

中国现代科学全书

CHINESE ENCYCLOPEADIC SERIES OF MODERN SCIENCES

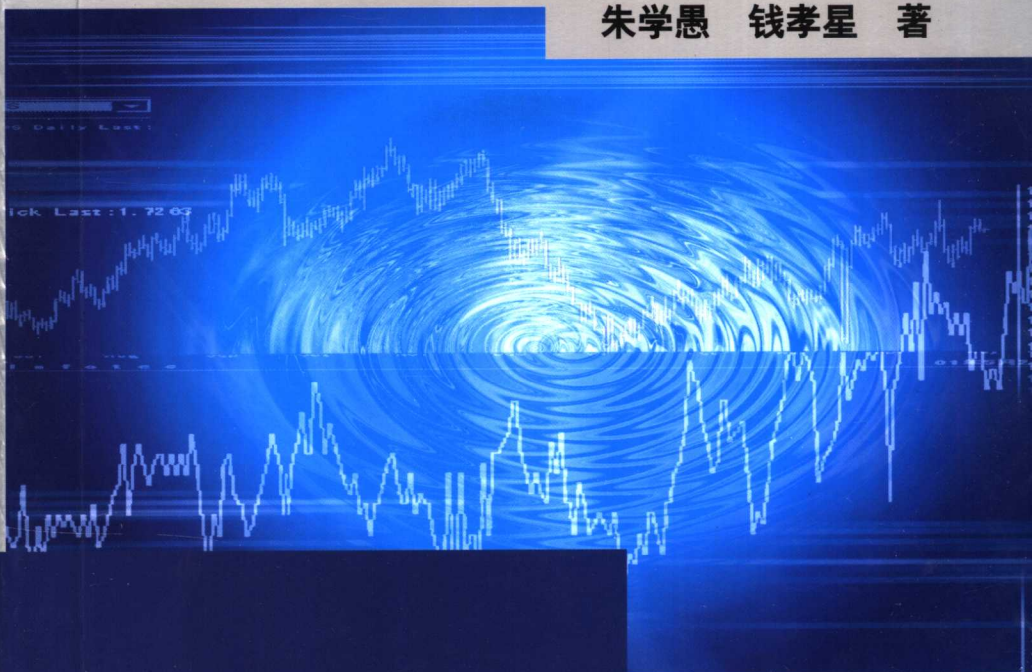
水文学

HYDROLOGY

地下水水文学

GROUNDWATER HYDROLOGY

朱学愚 钱孝星 著



中国环境科学出版社

中国现代科学全书·水文学

地下水水文学

朱学愚 钱孝星 著

中国环境科学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

地下水水文学/朱学愚, 钱孝星著. —北京: 中国环境科学出版社, 2005. 8

(中国现代科学全书·水文学)

ISBN 7-80209-211-6

I. 地… II. ①朱… ②钱… III. 地下水水文学
IV. P641. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 097952 号

地下水水文学

朱学愚 钱孝星 著

出版发行 中国环境科学出版社

(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)

网址: <http://www.cesp.cn>

电 话: 010-67113409

印 刷 唐山丰电印务有限公司印刷

经 销 各地新华书店

版 次 2005 年 7 月第一版

印 次 2005 年 8 月第一次印刷

印 数 1—2500

开 本 850 × 1168 1/32

印 张 16.75

字 数 434 千字

定 价 50.00 元

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编	胡绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	季羨林	王大珩	郑必坚	
主 编	姜士林	郭德宏	刘政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐诚	王洪峻	明立志

水文学编辑委员会

主 编	刘新仁	陈吉余		
编委委员	(按姓氏笔画为序)			
	王金奎	朱元生	朱学愚	朱慧芳
	刘新仁	林传真	陈吉余	陈家琦
	宋德敦	芮孝芳	杨针娘	钱孝星
	濮培民			

作者简介

朱学愚,男,浙江省临海市人,1936年1月20日生,现为南京大学地球科学系教授,博士研究生导师。长期从事地下水领域的教学和科研工作。在地下水动力学、地下水模型、地下水污染、地下水资源评价和管理、水文地质边界单元法等领域作出了贡献。独立培养了博士生10名,硕士生15名,作为第一负责人获得国家教委(教育部)科技进步奖二等奖3项,三等奖1项,及其它省、部级科技奖励。享受政府特殊津贴。代表著作有:《地下水动力学》(地质出版社,1979),《地下水资源评价》(南京大学出版社,1987),《地下水运移模型》(中国建筑工业出版社,1990)。在国内外发表学术论文100多篇。通讯地址:南京市汉口路22号南京大学地球科学系(210093)。电话:025-83593830, e-mail: gxyz@nju.edu.cn.

钱孝星,女,浙江省宁波市人,1934年11月20日生。1993年起任河海大学土木工程学院教授。长期从事“水文地质学”和“地下水动力学”的教学和科研工作,培养过十多名研究生。1995年获水利部优秀教师称号。曾3次获得省、部级科技进步二等奖,2次三等奖享受政府特殊津贴。主编有大学教材《水文地质计算》(水利电力出版社,1993年)及其他学术著作3本,发表学术论文数十篇。

前 言

水是生命的源泉。无论是人民生活、工业生产和农业生产都离不开水。我国是水资源不丰富的国家,人均水资源占有量只有全世界平均数的四分之一左右,因此水成为我国可持续发展的一个制约因素。

一提到水,人们自然地想到河水、湖水、海水。实际上地下水的重要性一点也不亚于地面水。我国由于季风气候,北方的雨季在7、8两月,而夏季比较干旱,往往河流断流、湖泊干涸。如不建设工程,地面水难以用作供水。而地下水具有较大的调蓄能力,没有这个问题。和地面水相比,地下水还不易受污染。所以在我国北方,广泛地利用地下水作为供水水源。因此,地下水水文学在水文科学当中具有相当的重要性。

作者在著书时有如下考虑:

(1)力求全面系统地介绍地下水水文学的学科内容。地下水水文学具有相当丰富的内容。其中每一个专题,如:地下水模型,地下水污染,地下水资源等都可以而且已经出版了一本或几本专著。本书力求对地下水水文学做全面的、简要的、系统的论述,包括地下水水文学的各项主要的内容。而篇幅又不宜过大。使读者能了解地下水水文学的全貌。

(2)力求反映国内外的新的研究成果。本书除介绍基本概念以外,对于20世纪80年代和90年代地下水研究中的热点问题,如各种地下水的数值模型,特别是模拟溶质运移的特征有限元法;地下水资源,尤其是地下水资源管理模型;地下水中无机和有机污

染物的特性,地下水污染的现场修复技术;地下水中的同位素;开采地下水引起的环境问题等都作了较多的介绍。对于地下水水文学的历史发展,我国古代对地下水的认识和发展,以及 21 世纪的学科展望,也作了专门的论述。

(3)本书的读者对象是具有大学以上程度的科技人员和工程师。故写法上和大学教科书有所差别。在介绍一些基本原理时,作一定的解释,但也不详细介绍来龙去脉,以便节省篇幅。

(4)本书没有涉及随机地下水水文学。

本书的分工如下:第一章,第六、七、八、九、十、十一章由南京大学朱学愚教授撰写。第二、三、四、五章由河海大学钱孝星教授撰写。全书由钱孝星先统稿一次,最后由朱学愚统一全书并定稿。全部图件由周念清博士用计算机制作。图版由刘建立博士制作。钱家忠博士、吴剑峰博士、郭飞博士和李根义硕士在本书成稿过程中做了大量工作,进行了全书的计算机排版。作者对他们的辛勤劳动表示感谢。

作 者

2000 年 9 月 1 日

内容简介

本书是一本系统论述地下水水文学的专著。全面介绍地下水水文学的研究内容、理论体系和工作方法。全书供分为十一章。其中前六章主要介绍地下水的基本概念,包括含水层、地下水的基本类型、地下水的化学成分和同位素、地下水运动、地下水中的溶质运移等。第七章到第十章介绍近二三十年来地下水水文学的热点问题,如地下水模拟、地下水资源、地下水污染以及与地下水有关的环境和生态问题。第十一章介绍地下水的历史发展和今后展望。本书可作为从事水文、水资源、水文地质、地质工程、环境科学的教学、科研、工程等领域的专业人员参考。也可作为研究生的教学用书。

目 录

第一章 绪 言	(1)
第一节 地下水的国民经济意义	(1)
第二节 地下水水文学概述	(3)
第二章 地下水的循环和储存	(6)
第一节 水文循环中的地下水	(6)
第二节 地下水的储存形式	(9)
第三节 含水层	(23)
第三章 地下水的基本类型及特征	(25)
第一节 包气带和饱水带	(25)
第二节 地下水分类	(26)
第三节 包气带水、潜水和承压水	(27)
第四节 孔隙水、裂隙水和岩溶水	(41)
第五节 滨海及海岛中的地下水	(60)
第六节 区域地下水流的概念	(63)
第七节 泉	(68)
第四章 地下水的补给、排泄和动态	(70)
第一节 地下水的补给	(70)
第二节 地下水的排泄	(81)

第三节	地下水的动态	(87)
第五章	地下水中的化学成分和同位素	(97)
第一节	地下水中的主要化学成分	(97)
第二节	地下水的化学成分的形成作用	(101)
第三节	地下水化学分析资料的整理和分类图示	(105)
第四节	地下水中的环境同位素	(111)
第六章	地下水运动和水中的溶质运移	(119)
第一节	地下水运动和溶质运移的基本规律	(119)
第二节	地下水运动和溶质运移的数学模型	(130)
第三节	地下水的稳定井流	(151)
第四节	地下水的非稳定井流	(160)
第五节	溶质运移问题的简单解析解	(175)
第七章	地下水模拟	(184)
第一节	地下水物理模拟简介	(184)
第二节	地下水数学模拟概述	(205)
第三节	有限差分法	(206)
第四节	有限单元法	(228)
第五节	混合的欧拉-拉格朗日方法	(263)
第六节	边界单元法	(289)
第七节	有限分析法	(311)
第八章	地下水资源	(324)
第一节	地下水资源的概念	(324)
第二节	地下水资源评价	(330)
第三节	地下水资源的开发利用	(340)

第四节 地下水资源的管理	(352)
第九章 地下水污染	(380)
第一节 污染源和污染途径	(380)
第二节 污染物运移的阻滞及衰减作用	(384)
第三节 地下水中的无机污染物	(396)
第四节 地下水中的有机污染物	(408)
第五节 多相流污染	(426)
第六节 地下水污染的修复	(439)
第十章 开发地下水引起的环境和生态问题	(454)
第一节 地下水资源的枯竭	(454)
第二节 地面沉降的形成	(456)
第三节 地裂缝和地面塌陷	(472)
第四节 海水入侵	(478)
第五节 生态变化	(487)
第十一章 地下水水文学的历史发展和 21 世纪的展望	(489)
第一节 中国古代关于地下水的理论和实践	(489)
第二节 19 世纪地下水水文学的理论准备	(492)
第三节 20 世纪地下水水文学的创立和发展	(493)
第四节 21 世纪地下水水文学的展望	(499)
附图	(501)
主要参考文献	(509)

第一章 绪 言

第一节 地下水的国民经济意义

水是人们赖以生存和从事生产不可缺少的宝贵资源。地下水是水的一种重要类型,顾名思义,地下水是存在于地底下的水。地球上淡水的总储量为 $35029.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中地下水为 $10530 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 约占淡水总量的 30%。而河川水的储量为 $2.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 仅占地球上淡水储量的 0.006%。但河川水的更新周期短, 仅 16 天, 一年中可以多次重复利用, 可利用的水资源反而多于地下水。而地下水的更新期高达 1400 年, 重复利用较困难。由于地下水的上述特点, 使得它的调节性能好。而且由于它深埋于地下, 不易受污染, 因而水质较好。在河流、湖泊被大量污染的今天, 地下水成为重要的供水水源, 尤其是生活供水的水源。美国地下水在生活供水中所占的比例已超过 50%, 而在欧洲则已超过 75%。我国由于季风气候, 全年的降水一半以上集中在 6~8 月。尤其在北方, 春夏季节往往干旱无雨, 河流断流, 而生活供水是一天都不能中断的, 因此许多城镇的供水, 甚至部分灌溉用水也都依靠地下水。在我国的西北地区, 属于干旱区, 降水量很少, 地表水也很少。地下水成为主要的、有时成为唯一的可用水源。因此, 地下水资源已成为我国北方尤其是西北地区可持续发展的一项重要制约因素。

地下水由于储量大, 更新期长, 地下水的枯竭是逐渐的过程。不像河流断流和水库、湖泊干涸那样一眼就能看出。如果一旦地下水发生枯竭, 则复原也要相当多年, 不像河流断流第二年雨季就能恢复。而地下水的污染修复更要困难。

一旦地下水过量开采,不仅会造成枯竭,也会引发一些环境问题。如:(1)引发地面沉降。我国的天津、上海的地面沉降都已超过2m,河北沧州、山西太原、陕西西安、江苏苏州、无锡、常州都已超过1m。地面沉降可能对水利工程、交通工程、建筑工程和给排水工程等造成很大的经济损失。(2)引起海水入侵。在大连市和烟台市的沿海市县,有些地方由于过量开采滨海含水层中的地下水,造成海水逐年向内陆推进。原来地下淡水区变成了咸水,造成居民生活供水困难。咸水灌溉造成农作物枯死。(3)造成地面塌陷和地裂缝。在一些隐伏岩溶区,由于过量开采地下水引起地面塌陷。在南方的一些岩溶矿山周围,由于矿山排水造成周围的地面塌陷。在一些城市地区,如杭州、徐州、泰安等,也有由于开采地下水而造成的地面塌陷,使得建筑物破坏。而在一些第四系地层地区,产生了地裂缝。以西安市的地裂缝最为典型,共发现10条,长度达数公里,最长的超过10公里。造成裂缝通过处建筑物的大量破坏。城市地区的地面塌陷和地裂缝造成了很大的经济损失。

因此,合理地开发和保护地下水资源,对于地区的可持续发展具有重要的意义。

地下水水文学就是一门研究地下水的学科。它在阐明基本原理的基础上,研究如何合理开发和保护地下水,并防止由于开发地下水引起的环境恶化和灾害。本书将对地下水水文学进行系统的、简要的介绍。

第二节 地下水水文学概述

一、地下水水文学的研究对象和研究方法

水文科学是研究地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律并运用这些规律为人类服务的科学。简单地说,水文学是研究地球上水体状况的科学。水体是以一定形态存在于自然界中的水的总称。如大气中的水汽;地球表面的江、河、湖、海、沼泽、冰川等中的水;地面以下的地下水等。

地下水水文学是研究地下水的形成、运动、循环、水情和地下水资源的学科。它的研究对象是地下水。所谓地下水是指存在于地面以下岩土的空隙、裂隙和洞穴中的水。地下水也参加地球上的水循环,是水循环的一个环节。

地下水水文学的研究方法和途径主要有两方面:(1)数学物理途径。根据地下水的水情(如水位、水量、流速、水中污染物的浓度等)和影响因素之间的物理联系,利用质量守恒、动量守恒、水量平衡等原理,建立它们之间的定量关系,这种关系一般用微分方程或积分方程表示。然后在一定的初始条件和边界条件下求解这些方程,即可得到我们所要求解决的地下水问题的解答。(2)概率统计的途径。根据大量的实测资料,用概率统计原理研究地下水各种水文要素的统计规律,用以进行地下水的计算和预测。

主要应用的技术手段有:(1)调查、钻探、地球物理勘探和遥感技术。主要用于查明含水层的空间分布、埋藏条件和含水层的性质等等。(2)各种观测和试验技术。包括井、泉的水位、流量、水温和化学成分的长期观测,各种野外试验,如抽水试验、压水试验、示踪试验、弥散试验等。主要用来求得含水层和地下水的各种参数。(3)各种地下水模拟技术。包括数学模拟和物理模拟。20 世

纪 70 年代以前,物理模拟用得较多。包括电模拟、沙槽模拟、黏性流模拟等等。20 世纪 70 年代以后,随着计算机技术的发展,大部分物理模拟被数学模拟所代替。现在除砂槽模拟和土柱模拟仍然常用以外,其他类型的物理模拟已较少使用。地下水模拟的目的在于求得各种复杂地下水问题的解答。模拟方法的广泛应用,是地下水水文学的一个重要进展。(4)同位素技术。利用稳定同位素和放射性同位素,可研究地下水的起源、年龄和运动等。

二、地下水水文学和相邻学科的关系

和地下水水文学最接近的学科是水文地质学。地下水水文学和水文地质学的研究对象都是地下水。两者的研究对象相同,仅仅是研究的侧重点稍有差异。地下水水文学把地下水当作水文循环的一个环节,侧重于运用水文循环和水量平衡的原理来研究地下水。水文地质学把地下水当作自然界的一个地质体,侧重于用地质学的方法来研究地下水,即侧重于自然历史和地质环境的影响。两者之间没有截然的区别,只是研究的侧重点稍有不同。有些内容是互相交叉重叠的。

因为地下水是存在于地下的岩土中,地下水的埋藏和分布与各种地质体关系密切,寻找地下水时必须研究当地的地质环境和地质历史,并且应用一些地质勘察的工作方法。因此地下水水文学和地质学及其分支学科如构造地质学、地层学、岩石学、第四纪地质学、同位素地质学等的关系密切。

地下水水文学的一个重要的研究内容是进行地下水资源评价和水位、水质的预测。这就要用到各种的数学方法,如数学物理方法、数理统计方法等。因此和数学物理方程、概率论及数理统计和偏微分方程的数值解等学科关系密切。在计算中广泛应用了计算机,因此和计算机科学的关系也非常密切。

近年来,地下水污染的评价和预测已成为地下水水文学的主

要内容,使得化学学科和地下水水文学的关系日益密切。地下水中污染物的化学性质,化学污染物在地下水环境中的状态和变化,要求地下水水文学家了解无机化学、有机化学、分析化学、胶体化学方面的知识。近年来,微生物降解是治理地下水有机污染尤其是石油污染的有效方法。有些微生物学家从事地下水有机污染的治理和修复,密切了地下水水文学和微生物学的联系。

物理学的原理渗透到地下水水文学的许多领域。如水文学中的一个基本原理——水量平衡,就是质量守恒原理在水科学领域的具体化,地下水运动的基本微分方程就是据此导出的。地下水中溶质运移的基本微分方程——对流弥散方程,也是根据质量守恒定理导出的。因此物理学不仅与地下水水文学关系密切,而且它是地下水水文学的基础学科之一。

第二章 地下水的循环和储存

第一节 水文循环中的地下水

地球上的水可以分为三部分,即大气水,地表水和地下水。它们各自分布在大气圈和水圈中。这些水在太阳辐射能量的作用下,处于连续不断地运动中,并且不断地循环,交替着。地球上绝大部分水储存在海洋中,海水在太阳辐射热的作用下,蒸发成水汽进入大气圈。海洋上空大气中的水汽被风吹向大陆,冷凝成云,通过降水降落在大陆表面。降落的水,一部分被蒸发重新返回大气中,一部分沿地形坡度从高处向低处流动,汇入江河,称为地表径流。另一部分渗入地下,变成地下水。地下水也处于不停的运动中,由水头高处向水头低处运动,称为地下径流。地表径流和地下

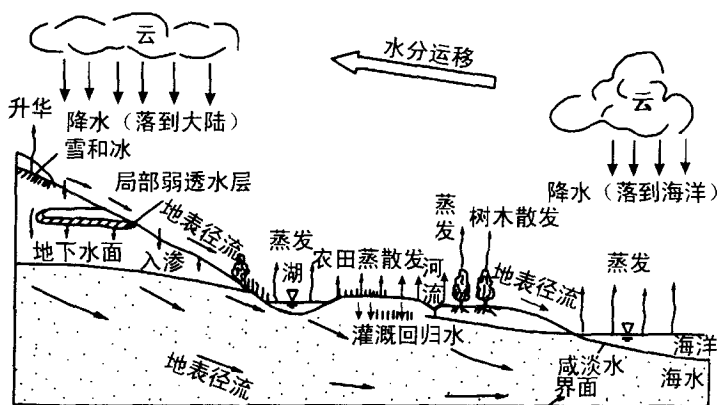


图 2-1 地球上水循环示意图(根据 J. Bear)