

# 土壤重金属污染及修复研究简述

高彦波, 蔡飞\*, 谭德远, 翟鹏辉, 郭宏凯 (北京东方园林生态股份有限公司, 北京 100012)

**摘要** 随着社会的不断发展, 土壤重金属污染问题越来越受到人们的关注。该研究主要对土壤重金属污染的来源、危害及被污染土壤修复进行了分析。土壤重金属污染的来源主要有自然输入和人为输入。土壤重金属污染不仅会对土壤微生物产生影响, 而且会对动物、植物甚至人类的生存产生深远影响。为减轻土壤的重金属污染, 从物理修复、化学修复、生物修复 3 个方面进行了阐述。

**关键词** 土壤; 重金属污染; 生态效应; 土壤重金属修复; 生物协同修复

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)16-093-03

## Discussion of Soil Heavy Metal Pollution and Remediation

GAO Yan-bo, CAI Fei\*, TAN De-yuan et al (Beijing Orientscape Ecology Corp., Beijing 100012)

**Abstract** In recent years, heavy metals pollution in soil is more and more serious, which has been paid more and more attention. This paper explained the sources and impacts of soil heavy metal pollutants. The main sources of heavy metal pollution is natural and anthropogenic inputs. Soil heavy metal pollution not only impact on soil microorganisms, but also have a profound impact on the animals, plants and even the survival of humanity. To alleviate the pollution of soil heavy metal, the paper described physical restoration, chemical remediation and bioremediation.

**Key words** Soil; Heavy metal pollution; Ecological effects; Remediation of soil heavy metal; Bio-synergy remediation

随着社会人口的不断增加、化工经济的迅猛发展, 化肥、农药、矿产资源等被大量消耗。这些资源在消耗过程中产生的含有重金属的废水、废气都被排入到土壤中, 使得土壤遭受越来越严重的重金属污染。由于离子迁移性和动植物的吸附性, 这些重金属会进入到生物链系统进行循环。当这些重金属进入到人体时就会对人类的健康造成伤害<sup>[1]</sup>。如何防治土壤的重金属污染已成为全球性问题之一。

### 1 重金属污染的主要来源

土壤中重金属的来源主要有 2 个部分组成, 一部分是自然输入, 另一部分是人为活动输入。自然输入主要指成土母岩的风化分解和凋落的生物质腐化分解, 在自然情况下流入土壤, 造成土壤重金属富集<sup>[2]</sup>。人类活动输入主要指人类在矿产资源开发、工业发展及农业生产等过程中造成的重金属在土壤中的积累, 是土壤重金属污染的主要原因<sup>[3]</sup>。目前, 人为活动造成的土壤重金属输入主要受废气沉降、农业活动、矿业生产、固体垃圾排放等方面的影响。

**1.1 废气沉降** 人类在生产、生活中产生的含有重金属的粉尘、废气以及烟气被排放到空气中后, 会通过重力或者雨雪沉降过程流回至土壤中。有研究发现, 煤、石油等矿物燃料燃烧后产生的挥发性金属排放到大气中后, 约有近 1/3 重金属沉降在周边 10 km 的范围内。在对北京市一次强沙尘暴降尘的重金属微量元素监测中发现, 测量中的重金属元素含量均超出北京市土壤含量的本底值<sup>[4]</sup>。

**1.2 农业活动** 随着化工技术的不断发展, 农业生产活动中的化学肥料、有机农药的使用力度不断加大, 使得土壤中重金属含量富集加重。高太忠等<sup>[5]</sup>在研究磷肥对土壤重金属的污染状况时, 发现磷肥中的重金属镉在土壤中的富集十分明显。由于当前动物饲料配方中添加了部分重金属元素,

有机肥料中重金属元素也出现了超标现象。农药中含有铜、汞、砷等重金属元素。农药的大量使用使得土壤中的重金属元素进一步增加<sup>[6]</sup>。

另外, 由于缺乏监管力度, 用污水对农田进行灌溉的现象时有发生。污水中的汞、镉、砷、铜等重金属元素导致土壤中重金属元素大大增加。污水、污泥的随意排放使土壤中的氮、磷、钾等营养元素在富集的同时, 也会使其重金属元素不断增加<sup>[7]</sup>。

**1.3 矿业生产** 在矿业生产过程产生的尾矿等废弃物露天堆放, 经风化、降雨等作用后废弃物中含有的重金属会渗入土壤中, 导致土壤重金属污染<sup>[8]</sup>。再者, 金属矿山在开采过程中被酸性废水溶解了的重金属元素会以离子形式随废液的排放进入土壤, 造成土壤重金属超标。2001 年中国环境监测部门在对金属矿山采选工艺废水调查时发现, 金属矿废水排放中含有的重金属量达 210 多 t, 占工业重金属总排放量的 18.93%<sup>[9]</sup>。

**1.4 固体垃圾** 经日晒、雨淋后, 长期堆积的固体垃圾内部的重金属以辐射状向周围土壤、水体扩散, 其中以矿业和工业固体废弃物污染最为严重。王亚平等<sup>[10]</sup>通过对某矿山固体垃圾堆放地的研究, 发现土壤中镉、汞、铬、铜、锌、铅、砷等重金属含量均高于当地背景值。

### 2 土壤重金属污染的危害

**2.1 对植物的危害** 重金属进入土壤后会以离子形式进入植物体内, 进而对植物产生毒害作用, 造成植物体变异<sup>[11]</sup>。这主要是因为吸收到植物体内的重金属会抑制植物的光合作用、酶活性, 改变细胞膜的通透性, 进而诱导其产生对植物不利的某些酶或有毒物质<sup>[12]</sup>。重金属元素污染的危害还表现在使植物的营养缺乏, 降低某些活性酶的有效性以及对植物运输和转运钙、镁等矿质元素的能力<sup>[13]</sup>。Dahiya 等<sup>[14]</sup>研究发现, 土壤中较高的镍含量会显著影响小麦对氮的吸收。Narwal 等<sup>[15]</sup>发现, 当土壤中镉浓度较高时, 玉米植株磷浓度和吸收量降低。

**作者简介** 高彦波(1973-), 男, 黑龙江林口人, 工程师, 从事生态修复与环境工程方面的研究。\* 通讯作者, 硕士研究生, 研究方向: 土壤生态修复。

**收稿日期** 2015-03-27

**2.2 对动物的危害** 重金属污染还可导致土壤中原生动物种类减少,数量降低,群落多样性下降。通过对受到重金属污染的土壤进行研究,发现污染后的土壤中原生动物群落呈现出简单化、不稳定化的特点,群落演替呈次生演替趋势<sup>[16]</sup>。有研究指出,重金属污染不但会对土壤动物构成危害,而且会使土壤动物的群落和数量减少,在受重金属污染的土壤中优势类群和常见类群的动物数量明显减少;重金属污染会导致土壤动物群落的多样性指数、均匀性指数、密度类群指数下降<sup>[17]</sup>。唐浩等<sup>[18]</sup>调查了鲁中地区受污染农田蚯蚓群体构成,发现重金属污染农田蚯蚓种群的多样性指数为1.583 5,相对于未被污染农田中的2.236 2,已明显降低。

**2.3 对微生物的危害** 当土壤中的重金属元素富集到一定浓度时,还会对微生物的代谢、生长、生存产生不利影响,主要表现有微生物生物量和活性细菌菌落数量减少,微生物活性受到抑制,微生物的生物量碳与有机碳比值降低,呼吸强度减弱,进而使土壤中微生物的区系、群落结构和功能发生改变<sup>[19]</sup>。段学军等<sup>[20]</sup>在研究镉对稻田土壤生物、酶的活性的影响时,发现镉对土壤中脲酶活性有显著的影响。

### 3 重金属污染土壤的修复

目前,对重金属污染土壤的修复技术主要包括物理修复、化学修复和生物修复3种,其中生物修复是当今社会研究的重点。

**3.1 物理修复** 物理修复主要包括电动修复、电热修复、土壤淋洗3种。第1种修复主要是通过通电,使得重金属离子定向移动到一端,从而将其去除<sup>[21]</sup>。电热修复主要是针对土壤中熔点低、易挥发的重金属。当用高频电压对土壤加热时,土壤重金属就会受热挥发,达到去除土壤中重金属的目的<sup>[22]</sup>。土壤淋洗是利用淋洗液将土壤中的重金属溶解到土壤淋洗液中,再将淋洗液中的重金属离子置换出来的一种土壤修复方法。该方法是现有条件下最成熟的物理修复方法<sup>[23]</sup>。

此外,物理修复方法还包括固化土壤修复法、稀释法、排土填埋法。目前,物理修复法存在的最大问题是处理成本高,而且存在再次污染的风险。

**3.2 化学修复** 化学修复主要是指向被重金属污染过的土壤中加入能够改变土壤中重金属化学性质的污泥、有机质等外源物质。这种外源物质会与土壤中金属离子结合,使得金属离子的迁移性和被植物吸收的可能性降低,进而防止这些重金属元素进入生态循环系统<sup>[24]</sup>。由于各种金属离子的迁移性各不相同,对不同金属离子只能使用不同的固定物质。例如,使用 $\text{CaCO}_3$ 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节土壤的酸碱性,促使土壤中的镉、铜、汞、锌等元素形成碳酸盐或氢氧化物沉淀<sup>[25]</sup>。在土壤中加入含硫物质,可以使土壤中的镉、汞生成硫化镉、硫化汞沉淀,进而减少重金属对土壤的污染<sup>[26]</sup>。

化学修复的缺点是它只能使重金属元素在土壤中固定下来,阻止其进入生物循环系统,但并没有从根本上将其从土壤中完全去除。在一定条件下,当金属离子的形态发生改

变时易造成“二次污染”。

**3.3 生物修复** 生物修复技术是上世纪开始研究的新型修复技术,主要是利用动植物的新陈代谢活动对土壤中的重金属进行固化、分离、降解、富集、修复<sup>[27]</sup>。该技术主要有动物修复技术和植物修复技术两种形式。生物修复技术主要有2种途径对受污染土壤进行修复。一种是在土壤中改变重金属形态,使其沉淀在土壤中,不再被生物吸收利用;另一种就是通过生物吸附,使其沉淀在生物体中,通过生物体代谢达到对重金属的削减、固化作用<sup>[28]</sup>。作为一种新兴的绿色环保技术,由于生物修复经济、适用范围广、环境友好、符合可持续性发展的目标等,已成为当今社会研究的热点。

**3.3.1 动物修复技术。**研究表明,土壤中的部分低等生物可以吸收土壤中富集的金属元素<sup>[29]</sup>。在受污染的土壤中,蚯蚓可以通过被动扩散作用和摄食作用使重金属进入其体内,待金属在蚯蚓体内富集后可以采用一定的方法将蚯蚓从土壤中驱出,集中处理,从而达到修复的目的<sup>[30]</sup>。蚯蚓在污染土壤中还能有效地改变土壤中重金属活性,促进和强化植物对重金属的修复作用<sup>[31]</sup>。

动物修复技术的缺点是只能在一定程度上减少重金属含量,而且对动物的伤害也较严重;当动物体内重金属含量达到一定程度时会导致其死亡,动物死亡后其体内的重金属还会进入土壤中再次污染土壤;另外,低等生物对生存环境的要求苛刻,限制了动物修复技术的发展<sup>[32]</sup>。

**3.3.2 植物修复技术。**植物修复是指通过利用植物、植物根系微生物对土壤中重金属进行修复的技术<sup>[33]</sup>。目前,植物修复主要是利用植物降解、植物萃取、植物挥发和植物过滤等作用来降低重金属污染物的生物有效性或清除土壤中的重金属污染物,降低重金属的环境风险<sup>[34]</sup>。随着对重金属植物修复技术研究的不断深入,尤其是耐重金属、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根际物理化学特性研究的深入,植物修复技术的含义和应用将得到延伸<sup>[35]</sup>。

**3.3.3 生物协同修复。**基于植物修复原理,利用土壤动物、微生物和植物的协同作用,改善土壤条件,促进植物生长,提高重金属的生物有效性,提高生物的吸收效率和修复效率,加速重建健康的土壤生态系统。一方面,微生物能够通过产生铁载体、ACC脱氧酶、合成植物生长激素等方式促进植物的生长,增加植物的生物量,有助于植物对重金属的积累;另一方面,微生物代谢活动中产生的有机酸、铁载体、氨基酸等小分子代谢产物能够活化土壤重金属,进一步提高植物对重金属的富集量。

由于生物协同修复具有成本低、绿色环保、不存在再次污染等特点,它已成为矿山恢复、重金属污染土壤改良等生态修复领域新兴的、高效的生物修复技术。

## 4 展望

随着工业技术的不断发展,土壤重金属污染问题变得更加严重。土壤作为人类赖以生存的根本基础,如何使土壤免受重金属污染已成为亟待解决的重大课题之一。目前,虽然

建立了土壤重金属污染标准,但基本上局限于农业用地的土壤。对于其他形式利用的土地,如污水排放地、工矿废弃物排放地等,还没有建立土壤重金属污染标准。在今后一段时间,应结合土壤利用方式和人体健康评估标准建立相应的土壤污染标准,并且在此基础上制定相应的防治办法。研究表明,生物修复技术应是今后研究的重点,尤其生物协同修复技术,由于其具有费用低、环境友好等特点,已成为当今社会研究的重点。

#### 参考文献

- [1] NRIAGU J O, PACYNA J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals [J]. *Nature*, 1988, 333 (6169): 134-139.
- [2] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 王龙龙, 郭笃发, 李桥. 土壤-植物系统重金属污染研究[J]. *绿色科技*, 2013(6): 236-238.
- [4] 张万儒, 杨光耀. 强沙尘暴降尘对北京土壤的影响[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(1): 66-69.
- [5] 高太忠, 李景印. 土壤重金属污染研究与治理现状[J]. *土壤与环境*, 1999, 8(2): 137-140.
- [6] 夏家洪, 骆永明. 关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(1): 87-90.
- [7] 胡文. 土壤-植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学林学院, 2008.
- [8] 张文江. 大型金属矿山环境污染及防治研究[J]. *资源节约与环保*, 2013(1): 67-68.
- [9] 於方, 张强, 过孝民. 我国金属矿采选业废水污染特征分析[J]. *金属矿山*, 2003(9): 40-44.
- [10] 王亚平, 鲍征宇. 恬矿库周围土壤中重金属存在形态特征研究[J]. *岩矿测试*, 2000, 19(1): 7-13.
- [11] PETERS R W. Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils [J]. *J Hazard Mater*, 1999, 66(1): 151-210.
- [12] 黄益宗, 朱永官. 森林生态系统镉污染研究进展[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 101-108.
- [13] 姜庭, 杨丽娟. 土壤重金属的生物有效性及对植物的毒害作用[J]. *吉林农业科学*, 2009, 34(5): 28-32.
- [14] DAHIYA D J, SINGH J P, KUMAR V. Nitrogen uptake in wheat as influenced by the presence of nickel [J]. *Arid Land Res Manag*, 1994, 8(1): 51-58.
- [15] NARWAL R P, SINGH M, SINGH J P, et al. Cadmium-zinc interaction in maize grown on sewer water irrigated soil [J]. *Arid Land Res Manag*, 1993, 7(2): 125-131.

- [16] HOLWAY DAVID A, SUAREZ ANDREW V. Homogenization of ant communities in mediterranean California: the effects of urbanization and invasion [J]. *Biol Conserv*, 2006, 127(3): 319-326.
- [17] DAI J, BECQUER T, ROULLER H J, et al. Heavy metal accumulation by two earthworm species and its relationship to total and DTPA-extractable metals in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(1): 91-98.
- [18] 唐浩, 朱江, 黄沈发, 等. 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.
- [19] 杨元根, PATERSON E, CAMPBELL C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. *环境科学*, 2001, 22(3): 44-48.
- [20] 段学军, 闵航. Cd 胁迫下稻田土壤生物活性与酶活性综合研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(3): 422-427.
- [21] 周东美, 邓昌芬. 重金属污染土壤的电动修复技术研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4): 505-508.
- [22] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 409-417.
- [23] 李玉双, 胡晓钧, 孙铁珩, 等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(3): 596-602.
- [24] 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1990-1996.
- [25] GOMES P C, PFFONTES M, DA SILVA A G, et al. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65(4): 1115-1121.
- [26] 邱莉萍, 张兴昌. Cu Zn Cd 和 EDTA 对土壤酶活性影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 30-33.
- [27] DIELS L, DE SMET M, HOOYBERGHS L, et al. Heavy metals bioremediation of soil [J]. *Mol Biotechnol*, 1999, 12(2): 149-158.
- [28] WILSON S C, JONES K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Environ Pollut*, 1993, 81(3): 229-249.
- [29] SABATINI D A, KNOX R C. Transport and remediation of subsurface contaminants: colloidal, interfacial, and surfactant phenomena [J]. *Amer Chemical Society Symp Series*, 1992, 491: 14-25.
- [30] 王瑞兴, 钱春香, 吴淼, 等. 微生物矿化固结土壤中重金属研究[J]. *功能材料*, 2007, 38(9): 1523-1526.
- [31] 冯凤玲, 成杰民, 王德霞. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 809-814.
- [32] 王振中, 郭永灿. 土壤重金属污染对蚯蚓(*Opisthopora*)影响的研究[J]. *环境科学学报*, 1994, 14(2): 236-243.
- [33] LOMBI E, ZHAO F J, DUNHAM S J, et al. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(6): 1919-1926.
- [34] GHOSH M, SINGH S P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products [J]. *Asian J Energy Environ*, 2005, 6(4): 18.
- [35] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. *Curr Opin Biotech*, 1997, 8(3): 279-284.

(上接第 81 页)

- [20] 韩明丽, 张志友, 陈丽萍, 等. 猕猴桃溃疡病发生的影响因素及其防治方法[J]. *湖南农业科学*, 2013(21): 77-80.
- [21] SCOTICHINI M, MARCELLETTI S, FERRANTE P, et al. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*: are-emerging, multi-faceted, pan-demic pathogen [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2012, 13: 631-640.
- [22] 王振荣, 高同春, 顾江涛, 等. 猕猴桃溃疡病主要发病条件研究[J]. *安徽农业科学*, 1998, 26(4): 347-348, 351.
- [23] 田呈明, 梁英梅, 高爱琴, 等. 基于栽培管理措施的猕猴桃细菌性溃疡病防治技术[J]. *西北林学院学报*, 2000, 15(4): 72-76.
- [24] 张毅, 徐进. 猕猴桃溃疡病防治田间药效试验[J]. *陕西农业科学*, 2012(1): 32-34.
- [25] 王西锐, 李艳红. 噻霉酮防治猕猴桃溃疡病药效试验[J]. *烟台果树*, 2013(1): 18-19.

- [26] 李瑶, 承河元, 钱子华, 等. 猕猴桃溃疡病防治研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2001, 28(2): 139-143.
- [27] 张锋, 陈志杰, 张淑莲, 等. 猕猴桃溃疡病药剂防治技术研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(3): 71-75.
- [28] 龙友华, 夏锦书. 猕猴桃溃疡病防治药剂室内筛选及田间药效试验[J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(10): 84-86.
- [29] 盛存波, 安德荣, 鲁燕文, 等. 生防菌株 B563 防治猕猴桃溃疡病的初步研究[J]. *西北农业学报*, 2006, 15(3): 75-78.
- [30] 申哲, 黄丽丽, 涂璇, 等. 植物内生放线菌活性物质防治猕猴桃溃疡病[J]. *中国生物防治*, 2008, 24(4): 329-334.
- [31] 魏海娟, 刘萍, 杨燕, 等. 多羟基双萜醌提取物对猕猴桃溃疡病菌的抑制作用[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(1): 126-130.