农业环境科学学报 2009,28(6):1085-1091

Journal of Agro-Environment Science

矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展

仇荣亮 1，仇 浩 1，雷 梅 2，叶志鸿 3

1.中山大学环境科学与工程学院，广东 广州 510275；2.中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；3.中山大学生命科学 学院，广东 广州 510275）

摘 要：本文阐述了矿区多金属污染土壤植物修复的研究现状及其修复实践。结合国内外多金属污染土壤修复技术与机理研究动 态，指出当前相关领域研究中存在的主要问题及未来的研究方向；同时考虑矿山及周边地区重金属污染土壤的不同特点，提出今后 的重点是开展分别以植物稳定和植物提取为核心的植物-微生物-化学联合修复机理研究及修复体系建设。

关键词：矿区；土壤重金属污染；植物修复；联合修复

中图分类号：X53 文献标志码:A 文章编号：1672-2043（2009）06- 1085-07

Advances in Research on Remediation of Multi-metal Contaminated Soil in Mine and Surrounding Area

QIU Rong-liang1, QIU Hao1, LEI Mei2, YE Zhi-hong3

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Institute of Geographical Sci－ ences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Life Science, Sun Yat-Sen Uni － versity, Guangzhou 510275, China)

Abstract： Multi -metal pollution in mine and surrounding area has become one of the most serious environmental problems. The research progress and field practice of phytoremediation of multi-metal contaminated soil were introduced in this paper. On the grounds of the domes － tic and overseas research trends of the remediation technology and mechanism, key issues on current research as well as the future study on remediation of multi -metal polluted soil were discussed. This paper also pointed out that mechanism study and system establishment for plant-microbe-chemistry integrated remediation technology (based on phytoextraction and phytostabilization respectively)was imperatively needed in view of the diverse characteristics of heavy metal contaminated soils in mine and surrounding area.

Keywords： mine and surrounding area ；soil heavy metal pollution ；phytoremediation ；integrated remediation

矿产资源的开发在为国家提供重要战略资源的 同时也造成了环境污染、地质灾害、生态破坏等严重 后果。矿冶活动是重金属污染的主要来源［1-2］，我国因 采矿累计占用、破坏土地达743万hm2,且每年仍以4 万 hm2 的速度递增［3］，而全国受矿业影响的土地复垦 率却只有 13.3％［4］,且其中主要是煤矿山相对较高的 复垦率贡献,而金属矿山的复垦率相对较低［5］,这与发 达国家75％的复垦率相差甚远。此外,矿产资源的开 发利用所造成的土壤重金属污染由地球化学链、食物 链进入生物体［1,6］,给矿山及其周边地区居民的食品安 全、生态安全甚至社会和谐带来严重隐患,因此对矿 区污染土壤的生态恢复就显得十分重要。

收稿日期：2009-04-07

基金项目：国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目（U0833004

作者简介：仇荣亮（1967—）,男,博士,教授,从事水土环境污染修复方

面的研究工作。E-mail: [eesqrl@mail.sysu.edu.cn](mailto:eesqrl@mail.sysu.edu.cn)

我国矿产资源的特点是总量丰富,但贫矿多,富 矿少,成分复杂的共（伴）生矿多。以广东省境内大型 矿山为例,大宝山多金属矿、凡口铅锌矿、云浮硫铁矿 等含有多种多样的伴生元素，如Pb、Cd、Cu、Zn、As 等。因此无论是重金属污染较严重的矿山废弃地,还 是污染程度相对较低的下游农业污染土壤，往往表现 为多种重金属的复合污染。由于复合污染土壤重金属 之间通常发生交互作用,给污染土壤的应用带来了困 难。因此基于矿山和周边地区多金属污染土壤的不同 特点开展联合修复技术和机理研究不仅是当前国际 资源与环境研究领域的热点问题，也是我国实施可持 续发展战略应优先关注的问题之一。

1. 矿区多金属污染土壤植物修复技术与机理 研究动态

在矿山和矿业废弃地修复的管理和研究方面，国

外起步较早，美国在 1977 年就通过了“地表采矿控制 和修复法案”，1990 年通过了“废弃矿山修复法案”［8-9］。 与传统的化学和物理治理技术相比，植物修复（phy­toremediation） 具有经济、对环境友好、能保持土壤生 产力和无二次污染等优点，近年来一直是国内外重金 属污染矿山修复的研究热点。植物修复技术是利用自 然生长植物或者遗传工程培育植物体系来吸收、挥发 或稳定土壤环境污染物的技术总称。重金属污染土壤 的植物修复技术包括植物提取技术（采用重金属超富 集植物将土壤中的重金属富集到植物地上部分，然后 采用常规农业方法收获后进一步处理） 、 植物稳定技 术（利用植物根系代谢活动将土壤活性重金属沉淀在 土壤中或将土壤中的重金属吸收富集在植物根部，从 而降低重金属在土壤中的迁移性能，减少其环境危 害）和植物挥发技术（利用植物从土壤中吸收挥发性 重金属元素，然后通过叶片挥发到大气中）等。

植物提取技术因其治理效果比较彻底且没有负 面影响而为众多研究者关注，自Brooks提出超富集 植物（hyperaccumulator）的概念［10］, Chaney提出利用超 富集植物清除土壤中重金属污染的思想以来［11］，植物 提取修复技术逐步成为国际土壤重金属污染修复的 热点研究领域。作为一种“绿色”的污染治理手段，该 方法在矿山周边中低污染农田土壤修复等方面具有 广泛的应用前景。

与植物提取技术相反，植物稳定技术是将重金属 元素吸收积累在根部、吸附在根表面、沉淀在根区的 技术。植物稳定技术由于能减少地表径流侵蚀、风蚀 等造成的重金属元素的迁移扩散，特别适用于污染程 度较高且植物提取技术难以成功实施的矿业废弃地 等重金属污染土壤，可以在污染源头减少矿山污染的 危害。

* 1. 矿区周边重金属中低污染土壤的植物提取

植物提取技术的研究与应用首先取决于超富集 植物的发现和筛选。目前，世界上共发现超富集植物 有 400 多种［12］，但通常只能对一种重金属元素表现出 富集能力，仅少部分可以超富集吸收两种或两种以上 的重金属问。近年来我国科学家陆续发现了 Zn、Cd、 As、Mn 的超富集植物多种［7，14-20］，但能用于复合污染 土壤修复的多金属超富集植物尚不多见。

目前，国内外关于超富集植物吸收重金属的机理 研究取得了一定进展，主要涉及以下过程：（1）超富集 植物根系对重金属的活化。一般认为超富集植物的根 系可以分泌质子和其他特异性小分子有机物，且根际 分泌物的种类和性质会因为重金属类型与浓度的变 化会改变［21］，从而促进植物对土壤中特定重金属元素 的活化和吸收。但也有研究发现超富集植物的根际酸 度与非富集植物没有显著差异，可能在土壤重金属的 活化过程中根系分泌物的作用有限。（2）植物体内重 金属的赋存形态与吸收转运过程。研究发现,Cd超富 集植物根系中的 Cd 多数以硫配位体形式存在，与谷 胱甘肽以及植物螯合肽（PCS结合,木质部汁液中Cd 多以小分子有机酸类型的氧配位体或氮配位体等形 式输送，一旦到达地上叶组织后，又主要以硫配位体 形态存在,然后由ATP酶转移到液泡中。但相比较而 言， Zn、Ni 的富集机理与 Cd 完全不同，在植物根系 和地上部分 Zn、Ni 均多以氧或者氮的配位体如有机 酸［22（］ 柠檬酸、苹果酸或草酸）与氨基酸［23（］ 组氨酸、半 胱氨酸）等螯合形态存在，其输送过程也主要以水合 离子或者有机酸的形态为主。因此不同类型重金属离 子的吸收与传输机理可能存在明显差异［24-26］。（3）植物 体内重金属的储存和解毒过程。超富集植物将体内大 部分重金属储存于细胞壁中，或通过非生理活动区的 区室化来减少金属对其的毒性和代谢影响。 研究表 明， Zn 超富集植物长柔毛委陵菜各部位的 Pb、Zn、Cd 主要富集在细胞壁和以液泡为主的可溶组分，随着多 金属处理浓度的增加，细胞壁对 Pb、Zn、Cd 的固持能 力增强，活性较强的金属结合形态减少，这可能是植 物在亚细胞水平上的耐性机制［27-28］。植物螯合素（PCS 也被广泛认为是植物对重金属解毒的重要机制［29］，但 近来发现超富集植物在除Cd外重金属胁迫下诱导 的 PCs 有限，因此它可能并不是重金属耐性的主要因 素［30］。 此外，还有报道研究植物抗氧化酶系统以及氮 素代谢过程在应对重金属胁迫方面的作用［31-32］。 由此 可见，土壤重金属的活化过程以及超富集植物对重金 属的吸收、迁移和储存解毒过程均存在重金属离子的 专一性和植物种类的特殊性，且与单金属离子相比， 多金属复合污染土壤重金属的活化与吸收过程可能 因为重金属之间的相互作用而更为复杂。 因此，对多 金属超富集植物的植物吸收与富集机理的研究将有 助于了解不同重金属离子吸收、 积累和忍耐机理，同 时可以将这项技术更成功地应用于复合污染土壤的 生物修复。

* 1. 矿区重金属高污染土壤的植物稳定 植被的重建被公认是固定矿业废弃物,减少污染 物对周边环境的污染及美化环境的最好方法 ［33-34］，但 矿业废弃地对植物来讲是一个非常恶劣的生长环境，

第 2 8 卷第 6 期 因为它存在着许多限制生长的因素，尤其是高浓度的 残留重金属、极端酸性、大量营养元素(如N、P的缺 乏和极差的土质结构［4，35-36］。 这些特征导致许多矿山 废弃地)即使是经过多年的废弃之后，绝大部分还是 缺乏自然植被的生长［33，36］。

现行的矿业废弃地的生态修复主要是强调废弃 地上植被的重建(revegetation)，并通过植物稳定技术 减少废弃地中重金属对周边环境的污染［5，34］。 为了达 到使植物能生长并建立在废弃地的目的，现行的主要 措施包括：(1)基质改良，主要利用一些含钙镁的碱性 物质、富含有机物的工业副产品及废弃物(如煤灰、污 泥)等改善基质的理化性状和营养条件，降低重金属 的生物毒性，通过“以废治废”完成矿业废弃地的植被 重建［36］；(2)隔离层的使用，是利用开矿时所产生的碎 石作为表土与废弃地之间的隔离层，以阻碍底质中重 金属的向上迁移；(3)利用重金属耐性植物或一些本 土草种，来进行植被重建。 经过基质的改良结合耐性 植物种的利用，已成功地对一些矿业废弃地进行了修 复［33，35］。但目前的矿业废弃地(尤其是重金属矿业废弃 地)的植被恢复/重建无论理论研究还是实践上都存 在不少要急需解决的问题。如：(1)耐性植物的种子资 源非常有限，目前世界上仅在温带地区能提供商业性 的金属耐性的草种；(2)金属耐性植物往往只是对专 一金属具有耐性；(3)由于植物金属耐性种群的缺乏 和相关修复实践的限制，植物对多金属复合污染的耐 性机理和植物固定机理尚缺少系统的研究。以上的因 素严重限制了多金属矿业废弃地的植物稳定技术的 大面积利用［5，33］。

1. 植物修复技术的联合强化技术研究动态 2.1 化学强化植物修复技术与机理

伴生硫化物的金属矿业废弃地除不良的物理结 构和极端贫瘠影响植物定居外，其重金属元素含量过 高和极端酸性条件下重金属元素高生物有效性会直 接抑制种子的萌发，成为影响植物修复的主要限制因 素［37］。 因此除必要的基质改良措施外，通过添加化学 固定剂降低重金属的生物有效性成为化学强化修复 的重要手段之一［38-43］。 化学固定剂对重金属离子的固 定过程主要包括：(1)固定剂表面对重金属离子的离 子交换或者配位吸附作用［44］；(2)与重金属通过溶解- 沉淀作用生成溶解度很低的无机盐类［45］；(3)在土壤 矿物或者化学固定剂表面先生成无机盐沉淀相，重金 属离子再扩散进入矿物的晶格［46-47］。 但不同化学固定

1087 剂对不同重金属固定效果有很大差异, 同时固定机理 也可能同时存在多种反应过程，并受到共存离子、环 境pH、土壤矿物等因素的影响。以羟基磷灰石为例, 其对铅离子以外的重金属往往难以完全固定, 而固定 产物羟基磷酸铅的形成过程则多表现为配位吸附过 程和沉淀溶解过程交叉的复杂动态变化过程，在无定 型沉淀Caio-xPbx(PO)6 (OH 2的不断溶解和重新晶化 过程中铅相对含量逐渐增加而被固定［48］。 目前，对土 壤重金属离子的固定机理多针对特定体系展开，而对 于矿山多金属污染环境体系而言，由于不同类型的重 金属表面化学反应过程和溶液化学反应参数不同，且 可能存在多金属之间交互作用影响，因此化学固定剂 对复合污染体系中不同类型重金属的固定机理与效 果可能也存在很大差异。

而对于植物提取技术而言，实际应用中常通过化 学螯合剂来活化土壤重金属以强化植物提取修复效 果。 常用的化学螯合剂包括人工合成的 EDTA、 HEDTA、NTA、EDDS、EGTA、CDTA、EDDHA 等和一些 小分子有机酸如柠檬酸、苹果酸、丙二酸、乙酸、组氨 酸等［49-50］。 其中 EDTA 等人工合成的螯合剂因具有较 强的活化能力而被广泛应用。但近年来也有研究发现 一些天然植物性有机酸如没食子酸、酢浆草酸等提高 土壤重金属的生物可利用态效果与EDTA相当，而对 重金属 Cd、Zn、Ni 的活化效果甚至比 EDTA 好［51］。 化 学螯合剂的活化过程可能包括一种或多种机制：(1) 酸化导致矿物表面电荷数量和种类发生改变［52］；(2) 金属离子交换吸附解吸过程；(3)通过还原剂降低金 属价态从而改变金属活性［53］；(4)金属离子的螯合与 络合过程［54-55］；(5)金属化合物或矿物成份(如铁锰氧 化物等)的溶解［56-57］等。 值得关注的是，化学强化措施 导致的土壤条件改变同时会影响重金属离子赋存状 态和植物对复合污染体系中不同金属离子吸收能力 的差异, 如 Li 等意外发现相对较低的 pH 值降低了两 种Alyssum植物对Ni的吸收，但Co的吸收有明显提 高，而相对较高的pH值反而有利于Ni的提取，植物 生长也得到了促进［29］。 同时不同类型金属的植物吸收 机理可能并不都属于游离离子活度模式［58］，螯合物整 体吸收很可能是化学强化吸取的主导机制。

尽管化学固定或活化剂对重金属在土壤中的吸 附、 固定或活化等环境化学行为得到了广泛认识，但 其反应机理尤其是多金属污染土壤条件下化学固定 或活化过程与机理尚未完全阐明。 因此,针对不同化 学强化措施对多金属污染土壤重金属离子活化、固定

及其与植物耐性/吸收过程的关系研究将有助于提高 植物修复的效率。

1. 微生物强化植物修复技术与机理 面对矿山废弃地及其周边污染土壤这样特殊的 生境，单一的植物修复技术显然无法达到生态修复的 目的。越来越多的证据表明土壤微生物（如固氮菌、溶 磷菌、菌根菌等）在重金属污染矿山废弃地的植物修 复过程中起着重要的作用［59］，其作用主要表现在以下 几个方面：

（1）促进植物生长和营养吸收：植物根际存在着 —些促生根际细菌（Plant Growth Promoting Rhizobac- teria,PGPR，它们可以通过直接或间接的方式促进 植物生长，防治病原菌引起的植物病害［60-61］。至今已发 现包括荧光假单孢菌、芽孢杆菌、根瘤菌、沙雷氏属等 20 多个种属的根际微生物可通过增加植物根系的营 养吸收和改善土壤的结构而提高植物在矿业废弃地 上的定居能力。其促进植物生长的机理主要表现在能 够合成铁载体（SideroporeS和吲哚乙酸（IAA、抑制 乙烯的产生以及刺激营养元素和水分的吸收来增加 植物的生物量等［62］。

（2 通过固定重金属提高植物耐性和定居能力： 一些研究结果显示生长在金属污染地的菌根真菌已 进化成金属忍耐型，植物与菌根真菌对重金属的耐性 是共同进化的，经具金属耐性的菌根真菌侵染后，显 著提高了植物的金属耐性［63-64］。这些根际微生物也可 能通过菌丝体等与金属结合，保护根系免受金属的伤 害［65］，并减少植物对金属从地下部向地上部的转移， 从而提高植物的定居能力［33，59］。微生物还会通过代谢 产物直接或间接与重金属形成沉淀等方式来降低植 物受到的毒性。如柠檬酸杆菌可在细胞表面超量产生 磷酸酶，分解有机磷产生磷酸盐,进而和重金属形成 沉淀［66］。近期研究也发现一种可快速还原硫酸盐的柠 檬酸杆菌*（Citrobacter* sp.strain DM®，其对重金属有 良好的沉淀效果，具有很好的重金属生物沉淀修复潜 力的。而微生物生长过程中分泌的胞外聚合物（extra- cellular polymeric substances， EPS 则一方面具有较多 的糖醛酸等结合位，与金属有极强的螯合能力，另一 方面,EPS中的酰胺、羧基、羟基和脂类等基团与重金 属也有很强的络合能力，有助于Cu、Zn、Cd等重金属 的生物沉淀 。

（3 提高重金属有效性,促进植物吸收：在重金属 污染的土壤环境中存在一些耐金属胁迫的微生物种 群［68］，可通过分泌金属螯合物如生物表面活化剂、高 铁载体、有机酸、氨基酸等酸化和溶解金属-磷酸化 合物、 改变土壤氧化还原电位等途径影响土壤中重 金属的移动性和植物有效性［69］，促进植物对重金属的 吸收和积累，从而提高超富集植物修复污染土壤的效 率［70］。

虽然上述的一些实验结果显示土壤微生物如菌 根真菌、细菌（如固氮菌 在重金属污染的环境条件下 能提高植物重金属耐性,减少金属对植物的毒害和帮 助植物获得营养方面发挥着重要作用，但是目前鲜有 在野外条件下研究土壤微生物（真菌、细菌 在重金属 污染矿业废弃地植被重建和维持中的真正作用，并且 在废弃地植被重建过程中微生物对不同类型金属活 化与固定机理、 影响机制及其与植物吸收/耐性之间 的关系也鲜有研究。

1. 矿区多金属污染土壤修复实践

我国对于矿山废弃地的植物修复研究起步于 20 世纪80年代，目前，我国在金属矿山废弃地改良方面 的研究多侧重于酸性Pb/Zn矿的植被恢复，对于碱性 Cu矿尾矿砂的改良研究也正在开展之中。在重金属 矿业废弃地生态恢复的理论与技术研究方面，中山大 学和香港浸会大学的合作研究取得了一系列成果，在 对金属矿山废弃地自然定居植被调查研究的基础上， 筛选出了一批具多金属耐性的本土植物，提出了行之 有效的基质改良方案，在植被重建和重金属植物固定 等方面取得一系列进展［3，5］。此外，安徽师范大学、浙江 大学、 中国科学院等科研机构通过对全国各地的重 金属矿山和尾矿的野外调查分析，报道了大批具有重 金属耐性的植物，北京矿冶总院在铜陵五公里铜尾 矿、 中国科学院生态环境研究中心在德兴铜尾矿的 生态恢复研究也都是矿山废弃地植被重建的代表性 工作［5］。

在植物修复领域,Chaney是国际上最早开始超 富集植物研究，并最先将其投入成功商业利用的科学 家之一，他领导的研究组和 Viridian 环境修复公司合 作，先后在美国和加拿大成功进行了 Ni污染土壤植 物修复的野外工作， 2004年在印度尼西亚的 Cd 污染 土壤修复工作也取得了成功㈤。Baker等在英国洛桑 试验站、Robinson等在法国南部利用盆栽和田间试验 研究了植物提取修复污染土地的潜力，认为超富集植 物 *Thlaspi caerulescens* 可以作为 Zn、Cd 这两种污染 金属的修复植物［72-73］。从 2000 年起我国学者陆续发现 了一批As、Zn、Cd、Mn的超富集植物，并对超富集机 理和影响植物修复的因素进行了较深入的研究。中国 科学院地理科学与资源研究所、中国科学院南京土壤 研究所、中山大学等在 863项目的支持下，在国内分 别建立了 As、Cu、Zn 等单金属污染土壤的矿山及周 边污染土壤植物修复基地。但由于超富集植物种类的 限制，在多金属污染土壤植物修复的实际应用方面还 缺乏系统性研究，2008年以来，中山大学等单位利用 所发现的多金属超富集植物［14，74］在大宝山开始了相 关的研究实践。

1. 研究展望

金属矿山及周边地区污染环境独特，由于较强酸 性、高重金属浓度和土壤物理化学性质不良等因素导 致修复困难，单一修复手段难以取得满意修复效果。 综合利用植物、微生物、化学等修复方法，开展多金属 污染土壤联合修复技术与机理研究既具有理论意义， 又可为实际应用提供科学依据。针对矿山和周边地区 多金属污染土壤的不同特点，目前在以下几方面需要 开展更为深入和系统的研究。

(1 应继续寻找和发现多金属超富集植物与耐性 植物，并以已发现植物种质资源为研究对象，加强多 金属复合污染土壤的植物提取与植物稳定修复机理 研究。同时土壤复合污染条件下对植物胁迫过程与机 理更为复杂,如何通过物理化学调控手段提高植物生 态适应能力，以指导根际土壤处理和调控技术、合理 耕作技术、基因工程技术的应用，并应用于田间实践 中，值得深入研究。

(2 对于多金属污染体系而言,不同类型重金属 在不同土壤-植物系统中的吸附，迁移转化行为，相互 作用规律以及交互作用机理研究有待深入。应分别从 化学、微生物和植物等相关方向比较不同类型重金属 固定、活化、稳定和吸收的机理，结合重金属特异性吸 收与富集机制以及多种重金属之间的交互作用，阐明 复合污染情况下超富集植物对多金属的吸收、 富集、 解毒等生理生化机制。同时涉及土壤重金属的植物 根-土-微生物界面反应的一系列基础理论问题如植 物根部吸收/耐受重金属的机制、 根际作用及根际微 生物群落的生态学和生理学特征、根际土壤环境条件 对重金属的生物有效性制约机理等也有待深入研究。

(3 在矿山及周边地区多金属污染土壤的治理实 践中，应该以生态学理论作为指导，针对矿山的具体 情况，在深入了解植物生物学特性与植物修复关系的 基础上，开展以植物稳定和植物提取为核心技术的化 学-微生物-植物联合修复体系及其修复机理研究。 从物理化学调控、 植物-微生物联合修复等角度分别 开展以植物稳定和植物提取为核心技术的化学-微生 物-植物联合修复体系及其修复机理研究，可为矿山 及周边地区多金属复合污染修复提供理论依据和技 术支撑，促进植物修复技术在我国的推广和应用。

参考文献:

1. Dudka S, Adriano D C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review [J]. Journal of Environmental Quality , 1997 , 26: 590-602.
2. Shotyk W, Weiss D, Appleby P G, et al. History of atmospheric lead de － position since 12,370 14C yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland[J]. Science, 1998, 281: 1635-1640.
3. 黄铭洪.环境污染与生态恢复[M].北京:科学出版社,2003:136-184.

Wong MH. Environmental pollution and ecological recovery[M]. Beijing:

Science Press, 2003： 136-184.

1. 黄铭洪，骆永明•矿区土地修复与生态恢复[J]. 土壤学报，2003, 40 (2 : 161-169.

Wong MH, Luo YM. Land remediation and ecological restoration of mined land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2 : 161-169.

1. Li MS. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and prac － tice[J]. Science of the Total Environment, 2006, 357: 38-53.
2. Sasaki K, Haga T, Hirajima T. Distribution and transition of heavy met － als in mine tailing dumps[J]. Materials Transactions, 2002, 43: 778­783.
3. 魏树和, 周启星 , 王 新 , 等 . 一种新发现的镉超积累植物龙葵 *(Solanum nigrum* L [J].科学通报，2004, 49(24): 2568-2573.

WEI SH, ZHOU QX, WANG X, et al. A newly-discovered Cd-hyperac － cumulator *Solanum nigrum* L[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24 : 2568-2573.

1. Surface Mining Control and Reclamation Act. USC.1021 et.seq. Public

Law, 1977, 87-95.

1. Abandoned Mine Reclamation Act. Public Law, 1990, 58-101.
2. Brooks RR, Lee J, Reeves RD, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geo*－ *chemical Exploration*, 1977, 7: 49-57.
3. Chaney RL. Plant uptake of inorganic waste constituents [R]//JF Parr, PD Marsh and JM Kla, Editors, Land treatment of hazadous wastes, Noyes Data Corporation: Park Ridge, NJ. 1983, 50-76.
4. Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumu － late metallic elements: a review of their distribution ，ecology and photo－ chemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
5. Gardea-Torresdey JL, Peralta-Videa JR, Montes M, et al. Bioaccumu － lation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: Impact on plant growth and uptake of nutritional elements[J]. *Biore*－ *source Technology*, 2004, 92(3 : 229-235.
6. Qiu RL, Fang XH, Tang YT, et al. Zinc hyperaccumulation and uptake by Potentilla griffithii Hook[J]. *International Journal of Phytoremedia* －

1090

仇荣亮等：矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展

tion, 2006,8:299-310.

1. Hong C, Tersa C. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr and Ni uptake by Helianthus annuus[J]. Chemosphere , 2001, 45: 21-28.
2. 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 集特性[J].科学通报,2002, 47(3 : 207-210.

CHEN TB, WEI ZY, HUANG ZC, et al. Arsenic hyperaccumulator Pteris vittata L. and its characterisic of accumulating arsenic [J]. Chi － nese Science Bulletin, 2002, 47(3 : 207-210.

1. 韦朝阳,陈同斌,黄泽春, 等.大叶井口边草———一种新发现的富集 砷的植物[J].生态学报,2002, 22(5 : 776-778.

WEI ZY, CHEN TB, HUANG ZC, et al. Cretan Brake(Pteris cretica L. : an Arsenic-accumulating Plant[J]. Acta Ecilogica Sinica, 2002, 22(5 : 776-778.

1. 杨肖娥，龙新宪，倪吾仲,等.东南景天(Sedum *alfredii* H) —种

新的锌超积累植物[J].科学通报,2002,47 (13 : 1003-1006.

YANG XE, LONG XX, NI WZ, et al. *Sedum alfredii* H.-A new ecotype of Zn-hyperaccumulator plant species native to China[J]. *Chinese Sci*－ *ence Bulletin*, 2002, 47: 1003-1006.

1. 刘 威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis* ---一种 新的超富集植物[J].科学通报,2003, 48(19 : 2046-2048.

LIU W, SHU WS, LAN CY. *Viola baoshanensis*, a plant that hyperac － cumulates cadmium[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19 : 2046­2048.

1. 薛生国, 陈英旭, 林 琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物--- 商陆[J].生态学报,2003, 23(5 : 935-937.

XUE SG, CHEN YX, LIN Q, et al. Phytolacca acinosa Roxb(*Phytolac* － *caceae* : A new manganese hyperaccumulator plant from Southern Chi－ na[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5 : 935-937.

1. Chen YX, Lin Q, Luo YM, et al. The role of citric acid on the phytore － mediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50 (6 : 807-811.
2. Robinson BH, Leblanc M, Petit D, et al. The potential of Thlaspi caerulescens for phytoremediation of contaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 1998, 203: 47-56.
3. Cui YS, Wang QR, Dong YT, et al. Elemental sulfur effects on Pb and Zn uptake by Indian mustard and winter wheat[J]. *Journal of Environ*－ *mental Sciences*(China , 2003, 15(6 : 836-840.
4. Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ, et al. Cadimium accumulation in popu － lations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*[J]. *New Phytol*－ *ogist*, 2000, 145: 11-20.
5. Papoyan A, Pineros M, Kochian L. The effect of plant cadmium and zinc status on root and shoot heavy metal accumulation in the heavy metal hyperaccumulator，*Thlaspi caerulescens*[J]. *New Phytologist*, 2007, 175：51-58
6. Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP. Arsenic hyperaccumulation by dif － ferent fern species[J]. *New Phytologist*, 2002, 156(1 : 27-31.
7. 周小勇, 仇荣亮, 李清飞, 等.锌对长柔毛委陵菜中铅的分布和化学 形态的影响[J]・环境科学学报,2008, 28(10 ：064-2071.

ZHOU X Y, QIU R L, LI Q F, et al. Effects of zinc on distribution and chemical form of lead in *Potentilla griff ithii* var. velutina[J]. *Acta Sci*－ *entiae Circumstantiae*, 2008, 28(10 ：2064-2071.

1. 周小勇, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等.镉和铅对长柔毛委陵菜体内锌的亚细 胞分布和化学形态的影响[J]•环境科学,2008, 29(7): 2028-2036.

ZHOU X Y, QIU R L, HU PJ, et al. Effects of cadmium and lead on subcellular distribution and chemical form of zinc in *Potentilla griffithii* var. velutina[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7 : 2028-2036.

1. Li YM, Chaney RL, Brewer EP, et al. Phytoextraction of nickel and cobalt by hyperaccumulator Alyssum species grown on nickel-contami － nated soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(7 : 1463-1468.
2. Ayoub AS, McGaw BA, Shand CA, et al. Phytoavailability of Cd and Zn in soil estimated by stable isotope exchange and chemical extraction [J]. *Plant andSoil*, 2003, 252: 291-300.
3. Qiu RL, Zhao X, Tang YT, et al. Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyperaccumulator, Arabis paniculata F [J]. *Chemosphere*, 2008, 74(1)：6-12.
4. 于方明, 仇荣亮, 周小勇, 等. 镉对超富集植物圆锥南芥氮素代谢的 影响研究[J]・土壤学报,2008, 45(3 : 497-502.

YU FM, QIU RL, ZHOU XY, et al. Effects of cadmium on activities of key nitrogen metabolism enzymes in leaves of *Arabis Paniculata* Franch [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3 : 497-502.

1. Tordoff GM, Baker AJM, Willis AJ. Current approaches to the revege － tation and reclamation of metalliferous mine wastes[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 219-228.
2. Wong MH. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 775-780.
3. Ye ZH, Shu WS, Zhang ZQ, et al. Evaluation of major constraints on revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay technique [J]. *Chemosphere*, 2002, 47: 1103-1111.
4. Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-A review [J ] . *Waste Management*, 2008, 28: 215-225.
5. Ma JF, Zheng SJ, Matsumoto H. Specific secretion of citric acid in－ duced by Al stress in *Cassia tora* L.[J]. *Plant Cell Physiology*, 1997, 38: 1019-1025.
6. Chen YC, Xiong ZT, Dong SY. Chemical behavior of cadmium in pur － ple soil as affected by surfactants and EDTA[J]. *Pedosphere*, 2006, 16 (1 : 91-99.
7. Ma LQ, Tralna SJ, Logan TJ. In situ immobilization by apatite[J]. *Envi*－ *ronmental Science and Technology*, 1993, 27(9 : 1803-1810.
8. Laperche V, Logan TJ, Gaddam P, et al. Effect of apatite amendments on plant uptake of lead from contaminated soil[J]. *Environmental Sci* － *ence and Technology*, 1997, 31: 2745-2753.
9. Ownby DR, Galvan KA, Lydy MJ. Lead and zinc bioavailability to *Eise*－ *nia fetida* after phosphorus amendment to repository soils[J]. *Environ*－ *mental Pollution*, 2005, 136: 315-321.
10. Gucwa-Przepio'ra E, Ma1kowski E, Sas-Nowosielska A, et al. Effect of chemophytostabilization practices on arbuscular mycorrhiza coloniza－ tion of Deschampsia cespitosa ecotype Waryn' ski at different soil depths[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150: 338-346.
11. Pichtel J, Bradway DJ. Conventional crops and organic amendments for Pb，Cd and Zn treatment at a severely contaminated site[J]. *Bioresource*

Technology, 2008, 99: 1242-1251.

1. Rene PJJR, Tjisse H, Willem HR. Interaction between calcium and phosphate adsorption on goethite[J]. Environmental Science and Tech－ nology, 2001, 35(16): 3369-3374.
2. Ma QY, RaoGN. Aqueous Pb reduction in Pb-contaminated soil by Flori－ da phosphate rocks[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 110: 1-16.
3. Jeanjean J, Rouchaud JC, Tran L, et al. Sorption of uranium and other heavy metals on hydroxyapatite[J]. Journal of Radioanalytical and Nu－ clear Chemistry, 1995, 201(6 : 529-539.
4. Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis AI. In situ stabiliza－ tion of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical pre － diction and experimental verification[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 117: 41-53.
5. Mavropoulos E, Rossi AM, Costa AM, et al. Studies on the mechanisms of lead immobilization by hydroxyapatote[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(7 : 1625-1629.
6. Pickering IJ, Prince RC, George GN, et al. X -ray absorption spec － troscopy of cadmium phytochelatin and model systems [J]. Biochemica et Biophysica Acta, 1999, 1429(2 :351-364.
7. Tolra RP, Poschenrieder C, Barcelo J. Zinc hyperaccumulator in Thlaspi caerulescens. II. influence on organic acids[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(12 : 1541-1550.
8. Clistens W, Dula A, Baoshan X. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil[J]. Environmental Pollution, 2006, 140: 114-123.
9. Gordon E, Brown J, Andrea LF, et al. Mineral surfaces and bioavail－ ability of heavy metals: A molecular-scale perspective[J]. Proceeding of the National Acadamic Sciences USA , 1999, 96: 3388-3395.
10. Riyad JA, Edward HS. Heavy metal contaminants removal by soil wash－ ing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 70: 71-86.
11. Mari S, Suzelle B. Effectiveness of the iodide ligand along with surfac－ tants on desorbing heavy metals from soils[J]. Water, Air, and Soil Pol－ lution, 2005, 161: 193-208.
12. Pascal S, Thomas L. Mercury-contaminated soil remediation by iodide and electroreclamation[J]. Journal of Enviromental Engineering, 2003, 129(5): 441-446.
13. Dermont G，Bergeron M，Mercier G，et al. Soil washing for metal re－ moval ： A review of physical/chemical technologies and field applica－ tions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(1): 1-31.
14. Sun B, Zhao FJ, Lombi E, et al. Leaching of heavy metals from contam－ inated soils using EDTA [J]. Environmental Pollution, 2001, 113: 111­120.
15. Sauve S, Hendershot W, Allen HE. Solid-solution partitioning of met－ als in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden，and organic matter[J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34 (7): 1125 -1131.
16. Khan AG, Kuek C, Chaudhry TM, et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation [J]. Chemosphere, 2000, 41: 197-207.
17. Marques APGC, Oliveira RS, Rangel AOSS, et al. Zinc accumulation in Solanum nigrum is enhanced by different arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Chemosphere, 2006, 65: 1256-1263.
18. 蔡信德, 仇荣亮, 陈桂珠, 等.接种泡囊假单胞菌对土壤生物性质及 A.corsicum 吸收 Ni 的影响[J].生态学报,2006, 26(5): 1405-1413.

CAI XD, QIU RL, CHEN GZ, et al. Effect of soil inoculation with Pseu－ domonas vesicularis on biological properties of three nickel -contami－ nated soils and on Ni accumulation by the hyperaccumulator Alyssum corsicum[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1405-1413.

1. 陶红群, 李晓林, 张俊伶. 丛枝根菌丝对重金属元素锌和镉吸收的 研究[J].环境科学学报，1998, 18(5): 545-548.

TAO HQ, LI XL, ZHANG JL. Uptake of Zn and Cd by hyphae of an ar－ buscular mycorrhizal funai (G. Mosseae) associated with red clover[J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(5): 545-548.

1. Gonzalez -Chavez C, Harris PJ, Dodd J, et al.. Arbuscular mycorrhizal confer enhanced arsenate resistance on Holcus lanatus[J]. New Phytol－ ogist, 2002, 155: 163-171.
2. Sharples JM, Meharg AA, Chambers SM, et al. Evolution - Symbiotic solution to arsenic contamination[J]. Nature, 2000, 404: 951-952.
3. Zazo JA, Paull JS, Jaffe PR.. Influence of plants on the reduction of hexavalent chromium in wetland sediments [J]. Environmental Pollu－ tion, 2008, 156(1): 29-35.
4. Macaskie LE, Dean ACR. Cadmium accumulation by a Citrobacter sp. [J]. Journal of General Microbiology, 1984, 130: 53-62.
5. Qiu RL, Zhao BL, Liu JL, et al. Sulfate reduction and copper precipita － tion by a Citrobacter sp. isolated from a mining area[J]. Journal of Haz－ ardous Materials, 2009, 164(2-3): 1310-1315.
6. Gremion F, Chatzinotas A, Kaufmann K, et al. Impacts of heavy metal contamination and phytoremediation on a microbial community during a twelve-month microcosm experiment[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 48(2): 273-283.
7. Khan AG. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation [J] . Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4): 355-364.
8. Vivas A, Azcon R, Bir6B, et al. Influence of bacterial strains isolated from lead -polluted soil and their interactions with arbuscular mycor－ rhizae on the growth of Trifolium pratense L. under lead toxicity [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2003, 49(10): 577-588.
9. Li YM, Chaney RL, Brewer EP, et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical consider－ ations[J]. Plant and Soil, 2003, 249 (1): 107-115.
10. Baker AJM, McGrath SP, Sidoli CMD, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-ac － cumulating plants[J]. Resourse,Conservation and Recycling, 1994, 11: 41-49.
11. Robinson BH, Brooks RR, Howes AW, et al. The potential of the high- biomass nickel hyperaccumulator Berkheya coddii for phytoremedia－ tion and phytomining[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 60: 115-126.
12. Tang YT, Qiu RL, Zeng XW, et al. Lead, zinc, cadmium hyperaccumu－ lation and growth stimulation in Arabis Paniculata Franch [J]. Environ－ ment and Experimental Botany, 2009,66(1):126-134.