

黄河上游年最大洪峰流量规律研究

王义民¹, 陈广圣¹, 闫正龙²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省测绘地理信息局, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于黄河上游年径流过程与年最大洪峰流量序列具有很好的相关性这一特点, 采用功率谱分析法和灰关联分析法从微观和宏观两方面研究洪水规律。功率谱分析结果表明: 黄河上游各水文站年最大洪峰流量序列具有一些周期谐波, 但均没能通过显著性检验, 因此难以建立确定性模型对年最大洪峰流量做出定量预报。通过太阳黑子周期性变化与黄河上游大洪水的相关性统计分析和灰关联度计算, 表明黄河上游大尺度的天气系统与太阳黑子具有很好的相关性, 因此可以通过太阳黑子的变化对年最大洪峰流量进行定性预测。

关键词: 年最大洪峰流量; 功率谱分析; 灰关联度

中图分类号: TV121.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0080-03

Law of annual maximum peak discharge at upper stream of the yellow river

WANG Yimin¹, CHEN Guangsheng¹, YAN Zhenglong²

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the characteristics of the better correlativity between annual runoff process and annual maximum peak flow series, the paper studied flood law in microcosmic and macroscopic aspects by applying the analysis method of power spectrum and grey relation. The results of power spectrum analysis show that the annual maximal peak flow series at upper reaches of the Yellow River has a few period harmonics, and they can not pass test of the building-up determinacy model. So it is difficult to forecast the maximum peak flow by establishing determination model. Through the correlativity statistic analysis and grey relational degree computation between macula cyclic change and flood of upper reaches of the Yellow River, the results show that the big dimension weather system of upper reaches of the Yellow River and macula have very good correlativity. Therefore, it is possible to forecast the maximum peak flow according to the change of macula.

Key words: annual maximum peak discharge; power spectrum analysis; grey relation degree

黄河上游地区, 因青藏高原的地形作用, 大气层中 50% 以上的水汽被削减, 又很少受低纬度强降雨天气系统影响, 且流域面积广大, 局部暴雨对造洪影响不大, 因此较大洪水的出现必须要有大尺度天气系统所形成的长历时、大面积连续降雨。另一方面, 降雨雨强小, 属于蓄满产流, 暴雨洪水径流系数为 $0.03 \sim 0.76 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$, 洪峰形状为矮胖型, 一次洪水历时 $22 \sim 66 \text{ d}$, 峰型系数(平均流量/洪峰流量)为 $0.70 \sim 0.84$ ^[1]。

经分析, 黄河唐乃亥、循化、上迳 3 水文站年径流量序列与年最大洪峰流量序列具有很好的相关

性, 表明年径流量与年最大洪峰之间存在密切的水文联系。年最大洪峰流量是否象年径流量一样具有周期性, 若有则可建立洪峰流量长期预报的确定性模型^[2]。洪峰流量随季节、时间变化的过程是一种复杂现象。本文从微观和宏观两方面探讨年最大洪峰流量规律, 采用功率谱分析法和灰关联分析法, 分别分析上述水文站年最大洪峰流量序列的周期性和其与太阳黑子的关系。时间序列周期分析方法有方差 2 分析、功率谱分析、小波分析等^[3-5], 对年最大洪峰流量这一随机序列进行周期分析的首要目的在于探讨其是否存在周期, 而不是周期的精度, 故采用

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179148、51179149); 水利部公益性行业基金(201101043、201101049); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0933); 陕西省重点实验室项目(11JS077); 教育部博导基金(20116118110009); 陕西省教育厅科技项目(2010JK705)

作者简介: 王义民(1972-), 男, 山西新绛人, 教授, 博士, 主要从事水资源系统工程研究。

功率谱进行周期初步分析,并对周期的显著性进行检验,以确定周期的真伪。

1 基于功率谱分析的年最大洪峰流量序列周期研究

1.1 功率谱分析

应用功率谱分析时间序列周期的步骤如下:

(1)数据序列预处理。一般情况下,数据序列的预处理是对序列进行标准化,以初步消除序列的非平稳性。设离散时间序列为 $Y(t)(t=1,2,\cdots,n)$,序列的均值为 μ_y ,序列的标准差为 σ_y ,则标准化后的新序列为:

$$Y'(t) = \frac{Y(t) - \mu_y}{\sigma_y} \quad (t = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

(2)计算序列的自相关函数。

$$r(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} y'(t)y'(t + \tau) \quad (\tau = 0, 1, 2, \cdots, m) \quad (2)$$

式中: τ 为自相关函数的时延; m 为最大时延。如果 m 取值较大,计算自相关函数的求和项就较少,会影响相关函数和谱估计值的稳定性; m 取值较小会使分辨率过低,且得不到低频部分的谱估计。在水文时间序列的处理中, m 的取值经验为:当 $n > 50$ 时,常取 m 在 $n/10$ 左右;当 $n < 50$ 时,取 m 在 $n/4$ 左右。

(3)计算不同时延的粗估谱。粗估谱公式为:

$$E(k) = \frac{1}{m} \left\{ r(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{m-1} r(\tau) \cos \frac{k\pi}{m} \tau + r(m) \cos k\pi \right\} \quad (k = 0, 1, 2, \cdots, m) \quad (3)$$

式中: k 为基本周期 $2m$ 内的谐波波数,用上式得到的粗估谱随 k 值的变化一般起伏较大,需要用“窗函数”对其作平滑处理,得到精细谱估计。

(4)计算不同时延的精细谱。用哈明-图基光滑系数对上式进行光滑处理后得到的精细谱如下:

$$\begin{cases} \bar{E}(k) = 0.54E(k) + 0.46E(k + 1) & (k = 0) \\ \bar{E}(k) = 0.23E(k - 1) + 0.54E(k) + 0.23E(k + 1) & (1 \leq k < m) \\ \bar{E}(k) = 0.46E(k - 1) + 0.54E(k) & (k = m) \end{cases} \quad (4)$$

(5)绘制谱图及周期分析。以谐波波数 k 为横坐标,粗估谱和精细谱为纵坐标绘制功率谱图。根据图形的极大值确定序列的周期。周期 $T_k = 2m/k$ 。

(6)周期检验。通过上述分析、计算得到的周期是否可靠,需要通过显著性检验确定每一个周期的合理性。主要从两方面进行检验,一是统计检验,二是物理成因分析检验。统计检验方法很多,如方差比法、随机概率判别法 χ^2 分布检验、 F 分布检验等。本

文采用 χ^2 分布检验。
假设样本的总体谱密度为随机过程谱密度,则个别频率的谱估计 $E(k)$ 与其平均值 $\bar{E}(k)$ 之比呈 χ^2/ζ 分布,即

$$\frac{E(k)}{\bar{E}(k)} = \frac{\chi^2}{\zeta} \quad (5)$$

式中: ζ 为谱估计的自由度,且

$$\zeta = (2n - \frac{3}{2}m)/m \quad (6)$$

一般情况下, χ^2_α 可以查数理统计表获得,但也可以根据 α 的不同由下式简化求得。

$$\begin{aligned} \chi^2_{0.05} &\approx \zeta + 0.85 + 1.645 \sqrt{2\zeta - 1} \\ \chi^2_{0.01} &\approx \zeta + 2.20 + 2.326 \sqrt{2\zeta - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

平均谱估计值 $\bar{E}(k)$ 的计算与随机过程的性质有关。“红噪声”过程和“白噪声”过程的平均谱估计值计算式分别为式(8)、(9):

$$\begin{aligned} \bar{E}(k) &= \left[\frac{1 - R^2(1)}{1 + R^2(1) - 2R(1) \cos \frac{k\pi}{m}} \right] \times \\ &\quad \left\{ \frac{1}{2m} [E(0) + E(m)] + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} E(k) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{E}(k) = \frac{1}{2m} [E(0) + E(m)] + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} E(k) \quad (9)$$

如果 $E(k) > \frac{\chi^2_\alpha}{\zeta} \bar{E}(k)$ (10)

则表明 $E(k)$ 以 α 显著水平不接受 $E(k)$ 为非周期谱值。

1.2 黄河上游洪峰流量序列周期分析

采用黄河上游龙羊峡水库入库站唐乃亥站以及循化站和上迳站年最大洪峰流量序列,按照上述步骤进行计算,其中唐乃亥站计算结果见表1,由计算结果绘制谱图(图1)。

表 1 唐乃亥站年最大洪峰流量功率谱分析结果

波数 (k 或 τ)	$r(\tau)$	$E(k)$	$\bar{E}(k)$	检验值	周期
0	0.9719	0.2264	0.2988	0.6038	
1	-0.0437	0.3837	0.3180	0.6038	22.00
2	0.1410	0.2555	0.2700	0.6038	11.00
3	0.2423	0.1903	0.1975	0.6038	7.33
4	0.0133	0.1566	0.2071	0.6038	5.50
5	0.1544	0.3424	0.2689	0.6038	4.40
6	-0.2049	0.2088	0.2440	0.6038	3.67
7	-0.2814	0.2284	0.2555	0.6038	3.14
8	0.0288	0.3659	0.3158	0.6038	2.75
9	0.0647	0.2855	0.3035	0.6038	2.44
10	-0.2526	0.2835	0.2656	0.6038	2.20
11	-0.1487	0.2039	0.2405	0.6038	2.00

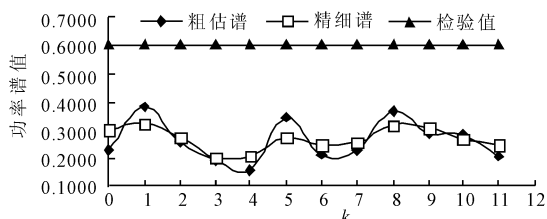


图1 唐乃亥站年最大洪峰流量功率谱

从图1中可看到,在 $k=1,5,8$ 等处功率谱有极大值,即通过功率谱分析,唐乃亥站年最大洪峰序列具有22、4.4、2.75年的周期。该序列的一阶自相关系数 $R(1)=-0.04$,据此可以判断该序列为一“白噪声”随机过程,其谱密度为常数,计算得0.6038,上述三周期均没有通过周期性检验,循化站和上谄站结果相同。因此,难以建立洪峰流量长期预报的确定性模型从量上对洪峰流量预报,本文根据其太阳黑子的关系进行定性分析。

2 太阳黑子与黄河上游年最大洪峰流量序列关联分析

经统计,循化站超过5年一遇的7场洪水(1946、1963、1964、1967、1979、1981、1989)中有4场发生在太阳黑子的峰年或谷年,3场发生在峰、谷年的前一年。特别是二十年一遇的洪水(1981年和1989年)均发生在太阳黑子的峰年。上谄站(仅有1956–1997年资料)超过五年一遇的6场洪水(1964、1967、1968、1978、1981、1989)中同样有4场发生在太阳黑子的峰年或谷年,2场发生在峰年的前一年,而超过二十年一遇的两场洪水一场发生在峰年,一场发生在峰前一年。这表明,黄河上游大洪水的发生与太阳黑子相对数具有一定的相关关系^[6]。

为了明确年最大洪峰流量与太阳黑子相对数的关系,以上谄站为例,对上谄站天然年最大洪峰流量与太阳黑子相对数进行灰关联分析,把年最大洪峰流量作为母序列 $Q(t)$,太阳黑子相对数作为子序列 $x(t)$ 。对 $Q(t)$ 和 $x(t)$ 进行无量纲处理,并记它们在时刻的绝对差为:

$$\Delta(t) = |Q(t) - x(t)| \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\text{最小差为: } \Delta_{\min} = \min_t |Q(t) - x(t)| \quad (12)$$

$$\text{最大差为: } \Delta_{\max} = \max_t |Q(t) - x(t)| \quad (13)$$

$$\text{关联系数为: } \zeta(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta(t) + k\Delta_{\max}} \quad (14)$$

式中: k 为分辨系数,一般取0.1~0.5,通常取0.5。

$$\text{由此可得灰关联度: } r = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \zeta(t) \quad (15)$$

上述关联度 r 表示母序列和子序列之间相关的程度,关联度的值大时,表示母序列和子序列的相关程度高,反之则表示相关程度低。

联立式(11)~(15)计算得上谄站洪峰流量和太阳黑子相对数的灰关联度 $r=0.7124$,说明两序列相关程度高。同理,可得循化站和唐乃亥站洪峰流量和太阳黑子相对数的灰关联度分别为 $r=0.7714$ 和 $r=0.7941$ 。从关联度分析可以看出唐乃亥站的灰关联度与循化站接近,而大于上谄站,这与贵—循区间无较大入流,而循—上区间有洮河等较大入流事实相符,表明太阳黑子的变化与黄河上游大尺度的天气降雨过程相关程度较高,区间洪水的加入减弱了其相关程度。因此可以通过太阳黑子的变化对年最大洪峰流量进行定性分析。

3 结 语

年最大洪峰流量涉及时、空尺度大,影响因素众多复杂,具有很大的不确定性,其分析和预测较为困难。通过对唐乃亥、循化、上谄三水文站年最大洪峰流量序列的功率谱周期性分析,表明其具有一些的周期谐波,但没能通过显著性检验。然而,这些周期的存在有一定的物理成因,如唐乃亥站22年的周期与太阳黑子的22年磁周期相对应,2.75年和4.4年的周期变化与副高脊线位置的3年准周期相近。这种物理成因与计算结果不吻合是否与采用的方法有关,还需作进一步的研究。

通过太阳黑子周期性变化与黄河上游大洪水的相关性统计分析和灰关联度计算,表明黄河上游大尺度的天气系统与太阳黑子具有很好的相关性,可以通过太阳黑子的变化对年最大洪峰流量进行定性预测。

参考文献:

- [1] 赵雪花,黄强.黄河上游径流变化的影响因素分析研究[J].自然科学进展,2004,14(6):700–705.
- [2] 张文鸽,黄强,佟春生.径流混沌时间序列局域多步预测模型及其在黄河上游的应用[J].水力发电学报,2007,26(4):11–15.
- [3] Perrier V. Wavelet spectra compared to fourier spectral[J]. Mathphys, 1995,36(3):1506–1519.
- [4] 衡彤.小波分析及其应用研究[D].成都:四川大学,2003.
- [5] 黄国如,芮孝芳.流域降雨径流时间序列的混沌识别及其预测研究进展[J].水科学进展,2004,15(2):255–260.
- [6] 冯利华,骆高远.长江、黄淮流域近期特大洪水预警和防洪形势[J].长江流域资源与环境,1997,6(1):82–85.