

陆地卫星图像在洪水随机模型——地貌气候单位线中的试验研究

熊江波 陈钦峦 陈丙咸

(南京大学地理系)

1986年5月22日收稿

摘 要

遥感在洪水计算和预报中的应用,其关键是模型参数的提取。这主要取决于用遥感资料获取的流域特征信息与模型参数属性之间的相关程度。洪水随机模型——地貌气候单位线与流域特征有密切的关系,它可表示为流域地貌参数和气候参数的函数。我们以浙江省浦阳江水系街亭流域作为模型试验区,根据 Landsat MSS 图像所绘制的街亭流域的河流分级系统图,提取了该流域的地貌参数。任意选取的该流域五次洪水过程的计算结果表明,这一模型的计算精度能够满足洪水计算的要求。

一、前 言

遥感技术在洪水计算中的应用,迄今尚处于探索阶段。主要问题在于:(1)陆地卫星的成像周期对研究洪水的动态变化过程还嫌过长,而气象卫星的分辨率则过低;(2)尚缺乏能较好地运用现有遥感资料的洪水计算模型。第一个问题还有赖于遥感技术的进步,而第二个问题则取决于洪水计算理论的发展。

按系统分析的观点,洪水计算方法有三类,即数学物理方法、黑箱子分析方法和概念性模型。目前,由于数学物理方法建立的方程(圣维南方程组)还无法求解,实际工作中多采用黑箱子分析方法和概念性模型,不过,这样的模式往往忽略了或无法顾及流域的自然特性对模型的作用。但现在,流域的特征信息可以既快又方便地从遥感资料中得到,并已有不少应用遥感资料提取模型参数,进行洪水总量计算的例子^{1),[1-3]}。在建立应用遥感资料进行洪水计算的模型时,弄清流域本身的自然特性,特别是在遥感图像上判读比较容易且准确的流域的线性景观特征、几何形态特征,是一个重要环节,因而,关键是研究暴雨洪水与这些特征信息之间的结构模式。

Rodriguez—Iturbe 等人于1979年提出的地貌气候单位线,为研究这一问题提供了一种方法。所谓单位线,就是单位时段内均匀分布的有效降雨所形成的流域出口断面的流量过程线,它是水文学界常用的计算洪水过程的一个过渡函数。而地貌气候单位线则是流域地貌、气候特征的函数。它以地貌特征反映流域对单位线的作用,而以气候特征反

1) 林文盘等,遥感次雨洪总量模型初探,中国地理学会第二届水文专业会议,1982年。

映单位线的非线性时变特性，比现今常用的单位线更接近实际情况。在遥感与洪水计算模型的研究中，也可把它看作是流域的特征信息与暴雨洪水相联结的一个新的结构模式。

本文是根据地貌气候单位线理论，应用遥感资料进行洪水过程的计算。

二、洪水随机模型——地貌气候单位线

(一) 洪水过程计算的基本原理

洪水过程计算的基本原理为 M. A. 维里加诺夫的径流成因公式^[4]，即

$$Q(t) = \frac{A_T}{3.6\Delta t} \int_0^t I(t-\tau)u(\tau)d\tau \quad (1)$$

式中， $Q(t)$ ——出口断面的流量 (m^3/s)； $I(t-\tau)$ ——有效降雨 (mm/hr)； $u(\tau)$ ——时段单位线(无因次)； Δt ——计算时段 (hr)； A_T ——流域总面积 (km^2)。

假定有效降雨为已知，则用(1)式计算某次洪水过程，就必须先求出其单位线。

(二) 流域地貌规律

地貌气候单位线理论是以 A. N. Strahler 河流分级系统和 R. E. Horton 地貌定律为基础来建立的。

Strahler 河流分级系统(图 1)划分的基本原则是：(1)最小的源头河流为一级河流；(2)两个一级河流汇合时，形成二级河流；两个二级河流汇合时，形成三级河流；其它依此类推；(3)两个不同等级的河流汇合时，形成的级别取其中较高的一级。如一级河流和三级河流汇合时，形成的是三级河流。

根据 Strahler 的河流分级系统，可用 Horton 地貌定律对河流进行定量描述。即

- (1) 河数律 $R_B = N_w/N_{w+1}$
- (2) 河长律 $R_L = \bar{L}_w/\bar{L}_{w-1}$
- (3) 面积律 $R_A = \bar{A}_w/\bar{A}_{w-1}$

式中 N_w ——级别 w 的河流数； \bar{L}_w ——级别 w 的平均河长； \bar{A}_w ——级别 w 的平均汇水面积； R_B, R_L, R_A 分别为河数比、河长比和面积比。

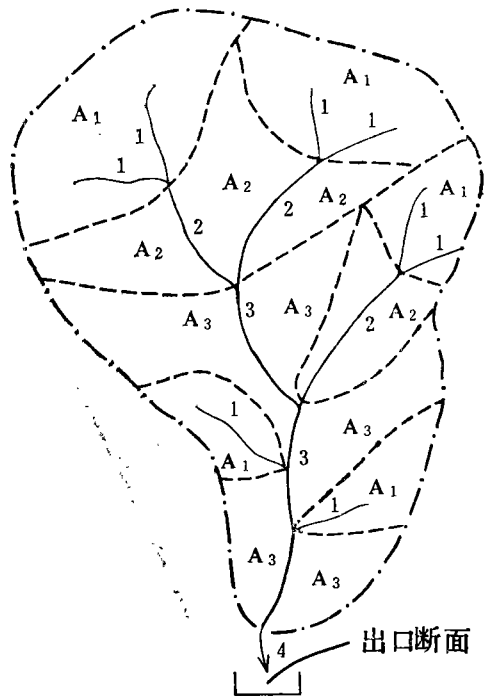


图 1 Strahler 河流分级系统

Fig. 1 Strahler River Ordering System

(三) 地貌气候单位线

地貌气候单位线理论认为，单位雨滴

在流域河流分级系统内的运动为马尔科夫过程。分级系统是 Strahler 所定义的。一定的河流级别对应一定的概率状态。雨滴从一个河流级别转移到另一个河流级别的运动,可用状态转移概率来描述,雨滴在某一河流级别内的滞留时间,可用指数分布函数来描述。出口断面视为收集状态,雨滴运动到收集状态处的概率函数可转换为瞬时单位线。同时,这些概率函数及其所含的参数可用流域地貌、气候特征来表示。以一条三级河流为例,其地貌气候单位线 $IUH(t)$ 为^[5-7]:

$$IUH(t) = \sum_{j=1}^3 \theta_j(0) \frac{d\phi_{j5}(t)}{dt} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} \theta_1(0) = R_B^2 / (R_A^2 + R_A R_B + R_B^2) \\ \theta_2(0) = \frac{R_A R_B}{R_A^2 + R_A R_B + R_B^2} \left(1 - \frac{R_B^2 + 2R_B - 2}{R_A(2R_A - 1)} \right) \\ \theta_3(0) = \frac{R_A^2}{R_A^2 + R_A R_B + R_B^2} \left(1 + \frac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2R_B}{R_A(2R_B - 1)} \right) \\ \phi_{15}(t) = 1 + A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} + A_3 e^{-\lambda_3^* t} + A_4 e^{-\lambda_3^* t} \\ A_1 = [(\lambda_3^*)^2 (\lambda_1 P_{13} - \lambda_2)] / [(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3^* - \lambda_1)^2] \\ A_2 = [(\lambda_3^*)^2 \lambda_1 P_{12}] / [(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3^* - \lambda_2)^2] \\ A_3 = [\lambda_3^* (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_3^* P_{13})] / [(\lambda_1 - \lambda_3^*)(\lambda_3^* - \lambda_2)] \\ A_4 = \{ (\lambda_3^*)^3 \lambda_1 P_{13} (\lambda_3^* - \lambda_1) (\lambda_2 - \lambda_3^*) - [3(\lambda_3^*)^2 - 2\lambda_2 \lambda_3^* - 2\lambda_1 \lambda_3^* \\ + \lambda_1 \lambda_2] [\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_3^*)^2 - \lambda_1 (\lambda_3^*)^2 P_{13}] \} / [(\lambda_3^*)^2 (\lambda_1 - \lambda_3^*)^2 (\lambda_2 - \lambda_3^*)^2] \\ \phi_{25}(t) = 1 - \frac{(\lambda_3^*)^2}{(\lambda_3^* - \lambda_2)^2} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_3^* \lambda_2}{\lambda_3^* - \lambda_2} t e^{-\lambda_3^* t} + \frac{\lambda_2 (2\lambda_3^* - \lambda_2)}{(\lambda_2 - \lambda_3^*)^2} e^{-\lambda_3^* t} \\ \phi_{35}(t) = 1 - \lambda_3^* t e^{-\lambda_3^* t} - e^{-\lambda_3^* t} \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} P_{12} = (R_B^2 + 2R_B - 2) / (2R_B^2 - R_B) \\ P_{13} = (R_B^2 - 2R_B + 2) / (2R_B^2 - R_B) \\ \lambda_3^* = 2\lambda_3 \\ \lambda_3 = v / \bar{L}_3 \\ \lambda_2 = v / \bar{L}_2 = \lambda_3 R_L \\ \lambda_1 = v / \bar{L}_1 = \lambda_3 R_L^2 \end{cases}$$

这里 $\theta_i(0)$ ——雨滴在状态 i (级别 i) 开始其运动时的概率; $\phi_{j5}(t)$ ——雨滴由状态 i 转移到状态 5 (出口断面) 的概率函数; P_{ij} ——雨滴由状态 i 到状态 j 的概率; λ_j ——雨滴在河流级别 j 内的平均滞留时间 (λ_j^{-1}) 的倒数 (hr^{-1}); v ——流域平均流速 (m/s); \bar{L}_j ——河流级别 j 的平均河长 (km); R_A, R_B, R_L 如前所定义。

由上述的表达式可见,模型的参数分为两大类:即地貌参数(包括 R_A, R_B, R_L 和 \bar{L}_j) 和气候参数 (v)。这样,只要先确定这些参数,便可确定单位线 $IUH(t)$,再引用 (1) 式,即可进行洪水过程的计算。

三、遥感图像处理 and 模型参数提取

(一) 典型流域的图像处理

如前所述,模型的建立是以流域分级系统的分析为基础的。这种分级系统由流域的水网结构和地貌结构所决定。在遥感图像上,这两种结构较之流域的其它特征更为直观和易于判读。其次,模型的主要地貌参数(R_A , R_B 和 R_L),不是各级河流的面积、河数和河长,而是其同一测度系统内的比值,因而,从未经几何纠正的图像上直接量测这些参数值,仍能满足计算精度的要求。因此,图像处理的重点在于增强流域的地貌结构特征和水网结构特征。

模型验证的典型流域选在地面资料比较多的浙江省浦阳江水系的街亭流域,该流域为山地丘陵河流。在 1981 年 9 月 8 日的图像上,它位于 Landsat 同一轨道的两幅相邻图像上。因而,在对其进行了数字镶嵌处理后,又对它进行了几种数字增强处理。比较处理结果,并根据分级系统图的绘制要求来看,只有当原始图像质量不佳时,才有进行图像增强处理的必要,否则,一般的假彩色合成图像亦能满足这种分级系统的成图要求。

(二) 模型参数提取

1. 河流分级系统图的绘制

根据街亭流域经数字镶嵌处理后的 MSS 假彩色合成图像^[3](2×2 采样,工作时为扫描负片放大的 1:20 万图像)及 Strahler 河流分级方法,绘制了该流域的河流分级系统图(图 2)。由于在不同比例尺的图像上,河流分级的序次、大小不同,所以需有一定的限制,一般在 1:20 万的图像上,以划分到三级河流为宜,并且当河长在图上的距离小于 0.5 cm (即实际距离小于 1000 m) 时,该河长可忽略不计。图 2 的绘制亦以此为准。

2. 地貌参数的提取

地貌参数包括河数比 R_B , 河长比 R_L , 面积比 R_A 及第三级河流的平均长度 \bar{L}_3 , 均可由遥感图像所制成的河流分级系统图来量测确定。

(1) 河数比 R_B

$$R_B = N_w / N_{w+1}$$

这里, N_w 是级别 w 的河数,可很容易地从分级系统图上获取。

(2) 河长比 R_L

$$R_L = \bar{L}_w / \bar{L}_{w-1}$$

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} L_{wi}$$

这里, L_{wi} 是级别 w 的第 i 条河流的河长。由于最终所取的是平均河长的比值,故各级河流的河长直接从分级系统图上量取。

(3) 面积比 R_A

$$R_A = \bar{A}_w / \bar{A}_{w-1}$$

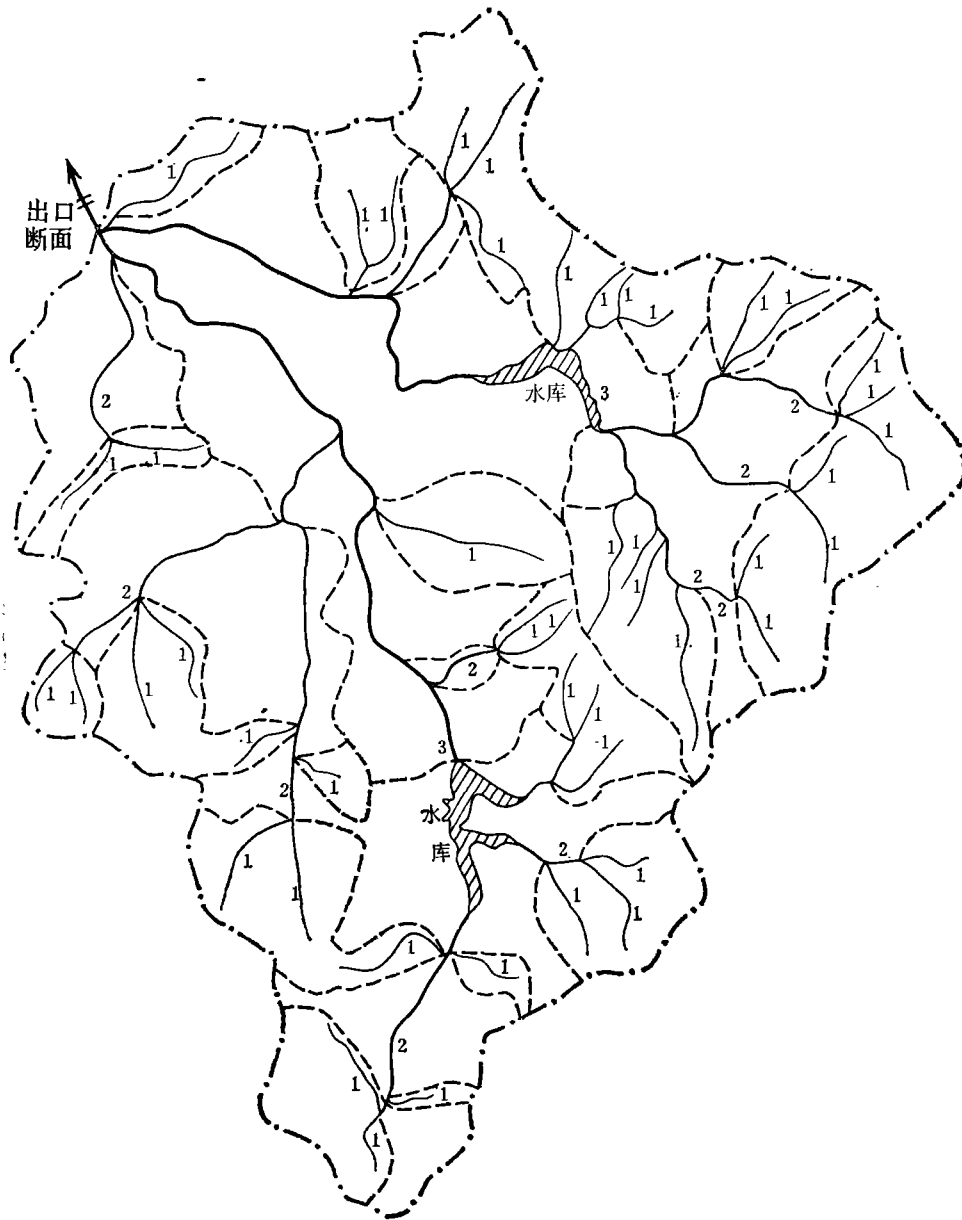


图 2 街亭流域河流分级系统(1:20 万)

Fig. 2 River Ordering System of Jiating Basin

$$\bar{A}_w = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} A_{wi}$$

这里, A_{wi} 是级别 w 的第 i 条河流的汇水面积, 同 L_{wi} 的计算一样, 也可直接从分级系统上量取。

(4) 第三级河流的平均河长 \bar{L}_3

$$\bar{L}_3 = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} L_{3i}$$

这里, L_{3i} 是第三级河流第 i 条河的平均河长, N_3 是第三级河流的河数。实际上, 根据 Strahler 的河流分级系统, 第三级河流为该流域的最大一级支流, 在不同比例尺的图上, 这级河流的变化最小。同时, 为了使数据的来源一致, 故 \bar{L}_3 也取自分级图上量算的结果。

根据上述方法, 计算了街亭流域的地貌参数值(表 1)。

表 1 街亭流域地貌参数统计(流域面积: 584 km²)
Table 1 Geomorphic Parameters of Jieting Basin

河流级别 w	河流数 N_w	平均河长 $\bar{L}_w(\text{km})$	平均面积 $\bar{A}_w(\text{km}^2)$	河数比 R_B	河长比 R_L	面积比 R_A
1	47	3.0	5.7			
2	10	7.5	18.9	4.9	3.0	3.3
3	2	25.4	65.5			

3. 气候参数的计算

地貌气候单位线模型中涉及的气候参数是流域的平均流速 v , 它用水文学方法确定。

表 2 街亭流域气候参数统计
Table 2 Climatic Parameters of Jieting Basin

有效降雨过程 $I(t)(\text{mm})$ 时段 $t(3\text{hr})$	洪号				
	68627	6872	7051	7058	71622
1	0.2	1.4	3.3	1.5	0.3
2	7.6	0.0	0.2	12.3	0.2
3	14.8	17.4	0.6	11.0	0.4
4		6.1	13.2	5.7	0.7
5			7.0	0.6	0.8
6			3.0	0.4	0.7
7			0.2	0.2	1.7
8				1.1	2.7
9				1.1	6.0
10				1.6	4.6
11				0.8	4.9
12				0.9	
Σ	22.6	24.9	27.5	37.2	23.0
流域平均流速 $V(\text{m/s})$	0.42	0.55	0.47	0.50	0.44

在用 (1) 式进行洪水过程计算时, 还应知道每次降雨产生的有效降雨过程 $I(t)$ 。这里的 $I(t)$ 系用蓄满产流模型^[9,10]进行计算的。表 2 列出了五次降水过程产生的有效降雨过程 $I(t)$ 及其流域平均流速 v 。

四、模型验证

由表 1 和表 2 所统计的街亭流域的地貌、气候参数值, 即可把 (2) 式所描述的地貌气候单位线 $IUH(t)$ 确定下来。根据 (1) 式, 先把它转换成时段单位线 $u(t)$, 即

$$u(t) = \int_0^t IUH(t) dt - \int_0^{t-\Delta t} IUH(t) dt \quad (\text{这里 } \Delta t \text{ 取 } 3\text{hr.})$$

然后, 把 (1) 式写成如下的离散形式:

$$Q_i(t) = \frac{A_T}{3.6\Delta t} \sum_{j=1}^m I_j u_{i-j+1}(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n; n > m) \quad (3)$$

式中, I_j ——时段有效降雨 (mm); u_i ——时段单位线 (无因次); $Q_i(t)$ ——洪水流量 (m^3/s); 其它参数的意义同前。同时规定:

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i(t) & 1 \leq i \leq n \\ 0 & i < 1 \end{cases} \quad (4)$$

这样, 上述洪水过程的计算便可在计算机上实现。

用上述方法对街亭流域任意选取的五次洪水过程所进行的模拟计算结果见图 3—7。

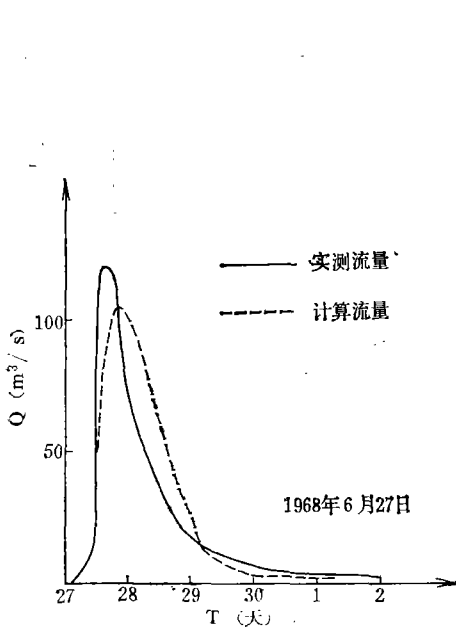


图 3 计算和实测洪水过程

Fig. 3 Computed and Observed Processes of Flood in Jieting Basin

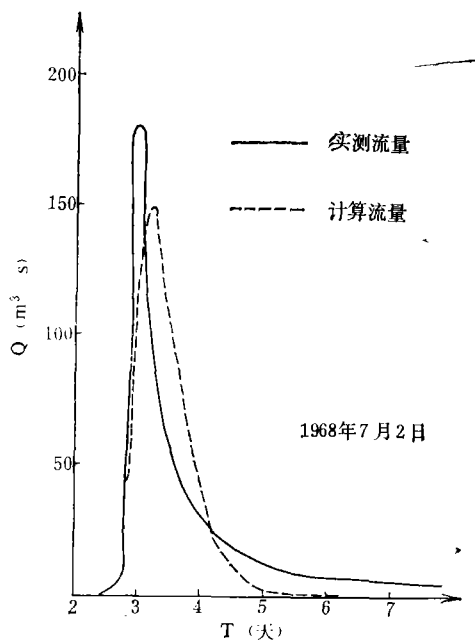


图 4 计算和实测洪水过程

Fig. 4 Computed and Observed Processes of Flood in Jieting Basin

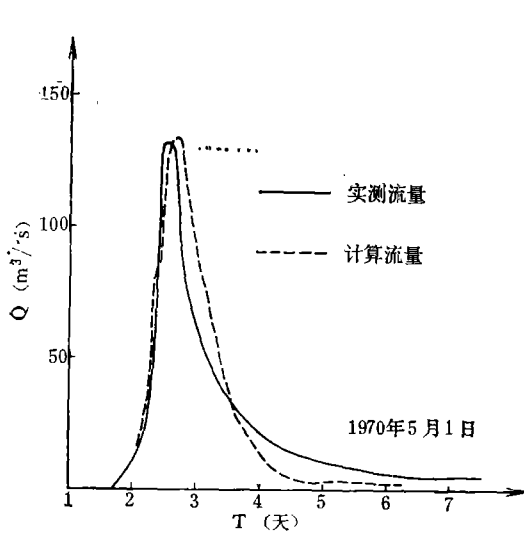


图 5 计算和实测洪水过程

Fig. 5 Computed and Observed Processes of Flood in Jieting Basin

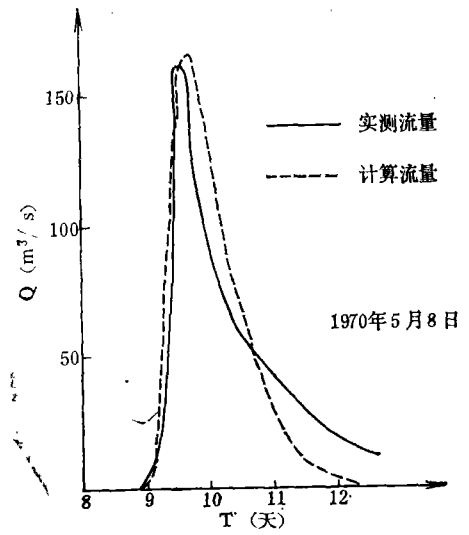


图 6 计算和实测洪水过程

Fig. 6 Computed and Observed Processes of Flood in Jieting Basin

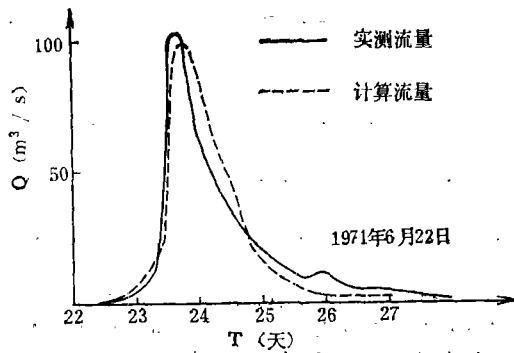


图 7 计算和实测洪水过程

Fig. 7 Computed and Observed Processes of Flood in Jieting Basin

表 3 街亭流域洪水计算特征值统计

Table 3 Characteristic Values of Flood Calculation in Jieting Basin

洪号	实测峰量 $Q_m(m^3/s)$	实测峰现时段 $T'_m(3hr)$	计算峰量 $Q'_m(m^3/s)$	计算峰现时段 $T''_m(3hr)$	峰量相对误差 (%)	峰现时段绝对误差 (3hr)
68627	120.5	4	104.5	6	-13.3	2
6872	179.8	4	147.3	6	-18.1	2
7051	132.0	6	133.8	7	1.4	1
7058	162.0	6	166.4	6	2.7	0
71622	103.0	11	98.9	13	-4.0	1

由这些图可见,计算的洪水过程与实际洪水过程的吻合是比较好的。但在退水尾部,下降较快,与实际的退水趋势不太一致。这可能是由于假定降雨均匀、从而使对单位线尾部的响应呈级差快速下降而引起的。

除过程的吻合外,洪水计算的优劣还以峰量大小和峰现时间的计算精度来衡量。从上述模型计算的洪水过程的统计结果(表 3)来看,峰量 Q'_m 和峰现时段 T'_m (或峰现时间)都在洪水计算所要求的精度范围内。

五、结 论

建立暴雨洪水与流域特征信息相结合的模型,是遥感在洪水计算应用中的关键。这一试验研究表明,这样的模型是能够建立的,如地貌气候单位线。由于模型本身的数学结构及其参数的物理属性,使直接从遥感图像上提取的模型参数,能够满足洪水计算的精度要求。从而为遥感在洪水计算,特别是为缺资料地区的洪水计算、铁路桥涵设计中的洪水计算等,提供了一种新的计算方法。

参 考 文 献

- [1] American Water Resources Association, Satellite Hydrology, 1979.
- [2] Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, Ney York, 1964.
- [3] Г. П. 加里宁(南京大学地理系译), 航空像片、卫星像片在径流预报和计算中的应用,地理科技资料, (17), 1979 年。
- [4] 长江流域规划办公室主编, 水文预报方法, 水利电力出版社, 1979 年。
- [5] Rodriguez-Iturbe, et al., The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response, Water Resources Research, 1979.
- [6] Rodriguez-Iturbe, et al., A Rainfall-Runoff Analysis of the Geomorphologic IUH, Water Resources Research, 1979.
- [7] Jose R. Cordova, et al., Geomorphoclimatic Estimation of Extrem Flow Probabilities, Journal of Hydrology, 65, 1983.
- [8] 熊江波, 用遥感资料确定水文模型参数的方法, 环境遥感, 2(1), 1987。
- [9] AgRISTARS, Remote Sensing and Hydrologic Models, NASA-CR-173232, 1982.
- [10] Olin Mintzer and Farid Askari, A Remote Sensing Technique for Estimating Watershed Runoff, PB-82-243668, 1980.

Experimental Research of Landsat Image in the Flood Stochastic Model—Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph

Xiong Jiangbo, Chen Qinluan and Chen Bingxian

(Department of geography, Nanjing University)

Abstract

An extraction of model parameters is the key for remote sensing application in the calculation and forecast of flood, which mainly depends on relationships between characteristic informations of a basin obtained by remote sensing data and characteristics of model parameters. There are close relations between the flood stochastic model—geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph (Rodriguez-Iturbe, et al., 1979.) and the characteristics of a basin. The model is deduced through Markov process of raindrops uniformly distributed over the river ordering system of a basin, which is advanced by R. E. Horton and is defined by A. N. Strahler. At this basis, we take Jieting basin of Puyong river in Zhejiang Province for the experimental area of the model. According to the map of river ordering system of a basin, which is interpreted from LANDSAT MSS image we extracted the geomorphic parameters of the model and calculated the processes of five floods in the basin. And the results indicated that the calculative precisions of the model can meet the requirements of flood calculation.