

# 污染土壤修复技术研究进展

周际海<sup>1</sup>, 黄荣霞<sup>1,2</sup>, 樊后保<sup>1</sup>, 田胜尼<sup>2</sup>, 李宗勋<sup>1</sup>, 姜伟<sup>3</sup>, 李特<sup>3</sup>, 高琪<sup>3</sup>

(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

## A Review on the Progresses of Remediation Technologies for Contaminated Soils

ZHOU Jihai<sup>1</sup>, HUANG Rongxia<sup>1,2</sup>, FAN Houbao<sup>1</sup>, TIAN Shengni<sup>2</sup>,

LI Zongxun<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>3</sup>, LI Te<sup>3</sup>, GAO Qi<sup>3</sup>

(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 abroad, especially the physical remediation technologies, chemical remediation technologies, bioremediation technologies (including phytoremediation, microbial remediation and soil fauna remediation technologies) and other remediation methods incorporating technologies mentioned above. In addition, a relatively comprehensive review is done on the research progress of various remediation technologies followed by the outlook on the future development of remediation technologies of contaminated soils.

**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<sup>[1]</sup>。我国现有耕地约 1.3 亿 hm<sup>2</sup>,其中约 0.2 亿 hm<sup>2</sup> 耕

收稿日期: 2015-05-21

修回日期: 2015-06-23

资助项目: 国家自然科学基金(31460149); 中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(K318009902-1414); 中国科学院土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812201236); 南昌工程学院 2015 年大学生科研训练计划

第一作者: 周际海(1973—),男,安徽和县人,博士,副教授,主要从事土壤微生物及污染修复研究。E-mail: zhoujihai2006@163.com

通信作者: 樊后保(1965—),男,江西修水县人,博士,教授,主要从事土壤生态学及全球变化生态学研究。E-mail: hbfan@nit.edu.cn

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<sup>[2-3]</sup>。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,以期污染土壤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<sup>[3]</sup>,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<sup>[3]</sup>。

## 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<sup>[4]</sup>、微波加热<sup>[5]</sup>、热脱附<sup>[6]</sup>等技术。

**2.1.1 热脱附技术** 热脱附(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<sup>[6]</sup>。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<sup>[6]</sup>。

**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<sup>[4]</sup>。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%<sup>[7]</sup>。

**2.1.3 超声/微波加热技术** 超声/微波加热(Ultrasonic/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CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O或环境易降解的小分子化合物<sup>[5]</sup>。Song等<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>。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<sup>[11]</sup>,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<sup>[12]</sup>。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<sup>[11]</sup>。

**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<sup>[13]</sup>。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掉的有机污染物,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。

**2.2.3 化学氧化—还原技术** 化学氧化—还原(Che-mical Oxidation-Reduction)技术是通过向土壤中投加化学氧化剂(Fenton 试剂、臭氧、 $H_2O_2$ 、 $KMnO_4$  等)或还原剂( $SO_2$ 、 $FeO$ 、气态  $H_2S$  等),使其与污染物发生化学反应来实现净化土壤的目的<sup>[14]</sup>。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<sup>[15]</sup>,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<sup>[16]</sup>。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<sup>[17]</sup>,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<sup>[18]</sup>。

## 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<sup>[19]</sup>。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<sup>[20]</sup>,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( $CO_2$  和  $H_2O$ )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(Phytoremediation)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<sup>[21-23]</sup>。包括利用植物超积累功能的植物吸取修复<sup>[24]</sup>、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<sup>[25]</sup>、利用植物代谢功能的植物降解修复<sup>[26]</sup>、利用植物转化功能的植物挥发修复<sup>[21]</sup>、利用植物根系吸附的植物过滤修复<sup>[21]</sup>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、铅等重金属以及多环芳烃复合污染土壤的研究与修复<sup>[27]</sup>,并发展出包括络合诱导强化修复<sup>[28]</sup>、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<sup>[29]</sup>。

**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<sup>[30]</sup>。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<sup>[31]</sup>。如:刘宪华等<sup>[32]</sup>用分离筛选出的假单胞菌 AEBL3 降解呋喃丹,结果发现未加菌土壤呋喃丹在 0—7 cm 土层中含量达 90 mg/kg,加菌土壤呋喃丹含量为 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<sup>[33]</sup>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),呋喃丹也可在 30 h 内被完全降解。

**2.3.3 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<sup>[34]</sup>。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<sup>[35]</sup>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<sup>[36]</sup>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。

**2.4.1 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<sup>[37]</sup>。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<sup>[6,38]</sup>;电动力学—芬顿联合技术用来去除污染黏土矿物中的非<sup>[39]</sup>;利用光调节的  $\text{TiO}_2$  催化修复农药污染土壤等<sup>[16]</sup>。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。

2.4.2 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<sup>[36,40-41]</sup>。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<sup>[40]</sup>;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<sup>[42]</sup>;接种食细菌线虫可以促进污染土壤杂草净的去除<sup>[36]</sup>。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<sup>[36,41,43]</sup>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。

2.4.3 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<sup>[44]</sup>。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<sup>[45]</sup>;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—生物联合修复技术可以提高石油中 PAHs 污染物的去除效率<sup>[46]</sup>。

### 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<sup>[47]</sup>。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<sup>[48]</sup>。(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<sup>[42]</sup>。(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<sup>[30]</sup>。(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<sup>[49]</sup>。(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<sup>[50]</sup>。

#### 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[J]. 环境科学,2011,32(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[J]. 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 soils and their hydrodechlorination 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[J]. Journal of Environmental Management,2004,71(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]. Chemosphere,2002,48(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]. Journal of Hazardous Materials,1987,14(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] Paria S, Yuet P K. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using Portland cement: a literature review[J]. Environmental Reviews,2006,14(4):217-255.
- [13] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(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] Higarashi M M, Jardim W F. Remediation of pesticide contaminated soil using  $\text{TiO}_2$  mediated by solar light [J]. Catalysis Today, 2002,76(2/4):201-207.
- [17] De L R D A, Teutli-León M M M, Ramirez-Islas M E. Polluted soils electroremediation, a technical review for field application [J]. Revista Internacional De Contaminación Ambiental,2007,23(3):129-138.
- [18] Virkutyte J, Sillanpää M, Latostenmaa P. Electrokinetic soil remediation-Critical overview[J]. Science of the Total Environment,2002,289(1/3):97-121.
- [19] 陈坚. 环境生物技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2000.
- [20] 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[J]. 核农学报,2012,26(7):1094-1099.
- [21] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤,1999,31(5):261-265.
- [22] 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[J]. 水土保持研究,2014,21(2):251-256.
- [23] 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[J]. 水土保持研究,2014,21(3):273-278.
- [24] Mullainathan L, Arulbalachandran D, Lakshmanan G M A, et al. Phytoremediation: Metallophytes an effective tool to remove soil toxic metal[J]. Plant Archives,2007,7(1):19-23.
- [25] Mendez M O, Maier R M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments: an emerging remediation technology [J]. Environmental Health Perspectives,2008,116(3):278-283.
- [26] Newman L A, Reynolds C M. Phytodegradation of organic compounds[J]. Current Opinions in Biotechnology,2004,15(3):225-230.
- [27] Xu L, Zhou S, Wu L, et al. Cd and Zn tolerance and accumulation by *Sedum jinianum* in east China[J]. International Journal of Phytoremediation,2009,11(3):283-295.
- [28] Roy S, Labelle S, Mehta P, et al. Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites [J]. Plant and Soil,2005,272(1/2):277-290.
- [29] 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.
- [30] 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[J]. 环境科学,2012,33(5):1767-1776.
- [31] 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[J]. 安徽农业大学学报,2012,39(6):973-978.
- [32] 刘宪华,冯忻,宋华文,等. 假单胞菌 AEBL3 对呋喃丹污染土壤的生物修复[J]. 南开大学学报,2003,36(4):63-67.