

南明河流域枯水径流量的长期预报

罗书文¹, 梁虹¹, 杨桃², 袁子勇¹, 孔兰¹

(1. 贵州师范大学 地理与生物科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵阳十二中, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 多年来对河流径流量进行预报, 一直是水文工作者追求的目标之一, 但由于全国各地水汽来源不同, 河流特性千差万别, 因而用一套通用的预报方案不能够准确、及时地预报, 以达到防洪抗旱的能力。介绍了用频谱分析进行枯水径流分析和预报的基本方法, 并用该方法对岩溶地区南明河流域径流进行预报分析和建模。模拟预报结果表明, 该流域径流量存在 3 个显著枯水周期(2, 4 和 9 a 左右), 预报结果可为南明河流域经济发展提供依据。

关键词: 频谱分析; 南明河流域; 周期成分; 枯水径流预报

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0044-04

中图分类号: S157, P338

Long-term Forecast of Low Water Runoff in Nanming River Basin

LUO Shu2wen¹, LIANG Hong¹, YANG Tao², YUAN Zi2yong¹, KONG Lan¹

(1. School of Geography and Biology, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. The Twelfth Middle School of Guiyang, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: Forecast of river runoff has been one of the objectives that hydrologists persevere to pursue for decades. However, because of different sources of water vapor throughout the country and the features of different rivers, using a common set of forecasting options can not give an accurate and timely prediction for flood prevention and drought controlling capabilities. Spectrum analysis is used to analyze and forecast low water runoff. Models are developed through forecasting runoff analysis of Nanming River basin in the karst area. Simulated results indicate that the forecasting of basin runoff involves in three notable low water cycles (two years, four years, and around seven years). Result from forecast can provide a basis for the economic development of Nanming River basin.

Keywords: spectrum analysis; Nanming River basin; periodic component; forecast of low water runoff

南明河位于贵州省黔中腹地, 是乌江中游右岸的大支流之一, 流经贵州省会贵阳市, 是典型的喀斯特地貌下的流域。在亚热带季风气候控制下, 降水量虽然丰富但是喀斯特流域可溶性的双重含水介质, 以及地表地下二元流场所组成的独特水文地貌结构及其产生的功能效应, 使得其水系发育, 水文动态上表现出与非喀斯特流域的巨大差异^[1], 严重影响和制约着该区的经济和社会的可持续发展。因此, 径流预报越来越受到人们重视, 特别是枯水径流的预报。径流预报模型很多, 其中频谱分析方法进行水温动态预报具有广泛的适用性和较高的精度, 特别是在气候、地下水、预报中得到广泛应用^[2] 9]。通过收集该流域具有代表性的贵阳水文站(106b44c E, 26b35c N) 1950) 1979 年共计 30 a 的径流实测资料, 采用频谱分析法,

找出科学的南明河流域径流量时间序列预测分析方法。对揭示其发展变化规律, 预测其未来状态, 为社会经济发展提供重要的借鉴意义。

1 基本原理

1.1 模型建立及傅里叶系数的确定

频谱分析在地下水预报中得到广泛运用。应用其在进行地下水预测的基本思路为: 地下水文过程线属于有序数列, 由大量的谐波成分与随机成分合成, 通过对已取得的一定数量观测数据的分析, 可得到与该观测数据性质有关的有序数列。利用这些参数又可以人工再造未来时刻可能出现的有序数列, 从而实现水位的中、长期预报。这是频谱分析预测地下水动态的基本思路^[4] 5]。在喀斯特地区喀斯特水流在地

收稿日期: 20080419

修回日期: 200806220

资助项目: 贵州省优秀青年科技人才培养计划资助项目[黔科合人字(2003)0315]; 贵州省优秀科技教育人才省长专项资金项目[黔科教办(2003)04]; 贵州省科学技术基金[黔科合人字(2005)2085]; 贵州师范大学学生课题(2007) 2008)

作者简介: 罗书文(1978), 男(汉族), 贵州省剑河县人, 硕士研究生, 研究方向为岩溶水文水资源与 GIS, E-mail: lucshuwen6700167@126.com,

通信作者: 梁虹(1959), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 教授, 主要从事喀斯特水文水资源与 GIS 教学与研究, E-mail: lianghong@gznu.edu.cn,

表与地下相互转换过程中, 也因其二元结构在径流过程中的调蓄功能因而有明显的周期变化和随机成分^[2]。水文时间序列的谱参数揭示了过程线内部谱成分与随机成分的比重以及谱结构组成方面的某些特有规律, 物理意义明确。水文时间序列的周期的分量可用一组正弦函数来表示, 且傅里叶证明了其连续函数一般能与无限个谐波之和相等。因此我们可以用傅里叶级数将其在一定区间上展开, 然后分析波参数之间的函数关系, 确定周期或显著性周期, 从而确定周期性变化项, 并建立相应的数学模型^[6-7]。

对序列的周期项一般假定为

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k A_i \sin(Xt + 5_i) \quad (1)$$

式中: 每一项为一个分波; $A_i, X, 5_i$))) 第 i 个分波的振幅、频率和相位; a_0))) 常数。通过数学变换, 并令: $a_i = A_i \sin 5_i, b_i = A_i \cos 5_i$ 则 $V(t)$ 可化为

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k [a_i \cos(Xt) + b_i \sin(Xt)] \quad (2)$$

设枯水径流量实测植序列为 $P_t (t = 1, 2, 3, 4, \dots, n)$, 除去趋势部分后, 余下的序列记为 P_t 。由于观测资料的有限性, 无法也没有必要进行无穷分波。因此一般假定 $V(t)$ 有 K 个分波 (试验周期个数), 认为 K 个分波各有 $n/1, n/2, n/3, \dots, n/k$ 年的周期, 即第 i 个分波的周期为 $T_i = n/i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$, 频率为 $X = 2\pi i/n$, 则 $V(t)$ 可表示为

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k [a_i \cos(\frac{2\pi i}{n}t) + b_i \sin(\frac{2\pi i}{n}t)] \quad (3)$$

一般假设, n 为偶数时, $k = n/2$; n 为奇数时, $k = (n-1)/2$ 。采用最小二乘法确定傅里叶氏系数, 可得

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \\ a_i &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n p_i \cos 1 \frac{2\pi i}{n} (t-1) \quad (4) \\ b_i &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n p_i \sin 1 \frac{2\pi i}{n} (t-1) \end{aligned}$$

1.2 谐波模式检验

频谱分析方法适用于研究的序列, 必须属于谐波模式, 一般用相关函数来判断^[7]。

$$R_i = \frac{\sum_{t=1}^{n-i} (p_t - \bar{p}_1)(p_{t+i} - \bar{p}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-i} (p_t - \bar{p}_1)^2 \sum_{t=1}^{n-i} (p_{t+i} - \bar{p}_2)^2}} \quad (5)$$

式中: p_t, p_{t+i}))) t 及 $t+i$ 时刻的观测值; \bar{p}_1, \bar{p}_2))) 序列开始 1 到 $n-i$ 项以及相应的 $t+i$ 项到 n 项的均值; n))) 序列的长度; $i = 1, 2, 3, \dots, k$ 。如果序列足够长, 可以用序列平均值 \bar{p} 代替 \bar{p}_1, \bar{p}_2 。即 $\bar{p} = \bar{p}_1 = \bar{p}_2$ 。

如果 R_i 随 i 的增加相对迟缓的减小, 则说明序列属于谐波模式。相反, 如果 R_i 随 i 的增加很快减小, 然后在零线附近波动, 则不属于谐波模式。

1.3 选择主周期

计算出各分波参数后可以计算周期强度 S_i^2 和相对周期强度 I_i^2 , 计算式为

$$\begin{aligned} S_i^2 &= \frac{(a_i^2 + b_i^2)}{2} \\ I_i^2 &= \frac{S_i^2}{\sum_{i=1}^k S_i^2} \quad i = (1, 2, 3, \dots, k) \quad (6) \end{aligned}$$

对周期进行周期显著性检验 (判断主周期)。当 N 较大时给定一个显著水平 A 如满足:

$$- \sum_{i=1}^N I_i < A \quad (7)$$

式中: N))) 样本容量或系列长度 n ; I_i))) 第 i 个分波的相对周期强度;

$$I_i = - \sum_{i=1}^k I_i$$

则认为周期 $T_i = N/i$ 在水平 A 上是显著的上式还可以化为一种更简明的形式。

$$I_i > - \frac{2}{N} \ln A \quad (8)$$

周期项确定: 设在 K 个分波中, 有 P 个分波的 I_i 满足 (8) 式, 则 (2) 式改写为

$$V(t) = a_0 + \sum_{m=1}^p [a_m \cos(\frac{2\pi i}{n}t) + b_m \sin(\frac{2\pi i}{n}t)] \quad (9)$$

1.4 精度检验

用式 (9) 进行预报时, 要检验其预报精度。根据经验, 对径流量预报结果, 一般采用后验预测法进行检验^[7]。假设用实测序列中前 n 个数数据建立预报模型, 其标准为 S_1 , 用后 k_1 个数数据进行后验检验, D 为 k_1 个预测值的残差, 其平均值为 \bar{D} 标准差为 S_2 , 则有后验差比值 $C = S_2/S_1$, 小误差频率 $p = \{ |D - \bar{D}| < 0.67455 S_1 \}$, 后验效果可由表 1 给出的标准进行衡量。

表 1 后验预测效果

预测效果	P	C
好	> 0.95	< 0.35
合格	> 0.80	< 0.50
勉强	> 0.70	< 0.65
不合格	[0.70	\ 0.65

2 实例研究

2.1 基本资料

南明河流域贵阳水文站 (106b44E, 26b35N), 位于南明河流域, 属于亚热带季风气候, 多年平均气温为 25.25 e, 多年平均降水量为 1 142.4 mm。该站

控制集水面积 757 km², 流域内岩溶强烈发育, 是典型的喀斯特地区。收集了该站枯水期从 1950) 1979

年共计 30 a 的径流实测资料(资料来源于贵州省历年水文水特征值统计资料), 其年径流量见表 2。

表 2 南明河贵阳站枯季(3 月份) 径流量

m³/s

年份	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
径流量	32.4	32.4	34.6	36.8	99.5	37.8	27.8	36.8	32.8	21.5
年份	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
径流量	17.8	62.3	52.4	59.6	83.4	62.2	39.2	48.6	46.9	34.2
年份	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
径流量	43.9	50.8	63.5	55.6	46.7	49	66.1	79.4	39.1	30.5

2.2 模型的建立与预报

首先对该站河流径流量序列进行分析, 贵阳站枯水径流量序列的周期性比较明显, 趋势性不显著。因此, 可不考虑序列的趋势性成分^[9], 其次判断贵阳站枯水径流量序列是否属于谐波模式。由枯水径流量自相关系数曲线(图 1), 可以看出随着 i 的增加, R_i 值在 0 附近均匀波动, 并无快速减小, 故该径流量序列属于谐波模式。

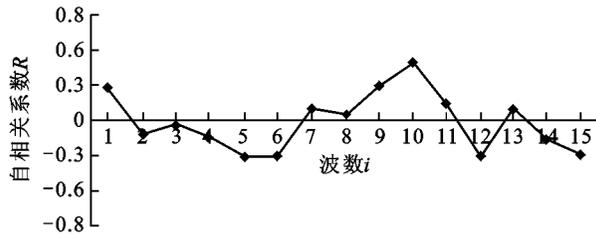


图 1 自相关系数曲线图

用序列的前 27 个数建模型, 用后 3 个数据进行后检验, 即 $n=27, K=3$ 。计算傅里叶系数 a_i 和 b_i , 振幅 A_i 及周期强度 S_i^2 和相对周期强度 I_i^2/b_i 。以波数 i 为横轴, 振幅 A 为纵轴作振幅谱图, 以及对径流序列的振幅功率分析。由图 2 可以看出, 波数 3, 6, 7, 10, 8, 11 时振幅较大, 一般说, 谐波展开式波数 i 需要适当, i 值越大谐波越接近原序列, 但是 i 值超过一定长度, 误差反而增大^{[10] [12]}。一般情况 i 值取序列长度的 1/2, 但是由于径流序列的偏态性, 在径流序列中 i 值以取最佳值并不是序列的 1/2^[5]。主周期的选择用(6) (9) 式进行显著性检验, 试验结果(图 3)表明, 年枯水径流量经过平滑处理后的最佳波数为 3, 所以最终确定了 3 个主要周期。

所以南明河的枯水径流量预报方程为:

$$V(t) = 47.19852 - 14.004\cos(6Pt/n) + 2\sin(6Pt/n) + 7.1862\cos(12Pt/n) - 6.85\sin(Pt/n) - 10.45\cos(22Pt/n) - 4.7906\sin(22Pt/n) \quad (10)$$

应用预报方程进行预报时, 首先要进行精度检

验。本例 1950) 1976 年是用建模数据而 1977) 1979 年是用模型拟合值, 由图 3 可看出虽然曲线的大体走向一致。将(10)式用于实际预报, 当 t 取 27~30, n 取 27 时, 1977) 1979 年的预报值曲线如(图 3), 对上述进行后验分析, 后验值 $C=0.299$, 小误差概率为 $P=1$, 即预报值与后验实测值的标准差只有原样本系列标准差的 0.299 倍, 预报值在误差范围内成功率为 100%。查表 1 可知预报效果为/ 好 0, 所以南明河流域枯水径流量可以用方程(10) 进行预报。

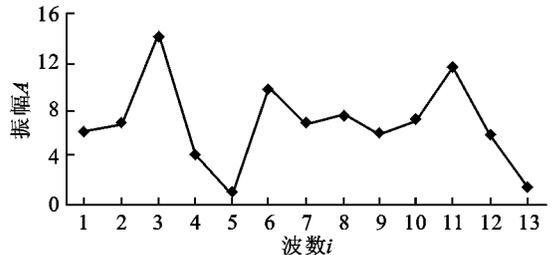


图 2 振幅波谱图

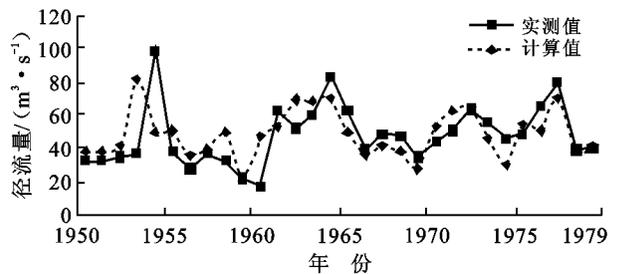


图 3 枯水径流量实测值及其拟合曲线

3 结论与讨论

对南明河流域建模预报分析可知, 南明河流域可以用该模型进行预报, 由于第 i 个分波的周期为 $T_i = n/i$, 所以贵阳站枯水流量有 3 个主要周期, 大约分别为 2, 4 和 9 a 左右。尽管频谱分析能在南明河流域中进行预报, 并不就说明该方法对于其它的喀斯特地区也适用, 只能对其流域的总变化趋势进行了分析预测, 进一步为水文计算、预测等奠定了基础, 同时对指

导喀斯特地区水资源规划及可持续利用有借鉴意义。由于径流量时间序列的发展变化受多种自然、人为因素的制约, 演变规律极其复杂, 水文时间序列表现出高度非线性和多时间尺度特性, 包含确定成分和随机成分。在喀斯特地区有独特的流域结构, 喀斯特流域可溶性的双重含水介质, 以及地表地下二元流场所组成的独特水文地貌结构及其产生的功能效应, 使得其水系发育、水文动态上表现出与非喀斯特流域的巨大差异。所以对喀斯特地区流域径流预报是在考虑周期项的同时还要考虑趋势项和随机项, 对喀斯特地区径流的准确预报还有待于利用其它方法进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 杨明德, 谭明, 梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 2) 25.
- [2] 邢兰辉, 吕惠萍, 张锦辉. 周期叠加方差分析法预报河川径流量 [J]. 2007, 27(4): 41) 44.
- [3] 黄忠恕. 波谱分析方法及其在水文气象中的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1983.

- [4] 陈葆仁, 洪再吉. 地下水动态及其水文预测 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [5] Hall David, Fitzpatrick, Caroline S B. Spectral analysis of pressure variations during combined air and water backwash of rapid gravity filters [J]. Water Research, 1999, 33(17): 3666) 3672.
- [6] 邢纪元. 谐波分析在短期气候预测中的应用 [J]. 山东气象, 2005, 25(2): 14) 15.
- [7] 黄友波, 谢平, 夏军. 频谱分析方法在水文时间序列代表性分析中的应用 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(3): 1) 3.
- [8] 郭彬锋, 尹伟平. 利用皮普分析法预测地下水动态 [J]. 勘察科学技术, 1993(3): 41) 44.
- [9] 李平, 卢文喜, 王福林. 频谱分析在挠力河流域年降水量中的应用 [J]. 水文, 2007(27): 25) 27.
- [10] 拉尔斯登 A, 维尔夫 H S. 数字计算机上用的数学方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [11] 华罗庚, 王元. 数值积分及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1963.
- [12] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望 [J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515) 517.

(上接第 43 页)

[参 考 文 献]

- [1] Kazuhiro K, Kazuhiko T, Jiang D M, et al. Vegetation restoration by seasonal enclosure in the Kerqin sandy land, Inner Mongolia [J]. Plant Ecology, 1998, 139: 133) 144
- [2] 杨持, 刘颖如, 刘美玲, 等. 多伦县沙质草原植被的变化趋势分析 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 393) 397.
- [3] 曹成有, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 小叶锦鸡儿人工固沙区植被恢复生态过程的研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 349) 354.
- [4] 崔全山, 刘冬梅. 内蒙古生态环境脆弱带浅析 [J]. 科学管理研究, 1995, 13(3): 69) 72.
- [5] 文海燕, 赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及其相关分析 [J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 76) 80.
- [6] 赵丽娅, 赵哈林. 我国沙漠化过程中的植被演替研究概述 [J]. 中国沙漠, 1999, 19(增刊): 40) 44.
- [7] 赵成义, 王玉朝. 荒漠) 绿洲边缘区土壤水分时空动态研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 124) 127.
- [8] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 不同强度放牧后自然恢复

- 的沙质草地土壤性状特征 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 333) 338.
- [9] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. Geoderma, 2004, 22(1): 43) 49.
- [10] Lobe, I, Amenlung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld [J]. Eur. J. Soil Sci., 2001, 52: 93) 101.
- [11] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(8): 928) 934.
- [12] Zalibekov Z G. Changes in the soil cover as a result of desertification [J]. Eurasian Soil Sci., 2002, 35: 1276) 1281.
- [13] Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, et al. Association between vegetation patterns and soil properties in the southeastern Tengger desert, China [J]. Arid Land Research and Management, 2004, 18: 369) 383.