

# 陡涨中小河流实用雨洪预报模型

李克先<sup>1</sup>, 余里红<sup>2</sup>

(1. 福建省宁德水文水资源勘测分局, 福建 宁德 352100; 2. 福建省水文水资源勘测局, 福建 福州 350001)

**摘要** 根据我国东南沿海中小河流的雨洪特性和预报需求, 从径流成因公式出发, 结合流域产汇流原理, 采用松散分布式结构、错时段单元净雨输入及洪峰流量沿程衰减滞后演算等针对性技术处理, 构建了结构合理、计算简单且满足实用预报需求的雨洪模型。该模型仅 1 个参数, 分析调试十分方便。经应用实例验证, 模型精度良好, 易于操作, 可用于预报区域。

**关键词** 东南沿海地区; 中小河流; 洪水预报模型; 非线性

**中图分类号** P338      **文献标识码** A      **文章编号** 1006-7647(2009)S1-0015-04

我国东南沿海有诸多独流入海的中小河流, 流域坡降大、河源短, 每年夏秋季常遭西太平洋热带风暴的侵袭, 致洪水陡涨, 呈现出骤发洪水特征。如 2006 年 8 月福建赛江“桑美”台风洪水, 造成其干流白塔水文站在 7.3 h 的涨洪历时内水位变幅高达 12.13 m, 其中最大 1 h 暴涨 7.23 m<sup>[1]</sup>。对于此类洪水, 常规的洪水预报模型往往难以取得满意的预报精度和有效预见期。究其原因, 主要是非线性效应的异常突出所致, 这种非线性通常认为与雨强和暴雨时空分布强烈不均有很大关系<sup>[2]</sup>。由于洪水时雨洪响应时间短、水文要素变化急剧, 常用于处理非线性的实时修正技术难以奏效, 而采用单位线修正、变参数等处理方法则增加洪水演算过程的复杂性, 不利于实用操作和分析判断, 尤其是很难被基层预报员所掌握, 若采用简易相关图或统计模型则因经验性要求高, 不易推广应用, 且预报精度同样难以保障<sup>[3-4]</sup>。基于此, 笔者试图针对东南沿海陡涨中小河流的雨洪特性和预报需求, 以径流成因公式为基础, 重点考虑台风暴雨引起的非线性问题, 通过有针对性的技术处理, 构建简易实用的雨洪预报模型。所建模型经实际流域的模拟和检验, 效果良好, 可用于预报区域。

## 1 实用雨洪预报模型的构建

### 1.1 模型的设计理念

笔者认为: 一个实用的雨洪预报模型, 首先应针对预报使用需求而设计, 同时应抓住影响预报要素

的主控因素以便于实用操作和判断, 而模型的缺陷不影响预报产品的精度要求。针对东南沿海陡涨中小河流, 通常其核心预报需求为洪峰要素和有效预见期, 而影响洪峰大小的主控因素为暴雨强度及时空分布, 因此, 暴雨、洪峰和预见期是该区域实用预报模型设计的构成要件。若能通过跳跃洪水过程直接建立暴雨洪峰响应关系, 则不仅可简化模型输入并有效避免洪水过程演算的复杂性, 同时可将非线性问题归结在洪峰状态下处理, 使模型得到极大的简化, 并从简化中增长有效预见期。

### 1.2 模型的数理基础

基于上述认识, 本模型选用以等流时概念导出的径流成因公式为基础, 其离散形式为<sup>[5]</sup>

$$Q(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{j=1}^m I_j(t - \tau_j) A_j \quad (1)$$

式中:  $Q(t)$  为  $t$  时刻出口断面流量;  $A_j$  为各单元面积;  $I_j(t - \tau_j)$  为各单元相应时段的净雨;  $\tau_j$  为各单元至出口断面的汇流时间;  $m$  为流域单元个数。

式(1)着眼于流域出口断面瞬时流量的组成, 通常采用等流时线法逐时段过程演算。如果围绕预报使用需求, 不考虑洪水过程, 将式中的  $Q(t)$  直接定义为洪峰流量, 则式(1)就是一个暴雨与洪峰的响应模型, 但目前文献中尚未查阅到跳跃洪水过程进行作业预报的直接计算方法。以下结合流域产汇流原理, 通过有针对性的技术处理, 探讨其求解途径。

### 1.3 模型的技术性处理和求解途径

#### 1.3.1 分布式结构设计及简化处理

基于式(1)的等流时概念, 决定了本模型可采用

分布式结构,恰好适应了东南沿海台风暴雨强度大且分布不均的特性。实用中可根据资料状况和预报精度要求将流域划分为网格、自然小流域或泰森多边形等单元形式。为了避免结构的复杂性,根据沿海湿润区土层薄、产流快、前期土湿和地下径流对洪峰影响微弱的特点,模型结构设计中不考虑产流“门槛”和垂向分层,使模型简捷实用化。

### 1.3.2 错时段单元净雨输入与出流概化

#### 1) 错时段单元净雨输入

为实现从式(1)中直接求解洪峰流量,必须采用错时段净雨输入方式,即截取流域各单元不同时段,但均在 $t$ 时刻流达出口断面形成洪峰的那部分净雨。笔者设计出一种逆向求解方法。

首先确定各单元的汇流时间 $\tau_j$ 。假定流域水滴运动速度处处均匀,则各单元汇流时间为

$$\tau_j = \frac{L_j}{\bar{u}} \quad (2)$$

式中: $L_j$ 为各单元形心至流域出口断面的距离; $\bar{u}$ 为流域沿程平均洪水波波速。考虑不同量级洪水波速的变化及陡涨河流汇流非线性突出的特性, $\bar{u}$ 采用变动等流时线的基本方程,即沿程平均洪水波速非线性校正公式进行计算<sup>[6]</sup>:

$$\bar{u} = C_l C_b C_v Q_l^\alpha \quad (3)$$

式中: $C_l$ 为沿程平均洪水波速与断面洪水波速的比值,中小流域取0.6; $C_b$ 为断面洪水波速与断面平均流速的比值,对于山区 $C_b$ 约为1.34; $C_v$ 和 $\alpha$ 分别为断面平均流速与流量 $Q_l$ 的关系系数和指数。

具体应用时,根据次洪峰流量及出现时刻,通过式(3)及式(2)求取各单元 $\tau_j$ ,然后从各单元代表雨量站净雨过程中截取相应时段的 $I_j(t - \tau_j)$ ,即为错时段单元净雨量。

#### 2) 单元出流的概化

为了简化计算,各单元出流点概化在其形心位置。出流量计算不考虑单元几何特征的空间变异性,采用集总方式并概化为时段净雨率,即

$$Q_j(t - \tau_j) = \frac{I_j(t - \tau_j)A(j)}{\Delta t} \quad (4)$$

式中 $Q_j(t - \tau_j)$ 为单元出流量。

上述概化未及考虑的单元汇流坦化问题统一在河道洪水演算中解决。

### 1.3.3 河道洪峰沿程衰减滞后演算

由于式(1)中没有流域调蓄因子,演算中只有水量平移而无坦化,这显然不符合洪水的传播特性。本模型通过建立一种简单的滞后演算方法来解决这一问题。

在天然河道中,洪水波在沿程传播中通常会出

现洪峰衰减现象,其衰减值一般与河段水力特征和长度有关,也与洪峰流量的大小有关<sup>[5]</sup>。洪水流路越长,洪峰衰减值越大;洪峰流量越大,洪峰衰减值亦越大。

根据王国安<sup>[7]</sup>的研究,自然科学中所有反映物质衰减过程的公式,其形式惊人地相似,可以概化为指数型方程,即: $M = M_0 e^{-\beta t}$ 的形式,这其中视物质性质或传输介质的不同既有随时间过程的衰变,也有沿程的衰变,王国安把它提升到科学定律来认识。本研究认为根据相似类比原理,这种规律也可解释河道中的洪峰衰减现象。因此,沿袭一般的水文学经验,如果将水力特征的影响作为参数考虑,借鉴物质衰减公式的形式,洪峰流量沿程衰减规律可表示为

$$Q_j(t) = Q_j(t - \tau_j) e^{-\beta L_j} \quad (5)$$

式中: $Q_j(t)$ 为单元出流量在流域出口断面的响应; $\beta$ 为考虑水力特征影响的参数。

当 $L_j = 0$ 时,表示该单元出流口在流域出口断面, $Q_j(t) = Q_j(t - \tau_j)$ 。随着 $L_j$ 的增大,单元出流口与流域出口断面距离增大,单元出流量在演进过程中坦化作用增大, $Q_j(t)$ 随之减小。因此式(5)用于滞后演算是符合水文学概念的。

实用中,考虑滞后演算的方便,亦可用式(2)的关系,将各单元至出口断面的汇流时间 $\tau_j$ 作为衰减变量,同时将波速 $\bar{u}$ 的影响归并到参数中考虑,用 $\lambda$ 表示,定义为流量衰减指数,即

$$Q_j(t) = Q_j(t - \tau_j) e^{-\lambda \tau_j} \quad (6)$$

### 1.4 流域出口断面的洪峰流量集成

上述构建的模型属于松散型,即各汇流单元对出口断面流量的贡献是相互独立的。因此,流域出口断面的洪峰流量由错时段的各单元造峰净雨出流量,经沿程衰减滞后演算后,在同一时刻 $t$ 到达出口断面的流量叠加而成,即

$$Q_m = \sum_{j=1}^m Q_j(t) \quad (7)$$

式中 $Q_m$ 为流域出口断面洪峰流量。

## 2 应用实例

### 2.1 流域简介

遴选2个有代表性的流域作为应用实例。一个是赛江白塔水文站以上流域,面积3270 km<sup>2</sup>;另一个是汀溪造水水文站以上流域,面积10.5 km<sup>2</sup>。2个流域均处于福建沿海台风暴雨区,具陡涨河流洪水特性,且位置一北一南,面积差异大,以此验证模型对于不同面积跨度的适用性。流域及水雨情站分布见图1、图2。

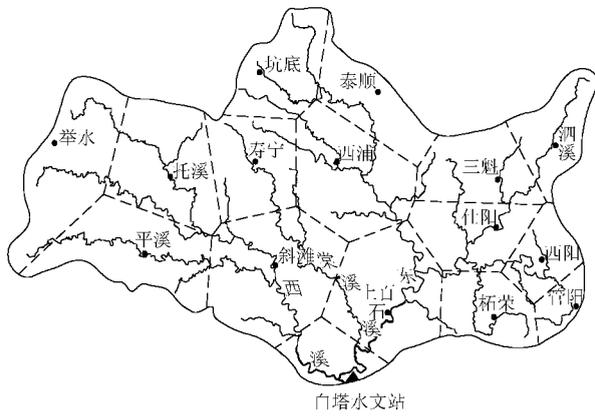


图1 赛江白塔水文站以上流域示意图

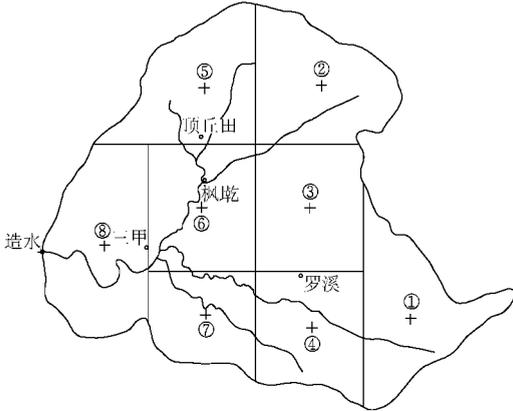


图2 汀溪造水水文站以上流域示意图

## 2.2 洪水样本的选取

选取雨洪资料配套基本一致且量级为中等以上的洪水作为样本。摘录统计得赛江白塔水文站 1978~2005 年雨洪样本共计 36 次,其中 1978~1999 年的 29 次作为率定样本,其余 7 次作为检验样本;汀溪造水水文站 1985~2001 年雨洪样本共计 35 次,其中 1985~1998 年的 28 次作为率定样本,其余 7 次作为检验样本。

## 2.3 模型建立和评价

针对流域洪水特性,以洪峰流量作为预报要素,建模主要步骤如下:①划分汇流计算单元(见图 1、图 2),并量算各单元的面积和至出口断面的距离。②根据水文站资料建立流域洪水波速与出口断面流量的关系。③计算次洪洪峰段各单元的汇流时间  $\tau_j$ 。④以洪峰出现时刻为基准,在次雨洪资料上截取各单元错时段净雨  $I_j(t - \tau_j)$ ,其中赛江白塔水文站流域时段长取 1h,汀溪造水水文站流域取 10min。⑤计算各单元对出口断面的洪峰流量贡献  $Q_j$ ,并相加得洪峰流量  $Q_m$ 。⑥比较计算值与实测值,以相对误差绝对值和最小为目标率定流量衰减指数  $\lambda$ 。通过率定得出赛江白塔水文站  $\lambda = 0.059$ ,汀溪造水水文站  $\lambda = 0.045$ 。⑦模型预报精度评定和检验<sup>[9]</sup>,见表 1。

表1 模型率定和检验成果

模型 序号	赛江白塔水文站				汀溪造水水文站				
	洪号	实测洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	预报洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	误差/ %	洪号	实测洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	预报洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	误差/ %	
率定	1	1999526	3080	3262	5.9	19850625	20.3	19.3	-5.2
	2	1998514	3190	3676	15.2	19850626	24.5	22.1	-9.6
	3	1998620	3030	2765	-8.8	19850627	75.0	72.7	-3.0
	4	1998621	3090	3125	1.1	19850708	41.5	41.1	-1.0
	5	1998621	3190	2767	-13.2	19860711	23.3	27.7	18.9
	6	1998622	5330	4289	-19.5	19870607	23.2	23.2	0.0
	7	1997830	6350	6399	0.8	19880923	33.8	36.8	9.0
	8	1997905	2930	3339	14.0	19880924	32.7	38.5	17.7
	9	1996801	4950	5640	13.9	19880924	29.1	33.9	16.5
	10	1995620	3700	3724	0.6	19890916	52.6	68.5	30.2
	11	1995627	3930	5197	32.2	19890921	20.1	17.0	-15.2
	12	1994711	3370	4195	24.5	19890922	24.4	20.8	-14.6
	13	1992706	2780	2638	-5.1	19890923	30.0	23.5	-21.7
	14	1992707	2930	2407	-17.9	19900630	53.7	46.6	-13.2
	15	1992831	7840	8594	9.6	19900803	107.0	116.0	8.4
	16	1992922	2680	2599	-3.0	19900909	52.9	50.7	-4.2
	17	1990601	3740	4494	20.2	19920614	59.2	66.5	12.4
	18	1990820	5680	5948	4.7	19920906	29.9	27.6	-7.7
	19	1990909	8790	7355	-16.3	19930630	62.1	72.7	17.1
	20	1989722	7460	8261	10.7	19940712	29.1	32.2	10.7
	21	1987911	7390	7363	-0.4	19940805	140.0	109.0	-22.0
	22	1988923	3450	2897	-16.0	19950801	29.2	22.1	-24.3
	23	1985823	8000	8072	0.9	19950803	26.3	16.0	-39.1
	24	1983826	4830	3960	-18.0	19960728	23.6	22.8	-3.3
	25	1982615	3510	2422	-31.0	19960802	169.0	145.0	-14.2
	26	1982618	3750	3664	-2.3	19970507	157.0	159.0	1.3
	27	1982730	2940	2353	-20.0	19981027	20.6	13.3	-35.4
	28	1979527	3540	4291	21.2	19990707	31.6	30.8	-2.4
	29	1978504	2710	3147	16.1				
检验	1	2005902	8910	8347	-6.3	20000611	71.5	90.2	26.2
	2	2005719	7640	7628	-0.2	20000618	62.1	55.5	-10.7
	3	2005620	4730	5428	14.8	20000718	58.7	56.2	-4.3
	4	2004826	9330	11903	27.6	20000823	84.2	67.4	-19.9
	5	2000611	3350	2873	-14.2	20000825	36.9	46.5	26.0
	6	2000611	3740	3106	-16.9	20010626	15.8	14.9	-5.7
	7	2000824	5970	5963	-0.1	20010920	32.1	38.3	19.2

统计显示,以实测洪峰流量的 20% 作为误差评价标准,赛江白塔水文站模型率定合格率 82.7%, 检验合格率 85.7%;汀溪造水水文站模型率定合格率 78.6%, 检验合格率 71.4%。结果表明模型满足洪水预报要求。

### 3 结 语

陡涨河流雨洪非线性的复杂性与作业预报要求的简单性是实用模型构建的一个难点。笔者针对使用需求进行模型设计,并视台风暴雨特点,将分布式结构与集总式演算相结合,采用错时段单元净雨输入,跳跃洪水过程直接建立流域雨峰与出口断面洪峰的响应关系,初步实现了复杂问题的简单模拟和实用计算。

在河道流量演算中,根据洪峰状态下流量沿程衰减现象,借鉴了物质衰减公式的形式,使流域出口断面的洪峰流量集成计算变得十分简单,便于实际预报作业。虽然文中尚未对洪峰流量沿程衰减公式进行数学上的严格证明,但笔者认为,根据相似类比原理,其隐含的物理基础是共通的,有待日后进一步揭示。

笔者构建的陡涨中小河流实用雨洪预报模型经福建东南沿海代表性流域的应用检验,结果表明预

报精度满足实用要求,操作简便,可以在该区域的洪水预报中使用。

致谢 福建省宁德水文水资源勘测分局林成勇、陈胜晶同志参加了雨洪资料摘录和模型率定工作,谨此致谢。

### 参考文献:

- [1] 李克先,陈胜晶.福建赛江“桑美”骤发洪水浅析与思考[J].水文,2007(4):94-96.
- [2] 张东辉,张金存,刘方贵.关于水文学中非线性效应的探讨[J].水科学进展,2007,18(5):776-782.
- [3] 世界气象组织(WMO).水文实践指南第二卷[M].赵珂经,等译.北京:水利电力出版社,1988.
- [4] 中华人民共和国水利部水文局.水文情报预报规范培训教材[R].北京:中华人民共和国水利部水文局,2001.
- [5] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [6] 长江水利委员会.水文预报方法[M].2版.北京:水利电力出版社,1993.
- [7] 王国安.水文定理、定律和假说初探[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [8] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [9] SL250—2000 水文情报预报规范[S].

(收稿日期 2008-09-11 编辑 高建群)

(上接第 3 页)

c. 综合以上 3 个模型的评价结果可知:方案 5 比较合理,3 个评价模型的评价结果中均把该方案评为优等方案,方案 4 亦具有较好的合理性,也可以通过进一步修正后使之更合理。

### 4 结 语

水资源配置涉及大量的经济、社会、环境和资源利用等决策问题,是一个复杂的决策过程,具有不确定性,经常需要解决不同层次、不同目标、不同用户间的相互竞争和冲突问题。因此,实践中往往需要通过多个模型和方法,对已经生成的水资源配置方案进行综合评价与分析,才能更好地避免决策的人为性和盲目性,最终生成满意决策。本文针对大连市水资源配置问题的实际情况,建立了多目标评价指标体系,该指标体系能较好地反映规划水平年大连市水资源的发展状况和趋势。在此基础上,采用 3 个评价模型对配置方案进行综合评价,形成了比较一致的评价结果,为大连市的水资源合理配置提供了科学依据,也可为其他地区的水资源配置决策提供一定参考。

### 参考文献:

- [1] 尚松浩.水资源系统分析方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 陈守煜.区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J].中国工程科学,2001,3(2):33-38.
- [3] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].长春:吉林大学出版社,2002.
- [4] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
- [5] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057-1061.
- [6] 黄旭.大连市水资源合理配置及其方案综合评价研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [7] 谷红梅,郭文献,徐建新,等.区域水资源开发利用程度的灰色关联分析评价[J].人民黄河,2006,28(1):47-51.
- [8] 冯峰,许士国.基于模糊优选理论的水资源效益评价体系[J].水利水电科技进展,2008,28(2):35-38.
- [9] 陈守煜,柴春岭.区域水资源可持续利用评价的模糊可变评价方法[J].水利水电科技进展,2007,27(5):1-5.
- [10] 尹正杰,胡铁松,崔远来,等.水库多目标供水调度规则研究[J].水科学进展,2005,16(6):875-880.

(收稿日期 2008-08-24 编辑 高建群)