

Remediation by Natural Attenuation at  
Contaminated Sites: Principles and Practice

# 污染场地自然衰减修复的 原理与实践

张敏 张巍 郭彩娟/著

非  
外  
借



科学出版社

# 污染场地自然衰减修复的 原理与实践

张 敏 张 巍 郭彩娟 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了污染场地自然衰减监测和评价技术的基本理论和方法。全书分为上下两篇：上篇回顾自然衰减的发展历程，介绍相关的概念原理，结合国内外的最新研究进展，重点阐述自然衰减的监测方法、评估等级及风险评价和管控策略；下篇以华北平原某石油类污染场地为案例，全面讲解自然衰减技术的实际应用，包括监测井布设、样品采集、检测分析、场地概念模型、自然衰减评估、长期监测方案和风险管控策略，涵盖自然衰减技术在污染场地应用的各个环节。

本书可供场地污染调查、评价、修复相关领域的科研人员、技术工程师和管理者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

污染场地自然衰减修复的原理与实践 / 张敏, 张巍, 郭彩娟著. —北京: 科学出版社, 2019. 9

ISBN 978-7-03-062243-3

I. ①污… II. ①张…②张…③郭… III. ①场地-环境污染-修复  
IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 199151 号

责任编辑: 李晓娟 / 责任校对: 樊雅琼  
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 9 月第一次印刷 印张: 19 1/4

字数: 388 000

定价: 238.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# | 序 |

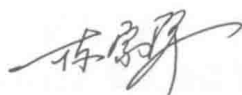
污染场地修复治理是科学家、工程技术人员和国际社会所共同面临的技术和经济挑战。经过近半个世纪的实践尝试与探索，人们已充分认识到“盲目”使用主动修复技术治理场地消耗大、成本高，难以解决二次污染风险等问题，尤其对于地下水污染的治理效果多数情况下不尽人意，修复工程和场地管理一直在寻求和关注以绿色、低耗、高效、安全为原则的修复技术。自然衰减，作为一项被动修复技术，被公认为是当前最符合上述原则的技术，20世纪90年代始，在欧美国家其已被成功应用于场地“精准”修复，其中，石油类和氯代烃类有机污染场地案例居多。我国在场地修复治理经验相对不足，自然衰减研究较少，且大多数为理论研究，实际场地应用案例罕见。实际上，自然衰减不仅仅是一项修复技术，其贯穿于场地管理的各个环节，是场地管理的灵魂与核心，是多种修复技术优化整合、各个治理阶段有效衔接的依据。自然衰减修复不仅需要考虑到一个高效运行的监测网络和有效的监测方案，而且需要解译监测数据和完善场地概念模型的有效方法。因此，关于自然衰减技术理论与实践的系统总结与阐述尤为重要。

为了适应污染场地修复和风险管理需求，张敏、张巍和郭彩娟等充分搜集阅读消化文献资料，结合自身科研成果撰写了《污染场地自然衰减修复的原理与实践》一书，系统论述了污染场地自然衰减修复的基本理论和方法。全书分上下两篇，上篇详细阐述自然衰减基本理论、监测和评估方法以及风险评价管控的各个部分；下篇以自身经验，在华北平原某石油类污染场地大量一手实际资料积累支持下，全面示范了自然衰减监测方案设计、场地概念模型刻画、自然衰减分等级评估、长期监测方案和风险管控策略制定的各技术环节，并针对性提出了添加电子受体强化自然衰减的建议。该专著为我国污染场地治理，尤其是石油类污染场地治理提供了十分宝贵的参考与借鉴。

更为难能可贵的是，该书十分注重理论与实践的有机结合。如上篇自然衰减监测部分，论述了监测需要考虑的关键因素和监测方案的设计细节以及值得注意的问题，回答了监测什么、在哪里监测、何时监测以及如何监测等问题，并通过实际场地的监测示范进行了深入的阐述；自然衰减评估部分，阐述了如何以监测数据与概念模型结合的方法确认衰减和评估降解，并展示了三个评估等级的应用

实例。下篇场地应用示范研究，在详细水文地质工作基础上，精细刻画了场地含水层、地下水流动及水文地球化学特征等，力求更切合实际地构建水文地质概念模型和污染概念模型，依此针对性提出自然衰减监测方案，实现对场地的“精准”修复。作者着眼于实际应用，强调基于水文地质刻画的监测方案设计对自然衰减的重要性，这是十分可贵和正确的，对该项技术的推广具有重要的指导作用。

总之，该书是一本对污染场地自然衰减监测和评价技术的基本理论方法和实践方面的著作，也是相关团队近年来在该方面研究成果的综合性总结，其实用价值很高，对我国污染场地修复与风险管控也将起到重要的示范作用。



中国地质科学院水文地质环境地质研究所

2019年7月

## | 序 二 |

自然衰减修复技术是一项绿色、原位、低成本修复技术，对污染场地自然衰减修复能力进行监测与评估是发达国家污染场地风险管控的重要策略。近十余年来，随着环境分子诊断技术的迅速发展，这一技术日趋成熟且应用前景广阔。我国是发展中国家，也是污染场地数量最多国家之一，据业内专家统计分析，数量达几十万个。这些场地人类健康风险和生态风险大小不同、且要求处置的时间不同，采取分类分级管控场地风险是一条正确路线，特别是对那些存在一定风险但处置时间可适当放缓的污染场地，开展自然衰减修复监测与评估可为适合我国国情的明智之举。因此，十几年前，我就坚定地选择了自然衰减修复监测与评估这一研究方向，带领团队（包括该书第一作者）在华北某石油化工污染场地，采用了地球化学方法和分子生物学方法，对一个苯系物（BTEX）地下水污染羽，开展了为期4年的自然衰减监测研究，积累了相关研究经验，深化了对自然衰减修复技术研究状况的认知，发现了这一研究方向存在的问题。近年来，由于业务方向调整，我不得不暂停自然衰减修复技术研究。然而，该书第一作者率领的团队，克服了场地准入、经费不足等困难，砥砺前行，坚守这一研究方向十年不动摇，编写出了这本著作成果。

就我所知，这是迄今见到的国内全面系统介绍污染场地自然衰减原理、技术与应用的第一部专著。通过仔细阅读，梳理出这本著作的特点与价值如下，与读者共勉。

一是构建了地下水污染自然衰减修复技术监测与评估理论技术体系。作者赋予了自然衰减概念新内涵，明确了自然衰减三个层级（初级、中级、高级）监测评估工作内容、关键技术及解决的主要问题。作者全面系统阐释了与自然衰减相关的物理、化学、微生物化学、放射性衰变等过程的原理、影响因素、研究现状及应用效果，基本理论与前沿研究成果结合，问题与研发方向并举，内容伸缩有度，可引导不同层级的读者找到前行的方向。

二是重视水文地质概念模型、污染概念模型构建在自然衰减研究中发挥的基础作用，注重样品采集、现场检测等野外工作关键环节质量，面向野外、根植于实践，提出了操作性强且科学规范的自然衰减监测技术要求。

三是将国外单体稳定同位素等环境分子诊断技术率先引入我国石油污染场地

自然衰减修复技术监测评估中，促进我国污染场地自然衰减修复风险管理向定量化和精细化水平发展。

四是基础理论与案例示范有机结合，提高了读者阅读兴趣和认识水平。这一特点不仅体现在著作的结构设置上，同时也在基础理论穿插的案例中予以说明。

自然衰减过程包括物理、化学、生物化学等复杂过程，准确监测与评估一个污染场地自然衰减能力，需要水文地质学、土壤学、化学、微生物学等基础理论及相关技术交叉融合，这对研究团队人员专业配置提出了较高要求。作为一名污染场地自然衰减能力研究的体验者，我认为自然衰减未来研究方向如下：①石油类场地包气带污染源区与地下水污染羽自然衰减协同监测评估研究；②复合有机污染物（如苯系物、卤代烃、多环芳烃）共用电子受体（如硝酸盐、硫酸盐等）与单个污染物生物地球化学作用对应关系辨析研究；③污染场地地下水中有有机污染物降解过程单体稳定同位素分馏模型正确判定与选择。

我国的污染场地自然衰减修复技术研究工作起步于 21 世纪初，已积累了十几年的经验，但与发达国家比较，尚存在较大差距。我相信，这本专著的出版，将在推动我国污染场地自然衰减修复技术进步和风险管理观念转变上发挥积极作用。



中国地质调查局水文地质环境地质调查中心

2019 年 8 月

## | 前 言 |

土壤和地下水是生态环境的重要组成部分，是基础性自然资源。党的十八大以来，国家明确推进生态文明建设，国务院2015年4月出台《水污染防治行动计划》，要求对地下水污染进行控制和修复；2016年5月出台《土壤环境保护和污染治理行动计划》，对土壤和地下水污染风险管控提出了要求；2018年8月31日全国人大常委会通过了《土壤污染防治法》，明确了土壤污染风险规制的理念。

虽然国家不断加强环境保护的力度，但随着中国经济发展和城市化进程的加快，土壤和地下水污染的问题日益凸显，由此引发的健康事件时有发生。特别是在工业企业退出、用地性质发生改变的过程中，原有工业生产造成的污染在场地后续开发中蕴藏的潜在风险，日益引起政府和公众的广泛关注。

土壤和地下水污染防治的一个主要原则是进行风险管控，即根据污染物的特征和扩散趋势，采用相应的技术措施评价和控制敏感目标的风险。结合污染物的自然衰减特征，设计基于风险评估的污染综合防控方案，是国际上普遍认同的最经济、最合理的解决土壤和地下水污染问题的方法。作为一种低成本的环境友好型修复技术，监测污染物的自然衰减受到越来越多的关注。需要指出的是，自然衰减修复并不是什么都不做，而是在监测土壤及地下水中污染物动态机理基础上，利用或强化大自然固有的物理、化学和生物作用，降低污染物的浓度、毒性、迁移性等，控制土壤和地下水中污染物导致的受体暴露风险，使其处于可接受水平。自然衰减技术是实现基于风险管控的污染场地管理的核心，“基于自然衰减监测评估的风险管控”即“受监控自然衰减修复”是国际上公认的污染场地优化管理模式。

自然衰减修复技术近年来发展较快，主要包括污染物分析、地球化学指标分析、微生物分析、稳定同位素分析等，但与国外相比，国内目前尚缺乏对自然衰减修复的体系化研究和应用实践。本书以自然衰减监控和评价为对象，介绍自然衰减修复技术的基本理论、国内外研究进展和应用。全书分为上下两篇，上篇重点阐述自然衰减的概念原理、监测方法、评估等级和风险管控，下篇以华北平原某石油类污染场地为案例，介绍自然衰减的实际应用示范。

本书上篇的相关资料主要由中国人民大学张巍、甄更崇、李元杰、任婷，中国地质科学院水文地质环境地质研究所张敏、郭彩娟、宁卓，北京大学刘波等收

集整理；下篇应用示范工作主要由中国地质科学院水文地质环境地质研究所张敏团队负责，北京大学李喜青团队、中国人民大学张巍团队协助完成，北京市政路桥集团有限公司、北京市勘查设计研究院给予了基础资料支持，中国地质科学院水文地质环境地质研究所陈宗宇给予了技术指导。本书得到国家自然科学基金项目(41471403、41671492、41602261)、国家重点研发计划项目(2018YFC1803302)的资助。全书由张敏、张巍、郭彩娟统稿，刘波、何泽、宁卓、史婵、蔡萍萍、张宁宁和张莎等校对。对本书所有参与者的辛勤劳动深表感谢。

本书编写引用和参阅了国内外大量专著、教材、论文及网络资源等，特此感谢。由于水平所限，书中难免存在疏漏和不足，恳请广大读者批评指正。

作者

2019年5月

# | 目 录 |

序一  
序二  
前言

## 上篇 基本理论

第1章 绪论 .....	3
1.1 国内外污染场地管理经验 .....	4
1.2 自然衰减——污染场地绿色可持续修复首选技术 .....	19
第2章 自然衰减概念内涵及体系框架 .....	27
2.1 概念及理论依据 .....	27
2.2 适用的污染物 .....	28
2.3 自然衰减应用一般流程 .....	29
2.4 监测评估等级 .....	34
第3章 自然衰减基础理论 .....	39
3.1 水文地质学基础 .....	39
3.2 污染物迁移转化基本原理 .....	41
3.3 对流迁移过程 .....	44
3.4 弥散迁移过程 .....	46
3.5 吸附/解吸迁移过程 .....	47
3.6 化学转化过程 .....	49
3.7 生物降解转化过程 .....	55
3.8 放射性衰变 .....	76
3.9 自然衰减与迁移转化过程的关系 .....	78
第4章 场地概念模型 .....	81
4.1 水文地质概念模型 .....	82
4.2 污染概念模型 .....	87
4.3 地下水污染计算机模拟 .....	92
第5章 自然衰减监测 .....	95
5.1 监测实施步骤及要点 .....	95

5.2	监测井布设原则	97
5.3	样品采集与现场检测	97
5.4	室内检测技术方法	105
5.5	自然衰减监测数据分析	109
5.6	典型污染物的自然衰减监测	113
<b>第6章</b>	<b>自然衰减评估</b>	<b>120</b>
6.1	初级评估	120
6.2	中级评估	127
6.3	高级评估	134
<b>第7章</b>	<b>风险评价与管控</b>	<b>154</b>
7.1	人体健康风险评价	154
7.2	生态风险评价	167
7.3	基于自然衰减及风险评价的管控策略	178

## 下篇 应用示范

<b>第8章</b>	<b>监测井布设、样品采集与检测</b>	<b>187</b>
8.1	场地概况	187
8.2	监测井布设	187
8.3	样品采集	188
8.4	检测分析	188
<b>第9章</b>	<b>场地概念模型</b>	<b>195</b>
9.1	水文地质概念模型	195
9.2	污染概念模型	203
<b>第10章</b>	<b>自然衰减监测评估</b>	<b>216</b>
10.1	初级评估	216
10.2	中级评估	231
10.3	高级评估	243
10.4	特色高级评估	265
<b>第11章</b>	<b>强化自然衰减措施及长期监测方案</b>	<b>277</b>
11.1	强化自然衰减措施	277
11.2	长期自然衰减监测方案	281
11.3	风险管控建议	283
参考文献		284
后记		297

# 上 篇

---

## 基本理论



## 第 1 章 | 绪 论

改革开放以来，我国经济高速发展，社会不断进步，建设取得了举世瞩目的成就。但是，伴随发展而来的环境污染危害逐渐呈现。在城市中，随着土地利用方式和使用功能的转化，生态环境时空格局演变剧烈，“棕地”（brownfield site）导致的生态环境健康问题日益突出，近年来，国家出台了“退二进三”“退城进园”“产业转移”等政策，大批污染企业搬迁、改造或停产；城市及其周边地区的大量遗留、遗弃的污染场地亟待处理、整治。在农村里，规模化养殖、生活垃圾无序堆填、农药化肥滥用及散乱小型企业偷排等现象普遍，加之为满足发展需求，城市污染企业往往转移至农村继续生产，农村的环境污染问题亦为严重。

2005~2013年，原环境保护部（现生态环境部）和原国土资源部（现自然资源部）开展了首次全国土壤污染状况调查，2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示：690家重污染企业用地及周边的5846个土壤点位超标点位占36.3%，81块工业废弃地的775个土壤点位超标点位占34.9%，146家工业园区的2523个土壤点位超标点位占29.4%，188处固体废物处理处置场地的1351个土壤点位超标点位占21.3%，13个采油区的494个土壤点位超标点位占23.6%，70个矿区的1672个土壤点位超标点位占33.4%，55个污水灌溉区39个存在土壤污染，267条干线公路两侧的1578个土壤点位超标点位占20.3%。业内人士根据美国污染场地数量和中美制造业情况对比估算，我国污染场地数量可达到30万~50万块，场地污染状况堪忧。

从污染特点来看，场地污染往往是“土壤-地下水一体化”问题。尤其是地下水污染，比大气污染、地表水污染等更具隐蔽性、滞后性、持久性，相应地，场地污染造成的危害更为隐蔽、滞后、持久。因此，许多现有环境修复技术在场地污染治理中可借鉴应用，但受场地污染特征限制明显。采用何种技术及时发现、科学预测场地污染，并有针对性地提出经济、有效的生态环境健康危害预防措施，是实现污染场地优化管理的核心。

国外污染场地工作已开展了近四十年，在20世纪80年代，经历了十几年“简单调查、传统修复”治理场地污染无效后，在20世纪90年代，场地工作者们充分认识到场地污染隐蔽、滞后、持久和不可逆特点，反思总结工作中的经验教训，逐渐建立起了科学系统的场地“调查-评价-修复”技术标准规范及管理

体系，使当前“基于自然衰减评估的风险管控”成为国际上公认的污染场地优化管理模式。相对而言，中国污染场地工作起步较晚，21世纪初，污染场地相关工作才逐步得以开展，当前场地调查、评价、修复等技术标准规范正在完善中；管理方面，存在场地修复治理责任主体不明、治理工程可参考案例缺乏、场地污染资料获取困难等诸多问题，在污染场地工作中，“轻视调查评估、盲目修复治理”现象突出。

综上所述，中国污染场地工作形势严峻，在场地污染研究工作中，有必要从其他国家吸收处理类似问题的经验，吸取教训，避免错误，少走弯路，加快建立科学实用的污染场地技术及管理体系，为实现我国绿色可持续发展目标提供支撑。

## 1.1 国内外污染场地管理经验

### 1.1.1 美国污染场地管理

#### 1. 美国污染场地治理的起源<sup>[1]</sup>

美国是最早对污染场地监控、修复、责任划分等方面开展详尽立法的国家，在20世纪80年代就建立起相应的制度，确保污染场地得到有效治理。

20世纪50年代以后，美国经济和社会发生了深刻的变革，美国的工业经历了由城市到农村，由东部到西部的转移，工业企业搬迁后留下了大量的污染程度不同的场地，即美国相关法律中规定的“棕地”，主要包括废弃的工业用地、汽车加油站、库房、可能含有有害放射性物质的建筑物等。这些场地在不同程度上被工业废弃物污染，给人体健康和生态环境造成了严重的威胁。1978年，美国纽约州发生了拉夫运河（The Love Canal）事件，引起了公众对“棕地”危害健康的关注。拉夫运河原为修建水电站挖成，20世纪40年代干涸后被废弃，后被一家化学品公司购买作为倾倒工业废弃物的场地。20世纪50年代，公司将充满毒废弃物的运河填埋覆盖好后转赠给当地政府，后这一区域被用作居住区。从1970年开始，当地居民，特别是儿童、孕妇等人群不断出现疾病征兆，孕妇流产、婴儿畸形、癌症等病症的发病率居高不下。相关资料显示，1974~1978年，拉夫运河小区出生的孩子56%有生理缺陷，孕妇流产率与入住此处前相比增加了300%。当局随后展开调查，最终将罪魁祸首锁定为胡克化工公司向运河中倾倒的工业废弃物。据估计，该公司共向运河倾倒了2万多吨含有有机致癌物质的工业垃圾。由于有害物质的渗透性、累积性以及污染的长期性，在1976年前后引

发了严重的土地污染和饮用水污染。拉夫运河事件引发美国社会对环境健康问题的深刻反思，要求政府加强污染治理和环境修复的社会舆论和呼声提高。

受“拉夫运河污染事件”等环境事故影响，1980年美国联邦政府颁布了《综合环境反应、赔偿和责任法》(*Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act*, CERCLA)。该法案是组成美国土壤和地下水污染防治体系的一部基本法律，制定该法案的主要目的是有针对性地开展全美范围内“棕地”修复；另外，包括对土地、厂房、设施的污染者、所有者和使用者在内，以溯及既往的方式，严格规定了无限连带法律责任。依据该法案，美国政府设立了名为“超级基金”(Superfund)的信托基金，为该法案的实施提供了一定的资金支持，故此该法案通常也被称为《超级基金法案》(*Superfund Act*)，该法案有力地推动了全美污染场地治理工作的开展。美国国家环境保护署(简称美国国家环保署)(United States Environmental Protection Agency, EPA/USEPA)依据《超级基金法案》，建立了污染场地环境监测、风险评价、场地修复的标准化管理体系，为污染地块的管理和土地再利用提供了有力支持。

## 2. 超级基金制度的演变

《超级基金法案》自1980年颁布以来，历经了多次修订、补充，包括《超级基金修订和补充法案》(1986年)、《公众环境应对促进法》(1992年)、《财产保存、贷方责任及抵押保险保护法》(1996年)以及《小企业责任减免及棕地复兴法》(2002年)，不断完善并健全了超级基金制度。纵观美国超级基金制度的发展，可分为四个阶段：政策项目诞生阶段(1976~1981年)、建立立法基础阶段(1982~1986年)、(1987年、1988年间断两年)加强立法阶段(1989~1994年)和改进成熟阶段(1995年至今)<sup>[2]</sup>。

政策项目诞生阶段(1976~1981年)：1976年左右，美国发生了数次规模较大的场地污染事件，如上述提及的纽约州拉夫运河事件，造成拉夫河谷地区环境质量恶化，同时增加了拉夫河谷地区居民健康风险，导致居民身体健康受到极大伤害。在一系列的公众游行、社会组织抗议、新闻舆论声援批评之后，政府开始采取行动防止场地污染危害恶化，并通过了《资源保护和恢复法案》(*Resource Conservation and Recovery Act*, RCRA)、《有毒物质控制法案》(*Toxic Substances Control Act*, TSCA)和《综合环境反应、赔偿和责任法》(CERCLA)等一系列场地防控法案。

建立立法基础阶段(1982~1986年)：该阶段主要进展包括建立了场地危险评级体系，通过了《国家应急预案》(*the National Contingency Plan*, NCP)，制定了《国家优先治理污染场地顺序名单》(*National Priorities List*, NPL)等。美国国会于1986年10月通过了《超级基金法案》修正案——《超级基金修订和补充法案》(*Superfund Amendments and Reauthorization Act*, SARA)。SARA规定了立法倡

议的执行、责任、透明度和绩效衡量等内容，明确了各级政府的责任与义务，加强了各级政府之间的合作。

加强立法阶段（1989~1994年）：该阶段取得的主要进展包括超级基金管理审查、首次提出执行第一的政策、基于税收的资金来源制度、防卫基地关闭计划、修订危险评级体系、整合 NCP 与 SARA、通过《污染预防法案》、公布超级基金加速治理模式等。在立法阶段规定了土壤污染负有责任的各方所必须承担的责任，包括各级政府部门及国防部的责任。

改进成熟阶段（1995年至今）：根据《超级基金法案》执行中不断遇到的问题，该阶段将持续改进并融入超级基金总体发展过程中，推出《棕地行动议程》、《棕地全国合作行动议程》、《超级基金再开发倡议》和《棕地法案》等法案。同时，评估了多种修复技术的修复效果及可能存在的长期风险，美国国家环保署颁布实施了5年回顾政策。2001年6月实施了《综合5年回顾指南》(Comprehensive Five-Year Review Guidance)，大约每5年进行回顾补充，2012年12月出台了《蒸汽入侵场地的评估保护：综合5年回顾指南的补充导则》(Assessing Protectiveness at Sites for Vapor Intrusion: Supplement to the Comprehensive Five-Year Review Guidance)。

另外，作为污染场地管理的重要组成部分，美国还制定了污染场地制度控制 (Institutional Controls, ICs) 措施，即通过行政手段或法律手段保护生态环境安全和公众健康，包括限制污染场地使用、改变污染场地相关人群的活动方式、向污染场地及其附近可能受影响的相关人群发布通知等。美国国家环保署作为污染场地制度控制的制定机构，在2000年颁布了首个污染场地制度控制指南，后又陆续制定了一系列关于污染场地制度控制下的识别、筛选、实施、评估方面的政策或指南，构建了相对完善的制度控制体系。

修复标准方面，基于《超级基金法案》执行下的修复行动，必须能够确保修复后的污染场地达到保护生态环境安全和公众健康的目标，同时，不论是长期还是短期的修复行动，都必须遵守“成本-效益”的原则。《超级基金修订和补充法案》中特别要求，修复行动至少达到《安全饮用水法案》中推荐的污染物最高含量水平标准，并同时达到《清洁水法案》中的水质标准，即二者中任一项水质指标的最严格标准。根据《超级基金修订和补充法案》规定，如果修复情况允许，美国国家环保署会直接选择永久性修复方法，而不是将污染废弃物（如污染土壤）填埋。如果采用非永久性的修复或处理方法，美国国家环保署必须每5年对污染场地进行一次调查，以确认污染场地是否存在污染威胁。<sup>[3-5]</sup>

### 3. 超级基金制度的主要特点<sup>[1]</sup>

《超级基金法案》是美国污染场地管理框架中最为全面的规范污染场地修复的法律，也是世界上最具代表性的土壤和地下水污染场地管理制度，为大多数国