

文章编号: 1005-0930(2003)02-0143-09 中图分类号: X53 文献标识码: A

土壤重金属污染的治理途径及其研究进展

顾继光, 周启星, 王新

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院陆地生态过程重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 由于工业“三废”的排放, 使农田遭受不同程度重金属的污染, 重金属通过在作物体内富集进入食物链, 对人畜健康构成了威胁. 文章对土壤重金属的污染现状、治理途径及其原理、优缺点、可行性作了简要的回顾, 对土壤重金属污染植物修复技术类型、原理、特点以及基因工程等现代生物技术在镉污染植物修复技术中的应用前景作了进一步的展望, 为实现对重金属污染土壤进行有效的生态整治与安全高效益的利用提供了新的技术途径.

关键词: 重金属; 土壤污染; 植物修复

土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源. 世界面临的粮食、资源和环境问题与土壤密切相关. 自 20 世纪 20 年代以来, 由于工业的发展, 金属的产量明显增加, 因而由此产生的重金属环境污染问题也随之出现. 在许多发展中和发达国家, 都面临着土壤污染严重阻碍农业生产的问题. 随着社会现代化和生产的发展, 土壤污染问题日益严重, 因而已引起人们的广泛关注.

在环境科学中常注意的重金属, 计有汞、镉、镍、铬、砷、硒、铁、锰、铜、锌、铅等. 其中有相当一部分重金属是生物所必需的微量元素, 另有一些重金属则表现为环境污染物, 目前, 研究较多的是镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)和汞(Hg). 在农业生产上, 重金属污染不仅使土壤肥力下降, 又致使生产出的农产品质量不符合生态学安全的要求, 危害人畜健康, 因而具有很大的危害性.

20 世纪 60 年代, 在日本的富山县神通川流域, 由于铅锌冶炼厂排放的含镉废水污染水稻田, 居民长期食用含镉稻米和含镉水而造成镉中毒, 镉进入人体后破坏人体的骨骼系统, 使骨质变脆易折, 也就是所谓的“骨痛病”. 近年来, 人们开始认识到重金属极易被植物的根系吸收而向籽实迁移, 然后通过食物链进入人体, 从而对人类的生命健康构成威胁. 随后, 有关重金属在土壤—作物系统内的迁移、富集及对重金属污染土壤的治理和植物修复等问题引起了全世界的高度重视和深入研究^[1-2].

1 土壤中重金属的污染现状及其形态

1.1 土壤中重金属的污染状况

土壤作为开放的缓冲动力学体系, 在与周围的环境进行物质和能量的交换过程中, 不

收稿日期: 2003-03-18; 修订日期: 2003-06-09

基金项目: 国家 973 项目课题(G1999011808); 国家杰出青年科学基金(20225722); 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-SW-416)资助

作者简介: 顾继光(1966—), 男, 博士研究生.

可避免地会有外源重金属进入这个体系. 重金属对土壤的主要污染途径是工业废渣、废气中重金属的扩散、沉降、累积, 含重金属废水灌溉农田, 以及含重金属农药、磷肥的大量施用. 外来重金属多富集在土壤的表层. 目前, 我国受镉、砷、铅等重金属污染的耕地面积近 2.0×10^7 公顷, 约占总耕地面积的 $1/5$; 其中工业“三废”污染耕地 1.0×10^7 公顷, 污水灌溉的农田面积 3.3×10^6 公顷. 我国每年因重金属污染而减产粮食超过 1.0×10^7 t, 另外被重金属污染的粮食每年也多达 1.2×10^7 t, 由此造成的经济损失合计至少为 200 亿元^[3\]. 例如: 某省的 47 个县和郊区的 2.59×10^6 公顷的耕地污染状况的调查显示, 75% 的县已受到不同程度的重金属污染的潜在威胁, 而且污染有逐年加重的趋势. 在所有重金属污染中, 尤以镉污染最为严重. 在沈阳张士灌区土壤中, 经污灌进入土壤中的 Cd 的 56.33% 累积于土壤的表层, 去表土 15~30cm, 可使稻米中的 Cd 下降 50%^[4]. 我国有关农田 Cd 污染的调查工作是 20 世纪 70 年代中、后期开始的, 但至今未见 Cd 污染总体状况的资料报道. 何电源等(1991)在 1987—1990 年间对湖南省的农田污染状况进行了调查, 结果发现, 农田 Cd 污染主要来源与工矿企业排放的废气和废水, 在各类 Cd 污染农田中 5%~10% 的面积减产严重^[5]. 值得注意的是, 我国 Cd 污染多数是由于引用工业污水灌溉造成的. 90 年代初, 我国污灌农田已扩大到 1.4×10^6 公顷, 由于污灌不当对 6.3×10^5 公顷农田造成不同程度的污染, 其中 Cd 污染耕地 1.3×10^4 公顷, 涉及 11 个省市的 25 个地区, 每年生产镉米(是指 Cd 含量超过 mg/kg 的糙米, 长期食用会引起骨痛病, 因而禁止食用) 5.0×10^7 kg. 如沈阳市张士灌区因污灌使 2533 公顷农田遭受 Cd 污染(土壤 Cd 含量 1.0mg/kg), 其中严重污染面积(可能产生的稻米 Cd 含量 1.0mg/kg 的农田)占 13%^[6]; 江西大余县污灌引起的 Cd 污染面积为 5.5×10^3 公顷, 其中严重污染面积占 12%^[7]. 另外, 土壤中的作物受 Cd 污染导致“镉米”的地区还有: 上海的沙川灌区、广东的广州和韶关地区、广西的阳朔、湖南的衡阳等. 在日本, 受 Cd 污染的农田有 472125 公顷, 占重金属污染总面积的 82%^[8].

华南某矿区周围农田土壤中锌含量达 690~4000mg/kg; 华北某污灌区土壤中锌含量超过 1500mg/kg; 长期施用污泥的土壤中锌含量达 370~470mg/kg. 受汞污染的面积达 3.2×10^4 公顷, 每年生产汞米 1.95×10^8 kg^[9].

表 1 世界各国土壤镉的环境标准和最大允许浓度^[10]

Table 1 The environmental standard and maximum allowed concentration of soil heavy metal in some countries and areas of the world

国家和地区	单位: mg/kg				
	镉(Cd)	铅(Pb)	铜(Cu)	锌(Zn)	汞(Hg)
德国	1.5	100	60	200	2
英国	1.75	550	55	200	1
欧洲	1—3	50—300	50—140	150—300	1—1.5
美国	3.56	—	73	730	5.34
加拿大	1.6	60	150	300	0.5
前苏联	5	背景值+20	—	—	2.1
中国	0.3—1.0	30—500	50—400	200—500	0.1—1

由于土壤重金属污染的严重性和土壤系统的复杂性,世界各国根据本国的实际情况制定了相应的土壤重金属的环境标准和最大允许浓度(见表1)。

1.2 重金属在土壤中的形态

重金属污染土壤后,在农田生态系统中的迁移和对人体的危害,不仅取决于污染元素的化学性质、迁移系数,更重要的是取决于土壤的环境因素及其理化特性。重金属进入土壤通过溶解、沉淀、凝聚、络合吸附等各种反应,形成不同的化学形态。土壤中重金属的形态影响它的活性和对植物的有效性。因此,研究土壤重金属的形态的转化对于分析其环境效应及污染土壤的治理修复具有重要意义。目前,国内外的学者根据 Tessler 的方法把土壤中重金属的形态分为:总量、可交换态、碳酸盐态、铁锰氧化物结合态、有机硫化物态和残留态^[11]。重金属在土壤中的存在形态十分复杂,受土壤组分及其在土壤中的化学行为影响,各形态之间处于一个动态平衡中,随环境条件的变化而互相转化。研究结果表明,随着土壤总 Cd 含量增加,残渣态百分率减少,交换态百分率显著上升,这说明土壤 Cd 污染越重,非残渣态的相对含量越高,将相对增加 Cd 的毒性。淹水后增加了有机质结合 Cd 的能力,使交换态 Cd 所占比例明显下降^[12]。

2 重金属污染土壤的治理途径

在通常情况下,重金属镉(Cd)、铅(Pb)和汞(Hg)均为危险的环境污染元素,铜(Cu)、锌(Zn)在含量达到一定值后也成为有害的环境污染元素。当重金属进入植物并积累到一定程度,就会产生毒害症状,表现出生长受到抑制、植株矮小、失绿、产量下降等症状。土壤重金属污染防治,应坚持预防为主,综合防治的原则。要严格控制矿山粉尘、工业企业含重金属废水和固体废弃物的排放。重金属污染土壤的治理途径有两种:一种是将污染物清除,即去污染(decontamination),另一种是改变重金属在土壤中的存在形态,使其固定,将污染物的活性降低,减少在土壤中的迁移性和生物可利用性,即稳定化(stabilization)。围绕这两种途径产生了不同的治理措施和方法。由于重金属镉(Cd)的危害性最大,世界各国对土壤重金属镉(Cd)污染的治理及植物修复的报导较多。

2.1 工程治理措施

重金属在土壤中具有稳定、易于累积和不易去除的特点,通过食物链对人畜产生慢性中毒。为了降低和消除土壤重金属的污染和危害,人们最初采取改土法、电化法、冲洗络合法等工程措施降低重金属的溶解性。

2.1.1 改土法 此法适用于小面积污染严重的土壤治理,一种方法是在被污染的土壤上覆盖一层非污染土壤;另一种方法是将污染土壤部分或全部换掉,覆土和换土的厚度应大于耕层土壤的厚度。此方法最早在英国、荷兰、美国等国家应用,对于降低作物体内重金属含量,治理土壤重金属污染是一种切实有效的方法。但是,由于该方法需花费大量的人力与财力,并且在换土过程中,存在着占用土地、渗漏、污染环境等不良因素的影响^[9]。因而,并不是一种理想土壤重金属污染的治理方法。

2.1.2 电化法 此法是由美国路易斯安那州立大学研究出的一种净化土壤污染的原位修复的方法,也可称为电动修复(Electroremediation)^[13]。此法在欧美一些国家发展很快,已经进入商业化阶段。其原理是,在水分饱和的污染土壤中插入一些电极,然后通一低

强度的直流电,金属离子在电场的作用下定向移动,在电极附近富集,从而达到清除重金属的目的,对 Cr 的清除效果要优于其它几种重金属。采用的电极最好是石墨,因为金属电极本身容易被腐蚀,容易引起二次土壤污染。电极的多少、间距及深度,电流的强度一般根据实际需要而定。此法经济合理,特别适合于低渗透性的黏土和淤泥土,每立方米污染土壤需要 100 美元左右,而且,可以回收多种重金属元素。但对于渗透性高、传导性差的砂质土壤清除重金属的效果较差。

2.1.3 冲洗络合法 用清水冲洗重金属污染的土壤,使重金属迁移至较深的根外层,减少作物根区重金属的离子浓度。为防止二次污染,再利用含有一定配位体的化合物冲淋土壤,使之与重金属形成具有稳定络合常数的络合物;或用带有阴离子的溶液,如碳酸盐、磷酸盐冲洗土壤,使重金属形成化合物沉淀,已有研究表明, CaCO_3 在酸性红壤和 K_2HPO_4 对碱性的碳酸盐褐土重金属 Cd 污染的治理效果较为显著^[9]。此种方法适用于对面积小、污染重的土壤治理,但同时也容易引起某些营养元素的淋失和沉淀。

2.1.4 热处理法 对于具有挥发性的重金属汞,热处理法可将其有效地从土壤中清除去。其原理是向汞污染土壤通入热蒸汽或用低频加热的方法,促使其从土壤中挥发并回收再处理。在处理土壤时,首先将土壤破碎,向土壤中加入能够使汞化合物分解的添加剂。然后,再分两个阶段通入低温气体和高温气体使土壤干燥,去除其它易挥发物质,最后使土壤汞汽化,并收集挥发的汞蒸汽。有试验表明,应用热处理法可使砂性土、粘土、壤土中 Hg 含量分别从 15000mg/kg、900mg/kg、225mg/kg 降至 0.07mg/kg、0.12mg/kg 和 0.15mg/kg,回收的汞蒸汽纯度达 99%。热处理法对于修复 Hg 污染土壤是一种行之有效的方法,并可以回收 Hg。它的不足之处是易使土壤有机质和土壤水遭到破坏,而且需消耗大量能量。

总之,用工程治理土壤重金属污染,对于污染重、面积小的土壤具有治理效果明显、迅速的优点,但对于污染面积较大的土壤则需要消耗大量的人力与财力,而且容易导致土壤结构的破坏和土壤肥力的下降。

2.2 农艺调控措施

作物从土壤中吸收重金属,不仅取决于其在土壤中的含量,而且也受土壤的性质、水分条件、施肥的种类和数量、栽培的植物种类、栽培方式以及耕作制度等农艺措施的影响。因此,可以通过调节土壤 pH、有机质、CEC、质地、 CaCO_3 等因素,改变土壤重金属活性,降低其生物有效性,减少从土壤向作物的转移。

2.2.1 提高土壤 pH Cd 的活性通常受土壤酸碱性的影响很大,一方面随着 pH 升高,可增加土壤表面负电荷对 Cd^{2+} 吸附;另一方面则由于是生成 CdCO_3 沉淀,使其活性逐渐降低。Naidu 在 Cd 污染的土壤上施用碱性物质如石灰,一般每公顷土壤施用 750kg 石灰,使土壤中重金属有效态含量降低 15%左右,从而使酸性土壤可被植物利用的 Cd 的活性降低,对减少 Cd 被作物吸收具有一定的作用^[15]。在发育于不同母质的旱地黄筋泥、水田黄筋泥、旱地红砂土、水田红砂土上施加石灰,有效态 Cd 明显减少^[16]。因此,在被镉污染的土壤上施用石灰是降低植物吸收镉有效措施之一。

2.2.2 调节土壤 Eh 土壤中重金属的活性也受土壤的氧化还原状况的影响,因而与土壤的水分状况有着密切的联系。陈涛(1980)的水稻盆栽试验结果表明,在抽穗后进行落

干,籽实的含镉量比正常灌水的高出 12 倍.在水田灌溉时,由于水层覆盖形成了还原性的环境,土壤中的 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,有机物不能完全分解而产生硫化氢,与镉生成溶解度很小的 CdS 沉淀;水中的 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 与 S^{2-} 生成 FeS 沉淀,由于镉在土壤中具有很强的亲硫性质,与之形成共沉淀,降低镉的活度,而难于被作物吸收^[17].可见,通过调节土壤水分可以控制重金属在土壤-植物系统中的迁移,旱田改水田降低土壤的氧化还原电位,能够降低重金属 Cd 的活性,减小对植物的危害.

2.2.3 增施有机肥 有机肥不仅可以改善土壤的理化性状、增加土壤的肥力,而且可以影响重金属在土壤中的形态及植物对其的吸收.向 Cd 污染土壤中加入有机肥,由于有机肥中大量的官能团和较大比表面积的存在,可促进土壤中的重金属离子与其形成重金属有机络合物,增加土壤对重金属的吸附能力,提高土壤对重金属的缓冲性,从而减少植物对其的吸收,阻碍它进入食物链^[18].因此,在 Cd 污染土壤中施加有机肥是一种十分有效的治理方法.

但利用有机肥改良 Cd 污染土壤存在一定的风险,主要是由于有机肥在矿化过程中分解出的低分子量的有机酸和腐殖酸组分对土壤中的 Cd 起到了活化作用,关键取决于腐殖酸组分和土壤环境条件,如果能够系统地研究不同 pH、Eh、质地等土壤条件下,腐殖酸组分对 Cd 的移动性和生物有效性的影响,合理施用有机肥就可以一方面对农田 Cd 污染起到了净化的作用,另一方面也克服了传统治理方法中既需消耗大量资金,又造成营养元素流失、二次污染等问题^[19].

2.2.4 离子拮抗 当土壤中某种重金属含量较高,对土壤的污染较为严重时,可利用另一种对作物危害较轻,且浓度低时对作物生长有利的微量元素拮抗它.由于 Cd 和 Zn 通常是伴随而生的,具有相似的化学性质和地球化学行为,因而 Zn 具有拮抗 Cd 被植物吸收的特性.已有试验证明^[20],土壤中适宜的 Cd/Zn 比,可以抑制植物对 Cd 的吸收,因此,可以通过向 Cd 污染土壤中加入适量 Zn,调节 Cd/Zn,减少 Cd 在植物体内的富集.

总之,重金属污染土壤的改良是一个十分困难的问题.实践表明,采取适宜的农艺调控措施,是合理利用和改良严重重金属污染土壤的良好途径,它有效地减少重金属通过食物链进入人体和家畜的机会,并可获得较好的经济、社会和环境效益.

3 重金属污染土壤植物修复研究进展

3.1 植物修复的概念和类型

随着人们对环境保护日益重视,一些科学工作者开始寻找在不破坏土壤生态环境,保持土壤结构和微生物活性的状况下治理重金属污染的新途径.植物修复则为开辟这一新途径提供了希望.植物修复是指用植物吸收土壤中的重金属,并将其带走,最终达到清除土壤中重金属的一类技术总称,也称绿色修复或生物修复^[21-22].它是一门新兴的环境污染治理应用技术,用来进行修复的植物可以包括高等植物界的一切植物,如野生的草、蕨以及栽培的树木、草皮和作物^[23-25],作为修复植物它们应具备在污染土壤上能正常生长,自身生长没有被抑制的特点.植物修复的机理通常包括以下几个方面:

3.1.1 植物萃取作用(Phytoextraction) 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、储存到地上部,随后收割地上部并集中处理,连续种植这种

植物,以使土壤中重金属含量降低到可接受水平。

3.1.2 植物挥发作用(Phytovolatilization) 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(如 Hg 和 Se),即植物将污染物吸收到体内后将其转化为气态,释放到大气中

3.1.3 根际过滤作用(Rhizofiltration) 植物通过改变根际环境(pH、Eh)使重金属的形态发生化学改变,通过在植物的根部积累和沉淀,减少重金属在土壤中的移动性。

目前,植物修复主要是指植物萃取作用^[26-27],即利用某些特定的植物对重金属超富集能力清除土壤重金属污染的技术。

3.2 重金属污染土壤植物修复研究进展

超积累植物(hyperaccumulator)是指能够超量吸收和积累重金属的植物,Brooks 等人 1977 年最早提出了这一概念^[28]。利用超积累植物对重金属的富集比普通植物高出几十倍到几百倍的能力,对重金属污染土壤进行修复。到目前为止,在美国、澳大利亚、新西兰等国已发现能富集重金属的超积累植物 500 多种^[29],其中有 360 多种是富集 Ni 的植物,就对 Cd 而言,公认 100DWmg/kg 作为其筛选超积累植物的临界标准。Baker 在欧洲中西部发现了能富集 Cd 高达 2130DWmg/kg 的十字花科植物天蓝褐蓝菜(*T. caerulea*)^[30]。目前,在世界各地已发现多种对重金属具有强富集能力的超积累植物(见表 2)。

表 2 在世界各地已发现的重金属超积累植物^[30]

Table 2 The discovered hyperaccumulator of heavy metal in the world^[30]

植物种	发现地	重金属含量/ mg/ kg				
		Cd	Pb	Cu	Zn	Cr
<i>T. caerulea</i>	欧洲中西部	2130	2740		43710	
<i>Minuartia verna</i>	南斯拉夫		11400			
<i>T. rotundifolium</i> subsp	奥地利/意大利		8200		17300	
<i>Aeollanthus biformifolii</i>	非洲砂坝哈			3920		
<i>Haumaniastrum robertti</i>	非洲砂坝哈			2070		
<i>Dicoma niccolifera</i> Wild	津巴巴韦					1500
<i>Sutera fodina</i> Wild	津巴巴韦					2400

植物修复技术的处理费用很低,与常规的填埋法相比具有明显的优势,尤其适合于在发展中国家应用;植物修复技术属于原位修复技术,具有保护表土、减少侵蚀和水土流失的功效,对环境影响小,可广泛应用于矿山的复垦、重金属污染土壤的改良,是目前最清洁的污染处理技术;与其它处理方法相比,植物修复技术产生的废物量较少,并且可以回收重金属^[31]。

3.3 植物修复的研究展望

虽然现已筛选的超积累植物对重金属的富集能力很强,随着研究的深入,人们发现超积累植物往往植株矮小,生物量较低,生长速度慢,生长周期长,而且受到土壤水分、盐度、酸碱度的影响,很难在实际中应用^[31-34]。如果能够根据污染土壤特性、污染的程度、当地的农业生产习惯、气候条件、经济技术水平及预期达到的修复目标综合考虑,将植物修复

技术与电化法、冲洗络合法、农艺调控措施等重金属污染土壤治理法结合起来应用到土壤的修复中,可以做到取长补短,比单一的方法效果好,达到高效、低耗的效果。同时,人们注意到能否应用现代生物技术将超积累植物的相关基因克隆,然后转移到生物量较大的植物或作物体内,培养出新的超积累植物品种,将其应用到污染土壤的修复上,必将大大提高对污染土壤的修复能力,减少重金属在食物链中的积累。

有研究表明,根际分泌物在根际环境中具有降低 Cd 的有效性,减少植物对 Cd 吸收的作用^[35]。因此,与超积累植物相反,筛选以体外抗性为主导机制的重金属排异植物,特别是农作物,减少其向可食用部位转移、积累,降低在食物链中的数量,对于人类寻找一种既对污染物有较高的抗性,又能保证生物产品具有较高的安全性,为污染土壤的再利用提供了一种崭新的广阔的途径。进而通过了解抗金属作物的抗性机制,选育抗性强、吸收少的作物品种在金属污染区推广种植。同时研究低吸收的遗传机制及基因定位,并通过基因工程等分子生物学技术进行遗传育种,培育出抗性强、吸收少、产量高、品质好的作物品种,以保证日益严重的重金属污染条件下的农业生产顺利进行,对于保护生态环境、治理环境污染和生产出合格的绿色食品具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environ Sci Technol, 1993, 27: 2630-2636
- [2] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator[J]. Proc Natl Acad Sci, 2000, 97:4956-4960
- [3] 陈怀满. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996:71-85
Chen Huaiman. Heavy metals pollution in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 1996:71-85
- [4] 吴燕玉, 陈涛, 孔庆新, 等. 张士灌区镉污染及其改良途径[J]. 环境科学学报, 1984, 4(3): 275-282
Wu Yanyu, Chen Tao, Kong Qingxin. Cadmium pollution at Zhangshi irrigation area and remediation[J]. Acta Sci Circum, 1984, 4(3): 275-282
- [5] 何电源, 王凯荣, 胡荣桂. 农田土壤污染对作物生长和产品质量影响的研究[J]. 农业现代化研究, 1991, 12(增刊): 1-8
He Dianyuan, Wang Kairong, Hu Ronggui. Crop growth and produce quality in agricultural area with heavy metal contamination[J]. Research of Agricultural Modernization, 1991, 12(Supplement): 1-8
- [6] 吴燕玉, 周启星, 田均良. 制定我国土壤环境质量标准(汞、镉、铅和砷)的探讨[J]. 应用生态学报, 1991, 2(4): 334-339
Wu Yanyu, Zhou Qixing, Tian Junliang. An approach to the enactment of soil-environmental standards (Hg, Cd, Pb and As) in China[J]. Chin J Appl Ecol, 1991, 2(4): 334-339
- [7] 王凯荣. 我国农田镉污染现状及其治理利用对策[J]. 农业环境保护, 1997, 16(6): 274-278
Wang Kairong. Cadmium pollution in agricultural soils and strategies for improvement [J]. Agro-environmental Protection, 1997, 16(6): 274-278
- [8] 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. 1993: 301-303
Liao Ziji. The environmental chemistry of trace elements and its biological effect[M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese), 1993: 301-303
- [9] 华璐, 陈承慈, 刘全义. 土壤污染的治理方法研究[J]. 农业工程学报, 1992, 第8卷(增刊): 90-99
Hua Luo, Chen Chenci, Liu Quanyi. A study on methodology in amelioration of soil pollution[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 1992, 8(supplement): 90-99

- [10] 孟凡乔,史雅娟,吴文良. 我国无污染农产品重金属元素土壤环境质量的制定与研究进展[J]. 农业环境保护, 2000,19(6):356-359
Meng Fanqiao, Shi Yajuan, Wu Wenliang. Development of soil environmental quality standards of heavy metal for non-polluted agricultural products in China[J]. Agro-environmental Protection, 2000,19(6):356-359
- [11] Tessler M, Campbell P G C, Usson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal[J]. Anal Chem, 1979,51:844-851
- [12] 郑绍建,胡霏堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学学报. 1995,15(2):142-147
Zheng Shaojian, Hu Aitang. Effects of flooding on the transformation of cadmium fraction in contaminated soils[J]. Acta Sci Circumt, 1995,15(2):142-147
- [13] Sav H, Christopher J. Intergrated in situ soil remediation technology: The Lasagna Process[J]. Environ Sci Technol, 1995,29:2528-2534
- [14] Brett Robinson, Charles Russell, Mike Hedley. Cadmium adsorption by rhizobacteria: implications for New Zealand pastureland[J]. Agro, Eco Environ, 2001,87:315-321
- [15] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E. Cadmium sorption and transport in variable charge soils[J]. Environ Qual, 1997,26:602-617
- [16] 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, 1998,17(3):101-103
Liao Min, Huang Changyong, Xie Zhengmiao. Abatement of cadmium toxicity in soils with different parent minerals by lime application[J]. Agro-environmental Protection, 1998,17(3):101-103
- [17] 陈涛,吴燕玉,张学询,等. 张士灌区镉土改良和水稻镉污染防治研究[J]. 环境科学, 1980,1(5):7-11
Chen Tao, Wu Yanyu, Zhang Xuexun, et al. Improvement of Cadmium contaminated soils at Zhangshi irrigation area and prevention of pollution in rice[J]. Environ Sci, 1980,1(5):7-11
- [18] 张亚丽,沈其荣,姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001,38(2):212-218
Zhang Yali, Shen Qirong, Jiang Yang. Effect of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil[J]. Acta Pedol Sin, 2001,38(2):212-218
- [19] 余贵芬,蒋新,孙磊. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002,22(5):770-776
Yu Guifen, Jiang Xin, Sun Lei. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils[J]. Acta Ecol Sin, 2002,22(5):770-776
- [20] 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, 1994,5(4):438-441
Zhou Qixing, Wu Yanyu, Xiong Xianzhe. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant[J]. Chin J Appl Ecol, 1994,5(4):438-441
- [21] Salt D E, Blaylock M, Ensley B D, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Biotechnology 1995,13:468-474
- [22] Cunningham S D, William R, Berti W. Phytoremediation of contaminated soils[J]. TIBTCH, 1995,13:393-397
- [23] Kumar P B A N, Duchonkov V, Motto H, et al. Phyextraction: the use of plants to remove heavy metal from soils[J]. Environ Sci Technol, 1995,29:1232-1238
- [24] Raskin I, Smith R D, Salt D E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997,8:221-226
- [25] Robinson B H, Mill T M, Petit D, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: implication for phytoremediation[J]. Plant and Soil, 2000,227:301~306
- [26] Mitch M L, Nicole S P, Deborah L D, et al. Zinc phytoextraction in thlaspi caerulescens[J]. International Journal of Phytoremediation, 2001,3:129-144
- [27] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated site[J]. J Environ Qual, 1997,26:1424-1430

- [28] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 5:49-57
- [29] Cunningham S D, Ow D W. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements[J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-97
- [30] Baker A J M. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements——a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1:81-126
- [31] 万云兵, 仇荣亮, 陈志良, 等. 重金属污染土壤中提高植物提取修复功效的探讨[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(4):56-59
Wan Yunbing, Qiu Rongliang, Chen Zhiliang, et al. On efficient improvement of phytoextraction of heavy metals from contaminated soil[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(4):56-59
- [32] Knight B, Zhao F J, McGrath S P, et al. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soils solution[J]. *Plant and Soil*, 1997, 197:71-78
- [33] Shen Z G, Zhao F J, McGrath S P. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum* [J]. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20:898-906
- [34] Paul Romkens, Lucas Bouwman, Jan Japenga. Cathrina draaisma potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils[J]. *Environmental pollution*, 2002, 116:109-121
- [35] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化[J]. *生态学报*, 2002, 22(4):496-502
Zhang Ling, Wang Huanxiao. Changes of root exudates to cadmium stress in wheat [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, 22(4):496-502

Reused Path of Heavy Metal Pollution in Soils and its Research Advance

GU Jiguang, ZHOU Qixing, WANG Xin

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract

Heavy metal contamination of agricultural soils as a result of industrial discharge is a serious threat to human and animals health because of bioaccumulation in the food chain. Current status of heavy metal pollution, remedial mechanisms, advantages and disadvantages of different methods, and feasibility of application are reviewed in this article. In addition, principle, characteristics and new biotechnological methods involving genetic engineering used in phytoremediation of soils contaminated by heavy metal and future prospect are discussed in details. The alternative methods provide novel approaches to restore the polluted ecological systems using highly efficient techniques.

Key word: heavy metal; soil pollution; phytoremediation