

# 地下水污染防治技术： 防渗、修复与监控

罗育池 廉晶晶 张沙沙 余香英 等 编著



科学出版社

# 地下水污染防治技术：防渗、 修复与监控

罗育池 廉晶晶 张沙莎 余香英 等编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书根据当前地下水环境保护工作的迫切需要,秉承“预防优先,防治结合,注重监控”的原则,结合水文地质、环境工程、土木工程等学科知识,从地下水污染防渗、地下水污染修复、地下水污染监控三个关键环节入手,构建地下水污染防控体系,弥补目前地下水污染防渗技术的缺失,提高地下水污染修复技术的实用性,完善地下水污染防治措施有效性监控手段,为促进我国地下水环境保护工作提供技术支持。

本书可供科研院所和企事业单位从事地下水污染防治、环境影响评价相关工作的科研、咨询和工程技术人员,高等院校环境类师生及政府部门有关环境管理人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下水污染防控技术: 防渗、修复与监控/罗育池等编著.  
—北京: 科学出版社, 2017. 8  
ISBN 978-7-03-054098-0

I. ①地… II. ①罗… III. ①地下水污染—污染控制  
IV. ①X523.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 182425 号

责任编辑: 许 健

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 颀

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>

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

上海蓝鹰印务有限公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 23 1/2

字数: 538 000

定价: 190.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《地下水污染防治技术：防渗、修复与监控》

## 编著委员会

主 编	罗育池		
副主编	廉晶晶	张沙莎	余香英
编 委	李 燕	吴雯倩	刘 畅
	张 鹏	吕业佳	程 洲

# 前 言

地下水是地球上最主要、分布最广泛的水资源之一,全世界超过 15 亿的人口主要依靠地下水作为饮用水,我国水资源总量的 1/3 和全国总供水量的近 20% 来自地下水。据统计,全国 657 个城市中有 400 多个以地下水为饮用水水源,北方地区 65% 的生活用水、50% 的工业用水和 33% 的农业灌溉用水来自地下水。近年来,地下水的不合理开发、土地的不合理利用、工业废物和生活垃圾等的不合理处置、农药化肥的大量使用,使地下水污染状况日益加重,因地下水污染造成的水资源短缺问题日益突出。据报道,全国 90% 的地下水遭受了不同程度的污染,其中 60% 污染严重。因此,我国的地下水污染防治形势非常严峻。

随着《全国地下水污染防治规划(2011—2020)》、《水污染防治行动计划》、《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610)等一系列法规和技术规范的颁布与实施,地下水污染防治工作得到了前所未有的重视。但是,由于我国长期以来对地下水管理主要侧重于地下水资源的开发、利用与保护,地下水的污染防治工作相对滞后,导致相关理论方法学体系不健全,尤其是技术手段针对性不强甚至缺失,给地下水环境保护实际工作造成了困扰。

本书针对上述问题,结合当前地下水环境保护工作的迫切需要,秉承“预防优先,防治结合,注重监控”的原则,结合水文地质、环境工程、土木工程等学科知识,从地下水污染防渗、地下水污染修复、地下水污染监控三个关键环节入手,构建地下水污染防控体系。技术创新点主要体现在弥补了目前地下水污染防渗技术的缺失,提高了地下水污染修复技术的实用性,完善了地下水污染防治措施有效性监控手段,对促进我国地下水环境保护工作具有十分重要的现实意义。

全书分为 4 篇,共 12 章。

第 1 篇为地下水污染相关基础知识。一是简要阐述了地下水污染的基本概念,系统归纳了地下水污染防控研究进展及地下水保护相关法律法规、标准与技术规范等,全面总结了当前我国在地下水环境保护方面存在的不足,并提出了相应的对策建议;二是概要梳理了水文地质学基础概念、地下水污染特征与途径、地下水污染物迁移转化,使非地下水相关专业的技术人员能全面掌握污染水文地质学基础知识。

第 2 篇为地下水污染防渗技术。一是从分区防控的原则出发,阐述了地下水污染防渗分区原则、分区方法和分区要求,为后续的地下水污染防渗材料与防渗结构选型提供依据;二是介绍了目前常用的地下水污染防渗材料和防渗结构,以及防渗材料和防渗结构选用的技术要点;三是选取矿山采选、金属冶炼、石油化工、电镀、制革、印染、固体废物处理处置(包括卫生填埋场、安全填埋场、尾矿库堆存场)等 7 大类对地下水环境可能造



成严重污染的典型企业和工程,从地下水污染识别、地下水防渗分区、防渗结构选用、防渗工程设计与施工要点等方面详细阐述了相应的地下水污染防渗技术和应用要点,弥补目前地下水污染防渗技术的缺失。

第3篇为地下水污染修复技术。一是详细介绍了地下水污染调查与评价的技术方法,提出了地下水污染修复方案制定与实施的基本流程和技术方法,为筛选针对不同地下水污染类型和特点的最佳修复技术提供参考;二是选取原位电动修复技术、原位化学氧化修复技术、原位微生物修复技术、可渗透反应墙修复技术、抽出-处理修复技术、曝气-气提修复技术、多相抽提处理修复技术等7大类目前较为成熟和常用的地下水污染修复技术,从修复技术基本原理与适用条件、修复技术工程设计要点、修复技术相关应用案例等方面详细阐述了相应的地下水污染修复技术和应用要点,提高地下水污染修复技术的实用性。

第4篇为地下水污染监控技术。一是概述了地下水污染监测技术,包括地下水污染防渗工程、修复工程和场地污染状况的监测布点及采样要求、地下水污染监测网与信息系统;二是介绍了地下水污染预警与应急技术,包括地下水污染预警方法、预警系统、应急响应与处置技术等。完善地下水污染防治措施有效性监控手段。

本书由广东省环境科学研究院罗育池主持编写,并负责统稿。长江大学廉晶晶、江苏省地质环境勘察院张沙沙、广东省环境科学研究院余香英作为副主编参与了编写框架的设计、部分章节编写和统稿工作。参与本书编写工作的人员还包括广东省环境科学研究院的李燕、吴雯倩、刘畅、张鹏、吕业佳和程洲等。其中,第1、3章由罗育池执笔;第2章由吴雯倩执笔;第4章由罗育池、张鹏执笔;第5、6章由罗育池、李燕执笔;第7章由张沙沙、余香英、刘畅执笔;第8章由罗育池、张沙沙执笔;第9章由廉晶晶、罗育池、张沙沙执笔;第10章由罗育池、廉晶晶、张沙沙执笔;第11章由余香英、吴雯倩、刘畅执笔;第12章由罗育池、余香英执笔;全书图件由吕业佳绘制,程洲参与了部分章节的校稿工作。汪永红教授级高级工程师、张永波教授级高级工程师在编写过程中给予了大力支持。在此,对所有为本书付出努力的人员表示衷心感谢!

本书在编写过程中参考了不少相关领域的文献,引用了国内外许多专家和学者的研究成果、应用案例及图表资料,谨此向有关作者致以谢忱!

鉴于知识水平和工作经验有限,本书难免存在不足和不当之处,恳请专家、学者及广大读者批评指正!

编 者

2017年5月

# 目 录

## 前 言

## 第 1 篇 地下水污染相关基础知识

<b>第 1 章 地下水污染防控概论</b> .....	3
1.1 地下水污染的基本概念 .....	3
1.1.1 地下水污染的定义 .....	3
1.1.2 地下水污染的危害 .....	3
1.1.3 地下水污染的状况 .....	4
1.2 地下水污染防控研究进展 .....	5
1.2.1 地下水污染调查评估 .....	5
1.2.2 地下水污染机理模拟 .....	6
1.2.3 地下水污染防治区划 .....	7
1.2.4 地下水污染防治技术 .....	7
1.2.5 地下水污染监测预警 .....	9
1.3 地下水环境保护法规标准 .....	10
1.4 存在的不足及对策建议 .....	12
1.4.1 存在不足 .....	12
1.4.2 对策建议 .....	13
<b>第 2 章 污染水文地质学基础</b> .....	14
2.1 水文地质学基础知识 .....	14
2.1.1 地下水系统的组成 .....	14
2.1.2 地下水的赋存特征 .....	17
2.1.3 地下水的运动规律 .....	22
2.1.4 地下水的化学成分 .....	26
2.2 地下水污染特征与途径 .....	30
2.2.1 地下水污染的来源 .....	30
2.2.2 地下水污染的特征 .....	32
2.2.3 地下水污染的途径 .....	33
2.3 地下水污染物迁移转化 .....	34
2.3.1 地下水污染物的运移 .....	35
2.3.2 地下水污染物的转化 .....	36

## 第2篇 地下水污染防治技术

<b>第3章 地下水污染防治分区</b> .....	41
3.1 污染防治分区概述 .....	41
3.1.1 污染防治分区目的 .....	41
3.1.2 污染防治分区原则 .....	41
3.2 污染防治分区方法 .....	42
3.2.1 污染防治分区流程 .....	42
3.2.2 污染防治分区方法 .....	43
3.3 污染防治分区要求 .....	49
3.3.1 污染防治分区防渗结构要求 .....	49
3.3.2 污染防治分区防渗标准要求 .....	50
<b>第4章 地下水污染防治材料与结构</b> .....	54
4.1 常用防渗材料介绍 .....	54
4.1.1 天然防渗材料 .....	54
4.1.2 柔性防渗材料 .....	55
4.1.3 刚性防渗材料 .....	63
4.2 常用防渗结构介绍 .....	67
4.2.1 天然防渗结构 .....	67
4.2.2 柔性防渗结构 .....	67
4.2.3 刚性防渗结构 .....	69
4.2.4 复合防渗结构 .....	69
4.3 防渗材料与结构选用 .....	71
4.3.1 防渗材料选用 .....	71
4.3.2 防渗结构选用 .....	73
<b>第5章 工业企业场地地下水污染防治技术</b> .....	77
5.1 地下水污染识别 .....	77
5.1.1 矿山采选企业 .....	77
5.1.2 金属冶炼企业 .....	81
5.1.3 石油化工企业 .....	88
5.1.4 电镀企业 .....	98
5.1.5 制革企业 .....	104
5.1.6 印染企业 .....	108
5.2 地下水污染防治分区 .....	113
5.3 地下水污染防治结构选用 .....	119
5.3.1 地面防渗结构 .....	119
5.3.2 地下管道防渗结构 .....	123
5.3.3 罐体防渗结构 .....	126





5.3.4	污水池防渗结构	131
5.4	防渗工程设计与施工要点	133
5.4.1	地面防渗工程	133
5.4.2	地下管道防渗工程	135
5.4.3	罐体防渗工程	137
5.4.4	污水池防渗工程	139
<b>第6章</b>	<b>固体废物填埋场地下水污染防渗技术</b>	<b>142</b>
6.1	地下水污染识别	142
6.1.1	卫生填埋场	142
6.1.2	安全填埋场	147
6.1.3	尾矿堆存场	151
6.2	地下水污染防渗分区	155
6.3	地下水污染防渗结构选用	158
6.3.1	卫生填埋场	158
6.3.2	安全填埋场	161
6.3.3	尾矿堆存场	164
6.4	防渗工程设计与施工要点	168
6.4.1	卫生填埋场	168
6.4.2	安全填埋场	171
6.4.3	尾矿堆存场	173

### 第3篇 地下水污染修复技术

<b>第7章</b>	<b>地下水污染调查与评价</b>	<b>179</b>
7.1	地下水污染调查技术方法	179
7.1.1	调查阶段划分	179
7.1.2	野外基础调查	180
7.1.3	样品采集检测	184
7.2	地下水污染评价技术方法	188
7.2.1	地下水质量现状评价	188
7.2.2	地下水污染状况评价	191
7.2.3	地下水污染风险评价	193
<b>第8章</b>	<b>地下水污染修复方案管理</b>	<b>202</b>
8.1	地下水污染修复方案制定策略	202
8.1.1	地下水污染修复技术路线	202
8.1.2	地下水污染修复前期诊断	202
8.1.3	地下水污染修复技术筛选	205
8.2	地下水污染修复方案编制与实施	211
8.2.1	地下水污染修复方案编制	211





8.2.2 地下水污染修复方案实施 .....	213
<b>第9章 地下水污染原位修复技术</b> .....	<b>215</b>
9.1 地下水污染原位电动修复技术 .....	215
9.1.1 修复技术基本原理 .....	215
9.1.2 修复技术分类及应用要点 .....	222
9.1.3 修复技术相关应用案例 .....	227
9.2 地下水污染原位化学氧化修复技术 .....	230
9.2.1 修复技术基本原理 .....	230
9.2.2 修复技术工程设计要点 .....	238
9.2.3 修复技术相关应用案例 .....	240
9.3 地下水污染原位微生物修复技术 .....	243
9.3.1 修复技术基本原理 .....	244
9.3.2 修复技术工程设计要点 .....	251
9.3.3 修复技术相关应用案例 .....	253
9.4 地下水污染可渗透反应墙修复技术 .....	257
9.4.1 修复技术基本原理 .....	257
9.4.2 修复技术工程设计要点 .....	264
9.4.3 修复技术相关应用案例 .....	269
<b>第10章 地下水污染异位修复技术</b> .....	<b>273</b>
10.1 地下水污染抽出-处理修复技术 .....	273
10.1.1 修复技术基本原理 .....	273
10.1.2 修复技术工程设计要点 .....	278
10.1.3 修复技术相关应用案例 .....	282
10.2 地下水污染曝气-气提修复技术 .....	285
10.2.1 修复技术基本原理 .....	285
10.2.2 修复技术工程设计要点 .....	293
10.2.3 修复技术相关应用案例 .....	298
10.3 地下水污染多相抽提修复技术 .....	301
10.3.1 修复技术基本原理 .....	301
10.3.2 修复技术工程设计要点 .....	305
10.3.3 修复技术相关应用案例 .....	309

## 第4篇 地下水污染监控技术

<b>第11章 地下水污染监测技术</b> .....	<b>317</b>
11.1 地下水污染监测技术方法 .....	317
11.1.1 地下水污染防渗工程监测方法 .....	317
11.1.2 地下水污染修复工程监测方法 .....	321
11.1.3 场地地下水污染状况监测方法 .....	323



11.2 地下水污染监测网与信息系统 .....	328
11.2.1 地下水污染监测网组成 .....	328
11.2.2 地下水污染监测网优化 .....	329
11.2.3 地下水污染监测信息化 .....	330
<b>第12章 地下水污染预警与应急技术 .....</b>	<b>334</b>
12.1 地下水污染预警技术 .....	334
12.1.1 地下水污染预警方法 .....	334
12.1.2 地下水污染预警系统 .....	341
12.2 地下水污染应急技术 .....	343
12.2.1 地下水污染事故特征 .....	343
12.2.2 地下水污染应急响应程序 .....	344
12.2.3 地下水污染应急处置技术 .....	346
<b>参考文献 .....</b>	<b>350</b>

# 第 1 篇

## 地下水污染相关基础知识





# 第1章 地下水污染防治概论

## 1.1 地下水污染的基本概念

### 1.1.1 地下水污染的定义

地下水是水资源的重要组成部分,在保证居民生活用水、社会经济发展和维持生态平衡等方面起到了不可估量的作用。据统计,我国水资源总量的1/3和全国总供水量的近20%来自地下水。657个城市中有400多个以地下水为饮用水水源,北方地区65%的生活用水、50%的工业用水和33%的农业灌溉用水来自地下水。随着社会经济的快速发展,人类生产、生活过程中产生的气态、固态及液态废弃物越来越多,并从不同途径对地下水环境造成了污染。

地下水污染通常指由于人类活动引起地下水中化学成分和物理性质及生物学特性发生改变,从而导致出现水质恶化、使用价值(功能)降低的现象。与地表水污染不同,污染物进入地下含水层后,迁移扩散速度缓慢,污染往往是逐渐发生的,难以及时发现;发现地下水污染后,确定污染源也相对比较困难。更重要的是,由于地表以下地层结构复杂性等因素的影响,地下水污染难以治理,即使彻底消除其污染源,已经进入含水层的污染物仍将长期产生不良影响。因此,地下水污染具有不确定性、隐蔽性和不可逆性。

地下水污染源的分类方法多种多样,按照形成原因可分为人为污染源和天然污染源两大类;按照分布形状可分为点源、线源和面源;按照污染来源可分为工业污染源、农业污染源、生活污染源、矿山污染源、区域性污染源和自然界自身污染源等。地下水中的污染物主要包括无机污染物、有机污染物、生物污染物和放射性污染物等。污染物可通过不同途径污染地下水。按照污染源种类可分为污水管渠和污水池渗漏、固体废物堆淋滤、化学液体渗漏、农业活动污染及矿山开采污染等;按照水力学特点可分为间歇入渗型、连续入渗型、越流入渗型及径流入渗型等。

### 1.1.2 地下水污染的危害

近年来,地下水污染问题在我国许多地方凸显出来。垃圾的填埋和淋滤,农药化肥随雨水渗入地下,石油及化工产品苯及其同系物、苯酚、高分子聚合物等难降解有机物等渗透到含水层中严重地污染地下水,对人类造成了巨大的危害。危害的主要表现有以下几个方面:

(1) 垃圾及废弃物的填埋污染。填埋释放气体中挥发出来的有机物及 $\text{CO}_2$ 都会溶解进入地下水,打破原来地下水中 $\text{CO}_2$ 的平衡压力,促进 $\text{CaCO}_3$ 的溶解,引起地下水硬度升高。全封闭型填埋场的填埋气体的逸出会造成衬层泄漏,从而加剧渗滤液的浸出,导致地下水污染。渗滤液组分较复杂,含有难以生物降解的有机物和重金属等。渗滤液通过下渗会对地下水造成严重污染,主要表现在地下水浑浊,有臭味,COD、“三氮”(亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨氮)含量高,油、酚、重金属污染严重,细菌、大肠杆菌超标等。

(2) 生活及农业污水排放污染。农业灌溉水、农村家畜产生有机废物、城镇居民产生生

活垃圾和生活污水,含有纤维素、淀粉、尿素、洗涤剂,还含有多种微生物。这些污染物质渗入地下水中会引起水的理化指标变差,COD、BOD 升高,严重者出现水质浑浊、恶化以至于不能饮用。并且微生物的作用使含氮有机物转变为亚硝酸盐和硝酸盐,长期饮用高硝酸盐浓度的地下水会引起消化道疾病、婴儿高铁血红蛋白症,导致婴儿窒息或死亡。人及动物饮用农药污染的地下水还会引起各种怪病,如畸胎、肿瘤、皮肤及神经系统疾病等。

(3) 工业有机物和重金属污染。目前,已发现地下水有机污染物竟达 184 种,其中包括芳香烃类、卤代烃类等,这些有机物都是难以生物降解、对人类健康危害极大的,有许多是致癌物质。受到污染的地下水中如果含有超量的汞、铬、镉、砷及铅等重金属元素及其化合物,可以在自然界生物体内富集,如人体的肝、肾、脾及脑组织、骨组织等重要部位。长期饮用含汞超标的地下水可引起肝炎、肾炎、运动失调等疾病。饮用被镉污染的水往往会引起人的慢性中毒,损害人的肝、肾和骨髓等。摄入超量的砷会引起慢性中毒,潜伏期可长达几年甚至几十年,最终将造成癌变或畸变。

(4) 海(咸)水入侵污染。沿海城市人为因素引发的海(咸)水入侵,会引起城市供水水源地的污染,造成大批机井报废,入侵区大面积耕地盐碱化,使耕地丧失灌溉能力,灌溉面积减少,更严重的是造成人、畜用水困难。饮用海水入侵的地下水会对人体健康造成严重影响,肝病、肠胃病发病率明显高于非污染区。

### 1.1.3 地下水污染的状况

长期以来,地下水的不合理开发、土地的不合理利用、工业废物和生活垃圾等的不合理处置、农药化肥的大量使用,使地下水污染状况日益加重,因地下水污染造成的水质型缺水问题日益突出。据报道,全国 90% 的地下水遭受了不同程度的污染,其中 60% 污染严重。因此,我国的地下水污染防治形势非常严峻。

根据《中国环境状况公报》,2015 年,以地下水含水系统为单元,以潜水为主的浅层地下水和承压水为主的中深层地下水为对象,国土部门对全国 31 个省(自治区、直辖市)202 个地市级行政区的 5 118 个监测井(点)(其中国家级监测点 1 000 个)开展了地下水水质监测。评价结果显示,水质呈优良、良好、较好、较差和极差的监测井(点)比例分别为 9.1%、25.0%、4.6%、42.5%和 18.8%。其中,3 322 个以潜水为主的浅层地下水水质监测井(点)中,水质呈优良、良好、较好、较差和极差的监测井(点)比例分别为 5.6%、23.1%、5.1%、43.2%和 23.0%;1 796 个以承压水为主(其中包括部分岩溶水和泉水)的中深层地下水水质监测井(点)中,水质呈优良、良好、较好、较差和极差的监测井(点)比例分别为 15.6%、28.4%、3.7%、41.1%和 11.2%。超标指标主要包括总硬度、溶解性总固体、pH、COD、“三氮”、氯离子、硫酸盐、氟化物、锰、砷、铁等,个别水质监测点存在铅、六价铬、镉等重(类)金属超标现象。

2015 年,以流域为单元,水利部门对北方平原区 17 个省(区、市)的重点地区开展了地下水水质监测,监测井主要分布在地下水开发利用程度较大、污染较严重的地区。监测对象以浅层地下水为主,易受地表或土壤水污染下渗影响,水质评价结果总体较差。2 103 个测站数据评价结果显示,水质优良、良好、较差和极差的测站比例分别为 0.6%、19.8%、48.4%和 31.2%,无水质较好的测站。“三氮”污染较重,部分地区存在一定程度的重金属和有毒有机物污染。

2015 年,全国地级以上城市的集中式地下饮用水水源地 358 个,达标水源地占 86.6%,主要超标指标为锰、铁和氨氮。



## 1.2 地下水污染防控研究进展

目前,我国的地下水污染防控研究主要集中在地下水污染调查评估、地下水污染机理模拟、地下水污染防治区划、地下水污染防治技术和地下水污染监测预警等几个方面。

### 1.2.1 地下水污染调查评估

#### 1. 地下水污染调查评估工作概况

地下水污染调查是地下水污染研究的基础。为全面掌握我国地下水污染状况,制定和实施地下水污染防治规划,有效保护地下水资源,中国地质调查局于2005年部署了“全国地下水污染调查评价”工作。地下水污染调查评价工作分为区域调查(1:25万)和重点区调(1:5万)两个区域。主要平原(盆地)区按1:25万部署地下水污染区域调查,在东部城市密集区、重要经济区(带)、全国主要城市,按1:5万部署地下水污染专项调查。重点区选择重点城市和城市密集区、地下水集中供水水源区、重点污染源区等。2005年起,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所承担的珠江三角洲地区地下水污染调查评价、华北平原地下水污染调查评价和由南京地质矿产研究所承担的长江三角洲地区地下水污染调查评价、淮河流域平原地区地下水污染调查评价项目正式启动。

2011年,环境保护部、国土资源部、水利部、财政部联合下发了《关于开展全国地下水基础环境状况调查评估工作的通知》(环办[2011]102号),要求开展全国地下水基础环境状况调查评估工作。调查对象为我国境内(不含香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省)地下水开发利用区和潜在地下水开发区涉及的集中式地下水饮用水源地,危险废物堆存场、垃圾填埋场、矿山开采区、石油化工生产及销售区、再生水灌溉区及工业园区等重点污染源,以及地表水污染严重城市、饮用水水源污染严重区域、典型城市群、大型灌区、规模化养殖区和岩溶区等典型区域周边的地下水环境状况。2013年起,全国各地均已经启动该项工作。

#### 2. 地下水污染调查评估方法研究

在地下水污染调查方法方面,我国的科技工作者进行了大量的研究和探索,取得了一些研究和应用进展。黄中敏和刘战胜(2006)综述了地球物理方法在DNAPL的调查与监测应用中的有效性,探讨了地球物理方法直接探测DNAPL的可行性;周迅和姜月华(2007)叙述了地质雷达的工作原理,阐明了地质雷达在地下水有机污染调查工作中的应用条件、实例和效果;文冬光等(2008)借鉴国外区域地下水污染调查经验,提出了我国区域地下水有机污染调查与评价方法,包括有机调查指标选取,采样井选择和清洗,样品采集、保存与送检,实验分析方法和目标检出限,样品野外采集质量控制和实验分析质量控制,有机污染物检出评价、超标评价和相关分析方法;张艳和徐斌(2010)将PDA和3S集成技术引入地下水污染调查评价工作中,构建了基于3S的地下水水质调查评价模型,并进行了系统设计和系统实现;蔡子昭等(2013)使用SQLServer2000建立了地下水污染调查数据库,利用VC++、MapGIS二次开发库和Delphi组件开发技术设计了地下水污染调查信息系统,实现了调查数据的录入、管理、制图、质量评价、污染评价、统计和导出等功能。



在地下水污染风险评价方面,我国的环境风险评价工作开始于 20 世纪 90 年代初,最初主要应用于核工业等领域。目前,国内的地下水污染风险评价是在国外环境风险评价方法的基础上,以地下水质量标准 and 风险评价的健康基准值为准则,量化地下水污染对人体健康的潜在影响。李政红等(2001)以美国环境保护局(US EPA)推荐的风险评价模型为基础,分析了某储油库地下水有机污染对场址内暴露人群造成的健康风险;韩冰等(2006)对美国环境保护局(US EPA)推荐的风险评价模型进行改进,对北方某市典型区域地下水中的有机污染物进行了饮水安全风险计算和评价;张应华等(2008)利用多介质暴露评价模型(MMSOILS),以苯为评价目标污染物,分析烯烃厂不同分区的土壤苯污染对某地区水源地造成的饮用地下水健康风险;李玮等(2012)针对北京通州、大兴再生水灌区,以 Multi-cell 模型为基础,构建了污染物随水在土壤剖面的垂向迁移衰减一维模型,研究了该地区地下水中多环芳烃(PAHs)萘和菲的污染风险差异;王曜等(2015)采集了安徽北部 26 个农村地下水样品,测试分析了 Mn、Zn、Cu、Pb、Ni、Cr 和 Cd 七种重金属,采用美国环境保护局(US EPA)推荐的风险评价模型,分析了地下水重金属污染对人类健康产生危害的风险。

### 1.2.2 地下水污染机理模拟

地下水污染机理模拟主要研究各种溶质浓度在多孔介质中的时空变化规律,定性或定量地预测含水层中污染物现在或未来的分布状况,包括模拟实验研究和数学模型应用研究两个方面。

#### 1. 模拟实验研究

模拟实验有野外原位实验和室内模拟实验,实验目的是模拟污染物的入渗过程及污染物在包气带中的吸附、解吸、转化机制,并且确定包气带的截污、自净能力等,探讨不同岩性地层对污染物的净化能力和机制,研究污染物对地下水的影响程度。我国学者在这方面做了大量的工作。董悦安等(2001)进行了 4 个土柱的模拟实验,模拟不同条件下农田区氮污染和氮转化的过程及结果,研究菜田施肥(化肥)残存量对地下水氮污染的影响;袁雯和方海兰(2007)通过土柱实验模拟矿化垃圾及矿化垃圾与污泥混合物在淋溶条件下重金属的淋失情况,并利用污染综合指数法分析矿化垃圾中重金属迁移对地下水的影响;张沙沙等(2010)通过室内土柱模拟实验,用干湿交替地面回灌模式研究包气带土柱对氨氮的去除效果及氮素在包气带中的迁移转化规律;林云等(2010)为查明河南省新乡市浅层地下水的污染机理,通过现场调查并对地下水、地表水进行采样,测定其氢、氧稳定同位素及水化学成分,对水样的氢氧同位素和水化学组成的空间分布规律进行了分析;靳孟贵等(2012)利用室内淋溶实验分析计算包气带中各种岩性对不同污染物的去除率,并分析地层对再生水的净化能力和污染物的迁移转化及再生水对地下水的影响;于梦麒等(2015)将野外调查与室内实验相结合,以北方某金属冶炼尾矿库作为研究对象,通过地下水和土壤样品的采集,分析其理化性质,利用土柱实验研究地下水中污染物扩散转移规律。

#### 2. 数学模型研究

数学模型包括地下水水流模型和溶质运移模型,其中,地下水流数值模型是溶质运移数值模型的基础,一般溶质运移模型是在水流模型得以识别校验后建立的,可提高模型的准确