

清华大学水利工程系列教材

全国水利行业规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

Watershed Hydrology

流域水文学

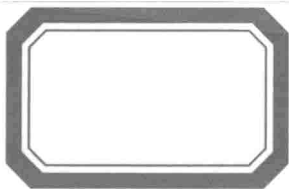
杨大文 杨汉波 雷慧闽 编著

Yang Dawen Yang Hanbo Lei Huimin

清华大学出版社

清华大学水利工程系列教材

全国水利行业规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

Watershed Hydrology

流域水文学

杨大文 杨汉波 雷慧闽 编著

Yang Dawen Yang Hanbo Lei Huimin

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为高等学校水文水资源专业及水利水电工程专业的通用教材。全书共 12 章, 主要内容包括: 地球上水的分布及循环, 降水, 积雪与融雪, 蒸发, 降雨下渗及土壤中的水分运动, 河川径流, 流域产汇流分析及水文模型, 流域水文预报, 水文统计分析方法, 设计年径流, 设计洪水等。全书系统介绍了流域水文学的基本概念、原理和方法, 包括流域水文基本过程、流域水文计算方法和工程水文设计三大部分。本书内容安排重视从原理到方法的自然过渡, 注重科学与工程相结合, 在保持经典内容的基础上体现水文学的新进展。

本书可供高等院校相关专业的师生使用, 也可作为相关专业科研人员和工程技术人员的参考书。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

流域水文学/杨大文, 杨汉波, 雷慧闽编著. --北京: 清华大学出版社, 2014

清华大学水利工程系列教材

ISBN 978-7-302-36069-8

I. ①流… II. ①杨… ②杨… ③雷… III. ①流域—水文学—高等学校—教材 IV. ①P343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 069720 号

责任编辑: 张占奎 洪 英

封面设计: 常雪影

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 沈 露

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 北京密云胶印厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 203mm×253mm 印 张: 14.75 字 数: 435 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版 印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~2500

定 价: 35.00 元

产品编号: 043973-01

前 言

水文学是研究地球上水的起源、循环及分布,水与物理、生态环境之间的相互作用及水对人类活动的响应等规律,以及应用这些规律为人类服务的知识体系。水文学是地理科学、水利科学与工程等专业的基础课程。流域水文学以流域为研究的基本对象,介绍流域尺度的水文过程、分析方法及工程应用等基础知识。

水文现象具有确定性和随机性,水文过程的描述方法也有确定性方法和统计方法两大类。确定性方法认为,水文过程遵循质量守恒、能量守恒和动量守恒定律,流域水量平衡、蒸发、下渗、地表与地下径流等水文过程的数学物理描述都是这三大守恒定律的具体应用。根据水文现象的随机性,概率与数理统计方法广泛应用于水文分析与工程水文设计。流域水文学力求体现对自然规律的认识,从不同时间和空间尺度讲解水文循环的现象、过程和原理,揭示流域水量平衡的基本规律。本书系统介绍了流域水文学的方法论,力求做到从原理到方法的自然过渡,注重科学与工程相结合,在保持水文学经典内容的基础上适当体现水文学的一些前沿发展,做到经典与前沿相结合。

早在1938年,清华大学土木工程系水利组就开设了水文学课程,并培养了一批我国早期的水文学家。1952年,清华大学成立水利工程系,工程水文学是本科生的专业基础课程。长期以来,水文学课程坚持课堂教学与实践教学相结合,强调基础理论知识,重视培养学生分析和解决工程实际问题的能力。20世纪50年代,黄万里教授讲授工程水文学课程并编写了《工程水文学》(电力工业出版社,1957年)教材,廖松教授参加了全国高等学校教材《工程水文学》(水利电力出版社,1987年)的编写,王燕生教授主持了全国高等学校教材《工程水文学(第2版)》(中国水利水电出版社,1992年)的编写。

为了适应水利学科及中国水利事业发展的新形势,从2004年开始,清华大学水利水电工程系对工程水文学课程的教学内容进行调整,启动编写水文学新教材,并同步启动了精品课程建设。2005年,将原来的工程水文学课程(48学时)调整为水文学系列课程,包括水文学原理与应用(I)(32学时)、水文学原理与应用(II)(32学时)及工程水文设计(16学时)。水文学原理与应用(I)的主要授课内容为流域水文学,水文学原理与应用(II)的主要授课内容为地下水文学。水文学原理与应用课程在2008年被评为清华大学精品课,在2009年被评为北京市精品课程和国家精品课程。

本书主要由杨大文编写与统稿,杨汉波和雷慧闽参与了部分内容的编写,全书由张思聪校稿。本书在编写过程中,得到了多位教师的热情帮助,清华大学水利水电工程系水文水资源研究所的多名研究生参与了资料的收集、整理和编写工作,特此感谢。虽然本书在编写过程中做了大量的工作,但是书中难免存在一些问题,希望广大师生及读者在使用过程中提出宝贵意见和建议,以便今后进一步完善。

编 者

2014年5月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水文学的研究对象和内容	1
1.2 水文学的发展历程	2
1.3 水文学的研究方法	3
参考文献	4
习题	4
第 2 章 地球上水的分布及循环	5
2.1 地球上水的分布与循环	5
2.1.1 地球上水的分布	5
2.1.2 全球水循环与水量平衡	5
2.2 全球能量平衡	9
2.2.1 太阳辐射传输	9
2.2.2 地球表面的能量平衡	9
2.3 流域水文循环与水量平衡	10
2.3.1 流域水量平衡	10
2.3.2 流域水文气候特征	11
参考文献	11
习题	12
第 3 章 降水	13
3.1 大气的基本特征	13
3.1.1 大气的垂直结构	13
3.1.2 主要气象要素	15
3.1.3 大气状态方程	17
3.1.4 大气稳定性	18
3.2 降水形成及分类	20
3.2.1 降水形成机理	20
3.2.2 降水类型	21
3.3 影响降水的天气系统	22
3.3.1 高纬度气旋和锋面	22
3.3.2 高纬度对流天气系统	24
3.3.3 季节性的热带天气系统	25
3.3.4 大尺度热带对流天气系统	25
3.3.5 降水的地形效应	25

3.4	降雨观测	26
3.4.1	雨量筒	26
3.4.2	天气雷达	27
3.4.3	卫星遥感	27
3.5	流域降雨特性分析	27
3.5.1	降雨的时空特征	27
3.5.2	流域面平均雨量	29
	参考文献	31
	习题	31
第4章	积雪与融雪	32
4.1	雪的物理性质及分布	32
4.1.1	雪的成分	32
4.1.2	雪的相变	33
4.1.3	积雪分布	34
4.2	融雪过程及融雪量计算	35
4.2.1	融雪的物理过程	35
4.2.2	融雪水分下渗及径流	36
4.2.3	融雪水量计算	36
4.3	降雪、积雪与融雪观测	38
4.3.1	降雪观测	38
4.3.2	积雪观测	39
4.3.3	融雪观测	40
	参考文献	40
	习题	41
第5章	蒸发	42
5.1	蒸发的物理过程	42
5.1.1	地表能量平衡	42
5.1.2	紊流扩散与湍流通量	43
5.1.3	蒸发与土壤水分	43
5.1.4	蒸腾与植被生长	44
5.2	蒸发能力	44
5.2.1	蒸发能力概念	44
5.2.2	蒸发能力测量	45
5.2.3	蒸发能力估算	46
5.3	流域实际蒸发	47
5.3.1	实际蒸发的组成	47
5.3.2	实际蒸发的观测	48
5.3.3	流域实际蒸发估算	48
5.4	气候变化对蒸发的影响	49

参考文献	50
习题	50
第 6 章 降雨下渗及土壤中的水分运动	51
6.1 降雨下渗	51
6.1.1 下渗过程及其定量描述	51
6.1.2 土壤下渗能力	52
6.1.3 实际降雨下渗过程	53
6.2 土壤包气带的调蓄作用	54
6.2.1 包气带对降雨下渗的影响	54
6.2.2 包气带对下渗水量的再分配	54
6.3 土壤水分运动过程	55
6.3.1 土壤水形态	55
6.3.2 土壤水分常数	55
6.3.3 土壤水分运动	57
6.4 地下水补给与排泄	58
6.4.1 潜水补给与排泄	58
6.4.2 承压水补给与排泄	59
参考文献	59
习题	60
第 7 章 河川径流	61
7.1 流域的基本概念	61
7.2 河网结构及其描述	62
7.3 流域地貌与水文特性	64
7.4 河川径流过程	66
7.4.1 产流过程	66
7.4.2 汇流过程	67
7.5 河川径流基本特征	68
7.5.1 河川径流的度量	68
7.5.2 河川径流特征	69
7.6 河川径流测量	70
7.6.1 水文站布设	70
7.6.2 水位观测	72
7.6.3 流量观测	73
7.6.4 水位-流量关系	75
参考文献	77
习题	77

第 8 章 流域产汇流分析及水文模型	78
8.1 概述	78
8.2 流域产流机制	79
8.2.1 蓄满产流	79
8.2.2 超渗产流	80
8.3 流域产流计算	80
8.3.1 蓄满产流计算	80
8.3.2 超渗产流计算	85
8.4 流域汇流计算	88
8.4.1 等流时线法	88
8.4.2 经验单位线法	91
8.4.3 纳西单位线法	96
8.4.4 地下径流的汇流计算	101
8.5 流域水文模型	102
8.5.1 经验性水文模型	102
8.5.2 概念性水文模型	103
8.5.3 分布式水文模型	105
参考文献	109
习题	109
第 9 章 流域水文预报	110
9.1 概述	110
9.1.1 水文预报的用途	110
9.1.2 水文预报方法分类	111
9.2 短期洪水预报	111
9.2.1 上下游相关关系法	112
9.2.2 河道洪水演进法	113
9.2.3 基于实测降雨的洪水预报	117
9.3 中长期径流预报	117
9.3.1 中长期枯水预报	118
9.3.2 中长期径流预报	119
参考文献	119
习题	120
第 10 章 水文统计分析方法	121
10.1 水文序列及其统计特征	121
10.1.1 水文序列的概念	121
10.1.2 概率与频率	121
10.1.3 水文序列的统计特征	122
10.2 水文学常用概率分布	125

10.2.1	正态分布	125
10.2.2	皮尔逊Ⅲ型分布	125
10.3	水文频率分析	127
10.3.1	概率分布的参数估计	127
10.3.2	水文频率分析	129
10.4	水文时间序列分析	135
10.4.1	趋势分析	136
10.4.2	突变分析	136
10.4.3	周期分析	137
10.5	水文相关分析	139
10.5.1	基本概念	139
10.5.2	线性相关	140
10.5.3	曲线相关	145
	参考文献	146
	习题	146
第 11 章	设计年径流	147
11.1	概述	147
11.1.1	年径流变化特性	147
11.1.2	年径流量的影响因素	148
11.2	根据长期实测资料推求设计年径流	149
11.2.1	资料审查	150
11.2.2	设计年、月径流量系列	151
11.2.3	设计代表年径流量及年内分配	152
11.3	根据短期实测资料推求设计年径流	154
11.3.1	根据径流资料的插补与延长	155
11.3.2	根据降雨资料的插补与延长	156
11.4	缺乏实测资料情况下的设计年径流计算	156
11.4.1	水文比拟法	156
11.4.2	参数等值线图法	157
	参考文献	157
	习题	158
第 12 章	设计洪水	159
12.1	概述	159
12.1.1	工程等级与设计标准	159
12.1.2	设计洪水的三要素	161
12.2	由流量资料推求设计洪水	161
12.2.1	资料审查	162
12.2.2	样本选取	162
12.2.3	特大洪水的频率计算	163

12.2.4	频率曲线参数估计	166
12.2.5	设计洪峰、洪量及洪水过程	167
12.2.6	误差分析及合理性检查	174
12.3	由暴雨资料推求设计洪水	174
12.3.1	设计面暴雨量	174
12.3.2	设计净雨计算	180
12.3.3	由设计净雨推求设计洪水	180
12.4	可能最大暴雨及可能最大洪水	183
12.4.1	可能最大降水量估算	183
12.4.2	流域可能最大降水	184
12.4.3	流域可能最大洪水	189
12.5	小流域设计洪水	190
12.5.1	小流域设计暴雨	190
12.5.2	小流域设计洪水的推理公式	192
12.5.3	小流域设计洪水过程线	195
参考文献	196
习题	196
附录 A	皮尔逊Ⅲ型频率曲线的离均系数 Φ 值表	198
附录 B	皮尔逊Ⅲ型频率曲线的模比系数 K_p 值表	202
附录 C	瞬时单位线 S 曲线查用表	209
附录 D	1000 hPa 地面到指定高度(用气压表示)间饱和假绝热大气中的可降水量与 1000 hPa 露点函数关系表	214
附录 E	1000 hPa 地面到指定高度(距地面的高度)间饱和假绝热大气中的可降水量与 1000 hPa 露点函数关系表	216
各章主要名词中英文对照	218

第 1 章 绪 论

1.1 水文学的研究对象和内容

在语源学上,hydrology 来源于古希腊,是一个复合词,由“水(water)”和“词(word)”组成。就词义而言,水文学是关于水的科学,涉及的范围非常广泛。水文学作为一门现代学科,直到 20 世纪 60 年代还没有全世界同行公认的定义。1968 年 Price 和 Heindl 对过去约百年的文献资料进行了调研,得出的结论是:人们有一个共识,即水文学是一门研究陆地和近海地区水循环的物理科学,而且水文学的概念还有不断拓展的趋势,甚至涉及社会经济学层面。

《中国大百科全书》中对水文学的定义是:水文学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律和应用这些规律为人类服务的知识体系。联合国教科文组织(UNESCO)对水文学的定义是:Hydrology is the science which deals with waters of the earth,their occurrence,circulation,distribution on the planet,their physical and chemical properties,and their interactions with the physical and biological environment,including their responses to human activity。由此可见,水文学研究的主要内容和目的是揭示地球上水的时空分布和变化规律以及如何应用这些规律为人类服务。

地球上水的循环包括大气水循环、海洋水循环和陆地水循环。根据不同的研究对象,水文学可分为气象水文学(hydrometeorology)、海洋水文学(marine hydrology)和陆地水文学(terrestrial hydrology)。水文学在全球尺度上以海洋—陆地—大气系统中的水循环为研究对象,揭示大气、海洋、陆地之间的水量交换规律。全球水循环研究又将上述地球科学中的不同分支联系在一起。在陆地水文学这个分支中,还有针对不同对象的流域水文学(watershed hydrology)、湖泊水文学(limnology)、地下水水文学(groundwater hydrology)、冰川水文学(glaciology)和沼泽(湿地)水文学(swamp hydrology)等更细的学科划分。水文学作为地球科学的一个分支,除研究水循环自身的机理和规律之外,另一个主要研究内容是水圈与地球表面其他圈层(包括大气圈、岩石圈、土壤圈、生物圈和人类圈)之间的相互作用,其中涉及水资源、洪水和干旱、地质灾害、生态与环境等方面,这些都与人类生存和发展息息相关。

由于水对人类有着广泛而深刻的影响,水文学是随工程应用而发展,并非由于水文学的发展而导致应用。为了满足防洪、供水和灌溉等的需求,水文学在水利工程和农业工程的实践中诞生、发展和不断完善,最初的水文学更应称为应用水文学。就从水利工程的视角而言,应用水文学也称为工程水文学,它直接服务于水利工程的规划设计、施工和运行管理等,在水利工程的规划设计、施工和运营管理阶段有不同的任务。工程水文学在水利工程规划、设计阶段的主要任务是确定合理的工程规模;在工程施工阶段是确保规划设计建筑物得以安全实施;在运营和管理阶段是保证水利工程效益的充分发挥。在这三个不同的阶段,工程水文学的主要任务是水

水计算、水文预测和预报。现代水利不仅仅是水利工程的规划、设计、施工和管理,更重要的是确保人类对水资源的可持续利用。人类开发、利用和保护水资源的活动通常是以流域为基本单元,流域是水文学研究的主要对象。流域水文学主要研究流域水文现象、水文过程、产汇流基本规律、径流和洪水的预测和预报方法,以及流域水资源开发中的水文计算方法等。

总之,无论是作为应用科学的工程水文学还是作为地球科学的水文学,其根本目的是为人类社会的可持续发展提供科学依据。

1.2 水文学的发展历程

水文学经历了从萌芽到成熟、从定性到定量、从经验到理论、又从应用再到理论的发展过程。

1. 萌芽时期(1400 年以前)

这一时期,一些早期的文明古国就开始了水文学的萌芽。古埃及在公元 3000 多年前,为了灌溉引水就开始对尼罗河水位进行了观测,至今还保存有公元前 2200 年所刻水尺的崖壁。在中国,公元前 300 年,战国时代的李冰父子在川西平原开凿了举世闻名的都江堰引水工程,设石人水尺进行水位观测,都江堰水利工程至今仍发挥着巨大的效益。早在公元前 239 年,《吕氏春秋》中就提出了水循环的朴素概念:“云气西行云云然,冬夏不辍;水泉东流,日夜不休;上不竭,下不满,小为大,重为轻,圜道也。”在长江上游涪陵城北,长江岸边有长 1600m,宽 15m 左右的“白鹤梁”,用雕刻的石鱼图形记载了自公元 700 年以来长江的最枯水位,被誉为“世界最早的古代水文站”。

2. 奠基时期(1400—1900 年)

自 14 世纪欧洲文艺复兴开始,特别是 18 世纪的工业革命以来,水文观测仪器得到了巨大发展,为建立水文学奠定了基础。法国人 Bernard Palissy(1510—1590 年)根据自己的野外观测,提出了降雨是河流的唯一来源的革命性理论,并首先正确解释了温带地区的水循环。之后,法国人 Pierre Perrault(1608—1680 年)开展了田间水文综合研究。英国人 Edmund Halley(1656—1742 年)进行了蒸发试验。

3. 应用时期(1900—1950 年)

在这一时期,水文观测站网开始建设并不断扩大,实测资料不断积累,应用水文学研究取得长足的进展。在这一时期诞生了诸多具有里程碑意义的水文分析方法,如 1924 年提出的 P-III 频率曲线分析方法,1932 年提出的谢尔曼单位过程线,以及 1935 年提出的马斯京根河道洪水演进计算方法等,这些方法不仅满足了当时的工程实践需要,而且极大地推动了水文学的发展。

4. 现代水文学的形成(1950 年以后)

20 世纪 50 年代以来,科学技术进入了新的发展时期,人类改造自然的能力迅速增强,人与水的关系正由古代的趋利避害,近代较低水平的兴利除害,发展到现代较高水平的兴利除害,水文学也进入了现代水文学时期。这个新阶段赋予水文学新的特色有:①人类对水资源的需求越来越迫切,水文学的研究领域正向着为水资源开发利用提供依据的方向发展。②大规模人类活动对水文循环,进而对地球环境正在产生多方面的影响。研究和评价这种影响,指导人们在水资源开发时注意保护人类生存环境,也是水文学发展中的新课题。水文学和环境学的交叉学科——环境水文学以及水文学与生态学的交叉学科——生态水文学正在孕育形成。③现代科学技术,如遥感技术(特别是地球观测技术)、地理信息系统、计算机技术、网络技术等,正在渗入水文学的各个研究领域,使传统水文学方法实现新突破成为可能。④水文学的研究领域不断扩大,水文学与地球科学中其他学科间的空隙逐渐得到填补,交叉学科正在蓬勃兴起。

现代水文学以研究地球表面不同时间和空间尺度的水循环过程为主要内容,包括水循环的物理过程、伴随

水循环过程的生物化学过程以及植物生态过程等。其应用范围涉及水利工程、水资源管理以及生态与环境保护等领域,在研究手段上,更加重视包括地面观测与试验、卫星遥感观测及计算机模拟和仿真等的综合方法;在学科发展上,更具多学科交叉的特色。总之,现代水文学是地球科学与工程科学的结合,架设从科学认知通向工程实践的桥梁是水文学研究的主要任务之一,这对应用科学而言尤为重要。

1.3 水文学的研究方法

1. 系统分析方法

系统分析方法是现代水文的一个标志,它将流域视为一个系统,气象因子(降雨和气温等)是该系统的输入,而流域出口断面的流量则是该系统的输出,旨在建立系统外部输入和系统输出之间的数学关系。由于系统分析方法没有考虑流域水循环要素之间的相互作用,而将流域系统视为一个“黑箱”,由此构建的水文模型称为“黑箱模型”。采用这一方法得出的数学关系是经验性的,所以系统分析方法也称为经验性方法。

采用系统分析可以方便地应用一些通用的数学算法,简单而且实用。但是,其得到的数学关系与流域水文过程的物理机理相差甚远,这也正是这种方法的缺陷。究其原因,首先,对于输入输出变量之间因果关系的判断主要源于经验,很有可能忽视了一些重要的现象;其次,这种方法仅仅是简单复制系统过去输入和输出的数据,不能处理系统中的变化因素,也就无法预测流域水文条件变化(如城市化、气候变化等)带来的影响。

2. 成因分析法

从水文现象的成因出发,分析流域水文过程,通过成因推理提出估算河川径流量、洪峰大小等关键水文变量的公式,这一方法称为成因分析法。成因分析法来自于对水文过程的认识和实践经验的积累,将复杂的流域水文过程进行简化,抽象为一个“概念性的模型”,并构建流域输入与输出的响应函数,这种函数中的许多系数通常采用经验系数。

3. 基于水文过程的分析方法

基于水文过程机理的分析方法,利用流体力学、热力学中的守恒原理和边界条件,以建立水文输入(如流域内的降雨量)和输出(如流域出口的流量)之间的关系。依据守恒定律建立流域水文过程的数学物理描述构建的水文模型称为“物理性水文模型”。由于大多数流域的地形地貌、土壤和植被等下垫面条件十分复杂,而且流域边界条件的不确定性也很大,因此难以推导模型的解析解,通常利用计算机进行数值求解。水文过程分析与计算机数值模拟相结合的方法是现代水文分析的主流方法。

4. 数理统计法

水利工程的使用寿命一般是数十乃至上百年,在工程规划和设计阶段需要对未来长期的水文情势进行合理预测。针对流域的历史气象和水文资料,采用数理统计方法分析其中的水文统计特征,由此可以预测未来较长时期内的流域水文情势。这种方法适用的前提是:流域过去的水文行为在未来可能重复,过去的水文统计特征可以代表流域未来的水文状况。数理统计方法仅适用于长期水文预测,不适用于短期或实时的水文预报。

系统分析、成因分析和机理分析方法之间的界限其实并不十分清晰,它们本质上都是成因分析方法,只是对流域水文过程机理的解释程度不同而已。还有一点必须指出:水文分析是在一定的时间和空间尺度上进行的。虽然基本的守恒定律并不随尺度改变,但是为了使方程闭合以便求解而补充的其他方程,是在一定尺度给出的。因此,在研究水文现象的时候,重要的并不是选择机理分析方法、系统分析方法或是概念性方法,而是根据现有的观测数据以及需要解决的问题,决定在什么尺度上构建什么方程。

参 考 文 献

- [1] 施成熙,华士乾,陈道弘. 中国大百科全书——大气科学·海洋科学·水文科学[M]. 北京: 大百科全书出版社,1987.
- [2] BISWAS A K. History of hydrology[M]. Amsterdam-London: North-Holland Publishing Company,1970.
- [3] Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences, et al. Opportunities in the hydrologic sciences[M]. Washington, D. C. : National Academies Press,1991.
- [4] BRUTSAERT W. Hydrology: an introduction[M]. Oxford: Cambridge University Press,2005.

习 题

- 1.1 水文学的一般定义。
- 1.2 水文学的主要研究对象有哪些? 水文学包括哪些学科分支?
- 1.3 在水利工程、农业工程的生产实践中,水文学有哪些应用?
- 1.4 以时间为线索,概述水文学的发展阶段。
- 1.5 现代水文学主要有哪些特点? 包含哪些研究内容?
- 1.6 简要的概述水文学的分析方法及特点。

第 2 章 地球上水的分布及循环

水是地球上一切生命之源,水的分布及循环与地球上人类的生存和繁衍息息相关。全球气候变化可能导致全球水循环发生变化,从而改变地球上水的分布,并影响地球生态系统,特别是陆地生态系统及人类。

本章主要介绍全球水循环和水量平衡的概念及其基本特征,全球能量平衡及其与水循环和水量平衡之间的关系,流域水文循环和水量平衡的概念及流域气候水文特征等。

2.1 地球上水的分布与循环

2.1.1 地球上水的分布

地球上的水主要存在于海洋、陆地和大气中,表 2-1 所示为地球主要水体中的水量分布。海洋中的水占地球总水量的 96.5%左右,陆地上的水占 3.5%左右,其中淡水仅占全球总水量的 2.5%左右,大气中的水在全球水体中所占比例微不足道。在全球的淡水中,江河水体中的淡水占全球淡水的比例仅为 0.006%,这部分淡水是人类利用的主要水资源。

表 2-1¹ 地球主要水体的水量分布

主要水体		水量/km ³	占全球总水量的百分比/%	占全球淡水的百分比/%
海洋		13.38×10 ⁸	96.5	—
陆地	总水量	48.51×10 ⁶	3.5	—
	淡水总量	35.03×10 ⁶	2.5	100
	冰川和积雪	24.36×10 ⁶	—	69.6
	地下水	10.53×10 ⁶	—	30.1
	湖泊	9.1×10 ⁴	—	0.26
	江、河	2120	—	0.006
大气		1.29×10 ⁴	0.001	0.04

2.1.2 全球水循环与水量平衡

1. 全球水循环(global water cycle)

地球上的水在太阳辐射作用下,不断蒸发变成水汽上升到空中,被气流带动输送到各地,在输送过程中水

汽遇凝结,形成降水降落到地面和海洋,降至地面的那部分水直接进入河流或渗入地下然后补给河流,再流入海洋。水分这种往返循环、不断转移交替的现象称为水文循环或水循环(见图 2-1)。图中数字表示全球水循环中的水量平衡关系,它反映了地球水循环的总体特征和大致的水量交换关系。

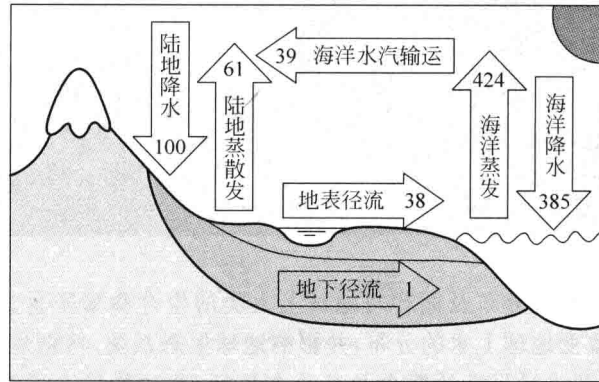


图 2-1 全球水循环及水量平衡关系示意图(以陆地上的年降水量为基准,100=119 000 km³/a,资料来源: MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. New York: McGraw-Hill, Inc. ,1993.)

从全球来看,水循环包括两个方向,即垂直方向上大气与地球表面之间通过降水和蒸发进行的垂向水分交换;水平方向上海洋和陆地之间进行的水分交换,包括海洋与陆地之间的双向水汽输送(由海洋向陆地输送的水汽较多)以及陆地向海洋输送径流(包括地表和地下径流)。图 2-2 是以水深(水量除以面积)表示的水量平衡关系,这给人以更加直观的认识。海洋的平均年降水量为 1270 mm,陆地为 800 mm;海洋的平均年蒸发量为 1400 mm,陆地为 480 mm;陆地向海洋输送的年径流量,以陆地面积衡量为 320 mm,以海洋面积衡量为 130 mm。人类水资源的主要来源是河川径流,水资源的可再生性取决于水的循环特性。

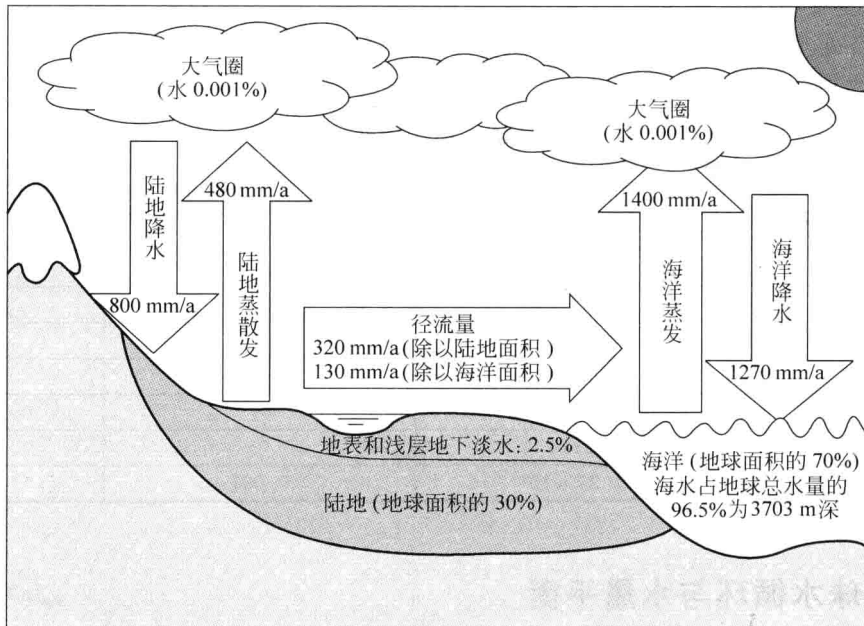


图 2-2 全球水循环中的水量平衡关系

2. 水量平衡(water balance)

在水循环中,任一地区(可以是全球、大陆、海洋、流域或区域)在一定时段内(可以是日、月、年或更长)的输入和输出水量之差,等于该地区蓄水量的变化量(即在时段始末的蓄水量之差)。水量平衡是水文学最基本的原理之一,是应用质量守恒定律对水文循环的特定描述。以积分形式来描述 Δt 时段内的水量平衡,可写为下列方程形式,即

$$\Delta S = I - O \quad (2-1)$$

式中, I 为该时段内输入研究区域的总水量, mm 或 m^3 ; O 为该时段内输出研究区域的总水量, mm 或 m^3 ; ΔS 为该时段内研究区域蓄水量的变化量, mm 或 m^3 。

以微分形式表示的水量平衡方程为

$$\frac{dS}{dt} = I' - O' \quad (2-2)$$

式中, S 为区域内水的体积, 量纲 [L^3]; I' 为水流入该区域的速率, 量纲 [$L^3 T^{-1}$]; O' 为水流出该区域的速率, 量纲 [$L^3 T^{-1}$]。

3. 全球水量平衡(global water balance)

若以地球陆地(continent)为对象, Δt 内的水量平衡方程可写成

$$P_c - R - E_c = \Delta S_c \quad (2-3)$$

式中, E_c 为时段内陆地的蒸发量, mm 或 m^3 ; P_c 为时段内陆地的降水量, mm 或 m^3 ; R 为时段内由陆地流入海洋的径流量, mm 或 m^3 ; ΔS_c 为时段内陆地蓄水量的变化量, mm 或 m^3 。

若以海洋(Ocean)为对象, Δt 内的水量平衡方程可写成如下形式:

$$P_o + R - E_o = \Delta S_o \quad (2-4)$$

式中, E_o 为海洋在时段内的蒸发量, mm 或 m^3 ; P_o 为海洋在时段内的降水量, mm 或 m^3 ; R 为时段内由陆地流入海洋的径流量, mm 或 m^3 ; ΔS_o 为海洋在该时段内蓄水量的变化量, mm 或 m^3 。

在多年平均的情况下, $\Delta S_c = 0$, $\Delta S_o = 0$, 则大陆水量平衡方程为

$$\overline{P_c} = \overline{E_c} + \overline{R} \quad (2-5)$$

海洋水量平衡方程为

$$\overline{P_o} = \overline{E_o} - \overline{R} \quad (2-6)$$

全球水量平衡方程为

$$\overline{P_c} + \overline{P_o} = \overline{E_c} + \overline{E_o} \quad \text{或} \quad \overline{E} = \overline{P} \quad (2-7)$$

式中, 变量的上划线表示多年平均值, 其中 $\overline{P} = \overline{P_c} + \overline{P_o}$, $\overline{E} = \overline{E_c} + \overline{E_o}$ 。

4. 全球水量平衡要素的估计

由于在全球范围内所能获得的数据还远不够充分, 全球水量平衡要素的估计不是十分准确。然而, 在一定的区域内, 观测得到的数据是被广泛认同的, 可以认为这些观测数据代表了世界上不同地区长期平均的水量平衡状况。根据各地区的观测数据, 估计全球水量平衡结果如表 2-2 所示。地球表面年平均降水量和蒸发量均为 1000 mm/a 的数量级。其中, 陆地上的年平均降水量为 800 mm/a, 相应的蒸发量大约为 500 mm/a, 相当于 63% 的年降水量。陆地上较长时期内的降水量与蒸发量之差相当于流入海洋的径流量, 即 $R = P_c - E_c$ 。陆地的年平均径流量是年降水量的 35%~40%。