

新丰江流域降水和径流量长期预测^{*}

陈俊合, 周 文, 王 萍
(中山大学地球与环境科学学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 利用正规化周期回归预测模型, 对新丰江流域的月降水径流序列进行拟合分析和预测, 无论是拟合的过程还是预测检验的结果都与实测值基本符合, 说明该预测模型是可行的. 该模型还具有能充分利用水文系列信息, 采用对最大左侧概率 P_F 值者进行 F 检验, 从而提高了检验的信度等优点.

关键词: 正规化周期回归预测模型; 新丰江流域; 降水预测; 径流量预测

中图分类号: P338.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 03-0104-04

东江是珠江三大水系之一, 东江水肩负着向香港、深圳和沿岸地区供水的任务, 作为香港和深圳供水主要水源的新丰江水库, 其调度决策是关系到供水效益的关键因素之一, 正确预报新丰江流域降水径流是调度决策的基础. 因此有必要对其降水径流长期预报进行研究. 流域水库长期预报主要采用时间系列分析法^[1]及逐步回归分析法^[2]. 为了更好地利用水文资料信息, 提高预报精度, 本文将在对水文资料正规化 (标准化) 处理的基础上, 通过方差分析决定水文序列的周期^[3], 利用正规化周期回归预测模型, 对新丰江流域降水径流量序列资料进行分析和预测.

1 新丰江流域的计算模式及方法

1.1 基本预测模型

本模型把标准化序列 Y_t 看成由超长期变化趋势函数项 Y_{Tt} , 各种周期函数项 Y_{pt} 和噪声项 Y_{et} 叠加而成:

$$\begin{cases} Y_t = Y_{Tt} + Y_{pt} + Y_{et} & (t = 1, 2, \cdots, N) \\ Y_{py} = \sum_{k=1}^p Y_{kt} \\ Y_{et} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

1.2 消除序列中超长期变化趋势项

采用以时间为自变量的非线性回归, 经严格的 F 分布左侧概率检验, 若通过 F 信度检验, 则认为序列中有明显的超长期变化趋势存在, 否则认为趋势项不存在或不明显. 若趋势项存在, 则可将它从序列中分离出来

$$Y'_t = Y_t - Y_{Tt} \quad (t = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

1.3 分离序列中各种周期函数分量

(1) 用方差分析寻找时间序列中第 1 周期函数. 设周期长度为 $L^{(1)}$, 将序列按 $L^{(1)}$ 排列.

$$Y_t = (y_{ij}) = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1l} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$(t = 1, 2, \cdots, n)$

构造统计量 F_L :

$$F_L^{(1)} = \frac{Q_B^{(1)} N_R^{(1)}}{Q_R^{(1)} N_B^{(1)}} \quad (4)$$
$$\begin{cases} Q_B^{(1)} = \sum_{j=1}^{L^{(1)}} \left[\frac{1}{n_j} \left(\sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} \right)^2 \right] - \left[\sum_{j=1}^{L^{(1)}} \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} \right]^2 / \sum_{j=1}^{L^{(1)}} n_j \\ Q_R^{(1)} = \sum_{j=1}^{L^{(1)}} \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij}^2 - \sum_{j=1}^{L^{(1)}} \left[\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} \right]^2 \\ N_B^{(1)} = L^{(1)} - 1 \\ N_R^{(1)} = N - L^{(1)} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $Q_B^{(1)}$ 为组间离差平方和 (周期离差平方和), $Q_R^{(1)}$ 为组内离差平方和 (残差平方和), $N_B^{(1)}$ 和 $N_R^{(1)}$ 分别为组间、组内自由度, $F_L^{(1)}$ 为服从自由度为 $N_B^{(1)}$, $N_R^{(1)}$ 的 F -分布.

令 $L^{(1)} = 2, 3, \cdots, N/2$, 通过计算 $F_L^{(1)}$ 进行周期普查, 通常对最大的 $F_L^{(1)}$ 进行显著性检验, 为了克服片面性, 可选出前若干个最大的统计量 $F_L^{(1)}$ 值, 和它们所对应的 2 个自由度 n_1 和 n_2 , 计

^{*} 基金项目: 香港研究基金资助项目 (2120095)
收稿日期: 2000-08-15; 作者简介: 陈俊合 (1947—), 男, 教授.
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

算出它们的 F -分布左侧概率：

$$P_F(n_1, n_2) = \int_0^F f(n_1, n_2, F) dF \tag{6}$$

选出 $P_{F(n_1, n_2)}$ 中最大者 P_{Fm} 作 F -信度检验。

设 P_{FC} 为周期显著性的临界信度值，若 $P_{Fm} > P_{FC}$ ，则所选周期显著，否则为不显著。若周期存在，则其序列为

$$Y_{1t} = Y_{1j} \tag{7}$$
$$\left[t = 1, 2, \dots, N; j = t - \left\lfloor \frac{t-1}{L^{(1)}} \right\rfloor \times L^{(1)} \right]$$

式中， $\left\lfloor \frac{t-1}{L^{(1)}} \right\rfloor$ 表示 $\frac{t-1}{L^{(1)}}$ 对取整数。

将周期序列从数据序列中分离出来：

$$Y_t^{(1)} = Y_t - Y_{1t} \tag{8}$$

(2) 对 $Y_t^{(1)}$ 序列寻找其它显著周期。由于从第 2 周期起，残余序列 $Y_t^{(1)}$ 已不是标准化序列，其离差平方和分解不满足 Cochran 定理。本模型采用逐次标准化的序列离差平方和分解方案，使每次的分解满足 Cochran 定理。寻找周期的方法同(3)~(8)式。由于被逐次分离出来的周期分量都处在原序列不同方差水平上，因此周期选择完毕时必须对它们逐次进行量纲的还原。

1.4 原标准化序列的拟合和外推预测

用序列的超长期变化趋势函数和各种显著周期分量对原标准化序列作拟合估计和外推预测。

$$Y_t = Y_{Tt} + Y_{Pt} \quad (t = 1, 2, \dots, N + N_T) \tag{9}$$

其中， N_T 为预测长度。

1.5 原始序列的拟合估计和外推预测

用估计的标准化序列和原始序列样本平均值 E_j 和标准差 S_j 对原序列作拟合估计和外推预测

$$Y_t' = Y S_j + E_j \tag{10}$$

$$(t = 1, 2, \dots, N + N_T; j = t - \left\lfloor \frac{t-1}{n} \right\rfloor \times n)$$

1.6 误差估计

(1) P 个周期复相关系数

$$R_P = \left[\sum_{i=1}^P Q_B^{(ij)} Q^{(1)} \right]^{1/2} \tag{11}$$

(2) 残余标准差 (拟合标准差)

$$S_K = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y_t - Y_t')^2 \right]^{1/2} \tag{12}$$

2 降水径流实例分析

2.1 资 料

本次采用的降雨资料，是以新丰江流域现有

20 个测站的 1959—1998 年逐月降水平均，作为该流域逐月面平均雨量，见图 1。径流量的逐月资料年限为 1943—1998 年。



图 1 新丰江流域水文监测布点图

Fig. 1 Sketch plan of the Xinfengjiang River Basin

2.2 流域年内平均降雨与径流量变化特征

从表 1 可以看出：①年内分配不均降水主要集中于 4—8 月，占全年降雨量的 82%，而径流也与之对应，约占全年的 72%；②变差系数 C_v 反映了变量的稳定性，越大越不稳定。对于降雨来说： $C_v > 1.0$ 的月份有 1 和 10—12 月，最大值为 12 月 (1.05)。 $C_v < 0.5$ 的月份有 4—8 月，最小值为 7 月 (0.39)，由此可见， C_v 的大值时段正好对应着年头年尾 (枯水期)，说明枯水期降雨较不稳定。 C_v 的小值时段正好对应着年中 (即丰水期)，表明降水较稳定。而对于径流来说，除 2—3 月较不稳定外，其余月份都比较稳定。

2.3 流域的月平均降水和径流量的拟合

该流域平均降水序列的时间趋势项一阶、二阶和三阶的回归平方和 $U = 5.36 \text{ mm}$ ， F 信度只有 0.852，未达到我们所设置的临界信度 0.92，可认为其降水趋势项不明显。按方差分配估计自由度缩减的离差平方和分解方案，选择周期和对周期进行 F 信度检验，找到 3 个周期：112 月 (9.33 a)、176 月 (14.67 a)、169 月 (14.08 a)，显然，第 1 周期恰好等于月球半回归周期，第 2、3 周期可能与太阳黑子周期有关^[3]。前 3 个周期的复相关系数高达 0.942，方差贡献百分率分别为 41.0%、33.9%、13.9%，共占总方差的 88.8%，可以提取约 89% 的信息具有一定的代表性，能够反映出其降水场的最重要特征。

表 1 新丰江流域月平均降水 R 及径流 Q 的特征值

Tah 1 Characteristics of the monthly precipitation and runoff in Xinfengjiang River basin

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨	R/mm	50.6	93.1	152.4	217.8	301.7	319.1	194.0	211.4	132.3	54.3	39.4	36.9
	δ/mm	52.4	89.3	94.6	103.8	132.2	153.8	75.9	89.7	67.3	54.4	40.4	38.9
	C_v	1.04	0.96	0.62	0.48	0.44	0.48	0.39	0.42	0.51	1.00	1.03	1.05
径流	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	57.8	84.4	129.6	248.5	384.9	534.7	282.2	250.6	186.7	97.4	73.4	56.0
	δ/mm	41.1	87.9	136.5	155.1	233.5	296.9	134.7	123.6	106.0	50.6	32.8	23.7
	C_v	0.71	1.04	1.05	0.62	0.61	0.56	0.48	0.49	0.57	0.52	0.45	0.42

径流量的趋势项一阶、二阶和三阶的回归平方和 $U=18.12\text{ m}^3/\text{s}$, 占总方差的 4.10%, F 信度达 0.999 (超过临界信度 0.92), 径流量序列有一个很显著的逐渐上升趋势, 趋势项方程为:

$$Y_t=-43009870.00+1.79933t-3.64097t^2+1.96761t^3$$

并筛选出 5 个周期: 87 月(7.25 a)、149 月(12.42 a)、112 月(9.33 a)、199 月(16.58 a) 和 53 月(4.42 a), 这 5 个周期的方差贡献百分率分别为 28.9%、29.4%、14.4%、13.1% 和 2.0%, 共占总方差的 87.8%。可以提取约 88% 的信息, 能够反映出径流量最主要特征。新丰江站径流量序列的第 3 周期与平均降水序列的第 1 周期相同, 正好反映出径流量与降水的密切关系。分别根据新丰江流域平均降水序列的前 3 个周期和径流量序列的前 5 个周期, 对这两个序列进行拟合和预测, 都能够较好地拟合出该流域实际降水量和径流量的变化, 平均拟合标准差分别为 31.88 mm、42.5 m^3/s 。表 2 列出了平均降水序列和径流量序列前

10 个最大、最小降水量的实际值和拟合误差, 进一步说明用正规化周期回归预测模型可以较好地拟合出实际降水序列和径流量序列中的极值, 由表 2 可以看出, 对前 10 个最大降水量和径流量实际值的平均绝对拟合误差分别为 51.2 mm、90.1 m^3/s , 前 10 个最小降水量径流量实际值的平均绝对拟合误差分别 8.4 mm、14.3 m^3/s 。

2.4 新丰江平均降水和径流量的预测

对新丰江平均降水和径流量从 1996—1998 年作连续 3 年的逐月具体数值预测, 见图 2 和 3。

从图 2、3 可看出, 总体上, 预测值与实际值比较接近。降水量与径流量有比较好的对应关系, 说明用正规化周期回归预测模型作降水量和径流量的预测是可行的, 但仍存在一些不足之处, 有待进一步改进。

3 结语和讨论

(1) 本文提出用正规化周期回归预测模型, 对新丰江流域平均降水和径流量变化进行分析, 并作连续多年预测, 是本流域一种全新尝试, 该

表 2 新丰江流域降水量 R 和径流量 Q 前 10 个最大, 最小实际值和拟合误差

Tah 2 The error of the top ten maximum and observed simulated precipitation and runoff in Xinfengjiang River basin

序号	R/mm						$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$					
	极大值			极小值			极大值			极小值		
	实际值	误差	时间	实际值	误差	时间	实际值	误差	时间	实际值	误差	时间
1	794.0	-79.5	196806	0.0	9.1	197910	1284.0	-45.5	196806	11.1	2.7	196701
2	721.0	84.5	196606	0.4	6.9	198410	1230.0	61.9	196606	14.0	-23.7	196305
3	667.7	-52.4	198905	0.6	3.7	197412	1210.0	-168.1	197505	15.8	-2.1	196310
4	647.0	-82.2	197505	1.0	18.3	197601	943.0	136.1	196406	16.7	5.4	196302
5	553.2	95.7	199306	1.8	1.0	199401	910.0	-91.8	198308	19.0	31.9	196303
6	5420	-36.0	198004	1.8	-1.8	199210	900.0	-44.3	198905	23.2	9.5	196312
7	491.1	21.2	198705	1.9	29.5	198601	842.0	61.7	199306	23.7	0.9	196412
8	490.0	-55.7	197606	2.2	10.0	199411	805.0	-47.8	197606	24.5	-10.9	198701
9	486.5	0.1	197406	2.4	3.8	199611	803.0	-134.4	199707	25.3	31.5	196601
10	463.1	5.1	199203	2.5	0.2	199610	769.0	109.4	197305	25.5	-24.7	198601
平均	51.2			8.4			90.1			14.3		

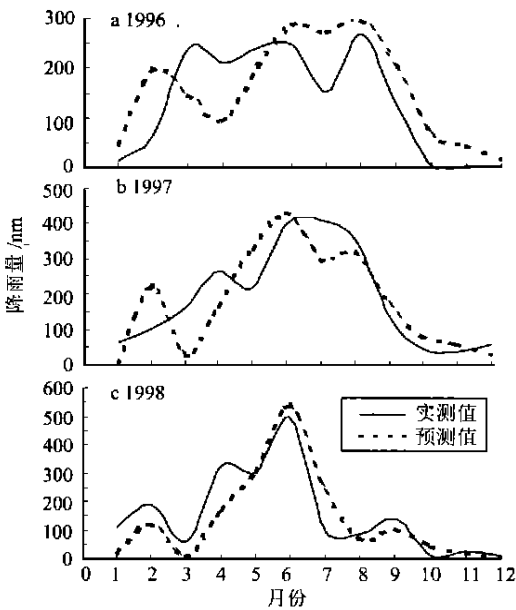


图 2 新丰江流域周期回归 1996—1998 年
降雨量实测值与预测值比较图

Fig 2 Comparison of predicted and observed
precipitation in Xinfengjiang River Basin

模型主要特点在于：①使用连续月标准化序列，能够充分利用序列中所保存的信息；②提出更适合于 Cochran 定理的逐次标准化与按方差分配估计自由度缩减的两种离差平方和分解方案；③采用对最大左侧概率 P_{Fm} 值者进行 F 检验，从而提高了检验的信度。

(2) 计算结果表明：①新丰江流域平均降水年内分布呈双峰型，降水趋势不明显，有大约 9~14 a 的周期变化；②径流量年内分布呈单峰型，径流量逐渐变大的趋势显著，有大约 4~7 a 和 9~16 a 的周期变化。

由于下垫面调蓄、径流形成滞后造成新丰江流域降水特征和径流特征有所不同，但总的来说

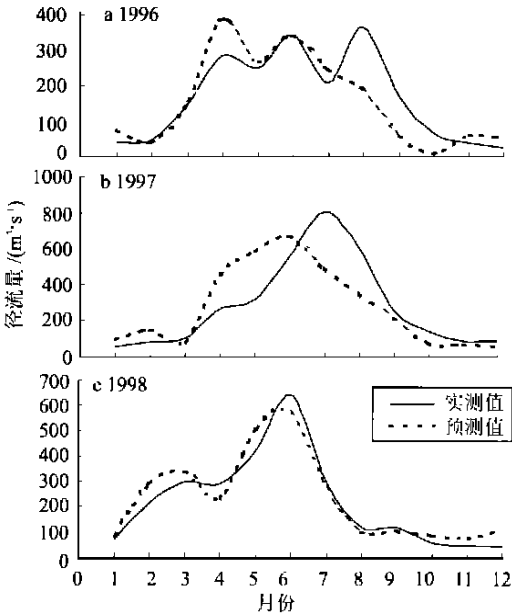


图 3 新丰江流域周期回归 1996—1998 年
径流量实测值与预测值比较图

Fig 3 Comparison of predicted and observed
runoff in Xinfengjiang River Basin

降雨与径流的变化是一致的。

(3) 该模型能较好地拟合出该流域的降水量和径流量的变化，并可连续预测多年，其预测值与实际值比较接近，且降水量与径流量有较好的对应。当然预测精度也有待于进一步提高。

参考文献：

[1] 卢华友,邵东国,郭元裕.丹江口水库径流长期预报研究[J].武汉水利电力大学学报,1996(6):6—10.
[2] 李杰友,熊学龙,罗清标.新丰江水库月径流预报模型[J].河海大学学报,1998(5):104—106.
[3] 谭冠日.逐步周期分析[J].大气科学,1981(4):434—443.

Research on Long-term Prediction of Rainfall
and Runoff in Xinfengjiang River Basin

CHEN Jun he, ZHOU Wen, WANG Ping

(The Earth and Environmental Sciences College, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on normalized periodic regression forecasting model, the monthly precipitation and runoff in Xinfengjiang River basin are analyzed, simulated and predicted. The fitting and predicting results are close to the observed ones, which proves that the model is feasible. The model also has a strong point that can ensure the confidence interval by proceeding the F test on P_F , the maximum left hand probability, with abundant serial information.

Keywords: normalized periodic regression forecasting; rainfall variation; runoff variation; Xinfengjiang River basin