

地下水污染

(原著第二版)

GROUND WATER CONTAMINATION

——迁移与修复

TRANSPORT AND REMEDIATION

菲利普·B·贝迪恩特

[美] 哈纳迪·S·里法尔 著

查尔斯·J·纽厄尔

施周 杨朝晖 陈世洋 译



中国建筑工业出版社

地下水污染 ——迁移与修复

(原著第二版)

GROUND WATER CONTAMINATION
TRANSPORT AND REMEDIATION

菲利普·B·贝迪恩特
[美] 哈纳迪·S·里法尔 著
查尔斯·J·纽厄尔

施周 杨朝晖 陈世洋 译

中国建筑工业出版社

前 言

20 世纪 70 年代，美国开始认识到空气污染和水质问题的严重性并开始采取行动。当时新组建的环境保护署（EPA）采取的一个重要举措，就是明确、维持并保护全美地表水与地下水的水质。因为当时环境工程尚未成长为一个独立领域，因而需要水文学家、土木与环境工程师、水文地质学家以及其他学科的科学家一同为地表水污染控制提供专业知识和进行工程设计。

20 世纪 70 年代末期，像纽约州的爱渠、科罗拉多丹佛的阿森那等地的危险性废物场的发现，以及在加利福尼亚州和亚利桑那州的一系列氯化有机物场地的确定，标志着—个关注危险性废物处置场问题新时代的开始。在 20 世纪 80 年代早期，相继发现了大量与工业生产和军事活动相关的危险性废物处置场，这些场地已存在多年。根据 EPA 授权行政的资源保护与再生法（RCRA）和超级基金（Superfund）的立法要求，对这些已废弃的和正在使用的废物处置/泄漏场地展开了大量研究，所有研究均按地下水水质保护要求进行。在这期间，水文地质工作者和工程师—道采集样本，进行地质学评价，分析数据，并视地下水污染情况进行现场修复。总计有 1500 个以上的危险性废物场被列入美国优先修复对象，除此之外仍有成千上万的其他场地有待清理。

直至 1985 年，地下储油罐泄漏成为最引人注目的地下环境污染问题。此外，由于氯化烃废物场发现了非水相流体（NAPLs），因而对其修复十分困难。虽然如此，在全美范围内，仍对这些场地及其他的场地进行了研究，修复系统也已设计与安装。至 1989 年，许多修复系统的运行结果表明，这些系统无法将含水层净化达到饮用水标准的要求。到 20 世纪 90 年代早期，EPA 和美国国家研究委员会（NRC）已认识到国家已在诸如泵抽处理（第 13 章）这样低效的修复系统上耗费了太多的资金。

随着环境工程和与其相关的地下水领域在 1980 年代发展成熟，对危险性废物问题的关注范围及传统地下水调研的重点已大大扩展。地下污染物的迁移问题已成为前沿问题，其涉及物理、化学和生物机理，这些机理影响迁移、降解及最终修复。20 世纪 90 年代，在野外现场或实验室进行了很多这类复杂的迁移机理研究。

在进行分析和修复溶解性污染物羽流尝试中，科学家和工程师在 20 世纪 90 年代及以后均应做好应对更复杂问题的准备，包括存在非水相流体（NAPLs）的污染源区、非饱和带中的残余油料和蒸气。浮在地下水面的轻质非水相流体（LNAPL）和沉入含水层底的重质非水相流体（DNAPL），在浅层地下水含水层中可形成几十年的污染泄漏。具体的修复方案，包括针对各种化合物混合污染的各种方法，在实施前必须根据地下水的成份对其进行评估。将受污染的地下水简单抽出地面的传统做法

无法有效地将含水层恢复。因此，需应用新方法和模型来研究并尽可能控制复杂的 NAPL 污染源区域问题。

本书第二版尝试从理论与工程两方面进一步探讨地下污染物的迁移与修复。本书包含有关现场特性评价和水文地质评估等传统重点内容，与其他主要以水文地质工作者为读者的著作相比，本书侧重从工程分析和模拟的角度对复杂区域问题进行论述。本版不同之处在于，本版内容从理论与实践的角度对应用于危险性废物场研究对的工程方法和迁移理论迁移进行探讨，包括生物降解、土壤蒸汽迁移、污染物迁移模拟和场地修复等内容，并通过收入大量新的研究实例来说明各种评估方案和新的修复技术。

本书第二版以水文学工作者、土木工程师、环境工程师和化学工程师、水文地质工作者，以及其他参与或将参与美国地下水评价与修复的地下水领域的决策者为读者。然而，近年来（1994 年以来），地下水污染技术领域发展变化迅速，全国各地的实验室和污染现场均在进行新的修复技术的研发。因此，任何涉及本领域的学生必须持续关注出版刊物所报道的新成果和新进展。我们期望本书能为新技术的推广并促进其与过去 20 年间所发展起来的传统技术的有机融合奠定基础。

RCRA 及 Superfund 指导下的地下水法律体系，迄今已为大量的地下水研究提供了十分重要的引导和资金支持。该完备的法规体系推动了全美从事危险性废物场的鉴别、表征、修复产业的整体发展。作为过去 20 年间所投入到修复调研的上千亿元资金所产生的成果之一，是形成了以成千上万科研人员和工程师为核心的地下水修复产业。在这期间，各大学迅速将地下水流动与迁移课程列入其传统的土木与环境工程和地理学专业课程体系；各专业团体，如地下水科研工作者与工程师协会，其会员迅速增加以应对教育与技术转移的挑战。

新版著作的出版也是顺应 20 世纪 90 年代及以后大学课堂与环境产业对采用现代工程手段解决地下水污染问题的需求。当今水文学工作者或工程师须掌握地下水流动原理（第 2 章和第 3 章）、污染源（第 4 章）、现场勘察（第 5 章）和污染物迁移（第 6 章和第 7 章）。除此之外，生物降解（第 7 章和第 8 章）、建模（第 10 章）、NAPL 对源区和羽流的影响（第 11 章）、自然衰减（第 12 章）和新修复方法（第 13 章）也应熟悉。在第二版中，第 4、7、8、9、11、12 和 13 章均全部重新编写以便更好地反映当前的发展趋势和观念。最新文献中报道的大量有关新修复方法的例子和实例研究也收入新版内容之中，并对诸如表面活性剂和协同溶剂（co-solvent）对残留油料污染区土壤清洗这样的新修复方法进行了详细阐述。本书的基本内容在第 1 章进行了更详细的概述。

致 谢

任何著作无不是在众多同事、学生和朋友的建议的基础上历经长时间构思而成的。我们要特别感谢手稿的审阅人，尤其是 Robert Borden 博士，所给予的有益指导和建议；要特别感谢俄克拉何马州 Ada 的 EPA Robert S. Kerr 环境研究实验室的工作人员和研究人员对我们的研究长达 10 年的协助与支持。由 Herb Ward 博士领导的美国地下水研究中心提供了交换意见的机会。我们还要感谢 Shell 基金以设立 Shell 环境科学杰出首席教授的形式对贝迪恩特 (Bedient) 博士多年的支持。最近，美国空军和 SERDP/EPA 基金对在犹他州的希尔空军基地进行的评估新修复技术的跨学科现场研究进行了资助，部分研究成果已在本书中进行了介绍。

许多赖斯大学的教师和学生对本书的新版作出了重要贡献。Joseph Hughes、Manar El-Beshry、Robert Lee 以及 Anthony Holder 执笔了第二版中的多个重要小节；Emily Hall、AnnMarie Spexet、Michelle Truesdale 和 Jude Benavides 进行了最后的校订工作；Susan Hickman 和 Michelle Truesdale 绘制了新图；Christina Walsh 编排了修改后的图表和第二版的最终格式；AnnMarie Spexet 很好地完成了图片的设计、索引和习题的修改，并协助完成了习题答案；Anthony Holder 出色地完成了最后文字与图表的校订、插入和计算机编辑；Cory Deveney 负责了新版封面的修改。最后，作者诚挚感谢 Emily Hall 进行打字、制作格式化文本及校订最新修改后的手稿。没有她每天全力以赴投入本书的各过程环节，本书的新版难以现在的形式如期出版。

目 录

前言	viii
致谢	x
第 1 章 地下水污染绪论	1
1.1 水文循环	1
1.2 地下水水文学	3
1.3 地下水污染和迁移	6
1.4 地下水信息发展	9
1.5 地下水修复	10
第 2 章 地下水水文学	13
2.1 引言	13
2.2 地下水的特性	13
2.3 地下水运动	20
2.4 通用流动方程	30
2.5 裘布依方程	32
2.6 流线和等水位线	35
2.7 非饱和渗流和地下水位	39
第 3 章 地下径流和管井水力学	41
3.1 稳流管井水力学	41
3.2 一维稳流	41
3.3 承压井的径向稳流	42
3.4 非承压井的径向稳流	43
3.5 均匀流场中的管井	45
3.6 井群系统	46
3.7 非稳流管井水力学	49

第 4 章	地下水污染物来源及种类	62
4.1	引言	62
4.2	地下储油罐	68
4.3	垃圾填埋场	70
4.4	地表蓄水池	72
4.5	排污注水井	73
4.6	化粪池系统	75
4.7	农业废弃物	77
4.8	土地利用和矿物开采	78
4.9	放射性污染物	79
4.10	军事污染源	81
4.11	有机化合物的分类	82
4.12	地下水中的无机化合物	90
4.13	一个典型的工业废弃物堆放场	92
第 5 章	水文地质现场勘察	96
5.1	引言	96
5.2	现场概念模型的建立	96
5.3	水文地质现场勘察方法	97
5.4	详细现场勘察计划的制定	103
5.5	数据收集方法	105
5.6	地质数据的获取	106
5.7	水文资料获取	118
5.8	土壤及地下水水质数据获取	123
5.9	数据评价步骤	125
第 6 章	污染物的迁移机理	131
6.1	引言	131
6.2	平流过程	133
6.3	弥散和扩散过程	133
6.4	质量迁移方程	136
6.5	一维模型	138

6.6	流动和迁移控制方程	143
6.7	解析方法	144
6.8	多维方法	147
6.9	扩散性的测试	150
6.10	扩散的自然梯度的现场实验	154
第7章	污染物归趋过程	165
7.1	前言	165
7.2	吸附与解吸	165
7.3	非生物归趋过程	173
7.4	挥发	176
7.5	生物降解	177
7.6	归趋过程的分析评价	185
第8章	生物降解与自然衰减模型	192
8.1	生物降解速率及动力学	192
8.2	生物降解过程的模拟	199
8.3	生物降解模型	200
8.4	自然衰减解析模型	210
8.5	自然衰减数值模型	219
8.6	现场应用	222
第9章	非饱和带的流动和迁移	236
9.1	毛细管作用	236
9.2	土壤——水的特征曲线	237
9.3	非饱和水力传导率	240
9.4	非饱和流控制方程	240
9.5	测定土壤性质	242
9.6	渗透模型	243
9.7	非饱和地带的迁移过程	248
9.8	蒸汽传输的控制方程	251
9.9	渗流区流动和迁移模型	257

第 10 章	污染物迁移的数值模拟	275
10.1	前言	275
10.2	数值方法	283
10.3	有限差分法	289
10.4	有限元法	297
10.5	特征值法 (MOC)	298
10.6	流体的数值计算模型	299
10.7	污染物迁移模型	303
10.8	建模和图形预处理器	306
10.9	现场应用数值模式	311
第 11 章	非水相流体 (NAPL)	321
11.1	引言	321
11.2	NAPL 的种类	326
11.3	NAPL 迁移的一般途径	329
11.4	NAPL 的迁移的计算方法	340
11.5	地下 NAPL 的归趋	347
11.6	修复现场 NAPL 的表征	351
第 12 章	自然衰减及基于风险水平的修复措施	361
12.1	前言	361
12.2	自然衰减的普遍原理	367
12.3	自然衰减协议和导则	370
12.4	自然衰减的表征	375
12.5	基于风险的修复措施 (RBCA)	387
第 13 章	地下水修复的可选方案	394
13.1	修复方法介绍	394
13.2	修复可选方案	396
13.3	污染源控制方案	397
13.4	水力控制和泵吸处理系统	401

13.5	生物降解	409
13.6	土壤蒸汽萃取系统	413
13.7	NAPL 修复站点污染区的修复	417
13.8	新兴修复技术	424
13.9	修复案例研究	430
第 14 章	地下水保护法规	453
14.1	地下水保护措施	453
14.2	1974 年的安全饮用水法	455
14.3	1976 年的资源保护与再生法	457
14.4	1984 年危险性和固体废弃物修正案 (HSWA)	464
14.5	综合环境响应、补偿和责任法 (CERCLA)	467
14.6	1986 年超级基金修正及再授权法案 (SARA)	475
	课后习题	479
	译后记	499

地下水污染绪论

1.1 水文循环

水文学研究水在地表径流、湖泊，以及在地下含水层中的储存和运动。每一个含水层代表一个地质单元，它可以储存和提供大量的水以满足多种用途。通过对污染物浓度升高的很多浅层和深层含水层的调查证实，其污染源处释放的污染物浓度可能在几十年前就已经升高。现代水文学涵括水文循环中水流的运动和水质的传输内容。

水文循环中的各组成部分如图 1.1 所示，包括自然的、人工的或工程的过程，以及传输途径。现代水文学著作（Bedient, Huber, 1992; Glintz, 1989; Chow 等, 1988）对这些概念进行了详细的介绍。大气中的水气和太阳能为陆地和海洋上形成降雨提供了条件。降雨能渗入土壤系统，渗入深层地下水，或从滞留区域蒸发，经由植物的呼吸作用回到大气中，或者就近流入小溪和河流。渗入水是根系区和地下含水层的主要补给源。河流既能对潜水进行补充也可作为潜水的排放点。海洋是地表和地下水最终的受体，并且是水分通过蒸发回到大气的主要来源。

自从人类文明诞生以来就有关于人类改变水循环的记载，包括通过开垦土地来改变渗流途径和蒸发作用；通过修建水库来改变径流和蒸发；通过开渠和管道运输来提高河川径流；通过水泵抽吸改变地下水位。自从 20 世纪 30 年代以来，传统水文工作者花费了大量的时间和精力设计新的非自然的水循环途径来满足人类

的需要。这些途径包括为工业、农业以及市政提供地表和地下水供应；饮用水和废水的处理；通过修建水坝、水库以及给水井群来满足供水需求；通过开渠和修坝来实现排水和防洪；通过修建水库、河道并进行管理调控来保障水质和实现景观娱乐目的。

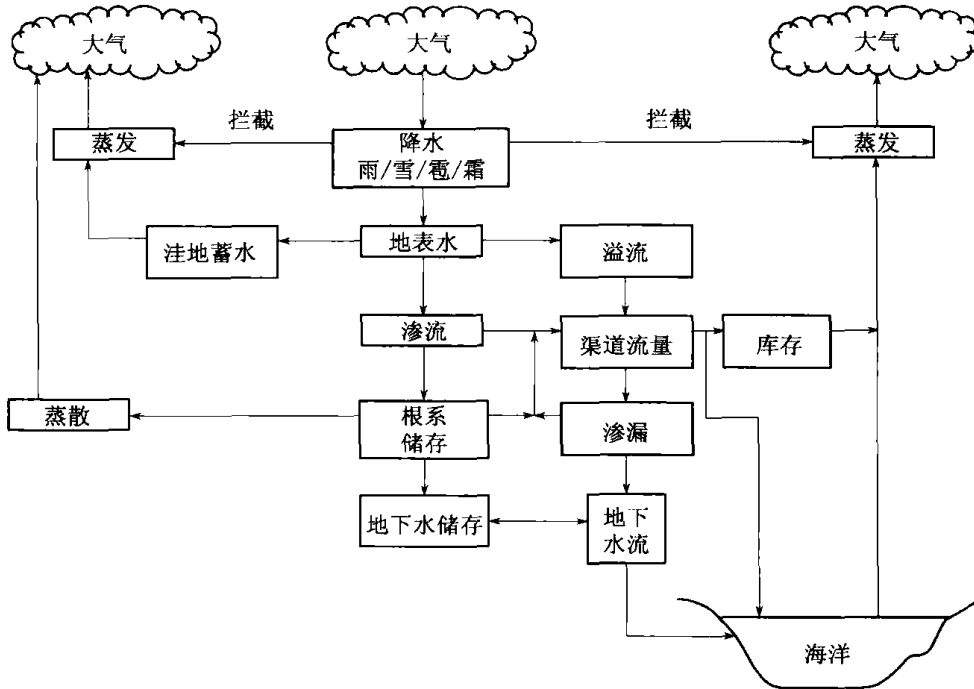


图 1.1 水文循环的组成

由图 1.1 显示的水循环的复杂性可知，不是所有传输途径和存储单元水量都可以容易地测量出来，在总的水量平衡方程式里，一些组成部分只能作为未知量来间接确定。渗入和蒸发量通常通过系统的损失量计算，而不直接测量。通过位于待研究的流域内的雨量计和水位标尺，可以直接测量出降雨量和河流水位标高。地下水位和流量可以通过设置在含水层中的观察井来测量，观察井的过滤器置于透水层。在复杂的地质条件下，必须对多层含水层的水位和污染物浓度进行监控。监测方法包括在管井中使用流量计和电子水位计。用泵抽吸和单独取样筒取样来对井中的水质状况进行分析。

如果上述水文数据已知，就可对流域或者地下水的整体水量平衡进行计算。20 世纪 70 年代，计算机方法就已经在流域分析、地下水评价以及水文设计中得到应用。有关地表水水循环中方面的内容可见于 Viessman 等 (1989)、Chow 等 (1988)，以及 Bedient 和 Huber (1992) 等人现代水文学的著作。

1.2 地下水水文学

地下水是市政、农业和工业供水的重要水源。图 1.2 所示为美国 1995 年以前地下水不同类型用途所占的百分比。其主要用于农业、市政、工业，以及一些地表水相对较少的农村地区，其中农业灌溉所占的比例最大。图 1.3 显示了美国大陆各个州地下水用量占总用水量的比例，可以看出，西部和中西部地区比东部和东北部地区更依赖地下水资源。

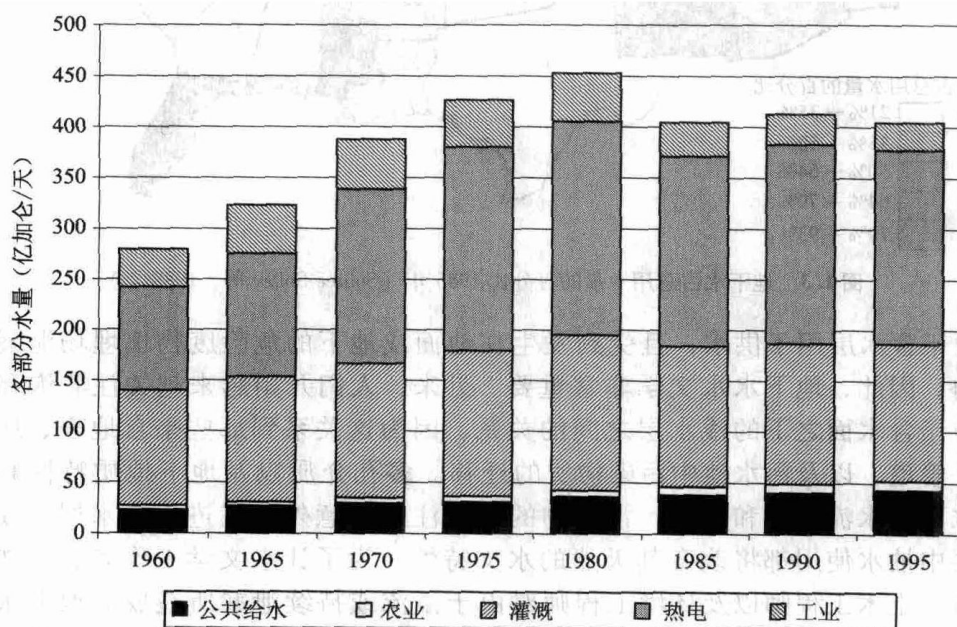


图 1.2 总用水量中不同用途的水量 (包括淡水和海水), 1960—1995 年, (美国地质勘探局, 1995 年)

地下水水文学通常包括对含水层特性的描述, 适用于多孔介质中地下水流动的达西定律、水流在土壤中的渗透, 以及水在浅/深层含水层中的流动规律。更深的内容包括单一或井群在径向坐标系统中的流动机理。含水层特性的分析技术是地下水研究的主要内容, 包括: 灌注试验、抽水试验以及示踪试验。预测水流在有压和无压状态下的速度和方向是了解地下水污染的基础。潜水面 (water table) 是指在大气压下, 水在开挖井中上升的高度。测压面是指有压含水层中的水头 (第 2 章)。

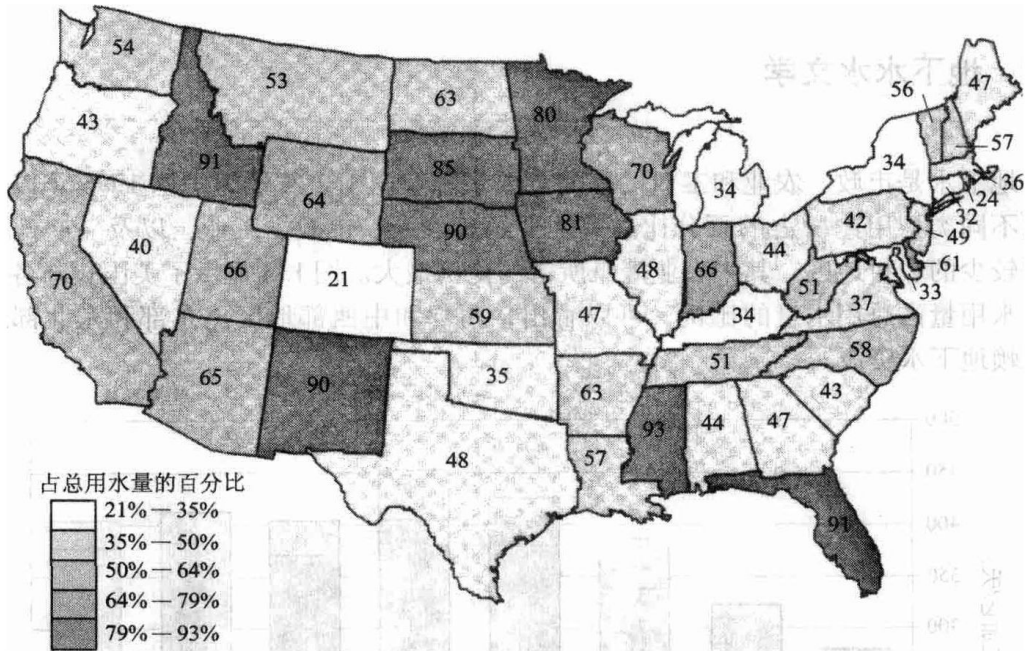


图 1.3 地下水占总用水量的百分比 1985 年 (Source Solley 等, 1988 年)

由于含水层用于供水, 且受到发生在地面或地下的危险废物填埋场泄漏污染的威胁, 因此, 地下水水文学非常重要。近来, 人们开始越来越关注非饱和层与刚好位于含水面之下的浅水层之间的关系, 因为这关系到那些来自地表、地下构筑物、管道, 以及污水池中污染物质的迁移。多孔介质以及地下地质特性影响着地下水层的水流速度和方向。污染物的人为注入或意外泄漏进入含水层, 或者从含水层中抽水使用都将改变其天然的水文特性。为了让水文学工作者、水文地质工作者、土木工程师以及环境工程师对由于溢流或持续泄漏所造成的地下水污染原理有更加全面的了解, 本书在第 2 章和第 3 章首先对地下水流动和水井的特性进行了介绍。

地下水地质, 有时被称为水文地质, 对于了解地下水的流动, 以及地下污染物质的迁移、归趋非常有用。Ferry 和 Cherry (1979)、Fetter (1994)、Domenico 和 Schwartz (1998) 在他们的著作中对区域地质进行了详细论述, 因此, 本书对此仅作一些基本介绍。地下水域是指具有相似地下水的地理区域。在美国被誉为“现代水文地质学之父”的 Meinzer (1923) 基于对 21 个不同地下水域的研究, 将地下水系统进行了分类。Thomas (1952) 在 10 个不同地下水域的研究基础上, 对地下水系统进行了分类。Health (1984) 在对 15 个地下水域调查的基础上, 对 Thomas 的系统进行了改进。Health 的系统建立在地下水系统的五个特性上:

1. 系统的组成和布局；
2. 是否可成为主要含水层或含水层可作为主水源或次要水源的含水地质空腔构造特性；
3. 根据矿物质的溶解性，来划分主要含水层岩体的矿物组成；
4. 主要含水层或一般含水层的储水和传输特性；
5. 补水和排水区域的特性和位置。

基于 DRASTIC 系统，美国被划分为如图 1.4 所示的不同的区域（Aller 等，1987）。

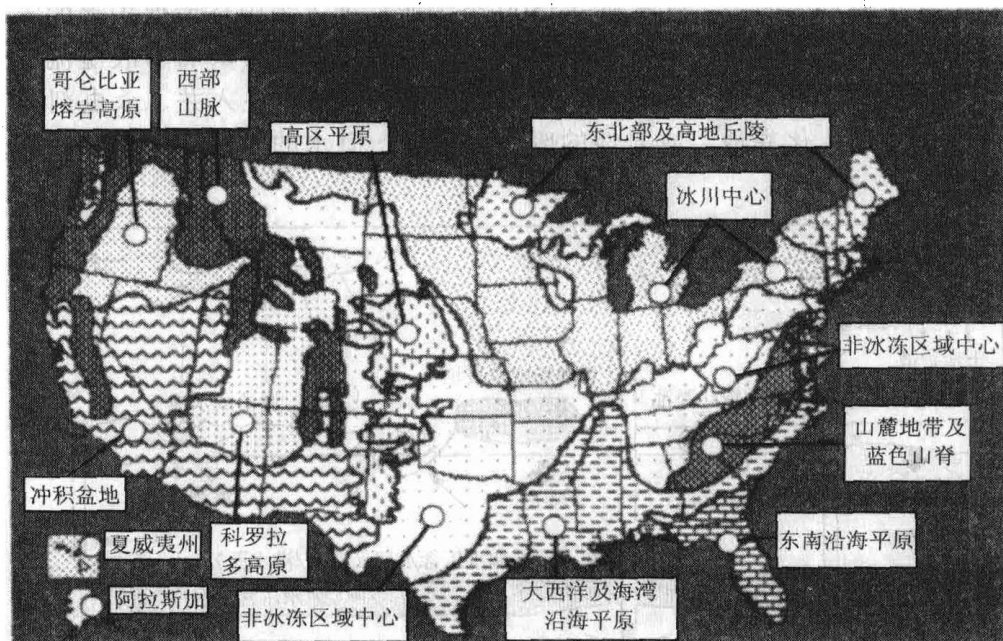


图 1.4 美国地下水区域 (Source Newell 等, 1990 年)

以上的各区域的地质分类是独特的，这对于了解影响地下污染物迁移的地层是很重要的。美国地质勘探局和州地质勘探局对各个区域都进行了广泛的研究，其中对某些区域的研究较其他的更为详尽。就污染和修复的实际情况的角度来讲，或许仅需研究含砂或淤泥的最浅地层（深 5—50m）。但专业水文地质学家对这些相对较浅的地层的评估方法却不尽一致，由此导致对流量和危险性废物填埋场污染物的危害影响估计产生了重大的误差。

在本修订版中的第 5 章，就浅层和深层地下水水文地质学实地研究列举了详细的方法和示例，第 12 章和第 13 章对各种可用于危险性废物填埋场的修复方法进行了介绍。这似乎对于学生和专家了解区域地质状况和废物填埋场周边浅层地质的关系非常重要。通常，区域整体地质状况与近地表的浅层含水层（20m 以内）没有多大的关系，浅层含水层通常是污染物在地下迁移的主要通道。但是，了解整体地质状

况对于评估含水层用于供水的可开采程度是非常重要的。

1.3 地下水污染和迁移

自 20 世纪 70 年代末大量危险性废物填埋场被发现以来，地下水污染以及地下水水质问题已经成为热点问题。废物填埋场在过去几十年里造成了严重的地下水污染，例如纽约州的爱渠、科罗拉多州的丹佛兵工厂，以及亚利桑那州的休斯第 44 工厂就是 3 个典型的例子。已有超过 1500 个场所被列入美国环境保护署的国家重点目录上。如图 1.5 所示，地下水源污染来源广泛，包括大量的事故溢流、土地填埋、地表的污水塘、地下储存罐、地表储存罐、管道、注入井、杀虫剂和其他有害物质的使用，化粪池、放射性的废物处置场、海水的入侵，以及酸性矿井的废水排放等。

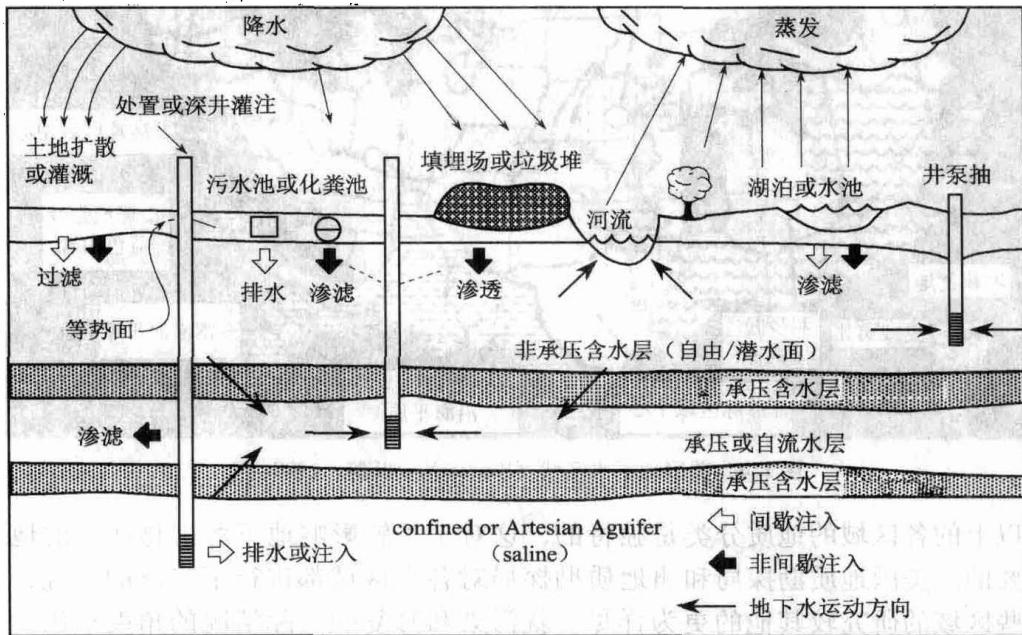


图 1.5 有害物质的排放对地下水系统的污染

当今，工程水文学家应能掌握地下水流动机制、污染物传输、生物降解和吸附作用，以及各种作用对水源、羽流 (plumes) 以及补救措施 (remediation schemes) 的单独影响。本书旨在协助工程和科学专业的学生、水文学家，以及其他从事地下水主要过程研究的专业人士，而这些内容在以前的文献中并未提及。

在对地下水污染过程进行解释或预言之前，必须对地下水的流动以及机制有一个全面的了解。第 2 章在工程实践的基础上，运用达西定律，推导出一种估算流速

以及地下水在含水层中的运动方向的判断方法。第3章介绍稳定和非稳定管井力学以及相关含水层试验（抽水试验、冲击测试、追踪测试）用来确定水力传导性（即渗透性）。本书中许多课后作业和例子都涉及了地下水的流动和井力学。

地下水源污染来源广泛，包括大量的事故溢流、土地填充、地表的污水塘、地下储罐、地表储罐、管道、注入井、杀虫剂和其他有害物质的使用、化粪池、放射性的废物处置场、海水的入侵，以及酸性矿井的排放等。在第4章中，对各种污染源进行了详细介绍，较之第一版有了很大的扩充。主要的有关污染物包括石油烃（例如苯、甲苯和二甲苯）；含氯有机物 [例如高氯酸盐（PCE）、三氯乙烯（TCE）及其衍生物]；重金属（例如铅、锌、铬和某些无机盐），还包括一部分有机物。

在过去的20年里，用于微电子学和低含量有机物水平分析方面的取样和监控方法（直接和间接）有了巨大的改进。圆锥透度计、推进技术，以及专业多层次取样仍然用于现场调查。有关数据收集和监控方法，以及现场调查的准备工作，在第二版中已被更新，将在第5章中进行详细介绍。

第6章介绍污染物迁移过程、理论和公式的讨论，包括水平对流、扩散和吸附的机制。这些机制对于分析污染物浓度在时间和空间的变化非常重要。这些机制对于分析污染物在含水层中的衰减也是很重要的。在这章里提出了很多例子和分析方法，并且重点介绍了由边界垃圾填埋场获得的追踪结果以及在奥蒂斯研究空军基地进行的实验。课后作业有利于进一步巩固这些概念。

第7章是全新的章节，介绍了污染物归趋，以及有机污染物的吸附、非生物转变、挥发和生物降解作用等。第8章介绍了有关模型化生物降解作用，增加了新的例子和对燃料污染物和含氯溶剂适用模型的讨论。这两章主要介绍了与含水层系统中自然衰减直接相关的传输新机制。

第9章在再版中进行了大量修改，提出了污染物在不饱和区域的流动和迁移的简单处理方法。在20世纪80年代和20世纪90年代早期发现，土壤气相抽提（SVE）对于很多燃料灌区是一种可行的补救方法。因此，对不饱和区域的研究开始引起人们的关注。本书中对土壤气相抽提系统的分析和数学建模方法附带了一些详细的实例进行介绍。而主要的土壤气相抽提实例研究将在第13章介绍。

第10章主要介绍地下水的流动和迁移系统的现代数学建模方法，包括有限差分法的详细介绍。并给出了工业中使用的许多标准模型实例。数学建模方法在近年来已经变得越来越重要，它可以降低用于收集资料和井群高效管理的费用。新的可视化工具可以大大提高我们运用模型收集数据和制定决策的能力。

第11章介绍了地下非水相流体（NAPLs），这一重要课题关系有害废物的降解，在过去10年得到了相当的关注（美国环境保护署，1992；美国国家研究委员会，1994；Pankow和Cherry，1996）。非水相流体是一种能够持续数十年的污染源，通常与燃料泄漏和含氯有机污染物有关。对被非水相流体污染的污染源区域的处理不容