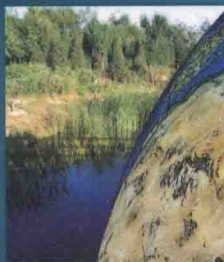


Investigation Assessment and Remediation
of Contaminated Sites

污染场地调查 评价与修复

杨再福 编著



化学工业出版社

污染场地调查评价与修复

Investigation Assessment and Remediation
of Contaminated Sites

杨再福 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共分为 9 章, 内容主要包括概述、场地污染过程与模拟、污染场地调查与监测方法、污染场地健康风险评价、场地生态风险评价、污染土壤修复技术、污染地下水修复技术、污染场地修复技术筛选与修复工程实践、污染修复效果检验与原理。

本书可供环境保护领域的技术人员、管理人员阅读使用, 也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

污染场地调查评价与修复/杨再福编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-122-28624-6

I. ①污… II. ①杨… III. ①场地-环境污染-污染调查②场地-环境污染-污染防治 IV. ①X508

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 298112 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 刘亚婷

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 470 千字 2017 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

前言

我国正在经历历史上规模最大、速度最快的城镇化与工业现代化进程，而美好环境是人类生存发展的物质基础，与健康息息相关、与发展密不可分，是产生一切人才、一切美好事物和美丽家园的基础。随着中国国民经济的快速发展和产业转型，以及“退二进三、退城进园、产业转移、产业升级”等一系列管理政策的发布，每年国内数以万计的工业企业关停或搬迁遗留下了大量的污染场地。而公众对环境问题的关注度越来越高、维权意识越来越强，公众环保意识的觉醒和随之而来的环境公众事件是污染场地修复行业发展的重要契机。但当今环境污染严重，环境承载能力已达到或接近上限，生态环境问题已成为全面建成小康社会的短板。我国目前耕地土壤质量正逐步下降，工矿业废弃地的土壤问题也逐渐凸显，土壤恶化速度加快。发展离不开土壤，土壤修复迫在眉睫。土壤修复是继大气治理、水体治理后又一大民生工程，未来我国土壤修复潜在市场将高达数万亿元，其中利润空间比较大的城市污染场地修复和耕地修复将成为投资者的首选，然而，成本高、周期长、难度大将成为土壤修复面临的难题。

本书在综合国际上主要发达国家的污染场地发展与修复历史的基础上，结合我国的污染现状阐述了污染场地调查评价与修复的问题。第1章概述了我国污染土壤与地下水的污染状况，结合国外污染场地发展史与经验，提出了我国污染场地的类型、现状与发展过程，以及已有相关法律法规的解读。第2章在场地水文地质分析的基础上对场地污染过程、迁移转化与模拟进行了分析。第3章对场地调查、监测方法、场地概念模型与不确定性因素进行了详细分析与总结。第4章对场地健康风险评价方法以及我国污染场地健康风险评估方法进行了系统分析。第5章污染场地生态风险评价方法与应用，探讨了目前较为先进的污染场地生态风险评价方法。第6章在传统土壤修复方法的基础上建立了土壤联合技术及其发展趋势的探讨。第7章归纳总结了地下水污染场地的修复方法与技术。第8章介绍了污染场地修复技术筛选与修复工程实践、如何建立全面而系统的绿色可持续的污染场地修复技术，归纳总结了修复融资策略。第9章进行了污染场地验收方法、修复标准的制定与污染场地管理方面的研究。本书参考了一些国内外著名论著与污染场地评价与修复工程师授课资料，对上述文献作者以及研究生孙冉冉等，一并表示衷心感谢！

本书力求内容系统和全面，体现并突出新方法与创新特色。但限于编著者的水平，本书难免存在疏漏和不足，敬请读者提出宝贵意见和建议。联系电话：021-67792551，微信 giantman1，E-mail: zzfyang@dhu.edu.cn。

杨再福

2016年1月于上海东华大学环境学院 5151 室

目 录

1 概述	1
1.1 污染场地概述	1
1.2 土壤污染状况	2
1.3 地下水污染状况	3
1.4 污染场地发展历史与相关法律法规	5
1.4.1 污染场地相关概念	5
1.4.2 美国污染场地	6
1.4.3 英国污染场地	10
1.4.4 日本污染场地	11
1.4.5 加拿大污染场地	11
1.4.6 荷兰	14
1.4.7 德国	14
1.4.8 国外污染场地调查修复特点	14
1.5 我国污染场地发展历史与现状	16
1.5.1 我国污染场地发展历史	16
1.5.2 我国污染场地类型	17
1.5.3 我国污染场地的现状与特点	19
1.5.4 我国污染场地法律法规的发展过程	21
1.5.5 我国污染场地发展存在的主要问题	22
1.5.6 我国《土壤污染防治行动计划》解读	24
2 场地污染过程与模拟	27
2.1 场地基本特性简介	27
2.1.1 土壤基本特性	27
2.1.2 地下水基本特性	32
2.1.3 污染场地的相关参数	44
2.2 污染物在场地环境中的迁移	44
2.2.1 污染物迁移过程	44
2.2.2 地下水污染迁移过程	45
2.2.3 污染物迁移原理与模拟	48
2.3 污染物迁移数据处理与制图	52

2.3.1	离散数据网格化方法简介	52
2.3.2	污染物扩散迁移推荐模型	58
2.4	污染场地模拟软件模型	62
2.4.1	GMS (Groundwater Modeling System)	62
2.4.2	Visual MODFlow	63
2.4.3	Visual Groundwater	63

3 污染场地调查与监测方法..... 64

3.1	场地调查的基本程序	65
3.1.1	国外场地调查基本程序	65
3.1.2	我国《污染场地调查技术导则》的场地调查流程	65
3.2	场地第一阶段调查	66
3.2.1	第一阶段调查内容	67
3.2.2	第一阶段调查方法	68
3.2.3	第一阶段调查目标	70
3.3	场地第二阶段调查	70
3.3.1	场地第二阶段调查主要目标	70
3.3.2	确定第二阶段调查测试清单	72
3.3.3	第二阶段调查方法	74
3.3.4	场地概念模型建立方法	75
3.4	土壤污染场地调查与监测方法	75
3.4.1	土壤样方设置方法	75
3.4.2	土壤样品的采集、保存与运输	83
3.5	地下水污染场地调查	87
3.5.1	地下水调查内容与原则	87
3.5.2	地下水监测布点方法	88
3.5.3	地下水调查方法	89
3.5.4	地下水取样与检测	94
3.5.5	地下水污染羽圈定	95
3.6	场地内其他污染调查方法	96
3.6.1	地表水污染调查	96
3.6.2	沉积物采样点的布设及样品采集技术	97
3.6.3	大气污染调查采样点的布设及样品采集技术	97
3.6.4	污染场地样品分析方法	98
3.6.5	场地第三阶段调查	101
3.7	数据处理与质量控制	102
3.7.1	分析结果的表示方法	102
3.7.2	质量保证和质量控制	102

3.7.3	不确定性分析	104
3.8	污染场地调查报告及其编制	105
4	污染场地健康风险评价	106
4.1	风险评价程序和基本方法	107
4.1.1	风险评价程序	107
4.1.2	危害识别	107
4.1.3	毒性评估	109
4.1.4	暴露评估	112
4.1.5	暴露量计算	114
4.1.6	风险表征	115
4.1.7	暴露风险贡献率分析	118
4.1.8	污染物修复目标的计算	118
4.2	污染场地风险评估技术导则 (HJ 25.3—2014) 简介	121
4.2.1	污染场地风险评估技术导则方法简介	121
4.2.2	污染场地风险评估技术导则存在的问题	123
4.3	不确定性分析	125
4.3.1	不确定性分析模式	127
4.3.2	模型参数敏感性分析	128
4.4	人体健康风险评估模型	129
4.4.1	暴露模型	130
4.4.2	健康风险评价软件	131
4.5	污染场地修复基准与修复标准	132
4.5.1	污染场地修复标准建立方法	132
4.5.2	国外污染场地修复标准	135
4.5.3	中国污染土壤修复标准	138
4.5.4	污染场地污染物修复目标确定	138
4.5.5	污染场地环境风险评价指导值	139
5	场地生态风险评价	140
5.1	生态风险评价的发展与基本流程	140
5.1.1	生态风险评价的发展简史	141
5.1.2	生态风险评价基本流程	142
5.2	生态风险评估方法	143
5.2.1	污染区域生态风险评价方法	144
5.2.2	评估因子法	146
5.2.3	商值法	146
5.2.4	物种敏感性分布法	147

5.2.5	生物有效性评估	149
5.2.6	土壤生态系统服务功能评估	149
5.2.7	专家判断法	151
5.3	场地生态风险评估模型与软件	151
5.4	不确定性分析	152
5.5	地下水风险评价方法	153
5.5.1	地下水脆弱性评价	153
5.5.2	外界污染源种类与危险度识别	155
5.5.3	地下水价值功能评价	155
5.5.4	污染物复杂物理、化学和生物过程模拟法	156
5.5.5	地下水污染风险计算	156
5.5.6	生态风险管理	158

6 污染土壤修复技术 159

6.1	污染土壤原位修复技术	160
6.1.1	土壤混合/稀释技术	160
6.1.2	填埋法	160
6.1.3	固化/稳定化技术	161
6.1.4	土壤气相抽提技术	165
6.1.5	热解吸修复技术	170
6.1.6	土壤微生物修复技术	171
6.1.7	植物修复技术	182
6.1.8	氧化还原技术	185
6.1.9	电动修复技术	188
6.1.10	土地处理技术	191
6.1.11	机械力化学修复	192
6.1.12	生物通风技术	192
6.1.13	农业土壤修复	193
6.1.14	其他修复技术	194
6.1.15	土壤原位修复技术汇总	195
6.2	污染土壤异位修复技术	195
6.2.1	土壤淋洗技术	195
6.2.2	泥浆相生物处理	197
6.2.3	化学萃取技术	197
6.2.4	焚烧	199
6.2.5	水泥窑共处置技术	200
6.3	污染土壤联合修复技术	201
6.4	土壤污染修复案例	202

6.5	土壤修复技术的发展趋势	204
7	污染地下水修复技术	205
7.1	地下水污染原位修复技术	206
7.1.1	空气注入修复技术	207
7.1.2	地下水循环井技术	209
7.1.3	可渗透反应墙技术	211
7.1.4	化学氧化还原技术	215
7.1.5	电动修复技术	217
7.1.6	生物修复技术	218
7.1.7	原位反应带技术	220
7.2	抽出处理技术	221
7.3	监控式自然衰减	223
7.4	地下水主要修复技术比较	223
7.5	地下水联合修复技术	225
7.5.1	土壤气相抽提-原位曝气/生物曝气联合修复 (SVE-AS/BS)	225
7.5.2	生物通风-原位曝气/生物曝气联合修复 (BV-AS/BS)	226
7.5.3	双相抽提	227
7.5.4	表面活性剂增强修复技术	227
7.5.5	电动修复 + 渗透反应墙	228
7.6	地下水污染的预警	232
7.7	污染场地修复过程管理与次生污染预防	233
8	污染场地修复技术筛选与修复工程实践	234
8.1	污染场地修复技术筛选	234
8.1.1	场地修复技术筛选的程序与原则	234
8.1.2	修复技术选择步骤与方法	235
8.1.3	场地修复技术筛选方法	236
8.1.4	场地修复的组合技术方案	238
8.2	污染场地修复工程设计与方案	246
8.2.1	污染场地修复工程程序	246
8.2.2	修复工程设计与方案	247
8.2.3	修复工程实践	248
8.3	绿色与可持续修复技术	248
8.3.1	绿色可持续修复目标与框架	249
8.3.2	绿色可持续修复原则	249
8.3.3	最佳管理方法	250
8.3.4	绿色可持续修复案例分析 (Krishna R. Reddy, Jeffrey A. Adams, 2015)	253

8.4	污染场地修复资金来源	267
8.5	污染场地修复存在的问题与发展趋势	268
9	污染修复效果检验与管理	269
9.1	污染场地修复标准	269
9.1.1	修复效果评价指标体系	269
9.1.2	修复效果评价	270
9.1.3	污染土壤修复效果生态学评价	270
9.2	污染场地修复验收	272
9.2.1	污染场地修复验收程序	272
9.2.2	验收监测布点要求	274
9.2.3	污染场地修复工程验收监测点位的布设	274
9.2.4	修复效果评价	279
9.2.5	质量控制与质量保证	280
9.2.6	验收报告编制	280
9.3	污染场地修复的环境监理	281
9.4	目前无法修复的污染场地管理	287
9.5	修复终止和场地关闭	289
9.6	污染场地风险管理策略	290
9.6.1	我国污染场地管理思路	290
9.6.2	美国污染场地管理体系	290
9.6.3	我国污染场地发展远景	292
	参考文献	293

1 概 述

1.1 污染场地概述

资源环境问题是长期制约我国社会经济可持续发展的重大问题。随着人类社会的发展,城市化进程不断加快,越来越多的工业企业搬迁,遗留下来大量可能存在潜在环境风险的场地。我国数以万计的工业企业关停或搬迁遗留下了大量的污染场地,据《中国环境年鉴》(2002—2009年),2001—2008年我国关停并转迁企业数由6611个迅速增加到22488个,增速为1984个/a,总数达到10万个以上。场地再利用需求量大,场地开发市场规模急剧膨胀,然而未经环境调查评价或修复的场地,再利用时就可能存在健康与生态隐患,场地土层中所含的易迁移污染组分对地下水也会产生一定的影响,甚至引发严重后果。在国外,因为缺乏规范的场地环境调查和修复制度及标准,发达国家场地开发再利用过程中都曾经多次出现污染事故,尤其是一些污染严重企业遗留下来的场地,如美国拉芙运河事件、日本东京都铬渣污染事件、英国 Loscoe 事件。

在美国化学文摘 (Chemical Abstracts, CA) 上正式登录的化合物数目就已超过了1300万种,目前已知的化合物远远超过3000万种,已经进入环境中的化学物质6.5万~8.5万种。全球人工合成的化学物质,1970年已达6000多万吨,到1985年增加到2亿5千万吨。全世界平均每年排放 Hg、Cu、Pb、Mn、Ni 分别达到1.5万吨、340万吨、500万吨、1500万吨、100万吨。进入自然界中的化合物(污染物)受到物理、化学、光化学和生物的作用而降解转化。从20世纪70年代,荷兰、美国等发现化学废弃物的倾倒导致土壤严重污染至今,土壤污染已遍布全球并主要集中在欧洲,其次是亚洲和美洲。亚洲约有 2.5×10^4 km²的污灌区,其中遭受重金属污染的占64.8%。我国近30年来伴随工艺水平化、城市化、农村集约化进程的加速,土壤问题日益突出。农业部调查全国污灌区中重金属污染占64.8%、轻度46.7%、严重8.4%。土壤污染不仅影响土壤与土地生产力、导致水体与大气质量下降,而且对我国实现可持续发展构成威胁。大量的环境异生物质通过各种途径进入环境,含量不一,变化多端,给环境带来巨大影响,给地球生物带来各种即时的或潜在的危害。污染场地对环境的危害主要包括以下几种。

- ① 由于污染场地渗漏液导致地下水与地表水质量恶化;
- ② 公众直接与污染土壤接触,或污染土壤对植物产生影响并通过食物链传递;
- ③ 垃圾填埋场气体的爆炸、燃烧与渗漏液对地下水的危害;
- ④ 污染场地泄漏液对地下管道和建筑物的侵蚀。

在环境产业发达的国家,土壤修复产业占环保产业的市场份额高达30%~50%。污染场地修复技术起源于欧美发达国家和地区,全球每年总修复费用为200亿~400亿美元。从表1.1可以看出,污染场地修复市场巨大。

表 1.1 2009 年全球污染场地修复市场

国家	污染场地数量/个	目前市值	未来潜在市场
美国	50000	120 亿美元, 约占全球需求量的 30 %	30~35 年后, 估计达到 1000 亿美元
加拿大	30000	2.5 亿~5 亿美元	10 年内达到 35 亿美元
澳大利亚	160000	—	—
英国	100000	60 亿英镑	—
日本	500000	12 亿美元	2010 年达到 30 亿美元

1.2 土壤污染状况

土壤资源是人类食物的主要来源，健康土壤带来健康生活。有研究表明 95% 的食物来自于土壤。中国是有 13 亿人口的大国，同时意味着它是粮食消费的大国，目前土壤生产和生态服务功能正不断下降。我国的土壤污染类型多样，呈现出新老污染物并存、无机有机复合污染的局面，既有重金属、农药、抗生素和持久性有机物等污染，又有放射性、病原菌等污染类型。土壤污染途径多，原因复杂，控制难度大。目前，我国土壤环境问题形势严峻，200 多万公顷以上的矿区污染仅有不到 20% 得到复垦，非正规垃圾填埋场导致的土壤和地下水污染总量巨大。产业转移及城镇化的进展，在客观上推动了我国污染场地修复行业的发展和进步。

根据《全国土壤污染状况调查公报》（2014 年 4 月 17 日），全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。全国土壤总的超标率为 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数占全部超标点位数的 82.8%。南方土壤污染重于北方；长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较为突出，西南、中南地区土壤重金属超标范围较大；镉、汞、砷、铅 4 种无机污染物含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。

无机污染物镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍 8 种无机污染物点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%。有机污染物六六六、滴滴涕、多环芳烃 3 类有机污染物点位超标率分别为 0.5%、1.9%、1.4%。

耕地土壤点位超标率为 19.4%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 13.7%、2.8%、1.8% 和 1.1%，主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃。林地土壤点位超标率为 10.0%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 5.9%、1.6%、1.2% 和 1.3%，主要污染物为砷、镉、六六六和滴滴涕。草地土壤点位超标率为 10.4%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 7.6%、1.2%、0.9% 和 0.7%，主要污染物为镍、镉和砷。未利用地土壤点位超标率为 11.4%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 8.4%、1.1%、0.9% 和 1.0%，主要污染物为镍和镉。

重污染企业土壤超标点位占 36.3%，主要涉及黑色金属、有色金属、皮革制品、造纸、石油煤炭、化工医药、化纤橡塑、矿物制品、金属制品、电力等行业。工业废弃地超标点位

占 34.9%，主要污染物为锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃，主要涉及化工业、矿业、冶金业等行业。工业园区土壤超标点位占 29.4%，金属冶炼类工业园区及其周边土壤主要污染物为镉、铅、铜、砷和锌，化工类园区及周边土壤的主要污染物为多环芳烃。固体废物处理处置场地的土壤超标点位占 21.3%，以无机污染为主，垃圾焚烧和填埋场有机污染严重。采油区土壤超标点位占 23.6%，主要污染物为石油烃和多环芳烃。采矿区土壤超标点位占 33.4%，主要污染物为镉、铅、砷和多环芳烃。有色金属矿区周边土壤镉、砷、铅等污染较为严重。调查 55 个污水灌溉区有 39 个存在土壤污染，超标点位占 26.4%，主要污染物为镉、砷和多环芳烃。干线公路两侧土壤超标点位占 20.3%，主要污染物为铅、锌、砷和多环芳烃，一般集中在公路两侧 150 米范围内。

国土部地质调查局发布的《中国耕地地球化学调查报告（2015 年）》，调查面积 150.7 万平方千米，调查耕地将近 14 亿亩，占 20 亿亩耕地的 68%。调查结果显示，8% 的耕地是受到污染的。我国真正意义上的土壤管理始于 2005 年，国务院发布《关于落实科学发展观加强环境保护的决定》，这个决定指出，以防治土壤污染为重点，加强农村环境保护；开展全国土壤污染调查和超标耕地综合治理；污染严重难以修复的耕地应依法调整。中国目前治理污染土壤花费了巨大财力，有专家称保护和修复已经受到污染的财力分布是 1:100 的关系，即花 1 块钱保护、花 100 块钱修理。因此，源头保护，使土壤不变毒是基本需求。

我国的场地类型主要有：农田耕地、工业市政场地、矿区土地、非正规堆场。场地污染有很大隐蔽性、潜在性、滞后性和持久性。污染物通常存在于土壤并通过土壤转移，变化和移动非常缓慢（几年甚至几十年），污染只有触及受体时才可能会被发现。

土壤修复市场主要包括污染场地修复、矿山土地修复和耕地修复。到 2020 年我国整个土壤修复的市场有可能达到上万亿元人民币。由于中国城市化进程加快，以前的化工矿产企业逐渐从城市中心搬迁至郊区，目前对城市中的污染场地修复需求最高。

土壤修复是多学科协同的复杂系统工程，随着近年来土壤污染事故时有发生，土壤污染治理开始成为热点，由此引爆了土壤污染修复市场。我国土壤污染治理刚刚起步，与发达国家相比总体差距较大，可一旦市场打开，其规模将远远大于大气和水污染治理。土壤污染一定程度上可看作是大气污染、水污染和固体废物污染的结果。目前我国土壤污染修复产业产值尚不足环保产业总产值的 1%。而在发达国家，这一比重达 30% 以上。2013 年，全国土壤修复领域企业由 200 多家增至 500 多家，产值达 140 亿元。未来 4~5 年，将是土壤修复产业快速发展的黄金期。我国计划到 2020 年，土壤污染恶化趋势得到遏制，农用地土壤得到有效保护，建设用地土壤安全得到基本保障，土壤污染防治示范取得明显成效，土壤环境管理体制机制基本健全。同时加快建立法规标准体系，实施土壤修复工程，实施农用地分级管理，坚决切断各类污染源，实施建设用地分类管理，强化土壤环境空间管制，加大科技研发力度，推动环保产业发展。发挥市场作用，完善投融资机制；建立健全管理体系，提升监管能力；强化目标考核，严格责任追究等。

1.3 地下水污染状况

世界上可供人类使用的淡水中 68% 是地下水。全世界超过 15 亿的人口主要依靠地下水作为饮用水。据统计日本 25% 的饮用水为地下水，美国 85% 以上的饮用水来自地下水，欧洲的比例约为 80%。中国地下水天然资源占全国水资源总量的 1/3，约为 $8.625 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

地下水开采量占全国总供水量的近 20%，全国 70% 的人口饮用地下水。在全国 600 多个城市中有 400 多个城市开采利用地下水。在广大的农村，地下水更成为主要的饮用水源。

凡是人类活动导致进入地下水并使水质恶化的溶解物或悬浮物，无论其浓度是否达到使水质明显恶化的程度，均称为地下水污染物。对地下水的污染途径可以分为：间歇入渗型、连续入渗型、越流型、径流型。连续入渗和间接入渗主要是污染潜水。对含水层污染的主要是越流型污染，它对地下水的影响非常大。在地下水中最难治理和对人类危害最大的是有机污染。美国环保署（USEPA）水质调查发现供水系统中有机污染物有 2110 种，饮用水中含 765 种。

我国部分行业严重威胁地下水环境安全，仅 2009 年全国 2 亿多吨工业固体废物未得到有效综合利用或处置，铬渣和锰渣堆放场渗漏污染地下水事件时有发生；石油化工业勘探、开采及生产等活动显著影响地下水水质，加油站渗漏污染地下水问题日益显现；部分工业企业通过渗井、渗坑和裂隙排放、倾倒工业废水，造成地下水污染；部分地下水工程设施及活动止水措施不完善，导致地表污水直接污染含水层，以及不同含水层之间交叉污染。我国单位耕地面积化肥及农药用量分别为世界平均水平的 2.8 倍和 3 倍，大量化肥和农药通过土壤渗透等方式污染地下水；部分地区长期利用污水灌溉，对农田及地下水环境构成危害，农业区地下水氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮超标和有机污染日益严重。加油站渗漏的典型污染物为石油烃（TPH）、苯系物（BTEX）、萘和甲基叔丁基醚（MTBE）。垃圾填埋场的主要污染物为 COD、Cd、Cu、Pb、Cr、Zn、氨氮、BOD₅。2008—2010 年，通过对全国 31 个省的 69 个城市地下水有机污染物检测，我国城市地下水有机污染超标率较低，但是检出率较高。超标率由高到低分别为：四氯化碳 0.75%、苯 0.5%、氯仿（三氯甲烷）0.25%、1,2-二氯乙烷（C₂H₄Cl₂）0.25%、三氯乙烯（C₂HCl₃，TCE）0.13%、1,1,2-三氯乙烷（C₂H₃Cl₃）0.13%、1,2-二氯丙烷 0.13%、苯并[a]芘 0.13%。地下水无机污染物主要是金属，包括 Cr、Cd、Pb、Hg、As、Ni、Zn、Cu、Ag 等；类金属砷；有机污染物如苯并[a]芘、四氯化碳、农药；无机污染物如硝酸盐等。

我国 90% 城市地下水不同程度遭受有机污染物、氮素、有毒有害元素污染，其中 60% 污染严重。地下水污染已经呈现出由点向面演化、由东部向西部扩展、由城市向农村蔓延、由局部向区域扩散的趋势；污染物组分则由无机物向有机物发展，危害程度日趋严重；地下水污染面积不断扩大，污染程度加剧。我国地下水中“三氮”，即氨氮（NH₃-N）、硝酸盐（NO₃⁻）、亚硝酸盐（NO₂⁻）超标普遍。

地下水中常见无机污染物有 37 种：最常见的是 NO₃⁻-N，其次是 Cl⁻、硬度、SO₄²⁻、TDS 等。它们的特点是大面积的污染多，局部的污染少，金属污染物比较少见。

地下水中常见有机污染物有 183 种：其中芳烃类 32 种；卤代烃类 25 种；含特殊元素烃类 111 种；其他烃类 15 种。它们包含了 63 种农药。最常见检出率高的是氯代烃，如 PCE、TCE、DCE、DCA（dichloroethane）、TCM 等；其次是单环芳烃，如 BTEX。

地下水微量有机污染组分含量虽然很低，往往都是 ppm（10⁻⁶）、ppb（10⁻⁹）甚至是 ppt（10⁻¹²）数量级的，但其危害是极其严重的，在世界范围内的饮用地下水中，已检出有机污染物 700 多种，其中 117 种是属于“三致”（致癌、致畸、致突变）物质。一些地区肠癌、宫颈癌、卵巢癌的高发均与饮水有机污染有关。有些有机组分使遗传基因发生变化，对人类繁衍构成危机。

地下水的补充速度是非常缓慢的，其循环周期是 1400 年，地下水蓄水层的形成需要几

十甚至上百年，而人们抽取地下水的速度远远高于其补充速度。而且由于某些地理及自然条件的限制，过度采集地下水会使地下蓄水层沉积物变得致密，从而使地下蓄水层的储水量不可逆转地永久缩减。同时由于地下水自净能力较差，一旦受到污染，修复起来是相当困难的，有些甚至是不可逆转的。随着水中污染物质不断在蓄水层中积累，可利用的地下水源正迅速减少。

1.4 污染场地发展历史与相关法律法规

1.4.1 污染场地相关概念

场地（site）是指某一地块范围内的土壤、地下水、地表水以及地块内所有构筑物、设施和生物的总和，或具有一定平面（面积为几百平方米至几平方千米）或空间范围的地域，包括地表附属物及地表以下的土壤和地下水。污染场地是指具有实际危害或潜在威胁的特定空间区域。

污染场地是指因从事生产、经营、使用、贮存、堆放有毒有害物质，或者处理、处置有毒有害废物，或者因有毒有害物质迁移、突发事件，造成场地内及周边不同程度的环境污染，涉及场地内部各种废弃物、建筑物墙体和设备，场地及周边土壤、地下水、地表水等，从而超过人体健康、生态环境可接受风险水平的场地。

中国环保部对污染场地的定义为：污染场地是指因堆积、贮存、处理、处置或其他方式（如迁移）承载了有害物质的，对人体健康或环境产生危害或具有潜在风险的空间区域。

污染场地构成必须是指一定区域或范围内存在的有害物质的含量或浓度对人类健康或生态环境构成威胁。其中有毒有害物质是污染场地的必要条件，污染场地法律规范研究和保护的对象为敏感受体并具有生命特征。污染场地属于非区域性环境问题，是非自然因素引起的有害有毒物质在环境中浓度升高（自然背景），且有害有毒物质浓度超过风险可接受水平。

国外对污染场地的定义与评论见表 1.2。

表 1.2 国外对污染场地的定义与评论

出处	定义	评论
美国环保署（U. S. EPA）：《超级基金法》	因堆积、贮存、处理或其他方式（如迁移）承载了有害物质的任何区域或空间	定义中没有规定有害物质浓度或累积的量需要达到何种程度。导致污染场地数量有夸大的可能
加拿大标准协会（CSA）	因有害物质存在于土壤、水体、空气等环境介质中，可能对人类健康或自然环境产生负面影响的区域	“可能”一词用得不当，极易与潜在污染场地混淆
荷兰：《土壤保护法》（1994）	已被有害物质污染或可能被污染，并对人类、植物或动物的功能属性已经或正在产生影响的场地	“或可能被污染”有些画蛇添足，去掉为好
西班牙	因人为活动产生的有毒有害物质的污染，使土壤功能失去平衡的区域	“使土壤功能失去平衡”只指土壤，范围太局限。而地下水、地表水等环境介质呢？
奥地利：《污染场地清洁法》（1989）	依据风险评价结果，包括土壤和地下水在内对人类和环境构成相当威胁的废物场地和工业场地	定义的“废物场地和工业场地”范围有些局限，问题出在对场地概念的理解

续表

出处	定义	评论
比利时:《土壤修复法令》	因人类的活动产生的污染物质赋存于土壤环境,并造成直接或间接的负面影响,或可能产生潜在负面影响的区域	只指土壤,范围太局限。与西班牙定义的缺陷一样
丹麦:《污染场地政策》	物质浓度高于指定的质量标准,对人类或环境存在威胁的场地	这一定义包括了自然状况下有害物质情形,若增加“人类活动或影响”这样的定语就完善了
芬兰:《废物法》	土壤中过量有害物质导致急性或长期危害	只指土壤,范围太局限。与西班牙、比利时定义的缺陷一样
瑞典环保署	经由工业或其他活动,故意或非故意污染的区域,垃圾场地、土地、地下水或沉积物	用“污染区域”来定义“污染场地”,概念转移,等同于没有解释
欧盟环保署:《西欧污染场地管理》(2000)	依据风险评价结果,废物或有害物质质量或浓度构成对人类或环境威胁的场所	把“场地”解释为“场所”,不太准确

1.4.2 美国污染场地

1962 年蕾切尔·卡逊 (Rachel Carson) 的《寂静的春天》直接推动了包括 DDT 在内的一系列杀虫剂的禁用,导致公众目光聚焦到农药污染土壤上。美国 1976 年颁布《资源保护与回收法》,其中对场地污染作了法律规定;1980 年发布《综合环境响应、补偿和义务法》(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA),其中规定土地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,并批准设立污染场地管理与修复的超级基金制度。

1.4.2.1 美国超级基金制度

1976—1978 年拉芙运河 (Love Canal) 事件:1894 年在美国加利福尼亚州开凿运河,1920 年废弃运河为游泳和休闲之后,1943—1953 年胡克电化学公司 (Hooker Electrochemical Company),将 2 万吨的化学物质废料封存入铁桶中,放入拉芙运河,填埋废物 21000t,超过 248 种化学品,59kg 二噁英,用泥土封住了运河的顶部;1953 年 Hooker 公司将该地块卖给了尼亚加拉瀑布市教育委员会,随后该委员会在该地块上建立了学校,并将其他部分卖出建设居住用地,最终导致污染物在地面聚积并四处流窜。1976 年及随后大量的调查报告表明,有毒污染物已渗入到居民的地下室,该地区出现了人、动植物异常,包括流产率、婴儿死亡率、肾和泌尿系统疾病增加等。主要有毒废物包括二噁英等。1994 年西方石油公司 (收购胡克公司) 被裁定“在废物处理和出售土地方面疏忽但不莽撞”、胡克 (Hooker) 化学的母公司被勒令支付 2.36 亿美元的赔偿。截至 2004 年,在付出 4 亿美元的代价和 24 年的时间后,拉芙运河的污染物清除工作才宣告完成。修复后拉芙运河地区再次成为繁荣社区。

在拉芙运河事件后,1980 年联邦政府通过了《超级基金法》,该法案强迫污染者付费清除被抛弃废弃物的垃圾场和他们制造的新废弃物。1980-12-11《综合环境响应、赔偿和责任法》——“超级基金”法 (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980, CERCLA) 赋予联邦政府 (USEPA) 管理污染场地的责任和权力,提出全国污染场地管理计划 (超级基金计划),确定相关责任方的原则,设立场地污染治理资

金（16 亿美元信托基金，又称超级基金），主要用于风险评估、责任追溯。而对于无主和污染者无力承担的污染场地，超级基金可支付约 30% 的费用。

美国超级基金制度与评价体系分为评估和修复两个阶段，场地评估是起始工作，筛选污染严重、危害最高的污染场地作为优先治理的场地列入国家优先控制场地名录（NPL），并基于《超级基金法》进行修复。评估包括如下内容。

（1）通知和发现污染场地、列入 CERCLIS 数据库 CERCLA 规定，如果污染物质释放量超过了其常规限值——“值得上报数量”（Reportable Quantities, RQ），当事人必须上报国家应急中心（National Response Center），否则会受到处罚。全国应急中心通知相应的职责部门，并采取任何必要的执法行动。污染场地的发现，不但包括各级环保机构的稽查行动，历史清单或调查项目，而且任何公民和组织均可检举可能存在的危险物质释放。

（2）PA 初步评估 初步评估（Preliminary Assessment, PA）包括文件搜索；桌面数据收集；地图、地质信息、数据库和地理信息系统、航拍照片、电话咨询；实地勘察（实地勘察准备、进行场内勘察、污染源特性描述和目标识别、额外数据收集、场地草图和照片文件材料、健康和安全问题）；进行场外勘察（周边考察、场地周围地区考察、额外数据收集）；应急反应相关问题。

初步评估是针对所有 CERCLIS 中的场地都要进行的一项概况调查工作。PA 的目标是在有限的经费支持下，根据有限的资料，区分出场地对于人类健康和环境的危害程度，减轻超级基金后续工作任务和节约管理成本。PA 调查人员根据 US EPA 1991 年颁布的《场地初步评估手册》（*Guidance for Performing Preliminary Assessments Under CERCLA*）进行评估。调查人员收集场地有关的数据、文件记录和图文资料等，通常还包括现场勘察，但不进行采样分析，根据 PA 指南或 EPA 提供的 PA-Score 评分软件评估场地的危害程度，如果场地得分大于 28.50 则要求进一步调查，给出场地调查（SI）的建议。PA 过程中还需要评估采取应急清除措施的必要性。如果调查者判断可以不需要进行完整的 PA 就可以达成目标，则可以进行简化 PA（Abbreviated PA, APA）。在 PA 阶段，可能部分重要数据尚缺乏，比如环境介质的污染分析浓度和受体实际暴露状况等，这些都是后续 HRS 评分的关键因子，在 PA 阶段只能依赖调查者合理且具有一致性的专业判断来评估，以作出对于有害物质释放及其传播到受体状况的假设。PA 阶段所作的专业判断是后续 SI 阶段所需印证的假设的基础和工作重点。由于 PA 调查的局限性，定性评估在 PA 初步评估阶段扮演重要角色，因此调查者的专业素养和从业经验就十分重要。关键的专业判断包括以下两种假设形式：①排放可能性——存在或不存在可疑的危险物质排放；②暴露目标——存在或不存在可疑的、暴露于危险物质的可能性较高的具体目标。

初步评估后建立综合环境反应、赔偿和责任信息系统（Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Information System, CERCLIS）是 EPA 维护的超级基金污染场地的数据库。CERCLIS 包含了美国全国各地污染场地的基本信息，包括场地 ID（CERCLIS 识别号码），名称，位置（市、县、州），NPL 状态，关注污染物，当前清理工作状态，清理行动的里程碑，已经清理污染介质（固体或液体）的数量，还有场地的记录文件，比如 RODs、五年审查等。

（3）SI 场地调查、扩展 SI（如有必要） 完成 PA 以后，如果场地得分大于 28.50，则需进行场地调查（Site Inspection, SI），为危害分级系统（Hazard Ranking System, HRS）评分提供确切信息，判断场地是否列入 NPL 以及进行相关数据文件的建档管理。