

重金属超富集植物及植物修复技术研究进展

韦朝阳, 陈同斌

(中国科学院地理科学与资源研究所农业生态与环境技术试验站, 北京 100101)

摘要: 植物修复技术(Phytoremediation)是近年来发展起来的一种主要用于清除土壤重金属污染的绿色生态技术。重金属超富集植物(hyperaccumulator)及植物修复技术是当前学术界研究的热点领域,目前虽已有 Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 等超富集植物发现的报道,但尚无一例报道来自于中国。中国具有广袤的国土面积、丰富的植物类型和多种(处)古老的矿山开采与冶炼场所,在中国开展超富集植物的寻找、研究与开发工作,将会有重要突破,并具有重要的理论与实践意义。本文拟就国内外在这一领域的研究进展作一简要综述。

关键词: 超富集植物; 植物修复技术; 重金属污染土壤

Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad

WEI Chao-Yang, CHEN Tong-Bin (Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract It has been estimated that more than 20 million hectares of farmland have been contaminated in China, accounting for 20% of the total in the country. Furthermore, a reduction of more than 10 million tons of food supplies results from this soil contamination. Techniques currently employed control soil contamination include cover with improved soil, application of lime and chemical washing. However, most of these are expensive, labour-intensive and can result in further contamination problems or leaching/deposition of nutrient elements during *in situ* treatment. Phytoremediation, a technique using plants to remove contamination from soil and water, has become a topical research field in the last decade as it is safe and potentially cheap compared to traditional remediation techniques. Based on information from the Phytoremediation Bibliography produced by the US-EPA, in 1977 there were only 7 reports published relating to phytoremediation, whereas in 1997, the total literature of phytoremediation increased to 214.

In 1583, A. Cesalpino, an Italian botanist discovered an unusual plant which grew on soils over 'black stone' (ultramafic rocks). This was probably the first ever report of a metal hyperaccumulator plant. It was later named as *Alyssum bertolonii* in 1814 by Desvaux and the nickel content of its leaves was reported as 7900 $\mu\text{g/g}$ in 1848 by C. Minguzzi and O. Vergnano. Similar plants, designated 'indicator plants', such as *Elsholtzia haichowensis* Sun, a copper accumulator, were discovered early in China and employed in prospecting for copper mineralization. R. R. Brooks, a geochemist from New Zealand first named these special accumulator plants 'hyperaccumulators' in 1977, and in 1982 R. Chaney from the USA first suggested the concept of phytoremediation using these hyperaccumulators. A hyperaccumulator has been defined by Baker and Brooks (1989) as a plant that can accumulate cadmium > 100 $\mu\text{g/g}$, cobalt, copper, nickel, lead > 1000 $\mu\text{g/g}$, manganese and zinc > 10000 $\mu\text{g/g}$ in their shoot dry matter. Furthermore, an operational defini-

基金项目: 国家自然科学基金(49941003, 40071075)和中国科学院知识创新工程重点方向资助项目(KZCX2-401)

收稿日期: 2000-06-29; 修订日期: 2000-12-14

作者简介: 韦朝阳(1965~), 男, 安徽铜陵人, 副研究员。主要从事污染土壤的植物修复与矿区生态环境整治研究工作。

来源于美国环保局网站的资料

tion was proposed by Baker (1981) that in accumulator plants the metal contents in shoots are invariably greater than that in roots, showing a special ability of the plants to absorb and transport metals and store them in their above-ground parts. To date, more than 400 species of metal hyperaccumulator plants have been reported in the literature. Among them, 315 are nickel hyperaccumulators, 24 are copper hyperaccumulators but the numbers of other metal hyperaccumulators for other metals are low and they are restricted in their distribution in some specific localities in the world.

The hyperaccumulators are mostly discovered in the heavy metal contaminated area such as mining and smelting localities. The author of this paper suggests that there may exist some "potential hyperaccumulators" on the earth. More attention should be paid to some plants that growing in some relatively "low" heavy metal content areas. The plants may not have very high tolerance but may have some extent degree of accumulation, by culturing the plants and adding some kinds of reagents in their growing media, they may reveal character of hyperaccumulation.

A systematic survey of plant and soil chemistry in the copper mining areas along the lower middle reaches of Yangtze River has revealed a few copper accumulators such as *Elythia haichowensis* Sun, *Camelina communis* L. and *Rumex acetosa* L.; the maximum leaf copper contents are 600, 160 and 100 $\mu\text{g/g}$ (dry matter basis) respectively, for copper contents in the soil around their roots ranging from 5000 to 20000 $\mu\text{g/g}$. We initiated pioneering research on hyperaccumulators and phytoremediation in China early in 1998. Several surveys were conducted in south China, and through systematic field investigation and glasshouse studies, we have now identified a hyperaccumulator of arsenic-*Pteris vittata* L. (Chinese brake fern). This is the first hyperaccumulator discovered in China. Unlike other reported hyperaccumulators, this plant can reach 2 m in height, with a fresh shoot biomass of up to 36t/km². The arsenic content in shoots can be as high as 5000 $\mu\text{g/g}$ (dry matter), and the ratio of arsenic in leaves, leafstalk and roots is 5:2:1, which reveals a unique arsenic accumulation capacity.

The mechanisms of metal hyperaccumulation have not been fully elucidated, although many studies have been conducted, especially on the mechanisms of hyperaccumulation of zinc and cadmium by the crucifer, *Thlaspi caerulescens*. Early reports suggested that some low molecular weight organic acids play an important role in tolerance and accumulation of heavy metals in plants. However, some recent studies have not found any clear relationship between them. What can be concluded now is that tolerance and accumulation may be independent characters; tolerance leads to compartmentation of metals in plant cells whereas accumulation relates to a highly efficient uptake and transport system.

It is important to clarify the patterns of tolerance and accumulation in different hyperaccumulators for different metals under different environmental conditions, in order to make phytoremediation practical and cost-effective in field. Nutrition and pot trials have been conducted, and the results show that hyperaccumulators such as *Thlaspi caerulescens* can tolerate abnormally high zinc and cadmium levels, and accumulate high contents of metals in their shoots in very short time periods, even from very lower background metal concentrations in their growth media. The hyperaccumulator plants themselves are the major factor that determines the capacity of hyperaccumulation. However, results also show that several external factors, such as pH, nutritional status and metal speciation, may greatly influence the patterns of metal accumulation, which highlights their importance in phytoremediation applications. Field trials of phytoremediation using hyperaccumulators have also been performed and shed light on the wider application and commercialization of this technique in the future. Arsenic is very toxic but an analog of phosphorus, it may disturb the metabolism of plants and cause closure of phosphate uptake channels. The arsenic hyperaccumulator, Chinese brake fern, has a uniquely high capacity to store arsenic in plant cells, that has not yet been

elucidated More research and development work with this plant should therefore be conducted in order to produce cheap and effective techniques for remediation of arsenic contaminated soils

Key words: hyperaccumulator; phytoremediation; heavy metal contaminated soil

文章编号: 1000-0933(2001)07-1196-08 中图分类号: Q 948 文献标识码: A

据估测, 目前中国受污染的耕地面积近 2 000 万 hm^2 , 约占耕地总面积的 1/5^[1], 其中工业“三废”污染 1 000 万 hm^2 ^[2], 农田灌溉面积已达 130 多万 hm^2 ^[3]。每年因土壤污染而减少的粮食产量高达 1 000 万 t, 直接经济损失达 100 多亿元^[4]。土壤重金属污染源包括“三废”的排放, 矿山的开采和冶炼, 化肥和农药的施用, 城市生活垃圾的排放, 污水灌溉和污泥农用等。导致土壤污染的重金属主要包括 As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn 等, 一般为几种重金属的复合污染^[5]。

重金属污染土地的治理大致有客土法、石灰改良法、化学淋洗法等^[6]。这些方法在污染土壤的改良和治理方面虽然具有一定的理论意义, 但在实际应用上往往都存在某些局限。如加入土壤改良剂的沉淀法虽然在一定时期内可以降低土壤溶液中重金属离子的溶解度, 但同时却会导致某些土壤营养元素的沉淀; 淋洗法会同时造成营养元素的淋失; 客土法虽效果较好, 但费用昂贵, 难以大面积工程推广。近年来发展起来的植物修复技术以其安全、廉价的特点正成为研究和开发的热点, 以美国环保局公布的 Phytoremediation bibliography 为例, 1977 年有关文献仅 7 篇, 到 1997 年已增长到每年 214 篇。美国、英国都设立了植物修复公司, 如美国的 Edenspace 公司, 专门从事土壤、水体重金属和放射性元素的植物修复商业化工作, 而国内尚未系统开展这方面的工作。

1 植物修复技术的产生与发展

1583 年意大利植物学家 Cesalpino 首次发现在意大利托斯卡纳“黑色的岩石”上生长的特殊植物, 这是有关超富集植物(Hyperaccumulator)的最早报道。1814 年 Desvaux 将其命名为 *Alyssum bertolonii*(庭荠属), 1848 年 Minguzzi 和 Vergnano 首次测定该植物叶片中(干重)富含 Ni 达 $7900\mu\text{g/g}$ (0.79%)^[7]。以后的研究证明这些植物是一些地方性的物种, 其区域分布与土壤中某些重金属含量呈明显的相关性^[8,9]。这些植物作为指示植物在矿藏勘探中发挥了一定的作用^[10]。在中国, 利用指示植物找矿的工作也开展较早, 如在长江中下游安徽、湖北的一些铜矿区域分布的 *Elsholtzia harchovensis* Sun(海州香薷, 俗称铜草)在铜矿勘探中发挥了重要作用^[11]。重金属污染土壤上大量地方性植物物种的发现促进了耐金属植物的研究, 同时某些能够富集重金属的植物也相继被发现。1977 年, Brooks 提出了超富集植物的概念^[12]; 1983 年 Chaney 提出了利用超富集植物清除土壤重金属污染的思想^[13]。随后有关耐重金属植物与超富集植物的研究逐渐增多, 植物修复作为一种治理污染土壤的技术被提出, 工程性的试验研究以及实地应用效果显示了植物修复技术商业化的巨大前景。

2 超富集植物的特点及其地理分布

超富集植物是能超量吸收重金属并将其运移到地上部的植物。通常, 超富集植物的界定可考虑以下两个主要因素: 植物地上部富集的重金属应达到一定的量; 植物地上部的重金属含量应高于根部。由于各种重金属在地壳中的丰度及在土壤和植物中的背景值存在较大差异, 因此, 对不同重金属, 其超富集植物富集浓度界限也有所不同。目前采用较多的是 Baker 和 Brooks 1983^[14]年提出的参考值, 即把植物叶片或地上部(干重)中含 Cd 达到 $100\mu\text{g/g}$, 含 Co, Cu, Ni, Pb 达到 $1000\mu\text{g/g}$, Mn, Zn 达到 $10000\mu\text{g/g}$ 以上的植物称为超富集植物。同时这些植物还应满足 $S/R > 1$ 的条件(S 和 R 分别指植物地上部和根部重金属的含量)。

目前, 世界上共发现有 400 多种超富集植物。其中 Ni 的超富集植物 277 种^[15]。他们分布在世界少数几

Hyperaccumulator, 国内有“超积累植物”和“超富集植物”两种译法。作者认为译为超富集植物为妥。超富集植物的重要特征在于: 相对于普通植物, 它能够从土壤或水体中吸收富集高含量的重金属, 并具有将重金属元素从根部转运到地上部的特殊能力, 表现出很高的生物富集系数。因此, 超富集植物的特征突出在“富集”上。

个地区(表 1~ 3)。

唐世荣^[16]对中国长江中下游安徽和湖北境内的铜矿区富铜植物 *Elsholtzia haichowensis* Sun (海州香薷)、*Cammelina cannunis* Linn (鸭跖草) 和 *Rumex acetosa* Linn (酸模) 进行了系统的调查研究, 发现酸模、海州香薷和鸭跖草样本叶片含铜(干重)平均 596、157 和 102 $\mu\text{g/g}$ 。野外这些植物生长的土壤上铜含量为 5 000~ 20 000 $\mu\text{g/g}$, 因此调查结果未能显示这些植物特殊的超富集能力。应进一步开展这些植物在人工驯化干预下条件下的富集试验, 深入揭示这些植物作为超富集植物应用于植物修复的可行性。自 1999 年开始对中国中南部一些炼铜区的植被和土地污染状况进行了考察、采样和室内盆栽试验和化学分析, 首次发现了一种 As 的超富集蕨类植物, 其叶片含 As 高达 5 000 $\mu\text{g/g}$ (干重, 未发表的数据)。同时, 调查还发现在砷污染严重区域生物种群极其单一, 这种超富集蕨类植物生长非常繁盛, 呈族群分布, 调查样方内几乎没有其他植物生长, 每平方米收割的植物地上部鲜种可达 3.6kg, 显示其具有很大的植物修复潜力。而离开污染区, 这种植物则很少能成群分布, 个体也小的多。这些表明所发现的超富集蕨类植物具有特殊的耐砷毒能力, 在砷污染区处于竞争优势。目前正在进一步开展深入的研究工作。

表 1 目前已发现的超富集植物

Table 1 The discovered hyperaccumulators up to date

金属 Metals	种数	科数
	Number of species	Number of families
砷 As	1	1
镉 Cd	1	1
钴 Co	26	12
铜 Cu	24	11
铅 Pb	5	3
锰 Mn	8	5
镍 Ni	277	36
锌 Zn	18	5

据 Baker(1996)^[15]修改 Revised after Baker(1996)^[15]

表 2 一些典型的超富集植物及其植物体中最大金属含量($\mu\text{g/g}$)

Table 2 Some popular hyperaccumulators and the maximum contents of heavy metals in their shoots or leaves

种 Species	产地 Localities	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Co	Cr	As
<i>A eollanthus bifomifolius</i> De Wild	非洲沙坝哈 Sabah, Africa	3 920					2 820		
<i>H aum aniastrum robertti</i>	非洲沙坝哈 Sabah, Africa	2 070					10 200		
<i>A meriam artitina vax</i> Balleri	德国 Gem any		1 600						
<i>Cardam inossis balleri</i>	德国 Gem any			13 600					
<i>D ichapetalum gelonioides</i>	非洲沙坝哈 Sabah, Africa			30 000					
<i>M inuaritia verna</i>	南斯拉夫 Yugoslavia		11 400						
<i>Polycarphae synandra</i>	澳大利亚 Australia		1 050	6 960					
<i>Thlaspi brachypetalum</i>	法国 France			15 300					
<i>T. caerulescens</i>	欧洲中西部 West central Europe		2 740	43 710	2 130				
<i>T. ochroleucum</i>	希腊 Greece		1 210	4 130					
<i>T. rotundifolium</i> subsp. <i>Cepaeifolium</i>	奥地利/意大利 Austria/Italy		8 200	17 300					
<i>T. caerulescens</i>	英国 U K		864	23 036	258				
<i>T. rotundifolium</i> (L.) Gaudin subsp. <i>Cepaeifolium</i>	中欧 Central Europe		8 200						
<i>Viola calaminaria</i>	比利时/德国 Belgium/Gem any			10 000					
<i>A lyssum bertolonii</i>	意大利 Italy					13 400			
<i>B orn uellera tymphacea</i>	希腊 Greece					31 200			
<i>D ican a niccolifera</i> Wild	津巴布韦 Zimbabwe							1 500	
<i>S utera fodina</i> Wild	津巴布韦 Zimbabwe							2 400	
<i>P teris vittata</i> L.	中国 China								5 000

据 Baker and Brooks(1989)^[26], Rees et al(1995)^[45]修改 Revised after Baker and Brooks(1989)^[26], Rees et al(1995)^[45].

3 超富集植物吸收富集重金属的机理

有关超富集植物吸收富集重金属的机理仍不清楚。在重金属胁迫下,植物根系分泌的低分子量有机酸如柠檬酸、苹果酸可与重金属结合,降低重金属对植物的毒性,促进植物对重金属的吸收。Shen^[17]发现超富集植物 *Thlaspi caerulescens* (遏蓝菜属) 和非超富集植物 *Thlaspi ochroleucum* 地上部柠檬酸和苹果酸含量相近,不同浓度的 Zn 处理对两种植物的苹果酸和柠檬酸含量影响也不显著,因此并不能认为柠檬酸和苹果酸在超富集植物中扮演特殊的作用。Kramer^[18]发现超富集植物 *T. caerulescens* 与组氨酸具有特殊的关系,营养液培养显示当植物吸收富集重金属较高时,其木质素中的组氨酸含量也高;而在营养液中加入组氨酸也能显著促进植物对重金属的吸收富集。有关超富集植物的耐性与富集机理则研究较多,结论普遍认为超富集植物的耐性与超富集由植物本身不同的生理机制所控制。超富集植物超量吸收富集重金属与其根部细胞具有与重金属较多的结合位点有关,而耐性则是由于重金属在植物细胞中分布的区域化相关,即重金属存在与细胞壁和液泡中,从而降低其毒性^[19]。

表3 Ni的主要超富集植物的种属与分布

Table 3 Ni hyperaccumulators and their distribution in the world

属名 Genus	种数 Number of species	主要分布地区 Mainly distribution area	植物重金属含量范围($\mu\text{g/g}$) Range of heavy metal content in plant shoots or leaves
庭荠属 <i>Alyssum</i>	48	安纳托利亚(土耳其)、塞浦路斯、意大利 Anatolia (Turkey), Cyprus, Italy	1 280 ~ 29 400
遏蓝菜属 <i>Thlaspi</i>	33	中欧、希腊、美国 Central Europe, Greece, U SA	2 000 ~ 31 000
柞木属 <i>Xylostea</i>	11	新喀里多尼亚(大洋洲) New Caledonia (Oceania)	1 000 ~ 3 750
叶下珠属 <i>Phyllanthus</i>	10	新喀里多尼亚 New Caledonia	1 180 ~ 38 100
苞复花属 <i>Geissois</i>	7	新喀里多尼亚 New Caledonia	1 000 ~ 34 000
天料木属 <i>Hanaliu</i>	7	新喀里多尼亚 New Caledonia	1 157 ~ 14 500
鲍缪勒氏属 <i>Bormiellera</i>	6	希腊、安纳托利亚、阿尔巴尼亚 Greece, Anatolia, Albania	12 000 ~ 31 200
鼠鞭草属 <i>Hybanthus</i>	5	澳大利亚、新喀里多尼亚 Australia, New Caledonia	3 000 ~ 25 500
其他 31 个属	38	新喀里多尼亚、中欧、美国 New Caledonia, Central Europe, U SA	1 000 ~ 47 500

据 Baker (1989)^[26] 整理。After Baker (1989)^[26]。

4 超富集植物吸收富集重金属的特征

目前发现的超富集植物均为在野外矿山开采或冶炼区发现的品种,一般土壤介质中的重金属含量较高,尽管植物地上部含量可以达到一定高的含量,但其生物富集系数(植物地上部重金属含量与土壤重金属含量的比值)并不大,大多数文献报道也都忽略了对生物富集系数的探讨。实际上,通过一些野生植物品种的人工驯化栽培,配合添加土壤改良剂,可显著提高植物对重金属的吸收富集能力,这些人工驯化成功的植物也可以称为超富集植物。因此,应特别注意对野外发现的一些重金属耐性强、生长快、生物量大并有一定的重金属富集能力植物的筛选、引种培育和综合试验工作,而不能仅仅把范围缩小在少数富集能力特别高,但往往生物量都很小的一些植物上。

目前的植物修复试验基本上还处于试验摸索阶段,大规模的工程应用较少。试验研究主要分为营养液培养试验和盆栽试验。

Brown 等^[20]以 7 组系列 Zn/Cd 浓度处理 *T. careulesences* (Zn 超富集植物)、*Silene vulgaris* (蝇子草, Zn 指示植物) 和 *Lycopersicon lycopersicum* L. (番茄, 非耐 Zn 植物), 结果 *L. lycopersicum* L. 在 $3\ 16\ \mu\text{mol/L Zn} + 0\ 063\ \mu\text{mol/L Cd}$ 处理时生长就受到严重影响, *S. vulgaris* 在 $1000\ \mu\text{mol/L Zn} + 20\ \mu\text{mol/L Cd}$ 处理时出现枯萎, 而 *T. careulesences* 则分别在 $10\ 000\ \mu\text{mol/L Zn}$ 和 $200\ \mu\text{mol/L Cd}$ 时也未曾出现生长停止的现象, 表明 *T. careulesences* 对 Zn 有较强的耐性。Shen 等^[17]发现溶液培养的 *T. careulesences* 地上部最大可吸收 $28\ 000\ \mu\text{g/g Zn}$ (干重), 溶液 Zn 处理浓度达 $1\ 000\ \mu\text{mol/L}$ 时未出现明显的受害症状, 而对照的同属植物 *T. ochroleucum* 在 $500\ \mu\text{mol/L}$ 时即出现明显损伤。研究还发现, 超富集植物 *T. careulesences* 的生长需要富 Zn 的土壤环境, 其生长的土壤溶液 Zn^{2+} 浓度是非超富集植物的 10 000 倍^[21]。

Morrison 等^[22]发现 *Alyssum* (庭荠属) 中的 11 种植物对 Ni 的吸收富集与泥炭培养基中 Ni 浓度相关性不大, 在 $30\sim 10\ 000\ \mu\text{g/g Ni}$ 处理条件下, 6 周后有 9 种植物叶片中 Ni 都达到了 $10\ 000\ \mu\text{g/g}$ (干重), 显示植物对 Ni 的主动吸收特征。Shen^[17]的研究结果也表明, 即使是在 $1\ \mu\text{mol/L}$ 处理时, *T. careulesences* 地上部富集的 Zn 比一般植物仍高达 10 倍, 而一般植物在这种浓度下已出现明显的缺 Zn 症状, 表明超富集植物对重金属具有特殊的吸收富集能力。

T. careulesences 的盆栽试验结果表明在几个不同 pH 处理条件下, 除 pH 5.06 处理的农田土壤之外, 其他情况下污染土壤上 *T. careulesences* 吸收的 Zn、Cd 均远高于轻污染的花园土壤和对照农田清洁土壤, 最高分别达 $18\ 455\ \text{Zn}$ 和 $1\ 000\ \mu\text{g/g Cd}$ (叶片干重), 植物对重金属的浓缩指数也显示 *T. careulesences* 比 *S. vulgaris* 和 *L. lycopersicum* L. 有更强的将重金属吸收运移到植物地上部的能力^[23]。

超富集植物对不同重金属的吸收富集能力不同。Reeves 和 Baker^[24]研究了由蛇纹岩(富 Zn)和石灰岩发育的土壤(不富 Zn)上生长的植物 *T. careulesences*, 不同土壤上 *T. careulesences* 富集重金属的能力均为 $\text{Zn} > \text{Cd} \geq \text{Pb}$ 。植物将重金属从根部运移到地上部的能力对不同重金属也不相同。*T. careulesences* 的 S/R 值对于 Co、Mn、Ni、Zn ≥ 1 , 对于 Ag、Cd、Mo 为 0.2~0.5, 对于 Al、Cr、Cu、Fe、Pb 则为 0.009~0.08^[25], 显示 *T. careulesences* 对 Co、Mn、Ni、Zn 具有较强的吸收富集能力。

5 影响超富集植物吸收富集重金属因素

5.1 物理化学因素

不同土壤类型上的超富集植物吸收 Ni 能力不同, 以发育于砂岩、花岗岩土壤上的植物低, 而以发育于超基性岩土壤上的植物高^[26]。通常, 植物根系周围土壤溶液中的重金属含量是影响重金属生物有效性的主要因素之一, 而其含量大小受重金属在土壤中的吸附-解吸、沉淀-溶解和氧化-还原平衡的控制。土壤 pH 变化显著影响耐重金属植物对重金属的吸收, 在不同 pH 处理的受 Zn、Cd 污染的花园和山地土壤盆栽试验中, *T. careulesences* 吸收的 Zn、Cd 量的大小随土壤 pH 下降而增加^[23]。

5.2 营养元素的影响

一般植物受重金属胁迫可导致对 Ca、P 吸收的抑制^[24], 野外发现的重金属耐性植物或超富集植物具有耐重金属、耐贫瘠、耐干旱等多种特征。作者发现的超富集蕨类植物对 As 有异常强的吸收富集能力, 这是传统植物营养与植物生理学所无法解释的现象, 因此从理论上开展这种植物对砷的吸收富集机理研究具有重要意义。As 和 P 具有相似的化学特性, 研究表明 As 干扰植物对 P 的代谢途径, As 胁迫可导致植物对 P 吸收通道的关闭^[27~30]。杨居荣发现耐 Cd 的甜菜与胡萝卜在对营养元素的吸收上呈现两种不同的特征, 即耐 Cd 的甜菜往往对 Ca、Mg、Zn、Fe 元素的吸收量大, 而胡萝卜则相反^[31]。研究发现重金属 Cd 能与植物蛋白质结合形成特殊的 Cd 蛋白, 据此提出了基于肽重金属结合相的植物吸收运移与富集重金属的假说^[32], 但这种假说还有待于实验的验证; 同时, 迄今为止尚未发现其他重金属元素蛋白, 因此这种假说的普适性也有待于检验。

5.3 重金属形态的影响

重金属的吸附-解吸、溶解-沉淀和氧化-还原平衡决定着土壤溶液中重金属的含量变化。在一定条件下, 呈吸附态和沉淀态的重金属可以在土壤水溶液之间相互交换, 一般降低 pH, 可使呈吸附态的重金属解吸释放进入土壤溶液中, 从而增加植物对重金属的吸收^[11]。但 Harter^[33]指出, Pb、Ni、Cu 在土壤中常以专

性吸附态形式存在,而 Zn 则较多以非专性吸附态存在,因此,降低 pH 并不能有效地增加植物对 Pb 、 Ni 、 Cu 的吸收。增加土壤有机质含量也可使部分呈沉淀状态的重金属与柠檬酸和苹果酸络合,转化为有机吸附态被植物吸收利用。类金属 As 的情况则完全相反, As 在土壤中以阴离子形式存在,增加 pH 将使土壤颗粒表面的负电荷增多,从而减弱 As 在土壤颗粒上的吸附作用,增大土壤溶液中的 As 含量,植物对 As 的吸收增加^[34, 35]。

对于不同重金属,植物吸收与土壤重金属总量及可交换态含量有不同的相关关系。较高和较低浓度下, *T. caerulea* 吸收 Zn 与土壤总量及交换态 Zn 量均不相关;吸收 Pb 的量与总 Pb 量呈正相关,与交换态 Pb 量不相关;而吸收 Cd 的量与总量及可交换态均呈正相关^[21]。植物对 Cd 的敏感性可能是由于 Cd 在土壤中主要以可交换态及有机质结合态形式存在,其结合力较弱,因而 Cd 容易释放到土壤溶液中,从而增加了土壤中的生物有效态 Cd 的含量^[36]。

6 植物修复技术的应用

广义上的植物修复是指利用植物(包括草、灌、乔)去除污染土壤和废水中重金属的技术,有时候又称生物修复或绿色修复。植物修复包括植物萃取^[37]、根际过滤^[38]、植物挥发^[39]和植物固定^[32]。其中最具有前景的是植物萃取,亦即通常所指的植物修复。

Baker^[15]等在英国洛桑试验站首次以田间试验研究了在 Zn 污染土壤($440\mu\text{g/g}$)栽种不同超富集植物和非超富集植物对土壤 Zn 的吸收清除效果。结果表明,超富集植物 *T. caerulea* 富集 Zn 是非超富集植物 *Raphanus sativus*(萝卜)的 150 倍,富集 Cd 相应则是 10 倍。其每年从土壤中吸收的 Zn 量为 $30\text{kg}/\text{hm}^2$,是欧盟^[40]允许年输入量的 2 倍,而非超富集植物萝卜则仅能清除其 1% 的量。

Baker 同时也发现,尽管 *T. caerulea* 吸收重金属能力很强,但由于其生物量小,需 13~ 14a 的连续栽种才能将试验地的重金属含量修复到欧共体规定的临界标准($300\mu\text{g/g}$)。而 *B. juncea*(印度芥菜)对重金属的富集能力虽不如 *T. caerulea*,但其生物量至少是它的 20 倍,因而显示 *B. juncea* 在植物修复上具有更大的潜力。Robinson 等^[41]在法国南部利用盆栽和田间试验结合进一步研究了 *T. caerulea* 修复污染土地的潜力,通过施肥, *Thlaspi caerulescens* 的生物量增加了两倍,而其地上部 Zn 、 Cd 含量没有下降,但修复 $< 500\mu\text{g/g}$ Zn 污染土地仍需 8.13a,因此,继续寻找开发生物量大、富集重金属能力强的超富集植物是植物修复技术走向工程应用的首要任务。

在中国,已开展了利用耐重金属植物进行矿山尾矿地植被恢复的实验研究,确定了一些矿山尾矿地影响植物定居的主要因素,并建立了植被重建技术^[42, 43]。对污染农田的生物治理方法也进行了深入的研究^[44]。但尚未涉及到超富集植物应用与污染土地植物修复技术的系统性研究。

参考文献

- [1] 王先进主编 中国权威人士论中国怎样养活养好中国人. 北京: 中国财经出版社, 1997. 203~ 204
- [2] 中国科学技术信息研究所, 国家科委高技术计划司 中国人能够养活自己 环球科技与经济快报, 1995, 17.
- [3] 高 梁 土壤污染及其防治措施 农业环境保护, 1992, 11(6): 272~ 273
- [4] 中国农业持续发展和综合生产力研究组 中国农业持续发展和综合生产力研究 济南: 山东科技出版社, 1995. 306~ 307.
- [5] 谢正苗, 黄昌勇, 徐建民 土壤污染化学. 见: 黄昌勇主编, 土壤化学研究与应用 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 168~ 199.
- [6] 夏星辉, 陈静生 土壤重金属污染治理方法研究进展 环境科学, 1997, (3): 72~ 76
- [7] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. *CAB international*. 1989, 1~ 2
- [8] Baker A J M, Proctor J. The influence of cadmium, copper, lead and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in the British Isles. *Plant System Evolution*. 1990, 173: 91~ 108
- [9] Ingrouille M J, Smirnoff N. *Thlaspi caerulescens* J. & C. presl (T. alpestre L.) in Britain. *New Phytol*, 1986, 102: 219~ 233
- [10] Brooks R R. Biological methods of prospecting for minerals. John Wiley: New York. 1983
- [11] 谢学锦, 徐邦梁 铜矿指示植物海州香薷 地质学报, 1952/3, 32(4).
- [12] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*. 1977, 7: 49~ 57.
- [13] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: Parr J. F. eds. *Land Treatment of Hazardous Wastes*. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. 1983. 50~ 76
- [14] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa

- within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire. *Plant and Soil* 1983, **73**: 377~ 385
- [15] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, *et al*. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resource, Conservation and Recycling*, 1994, **11**: 41~ 49
- [16] Tang S R, Wilke B M and 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
- [17] Shen Z G, Zhao F J, McGrath S P. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant Cell and Environment*, 1997, **20**: 898~ 906
- [18] Kramer U, Janet D, Cotter-Howells, *et al*. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature* 1996, **379**: 635~ 638
- [19] Chaney R L, Malik M, Li Yin, *et al*. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*. 1997, **8**: 279~ 284
- [20] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, *et al*. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Sci Soc Am. J.* 1995, **59**: 125~ 133
- [21] Li Y M, Chaney R L, Angle J S, *et al*. Genotypic differences in zinc and cadmium hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* [abstract]. *Agronomy Abstracts*. 1996, 27.
- [22] Morrison R S, Brooks R R and Reeves R D. Nickel uptake by *Alyssum* species. *Plant Science Letters* 1980, **17**: 451~ 457
- [23] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, *et al*. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium-contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*. 1994, **23**: 1151~ 1157
- [24] Reeves R D and Baker A J M. Studies on metal uptake by plants from serpentine and non-serpentine populations of *Thlaspi goesingense* Halacsy (Cruciferae). *New Phytol* 1984, **98**: 191~ 204
- [25] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytol* 1994, **127**: 61~ 68
- [26] Baker A J M. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1989, **1**: 81~ 126
- [27] Meharg A A and McNair M R. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. *Journal of Experimental Botany*. 1992, **43**(249): 519~ 524
- [28] Meharg A A, Bailey J, Bredmore K, *et al*. Biomass allocation, phosphorus nutrition and vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in clones of Yorkshire Fog, *Holcus lanatus* L. (Poaceae) that differ in their phosphate uptake kinetics and tolerance to arsenate. *Plant and Soil* 1994, **160**: 11~ 20
- [29] Meharg A A and McNair M R. Relationship between plant phosphate status and the kinetics of arsenate influx in clones of *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. that differ in their tolerance to arsenate. *Plant and Soil* 1994, **162**: 99~ 106
- [30] Meharg A A, Naylor J and McNair M R. Phosphorus nutrition of arsenate-tolerant and nontolerant phenotypes of velvetgrass. *J Environ Qual* 1994, **23**: 234~ 238
- [31] 杨居荣, 久保井 镉、铜抗性植物细胞株的增长及元素吸收特性. *应用生态学报* 1992, **3**: 273~ 279
- [32] Salt D E, Blaylock M, Kumar P B A N, *et al*. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Bio/Technology*. 1995, **13**: 468~ 474
- [33] Harter D R. Effect of Soil pH on Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Nickel. *Soil Sci Soc Am. J.* 1983, **47**: 47~ 51.
- [34] Onken B M and Adriano D C. Arsenic availability in soil with time under saturated and subsaturated conditions. *Soil Sci Am. J.*, 1997, **61**: 746~ 752
- [35] Onken B M and Hossnar L R. Determination of arsenic species in soil solution under flooded conditions. *Soil Sci Am. J.*, 1996, **60**: 1385~ 1392
- [36] Ramos L, Hernandez L M, Gonzalez M J. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park. *J Environ Qual*, 1994, **23**: 50~ 57
- [37] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, *et al*. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology*. 1995, **29**: 1232~ 1238
- [38] Dushenkov V, Kumar P B A, Motto H, *et al*. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology*. 1995, **29**: 1239~ 1245
- [39] Watanabe M E. Phytoremediation on the brink commercialization. *Environmental Science and Technology/News* 1997, **31**: 182A~ 186A.
- [40] CEC (Commission of the European Communities) Council directive of 12 Jun 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. *Official Journal of the European Communities* 1986, L 181(86/278/EEC), 6~ 12
- [41] Robinson R H, Leblanc M, Daniel P, *et al*. The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils. *Plant and Soil*, 1998, **203**: 47~ 56
- [42] 束文圣, 蓝崇玉, 张志权. 凡口铅锌矿影响植物定居的主要因素分析. *应用生态学报* 1997, **8**(3): 314~ 318
- [43] 张志权, 蓝崇玉. 铅锌矿尾矿场植被重建的生态学研究. I 尾矿对种子萌发的影响. *应用生态学报* 1994, **5**(1): 52~ 56
- [44] 王凯荣, 陈朝明, 龚惠群. 镉污染农田农业生态整治与安全高效利用模式. *中国环境科学* 1998, **18**(2): 97~ 101.
- [45] Reeves R D, Baker A J M, Brooks R R. Abnormal accumulation of trace metals by plants. *Mining Environmental Management*, 1995, **9**: 4~ 8