



同济大学本科教材出版基金资助

水文学与水文地质

陶 涛 信昆仑 颜合想 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学本科教材出版基金资助

水文学与水文地质

陶 涛 信昆仑 颜合想 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书根据高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会教学大纲的要求,将“水文学”与“供水水文地质”两门课程融合,包括了绪论,水文循环与径流形成,水文统计基本原理与方法,年径流与洪、枯径流分析计算,降水资料的收集与整理,小流域暴雨洪峰流量的计算,地下水的系统与结构及地下水运动共8章内容,讲授与城市取水和排水有关的水文学和水文地质知识,使学生了解水文现象和地下水的基本特点,掌握水文学与水文地质的基本原理。

本书适合土木、水利、环境等相关专业的学生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

水文学与水文地质 / 陶涛,信昆仑,颜合想主编.

—上海: 同济大学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5608-6458-7

I. ①水… II. ①陶… ②信… ③颜… III. ①水文学—高等学校—教材②水文地质—高等学校—教材 IV. ①P33②P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 167669 号

水文学与水文地质

陶 涛 信昆仑 颜合想 主编

责任编辑 胡晗欣 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 上海同济印刷厂有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 11.25

字 数 281 000

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6458-7

定 价 32.00 元

前 言

“水文学”与“供水水文地质”作为给排水科学与工程专业基础课程,是研究水文现象变化规律与水文地质特性及其在给水处理工程应用的学科。在高等学校给排水科学与工程学科专业指导委员会修订的新教学大纲中,将两门课程融合为“水文学与水文地质”课程,为适应此要求,编者在2008年出版的《水文学》教材基础上,编写了《水文学与水文地质》。

水文学是探求地球上自然界中水的各种现象和运动规律的科学,是地球科学的一个重要分支。主要研究地球上水的起源、存在、分布、循环和运动等变化规律,并运用这些规律为人类服务。水文地质学是研究地下水的科学,重点研究自然界中地下水的各种变化和运动的现象。主要包括地下水的分布和形成规律,地下水的物理性质和化学成分,地下水资源及其合理利用,地下水对工程建设和矿山开采的不利影响及其防治等。

本书根据全国高等学校土建类专业本科教育培养目标和培养方案及主干课程教学基本要求,以现代新技术及新理论应用为支撑,系统阐述水文学的基本概念、理论、方法及应用,为给排水及相关专业研究提供水文学的研究基础,使读者认识和掌握本学科中的最新技术及发展方向。全书系统阐述了水文循环的概念、原理及研究进展,流量的观测方法和降水资料的观测方法,水文统计的基本原理,年径流和洪枯径流,小流域暴雨洪峰流量的计算特点和计算方法,地下水的系统与结构、地下水运动等内容。

通过本教材的学习可以帮助学生认识水文现象与水文地质的一般规律,正确理解和掌握与水文学有关的基本概念、基本原理和基本方法,初步具有在各种不同资料情况下进行水文分析计算和水文预报的能力,并能进行最基本的水文测验和资料收集,为学习专业课、从事专业工作和进行科学研究打下基础。通过本书的学习还可深入认识与广泛应用水文与水文地质规律,为国民经济建设服务,为给排水工程的规划、设计、施工及管理提供正确的水文资料及分析成果,以及充分开发与合理利用水资源、减免灾害,充分发挥工程效益。本书还适合土木、水利等其他相关专业的学生学习。

本书删除了《水文学》中第七章的选学内容,补充了供水水文地质中地下水系统与结构以及地下水运动等部分,其他章节中也做了适当的修改和补充。主要讲授与城市取水和排水有关的水文学和水文地质知识,结合专业需要,使学生了解水文现象和地下水的基本特点,掌握水文学与水文地质的基本原理,学会水文分析计算基本方法,熟悉水文地质资料的搜集、整理与应用,以完成专业培养计划要求的有关基本训练,为后续专业课程的学习和以后从事专业工作解决水文及水文地质问题打下良好基础。

因水平有限,书中存在不足和疏漏在所难免,恳请读者予以批评指正。

编者
2017年4月

目 录

前言

1 绪 论	1
1.1 水文学与水文地质的任务	1
1.2 水文现象的特性及研究方法	2
1.3 专业中的水文学与水文地质问题	4
2 水文循环与径流形成	5
2.1 水文循环与水量平衡	5
2.2 河流与流域	8
2.3 降水与蒸发	16
2.4 河川径流形成过程及影响径流的因素	20
2.5 水位与流量关系曲线	22
3 水文统计基本原理与方法	27
3.1 概述	27
3.2 概率与频率的基本概念	28
3.3 随机变量及其概率分布	31
3.4 统计参数	34
3.5 水文频率曲线线型	37
3.6 水文统计参数估计方法	49
3.7 水文频率计算适线法	50
3.8 抽样误差	57
3.9 相关分析	58
4 年径流与洪、枯径流分析计算	68
4.1 概述	68
4.2 设计年径流系列的推求	70
4.3 设计年径流量的年内分配	77
4.4 设计枯水流量及径流	80
4.5 设计洪水	81

5	降水资料的收集与整理	94
5.1	降水	94
5.2	降水的时空分布	99
5.3	暴雨强度公式的计算	103
5.4	可能最大降水简介	110
6	小流域暴雨洪峰流量的计算	115
6.1	小流域暴雨洪峰流量计算的特点	115
6.2	流域汇流	116
6.3	暴雨洪峰流量的推理公式	124
6.4	地区性经验公式及水文手册的应用	128
7	地下水的系统与结构	132
7.1	地下水系统的组成与结构	133
7.2	地下水流系统	138
7.3	地下水系统的垂向结构	139
7.4	地下水类型	141
7.5	地下水的循环	146
8	地下水运动	151
8.1	地下水运动的分类	151
8.2	地下水运动的特点	152
8.3	地下水运动的基本规律	153
8.4	地下水流向井的稳定流理论	154
8.5	地下水完整井非稳定流理论	161
8.6	地下水的动态与平衡	165
8.7	地下水动态的研究内容	168
8.8	地下水平衡	169
	参考文献	173

1.1 水文学与水文地质的任务

水文学主要研究地表面或近地面的水,其研究对象主要包括降水、蒸发、入渗、地下水径流、河川径流以及溶解物或悬浮物在水流中的输送等。水文地质学是研究地下水的科学,是地质学的一门分支学科。

水文学是研究地球上各种水的发生、循环、分布,水的化学和物理性质,以及水对环境的作用,水与生命体的关系等的科学,其范畴包含了水在地球上的整个生命过程。水文科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,都是水文科学的研究对象;水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系,也是水文科学的研究领域;水文科学不仅研究水量,而且研究水质,不仅研究现时水情的瞬息动态,而且探求全球水的生命史,预测它未来的变化趋势。1850年是水文学方法论的开端之年。1851年, Mulvaney 首先提出了汇流时间的概念,也就是现在的径流计算的推理法的基本形式,他还设计了原始的雨量器,以记录降雨过程的强度变化。之后,水文知识在不断地发展。自20世纪50年代以来水文学知识有一个加速发展的阶段,计算机技术自60年代开始发展较快。水文原理和基本方程一般由物理基本定律推出,或者从野外观测到的水文现象进行综合分析得到。当对某种现象的物理过程有了恰当的理解和描述时,通常将其概化成一种计算机模型,应用研究流域的实测资料率定模型参数。虽然水文学在理论和技术方面均取得了很多进展,但是对于水文过程及其作用等方面仍有许许多多未知或者未确定的问题。此外,现在的一些知识和方法尚未被广泛地应用。逐渐地探讨和解决水文学中的不确定性等问题,以及应用更好的方法、技术和更精确地确定模型参数值,是水文研究的热点。水文学作为一门地球科学,与其他自然科学有密切的关系。要研究降水、蒸发,就需要了解气候学和气象学方面的知识;同样,入渗与土壤科学有关,地下径流与地质学有关,地表径流与地貌学有关,河川径流与流体力学有关。除水的流动外,还要掌握化学和物理等方面的知识,研究各种成分的输送情况,用以计算各种成分的浓度在水流过程中的衰减、沉淀、溶解、扩散以及化学反应等。

水文地质学研究主要包括地下水的起源、分布和赋存状态,补给、径流与排泄条件,水质、水量在时空上的变化与运动规律,即在各种自然因素和人为因素影响下,地下水作为一种地质营力对环境的改造作用以及在作用过程中它自身发生的各种变化规律。水文地质学的研究内容是地下水在周围环境影响下,数量和质量在时空上的变化规律,以及如何利用这一规律有效地利用和调控地下水。地下水赋存和运动于地壳岩石的空隙之中,其形成和分

布无一不受地质条件的制约,学习水文地质学必须掌握矿物岩石学、地球化学、地层学、构造地质学、地貌及第四纪地质学等基本地质理论。同时,地下水又是自然界水循环的一部分,与大气降水、地表水的关系非常密切,三者之间相互联系,互相转化,因此,学习水文地质学也需要具备水文学、气象学等方面的基本知识。为了深入研究地下水水质与水量变化规律,还需借助数学、化学、水力学等学科的原理和方法,对其进行定量评价。

“水文学与水文地质”课程,主要包括水文学和供水水文地质学两方面。水文学主要叙述水循环运动中,从降水到径流入海的这一段过程中,关于地面径流的运动规律、量测方法及在工程上的应用等问题,基本上属工程水文学的范畴。它包括河川及径流的基本概念,河川水文要素的量测方法,水文分析中常用的数理统计的基本原理,河川径流的年内变化与年际分配,枯水径流与洪水径流的调查分析与计算,降雨资料的整理与暴雨公式的推求,小流域暴雨洪水流量的计算,城市降雨径流的特点等。供水水文地质学是为了供水目的,研究地下水的形成与埋藏、物理和化学性质特征、开采条件下的动态变化、水资源评价方法、供水水源地勘察、地下水资源的合理开发利用与科学管理。

通过本课程的学习,要求能了解河川水文现象的基本规律,掌握水文统计的基本原理与方法,能够独立地进行一般水文资料的收集、整理工作,具有一定的水文分析计算技能。由于水文现象本身所具有的特点,一般在处理上多运用数理统计方法进行分析,注重实际资料的收集,强调深入现场进行调查研究。因此在学习中,不仅要学会某种具体方法,而且要体会运用这种方法的条件。总之,随时注重资料收集,深入掌握分析方法,全面熟悉应用条件,才能在学习中有有所获益。

1.2 水文现象的特性及研究方法

1. 水文现象的特性

水在循环过程中存在各种运动形态,如蒸发、降水、河流和湖泊中的水位涨落、冰情变化、冰川进退、地下水的运动和水质变化等,统称为水文现象。水文现象在各种自然因素和人类活动影响下,在空间分布或时间变化上都显得十分复杂。

水文现象的基本特征可以归结为以下两个方面。

(1) 水文现象时程变化的周期性与随机性的独立统一

在水文现象的时程变化方面存在周期性与随机性的统一。水文现象的时间变化过程存在着周期而又不重复的性质,一般称为“准周期”性质。例如,潮汐河口的水位存在以半个或一个太阴日为周期的日变化;河流每年出现水量丰沛的汛期和水量较少的枯季;通过长期观测可以看到,河流、湖泊的水量存在着连续丰水年与连续枯水年的交替,表现出多年变化;每年河流最大和最小流量的出现中虽无具体固定的时日,但最大流量每年都发生在多雨的汛期,而最小流量多出现在雨雪稀少的枯水期,这是由于四季的交替变化是影响河川径流的主要气候因素。又如,靠冰川或融雪补给的河流,因气温具有年变化的周期,所以随气温变化而变化的河川径流也具有年周期性,其年最大冰川融水径流一般出现在气温最高的夏季七、八月间。有些人在研究某些长期观测的资料时发现,水文现象还有多年变化的周期性。形成这种周期变化的基本原因是地球的公转和自转、地球和月球的相对运动,还包括太阳活动,如太阳黑子的周期性运动的影响。它们导致太阳辐射的变化和季节的交替,使水文现象

也出现相应的周期变化。当然,水文现象还受众多其他因素的影响,这些因素自身在时间上也不断地变化,并且相互作用和相互影响着。

此外,河流某一年的流量变化过程,实际上不会和其他年份的完全一样,每年的最大流量与最小流量的具体数值也各不相同,这些水文现象的发生在数值上都表现为随机性,也就是带有偶然性。因为影响河川径流的因素极为复杂,各因素本身也在不断地发生着变化,在不同年份的不同时期,各因素间的组合也不完全相同,所以受其制约的水文现象的变化过程,在时程上和数量上都没有重复再现过,都具有随机性。

(2) 水文现象地区分布的相似性与特殊性的对立统一

不同流域所处的地理位置如果相近,气候因素与地理条件也相似,由其综合影响而产生的水文现象在一定范围内也具有相似性,其在地区的分布上也有一定的规律性。如在湿润地区的河流,其水量丰富,年内分配也比较均匀;而在干旱地区的大多数河流,则水量不足,年内分配也不均匀。又如同一地区的不同河流,其汛期与枯水期都十分相近,径流变化过程也都十分相似。

此外,相邻流域所处的地理位置与气候因素虽然相似,但由于地形地质等条件的差异,从而会产生不同的水文变化规律。这就是与相似性对立的特殊性。如在同一地区,山川河流与平原河流,其洪水运动规律就各不相同;地下水丰富的河流与地下水贫乏的河流,其枯水水文动态就有很大差异。

由于水文现象具有时程上的随机性与地区上的特殊性,故需要对各个不同流域的各种水文现象进行年复一年的长期观测,积累资料,通过统计计算分析其变化规律。又由于水文现象具有地区上的相似性,故只需有目的地选择一些有代表性的河流设立水文站进行观测,将其成果移用于相似地区即可。为了弥补观测年限的不足,还应对历史上和近期发生过的大暴雨、大洪水及特枯水等进行调查研究,以便全面了解和分析水文现象周期性随机性的变化规律。

2. 水文现象的研究方法

由水文现象的基本特征可知,对水文现象的研究分析,都要以实际观测资料为依据。按不同目的要求,可把水文学常用的研究方法归结为成因分析法、数理统计法和地理综合法三类。

(1) 成因分析法

利用水文现象的确定性规律解决水文问题的方法,称为成因分析法。当某种水文现象与其影响因素之间确定性关系较为明确时,通过水文网站和室外、室内试验的观测资料及实验数据,从物理成因出发,建立水文现象与影响因素之间的定量关系,研究水文现象的形成过程,以阐明水文现象的本质及其内在联系。成因分析法广泛应用在水文预报、降雨径流分析中。但由于影响水文现象的因素极其复杂,其形成机理还不完全清楚,因而成因分析法在定量方面仍存在着很大困难,目前尚不能满足工程设计的需要。

(2) 数理统计法

基于水文现象具有的随机特性,可以根据概率理论、运用数理统计方法,处理长期实测所获得的水文资料,求得水文现象特征值的统计规律,为工程规划、设计提供所需的水文数据。水文学需要对未来水利工程运行时期(百年以上的时间)的水文现象做出预估,这种情况难以用确定性方法实现(因影响水文过程的因素众多,每个因素在未来时间内的变化也很复杂,无法给出确定性答案),只能依据已有的长期观测资料,探求其统计规律,求得工程规

划设计所需要的设计水文特征值。这种方法根据过去与现在的实测资料来推算未来的变化,但它未阐明水文现象的因果关系。若数理统计法与物理成因法结合起来运用,可望获得满意的结果。

(3) 地理综合法

因气候因素和地形地质等因素的分布具有地区特征,从而使水文现象的变化在地区的分布上也呈现出地区性的变化规律。这样就可以建立水文现象的地区性经验公式,或与地图结合在一起绘制水文特征的等值线图来反映水文特征值的地区变化,以分析水文现象的地区特征,解释水文现象的地区分布规律,即地理综合方法。

在解决实际问题时,以上三类方法常常同时使用,它们应该是相辅相成、互为补充的。经过多年实践,我国已初步形成一种具有自己特点的研究方法,已概括为“多种方法、综合分析、合理选定”的原则。在使用时,应根据工程所在的地区特点,以及可能收集到的资料情况,对采用的方法应有所侧重,以便为工程规划设计提供可靠的水文依据。

1.3 专业中的水文学与水文地质问题

在给水方面,以地面水为水源的给水工程,必须要考虑水量变化及其取用条件。当水源水量充沛时,需要确定取水口的位置,了解水位流量、泥沙及冰凌的变化情况等;当水源水量不足时,就要设计水库调节,以丰补歉,远距离调水与调节,这需要对流城内径流的年际变化及年内分配等水文情况进行分析。如果给水工程为多目标时,即与灌溉、航运、水力发电等其他水利设施配合在一起综合利用,那么水文分析与计算的内容就更加复杂、更加广泛。然而,由于我国幅员辽阔,许多城市的供水水源使用地下水,在一些沙漠地区、干旱地区 and 海岛,地下水有时是唯一的水源,在我国北方一些农村,绝大部分人口用的是地下水。因此,对给水排水工作者来说,掌握基本的水文地质知识,学会阅读和利用水文地质资料,能进行简单的水文地质计算,具备地下水取水工程的基础知识,均是正确选择水源和合理设计取水构筑物的必要条件。新型节能技术,如水源热泵、地温热泵技术,还有地下水人工补给、地下水与地表水联合调蓄等问题,都涉及水文地质学的知识,因此水文地质学对给水排水工程专业具有重要意义。

在排水方面,由于城市内涝问题的日益加剧,城市产汇流基础理论分析、暴雨强度公式推求、暴雨雨型分析等都与解决城市内涝问题密切相关,而雨水管网设计中的推理公式、径流系数等基本概念都需要水文资料的收集、分析与计算。

所以说,水文学与水文地质和给排水工程有着密切的关系。研究水文学与水文地质,可以深入认识与广泛运用水文规律,为国民经济建设服务,为给水排水工程的规划、设计、施工及管理提供正确的水文资料及分析结果,以充分开发与合理利用水资源,减免水害,充分发挥工程效益,学好该课程对系统地掌握给水排水专业知识具有重要的意义。

水文循环与径流形成

2.1 水文循环与水量平衡

地球上现有约 13.9 亿 km^3 的水,它以液态、固态和气态分布于地面、地下和大气中,形成河流、湖泊、沼泽、海洋、冰川、积雪、地下水和大汽水等水体,构成一个浩瀚的水圈。水圈处于永不停息的运动状态,水圈中各种水体通过蒸发、水汽输送、降水、地面径流和地下径流等水文过程紧密联系,相互转化,不断更新,形成一个庞大的动态系统。在这个系统中,海水在太阳辐射下蒸发成水汽升入大气,被气流带至陆地上空,在一定的天气条件下,形成降水落到地面。降落的水一部分重新蒸发返回大气,另一部分在重力作用下,或沿地面形成地面径流,或渗入地下形成地下径流,通过河流汇入湖泊,或注入海洋。从海洋或陆地蒸发的水汽上升凝结,在重力作用下直接降落在海洋或陆地上。水的这种周而复始不断转化、迁移和交替的现象称水文循环。在地面以上平均约 11 km 的大气对流层顶至地面以下 $1\sim 2$ km 深处的广大空间,无处不存在水文循环的行踪。全球每年约有 57.7 万 km^3 的水参加水文循环。水文循环的内因,是水在自然条件下能进行液态、气态和固态三相转换的物理特性,而推动如此巨大水文循环系统的能量,是太阳的辐射能和水在地球引力场所具有的势能。

水和水的循环对于生态系统具有特别重要的意义,不仅生物体的大部分(约 70%)是由水构成的,而且各种生命活动都离不开水。水在一个地方将岩石侵蚀,而在另一个地方又将侵蚀物沉降下来,久而久之就会带来明显的地理变化。水中携带着大量的多种化学物质(各种盐和气体)周而复始的循环,极大地影响着各类营养物质在地球上的分布。除此之外,水对于能量的传递和利用也有着重要影响。地球上大量的热能用于将冰融化为水使水温升高和将水化为蒸汽。因此,水有防止温度发生剧烈波动的重要生态作用。

不同纬度带的大气环流使一些地区成为蒸发大于降水的水汽源地,而使另一些地区成为降水大于蒸发的水汽富集区;不同规模的跨流域调水工程能够改变地面径流的路径,全球任何一个地区或水体都存在着各具特色的区域水文循环系统,各种时间尺度和空间尺度的水文循环系统彼此联系着、制约着,构成了全球水文循环系统。

2.1.1 自然界的水文循环

1. 含义

地球上的水在太阳辐射作用下,不断地蒸发成水汽进入大气,随气流输送到各地;输送中,遇到适当的条件,凝结成云,重力作用下降落到地面,即降水;降水直接地或以径流的形式补给地球上的海洋、河流、湖泊、土壤、地下和生态水等,如此永不停止的循环运动,如图

2-1 所示,称为水文循环。

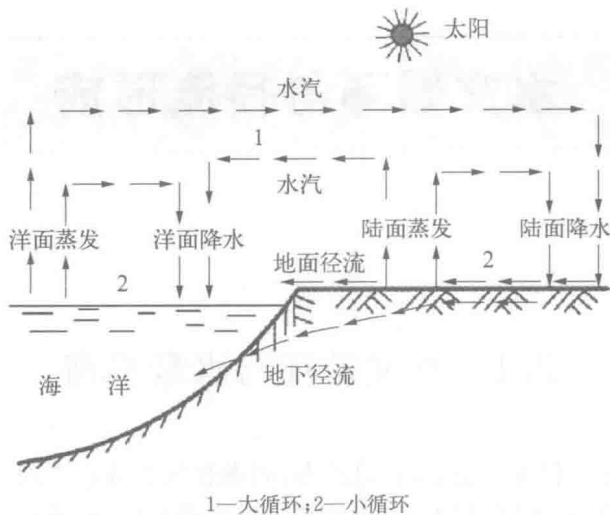


图 2-1 自然界的水文循环示意图

水的循环过程具体可以分为以下三个步骤:

第一步是蒸发和蒸腾的水分子进入大气。吸收太阳辐射热后,水分子从海洋、河流、湖泊、潮湿土壤和其他潮湿表面蒸发到大气中去;生长在地表的植物,通过茎叶的蒸发将水扩散到大气中,植物的这种蒸发作用通常又称为蒸腾。据估计,在一个生长季中,0.4 hm²的谷物几乎就可以蒸腾 200 万 m³的水,等于同等面积内 43 cm 深的水层。通过蒸发和蒸腾的水,水质都得到了纯化,是清洁水。

第二步是以降水形式返回大地。水分子进入大气后,变为水汽随气流运动,在适当条件下,遇冷凝结形成降水,以雨或雪的形式降落到地面。降水不但给地球带来淡水,养育了千千万万的生命,同时,还能净化空气,把一些天然的和人为的污物从大气中洗去。降水是陆地水资源的根本来源。我国多年平均年降水量为 632 mm,而全球陆地平均年降水量是 834 mm。

第三步是重新返回蒸发点。当降水到达地面,一部分渗入地下,补给地下水;一部分从地表流掉,补给河流。地表的流水,即径流可以带走泥粒,导致侵蚀;也可以带走细菌、灰尘和化肥、农药等,因而径流常常被污染。最后流归大海,水又回到海洋以及河流、湖泊等蒸发点。这就是地球上的水分循环。

有时水循环会出现一些较特殊的情况。在高纬度和高海拔区,自大气层降下的不是水而是雪。落在极地区或山地的雪积久可成冰,水因此得到保存,即退出水文循环,退出时间一般为几十年、几百年或几千年。因此,冰雪的固结与消融,影响着参与水循环的水的总量,进而影响全球海面变化。南极冰盖和格陵兰冰盖是世界上最大的冰库。如果全部融化,海洋的水位就会上升大约 60 m,这意味着各大洲的沿海地区、包括许多世界级大城市都将被淹没,海平面将达到纽约曼哈顿摩天大楼的 20 层楼那么高。水分循环把地球上所有的水,无论是大气、海洋、地表还是生物圈中的水,都纳入了一个综合的自然系统中,水圈内所有的水都参与水的循环。像人体中,从饮水到水排出体外只要几个小时;大气中的水,从蒸发进入大气,到形成降水离开大气,平均来说,完成一次循环要 8~10 天;世界大洋中的水,如果都要蒸发进入大气,完成一次水分循环的过程,需要 3 000~4 000 年。

水循环的另一个重要特点是每年降到陆地上的雨雪大约有 35%又以地表径流的形式流入了

海洋。值得特别注意的是,这些地表径流能够溶解和携带大量的营养物质,因此它常常把各种营养物质从一个生态系统搬运到另一个生态系统,这对补充某些生态系统营养物质的不足起着重要作用。由于携带着各种营养物质的水总是从高处往低处流动,所以高地往往比较贫瘠,而低地比较肥沃,例如沼泽地和大陆架就是这种最肥沃的低地,也是地球上生产力最高的生态系统之一。

2. 分类

水分循环的过程是非常复杂的。除了这种海陆之间的水分循环外,海洋有自己的洋流等水圈内部的水循环;大气圈里有随着大气环流进行的大气内部水循环;大气圈与陆地之间,大气圈与洋面之间,有着水汽形成降水,降落的水分又被蒸发的直接循环;岩石圈上存在着地表水与地下水之间的转换与循环;生物体内也有着生物水的循环等。根据水文循环过程的整体性和局部性,可把水文循环分为大循环和小循环。大循环是指海洋蒸发的水汽降到大陆后又流归海洋,它是发生在海洋与陆地之间的水文循环,是形成陆地降水、径流的主要形式;小循环是指海洋蒸发的水汽凝结后成为降水又直接降落在海洋上,或者陆地上的降水在没有流归海洋之前,又蒸发到空中去的局部循环。

3. 与水资源的关系

水文循环供给陆地源源不断的降水、径流,某一区域多年平均的年降水量或年径流量,即该地区的水资源量,因此水文循环的变化将引起水资源的变化。水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带,是认识地球系统自然科学规律的重要方面。国际地圈生物圈计划(IGBP)代表国际地球学科发展前沿,其中除了碳循环外,21世纪核心的科学问题就是水循环和食物问题。水资源问题直接关系到国计民生和社会经济可持续发展的基本需求,水资源时间与空间的变化又直接取决于水文循环规律的认识。因此,陆地水文水资源学科在地球地理学科占据十分重要的地位。

2.1.2 地球上的水量平衡

水量平衡是水文学的基础,一般可用下式来反映:

$$\text{径流量} = \text{降雨量} - \text{蒸发量} \pm \text{蓄水量的变化}$$

流域的总水量平衡可以用流域内各种水源(如地表水、地下水、土壤水、河槽蓄水等)水量平衡之和来计算。不同水源的划分,根据其对外流域的出口断面,径流量的影响大小,随流域而异。然而,对每一种水源都可用一个非线性水库来概化。该水库接纳各种水量输入并产生其输出,这些输入可能为正也可能为负,比如,降水对任何水源都是正的收入,蒸发则为支出。

水文循环过程中,对任一地区、任一时段进入的水量与输出的水量之差,必等于其蓄水量的变化量,这就是水量平衡原理,是水文计算中始终要遵循的一项基本原理。依此,可得任一地区、任一时段的水量平衡方程。

1. 对于某一时段 Δt

就全球的整个大陆,其方程为

$$P_c - R - E_c = \Delta S_c \quad (2-1)$$

就全球的海洋,其方程为

$$P_o + R - E_o = \Delta S_o \quad (2-2)$$

式中 P_c, P_0 ——大陆和海洋在时段间的降水量;

E_c, E_0 ——大陆和海洋在时段间的蒸发量;

R ——流入海洋的径流量;

$\Delta S_c, \Delta S_0$ ——大陆和海洋在时段 Δt 间的蓄水变量,等于时段末的蓄水量减时段初的蓄水量。

对于全球,显然为式(2-1)和式(2-2)相加,即

$$P_c - P_0 - (E_c + E_0) = \Delta S_c + \Delta S_0 \quad (2-3)$$

2. 对于多年平均

由于每年的 $\Delta S_c, \Delta S_0$ 有正、有负,多年平均趋于零,故有

$$\text{大陆:} \quad P_c - R = E_c \quad (2-4a)$$

$$\text{海洋:} \quad P_0 + R = E_0 \quad (2-4b)$$

$$\text{全球:} \quad P_c + P_0 = E_c + E_0 \quad (2-5)$$

即全球多年平均的蒸发量等于多年的降水量,为 $577\,000\text{ km}^3/\text{年}$ 。

降水、蒸发和径流是水循环过程中的三个最重要环节,并决定着全球的水量平衡。假如将水从液态变为汽态的蒸发作用作为水的支出(E),将水从汽态转变为液态(或固态)的大气降水作为收入(P),径流是调节收支的重要参数。根据水量平衡方程全球一年中的蒸发量应等于降水量,即 $E_{\text{全球}} = P_{\text{全球}}$ 。对任一流域、水体或任意空间,在一定时段内,收入水量等于支出水量与时段始末蓄水变量的代数和。例如,多年平均的大洋水量平衡方程为降水量+径流量=蒸发量;陆地水量平衡方程为降水量=径流量+蒸发量。但是,无论是在海洋上或陆地上,降水量和蒸发量因纬度不同而有较大差异。赤道地区,特别是北纬 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间水分过剩;在南北纬 $10^\circ \sim 40^\circ$ 一带,蒸发超过降水;在 $40^\circ \sim 90^\circ$ 之间,南、北半球的降水均超过蒸发,又出现水分过剩;在两极地区降水和蒸发都较少,趋于平衡。降水和蒸发的相对和绝对数量以及周期性对生态系统的结构和功能有着极大影响,世界降水的一般格局与主要生态系统类型的分布密切相关。而降水分布的特定格局又主要由大气环流和地貌特点所决定的。

地球表面及其大气圈的水只有大约 5% 是处于自由的可循环状态,其中 99% 都是海水。令人惊异的是地球上 95% 的水不是海水,也不是淡水,而是被结合在岩石圈和沉积岩里的水,这部分水不参与全球水循环。地球上的淡水大约只占地球总水量(不包括岩石圈和沉积岩里的结合水)的 3%,其中 3/4 被冻结在两极的冰盖和冰川里。如果地球上的冰雪全部融化,其水量可满盖地球表面 50 m 厚。虽然地球上全年降水量多达 $5.2 \times 10^{17}\text{ kg}$ (或 $5.2 \times 10^8\text{ km}^3$),但是大气圈中的含水量和地球总水量相比却是微不足道的。地球全年降水量约等于大气圈含水量的 35 倍,这说明,大气圈含水量足够 11 天降水用,平均每隔 11 天,大气圈中的水就得周转一次。

2.2 河流与流域

2.2.1 河流

1. 河流及其分段

在陆地表面上接纳、汇集和输送水流的通道称为河槽,河槽与在其中流动的水流统称为

河流。河流是地球上水分循环的重要路径,是与人类关系最密切的一种天然水体。它是自然界中脉络相通的排泄降水径流的天然输水通道,其中分为各级支流及干流。河流的干流及其全部支流,构成脉络相通的河流系统,称为河系或水系。具有同一归属的水体所构成的水网系统称水系。组成水系的水体有河流、湖泊、水库和沼泽等。河流的干流及其各级支流构成的网络系统又称河系。一般水系和河系经常通用。

一个流域的水系,由干流和各级支流组成。直接汇集水流注入海洋或内陆湖泊的河流称为干流,直接流入干流的支流称一级支流,流入一级支流的支流称二级支流,依次类推。也有把接近源头的最小的支流叫一级支流,一级支流注入的河流叫二级支流,随着汇流的增加,支流的级别增多。不同水系的支流级别多少是不同的,这和水系的发展阶段有关。

每条河流一般可分为河源、上游、中游、下游、河口五个分段,各个分段都有其不同的特点。

(1) 河源。河流开始的地方,可以是溪涧、泉水、冰川、沼泽或湖泊等。

(2) 上游。直接连着河源,在河流的上段,它的特点是落差大,水流急,下切力强,河谷狭,流量小,河床中经常出现急滩和瀑布。

(3) 中游。中游一般特点是河道比降变缓,河床比较稳定,下切力量减弱而旁蚀力量增强,因此河槽逐渐拓宽和曲折,两岸有滩地出现。

(4) 下游。下游的特点是河床宽,纵比降小,流速慢,河道中淤积作用较显著,浅滩到处可见,河曲发育。

(5) 河口。河口是河流的终点,也是河流流入海洋、湖泊或其他河流的入口,泥沙淤积比较严重。

2. 河流基本特征

(1) 河长 L

自河源沿干流到流域出口的流程长度称为河长,是确定河流落差、比降和能量的基本参数,以 km 计。河槽中沿流向各最大水深点的连线,叫作溪线,也称为深泓线。河流各横断面表面最大流速点的连线为中泓线。测定河长,就要在精确的地形图上画出河道深泓线,用两脚规逐段量测。

(2) 弯曲系数

弯曲系数是河流平面形状的弯曲程度,是河源至河口的河长 L 与两地间的直线长度 l 之比,用字母 φ 表示。

$$\varphi = \frac{L}{l} \quad (2-6)$$

据此也可求出任意河段的弯曲系数。显然 $\varphi \geq 1$, φ 值越大,河流越弯曲;当 $\varphi = 1$ 时,河流顺直。一般平原地区的 φ 值比山区的大,下游的 φ 值比上游的大。

(3) 平面形态

在平原河道,由于河中水流发生环流的作用,泥沙的冲刷与淤积,使平原河道具有蜿蜒曲折的形态。由于在河流横断面上存在水面横比降,使水流在向下游流动过程中,产生一种横向环流,这种横向环流与纵向水流相结合,形成河流中常见的螺旋流。在河道弯曲的地方,这种螺旋流冲刷凹岸,使其形成深槽或使凸岸淤积,形成浅滩,直接影响着水源取水口位置的选择。两反向河湾之间的河段水深相对较浅,称之为浅槽,深槽与浅槽相互交替出现,

表现出河床深度的分布与河流平面形态的密切关系。

在山区,河流一般为岩石河床,平面形态异常复杂,并无上述规律,其河岸曲折不齐,深度变化剧烈,等深线也不匀调缓和。

(4) 河流断面

① 河流的横断面:河槽中某处垂直于流向的断面称为在该处河流的横断面。它的下界为河底,上界为水面线,两侧为河槽边坡,有时还包括两岸的堤防。不同水位有不同的水面线。某一时刻的水面线与河底线包围的面积称过水断面。河槽横断面是决定河道输水能力、流速分布等的重要特征,也是计算流量的重要参数。过水断面面积(F)随水位(H)的变化而变。过水断面上,河槽被水流浸湿部分的周长称为湿周(P),过水断面面积与湿周之比值称为水力半径(F_R),即 $F_R = F/P$ 。河槽上的泥沙、岩石、植物等对水流阻碍作用的程度称为河槽的糙度,其大小对河流流速有很大影响。河槽的糙度多用粗糙系数 n 表示。过水断面面积(F)与水面宽度(B)的比值称平均水深 h ,即 $h = F/B$ 。如图 2-2 所示的横断面分单式断面和复式断面。

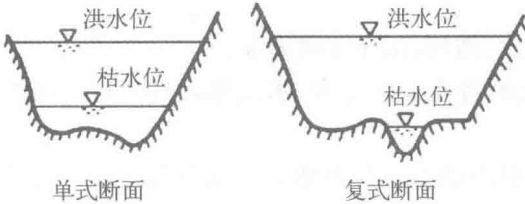


图 2-2 单式断面和复式断面示意图

② 河流的纵断面:河流的纵断面是指河底或水面高程沿河长的变化。河底高程沿河长的变化称河槽纵断面;水面高程沿河长的变化称水面纵断面。沿河流中线(也有取沿程各横断面上的河床最低点)的剖面,测出中线以上(或河床最低点)地形变化转折的高程,以河长为横坐标,高程为纵坐标,即可绘出河流的纵断面图。纵断面图可以表示河流的纵坡及落差的沿程分布。

(5) 河道坡度(河道纵比降)

河槽或水面的纵向坡度变化可用比降表示,河槽纵比降是指河段上下游河槽上两点的高差(又称落差)与河段长度的比值。水面纵比降是指河段上下游两点同时的水位差与河段长度的比值。河槽(或水面)纵比降可用下式计算:

$$i = (H_{\text{上}} - H_{\text{下}}) / L \quad (2-7)$$

式中 i ——河槽(或水面)纵比降;

$H_{\text{上}}, H_{\text{下}}$ ——河段上、下游两点的高程(或同时的水位);

L ——河段长度。

某一河段河底高程自上游向下游变化,纵断面如图 2-3 所示,其平均河道坡度 J 按下式计算:

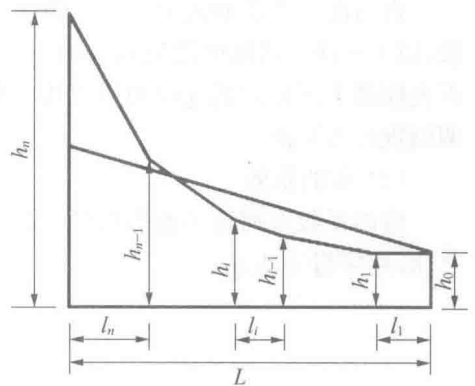


图 2-3 河道纵断面及河道坡度计算示意图

$$J = \frac{(h_0 + h_1)l_1 + (h_1 + h_2)l_2 + \dots + (h_{n-1} + h_n)l_n - 2h_0L}{L^2} \quad (2-8)$$

(6) 河流侵蚀基准面

河流在冲刷下切过程中其侵蚀深度并非无限度,往往受某一基面所控制,河流下切到这一基面后侵蚀下切即停止,此平面成为河流侵蚀基准面。它可以是能控制河流出水口水面

高程的各种水面,如海面、湖面、河面等,也可以是能限制河流向纵深方向发展的抗冲岩层的相应水面。这些水面与河流水面的交点成为河流的侵蚀基点。河流的冲刷下切幅度受制于侵蚀基点。所谓的侵蚀基点并不是说在此点之上的床面不可能侵蚀到低于此点,而只是说在此点之上的水面线和床面线都要受到此点高程的制约,在特定的来水来沙条件下,侵蚀基点的情况不同,河流总剖面的形态、高程及其变化过程,也可能有明显的差异。

3. 河流的水情要素

(1) 水位

水位是指河流某处的水面高程。它以一定的零点作为起算的标准,该标准称为基面,我国目前统一采用青岛基面。在生产和研究中,常用的特征水位有:① 平均水位:指研究时段内水位的平均值。如月平均水位、年平均水位、多年平均水位。② 最高水位和最低水位:指研究时段内水位的最大值和最小值。如月最高和最低水位,年最高和最低水位,多年最高和最低水位等。

(2) 流速

① 流速的脉动现象,流速是指河流中水质点在单位时间内移动的距离。即

$$V = x/T \quad (2-9)$$

式中 V ——流速, m/s;

x ——距离, m;

T ——时间, s。

河水的流动属紊流运动。紊流的特性之一是水流各质点的瞬时流速的大小和方向都随时间不断变化,称其为流速脉动。

② 河道中流速的分布,天然河道中流速的分布十分复杂,在垂线上(水深方向),从河底至水面,流速随着糙度影响的减小而增大,最小流速在河底,最大流速在水面下某一深度。河流横断面上各点流速,随着在深度和宽度上的位置以及水力条件变化而不同,一般都由河底向水面,由两岸向河心逐渐增大,最大流速出现在水流中部。

(3) 流量

单位时间内通过某一过水断面水的体积称流量,单位为 m^3/s 。根据流量的定义,通过微分面积 dF 的流量 $dQ = v dF$, 则断面流量可用下式表示:

$$Q = \int dQ = \int v dF \quad (2-10)$$

因此,测定某断面的流量就要进行流速和断面的测定。在河流断面上,流量增大,水位升高;流量减小,水位降低。因此,水位和流量具有一定的关系,可用下式表示:

$$Q = f(H) \quad (2-11)$$

这种关系可用一条曲线表示,即水位流量关系曲线。流量代表着河流的水资源,应用很广泛,故有多种特征值,如瞬时流量、日平均流量、月平均流量、年平均流量等。

(4) 径流总量

将某一时段内的流量加合起来,则叫某时段的径流总量(W),常用以表示水资源:

$$W = Q \cdot T \quad (2-12)$$

式中, Q 为 T 时段内的平均流量。