

紫坪铺水库工程非汛期径流预报的研究

邓育仁 丁晶 袁鹏

(四川联合大学,成都,610065)

梁棣

(四川省水利水电勘测设计研究院,成都,610072)

摘要 紫坪铺水文站非汛期划分为退水期和过渡期,前者的径流变化选用分级退水模型和季节性自回归模型描述,后者采用多元回归、灰色动态、非参数权重和模糊集预报模型等刻画。经优选后采用的预报模型,其评定和预报检验对旬、月径流都有令人满意的精度。

关键词 非汛期径流 预报模型 模型评定和检验

紫坪铺水库工程位于四川省都江堰市以上9km岷江干流上,是准备修建的大型水利枢纽工程。非汛期径流的中长期预报对水库工程合理地运行调度有十分重要的作用。

本文以紫坪铺水文站基本资料为依据,在分析该站非汛期(10月~翌年4月)径流变化规律基础上,将非汛期分为退水期和过渡期。根据两个时期不同的水情变化特点,选择不同模型描述其变化规律,经模型的评定和预报检验,优选最佳预报模型。

本研究中一般都采用1958~1980年水文气象资料建模和模型评定,1981~1990年资料用于模型的预报检验。

1 非汛期径流变化规律分析

紫坪铺站10月~翌年4月为非汛期,其中11月~翌年3月主要为地下水补给,退水规律较好;10月和4月除地下水和降水补给外,4月还有融雪水补给。因此径流变化有不同规律。

1.1 退水规律显著

紫坪铺站月、旬流量在11月~翌年2月有显著的消退变化规律,3月有少量融雪水等补给,径流有很小的回升,但仍以地下水补给为主(如表1)。

表1 月、旬流量退水系数表

月	11	12	1	2	3
月流量系数	0.615	0.465	0.270	0.121	-0.080
上旬流量系数	0.234	0.149	0.088	0.043	-0.002
中旬流量系数	0.189	0.122	0.078	0.022	-0.064
下旬流量系数	0.167	0.109	0.047	0.015	-0.117

1.2 相邻时段流量关系密切

紫坪铺站相邻月或旬流量关系密切,在11月~翌年3月一阶相关系数一般都在0.90以上(见表2),且随着统计时段缩短,从月到旬的相关系数越来越大,关系越来越密切。

表2 月、旬流量一阶相关系数表

月	10	11	12	1	2	3	4
月流量系数	0.60	0.85	0.92	0.96	0.96	0.85	0.49
上旬流量系数		0.95	0.98	0.97	0.99	0.97	0.72
中旬流量系数	0.80	0.96	0.97	0.97	0.99	0.90	0.75
下旬流量系数	0.87	0.98	0.99	0.99	0.97	0.84	0.71

11月~翌年3月的月、旬流量2~4阶自相关系数可达0.80以上,这表明不仅相邻时段流量关系密切,就是推移到3、4个时段或更长时段关系仍然密切。

1.3 10和4月流量变化不规则

如前所述,由于这期间的径流除地下水补给外,还有降水、融雪等补给,因此,10月

和 4 月过渡期流量变化不规则。

2 11 月~翌年 3 月径流预报模型

这期间径流有显著的退水规律或前后期径流关系密切,因此选用退水模型和季节性一阶自回归模型(AR(1))为预报模型。

2.1 分级退水模型

设 Q_t 和 Q_0 分别为 t 时段流量和起退流量, β 为退水系数,则退水模型为

$$Q_t = Q_0 e^{-\beta t} \quad (1)$$

由于地表径流、壤中流及地下径流退水规律不同,不同起退流量退水规律是不同的,因此按起退流量分级,采用不同退水系数建立预报模型。表 3 中仅列出了月流量分级退水系数 β 值。

2.2 季节性一阶自回归模型

季节性 AR(1)模型为

表 4 分级退水和季节性 AR(1)模型精度评定(检验)表

预报要素	预报使用时间	预见期	预报模型	评定等级		检验等级	
				$e \leq 20\%$	$e \leq 30\%$	$e \leq 20\%$	$e \leq 30\%$
旬流量	11~3月	旬	分级退水	甲	甲	甲	甲
旬流量	11~3月	旬	季节性 AR(1)	甲	甲	甲	甲
月流量	11~3月	月	分级退水	甲	甲	甲	甲
月流量	11月	月	季节性 AR(1)	丙	乙	乙	甲
月流量	12~3月	月	季节性 AR(1)	甲	甲	甲	甲

表注: e 为许可误差;甲等:合格率 $\geq 85\%$;乙等:合格率 $70\% \sim 84\%$;丙等:合格率 $60\% \sim 69\%$ 。

3 10 月和 4 月径流预报模型

10 月和 4 月为明显的过渡期,径流变化受较多因子的影响,预报模型应反映多个影响因子与径流量之关系。本文的研究选用了多元回归、灰色动态、非参数权重及模糊集预报模型等制作预报方案。

3.1 多元回归模型

多元回归模型的回归因子除选择前期径流量 x_1 (m^3/s)外,还应选择前期降水量 x_3 (mm),反映前期土壤干湿程度和对径流补给的影响,此外选前期气温 x_2 ($^{\circ}C$),反映融

$$Q'_{t,\tau} = \varphi_{\tau} Q'_{t,\tau-1} + \epsilon_{t,\tau} \quad (2)$$

$$t = 1, 2, \dots, n(\text{年}); \tau = 1, 2, \dots, \omega(\text{季})$$

式中 $Q'_{t,\tau}$ 为 t 年 τ 季中心化流量; φ_{τ} 为 τ 季自回归系数; $\epsilon_{t,\tau}$ 为正态白噪声。

表 3 月流量分级退水系数表

$Q_0 / m^3 \cdot s^{-1}$	>900	$800 \sim 900$	$600 \sim 800$	<600
11月	0.68	0.67	0.66	0.48
12月	0.50	0.50	0.46	0.46
1月	0.29	0.28	0.28	0.25
2月	0.13	0.13	0.12	0.10

按矩法估计模型参数 φ_{τ} (见表 2)。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,采用文献[1]方法对 $\epsilon_{t,\tau}$ 进行假设检验,均接受独立性的原假设,即通过了模型检验。

分级退水模型和季节性 AR(1)模型评定和预报检验结果(见表 4),除 11 月径流模型外,其余各月、旬径流模型都有很高精度。

雪水补给或蒸发量损失对径流量的影响。则多元回归模型为

$$Q = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (3)$$

式中 Q 为预报的月(旬)流量; a_0, a_1, a_2, a_3 为待定的模型参数。

按多元回归分析方法估计模型参数。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时,各月(旬)模型均通过 F 检验。

3.2 灰色动态模型^[2]

GM(1,1)模型为

$$x_1^{(1)}(t+1) = (x_1^{(0)}(1) - u/a) e^{-at} + u/a \quad (4)$$

GM(1,2)模型为

$$x_1^{(1)}(t+1) = [x_1^{(0)}(1) - bx_2^{(1)}(t+1)/A] e^{-at} + bx_2^{(1)}(t+1)/A \quad (5)$$

$$t = 1, 2, \dots$$

式中 $x_1^{(0)}(t)$, $x_1^{(1)}(t)$ 和 $x_2^{(0)}(t)$, $x_2^{(1)}(t)$ 分别

代表原始和累加径流序列以及原始和累加降水量序列; a, u, A, b 为模型参数。按文献[2]估计的参数见表 5。模型关联度和后验差检验多数通过了检验。

表 5 灰色动态模型参数表

预报要素	模型	预报使用时间	预见期	GM(1,1)		GM(1,2)	
				a	u	A	b
旬流量	GM(1,2)	4月上旬	年			0.9025	1.0809
		4月中旬	年			0.2722	0.4288
		4月下旬	年			1.6726	2.5040
月流量	GM(1,1)	4月	年	0.0013	253.20		
		10月	年	-0.0014	558.88		

3.3 非参数权重模型^[3]

该法是利用相似性原理,如欲预报 4 月流量,则利用已有的 3 月流量资料,与欲预报的哪一年 3 月流量比较,当用于建模的已有的哪一年 3 月流量与欲预报的哪一年 3 月流量相差不大,就给建模哪一年 4 月流量以较大的权重,说明它们相似程度高,否则,权重小,相似程度低。由此建立预报方案。设欲预报的 4 月流量为 $Q_{4, \text{预}}$, 则有

$$Q_{4, \text{预}} = \frac{Q_1^{(4)}W_{3,1} + Q_2^{(4)}W_{3,2} + \dots + Q_n^{(4)}W_{3,n}}{W_{3,1} + W_{3,2} + \dots + W_{3,n}} \quad (6)$$

其中 $W_{3,i} = 1/(Q_i^{(3)} - Q_{3, \text{预}})^2$
 $i = 1, 2, \dots, n$ (年)

式中 $Q_{3, \text{预}}$ 为预报的哪一年 3 月流量; $Q_i^{(3)}$, $Q_i^{(4)}$ 分别为建模资料中第 i 年 3 月和 4 月流量; $W_{3,i}$ 为权重。当 $(Q_i^{(3)} - Q_{3, \text{预}}) \approx 0$, 则 $W_{3,i}$ 值极大,需作适当处理。

3.4 模糊集预报模型^[4]

设月(旬)径流序列为: $Q = \{Q_1, \dots, Q_n\}$
 $= (Q_j)$ 已选择的相应影响因子矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & \dots & x_{3n} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, m (=3); j = 1, 2, \dots, n$ (年)

将上式转化为 $[0, 1]$ 闭区间规格化因子矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & \dots & r_{2n} \\ r_{31} & \dots & r_{3n} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (7)$$

若将月(旬)径流序列划分为 c 类模式(如划为丰、中、枯水,则 $c = 3$),这是一种模糊划分,与之对应的 m 个因子(在此 $m = 3$),也划分为 c 类模式,则组成 c 个模式 m 个因子的模糊分类中心矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = (s_{ih}) \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c$ 。

设 u_{hj} 为隶属度,其模糊划分矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & \dots & u_{2n} \\ u_{31} & \dots & u_{3n} \end{bmatrix} = (u_{hj}) \quad (9)$$

$h = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, n$ 。

考虑影响因子第 j 项与第 h 类模式的差异程度,用目标函数——全部影响因子 n 项与全部 C 类模式之间的权广义距离平方和——最小,可求得

$$s_{ih} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{hj}^2 W_j r_{ij}}{\sum_{j=1}^n u_{hj}^2 W_j} \quad (10);$$

$$u_{kj} = 1 / \sum_{i=1}^c \left[\frac{\sum_{i=1}^m [W_i(r_{ij} - s_{ik})]^2}{\sum_{i=1}^m [W_i(r_{ij} - s_{ik})]^2} \right] \quad (11)$$

W_i 为反映各因子对 Q 影响大小的权重系数。

当给定精度后,假定一个初始模糊划分矩阵(u_{kj}^0),由(10)(11)式迭代计算,可求得最优化模糊划分矩阵(u_{kj}^*)= U^* 和模糊分类中心矩阵(s_{ik}^*)= S^* 。

按隶属度最大原则,将(u_{kj}^*)每一列最大者取为 1,其余为 0,成为布尔矩阵 U_B^* ,如

$$U_B^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

对于 U_B^* 与 Q ,若 Q 的划分与 U_B^* 一一对应,则模型通过检验, W_i 、(u_{kj}^*)和(s_{ik}^*)确定合理,否则调整权重系数 W_i ,甚至改变影响因

子,再迭代求(u_{kj}^*)和(s_{ik}^*),直到通过检验。

当已知规格化前期影响因子(r'_{ij})时,要求预报其相应月(旬)流量(Q'_j),只需将(s_{ik}^*)代入(11)式,即可得预报模型

$$(u_{kj}^*) = 1 / \sum_{i=1}^c \left[\frac{\sum_{i=1}^m [W_i(r'_{ij} - s_{ik}^*)]^2}{\sum_{i=1}^m [W_i(r'_{ij} - s_{ik}^*)]^2} \right] \quad (13)$$

将(r'_{ij})、 W_i 和(s_{ik}^*)代入(13)式得(u_{kj}^*);比较(u_{kj}^*)与(u_{kj}^*)每一列元素,若都一一相近,则实测系列中计算的(u_{kj}^*)对应的(Q_j),即为预报值(Q'_j)。

10月和4月预报模型精度评定和检验如见表6。可以看出4月流量一般可用多元回归模型等预报,10月流量用多元回归模型或模糊集预报模型等预报,都有较高精度。

表6 10月和4月预报模型精度评定(检验)表

预报要素	预见期	预报模型	评定等级		检验等级	
			$e \leq 20\%$	$e \leq 30\%$	$e \leq 20\%$	$e \leq 30\%$
10月流量	月	多元回归模型	甲	甲	乙	乙
	月	季节性AR(1)模型	丙	甲	乙	甲
	年	GM(1,1)模型	乙	甲	丙	乙
	月	非参数权重模型	乙	甲	/	/
	月	模糊集预报模型	/	/	乙	甲
4月流量	月	多元回归模型	甲	甲	乙	乙
	月	季节性AR(1)模型	乙	甲	丙	甲
	年	GM(1,2)模型	乙	甲	丙	乙
	月	非参数权重模型	乙	甲	/	/
	月	模糊集预报模型	/	/	乙	甲

注:为减少篇幅,旬流量模型精度评定未列出。

表7 紫坪铺水库工程非汛期径流预报模型

预报要素	预报时间	预见期	预报模型	等级($e \leq 20\%$ 时)		等级($e \leq 30\%$ 时)	
				评定	检验	评定	检验
旬流量	10月中旬	旬	退水模型	乙	乙	甲	甲
	10月下旬~4月上旬	旬	退水模型或季节性AR(1)模型	甲	甲	甲	甲
	4月中旬	旬	多元回归模型	甲	甲	甲	甲
	4月下旬	旬	多元回归模型	乙	丙	甲	乙
月流量	10月	月	多元回归或模糊集预报模型	甲	乙或甲	甲	乙或甲
	11~3月	月	退水模型	甲	甲	甲	甲
	4月	月	多元回归或模糊集预报模型	甲	乙或甲	甲	乙或甲

4 最优预报模型的选择

遵循“多种方法,综合分析,合理选用”的工程水文设计原则,根据模型评定和预报检验的结果,并考虑在精度相近的情况下,对那些理论基础坚实,结构简单,使用方便,对前期资料要求不高的模型优先选用。据此优选的紫坪铺水库工程非汛期径流预报模型见表7。可以看出,对10月~翌年3月的旬、月流量的预报一般都可采用分级退水模型或季节性AR(1)模型;对10月和3月的旬、月流量的预报可采用多元回归和模糊集预报模型等

多种模型。这些预报模型一般都有较高的预报精度,可满足工程施工和运行的需要。

参考文献

- 1 丁晶、邓育仁.《随机水文学》.成都科技大学出版社,1988年10月
- 2 邓聚龙.灰色预测与决策.华中理工大学出版社,1986年8月
- 3 James A. Smith. Long-Range Streamflow Forecasting Using Nonparametric Regression, Water Resources Bulletin,1991,Vol. 27, NO. 1
- 4 陈守煜.模糊水文学与水资源系统模糊优化原理.大连理工大学出版社,1990年8月

(收稿日期:19940131)

Study on Runoff Prediction During Dry Season in Zipingpu Reservoir Project

Deng Yuren Ding Jing Yuan Peng

(Sichuan Union University)

Liang Di

(Sichuan Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract Dry season is consist of recession period and transitory period at Zipingpu hydrological station. Runoff variations during recession period are described by stage recession model and seasonal autoregressive model. Tyansitory period is expressed by multiple regression, grey dynamic state, non-parameter weighting and prediction model of fuzzy sets. After comparing, prediction model is adopted. The assessment and prediction is correct and monthly runoff is accurate.

Key words runoff during dry season prediction model assessment and checking of model

(上接第5页)

Abstract Serious situation of soil erosions within upper reaches of Yangzi River and subsequent harmfulness are analyzed. Benitits gained after preventing soil erosions in two periods since 1982 is shown. Meanwhile, due to present small preventing area and less cost which can not meet the needs of the construction the Three Gorges Project, several suggestions for speeding up preventing soil erosions and changing the Three Gorges into green defence are provided.

Key Words soil erosions Preventing the Three Gorges Project green defence