污染土壤修复技术研究进展

周际海1，黄荣霞1**，**2，樊后保1，田胜尼2，李宗勋1，姜 伟3，李 特3，高 琪3

(1.南昌工程学院生态与环境科学研究所，南昌330099； 2.安徽农业大学  
生命科学学院*,*合肥230036； 3.常州大学环境与安全工程学院，江苏常州213164)

摘 要：土壤是人类生产活动的重要物质基础， 随着社会经济的高速发展和高强度的人类活动， 土壤受污染面积不断 扩大， 土壤质量持续恶化，影响到实现可持续发展的战略目标。由土壤污染导致的农产品的生态安全问题已不容忽 视 。 因此 ， 开展污染土壤修复活动， 完善土壤修复技术体系， 对阻断污染物进入食物链， 防止对人体健康造成危害， 实 现社会经济可持续发展是非常重要的。该文系统介绍了目前国内外污染场地修复中广泛使用的物理修复技术、化学 修复技术、生物修复技术(包括植物修复、微生物修复和动物修复技术) 以及相关技术结合使用的联合修复技术， 并对 各种方法的研究进展进行了较全面的综述， 最后也对未来土壤污染修复技术的发展方向进行了展望。 关键词：污染土壤； 物理修复； 化学修复； 生物修复； 联合修复

中图分类号：X53 文献标识码:A 文章编号：1005-3409(2016)03-0366-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2016.03.064

A Review on the Progresses of Remediation Technologies for Contaminated Soils

ZHOU Jihai1 , HUANG Rongxia12, FAN Houbao1 , TIAN Shengni2,

LI Zongxun1 , JIANG Wei3 , LI Te3 , GAO Qi3

(1. *Research Institute of Ecology & Environmental Sciences , Nanchang Institute of Technology ,*

*Nanchang* 330099 , *China ；* 2. *School of Life Science , Anhui Agricultural University , Hefei* 230036 ,

*China ；* 3. *School of Environmental & Safety Engineering , Changzhou University , Changzhou, Jiangsu* 213164, *China)*

**Abstract：**The development of modern agriculture has been affecting natural environment. The conditions of contaminated soils are getting worse due to fertilizer and chemical pesticides used in great quantities, making remediation of pollutants contaminated soils as the pressing issue . We give a systematical introduction to the technologies for remediating contaminated soils being widely used at home and aboard, especially the physical remediation technologies**，**chemical remediation technologies**，** bioremediation technologies **(**including phytoremediation**，**microbialremediation and soil fauna remediation technologies**)**and otherremediation methodsincorporatingtechnologiesmentionedabove Inaddition**，**arelativelycomprehensivereviewisdone ontheresearchprogressofvariousremediationtechnologiesfo**l**owedbytheoutlookonthefuturedevelopmentof remediationtechnologiesofcontaminatedsoils

**Keywords:**contaminated soils； physical remediation； chemical remediation； bioremediation； joint remediation

土壤是人类生产活动的重要物质基础，是不可缺 少、难以再生的自然资源，其管理使用的好坏直接决定 着农业生产的成败和人类文明的兴衰。近40年来，随 着社会经济的高速发展和高强度的人类活动，土壤受 污染面积不断扩大，危害越来越严重，影响到实现可持 续发展的战略目标。现代农业改变了自然界原有状 况，为追求高产优质，导致化肥和农药大量使用，使土 壤污染成为全球性的主要环境问题之一。此外，工业 生产、石油开采、交通运输、畜禽养殖及居民生活等工 农业生产生活过程中也会排出大量污染物，如多环芳 烃、多氯联苯及重金属等，使土壤污染进一步加剧［1］。 我国现有耕地约1 3亿 hm2 ，其中约0 2亿 hm2 耕

地受到不同程度的污染，由土壤污染导致的农产品的 生态安全问题已不容忽视。由于土壤对环境污染具 有汇的作用，土壤中有毒有害化学物质通过大气和水 体传递，已危及人类和动物的生存繁衍与生命安全， 土壤污染已成为全球性的主要环境问题之一，引起了 世界各国的高度重视氏3。因此，开展污染土壤修复 活动，对阻断污染物进入食物链，防止对人体健康造 成危害，实现社会经济可持续发展是非常重要的。 基 于此，本文就目前的污染土壤修复技术进行详细综 述，以期为土壤污染修复研究提供一些参考。

**1**污染土壤的修复研究及其发展

污染土壤修复是指利用物理、化学或生物的方 法，转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物，使其浓 度降低到可接受的水平，或将有毒有害污染物转化为 无害物质的过程。污染土壤修复的研究起步于20世 纪70年代后期，在过去的将近40年的时间里，欧、 美、日、澳等国制定了大量的土壤修复计划， 并投资研 究了大量土壤修复技术与设备，积累了丰富的现场修 复技术与工程应用经验，成立了许多土壤修复公司和 网络组织，使土壤修复技术得到了迅猛发展。 而我国 的污染土壤修复研究起步较晚，在“十五”期间才得到 重视，随后列入国家高技术研究规划发展计划［3］ ，但 研发水平和应用经验与美、英等发达国家存在很大差 距。 近年来，科学技术部、国家自然科学基金委、环境 保护部等部门有计划地部署了一些土壤修复研究项 目和专题， 有力促进和带动了土壤污染控制与土壤修 复科学技术的研究与发展。 期间，以土壤修复为主题 的一系列学术活动也为我国污染土壤修复技术的研 究和发展起到了引领和推动作用，土壤修复理论与技 术成为土壤科学、环境科学领域研究的新内容［3］。

**2**污染土壤修复技术

根据修复原理的不同，污染土壤修复可分为物理 修复、化学修复和生物修复3种类型。 目前，污染土 壤修复技术研究和应用已经比较广泛，包括冶金及化 工等污染场地修复、农田污染土壤修复、矿区污染修 复及油田污染等的修复，由于不同污染的土壤类型和 性质的不同，使用的修复手段也不完全相同，并出现 了一些修复技术手段的交叉融合使用。

**2. 1**污染土壤物理修复技术 物理修复是指通过各种物理过程将污染物从污 染土壤中去除或分离的技术。 其中热处理技术是应 用于场地土壤有机物污染去除的主要物理修复技术， 常用的包括土壤蒸气浸提4、微波加热旧、热脫附6 等技术。

2.1.1 热脫附技术 热脫附(Thermal Desorption) 技术是指通过直接或间接的热交换， 加热土壤中有机 污染组分到足够高的温度，使其蒸发并与土壤介质相 分离的过程。 热脱附技术具有污染物处理范围宽、设 备可移动、修复后土壤可再利用 等优点， 特别是对 PCBs等含氯有机污染物，非氧化燃烧的处理方式可 以显著减少二噁英的生成［6 。 目前，欧美国家已将土 壤热脱附技术工程化，广泛应用于高浓度污染场地的 有机物污染土壤的离位或原位修复，但是诸如相关设 备价格昂贵、脱附时间过长、处理成本过高等问题尚 未得到很好解决，限制了热脱附技术在持久性有机物 污染土壤修复中的应用［6 。

2. 1. 2 土壤蒸气浸提技术 土壤蒸气浸提(Soil Vapor Extraction)技术是能有效去除土壤中挥发性 有机污染物(VOCs)的一种原位修复技术4。该技 术是将新鲜空气通过注射井注入污染区域，利用真空 泵产生负压，空气流经污染区域时， 解吸并夹带土壤 孔隙中的 VOCs 经 由 抽 取 井 流 回 地 上；抽 取 出 的 气 体在地上经过活性炭吸附法以及生物处理法等净化 处理，可排放到大气中或重新注入地下循环使用。 该 方法具有成本低、可操作性强、可采用标准设备、处理 有机物的范围宽、不破坏土壤结构和不引起二次污染 等优点。 应用该方法可使苯系物等轻组分石油烃类 污染物的去除率达90%⑺*。*

2.1.3超声/微波加热技术 超声/微波加热(Ultrosonic/ Microwave Heating)技术是利用超声空化现象所产生 的机械效应、热效应和化学效应对污染物进行物理解 吸、絮凝沉淀和化学氧化作用，从而使污染物从土壤 颗粒上解吸，并在液相中被氧化降解成CO2和H2O 或环境易降解的小分子化合物日。Song等归研究表 明，超声波不仅能对土壤有机污染物进行物理解吸， 还能通过氧化作用 将有机污染物彻底清除。 张文 等［9 用超声波净化石油污染土壤，结果表明，超声波 技术可有效修复石油污染土壤。

**2．2** 污染土壤化学修复技术

污染土壤的化学修复技术发展较早，主要有土壤 固化—稳定化技术、淋洗技术、氧化—还原技术、光催 化降解技术和电动力学修复技术等。

2.2.1固定/稳定化技术固定/稳定化技术(Solidifi­cation/ Stabilization)是指将污染物固定在土壤中，使其 长期处于稳定状态，防止或降低污染土壤释放有害化 学物质的修复技术［10］。该技术通过将特殊添加剂与 污染土壤相混合，利用化学、物理或热力学过程来降 低污染物的物理、化学溶解性或在环境中的活泼性。 该处理技术的费用比较低廉，对一些非敏感区的污染 土壤可大大降低场地污染治理成本。常用的固化／稳 定剂有飞灰、石灰、沥青和硅酸盐水泥等［11］，其中水 泥应用最为广泛，国际上已有利用水泥固化／稳定化 处理有机与无机污染土壤的报道［12］。固定／稳定化 技术可以处理多种复杂金属废弃物，形成的固体毒性 低，稳定性强，处置费用也较低，但其所需的仪器设备 较多，如螺旋转井、混合设备、集尘系统等。另外，污 染物埋藏深度、土壤pH值和有机质含量等都会在一 定程度上影响该技术的应用及有效性的发挥。固化／ 稳定化技术在美国处理各类污染物已有40 多年的历 史，有30%已完成的美国超级资助项目是用于污染 源控制的，平均运行时间约为1 个月，比其他修复技 术（如土壤蒸气提取、堆肥等）的运行时间短许多。固 化／稳定化技术也应用于我国部分重金属污染土壤和 铬渣清理后的堆场的修复，获得了较好效果［11］。

2. 2. 2 淋洗/浸提技术 淋洗/浸提（Leaching/

Extraction）是将水或含有冲洗助剂的水溶液、酸/碱 溶液、络合剂或表面活性剂等淋洗剂注入到污染土壤 或沉积物中，洗脱土壤中的污染物的过程。淋洗的废 水经处理后达标排放，处理后的土壤可以再安全利 用 。 这种离位修复技术在多个国家已被工程化应用 于修复重金属污染或多污染物混合污染介质的处 理［13］。同其他修复技术相比，淋洗/浸提技术的优势 在于其可用来处理难以从土壤中去除的有机污染物， 如PCBs、油脂类等易于吸附或黏附在土壤中的物质， 溶剂浸提技术可轻易去除该类土壤污染物。该技术 用水较多，修复场地要求靠近水源，需要处理废水而 增加成本。研发高效、专性的表面增溶剂、提高修复 效率，降低设备与污水处理费用、防止二次污染等是 该技术领域重要的研究课题。

22 3 化学氧化—还原 技术 化 学氧化—还原

（Chemical Oxidation-Reduction）技术是通过向土 壤中投加化学氧化剂（Fenton试剂、臭氧、H? O2、 KMnO4等）或还原剂（SO2、FeO、气态H2S等），使其 与污染物发生化学反应来实现净化土壤的目的［14］。 化学氧化法可用于土壤和地下水同时被有机污染物 污染的修复。运用化学还原法修复对还原作用敏感 的有机污染物是当前研究的热点。例如，纳米级粉末 零价铁的强脱氯作用已被接受和运用于土壤与地下 水的修复。但是，目前零价铁还原脱氯降解含氯有机 化合物技术的应用还存在诸如铁表面活性的钝化、被 土壤吸附产生聚合失效等问题［15］，需要开发新的催 化剂和表面激活技术。

2.2.4 光催化降解技术 土壤光催化降解（Photo- catalytic Degradation）技术是一项新兴的深度土壤氧 化修复技术，可应用于农药等有机污染物污染土壤的 修复［16］。土壤质地、粒径、氧化铁含量、土壤水分、土 壤pH值和土壤厚度等对光催化氧化有机污染物有 明显的影响， 如高孔隙度的土壤中污染物迁移速率 快，黏粒含量越低，光解越快；土壤中氧化铁对有机物 光解起着重要调控作用。

2.2.5电动力学修复技术电动力学修复（Electro- kinetic Remediation）是通过电化学和电动力学的复 合作用（电渗、电迁移和电泳等）驱动污染物富集到电 极区，再进行集中处理或分离的过程。即通过在污染 土壤两侧施加直流电压形成电场梯度 ， 土壤 中污染 物 质在电场作用下通过电迁移、电渗流或电泳的方式被 带到电极两端从而修复污染土壤。目前，电动修复技 术已进入现场修复应用阶段［17］，我国也先后开展了 菲和五氯酚等有机污染土壤的电动修复技术研究。 电动修复速度较快、成本较低，特别适用于小范围的 粘质的可溶性有机物污染土壤的修复，其不需要化学 药剂的投入， 修复过程对环境几乎没有任何负面影 响，与其他技术相比，电动修复技术也更容易为大众 所接受。但电动修复技术对电荷缺乏的非极性有机 污染物去除效果不好，对于不溶性有机污染物，需要 化学增溶，易产生二次污染［18］。

**2.3**污染土壤生物修复技术

生物修复（Bioremediation）技术研究开始于20 世纪80 年代中期，到20 世纪90 年代有了成功应用 的实例。广义的污染土壤生物修复技术是指利用土 壤中的各种生物（包括植物、动物和微生物）吸收、降 解和转化土壤中的污染物，使污染物含量降低到可接 受的水平或将有毒有害的污染物转化为无害物质的 过程［19］。根据污染土壤生物修复主体的不同， 分为 微生物修复、植物修复和动物修复3 种［20］，其中以微 生物修复与植物修复应用最为广泛。狭义的污染土 壤生物修复是指微生物修复，即利用土壤微生物将有 机污染物作为碳源和能源，将土壤中有害的有机污染 物降解为无害的无机物（CO2和H2O）或其他无害物 质的过程。生物修复技术近几年发展非常迅速，不仅 较物理、化学方法经济，同时也不易产生二次污染，适 于大面积污染土壤的修复。同时由于其具有低耗、高 效、环境安全、纯生态过程的显著优点，已成为土壤环 境保护技术的最活跃的领域。

2.3.1 植物修复技术植物修复(Phytoremedi- ation)技术是指利用植物忍耐和超量积累某种或某 些化学元素的功能，或利用植物及其根际微生物体系 将污染物降解转化为无毒物质的特性，通过植物在生 长过程中对环境中的金属元素、有机污染物以及放射 性物质等的吸收、降解、过滤和固定等功能来净化环 境污染的技术［21-23］。包括利用植物超积累功能的植 物吸取修复［24］、利用植物根系控制污染扩散和恢复 生态功能的植物稳定修复［25］、利用植物代谢功能的 植物降解修复［26］、利用植物转化功能的植物挥发修 复［21］、利用植物根系吸附的植物过滤修复［21］等技术。 可被植物修复的污染物有重金属、农药、石油、持久性 有机污染物、炸药和放射性核素等。其中，污染土壤 的植物吸取修复技术在国内外都得到了广泛研究，已 经应用于砷、镉、铜、锌、镍、铅等重金属以及与多环芳 烃复合污染土壤的研究与修复［27］，并发展出包括络 合诱导强化修复［28］、不同植物套作联合修复、修复后 植物处理处置的成套集成技术。该技术应用的关键 在于筛选具有高产和高去污能力的植物，摸清植物对 土壤条件和生态环境的适应性。污染土壤的植物修 复技术与其他修复技术相比，有着许多优点，如技术 成本低、对环境影响小、能使地表长期稳定、可在清除 土壤污染的同时清除污染土壤周围的大气和水体中 的污染物，从而有利于改善生态环境［29］。

2. 3. 2 微生物修复技术微生物修复(Microbial Remediation)是指利用天然存在的或筛选培养的功 能微生物群(土著微生物、外源微生物和基因 工程 菌)，并在人为优化的适宜环境条件下，促进或强化微 生物代谢功能，从而达到降低有毒污染物活性或降解 成无毒物质以修复受污染土壤的修复技术［30］。另 外，微生物也可通过改变土壤环境的理化特征降低有 机污染物的有效性，从而间接起到修复污染土壤的作 用。通常一种微生物能降解多种有机污染物，如假单 胞杆菌可降解DDT、艾氏剂、毒杀酚和敌敌畏等。因 此 ，微生物已成为污染土壤生物修复技术的重要组成 部分和生力军。 目前，微生物修复研究工作主要体现 在筛选和驯化特异性高效降解微生物菌株，提高功能 微生物在土壤中的活性、寿命和安全性，以及修复过 程参数的优化和养分、温度、湿度等关键因子的调控 等方面［31］。 如：刘宪华等［32］用分离筛选出的假单胞 菌AEBL3降解咲喃丹，结果发现未加菌土壤咲喃丹 在0—7 cm 土层中含量达90 mg/kg,加菌土壤咲喃 丹含量为48 mg/kg,降解率达96.4%。当前，微生 物修复有机污染物的研究已进入基因水平，通过基因 重组、构建基因工程菌来提高微生物降解有机污染物 的能力。 在我国,已构建了有机污染物高效降解菌筛 选技术、微生物修复制剂制备技术和有机污染物残留 微生物降解田间应用技术。 蒋建东等［33］通过同源重 组法构建多功能农药降解基因 工程菌 CD-mps 和 CDS-2 mpd,在1〜24 h内便可迅速降解甲基对硫磷 (MP),咲喃丹也可在30 h内被完全降解。

2 33 动物修复技术 近几十年来,微生物修复和 植物修复污染土壤已经有了长足的发展,但动物修复 污染土壤的研究相对很少。动物修复(Soil Fauna Remediation)是指通过土壤动物群的直接(吸收、转 化和分解)或间接作用(改善土壤理化性质、提高土壤 肥力、促进植物和微生物的生长)而修复土壤污染的 过程。 土壤中的一些大型土生动物,如蚯蚓和某些鼠 类,能吸收或富集土壤中的污染物,并通过自身的代 谢作用,把部分污染物分解为低毒或无毒产物［34］。 此外,土壤中丰富的小型动物种群, 如线虫纲、弹尾 类、稗螨属、蜈蚣目、蜘蛛目、土蜂科等,均对土壤中的 污染物有一定的吸收和富集作用,可以从土壤中带走 部分污染物。 寇永纲等［35］通过研究污染土壤不同铅 浓度梯度下,蚯蚓在培养期内对铅的富集量,结果表 明,蚯蚓对铅有较强的富集作用,且随铅浓度的增加 蚯蚓体内的铅含量也增加；蚯蚓培养期内吸收铅量与 铅浓度梯度表现出极显著相关性。Zhou等〔36〕研究 发现食细菌线虫与土壤微生物相互作用可以促进污 染土壤中扑草净的降解。 但关于土壤微型动物在污 染土壤修复方面却少有研究,今后还需进一步加强对 土壤微型动物在污染土壤修复中作用的研究。

**2.4**污染土壤联合修复技术

协同两种或两种以上修复方法,形成联合修复技 术,不仅可以提高单一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,实现对多种污染 物的复合污染土壤的修复,成为土壤修复技术的重要 研究内容。

2 41 物理—化学联合修复技术 土壤物理—化学 联合修复技术是适用于污染土壤离位处理的修复技 术［37］。 例如,利用环己烷和乙醇将污染土壤中的多 环芳烃提取出来后进行光催化降解,利用 Pd/Rh 支 持的催化—热脱附联合技术或微波热解—活性炭吸 附技术修复多氯联苯污染土壤［6,8**］**;电动力学一芬顿 联合技术用来去除污染黏土矿物中的菲**［**39**］**； 利用光 调节的 TiO2 催化修 复农药污染 土 壤等**［**16**］**。溶剂萃 取—光降解联合修复技术是利用有机溶剂或表面活 性剂提取有机污染物后进行光解的物理—化学 联合 修复新技术。

24 2 微生物／动物—植物联合修复技术 微生物 (细菌、真菌)—植物、动物(如蚯蚓、线虫)—植物联合 修复是土壤生物修 复 技 术 研究的新内容**［**36**，**40-41**］**。研 究表明，种植紫花苜蓿和土壤微生物互作可大幅度降 低土壤中多 氯 联 苯浓度**［**40**］**； 根瘤菌和菌根真菌双接 种能强化紫花苜蓿对多氯联苯的修复作用**［**42**］**； 接种 食细菌线虫可以促进污染土壤扑草净的去除**［**36**］**。利 用能促进植物生长的根际细菌或真菌，发展植物—降 解菌群协同修复、动物—微生物协同修复**［**36**，**41**，**43**］**及其 根际强化技术，促进有机污染物的吸收、代谢和降解 是生物联合修复技术新的研究方向。

24 3 化学／物化—生物联合修复技术 发挥化学

或物理化学修复的快速优势，结合非破坏性的生物修 复特点，发展基于化学—生物修复的联合修复技术， 是最具应用潜力的污染土壤修复方法之一**［**44**］**。化学 淋洗—生物联合修复是基于化学淋溶剂作用，通过增 加污染物的生物可利用性来提高生物修复效率； 利用 有机络合剂的配位溶出，增加土壤溶液中重金属浓 度，提高植物有效性，从而实现强化诱导植物吸取修 复； 化学预氧化—生物降解和臭氧氧化—生物降解等 联合技术已经应用于污染土壤中多环芳烃的修 复**［**45**］** ； 电动力 学—微生物修复技术可以克服单独的 电动修复或生物修复技术的缺点，在不破坏土壤质量 的前提下，加快污染土壤 修复进程； 硫氧化细菌与电 动综合修复技术用于强化污染土壤中铜的去除； 应用 光降解一生物联合修复技术可以提高石油中PAHs 污染物的 去除效 率 **［**46 **］**。

**3**问题与展望

污染土壤的修复治理是一个综合的复杂过程，涉 及众多因素，单一的修复技术必然受到制约，影响修复 效果**［**47**］**。由于不同污染物本身的特性、污染场地的环 境条件、各种修复技术都有一定的适用范围、各个修复 技术之间缺乏交融性等，导致不管是物理的、化学的， 还是生物的修复方法与技术都不能完全修复某种污 染，一种修复方法也不能修复所有种类的污染物，到目 前为止还没有一种通用可行的污染土壤修复方法。

基于此，今后污染土壤修复的研究可在如下几个 方面开展：(1)植物修复技术。从植物的生理、栽培、 遗传的角度进行研究，筛选能超量积累污染物的植 物； 改善植物吸收性能，发掘高效污染修复植物； 开展 植物修复的机理研究，探索有效修复污染环境的植物 修复技术； 应用分子生物学 和基因工程技术，鉴定和 克隆抵抗重金属或降解有机污染物的植物基因，通过 转基因技术创造一批新的植物品种，培育转基因植 物，从而构建出高效去除污染物的植物； 其他，如污染 物在植物体系中的迁移转化规律、植物—微生物体系 的作用规律、植物物种的搭配、工程设计规范及工程 治理标准等，也是使植物修复技术最优化的重要研 究［48\ **(2**)微生物修复技术。运用分子生物学、遗 传学和基因工程等新理论、新技术分离和选育高效降 解菌，培育基因工程菌，增强它们对污染物的降解能 力，是提高土壤微生物修复 效果的研究热点； 通过工 程化措施，利用土著、 外源微生物 或基因工程菌进行 污染土壤的生物修复； 基于微生物 的复合修 复：微 生 物—土壤物理改良、 微 生 物—化学 活化、 微 生物—动 物、微生物—植物、 甚至于微生 物—植物—动 物 等多 生命体的系统组合研究**［**42**］**。 (3) 酶学 修复 技术。 利 用已经分离筛选出来的具有特定降解功能的微生物、 植物，通过发酵工程及酶工程手段，提取、分离纯化相 关酶类及酶系，制成酶制剂或生产固定化酶，用于有 机污染场地的修复**［**30**］**。(4) 生态修复技术。 从生 态 学角度出发，修复土壤污 染的同时，维护正常的生态 系统结构和功能，实现绿色意义的污染土壤修复。 在 修复污染土壤时，必须尽量考虑工程实施给环境带来 的影响，阻止次生污染的发生，或防止次生有害效应 的产生。 污染土壤生态修 复研究的重点在于超积累 植物和高效降解微生物的筛选及合理搭配、修复机理 的探索和基于植物与微生物联合修复的根际圈效应、 以广义生物修复为核心的联合修复以及修复强化措 施。 可以预见，污染土壤的生态修复将成为解决土壤 污染问题的根本技术**［**49**］**。(5) 复合污染修复技术及综 合修复技术。 一方面，由于土壤复合污染的普遍性、复 杂性和特殊性，复合污染土壤的修复不可能单独依靠 一种修复措施就能彻底解决，往往需要多途径、多方式 的修复手段，可以将多 种方法融合起来构成一个复合 污染修复技术体系，以发挥各自优势，摒弃各自缺点； 另一方面，即使是单一污染土壤，也必须综合考虑各种 因素，采用多种修复技术结合，形成适应于现场污染土

壤状况及条件、集多种方法优点于一体的综合修复技

术，以达到彻底修复污染土壤的目的⑸]。

参考文献：

1. 高园 园，周启 星 纳米零价铁在污染土壤修复中的应用 与展望[J].农业环境科学学报，2013,32(3):418-425.
2. 宋伟，陈百明，刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究，2013，20(2):293-298
3. 骆永明.中国主要土壤环境问题及对策[M].南京：河海 大学 出版社，2008
4. 殷甫祥，张胜田，赵欣，等.气相抽提法(SVE)去除土壤 中挥发性有机污染物的试验研究[].环境科学,011, 32(5):1454-1461
5. 刘娜,赵维,赵浩,等 微波修复氯丹污染土壤中氯丹降 解的影响因素研究[].环境污染与防治，2012,34(5)： 43-47
6. Aresta M, Dibenedetto A, Fragale C, et al. Thermal desorption of polychlorobiphenyls from contaminated soilsandtheirhydrodechlorination using Pd-and Rh- supported catalysts [J]. Chemosphere, 2008, 70 ( 6 )： 1052-1058
7. Khan F I, Husain T, Hejazi R. An overview and analy­sis of site remediation technologies]」]. Journal of Envi- ronmentalManagement2004，71(2)：95-122
8. Song Y F, Jing X, Fleischmann S, et al. Comparative study of extraction methods for the determination of PAHs from contaminated soils and sediments [J ] Chemosphere2002，48(9)：993-1001
9. 张文，李建兵，韩有定，等 超声波净化石油污染土壤试 验研究[J]环境工程学报，2010,4(4)941-944.
10. Wiles C C. A review of solidification/stabilization technology [J] JournalofHazardousMaterials198714(1)：5-21
11. 杨林**，**陈志明**，**刘元鹏**，**等 石灰**、**活性炭对铬污染土壤 的修复效果研究[J**]** 土壤学报**，**2012,49(3**)**518-525.
12. PariaS，YuetPK Solidification-stabilizationoforganicand inorganiccontaminantsusing Portlandcement： aliterature review[J] EnvironmentalReviews200614(4)：217-255
13. Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil wash- ingfor metalremoval： areview ofphysical/chemical technologiesandfieldapplications[J] Journal of Haz­ardous Materials2008，152(1)：1-31
14. 周秋生，张永康，屈学理，等 乙酸钠修复铬污染土壤的 机制研究[J]环境污染与防治，2012,34(5)58-62.
15. Zhang W X. Nanoscale iron particles for environmental remediation： an overview[J]. Journal of Nanoparticle Research 2003 5(3/4)：323-332
16. HigarashiM M，Jardim W F Remediationofpesticide contaminated soil using T1O2 mediated by solar light

[J] CatalysisToday，200276(2/4)：201-207

1. De L R D A, TeutihLeon M M M, Ramirez-Islas M E Po**l**utedsoilselectroremediation，atechnicalreview forfield application [J ] Revista Internacional De ContaminacionAmbiental2007，23(3)：129-138
2. VirkutyteJ，Si**l**anpwwM，LatostenmaaP Electroki- neticsoilremediation-Criticaloverview[J] Scienceof theTotalEnvironment 2002 289(1/3)：97-121
3. 陈坚.环境生物技术[M]北京：中国轻工业出版社， 2000
4. 张弛,顾震宇,龙於洋,等 多氯联苯污染土壤植物修复 的机理、遗传缺陷及转基因技术核农学报,012, 26(7)：1094-1099
5. 骆永明.金属污染土壤的植物修复土壤，1999,31
6. ：261-265
7. 王波,李凯荣,崔碧霄,等 刺槐苗木抗氧化保护系统对石 油污染的响应水土保持研究,014,1(2):251-256.
8. 张家春，林绍霞，张清海，等 贵州草海湿地周边耕地土 壤与农作物重金属污染特征水土保持研究,2014, 21(3)：273-278
9. Mu**l**ainathanL，ArulbalachandranD，LakshmananG M A， etal Phytoremediation： Meta**l**ophytes an e**f**ective tool to removesoiltoxicmetal[J] PlantArchives20077(1)：19-23
10. Mendez M O，MaierR M Phytostabilizationofmine tailingsinaridandsemiaridenvironments：anemerging remediation technology [J ] Environmental Health Perspectives2008，116(3)：278-283
11. NewmanL A，ReynoldsC M Phytodegradationoforganic compounds[J] Cu**r**entOpinionsinBiotechnology200415 (3)：225-230
12. XuL，ZhouS，WuL，etal CdandZntoleranceand accumulation by *Sedum jinianum* in east China[J]. Interna- tionalJournalofPhytoremediation200911(3)：283-295
13. RoyS，Labe**l**eS，MehtaP，etal Phytoremediationof heavy metaland PAH-contaminated brownfield sites [J] PlantandSoil2005，272(1/2)：277-290
14. 唐世荣，黄昌永，朱祖祥 利用植物修复污染土壤研究 进展[J].环境科学进展，1996,4(6)10-17.
15. 钱林波，元妙新，陈宝梁 固定化微生物技术修复

PAHs污染土壤的研究进展[].环境科学，2012,33

1. ：1767-1776
2. 葛高飞,郜红建,郑彬,等 多环芳烃污染土壤的微生物 效应研究现状与展望安徽农业大学学报,012,9
3. ：973-978
4. 刘宪华，冯忻，宋华文，等.假单胞菌AEBL3对咲喃丹 污染土壤的生物修复南开大学学报，2003,36(4)： 63-67
5. 蒋建东，顾立锋，孙纪全，等 同源重组法构建多功能农 药降解基因工程菌研究[J1生物工程学报，2005,21
6. ：32-39.
7. 张伟，马静静，郑彬，等.土壤B[a]P多次累积污染对蚯 蚓体内谷胱甘肽-S■转移酶活性的影响[J1安徽农业大 学学报,014,1(4):647-653.
8. 寇永纲，伏小勇，侯培强，等 蚯蚓对重金属污染土壤中铅 的富集研究[J丄环境科学与管理,008,3(1):62-64.
9. Zhou J, LiX, Jiang Y, et al. Combined effects of bac­terial-feeding nematodes and prometryne on the soil microbial activity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,192(3)1243-1249.
10. 樊广萍，仓龙，周东美，等 土壤性质对铜—芘复合污染 土壤电动一氧化修复的影响研究[J]环境科学,2011, 32(11)：3435-3439
11. Liu X T, Yu G. Combined effect of micro wave and activa- tedcarbonontheremediationofpolychlorinatedbiphenyl- contaminatedsoil[J] Chemosphere200663(2)：228-235
12. Alcantara T, Pazos M, Gouveia S, et al. Remediation of

phenanthrene from contaminated kaolinite by electroremed- iation-Fenton technology [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A， 2008 43(8) ：901-906

1. 徐莉，滕应，张雪莲，等 多氯联苯污染土壤的植物—微 生物联合田间原位修复[J]中国环境科学,2008,28
2. ：646-650
3. Zhuang X, Chen J, Shim H, et al. New advances in plantgrowth-promoting rhizobacteria for bioremediation [J]. Environment Intemational,2007,33(3) ：06-413.
4. 滕应，骆永明，高军，等 多氯联苯污染土壤菌根真菌— 紫花苜蓿一根瘤菌联合修复效应环境科学,2008,

29(10)：2925-2930

1. Contreras-Ramos S M, Alvarez-Bernal D, Dendooven L. Removalofpolycyclicaromatichydrocarbonsfromsoil amended withbiosolidorvermicompostinthepresence of earthworms (*Eisenia fetida*) [J]. Soil Biology and Biochemistry 2008 40(7)：1954-1959
2. 万芹方，邓大超，柏云，等 植物和动电修复铀污染土壤的 研究现状[J]核化学与放射化学,2012,34(3):148-156.
3. Kulik N, Goi A, Trapido M, et al. Degradation of polycyclicaromatichydrocarbonsbycombinedchemical pre-oxidation and bioremediation in creosote contami- natedsoil[J] JournalofEnvironmentalManagement， 2006，78(4)：382-391
4. Guieysse B, Viklund G, Toes A C, et al. Combine UV-biological degradation of PAHs[J]. Chemosphere, 2004，55(11)：1493-1499
5. 周际海，袁颖红，朱志保，等 土壤有机污染物生物修复技 术研究进展生态环境学报,2015,24(2)343-351.
6. Barrutia O, Garbisu C, Epelde L, et al. Plant tolerance to dieselminimizesitsimpactonsoilmicrobialcharacteristics during rhizoremediation of diesel-contaminated soils [J] Science of the Total Environment 2011 409(19) ： 4087-4093
7. 潘澄，滕应，骆永明，等 多氯联苯污染农田土壤的原位生 态调控修复效应环境科学,2012,33(7):25102515.
8. Mi**t**onF M GonzalezM PenaA etal E**f**ectsofamend- mentsonsoilavailabilityandphytoremediationpotentialof agedp p-DDT p p-DDEandp p-DDDresiduesbywil- low plants(*S*a*i*jc sp. )[J]. Journal of Hazardous Materials , 2012203／204:62-68