

溶解相DNAPLs

残

DNAPLs池

# 土壤-地下水污染与修复

仵彦卿 编著



科学出版社

# 土壤-地下水污染与修复

仵彦卿 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

土壤与地下水环境的变化性、地层结构的复杂性、污染物时空分布的高度离散性、隐蔽性、长期积累性、低剂量毒性释放性以及去除的缓慢性,使得土壤与地下水环境调查、监测、健康风险评估、管理以及污染修复方法不同于大气和地表水体环境。本书从土壤与地下水环境和污染的基本概念出发,重点介绍土壤与地下水环境和污染的基础理论、土壤与地下水污染源及污染物类型、土壤与地下水环境调查、监测、健康风险评估、管理以及污染修复技术与方法。

本书可作为环境科学与工程、土壤学、地下水科学与工程、环境岩土工程等学科的研究生教材以及场地环境调查、评价与污染修复工程技术人员和研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

土壤-地下水污染与修复/仵彦卿编著. —北京: 科学出版社, 2018.6  
ISBN 978-7-03-058073-3

I. ①土… II. ①仵… III. ①土壤污染-修复②地下水污染-修复  
IV. ①X52②X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 133184 号

责任编辑: 王腾飞 沈 旭/责任校对: 彭 涛

责任印制: 张克忠/封面设计: 许 瑞

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>

保定市中西美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 23

字数: 459 000

定价: 149.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

土壤与地下水环境作为环境介质的一部分，与大气环境和地表环境进行物质和能量的交换。由于土壤与地下水环境的隐蔽性，人们对土壤与地下水污染的认识没有大气环境和地表环境污染直接和敏感，因此，对土壤与地下水环境的关注度滞后于大气和地表环境。通常人们认为土壤是地表松散的固体材料，土壤中的污染物是不移动的，可以与固体废弃物一样处理；地下水是液体，类似于河水，将地下水与地表水等同看待，这些认识是非科学的朴素认识。固体废弃物是人类活动的产物，是一种污染源，而土壤是天然的环境介质，土壤中的物质是变化的，土壤内存在各种矿物、微生物和微小生物、水分、各种养分、气体包括空气和有机挥发物质，能够生长植被，是一种多相多组分的复杂体系。土壤中的污染物随土壤环境的变化，污染物的形态和重金属的价态也随之发生变化；土壤中的污染物随降水入渗和土壤中水分迁移而向地下水迁移；土壤中的有机污染物经微生物分解可能变化成挥发性有机物排放到大气中，目标污染物也可能降解殆尽而转化成中间产物。因此，从科学的角度看，土壤中的污染物也是变化的、流动的。地下水处于岩土介质中，岩土介质沉积环境的不同，岩土介质的物理化学性质各异；地下水与岩土介质发生着物理、化学的相互作用，地下水环境变化(如抽水、注水及地下工程活动等)，地下水与岩土介质的相互作用发生变化，导致地下水中的各种物质发生变化。尤其是有机污染物进入地下环境，会发生溶解作用、吸附作用、水解作用、非生物转化作用、生物降解作用、对流和弥散作用，非水相的有机物难溶于地下水，大部分以吸附态、自由态和挥发态存在于地下环境中。对于大气和地表环境污染，一定存在人工污染源；而地下水污染不一定存在人工污染源，如天然岩土介质中存在某种重金属或放射性物质，在人类未改变地下环境的条件下，岩土介质中的重金属或放射性物质固定在固体相，当改变了地下环境后，岩土介质中的重金属或放射性物质就会溶解在地下水中，导致地下水重金属和放射性污染。因此，土壤与地下水中污染物的迁移转化十分复杂，调查、监测、风险评估以及修复技术的选择一定要考虑地层岩性、结构、水文地质条件、污染物的类型和历史。土壤污染不同于固体废弃物污染，地下水环境不同于地表水环境。由于土壤与地下水污染物相互转化，具有相同的地下环境，因此，国外将土壤与地下水环境作为一体进行研究。

土壤与地下水环境在自然和人类活动条件下，pH 和 Eh 不断变化，导致土壤

与地下水中的环境要素发生变化, 污染物的形态和重金属的价态也发生变化, 地下环境中的固相和液相中的物质不断转换, 这就是说土壤与地下水环境是变化的。由于土壤和赋存地下水的含水层的结构的复杂性, 土壤与含水层成因的不同, 土壤与地下水污染的高度离散性、隐蔽性、长期积累性、低剂量毒性释放性以及去除的缓慢性, 土壤与地下水环境调查、监测、健康风险评估、管理以及污染修复方法不同于大气和地表水环境。本书从土壤与地下水环境和污染的基本概念出发, 重点介绍土壤与地下水环境和污染的基础理论, 土壤与地下水污染源及污染物类型, 土壤与地下水环境调查、监测、健康风险评估、管理以及污染修复技术。第 1 章绪论, 介绍中国土壤与地下水污染现状、土壤-地下水污染与修复的研究意义、土壤-地下水污染与修复的研究内容、土壤-地下水污染与修复的研究进展。第 2 章介绍土壤与地下水的基本概念, 包括定义、土壤的基本物理量、土壤生态系统、地下水的类型、地下水的重要参数、地下水渗流的基本概念以及地下水的化学组分。第 3 章介绍土壤与地下水污染物迁移转化的基础理论, 包括土壤与地下水流动的基本定律、土壤与含水层中水流运动的基本方程、定解条件、土壤与地下水污染物迁移转化的基本定理、对流-弥散方程、对流-弥散-吸附方程、对流-弥散-吸附-化学反应方程、双域模型、双重介质模型、变饱和土壤渗流与污染物迁移转化方程、土壤与地下水污染物迁移转化的数值模拟、地下水污染物迁移转化的数值模拟与预测以及土壤水分和污染物迁移转化的数值模拟。第 4 章土壤与地下水污染源及污染物类型, 包括土壤中重金属的形态、土壤中有机污染物的形态、土壤中重金属的价态、地下水中污染物的存在状态。第 5 章土壤与地下水环境的复杂性, 包括地下环境的复杂性、污染物进入到地下环境迁移转化的复杂性、人类活动影响的复杂性。第 6 章土壤与地下水污染管理问题, 包括土壤与地下水污染管理体系建设和土壤与地下水污染管理制度建设。第 7 章土壤与地下水环境初步调查、详细调查、土壤与地下水环境监测、土壤与地下水环境监测网优化以及案例分析。第 8 章土壤与地下水污染修复标准, 包括土壤与地下水环境质量标准、污染控制标准、污染修复标准的基本概念、国内外土壤与地下水污染修复标准等。第 9 章土壤与地下水污染风险评估方法, 包括基本概念、污染土壤人体健康风险评估方法、污染地下水人体健康风险评估方法、生态系统(植被、环境、水循环系统等)健康风险评估方法以及案例分析。第 10 章土壤与地下水污染修复技术, 包括土壤与地下水重金属和放射性污染修复技术、土壤与地下水有机污染修复技术、土壤与地下水污染修复技术的选择以及案例分析。第 11 章地下水污染预测及修复工程模拟设计, 包括输油管线泄漏对地下水源污染预测、地下水六价铬污染修复工程模拟设计、地下水四氯乙烯污染修复工程模拟设计以及地下水苯污染修复工程模拟设计。第 12 章土壤与地下水污染相关问题, 包括土壤与地下水一体化修复、地下环境复杂性、土壤与地下水环境调查监测方法、评估方法、污染标准和修复

技术选择、修复费用、地下水采样等问题。

本书是作者从2004年开始在上海交通大学主讲的“土壤-地下水污染修复”研究生课程的基础上，经过多年的讲述和修改，并参考和引用了前人大量的研究成果，经过作者的理解、提炼和组织，同时也加入了作者的研究成果，形成了系统描述土壤与地下水环境和污染的基本概念、污染物迁移转化的基本原理、土壤与地下水环境调查与监测、健康风险评估与污染修复技术的著作——《土壤-地下水污染与修复》。感谢上海市科学技术委员会资助项目“地下水污染迁移规律与可渗透性反应墙修复技术研究”(15DZ1205803)和国家自然科学基金项目“非均质含水层中有机污染物迁移机理研究”(41272261)的资助。

衷心感谢在这一领域做出贡献的学者，没有他们的研究和长期积累，很难形成这一领域的理论和学科体系，也衷心感谢以各种方式对本书的编写提供过帮助的所有人。

由于时间有限，编写过程中错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

仵彦卿

2017年4月20日于上海

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 中国土壤污染现状 .....	1
1.2 中国地下水污染状况 .....	3
1.3 土壤-地下水污染与修复的研究意义 .....	5
1.4 土壤-地下水污染与修复的研究内容 .....	5
1.5 土壤-地下水污染与修复的研究进展 .....	9
第 2 章 土壤与地下水的基本概念 .....	17
2.1 土壤的基本概念 .....	17
2.2 土壤的基本物理量 .....	20
2.3 土壤生态系统 .....	25
2.4 地下水的基本概念 .....	26
2.5 地下水的类型 .....	33
2.6 地下水渗流的基本概念 .....	36
2.7 地下水的化学组分 .....	40
第 3 章 土壤与地下水污染物迁移转化的基础理论 .....	42
3.1 概述 .....	42
3.2 土壤与地下水流运动的基本原理 .....	44
3.3 土壤与地下水污染物迁移转化的基本原理 .....	56
3.4 土壤与地下水污染物迁移转化的数值模拟 .....	81
第 4 章 土壤与地下水污染源及污染物类型 .....	95
4.1 土壤与地下水污染源 .....	95
4.2 土壤与地下水污染物类型 .....	98
4.3 土壤中重金属的形态 .....	109
4.4 土壤中有机污染物的形态 .....	110
4.5 土壤中重金属的价态 .....	111
4.6 地下水中污染物的存在状态 .....	114
第 5 章 土壤与地下水环境的复杂性 .....	119
5.1 地下环境的复杂性 .....	120

5.2	地下水污染源、污染物类型的复杂性	124
5.3	人类活动影响的复杂性	126
<b>第6章</b>	<b>土壤与地下水污染管理问题</b>	<b>128</b>
6.1	土壤与地下水污染管理体系建设	129
6.2	土壤与地下水污染管理制度建设	133
<b>第7章</b>	<b>土壤与地下水环境调查与监测</b>	<b>135</b>
7.1	概述	135
7.2	土壤与地下水环境初步调查	137
7.3	土壤与地下水环境详细调查	141
7.4	地下水环境调查	143
7.5	土壤与地下水环境监测	146
<b>第8章</b>	<b>土壤与地下水污染修复标准</b>	<b>159</b>
8.1	概述	159
8.2	荷兰土壤与地下水污染修复的干预值	162
8.3	美国爱荷华州土壤与地下水污染物标准	165
8.4	美国国家环境保护局土壤与地下水筛选值	168
8.5	地下水质量标准	179
8.6	上海市场地土壤环境健康风险评估筛选值	180
8.7	土壤污染风险管控标准、农用地土壤污染风险筛选值和管制值 (试行)	181
8.8	上海市低效工业用地复垦场地安全利用土壤环境质量指导值	182
<b>第9章</b>	<b>土壤与地下水污染风险评估</b>	<b>184</b>
9.1	基本概念	184
9.2	污染土壤的人体健康风险评估方法	185
9.3	污染地下水人体健康风险评估方法	207
9.4	土壤与地下水污染的生态环境风险评估方法	220
9.5	案例分析	222
<b>第10章</b>	<b>土壤与地下水污染修复技术</b>	<b>225</b>
10.1	概述	225
10.2	土壤与地下水重金属和放射性污染修复技术	227
10.3	土壤与地下水有机污染修复技术	244
10.4	土壤与地下水中污染联合修复技术	269
10.5	土壤与地下水污染修复技术的选择	271
10.6	案例分析	276



---

第 11 章 地下水污染预测及修复工程模拟设计 .....	279
11.1 输油管线泄漏对地下水源污染预测 .....	279
11.2 地下水六价铬污染修复工程模拟设计 .....	296
11.3 地下水四氯乙烯污染修复工程模拟设计 .....	306
11.4 地下水苯污染修复工程模拟设计 .....	326
第 12 章 土壤与地下水污染相关问题 .....	336
12.1 土壤与地下水污染一体化修复问题 .....	337
12.2 地下环境的复杂性问题 .....	338
12.3 土壤与地下水污染修复问题 .....	339
12.4 土壤与地下水污染修复经费问题 .....	340
12.5 土壤与地下水污染风险评估问题 .....	340
12.6 土壤与地下水评估和修复标准问题 .....	341
12.7 土壤与地下水环境调查问题 .....	342
12.8 土壤与地下水采样问题 .....	342
参考文献 .....	345
后记 .....	353

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 中国土壤污染现状

根据《全国土壤污染状况调查公报》<sup>[1]</sup>，全国土壤总的点位超标率为 16.1%，其中耕地土壤点位超标率更是高达 19.4%。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，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。

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。

重污染企业用地：在调查的 690 家重污染企业用地及周边的 5846 个土壤点位中，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：在调查的 81 块工业废弃地的 775 个土壤点位中，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：在调查的 146 家工业园区的 2523 个土壤点位中，超标点位占 29.4%。其中，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。

固体废物集中处理处置场地：在调查的 188 处固体废物处理处置场地的 1351 个土壤点位中，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：在调查的 13 个采油区的 494 个土壤点位中，超标点位占 23.6%，主

要污染物为石油烃和多环芳烃。

采矿区：在调查的 70 个矿区的 1672 个土壤点位中，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。

污水灌溉区：在调查的 55 个污水灌溉区中，有 39 个存在土壤污染。在 1378 个土壤点位中，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：在调查的 267 条干线公路两侧的 1578 个土壤点位中，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 m 范围内。

从中国土壤污染调查看，目前中国土壤污染比较严重，主要表现在以下几个方面：

(1) 农用耕地尤其是污水灌区土壤污染严重。大多数污水灌区的污水属于未处理的污水，由于污水的来源和种类不同，土壤污染物的类型不同，大多为难以降解的重金属和有机物，这些污染物通过食物链进入食品，造成人体健康风险。农田重金属不仅在农作物中累积，还进入人体威胁人体健康，而且造成农作物减产。

(2) 工业场地土壤污染严重。几乎所有流转工业场地均有不同程度的土壤和地下水污染。如上海市宝山区南大地区和普陀区桃浦地区(原化工行业场地)，场地土壤和地下水污染严重，土壤中有机污染物和重金属的浓度很高，每个地区土壤污染修复费用高达 15 亿元。

(3) 矿山开采区土壤污染严重。矿山开采区、尾矿坝、尾矿库及其下游流域土壤和地下水均有不同程度污染。受采矿污染的土地面积大约为 200 万  $\text{hm}^2$ ，并且以每年 3.3 万~4.7 万  $\text{hm}^2$  的速度递增。湖南、江西、云南、四川、广西的有色金属矿区的重金属污染尤为严重。

(4) 垃圾和电子废弃物堆场及其附近土壤污染严重。

(5) 土壤重金属背景值高的地区超标。云南、贵州、广西土壤中镉、铅、锌、铜和砷等的背景值远远高于全国土壤背景值，主要是岩石风化过程释放的重金属富集到土壤中。上海地区(长江流域沉积物)土壤中铊和钴背景值过高。全国不同地区土壤中重金属的背景值存在差异，主要与土壤成因有关。

2016 年 5 月，国务院印发了《土壤污染防治行动计划》<sup>[2]</sup>，提出开展土壤污染状况详查工作，并规定 2018 年年底前查明农用地土壤污染情况，2020 年年底前掌握重点行业企业用地中的污染情况。面对严峻的土壤污染状况，目前我国在土壤污染研究方面基础十分薄弱，表现在标准规范不健全，土壤环境调查评估、风险管控、污染修复技术等方面缺乏可操作的标准和技术规范。

土壤不同于固体污染物，它是一种复杂的、高度离散的，由矿物、有机物质、

水、气、生物组成的多相多组分环境介质。污染物进入到变化环境的土壤介质中,发生时空分布、形态和价态的变化。因此,土壤污染调查点(平面和深度上的采样点)的代表性至关重要。土壤污染是一个长期的累积过程,污染修复也不是短时期能够彻底解决的。对于土壤污染的修复,针对土地的不同用途和污染源的不同类型,土壤环境调查、监测、健康风险评估的污染修复方法是不同的,目前我国针对城市工业场地、农用地和矿山土地三类土壤开展环境调查、监测、健康风险评估和污染修复工作。

## 1.2 中国地下水污染状况

根据《2016 中国环境状况公报》<sup>[3]</sup>,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,国土资源部对全国 6124 个监测点包括 1000 个国家级监测点开展了地下水水质监测,监测结果显示:水质为优良级、良好级、较好级、较差级和极差级的监测点分别占 10.1%、25.4%、4.4%、45.4%和 14.7%。地下水水质超标占 60.1%,主要超标指标为总硬度、溶解性总固体、铁、锰、“三氮”(亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨氮)、氟化物、硫酸盐等,个别监测点有砷、铅、汞、六价铬、镉等重(类)金属超标现象。根据《2015 中国环境状况公报》<sup>[4]</sup>,全国 202 个地市级行政区的 5118 个监测井,其中国家级监测点 1000 个,地下水水质监测结果显示:水质呈优良、良好、较好、较差和极差级的监测井比例分别为 9.1%、25.0%、4.6%、42.5%和 18.8%。其中,3322 个以潜水为主的浅层地下水水质监测井中,水质呈优良、良好、较好、较差和极差级的监测井比例分别为 5.6%、23.1%、5.1%、43.2%和 23.0%;1796 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、较差和极差级的监测井比例分别为 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”(亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和铵氮)、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。

2016 年水利部针对松辽平原、黄淮海平原、陕西及西北地区盆地和平原、江汉平原重点区域进行浅层地下水水质监测,2104 个监测站点地下水水质综合评价结果显示:水质优良和良好的测站分别占 2.9%和 21.2%,无较好测站,水质较差和极差的测站分别占 56.2%和 19.8%,全国 76%的浅层地下水污染,其中松花江流域地下水水质较差和极差占 87.1%,辽河流域地下水水质较差和极差占 89.4%,海河流域地下水水质较差和极差占 68.9%,黄河流域地下水水质较差和极差占 74.6%,淮河流域地下水水质较差和极差占 75.9%,长江流域地下水水质较差和极差占 80%,内陆河流域地下水水质较差和极差占 74%。

根据《2016年中国水资源公报》<sup>[5]</sup>,许多浅层地下水存在有机污染物的污染,而原有的《地下水质量标准》(GB/T 14848—1993)<sup>[6]</sup>中只有39个指标,没有有机污染物,所以说,《地下水质量标准》(GB/T 14848—1993)不适合目前地下水污染评价,需要修改,修改后的《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)<sup>[7]</sup>中增加了54种有机污染物,该标准2018年5月1日实施。另外,目前监测地下水水质是检测溶解在地下水中的指标,而有机污染物进入到地下水中大部分不溶解在地下水中,而是吸附在含水层和以自由态形式存在于含水层中,只要检出地下水中的非水相的污染物(NAPLs),说明在地下环境中存在较多的NAPLs,这些NAPLs会长期释放进入到地下水中,因此,在检测出地下水含有NAPLs(尽管未超标)时,应该同时采集含水层土壤样品进行分析,追溯污染源。

根据118个城市地下水污染调查,64%为重度污染,33%为轻度污染,3%为未污染,说明目前我国地下水污染情况不容乐观。东北地区重工业和油田开发区地下水污染严重。东北地区的地下水污染,不同地区有不同特点。松嫩平原的主要污染物为亚硝酸盐氮、氨氮、石油类等,下辽河平原硝酸盐氮、氨氮、挥发性酚、石油类等污染较普遍。

华北地区地下水污染普遍呈加重趋势,主要污染组分有硝酸盐氮、氰化物、铁、锰、石油类等。此外,该区地下水总硬度和矿化度超标严重,大部分城市和地区水的总硬度超标。

南方地区地下水局部污染严重。西南地区的主要污染指标有亚硝酸盐氮、氨氮、铁、锰、挥发性酚等,污染组分呈点状分布于城镇、乡村居民点,污染程度较轻,范围较小。中南地区主要污染指标有亚硝酸盐氮、氨氮、汞、砷等,污染程度轻。东南地区主要污染指标有硝酸盐氮、氨氮、汞、铬、锰等,地下水总体污染轻微,但城市及工矿区局部地域污染较重,特别是长江三角洲地区、珠江三角洲地区经济发达,浅层地下水污染普遍。

西北地区地下水污染总体较轻。内陆盆地地区的主要污染组分为硝酸盐氮;黄河中游、黄土高原地区的主要污染物有硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、铬、铅等,以点状、线状分布于城市和工矿企业周边地区<sup>[8]</sup>。

从以上中国地下水污染状况可以看出,中国浅层地下水污染严重,浅层地下水的污染源主要来自于工业场地化学品污染、加油站石油类污染、污染土壤渗漏、污染地表水体渗流、矿山开发污染源、农业面源污染源等。为了对地下水污染进行防治与控制,国务院2011年通过了《全国地下水污染防治规划(2011—2020)》<sup>[9]</sup>,投入大量资金进行地下水污染调查,实施污染防控工程以及污染修复工程。

### 1.3 土壤-地下水污染与修复的研究意义

土壤与地下水是人类赖以生存的重要资源,地球上大多数国家的饮用水源为地下水,如亚太地区(印度农村 80%、菲律宾 60%、泰国 50%、尼泊尔 60%、澳大利亚 21%)、欧洲(丹麦 100%、德国 75%、荷兰 75%、比利时 83%、英国 27%)、拉丁美洲、美国(农村)、突尼斯、摩洛哥的饮用水中地下水占的比例分别为 32%、75%、29%、51%(96%)、95%、75%。我国 18%的供水为地下水源,北方地区主要供水水源为地下水;浅部土壤是维持植被和农作物生长的基础,提供人类和动物生存的食物。

土壤与地下水也是生态系统的一部分,维持生态系统的生存,地表的显性生态系统和地表以下的隐性生态系统的生长依赖土壤和地下水,地下水流系统通过水分循环、养分循环和碳循环,将地表显性生态系统和地表以下隐性生态系统联系起来,因此,土壤与地下水污染不仅直接危害人类健康,而且通过食物链和损伤生态系统威胁人类安全。土壤污染引起农作物中某种元素含量超标,并通过食物链富集到人体和动物中,危害人畜健康,引发人类癌症和其他疾病等。另外,土壤受到污染后,含污染物质浓度较高的污染表土容易在风力和水力作用下分别进入到大气和地表水体中,导致大气污染、地表水和地下水污染以及生态系统退化等其他次生生态环境问题。人类产生的污染物最终会通过各种途径进入到地下,从而污染土壤和地下水。地下水污染物通过水流转化到地表水体,污染河流、湖泊和海洋,进而污染水生生物,通过食物链影响人体健康;土壤和地下水挥发和半挥发性有机污染物转化成气体,直接影响人体健康;土壤污染物转移到作物中,影响食品安全;土壤与地下水污染,影响饮用水源,从而影响人类健康;污染严重的工业场地转化成商用或民用建筑,会通过地基和建筑物底部裂隙或空隙通道,挥发性气态污染物进入到房间,影响人体健康;土壤与地下水污染影响地下空间环境质量,从而影响人体健康。因此,土壤-地下水污染与修复研究,具有重要的科学研究意义和现实的应用价值。

### 1.4 土壤-地下水污染与修复的研究内容

土壤-地下水污染与修复的主要研究内容有:地表以下岩土介质的物理、化学和生物特性,地下环境的复杂性及其变化规律、污染物进入变化的地下环境中的迁移转化过程、土壤与地下水环境调查、监测、风险评估方法以及污染修复技术等。具体的研究内容如下:

### 1.4.1 土壤与地下水的基本概念研究

从资源的角度和从环境的角度定义土壤和地下水是有区别的。从资源的角度定义土壤，主要关注的土壤中营养物质组成和水分迁移规律；从环境的角度定义土壤，要考虑污染物进入土壤后的形态和重金属价态的变化，对土壤中的生物的影响、对植被的影响以及通过食物链对人体健康的影响，挥发性污染物通过各种途径对人体健康的影响等。从水资源的角度定义地下水，仅考虑地下水的可利用量和溶解在水中的物质不能超过水资源用途的标准；从环境的角度定义地下水，不仅考虑溶解在地下水中的物质对生态环境的影响，也要考虑污染物在变化的环境介质(土壤与含水层)中的不同形态(气态、液态、自由态、吸附态)和迁移转化规律以及含水层和隔水层的定义不同、地下水采样方法不同等。

### 1.4.2 土壤与地下水污染物迁移转化规律研究

污染物进入到土壤与地下水后不是不变的，而是在土壤与地下水中不断地迁移转化；不同的污染物在土壤与地下水中的迁移转化不同，同一种污染物在不同土壤与含水层介质中的迁移转化也不同。对于重金属污染物来说，进入到土壤与含水层中会发生络合作用和离子交换作用，形成铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态和有机物结合态，这些结合态的重金属在 pH 和 Eh 发生变化时会溶出，向地下水迁移，土壤中离子态的重金属可能被植被吸收，也可能进入到地下水中。有机污染物有两种，分别是比水轻的非水相轻液(LNAPLs)和比水重的非水相重液(DNAPLs)，有机污染物进入土壤，在向地下迁移过程中发生形态变化，部分为挥发态、部分为吸附态、部分为自由态、部分为溶解态，进入到地下水中的溶解态有机污染物随地下水流迁移，同时发生化学和生物反应的转化过程。因此，土壤与地下水污染物迁移转化规律研究的内容包括不同污染物(重金属、放射性物质、非水相轻液、非水相重液)在不同类型土壤与含水层(孔隙型、裂隙型、溶隙型)、非均质各向异性土壤与含水层中迁移的物理过程、化学过程、生物过程研究，多相多组分多场耦合系统研究，以及数学模型构建和数值方法研究等。

### 1.4.3 土壤与地下水污染源和污染物的类型研究

由于土壤与地下水的隐蔽性和高度的离散性，污染源的类型不同，如面源污染、点源污染和线源污染等，污染物在土壤与地下水中的分布差异较大。污染物的类型不同，如重金属、无机污染物(氮、氰化物、氟化物等)、放射性物质、有机污染物(LNAPLs 和 DNAPLs)等，污染物进入到土壤与地下水中的形态、重金属价态、迁移转化不同。另外，由于地下水处于含水层中，存在水-岩(土)相互作用过程，一方面，污染物进入到土壤与地下水中，不仅发生污染物的迁移转化，



也会改变水-岩(土)相互作用过程,改变水-岩(土)之间的物质平衡。另一方面,不存在污染源的情况下,如果改变土壤与地下水的环境,如灌溉、抽水、地下工程活动、土地利用方式变化以及污染修复工程等,将会改变土壤中的微生物、pH和Eh,使得原本络合态的重金属变成离子态而迁移到地下水中,导致地下水重金属污染。

#### 1.4.4 土壤与地下水环境监测方法研究

由于土壤与含水层所处的地质环境的复杂性,土壤与地下水环境调查、监测、风险评估、污染修复过程中监测点的布设和采样方法至关重要,设计的监测点能否找到污染源,是评价和修复土壤与地下水污染的关键。因此,土壤与地下水环境监测方法研究包括监测目的、监测点的空间布设方法(采样点的平面布设和垂向布设)、采样时间间隔、监测要素选择、检测分析方法、监测方式(在线监测、离线监测)选择以及监测网的优化设计方法等。针对监测目的和监测的阶段性的,如场地土壤与地下水环境监测、初步环境调查阶段监测、详细环境调查阶段监测、修复阶段监测和后评估阶段监测;区域土壤与地下水环境初步和详细调查;农田土壤与地下水初步和详细调查。不同监测目的,不同监测阶段,监测点的布设和优化方案的制定都不相同。

#### 1.4.5 土壤与地下水环境的相关标准研究

土壤与地下水污染的评判是依据相关标准确定的,标准的制定要考虑不同的用途、污染物对生态环境和人体健康的危害、技术水平和经济承受能力等。土壤与地下水环境标准包括以下方面。

(1)目标值(无污染的值,也称为基准值),有时也称为背景值。但要注意:有的地区的土壤与地下水背景值超出了人体健康的风险控制值,这些地区的背景值不应该作为目标值。

(2)土壤与地下水质量标准值。这是反映土壤与地下水环境状况的值,该标准值分为几种类型,根据用途选择类型,如地下水质量标准包括五类,Ⅲ类水质标准符合饮用水质标准,Ⅳ类水符合农业灌溉水质标准;土壤质量标准根据农田适用类型,如林地、草地、稻田、果林等不同,标准也有所不同。

(3)土壤与地下水筛选值(或干预值)。根据土地用途可分为建设用地和农业用地,建设用地按照人体健康风险评价土壤的污染风险,该标准依据人体健康风险计算得出;农业用地既要考虑人体健康风险,又要考虑生态健康风险,还要考虑土壤与地下水污染物扩散到邻近水域,对生态环境健康造成影响,如深层土壤污染对人体健康影响的途径较长,人体健康风险较小,风险控制值往往大于筛选值,但深层土壤污染物可能处于饱和带或非饱和带会扩散到地下水中,如果地下



水作为饮用水(按饮用水质量标准),就会造成人体健康风险增大,如果地下水不作为饮用水(按地下水用途采用不同的标准,如地下水作为农业灌溉用水,按农用水标准;如果地下水转化成地表水,按地表水质量标准),但地下水与地表水相互转化,会影响地表水质量,因此,按照风险评估方法制定的标准,一定要综合考虑潜在风险。筛选值或干预值属于低风险控制标准,不是环境质量标准值。

(4)土壤与地下水污染修复标准,该标准称为修复目标值。对于人体健康高风险的土壤与地下水污染,必须进行修复,该标准的制定,要考虑土壤与地下水的用途、风险控制值、修复技术水平和经济可承受能力。根据风险高低和经济承受能力分阶段进行修复,因此,可以制定分阶段的修复目标。

(5)后评估标准。对于修复的土壤与地下水需要长期监测,如果发现按照修复标准修复的土壤与地下水对生态环境造成一定影响,必须修订修复标准,后评估标准不是某一个值,而是一个修复标准的修正值。

#### 1.4.6 土壤与地下水污染防治对策研究

土壤与地下水一旦污染,修复时间和经费投入巨大,因此,土壤与地下水污染以防控为主(污染源的管理),风险管控和修复(土壤与地下水污染修复工程同样会带来次生污染或污染转移)为次,土壤与地下水污染管控尤为重要。土壤与地下水污染防治对策研究包括:土壤与地下水污染防治法规制定、土壤与地下水污染防治法规执行程序、土壤与地下水污染防治管理机构、土壤与地下水污染治理的市场化、金融保障(建立土壤与地下水污染修复基金)以及信息透明与数据共享等,做到土壤与地下水污染的防控与修复的全过程管理,包括后续监测管理。

#### 1.4.7 土壤与地下水污染修复技术研究

土壤与地下水污染修复技术包括原位修复技术和异位修复技术。各种修复技术在欧美国家使用了几十年,大部分修复技术比较成熟,但技术的适用性具有很大的差异,这是由于土壤与地下水环境的差异性,全世界任何地方的地下环境都是不同的。因此,在土壤与地下水污染修复技术选择时,一定要考虑该地区的自然条件和地下环境的岩土性质、地层结构与水文地质条件以及技术水平和经济可承受能力。

土壤与地下水污染修复技术研究,不仅研究修复技术本身,还要研究不同污染物在不同土壤与含水层介质中的存在形式、地下环境特征、地层结构和岩性,修复工程与地下环境的兼容性等,综合考虑修复工程改变地下环境诱发的污染、修复药剂对地下环境的影响、有机物降解中间有毒有害产物对地下环境的影响以及过高的能耗等,做到绿色修复。