

【中国现代科学全书·水文学】

RIVER HYDROLOGY

河流水文学

芮孝芳 陈界仁 著

河海大学出版社

中国现代科学全书·水文学

河流水文学

芮孝芳 陈界仁 著

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

河流水文学 芮孝芳,陈界仁著. 南京:河海大学出版社,2003.10

(中国现代科学全书·水文学)

ISBN 7-5630-1924-3

I. 河... II. ①芮... ②陈... III. 河流—区域水文学 IV. P343.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 087398 号

- 书 名 河流水文学
书 号 ISBN 7-5630-1924-3 IV·230
责任编辑 马文潭
责任校对 江 南
封面设计 朱迎春
出 版 河海大学出版社
地 址 南京西康路1号(邮编:210098)
电 话 (025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)
经 销 江苏省新华书店
印 刷 丹阳市教育印刷厂
开 本 850毫米×1168毫米 1/32 10印张 258千字
版 次 2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷
定 价 30.00元(平装) 40.00元(精装)

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编	胡绳	钱伟长	吴阶平
	周光召	许嘉璐	罗豪才
	季羨林	王大珩	郑必坚
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政
	程湘清	卞晋平	王洛林
	许智宏	白春礼	卢良恕
	徐 诚	王洪峻	明立志

(副主编和编辑委员会名单容后公布)

水文学编辑委员会

主 编	刘新仁	陈吉余
编辑委员	(以姓氏笔画为序)	
	王金奎	朱元性
	朱慧芳	刘新仁
	陈家琦	宋德敦
	杨针娘	林传真
	濮培民	钱孝星

内 容 简 介

本书阐述了20世纪河流水文学的主要进展,对21世纪河流水文学的发展作了初步展望,主要包括:河系及流域地貌、流域产流与汇流、河流洪水与枯水、河流泥沙及河床演变、河流热状况及冰情、河流水质及生态环境等。对河流水文学的研究方法和发展简史本书也作了论述。本书可供从事水文水资源、水利工程、土木工程、农业水土工程、地理科学、环境科学等专业的科学工作者和工程技术人员参考,也可作为这些专业的在校大学本科生、研究生的参考书。

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 河流的形成与补给	(1)
第二节 河流水文学的研究对象	(4)
第三节 河流水文学的研究方法	(7)
第四节 中国河流水文学研究简史	(9)
第二章 河系及流域地貌	(12)
第一节 引 言	(12)
第二节 河系的拓朴学特征	(13)
第三节 河系的几何学特征	(16)
第四节 流域的形状特征	(21)
第五节 流域的结构特征	(24)
第六节 河系的随机模拟	(27)
第七节 河系的分形理论	(36)
第八节 数字高程模型(DEM)及应用	(40)
第三章 产流与汇流	(47)
第一节 概 述	(47)
第二节 产流机制	(48)
第三节 基本产流模式	(50)
第四节 流域产流	(53)
第五节 流域产流计算方法的进展	(57)
第六节 流域出口断面流量过程线的形成	(62)

第七节	面积—时间曲线	(66)
第八节	Rodriguez-Iturbe 地貌瞬时单位线	(68)
第九节	基于宽度函数的地貌瞬时单位线	(73)
第十节	流域汇流系统分析	(75)
第十一节	流域汇流的概念性模型	(83)
第十二节	地下水的流域汇流	(87)
第十三节	流域水文模型	(90)
第十四节	人类活动对产汇流的影响	(97)
第四章	河流洪水与枯水	(103)
第一节	河流洪水形成及洪水波运动	(103)
第二节	洪水波运动的数学描述	(105)
第三节	洪水波的分类及其特点	(108)
第四节	洪水波的小扰动分析	(117)
第五节	水文学洪水演算方法之进展	(124)
第六节	水力学洪水演算方法之进展	(132)
第七节	河流洪水的变化	(159)
第八节	中国河流洪水	(167)
第九节	河流枯水	(174)
第五章	河流泥沙及河床演变	(177)
第一节	坡面侵蚀与产沙	(177)
第二节	河流输沙机理	(184)
第三节	河流泥沙数学模型	(202)
第四节	河相关系及河床演变	(208)
第五节	高含沙量泥沙运动	(213)
第六节	中国河流泥沙	(219)
第六章	河流热状况及冰情	(221)
第一节	河流热量平衡	(224)

第二节	河流水温·····	(228)
第三节	河冰的形成·····	(230)
第四节	河流冰情·····	(232)
第五节	河流冰情的数学模型·····	(239)
第六节	中国河流冰情·····	(243)
第七章	河流水质及生态环境·····	(248)
第一节	“水质”的由来·····	(248)
第二节	河流本底水质·····	(248)
第三节	河流污染的途径及污染源·····	(251)
第四节	河流污染的主要类型及性质·····	(253)
第五节	河流的稀释扩散·····	(261)
第六节	污染物的源与汇·····	(268)
第七节	影响河流自净的因素·····	(276)
第八节	河流水质模型·····	(278)
第九节	河流生态系统的特点·····	(290)
第十节	人类活动对河流生态环境的影响·····	(293)
第八章	21 世纪河流水文学发展展望·····	(298)
参考文献	·····	(304)
后记	·····	(310)

第一章 绪论

第一节 河流的形成与补给

河流是陆地上水流的通道,是溪、川、江、河等的总称。河流是自然景观和生态系统的重要组成部分,是地球物质输移和循环的重要载体。

河流是气候的产物,这是俄罗斯气候学家沃耶依科夫所说的一句名言,它深刻地指出了自然界河流形成的充分而必要的条件是降水。但不同地区河流水量的补给来源还是形形色色的,其中主要的有地面水补给、地下水补给、冰雪补给和混合补给等。

地面水补给 凡地面水补给的河流,其任一断面的水位或流

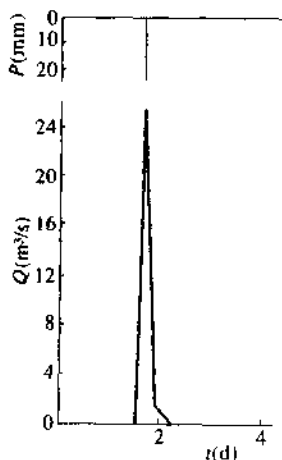


图 1-1 地面水补给的
河流流量过程线

(陕北陀耳巷, $F=5.74 \text{ km}^2$, 1964 年 8 月)

量的动态变化与该断面以上集水面积上降雨的动态变化一致(图 1-1)。降雨时,河中水位或流量增加;降雨终止后,河中水位或流量即开始逐步消落。水位或流量涨落的快慢与降雨强度的变化和流域调蓄作用的大小有关。

地下水补给 由于深层地下水动态变化十分缓慢,因此,由深层地下水补给的河流水位或流量的动态变化也十分缓慢。潜水是浅层地下水。在降雨形成地面水的同时,一般也会形成

一定数量的潜水。由潜水补给的河流在自然界是比较常见的。有些河流,即使流域内较长时间无降雨,但河中仍有比较稳定的水流,这就是地下水补给的作用(图 1-2)。

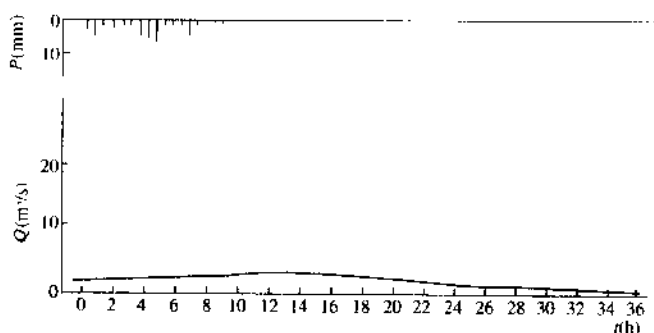


图 1-2 潜水补给的河流流量过程线
(浙江姜湾高坞溪, $F=0.025\text{km}^2$, 1978 年 5 月)

地下水补给与含水层和河流之间有无水力联系有关。当两者无水力联系时,地下水总是流向河流,例如山区河流;而当两者存在水力联系时,地下水与河水的关系就变得比较复杂,例如平原河流。如果地下水等水位线与河流水流方向之间的关系如图 1-3(a)所示,则河水流向地下水,河水不仅得不到地下水补给,而且有一部分河水要补给地下水;如果地下水等水位线与河流水流方向之间的关系如图 1-3(b)所示,则地下水将补给河流;如果地下水等水位线与河流水流方向之间的关系如图

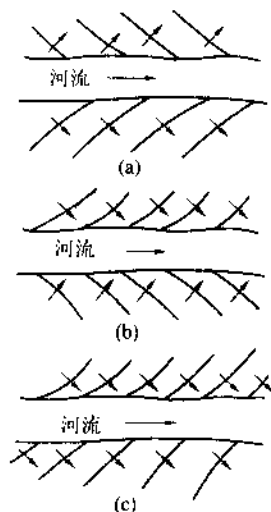


图 1-3 地下水与河流的水力联系

1-3(c)所示,则在河流的左岸(面向下游,下同)地下水补给河流,而在右岸河水则流向含水层。

冰雪补给 陆地表面的冰川和积雪,只有当气温大于 0°C 后才开始融化成水,且融化强度与气温超过 0°C 的多少有关。由冰雪融化水补给的河流最显著的特点是:河流某断面的水位或流量动态变化与气温的动态变化相应。例如气温有明显的日变化,则由冰雪融化水补给的河流水位或流量也呈现相应的日变化态势(图1-4)。

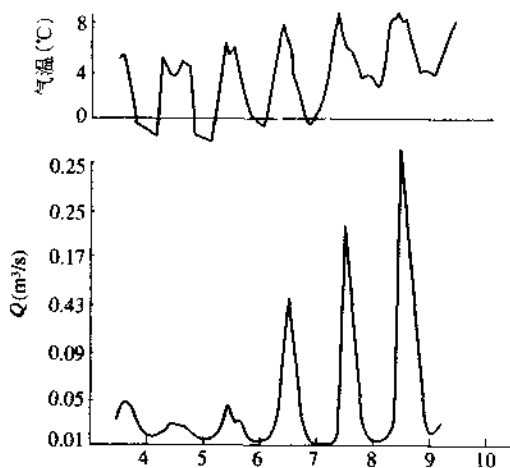


图1-4 冰雪补给的河流流量过程线
(祁连山冷龙岭北坡18~62号冰川,1958年9月)

地面水和地下水混合补给 由地面水和地下水混合补给的河流在自然界比较常见。在这种河流中,洪水期河流的流量由降雨形成的地面水和地下水组成,且一般以地面水为主;而在枯水期,河中流量一般以地下水为主。由降雨与地下水混合补给的河流水位或流量的动态变化的显著特点是陡涨缓落(图1-5)。

降雨和冰雪混合补给 在降雨和冰雪混合补给的情况下,流域的降雨—径流关系不密切,而且常有径流量大于相应降雨量的

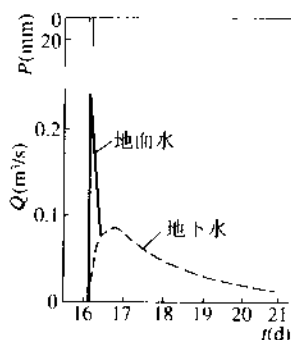


图 1-5 地面水和地下水混合补给的河流流量过程线
(江苏宜兴大相坝, $F=1.63\text{km}^2$, 1965 年 8 月)

情况出现。表 1-1 是中国青藏高原拜渡河雁石坪流域(流域面积 4235km^2)的年降雨量和年径流量对照表。由表可见,拜渡河就是一条由降雨和冰雪混合补给的河流。

表 1-1 拜渡河雁石坪流域的年降雨量和年径流量

年 份	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
年降雨量(mm)	19.2		9	7	14	12	22	18	—	12	24
年径流量(mm)	13.5	7.8	15.9	9.4	17.1	11.1	15.7	4.2	7.8	8.9	12.8

根据以上讨论,河流中某一断面流量的组成可用下式表达:

$$Q = Q_p + Q_g + Q_i + Q_w \quad (1-1)$$

式中: Q 为河流某断面的流量; Q_p 为降雨补给形成的地面水流量; Q_g 为地下水补给的流量; Q_i 为冰雪融化水补给的流量; Q_w 为其他形式补给的流量。

第二节 河流水文学的研究对象

河流水文学是水文学的分支学科之一,主要研究河流中所发

生的各种水文现象的基本规律,流域产流与汇流,河流资源的利用以及人类活动与河流生态系统的关系等。河流水文现象主要包括:洪水与枯水,热状态与冰情,水化学与水质以及泥沙运动等。流域的地形地貌、河流形势以及河床演变,对流域产流、汇流和河流水文现象有重要影响,也是河流文学研究的重要课题。河流是地球上重要的生态系统,河流资源与人类生存关系密切。因此,河流资源的可持续利用以及人类与河流生态系统的和谐共存是十分重要的,作为河流文学,对此也必须着力研究。

河流中所发生的各种水文现象与水的自然性质有关。借助于大气运动、蒸发、降水和径流,水在由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈组成的地球系统中作周而复始的运动,即水文循环。产生水文循环的外因是太阳辐射和地球引力,内因是水在常温下固、液、汽三态的转换。地球系统中总水量大体不变,但每年的时空分布不同,甚至导致有的地方出现洪水,有的地方出现干旱。水是良好的溶剂,许多物质都易溶解于水。水流具有势能、动能,是重要的载体。坡面土壤的侵蚀与搬运,河流泥沙运动,河中冰块的移动,水污染物质的迁移扩散等都是在水流作用下进行的。没有水流,就不可能有坡面土壤流失、河道冲淤变化和水污染物质的搬运。如果将水流具有的能量设法集中起来,就成为一种可再生的清洁能源——水能。水是地球系统的“血液”,水文循环就是地球系统的“血液循环”。水文循环导致的水的时空分布是地球上具有丰富多彩的生态系统和不同自然景色的根本原因。

河流文学的研究对象是随着生产的发展和科技的进步而不断丰富。19世纪,以牛顿力学为基础和模本的古典科学得到了极大的发展。在物理科学领域,以牛顿力学为基础,统一了声学、光学、电磁学和热力学。牛顿力学有效地支配着小到超显微粒子、大到宇宙天体的物理世界。在河流文学领域,基于牛顿力学,于1856年提出了描述渗流运动的 Darcy 定律,于1871年提出了描

述明渠缓变不稳定流的 St. Venant 方程组。这就为河流水文学奠定了理论基础。

20 世纪初至 20 世纪 50 年代,由于生产力的发展,人们期望能更科学地了解和掌握河流洪水与枯水的变化规律,以便能预测预报未来洪水与枯水的情况,在河流上建造水利工程,达到控制洪水、调节枯水、减少由水旱灾害造成生命财产损失的目的。基于人类与水旱灾害作斗争的客观需要,就使得流域产流与汇流、河流洪水与枯水、河流泥沙、河流冰情等成为河流水文学的主要研究对象。

到了 20 世纪 60 年代至 70 年代,计算机的发明与应用所引发的信息革命带来了现代科学技术的突飞猛进。经济的迅速发展和人口的快速增加,使得一些国家和地区,早在 70 年代就开始出现水危机,水资源的紧缺成为经济社会发展的制约因素,加强水资源形成变化规律和河流水量合理开发利用的研究,成为河流水文学刻不容缓的任务。差不多在同一时期,人们开始认识到发展就是增长经济的观点是片面的,它必然导致人口膨胀,资源浪费,环境污染。有些国家所走的“先发展经济,后治理污染”的发展道路,造成了污染治理上愈来愈大的困难,河流首当其冲,它是最先受到污染的。因此,如何防治河流污染,保护河流水质,也成为河流水文学的研究对象。

20 世纪 80 年代以来,全球气候变化及大气、海洋与陆地相互作用过程的研究,引起了科学家的广泛兴趣,认为波及许多国家和地区的水危机和洪涝灾害,与全球气候变化异常有关。因为由此导致的地球上太阳辐射再分布改变了蒸发、大气中水汽输送和降水的时空分布,这是 Eagleson 于 1986 年提出的全球尺度水文学(Global Scale Hydrology)研究的基本问题。一些人士认为,全球尺度水文学的研究对当前和今后水文学的发展具有重要意义,必将为河流水文学提供新的研究课题。

第三节 河流水文学的研究方法

学科的发展,新知识、新规律的发现,从一定意义上来说,得益于合理、巧妙的研究方法的应用。从河流水文学的发展过程可以总结出下列主要的研究方法。

科学实验 河流水文学实验可分为原型观测和物理模型实验两类。前者在野外自然条件下进行,例如,在河流上布设水文站网进行观测,设立实验河段、实验流域等。后者属于室内实验,例如,为不同研究目的设立的水文实验室、河流比尺模型、流域比尺模型等。科学实验是人们认识和揭示河流水文规律的实践基础。Darcy定律的发现离不开Darcy在实验室内进行的沙柱渗流试验。20世纪60年代,如果不是对大量不同气候和下垫面条件下水文观测资料的科学分析与归纳,中国水文学家就不可能得出湿润地区以蓄满产流为主、干旱地区以超渗产流为主的产流理论。20世纪70年代,如果不是用先进量测手段对野外实验流域进行观测,Dune等人就不可能揭示用Horton产流理论无法解释的饱和地面径流和壤中径流的形成机制。随着同位素技术、示踪剂技术及量测技术的进步,科学实验对推动河流水文学的发展必将越来越重要。

数学模型 数学模型中的数学物理模型是根据物理定律,建立河流水文要素时空变化数学方程式,然后求其解的一种模型。例如,河流洪水波运动受控于质量守恒定律和能量守恒定律,据此即可导出描写河流洪水波运动规律的偏微分方程组,即St. Venant方程组。对河流泥沙运动、河流水温变化及河流污染物迁移扩散,也可根据有关物理定律来建立各自的描述方程式。由这样的数学物理方程式得到的模型就是数学物理模型。基于一定的物理成因概念,从河流水文现象的宏观表现上进行数学模拟,

求得河流水文要素变化规律的方法称为概念性模型。例如,模拟河流洪水形成和运动的流域水文模型通常就是概念性模型,它由若干个可以反映蒸散发、下渗、坡面和河道水流运动的概念性元素,按径流形成过程排列组合而成。概念性模型与数学物理模型之间并无截然的界限,因为当概念性模型中的某些假设被实践证明是正确了的时候,概念性模型就成为数学物理模型了。随着计算机技术的不断进步,在河流水文学研究中,数学模型得到了越来越广泛的应用。

确定性与随机性方法的结合 水的物质结构有别于气体。组成气体的“粒子”之间,相互作用十分微弱,可看作是相互独立的。因此,气体“粒子”所表现出的非结构纯随机运动,可用统计力学方法精确描述。对于水,组成水的“水滴”之间是一种松散的结构关系,牛顿力学不能精确地描述大量“水滴”的集体运动,统计力学也不能精确地描述这种运动。水的物质结构上的这种特点,必然要求在探讨其运动规律时,将确定性方法和随机性方法有机地结合起来。此外,河流水文要素的变化既有确定性的一面,又有随机性的一面。例如,河川径流量在一年之内有丰、枯水期的变化,在年与年之间有多水年、少水年的变化,这是河川径流变化的确定性表现。河川径流在未来某一时刻将出现什么量值,是不能事先确切预知的,这是河川径流变化的随机性表现。因此,在探讨河流水文要素变化规律时,也应将确定性方法和随机性方法有机地结合起来。近二十年来,地貌瞬时单位线理论的创立以及水文随机模拟技术的发展,已显示出了确定性方法与随机性方法相结合的研究方法在探索河流水文规律中的重要作用。

多学科的交叉与渗透 河流水文学是一门综合性的学科,它必须从基础学科和其他相关学科中吸取营养,发展自己。这就决定了多学科的交叉与渗透在河流水文学的发展中起着十分重要的作用。除基础学科外,水动力学、热力学、地球科学、环境科学、系

统科学以及以计算机科学为代表的近代技术,都曾强烈地影响着河流水文学的发展。今后,它们与河流水文学之间必然会在更高的层次上交叉与渗透。

第四节 中国河流水文学研究简史

中国地域辽阔,自然地理条件复杂多样,有众多的名山大川。生活在这块土地上的历代劳动人民,为了生存与发展,不断地与旱灾作斗争,在斗争中逐步认识河流水文特征,探索河流水文要素的变化规律,一部河流水文学研究史是中国五千年文明史的重要组成部分之一。

根据考古与历史文献记载,距今五千年前,中国浙江余姚县河姆渡村就有了地下水井,说明地下水的开发利用在中国是很早的。约公元前 2000 年,大禹治水时,相传有“随山刊木”之说,这是一种原始的河流水文观测。公元前 11 世纪以前的商代甲骨文字中,就有关于雨、泉和洪水等现象的记载。成书于公元前 5 世纪至公元前 3 世纪的《山海经》和《尚书·禹贡》,就有中国河流水文情况的描述。春秋战国时代出现了一些关于河流水文现象的理论性阐述。例如,《吕氏春秋》有关于水文循环过程的叙述;《淮南子》有关于水质与适宜农作物关系的叙述;《管子》有关于渠系水流运动规律和河流分类的叙述。秦代制订的《田律》规定了上报雨情的制度。汉代张戒提出了黄河泥沙的定量概念,指出黄河水浊,一石(dàn)水含有六斗泥沙。北魏酈道元的《水经注》记载了中国 1 252 条河流的水文特性。南宋秦九韶在《九章算术》中记述了用天池盆、圆罍测雨和竹笼测雪以及换算成平地雨、雪深的计算方法。元代李好文在《长安志图》中记载了当时的流量单位“徽”,称在河道上某一固定断面“量彻入渠水头,深广方一尺谓之—徽”。明代刘天和发明了可测量河流含沙量的“乘沙量水器”。清代陈潢介绍