

地下水力学概论

Fundamental Theory of
Groundwater Mechanics

项彦勇 著

地下水力学概论

Fundamental Theory of Groundwater Mechanics

项彦勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书简明扼要地阐述了地下水流动、传热和溶质运移的基本理论、数值解法、参数估计方法和参数不确定性分析方法。正文分10章,依次阐述了地下水系统与工程关系,流体力学理论基础,孔隙水流动理论,不同含水层系统地下水因外部作用而流动的一些理论模型和解析解,裂隙水流动理论,地下水流动-传热理论和一些解析解或半解析解,地下水溶质运移理论和一些解析解,数值解法要点及有限差分法、有限单元法、积分有限差分法和边界单元法理论,参量模型及参数估计的逆分析法、普通统计法和地质统计法,参数的概率模型及不确定性分析的随机微分方程模型、可靠度模型、随机抽样法和近似极限状态法。附录包含7个部分,分别阐述了张量与积分定理、矢量恒等式与积分定理、泰斯公式的3种推导过程、二维稳态流动的复变势函数理论与水下地层(或高位潜水层)——隧洞排水流动解析解的推导、单裂隙岩体流动——传热解析解的推导、一维溶质运移方程——常量与瞬态第一类溶质源边界条件问题解析解的推导和格林函数。

本书可以用作岩土工程、地质工程、环境工程、水文地质与地下水资源等学科的研究生教学参考书,也可以供相关领域的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水力学概论=Fundamental Theory of Groundwater Mechanics / 项彦勇著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030920-4

I. ①地… II. ①项… III. ①地下水动力学-概论 IV. ①P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第075203号

责任编辑:韦沁 朱海燕 杨然 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作者

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年5月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—1 500 字数:420 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

地下水是岩土空隙中的水,是自然水循环系统中的一部分。“水土”是生命之本源,生命之依托,也是生命之归宿。地下水既影响人类的活动,也被人类活动所影响。地下水与人类活动相互作用的问题有很多,如地下水资源开发、地热开发、岩土与地下工程降水、地下结构防水、废物地质处置、地下水污染控制与治理、能源地下储存等。

由于受到岩土孔隙与裂隙透水能力的限制,孔隙与裂隙地下水的流动一般比较缓慢,故也常称之为渗流。可以采用连续介质模型描述孔隙地下水的流动,而对于裂隙地下水的流动,则需要根据具体情况,或采用等效连续介质模型,或采用离散的裂隙网络模型。

岩土热传导和地下水及其他流体的流动传热是地下环境中传热的主要物理机制。地下水流动引起的溶质运移(流移和流散,又称对流和机械弥散)和溶质的分子扩散是地下水溶质运移的基本物理机制。

岩土颗粒和孔隙(裂隙)流体中的各种物理、力学和化学过程往往是相互关联的,如孔隙水压强与岩土颗粒有效应力之间的相互影响(流动-应力耦合)、孔隙水流动与传热之间的相互影响(流动-传热耦合)、孔隙水流动与溶质化学反应及运移之间的相互影响(流动-化学耦合)、传热与岩土应力(应变)之间的相互影响(传热-应力耦合),或者,更为复杂的流动-传热-应力-化学之间的相互影响(水-热-力-化耦合)。根据具体问题和分析目的的不同,可以忽略那些相对次要的耦合,仅考虑单项过程或必要的耦合过程。

地下水流动、传热和溶质运移问题的理论解可以分为三种类型:① 解析解,理论上准确且无需近似计算的解;② 半解析解,理论上是准确的,但实际计算是近似的;③ 数值解,基于近似理论。解析解和半解析解方法均采用严谨的数学推导,因而仅适用于控制方程和定解条件都比较简单的问题;虽然局限于假设条件,但却具有理论表达透明、计算过程透明和计算方便等优点,可以较直接地用于分析问题的基本特征和参数敏感度,还可以作为校验数值方法合理性与精确度的参考基准。数值解法基于空间和时间的离散与叠加,与计算机相结合,几乎是无所不能。

经验类比、取样实验、现场实验或观测是确定地下水流动、传热和溶质运移理论参数的基本方法。由于岩土介质的尺度效应,取样实验的结果可能不足以代表现场的实际情况,因而往往需要在现场实验或观测的基础上,选择合理的参数模型(确定性表征单元模型、表征单元概率模型、随机场模型),采用逆分析法、统计分析法或地质统计法,确定岩土的物理力学参数。

由于岩土介质和各种物理力学过程的复杂性,地下水流动、传热和溶质运移问题的不确定性是必然的。由于客观条件的制约,一般只能在模型参数估计的基础上构造概率模型,进行参数的不确定性分析。

本书旨在简明扼要地阐述地下水流动、传热和溶质运移的基本理论、数值解法、参数估计方法和参数不确定性分析方法,共含 10 章和 7 个附录:

第1章：自然水循环与地下水系统——概述自然水循环、地下水系统基本特征及与地下水有关的工程问题类型。

第2章：流体力学基础——阐述流体的应力分析与运动分析、物理力学性质和本构定律、雷诺运移定理、质量守恒原理和质量守恒控制微分方程、动量守恒原理和运动微分方程及其伯努利积分。

第3章：孔隙流动——阐述(饱和与非饱和)孔隙水流动的表征单元概念模型、状态变量、达西实验定律与达西方程、控制微分方程和定解条件。

第4章：含水层流动——阐述承压水层-完整井点流动的解析解、潜水层-井点流动的解析解、群井流与影像法、含水层组-井点流动模型与解析解、水下地层(或高位潜水层)-隧洞排水流动的解析解、非饱和带地表水入渗的解析解。

第5章：裂隙流动——阐述岩体裂隙的几何特征与渗流性质、光滑平行壁面裂隙水的饱和流动公式、平行粗糙壁面裂隙水的饱和流动公式、非饱和裂隙水的毛细缝模型、裂隙岩体地下水流动概念模型的分类、变饱和流动的等效连续体模型和双渗透率模型、确定裂隙网络模型和随机裂隙网络模型。

第6章：传热——阐述热力学基本概念、地下水流动-传热机制和控制微分方程、单裂岩体地下水流动-传热的解析解、分布热源作用下稀疏裂隙岩体地下水流动-传热的拉氏变换-格林函数法半解析解、水-气两相流动与传热耦合的控制积分方程。

第7章：溶质运移——阐述地下水溶质运移的物理机制、控制微分方程与定解条件、岩土溶质流散系数张量与流散率、化学反应对溶质运移的影响方式、平衡态吸附/解吸附对溶质运移的影响、一阶化学反应-衰变对溶质运移的影响、孔隙水稳态均匀流动-溶质运移的解析解、裂隙水稳态均匀流动-溶质运移的解析解。

第8章：数值解法——阐述数值离散与数值解法要点、有限差分法(差分的定义、差分格式与计算稳定性、数值弥散)、有限单元法(有限元方程的建立过程、饱和孔隙水流动的有限元方程、非饱和孔隙水流动的有限元方程、溶质运移的有限元方程、单元矩阵的计算方法)、积分方程的有限差分法和边界单元法。

第9章：参数估计方法——阐述岩土物理力学参数的分类、参量模型、参数的平均值、参数估计的逆分析法以及参量估计的普通统计法和地质统计法。

第10章：参数不确定性分析方法——阐述参数的概率模型、随机微分方程模型与求解方法、可靠度模型与随机抽样法(蒙特卡罗法、拉丁超立方方法、均值网格法)和近似极限状态法(一阶二次矩法、一阶可靠度法)。

附录：A, 张量与积分定理；B, 向量恒等式与积分定理；C, 泰斯公式的推导；D, 二维稳态流动的复变势函数理论与水下地层(或高位潜水层)——隧洞排水流动解析解的推导；E, 单裂隙岩体流动——传热解析解的推导；F, 一维溶质运移方程——第一类溶质源边界条件问题解析解的推导；G, 格林函数。

关于符号的定义, 由于本书的覆盖面和深度, 符号既要尽量表达简单, 又要尽量符合一般习惯, 不方便、也没有必要全书统一符号, 故此采用以下符号约定: 符号定义大体上分章(附录)独立, 即任意章或附录内的符号定义仅适用于该章或附录; 局部范围内, 如果没有具体说明, 则符号定义均以所在章或附录内的首次定义为准, 但是, 如果另有不同定义,

则以该具体定义为准。

个别(特殊)专业词汇的英文写法,所有外国人名音译的外文拼写,均于各章或附录内首次出现时给出。关于部分内容的附加说明,以脚注的形式给出。书中插图除有具体数字标注以外均为无比例尺示意图。

“夫天地者,万物之逆旅。光阴者,百代之过客。而浮生若梦,为欢几何?”(李白)
成者乐业,修者善学。书门有道,其情缠绵,其境逍遥。

感恩天地人,生而有书读,思索过去,探寻未来,收获了知识与快乐,体验了神圣与奇妙。现在,籍地下水力学概论之名,承科学出版社之惠,手稿付梓,今日是而昨日非已鉴,明日是而今日非未卜,诚惶诚恐,但愿没有辜负知识的优雅,不会亵渎“书”的灵韵。

项彦勇

2011年5月
于北京交通大学

主要变量与参数的符号定义

参量	符号	量纲	SI 单位示例
变量			
空间位置坐标	x_i	[L]	m
	$\mathbf{x}$	[L]	m
	x, y, z	[L]	m
时间	t	[T]	s
空间位置间隔向量	$\mathbf{s}$	[L]	m
流体压强	p	[FL ⁻²]	Pa
水头	h	[L]	m
界面张力集度	σ	[FL ⁻¹]	N/m
浸润角	θ	—	rad
毛细压强	p_c	[FL ⁻²]	Pa
吸强水头	ψ	[L]	m
地下水饱和度	S	—	—
体积含水量	θ	—	—
达西流速(渗透速度)	q	[LT ⁻¹]	m/s
孔隙水流速	u	[LT ⁻¹]	m/s
裂隙水平均流速	u	[LT ⁻¹]	m/s
温度	T	[H]	℃
比内能	e	[UM ⁻¹]	kJ/kg
内能	E	[U]	kJ
比焓	h	[UM ⁻¹]	kJ/kg
比熵	u	[UM ⁻¹ H ⁻¹]	J/(mol · K)
熵	U	[UH ⁻¹]	J/K
地下水溶质浓度	c	[ML ⁻³]	mg/l

续表			
参量	符号	量纲	SI 单位示例
参数			
重力加速度	g	$[LT^{-2}]$	m/s^2
流体的质量密度	ρ	$[ML^{-3}]$	kg/m^3
流体的(动力)黏度	μ	$[FTL^{-2}]$	$Pa \cdot s$
流体的运动黏度	ν	$[L^2T^{-1}]$	m^2/s
流体的压缩系数	β	$[F^{-1}L^2]$	$1/Pa$
岩土孔隙度	ϕ	—	—
岩土压缩系数	α	$[F^{-1}L^2]$	$1/Pa$
岩土渗透率	k	$[L^2]$	m^2
岩土渗透系数	K	$[LT^{-1}]$	m/s
岩土储水率	R_s	$[L^{-1}]$	$1/m$
潜水层给水度	ω_y	—	—
岩土储水系数	R	—	—
岩土导水系数	T	$[L^2T^{-1}]$	m^2/s
地下水残余饱和度	S_r	—	—
岩土孔隙进气压强水头比例因子	a	$[L^{-1}]$	$1/m$
岩土孔隙尺寸分布参数	b	—	—
裂隙开度	e	$[L]$	m
裂隙间距	s	$[L]$	m
岩体裂隙度	ϕ_f	—	—
裂隙渗透率	k_f	$[L^2]$	m^2
裂隙渗透系数	K_f	$[LT^{-1}]$	m/s
裂隙走向角	α	—	rad
裂隙倾向角	ω	—	rad
裂隙倾角	γ	—	rad
岩土(复合)热传导系数	λ	$[UT^{-1}L^{-1}H^{-1}]$	$J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$

续表

参量	符号	量纲	SI 单位示例
水的比热	c_w	$[UM^{-1}H^{-1}]$	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
岩土干比热	c_s	$[UM^{-1}H^{-1}]$	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
水的质量密度	ρ_w	$[ML^{-3}]$	kg/m^3
岩土(颗粒)干密度	ρ_s	$[ML^{-3}]$	kg/m^3
岩土的体密度	ρ_b	$[ML^{-3}]$	kg/m^3
岩土的纵向溶质流散率	α_l	$[L]$	m
岩土的横向溶质流散率	α_t	$[L]$	m
岩土孔隙弯曲度	τ	—	—
自由水溶质分子扩散系数	D_0	$[L^2T^{-1}]$	m^2/s
岩土阻滞系数	R	—	—

- 注：① 参量的符号。符号定义基本上分章、分附录独立；局部范围内，如无具体说明，则符号定义均以所在章或附录的首次定义为准，如另有不同定义，则以该具体定义为准。
- ② 参量的量纲。 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 为基本量纲，分别代表长度、时间和质量； $[F]=[MLT^{-2}]$ 代表力的量纲； $[U]=[ML^2T^{-2}]$ 代表功、能或热的量纲； $[H]$ 代表温度的量纲。
- ③ 参量的单位。采用国际单位制 SI [International System of Units；法文(原文)：Système International (d’Unites)]；例如：秒(s)、米(m)、公斤(kg)、弧度 $\left(\text{rad}, 1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{rad}\right)$ 、帕(Pa, $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$, Pascal)、牛顿(N, Newton)、焦耳(J, Joule)、瓦特(W, $\text{W} = \text{J}/\text{s}$, Watt)、摩尔(mol, Mole)。
- ④ 单位的前置符号。为了方便以某个单位表达数值较大或较小的参量，可以把该单位的某个倍数定义为更大或更小的单位，并用前置符号表示：千 $[10^3, \text{k}(\text{kilo})]$ 、兆 $[10^6, \text{M}(\text{mega})]$ 、千兆 $[10^9, \text{G}(\text{giga})]$ ；毫 $[10^{-3}, \text{m}(\text{milli})]$ 、微 $[10^{-6}, \mu(\text{micron})]$ 、纳 $[10^{-9}, \text{n}(\text{nano})]$ 。例如：千帕(kPa)、兆帕(MPa)、纳米(nm)，等等。

目 录

前言

主要变量与参数的符号定义

第 1 章 自然水循环与地下水系统	1
1.1 自然水循环	1
1.2 地下水的赋存特征	3
1.2.1 矿物水	3
1.2.2 孔隙水	3
1.3 地下水的分类与分区	5
1.4 地下水与工程	8
第 2 章 流体力学基础	12
2.1 应力分析——流体的压强与剪应力	12
2.1.1 流体的压强、压强水头和测压管水头	12
2.1.2 黏性流体的剪应力与动压强	13
2.2 运动分析——流体的速度、加速度和物质导数	13
2.2.1 拉格朗日法	13
2.2.2 欧拉法	14
2.2.3 速度分解定理	15
2.2.4 欧拉法质点加速度	17
2.2.5 物质导数	18
2.3 流体密度与状态方程	18
2.4 流体黏度、黏性定律和本构方程	20
2.5 流动的分类	23
2.6 守恒原理与雷诺运移定理	23
2.7 流体力学控制微分方程	25
2.7.1 质量守恒微分方程	25
2.7.2 动量守恒原理与流体运动微分方程	27
2.8 流体运动微分方程的伯努利积分	29
2.8.1 理想流体运动微分方程的伯努利积分	29
2.8.2 黏性流体元流的伯努利方程	30
第 3 章 孔隙流动	32
3.1 表征单元概念模型	32
3.2 岩土孔隙度与压缩系数	34
3.3 孔隙水流动的状态变量	35

3.3.1	孔隙水的饱和度	35
3.3.2	孔隙水的流动速度	35
3.3.3	孔隙水的压强和水头	36
3.4	达西实验定律与达西方程	46
3.4.1	达西实验定律与分析	46
3.4.2	饱和孔隙水流动的达西方程	50
3.4.3	非饱和孔隙水流动的达西方程	54
3.4.4	非饱和孔隙水流动的水力特征函数和相对渗透率函数	55
3.5	孔隙水流动的控制微分方程与定解条件	59
3.5.1	饱和孔隙水流动的控制微分方程与储水率	59
3.5.2	非饱和孔隙水流动的控制微分方程与容水度	61
3.5.3	初始条件与边界条件	64
第4章	含水层流动	66
4.1	承压水层-完整井点流动	66
4.2	潜水层-井点流动	69
4.2.1	杜伊特假设与潜水井流的近似公式	69
4.2.2	潜水井流的纽曼模型与解析解	74
4.3	群井流与影像法	78
4.3.1	群井流	78
4.3.2	影像法	80
4.4	含水层组-井点流动	83
4.4.1	越流	83
4.4.2	弱透水层的流动特征	83
4.4.3	有越流的承压含水层-完整井点流动	85
4.4.4	含水层组-井点流动的控制微分方程组	88
4.5	水下地层(或高位潜水层)-隧洞排水流动	88
4.5.1	等水头隧洞边界	88
4.5.2	等水压隧洞边界	91
4.5.3	隧洞衬砌结构外水压强	91
4.6	非饱和带地表水入渗	92
第5章	裂隙流动	97
5.1	岩体裂隙的几何特征与渗流性质	97
5.1.1	单个裂隙的几何特征参数	97
5.1.2	岩体裂隙的网络特征参数与渗流性质	97
5.2	裂隙水流动的力学模型	99
5.2.1	光滑平行壁面裂隙水的饱和流动公式	99
5.2.2	平行粗糙壁面裂隙水的饱和流动公式	104
5.2.3	非饱和裂隙水的毛细缝模型	106

5.3	裂隙岩体地下水流动概念模型的分类	106
5.3.1	裂隙网络模型	107
5.3.2	连续介质模型	108
5.4	裂隙岩体地下水流动的等效连续体模型	110
5.4.1	饱和流动的等效连续体模型	110
5.4.2	非饱和流动的等效连续体模型	116
5.5	裂隙岩体地下水流动的双渗透率模型	119
5.6	裂隙岩体地下水流动的裂隙网络模型	120
5.6.1	确定裂隙网络模型	120
5.6.2	随机裂隙网络模型	121
第6章	传热	125
6.1	热力学基本概念	125
6.1.1	温度与热	125
6.1.2	显热	126
6.1.3	相变与潜热	127
6.1.4	焓	127
6.1.5	熵	128
6.1.6	热力学定律	128
6.2	流体传热的控制微分方程	129
6.2.1	拉格朗日法推导流体传热的控制微分方程	130
6.2.2	欧拉法推导流体传热的控制微分方程	131
6.3	地下水流动-传热机制	132
6.4	地下水流动-传热的控制微分方程与定解条件	134
6.4.1	控制微分方程	134
6.4.2	初始条件与边界条件	136
6.4.3	求解过程	137
6.5	单裂隙岩体地下水流动-传热的解析解	137
6.5.1	有填充单裂隙岩体地下水流动-传热	137
6.5.2	无填充单裂隙岩体地下水流动-传热	139
6.6	稀疏裂隙岩体地下水流动-传热的拉普拉斯变换-格林函数法半解析解	141
6.6.1	单裂隙岩体地下水流动-传热	141
6.6.2	分布热源作用下稀疏裂隙岩体地下水流动-传热	146
6.7	水-气两相流动与传热耦合的控制积分方程	151
第7章	溶质运移	153
7.1	地下水溶质运移的物理机制	153
7.1.1	流移	153
7.1.2	分子扩散	154
7.1.3	流散	155

7.2	地下水溶质运移的控制微分方程与定解条件	157
7.2.1	控制微分方程	157
7.2.2	初始条件与边界条件	158
7.3	岩石的溶质流散系数张量与流散率	161
7.4	化学反应对溶质运移的影响	164
7.4.1	影响方式	164
7.4.2	平衡态吸附/解吸附对溶质运移的影响	165
7.4.3	一阶化学反应——衰变对溶质运移的影响	166
7.5	孔隙水稳态均匀流动-溶质运移的解析解	167
7.5.1	一维稳态流动—弥散	167
7.5.2	稳态均匀流—二维弥散(瞬时面域溶质源)	169
7.5.3	稳态均匀流—三维弥散(瞬时体域溶质源)	169
7.6	裂隙水稳态均匀流动—溶质运移的解析解	169
第8章	数值解法	173
8.1	数值离散与数值解法要点	173
8.2	有限差分法	176
8.2.1	差分的定义	176
8.2.2	差分格式与计算稳定性	177
8.2.3	数值弥散	180
8.3	有限单元法	183
8.3.1	有限元方程的建立过程(伽辽金法)	183
8.3.2	饱和孔隙水流动的有限元方程	188
8.3.3	非饱和孔隙水流动的有限元方程	191
8.3.4	溶质运移的有限元方程	192
8.3.5	单元矩阵的计算方法	193
8.4	积分方程的有限差分法	196
8.5	边界单元法	198
8.5.1	边界单元法的特点与求解过程	198
8.5.2	瞬态问题的处理方法	201
8.5.3	均质各向异性问题的处理方法	203
8.5.4	非均质问题的处理方法	204
第9章	参数估计方法	205
9.1	岩土物理力学参数的分类	205
9.2	参量模型	207
9.2.1	参量模型的分类	207
9.2.2	随机场的定义	209
9.2.3	遍历型随机场	209
9.2.4	平稳型随机场	210

9.3 参数的平均值	211
9.3.1 参数平均值的类型与特点	211
9.3.2 复合地层的平均渗透系数	213
9.4 参数估计方法的分类	214
9.5 参数估计的逆分析法	216
9.6 参量估计的普通统计法	219
9.6.1 表征单元概率模型的普通统计法	219
9.6.2 随机场模型的普通统计法	220
9.7 参量估计的地质统计法	221
9.7.1 地质统计法——Kriging 的一般格式	221
9.7.2 二阶平稳随机场的 Kriging 估计	222
9.7.3 本征随机场的 Kriging 估计	224
9.7.4 半变差函数的确定方法与基本特征	226
9.7.5 Kriging 估计的特征	229
第 10 章 参数不确定性分析方法	231
10.1 参数的概率模型	231
10.2 随机微分方程模型与求解方法	234
10.2.1 谱方法求解	235
10.2.2 摄动法求解	238
10.3 可靠度模型	239
10.4 随机抽样法	242
10.4.1 参数模型与随机参数生成方法	242
10.4.2 蒙特卡罗法及其变种	248
10.5 近似极限状态法	250
10.5.1 一阶二次矩法	250
10.5.2 一阶可靠度法	251
附录	254
附录 A 张量与积分定理	254
A.1 指标符号约定与张量的定义	254
A.2 张量代数	254
A.3 张量的梯度、散度和旋度	255
A.4 各向同性张量	256
A.5 二阶对称张量的特征向量与特征值	256
A.6 积分定理——张量形式	256
附录 B 向量恒等式与积分定理	257
B.1 向量恒等式	257
B.2 积分定理——向量形式	257
附录 C 泰斯公式的推导	258

附录 D 二维稳态流动的复变势函数理论与水下地层(或高位潜水层)—— 隧洞排水流动解析解的推导	263
D.1 二维稳态流动的复变势函数理论	263
D.2 水下地层(或高位潜水层)——隧洞排水流动解析解的推导	266
附录 E 单裂隙岩体流动——传热解析解的推导	271
附录 F 一维溶质运移方程——第一类溶质源边界条件问题解析解的推导	273
附录 G 格林函数	277
G.1 基本概念	277
G.2 二维拉普拉斯算子的格林函数	278
G.3 三维拉普拉斯算子的格林函数	279
G.4 二维变型亥姆霍兹算子的格林函数	279
G.5 三维变型海姆霍兹算子的格林函数	280
G.6 扩散方程的格林函数	280
参考书目	282

第 1 章 自然水循环与地下水系统

本章概述地球自然界水的分布特征与循环关系,地下水系统的赋存特征、分类和分区,以及与地下水有关的工程问题类型。

1.1 自然水循环

地球自然界中的水分布于水圈(hydrosphere)、岩石圈(lithosphere; 又称地圈, geosphere)和大气圈(atmosphere)中,其总量估计和分布概况如表 1.1 所示。可见,地下水(地表之下的水)^①总量约为 $8 \times 10^6 \text{ km}^3$,其中约 50%分布于地面以下约 800m 的深度范围内。

表 1.1 地球水的总量估计和分布概况

分布区域类型	数量/ 10^6 km^3	近似比例/%
总水量	1358.304	100
海洋	1320	97.20
长年冰雪(冰川、雪川等)	30	2.21
埋深小于 800m 的地下水	4	0.29
埋深大于 800m 的地下水	4	0.29
非饱和带地下水	0.07	0.005
淡水湖	0.12	0.009
咸水湖	0.10	0.007
河流	0.001	0.0001
大气	0.013	0.001

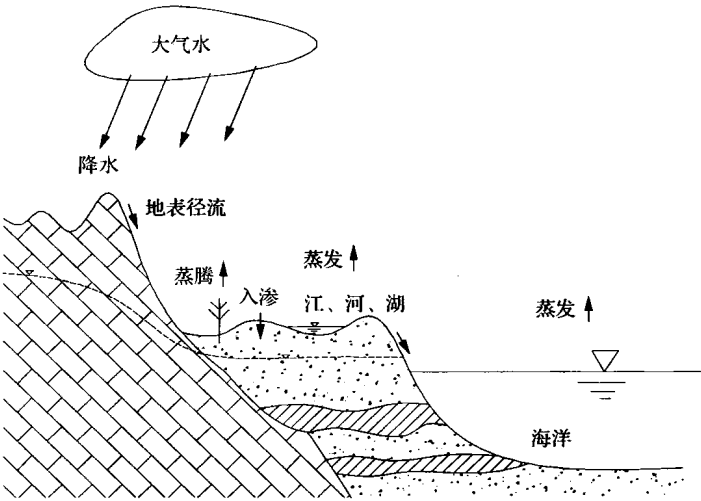
资料来源: de Marsily, 1986。

分布于地球的不同圈层中的水分(大气水、地表水、地下水)彼此联系并相互转化,即自然水循环(hydrological cycle),如图 1.1 所示。

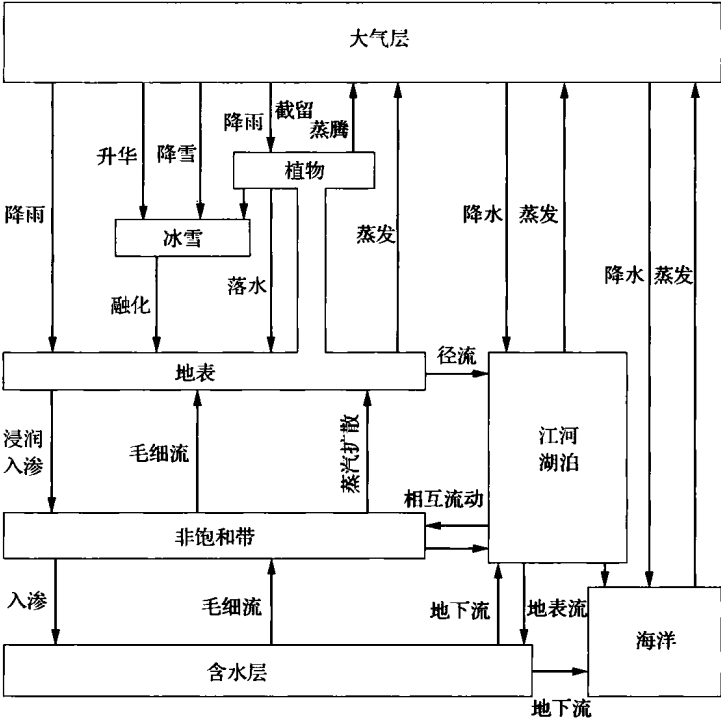
(1) 大气水,可以凝结成液态水或固态水降落到地表面,即雨、雪、雹等不同形式的降水(precipitation),其中一部分通过地表径流(surface runoff)汇集于江河湖海成为地表水,另一部分入渗(infiltration)到岩土体中成为地下水。

(2) 地表水,可以入渗到岩土体中成为地下水,也可以蒸发(vaporization)成为大气水。

① 地下“水”并非“纯水(H_2O)”,而是含有多种气体、离子、分子化合物、有机物和微生物等形式的化学成分。地下水中常见的气体成分有 O_2 、 N_2 、 H_2S 和 CO_2 等,但一般含量较小。地下水中的七种主要离子成分是:氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})、重碳酸根离子(HCO_3^-)、钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)、钙离子(Ca^{2+})和镁离子(Mg^{2+})。



(a)



(b)

图 1.1 自然水循环
(a) 概念; (b) 过程

(3) 地下水,可以通过地面蒸发(evaporation)成为大气水,可以被植物吸收并通过植物叶面蒸发(蒸腾,transpiration)成为大气水,还可以从岩土体中排出成为地表水。