

洞庭湖流域降雨序列突变性和多尺度特征分析

周念清¹, 杨 硕¹, 沈新平², 刘晓群²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为了得到洞庭湖流域降雨变化特征, 综合运用 Mann-Kendall 统计检验法及 Morlet 小波函数, 对洞庭湖流域 1960—2008 年降雨时间序列进行了分析。研究结果表明, 1960—2008 年间, 年降雨序列呈微弱增加的趋势, 进入 21 世纪后降雨量呈显著减少的趋势; 1960—2005 年年降雨量变化的特征时间尺度为 3、7、24 年, 汛期降雨量变化的特征时间尺度为 3、7、16 年; 根据主周期降雨量变化可以预测, 2006—2008 年年降雨量和汛期降雨量均将处于偏少水平, 其结论与实际数据相吻合, 验证了 Morlet 小波分析法对于降雨量趋势预测的有效性。

关键词: 降雨量; 洞庭湖流域; 突变性; 多尺度特征; Mann-Kendall 法; 小波分析

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

Mutation and Multi-scale Characteristics Analysis of Rainfall Series in Dongting Lake Watershed

ZHOU Nianqing¹, YANG Shuo¹, SHEN Xinping², LIU Xiaoqun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Dongting Lake Water Resources Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to study the variations characteristics of rainfall in the Dongting Lake Watershed, the method of Mann-Kendall test and Morlet wavelet function were used to analyze the rainfall time series during the period of 1960—2008 in Dongting Lake Watershed. The research results showed that the annual rainfall series took on a weak increasing trend during the period of 1960—2008, while a remarkable decreasing tendency arose after entering the 21st century. The characteristic time scales of changes in annual rainfall were 3, 7 and 24 years, and the characteristic time scales of changes in flood season rainfall were 3, 7 and 16 years during the period of 1960—2005. According to the analysis of major

period of changes in rainfall, it could be conjectured the annual rainfall and flood season rainfall would both be less than the normal level during the period of 2006—2008, which agrees well with the data. The Morlet wavelet analysis method proved to be feasible in prediction of rainfall trends in the future.

Key words: rainfall; Dongting Lake Watershed; mutation; multi-scale characteristics; Mann-Kendall method; wavelet analysis

洞庭湖是我国第二大淡水湖, 是长江进入中下游平原后的第一个通江湖泊^[1]。由于其特殊的地理位置及对长江具有重要的调蓄滞洪作用, 有关洞庭湖的研究历来为许多学者所关注。史璇等^[2]对近 50 年来洞庭湖水位变化的特征和成因进行了研究, 刘娜等^[3]利用灰色关联法分析了洞庭湖景观格局变化及其对湿地水文调蓄功能产生的影响, 梁婕等^[4]基于中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 影像数据集提取了洞庭湖水面面积, 并分析了湿地面积变化所产生的水文响应, 钟振宇等^[5]基于层次分析法对洞庭湖生态安全进行了评估。然而, 关于洞庭湖流域降雨变化特征的研究则相对较少。随着全球气候变暖, 洞庭湖流域降雨量势必会发生改变, 从而对洞庭湖流域的水文要素和周边环境产生影响。

目前, 有关降雨变化特征的研究方法较多。其中一种是基于秩的非参数 Mann-Kendall 法 (M-K 法), 它是一种常用的突变统计检验方法。已有不少学者采用 M-K 法对不同地区的降雨量进行统计分析以确定不同降雨时间序列的变化规律, 如张文纲等^[6]、康淑媛等^[7]、Khaked 等^[8]、Donald 等^[9], 均得出了有一定价值的研究成果。

收稿日期: 2013-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(41272249); 教育部博士点专项科学基金(20110072110020)

第一作者: 周念清(1964—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为水文水资源数值模拟与水环境评价。

E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

降雨量的时间序列作为一种信号,还存在多时间尺度(multiple timescales)的特点^[10].小波分析法(wavelet analysis method)作为一种高效的信号分析处理方法,它能有效地处理存在时间尺度的序列,该方法现已广泛运用于降雨时间序列分析.徐利岗等^[11]基于小波分析对北方荒漠地区降雨的多时间尺度变异性进行研究,桑燕芳等^[12]提出了小波互相关分析的理论和方法,并应用到水文时间序列的研究,WANG 等^[13]针对水文时间序列小波分析方法存在的问题提出了改进方法,BING 等^[14]基于小波分析方法对长江、黄河源区洪水期和枯水期径流特征进行分析,王兆礼等^[15]将小波分析应用于东江流域降雨序列的特征研究.

本文根据洞庭湖流域 1960—2008 年的降雨资料,采用 M-K 统计检验法和 Morlet 小波分析法研究洞庭湖流域降雨变化的突变特性,并进行降雨变化周期的研究,为流域短期降雨量预测、洞庭湖演变趋势分析以及水资源合理调配提供依据和支撑.

1 研究方法

1.1 M-K 突变检验

对于具有 n 个样本的时间序列 x ,构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n$$

式中, S_k 为第 i 时刻 x 值大于第 j 时刻 x 值个数的累计数;当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$, 否则 $r_i = 0, j = 1, 2, \dots, i$. 当时间序列随机独立时,定义统计量:

$$U_{F,k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{V_{ar}(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n$$

式中, $E(S_k)$ 和 $V_{ar}(S_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差; $U_{F,1} = 0$. $U_{F,i}$ 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|U_{F,i}| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化.按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 再重复上述过程,得到 $U_{F,k}$ 的反序列 $U_{B,k}$,同时使 $U_{B,k} = -U_{F,k}, k = n, n-1, \dots, 1, U_{B,1} = 0$.若 U_F 与 U_B 两条曲线出现交点且在临界线之间,则交点对应的时刻即是突变开始的时间.

1.2 小波分析

选用复 Morlet 小波作为基小波,它能够更真实地反映出时间序列各尺度在时域中的分布和周期性大小,其表达式为

$$\psi(x) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

式中, ω_0 为常数, t 为时间.

水文时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换式为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi'(\frac{t-b}{a}) dt$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子; b 为时间因子; $f(t)$ 为一个分析信号的函数; $\varphi'(t)$ 为母小波 $\varphi(t)$ 的复共轭函数.

对时域上有关 a 的所有小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的平方值进行积分,得到小波方差:

$$V_{ar}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db$$

式中, $V_{ar}(a)$ 表示时间序列中一定尺度(周期)波动的强弱(能量大小).

2 研究区概况

洞庭湖位于湖南省北部,长江荆江段以南,介于北纬 $28^\circ 30' \sim 30^\circ 20'$ 、东经 $110^\circ 40' \sim 113^\circ 10'$ 之间,流域面积 $2\ 820\ \text{km}^2$,最大深度 $30.80\ \text{m}$,容积 $188.0\ \text{亿}\ \text{m}^3$,东、南、西三面环山,北部敞口,成马蹄形格局.洞庭湖流域属于典型的亚热带季风气候,湖区年均温 $16.4 \sim 17.0^\circ\text{C}$,降雨量年际变化大且分布不均,年降雨量为 $1\ 148 \sim 1\ 837\ \text{mm}$,多年平均年降雨量 $1\ 427\ \text{mm}$,4~6 月降雨量占年总降雨量 50% 以上,旱涝灾害发生频率高.本文选取洞庭湖流域 27 个气象站 1960—2008 年月降雨量数据,对降雨变化特征进行统计分析.观测站点布置位置如图 1 所示.

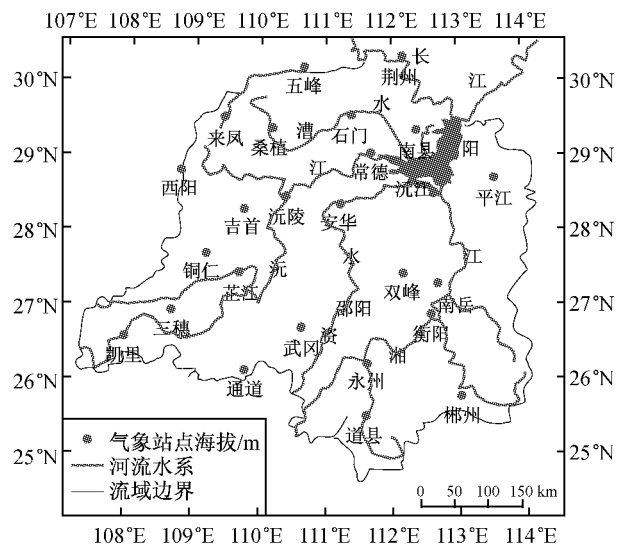


图 1 洞庭湖流域气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Dongting Lake Watershed

3 降雨突变性及多尺度特征分析

3.1 年降雨量变化趋势及突变检验

对 1960—2008 年流域降雨量进行统计,得到年代距平见表 1. 20 世纪 90 年代降雨距平为正,降雨距平百分率为 4.85%,在此期间降雨量较正常值偏高;其他年代降雨距平为负,说明此期间降雨量较正常值偏少.

表 1 1960—2008 年降雨量年代际距平

年代	年代距平/mm	距平百分比/%
20 世纪 60 年代	-15.49	-1.12
20 世纪 70 年代	-8.29	-0.60
20 世纪 80 年代	-9.29	-0.67
20 世纪 90 年代	66.91	4.85
21 世纪初	-37.62	-2.72

为了进一步分析流域年降雨量变化趋势,对 1960—2008 年的降水量进行统计,绘制降雨量年际变化线、5 年滑动平均线和趋势变化线,如图 2 所示. 洞庭湖流域年降雨量序列总体上呈现微弱增加的趋势,趋势倾向率为每 10 年 3.17 mm. 从 5 年滑动平均曲线上看,1960—1985 年降雨量总体不变;1985—1990 年降雨量呈下降趋势;1990—2000 年,降雨量缓慢上升;进入 21 世纪后,降雨量呈显著减少趋势.

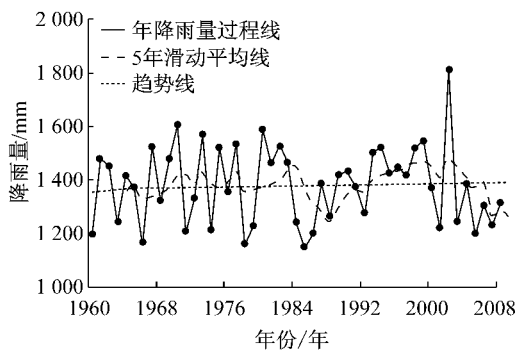


图 2 洞庭湖年降雨量过程线、5 年滑动平均线及趋势线
Fig.2 Annual rainfall hydrograph, 5-year moving-average line and the trend line in Dongting Lake Area

图 3 是流域 1960—2008 年降雨量 M-K 检验曲线,并给出显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时的临界值曲线 $U_{0.05} = \pm 1.96$. 由图 3 可知,在 1966 年、1985 年、2004—2005 年存在交点,且都在临界线区间. 因此,1966 年、1985 年和 2004 年是可能的突变年. 对可能的突变年前后的年平均降水总量进行对比分析. 1960—2004 年平均降雨量为 1 385 mm,2005—2008

年平均降雨量为 1 284 mm,结合滑动 t 检验的方法对两个时间序列的均值进行显著性差异检验,发现两组序列均值差异显著,表明 2004 年极有可能是突变年. 同样地,对 1966 年和 1985 年的统计分析表明,1966 年和 1985 年不算有效突变点.

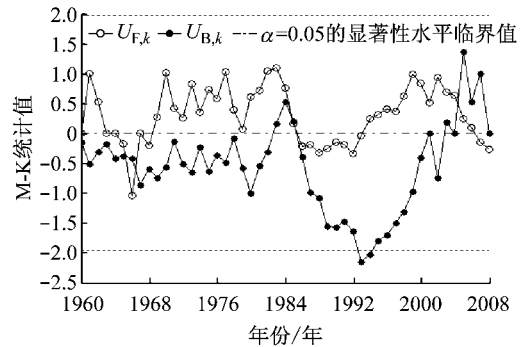


图 3 洞庭湖年降雨量的 M-K 检验曲线
Fig.3 M-K testing curves of annual rainfall in Dongting Lake Area

此外, U_F 曲线一直在两检验曲线之间变动,说明近 50 年来,洞庭湖流域的年降雨量呈现不显著的变化趋势.

3.2 年降雨量变化的多尺度特征分析

在进行小波分析前,为消除降雨时间序列中短期误差干扰,需将降雨量序列标准化后进行小波变换. 其中,信号的强弱由小波系数的大小表示,小波系数大于 0 时表示降雨量偏多;小波系数小于 0 时表示降雨量偏少;小波系数为 0 时则对应突变点.

1960—2005 年的年降雨量小波变换系数模平方图如图 4 所示. 其中,6~14 年时间尺度信号能量变化最强,主要发生在 1977—1988 年,振荡中心在 1982 年;2~4 年时间尺度信号能量变化较强,主要发生在 1968—1972 年、2002—2004 年;16~28 年时间尺度信号主要发生在 1982—1984 年、1992—2000 年;其余尺度信号能量变化则较弱. 16~28 年左右的年代际周期振荡存在于整个时间域中;在 16 年以下时间尺度里,1960—1975 年、1995—2005 年以 2~4 年左右周期振荡较明显;1975—1995 年以 7 年左右周期振荡最为明显.

图 5 为 1960—2005 年年降雨量小波变换实部的时频分布. 其中,2~4、6~14、16~28 年左右尺度的丰、枯交替变化规律较清晰,①2—4 年振荡周期贯穿 20 世纪 60 年代初—21 世纪初,其中心时间尺度在 3 年左右;②6—14 年振荡周期在 20 世纪 60 年代中期—90 年代初较明显,其中心时间尺度在 7 年和 10 年左右;③16—28 年振荡周期在 70 年代初—21

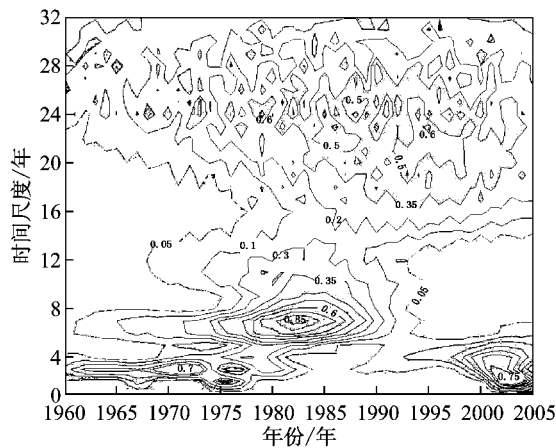


图 4 年降雨量小波变换系数模平方图

Fig. 4 The coefficients modulus squared figure of wavelet transform for annual rainfall

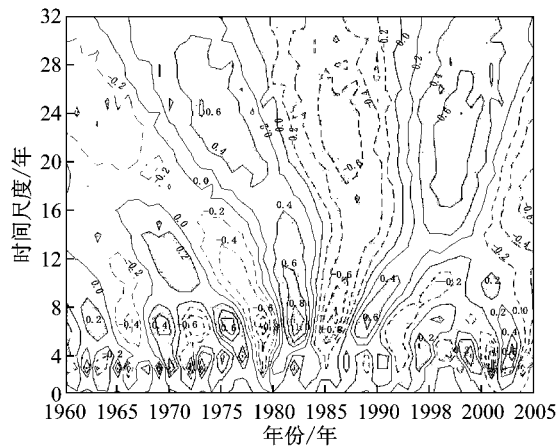


图 5 年降雨量小波变换实部的时频分布

Fig. 5 The time-frequency distribution figure of the real part of wavelet transform for annual rainfall

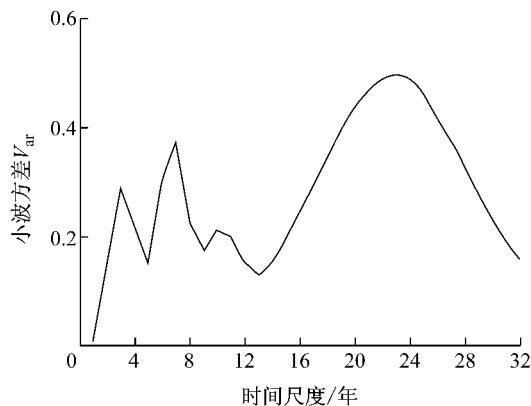


图 6 年降雨量变化过程的小波方差图

Fig. 6 The wavelet variance figure of annual rainfall changing processes

3.3 汛期降雨量变化的多尺度特征分析

1960—2005 年汛期降雨量小波变换模平方图如

世纪初较明显,其中心时间尺度在 24 年左右,经历了降雨量偏多—偏少的 3 个循环交替,到 2005 年时等值线未闭合,说明 2005 年之后的几年内,降雨量仍将偏少,这与 2006—2008 年的降雨量数据相吻合.

小波方差图反映能量随时间尺度的分布情况,可以确定时间序列中不同尺度扰动的强弱,图中曲线峰值处为该序列的主要时间尺度.图 6 为洞庭湖流域年降雨量时间序列的小波方差图,曲线峰值对应的特征时间尺度为 3、7、10、24 年,其中周期振荡最强的是 7 年左右的时间尺度,为降雨量变化的第 1 周期,第 2 和第 3 周期分别为 24、3 年,而 10 年的周期振荡并不明显,不算作主周期.

根据由小波方差图得出的主周期,分析年降雨量主周期小波系数的实部 $W_E(a, b)$ 变化图,反映出不同时间尺度上,降雨量的周期变化及其强弱情况、突变点分布和位相结构.其中小波系数为正时是多雨期,为负时是少雨期,为 0 时则对应突变点.

图 7 为年降雨量在主周期 3、7、24 年尺度下小波系数的实部变化图.从 3 年时间尺度来看,20 世纪 60 年代以来经历了雨量偏少—偏多的 15 个周期阶段;从 7 年时间尺度来看,经历了雨量偏多—偏少的 7 个周期阶段,2005 年后降雨量将偏少;从 24 年左右时间尺度来看,经历了雨量偏少—偏多的 2 个周期阶段,突变点在 1969、1980、1992 和 2004 年,降雨量在 2004 年后偏少.从第 1 主周期变化趋势可以预测,2006—2008 年降雨量将处于偏少阶段,根据年降雨量实测数据,验证该预测结果正确.

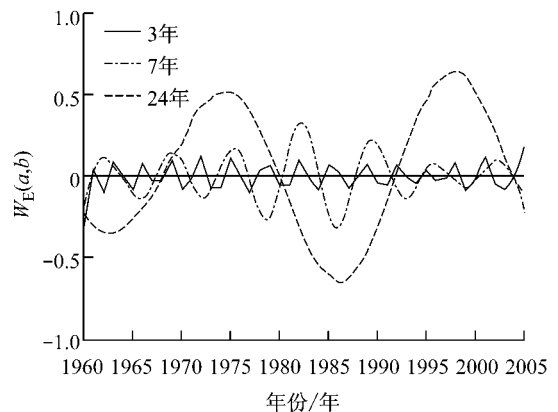


图 7 年降雨量在不同尺度下小波变换系数实部变化过程 Fig. 7 The real part changing processes of wavelet transform coefficients of annual rainfall on different scales

图 8 所示.其中,5~8 年时间尺度信号能量变化最强,主要发生在 1980—1993 年,振荡中心在 1985

年;2~4 年时间尺度信号能量变化较强,主要在 1968—1973 年、2002—2004 年;14—18 年时间尺度信号主要发生在 1990—2003 年,振荡中心在 1994 年、1998 年;其余尺度信号能量变化则较弱。

图 9 为 1960—2005 年汛期降雨量小波变换实部的时频分布,由图可见,2~4、5~8、14~18 年左右尺度的丰、枯交替变化规律清晰,①2~4 年振荡周期贯穿 20 世纪 60 年代初至 21 世纪初,其中心时间尺

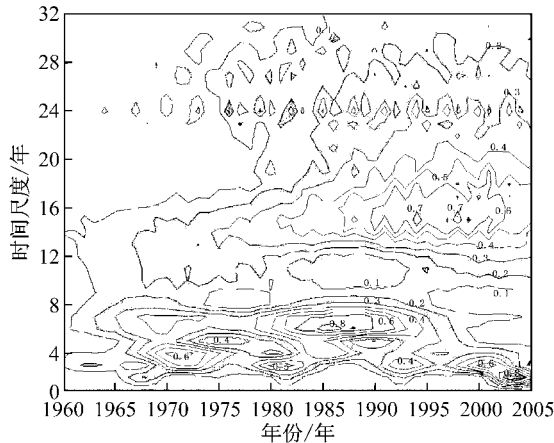


图 8 汛期降雨量小波变换系数模平方图
Fig. 8 The coefficients modulus squared figure of wavelet transform for flood rainfall

图 10 为汛期降雨量时间序列的小波方差图,曲线峰值对应的特征时间尺度为 3、7、16 年,其中周期振荡最强的是 7 年左右的时间尺度,是汛期降雨量变化的第 1 周期,16、3 年分别为汛期降雨量变化的第 2、3 周期。

图 11 为汛期降雨量在主周期 3、7、16 年尺度下小波系数的实部变化图,从 3 年时间尺度来看,20 世纪 60 年代以来经历了雨量偏少—偏多 14 个周期阶

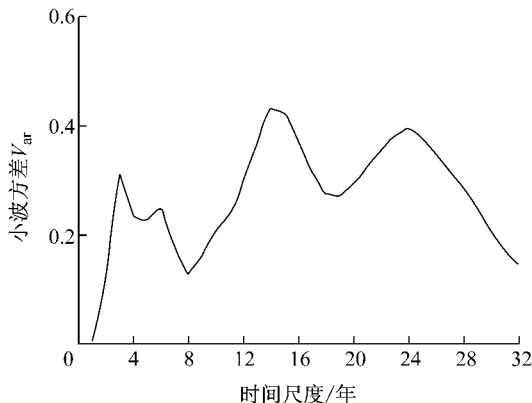


图 10 汛期降雨量变化过程的小波方差图
Fig. 10 The wavelet variance figure of flood rainfall changing processes

度在 3 年左右;②5~8 年振荡周期在 20 世纪 60 年代中期至 90 年代末期较明显,其中心时间尺度在 7 年左右;③14~18 年振荡周期在 20 世纪 70 年代初至 21 世纪初较明显,其中心时间尺度在 16 年左右,经历了降雨量偏多—偏少的 6 个循环交替,且到 2005 年等值线未闭合,说明 2005 年后几年的汛期降雨量将偏少,与 2006—2008 年汛期降雨量数据吻合。

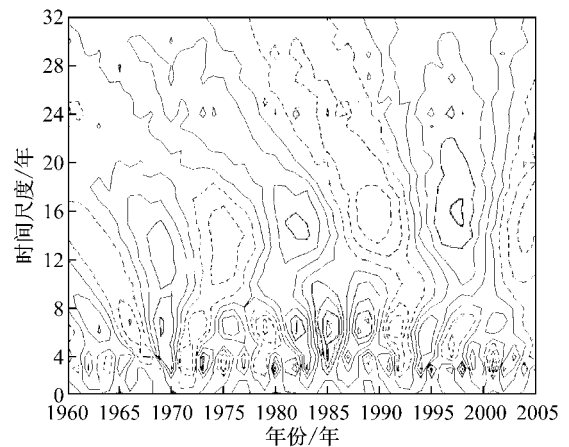


图 9 汛期降雨量小波变换实部的时频分布
Fig. 9 The time-frequency distribution figure of the real part of wavelet transform for flood rainfall

段;从 7 年时间尺度来看,经历了雨量偏多—偏少 7 个周期阶段,2005 年后汛期降雨量将偏少;从 16 年左右时间尺度来看,经历了雨量偏少—偏多 3 个周期阶段,突变点在 1964、1971、1978、1986、1993 和 2002 年,降雨量在 2005 年后将偏少.从第 1 主周期变化趋势可以预测,2006—2008 年汛期降雨量将处于偏少阶段.根据汛期降雨量实测数据,验证了该预测结果的正确性。

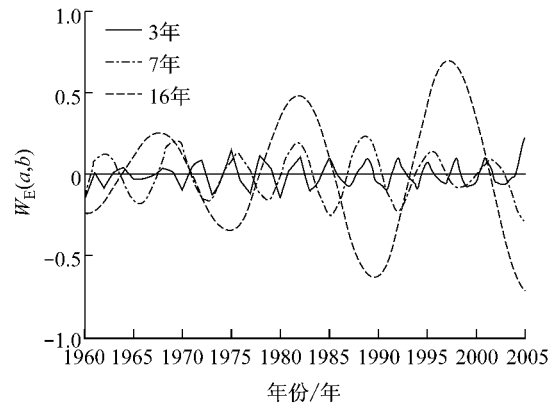


图 11 汛期降雨量在不同尺度下小波变换系数实部变化过程
Fig. 11 The real part changing processes of wavelet transform coefficients of flood rainfall on different scales

4 结论

通过 M-K 统计检验法和 Morlet 小波函数等方法,对洞庭湖流域降雨量序列的突变性和多尺度特性进行了分析,可以得出如下结论:

(1) 洞庭湖流域年降雨量总体上呈微弱上升的趋势,进入 21 世纪后,降雨量呈现比较显著的下降趋势.通过 M-K 突变分析,确定洞庭湖流域 21 世纪初降雨量减少是突变现象,2004 年是突变年.

(2) 洞庭湖流域年降雨量变化的特征时间尺度为 3、7、24 年,其中 7 年左右尺度的周期振荡最强,为年降雨量变化的第 1 主周期,6~14 年时间尺度信号能量变化最强,主要发生在 1977—1988 年,振荡中心在 1982 年.通过分析年降雨量第 1 主周期的变化趋势可以预测,2006—2008 年年降雨量将处于偏少阶段,这与降雨量实际数据相符合.

(3) 洞庭湖流域汛期降雨量变化的特征时间尺度为 3、7、16 年,其中周期振荡最强的是 7 年左右的时间尺度,为汛期降雨量变化第 1 主周期.5~8 年时间尺度信号能量变化最强,主要发生在 1980—1993 年,振荡中心在 1985 年.分析汛期降雨量第 1 主周期的变化趋势可以预测,2006—2008 年汛期降雨量均将处于偏少阶段,这与降雨量实际数据相符合,验证了 Morlet 小波分析法对降雨量趋势预测的可行性.

参考文献:

- [1] 姜加虎,黄群.洞庭湖近几十年来湖盆变化及冲淤特征[J].湖泊科学,2004,16(3):209.
JIANG Jiahua, HUANG Qun. Analysis of the lake basin change and the rushing-silting features in the past decades of Dongting Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(3):209.
- [2] 史璇,肖伟华,王勇,等.近 50 年洞庭湖水位总体变化特征及成因分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(5):18.
SHI Xuan, XIAO Weihua, WANG Yong, et al. Characteristics and factors of water level variations in the Dongting Lake during the recent 50 years [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(5):18.
- [3] 刘娜,王克林,段亚峰.洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响[J].生态学报,2012,32(15):4641.
LIU Na, WANG Kelin, DUAN Yafeng. Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake Area [J]. Acta Ecological Sinica, 2012, 32(15):4641.
- [4] 梁婕,蔡青,郭生练,等.基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应[J].生态学报,2012,32(21):6628.
LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al. MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake [J]. Acta Ecological Sinica, 2012, 32(21):6628.
- [5] 钟振宇,柴立元,刘益贵,等.基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估[J].中国环境科学,2010,30(1):40.
ZHONG Zhenyu, CHAI Liyuan, LIU Yigui, et al. Ecological security evaluation based on AHP of Dongting Lake [J]. China Environmental Science, 2010, 30(1):40.
- [6] 张文纲,李述训,庞强强.青藏高原 40 年来降水量时空变化趋势[J].水科学进展,2009,20(2):168.
ZHANG Wengang, LI Shuxun, PANG Qiangqiang. Changes of precipitation spatial-temporal over the Qinghai-Tibet Plateau during last 40 years [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3):168.
- [7] 康淑媛,张勃,柳景峰,等.基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J].资源科学,2009,31(3):501.
KANG Shuyuan, ZHANG Bo, LIU Jingfeng, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method [J]. Resources Science, 2009, 31(3):501.
- [8] Khaled H H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349: 350.
- [9] Donald H Burn, Mohamed A, Hag Elmur. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2005, 255:107.
- [10] 祁顺杰,陈皓锐. Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):79.
QI Shunjie, CHEN Haorui. Multiple time scale analysis on yearly rainfall with Morlet wavelet analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3):79.
- [11] 徐利岗,周宏飞,梁川,等.中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J].水利学报,2009,40(8):1002.
XU Ligang, ZHOU Hongfei, LIANG Chuan, et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8):1002.
- [12] 桑燕芳,王栋,吴吉春.水文时间序列小波互相关分析方法[J].水利学报,2010,41(11):1272.
SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun. Wavelet cross-correlation method for hydrologic time series analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11):1272.
- [13] WANG Hongrui, YE Letian, LIU Changming, et al. Problems in wavelet analysis of hydrologic series and some suggestions on improvement [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(1):80.
- [14] BING Longfei, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan. Runoff characteristics in flood and dry seasons based on wavelet analysis in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2):261.
- [15] 王兆礼,陈晓宏,黄国如,等.东江流域汛期降雨序列的小波分析[J].人民长江,2010,41(2):52.
WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, HUANG Guoru, et al. Wavelet analysis of rainfall series during flood season in Dongjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2010, 41(2):52.