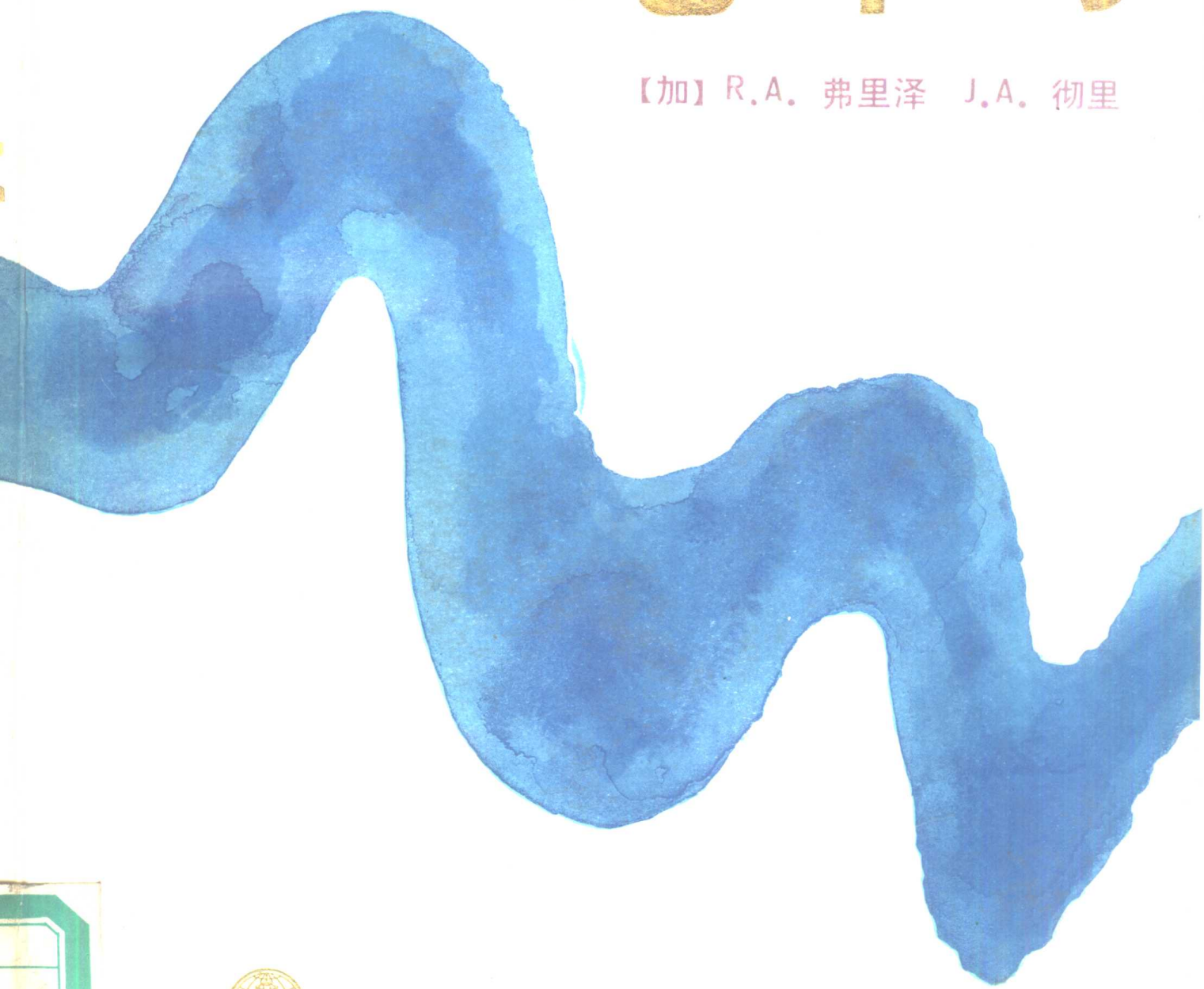


地下水

【加】R.A. 弗里泽 J.A. 彻里



地震出版社

地 下 水

[加] R. A. 弗里泽 J. A. 彻里 著

吴静方 译 沈垠卿 校

地 震 出 版 社

1 9 8 7

F562/26

内 容 提 要

这是一本全面系统阐述地下水科学基本理论和实际应用的书籍，共分11章，包括：地下水与人类；地下水的物理与化学特性；地下水地质学；地下水水力学及流网；地下水水文循环；地下水化学演变规律；地下水资源评价；地下水污染机理与防治；地下水与工程地质；地下水在地震、地热与石油运移等地质过程中的作用等。每章内容基本反映出了当今世界上在地下水科学方面的新成果。

本书可供水利、地质、环保、石油、煤炭、交通、建筑、勘探等方面科技人员和有关院校师生参阅。

GROUND WATER

R. A. Freeze J. A. Cherry
Prentice-Hall, Inc.

1979

地 下 水

〔加〕R. A. 弗里泽 J. A. 彻里 著
吴静方 译 沈培卿 校
责任编辑：程宏珍

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 28.25印张 700千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数0001—1600

ISBN 7-5028-0046-8/P·34

书号：13180·446 平装定价：8.60元

译 者 的 话

这本书的出版是中、加两国人民友谊的又一象征。加拿大是白求恩同志的故乡。中国人民在抗日战争时期曾得到过以他为代表的加拿大人民的无私援助。今天，在中国人民四个现代化建设的新时期，我们又一次看到了这种友谊的光辉——UNESCO 加拿大委员会和 R.A. 弗里泽教授、J.A. 彻里教授以感人的热诚，积极帮助我们出版了这本书。因此，每当我翻开这本书的第一页时，就会想到这一点，并深深感谢他们对我国科学文化发展方面所作的这一贡献。

本书的两位作者，R.A. 弗里泽教授和 J.A. 彻里教授，在地下水科学方面具有丰富的实践经验，并在大学任教多年，不但对地下水的生成、运动及其物理、化学特性方面具有深厚的造诣，而且在地下水资源调查、评价、开发利用等方面也有独到的见解。除此之外，对与地下水有关的环境问题也作过比较深入的研究和探讨。

这本书以其内容上的全面、系统，编排上的详尽、灵活和水平上的先进性等特点感动和激励了我，使我鼓起勇气，不计重重困难，拿起笔来翻译成了中文，以便为我国广大地下水科学界的同行与同学们提供一本内容比较系统，知识比较广泛的地下水专著，并为还不能直接阅读原文的同志们提供方便。

我国广大地下水工作者深知：地下水科学与水文地质学和陆地水文学等虽有不可分割的联系，但是，它也具有与这两门学科不能相互代替的特点。也就是说，它本身作为一门独立学科的时代早已成熟。而且，非如此，就不能适应和满足我国当前四个现代化建设的迫切需要。因为无论是只从水文地质观点，还是从陆地水文观点来对我国地下水资源进行调查和评价，其成果都会给合理开发利用地下水资源的战略决策带来难于明辨的麻烦。而这两种观点的融合，则首先需要一个概念和方法上的统一。这本书正是在这一点上有着明显的优点，因为它是把地下水作为一个独立的、自成系统的、有着本身广阔前景的新事物来看待的，从而与客观现实最大程度地接近了。

限于水平，译文中不妥和错误之处敬希读者指正。

前 言

在地下水水文学的研究和实践中，我们觉察到一种新的趋势——一门介于各自然学科之间，并在人类活动中颇具重要意义的新兴学科正在地质学和水力学的基础上萌生出来。本书的问世是我们对这种趋势的响应。

作为一种尝试，我们把地质学和水文学、物理学和化学、基础科学和工程学更大程度地综合于本书之中，以便向读者提供一本适应这种趋势需要的、进行地下水科学研究的书籍。

本书也是大学地质、工程地质、工程建筑等专业地下水课程的一本有价值的教学参考书。它的内容比一学期课程所包含的材料多得多，这样可以使教师在安排教学大纲时有充分的选择余地，其余部分则可供专门化教学时选用。书中各学科的知识交叉渗透，这对于仅有地学基础知识的学生来说可能造成一些困难，但这种努力仍然是必要的。

学习地下水基础知识，要求对地质学、物理学、化学和数学的基本原理有所了解，同时要求具备其他一些学科的基本知识。本书对已经具备这些知识的学生是适用的。对于刚刚跨入这一学科的学生来说，本书将能帮助他们更好地理解地下水的基本物理原理；对于在地下水科学领域进行专门化学习的学生来说，将能从书中获得最新的专业知识。书中很少应用微分方程，只是在不用微分方程则不能说明边界条件的物理意义时，才出现微分方程。为了在展示物理概念时避免数学上的繁演，把详细的推导和解算方法放在附录中。

在大学教学中，目前地下水科学还仅仅是地质学和水力学课程的一部分。由于天然水和地下水的污染问题日益严重，我们编入了以水化学为主要内容的第三章。在这一章中介绍了物理化学的主要原理，因为这些原理对地下水环境中的地球化学状态的描述是必要的。如果想对这一课题进行更深入的探讨，则需要超出本书的范围去进修热动力学。

我们试图对地下水科学提供一些渗透着各学科知识的广泛内容，但我们并没有花更多篇幅介绍某些具体的技术问题，如水井的设计和安装、水泵的运行、地下水取样方法、地下水化学分析程序以及渗透仪和压实试验等。这些实践原理和重要技术只在本书中作了介绍，其具体操作方法则需从有关手册和参考书中寻求答案。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 地下水、地球和人类	(1)
地下水和水文循环	(1)
地下水资源	(4)
地下水污染	(6)
地下水与土力学	(7)
地下水和地质过程	(7)
1.2 研究地下水的科学基础	(7)
1.3 地下水资源开发利用的技术基础	(9)
第2章 物理特性和原理	(10)
2.1 达西定律	(10)
2.2 水力水头和流体势能	(12)
流体势能的哈伯特分析	(12)
量纲和单位	(15)
地下水位计和地下水位计组	(16)
共轭水流	(17)
2.3 水力传导率和渗透能力	(19)
2.4 水力传导率的非均质性与各向异性	(22)
均质性与非均质性	(22)
各向同性与各向异性	(23)
三维中的达西定律	(25)
水力传导率椭圆	(26)
2.5 孔隙度与空隙比	(27)
2.6 非饱和水流与地下水位	(29)
含水量	(29)
地下水位	(29)
负压力水头和张力计	(29)
非饱和水力参数的特性曲线	(31)
饱和带、非饱和带和张力饱和带	(33)
悬滞的和向下凸出的地下水位	(34)
多相水流	(34)
2.7 含水层和滞水层	(35)
含水层、滞水层和隔水层	(35)

封闭含水层与非封闭含水层	(36)
潜势面	(36)
2.8 稳定流与非稳定流	(37)
2.9 压缩性与有效应力	(39)
水的压缩性	(39)
有效应力	(40)
孔隙介质的压缩性	(40)
含水层的压缩性	(42)
非饱和带中的有效应力	(43)
2.10 导水系数与贮水系数	(44)
单位贮水量	(44)
封闭含水层的导水系数与贮水系数	(45)
非封闭含水层的导水系数与单位产水量	(46)
非饱和带的贮水量	(47)
2.11 地下水流方程式	(47)
稳定饱和水流	(48)
非稳定饱和水流	(49)
非稳定非饱和水流	(50)
边界值问题	(51)
2.12 达西方法的局限性	(52)
达西连续体和代表性单元体积	(53)
单位面积流量、宏观流速和微观流速	(53)
达西定律的上限和下限	(55)
裂隙岩石中的水流	(55)
2.13 水动力弥散	(57)
第3章 化学特性和原理	(61)
3.1 地下水及其化学成分	(61)
水和电解质	(61)
有机成分	(64)
溶解气体	(65)
浓度单位	(65)
3.2 化学平衡	(66)
质量作用定律	(66)
活性系数	(67)
平衡与自由能	(68)
溶解气体	(71)
3.3 溶解物质的结合与分解	(72)

电中性条件	(72)
水的分解与活性	(73)
多元酸	(74)
离子络合	(75)
溶解物质的计算	(76)
3.4 浓度梯度效应	(77)
3.5 矿物溶解和可溶性	(79)
可溶性和平衡常数	(79)
离子力效应	(81)
碳酸盐系统	(81)
普通离子效应	(84)
不平衡与饱和指数	(84)
3.6 氧化和还原过程	(85)
氧化状态和氧化还原反应	(85)
氧的消耗和有机物质	(88)
氧化还原平衡条件	(89)
微生物因素	(91)
pE-pH曲线	(92)
3.7 离子交换和吸附作用	(95)
机理	(95)
阳离子交换能力	(96)
质量作用方程式	(97)
3.8 环境同位素	(100)
碳14 (^{14}C)	(101)
氚 (^3H)	(102)
氧18 (^{18}O) 和重氢 (^2H)	(103)
3.9 指标参数的野外测量	(104)
第4章 地下水地质学	(108)
4.1 岩性、地层和构造	(108)
4.2 河流沉积	(109)
4.3 风积	(111)
4.4 冰川沉积	(111)
4.5 沉积岩	(113)
砂岩	(113)
碳酸盐岩	(115)
煤	(117)
页岩	(117)

4.6	火成岩和变质岩·····	(118)
4.7	永久冻土层·····	(121)
第 5 章	流网·····	(124)
5.1	流网构图·····	(124)
	均质、各向同性系统·····	(124)
	非均质系统和正切定律·····	(126)
	各向异性系统和变换剖面·····	(128)
5.2	类比模拟流网·····	(131)
	电导纸模拟·····	(132)
	电阻网模拟·····	(132)
5.3	数值模拟流网·····	(133)
5.4	饱和-非饱和流网·····	(136)
5.5	渗透面和裘布衣水流·····	(137)
	渗透面、渗出点、自由表面·····	(137)
	自由表面水流的裘布衣-福尔海默 原理·····	(139)
第 6 章	地下水和水文循环·····	(141)
6.1	稳定的区域性地下水流·····	(141)
	补给区、排泄区、地下水分水线·····	(141)
	地形对区域性水流系统的影响·····	(142)
	地质对区域性水流系统的影响·····	(143)
	溢水井·····	(145)
	水流系统制图·····	(146)
6.2	稳定水量平衡·····	(149)
	区域性水流系统的定量解释·····	(149)
	作为水量平衡组成部分的地下水的补给与排泄·····	(150)
6.3	非稳定的区域性地下水流·····	(152)
6.4	渗入作用与地下水补给·····	(154)
	渗入理论·····	(155)
	野外定点测量·····	(158)
6.5	山坡水文学与河水的产生·····	(160)
	坡面流·····	(160)
	壤中流·····	(161)
	化学和同位素指示剂·····	(163)
6.6	基流消退和岸贮·····	(166)
6.7	地下水与湖泊的相互作用·····	(168)
6.8	地下水位的升降变化·····	(169)

蒸散发和浅层地下水消耗·····	(170)
在地下水补给期间挟带空气·····	(171)
大气压力效应·····	(172)
外部负荷·····	(173)
地下水位计中的时间滞后·····	(173)
第 7 章 天然地下水的化学演变·····	(175)
7.1 水化学序列和外观·····	(175)
大气降水的化学状态·····	(175)
土壤带中的二氧化碳·····	(175)
主要离子演变程序·····	(178)
电化学演变程序·····	(180)
7.2 图解法和水文化学相·····	(182)
7.3 碳酸盐区地下水·····	(186)
开系统的溶解作用·····	(186)
闭系统的条件·····	(189)
异元溶解·····	(190)
其他因素·····	(191)
化学分析的解释·····	(193)
7.4 结晶岩中的地下水·····	(197)
理论见解·····	(198)
实验室试验·····	(201)
野外数据的解释·····	(202)
7.5 复杂沉积系统中的地下水·····	(205)
相遇的次序·····	(205)
冰川沉积中水的组分·····	(208)
层状沉积岩中的地下水·····	(209)
7.6 ^{14}C 测年的地球化学解释·····	(212)
7.7 深层沉积盆地的薄膜效应·····	(214)
7.8 进程速率与分子扩散·····	(216)
第 8 章 地下水资源评价·····	(221)
8.1 地下水资源的开发利用·····	(221)
勘探、评价、开发·····	(221)
水井产水量、含水层产水量、盆地产水量·····	(222)
8.2 含水层勘探·····	(222)
地表地质方法·····	(222)
地下地质方法·····	(223)

地表地球物理方法	(223)
地下地球物理方法	(225)
水井和地下水位计的钻进与设备	(226)
8.3 理想含水层对抽水的响应	(228)
向井的辐向流	(228)
泰斯(Theis)解	(230)
渗滤含水层	(232)
非封闭含水层	(236)
多井系统、分阶段的抽水流量、水位的恢复、局部渗透	(238)
有边界的含水层	(240)
理想滞水层的响应	(242)
现实条件	(244)
8.4 参数的测量：实验室试验	(244)
水力传导率	(245)
孔隙度	(246)
压缩系数	(246)
非饱和特性曲线	(247)
8.5 参数的测量：地下水位计试验	(248)
8.6 参数的测量：抽水试验	(250)
双对数典型曲线拟合	(251)
半对数点绘	(254)
抽水试验的优点与缺点	(256)
8.7 饱和和水力传导率的估算	(256)
8.8 用数值模拟预测含水层产水量	(258)
有限差分法	(258)
有限单元法	(261)
模式校正与反转问题	(263)
8.9 用类比模拟预测含水层产水量	(264)
电流与地下水流的类比	(264)
电阻-电容网络	(265)
类比与数值模拟的比较	(267)
8.10 盆地产水量	(268)
一个地下水盆地的安全产水量与最优产水量	(268)
非稳定水量平衡与盆地产水量	(268)
8.11 人工补给与诱发渗滤	(270)
8.12 地面沉降	(272)
地面沉降的机理	(273)
地面沉降的野外测量	(275)

8.13	海水入侵	(276)
第 9 章	地下水污染	(282)
9.1	水质标准	(232)
9.2	迁移过程	(285)
	均质介质中不起反应的成分	(285)
	非均质介质中不起反应的成分	(291)
	反应成分的迁移	(294)
	在裂隙介质中的迁移	(300)
9.3	污染物质的水化学动态	(303)
	氮	(303)
	微量金属	(305)
	微量非金属	(309)
	有机物质	(312)
9.4	参数的测量	(313)
	流速的测定	(313)
	弥散系数	(316)
	化学分配	(318)
9.5	污染源	(319)
	固体废物的地面排放	(319)
	下水道污物的地面排放	(323)
	农业活动	(325)
	石油的漏泄与溢出	(326)
	放射性废物的处置	(328)
	液体废物的深井排放	(333)
	其他来源	(335)
第10章	地下水和土力学问题	(339)
10.1	孔隙压力、滑坡和边坡稳定性	(339)
	莫尔-库伦破裂原理	(339)
	边坡稳定分析的极限平衡法	(341)
	地下水条件对土质边坡稳定性的影响	(343)
	地下水条件对岩石边坡稳定性的影响	(345)
10.2	地下水与坝	(347)
	坝的类型与坝的失事	(348)
	混凝土坝下渗漏	(349)
	大坝基础的灌浆与排水	(350)
	通过土坝的稳定渗漏	(351)

通过土坝的非稳定渗漏·····	(353)
水库的水文地质效应·····	(354)
10.3 地下水流向坑道·····	(356)
作为稳定或过渡性排路的坑道·····	(357)
坑道的水文地质灾害·····	(358)
对流向坑道的地下水入流的预测分析·····	(359)
10.4 地下水流向基坑·····	(359)
基坑的排水和疏干·····	(360)
对流向基坑的地下水入流的预测分析·····	(361)
第11章 地下水和地质过程·····	(364)
11.1 地下水与构造地质·····	(364)
逆掩断层的哈伯特-鲁比理论·····	(364)
地震预测与控制·····	(365)
11.2 地下水与石油·····	(367)
石油的迁移和累积·····	(367)
石油的水动力挟带·····	(368)
区域性水流系统与石油的累积·····	(370)
石油勘探的推断·····	(370)
11.3 地下水与热系统·····	(371)
天然地下水流系统中的热系统·····	(371)
地热系统·····	(372)
深成岩体的定位·····	(374)
11.4 地下水与地貌·····	(375)
岩溶和洞穴·····	(375)
天然坡度的发展·····	(376)
河流过程·····	(377)
冰川过程·····	(378)
11.5 地下水和成矿作用·····	(379)
经济矿物沉积的形成·····	(379)
地球化学勘探的推断·····	(381)
附 录·····	(383)
I 流体力学要素·····	(383)
II 通过变形饱和介质的非稳定水流方程式·····	(386)
III 一个边界值问题解析解的实例·····	(389)
IV 离子活性系数的迪贝-赫克尔方程和凯兰德表·····	(390)
V 误差余函数·····	(392)

VI 均质、各向同性介质中稳定流有限差分方程的推导	(392)
VII 区域性地下水流的托思解析解	(394)
VIII 代表一个补给性地下水流系统的一维渗透边界值问题的数值解	(395)
IX 非均质各向异性, 水平、封闭含水层中非稳定水流有限差分方程的推导	(397)
X 饱和孔隙介质中溶质迁移的平流-弥散方程的推导	(399)
参考文献	(403)

第1章 绪 论

1.1 地下水、地球和人类

本书从以下几方面阐述地下水，即：控制地下水生成的地质环境；描述地下水流的物理定律；伴随水流的化学演变；人类在天然地下水体系中的影响以及天然地下水体系对人类的影响等。

“地下水”一词一般用来指：出现在已经充分饱和了的土层和地质层组中的地下水位以下的水体，我们将保留这个传统的定义。但我们在此却充分认识到，对于地下水的研究必须建立在对于地下水体系有更广泛理解的基础之上才行。我们在这里将与传统的侧重点相一致，即重点放在浅层、饱和的地下水流上。但也将围绕近地表的非饱和土壤水分体系（它在水文循环中扮演重要角色）和相当深的饱和体系（它在很多地质过程中有着重要影响）进行必要的研究。

我们认为对地下水的研究本来就是跨学科的。本书试图有意识地去把化学和物理学、地质学和水文学、基础科学和工程学综合到比过去更进一步的程度。地下水的研究，与地质学家、水文学家、土壤学家、农业技师、森林工作者、地理学家、生物学家、土力学工程师、采矿工程师、卫生工程师、石油贮藏分析技师以及其他很多有关方面密切相关。我们希望，我们这种处理方法是与这些广泛的跨学科需要相协调一致的。

如果这本书写在十年以前，它将会完全把地下水作为一种资源来讨论。因为时代的需要确定了那种必然性。也就是说，任何书的写法都将反映其所处时代的需要。那个时代强调通过打井来促进供水的发展和含水层产水量的计算。他们之所以要那样看待地下水，乃是出于对产水量的担心。当然，地下水的供水状况依然是重要的，所以将在本书中按照它们不同的服务对象被分别作出处理。但是地下水的意义不止资源一项，它是自然环境的一个重要方面。它导致环境问题，在很多情况下起着重要的溶解介质的作用。它是水文循环的一个组成部分，如果说流域资源研究和环境污染的区域性评价促进了综合分析方法的应用，那么，对地下水在循环中所起作用的了解就是完全必需的。在工程上，从始至终，地下水在土力学问题上起重要作用，如边坡稳定性分析和地面沉陷问题的研究等。此外，地下水也是了解多种地质过程的一把钥匙，例如地震的产生、石油的运移和积聚、一些沉积矿床、土壤类型和地貌的产生等。

本书的前5章奠定了学习地下水的物理、化学和地质学基础。后面6章把这些原理应用于地下水、地球和人类间相互作用的各个方面。下面这一节可以被看作是后面每一章的引论。

地下水和水文循环

水在海洋、大气和陆地之间无休止地运行称为“水文循环”。我们的兴趣集中在循环的陆地部分。这种循环，有时可以在一个单独的流域上完成。图1.1和1.2提供出某个流域水文

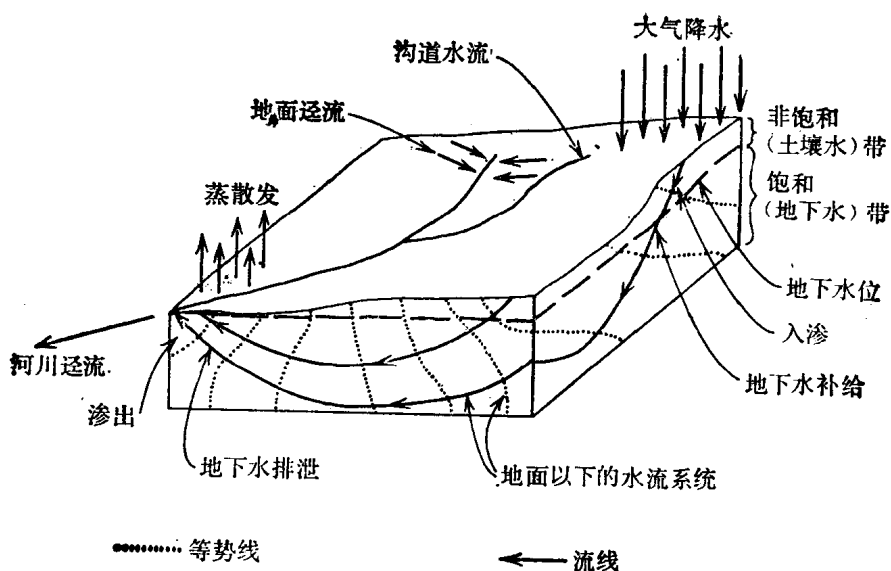


图1.1 水文循环的示意性说明

循环的两份示意图。它们在这里主要向读者介绍水文专业术语。图1.1在概念上比较清楚，着重其运动过程，并说明了水文循环的水流系统概念。图1.2中所用的框式符号与流程线代表水文模型的系统说明，它并不反映动力状态，但它在包含有运动速率的那些项目（插在六角形框式符号内）与仅含有贮集量的那些项目（括在矩形框式符号内）之间是有清楚区别的。

以雨或雪的形式到达地面的“降水”，形成进入水文循环的入流。出流表现为“河流”（或径流）和“蒸散发”（它是裸露水体蒸发、土壤表面蒸发、植物在土壤中生长时的散发等的总称）。雨水进入河流通过两种方式：一是在地表面，形成“坡面流”，进入支流小溪。二是紧跟“渗透”到土中之后，通过地下流通过路径，形成“壤中流”和“基流”。图1.1清楚地表示出，一个流域必须被设想为一个地表排泄区和那块地表面以下的土壤与土壤下面地质层组的综合体。地表以下的水文过程与地表以上的同样重要。事实上，人们还会同意它更重要些，因为它是地表以下地质材料的一种天然特性，它控制降水的渗透速率，而渗透速率则直接影响地表径流的时间和空间分布。在第6章，我们将比较详细地考察区域性地下水流性质，同时我们将调查研究渗透、地下水补给、地下水排泄、基流和河流形成之间的相互关系。在第7章，我们还将考察地下水的化学变化，因为它是与地下水水文循环结合在一起的。

在结束这节之前，有必要考察一下与水文循环其它组分有关的反映地下水在数量上重要性的数据，近年来，对“世界水均衡”的概念已倾注了相当大的注意力(Nace, 1971; Lvovitch, 1970; Sutcliffe, 1970)，这些数据的最新估算指出，在水圈中，地下水无处不在。从表1.1可知，如果我们不去考虑占地球总水量94%的高咸度的海水，那么地下水就占全世界淡水资源的约三分之二。如果考虑到淡水资源在可用性上的限制（即减掉冰盖和冰川），那么地下水就几乎占有了淡水资源的全部。甚至如果我们仅考虑最“活跃的”的地下水体

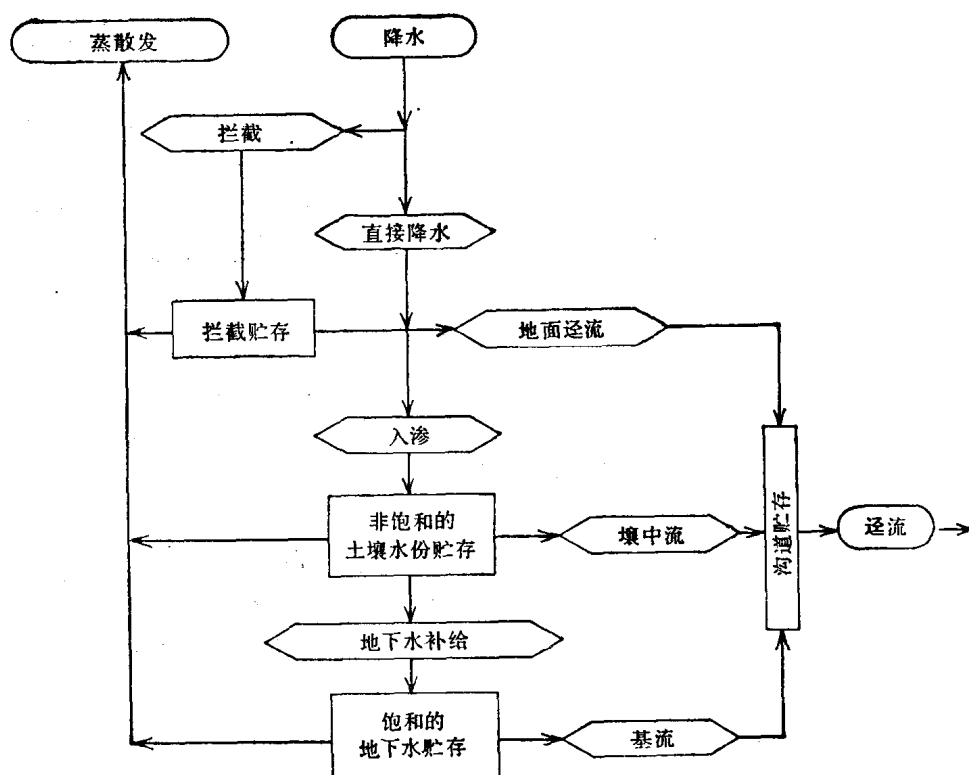


图1.2 水文循环的系统说明

表1.1 世界水平衡估算

项 目	表 面 积 ($\text{km}^2 \times 10^6$)	体 积 ($\text{km}^3 \times 10^6$)	体 积 百分比 (%)	等 效 深 度 (m) ¹⁾	滞 留 时 间
海洋	361	1370	94	2530	~4000年
湖泊和水库	1.55	0.13	<0.01	0.25	~10年
沼泽	<0.1	<0.01	<0.01	0.007	1—10年
河流、渠道	<0.1	<0.01	<0.01	0.003	~2星期
土壤水分	130	0.07	<0.01	0.13	2星期—1年
地下水	130	60	4	120	2星期—1万年
冰盖和冰川	17.8	30	2	60	10—1000年
大气圈水	504	0.01	<0.01	0.025	~10天
生物圈水	<0.1	<0.01	<0.01	0.001	~1星期

资料来源：纳斯 (Nace, 1971)。

1) 按大致贮量完全均布在地球整个表面上计算。

系，由勒沃维奇(Lvovitch, 1970)所估计的地下水总量也在 4×10^6 立方公里左右 (不按表 1.1 中所列 60×10^6 立方公里)。因此淡水的分割将为：地下水占95%，湖泊、沼泽、水库和河流、渠道等占3.5%，土壤水分占1.5%。

但是，这种体积上的优越性被平均滞留时间所降低了，河水有一个约2星期的周转时