



“十三五”国家重点图书出版规划项目

工业污染地基处理与控制

丛书主编：刘松玉

污染场地处理原理与方法

PRINCIPLES AND METHODS OF
CONTAMINATED SITE TREATMENT

© 刘松玉 杜延军 刘志彬 著



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

“十三五”国家重点图书出版规划项目

污染场地处理原理与方法

刘松玉 杜延军 刘志彬 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书针对工业污染场地勘察与处理技术问题,全面介绍了污染场地勘察方法,土体污染后工程性质变化的基本规律,污染场地风险评价主要参数的原位测试技术,污染场地处理原则,重点介绍了重金属污染场地的固化/稳定处理技术、有机污染场地的曝气法处理技术和污染场地的隔离技术。本书可供岩土工程专业研究生、本科生参考,也可供环境、岩土工程勘察施工专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

污染场地处理原理与方法/刘松玉,杜延军,刘志彬
著.—南京:东南大学出版社,2018.8

(工业污染地基处理与控制 / 刘松玉主编)

ISBN 978-7-5641-7832-1

I. ①污… II. ①刘… ②杜… ③刘… III. ①场
地—环境污染—污染控制 IV. ①X506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 138334 号

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人:江建中

网 址:<http://www.seupress.com>

电子邮箱:press@seupress.com

经 销:全国各地新华书店

印 刷:江苏凤凰数码印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:13

字 数:324 千字

版 次:2018 年 8 月第 1 版

印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-7832-1

定 价:68.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025-83792328

前言

我国城市化进程高速发展为经济持续发展提供了强劲持久的动力,但也导致城市用地紧张、交通堵塞、环境污染等城市问题日益突出,严重制约了城市化的可持续发展。自 20 世纪 80 年代以来,我国开始全面推行、实施产业布局调整和污染企业退城进园等战略,一大批大型企业实施退城进园、关停并转工作,其置换出的场地主要用于民用和商业开发,由于历史原因,这些大型企业在建设和运营期间,对污染控制不严格、环保设施缺乏或不完善而导致大量有毒有害重金属、有机污染物侵入厂址区的土壤和地下水,使原址场地成为严重污染的工业污染场地。

2014 年我国环保部和国土部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明,我国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;重污染企业用地、工业废弃地、工业园区等工业污染场地超标点位 30% 以上,主要涉及化工业、矿业、冶金业等行业。与农业耕地表层污染有所不同,工业污染场地的污染深度最大可达数十米,下伏土层和地下水也会受到污染物影响。这类工业污染场地不仅污染土层和水体环境、直接危害人民身心健康,还会引起地基工程性质改变,造成工程变形或破坏。

为此,自 2004 年以来原国家环保总局、环保部等颁发了系列文件,旨在加强污染场地的管理与控制,2013 年 1 月国务院印发《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》,提出了未来五年我国污染土壤调查、治理、控制和监管等方面的任务和目标;2016 年 5 月 31 日,国务院发布《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”),为我国土壤污染防治提供了行动指南。2017 年习近平总书记在中国共产党第十九次全国代表大会报告中,将污染防治作为新时期全面建设小康社会的三大攻坚战之一,国务院则在 2018 年的政府工作报告中对污染防治攻

坚战进行了具体部署,因此,未来一段时期,我国环境污染防治研究与实施技术水平必将达到一个新的高度。城市工业污染场地是城市环境污染防治面临的新课题,如何对其进行处理和控制在,使之既满足环境安全需要又达到再开发利用功能,是实现我国城市可持续发展所必须解决的重大课题,也是环境岩土工程学科面临的新挑战。

环境岩土工程是岩土工程学科的一门新兴分支,其主要研究目标是岩土环境污染控制与防治技术问题,它是利用土力学与岩土工程理论和技术来解决人类活动和自然演变引起的环境问题,是岩土工程学科和环境工程学科、地下水学科等的多学科交叉。环境岩土工程研究自20世纪80年代出现以来得到了快速发展,1980—2000年间,国际环境岩土工程研究的重点主要是城市垃圾卫生填埋技术相关的理论和技术问题,2000年以来污染土壤和地下水修复处理进一步拓展了环境岩土工程研究领域,成为环境岩土工程研究的新兴领域,近十年来,引入风险理论评价场地污染和处理对环境的影响成为趋势。本书从环境岩土工程角度,重点介绍污染场地勘察测试与评价方法、污染对土体工程性质的影响规律、污染场地处理原则、重金属污染场地的固化/稳定处理技术、有机污染场地的曝气法处理技术、污染场地的隔离技术等,反映了著者及其课题组近十年来的研究成果。

本书研究成果得到国家自然科学基金重点项目“城市化过程中天然沉积土污染演化机理与控制技术研究”(No. 41330641)资助,也反映了多名研究生论文的部分成果,这些研究生包括:边汉亮、范日东、储亚、邹海峰、陈蕾、王强、方伟、陈志龙、毛柏杨等。本书第一章、第二章、第三章、第四章由刘松玉撰写,第五章、第七章由杜延军、刘松玉撰写,第六章由刘志杉、刘松玉撰写,全书由刘松玉负责统稿。东南大学岩土工程研究所蔡国军教授、童立元博士、杜广印博士等在本书原位测试评价内容方面提供了很多支持,经绯副教授为本书的出版也付出了辛勤努力!本书撰写过程中参考了国内外许多参考文献,并得到不少国内外同行的帮助。在此对上述基金资助、研究生的刻苦工作和提供帮助的专家学者们一并表示由衷的感谢!

本书入选了“十三五”国家重点图书出版规划,衷心感谢东南大学出版社和本书的编辑老师!

我国污染场地治理工作才刚刚开始,希望本书出版能有助于推动我国污染场地技术的发展,促进我国环境岩土工程理论和技术水平的提高!由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正!

刘松玉 于南京东南大学九龙湖校区
2018.6.9

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 环境岩土工程学科的发展	3
1.3 污染场地基本特点	4
1.4 污染场地对构筑物的影响	9
第 2 章 污染场地勘察调查与评价	11
2.1 概述	11
2.2 污染场地勘察调查	11
2.3 污染场地勘察调查方法	15
2.4 污染场地分类评价	64
第 3 章 污染土工程性质	77
3.1 界限含水率	77
3.2 土的粒度成分	80
3.3 pH	81
3.4 抗剪强度	82
3.5 压缩特性	84
3.6 孔隙结构	86
第 4 章 污染场地处理原则与方法	88
4.1 污染场地处理原则	88
4.2 污染场地处理方法	89
4.3 几种污染场地处理技术简介	93

第 5 章 固化/稳定化技术	98
5.1 概述	98
5.2 固化/稳定法机理	99
5.3 水泥固化重金属污染土的工程性质	105
5.4 水泥固化重金属污染土的环境安全性	113
5.5 固化/稳定化施工技术	115
第 6 章 曝气法	118
6.1 概述	118
6.2 曝气法机理	119
6.3 AS 过程气相运动基本规律	122
6.4 曝气法去除有机污染物效果分析	138
6.5 表面活性剂强化曝气技术	143
6.6 曝气法设计方法	144
第 7 章 隔离技术	150
7.1 概述	150
7.2 竖向隔离屏障材料工作性能	153
7.3 竖向隔离屏障防渗截污性能	163
7.4 屏障设计方法	164
7.5 竖向隔离屏障施工技术	166
参考文献	171

第 1 章

绪 论

1.1

研究背景

自 20 世纪我国城市化进程快速发展以来,全国城市化平均水平已由 1958 年的 17.9% 发展到 2016 年的 57.35%。我国城市化进程高速发展为经济持续发展提供了强劲持久的动力,但也导致城市用地紧张、交通堵塞、环境污染等城市问题日益突出,严重制约了城市化的可持续发展^[1]。

由于历史原因,我国城市一般都是在老城和工业化进程基础上发展起来的,往往缺少总体规划,基础设施落后,工业区和生活区并存,不能满足可持续发展的要求。为此,自 20 世纪 80 年代已逐步在全国范围内推行、实施产业布局调整和污染企业退城进园等战略。如北京首钢集团、南京化工园区、南京金陵石化等已经实施退城进园、关停并转工作,而所置换出的场地主要用于民用和商业开发用地,如上海世博会场就是在原造船厂、试剂厂、印染厂等原址建设。这些工业企业在建设和运营期间,对污染控制不严格、环保设施缺乏或不完善而导致大量有毒有害重金属、有机污染物侵入厂址区的土壤和地下水,代表性污染物包括铅、锌、铬、砷等重金属以及石油烃类、有机农药、苯系物及多氯联苯等有机污染物,使原址场地成为严重污染的工业污染场地^[2-4]。

所谓污染场地是指因堆积、储存、处理、处置或其他方式(如迁移)承载了有害物质,经过调查和风险评估后确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地,又称污染地块^[5](图 1-1)。

英美等发达国家在 20 世纪 80 年代末就已开始对土壤中因加油站渗漏造成的土壤及地下水污染的问题进行研究,世界每年约有 800 万吨石油类物质进入环境,其中大部分进入土壤,导致土壤发生石油污染。有统计资料表明,1989 年至 1990 年间,美国约有 200 万个地下汽油储罐,其中有 9 万个发生了泄漏。统计数据显示,至 2004 年 3 月,美国正在使用的地下储油罐大约有 68 万个,其中 97% 用于储存石油类产品,包括一些已经使用过的油类,另外,还存在超过 150 万个已经废弃或关闭的储油罐,20 世纪 70 年代以前建成的加油站的地下储油罐几乎全

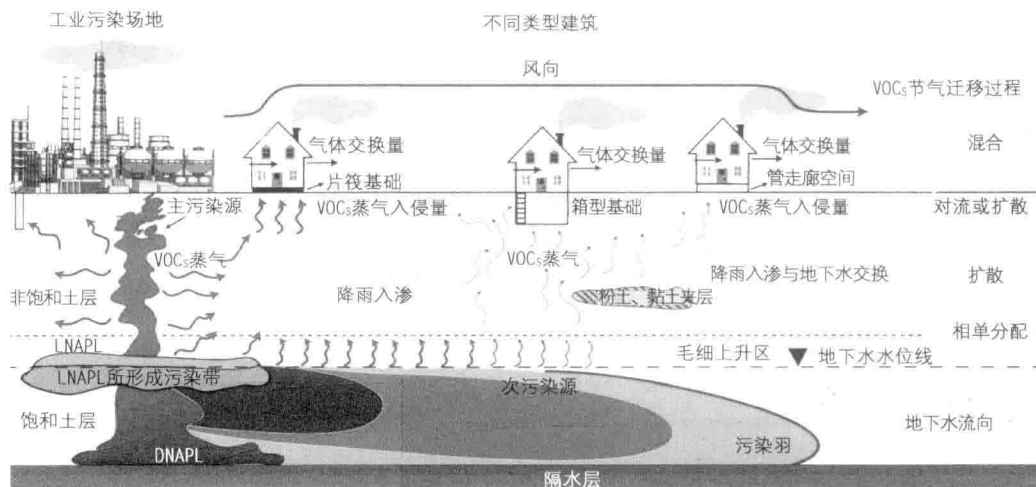


图 1-1 污染场地示意图(据文献[6]修改)

部存在渗漏现象,而超过 20 年的加油站也大部分存在渗漏,加油站已成为美国地下水的最大污染源^[7]。英国壳牌石油公司也曾宣布在英国的 1 100 个加油站中有 1/3 对土壤和地下水造成了污染。我国自 20 世纪 50 年代开始建设加油站,随后加油站数量不断增加,自 90 年代以来,建设速度加快,全国仅新建加油站就有 10 余万座。北京市现有加油站就达 1 060 多个,上海有地下储油罐近 6 000 个。随着时间推移,一些建设时间较早的加油站,因地下储油罐、输油管等严重老化已经开始渗漏^[8]。另外,随着油田区石油开采及石化工业的发展,在石油及其相关产品开采、运输、加工、储存过程中不可避免地会发生泄漏,造成土体污染。

2014 年 4 月 17 日我国环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》表明^[9]:全国土壤总的点位超标率为 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的 82.8%。从污染分布情况看,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;重污染企业用地、工业废弃地、工业园区等工业污染场地超标点位 30%以上,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。

与农业耕地表层污染有所不同,工业污染场地的污染深度最大可深达数十米,不仅浅层回填/杂填土受污染,下伏土层和地下水也会受到污染物影响。例如南京燕子矶化工厂有机物污染深度深达 15 m,南通农药厂的氯化碱影响深度达 8 m。天然土体中重金属和有机物富集,不仅污染土水体环境、直接危害人民身心健康,还会引起地基工程性质改变、造成工程损伤和破坏^[1]。

为此,2004 年 6 月 1 日,原国家环保总局以环办[2004]47 号文件发出《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》,环保部于 2010 年制定了《污染场地土壤环境管理暂行办法》,我国环境保护“十二五”规划将“受污染场地和土壤污染治理与修复工程”列为重大环保工程之一。2012 年环保部、工信部、国土部、住建部联合下发了《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》,2013 年 1 月国务院印发《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》,

提出了未来五年我国污染土壤调查、治理、控制和监管等方面的任务和目标;2014年环保部批准发布了5项污染场地系列环保标准:《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),《污染场地术语》(HJ 682—2014)。2016年5月31日,国务院公开发布《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”),该条例按照党中央、国务院决策部署,由环保部会同国家发改委、科技部、工信部、财政部、国土部、住建部、水利部、农业部、质检总局、林业局、国务院法制办等部门编制而成,为我国土壤污染防治提供了政策依据。全国人大正在制定《中华人民共和国土壤污染防治法》,将为我国土壤污染治理与控制提供法律依据,有力推动我国污染场地处理研究的发展。另外北京市、浙江省、江苏省等多个省市政府也制定了有关污染场地的地方规程和管理办法。

因此,对城市工业污染地基问题进行处理控制,使之既满足环境安全需要又达到再开发利用功能,是当前我国城市可持续发展和建设面临的重大课题,也是环境岩土工程学科面临的新课题。

1.2 环境岩土工程学科的发展

为了解决岩土环境污染问题,20世纪80年代以来,岩土工程中一门新兴分支学科——环境岩土工程应运而生,它是利用岩土工程理论和技术来改善和解决人类活动和自然演变引起的环境问题^[10],是岩土工程学科和环境工程学科、地下水工程学科等多学科交叉的结果(图1-2)。

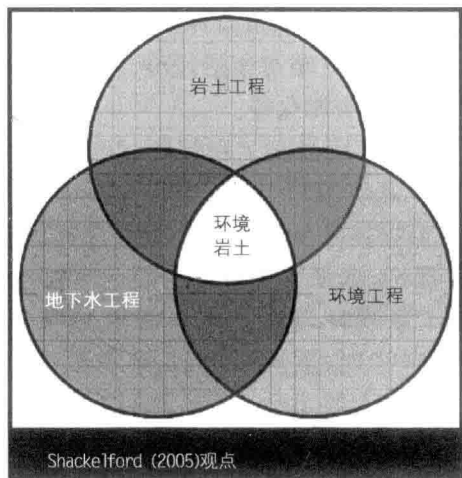


图 1-2 环境岩土工程与其他学科间的关系

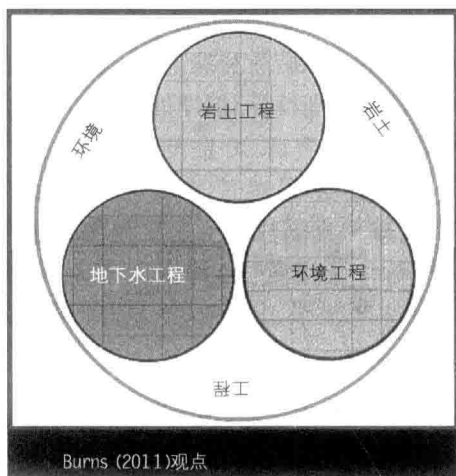


图 1-3 环境岩土研究领域的拓展

法国在1976年通过《基于环境保护的工业场地分类环境许可法》基础上,逐步开展了污染场地管理实践;1977年在东京召开的国际土力学与基础工程大会开始设立环境岩土工程分会场,为环境岩土工程的发展提供了世界级的交流平台;1970—1980年间,美国颁布的几部环境法(RCRA, CERCLA, Superfund Law),标志着岩土工程师开始参与环境工程问题;加拿大环境部长委员会在1989年起草了《国家污染场地修复五年纲要》,并在1992年出台

了污染场地国家分类系统;欧盟诸国从 20 世纪 90 年代以来开展了污染土的原位处理技术研究,并完成了污染场地风险评价指南;日本在 1994 年提出了污染土体的修复标准,于 2001 年制定了《土壤污染法对策》,并于 2009 年对该法案进行了修订,指出了需要修复区域的具体要求。

总的来说^[1,11],1980—2000 年间,国际环境岩土工程研究的重点主要是城市垃圾卫生填埋技术相关的理论和技术问题,2000 年以来污染土壤和地下水修复处理进一步拓展了环境岩土工程研究领域(图 1-3);与传统的岩土工程学科相比,环境岩土工程更强调大气、水、生物、化学等与岩土体相互作用,尤其强调化学和生物的作用,环境岩土工程的研究内涵也在不断丰富发展。国际上也采用 Geoenvironmental Engineering 代替 Environmental Geotechnics 以反映废物处理和污染土壤修复技术。近十年来,引入风险理论评价场地污染和处理对环境的影响成为趋势(图 1-4)。

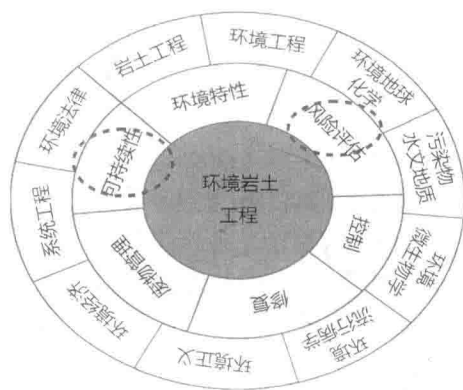


图 1-4 环境岩土工程的研究内涵

国际土力学及岩土工程学会(ISSMGE)于 1987 年成立环境土工专业委员会(TC5),目前已组织召开了七届国际环境土工大会,分别在加拿大埃德蒙顿(1994)、日本大阪(1996)、葡萄牙里斯本(1998)、巴西里约热内卢(2002)、英国卡迪夫(2006)、印度新德里(2010)、澳大利亚墨尔本(2014)举行。从近期国际环境土工大会论文集可以看出,目前国外环境岩土工程学研究内容主要涉及“小环境”问题,具体包括:①岩土环境风险评价、管理和可持续发展;②污染物运移、扩散和持久性;③高污染性固体废弃物(城市生活垃圾、工业危险废物、高水平放射性核废料等)填埋处置;④工业废弃物利用与资源化等。

我国同济大学自 20 世纪 90 年代开始率先关注环境岩土工程问题,2000 年以来浙江大学、河海大学等单位开始重点研究城市垃圾卫生填埋技术,取得了一系列成果,2012 年颁布了我国《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》^[12]。近年来东南大学、清华大学等单位注重研究污染场地修复技术与理论,取得了相应的进展。2003 年中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会召开了系列环境岩土与土工合成材料会议(2002,杭州;2005,大连;2008,湖南;2011,上海;2014,重庆);2012 年中国土木工程学会土力学与岩土工程分会正式成立了环境土工专业委员会,并于 2012(杭州)、2014(上海)、2016(南京)分别召开了岩土多场相互作用及环境土工学术会议,有力地推动了我国环境岩土工程研究的发展。

1.3 污染场地基本特点

《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[13]将场地定义为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;污染场地则定义为经调查

和风险评估后,确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地。

污染土一般定义为由于外来致污物质的侵入,土性发生了化学变化,土体改变了原生性状的土^[14-15]。污染地基则是指天然土体经外来致污物质侵入后发生物理化学力学变化后的地基。根据污染物种类主要分为无机和有机污染,具体可分为重金属污染场地和有机物污染场地以及复合污染场地。

1. 重金属污染场地

所谓重金属,通常指的是比重(密度)大于 5 g/cm³ 的金属,较典型的重金属有汞、锌、镉、铅、镍、砷等,重金属或其化合物有极强的毒性,如化合态的镉和铅、单质汞等。重金属污染主要来自采矿、金属冶炼、油漆制造等(表 1-1),代表性污染物包括砷、铅、锌、镉、铬等。

表 1-1 排放重金属污染物的工矿企业类型^[16]

企业类型	金属																		
	银 (Ag)	砷 (As)	钡 (Ba)	镉 (Cd)	钴 (Co)	铬 (Cr)	铜 (Cu)	铁 (Fe)	汞 (Hg)	锰 (Mn)	钼 (Mo)	铅 (Pb)	镍 (Ni)	锑 (Sb)	锡 (Sn)	钛 (Ti)	铀 (U)	钒 (V)	锌 (Zn)
采矿/ 选矿		✓		✓				✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	
冶金/ 电镀	✓	✓		✓		✓	✓		✓			✓	✓						✓
化工		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓			✓	✓	✓		✓
染料		✓		✓			✓	✓				✓		✓		✓			
墨水 制造					✓		✓		✓				✓						
陶瓷		✓				✓								✓			✓		
涂料			✓			✓						✓				✓			✓
照相	✓			✓		✓					✓	✓					✓		
玻璃		✓	✓		✓								✓			✓		✓	
造纸						✓	✓		✓			✓	✓			✓		✓	
制革		✓	✓			✓	✓	✓	✓										✓
制药							✓	✓	✓										
纺织		✓	✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓	✓					
核技术				✓													✓		
肥料		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓						✓
氯碱 工业		✓		✓		✓		✓	✓			✓			✓				✓
炼油		✓		✓		✓	✓	✓				✓	✓						✓

注:“✓”表示企业存在排放该种重金属的情况

天然土体经过重金属污染后,由于黏性土颗粒表面存在负电荷缺陷,引起阳离子的吸

附,引起表面作用力的改变和结合水的改变,从而影响土的基本物理力学性质。一般认为随着金属离子浓度的增加,液限、塑性指数、黏粒成分和膨胀率减小,粉粒含量、最大密实度和渗透率变大,随着金属离子浓度增加,土的抗剪强度有所增大^[17]。

2. 有机污染场地

有机污染场地主要来源于化工类工厂、加油站、农业等,代表污染物为苯系物、石油类、农药、多氯联苯等。按照不同的分类方法,不同部门对有机污染物分类有所不同。

《土壤环境质量标准(修订)》(GB 15618—2008)^[18]把有机污染物分成挥发性有机物、多环芳烃类有机物、持久性有机污染物、农药、石油烃总量等类型。

《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[13]中根据污染物的性质把有机污染物分为挥发性有机物和半挥发性有机物,其中半挥发性有机物包括多种农药及多氯联苯等有机物。

《环境化学》^[19-20]中把有机物主要分成持久性有机物、有机卤代物、芳香烃、表面活性剂、石油烃污染等几种,该分类方法存在一定的重复性,如持久性有机物中的多氯联苯,也属于有机卤代物;芳香烃可分为单环芳烃和多环芳烃,单环芳烃分子中只含有一个苯环,如苯及苯的氯、硝基、甲基、乙基等取代衍生物;多环芳烃分子中含两个或两个以上的苯环,如联苯、萘、蒽等,很多芳香烃具有易挥发性,被称为挥发性有机化合物类(VOCs)。根据世界卫生组织定义,凡有机化合物(不包括金属有机化合物和有机酸类)其在标准状态(293 K 和 101.3 kPa)下的蒸气压大于 0.13 kPa 者即属挥发性有机化合物类(VOCs)化合物,包括苯、甲苯、二甲苯、乙苯等单环芳烃以及诸如四氯化碳、三氯乙烯等挥发性非芳烃类化合物。

持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs)是指在环境中难降解、高脂溶性、可以在食物链中富集放大、能够通过各种传输途径而进行全球迁移的一类半挥发性且毒性极大的污染物。2004 年生效的《斯德哥尔摩公约》(以下简称公约)规定的 12 种 POPs,包括 9 种农药(艾氏剂、氯丹、滴滴涕、狄氏剂、异狄氏剂、七氯、六氯苯、灭蚁灵、毒杀芬)、1 种工业化学品(多氯联苯)、多氯代二苯并-二噁英、多氯代二苯并呋喃;2009 年 5 月 4—8 日在瑞士日内瓦举行的缔约方大会第四届会议决定将全氟辛基磺酸及其盐类、全氟辛基磺酰氟、商用五溴联苯醚、商用八溴联苯醚、开蓬、林丹、五氯苯、 α -六六六、 β -六六六和六溴联苯等十种新增化学物质列入公约附件 A、B 或 C 的受控范围。

有机卤代物包括卤代烃、多氯代二噁英、有机氯农药等。多氯联苯(PCBs)属于卤代烃,是一组由多个氯原子取代联苯分子中氢原子而形成的氯代芳烃类化合物。按联苯分子中的氢原子被氯取代的位置和数目不同,从理论上计算,一氯化物应有 3 个异构体,二氯化物有 12 个异构体,三氯化物有 21 个异构体,PCBs 全部异构体有 210 个,目前已鉴定出 102 个。

表面活性剂是分子中同时具有亲水性基团和疏水性基团的物质,能显著改变液体的表面张力或两相间界面的张力,具有良好的乳化或破乳,润湿、渗透或反润湿,分散,起泡、稳泡和增加溶解的能力,可按其亲水基团结构和类型进行分类。

综合上述,有机污染物的分类如表 1-2 所示。

表 1-2 有机污染物分类表

类别		典型污染物	污染物来源	备注
挥发性有机物(VOCs)	单环芳烃类	苯、甲苯、乙苯、总二甲苯、氯苯、硝基苯、苯乙烯等	化工厂、农药厂、加油站、炼油厂、化学品储罐、城市固废处理等所产生的废弃物	总二甲苯包括对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、二甲苯
	非芳烃类化合物	丙酮、丁酮、氯仿、四氯化碳、二氯乙烷、三氯乙烷、氯乙烯等		
半挥发性有机物(SVOCs)	多环芳烃类(PAHs)	苯并(a)蒽、苯并(a)芘、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、二苯并(a, h)蒽、茚并(1, 2, 3-cd)芘、蒽、苯、菲、芘、蒽、荧蒽、芴、芘等	矿物燃料和含碳氢化合物的不完全燃烧产生的气体, 炼焦厂、炼油厂、煤气厂、发电厂的排出物, 机动车尾气	
	非芳烃类化合物	2-氯酚、2,4-二氯酚、2-硝基酚、五氯酚、2,4,5-三氯酚、4-甲酚等	化工厂、农药厂、染化厂、制药厂等企业	
持久性有机物(POPs)	杀虫剂	艾氏剂, 氯丹, 滴滴涕(DDT), 狄氏剂, 异狄氏剂, 七氯, 六氯代苯, 灭蚁灵, 毒杀芬	农药厂、化工厂、造纸厂、皮革厂、机械制造、橡胶厂等所产生的废水废渣、城市固废焚烧	多氯联苯属于有机卤代物
	工业化学品	多氯联苯(PCBs)		
	生产中的副产品	二噁英, 苯并呋喃		
	新增化学物质	全氟辛基磺酸及其盐类、全氟辛基磺酰氟、商用五溴联苯醚、商用八溴联苯醚、开蓬、林丹、五氯苯、 α -六六六、 β -六六六和六溴联苯		
农药		六六六、敌敌畏、乐果、西玛津、敌俾、草甘膦、二嗪磷(地亚农)、代森锌等	农药厂、化工厂、农田喷洒等	
总石油烃(TPH)	直链烃类	C7 以上的烷烃和烯烃, 环己烷、甲基环己烷、苯、甲苯、苯并(a)芘等	石油开采、炼油厂、精炼厂、加油站、油轮漏油、油气储存或运输管道泄漏等	
	环烷烃类			
	芳香烃类			
	多环芳烃			
表面活性剂	阴离子表面活性剂	羧酸盐(如肥皂)、磺酸盐、硫酸酯盐、磷酸酯盐	纤维、造纸、塑料、日用化工、医药、金属加工、石油、煤炭等加工企业所产生的废水	
	阳离子表面活性剂	季铵盐(如消毒灭菌剂)		
	非离子表面活性剂	聚氧乙烯烷基胺		

挥发性有机物(VOCs)是油类污染场地中普遍存在的污染物,在地下环境中一般以非水相流体(Non-Aqueous Phase Liquids, NAPLs)的形式存在,按密度划分为两类:密度小于水的称为轻质非水相流体(LNAPLs),密度大于水的称为重质非水相流体(DNAPLs)^[20]。在污染区域内,VOCs 通常以液相、气相、NAPLs 相的形式存在,它们具有明显的流体性质,因而常以多相流的形式存在和运移,并且受到一系列复杂的物理、化学、生物过程影响,如对流(advection)、扩散(diffusion)、吸附(sorption)、生物转化(biological transformation)等^[21]。

NAPLs 在地表泄漏后,向下迁移进入非饱和土层,之后随降雨和地表径流迁移进入含

水层环境中,在其流经的区域,会因吸附、溶解以及毛细截留等作用,部分污染物残留在多孔介质中^[22]。另外,地层中的污染物由于挥发和溶解作用,在非饱和区会形成一个气态分布区,而在饱和区则形成一个污染物羽流状体,随着地下水位的变动可横向和纵向运移,对地下水环境和人体健康造成危害^[23-24]。典型的储油罐泄漏污染如图 1-5 所示。

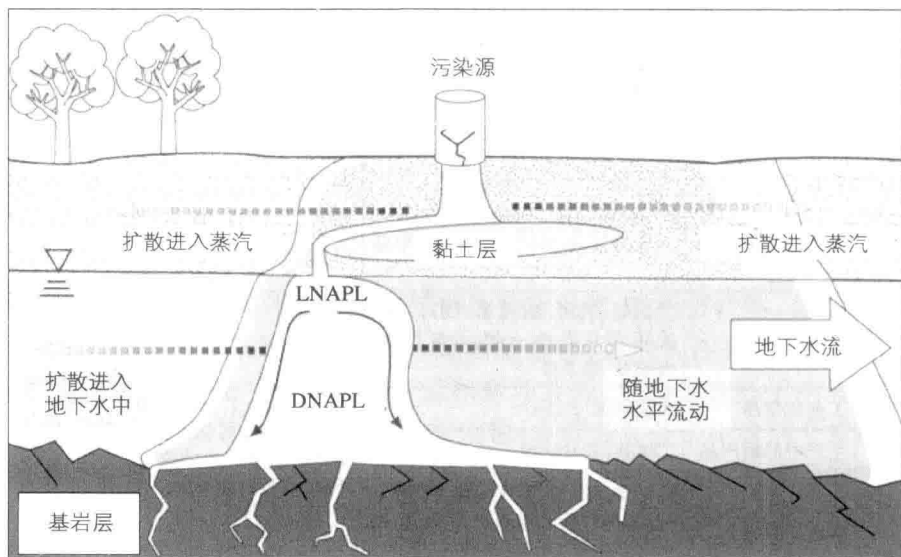


图 1-5 有机污染物在地表下泄漏运移^[25]

天然沉积土受到有机物污染后,其工程性状如何演变,受多种因素的制约和影响^[26]。首先取决于土颗粒、粒间胶结物和污染物的物质成分^[27],其次是土的结构和粒度、土粒间液体介质、吸附阳离子的成分及污染物(液体)的浓度等^[28],再者是土与污染物作用时间和温度。有机污染土体界限含水率、强度与固结特性、击实特性、渗透特性及颗粒级配等工程性质会发生明显改变,一般来说随着有机污染物浓度的增大,其抗剪强度、渗透系数、最大干密度、最优含水量、阿太堡界限都呈减小趋势^[29-32]。但不同学者的研究结论也有所不同,甚至得出相反的结论。

事实上由于污染场地的复杂性和地下土水作用的特点,很多污染场地往往出现重金属污染和有机污染共同存在的复合污染,使得污染场地特性更加复杂。

我国常见污染场地类型及其特征污染物如表 1-3。

表 1-3 常见污染场地类型及特征污染物^[33]

行业分类	场地类型	潜在特征污染物类型
制造业	化学原料及化学品制造	挥发性有机物、半挥发性有机物、重金属、持久性有机污染物、农药
	电气机械及器材制造	重金属、有机氯溶剂、持久性有机污染物
	纺织业	重金属、氯代有机物
	造纸及纸制品	重金属、氯代有机物
	金属制品业	重金属、氯代有机物
	金属冶炼及延压加工	重金属

(续表)

行业分类	场地类型	潜在特征污染物类型
制造业	机械制造	重金属、石油烃
	塑料和橡胶制品	半挥发性有机物、挥发性有机物、重金属
	石油加工	挥发性有机物、半挥发性有机物、重金属、石油烃
	炼焦厂	挥发性有机物、半挥发性有机物、重金属、氰化物
	交通运输设备制造	重金属、石油烃、持久性有机污染物
	皮革、皮毛制造	重金属、挥发性有机物
	废弃资源和废旧材料回收加工	持久性有机污染物、半挥发性有机物、重金属、农药
采矿业	煤炭开采和洗选业	重金属
	黑色金属和有色金属矿采选业	重金属、氰化物
	非金属矿采选业	重金属、氰化物、石棉
	石油和天然气开采业	石油烃、挥发性有机物、半挥发性有机物
电力燃气及水的生产和供应	火力发电	重金属、持久性有机污染物
	电力供应	持久性有机污染物
	燃气生产和供应	半挥发性有机物、半挥发性有机物、重金属
水利、环境和公共设施管理业	水污染治理	持久性有机污染物、半挥发性有机物、重金属、农药
	危险废物的治理	持久性有机污染物、半挥发性有机物、重金属、挥发性有机物
	其他环境治理(工业固废、生活垃圾处理)	持久性有机污染物、半挥发性有机物、重金属、挥发性有机物
其他	军事工业	半挥发性有机物、重金属、挥发性有机物
	研究、开发和测试设施	半挥发性有机物、重金属、挥发性有机物
	干洗店	挥发性有机物、有机氯溶剂
	交通运输工具维修	重金属、石油烃

1.4

污染场地对构筑物的影响

上述分析表明,土体受到污染后,其基本物理力学特性会发生明显改变,并引起土体工程性质的变化。对于既有建(构)筑物基础,当其使用期间地基受到污染后,则会导致地基基础不同形式的破坏。

吉林某化工厂浓硝酸成品房,生产不到四年,因地基腐蚀造成的基础下沉,以致拆毁重建^[34]。南京某厂因强碱渗漏,受腐蚀的地基产生不均匀沉降,引起喷射炉体倾斜^[35]。西北某化工厂镍电解厂房,地基为卵石混砂的戈壁土,后因地基受硫酸液腐蚀而发生猛然膨胀,地面隆起,最大抬升高度达 80 cm,柱基被抬起,厂房严重开裂^[35]。太原某化工厂苯酸厂房碱液部的框架梁、柱,因地基受碱液腐蚀而膨胀,引起基础上升而开裂,其电解车间的排架柱,也因地基腐蚀而抬起,造成吊车梁不平和屋面排水反向^[35]。福建某造纸厂于 1971 年建成后,由于地下管道断裂,废碱液渗入地下,使作为地基的硬塑状态的杏红、红褐色黏土受侵蚀变成软塑和流塑状态的黑褐色土,强度大幅度降低,导致建筑物不均匀沉降,管道开

裂^[36]。上海某化工厂于1958年建成后,由于煤焦油废液大量渗入地基土中达8 m之深,使地基强度降低,砖基础损坏。据试验可知,废液使土的孔隙比增大31%,压缩系数增大17%^[36]。江苏扬州某厂甲醚菊车间,由于硫酸等污染物侵入地基土中长达20年之久,使硫酸池产生严重倾斜^[36]。昆明某厂硫铵工段建成后,由于地坪封闭不严,生产中大量硫酸和硫铵侵入坡残积的红黏土地基中,仅两年时间就使基础发生不均匀下沉,墙和地坪开裂,屋面板拉裂,行车轨道扭曲^[37]。上海某厂的葡萄糖车间由于反应池开裂、盐酸下渗日久,将地基土及建筑物侵蚀,附近的外墙墙基受到侵蚀已形成一个长2 m、高1 m的空穴^[37]。上海某合成洗涤剂厂喷粉车间在建成10年后车间地坪、墙、柱出现开裂,设备管道严重断裂渗漏,开挖地基后发现原先的沥青防腐层已被腐蚀掉,混凝土腐蚀破碎,地基土发黑发臭。经查,此车间使用的有机溶剂苯大量下渗,将沥青溶解并随地下水流失,继而酸碱废液下渗使混凝土及地基土受到腐蚀^[38]。

污染物也会对结构本身造成直接破坏。苏联援建的兰州橡胶厂和兰州化肥厂,在一次关于侵蚀性介质对工业建筑物腐蚀作用的调查中,发现建筑物墙体、屋盖等构件有较为严重的腐蚀,产生不同状态(雾状、气态、液态等)的腐蚀物质,其中,液态腐蚀物质包括工厂排出的酸液、碱液、盐溶液及含酸碱盐的污水,它们与建筑构件中不同材料接触后,产生不同程度的腐蚀^[39]。1911年至1917年间苏联建造的巴库至乌拉尔斯基输水管道,由于沿线地下水中的硫酸盐渗入导致管道腐蚀破坏^[39]。印度南部沿海城市金奈一座生产氯化铵的工厂在检测中发现大约50%的建筑构件受到了严重的腐蚀,部分柱子和梁分别产生了15 mm和20 mm宽的裂缝,混凝土强度、pH降低,钢筋产生锈蚀^[40]。爱沙尼亚某建于1951年生产页岩油的工厂在进行检测时发现由于生产过程中产生的腐蚀气体对结构的腐蚀,导致梁柱结构混凝土强度降低,有较多裂缝产生,个别部位钢筋外露,混凝土碎裂,在结构混凝土中检测出较高含量的氯离子与硫酸根离子^[41]。

从调研的文献案例中可以看出,污染场地上建筑物的腐蚀破坏方式主要有两种:

(1) 酸、碱、有机物等污染物入渗建筑地基,改变地基土物理力学特性,造成基础不均匀沉降或隆起,从而导致上部结构的破坏;

(2) 酸、硫酸盐、氯盐等污染物以液态或气态形式直接对上部结构造成腐蚀,导致混凝土开裂、碎落,强度降低,钢筋锈蚀。

综上所述,在污染场地进行工程建设,必须进行场地污染风险评估并对污染场地进行必要的修复处理,使之既满足环境污染控制要求又满足工程设计使用需要,这也是环境岩土工程发展研究的新阶段。