

高等学校教材

(第二版)

水文 预报

四川大学 林三益 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高 等 学 校 教 材



水 文 预 报

(第二版)

四川大学 林三益 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本教材较系统地介绍了水文预报的基本原理、基本方法和实践经验。主要内容有：绪论，河段洪水预报，降雨产流量预报，流域汇流预报，实时洪水预报，降雨径流流域模型，枯季径流预报与旱情分析，水库水文预报，水质预报，冰川积雪融水径流与冰情预报，水文预报误差和精度评定等。

本书第一版于1986年出版。第二版在原有基础上作了较大幅度修改，对系统理论和新技术在水文预报上的应用等有较大充实和提高。

本书为水文学及水资源专业水文预报课程的教材，亦可供从事水文、水利、水电与水环境的教学、科研、设计与工程管理人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

水文预报/林三益主编. —2版. —北京：中国水利水电出版社，2001
高等学校教材

ISBN 7-5084-0659-1

I. 水… II. 林… III. 水文预报—高等学校教材 N.P338

中国版本图书馆CIP数据核字（2001）第049862号

书 作 出 版	名 者 版	高等学校教材 水文预报（第二版） 四川大学 林三益 主编 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） 新华书店北京发行所 全国各地新华书店
发 行 经 售	行 售	
排 印 规 版 次 印 数 定 价	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 水利电力出版社印刷厂 787×1092毫米 16开本 15.25印张 362千字 1986年10月第一版 2001年11月第二版 2001年11月北京第四次印刷 7101—9200册 18.99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 二 版 前 言

本教材是在 1986 年 10 月出版的高等学校教材《水文预报》基础上,根据教学要求,并结合近十余年来水文预报技术发展和研究成果编写的。部分内容引用了国内外一些成果。全书共十一章,以系统介绍短期洪水预报的基本概念和方法为主。

本书由四川大学林三益主编,河海大学朱华、包为民和水利部长江水利委员会水文局葛守西参编。其中第三、九、十章由包为民编写,第六章由朱华编写,第五章由葛守西编写,其余第一、二、四、七、八、十一章由林三益编写,并对全书进行统稿和修改。

葛守西高级工程师对本书提出了许多宝贵的修改意见和建议,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,生产实际工作经验少,书中定会有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 2 月

编者的话（第一版）

本书根据 1982 年 4 月原水利部主持召开的高等学校陆地水文专业“水文预报”教学大纲编写，共有十章，以系统介绍短期洪水预报方法为主，讲课总时数是 65 学时。

本书由庄一鹤（华东水利学院）和林三益（成都科学技术大学）两同志合编。韩承荣（长江流域规划办公室水文局）主审。其中第一、二、六、九、十章由林三益编写，其余各章由庄一鹤编写。

书中部分章节内容及预报方案实例取材于《中国湿润地区洪水预报方法》（华东水利学院编）。部分示例引用了各地交流材料。在此谨向有关作者致谢。

本书第八章主要参考及取材于张书农教授（华东水利学院）所著《环境水力学》（即将出版）等教材，张教授对本章的编写给予了帮助及指导，在此谨致谢意。

由于编者水平所限，加上编写时间仓促，书中定有不少错误及缺点，恳请读者批评指正。

1984 年 12 月

目 录

第二版前言

编者的话 (第一版)

第一章 绪论	1
第二章 河段洪水预报	5
第一节 相应水位 (流量) 法	5
第二节 回水、感潮、分洪溃口河段的水位 (流量) 预报	16
第三节 多沙河段的水位 (流量) 预报	22
第四节 流量演算法	24
第五节 问题讨论	47
第三章 降雨产流量预报	50
第一节 产流量计算概述	50
第二节 产流方式论证	51
第三节 流域蒸散发量计算	56
第四节 实测径流分析	63
第五节 前期雨量指数模型	68
第六节 蓄满产流模型	70
第七节 超渗产流模型	88
第八节 混合产流	99
第四章 流域汇流预报	102
第一节 流域汇流的基本概念	102
第二节 单位过程线法	102
第三节 瞬时单位线法	113
第四节 等流时线法	119
第五节 地下径流汇流计算	123
第五章 实时洪水预报	127
第一节 系统建模基础	127
第二节 实时预报的基本方法	131
第三节 应用概况	134
第六章 降雨径流流域模型	140
第一节 新安江模型	141
第二节 萨克拉门托模型	145
第三节 水箱模型	148
第四节 模型参数的率定	151

第五节	模拟检验与作业预报	153
第七章	枯季径流预报与旱情分析	154
第一节	枯季径流	154
第二节	枯季径流预报方法	157
第三节	旱情分析	162
第四节	旱情分析预报方法	167
第八章	水库水文预报	172
第一节	建库后河道水力要素和水文特性的变化	172
第二节	水库水位与出流量预报	173
第三节	水库施工期水文预报	180
第四节	中小型水库的水文预报	183
第九章	水质预报	187
第一节	概述	187
第二节	水质预报方法基础	189
第三节	河流一维稳态水质预报模型	195
第四节	湖库水质预报模型	201
第十章	冰川积雪融水径流与冰情预报	204
第一节	冰川积雪融水径流概述	204
第二节	冰川积雪融水量计算	208
第三节	积雪融水径流模拟	209
第四节	冰情概述	212
第五节	封冻预报	214
第六节	解冻预报	218
第七节	水库调蓄后冰情的变化和预报	224
第十一章	水文预报误差和精度评定	229
第一节	水文预报误差	229
第二节	水文预报精度评定	230
附 录		235
附表 1	布阿松函数表	235
附表 2	长办汇流曲线汇流系数表	236
主要参考文献		237

第一章 绪 论

(一)

中国是历史悠久的文明古国，幅员辽阔，山丘遍布，河流众多（流域面积在 100km² 以上的河流有 50000 多条），洪旱灾害频繁。根据我国历史记载^[2]，在 1949 年以前的 2155 年间，中国发生过较大的水灾 1092 次，较大的旱灾 1056 次。例如：1931 年长江大水，淹没了武汉市；1939 年海河大水，淹没了天津市；黄河更是“三年两决口”。根据对近 500 年来中国东部 17 个省区水旱灾统计分析表明，各世纪中按受灾县数划分的不同级别灾年频数如表 1-1 所示。

表 1-1 中国东部 17 省区不同级别灾年频数表

灾种	受灾县数	灾害在各世纪中出现年数						灾种	受灾县数	灾害在各世纪中出现年数					
		15	16	17	18	19	合计			15	16	17	18	19	合计
水灾	10~20	16	20	16	23	21	96	旱灾	10~20	8	15	17	11	15	66
	21~40	12	29	37	29	25	132		21~40	4	8	24	11	5	52
	41~80	1	11	14	20	22	68		41~80	1	5	4	6	10	26
	81 以上		2	2	2	8	14		81 以上		3	6	9	4	16
合 计		29	62	69	74	76	310	合 计		13	31	51	37	34	160

人类为了生存与发展，长期与自然灾害做不懈斗争，在不断地总结经验与教训中逐渐认识了自然界水文现象及其运动、变化规律，形成和发展了水文科学。当人们掌握了这些水文规律，创建了水文科学理论，即可对已出现的水文情势进行分析，并预测未来将可能发生的水文要素的变化。水文预报的主要基础就是运用水文学原理，深入剖析水文现象的物理成因，充分了解和掌握其内在的客观规律，然后通过合理的技术途径和科学的方法预测未来的水文情势变化。因此，水文预报属实用水文学范畴。本课程的目的以河流和流域为主，以实测水文、气象等资料为依据，系统地介绍如何运用水文学基本原理对水文现象及其变化与特征进行剖析，分析和探索其内部因素与外界影响因素，以及在它们作用下的演变规律，并介绍研制短期水文预报方案（或模型）的一些方法与技术。

(二)

在中国，自有文字记载以来的五千余年中，就有许多运用水文知识于兴利除害的记载。传说在公元前 21 世纪前，大禹在治水中接受了前人失败的教训，认识到“水性就下”的水文规律后，采取疏导分流措施，使洪水流入大海，治理了水患。秦昭襄王五十六年（公元前 251 年），蜀郡守李冰在岷江修建都江堰，并在引水口处刻凿石人水尺以观测水位，是我国最早的水位观测，并刻注着：“乾毋及足，涨毋及肩，年中水量，以此为度”的说明。至

隋代，用石碑或在石崖上刻划“水则”以观测水位。后来，刻记在石崖上的一些大洪水水位成为现代历史洪水调查的重要依据。公元前 11 世纪前的商代，甲骨文中有降雨的定性记述，如细雨、大雨和骤雨等的分类。春秋时期（公元前 8 世纪～前 5 世纪），在《管子》书中记载有将河流分为“经水”（干流）、“枝水”（支流）、“谷水”（季节性河）、“川水”（人工河）、“渊水”（湖泊）等五类的水文概念。在《后汉书》（公元前 25 年～公元 220 年）中有对雨量测报的记载：“自立春至立夏，尽立秋，郡国上雨泽”。战国时期，慎到（约公元前 395 年～前 315 年）曾在黄河龙口用“流浮竹”测河水流速。宋元丰元年（1078 年），开始有以河流断面面积和水流速度估计流量的概念。明万历年（1573 年），在《治水筌蹄》中有黄河洪水报讯的记述：在黄河沿岸设驿站，每三十里为一站，当发生洪水时，驿吏乘快马向下游逐站传递水情，日夜不息，并了解到“凡黄水消长必有先兆，如水先泡则方盛，泡先水则将衰”的规律，据此对黄河水势涨落作预报，说明 400 多年前我国已有了水文情报预报制度和办法。我国近代水尺始于 1860 年设置在上海黄浦江，1911 年成立江苏水利公司，开始近代的水文测验工作。至 1937 年，全国有水文站 409 处，水位站 636 处，雨量站 1592 处。

早在古埃及，水文工作就已开始。据悉，约公元前 3000 年以前，埃及就建有运河，用其水于灌溉。公元前 3500 年～前 3000 年期间，在尼罗河上使用原始的水位计，后人称为“尼罗计”。早期的水文学知识在希腊亚里斯多得（Aristotle，公元前 384 年～前 322 年）和柏拉图（Plato，约公元前 428 年～前 348 年）的著作中已有撰述，前者在《气象学》一书中将雨、露、雹、雪统称为“降水”，后者在“the Critias”一文中论述了溪河的洪水成因。至 17 世纪，现代水文学开始逐渐形成，到 19 世纪渐趋完善，对流速、流量的观测与计算提出了相应的理论与公式，对地下水和蒸发量的估算也相继提出了不少经验公式，如 1856 年达西（Darcy）地下水流定律的提出等。

（三）

中华人民共和国成立以后，为适应社会主义建设事业蓬勃发展需要，水文情报预报工作由点到面迅速发展。尤其是我国东部和沿海地区，在松辽河、海滦河、黄河、淮河、长江、珠江等七大江河的中下游的 100 多万 km^2 面积上，是我国政治、经济、文化发达且人口密集、城市密布的地区，但其地面高程大多低于江河的洪水位，有些甚至低于河底 10 余米，水灾威胁严重，这些地区的安全主要依靠沿河堤防的保护，是我国江河防洪任务最突出的地区。作为防洪决策主要依据的水文情报预报，担负着重大责任。因此，为了满足客观形势的需要，认真做好这项工作，要充分吸收和引用相关学科领域的高新技术研究成果，进一步深入研究和发发展水文情报与预报的方法和技术，是十分紧迫而重要的。现在，从中央到各省（区）市、各大流域机构、各水利水电工程单位都成立了防汛指挥机构，建立了水情自动测报系统和防洪决策系统，在设备、技术、方法上及技术队伍与水平上，都有很大发展和提高。为适应全国水文工作发展的需要，从 1950 年起，在一些单位和专科学校开设短期水文干部训练班，随后，在一些中等技术学校和大学开设水文专业专科班，自 1954 年起，在国内一些大学开设了水文专业本科班，并相继培养了水文专业研究生，为我国水

文事业和水文队伍建设不断地输送专业技术力量。与此同时,我国向一些先进国家派遣了留学生和访问学者,与国外水文学界开展广泛的合作研究和技术交流,对推进我国水文科学技术发展、提高水文工作水平发挥了积极作用,作出了很大贡献。据有关资料统计,至1997年,全国有水文站3040个,水位站1093个,雨量站14191个,水质测点2572个,地下水观测井点10874个,蒸发站498个,实验站128个,与1949年中华人民共和国成立时的各类测站总数353处相比,水文工作和水文事业有了大幅度增长和发展。

(四)

水文预报是现代水文学科的一个分支,水文预报方法和技术在大量的实践经验和科学研究(包括借鉴和引用国外的)成果基础上,迅速提高和发展,并在某些方面形成了我国的特色。例如:①对已使用数十年的河道相应水位(流量)预报方法,根据天然河道洪水波运动规律与变化特征以及水力学的基本理论,分析影响河段上、下游和干、支流间的水位(流量)关系的各种因素,从定性定量相结合建立相应水位(流量)关系,或以数学函数形式表示,与以往的单纯的经验相关相比,有很大的提高。②在多沙河流上,考虑和分析了河槽断面冲淤变化和河流泥沙运动等复杂的作用与影响,编制了不同条件下的相应水位(流量)预报方案,结合实时校正技术,提高了预报精度。③在河道流量演算方面,对应用十分广泛的马斯京根法(Muskingum Method)的基本概念和基本原理进行了深入的分析与研究,剖析了参数的物理意义,并对该法的使用条件作了明确的论证,进一步提出了具有我国鲜明特色的多河段连续演算的方法,在非线性影响的处理上也有新的发展,大大地提高了长河段和河网的流量演算精度。④在降雨径流量预报方面,根据我国不同自然地理条件下的水文现象和产流特点,提出了湿润地区的蓄满产流模型和半干旱与干旱地区的超渗产流模型。⑤在流域蒸散发量计算、不同成分的径流量计算等方面取得了有特色的成果。⑥在流域汇流计算方面,除了对广泛采用的谢尔曼单位过程线法作了深入的分析、研究,提出了许多有实效的改进办法外,在考虑降雨分布不均匀性和流域下垫面不均匀性对流域汇流的影响方面,较早地提出了分散式计算模型,从而较好地处理汇流中的非线性影响。对引进的一些国外的模型结合我国实际条件也作了不少改进(如意大利的CLS模型),并在实践基础上发展了新的水文预报模型,在模型参数的确定上也有不少独特的方法和技术。⑦在实时洪水预报技术上也有新的成果,提出了具有我国特色的适用性较广、效果较好的实时洪水预报模型。⑧在水库水文预报,特别是施工期水文预报方面,根据我国修建众多的大中型以及特大型水利水电工程过程中的实践与体会,在作业预报方法和技术上积累了丰富的经验,如葛洲坝电站日调节造成库水位的频繁波动对三峡围堰截流期的水位与流量的影响是十分明显的,由于处理得当取得了好的效果。⑨在冰情预报方面,对我国黄河(特别是上游和下游河段)和北方一些河流的冰情特点、冰的生消过程、冰期的河道水力要素等进行了比较深入的观测与研究,在热力、动力与河道特征等成因分析的基础上,建立了一些有实效的预报方案,对我国北方河流的冰情水文预报和防止冰灾发挥了积极的作用。⑩在河流水质预报、枯季径流预报与旱情分析等方面,也都根据我国的具体情况和观测资料等条件,开展了不少新的探索,提出了一些新的成果。

近十多年来,我国水情自动远传遥测和作业预报自动化与实时校正等技术方面都有长足进步,水文自动测报系统技术及水平有较大提高,覆盖面日益增大。在功能上主要体现在:雨情、水情信息时空动态分布显示直观,预报模型实时校正精度高,人机交互式预报性能强,数据库管理支持系统性能好,并正向全国水文预报系统信息网络化方向发展。利用遥感遥测(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)(即3S系统)于分布式流域水文模型已开始实用性研究,将水文预报用于工程优化调度和决策支持系统的研究也日臻完善。由此可见,我国水文预报技术、理论研究和设备条件改善等方面都有很大发展,为经济建设和社会服务作出了贡献,取得了可喜的成绩。

系统理论及其数学模型以及计算机技术的发展,为水文预报方法开辟了一条广阔的应用技术途径。这种宏观的系统分析方法与微观的成因分析方法相结合将会是现代水文预报技术一个新的发展方向。

然而,我国水文预报工作的发展是不平衡的,与国民经济建设和世界科学技术的发展还不能很好相适应。干旱半干旱地区和岩溶地区的洪水预报、多沙河流的沙量过程预报、风暴潮预报、墒情预报、融雪径流预报等,在方法和技术上仍很薄弱;泥石流预报、山洪预警报等基本上尚属空白,有些防汛部门的水文预报方法仍以经验相关为主,雷达测雨技术、地理信息系统技术等在水文情报预报工作中的应用研究还不多见,水文联机自动测报系统尚未普遍建立,水文预报的理论实验研究发展缓慢。因此,发展、提高我国水文预报水平的任务还十分艰巨。尤其是我国人均水资源贫乏,要十分重视水资源合理开发利用和保护,做好水土保持和水环境保护,以改善气—水—土—生物的良性循环系统。为此,水文预报要进一步与气象、气候结合,长、中、短期结合,水系与区域结合,预报与运用管理结合,确定性途径与非确定性途径结合,全面开展水文预报工作,使理论与技术水平和服务效益上上新台阶。

(五)

水文预报是水文学的一个重要组成部分,与水文学科(特别是大尺度水文宏观现象研究)的发展有着相互依存的密切联系。它的基本依据是大量的水文、气象、土壤、地形、地质、植被等等实测资料。水文预报课是水文及水资源专业的专业课,其主要技术基础课程是水力学、气象学和水文学原理。水文预报涉及数学、物理学、水文学、水力学、气象学、地理学、水文地质学、化学等等的基础理论知识。鉴于目前对水文现象演变的物理机制虽有较充分认识,但对其众多的影响因素及人类经济活动等信息还难以完全掌握,现行的水文预报方法(模型)大多属于以物理成因为基础的、具有一定经验性的范畴。因此,做好水文预报工作除掌握理论知识与分析技术外,经验(感性认识)的积累十分重要。在本课程的学习过程中,既要深入钻研(水文学原理课程)基本理论,建立正确的基本概念,掌握编制预报方案的方法与技术,也要善于运用已学各课程的基础知识,对水文要素变化规律进行深入细致的分析,勤奋思考,注重实践,以加强培养分析问题和解决问题的能力,增强理论与实际的联系。

第二章 河段洪水预报

在集水面积较大的流域的中、下游河段，其上游断面的来水量常比区间入流量大，上、下游断面的水位（流量）过程线相似性好，水力要素差异也不大，使上、下游断面同位相的水文要素值之间在定性和定量上存在着一定的变化规律，可建立其间的定量关系。河段洪水预报就是利用这种定量关系，根据上游断面刚出现的水位（流量）值预测下游断面未来的水位（流量）值，后者将发生的时间取决于洪水波在上、下游断面间的传播时间，此即为河段洪水预报的预见期。由此可见，进行河段洪水预报要解决好两个问题：上、下游断面同位相水文要素值之间的定量关系及其河段传播时间。由此即组成河段洪水预报方案。河段洪水预报的实质是以水文学途径近似求解河道非恒定渐变流。而且，对河段洪水波运动规律的探索，必定会给流域和河网的汇流研究从物理成因分析和数学推导论证等方面奠定良好的基础。

常用的河段洪水预报方法有相应水位（流量）法和流量演算法，分别介绍于下。

第一节 相应水位（流量）法

相应水位（流量）法是大流域的中、下游河段广泛采用的一种实用方法。它根据天然河道洪水波运动原理，在分析大量实测的河段上、下游断面水位（流量）过程线的同位相水位（流量）之间的定量关系及其传播速度的变化规律的基础上，建立经验相应关系（即预报方案），据此进行预报。

一、相应水位（流量）预报的基本原理

在区间入流量很小的棱柱形无支流河段上，洪水波经上游断面向下游传播过程中，由于存在着附加比降，各位相的水深不等、断面流速分布不均、流速值不相同等原因，洪水波发生展开和扭曲：波高减小，波长增大，波前的部分水量向波后转移。图 2-1 是渠江下游河段 1964 年 7 月的一次洪水过程。该次洪水的区间降雨量很小，上游断面苟渡口站洪水的总涨差是 8.93m，涨洪历时 29.5h，下游断面罗渡溪站的总涨差是 8.01m，涨洪历时 22.0h，即下断面水位变幅减少 0.92m，涨洪历时缩短了 7.5h，且下游断面洪水过程线比上游断面匀滑。此例较好地反映了天然洪水波在河道传播过程中变形的规律。

洪水波变形除受其内因作用外，还要受外因的影响，外因的影响量往往远大于内因，成

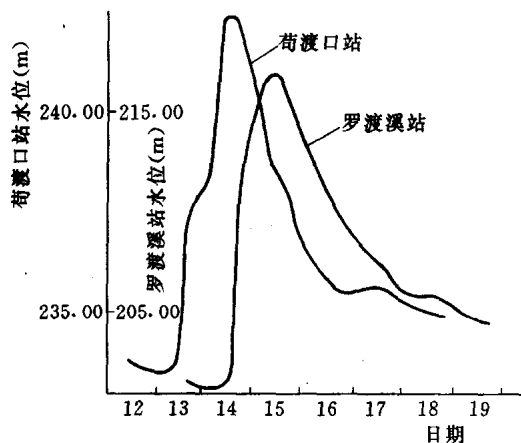


图 2-1 渠江 1964 年 7 月一次洪水过程线

为河段洪水波变形的控制性因素。例如，区间有较大降雨量，区间有支流注入，河段有分洪措施或受回水、壅水顶托，河槽过水断面急剧变化（如狭谷、漫滩地）等等。因此，在编制河段洪水预报方案时，要了解河段具体情况，详细、深入分析河段洪水的内因与外因及其影响量，采用合适方法建立实用的定量关系。

洪水波上某一位相在流经河段上、下游断面时所形成的水位称为相应水位，该位相的流量称相应流量。相应流量值在传播过程中要发生变化，并引起相应水位的变化。因此，在外界条件不变情况下，研究相应水位关系的实质是研究其相应流量在河段传播过程中流量值和传播速度值的变化规律。

设河段长为 L ，上游站 t 时刻流量为 $Q_{上,t}$ ，经传播时间 τ ，下游站 $t+\tau$ 时刻的相应流量为 $Q_{下,t+\tau}$ 。若河段无旁侧入流，则该河段相应流量关系为

$$Q_{下,t+\tau} = Q_{上,t} - \Delta Q_L \quad (2-1)$$

其中： ΔQ_L 是河段洪水波展开量，它是流量和附加比降的函数。

如果河段有旁侧入流量 $q_{t+\tau}$ 汇入，则

$$Q_{下,t+\tau} = Q_{上,t} - \Delta Q_L + q_{t+\tau} \quad (2-2)$$

据上式建立相应流量（水位）关系时还需确定传播时间 τ 。设洪水波的波速为 c ，则

$$\tau = \frac{L}{c} \quad (2-3)$$

在棱柱形河槽，波速 c 与断面平均流速 v 之间关系可表示为

$$c = \eta \cdot v \quad (2-4)$$

其中： η 是河槽断面形状系数（或称波速系数），其值可参阅表 2-1。

式（2-4）代入式（2-3）可得

$$\tau = \frac{L}{\eta \cdot v} \quad (2-5)$$

断面形状	断面形状系数 η 值表	
	流速计算公式	
	$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$	$v = C \sqrt{RS}$
矩形	1.67	1.50
抛物线形	1.44	1.33
三角形	1.33	1.25

式（2-2）和式（2-5）即为河段相应水位（流量）预报的基本关系式。当 $q_{t+\tau}$ 值较大时，可用其他预报方法（如第三、四章所介绍的）另行计算。

按式（2-2）和式（2-5）建立的相应水位（流量）预报方案表示了洪水波任一位相水位（流量）经河段传播后在数值上和传播

速度上变化的定量关系。其中，洪水波的展开主要反映在相应水位（流量）关系上，洪水波的扭曲因导致水面比降的改变，引起 c 值变化，因此主要体现在传播时间曲线上。

对于棱柱形河道的固定河段，若不计 $q_{t+\tau}$ 项，按式（2-2）和式（2-5）建立预报方案时，主要的影响因素是水位和比降。应当指出，如何更好地反映比降及其影响量是建立相应水位（流量）预报方案时的一个重要问题。如果河段有较大的区间入流量，尤其当区间入流与上游来水量不同步时，更应细致分析洪水波由内因和外因引起的变化量，否则会影响预报方案的合理性和可靠性，影响预报的精度。

二、相应水位（流量）法

相应水位（流量）法适用于无支流河段或支流水量小的有支流河段。

(一) 洪峰水位 (流量) 预报

在断面冲淤变化不大、无回水顶托、区间来水量小的无支流河段,洪水波变形主要受自身的内因影响,上、下游站相应洪水过程线和峰、谷点的对应性好,如图 2-2 所示,摘取相应的峰、谷、涨落洪段反曲点的水位和发生时间,即可制作相应水位关系和传播时间曲线。例见图 2-3 所示,其中, (a) 的关系线呈大于 45° 的曲线,反映了展开量,是合理的。常见关系式为

$$O_{m,t+\tau} = f(I_{m,t}) \quad (2-6)$$

$$\tau = f(I_{p,t}) \quad (2-7)$$

或

$$Z_{m\text{下},t+\tau} = f(Z_{m\text{上},t}) \quad (2-8)$$

$$\tau = f(Z_{m\text{上},t}) \quad (2-9)$$

式中 I_m 、 O_m ——河段上、下游站的洪峰流量;

$Z_{m\text{上}}$ 、 $Z_{m\text{下}}$ ——河段上、下游站洪峰水位;

τ ——河段传播时间。

式 (2-6) 和式 (2-7) 的示例见图 2-3。由图可知,该河段洪水波的附加比降对洪水波变形的影响不显著,这类河段多系上游河段或山区性河流。在流域中下游地区,因稳定流比降较小,往往由于附加比降不同或涨水前的河槽蓄水量不同,使相同上游水位 (流量) 的

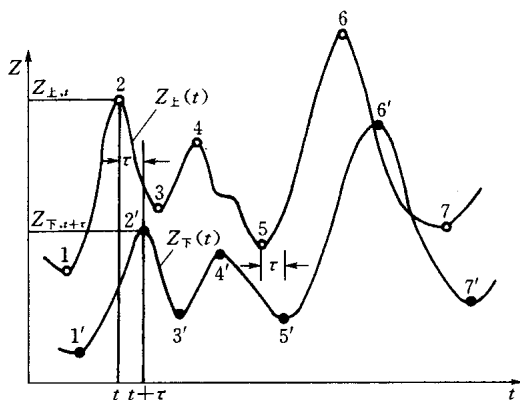


图 2-2 河段上、下游站相应水位过程线

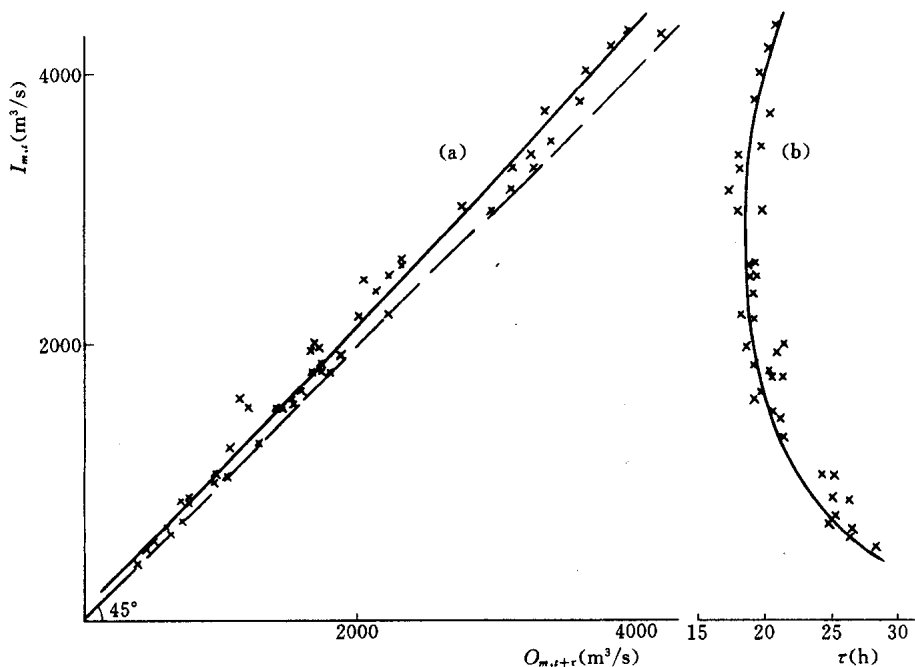


图 2-3 沱江三皇庙~登云岩河段相应洪峰流量预报曲线

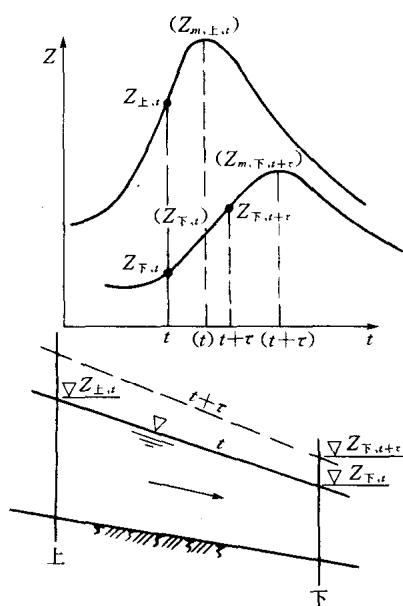


图 2-4 下游同时水位示意图

展开量各异,在上、下游站相应水位关系曲线图上点据分散。为此,需加入参数以反映水面比降和河槽蓄水量对相应关系的影响。应用较多的参数有下游同时水位($Z_{F,t}$)和涨率($\frac{\Delta Z}{\Delta t}$)。

若河段内水面分布呈直线, $Z_{F,t}$ 可反映 t 时刻的河段水面比降和“底水”,见图 2-4。洪峰水位预报方案可建成为

$$Z_{m,F,t+\tau} = f(Z_{m,u,t}, Z_{F,t}) \quad (2-10)$$

方案示例如图 2-5 和表 2-2。

由上述可知,相应水位(流量)预报方法的主要技术途径是根据大量实测的水位(流量)过程资料,建立河段上、下游站相应水位(流量)经验相关曲线和传播时间曲线,其中可加入反映河段洪水波运动变化特性的要素作参数,使经验点据的分布具有良好的规律。作业预报时,根据已出现的上游站水位(流量)和参数值,预报 τ 小时后下游站将会出现的水位(流量)值。

t 时刻以前的区间入流量抬高了 $Z_{F,t}$ 值,即 $Z_{F,t}$ 值包含了 $q_{区,t}$ 的影响。在多数情况下,若 t 时刻前后区间入流量变化有较好持续性,则 $Z_{F,t}$ 可经验地反映区间入流对 $Z_{m,F,t+\tau}$ 值的影

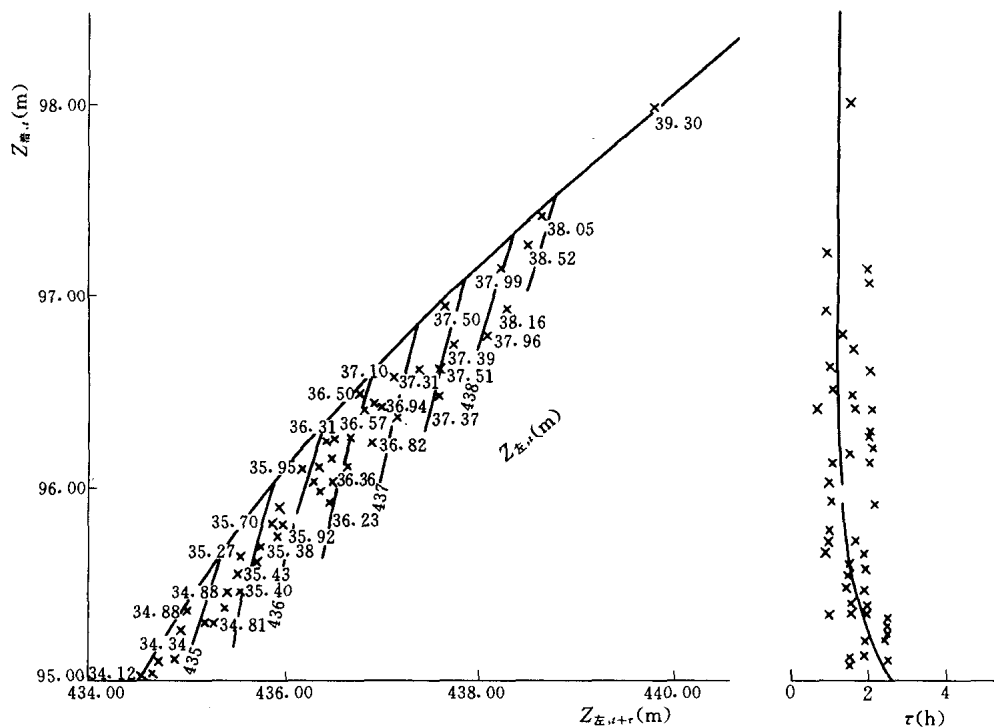


图 2-5 涪江涪江桥~左家岩河段相应洪峰水位与传播时间曲线

表 2-2

涪江涪江桥~左家岩相应洪峰水位及传播时间摘录表

涪江桥洪峰		左家岩洪峰		左家岩同时水位 (m)	传播时间 (h)
时间 (月·日·时·分)	水位 (m)	时间 (月·日·时·分)	水位 (m)		
5.14.18:30	94.38	5.14.21:00	435.57	435.25	2.5
5.16.15:00	95.53	5.16.16:30	437.57	437.37	1.5
8.19.18:30	93.01	8.19.21:00	434.62	434.58	2.5
8.26.18:12	96.57	8.26.19:30	438.06	437.96	1.3
8.4.15:00	97.13	8.4.17:00	438.70	438.28	2.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

响,式(2-10)关系可获较好效果。如果 t 时刻前后区间入流强度差异大,或下游断面受冲淤变化或回水顶托等影响, $Z_{F,t}$ 不能反映河段洪水波运动的变化规律,按式(2-10)建立上、下断面洪峰水位预报方案时, $Z_{F,t}$ 点据散乱,效果不好。

当洪水波波形陡,水面比降较大,河段内的水面线不呈直线分布(多系上游或山区性河段,常称为“长河段”), $Z_{F,t}$ 不能反映水面比降。此时,常用涨率($\Delta Z/\Delta t$)作参数。涨率与水面比降之间的关系可由以下推导论证。

连续方程

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

因

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} = c \frac{\partial A}{\partial x}$$

$$A = \bar{B}h$$

代入上式得

$$c \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

因水面比降 $S = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x}$ (S_0 是河底比降), 则得

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c(S - S_0) \quad (2-11)$$

其中: Q 是流量; A 是断面面积; $\bar{B}$ 是断面平均宽; h 是水深; c 是波速。由式(2-11)可知, 涨率可反映水面比降。对于固定河段而言, c 、 S 是 Z 的函数, 则 $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ 与 S 、 Z 有关。图 2-6 是以上游断面一次洪水的总涨差为参数的洪峰水位预报曲线, 这在洪水涨落率大的无支流长河段常会取得较好效果。一般采用的预报曲线关系式为

$$\sum \Delta Z_F = f(\sum \Delta Z_U) \quad (2-12)$$

$$\sum \Delta Z_F = f(\sum \Delta Z_U, Z_{F,t}) \quad (2-13)$$

其中: $\sum \Delta Z$ 表示水位总涨差。

由于万县站位于长江三峡上游, 洪水水位变幅受峡谷壅水影响而增大, 而宜昌站位于三峡下游, 河槽宽浅, 水位变幅小, 故图 2-6 中的宜昌站一次洪水总涨差值小于万县站。

在有支流河段上, 常取支流(一般取其中影响较大的一、二条支流)的相应水位(流量)为参数, 其关系式一般为

$$Z_{m\downarrow,t+\tau} = f(Z_{m\uparrow,t}, Z_{\uparrow,t\pm\Delta\tau_i}) \quad (2-14)$$

其中： $Z_{m\uparrow,t}$ 为干流上游站洪峰水位； $Z_{\uparrow,t}$ 为支流上游站水位； $\Delta\tau$ 为干、支流河段的传播时间差。图 2-7 即为上式的示例（ $\Delta\tau=0$ ）。

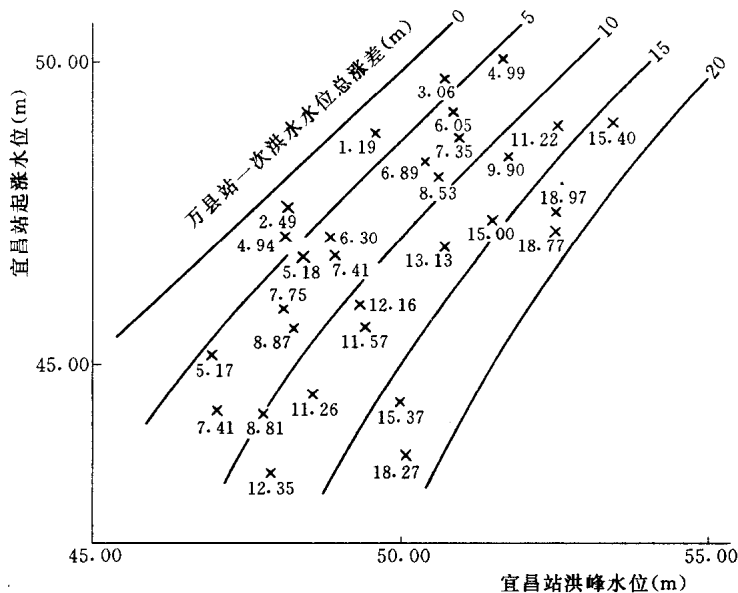


图 2-6 长江宜昌站总涨差法洪峰水位预报图

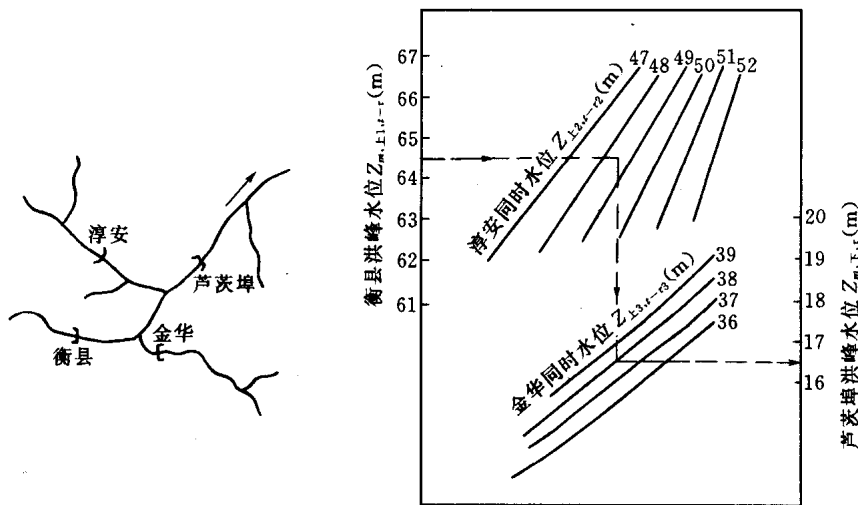


图 2-7 衡县—芦茨埠洪峰水位关系曲线图^[2]

如果干、支流洪水之间干扰大，相应水位关系很难有明显规律，此时，宜用合成流量法作河段预报。

不少情况下，区间内降雨量大，用相应水位（流量）法作预报时，其精度取决于区间降雨量对预报值的影响。也有采用区间雨量作参数建立相应水位关系，由于受雨量大小、主雨的位置、雨型、雨量分布等因素影响，这类预报曲线上点据常常较散乱，规律性不好。