

章 淹 黄忠恕

范钟秀 宋肇英

等编

长江三峡致洪暴雨与 洪水的中长期预报

气象出版社

“七五”国家重点科技攻关研究

长江三峡致洪暴雨与洪水 的中长期预报

章 淹 黄忠恕 等编
范钟秀 宋肇英

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 提 要

本书是国家“七五”重点科技攻关成果的一部分,包括长江三峡致洪暴雨的中期预报及洪水的长期预报两大部分,内容涉及致洪暴雨的中、长期预报的可行性问题、预报方法问题、长江上游致洪暴雨天气过程的环流特征、时空演变规律、资料分析等诸多方面,并有具体预报方法如数值预报模式的介绍等。

该书可供中、长期预报工作者及研究人员使用,亦可供从事长江三峡开发的研究人员参考。

长江三峡致洪暴雨与洪水的中长期预报

章 淹 黄忠恕 等编
范钟秀 宋肇英

责任编辑 成秀虎 终审:顾仁俭

封面设计:严瑜仲 责任技编:都平 责任校对:刘祥玉

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号)

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.25 字数: 510 千字

1993 年 7 月第一版 1993 年 7 月第一次印刷

印数: 1—600 定价: 15.80 元

ISBN 7-5029-1278-9/P·0570

目 录

I、致洪暴雨中期预报

致洪暴雨中期预报的可行性·····	章淹 (1)
长江上游暴雨洪水过程中期预报方法研究·····	黄忠恕 (7)
长江上游强暴雨中期天气过程的环流特征·····	徐景芳 吕君宁 (18)
长江上游致洪暴雨及其特征·····	周允中 杨秀海 (29)
长江上游暴雨过程时空演变规律的分析·····	徐晓希 (37)
运用气象卫星资料探讨长江中上游地区强暴雨过程的 3—5 天预报方法 ·····	江吉喜等 (44)
长江上游洪涝暴雨环流形势中期演变的定量分析·····	郁淑华等 (51)
三峡洪峰与流域致洪暴雨·····	李国杰等 (64)
青藏高原上空 30—50 天大气低频振荡与南亚高压活动及四川盆地夏季旱涝的关系·····	李跃清等 (73)
大气低频波与开梅期的关系·····	张秀雯等 (81)
长江上游致洪暴雨背景环流的客观分类试验·····	姚志展 (86)
最小化残差绝对值和的稳健回归及其在气象、水文中期预报中的应用·····	王建新、施能 (89)
长江上游洪涝暴雨中期分量级预报方法·····	郁淑华等 (96)
长江三峡地区致洪暴雨的大气物理量诊断 ·····	周君群等 (101)
北半球 500hPa 遥相关的季节变化·····	谢文斌等 (110)
长江上游致洪暴雨北半球 500 百帕超长波、长波特征·····	周允中等 (122)
长江中上游强降水过程的候平均超长波特征·····	沈潋英 (129)
长江上游盛夏致洪暴雨的合成特点·····	许晨海等 (137)
致洪暴雨与角动量输送·····	章淹 徐预红 (144)
川东降水过程的波谱分析·····	王建新等 (159)
原始方程业务模式并行计算方案的设计与试验·····	李国杰等 (167)
山区地面风模拟的参数化试验·····	李国杰等 (173)
一次锋面气旋暴雨的数值试验·····	张秀雯等 (179)
致洪暴雨的模拟预报方法·····	张秀雯 (183)
用相似离度作长江上游暴雨中期预报·····	周允中等 (188)
欧洲实时资料与致洪暴雨关系的分析和预报·····	周国良 (191)
洞庭湖区致洪暴雨的天气气候特点·····	孙捷等 (194)
洞庭湖区域致洪暴雨过程的特点·····	朱金元等 (199)
湖南省 7—9 月中期致洪强降水数值相似预报方法·····	陈江民等 (207)

II、长期预报

长江上中游地区旱涝规律的初步分析·····	宋肇英 (213)
影响长江上中游汛期水量丰枯的物理因素分析·····	范钟秀 (218)
长江上游洪涝前期影响因素的选择和预报关系的建立·····	邱荣贞等 (225)
长江上游洪涝前期环流特征和球展特征量分析及其在长期预报上的应用·····	宋肇英等 (235)
长江中、上游流量长期预报研究·····	莫如平 (242)
用 CEOF 方法分析长江流域降水扰动的传播·····	杨桂英 (248)
长江上中游丰枯与厄尼诺事件的相关分析·····	刘为纶等 (254)
长江上游水量与厄尼诺年低频振荡的远程联系·····	杨桂英 (262)
赤道及北太平洋海温与长江上游水文特征的关系·····	邱荣贞等 (273)
北大西洋、印度洋海温与长江上游汛期水量的丰枯·····	章新平等 (282)
北大西洋海冰与长江上中游旱涝·····	沈小勤等 (288)
长江上、中游汛期水量与北极海冰·····	王小兰等 (294)
南极海冰影响西北太平洋副高的可能途径·····	钱步东等 (298)
南极海冰对 500hPa 印缅位势高度场的影响及其与长江上游水量的关系·····	钱步东等 (306)
青藏高原积雪与长江上中游汛期的旱涝·····	周国良等 (314)

致洪暴雨中期预报的可行性

章 淹

(北京气象学院)

提 要

根据我国国情和暴雨出现的特点,从防洪防汛,减灾抢险及生产建设等的需要出发,简要阐述了延长暴雨预报时效的必要性与紧迫性,提出了“致洪暴雨”这一新概念,并给出其数学表达式。研究气象与水文相结合的途径,探寻致洪暴雨出现的规律,论述了开展致洪暴雨落区、落时、落量及其中期延伸预报研究与应用的可行性。

暴雨是世界上广泛多发的一种灾害性天气,严重的雨洪每年都在世界上不少地方频频出现,造成许多重大的灾难和经济损失。而另一方面,降水又是重要的水资源,特别在当前许多水资源短缺形势日益严峻的地区,降水则更显宝贵。因此,暴雨的预报仍是目前世界上许多国家十分重视的重要研究课题。

在我国,暴雨出现的范围之广,往往超出热带风暴,从我国东南沿海到内陆的高原或沙漠,均有暴雨出现;暴雨出现的季节之长,通常又长于我国寒潮或冰凌等出现的季节,在我国南方和山区,情况更其如此。所以,总的看来,暴雨每年在我国出现的总频数很高,而且,我国暴雨种类繁多,降水(量)相当强(大),已出现的一些特大暴雨纪录,有的降水量已接近或超过世界极值^①。各次暴雨出现的面积一般虽较热带气旋、寒潮等大尺度灾害性天气的面积要小,但严重的暴雨一旦与江河、湖泊或水库等汇、蓄的大水相结合而形成洪涝灾害,其危害范围常可达数省以上。我国人口众多,绝大部分江河是雨洪河流,有些还是雨洪与泥石流或融冰雪相伴的河流,所以,在我国诸多常见的自然灾害中,雨洪是最不容忽视的一种灾害。

在雨洪的防范及抗灾和救灾方面,我国每年都要花费大量资金。遇上大灾之年,耗资与毁损更是惊人。不仅如此,许多雨洪的发生还直接威胁着千千万万人民的生命安全,特别在我国人口稠密的地区,为防雨洪常需提前紧急转移数万至数百万以上的灾区人民。因此,如何增强防范效益,延长现有暴雨洪水预测和预防的时效,以便赢得洪水袭来之前的宝贵时间,以挽救千百万人民生命财产和国家社会的损失,更是我们的一项紧迫任务。为此,“七五”期间,在国家重点科技攻关项目,长江三峡工程重大技术研究(75—16)的防洪问题中,设置了这一延长暴雨洪水预报时效的课题,以长江三峡地区为试点,开展攻关研究。

与此同时,我国水资源短缺问题也普遍存在。除淮河及其以北地区由于干旱、半干旱气候及沙漠发展的影响下,水资源短缺外,随着现代城市建设与生产的发展,水资源的供需矛盾亦日益激化。全国有200多个城市缺水,地下水位因超采而加剧下降。甚至一些近海城市也严重缺水,造成经济损失近200亿元^②。在世界上120个国家的首都中,北京人均占有水量居100位之外^③。因此,暴雨预报时效的延长,对于调蓄雨洪,减免不必要的弃水与缓解水资源矛盾来

① 张光斗、陈志恺 1989 年 12 月:“我国水资源问题及其解决途径”。

② 北京气象学会 1989:“干旱与水资源及其对策学术报告讨论会”中国气象学会会讯 1990 年第 1 期。

说,也有很大的现实意义。

暴雨预报迄今仍是气象预报中难度最大的问题之一。七十年代中期以后,国内对暴雨开展了大规模的重点研究。但大量的工作是围绕暴雨的短期和短时,临近预报进行的^①。并大多是按行政分区进行研究和提供预报,比较缺乏跨省区以上的江河流域预报。而且,由于攻关的时限很紧,为了集中力量,瞄准目标,突破重点,本课题在此项研究中,采用气象与水文相结合的方法,以重点防洪防汛地区跨省区以上江河流域中,最危重紧迫的雨洪问题为主攻对象,针对长江上中游(长江三峡附近及其以上流域)致洪暴雨的中期(或称延伸)预报进行攻关研究。

暴雨的中期预报过去一直被国内外不少学者视为禁区。目前,世界上有不少国家的气象业务工作,一般是仅提供暴雨的1—2天预报。这当然是有其理由的,因为暴雨的落区比较小,在现有条件和一般的监测网中,不易确定其确切的生消位置。而且,其直接影响系统的尺度(范围)也比较小,主要是中、小尺度的天气系统。小尺度天气系统的监测和预报目前困难更多,姑且不论,以中尺度系统而言,其尺度多在几十到二、三百公里间,不易被发现,暴雨的生命史大多只有几个小时,至多十几个小时。待到发现了这些中尺度系统,或较有把握地测知其即将发生的苗头时,再来诊断和推测其未来的发展演变,预报的时效往往不会很长。所以,通常若能提供12小时以上的预报已非易事。并且,由于现代探测技术的发展,一些发达国家现在比较热衷于在监测到其直接影响的中、小尺度系统后,发展6—12小时以内的临近预报。然而,鉴于我国的国情,从防洪防汛等特殊需要出发,本课题必需对暴雨的延伸预报开展攻关研究,为此,我们首先对暴雨中期预报的“可行性”进行研究。

一、可行性攻关途径的选择

据暴雨形成的理论和生消规律,我们知道,暴雨的出现具有很强的时、空分布不均匀性。有些类型的暴雨,在其个别特大暴雨站点的附近甚至在仅仅相邻几公里的地方,就可能只有几毫米的降水或竟至无雨。这种暴雨,即便个别站点上的雨量很大,有的甚至达100—200 mm以上,却不一定会形成洪水,若具备土壤干燥和前期枯水等条件则更其如此。相反,在其他类型的暴雨中,即便某些点暴雨量没有前者强大,但若在相当大的面积上连续(或接连)数日以上较长时间地出现大到暴雨,也会形成洪泛威胁。因此,对于防洪来说,需要集中力量,主攻大面积长历时的强降水——致洪暴雨。

暴雨虽有多种不同的类型,我们发现,在实际常见的暴雨中,致洪暴雨大多与一次次大尺度的系统性降水过程相联系,其中有些“联系”还相当密切或较为关键。对于这种系统性的降水过程来说,其中期(3天以上)预报问题就比较容易解决,因为一次系统性降水过程的演变活跃期通常多在3—7天以上。这3—7天左右的活动本身,具有一定的中期连续性规律。国内外大量样本的分析研究表明:这种中期演变规律目前已可以探寻。而且,有些预报员在实际工作中已掌握了一些这方面的实践经验。对此,我们曾做过一些调研。当前虽然很多气象台站并未正式开展天气过程的中期预报,但在有特殊需要时,预报员们曾经援引此种思路提供中期预报并取得成功。有时,这种中期过程的趋势预报也可以达到一定的成功率。我国华南曾有材料反映,在暴雨过程的趋势预报上,其准确率可达70—80%左右,较暴雨落区和落量短期预报的准确率高出近一倍。

^① 当前美国气象部门的业务工作,一般可提供暴雨的两天(48小时)预报。

此外,在大气超长波及长波与降水过程的研究中,我们已揭示出它们之间存在着的良好关系^[2],并曾在葛洲坝水利枢纽建设的强雨中期预报中应用,获得好的效果^[3]。这对研讨降水过程和致洪暴雨的中期预报提供了有利的基础条件。

因此,我们考虑从中尺度暴雨短时变化与大尺度系统性暴雨过程的相互关系入手,研究致洪暴雨出现的规律及其制约因素,并从而提出其中期预报的方法。这应是当前具有理论与实践基础,又合理可行的一个途径。

二、致洪暴雨与一般暴雨的定义不同

我国的暴雨一般是根据单位时间内(通常是24小时)测雨站上的点降水量数值或一场降水中最大暴雨中心的降水量来定义并划分暴雨、大暴雨、特大暴雨等量级的^[4]。然而前面可能形成洪涝威胁的仅是其中的一部分降水。在这部分降水过程中,有的有大暴雨中心存在;有的则暴雨中心雨量并不特别强大,但有大面积长时间的大到暴雨以上降水出现,我们称之为“致洪暴雨”(Flood-causing Torrential Rain,简称FCTR)。致洪暴雨与一般的暴雨有一定区别,在研究其出现的规律与预报方法上,亦需要有很多不同的考虑。为此,我们认为致洪暴雨的定义,可以采用气象与水文相结合的法,以下列数学式来表达:

$$FCTR = \int_a \int_t I_{tt} da dt + BQ \quad (1)$$

式中 I_{tt} 表示强降水的降水量,强降水指降水量 $\geq 20-30\text{mm/d}$ (包括通常定义的暴雨以上降水), a 代表强降水的面积, t 代表强降水出现的历时; BQ 代表前期基础降水量(或江河底水)。(1)式右端第1、2项的单位,经过处理可使之无量纲化或同一化。

同洪水一样,致洪暴雨并不一定都形成洪涝灾害,这与人们的防范能力与调度措施等是否有力和得当有关。因此,不宜于用是否出现(或造成)了洪涝灾害作为“致洪”与“非致洪”的区别标准。但由于暴雨与洪涝灾害形成的关系十分密切,着眼于防的角度,我们也可以考虑一定流域的集水面积上,某些重要控制站的水文特征,如水位、流量,包括洪峰与警戒水位等出现的特征。以这些特征的数值为据,找出洪涝威胁可能出现前的强降水过程,将它们定为“致洪暴雨”过程,以为研究的主要对象。

另外,由于暴雨具有很强的地域性特征,各不同地区的河湖洪涝也有各自的地域性特点,故对某些特殊的地区,(1)式需做一定的修订。如某些干旱及强对流性暴雨区,点暴雨中心所出现的位置,对洪涝的形成与否有很大关系,在这种地区致洪暴雨的表达式中,还需增补一些相关考虑。

三、暴雨落区与落时中期预报的可预报性

在一般暴雨的短时与短期(6—24h)预报中,落区预报是最基本的一个项目。由于暴雨落区的范围比较小,在大片降水中,它所占的面积往往亦很小,不易测到测准,这是暴雨落区预报的难点之一。

在致洪暴雨过程中,虽然从每6—24小时的分时段降水来看,暴雨落区同样是比较小的。但是就一次降水过程中连续数日的雨区变化来看,情况就不同了。若将连续数日的小片暴雨区连接起来,就可以看出,那是一片(或一片以上)增大了几倍的暴雨区(如图1)。这样对于落区中期预报来说,倒反而比短时短期预报更具有它的有利之处,也就是说可以避开落区过小这一难点了。因此,只要我们能够掌握该次降水过程中落区变化的规律和主要动向,暴雨落区

的延伸预报存在着它可攻的缺口。而有关的变化规律,人们在目前的预报中已掌握了部分,随攻关研究的努力,还可以更好地丰富起来。

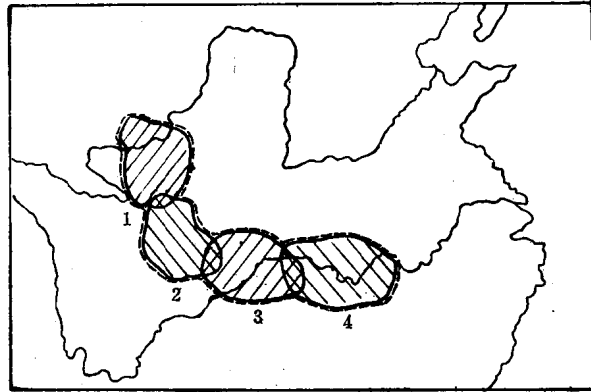


图1 致洪暴雨过程中暴雨落区连续变化的示意图
——代表连续数日的强降雨区,斜线区表示其中不同时段的重雨区

按照通常的办法,在暴雨落时中期预报精度的要求上,允许的时间误差比短期短时预报要宽。比如在短期预报中,若预报某月4日无雨,5日有暴雨。而实况是4日有暴雨,5日无雨,则4、5两日均算是报错。但在一次中期降水过程的预报中,若预报4—5日出现暴雨,6日无雨,而实况是4日无雨,5—6日出现了暴雨。这从3天以上降水预报的精度看,在当前这种初期阶段,这种误差一般是可以允许的,而且在中期预报上,若暴雨连日出现,其累计降落的时间显然增长,可以减免有些暴雨因落时过程而难以抓住的困难。所以,由此看来,暴雨落时的中期预报,亦有它易于着手之处。这与落区预报类似,在掌握了一定的规律后,是可以作出的。

“致洪暴雨”过程中的强降雨落区与落时大多比一般暴雨大而长。如果一般暴雨落区与落时的中期预报可以解决,那么,我们考虑致洪暴雨落区与落时的中期预报也可以突破。

四、致洪暴雨降水量中期预报的可预报性

降水量预报在降水预报中难度最大,而暴雨降水量的预报难中更难。洪水过程的中期预报由于预见期超过了流域的最大汇流时间,不能应用汇流理论和经验关系曲线来推算预报,所以国内尚未正式开展洪水的中期预报。但鉴于防洪防汛抢险和水利工程建设与调度方面急需此项预报的情况,在本次攻关研究中,我们将洪水与暴雨结合起来,寻找办法,对致洪暴雨降水量的中期预报也试予探讨。

开展此项探索性研究的基础主要有以下几点:

(1) 预报经验: 在预报员的实践中,可以挖掘出一部份暴雨降水量中期预报的经验。

(2) 短期预报研究的基础: 七十至八十年代在国内重点开展的大规模暴雨研究中积累了很多资料、素材或研究结果,可以在本项研究中引用。例如五十年代后,国内在定量降水客观预报^[1]中开展的大气-物理参变数诊断方法研究,至七十年代后又得到很大发展,不少工作者测算了许多有关降水参变量出现的实况数据,并从而提出了多种有效可行的暴雨降水量短时与短期预报方法^[2]。至今有些台站(如安徽、上海等)还积累有数十至数百万以上这方面的数据。这些实况数据,除可供暴雨成因及其出现规律的研究应用外,其中有些是具有中期预报意义的,还可以在本项中期降水量预报研究中应用,是一份很好的基础材料。

此外,其他如暴雨形成的机理、出现的背景、气候条件、影响因素及类型研究等的结果与资料也可为本项研究提供基础与思路。

(3) 现有中期预报方法的拓宽: 在现行数值预报中期形势预报, 人机结合 MOS 预报, 大气波谱分析降水中期预报^[1]等有效方法的基础上, 拓宽研究, 探讨致洪暴雨降水量的延伸预报方法。

(4) 遥感新技术的开发应用: 我国的大面积长历时暴雨大多与充足的水汽供应有关。过去人们已经发现, 高、中、低纬度环流的相互作用, 低纬热带充足水汽的输入是特大暴雨形成的一个重要条件。另外, 通过对南、北半球卫星云图的分析, 我们发现许多强劲的自南向北输入我国的水汽通道往往还与来自南半球的越赤道气流相连系。这种强劲的越赤道气流在全球卫星云图上的反映比较清楚, 而且生命史较长, 常可达 3—7 天以上, 具有一定的持续性和中期变化规律。此外, 气象卫星观测到的地-气系统长波辐射资料, 可以定量地给出辐射能量的源和汇, 它们影响着大气环流的变化, 与重大降水过程的形成有关, 而且可以直接反映云、降水、垂直运动及凝结潜热等多种与强雨密切相关的信息。为此, 我们考虑遥感新技术的开发应用, 可以在本项研究中发挥不少作用。

(5) 大面积长历时致洪暴雨预报本身所存在的攻关突破口初步研究发现, 在本项预报中, 存在着一些易于着手之处。如:

(a) 若 30—50mm 以上的日降水量连续几天出现在某江河流域的多数站点上, 经过流域汇水, 其累计降水量可以达到“致洪”暴雨的标准。为此, 对于致洪暴雨来说, 我们需要考虑的是大于 30mm 以上的降水量; 而一般暴雨主要是针对 50mm 以上的降水而言。在实际工作中, 通常是雨量小的降水量比大的容易预报, 因此, 在致洪暴雨预报中, 降水量的起报底限有所放宽。从这一点看, 难度有所下降。

(b) 大面积的强降水中, $\geq 50\text{mm}$ 之暴雨中心的个数愈多, 愈易达到“致洪”标准。例如若有 10—15 个以上这种暴雨中心存在, 通过流域汇水, 便可以达到致洪暴雨的雨标准。这样, 一方面是为暴雨降水量预报增加了一种途径, 即除了预报各暴雨点上的降水量数值外, 还可以由某个“面”上 $\geq 50\text{mm}$ 的暴雨点数 (实际上相当于 $\geq 50\text{mm}$ 降水量的大致面积) 来做预报; 另一方面是这种“面”上的预报, 一般比点暴雨的降水量及其落区预报要容易些。

(6) 气象与水文相结合而形成的可攻优势: 暴雨降水量的时空分布很不均匀, 十分复杂, 但是, 出现在一个流域面上的暴雨, 经过流域汇水的自然滤波, 反映在江河水情观测站的洪流量演变过程上的特征, 既与防洪防汛问题直接相关, 也较为简明清晰, 具有可攻优势。

五、结 语

当前, 致洪暴雨出现的规律及其中期预报研究才刚开始, 许多问题和新的概念尚待不断地探讨与充实。除大量有关的机理、成因、出现规律、影响因素与预报方法需做很多工作外, 还有不少基础性的科技问题亟需解决, 比如“致洪”与“非致洪”暴雨的区别、致洪暴雨强弱等级和降水量等级的划分标准、致洪暴雨中期预报准确率的评定和检验方法等, 未解决的难点还不少。不过, 除上所述, 我们考虑, 若需要开展这方面的研究并付诸应用实施, 还是有可能的, 鉴于当前各方面对致洪暴雨中期预报的迫切需要, 可以开展攻关研究及其应用试验。

参 考 文 献

【1】 王家祁、胡明思, 中国点暴雨量极值的分布, 水科学进展, 1(1), 2—12(1990)。

- [2] 章淹,超长波长波演变形势在中期预报上的试验,中长期水文气象预报文集,第一集,水利电力出版社,254—263,(1979)。
- [3] 陈新强,谱分析在我国天气分析预报上应用的进展,谱分析中期天气预报文集,气象出版社,10—23,(1987)。
- [4] 章淹等,暴雨预报,气象出版社,1—6,208—395(1990)。
- [5] 章淹,天气月刊,1—3月号。(1958)。

THE FEASIBILITY OF EXTENDED FORECASTING OF FLOOD-CAUSING TORRENTIAL RAIN

Zhang Yan

(Beijing Institute of Meteorology)

Abstract

By the special national necessity and the features of torrential rain, and for the flood protection and the establishment of Great-Dam of the Three-Gorges on Yangtze River, the extended forecasting of heavy precipitation along this river is needed. So that the studies are concentrated on the heavy rains which may produce flash-flood firstly. For this connection, a new concept and its mathematical expression of "Flood-Causing Torrential Rain (FCTR)" are provided. By the combination of the meteorology and the hydrology, the feasibility of the extended forecasting of the precipitation area, the duration and the quasi-quantities (in some different classes) of FCTA are given.

长江上游暴雨洪水过程中期预报方法研究

黄 忠 恕

(长江水利委员会水文局)

提 要

洪水过程的中期预报在水利水电建设和防汛抢险工作中的作用极为重要,但由于其难度很大,目前国内尚未正式开展这项业务预报。本文根据洪水过程的谐波特性,设计了一种新的谐波计算方法——回归算法,试用于长江宜昌站洪水过程和候平均流量的分析和中期预报,取得了较好的效果。以1980年8月3日至25日逐日流量序列和1980年6月第3候至8月第1候的候平均流量序列为例,取相关置信水平 $\alpha=0.05$ 作为选取周期和趋势分量的标准,前者得谐波分量6个,而后者有5个分量。6个分量对宜昌洪水过程的方差拟合率为81.86%,模拟的相对误差最大为6.61%,最小为0.29%,平均为2.35%。对洪水过程作1—8天的预报表明,洪峰出现日期预报完全正确,流量预报的平均误差为7.83%。宜昌站候平均流量序列的5个谐波分量对候平均流量的方差拟合率为78.19%,模拟的相对误差最大为7.53%,最小为0.83%,平均为3.27%。对候平均流量作1—4候预报,平均误差为8.16%。为了进一步推广应用,最后还讨论了序列长度、趋势周期和极值点对预报的影响。

一、引 言

洪水过程的中期预报在水利枢纽施工、水库预报调度和防汛抢险等工作中有着极为重要的作用。由于预见期超过了流域的最大汇流时间,不能应用汇流理论和经验关系曲线推算预报,其难度很大,国内尚未正式开展中期洪水预报。

长江宜昌以上地区,汇水面积约100万平方公里。降水经过流域的产流、汇流以及河道调蓄等水文演变而形成的洪水,其时空谱特征得到了较充分的自然滤波,随机振动和高频成份大大降低,而低频振动和趋势变化的比重得以增强,为谐波分析方法在洪水分析和中期预报中的应用奠定了可靠的基础。

但是,经典的谐波分析方法只能得到时间序列的整数波,不能分析长于序列的趋势周期和短于序列的任意周期分量,这就大大限制了该方法合理地揭示洪水过程自然周期的能力。同时,经典谐波分析对序列的模拟速度比较慢,预报效果也较差。为此,本文应用作者在文献[1]中提出的谐波分析回归算法,有效地解决了上述问题。

二、上游地区暴雨与洪水关系

长江三峡(以宜昌站代表)的洪水过程与上游地区的河网特性、降水过程和时空分布等因素紧密相关。上游水系一般分为金沙江、岷江、沱江、嘉陵江、乌江和干流区间六部分(见表1)。金沙江水系汇水面积和年径流量最大,分别占上游地区的48.2%和32.6%,平均雨深、径流深和径流系数最小,水量变化比较平稳,它对三峡洪水主要起基流作用。沱江流域面积和径流量最小,乌江流域雨季较早(降雨集中在5—7月),来水量与长江上游其它地区不同步,它们对三峡洪水的作用相对较小。因此,在三峡洪水中起主要作用的是岷江、嘉陵江和干流区间的

降雨过程。

表 1 长江上游水系多年平均水文气象特征值

水系	控制站	汇水面积 (km ²)	面积比	平均雨深 (mm)	径流深 (mm)	径流系数	径流量 (亿 m ³)	径流比
金沙江	屏山	485099	0.482	810.3	294.8	0.364	1430	0.326
岷江	高场	135378	0.135	970.6	647.1	0.667	876	0.199
沱江	李家湾	23283	0.023	970.6	536.9	0.553	125	0.028
嘉陵江	北碚	156142	0.155	979.6	449.0	0.458	701	0.160
乌江	武陵	83035	0.083	1095.1	597.3	0.545	496	0.113
干流区间	屏山—宜昌	122564	0.122	1095.8	621.7	0.567	762	0.174
长江上游	宜昌	1005501	1.000	930.2	436.6	0.469	4390	1.000

图 1 是长江宜昌站 1980 年 8 月 1 日至 9 月 30 日流量过程线,在二个月内,共出现大小洪峰 8 次,洪峰周期最短为 4 天,最长 12 天,平均 7.5 天。其中 8 月 29 日的洪峰流量达 56400 m³/s,为该年的最大洪峰。

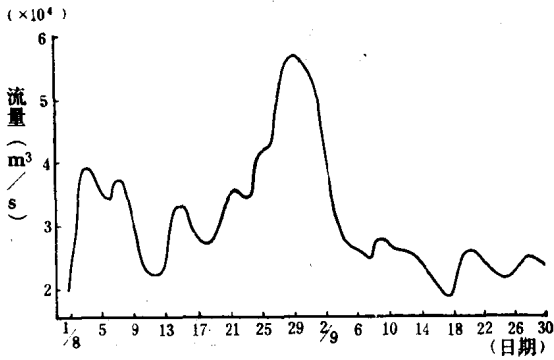


图 1 长江宜昌站 1980 年 8 月 1—9 月 30 日流量过程线

表 2 1980 年长江上游降雨过程与宜昌洪峰

降雨过程	降雨强度	主 要 雨 区	宜昌洪峰出现日
7.28—30	大一暴	岷江、沱江、嘉陵江、干流、乌江	8 月 3 日
8.1—3	大一暴	同上	8 月 7 日
8.5—7	小一中	岷江、沱江、干流、乌江	
8.9—11	中一大	岷江、沱江、嘉陵江、干流、乌江	8 月 15 日
8.12—14	小一中	乌江	
8.16—17	中一大	岷江、沱江、干流、乌江	8 月 22 日
8.20—21	中一大	岷江、沱江、嘉陵江、干流	
8.22—24	大一暴	同上	8 月 29 日
8.26—27	大一暴	同上	
9.3—4	中一大	同上	9 月 9 日
9.7—8	中一大	岷江、沱江、嘉陵江、干流、乌江	
9.13—15	中一大	岷江、沱江、嘉陵江、干流	9 月 20 日
9.20—23	中一大	岷江、沱江、嘉陵江、干流、乌江	9 月 28 日
9.26—27	小一中	岷江、沱江、干流	

表 2 为同期长江上游的降雨过程,共有大小降雨过程 14 次。8 次洪峰与大雨以上的降雨过程有较好的对应关系,降雨结束后 4—5 天,宜昌站出现洪峰。比较图 1 和表 2,可以看出,

洪水过程对降雨过程有明显的滤波作用。

三、资料的截取和数据预处理

应用谐波分析方法作中期洪水预报,预报对象无论是洪水过程还是旬、候平均流量,首先都有一个资料截取的问题,包括起报日期的确定和由起报日向前截取一定长度的资料序列进行分析和预报。以1980年8月29日的年最大洪峰为例,对洪水过程的中期预报来说,最重要的是洪峰出现日期和洪峰流量的预报。因此,起报日期一般应选在前一次洪峰过程结束后至下一次洪峰到来之前,近涨洪段附近为宜。为了分析和预报宜昌站8月29日的洪峰,我们选定8月25日为起报日。关于资料序列长度的选择,应考虑长短适中。序列过程,计算虽然方便,但包含的周期和趋势变化的信息量不足,计算和分析结果欠准确,预报效果不好;序列过长,信息量固然充分,但得到的周期和趋势分量容易受到时间平滑的影响,预报效果也不佳。因此,选择序列的合适长度是非常重要的。根据分析,长江宜昌站洪水过程中期预报的序列长度取3倍于平均洪峰周期长比较适宜。我们取8月3日至25日的流量过程为分析的序列,样本数 $N = 23$ (见表3)。关于选择序列长度问题,在第六节中还要讨论。

为了有利于计算和分析,在进行谐波分析时,一般应对资料数据进行预处理。常用的预处理方法有距平化、标准化、极值归一化和修匀处理等。这些数据处理方法在一般的数理统计文献中都能见到,这里不作介绍。宜昌站流量序列及其预处理结果见表3。

表3 长江宜昌站流量及预处理序列

日期	序号 i	流量系列 f_i	距平序列 f'_i	标准化序列 f''_i	极值归一化序列 f'''_i	修匀序列 $\bar{f}_i$
1980.8.3	1	39400	7257	1.37	0.74	36500
4	2	38000	5857	1.08	0.60	37800
5	3	36000	3857	0.71	0.39	36200
6	4	34500	2357	0.43	0.24	36100
7	5	37700	5557	1.02	0.57	35900
8	6	35500	3357	0.62	0.34	34400
9	7	30000	-2143	-0.40	-0.21	30300
10	8	25300	-6843	-1.26	-0.69	26000
11	9	22800	-9343	-1.72	-0.94	23400
12	10	22200	-9943	-1.83	-1.00	23100
13	11	24200	-7943	-1.46	-0.80	25800
14	12	31100	-1043	-0.19	-0.10	29600
15	13	33400	1257	0.23	0.13	31800
16	14	30800	-1343	-0.25	-0.13	31000
17	15	28800	-3343	-0.62	-0.33	28900
18	16	27100	-5043	-0.93	-0.51	28000
19	17	28000	-4143	-0.76	-0.41	28800
20	18	31300	-843	-0.16	-0.08	31400
21	19	35000	2857	0.53	0.29	34200
22	20	36200	4057	0.75	0.41	35300
23	21	34600	2457	0.75	0.25	35400
24	22	35400	3257	0.60	0.33	37300
25	23	42000	9857	1.82	1.00	39800

四、计算方法

经典的谐波分析是采用欧拉-富里叶差分算式计算谐波分量的富里叶系数,从而将序列展开为有限个谐波分量之和。这种算法具有两个重要性质:一是谐波分量相互正交;二是谱展式与序列之间的误差平方和最小,即回归特性。正交性是由波数 k 为正整数的假定产生的,这种假定除数学分析和某些特殊情况(如气象中的纬圈谱分析)外,一般是不必要的,相反还会给时间序列的谱分所造成失真现象。为此,本文基于回归特性提出以下算法:

将序列 $f_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 展开为一个波数 k 为任意正数值的谐波分量,展开式可写为

$$f_i = \frac{a_0}{2} + a_k \cos \frac{2\pi k}{N} (i-1) + b_k \sin \frac{2\pi k}{N} (i-1) + \varepsilon(k)_i \quad (1)$$

式中 a_0, a_k, b_k 为富氏系数, $\varepsilon(k)_i$ 为误差项,除波数 k 的取值不受限制外,各参数的意义与差分算法相同。波数 k 值给定后,在 $\sum_{i=1}^N \varepsilon^2(k)_i = \min$ 的条件下计算 a_0, b_k 和 a_k 之值,从而可以得到相应的谐波参数:周期 T_k 、波幅 C_k 和初始位相 φ_k 。为此,试比较时间序列的二元线性回归模式

$$f_i = A_0 + Ax_{1i} + Bx_{2i} + \varepsilon(x)_i \quad (2)$$

不难看出,(1),(2)两式在形式上是相似的,它们的差别仅在于(1)式中序列值 f_i 为变量 i 的非线性回归,而(2)式中 f_i 与变量 x_{1i}, x_{2i} 呈线性回归。

$$\text{令 } x_{1i} = \cos \frac{2\pi k}{N} (i-1)$$

$$x_{2i} = \sin \frac{2\pi k}{N} (i-1)$$

$$\text{则 } \frac{a_0}{2} = A_0 \quad a_k = A \quad b_k = B$$

$$\varepsilon(k)_i = \varepsilon(x)_i$$

经过上述变换,(1)式就转化为线性回归问题了。根据二元线性回归算法,可以得到谐波分析的回归算式如下:

$$\frac{a_0}{2} = A_0 = \bar{f} - A\bar{x}_1 - B\bar{x}_2 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{11}A + L_{12}B &= L_{10} \\ L_{21}A + L_{22}B &= L_{20} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$a_k = A = \frac{L_{10}L_{22} - L_{20}L_{12}}{L_{11}L_{22} - L_{21}L_{12}} \quad (5)$$

$$b_k = B = \frac{L_{10}L_{21} - L_{20}L_{11}}{L_{12}L_{21} - L_{22}L_{11}} \quad (6)$$

以上各式中

$$\begin{aligned} L_{10} &= \sum_{i=1}^N (x_{1i} - \bar{x}_1)(f_i - \bar{f}) \\ &= \sum_{i=1}^N \left[\cos \frac{2\pi k}{N} (i-1) - \cos \right] f'_i \end{aligned}$$

$$L_{20} = \sum_{j=1}^N (x_{2j} - \bar{x}_2)(f_j - \bar{f})$$

$$= \sum_{j=1}^N \left[\sin \frac{2\pi k}{N} (j-1) - \overline{\sin} \right] f_j$$

$$L_{11} = \sum_{j=1}^N (x_{1j} - \bar{x}_1)^2$$

$$= \sum_{j=1}^N \left[\cos \frac{2\pi k}{N} (j-1) - \overline{\cos} \right]^2$$

$$L_{22} = \sum_{j=1}^N (x_{2j} - \bar{x}_2)^2$$

$$= \sum_{j=1}^N \left[\sin \frac{2\pi k}{N} (j-1) - \overline{\sin} \right]^2$$

$$L_{12} = \sum_{j=1}^N (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{2j} - \bar{x}_2)$$

$$= \sum_{j=1}^N \left[\cos \frac{2\pi k}{N} (j-1) - \overline{\cos} \right] \left[\sin \frac{2\pi k}{N} (j-1) - \overline{\sin} \right]$$

$$L_{21} = L_{12}$$

$$\overline{\cos} = \bar{x}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \cos \frac{2\pi k}{N} (j-1)$$

$$\overline{\sin} = \bar{x}_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sin \frac{2\pi k}{N} (j-1)$$

应用(3)一(6)式可以逐一得到各谐波分量的富里叶系数和波参数,然后根据统计检验法则筛选出主要分量。当 k 为正整数时,得到正交分量与差分算式的结果一致;当 k 为非正整数时,得到自然分量;当 $0 < k < 1$ 时,得到趋势分量,其周期大于样本数 N 。因此,谐波分析的回归算法适应性很强,适合于各种时间序列分析和中期水文预报。

一般应用回归算法时,常以周期 $T_k = N/k$ 代替波数 k 更为直观和方便。

五、分析和预报

1. 洪水过程

取长江宜昌站 1980 年 8 月 3 日至 25 日的流量序列,应用回归算法进行谐波分析的结果见表 4,依次得到相关置信水平 $\alpha = 0.05$ 以上的周期和趋势分量共 6 个,其中趋势分量 2 个(周期为 36 天和 77 天),它们反映流量过程存在 1—2.5 个月的长周期振动。周期分量 4 个,最长的周期 11 天,最短的 5 天,平均 7.2 天,与前面的资料分析一致。6 个分量对序列的方差拟合率达 81.86%。第一次提取的(一般也是最强的)是 36 天的趋势周期,波幅达 9440 米³/秒²,与序列的相关系数为 0.817,置信水平达 0.001,仅一个分量的方差拟合率就达 42.17%。

最后,我们得到宜昌站以 8 月 3 日为序列的起始日($j=1$)和 8 月 25 日为起报日($j=23$)的流量过程模拟和预报模式如下:

表4 长江宜昌站1980年8月3日—25日流量序列谐波分析结果

分析次数	富氏系数			谐波参数			相关系数 R_k	置纹水平 α_k	方差累积拟 合率(%)
	$a_0/2$	a_k	b_k	T_k	c_k	φ_k			
1	35700	3180	-8890	36	9440	2.798	0.817	0.001	42.17
2	1000	-1240	-2660	7	2940	3.578	0.677	0.001	57.64
3	-200	830	2350	11	2500	0.339	0.772	0.001	72.82
4	100	940	-660	6	1150	2.183	0.551	0.01	77.24
5	3000	-2690	-2000	77	3350	4.073	0.496	0.02	80.47
6	-100	-540	-80	5	550	4.565	0.367	0.05	81.86

$$\begin{aligned} f_j = & 39500 + 9440 \sin \left[\frac{2\pi}{36} (j-1) + 2.798 \right] \\ & + 2940 \sin \left[\frac{2\pi}{7} (j-1) + 3.578 \right] + 2500 \sin \left[\frac{2\pi}{11} (j-1) + 0.339 \right] \\ & + 1150 \sin \left[\frac{2\pi}{6} (j-1) + 2.183 \right] + 3350 \sin \left[\frac{2\pi}{77} (j-1) + 4.073 \right] \\ & + 550 \sin \left[\frac{2\pi}{5} (j-1) + 4.565 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

上式中流量单位为米³/秒,位相单位为弧度。以 $j = 1-23$ 和 $j = 24-31$ 依次代入(7)式即得流量过程的模拟值和起报日后8天的预报值(见图2)。与实况对照,预报洪峰出现日期为8月29日,完全正确。预报洪峰流量为50300米³/秒,实况为56400米³/秒;预报值偏小约10.8%。用(7)式对宜昌站洪水过程所做的全部模拟分析和中期预报的误差情况列于表5。可以看出,模拟分析是很成功的,它的各种误差值都很小。但预报误差一般都大于相应的模拟误差,这是可以理解的,在任何情况下,我们都不能用模拟的精度来要求预报。从中期预

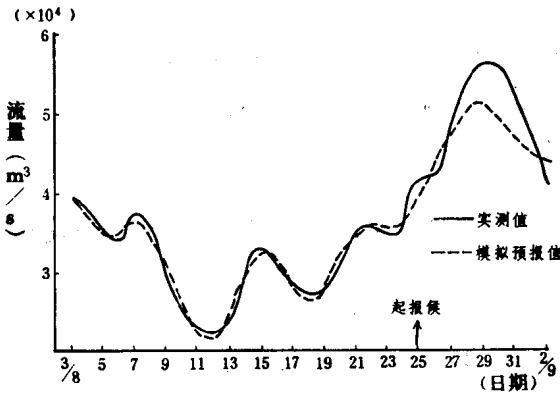


图2 长江宜昌站洪水过程的模拟和中期预报

表5 宜昌站洪水过程的模拟和预报误差

分类	绝对误差 (米 ³ /秒)			相对误差 (%)		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均
模拟	2400	100	765	6.61	0.29	2.35
预报	7100	800	3988	12.77	1.65	7.83