

学位论文独创性声明:

本人所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其
他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同事对本研究所做的任何
贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。如不实,本人负全部责任。

论文作者(签名): 王政祥 2005年 11 月 日

学位论文使用授权说明:

河海大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘
版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件或电子文档,可以采用
影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容
相一致。除在保密期内的保密论文外,允许论文被查阅和借阅。论文全部或部分
内容的公布(包括刊登)授权河海大学研究生院办理。

论文作者(签名): 王政祥 2005年 11 月 日

摘 要

可能最大洪水是跨坝后果特别严重的水利水电工程及核电站工程的设计洪水标准。国内外水文气象工作者在可能最大降水与洪水(PMP/PMF)的估算上做了大量的理论研究、方法探索和实际应用工作,取得了丰硕的研究成果,并积累了宝贵的经验。论文的主要工作和结论包括:

(1) 在回顾和总结国内外有关文献成果的基础上,对 PMP/PMF 估算方法的研究进展进行了综述,评价了估算方法的特点及适用条件。

(2) 在分析清江流域暴雨洪水特性的基础上,拟定了估算清江水布垭 PMP/PMF 的方法和方案。用当地暴雨放大、暴雨移置、时面深概化法估算了水布垭工程以上流域的 24 小时和 3 天 PMP,为得到坝址的 7 天洪量,在暴雨移置、时面深概化估算得可能最大 3 天降水后组合了一场一般暴雨。结果表明:时面深概化法估算的 24 小时和 3 天 PMP 最大;当地暴雨放大法估算的 24 小时和暴雨移置法估算的 3 天 PMP 最小。

(3) 采用 PMP 条件下的产汇流计算方法,计算了坝址的 PMF 过程,结果表明:由时面深概化法估算的 PMP,用“69.7”和“71.6”时雨型推算的 PMF 洪峰洪量均较大;由当地暴雨放大法估算的 PMP 推算的 PMF 洪峰洪量均较小。

(4) 对估算得到的 PMP/PMF 成果,从方法和资料上进行了评价,与中国大暴雨时面深记录、24 小时可能最大点雨量及我国部分水利水电工程可能最大暴雨洪水的成果进行了比较,综合分析后认为成果是合理的,满足工程设计要求。

关键词: 可能最大降水 可能最大洪水 估算方法

时面深概化法 水布垭

Abstract

Possible maximal flood is the designed flood standard of the hydroelectric engineering and nuclear power plant, which affront very serious dam falling. Many internal and overseas meteorologist have done much research, exploration and practice on the estimation of Possible Maximal Precipitation and Flood (PMP/PMF), they have get great success, and accumulate valuable experience. This thesis's main job and conclusion are:

(1) Based on reviewing and summarizing the internal and overseas relational literatures, summing up the research headway of the estimation of PMP/PMF, evaluating the estimation method's characteristic and applying condition.

(2) Based on analyzing the Qingjiang basin rainstorm's characteristic, studying out its method and precept on the estimation of PMP/PMF. Zooming in local rainstorm, displacing the rainstorm, adopting the time-area-depth summarization to estimate the 24 hours and 3 days' PMP upward the Shuibuya engineer. To get 7 days flood-flow, combing a common rainstorm after the maximal possible estimate 3 days precipitation by displacing the rainstorm and adopting the time-area-depth summarization. The result shows: the 24 hours and 3 days' PMP value computed by time-area-depth summarization is maximum. The 24 hours' PMP value computed by zooming in local rainstorm and 3 days' PMP value computed by displacing the rainstorm are both minimum.

(3) Adopting the output-conflux count method on the PMP condition, calculated the PMF process of the dam. The result shows: estimated by the time-area-depth summarization, the PMF flood-peak flows' reckoned by "69.7" and "71.6" rain type are both big. The PMF flood-peak flows' reckoned by PMP which is estimated by zooming-in local rainstorm method are small.

(4) Evaluating the estimated PMP/PMF result from method and information, comparing with Chinese big flood time-area-depth note, 24 hours possible maximal point rainfall and our possible maximal flood result in some hydroelectric engineering. The result is reasonable, it can reach the engineering design's needs.

Key words: possible maximal precipitation;possible maximal flood; estimation method; time-area-depth summarization; Shuibuya.

第一章 绪 论

1.1 可能最大降水与洪水概述

在河川上修建任何水利工程(包括水库、堤坝、围堰、桥梁等)均需要根据一定大小的洪水作为标准来进行设计,即要进行设计洪水计算。设计洪水是水利水电工程防洪安全设计所依据的各种标准洪水的总称。它既包括以频率表示的洪水,也包括可能最大洪水;既包括设计永久性水工建筑物正常运用情况下的洪水(设计洪水)和非常运用情况下的洪水(校核洪水),也包括施工期间设计临时建筑物所采用的洪水。合理确定设计洪水是江河流域规划和水利水电工程规划设计中的首要任务,它直接关系到江河治理的战略布局、工程的安全与经济效益、人民生命财产的安全和社会的安定,因此,这个问题历来都受到世界各国的重视。新中国成立以来,已修建 9000 余座水利工程,在设计洪水计算方面取得了丰富的经验。

设计洪水计算有两大途径^[1]:一是数理统计法,即把暴雨或洪水看作是随机事件,运用数理统计学的原理和方法来推求指定频率的设计洪水,该方法一般称为频率分析法;二是水文气象途经,即把暴雨/洪水看作是必然事件,运用水文学和气象学的原理和方法,推求出近似于物理上限的暴雨/洪水,即可能最大降水/可能最大洪水(Probable Maximum Precipitation/ Probable Maximum Flood, 简称 PMP/PMF),该方法一般称为水文气象法。频率分析法是根据短期的洪水资料,通过频率曲线的外延来推求各种设计标准的洪水,此途径得出的设计洪水具有明确的频率概念,但其物理形成过程不清楚;水文气象法则在现有特大暴雨资料分析研究基础上,结合流域特性和工程要求,推求可能最大降水,将其转化为洪水,即可能最大洪水,此途径得出的洪水,在主要环节上能从物理成因上得到一定的解释,但无明确的物理概念。

迄今为止,无论在国内或国外,大中型水利工程的设计洪水计算仍是以频率分析法和水文气象法为主要手段。频率分析法属经验性的,与资料系列长短有关,现有水文站系列长度一般为 40 年左右,调查历史洪水一般也只是近百年(或几百年)中的最大值,可是保坝校核洪水往往需要千年、万年一遇洪水,这就必然造

成经验性的频率曲线外延幅度过大,求得的保坝设计洪水可靠性较差。水文气象法是从降水量的物理成因上分析某区域一定历时内降水量的上限值,这个上限值就是可能最大降水,经产汇流转化为可能最大洪水。水文气象法所得到的设计洪水成果,在一些主要环节上能够从物理成因上解释,在资料应用上,它着眼于一个很大的区域,即气象一致区,故所获得的水文气象信息相对较多,从而更有可能使计算成果接近于实际。

1.2 PMP/PMF 研究进展

可能最大降水与洪水估算是推求高风险水库工程设计洪水的重要方法,随着社会经济的发展、人口的增加和人类活动导致下垫面条件的改变,这种方法将更加显示其强大的生命力。

1.2.1 国外 PMP/PMF 研究进展

可能最大降水与洪水首先由美国于 20 世纪 30 年代提出,并用于工程设计,作为重要水库大坝和溢洪道的普遍设计标准。美国在 1947 年完成了 105°W 经线以东地区 PMP 的综合研究(面积控制在 25900km²),1980~1998 年间美国国家天气局水文气象设计研究中心与各州合作出版了一系列水文气象报告^[2-12](简称 HMR),报告情况见表 1-1。HMR 的一系列报告系统研究了可能最大降水的地区分布、时面深关系、季节变化、地形影响和设计时面雨型。1981~1987 年间,美国举行了多次水文气象会议(第 4~7 次),1983 年在美国召开了国际水文气象讨论会,其会议文集中有不少涉及暴雨估算的内容。美国工程界也有讨论 PMP 估算的例子和观点。

英国在 1975 年发表了《洪水研究报告》^[13,14]之后,又作了补充研究,发表了补充研究报告。在上世纪 80 年代出版的水文书籍中有大量篇幅介绍《洪水研究报告》中的计算方法和详细的查算图表。

澳大利亚在上世纪 80 年代举行了多次水文和水资源学术讨论会,会议文集中均有涉及 PMP 的论文发表^[15]。澳大利亚气象局(Xuereb K. C., 2001)在上世纪 90 年代出版了多年研究热带和亚热带地区短历时小面积 PMP 估算方法的水文系列报告(简称 HRS)。

表 1—1 美国水文气象报告列表

报告名	研究流域	出版时间
HMR49	科罗拉多州	1984
HMR51	105°W 经线以东地区	1980
HMR52	105°W 经线以东地区	1982
HMR53	105°W 经线以东地区	1980
HMR54	阿拉斯加东南部地区	1983
HMR55A	大陆分水岭至 103°W 经线之间地区	1988
HMR56	田纳西州	1986
HMR57	哥伦比亚河西北部地区及太平洋沿岸	1994
HMR58	加利福尼亚州	1998
HMR59	加利福尼亚州	1998

印度暴雨量级甚大，近年对印度西部的三次特大暴雨有过专门的介绍，对热带地区 PMP 的估算也有一些研究。

1986 年世界气象组织(简称 WMO) 出版了《可能最大降水估算手册》^[16] 第二版，基本保留了 1973 年第一版的所有内容，并又补充了美国、澳大利亚、印度等国新的经验。

1.2.2 国内 PMP/PMF 研究进展

我国 PMP/PMF 的发展进程大致分为三个阶段：

1. 学习和开创阶段(20 世纪 50 年代末至 20 世纪 60 年代末)

我国开展 PMP/PMF 工作始于上世纪 50 年代，当时为满足长江三峡水利枢纽规划设计的需要，长江水利委员会(原称长办)协同中国科学院地球物理研究所、原华东水利学院(简称华水)、北京大学等单位，于 1958 年率先在我国开展了 PMP/PMF 的研究和估算工作。在广泛学习和吸收国外经验的基础上，结合三峡工程的特点，历经两年时间，采用十个方案估算了三峡 60 天的可能最大降水和可能最大洪水，在估算大面积、长历时 PMP/PMF 方法上有所创新。随后原上海院和华水共同对华东地区有台风和锋面雨的可能最大暴雨作了研究，长办、北京院、东北院、西北院、昆明院、长沙院等单位陆续对丹江口、隔河岩、偏窗子、宝珠寺、乌江渡、陆水、鸭河口、普定、五强溪、白山等工程进行了可能最大暴雨的分析计算。1963 年 8 月，海河流域发生了特大暴雨洪水，导致刘家台等中小型

水库垮坝和京广铁路中断,在全国引起较大的震动,使人们开始对 PMP/PMF 工作重视起来。水利电力部水电总局为了向全国推广这项工作,于 1965 年秋,委托长办举办了水文气象研习班,部属设计院和部分省设计院派员参加了学习。

这个阶段分析 PMP 所使用的方法特点是:除少数工程为暴雨组合和暴雨移置外,其余偏重于采用水汽输送、动能平衡、对流环、锋面模式和综合模式等理论方法。由于这些方法在理论上存在重大缺陷,参数的定量还要应用高空观测资料,而中国这方面的资料又很少(站点稀、观测年限短、测次少),故其成果较难令人信服。这一阶段的成果并未在实践中正式应用。

2. 运用和普及阶段(20 世纪 70 年代至 20 世纪 80 年代初)

1972 年 10 月~1973 年 10 月,为满足黄河中上游防洪规划的需要,黄河水利委员会(原称黄委)和华水、河南省气象局协作,对黄河三门峡至花园口区间开展 PMP 研究工作。他们将国外的方法结合中国实际情况和多年来的水文分析工作经验加以运用,并注意把水文学和气象学密切结合起来,提出了一套比较系统的计算方法,对其它地区的可能最大暴雨估算起了一定的作用。1973 年 11 月,水电部在兰州召开了全国第一次设计洪水规范讨论会,会议决定将水文气象法计算设计洪水列为水工建筑物设计洪水计算规范。兰州会议引起了全国上下对 PMP 的兴趣和重视,为了使更多的人能够掌握 PMP 的估算方法,原华水于 1975 年夏举办了 PMP 短期训练班,并由詹道江教授翻译了世界气象组织 1973 年出版的《可能最大降水估算手册》^[17]。

1975 年 8 月我国淮河上游发生特大暴雨,导致板桥、石漫滩等大中型水库垮坝和京广铁路长时间中断,给人民生命财产造成了巨大损失。为吸取淮河“75·8”大水的教训,水电部在郑州召开了规模庞大的全国防汛及水库安全会议。会议要求编制全国可能最大暴雨等值线图,以作为估算各重要的中小型水库保坝洪水的主要依据,也为控制流域面积较小的大型水库的防洪安全复核提供重要的参考数据。郑州会议后,一方面,由流域机构、部直属设计院和各省市自治区自己组织力量,对所辖范围内的已建和在建重要水库,进行全面的防洪安全复核(主要是 PMP/PMF 分析计算);另一方面,由水电部和中央气象局领导,组织全国水利水电、气象、科研和教学部门的 800 多名水文气象科技人员,编制了《中国可能最大 24 小时点雨量等值线图》。1978 年,水利电力部颁布了《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准(山区、丘陵区部份)SDJ12-78(试行)》^[18]规定:“失事

后对下游将造成较大灾害的大型水库、重要的中型水库以及特别重要的小型水库的大坝,当采用土石坝时,应以可能最大洪水作为非常运用标准”。1979年,水利、电力两部联合颁布了《水利水电工程设计洪水计算规范 SDJ22-79(试行)》^[9]及七个目录,其中附录四为《用水文气象法计算可能最大暴雨》,并对几十座大中型水库采用《规范》所列的方法计算了 PMP/PMF。这个阶段是中国水文气象工作发展史上重要的时期,参与人员之多、代表面之广、成果之硕都是空前的。

3. 发展总结阶段(20 世纪 80 年代至今)

为了进一步提高 PMP 计算成果的精度,减少定量中的任意性,改进现行的计算方法,1983 年 12 月,水电部水利水电规划设计总院在成都主持召开了大中型水利水电工程可能最大暴雨工作总结会。会议肯定了中国 PMP 工作取得的成绩,但也指出了由于受水文气象科学技术水平和资料条件的限制,现行方法还存在一些问题。这一阶段 PMP/PMF 的研究又有了一些新成果:1983 年,詹道江和邹进上教授著合著出版了《可能最大暴雨与洪水》^[20],对国内外 PMP/PMF 一些估算方法和实践经验做了介绍。修订了《水利水电工程设计洪水计算规范》,为了便于从事水文计算专业的工程技术人员理解新《规范》的规定和要求,又编写了《水利水电设计洪水计算手册》^[21]。1999 年,黄河水利委员会王国安教授编写出版了《可能最大暴雨和洪水计算原理与方法》^[1]的专著,书中系统介绍了水文气象法的原理以及由水文气象法估算 PMP 的主要经验、最新进展和存在的问题。1985 年,林炳章等把美国汉森按 PMP 的新定义推求 PMP 的方法(时面深概化法)用于中国海南岛昌化江流域的大广坝工程,于 1988 年编写了《海南岛昌化江大广坝工程 PMP/PMF 估算综合报告》等。

1.3 PMP/PMF 在工程设计中的作用

2000 年颁布的《水利水电工程等级划分及洪水标准》,是中国水利水电工程目前选择洪水标准的依据。规范按工程规模、效益和在国民经济中的重要性划分工程等级,再根据各等级工程中不同建筑物的性质和重要性划分水工建筑物的级别,并规定各级别建筑物所应采用的洪水标准。

我国目前采用的洪水标准有两种表达方式,一种是以洪水的重现期(率)表示的,这种洪水也称为频率洪水,是绝大多数工程防洪安全设计所采用的洪水。另

一种是可能最大洪水,其采用有严格的限制,只对水库工程石坝的挡水和泄水建筑物一旦失事将对下游造成特别重大灾害时,作为一建筑物的非常运用洪水标准。

世界上平均每 10 年发生一起大坝失事事件,还有一些大坝濒于破坏^[22]。发生在我国的 1963 年 8 月,海河流域特大暴雨洪水,导致刘家台等中小型水库垮坝,1975 年 8 月淮河上游发生特大暴雨,导致板桥、石漫滩等大中型水库垮坝。这些事故大多是起因于无法预见的大洪水。高坝水库及江河海附近核电站的防洪工程一旦失事,就会造成生命财产的巨大损失。对于这类失事后会造成严重灾害的工程,如何计算设计洪水,是一个严峻而必须认真研究的问题。可能最大降水与可能最大洪水估算,就是针对这种需要高度安全而提出的洪水计算方法。可能最大洪水是指合理地考虑水文与气象条件的最严重遭遇而发生的洪水。因此当水库大坝采用土石坝时,应以可能最大洪水作为非常运用标准,江河海附近的核电站,其防洪措施需要特别安全,也必须以可能最大洪水作为防洪设计标准。

美国内政部垦务局编的《小坝设计》中正式提出,凡跨坝后会造成生命损失的工程,应以 PMF 作为设计洪水。美国土木工程师学会水文委员会正式提出的美国大坝分级标准及设计洪水标准中规定:“不允许失事的极重要工程(坝高大于 18m,库容大于 6200 万 m^3),溢洪道设计洪水采用 PMF。”

1.4 主要研究内容

结合清江水布垭水利枢纽工程的水文分析计算工作,在综述国内外 PMP/PMF 估算方法研究进展的基础上,对 PMP 的主要计算方法,特别是近期国外用的较多而国内使用较少的时面深概化方法在清江水布垭枢纽上的应用进行了研究,主要开展了以下工作:

(1)综述国内外 PMP/PMF 估算方法研究进展,评价了估算方法的特点及适用条件。

(2)对估算 PMP 的主要方法:当地暴雨放大、暴雨移置、暴雨组合及时面深概化法在清江水布垭工程上的应用进行了研究,并对各种方法计算的成果进行了比较分析。

(3)采用可能最大降水条件下的产流计算方法计算了净雨过程,利用 PMP 净雨

与实测典型暴雨的净雨差值、单位线推算出流量差值，再求出 PMF 过程，并对各方法估算的 PMP 推求的 PMF 成果进行了比较。

(4)对估算得到的 PMP/PMF 成果，从多方面作了合理性分析。

第二章 PMP/PMF 估算方法研究进展

2.1 PMP/PMF 分析估算原理

2.1.1 可能最大降水分析

1. 可能最大降水

为了设计如大坝溢洪道这样一些高风险的建筑物,需要采用具有很低超越风险的降水值。理想情况是水文工作者希望能选用无超越风险的设计暴雨。理论上寻求这样一种暴雨先得确定是否真的存在暴雨的上限值。Gilman^[23]得出的结论是,无论从数学上或者物理上讲,降水量是存在上限的。降水量上限在空间和时间方面的考虑包含在可能最大降水的定义中。关于 PMP 的定义,世界各国专家说法不尽一致,具有代表性的说法有如下几条:

(1)美国水文气象学者 Hansen(1982)等人给出了 PMP 定义:在一年的某个时期内、特定地理位置、给定暴雨面积,物理上可能发生的给定历时的理论最大降水深度;

(2)WMO《PMP 估算手册》^[16](1986)第二版的定义是:PMP 是在不考虑长期气候趋势的条件下,一年的某一特定时期、特定位置、给定暴雨面积,在气象上可能发生的给定历时的最大降水深度;

(3)我国《水利水电工程设计洪水计算手册》^[21](1995)中的定义是:设计流域的可能最大暴雨是指在现代气候条件下,在一年的某一时期,流域上一定历时内可能发生的最大降水量。

总之,上述定义均表明,PMP 是近似的上限降水,且必须经由气象成因分析求得。

2. 估算可能最大降水的基本原理

可能最大降水的估算在美国是作为一种水文气象法研究和发展起来的。决定可能最大降水的气象要素有三个:①可降水量;②辐合程度;③垂直运动。已有一些气象模型^[24]来描述这三个分量,而另有研究表明,要为模型确定最大的面上辐合速率和垂直运动状况是相当困难的。计算 PMP 时包括两个重要部分:实测暴雨的水汽极大化和暴雨移置。水汽极大化的目的是使暴雨量增大以反映最大可能

的水汽效应；暴雨移置是要确定一次已发生在设计流域以外地区的暴雨能否被移用来代表本流域的暴雨。

暴雨移置基于这样假定：对一已知的暴雨来说，存在着与其在气象上一致的地区，在该地区中同样可能出现这样的暴雨。移置步骤包括要被移置暴雨的气象分析、移置范围的确定以及由于位置的改变对暴雨作适当调整。气象分析能鉴定暴雨类型的一些关键性因素；移置范围一般这样来确定，即由长期的逐日天气图上定出发生过气象上相似暴雨类型的地区边界；调整是针对暴雨位置上与移置地点的水汽极值差异及暴雨位置与移置地点的地形差异而进行的。

3. 估算可能最大降水的方法

Wang^[25]根据所建工程的位置、获取的资料情况和其它考虑概述了 PMP 的所有方法，其中除了统计分析外，几乎所有方法都需要分析工程所在区域的气象资料。

Wiesner 等^[24]总结了用于估算 PMP 的主要方法：①暴雨模型法；②实际暴雨的极大化和移置；③使用从雷暴雨中概化的暴雨资料，包括暴雨面积、暴雨历时及最大雨深；④使用根据降雨时面深关系推求的经验公式；⑤使用特殊地区概化的变量间的经验关系；⑥极值降雨的统计分析。

我国水文气象工作者根据我国各地估算 PMP 的工作经验，总结出了我国估算 PMP 的主要方法(水利水电工程设计洪水计算规范 SL 44—93)：①当地暴雨法；②暴雨移置法；③暴雨组合法；④暴雨时面深概化法。

PMP 估算值的推导可以是为特定流域而作，也可以是为了制作较大区域的概化图。制作概化图必须采用客观的分析程序，在坐标网格上绘制 PMP 的估算值图。美国已制作出许多地区的类似概化图，如各州的水文气象报告^[3,4]。

2.1.2 可能最大洪水分析

1. 可能最大洪水

和 PMP 一样，目前世界上对 PMF 也没有统一的定义。世界气象组织定义 PMF 为：研究一个流域或地区的降雨，目的在于估算暴雨的物理上限，得到的估计值称为“可能最大暴雨”，然后采用一定的方法换算为洪水就称为“可能最大洪水”；美国田纳西河流域管理局定义：根据水文气象情况的结果，预期在某一地点上可能发生的最严重的洪水，假定 PMP 危险地集中在流域上，而且一系列对特大暴雨有代表性的有关水文和气象因子同时发生；1970 年美国国家天气局出版的美国

水文气象报告定义：PMF 是研究地区内由不利而又有可能出现的气象和水文条件的组合而产生的最严重的洪水。

我国华东水利学院定义是：可能最大洪水是指现代气候及地理条件下，设计地区(或流域)可能发生的最大洪水(1961)；可能最大洪水是指恰当的(合理的)考虑气象、水文及自然地理诸要素的组合可望发生的洪水(1965)。长办水文局定义为：可能最大洪水系指一定流域上可能出现的最大洪水，可能最大洪水一般多从可能最大降水途经来推算。

2. 估算可能最大洪水的基本假定

由 PMP 推求 PMF 的基本假定是：PMF 是 PMP 经产汇流计算后得到的洪水流量过程线。这个假定和使用数理统计法由设计暴雨推求设计洪水时所作的基本假定——暴雨和洪水同频率是一致的。事实上，暴雨和洪水不一定是同频率的，但目前世界各国都是这样做的。同样，由 PMP 推得的洪水不一定是 PMF，因为在一个特定的流域上面平均雨深最大，所形成的洪水不一定是最大，特别是流域面积较大，而流域内上中下游或左右岸产汇流条件相差较大时，更是如此。因为在这种情况下，不同时(面)分布的暴雨，所形成的洪水就有较大的差别。

3. 估算可能最大洪水的基本原理和方法

由降水计算极值洪水或可能最大洪水的原理与一般的由设计暴雨推求设计洪水的原理是一样的，差别仅是采用的设计参数不同而已。极值设计暴雨的时程分配一般比大概率暴雨更均匀，前期湿度假定更高，损失值假定等于或稍小于实测洪水中的最小损失值。如果以可能最大洪水作为合理的极限值，除了短历时暴雨可以忽略损失外，零损失的假定则过于保守。

我国由可能最大降水推求可能最大洪水的方法一般分为两类：一类是产汇流计算法，另一类是流域模型法。我国常用的产汇流计算方法有扣损法、暴雨径流相关法和径流系数法；流域汇流计算方法有：单位线法、单元汇流法、流量差值汇流法、典型洪水放大修正法等。

2.2 国内外 PMP 估算方法综述

2.2.1 PMP 估算方法

PMP 的估算方法最早始于美国，其它国家的估算方法与美国相似，只是在

些环节上的处理有所差异。目前,在 PMP 估算方面是多种方法并存,这些方法大致可概括为两类:

(1)直接式:即针对设计流域特定工程的集水面积直接推求 PMP。采用方法主要有:①当地暴雨放大法;②暴雨移置法;③暴雨组合法;④理论或物理模式法。以上四种方法在山区、平原均可运用。除最后一种方法一般只适用于面积在 4000km^2 以下、历时在 24 小时以下外,其余三种方法基本上不受面积大小和历时长短的限制。

(2)间接式:即先求出暴雨面积上的 PMP,然后则设法转换为设计流域的 PMP。采用方法主要是概化估算法,其适用范围是:平原地区面积 52000km^2 以下,山区面积 13000km^2 以下,降雨历时在 6 小时~72 小时^[16]。

此外,PMP 的估算方法还有统计估算法和经验公式法等

2.2.2 当地暴雨放大法

1. 概述

当地暴雨放大法的中心思想是以设计流域的实测暴雨为典型,选择有关的影响因子,合理地放大。典型暴雨必须是其量级、时空分布型式等对于指定的设计工程来说,防洪威胁最大。选取典型暴雨时,不能拘泥于设计流域,必须与邻近流域的实测特大暴雨作比较。例如:一般流域的实测资料都不足以找出严重的时程分配型式,而历史资料难于做出较准确的时程分配,所以必须参考邻近流域的特大暴雨资料,以选取对工程防洪最不利的暴雨分配型式。

2. 暴雨放大方法

放大典型暴雨应按暴雨特性、稀遇程度及流域特性等不同情况,选取放大方法。暴雨放大方法一般有以下几种:

(1)水汽放大。大气中水汽是降水的根本条件,水汽含量越高,转化为降水的数量和可能性越大。若选取的典型暴雨属于高效暴雨,即效率因子已达到足够大,则可采用水汽放大。水汽放大的基本假定是水汽与效率相互独立,对高效暴雨作水汽调整不影响其效率。

(2)水汽效率放大法。同一水汽量(可降水)可以与各种不同的效率相组合,同一效率也可以与不同水汽组合,而特大暴雨则是水汽与高效率相遇的结果。因此,设计流域或邻近地区缺乏特大暴雨资料,而有较大的实测暴雨或特大历史暴雨洪

水资料时,可采用水汽效率放大。水汽效率放大的假定是水汽与效率相互独立,即放大水汽不改变其效率,放大效率也不改变其水汽;PMP 系由高效率与高水汽同时遭遇形成。

(3)水汽风速联合放大及水汽输送率放大(水汽因子和动力因子联合放大)。空气动力因子是将可降水转化为降水的催化剂,在形成 PMP 过程中发挥着极为重要的作用。从理论上讲,当典型暴雨的可降水条件已经达到最大,只要再做动力因子放大,即可求得可能最大降水。但在实际暴雨中,可降水已经达到最大的情况非常少,因此做动力因子放大时,常与水汽因子放大联合进行,动力因子有降水效率 and 风速等可供选用。水汽风速联合放大及水汽输送率放大法只是在指标的选取上有所不同,前者是对风速和水汽分别取可能最大值进行放大,后者是取风速与水汽乘积的可能最大值进行放大。

水汽风速联合放大及水汽输送率放大。对于入流指标 VW 或风速 V 与相应的流域平均降水量 P 有一定正相关关系,且暴雨期间入流风向和风速较为稳定的流域,可采用水汽风速联合放大或水汽输送率放大法。

(4)水汽净输送量放大法^[26, 27]是我国水文气象工作者于 20 世纪 50 年代末提出的,首先应用于三峡水利枢纽的 PMP 估算。水汽净输送量放大法的假定是:在降雨期间,从流域周边输入的净水汽量能准确地求得,然后再假定凝结率等于降水率,得出降水量的计算公式。其基本思路是从整个流域边界输入和输出水汽量之差来考虑问题,具体方法是从多年资料中选取入流边界某种历时(要求)最大水汽输入和输出量之差,来推算流域某种历时的 PMP。本方法适用于大面积、计算时段长、天气系统稳定的降水。根据长委在长江流域应用的经验^[28],推求大面积的造峰暴雨,采用水汽净输送量法最好。

3. 对当地暴雨放大法的评价(对放大方法的评价)

水汽放大法简便易行,已为国内外普遍采用。水汽放大法的实质是对实际暴雨不做效率调整。美国一般只做水汽放大,水文气象学家 Wiesner(1970)^[29]说明其原因如下:①降水理论还不足以完全估计暴雨效率及其能达到的最大值;②严重的大暴雨是由于高效率而非高水汽含量,即高效暴雨已经发生并包含在资料之中;③观测的大暴雨资料中的极端情况表明,大暴雨已经达到其最大效率;④相应于同一地面露点,其雨量变化很大,说明暴雨中有些已经包括气象因子的最有效组合而达到最大效率;⑤对实际暴雨作水汽放大结果可能偏大,但可以通过对

效率稍作调整来修正。

水汽效率联合放大法中的降水效率是根据流域平均雨量来计算的,因而它是唯一能间接反映整个设计流域内空气辐合上升运动情况的指标。效率是根据地面观测雨量和露点资料计算的,且地面观测站较多、系列较长、精度高。因此,效率放大法是最容易计算且精度较高的一种方法。

水汽净输送法的优点是物理概念明确,方法原理简单。但要想准确地求得水汽净输送量,必须有充分的高空气象观测资料,而在资料稀疏,观测次数少的情况下,要求降水系统的流场和湿度场在平面上的变化是均匀的,在时间上的变化也是均匀的。所以,水汽净输送法目前仅适用于大面积、长历时、稳定性的降水系统,实践证明在长江流域和西南地区应用比较成功。

2.2.3 暴雨移置法

1. 概述

PMP 是近似于上限的暴雨,对于任意一个特定流域来说,其暴雨观测资料越长,其中的极值应越接近于暴雨的物理上限。当设计流域缺少足够的时空分布较恶劣的特大暴雨资料,而气象一致区内具有可供移置的实测特大暴雨资料时,可以采用暴雨移置法推求设计流域的 PMP。暴雨移置的实质,从资料样本的角度看,就是用空间代替时间。由于特大暴雨发生地区和设计流域在自然地理气候条件上的差异,在进行暴雨移置时,大多需要做必要的改正。

2. 移置可行性分析

暴雨移置法的关键是移置可行性分析。分析方法有:①气象一致区的划分;②针对具体暴雨划定移置界线;③针对设计流域作具体分析。

3. 暴雨移置范围

WMO 认为^[16, 29]:若一个地区面积达几十万平方公里,雨量站网比较稠密,资料系列达 40 年以上,则可以根据气象资料、气候特征和下垫面条件明确划定移置范围;若一个地区雨量站网比较稀疏,资料系列不长,暴雨移置范围不便明确划定,此时暴雨移置范围可适当放宽;在热带地区,海域宽广,实测雨量资料更为稀少,移置范围更可放宽。

4. 暴雨移置改正

设计流域和移置区两地由于区域形状、地理位置、地形等条件差异而造成降

雨量不同,因此,暴雨移置时需作移置改正,即流域形状改正、地理改正和地形改正。其中①地理改正只考虑水汽改正,即因地理位置上差异而造成水汽条件不同所作的改正。②地形改正包括水汽改正和动力改正两个方面,地形差异不足以引起暴雨机制的较大变化,则可以不考虑动力改正,只考虑水汽改正(平原、浅山区常用的方法)。水汽改正有障碍改正和高程改正两种,前者是指移置前后水汽入流方向障碍高程差异而使入流水汽增减的改正;后者是指移置前后两地区地面高程不同而使水汽增减的改正。两种改正只能取其一,流域入流边界的高程若接近流域平均高程,则采用高程改正;若高于流域平均高程,则用障碍改正。③流域形状改正是任何暴雨移置必须进行的改正。

2.2.4 暴雨组合法

在研究大型水电站水库调度,特别是梯级水库调度时,往往需要提供较长历时的暴雨洪水,即连续天气过程造成的洪水。此时可以将两场或两场以上的暴雨,按天气气候学原理,合理地组合在一起,构成一个新的暴雨序列,以之作为典型暴雨来推求 PMP,这种方法称为暴雨组合法。

组合方式一般是从时间上进行组合,必要时也可以从空间上进行组合,或从时间和空间上均进行组合。

1. 时间组合

暴雨时间组合就是将两场或两场以上暴雨的雨量过程,合理地衔接起来。衔接时注意保持一个合理的时距,以便使前一天气过程能演变为后一过程。所用组合单元,均是本流域实测的。时间组合又分为两种^[21]:①相似过程替换法,以设计流域实测特大暴雨过程为基础,将典型暴雨中雨量较小的一次或数次降雨过程,用历史上环流形势基本相似、天气系统大致相同而降雨量较大的另一场或数场暴雨过程予以替换,从而构成一新的暴雨序列。②演变趋势分析法,是从天气形势的发展趋势上来进行组合,即以实测资料中降水量最大的一个或数个天气过程作为组合基点,然后从该基点出发,按天气过程演变趋势的统计规律向前进行组合,以构成一较长历时的新暴雨序列。

2. 空间组合

空间组合一般是将发生在设计流域及其附近的暴雨移置到流域中的一个或多个危险位置,以使流域产生最大洪水。换言之,空间组合就是将暴雨单元在空

间上重新排位，来加强造洪效果。当设计流域面积较大，流域上、下游分属两个暴雨区或一为暴雨区，另一为非暴雨区时，需要考虑空间组合。

3. 组合暴雨极大化

暴雨组合本身不仅延长了实际典型暴雨的降雨历时，同时也增加了典型的降雨总量，在某种意义上说，已经是一种放大了，故在作气象因子极大化时应慎重。组合暴雨序列是否需要极大化，主要取决于典型暴雨本身的严重性和组合结果的恶劣程度。组合暴雨极大化方法与当地暴雨放大方法相同，具体采用何种方法则视流域情况和资料条件而定。

2.2.5 概化估算法

1. 概述

将暴雨放大、移置、外包来估算 PMP 的一套方法。这种方法的基本思路是：把 PMP 的估算分为非山岳地区和山岳地区分别进行。非山岳地区的降水假定是由天气系统过境而产生的，山岳地区的降水假定是由天气系统过境和地形影响共同产生。由天气系统引起的降水简称辐合雨(或辐合分量)，由地形引起的降水简称地形雨(或地形分量)。

概化研究主要针对辐合雨而言，这种方法可用于特定流域，也可用于包括许多大小不同流域的大区域，后一种情况被称为概化或区域估算。概化内容包括时面深关系的概化和 PMP 时空分布的概化。

概化估算法所得成果有：①PMP 的雨深：一种是 PMP 的时面深，一种是不同历时、不同面积的 PMP 等值线图；②PMP 的时程分布，概化为单峰型；③PMP 的空间分布，概化为一组同心相似的椭圆形图形；④对山岳地区还有若干相关图或某些反映地形影响的参数的等值线图，以便将辐合分量转化为山岳地区的 PMP。

概化估算法目前为美国、澳大利亚、印度及一些中低纬度国家广泛利用，也是 WMO《PMP 估算手册》中的主要方法，1973 年出版手册中是按 PMP 的老定义(即“特定流域”的 PMP)进行的，1986 年版是按 PMP 的新定义(即“给定暴雨面积”的 PMP)进行的。美国将暴雨划分为一般暴雨和局部暴雨，分别进行了概化研究；澳大利亚又将一般暴雨分为热带和温带天气系统，分别作概化研究；我国则在将温带天气系统再作分类的基础上进行概化研究，但此类研究比较少，我国一般称这种方法为时面深概化法^[21]。

2. 概化估算法计算步骤

时面深概化法推求 PMP 包括四个步骤：①将实测大暴雨加以极大化(一般只进行水汽放大)；②将极大化后的暴雨移置到设计地区；③将这些极大化了的并可移入设计地区的大暴雨时面深关系加以外包，作为各暴雨面上的可能最大暴雨量；④将暴雨面上的可能最大暴雨量应用于设计流域，求得流域面上的可能最大暴雨。这套方法在美国适用于平原区 52000km^2 以下，山区 13000 km^2 以下面积，6 小时~72 小时的可能最大暴雨估算^[16]。

将暴雨面上的 PMP 转化为设计流域面积上的 PMP 时，还须注意几个问题^[21]。

(1)关于临界暴雨面积试算准则问题

美国第 52 号水文气象报告提出的试算准则是：求设计流域的最大洪量是以面平均雨深最大为准；求设计流域的最大洪峰则是以洪水最大为准。国内许多文献对此也没有统一论。一个折衷的办法是：如果设计流域的工程是洪量起控制作用，则以面平均雨深最大为准则；如果设计流域的工程是洪峰起控制作用，则以洪水最大为准则。

(2)关于等雨量线图的绘制及试算历时问题

美国第 52 号水文气象报告建议，对 72 小时雨量的面分布，只对最大三个 6 小时雨量制作，而对余下的九个 6 小时雨量按均匀面分布处理，因为这些雨量很小。这是一种简化处理。因此试算历时为最大 6 小时、最大 12 小时、最大 18 小时。我国由于资料条件限制，仅采用对工程起控制作用的一个历时试算。

(3)关于等值线图形的定位问题

PMP 等雨量线图在设计流域的具体安置涉及到暴雨中心位置和雨图的轴线方向。暴雨中心位置以求得的流域雨量最大或洪水最大为准则；雨轴方向可采用同类天气系统所形成暴雨的平均轴向。

(4)关于临界暴雨面积大小和个数的问题

临界暴雨面积大小和设计流域的形状与概化的椭圆图形的相似程度及两者在方位上的配置有关。若相似程度高，则临界暴雨面积接近流域面积；若相似程度较差，但方向配置较一致，则当流域平均宽度较大时，临界暴雨面积小于流域面积，当流域平均宽度较小时，临界暴雨面积大于流域面积。

临界暴雨面积是通过试算求得，不同历时一般临界暴雨面积也应不同，但试算太复杂，实际工作中取对工程起控制作用的一种历来求临界暴雨面积。

3. 对概化估算法的评价

时面深概化法在国外用得较多, 目前, 世界上大部分国家采用该方法估算 PMP。其优点是: ①充分利用了一个大区域的所有资料, 避免了在极大化计算中放大因子选择的任意性; ②地区内采用统一的方式完成历时、面积的地区变化修匀, 可减少局部地区资料所带来的偶然误差; ③保持地区内各流域估值的一致; ④一旦完成, 可把气象一致区内的 PMP 应用于区内各个流域, 并使各流域的 PMP 相协调。其缺点是: ①应用面积及时段受到限制, 只适用于平原区 52000km² 以下, 山区 13000 km² 以下面积, 6 小时~72 小时 PMP 估算。②应用于山区时, 其精度相对较差, 因为在地形雨的分割和回加上存在较大误差; ③它仍受实测大暴雨资料的控制; ④分析计算工作量大, 研究时间长; ⑤PMP 成果概化统计味道重, 物理成因概念模糊。

2.2.6 统计估算法

1. 概述

美国学者赫希菲尔德于 20 世纪 60 年代初期提出统计估算法, 它是根据实际降雨资料计算出一个统计量 K_m 用于估算 PMP 的方法。WMO 的《PMP 估算手册》第一版和第二版都详细介绍了该方法。这种方法已经在许多国家广泛应用, 我国引进使用此法时, 作了一些改进, 目前较少使用该方法。

(1) 频率因子 K_m 。赫希菲尔德定义统计量 K_m 为某站实测最大值减去系列的均值再除以标准差。对于一个长度为 n 的系列, K_m 的表达式为

$$K_m = \frac{X_m - \bar{X}_{n-1}}{\sigma_{n-1}} \quad (2-1)$$

式中: X_m 为实测系列中的首项, 即特大值, $\bar{X}_{n-1}$ 为去掉特大值后的系列的平均值, σ_{n-1} 为去掉特大值后的均方差。

K_m 已不是我国习惯采用的离均系数 Φ_m , 因为 $\bar{X}_{n-1}$ 是除去特大值后的平均值, 而计算 Φ_m 时是采用的原系列的均值。

(2) 估算 PMP。统计法估算 PMP 的公式如下:

$$PMP = \bar{X}_n + K_{mm} \times \sigma_n \quad (2-2)$$

式中： $\bar{X}_n$ 和 σ_n 是对整个系列计算并经两种校正（样本首项和样本容量影响）后的均值和均方差； K_{mm} 表示 K_m 的外包值。赫希菲尔德曾考虑世界大暴雨区的一些资料绘制了三种历时的 K_m 随 $\bar{X}_n$ 递减的外包线，使用时，只需先确定 $\bar{X}_n$ ，然后查外包线图即可求得 K_{mm} 。

2. 我国对该方法的探讨

对赫希菲尔德的做法，我国学者有两种不同的意见：

一种持反对意见^[30]，他们认为统计法破坏了概念的一致性，因此所得的结果缺乏宏观依据。在点绘 $K_m \sim \bar{X}_n$ 关系曲线时，是根据式(2-1)计算的 K_m ，而在计算PMP时是根据式(2-2)。事实上，

$$\Phi_m = \frac{X_m - \bar{X}_n}{\sigma_n} \quad (2-3)$$

K_{mm} 应该就等于 Φ_m 的外包值 Φ_{PMP} 。

另一种持肯定意见^[31]，他们认为赫希菲尔德方法的思路独到之处就在于他所定义的 K_m 并不包括实测系列中的特大值项，故使之区别于离差系数 Φ_m ，然后在不涉及其它统计量指标的情况下计算PMP。

由于对该方法存在较多争议，我国在引进该方法时根据我国实际情况作了修改。如西北地区和湖北省等在进行PMP编图时，采用下式计算PMP

$$PMP = \bar{X}_n(1 + \Phi_{mm} C_{vn}) \quad (2-4)$$

式中 Φ_{mm} 是 Φ_m 的外包值，即为最大的离均系数； $\bar{X}_n$ 和 C_{vn} 分别为包括特大值在内的 n 年系列的均值和变差系数。云南仍采用式(2-2)来计算PMP， K_m 为单站值， K_{mm} 表示 K_m 的外包值，但在计算 K_m 和 K_{mm} 时有自身的特点，同时要要进行系列长度校正和特大值的处理。

国外在确定 $\bar{X}_n$ 和 C_{vn} 时先用矩法估计均值和变差系数，然后再根据特大值和样本容量对其进行校正。我国则遵循所谓“往返一致”的原则，也就是分析 Φ_m

时采用的计算均值和变差系数的方法，在计算 PMP 时也必须采用同样的方法。

目前我国用统计法估算 PMP 的较少。

3. 马来西亚对统计估算法的应用

马来西亚以往采用赫希菲尔德法估算 PMP 时，一般取频率因子 K_m 为 15，后来研究发现，对该国湿润地区来说， K_m 等于 15 时计算的 PMP 过高，而对于较干旱的地区来说， K_m 等于 15 时估算的 PMP 又偏小。赫希菲尔德法曾指出， K_m 与降雨历时成正比，与年平均降雨量成反比。因此，只有基于测站实测降雨资料分析的频率因子才可能给出 PMP 的可靠值。

Desa M 等^[32]在对马来西亚 Selangor 地区做 PMP 研究时，选用了该地区 33 个雨量站的年最大 1 天的降雨资料来估算 24 小时的 PMP。他们根据实测资料分析该地区的 K_m 一般介于 1.2 至 6.0 之间，最大为 8.7。因此，由 K_m 等于 8.7 计算的 PMP 相当于 125000 年一遇，而由 K_m 等于 15 计算出来的 PMP 则相当于 10^9 年一遇，显然前者合理一些。

马来西亚在采用式(2-2)计算 PMP 之前，先计算均值和变差系数，然后对不合理的变差系数作校正，根据校正后的标准偏差计算 PMP。再乘以转换系数 1.13，将 1 天的 PMP 转换为 24 小时的 PMP。

2.3 国内外 PMP 估算方法研究进展

国内外对 PMP/PMF 估算方法的研究进展可归纳如下：

2.3.1 PMP 概念的进展

1. 可能最大降水的定义

1959 年美国气象学会提出的定义为：“在一年中某个时期内，特定流域物理上可能发生的给定历时的理论最大降水深度”。1982 年美国国家气象局与陆军工程兵团、垦务局共同将“特定流域”修改为“特定地理位置给定大小暴雨区”。PMP 定义变为“在一年中某个时期内，特定地理位置给定大小暴雨区物理上可能发生的给定历时的理论最大降水深度”。世界气象组织引用了 1982 年美国对 PMP 的修改，对 PMP 的新定义是：“PMP 是在现代气候条件下，一定历时内的最大降水量。这种降水量对于特定的地理位置给定暴雨面积上，一年的某一时期在物理上是可以发生的”。旧定义是指流域上的 PMP。新定义强调了 PMP 是暴雨面积上的最大降水量，PMP 具有季节变化。

1975 年以前，我国有关可能最大降水的文献中采用“可能最大降水”一词，和国外的一致。1975 年以后，我国一些有关 PMP 的文件中采用“可能最大暴雨”（PMS）一词，但仍有一些文件采用 PMP。1980 年，我国颁布的《水利水电工程设计洪水计算规范》第一次在正式文件中采用了“可能最大暴雨”一词，其含义是：“可能最大暴雨是指在现代气候条件下，特定流域上一定历时内可能发生的最大暴雨”，这里用“暴雨”代替了以往通用的“降水”一词。

2. PMP 和 PMS 的关系

在我国 PMP 与 PMS 是一个意思^[33]，但世界气象组织的文件中，PMS 是指某个实测的并经过放大的暴雨，而 PMP 是若干个 PMS 的时面深外包值。

3. 流域上的 PMP

暴雨面积的 PMP 和流域上的 PMP 不同，这是 PMP 概念的新发展，E. M. 汉森详细介绍了如何从暴雨面积的 PMP 推求流域 PMP 的技术。

2.3.2 PMP 估算方法的进展

1. 暴雨移置

(1) 移置范围

暴雨可移置的范围,一般限制在气象一致区内,若一个地区雨量站网较稀疏,资料系列不长或实测雨时资料较少,移置范围可放宽。但从近年来的研究情况看,由于暴雨资料的积累,移置技术的发展,短缺资料地区水利水电工程建设的需要,暴雨移置的距离已越来越远。不仅有国内到处移置,更有跨洲的移置,例如澳大利亚把美国暴雨资料移用于本国^[1]。我国在估算海南岛大广坝的 PMP 时就移置了美国的台风暴雨¹。

(2) 移置调整

① 等百分数线法的发展:应用等百分数线法进行暴雨移置地形调整,在求暴雨量占多年平均时段雨量的百分数时,时段雨量通常取年或季雨量。但是,年或季雨量中包含有一些小雨,不能反映地形对大暴雨的影响,为了把小雨去掉,近来的一些研究采取移置雨量占某一频率的年或季雨量的百分比进行移置暴雨的地形调整。

② 地形增强因子法:河海大学林炳章在文献^[34]一文中指出:山区暴雨较平原区的大,主要是地形的增幅作用所致,并用该概念来解决山区移置暴雨的地形调整问题。该方法是把由天气系统引起的降水量从实测雨量中分离出来,移置这部分雨量至研究区域或设计流域,再受研究区域地形增强因子的作用。辐合降水用实测降水量除以地形增强因子求得,地形增强因子可通过对山区和平原区雨量的对比分析中求得

美国 1984 年出版的水文气象报告第 55 号^[7](HMR55)中,在移置辐合分量进行地形调整时,考虑了暴雨强度因子:

$$PMP = FAFP \left[M^2 \left(1 - \frac{T}{C} \right) + \frac{T}{C} \right] \quad (2-5)$$

式中:FAFP 为暴雨辐合分量;T/C 为实测雨量与辐合分量之比,代表地形增强因子;M 为暴雨强度因子,常以暴雨最强部分的 6 小时雨量与 24 小时雨量之

¹林炳章.海南岛昌化江大广坝工程 PMP/PMF 估算综合报告.河海大学水资源水文系,能源部水利部中南勘测设计院

比表示。从(2-5)式可见,对短历时强对流性暴雨, M 值很大,地形增强因子作用被削减。对于强度不大的持续性降水,地形增强作用就较大。

2. 暴雨组合

流域面积较大的河流,单独一场暴雨不足以形成大洪水,需要采用暴雨组合的方式推求大流域的可能最大洪水。美国曾采用该方法推求密西西比河分洪工程的设计洪水。我国早在 20 世纪 50 年代末就采用暴雨组合法推求了长江上游地区的可能最大洪水。80 年代,利用长江流域较丰富的历史记载及洪水调查资料,模拟了 1870 年 7 月发生在长江上游的特大暴雨并将它与实测暴雨组合推求长江上游的 PMP^[36]。

3. 概化 PMP 估算

美国估算 PMP 的方法包含实测典型暴雨的放大、放大了的暴雨移置,放大了的暴雨时面深关系的外包、由雨面的 PMP 转换成流域 PMP 等一整套方法(称为概化估算)。近年美国、英国、澳大利亚、印度等国都进行了概化研究,特别是美国又对各个地区作了重新研究,利用这些研究成果来估算个别流域的值。概化估算的优点是:一个地区所有资料得到充分的利用;地区内采用统一的方式完成历时、面积的地区变化修匀;保持地区内各流域估计的一致;一旦完成,各流域可以精确而容易地得到最好的估计。美国 HMR51 详细分析了本国 500 多次暴雨时面深资料,给出了多种历时多种面积的概化时面深等值线图。综合分析 PMP 的面积 26、518、2590、12950、25900、51800km² 共 6 种,历时 5、12、24、48、72 小时共 5 种。但概化方法的使用也有一些限制,主要是面积过大和地形复杂的地区。

澳大利亚地广站稀,大暴雨资料很少,但分析认为澳大利亚和美国的降雨能力相似。1985 年《澳大利亚短历时小面积 PMP 估算》就是在资料稀少地区引入已进行分析地区的成果的例子。澳大利亚采用“修正美国资料”的方法,将美国的时面深外包曲线作调整,移用于自己国家。

4. 热带地区 PMP 估算

世界气象组织出版的《可能最大降水估算手册》第二版中,热带地区 PMP 的估算单独写成了一章。热带地区 PMP 的计算方法有很多还是引用温带地区的内容。但由于热带地区气候和暴雨特点与温带地区有很大差异,在暴雨的放大、移置上是不同的。《可能最大降水估算手册》第二版中认为在热带地区时空放大法

是暴雨放大的方法。热带地区同类暴雨可发生的地区很广，暴雨可移置的范围比温带地区宽广得多。移置暴雨的调整，除作地形调整外，还应进行海温差异的调整。

2.3.3 PMP 成果的评价

估算的 PMP 成果是否安全可靠，是从事 PMP 工作者常遇到的一个问题。E. M. 汉森认为，无法知道什么是 PMP 的真值，仅仅能做到所提出的成果是现有知识及资料基础上的最好估值^[36]。其可靠性主要从采用资料的可靠性和计算过程的科学性进行检查，其安全性采用比较法，与本流域及邻近地区实测或历史大暴雨进行比较，还可与世界最大记录进行比较。美国把已完成 PMP 成果与实测大暴雨记录进行了比较，绝大多数实测暴雨小于同样面积和历时的 PMP，只有个别创世界记录的特大暴雨略超过 PMP。

国内外最大点暴雨与历时关系的外包线用下式表示^[37]：

$$P = 421.6t^{0.475} \quad (2-6)$$

世界最大点雨量与历时关系外包线方程是：

$$P = 16.6t^{0.475} \quad (2-7)$$

为了比较不同流域面积洪水的大小，文献[38]给出表征洪峰流量大小的 Francou 系数的计算公式：

$$K = 10 \left(1 - \frac{\lg Q_m - 6}{\lg A - 8} \right) \quad (2-8)$$

式中： Q_m 为最大洪峰流量 (m^3/s)； A 为流域面积 (km^2)。在双对数纸上，流域面积大于 100 km^2 的各面积的世界最大洪水的外包线为一条直线，相应的 K 值为 6。可以用 Francou 系数来判断 PMF 的极大性。

文献[39]提出了一个对 PMP 和 PMF 成果进行综合评价的方法，将影响 PMP 成果的各因素分别评分，以总分高低评价 PMP 和 PMF 的安全性。评分标准可自行确定。影响 PMP 成果的最重要因素是暴雨样本的多少，及样本中是否含有特大暴雨。

此外，还可对 PMP 的时空分布评分，对影响 PMF 的诸因素如前期雨量，稳渗率等评分。最后以总分来评价 PMP 和 PMF 的安全可靠性。文献[39]规定，若总分

在 100 分以下, 则认为 PMF 成果不安全。

2.4 国内外 PMF 的估算

在现代气候条件下, 由一年中某一时期特定设计流域上一定历时内物理上可能发生的近似上限降水转化为洪水过程就是工程设计所要求的近似上限洪水, 即可能最大洪水。

PMP 的总量及其时空分布确定后, 推求 PMF 有三大步骤: ①产流计算, 即由降雨过程, 通过适当的方法求出净雨过程; ②汇流计算, 即由净雨过程, 通过适当的方法求出洪水过程; ③对计算的 PMF 成果进行合理性检查。

为此, 首先需广泛收集资料, 对设计流域的产汇流特性进行深入分析, 特别是对于那些上中下游或左右岸下垫面条件相差较大、人类活动较多, 因而使各地的产汇流条件相差也较大的流域, 这种分析就更显重要。

2.4.1 我国现状

1. 产流计算

我国常用的产流计算方法有扣损法、暴雨径流相关法和径流系数法。这些方法与一般的由设计暴雨推求设计洪水的方法相同。在 PMP 条件下的产流计算, 对湿润地区来说, 无论采用什么方法, 对 PMF 成果的影响的确不太大。但对于干旱和半干旱地区来说, 产流计算方法仍很重要。因为干旱和半干旱地区的暴雨洪水具有以下特点: ①短历时暴雨特别强, 时空分布不均匀; ②下垫面经常处于干燥状态; ③洪水过程短促, 陡涨陡落, 基流比重很小; ④部分产流和部分汇流现象较普遍。根据我国的实践经验, 在干旱和半干旱地区, 产流计算以扣损法较之相关法更为适合。

前期影响雨量 P_0 的最合理计算方法是在推求 PMP 时, 把 PMP 发生前一段时间(一般为 15 日~30 日)的降雨过程也推算出来, 用来计算 P_0 值。由于估算 PMP 已经作了许多天气气候和洪水分析, 加长一段降水过程并无多大困难。在湿润地区, 有时取偏于安全的数值, 即令 $P_0 = I_m$ 。对于干旱地区, 由于 P_0 极难达到 I_m , 可取各次洪水 P_0 的平均情况作为 PMP 的 P_0 。PMP 是非常事件, 与其相应的其它事

件有时也不一定都要取最安全的数值。我国特大暴雨主要雨区的洪水研究说明,设计 P_a 可以采用 $I_m/2$, 国外经验也是如此。

2. 汇流计算

将 PMP 转化为 PMF 的汇流过程就是把 PMP 产生的净雨过程, 转化为设计断面的直接径流过程, 然后再加上地下径流, 得出 PMF 的径流过程。我国在 PMF 计算中所采用的流域汇流计算方法有: 单位线法、单元汇流法、流量差值汇流法、典型洪水放大修正法等。前两种方法在一般的设计洪水计算中用得比较多, 流量差值汇流法和典型洪水放大修正法属线性汇流。

根据我国水文学者^[40]的研究, PMP 条件下产汇流计算的重要性, 在设计洪水计算中较在水文预报中要小得多, 这是因为设计暴雨值都超过流域最大初损值很多, 故扣损计算误差占设计暴雨计算误差的百分数很小, 即使采用较简单的方法扣除损失, 其计算误差对设计洪水的影响也很小; 在 PMP 条件下, 这种影响就更小。即使目前我们对流域下渗机制还不甚了解, 但各个流域的最大初损值及稳渗率还是可以分析出来的, 且在 PMP 条件下, 流域最大初损值的变化不会太大, 稳渗率的下限是渗透系数, 如果在实测资料范围内稳渗率随雨率的变化不大, 一般可视为常数。

3. 河道汇流计算

目前水文上常用的河道汇流计算方法还是马斯京根法, 它以水量平衡方程代替反映质量守恒的连续性方程, 以槽蓄曲线代替反映能量守恒的动力方程进行求解。

在 PMP 条件下, K 、 x 的推求还是采用解析法或试错法, 以实测洪水资料为基础, 但是如果缺乏特大洪水, 则求得的 K 、 x 用于 PMF 情况就不太合适, 因为这里有一个非线性外延问题, 处理这一问题可以采用水力学方或其它方法。

2.4.2 英国由单位线和损失模型推求 PMF

1. 估算步骤

英国洪水研究报告 FSR 用来估计 PMF 的降雨~径流方法, 就是将 PMP 输入到 FSR 单位线和损失模型中进行计算, 其步骤如下^[41]:

(1)估计 FSR 单位线峰现时间、径流百分比和基流, 从而确定 FSR 单位线和损失模型; (2)根据径流百分比从总降雨过程线中导出净雨过程线; (3)对净雨过程和

FSR 单位线进行卷积运算求出快速响应径流过程线；(4)将基流加到快速响应径流过程线得到总流量过程线。

2. PMF 的名义重现期

英国洪水研究报告赋予 PMF 一个名义重现期。有两种方法用来估计可能最大洪水 PMF 的名义重现期 T_{PMF} ：一种叫常规法，另一种称为几何法。在这两种方法得到的结果中取较小值作为 PMF 的重现期。

常规法认为 PMF 的重现期是 10^6 年，如果在下面列出的各种情况中有任意两种情况同时发生，那么 PMF 的重现期就要再乘以 10。这些情况是：PMP 所在的流域面积超过 100km^2 ；推求出来的 PMP 是全年最大的，即夏季的 PMP 加上融雪影响；融雪速率达到了 5mm/h 。如果 PMP 所在的流域面积超过 500km^2 ，PMF 的重现期也可考虑乘以 100。

几何法确定 PMF 的重现期的步骤如下：

(1) 计算比例参数 k

$$k = \frac{Q_{PMF} - Q_{1000}}{Q_{1000} - Q_{100}}$$

式中： Q_{100} 、 Q_{1000} 、 Q_{PMF} 分别代表由 FSR 降雨径流法得到的百年一遇设计洪水、千年一遇设计洪水和可能最大降水得到的可能最大洪水。

(2) 根据 k 值从表 2-1 中查出 PMF 的重现期

表 2-1 基于几何法的 T_{PMF} 查算表

k	$T_{PMF}(\text{年})$
<5	10^6
$5\sim10$	10^7
$10\sim15$	10^8
>15	10^9

2.4.3 澳大利亚由改进线性水库演算模型估算 PMF

Zhang 和 Cordery^[42, 43]提出了线性水库演算模型(the linear storage routing model, 简称 LSRM)，该模型主要用于流域由较大的设计暴雨推求设计洪水的过程，如：由 PMP 推求 PMF，并可考虑降雨在全流域上分布不均匀的情况。LSRM 本身不需要参数率定，且估计的洪水流量过程能与实测大洪水较好地拟合。模型首先将流域划分为若干子流域，然后采用总量控制法推求各子流域的滞时，

最后根据一个简单的线性水库演算模型推求流域出口断面的流量过程线。

Zhang 和 Cordery 等曾将改进线性水库演算模型应用到我国的淮河流域,并模拟了“75.8”特大暴雨洪水过程,其拟合的洪峰流量较观测值稍小,总的来讲拟合得不错,特别是涨水段。另外在澳大利亚多个流域的应用研究表明,该方法在模拟大洪水(特别是 PMF)时精度较高。

第三章 清江流域概况

3.1 地理地形特征^[44, 45]

清江流域位于 $108^{\circ}35' \sim 111^{\circ}35' E$, $29^{\circ}33' \sim 30^{\circ}50' N$ 间的副热带地区, 是长江出三峡后的第一条大支流, 发源于鄂西利川县齐岳山龙洞沟, 自西向东流经湖北省利川、恩施、建始、巴东、长阳等 10 个县市, 于枝城市注入长江。干流全长 423km, 总落差 1430m。流域呈南北窄、东西长的狭长形, 干流几乎与纬线平行, 面积约 17000km^2 。全流域地处云贵高原东端, 我国第二地形阶梯向东部平原的过渡地带。流域地势西高东低, 西以齐岳山与乌江分界, 分水岭高程为 1500m~2000m, 东部河口高程不足海拔 200m, 流域东部濒临的江汉平原, 海拔只有几十米; 南以武陵山支脉与澧水相隔, 分水岭高程约 1000m~2000m, 因此, 流域东部可受东南气流的影响, 而中西部地区, 因有武陵山支脉的阻挡, 东南气流不易到达; 流域北方有秦岭、大巴山, 与三峡分界的巫山山脉, 海拔也达 1000m~1500m, 这些地形屏障, 减弱了北方南下的冷空气对流域的影响; 流域西南部的咸丰地区, 因受地层断裂陷落影响, 海拔高度仅 500m 左右, 构成鄂黔之间的天然通道, 西南暖湿气流可长驱直入, 是清江中、上游流域降水水汽的主要入流方向。

清江流域内地形起伏变化很大, 河谷深切, 江面与分水岭高差大多达 2000 余 m。流域内除利川、恩施、建始境内的三个小盆地及河口附近的局部冲积平原外, 均系山地, 山地面积占全流域的 80%。清江共有 25 条支流, 大多支流流程较短, 流域面积在 500km^2 以上的有 7 条, 以忠建河最长, 流域面积最大, 而天然落差最小; 与忠建河对峙的清江干流北岸支流马水河为第二大支流。忠建河、马水河构成了西南部低, 东北部高的西南暖湿气流的通道, 对西南暖湿气流有明显的抬升作用。

3.2 气候概况

3.2.1 基本资料

清江流域内现有恩施、利川、建始、宣恩、咸丰、五峰和长阳 7 个气象站，除恩施站于 1950 年建站并兼有地面和高空气象观测外，其他均为地面气象站，其中，五峰、咸丰站建于 1957 年，其余各站建于 1959 年。地面气象要素进行四段制观测，观测项目有气温、气压、湿度、降水、蒸发、风、日、照、天气现象、地温等，有些气象要素有自记观测记录，成果精度较好。高空气象要素实行两段制观测，观测项目包括各大气层的温、压、湿、风等。流域内现有雨量站近 70 个，其中有 27% 的站有 40 余年的记录，70% 的站有 20 余年的记录，20 余站有自记观测记录。大部分雨量站汛期实行 4 段制观测，暴雨时随雨强变化适当加测，雨量资料可靠。雨量站站网密度约为 $200\text{km}^2/\text{站}$ ，基本可以反映降水和暴雨的特征，但是，对于由中小尺度天气系统引起的暴雨，现有的测站布设难以全面反映其时空分布特征。

流域外邻近的探空站有，流域东边的宜昌，东南部的常德，南部的芷江，西南部的贵阳，西部的重庆，西北部的达县和北部的安康，这些站都有一日两次的高空气象要素观测，资料精度较好。

3.2.2 气候概况

清江流域的地理位置使其气候为中亚热带季风气候，它的地势特点又使其气候和流域东部平原相比，有冬暖夏热、湿润多雨、云多风小、气温年较差小、秋雨显著等特点。但因流域内地形起伏变化很大，地形高低相差悬殊，其气候又多种多样，在河谷地区风和日丽，无霜期长，热量多，生长季长；而在山坡和山顶，冬冷夏凉，降水增多，夏季多雷暴，冬季多雪日，气候和河谷迥然不同，从河谷至山顶气候有“十里不同天”的特点。清江流域多暴雨，易遭洪水灾害，却少受干旱的影响。

据对流域内长阳等七个气象站资料的统计，年平均气温在 $12.8^{\circ}\text{C}\sim 16.5^{\circ}\text{C}$ 间，河谷和盆地年平均气温超过 16°C ，而山区在 13°C 左右。月平均气温以 1 月最低，为 $2^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，除利川、五峰等山区外，流域内 1 月平均气温为 $4^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，

均比其东部江汉平原的武汉市的 2.9°C 高,可见,清江流域大部分地区冬季比江汉平原温暖。7 月是全年最热的时期,流域内各地气温都较高,以长阳、恩施地区最热,7 月平均气温分别为 27.9°C 和 27.1°C ,和武汉市的 28.8°C 相比,仍比较凉爽,在五峰、利川等山区则更为凉爽,7 月平均气温仅 24.1°C 和 23.3°C 。流域内气温年较差在 22°C 左右,比武汉的年较差(26°C)小,气温日较差也小,尤以冬季和秋季显著。

极端气温以长阳的 42.1°C 为流域的最高值(1966 年 8 月 6 日)。极端最低气温以利川的 -15.4°C 为流域的最低值(1972 年 2 月 8 日)。流域内年平均风速较小,为 $0.5\text{ m/s}\sim 2.3\text{ m/s}$,8 级以上大风天数为 $0.5\text{ 天}\sim 1.7\text{ 天}$,大多出现在春、夏两季。最大风速为 $15\text{ m/s}\sim 19\text{ m/s}$,以咸丰 1977 年 8 月 23 日的 19 m/s 为最大,风向为 NE。流域相对湿度较大,大多在 $80\%\sim 84\%$ 。日照较少,多年平均年日照时数为 $1160\text{ 小时}\sim 1570\text{ 小时}$ 。年雾日在 $29\text{ 天}\sim 62\text{ 天}$,以五峰年雾日最多,为 87 天,出现在 1959 年。年霜日在 $29\text{ 天}\sim 62\text{ 天}$,是长江流域霜日最少的地区之一。

3.2.3 年降水量时空分布特征

清江流域多年平均年降水量为 $1000\text{ mm}\sim 2000\text{ mm}$,面平均雨深为 1460 mm ,水布垭以上为 1500 mm ,是长江流域多雨区之一。造成多雨区的原因主要是:该流域既受来自孟加拉湾和南海来的西南暖湿气流的影响,又受来自太平洋、东南气流的影响,水汽条件充沛;该地区处于西南低涡频繁通过的路径上,暴雨发生的机会多;该地区又处于鄂西南山地,地形对东南或西南暖湿气流的抬升明显。年降水量的分布特点是:上、下游大,中游小。年雨量较大的地区是上游西南暖湿气流入流通道的咸丰、晓关、见天坝、宣恩、建始及磺厂坪一带,达 $1500\text{ mm}\sim 2000\text{ mm}$,其中,北岸支流马水河上游因位于巫山南侧迎风坡,磺厂坪站年雨量达 2023 mm ,为全流域年降水量最大的地方。清江下游有两处多雨区,一处位于干流南岸支流渔洋河中上游一带,渔洋关站年雨量为 1602 mm ,在与澧水分水岭附近的清水湾站年雨量达 1891 mm ;一处位于北岸支流丹水上游,堡子站年雨量为 1746 mm 。年雨量较小的地区在中游河谷的渔峡口、榔坪、都镇湾一带,为 $1000\text{ mm}\sim 1200\text{ mm}$ (见图 3-1)。

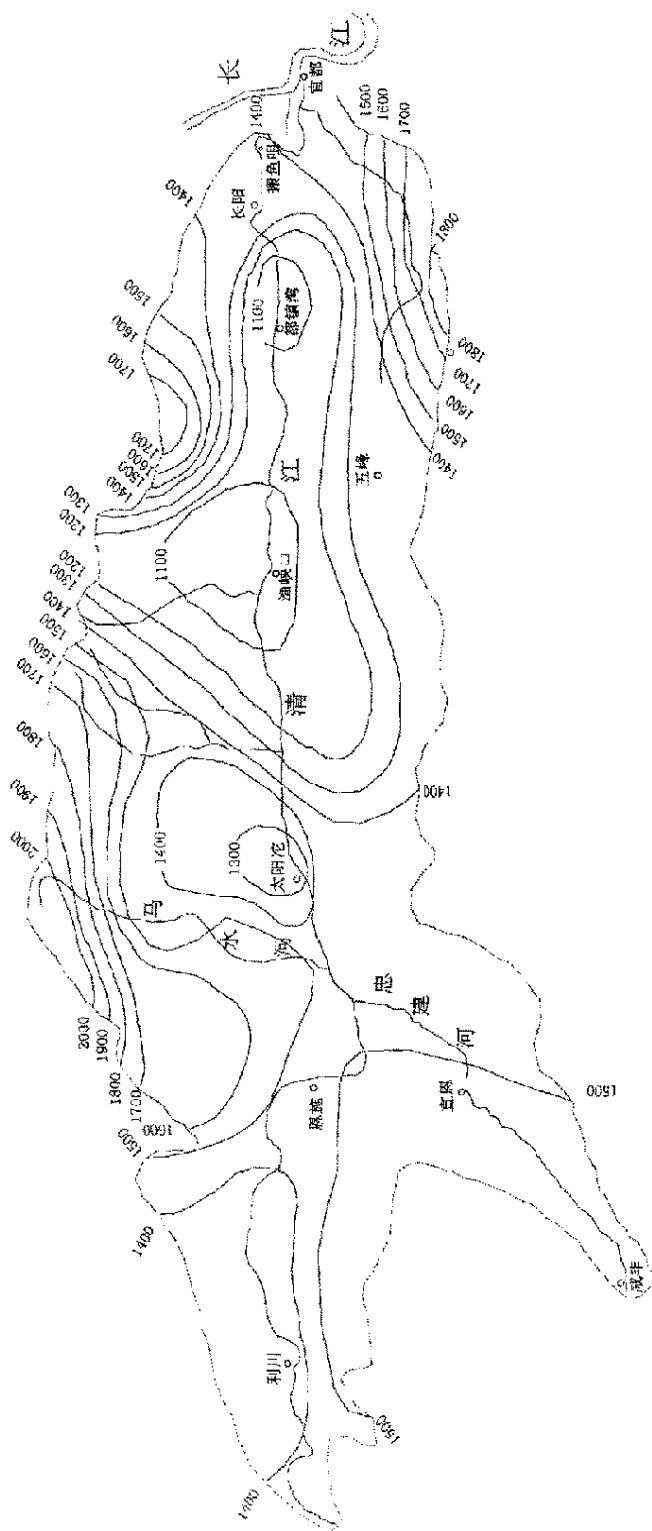


图 3-1 清江流域多年平均年降水量等值线图

降水量的年内分配与西太平洋副热带高压的季节性位移和西风带天气系统的活动有关。雨季一般从 4 月份开始, 9 月底或 10 月初结束, 降水量年内分配不均, 4~9 月降水量占年的 75~78%, 其中 5~8 月的降水量占全年的 50~55%; 冬季雨量较少, 尤以 1 月份最少, 一般在 20~30mm。7 月份雨量最多, 在 200~300mm。渔峡口以上流域因地处华西秋雨区东缘, 9 月雨量较 8 月略多, 详见图 3-2。降水量的年际变化不大, 单站年降水量的最大值与最小值之比, 大多在 1.5~2.0 间。历年最大年降水量是五峰站的 2577.9mm, 发生在 1935 年。

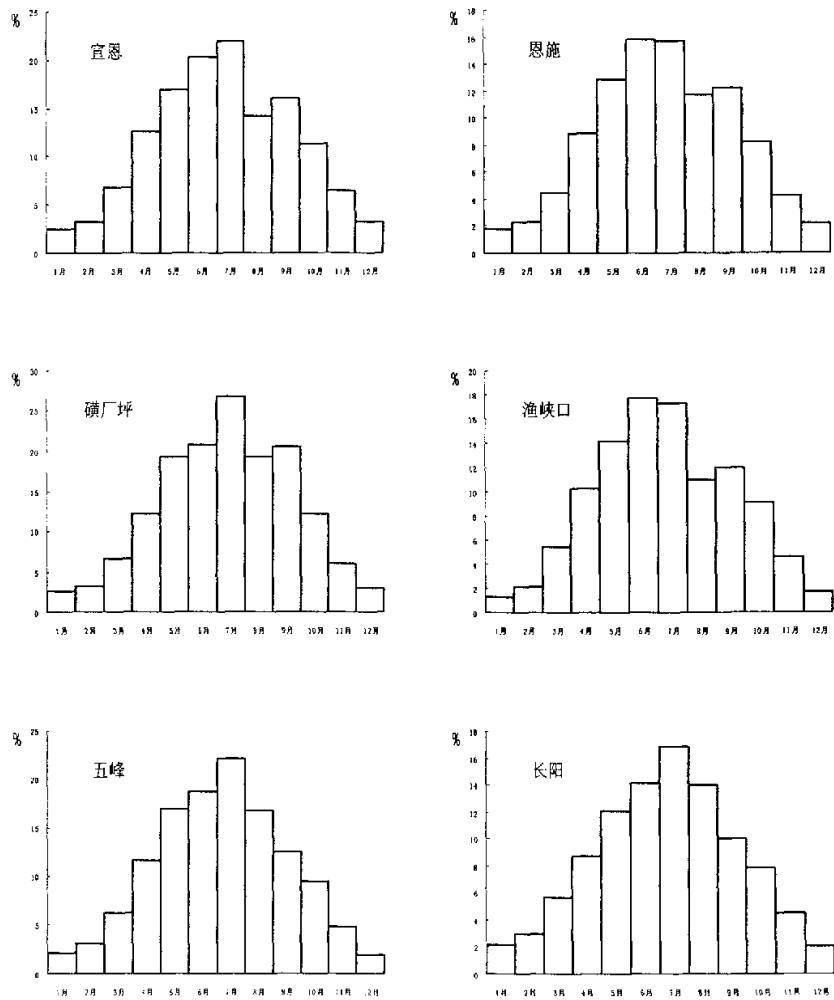


图 3-2 清江主要站各月降水量占年降水量的百分比

3.3 水布垭工程概况

水布垭水电站位于清江中游下段，坝址以上控制面积 10860km²，约占清江流域集水面积(约 17000km²)的 64%。水布垭坝址下游约 17.6km 处，有渔峡口水文站，控制面积 11906km²。水布垭水电站有关水文特性资料系用渔峡口站水文资料推求，工程特性见表 3-1。

表 3-1 水布垭水电站有关工程特性

项目	集水面积 (km ²)	多年平均 流量 (m ³ /s)	多年平均 径流量 (亿 m ³)	多年平均 含沙量 (kg/s)	实测最大 流量 (m ³ /s)	P=0.1% 设计流量 (m ³ /s)	最大坝高 (顶高程) (m)	坝顶全长 (m)
特征值	10860	299	94.4	0.59	12400	20200	233 (409)	439.5
项目	坝型	正常蓄 水位 (m)	死水位 (m)	总库容 (亿 m ³)	调节库容 (亿 m ³)	装机容量 (万 kw)	平均年发 电量(亿 kw.h)	工程 总投资 (万元)
特征值	面板堆 石坝	400	350	45.8	7.70	160	39.2	1482872

水布垭坝址以上流域支流较多，呈羽状分布，流域面积在 500km²以上的有 4 条：

忠建河——是在中游右岸注入清江的最大一条支流，全长 117km，流域面积 1881km²，天然落差 424m。

马水河——是中游左岸注入清江的第二大支流，全长 102km，流域面积 1693km²，天然落差 1569m。

野三河——是中游左岸注入清江的主要支流之一，全长 63km，流域面积 1092km²，天然落差 1527m。

龙王河在中游右岸注入清江，流域面积 594km²。

清江水布垭坝址以上流域水系图见图 3-3。

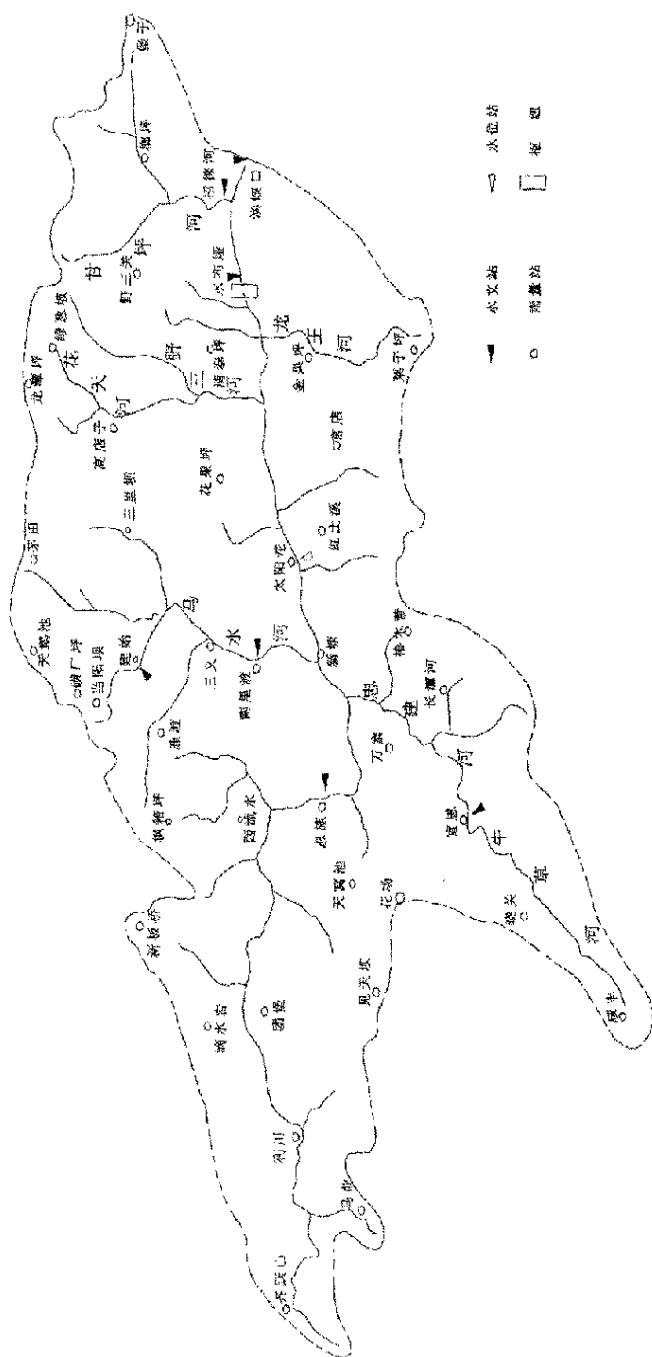


图 3—3 清江水布垭坝址以上流域水系示意图

第四章 清江流域暴雨洪水特性及 PMP/PMF 估算方案拟定

4.1 清江流域及其附近地区的暴雨特征

据长江流域年暴雨日数分布图、中国年最大 24 小时和 3 天点雨量均值等值线图(图略)知,清江流域处于湘西、鄂西南暴雨区中。湘西、鄂西南暴雨区是长江流域著名的暴雨区之一,其范围包括清江、澧水中上游和沅水上游。该暴雨区多年平均年暴雨日数(日降水量 $\geq 50\text{mm}$ 天数),除个别河谷地区外,达 4 天~7 天,年最大 24 小时和 3 天点暴雨均值分别为 $100\text{mm}\sim 150\text{mm}$ 和 $140\text{mm}\sim 200\text{mm}$,均比其周围地区的大。在估算清江渔峡口以上流域可能最大降水(PMP)时,将上述地区视为含清江流域的暴雨一致区,将该区内出现的暴雨作为估算 PMP 的基础。

4.1.1 暴雨时空分布特点

1. 年暴雨日数的时空分布

清江流域及其附近地区平均年暴雨日数在 5 天以上的多暴雨区有三处,一处 在澧水上游,其中大坪站年暴雨日数达 8.7 天之多,是长江流域暴雨最多的地区;另两处均在清江流域内,分别位于上游支流马水河中上游和清江下游支流渔洋河上游。马水河正处于西南暖湿气流的迎风坡,磺厂坪站平均年暴雨日为 7.3 天,1969 年该站出现了 12 天暴雨;渔洋河上游为东南暖湿气流的迎风坡,高桥站平均年暴雨日为 6 天;马水河上游的多暴雨区范围比渔洋河上游的大得多,是清江流域的主要暴雨区,也是渔峡口站雨洪的主要来源地区。清江流域河谷地区暴雨频次较少,如渔峡口站多年平均年暴雨日数不到 2 天(图 4-1)。

清江流域的暴雨最早出现在 4 月,除个别站 11 月还可以发生暴雨外,大多 于 10 月结束。6 月~9 月为暴雨集中的时期,4 个月暴雨日数可占全年的 85%~95%,其中又以 7 月暴雨最多,其次是 6 月,6 月~7 两月暴雨日占全年的 50%左右。6 月~7 月间正是长江中下游的梅雨季节,梅雨是一种大范围的天气现象,梅雨雨区呈大范围东~西向或东北~西南带状分布,可从乌江流域经湖北、湖南、江西至长江中下游江淮一带,梅雨期可长达 1 月之久。清江流域正处于梅雨雨带

之中，因此，梅雨期间，清江流域暴雨频频，而且是清江流域主要的致洪暴雨，如清江流域的“68.7”，“69.7”，“83.7”，“97.7”等暴雨均属梅雨雨带中的暴雨，造成了清江的大洪水。

清江上游和其邻近地区的乌江、三峡巫溪一带，处于我国华西秋雨区的东缘，9月暴雨日数比8月偏多，个别年份9月暴雨很突出，如清江支流野三河上游的龙坛坪站，1979年全年共有10天暴雨，仅9月一个月就有5天，清江渔峡口站1979年年最大洪峰就出现在9月。

2. 最大24小时和3天点暴雨分布特点

清江流域年最大24小时点暴雨的分布特点是下游大于上游，在渔峡口以上流域，以芭蕉河花场站的286.4mm(1997年7月)为最大，清江下游以都镇湾的630.4mm(1975年8月)为最大，该值不仅是清江流域的最大值，也是湘西、鄂西南暴雨区的最大值。年最大3天点雨量，也是清江下游比上游大，渔峡口以上流域的最大值是咸丰站的414.2mm(1983年9月)。咸丰站附近的忠堡站虽不在清江流域，但在清江与沅水的分水岭附近，其最大3天雨量为577.8mm(1983年7月)。清江流域3天点雨量的最大值为下游五峰站的1076.1mm(1935年7月)，该值也是长江流域的最大值。

4.1.2 暴雨天气系统

影响清江流域的暴雨天气系统主要有切变低涡，冷锋低槽和登陆热带低压三种类型。

切变低涡的特点是：在700hpa上的 $30^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 地区有东～西向或东北～西南向切变线在长江流域上空持续，有西南低涡沿切变东移，在500hpa上西风环流较平直，有西风槽不断东移，在地面天气图上，相应静止锋存在。由这种类型的天气系统带来的暴雨，移动方向自西向东，波及整个清江流域，24小时和3天暴雨图呈东～西向或东北～西南向带状分布，暴雨持续时间可达2天～4天之久，如“69.7”、“83.7”、“97.7”暴雨等。

冷锋低槽的特点是：500hpa 环流经向度较大，西风槽自西向东移至蒙古时发展加强南下，影响清江流域，地面有冷锋自陕、甘、青南下。由这种系统产生的暴雨在清江流域持续时间较短，一般只有 1 天~2 天，但强度较大。暴雨区呈东北~西南向。

登陆台风转成的热低压只能对清江下游流域产生影响，而且次数很少，在干流造成的洪水不恶劣，但局部的暴雨强度特大，也能造成局部特大洪水，如“75.8”都镇湾暴雨，24 小时雨量达 630.4mm。

有热带系统影响的切变低涡暴雨，在清江流域实测记录中，只有 1935 年 7 月 3 日~7 日一次，暴雨中心出现在清江下游五峰站，简称“35.7”五峰暴雨，五天暴雨图呈南北向分布，暴雨范围特别广，自澧水流域下游、清江下游至汉江中游均在暴雨笼罩之下。清江下游的长阳站出现了肥胖型大洪水。渔峡口以上流域尚未发现由热带系统影响的暴雨。

4.2 可能最大暴雨和洪水的计算方案

因水布垭坝址没有水文站，没有实测流量资料，现有的产汇流方案是根据渔峡口水文站的资料及渔峡口以上流域的雨量表制作的，所以，需先估算渔峡口以上流域的可能最大暴雨和渔峡口站的可能最大洪水，再转换成水布垭坝址的可能最大洪水(PMF)。

拟定可能最大暴雨计算方案，应以流域的暴雨洪水特性为主要依据。

4.2.1 清江中上游暴雨洪水特性

经对渔峡口以上地区暴雨洪水的分析，清江中上游暴雨洪水具有以下特点：

(1)渔峡口站有 68%的年最大洪峰出现在 6 月中旬~7 月中旬，且在 1965 年~2003 年系列中前六位的洪水(峰或量)均出现在这段时期，这前六位的洪水是：1997 年 7 月、1969 年 7 月、1971 年 6 月、1977 年 7 月、1989 年 7 月、1980 年 6 月，还有 1968 年 7 月(三天洪量居系列第一位)洪水，均为梅雨雨带中的暴雨所致。

(2)渔峡口站洪水过程，以陡涨陡落的单峰型洪水为主，大多由 2 天~3 天的暴雨形成。也有少数双峰型洪水，如“69.7”、“68.7”和“97.7”洪水，前两场

洪水主峰在前，次峰在后，两峰间相距多为 2 天~3 天，后一场洪水次峰在前，主峰在后，两峰间距为 2 天，见表 4-1，最大七天洪量跨双峰。这种双峰型洪水由两次暴雨形成，两次暴雨间隔 20 小时左右。

(3)造成清江大洪水的梅雨期暴雨并不完全落在清江流域，暴雨雨区是跨流域的。

(4)渔峡口以上流域的暴雨受西南季风的影响，水汽入流方向为西南方向，东南季风不明显。

表 4-1 渔峡口站大洪水峰型特征表

洪水号	峰型	主峰		次峰		主次峰相距时间(h)	7 天洪量		序位 (1965~2003)	
		流量 (m ³ /s)	出现时间	流量 (m ³ /s)	出现时间		W ₁₆₈ (亿 m ³)	出现时间	主峰	W ₁₆₈
68.7	双	7620	15 日 11 时	7190	18 日 2 时	87	25.01	7 月 14-20 日	11	2
69.7	双	11900	12 日 3 时	4800	14 日 19 时	64	20.59	7 月 11-17 日	2	4
71.6	双	9160	11 日 14 时	3520	15 日 16 时	98	16.89	6 月 1-7 日	3	7
76.7	双	7840	19 日 17 时	2310	22 日 17 时	72	13.68	7 月 18-24 日	9	10
77.7	单	9150	18 日 17 时				12.83	7 月 12-18 日	4	12
79.9	双	8010	13 日 19 时	6850	16 日 2 时	55	19.93	9 月 13-19 日	8	5
80.6	双	8830	17 日 17 时	3570	19 日 20 时	51	18.07	8 月 1-7 日	6	6
82.7	单	7790	28 日 15 时				15.23	7 月 24-30 日	10	8
83.9	单	7300	16 日 22 时				21.21	7 月 9-15 日	12	3
89.7	单	8930	11 日 18 时				11.91	7 月 10-16 日	5	13
90.6	单	8160	20 日 12 时				11.20	6 月 20-26 日	7	14
91.6	单	7100	15 日 16 时				14.82	7 月 1-7 日	14	9
96.7	单	7290	4 日 23 时				13.46	7 月 14-20 日	13	11
97.7	双	13200	16 日 13 时	9700	14 日 23 时	38	29.76	7 月 14-20 日	1	1

4.2.2 清江及其附近地区的著名大暴雨

清江及其附近地区的著名特大暴雨有“35.7”五峰暴雨，“69.7”清水湾暴雨，“75.8”都镇湾暴雨，“97.7”花场暴雨，这四场暴雨中心均落在清江流域，此外还有发生在澧水流域的“91.7”凉水口暴雨等。

“35.7”暴雨是由西南低涡和热低压同时作用造成的，水汽入流为东南方向，地形的影响也十分显著；“75.8”暴雨是由登陆台风转成的热低压造成的，这两种类型的暴雨在渔峡口以上流域不曾出现过，因此，估算渔峡口以上流域 PMP 时不考虑这两场暴雨。

“69.7”、“91.7”、“97.7”暴雨均为东西向梅雨雨带中的暴雨，尤其是“69.7”、“97.7”暴雨，就发生在清江流域，“69.7”一天和三天暴雨图形呈东

西向带状分布,笼罩清江全流域,暴雨自西向东移动,造成了清江全流域性大洪水;“97.7”暴雨造成渔峡口站洪水为有实测资料以来的最大值,这两场暴雨是估算渔峡口以上流域可能最大暴雨时应考虑的重点暴雨。

此外,在清江流域及其附近地区的梅雨期暴雨还有“68.7”,“71.6”,“77.7”,“80.6”,“83.7”,“89.7”,“91.6”等暴雨,在估算可能最大暴雨时均不可忽视。

4.2.3 形成水布垭坝址可能最大洪水的水文气象特征

(1)7月是出现可能最大洪水的最佳季节

从多年平均情况看,月降水量以7月降水量最大,从历年各站最大月降水量看,也出现在7月。暴雨日数也以7月最多,即7月发生暴雨的机会比其他月多。再从渔峡口站年最大洪峰出现的时间看,以7月出现次数最多,而且实测最大值也出现在7月。因此,7月是清江中上游发生PMF的最佳季节。

(2)形成清江中上游PMF的天气形势和梅雨形势类似,暴雨天气系统是低涡切变类,水汽入流方向为西南方向,暴雨为梅雨期暴雨,自西向东移动。

(3)PMF的过程线为主峰在前,次峰在后的双峰型洪水过程。这样的洪水过程由两次暴雨天气过程形成。形成PMF主峰的暴雨历时需要2天~3天并达到PMF水平,形成次峰的暴雨为一般暴雨。两场暴雨的最短时间间隔为20小时左右。

4.2.4 可能最大暴雨和洪水估算方案

通过以上分析,拟定以下三种方法估算渔峡口以上流域24小时和3天可能最大暴雨。

第一种方法:放大当地“97.7”暴雨估算可能最大暴雨。

第二种方法:移置“69.7”清水湾暴雨估算可能最大暴雨,下设两个方案,一个是移置“69.7”暴雨,另一个是移置“69.7”概化暴雨。

第三种方法:考虑多场梅雨期暴雨,采用时面深概化法估算可能最大降水,下设三个方案,一个是采用“69.7”时雨型,一个是用“71.6”时雨型,还有一个是“97.7”时雨型。

放大计算采用水汽、风速联合放大。为得到7天可能最大洪量,尚需在3天可能最大暴雨之后组合一场暴雨。

第五章 可能最大降水的估算

5.1 当地暴雨放大法估算 PMP

根据第四章的分析,对发生在清江中上游地区的“97.7”暴雨进行放大,估算渔峡口以上流域的 PMP。

5.1.1 “97.7”暴雨分析^[46]

5.1.1.1 “97.7”暴雨概述

“97.7”暴雨是典型的梅雨期暴雨,自7月11日开始至19日结束,历时9天之久。降水分为两个阶段,11日~16日和17日~19日,前一阶段降水量大,其中暴雨主要集中在13日~15日,以15日暴雨最大,所要放大的就是13~15日暴雨。3天雨量图呈东西向带状分布,暴雨中心位于花场附近,中心位置在3天内稳定少动,200mm等值线几乎笼罩整个清江中上游流域,相应降水量为37.9亿 m^3 ,清江渔峡口以上流域面雨深达234mm,其中以15日雨量最大,100mm以上雨区范围为7420 km^2 ,渔峡口以上流域面雨深92.8mm。这场暴雨致使清江中上游发生大洪水,渔峡口水文站出现有记录以来的最大洪水,洪峰流量为13200 m^3/s 。

5.1.1.2 暴雨强度和时间分布特征

清江流域有实测降水资料以来发生的大暴雨有“68.7”、“69.7”、“97.7”等暴雨,“69.7”暴雨造成清江流域渔峡口站的洪峰特别大,“68.7”暴雨造成清江渔峡口站洪量特别大,“97.7”暴雨造成渔峡口站洪峰、洪量均较大。在此对这几场暴雨作一对比分析。

(1)强度特征

“97.7”暴雨历时长,但主要集中在13日~15日,降雨中心花场站最大日雨量为239.5mm,其余均在120mm~200mm之间;花场站最大6小时雨量为133.9mm,12小时雨量204mm,最大3天雨量363.4mm(见图5-1),一次雨量524.7mm。“97.7”降水6小时、12小时及1天、3天点雨量均比“68.7”暴雨的大,但均未超过“69.7”暴雨(见表5-1),而7天点雨量则是“97.7”暴雨最大,居清江有实测降水记录之首。

短历时(1天以内)面雨量(渔峡口以上流域)是“69.7”暴雨最大,但长历时

(3 天、7 天)面雨量则是“97.7”暴雨最大,成为有资料以来渔峡口以上流域的最大面暴雨,“97.7”暴雨 3 天面雨量为 234.1mm,7 天面雨量为 307.8mm。

表 5—1 “97.7”暴雨与“68.7”、“69.7”暴雨比较

时段 暴雨	点 雨 量(mm)					渔峡口以上面雨深(mm)				
	6h	12h	1d	3d	7d	6h	12h	1d	3d	7d
68.7	87.4	130.1	155.4	252.5	398.8	27.8	46.0	58.6	154.7	255.1
69.7	209.1	284.5	343.4	395.1	411.7	54.9	88.5	97.2	154.0	211.1
97.7	133.9	204.0	239.5	363.4	487.0	47.9	80.9	92.8	234.1	307.8

(2)面暴雨时间分布特征

从三场暴雨渔峡口以上流域最大 168 小时时段($\Delta t=6$ 小时)面雨深分布(图略),可以看到“97.7”暴雨集中在 13 日 14 时~16 日 14 时,有两个峰值,一个是 14 日 8 时~14 时,一个是 16 日 2 时~8 时,间隔 6 个时段,前小后大,后一个是“97.7”洪水的造峰雨量;“69.7”暴雨降水集中在 30 小时内,单峰、峰值较大;“68.7”暴雨时段面雨深分布较均匀;“97.7”暴雨最大 72 小时面雨量占最大 168 小时面雨量的 79.2%,比“69.7”暴雨(76.8%)、“68.7”暴雨(67.4%)均要大,因而造成渔峡口站前小后大的复式洪水过程,洪峰超过“69.7”洪水,洪量超过“68.7”洪水。

(3)时面深特征

从前面分析知,渔峡口以上流域面雨量短历时“69.7”暴雨最大,长历时“97.7”暴雨最大,因此,对这两场暴雨作了时面深关系分析,表 5—2 即为“69.7”和“97.7”暴雨的时面深关系,可见,“97.7”1 天各面积上的暴雨并不突出,而 3 天在 2000km²以下面积上的面雨深是“97.7”比“69.7”小,在 2000 km²~15000km²面积上的面雨深则是“97.7”略超过“69.7”,成为清江流域有记录以来的最大暴雨。

表 5—2 “69.7”暴雨与“97.7”暴雨时面深关系

面积(km ²)		点	200	500	1000	2000	5000	10000	15000
面 雨 深	1 天	69.7	343	304	280	262	242	216	193
		97.7	240	239	217	205	184	151	125
	3 天	69.7	395	374	362	349	330	296	262
		97.7	363	359	352	343	328	299	270

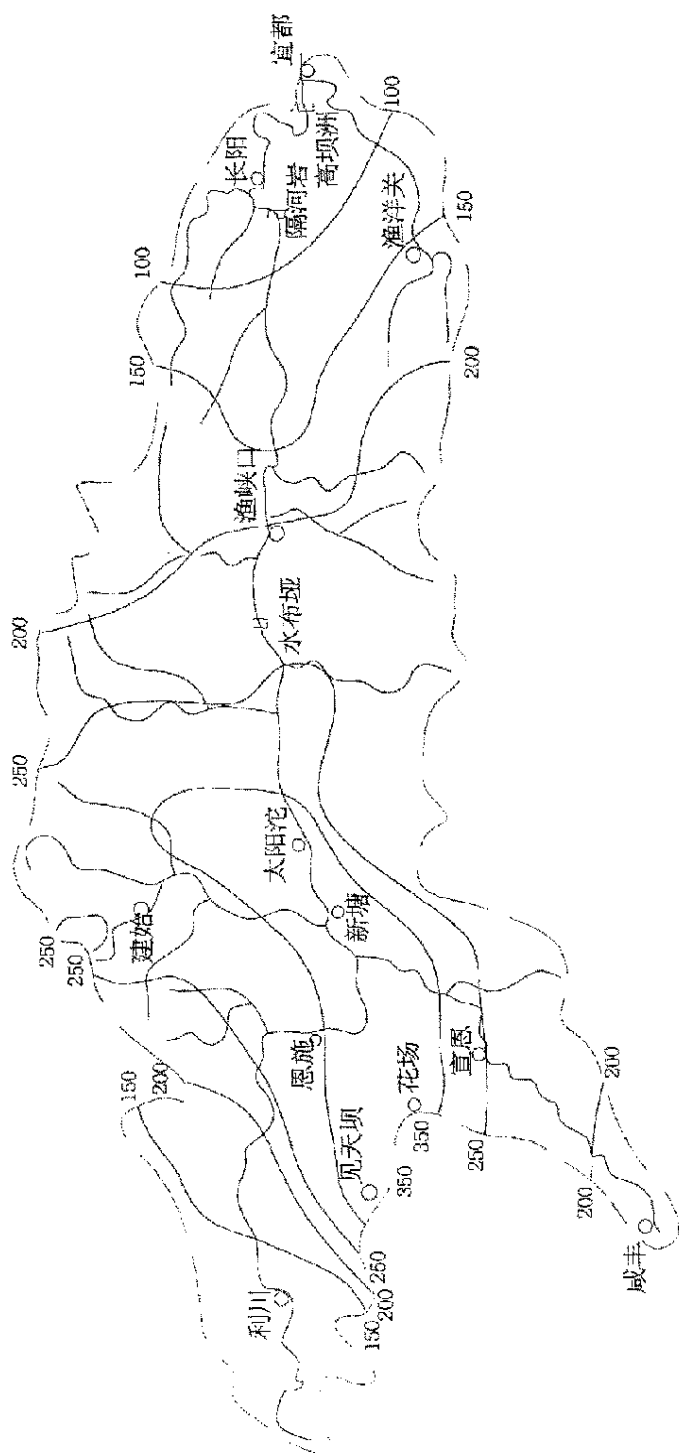


图 5-1 清江流域 1997 年 7 月 13 日~15 日降水量等值线图

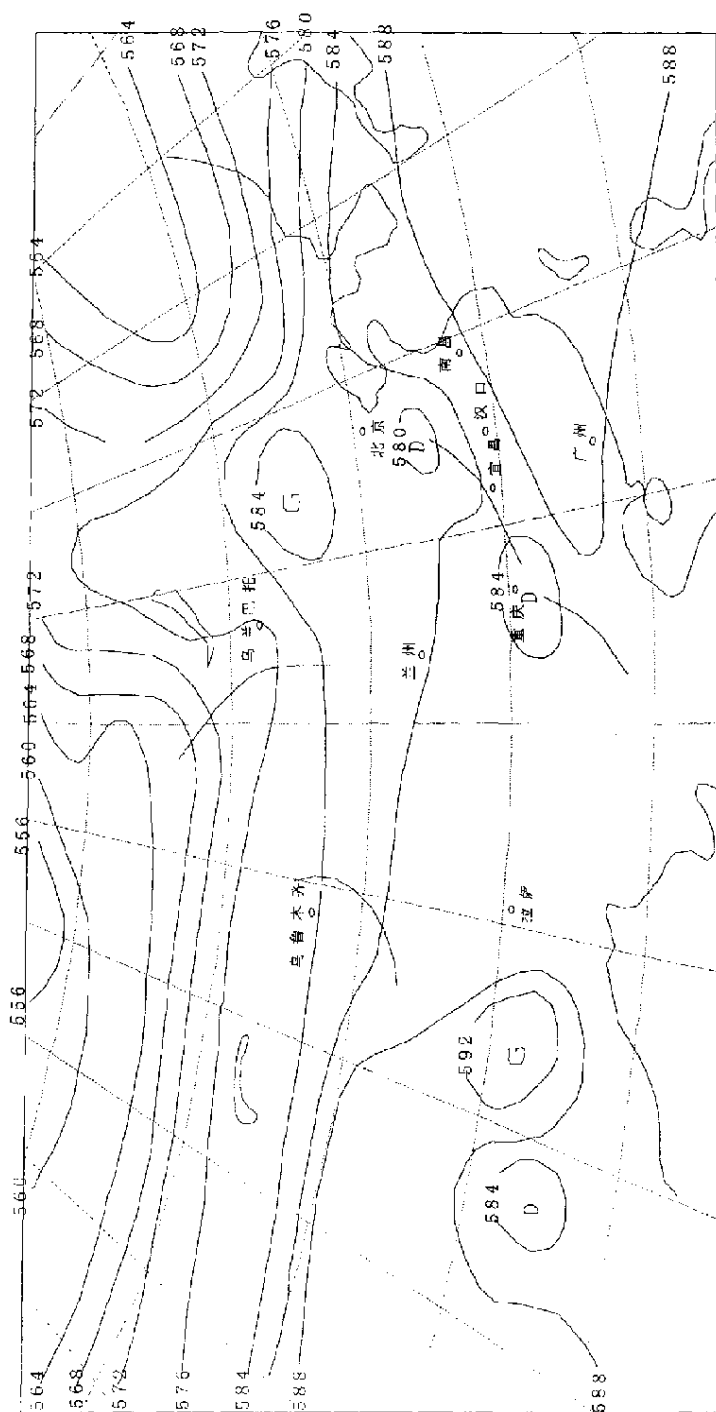


图 5-2 1997 年 7 月 14 日 20 时 500hPa 天气图

5.1.1.3 暴雨成因

“97.7”暴雨范围大，历时长，雨区位置稳定，是由反常大气环流背景下，切变低涡天气系统影响而形成的。这场暴雨出现在梅雨期末，环流形势开始调整，500hPa 中高纬环流形势为二槽一脊型，我国华北平原有一冷高压，副热带高压脊线较常年偏北、西伸脊点偏西，与华北高压对峙，形成东～西向切变线，切变线上不断有低涡东移，13 日～15 日清江流域西南方向的低涡由于受到副热带高压和华北高压的阻挡，移动缓慢，在流域上空持续了近 2 天，低涡东南面的西南气流和副高西南面的东南气流源源不断地将南方的暖湿空气输送到清江流域，巴尔喀什湖大槽不断分裂小槽南下，带来一股股的冷空气，冷暖空气在流域上空长时间交汇，造成了清江流域的大暴雨。7 月 14 日 20 时 5000hPa 天气图见图 5-2。

5.1.2 放大

清江流域的暴雨资料仅 40 余年，所掌握的暴雨样本容量不大。“97.7”暴雨中心花场站 3 日雨量仅 363.4mm，(咸丰县的忠堡站最大 3 天雨量达 557.8mm)不是“高效”暴雨，需进行放大。“97.7”暴雨为梅雨锋暴雨，通过对几场梅雨锋暴雨 1 天雨量与西南水汽入流方向代表站贵阳的 3000 米西南风速关系的分析，尚有正相关趋势，如图 5-3 所示。因此，对“97.7”暴雨需进行水汽和动力放大，即对最大 3 天暴雨中的最大 1 天(15 日)，施以水汽风速联合放大，其他两天(13 日、14 日)则只作水汽放大。

(1)水汽放大

因“97.7”暴雨水汽入流方向为西南方向，为减小单站的偶然误差，取“97.7”暴雨区西南方向的桐梓、遵义、恩南、贵阳 4 站为代表站，分别找出各站的持续 12 小时地面代表性露点，再订正至 1000hpa，取 4 站之平均值“97.7”暴雨持续 12 小时 1000hpa 的代表性露点为 $(T_d)_{1000hPa} = 24.6^{\circ}\text{C}$ 。

最大持续 12 小时露点仍取以上 4 站之平均值，依据《贵州省可能最大暴雨图集》(贵州省可能最大暴雨编制办公室，1978.12)并审查了 1977 年以来系列中的最大露点值，取暴雨西南入流方向的最大值 $(T_d)_{1000hPa} = 27^{\circ}\text{C}$ 。

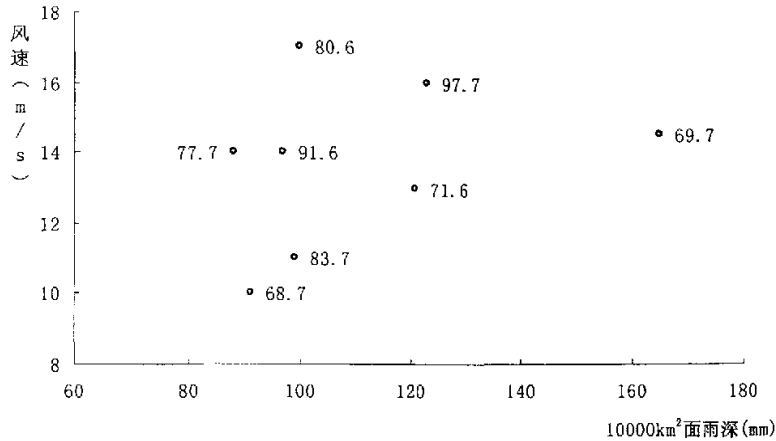


图 5-3 贵阳 3000m 高空西南风速与一致区内 10000km² 日面雨量关系

暴雨区的海拔高度大约为 1000m~1200m，则水汽放大系数由下式计算得 $k_1=1.28$ 。

$$k_1 = \left(\frac{W_M}{W_{典}} \right)_{1000M} \quad (5-1)$$

式中 W ——可降水。

(2)水汽风速放大

水汽风速放大系数按下式计算得 $k_2=1.56$ 。

$$k_2 = \frac{W_M \cdot V_M}{W_{典} \cdot V_{典}} \quad (5-2)$$

式中 V ——风速。

V_M 取贵阳站 3000m 梅雨期的连续两个观测时间平均最大西南风速，从 1959 年~1997 年资料中选取得 $V_M=19.5\text{m/s}$ 。 $V_{典}$ 取贵阳站 3000m “97.7”暴雨期间及前夕的连续两个观测时间的平均西南风最大值为 $V_{典}=16\text{m/s}$ 。

5.1.3 渔峡口以上流域 24 小时和 3 天 PMP 估算

根据“97.7”暴雨最大 3 天(13 日~15 日)逐日等值线图，计算出渔峡口以上流域逐日面雨量，对其中最大 1 天(15 日)进行水汽风速联合放大，其余两天(13 日、14 日)进行水汽放大，并考虑 1 天雨与 24 小时雨的关系，估算得渔峡口

以上流域 24 小时和 3 天的可能最大暴雨分别为 159.2mm 和 340.2mm。

时程分配采用“97.7”暴雨渔峡口以上流域面雨量的时程分配方式。

5.2 暴雨移置法估算 PMP

5.2.1 “69.7”暴雨概述^[47]

“69.7”暴雨发生在梅雨后期,自7月10日开始至16日结束,历时7天之久。该场暴雨分为10日~12日和13日~16日两个阶段。所要移置的是10日~12日暴雨,这段暴雨主要集中在11日。3天雨量图呈东西向带状分布,在该东西向的雨带中有两个200mm以上的暴雨中心区,一个位于江汉平原,长江中游支流沮水流域;另一个位于清江下游五峰县清水湾站,11日雨量达343.4mm,10日~12日,3天雨量为395.1mm,这个200mm等雨量线跨越清江至澧水、沅水上游呈东北西南向带状分布如图5-4所示。这场暴雨首先发生在清江上游,然后自西向东移动,致使清江发生全流域性洪水,渔峡口水文站和长阳水文站出现有记录以来的最大洪水,洪峰流量分别为 $11900\text{m}^3/\text{s}$ 和 $18900\text{m}^3/\text{s}$ 。形成这场暴雨的500hPa环流形势为双阻型梅雨形势,在贝加尔湖西部和东部库页岛附近分别为高脊,从贝加尔湖东南部经蒙古有一东北—西南向低压槽伸至江淮流域西北部,环流形势稳定,西风带有小槽东移。西太平洋副高脊线位于 23°N 附近,其西缘的西南气流与孟加拉湾低槽前的西南气流将暖湿气流输送至长江流域上空,在长江中游干流南岸到中下游江淮流域与北方来的冷空气构成辐合带,造成东北西南向大片雨区。形成这次暴雨的主要天气系统为切变低涡,见图5-5。清水湾暴雨即拟移置到渔峡口以上流域的暴雨。

5.2.2 “69.7”暴雨移置的可能性分析

以下从三方面论证移置“69.7”清水湾暴雨到渔峡口以上流域的可能性。

(1)降水气候背景分析

“69.7”暴雨中心清水湾最大3日雨量为395.1mm,与渔峡口以上地区相比,咸丰县忠堡站最大3日雨量为577.8mm(1983年7月),恩施为347.9mm(1962年7月),花场363.4mm(1997年7月),可见,渔峡口以上流域已发生了清水湾“69.7”最大3日点雨量这种量级的暴雨。再从“69.7”清水湾暴雨发生地区与渔峡口以上地区降雨气候背景分析,两地的多年平均年雨量(分别为1890和2000余mm);暴雨日数(分别为6.3天和7.3天);年最大24小时点暴雨均值(分别为100mm~

110mm 和 100mm~120mm), 年最大 3 日点暴雨均值(分别为 140mm~160mm 和 140mm~150mm)都比较接近。两地暴雨集中的季节均为 6~7 月。综上所述, 从降雨的气候背景上看, “69.7” 清水湾暴雨是有可能发生在渔峡口以上地区的。

(2)天气形势分析

“69.7” 清水湾暴雨是梅雨锋暴雨, 影响系统为切变低涡。6.7 月间, 渔峡口以上地区暴雨的天气系统也主要是切变低涡类。例如 1983 年 7 月发生在清江支流忠建河的暴雨就是由切变低涡系统形成。此外还有“91.7”、“89.7”、“97.7” 渔峡口以上的暴雨也属此类。因此, 形成“69.7” 清水湾暴雨的天气系统完全可以发生在渔峡口以上地区。

(3)地形条件比较

清水湾暴雨区平均海拔高程为 800m~1000m, 渔峡口以上流域中部地区平均海拔高程为 1000m~1200m, 相差不远。清水湾暴雨区与渔峡口以上地区同属鄂西南山地, 没有特别突出的大型地形障碍, 而且在进行暴雨移置时仅移置由天气系统形成的雨量, 简称暴雨的辐合分量。

综上所述, 将“69.7” 清水湾暴雨移到渔峡口以上地区是可能的。

5.2.3 “69.7” 暴雨移置辐合分量的计算

实测降雨量是由两部分组成: 一部分由天气系统引起的降水量, 称为暴雨的辐合分量; 另一部分是由于地形的增幅作用增加(或减少)的降水量, 称为暴雨的地形分量。移置“69.7” 暴雨时, 需要扣除暴雨的地形分量, 只移置暴雨的辐合分量。从实测暴雨中分离出暴雨辐合分量和地形分量的方法有两种, 一种是根据大气热力学和动力学方程组直接计算的理论方法, 另一种是对山区和平原区暴雨进行对比分析的经验统计方法。在此使用后一种方法。

(1)24 小时和 3 天暴雨平均地形增强因子计算。

多年平均 Δt 时间某点 (x, y) 上的地形增强因子按下式计算:

$$\bar{f}_{\Delta t}(x, y) \approx \frac{\bar{R}_{\Delta t}(x, y)}{R_{0\Delta t}} \quad (5-3)$$

式中 $\bar{R}_{\Delta t}(x, y)$ ——点 (x, y) 上 Δt 时段实测雨量的多年平均值;

$\bar{R}_{0\Delta t}$ —— Δt 时段的平均暴雨辐合分量, 可用无明显山脉地区的实测暴雨均值近似代替。

利用我国年最大 24 小时和 3 天点暴雨均值等值线图和(5-3)式即可求得 24 小时和 3 天的 $\bar{f}_{\Delta}(x, y)$ 。具体计算时, 先将暴雨一致区内布上网格, 清江流域为重点地区, 布上细密网格, 求各网格点的 $\bar{f}_{\Delta}(x, y)$ 值。 $\bar{R}_{0\Delta}$ 选择水汽西南入流方向鄂、黔通道上地形不显著地区的雨量。图 5-6 为 24 小时暴雨平均地形增加因子。

(2)暴雨辐合分量的计算。

“69.7”暴雨的 1 天和 3 天暴雨辐合分量按下式近似计算:

$$R_{0\Delta}(x, y) \approx \frac{R_{\Delta}(x, y)}{\bar{f}_{\Delta}(x, y)} \quad (5-4)$$

式中 $R_{0\Delta}(x, y)$ ——“69.7”暴雨在 (x, y) 点上的辐合分量;

$R_{\Delta}(x, y)$ ——“69.7”暴雨在 (x, y) 点的实测值。

5.2.4 放大

考虑到“69.7”暴雨不是“高效”暴雨, 需进行放大。同“5.1.2”节的理由, 对“69.7”暴雨需进行水汽和动力放大, 即对最大 3 天暴雨中的最大 1 天, 施以水汽风速联合放大, 其他两天则只作水汽放大。

(1)水汽放大

取“69.7”暴雨区西南方向的桐梓、遵义、恩南、贵阳 4 站为代表站, 分别找出各站的持续 12 小时地面代表性露点, 再订正至 1000hpa, 取 4 站之平均值得“69.7”暴雨持续 12 小时 1000hpa 的代表性露点为 25.1℃。最大持续 12 小时露点同“5.2”节中的最大露点值 $(T_d)_{1000hPa} = 27^\circ\text{C}$ 。

清水湾暴雨区的海拔高度大约为 800m~1000m, 水汽放大系由式(5-1)计算得 $k_1 = 1.22$ 。

(2)水汽风速放大

水汽风速放大系数按式(5-2)计算, 其中 $v_{\text{真}}$ 取贵阳站 3000m “69.7”暴雨期间及前夕的连续两个观测时间的平均西南风最大值为 14.5m/s, 计算得 $k_2 = 1.64$ 。

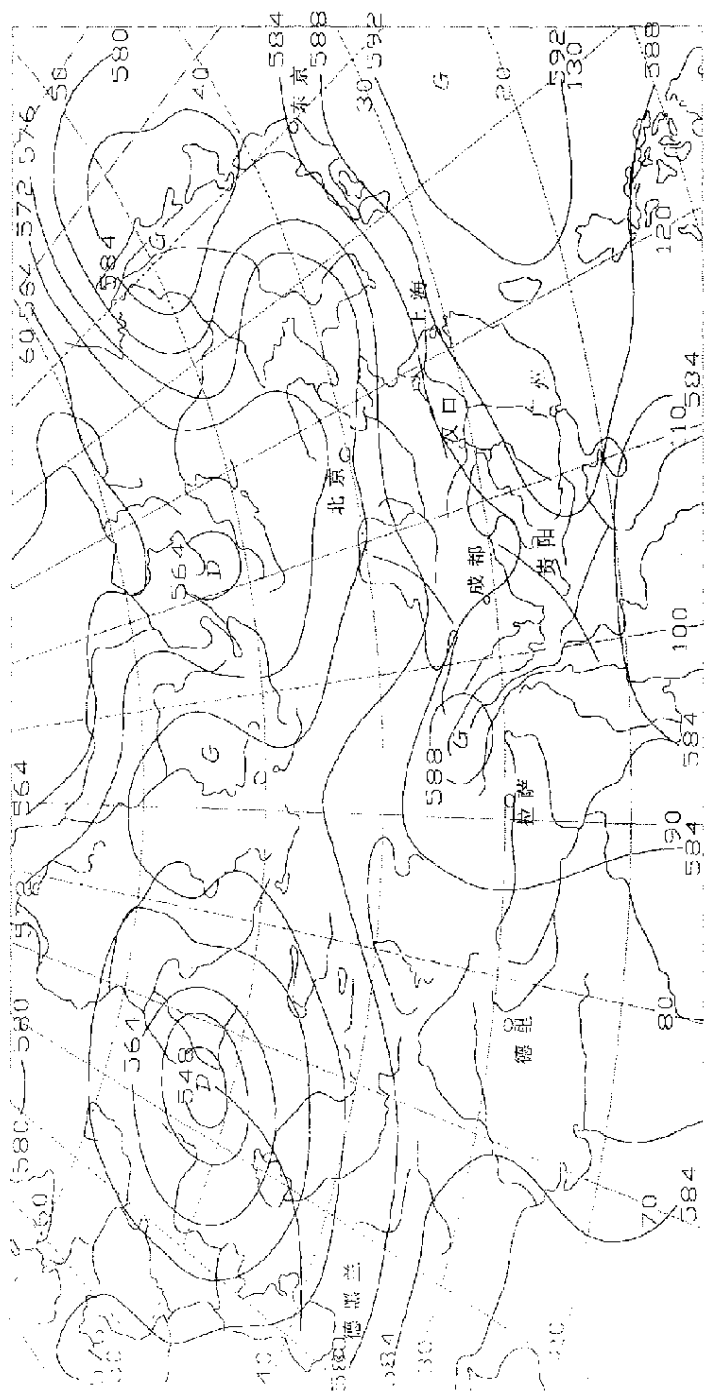


图 5-5 1969 年 7 月 11 日 08 时 500hPa 天气图

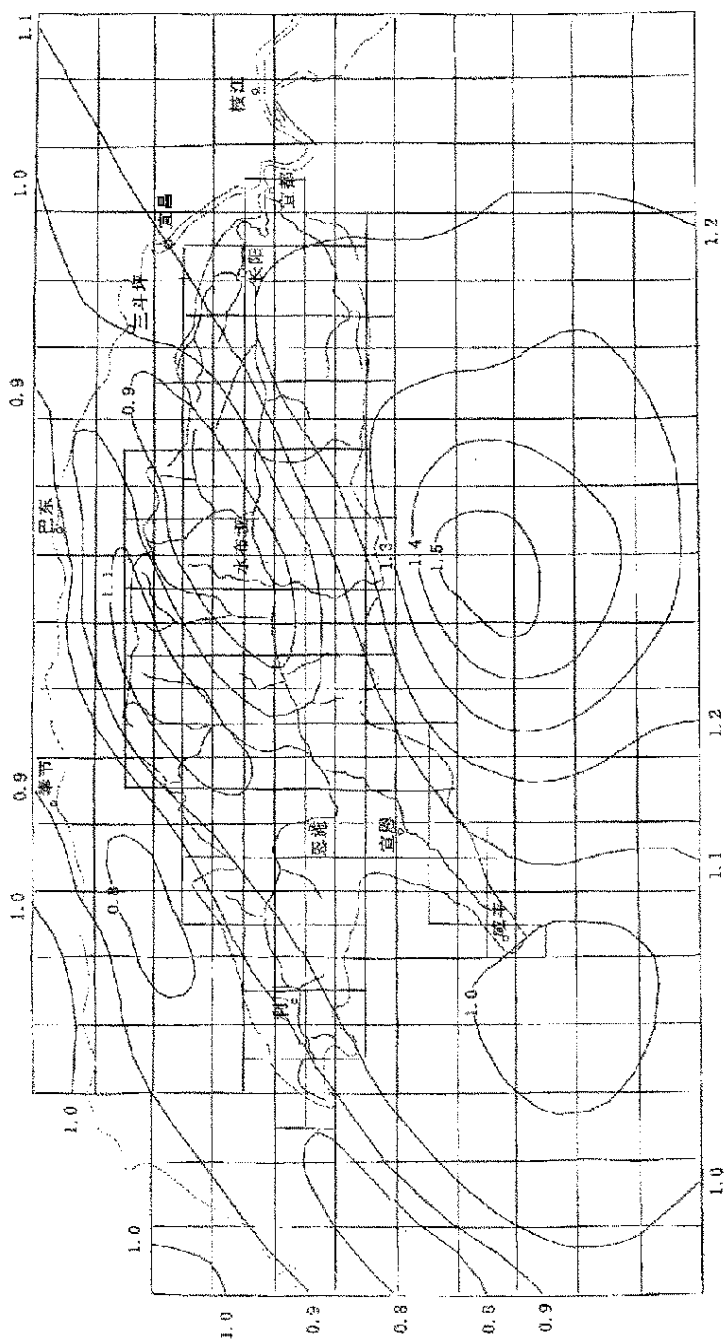


图 5-6 24 小时暴雨平均地形增强因子

5.2.5 移置“69.7”暴雨(移置方案 I)

5.2.5.1 移置位置的确定

将经过放大的“69.7”暴雨辐合分量等值线图移置到渔峡口以上地区，按照雨区长轴方向与水汽入流方向基本一致，并使渔峡口以上的降水为最大的原则，将放大的“69.7”1天暴雨辐合分量的雨图逆时针旋转 15° ，暴雨中心移至干流太阳沱至野三河之间，3天暴雨辐合分量的雨图逆时针旋转 17° ，暴雨中心移至恩施至野三河区间。

5.2.5.2 地形调整

地形调整按下式计算

$$PMP_{\Delta t}(x, y) = \bar{f}_{\Delta t}(x, y) \cdot PMP_{0\Delta t}(x, y) \quad (5-5)$$

式中： $PMP_{\Delta t}(x, y)$ ——构成渔峡口以上流域 Δt 时段 PMP 的各网格点 (x, y) 上的相应雨量。

$\bar{f}_{\Delta t}(x, y)$ ——渔峡口以上流域网格点 (x, y) 上 Δt 时段的平均地形增强因子。

$PMP_{0\Delta t}(x, y)$ ——放大的“69.7”暴雨辐合分量移入渔峡口以上地区后在网格点 (x, y) 上的值。

渔峡口以上流域1天和3天的可能最大暴雨由下式计算：

$$PMP_{\Delta t} = \frac{1}{n} \frac{1}{m} \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m PMP_{\Delta t}(x, y) \quad (5-6)$$

经对“69.7”暴雨中心区10个站最大1天与最大24小时雨量关系的分析，得到 $H_{24h} = 1.14H_{1d}$ ，则清江渔峡口以上流域24小时和3天的PMP分别为265.5mm和330.6mm。

PMP时程分配采用“69.7”型，利用暴雨中心区5个站的6小时时段雨量的时程分配之平均值分配3天面雨量。

5.2.6 移置“69.7”暴雨(移置方案 II)

5.2.6.1 放大的“69.7”暴雨辐合分量概化雨图的绘制

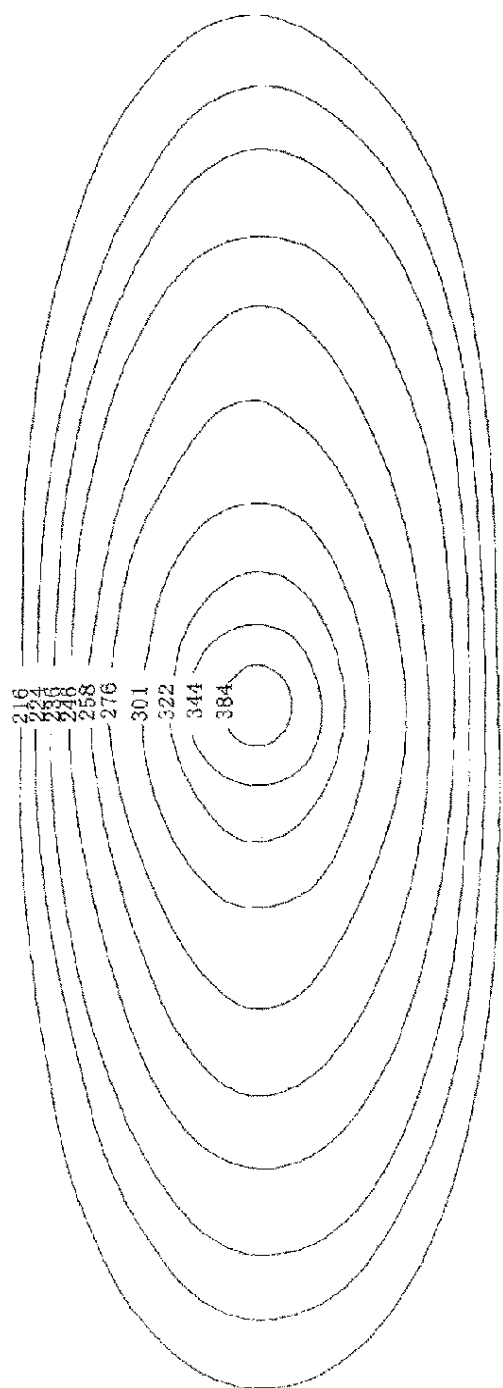
绘制概化雨图需先分析“69.7”暴雨形状比率（暴雨等值线概化为椭圆的长

轴与短轴之比)与面积的关系和“69.7”暴雨的时面深关系。“69.7”暴雨形状比率与面积的关系图(图略),反映了暴雨面积越小,图形越圆反之越扁的特点。根据“69.7”暴雨形状比率与面积的关系及施以水汽风速放大的“69.7”暴雨辐合分量的时面深关系,绘制了1天和3天的“69.7”型可能最大暴雨辐合分量概化雨图,图5-7为1天的概化雨图,3天概化雨图与图5-7类似。

5.2.6.2 渔峡口以上流域可能最大暴雨估算

将“69.7”概化1天暴雨图及3天暴雨图置于渔峡口以上流域中部,长轴方向与“69.7”雨图一致并使面雨量最大。按(5-5)式对1天和3天概化雨图分别进行地形调整,并考虑1天雨与24小时雨的关系,算得渔峡口以上流域24小时和3天的PMP分别为295.2mm和351.0mm。

面雨量的时程分配方法同移置方案I。



比例尺:1:1000000

图 5—7 “69.7”型可能最大 1 天辐合暴雨概化图

5.3 用时面深概化法估算 PMP

选择设计流域及其邻近气候条件相似地区的大暴雨, 对其进行放大、移置、外包来估算设计流域 PMP 的一套方法称时面深概化法。

5.3.1 暴雨一致区的确定^[48]

根据已有的气候区划, 暴雨区划资料, 对清江流域及其附近地区暴雨气候特征的分析, 并考虑地形特点, 含清江流域的暴雨一致区范围大致为清江、澧水中上游、沅水上游及乌江流域东部。将一致区内出现的暴雨作为估算可能最大暴雨的基础。

5.3.2 暴雨的选用

渔峡口的大洪水大多发生在梅雨期中, 而且前六位的洪峰或洪量均由梅雨期暴雨形成, 所以选用暴雨一致区中梅雨期大暴雨作为进行时面深关系外包的单元暴雨, 所选暴雨有“68.7”, “69.7”, “71.6”, “97.7”等 10 多场暴雨, 暴雨简况见表 5-3, 这些暴雨的中心均在一致区内, 雨区呈东~西向或东北~西南向带状, 水汽入流方向均为西南方向。

5.3.3 暴雨辐合分量的时面深分析

对所选的暴雨按(5-4)式求得各网格点上的最大 1 天和 3 天暴雨的辐合分量, 再绘制各场暴雨的最大 1 天和 3 天的暴雨辐合分量等值线图(图略)。

在对各场暴雨的辐合分量进行时面深分析时, 对于有两个暴雨中心的图形, 只着重考虑其中一个主要的, 并只量取闭合等雨量线包围的面积, 限于资料条件, 此处只分析 1 天和 3 天的面深关系。

表 5-3 用作时雨深外包的暴雨简况

暴雨日期	暴雨中心区位置	中心雨量						主要暴雨区形状
		最大 1 天			最大 3 天			
		站名	雨量(mm)	日期	站名	雨量(mm)	日期	
1968. 7. 12-17	清江中游南岸至沅水澧水上游	河坪 红土	155 152	14 日 14 日	河坪 清水湾	253 243	13-15 日 13-15 日	东~西向带状
1969. 7. 10-12	清江下游南岸至澧水上游	清水湾	343	11 日	清水湾	395	10-12 日	东北东~西南西向带状
1971. 6. 9-11	乌江下游右岸支流、熊江下游至清江上游	见天坝 碾厂坪	189 168	10 日 10 日	晓关 碾厂坪	220 252	9-11 日 9-11 日	东北~西南向带状
1977. 7. 16-18	清江上游至中游南岸	河坪 恩施	279 137	17 日 17 日	河坪 恩施	376 166	16-18 日 16-18 日	东~西向带状
1980. 6. 16-18	清江上游至中游北岸	三里坝	169	16 日	二里坝	258	16-18 日	东北东~西南西向带状
1983. 7. 4-6	澧水上游至清江中游	大坪 (澧水) 花果坪	185 139	4 日 4 日	湾潭 花果坪	419 275	4-6 日 4-6 日	东~西向带状
1989. 7. 8-10	清江上游沅水上游	恩施	169	10 日	恩施 大河坝	205 214	8-10 日 8-10 日	东北~西南向带状
1991. 5. 30-7. 2	澧水、沅水上游至清江中、下游南岸	五里坪 (澧水)	191.5	30 日	五里坪	340	6. 30-7. 2	东北东~西南西向带状
1991. 7. 4-6	澧水上游至清江中下游南岸	凉水口	215.5	4 日	凉水口 走马坪	419 403	4-6 日 4-6 日	块状
1997. 7. 11-16	清江中上游	花场	239.5	15 日	花场	363.4	13-15 日	东~西向带状

5.3.4 放大、外包

5.3.4.1 放大

考虑如“5.1.2”节中同样的理由，采用对最大一天作水汽风速放大其他两天只进行水汽放大。各场暴雨的水汽放大和水汽风速放大系数见表 5-4。因采用的是多场暴雨，各场暴雨的中心位置不同，在进行水汽放大时，可降水为地面（Ps）至大气顶的值。

表 5-4 各场暴雨的放大系数

暴雨	水汽放大系数 k_1	水汽风速放大系数 k_2
1968.7	1.19	2.58
1969.7	1.22	1.64
1971.6	1.26	1.97
1977.7	1.27	1.77
1980.6	1.36	1.56
1983.7	1.12	1.98
1989.7	1.29	2.10
1991.6	1.19	1.66
1997.7	1.28	1.56

5.3.4.2 外包

图 5-8 和图 5-9 分别为经过水汽风速放大的 1 天和 3 天暴雨面深关系的外包线。最大 1 天暴雨的外包线就是“69.7”暴雨的面深关系。最大 3 天面深关系的外包线在 15000km² 以下是“97.7”暴雨的，在 15000km² 以上是“69.7”暴雨的。

5.3.5 可能最大暴雨概化雨图的绘制

外包线上某一面积某一历时的数值只是面平均降水量。面平均降水量在面上如何分布，一般有两种方法，一种是概化暴雨图形，一种是按实测典型暴雨的面分布同倍比放大。一般多采用第一种方法。

在对没有明显地形影响地区的许多大暴雨的等值线图进行分析后发现，这些暴雨图形有一个共同特点：其形状多为一组同心椭圆，形状可用形状比率和雨轴方位表示^[21]。

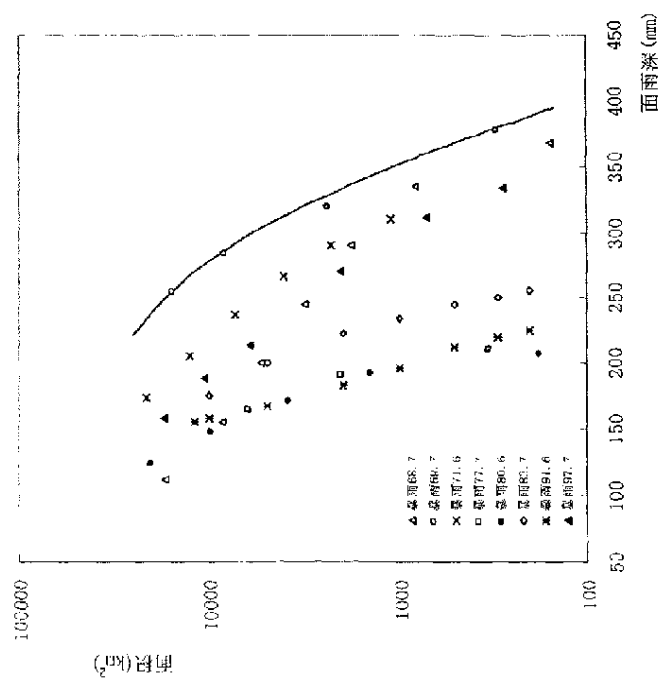


图 5-8 经水汽风速放大的 1 天暴雨辐合分量面~深关系外包线

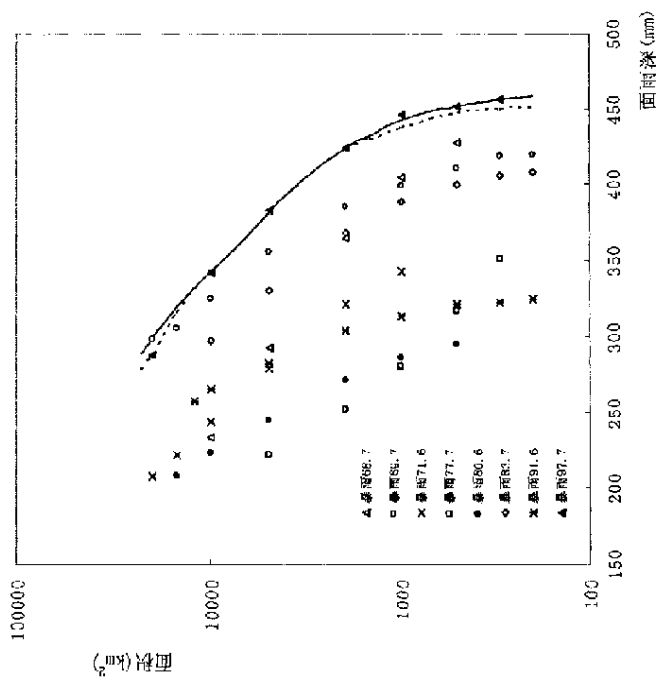


图 5-9 经水汽风速放大的 3 天暴雨辐合分量面~深关系外包线

5.3.5.1 暴雨形状比率和面积关系分析

由图 5-8 和图 5-9 知,最大 1 天辐合暴雨面深关系外包线基本上是“69.7”暴雨的,最大 3 天辐合暴雨面深关系外包线基本上是“97.7”暴雨的,因此最大 1 天和 3 天可能最大暴雨概化雨图的(不含地形雨)形状比率与面积的关系分别采用“69.7”和“97.7”暴雨的,参考我国南京水文水资源研究所的工作,取 10000km^2 面积的雨形的形状比率为 3.0(长轴与短轴之比)^[21]作为绘制概化暴雨雨形的依据。

5.3.5.2 可能最大暴雨概化图的绘制

绘制 1 天可能最大暴雨辐合分量概化图形所需的面深关系,采用图 5-8 中 1 天暴雨的外包线,因这条外包线就是“69.7”暴雨的。对于 3 天可能最大暴雨概化图的绘制,由于面~深外包线有“97.7”暴雨,又有“69.7”的,故作概化图时需采用图 5-9 中虚线所示的面深关系,这条虚线是根据经验试错得到。

根据以上分析的暴雨形状比率和面积的关系、1 天和 3 天暴雨的面深关系求得各等雨量线的形状、等雨量线的数值及其相应的面积,据此绘制了 1 天和 3 天可能最大辐合暴雨概化图,其图形和图 5-7 相似。

5.3.6 渔峡口以上流域 24 小时和 3 天 PMP 估算

5.3.6.1 地形调整

将概化雨图置于渔峡口以上流域中部,长轴与纬线的夹角为 20 度(与梅雨型暴雨长轴方向相近)以使渔峡口以上流域面平均雨深最大。按“6.5.2”节方法,对置于流域上的概化雨图进行地形订正,即得渔峡口以上流域 1 天和 3 天可能最大暴雨,再将 1 天可能最大暴雨转化为 24 小时可能最大暴雨。

5.3.6.2 可能最大暴雨时雨型的确定

可能最大暴雨的时程分配,以对所选实测各场暴雨时雨型的分析为基础。将各场暴雨的时雨型和其对应的渔峡口洪水过程线比较,选择对形成洪水最不利的时雨型。经分析,选择“69.7”、“71.6”和“97.7”暴雨的时雨型(见图 5-10)进行可能最大洪水的时程分配。这种时程分配的特点是:最大 24 小时雨量在中间,在最大 24 与小时雨量中,最大的二个 6 小时雨量在中间。这种时雨型不仅符合实际,而且也符合国际的习惯做法。

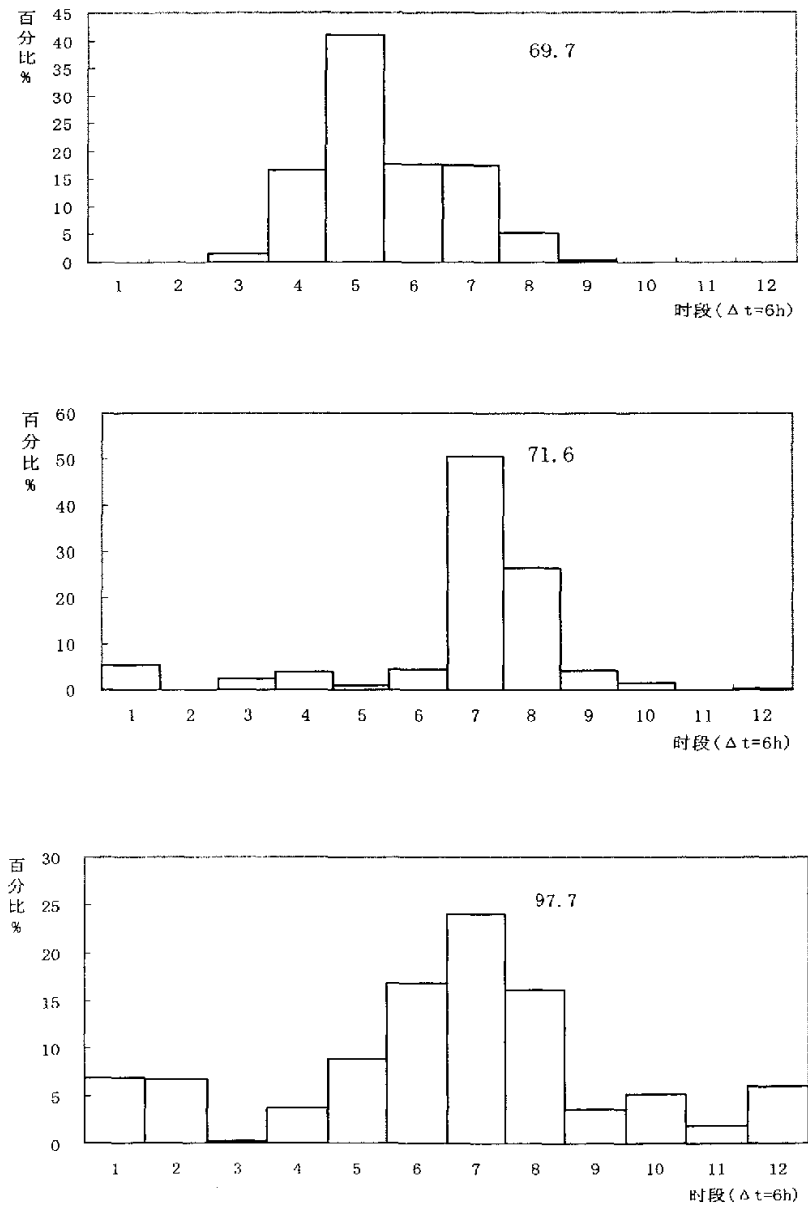


图 5-10 清江渔峡口以上流域面暴雨时雨型

5.4 暴雨组合

根据第 4.2.3 节的分析,渔峡口站的 PMF 过程为主锋在前次峰在后的双峰型洪水过程。为此,尚需在已求得的 3 天 PMP 后组合一场一般暴雨。暴雨组合以对形成渔峡口主峰较大的双峰型洪水过程的暴雨分析为基础,按暴雨过程相似性原理和连续性原理,拟定以下暴雨组合方案:

分别以形成“69.7”、“97.7”洪水的暴雨序列为基础,按暴雨过程相似性原理,用 1968 年 7 月 14 日~15 日暴雨分别替换 1969 年 7 月 13 日~14 日暴雨和 1997 年 7 月 16 日~17 日。

为论证 3 天可能最大暴雨之后组合 1968 年 7 月 14 日~15 日暴雨的可能性,只需论证 1969 年 7 月 13 日~14 日、1997 年 7 月 16 日~17 日与 1968 年 7 月 14 日~15 日天气形势相似即可。

表 5-5 列出这三场雨的天气形势特点,图 5-11、图 5-12 为“69.7”和“68.7”这两场雨的 500hpa 天气形势图,可以看到,这三场雨均为梅雨后期的暴雨,天气形势相似,因此,组合方案是符合相似性原理的。

表 5-5 天气形势比较

项目 暴雨	500hpa 副高脊	影响系统				水汽 入流	雨带	梅雨期
		500hpa	700hpa	850hpa	地面			
69.7.13~14	23°,20°N	蒙古槽	E~W 向 切变	NE~SW 向切变	冷锋	西南	NE~SW	6.23~ 7.20
97.7.16~17	23°,22°N	蒙古槽	NE~SW 向切涡	NE~SW 向切涡	冷锋	西南	NE~SW	6.29~ 7.23
68.7.14~15	24°,23°N	蒙古槽	NE~SW 向切涡	NE~SW 向切涡	冷锋	西南	NE~SW	6.24~ 7.19

表 5-6 列出形成渔峡口站 PMF 的六种暴雨序列。“97.7”当地暴雨放大中时序 3 (15 日) 是水汽风速联合放大,时序 4、5 用“97.7”实际降水。用移置法推算的 PMP 有两个方案,一个是移置“69.7”暴雨,一个是移置“69.7”概化暴雨,它们分别与 1968 年 7 月 14~15 日暴雨组合。用时面深概化法推算的 PMP 有三个方案,一个是“69.7”时雨型,一个是“71.6”时雨型,还有一个是“97.7”时雨型,它们后面也分别组合 1968 年 7 月 14 日~15 日暴雨。

表 5—6 形成渔峡口站 PMF 的暴雨序列 (mm)

方案 \ 时序 (24h)		1	2	3	4	5
		水汽放大	水汽风速放大	水汽放大	68.7.14	68.7.15
当地暴雨放大		“97.7”暴雨 69.8 (13)	111.1 (14)	159.2 (15)	17.9 (16)	9.9 (17)
组合 68.7 暴雨	移置	“69.7”暴雨 14.7	265.4	50.5	59.9	55.0
		“69.7”概化暴雨 12.6	295.2	43.2		
	外包	“69.7”时雨型 13.9	295.2	47.6		
		“71.6”时雨型 54.0 ^①	295.2	7.5 ^②		
		“97.7”时雨型 3.3 ^③	295.2	58.2 ^④		

注：①30h 的雨，②18h 的雨，③6h 的雨，④42h 的雨。

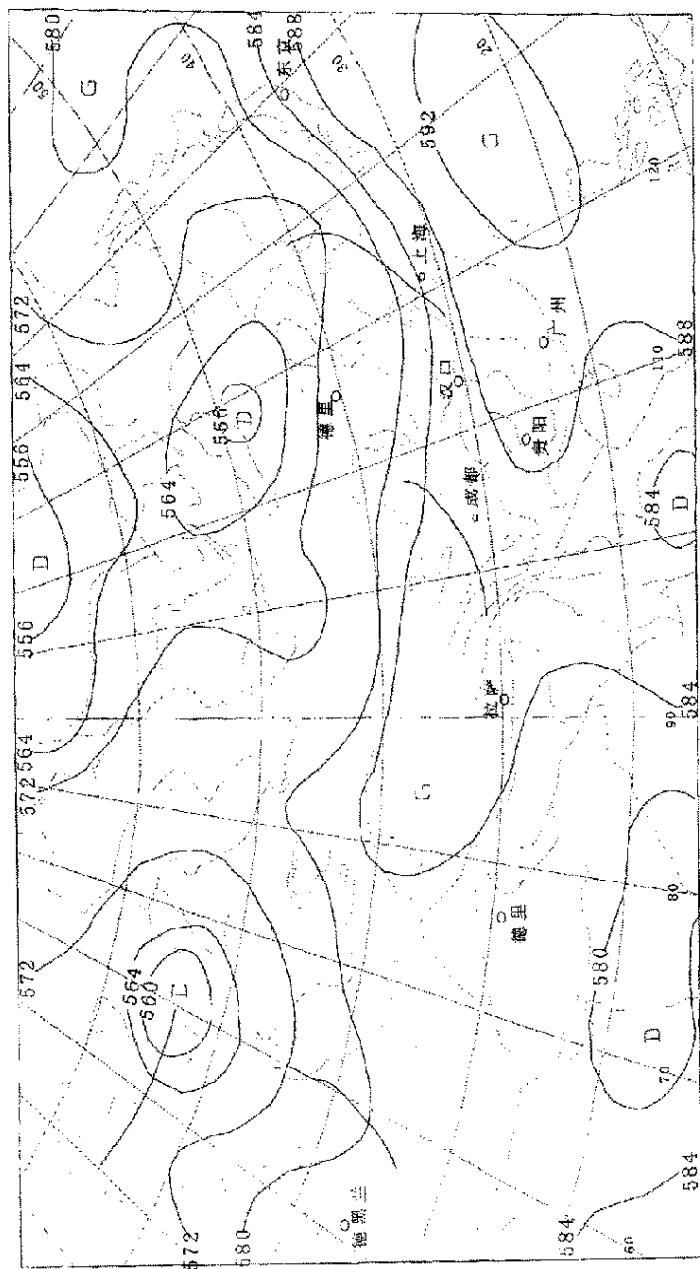


图 5—11 1969 年 7 月 13 日 08 时 500hPa 环流形势图

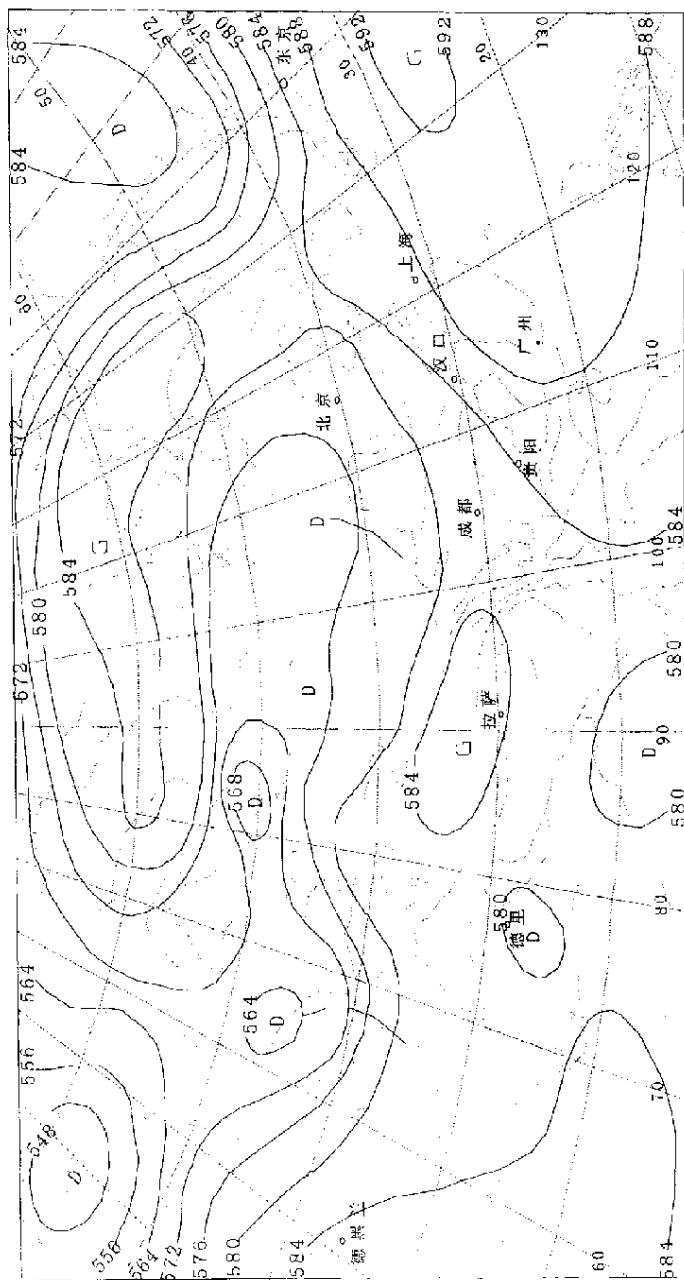


图 5-12 1968 年 7 月 14 日 08 时 500hPa 环流形势图

第六章 水布垭坝址 PMF 估算

6.1 产汇流方案及其精度

产汇流方案采用湖北省宜昌水文水资源勘测局 1993 年编制的“清江流域渔峡口站洪水预报方案”。此方案将流域分为恩施以上(2928km²)和恩施至渔峡口(8978 km²)两个单元,分别给出各区的降雨径流关系和经验单位线。恩施至渔峡口的河道汇流系数采用马斯京干法试错确定。单位线时段长 Δt 取 6 小时。

湖北省宜昌水文水资源勘测局按《水文情报规范》评定标准,对产、汇流方案进行评定,评定采用 1971~1991 年资料。经评定,产流方案恩施站以上合格率为 82.7%,恩施至渔峡口区间合格率为 78.0%。汇流方案,恩施站的合格率为 80.8%,渔峡口站合格率为 87.5%。洪峰时间合格率为 68.8%,水位合格率为 100%。

6.2 产、汇流计算

为减小产流及汇流计算过程中的误差,此处用可能最大暴雨的净雨与“69.7”净雨(或“97.7”净雨)的差值过程进行计算。

产流计算

对可能最大暴雨和“69.7”、“97.7”暴雨分别求其净雨过程,再求可能最大暴雨与典型暴雨的净雨差值过程。

恩施以上和恩施至渔峡口区间分别采用各自的降雨径流关系,恩施以上 $I_w=80\text{mm}$, $K=0.93$,恩施至渔峡口区间 $I_w=80\text{mm}$, $K=0.94$ 。 P_a 按下式计算:

$$P_a = K \cdot (P_t + P_{at}) \quad (6-1)$$

可能最大暴雨的前期雨量采用 1969 年 7 月 10 日以前半个月的实测降雨,按上式算得。由降雨径流关系图得到恩施以上和恩施至渔峡口区间的净雨过程。

汇流计算

用各区经验单位线推流,将恩施的出流过程演算至渔峡口,再与恩~渔区间的推流过程叠加,得到渔峡口的流量差值过程,加上“69.7”(或“97.7”)渔峡

口实测流量过程即得 PMF 过程，再按水布垭与渔峡口面积比 2/3 (0.941)，将渔峡口各方案的可能最大洪峰转化为水布垭坝的可能最大洪峰，按面积比 (0.912) 转化洪量。

清江渔峡口以上流域 PMP 及水布垭坝址的 PMF 成果如表 6—1 所示。

表 6—1 清江水布垭 PMF 成果表

方 案			PMP		PMF				备注
			24h (mm)	3d (mm)	Qm (m ³ /s)	W ₂₄ (亿 m ³)	W ₇₂ (亿 m ³)	W ₁₆₈ (亿 m ³)	
1	放大	放大本地“97.7”	159.2	340.1	18600	12.93	29.98	42.37	组合 “68.7”
2	移置	移置“69.7”	265.6	330.6	21200	15.11	29.20	44.02	
3	移置	移置“69.7”概化	295.2	351.0	23200	16.45	31.47	46.07	
4	外包	“69.7”时雨型	295.2	356.7	23500	16.73	32.14	46.82	
5	外包	“71.6”时雨型	295.2	356.7	24300	16.29	32.20	46.16	
6	外包	“97.7”时雨型	295.2	356.7	22600	15.66	30.78	46.63	

第七章 PMP 与 PMF 成果及其合理性分析

7.1 PMP 与 PMF 成果

通过以上分析计算, 将各方案的 PMP、PMF 成果列入表 6-1 中, 由表 6-1 可见, PMP 成果变化范围是:

24h: 159mm~295mm

3d: 331mm~357mm

24 小时是本地暴雨放大估算的最小, 概化外包估算的最大。3 天是移置“69.7”估算的最小, 概化外包估算的最大。

PMF 变化范围是:

Q_m : 18600m³/s~24300m³/s

W_{24} : 12.93 亿 m³~16.73 亿 m³

W_{72} : 29.20 亿 m³~32.20 亿 m³

W_{168} : 42.37 亿 m³~46.82 亿 m³

本地暴雨放大估算的 PMF 洪峰洪量均较小, 概化外包估算的 PMF 与雨量时程分配关系密切, 相同的 PMP, 不同时雨型产生的峰量不一样。

由表 6-1 可看到, 方案三和方案四数值比较接近, 推荐该 PMF 成果供设计部门使用, 其可能最大洪水过程线如表 7-1 和图 7-1。

7.2 合理性分析

7.2.1 从方法和资料方面对成果的评价

因渔峡口的大洪水是由梅雨雨带中的暴雨所致, 而“69.7”、“97.7”暴雨是此种类型的实测大暴雨, “97.7”暴雨中心就在清江中上游, “69.7”清水湾暴雨中心区在清江下游, 采用放大“97.7”暴雨、移置“69.7”暴雨的方法可行; 采用含清江流域的暴雨一致区内梅雨锋暴雨时面深关系的外包方法也是可行的。

表 7-1 清江水布垭坝址可能最大洪水过程表

时段 $\Delta t=6h$	方案 流量 (m^3/s)	移置 “69.7” 概化雨型 组合 “68.7”	时面深概化 组合 “68.7” “69.7” 时雨型
1		875	934
2		7430	7520
3		14100	14300
4		23200	23500
5		20300	20500
6		17700	18200
7		15800	16200
8		12500	12900
9		9600	9800
10		7590	7800
11		6330	6550
12		5560	5750
13		5470	5650
14		7690	7800
15		9940	10000
16		9120	9180
17		7330	7420
18		6310	6350
19		5520	5540
20		4360	4370
21		3500	3500
22		2870	2860
23		2420	2410
24		2050	2040
25		1760	1750
26		1520	1510
27		1300	1300
28		1110	1110
29		952	949

估算可能最大暴雨采用的雨量资料充分考虑了 1950 年~2003 年暴雨一致区内的所有大暴雨资料,但实测资料容量仍不够大,尤其是样本中的大暴雨不够多,在极大化计算上,除对三天雨量进行水汽放大外,对其中最大 1 天雨量作水汽风速放大的考虑也是合理的。

考虑到最大 7 天洪量可能跨两个洪峰的特点,在三天可能最大暴雨之后安排了一次一般暴雨过程,这种考虑比较贴近实际情况。产汇流方案虽经制作单位(宜昌水文分站)进行了验证,在估算可能最大洪水时,还利用 “69.7”、“97.7” 暴雨洪水资料作了验证,认为该方案可行。

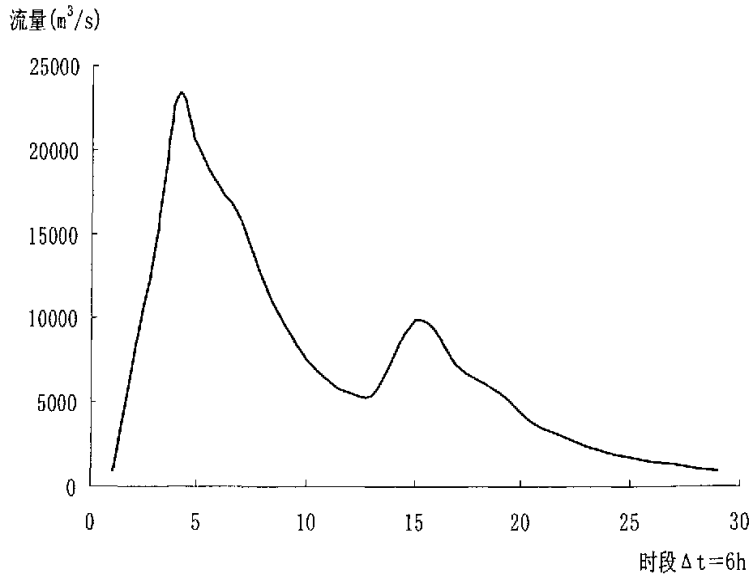


图 7-1 清江水布垭坝址可能最大洪水过程线
(时面深概化“69.7”时雨型)

7.2.2 与“69.7”大水河大暴雨的比较

如前面所述,“69.7”梅雨型大暴雨分为7月10日~12日,13日~16日两个阶段。第一阶段暴雨发生在清江流域和江汉平原,暴雨中心为清江流域的清水湾;第二阶段暴雨发生在大别山区至巢湖地区,暴雨中心为大别山区潜山县大水河站。因为第二段暴雨发生的地区与清江流域不属同一气候区,估算清江渔峡口以上流域可能最大暴雨时,没有考虑这场暴雨。现为了对可能最大暴雨成果作比较分析,将渔峡口以上流域可能最大暴雨与同样面积的7月13日~16日大水河暴雨进行比较。1969年7月13日~16日暴雨中心区位于江淮之间大别山区至巢湖地区,4天雨量等值线图上雨区呈东北~西南向带状分布(图略),200mm大暴雨区主要位于安庆以北,合肥以南,暴雨中心大水河站最大一天482.8mm(7.16),最大三天959.2mm,四天累积雨量1120.1mm。相当渔峡口以上流域面积的面平均雨深如表7-2所示:

表 7-2 “69.7”大水河暴雨与渔峡口以上流域可能最大暴雨

比较表(A=11906km²)

项目\历时	H _{24h} (mm)	H _{3d} (mm)	H _{5d} (mm)	备注
“69.7”大水河暴雨	151	384	537	
PMP	移置概化	295	351	组合“68.7”
	外包	295	357	

由表 7-2 可见，24 小时可能最大暴雨比实测同面积的 24 小时大水河暴雨大，而 3 天和 5 天可能最大暴雨比实测同面积的 3 天、5 天大水河暴雨小，究其原因，在长江下游冷空气的对峙时间一般比清江地区持久，反映在实测暴雨资料上，梅雨期清江大暴雨在一个地区持续时间一般为 2~3 天，而在大水河地区，则可持续 3~5 天之久。因此，大别山区的 3~5 天的长历时暴雨，要比清江的大。

7.2.3 与中国大暴雨时面深记录的比较

因渔峡口站控制的流域面积为 11906km²，故选 10000km² 清江可能最大暴雨与同样面积的中国最大面雨量记录进行比较，见表 7-3。

表 7-3 10000km²面雨深比较表

历时	清江可能最大暴雨	中国
24h	295	435f
		430d
3d	357	940d
		860b

注：中国资料取自王家祁《水文》1985 年第一期；f 表示“75.8”河南暴雨，d 表示“35.7”五峰暴雨，b 表示“63.9”台湾暴雨。

由表 7-3 可见，清江 10000km²的可能最大暴雨小于“35.7”和“75.8”同样面积雨量。由于从现有暴雨分析，“35.7”南北向带状暴雨有热带系统的影响，水汽入流方向为东南方向，且有大地形的影响，“75.8”暴雨是由 7503 号台风转变的热低压形成的，这两场暴雨不可能发生在渔峡口以上，故所得的可能最大暴雨成果小于“75.8”和“35.7”是合理的。

7.2.4 与我国 24 小时可能最大点雨量比较

根据《中国可能最大 24 小时点雨量等值线图》，清江渔峡口以上流域可能最大点雨量自上游 600 余 mm，向下游递增至渔峡口的 800 余 mm。按水汽风速联合放大系数放大“69.7”暴雨中心清水湾 24 小时雨量为 606.3mm，比全国的成果小，但所要推求的是流域的可能最大暴雨，点雨量小于清江 24 小时 PMP 点雨量是合理的。

7.2.5 与我国部分水利工程可能最大暴雨洪水成果的比较

1.与我国可能最大 24 小时暴雨成果的比较

图 7-2 为我国部分水利工程可能最大 24 小时暴雨和集水面积的关系图，与长江流域可能最大暴雨成果比较，水布垭可能最大 24 小时暴雨量处于中部偏上，与全国成果比较，处于中部，成果比较合理。

2.与长江流域部分工程的可能最大洪水比较

由表 7-4 可见，水布垭可能最大洪水的洪峰模数比乌江各枢纽的大而比修水和新安江的小，这是由于在气候背景上，乌江流域的暴雨不及清江流域的大，而位于江西的修水和位于沿海的新安江，会遭到热带天气系统的影响，暴雨比清江流域的强，因此，水布垭可能最大洪水的洪峰模数比乌江各枢纽的大而比修水和新安江的小是合理的。

表 7-4 长江流域部分工程可能最大暴雨、洪水表

河流	枢纽	面积 (km ²)	PMP		PMF				洪峰 模	方法	备注
			1d (mm)	3d (mm)	Q _m (m ³ /s)	W ₂₄ (10 ⁸ m ³)	W ₇₂ (10 ⁸ m ³)	W ₁₆₈ (10 ⁸ m ³)			
乌江	乌江渡	36500	131.1	219.3	22600				0.62	移“707”水汽放大	1974 年八局
乌江	洪家渡	9900	238	394	10900	8.11	19.74	28.87	1.1	移“707”水汽辐合放大	1989 年
乌江	江界河	42306	126.4	218.3	40700	33.0	75.1	108.8	0.96	移“707”水汽效率放大组合“646”	
岷江	紫坪铺	22662	210		12700		13.5		0.56	“647”本地暴雨水汽风速放大	1989 年
修水	柘林	9340	259.8	640.7	25600				2.74	水汽输送并放大本 地暴雨	1977 年江西院
新安江	新安江	10442	330	607	37600			82.0	3.6	水汽输送法	1978 年华东院
清江	隔河岩	14430	184.1	462	31800	25.9	66.7	89.7	2.2	“357”调整	1986 年长委
清江	水布垭	10860	295 295	351 357	23200 23500	16.45 16.73	31.47 31.71	46.07 46.82	2.14 2.16	移置 外包	长委

3. 与我国可能最大洪水成果的比较

图 7—3 和图 7—4 是我国部分水利工程可能最大洪水与集水面积关系图, 可以看到水布垭可能最大洪水成果 (Q_m 和 W_{72}) 并无异常之处。

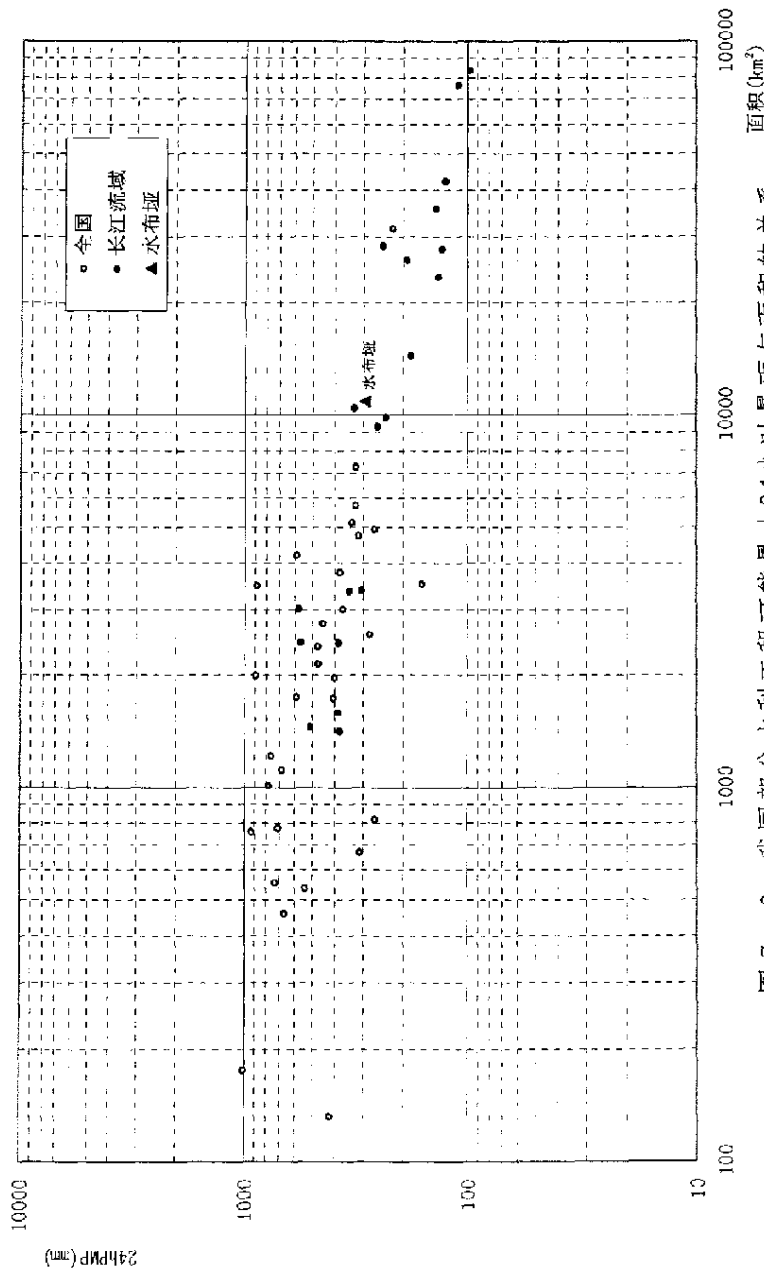


图 7 - 2 我国部分水利工程可能最大24小时暴雨与面积的关系

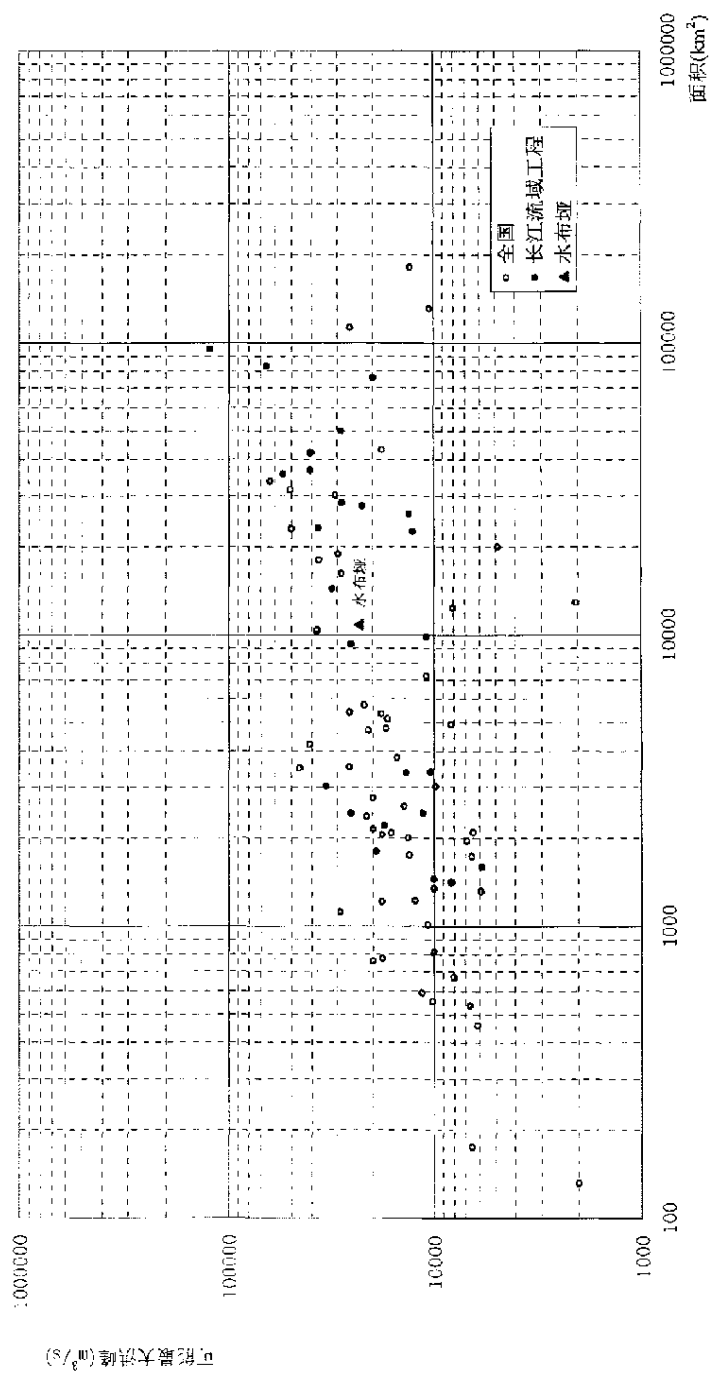


图 7 - 3 我国部分水利工程可能最大洪峰和面积的关系

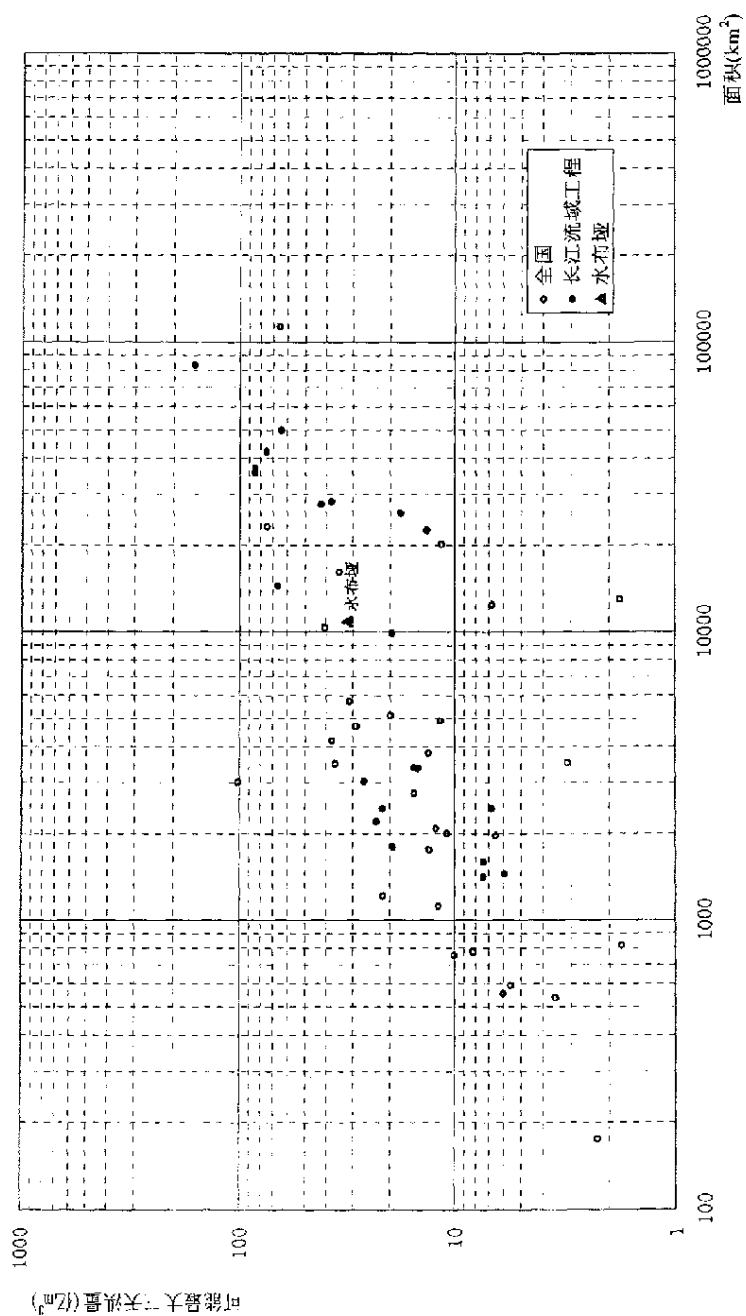


图 7-4 我国部分水利工程可能最大三天洪量和面积的关系

第八章 结论与展望

本文在对 PMP/PMF 估算方法及其研究进展分析的基础上,根据含清江流域的暴雨一致区内的实测暴雨资料,深入分析了形成渔峡口大洪水的暴雨特点及其成因,采用当地暴雨放大、暴雨移置、时面深概化及暴雨组合等方法,对清江渔峡口以上流域的可能最大降水进行了估算研究,同时采用多种方案对水布垭坝址的可能最大洪水进行了推求,并对各种方案的计算成果进行了比较分析,做了大量的比较分析与计算工作。

经过分析比较后,推荐了移置“69.7”概化,时面深外包“69.7”时雨型两种方案的分析估算成果,认为该成果在现阶段是合理的,可供设计部分使用。但是随着大暴雨资料的不断增多及对暴雨洪水研究的不断深入,现阶段计算成果将会有所变化。

利用水文气象学的原理和方法,求出可能最大降水,通过产、汇流计算,转化为可能最大洪水,这是推求重要水利水电工程设计洪水的主要途经之一,亦是推求不允许失事的重要工程设计洪水的惟一方法。用该方法推求 PMP/PMF 的关键问题是估算方法的确定及对暴雨的极大化因子的选取,这两个问题均必须以流域特征及流域暴雨洪水特性分析为基础来确定。本文在回顾、分析与总结 PMP/PMF 计算方法的基础上,以水布垭枢纽 PMP/PMF 分析研究为例,根据流域的暴雨资料及暴雨洪水特性,采用合理可行的方法,估算了清江水布垭坝址的 PMP/PMF,并经多方案成果比较,得出了较为合理的成果。本次研究选用了国内外比较先进的方法。可能最大暴雨计算,除采用常用的当地暴雨放大、移置一场暴雨的暴雨移置放大法外,还采用了移置“69.7”概化暴雨及气象一致区内多场暴雨的时面深概化法。在进行暴雨的时面深分析时,采用客观分析的方法,把测站的资料变成网格点上的值,加快了计算速度并提高了计算精度。用净雨差值计算可能最大洪水,减小了计算误差。上述处理方法,在可能最大洪水计算中,具有创新性。本文主要研究成果和结论如下:

(1) 回顾了国内外在可能最大降水与洪水研究方面的概况,并对可能最大降水与洪水估算方法的研究进展进行了较为全面的综述。

(2) 详细分析了清江及其附近地区的暴雨特征及清江中上游洪水特性, 得出了形成水布垭 PMP 的水文气象特征, 据此拟定了估算水布垭 PMP/PMF 的方法和方案。PMP 采用当地暴雨放大、暴雨移置、时面深概化法进行了估算, 为得到坝址的 7 天洪量, 在暴雨移置、时面深概化估算得可能最大 3 天降水后组合了一场一般暴雨; PMF 采用流量差值法计算, 减小了计算误差。

(3) 由于无法知道 PMP 的真值是什么, 求得的 PMP 是否正确, 仅能通过对成果的合理性检查来说明所得成果是在现代知识和现有资料的基础上得到的最佳估值。对清江水布垭 PMP/PMF 的成果, 从方法和资料上进行了评价, 与中国大暴雨时面深记录、24 小时可能最大点雨量及我国部分工程可能最大暴雨洪水的成果进行了比较, 综合分析后认为成果在现阶段是合理的, 计算成果满足工程设计要求。

(4) 本次研究中用移置概化的“69.7”暴雨, 推求坝址以上流域可能最大暴雨, 在国内可能最大暴雨计算中, 尚未见到例子; 首次在长江流域使用气象一致区内多场暴雨的时面深概化法估算 PMP, 采用资料信息量大, 在资料处理上, 符合流域自然地理特征。在我国水利水电工程可能最大暴雨计算工作中, 处于领先地位。用流量差值法计算可能最大洪水, 减少了计算误差, 该处理方法在可能最大洪水计算中, 也有所创新。

(5) 时面深概化法估算 PMP, 用到了气象一致区内多场暴雨资料, 所得可能最大降水成果, 除应用于水布垭工程外, 还适用于渔峡口以上流域和邻近流域控制面积在 $1000 \sim 12000 \text{ km}^2$ 面积的工程的可能最大洪水计算。

本文在用时面深概化法估算 PMP 时, 分析考虑的暴雨面积多与水布垭枢纽控制面积接近 (10000 km^2 左右), 对小面积暴雨考虑的较少, 若想使成果适用于控制面积较小的水电枢纽, 还需收集分析气象一致区内小面积的暴雨资料, 完善 PMP 成果。

致 谢

本文是在导师谢悦波教授和郭海晋教授级高级工程师的悉心指导下完成的，他们渊博的知识、诲人不倦、精益求精、严谨的治学态度及高效率的工作作风令我深深感到敬佩和难忘，也是本人在今后工作和学习中追求的目标。在此，谨向导师们表示衷心的感谢和诚挚的敬意！

本人也向几年来在各方面支持、帮助和关心我的长江水利委员会水文局各位领导和同事们表示最真诚的感谢！同时在论文有关内容的研究过程中，得到了张有芷教授级高级工程师的指导和帮助；还有室内各位同事也给予了大力支持，在此向他们表示衷心的感谢！

近几年来家人也给了我最大的支持和帮助，向他们表示感谢。

2005年10月

读硕期间主要成果

攻读硕士学位期间的主要生产、科研成果如下:

(1) 规划、设计、科研项目及报告

① 全国水资源综合规划——长江流域水资源及其开发利用调查评价报告(负责完成了水资源调查评价内容的统计分析和报告编写),西南诸河水资源及其开发利用调查评价报告;

② 规划项目——滁河流域防洪规划报告(2004年修订)水文分析计算报告,长江下游华阳河分蓄洪区规划,武汉附近分蓄洪区规划等;

③ 科研项目——清江隔河岩水库汛限水位设计与运用研究,南水北调中线工程水源区连续枯水年的分析研究;

④ 南水北调中线工程——汉江兴隆水利枢纽初步设计,引江济汉工程可行性研究进出口河段水文分析并完成报告编写;

⑤ 武汉长江隧道(含地铁)工程水文专题研究报告;

⑥ 完成了2002、2003、2004年《长江流域及西南诸河水资源公报》的编制;

⑦ 核电项目——湖南省小墨山、李师垄核电厂厂址工程水文研究专题报告,湖南省九龙山核电厂厂址工程水文研究专题报告;

⑧ 长江防洪模型——长江中下游水文基本特性分析报告;

⑨ 水利水电工程——汉江孤山水电站枢纽可行性研究,汉江新集水电水利枢纽工程可行性研究,清江抽水蓄能电站水文分析计算等;

⑩ 公路、铁路工程的水文分析及防洪影响评价——宁淮高速公路江北段水文分析计算报告,崇海公路大桥水文分析报告,汉康铁路跨汉江、南河防洪评价报告等。

(2) 规范、专著

参加了《水利水电工程设计洪水计算规范》的第三次修订;《工程水文与实践》一书中可能最大降水与可能最大洪水章节的编写。

(3) 发表的学术论文

① 南水北调中线水源区与供水各区旱涝的统计特征,水问题研究与进展,

2003 年;

- ② 滁河流域 2003 年梅雨期暴雨洪水分析 水资源研究, 2004 年, 第 25 卷, 总第 93 期。

(4) 获奖情况

- ① 南水北调中线水源区与供水各区旱涝的统计特征获 2004 年度长江委水文局优秀论文奖;
- ② 2003 年被水利部水资源司评为中国水资源公报编制工作先进个人。

参考文献

- [1] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理和方法[M]. 中国水利水电出版社, 黄河水利出版社, 1999.
- [2] Marshall E., Hansen, Francis K., Schwarz, John R. T. Probable maximum precipitation estimates, Colorado River and Great Basin Drainage. Hydrometeorological Report, NO. 49, 1984.
- [3] Louin C., Schreiner, John T., Riedel. Probable Maximum Precipitation Estimates, United States East of the 105th Meridian. Hydrometeorological Report, NO. 51, 1980.
- [4] Hasen E.M., Schreiner L.C. and Millers F. Application of Probable Maximum Precipitation Estimates, U.S. east of 105th Meridian, Hydrometeorological Report, NO. 52, 1982.
- [5] Francis P., John T., Riedel. Seasonal variation of 10-square-mile probable maximum precipitation estimates, United States east of the 105th meridian, Hydrometeorological Report, NO. 53, 1980.
- [6] Francia K., Schwartz, John F., Miller. Probable maximum precipitation and snowmelt criteria for Southeast Alaska, Hydrometeorological Report, NO. 54, 1983.
- [7] Hasen E.M., Fenn D.D., Schreiner L.C., Srodt R.W., Miller J.F. Probable maximum precipitation estimates—United States between the continental divide and the 103rd meridian. Hydrometeorological Report, NO. 55, 1988.
- [8] Zurndorfer E. A., Schwarz F. K., Hansen E. M., Fenn D. D., Miller J. F. Probable maximum and TVA precipitation estimates with areal distribution for Tennessee river drainage less than 3000mi² in area. Hydrometeorological Report, NO. 56, 1986.
- [9] Hansen E.M., Fenn D.D., Corrigan P., Vogel J.L., Schreiner L.C. and Srodt R. W. Probable maximum precipitation—Pacific northwest states Columbia river (including portions of Canada), Snake River and Pacific Coastal Drainages. Hydrometeorological Report, NO. 57, 1994.
- [10] Corrigan P., Fenn D. Kluck R. and Vogel J.L. Probable maximum precipitation for California calculation procedures. Hydrometeorological Report, NO. 58, 1998.
- [11] Corrigan P., Fenn D. Kluck R. and Vogel J.L. Probable maximum precipitation for California. Hydrometeorological Report, NO. 59, 1999.
- [12] Millers J.F., Hasen E.M., Fenn D.D., Schreiner L.C. and Jensen D.T. Probable Maximum Precipitation Estimates, United States Between the Continental Divide and the 103rd Meridian. Hydrometeorological Report, 1984, NO. 55
- [13] Institute of Hydrology. Flood Estimation Handbook, Volume 4, Restatement and application of the Flood Studies Report rainfall-runoff method. UK, 1999.
- [14] Natural Environment Research Council. Flood Studies Report, vol. I, Natural Environment Research Council. Department of the Environment, London, 1975.
- [15] Pilgrim D.H. Australia Rainfall and Runoff, A Guide to Flood Estimation[M]. Institute of Engineering Australia, Canberra, Australia, 1987.
- [16] WMO. Manual For Estimation of Probable Maximum Precipitation, 2nd, Edition, 1986.

- [17] 詹道江, 可能最大降水估算手册[M]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究院出版社。
- [18] 水利电力部. 水利水电枢纽工程等级划分及设计标准(山区、丘陵区部分)SDJ12-78(试行). 水利出版社, 1980.
- [19] 水利部, 电力工业部. 水利水电工程设计洪水计算规范SDJ22-79(试行). 水利出版社, 1980.
- [20] 詹道江, 邹进上. 可能最大暴雨与洪水[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [21] 水利部长江水利委员会, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [22] National Academy of Science, Safety of Dams, Flood and Earthquake Criteria, 321pp, 1985
- [23] Pike W. S. Radar study of thunderstorms developing over central southern England and the south Midlands during the afternoon of 26 September 1991. Weather, 1992, 47(10):383-387
- [24] Wiesner, C. J. Hydrometeorology. Chapman and Hall, London, 1970.
- [25] Wang B H. Estimation of Probable Maximum Precipitation: case studies. Journal of Hydrology Engineering, 1984, 110: 1457-1471.
- [26] 长江水利委员会. 三峡工程水文研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [27] 张有芷. 用净水汽输送计算可能最大降水[J]. 水文, 1982(3).
- [28] 长办水文局(金蓉玲执笔). 长江大型水利枢纽可能最大降水计算经验总结[J]. 水文计算(PMP 专刊), 1984(3).
- [29] 张有芷. 可能最大降水方法的进展[J]. 人民长江, 1992(6).
- [30] 丛树铮, 吴正平. 关于可能最大暴雨的统计估算法[J]. 水文计算技术, 1979(6).
- [31] 云南省编制《全国可能最大暴雨等值线图》办公室. 对美国赫许菲尔德统计估算法的批评和改造[J]. 水利水电技术, 1979(7).
- [32] M. N. Desai, A. B. Noriah, P. R. Rakhecha. Probable maximum precipitation for 24h duration over southeast Asian monsoon region-Selangor, Malaysia[J]. Atmospheric Research, 2001(58):41-54.
- [33] 中国大百科全书, 大气科学、海洋科学、水文科学卷 P. 531. 中国大百科全书出版社, 1987.
- [34] 林炳章. 分时段地形增强因子法在山区 PMP 估算中的应用[J]. 河海大学学报, 1988 (6).
- [35] 赵毅如, 张有芷, 周良芳. 1870 年 7 月长江上游特大暴雨的模拟和分析. 水文, 1983(1).
- [36] Hasen E M. Probable Maximum Precipitation for Design Floods in the United States. Journal of Hydrology, 1987, 96(4).
- [37] 王国安. 对我国水库设计洪水及标准问题研究的主要成果[J]. 人民黄河, 1994(5).
- [38] Rodier J. A and Roche M, World Catalogue of Maximum Observed Flood. IAHS-AISH Publication, No. 143. 1984
- [39] Bi-Huei Wang and Russell W. Revell, Conservatism of Probable Maximum Flood Estimates. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(3).
- [40] 华士乾. 在可能最大降水条件下的流域产汇流计算问题[J]. 水文, 1984(1).
- [41] 徐长江, 郭生练, 熊立华, 周芬. 英国设计洪水研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2004.
- [42] Zhang S Y, Cordery I and Sharma A. Application of an improved linear storage routing model for the estimation of large floods. Journal of hydrology, 2002(258): 58-68.
- [43] Zhang S Y, Cordery I and Sharma A. A volume law for specification of linear channel storage for estimation of large floods. Water Resource Research, 2000, 36(6):1535-1543.

- [44] 长江水利委员会水文局, 清江水布垭水电站可行性研究水文气象专题报告, 1998年3月。
- [45] 陈桂亚、郭海晋, 清江流域水文特性概述, 长江职工大学学报, 2001年, 第18卷, 第1期, P29~P31。
- [46] 陈桂亚 王政祥, 清江“97.7”暴雨洪水分析, 人民长江, 1999年, 第30卷, 第3期, P23~P24。
- [47] 张少婕, 张有芷. 清江渔峡口以上流域可能最大暴雨估算[J]. 人民长江, 1999, 30(3): 20~22.
- [48] 张有芷, 王政祥. 用时面深概化法估算清江中上游流域可能最大暴雨[J]. 水文, 1998(4).
- [49] David R. Maidment 主编, 张建云, 李纪生等译. 水文学手册[M]. 北京: 科学出版社 2002, 10.
- [50] 王作述. 可能最大暴雨的一个数值试验研究[J]. 河海大学学报, 1988(3).
- [51] 熊学农, 高治定. 黄河三花区间可能最大暴雨估算[J]. 河海大学学报, 1995, 21(3).
- [52] 王家祁. 中国设计暴雨和暴雨特性的研究[J]. 水科学进展, 1999, 10(3).
- [53] 金蓉玲, 李心铭. 三峡工程至上游水库区间可能最大洪水估算[J]. 水文, 1989(6).
- [54] 叶守泽, 詹道江主编. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000年.