

自回归总径流线性响应模型 在洪水预报中的应用

李蝶娟 周冰清

(水利部南京水文水资源研究所 南京 210024)

提要 采用自回归总径流线性响应(ATLR)模型建立淮河王家坝站洪水预报方案和海河流域南运河水系洪水预报调度方案。自回归TLR模型与TLR模型加误差自回归实时校正模型的结构相同,但前者计算简捷,预报精度也有所提高。

关键词 自回归 总径流线性响应模型 洪水预报

一、前言

近年来,以多元线性回归方法为基础的总径流线性响应(TLR)模型在河流洪水实时预报中得到迅速发展。80年代后期,曾用我国南方和北方10个典型流域的逐日雨洪资料,对TLR模型的适用性进行检验。结果表明,除个别流域外,预报精度基本上能满足作业预报的要求^①。

为了提高TLR模型的预报精度,在建立淮河王家坝站洪水预报方案和海河流域南运河水系的洪水预报调度方案时,除通常考虑上游的多站流量和区间雨量作为模型的输入外,增加了预报站的实测流量,建立相应的自回归TLR模型预报方案。自回归TLR模型可以充分利用包括预报站流量在内的信息资料,概念清楚,应用方便。模型检验结果表明,自回归TLR模型是提高洪水预报精度的一个有效途径。

二、自回归TLR模型结构

(一) 自回归TLR模型结构

对多输入单输出的TLR模型在预见期为一个时段时,预报流量的计算公式^[1]为

$$q_{t+1} = c_1^{(1)} i_t^{(1)} + c_2^{(1)} i_{t-1}^{(1)} + \dots + c_L^{(1)} i_{t-L+1}^{(1)} + 1 \\ + c_1^{(2)} i_t^{(2)} + c_2^{(2)} i_{t-1}^{(2)} + \dots + c_L^{(2)} i_{t-L+1}^{(2)} + 1 \\ \dots \dots \dots$$

本文于1990年11月22日收到,1991年2月25日收到修改稿。

^① 南京水文水资源研究所模型检验小组,关于TLR与LPM模型在我国水文预报中的应用,1987

$$+ c_1^{(j)} i_t^{(j)} + c_2^{(j)} i_{t-1}^{(j)} + \dots + c_{L(j)}^{(j)} i_{t-L(j)+1}^{(j)} + v_{t+1} \quad (1)$$

其离散卷积形式为

$$q_{t+1} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{L(j)} c_k^{(j)} i_{t-k+1}^{(j)} + v_{t+1} \quad (2)$$

式中 J 为输入系列个数； $L(j)$ 为第 j 个输入的系统记忆长度； $c_k^{(j)}$ 为相应于第 j 个输入的离散脉冲的第 k 个响应纵标； v_{t+1} 为扰动项。

对自回归 TLR 模型，由于是在 TLR 模型输入项中增加了流域出口断面的流量，则出口断面的预报流量由如下形式表示：

$$\begin{aligned} q_{t+1} = & b_1^{(1)} i_t^{(1)} + b_2^{(1)} i_{t-1}^{(1)} + \dots + b_{L(1)}^{(1)} i_{t-L(1)+1}^{(1)} \\ & + b_1^{(2)} i_t^{(2)} + b_2^{(2)} i_{t-1}^{(2)} + \dots + b_{L(2)}^{(2)} i_{t-L(2)+1}^{(2)} \\ & \dots \dots \dots \\ & + b_1^{(j)} i_t^{(j)} + b_2^{(j)} i_{t-1}^{(j)} + \dots + b_{L(j)}^{(j)} i_{t-L(j)+1}^{(j)} \\ & + b_1^{(j+1)} q_t^{(j+1)} + b_2^{(j+1)} q_{t-1}^{(j+1)} + \dots + b_{L(j+1)}^{(j+1)} q_{t-L(j+1)+1}^{(j+1)} + v_{t+1} \quad (3) \end{aligned}$$

其矩阵形式为

$$Q = I^{(1)} b^{(1)} + I^{(2)} b^{(2)} + \dots + I^{(j)} b^{(j)} + Q b^{(j+1)} + v_{t+1} \quad (4)$$

相应各输入的响应函数的最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \\ \vdots \\ b^{(j)} \\ b^{(j+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I^{(1)T} \\ I^{(2)T} \\ \vdots \\ I^{(j)T} \\ Q^T \end{bmatrix} \left[I^{(1)} I^{(2)} \dots I^{(j)} Q \right]^{-1} \begin{bmatrix} I^{(1)T} \\ I^{(2)T} \\ \vdots \\ I^{(j)T} \\ Q^T \end{bmatrix} Q \quad (5)$$

(二) 自回归 TLR 模型与 TLR 模型加误差自回归模型之间的关系

定义出口断面流量的预报误差为实测流量 q_t 与计算流量 q_t^i 之差

$$e_{t+1} = q_{t+1} - q_{t+1}^i \quad (6)$$

式中

$$q_{t+1}^i = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{L(j)} c_k^{(j)} i_{t-k+1}^{(j)} \quad (7)$$

考虑实时校正值后的预报流量

$$q_{t+1}'' = q_{t+1}^i + e_{t+1} \quad (8)$$

误差 e_{t+1} 可根据实际误差系列资料用 TLR 模型建立以下 ρ 价误差自回归方程：

$$e_{t+1} = \phi_1 e_t + \phi_2 e_{t-1} + \dots + \phi_\rho e_{t-\rho+1} \quad (9)$$

将式(6)、(7)、(9)代入式(8)，经化简后可得：

$$\begin{aligned} q_{t+1}'' = & q_{t+1}^i + e_{t+1} = c_1^{(1)} i_t^{(1)} + (c_2^{(1)} - \phi_1 c_1^{(1)}) i_{t-1}^{(1)} + \dots \\ & + (c_{L(1)}^{(1)} - \phi_1 c_{L(1)-1}^{(1)} - \phi_2 c_{L(1)-2}^{(1)} - \dots - \phi_{L(1)-1} c_1^{(1)}) i_{t-L(1)+1}^{(1)} \\ & + c_1^{(2)} i_t^{(2)} + (c_2^{(2)} - \phi_1 c_1^{(2)}) i_{t-1}^{(2)} + \dots \\ & + (c_{L(2)}^{(2)} - \phi_1 c_{L(2)-1}^{(2)} - \phi_2 c_{L(2)-2}^{(2)} - \dots - \phi_{L(2)-1} c_1^{(2)}) i_{t-L(2)+1}^{(2)} \\ & \dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & c_1^{(j)} i_1^{(j)} + (c_2^{(j)} - \phi_1 c_1^{(j)}) i_1^{(j)} + \dots \\
 & + (c_L^{(j)} - \phi_1 c_{L-1}^{(j)} - \phi_2 c_{L-2}^{(j)} - \dots - \phi_{L-1} c_1^{(j)}) i_{L-1}^{(j)} + \dots \\
 & + \phi_1 q_t + \phi_2 q_{t-1} + \dots + \phi_\rho q_{t-\rho+1}
 \end{aligned} \quad (10)$$

将(3)式与(10)式比较,可以看出,自回归TLR模型实际上就是TLR模型加误差自回归模型。两者的离散脉冲响应纵标之间存在以下关系:

$$\begin{cases}
 b_1^{(j)} = c_1^{(j)} & (j=1,2,\dots,J) \\
 b_2^{(j)} = c_2^{(j)} - \phi_1 c_1^{(j)} & (j=1,2,\dots,J) \\
 \vdots \\
 b_L^{(j)} = c_L^{(j)} - \phi_1 c_{L-1}^{(j)} - \phi_2 c_{L-2}^{(j)} - \dots - \phi_{L-1} c_1^{(j)} & (j=1,2,\dots,J) \\
 b^{(i+1)} = \phi_i & (i=1,2,\dots,\rho) \\
 \phi_i = 0 & (i>\rho)
 \end{cases} \quad (11)$$

由以上可看出,自回归TLR模型与TLR模型加误差自回归校正模型公式的结构相同,但从推导过程来看,前者所建立的多元回归预报方程,包括各输入响应函数记忆长度 $L(j)$ 的选择,是就输出变量 q_{t+1} 的均方差最小为目标一次完成的,而后者,是分别就式(8)中 q_{t+1} 和 e_{t+1} 分两次完成的,即前者为一步总体最优,后者为两步部分最优。显然,前者比后者预报精度有所提高。

三、自回归TLR模型在洪水预报中的应用

(一) 王家坝站洪水预报方案

淮河王家坝站以上流域面积 30630km^2 。王家坝站的流量主要由淮河息县、洪河班台、潢河潢川站以上来水和息县、班台、潢川至王家坝区间(以下简称区间)的径流组成。

模型计算时段为6小时。模型输入系列为息县、班台、潢川的6小时时段平均流量和区间息县、包信集、班台和王家坝等15个雨量站的6小时时段雨量。输出系列为王家坝站的6小时时段平均流量。输入、输出站位置见图1。

模型以1968~1973年6年汛期雨洪资料为率定期,以1976、1977、1982、1983年汛期为验证期。模型的输入拟考虑以下三种情况:

1. 以息县、班台、潢川流量系列和区间雨量系列为输入(称输入情况A),经TLR模型的计算,率定期的效率为88.1%,验证期的效率为89.8%。

2. 除以上所列输入项外,将王家坝站流量也作为一个输入,经自回归TLR模型计算(称输入情况B),率定期效率提高到98.0%,验证期效率提高到95.3%。

3. 为进行比较,不考虑区间雨量输入项,其余与输入情况B相同(称输入情况C)。经计算,率定



图1 淮河王家坝站以上测站位置示意图
Fig. 1. Locations of gauging and rainfall stations over Wangjiaba in Huaihe River basin

期和验证期效率分别为 96.9% 和 92.8%。

图 2 为 1968 年 7 月洪水(率定期最大洪水)上述三种输入情况的计算流量过程和实测流量过程的拟合情况; 图 3 为验证期 1975 年 6 月 11 日~7 月 8 日计算流量过程与实测流量过程的拟合情况。

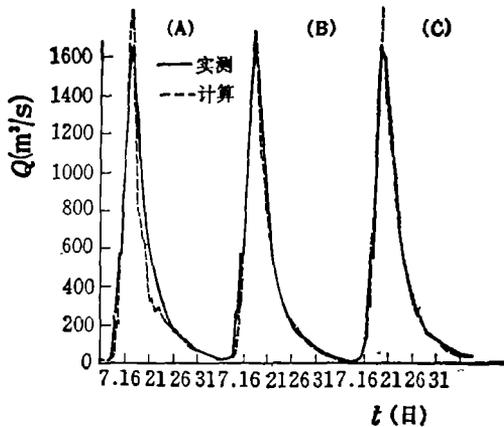


图 2 淮河王家坝 1968 年 7 月洪水
计算与实测过程比较

Fig. 2. Comparison of estimated and recorded flood hydrograph July 1968 at Wangjiaba in Huaihe River.

以上结果表明, 考虑预报站流量的输入情况 B 的预报精度比不考虑预报站流量的输入情况 A 有了比较显著的提高; 对所研究的具体流域不考虑区间降雨输入情况 C 仅比输入情况 B 的预报精度略有降低。这表明预报站前期流量对预报精度有重要作用。

4. 为了分析增长预见期对预报精度的影响, 分别对上述三种输入情况作增加 1 个计算时段和 2 个计算时段预见期的研究, 结果如表 1 所示。

表 1 三种输入情况不同预见期预报精度比较
Table 1. Accuracy comparison of results derived from different foresight periods under three forecast schemes

方 案	效 率 R^2 (%)					
	率 定 期			验 证 期		
	I	II	III	I	II	III
A	88.1	86.6	81.7	89.8	80.7	88.6
B	98.0	97.4	96.4	95.3	93.6	91.1
C	96.9	95.7	93.6	92.8	89.2	86.6

注: I——预见期 36 小时; II——预见期 42 小时; III——预见期 48 小时。

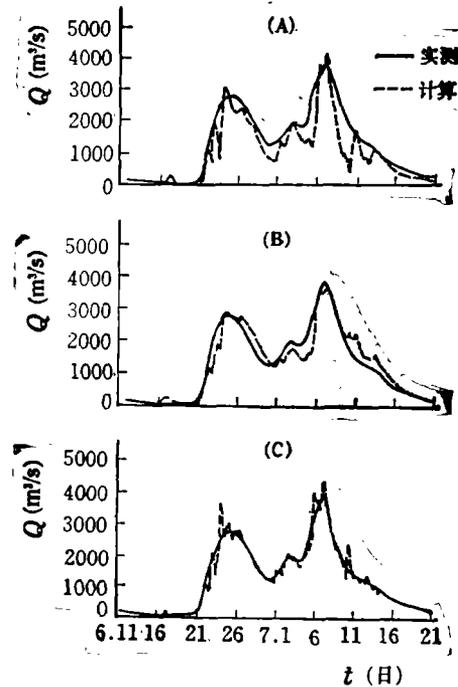


图 3 淮河王家坝 1975 年 7 月洪水
计算与实测过程比较

Fig. 3. Comparison of estimated and recorded flood hydrograph July 1975 at Wangjiaba in Huaihe River.

从表 1 可看出, 预报精度随预见期增长而降低, 但预报值仍可供预报作业参考使用。

(二) 南运河水系预报调度

南运河水系防洪预报调度系统共设 7 个预报区段(图 4)：

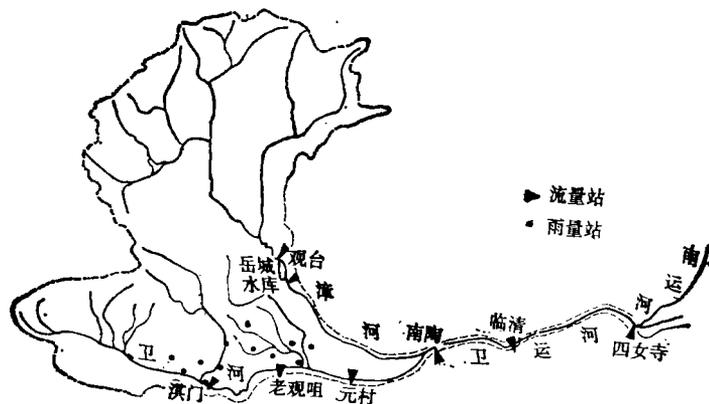


图 4 南运河水系洪水预报控制站位置图

Fig. 4. Locations of gauging stations for flood forecast control in the South Canal River System.

1. 观台站以上流域；
2. 淇门(含刘庄闸)站以上流域；
3. 淇门至老观咀坡洼区段；
4. 老观咀至元村(楚旺)区段；
5. 元村、岳城水库至南陶区间；
6. 南陶至临清段；
7. 临清至四女寺闸。

各预报区段选用资料情况见表 2。计算时段除观台为 3 小时外, 其余均为 6 小时。

表 2 各预报段分析资料表

Table 2. Analysis data used for flood forecast in various river reaches

流 域	站 名	输 入 站 数		分 析 资 料	
		流 量 站	雨 量 站	率 定 期	验 证 期
海 卫 河	观 台	2	6	1963, 1964, 1967, 1975, 1982	1969, 1976
	淇 门	2	6	1970, 1975, 1976, 1982	1963
	老 观 咀	2	0	1970, 1975, 1976, 1982	1963
	元 村	2	4	1970, 1975, 1976, 1982	1963
	南 陶	2	0	1970, 1975, 1976, 1982	1963
卫 运 河	临 清	1	0	1970, 1975, 1976, 1982	1963
	四 女 寺	1	0		

注：(1) 70 年代后, 海河流域干旱少水, 无雨洪；(2) 临清至四女寺采用平移。

各预报区段采用如下三种输入情况作模型计算：

- A、上游流量输入和区间雨量输入；
- B、上游流量和区间雨量输入加预报站流量作自回归计算；
- C、上游流量输入加预报站流量作自回归计算。

计算结果如表 3 所示。

表3 各站不同输入情况预报精度比较表
Table 3. Accuracy comparison of forecast derived from different schemes at various stations

方 案		效 率 R^2 (%)					
		观 台	淇 门	老 观 咀	元 村	南 陶	临 清
A	率 定 验 证	93.37	77.12	24.60	81.87	93.06	95.14
		88.40	69.81			62.48	85.21
B	率 定 验 证	94.91	98.23	89.33	94.59	96.18	95.36
		90.72	91.72			86.59	86.70
C	率 定 验 证	94.04	97.82		92.58		
		90.01	90.09				

注：(1) 老观咀1963年无资料，故不能验证；(2) 老观咀、南陶、临清以上无区间，故无输入情况C。

此外，还对淇门、老观咀、元村、南陶等站作了增长预见期对预报精度影响的研究，得到了与王家坝站相同的结果。图5中给出卫河淇门站验证期(1963年8月)洪水的拟合过程。

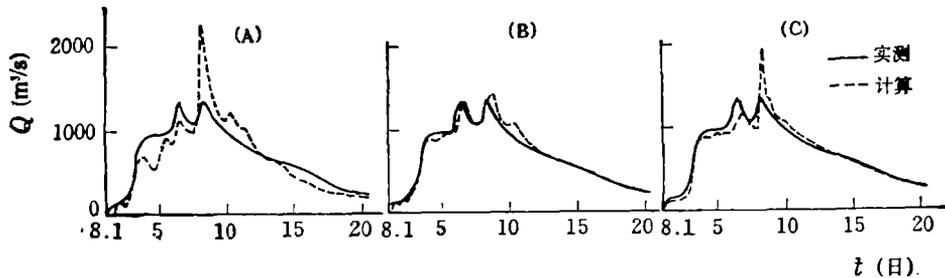


图5 卫河淇门1963年8月洪水计算与实测过程比较

Fig. 5. Comparison of estimated and observed flood hydrograph August 1963 at Qimen in Weihe River

四、结 语

1. 从所研究流域预报流量过程的拟合情况可以看出，输入情况B的预报精度最高，输入情况C次之，输入情况A的预报精度最低。由此可见，在输入系列中考虑增加预报站流量资料用自回归TLR模型计算，可明显地提高预报精度。

2. 自回归TLR模型的结构，经推导表明，与TLR模型计算结果作误差自回归校正的模型结构相同，且前者较后者应用简便，又一次完成回归计算，总体拟合最优，预报精度有所提高。

3. 输入情况C，是在预报系统中抽去区间降雨而增加自回归的情况。它的效率远高于输入情况A，且接近于输入情况B。这说明将输出站资料作为模型的一个输入，可弥补缺少雨量资料的不足，还可避免因雨量报讯资料采集和传递困难而损失预见期。

4. 根据本文所提供的预见期和预报精度之间的关系, 在进行洪水预报作业时, 可以在一定的预报精度范围内预报不同预见期的洪水变化过程, 为河流防洪系统的合理调度提供比较可靠的信息。

参 考 文 献

- (1) 文康等, 总径流线性响应模型和线性扰动模型, 水利学报, 1986, (6): 1~9

ATLR Model and its Application in Flood Prediction

Li Diejuan and Zhou Binqin

(Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources)

Abstract: This paper presents an autoregression total linear response model (ATLR) by which the forecast schemes were developed for the Wangjiaba station and the South Canal River system in the Haihe River basin. The proposed model has the same construction as that of the combined model consisting of TLR and error autoregressive real time updating. But, the former is simpler and more accurate than the latter.

Key words: autoregression; total linear response model; flood forecast.