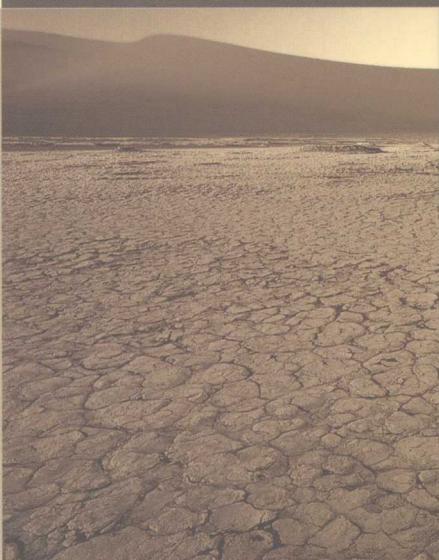


# 多孔介质污染物

# 迁移动力学



许彦卿/编著

上海交通大学出版社

# 多孔介质 污染物迁移动力学

仵彦卿 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

多孔介质材料广泛存在于自然界,天然材料、人造材料(金属、非金属及高分子材料)、地质体(土壤和岩石)、以及生物体(动物、植物和人体)等都属于多孔介质。多孔介质中的渗流、传热、传质以及物理力学化学特性的研究,涉及地质、水利、力学、机械动力、交通、环境、农业、材料、医学、生物学、地理、服装等多个学科领域。本书比较系统地介绍了《多孔介质污染物迁移动力学》这门课程的基础理论和最新的研究成果,包括多孔介质基本概念、多孔介质饱和与非饱和渗流理论、多孔介质污染物迁移基础理论、数学模型及其求解方法。另外,还介绍了多孔介质传热理论和滨海地区海水入侵动力学模型。可作为环境科学与工程、水文学及水资源、土木工程、化学工程、力学、医学、生物学、农学等学科的本科生、研究生的教材以及研究人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多孔介质污染物迁移动力学/仵彦卿编著. —上海:上海交通大学出版社,2007  
ISBN 978-7-313-04665-9

I. 多… II. 仵… III. 多孔介质-污染物-迁移-动力学 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 008883 号

### 多孔介质

#### 污染物迁移动力学

仵彦卿 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:10.5 字数:255 字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~2050

ISBN 978-7-313-04665-9/X·014 定价:19.00 元

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

多孔介质材料广泛存在于自然界,如地质体中的土壤和岩石;人造材料,如建筑材料、服装材料、化工材料等;生物体材料,如人体、动物体、植物体等都属多孔介质。研究多孔介质中的渗流、传热、传质以及物理力学化学特性涉及多学科领域,具有普遍意义。多孔介质污染物迁移动力学既是一门基础课又是一门专业基础课,广泛应用于土木、水利、力学、环境、交通、材料、生命科学、纺织等诸多领域。因此,学习和掌握多孔介质渗流和物质迁移的基础理论和方法,不仅对于这些领域将来从事科学研究的理科学学生,还是将来从事工程技术工作的工科学学生来说都是必不可少的。通过该门课程的学习,希望学生能深刻地理解多孔介质渗流和物质迁移的基本理论,提高学生的量化分析问题的素质,提高科研能力。

本书重点介绍多孔介质的渗流与污染物迁移的基本理论,全书共分8章。第1章绪论:从复杂的环境介质出发,介绍环境介质的多介质特性、多过程特性、多组分特性、多相流特性、多界面特性、多尺度特性以及多场耦合特性;土壤和含水层作为多孔介质的一种特例,介绍土壤和含水层的基本概念。地下水是土壤和含水层中的重要流体,介绍地下水的特性;土壤和含水层是一种复杂的多孔介质,具有非均质各向异性和非连续性,为了运用连续方法定量描述多孔介质流体和物质运动规律,引入多孔介质基本概念、流体连续介质与多孔介质的连续介质方法,在宏观水平上定义多孔介质渗流和污染物迁移的物理量,这样就可以将复杂的非连续介质用多孔连续介质理论描述。第2章多孔介质渗流基本定律:介绍达西定律及其扩展、裘布依假定、多孔介质渗流的状态方程、连续方程、渗流基本微分方程以及渗流模型的定解条件。第3章多孔介质饱和和渗流模型:从介绍多孔介质体系中固体骨架的物理状态方程、流体的物理状态方程、流体在多孔介质中运动的连续方程(质量守恒原理)入手,依据多孔连续介质方法,以流体力学的控制体,即表征体元为基本单元,推导多孔介质渗流基本微分方程和积分方程;依据含水层的特点,将多孔介质渗流基本微分方程进行推广,然后再介绍多孔介质渗流的定解条件和数学模型。第4章多孔介质非饱和和渗流模型:从非饱和渗流的基本概念出发,介绍毛细压力和毛细水头、给水度和持水度、含水率和饱和度等;以达西定律为基础,介绍非饱和和渗流定律、渗流基本微分方程及数学模型等。第5章多孔介质污染物迁移模型:重点介绍污染物在多孔介质中迁移的物理过程,包括对流、弥散及吸附过程,化学过程和生物降解过程等;介绍多孔介质污染物迁移基本微分方程、固-液相互作用发生链式衰减时的多孔介质污染物迁移方程、多孔介质多相多组分污染物迁移的一般方程、多孔介质中流体密度变化时的污染物迁移方程以及多孔介质污染物迁移定解条件和数学模型等。第6章多孔介质污染物迁移模型的解析解法:主要介绍一些简单模型的解析解,包括多孔介质污染物迁移一维数学模型的解析解法、多孔介质污染物迁移二维数学模型的解析解法以及多孔介质污染物迁移三维数学模型的解析解法等。第7章多孔介质传热过程及数学模型(选学内容):在多孔介质污染物迁移过程中,往往伴随着热传输过程。多孔介质中的温度变化,不仅影响流体的流动速度,而且影响污染物的吸附性能、化学反应速度、以及生物的降解速率和生物的繁衍。因此,多孔介质传热规律的研究是多孔介质污染物迁移动力学研究中一项重要的内容。本章从多孔介质热量传输的基本定理

出发,介绍多孔介质体系的热量传输连续方程、稳定渗流的热传输方程、运动坐标系下的热量传输方程;多孔介质内流体的热量传输方程,包括对流作用引起水的热量通量的变化量、热传导与热弥散作用引起水的热量通量的变化量、固相与水相热交换作用引起水的热量通量的变化量、多孔介质中水相的热传输方程、多孔介质内固相的热传输方程以及多孔介质热传输数学模型。第8章滨海地区多孔介质含水层中的海水入侵动力学模型(选学内容):海水入侵实质上是两种密度不同的流体在多孔介质中的运动,两种密度不同的流体相互作用的界面移动是这一问题研究的难点,本章重点介绍海水入侵的基本概念和动力学模型,作为一种多孔介质污染物迁移动力学的应用特例介绍。

本书的重点放在物理现象本质的认识和数学方程或模型的定量描述上,所以要求读者掌握下列数学知识:微积分、偏微分方程、向量的概念等。在本课程之前还要学一些流体力学基础课程。

本书是以作者多年的教学实践总结和部分科研成果总结,尤其是在上海交通大学本科生教案的基础上,参考国内外教科书和最新研究成果,经过修改充实编写而成的。孙承兴博士参与了部分章节的输入和部分插图工作,参与了教学助教工作,在此表示感谢。最后,衷心感谢以各种方式对本书的编写提供过帮助的那些人,十分感谢我的学生们在不同方面提出了建设性的意见。

该书作为上海交通大学2005年度立项重点建设教材,得到出版经费资助,在此深表谢意。编写过程中错误在所难免,恳切希望批评指正。

仵彦卿

2006年9月8日于上海

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 环境介质的特点 .....	1
1.1.1 多介质迁移与转化特点 .....	2
1.1.2 多界面迁移的非线性特点 .....	2
1.1.3 多组分迁移特征 .....	2
1.1.4 多过程迁移特征 .....	2
1.1.5 多相流迁移特征 .....	2
1.1.6 多尺度转化特征 .....	3
1.1.7 多场耦合特征 .....	3
1.2 土壤、含水层与地下水.....	4
1.2.1 基本概念 .....	4
1.2.2 土壤与地下水污染 .....	9
1.2.3 污染土壤与地下水修复.....	10
1.3 多孔介质.....	10
1.3.1 多孔介质的定义.....	10
1.3.2 多孔介质的基本性质.....	11
1.4 连续介质方法.....	12
1.4.1 流体连续介质.....	12
1.4.2 多孔连续介质.....	14
1.5 有关渗流物理量的定义.....	15
1.6 本书涉及的范围.....	17
习题 .....	18
<b>第 2 章 多孔介质渗流基本定律</b> .....	20
2.1 达西定律.....	20
2.1.1 达西实验及其公式.....	20
2.1.2 达西实验定律的适用范围.....	23
2.2 达西定律的扩展.....	23
2.2.1 均质各向同性多孔介质三维渗流定律.....	23
2.2.2 非均质各向同性多孔介质渗流定律.....	24
2.2.3 各向异性多孔介质渗流定律.....	27
2.2.4 均匀可压缩流体的渗流定律.....	28
2.2.5 多孔介质体系中固-液两相流动问题达西定律推广 .....	29

2.3	渗透系数	29
2.4	二维潜水含水层地下水运动的裘布依假设	31
2.5	二维承压含水层的导水系数	33
	习题	34
<b>第3章 多孔介质饱和渗流模型</b>		<b>36</b>
3.1	多孔介质体系的物理状态方程式	36
3.1.1	均质等温流体密度的状态方程式	36
3.1.2	多孔介质骨架的物理状态方程式	38
3.2	多孔介质饱和渗流连续性方程式	38
3.3	多孔介质饱和渗流基本微分方程式	40
3.4	多孔介质饱和渗流基本微分方程式的另一种形式	44
3.5	多孔介质渗流基本微分方程的扩展	46
3.5.1	均质各向同性多孔介质	46
3.5.2	多孔介质饱和稳定渗流方程式	46
3.5.3	非均质各向异性多孔介质饱和渗流方程式	47
3.5.4	存在源或汇的多孔介质饱和渗流方程式	47
3.5.5	各向同性多孔介质的平面( $xOy$ )二维渗流	47
3.5.6	具有自由面的平面( $xOy$ )二维渗流	49
3.6	多孔介质饱和渗流积分方程式	49
3.7	定解条件	50
3.7.1	初始条件	50
3.7.2	边界条件	51
3.8	多孔介质饱和渗流数学模型	57
3.9	河间地块内的地下水稳定渗流问题	60
	习题	62
<b>第4章 多孔介质非饱和渗流模型</b>		<b>64</b>
4.1	多孔介质非饱和渗流的基本概念	64
4.1.1	含水量和饱和度	64
4.1.2	毛细压力和测压水头	64
4.1.3	给水度和持水度	65
4.2	多孔介质非饱和渗流基本方程	66
4.2.1	多孔介质非饱和渗流定律	66
4.2.2	连续性方程	69
4.2.3	非饱和渗流基本微分方程	69
4.2.4	以含水量 $\theta$ 为变量的多孔介质非饱和渗流微分方程	69
4.2.5	以毛细压力水头 $h_c$ 为变量的多孔介质非饱和渗流微分方程	70
4.2.6	以水压强 $p_w$ 为变量的多孔介质非饱和渗流微分方程	71

4.2.7 考虑水和多孔介质压缩性的非饱和渗流方程 ..... 72

4.2.8 多孔介质非饱和渗透系数的确定 ..... 74

4.2.9 变饱和多孔介质中湿润相流体渗流方程 ..... 75

4.2.10 变饱和多孔介质中非湿润相气体渗流方程 ..... 75

4.3 定解条件 ..... 76

4.3.1 初始条件 ..... 76

4.3.2 边界条件 ..... 77

4.4 多孔介质非饱和渗流数学模型 ..... 78

4.4.1 垂直方向土柱的一维非饱和和渗流问题 ..... 78

4.4.2 水平方向土柱的一维非饱和和渗流问题 ..... 78

4.4.3 铅直方向土柱的一维饱和-非饱和和渗流问题 ..... 79

4.4.4 多孔介质三维饱和-非饱和和渗流问题 ..... 79

习题 ..... 80

**第5章 多孔介质污染物迁移模型 ..... 81**

5.1 多孔介质中污染物迁移机理 ..... 81

5.1.1 污染物在多孔介质中的对流作用 ..... 81

5.1.2 污染物在多孔介质中的分子扩散作用 ..... 82

5.1.3 污染物在多孔介质中的机械弥散作用 ..... 83

5.2 多孔介质中污染物迁移的对流-弥散方程 ..... 86

5.3 污染物在多孔介质中的吸附与解吸附作用 ..... 90

5.3.1 等温线性吸附 ..... 91

5.3.2 等温非线性 Langmuir 吸附 ..... 92

5.3.3 等温非线性 Freundlich 吸附 ..... 92

5.3.4 动力学吸附(慢的、非平衡吸附) ..... 93

5.4 污染物在多孔介质中的衰减和转化作用 ..... 93

5.4.1 发生在固体相中的源或汇项 ..... 94

5.4.2 发生在液体相中的源或汇项 ..... 94

5.4.3 存在点源污染时的点源或汇项 ..... 99

5.4.4 多孔介质中的非移动水效应 ..... 100

5.4.5 固-液相互作用发生链式衰减时的多孔介质污染物迁移方程 ..... 101

5.5 多孔介质多相多组分污染物迁移的一般方程 ..... 101

5.6 多孔介质中流体密度变化时的污染物迁移方程 ..... 102

5.7 污染物在多孔介质中迁移规律概述 ..... 103

5.8 定解条件 ..... 104

5.8.1 初始条件 ..... 104

5.8.2 边界条件 ..... 104

5.9 多孔介质中污染物迁移的数学模型 ..... 108

5.9.1 一维半无限域含水层污染物迁移模型的解析解法(非平衡吸附-对流-



弥散-衰减方程) .....	108
5.9.2 一维半无限域含水层污染物迁移模型的解析解法(平衡吸附-对流-弥散-连续链式衰减方程) .....	109
习题.....	110
<b>第 6 章 多孔介质污染物迁移数学模型的解析解法</b> .....	<b>112</b>
6.1 多孔介质污染物迁移一维数学模型的解析解法 .....	112
6.1.1 半无限长柱状多孔介质污染物迁移一维数学模型的解析解法(对流-弥散方程).....	112
6.1.2 纵向弥散系数 $D_L$ 的反演计算 .....	117
6.1.3 无限域含水层污染物迁移一维数学模型的解析解法(吸附-对流-弥散方程).....	121
6.1.4 多孔介质含水层污染物迁移一维稳态数学模型的解析解法(考虑对流-弥散-化学反应衰减作用).....	123
6.2 多孔介质污染物迁移二维数学模型的解析解法 .....	124
6.2.1 多孔介质含水层的二维弥散问题 .....	124
6.2.2 多孔介质含水层的一维对流二维弥散问题 .....	127
6.2.3 水平面内的二维渗流二维弥散问题 .....	128
6.2.4 水平面内的一维渗流二维弥散问题(对流-弥散-吸附-衰减) .....	131
6.2.5 二维稳态问题 .....	132
6.3 多孔介质污染物迁移三维数学模型的解析解法 .....	134
习题.....	135
<b>第 7 章 多孔介质传热过程及数学模型(选学内容)</b> .....	<b>136</b>
7.1 多孔介质热量传输的基本定理 .....	136
7.2 多孔介质体系的热量传输方程 .....	138
7.2.1 连续方程 .....	138
7.2.2 稳定渗流的热传输方程 .....	140
7.2.3 运动坐标系下的热量传输方程 .....	140
7.3 多孔介质内流体的热量传输方程 .....	140
7.3.1 对流作用引起水的热通量的变化量 .....	141
7.3.2 热传导与热弥散作用引起水的热通量的变化量 .....	141
7.3.3 固相与水相热交换作用引起水的热通量的变化量 .....	141
7.3.4 多孔介质中水相的热传输方程 .....	141
7.4 多孔介质内固相的热传输方程 .....	142
7.5 多孔介质热传输数学模型 .....	143
7.5.1 初始条件 .....	143
7.5.2 边界条件 .....	143
7.5.3 多孔介质传热问题的数学模型及其解析解 .....	143

---

习题.....	144
<b>第 8 章 滨海地区多孔介质含水层中的海水入侵动力学 模型(选学内容) .....</b>	<b>145</b>
8.1 海水入侵的基本概念与危害 .....	145
8.2 海水入侵的突变面模型 .....	146
8.2.1 海水入侵的突变面模型的一般表述 .....	146
8.2.2 Ghyben-Herzberg 近似解 .....	149
8.2.3 海水入侵的垂向剖面稳态突变面模型 .....	150
8.3 海水入侵的对流-弥散模型 .....	151
8.3.1 海水入侵过程的变密度渗流方程 .....	151
8.3.2 海水入侵过程的盐分迁移方程 .....	152
8.3.3 海水入侵过程的定解条件 .....	153
习题.....	153
<b>参考文献 .....</b>	<b>155</b>

# 第1章 绪论

探究自然界的物质运动规律,是一个永恒的科学研究课题,从天体运动、地球运动、地球板块运动,到微生物运动、分子运动、原子和电子运动等,这些研究都是基础性的研究,它不断地为应用研究提供动力。

多孔介质污染物迁移动力学问题是研究物质运动的一种特殊现象,在自然科学中具有普遍意义,如植物中的水分迁移和养分输送过程,也是多孔介质中的渗流和传质问题;人体中的水分迁移、养分转化、氧气输送等过程都是多孔介质中的渗流和传质问题;生命体作为一种多孔介质特例,其内部的水分迁移和物质输送问题的研究称为生物渗流问题;化学工程、材料及机械工程中的传质过程,也是多孔介质中的物质迁移问题;服装中的水分和气体传输过程也是多孔介质中渗流问题;环境工程中的膜法水处理、吸附材料进行污染物去除过程也涉及多孔介质渗流和污染物迁移问题;土壤、地下含水岩层也属于多孔介质,其中的水分运动和物质迁移也是多孔介质渗流和迁移问题。因此,多孔介质污染物迁移动力学是一门适应面比较广的专业基础课程。

环境科学与工程学科是伴随着全球环境问题的出现而发展的一门新的、变化的交叉学科。环境科学家要进行污染物的控制与修复,不但要知道污染物在环境介质中的迁移与转化过程(物理过程、化学过程以及生物过程等)和机制,而且能够用数学模型定量化描述这一复杂过程,同时能通过实验方法再现这一过程,最终达到控制污染物(无害化、资源化)的目的。因此说,对污染物在环境介质的迁移与转化规律的研究,是环境科学与工程学科研究的一个重要课题。环境介质包括大气、地表水体(河流、湖泊、湿地、海洋、人工水库、鱼塘以及景观水体等)、地表以下的土壤、含水层介质以及生命介质。其中地表以下环境介质(土壤-含水层及其中的地下水)最为复杂,土壤水-地下水与地表水和大气降水关系密切,相互进行着物质和能量的交换。地表水污染会导致地下水污染,地下水污染也会导致地表水和植被生态的污染,从而威胁人类健康。因此,土壤-含水层作为多孔介质的一种特例,研究土壤-地下水中污染物的物理过程、化学过程和生物过程的迁移规律,具有普遍意义。

本章主要介绍环境介质特点,土壤、含水层与地下水特征。通过多孔介质定义和引入连续介质的概念,把复杂的土壤-含水层介质体系中的微观渗流和污染物迁移问题,转化成多孔介质连续介质中的渗流和污染物迁移问题,把微观物理参量转化成宏观物理参量(实际中测到的物理参量大多是宏观量,如物质的密度、多孔介质的孔隙率、流体的流速等)。

## 1.1 环境介质的特点

环境介质(environmental media)是指大气、水、岩土以及生物体等。污染物在环境系统中的运动十分复杂,从物质在环境介质中的迁移与转化角度看,环境介质具有多介质、多界面、多组分、多过程、多尺度转化以及多相流等特点。

### 1.1.1 多介质迁移与转化特点

多介质(multi-media)迁移与转化是污染物在环境介质中运动的重要形式。由于环境介质具有不同的环境界面,诸如,气/水界面、气/土界面、气/植物界面、气/动物界面、水/土界面以及水/生物界面等,污染物在环境介质中的分布是通过多介质迁移与转化来实现的。

污染物从它的发生源排出之后,通过三种途径进入周围环境:一是单一污染物从污染源同时排入到不同的环境介质单元,然后在这些不同的环境介质单元之间进行迁移与转化;二是单一污染物首先排入到某一环境介质单元,然后再由该介质单元转移到其他的介质单元。在这种情况下,前一个环境介质单元便成为后一个介质单元的污染源,例如,通过生物链的迁移;从土壤到地下水;从地表水到地下水等;三是多组分污染物从污染源同时排入到不同的环境介质单元,然后在各介质间进行迁移与转化。

### 1.1.2 多界面迁移的非线性特点

在多介质环境中,存在着介质与介质之间的物理转换区,即多界面(multi-interfaces)。界面两侧的环境介质表现出状态、结构以及物理、化学性质的不同,污染物通过界面的传输相对于它原来所在介质中的传输将会加快或减慢,表现出明显的非线性特征。如气/水界面的双膜理论,地表水/地下水间的物质传输函数,在生物新陈代谢中与周围环境介质进行物质和能量交换的过程,以及有机污染物在有机碳含量极低的矿物质上的吸附行为等,都涉及污染物或其他物质在多介质环境界面行为的过程,这些过程大多数是非线性的。界面上物质和能量交换是科学研究的前沿问题之一。

### 1.1.3 多组分迁移特征

环境介质中存在着多种物质,也即存在着多组分(multi-components)。当流体运动时,多种物质随同流体一起运动,可产生三种情况。第一种情况是这些物质与流体的运动速度相同,处于混溶状态;第二种情况是由于多组分物质密度差异与流体运动速度不同,如比水轻的油和比水重的硝基苯等,处于不混溶状态;第三种情况多种组分在迁移的过程中发生生物化学反应。多组分物质的生物地球化学作用通过改变岩土介质的化学组分和结构影响岩土介质的力学性质;同时也改变流体的组分和迁移特性。

### 1.1.4 多过程迁移特征

污染物在多介质环境系统内的迁移过程涉及许多过程中,即多过程(multi-processes),可与多介质环境发生相互的物理、化学和生物作用。物理过程包括对流、弥散与扩散;化学过程包括溶解(盐岩、碳酸盐岩及黄土等)、沉淀(化学淤堵)、放射性衰减(核素迁移)、酸离子反应(文化建筑物酸蚀、风化等)、配位、水解与置换(膨胀土)、离子交换、氧化与还原等化学反应;生物过程包括有机物的生物降解,生物在多孔介质中生长、繁衍与死亡引起的多孔介质空隙堵塞导致的渗流通道的堵塞,生物作用会加速或改变化学过程。

### 1.1.5 多相流迁移特征

环境介质中存在着气体相、固体相、可移动的胶体相和液相(水、油、非水相液体(non-

aqueous phase liquids, NAPLs))。非水相液体由于密度的不同,又可分为两类:第一类是高密度的非水相液体(dense non-aqueous phase liquids, DNAPLs),如密度大于水的硝基苯、三氯乙烯(TCE)等;第二类是轻的非水相液体(light non-aqueous phase liquids, LNAPLs),如密度小于水的汽油等。由于多相流(multiphase flow)的存在,使得环境介质中污染物迁移动力学过程变得极为复杂。

### 1.1.6 多尺度转化特征

多尺度(multi-scales)转化是科学研究的前沿问题之一,涉及到时间尺度(temporal scale),如,日、月、年、10年、100年、1000年等。不同时间尺度,环境介质的物理过程、化学过程和生物过程不同,污染物的迁移转化过程也随之不同。因此,在分析研究污染物在多介质环境中迁移和环境系统的自然降解污染物的能力(环境介质自净能力)的时候,要考虑时间尺度的变化,如研究地球环境变化问题时,可将其分为古环境变化(以百万年或亿年为时间尺度)和现代环境变化(以千年或万年为时间尺度)。不同时间尺度反映的环境变化水平和规律是不同的。

空间尺度(spatial scale),如以物质内部的原子为基本单位来研究物质的物理特性时采用原子尺度(atom scale)、纳米尺度(nano-scale)、分子尺度(molecule scale)和微观尺度(micro-scale);细观尺度(meso-scale)是介于微观尺度和宏观尺度之间的尺度,在化学中称为介观尺度,在气象学中称为中尺度;宏观尺度(macro-scale),像室内实验用的反应器尺度、岩土样尺度(rock or soil samples);现场的局地尺度(local scale)、区域尺度(regional scale)、全球尺度(global scale)、宇观尺度(astro-scale)等。尺度不同,研究方法、数学模型、污染物迁移规律存在差异,如研究流体运动时,用分子尺度研究流体时,此时流体属于非连续体,按微观尺度研究流体时,即用质点作为流体基本单位,此时流体为连续体;研究多孔介质问题时,在微观尺度进行研究其为非连续介质,用宏观尺度研究多孔介质问题时,即以表征体元作为其基本单位时,此时多孔介质为连续介质。

### 1.1.7 多场耦合特征

在土壤和岩石介质中存在渗流场、应力场、温度场、地球化学场等,这些场相互作用、相互影响,称为多场耦合(multi-fields coupling)。因此,在研究污染物迁移机制和修复技术时,要考虑这些场对污染物迁移的影响。如果用电化学动力学方法修复土壤时,还要考虑电场对渗流场和溶质运移场的影响。下面是一些耦合模型:①多孔介质中流体-化学过程耦合模型(H-C; coupled flow and transport model);②多孔介质流体-热-化学过程耦合模型(T-H-C; coupled thermal-hydro-chemical model);③多孔介质流体电化学动力耦合模型(H-E-C; coupled electro-kinetic-flow and transport model);④多孔介质流体-化学-力学耦合模型(H-C-M; coupled thermal-hydro-chemical-mechanical model);⑤多孔介质流体-多组分-多相流耦合模型(coupled multi-component-multi-phase flow and transport model);⑥生物地球化学-多组分-多相流耦合模型(biogeochemical-multicomponent-multiphase flow and transport model);⑦多介质环境系统集成模型(integrated model for multimedia environment system)。

## 1.2 土壤、含水层与地下水

### 1.2.1 基本概念

土壤与含水层是环境介质的一部分(属于一种特殊的多孔介质),也是环境介质中最复杂的介质体系,称为地下环境(subsurface environment)。地下环境中存在固相、液相和气相,而水分运动对于污染物的迁移起着决定性作用。地下环境介质中的水统称为地下水(subsurface water)。传统的水文学中把潜水面以下饱和状态的含水层中的重力水称为地下水(groundwater)。在地下工程中,国外一些文献也把地下水称为 underground water。根据地下环境中地下水分布的特点,可将地下水分为饱和带(saturated zone or zone of saturation)和非饱和带(unsaturated zone)。前者包括毛细水带(capillary fringe)和地下水带(groundwater zone)(传统的定义把毛细水带划分为非饱和带或包气带(zone of aeration)),后者包括土壤水带(soil water zone)和过渡带(intermediate zone or vadose water zone)。土壤水带和过渡带中的水以薄膜水(pellicular water)和重力水(gravitational water)的存在形式;地下水位面(phreatic surface)是一个假想的水面。该水位面上的所有点的压力等于大气压力,近似等于零( $p_w = p_a = 0$ )。以地下水位面(phreatic surface)为界,其上为负压带(zone of negative pressure,  $p_w < 0$ ),为基质势;其下为正压带(zone of positive pressure,  $p_w > 0$ ),为重力势。毛细带高度与土壤性质有关,土壤颗粒越细毛细高度越高。一般在粗砂砾中无毛细带高度,粉细砂和粘土中毛细高度可达 2~3m 高。毛细带顶部组成的面称为潜水面(water table)。当含水层的厚度远远大于毛细带高度时,或研究大尺度地下水问题时,可以忽略毛细带高度。因此,在许多教科书上把潜水面与地下水位面等同,英文中的 water table 与 phreatic surface 都翻译成潜水面。地下水的分带特点如图 1-1 所示。

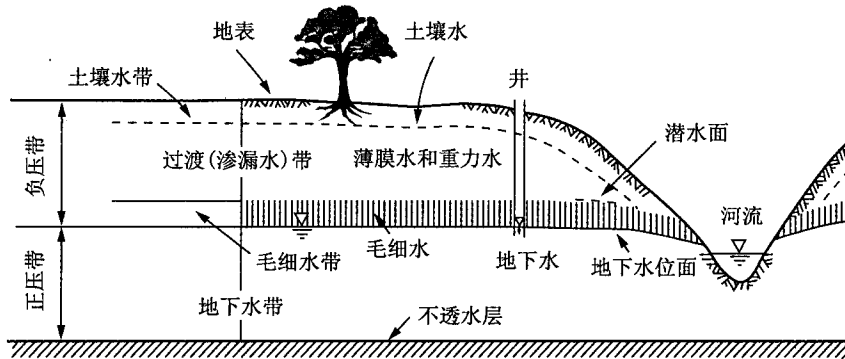


图 1-1 地下水的分带特点[据 Bear and Verruijt(1987 年)修改]

地下水是地球上最重要的水源之一,也是人类赖以生存的淡水资源之一(表 1-1)。在美国,地下水约占所有淡水资源 96%,约有 97%的城市人口以地下水作为饮用水。中国北方 80%以上人口以地下水作为饮用水。

表 1-1 地球上水的分布

位 置	体积/ km <sup>3</sup>	百分比/ (%)	平均停留 时间	位 置	体积/ km <sup>3</sup>	百分比/ (%)	平均停留 时间
海洋	1 370 000	97.6	3 000~30 000 年	土壤间隙水	65	0.005	2 周~1 年
冰川和积雪	29 000	2.07	1~16 000 年	生物水	65	0.005	1 周
地下水	4 000	0.28	数天~数千年	大气	13	0.001	8~10 天
湖泊、水库	125	0.009	1~100 年	沼泽湿地	3.6	0.003	数月~几年
咸水湖	104	0.007	10~1 000 年	江河溪流	1.7	0.000 1	10~30 天

从表 1-1 可以看出,地球上的海水占 97.6%,而淡水仅占 2.393%(除去 0.007% 的咸水湖),在淡水中冰川和积雪占 86.5%(主要为南极和北极的冰雪),而地下水占 11.7%。因此,地下水在淡水资源中占有重要的地位;同时,地下水水质优于地表水水质。

地下水(subsurface water)是指存在于地表面以下的土壤和含水层中的水,包括非饱和水和饱和水。在水文地质学中,地下水(groundwater)是指存在于地表面以下含水层中的饱和水,即地下水面以下的饱和水。在农田水利学中,有时候把地下水定义为地下水面以上非饱和带中的水。

地下水是一种可更新的水源,属可再生资源,它是水资源(water resource)中的重要组成部分,在水文循环(hydrologic cycle)中起着重要的作用,如图 1-2 所示。地下水既具有重要的水资源意义,世界上许多地区把地下水作为重要的供水水源;又有重要的生态学与环境学意义,地下水排泄盆地的植被生长,尤其在干旱、半干旱地区,植被生态系统依靠地下水得以维持;湿地生态系统的维持也是依赖于地下水;地下水也是重要的天然水库,它与大气降水、地表水体相互作用,调节着地球上的淡水资源,维持着地表和近地表生态系统及环境系统。此外,地下水还可作为冷却水用于电厂和住宅区;地热区的地下水是一种热量资源,可用作温泉疗养、发电以及取暖等。地下水又是一种重要的地质营力,地下水的变化会出现许多地质环境问题,如滑坡、地震、黄土湿陷、地面沉降、岩溶地表塌陷等;地下水也是地质成矿过程中的重要载体,如热液矿床的形成、盐矿的形成等。

水资源是指可供生态系统利用的一切水体的总称。人类作为生态系统的一部分,一方面可以通过食物链从生物中获取水,此生物水也称绿色水(green water);另一方面可以通过一定的科学技术从自然界中获取水,包括河川径流量和与地表水不重复的地下水量(这是传统意义上的水资源定义),也称蓝色水(blue water),还有通过各种技术重复利用的水,如海水淡化、污水资源化等。

含水层(aquifer)是指含有一定量的水并具有允许足够水量透过的地质体,该地质体可以是松散沉积层,也可以是坚硬的岩层或岩组。Todd(1959 年)认为英文含水层 aquifer 来源于拉丁文中的 aqua(水的)与 ferre(含有)中的 fer 的组合,其意为含有水的地质体,这里并没有提及允许透过水的意思。

隔水层(aquiclude)与含水层相反,是指含有一定量的水或不含水并且不允许透过足够量水的地质体。从实用观点看,隔水层也可称为不透水层(impervious formation or layer),如粘土层含有大量的水,但不能透过足够量的水,是一种隔水层。

弱透水层(aquitard)是指具有弱透水性能的含水地质体,它虽能允许水透过,但其速度比一般含水层小得多。在人工强烈抽水条件下,在大范围内它是沟通相邻含水层之间水力联系

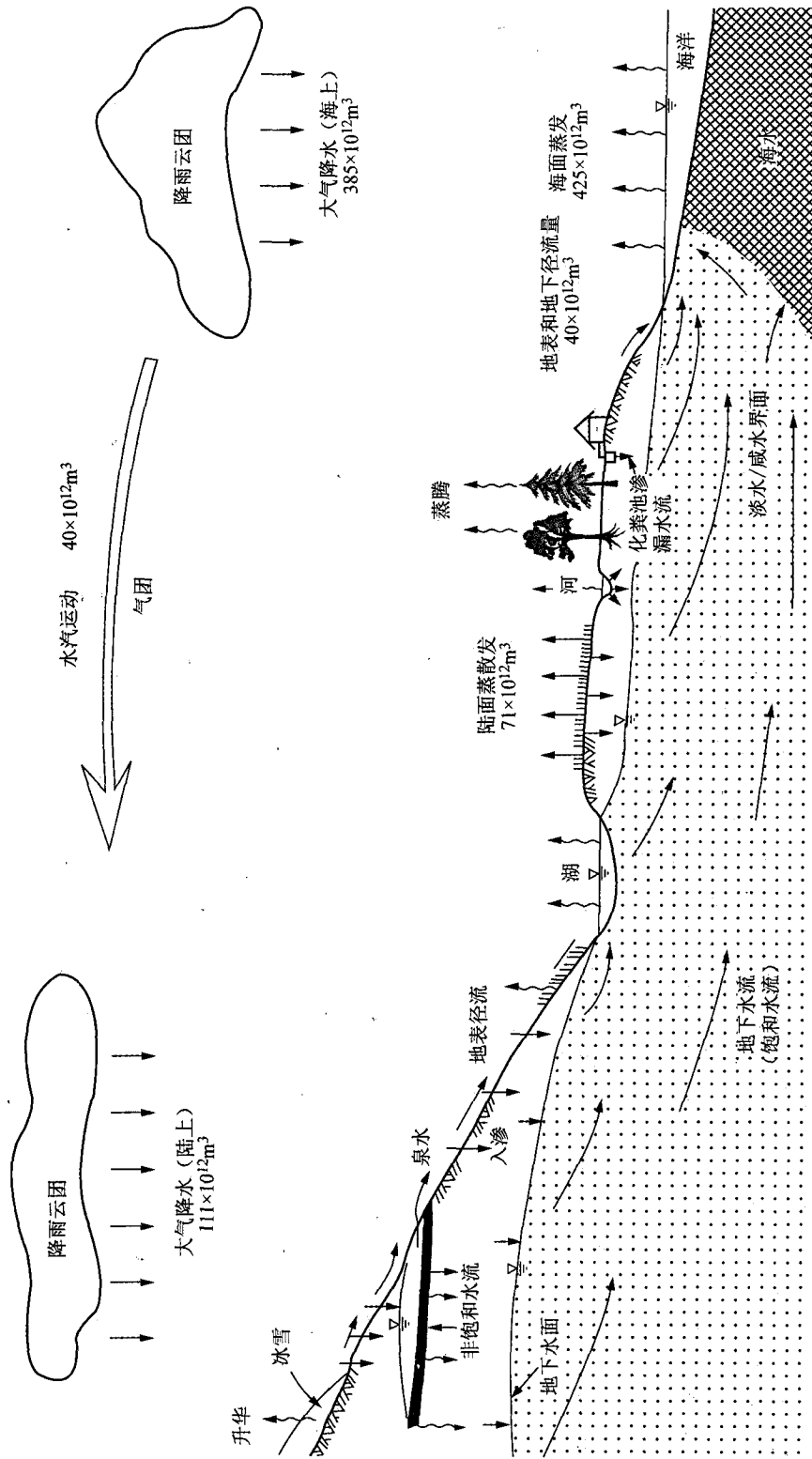


图 1-2 地球上的水文循环示意图 [据 Bear and Verruijt (1987 年) 修改]



的纽带。因此,常把弱透水层称为越流层(leaky formation),也可称为半透水层(semi-pervious formation)。

不透水层(aquifuge, impervious formation)是指不允许水流透过的地质体,该地质体可能不含水,也可能含水。

我们这里谈到的含水层、弱透水层、不透水层和隔水层的定义,是从地质体中获取足够水资源量的观点来进行定义的。从严格的环境学意义上讲,自然界的地质体几乎不存在不透水层或隔水层。如在深部花岗岩地层中存储核废料,非常低渗透性( $<10^{-12}$  cm/s)的花岗岩(从水资源角度看,为隔水层)地层不能看作隔水层,但在高温高压状态下,地下水会在花岗岩中渗透,并会使核素在花岗岩地层中产生迁移问题;还有一些隔水层在人工干扰下会变成透水层或含水层。

在含水层中,由固体物质占据的那一部分岩层称为固体骨架(solid matrix),其余部分称为空隙空间(void space)或孔隙空间(pore space)。空隙空间或者被水相占据,或者被水-气相占据。只有彼此连通的空隙才可在含水层中构成流体流动的单元管道。由于地质体中岩土性质的不同,岩土介质中空隙结构存在很大的差异,有砂岩或松散沉积物中的孔隙结构、石灰岩中的大溶洞,还有坚硬岩石中的节理和裂隙等(图 1-3)。

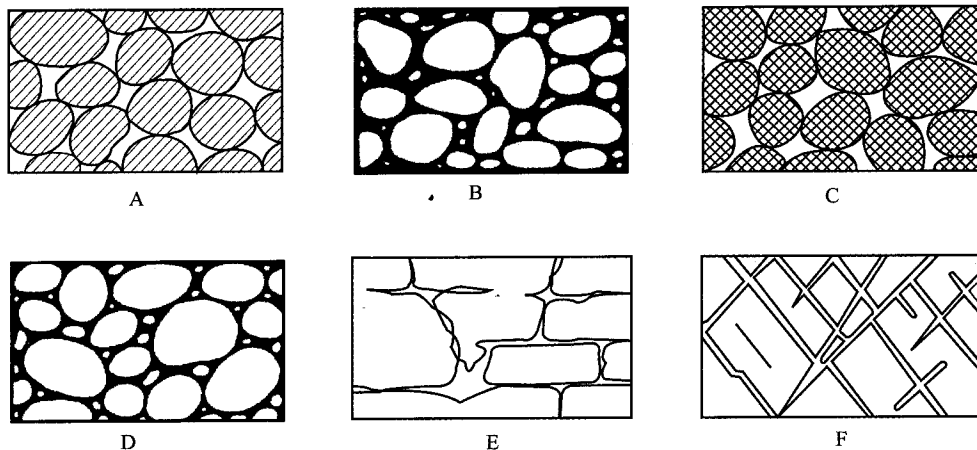


图 1-3 含水层中空隙的几种类型(据 Meinzer, 1942 年)

A—分选性好的高空隙率沉积物;B—分选性差的低空隙率沉积物;C—由多孔的卵石组成的分选性好的高空隙率沉积物;D—大小颗粒组成的分选性较差低空隙率的沉积物;E—碳酸盐岩中溶蚀空隙;F—岩石中节理和裂隙组成的空隙。

含水层的类型:根据含水层中地下水位压力状况可将含水层划分为承压含水层(confined aquifer or pressure aquifer)和非承压含水层(unconfined aquifer),如图 1-4 所示。

承压含水层(图 1-4)是指顶底由相对隔水层限制的含水层,在此含水层中地下水位高于顶部相对隔水层的位置。若钻井刚好揭露这类含水层时,井中水位将上升到顶部相对隔水层的底面之上,这个水位称为测压水头(piezometric head),多个观测井中的水位组成一个测压面(piezometric surface)。当井中水位高出地表面时,地下水就会喷出地表,这样的井称为自流井(artesian well or flowing well),这样的含水层称为自流含水层(artesian aquifer),它也是承压含水层的一种。