

土壤重金属污染及修复方法研究进展

郑小东^{1,2}, 荣湘民¹, 罗尊长², 黄海涛¹, 张海鹏¹

(¹湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; ²湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410128)

摘要: 为了解土壤重金属污染现状、各种修复方法的研究动态以及未来重金属的研究方向, 综述了土壤重金属的主要形态、污染程度评价指标、循环机制、离子间相互效应、修复方法等, 并对今后的研究方向进行展望, 为其他研究者提供参考。关于土壤重金属的基础性研究还有待于进一步地深入和发展, 特别是重金属的循环机制; 重金属修复以植物和微生物修复为主体, 其他修复方法并用将是趋势。

关键词: 重金属; 污染评价指标; 循环机制; 离子相互效应; 修复方法

中图分类号: X-1

文献标志码: A

论文编号: 2011-0487

Research Progress of Heavy Metal Contamination in Soil and Remediation Method

Zheng Xiaodong^{1,2}, Rong Xiangmin¹, Luo Zunchang², Huang Haitao¹, Zhang Haipeng¹

(¹College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China;

²Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410128, Hunan, China)

Abstract: The current status of heavy metal pollution in soil was discussed from some aspects such as major form of heavy metal in soil, assessment index of pollution level, circulation mechanism, mutual effect of ions and remediation methods in order to understand the research situation of different remediation methods and the future works of heavy metal pollution. The future research directions of heavy metal pollution in soil were given so as to provide reference for other researchers. It is pointed out that the basic research of heavy metal pollution in soil needed to be further conducted, especially the circulation mechanism. Plant and microorganism remediation methods were main parts of heavy metal remediation, and other remediation methods were together involved.

Key words: Heavy Metal; Assessment Index of Pollution Level; Circulation Mechanism; Mutual Effect of Ions; Remediation Method

0 引言

土壤重金属主要包括汞、镉、铬、铅和类金属砷等^[1]。人们对重金属的研究经历了较长时间, 从最初的基本形态特性的研究到侧重于重金属污染的治理。而今, 土壤重金属污染治理已有多种方法, 主要分为物理、化学、生物方法, 但各有优缺点。基于这种情况, 研究目前土壤重金属污染修复的方法对未来重金属修复方法发展的方向具有较大的意义。本研究重点提出了重金属的循环机制, 具体阐述了各种重金属修复方法和污

染程度的评价指标, 对以后重金属的研究发展方向具有一定的参考意义。同时, 笔者还提出重金属循环机制, 这在当前研究中较少, 以期更多的研究者能够注重此方面的研究。

1 土壤重金属的主要形态

总的来讲, 土壤重金属大体可分为可吸收态部分、交换态部分和难吸收态部分^[2], 也可以根据生物有效性的大小, 将重金属划分为5种形态, 可交换离子态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机结合

基金项目: 湖南省科技重大专项“生猪适度规模清洁养殖模式关键技术研究集成示范”(2009FJ1005)。

第一作者简介: 郑小东, 男, 1987年出生, 江苏泰州人, 硕士, 研究方向为植物营养生态。通信地址: 410128 湖南省长沙市芙蓉区 湖南农业大学八教北220, E-mail: ab550895299@yahoo.cn。

通讯作者: 荣湘民, 男, 1965年出生, 湖南东安人, 教授, 博士, 研究方向为养分资源高效安全利用。通信地址: 410128 湖南省长沙市芙蓉区 湖南农业大学八教北220, E-mail: rongxm2005@126.com。

收稿日期: 2011-06-23, **修回日期:** 2011-07-18。



态和残渣态^[3]。可吸收态部分,是指土壤溶液中游离的重金属离子或可溶性重金属化合物。一般来讲,土壤中可吸收态的重金属很少,只有当受到污染时,才可能有较多可吸收态重金属,并且逐渐转化为其他形态的重金属。交换态部分,是指位于离子交换位点上和专性吸附在无机土壤组分上的重金属离子,以及被土壤胶体和土壤颗粒表面吸附的重金属,如可交换离子态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态。难吸收态部分,即难溶态复合物,在土壤中,难溶态的重金属含量最高,很难被生物利用或潜在迁移性很小,如硫化物及有机结合态和残渣态^[4]。随着土壤环境一些理化性质的改变,如土壤粘粒矿物组成、酸碱性、氧化还原状况等^[5],难吸收态重金属也会向交换态重金属转化,并处于动态平衡中。

2 土壤重金属污染程度评价指标

当前土壤重金属污染的评价指标较多,可分为非生物指标,如重金属全量、有效态含量;生物指标,如微生物生物量、酶活性;数学模型指标等,这些都可以反映重金属的污染程度,但尚未有统一标准来评价重金属的污染程度。

2.1 非生物指标

由于土壤重金属的背景值相对较小,土壤重金属主要来源于工农业,因此土壤重金属全量可以反映其污染程度^[6]。但不同地域背景值不同,因此不能准确评定各个地方的污染程度。用重金属的有效态含量可以更加准确的评价重金属的污染程度。在土壤中,并非所有形态的重金属都易被植物吸收,而引起重金属污染的主要就是可吸收态和可交换态重金属^[7]。目前,重金属有效态含量的测定方法还没有统一的标准,这有待于深入研究。

2.2 生物指标

土壤重金属的污染必然会对微生物的生理代谢和群落结构产生影响,从而影响土壤生态结构和功能的稳定性。重金属污染会影响微生物的活性,而微生物活性可以由呼吸作用、代谢熵、相关酶活性^[8]来表示。代谢熵是指单位生物量的微生物在单位时间内的呼吸作用强度,是评价重金属微生物效应的敏感指标,它可以反映出土壤重金属污染程度^[9]。有研究表明,受到重金属污染的微生物为了维持生存需要更多的能量,代谢活性也会发生相应不同的反应^[10]。一般来讲,微生物的呼吸作用和代谢熵会随着重金属浓度增加而增加。

重金属污染会影响土壤中的酶活性,但影响程度受多种因素影响,包括重金属属种类、有效态深度大小、酶的种类等。一般来讲,随着重金属深度的增加,

土壤酶活性,如磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶活性表现出先上升后下降的趋势^[11],但缺乏特异性。因此,找出某种酶对特定重金属污染有特异性差异反应非常有意义。镉污染对土壤脲酶活性有显著的抑制作用,高浓度的镉也会降低其他酶的活性,但没有脲酶敏感。因此,用脲酶作为土壤镉污染的评价指标具有可行性。

2.3 数学模型指标

建立在数学模型基础上的重金属评价指标可广泛应用于土壤、沉积物等环境介质中的重金属污染评价,如单项污染指数法、内梅罗指数法、地质累积指数法、模糊贴近度法^[12]等。这些方法各有优缺点,评价重点和适用条件也不同。

单因子污染指数法适于以土壤元素背景值为评价标准来评价重金属的累积污染程度,它能反映污染物的污染程度,适用于特定区域单一因子污染的评价,但不能全面、综合反映重金属的污染程度^[13]。

内梅罗指数法则适用于对多种重金属元素污染进行评价,它能反映出各种污染物对土壤环境的作用,并且突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响^[14],但此法未考虑污染因子之间的污染程度差异。有人对内梅罗指数作了修改,将污染指数平均值改为加权平均,这样既能突出最大污染因子产生的影响,又弥补了平均指数的缺陷,能够较准确地反映重金属污染的客观情况^[15]。

地质累积指数称为Muller指数,是广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标。该法考虑了人为污染因素、自然成岩作用对背景值的影响,是可以反映沉积物中重金属富集程度的常用指标,但其侧重于单一金属,未考虑到生物有效性、各因子的不同污染贡献比及其地理结构差异等因素对它的影响^[16]。影响土壤重金属污染的因素很多,并且每种因素会因所处的自然环境条件、时间、空间及本身性质和权值等的差异而表现不同的特征,这些因素相互影响,相互关系较为复杂,不易确定,具相关模糊性。若将这种模糊关系人为地用传统数学的定量方法来描述,则带有较强的主观性,往往使得出的结论与实际情况相差较大。用模糊贴近度法评价重金属污染程度准确性较高,但此法较为复杂,应用较少^[17]。

3 重金属的循环机制

目前,关于重金属的循环机制的研究较少。总的来讲,重金属的循环机制可以分为地球物理化学循环和生物化学循环^[18]。

3.1 地球物理化学循环

重金属的迁移方式包括机械迁移、物理化学迁移

和生物迁移^[19]。重金属的地球物理化学循环是漫长的过程,主要包括机械迁移和物理化学迁移。机械迁移是指重金属以颗粒形态随陆地和水体的运动而迁移,此过程中不涉及重金属物化性质的改变。物理化学迁移指重金属在迁移过程中发生了物化性质的改变,通常以简单粒子、可溶性分子或离子存在,迁移过程中的变化决定了重金属在环境中的存在形态、富集数量和潜在危害程度。

如图1所示,非挥发性的重金属的地球物理化学循环主要包括土壤和水体,污染土壤的重金属大部分

会被土壤吸附并固定转变为难吸收态^[20],少部分可溶态和可交换态会转移到水体中或被植物吸收^[21]。水体中的重金属大部分会沉积在淤泥中,少部分会被生物吸收从而进入食物链^[22]。对于易挥发的重金属(汞、硒)还会在大气中循环。散发到大气中的重金属经过一定距离的传输,最终会回降于陆地^[23]。因此,大气中的可挥发性重金属降落是土壤重金属的一个重要来源。

3.2 生物化学循环

重金属的生物化学循环主要是指生物迁移。生物迁移指重金属从自然环境中进入生物体,通过生物体

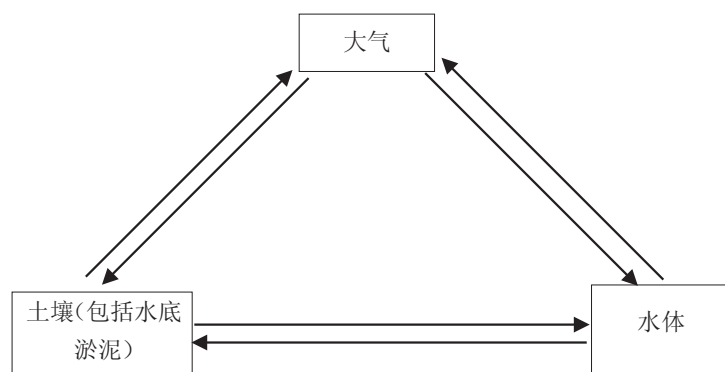


图1 重金属地球地理化学循环

内各种新陈代谢反应、死亡和食物链进行传递的过程,包括动物迁移,植物迁移,微生物迁移^[24]。如图2所示,植物或微生物可以直接吸收或吸附土壤中的有效态重金属,并参与影响体内的生理生化代谢反应^[25],如通过吸收、沉淀、螯合、氧化和还原等作用^[26],把重金属离子转化为低毒产物,从而降低土壤中重金属的毒性。重金属一般先由植物吸收,经过食物链最终进入动物或人体^[27]。当生物死亡后,体内不同形态的重金属化合物便重新进入土壤,并受很多因素的影响,如土壤pH、土壤氧化还原电位(Eh)、有机质、阳离子交换量(CEC)、质地、微生物等,使这些重金属化合物的生物有效性发生变化,并使难溶态重金属和交换态重金属处于动态平衡中^[28]。

4 与其他离子之间的相互影响效应

重金属污染通常以多元素共存,并所造成的复合污染在土壤重金属污染中也作为主要表现形式,主要表现为重金属元素与非重金属元素的相互作用、重金属之间的相互作用。利用重金属元素与非重金属元素的相互作用可以适当控制重金属的污染,而重金属之间的相互作用通常会加大其污染效应,应减少其相互接触。

4.1 金属与非金属离子之间的相互作用

重金属主要通过以下方面影响植物对营养元素的

吸收:

4.1.1 形成沉淀 铅和镉影响根对磷的吸收^[29-30],主要是由于铅和镉与磷酸离子易形成沉淀,从另一方面讲,利用廉价的含磷物质可以用来治理铅、镉污染。

4.1.2 拮抗作用 土壤EDTA • Na₂Fe能显著降低水稻中的镉含量^[31];硅的加入能降低小白菜对铬的生物有效性,使小白菜的铬含量降低^[32];砷影响植物对钾的吸收^[33]。

4.1.3 吸附作用 Ca²⁺主要是通过吸附作用改变吸附剂表面的电荷特征而影响As⁵⁺的吸附;在土壤中加入铁锰矿物后,土壤中的有效态镉含量明显降低^[34];Cl⁻对Hg²⁺具有很强的亲和力,高浓度的Cl⁻会降低土壤对外源汞的吸附能力,甚至还会使土壤释放出原被固定的汞,即负吸附现象,造成额外的污染。因此,用含盐量高的水浇灌作物可能会造成汞的二次污染^[35]。但是,这种“负吸附”现象可用于土壤汞污染治理,即用含盐量高的溶液,如用NaCl溶液或直接引用含盐量高的河水作为淋溶液来洗涤汞污染土壤,迫使它释放出已固定的汞,虽无先例,但值得继续探索。

4.2 金属之间的相互作用

土壤中往往有多种金属离子存在,其相互影响效应总体上表现为协同效应和拮抗效应。协同效应一般由吸附作用引起,金属与非金属之间的拮抗效应可由

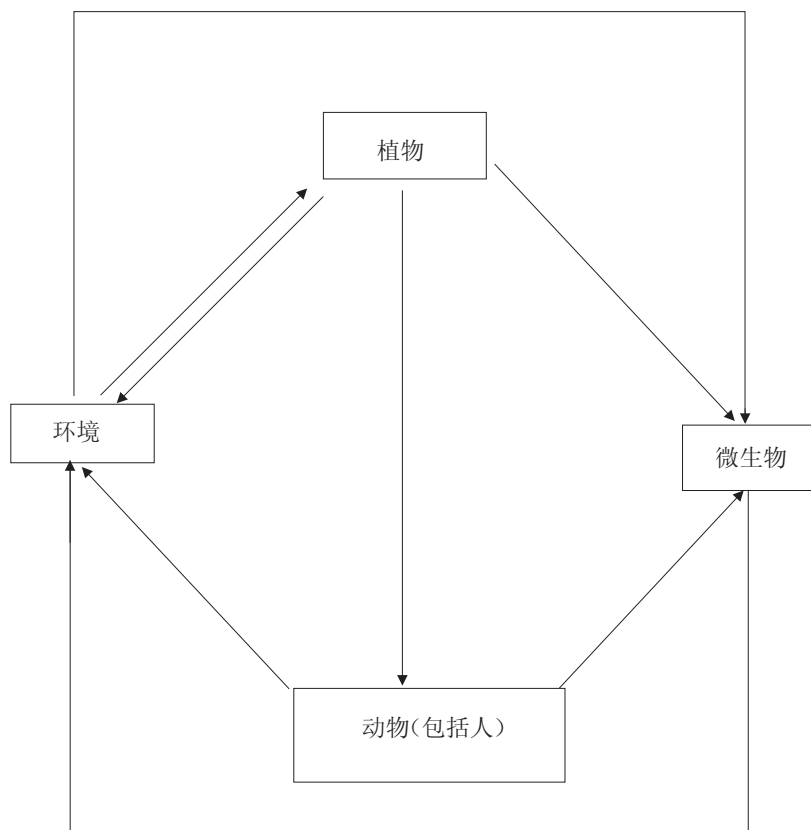


图2 重金属生物化学循环

拮抗作用、形成沉淀引起,而金属之间的拮抗效应则只由拮抗作用引起。

4.2.1 协同效应 土壤重金属污染中,以多种元素形成的复合污染突出,尤其是重金属之间的相互作用引起的污染。研究表明^[36],锌、铬、铜、铅(铅含量为300 mg/kg)复合污染可使水稻减产4.6%~6.8%,而单元素铅含量高达2000 mg/kg时,水稻仅减产3.4%,显然,重金属复合污染可加剧对作物的毒性作用。砷可以同 CrO_4^{2-} 等阴离子通过竞争作用降低土壤对砷的吸附,提高其生物有效性,导致复合污染效应^[37]。 As^{5+} 的存在促使了 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附,并且 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附量和解吸量均随 As^{5+} 浓度的增加而增加。其机理可能是砷酸根专性吸附导致表面负电荷增加从而促进土壤吸附 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 。

4.2.2 拮抗效应 土壤重金属复合污染毒性不一定大于单一重金属污染毒性,金属之间可能存在拮抗作用、形成沉淀而降低其毒性。研究表明, Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子与 Cd^{2+} 之间存在着离子拮抗作用,可以减少植物对镉的吸收^[38];金属砷和硒有拮抗作用,当土壤中砷的含量高时,可以适当喷硒溶液,减少植物对砷的吸收^[39]。此外,同一重金属对不同作物的影响不同。铬可以抑制矮菜豆、黄豆等对锌的摄取,增加水稻对锰、镁的摄取,

增加黄豆对镁的摄取^[40]。

5 修复方法

总的来讲,重金属污染土壤的治理方法分为2类:一是将污染物清除,即将污染物从一个地方移到另一个地方;二是将污染物固定,即从可溶态或可交换态转变为难溶态,减少在土壤中的迁移性和生物可利用性^[41]。

土壤重金属污染的修复方法较多,包括物理方法、化学方法和生物方法^[42],但各种方法都有一定的局限性,因此都未成为理想的修复措施。近年来,土壤修复中生物方法最受关注,主要是植物修复和微生物修复。

5.1 植物修复

植物修复主要包括植物提取、植物固定、植物挥发、植物过滤^[43],主要通过将吸收土壤中的重金属从而减少土壤中重金属的含量,如植物提取、植物过滤;或者通过植物的生理生化反应降低土壤中重金属的生物有效性,减少其毒性,如植物固定。其中,植物提取、植物过滤具有永久性和广泛性,有望成为以后去除土壤内重金属污染的重要方法。植物挥发虽然能将挥发性的重金属从土壤中移除,但挥发到大气中的重金属又会回落到土壤中^[44],因此并不是一个很好的方法。植物固定是指植物通过某种生化过程使土壤环境中重金属流动性降低,生物可利用性下降,从而减轻其毒性^[45],但

当土壤环境发生改变时,可能会引发二次污染。

与传统方法相比,植物修复技术费用少、治理效果好且美化环境,是一项很有发展前景的土壤重金属污染修复技术。但土壤环境较为复杂,单纯使用植物修复技术效率通常较低,周期较长,因此采取一系列物理化学方法、农艺措施,如通过添加有机螯合剂^[46]、表面活性剂^[47]等一系列调控措施来提高植物修复的效率,改良土壤理化特性,提高土壤重金属的生物有效性,使其易于被植物吸收。

5.2 微生物修复

微生物修复是重金属修复的另一种主要方法。微生物可以提高重金属的生物有效性,从而有利于植物的吸收。土壤中有些微生物可以通过分泌有机酸降低土壤的pH,从而提高土壤重金属的生物有效性^[48]。有研究指出^[49],土壤中重金属的生物有效性低是植物修复的主要限制因素。重金属的生物有效性越高,越有利于植物吸收重金属,从而降低土壤重金属含量。在土壤中接种根际微生物和外生菌根真菌,能提高土壤中重金属的有效态浓度^[50]。此外,微生物还能够通过自身代谢降低重金属的毒性。土壤中微生物种类和数量多,代谢旺盛,受到重金属污染的土壤,往往富集多种耐重金属的真菌和细菌,微生物可通过多种作用方式影响土壤重金属的毒性,主要是通过生物吸附和生物转化来对土壤中重金属进行吸收、沉淀、氧化和还原^[51]等作用,把重金属离子转化为低毒产物,从而降低土壤中重金属的毒性。*Xanthomonas maltophyla*能够催化高移动性的 Cr^{6+} 转化为移动性差和毒性较小的 Cr^{3+} ^[52]。

5.3 农艺措施修复方法及其他修复措施

近年来,新出现的植物修复和微生物修复技术,由于费用低、不破坏土壤结构并且美化环境等,因此具有很好的发展前景。但是,由于土壤环境的复杂性,单纯使用某种修复技术效率较低,有必要采取强化措施来提高修复效率。很多研究表明,农艺措施可显著提高植物、微生物修复的效率。

农艺措施修复方法主要包括施肥、土壤化学环境调控、管理措施^[53]等。研究表明,施肥可提高植物生物量但不降低植物体内重金属浓度,从而提高植物体内累积的重金属总量。土壤化学环境调控包括土壤pH、土壤氧化还原电位(Eh)的调控。在一定的范围内,降低土壤pH,能通过溶解土壤矿物、促进解吸等作用,提高土壤重金属的生物有效性,从而使植物能够吸收更多的重金属^[54]。农业生产中常施用铵态氮肥或其他酸化剂来调节土壤pH。有研究表明,适量施用单质硫粉可提高超富集植物对土壤中锌、镉、镍等的吸收和积累^[55-56]。

土壤氧化还原电位主要通过改变重金属价态、使固定重金属的物质发生变化来影响土壤重金属的生物有效性。提高土壤Eh时, Cr^{3+} 易被氧化成 Cr^{6+} ,使 Cr^{6+} 浓度增加,而 Cr^{6+} 毒性大,移动性强,易被植物吸收。当土壤Eh降低时, As^{5+} 还原为 As^{3+} ,从而增大砷的溶解度,也更有利于被植物吸收。重金属与硫一般形成难溶物质,当Eh增加时,硫化物易发生氧化,使重金属释放出来,导致土壤溶液中重金属浓度升高。当前,农业生产中主要以干湿灌溉、水田和旱田轮作来调节土壤Eh,此外,土壤中有机的增加会降低土壤Eh,因此施有机肥可以促进植物对某些重金属的吸收。在农业生产中,农田管理措施也会对土壤重金属形态和有效态含量产生影响。管理措施包括播种方式、作植密度、杂草控制、收获程度及方法、授粉控制以及种子处理等。

在重金属污染修复中,还有一些其他的措施,包括物理、化学方法,如改良剂沉淀法、螯合剂修复法、表面活性清洗剂修复法^[57]等,以及工程修复方法,如客土法、换土法、去表土法、深耕翻土法、电动修复法、土壤淋洗法^[58]等。这些措施有一定的效果,但对土壤副作用较大,花费较大,因此近年来使用减少。而相比于其他物理、化学或者工程强化措施,农艺措施具有技术成熟、成本较低、对土壤环境影响较小等特点。因此,采用农艺措施强化修复效率更具前景。

6 结论

6.1 重金属污染的评价指标

主要分为非生物指标、生物指标和数学模型指标。目前,评价指标较多,但缺乏特异性和统一的标准,这有待于今后更深入地研究。不同重金属对不同生物的特异性指标的寻找,将是一大研究热点。

6.2 循环机制

目前,重金属循环机制研究的较少,但笔者认为意义较大。循环机制包括各个重金属在生物圈中的流动路径以及在生物体中的代谢途径,这有助于从源头上控制重金属的污染。

6.3 离子间的相互效应

离子间的相互作用对植物可能有利,也有可能有害,这与植物种类、化学形态及其含量、土壤理化特性有关。离子间可以通过形成沉淀、拮抗作用、吸附作用而影响植物对营养元素的吸收;多种重金属污染通常会形成复合污染效应,产生的危害比单个重金属污染的危害大。

6.4 修复方法

重金属污染方法有多种,但以植物修复和微生物修复为主体的修复方法将是今后重金属污染修复的主



要方向,同时以其他措施来提高这2种修复方法的效率将会成为一大热点,包括物理、化学、生物方法及农艺措施等。

7 讨论

土壤重金属是近年来的研究热点,发展速度很快。在当前研究进展下,主要注重于重金属污染原理及治理方法的研究。在今后相当长的时间里,研究热点为以下几点:

7.1 重金属的循环机制

目前,关于重金属的循环机制研究较少,且各个重金属的循环路径和形态特征不同,这有待于今后更深入地研究。研究重金属的循环机制可以了解重金属的形态分布和各个路径的具体过程,从而更有效地控制重金属污染。

7.2 重金属作用于植物的分子机制

当前,国内重金属作用于生物分子机理研究得较少,国外研究得相对较多,主要是关于生物吸收重金属的方式、在体内的转移和形态变化机制以及毒害机制和生物的耐受机理,但还不够透彻。环境科学、动物学、植物学、微生物学科的交叉结合将是一个很好的研究方式。

7.3 重金属修复机制

由于土壤环境的复杂性,重金属污染土壤的修复必须各种方法结合才能达到预期效果,如以植物修复、微生物修复为主,辅以物理化学方法及各种农业生态措施,通过各种渠道增加土壤重金属的生物有效性,使植物转移土壤中的重金属。同时,随着分子生物学和分子遗传学技术的日益完善,对不同植物重金属耐受型基因的研究将会越来越多,主要包括重金属耐性相关基因分离、克隆和功能鉴定以及转基因植物的研究。

参考文献

- [1] 戴学龙,蒋玉根,裴希雅,等.提取液对土壤有效重金属含量与生物有效性的影响[J].江西农业科学,2010,4:886-889.
- [2] 朱雅兰.重金属污染土壤植物修复的研究进展与应用[J].湖北农业科学,2010,49(6):1495-1499.
- [3] 石元值,韩文炎,马立峰,等.不同茶园土壤中外源铅的形态转化及其生物有效性[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1117-1124.
- [4] 程东祥,张玉川,马小凡,等.长春市土壤重金属化学形态与土壤微生物群落结构的关系[J].生态环境学报,2009,18(4):1279-1285.
- [5] 王友保,张莉,张凤美,等.大型铜尾矿库区节节草根际土壤重金属形态分布与影响因素研究[J].环境科学学报,2006,26(1):76-84.
- [6] 李双异,刘赫,汪景宽.长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1125-1129.
- [7] 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.
- [8] 李勇,黄占斌,王文萍,等.重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2241-2245.
- [9] 赵庆龄,张乃弟,路文如.土壤重金属污染研究回顾与展望 II——基于三大学科的研究热点与前沿分析[J].环境科学与技术,2010,33(7):102-106.
- [10] 刘霞,刘树庆,王胜爱,等.重金属复合污染对土壤微生物生态特征的影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26:17-21.
- [11] 荆延德,何振立,杨肖娥.汞污染对水稻土壤生物和酶活性的影响[J].应用生态学报,2009,20(1):218-222.
- [12] 刘衍君,汤庆新,白振华,等.基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J].中国农学通报,2009,25(20):174-178.
- [13] 李春艳,田永圻,华德尊,等.不同土地利用类型下土壤特性及重金属评价[J].环境科学与管理,2007,32(9):39-43.
- [14] 张江华,赵阿宁,王仲复,等.内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨——以小秦岭金矿带为例[J].环保与分析,2010,8(31):43-46.
- [15] 李亚松,张兆吉,费宇红,等.内梅罗指数评价法的修正及其应用[J].水资源保护,2009,25(6):48-50.
- [16] 滕彦国,庾先国,倪师军,等.应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J].重庆环境科学,2002,24(4):25-28.
- [17] 际洋,谢锋,谭红,等.用模糊贴近度方法评价土壤重金属污染程度[J].中国环境监测,2007,23(6):69-71.
- [18] Wang B S, Zan Q J, Zhang Weiyn et al. Accumulation and Cycle of Heavy Metals in *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* Mangrove Community at Futian of Shenzhen, China[J].Marine Science Bulletin,2003,5(1):59-68.
- [19] 陈威,杨亦霖,张爱国,等.非饱和土壤中重金属污染物迁移机理分析[J].安徽大学学报,2010,34(5):98-103.
- [20] 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.
- [21] 张磊,宋凤斌.土壤吸附重金属的影响因素研究现状及展望[J].土壤通报,2005,36(4):628-631.
- [22] 肖智,刘志伟,毕华.土壤重金属污染研究述评[J].安徽农业科学,2010,38(33):18812-18815.
- [23] 李枫,张微微,刘广平.扎龙湿地水体重金属沿食物链的生物累积分析[J].东北林业大学学报,2007,1:44-46.
- [24] 金晓丹,王敦球,张力,等.大气环境中汞形态及其分析方法研究进展[J].广西轻工业,2008,10:97-98.
- [25] 何宝燕,尹华,彭辉,等.酵母菌吸附重金属铬的生理代谢机理及细胞形貌分析[J].环境科学,2007,28(1):194-198.
- [26] 焦渊.土壤中重金属污染的生物修复技术[J].环境科学,2010,10:112-113.
- [27] 张先福,樊立超,宋晓平,等.Hg、As、Cr、Cd在食物链中迁移规律的研究[J].西北农林科技大学学报,2001,29(1):103-105.
- [28] 宋学东,李晓晨.浸提时间对污泥中重金属浸出的影响[J].安徽农业科学,2008,36(9):3842-3843.
- [29] 李坤权,郑正,张继彪,等.磷酸活化植物基活性炭对水溶液中铅的吸附[J].环境工程学报,2010,4(6):1238-1242.
- [30] 邓新,温璐璐,迟鑫姝.镉对人体健康危害及防治研究进展[J].中国医辽前沿,2010,5(10):4-5.
- [31] 邵国胜,陈铭学,王丹英,等.稻米镉积累的铁肥调控[J].中国科学C 逻辑:生命科学,2008,38(2):180-187.

- [32] Gilmour J T. Effecton of some negative ions on mercury adsorption by soils[J]. Environ Lett,1977,2:143-147.
- [33] 吴峰,熊俊芬.蜈蚣草中神与磷、钾、钙等营养元素的交互作用[J].资源与环境科学,2010,8:278-280.
- [34] 侯秀,王祖伟.铁锰氧化矿物添加对土壤有效态及生物效应的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2313-2317.
- [35] 易建春,汪模辉,李锡坤.土壤中镉的污染及治理[J].广东微量元素科学,2006,13(9):11-15.
- [36] 闫茂鹏,熊俊芬,马琼芳,等.砷污染土壤植物修复的主要影响因素及改良研究进展[J].广西农业科学,2010,41(6):581-585.
- [37] 胡正义.Cu 污染土壤-水稻系统中 Cu 的分布特征[J].环境科学,2000,21(2):62-63.
- [38] 王永,徐仁扣,王火焰,等.磷酸根在可变电荷土壤颗粒表面的配位吸附[J].环境化学,2009,28(2): 163-167.
- [39] 李淑仪,林翠兰,许建光,等.施硅对污染土壤中铬形态及其生物有效性的影响[J].生态环境,2008,17(1):227-231.
- [40] 江澜,王小兰.铬的生物作用及污染治理[J].重庆工商大学学报,2004,21(4):325-328.
- [41] 彭亢晋,孔海南,张大磊,等.Cr(VI)污染土壤的热解还原无害化处理[J].环境污染与防治,2009,31(5):31-35.
- [42] 孙铁珩,周启星,李培军,等.土壤污染形成机理与修复技术[M].北京:科学出版社,2005:100-101.
- [43] 牛立元.重金属污染土壤的植物修复[J].河南科技学院学报,2010,38(2):47-51.
- [44] 肖鹏飞,李法去,付宝荣,等.土壤重金属污染及其植物修复研究[J].辽宁大学学报,2004,31(3):279-283.
- [45] 刘杰,朱义年,罗亚平,等.清除土壤重金属污染的植物修复技术[J].桂林工学院学报,2004,24(4):507-511.
- [46] 李双喜,吕卫光,郑宪清,等.不同整合剂处理下黑麦草对重金属Pb, Cr,Hg的吸收作用研究[J].上海农业科技,2010,2:20-23.
- [47] 郝春玲.表面活性剂修复重金属污染土壤的研究进展[J].安徽农学通报,2010,16(9):158-161.
- [48] Chen Y X, Wang Y P, Lin Q, et al. Effect of copper-tolerant rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*[J].Environment International, 2005,31:861-866.
- [49] 王海鸥,徐海洋,钟广蓉,等.根际微生物对植物修复重金属污染土壤作用的研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(30):14832-14834, 14903.
- [50] 董明,王冬梅,王晓英.菌根菌在植物修复重金属污染土壤中的作用[J].华北农学报,2010,25:250-253.
- [51] 梁慧星,陈欣.污染土壤微生物修复技术的研究进展[J].中国科技信息,2006,8:131-132.
- [52] BLAKE R C, CHOATE D M, BARDHAN S, et al. Chemical transformation of toxic metals by a *Pseudomonas* strain from a toxic waste site Environ[J]. Toxicol Chem,1993,12:1365-1376.
- [53] 王林,周启星.农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J].中国生态农业学报,2008,16(3):772-777.
- [54] Alkorta I. Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals[J]. Rev. Env. Sci. Bio/Tec.,2004,3:55-70.
- [55] Kayser A, Wenger K, Keller A, et al. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments[J]. Environ. Sci. Technol.,2000,34: 1778-1783.
- [56] Robinson B H, Brooks R R, Clothier B. E. Soil amendments affecting nickel and cobalt uptake by *Berkheya coddii*: potential use for phytomining and phytoremediation[J]. Ann. Bot.,1999,84: 689-694.
- [57] 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.
- [58] 顾继光,周启星,王新.土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(2):143-151.