

# 土壤重金属污染现状及生物修复技术综述

程树青<sup>1</sup>, 夏建东<sup>2</sup>, 赵宽<sup>2\*</sup> (1. 安庆职业技术学院, 安徽安庆 246003; 2. 安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246133)

**摘要** 在讨论土壤重金属污染物来源和分布的基础上, 着重分析了重金属污染土壤研究现状及其植物修复技术和微生物修复技术, 旨在为土壤重金属污染的有效修复提供科学依据。

**关键词** 土壤; 土壤污染; 重金属; 修复技术

**中图分类号** X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)12-0040-03

## Current Situation of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioremediation Technology

CHENG Shu-qing<sup>1</sup>, XIA Jian-dong<sup>2</sup>, ZHAO Kuan<sup>2\*</sup> (1. Anqing Vocational & Technical College, Anqing, Anhui 246003; 2. School of Resources and Environments, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246133)

**Abstract** Based on discussing the source and distribution of heavy metals, the current situation and research on plant of heavy metal contaminated soil remediation and microbial remediation was emphatically analyzed, which in order to provide scientific evidence for effective remediation of heavy metal pollution in soil.

**Key words** Soil; Soil pollution; Heavy metal; Remediation technology

随着科学技术和城镇化的迅速发展, 许多重金属被大量应用, 并且通过各种方式被排放到自然环境中。由于人类对重金属处置不当, 已经对生态环境造成了严重污染。由于重金属具有隐蔽性和长期存在性, 会通过水体和大气等方式迁移转化并在自然环境中富集, 因此, 分析重金属在土壤中的迁移、转化和累积规律, 探寻有效的重金属污染处理技术方法已经成为人类环保领域中亟待解决的问题<sup>[1-4]</sup>。笔者综述了重金属污染土壤现状及生物修复技术, 以期对土壤重金属污染的有效修复提供科学依据。

## 1 土壤重金属污染研究现状

我国总人口约占世界人口的 20%, 但耕地面积仅占世界耕地面积的 7%, 人均占有耕地面积仅为世界人均占有耕地面积的 25%。据统计, 2001 年我国受到污染的耕地面积达 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 约占总耕地面积的 20%, 农田污染面积达 130 余万  $\text{hm}^2$ , 土壤污染造成的粮食减产约 1 000 万  $\text{t/a}$ , 同时因受污染而不能食用的粮食也高达 1 200 万  $\text{t/a}$ , 造成经济损失大约 200 亿元。然而, 土壤污染中以重金属污染最为典型, 全世界 Hg 的排放量约 1 500 万  $\text{t/a}$ , Cu 340 万  $\text{t/a}$ , Pb 500 万  $\text{t/a}$ , Mn 1 500 万  $\text{t/a}$ , Ni 100 万  $\text{t/a}$ 。根据国土资源部统计的结果显示, 目前我国 10% 以上的耕地已受到重金属污染。

随着全球经济的迅速发展, 特别是矿山的开采、冶炼、电镀等行业蓬勃发展, 使重金属对土壤的污染十分严重。湖南省是世界著名的有色金属产地, 其发达的采矿业和冶炼业长期的粗放发展使当地重金属污染严重, 浏阳、郴州等地多次出现血铅、尿镉超标及家禽重金属中毒的事件。长江三角洲及珠江三角洲等一些工业发达的地区也有较严重的重金属污染。农业上含 Cd 农药和化肥的大量使用, 也使得重金属

对土壤的污染进一步加剧。重金属污染的土壤会危害人体健康。我国土壤中 Pb、Cd、Zn 等重金属污染状况日益严重, 重金属通过食物链富集在人体内, 进而危害人体健康。2008 年以来, 我国已发生百余起重金属污染事故, 其中 Pb、Cd、As 等重金属污染事故达 30 余起<sup>[5]</sup>。

## 2 重金属在土壤中的迁移、转化和累积, 及其影响因素

**2.1 迁移、转化和累积** 重金属在土壤中的迁移转化受其化学行为影响, 包括重金属的沉淀溶解状况、重金属的被吸附状况以及植物对其的吸收利用状况<sup>[6]</sup>。由于重金属在土壤中容易聚集, 主要包括积累在土壤表层、迁移至地表水或地下水和植物体 3 种归趋, 还可以通过其他途径转化成毒性更强的化合物, 具有潜在危害。土壤中重金属的迁移转化包括物理迁移、化学迁移、物理化学迁移和生物迁移 4 种途径<sup>[7]</sup>。土壤中常见的重金属有 Cd、Cr、As、Hg 等, 它们在土壤-植物界面的迁移转化和吸收利用受多种因素的影响<sup>[8]</sup>。

①Cd 的迁移转化。Cd 在土壤中主要是以水溶性 Cd 和非水溶性 Cd 2 种形式存在。对于水溶性 Cd, 如  $\text{CdCl}_2$  和  $\text{CdCO}_3$ , 在土壤中比较容易迁移转化; 而对于非水溶性 Cd, 如 Cd 的沉淀物, 在土壤中就不容易迁移, 更不容易被植物吸收利用。Cd 会被具有吸附性的土壤吸附于土壤表层, 当土壤中有积水时, Cd 会随着水的流动而进行迁移转化。Cd 又很容易被绿色植物吸收, Cd 在植物各部分的分布浓度从大到小依次为根、叶、枝的秆皮、花、果、籽粒。②Cr 的迁移转化。土壤中的 Cr 通常以 2 种化合价存在: 2 价和 6 价,  $\text{Cr}^{6+}$  的毒性远远大于  $\text{Cr}^{3+}$ 。土壤中存在的 Cr 大多难溶于水, 不容易迁移, 主要积聚在土壤表层。③Hg 的迁移转化。土壤中的 Hg 元素主要以离子吸附和共价吸附的 Hg、可溶性 Hg 和难溶性 Hg 3 种形式存在。Hg 在进入土壤时被土壤胶体吸附聚集在表层, 不容易向深层土壤迁移; 土壤中的无机 Hg 之间又能通过氧化还原反应相互转化, Hg 在特定细菌的作用下在氧化环境中进行氧化反应生成  $\text{Hg}_2^{2+}$ ; Hg 在土壤中的迁移转化又可以通过植物吸收作用来进行。④As 的迁移转化。土壤中 As 的存在形式有水溶性 As、交换性 As 和难溶性 As 3 种。As

**基金项目** 安徽省科技厅公益性技术应用研究项目(15011d04050); 安庆师范学院人才引进项目(140001000032)。

**作者简介** 程树青(1984—), 男, 安徽安庆人, 助教, 硕士, 从事土壤-植物化学研究。\* 通讯作者, 讲师, 博士, 从事逆境植物-土壤生理生态学研究。

**收稿日期** 2017-01-01

也是在耕层土壤积累。土壤中的 As 可以通过与其他组分发生反应进行迁移转化,如 As 与碱土金属化合可形成亚砷酸盐,或与重金属化合;As 可以被胶体吸附,与有机物发生螯合、络合;交换性 As 可以被植物吸收来迁移转化。

## 2.2 影响因素

**2.2.1 土壤理化性质的影响。**土壤的理化性质对重金属在土壤中的迁移转化有一定影响。它间接地通过影响重金属存在形式来影响重金属的生物有效性,进而影响其迁移转化过程。土壤的理化性质主要包括酸碱值、土壤氧化还原电位、有机质等。①酸碱值。土壤中的酸碱值直接影响土壤重金属的迁移转化规律。土壤 pH 较低,土壤中阳离子数量增加,土壤中一些盐类的溶解度也随之增大,进而影响土壤对重金属元素的吸附过程,使得重金属的被吸附量减少,重金属的生物有效性变大,增大了重金属的迁移转化速度。而土壤 pH 升高到中性至微碱性时,重金属的生物有效性将会受到抑制,土壤中有机和表面胶体对重金属的吸附量将会增加。②氧化还原电位。土壤的氧化还原电位是影响重金属存在形式和生物有效性的主要因素。它通过影响重金属元素在土壤中的行为和迁移转化情况来制约其迁移转化情况。一般来说,土壤中水溶性重金属元素含量会随着氧化还原电位的升高而增大,使植物对土壤重金属的吸收也相应升高;但如果土壤氧化还原电位较低,许多重金属易产生硫化物沉淀,使土壤中重金属元素含量降低。③土壤有机质。土壤有机质是影响土壤对重金属的吸附性和生物有效性的主要理化性质之一。在微生物的作用下,土壤有机质会形成土壤腐殖质与土壤中的无机颗粒结合形成复合胶体,土壤对重金属元素的吸附性和生物有效性也因此而增加。因此,有机质含量较高的土壤对重金属的吸附能力高于有机质含量低的土壤。

**2.2.2 重金属含量及形态的影响。**重金属的生物有效性大小取决于土壤中的重金属含量,而土壤中的氧化-还原、吸附-解吸和沉淀-溶解平衡又制约着土壤中重金属含量。土壤中 Cd 的存在形态主要是可交换态,土壤中 Pb 的存在形式主要是铁锰氧化物和碳酸盐。

**2.2.3 植物种类的影响。**不同植物体内重金属含量存在很大差异,相同植物对不同重金属的吸收情况也存在不同。有研究表明,印度芥菜对于不同重金属元素的忍耐能力也不同,印度芥菜能够正常生长在含 Cu 250 mg/kg 或 Pb 500 mg/kg 的土壤上,但在含 Cd 200 mg/kg 的土壤上会出现“镉中毒”现象。另有试验表明,相同植物不同器官中的重金属含量也会不同,重金属含量从大到小依次为根、叶、茎、花、果<sup>[9]</sup>。

## 3 土壤重金属污染对作物及人类的影响

**3.1 对作物生长发育的影响** 当土壤中重金属含量超过某一临界值时,会在植物的根、茎、叶及果实中大量积累并对它们产生一定毒害作用,轻则影响生长发育,重则导致植物死亡或者通过食物链影响人类健康。Cd 是危害植物生长发育的有毒元素,如果土壤中的 Cd 含量过高,会破坏叶片的叶绿素结构,使叶绿素含量降低,进而使叶片出现黄化症状。土

壤中的 Pb 进入植物并在其中累积,制约着植物的光合作用和代谢过程,影响植物的生长发育。Hg 虽然不是植物生长发育的必需元素,但其对植物的影响很大。Hg 能破坏植物的叶片结构,从而导致植物根系生长受限,使植株表现矮小和发育不良。当土壤环境中同时受到多种重金属污染时,就会形成复合型污染,这种污染往往要比单一型污染严重,对植物的生长发育影响较大。

**3.2 对人类健康的危害** 土壤被重金属污染后,通过一系列迁移转化累积在土壤表层,一旦含量超过一定数值便会会影响植物的发育或通过食物链影响人类机体功能,长期接触可能会致畸、致癌和致突变,甚至出现急性中毒或死亡。Pb 在人体血液中的含量不得超过 0.2 mg,如果超过这一数值就会出现急性中毒现象,症状表现为内分泌失调、神经系统失调、造血功能障碍和消化系统紊乱,Pb 对儿童的智力发育也存在一定影响<sup>[10]</sup>。Cd 的毒性巨大,其能够在人体内蓄积,主要损害人体肾脏器官和骨骼结构,症状表现为泌尿系统失调,还会引发糖尿病、高血压,如在 1955 年日本的由土壤 Cd 污染引起的“痛痛病”事件。Hg 也不是人体必需元素,Hg 会通过呼吸道进入肺泡,经血液循环进入人体血液后,能够在脑组织中聚集,临床主要表现神经系统症状,如头痛头晕、肢体麻木和语言、行动、意识失调等。1953 年日本发生的“水俣病”事件就是因为人体食入了含有甲基汞的鱼类而出现病状。

## 4 土壤重金属污染的植物修复技术

**4.1 植物修复技术** 世界各地都面临着越发严重的土壤重金属污染问题,因此运用有效的解决方法治理土壤污染刻不容缓,其中植物修复技术是一项应用广泛的修复技术。植物修复技术是指利用植物处理有毒有害污染物的方法,通过提取、吸收、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥或地表、地下水中污染物的方式来达到处理效果<sup>[11-12]</sup>。植物萃取、植物固化、根圈生物修复和植物转化技术 40 项修复技术都属于植物修复技术范畴之内<sup>[13]</sup>。植物修复技术是一项与工程实践活动紧密结合的土壤环境污染控制技术,在全球范围内已经逐渐发展成为一个热点研究领域。国外已陆续有一些专门从事土壤或水体污染修复工作的公司进入市场,使植物修复技术的市场面向全国、面向全世界,所以,植物修复技术作为新型的污染修复技术有着巨大的发展潜力。

**4.1.1 植物萃取技术(Phytoextraction)。**植物修复技术中的植物萃取技术是土壤污染处理过程中必须要进行的途径。由于某些特殊植物具有吸收重金属元素的能力,可以利用这些特殊植物的特殊功能,通过植物根系将土壤中 1 种或几种有毒有害重金属元素吸收,并将其转移至植物地上茎叶部分,通过收割地上部物质,从而达到去除污染物的一种方法。而应用于该项技术的特殊超积累植物都具有相同的生物量大、抗病虫害能力强和对重金属具有较强富集能力的特点。而目前常见的超积累植物有油菜、杨树、苎麻等<sup>[13-14]</sup>。

**4.1.2 植物固化技术(Phytostabilization)。**土壤重金属的移动性能够通过植物根系组织中的一些特殊物质来降低,进而

降低土壤重金属含量,这种方法被称为植物固化技术。在该技术实施过程中,可以通过土壤添加剂和植物的双重作用,使重金属污染物的扩散迁移过程受到控制,但土壤中的重金属含量并未因此而降低,只是将其暂时固定起来,使植物对重金属的吸收减少和重金属的生物有效性降低。该技术对于处理废弃的重金属污染和放射性核素污染物能够起到很大的作用。

**4.1.3 根圈植物修复技术。**根圈植物修复技术是指距根系表面几毫米土壤区域的分泌物和脱落物能够刺激细菌和真菌快速生长,而细菌和真菌都具有将土壤中有机污染物转化为矿物质的能力,从而达到处理效果。同时,在此植物修复过程中,土壤有机碳、细菌和真菌含量都会升高,对土壤中有机化合物的降解过程有一定促进作用,也对土壤重金属污染的修复具有积极作用。

**4.1.4 植物转化技术。**植物通过吸收土壤或水体中的有机和无机污染物,然后利用植物本身的新陈代谢过程将这些污染物降解。另外一种表现形式是通过植物自身的挥发过程向环境中排入易挥发物质,从而达到去除土壤中污染物的目的。对于疏水性一般的污染物,可以通过植物转化技术将其去除。但是该项技术会使污染物从土壤中转移到大气中,对大气环境质量造成危害,影响人类健康。

**4.2 土壤重金属的植物修复技术** 土壤重金属植物修复是指种植一些超富集重金属植物,利用其对重金属元素的吸收、累积,使重金属污染物含量降低的环境友好的生物技术。依据修复植物的修复功能和特点可分为植物提取修复、植物挥发修复和植物稳定修复<sup>[9]</sup>。

**4.2.1 植物提取修复。**植物提取修复是利用重金属积累植物或超积累植物对土壤中重金属污染的修复过程<sup>[9]</sup>,具体包括土壤中重金属的释放、植物根际效应、重金属由根向地上部的转移和地上部对重金属的积累4个过程<sup>[15]</sup>。而植物提取修复技术包括持续植物提取和诱导植物提取2个过程。

**4.2.1.1 持续植物提取过程。**持续植物提取是利用超积累植物吸收土壤中重金属元素的特性来降低土壤中重金属元素含量的方法;超积累植物是一种能够超量吸收和积累重金属元素的植物,其体内的重金属含量比一般植物要多百倍以上,我国目前发现的超积累植物有蜈蚣草和东南景天等。研究表明,超积累植物蜈蚣草植物体内As含量可达1%~2%,它在改良土质土壤和对污染土壤重金属的提取方面具有很大优势。

**4.2.1.2 诱导植物提取过程。**诱导植物提取是土壤经过化学物质作用将重金属的溶解性提高,使普通植物被诱导吸收富集土壤中重金属元素的方法。其中可利用诱导植物提取过程来降低土壤重金属含量的植物包括向日葵和玉米等,向日葵和玉米本身不是超积累植物,但在添加螯合剂后,使利用普通植物治理土壤重金属污染成为可能。

**4.2.2 植物挥发修复。**植物挥发是指植物将土壤中一些挥发性污染物吸收、积累到体内后并将其转化为气态物质释放到大气中的一种植物修复方法。Hg是一种以多种形式存在

于土壤并对土壤环境危害很大的重金属。尤其是土壤中的离子态Hg能够在厌氧细菌作用下转变成毒性很大的甲基Hg。而植物挥发修复技术就是利用单质重金属Hg的易挥发特点,运用转基因植物将从土壤中吸收的Hg转化为可挥发、毒性小的单质Hg,再通过植物叶片的蒸腾作用将单质Hg释放到大气中,从而去除土壤中的Hg污染<sup>[16]</sup>。利用植物挥发修复技术挥发土壤污染的Hg时,虽然单质Hg的毒性比土壤中的离子态Hg和无机Hg的毒性都小,但其被排入到大气环境中仍会对大气环境产生新的影响和危害。

**4.2.3 植物稳定修复。**植物稳定修复是指利用种植非食用的重金属耐性能源植物以改变重金属的存在形态或价态,降低重金属污染物的流动性和活性,以防重金属被渗滤到地下水或扩散到空气中造成更大的环境危害。目前,在矿区该项修复技术被普遍应用,如废弃矿山的尾矿复垦工程,各种尾矿库的植被重建等。由于矿山废弃地植被遭到破坏,使重金属的迁移性升高,利用传统处理方法难以有效解决其问题,而植物稳定修复技术就是通过种植植物使其覆盖率增加,减少水土流失,并且在稳定矿山废弃地重金属的同时能取得显著的经济效益和生态效益,能够很好地防止重金属迁移扩散带来的环境污染。但还要注意的一点就是植物稳定修复只是暂时地稳定重金属,并未彻底消除其带来的污染,它在一定环境条件下可能会重新恢复活性进而对环境产生更大威胁。

**4.2.4 提高植物修复功效的方法。**目前,植物修复技术已经被世界许多国家所接受,而且还有很多科学家研究者致力于研究提高植物修复效率的方法。研究表明,主要是从提高土壤中重金属的有效性和改进超积累植物的性能2个方面开展研究<sup>[17]</sup>。

**4.2.4.1 提高土壤重金属的有效性。**土壤中重金属大多是以不溶性沉淀形式存在,并吸附在土壤表层,生物有效量较少,这限制了植物提取修复技术的实施。近年来,我国对提高土壤重金属有效性的研究主要集中在以下2个方面:①增加土壤溶液中有效态重金属浓度。有研究显示,土壤中重金属生物有效性的主要影响因素是土壤pH,且土壤溶液中有效态重金属的浓度随着土壤酸碱值的降低而升高,因此,可以通过施用铵态氮肥或土壤酸化剂等来改变土壤的酸碱值,从而增加土壤中重金属的可利用性。②通过土壤微生物增加金属生物有效性。无菌土壤环境中的Cd在无氧和有氧条件下都不会释放出来,而有菌土壤环境中的Cd则会被活化进而释放到环境中,使其有效性明显增加。有研究者发现,某些植物根系分泌出的物质通过溶解铁氧化物能够增加重金属的生物有效性<sup>[18-19]</sup>。植物对矿物质的吸收利用过程也可以通过根际微生物来促进,如Fe、Mn<sup>[20]</sup>。

**4.2.4.2 改进超积累植物的性能。**尽管植物修复技术处理土壤重金属污染的应用前景广阔,但仍存在着一定缺陷<sup>[21]</sup>。如果要解决这些问题,就要改进超积累植物的性能,如现代分子生物技术就能够大大加快植物修复应用的步伐。

- [5] SOUVERAIN S, RUDAZ S, VEUTHEY J L. Matrix effect in LC-ESI-MS and LC-APCI-MS with off-line and on-line extraction procedures [J]. *J Chromatogr A*, 2004, 1058(1/2): 61–66.
- [6] PATEL K, FUSSELL R J, GOODALL D M, et al. Analysis of pesticide residues in lettuce by large volume-difficult matrix introduction gas chromatography - time of flight-mass spectrometry (LV-DMI-GC-TOF-MS) [J]. *Analyst*, 2003, 128(10): 1228–1231.
- [7] The Commission of the European Communities. Directive 2002 /657 /EC, Official Journal of the European Communities L 221 [S]. EC, 2002; 8–36.
- [8] MARTÍNEZ VIDAL J L, ARREBOLA F J, FRENICH A G, et al. Validation of a gas chromatographic-tandem mass spectrometric method for analysis of pesticide residues in six food commodities. Selection of a reference matrix for calibration [J]. *Chromatographia*, 2004, 59(5): 321–327.
- [9] MERCER G E. Determination of 112 halogenated pesticides using gas chromatography/mass spectrometry with selected ion monitoring [J]. *J AOAC Int*, 2005, 88(5): 1452–1462.
- [10] 庞国芳, 李岩, 范春林, 等. 水果和蔬菜中 450 种农药及相关化学品残留量的测定液相色谱-串联质谱法; GB/T 20769—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 庞国芳, 刘永明, 范春林, 等. 水果和蔬菜中 500 种农药及相关化学品

残留的测定 气相色谱-质谱法; GB/T 19648—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

- [12] 潘灿平, 张微, 王一茹, 等. 蔬菜、水果中 51 种农药多残留的测定 气相色谱-质谱法; NY/T 1380—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 贺利民, 刘祥国, 曾振灵. 气相色谱分析农药残留的基质效应及其解决方法 [J]. *色谱*, 2008, 26(1): 98–104.
- [14] CAJKA T, MASTOVSKA K, LEHOTAY S J, et al. Use of automated direct sample introduction with analyte protectants in the GC-MS analysis of pesticide residues [J]. *J Sep Sci*, 2005, 28(9/10): 1048–1060.
- [15] 许秀丽, 赵海香, 李礼, 等. 分析保护剂补偿基质效应-气相色谱-质谱法快速测定水果中 40 种农药残留 [J]. *色谱*, 2012, 30(3): 267–272.
- [16] MARTÍNEZ-GALERA M, LÓPEZ-LÓPEZ T, GIL-GARCÍA M D, et al. A comparative study of the correction of systematic errors in the quantitation of pyrethroids in vegetables using calibration curves prepared using standards in pure solvent [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2003, 375(5): 653–660.
- [17] CUADROS-RODRÍGUEZ L, GARCIA-CAMPAÑA A M, ALMANSALÓPEZ E, et al. Correction function on biased results due to matrix effects application to the routine analysis of pesticide residues [J]. *Analytica chimica acta*, 2003, 478(2): 281–301.

(上接第 42 页)

## 5 微生物修复技术

微生物在生物修复技术方面也担当着重要角色,更是在土壤重金属污染修复中起着特殊作用。由于微生物能够亲和吸附土壤中的重金属,从而使土壤重金属毒性降低。在重金属污染较严重的土壤中,往往存在着类似真菌和细菌等耐重金属的微生物,它们虽然难以使重金属降解,但其能通过改变重金属的物理化学特性等多种作用形式来制约重金属的迁移转化,直至使土壤重金属毒性降低,达到修复目的。

微生物对土壤重金属活性的影响主要从吸附作用、溶解作用、氧化还原作用和菌根真菌作用对重金属污染土壤进行修复 4 个方面体现<sup>[22]</sup>。目前,我国利用微生物修复土壤环境可在一定程度上取得相当好的经济效益和生态效益,且还具有成本低、二次污染少的优点;但由于其吸附累积的容量有限,使该方法在实施过程中受到一定局限。因此,在处理土壤重金属污染问题上,需要将微生物修复技术与植物修复等其他生物修复技术相结合,从而实现土壤重金属污染的有效治理<sup>[3]</sup>。

## 6 展望

目前,土壤重金属污染问题越来越严重,重金属污染问题备受重视,不断地有研究者表示需要对土壤重金属污染修复进行更全面、更深入的探究,而土壤重金属污染的生物修复技术目前是世界各国的环保行业研究的重要组成部分,取得了相当好的成绩。今后应该将生物修复和物理化学修复等其他技术有效结合,共同为国际环保事业做出贡献。

## 参考文献

- [1] 俄胜哲, 杨思存, 崔云玲, 等. 我国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(19): 9104–9106.
- [2] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. *土壤*

通报, 2004, 35(3): 366–370.

- [3] 张艳, 邓扬梧, 罗仙平, 等. 土壤重金属污染以及微生物修复技术探讨 [J]. *有色金属科学与工程*, 2012, 3(1): 63–66.
- [4] 郝喜海, 罗浩, 衣潇鹏. 我国重金属污染现状与微生物修复技术 [J]. *广州化工*, 2013, 41(11): 42–44.
- [5] 杨飞黄. 论我国土壤重金属污染现状及其防治措施研究进展 [J]. *工程管理前沿*, 2015(5): 197–201.
- [6] 刘培桐, 薛纪渝, 王华东. 环境学概论 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [7] 房存金. 土壤中主要重金属污染物的迁移转化及治理 [J]. *当代化工*, 2010, 39(4): 458–460.
- [8] 宋书巧, 吴歆, 黄胜勇. 重金属在土壤-农作物系统中的迁移转化规律研究 [J]. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 1999, 16(4): 87–92.
- [9] 郭亚平, 胡曰利. 土壤-植物系统中重金属污染及植物修复技术 [J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(2): 59–62.
- [10] 韦友欢, 黄秋婵. 铅对人体健康的危害效应及其防治途径 [J]. *微量元素与健康研究*, 2008, 25(4): 63–64.
- [11] 邓家胜, 阮玲, 时维静, 等. 安徽三大药菊矿物元素和重金属的检测 [J]. *安徽科技学院学报*, 2014, 28(2): 22–26.
- [12] 丁佳红, 刘登义, 储玲, 等. 重金属污染土壤植物修复的研究进展和应用前景 [J]. *生物学杂志*, 2004, 21(4): 6–9, 20.
- [13] 王晶, 尹国勋. 污染土壤植物修复研究现状与存在问题 [J]. *广东化工*, 2010, 37(1): 82–83, 97.
- [14] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 833–839.
- [15] 董社琴, 李冰雯, 周健. 超积累植物对土壤中重金属元素吸收机理的探讨 [J]. *太原科技*, 2004(1): 64–66.
- [16] 刘平, 仇广乐, 商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 933–937.
- [17] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展 [J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 858–865.
- [18] 黄艺, 陈有键, 陶澍. 菌根植物根际环境对污染土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 形态的影响 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 431–434.
- [19] 李琦, 韩亚芬. 煤矿区农田土壤-豆类作物系统的重金属富集状况及风险评估 [J]. *安徽科技学院学报*, 2015, 29(1): 47–52.
- [20] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 土壤重金属污染的植物提取修复技术及其应用前景 [J]. *农业环境保护*, 2000, 19(3): 179–183.
- [21] 褚贵新, 任岗. 重金属污染土壤的植物修复技术的研究进展 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2001, 5(4): 342–346.
- [22] 阎晓明, 何金柱. 重金属污染土壤的微生物修复机理及研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(6): 877–879, 883.