

Analysis of Soil Heavy Metals Pollution and Its Present Situation around Lead-Zinc Mining Areas in China

Pei Xu, Chao Wu

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha
Email: 276534317@qq.com

Received: Aug. 9th, 2014; revised: Sep. 10th, 2014; accepted: Sep. 22nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

We analyze the source of heavy metals soil pollution, its pollution character and the harm of pollution, and review the condition of heavy metal soil pollution in lead-zinc mining areas in recent years to propose some suggestions for pollution control.

Keywords

Lead-Zinc Mines, Soil, Heavy Metals Pollution

我国铅锌矿山土壤重金属污染综述及现状分析

徐佩, 吴超

中南大学资源与安全工程学院, 长沙
Email: 276534317@qq.com

收稿日期: 2014年8月9日; 修回日期: 2014年9月10日; 录用日期: 2014年9月22日

摘要

综述了我国铅锌矿山土壤重金属污染来源、特点和危害, 分析了近几年我国铅锌矿山土壤重金属污染状

况，并提出了一些污染治理的建议，以期对铅锌矿山土壤重金属污染的专项治理提供一定的理论帮助。

关键词

铅锌矿，土壤，重金属污染

1. 引言

我国是矿产大国，其中铅锌矿分布广泛、资源丰富，是我国的优势矿种[1]。然而，随着铅锌矿业快速发展，在其对国家经济发展做出卓越贡献的同时，由于矿山开采过程中技术缺乏、管理不善等原因，也对环境造成严重的污染，特别是重金属污染现象越来越严重，这不仅制约了矿山企业自身长久发展，同时给矿山周边的生态环境及居民健康带来极大的隐患。

土壤由于其自身的特殊性质，致使重金属污染物在其中扩散和稀释作用发生的较慢，迁移难度大，因而成为重金属污染物的归宿地[2]。而重金属在环境中相对稳定，难以降解，不能被生物分解，其一旦污染土壤后，很难消除。大量滞留在土壤中的重金属可被植物吸收累积，进而通过食物链进入动物和人体内，危害动植物健康。

重视我国铅锌矿山土壤重金属污染问题，采取相应有效措施进行治理已刻不容缓。虽然目前重金属污染治理已经得到国内外学者的高度重视，但仍未找到普遍适用于大面积土壤重金属污染治理的有效方法。因此，为了给我国铅锌矿山土壤重金属污染的治理提供一定的理论帮助，本文分析了我国铅锌矿山土壤重金属污染的主要来源、污染特点以及污染危害，简要介绍了各大铅锌生产基地主要铅锌矿及个别大中小型矿山，以此为例，对我国铅锌矿山土壤重金属污染现状进行分析。根据分析结果，对我国铅锌矿山土壤重金属污染治理提出一些建议。

2. 铅锌矿山土壤重金属污染及危害

2.1. 铅锌矿山土壤重金属污染源

矿山土壤重金属污染是指由于人类采、选、冶等活动过程以及废弃物堆积过程中，重金属元素被不断的加入进土壤，由于重金属不能被土壤中的微生物分解且易于在土壤中富集，致使土壤中重金属含量明显高于环境背景值，导致土壤的组成、结构和功能发生变化，进而造成生态破坏和环境质量恶化。

铅锌矿山土壤重金属污染主要是重金属元素 Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 和类金属 As 的污染，其污染源主要包括采选生产过程中的废水、固体废弃物及粉尘三类。具体污染源及其污染原理如表 1 所示。

2.2. 铅锌矿山土壤重金属污染特点

铅锌矿山土壤重金属污染，除具有一般土壤重金属污染特点外，还因其自身性质，具有其他特点。

2.2.1. 土壤重金属污染特点

土壤重金属污染具有累积性、地域性、隐蔽性、滞后性、不可逆性和难治理性。重金属污染物在土壤中扩散和稀释作用发生的较慢，迁移难度大，使得其在土壤中不断积累以致超标。此外，土壤的均匀性和透明度较差，重金属污染土壤需要对土壤样品或其上生长的植物样品进行分析化验等技术方法检验后才能确定，不能直观的通过表象来观察到。土壤重金属污染还是一种不可逆的污染过程，被重金属污染的土壤进行自然净化和人工治理都是非常困难的，有些重金属污染可能要 100~200 年的时间才能恢复[4]。

Table 1. The sources of soil heavy metals pollution and its principle of mines
表 1. 矿山土壤重金属污染来源及其污染原理

类型	废水	固体废弃物	粉尘
主要包括	矿井开采过程产生的地标渗透水、矿坑水、选矿废水、井下生产防尘、灌浆、填充污水、洗矿废水、矿渣堆积场浸出水，等等[3]。	采矿的废石、选矿的尾矿以及冶金的废渣等等。	露采或地下开采的钻孔、爆破产生的粉尘和扬尘；矿石装运过程产生的粉尘和扬尘；排土过程的尘埃；堆积废弃物随风产生的扬尘等等[2]。
污染原理	矿业废水以酸性为主，其中含有大量重金属，往往未经废水处理或者处理不达标直接排放，其中的重金属离子随着废水进入土壤并在土壤而发生络合、吸附与解吸等作用，部分滞留于土壤并富集。	固体废弃物裸露堆积，受地表水冲洗、降雨淋滤作用、风力侵蚀等作用影响，发生各种物理化学作用，淋滤出重金属离子，特别是硫化铅锌矿中含硫物质的氧化作用产生酸性水进一步促进重金属淋滤，淋滤出的重金属离子随着水进入土壤并累积。	铅锌矿山生产运输过程中产生的扬尘和粉尘中含有重金属，这些扬尘和粉尘可扩散沉降于大范围的土壤表面，随地表水、雨水、灌溉水等进入土壤，其含有的重金属也随之进入土壤并富集。

2.2.2. 铅锌矿山土壤重金属污染其他特点

铅锌矿山土壤重金属污染主要是重金属元素 Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 和类金属 As 的多元素复合污染，这些重金属使得铅锌矿区土壤重金属污染还具备以下特点：

1) 水平向上：水平面上距离污染源越近，土壤重金属污染总体呈现越大的规律。王莹等[5]的研究表明，土壤中重金属污染程度随着远离铅锌尾矿而逐渐减小，离尾矿山较近的污染稻田污染最为严重，而离尾矿山最远的普通稻田污染最小；重金属的水平迁移影响范围很大，根据有关研究表明，距矿区 10 km 的范围仍可受到影响[6]；不同元素迁移能力存在一定差异。有研究表明，Pb、Zn 和 Cd 的污染范围较大，可超过 1500 m，而 Cu 的迁移性较小，污染范围大多在 1500 m 以内[7]。

2) 垂直向上：重金属会向下迁移，不同元素迁移能力存在一定差异。邓超冰[8]等对某铅锌矿区水田土壤重金属污染特征进行的研究指出，研究区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 均呈现明显向下迁移的趋势，0~20 cm 深度土壤 4 种金属含量较大，而 20~80 cm 深度土壤中呈现重金属浓度先升高后降低的趋势，且浓度峰值出现在 60~120 cm 深处。各元素迁移规律略有差异，Cd 迁移浓度峰值出现的深度比 Cu、Zn、Pb 要深。

2.3. 铅锌矿土壤重金属污染危害

铅锌矿区土壤重金属污染问题会带来严重后果，不容忽视。主要危害包括：

1) 对植物的危害。土壤中的重金属可在植物体内富集，当土壤中的重金属超过一定浓度时，会对植物产生毒害作用，影响植物的产量和质量。重金属对植物的危害作用，主要受植物自身性质、重金属性质和形态、重金属之间相互作用及土壤理化性质等影响。有些重金属的危害作用，主要体现在影响植物的生长发育方面，在重金属积累未增高到对人畜有害以前，植物就死亡，如 Cu 等重金属；有些重金属对植物生长危害较小，在对植物生长发育造成影响之前，其积累量就可对人畜产生毒害作用，如 Cd、As 等重金属[9]。王莹等对某铅锌矿区周边人工培育的植物进行分析研究，指出萝卜可食用部分 As 和 Pb 含量分别超过国家农产品安全质量标准的 5 倍和 220 倍，水稻可食用籽粒中 As、Cu 虽相对含量要少，但也超过国家粮食重金属的限量标准[5]。

2) 对人畜的危害。土壤中的重金属对畜类产生危害作用，主要是由于畜类食用受重金属污染的饲料，使得重金属在畜类体内富集，危害畜类健康。例如畜类长期食用被 Cd 污染的稻草等饲料，会引起畜类生长发育缓慢、肝脏和肾脏机能障碍、呼吸机能不全、骨骼损伤等多种疾病[10]。重金属污染土壤中长出的

农作物或长期食用重金属污染饲料的畜类，一旦被人类食用，其所含的重金属可在人体内富集，引发各种疾病，影响人体健康。项黎新等[11]通过对六种重金属离子胁迫诱导鱼类细胞凋亡试验研究，指出 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Hg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 As^{5+} 、 Pb^{2+} 能诱导鱼类细胞出现明显的染色质凝聚、趋边化、形成凋亡小体，即发生凋亡。众所周知，上世纪日本由于炼锌致使 Cd 严重污染农田，农民长期食用污染土壤种植的稻米、污染河水生长的鱼虾等食物，由于 Cd 在人体内排泄速度极慢，造成体内 Cd 大量富集，致使人骨骼软化、四肢弯曲、脊柱变形，疼痛无比，严重者甚至死亡。

3) 对微生物的危害。适量的重金属，对微生物多样性、提高微生物抗性和耐性机制有一定的积极作用，但当土壤中重金属超过一定浓度时，则会破坏微生物群落结构的稳定性，降低微生物生物量，影响其生物活性及土壤微生物的区系，甚至抑制微生物代谢和生长。Kandeler 等[12][13]的研究表明，矿区受污染的土壤中，靠近矿区土壤的微生物生物量明显低于远离矿区土壤中的微生物生物量，且离矿区越近，微生物的生物量下降幅度越明显。

4) 对环境的危害。由于土壤与大气和水环境相连，土壤中的重金属在一定条件下，如在自然风化作用或者降雨作用影响下，以风或水为载体，随着土壤进入大气或水体中，污染大气和水体。李永华等[14]对凤凰铅锌矿水体重金属污染的研究发现，受地球化学作用如风化淋溶作用等的影响，重金属随岩石风化、土壤淋溶等过程不断进入水体，导致矿区水体中重金属含量超标。此外，重金属污染严重的，会致使土壤上植物无法生长，大量植被、树木死亡，从而造成严重的水土流失现象，这些土地复垦非常困难，使矿山周边的生态平衡遭到严重破坏，需要花费大量的人力物力乃至上百年的时间才能恢复或者根本无法恢复。有关资料显示，某省各类矿山(包括生产、闭坑矿山)占地面积达 2000 km^2 ，但仅复垦 60.47 km^2 ，复垦率在 10%左右，恢复植被面积 31.33 km^2 ，土地换绿率仅 7.63% [15]。

3. 我国铅锌矿土壤重金属污染现状

3.1. 我国铅锌矿资源分布现状

我国铅锌矿产资源丰富，分布广泛，经过多年发展、建设，已形成东北、湖南、两广、滇川、西北等五大铅锌矿采选冶和加工配套的生产基地。各大生产基地主要铅锌矿：东北铅锌生产基地是我国开发较早的铅锌生产基地之一，以青城子铅锌矿、八家子铅锌矿等七矿两厂为主；湖南铅锌生产基地主要包括水口山铅锌矿、黄沙坪铅锌矿，东坡铅锌矿等矿山；两广铅锌生产基地主要包括凡口铅锌矿、泗顶铅锌矿、大新铅锌矿等矿山；滇川铅锌生产基地主要包括会泽铅锌矿、金顶铅锌矿、兰坪铅锌矿等矿山；西北铅锌生产基地主要包括银洞梁铅锌矿、白银厂小铁山铅锌矿等矿山。此外，贵州等省也建设了一批中小型矿山，例如贵州赫章铅锌矿、杉树林铅锌矿等。

3.2. 各区域铅锌矿山土壤重金属污染现状

近年来大量调查研究表明，我国铅锌矿山土壤重金属污染状况十分严峻，大量铅锌矿山土壤已经受到十分严重的重金属污染，对矿区的生态环境和居民健康已经构成了严重威胁。若不及时治理，还会产生迁移、积累等，且将遗祸后代。以全国各区域铅锌生产基地的主要铅锌矿山及个别大中小型矿山为例，分析我国铅锌矿山土壤重金属污染现状。

东北铅锌生产基地：石平等[16]对辽宁矿区尾矿废弃地土壤重金属污染研究表明，葫芦岛八家子铅锌矿尾矿库周边土壤存在重金属严重富集现象，尤以 Cd、Zn 富集最为严重，同时模糊综合评价结果也指出，尾矿库周边土壤受到重金属污染程度严重，其主要污染因子为 Cd、Zn。石平等[17]对青城子铅锌矿区土壤重金属污染的调查研究表明，矿区土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu、As 的含量均严重超标，尤其是 Pb 和 Cd，其含量超出背景值 100 多倍。此外，周边农田由于受矿山过度开采、过量使用农药化肥等人为因

素影响, Hg 污染也很严重。矿山不同区域土壤中, 尾矿库土壤污染最为严重, 其次为排土场, 周边农田土壤污染相对来说最轻, 但也处于非常严重的状态, 已不适合发展农业, 应考虑发展林业带土壤环境改善后再发展农业。

湖南铅锌生产基地: 李贵等[18]以水口山铅锌矿区及其周边地区土壤为对象调查分析其受重金属污染状况, 指出研究区土壤受到严重的 Cd、Pb、Hg 和轻度的 Zn、As 的复合污染, 且重金属污染物主要累积在表层土壤上, 严重污染区土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn、As、Hg 含量最高分别可达 2691.88、28.91、376.91、135.91、1309.00、2.78(mg/kg)。姬艳芳等[19]对湘西凤凰铅锌矿区典型土壤剖面重金属迁移分布特征的调查分析显示, 整个矿区受地质背景和人为采矿活动以及矿渣堆放影响, 母岩和土壤中 Pb、Cd、Zn、As、Hg 等重金属含量普遍较高。受采矿活动影响时间长的老矿口附近土壤剖面中重金属呈现垂直往下含量升高并且表层富集现象, 而新矿口附近土壤中重金属则呈现底层富集趋势。

两广铅锌生产基地: 尹仁湛等[20]对泗顶铅锌矿周边土壤进行采样分析, 指出矿区土壤中重金属含量很高, Pb、Zn、Mn、Cu、Cr 平均含量分别为: 5934.2、23285.3、447.0、78.8、51.7(mg/kg)。结合广西土壤背景值和潜在生态危害指数法对土壤重金属潜在生态危害进行评价, 结果表明矿区土壤中 Pb、Zn 为极强生态危害, Cu、Cr 为轻微生态危害。吕晶晶等[21]对新大新铅锌矿区东南面某耕地土壤重金属污染的研究表明, 研究区土壤受到以 Pb、Zn、Cd 为主, Cu、Mn、Cr 次之的复合污染, 且 Pb、Zn、Cd 平均值均超过国家土壤环境质量二级标准, Cu、Cr、Mn 平均值超过桂西南土壤背景值。以国家土壤环境质量二级标准为评价标准, 研究区菜地、玉米地、弃耕地土壤样品内梅罗综合污染指数均超过 15, 属于严重污染, 需加强重视, 加快土壤的治理进度和深度。

滇川铅锌生产基地: 雷冬梅等[22]对云南不同矿区废弃地土壤重金属污染的研究指出, 云南兰坪铅锌矿废弃地受到严重的重金属污染, 各重金属在土样中的含量分别为: 全 Pb 为 169.94 到 15064.68 mg/kg, 全 Zn 为 2143.78 到 107198.6 mg/kg, 全 Cu 为 15.23 到 1432.04 mg/kg, 全 Ni 为 14.75 到 683.63 mg/kg。以国家土壤环境质量二级标准为评价标准, 单因子污染指数法评价结果表明 Zn 污染最为严重, Pb 次之, Cu、Ni 相对较轻, 但其单因子污染指数均超过 3, 污染较为严重, 内梅罗综合污染指数法评价结果表明矿区土壤重金属污染达到重度污染等级。房辉等[23]对云南会泽废弃铅锌矿土壤重金属污染状况的研究表明, 矿区土壤中均存在 Cd、Zn、Pb 大量富集现象, 其中, 复垦地中 Cd、Zn、Pb 总量分别为土壤环境质量标准三级标准的 35.0、28.0 和 11.3 倍, 撂荒地中 Cd、Zn、Pb 总量分别为三级标准的 40.7、37.6 和 16.7 倍。综合污染指数评价结果显示废弃地重金属污染已经达到重度污染等级, 复垦地不适合耕种农作物, 应改变土地利用方式, 避免土壤中重金属通过食物链进入人体危害人类健康。

西北铅锌生产基地: 陈国栋[24]对银洞梁铅锌矿区土壤进行采样分析, 并结合土壤环境质量二级标准对矿区土壤进行单因子污染指数评价, 结果指出矿区土壤中重金属 Cd、Pb 污染最为严重, 污染指数平均值分别为 19.43、17.67, 属于非常严重的污染状态。Zn、Cr 次之, 但污染指数平均值分别为 2.49、1.62, 均为污染级别。仅 Cu 未到污染级别。同时, 研究区土壤中重金属活性态含量较高, 对周围环境直接威胁大。污染土壤上生长的小麦、玉米等也存在重金属污染超标现象, 已经不能食用。

个别大中小型矿山: 杨元根等[25]对黔西北不同铅锌矿区土壤和河流沉积物中 Pb、Cd、Zn 的分布进行研究分析, 指出水城杉树林铅锌矿由于采矿等人类活动和废石长期堆积影响, 已造成河流沉积物和土壤中重金属一定程度的积累, 由于喀斯特背景影响矿石表生风化作用, 使得土壤中重金属的积累不是很高, 但其中 Pb、Cd、Zn 的含量均超过国家对土壤中重金属的最高限量。储彬彬等[26]对南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染的研究表明, 以土壤环境质量一级标准为背景值进行对比, 栖霞山铅锌矿采矿区、菜园和栖霞寺土壤主要受到 Pb、Cd、Zn、As 的重污染, 部分土壤还存在 Cu 的轻度污染, Cr 含量在背景值内未受污染。内梅罗综合污染指数评价结果表明, 研究区土壤属于重度污染状态。土壤污染严重区

集中在选矿厂、矿口和坑道排风井口等周围，并且污染程度随远离矿区逐渐减弱。

综上所述，我国铅锌矿山土壤普遍存在重金属 Pb、Cd、Zn 非常严重的污染，Cu 相对较轻的污染，部分矿区土壤存在 As 的重污染及 Cr 的轻污染，此外，部分地区的矿山土壤中还存在 Hg 重污染(例如湖南、辽宁部分地区)、Ni 污染(云南部分地区)或 Mn 的富集现象(例如广西部分地区)。

4. 我国铅锌矿山土壤重金属污染治理研究现状

4.1. 土壤重金属污染治理技术研究进展

土壤重金属污染的治理，主要是将重金属从土壤中去掉或者改变其在土壤中的形态，降低其危害。目前，常见的土壤治理技术主要包括：工程治理方法、化学治理方法、生物治理方法和农业治理方法。

工程治理方法是指利用物理、物理化学等原理治理重金属污染土壤的方法。主要包括客土、换土、去表土、深耕翻土法、电动修复等等；化学治理方法是指向污染土壤中加入固化剂等化学药剂，使土壤中的重金属发生氧化、沉淀、吸附、拮抗等作用，来降低重金属的迁移性和生物可用性；生物治理方法是指利用动植物、微生物等的生命代谢活动，降低土壤中重金属含量或改变重金属化学形态从而降低其毒性，净化土壤的方法。主要包括植物修复、微生物修复和动物修复方法等，但由于植物修复相较于土壤动物和微生物修复方法成本低廉、更易于实施，目前研究应用最为广泛；农业治理方法是指根据实际情况调整耕作管理制度、采取适当农业措施降低土壤中重金属含量、迁移性，或者生物活性，降低其危害性。主要包括控制土壤水分、调节土壤 PH 值或 Eh 值，科学合理施用化肥、有机肥和农药，改变耕作制度、调整作物种类等方法。

4.2. 铅锌矿山土壤重金属污染治理研究现状

由于工程治理等方法投资大，需要设备复杂，治理面积小、存在二次污染的可能，部分方法实施起来难以操作。目前，针对铅锌矿山土壤重金属污染的治理方法研究，主要集中在植物治理方法、修复剂如含磷修复剂修复等治理方法的研究上。

陈红琳等[27]通过对汉源铅锌矿区植物对 Pb、Zn 积累及耐性研究表明，虽然矿区植物未达超富集临界含量要求，但其部分体内已形成 Pb、Zn 耐性。蔗茅、大乌泡地上部分对 Pb、Zn 均表现出较强富集性，新樟地下部分对 Zn 积累能力较强，籽粒苋的地上部分和曼陀罗的地下部分对 Pb 的积累较好。这些植物在矿区分布广泛，生物量大，均可作为潜在的 Pb、Zn 污染修复物种。王学礼等[28]分析研究了三明铅锌矿区优势植物对 Pb、Zn 和 Cd 耐性、富集特性，指出笔管草、一年蓬、五节芒的地上部分重金属富集量较大，对修复矿区周边 Pb、Cd 污染土壤有潜在应用价值，其中，笔管草、五节芒的地上部分 Pb 含量均超过了 Pb 超富集植物含量的临界值，一年蓬地上部分 Cd 含量超过了超富集植物的临界值，是潜在的 Cd 超富集植物；柔枝莠竹、乌蕨、狗娃花、千金子、短叶水蜈蚣、二歧飘拂草在矿区重金属污染较重的土壤上正常生长、繁衍，生物量较大，且将重金属吸收积累在根部，可减少地表径流侵蚀、风蚀等造成的重金属迁移扩散，适用于污染程度较高且植物萃取技术难以实施的矿山污染废弃地。

铅锌矿土壤重金属污染，是以 Pb、Zn 和 Cd 等重金属为主的复合重金属污染，Pb、Zn、Cd 具有相似的土壤化学行为，可与磷肥中的 P 互相作用，生产溶解度很低的磷化合物。早有研究表明，采用田间实验的方法，对 Pb、Zn、Cd、Cu、As 复合污染土壤施用 P 肥、Mg、石灰+Ca 后，土壤中重金属迁移、积累及生物活性发生了变化。处理后污染土壤中重金属向作物籽实迁移和积累量明显减少，特别是 Pb、Cd、As 三种元素。小麦、大豆、水稻、玉米中 Pb 吸收量降低 23.4%至 57.8%，小麦、大豆中 As 吸收量减少了 61.8%至 81.1%，小麦、水稻的 Cd 吸收量降低 31.5%至 55%。同时，处理后的土壤中 Pb、Zn、Cd 交换态百分含量均有所减少，碳酸结合态有所增加，生物可利用部分重金属含量降低[29]。王碧玲等

[30]在应用磷肥修复铅锌矿污染土壤中铅毒的实验研究中发现,磷肥依靠磷与非残渣态铅反应形成溶解度极小的磷矿沉淀,降低铅溶解性,具有原位修复铅污染土壤的潜能。过磷酸钙、钙镁磷肥、磷矿粉都具有显著降低铅非残渣态含量的作用,使用相同磷含量磷肥时磷矿粉修复效果要低于过磷酸钙、钙镁磷肥,但也大幅度降低水溶-交换态 Pb 含量。磷肥用量在 P/Pb 摩尔比为 7.0 时足以修复土壤铅毒。

5. 总结

土壤重金属污染因其特性,对动植物及环境危害极大。由于长期受到人类采选冶活动及固体废弃物堆积等影响,我国铅锌矿山土壤重金属污染状况已经非常严重,土壤中普遍存在以 Pb、Cd、Zn 重污染为主,Cu、As、Cr 轻度污染次之,部分地区存在 Hg、Ni、Mn 等污染的复合重金属污染。采取积极有效的措施进行治理、预防已刻不容缓。

目前,铅锌矿山土壤重金属污染治理方法的研究,主要集中在植物治理方法、修复剂修复等治理方法的研究上,且多是建立在实验室或模拟试验基础上,缺乏矿区污染土壤修复的实践经验。这些方法在实际运用时,特别是在治理大面积矿区土壤污染时,难以达到有效去除土壤中重金属毒害的目的,难以普及。例如超富集植物对环境要求较严格,区域性分布较强,且往往只对某些特定重金属表现超富集能力,难以全国范围内推广施用。

为克服这些缺陷,可研究如何将多种治理方法科学的结合起来,例如将微生物与植物修复结合起来,磷肥与植物修复结合起来,运用各方法的优点弥补其他方法的缺陷,相互促进,更高效、全面的对重金属污染土壤进行修复。此外,可加大研究力度,深化修复机理,培育出环境要求低、适应力强、生长繁殖速度快、可富集 Pb、Zn、Cd、Cu、As 等多种重金属的超强富集植物。

基金项目

高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(编号:20110162110051)。

参考文献 (References)

- [1] 雷力,周兴龙,文书明,吴谊民,季清武 (2007) 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状. *矿业快报*, **9**, 1-4.
- [2] 张力,王树 (2007) 浅谈金属矿山土壤重金属污染及其修复. *有色金属(矿山部分)*, **4**, 38-40.
- [3] 陈桂荣,曾向东,黎巍,袁艳梅,周圆圆 (2010) 金属矿山土壤重金属污染现状及修复技术展望. *矿产保护与利用*, **2**, 41-44.
- [4] 李选统,卢维盛,李谦,李拥军,郑飞腾 (2011) 土壤重金属污染的修复. *现代农业科技*, **24**, 295-297.
- [5] 王莹,赵全利,胡莹,杜心,葛伟,刘文菊 (2011) 上虞某铅锌矿区周边土壤植物重金属含量及其污染评价. *环境化学*, **7**, 1354-1360.
- [6] Elberling, B., Asmund, G., Kunzendorf, H. and Krogstad, E.J. (2002) Geochemicals trends in metal-contaminated fiord sediments near a former lead-zinc mine in West Greenland. *Applied Geochemistry*, **17**, 493-502.
- [7] 张骁勇 (2012) 尤溪铅锌矿区重金属的迁移和分布研究. 硕士论文,福建农林大学,福州.
- [8] 邓超冰,李丽和,王双飞,黎宁,张超兰,李忠义 (2009) 典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征. *农业环境科学学报*, **11**, 2297-2301.
- [9] 田丽梅 (1997) 土壤重金属污染对农作物的影响. *天津农林科技*, **4**, 37-38.
- [10] 胡国良,张彩英 (2012) 重金属对畜类的危害及控制. *生物灾害科学*, **1**, 93-96.
- [11] 项黎新,邵建忠,孟真,等 (2001) 六种重金属离子胁迫诱导鱼类细胞凋亡的研究. *生物化学与生物物理进展*, **6**, 866-869.
- [12] Kandeler, E. and Luftenegger, G. (1997) Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. *Biology and Fertility of Soils*, **23**, 299-306.
- [13] 王嘉,王仁卿,郭卫华 (2006) 重金属对土壤微生物影响的研究进展. *山东农业科学*, **1**, 101-105.

- [14] 李永华, 姬艳芳, 杨林生, 李顺江 (2007) 采选矿活动对铅锌矿区水体中重金属污染研究. *农业环境科学学报*, **1**, 103-107.
- [15] 周振民, 李香园 (2012) 我国尾矿坝溃坝事故成因及生态环境影响评价. *金属矿山*, **11**, 121-124, 167.
- [16] 石平, 王恩德, 魏忠义, 杨朝强 (2008) 辽宁矿区尾矿废弃地及土壤重金属污染评价研究. *金属矿山*, **2**, 118-121, 135.
- [17] 石平, 王恩德, 魏忠义, 杨朝强 (2010) 青城子铅锌矿区土壤重金属污染评价. *金属矿山*, **4**, 172-175.
- [18] 李贵, 童方平, 刘振华 (2012) 衡阳水口山铅锌矿区重金属污染现状的分析. *中南林业科技大学学报*, **7**, 105-109.
- [19] 姬艳芳, 李永华, 杨林生, 孙宏飞, 王五一 (2009) 湘西凤凰铅锌矿区典型土壤剖面中重金属分布特征及其环境意义. *环境科学学报*, **5**, 1094-1102.
- [20] 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 罗文连, 朱义年 (2008) 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征. *农业环境科学学报*, **6**, 2158-2165.
- [21] 吕晶晶, 张新英, 吴玉峰, 曾奔豪 (2013) 广西大新县铅锌矿区某屯耕地土壤重金属污染特征及评价. *广西师范学院学报*, **4**, 51-54.
- [22] 雷冬梅, 段昌群, 王明 (2007) 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价. *农业环境科学学报*, **2**, 612-616.
- [23] 房辉, 曹敏 (2009) 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价. *生态学杂志*, **7**, 1277-1283.
- [24] 陈国栋 (2010) 凤县银洞梁铅锌矿区重金属污染研究. 硕士论文, 西安科技大学, 西安.
- [25] 杨元根, 刘丛强, 张国平, 吴攀, 朱维晃 (2003) 铅锌矿山开发导致的重金属在环境介质中的积累. *矿物岩石地球化学通报*, **4**, 305-309.
- [26] 储彬彬, 罗立强 (2010) 南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价. *岩矿测试*, **1**, 5-8, 13.
- [27] 陈红琳, 张世熔, 李婷, 代英, 毛竹 (2007) 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究. *农业环境科学学报*, **2**, 505-509.
- [28] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 雷梅, 马祥庆 (2010) 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征. *生态环境学报*, **1**, 108-112.
- [29] 王新, 吴燕玉 (1999) 改性措施对复合污染土壤重金属行为影响的研究. *应用生态学报*, **4**, 440-444.
- [30] 王碧玲, 谢正苗, 孙叶芳, 李静, 田兆君, 陈英旭 (2005) 磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的修复作用. *环境科学学报*, **9**, 1189-1194.