

# 污染土壤修复技术研究现状与趋势<sup>\*</sup>

骆永明<sup>\*\*</sup>

(中国科学院南京土壤研究所 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室 南京 210008)

**摘 要** 本文综述了国内外污染土壤修复技术的研究现状和发展趋势,并联系我国土壤污染态势探讨了中国土壤修复技术研发的需求。文中指出,包括生物修复、物理修复、化学修复及其联合修复的污染土壤修复技术体系已经基本形成;土壤修复技术正朝着 6 大方向发展,即向绿色与环境友好的生物修复、联合杂交的综合修复、原位修复、基于环境功能材料的修复、基于设备化的快速场地修复以及土壤修复决策支持系统及修复后评估等技术方向发展。我国土壤环境污染态势严峻,需要发展能广泛应用、安全、低成本的原位农田生物修复技术和物化稳定技术,发展安全、土地能再开发利用、针对性强的工业场地快速物化工程修复技术与设备,发展能控制水土流失与污染物扩散的矿区植物稳定化与生态工程修复技术,建立污染土壤修复技术规范、评价标准和管理政策。

**关键词** 土壤污染 土壤修复 技术发展

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-281X(2009)02/3-0558-08

## Current Research and Development in Soil Remediation Technologies

Luo Yongming<sup>\*\*</sup>

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation of CAS, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** This paper makes a review on current research and development in contaminated soil remediation technologies at home and abroad, and also discusses demand for development in soil remediation technologies in China. This review indicates that systematic remediation technologies for contaminated soil have been developed, which included bioremediation, physical/chemical remediation and integrated remediation. Six research and development trends in soil remediation are summarized as follows: green and environmentally-friendly bioremediation, combined and hybride remediation, in situ remediation, environmentally functional material based remediation, equipment based site remediation, remediation decision supporting system and post-remediation assessment. It needs in China to develop wide-use, safe, cost-effective in situ bioremediation and physical/chemical stabilization technologies for agricultural farmland soil, to develop safe, land reusable, site-specific physical/chemical and engineering remediation technologies for heavily polluted industrial site, and to develop phytostabilization and eco-engineering remediation technologies for controlling soil erosion and pollutants transport in mined area. Besides, it also needs to develop national guidelines, standards and management policies for contaminated soil remediation.

**Key words** soil pollution; soil remediation; technology development

收稿: 2009 年 1 月

\*中国科学院创新团队(CXTD-Z2005-4)和创新工程方向项目(KZCX2-YW-404)资助

\*\*通讯联系人 e-mail: ymluo@issas.ac.cn

## Contents

- 1 Introduction
- 2 Current researches in contaminated soil remediation technologies
  - 2.1 Bioremediation technologies for contaminated soil
  - 2.2 Physical remediation technologies for contaminated soil
  - 2.3 Chemical or physico-chemical remediation technologies for contaminated soil
  - 2.4 Combined remediation technologies for contaminated soil
- 3 Trends in development of contaminated soil remediation technologies
  - 3.1 Green and environmentally-friendly bioremediation technologies
  - 3.2 Combined and hybride remediation technologies
  - 3.3 In situ remediation technologies
  - 3.4 Environmentally functional materials based remediation technologies
  - 3.5 Equipment based site remediation technologies
  - 3.6 Remediation decision supporting system and post-remediation assessment technologies
- 4 Opinions on R&D of contaminated soil remediation technologies in China
  - 4.1 Soil contamination situation in China
  - 4.2 Demands in R&D of contaminated soil remediation technologies
- 5 Conclusion

## 1 引言

污染土壤修复技术的研究起步于 20 世纪 70 年代后期。在过去的 30 年期间,欧、美、日、澳等国家纷纷制定了土壤修复计划,巨额投资研究了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快速的发展。我国的污染土壤修复技术研究起步较晚,在“十五”期间才得到重视,列入了高技术研究规划发展计划<sup>[1]</sup>,其研发水平和应用经验都与美、英、德、荷等发达国家存在相当大的差距。近年来,顺应土壤环境保护的现实需求和土壤环境科学技术的发展需求,科学技术部、国家自然科学基金委、中国科学院、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,有力地

促进和带动了全国范围的土壤污染控制与修复科学技术的研究与发展工作。期间,以土壤修复为主题的国内一系列学术性活动也为我国污染土壤修复技术的研究和发展起到了很好的引领性和推动性作用。土壤修复理论与技术已成为土壤科学、环境科学以及地表过程研究的新内容。土壤修复学已经成为一门新兴的环境科学分支学科,修复土壤学也将发展成为一门新兴的土壤科学分支学科<sup>[2,3]</sup>。

本文将着重介绍近年来国内外污染土壤修复技术的研究现状与发展趋势,并探讨我国土壤修复技术研发的重点,以促进土壤修复科学技术的发展。

## 2 污染土壤修复技术的研究现状

经过近十多年来全球范围的研究与应用,包括生物修复、物理修复、化学修复及其联合修复技术在内的污染土壤修复技术体系已经形成,并积累了不同污染类型场地土壤综合工程修复技术应用经验,出现了污染土壤的原位生物修复技术和基于监测的自然修复技术等研究的新热点。下面简要介绍国内外污染土壤修复技术研究现状。

### 2.1 污染土壤生物修复技术

土壤生物修复技术,包括植物修复、微生物修复、生物联合修复等技术,在进入 21 世纪后得到了快速发展,成为绿色环境修复技术之一。

#### 2.1.1 植物修复技术

从 20 世纪 80 年代问世以来,利用植物资源与净化功能的植物修复技术迅速发展<sup>[4,5]</sup>。植物修复技术包括利用植物超积累或积累性功能的植物吸取修复<sup>[6,7,8]</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>[9]</sup>、利用植物代谢功能的植物降解修复<sup>[10]</sup>、利用植物转化功能的植物挥发修复<sup>[4]</sup>、利用植物根系吸附的植物过滤修复<sup>[4]</sup>等技术;可被植物修复的污染物有重金属、农药、石油和持久性有机污染物、炸药、放射性核素等。其中,重金属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修复<sup>[6,7,11,12]</sup>,并发展出包括络合诱导强化修复<sup>[13]</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<sup>[11]</sup>。这种技术的应用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。近年来,我国在重金属污染农田土壤的植物吸取修复技术应用方面在一定程度上开始引领国际前沿研究方向。但是,虽然开展了利用苜蓿、黑麦草等植物

修复多环芳烃、多氯联苯和石油烃的研究工作<sup>[1]</sup>,但是有机污染土壤的植物修复技术的田间研究还很少,对炸药、放射性核素污染土壤的植物修复研究则更少。

植物修复技术不仅应用于农田土壤中污染物的去除,而且同时应用于人工湿地建设、填埋场表层覆盖与生态恢复、生物栖身地重建等。近年来,植物稳定修复技术被认为是一种更易接受、大范围应用、并利于矿区边际土壤生态恢复的植物技术,也被视为一种植物固碳技术和生物质能源生产技术;为寻找多污染物复合或混合污染土壤的净化方案,分子生物学和基因工程技术应用于发展植物杂交修复技术<sup>[14]</sup>;利用植物的根圈阻隔作用和作物低积累作用<sup>[15]</sup>,发展能降低农田土壤污染的食物链风险的植物修复技术正在研究。

#### 2.1.2 微生物修复技术

微生物能以有机污染物为唯一碳源和能源或者与其他有机物质进行共代谢而降解有机污染物。利用微生物降解作用发展的微生物修复技术是农田土壤污染修复中常见的一种修复技术。这种生物修复技术已在农药或石油污染土壤中得到应用。在我国,已构建了农药高效降解菌筛选技术、微生物修复剂制备技术和农药残留微生物降解田间应用技术;也筛选了大量的石油烃降解菌,复配了多种微生物修复菌剂,研制了生物修复预制床和生物泥浆反应器,提出了生物修复模式<sup>[1]</sup>。近年来,开展了有机肿和持久性有机污染物如多氯联苯和多环芳烃污染土壤的微生物修复技术工作。分离到能将 PAHs 作为唯一碳源的微生物如假单胞菌属、黄杆菌属等,以及可以通过共代谢方式对 4 环以上 PAHs 加以降解的如白腐菌等<sup>[16]</sup>。建立了菌根真菌强化紫花苜蓿根际修复多环芳烃的技术和污染农田土壤的固氮植物-根瘤菌-菌根真菌联合生物修复技术<sup>[17,18]</sup>。总体上,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,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。微生物固定化技术因能保障功能微生物在农田土壤条件下种群与数量的稳定性和显著提高修复效率而受到青睐。通过添加菌剂和优化作用条件发展起来的场地污染土壤原位、异位微生物修复技术有:生物堆沤技术、生物预制床技术、生物通风技术和生物耕作技术等。运用连续式或非连续式生物反应器、添加生物表面活性剂和优化环境条件等可提高微生物修复过

程的可控性和高效性<sup>[19,20]</sup>。目前,正在发展微生物修复与其他现场修复工程的嫁接和移植技术,以及针对性强、高效快捷、成本低廉的微生物修复设备,以实现微生物修复技术的工程化应用。

#### 2.2 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(特别是有机污染物)从土壤中去或分离的技术。热处理技术是应用于工业企业场地土壤有机污染的主要物理修复技术,包括热脱附<sup>[21]</sup>、微波加热<sup>[22]</sup>和蒸气浸提<sup>[23]</sup>等技术,已经应用于苯系物、多环芳烃、多氯联苯和二噁英等污染土壤的修复。

##### 2.2.1 热脱附技术

热脱附是用直接或间接的热交换,加热土壤中有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,特别对 PCBs 这类含氯有机物,非氧化燃烧的处理方式可以显著减少二噁英生成<sup>[21]</sup>。目前欧美国家已将土壤热脱附技术工程化,广泛应用于高污染的场地有机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污染土壤修复中的应用<sup>[24]</sup>。发展不同污染类型土壤的前处理和脱附废气处理等技术,优化工艺并研发相关的自动化成套设备正是共同努力的方向。

##### 2.2.2 蒸气浸提技术

土壤蒸气浸提(简称 SVE)技术是去除土壤中挥发性有机污染物(VOCs)的一种原位修复技术。它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 经由抽取并流回地上;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,可排放到大气或重新注入地下循环使用。SVE 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。苯系物等轻组分石油烃类污染物的去除率可达 90 %<sup>[25]</sup>。深入研究土壤多组分 VOCs 的传质机理,精确计算气体流量和流速,解决气提过程中的拖尾效应,降低尾气净化成本,提高污染物去除效率,是优化土壤蒸气浸提技术的需要。

#### 2.3 污染土壤化学/物化修复技术

相对于物理修复,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等。

### 2.3.1 固化-稳定化技术

固化-稳定化技术是将污染物在污染介质中固定,使其处于长期稳定状态,是较普遍应用于土壤重金属污染的快速控制修复方法,对同时处理多种重金属复合污染土壤具有明显的优势<sup>[26]</sup>。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,其中水泥应用最为广泛。在美国的非有机物污染的超级基金项目大部分采用固化-稳定化技术处理。我国一些冶炼企业场地重金属污染土壤和铬渣清理后的堆场污染土壤也采用了这种技术。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>[27]</sup>。目前,需要加强有机污染土壤的固化-稳定化技术研发、新型可持续稳定化修复材料的研制及其长期安全性监测评估方法的研究。

### 2.3.2 淋洗技术

土壤淋洗修复技术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,洗脱和清洗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<sup>[28]</sup>。由于该技术需要用水,所以修复场地要求靠近水源,同时因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,防止二次污染等依然是重要的研究课题。

### 2.3.3 氧化-还原技术

土壤化学氧化-还原技术是通过向土壤中投加化学氧化剂(Fenton 试剂、臭氧、过氧化氢、高锰酸钾等)或还原剂( $\text{SO}_2$ 、 $\text{Fe}^0$ 、气态  $\text{H}_2\text{S}$  等),使其与污染物发生化学反应来实现净化土壤的目的<sup>[29,30,31]</sup>。通常,化学氧化法适用于土壤和地下水同时被有机物污染的修复。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>[29]</sup>,需要开发新的催化剂和表面激活技术。

### 2.3.4 光催化降解技术

土壤光催化降解(光解)技术是一项新兴的深度土壤氧化修复技术,可应用于农药等污染土壤的修

复<sup>[32]</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:高孔隙度的土壤中污染物迁移速率快,粘粒含量越低光解越快;自然土中氧化铁对有机物光解起着重要调控作用;有机质可以作为一种光稳定剂;土壤水分能调解吸收光带;土壤厚度影响滤光率和入射光率。

### 2.3.5 电动力学修复

电动力学修复(简称电动修复)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,进行集中处理或分离的过程。电动修复技术已进入现场修复应用<sup>[33,34]</sup>。近年来,我国也先后开展了铜、铬等重金属、菲和五氯酚等有机污染土壤的电动修复技术研究<sup>[1]</sup>。电动修复速度较快、成本较低,特别适用于小范围的粘质的多种重金属污染土壤和可溶性有机物污染土壤的修复;对于不溶性有机污染物,需要化学增溶,易产生二次污染<sup>[35]</sup>。发展电动强化的复合污染土壤联合修复技术将是值得研究的课题。

## 2.4 污染土壤联合修复技术

协同两种或以上修复方法,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性,实现对多种污染物的复合/混合污染土壤的修复,已成为土壤修复技术中的重要研究内容。

### 2.4.1 微生物/动物-植物联合修复技术

微生物(细菌、真菌)-植物、动物(蚯蚓)-植物联合修复是土壤生物修复技术研究的新内容<sup>[17,18,36,37]</sup>。筛选有较强降解能力的菌根真菌和适宜的共生植物是菌根生物修复的关键。种植紫花苜蓿可以大幅度降低土壤中多氯联苯浓度<sup>[17]</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>[18]</sup>。利用能促进植物生长的根际细菌<sup>[36]</sup>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>[37]</sup>及其根际强化技术,促进有机污染物的吸收、代谢和降解将是生物修复技术新的研究方向。

### 2.4.2 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-生物修复技术是最具应用潜力的污染土壤修复方法之一。化学淋洗-生物联合修复是基于化学淋洗剂作用,通过增加污染物的生物可利用性而提高生物修复效率。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<sup>[12]</sup>。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>[38,39]</sup>。电动力学-微生物修复技术可以克服单独的电动技术或生物修复技术的缺点,在不破坏土壤质量的前提下,加快土壤修复进程<sup>[33]</sup>。电动力学-芬顿联合技术已用来去除污染黏土矿物中的菲<sup>[40]</sup>,硫酸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<sup>[41]</sup>。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。总体上,这些技术多处于室内研究的阶段。

#### 2.4.3 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。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一项新的物理-化学联合修复技术。例如,可以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。此外,可以利用 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>[42,43]</sup>;也可以利用光调节的  $\text{TiO}_2$  催化修复农药污染土壤<sup>[32]</sup>。

### 3 污染土壤修复技术的发展趋势

从 2000、2004 和 2008 年连续 3 届的土壤污染与修复国际会议主题与交流情况来看<sup>[44-46]</sup>,在污染土壤修复决策上,它已从基于污染物总量控制的修复目标发展到基于污染风险评估的修复导向;在技术上,已从物理修复、化学修复和物理化学修复发展到生物修复、植物修复和基于监测的自然修复,从单一的修复技术发展到多技术联合的修复技术、综合集成的工程修复技术;在设备上,从基于固定式设备的离场修复发展到移动式设备的现场修复;在应用上,已从服务于重金属污染土壤、农药或石油污染土壤、持久性有机化合物污染土壤的修复技术发展到多种污染物复合或混合污染土壤的组合式修复技术;已从单一厂址场地走向特大城市复合场地(mega-city site),从单项修复技术发展到融大气、水体监测的多技术多设备协同的场地土壤-地下水综合集成修复;已从工业场地走向农田耕地,从适用于工业企业场地污染土壤的离位肥力破坏性物化修复技术发展到适用于农田耕地污染土壤的原位肥力维持性绿色修复技术。

#### 3.1 向绿色与环境友好的土壤生物修复技术发展

利用太阳能和自然植物资源的植物修复、土壤中高效专性微生物资源的微生物修复、土壤中不同

营养层食物网的动物修复、基于监测的综合土壤生态功能的自然修复,将是 21 世纪土壤环境修复科学技术研发的主要方向。农田耕地土壤污染的修复技术要求能原位地有效消除影响到粮食生产和农产品质量的微量有毒有害污染物,同时既不能破坏土壤肥力和生态环境功能,又不能导致二次污染的发生。发展绿色、安全、环境友好的土壤生物修复技术能满足这些需求,并能适用于大面积污染农地土壤的治理,具有技术和经济上的双重优势<sup>[7]</sup>。从常规作物中筛选合适的修复品种,发展适用于不同土壤类型和条件的根际生态修复技术已成为一种趋势。应用生物工程技术如基因工程、酶工程、细胞工程等发展土壤生物修复技术,有利于提高治理速率与效率,具有应用前景。

#### 3.2 从单项向联合、杂交的土壤综合修复技术发展

土壤中污染物种类多,复合污染普遍,污染组合类型复杂,污染程度与厚度差异大。地球表层的土壤类型多,其组成、性质、条件的空间分异明显。一些场地不仅污染范围大、不同性质的污染物复合、土壤与地下水同时受污染,而且修复后土壤再利用方式的空间规划要求不同。这样,单项修复技术往往很难达到修复目标,而发展协同联合的土壤综合修复模式就成为场地和农田土壤污染修复的研究方向,例如:不同修复植物的组合修复,降解菌-超积累植物的组合修复,真菌-修复植物组合修复,土壤动物-植物-微生物组合修复,络合增溶强化植物修复,化学氧化-生物降解修复,电动修复-生物修复,生物强化蒸气浸提修复,光催化纳米材料修复等。

#### 3.3 从异位向原位的土壤修复技术发展

将污染土壤挖掘、转运、堆放、净化、再利用是一种经常采用的离场异位修复过程。这种异位修复不仅处理成本高,而且很难治理深层土壤及地下水均受污染的场地,不能修复建筑物下面的污染土壤或紧靠重要建筑物的污染场地。因而,发展多种原位修复技术以满足不同污染场地修复的需求就成为近年来的一种趋势。例如,原位蒸气浸提技术、原位固定-稳定化技术、原位生物修复技术、原位纳米零价铁还原技术等。另一趋势是发展基于监测的发挥土壤综合生态功能的原位自然修复<sup>[47,48]</sup>。

#### 3.4 基于环境功能修复材料的土壤修复技术发展

黏土矿物改性技术、催化剂催化技术、纳米材料与已经渗透到土壤环境和农业生产领域,并应用于污染土壤环境修复,例如利用纳米铁粉、氧化铁等去除污染土壤和地下水中的有机氯污染物<sup>[29,32]</sup>。

但是,目标土壤修复的环境功能材料的研制及其应用技术还刚刚起步,具有发展前景。但是,对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,对其环境安全性和生态健康风险还难以进行科学评估。基于环境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有待回答。

### 3.5 基于设备化的快速场地污染土壤修复技术发展

土壤修复技术的应用在很大程度上依赖于修复设备和监测设备的支撑,设备化的修复技术是土壤修复走向市场化和产业化的基础。植物修复后的植物资源化利用、微生物修复的菌剂制备、有机污染土壤的热脱附或蒸气浸提、重金属污染土壤的淋洗或固化-稳定化、修复过程及修复后环境监测等等都需要设备。尤其是对城市工业遗留的污染场地,因其特殊位置和土地再开发利用的要求,需要快速、高效的物化修复技术与设备。开发与应用基于设备化的场地污染土壤的快速修复技术是一种发展趋势。一些新的物理和化学方法与技术,在土壤环境修复领域的渗透与应用将会加快修复设备化的发展,例如,冷等离子体氧化技术可能是一种有前景的有机污染土壤修复技术(未发表资料),将带动新的修复设备研制。

### 3.6 向土壤修复决策支持系统及后评估技术发展

污染土壤修复决策支持系统是实施污染场地风险管理和修复技术快速筛选的工具。污染土壤修复技术筛选是一种多目标决策过程,需要综合考虑风险削减、环境效益与修复成本等要素。欧美许多土壤修复研究组织如 CLARINET、EUGRIS、NATO/CCMS 等针对污染场地管理和决策支持进行了系统研究和总结。一些辅助决策工具如文件导则、决策流程图、智能化软件系统等已陆续出台和开发,并在具体的场地修复过程中被采纳<sup>[49]</sup>。基于风险的污染土壤修复后评估也是污染场地风险管理的重要环节,包括修复后污染物风险评估、修复基准及土壤环境质量评价等内容。土壤污染类型多种多样,污染场地错综复杂,需要发展场地针对性的污染土壤修复决策支持系统及后评估方法与技术。

## 4 对我国污染土壤修复技术研发的思考

我国土壤污染防治与修复技术的研发需要针对国内土壤污染特征与发展趋势,既要满足土壤污染问题的解决,也要联系国家的经济社会发展现状和相关的技术研发基础与条件。

### 4.1 我国土壤污染态势

总体上,我国土壤环境污染形势严峻<sup>[1,50]</sup>。在一些经济快速发展地区耕地土壤中持久性毒害物质已经大量积累,部分农田、菜地重金属(镉、汞、砷等)、农药(滴滴涕等)、多环芳烃、多氯联苯、二噁英等持久性有机污染物复合污染突出,影响粮食生产和农产品质量安全。在快速的城市化和实施“退二进三”的城市布局改造战略的进程中,污染企业搬迁引发的场地土壤环境污染事故已经影响到人居环境安全健康。在一些矿区、油田区及其周边土壤中重金属和有机污染也相当严重,对周边生态安全和人体健康构成威胁。一些湿地不仅是生物栖身地和生态敏感区,而且也是污水和废弃物的汇集地,污染严重,影响生物多样性和生态安全。在高强度的资源和能源利用与污染物排放过程中,我国土壤污染的范围在扩大,土壤污染物的种类在增多,出现了复合型、混合型的高风险污染土壤区,呈现出从污灌型向与大气沉降型并重转变,城郊向农村延伸,局部向区域蔓延的趋势;从有毒有害污染发展至有毒有害污染与养分过剩、土壤酸化的交叉,形成点源与面源污染共存、生活污染、种植养殖业污染和工矿企业排放叠加、各种新旧污染与次生污染相互复合/混合的态势,危及粮食生产与质量安全、生态环境安全和人体健康,迫切需要治理和修复。

### 4.2 我国污染土壤修复技术研发需求

我国的污染土壤修复技术研发应该为解决农田土壤(含污灌区)污染、工业场地土壤污染、矿区及周边土壤污染以及生态敏感的湿地土壤污染等问题提供技术支持。这就需要研发能适合原位或异位、现场或离场的土壤修复技术与设备,能适用于不同土壤类型与条件、不同土地利用方式和不同污染类型与程度的土壤修复技术,能快速、高效、廉价、安全、使土地再开发利用的修复技术体系。针对受重金属、农药、石油、多环芳烃、多氯联苯等中轻度污染的农业土壤或湿地土壤,需要着力发展能大面积应用、安全、低成本、环境友好的生物修复技术和物化稳定技术,实现边修复边生产,以保障农产品安全和生态安全。针对工矿企业废弃的化工、冶炼等各类重污染场地土壤,需要着力研究优先修复点位确定方法和修复技术决策支持系统,发展场地针对性、能满足安全与再开发利用目标、原位或异位的物理、化学及其联合修复工程技术,开发具有自主知识产权的成套修复技术与设备,形成系统的场地土壤修复标准和技术规范,以保障人居环境安全健康。针对各类

矿区及尾矿污染土壤,现阶段需要着力研究能控制水土流失与污染物扩散的生物稳定化与生态工程修复技术,将矿区边际土壤开发利用为植物固碳和生物质能源生产的基地,以保障矿区及周边生态环境安全,并提高其生态服务价值。

## 5 结 语

污染土壤的修复是以去污染、复质量、再利用、保安康为目的的。土壤修复往往是控污、减污、降毒、化险的综合净化过程,可使土壤恢复生产力、场地安全健康、矿区及湿地生态安全和景观美化。但是,土壤修复也是耗人力、物力和财力的过程。只有做好土壤污染防治管理工作,才能避免或减少这样的消耗。“万物土中生”,土壤质量决定万物的质量。为保障人类的食物安全和身体健康,需要实施“净土”战略,制定土壤污染的“防控修复”行动计划。这对我国这样的拥有 13 亿人口的农业大国尤为重要。这也就需要政府和社会大力支持土壤污染防治修复技术的研究,需要建立土壤修复技术应用的规范、融资机制和立法管理政策。污染土壤的修复不同于污染水体的修复,土壤中的污染物难移动、难稀释,加上土壤类型、土地利用方式和污染场地的空间分异,更需要发展场地针对性和专门化的修复技术与设备。国际上,污染土壤修复技术体系基本形成,虽然我国可以通过引进-吸收-消化-再创新来发展土壤修复技术,但是国内的土壤类型、条件和场地污染的特殊性决定了需要发展更多的具有自主知识产权并适合国情的实用性修复技术与设备,以推动土壤环境修复技术的市场化和产业化发展。全球土壤修复产业市场容量约达万亿美元,发展我国土壤修复技术与设备,不仅是土壤环境保护与技术产业化的需要,而且是使我国这一新兴产业进入国际环境修复市场竞争的需要。

## 参 考 文 献

- [1] 骆永明(Luo Y M). 中国主要土壤环境问题及对策(骆永明主编)(Soil Environmental Problems and Solutions in China. Ed. Luo Y M). 南京:河海大学出版社(Nanjing: Hehai University Press), 2008. 26—29
- [2] 骆永明(Luo Y M), 滕应(Teng Y), 过园(Guo Y). 土壤(Soils), 2005, 37(3): 230—235
- [3] 骆永明(Luo Y M). 纪念朱祖祥院士诞辰 90 周年文集(Festschrift on 90th Anniversary of the Birth of Academician Zhu Zuxiang). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 2006, 201—208
- [4] 骆永明(Luo Y M). 土壤(Soils), 1999, 31(5): 261—265
- [5] Arthur E L, Rice P J, Rice P J, et al. Crit. Rev. Plant Sci., 2005, 24(2): 109—122
- [6] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. Nature, 2001, 409: 579—579
- [7] Whicker F W, Hinton T G, MacDonell M M, et al. Science, 2004, 303(5664): 1615—1616
- [8] Mullainathan L, Arulbalachandran D, Lakshmanan G M A, et al. Plant Archives, 2007, 7(1): 19—23
- [9] Mendez M O, Maier R M. Environ. Health Persp., 2008, 116(3): 278—283
- [10] Newman L A, Reynolds C M. Curr. Opin. Biotech., 2004, 15(3): 225—230
- [11] Xu L S, Zhou S B, Wu L H, et al. Int. J. Phytoremediation, 2009, 11: 283—295.
- [12] Meers E, Tack F M G, van Slycken S, et al. Int. J. Phytoremediation, 2008, 10(5): 390—414
- [13] Roy S, Labelle S, Mehta P, et al. Plant Soil, 2005, 272(1/2): 277—290
- [14] Eapen S, D Souza S F. Biotechnol. Adv., 2005, 23(2): 97—114
- [15] Lugon-Mulin N, Zhang M, Cadani F, et al. Adv. Agron., 2004, 83: 111—180
- [16] Wu Y C, Teng Y, Li Z G, et al. Soil Bio. Biochem., 2008, 40: 789—796
- [17] 徐莉(Xu L), 滕应(Teng Y), 张雪莲(Zhang X L)等. 中国环境科学(China Environmental Science), 2008, 28(7): 646—650
- [18] 滕应(Teng Y), 骆永明(Luo Y M), 高军(Gao J)等. 环境科学(Environmental Science), 2008, 29(10): 2925—2930
- [19] Hwang H M, Hu X, Zhao X. J. Environ. Sci. Heal. C, 2007, 25(4): 313—352
- [20] Li P J, Sun T H, Stagnitti F, et al. Environ. Eng. Sci., 2002, 19(5): 277—289
- [21] Lee W J, Shih S I, Chang C Y, et al. J. Hazard. Mater., 2008, 160(1): 220—227
- [22] Jones D A, Lelyveld T P, Mavrofidis S D et al., Resour. Conserv. Recy., 2002, 34(2): 75—90
- [23] Di P, Chang D P Y, Dwyer H A. Environ. Sci. Technol., 2002, 36(8): 1845—1850
- [24] Aresta M, Dibenedetto A, Fragale C, et al. Chemosphere, 2008, 70(6): 1052—1058
- [25] Khan F I, Husain T, Hejazi R. J. Environ. Manage., 2004, 71(2): 95—122
- [26] Ma G, Garbers-Craig A M. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006, 106(11): 753—763
- [27] Paria S, Yuet P K. Environ. Rev., 2006, 14(4): 217—255
- [28] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. J. Hazard. Mater., 2008, 152(1): 1—31
- [29] Zhang W X. Nanopart. Res., 2003, 5: 323—332
- [30] Rivas F J. J. Hazard. Mater., 2006, 138(2): 234—251
- [31] Pignatello J J, Oliveros E, MacKay A. Crit. Rev. Env. Sci. Tec., 2006, 36(1): 1—84
- [32] Higarashi M M, Jardim W E. Catalysis Today, 2002, 76: 201—207
- [33] Saichek R E, Reddy K R. Crit. Rev. Env. Sci. Tec., 2005, 35(2): 115—192

- [34] De la Rosa-Perez D A, Teutli-Leon M M M, Ramirez-Islas M E. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 2007, 23 (3) : 129—138
- [35] Virkutytea J, Sillanp M, Latostenm P. *Sci. Total Environ.*, 2002, 28(9) : 97—121
- [36] Zhuang X L, Chen J, Shim H, et al. *Environ. Int.*, 2007, 33 : 406—413Z
- [37] Hickman Z A, Reid B J. *Environ. Int.*, 2008, 34 : 1072—1081
- [38] Kulik N, Gbi A, Trapido M, et al. *J. Environ. Manage.*, 2006, 78 (4) : 382—391
- [39] Nam K, Kukor J J. *Biodegradation*, 2000, 11(1) : 1—9
- [40] Alcantara T, Pazos M, Gouveia S, et al. *J. Environ. Sci. Health Pt. A*, 2008, 43 : 901—906
- [41] Maini G, Sharman A K, Sunderland G, et al. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, 34(6) : 1081—1087
- [42] Aresta M, Dibenedetto A, Fragale C, et al. *Chemosphere*, 2008, 70 (6) : 1052—1058
- [43] Liu X T, Yu G. *Chemosphere*, 2006, 63(2) : 228—235
- [44] Luo Y M, McGrath S P, Cao Z H, et al. *Proceedings of the 1st International Conference of Soil Remediation*. Hangzhou, 2000.
- [45] Luo Y M, McGrath S P, Japenga J. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Pollution and Remediation*. Nanjing, 2004
- [46] Luo Y M, Japenga J, McGrath S P. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Pollution and Remediation*. Nanjing, 2008
- [47] Rugner H, Finkel M, Kiaschl A, et al. *Environ. Sci. Policy*, 2006, 9(6) : 568—576
- [48] Chen C H, Chiou I J. *Environ. Eng. Sci.*, 2008, 25(1) : 11—32
- [49] 张红振(Zhang H Z), 骆永明(Luo Y M), 章海波(Zhang H B) 等. 中国主要土壤环境问题及对策(骆永明 主编)(*Soil Environmental Problems and Solutions in China*. Ed. Luo Y M). 南京:河海大学出版社(Nanjing: Hehai University Press), 2008, 30—35
- [50] 骆永明(Luo Y M), 滕应(Teng Y). *土壤(Soils)*, 2006, 38 : 505—508