

嫩江中上游年最大流量的多时间尺度分析

孙砾石¹, 席剑辉², 袁湘玲¹

(1. 黑龙江省齐齐哈尔市气象局, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 2. 沈阳航空工业学院自动化系, 辽宁 沈阳 110034)

摘要 结合方差分析和小波分析方法研究近百年来嫩江中上游最大流量的周期成分和周期特性. 方差分析得到了最大流量的主周期特性, 小波分析则采用 Morlet 小波变换对最大流量变化的多时间尺度特征和突变特征进行了研究, 指出其年际及年代际时间尺度的周期变化具有明显的局部化特征. 两种结果在准 32 a 和 5 a 左右的周期上有比较显著的一致性, 结论对嫩江中上游的洪枯预报有一定的指导意义.

关键词 最大流量; Morlet 小波变换; 多时间尺度; 嫩江

中图分类号: TV122⁺.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2004)07-0001-03

传统的谱分析方法建立在 Fourier 变换的基础之上, 由于不能根据高、低频信号的特点, 自适应地调整时频窗, 不能满足时频局部分析的要求. 小波分析是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种信号时频局部化分析新方法. 通过伸缩和平移基小波, 实现了对函数或信号序列的多尺度细化分析, 具有良好的时频局部化特点. 目前在信号处理、大气科学等许多非线性科学领域被广泛应用^[1,2]. 将小波变换引入水文学科已取得了一些研究成果^[3~5], 主要表现在水文多时间尺度分析、水文时间序列变化特性分析、水文预测预报和随机模拟方面.

嫩江发源于大、小兴安岭, 是中国七大江河之一的松花江的主要支流, 流域面积 282 748 km². 流域内的工农业生产和人民生活受嫩江洪枯变化的影响极为明显, 例如发生在 1998 年的特大洪水给当地造成了 40 亿元的直接经济损失. 因此, 研究和掌握嫩江洪枯变化特点, 是做好洪水与枯水预报的基本前提, 对当地的经济发展有十分重要的意义. 本文采用嫩江中上游近百年的最大流量资料, 基于复数 Morlet 小波变换, 探讨嫩江洪枯变化的多时间尺度演变特性.

1 资料和方法

小波函数是指具有振荡特性, 能够迅速衰减到零的一类函数. 设母小波函数为 $\psi(t)$, 经过平移和伸缩可以构成一族函数系

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{1/2} \psi(at - b) \quad (1)$$

式中: $\psi_{ab}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子, 表示小波的周期长度; b 为时间因子, 反映小波在时间上的平移. 将式 (1) 进行 Fourier 变换得

$$\psi_{ab}(\omega) = a^{-1/2} e^{-i\omega b/a} \psi\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (2)$$

可见, 小波具有自适应变化的时频窗口. a 较大时, 窗口呈“瘦窄”状, 符合高频信号的局部时频特性; a 较小时, 窗口呈“扁平”状, 符合低频信号的局部时频特性, 从而实现了函数或信号序列的多尺度细化分析. 信号或函数 $f(t)$ 的连续小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \int_R f(t) \bar{\psi}_{ab}(t) dt \quad (3)$$

式中: $\bar{\psi}_{ab}(t)$ 为 $\psi_{ab}(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a, b)$ 为相应的小波系数.

本文选用的母小波为复数 Morlet 小波, 它的实部与虚部位相相差 $\pi/2$, 消除了实部形式子波变换系数模的振荡. 变换后的小波系数为复数, 从中可以分离出模和位相. 模代表某一尺度成分的多少, 位相可以用来分析信号的奇异性和即时频率.

本文所使用的流量资料来自嫩江干流上两个有代表性的水文站——阿彦浅和江桥. 总共有 1905 ~ 2003 年共 99 年的年最大流量. 其中, 1945 年的资料短缺, 所以采用同一时段内具有相同旱涝等级的 5 个年份的平均值代替. 首先利用方差分析方法分析各时间序列的显著周期, 然后通过小波变换方法得出序列变化的多时间尺度结构、周期变化的局部特

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50139020)
作者简介: 孙砾石(1959—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师, 主要从事气候分析与预报研究.

征 综合分析最大流量和旱涝等级的变化规律.

2 嫩江中上游年最大流量的变化特征

2.1 嫩江中上游年最大流量的基本概况

嫩江中上游年最大流量 $Q_{\max}$ 的平均值为 $3492 \text{ m}^3/\text{s}$. 其中, 发生 $Q_{\max} \geq 10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的特大洪水年有 3 年, $10000 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 7000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水年有 3 年, $7000 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 5500 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水年有 7 年, $5500 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的偏丰水年有 15 年, $4000 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的中等水年有 17 年, $3000 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的偏少水年有 18 年, $2000 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{\max} \geq 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的少水年有 16 年, $Q_{\max} < 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的枯水年有 14 年. 图 1 为江桥站最大流量的历史变化图, 可以看到洪枯过程有着明显的阶段性. 主要洪水期集中在 1929 ~ 1932 年、1953 ~ 1957 年、1988 ~ 1993 年; 主要枯水期集中在 1921 年以前和 20 世纪 70 年代.

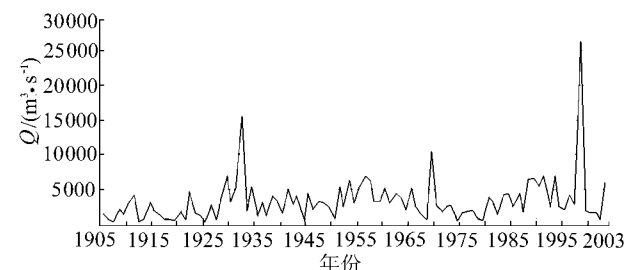


图 1 江桥最大流量时序图

2.2 嫩江中上游年最大流量变化的方差分析

通过对嫩江中上游年最大流量变化的方差分析^[6], 可以较为清晰地表明其周期变化的背景. 主要包含两种周期成分: 江桥站的第一主周期为 32 a, 其组间组内平均离差平方和的比值 $Q = 0.908$; 第二主周期为 5 a, $Q = 0.1403$. 阿彦浅站的第一主周期为 29 a, $Q = 0.9044$; 第二主周期为 5 a, $Q = 0.1507$. F 检验的结果表明两个主周期的置信度达到 0.05, 这种长周期与短周期同为显著周期的现象反映了在长周期变化的背景下, 叠加着短周期的活动过程. 由于这种分析方式受时间序列的长度和分组方式等影响, 只能表现一部分周期的特征, 为了反映实际的周期变化过程的多时间尺度和多层次性特点, 引入小波变换分析方法.

2.3 嫩江中上游年最大流量变化的多时间尺度分析

2.3.1 小波变换系数的实部特征

为便于分析, 以下结果中的最大流量数据都作了归一化处理. 图 2 为嫩江中上游年最大流量序列 Morlet 小波变换系数的实部时频图, 实线对应小波系数为正, 虚线对应小波系数为负, 点划线则对应小

波系数为零值. 每一年的小波特征通过垂直向截取来考察, 每一种周期小波随时间的变化趋势可通过水平截取考察. 分析图 2 可以了解到:

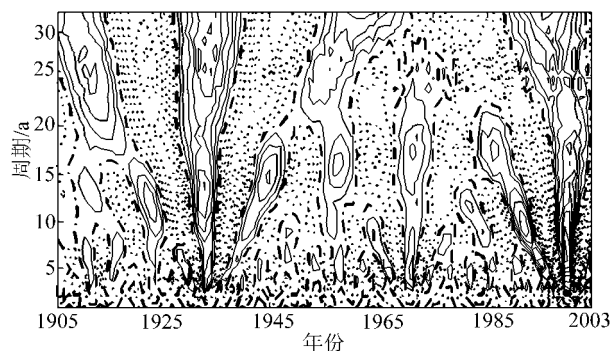


图 2 江桥站最大流量小波系数的实部时频图

a. 嫩江中上游年最大流量变化存在着明显的年代际尺度的周期变化, 而其年际尺度的变化表现得比较弱. 大于等于 25 a 的周期信号最为明显, 但有时域性; 10 ~ 20 a 的周期信号也很明显, 而且变化还是全时域的. 大于等于 25 a 的周期信号可以作为嫩江中上游年最大流量变化的背景周期. 在这个尺度上, 近百年来嫩江中上游年最大流量的变化存在着 4 个多水期和 3 个少水期, 这与嫩江中上游年最大流量的基本特征是一致的.

b. 20 世纪 30 年代以前是以 25 ~ 27 a 的周期为主, 以后这个周期明显地加长, 以大于等于 32 a 的尺度为主了, 表明年代际的周期变化随时间的推移有加大的趋势, 也反映了洪枯的背景是有变化的. 10 ~ 20 a 尺度周期信号的闭合中心值较小, 相对较弱, 在这个尺度上, 最大流量的变化表现为经过了 8 个多水阶段和 7 个少水阶段. 20 世纪 30 年代初期和 50 年代后期以及 90 年代后期的多水期是与背景周期的多水期相叠加的, 而在这期间发生了 1932 年和 1998 年的特大洪水, 以及 1956 年和 1957 年的大洪水, 表明这种分析十分有意义.

c. 嫩江中上游年最大流量的变化也存在着 5 ~ 8 a 和准 3 a 的年际周期, 其中 5 ~ 8 a 的周期在 1909 ~ 1939 年和 1955 ~ 1970 年间表现得比较明显; 在 1970 年以后又有一个准 10 a 的周期出现.

另外, 分析代表上游区域的阿彦浅站最大流量的小波变换(图略), 其基本特征与江桥站的一致, 但其 3 ~ 5 a 的周期变化显得更清楚, 反映了上游地区气候的短周期变化特征也要明显一些.

2.3.2 小波系数的模的时频特征

小波系数模值的大小代表了某一尺度成分的多少, 反映了它所对应时段的时间尺度的周期性是否明显. 图 3 为江桥站最大流量小波系数的模的时频图, 从中可以看到:

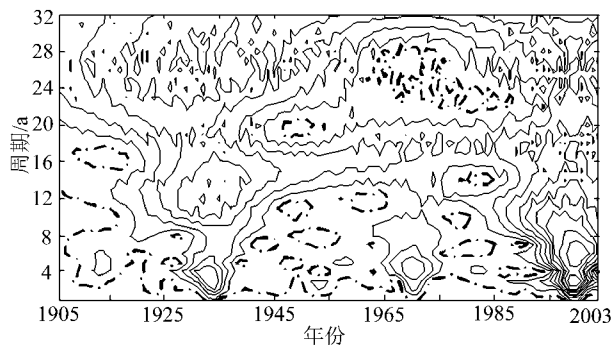


图3 江桥站最大流量小波系数的模时频图

a. 24~30 a 尺度的周期变化在 1905~1955 年间是最为明显的,1956~1985 年间该振荡周期比较弱,到 1987 年以后又有再度加强的迹象。

b. 16 a 尺度附近的振荡周期,虽然相对弱一些,但从 1920 年到现在一直都存在,持续性比较明显,在 1920~1945 年间是一个比较主要的周期(主要在 14 a)。

c. 4~7 a 尺度的周期在 20 世纪 30 年代初、60 年代末和 90 年代末表现明显。

以上的分析表明,各尺度的局部化特征是比较明显的,但长波部分的持续性比较好,而短波部分的局部化特征最为明显。另外,4 a 尺度附近的异常变化均在特大洪水年出现的阶段,反映了小尺度部分的特殊作用。

2.3.3 小波系数的位相时频特征

小波系数的位相时频图反映的是时间序列的突变特征,表现为小波系数的等位相线从大尺度区域向小尺度区域的辐合,可以探测信号突变点在时域中出现的具体位置。图 4 是江桥站的小波系数的位相时频图。可以看出近百年来,嫩江中上游的最大流量变化存在着不同时间尺度的突变,如 32 a 尺度辐合到 1 a 尺度的突变点分别出现在 1925 年和 1932 年,其分别对应着该阶段的流量变化的极值,即表明了这些辐合点分别对应着该尺度在该阶段的突变点。

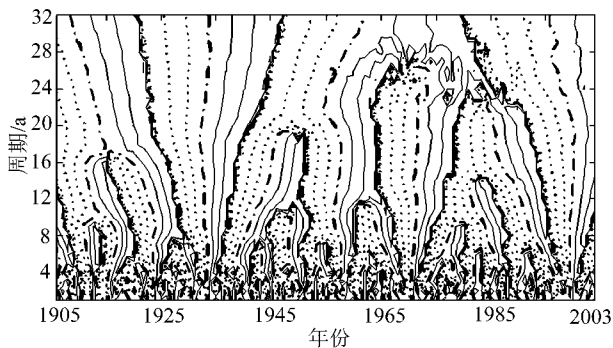


图4 江桥站最大流量小波系数的位相时频图

3 结 论

a. 嫩江中上游年最大流量变化具有多时间尺度结构和突变特征,存在着明显的 30 a 左右和 10~20 a 的年代际尺度的周期变化,以及 3 a 和 5~8 a 的年际尺度的周期变化。年代际尺度的主要周期也不是全时域的,阶段性的周期信号变化也比较明显。年际尺度的周期变化的阶段性和局部性特征更为明显,以准 6 a 尺度的周期振荡信号最为显著。在不同尺度之间也存在着周期突变。

b. 方差分析和小波变换方法在诊断最大流量变换上在准 32 a 和 5 a 左右的周期上有比较显著的一致性,但方差分析只能反映在较大尺度上的周期变化背景,不能反映多尺度的变化特征,以及同一尺度变化的局限性;小波变换较好地解决了这些问题,指出了 10~20 a 时间尺度的交替变化的特点,揭示了各尺度周期随时间变化的多层次性特征,而传统的方差分析和功率谱分析方法是难以解决这些问题的。

c. 当几个主要尺度周期在出现同位相叠加时,往往是大洪水或枯水期出现的时间。

参考文献:

- [1] 林振山,邓自旺.子波气候诊断技术的研究[M].北京:气象出版社,1999.
- [2] 孙卫国,程炳岩.河南省近 50 年来旱涝变化的多时间尺度分析[J].南京气象学院学报,2000,23(2):251~255.
- [3] 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):515~520.
- [4] Cao L, Hong Y, Fang H, He G. Predicting chaotic time series with wavelet networks[J]. Physica D, 1995, 85(1-2):225~238.
- [5] 李贤彬,丁晶.基于子波变换序列的人工神经网络组合预测[J].水利学报,1999(2):1~4.
- [6] 侯瑞科.方差分析及其在海洋水温预报中的应用[J].海洋预报,1994,11(4):68~73.

(收稿日期 2004-09-16 编辑 熊水斌)

