

农业科学技术领域发展态势报告

NONGYEKEXUEJISHU
LINGYU
FAZHANTAISHI
BAOGAO

土壤污染修复领域 发展态势分析

串丽敏 郑怀国 等著



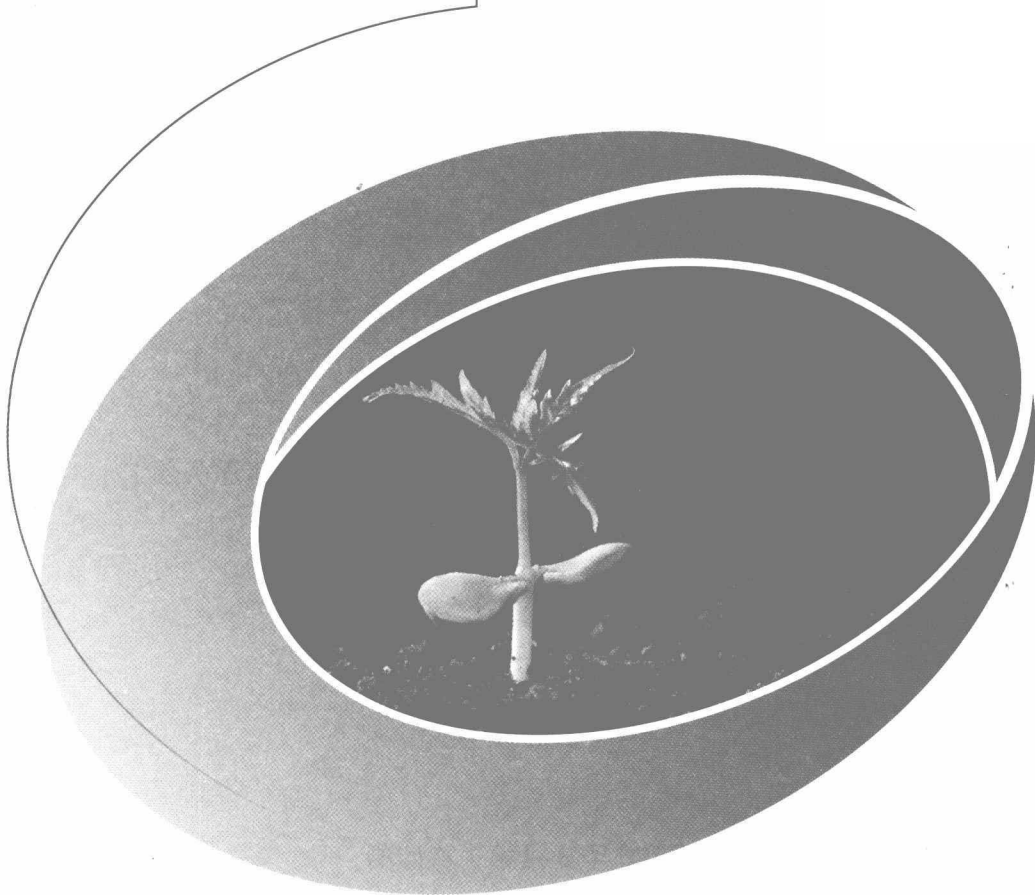
中国农业科学技术出版社

农业科学技术领域发展态势报告

NONGYEKEXUEJISHU
LINGYU
FAZHANTAISHI
BAOGAO

土壤污染修复领域 发展态势分析

串丽敏 郑怀国 等著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤污染修复领域发展态势分析 / 串丽敏, 郑怀国等著. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5116-2163-4

I. ①土… II. ①串… ②郑… III. ①土壤污染 - 污染防治 - 研究
IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 148480 号

责任编辑 徐毅

责任校对 马广洋

出版 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电话 (010) 82106631 (编辑室)

(010) 82109702 (发行部) (010) 82109709 (读者服务部)

传真 (010) 82106631

网址 <http://www.castp.cn>

经销 各地新华书店

印刷 北京华忠兴业印刷有限公司

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 8.25

字数 190 千字

版次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定价 68.00 元

《土壤污染修复领域发展态势分析》

参著人员

串丽敏 郑怀国 孙素芬 张峻峰 赵静娟

张晓静 颜志辉 谭翠萍 龚晶 孟鹤

赵姜 秦晓婧 汪十红 张辉

序

情报研究是科学决策的基础，农业情报研究具有辅助农业生产决策，促进农业宏观经济健康发展的重要作用。发展态势分析是情报研究的一项重要内容，是针对某一学科或技术领域，全面剖析该学科或技术领域的政策环境、研究动态和发展趋势，提出未来发展的对策与建议，为制定科技发展战略、开展科学研究提供决策参考的一种深层次的情报服务。

当今世界，科技发展日新月异，科技信息飞速激增，如何在海量信息中准确把握学科或技术领域的发展趋势，做出科学的决策，是科研及管理人员面临的困扰。科学决策是以事实和数据为依据，以情报分析为手段，提出问题、分析问题、解决问题的一个完整动态过程，发展态势分析是辅助科学决策的一种有效手段。

为了明确当前农业各领域在世界范围的研究布局 and 水平，提高我国农业科技自主创新能力，北京市农林科学院农业科技信息研究所选择农业科技创新前沿学科、热点问题和重点技术领域，结合世界农业发展现状与北京市农业发展方向，开展了多个学科技术领域的发展态势分析，从世界主要国家政策、法规、科技项目、技术研究进展等角度开展定性调研，并与情报学定量分析方法相结合，从论文和专利角度，分析主要学科领域在世界范围的研究布局，筛选出核心技术或研究热点，分析关键技术的研发水

平及主要应用领域，剖析农业科研重要技术领域的国际发展态势，并结合我国农业发展现状提出本领域的战略规划与建议，最终以《农业科学技术领域发展态势报告》形式公开出版。

该系列报告将情报服务的新理论和新方法应用于农业科学决策，有助于全面提升农业科技情报服务水平，并进一步面向前沿、面向需求、面向决策，推动科技情报分析和决策咨询研究。同时，该书也可为农业科技人员及科研管理人员在把握科技发展新趋势、新动向、开展农业科研发展规划、对接国际农业科技前沿等方面提供重要决策与参考。

该报告的撰写得到北京市科委、北京市农委、北京市农林科学院领导和相关科研管理部门的大力支持，得到相关科技领域专家、学者的指导，在此表示诚挚谢意！也衷心希望在相关部门和专家学者的支持下，农业科技情报研究工作在支撑农业科学研究及农业发展战略研究方面发挥不可替代的重要作用。

孙素芬

2015年5月

前 言

土壤作为陆地生态系统重要组成部分，是人类和动物居住不可替代的环境因子，也是食物安全与人体健康的基本保障，在环境保护和维持生态平衡中具有重要作用。土壤有着其自身的净化能力和对污染物的缓冲能力，同时也受其负载容量的限制。当土壤中含有有害物质过多，超过土壤自净和缓冲能力时，就会引起土壤的组成、结构和功能发生变化，微生物活动受到抑制，有害物质或其分解产物在土壤中逐渐累积，造成土壤污染。

2013年年底，环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，全国土壤环境状况总体不容乐观，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。加强土壤污染防治是深入贯彻落实科学发展观的重要举措，是构建国家生态安全体系的重要部分，是实现农产品质量安全的重要保障，是新时期环境保护工作的重要内容。面对严峻的土壤污染形势，如何从政策供给、法规制定、标准管理、技术创新等角度提供决策支持与情报支撑，是农业科技情报人员面临的艰巨任务。因此，本课题组历时近两年时间开展了土壤污染修复领域发展态势研究方面的工作，撰写本书以供相关科技、企业和管理人员参考。

本书是《农业科学技术领域发展态势报告》的第一卷，共分为四章。第一章从土壤污染源解析出发，定性调研国内外在土壤环境保护领域的相

关政策法规、目标和行动，比较当前国内外土壤环境质量标准，综述土壤污染修复技术发展历程，介绍当前在土壤污染修复技术上的研究进展，着重阐述国内外在土壤污染防治技术上已有的一些方法与实践，提出今后土壤污染修复领域的发展方向。第二章和第三章采取定性调研与定量分析相结合的方法，基于科学引文索引数据库和德温特专利数据库对土壤污染修复领域的研究论文和专利进行计量学统计，分析该领域在世界范围的研究布局，探讨其研究重点与发展趋势；第四章总结基于论文和专利数据库的分析结果，并针对中国与世界主要发达国家和地区存在的差异，提出中国在土壤污染修复领域发展的方向与建议，为土壤环境学科的发展、研究布局的规划以及我国土壤污染修复技术的创新、政府管理部门决策的制定提供参考与借鉴。

本书的撰写得到了北京市科委、北京市农委、北京市农林科学院领导和相关科研管理部门的大力支持。在撰写过程中，相关人员参阅了多个政府机构、国际组织以及知名研究机构的公开报告，参考了大量中外文文献，由于篇幅所限，未在正文中全部标注，谨表歉意。同时，土壤环境领域的多位专家全程参与研究和指导，在此向他们付出的辛勤劳动表示衷心感谢！

由于时间和水平有限，本书难免存在不足之处，敬请批评指正。

作者

2015年5月

目 录

第一章 土壤污染修复领域研究进展 / 1

- 一、概述 / 1
- 二、土壤污染物种类及来源 / 2
 - (一) 化学污染物 / 2
 - (二) 物理污染物 / 3
 - (三) 生物污染物 / 3
 - (四) 放射性污染物 / 3
- 三、土壤环境管理政策与法规 / 3
 - (一) 美国 / 4
 - (二) 加拿大 / 5
 - (三) 日本 / 7
 - (四) 欧洲 / 8
 - (五) 中国 / 11
 - (六) 启示 / 16
- 四、土壤质量标准概述 / 17
 - (一) 国外土壤质量标准 / 19

- (二) 中国土壤质量标准 / 23
- (三) 土壤质量标准研究进展 / 32
- (四) 土壤环境质量标准比较 / 38
- (五) 存在的主要问题 / 39
- 五、土壤污染防治与修复技术进展 / 41
 - (一) 土壤污染防治措施 / 41
 - (二) 土壤修复技术发展阶段 / 42
 - (三) 土壤修复技术研究进展 / 43
- 六、土壤污染修复产业 / 52

第二章 基于 SCI 论文的土壤污染修复领域发展态势分析 / 57

- 一、数据来源与分析方法 / 57
- 二、基于论文数量的分析 / 58
 - (一) 发文量及年度变化分析 / 58
 - (二) 主要国家总发文量分析 / 58
 - (三) 主要国家年度发文量分析 / 59
 - (四) 来源期刊分析 / 60
 - (五) 论文被引频次分析 / 62
 - (六) 重要研究机构分析 / 78
 - (七) 项目资助来源分析 / 81
 - (八) 研究人员分析 / 82
- 三、基于领域主题的分析 / 84
 - (一) 研究领域分析 / 84
 - (二) 研究主题分析 / 85
- 四、小结 / 87

第三章 基于专利的土壤污染修复领域发展态势分析 / 89

- 一、数据来源与分析方法 / 89
- 二、专利申请宏观态势分析 / 90
 - (一) 专利申请数量及年度变化趋势 / 90
 - (二) 专利申请受理机构分析 / 90
 - (三) 专利优先权国家分布 / 93
 - (四) 主要申请机构分析 / 94
- 三、专利技术发展与布局分析 / 95
 - (一) 学科领域分析 / 95
 - (二) 技术布局分析 / 97
- 四、高被引专利分析 / 102
- 五、小结 / 104

第四章 主要结论与展望 / 107

- 一、主要结论 / 107
- 二、建议与展望 / 108
- 三、结语 / 112

参考文献 / 113

第一章

土壤污染修复领域研究进展

一、概述

土壤作为陆地生态系统重要组成部分，是人类和动物居住不可替代的环境因子，也是食物安全与人体健康的基本保障，在环境保护和维持生态平衡中具有重要作用。作为一个有生命的活的自然体，土壤有着其自身的净化能力和对污染物的缓冲能力，但是，也受其负载容量的限制。当土壤中含有有害物质过多，超过土壤自净和缓冲能力时，就会引起土壤的组成、结构和功能发生变化，微生物活动受到抑制，有害物质或其分解产物在土壤中逐渐累积，造成土壤污染。

近年来，由于工业、农业生产等一系列人为活动的影响造成土壤负荷加大，土壤污染日益严重，致使粮食和蔬菜等必需品品质下降，并且直接危害人类健康。随着社会经济快速发展，我国土壤环境面临严重的污染问题，主要包括铬（Cr）、镉（Cd）、铅（Pb）、汞（Hg）、砷（As）、铜（Cu）、锌（Zn）和镍（Ni）等重金属以及持久性有机污染物、病原微生物或放射性物质含量超标。土壤污染通常被称作“隐身杀手”，由于其污染类型多样、污染途径复杂，且潜伏期长，迁移性差，因此，修复难度更大。2013年年底，环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》数据显示，我国耕地总面积为20.3亿亩（15亩=1公顷。全书同），但由于生态承载问题日益突出，全国受到中重度污染导致不宜耕种的土壤面积约为5000万亩，适宜稳定利用的耕

地约为 18 亿亩；全国土壤总超标率为 16.1%，其中，轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 11.2%、2.3%、1.5% 和 1.1%。污染类型以无机型为主，有机型次之，复合型污染比重较小，无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%。可见，全国土壤环境状况总体不容乐观，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出（国土资源部等，2013）。

面对严峻的土壤污染形势，如何治理已成为当今农业、生态和环境科学领域研究的热点。土壤污染修复是利用物理、化学或生物学方法将土壤污染物清除出土体或将其固定在土壤中，以降低其迁移性和生物有效性，降低其健康威胁和环境风险。为实现农田的可持续利用，保障人民获得充足且安全的食材，迫切需要研究并提出经济、高效、可行的土壤污染修复技术。

本文笔者从土壤污染源解析出发，定性调研国内外在土壤环境保护领域的相关政策法规、目标和行动，比较当前国内外土壤环境质量标准，综述土壤污染修复技术发展历程，介绍当前在土壤污染修复技术上的研究进展，着重阐述国内外在土壤污染防治技术上已有的一些方法与实践，提出今后土壤污染修复领域的发展方向。同时，采取定性调研与定量分析相结合的方法，基于科学引文索引扩展版数据库（Science Citation Index Expanded, SCIE）和德温特专利数据库（Derwent Innovations Index, DII）对土壤污染修复领域的研究论文和专利进行计量学统计，分析该领域在世界范围的研究布局，探讨其研究重点与发展趋势，针对中国与世界主要发达国家和地区存在的差异，提出中国在该领域发展的方向和建议，为土壤环境学科的发展、研究布局的规划以及为我国土壤污染修复技术的创新、农业环境保护和政府管理部门决策的制定提供参考与借鉴。

二、土壤污染物种类及来源

土壤污染物种类繁多，按照性质主要可分为以下几类。

（一）化学污染物

化学污染物包括无机污染物和有机污染物。前者包括汞、镉、铅、砷等重金属以及过量的氮、磷植物营养元素以及氧化物、硫化物和氟化物等；后者包

括各种化学农药、农膜、除草剂、洗涤剂、石油及其裂解产物以及酚类等其他各类有机合成产物。

（二）物理污染物

物理污染物主要包括来自工厂、矿山的固体废弃物如尾矿、废石、粉煤灰和工业垃圾等。在某些矿床或元素和化合物的富集中心周围，由于矿物的自然分解与风化，往往形成自然扩散带，使附近土壤某些元素含量超出土壤环境质量限定值，造成污染。

（三）生物污染物

生物污染物包括带有各种致病菌的城市垃圾和由卫生设施排出的废水、废物和厩肥等。畜禽粪便的肆意堆放以及污水灌溉，其中的寄生虫、病原菌和病毒，如肠道细菌、炭疽杆菌、肠寄生虫、结合杆菌等均可引起土壤污染。

（四）放射性污染物

放射性污染物主要存在于核原料开采和大气层核爆炸地区，以⁹⁰锶和¹³⁷铯等在土壤中生存期长的放射性元素为主。

另外，依据的角度不同，分类也有所差异。根据环境中污染物存在的状态，可分为单一污染、复合污染及混合污染等。依污染物来源，可分为农业物资（化肥、农药、农膜等）污染型、工企三废（废水、废渣、废气）污染型及城市生活废物（污水、固废、烟/尾气、废旧电池等）污染型。按污染场地（所），可分为农田、矿区、工业区、老城区及填埋区等污染场区。按照污染物属性，又可分为人为污染源和自然污染源。

三、土壤环境管理政策与法规

土壤污染在很多国家普遍存在，已经成为环境发展的主要障碍和经济发展的瓶颈。然而，土壤污染的管理有经验可循，很多发达国家，诸如美国、加拿大、日本和欧盟成员国等，均在土壤污染管理方面积累了丰富的经验，制

定了可行、有效的土壤管理框架。本部分将述评美国、加拿大、日本和欧盟主要成员国（英国、荷兰和德国）在土壤环境质量管理方面相关的政策、法规和标准，总结可能对中国土壤管理具有积极意义的国际经验，有助于中国制定适合当前国情的土壤污染管理框架、政策和法律法规，找到解决土壤污染修复、管理和再开发的重要途径。

（一）美国

在美国，污染场地引起政府和公众的关注源自 20 世纪 70 年代末的一系列危害巨大、影响恶劣的环境事故，如拉夫运河事件^①、时代海滩事件和鼓谷事件。为应对这些环境灾难，美国国会 1980 年通过了《综合环境反应、赔偿与责任法案》（Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA）。由于该法案制定了设立特别信托基金的条款，因而通常又被称为《超级基金法》。《超级基金法》确立了“污染者付费原则”，规定不同当事人（在法律上被定义为“潜在责任方”）承担修复历史上被污染场地的责任。此外，《超级基金法》授权美国环境保护署，可以强制任一潜在的责任方支付场地的修复费用，包括不在土地被污染时期经营该块土地的所有者。场地修复费用的分担和责任的分摊将在各潜在责任方之间解决。《超级基金法》及其修正法案和相关计划共同构成了美国污染场地管理框架（袁建霞等，2011）。

但是，《超级基金法》也存在着不足，包括引起大量的法律诉讼，使小企业承受不公平的负担，州政府和当地社区的参与不充分（主要行动由联邦政府负责），特别是由于潜在的责任方可能承担无限的且不确定的责任，这使得投资者和开发商望而却步，致使场地闲置，无法开发，最终变成棕地（又称污染场地）。该法的这些缺点，已逐步通过对超级基金计划的多轮修正和改革得以纠正，其中，包括 2002 年的《小规模企业责任减轻和棕地振兴法》和其他与

^① 拉夫运河位于美国加州，是为修建水电站挖成的一条运河，20 世纪 40 年代干涸被废弃。1942 年，美国一家电化学公司购买了这条大约 1 000 米长的废弃运河，当作垃圾仓库来倾倒大量工业废弃物，持续了 11 年。1953 年，这条充满各种有毒废弃物的运河被公司填埋覆盖好后转赠给当地的教育机构。此后，纽约市政府在这片土地上陆续开发了房地产，盖起了大量的住宅和一所学校。从 1977 年开始，这里的居民不断发生各种怪病，孕妇流产、儿童夭折、婴儿畸形、癫痫、直肠出血等病症也频频发生。1987 年，这里的地面开始渗出含有多种有毒物质的黑色液体。

棕地有关的多个项目和计划。修改后的《超级基金法》受到各利益方的欢迎，这些修正和改革正是对发展中国家具有实际意义和可借鉴的经验。

此外，美国《超级基金法》的经验教训还包括污染场地的修复成本很高，控制现有污染扩散等科学的管理比场地修复更为有效。《超级基金法》规定了污染场地的两类反应行动。

1. 清除行动 (Removal actions)

为典型的短期反应行动，指从环境中清除已经泄漏或即将泄露的危险物质的紧急应急行动。根据时间紧迫程度，清除行动可分为：(1) 紧急性 (emergency)；(2) 时间紧迫性 (time-critical)；(3) 非时间紧迫性 (non-time-critical)。清除反应通常是针对局部的环境风险展开，如含有危险物质的弃桶，对人体健康或环境构成极大风险的表层污染土壤等。

2. 修复行动 (Remedial actions)

相对于清除行动，修复行动通常是指长期的反应行动。修复行动将永久和显著地减少因危险物质释放或释放威胁所构成的风险。尽管修复行动涉及的环境风险比较严重，但是，不像清除行动那样具有时间紧迫性。修复行动的措施包括阻止污染物的转移和有毒物质发生化学反应等措施 (龚宇阳, 2010)。

同时，美国的《固体废物处置法》、《清洁水法》、《安全饮用水法》、《有毒物质控制法》等法律也涉及土壤保护，形成了较为完备的土壤保护和污染土壤治理法规体系。

(二) 加拿大

加拿大的土壤保护法一般由省级政府制定，不同省份的法规不尽相同。不过，大多数省份的法规都具备如下特点：污染者付费原则；污染者责任可追溯力；出于控制污染行动或污染场地的考虑，非污染者也可能被追究责任；个人责任，在某些情况下公司主要管理人员和股东将承担相应责任。实际上，加拿大的污染场地法规与美国的《超级基金法》非常相似。

在联邦政府层面，设立了一个跨省的协调委员会，即加拿大环境部长理事会 (Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)，该委员会制定了许多与污染场地相关的技术指南。加拿大环境部长理事会于 1989 年 (美

国《超级基金法》通过之后的第9年)迈出了处理污染场地问题的重要一步,即建立了《国家污染场地修复计划》(National Contaminated Sites Remediation Program, NCSRP),以提供人力与资金支持对联邦管辖区域内的污染场地进行确定与评估、修复高风险的“遗弃场地”,并支持与场地修复技术、法律责任和修复标准相关的研究(Sousa, 2001)。

加拿大建立了联邦污染场地管理框架,包括相关政策和最佳实践的建议,其目的是采用连贯的方法来管理联邦辖区内的污染场地。2003年,加拿大政府建立了联邦污染场地加速行动计划,推进由联邦政府负责的污染场地修复行动,特别是那些对人体健康和环境造成巨大风险的场地。

联邦一级的相关法律与管理政策包括《加拿大环境保护法》《加拿大环境评价法》《加拿大制定污染场地土壤质量修复目标值之导则》以及《加拿大推荐土壤质量导则》(Rodrigues, 2009)、《财政委员会关于解释污染场地成本和责任的政策》《加拿大印第安与北方事务部的污染场地管理政策》等。

2003年加拿大环境部长理事会制定了《含有石油和相关石油产品的地上和地下储罐系统的环境行为准则》,2006年制定了《污染场地责任的推荐原则》,该原则在加拿大环境部长理事会处理污染场地责任的原则基础上,增加了一个新原则。这一新原则规定在政府制定的特殊条件下,一个污染场地的环境法律责任可由卖方向买方转移,以确保场地修复工作的开展。新原则在加拿大推动了“棕地”的再开发,促进了闲置或未被充分利用的商业财产的再开发,同时,确保了人类和环境安全。2008年发布了《全国污染场地分类系统指导文件》,这是一个根据其目前或潜在的对人类健康和环境产生不利影响的污染场地评估方法。另外,加拿大卫生部制定了《加拿大联邦污染场地对人体健康风险评估指南》,主要包括人类健康初步定量风险评估指南、加拿大卫生部毒理学参考值、污染场地人体健康风险评估审查指南、污染场地经理指南等。

加拿大各州及地区负责制定本辖区内的污染场地修复标准与指导值导则,以及场地风险评价的执行程序。在大不列颠哥伦比亚省和育空地区,综合性立法规定了污染场地的管理问题,污染场地管理的所有方面均由一个环保部门负责监管,以更为严格的方法指导污染场地的修复与再开发程序。其他地区,如安大略省、阿尔伯达省、曼尼托巴省、新斯科舍省、新不伦瑞克省、爱德华王