



面向 21 世纪 课 程 教 材

Textbook Series for 21st Century

工 程 水 文 学

主 编 任树梅 朱仲元
副主编 张文萍 王丽学



中国农业大学出版社

面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

工 程 水 文 学

主 编：任树梅 朱仲元

副主编：张文萍 王丽学

中国农业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程水文学/任树梅等主编. —北京: 中国农业大学出版社, 2001. 6
ISBN 7-81066-355-0

I. 工… II. 任… III. 工程水文学 IV. TV12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 026746 号

出 版 中国农业大学出版社
发 行
经 销 新华书店
印 刷 北京春雷印刷厂
版 次 2001 年 6 月第 1 版
印 次 2001 年 6 月第 1 次印刷
开 本 16 20.75 印张 384 千字
规 格 787×980
印 数 1~2 000
定 价 26.00 元

社址: 北京市海淀区圆明园西路 2 号

邮编: 100094 电话: (010)62336496 62892620

内容提要

本书为高等院校农业水利工程、水利水电工程、给水排水工程、水文水资源、桥梁与道路建筑及施工专业的通用教材。主要论述了工程水文学的基本原理和方法。力求在论述学科的基本知识和计算方法的基础上,反映本学科领域发展的新内容。

全书共分十一章,内容包括:河川径流形成的基本知识、水文测验与水文资料的收集、水文统计、年径流分析计算、流域产流汇流分析计算、设计洪水、河流泥沙分析计算、水文预报、水文模型、水质及水质评价。

与其他同名教材相比,本书所涉及的有关计算标准和规范均为国家新近颁布的标准和规范。在水文测验、水文统计、水文预报、水文模型、水质及水质评价等章节中均增加了本领域发展的新内容。

本教材除供本专业师生教学使用外,还可作为相关专业的师生及从事水利 engineering 事业的工程技术人员的参考用书。

前 言

本教材是国家教育部面向 21 世纪农业工程类本科人才培养方案及教学内容课程体系改革 04—18 项目研究成果,是依据高等学校水利水电专业和农业水利工程专业《工程水文学》教材编写大纲编写的。在编写的过程中,除征求了有关农业院校相关专业师生的意见和吸收过去教材编写经验之外,力求在保证论述学科的基本知识和计算方法的基础上,反映本学科领域发展的新内容。

全书共分十一章,按 72 学时编写,以河川径流形成的基本知识、水文统计、年径流分析计算、流域产流汇流分析计算、设计洪水等为主要内容;同时,扼要论述了水文测验与水文资料的收集、河流泥沙分析计算、水文预报、水文模型、水质及水质评价等方面的知识。

本书第一、二章由朱仲元编写,第三、四、五、六章由朱仲元、任树梅编写;第七、八、九章由任树梅编写;第十章由王丽学编写;第十一章由张文萍编写。任树梅负责全书的定稿工作。

本书引用了有关院校和生产、科研单位编写的教材及文章中的相关内容,编者在此一并致谢。

最后,我们诚恳地希望广大读者对本书的错误和不当之处提出宝贵的批评和建议。

编 者

2001 年 2 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 工程水文学的研究对象及其内容	(1)
第二节 工程水文学的主要任务	(3)
第三节 水文现象的基本规律与工程水文学的分析研究方法	(4)
第四节 工程水文学的发展历史与现代水文学的特点	(5)
第二章 河川径流形成的基本知识	(9)
第一节 水循环及水量平衡	(9)
第二节 河流与流域	(12)
第三节 降水与蒸发	(16)
第四节 下渗、土壤水与地下水	(27)
第五节 径流的形成	(37)
第六节 影响径流的因素	(39)
第三章 水文测验与水文资料收集	(41)
第一节 概述	(41)
第二节 水位观测与计算	(44)
第三节 流量观测与计算	(46)
第四节 泥沙观测与计算	(61)
第五节 水文资料收集	(66)
第四章 水文统计	(67)
第一节 概述	(67)
第二节 概率的基本概念	(68)
第三节 随机变量及其概率分布	(71)
第四节 水文频率分布曲线	(79)
第五节 统计参数估计方法	(85)
第六节 无偏估计和抽样误差	(95)
第七节 相关分析	(99)

第五章 年径流分析计算	(112)
第一节 概述	(112)
第二节 年径流的变化特性	(113)
第三节 影响年径流量的因素	(116)
第四节 设计年、月径流系列的分析计算	(117)
第五节 缺乏实测资料的设计年径流量计算	(130)
第六章 流域产流、汇流分析计算	(133)
第一节 概述	(133)
第二节 流域产流的方式	(135)
第三节 超蓄产流的分析计算	(138)
第四节 超渗产流的分析计算	(151)
第五节 流域汇流的分析计算	(155)
第六节 河槽汇流计算	(167)
第七章 设计洪水	(178)
第一节 设计洪水计算的基本概念	(178)
第二节 设计洪峰流量及设计洪量的推求	(181)
第三节 由暴雨资料推求设计洪水	(195)
第四节 小流域设计洪水	(206)
第五节 可能最大暴雨及可能最大洪水	(222)
第八章 河流输沙量分析计算	(231)
第一节 概述	(231)
第二节 多年平均年输沙量的计算	(231)
第九章 水文预报	(236)
第一节 概述	(236)
第二节 洪水预报	(238)
第三节 枯季径流预报	(240)
第四节 冰情预报	(241)
第五节 施工水文预报	(245)
第六节 水质警报及预报	(248)
第七节 水文预报精度评定	(249)
第十章 水文模型	(252)
第一节 概述	(252)

第二节 水文系统理论模型.....	(254)
第三节 水文概念性模型.....	(266)
第十一章 水质及水质评价	(285)
第一节 水质.....	(285)
第二节 水质评价标准及评价指标.....	(287)
第三节 水质评价.....	(293)
参考文献	(297)
附 表	(298)

第一章 绪 论

第一节 工程水文学的研究对象及其内容

工程水文学是水文学的一个分支。

水文学是研究地球上各种水体的存在、分布、运动及其变化规律的科学。探讨水体的物理、化学特性和水体对生态环境的作用。水体是指以一定形态存在于自然界中的水的总称。如大气中的水汽、地面上的河流、湖泊、沼泽、海洋、冰川和地面下的地下水。各种水体都有自己的特征和变化规律。因此,按水体在地球圈层的分布情况,水文学可分为水文气象学、地表水文学和地下水文学。按水体在地球表面的分布情况,地表水文学又可分为海洋水文学和陆地水文学。

水文气象学。运用气象学来解决水文问题,是水文学与气象学间的边缘科学。主要研究大气水分形成过程及其运动变化规律。亦可释为研究水在空气中和地面上各种活动现象(如降水过程、蒸发过程)的学科。如可能最大降水的推求,即属于水文气象学中的问题。

海洋水文学。又称“海洋学”。主要研究海水的物理、化学性质,海水运动和各种现象的发生、发展规律及其内在联系的科学。海水的温度、盐度、密度、水色、透明度、水质以及潮汐、波浪、海流和泥沙等与海上交通、港口建筑、海岸防护、海涂围垦、海洋资源开发、海洋污染、水产养殖和国防建设等有密切关系。

地下水文学。研究地壳表层内地下水的形成、分布、运动规律及其物理性质、化学性质、对所处环境的反应、与生物的关系。

陆地水文学。主要研究存在于大陆表面上的各种水体及其水文现象的形成过程与运动变化规律。按研究水体的不同又可分为:河流水文学、湖泊水文学、沼泽水文学、冰川水文学、河口水文学等。在天然水体中,河流与人类经济生活的关系最为密切。因此,河流水文学与其它水体水文学相比,发展的最早、最快,目前已成为内容比较丰富的一门科学。河流水文学按研究内容的不同,可划分为下列一些学科:

(1)水文测验学及水文调查。研究获得水文资料的手段和方法、水文站网布设理论、水文资料观测与整编方法、为特定目的而进行的水文调查方法及资料整理等。

- (2) 河流动力学。研究河流泥沙运动及河床演变的规律。
 - (3) 水文学原理。研究水分循环的基本规律和径流形成过程的物理机制。
 - (4) 水文实验研究。运用野外实验流域和室内模拟模型来研究水文现象的物理过程。
 - (5) 水文地理学。根据水文特征值与自然地理要素之间的相互关系,研究水文现象的地区性规律。
 - (6) 水文预报。根据水文现象变化的规律,预报未来短时期(几小时、几天)或中长期(几天、几个月)内的水文情势。
 - (7) 水文分析与计算。根据水文现象的变化规律,推估未来长时期(几十年到几百年以上)内的水文情势。
- 此外,还有研究水体化学与物理性质的水文化学与水文物理学。

一、工程水文学的研究对象

水文学是地球科学的组成部分、也是现代科学技术的一个领域,它有许多实际用途,通常称为“应用水文学”。工程水文学就属于应用水文学,它是将水文学的基本理论与方法应用于工程建设(如水利水电能源工程、城市工矿用水工程、农田水利工程、修建铁路、公路、桥梁、国防建设等)的一门学科。它主要研究与水利工程的规划、设计、施工和运行管理有关的水文问题。

二、工程水文学的研究内容

工程水文学应用于水利工程中,主要研究内容为水文测验、水文计算和水文预报。

水文测验是系统地收集和整理水文资料的统称,包括水文要素的观测、资料信息的收集、处理、存储和检索。

水文计算是为水资源开发利用、防洪排涝和桥涵建筑等工程或非工程措施的规划、设计、施工和运用提供水文数据的各种水文分析和计算的总称。其主要任务是提供工程规划设计所需要的和施工运行期间可能出现的水文设计特征值及其在时间和空间上的分布。

水文预报是根据前期或现时水文、气象资料,运用水文学、气象学和水力学的原理和方法,对河流等水体在未来一定时段(一般是几小时或几天)内的水文状况做出定量或定性的预测,为防汛、抗旱及工程运行管理提供决策依据。

第二节 工程水文学的主要任务

河流的天然来水能够满足当地工农业用水、生态和生活需水,则天然来水可以为人类社会所利用,成为自然资源。然而来水过多或过少,又会成为威胁人类生存和社会发展的水、旱灾害。兴建水利工程的目标是“兴利除害”,是解决上述矛盾的主要技术措施。因此每一项水利工程建设都必然与水体有密切关系,必须了解水体的存在、分布、循环和运动规律。水利工程从修建到运用一般要经过规划设计、施工、管理三个阶段,每一阶段都需要掌握未来水文情势的变化。由于各阶段的任务不同,因而要求对水文情势的研究各有侧重点。

工程水文学应用于水利工程主要研究水利工程的规划、设计、施工和运行管理中有关水文分析计算和水文管理的基本理论和方法。

水利工程的规划设计阶段是确定工程规模。工程规模则主要取决于河流的来水量或洪水。如果对河流来水量估计过大,就会使工程设计规模太大,造成资金浪费;反之对来水量估计过小,则工程设计容量不够,以致不能充分利用水资源。特别是对河流洪水量的估计偏低,泄洪能力设计不足时,将关系到工程本身和下游人民生命财产的安全。在多泥沙河流上兴建水利工程时,还需估算蓄水、引水工程的泥沙淤积量,以便采取措施延长工程寿命。在工程规划设计阶段工程水文计算的任务首先需要估计河流水量及其变化,提出作为工程设计依据的水文特征值,如设计年径流、设计洪水和设计输沙量等,以便确定工程规模。此外,还要研究工程修建后,在使用期限内的水文情势。

水利工程的施工阶段是将规划设计好的建筑物建成。施工期需要修建临时性的施工建筑物(围堰导流建筑物等)。在该阶段,工程水文计算的任务是为确定临时性水工建筑物的规模提供施工期设计洪水。一些水利工程,特别是大型工程的施工期较长,一般需要几年,甚至十几年,显然施工期设计洪水若估计的偏大,会使施工建筑物规模过大,造成浪费;若施工期设计洪水估计的偏小,易使施工建筑物受损坏,影响施工进度或造成损失。所以,施工期设计洪水的确定也是十分重要的。同时,需要提供具有一定精度的中、短期洪水或枯水预报。水利工程的管理运用阶段在于充分发挥已建成的水利工程的作用。为此就需要知道未来一定时期内的来水情况,以便确定最合理的调度运用方案,提高工程效益。这一阶段工程水文计算的任务是根据水文分析计算获得未来长期可能出现的平均情势,再考虑到水文预报提供的短期实时预报,从而拟定出最佳的调度运用方案。

总之,在水体上修建水利工程必须掌握水体长期水文情势和近期的确切水情。工程水文学就是专门研究这些问题的学科。

第三节 水文现象的基本规律与工程水文学的分析研究方法

一、水文现象的基本规律

地球上的水在太阳辐射和重力作用下,以蒸发、降水和径流等方式周而复始地循环着。水在循环过程中存在和运动的各种形态,统称水文现象。水文现象在时间和空间上的变化过程与其他自然现象一样具有必然性和偶然性,水文学中习惯称必然性为确定性,称偶然性为随机性。

1. 水文现象的确定性规律

从流域尺度考察一次洪水过程,可以发现暴雨强度、历时及笼罩面积与所产生的洪水之间的因果关系。当一条河流的流域面积上降落一场暴雨,这条河流就会涨水,出现一次洪水过程。如果暴雨强度大,降雨历时长,笼罩面积大,则会出现较大的洪峰、洪量。反之,则洪水较小,这种因果关系一般是确定性的。从大陆或全球尺度考察,各地每年一般都出现水量丰沛的汛期(洪水期)和水量较少的非汛期(枯水期),两者周期交替,表现出水量的季节变化。冰雪补充的河流具有以日为周期的水量变化;产生这些现象的基本原因是地球的公转和自转。各地的降水、年径流量都随纬度、距海洋的距离的增大而呈现出地带性的变化。上述这些都说明了水文现象具有其发生原因及其形成条件,服从确定性规律。

2. 水文现象的随机性规律

自然界中的水文现象受众多因素综合影响,而这些因素本身在时间上和空间上是处于不断变化的过程,并且相互影响着。河流每年都可能出现数场洪水,在其某一断面,洪水出现的时间是不固定的,洪峰流量的大小是不相同的,每年的最大洪峰流量也有所不同。所以水文现象的变化过程,特别是长时期的水文过程,又表现出明显的不确定性,即随机性规律。通过长期大量的观测资料可以发现,特大洪水流量和特小枯水流量出现的机会较小,中等洪水和枯水出现的机会较大,多年平均年径流量是一个趋近稳定的数值。水文现象的这种随机性规律需要由大量资料统计出来,所以通常称为统计规律。

水文现象往往既受到确定因素的作用,又受到随机因素的作用,是十分复杂

的。实际应用中,当某种水文现象确定性因素起主要作用时,则以确定性规律描述能反映此种水文现象的本质。同理,随机性亦然。

二、水文学的研究方法

根据上述水文现象的基本规律,按不同的要求,水文学的研究方法通常可以分为三类:

1. 成因分析法

由于水文现象与其影响因素之间存在确定性关系,通过观测资料和实验资料的分析研究,可能建立这一水文现象与其影响因素之间的定量关系。这样,就可以根据当前影响因素的状况,预测未来的水文现象。这种利用水文现象的确定性规律来解决水文问题的方法,称为成因分析法。这种方法能求出比较确切的成果,在水文现象基本分析和水文预报中,得到广泛的应用。

2. 数理统计法

根据水文现象的随机性规律,以概率理论为基础,运用数理统计方法,可以求得长期水文特征值系列的概率分布,从而得出工程规划设计所需要的设计水文特征值。水文计算的主要任务就是预估某些水文特征值的概率分布。因此,数理统计法是水文计算的主要方法。

3. 地理综合法

根据气候要素及其他地理要素的地区性规律,我们可以按地区研究受其影响的某些水文特征值的地区分布规律。这些研究成果可以用等值线图或地区经验公式表示(如多年平均年径流量等值线图,洪水地区经验公式等)。利用这些等值线图或经验公式,可以求出观测资料短缺地区的水文特征值。这就是地理综合法。

上述三种研究方法,在实际工作中常常同时应用。它们是相辅相成、互为补充的。

第四节 工程水文学的发展历史与现代水文学的特点

一、水文学发展简史

早在公元前 3000 年埃及人即开始观测尼罗河水位。公元前 450~350 年希腊柏拉图(Plato)和亚里斯多德(Aristotle)提出水文循环的臆说。公元前 250 年,我国李冰在四川都江堰设立石人测量水位。此后公元 100~200 年东汉王充在《论衡》一

书中对水循环概念作了论述。公元 1452 年(明仁宗洪熙元年)颁布“测雨器制度”。公元 1452 年意大利达·芬奇(Leonardo da Vinci)用浮标测流速,并通过观测论证了水循环,一些水文学的基本原理开始形成。这个时期被认为是水文学的萌芽时期。

公元 1600~1900 期间,实验水文学兴起,一些水文测验仪器制造成功,如毕托管(Pitot tube)、瓦尔德曼流速仪(Waldmann flowmeter)等;科学家发现了一些水文学原理,如流传至今的伯努利方程(Bernoulli equation)、谢才流速公式(Chezy Velocity formula)、达西定律(Darcy law)、曼宁公式(Manning formula)等。特别是公元 1674 年法国人 P·贝罗特(Pierre Perrault)在巴黎出版了《喷泉的起源》一书,将人们对水文循环的认识提高到数量描述的高度。书中记叙他在塞纳河进行了三年的雨量观测,计算出塞纳河在伯格底以上流域内的年径流量只是降水量的六分之一,这一结论的公布,被认为是现代水文科学的开始。为了纪念他对水文学的贡献,1974 年联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)联合在巴黎举行了水文科学 300 周年纪念会。这一时期被称为水文学的奠基时期。

1900~1950 年各国逐渐建立正规的水文站、雨量站,更深入的探讨水文规律,水文学基本理论有很大发展并被应用于生产实践,应用水文学得到广泛的发展。由于科学技术的进步,水利、交通、动力等大量开发,迫切需要解决工程建设中的许多水文问题;实测水文资料的增长,水文站网的发展,促进了水文预报和计算工作。除出现了许多经验公式和预报方法外,还出现了许多结合成因分析的推理公式、合理化公式以及相关因素预报方法等,并对水文过程的机制进行了探讨。如 1932 年谢尔曼(L. K. Sherman)的汇流单位线,1940 年霍顿(R. E. Horton)的下渗理论等。同时,统计方法也开始用于水文分析计算。这一时期被称为水文学的实践时期。

50 年代之后,世界水文科学出现了新的因素:一是水文科学理论的深入研究和有关学科的渗透,促使水文计算和水文预报出现了许多新方法;二是电子计算机的应用大大改变了水文科学的面貌,遥感、遥测和核技术的应用使水文科学进入了现代化时期,如水文自动遥测系统、联机预报系统及各类水文模型等。特别是近几年全球定位系统(Global Positioning System)、地理信息系统(Geographic Information System)和遥感遥测系统(Remote Sensing System)技术(统称 3S 技术)在水文学中的应用,为水文实时预报展示了广阔的前景。许多新的水文分支学科,如随机水文学、城市水文学、农业水文学、森林水文学、环境水文学也已出现。

二、建国以来的水文事业

新中国成立以来,我国水文事业取得了巨大的成就和丰富的经验。这里只简单

叙述水文资料的收集、水文分析计算和水文预报方面的发展情况。

1. 水文资料的收集

解放后,从旧中国接收的水文站只有 353 处。随着国民经济建设的发展,到 2000 年水利电力系统的专业水文站已发展到 3 683 处,水位站 1 084 处,水文实验站 129 处,以及雨量站点 13 910 处。解放初期水利电力部制定的《水文测验规范》,经过两次修订,进一步完善,统一了水文测验技术标准,保证了测验成果的精度。《水文资料整编规范》也经多次修订,1999 年 12 月颁布的《水文资料整编规范》增加了计算机整编水文资料的技术和数据库的内容。测验仪器设备向自动、遥控、高精度、全天候方向发展。

2. 水文分析计算

解放后国民经济建设的蓬勃发展,促进了水文分析计算工作。水文分析计算积累了比较丰富的实践经验。1981 年颁发了《水利水电工程设计洪水计算规范》,1983 年颁发了《水利水电工程水文计算规范》,1995 年 12 月 8 日颁发了《水利工程水利计算规范》。1975 年以后,全国开展了可能最大暴雨的研究,已制成《全国 24 小时可能最大暴雨等值线图》,并进行了《暴雨洪水查算图表》的编制工作。80 年代初在全国范围内进行了历史洪大的汇编的历史调查洪水涉及 6 000 多个河段,包括 10 000 多次历史洪水。各省都出版了《洪水调查资料》。从 1980 年起,又进行了全国水资源调查评价工作,已编成《中国水资源初步评价》。2000 年我国又开始进行全国范围内的水资源调查评价工作。所有这些工作,在我国的水利建设中起了重要作用。

3. 水文预报

新中国成立初期,由于防洪的需要,在一些较大河流上开展的短期预报,取得了良好效果。随着社会主义建设事业的前进,水文预报技术有了新的发展。对不同自然地理条件下的产流、汇流、水库预报、冰情预报、枯季径流和旱情预报的理论和方法,进行了不同程度的研究和探索,积累了许多宝贵的经验。初步形成了适合我国情况、具有我国特点的水文预报方法,在防汛抗旱、水库调度运用和工农业建设等方面,都起到很好的参谋和耳目作用。长江流域规划办公室主编的《水文预报方法》(1979 年由水利电力出版社出版)是我国在水文预报方面的技术经验总结。2000 年 6 月颁发了《水文情报预报规范》。我国已建成比较完整的水文情报站网,能及时传递水情,保证了水文预报的顺利进行。

三、现代水文学的特点

20 世纪末,随着科学技术的发展和社会进步,赋予水文科学以新的动力和下

列新的特色。

(1)现代化工业和农业的发展增加了对水资源的需求,同时造成水源污染,加剧了水资源的供需矛盾。水文科学的研究领域正在向水资源最优开发和持续利用的方向发展,以期为客观的评价、合理的开发利用、保持生态环境、保护水资源提供水文依据。

(2)现代科学技术的发展,使获取水文资料的手段和水文分析方法有了长足的进步。例如 3S 技术和电子计算机的应用,从水文观测到基本规律的研究,已发展成以电子计算机为核心的自动化。另外,水文模拟方法、水文系统分析方法,使人们研究水文现象的能力提高到了新的水平。

(3)随着科学技术的进步,大规模的人类活动对自然界水体的干预,对自然环境产生了多方面的影响,促使水文学向新的研究领域发展。如在随机数学理论上,逐步形成随机水文学;水文科学和环境科学的交叉学科——环境水文学;城市水文学等都正在孕育形成。

第二章 河川径流形成的基本知识

第一节 水循环及水量平衡

一、地球上水的分布

地球上的水以汽态、液态和固态三种形式存在于空中、地面、地下及生物体内,组成一个相互联系的水圈。地球上水的总量为 13.86 亿 km^3 。各种类型水的储量及分布见表 2-1。地球水储量中 97.74% 为咸水(主要为含盐量较高的海洋水), 2.53% 为淡水(主要为冰川与洋盖)。可供人类生活、生产用的淡水资源仅占全球水总储量的万分之一。

表 2-1 地球水储量

水体种类	水 量		咸 水		淡 水	
	(10^3 km^3)	(%)	(10^3 km^3)	(%)	(10^3 km^3)	(%)
海洋水	1 338 000	96.54	1 338 000	99.04	0	0
地表水	24 254.1	1.75	85.4	0.006	24 168.7	68.7
其中						
冰川与冰盖	24 064.1	1.736	0	0	24 064.1	68.7
湖泊水	176.4	0.013	85.4	0.006	91.0	0.26
沼泽水	11.47	0.000 8	0	0	11.47	0.033
河流水	2.12	0.000 2	0	0	2.12	0.006
地下水	23 700	1.71	12 870	0.953	10 830	30.92
其中						
重力水	23 400	1.688	12 870	0.953	10 530	30.06
地下冰	300	0.022	0	0	300	0.86
土壤水	16.5	0.001	0	0	16.5	0.05
大气水	12.9	0.000 9	0	0	12.9	0.04
生物水	1.12	0.000 1	0	0	1.12	0.003
全球总储量	1 385 984.6	100	1 350 955.4	100	35 029.2	100