

土壤重金属污染现状及修复技术研究进展

邵云, 郝真真, 王文斐, 陈静雯, 王敬嫒, 王温澎

(河南师范大学 生命科学院, 河南 新乡 453007)

摘要:近年来,重金属污染对环境和人类健康造成了严重的危害。污染范围广、危害严重令人堪忧,如何修复受重金属污染的土壤已成为社会关注的焦点。现对我国重金属污染的现状、来源加以阐述,结合已有重金属污染修复技术的优缺点,发现重金属污染的复杂性不是单一的修复技术就能解决的,当务之急需积极寻求新的复合修复技术,根治重金属污染土壤。

关键词:土壤;重金属;污染;修复技术

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)17-0193-04

近年来,由于人类的频繁活动,土壤中的金属元素含量超标,引发重金属污染,备受社会关注。土壤中重金属污染主要是指Cd、Pb、As、Hg、Cr、Cu、Zn、Ni等重金属含量超标^[1]。土壤重金属污染已成为全世界关注的环境问题,它不仅影响农作物的生长,直接导致产量降低,品质下降,对经济造成亏损;而且重金属的潜伏期较长,难降解,毒性大,一旦被人体吸收积累,危害极大^[2-3],如:Cd中毒会影响人体的消化系统,损害肾脏和肝脏酶系统,最终导致高血压、心血管疾病的发生;Hg在人体内积累过量会引发神经异常,脑组织受损,眼睛、皮肤、泌尿系统也会出现一系列的不适症状;Pb对胎儿的神经系统损害极大,致使胎儿不能正常发育,脑细胞损害严重,智力发展就会受到阻碍,而且去除人体内的Pb十分困难^[4-5]。因而,怎样妥善恢复受重金属污染的土壤迫在眉睫。

1 土壤重金属污染现状

工农业的快速发展不仅带来经济的繁荣,同时也带来了严重的环境问题,土壤中积累和吸收的重金属毒性物质已影响到人们的生活。据不完全统计,全世界平均每年向环境中排放Pb、Hg、Ni、Cu、Mn的量约为 5.0×10^6 、 1.5×10^4 、 1.0×10^6 、 3.4×10^6 、 1.5×10^7 t,严重影响人类环境健康和食品安全^[6-8]。目前,我国约有20万km²的耕地受重金属污染,每年因此超过1000万t的粮食减产,1200万t的粮食受到污染,损失高达200亿元^[9-12]。根据农业部的调查显示,我国污水灌溉区面积约1.4×

10⁶ hm²,而重金属污染面积占总面积的64.8%;其中污染范围最大的是Hg和Cd,受其污染耕地面积分别为 3.2×10^4 hm²和 1.3×10^4 hm²,涉及到多个地区和省市^[13]。我国大多数城市土壤都受到了不同程度的重金属污染,如沈阳市近郊菜地土壤中Zn、Pb、Cd含量都高于土壤环境质量标准值,分别为其3.87、3.96、7.06倍^[14],某污灌区重金属Cd含量远远超过土壤环境质量标准值,高达130 mg·kg⁻¹^[4];北京市近郊农田土壤中,重金属Hg、Pb、Cd含量连续5年的平均值(2005—2009年)都高于远郊^[15];南京市土壤受重金属Hg污染较重^[16];深圳市于2010测定土壤中Hg的质量分数数据显示,37%采样点中的Hg测定值超过土壤环境标准值,中度污染和严重污染采样点约占6%^[17]。此外,香港、海南、福建、贵州、广西、江西、珠江三角洲、北方河套地区等许多省市都发现了不同程度Cr、Cd、Hg、Pb、Ni、Zn、Cu和As污染^[18]。

2 土壤重金属污染来源

人为因素和自然因素是导致重金属污染的两大来源,其中,人为因素是主要成因。人为因素主要包括生产、农业和生活来源。生产来源是指在工业生产中未能完全净化处理的“三废”排放到环境中,重金属元素随大气和水体等进入土壤,造成污染。农业来源分为2个方面:一方面是人们为了寻求最大效益,大量使用含有重金属的农用物资,长期使用和不合理的堆置使土壤受到污染^[19-20];另一方面是人们对含重金属污水的认识不足、防患欠缺或在缺水的情况下,采用污水灌溉农田,直接导致重金属进入土壤。生活来源是指人们对含重金属物品(如电池、温度计、涂料等)的危害意识缺乏,不能正确安置和处理废弃的含重金属物品,长时间堆置或随意丢弃,导致它们以所处的位置为中心,向四周扩散,造

第一作者简介:邵云(1973-),女,博士,教授,现主要从事小麦生理生态等研究工作。E-mail:shaoyun73@126.com

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD14B08, 2013BAD07B14, 2013BAD07B07)。

收稿日期:2016-05-20

成污染^[21-22]。

3 重金属污染土壤修复技术研究进展

3.1 物理修复技术

3.1.1 工程修复 工程修复主要包括客土、换土以及深耕翻土等。深耕翻土用于修复轻度污染的土壤,而客土和换土则常用于重度污染土壤的修复。最初在英国、美国、荷兰等国家被采用,能够彻底降低危害物,是一种有效、稳定的方法。但这些方法工程量大、成本高、未能根除重金属,存在占用土地、二次污染和破坏土体结构等问题,因此,只适于小面积污染土壤的修复^[21]。

3.1.2 热解吸法 热解吸法是对具有挥发性的重金属(如 Hg、As 等)进行加热,将其从土壤中解析出来的一种方法。KUNKEL 等^[23]利用热解吸法对土壤中 Hg 的去除率达到了 99.8%。NAVARRO 等^[24]利用太阳能作为能源来热解吸土壤中的 Hg 和 As。该方法适用于治理具有挥发性的重金属污染物,工艺简单,但费用高,耗能大,且存在对挥发物进行处置的问题,还需要进一步的研究工作^[25]。

3.1.3 土壤淋洗 土壤淋洗技术是人们应用最早、最多和技术最成熟的物理修复方法。它将土壤固相中的重金属随着淋洗液转移到液相中,再回收处理的方法。此种方法成效显著,但推广困难,操作复杂,费用昂贵,工作量大,破坏土壤肥力。

3.2 化学修复技术

化学修复技术主要是向土壤中投入稳定化剂来改变重金属的理化性质,产生一系列的吸附、沉淀、络合、氧化还原和离子交换等反应,降低重金属的生物有效性,减少对动植物的危害。此项技术的关键在于选择经济有效的稳定化剂,包括碳酸钙、硅酸盐、石灰、沸石、赤泥、骨粉等无机物,以及畜禽粪便、秸秆堆肥和泥炭等有机物。稳定化剂的作用机理各不相同,例如投入石灰,可使土壤 pH 升高和土壤中的 Cu、Zn、Cd 等元素形成碳酸盐类或氢氧化合物类沉淀。廖敏等^[26]在研究石灰降低土壤中的重金属时发现,加入石灰后,土壤中的可变电荷增多, Cd²⁺ 与 CO₃²⁻ 生成 CdCO₃ 沉淀,降低 Cd 的生物有效性,将其固定在土壤中。有机物不仅能够促使重金属形成硫化物沉淀,而且有机物中的腐殖酸也能与其形成螯合或络合物,降低它们的活性。有些重金属间有拮抗作用,向污染土壤中加入少许危害较轻的具有拮抗性重金属元素,也可以降低土壤中重金属的毒性和有效性。周启星等^[27]研究发现加入少许 Zn 后,植物对 Cd 的吸收有所降低,Zn 与 Cd 表现为拮抗作用。这种方法简单易行、修复快速、投入小,对大面积中低度污染土壤的修复具有优越性^[28]。但不是一种永久的修复措施,因重金属仍存在土壤中,只改变了形态,容易再度活化产生“二次污染”。

3.3 生物修复技术

生物修复技术是利用植物、动物和微生物的生命代谢活动,改变土壤环境中的重金属形态或降低其含量,实现净化环境、恢复生态效应的生物措施。生物修复技术具有安全、经济、对土壤结构干扰小、不会造成二次污染等特点,受到人们的关注,得以实施、应用和推广。

3.3.1 植物修复技术 植物修复技术是指利用植物以及根际微生物体系提取、挥发、吸收、转化、降解或固定土壤中重金属的一种修复技术。植物修复技术是社会广泛关注的绿色环保技术,不仅对土壤结构波动小,安全系数高,而且不会造成二次污染,经济环保。寻找超富集植物是植物修复技术的核心。目前,已知的 500 多种超富集植物中,只有少数能够耐受复合重金属,其余的只对单一重金属具有抗性。Cd 超富集植物有忍冬^[29]和串叶松香草^[30];As 超富集植物蜈蚣草^[31]、大叶井边口草^[32];Pb 超富集植物苧麻^[33];Ni 超富集植物车前草^[34];Cr 超富集植物李氏禾^[35];Zn 超富集植物狼把草、香根草^[36]以及 Zn、Cd 多重金属超富集植物东南景天^[37]、印度芥菜^[38]、朝天委陵菜^[39]等。

3.3.2 动物修复技术 动物修复技术是指利用一些本土动物对其所处污染土壤的修复,对土壤中的重金属进行吸收、分解和转化作用,改善土壤环境。MAITY 等^[40]研究发现蚯蚓能够降低 Pb 和 Zn 的有效性。伏小勇等^[41]研究发现蚯蚓对土壤中 Pb、Cu、Zn 的吸收能力较强。同时蚯蚓还能够改良土壤,提高肥力。马正学等^[42]研究发现梅氏扁豆虫和腐生波豆虫对 Pb 的吸收能力很强。但是,污染较严重的土壤会对土壤动物造成一定的伤害,影响修复效果。所以,轻度污染的土壤适合用此技术来修复。

3.3.3 微生物修复技术 微生物修复技术就是利用土壤中某些微生物(如藻类、细菌和真菌等)对污染土壤中的重金属进行氧化还原、吸附、沉淀的作用,从而降低重金属的毒性^[43]。微生物的代谢产物(有机酸、络合物等)和细胞壁中的物质(肽聚糖、磷壁酸、脂多糖等)不仅能溶解、沉淀、螯合重金属,还能通过氧化还原作用改变其形态,降低其毒性。POLTI 等^[44]从甘蔗中筛选出的 *Streptomyces* sp. MCI 能有效降低土壤中 Cr(VI)的生物利用率。假单胞杆菌能将 Fe²⁺、As²⁺ 等金属离子氧化,降低其活性^[43]。TIWARI 等^[45]研究发现,从香蒲中分离的一些微生物能将土壤中的 Cd 和 Cu 钝化固定,降低它们的生物有效性。微生物可通过改变根际环境,以提高植株对重金属的耐受性,从而提高修复效率,促进植物形成。LEUNG 等^[46]研究发现土著菌根真菌能够促进蜈蚣草植株对 As 的吸收,提高植株的耐受性。LINS 等^[47]研究发现接种幼套球囊霉后,对重金属 Cu 固定、隔离,减少了其向银合欢植株地上部分的转移,Cu 含量降

低。因而,选择合适的菌根菌株在实际修复中至关重要。

3.4 农业生态修复技术

农业生态修复技术是在原有的耕作方式和管理方法上做出调整,再种植一些特殊植物(不进入食物链的植物)来改善重金属污染的土壤,主要有农艺和生态修复。农艺修复是指通过合理使用农药、化肥和有机肥,调整耕作管理制度以及作物品种,种植不进入食物链的植物,来减轻重金属的污染。生态修复是指通过控制土壤中生态因子(水分、养分、湿度等)和调节土壤氧化还原电位,来降低重金属的危害。农业生态修复技术操作方便,容易实施,对环境的波动不大,费用少,但是修复效果不显著,耗时较长。

4 展望

近年来,土壤重金属污染已严重威胁到人类健康和生态安全,如何治理受重金属污染的土壤迫在眉睫。然而,单个修复技术在修复复杂的重金属污染土壤时很难达到预期的效果。所以如何将物理、化学、生物、农艺生态修复技术进行合理的结合,寻求经济、高效、安全、环保的修复技术,成为未来的发展趋势。将其推广到大田生产实践中,从而使重金属污染控制到最低限度。

参考文献

- [1] 申丽敏,赵同科,郑怀国,等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2014(S2):213-222.
- [2] WENZEL W W, UNTERBRUNNER R, SOMMER P, et al. Chelate-assisted phytoextraction using canola(*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 83-96.
- [3] CAI Q, LONG M L, ZHU M, et al. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead-zinc smelter in Guizhou, China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(11): 3078-3082.
- [4] 诸振兵. 重金属污染及其生物修复[J]. 科技资讯, 2012(6): 139-140.
- [5] 黄宝圣. 镉的生物毒性及其防治策略[J]. 生物学通报, 2005(11): 26-28.
- [6] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002(1): 79-84.
- [7] 李法云, 臧树良, 罗义. 污染土壤生物修复技术研究[J]. 生态学杂志, 2003(1): 35-39.
- [8] 闫兴凤, 李高平, 王建党, 等. 土壤重金属污染及其治理技术[J]. 微量元素与健康研究, 2007(1): 52-54.
- [9] 林强. 我国的土壤污染现状及其防治对策[J]. 福建水土保持, 2004(1): 25-28.
- [10] 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(4): 809-814.
- [11] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006(5): 505-508.
- [12] WU G, KANG H, ZHANG X, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1): 1-8.
- [13] 崔斌, 王凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012(1): 373-375, 447.
- [14] 宋菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 镉、锌、铅复合污染对菠菜的影响[J]. 农业环境保护, 1996(1): 9-14.
- [15] 陆安祥, 孙江, 王纪华, 等. 北京农田土壤重金属年际变化及其特征分析[J]. 中国农业科学, 2011(18): 3778-3789.
- [16] 黄顺生, 吴新民, 颜朝阳, 等. 南京城市土壤重金属含量及空间分布特征[J]. 城市环境与城市生态, 2007(2): 1-4.
- [17] 张铭杰, 张璇, 秦佩恒, 等. 深圳市土壤表层汞污染等级结构与空间特征分析[J]. 中国环境科学, 2010(12): 1645-1649.
- [18] 孙建光, 高俊莲, 徐晶, 等. 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(2): 338-343.
- [19] NZIGUHEBA G, SMOLDERS E. Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries[J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 53-57.
- [20] CARBONELL G, DE IMPERIAL R M, TORRIJOS M, et al. Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilizer amendments on soil properties and heavy metals distribution in maize plants (*Zea mays* L.) [J]. Chemosphere, 2011, 85(10): 1614-1623.
- [21] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013(10): 1727-1736.
- [22] 余志, 黄代宽. 重金属污染土壤修复治理技术概述[J]. 环保科技, 2013(4): 46-48.
- [23] KUNKEL A M, SEIBERT J J, ELLIOTT L J, et al. Remediation of elemental mercury using in situ thermal desorption (ISTD) [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(7): 2384-2389.
- [24] NAVARRO A, CANADAS I, MARTINEZ D, et al. Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils [J]. Solar Energy, 2009, 83(8): 1405-1414.
- [25] WANG J X, FENG X B, ANDERSON C W N, et al. Remediation of mercury contaminated sites-a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 221-222: 1-18.
- [26] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. 农业环境保护, 1998(3): 6-8, 49.
- [27] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报, 1994(4): 438-441.
- [28] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011(7): 1441-1453.
- [29] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬: 一种新发现的镉超富集植物[J]. 生态环境学报, 2013(4): 666-670.
- [30] ZHANG X, XIA H, LI Z, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 2063-2066.
- [31] CHEN T, WEI C, HUANG Z, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(11): 902-905.
- [32] 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(5): 777-778.
- [33] 黄闰, 孟桂元, 陈跃进, 等. 苎麻对重金属铅耐受性及其修复铅污染土壤潜力研究[J]. 中国农学通报, 2013(20): 148-152.
- [34] 陆引强, 黄建国, 滕应, 等. 重金属富集植物车前草对镉的响应[J]. 水土保持学报, 2004(1): 108-110, 114.
- [35] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物: 李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz) [J]. 生态学报, 2006(3): 950-953.
- [36] ANTIOCHIA R, CAMPANELLA L, GHEZZI P, et al. The use of vetiver for remediation of heavy metal soil contamination [J]. Analytical and Bioana-

lytical Chemistry, 2007, 388(4): 947-956.

[37] SUN Q, YE Z H, WANG X R, et al. Cadmium hyperaccumulation leads to an increase of glutathione rather than phytochelatins in the cadmium hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(11): 1489-1498.

[38] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P B A, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Nature Biotechnology, 1995, 13(5): 468-474.

[39] 胡嫣然, 周守标, 吴龙华, 等. 朝天委陵菜的重金属耐性与吸收性研究[J]. 土壤, 2011(3): 476-480.

[40] MAITY S, PADHY P K, CHAUDHURY S. The role of earthworm *Lampito mauritii* (Kinberg) in amending lead and zinc treated soil[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7291-7298.

[41] 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 等. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009(1): 78-83.

[42] 马正学, 龚大洁, 宁应之, 等. 铅锌矿采矿业废物污染对土壤原生动物

的影响[J]. 甘肃科学学报, 2002(3): 53-57.

[43] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. 土壤, 2007(4): 497-502.

[44] POLTI M A, GARCIA R O, AMOROSO M J, et al. Bioremediation of chromium (VI) contaminated soil by *Streptomyces* sp. MC1[J]. Journal of Basic Microbiology, 2009, 49(3): 285-292.

[45] TIWARI S, KUMARI B, SINGH S N. Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of *Typha latifolia* growing on fly ash dumps[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 1305-1310.

[46] LEUNG H M, YE Z H, WONG M H. Interactions of mycorrhizal fungi with *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) in As-contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2006, 139(1): 1-8.

[47] LINS C E L, CAVALCANTE U M T, SAMPAIO E V S B, et al. Growth of mycorrhized seedlings of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, in a copper contaminated soil[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 181-185.

Research Progress on Heavy Metal Contaminated Soils and Research Advances in Remediation Technology

SHAO Yun, HAO Zhenzhen, WANG Wenfei, CHEN Jingwen, WANG Jingruo, WANG Wenpeng
(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007)

Abstract: In recent years, it is a fact that heavy metal pollution causes harm to the environment and human health, which has a wide range and high degree. How to remediate the polluted soil has become a focus of public attention. This paper expounded the status and sources as well as harm of heavy metal pollution in soil, and reviewed the advantages and disadvantages of different remediation technologies, and found that the heavy metal pollution were so complex that a single technology could not solve. Urgently, we need to seek new composite remediation technology for the remediation of heavy metal contaminated soils.

Keywords: soil; heavy metal; pollution; remediation technology

2017 年《中国林副特产》征订启事

《中国林副特产》应用技术性科技期刊, 国内外公开发刊, 双月刊, 大 16 开。中国标准连续出版物号: CN23—1303, ISSN1001—6902。被“中国学术期刊(光盘版)”、“中国期刊网”全文数据库、“万方数据—数字化期刊群”、中文科技期刊数据库(全文版)、中国核心期刊(遴选)数据库收录, 是中国科技论文统计源期刊。

办刊宗旨: 以应用技术为主, 立足林业, 面向社会, 为科学地保护、开发和利用林区特色资源, 推广科技成果, 传递科技与产品信息, 交流经营决策经验, 开发林区特色产品和提供致富门路服务。

主要报道: 山野菜、中草药、果树、油料、香料、蜜源等林区特产经济植物的调查、保护、开发种植和加工; 野生动物的调查、养殖、加工; 食用菌的引种、栽培、加工; 林区农作物种植; 园林绿化; 林业多种经营管理经验; 科技信息等。

订阅办法: 全国各地邮局均可订阅, 也可直接向编辑部订阅。邮发代号: 14—202。每册定价 8.00 元, 年价 48.00 元。双月 20 日出版。

海外总发行: 中国国际图书贸易集团有限公司, 发行代号: BM4107。

地址: 黑龙江牡丹江市爱民区北山街 165 号

邮编: 157011

网址: www.fbsic.com

电子信箱: zgltc@sohu.net

电话: (0453)6527409

传真: (0453)6528052