

土壤重金属污染修复研究进展

刘 刊, 王 波, 权 俊 娇, 商 海 燕, 陆 小 平

(苏州大学 园艺系, 江苏 苏州 215123)

摘 要:土壤重金属污染已成为全球面临的一个严重的环境问题。该文综述了土壤重金属污染修复措施的研究现状,包括物理修复、化学修复、生物修复、综合修复等。对土壤重金属污染修复技术的发展趋势作展望,为进一步开展土壤重金属修复研究提供一些思路。

关键词:土壤污染;重金属;修复

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)22-0189-06

1 我国土壤重金属污染现状

重金属指密度在 4.5 kg/dm^3 以上的金属元素^[1]。土壤重金属污染是指由于人类活动使重金属在土壤中的累计量明显高于土壤环境背景值或土壤环境质量标准,而致使土壤环境质量下降和农田生态环境恶化的现象^[2]。导致土壤污染的重金属主要包括 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Hg、Pb 等,有单一重金属形成的污染,也有几种重金属形成的复合污染,常见的重金属污染主要是复合污染。重金属污染是当今土壤污染中污染面积最广、危害最大的环境问题之一^[3]。不仅导致土壤退化、农作物产量和品质降低,而且还可能通过直接接触、食物链传递等途径危及人类的健康和生命。

土壤重金属污染源主要包括:(1)工业污染源:矿产冶炼、化工、电镀、电子和制革等工业产生的废气、废水和废渣;(2)农业污染源:主要是农药、化肥、有机肥不合理施用和污水灌溉,以及畜禽养殖业;(3)生活污染源:生活垃圾中含有的重金属能渗到土壤中,家庭燃煤以及采矿形成的废煤矸石山;(4)交通污染源:汽车尾气排放及汽车轮胎及车辆镀金部分磨损或润滑油燃烧都会释放出大量含重金属的有害气体和粉尘;(5)自然污染源:土壤母质土中的重金属本身含量高,还有火山喷发造成的土壤污染,大气沉降^[4-5]。重金属在土壤中不易随水淋溶和被生物降解,有明显的生物富集作用,其主要是通过影响农作物的产量和品质来体现其危害的,因此土壤污染有较长的潜伏期。其具体特点为:隐蔽性、不可逆性、普遍性、表聚性、长期性。此外,土壤重金属会导致

土壤微生物的生物量下降,影响微生物种群结构,降低土壤微生物的多样性^[6-7],影响土壤微生物活性,这些微生物对土壤及植物系统至关重要。

据 2007 年第 1 次全国污染源普查公报,我国 31 个省(市)工业污染源、农业污染源、生活污染源等 592.6 万个普查对象中,农业源中主要水污染物 Cu 排放(流失)量达到 2 452.09 t, Zn 达到 4 862.58 t。工业废水中重金属产生量为 24 300 t。2008 年重金属(Hg、Cd、Cr、Pb、As)排放量位于前 4 位的行业依次为有色金属矿采选业、有色金属冶炼及压延加工业、化学原料及化学制品制造业、黑色金属冶炼及压延加工业。这 4 个行业重金属排放量为 483.3 t,占重点调查统计企业排放量的 84.5%^[2]。2010 年经由全国 66 条主要河流入海的重金属 42 000 t,其中 Cu 4 159 t、Pb 2 812 t、Zn 34 318 t、Cd 191 t、Hg 77 t、As 4 226 t^[3]。据农业部进行的全国污水灌溉区域调查,在约 140 万 hm^2 的污水灌区中,遭受重金属污染的土地面积占污水灌区面积的 64.8%,估计有 0.1 亿 hm^2 污染土壤,每年被重金属污染的粮食达 1 200 万 t,造成的直接经济损失超过 200 亿元^[8]。这引起了国家有关部门的高度重视,在国家环境保护“十二五”规划中,提出要遏制重金属污染事件高发态势,加强重点行业和区域重金属污染防治。因此,在我国耕地资源日益紧张的今天,高效安全地修复重金属污染土壤已成为紧迫任务^[9]。

2 重金属污染土壤修复技术

土壤作为植物生长的介质,改善其理化性质,降低土壤中的有毒物质含量或使其钝化,这对生产生态健康的农产品是非常重要的。重金属污染土壤修复是实施一系列的技术以清除土壤中污染的重金属或降低土壤中重金属的活性和有效态组分,以期恢复土壤生态系统的正常功能,从而减少土壤中重金属向食物链和地下水的转移^[10]。根据处理土壤的位置是否变化,可以分为原

第一作者简介:刘刊(1987-),女,贵州遵义人,在读硕士,研究方向为植物栽培与生理。E-mail:liukanliketvb@126.com.

责任作者:王波(1965-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为植物营养生理。E-mail:wangb@suda.edu.cn.

收稿日期:2012-08-07

位修复和异位修复^[11]。根据采用方法与原理的不同,可以分为物理修复、化学修复和生物修复,以及综合修复^[12]。

2.1 物理修复

物理修复是根据物理学原理,采取一定的工程措施,使环境中重金属部分彻底去除或转化为无害物质的一类方法。主要有工程措施、电动法、热处理法、玻璃化法等。工程措施主要包括排土、换土、去表土、客土和翻土等措施^[13]。汪雅谷等^[14]对重金属污染的菜区进行客土改良试验,结果表明,青菜内的重金属残留量平均下降了50%~80%。但是该方法工程量大,投资高,易导致土壤结构破坏、生物活性下降和土壤肥力退化等^[15]。电动法是根据离子的电动力学和电渗析原理,在土壤酸性条件下,直流电作用,金属离子流在电解、电迁移、电渗、电泳等的作用下移向阳(阴)极处,然后采取措施从土壤中取出^[16]。钱署强等^[17]建立了土壤电修复试验装置,并以 Cu^{2+} 为模拟污染物进行试验研究,以柠檬酸为清洗液,在适宜的操作条件下,土壤中 Cu^{2+} 的去除率可达89.9%。这种技术目前存在较大的问题是,现场原位修复时,受环境条件影响较大,土壤pH、有机质、渗透性等都影响修复效果,且成本较高。热处理法是将污染土壤加热,使土壤中的挥发性污染物(如Hg)挥发并收集起来进行回收或处理^[18-19]。热处理法工艺简单、技术成熟,但能耗大、操作费用高,仅适用于易挥发的污染物,且回收不良时易造成大气Hg污染^[20]。玻璃化是将污染区进行高温、高压处理,使其中的污染物形成玻璃质材料(通常为氧化物固体)以降低金属污染物活性的过程^[21]。技术工程量大,消耗电能大、费用高昂,但对某些特殊废物如放射性废物非常适用,能从根本上消除重金属污染,并且见效快,因此常用于重金属重污染区修复^[22]。

2.2 化学修复

化学修复主要是通过向土壤中施加化学物质,以改变土壤的化学性质,从而降低重金属的活性,减少植物对重金属的吸收^[23]。化学方法见效快,但投资昂贵、需用复杂的设备条件、打乱土层结构和易带来二次污染^[24]。化学修复主要包括淋洗法、固化法、化学氧化修复法。淋洗法是用水或淋洗液来淋洗土壤,使吸附固定在土壤颗粒上的重金属形成溶解性的离子或金属试剂络合物,然后收集淋洗液回收重金属并循环淋洗液^[25]。此法的关键是试剂的选择,分为无机冲洗剂、人工螯合剂、阳离子表面活性剂、天然有机酸、生物表面活性剂等。淋洗法使用时,由于试剂在土壤中的残留,可能影响土壤生态系统的正常功能,一般要将土壤离地,进行场外修复或者异地修复。固化法即在土壤中加入固化剂,通过对重金属的吸附或共沉淀作用改变其在土壤中

的存在形态,从而降低其生物有效性和迁移性^[26]。但固化方法只是改变了重金属在土壤中的形态,不能使重金属真正从土壤中脱离,如果土壤环境发生变化,又可能引起其形态的变化,使其重新被植物吸收,进而发生危害^[27]。固化技术的处理效果与固化剂的组成、比例、土壤重金属总浓度以及土壤中一些干扰固化的物质的存在有关。该技术不但大大减轻土壤重金属污染,而且其产物还可用于建筑、铺路工程中等。有研究表明,用柠檬酸淋洗来修复重金属污染土壤,Cr发生活化-迁移-再吸附的过程,有效降低砂土与壤土表层土壤的重金属Cr含量,将其淋洗到根层外,减少植物根层重金属含量^[28]。

2.3 生物修复

生物修复是指利用生物的生命代谢活动降低土壤环境中有毒、有害物的浓度,甚至使其完全无害化,从而使污染的土壤环境能够部分地或完全地恢复到原初状态的过程^[29]。

2.3.1 植物修复 植物修复技术广义上是指利用植物提取、吸收、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥或地表、地下水中有毒有害污染物技术的总称^[30],狭义上是一种利用自然生长植物或者遗传工程培育植物修复重金属污染土壤环境的技术总称^[31]。植物修复经济有效、成本低,对环境扰动小,产生的富集重金属的植物可统一处理,甚至可以从这些植物体内回收重金属,可以长期、大面积的田间应用,还可绿化环境^[2,32]。但也有一定的缺点,超富集植物生长缓慢,需时较长,局限在植物根系所能延伸的范围内,只能积累某种重金属,而土壤污染大多是重金属的复合污染,超富集植物需收割并作为废弃物妥善处置,对生物多样性存在一定的威胁^[33]。超积累植物回收处理的方法主要有:焚烧法、堆肥法、高温分解法、压缩填埋法、灰化法等。根据修复植物的修复功能和特点可分为4种基本类型^[34-35]:植物提取修复、植物挥发修复、植物稳定修复、植物滤除修复,植物提取是目前最彻底、最有发展前景的方法。超富集植物是指能超量吸收重金属并将其运移到地上部的植物,包括3个指标:一是植物地上部富集的重金属应达到一定的量,由于不同元素在土壤和植物中的自然浓度不同,临界值的确定取决于植物富集的元素类型;二是植物地上部的重金属含量应高于根部,即有较高的地上部/根浓度比率;三是在重金属污染的土壤上这类植物能良好地生长,一般不会发生毒害现象^[36]。由于各种重金属在地壳中的丰度及在土壤、植物中的背景值存在较大的差异,因此对于不同重金属,其超富集植物富集浓度界限也有所不同,且大多数超积累植物只能积累1种或2种重金属。目前,全世界已经发现超富集植物500多种:Cr超富集植物有遏蓝菜^[37]、李氏禾^[38];Mn的超富集植物商陆^[39]、鼠麴草^[40];Ni超富集植物车前草^[41];Cu超富集植物有

燕麦^[42]、鸭跖草^[43]、海州香薷^[44]; Zn 的超富集植物狼把草^[45]、香根草^[46]; As 超富集植物大叶井口边草^[47]、蜈蚣草^[48]; Se 超富集植物有黄芪^[49]; Cd 超富集植物商陆^[50]和龙葵^[51]; Hg 超富集植物有大米草^[52]; Pb 超富集植物绿叶苋菜、裂叶荆芥^[53]、麻疯树^[54]等。以及 Cd/Zn 多重金属富集植物东南景天^[55]、伴矿景天^[56], Pb/Cr/Ni/Cd 多重金属富集植物印度芥菜^[57], Pb/Cu/Zn/Cd 多重金属富集植物朝天委陵菜^[58]等。

2.3.2 微生物修复 微生物修复是利用土壤中的微生物对重金属的吸收、沉淀、降解、氧化和还原等作用,将污染物分解并最终去除,从而降低土壤中重金属的毒性的技术^[59-60]。其二次污染较小,处理形式多样,操作相对简单,可进行原位处理,对环境的扰动较小且不破坏植物生长所需要的土壤环境,费用较低,但是受各种环境因素的影响较大,且某些微生物只能对特定的污染物起作用,时间相对较长。微生物修复的机理:一是生物吸附和富集,细菌、真菌和藻类细胞上的胞外多糖带有负电荷,可作为生物吸附剂,阻止重金属离子进入细胞;二是细胞代谢,专一性的代谢途径可使金属生物沉淀或通过生物转化使其低毒或易于回收;三是金属的转化作用,通过氧化、还原、甲基化和去甲基化作用对重金属进行转化;四是胞外络合和结晶作用,微生物通过向胞外周围环境释放无机和有机酸可以扰乱金属元素的地球化学形态。细胞外有机化合物中含有具多功能团分子结构的低分子量有机物,其可以改变可溶性金属离子的形态,使它们沉淀下来^[61-62]。常见形式^[63-64]:一是投菌法,通过微生物对污染物的降解和代谢达到去除污染物的目的;二是生物吸食法,主要采用当地微生物或培养后具有特异功能的菌株降解污染物;三是生物通气法,结合了蒸气浸提技术的优点,将空气和营养物质添加到污染土壤中以达到给微生物提供氧气和营养物质的目的,促使微生物繁殖,进而达到修复的目的。如姜华等^[65]从污水处理厂活性污泥中分离到的变幻青霉(*Penicillium variable* Sopp)、桔黑青霉(*Penicillium citreogrum* Dierckx)、淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson)、链格孢霉(*Alternaria alternata* (Fr.) Keissler)对重金属 Cd、Cr、As、Hg、Pb 都有较强的吸附能力。许友泽等^[66]采用微生物淋溶法去除重金属,在最佳工艺条件下(培养基的 pH 值为 1.0,微生物的接种量为 15.0%,淋溶温度为 30℃,循环淋溶时间为全天循环),污泥中 Cd、Mn、Cu、Pb、Zn 的浸出率分别高达 88.0%、88.0%、69.0%、67.0%和 83.0%。谢朝阳等^[67]试验结果表明,在细菌的参与下,土壤胶体和粘土矿物对重金属离子的吸附能力有一定程度增加。提高土壤中耐重金属微生物的生物量,对提高土壤对 Cd 缓冲容量,减缓与防治 Cd 的污染会有一定的作用。

2.3.3 动物修复技术 动物修复技术是利用土壤中某些低等动物(如蚯蚓、鼠类等)能吸收土壤中的重金属,从而在一定程度上降低污染土壤中重金属的含量,但低等动物吸收重金属后可能会通过再次释放到土壤中而造成二次污染^[68]。蚯蚓提高植物修复重金属污染效率的可能机理:一是蚯蚓活动可以提高土壤的微生物数量和酶活性,加速土壤养分循环并提高养分生物有效性,从而促进植物生长;二是蚯蚓活动有助于分解土壤有机物,提高土壤可溶性有机碳含量,促进土壤重金属从无效态向有效态转变;三是蚯蚓活动改善污染土壤的微生物生态环境,而微生物的生物吸附、富集以及代谢活动都在一定程度上影响重金属形态的变化^[69]。如戈峰等^[70]研究表明,饲养在牛粪和生活垃圾中的蚯蚓对 Se 和 Cu 元素的富集能力很强,其最高富集 Se 和 Cu 量分别为 332.5 mg/kg 和 1 376.0 mg/kg。

2.4 综合修复

2.4.1 生物电动修复 生物电动修复是生物修复和电动修复的有机结合,促进了土壤中污染物的去除,克服了传统生物修复中营养物质和微生物水力输送的障碍,有效提高了生物修复的效率^[71-72]。主要分为植物电动修复,在电压作用下,电极附近土壤溶液发生电化学反应,改变了土壤的理化性质,加快土壤固体上重金属的解吸,提高土壤溶液中重金属的含量,从而有利于植物的吸收、积累,加快修复过程;微生物电动修复,有研究表明,由硫氧化细菌浸出可能是一个很好的集合尾矿土壤中的重金属的预处理。微生物电动修复是一个有效的尾矿土壤重金属修复技术^[72]。

2.4.2 植物-微生物修复 微生物与植物的相互作用不仅可以促进植物的生长,增加植物的生物量,而且可以增加植物对重金属的抗性,提高植物从污染环境中萃取重金属的量,增强植物吸收重金属的能力,加速重金属向地上部分转运,从而提高植物修复能力^[73]。植物的生长也为微生物的活动提供了更好的条件,特别是根际环境的各种生态因素能调节微生物的生长代谢,并形成特别的根际微生物群落,且植物本身与环境污染产生直接作用和间接作用^[64],这种植物-微生物联合体系能促进植物对重金属污染的固定、积累或转化,从而减轻土壤中重金属污染。如 Leung 等^[74]试验表明,AM 真菌同时提高蜈蚣草地上部的生物量和 As 浓度,从而显著增加蜈蚣草对 As 的提取量,促进 As 从蜈蚣草的根部向地上部转运。杨秀敏^[75]研究表明,接种菌根不但促进了东南景天对 Pb、Cd、Zn 的吸收,而且促进了东南景天的生物量,提高了东南景天对重金属的生物富集系数。Sell 等^[76]研究以根外生真菌加强柳树和白杨 Cd 提取的可能,白杨和真菌(*Paxillus involutus*)联合导致 Cd 含量明显增加,特别是叶子里。刘灵芝等^[77]研究表明,污染土

壤中分离的丛枝菌根真菌促进了万寿菊对土壤中 Cd 的吸收,并增加了 Cd 向地上部分的运转。唐明灯等^[78]等研究表明,接种无色菌(*Achromatium* sp.)可促进海州香薷生长及其地上部对 Cu 的吸收,从而显著提高海州香薷对污染土壤中 Cu 的吸收去除能力。芽孢杆菌属(*Bacillus* sp. DBM)可以溶解根际土壤中 Zn 的有效态含量,但水稻地上部和地下部 Zn 浓度比不加菌处理对照减少。而由于促生效果也极为显著,其地上部和地下部 Zn 总量仍比不加菌处理对照增加^[79]。

2.4.3 植物-化学修复 植物对重金属的修复效率有限,影响重金属污染土壤植物吸取修复效率的限制因素主要包括土壤重金属溶解度低、迁移能力差以及重金属从植物根向地上部转运的效率低。螯合剂可增加金属离子的溶解度但降低离子的活度,表面活性剂对微量重金属阳离子具有增溶作用和增流作用,与重金属结合后,能显著提高土壤中重金属的溶解。向土壤施加螯合剂、表面活性剂能提高植物对金属的吸收和富集,提高植物修复效率,甚至常规植物都可能用于植物修复^[80-81]。常用螯合剂和表面活性剂有乙二胺四乙酸(EDTA)、二乙烯三胺五乙酸(DTPA)、二乙基三乙酸(NTA)、乙二胺二琥珀酸(EDDS)、柠檬酸、乙酸等,应用较多的是 EDTA 和 DTPA。如 Quanacci 等^[82]研究表明,施加 EDDS 不仅可提高印度芥菜对 Cu、Pb、Zn 的积累,而且对其生物量影响很小。李佳华^[83]研究表明,EDTA 能促进金丝垂柳根、茎、叶对 Cd 的吸收,富集量增加。Peáalosa 等^[84]研究表明,NTA 能够促进金属离子(Fe、Mn、Cu、Zn、Cd)迁移,促使羽扇豆所含的金属离子浓度升高,尤其是 As、Cd 和 Pb 浓度增加更明显。孟桂元等^[85]研究表明,施加有机肥及其与石灰、海泡石组合处理能有效降低污染土壤中有效 Cd、Pb,改善土壤理化性能,促进苎麻生长,具有较理想植物修复效果。李正强等^[86]研究表明,有机肥、石灰、蛭石和白云石等 4 种改良剂能不同程度地提高土壤 pH 值,显著降低土壤各重金属有效态含量,并显著抑制 Cd、Pb 向光叶紫花苕地上部转移,降低重金属在光叶紫花苕植株地上部的积累,改善光叶紫花苕的生长和发育。王恒^[87]研究表明,不同浓度的 EDTA 与 DTPA 及其组合都增加了富集植物黑麦草地上部对 Pb、Zn 的吸收,增加了对铅锌的地上部分富集系数。

2.4.4 土壤生态化学修复 污染土壤生态化学修复采用污染生态化学原理对污染环境进行修复,是微生物修复、植物修复和化学修复技术的综合,是近年来兴起的一种技术,被认为是 21 世纪污染土壤修复技术的发展方向^[88]。其优势主要表现在^[88-89]:生态影响小,注意与土壤的自然生态过程相协调,最终产物为二氧化碳、水和脂肪酸,不会形成二次污染;费用低,与市场结合紧

密,易被大众接受,且风险小;应用范围广,可在其它方法不能进行的场地进行,同时还可以处理地下水污染;易操作,容易推广。其主要的修复机理是通过化学氧化还原、土壤催化氧化、化学聚合、化学脱氯与生物修复中植物的超积累富集吸收、微生物的分解与固定综合利用去除污染土壤中的重金属和有毒有机物,修复污染效率也更高一些^[90]。有研究表明,在植物微生物联合体系修复前,加入土壤改良剂(如赤泥、城市污泥和熟石灰等)调节土壤营养及物理化学条件,以改良植物及微生物的生长环境,可促进二者对重金属的吸收^[91]。

3 展望

综上所述,土壤重金属污染修复技术的研究取得了一定的成果,但也有许多不足。土壤污染类型多样,污染途径多,重金属污染土壤的修复是一个系统工程,单一的修复技术很难达到预期效果。综合技术的应用可以弥补单一技术的缺陷,如何将生物修复、物理修复和化学修复科学地结合起来,具有很好的发展前景。污染土壤重金属修复技术的发展趋势是,向绿色、环境友好的生物修复技术发展;从异位向原位修复技术发展;向基于设备化的快速场地修复技术发展;向土壤修复决策支持系统及修复后评估技术发展;向土壤-环境与生态可持续发展。

参考文献

- [1] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京:高等教育出版社,2001:387-398.
- [2] 王燕,李贤庆,宋志宏,等. 土壤重金属污染及生物修复研究进展[J]. 安全与环境学报,2009,9(3):60-67.
- [3] 李选统,卢维盛,李谦,等. 土壤重金属污染的修复[J]. 现代农业科技,2011(24):295-297.
- [4] 王文兴,童莉. 海热提. 土壤污染物来源及前沿问题[J]. 生态环境,2005,14(1):1-5.
- [5] 尹彦勋,张玉芬,王坤. 浅论植物修复技术对土壤重金属污染的清除[J]. 天津科技,2007(1):43-44.
- [6] Bruce F M. Zinc contamination decreases the bacterial diversity of agricultural soil[J]. Fems Microbiology Ecology,2003(43):13-19.
- [7] Komarova N N. Relationships of sorption of heavy metals (lead,nickel,cobalt) on biomass isolated from production waste of megaterin enzyme preparation[J]. Russian Journal of Applied Chemistry,2002,75(3):509-510.
- [8] 罗锡文. 对加速我国农业机械化发展的思考[J]. 农业工程,2011,1(4):1-8,56.
- [9] 郭彬,李许明,陈柳燕,等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(33):10776-10778,10781.
- [10] 孙铁珩,李培军,周启星,等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京:科学出版社,2005:210-211,217.
- [11] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [12] 郑喜坤,鲁安怀,周建利,等. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状和展望[J]. 湖北农学院学报,2002,22(5):476-479.
- [13] 陈志良,仇荣亮,张景书,等. 重金属污染土壤的修复技术[J]. 环境保护,2002(6):21-23.
- [14] 汪雅谷,王玮,卢善玲,等. 客土改良菜区重金属污染土壤[J]. 上海农

业学报,1990,6(3):50-55.

[15] 汪琳琳,方凤满,蒋炳言. 中国菜地土壤和蔬菜重金属污染研究进展[J]. 吉林农业科学,2009,34(2):61-64.

[16] 夏星辉. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学,1997(3):72-76.

[17] 钱署强,金卫华,刘铮. 从土壤中去掉 Cu^{2+} 的电修复过程[J]. 化工学报,2002,3(53):236-240.

[18] 刘俊平. 山西省农田重金属污染生物防治研究[J]. 山西农业科学,2008,36(6):16-17.

[19] 丁园. 重金属污染土壤的治理方法[J]. 环境与开发,2000,2(15):25-28.

[20] 钱署强,刘铮. 污染土壤修复技术介绍[J]. 化工进展,2000(4):10-15.

[21] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: An evaluation[J]. Engineering Geology,2001,60:193-207.

[22] 张云峰,盛金聪,陆秋艳. 污染土壤修复技术的研究进展[J]. 甘肃农业科技,2004(10):36-39.

[23] 何容,杜佳佳,许波峰,等. 土壤重金属污染研究概况[J]. 山东林业科技,2008(1):85-87.

[24] 封功能,陈爱辉,刘汉文,等. 土壤中重金属污染的植物修复研究进展[J]. 江西农业学报,2008,20(12):70-73.

[25] 王海峰,赵保卫,徐瑾,等. 重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J]. 环境科学与管理,2009,34(11):15-20.

[26] 李战,李坤. 重金属污染的危害与修复[J]. 现代农业科技,2010(16):268-270.

[27] 陈志良,仇荣亮,张景书,等. 重金属污染土壤修复技术[J]. 环境保护,2002(6):21-23.

[28] 姜晓琪,李旭霖,张娇,等. 柠檬酸对铬污染不同质地土壤萃取与淋洗的研究[J]. 中国农学通报,2012,28(2):278-281.

[29] 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.

[30] USEPA. Introduction to Phytoremediation [R]. Washington D C: USEPA,2000.

[31] 张维碟. 重金属污染土壤植物富集能力的诱导作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.

[32] 袁燕,卞建春,刘学忠,等. 环境中重金属污染的生物治理[J]. 中国兽医学报,2009,29(8):1089-1091.

[33] 吴志谦,罗兵. 浅谈土壤重金属污染的植物修复[J]. 绿色大世界,2009(5):34-35.

[34] 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.

[35] 郭彦威,王立新,林瑞华. 污染土壤的植物修复技术研究进展[J]. 安全与环境工程,2007,14(3):25-28.

[36] 亢希然,范稚莲,莫良玉,等. 超富集植物的研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(16):4895-4897.

[37] 韩璐,魏鬼,官子楸,等. Zn/Cd 超富集植物天蓝遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*) TcCaM2 基因的克隆及在酵母中的重金属耐受性分析[J]. 中国科学院研究生院学报,2007,24(4):465-472.

[38] 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,2006,26(3):950-953.

[39] 薛生国,陈英旭,林琦,等. 中国首次发现的锰超积累植物商陆[J]. 生态学报,2003,23(5):935-937.

[40] 张慧智,刘云国,黄宝荣,等. 锰矿尾渣污染土壤上植物受重金属污染状况调查[J]. 生态学杂志,2004,23(1):111-113.

[41] 陆引罡,黄建国,滕应,等. 重金属富集植物车前草对镍的响[J]. 水土

保持学报,2004,18(1):108-110.

[42] Ebbs S D, Kochian L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. Environmental Science and Technology,1998(32):802-806.

[43] 唐世荣. 重金属在海州香薷和鸭跖草叶片提取物中的分配[J]. 植物生理学通讯,2000,36(2):128.

[44] 唐明灯,吴龙华,李振高,等. 无色菌产酸对土壤溶液重金属浓度及海州香薷重金属吸收的影响[J]. 土壤,2009,41(3):425-431.

[45] 魏树和,周启星,王新. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(2):152-158.

[46] Antiochia R, Campanella L, Ghezzi P, et al. The use of vetiver for remediation of heavy metal soil contamination [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry,2007,388:947-956.

[47] 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,2002,22(5):777-778.

[48] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 砷超积累植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报,2002,47(30):207-210.

[49] 刘国华,舒洪岚. 重金属污染土壤的植物修复技术[J]. 江西林业科技,2002(2):30-31.

[50] 傅晓萍. 美洲商陆福吸收和耐性机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[51] 石磊,金玉青,金叶华,等. 土壤重金属污染的植物修复技术[J]. 上海农业科技,2009(4):24-28.

[52] 田吉林,诸海焘,杨玉爱,等. 大米草对有机汞的耐性、吸收及转化[J]. 植物生理与分子生物学报,2004,30(5):577-582.

[53] 聂俊华,刘秀梅,王庆仁. Pb(铅)超富集植物品种的筛选[J]. 农业工程学报,2004,20(7):255-258.

[54] 李清飞. 麻疯树对铅胁迫的生理耐性研究[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):72-76.

[55] Sun Q, Ye Z H, Wang X R, et al. Cadmium hyperaccumulation leads to an increase of glutathione rather than phytochelatin in the cadmium hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164: 1489-1498.

[56] 李思亮,李娜,徐礼生,等. 不同生境下锌镉在伴矿景天不同叶龄叶中的富集与分布特征[J]. 土壤,2010,42(3):446-452.

[57] Salt D E, Blaylock M, Nanda-Kumar PBA, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Biotechnology,1995(13):468-474.

[58] 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,2011,43(3):476-480.

[59] 邱廷省,王俊峰,罗仙平. 重金属污染土壤治理技术应用现状与展望[J]. 四川有色金属,2003(2):48-52.

[60] 宋玉芳,宋雪英,张薇,等. 污染土壤生物修复中存在问题的探讨[J]. 环境科学,2004,25(2):129-133.

[61] 李军,苏永杰,马学文,等. 土壤重金属污染用微生物修复的研究[J]. 中国科技博览,2009(28):342-343.

[62] 徐云,鲁旭阳,申旭红. 重金属污染对土壤微生物影响的研究进展[J]. 湖北农业科学,2008,47(12):1506-1508.

[63] 林力,杨惠芳. 生物整治技术进展[J]. 环境科学,1997(5):67-72.

[64] 汪小勇,张超兰,姜文. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2005,33(1):128-129.

[65] 姜华,魏晓晴,胡晓静. 抗重金属霉菌的筛选鉴定及其特性研究[J]. 辽宁师范大学学报,2007,30(1):100-103.

[66] 许友泽,马超,成应向,等. 微生物淋溶法去除污泥中的重金属[J]. 西南交通大学学报,2012,47(1):169-174.

- [67] 谢朝阳,黄巧云,黄敏耐重金属细菌对土壤胶体及矿物体系吸附的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(4):855-858.
- [68] 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.
- [69] 王丹丹. 蚯蚓及蚓粪对植物修复 Cu、Zn 污染土壤的影响[D]. 南京:南京农业大学,2006.
- [70] 戈峰,刘向辉,江炳祺. 蚯蚓对金属元素的富集作用分析[J]. 农业环境保护,2002,21(1):16-18.
- [71] Lee K Y, Kim H A, Lee B T, et al. A feasibility study on bioelectrokinetics for the removal of heavy metals from tailing soil[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011(33):3-11.
- [72] Virkutytė J, Sillanp M, Latostenma P. Electrikinetic soil remediation-critical overview[J]. Science & Environment, 2002, 289:97-121.
- [73] 李安明,邓青云,李德华,等. 内生细菌在植物修复中的应用[J]. 湖北农业科学,2011,50(19):3893-3896.
- [74] Leung H M, Ye Z H, Wong M H. Interactions of mycorrhizal fungi with *Pteris vittata* (As hyeraceumulator) in As-contaminated soils [J]. Environment Pollution, 2006, 139(1):1-8.
- [75] 杨秀敏. 重金属复合污染土壤的粘土矿物与生物综合修复技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2009.
- [76] Sell J, Kayser A, Schulin R. Contribution of ectomycorrhizal fungi to cadmium uptake of poplars and willows from a heavily polluted soil[J]. Plant and Soil, 2005, 277:245-253.
- [77] 刘灵芝,张玉龙,李培军,等. 铅锌矿区分离丛枝菌根真菌对万寿菊生长与吸镉的影响[J]. 土壤学报,2012,49(1):43-49.
- [78] 唐明灯,吴龙华,李振高,等. 无色菌产酸对土壤溶液重金属浓度及海州香薷重金属吸收的影响[J]. 土壤,2009,41(3):425-431.
- [79] 陈佛保,柏珩,林庆祺,等. 植物根际促生菌(PGPR)对缓解水稻受土壤锌胁迫的作用[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):67-74.
- [80] 丁竹红,胡忻,尹大强,等. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. 生态环境学报,2009,18(2):777-782.
- [81] Turguta C, Pepeb M K, Cutrightb T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoextraction of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus* [J]. Environment Pollution, 2004, 131:147-154.
- [82] Quartacci M F, Irtelli B, Baker A J M, et al. The use of NTA and EDDS for enhanced phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata* [J]. Chemosphere, 2007, 68:1920-1928.
- [83] 李佳华. 典型污染土壤的原位生态化学修复研究[D]. 南京:东南大学,2009.
- [84] Pedálosa J M, Carpena R O, Vázquez S, et al. Chelate-assisted phytoextraction of heavy metals in a soil contaminated with a pyritic sludge[J]. Science of Total Environment, 2007, 378:199-204.
- [85] 孟桂元,周静,郭腊梅,等. 改良剂对苧麻修复镉、铅污染土壤的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(2):273-277.
- [86] 李正强,熊俊芬,马琼芳,等. 4种改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苕生长及重金属吸收特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(1):158-163.
- [87] 王恒. 螯合剂对黑麦草(*Lolium perenne* L.) 铅锌富集及养分吸收的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2009.
- [88] Khodadoust A P, Sorial G A, Wilson G J, et al. Integrated system for remediation of contaminated soils[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(11):1033-1041.
- [89] Di G S, Serra R, Villani M. Applying cellular automata to complex environmental problems; the simulation of the bioremediation of contaminated soils[J]. Theoretical Computer Science, 1999, 217(1):131-156.
- [90] 邓佑,阳小成,尹华军. 化学-生物联合技术对重金属-有机物复合污染土壤的修复研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(4):1940-1942.
- [91] 彭桂香,蔡婧,林初夏. 超积累植物和化学改良剂联合修复锌镉污染土壤后的微生物特征[J]. 生态环境,2005,14(5):654-657.

Research Progress of Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils

LIU Kan, WANG Bo, QUAN Jun-jiao, SHANG Hai-yan, LU Xiao-ping
(Department of Horticulture, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215123)

Abstract: Heavy metals contaminated soils have become a serious environmental problem in global. A review were presented of the recent advancement in the research of remediation techniques of heavy metals contaminated soils, including physical, chemical, biological remediation techniques, and integrated remediation. Future outlook in further research related to remediation of heavy metals contaminated soils were also discussed.

Key words: soil pollution; heavy metals; remediation