

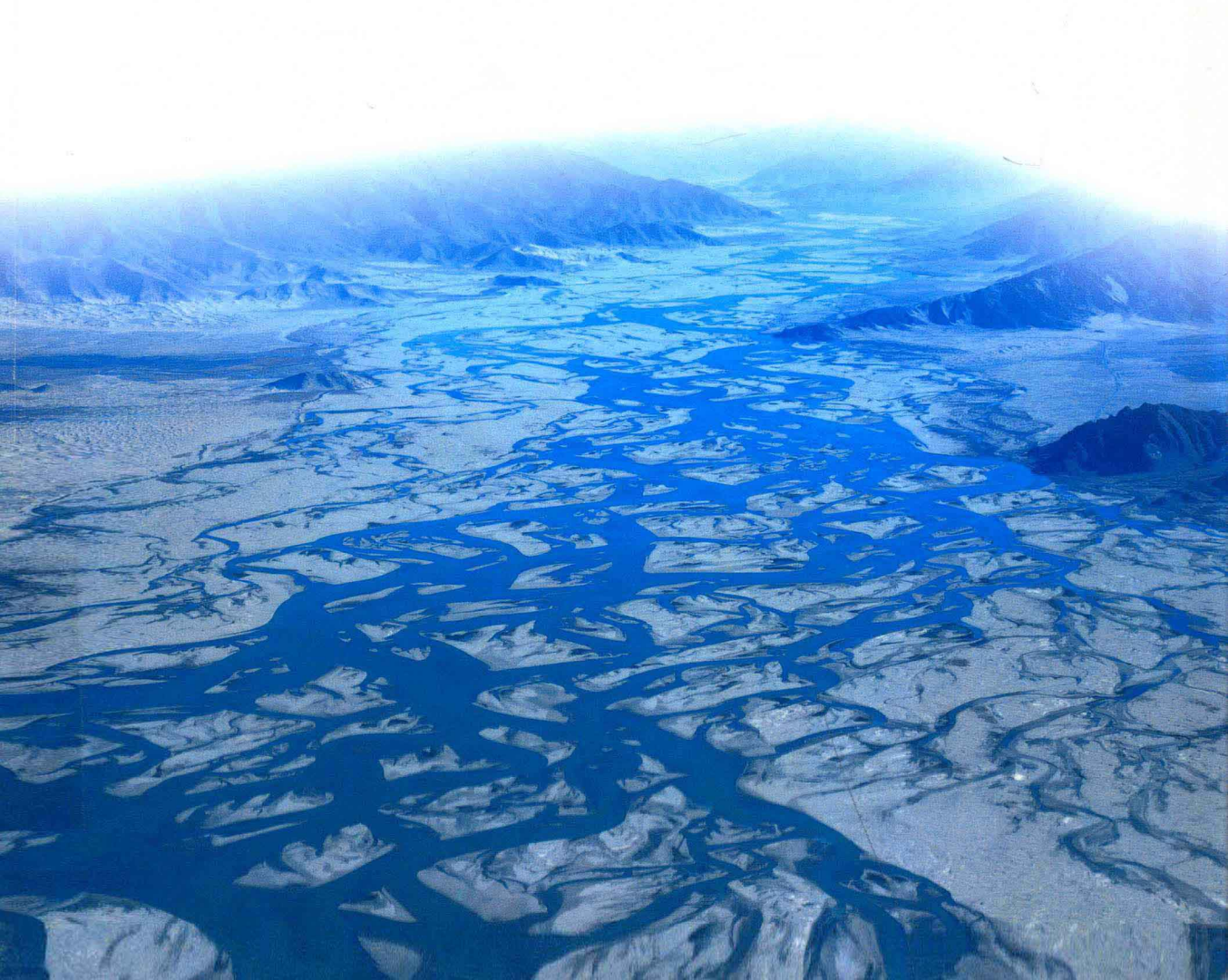
高等教育“十二五”规划教材

水文地质学

Shuiwen Dizhixue

高宗军 郭健斌 魏久传 王 敏 主编

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

水文地质学

主 编	高宗军	郭健斌	魏久传	王 敏
副主编	尹会永	邓清海	冯建国	任加国

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

经过多年的实践,水文地质学科专业知识的教学已形成了较为完整的体系,通常是在两年左右时间内先后完成“水文地质学基础”、“水文地球化学”、“地下水动力学”、“专门水文地质学”的教学,再讨论专门水文地质问题。本教材则将上述内容简明扼要、系统全面地融汇在一起,并增加了地下水数值模拟、地下水资源开发与保护以及矿井水害防治的部分内容,适于具有地质学基础的非水文地质专业学生使用。建议授课学时 40~50 学时。

图书在版编目(CIP)数据

水文地质学/高宗军等主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2011.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0884 - 2

I. ①水… II. ①高… III. ①水文地质学—高等学校—教材 IV. ①P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 180702 号

书 名 水文地质学
主 编 高宗军 郭健斌 魏久传 王 敏
责任编辑 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 16.25 字数 416 千字
版次印次 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

为了让非水文地质专业的学生在较少的课时内,通过一门课程就能全面了解水文地质学的内容,我们于2005年编撰了《综合水文地质学》(讲义)供学生使用。经过1年的试用并增加、删减部分内容后,于2006年以《水文地质学》书名印刷成讲义,继续供学生使用。试用2年,把内容再进行补充、修改、完善,如增加了地下水系统、地下水环境评价方法、地下水保护等内容,并征得李白英老师的同意,将水体(承压水)上开采(矿床)的防治水理论与实践的内容进行了详尽的介绍,于2008年在山东农业大学电子音像出版社出版了《水文地质学》。经过近2年的使用,教学效果总体较好,但仍然存在一些问题,如缺乏目前普遍开展的地下水数值模拟的内容等,需要进一步补充和完善,是再版本书的初衷。

本书的再版得到了山东科技大学地质科学与工程学院院长魏久传教授以及水文与环境系老师们的支持和协助,是集体工作的结晶。本书编写的具体分工是:绪论、第一章、第二章、第三章、第七章、第十章、结语由高宗军编写,第四章、第五章、第六章和第八章前四节由郭建斌编写,第九章由王敏编写,第八章的第五节由魏久传编写。王敏参与了第五章和第十章的编写;尹会永参与了第五章、第八章的补充修订;邓清海参与了第六章、第七章、第十章的补充修订;冯建国参与了第二章、第四章的补充修订;任加国参加了第三章的补充修订。最后统稿由高宗军完成。

感谢中国矿业大学出版社的同仁,感谢他们为出版此书所付出的心血。

本书编写过程中,引用了前人的很多优秀内容,谨此深表感谢!

编者水平所限,谬误在所难免,恳请读者不吝赐教。

编 者

2011年8月

目 录

绪 论	1
第一章 水循环与地下水赋存	6
第一节 地球上的水及其循环	6
第二节 地下水赋存	13
第二章 地下水的基本类型及其特征	21
第一节 包气带与饱水带	21
第二节 含水层、隔水层与弱透水层	22
第三节 地下水类型的划分	23
第四节 地下水的补给、径流与排泄	24
第五节 泉及其意义	25
第六节 不同埋藏条件下的地下水	26
第七节 不同含水介质中的地下水	32
第三章 地下水的物理性质及化学成分	44
第一节 地下水的物理性质	44
第二节 地下水的化学成分	46
第三节 地下水化学成分的形成作用	53
第四节 矿山地下水的形成与化学特征	56
第五节 地下水化学成分和水化学类型的划分	64
第六节 地下水水质评价的基本方法	68
第四章 地下水系统与地下水动态	78
第一节 地下水系统概述	78
第二节 地下水动态与均衡	84
第五章 地下水的运动	90
第一节 渗流理论基础	90
第二节 地下水向完整井的稳定运动	103

第三节	地下水向完整井的非稳定运动	108
第四节	干扰井群	113
第五节	地下水向边界附近井的运动	114
第六章	水文地质调查	118
第一节	概述	118
第二节	水文地质测绘	121
第三节	水文地质钻探	122
第四节	水文地质物探	126
第五节	水文地质试验	126
第六节	地下水动态长期观测	137
第七节	水文地质资料整理	139
第七章	供水水文地质与地下水资源评价	143
第一节	供水水文地质勘察的目的、任务及工作阶段	143
第二节	不同类型供水对水文地质勘察工作的要求	145
第三节	供水水文地质勘察方法简述	146
第四节	地下水资源量的计算与评价	152
第八章	矿床水文地质与 Water 防治理论	166
第一节	影响矿床(矿井)充水的因素	166
第二节	矿床水文地质分类	174
第三节	矿坑涌水量预测	177
第四节	矿井水的防治	187
第五节	水体上、下开采	199
第九章	数值模拟方法概述	219
第一节	概述	219
第二节	有限差分法	221
第三节	有限单元法	226
第四节	反求参数的数值方法	232
第十章	地下水资源开发与保护	238
第一节	地下水开发及其所伴生的环境地质问题	238
第二节	地下水利用及其所伴生的环境地质问题	241
第三节	地下水污染	242
第四节	地下水的保护	244
参 考 文 献		251

绪 论

一、水文地质学及其研究内容

地下水是赋存在地下岩石(土)空隙中的水,包括气相、液相和固相三种状态以及介于其间的各种类型的水。地下水是地球上水的重要组成部分,参与地球的水循环,是陆地上水的主要存在形式(图 0-1)。

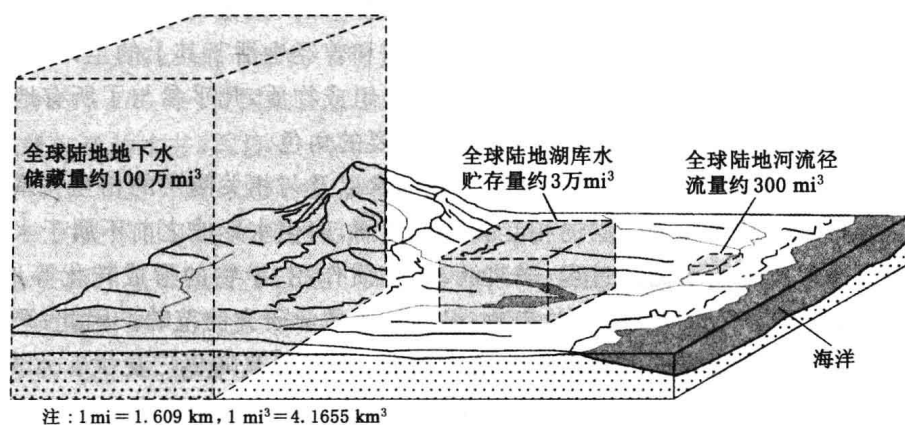


图 0-1 全球陆地水量分布示意图(据 USGS 网站)

水文地质学是研究地下水的科学,它研究岩石圈、水圈、大气圈、生物圈以及人类活动相互作用下地下水的形成与演化,即地下水的水量(水位)、水温和水质等要素的时空变化及其影响因素。

水文地质学是地质学的一个分支。也有人把研究地下水的科学称之为地下水文学,作为水文学的一个分支。在人们看来,无论是叫做水文地质学还是叫做地下水文学,其研究的对象、内容是相同的,只是由于其称谓不同,侧重点也有差异而已,但作者却有自己的理解。

水文学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等规律和运用这些规律为人类服务的知识体系。水文学的研究领域十分宽广,从大气中的水到海洋中的水,从陆地表面的水到地下水,都是水文学的研究对象,包括水圈与大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系,不同条件下各地区和全球水文循环及其变化,等等。水文学不仅研究自然界水量,而且研究其水质,探讨水体化学和物理性质以及它们对环境的反应;不仅研究现代水,而且探求全球水的形成演化历史,预测其未来的发展变化趋势,即研究自然界水体的运动状态、循环变化及其随时空的分布规律。近年来,环境变化下水循环的研究以及水资源开发利用和人类活动对自然环境的影响即人类的水行为对自然界水环境的影响的研究成为焦点。

水文学具有完整的科学体系(图 0-2)。按照研究水体所处空间位置的不同,通常把研

究大气圈、水圈、岩石圈中水体为研究对象的水文学科分别称为水文气象学、地表水文学和地下水文学。依照习惯,没有特别说明时水文学指的是地表水文学。地表水文学可以分为海洋水文学和陆地水文学。海洋水文学以海洋中的水为研究对象,陆地水文学以陆地上的水为研究对象,分支都很多。

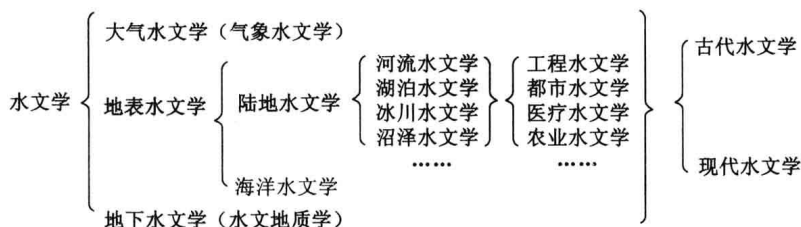


图 0-2 水文学科分支示意图

地质学是研究地球的科学。它研究地球(目前主要是研究地球的壳层)的物质成分、内部构造、表面特征、地球发展历史中的各种地质作用和曾经生活于其上的生命的形式及其演变和影响因素。地下水是构成水圈和岩石圈的重要组成部分,几乎参与了所有地质过程,在地质作用及地质演化中起着重要的作用,扮演着重要的角色。

由上述可知,水文学的研究对象是地球水圈的水以及与相关圈层的相互关系,地质学的研究对象是岩石圈以及与相关圈层的相互关系。然而,内生水形成之前不属于水圈范畴,不参与或未参与通常所说的水循环过程;岩浆活动、变质作用、矿物的形成转化等地质作用所涉及的水的内容,不属于水文学研究的范畴,但却是地质学研究的范畴。因此,严格来说,水文地质学与地下水文学研究的内容存在些微小差异,研究的范畴更广更大。水文地质学不仅研究参与地球水循环的地下水,而且研究参与一切地质作用的地下水。

更进一步说,地下水的形成(补给)、运动(径流)、变化(水质与水温的变化)、消亡(排泄)确实是一种水文过程,但是它区别于地表水文与气象(大气)水文,更像一个地质过程;地下水的作用本身就是一种地质作用,而其他地质作用又反过来对地下水产生作用,因而把研究地下水的学问称之为水文地质学,较之地下水文学更为贴切,故名水文地质学。

二、地下水的功能属性

自然界中水的作用是无与伦比和无可替代的。对陆地生态与环境来说,地下水的作用至关重要,不可或缺,地下水的功能属性很多,归纳起来主要表现在五个方面:资源、生态因子、环境(灾害)因子、地质营力、信息载体。

地下水的资源属性。地下水是一种不可或缺的但又是十分有限的资源,已经被人们普遍接受和认识,而且越来越得到人们的重视;陆地上的绿色需要地下水的滋养,大部分人类的生存与生活需要地下水,特别是地下淡水的开采和利用,然而陆地上的地下水特别是地下淡水确实是十分有限的,因而地下水是十分珍贵的资源。

地下水是生态因子。自然界的水不仅有限,而且容易受到伤害,从而进一步伤害环境和人类的生存与发展,地下水也是一样。水参与一切生物的作用,是生命的源泉,因而地下水是自然界的重要生态因子。

地下水是环境(灾害)因子。洪水与干旱都能给人类带来灾难,但又是环境优化的最主要因素;自然界中的水尤其是地下水,还不断参与其他灾害的形成与发展,比如滑坡、泥石流

等,因而地下水是重要的环境(灾害)因子。

地下水是一种重要的地质营力。水是除了地球内部能量释放形成的内力地质作用以外的最大的地质营力,它把地球表面高处的物质带向低处,总是试图使地球表面变得圆滑,它的侵蚀搬运作用是巨大的;水参与所有的地球表面的地质作用;在岩浆排向地表的过程中,有水分时会使火山强烈喷发;岩石圈内一切地质作用和成矿作用都离不开地下水的参与。因而地下水是一种重要的地质营力。

地下水是地球深部的信息载体。由于水的流动性和强烈的溶解能力以及巨大的热容性等,使其成为地球内部情况的信息载体,因而水是不可多得的地球深部的信息载体。人们可以利用这些信息,了解地球深部的地质作用、矿产信息以及可能的内生灾害信息,如地震、火山活动等。

三、水文地质学的发展阶段

水文地质学的发展通常划分为三个阶段:1856 年达西定律提出以前的萌芽时期,1856 年至 20 世纪中叶的奠基时期,20 世纪中叶至今的发展时期。

萌芽时期——人们对地下水的了解要比对地表水、泉水晚些,但是仍然可以追溯到几千年以前。距今约 5 700 年,我国的先民就有了建井取用地下水的技术。浙江余姚河姆渡井是我国发现最古老的水井,深度 1.35 m,有 200 多根圆木支撑保护,结构精巧。公元前 1 世纪,出现了利用矿水进行医疗的记载。李时珍在《本草纲目》中按成分进行了泉的分类。国外利用地下水的技术可以追溯到公元前 7 世纪,亚美尼亚修建了坎儿井。公元前约 200 年的我国汉代,在四川坚硬基岩中开凿了深逾百米的自流井开采卤水。

总之,在萌芽时期,人们凿井取水,只是一门应用技术,对地下水的来源等问题,尽管有所探索,更多的是猜测、臆断,所谓“井水不犯河水”的论调,就是对地下水认识上的无知所产生的错误判断。到这个时期的后期,人们才开始研究、探索地下水的来源问题,但是没有解决如何确定地下水量等各种水文地质问题。

奠基时期——1856 年,法国水力工程师达西(H. Darcy, 1803—1858)为设计第戎(Dijon)的供水系统,进行了水透过砂的室内试验,得出水在砂中的渗透速度与水力梯度的一次方成正比的达西定律,提供了地下水定量计算的依据,奠定了水文地质学的基础。1863 年,法国人裘布依(A. Dupuit, 1804—1866)提出了地下水稳定井流公式。1886 年,奥地利的福希海默(P. Forchheimer, 1852—1933)绘制了地下水流网。1935 年,美国人泰斯(C. V. Theis)利用地下水流动与热传导的相似性,得出了地下水非稳定井流方程——泰斯公式。

与此同时,人们对地下水的起源也提出了一些新的看法。1902 年,奥地利的修斯(E. Suess, 1831—1914)提出初生水学说,认为地下水来源于岩浆冷凝时析出的水。大致与此同时,美国的兰(A. C. Lane)、戈登(W. C. Gordon),俄国的安德鲁索夫分别提出了埋藏水(沉积水)的存在。这些水是与沉积物堆积同时存在于岩石孔隙之中的,黏性土固结压密时也可能将水释入周围含水层中。

在地下水水质研究探索方面,我国早期的温泉、矿泉利用,就是很好的例证。欧洲的矿泉利用也起步较早。至 19 世纪,油田地下水的研究积累了大量水化学资料。1930 年,前苏联的伊利茵提出了苏联潜水化学分带规律。随后,前苏联学者伊格纳托维奇提出了自流盆地的水化学分带。20 世纪中叶,前苏联学者奥弗琴尼科夫建立了水文地质学的一个新分支——水文地球化学。

1912年,德国人凯尔哈克进行了地下水和泉的分类,总结了地下水的埋藏条件和排泄条件。迈因策尔(O. E. Meinzer)在1923年提出了地下水资源的概念。

由此可见,大致20世纪中叶,有关地下水赋存、运动、补给、排泄、起源、水化学以及水量评价等方面,已有了一套比较完整的理论与研究方法,水文地质学已经确立为一门成熟的学科了。

发展时期——二次世界大战后,随着城市化、工业化、农业现代化的逐步实现,人们对地下水的需求和开采量迅速增加,严重影响着地下水的形成与变化、甚至整个水循环过程。人们在盲目或无节制地开采地下水的过程中,陆续出现地下水水位深降、地下水资源枯竭、地面沉降、海水与咸水入侵淡水含水层、地下水污染等问题。由此使人们认识到地下水是一种重要的生态环境因子。

在这一阶段中,人们从对地下水含水层、隔水层的观念中,发展出了透水能力比较微弱的弱透水层的概念,进而出现了越流的认识,产生了地下水含水系统的概念。20世纪60年代,托特提出,只要时间尺度足够长,在地形控制的重力势能作用下,地下水可产生穿层流动,进而发展出了地下水流动系统理论,将其运用于分析与溶质迁移有关的各种水文地质问题。

从20世纪50年代开始,人们的目光转向包气带的研究,对降水与地下水关系开始进入实质性研究阶段。之后各种水文地质试验及模型模拟开始用于解决遇到的问题,同位素技术也逐渐地应用到水文地质领域中来。随着计算机技术的运用与发展,地下水数值模拟技术逐渐得到应用,对解决一些复杂的水文地质问题发挥了巨大的作用。

然而,水文地质学发展到今天,还仍然算不上如同物理学、化学那样的定量的、严谨的科学。很多地下水的现象与作用并没有得到很好的解释,在地质灾害防治和矿产资源的形成与破坏中的水文地质机理、矿产资源开发利用中的水文地质问题、地质作用过程中的地下水行为、地下水污染的修复治理等许多方面还存在不足或缺乏足够的认识,尚需要人们做出艰辛、积极的努力。这些不足一方面是由于自然界的复杂性,另一方面是由于一些观念上的束缚。进入21世纪已经10年,科学技术突飞猛进,创新思想、创新实践正深入人心。相信在不久的将来,我国的新一代水文地质工作者肯定能够在一系列水文地质问题的解决和水文地质规律的探索上,取得骄人的成绩。

四、水文地质学的研究方法

如前所述,水文地质学既属于水文学范畴,又属于地质学范畴,因而人们把水文地质学称之为水文学与地质学的边缘学科。既然是边缘学科,当然也就是综合性的学科,研究的内容及方法既有水文学的内容与方法,也有地质学的内容与方法。所以与其他科学一样,水文地质学的研究方法是多种多样的,是随着总体科学技术的发展而不断发展的,几乎所有人类文明成果都可以用来研究水文地质学;目前尚未应用于水文地质学的新的人类科学技术成果,在未来必将成为水文地质学的新的研究方法和手段。当前,作为地质学与水文学交叉渗透形成的科学分支,水文地质学具有水文学和地质学传统的研究方法,也具有水文学和地质学的现代研究方法。归纳起来可以总结为以下几种(类):

① 野外调查——这是水文地质工作的基础性工作。通过野外水文地质调查,获得第一手的水文地质信息,对地表水和地下水的露头的分布、特征及其相互关系进行实地调查研究,尤其开展地形地貌、地质构造与地下水露头的关系的调查,对揭示水文地质条件是极为

重要的。

② 野外试验——包括地表水水位与径流量的观测、地下水抽水试验、压水试验、水质检测、水力连通试验、降水及地表水入渗试验等。通过野外的试验工作,获得第一手的水文地质数据信息。

③ 室内试验——包括渗滤试验、水质分析、水文地质物理模型的模拟试验、地下水数值模拟等。

④ 遥感——遥感技术作为当代科学技术的典范,已经广泛应用于地质学和水文学研究的各个方面,因而遥感技术在当代水文地质研究中具有举足轻重的作用,它既是水文地质工作的先锋,又是水文地质学的主力。

⑤ 地球物理勘察——水文地质工作开展,始终伴随着地球物理勘察工作,目前地球物理勘察已经成为水文地质工作的重要组成部分。

⑥ 信息技术的应用。在当今信息时代,任何科学都离不开信息技术。计算机的应用,使得一些复杂、繁琐的水文地质计算成为可能;而当今信息技术的应用,又使水文地质信息的快捷准确提取、分析、预测成为现实。

水是生命之源,是地球生命存在的最基本元素,优良的水供给是人类赖以生存和发展的基础,因此研究地下水的水文地质学必定是水文学的一个分支,必须应用水文学的一切研究成果开展水文地质学研究;同时,地下水是赋存于地表以下岩石空隙中的水,其存在形式、运动方式和富集规律无不受制于地质构造条件,这些条件包括岩石的空隙性质、岩石的埋藏及空间展布特征、岩石空隙的连通特征等,因而研究地下水的水文地质学必定是地质学的一部分。没有地质学理论为基础,水文地质学是不可想象的,因而水文地质学的研究必须借助于地质学的研究成果和研究方法。

总之,科学是没有界线的。把其他领域的最新研究成果应用于水文地质学的研究,什么时候都不过时,都是值得提倡的。这样做既是学科发展的需要,也是每一个水文地质工作者的责任。只有把更多的科学研究成果应用于水文地质学的研究,才能够把水文地质学发展得更好。

第一章 水循环与地下水赋存

第一节 地球上的水及其循环

一、地球及其圈层构造

(一) 地球的行星性质和表面形态

地球是我们人类的家园。她是太阳系自中心向外的第三颗行星,与其他行星一样绕太阳沿着一个椭圆轨道公转,轨道椭圆的偏心率为 0. 017。地球到太阳的平均距离约为 1.496×10^8 km,通常把这个数据称为 1 个天文单位,地球绕太阳公转的平均角速度为 $59'08''/d$,平均线速度为 30 km/s,公转一周的时间为 365. 256 d。地球绕着自己的极轴自转的角速度约为 7.292×10^{-5} rad,即 $15^\circ/h$ (或者 $15'/min$ 、 $15''/s$),在赤道处的线速度为 465 m/s,自转一周的时间为 23 h 56 min 4 s。实际监测资料证实,地球自转速度具有长期减慢、周期变化和不规则变化的特点。根据地质资料,在 3. 7 亿年前的泥盆纪中期,每年的地球日为 400 d 左右,与天文观测结果相符。

地球绕日公转的轨道面叫做黄道面,它与地球赤道面的夹角是 $23^\circ26'$;地球的天然卫星——月球绕地球的公转轨道面为白道面,黄道面和白道面之间的夹角为 $5^\circ09'$ 。在地球和月球各自的公转过程中,它们并非严格地沿着各自的轨道面运动,而是做上下摆动地前进,甚至还要受到其他行星体的影响。地球的自转极轴也不是固定不变的,它在日月的共同影响下产生运动,每 26 000 年左右地球的极轴在黄道面上做一周的运动叫做岁差,而其中发生的时间尺度较小的周期性运动称为章动;地球的自转轴对于地球本体而言也在运动,叫做极移,即两极在地球表面的位置发生的运动。地球磁极的类似的运动是明显的,称为地球磁场的极移。

地球的整体形状接近于一个扁率非常小的旋转椭球体(即扁球体),其赤道半径略长、两极半径略短,极轴相当于扁球体的旋转轴。如果再进一步描述,地球真实形状略呈梨形,其南半球略粗、短,南极向向内下凹约 30 m;北半球略细、长,北极约向上凸出 10 m。根据国际大地测量与地球物理联合会 1980 年公布的数据,地球形状和大小参数见表 1-1。

表 1-1 地球形状和大小参数表

赤道半径	6 378. 140 km	两极半径	6 356. 755 km
平均半径	6 371. 004 km	扁 率	1/298. 257
赤道周长	4 0075. 04 km	子午线周长	40 008. 08 km
表面积	$5. 11\times10^8$ km ²	体 积	$1. 083\times10^{12}$ km ³

地球表面分为陆地和海洋两大部分。其中陆地面积为 $1.49 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面积的 29.2%；海洋面积为 $3.62 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占地球表面积的 70.8%。地球表面起伏不平，陆地和海底都是如此。地表的最高点珠穆朗玛峰海拔 8 844.43 m，最低点位于太平洋西侧的马里亚纳海沟，海底在海面以下 11 034 m，因此地表最大垂直起伏约 20 km。对于大地水准面而言，陆地的平均高度为 875 m，海洋的平均深度为 3 729 m。

(二) 地球的圈层构造

单单的地球固体部分不叫地球，至少是不完整的地球，地球还应该包括诸如大气、水、生命等许多内容。所以在研究地球上的水的时候，必须站在“大地球”的角度来认识她。基于此，可将地球分为内部圈层和外部圈层。生命和水是分布在这两大地球圈层的接触部位，并向各自的纵深方向有所深入(表 1-2)。

表 1-2 地球圈层构造划分表

圈层名称				D/km	状态	备 注	
外部圈层	大气层	散逸层		800	气 态	水文 水圈 和生 物圈	
		暖层		85			
		中间层		55			
		平流层		18			
		对流层		0			
内部圈层	地壳	地壳		33	岩石圈(固态)	地质 水圈	
	地幔	上地幔		60			
			低速层	250			
				650	固 态		
		下地幔		2 885	固 态		
	地核	外核		4 170	液 态		
		过渡层		5 155	过渡带		
		内核		6 371	固 态		

注：D 为该圈层底界面与地球表面的平均距离。

(1) 地球的内部圈层

迄今为止，人类可以直接获取物质样本的深度最大为 10 km，对地球而言是微乎其微的，有关地球内部情况的知识都是通过间接的手段获得的。因而人们通过弹性、重力、电磁性质等获得地球深部信息，其中以弹性为主。通过对地震波传播速度、地震波的折射反射特征等，推求出了不同密度的密度、压力、重力和温度等指标，成为进行地球内部圈层结构划分的主要依据。

需要指出的是，表 1-2 中的备注栏，标出了地质水圈与水文水圈和生物圈的范围，两者在地壳处相互重叠，说明在地壳内部，既存在参与水文水循环的地下水，也存在参与地质水循环的地下水，接下来将做详细讨论。

(2) 地球外部圈层

地球外部圈层有人称之为地球外部圈层系统，由 5 个大致成层分布的自然子系统组成。按照性质可以分成 3 类，即 3 个无机子系统——大气圈、水圈、岩石圈；1 个类有机子系

统——土壤圈;1个有机子系统——生物圈。

大气圈是由分布在行星地球周围的一层薄薄的气体混合物组成,这些气体通常称为大气,它的总质量约为 5.3×10^{21} g,占地球总质量的百万分之一。在垂向上,由于地心引力的作用,大气质量的 99% 以上聚集在离地表 30 km 的高度内,到 2 000 km 高度以上,大气极其稀薄,逐渐向星际空间过渡,无明显上界。在水平方向上,大气的空间尺度以南、北极之间的距离表示,具有 20 000 km 的量级。由于大气具有相当大的可压缩性,较小的比热和密度,使大气易于流动,也极不稳定。尽管太阳能量的输入是相对稳定的,但是大气的运动状态却是丰富多彩的。

大气是重要的环境要素之一,它不断地与岩石圈、水圈和生物圈进行着物质、能量传递的大循环和多种小循环。同时,洁净的空气也是一种极宝贵的资源。

现代大气的化学成分,由恒定的、可变的和不定的一部分组成,其主要成分列于表 1-3。
① 恒定组分是混合气体,其中氮占 78.09%,氧气占 20.95%,氩气占 0.93%,三者约占空气总质量的 99.97%。微量的氦气、氖气、氙气、氢气、氙气、氦气、甲烷、臭氧等含量甚低,又称为稀有气体。
② 可变的组分有二氧化碳、水蒸气等。水蒸气含量为 0~4%,二氧化碳含量为 0.027%(有资料认为,近年来二氧化碳含量已达 0.035%)。
③ 不定组分有尘埃、硫化氢、硫氧化物、氮氧化物等。

表 1-3 地球大气的主要组分

气 体	体积分数/ 10^{-6}	气 体	体积分数/ 10^{-6}
氮气(N ₂)	780 900	氩气(Kr)	1
氧气(O ₂)	209 400	一氧化氮(NO)	0.5
氩气(Ar)	9 300	氢气(H ₂)	0.5
二氧化碳(CO ₂)	315	氙气(Xe)	0.08
氦气(He)	18	二氧化氮(NO ₂)	0.02
氖气(Ne)	5.2	臭氧(O ₃)	0.01~0.04

土壤圈:覆盖于陆地表面和浅水域底部、具有肥力的疏松土层构成土壤圈,它呈不连续分布,厚度不等。土壤圈属于岩石圈的一很小部分,但是由于处于大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的界面(或交叉带)上,是植物、动物与微生物生活的重要环境与大气、水、岩石、生物之间进行物质及能量循环、转化、交换的中心场所。

生物圈:地球上所有植物、动物和微生物等生命有机体及其占据的空间构成生物圈,呈不连续分布。组成生物圈的有机物质总质量约为 1.6×10^{18} g,约占地球总质量的 4×10^{-7} %。生物圈主要分布范围大约从海洋底部和陆地土壤层到地表以上大气圈中 8 km 处,但是在陆地土壤层以下和大气层 8 km 以上仍然有生物存在,其中地表以上 100 m 至水下 200 m 之间是生物圈的核心部分。地球上生命有多少? 据估计至少有 5×10^6 种生物,而实际存在的生物物种很可能大大高于这个数目,达到 3×10^7 种,其中已鉴定的有大约 1.7×10^6 种。在人类活动的巨大扰动下,生物物种的数量正在以惊人的速度减少。据估计,从 20 世纪 70 年代末到 90 年代末,已有 $0.5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6$ 个物种灭绝。不同生物类群物种数量的估计值和其中已经鉴定的物种数量列于表 1-4。

表 1-4

地球上不同生物类群的物种数量

生物类群	估计种数	鉴定种数
鸟 类	9 000	8 715
爬行动物	6 000	5 115
两栖动物	3 500	3 125
鱼 类	23 000	21 000
无脊椎动物	4 400 000	1 300 000
维管植物	280 000	250 000
无维管植物	200 000	150 000
总计	4 925 800	1 742 125

(3) 人类圈

人类创造了现代辉煌的文明,是世界的主宰。从生物学上来说,人是一种动物,是高等哺乳动物中灵长类的一种。具体在生物分类中,人属于动物界脊椎动物门哺乳动物纲灵长目人科人属人种。这里的人种是物种的概念,世界各地的人都属于一个物种,即现代人。通常所说的黄种人、白种人、黑人和棕色人等是指种族的概念。

由于人类具有主观能动性,能够在认识自然的基础上,通过社会性的物质生产和消费过程,显著地改造自然,影响其进化方向、强度和速度,所以人类活动已经成为地球系统变化的驱动力之一。由于人类活动范围内至地表以下 12.5 km 的岩石圈深部,外至太阳系空间,所以人类圈比生物圈大。

人类圈最基本的状态变量是人口数量,随着人类文明的进步,全球人口呈现加速增长的趋势(表 1-5),人口倍增时间越来越短,预计到 2025 年将达到 82 亿。人口的迅速增长必然会引起自然资源消耗量的增加和环境压力的加剧。因此控制人口的增长是协调人与环境关系,实现可持续发展的重要战略措施。

二、地质水圈与水文水圈

地球表层到处都有水,是一个富水的行星。从地球的外层空间直到地球内部的地幔甚至地核,在地球的各个圈层都有水的存在,只不过存在的形式不同罢了。所以广义地说,整个地球构成一个统一的水圈。依据水的存在形式和参与循环的速度等,可以把地球水圈划分为地质水圈和水文水圈两种。

表 1-5

全球人口的发展

年 份	人口数/亿	人口倍增时间/年	人口增加 10 亿的时间/年
7 000 B. C. ~6 000 B. C.	0.05~0.1	约 1 650	7 830~8 830
公元元年	2.30~3.27		
1650	4.70~5.45		
1830	10	约 200	约 100
1900	15.50~17.62	约 100	
1930	20.15		

续表 1-5

年 份	人口数/亿	人口倍增时间/年	人口增加 10 亿的时间/年
1950	25.13	约 46	约 30
1960	30.27		
1970	36.78		约 16
1976	40.44		
1980	44.15	约 49	约 12
1985	48.45		
1988	50.73		
2000	61.16		
2025	81.92		

(一) 地质水圈

地球内部层圈中特殊高压高温下的离解状态的水,以及地壳矿物内部的结合水,均是以非自由态存在的水,不能参与地球表面的水文循环,故称做地质水圈。根据这一定义,地质水圈由地表深达地心。

地球内部层圈水分布于地壳下部直到下地幔这一范围内。有人测算,未经去气作用的地幔物质含 5%~7%的水,按照地幔总质量 4×10^{24} g 计,其中熔融物质占 25%,则地幔软流层中所含的水分总量相当于现代海洋水总量的 35~50 倍。在极高的温度压力下,这里的水被认为可电离为 H^+ 及 OH^- ,甚至进一步电离为 H^+ 及 O^{2-} 。当软流层的岩浆沿通道上升,温度压力降低时,氢、氧离子将结合为自由态的水(H_2O)而析出(王大纯等,1995)。

地壳岩石中的矿物结合水是指矿物结晶内部及其间的水,如沸石水、结晶水、结构水等。三基矾石($Al_4[(OH)_{10}SO_4] \cdot 36H_2O$)含矿物结合水占质量的 65%,正长石为 17%,黑云母为 48%等。整个地壳矿物组成中矿物结合水含量可以达到 4.2×10^8 km³,它们在一定温度下可以从矿物中释出成为自由态的水(H_2O)(王大纯等,1995)。

(二) 水文水圈

从地球大气圈到地球表面甚至地壳深部,依次分布有大气水、地表水、地下水以及生物体中的水。这些水均以自由态 H_2O 分子形式存在,以液态为主,也呈气态与固态存在,参与地球表面的水文循环,构成水文水圈。这是经常所说的水圈。水文水圈中水的总体积约为 13.86×10^8 km³。若将这些水均匀平铺在地球体表面,水深约为 2 718 m(表 1-6)。

三、地球上的水循环

地球各个层圈中的水相互联系、相互转化的过程统称为大气水的水循环,又叫做自然界的水循环。按其循环途径的长短、循环速度的快慢以及涉及层圈的范围,可分为地质循环和水文循环两类。

(1) 地质循环

地球浅层圈和深层圈之间水的相互转化过程称为水的地质循环,参与地质循环的水构成地质水圈。它们不能够参与地球表面水文循环,在现有技术条件下不能够为人类所利用。上地幔高温熔融的塑性物质(软流圈)大规模对流,据认为是地球板块运动的驱动力。上地幔熔融物质进入地壳或喷出地表时,所挟带的水分也随之上升、分异,转化为地球浅层圈的

水。这种由地幔熔岩物质直接分异出来的水称为初生水。有人根据观测结果推算出全球所有岛弧火山喷发作用、水热作用和喷气作用,每年溢出地表的初生水约为 2×10^8 t。含有大量水的板块俯冲沉入地幔,使地幔得到浅层圈水的补充(王大纯等,1995)。

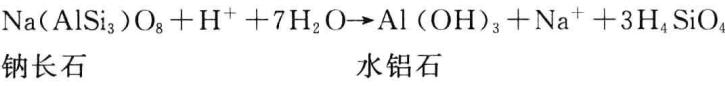
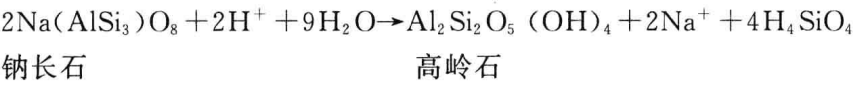
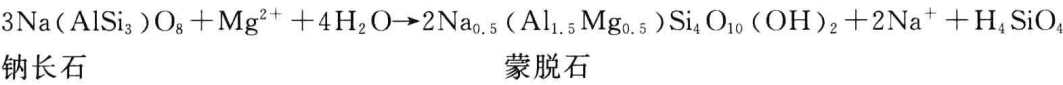
表 1-6 地球水文水圈中水的分布

水 体		总水量		咸水总量		淡水总量	
		10^3 km^3	%	10^3 km^3	%	10^3 km^3	%
大气水		12.9	0.000 9			12.9	0.037 8
地表水	海洋水	1 338 000.0	96.54	1 338 000.0	99.04		
	河流水	2.1	0.000 2			2.1	0.006 1
	沼泽水	11.5	0.000 8			11.5	0.033 7
	湖泊水	176.4	0.013	85.4	0.006	91.0	0.259 8
	冰川和永久积雪	24 064.1	1.74			24 064.1	68.769 7
地下水	地下水	23 400.0	1.69	12 870.0	0.95	10 530.0	30.060 6
	永冻层中的水	300.0	0.022			300.0	0.856 4
	土壤水	16.5	0.001 2			16.5	0.017 1
生物水		1.1	0.000 1			1.1	0.003 2
总 计		1 385 984.6	100	1 350 955.4	100	35 029.2	100

※此表内容只考虑参与地球水文循环的水,即水文水圈中的水,未计入地质水圈的水

自然界水的地质循环还发生在成岩作用、变质作用、风化作用等地质过程中。在这些地质作用过程中,不仅有分子态的水(H_2O)进入矿物(成为矿物结合水)或从矿物中脱出,同时还常常伴有水分子的分解与合成(王大纯等,1995)。

沉积作用中,石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的形成就使水转入矿物晶格,进入地质水循环过程。再如风化作用,钠长石风化转化成蒙脱石、高岭石和水铝石,都要有水的参与:



(2) 水文循环

如果没有特指,一般所说的地球上的水循环即是指水文循环。水文循环是发生于以自由态 H_2O 分子形式存在的大气水、地表水、生物水和地壳岩石(土)空隙中的地下水之间的水循环。水文循环的速度较快,途径较短,转换交替比较迅速。水文循环分为小循环与大循环。海洋与大陆之间的水分交换为大循环。海洋或大陆内部的水分交换称为小循环。

水文循环是在太阳辐射和重力共同作用下,以蒸发、降水和径流等方式周而复始进行的。平均每年有 $577\,000 \text{ km}^3$ 的水通过蒸发进入大气,然后通过降水又返回海洋和陆地。地表水、包气带水及饱水带中浅层水通过蒸发和植物蒸腾而变为水蒸气进入大气圈。水气随