

Analysis of Precipitation Cycles and Trend in the Binjiang River Basin*

Hualong Ding^{1,2}, Xiaohong Chen^{1,2#}, Yun Zhang^{1,2}, Yiyang He^{1,2}

¹Center of Water Resources and Environment Research, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou
Email: dinghualongfirst@126.com, #eescxh@mail.sysu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Analysis of precipitation cycles and trends variations is very important for regional water resource management. This paper is based on the daily precipitation data during 1965-2011 from Zhukeng controlling hydrologic station of Binjiang River Basin—the first tributary of the North River in the Pearl River Basin, and adapted from the Morlet wavelet analysis and Mann-Kendall trend test to analyze the cycles as well as the trend variation and catastrophe point of the annual, flood season and non-flood season precipitations over the Binjiang River Basin. The results show that annual precipitation exists in about 24, 9 and 5 years primary cycles; flood season precipitation cycle is similar with annual precipitation cycle; non-flood season precipitation exists in 12 and 5 years main cycles. The annual and flood season precipitations show a significant decreasing trend, but non-flood season precipitation shows a weak decreasing trend. The annual and flood season precipitations were in sufficient period and non-flood season precipitation was in insufficient period in 2011, which indicates that annual and flood season precipitations will enter the dry period and the flood season precipitation will enter the abundant period around 2015. Significant mutations of the annual and flood season precipitations took place around 1966 and non-flood season precipitation in 1979.

Keywords: Precipitation; Cycles; Mann Kendall; Morlet Wavelet; Trend Analysis; Binjiang River Basin

滨江流域降水周期及趋势分析*

丁华龙^{1,2}, 陈晓宏^{1,2#}, 张云^{1,2}, 何映颖^{1,2}

¹中山大学水资源与环境研究中心, 广州

²华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广州
Email: dinghualongfirst@126.com, #eescxh@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘要: 降水的周期和趋势变异分析对区域水资源管理具有重要意义。以珠江流域北江一级支流滨江流域控制性水文站珠坑站 1965~2011 年逐日降雨资料为基础, 采用 Morlet 小波分析和 Mann-Kendall 趋势检验法, 分析了该流域年、汛期和非汛期降水量的周期、趋势变化和突变点。结果表明: 年降水量存在 24 年、9 年和 5 年左右的主周期, 汛期降水量周期与年降水量周期基本相同, 非汛期降水量存在 12 年和 5 年左右的主周期; 年和汛期降水量呈显著性减少趋势, 非汛期降水量呈微弱减少趋势; 2011 年年和汛期降水量处于偏丰期, 非汛期降水量处于偏枯期, 预计 2015 年左右年和汛期降水量将进入偏枯期, 非汛期降水量将进入偏丰期; 年和汛期降水量在 1966 年左右发生显著性突变, 非汛期

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51210013, 50839005), 国家科技支撑计划(2012BAC21B0103), 水利部公益项目(201201094, 201301002-02), 广东省科技厅项目(2010B050300010), 广东省水利科技创新项目(2011-11), 中英瑞气候变化适应项目广东气候变化风险评估及应对策略研究(ACCC/20100705-1)。

作者简介: 丁华龙(1989-), 男, 广西钦州人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。

#通讯作者。

降水量在 1979 年发生显著性突变。

关键词: 降水量; 周期; Mann-Kendall; Morlet 小波; 趋势分析; 滨江流域

1. 引言

在华南湿润区, 降水是水资源的主要来源, 很多学者都对降水量进行了研究: 姚惠明等(2013)研究发现中国近期年降水量 600 mm 等值线在环渤海湾有所南移, 100°E 以西地区年降水量有所增加^[1]; 张文纲等(2009)利用青藏高原 1961~2000 年的降水资料, 分析得出近 40 年来青藏高原大部分地区降水量呈增大趋势, 只有南疆和西藏部分地区及青海东南部呈减少趋势^[2]; 徐立岗等(2009)利用 Morlet 小波分析、Mann-Kendall 趋势检验等方法对我国北方荒漠地区降水量进行研究得出我国北方荒漠区降水存在 5 年、9 年及准 14 年的主周期, 预计未来春、夏季节降水量有所增加, 冬季降水量减少, 年降水量有增加趋势^[3]; 祝青林等(2005)发现黄河流域总降水量呈下降趋势, 空间上表现为北半部以增加为主, 南半部以减少为主^[4]; 彭俊台等(2011)研究珠江流域极端降水时空分布特征, 结果显示珠江三角洲、桂林市和百色市等地区为极端降水高发区^[5]; 潘雅婧等(2012)综合采用小波分解、Morlet 小波分析等方法对汉江中下游降水量序列周期及未来趋势进行分析, 发现汉江中下游流域降水量存在 5 年左右的短周期和 10~15 年的中长周期^[6]; 高峰等(2012)采用小波分析、M-K 法和最大熵谱分析等对丰满流域汛期降水量变化特征进行了分析, 发现该流域汛期降水量呈减少趋势, 存在 8~9 年的短周期和一个 28 年的长周期^[7]。降水量在大尺度流域内的研究较多, 而专门研究暴雨中心降水量周期趋势变化的较少。

滨江流域位于珠江流域北江中下游, 是广东省三大暴雨中心之一。本文以流域代表站珠坑站 1965~2011 年降水量实测资料为基础, 重点研究年、汛期和非汛期降水量的周期、不同时间尺度的丰枯变化、变化趋势和突变点, 以此揭示华南地区典型小流域降水特征变化过程。

2. 材料和方法

2.1. 研究区概况

滨江流域位于广东省清远市清新区境内(图 1), 属

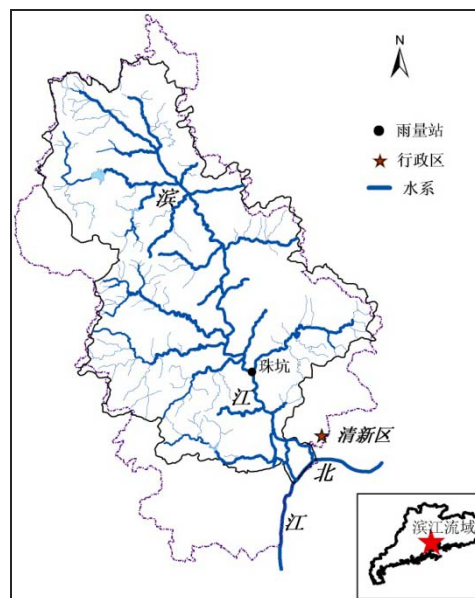


Figure 1. Distribution map of river system and precipitation station in Qingxin District

图 1. 清新区水系及雨量站分布图

于北江的一级支流。该流域发源于清新区内西北部石潭镇的大雾山, 上游称大岩水, 至石潭墟与白湾水汇合后始称滨江, 经迳口水利枢纽工程由飞水口汇入北江。滨江流域雨量充沛集中, 四季明显, 夏长冬短。滨江干流全长 97 km, 集水面积 1728 km², 平均坡降 1.1‰, 多年平均日照为 1687 h, 多年平均气温为 21.6℃, 年日照率为 36%, 太阳辐射量为 99.9 kCal/cm², 多年平均降水量为 2095 mm, 多年平均径流量为 25.7 亿 m³。珠坑水文站位于滨江干流中下游, 为流域的控制性水文站, 本文以该站 1965~2011 年逐日降水实测资料为基础, 重点分析降水周期、变化趋势和突变点。

2.2. 研究方法

2.2.1. 小波分析

小波分析是一种时、频多分辨率分析的方法, 在时域和频域同时具有良好的局部化功能, 可以对信号进行多尺度细化分析, 以分析信号不同周期的时间演变规律^[8], 从而分析周期、丰枯旱涝情况以及突变点。具体方法如下^[9]:

小波函数是指具有震荡特性、能够迅速衰减到 0

的一类函数, 即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0 \tag{1}$$

Morlet小波函数为:

$$\varphi(t) = e^{iwt} e^{-t^2/2} \tag{2}$$

式中 w 为常数, i 为虚数。

对于给定的满足一定条件的小波函数 $\varphi(t)$, 时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \tag{3}$$

离散形式为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \overline{\varphi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right)} \tag{4}$$

$W_f(a, b)$ 能同时反映频域参数 a 和时域参数 b 的特征, 是 $f(t)$ 通过单脉冲响应滤波器的输出。以 a 为纵坐标, b 为横坐标, 绘制 $W_f(a, b)$ 的等值线图, 正小波系数对应偏多期, 负的则对应偏少期。小波系数正负交替显著, 绝对值越大, 表明该时间尺度变化越明显。从而可以识别水文序列中的突变特征与多时间尺度演变特性。

小波方差是将时域上有关 a 的所有小波系数的平方进行积分。计算公式如下:

$$\text{Var}(a) = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n |W_f(a, b)|^2 \tag{5}$$

小波方差随着 a 的变化过程图的各个峰值对应各个显著周期, 因此可以确定时间序列的主要时间尺度(即主周期)。

2.2.2. Mann-Kendall 趋势检定

Mann-Kendall 趋势检定法(以下简称 M-K 法)是世界气象组织(WMO)推荐的对环境数据时间序列趋势分析的一种方法, 在水文、气象时间序列趋势分析中得到广泛应用^[10]。其计算说明如下^[11]:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_i - x_j) \tag{6}$$

其中,

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i = x_j \\ -1 & x_i < x_j \end{cases} \tag{7}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{8}$$

在双边的趋势检验中, 在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或者下降趋势。当统计变量 Z 值大于0, 表示增加趋势, Z 值小于0表示减少趋势。

在 M-K 法检验进一步用于检验序列突变时, 需要通过构造时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 的秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \tag{9}$$

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{10}$$

当 n 增加时, UF_k 很快收敛于标准正态分布, $UF_k > 0$ 表示序列呈上升趋势, $UF_k < 0$ 表示序列呈下降趋势。给定显著水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 则表明序列存在明显趋势。然后将时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 按逆序排列, 按照上面的公式计算出逆序的 UF , 如果 UF 和 UB 两条曲线交叉点在置信度线之间, 那么交叉点对应的时间序列就是该序列突变的开始时间。

3. 结果与讨论

3.1. 降水量周期分析

图2为年降水量序列Morlet小波变化实部和模平方的时频变化, 从图中可以看出, 年降水量序列7~11年尺度变化在20世纪60年代初至90年代中年变化较强, 其中心时间尺度为9年左右, 振荡中心在1980年左右; 17~28年尺度变化在20世纪70年代至21世纪初表现明显, 中心时间尺度为23年左右, 振荡中心在1990年左右。由图3可以看出, 年降水量序列存在3、6、9和23年左右的主周期, 其中23年为第一主周期, 9年为第二主周期。

由图4可以看出, 汛期降水量序列Morlet小波变化实部和模平方的时频变化7~11年和17~28年尺度变化明显, 振荡中心分别在1980年和1990年。由图3可知,

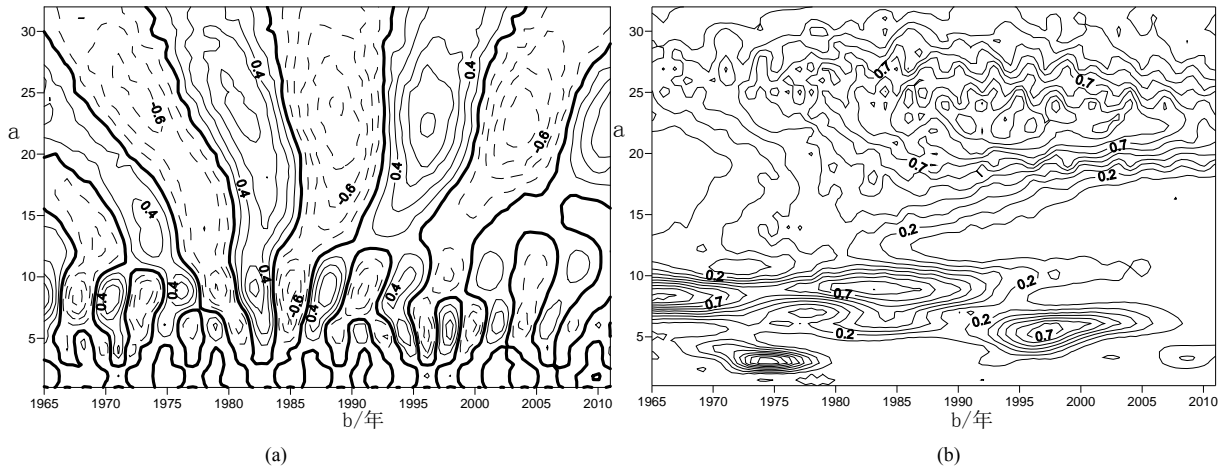


Figure 2. The real part (a) and modulus square (b) of Morlet wavelet transform coefficient of annual precipitation in the Binjiang River basin
 图2. 滨江流域年降水量小波变换的实部(a)和模平方(b)的时频分布

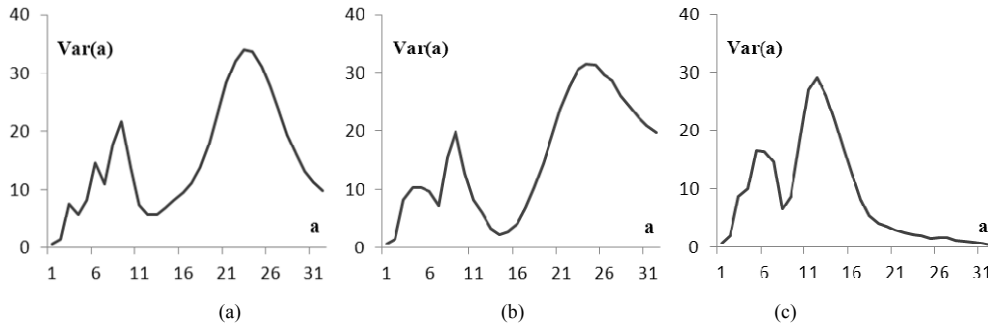


Figure 3. The wavelet variance of annual precipitation (a), flood season precipitation (b) and non-flood season precipitation (c)
 图3. 滨江流域年降水量(a)、汛期降水量(b)和非汛期降水量(c)小波方差图

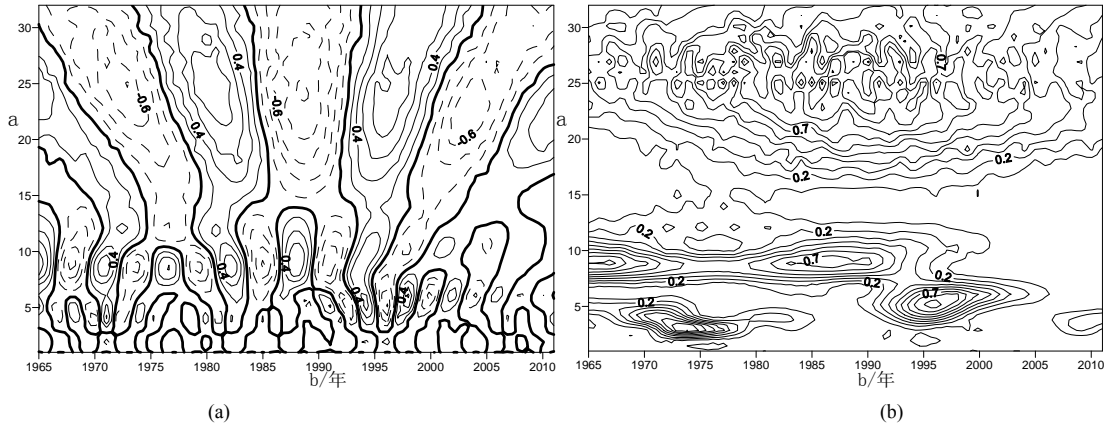


Figure 4. The real part (a) and modulus square (b) of Morlet wavelet transform coefficient of flood season precipitation in the Binjiang River basin
 图4. 滨江流域汛期降水量小波变换的实部(a)和模平方(b)的时频分布

汛期降水量序列存在4、9和24年左右的主周期, 其中24年为第一主周期, 9年为第二主周期。

根据图5可知, 非汛期降水量序列4~8年、10~15年时间尺度变化明显, 其中4~8年时间尺度在1975~1990年变化较强, 中心时间尺度为5年左右, 振

荡中心为1983年左右; 10~15年时间尺度在1970~1995年变化较强, 中心时间尺度为12年, 振荡中心在1983年左右。由图3可知, 非汛期降水量时间序列存在5年和12年的主周期, 其中12年为第一主周期, 5年为第二主周期。

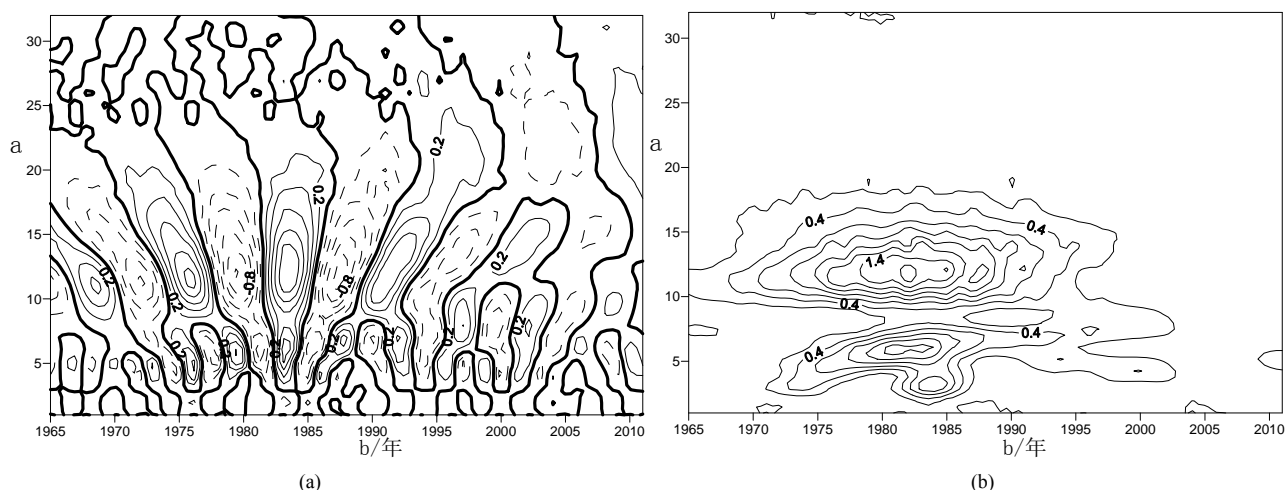


Figure 5. The real part (a) and modulus square (b) of Morlet wavelet transform coefficient of non-flood season precipitation in the Binjiang
图5. 滨江流域非汛期降水量小波变换的实部(a)和模平方(b)的时频分布

综合图2和图4可以看出,年降水量和汛期降水量小波变化实部和模平方时频变化有很大的相似性,说明汛期降水完全控制着全年降水。由图3知,年降水量和汛期降水量都存在24年和9年左右的主周期,汛期降水量序列与年降水量序列周期变化比较接近,年、汛期和非汛期都存在5年左右的短周期。

有关学者研究表明,中国年降水与太阳活动有明显的相关关系,尤其在准22年周期尺度上^[12-14],而本文年和汛期降水量第一主周期分别为23和24年,与相关研究结果相近。非汛期第一主周期为12年,与太阳黑子相对数变化11.1年平均周期相近^[15]。

3.2. 降水量多时间尺度分析

由第一主周期小波变化实部变化过程(图6a)可以得出,年、汛期在1965~1970、1977~1984、1993~2000和2008~2010为正位相,表示年、汛期降水量偏丰,在1971~1976、1985~1992、2001~2007为负位相表示年、汛期降水量偏枯;非汛期降水量在1966~1969、1974~1977、1982~1985、1990~1993、1998~2002、2007~2010为正位相,表示非汛期降水量偏丰,1970~1973、1978~1981、1986~1989、1994~1997、2003~2006和2011为负相位,表示非汛期降水量偏枯。2011年以后,滨江流域年和汛期降水量处于丰水年高峰时段的后期,有转向降水量减少的趋势,预计2015年左右年和汛期降水量将进入偏枯年,2011年非汛期降水量已进入偏枯年,未来3年内仍将处于偏枯年,预计2015年左右非汛期降水量将进入偏丰年。

由第二主周期小波变化实部变化过程(图6b)可以看出,年、汛期降水量序列每隔2~3年、非汛期每隔1~2年正负位相交替出现。年降水量和汛期降水量序列变化过程非常相似,非汛期一般是一年偏丰、两年偏枯交替出现。由图6可知,不同时间尺度丰枯变化不一样。

3.3 降水量趋势分析

对珠坑站年、汛期和非汛期降水量进行M-K检验。结果显示:珠坑站年和汛期降水量M-K检验Z值分别为-3.52、-3.6绝对值均大于2.58,通过99%的显著性检验水平,表明滨江流域年和汛期降水量呈显著减少趋势;非汛期降水量M-K检验Z值为-0.96,表明滨江流域非汛期降水量呈不显著减少趋势。

M-K突变检验结果表明(图7),年和汛期降水量序列在1966年左右发生了显著性突变,非汛期降水量序列在1979年发生了显著性突变。由(7a)所示,年降水量序列除在1981~1985年左右有增加趋势外,其余时间段均呈减少趋势,在2004年后呈显著性减少趋势,通过了95%的显著性检验水平。由(7b)可知,汛期降水量只有在1983年左右有微弱增加外,其余时间段均呈减少趋势,2004年后呈显著性减少趋势通过了95%的显著性检验水平。由(7c)可知,非汛期降水量在1965~2003年呈微弱增加趋势,2004年后呈微弱减少趋势。

有关北江流域年和汛期降水量研究表明,北江流域年和汛期降水量呈微弱增加趋势,北部以增加为

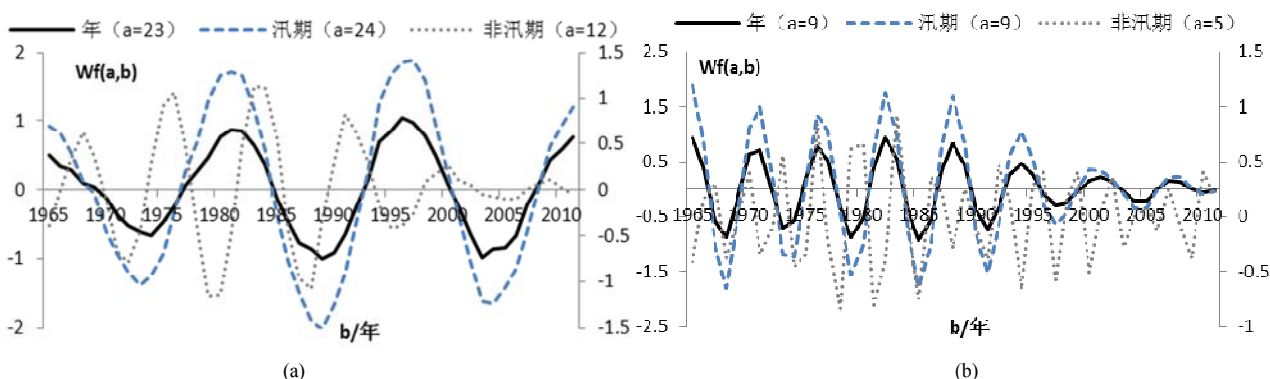


Figure 6. The Morlet wavelet transform real change process in the first main cycle (a) and second main cycle (b)
图 6. 第一和第二主周期 Morlet 小波变换实部变化过程

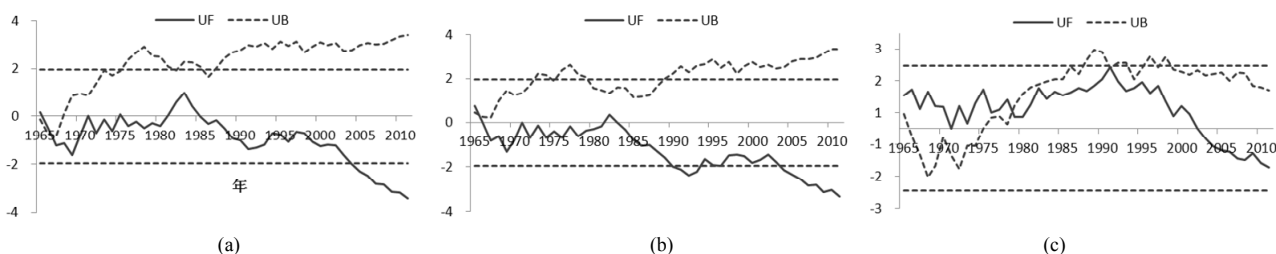


Figure 7. The M-K curve of annual precipitation (a), flood season (b) and non-flood season (c) precipitation
图 7. 年(a)、汛期(b)和非汛期(c)降水量 M-K 曲线图

主, 南部以减少为主^[16,17], 而滨江流域处于北江的偏南部, 本文研究结果表明, 该流域呈显著性减少趋势, 与相关研究结果一致。

4. 结论

本文采用 Morlet 小波分析和 M-K 趋势变异检验法分析了气候变化下华南地区小尺度流域代表滨江流域年、汛期和非汛期降水量的周期、趋势及变异点, 主要结论如下:

1) 滨江流域年降水量存在 24 年、9 年和 5 年左右的主周期, 汛期降水量周期与年降水量周期基本相同, 非汛期降水量存在 12 年和 5 年左右的周期。

2) 滨江流域降水量丰枯周期变化明显, 2011 年年降水量处于丰水年高峰时段的后期, 有转向降水量减少的趋势, 预计 2015 年左右将进入偏枯年, 汛期降水量与年降水量变化情况相同; 2011 年非汛期降水量刚进入偏枯年, 未来 3 年内仍将处于偏枯年, 预计 2015 年左右将进入偏丰年。

3) 滨江流域年和汛期降水量呈显著性减少趋势, 检验 Z 值通过了 99% 的显著性检验水平; 非汛期降水量呈不显著减少趋势。

4) 年与汛期降水量序列在 1966 年左右发生显著性突变, 非汛期降水量在 1979 年左右发生显著性突变。

5. 致谢

感谢第十一届中国水论坛推荐。

参考文献 (References)

- [1] 姚惠明, 吴永祥, 关铁生. 中国降水演变趋势诊断及新事实[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 1-10.
YAO Huiming, WU Yongxiang and GUAN Tiesheng. Diagnose of precipitation evolution trend in China and new facts. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 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): 168-176.
ZHANG Wengang, LI Shuxun and PANG Qiangqiang. Changes of precipitation spatio-temporal over the Qinghai-Tibet Plateau during last 40 years. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 168-176. (in Chinese)
- [3] 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): 1002-1011.
XU Ligang, ZHOU Hongfei, LIANG Chuan, et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China. Shuli Xuebao, 2009, 40(8): 1002-1011. (in Chinese)
- [4] 祝青林, 张留柱, 于贵瑞等. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征[J]. 自然资源学报. 2005, 20(4): 477-482.
ZHU Qinglin, ZHANG Liuzhu, YU Guirui, et al. The spatial and temporal variability characteristics of precipitation in the Yellow

- River basin of recent 30 years. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 477-482. (in Chinese)
- [5] 彭俊台, 张强, 陈晓宏等. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. *灾害学*, 2011, 26(4): 24-28+34.
PENG Juntai, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfalls in the Pearl River basin. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(4): 24-28, 34. (in Chinese)
- [6] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. *地理研究*, 2012, 31(5): 811-820.
PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis. *Geographical Research*, 2012, 31(5): 811-820. (in Chinese)
- [7] 高峰, 孙力, 苏丽欣等. 丰满流域汛期降水变化特征分析[J]. *地理科学*, 2012, 32(10): 1282-1288.
GAO Feng, SUN Li, SU Lixin, et al. The characteristic analysis of precipitation variation in Fengman Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(10): 1282-1288. (in Chinese)
- [8] 易淑珍, 王钊. 水文时间系列周期分析方法探讨[J]. *水文*, 2005, 25(4): 26-29.
YI Shu-zhen, WANG Zhao. The study of the period method for hydrologic time series. *Journal of China Hydrology*, 2005, 25(4): 26-29. (in Chinese)
- [9] 王文圣等. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
WANG Wensheng. *Hydrology and wavelet analysis*. Beijing: Chemical Industry Publisher, 2005. (in Chinese)
- [10] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3): 350-363.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. *Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology*. The Second Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 田荣湘, 张炎. 太阳黑子、QBO 对杭州地区梅雨的影响[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2007, 34(1): 115-120.
TIAN Rongxiang, ZHANG Yan. Sunspot/QBO effect on Meiyu precipitation in Hangzhou. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2007, 34(1): 115-120. (in Chinese)
- [13] 刘广深, 米家榕, 戚长谋等. 东北地区降水周期与太阳活动的关系[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(4): 63-68.
LIU Guangshen, MI Jiarong, QI Changmou, et al. Relationship between the solar forcing and periodic variations of meteoric water in the northeastern China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, 26(4): 63-68. (in Chinese)
- [14] 郝志新, 郑景云, 葛全胜. 黄河中下游地区降水变化的周期分析[J]. *地理学报*, 2007, 62(5): 537-544.
HAO Zhixin, ZHENG Jingyun, GE Quansheng. Precipitation cycles in the middle and lower yellow river. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 537-544. (in Chinese)
- [15] 贾玉芳, 申洪源, 丁召静. 鄱阳湖流域降水变化及其与太阳黑子的关系[J]. *热带地理*, 2011, 31(2): 178-181, 198.
JIA Yufang, SHEN Hongyuan, DING Zhaojing. Relationship between sunspot activities and precipitation changeover the Poyang Lake basin. *Tropical Geography*, 2011, 31(2): 178-181, 198. (in Chinese)
- [16] 罗律, 张广存, 吴俊宁. 1965~2010年广东北江流域汛期降水量的气候特征分析[J]. *广东气象*, 2012, 34(3): 13-15.
LUO Lv, ZHANG Guangcun, WU Junning. Analysis of the climate characteristics of precipitation from 1965 to 2010 in Beijiang River basin, Guangdong Province. *Guangdong Meteorology*, 2012, 34(3): 13-15. (in Chinese)
- [17] LUO, Y., LIU, S., FU, S.L., et al. Trends of precipitation in Beijiang River basin, Guangdong Province, China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(13): 2377-2386.