t,其中大部分进入土壤,致使世界各国土壤出现不同程度的重金属污染(Singh, 2003),中国土壤的重金属污染也十分严重(王新和周启星, 2004)。土壤中的重金属离子可以作为中

心离子与土壤中的水、羟基、氨以及一些有机质中的某些分子形成螯合物,并在土壤中迁移转化,易于被植物或微生物吸收利用,继而通过食物链进入人体,引起各种生理功能改变,导致各种急慢性疾病,如慢性中毒、致癌和致畸等。因此,有必要开展土壤重金属污染的生态修复。

传统的土壤重金属污染修复技术有排土填埋法、稀释法、淋洗法、物理分离法和化学法等。在20世纪80年代初期,土壤重金属污染的植物修复开始起步,目前关于这方面的研究比较多,是一项有发展前景的修复技术。与传统的处理方式相比,植物修复的主要优点是成本低,处理设施简单,适合大规模的应用,利于土壤生态系统的保持,对环境扰动小,具有美学价值等特点。植物修复是生物修复(biore-

\*国家自然科学基金项目(30440036)和中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(30770306)。

\*\*通讯作者 E-mail: mengwei@caes.org.cn

收稿日期: 2007-06-24 接受日期: 2007-12-03

mediation)的一种方式,又称绿色修复(green remediation),是以植物忍耐、分解或超量积累某种或某些化学元素的生理功能为基础,利用植物及其共存微生物体系来吸收、降解、挥发和富集环境中污染物的一项环境污染治理技术。随着对重金属植物修复技术的研究,特别是耐重金属和超富集植物及其根际微生物共存体系的研究、根际分泌物在微生物群落的进化选择过程中的作用、以及根际物理化学特性研究的深入,植物修复技术的涵义和应用将得到延伸。本文重点论述了土壤重金属污染的3种植物修复方式(单一植物、植物与微生物联合、植物与化学方法相结合)、机理和影响因素,以期为深入开展该领域研究和实践提供参考。

## 1 单一植物修复

### 1.1 植物的富集作用

筛选超富集植物是植物修复的基础,土壤重金属污染植物修复成功与否的关键在于超富集植物的选择。对于超富集植物来说,即使在外界重金属浓度很低时,其体内重金属的含量仍比普通植物高10倍甚至上百倍。如,对于Cr超富集植物而言,Chaney等(1997)认为生长在被Cr污染的土壤里的植物,如果其地上部分富集Cr达到 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,且地上部分富集的Cr多于根部,则该植物称为Cr超富集植物,目前被广泛应用于Cr污染生态修复中的3种超富集植物 *Dicoma niccolifera*、*Sutera fodina*和 *Convolvulus arvensis*地上部分富集Cr的最大量分别为 $1\ 500$ 、 $2\ 400$ 和 $2\ 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Gardea-Torresdey *et al.*, 2004),均达到Cr超富集植物的水平,是土壤Cr污染修复的较为理想的植物。对土壤Cr污染富集效果明显的植物还有遏蓝菜(*Thlaspi caenulescens*) (Wang *et al.*, 2004; 韩璐等, 2007); 张学洪等(2006)在广西某电镀厂附近调查野外湿生植物时,发现了Cr超积累植物李氏禾(*Leersia hexandra*),叶片平均Cr含量达 $1\ 786.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,叶片与根际土壤中Cr含量之比为56.83。此外,陈同斌等(2002)于1999年首次报到了蜈蚣草(*Pteris vittata*)能大量富集As的研究结果,同时分析了该植物不同器官对重金属的富集量,发现蜈蚣草不同器官组织中As的含量为羽片>叶柄>根系,说明As在该植物体中容易向上运输和富集,显示出蜈蚣草对As有极强的耐性和独特的富集能力。

研究证实,某一类植物可能对一些重金属具有

明显的富集作用。如景天属中的一些植物具有较强的富集重金属的能力,试验表明,东南景天(*Sedum alfredii*)不仅能忍耐高浓度Zn/Cd复合污染,还对其具有超量积累的能力,对Zn/Cd的吸收量随着Zn/Cd处理水平的提高而增高(叶海波等, 2003)。Sun等(2007)研究发现,生长在含Cd矿渣土壤里的东南景天植株茎和叶中Cd含量明显高于根部,而生长在非Cd矿区的东南景天植株根部Cd含量则明显高于茎叶中的含量,从而证实东南景天对Cd也有较强的富集作用。

此外,生长在被重金属污染土壤上的植物也是被研究的重点之一。生长在矿区的成年期的柳树(*Salix caprea*)和欧洲山杨(*Populus tremula*)的叶子能积累大量Cd和Zn,柳树叶里的Cd和Zn浓度达到 $116$ 和 $4\ 680\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,还发现土壤质地是影响树叶重金属含量的主要因素之一(Unterbrunner *et al.*, 2007)。土壤pH值是影响植物富集Cd的最重要因素,低pH值有助于植物富集Cd,磷酸盐和Zn的存在则抑制Cd的富集(Kirkham, 2006)。对生长在矿渣区的植物 *Hyparrhenia hirta*和 *Zygophyllum fabago*研究发现,它们能富集Pb和Zn, *H. hirta*根部能富集 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Pb, *Z. fabago*幼芽能富集 $750\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn;种植这2种植物的土壤的电导率都是 $4\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ,对照(即没有种植植物的土壤)的电导率是 $8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ,表明那些能耐受高电导率的植物才可以生长在矿渣区,并且可以降低土壤的电导率,从而一定程度上修复矿区的土壤,减少矿区的水土流失(Conesa *et al.*, 2007)。

重金属复合污染的超富集植物筛选是目前土壤植物修复一个重要研究方向。例如,印度芥菜(*B. juncea*)可同时积累高浓度的Pb、Cr、Ni、Cd、Zn、Cu和Se等,在重金属污染土壤植物修复中被广泛应用(US EPA, 2001; 蒋先军等, 2002; Quartacci *et al.*, 2005)。田胜尼等(2004)通过与鹅冠草(*Roegneria kan oji*)的比较认为,香根草(*Vetiveria zizanioides*)无论是对Cu、Pb、Zn单一污染还是复合污染都有较好的修复功能。杨兵等(2005)也验证了香根草对Pb、Zn尾矿的修复作用。由于土壤污染大多是几种重金属的复合污染,因而筛选出能修复复合污染土壤的植物更具有现实意义。

### 1.2 植物的降解作用

利用植物根际分泌出的一些特殊化学物质,使土壤中的重金属转化为毒性较低或无毒物质的理想

植物,应是一种能忍耐高浓度重金属、根系发达的多年生常绿植物。这些植物通过根系分解、沉淀、整合、氧化还原等多种过程使重金属惰性化。通过对小麦根际土壤低分子量有机酸与 Cd 的生物积累的研究,证实了植物可以通过分泌有机酸来复合或整合溶解土壤中的 Cd (万敏等, 2003)。有机化合物在植物耐重金属毒害中的作用早有许多报道, Ni 超富集植物比非超富集植物具有更高浓度的有机酸 (Brooks *et al*, 1981)。重金属与各种有机化合物络合后,能降低自由离子的活度系数,减少其毒害。

叶春和 (2002)研究了紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)对 Pb 污染土壤的修复及活化机理,从 X-ray 微区分析结果看出,细胞间隙 Pb 含量最高,细胞壁和液泡次之,胞质中最低; Pb 在紫花苜蓿体内主要以难溶的形式存在,紫花苜蓿对 Pb 的耐受与植物络合素的形成有关。由于紫花苜蓿生物量高,所以,紫花苜蓿可以当作是土壤 Pb 污染的一种理想修复植物。

$\text{Cr}^{6+}$ 具有较高的毒性,而  $\text{Cr}^{3+}$ 非常难溶,毒性低。利用一些植物可以将  $\text{Cr}^{6+}$ 还原为  $\text{Cr}^{3+}$ ,从而降低其毒性 (Salt *et al*, 1995)。水葫芦 (*Eichhimmia crassipes*)根部可以解毒  $\text{Cr}^{6+}$ 为  $\text{Cr}^{3+}$ ,解毒后的  $\text{Cr}^{3+}$ 可以迁移到叶组织 (Lytle *et al*, 1998)。吸收  $\text{Cr}^{6+}$ 的植物一般都是喜 S 植物,如花椰菜 (*Brassica oleracea*)、甘蓝 (*Brassica* spp.)可能是因为铬酸盐和硫酸盐离子在化学性质上的相似性有关 (Zayed *et al*, 1998)。 $\text{Cr}^{6+}$ 还原过程主要发生在植物组织内部,可能是通过  $\text{Fe}^{3+}$ 还原酶催化完成的,这一机理还有待于深入研究。

植物富集具有永久性和广域性的特点,但植物富集的效果主要依赖于该种超富集植物体内重金属的浓度和生物量,并且富集重金属的效率问题也一直是困扰环境科学界的难题。目前已发现的超积累植物尽管能耐受、富集高浓度重金属,但生物量低。因而当务之急,必须解决植物富集重金属的机制及影响植物富集过程的外环境诱导。例如,利用真菌、细菌等在土壤中分泌有机配体、改变重金属的活性等,从而促进植物对重金属的富集。

## 2 植物与微生物联合修复

### 2.1 植物与菌根真菌的联合修复

微生物不仅能将本身分泌的质子、酶、铁载体等用来活化重金属,而且也可将土壤有机质和植物根系分泌物转化为自身利用,同时这些小分子化合物

(如有机酸)对土壤中的重金属也有活化作用 (郇红建, 2004)。自从 1887 年发现豆科植物根际具有固氮功能和根瘤菌的纯培养获得成功以后,利用微生物植物的共生关系来修复土壤重金属污染的研究便得到了迅速发展。

在长期的生物进化过程中外生菌根真菌与植物形成了互惠关系,一方面,外生菌根的形成可以明显改善寄主植物对水分、营养物质的吸收,也大大增强了寄主植物对环境压力的抵抗能力;另一方面,外生菌根真菌从植物获得其生长所必需的糖类、维生素和氨基酸等。菌根真菌也能借助有机酸的分泌来活化某些重金属离子,菌根真菌还能以其它形式,如离子交换、分泌有机配体和激素等间接作用,来影响植物对重金属的吸收 (Janouškov *á et al*, 2006; Marques *et al*, 2006)。在一些植物和某些真菌存在的土壤里,重金属能诱导植物体内螯合肽 phytochelatins (PCs)的合成,致使金属离子被螯合。常见的螯合肽结构是  $(-\text{Glu-Cys})_n\text{-Gly}$ , *Arabidopsis thaliana* 细胞能够合成与螯合肽相关的缩氨酸已经被认可。但是,在 *A. thaliana* 存在的环境里,当向培养基里加入  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd 时,还诱导了缩二氨基酸 谷氨酰半胱氨酸 ( $-\text{EC}$ )的产生 (Ducruix *et al*, 2006)。这暗示,与 PCs 相关的缩氨酸的生物合成过程中,谷胱甘肽合成酶或氨基乙酸的可利用性是一种制约因素。因此,要想提高重金属的螯合效率,还可以间接调控谷胱甘肽合成酶或氨基乙酸的浓度。当向培养基里加入  $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  氨基乙酸时,将抑制  $-\text{EC}$  的产生。氨基乙酸的存在将影响谷胱甘肽和螯合肽的浓度,但绝大部分螯合肽的浓度却得以显著提高。研究发现,除 Cd 之外,一些有毒重金属或生物必需金属 (如 Hg, Ni, Zn 和 Cu 等)也能诱导合成 PCs (Lee *et al*, 2003; Wang *et al*, 2007)。高等植物中 PCs 对缓解有毒重金属的毒害以及维持细胞内必需金属元素的动态平衡具有重要作用 (Beck *et al*, 2003)。而酵母菌 *Saccharomyces cerevisiae* 里的 PCs 是由羧肽酶 (carboxypeptidase) CPY 和 CPC 产生的 (Wünschmann *et al*, 2007)。

Hildebrandt (2007)报道了灌木菌根真菌与豆科植物苜蓿 (*Thlaspi* sp.)的联合修复作用,并分析了在重金属压力胁迫下植物和真菌的基因表达。在不同重金属 (Cd, Cu, Zn) 的处理下,编码能耐受重金属 Zn 转移酶、金属硫因、90 kD 热休克蛋白和谷胱甘肽,硫转移酶的基因表达随着接触不同重金属也

有所变化,基因转录水平得到提高。利用模拟土壤重金属污染研究发现:与对照(自来水)相比,假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)菌株 BS2产生的生物活化剂鼠李糖脂液,不仅可以除掉可渗滤的 Cd和 Pb离子,而且也可以除掉那些被结合的金属离子,并且证实该方法对土壤微生物群没有影响,没有破坏土壤,这是一种值得深入研究的方法(Juwarakar et al, 2007)。

## 2.2 植物与细菌的联合修复作用

在被重金属污染的土壤里,能促进植物生长的细菌(plant growth promoting bacteria)也是近几年的研究热点(Cakmakci et al, 2006; Zhuang et al, 2007)。细菌对金属的细胞外吸附是其抗性机制之一。细菌的分泌物,如多聚体(主要是多糖、蛋白质和核酸),含有多种具有金属络合、配位能力的基团,如巯基、胺基等,这些基团能通过离子交换或络合作用与金属结合形成金属有机复合物,使有毒金属元素毒性降低或变成无毒化合物。Abou-Shanabab等(2006)从生长在含 Ni的土壤里的 *Alyssum murale*根际周围分离出 9 个根际细菌菌落,并把它们接种到土壤里,来检验它们对土壤里 Ni的可溶性以及对 *A. murale*富集 Ni的影响。结果发现,接种菌落的 *A. murale*幼芽鲜质量和干质量与对照组并没有差异,这表明这些细菌对植物 *A. murale*生长没有影响;受不同浓度 Ni污染的土壤里,与对照(没有接种细菌)相比, *Microbacterium oxydans* AY509223 能显著提高 *A. murale*植株对 Ni离子的富集,尤其是对于高浓度( $2\ 829.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Ni离子的土壤来说效果更好,使得植物叶子 Ni含量升高了  $1\ 085\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;其它 8 个菌株亦均能不同程度提高植物对含 Ni土壤的修复能力。Belimov(2005)从生长在含高浓度 Cd土壤里的印度芥菜根际分离出 11 株耐受 Cd的细菌菌落,发现这些菌落体内所含的 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC)脱氨酶可促进芥菜根部生长,并提高印度芥菜根系对 Cd的吸收富集。随着分子技术的发展,利用 16S rDNA 分离技术(Zaidi et al, 2006),鉴定出一株耐受 Ni的根际细菌菌株 *Bacillus subtilis*,证实了该菌株能促进印度芥菜对 Ni的富集,接种该菌株和不接种的土壤(含  $\text{NiCl}_2$  浓度为  $1\ 750\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )里植物体内富集的 Ni分别是 0.0147%和 0.094%,并且盆栽实验表明,该菌株能促进芥菜的生长。

## 3 植物修复与化学方法联合修复

在污染的土壤中,大多数重金属离子处于固相中,被吸附在土壤颗粒表面,并且结合的非常牢固。化学方法可以打破这种状态,将处于固相的重金属转化为植物可富集的处于液相的金属离子。植物修复与化学方法的结合原理就是扰动重金属在土壤液相浓度和固相浓度之间的平衡。因此,对许多植物而言,需要向土壤中添加移动剂以增加土壤溶液中的金属浓度,进而促进植物对金属的吸收和富集(Komárek et al, 2007)。Peáalosa等(2007)研究了几种促进羽扇豆(*Lupinus polyphyllus*)修复土壤重金属污染的因素,结果发现,螯合剂 NTA(三乙酸胺)能够促进金属离子(Fe, Mn, Cu, Zn, Cd)迁移,促使羽扇豆所含的金属离子浓度升高,尤其是 As, Cd和 Pb浓度增加更明显。采用这种方法时,需要注意螯合剂的用量,以免造成二次污染。通过聚合酶链式反应(PCR-DGGE)研究发现,与对照(不含螯合剂)相比,生长在含葡萄糖和柠檬酸螯合剂的土壤(Cu浓度  $317\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )里的植物海州香薷(*Elsholtzia splendens*)根际生物量没有差别,表明该螯合剂没有影响根际生物多样性;将海州香薷和白三叶(*Trifolium repens*)2种植物种植在含 Cu的沙壤土里,向土壤里分别施加柠檬酸、葡萄糖之后,海州香薷幼芽根部 Cu的浓度分别是白三叶(不能富集 Cu)的 1.9、2.9倍;并且,不管是否种植植物,土壤施加了葡萄糖或柠檬酸之后,都使得可被富集的 Cu浓度增加,降低土壤 Cu含量(Chen et al, 2006)。Cao等(2007)采用了容易被生物降解的螯合剂 EDDS和 MGDA,来促进植物紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)对 Pb和 Zn吸收。

以上研究表明,土壤中重金属种类和浓度、金属螯合剂种类和浓度等因素对植物修复效果都会产生影响。因而,采用植物与化学方法相结合修复植物重金属时,不仅要考虑单因素的作用,也要考虑复合因素的作用。

## 4 展望

关于土壤重金属污染的植物修复研究已经取得了一定成果,但是和其它污染治理技术一样,植物修复也有其局限性,存在的问题主要有:1)植物修复只适用于表土或浅层地下水的轻度污染的治理;2)植物与微生物的联合修复的很多实验都是室内模拟

实验和盆栽实验,还有待于在室外污染区验证筛选出来的植物和微生物的修复效果;3)关于重金属螯合机理以及影响因素的研究仍需要深入。

随着现代化技术与精密仪器的开发,合成出能被植物根系微生物降解的生物螯合剂和生物活化剂(Juwarkar *et al*, 2007),以避免二次污染的试剂将不是梦想;植物与真菌、细菌以及蚯蚓之类的土壤、水体等动物联合修复的吸收、运输、累积重金属的生理机制(Abou-Shanabab *et al*, 2006)的实验已经开展。可以预测,土壤重金属污染的动物、植物和微生物的联合修复的研究将是未来研究的热点之一。目前,对于耐性物种的筛选多集中在野外受污染区耐性物种上,但是,已经发现的物种数量和中国的生物资源量相比较只是很小的一部分,所以在中国范围内,进行耐性植物的人工筛选显得尤为重要,采取分子育种、基因工程技术,找出影响耐性品种的关键基因,并克隆复制到植物体内,将具有很强的现实意义。

## 参考文献

- 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 2002 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 47(3): 207-300.
- 郜红建, 蒋新, 常江, 等. 2004 根分泌物在污染土壤生物修复中的作用. 生态学杂志, 23(4): 135-139.
- 韩璐, 魏崑, 官子楸, 等. 2007 Zn/Cd超富集植物天蓝遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*) TcCaM<sub>2</sub>基因的克隆及在酵母中的重金属耐受性分析. 中国科学院研究生院学报, 24(4): 465-472.
- 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 2002 重金属污染土壤的植物修复研究——金属富集植物 *Brassica juncea* 对锌、镉的吸收和积累. 土壤学报, 39(5): 664-670.
- 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 等. 2004 香根草和鹅观草对 Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究. 生物学杂志, 21(3): 15-26.
- 万敏, 周卫, 林葆, 等. 2003 不同镉积累类型小麦根际土壤低分子量有机酸与镉的生物积累的研究. 植物营养与肥料学报, 9(3): 331-336.
- 王新, 周启星. 2004 土壤重金属污染生态过程、效应及修复. 生态科学, 23(3): 278-281.
- 杨兵, 蓝崇钰, 束文圣. 2005 香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收. 生态学报, 25(1): 45-50.
- 叶春和. 2002 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究. 土壤与环境, 11(4): 331-334.
- 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 2003 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对镉吸收和积累特性的研究. 农业环境科学学报, 22(5): 513-518.
- 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 2006 一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz). 生态学报, 26(3): 950-953.
- Abou-Shanabab RA I, Angle JS, Chaney RL. 2006 Bacterial inoculants affecting nickel uptake by *Alyssum murale* from low, moderate and high Ni soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 2882-2889.
- Beck A, Lendzian K, Oven M, *et al* 2003 Phytochelatin synthase catalyzes key step in turnover of glutathione conjugates. *Phytochemistry*, 62: 423-431.
- Belimov AA, Hontzas N, Saftonova V I, *et al* 2005 Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.). *Soil Biology and Biochemistry*, 37: 241-250.
- Brooks RR, Shaw S, Marfill AA. 1981. The chemical form and physiological function of nickel on some Iberian alyssum species. *Physiologia Plantarum*, 51: 167-170.
- Cakmakci R, Dönmez F, Aydın A, *et al* 2006 Growth promotion of plants by plant growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 1482-1487.
- Cao A, Carucci A, Lai T, *et al* 2007. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria. *European Journal of Soil Biology*, 43: 200-206.
- Chaney RL, Malik M, Li YM, *et al* 1997. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 8: 279-284.
- Chen YX, Wang YP, Wu WX, *et al* 2006 Impacts of chelate-assisted phytoremediation on microbial community composition in the rhizosphere of a copper accumulator and non-accumulator. *Science of the Total Environment*, 356: 247-255.
- Conesa HM, Faz Á, A maldos R, *et al* 2007. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere*, 66: 38-44.
- Ducnux C, Junot C, Fiévet JB, *et al* 2006 New insights into the regulation of phytochelatin biosynthesis in *A. thaliana* cells from metabolite profiling analyses. *Biochimie*, 88: 1733-1742.
- Gardea-Torresdey JL, Peralta-Videa JR, Montes M, *et al* 2004. Bioaccumulation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: Impact on plant growth and uptake of nutritional elements. *Bioresour Technol*, 92: 229-235.
- Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. 2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68: 139-146.
- Janouškov ĀM, Pavlíková ĀD, Vosáka M. 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere*, 65: 1959-1965.
- Juwarkar AA, Nair A, Dubey KV, *et al* 2007. Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere*, 68: 1996-2002.
- Kirkham MB. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*, 137: 19-32.

- Komárek M, Tlustoša P, Száková J, *et al* 2007. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soil *Chemosphere*, **67**: 640-651.
- Lee S, Moon JS, Tae-Seok KO, *et al* 2003. Overexpression of *Arabidopsis phytochelatin* synthase paradoxically leads to hypersensitivity to cadmium stress *Plant Physiology*, **131**: 656-663.
- Lytle CM, Lytle FW, Yang N, *et al* 1998. Reduction of Cr(Ⅵ) to Cr(Ⅲ) by wetland plants: Potential for in situ heavy metal detoxification *Environmental Science and Technology*, **32**: 3087-3093.
- Marques APGC, Oliveira RS, Rangel AOSS, *et al* 2006. Zinc accumulation in *Solanum nigrum* is enhanced by different arbuscular mycorrhizal fungi *Chemosphere*, **65**: 1256-1263.
- Peñalosa JM, Carpena RO, Vázquez S, *et al* 2007. Chelate-assisted phytoextraction of heavy metals in a soil contaminated with a pyritic sludge *Science of the Total Environment*, **378**: 199-204.
- Quartacci MF, Baker AJM, Navari-Ezra F 2005. Nitrotriacetate- and citric acid-assisted phytoextraction of cadmium by Indian mustard (*Brassica juncea* L.) Czernj. Brassicaceae). *Chemosphere*, **59**: 1249-1255.
- Salt DE, Blaylock M, Kumar NPBA, *et al* 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants *Biotechnology*, **13**: 468-474.
- Singh OV, Labana S, Pandey G, *et al* 2003. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil *Applied Microbiology and Biotechnology*, **61**: 492-405.
- Sun Q, Ye ZH, Wang XR, *et al* 2007. Cadmium hyperaccumulation leads to an increase of glutathione rather than phytochelatins in the cadmium hyperaccumulator *Sedum alfredii* *Journal of Plant Physiology*, **164**: 1489-1498.
- Unterbrunner R, Puschenreiter M, Sommer P, *et al* 2007. Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe *Environmental Pollution*, **148**: 107-114.
- US EPA. 2001. Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites EPA/540/S-01/500, Washington DC
- Wang FY, Lin XG, Yin R, *et al* 2007. Role of microbial inoculation and chitosan in phytoextraction of Cu, Zn, Pb and Cd by *Elsholtzia splendens* - a field case *Environmental Pollution*, **147**: 248-255.
- Wang KR, Gong H, Wang Y, *et al* 2004. Toxic effects of cadmium on *Morus alba* L. and *Bambusa morio* L. *Plant and Soil*, **261**: 171-180.
- Wünschmann J, Beck A, Meyer L, *et al* 2007. Phytochelatin synthase is synthesized by two vacuolar serine carboxypeptidases in *Saccharomyces cerevisiae* *FEBS Letters*, **581**: 1681-1687.
- Zaidi S, Usmani S, Singh BR, *et al* 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea* *Chemosphere*, **64**: 991-997.
- Zayed A, Lytle CM, Qian JH, *et al* 1998. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops *Planta*, **206**: 293-299.
- Zhuang X, Chen J, Shim H, *et al* 2007. New advances in plant growth promoting rhizobacteria for bioremediation *Environment International*, **33**: 406-413.

---

作者简介 屈冉,女,1978年生,博士研究生。主要从事环境科学方面的研究。E-mail: qword@126.com  
责任编辑 魏中青

---