DOI ：10. 13292<j. 1000 一4890. 2006. 0295

生态学杂志 Chinese Journal of Ecology 2006, 25(12)： 1544 〜1548

我国污染土壤修复研究现状与展望

李培军 刘 宛］孙铁術 巩宗强1付莎莎

(1中国科学院沈阳应用生态研究所，沈阳110016； $沈阳大学环境工程重点实验室，沈阳110044；

3中国科学院研究生院，北京100039)

摘 要 介绍了我国土壤污染的突出特点及其危害，回顾了污染土壤从清洁技术研究到物理、化学和 生物修复研究的历程，总结了污染土壤修复取得的初步成果，提出了污染土壤修复的实质和系统技术 方法。根据我国土壤污染的实际和修复需求，本文提出了当前本领域急需开展的研究内容，预测了污 染土壤修复研究对环境科学相关学科的推动作用。

关键词污染土壤，修复，技术体系

中图分类号X53 文献标识码A 文章编号1000—4890(2006)12—1544—05

**Remediation of contaminated soil： Its present research situation and prospect.** LI Peijun1,2, LIU Wan1, SUN Tieheng1,2, GONG Zongqiang, FU Shasha1,3 *C Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sci­ences, Shenyang* 110016, *China* ； *2Shenyang University, Key Laboratory for Environmental Engineering Research, Shenyang* 110044, *China； 3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China ). Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12)： 1544 ~ 1548.

This paper introduced the outstanding characteristics and the harmfiilness of soil contamination, looked back the research course and summarized the theoretical and applied research results in contaminated soil remedia­tion, and brought forward the essence and technologic system of this remediation in China. Aimed at the ac­tual conditions and demands of contaminated soil remediation, the urgent research contents were suggested, and the promotion effect of related research on the development of environmental sciences was predicted.

**Key words** contaminated soil, remediation,

**1**引言

土壤是人类社会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。当前，我国土壤污 染的形势已十分严峻，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品通过大气和水 体传递，可危害人类和动物的生存繁衍与生命安全。 这一过程可能比较隐蔽，但土壤污染已威胁人类的 安全。

由于土壤污染的严重性及其修复的难度，以及 对污染土壤修复的迫切性与需求，污染土壤修复已 成为当今环境科学研究的热点与极具挑战性的领 域。近20多年来，美国、德国、荷兰、英国等国家先 后投入巨大的人力、财力，深入开展了污染土壤修复 研究，在物理修复、化学修复和生物修复方面均取得 显著进展，在一些技术应用方面已进入到商业化阶 段。整个欧洲从事生物修复工程技术的研究机构和 商业公司有近百个

众多的理论和实践证明，土壤污染在一定条件

technologic system.

下是可逆的，但需要投入一定的能量和物质。随着 科学技术的进步，这种投入量可以降低到经济上接 受的程度。本文根据我国土壤污染的特点与发展趋 势，分析了污染土壤修复研究的迫切性;根据我国污 染土壤修复的需求，提出了急需开展的相关研究内 容，预测了其对环境科学与技术学科发展的贡献与 推动作用。

**2**我国的土壤污染与污染土壤修复

**21**我国土壤污染现状与污染土壤修复的迫切性 我国土壤污染状况已开始对土地资源可持续利 用与农产品生态安全构成威胁。全国受有机污染物 (农药、石油桂和PAHs)污染的农田达3.6X 107 hm2,其中农药污染面积约1.6X 107 hm2,主要农产 品的农药残留超标率咼达16% ~20%。其中因油 田开采造成的严重石油污染土地面积达IX 104 hnA石油炼化业也使大面积土地受到污染。在沈 抚石油污水灌区，表层和底层土壤多环芳炷含量有 的超过600 mg°kg\_\造成农作物和地下水的严重 污染。全国受重金属污染的农业土地约为2.5X 107 hm2,其中严重污染土地超过7X 105 hm2,有1. 3 X 104 hm2 土地因镉含量超标而被迫弃耕。我国土 壤污染目前呈现如下特点：①污染面积增加明显，一 些地区土壤污染由局部开始呈连续分布；②污染物 种类增加，复合污染特点日益突出；③污染物含量呈 增加趋势，在一些传统农业区，土壤中重金属镉超过 国家二类土壤标准的面积达35. 9%，超过国家一类 土壤标准的面积达89. 4X且部分污染物来源尚未 查清;④城市土壤污染严重，我国西南某城市土壤中 汞含量超过国家标准100倍，在东北某城市工厂废 弃地，土壤镉、铅含量也超标数百倍。必须指出的 是，目前仍无适用于不同用途的城市土壤环境质量 标准，与其相关的研究和标准的制定是该领域亟待 解决的重要任务之一。

土壤污染已造成严重的后果，全国每年因土壤 污染而损失的粮食达1. 2X IO10 kgo 土壤污染导致 农产品品质下降，危害人体健康。在沈阳市西部原 张士镉污染区，糙米镉含量最高达到2.6 mg °kg-\ 是食品中镉限量卫生标准（大米W0.2 mykgT）的 13倍;9种蔬菜平均含镉量为0. 76 mg °kg-\比对 照区（0. 135 mg^kg"1）高5. 6倍。土壤污染还导致 大气和水体环境污染。土壤污染具有典型的定时炸 弹性质，一旦大面积爆发，将会对国家可持续发展造 成难以估量的影响，因此必须对土壤污染的预防和 污染土壤修复予以高度重视［4Ubl2］。

*2. 2*污染土壤修复的内涵与技术体系

污染土壤修复是指利用物理、化学和生物方法， 转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物，使其浓度 降低到可以接受的水平，或将有毒有害的污染物转 化为无害的物质。污染土壤修复的技术原理包括: 改变污染物在土壤中的存在形态或同土壤的结合方 式，降低其在环境中的可迁移性与生物可利用性;降 低土壤中有害物质的浓度。

根据工艺原理不同，污染土壤修复方法可分为 物理、化学和生物3种类型。其中，物理方法主要包 括物理分离法、溶液淋洗法、固化稳定法、冻融法和 电动力法;化学方法主要包括溶剂萃取法、氧化法、 还原法和土壤改良剂投加技术等生物修复方 法是污染土壤修复的主体，可分为微生物修复、植物 修复和动物修复3种代2化其中以微生物与植物修 复应用最为广泛。同物理化学方法相比，生物修复 具有可基本保持土壤的理化特性、污染物降解完全、 处理成本低和应用广泛的特点。生物修复的局限性 包括污染物种类的局限性、受环境因素的影响大、修 复时间长等。可通过与物理化学方法相结合，来解 决生物修复的局限性⑴刃。

**2.3**污染土壤生物修复研究回顾

鉴于土壤污染的危害，世界各发达国家均开展 了污染土壤治理与修复。最早大规模应用生物修复 技术的是美国阿拉斯加（1989年）。油轮搁浅造成 3. 8X 104 t原油泄漏，当地采用多种物理、化学和生 物的方法，治理原油污染。实践表明，3种方法以生 物方法最为有效，在投入了特殊的氮、磷营养盐以 后，促进了土著石油降解菌生长和繁殖，加速了油污 的降解。荷兰在20世纪80年代花费了约15亿美 元进行土壤修复工作，德国在1995年投资约60亿 美元净化土壤。美国20世纪90年代用于污染土壤 修复方面的投资约有数百亿到上千亿美元⑴o

我国从20世纪70年代起，以土壤植物系统污 染生态学理论为基础，坚持生物修复为主、生物修复 同物理化学修复相结合的技术路线，开展了有机、无 机污染土壤的调查与修复研究。主要研究进展包 括：1）针对石油污染物生物修复技术开展了降解微 生物的筛选、驯化和活性监测，污染土壤残油的定量 分析、生物降解过程中环境因子调控等。2）在石油 污染物的生物降解性、降解机理、限制性因素以及降 解动力学模型等方面取得了显著的研究成果。90 年代以来，我国科技工作者综合生态学、土壤学、微 生物学、生态毒理学、环境化学、工程学的理论和方 法，以石油、多环芳桂（PAHs）和重金属污染土壤为 研究对象，开展了生态毒理学、生物修复技术和污染 生态工程技术研究，提出了以土壤为研究对象的生 态毒理学实验方法，建立了以生物泥浆反应器和预 制床堆腐技术为主体的有机污染土壤异位生物修复 技术体系，为复合污染条件下土壤环境质量标准制 定提供了理论依据249,13］。研究发现，微生物固定 化技术可以提高引进微生物在土壤中种群与数量的 稳定性，可显著提高修复效率。经理想载体固定化 的细菌和真菌，对PAHS的降解效率分别提高10% 〜30%® 20,21］。

目前，我国污染土壤修复研究正经历由实验室 研究向实用规模过渡阶段，即将进入一个快速发展

时期。进入21世纪以来，相关领域的科学技术人员 在一些典型污染地区，进行了实用规模的污染土壤 原位和异位生物修复实验。例如，利用微生物固定 化技术和菌根技术在沈抚灌区开展污染土壤原位修 复实验，在辽河油田进行了实用规模的预制床异位 生物修复试验等［绚。

我国对污染土壤的植物修复研究起步较晚，但 近几年来进展很快。碑、铜、锌等重金属和**POPs**污 染土壤的植物修复技术取得了许多研究成果，并且 已引起国家有关管理部门的高度重视。王国栋 等⑺培育了能够分泌漆酶和转化三氯苯酚的转基 因植物，初步建立了三氯苯酚等有机污染物体外植 物修复的生物技术;何玉科等"］从植物上分离出多 种有生物转化和降解能力的基因，培育了富集汞和 抗有机汞的转基因烟草;陈同斌等⑸从植物上分 离出碑代谢基因〔® ;魏树和等小］已筛选出多种重 金属超富集植物。这些成果为今后深入研究污染土 壤植物修复、植物-微生物联合修复技术，尽快建立 实用规模的土壤污染控制与修复工程提供了良好的 理论基础和技术。

**3**污染土壤修复的研究趋势

**3. 1**复合污染土壤的溶剂淋洗/萃取-微生物修复

在此项技术中需要进一步研究的内容主要有: ①筛选萃取剂。包括微生物菌液生物萃取剂，有机、 无机萃取剂，植物油脂萃取剂；②研究土壤类型、理 化性质对有机、无机污染物的萃取效果的影响;③研 究不同萃取剂对不同类型污染土壤的修复效果，以 及污染物从土壤向萃取液的转移机理和过程；④对 于长期污染土壤，研究封锁与老化程度对萃取的影 响，不同萃取液和表面活性剂对土壤闭锁污染物的 活化和修复效果；⑤微生物修复方法作为萃取修复 后续修复的可行性，包括土壤残余萃取剂对微生物 活性和修复效果的影响，萃取过程对残余有机污染 物生物可给性的效应，萃取工艺和生物修复工艺的 最佳耦合方式**［2**厶**24］**。

**3.2**引进微生物与土著微生物共存条件与固定化 方法

此方面需要进一步研究的内容主要有:①引进 同土著微生物的竞争机制和引进微生物的退化原 因；②引进同土著微生物稳定共存条件和生态环境 因子调控;③筛选实用的固定化载体，并确定复合污 染条件下微生物的固定方式，将微生物细胞和酶固 定化方法应用于实用规模的有机复合污染土壤原位 修复和异位修复中；④深入了解固定化条件下微生 物的形态学与生理学特性，阐明固定化介质中污染 物扩散以及同微生物作用的过程，建立微环境下生 物膜反应动力学模型；⑤加氧酶、过氧化物酶、漆酶 及其固定化在难降解有机物污染土壤修复中发挥着 重要的作用，应通过实验确定优势降解微生物的最 佳固定化条件、催化活性、抗逆性以及在厌氧与兼性 条件下对有机氯和**PAHS**污染土壤的修复效果，并 确定过氧化酶催化修复污染土壤的最适宜环境条 件

**3.3**有机污染物的光降解与生物修复联合作用机 理

由于不同光谱对土壤中高分子量的多环芳炷和 多氯联苯类污染物的降解效果存在着差异，所以需 要通过不同光源和光照强度对污染物降解效果的影 响实验，以及不同分子量多环芳炷和多氯联苯类污 染物对光降解的敏感程度实验，研究和确定土壤介 质中污染物的光降解反应动力学与主要中间产物及 土壤矿物对光降解的调控因子与催化作用机理。此 外，应重视土壤类型、污染物浓度和环境条件对光降 解作用机理和降解效果的影响，正确选择光降解同 生物修复的最佳耦合条件。

**3. 4**复合污染条件下植物与微生物协同修复原理

此方面需要进一步研究的内容主要有:①复合 污染条件下植物和菌根真菌对典型有机污染物的修 复作用；②筛选能同时降解多环芳炷和多氯联苯的 多种菌根真菌；③研究菌根真菌-宿主植物-菌根根 际微生物对污染物的协同作用机理；④在炷类和联 苯类污染物存在下假薄壁组织的形成及其对污染物 降解的作用；⑤菌根根际微生物种群、密度、生理活 性与稳定性;⑥不同污染物种类和浓度对菌根根际 物质和能量流动的影响；⑦典型污染物降解的指示 标记物;⑧建立重金属与多环芳炷复合污染条件下 菌根真菌对重金属的抗性及其特性表述指标;⑨明 确重金属存在条件下菌根真菌对有机污染物的净化 功能，以及菌根真菌对有机无机复合污染的修复功 能与原理。

**3.5** 土壤复合污染的化学还原-微生物降解修复原 理

此方面需要进一步研究的内容主要有:①筛选 土壤介质中降解多氯联苯的优势菌和共代谢底物， 确定缺氧与厌氧条件下多氯联苯降解的电子受体和 碳源;②研究厌氧修复动力学过程，厌氧修复的中间 产物及其毒性［⑴；③研究多氯联苯污染土壤厌氧修 复与厌氧-好氧修复的机理和修复效果，不同多氯联 苯组分和场地电子供体对修复的影响，电子供体与 电子受体的投配时间与配置，场地条件对修复效果 的影响；④对比不同0价胶态金属对还原脱氯的影 响，研究缶与0价胶态金属对还原脱氯的协同效 应，注入速率和浓度变化对脱氯的影响，以及场地条 件特别是pH和Eh对脱氯的作用，探讨0价胶态金 属修复的活性栅技术。

**3.** *6*有机复合污染土壤修复的生物反应器机理 此方面需要进一步研究的内容主要有：①利用 微生物细胞固定化技术，建立实用规模的有机污染 土壤修复的生物反应器（BSR），深入研究污染土壤 连续性修复的可能性。反应器类型以搅拌泥浆反应 器和流化床反应器为主。②研究反应器中细胞的固 定化方法与微生物模块，泥浆中固体物和营养物的 最佳配比，细胞存活率的需求与再生，反应条件与流 速控制0］。在化学物理方法与生物方法相结合时， 生物方法应放在末端，因为物理化学修复方法往往 意味着资源的回收，而生物修复可消除物理、化学方 法对土壤理化性质带来的某些影响。

**3. 7**建立污染土壤生态修复的理论与技术体系 由于土壤污染大多属于复合污染，而单一修复 方法难以解决复合污染土壤修复问题，所以不同修 复方法的组合是污染土壤修复的实际需求。两种乃 至多种方法的组合已难以用单一的物理、化学、生物 名称来描述。把多种修复方法涵盖在统一系统之 内，是污染土壤修复理论研究和应用的需要。

当人们对物理、化学和生物修复给予更多关注 时，系统的自净功能常常被疏忽和遗忘。实际上，当 污染物浓度限制在一定程度时，系统本身的调节与 净化功能也可使污染物得以去除。物理化学和生物 修复意味着把大量能量、化学品和生物体投入到被 污染的环境介质和生态系统，在消除污染的同时，这 种投入也有可能带来新的不良影响。修复方法的优 化，不仅包括不同修复方法之间的优化组合，更包括 了系统内在修复功能同外加修复功能的有机结合， 其目标是寻求修复效果与投入的最佳结合。

污染物减量已不再是污染修复的唯一目标。污 染物减量只能消除污染土壤作为污染“源”的作用。 人们对修复目标的描述开始变得更为全面，已将其 扩展到系统生态服务功能的全面恢复。这种多功能 目标的实现必将对修复方法提出更高的要求。由于 污染土壤修复理论与实践的快速发展，人们迫切需 要对修复方法的构成、不同修复方法结合的原理与 工艺、修复目标的设置及实现进行深入研究，生态修 复概念的提出正是对这一研究的促进和重要进展。

**4**前景与展望

**4.1**若干重点污染物的土壤环境基准

应该看到，同水和大气环境质量标准相比，土壤 的有关标准仍然是不完善的。一些国家（如美国、英 国、德国、荷兰等）已经给出一些重点污染物的污染 控制建议标准，而我国在这一方面则刚刚起步。随 着土壤污染和污染土壤修复研究的开展，人们必然 会提出这样的问题，即土壤污染到何等程度需要治 理，治理到何等程度可结束等。这一问题必然涉及 到若干重点污染物的土壤环境基准问题，特别是城 市污染土壤不同用途的环境标准及其评价方法;对 污染土壤生态毒理学诊断和预警的研究（如用于土 壤污染诊断的生物标记物研究等）也将是一个极大 的推动阳。

**4.2**环境微生物学

微生物同污染物之间的相互作用对于生物修复 来说是一个极为重要的问题，它包括了微生物对污 染物的降解作用、解毒作用和对污染物的毒性激活 作用，也包括了污染物化学结构对微生物活性的影 响，即污染物对微生物的毒性和不同污染物之间生 物可利用性的差异。这些问题对污染土壤修复有着 极大的影响。

应用基因工程菌，可望解决许多通常条件下难 以解决的问题，如可以把只能通过共代谢转化的污 染物作为唯一碳源和能源，创造新的分解代谢途径， 减少污染物对微生物的毒害作用等。通过基因重组 的方法已使得基因工程菌在污染土壤修复中的应用 成为可能。但是，必须考虑工程菌应用的生态安全 问题,特别是在野外实用规模应用时更是如此。

**4. 3**环境工程学

污染土壤生物修复研究的开展，对于环境工程 学也将是一个有力的推动，它将成为一种新兴环保 产业。在一些国家，污染土壤和地下水修复己占环 保产业产值的15%以上，并保持强劲的增长势头。

我国是土地资源短缺的国家，土壤污染更加剧 了短缺的严重程度。对已污染的土地资源开展有效 修复，是解决这一问题的有效途径之一。因此，应当 继续深入开展污染土壤修复研究，将科学研究成果 尽快转化为生产力，尤其是发展以污染土壤修复的 生物材料、修复设备及成套技术，发展污染土壤修复 环保产业，为我国土地资源保护与可持续利用提供 理论依据与技术支持。

参考文献

1. 马文漪，杨柳燕.1998.环境微生物工程[M].南京：南京大 学出版社.
2. 王国栋，陈晓亚.2003.漆酶的性质、功能、催化机理和应用 [J].植物学通报，20(4)： 469 -475.
3. 王新，宋守志，梁吉艳，等.2004.固定化微生物菌种的筛 选与鉴定[J].环境污染治理技术与设备，5(10)： 20〜22.
4. 孙铁玷，李培军，周启星.2005. 土壤污染形成机理与修复 技术[M].北京：科学出版社.
5. 孙铁玷，宋玉芳.2002. 土壤污染的生态毒理诊断[J].环境 科学学报，**22**(6)： 689 ~695.
6. 李培军，孙铁玷，巩宗强，等.2006.污染土壤生态修复理论 内涵的初步探讨[J].应用生态学报，17(4)： 747 -750.
7. 李彬，李培军，王 晶，等.2003.重金属污染土壤毒性的 发光菌法与斜生栅藻法诊断[J] . 土壤通报，34(5)： 448〜 451.
8. 张 从，夏立江.2000.污染土壤生物修复技术[M].北京： 中国环境科学出版社.
9. 宋玉芳，周启星，许华夏，等.2002.菲、瓦、1,2,4-三氯苯对 土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应[J].生态学报，**22** (11)： 1945 -1950.
10. 陈同斌，韦朝阳，黄泽春，等.2002. W超富集植物是蟆蚣草 及其对碑的富集特征•科学通报，47(3)： 207-210.
11. 周启星，宋玉芳.2004.污染土壤修复原理与方法[M].北 京：科学出版社.
12. 高拯民.1986. 土壤-植物系统污染生态研究[M].北京：中 国科学技术出版社.
13. 龚平，李培军.1997. Cd、Zn、菲和多效醴复合污染土壤的 微生物生态毒理效应[J].中国环境科学**，17(1)：** 58〜62.
14. 魏树和，周启星，王 新，等.2003.杂草中具重金属超富集 特征植物的筛选[JJ.自然科学进展，13(12)： 1259〜1265.
15. 魏树和，周启星，王 新.2005.超积累植物龙葵及其对镉

的富集特征[J].环境科学，26(3)： 167〜171.

1. Arnold WA, Roberts AL. 1998. Pathways of chlorinated ethy­lene and chlorinated acetylene reaction with Zn (0) [ J] . *Envi­ron .Sci. Technol.,* **32：** 3017 ~3025.
2. Dutta TK, Harayama S. 2000. Fate of crude oil by the combi­nation of photooxidation and biodegradation [ J] . *Environ . Sci. Technol.,* 34： 1500 ~ 1505.
3. Feron VJ, Groten JP. 2002. Toxicological evaluation of chemi­cal mixture [ J] . *Food Chem . Toxicol.***, 40：** 825 ~839.
4. He YK, Sun JG, Feng XZ, *et al.* 2001. Differential mercury volatilization by tobacco organs expressing a modified bacterial merA gene [ J] . *Cell Res.,* **11** (3 )： 231 ~236.
5. Li PJ, Sun TH, Stagnitti F, *et al.* 2002. Field scale bioremedi­ation of soil contaminated with crude oil [ J] . *Environ. Eng. Sci.,* 19(5)： 277 -289.
6. Li PJ, Wang X, Stagnitti F, *et al.* 2005. Degradation of phenanthrene and pyrene in soil slurry reactors with immobilized bacteria *Zoogloea* sp. [ J] . *Environ . Eng. Sci.,* **22** (3 )： 390 〜399.
7. Mann MJ. 1999. Full scale and pilot scale soil washing *[J] . J. Hazard. Mater.*, 66(1-3 )： 119 - 136.
8. Steinle P, Stucki G, Bachofen R, *et al.* 1999. Alkaline soil ex­traction and subsequent mineralization of 2, 6-Dichlorophenol in a fixed-bed bioreactor [ J] . *Bioremediat. J.***, 3(3)：** 223 ~232.
9. Udell KS, Grubb DG, Sitar N. 1995. Technologies for in situ cleanup of contaminated sites [ J] . *Cent. Eur. J. Public Health,* 3(2)： 67~76.
10. Wiles CC. 1987. A view of solidification/stabilization technology [J] . *J. Hazard. Mater.***, 14：** 5 ~21.
11. Wilson SC, Jones KC. 1993. Bioremediation of soil contaminat­ed with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs)： A review [J] . *Environ . Pollut.,* **81：** 229 ~249.
12. Wise DL, Trantolo DJ, Cichon EJ, *et al.* 2000. Bioremediation of Contaminated Soil [ M] . New York, Basel： Marcel Dekker, Inc.

作者简介 李培军，男，1950年生，研究员，博士研究生导 师。主要从事污染生态学和环境科学研究，发表论文140余 篇 o E-mail： lipeijun @ae. ac. cn

责任编辑梁仁禄

\*国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418506)、国家自然科学 重点基金(20337010 )和国家高科技研究发展计划资助项目 (2004AA649060)。

\* \* \*通讯作者

收稿日期：2005-07- 18 接受日期：2006-09-28