

# 土壤重金属污染与修复技术研究进展

夏来坤<sup>1</sup>, 郭天财<sup>1,2\*</sup>, 康国章<sup>1,2</sup>, 岳艳军<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学, 河南 郑州 450002; 2. 国家小麦工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 阐述了土壤重金属污染的来源、特点及修复技术的研究现状, 分析了各种修复技术的优缺点, 为土壤重金属污染的修复与治理提出了思路。

**关键词:** 土壤; 重金属; 污染; 修复技术; 研究进展

**中图分类号:** X53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2005)05-0088-05

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一, 也是人类生态环境的重要组成部分。随着农业生产的发展和农业现代化的推进, 人们忽视了土壤的环境承载能力, 过量施用劣质化肥、农药, 造成土壤中重金属污染日趋严重。目前, 全世界平均每年排放 Hg 约 1.5 万 t, Cu 340 万 t, Pb 500 万 t, Mn 1 500 万 t, Ni 100 万 t<sup>[1]</sup>。据农业部的调查结果, 目前我国污水灌区面积约 140 万 hm<sup>2</sup>, 遭受重金属污染的土地面积占污灌总面积的 64.8%。其中, 轻度污染面积占 46.7%, 中度污染面积占 9.7%, 严重污染面积占 8.4%, 并且以汞和镉的污染面积最大, 部分地区的重金属污染已经相当严重<sup>[2]</sup>。

土壤中重金属积累到一定程度会对土壤—植物系统产生毒害, 会造成重大的经济损失。据初步估计, 全国每年因重金属污染而造成的粮食减产损失高达 1 000 多万 t; 另外, 每年被重金属污染的粮食也多达 1 200 万 t, 合计经济损失至少 200 亿元<sup>[3]</sup>。目前, 已有一些地方生产的粮食、蔬菜、水果等食物中重金属含量超标或接近临界值, 这些农产品通过食物链富集到人体和动物体中, 还会危及人类的生命和健康<sup>[4]</sup>, 引发癌症和其他疾病等, 并导致大气、地表水、地下水污染和生态系统退化等其他次生生态问题。因此, 土壤重金属污染已引起许多国家的高度重视。

## 1 土壤重金属污染的来源

土壤重金属污染主要是由于采矿、冶炼、电镀、

化工、电子、制革等工业产生含重金属的废弃物进入土壤, 以及污灌、农药、化肥、垃圾、粉煤灰和城市污泥的不合理施用引起的。概括起来主要有 3 个方面。

### 1.1 随污水灌溉进入土壤

由于我国是一个水资源紧缺的国家, 部分灌区常把污水作为灌溉水源来利用。污水按其来源可分为城市生活污水、石油化工污水、工业矿山污水和城市混合污水等<sup>[5]</sup>。城市生活污水中重金属含量很少, 但由于我国工业发展迅速, 工矿企业污水未经分流处理而排入下水道与生活污水混合排放, 从而造成污灌区土壤 Hg、As、Cr、Pb、Cd 等重金属含量逐年增加。据调查, 淮阳污灌区土壤 Hg、Cd、Cr、Pb、As 等重金属在 1995 年已超过警戒线<sup>[6]</sup>, 其他灌区部分重金属含量也远远超过当地背景值。

### 1.2 随固体废弃物进入土壤

固体废弃物种类繁多, 成分复杂, 其危害方式和污染程度也不尽相同。其中, 以矿业和工业固体废弃物污染最为严重。这类废弃物在堆放或处理过程中, 由于日晒、雨淋、水洗等, 重金属极易移动, 以辐射状、漏斗状向周围土壤、水体扩散<sup>[9]</sup>, 从而造成土壤重金属污染。如沈阳冶炼厂冶炼锌的过程中产生的矿渣主要含 Zn、Cd, 1971 年开始堆放在一个洼地场所, 其浸入液中 Zn、Cd 含量分别达  $6.6 \times 10^3$  mg/L 和  $7.5 \times 10^3$  mg/L, 目前已扩散到离堆放场 700 m 以外的范围<sup>[7]</sup>。通过对武汉市垃圾堆放场、杭州铬渣堆放区附近土壤中重金属含量的研究发

收稿日期: 2005-03-10

基金项目: “十五”国家重大科技专项(2001BA804A30-03)部分研究内容

作者简介: 夏来坤(1981-), 男, 河南鹿邑人, 在读硕士, 主要从事小麦品质生态研究。

通讯作者: 郭天财(1953-), 男, 河南济源人, 教授, 博士生导师, 主要从事小麦高产优质栽培生理研究。

现, 这些区域土壤中 Cd、Hg、Cr、Cu、Zn、Pb、As 等重金属含量均高于当地土壤背景值<sup>[8,9]</sup>。

1.3 随农用物资进入土壤

农药、化肥和地膜是重要的农用物资, 对农业生产发展曾起到重大的推动作用。但由于长期不合理施用, 也可导致土壤重金属污染。绝大多数的农药为有机化合物, 少数为有机-无机化合物或纯矿物质, 个别农药在其组成中还含有 Hg、As、Cu、Zn 等重金属, 生产中过量或不科学使用农药将会造成土壤重金属污染。金属元素是肥料中报道最多的污染物质, 氮、钾肥料中重金属含量相对较低, 而磷肥中则含有较多的有害重金属, 复合肥的重金属主要来源于母料及加工流程所带入。肥料中重金属含量一般是磷肥> 复合肥> 钾肥> 氮肥。近年来, 地膜的大面积推广使用, 造成了土壤的白色污染。由于地膜生产过程中加入了含有 Cd、Pb 的热稳定剂, 同时也增加了土壤重金属污染<sup>[5]</sup>。

2 重金属在土壤中的形态及吸附、解析

重金属在土壤中富集, 会对植物产生危害, 但植物体内的重金属含量往往与土壤中重金属的总量并不相关<sup>[10]</sup>。因此, 科学家们对土壤中重金属的形态做了多种分类。比如, Tessier (1979) 将土壤中重金属形态分为交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态以及残渣态等<sup>[11]</sup>。以不同的浸提剂分析重金属元素在各个结合形态中的含量, 可以找出其与植物体中重金属含量的相关性。水溶态及土壤胶体吸附的代换态都是可以被植物直接吸收利用的形态<sup>[12,13]</sup>。锌、镉交换态和碳酸盐结合态对植物吸附重金属的影响要比其在土壤中全量的影响大得多<sup>[14]</sup>。

由于土壤是一个复杂的多相体系, 因此, 进入土壤的重金属元素将受到沉淀溶解平衡、络合解离平衡以及吸附平衡三大平衡体系的影响。重金属元素在土壤中的吸附解析研究常采用一次平衡法和流动性。在复合污染(镉、锌、铅)的条件下, 有些污染元素在土壤中的吸附用 Langmuir、Freundlich 及 Temkin 方程回归都不显著, 这再一次证明了复合污染条件下土壤中污染元素的性质会发生改变。

3 土壤重金属污染的特点

3.1 土壤重金属污染的隐蔽性和滞后性

大气、水和废弃物污染等问题一般都比较直观, 通过感官就能发现。而土壤污染则不同, 它往往要

通过对土壤样品进行分析化验和对农作物的残留检测, 甚至通过研究对人畜健康状况的影响才能确定。因此, 土壤重金属从产生污染到出现问题通常会滞后较长的时间, 因此, 土壤污染问题一般都不太容易受到重视。如日本的“痛痛病”经过了 10~20 年之后才被人们所认识。

3.2 土壤重金属污染的累积性

重金属污染物在大气和水体中一般都比在土壤中更容易迁移, 这使得污染物质在土壤中并不像在大气和水体中那样容易扩散和稀释, 因此, 重金属很容易在土壤中不断积累而超标, 同时也使土壤污染具有很强的地域性。

3.3 土壤污染的不可逆转性

重金属对土壤的污染基本上是一个不可逆转的过程, 许多有机化学物质的污染也需要较长的时间才能降解。譬如, 被某些重金属污染的土壤可能要 100~200 年时间才能够恢复。

3.4 土壤重金属污染的难治理性

如果大气和水体受到污染, 切断污染源之后通过稀释和自净化作用也有可能使污染得到不断逆转, 但积累在土壤中的难降解污染物则很难靠稀释作用和自净化作用来消除。土壤污染一旦发生, 仅仅依靠切断污染源的方法则往往很难恢复, 有时要靠换土、淋洗土壤等方法才能得到解决, 其他治理技术可能见效较慢。因此, 治理污染土壤通常成本较高, 治理周期也较长。

4 土壤重金属污染的修复技术

4.1 工程措施

主要包括客土、换土翻土和去表土等措施<sup>[15]</sup>, 这些方法都可以使耕作层土壤中的重金属浓度降至临界浓度以下, 或减少重金属污染物与植物根系的接触而达到控制危害的目的。但所需工程量较大, 花费大, 并有污土处理的问题, 大面积推广应用受到一定限制。

4.2 物理化学措施

土壤重金属污染修复的物理化学措施主要有化学固化、电动修复和土壤淋洗等。

4.2.1 化学固化 所谓化学固化<sup>[16]</sup>, 就是加入添加剂(固化剂)改变土壤的理化性质, 通过重金属的吸附或共沉淀作用等改变其在土壤中的存在形态, 从而降低其生物有效性和迁移性。但固化方法并不是一个永久性的措施, 因其只改变了重金属在土壤中的存在形态, 仍持留在土壤中, 而且土壤很难恢复

到原始状态,不适宜进一步利用,且目前尚缺乏这方面的研究。

4.2.2 电动修复 电动修复<sup>[17]</sup>就是通过电流的作用,在电场的作用下,土壤中的重金属离子(如 Pb、Cd、Cr、Zn 等)和无机离子以电透渗和电迁移的方式向电极运输,然后进行集中收集处理。许多研究发现,土壤 pH、缓冲性能、土壤组分及污染金属种类都会影响修复的效果<sup>[18]</sup>。该方法特别适合于低渗透的粘土和淤泥土,可以控制污染物的流动方向。经在沙土上试验,Pb<sup>2+</sup>、Cr<sup>3+</sup> 等重金属离子的除去率可达 90% 以上<sup>[19]</sup>。电动修复是一种原位修复技术,不搅动土层,并可缩短修复时间,是一种经济可行的修复技术。

4.2.3 土壤淋洗 土壤淋洗<sup>[20]</sup>是利用提取剂将土壤中的固相重金属转移至液相中,含有提取剂的土壤经清水洗涤后归还原位再利用,富含重金属的废液则进行进一步的处理。该项技术的关键在于提取剂的选择,即既能提取重金属,又不破坏土壤结构,但事实上很难找到,而且,如果处理不当,引入的提取剂很有可能造成二次污染。

#### 4.3 化学措施

4.3.1 化学改良剂修复 目前应用比较多的方法是向土壤中添加改良剂(抑制剂),如磷酸盐、石灰、硅酸盐等被认为是处理重金属污染的常用改良剂。廖敏等研究表明<sup>[21]</sup>,在低石灰水平下,土壤中有机的主要官能团羟基和羧基与 OH<sup>-</sup> 反应促其带负电,土壤可变电荷增加,土壤有机结合态的重金属比较多,另外,Cd<sup>2+</sup> 与 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 离子结合生成难溶的 CdCO<sub>3</sub>,且随着 pH 值的增高 CdCO<sub>3</sub> 含量增加,在 pH 值大于 5.5 时,粘土矿物和氧化物与重金属生成络合、螯合物,性质稳定,表明石灰是一种良好的化学改良剂。

4.3.2 表面活性清洗剂修复法(Surfactant, Surface Active Agent, 简称 SAA) 利用表面活性剂润湿、增溶、分散、洗涤等特性,改变土壤表面电荷和吸收位能,或从土壤表面把重金属置换出来,以络合、螯合物的形式存在于土壤溶液中,加快重金属在土壤溶液中的流动性。这种方法由于会加重土壤溶液中重金属的含量,同时会污染地下水源,因此,环境工作者一直认为 SAA 是一种有害物质。但经进一步研究发现,SAA 的增溶性及络合、螯合和降低界面表面张力等作用,增加了土壤中污染物的流动性,为清除土壤中重金属污染提供了一条新的途径。SAA 有助于重金属从土壤颗粒上解析出来,并进入土壤

环境,增加污染物在自然环境中的可动性,从而加速污染物的去除<sup>[22]</sup>。

4.3.3 重金属拮抗剂 根据土壤环境中重金属元素之间的拮抗作用,如重金属与 Sn、As、Zn、Cu 等元素具有拮抗性,利用一些对人体没有危害或有益的金属元素的拮抗作用,减少土壤中重金属的有效态。因此,在轻污染土壤中施用少量的重金属拮抗剂,将可起到良好防治作用。

#### 4.4 农业生态措施

农业生态修复主要包括 2 个方面:一是农艺修复措施。包括改变耕作制度,调整作物品种,种植重金属不进入食物链的植物,选择能降低土壤重金属污染的化肥,或增施能够固定重金属的有机肥等措施,来降低土壤重金属污染。二是生态修复。通过调节诸如土壤水分、土壤养分、土壤 pH 值和土壤氧化还原状况及气温、湿度等生态因子,实现对污染物所处环境介质的调控。我国在这一方面研究较多,并取得了一定的成效<sup>[23~25]</sup>。但利用该技术修复污染土壤周期长,且效果不太显著。

#### 4.5 植物修复技术

植物修复<sup>[26~27]</sup>(phytoremediation)是指将某种特定的植物种植在重金属污染土壤上,而该种植物对土壤中污染元素具有特殊吸收富集能力,将植物收获后并妥善处理(如灰化回收)后即可将该种重金属移出土体,达到污染治理与生态修复的目的。根据其作用过程和机理,可将其分为以下 3 种类型。

4.5.1 植物稳定(phytostabilization) 植物稳定是利用耐重金属植物降低土壤中有毒金属的移动性,从而减少金属被淋滤到地下水或通过空气扩散进一步污染环境的可能性<sup>[27,28]</sup>。植物稳定技术适合土壤质地粘重,有机质含量高的污染土壤的修复。目前,该技术主要用于矿区污染土壤修复。

4.5.2 植物挥发(phytovolatilization) 植物挥发是利用植物的吸收、积累和挥发而减少土壤中一些挥发性污染物,即植物将污染物吸收到体内后将其转化为气态物质释放到大气中<sup>[29]</sup>。目前,这方面研究最多的是类金属元素 Hg 和非金属元素 Se。植物挥发通过植物及其根际微生物的作用,将环境中挥发性污染物直接挥发到大气中去,不需收获和处理含污染物的植物体。这种方法作为一种有潜力的植物修复技术会将污染物转移到大气中,对人类和生物具有一定的风险。

4.5.3 植物提取(phytoextraction) 植物提取这一概念是由 Chaney<sup>[30]</sup> 和 Baker 等<sup>[31]</sup> 最早提出来的,

是指利用重金属超积累植物从土壤中吸取一种或几种重金属,并将其转移、贮存到地上部分,随后收割地上部分并集中处理,连续种植这种植物,可使土壤中重金属含量降低到可接受水平。

植物修复技术与传统的物理、化学技术相比,具有技术和经济上的双重优势<sup>[32]</sup>:一是应用范围广。在清除土壤中重金属污染物的同时,也可清除土壤周围大气、水体中的污染物;二是污染物在原地去除,使成本大大降低,而且还可从产生的富含金属的植物硅体中回收贵重金属,取得直接的经济效益;三是植物本身对环境的净化和美化作用,更易被社会所接受;四是植物修复过程也是土壤有机质含量和土壤肥力增加的过程,被修复过的土壤适合多种农作物的生长。植物修复技术存在的主要问题是如何提高植物修复效率和速率。目前最具有推广价值的超积累植物植株矮小、生物量低、生长缓慢和生活周期长,因而修复效益低,且不易于机械化操作。同时,一种植物通常只能吸收一种或2种重金属,对土壤中共存的其他金属忍耐能力差,从而限制了植物修复技术在复合污染土壤治理方面的应用。此外,植物是一个生命有机体,对土壤肥力、气候、水分、盐度、pH值等有一定的要求,而这些植物多为野生植物,目前,对其生活习性和耕种方法还不了解,限制了其在治理土壤重金属污染方面的广泛利用。

由于生物修复是一项新兴的高效修复技术,具有良好的社会、生态综合效益,且易被大众接受,因此,具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。目前,土壤重金属污染修复技术的重点研究领域,一是超累积植物筛选与培育。超累积植物是在重金属胁迫条件下的一种适应性突变体,往往生长缓慢,生物量低,气候环境适应性差,具有很强的富集专一性。因此,筛选、培育吸收能力强,同时能吸收多种重金属元素,且生物量大的植物是生物修复的一项重要任务。二是分子生物学和基因工程技术的应用。随着分子生物技术迅猛发展,将筛选、培育出的超累积植物和微生物基因导入生物量大、生长速度快、适应性强的植物中已成为现实,因此,利用分子生物技术提高植物修复的实用性方面将取得突破性进展。三是生物修复综合技术的研究。重金属污染土壤的修复是一个复杂的系统工程,单一的修复技术很难达到预期效果,必须以植物修复为主,辅以化学、微生物及农业生态措施,增加重金属的生物有效性,促进植物的生长和吸收,从而提高植物修复的综合效率。因此,生物修复

综合技术将是今后重金属污染土壤修复技术的主要研究方向。

参考文献:

- [1] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制[J]. 资源生态环境网络研究动态, 1999, 10(3): 21—27.
- [2] 陈志良, 仇荣亮. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护, 2002, 29(6): 21—23.
- [3] 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(3): 25—28.
- [4] 王向健, 郑玉峰. 重金属污染土壤修复技术现状与展望[J]. 环境保护科学, 2004(4): 48—49.
- [5] 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): 365—370.
- [6] 张书海, 沈跃文. 污灌区重金属污染对土壤的危害[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 12(2): 22—24.
- [7] 李天杰. 土壤环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. 112—113.
- [8] 方满, 刘洪海. 武汉市垃圾堆放场重金属污染调查及控制途径[J]. 中国环境科学, 1998, 8(4): 54—59.
- [9] 潘海峰. 铬渣堆存区土壤重金属污染评价[J]. 环境与开发, 1994, 9(2): 268—270.
- [10] 陈英旭, 朱祖祥, 何增耀. 土壤中铬的有效性与污染生态效应[J]. 生态学杂志, 1995, 15(1): 79—84.
- [11] A Tesser. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844—851.
- [12] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [13] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [14] X XIAN. Effect of chemical forms of cadmium zinc and lead in polluted soil on their uptake by cabbage plant[J]. Plant and Soil, 1989, 13: 257—264.
- [15] 丁园. 重金属污染土壤的治理方法[J]. 环境与开发, 2000. 15—2.
- [16] 陈志良, 仇荣亮. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护, 2002, 29(6): 21—23.
- [17] Probst R F, Hick R E. Removal of contaminants from soils by electric fields[J]. Science, 1993, 260: 498—503.
- [18] Kawachi T, Kubo H. Model experimental study on the migration behavior of heavy metals in electokinetic remediation process for contaminated soil[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1999, 45(2): 259—268.
- [19] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79—84.
- [20] 宋静. 土壤重金属修复技术[J]. 污染农业环境保护, 1998, 17(6): 271—273.

# 甜玉米高产栽培新技术

牛永锋<sup>1</sup>, 郑丽敏<sup>1</sup>, 段改霞<sup>2</sup>

(1. 安阳市农业科学研究所, 河南 安阳 455000; 2. 内黄县第二高级中学, 河南 内黄 456300)

中图分类号: S513      文献标识码: B      文章编号: 1004—3268(2005)05—0092—01

近年来, 随着我国农业结构的调整, 许多特种种植代替了普通种植。由于甜玉米种植成本低(省工), 生长期短, 见效快, 效益高, 销路好, 深受广大种植户的欢迎, 种植面积不断扩大, 种植甜玉米已成为农民的致富途径。采用适合甜玉米特点的高产栽培技术, 对提高农民的种植效益, 有着重要意义。

### 1 品种选择

目前, 生产上种植的品种主要有甜单 8 号、甜单 6 号、京科甜 112、科甜 115、116、118 等品种, 其中甜单 8 号为首选品种。

### 2 精细整地

大面积平作, 可将底肥均匀撒于地表, 然后旋耕翻下与土壤充分混匀。有机肥作基肥施用, 一般用量为 15 000~22 500 kg/hm<sup>2</sup>, 并与二铵 225 kg/hm<sup>2</sup> 混合作基肥; 潮湿易涝地区应起垄种植以利排水。

### 3 隔离种植

甜玉米与其他玉米要有空间或时间隔离, 以免接受其他玉米花粉影响品质。在空间隔离上, 如没有障碍物的平原地区, 需 300 m 的隔离带, 如果空间隔离有困难, 也可利用高秆作物、围墙等自然屏障隔离; 在时间隔离上, 需与其他玉米种植时期错开 25 d 以上。如大面积成片种植甜玉米, 可适当降低隔离标准。

### 4 提高播种质量

播前一定要保证有充足适宜的底墒; 下种量应在 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 左右, 播深 2~3 cm 左右, 行距 65 cm, 最好采用宽、窄行种植(宽行 80 cm, 窄行 50 cm), 机播或畜播均可。

### 5 分期播种

甜玉米如能赶上水果淡季或较早供应市场, 可获得较高的经济效益。因此, 甜玉米的种植应根据市场需求, 遵循前伸后延、分期播种、均衡上市的原则安排播期。早春播种(4 月初)应盖膜栽培; 夏播以 6 月 21 日左右为好, 最晚应在 7 月 10 日前播完, 大面积种植应错期播种。

### 6 合理密植

为了确保甜玉米果穗大小均匀一致, 增加商品性, 提高鲜果穗产量, 种植密度一般在 55 500~60 000 株/hm<sup>2</sup>。

### 7 定苗去穗

四叶期定苗, 平均株距 28 cm; 在玉米雌穗成穗后, 要及时去除多余的雌穗, 以促进第 1、2 果穗的正常发育。

### 8 施肥浇水

种植甜玉米应坚持增施有机肥、均衡施用 N、P、K 肥, 早施前期肥的施肥原则。追肥应注重苗肥的施用, 一般苗肥占 70%, 穗肥占 30%, 拔节至小喇叭口期适时追肥, 追施尿素 600 kg/hm<sup>2</sup>, 追肥后及时浇水。小喇叭口期至灌浆期是需水关键时期, 遇旱一定要及时浇水, 并追施尿素 225 kg/hm<sup>2</sup>。及时防治病、虫、草害等, 以免影响果穗的外观和产量。

### 9 适时收获

玉米适时收获极为重要, 根据其籽粒含糖指数可在玉米授粉 21~25 d 采收。在生产中可根据所需而定。在此特别指出, 春播甜玉米收获时, 正处在夏季高温时期, 其灌浆速度快, 种植户要注意观察, 适时收获, 不然会影响籽粒品质; 夏播甜玉米收获时, 为秋季低温时期, 其灌浆速度慢, 收获时间可适当拉长。

收稿日期: 2004—11—17  
作者简介: 牛永锋(1976—), 男, 河南内黄人, 研究实习员, 本科, 主要从事玉米育种。

[ 21 ] 廖敏, 谢正苗, 黄昌勇. 重金属在土水系统中的迁移特征[ J ]. 土壤学报, 1998, 35(2): 179—184.  
[ 22 ] 戴树桂, 董亮, 王臻. 表面活性剂在土壤颗粒物上的吸附行为[ J ]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 392—396.  
[ 23 ] 丁园. 重金属污染土壤的治理方法[ J ]. 环境与开发, 2000, 15(2): 25—28.  
[ 24 ] 王新. 不同作物对重金属复合污染物吸收特征研究[ J ]. 农业环境保护, 1998, 17(5): 193—196.  
[ 25 ] 蒋玉根. 农艺措施对降低污染土壤重金属活性的影响[ J ]. 土壤, 2002, 34(3): 145—147.  
[ 26 ] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超积累植物及其植物修复技术的研究进展[ J ]. 生态学报, 2001, 21(7): 196—1203.  
[ 27 ] Salt DE, Smith RD, Raskin. Phytoremediation[ J ]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1998, 49: 643—668.  
[ 28 ] Salt DE, Blaylock M, Nanda—Kumar PBA, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the envirement using plants[ J ]. Bio/ Technol, 1996, 13: 468—474.  
[ 29 ] Watanabe ME. Phytoremediation on the brink of commercialization[ J ]. Envirvn Sci Technol, 1997, 31: 182—186.  
[ 30 ] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents[ A ]. In: Parr JF eds. Land Treatment of Hazardous Wastes[ C ]. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1983. 50—76.  
[ 31 ] Baker A J M, Receves R D, McGrath S P. In situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants a feasibility study. Hinchee RE, Olfenbittel RF, Eds. In Situ Bioreclamation[ M ]. Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 1991. 539—544, 600—605.  
[ 32 ] 龙新究, 杨肖娥, 倪吾钟, 等. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[ J ]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757—762.