

# Review on Contamination and Remediation Technology of Heavy Metal in Agricultural Soil

Bin Xuan, Ji Wang, Zhibin Duan, Kun Wang, Jiping An

School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou  
Email: xuanbin216@126.com, wangji@gznu.edu.cn

Received: Jan. 30<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 14<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 20<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Heavy metal pollution of agricultural soil not only directly affects the quality of crops, but also their accumulation throughout the food chain leads to serious health problem. The status of heavy metal pollution remediation technology is of great significance to the safety of agricultural products. This paper reviews the research progress and advantages and disadvantages of heavy metal remediation technologies widely used at home and abroad. Joint remediation technology must be developed in the direction of the green and environmental friendly. In view of the current Chinese land development situation, economic and practical remediation (such as microbial remediation of oil crops) is an urgent problem that should be solved. As the above concluded, joint repair technology should be applied in the direction of engineering application, and deeply explored the interaction mechanism, in order to provide scientific reference for the comprehensive treatment and remediation technology of heavy metal pollution in agricultural soil.

## Keywords

Agricultural Soil, Heavy Metal, Pollution, Remediation Technology

---

# 农田土壤重金属污染现状及修复技术应用研究进展

宣 斌, 王 济, 段志斌, 王 堃, 安吉平

贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳  
Email: xuanbin216@126.com, wangji@gznu.edu.cn

收稿日期: 2017年1月30日; 录用日期: 2017年2月14日; 发布日期: 2017年2月20日

## 摘要

农田土壤重金属污染不仅直接影响农作物质量,而且会通过食物链进入人体产生富集,威胁人体健康,研究农田土壤重金属污染现状及修复技术对农产品安全具有重要意义。本文综述了国内外广泛使用的农田重金属污染修复技术及其优缺点,提出联合修复技术必须朝着绿色和环境友好的方向发展。针对当前中国人多地少的现状,开发经济实用的联合修复技术(如微生物-油料作物联合修复技术)是当下需要迫切解决的问题。最后在已有研究的基础上,提出联合修复技术应朝着工程应用化的方向发展,深入探索联合修复的相互作用机理,以期为农田重金属污染的综合治理与修复技术提供科学参考。

## 关键词

农田, 重金属, 污染, 修复技术

Copyright © 2017 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

## 1. 引言

随着工业化、城镇化进程的快速发展,矿产资源的大量开发,各种化学产品的广泛使用,工业三废通过大气沉降、污水农灌、禽畜粪便、固废堆积等进入土壤,导致土壤重金属污染,尤其是农田土壤重金属污染日益突出。目前,世界各国的土壤均受到不同程度的重金属污染,全世界每年平均排放 Mn 约 1500 万 t、Pb 500 万 t、Cu 340 万 t、Ni 100 万 t、Hg 约 1.5 万 t [1]。我国受 Cd、Hg、As、Cr、Pb 污染的耕地面积约占全部耕地的 1/5,每年因重金属污染而损失的粮食约 1200 万 t,直接经济损失 200 亿元以上,严重影响了我国的粮食安全生产[2]。

重金属的非生物降解性,致使其通过生物富集和放大作用污染农产品,严重威胁人类健康。农田土壤重金属污染已成为当前亟待解决的环境问题,其污染来源与修复技术也一直备受国内外的关注。本文系统介绍了近年来国内外农田重金属污染修复技术及案例,对农产品生产安全具有重要意义,也为农田重金属污染治理与修复提供科学参考依据。

## 2. 我国农田重金属污染现状

对我国主要城市农田土壤重金属(Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、Ni、As 和 Hg)的含量进行统计分析,大部分均超过其背景值(见表 1) [3]。据统计资料显示,全国受到污染的农田已有  $1000 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,部分地区土壤重金属污染超标几十倍甚至几百倍,其中 11 个省 25 个地区的农田受到镉污染[4]。

我国大多数城市农田都不同程度的受到了重金属污染,如北京市土壤已受到 Cu、Zn、Cr、Cd 污染,其中 Cd 污染最为严重[14];对沈阳市农田土壤加密监测显示,已受到 Cd、Pb、Hg 污染,根据国家土壤环境质量二级标准评估,平均超标 8.8 倍,最大超标达 26.4 倍[15]。此外,在贵州、河北、广西、海南、重庆、香港等省市区域均发现了不同程度的 Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、As、Ni 和 Hg 污染[16]。

## 3. 农田重金属污染修复技术

目前,对土壤重金属的治理主要通过物理、化学、生物、联合修复等手段,改变重金属在土壤中的赋存形态,降低其在环境中的迁移性和生物可利用性,从而削减土壤中重金属的总量,达到治理和修复土壤污染的目的。

**Table 1.** Concentrations of heavy metals in agricultural soils in the cities from China ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
**表 1.** 中国城市郊区农田土壤重金属含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 城市    | Zn     | Cd    | Pb    | Cu    | Cr    | Ni    | As    | Hg    | 参考文献 |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 北京    | 92.60  | 0.13  | 23.20 | 17.33 | 61.00 | 24.0  | -     | -     | [5]  |
| 上海    | 106.10 | 0.199 | 26.30 | 31.60 | 84.20 | 44.30 | 7.66  | 0.12  | [6]  |
| 西安    | 151.16 | 1.45  | 55.01 | 52.24 | 88.41 | 34.14 | 9.88  | 1.38  | [7]  |
| 沈阳    | 77.70  | 0.20  | 34.10 | 24.60 | 62.20 | -     | 8.90  | 0.10  | [8]  |
| 杭州    | 153.60 | 0.06  | 39.79 | 39.85 | 34.94 | 36.80 | -     | -     | [9]  |
| 广州    | 162.6  | 0.28  | 58.0  | 24.0  | 64.65 | -     | 10.90 | 0.73  | [10] |
| 扬州    | 98.10  | 0.30  | 35.70 | 33.90 | 77.20 | 38.50 | 10.20 | 0.20  | [11] |
| 贵阳    | 84.70  | 0.302 | 43.20 | 43.10 | 75.3  | 38.3  | 18.09 | 0.22  | [12] |
| 全国背景值 | 74.20  | 0.097 | 26.00 | 22.60 | 61.00 | 26.90 | 11.20 | 0.065 | [13] |

### 3.1. 物理修复技术

#### 3.1.1. 工程措施

土壤重金属污染的主要工程措施包括换土、客土、深耕翻土、水洗、高温热解、蒸汽抽提等。传统的换土、客土法主要用于重污染区土壤，深耕翻土用于轻度污染的土壤，而高温热解和蒸汽抽提适用于含易挥发、半挥发污染物的土壤[17]。工程措施是比较经典的土壤重金属污染治理措施，具有彻底稳定的特点，但工程量大，费用高，易打乱土体结构，引发二次污染，因此只适用于小范围重污染的土壤治理。

#### 3.1.2 热处理技术

热处理技术主要包括热脱附(*Thermal Desorption*)技术、土壤蒸汽浸提(*Soil Vapor Extraction*)技术和超声/微波加热(*Ultrasonic/Microwave Heating*)技术。目前对土壤重金属的修复主要运用热脱附技术(如滚筒式热脱附、微波热脱附和远红外线热脱附)，它是通过载气直接或间接加热土壤，使当中易挥发的重金属从土壤中分离出来并进入气体处理系统的一种修复方法[18]。杨勤等[19]将 Hg 污染土壤分别设置在 300℃、500℃，停留时间 60 min、30 min 条件下，结果显示残余总汞降至 10 mg/kg，以残渣态为主，脱附率接近 90%，说明热脱附技术能够有效去除土壤汞，且环境风险小。

选用适合的辅助添加剂，热脱附效果越好。Comuzzi 等[20]对含 Hg 污泥进行热脱附处理时，添加 15% 浓度的  $(\text{C}_4\text{H}_9)_4\text{NCl}$  溶液后，发现其总汞去除率大幅提高。赵涛等[21]也得出相似的结论，与未添加氯盐处理比较，添加  $\text{MgCl}_2$  后土壤样品 A、B 热脱附总汞去除率分别从 65.67%、70.74% 升至 81.35%、84.91%。热脱附效果虽好，但耗能大、费用高，只适宜易挥发的污染物，且脱附的气体需要进行后期处理，今后在成套工艺方面还需进一步探索。

#### 3.1.3. 电动修复技术

电动修复是一种环保、高效，周期短的原位修复技术，特别适用于小范围粘质的重金属污染土壤。目前，已经在池体设计、电源供应、电极设置、电动过程及其机理、表面活性剂开发、电动修复模型建立等方面开展了一系列的探索。电动力能够使土壤中的重金属离子发生有效的迁移，并且迁移速率的大小与离子浓度和电场强度分布有关。马建伟等[22]研究发现在 1.0 V/cm 的直流电压条件下，土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  的迁移速率明显加快，达到 0.6786~0.6875 cm/h。而添加表面活性剂，电动修复的效果更好。Almeira 等[23]对电解液中添加硝酸效果进行研究，发现 Cd 去除率可达 98%。Zhou 等[24]添加一系列表面活性剂(HCl、

EDTA、Hac-NaAc、乳酸等)在 Cu 污染的土壤上, 结果表明乳酸的效果最好, Cu 的去除率可达 76%。电动修复方法仅仅只起到迁移富集作用, 并不能直接原位降解污染物。

因此, 为避免单一电动修复方法的不足, 需采用其他修复技术与其进行工艺上的联合使用。Karim 等[25]采用电动修复和水动相结合的方式对污染土壤进行修复实验, 结果表明, 在阳极上施加水动作用, 可使阴极产生的 OH<sup>-</sup> 向土柱的迁移产生抑制作用, 并且在 100 h 内成功去除约 97% 的重金属污染物, 修复效果显著。目前, 已开发出电动-Fenton 联用技术、电动表面活性剂/助溶剂联合处理技术、电动-超声波联用技术、电动-微生物联用技术等。今后的电动修复方向应在针对多种污染物多元联合修复技术上进行探索, 如热力学修复和电动技术联用、植物修复和电动技术联用等。此外, 还应增强电动修复技术实用性的检验, 如修复现场的地下水二次污染风险评估、含污染物电解液的处理和循环利用等。

当前的物理修复技术主要针对原位修复, 不论是热处理技术, 还是电动修复技术, 都只是对不可转移的土壤重污染区进行治理, 虽然修复效果显著, 但是造价高、治理难度大, 不适宜当前中国的土壤修复现状。因此, 今后土壤重金属物理修复技术, 需朝着经济适用、工程化应用的方向发展。

### 3.2. 化学修复技术

化学修复是利用加入到土壤介质中的化学修复剂的化学反应(主要包括沉淀、吸附、氧化还原、水解和 pH 调节等), 对退化土壤进行恢复或重建的一种治理方法, 当前最常用的是稳定/固化技术和淋洗/萃取技术。

#### 3.2.1. 稳定/固化技术

稳定化/固化(Solidification/Stabilization)修复技术是指向污染土壤中加入药剂, 将重金属捕获或固定在固体结构中, 从而降低其生物有效性, 具有修复周期短, 处理费用低, 可同时修复多种复合重金属污染, 易操作等优点, 为处理有毒有害废物的最佳技术[26]。在实际工程中已有多种金属氧化物、高分子聚合材料、有机质、生物炭及新型材料等大量改良药剂投入使用, 该技术的关键在于选择经济实用且环境友好的改良剂。

石灰可以提高土壤 pH, 而且对部分重金属离子有拮抗作用, 故被认为是抑制和促进酸性土壤上植物吸收重金属的有效措施[27]。而生物炭作为近年来一种新型的生物材料, 其较大的比表面积、较高的 pH 值和阳离子交换量(CEC)以及丰富的含氧官能团等潜在优势, 可与重金属产生络合反应, 增加专性吸附, 从而降低重金属的迁移率, 增加土壤肥力, 减少毒害作用[28]。Jiang 等[29]研究由水稻秸秆制成的生物炭的修复效果, 发现随着生物炭添加量的增加, 有效态 Cu(II)和 Pb(II)分别减少了 19.7%~100% 和 18.8%~77.0%, 而可还原态 Pb 较之前高出 2~3 倍, 可还原态 Cu 和 Cd 则分别增加 61.6% 和 132.6%。Uchimiya 等[30]研究也发现生物炭的施用对土壤中可容态重金属 Pb、Cd、Cu、Ni 具有显著的固定作用。稳定/固化土壤修复技术作为一种原位修复手段, 成本低, 简单易行, 但只是改变了重金属的赋存形态, 并没有从根本上去除重金属。今后, 对修复的场地应进行长期观察和监测, 尽量避免二次污染的发生。

#### 3.2.2. 淋洗/萃取技术

淋洗/萃取修复技术是用水或含有冲洗助剂的无机溶液(HNO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、螯合剂(EDTA, DTPA, HEDTA, EGTA)、表面活性剂(DDT, APG, SDS)、天然有机酸(草酸、酒石酸、柠檬酸)等水溶液淋洗土壤中污染物, 通过淋洗液的解吸、螯合、溶解或固定等作用使污染物和土壤分离, 以达到修复效果[31]。

研究表明, 选择合适的淋洗剂对于修复对象有不同的效果。在多数情况下, 水对重金属有一定的去除效果[32]; 草酸铵、硝酸铵和磷酸二氢铵等铵盐对 Zn 和 Pb 有理想的萃取效果[33]; 常用的人工螯合剂(如 EDTA 和 EDDS)等对 Cd 和 Pb 的去除率分别可达 82% 和 46% [34]; Y 等[35]研究 3 种天然有机酸对重

金属污染土壤淋洗效果,  $0.6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的柠檬酸和酒石酸, 淋洗 8 h 效果最好, 草酸的修复效果最差, 固液比对淋洗效果影响不大。单一的纳米材料对低分子质量有机酸淋洗 Pb、Zn 和 Cd 效率有限, 而经过有机酸改性后的纳米材料, 可显著提高对重金属的去除率[36]。因此, 筛选新型高效的淋洗剂是该项技术的重点和关键。

土壤淋洗修复技术具有适用范围广、处理容量大、见效快等特点, 但也存在价格昂贵, 洗脱废液二次污染等弊端, 在今后的研究中, 要根据淋洗剂自身特性, 联合不同淋洗剂, 开发经济实用、对土壤理化性质破坏小、易回收的淋洗产品和制定适宜的修复工艺程序。

### 3.3. 生物修复技术

生物修复技术是指利用生物的吸收、转化和代谢作用, 清除、降解或转移环境污染物, 达到生态恢复、环境净化的目的, 是被认为最有发展前景的污染修复技术。

#### 3.3.1. 植物修复

植物修复(*Phytoremediation*)技术是利用绿色植物吸收、提取、分解、转化或固定等作用去除环境中的污染物或降低其毒性[37]。根据植物修复土壤重金属的作用过程和机理, 可将植物修复分为植物萃取(*Phytoextraction*)、植物固定(*Phytostabilization*)、植物挥发(*Phytovolatilization*)、根际圈生物降解(*Rhizobiodegradation*)以及植物根际过滤(*Rhizofiltration*)等基本类型[38]。其中最具有应用前景的就是植物萃取技术, 它通过超富集植物(*Hyperaccumulation*)从土壤中吸取重金属, 并将其转移、存储到茎叶等器官进行集中处理, 达到降低或去除重金属的目的[39]。

因此, 筛选生物量大, 生长迅速, 重金属耐性高且富集能力强的超积累植物是植物萃取修复技术应用的关键。国际上发现的超富集植物有近 500 种, 多数草本植物对高浓度重金属有着天然的耐性, 但因其生物量小、生长缓慢、吸收不稳定等因素, 限制了其实际修复应用[40]。除草本植物外, 高累积的木本植物、蔬菜和农作物等生物量大的植物对重金属也有一定的富集能力, 包括可高积累镉的农作物和花卉品种(如朱苍花籽和溪口花籽油菜、紫茉莉等)。胡国涛等[41]在高镉( $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )生境下研究竹柳的生长吸附情况, 结果表明其生长不受抑制, 且地上部位吸收转移达总 Cd 量的 47%~77%。Marchio 等[42]实验对比了萝卜(*Raphanus sativus*)和油菜(*Brassica napus*)对重金属的耐性和提取能力, 结果表明块茎类的萝卜吸附性更强。

当前, 农田土壤重金属植物修复技术还处在实验阶段, 对植物修复成本及后续处置风险等环节也缺乏系统评估, 而且植物修复本身就存在修复元素单一, 修复周期长, 易二次污染等特点。因此, 还需要更多的大田实验数据来支撑这项技术的研究和推广。

#### 3.3.2. 微生物修复

重金属污染物的不可降解性, 决定了微生物修复只能通过对重金属的迁移和钝化作用来实现。目前修复的菌种主要是植物内生菌, 其对土壤中重金属活性的影响主要通过生物吸收富集、氧化还原、溶解沉淀等作用来体现[43]。Zemberyova 等[44]研究了 *Aspergillus niger* 菌吸附不同重金属离子的影响, 发现其吸附效果依次为 Zn、Cd、Cu、Cr(VI)和 Mn, 当微生物处于重金属离子的混合物中时, 微生物对重金属离子的吸附能力会产生一定的差异。Luo 等[45]实验也表明微生物吸附后, 废水中的重金属离子浓度会明显降低, 浓度会保持在  $0.001 \text{ mg/L}$  以下。实验证明: 微生物的氧化还原反应过程不仅可以影响重金属离子的价态和毒性, 而且能提高其流动性和溶解性。例如, Choppala 等[46]利用微生物将高毒性的 Cr(VI)还原为低毒的 Cr(III), 而且发现氧化还原作用可提高 Cr 的流动性和生物利用活性。

微生物修复技术应用前景广阔且发展潜力巨大, 筛选和培育特种微生物, 深入研究修复微生物与特

定生境中土著微生物的相互关系, 构建多菌种协同修复将是未来研究的重点。

### 3.3.3. 动物修复

动物修复是通过大型土壤动物(如蚯蚓、鼠类等)及其肠道微生物在土壤活动过程中, 对污染物进行分解、消化, 从而达到降低或消除污染物的目的[47]。其消除机理主要有三个方面: (1) 土壤动物吸收重金属, 形成金属硫蛋白或者富含半胱氨酸的小分子蛋白质; (2) 通过代谢作用产生多肽与重金属螯合, 降低其活性; (3) 在重金属胁迫下产生多种转运蛋白基因, 从而提高对重金属的抗性[48]。以蚯蚓为例, Amm [49]和 Hendriks [50]进行田间和室内模拟试验, 均证明了蚯蚓体内重金属含量与土壤重金属含量具有很强的相关性, 说明蚯蚓对 Pb、Cd、Zn 的生物可利用性和富集能力较强。寇永纲等[51]研究也表明, 随着 Pb 浓度的增加, 蚯蚓体内的富集量也不断增加。

动物修复可在一定程度上改善土壤条件, 促进养分循环, 提高生物可利用性, 但其对重金属的吸收有一定的耐性。因此改变单一的修复手段, 需要在动物-植物或者动物-微生物联合修复方面进一步探索。

### 3.4. 联合修复技术

联合修复可从一定程度上弥补单一修复技术的不足, 发挥各项技术的优势, 解决重金属污染源广, 污染种类多样的问题, 从而取得更好的修复效果。当前的联合修复技术主要有: 土壤动物-植物-微生物组合修复、降解菌/真菌-超积累植物的组合修复、化学氧化-生物降解修复、电动-生物修复、蒸气浸提-生物修复、光催化纳米材料修复等。田伟莉等[52]通过蚯蚓和根瘤菌的共同作用, 来观察黑麦草和白三叶对土壤重金属的吸收效果, 结果表明土壤中 Cu、Pb、Cd 浓度明显降低。通过对东南景天和玉米套种在不同浓度梯度下长达九个月的实验证明, 套种淋洗可加速土壤修复, 其土壤重金属 Cd、Zn 和 Pb 浓度分别降低 27.8%~44.6%、12.6%~16.5% 和 3.6%~5.7%, 并有助于解决 Cd/Zn/Pb 复合污染问题[53]。

选择经济适用, 可行性强的联合修复技术是现阶段农田重金属污染修复的关键, 而微生物-油料作物联合修复的方法, 特别适宜当下中国人多地少的现状。油料作物(如油葵、油菜、花生、蓖麻等)具有生物量大和较强的重金属耐性以及积累特性[54], 其种籽中也将积累一定的重金属, 但重金属主要与种籽中的蛋白质络合, 其脂肪中的重金属含量甚微, 因此油料作物在重金属污染土壤修复中的应用前景乐观。研究发现, 添加耐镉土壤微生物和油菜内生菌不仅能促进油菜根部和地上部的生长, 还能提高油菜植株对 Cd 和 Pb 的吸收效率, 其提高比例可达 16%~74% 和 59%~131% [55]; 同时, 施加菌肥能有效促进向日葵、蓖麻等油料作物对 Pb 的吸收, 从而降低土壤 Pb 含量; 而木霉突变菌株能显著提高油菜对农田土壤 Cd 污染的净化率[56]。因此, 开发油料作物与耐重金属微生物、内生菌的联合修复技术, 是适应当前土地利用现状的发展方向之一, 而该项技术未来发展的关键在于筛选合适的强降解能力的根际内生菌与耐重金属的油料作物, 以及寻找累积量高的重金属作物安全利用途径。

## 4. 研究展望

随着“土十条”的逐步落实, 人们对农田土壤重金属污染的认识以及环境保护的要求也不断提高, 不仅仅是消除土壤重金属污染, 而且对恢复土壤质量也提出了更高的要求。因此, 土壤重金属污染的联合修复技术必然是今后一段时间的研究重点, 而联合修复技术想要取得突破性的进展, 必须解决下面几个方面的问题:

(1) 针对中国人多地少的现状, 选择经济适用, 可行性强的联合修复技术(微生物-油料作物联合修复)是现阶段农田重金属污染修复的关键。因此, 需加强在驯化和筛选高效的动植物、微生物品种, 构建生物修复基因库, 优化组合修复技术方面的研究。

(2) 重金属污染土壤的治理必须以生态修复为前提, 所以联合修复技术需向绿色和环境友好的方向发

展, 进行生态风险控制, 避免带来二次污染和潜在的生态隐患, 借鉴欧美成熟的污染场地治理经验, 加快设备的研发和土壤修复技术的工程化应用。

(3) 各种修复技术应用之后, 必然会对土壤本底值和生物多样性带来影响。因此, 需要对修复土壤进行长期定点监测和生态风险控制, 保障农产品的安全。

## 基金项目

国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B02-6); 贵州省科学技术基金重点项目(黔科合 JZ 字 [2014]2012 号)。

## 参考文献 (References)

- [1] 宋想斌, 李贵祥, 方向京, 等. 重金属胁迫下施肥影响作物富集重金属的研究进展[J]. 作物杂志, 2015(2): 12-17.
- [2] Wu, G., Kang, H.B., Zhang, X.Y., Shao, H.B. and Chu, L. (2010) A Critical Review on the Bio-removal of Hazardous Heavy Metals from Contaminated Soils: Issues, Progress Eco-Environmental Concerns and Opportunities. *Journal of Hazardous Materials*, **174**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.113>
- [3] Wei, B.G. and Yang, L.S. (2010) A Review of Heavy Metal Contaminations in Urban Soils, Urban Road Dusts and Agricultural Soils from China. *Microchemical Journal*, **94**, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>
- [4] 徐子成, 陈思浩, 涂闽. 我国耕地重金属污染治理与防范刻不容缓[J]. 上海化工, 2013, 38(12): 1-2.
- [5] Xia, X.H., Chen, X., Liu, R.M., and Liu, H. (2011) Heavy Metals in Urban Soils with Various Types of Land Use in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, **186**, 2043-2050. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.104>
- [6] 赵一先. 环境影响评价中选取上海地区土壤重金属含量背景值的合理范围[J]. 科技创新与应用, 2016(7): 158-159.
- [7] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期灌溉农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [8] 吴学丽, 杨永亮, 徐清, 等. 沈阳地区河流灌渠沿岸农田表层土壤中重金属的污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 282-288.
- [9] 高清, 顾优丽, 龚梦丹, 等. 杭州市和睦湿地农田土壤重金属污染评价及关联特征研究[J]. 湿地科学与管理, 2014, 10(2): 48-52.
- [10] Li, J., Lu, Y., Yin, W., Gan, H. and Zhang, C. (2009) Distribution of Heavy Metals in Agricultural Soils Near a Petrochemical Complex in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **153**, 365-375. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0363-x>
- [11] Huang, S.S., Liao, Q.L., Hua, M., Wu, X.M. and Bi, K.S. (2007) Survey of Heavy Metal Pollution and Assessment of Agricultural Soils in Yangzhong District, Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, **67**, 2148-2155. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.043>
- [12] 王济. 贵阳市表层土壤中的重金属[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2006: 170-173.
- [13] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [14] 吴琼, 赵同科, 邹国元, 等. 北京东南郊农田土壤重金属含量与环境质量评价[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 7-12.
- [15] 李春颖. 沈阳市区域农田土壤重金属污染状况研究[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(9): 56-58.
- [16] 孙建光, 高俊莲, 徐晶, 徐明岗, 姜瑞波. 微生物分子生态学方法预警农田重金属污染的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(9): 15-16.
- [17] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 130-135.
- [18] Navarro, A., Caadas, I., Martinez, D., Rodriguez, J. and Mendoza, J.L. (2009) Application of Solar Thermal Desorption to Remediation of Mercury-Contaminated Soils. *Solar Energy*, **83**, 1405-1414. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.03.013>
- [19] 杨勤, 王兴润, 孟昭福, 张洁. 热脱附处理技术对汞污染土壤的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 203-208.
- [20] Comuzzi, C., Lesa, B., Aneggi, E., Dolcetti, G. and Goi, D. (2011) Salt-Assisted Thermal Desorption of Mercury from Contaminated Dredging Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, **193**, 177-182.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.047>

- [21] 赵涛, 王兴润, 杨晓进, 颜湘华. 氯盐对汞化合物污染土壤热脱附过程的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 425-430.
- [22] 马建伟, 王慧, 罗启仕. 电动力学-新型竹炭联合作用下土壤镉的迁移吸附及其机理[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1829-1834.
- [23] Almeida, O.J., Peng, C.S. and Abou-Shady, A. (2012) Simultaneous Removal of Cadmium from Kaolin and Catholyte during Soil Electrokinetic Remediation. *Desalination*, **300**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.023>
- [24] Zhou, D.M., Long, C., Alshawabkeh, A.N., Wang, Y.J. and Hao, X.Z. (2006) Pi-Lot-Scale Electrokinetic Treatment of a Cu Contaminated Red Soil. *Chemosphere*, **63**, 964-971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.059>
- [25] Karim, M.A. and Khan, L.L. (2001) Removal of Heavy Metals from Sandy Soil Using CEHIXM Process. *Journal of Hazardous Materials*, **81**, 83-102. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00310-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00310-1)
- [26] 秦樊鑫, 魏朝富, 李红梅. 重金属污染土壤修复技术综述与展望[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12Q): 199-208.
- [27] Cao, X.D., Ma, L.Q., Singh, S.P. and Zhou, Q. (2008) Phosphate-Induced Lead Immobilization from Different Lead Minerals in Soils Under Varying pH Conditions. *Environment Pollution*, **152**, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.008>
- [28] Chen, B., Zhou, D. and Zhu, L. (2008) Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Biochars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures. *Environment Science and Technology*, **42**, 5137-5143. <https://doi.org/10.1021/es8002684>
- [29] Jiang, J., Xu, R.K., Jiang, T.Y. and Li, Z. (2012) Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd (II) by the Addition of Rice Straw Derived Biochar to a Simulated Polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials*, **229-230**, 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.086>
- [30] Uchimiya, M., Lima, I.M., Klasson, K.T. and Wartelle, L.H. (2010) Contaminant Immobilization and Nutrient Release by Biochar Soil Amendment: Roles of Natural Organic Matter. *Chemosphere*, **80**, 935-940. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.020>
- [31] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂. 化学淋洗深层土壤固定联合技术修复重金属污染土[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 407-408.
- [32] Navarro, A. and Martinez, F. (2010) The Use of Soil Flushing to Remediate Metal Contamination in a Smelting Slag Dumping Area: Column and Pilot Scale Experiments. *Engineering Geology*, **115**, 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.07.001>
- [33] 莫良玉, 范稚莲, 陈海凤. 不同铵盐去除农田土壤重金属研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2407-2411.
- [34] Yang, R.X., Luo, C.L., Zhang, G., Li, X. and Shen, Z. (2012) Extraction of Heavy Metals from E-Waste Contaminated Soils Using EDDS. *Journal of Environmental Sciences*, **24**, 1985-1994. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)61036-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)61036-X)
- [35] Yi, L.S., Wang W.Y., Tao, Y., Liu, Y. and Wen, J. (2013) Removing Heavy Metals in Contaminated Soils by the Organic Acids. *Journal of Agro-Environment Science*, **32**, 701-707.
- [36] 王怡君, 张世榕, 肖罗怡, 等. 3 种纳米材料对低分子量有机酸淋洗铅, 锌和镉效率的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 6001-6008.
- [37] Babu, A.G., Shim, J., Bang, K.S., Shea, P.J. and Byungtaek, O. (2014) Trichoderma Virens PDR-28: A Heavy Metal-Tolerant and Plant Growth-Promoting Fungus for Remediation and Bioenergy Crop Production on Mine Tailing Soil. *Journal of Environmental Management*, **132**, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.009>
- [38] Marques, A.P.G.C., Rangel, A.O.S.S. and Castr, O.P.M.L. (2009) Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39**, 622-654. <https://doi.org/10.1080/10643380701798272>
- [39] Fulekar, M.H., Singh, A. and Bhaduri, A.M. (2009) Genetic Engineering Strategies for Enhancing Phytoremediation of Heavy Metals. *African Journal of Biotechnology*, **8**, 529-535.
- [40] Verburggen, N., Hermans, C. and Schat, H. (2009) Molecular Mechanisms of Metal Hyperaccumulation in Plants. *New Phytologist*, **181**, 759-776. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x>
- [41] 胡国涛, 于阳, 杨兴, 等. 速生树种竹柳对镉的吸收, 积累与分布特性[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1508-1514.
- [42] Marchio, L., Assolari, S., Sacco, P. and Zerbi, G. (2004) Phytoextraction of Heavy Metals by Canola (*Brassica napus*) and Radish (*Raphanus sativus*) Grown on Multicontaminated Soil. *Environmental Pollution*, **132**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.04.001>
- [43] Vijayarathavan, K. and Yun, Y.S. (2008) Bacterial Biosorbents and Biosorption. *Biotechnology Advances*, **26**, 266-291.



<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.02.002>

- [44] Zemberyova, M., Okenicova, L., Bartekova, J., Simonovicova, A. and Gaplovska, K. (2014) Bioaccumulation of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Live Biomass of *Aspergillus Niger* Wild Type Strains Isolated from Different Environments. *Fresenius Environmental Bulletin*, **23**, 597-602.
- [45] Luo, S.L., Li, X.J., Chen, L., Chen, J. and Wan, Y. (2014) Layer-by-Layer Strategy for Adsorption Capacity Fattening of Endophytic Bacterial Biomass for Highly Effective Removal of Heavy Metals. *Chemical Engineering Journal*, **239**, 312-321. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.029>
- [46] Choppala, G., Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Skinner, W. and Seshadri, B. (2015) Concomitant Reduction and Immobilization of Chromium in Relation to Its Bioavailability in Soils. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 8969-8978. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1653-6>
- [47] 刘军, 刘春生, 纪洋, 刘玉升, 阴启蓬. 土壤动物修复技术作用的机理及展望[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2009, 40(2): 313-316.
- [48] 唐浩, 朱江, 黄沈发, 邱江平. 蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 17-25.
- [49] Amm, A.R. and Bouche, M.B. (1997) Heavy Metal Linkages with Mineral, Organic and Living Soil Compartment. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**, 649-655.
- [50] Hendriks, A.J. and Ma, W.C. (1999) Modelling and Monitoring Organochlorine and Heavy Metal Accumulation in Soils, Earthworms and Shrews in Rhinedelta Floodplains. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **37**, 70-77.
- [51] 寇永纲, 伏小勇, 侯培强, 等. 蚯蚓对重金属污染土壤中铅的富集研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1): 62-64.
- [52] 田伟莉, 柳丹, 吴家森, 王立江, 陈昆柏. 动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用[J]. 水土保持学报, 2013, 27(05): 188-192.
- [53] 黄细花, 卫泽斌, 郭晓方, 史学峰, 吴启堂. 套种和化学淋洗联合技术修复重金属污染土壤[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 3067-3074.
- [54] 雷平. 微生物-油料作物联合修复重金属污染耕地技术探讨[J]. 湖南农业科学, 2016(9): 121-123.
- [55] Sheng, X.F. and Xia, J.J. (2006) Improvement of Rape (*Brassica napus*) Plant Growth and Cadmium Uptake by Cadmium-Resistant Bacteria. *Chemosphere*, **64**, 1036-1042. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.051>
- [56] Wang, B., Liu, L., Gao, Y. and Chen, J. (2009) Improved Phytoremediation of Oilseed Rape (*Brassica Napus*) by Trichoderma mutant Constructed by Restriction Enzyme-Mediated Integration (REMI) in Cadmium Polluted Soil. *Chemosphere*, **74**, 1400-1403. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.027>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)