

污染土壤的生物修复治理技术研究进展

张强¹ 刘彬² 刘巍¹ 任津¹ 徐圣¹ 张斌¹

(1. 湖北省环境科学研究院, 武汉 430072; 2. 湖北省环境监测中心站, 武汉 430072)

摘要: 污染土壤的生物修复技术是一种极具潜力的土壤污染绿色修复治理方法, 具有高效低耗、环境友好等特点。通过对动物修复、植物修复、微生物修复及联合修复等土壤生物修复治理技术进行分析, 探讨了各种工艺技术对重金属、有机物等目标污染物的修复性能及优缺点, 旨在为我国土壤污染修复治理技术的选择提供参考。

关键词: 污染土壤 动物修复 植物修复 微生物修复 联合修复

The Biological Remediation Technology for the Contaminated Soil

Zhang Qiang¹ Liu Bin² Liu Wei¹ Ren Jin¹ Xu Sheng¹ Zhang Bin¹

(1. Hubei Academy of Environmental Science, Wuhan 430072; 2. Hubei Environmental Monitoring Central Station, Wuhan 430072)

Abstract: Biological remediation of contaminated soil is a potential contamination control technology by its characteristic of high efficiency, low cost and no pollution. The paper analyzed several biological remediation technologies such as animal remediation, phytoremediation, microbial remediation and combined remediation, discussed the technical features of these technologies for treating heavy metals, organic compounds, etc. and provided reference for the remediation of contaminated soil in China by suitable technology.

Key words: Contaminated soil Animal remediation Phytoremediation Microbial remediation Combined remediation

伴随着我国工业化的迅速发展和农业生产中化肥农药的广泛使用, 大量有机和无机污染物通过各种途径进入土壤环境, 导致我国土壤污染形势不断加剧。土壤污染不仅影响植物的生长发育及农产品的数量和质量, 还会通过食物链影响人类的身体健康和生命安全。土壤污染已成为我国亟待解决的重要环境问题之一。目前, 国内外针对土壤的有机和无机污染已经研发了一系列的修复技术。其中, 生物修复技术是近年发展起来的一项用于污染土壤治理的绿色修复技术, 主要是通过综合利用动物、植物或微生物的生命代谢活动, 使土壤中的有害污染物得以去除或稳定化, 土壤质量得以提高或改善的过程。污染土壤的生物修复技术主要包括动物修复、植物修复、微生物修复及联合修复等。

1 动物修复

蚯蚓属环节动物门寡毛纲, 是土壤中生物量最大的无脊椎动物, 也是目前国内外污染土壤动物修

复技术的主要研究对象。Langdon 等^[1]研究发现在砷(As)污染土壤中长期生活的蚯蚓会对 As 产生一定的抗性, 具有修复 As 污染土壤的潜力; 戈峰等^[2]将蚯蚓用于铜矿区废弃场地的生态恢复中发现, 蚯蚓对铜矿土壤中的铜(Cu)富集能力很强, 体内组织的富集量可达 82.5–1 218.4 mg/kg; 戈峰等^[3]又通过进一步的试验发现, 蚯蚓对 Se 也具有很强的富集能力, 其体内组织最高硒富集量为 332.5 mg/kg。此外, Singer 等^[4]在多氯联苯(PCBs)污染土壤中也引入蚯蚓培养, 结果发现土壤中 PCBs 的降解率为 55%, 而在未培养蚯蚓的污染土壤中, PCBs 的降解率仅为 39%。目前, 仅有上述少数几种污染物导致的土壤污染有采用蚯蚓修复的研究报道, 但是蚯蚓在重金属及有机污染土壤的生态监测和评价领域中应用非常广泛, 说明其具有一定的重金属富集及有机物降解能力, 而具体修复技术的实施应用有待深入研究。除针对蚯蚓的研究外, 王一华和张薇等^[5, 6]分别对

甲螨、线虫等土壤动物生物指示作用进行研究发现, 这些土壤动物对农药的富集作用比较明显, 具有应用于农药污染土壤修复的潜力。

2 植物修复

植物修复技术是利用植物来转移、容纳或转化环境介质中有毒有害污染物, 实现对污染物的无害化处理, 进而使污染土壤得到修复与治理。主要包括利用植物超富集或富集性功能的植物提取修复、利用植物根系分泌物控制污染扩散和恢复生态功能的植物固定修复、利用植物转化功能的植物挥发修复、利用植物根系吸附的植物过滤修复技术, 以及利用植物根区微生物群分解代谢作用的根际降解技术等。植物修复的对象通常是土壤中的重金属、有机物或放射性元素等。

其中, 重金属污染土壤的植物修复技术在国内外都得到了广泛的研究与应用, 主要涉及植物挥发、植物提取和植物固定。植物挥发是指利用植物根系分泌的一些特殊物质或微生物使土壤中的硒 (Se)、汞 (Hg)、As 等转化为挥发形态以去除的一种方法。Banuelos 等^[7, 8]研究表明, 在 Se 和 Hg 污染的土壤中分别种植芥菜和烟草, 可使土壤中的 Se 和 Hg 通过挥发形式得以有效去除; Meagher 等^[9]研究表明在 Se 污染的土壤中种植洋麻可使土壤中 Se^{3+} 转化为挥发性的甲基硒而得以去除。但值得注意的是, 气态 Se、Hg、As 等挥发到大气中易引发二次污染, 因此必须妥善处置植物挥发所产生的有害气体。与植物挥发不同, 植物固定则是利用植物根际分泌的特殊物质将根系周围重金属污染物包围使其稳定化的过程。但是, 植物固定只是暂时将土壤中的重金属元素固定, 使其生物毒性降低更有利于植物种群的生存, 并没有彻底从土壤环境中去除重金属, 如果环境条件发生变化, 重金属离子会再度活化进入土壤并造成危害。

植物提取是目前研究最为广泛和深入的重金属污染植物修复技术, 是以植物能耐受和超量富集一种或几种重金属为基础, 吸收污染土壤中的重金属并在地上部分累积, 然后通过收割植物地上部分从而达到彻底去除重金属的目的。该技术的关键在于超富集植物的筛选, 尽管目前世界上已经发现了大

量的重金属超富集植物, 但这些植物普遍存在生物量低、生长缓慢、地域性较强和修复时间较长等缺陷^[10]。因此, 国内外学者在寻找超富集植物的同时也开始关注对重金属具有耐性、适应性强、分布广泛和生物量高的一些能源作物和园林花卉等常见植物。这些植物与超富集植物相比体内重金属富集量很低, 但因植物生物量及生长速度都远远大于超富集植物, 即使体内重金属含量未达到临界含量标准, 同样时间内所积累的重金属绝对量反而比超富集植物积累的绝对量大, 对重金属污染土壤的修复作用更大。表 1 为目前国内学者研究发现的一些对单一或多种重金属元素, 如铅 (Pb)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、锰 (Mn) 等, 具有耐性、富集和超富集能力的野生植物、能源作物和观赏花卉等。

除上述直接选用超富集植物持续性吸收提取土壤中的重金属外, 学者们还研究发展出了螯合诱导植物提取技术。该技术主要是通过人工添加特定的螯合剂, 活化释放被土壤固相吸附固定的重金属离子, 并使其溶解进入土壤溶液, 从而提高超富集植物对重金属的吸收富集效率^[63]。Wu 等^[64]研究发现, 在种植印度芥菜的 Cu、Pb 污染土壤中施加乙二胺四乙酸 (EDTA) 可显著增加印度芥菜地上部分的 Cu、Pb 含量, 相较于未添加 EDTA 的对照组分别高 1 倍和 2 倍; Debra 等^[65]也发现在利用印度芥菜修复土壤中 Cd 污染时, 添加 EDTA 可使其体内 Cd 富集浓度从 131 mg/kg 提高到 1 283 mg/kg; Deram 等^[66]发现在种植双叶燕麦草的重金属污染土壤中施加适量 EDTA 后, 双叶燕麦草对 Cu 的累积浓度由 200 mg/kg 增加到 7 500 mg/kg, 钴 (Co) 由 40 mg/kg 增加到 175 mg/kg, 镍 (Ni) 由 8 mg/kg 增加到 1 276 mg/kg。除 EDTA 外, 乙二醇双四乙酸 (EGTA)、乙二胺二琥珀酸 (EDDS) 和二乙基三乙酸 (NTA) 等也是常用的螯合剂。Zhou 等^[67]研究表明 EGTA 可显著促进超富集植物对土壤中 Cd 的吸收; 裘希雅等^[68]的田间小区试验表明 EDDS 能显著提高海州香薷对 Cu、Zn、Pb 的吸收; Quartacci 等^[69]发现施加 NTA 后印度芥菜地上部分 Cd、Zn 的浓度提高了 2 倍, Cu 的浓度提高了 3 倍。

在土壤重金属污染的植物修复技术日趋成熟的同时, 土壤有机污染的植物修复技术也取得了长足

表 1 国内外常见重金属耐性、富集和超富集植物

植物名称	目标重金属元素					植物名称	目标重金属元素				
	Pb	Zn	Cd	Cu	As		Pb	Zn	Cd	Cu	Mn
类芦 ^[11]	✓					香附子 ^[40]	✓	✓			
桦树 ^[12]		✓				滇白前 ^[41]	✓	✓	✓		
珍珠梅 ^[12]		✓				凤尾蕨 ^[42]	✓				
杨树 ^[12]		✓				蔗茅 ^[42]	✓				
云杉 ^[12]		✓				细风轮菜 ^[42]	✓				
海州香薷 ^[13]				✓		杂交狼尾草 ^[43]		✓	✓		
油菜 ^[14]			✓			串叶松香草 ^[43]			✓		
银合欢 ^[15]	✓					黑籽雀稗 ^[43]			✓		
东方香蒲 ^[15]		✓				密毛白莲蒿 ^[44]	✓				
东南景天 ^[16]	✓	✓				假繁缕 ^[45]	✓	✓			
蜈蚣草 ^[17]					✓	五节芒 ^[46]			✓		
大叶井口边草 ^[18]					✓	香根草 ^[47]	✓				
紫花苜蓿 ^[19]	✓					羽叶鬼针草 ^[47]	✓				
长柔毛委陵菜 ^[20]		✓				刺天茄 ^[48]	✓				
遏蓝菜 ^[21]	✓		✓			白三叶 ^[49]	✓		✓	✓	
圆锥南芥 ^[22]	✓	✓	✓			牛耳枫 ^[50]					✓
拟南芥 ^[23]			✓			小叶女贞 ^[50]					✓
工业大麻 ^[24, 25]	✓	✓	✓			大叶樟 ^[50]					✓
印度芥菜 ^[26]			✓			蚊母 ^[50]					✓
龙葵 ^[27]			✓			构树 ^[50]					✓
土荆芥 ^[28]	✓					三叶鬼针草 ^[51]				✓	
杨梅 ^[29]	✓					中华景天 ^[51]				✓	
裂叶荆芥 ^[30]	✓					紫茉莉 ^[51]				✓	
苍耳 ^[30]	✓					胜红蓟 ^[52]		✓	✓	✓	✓
绿叶苋菜 ^[30]	✓					银杏 ^[53]	✓		✓		
蓖麻 ^[31]			✓			红椿 ^[54]	✓				
刺玫蔷薇 ^[32]	✓	✓				麻疯树 ^[55]	✓				
小叶杨 ^[32]	✓	✓				三叶木蓝 ^[56]		✓	✓	✓	
芒 ^[33]			✓			全叶马兰 ^[56]		✓	✓	✓	
木贼 ^[33]			✓			淡黄鼠李 ^[56]		✓	✓	✓	
商陆 ^[34]			✓			野古草 ^[56]		✓	✓	✓	
伴矿景天 ^[35]			✓			长春花 ^[57]			✓		
双穗雀稗 ^[36]	✓					忍冬 ^[58]			✓		
黄花捻 ^[36]	✓					荻 ^[59]				✓	
多穗兰 ^[37]			✓			吊兰 ^[60]		✓			
宝山堇菜 ^[38]			✓			德国鸢尾 ^[61]			✓		
小鳞苔草 ^[39]	✓	✓				草地早熟禾 ^[62]	✓				

的进步和发展。Campbell 等^[70] 通过研究发现工业大麻具有一定修复苯并[a] 芘和屈污染土壤的能力，可用于苯并[a] 芘和屈污染土壤的修复；许端平等^[71] 研究发现高粱和玉米对石油烃具有一定的降解去除作用，对多环芳烃和直链烷烃具有一定的积累与富集作用；蔡顺香等^[72] 种植黑麦草来修复芘污染土

壤发现，黑麦草对低含量芘污染的土壤具有较好的修复效果；潘淑颖等^[73] 研究了喜氯的特异性植物芹菜对有机氯农药 DDT 污染土壤的修复，也取得了较好的修复效果；董亚明等^[74] 还研究了芦苇、柽柳、沙枣对石油污染土壤的修复效果，结果表明经过 80 d 的修复，污染土壤中石油烃的去除率可达到

26.50%–31.27%，明显高于空白的 15.57%–20.34%。

与传统的物化修复方法相比，植物修复具有运行费用低、减少土壤侵蚀、不造成二次污染和美化景观等特点，是一种很有潜力的修复土壤环境污染的绿色技术，具有广泛的应用前景。但是植物修复技术也尚存在一些缺点，如植物对重金属污染物的耐性有限、修复耗时长，因此植物修复只适用于中低污染程度的重金属修复；对于多种重金属或/和有机物造成的土壤复合污染，单一的植物往往不能取得理想的修复效果等。

3 微生物修复

土壤中微生物数量众多，某些微生物如细菌和真菌等对重金属具有吸附、沉淀、氧化还原等作用，从而可降低污染土壤中重金属的生物有效性，达到修复污染的目的。微生物修复重金属污染的机制主要有生物吸附、胞外沉淀、生物转化、生物累积和外排作用。Cernansky 等^[75]在高 As 含量的沉积物中分离得到一株 As 吸收能力较强的耐高温真菌，发现该真菌几乎能将所吸收的 As 全部以气态形式释放到体外；Srivastava 等^[76]研究发现了 4 种菌株在 10 mg/L 的 As 污染介质中培养 21 d 之后可将 22.31%–29.86% 的 As 通过挥发而去除。Desjardin 等^[77]发现 Cr 污染土壤中存在的 Cr 还原菌株能将 Cr^{6+} 还原成低迁移率的 Cr^{3+} ，显著降低 Cr 的生物有效性；Chai 等^[78]也发现了一种土著菌可有效去除土壤中的总 Cr^{6+} ，去除率高达 98%。此外，Tiwari 等^[79]从香蒲根际中分离出了一些菌株能有效钝化固定土壤中的 Cu 和 Cd；肖根林等^[80]发现一种光合细菌——球形红细菌（*Rhodobacter sphaeroides*）能使土壤中可交换态和碳酸盐结合态 Cd 含量降低，显著降低 Cd 的生物有效性。

微生物修复有机污染主要是利用微生物的代谢过程将土壤中的有机污染物转化为二氧化碳、水、脂肪酸等无毒物质的过程。王莉丽等^[81]从石油污染土壤中筛选出铜绿假单胞菌和凝结芽孢杆菌用于修复油污土壤，发现投加降解菌后土壤中水溶性有机物的芳构化程度显著降低；吴涛等^[82]研究发现，在含盐量为 0.22% 和 0.61% 土壤中添加耐盐菌 *Serratia* BF40，降解 40 d 后，土壤总石油烃降解率

可达 50% 以上；董亚明等^[83]利用筛选获得的石油烃降解混合菌 KL9-1 对稠油污染土壤进行修复，70 d 后石油烃降解率最高可达 54.07%。除石油污染外，Fidlej 等^[84]发现烟管菌属菌株 BOS55 对蒎和苯并[a]芘有很好的降解效果，二者的去除率分别高达 99.2% 和 83%；罗雪梅等^[85]研究发现枯草芽孢杆菌能够吸附或降解菲和苯并[a]芘，二者的去除率也分别高达 98% 和 85%。Wang 等^[86]还研究发现生丝微菌 MAP-1 对 1 000 mg/kg 的甲胺磷去除率可达 100%（36 h），对 100 mg/kg 的乙酰甲胺磷去除率可达 100%（5 d），对 100 mg/kg 的水胺硫磷去除率可达 73.5%（5 d）。此外，为了进一步提高微生物修复效率，学者们还研究了固定化微生物技术，即将分散、游离的微生物通过物理或化学的方法固定在某一限定空间区域内，以提高微生物细胞的浓度，保持较高的生物活性，同时也屏蔽外界不利因素和土著菌恶性竞争的侵害。Su 等^[87]用玉米棒吸附固定真菌以修复苯并[a]芘污染土壤，发现固定化菌对环境适应能力更强、反应启动速度更快，对苯并[a]芘去除效果更好。

微生物修复是一种低成本、高效能的利用生物技术治理土壤污染的绿色修复方法，具有效果好、易操作、无二次污染等特点。但是修复速度慢且周期长以及微生物物种的挑选受多种因素的制约，使其在土壤污染修复中的应用存在一定的困难。目前该技术处于实验室或模拟试验阶段的研究成果较多，商业化应用则有待该技术的进一步成熟和创新性技术的开发。

4 联合修复技术

协同两种或两种以上修复方法，形成联合修复技术，不仅可以提高污染土壤的修复速率与效率，而且可以克服单项修复技术的局限性，实现对多种污染物复合污染土壤的修复。Ma 等^[88]研究了木本豆科植物与蚯蚓协同对 Pb、Zn 尾矿土壤进行修复，发现蚯蚓的存在可使植物吸收重金属比率提高 16%–53%；马淑敏等^[89]采用甜高粱与蚯蚓协同对 Cd 污染土壤进行修复，结果表明蚯蚓能显著提高高粱生物量以及对 Cd 的吸收量。相对于动植物协同修复而言，植物与微生物协同修复技术的研究和发展则更

为深入和成熟。Rajkumar 等^[90]给蓖麻接种两种抗重金属的植物促生菌后发现蓖麻生物量和体内 Zn、Ni、Cu 的积累量均显著增加;Tseng 等^[91]通过给鬼针草和龙珠果接种丛枝菌根真菌极大地提高了两种植物对污染土壤中 Cu、Pb、Zn 的吸收积累;李春荣等^[92]等在种植玉米和向日葵的石油污染土壤中添加外源菌(DX-9)后,石油降解率分别提高了 30.3% 和 30.0%;Zhang 等^[93]通过种植铺地黍、牛筋草、高羊茅等草本植物以促进土著菌对石油的降解,结果发现种植植物后石油降解速率提高了 2.33–3.19 倍。此外,卓胜等^[94]还研究了黑麦草–蚯蚓–菌根的动植微生物联合技术修复 PCBs 污染土壤,结果表明菌根和蚯蚓相互作用可以显著提高黑麦草修复土壤 PCBs 的能力,PCBs 去除率达到 61.05%,说明联合修复具有良好的应用潜力。

5 结语

特定污染现场的实际情况通常比较复杂,往往同时有多种污染物存在造成土壤的复合污染,较之单一污染治理难度更大。而污染土壤的生物修复技术通常具有运行费用低、修复效果好、减少土壤侵蚀、不造成二次污染等优点,是一种极具潜力的土壤污染绿色修复技术,但同时也具有修复速度慢且周期长、仅适用于中低污染浓度水平等局限性。因此,针对我国日益严重的土壤污染形势和成因复杂的污染现状,克服单一治理技术的不足,联合运用生物与物化技术进行综合治理是污染土壤修复的发展方向。

参考文献

- [1] Langdon CJ, Pearce TG, Meharg AA, et al. Interactions between earthworms and arsenic in the soil environment : a review [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124 (3) : 361-373.
- [2] 戈峰,刘向辉,潘卫东,等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用 [J]. *生态学报*, 2001, 21 (11) : 1790-1795.
- [3] 戈峰,刘向辉,江炳缜. 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.
- [4] Singer AC, Jury W, Luepromchaia E, et al. Contribution of earthworms to PCB bioremediation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33 (6) : 765-776.
- [5] 王一华,傅荣恕. 辛硫磷农药对土壤螨类影响的研究 [J]. *山东师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 4 : 72-75.
- [6] 张薇,宋玉芳,孙铁珩,等. 土壤线虫对环境污染的指示作用 [J]. *应用生态学报*, 2004, 10 : 1973-1978.
- [7] Banuelos G, Cardon G, Mackey B, et al. Boron and selenium removal in boron-laden soils by four sprinkler irrigated plant species [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22 : 786-792.
- [8] Banuelos G, Ajwa H, Mackey B, et al. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26 : 639-646.
- [9] Meagher R. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3 : 153-162.
- [10] 屈冉,孟伟,李俊生,等. 土壤重金属污染的植物修复 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27 (4) : 626-631.
- [11] 张志权,蓝崇钰. 铅锌矿尾矿场植被重建的生态学研究 I. 尾矿对种子萌发的影响 [J]. *应用生态学报*, 1994, 5 (1) : 52-56.
- [12] 孔牧,任天祥. 黑龙江小西林铅锌矿植物内铅锌积累机制初步研究 [J]. *有色金属矿产与勘查*, 1996, 5 (1) : 54-57.
- [13] Tang S, Huang C, Zhu Z. *Commelina communis* L. : copper hyperaccumulator found in Anhui province of China [J]. *Pedosphere*, 1997, 7 (3) : 207-210.
- [14] Leendase PC, Pak GA. Green soil clean-up by farmers : a challenge Contaminated Soil' 98 [M]. London : Thomas, 1998 : 1107-1108.
- [15] 张志权,束文圣,蓝崇钰,等. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收和再分配 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25 (3) : 306-311.
- [16] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H) 一种新的锌超积累植物 [J]. *科学通报*, 2002, 47 (13) : 1003-1006.
- [17] Chen TB, Wei CY, Huang ZC, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (11) : 902-905.
- [18] 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.
- [19] 叶春和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11 (4) : 331-334.
- [20] 郭水良,黄朝表,边媛,等. 金华市郊杂草对土壤重金属元素

- 的吸收与富集作用(Ⅰ)-6种重金属元素在杂草和土壤中的含量分析[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2002, 20(1): 22-30.
- [21] Schwartz C, Echevarria G, More JL. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant and Soil, 2003, 249: 27-35.
- [22] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥 (*Arabis Paniculata* L.) [J]. 中山大学学报, 2005(4): 135-136.
- [23] Bert V, Meerts P, Saumitou-Laprade P, et al. Genetic basis of Cd tolerance and hyperaccumulation in *Arabidopsis halleri* [J]. Plant and Soil, 2003, 249: 9-18.
- [24] Citterio S, Santagostino A, Fumagalli P. Heavy metal tolerance and accumulation of Cd, Cr and Ni by *Cannabis sativa* L. [J]. Plant and Soil, 2003, 256(2): 243-252.
- [25] Kos B, Lestan D. Soil washing of Pb, Zn and Cd using biodegradable chelator and permeable barriers and induced phytoextraction by *Cannabis sativa* [J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 43-51.
- [26] Qadir S, Qureshi MI, Javed S, et al. Genotypic variation in phytoremediation potential of *Brassica juncea* cultivars exposed to Cd stress [J]. Plant Science, 2004, 167: 1171-1181.
- [27] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [28] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究 [J]. 生态环境, 2004(2): 156-157, 160.
- [29] 何新华, 陈力耕, 何冰, 等. 铅对杨梅幼苗生长的影响 [J]. 果树学报, 2004, 21(1): 29-32.
- [30] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb(铅)富集植物品种的筛选 [J]. 农业工程学报, 2004(4): 255-258.
- [31] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属Cd的耐性与吸收积累研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(41): 674-677.
- [32] 刘成志, 尚鹤, 姚斌, 等. 柴河铅锌尾矿耐性植物与优势植物的重金属含量研究 [J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 246-249.
- [33] Arduini I, Ercoli L, Mariotti M, et al. Response of miscanthus to toxic cadmium applications during the period of maximum growth [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 55(1): 29-40.
- [34] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应 [J]. 生态环境, 2006, 15(2): 303-306.
- [35] 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 中国景天科植物一新种——伴矿景天 [J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633.
- [36] 祝鹏飞, 宁平, 曾向东, 等. 矿区土壤 Pb 的分布特征及植物修复应用性研究 [J]. 工业安全与环保, 2006, 32(5): 4-6.
- [37] Solís-Domínguez FA, González-Chávez MC, Carrillo-González R, et al. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141: 630-636.
- [38] 邓培雁, 刘威, 韩博平. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*) 镉胁迫下的光合作用 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1858-1862.
- [39] 胡宗达, 杨远祥, 朱雪梅, 等. Pb, Zn 对超富集植物(小鳞苔草)抗氧化酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2007(6): 86-91.
- [40] 陈一萍. 重金属超积累植物的研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33(3): 20-24.
- [41] 肖青青, 王宏镔, 王海娟, 等. 滇白前 (*Silene viscidula*) 对铅、锌、镉的共超富集特征 [J]. 生态环境学报, 2009(4): 1299-1306.
- [42] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量 [J]. 生态学报, 2009(4): 2020-2026.
- [43] Zhang X, Xia H, Li Z, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 2063-2066.
- [44] 罗于洋, 赵磊, 王树森. 铅超富集植物密毛白莲蒿对铅的富集特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2010, 5: 37-40.
- [45] 叶林春, 张青松, 蒋小军, 等. 矿区植物假繁缕对铅、锌积累特性的研究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(2): 239-245.
- [46] 秦建桥, 夏北成, 赵鹏, 等. 五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 不同种群对镉积累与转运的差异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 21-28.
- [47] 陈三雄, 陈家栋, 谢莉, 等. 广东大宝山矿区植物对重金属的富集特征 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 216-220.
- [48] 邓小鹏, 彭克俭, 陈亚华, 等. 4种茄科植物对矿区污染土壤重金属的吸收和富集 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33(1): 46-51.
- [49] 况武, 田伟莉, 高全喜. 白三叶在铜、镉、铅复合污染土壤修复上的应用 [J]. 能源工程, 2012, 6: 53-56.
- [50] 欧阳林男, 吴晓芙, 郭丹丹, 等. 锰污染土壤修复的植物筛选与改良效应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(12): 7-11.
- [51] 韩少华, 黄沈发, 唐浩, 等. 3种植物对 Cd 污染农田土壤的修复效果比较试验研究 [J]. 环境污染与防治, 2012, 34(12):

- 22-25, 30.
- [52] 杨期和, 何彦君, 李皎清, 等. 煤矸石废弃地中胜红蓼的重金属富集研究 [J]. 生态环境学报, 2012, 21 (10): 1749-1755.
- [53] 曹福亮, 郁万文, 朱宇林. 银杏幼苗修复 Pb 和 Cd 重金属污染土壤特性 [J]. 林业科学, 2012, 48 (4): 8-13.
- [54] 胡方洁, 张健, 杨万勤, 等. Pb 胁迫对红椿 (*Toona ciliata* Roem.) 生长发育 Pb 富集特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (2): 284-291.
- [55] 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.
- [56] 李庚飞. 4 种植物对 3 种重金属的吸收研究 [J]. 吉林农业科学, 2013, 38 (3): 86-88.
- [57] 刘柿良, 石新生, 潘远智. 镉胁迫对长春花生长, 生物量及养分积累与分配的影响 [J]. 草业学报, 2013, 22 (3): 154-161.
- [58] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬——一种新发现的镉超富集植物 [J]. 生态环境学报, 2013, 22 (4): 666-670.
- [59] 张杰, 周守标, 黄永杰, 等. 能源植物获对铜胁迫的耐性和积累特性 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (2): 168-172, 188.
- [60] 李伟, 韦晶晶, 刘爱民, 等. 吊兰生长对锌污染土壤微生物数量及土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (2): 276-281.
- [61] 张呈祥, 陈为峰. 德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 [J]. 生态学报, 2013, 33 (7): 2165-2172.
- [62] 张呈祥, 陈为峰, 裴洪翠. 草地早熟禾对铅的胁迫反应及积累特性 [J]. 中国草地学报, 2013, 35 (1): 96-101.
- [63] Vassil AD, Kapulink Y, Raskin I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard [J]. Plant Physiology, 1998, 117 (20): 447-453.
- [64] Wu LH, Luo YM, Christie P, et al. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil [J]. Chemosphere, 2003, 50: 819-822.
- [65] Van Engelen DL, Sharpe-Pedler RC, Moorhead KK, et al. Effect of chelating agents and solubility of cadmium complexes on uptake from soil by *Brassica juncea* [J]. Chemosphere, 2007, 68: 401-408.
- [66] Deram A, Petit D, Robinson B. Natural and induced heavy metal accumulation by *Arrhenatherum elatius*: Implications for phytoremediation [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 31 (3/4): 413-421.
- [67] Zhou JH, Yang QW, Lan CY, et al. Heavy metal uptake and extraction potential of two *Bechmeria nivea* (L.) Gaud. (Ramie) varieties associated with chemical reagents [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2010, 134: 246-252.
- [68] 裴希雅, 孙小峰, 何旭华, 等. 施用 EDDS 对海州香薷铜锌吸收的强化作用及淋溶风险 [J]. 浙江农业学报, 2006, 18 (2): 86-89.
- [69] Quartacci MF, Argilla A, Baker AJ, et al. Phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by Indian mustard [J]. Chemosphere, 2006, 63 (6): 918-925.
- [70] Campbell S, Paquin D, Awaya JD, et al. Remediation of Benzo [a] pyrene and chrysene contaminated soil with industrial hemp (*Cannabis sativa*) [J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, 4 (2): 157-168.
- [71] 许端平, 董天骄, 吕俊佳. 典型禾本科植物对石油污染土壤的修复作用 [J]. 环境工程学报, 2012, 6 (4): 1398-1402.
- [72] 蔡顺香, 林琼, 邱孝煊, 等. 黑麦草及其根际土壤酶对砷胁迫的响应与植物修复研究 [J]. 福建农业学报, 2013, 28 (3): 262-267.
- [73] 潘淑颖, 马光辉, 宋建民, 等. 特异性作物对土壤中 DDT 降解的诱导作用研究 [J]. 农业灾害研究, 2012, 2 (6): 53-56, 62.
- [74] 董亚明, 赵朝成, 蔡芸, 等. 新疆石油污染土壤植物修复特性研究 [J]. 干旱区研究, 2013, 30 (1): 162-165.
- [75] Cerňanský S, Koleník M, Seve J, et al. Fungal volatilization of trivalent and pentavalent arsenic under laboratory conditions [J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 1037-1040.
- [76] Srivastava PK, Vaish A, Dwivedi S, et al. Biological removal of arsenic pollution by soil fungi [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409: 2430-2442.
- [77] Desjardin V, Bayard R, Huck N, et al. Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils [J]. Waste Management, 2002, 22 (2): 195-200.
- [78] Chai L, Huang S, Yang Z, et al. Cr (VI) remediation by indigenous bacteria in soils contaminated by chromium-containing slag [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167 (1-3): 516-522.
- [79] Tiwari S, Kumari B, Singh S. Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of *Typha latifolia* growing on fly ash dumps [J].

- Bioresource Technology, 2008, 99 : 1305-1310.
- [80] 肖根林, 白红娟, 贾万利. 光合细菌对土壤中 Cd 形态分布的影响 [J]. 化工技术与开发, 2011, 40 (3): 43-45.
- [81] 王莉丽, 吴蔓莉, 丁艺, 等. 油污土壤修复过程水溶性有机物光谱特性研究 [J]. 安全与环境学报, 2012, 12 (6): 27-30.
- [82] 吴涛, 依艳丽, 谢文军, 等. 耐盐菌 BF40 产表面活性剂特性及其对石油污染盐渍化土壤的修复能力 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (12): 2389-2396.
- [83] 董亚明, 刘其友, 赵东风, 等. 石油烃降解混合菌修复稠油污染土壤的影响因素 [J]. 干旱区研究, 2013, 30 (4): 603-608.
- [84] Fidlej A, Dejong E, Costa GF. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by new isolates of white rot fungi [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58 (7): 2219-2226.
- [85] 罗雪梅, 何孟常, 刘昌明. 微生物对土壤与沉积物吸附多环芳烃的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28 (2): 261-266.
- [86] Wang L, Wen Y, Guo XQ, et al. Degradation of methamidophos by *Hyphomicrobium* species MAP-1 and the biochemical degradation pathway [J]. Biodegradation, 2010, 21 : 513-523.
- [87] Su D, Li PJ, Stagnitti F, et al. Biodegradation of benzo [a] pyrene in soil by *Mucor* sp. SF06 and *Bacillus* sp. SB02 coimmobilized on vermiculite [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18 (6): 1204-1209.
- [88] Ma Y, Dickinson NM, Wong MH. Interactions between earthworms, trees, soil nutrition and metal mobility in amended Pb/Zn mine tailings from Guangdong, China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35 (10): 1369-1379.
- [89] 马淑敏, 孙振钧, 王冲. 蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理初探 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (1): 133-138.
- [90] Rajkumar M, Freitas H. Influence of metal resistant plant growth promoting bacteria on the growth of *Ricinus communis* in soil contaminated with heavy metals [J]. Chemosphere, 2008, 71 (5): 834-842.
- [91] Tseng CC, Wang JY, Yang L. Accumulation of copper, lead, and zinc by *in situ* plants inoculated with AM fungi in multicontaminated soil [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40 (21-22): 3367-3386.
- [92] 李春荣, 王文科, 曹玉清. 石油污染土壤的生物修复研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (2): 234-238.
- [93] Zhang ZZ, Su SM, Luo YJ, et al. Improvement of natural microbial remediation of petroleum-polluted soil using graminaceous plants [J]. Water Science & Technology, 2009, 59 (5): 1025-1035.
- [94] 卓胜, 苏嘉欣, 黎华寿, 等. 黑麦草-菌根-蚯蚓对多氯联苯污染土壤的联合修复效应 [J]. 环境科学学报, 2011, 31 (1): 150-157.

(责任编辑 狄艳红)