



全国高等院校水利水电类精品规划教材

工程水文学

主编 宋孝玉 马细霞

主审 吴泽宁 孙保沐



黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

工程水文学

主 编 宋孝玉 马细霞
副主编 桂发亮 王双银
主 审 吴泽宁 孙保沐

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书作为高等院校水利类专业教材,共分九章,主要包括水文学与水资源概述、水文循环与径流形成、水文资料收集与整理、水文统计、年径流与多年平均输沙量计算、由流量资料推求设计洪水、流域产汇流分析与计算、由暴雨资料推求设计洪水、水文预报等,并配有相应习题。

本教材适用对象为高等院校水利水电工程、农业水利工程、工程管理等水利水电类专业的本科生,可作为环境工程、给水排水工程、水土保持等专业的教学参考书,也可供水利水电工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程水文学/宋孝玉,马细霞主编. —郑州:黄河水利出版社,2009.5

全国高等院校水利水电类精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 584 - 8

I. 工… II. ①宋…②马… 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(2009)第 039246 号

策划组稿:马广州 电话:13849108008 E-mail: magz@yahoo. cn

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126. com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16. 75

字数:384 千字

版次:2009 年 5 月第 1 版

印数:1—3 100

印次:2009 年 5 月第 1 次印刷

定价:32. 00 元

出版者的话

近年来,随着我国对基础设施建设投入的加大,水利水电工程建设也迎来了前所未有的黄金时间。截至 2006 年,全国已建成堤防 28.08 万公里,各类水库 85 849 座,2006 年水利工程在建项目 4 614 个,在建项目投资总规模达 6 121 亿元(《2006 年全国水利发展统计公报》)。据《可再生能源发展“十一五”规划》,到 2010 年,我国水电总装机容量将达到 1.9 亿千瓦。水利水电工程的大规模建设对设计、施工、运行管理等水利水电专业人才的需求也更为迫切,如何更好地培养适应现今水利水电事业发展的优秀人才,成为水利水电专业院校共同面临的课题。作为水利水电行业的专业性科技出版社,我社长期关注水利水电学科的建设与发展,并积极组织水利水电类专著与教材的出版。

在对水利水电类本科层次教材的深入了解中,我们发现,以应用型本科教学为主的众多水利水电类专业院校普遍缺乏一套完整构建在校本科生专业知识体系又兼顾实践工作能力的教材。在广泛调研与充分征求各课程主讲老师意见的基础上,按照高等学校水利学科专业教学指导委员会对教材建设的指导精神与要求,并结合教育部实施的多层次建设、打造精品教材的出版战略,我社组织编写了本系列“全国高等院校水利水电类精品规划教材”。

此次规划教材的特点是:

- (1) 以培养水利水电类应用型人才为目标,充分重视实践教学环节。
- (2) 在依据现有的专业规范和课程教学大纲的前提下,突出特色,力求创新。
- (3) 紧扣现行的行业规范与标准。
- (4) 基本理论与工程实例相结合,易于学生接受与理解。

本系列教材除了涵盖传统专业基础课及专业课外,还补充了多个新开课程的教材,以便于学生扩充知识与技能,填补课堂无合适教材可用的空缺。同时,部分教材由工程技术人员或有工程设计施工从业经历的老师参与编写,也是此次规划教材的创新。

本系列教材的编写与出版得到了全国 21 所高等院校的鼎力支持,特别是三峡大学党委书记刘德富教授和华北水利水电学院副院长刘汉东教授对系列教材的编写与出版给予了精心指导,有效保证了教材出版的整体水平与质量。在此对推进此次规划教材编写与出版的各院校领导和参编老师致以最诚挚的谢意,是他们在编审过程中的无私奉献与辛勤工作,才使得教材能够按计划出版。

“十年树木,百年树人”,人才的培养需要教育者长期坚持不懈的努力,同样,好的教材也需要经过千锤百炼才能流传百世。本系列教材的出版只是我们打造精品专业教材的开始,希望各院校在对这些教材的使用过程中,提出改进意见与建议,以便日后再版时不断改正与完善。

黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

编 审 委 员 会

主 任：	三峡大学	刘德富	华北水利水电学院	刘汉东
副主任：	西安理工大学	黄 强	郑州大学	吴泽宁
	云南农业大学	文 俊	长春工程学院	左战军
委 员：	西安理工大学	姚李孝	西北农林科技大学	辛全才
	扬州大学	程吉林	三峡大学	田 斌
	华北水利水电学院	孙明权	长沙理工大学	樊鸣放
	重庆交通大学	许光祥	河北农业大学	杨路华
	沈阳农业大学	迟道才	河北工程大学	丁光彬
	山东农业大学	刘福胜	黑龙江大学	于雪峰
	新疆农业大学	侍克斌	内蒙古农业大学	刘廷玺
	三峡大学	张京穗	华北水利水电学院	张 丽
	沈阳农业大学	杨国范	南昌工程学院	陈春柏
	长春工程学院	尹志刚	昆明理工大学	王海军
	南昌大学	刘成林	西华大学	赖喜德

前 言

工程水文学是水利类专业的一门重要的专业基础课,是为工程规划设计、施工建设及运行管理提供水文依据的一门科学,主要内容包括水文学与水资源概述、水文循环与径流形成、水文资料收集与整理、水文统计、年径流与多年平均输沙量计算、由流量资料推求设计洪水、流域产汇流分析与计算、由暴雨资料推求设计洪水、水文预报等。本教材适用对象为高等院校水利水电工程、农业水利工程、工程管理等水利水电类专业的本科生,可作为环境工程、给水排水工程、水土保持等专业的教学参考书,也可供水利水电工程技术人员参考使用。

本教材共分九章,由西安理工大学宋孝玉和郑州大学马细霞任主编,南昌工程学院桂发亮、西北农林科技大学王双银任副主编。宋孝玉主持编写第一、八、九章,马细霞主持编写第五、六、七章,桂发亮主持编写第二、三、四章。参加编写的人员有:西安理工大学宋孝玉(第一、八章);黑龙江大学王红星(第二章);南昌工程学院王永文(第三章),桂发亮、兰盈盈(第四章);云南农业大学关志成(第五章);郑州大学胡彩虹(第六章)、马细霞(第七章);西安理工大学黄领梅(第八章);西北农林科技大学王双银(第九章)。硕士研究生马玉霞、孙旭、白鹏等参与了本教材的校对工作。本教材由吴泽宁教授、孙保沐教授主审,他们在对书稿进行了认真的审查后,提出了宝贵的修改和补充意见,对提高教材质量帮助很大。本教材在编写过程中,参阅了书后所列参考文献的相关内容,编者在此一并致谢!

黄河水利出版社及各位编者所在单位的领导、同事对本教材的编写和出版给予了极大的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。此外,还要感谢向编者提供资料、提出意见和建议以及关心本教材编写、出版的所有同志。

最后,对于本教材的不足之处,敬请读者批评指正,提出改进意见。

编 者

2008 年 12 月

目 录

出版者的话

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 水文学与水资源	(1)
第二节 水文现象的特性及水文学的研究方法	(2)
第三节 工程水文学的研究内容	(4)
第四节 水文学的发展及展望	(5)
习题与思考题	(8)
第二章 水文循环与径流形成	(9)
第一节 水文循环与水量平衡	(9)
第二节 河流与流域	(11)
第三节 降 水	(13)
第四节 土壤水、下渗与地下水	(19)
第五节 蒸散发	(24)
第六节 径 流	(27)
习题与思考题	(33)
第三章 水文资料收集与整理	(34)
第一节 水文测站与站网	(34)
第二节 水位观测	(36)
第三节 流量测验	(37)
第四节 泥沙测验与计算	(43)
第五节 水文调查与水文遥感	(46)
第六节 水文数据处理	(52)
习题与思考题	(62)
第四章 水文统计	(63)
第一节 概 述	(63)
第二节 随机变量及其分布参数	(64)
第三节 水文频率曲线线型	(73)
第四节 水文统计参数估计方法	(78)
第五节 无偏估计和抽样误差	(82)
第六节 现行水文频率计算方法——适线法	(84)
第七节 相关分析	(89)
习题与思考题	(99)

第五章 年径流与多年平均输沙量计算	(100)
第一节 概 述	(100)
第二节 影响年径流的因素	(104)
第三节 具有长期实测径流资料时设计年径流量及其年内分配的分析计算	(106)
第四节 具有短期实测径流资料时设计年径流量及其年内分配的分析计算	(112)
第五节 缺乏实测径流资料时设计年径流量及其年内分配的分析计算	(114)
第六节 多年平均年输沙量的估算	(116)
习题与思考题	(120)
第六章 由流量资料推求设计洪水	(122)
第一节 概 述	(122)
第二节 设计洪峰流量及设计洪量的推求	(124)
第三节 设计洪水过程线的推求	(133)
第四节 设计洪水中的其他问题	(136)
习题与思考题	(138)
第七章 流域产汇流分析与计算	(140)
第一节 降雨径流要素计算	(140)
第二节 流域产流分析	(148)
第三节 流域产流计算	(150)
第四节 流域汇流计算	(164)
习题与思考题	(182)
第八章 由暴雨资料推求设计洪水	(188)
第一节 概 述	(188)
第二节 直接法推求设计面暴雨量	(188)
第三节 间接法推求设计面暴雨量	(191)
第四节 设计暴雨时空分配的计算	(193)
第五节 由设计暴雨推求设计洪水	(195)
第六节 小流域设计洪水计算	(199)
习题与思考题	(214)
第九章 水文预报	(216)
第一节 概 述	(216)
第二节 河段洪水预报	(217)
第三节 流域降雨径流预报模型	(224)
第四节 枯季径流预报	(229)
第五节 冰情预报	(230)
第六节 水文预报精度评定	(232)
习题与思考题	(234)
附 录	(235)
参考文献	(254)

第一章 绪 论

第一节 水文学与水资源

一、水文学

水文学 (Hydrology) 是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律和运用这些规律为人类服务的知识体系,是地球科学的组成部分。它所涉及的研究范围是地球上的整个水圈,包括大气圈、生物圈及岩石圈。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。各种水体都有自己的特性和变化规律,因此水文学可按其研究对象分为水文气象学、河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、海洋水文学和地下水水文学。水文学的知识体系以水文循环为主线,以径流形成(包括产流与汇流)为重点,涉及陆地上的水汽来源、降水的形成及下垫面不同的作用介质。随着水资源开发利用规模的日益扩大,人类活动对水循环的影响明显增强,水文循环、水环境的反馈效应也已成为现代水文学研究的重要内容。因此,也可以说,水文学是研究地球上水的时空分布和运动规律并应用于水资源开发利用和保护的科学。水资源的开发利用与保护及水旱灾害防治都要以水文规律为依据,因此水文学也是水利科学的一部分。

二、水资源

水资源作为地球自然资源的一种,是指地球所属范围内的、可作为资源的水,包括地球表面地层中的水分和围绕地球的大气中的水分。因此,有一种非常广义的水资源定义,即地球所有圈层中一切形态的水都是水资源。由于这个定义来自《不列颠百科全书》,具有一定的权威性,因而这种解释较普遍地被引用。1998年,由联合国教科文组织和世界气象组织给出的水资源定义比较有影响力,其定义是:“作为资源的水应当是可供利用或有可能被利用,具有足够数量和可用质量,对某地用水需求能够长期供应的水源。”因此,水资源可以理解为人类长期生存、生活和生产过程中所需要的各种水,既包括了它的数量和质量,又包括了它的使用价值和经济价值。许多国家在谈到水资源时,常常把通过全球水文循环而不断获得补充的淡水作为水资源。

水资源不同于土地资源和矿产资源,有其独特的性质,只有充分认识它的特性,才能合理、有效地利用。

(一) 循环性和有限性

由于水圈中的水不断循环,使得地表水和地下水不断得到大气降水的补给,开发利用后可以恢复和更新,这是地球上水资源具有的特征,但各种水体的补给量是不同和有限的,为了可持续供水,多年平均利用量不应超过补给量。循环过程的无限性和补给量的有

限性决定了水资源在一定数量限度内才是“取之不尽、用之不竭”的。

(二) 时空分布不均匀性

水资源在地区分布上很不均匀,年际、年内变化大,给开发利用带来许多困难。地球表面淡水资源分布的不均匀性表现为降水多的地区淡水资源比较充足;反之,淡水资源则比较贫乏。为了满足各地区、各部门的用水要求,可通过修建蓄水、引水、提水等工程对天然水资源进行时空再分配。

(三) 用途广泛性

在国计民生中,水资源的用途十分广泛,各行各业都离不开水,水不仅用于农业灌溉、工业生产和城乡生活,而且还用于水力发电、航运、水产养殖、旅游娱乐等。随着人们生活水平的提高、国民经济和社会的发展,用水量不断增加,不少地区出现了水源不足的紧张局面,水资源短缺问题已成为当今世界面临的重大难题之一。

(四) 经济上的两重性

由于降水和径流时空分布不均,形成了因水过多或过少而引起的洪、涝、旱、碱等自然灾害;由于水资源开发利用不当,也会造成人为灾害,如垮坝事故、土壤次生盐渍化、水体污染、海水入侵和地面沉降等。水的可供利用及可能引起灾害决定了水资源在经济上的两重性,既有正效益也有负效益。水资源的综合开发和合理利用应达到兴利、除害的两重目的。

三、水文学与水资源开发利用的关系

水文学是水资源的学科基础。在有关水资源开发利用的技术业务活动中,其基础工作的大部分都要用到水文学的有关知识。例如,对某个区域进行水资源评价要涉及到水文、气象、地质等基础资料的收集、分析、整理与计算,这些都属于水文学的研究范围。

水资源开发利用推动水文学的发展。在水资源开发利用的过程中,特别是水资源问题日益突出的今天,时常出现一些新情况、新问题,要从技术上解决和完善它们,需要水文学的理论发展。因此,两者的有机结合既可推动水资源开发利用在技术上的逐渐完善,也可促进水文学的发展。

第二节 水文现象的特性及水文学的研究方法

一、水文现象的基本特性

水文现象属于自然现象的一种,是由自然界中各种水体的循环变化所形成的。比如降水,蒸发,河流中的洪水、枯水等。它和其他自然现象一样,是许多复杂因素综合作用的结果。这些因素按其影响作用分为必然性因素和偶然性因素两类。其中,必然性因素起主导作用,决定着水文现象发生发展的趋势和方向;而偶然性因素起次要作用,对水文现象的发展过程起着促进或延缓作用,使发展的确定趋势出现这样或那样的振荡、偏离。人们通过对水文现象的长期观察、观测、分析和研究,发现水文现象具有以下三种基本特性。

(一) 水文现象的确定性

在水文学中通常称必然性为确定性,称偶然性为随机性。由于地球的自转和公转,昼夜、四季以及气候现象等具有同期性规律,使水文现象在时程变化上形成一定的周期。如一年四季的降水有多雨季和少雨季的周期变化,河流中的水量则相应呈现汛期和非汛期的交替变化。另外,降雨是形成河流洪水的主要原因,如果在一个河流流域上降一场暴雨,则这条河流就会出现一次洪水。若暴雨雨量大、历时长、笼罩面积大,形成的洪水就大。显然,暴雨与洪水之间存在着因果关系。这就说明,水文现象有其发生的客观原因和形成条件,具有确定性规律。

(二) 水文现象的随机性

因为影响水文现象的因素众多,各因素本身在时间上不断地发生着变化,所以受其影响的水文现象也处于不断的变化之中。它们在时程上和数量上的变化过程伴随着确定性出现的同时,也存在着偶然性,即具有随机性。如同一河流,不同年份的流量过程不会完全一致;同一断面的年最大洪峰流量有的年份大,有的年份小,而且各年出现的时间不会完全相同。

(三) 水文现象的地区性

由于气候因素和地理因素具有地区性变化的特点,因此受其影响的水文现象在一定程度上也具有地区性特点。若气候因素和自然地理因素相似,则其水文现象在时空上的变化规律具有相似性;若气候因素和自然地理因素不相似,则其水文现象也具有比较明显的差异性。如我国南方湿润地区的河流,水量普遍丰沛,年内各月水量分配相对比较均匀;而北方干旱地区的大多数河流则水量不足,年内分配极不均匀。

二、水文学的基本研究方法

根据水文现象的基本特性,水文学的研究方法相应地可分为以下三类。

(一) 成因分析法

由于水文现象与其影响因素之间存在着比较确定的因果关系,因此可通过对实测资料或试验资料的分析建立某一水文要素与其主要影响因素之间的定量关系,从而由当前的影响因素状况预测未来的水文情势,这种方法在水文预报上应用较多,但是由于水文现象的影响因素非常复杂,使其在应用上受到一定限制,目前并不能完全满足实际需要。

(二) 数理统计法

数理统计法是根据水文现象的随机性特点,运用概率论和数理统计的方法,分析水文特征值的统计规律,对未来的水文情势做出概率预估,为工程的规划设计和施工提供基本依据。数理统计法是目前水文分析计算的主要方法,不过这种方法只注重于水文现象的随机性特点,所得出的统计规律并不能揭示水文现象的本质和内在联系。因此,在实际应用中应和成因分析法相结合。

(三) 地区综合法

根据水文现象的地区性特点,气候和地理因素相似的地区,水文要素的分布也有一定的地区分布规律。可以依据本地区已有的水文资料进行分析计算,找出该地区的分布规律,以等值线图或地区经验公式等形式表示,用于缺乏实测资料的流域进行水文分析

计算。

以上三种方法相辅相成、互为补充。在实际运用中,应结合工程所在地的地区特点以及水文资料情况,遵循“多种方法,综合分析,合理选用”的原则,以便为工程规划设计提供可靠的水文成果。

第三节 工程水文学的研究内容

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。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、林业及城市建设向水文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。

工程水文学的主要内容包括水文计算和水文预报。天然来水过程与国民经济的需要常常不相适应,而修建水利工程就是解决这一矛盾的技术措施。每一项水利工程在其实施工过程中,都可划分为规划设计、施工及运营管理三个阶段,而每一阶段都需要工程水文学的服务。

一、规划设计阶段

规划设计阶段水文计算的主要任务是为确定工程的规模提供设计水文数据。规模过大,会造成工程投资上的浪费;规模过小,又使水资源不能充分利用,也是一种浪费。对于防洪措施,如果标准过低,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,工程规划设计时必须知道控制水体在使用期间的水文情势,提出作为工程设计依据的水文特征数值,如设计年径流量、设计洪水等。

二、施工阶段

施工阶段水文计算的任务是为确定临时性水工建筑物(如施工围堰、导流隧洞和导流渠等)规模提供施工期的设计洪水。水利工程工期一般较长,往往需要一个季度甚至长达几年,因此对水文情势的了解应包括两个方面:一方面,为了临时性建筑物(如围堰、引水隧洞或渠道等)的修建,须预报整个施工期的天然来水情势,而通常的水文预报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)的水文预报。

三、运营管理阶段

运营管理阶段需要知道未来一定时期内的来水情况,以便编制水量调度方案,合理调度水量,充分发挥工程效益。因此,在这一阶段,水文预报工作十分重要。例如,汛前根据洪水预报信息,在洪水来临之前,预先腾出库容拦蓄洪水,使水库安全度汛,下游免遭洪水

灾害。到汛期快结束时,及时拦蓄尾部洪水,以保证灌溉、发电等方面的需求。此外,在工程运用期间,随着水文资料的积累,需要经常地复核和修正原设计的水文数据,改进调度方案或对工程实行必要的改造。

第四节 水文学的发展及展望

水文学作为一门科学是在社会生产发展和人类活动需要中逐步形成的。1962 年美国联邦政府科技委员会提出水文学是一门关于地球上水的存在、循环、分布,水的物理、化学性质及其对环境的反应的学科。1987 年,《中国大百科全书》定义水文学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律和运用这些规律为人类服务的知识体系。显然,水文学的内涵包括许多基础科学问题,具有自然属性,是地球科学的组成部分,其研究方向是地理水文学;另一方面,由于它在形成与发展过程中,直接为人类服务,并受人类活动的影响,具有社会属性,又属于应用科学的范畴,因此其研究方向是应用水文学或工程水文学。

一、水文学的发展历程

(一) 20 世纪以前是水文学的萌芽和奠基阶段

远古时代,人们在治水过程中就已经认识到水文工作的必要性。例如,公元前约 3 000 年埃及在尼罗河上设置水位观测设备,公元前约 250 年李冰在都江堰设置“石人”观测水位,隋代的石刻水则、宋代的水碑等都是为了掌握水情而设立的。公元 6 世纪,《水经注》定性描述了我国境内河流的概况,表明古代已有水文知识和水情记载。

15 世纪以后,水文测量技术和设备有了显著的发展:自记雨量计(C·雷恩等,1663)、蒸发器(哈雷,1687)、流速仪(T·G·埃利浦,1870),以及与水文有关的水力学测试设备如伯努利测压管、毕托管的发明,有关理论和公式如伯努利原理、谢才公式(1775)等的提出,特别是在 19 世纪,许多理论和公式相继出现,如达西定律(1856)、圣维南方程(1871)、曼宁公式(1889)、道尔顿蒸发公式(1802)以及库切林合理化公式(1889)为水文学的发展奠定了基础。

(二) 1900 ~ 1960 年是应用水文学的兴起阶段

20 世纪以来,随着生产建设的发展,为适应兴建大量水利工程和其他设施的需要,应用水文学应运而生,主要反映在以下几个方面:

(1) 建立了一些水文实验站,如苏联的瓦尔达依水文实验站、美国的科威达水文实验站。我国在新中国成立初期已开始在长江、黄河和一些省区建立水文实验站,探索降雨—径流变化规律,为生产建设提供水文数据。

(2) 设置水文站网,观测、调查、收集水文气象资料,为生产建设提供水文情报。

(3) 为适应水工建筑物水文计算的要求,大量的经验公式和参数估计方法相继出现。

(4) 产汇流理论和计算公式的提出,如谢尔曼单位线(1932)、佐贺瞬时单位线(1934)、麦卡锡的马斯京根洪水演算法(1936),以及耿贝尔极值分布(1941)和海森的水文频率计算(1930)等都促进了降雨径流和水文频率计算工作的开展。

(三) 1960~2000 年是水文学的变革和发展阶段,也是进入现代水文学的一个新阶段

20 世纪 60 年代以来,随着计算机技术的发展、遥感遥测技术的引用、一些新理论和边缘学科的渗透,加上人口膨胀、水资源紧张、环境污染、气候变化,使水文学面临着机遇与挑战,特别是近二三十年,国际水文学术活动频繁,我国水文界也开展了大量的研究工作,促使水文学发生了深刻的变革和发展,从而使水文学进入了现代水文学的新阶段。

联合国教科文组织从 20 世纪 60 年代开始组织各国参加国际水文十年(IHP, 1965~1974)的国际水文学术活动,主要研究工作在于全球水文基本资料收集和水量平衡研究。从 1975 年起继续执行国际水文计划(IHP),将 1975~1995 年分四个阶段进行:第一阶段着重人类活动影响,水资源与自然环境之间关系的研究;第二阶段把研究领域扩大到各个特定的地理、气候区域,并向着综合利用水资源的水问题方向发展;第三阶段定名为“为经济、社会发展合理管理水资源的水文学和科学基础”,除继续把水文学作为重点外,还把计划内容扩大到合理管理水资源;第四阶段研究计划重点是大气—土壤—植被之间的水循环关系,全球气候变化对陆地水文过程的影响;第五阶段(1996~2001)的主题是“脆弱环境中的水文水资源开发”,相对以前的四个阶段,它更加突出了通过水文学的基础和知识支持可持续水资源的规划与管理,计划的核心内容有:水文过程中尺度问题的作用,环境的脆弱性,水资源的综合集成管理,科学的教育训练与传播。

水文学的研究不仅需要认识作用于水文循环的物理过程,同时也需要强调通过对水文循环的生物控制和它们的气候、水文和环境中的相互作用的反问题,认识对陆面生态系统改变的影响,认识全球变化和人类活动对国民经济和社会可持续发展的影响,保护人类生存的环境。其中,水文生态学已经成为近代水文学发展的一个重要方面。内容涉及:土壤—植被—大气转化模型的研制,河流生态系统多样性,时间和空间的变异性分析,生态系统变化与河流泥沙输送和氮负荷响应的影响关系,水文生态模型等。国际地球科学在面向 21 世纪的发展中十分重视水文学和生态学交叉方向的研究。

我国近二三十年来,水文学有很大的变革和发展。雷达测雨、中子测土壤含水量、放射性示踪测流、卫星遥感传递资料等现代技术的引用,使人们能获得使用常规方法无法取得的水文信息。一些科研院所和高等院校建立了拥有现代化设备的水文实验室,使人们有可能对水文现象的物理过程了解得更深透。设计洪水计算理论与方法、联机实时洪水预报技术与方法、流域水文模型等都取得了适合我国需要的先进成果。全国和各大江大河流域的水资源(水质)评价、水资源合理利用及水质研究、江河水文水情研究,以及气候变化对水文水资源影响评价等课题已列入国家科技攻关计划,并在各有关部门广泛开展。随着新理论如信息论、系统论、控制论以及一些交叉学科如随机理论、模糊数学、灰色系统理论、人工神经网络等系统方法的引进和渗入,水文学相继出现许多新的研究方向或分支学科,诸如系统水文学(包括灰色系统理论)、随机水文学、模糊水文学、环境水文学、水文遥感、水文学的地貌学研究等,从而使水文学进入一个变革与发展时期,形成百花齐放、百家争鸣的格局,这也是在世纪交替进入现代水文学新阶段的一个特色。

二、水文学的发展

综观国际和中国水文学的发展,可以看出水文学研究具有以下趋势与特点:

(1) 水文学研究的领域愈来愈广泛,研究的问题也越来越复杂,并且遇到了来自各方面的不确定性和非确知问题,这给水文学的进展提出了挑战,也提供了机遇。探索水文现象复杂性和不确定性将是水文学的一项长期任务和责任。

(2) 近代水文学的研究已愈来愈注重系统性和整体性。例如,对流域尺度水文学问题,不是将其产流、汇流割裂开而是整体(即系统观点)地研究流域水文学方法;又如,近代水文学将水圈、大气圈、生物圈视为一个有机的联系体,从地球系统角度研究气候—水循环—生态影响—气候变化的相互作用,并预测未来趋势的变化和对人类社会经济的影响。水文系统分析的观点和方法论得到了提倡,这给系统水文学的发展提出最新的要求和动力。

(3) 水文学的研究与为人类服务、解决实际工作中各项水的问题的联系紧密了,如研究全球气候变化的影响,水旱灾害预报等。

21 世纪中国水文学将对世界水文学的发展作出更多贡献,在国家和有关部门的积极支持下,将在下列几个方面取得新的进步。

(一) 水文信息新技术的应用研究

利用更多的高新技术,如水文遥感、水文示踪技术和地理信息系统等,揭示水文时间和空间变化规律,提出新的认识,是 21 世纪水文学发展的一个必然趋势。遥感技术能观测地球表面的信息,并可观测一些传统方法观测不到的水文变量。近年来,遥感技术在观测降水、获取冰雪水文资料、测量蒸散发和土壤湿度等方面的应用对区域和大尺度水文学的发展起着重大的推动作用。随着更多卫星的发射、遥感技术的改进和水文示踪技术的应用,人们将能够更多地获取水文循环中的一些重要变量信息,补充常规观测数据的不足,将会扩大现有水文学的研究领域。随着地理信息系统、数字水文的应用开发,集成影响水文过程变化识别多方位信息成为现实,认识水文复杂性规律水平得到明显提高。

(二) 水文尺度问题的研究

水文学的研究对象包括地球水圈范围内所有尺度水文现象及过程与环境的相互作用研究。水文理论研究和实践表明,不同时间尺度和空间尺度的水文系统规律通常有很大的差异。典型的例子是微观尺度水文试验获得的“物理”参数,如土壤饱和含水率(K_s),往往不能直接应用到流域尺度的水文模拟;反过来,宏观尺度的水文气象背景值变化也不能直接套用时空变异性十分突出的微观水文生态模拟预报。从水文系统的观点看,不同尺度之间存在客观的联系和能量的输送。如何寻求它们之间的内在联系,即水文尺度问题,将是 21 世纪水文学基础研究的前沿课题。

进入 21 世纪,不同尺度的水文规律或特性将会被不断地认识和采用新的理论方法量化(如地貌尺度的分形律,水文动力学参数的尺度化律等);通过高新技术的应用和水文学基础理论的发展,过去主要应用在微观尺度水文学的物理方法,将会逐步向流域和全球的中观尺度或宏观尺度扩展,不同尺度的水文规律和它们之间的某种新的过渡规律,会得到新的认识。

(三) 水资源管理的水文基础研究

充分了解流域的水文信息、自然界变化与人类活动经济发展对水文水资源量和质的影响,是可持续水资源管理的重要前提。除不同尺度水文循环观测和机理研究外,可持续

水资源管理的水文学基础研究包括跨越不同时间和空间尺度水文信息变化的相似性和变异性研究、长期变化的预测和生态需水量等。21 世纪的水文学研究进展将会有:变化环境中的水文循环及水资源形成机理的认识,包括水资源开发对水循环的影响规律、土地利用对水循环的影响规律、城市化进程对水循环的影响规律等;变化环境中的水文环境生态演进规律、干旱半干旱地区的生态需水规律认识,水形态转化过程中污染形成与水质转化机理,水文—水环境的相互作用与转化关系,跨越不同时空尺度水信息变化的相似性和变异性等。期待在 21 世纪能够打破地区行政(包括国家)的界限,以整个陆地系统或者自然流域为基础建立的有较高时空分辨率的水文水资源信息系统。

(四) 水文复杂性和不确定性研究

水文复杂性和不确定性是水文学研究最为重要和棘手的两个方面,它们既有联系又有区别。水文复杂性涉及降水、蒸发、下渗和径流形成的水文循环机理与水文尺度问题。水文不确定性既与水文输入变量和水文状态变量观测精度有关,又与复杂性认识不足等诸问题(缺乏充分信息,模型设计不准确)有联系,它是输入不确定性和系统不确定性的综合体现。目前,特别是在全球水文及气候变化研究中,水文不确定性比较突出,成为水文学发展中一个新的前沿课题。传统的水文不确定性涉及到水文的随机性或统计特性,而近代的水文不确定性的概念有了新的拓展,它包括对系统认识的不确定性(模糊性、灰色系统)和水文复杂性(混沌与分形)的未知程度。随着科学技术水平的提高和对水文不确定性认识的升华,21 世纪的水文不确定性研究和方法论会有新的发展。

习题与思考题

- 1-1 简述水文学与水资源开发利用的关系。
- 1-2 水文现象的基本特性及工程水文学的研究方法是什么?
- 1-3 工程水文学在水利工程各阶段有何作用?
- 1-4 水文学发展经历了几个阶段,未来发展趋势如何?

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

地球表面的各种水体,在太阳辐射作用下,从海洋和陆地表面蒸发,上升到空中,并随空气流动,在一定条件下,冷却凝结形成降水又回到地面。降水的一部分经地面、地下形成径流并通过江河流回海洋;一部分又重新蒸发,回到空中,继续上述过程。各种水体的这种通过不断蒸发、水汽输送、凝结、降落、下渗、地面径流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,向下至地表以下平均 1 km 深处。

水文循环可分为大循环和小循环。大循环是指海洋与陆地之间的水分交换过程,而小循环是指海洋或陆地上局部的水分交换过程。譬如,海洋上蒸发的水汽在海洋上空凝结后,以降水的形式降落到海洋里,或陆地上的水经蒸发凝结又降落到陆地上,都属于小循环。大循环包含若干个小循环。水文循环示意图如图 2-1 所示。

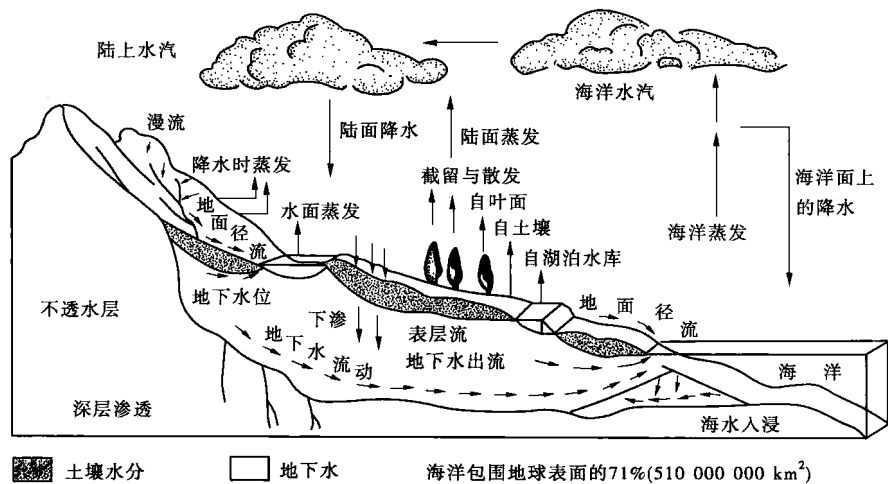


图 2-1 地球上水文循环示意图

水文循环的成因包括内因和外因两个方面。内因是水的物理三态(固、液、汽)在一定条件下的相互转换。外因是太阳辐射和地心引力。太阳辐射为水分蒸发提供热量,促使液态、固态的水变成水汽,并引起空气流动。地心引力使空气中的水汽以降水形式回到地