

高等学校教材

(第三版)

工程水文学

河海大学 詹道江
武汉大学 叶守泽
合编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校教材

工程水文学 (第三版)

中国水利水电出版社

12

(3)

TV12

15(3)

高等学校教材

工程水文学

(第三版)

河海大学 詹道江
武汉大学 叶守泽 合编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书阐述工程水文学的基本原理与方法,包括:水文信息采集,径流形成,产流汇流计算,水文预报,水文模型,水文统计,设计径流与径流随机模拟,设计洪水,古洪水与可能最大洪水,水污染及水质模型等内容。

本书为高等学校水利水电类专业国家级重点教材,也可供从事水利工程和市政工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程水文学/詹道江,叶守泽合编. —3版. —北京:中国水利水电出版社, 2000

高等学校教材

ISBN 7-5084-0281-2

I. 工… II. ①詹…②叶… III. 工程水文学-高等学校-教材 IV. TV12

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第04561号

书 名	高等学校教材 工程水文学(第三版)
作 者	河海大学 詹道江 合编 武汉大学 叶守泽
出 版	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sale@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机)、68331835(发行部)
发 行 经 售	新华书店北京发行所 全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 21印张 491千字
版 次	1987年6月第一版 1992年11月第二版 2000年10月第三版 2001年8月北京第七次印刷
印 数	41291—46290册
定 价	25.80元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

第三版前言

本书根据“高等学校水利水电类专业教学指导委员会第四轮教材规划”及编写组拟定的编写大纲编写,并经原国家教育委员会立项,定为“九五”普通高等教育国家级重点教材。

《工程水文学》是水利水电类专业的主要专业基础课,课内讲授 60 学时,另习题作业 10 学时,实习一周。其主要任务是讲述水文学的基本理论和基本计算方法。

根据课程的任务,编写本书遵循的原则为:加强学科的基础知识和基本技能的内容,充分反映 90 年代的水文科学水平,使其成为一部培养跨世纪复合型人才的和与国际学术接轨人才的,并有中国特色的教材。在此原则下,对本书第二版从体系到内容进行了必要的扬弃更新:

(1) 加强了气象和水文基础知识,增强了降水、蒸散发、下渗与地下水、径流形成等部分的内容。

(2) 年径流分析计算,增加了随机模拟。

(3) 水文计算,重点安排了设计洪水的内容,其中:水文统计介绍了国内外常用的频率曲线线型和我国近来推荐的皮尔逊Ⅲ型频率曲线参数估计方法。汇流计算增加了地貌单位线的应用,对产流计算的体系也作了相应的改变。为国内外所瞩目的、并已在我国大型工程中应用的古洪水研究,也在书中予以介绍。对 PMP/PMF 计算也作了全面更新,以便与国际接轨。

(4) 水文信息的采集,增加了水文遥感、水文信息等先进量测手段的内容。

(5) 水文预报,增加了洪水实时预报的具体方法。

(6) 增加了一些新章节,如水文模型中增加了城市降雨径流模型和水污染及河流水质模型等。

本书由河海大学詹道江和武汉大学叶守泽主编。詹道江主持编写第一、二、三、四、八、十、十一章,叶守泽主持编写第五、六、七、九、十二、十三章。此外,还特约了一些有独到专长的教师和工程师参加编写。各章的编写人为:詹道江(第一、十一章),朱颖元(第二、四章),谢悦波(第三章),宋星原(第五章),夏军(第六章),叶守泽(第七、九、十二、十三章),王维第、孙汉贤、陈元芳(第八章),陈元芳(第十章)。

全书由詹道江统稿,沈晋主审。

高等学校水利水电类专业教学指导委员会于 1998 年 3 月 10 日至 12 日,在南京河海大学为本书特别召开编审会议。参加人员除本书主编、主审和各编写人员外,还有各方面的专家及出版社的责任编辑共 20 余人,对本书初稿进行认真的评审,提出许多修改意见,使本书质量得以全面提高。本书的编写工作及编审会议的召开,都得到了河海大学的大力支持和经费资助;各参编单位也给予了很大的帮助。在此,编者谨向他们一并表示衷心的感谢。

本书较前两版的内容增多,请各校斟酌选用。书中错误之处,请函告:210098,南京河海大学水文水资源系詹道江。

编 者

1999 年 7 月 3 日

第一版前言

本教材是根据水利电力部“1983~1987年高等学校水利电力类专业教材编审出版规划”及编写组拟定的“《工程水文学》教材编写大纲”编写的。

全书共十二章，按64学时编写；另列有附录《水文模型》供学生课外参考。本书是水利水电建筑、农田水利工程和河流力学及治河工程三个专业的通用教材，各专业可根据教学要求酌情取舍。

本教材以水循环及径流形成过程、水文统计的基本知识及方法、设计年径流及设计洪水的推求、降雨径流分析、水文预报为主要内容；同时，扼要讲述水文测验及水文资料的收集、可能最大暴雨、河流泥沙等方面的知识。

本教材由吴明远、詹道江、叶守泽合编，廖松参编，另约吴正平、丁晶编写部分章节。吴明远负责全书的汇总工作。

本教材由沈晋主审。沈晋、吴明远、丁晶、詹道江、林一冬、叶守泽、袁作新、肖琳、廖松、陈传诗、贺缠许、孔令文出席了1984年4月在武汉水利电力学院召开的审稿会议，对本书初稿进行了认真的审查，提出了修改意见，对提高教材质量帮助很大。本书有些材料引自有关院校和生产、科研单位编写的教材及技术资料，编者在此一并致谢。

最后，我们诚恳地希望读者对本书的缺点和错误提出批评意见，请将意见寄交成都科技大学水利系吴明远为感。

编 者

1985年3月

第 二 版 前 言

本教材是水利部“1990~1995 年高等学校水利水电类专业本科教材选题和编审出版规划”中，为水利水电工程建筑专业及施工专业编写的通用教材。

本教材采用先阐明水文学原理，再讲述水利水电工程规划设计施工所需要的水文预报及水文分析计算方法的体系，并力图结合工程实际问题，反映工程水文学的新进展。

全书共分十一章。第一章、第二章 1~5 节、第九章、第十章由王燕生编写；第二章 6~8 节、第三章、第十一章由毛荣生编写；第四章、第六章、第七章由芮孝芳编写；第五章由潘久根编写；第八章由丁晶编写；全书由王燕生主编。

本教材由袁作新主审。主审对本书进行了非常认真的审查，并给予热心的指导和帮助。本书有些材料引自有关院校和生产科研单位编写的教材及文章，编者在此一并致谢。

最后，我们诚恳地希望读者对本书的缺点和错误提出批评意见，请将意见寄交清华大学水电系王燕生，以便今后改正。

编 者

1991 年 11 月

目 录

第三版前言	
第一版前言	
第二版前言	
第一章 绪论	1
第一节 水文学	1
第二节 工程水文学的研究方法	4
第三节 水文学的发展	4
第二章 水文循环与径流形成	7
第一节 水文循环与水量平衡	7
第二节 河流与流域	9
第三节 降水	12
第四节 土壤水、下渗与地下水	30
第五节 蒸散发	37
第六节 径流	43
第三章 水文信息采集与处理	49
第一节 测站与站网	49
第二节 水位观测	51
第三节 流量测验	52
第四节 泥沙测验与计算	58
第五节 水质监测	62
第六节 水文调查与水文遥感	65
第七节 水文数据处理	68
第四章 流域产汇流计算	74
第一节 降雨径流要素计算	74
第二节 流域产流分析	80
第三节 产流计算	84
第四节 流域汇流计算	95
习题	114
第五章 水文预报	119
第一节 概述	119
第二节 短期洪水预报	120
第三节 洪水实时预报方法	128
第四节 水文预报精度评定	136

第五节	中长期水文预报简介	138
第六节	施工水文预报	141
习题		144
第六章	水文模型	145
第一节	概述	145
第二节	水文系统理论模型	146
第三节	水文概念性模型	155
第七章	水文统计	173
第一节	概述	173
第二节	概率的基本概念	173
第三节	随机变量及其概率分布	175
第四节	水文频率曲线线型	181
第五节	频率曲线参数估计方法	188
第六节	水文频率计算适线法	194
第七节	相关分析	200
习题		210
第八章	设计年径流及径流随机模拟	211
第一节	设计年径流分析计算的目的和内容	211
第二节	有较长资料时设计年径流频率分析计算	212
第三节	短缺资料时设计年径流的频率分析计算	214
第四节	设计年径流的时程分配	219
第五节	年际连续枯水段径流分析	220
第六节	径流随机模拟	222
第七节	设计枯水流量分析计算	230
习题		231
第九章	由流量资料推求设计洪水	234
第一节	概述	234
第二节	设计洪峰流量及设计洪量的推求	235
第三节	设计洪水过程线的推求	243
第四节	分期设计洪水	246
第五节	入库设计洪水	247
第六节	设计洪水的地区组成	250
习题		251
第十章	由暴雨资料推求设计洪水	252
第一节	概述	252
第二节	直接法推求设计面暴雨量	252
第三节	间接法推求设计面暴雨量	256
第四节	设计暴雨时空分配的计算	257

第五节	由设计暴雨推求设计洪水	259
第六节	小流域设计洪水的计算	262
习题		271
第十一章	古洪水与可能最大降水/可能最大洪水	272
第一节	洪水频率计算问题	272
第二节	古洪水水文学	273
第三节	古洪水流量	276
第四节	古洪水研究的应用	277
第五节	可能最大降水与可能最大洪水 (PMP/PMF)	280
第六节	可能最大降水的估算方法	281
第七节	流域 PMP 计算	285
第八节	可能最大洪水	287
第九节	讨论	288
第十二章	水污染及水质模型	291
第一节	概述	291
第二节	河流水体的污染与自净	291
第三节	河流水质模型的基本方程	292
第四节	河流水质 BOD—DO 模型	294
第五节	模型参数的估计	298
第六节	河口水质数学模型	303
第七节	湖泊水质数学模型	304
习题		306
第十三章	河流泥沙计算	307
第一节	概述	307
第二节	多年平均输沙量的估算	307
第三节	输沙量的变化	310
第四节	悬移质的颗粒级配	312
附录		314
主要参考文献		327

第一章 绪 论

第一节 水 文 学

一、水文学

(一) 地球上各种水体的数量与分布

大气中的水汽，地面上的江河、湖沼、海洋和地下水等，统称为水体。水文学 (Hydrology) 研究各种水体的存在、循环和分布，物理与化学特性，以及水体对环境的影响和作用，包括对生物特别是对人类的影响。地球上各种水体的数量和分布如表 1-1 所示。

表 1-1 水文循环各环节中的近似水量及其更新所需时间

环 节	总 量 (10^3km^3)	占总量 (%)	占淡水 (%)	年循环量 (km^3)	更新所需时间
海洋	1338000	96.5		505000	2650 年
直至 2000 m 深的地下水	23400	1.7		16700	1400 年
其中淡水	10530	0.76	30.1		
土壤水	16.5	0.001	0.05	16500	1 年
冰川与永久雪	24064.1	1.74	68.7		
其中南极	21600	1.56	61.7		
格陵兰	2340	0.17	6.68	2477	9700 年
北极岛屿	83.5	0.006	0.24		
其他山区	40.6	0.003	0.12	25	1600 年
地面冰 (永冻)	300	0.022	0.86	30	10000 年
湖泊	176.4	0.013		10376	17 年
其中淡水湖	91	0.007	0.26		
咸水湖	85.4	0.006			
沼泽	11.47	0.0008	0.03		5 年
河流	2.12	0.00002	0.006	49400	16 日
大气水	12.9	0.001	0.04	577000	8 日
生物水	1.12	0.0001	0.0023		数小时
总水量	1385981.61	100			
总淡水量	35029.21	2.53	100		

(二) 全球的水储量

某一时刻储存于地球表面 (5.1 亿 km^2) 上的水量，约为 13.68 亿 km^3 ($1 \text{ km}^3 = 10 \text{ 亿 m}^3$)。其中分布在海洋的水量约为 13.38 亿 km^3 ，占总水量的 96.5%，分布在陆地上的水量约为 0.48 亿 km^3 ，占总水量的 3.5%。而陆地水中有 1.7% 存在于极地冰雪，1.7% 存在于地下水中，仅有 0.1% 存在于地面和大气中。其中大气水量很小 (仅 12900 km^3)，但地球上的水分循环不已，每年通过大气的水量是很大的，年循环达 600000 km^3 。地球上的水量平衡如表 1-2 所示 (a 代表年)。

水体通过水循环得到更新,更新所需时间 t_r ,可由式 (1-1) 计算:

$$t_r = s/q \quad (1-1)$$

式中, s 为水体的储量, q 为流量。

【例 1-1】大气中的水量 s 为 12900 km^3 (见表 1-1), 流量 q (年降水量为 $458000 + 119000 = 577000 \text{ km}^3/\text{a}$, 见表 1-2)。

$$t_r = 12900/577000 = 0.022 \text{ a} = 8.2 \text{ d}$$

二、水资源 (Water Resources)

地球表层可供人类利用的水称为水资源。水资源包括水量、水质、水能资源和水域。

对人类最为实用的水资源,是陆地上每年可以更新的降水量、江河流水量和浅层地下水的淡水量。降水可以直接为人类利用,同时,它又是江河径流和浅层地下淡水的来源。全球陆地上多年平均年降水量为 800 mm , 中国为 628 mm (在整个国土上平均每年的降水量为 6.0 万亿 m^3), 比全世界平均少 22% 。江河径流是人类最重要和最经常利用的水资源。人类可从江河引水,供城市、工矿、农业灌溉利用。在全球 46.8 万亿 m^3 的江河年径流量中,中国占 2.72 万亿 m^3 ,折合水深 284 mm 。我国水资源量与世界各国比较,仅次于巴西、前苏联、加拿大、美国及印尼,居世界第六位。但因为人口众多,人均占有 2400 m^3 ,只有世界人均占有量的 $1/4$,排在世界百位以后。耕地平均分摊水量只有世界平均数的 $3/4$ 。

中国降水量的地区分布也很不均匀,南部和东南沿海平均年降水量大于 1600 mm 。台湾省的平均年降水量为 2540 mm ,是全国最湿润地区。华北和东北年降水量为 $400 \sim 800 \text{ mm}$ 。西北的大部地区,只有 $200 \sim 400 \text{ mm}$,一些沙漠边缘地区少于 100 mm ,新疆塔里木盆地和青海柴达木盆地平均年降水量小于 25 mm ,是全国最干旱的地区。中国境内江河年径流深的分布趋势,大致与年降水量分布相似,自东南向西北逐渐递减。东南沿海年径流深大于 900 mm ,而西北部的沙漠边缘年径流小于 10 mm 。由于降水径流与耕地间的不相适应,造成我国水土资源不平衡,需要跨流域调度水资源。

各地的降水量和江河径流量,在各年之间和年内各月之间都不均衡,这就使水资源利用困难,并造成洪涝和干旱灾害。

水能资源,全球的理论蕴藏量为 $44.28 \text{ 万亿 kW} \cdot \text{h/a}$,其中技术上可开发的水能资源为 $19.39 \text{ 万亿 kW} \cdot \text{h/a}$ 。我国径流丰沛,地形有利,在可开发容量和可开发年发电量方面,均居世界第一位。根据 1997~1998 年全国水力资源普查成果:全国水能蕴藏量为 6.67 亿 kW (包括台湾省为 6.91 亿 kW),其中可开发的装机容量为 3.78 亿 kW (包括台湾省为 3.83 亿 kW)。我国大量的水能资源可以进行长期持续开发利用。

三、工程水文学 (Engineering Hydrology) 及其任务

从水文学的研究对象来看,水文学是地球物理科学的一部分。进入 20 世纪特别是第一次世界大战以后,大量兴起的防洪、灌溉、水电、航运工程和农业、林业及城市建设,向

表 1-2 全球年水量平衡

水 情	海 洋	陆 地
面积 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	361000	149000
降水 (km^3/a)	458000	119000
(mm/a)	1270	800
蒸发 (km^3/a)	505000	72000
(mm/a)	1400	485
径流 (入海)		
地面 (km^3/a)		44700
(mm/a)		300
地下 (km^3/a)		2200
(mm/a)		15
总径流 (km^3/a)		46900
(mm/a)		315

注 本表引自刘国纬《水文循环的大气过程》,科学出版社,1997。

水文科学提出了许多新课题。解决这些新课题的方法也由经验的、零碎的知识逐渐理论化和系统化，水文科学的应用特色也逐渐显现出来，并率先形成最重要的分支学科——工程水文学。

工程水文学包括水文计算、水利计算和水文预报等内容。由于天然来水过程与国民经济的需要不相适应，修建水利工程就是解决这一矛盾的技术措施。

每一水利工程在其实施过程中，都可划分为规划设计、施工及管理运营三个阶段。

规划设计阶段，水文计算的主要任务是确定工程的规模。规模过大，造成工程投资上的浪费；过小，又使水资源不能充分利用，也是一种浪费。对于防洪措施如标准过低，还可能导致工程失事，造成工程本身和下游人民生命财产的巨大损失。在多沙河流兴建水利工程还需估算蓄水引水工程的泥沙淤积量，以便考虑延长工程寿命的措施。水利工程的使用期限一般为几十年甚至百年以上，规划设计时，必须知道控制水体在使用期间的水文情势。水文计算就是研究这类问题的学科。

施工阶段，其任务即将规划设计的工程付诸实施。因而在施工期间必须对水文情势有所了解。水利工程工期一般较长，往往需要一个季度甚至长达几年。对水文情势的了解应包括两个方面：一是为了临时性建筑物如围堰、引水隧洞或渠道等，须预报整个施工期的天然来水情势，而通常的水文和气象预报，往往不能提供如此长期的预报，仍需通过水文计算来解决这个问题。另一方面，为了安排日常工作也必须了解近期更为确切的水情，这就需要提供短期（如几天之内）的水文预告。水文预报是为解决这一类问题服务的。

管理运营阶段，其主要任务在于使建成的工程充分发挥作用。为此需要未来一定时期的水文情况，以便确定最经济合理的调度方案。此时需要由水文分析得到的长期平均情势结合水文预报的短期水情，从而提出最佳的调度运用方案。

规划设计水利工程大体可分为两大环节。水文计算为第一个环节，其输入为基本水文气象资料，输出是当地可能出现的水文情势。水文计算的输出则是后继环节——水利计算的输入；水利计算由当地的水文情势、自然情况和国民经济对水资源开发的需求，研究各种设计方案的经济效益，从中选出最优方案，如图 1-1 所示。^①

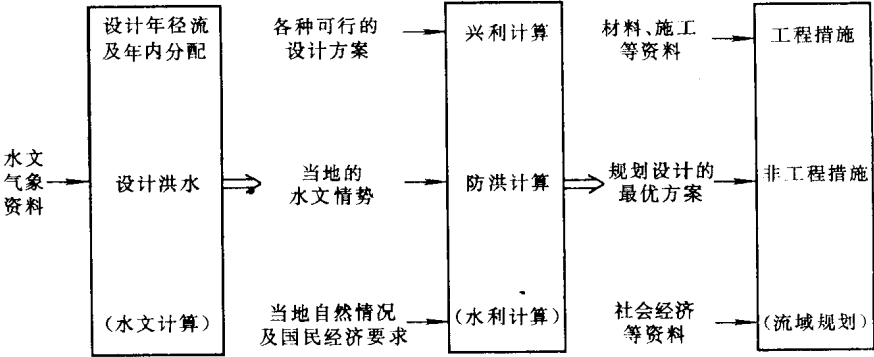


图 1-1 流域规划工作流程图

① 水利计算另有专门课程，不在本书之内。

第二节 工程水文学的研究方法

水文现象异常复杂,不易完全了解。但通常可以借系统概念作简化处理。所谓系统,是由许多互相关联部分组成的总体。系统大的可以包括整个地球水循环,小的可以只涉及地球上的一个小部分(如流域)面积上的几个水文过程。

【例 1-2】 试定出流域上的降雨径流水文系统。

解 如图 1-2,流域是指汇集于一条河流的集水区域。分水岭是流域汇水的分界线。沿流域分水岭的界面在向上向下与顶面和底面包围成一个水文系统(图 1-2)。

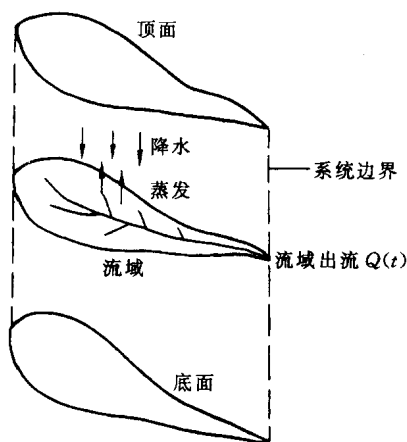


图 1-2 流域水文系统

此系统可以降雨作为输入,河流出口的水流作为输出,蒸发也是输出,但降雨时蒸发甚小,可以不计。这是一个非常复杂的系统:降雨在流域面上随时随地发生变化,汇流过程中也不断发生时空变化。这样一个变化复杂的水文现象若以严格的物理数学方程来描述是不可能的。实用上只能以联系输入与输出的模型来代表。水文系统模型的用途是由输入预测输出。模型的输入输出是可测量的水文变量。其中心结构是联系输入输出的方程式,设输入输出以时间函数 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 表示,则系统由输入变换为输出的方程为式(1-2):

$$Q(t) = \Omega I(t) \quad (1-2)$$

式中, Ω 称为变换函数,它可以是代数式,也可以是微分方程式。

水文系统是一种自然现象,存在两种基本规律:动态物理规律(成因规律)和统计规律。工程水文学中的水文计算与水文预报都有预报性质的任务,但因预见期长短的不同而采用不同的方法。水文预报通常只能预报几天的来水情况,往往是根据现象的前一过程预报后一过程(未来)情况,此时必然性起主要作用,往往采用动态规律。例如可以由上游的洪水通过洪水的传播规律预报下游的未来情况。随着预见期的加长,所研究的水文现象影响因素更为复杂,此时必然性退居次要地位,偶然性显示其重要性,因此要求预见期较长的水文计算多采用统计方法进行概率预报。概率预报不同于实时预报,只能预报水文事件出现的概率,而不能预报该事件出现的时间。

在工程水文学应用中,这两种方法相辅相成,是不能截然分开的。

第三节 水文学的发展

水文学经历了由萌芽到成熟、由定性到定量、由经验到理论的发展过程。

一、萌芽时期(1400 年以前)

在一些古文明国家和地区,从历代古籍、文献、碑刻古迹和发掘的文物中,可以发现水文科学萌发的一系列史实:古埃及在公元前 3500~300 年因灌溉引水开始观测尼罗河水

位，至今还保存有公元前 2200 年所刻水尺的崖壁。中国古代的一些水利工程如都江堰、灵渠等建成后能较长期地发挥效益，都与运用水文知识有关，尤其是 2000 年前建成的都江堰，至今仍在发挥巨大的效益。中国西汉四年（公元 4 年）张戎最先提出的“以水攻沙”，对当时和后世治理黄河的影响甚大。中国的测雨可追溯到公元前 11 世纪以前的商代，甲骨文中有细雨、大雨和骤雨的分类。宋秦九韶在《数书九章》记有当时全国都有天池盆测雨量及测雪量的计算方法。北魏郦道元的《水经注》（公元 527 年）记述干支河流达 1252 条之多，比欧洲同类水平的著作约早 1000 年，是一部水文地理巨著。《吕氏春秋》（公元前 239 年）完整地提出了水循环概念“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。”《吕氏春秋》最先提出水文循环，至今尚为世界学术界所称道。

总的说来，这一时期中国的水文知识居于世界领先地位。

二、奠基时期（1400~1900 年）

14~16 世纪欧洲文艺复兴和 18~19 世纪工业革命给自然科学的发展以很大影响。此时期水文方面雨量器、蒸发器和流速仪等一系列观测仪器的发明，为水文现象的实地观测、定量研究和科学实验提供了必要的条件。水文循环在观测和实验基础上得到验证，水文现象由概念描述深入到定量表达，为水文科学的建立奠定基础。这一时期，水文学首先在西欧发展，后在北美兴起，并应用于实际。

1424 年中国开始全国统一制作和使用标准测雨器。1610 年意大利 B. 卡斯泰利提出流量测量方法。英国雷恩发明自记雨量计。1790 年法国 R. 活尔特曼发明了转子式流速仪。1870 年美国 T.G. 埃利斯发明了旋桨式流速仪。1885 年美国 W.G. 普赖斯发明了旋杯式流速仪，为水文定量观测和水文科学提供了有力的工具。

在欧洲，由于实测水文资料增加和许多实验研究，揭示了一系列水文基本规律。在中国，徐霞客经过 28 年的野外考察，他的游记关于岩溶地貌和水文地理的记述，早于国外同类著作近 300 年。18~19 世纪西欧产业革命促进城市、交通和工业发展，大量的水利建设要求解决各种设计中的水力计算问题，使水力学理论得到较大进步，由此又为一些水文规律的理论研究提供了有力的工具。水文学基本理论和方法逐步完善，使水文计算和水文预报水平得到提高，在工程建设和防洪中的效果日益显著，从而形成以水文计算和水文预报为主的新分支学科——应用水文学。但在这一时期总的说来，中国水文科学进展则比较缓慢。

三、应用水文学的兴起（1900~1950 年）

进入 20 世纪，特别是经过两次世界大战的破坏后，各国都致力于经济恢复和发展，迫切需要解决城市建设、动力开发、交通运输、工农业用水和防洪等水利工程中的一系列水文问题，促进了水文科学的迅速发展。此时期水文站网扩大，实测资料积累丰富，为水文分析研究提供了前所未有的条件，应用水文学取得了许多新进展。美国在这一时期取得的成果较多，处于领先地位。1900 年美国 J. A. 塞登提出了著名的塞登定律，为天然河道洪水演进提供了理论。1935 年美国的 G. T. 麦卡锡提出的马斯京根方法简化了河道的洪水演进计算。为适应工程设计和防洪要求，水文计算和水文预报方面得出许多新的概念和方法：1914 年，黑曾首先用正态概率格纸选配流量频率曲线。1924 年 H. A. 福斯特完整地提出了

P-Ⅲ 频率曲线的分析方法。W. 韦伯尔提出了经验频率计算公式。这些学者把概率论和数理统计引进了水文学。1932 年美国 L. R. K. 谢尔曼提出的单位过程线被誉为水文学进展的里程碑。1937 年美国 M. 贝纳德和 R. K. Jr. 林斯雷等提出可能最大降水/洪水方法。这些水文计算方法在实际应用中得到迅速推广,丰富了应用水文学。1936 年美国的 W. G. 霍伊特提出随机过程引入水文计算,形成了随机水文学。此外,许多应用水文学著作的出版,标志着水文学进入了成熟阶段。

这一时期中国在停滞了数个世纪之后,开始从西方引进了新的水文科学,从事于中国江河水文学的研究。

四、水文学的现代特色与发展(1950 年以后)

20 世纪后期水文科学的发展,出现了新的形势:首先,由于新技术特别是计算机的应用,使水文信息(实时资料)的获取、传递和处理大为方便迅速,节省了大量人力和时间。其次,由于工农业和城市建设的需要,应用水文学发展迅速。其三,由于生产和生活用水的增长,环境污染日趋严重,出现了水资源紧张局面,迫使水文学特别侧重于水资源研究,不仅注重水量还要注重水质;不仅注重洪水,还要注重枯水;不仅研究一条河流、一个流域的水文特性,还要研究跨流域、跨地区的水资源联合调度问题;不仅要研究短期、近期的水文预报(forecast),还要研究长期的水文趋势预估(predication)。从此,水文科学进入了一个现代化的新时代。

美国 1971 年建立了水文资料库,能够在各州终端上获得全美任一地点的资料。80 年代前期先后发射 4 颗陆地卫星,取得了许多水文研究成果,并为国际服务。美、英和挪威等国采用测深仪直接绘制断面图。这一时期,中国水文站网发展迅速,全国基本站达 21600 处,可以基本掌握全国各主要河流的水文情势;在长江、黄河等流域开始应用卫星图片和遥感技术研究水文和水资源问题。

50 年代,随着电子计算技术的发展,出现了许多水文数学模型,为水文科学的进一步发展开创了新途径。

1966 年美国林斯雷和 N. H. 克劳福法提出的斯坦福流域模型和美籍华人周文德在 60~70 年代提出的流域水文模型以及一系列的水文随机模型、水系统模型等,推动了水文预报和水资源系统分析。中国水文预报自 50 年代初开始,也提出了具有中国特色的洪水预报方法。

调查、考证和分析历史洪水资料,以弥补实际资料的不足。除广泛调查历史洪水外,90 年代又发展古洪水研究,利用放射性同位素碳十四获得全新世(约距今 10000 年)以来的古洪水资料,在长江三峡、黄河小浪底等水利枢纽工程的洪水计算中取得了有巨大意义的成果。70 年代以来,中国还相继编绘出版了《全国可能最大降水等值线图》和《全国暴雨参数等值线图》等,为中国的暴雨洪水研究和计算作出了贡献。

70 年代中期开展的国际水文合作,兴起了全球性的水文科学研究和国际水文十年(IHD)、世界气象组织(WMO)的业务水文计划(OHP)、联合国教科文组织国际水文计划(IHP)等。广泛的国际合作,促进了全球水文、水资源知识的交流,推动了水文科学的发展。

第二章 水文循环与径流形成

第一节 水文循环与水量平衡

一、自然界的水文循环

地球上的水以液态、固态和气态的形式分布于海洋、陆地、大气和生物机体中，这些水体构成了地球的水圈。水圈中的各种水体在太阳的辐射下不断地蒸发变成水汽进入大气，并随气流的运动输送到各地，在一定条件下凝结形成降水。降落的雨水，一部分被植物截留并蒸发。落到地面的雨水，一部分渗入地下，另一部分形成地面径流沿江河回归大海。渗入地下的水，有的被土壤或植物根系吸收，然后通过蒸发或散发返回大气；有的渗透到较深的土层形成地下水，并以泉水或地下水流的形式渗入河流回归大海。水圈中的各种水体通过这种不断蒸发、水汽输送、凝结、降落、下渗、地面和地下径流的往复循环过程，称为水文循环，也称为水循环。水文循环的范围贯穿整个水圈，向上延伸到 10 km 左右，下至地表以下平均 1 km 深处。

按水文循环的规模与过程，可分为大循环和小循环。从海洋蒸发的水汽，被气流输送到大陆形成降水，其中一部分以地面和地下径流的形式从河流汇归海洋；另一部分重新蒸发返回大气。这种海陆间的水分交换过程，称为大循环或外循环。在大循环运动中，水一方面在地面和上空通过降水和蒸发进行纵向交换，另一方面通过河流在海洋和陆地之间进行横向交换。海洋从空中向大陆输送大量水汽，陆地则通过河流把水输送到海洋里。陆地也向海洋输送水汽，但与海洋向陆地输送的水汽相比，其量很少，约占海洋蒸发量的 8%，所以，海洋是陆地降水的主要水汽来源。海洋上蒸发的水汽在海洋上空凝结后，以降水的形式落到海洋里，或陆地上的水经蒸发凝结又降落到陆地上，这种局部的水文循环称为小循环或内循环。前者称为海洋小循环，后者称为内陆小循环。内陆小循环对内陆地区降水有着重要作用。因为内陆地区距离海洋很远，从海洋直接输送到内陆的水汽不多，通过内陆局部地区的水文循环，使水汽逐步向内陆输送，这是内陆地区主要的水汽来源。由于水汽在向内陆输送过程中，沿途会逐渐损耗，故内陆距海洋越远，输送的水汽量越少，降水量越小。水文循环中的各种现象如图 2-1 所示。

水文循环是地球上最重要、最活跃的物质循环之一。在水文循环过程中，水的物理状态、水质、水量等都在不断地变化，水通过蒸发、水汽输送、降水和径流四个环节进行着交换。由于大气环流机制和海陆分布决定了地球上水汽的运行规律，加之不同的地区地质构造、地貌、岩石土壤性质、植物覆盖、湖泊、沼泽等条件不同，水在自然界循环的路径和过程极其复杂且多变。有的地区湿润多雨，水量丰沛，有的则干旱少雨，河湖干涸。同一地区，有时大雨滂沱，江河横溢。有时却久旱不雨，江河枯竭。正是由于自然界的水文循环，才形成这种永无终止千变万化的水文现象。

水在自然界中的循环运动，为人类带来了取之不尽、用之不竭的水资源，对人类的生活和生产活动有着重大的影响。研究水文循环的目的，在于认识它的基本规律，揭示其内

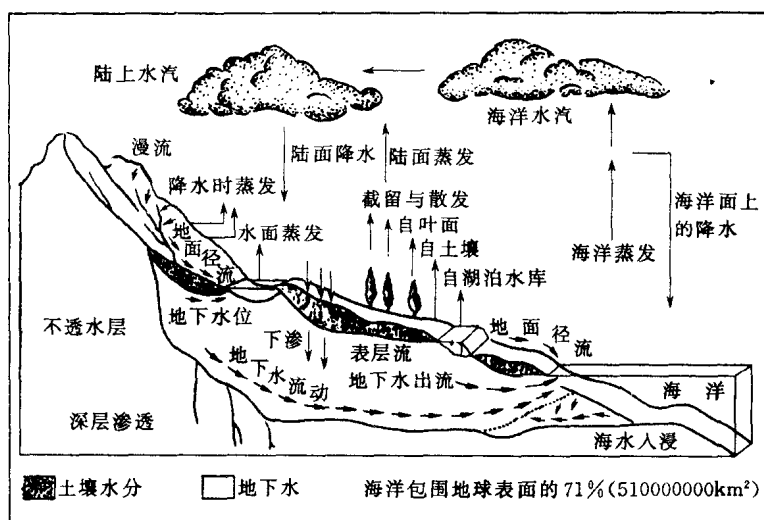


图 2-1 水文循环示意图

在联系，这对合理开发和利用水资源，抗御洪旱灾害，改造自然，利用自然都有十分重要的意义。

二、地球上的水量平衡

在水文循环过程中，对任一区域、任一时段进入水量与输出水量之差额必等于其蓄水量的变化量，这就是水量平衡原理。水量平衡原理是水文学的基本原理，水量平衡法是分析研究水文现象，建立水文要素之间定性或定量关系，了解其时空变化规律等的主要方法之一。

根据水量平衡原理，可列出水量平衡方程。对某一区域，有式 (2-1)：

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

式中 I 、 O ——给定时段内输入、输出该区域的总水量；

ΔS ——时段内区域蓄水量的变化量，可正可负。

上式为水量平衡方程的通用式，对不同的研究对象，需具体分析其输入输出量的组成，写出相应的水量平衡方程式。

若以地球的整个大陆作为研究范围，其水量平衡方程为式 (2-2)：

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

若以海洋为研究对象，其水量平衡方程为式 (2-3)：

$$P_o + R - E_o = \Delta S_o \quad (2-3)$$

式中 P_c 、 P_o ——大陆和海洋上的降水量；

E_c 、 E_o ——大陆和海洋上的蒸发量；

R ——流入海洋的径流量（包括地面和地下径流量）；

ΔS_c 、 ΔS_o ——大陆和海洋上在研究时段内蓄水量的变化量。

在短时段内， ΔS_c 和 ΔS_o 可正可负，但对多年平均情况，正负可以相互抵消，蓄水量的变化量趋于零。因此，对多年平均情况，有式 (2-4) 和式 (2-5)：