2016,5 (12:2250-2259 农业 环境科 学学报 2016年12月

***Journal of Agro-Environment* Science** 吴志能，谢苗苗，王莹莹.我国复合污染土壤修复研究进展[J].农业环境科学学报,2016,35 (12 : 2250-2259.

WU Zhi-neng, XIE Miao-miao, WANG Ying-ying. Remediation of soils with combined pollution in China：A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2250-2259.

我国复合污染土壤修复研究进展

吴志能，谢苗苗，王莹莹 [[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3)

天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室，环境污染过程与基准教育部重点实验室，南开大学环境科学与工程学院，天

津 300071)

摘 要 :重金属 、有机污染物造成的土壤复合污染是我国亟待解决的环境问题之一 。当前，我国对复合污染土壤修复的研究主要集 中于单一的生物、物理、化学等修复方法，而对于不同修复方法联合修复复合污染土壤的研究较少。从土壤重金属复合污染修复、有 机污染物复合污染修复、重金属-有机污染物复合污染修复三方面全面综述了我国复合污染土壤修复的研究进展，并在此基础上提 出了复合污染土壤修复研究的发展方向。

关键词:土壤；复合污染；重金属；有机污染物；修复

中图分类号：X53 文献标志码:A 文章编号：1672-2043(2016 12-2250-10 doi:10.11654/j aes.2016-0863

Remediation of soils with combined pollution in China:A review

WU Zhi-neng, XIE Miao-miao, WANG Ying-ying\*

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria(Ministry of Education), Tianjin Key Laboratory of Environmental Remedi－ ation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

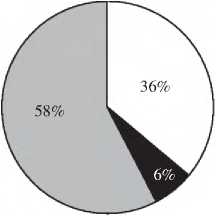
**Abstract：**The rapid growth of the world's population has led to three global crises ： depletion of resources, environmental pollution and eco­logical destruction. Soil pollution is one of the major types of environmental pollution. It mainly includes the pollution of heavy metals, or－ ganic pollutants and radioactive pollutants. Combined pollution is a common form of soil pollution. In recent years, combined soil pollution has caused extensive concern of human health. It is one of the most important environmental problems to be solved in China. It is found that the remediation of combined soil pollution in China had mainly focused on a single biological, physical or chemical remediation method. Very limited information is available on the combined remediation technologies. The current review summarized the remediation research on the combined soil pollution in China, including heavy metals combined pollution, organic pollutants combined pollution, and heavy metals and organic pollutants combined pollution. Furthurmore, future research directions of combined soil pollution remediation are also proposed. **Keywords**： soil; combined pollution; heavy metals; organic pollutants; remediation

土壤污染主要包括重金属污染、非重金属无机物 污染、有机污染物污染、放射性污染等，而这些污染主 要以复合污染的形式存在。复合污染(Combined pol­lution) 是土壤污染存在的普遍形式，复合污染土壤主 要包括重金属复合污染、有机污染物复合污染、重金 属-有机污染物复合污染。近年来，复合污染土壤引起 了人类的广泛关注，科学家们在土壤污染防治与修复 方面进行了重要的探索。 20 世纪 80 年代以前，国际 上复合污染土壤治理方式为物理、化学修复，修复技 术主要采用挖掘填埋、客土法、固化/稳定化、化学萃 取等；20世纪 80年代至 21 世纪初，治理方式主要为 物理、化学和生物修复，主要技术为淋洗、化学萃取、 化学氧化还原、玻璃固化等；21 世纪以来，土壤治理 方式为物理、化学和生物修复，并开始广泛关注高效 低费的修复方法，研究重点为植物修复及自然转移和

L 吴志能，等:我国复合污染土壤修复研究进展 衰减。然而，我国土壤修复技术研究起步较晩，目前主 要以植物修复为主，已建立了许多示范基地、示范区 和试验区，取得了一定的技术成果。但是，与发达国家 相比，我国复合污染土壤的修复还存在以下几方面差 距:（1）技术种类单一，缺乏体系，尤其是原位、快速、 适用于场地土壤的物化技术；（2）技术装备严重缺乏， 缺产业化；（3）缺乏技术规范、标准和法规；（4）工程化 修复案例极少，缺市场化；（5）缺乏自身实践积累的经 验，公司少；（6）关键是投入少，缺乏实用技术［1］。从现 有复合污染土壤修复的文献来看，我国对于土壤污染 的各种物理、化学、植物、微生物等单一修复方法的研 究较多。由于土壤环境的复杂性和土壤污染的复合性 特征，如何联合各种修复技术和手段，在复合污染土 壤修复方面取得突破性进展，成为当前的研究热点之 一。本文综述了我国复合污染土壤与修复研究现状， 拟为复合污染修复提供一定的借鉴和思路。

1. 复合污染土壤修复研究现状

本文以CNKI系列全文数据库和ISI Web of Knowledge 为检索工具，以“复合污染”和“修复”为检 索主题的关键词，选定发表于2001—2015年的论文， 统计得出 15 年复合污染土壤修复研究的论文数量变 化（图1）。从检索结果来看， 2001—2015年15年间， 关于复合污染土壤修复研究的论文数量整体呈增加 趋势。从笔者下载的文献来看，关于复合污染土壤修 复的研究主要集中在重金属复合污染、有机污染物复 合污染、重金属-有机污染物复合污染 3 个方面。其 中，土壤重金属-有机污染物复合污染修复的研究相 对较多，占复合污染土壤修复研究论文总数的58%； 其次是重金属复合污染修复研究，占总数的36%；而 有机污染物复合污染的研究相对较少，仅占总数的 6%（图 2）。从现有研究可以看出，土壤重金属-有机 污染物复合污染修复的研究是当前的研究热点，且当 前的研究主要集中于复合污染土壤的植物修复、微生 物修复、物理修复、化学修复等单一的修复手段，而对 于复合污染土壤联合修复手段的研究较少。



□重金属复合污染修复 有机物复合污染修复

n重金属-有机物复合污染修复

图 2 不同类型复合污染土壤修复研究成果数量分布图  
（2001—2015）

Figure 2 Quantity distribution of different types of soil combined  
pollution remediation research achievements（2001 —2015）

1. 重金属复合污染土壤与修复
   1. 生物修复

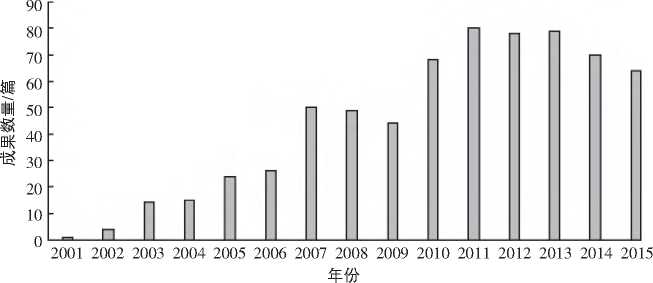
生物修复包括植物修复和微生物修复。其中，植 物修复技术是一种经济有效的重金属污染土壤修复 技术，具有修复效果好、成本投入低、易于操作和管理 等优点。植物修复主要是通过植物挥发、植物固定、植 物吸收对重金属污染进行修复。超积累植物商陆对 镉-锌复合污染具有一定的修复效果，土壤中低浓度 镉的增加会促进其对锌的吸收［2］。另外一种超积累植 物东南景天对农田复合污染土壤中的锌和镉也具有 很好的去除效果［3］。此外，肾蕨对砷、汞、铅、镉均有较

图 1 复合污染土壤修复研究成果数量年份分布图(2001—2015)

Figure 1 Annual distribution of soil combined pollution remediation research achievements(2001 —2015)

好的富集作用［4］。

* 1. 物理修复

土壤物理修复方法主要包括：客土、翻土、换土、 去表土法；淋洗法；热处理法；热解吸技术等。客土、翻 土、换土、去表土法主要是用清洁土壤将受污染土壤 全部或部分换掉，或在重金属污染土壤上覆盖一层清 洁土，降低土壤中的重金属含量。淋洗法是用清洁水 或能提高重金属可溶性试剂的溶液淋洗重金属污染 土壤，使吸附在土壤颗粒表面的重金属直接溶解出来 或形成络合物而溶解出来，并通过一些方法回收重金 属使其循环利用的方法。热处理技术适于易挥发重金 属污染土壤的治理，如Hg污染土壤治理中热处理是 一种行之有效的方法［5］。另外，热解吸技术是采用某种 方式对重金属污染土壤进行加热，当达到一定温度时 土壤中的某些重金属将挥发，收集后集中处理，从而 达到去除重金属污染的目的。

* 1. 化学修复 化学修复就是利用一些改良剂与污染土壤中的重

金属发生化学反应，通过改变土壤的pH值、Eh等理化 性质，经氧化还原、沉淀、吸附、络合、螯合、抑制和拮抗 等作用钝化土壤中的重金属，降低土壤中重金属的活 性，达到治理和修复重金属污染的目的。化学方法主要 包括溶剂萃取法、化学淋洗、氧化法、还原法、钝化技术、 施加改良剂以及电动力学修复等。相关研究见表1。

* 1. 联合修复 黎大荣［21］研究发现，蚕沙和赤泥的复合处理不但

表 1 重金属复合污染土壤的化学修复研究进展统计

Table 1 Studies on the remediation of heavy metal combined pollution soil

| 海泡石 | 镉-铅 | 农田土壤 | 污染土壤中的Cd和Pb由活性较高的可提取态向活性低的碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态 以及残渣态转变，土壤可溶态Cd和Pb含量降幅分别达到了 1.4%〜72.9%和11.8%〜51.4% | [6] |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 磷基材料 | 铅-铜-锌 | 校园苗圃土壤 | 含P材料重过磷酸钙磷肥和磷灰石矿尾料均可有效地钝化土壤中的Pb；含P材料对Cu和Zn  的稳定效果依赖于评价方法，其活性与表面吸附或络合有关 | [7] |
| 含磷物质 | 铜-锌- 铅-镉 | 校园苗圃土壤 | 磷肥和磷矿粉对Pb的修复效果较为理想，其次是Cd,对于Cu和Zn的修复效果一般 | [8] |
| 复合钝化剂 | 铅-镉-砷 | 铅锌尾矿库 | Ca （H2PO）2对Cd、Pb修复效果较好，对有效态Cd和Pb钝化率分别为39%和62%, Fe, （SO）3对 | [9] |
|  |  | 周边 | As钝化效果最好，有效态As钝化率为75%。Ca （H’PO） 2和Fe, （SO）3复配能同时修复Cd、Pb、  As复合污染土壤，分步加入Ca（H2PO4 2和Fe,（SO）3的条件下，有效态Cd、Pb、As的钝化率分 别为 47%、64%和 51% |  |
| 生物炭 | 铜-铅-镉 | 林地 | 400七生物炭（BC400和700七生物炭（BC700均可以使土壤重金属形态钝化，施加量越大，效  果越明显 | [10] |
| 生物质炭 | 镉-铜- | 水稻土 | 5%细粒径（0.25 mn）稻草炭的施用能显著提高土壤的pH值和有效磷含量，降低土壤中Cd、 | [11] |
|  | 铅-锌 |  | Cu、Pb和Zn的DTPA有效态含量。Cd、Cu和Zn有效态含量随着细粒径（0.25 mn）稻草炭施用 量的增加而显著降低；Cd、Cu、Pb和Zn有效态含量均随着粗粒径（1 mn）竹炭施用量的增加而 显著降低 |  |
| 水稻秸秆 | 镉-铅 | — | 与未加生物炭处理相比,添加生物炭后高浓度Cd污染土壤中弱酸提取态Cd含量极显著降低， | [12] |
| 生物炭 |  |  | 可氧化态Cd含量增加，而残渣态Cd含量变化不显著，表明添加生物炭可以促进弱酸提取态 Cd向可氧化态Cd转化°Pb、Cd复合污染土壤中Pb-Cd交互作用极显著,添加生物炭减弱了交 互作用对弱酸提取态Pb的影响 |  |
| 改良剂 | 铜-镉 | 铜冶炼厂周边 | 石灰、磷灰石和木炭能显著提高污染土壤溶液pH值,降低土壤溶液Cu、Cd含量。铁粉和猪粪 处理在第一年内，显著提高污染土壤溶液pH值，降低了土壤溶液Cu、Cd含量,第二年污染土 壤溶液pH值和Cu、Cd含量与对照相比，均没有显著差异 | [13] |
| 改良剂 | 铜-镉 | 水稻田 | 以黑麦草的生物量和Cu、Cd富集量作为评价指标，种改良剂修复Cu、Cd复合污染土壤效果 依次为：石灰＞磷灰石＞木炭＞猪粪＞凹凸棒石＞蒙脱石 | [14] |
| 阴极控制液 | 铜-镉 | 校园内土壤 | 低分子有机酸柠檬酸对Cu2+和Cd2+的解吸效果最好，能增强重金属的可迁移性 | [15] |
| 皂苷 | 铜-铅 | 试验农场 | 当皂苷质量浓度为50 g・L-1、pH值为5.0、淋洗时间为240 mm、无背景电解质离子共存时，重金 属离子通过与皂苷胶团络合，对污染塿土中Cu、Pb的淋洗去除效果达到最大 | [16] |
| 淋洗剂 | 镉-铅-锌 | 玉米和蔬菜田 | 四种淋洗剂HCl、FeC13、柠檬酸和EDTA都能够有效降低土壤中Cd的风险，其中EDTA和HC1 对Zn的效果较好，而EDTA和FeCb对Pb的效果较好。总体来看,EDTA溶液对Cd-Pb-Zn复 合污染土壤的淋洗效果最好。 | [17] |
| FS@IDA | 镉-铅 | — | FS@IDA是一种磁力固体螯合剂粉，对Cd、Pb的去除率分别达到84.9%和72.2%。 | [18] |
| 皂土 | 镉-铅 | 农田土壤 | 皂土的投加促进了水稻对土壤中Cd和Pb的吸收，土壤中交换态Cd减少了 11.1%~42.5%,Pb 减少了 20.3%~49.3% | [19] |
| 聚合铝盐 | 铅-镉- | 城郊土壤 | 使用聚氯化铝和聚合硫酸铝修复土壤中的Pb、Cd、Cu和Zn，聚氯化铝对四种重金属的修复率 | [20] |
|  | 铜-锌 |  | 分别为 88.3%、85.1%、85.4%和 73.7%，聚合硫酸铝对四种重金属的修复率分别为 89.7%、  88.7%、83.5%和 72.6% |  |

化学材料 污染物 土壤类型 修复效果 文献

注“：—”表示论文中未提及

L 吴志能，等:我国复合污染土壤修复研究进展 能改善农田污染土壤的pH值和有机质，还能降低土 壤中TCLP提取态Pb和Cd的含量。另外，在酸性铅- 镉复合污染土壤中，同时添加碱性材料和有机材料能 有效钝化重金属。有机螯合剂EDTA和生物表面活性 剂鼠李糖脂联合对土壤中的 Pb、Cd 具有很好的淋洗 效果㈣。当EDTA和鼠李糖脂的配比为1.5：1时,Pb、 Cd的淋溶率达到最大，轻度、中度和重度污染土壤中 Pb的淋溶率分别为82.97%,87.61%和91.45%, Cd分 别为85.45%,89.25%和93.88%。EDTA辅助小藜修复 Pb-Cd 复合污染土壤的效果优于修复 Pb 污染土壤 的效果㈣。此外，施加EDDS和EDTA能够显著增强苎 麻植株各部位铅、镉的含量，有效提升苎麻对农田土 壤中重金属的修复效果［24］。 在土壤淋洗过程中，添加 FeCl3能够促进表层土壤中重金属的去除㈣。FeCl3+ MC复合处理下的土壤淋洗对Cd、Zn、Pb和Cu的去 除率分别为 28%、53%、41%和 21%。 电动力修复和植 物修复相结合能够有效地去除污染土壤中的 Pb、As 和Cs，提高它们的生物可利用性㈣。研究发现,利用筛 分和沥滤结合的方法能够去除土壤中的重金属和砷， 在不同的土壤颗粒等级下,Pb和Cd的去除率为75%~ 87%，Zn 和 Cu 为 61%~77%, Cr 和 As 低于 45%叭 土 著植物金黄狗尾草、香根草、海州香薷、巨菌草分别与 0.21%石灰联合能够促进对Cu、Cd复合污染土壤的 修复效果，4 种植物与石灰联合修复潜力为巨菌草＞ 海州香薷＞香根草＞金黄狗尾草［28］。 此外，含磷材料和 牛粪生物炭是理想的土壤 Pb、Zn、Cd 污染修复材 料［29］，含磷材料、牛粪生物炭和水稻秸秆生物炭均可 促进Pb、Cd从不稳定态向稳定状态转化。Wang等［30］ 研究发现，相对于单一淋洗剂去除效果，复合淋洗剂 对铅和锌的去除率分别被提高了31.4%~51.9%和 27.6%~38.5%。 骨炭-硫化钠组合制剂能够有效修复 镉-锌复合污染土壤，研究发现骨炭-硫化钠使土壤 中 TCLP 浸提态 Cd 和 Zn 分别 降低了 15.88%~ 58.82%和 7.91%~73.60%［31］。 磷基及铁基钝化剂对 Pb、Cd、As 复合污染土壤具有较好的修复效果，铁基 与磷基钝化剂复配能够同时固定土壤中的 Pb、Cd、 As当Fe3+与PO3-物质的量的比为7.2：1时,7d后土 壤有效态 Pb、Cd、As 去除率分别为 99%、41%、69%。 在土壤中同时加入羟磷灰石、沸石、石灰岩和腐植酸 能够促进小白菜的生长和对Pb、Cd、Zn的富集［33］。在 Pb 和 Cd 污染的土壤中加入沸石和腐植酸能够减少 重金属在玉米叶片中的积累，提高叶绿素含量，进而 减少重金属对玉米的损伤［34］。

1. 有机污染物复合污染土壤与修复

从已有的文献来看，在 3 种复合污染土壤中，土 壤有机污染物复合污染修复的研究最少。当土壤含水 量为田间持水量的 60%时，加入淀粉、葡萄糖和琥珀 酸钠均能够促进土壤中PCBs的土著微生物降解。当 淀粉投加量为C 1.0 g-kg-1 土时，土壤中PCBs的降解 效果较好，而葡萄糖和琥珀酸钠加入量为C 0.2 g-kg-1 土时,PCBs的降解效果明显。土壤C/N为10：1的处 理效果优于 C/N 为 25：1 和 40：1。 植物协同作用对 PCBs复合污染土壤具有很好的修复效果，紫花苜蓿- 海州香薷混作、紫花苜蓿-海州香薷-伴矿景天混作种 植120d后，土壤中PCBs含量比紫花苜蓿单作时分 别降低43.0%和 47.8%［35］。因此，混作可有效提高植株 的生物量，增强植物对土壤中 PCBs 的吸收富集能 力。 紫花苜蓿和多年生黑麦草对土壤中 PAHs 的去除 率分别为48.4%和46.8%,对3环PAHs去除较为彻 底，但对4环及4环以上的PAHs去除效果较差［3役此 外，李政等何通过富集筛选获得一组PAHs降解混合 菌群和3株降解单菌,混合菌群对土壤中总PAHs的 降解率(54.17%)显著高于单一菌株(28.40%、31.95%、 24.64%)，降解菌对高相对分子质量 PAHs 的降解表 现出了极大优势。 因此，利用混合菌群来修复土壤 PAHs 复合污染是一种十分有效的修复方法。 熊雪丽 等［38］利用 16 种洗脱剂对两种复合有机氯农药［六六六 (HCH9和滴滴涕(DDTs、氯丹和灭蚁灵］污染土壤进 行超声洗脱修复，发现乙酸乙酯、丙酮和乙醇等高效 低毒的有机试剂是有机氯农药污染土壤修复的首选。 土壤增效洗脱与光催化联合处理是一种修复氯丹和 灭蚁灵污染场地土壤的有效技术，500 W 汞灯照射 Triton X-100洗脱液，反应3 h后氯丹完全降解，灭蚁 灵在反应1 h后几乎完全降解㈣。

1. 重金属 -有机污染物复合污染土壤与修复
   1. 生物修复

生物修复包括植物修复和微生物修复两种。大量 研究表明，对于农田和场地土壤重金属-有机污染物 复合污染修复，植物修复是一种高效的修复方法，因 此植物修复的研究较多，主要研究内容集中于高效富 集和超积累植物的选择，以及不同植物的修复效果。 刘利伟［40］研究了29 种玉米对重金属 Zn、Pb、Cd 和十 溴联苯醚复合污染的修复，研究结果表明，中紫糯 818 对复合污染物的综合吸收量最高，尤其对重金属

农业环境科学学报

2254

Cd、Zn 吸收量最高；若用吸收量来评价玉米的修复效 果，则华宝八号对复合污染物综合修复的吸收量最 佳，甜玉四号对复合污染物的吸收量最低。红薯对 Cd 的富集大于Pb,而且红薯根际能够强化土壤PYR污 染的去除，具有修复水稻土复合污染土壤的潜力［41］。 对于镉-芘的修复，李跃鹏［42］的研究表明氧化节杆菌、 耳葡萄球菌和嗜麦芽窄食单胞菌3 种菌株可以促进 紫花苜蓿对水稻土中镉、芘的吸收及向地上部分的运 输作用阿。此外，可生物降解的螯合剂EDDS能够促 进玉米对电子垃圾污染土壤中Cu、PCBs和PBDEs复 合污染的修复［44］。 东南景天是一种锌、镉、铅超积累植 物，能将Cd、Pb、Zn等重金属吸收到地上部分的植株 中，从而减轻土壤重金属污染。 王凯［45］研究发现东南 景天能从Cd-PHE/PYR复合污染土壤中有效地提取 Cd，但PHE和PYR对东南景天吸收土壤中高浓度 Cd具有抑制作用。在Cd复合污染土壤中添加PHE 或者PYR，能够促进东南景天对Cd的吸收，但东南 景天并不适合用于PAHs的修复跑。能源植物蓖麻对 土壤DDTs具有较大的生物累积因子，是修复重金 属-持久性有机污染物（Cd-DDTS复合污染土壤的新 型植物材料［47］。 此外，紫茉莉对高浓度镉和八氯代二 苯并呋喃（OCDF复合污染土壤中的镉具有有效的修 复能力［48］。 红三叶草对土壤中菲和芘的去除率分别可 达 87.8%~95.4%和 65%~82.5%，同时能够有效富集 土壤中的Cu［49］。龙葵对污染物具有较强的耐受性、富 集能力和去除效果，是最理想的修复植物。 刘京［50］对 BDE209-Cd 复合污染修复的研究表明，不同植物对 BDE209修复效果依次为龙葵〉狼尾草、空心菜，对Cd 的去除效果龙葵好于狼尾草和空心菜。利用表面活性 剂和外源菌能够强化龙葵对Cd和BDE209复合污染 土壤的修复［51］。 此外，杂交狼尾草、高丹草、苏丹草对 污灌区农田复合污染土壤中 PAHs 和 As 具有较好的 去除效果［52］。万寿菊*（Tagetes patuld*能够吸收、富集和 挥发重金属和苯并（）芘（B［a］P，低剂量的B［a］P（W 10mg・kg-）能够促进万寿菊的生长佝。此外，可食用 菌大杯蕈的子实体对 2， 4， 5-trichlorophenol （TCP 和 重金属（Cu、Cd、Cu+Cd复合污染具有较好的修复效 果［54］。

关于土壤重金属-有机污染物复合污染的微生物 修复的研究甚少。 在纯培养条件下，恶臭假单胞菌属 *（Pseudomonsaputidd* 3 d 对 30mg・L-1 丁草胺的降解率 可达90%以上，在Cd浓度为lmg・L-1的条件下该菌能 够正常生长，对丁草胺的降解率达到50%以上［55］。 此外，

农业环境科学学报”第35卷第12期 王婷［56］用广东省汕头市贵屿镇电子废弃物拆解地的环 境样品中筛选出的两株蜡状芽孢杆菌构成了复合菌， 研究发现该复合菌对低浓度Pb2+和Zn2+具有高效、快 速、稳定的吸附能力，对低浓度Cu2+也有一定的去除 效果，同时，该复合菌对BDE209有良好的脱溴性能， 低浓度重金属的存在会减缓复合菌对BDE209的降 解速率。

* 1. 化学修复 生物表面活性剂鼠李糖脂对环境无毒害，能够通

过降低表面张力，增溶污染物，完全生物降解污染物 且不产生二次污染。pH值为10的鼠李糖脂溶液对 Pb 和 Cu 达到最大去除率分别为 79.5%和 35.5%， PAHs也达到最大去除率60.3%；而Zn在pH值为8 时达到最大去除率 20.5%［57］。 纳米羟基磷灰石、石灰、 木炭是修复重金属和氟污染严重的水稻土土壤最为 经济、环保和有效的改良剂％不同改良剂对污灌区Cd、 As和多环芳烃复合污染土壤的修复研究表明，硫磺、 酵素菌菌剂、石灰、钠质膨润土、腐植酸、硅藻土 6种 改良剂对污灌农田土壤中Cd、As含量普遍影响不大， 但在CXEM菌剂作用下，土壤SPAHs含量降低了 17.8%［59］。 ZEA 类 Fenton 氧化体系对 PCB 和重金属 （Cu和Pb复合污染土壤具有较好的修复效果画。同 时，该课题组建立了一种以零价铁亿VI、乙二胺二琥 珀酸（EDDS和空气（Air组成的环境友好的新型类 Fenton体系，实现了有机氯和重金属复合污染土壤修 复阿。此外，增强的电动修复技术,对芘和Cu的最大去 除率分别达到了 52%和94%闽。Hung等佝研究发现一 种持续小规模的热系统（CPTS能够有效去除土壤中 PCP、PCDD/Fs和汞复合污染。生物质炭（Biochar因多 孔性和巨大比表面积而具有良好的吸附能力，能够有 效降低土壤和水体中的重金属和有机污染物的活性［64］。 皂角苷（Saponii），是一种从皂树皮中提取的天然非离 子生物表面活性剂，是一种兼嗜性（亲水、亲油 化合 物，能与重金属形成络合物的配体而使皂角苷能较好 地应用于重金属污染土壤修复。 皂角苷能高效洗脱复 合污染农田土壤中PAHs，并有效去除土壤中的重金属 离子［65］。 皂角苷增溶洗脱复合污染土壤中菲和芘的效 率均可达到90%左右;在Cd-菲复合污染土壤中，皂角 苷对Cd的洗脱效率高达87.7%，而对重金属-PAHs 复合污染土壤中Cd的洗脱效率为55.8%，同时对Cu、 Zn 和 Pb 的去除率分别为 58.1%、47.8%和 22.1%。 此 外,皂角苷对黑麦草修复Pb-芘复合污染土壤具有促 进作用。

表 2 重金属 - 有机污染物复合污染土壤联合修复研究进展统计

Table 2 Studies on the remediation of heavy metal-organic pollutants combined pollution soil

| 修复手段1 | 修复手段2 | 土壤类型 | 重金属-有 机污染物 | 修复效果 | 参考文献 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 外源氨基酸 | 龙葵 | 菜地土壤 | Cd-PAHs | 甘氨酸、谷氨酸和半胱氨酸复合处理能够促进土壤环境中Cd和多环芳烃的去除：.3 mmol - kg-1甘氨酸+0.3 mmol-kg-1谷氨酸+0.3 mmol-kg-1半胱氨酸效果最佳，与对照相比， 龙葵地上部Cd含量增加了 1.26倍，土壤中多环芳烃总量的去除率提高了 4.46倍 | [66] |
| 化学添加剂 | 东南景天 | 水稻土 | 重金属-十  溴联苯醚 | 复合污染下,EDTA对东南景天吸收效果最好。2 mmol-kg-1的TW80对东南景天吸收土 壤中的Pb效果最好；45 d添加1 mmol・kg-1的EDTA对东南景天吸收土壤中Zn效果最 好;2 mmol-kg-1的SDBS对东南景天吸收土壤中Cd效果最好。除EDTA外，各化学添加 剂均能有效提高土壤BDE209的去除效率,45 d添加1 mmol・kg-1 SLS的处理去除效率 最高，去除效率 SLS>SDBS>TW80>TX100>对照>EDTA | [67] |
| 植物 | 微生物 | 菜地土壤 | Cd-DDT | 在Cd-DDs复合污染土壤条件下，降解菌DDT-1增加了东南景天的根系生物量,东南景 天与DDT-1联合修复去除了土壤32.1%**〜**40.3%的Cd和33.9%**〜**37.6%的DDs | [68] |
| 东南景天 | DDT 降解菌 | 农田土壤 | Cd-DDT | 复合污染土壤添加DDT-1降解菌能够促进东南景天的根系生物量，提高DDs的去除。 东南景天和微生物的复合处理对复合污染土壤中Cd和DDs分别降低了 32.1%**〜**40.3% 和33.9%**〜**37.6%。在18个月的大田实验中,Cd和DDs分别降低了 31.1%和53.6% | [69] |
| 电动学 | 生物刺激 | 石油冶炼厂  土壤 | Pb-TPH | 添加EDTA**、**Tween 80和定期更换电解液是复合污染降解的最优条件。在最优条件下，土 壤Pb和TPH 30 d的去除率可以达到81.7%和88.3%。处理后，土壤中Pb和TPH的浓 度符合中国土壤环境质量标准 | [70] |
| 食用菌  (紫孢平菇 | 苏云金 芽孢杆菌 | 农田土壤 | Cd-菲 | 苏云金芽孢杆菌的接种能够促进紫孢平菇的生长(26.68%**〜**43.58%)和Cd的富集 (14.29%**〜**97.67%)，细菌和食用菌的复合处理中，添加200 mg-kg"1和500 mg-kg"1的菲， 去除率分别可以达到100%和95.7% | [71] |
| 化学强化 | 植物 | 水稻土 | 重金属-十  溴联苯醚 | 种植龙葵和黑麦草土壤中BDE209去除率高于未种植植物土壤，黑麦草对土壤BDE209 去除率高于龙葵**。**5种化学添加剂处理下，龙葵、黑麦草对BDE209去除率分别在26.74% **〜**35.41%**、**37.25%**〜**45.84%之间，0-环糊精效果最好，分别比各自对照提高49.7%**、**32.8% | [72] |
| 苏云金芽孢 杆菌 | 黑麦草 | 水稻土 | BDE209-  Cu | 黑麦草对Cu和BDE209的积累，地下部的作用大于地上部。外加菌苏云金芽孢杆菌能 够强化黑麦草对BDE209污染土壤的修复能力,45 d对1 mg-kg-1 BDE209污染土壤的 去除率可达48.02%,根际土 BDE209的去除效果优于非根际土 | [73] |
| 微生物 | 植物 | 油区土壤 | 石油- 重金属 | 添加石油降解微生物修复石油污染,60dCd污染土壤添加微生物后的石油降解率从  17.86%提高到44.27%, Ni污染土壤石油降解率从16.08%提高到44.03%。 | [74] |
| 植物 | 微生物 | 农田土壤 | PAHs-Cd-  Zn | 黑麦草和东南景天间作与*Microbacterium* sp. KL5和*Candida tropicalis* C10的添加对  PAH具有矿化作用，最大去除率为96.4%,其中植物对钙的修复率达到了 36.1%,对锌的 修复率为 12.7% | [75] |
| 杂交狗尾草短芽孢杆菌 | | 水稻土 | 十溴联苯  醚-Zn | *B.brevis*能强化杂交狼尾草对土壤中BDE209/Zn复合污染的修复，妾种*B.brevis* 后,杂交 狼尾草地下部分对土壤中Zn的吸收和富集能力显著增强，但植物体内Zn的转运能力 受到一定抑制。杂交狼尾草-土著微生物联合修复土壤中BDE209的贡献率最大，可达 35.82% | [76] |
| 茶皂素 | 黑麦草 | 芘-Cd污染 表层土 | 芘-Cd | 添加40 mg-kg-1的茶皂素可以增加黑麦草的生物量，促进其对Pyrene和Cd的降解与富 集，提高植物中过氧化氢酶和过氧化物酶的活性，增强植物的抗逆性和自我保护机制。 | [77] |
| Tween80 | 柠檬酸 | 农田土壤 | Cu-Pb-  Cd-PCBs | 污染土壤重金属 Cu 浓度为 5000 mg・kg-1、Pb 1967 mg-kg-1, Cd 51.0 mg-kg-1 及 PCBs 12 mg-kg-1时,Tween80和柠檬酸复合淋洗剂中各组分浓度为20 g・L-1,对各污染物洗脱率 分别能达到 95.90%、61.71%、63.05%和 60.10% | [78] |
| 鼠李糖脂 | 柠檬酸 | 园土 | 林丹-Pb-  Cd | 柠檬酸对林丹有增溶作用，鼠李糖脂对Cd有增溶作用。1%的鼠李糖脂和0.1 mol-L-1的 柠檬酸联合对林丹、Cd和Pb的最大解吸率分别为85.4%、76.4%和28.1% | [79] |

* 1. 联合修复

从现有的研究来看，单一的生物、物理、化学等修 复手段对复合污染的修复效果并不明显，而复合修复 技术的使用一定程度上克服了单一修复手段的缺点， 很大程度上提高了复合污染土壤的修复效率、降低了 修复成本，对于重金属-有机污染物复合污染联合修 复的研究见表 2。

1. 研究展望 根据复合污染土壤修复的现有研究进展，笔者提 出以下几点研究展望：

(1 发展功能修复材料应用于污染土壤修复。催 化剂催化技术、纳米材料与技术已经被广泛应用于土 壤修复领域，而土壤修复的环境功能材料的研制及其 应用技术还处于起步阶段，这些物质在土壤中的分 配、反应、行为、归趋及生态毒理等尚缺乏了解。因此， 对于功能修复材料的土壤修复技术的应用条件、长期 效果、生态影响和环境风险等都有待进一步研究。

(2 开展多种修复方法耦合的修复技术研究。 当 前，单一修复技术是去除复合污染土壤的主要手段， 如何协调复杂环境因素，开展不同单一修复方法耦合 的联合修复技术仍是今后复合污染土壤修复研究的 主要方向和热点问题。

(3 开展复合污染土壤的原位修复研究。 现有的 研究主要以实验室内进行的异位修复为主，而对于复 合污染土壤原位修复的研究少见报道。 因此，在实际 环境中复杂土壤条件下，复合污染土壤修复技术的大 规模原位的实际应用，及修复效果有待进一步探究。

(4 复合污染土壤修复的过程控制。 由于土壤环 境的复杂性和复合污染土壤的特殊性，土壤修复过程 的监控显得尤为重要，如何在土壤修复过程中，反映 修复过程中有效的重要因子，表征这种变化，利用现 有的技术手段建立相应的监控程序和指标，都将是未 来这一领域的研究方向。

(5 复合污染土壤修复机理研究缺乏。 当前的研究 仅仅停留在不同修复方法的修复效率探索和不同修复 技术在复杂的土壤环境中的作用效果，而关于不同修 复技术在修复过程中的修复机理的研究十分缺乏。

(6 复合污染土壤修复的安全研究。物理、化学等修 复技术在复合污染土壤修复过程中的修复风险是现实 存在的，充分考虑不同修复手段的环境效应，进行风险 评估，并将修复过程中可能的风险问题控制在一定的范 围之内是未来复合污染土壤修复必须考虑的问题。

(7 开展复合污染土壤的环境容量研究。 只有明 确土壤污染现状和修复目标，明确土壤中存在多少浓 度的重金属和有机污染物、以什么形式存在的重金属 和有机污染物是安全的，才能更加有效地开展复合污 染土壤修复。因此，加强对土壤某种重金属或有机污染 物污染的环境容量与修复阈值的研究十分必要。

(8 建立完善的污染土壤修复技术规范、评价标 准和管理政策。 针对不同的复合污染土壤类型，建立 完善的适合不同类型污染土壤修复的技术体系，开发 具有自主知识产权的成套设备和技术规范，建立系统 的土壤修复管理体系、评价标准和技术规范。

参考文献：

1. 杨勇，何艳明,栾景丽，等.国际污染场地土壤修复技术综合分析[J].

环境科学与技术,2012,35(10 ：92-98.

YANG Yong, HE Yan-ming, LUAN Jing-li, et al. Comprehensive anal － ysis on soil remediation technologies of international contaminated sites [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10 ： 92-98.

1. 吴双桃. 镉污染土壤超富集植物选择和镉-锌复合污染实验研究 [D].长沙:中南林学院,2003.

WU Shuang -tao. The choose of hyperaccumulation plants for cadmium pollution soil remediation and cadmium and zinc combined pollution ex － perimental research[D]. Changsha : Central South University of Forestry and Technology, 2003.

1. Tang L, Tang Y T, Zhang G H, et al. Spatial heterogeneity effects of Zn/ Cd-contaminated soil on the removal efficiency by the hyperaccumula － tor Sedum alfredii[J]. J Soils Sediments, 2014, 14(5 : 948-954.
2. 潘志明.砷汞铅镉复合污染土壤的肾蕨植物修复技术研究[D].成 都:成都理工大学,2006.

PAN Zhi -ming. Studies on phytoremediation of Nephroleis auriculata (L. for arsenic, mercury, lead and cadmium in the multiple contami － nated soils[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.

1. Hung P C, Chang S H, Ouyang C C, et al. Simultaneous removal of PCDD/Fs, pentachlorophenol and mercury from contaminated soil [J]. Chemosphere, 2016, 144: 50-58.
2. Sun Y B, Zhao D, Xu Y M, et al. Effects of sepiolite on stabilization re － mediation of heavy metal -contaminated soil and its ecological evalua － tion[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering , 2016, 10 (1 : 86-92.
3. 施 尧•磷基材料钝化修复重金属Pb、Cu、Zn复合污染土壤[D].上 海:上海交通大学, 2011.

SHI Yao. Phosphorus -induced immobilization of Pb, Cu, and Zn in a multi-metal contaminated soil[D]. Shanghai : Shanghai Jiao Tong Uni－ versity, 2011.

1. 魏晓欣•含磷物质钝化修复重金属复合污染土壤[D].西安：西安科 技大学, 2011.

WEI Xiao -xin. Phosphate -induced immobilization of heavy metals in multi-metal contaminated soils [D]. Xi'an： Xi'an University of Science and Technology, 2011.

1. 吴宝麟.铅镉砷复合污染土壤钝化修复研究[D].长沙：中南大学，

2014.

WU Bao-lin. The immobilization remediation of cadmium(Cd , lead (Pb and arsenic(As in contaminated soils[D]. Changsha： Central South University, 2014.

1. 唐行灿, 陈金林, 张 民. 生物炭对铜、铅、镉复合污染土壤的修复 效果[J].广东农业科学，2014(12 ：67-71.

TANG Xing-can, CHEN Jin-lin, ZHANG Min. Remediation effects of biochar on soil co -contaminated by copper， lead and cadmium [J]. Guangdong Agriculture Science， 2014(12 ： 67-71.

1. 刘晶晶，杨 兴，陆扣萍，等.生物质炭对土壤重金属形态转化及其 有效性的影响[J].环境科学学报,2015,35 (11)：3679-3687.

LIU Jing-jing， YANG Xing， LU Kou-ping， et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(11 ： 3679­3687.

1. 高瑞丽,朱 俊,汤 帆,等.水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土 壤中重金属形态转化的短期影响[J].环境科学学报,2016, 36 (1):

251-256.

GAO Rui -li, ZHU Jun, TANG Fan, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short -term application of rice straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae , 2016, 36(1 :251-256.

1. 崔红标•不同改良剂修复重金属Cu/Cd污染土壤的研究[D].合肥： 安徽农业大学, 2011.

CUI Hong-biao. Study on the remediation of heavy metal Cu and Cd contaminated soil by different ameliorants[D]. Hefei:Anhui Agricul－ tural University, 2011.

1. 杜志敏•改良剂对铜镉复合污染土壤的原位修复研究[D]・南京：南 京农业大学, 2011.

DU Zhi-min. Field in-situ remediation of Cu-Cd pollution soil by a－ mendments[D]. Nanjing： Nanjing Agricultural University, 2011.

1. 方振东.电动力学修复重金属铜镉复合污染土壤的研究[D].合肥： 合肥工业大学, 2014.

FANG Zhen-dong. Research on repair heavy metals complexes of Cu2+ and Cd2+ contaminated soil by electrokinetic remediation [D] . Anhui ： Hefei University of Technology, 2014.

1. 邓红侠，杨亚莉，李 珍，等.不同条件下皂苷对污染塿土中Cu、Pb 的淋洗修复[J].环境科学,2015, 36(4 : 1445-1452.

DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, et al. Leaching remediation of copper and lead contaminated lou soil by saponin under different con － ditions[J]. Environmental Science, 2015, 36(4 ： 1445-1452.

1. Chen C, Chen Y H, Xie T, et al. Removal, redistribution, and potential risks of soil Cd, Pb, and Zn after washing with various extractants [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(21 ： 16881-16888.
2. Fan L R, Song J Q, Bai W B, et al. Chelating capture and magnetic re－ moval of non-magnetic heavy metal substances from soil[J]. Sci Rep, 2016： 6, 21027.
3. Sun Y B, Li Y, Xu Y M, et al. In situ stabilization remediation of cad－ mium(Cd and lead(Pb co -contaminated paddy soil using bentonite [J]. Applied Clay Science, 2015, 105(106 ：200-206.
4. Yuan Y N, Chai L Y, Yang Z H, et al. Application of polymeric alu－ minum salts in remediation of soil contaminated by Pb, Cd, Cu, and Zn [J]. J Cent South Univ, 2013, 20：1638-1644.
5. 黎大荣•铅镉复合污染土壤的化学钝化修复研究[D].南宁：广西大 学, 2014.

LI Da -rong. The research on immobilization remediation of lead and cadmium contaminated soil[D]. Nanning： Guangxi University, 2014.

1. 施秋伶.有机螯合剂和生物表面活性剂联合淋洗污染土壤中的 Pb、Cd [D]. 重庆：西南大学, 2015.

SHI Qiu -ling. Leaching characteristics of Pb and Cd in the contami － nated soils by organic chelating agents and biosurfactant[D]. Chongqing ： Southwest University, 2015.

1. 王学锋，姚远鹰.EDTA辅助小藜修复Pb及Pb-Cd复合污染土壤 的研究[C].第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集，2009： 379-383.

WANG Xue-feng, YAO Yuan -ying. EDTA assisted phytoremediation of Chenopodium serotinum L. for Pb and Pb-Cd contaminated soil[C]. The Third National Agricultural Environmental Science Academic Conference Proceedings, 2009： 379-383.

1. 刘 金,殷宪强，孙慧敏,等. EDDS和EDTA强化苎麻修复镉铅污 染土壤[J].农业环境科学学报,2015, 34(7 ： 1293-1300.

LIU Jin, YIN Xian-qiang, SUN Hui-min, et al. EDTA and EDDS en－ hanced remediation of Cd and Pb contaminated soil by Ramie (Boehmeria Nivea [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34 (7 ：1293-1300.

1. Guo X F, Wei Z B, Wu Q T. et al. Effect of soil washing with only chelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability ： Field experiments [J] . Chemosphere, 2016, 147： 412-419.
2. Mao X Y, Han F X, Shao X H, et al. Electro-kinetic remediation cou－ pled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety , 2016, 125： 16-24.
3. Liao X Y, Li Y, Yan X L. Removal of heavy metals and arsenic from a co -contaminated soil by sieving combined with washing process [J]. Journal of Environmental Science, 2016, 41： 202-210.
4. 徐 磊，周 静,梁家妮，等.巨菌草对Cu、Cd污染土壤的修复潜 力[J].生态学报,2014, 34(18 ：5342-5348.

XU Lei, ZHOU Jing, LIANG Jia -ni, et al. The remediation potential of Pennisetum sp. on Cu, Cd contaminated soil[J]. Acta Ecologica Sinica,

1. 34(18 ：5342-5348.
2. 梁 媛, 李飞跃, 杨 帆, 等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染 土壤修复效果与修复机理[J]・农业环境科学学报，2013, 32(12 : 2377-2383.

LIANG Yuan, LI Fei -yue, YANG Fan, et al. Immobilization and its mechanisms of heavy metal contaminated soils by phosphate-contain － ing amendment and biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12 ：2377-2383.

1. Wang J M, Jiang J G, Li D, et al. Removal of Pb and Zn from contami－ nated soil by different washing methods： The influence of reagents and ultrasound[J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(24 ： 20084-20091.
2. 陈才丽,张 进,成应向,等.骨炭和硫化钠联用修复镉-锌污染土 壤[J].环境工程学报,2015, 9(8 ：4069-4073.

CHEN Cai-li, ZHANG Jin, CHENG Ying-xiang, et al. Remediation of Cd, Zn contaminated soil by bone char and sulfide composites[J]. Chi－ nese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8 ： 4069-4073.

1. 吴宝麟，杨志辉,柴立元，等•磷基及铁基钝化剂对Pb.Cd.As复合 污染土壤的修复效果及其工艺条件优化[J]・安全与环境学报，
2. 15(5 ：314-318.

WU Bao-lin, YANG Zhi-hui, CHAI li-yuan, et al. Effects of the biochar application and water management on the rice growth and Cd accumulation[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5 ： 314­318.

1. Li Z W, Liao W M, Zhong Z R. Co-remediation of the lead, cadmium, and zinc contaminated soil using exogenous hydroxyapatite, zeolite, limestone and humic acids[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2015, 24(4A ： 1425-1433.
2. Shi Y, Huang Z B, Liu X J, et al. Environmental materials for remedia － tion of soils contaminated with lead and cadmium using maize(Zea mays L. growth as a bioindicator[J]. Environmental Science and Pol－ lution Research, 2016, 23(7 ： 6168-6178.
3. 孙向辉, 滕 应, 骆永明, 等. 多氯联苯复合污染农田土壤的植物协 同修复效应[J].中国环境科学,2010,30(9 ： 1281-1286.

SUN Xiang-hui, TENG Ying, LUO Yong-ming, et al. Combined phy－ toremediation effect of several plants in PCBs contaminated farmland soils[J]. China Environmental Science, 2010, 30(9 ： 1281-1286.

1. 沈源源, 滕 应,骆永明,等.几种豆科、禾本科植物对多环芳烃复 合污染土壤的修复[J]. 土壤,2011,43 (2 ：253-257.

SHEN Yuan -yuan, TENG Ying, LUO Yong -ming, et al. The remedia － tion of several beans and gramineaes on soils contaminated with poly － cyclic aromatic hydrocarbon[J]. Soils, 2011, 43(2 ： 253-257.

1. 李 政, 赵朝成, 张云波, 等. 16 种 EPA-PAHs 复合污染土壤的菌 群修复[J].中国石油大学学报：自然科学版,2002,36 (1 ： 175-180.

LI Zheng, ZHAO Zhao -cheng, ZHANG Yun -bo, et al. Bioremediation of 16 EPA-PAHs combined contaminated-soil with microbial consor － tium[J]. Journal of China University of Petroleu, 2002, 36(1 ： 175-180.

1. 熊雪丽,占新华,周立祥.不同洗脱剂对有机氯农药污染场地土壤 修复效果比较[J].环境工程学报,2012, 6 (1 ：348-351.

XIONG Xue-li, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li -xiang. Effectiveness com－ parison of different solvents in organochlorine pesticide contaminated soil flushing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6 (1 ：348-351.

1. 徐君君, 郑冠宇, 徐峙晖, 等. 土壤洗脱与光降解技术联合修复氯 丹和灭蚁灵污染场地土壤的研究[J]・农业环境科学学报,2015, 34 (9 ：1715-1721.

XU Jun -jun, ZHENG Guan -yu, XU Zhi -hui, et al. Remediation of chlordane and Mirex -contaminated soil by combined soil washing and photodegradation technique[J]. Journal of Agro -Environment Science, 2015, 34(9 ：1715-1721.

1. 刘利伟. 不同品种玉米对土壤重金属-十溴联苯醚复合污染的修 复研究[D]・广州：暨南大学,2011.

LIU Li-wei. Research on the remediation of combined contamination of heavy metals and BDE-209 by different maize cultivars[D]. Guangzhou ： Jinan University, 2011.

1. 谢 素.红薯对芘、Cd、Pb复合污染土壤修复潜力的研究[D].广 州：暨南大学,2012.

XIE Su. The study of repairing potential of sweet potato to pyrene, Cd, Pb compound polluted soil[D]. Guangzhou： Jinan University, 2012.

1. 李跃鹏.紫花苜蓿对土壤中镉-芘复合污染的修复及机理[D].广 州：暨南大学,2012.

LI Yue-peng. Research on the characteristics and mechanisms of Med－ icago sativa L. in the phytoremediation of Cd and pyrene co-contami－ anted soil[D]. Guangzhou： Jinan University, 2012.

1. 王效国•大豆、龙葵单作和间作对镉、芘污染土壤的修复[D].陕西： 西北农林科技大学,2015.

WANG Xiao -guo. Remediation of cadmium and pyrene contaminated soil by monoculture and inter cropping of glycing max and Solanum ni－ grum[D]. Shaanxi： Northwest A&F University, 2015.

1. Wang S R, Wang Y, Lei W R, et al. Simultaneous enhanced removal of Cu, PCBs, and PBDEs by corn from e -waste -contaminated soil using the biodegradable chelant EDDS[J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22 (22 ：18203-18210.
2. 王 凯. 镉-多环芳烃复合污染土壤植物修复的强化作用及机理

[D]•杭州:浙江大学,2012.

WANG Kai. Enhancement and remediation of phytoremediation for Cd and PAHs co-contamianted soils[D]. Hangzhou ： Zhejiang Universi－ ty, 2012.

1. Wang K, Zhu Z Q, Huang H G, et al. Interactive effects of Cd and PAHs on contaminants from co-contaminated soil planted with hyper － accumulator plant Sedum alfredii [J]. J Soils Sediments, 2012, 12(4 ：

556-564.

1. 黄化刚. 锡-锌/滴滴涕复合污染土壤植物修复的农艺强化过程及 机理[D]•杭州：浙江大学，2012.

HUANG Hua-gang. Processes and mechanisms of agronomic factors for enhancing phytoremediation of Cd-Zn/DDTs co-contaminated soils[D]. Hangzhou： Zhejiang University, 2012.

1. 张杏丽,邹 威,周启星.镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中 紫茉莉对镉的修复能力J].环境科学,2015, 36 (8 ：3045-3053.

ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi -xing. Competence of Cd phy－ toremediation in Cd-OCDF co-contaminated soil using Mirabilis jala－ pa L.[J]. Environmental Science, 2015, 36(8 ： 3045-3053.

1. 李小燕. 多环芳烃污染及其与重金属铜复合污染土壤的生物修复 研究[D].福州：福建师范大学,2010.

LI Xiao-yan. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aro － matic hydrocarbon and its combination with Cu[D]. Fuzhou： Fujian Nor－ mal University, 2010.

1. 刘京.龙葵对土壤中十溴联苯醚-镉复合污染的修复研究[D].广 州：暨南大学,2013.

LIU Jing. Research of remediation of BDE209 -CD co -contaminated soil by Solanum nigrum[D]. Guangzhou： Jinan University, 2013.

1. 吕 俊,尹 华,叶锦韶,等.杂交狼尾草对土壤锌/十溴联苯醚复 合污染的生理响应及修复J].农业环境科学学报，2013, 32 (12 : 2369-2376.

L譈 Jun, YIN Hua, YE Jin -shao, et al. Physiological responses and phytoremediation effects of Penniseium americanum on Zn/BDe -209 co-contaminated soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12 ：2369-2376.

1. 贾 婵, 呼世斌, 张春慧, 等. 苏丹草对镉-芘复合污染土壤的修复 作用[J].农业环境科学学报,2014,33 (6 ：1139-1145.

JIA Chan, HU Shi-bin, ZHANG Chun-hui, et al. Phytoremediation of cadmium and pyrene co-polluted soil by Sudan grass(Sorghum vulgare

L. [J]. Journal of Agro-Environment Science , 2014, 33(6 ：1139- 1145.

1. Sun Y B, Zhou Q X, Xu Y M, et al. Phytoremediation for co-contami－ nated soils of benzo[a]pyrene(B[a]P and heavy metals using ornamen－ tal plant Tagetes patula [J] . Journal of Hazardous Materials, 2011, 186 (2 ： 2075-2082.
2. Liu H Y, Guo S S, Jiao K, et al. Bioremediation of soils co-contaminat－ ed with heavy metals and 2, 4, 5 -trichlorophenol by fruiting body of Clitocybe maxima[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 294： 121 - 127.
3. 王金花. 丁草胺－镉复合污染对土壤微生物的分子生态毒理效应 与生物修复研究[D].上海:上海交通大学,2007.

WANG Jin-hua. Studies on molecular ecotoxicological effects of com－ bined pollution between butachlor and cadmiumon soil microbe and bioremediation[D]. Shanghai： Shanghai Jiao Tong University, 2007.

1. 王 婷. 蜡状芽孢杆菌修复重金属及多溴联苯醚复合污染的研究 [D].广州：暨南大学,2007.

WANG Ting. Research on the remediation of combined contamination of heavy metals and polybrominated diphenyl ethers by Bacillus cereus [D]. Guangzhou： Jinan University, 2007.

1. 彭立君.鼠李糖脂修复重金属和多环芳烃(PAHs)复合污染研究

[D].长沙:湖南大学,2008.

PENG Li-jun. Rhamnolipid for remediation of heavy metals and PAHs

combined contaminated soil[D]. Changsha ：Hunan University, 2008.

1. 梁家妮.土壤重金属Cu、Cd和F复合污染评价及修复技术探讨

[D]. 合肥：安徽农业大学, 2009.

LIANG Jia -ni. Assessment and remediation technology on the com － pound pollution soil of Cu, Cd and F[D]. Hefei ：Anhui Agricultural University, 2009.

1. 刘利军,赵 颖,党晋华,等.不同改良剂对污灌区镉砷和多环芳烃 复合污染土壤的修复研究[J].中国农学通报，2013,29 (26 ：32- 136.

LIU Li-jun, ZHAO Ying, DANG Jin -hua, et al. Remediation of differ － ent soil amendments on soil combined pollution with cadium, arsenic and PAHs in a sewage irrigation area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(26)：132-136.

1. 曹梦华•基于零价铁的复合污染土壤化学修复研究[D].武汉:华中 科技大学,2013.

CAO Meng-hua. Chemical remediation of co-contaminated soils based on zero-valent iron[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Tech－ nology, 2013.

1. 孙 倩•氯酚和重金属污染土壤的类Fenton修复研究[D].武汉:华 中科技大学, 2013.

SUN Qian. Research on remediation of chlorophenols heavy metals contaminated soils by Fenton-like system[D]. Wuhan: Huazhong U－ niversity of Science & Technology, 2013.

1. Cang L, Fan G P, Zhou D M, et al. Enhanced -electrokinetic remedia－ tion of copper-pyrene co-contaminated soil with different oxidants and pH control[J]. Chemosphere, 2013, 90(8): 2326-2331.
2. Hung P C, Chang S H, Ouyang C C, et al. Simultaneous removal of PCDD/Fs, pentachlorophenol and mercury from contaminated soil [J]. Chemosphere, 2016, 144: 50-58.
3. 潘丽萍•生物质炭对镉-阿特拉津复合污染土壤的修复研究[D].南 宁:广西大学,2014.

PAN Li -ping. Study on remediation of cadium and atrazing combined pollution soil by biochars[D]. Nanning : Guangxi University, 2014.

1. 宋赛赛.皂角苷对重金属-PAHs复合污染土壤的强化修复作用及 机理[D].杭州：浙江大学,2014.

SONG Sai-sai. The role and mechanism for saponin to remediate co­contaminated soils with heavy metals and PAHs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

1. 杨传杰，魏树和，周启星，等.外源氨基酸对龙葵修复Cd-PAHs污 染土壤的强化作用[J].生态学杂志,2009,28(9 ： 1829-1834.

YANG Chuan-jie, WEI Shu -he, ZHOU Qi -xing, et al. Promotion ef－ fects of exogenous amino acids on phytoremediation of Cd-PAHs con－ taminated soils by using hyperaccumulator plant Solanum nigrum [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1829-1834.

1. 邹 星.化学强化东南景天修复土壤重金属-十溴联苯醚复合污 染的研究[D].广州：暨南大学,2011.

ZOU Xing. The research of chemical strengthening *Sedun alfredii* H's remediation on the composite pollution of heavy metals-BDE-209[D]. Guangzhou： Jinan University, 2011.

1. 朱治强.Cd-DDT复合污染土壤的植物与微生物联合修复及机理

[D].杭州：浙江大学，2012.

ZHU Zhi-qiang. Plant-microbe remediation of Cd-DDT co-contami －

nated soil and its mechanisms[D]. Hangzhou： Zhejiang University, 2012.

1. Zhu Z Q, Yang X E, Wang K, et al. Bioremediation of Cd-DDT co-con－ taminated soil using the Cd -hyperaccumulator *Sedum alfredii* and DDT-degrading microbes[J]. *Journal ofHazardous Materials*, 2012, 235/ 236：144-151.
2. Dong Z Y, Huang W H, Xing D F, et al. Remediation of soil co-con－ taminated with petroleum and heavy metals by the integration of elec－ trokinetics and biostimulation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260： 399-408.
3. Jiang J, Liu H Y, Li Q, et al. Combined remediation of Cd -phenan－ threne co -contaminated soil by *Pleurotus cornucopiae* and *Bacillus thuringiensis* FQ1 and the antioxidant responses in *Pleurotus cornu* － *copiae*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety* , 2015, 120： 386­393.
4. 王文财. 化学强化植物修复土壤重金属-十溴联苯醚复合污染的 研究[D].广州：暨南大学,2012.

WANG Wen-cai. The research of chemical strengthening plant's reme－ diation on the combined pollution of heavy metals -deca -brominated diphenyl ether in soils[D]. Guangzhou ： Jinan University, 2012.

1. 李丽华.苏云金芽孢杆菌与黑麦草对BDE209-Cu复合污染土壤 的修复[D].广州:暨南大学,2012.

LI Li -hua. Bioremediation of BDE209 -Cu co -contaminated soil by *Bacillus thuringiensis* and ryegrass [D]. Guangzhou ： Jinan University, 2012.

1. 高宪雯. 微生物-植物在石油-重金属复合污染土壤修复中的作用 研究[D].山东：山东师范大学,2013.

GAO Xian -wen. Micro -phyto combined remediation on petroleum - heavy metals contaminated soil[D]. Shandong ： Shandong Normal Uni－ versity, 2013.

1. Chen F, Tan M, Ma J, et al. Efficient remediation of PAH-metal co­contaminated soil using microbial -plant combination ： A greenhouse study[J]. *Journal ofHazardous Materials*, 2016, 302： 250-261.
2. 吕 俊.杂交狼尾草和短短芽孢杆菌对土壤中十溴联苯醚-锌复 合污染的修复[D].广州：暨南大学,2014.

L譈 Jun. Bioremediation of BDE209-Zn co-contaminnated soil by *Pen- niseium americanum* and *Brevibacillus brevis*[D]. Guangzhou： Jinan U－ niversity, 2014.

1. 王 倩. 茶皂素强化黑麦草修复芘-镉污染土壤及污染物形态转 化机制[D].上海:上海大学,2015.

WANG Qian. Tea saponin enhanced *Loliun multiflorum* in the remedi－ ation of pyrene-cadmium contaminated soils and morphological trans － formation mechanism of pollutants[D]. Shanghai ： Shanghai University, 2015.

1. 孙贝丽.电子垃圾拆解场地土壤中重金属-多氯联苯的同步洗脱 研究[D].广州：华南理工大学,2015.

SUN Bei -li. Study on simultaneous desorption of heavy metals and PCBs by composite eluents from e -waste dismantling sites soil [D]. Guangzhou： South China University Technology, 2015.

1. Wan J Z, Meng D, Long T, et al. Simultaneous removal of lindane, lead and cadmium from soils by rhamnolipids combined with citric acid[J]. *Plos One*, 2015, 10(6)： e0129978.

1. 收稿日期：2016-06-29

   基金项目：国家重点基础研究发展计划973计划)项目(2015CB459000 ； 国家自然科学基金面上项目(31270545

   作者简介：吴志能(1988— ，女，河南潢川人，博士研究生，主要从事污

   染生态修复研究。E-mail: [wuzhineng524@163.com](mailto:wuzhineng524@163.com) [↑](#footnote-ref-2)
2. 通信作者：王莹莹 E-mail： [wangyy@nankai.edu.cn](mailto:wangyy@nankai.edu.cn) [↑](#footnote-ref-3)