

附件 3

污染场地修复技术应用指南

（征求意见稿）

编制说明

项目名称：污染场地修复技术应用指南

项目统一编号：15.1.1

承担单位：中国环境科学研究院，国家环境保护城市土壤污染控制与修复工程技术中心(筹)，国家环境保护工业污染场地及地下水修复工程技术中心

主要起草人：谷庆宝，李发生，胡清，黄沈发，张倩，马福俊，李方，刘翔，陈梦舫，林匡飞，邵春岩，杨洁

项目管理负责单位及负责人：中国环境科学研究院 何连生

环保部科技标准司项目管理人：许丹宇

目 录

1 任务背景.....	1
1.1 任务由来.....	1
1.2 工作过程.....	1
2 指南编制的目的及原则.....	3
2.1 编制的目的.....	3
2.2 编制原则.....	4
3 指南编制的方法、依据和技术路线.....	6
3.1 编制方法.....	6
3.2 编制依据.....	6
3.3 技术路线.....	7
4 国内外污染场地管理规范.....	8
5 行业技术现状分析.....	11
6 指南主要技术内容及说明.....	14
6.1 修复技术分类.....	14
6.2 污染场地土壤修复技术.....	14
6.3 污染场地地下水修复技术.....	17
6.4 污染场地环境修复技术筛选及应用方案.....	18
6.5 污染场地修复过程次生污染预防.....	20
8 指南实施建议.....	22

1 任务背景

1.1 任务由来

本指南由环境保护部环办函[2010]486号下达编制任务，由中国环境科学研究院承担该指南的具体编制工作。本指南为首次制订。

1.2 工作过程

为了完善污染场地相关制度体系，应环保部的要求中国环科院开展了“污染场地修复技术应用指南”的编制工作，具体过程如下：

接到环境保护部的通知，中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室立即成立了编制组，召开专门会议探讨并开展相关编制任务，同时制订工作计划，为定时定量完成任务打好基础。

按照工作计划的要求，编制组广泛查阅国内外相关文献和专利，并邀请污染场地相关专家领导就编制的任务目标、整体框架和编制思路等进行指导，确定工作开展的方向。

针对其中需进行考察和调研的案例，通过现场考察、对相关修复企业的技术人员进行咨询等方式开展调研工作。

目前已经完成的主要工作为：

1. 《指南》编制过程中进行了国内外相关政策、法规、标准及技术规范的调研工作。结合国内外污染场地的现状和国内已经发布或准备发布的污染场地相关行业标准，就我国污染场地的风险评估、修复技术和运行管理等方面的情况进行详细调研。

2. 对我国污染场地修复技术应用的案例进行实地考察，为本指南将来能够切实有效的发挥作用打好基础。

3. 2011年5月6日，由环保部科技标准司主持，在环保部时代大厦会议室召开研讨会。参加会议的包括环保产业协会、北京市环保科学研究院、北京师范大学、国家危废处置工程技术中心、中国环境科学学会和环保部履约办等单位的专家和领导。与会专家提出许多修改意见，编制组给予了充分重视，并对编制文本进行了修改。

4. 2014年3月，环保部科技标准司结合现有污染场地的标准体系和新发布的

污染场地五项环保标准与文件，提出新的意见和建议，编制组进行了相应的修改和调整。

2 指南编制的目的及原则

2.1 编制的目的

由于我国经济高速发展，工业和城市废水大量排放，工业废渣、生活垃圾大量堆存或填埋，污水灌溉等人为活动，导致我国土壤污染日趋严重，环境污染问题日益突出，已经变为制约我国经济发展的瓶颈。城市化的必然趋势导致很多企业面临搬迁的问题。中国每年均有大量因各种人为活动导致的污染场地出现，虽然通过国家、部门、企业等多渠道支持，我国已经开始了工业场地污染的相关研究，土壤污染的修复与治理工作也越来越受到重视，但总体上我国工业场地污染的管理、风险评估及修复方面的工作才刚刚起步，对于逐步开展的场地调查和修复工作需要一系列的导则和指南等文件作为指导，规范污染场地的修复治理工作。在实际修复工作中，对污染物种类的识别、污染的风险评估和污染修复的方法选择上都存在很多不足。虽然各级政府和各修复企业努力借鉴国外先进的技术和管理经验，用以指导我国的污染场地的修复工作，但是对于适合我国国情的修复技术方案的确立上仍有很大的发展空间。针对目前状况，本技术指南的制订将在我国工业污染场地的治理修复方面起到引导和促进的作用

我国党和国家领导人在不同场合均指出要开展和加强土壤的污染防治。《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》（2005年12月3日，国发〔2005〕39号）规定：“对污染企业搬迁后的原址进行土壤风险评估和修复”。国务院办公厅2007年11月13日转发了环保总局、发展改革委、农业部、建设部、卫生部、水利部、国土资源部、林业局等八部门联合提出的《关于加强农村环境保护工作的意见》（国办发〔2007〕63号）。该意见第十一条要求：“做好全国土壤污染状况调查，查清土壤污染现状，开展污染土壤修复试点，研究建立适合我国国情的土壤环境质量管理体系。加强对主要农产品产地、污灌区、工矿废弃地等区域的土壤污染监测和修复示范”。环保部于2014年2月批准发布了污染场地五项环保标准《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1-2014）、《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2-2014）、《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）、《污染场地土壤修

复技术导则》(HJ 25.4-2014)和《污染场地术语》(HJ 682-2014)等5项污染场地系列环保标准(以下简称五项标准),迈开了场地环境状况调查、风险评估、修复治理标准体系建设的第一步。同时,环境保护部和国土资源部于2014年4月发布了2005-2013年全国土壤污染状况调查公报,结果显示我国工业企业用地中有高于30%的土壤受到污染,土壤修复势在必行。

二十世纪90年代以来,我国较发达城市首先出现了大规模的污染企业关闭或搬迁的现象,并日益扩散到中小城市,目前城市中心区的污染企业搬迁已达到高峰期。由于城市中心区的企业多数建厂时间早,部分企业当时甚至未装备环保设施,因而经过多年的生产活动,企业关闭或搬迁后遗留的场地在再开发利用时存在较大的环境健康风险。据粗略统计,全国不同类型的数万家企业甚至更多将在未来几年内实施搬迁,涉及的污染土地面积十分惊人,迫切需要有针对性的修复技术对这些场地进行修复,才能保障土地资源的安全再利用。然而,国内外实际应用和处在试验阶段的土壤和地下水修复技术种类繁多,其作用机理、使用范围、应用成本和修复效果等各不相同,给场地修复工作人员及各相关方在技术筛选和具体应用时带来诸多不便。同时,我国污染场地修复工作开展的时间不长,技术应用等方面的经验较为缺失,对于修复过程中的技术选择尚缺少规范和指导文件,选用不适当的修复技术不仅达不到修复目标,而且是对资源、资金和时间的浪费,更有可能造成二次污染,对人体健康和生态环境产生更大的危害。因此,非常有必要参考国外工业场地污染修复的相关经验,结合国内现有污染场地修复的成功案例,制订适合我国国情的污染场地修复技术指南,从而完善我国污染场地管理技术体系,促进污染场地修复工作的发展。

在此背景下,环保部科技标准司委托中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室编制《污染场地修复技术应用指南》。此指南可填补了我国在污染场地修复技术体系方面的空白,可为各级环保部门、国土与规划部门、建设部门、农业部门和工业与信息部门,以及工业污染场地从业相关人员提供便利和技术参考。

2.2 编制原则

(1) 满足环保体系建立和环保工作的当前需求

本技术指南作为污染场地系列指导性文件,要针对我国经济、人力资源和社会现状,并要满足我国当地污染场地的治理修复和工程技术的实际需求。技术指

南的制订可以为技术从业人员、相关政府工作人员、有关企事业单位等的工作人员等提供技术参考。

（2） 科学性和实用性相结合

通过对各类修复技术进行调研，掌握其原理、特点和适用范围，并进行技术经济比较分析，筛选不同条件下污染土壤和地下水的最佳修复技术，使指南具有较强的科学性、指导性和可操作性。

（3） 代表性和典型性

选取了国内外实用价值较高的修复技术及典型修复技术组合，针对不同污染场地污染物、污染介质和污染物类型等的区别，提出了科学的修复技术筛选方法，可以让使用者能够因地制宜的选择适合本场地的修复技术及技术组合。

（4） 全过程风险控制

本技术指南体现全过程风险控制的思想，从修复技术的合理选择到修复过程中的二次污染预防均有所体现，不仅为管理部门提供了技术支持，也满足了工业企业污染场地环境管理的要求。

3 指南编制的方法、依据和技术路线

3.1 编制方法

(1) 查阅国外发达和中等发达国家的污染场地修复技术资料，以这些国家实用的修复技术为主要编制依据，在技术选择时充分考虑我国的经济的发展、人力资源水平、公众认识水平等多种因素。

(2) 通过对我国修复技术应用案例的调查和测试，掌握修复技术的发展水平、应用现状、修复技术工艺、运行参数、处理效果及二次污染等的情况；

(3) 组织国内外行业专家、管理部门开展咨询与交流，吸纳多方面智力资源；

(4) 对调研结果进行综合分析，归纳总结，力求使本指南从结构到内容上，符合我国管理、科研和从业人员的实际需求；

(5) 编写技术应用指南文本及编制说明，公开征求社会意见，最后送审并报批。

3.2 编制依据

1. 法律法规

(1) 《中华人民共和国环境保护法》(1989年12月26日)；

(2) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》2005年4月1日)；

(3) 《危险化学品安全管理条例》(国务院令[2003] 344号)；

(4) 《关于保障工业企业场地再开利用环境安全的通知》(环发[2012] 140号)

(5) 《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作中的通知》(环办[2004] 47号)；

(6) 《关于土壤污染防治工作的意见》(环发[2008] 48号)。

2. 技术导则、标准及规范

(1) 《中华人民共和国地下水质量标准》(GB/T 14848-1993)

(2) 《中华人民共和国生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)；

(3) 《中华人民共和国土壤环境质量标准》(GB15618-1995)；

(4) 《环境检测分析方案标准指定技术导则》(HJ/T168-2004)；

- (5) 《场地环境调查技术导则》(HJ25.1-2014);
- (6) 《场地环境监测技术导则》(HJ25.2-2014);
- (7) 《污染场地术语》(HJ682-2014)
- (8) 《污染场地土壤修复技术导则》(HJ25.4-2014);

3.3 技术路线

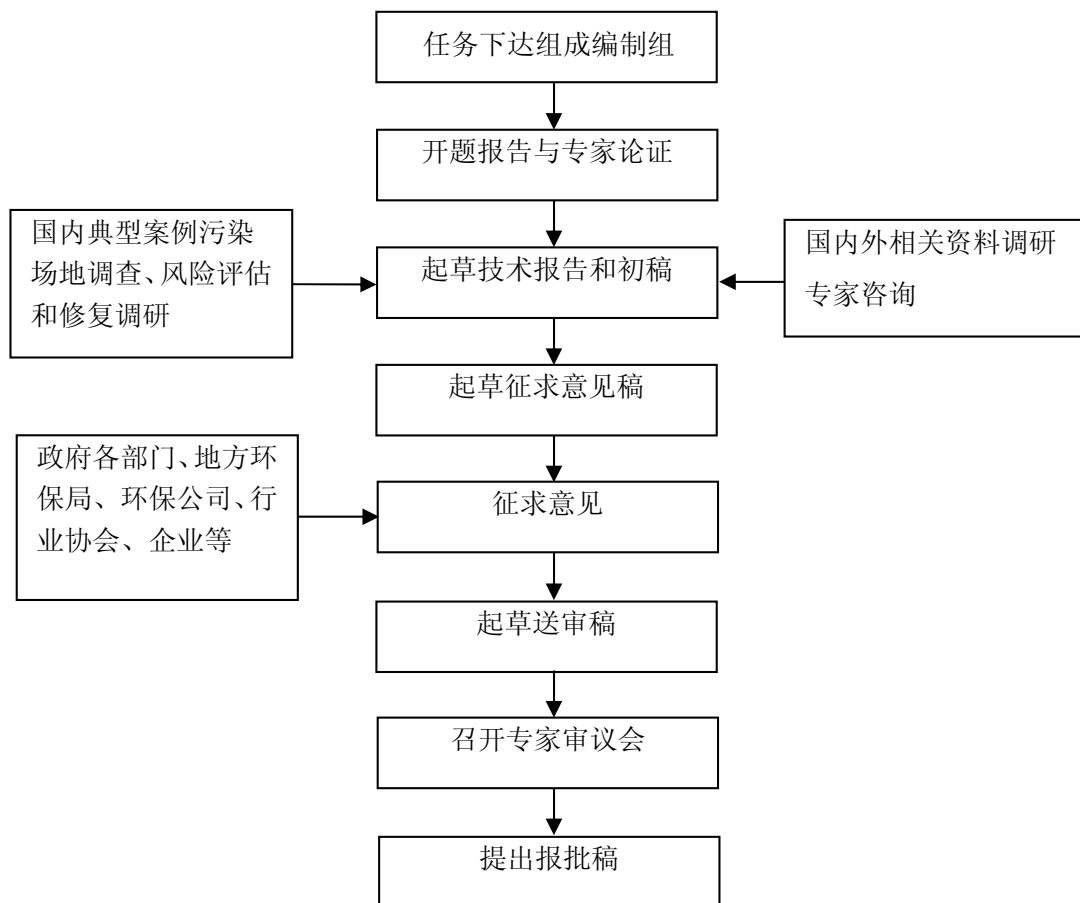


图1 编制技术路线图

4 国内外污染场地管理规范

由于人们对环境的忽视和工业化水平的高度发展,污染场地已经变成一个世界性的环境问题,对人类和环境产生了严重危害。目前,世界上许多国家均存在大量污染场地,特别是发达国家,污染场地呈现数量多、种类全、危害严重等特点。

美国政府于1980年发布了《综合环境响应、补偿和义务法》(俗称“超级基金法”),规定了过去和现在土地的拥有者和使用者必须对土地的污染负责和有清除污染的义务。在此基础上,美国环保局(USEPA)和美国测试与材料协会(ASTM)建立了大量场地环境调查和评估的方法、技术标准和指南对场地进行环境调查、风险评估和修复,并判别污染责任。美国推出了多本超级基金场地修复技术手册,如《超级基金定位手册》,《修复设计与修复行动手册》,《超级基金修复选择的经验规则》等。此外,美国环保局针对不同的修复技术类型还制定了一系列的技术指南,如《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:需氧生物降解修复筛查》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:生物降解修复选择》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:化学脱卤》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:土壤蒸汽抽提》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:土壤淋洗》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:溶剂提取》,《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南:热解吸修复选择》等。

在加拿大,加拿大环境部长委员会(CCME)出版了《在加拿大污染场地构建特定场地土壤质量修复目标的指导手册》,加拿大污染场地管理工作组编写了《场地修复技术:参考手册》,加拿大科学应用国际公司(Science Applications International Corporation, SAIC)在其研究报告《对加拿大修复指导值,标准值,和规定值的汇编和评论》中对加拿大联邦、省和地区的污染场地修复标准值、指导值和规定值进行了全面系统的总结和评述。

澳大利亚对污染场地的环境管理非常重视,最初由国家卫生与医药委员会(National Health and Medical Research Council, NHMRC)会同澳大利亚-新西兰环境与保护委员会(Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, ANZECC)于1992年合作制订了《澳大利亚和新西兰污染场地评价和管理指南》(已于2002年3月14日废止),以此为基础从技术和管理上

建立了比较完善的污染场地环境管理体系。澳大利亚环境保护委员会（National Environment Protection Council, NEPC）在1999年制订了一系列与污染场地调查（监测）和风险评估相关的指南：《国家环境保护措施（场地污染评价）》，为澳大利亚在全国范围内的场地调查与评估提出了统一的要求与技术标准。澳大利亚国家标准委员会（Council of Standards Australia）还将污染场地的调查技术提升到了国家标准的水平，在对1997年出版的《场地潜在污染土壤的调查与采样指南》进行修订的基础上，于2005年推出了该指南的修订版，从而有力地支撑了澳大利亚污染场地调查技术的规范与标准化。

新西兰环境部也在最近几年制订了一系列的《污染土地管理指南》，其《污染土地管理指南第5卷：场地调查与土壤分析》就场地调查的原则、野外工作与采样、实验室分析、数据解释等给出了详细的要求与指导；《污染土地管理指南第2卷：环境指导值的分级应用》对场地调查中场地指导值的选择与应用进行了规定；《污染土地管理指南第3卷：风险筛查系统》对场地初步调查结果的评估和场地风险的初步识别提出了方法学上的指导与要求。

英国在《环境保护法1990：污染土地II A部分》明确规定应遵循污染者责任原则，即任何把污染物排放到土壤表面和地下的个人和单位，都有修复土地并支付费用的责任和义务。如果没明确的污染者，该责任将转移给土地当前的所有者和使用者；还规定了场地调查是由地方政府负责，环保局给地方政府提供技术支持。法律允许当事人提供关于排除和污染有关责任的证据。英国环境、食品和农村事务部（Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA）也发行了一系列（共15册）涉及污染土地调查、评估和修复技术选择等技术报告：《污染土地报告》（Contaminated Land Report, CLR）。英国环境署（EA）也制订有共2卷的《场地调查技术要点》。

我国台湾省及香港地区也在污染场地管理方面开展了相关的工作，台湾省的《土壤及地下水污染整治法》第八条第一款规定：中央主管机关指定公告之事业所使用之土地移转时，让与人应提供土壤污染检测资料；第九条规定：中央主管机关指定公告之事业于设立，停业或歇业前，应检查用地土壤污染检测资料，报请所在地主管机关备查后，使得向目的事业主管机关申办有关事宜。该法第三章规范了场地环境调查评估措施。由于法律条文的明确规定，使得在台湾某些土地

转移时，必需进行场地环境评估。台湾地区的场地环境调查技术规范，基本是直接对美国相关规范的转换。

香港特别行政区政府根据香港自身经济发展和地域特点，颁布了《受污染土地勘察及整治指引》，该指引主要适用于曾用作加油站、船厂及车辆维修/拆卸工厂的场地的调查。

我国以防治土壤污染为主要任务的科研与生产实践始于20世纪60年代后期，经过近40年的研究与发展，取得了显著的成果与成效。然而，与大气污染和水环境污染相比，我国土壤污染的环境管理严重滞后，至今仍缺乏全面系统的研究，污染场地环境标准体系还没有建立起来，甚至还处于刚刚起步的初始研究阶段。据文献报道，我国在60年代就有单位（如化工部南京勘察公司）研究老厂房改造过程中的地基污染问题。“六五”和“七五”期间，我国开展了全国性大规模土壤环境背景和环境容量调查，初步明确了我国土壤中元素和化合物的背景浓度，对了解我国土壤的自然环境状况以及追溯污染历史，制订土壤环境标准和污染控制目标等都具有重要的参考意义。20世纪70年代中期以来，我国在取得土壤环境背景值、土壤环境容量、土壤环境基准值等大量研究成果的基础上，于1995年制订了《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)，按土壤应用功能和保护目标之不同，将土壤环境质量分为三类：一类土壤执行一级标准，保护区域自然生态，维护自然背景的土壤环境质量；二类土壤执行二级标准，保证农业生产，维护人体健康；三类土壤执行三级标准，保障农林生产和植物正常生长。该标准为我国土壤环境质量评估提供了依据，在我国土壤环境质量评估工作中广泛应用。随后，我国于1999年颁布了《工业企业土壤环境质量风险评价基准》，于2000年制订了《农田土壤环境质量监测技术规范》，于2002年出版了《土壤质量词汇》，于2004年出台了《土壤环境监测技术规范》，于2007年发布了《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》，这无疑大大推动了我国土壤环境质量管理，使其逐步趋向规范化和系统化。尽管如此，我国还没有形成有效的土壤污染综合防治体系，包括法律法规与管理体系、风险评估标准体系、监测监控体系、土壤修复技术体系等。目前，我国涉及土壤保护的法律法规主要有《宪法》、《刑法》、《环境保护法》、《固体废物污染环境防治法》、《清洁生产促进法》、《土地管理法》、《水土保持法》、《矿产资源法》、《基本农田保护法》、《草原法》等，但还没有一部类似于美国《超

级基金法》的专门清洁治理污染场地的法律或法规。鉴于此种情况，亟需建立一套适合我国国情的土壤污染防治法规及标准体系，以便更好的保证人们的健康和环境的安全。

5 行业技术现状分析

目前，许多技术都可用于污染场地的修复，但往往一个场地的修复需要一种优化的技术或技术组合。因此，为目标污染场地选定合理的技术也成为整个修复过程中的技术难点。对污染场地中土壤的修复，应根据土地用途确定恰当的修复目标，污染场地的土壤应优选可将土壤中污染去除或分解的技术。对于高风险污染土壤，宜采用处理技术，对低风险污染土壤，应采用工程控制措施。尽可能采用多种技术联合的方法，从而可经济有效地获得保护人体健康与环境的目的。

与异位修复技术相比，原位修复技术更为经济，不需要建设昂贵的地面环境工程设施和对污染物进行远程运输，就可以使污染物降解和减毒，操作维护起来比较简单。原位修复技术的另一个优点是可对深层土壤进行修复，对土壤的破坏小，适合规模较大的土壤修复。但原位修复技术受场地本身特性的限制较大，较难在低渗透性和地质结构复杂的土壤进行实施。此外，原位修复周期较长，修复效果难以达到理想状态。相比而言，异位修复技术则在挖掘和设备使用维护等方面费用较高，但修复的周期短，修复效率高，且修复效果好。

对1982—2005年美国超级基金场地修复行动的修复决策记录中常用土壤修复技术的分析表明，在涉及的862个工程中，其中的47.7%为原位污染源控制技术，52.3%为异位污染源控制技术。同时，已完成的土壤修复工程中有361项（占已完成工程的68.9%）采用的是异位修复技术，164项（占31.1%）采用的是原位修复技术，也即大多数已完成的修复工程采用的技术为异位修复技术。采用最多的异位修复技术是焚烧技术，采用最多的原位修复技术是土壤蒸汽提取技术。

在美国开始实施超级基金时（1982-1986），土壤处理技术的高频使用引起人们对修复费用大幅上涨的抱怨，甚至有人怀疑场地风险是否被过度夸大。20世纪90年代后期，人们在筛选修复技术时，更多地考虑了现实的因素，如场地修复经费的来源、未来土地的利用方式等，同时对修复技术的认识也在改变。这使得修复技术的筛选更具灵活性，如为了节省经费，将场地修复至指定用途的土壤质量，而不是将场地土壤质量修复至可作为任何用途。同时人们认识到，在一些场地，采用非处理手段（如工程控制措施和制度控制），不失为一种有效而低廉的控制手段。因此，在这一时期，工程控制措施和制度控制在修复技术应用中的比例开始逐步提高。总体上，美国对污染场地修复技术选择的趋势为：80年代初期，刚

开始开展污染场地修复时，较多的采用了工程控制措施，遭到批评后，采用了较为昂贵的污染源处理技术，而随后由于修复经费短缺和基于土地利用方式的风险管理等原因，工程控制措施和制度控制的又开始较多的被采用，如图2，即显示了近年来美国超级基金采用的土壤修复技术的变化。

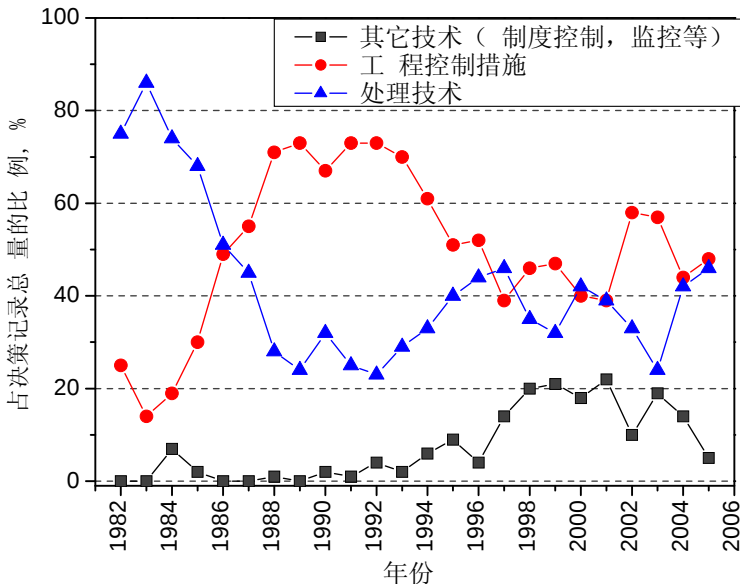


图2 美国超级基金1986年-2006年土壤修复技术比例

在地下水修复技术方面，目前抽出-处理技术的治理对象主要有12种污染物。其典型治理目标为三氯乙烯（TCE），此外还有一些卤化挥发性有机物，如：四氯乙烯（PCE）、氯乙烯（VC）等。对于非卤化挥发性有机物BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）以及铬、铅、砷等也可采用抽出-处理技术进行治理。对于原位修复技术，治理对象主要以卤化挥发性有机物、非卤化挥发性有机物、非卤化半挥发性有机物、卤化半挥发性有机物、BTEX、多环芳烃、杀虫剂以及金属、非金属等为主。其中，空气注入技术的治理对象主要以卤化挥发性有机物、非卤化挥发性有机物、非卤化半挥发性有机物及BTEX为主。而渗透性反应墙技术则主要用于金属、非金属、卤化挥发性有机物、BTEX、杀虫剂、除草剂以及多环芳烃的治理。

对1982-2005财政年度美国国家污染场地优先名录中采用抽出/处理系统、原位处理和监控的自然衰减技术修复地下水的工程分析表明，在所有的877个工程中，采用抽出/处理系统的工程的比例高达83%，仅采用修复地下水的工程比例也达56%，说明对地下水的修复，抽出/处理系统是主要的修复技术。但至1997年以

后，在地下水修复工程中，采用抽出/处理系统的工程数量与采用其它技术的工程数量非常接近，说明抽出/处理系统虽然是一个效果非常好的成熟修复技术，但由于抽出/处理系统修复地下水工程的完成的比例很低（约10%），成本也非常高。因此，随着人们对场地修复认识的提高，以及基于风险的控制目标的采用，原位工程控制措施和监控的自然衰减技术日益受到青睐。图3清晰的显示出近年来美国超级基金地下水处理技术的变化趋势。

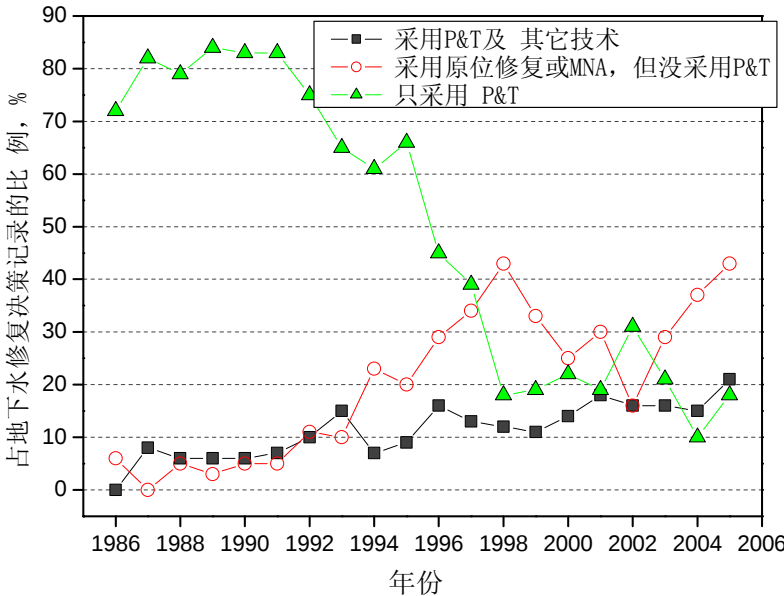


图3 美国超级基金1986年-2006年地下水修复技术比例

(P&T: 抽出处理技术, MNA: 监控自然衰减)

与国外相比，我国的污染场地修复启动较晚，2004 年北京市迎接奥运会的地铁五号线施工导致的“宋家庄事件”，是开启我国污染场地调查与修复的钥匙。“宋家庄事件”发生后，原国家环保总局 2004 年发出通知，要求各地环保部门切实做好企业搬迁过程中的环境污染防治工作，一旦发现土壤污染问题，要及时报告总局并尽快制定污染控制实施方案。

2004年上海开始筹备2010年世博会，专门成立了土壤修复中心，对世博会规划区域内的原工业用地污染土壤进行处理处置。到目前为止，中国已成功完成了多个场地的土壤修复工作，如北京化工三厂、红狮涂料厂、北京焦化厂（南区）、北京染料厂、北京化工二厂、北京有机化工厂、沈阳冶炼厂、唐山焦化厂、重庆天原化工厂、赫普(深圳)涂料有限公司、杭州红星化工厂、江苏的农药厂等等，这些案例为中国污染土壤的修复和再开发提供了宝贵的技术和管理经验。从修复技术上看，使用比较成熟的技术主要是异位的处理处置，包括挖掘-填埋处理和

水泥窑共处置技术等，还有相当一部分修复技术与设备在研究开发之中，如热解吸技术、生物修复技术和气相抽提技术等，特别是一些原位的修复技术，都还处于试验和试点示范阶段，国家对于典型污染场地的修复工程示范也给予了支持。目前编制完成的“污染场地土壤修复技术导则”提出制订修复技术方案和进行项目可行性研究的要求，为在我国实施污染场地的修复提供了依据和支撑。

6 指南主要技术内容及说明

本指南共分为六章：总则、修复技术分类、污染场地土壤修复技术、污染场地地下水修复技术、污染场地环境修复技术筛选及应用、污染场地修复过程次生污染预防。主要内容说明如下：

6.1 修复技术分类

修复技术从不同的角度分，有多种分类方法。污染场地的介质主要为土壤和地下水，针对这两种介质有多种原理不同的处理技术，如生物、物理、化学和物理化学修复技术等。生物技术是利用动物、植物和微生物的方法对污染物进行降解、或富集的方法；物理技术是利用热或者气对介质与污染物进行分离或稳定化，一般不改变污染物本身的特性；化学技术是通过添加或物质间的反应，改变污染物的特性从而消除污染物或降低其毒性的方法；物理化学方法结合了物理分离及化学改变，通过联合作用达到去除污染物的目的。通常所应用的技术中可能会同时包含多种变化。同样的技术根据其处理的位置不同，可分为原位和异位修复。在场地的修复时间比较宽裕，修复资金较为受限，场地本身具备原位修复条件时（如产地较为空旷，地质结构相对简单，渗透性较好等），建议优先选择原位修复技术。异位修复技术的修复周期短，修复效率高，且修复效果好，但存在挖掘和设备使用维护费用高的问题。与异位修复相比，原位修复更为经济，不需要建设昂贵的地面环境工程设施和远程运输，就可以使污染物降解和减毒，操作维护起来比较简单。原位修复技术还有一个优点就是可以对深层次的土壤进行修复，对土壤的破坏小，适合规模较大土壤的修复。如果采用的技术为新技术或者场地条件比较复杂，不能确定修复技术的效果，则应先在实验室进行小试或中试试验，以便获得可靠的技术参数，从而更好的确保修复效果。

由于土壤修复技术的种类较多，原理较为复杂，有些技术的应用是多种反应原理联合作用的结果，如每种反应原理按照工作方式或微生物种类等的不同进行细分，可能还有更多种技术种类。因此，本指南主要按照技术的主导作用原理，介绍一些国内外较为实用，且符合我国目前需求的一些技术。

6.2 污染场地土壤修复技术

在确定修复目标后，土壤修复工作的关键在于选择合适的修复技术。应根据土壤污染物的特点进行修复技术的排查，然后根据修复的时间要求和经济条件选择合适的技术，对其中的污染物进行转移、吸收、降解或转化，从而达到恢复场地使用功能，保证场地二次开发利用安全的目的。随着技术的发展，各种新型、低成本、高效能、更快捷和低排放的土壤修复技术正在逐渐研发出来，在后续的工作当中，可以根据技术的发展和社会的进步进行变动。

(1) 一般说来，对于污染物浓度较高，迁移性较强或处在敏感区域的污染场地，针对土壤中不同种类的污染物，宜采用将污染物与土壤介质分离，或可以将将污染物结构得以分解的修复技术。

在技术指南中列出的技术是基于目前国内外修复场地的实际案例应用列出的。本技术指南中是根据场地污染物的类型进行技术选择的，但实际场地大都存在多种污染物共存的情况，应根据实际状况选择一种或多种技术的组合进行处理，将每种污染物都降至修复标准值下。

挥发性有机物毒性大，挥发性强，易暴露在空气中，造成大气污染和影响人体健康。在处理挥发性有机物赋存的土壤时，宜将挥发性污染物收集起来集中处理，因此可根据此原理选择土壤气相抽提、生物通风、填埋、热解吸、焚烧、生物堆、化学氧化还原、植物修复和化学萃取等方法。

半挥发性有机污染土壤与挥发性有机污染土壤类似，但有些半挥发性有机污染物在土壤中的吸附性较好，采用分离的方法（如生物通风、热解吸等）成本较高且修复效果不好，因此除分离方法外还可采用填埋、焚烧、化学氧化、固化稳定化和覆盖等，需针对其特性进行选择。

其他类型污染物目前可选用填埋、生物堆、植物修复、生物通风、化学氧化、热解吸和焚烧等方法。目前利用微生物方法分解石油是研究的热点，考虑到石油某些组分燃点较低，也可采用热解吸或焚烧的修复技术进行处理。

无机物及重金属的处理方法目前主要有填埋、固化稳定化、化学氧化还原、覆盖、植物修复和淋洗等，可将污染物进行固定，降低其迁移性；或改变其化学性质，使其变为无毒或低毒的化合物；或对其进行富集，集中处理，最终降低对人体和生态健康的威胁。

填埋、固化稳定化或者覆盖等是一类阻隔污染物传播途径的修复方法，并未消除污染物，只是以某种方法封闭污染物。在不破坏封存设施的基础上，污染区域对环境的影响较小，但如果场地上进行较多的开发或建筑活动，可能会产生泄露，使污染物重新暴露在环境中。因此，此类工业污染场地不宜作为居住、商业或学校等人口密度较高的建筑用地。对于采用异位修复技术并已完成现场清理的场地需要当地环保部门出具此工业污染场地的验收证明。此证明能够确保场地内部污染土壤及地下水已经清理干净，不再对人体健康及生态环境产生危害。

(2) 需要特别提出的是，对于场地周边无敏感受体存在、场地中污染物浓度较低、迁移性较弱、风险较小的情况，宜由当地政府部门对该场地实施制度控制措施。

本技术指南所称制度控制措施，是指地方政府或环保部门通过法律或者行政手段来限制人体和生态要素在污染场地中的暴露，必要时对场地内的土壤进行定期监测，以保证修复工程的顺利完成和实现潜在污染暴露最小化的方法。一般来说，采用制度控制措施的污染场地在再利用前，应由有资质的单位对其进行风险评估。制度控制措施在国外应用较多，且大都有相关法律条文进行规定，在执行过程中作为强制性措施由政府部门进行监控。考虑到我国国情，建议应在政府或环保部门的监督下，采用通知、颁布条例、宣传等方法，对民众进行告知，保护受体远离污染场地。同时，在场地土壤存在风险时，宜由政府或环保部门委托相关部门对污染土壤进行监测，比控制风险，降低人群和生态环境在污染物中的暴露。适度采取制度控制措施，既可以保护人体健康和生态要素，又可以降低成本。制度控制措施是参考国外的经验，结合我国国情采取的一种限制措施。国外一般认为将制度控制措施是整个清理工作很重要的一个环节，在超级基金、棕色土地、联邦设施、地下储油罐、资源保护和回收法等方面都发挥了极其重要的作用。作为一种维护人类和环境安全的法律和行政手段，制度控制措施的应用可基于多种原因，有多种类型，具体措施包括限制场地用途、改变人类行为及向人们提供相关信息等，从而降低人类和环境暴露于污染物中的可能性。国外普遍的定义为，在现场遗留废弃物或者清理设备仍然留在现场的情况下，通过限制场地用途、改变人类行为及向人们提供相关信息等方式，降低人类和环境暴露于污染物中的可能性，从而达到安全的目的。制度控制很少单独用来处理场内污染物，是一种不

涉及建筑或物理变化的措施。一般作为一种行政和法律手段，作为一种基于工程和非工程补救措施的平衡的、实用的方法，成为一个大型清理方案的一部分来应用。制度控制可以用来防止人们不安全的使用场地或者防止人们损坏清理设备，有助于降低人们接触污染物的可能性，以便对人类和环境的潜在危害实施保护。

对于需要进行制度控制措施的场地，我国暂时没有法律强制规定需要采取张贴通告、限制人类活动等，只能通过当地政府或环保部门进行监督管理，并将此方法贯彻执行，同时应该对保护对象进行定期监测，才能保证人体和生态环境的安全。

6.3 污染场地地下水修复技术

土壤中的污染物会因地表径流、雨水或浅层地下水发生水平扩散和垂向迁移进入，有机污染物的迁移性比重金属强。因此，污染场地中的土壤污染常伴随地下水污染。地下水以其流向和联通的复杂性和隐蔽性，增大了其治理和修复的难度。由于地下水和土壤的连接紧密，使地下水的修复跟土壤的修复不可分离。只修复土壤，地下水仍然会对替换的土壤进行污染，反之亦然。在确定地下水污染状况时，应根据场地历史或土地利用的要求、已知或潜在的地下水污染物、场地的水文地质条件、当前和未来地下水资源的实际使用情况、邻近的地表水资源、已知或已经察觉的环境和健康风险等要素会影响地下水修复技术的选择。许多与特定场地相关的问题，如场地的水文地质条件（包括地下水的埋深、土壤或岩石的类型、多个含水层的存在情况等），对未受污染含水层或地表水的潜在污染，与场地地质结构、地下承载能力、场地基础建设、场地操作干扰等场地准入条件相关的限制因素，对环境和公众安全的风险，以及土地的柔韧性和饱和性、坑洼性地形及其稳定性等地质技术的限制，都可能会制约某些修复技术的应用，或者对地下水修复技术的选择产生决定性的作用。

污染物的类型与性质可影响其在地下水中的污染与分布情况，继而影响到修复技术与方法的选择，这些性质包括污染物的水溶性、NAPL的存在情况、污染物的相对密度、化学和生物稳定性、分配特点（吸附性、挥发性、亨利定理常数）、降解产物和电子受体的存在情况等。

鉴于地下水流向的分散性和迁移性，在进行地下水修复时需要对地下水建立监测井，以监测地下水断面的水位，防止因水位的降低等造成地面下沉等地质灾

害。监测井还需要对含水层的各种参数，例如渗透性、水力梯度、水体pH值，污染物浓度等进行监测和记录，同时也可得出污染物的扩散程度。

如遇到紧急泄露的情形，可使用抽出处理技术来防止污染物的进一步扩散。由于抽出处理技术在修复后期的处理效果较差，有明显的拖尾现场，因此需要结合其他的修复方式对污染的地下水进行处理。

对于挥发性/半挥发性有机物污染的地下水，可采用曝气法+土壤气相抽提、生物修复、化学氧化、渗透性反应墙、热解吸、植物修复、隔离墙和抽出-处理技术等修复方法。考虑到污染物的溶解度及吸附性等特性，由于挥发性有机物相对溶解度更小，更易从水体中溢出，因此含有挥发性有机物的地下水还可用双相提取法等技术进行修复。

对于石油类有机物污染的地下水，可采用原位化学氧化还原、渗透性反应墙、隔离墙和抽出处理技术等。对于无机物污染的地下水，可采用原位化学氧化还原、地下水固化稳定化、渗透性反应墙、隔离墙和抽出-处理技术等。其中渗透性反应墙的种类有多种，例如填充微生物、零价铁或各种木屑等吸附性物质的，统称为渗透性反应墙，具体可根据经济条件和污染物种类进行选择。

对1982-2005财政年度美国国家污染场地优先名录中采用抽出/处理系统、原位处理和监控的自然衰减技术修复地下水的工程分析表明，在所有的877个工程中，采用抽出/处理系统的工程的比例高达83%。但至1997年以后，在地下水修复工程中，采用抽出/处理系统的工程数量与采用其它技术的工程数量非常接近，说明抽出/处理系统虽然是一个效果非常好的成熟修复技术，但由于抽出/处理系统修复地下水工程的完成的比例很低(约10%)，不能完全移除地下水中的污染物，成本也非常高。因此，随着人们对场地修复认识的提高，以及基于风险的控制目标的采用，原位工程控制措施和监控的自然衰减技术日益受到青睐。在目前及以后的应用中，建议将抽出-处理作为控制地下水中污染物扩散的技术进行应用。

在低风险地下水的治理方法中，建议可采用监控自然衰减的技术，利用自然界的微生物等进行自净，保护人体和生态健康。需注意的是，此类场地再利用需要运行严格的风险评估程序，确保其风险值在可接受范围内。监控自然衰减并不是不采取措施，而是通过人为的监测来确定自然衰减可以使环境中（特别是地下水）中的污染物的浓度和扩散范围不会对人体和生态环境产生危害。监控自然衰

减是一种被动处理措施，对环境的修复不是通过采取具体措施降低污染物的浓度或毒性，或迁移性等，而是在污染风险较低或经费收到限制情况下，采取的一种应对措施。

6.4 污染场地环境修复技术筛选及应用

6.4.1 修复技术的确定原则

（1）污染场地的修复需根据污染物的特性、场地具体水文地质等条件，筛选出能够将污染物清除或降低其迁移性的可满足场地利用类型要求的技术方法，体现适用性和稳定性。

（2）对于常见污染物及复合污染物，结合场地条件等选择具有操作性的技术手段，也可以在经过小试或中试试验确定参数后选择较为新型的方法，体现创新性。

（3）结合场地资金支持情况和修复时间要求进行修复技术筛选，在保证处理效果的基础上，优先选择无二次污染或次生污染少的修复技术。修复的效果以满足该场地的利用类型为主，避免过度修复。

6.4.2 修复技术的评估和筛选方法

编制组通过查阅文献、考察现场、采样实测等方法，汇集了目前土壤和地下水修复的常用技术。

应用综合评价方法，对土壤和地下水污染修复技术进行系统、科学的评估，筛选出综合评价指标，并建立筛选体系和评价标准（表 1）。

表 1 修复技术筛选指标与评价标准

项目		☞ 好	· 中	① 差	其他
成熟性		已成功应用且资料齐全	已有应用但需要改进	处于实验研究阶段	Δ 表示修复效率或者指标性能取决于特定场地条件和技术设计参数。
可操作性		掌握相关原理及技术参数	技术参数需要调整	技术参数需要较大改进	
适用土壤渗透性		渗透性差	渗透性一般	渗透性良好	
污染物去除率/无害化率		>90%	70-90%	<70%	
时间	土壤原位	<1 年	1-3 年	>3 年	

	土壤异位	<6 个月	6 个月~1 年	>1 年
	地下水	<3 年	3~10 年	>10 年
费用（元/t）		<500	500~1000	>1000
二次污染		小	中等	大
公众认可度		>60%	30%~60%	<30%
各类污染物		非常适用	不完全适用	不适用

6.5 污染场地修复过程次生污染预防

（1）人员防护和车辆管控

污染场地修复的目的是为了保护人体健康和生态环境，在修复过程中不管是污染物本身的挥发、污染土壤粉尘、污染水体的接触都可能通过呼吸、皮肤或饮用等进入人体造成损害，因此需要对其中的施工人员进行安全防护。同时出入的人员和车辆会沾染污染土壤，污染物会随人员走动和车辆运输往外扩散，因此应对人员和车辆进行严格管控。

（2）污染土壤和地下水的异位处置过程符合要求

针对需要异位处理的污染土壤，修复过程中需要进行土壤的挖掘、转移、运输和处置，均宜遵循国家或地方相关固体废物的法律法规。如其中有挥发性污染物质的，择需根据相关法规进行挖掘过程中的覆盖及运输中的密闭处理等，避免挥发性物质造成二次污染。含污染物的土壤在运输过程中，应该清理运输车道及车身、车轮上的污染土壤，防止场内污染物散落到场外。对于含有挥发/半挥发性有机污染物的土壤在运输过程中，应当进行保证车辆的密封，防止污染物溢出。

（3）处置过程中“三废”的处理

人们在场地上的挖掘活动会大规模的改变土壤污染物的分布，造成污染物向更大范围扩散，并且可能对实施挖掘活动的人产生健康、安全方面的不利影响，因此，应尽量采取覆盖等措施控制扬尘及挥发性污染物的自由排放，保护环境和人体健康不受危害。在对土壤及地下水进行处理时，如采用淋洗等方式，可能会对自然环境有影响，应避免场地中的水土流失；水处理过程中产生的废弃沉渣和废水应进行集中处理，防止随意堆放产生二次污染。现场挖掘机等设备的工作以及运输车辆进出频繁，必要时应进行交通管制，避免对地方交通产生影响；同时，应尽量避免周围群众的休息时间，特别是在住宅区密集的区域，降低噪声控制在

一定标准下。

（4）更换材料的处置

为保证修复效果，用来吸附污染物的活性炭和渗透性反应墙中的填充材料需要定期更换，这些材料中累积了大量污染物，如随意弃置则非常容易造成二次污染，因此应按照国家有关规定，对这类材料进行集中处置和更换。

（5）富集介质的处置

一些植物修复、物理和物理化学修复技术，是利用富集效果来清除介质中污染物的，例如超累积植物对于重金属的富集，曝气或电动力学修复技术在土壤中富集污染物等，处理后的介质富含浓度较高的化学物质，在条件允许的情况下可对其进行回收利用，否则应按照国家相关规定进行集中处理或统一管理。

（6）定期监测

当采用热解吸、焚烧或土壤气相抽提等处理技术时，由于其温度条件或处理方法等会产生尾气或危害更大的污染物，对环境造成更严重的影响，例如，含氯苯的污染土壤在高温条件下易产生二噁英，具有高毒性，足以威胁环境和人体健康。对于此类易产生毒性气体的修复技术，需要对尾气进行监测，并对其进行有效处理使达标排放，以防对人体健康和生态环境产生危害。

7 指南实施建议

本指南围绕污染场地修复过程技术选择的需要,在对不同种类修复技术进行系统分析和评估的基础上,结合目前的技术发展水平和应用状况,提出了修复技术筛选体系,对于推进场地土壤和地下水修复技术的选择、修复技术方案的制定、工程管理等方面的工作具有重要的指导意义。

本指南所提到的修复技术为现阶段具有应用和开发价值的技术,在鼓励采用适用于特定场地的修复技术和技术组合的同时,应鼓励开发应用更加成熟、可靠、绿色的修复技术,并根据国内外污染场地修复技术水平的提高适时修订本指南。