

# 珠江上游流域近55年气温变化特征分析

张峰<sup>1,2</sup>, 雷晓辉<sup>2</sup>, 蒋云钟<sup>2</sup>, 白建锋<sup>1,2</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 采用线性回归、Mann-Kendall 检验及小波分析等方法, 对珠江上游流域 1954 - 2008 年气温系列进行研究分析。结果表明: ①近 55 年来, 珠江上游流域多年平均气温呈显著上升趋势。在空间上, 气温上升显著的区域主要集中在红水河、柳江、桂江、贺江、黔浔江、西江梧州以下及北江流域。年平均气温存在 3、7、17 和 43 a 左右的主周期。②从各季节气温变化看, 夏、秋两季气温上升显著, 冬、春两季上升不显著。各季节平均气温周期和年平均气温周期大体一致, 均存在 3、7、18 和 40 a 左右的主周期。该研究结果对进一步研究珠江上游流域气候及其未来气候预测具有重要意义。

**关键词:** Mann-Kendall 检验; Morlet 小波分析; 气温; 珠江

中图分类号: P461 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)02-0020-06

## Analysis on character of temperature variation in upstream of Pearl River basin during 55 years

ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, LEI Xiaohui<sup>2</sup>, JIANG Yunzhong<sup>2</sup>, BAI Jianfeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Based on linear regression, Mann-Kendall test and wavelet analysis methods, the temperature series from 1959 to 2008 in the upstream of Pearl River basin were researched. The results indicated that: ①during recent 55 years, the annual temperature presents a significantly upward trend. The temperature rising obviously areas focuses on Hongshui River, Liujiang River, Guijiang River, Hejiang River, Qianxunjiang River, downstream of Wuzhou and North River basin. In addition, the annual temperature exhibits 3, 7, 17 and 43 year periods. ②As for seasonal temperature, the summer and autumn temperatures demonstrate a significantly upward trend, while there is an insignificantly upward trend in spring and winter. Generally, seasonal temperature periods are nearly as same as annual temperature, which exist more or less 3, 7, 18 and 40 year periods. The results will play an important significance in the climate prediction of Pearl River basin.

**Key words:** Mann-Kendall test; Morlet wavelet analysis; temperature; Pearl River

## 1 概述

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出<sup>[1]</sup>,最近12年(1995-2006年)中,有11年位列最暖的12个年份之中。气候变化已成为当今各国政府、科学界及公众关注的焦点之一。在全球变暖背景下,近100年来中国年地表平均气温增加明显,升温幅度约为0.5~0.8℃,比同期全球平均值(0.6℃±0.2℃)略高;近50年中国增温尤其明显,增暖主要发生在20世纪80年代中期以后,增暖速率明显大于全球的平均值<sup>[2]</sup>。气候变化将改变全球水循环现状,引起水资源在时空上的重新分配,这将进一步影

响到农业、牧业、渔业、航运、水利发电等其它部门领域<sup>[3]</sup>。因此,气候变化下,对流域水文气象要素变化趋势及演变特征研究十分必要。

近年来,对气温变化特征的研究主要集中在变化趋势和周期性两个方面,虽然对珠江流域气温已有相关研究<sup>[4-6]</sup>,但采用Mann-Kendall检验和小波分析相结合的方法系统地研究该流域气温变化的却较少。本文根据珠江上游流域40个气象站1959-2008年实测气温资料,采用线性回归、Mann-Kendall检验以及小波分析法对气温序列作趋势检验与周期分析,以揭示该流域气温时空演变特征,为研究该区域水资源演变规律、气候变化及其对水生态安全和

收稿日期:2011-10-27; 修回日期:2011-11-23

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体基金项目(51021006)

作者简介:张峰(1985-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事环境水文方面研究。

社会经济的影响提供参考。

## 2 研究区概况

珠江流域水系由西江、北江、东江、珠江三角洲诸河组成,其中上游流域主要包括西江和北江,流经云南、贵州、广西和广东等省(自治区)。西江是珠江流域主干流,全长 2 075 km,集水面积 35.31 万 km<sup>2</sup>,主要支流有北盘江、柳江、郁江、桂江和贺江;北江是该流域第二大水系,干流全长 468 km,集水面积 4.67 万 km<sup>2</sup>。流域属于亚热带季风气候,兼受中高纬度西风带和低纬度东风带、热带天气系统影响,降水量年内分配极不均匀,降水量主要集中在汛期(4-9月),汛期降水量一般占全年的 70%~80%左右,非汛期降水量比较少,一般占全年的 20%~30%。珠江上游流域及气象站分布见图 1。



图1 珠江上游流域及气象站分布图

## 3 资料来源与研究方法

### 3.1 资料来源

本研究采用的数据来源于中国气象局,数据为珠江上游流域内分布较均匀的 40 个气象站气温数据,且年份为 1954-2008 年。基于站点逐日数据,将其处理为年平均(1-12月)以及春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-2月)等平均气温序列。

### 3.2 研究方法

3.2.1 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验(以下简称 M-K 检验)是世界气象组织推荐的一种非参数检验法。常用来分析降水、气温、径流等气象水文要素时间序列的趋势变化,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算简便,适合于水文、气象等非正态分布的时间序列<sup>[7]</sup>,并已得到广泛应用<sup>[8-10]</sup>。

对于给定的置信水平  $\alpha$ :若 M-K 统计量  $Z$  满足  $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$ ,则说明气温序列存在显著上升或下降趋势。若  $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ ,则原说明气温序列不存在显著趋势变化,且当  $Z > 0$  时,存在无显著上升趋势,

当  $Z < 0$  时,存在无显著下降趋势。本研究取  $\alpha = 0.05$ ,临界值  $Z = \pm 1.96$ 。此外,该方法还能够根据顺序降水序列和逆序降水序列的秩序列得到 UF 和 UB 曲线,以此来确定降水序列突变时间。

3.2.2 小波分析法 趋势分析一般只能给出气温变化的总体情况,而小波分析的时频局部化特性可展现时间序列的精细结构,对水文气象序列分析具有很好的适用性,为分析气温多时间尺度变化特征等问题研究提供了一种新途径<sup>[11]</sup>。

小波方差图反映了波动的能量随尺度的分布,通过小波方差图可以得知一个水文时间序列存在的主周期。由于采用连续 Morlet 小波作为基函数进行小波变换,能够很好地对气温序列连续进行时频局部化分析<sup>[12]</sup>,因此,本研究选取 Morlet 小波对气温序列进行周期分析。为消除季节变化的影响,分别对年平均气温及各季节平均气温进行距平,对各时间序列的距平值进行连续小波变换<sup>[13-14]</sup>。

## 4 结果与分析

### 4.1 年平均气温变化特征

4.1.1 多年变化趋势分析 珠江上游流域年平均气温线性趋势如图 2 所示。由图可知,流域多年平均气温在 19℃左右,平均最高气温为 20℃左右,平均最低气温为 18℃左右。近 55 年来,流域多年平均气温呈上升趋势,且上升率为 0.078℃/10a,平均气温上升超过 0.4℃,尤其是在 20 世纪 90 年代以后,上升趋势最为明显,这和全球变暖的趋势是一致的。从年代际尺度变化来看(表 1),20 世纪 50 年代以来,流域气温是波动上升的。50-70 年代平均气温呈现下降趋势,70 年代气温达到最低,气温降幅为 0.18℃;80 年代气温开始回升,90 年代比 80 年代平均升温 0.23℃,2000-2008 年气温比 90 年代高 0.17℃。可见,90 年代气温增幅最大,进入 21 世纪气温达到最高。

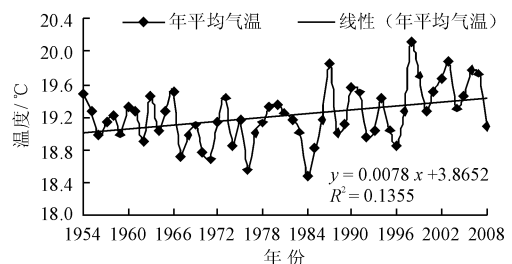


图2 年平均气温线性趋势

表1 平均气温年代际变化

时间	1954-1959	1960s	1970s	1980s	1990s	2000-2008
平均气温	19.18	19.16	19	19.12	19.35	19.52

4.1.2 M-K 检验

(1)显著性检验。在  $\alpha = 0.05$  (95% 的置信度) 下,对珠江流域内 40 个气象站及流域年平均气温 (1954 - 2008 年) 作 M-K 检验分析。根据统计量 Z 值是否通过 95% 的置信度检验,本文气温变化趋势分为显著上升 ( $Z \geq 1.96$ )、显著下降 ( $Z < -1.96$ )、无显著上升 ( $0 < Z < 1.96$ ) 和无显著下降 ( $-1.96 < Z < 0$ ) 4 种类型。年平均气温变化空间分布见图 3, 图中背景为年平均气温空间分布,采用距离反比法将流域内每个气象站多年平均气温插值到空间而得到。由图可知,在空间上,流域年平均气温呈现由西北向东南递增的趋势。40 个气象站中,年平均气温呈上升趋势的站点占 92.5%,其中 70.3% 的站点通过了 95% 的置信度检验,上升趋势显著。总体上,流域年平均气温呈显著上升趋势 ( $Z = 2.44$ ),这与文献[2] 研究结果一致。气温上升显著的区域主要集中在红水河、柳江、桂江、贺江、黔浔江、西江梧州以下及北江流域,其它区域无显著变化。造成这种空间显著变化的原因可能与区域社会经济发展和人类活动强度有关,西江下游和北江地区社会经济发展迅速,城市化进程速度较快,人类活动较强,使大气中温室气体及气溶胶含量增加,造成温室效应和城市热岛效应增强,促进了气温的上升<sup>[15-16]</sup>;西江上游多为山区,植被覆盖较好,社会经济发展较慢,人类干扰活动相对较弱,因而对气温变化影响较小。

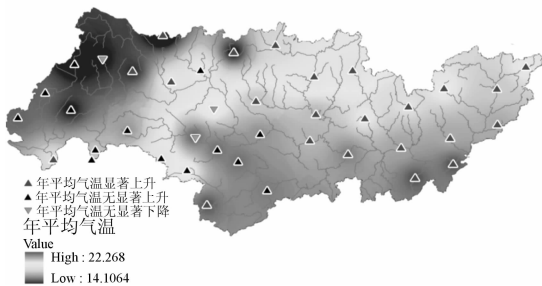


图3 年平均气温变化空间分布图

(2)突变点检验。图 4 给出了流域年平均气温 M-K 统计量曲线(图中水平虚线代表  $\alpha = 0.05$  显著水平上的临界值  $\pm 1.96$ ,下同)。由图可知,年平均气温在 20 世纪 90 年代发生了突变,突变开始的时间是 1997 年,2004 年以后气温显著上升,超过了  $\alpha = 0.05$  显著水平线。

4.1.3 周期分析 年平均气温距平小波系数等值线图如图 5 所示。图中实线表示小波变换系数为正值,表征气温偏暖;虚线表示为负值,表征气温偏冷。由图可知,珠江上游年平均气温以 2 ~ 4 a、5 ~ 10 a、

13 ~ 22 a 左右和 26 a 以上的时间尺度相位变化较明显,其中心时间尺度分别为 3、7、17 和 43 a 左右。其中以 43、17 和 7 a 左右周期相位变化十分显著。以 43 a 左右为周期的气温存在 2 个偏暖期 1 个偏冷期,经历了“暖—冷—暖”循环交替变化;在 1954 - 1961 年和 1990 - 2008 年处于正相位,气温为偏暖期;在 1962 - 1989 年处于负相位,气温为偏冷期;从图还可看出,2008 年以后正相位等值线未完全闭合,可以推断此后一段时间气温仍将处在偏暖期。以 17 a 左右为周期相位变化主要发生在 1967 - 2008 年,经历了“冷—暖—冷—暖”交替变化,2008 年以后气温仍将处于偏暖期;以 7 年左右为周期相位变化主要发生在 1967 - 2000 年,气温冷暖变化频繁。图 6 为年平均气温距平小波方差图,由图可见,年平均气温存在 3、7、17 和 43 a 左右的主周期。

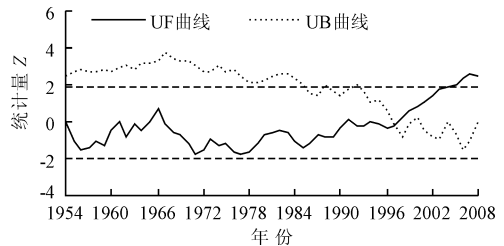


图4 年平均气温 M-K 统计量曲线

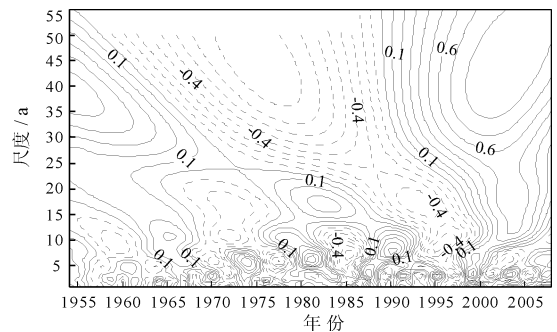


图5 年平均气温距平小波变换系数等值线图

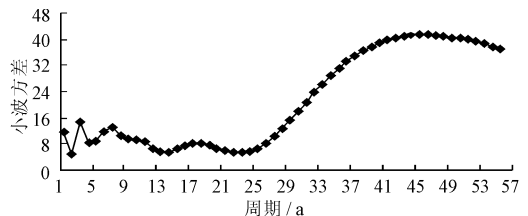


图6 年平均气温距平小波方差图

4.2 季节平均气温变化特征

4.2.1 多年变化趋势分析 图 7 给出了珠江上游流域各季节平均气温线性趋势。由图可知,近 55 年来,各季节平均气温均呈现上升趋势,但上升幅度存在差异。春季多年平均气温上升率为每 10 年 0.009℃,气温无明显变化;夏季上升率为每 10 年

0.06℃,变化幅度不明显;秋季上升率为每 10 年 0.1℃,冬季上升率为每 10 年 0.16℃。可见,冬季平均气温上升幅度最大,秋季次之,春季最小,说明冬季对流域年平均气温增暖贡献最大,由此也说明该流域出现了暖冬现象。

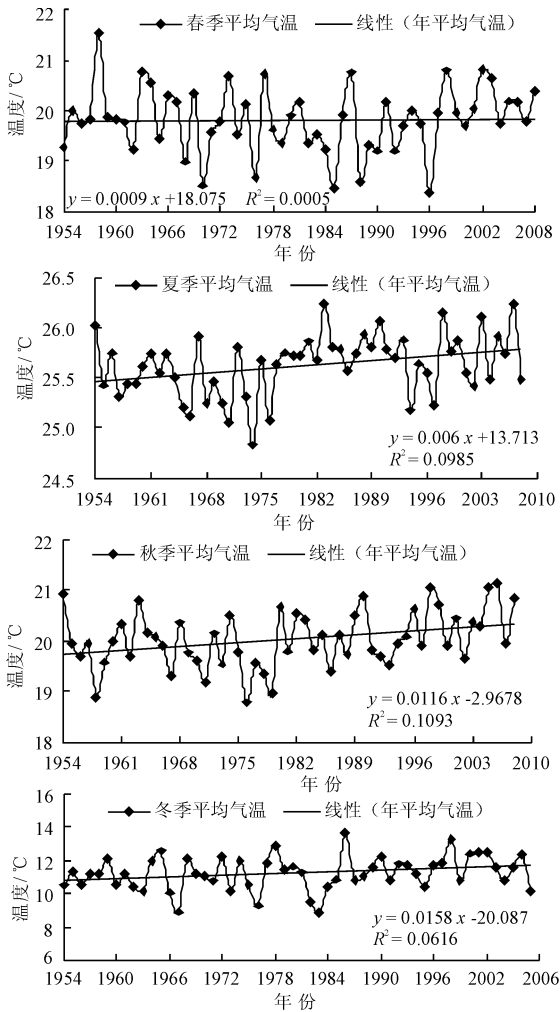


图 7 各季节平均气温线性趋势

各季节平均气温年代际变化如表 2 所示。由表 2 可知,20 世纪 50 年代以来,各季节气温也是波动上升的。春季平均气温从 50 - 80 年代呈下降趋势,下降幅度达 0.51℃;90 年代开始气温处于回升状态,2000 - 2008 年气温比 90 年代升高了 0.45℃。夏季平均气温从 50 - 70 年代呈微弱下降趋势,80 年代开始反弹,但 90 年代又有所下降,2000 年以后气温又出现回升。秋季平均气温除 70 年代出现下降外,其它年代都呈上升趋势。冬季平均气温则经历了“下降 - 上升 - 下降 - 上升 - 上升”的变化。对比各季节,最高气温除夏季出现在 80 年代外,其余各季节都出现在 2000 - 2008 年。

4.2.2 M-K 检验

(1)显著性检验。在  $\alpha = 0.05$  (95% 的置信度) 下,对流域范围内 40 个气象站及各季节平均气温 (1954 - 2008) 作 M-K 检验分析。图 8 只给出春季和夏季平均气温变化空间分布图 (秋季和冬季图略)。流域各季节平均气温序列统计量值见表 3。

表 2 各季节平均气温年代际变化 ℃

	1954 - 1959	1960s	1970s	1980s	1990s	2000 - 2008
春季	20.04	19.94	19.66	19.53	19.71	20.16
夏季	25.57	25.51	25.41	25.81	25.69	25.76
秋季	19.84	20.04	19.54	20.11	20.23	20.40
冬季	11.14	10.93	11.23	10.98	11.59	11.72

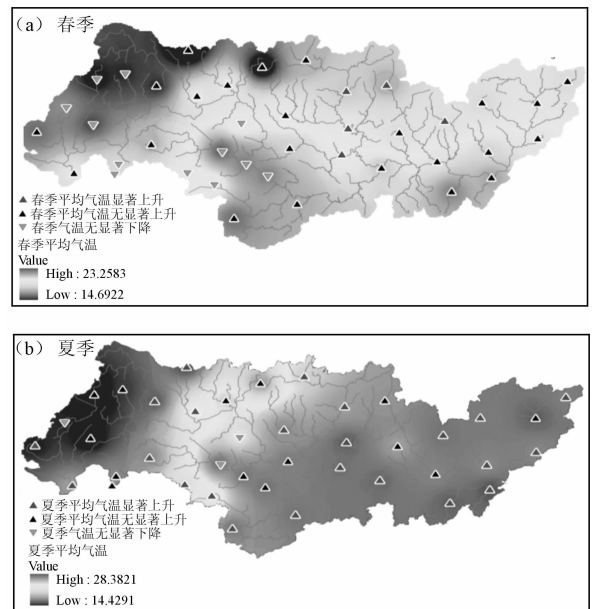


图 8 春季和夏季平均气温变化空间分布图

表 3 各季节平均气温序列统计量值

季节	统计量 Z	临界值	变化趋势	是否显著
春季	0.57	1.96	上升	否
夏季	2.25	1.96	上升	是
秋季	2.28	1.96	上升	是
冬季	1.72	1.96	上升	否

从图 8(a) 可以看出,40 个气象站中,春季气温呈上升趋势的站点占 70%,其中,17.9% 的站点通过了 95% 的置信度检验;其余 30% 的站点下降趋势均不显著。在空间上,气温上升显著的区域主要集中在柳江,其它区域气温变化均不明显。总体上,春季气温呈上升趋势,但不显著 ( $Z = 0.57$ )。对夏季而言(图 8(b)),流域中有 92.5% 的站点气温呈上升趋势,其中 64.9% 的站点上升趋势显著;夏季平均气温总体呈显著的上升趋势,左江、郁江、柳江、桂江、贺江、西江梧州以下流域及北江下游气温增暖较显著。从对秋季和冬季气温变化空间分布分析可

知,秋季流域40个站点全部呈上升趋势,其中超过一半以上的站点气温上升较显著,流域秋季平均气温总体呈显著的上升趋势;在冬季,流域中有95%的站点气温呈上升趋势,其中有36.8%的站点通过了95%的置信度检验,南盘江和北江冬季气温上升较显著。总体上,流域冬季气温总体呈增暖趋势,但不显著( $Z = 1.72$ )。

(2) 突变点检验。春季和夏季平均气温 M-K 统计量曲线见图9(秋季和冬季图略)。

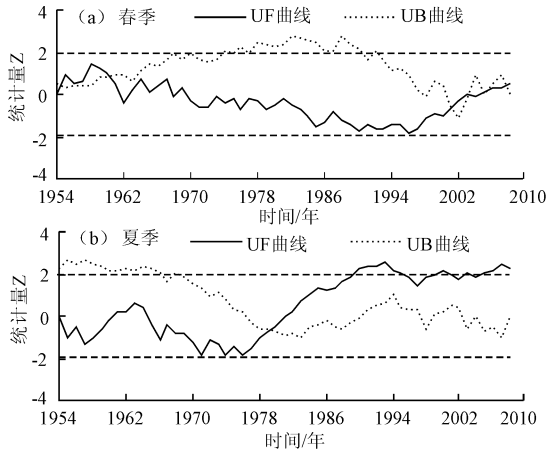


图9 春季和夏季平均气温 M-K 统计量曲线

由图9可知,近55年来,春季平均气温没有发生

突变;夏季平均气温在20世纪80年代前后发生了突变,突变开始时间为1979年,1989年后大部分年份气温上升显著。从秋冬季突变点分析可知,秋季平均气温在1996年发生了突变,2006-2008年超过 $\alpha = 0.05$ 显著水平线;冬季平均气温则在1988年发生了突变。

4.2.3 周期分析 图10为各季节平均气温距平小波系数等值线图。从图10(a)可以看出,春季平均气温以35 a左右周期相位变化最为显著,气温存在2个偏暖期和1个偏冷期;在1954-1974年和1997-2008年处于偏暖期;1975-1996年处于偏冷期,2008年以后仍将处于偏暖期;以10~22 a左右时间尺度相位变化主要发生在1955-1998年;以4~8 a和2~3 a时间尺度相位变化均发生在整个时域内,且冷暖交替频繁。夏季平均气温以35 a以上的时间尺度相位变化发生在整个时域内,气温存在1个偏暖期和1个偏冷期,2008年以后仍处于偏暖期;以15~30 a左右时间尺度相位变化经历了“暖—冷—暖—冷—暖”循环交替变化,2008年以后仍将处于气温偏暖期(图10(b))。秋季平均气温以25 a以上的时间尺度的相位变化发生在整个时域内,气温存在2个偏暖期和1个偏冷期;以12~22 a左右时间尺度相位变化经历了“冷—暖—冷—暖—冷—

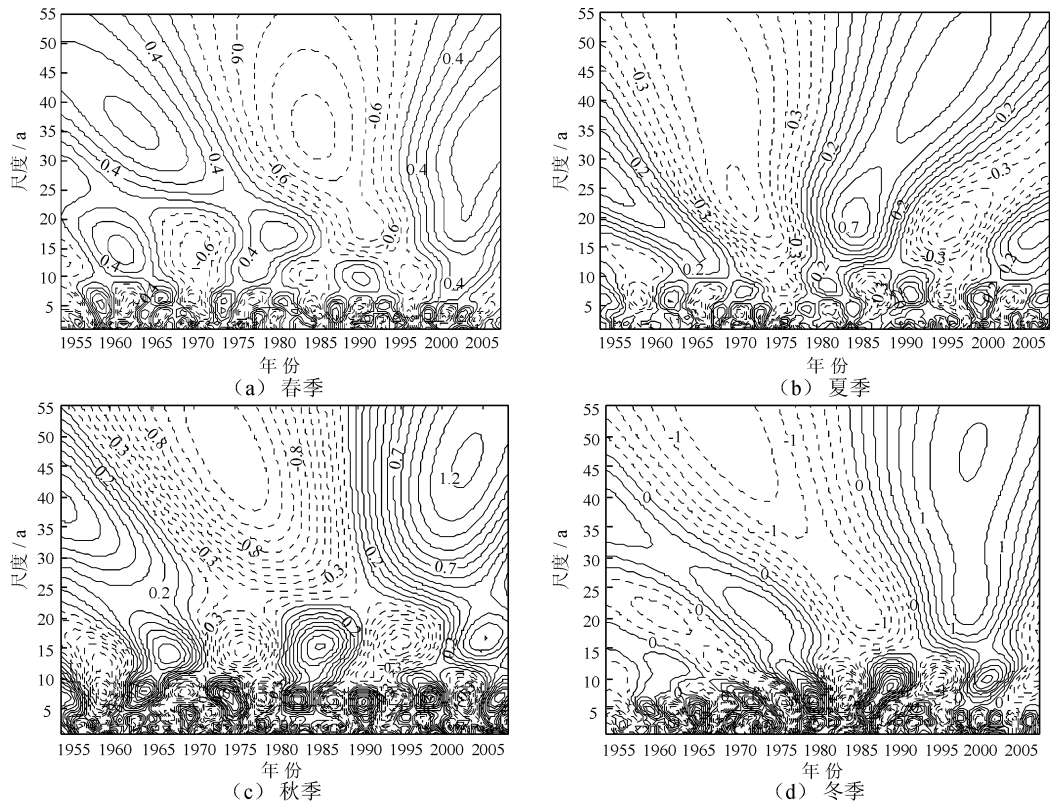


图10 各季节平均气温距平小波变换系数等值线图

暖”的交替变化;以5~10 a左右时间尺度相位变化均发生在整个时域内(图10(c))。冬季平均气温以30 a以上时间尺度相位变化发生在整个时域内,气温存在1个偏暖期和1个偏冷期;以15~28 a左右时间尺度相位变化经历了“冷—暖—冷—暖”循环交替变化(图10(d))。图11给出了各季节气温距平时间序列小波方差图,由图可知,春季平均气温存在3、6、17和35 a左右的主周期,夏季平均气温存在2、7、19和43 a左右的主周期,秋季平均气温存在2、7、15和45 a左右的主周期,冬季平均气温存在3、6、21和49 a左右的主周期。从以上分析可以看出,各季节平均气温周期和年平均气温周期大体一致。

## 5 结 语

(1)近55年来,珠江上游流域多年平均气温呈显著上升趋势,20世纪90年代气温增幅最大,进入21世纪气温达到最高,1997年气温突变开始。在空

间上,气温上升显著的区域主要集中在红水河、柳江、桂贺江、黔浔江、西江梧州以下及北江流域。年平均气温存在3 a、7 a、17 a和43 a左右的主周期。

(2)从各季节气温变化看,各季节平均气温均呈上升趋势,其中夏、秋两季上升显著。最高气温除夏季出现在20世纪80年代外,其余各季节均出现在2000-2008年。各季节气温突变开始时间各异,除春季无突变发生外,夏、秋、冬三季突变开始时间依次为1979、1996和1988年。各季节平均气温周期和年平均气温周期大体一致,均存在3、7、18和40 a左右的主周期。

(3)气候变暖会引起流域水循环的变化,但这种变化在不同的时间、空间尺度上对珠江上游流域水循环产生怎样的影响却鲜见研究。因此,今后有必要把气温与其它水循环要素(如降水、径流、蒸发等)进行综合研究,特别是要结合珠江流域压咸调度期,以揭示气候变化条件下珠江上游流域水循环要素演变规律。

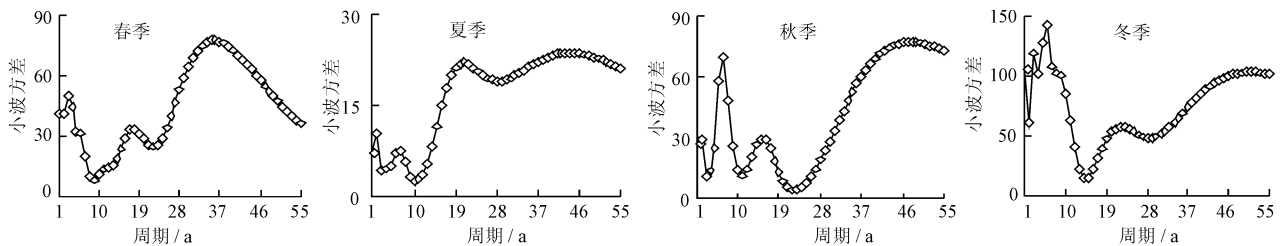


图11 各季节平均气温距平小波方差图

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical basic climate [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 气候变化国家评估报告[M].《气候变化国家评估报告》编写委员会.北京:科学出版社,2007.
- [3] 张建云,王国庆,等.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.
- [4] 王兆礼,陈晓宏,黄国如.近40年来珠江流域平均气温时空演变特征[J].热带地理,2007,27(4):289-293.
- [5] 董满宇,江源,熊兴,等.1959-2004年东江流域气温变化特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(6):733-737.
- [6] 何艳虎,林凯荣.近期气候变化对东江流域水资源的影响研究[J].中国农村水利水电,2011(6):7-10.
- [7] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [8] Feng X Q, Zhang G X, Yin X R. Hydrological Responses to Climate Change in Nenjiang River Basin, Northeastern China [J]. Water Resour Manage, 2011(25): 677-689.
- [9] Chen H, Guo S L, Xu C Y, et al. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin [J]. Journal of Hydrology, 2007(344): 171-184.
- [10] 王兴海,张勃,王海军,等.石羊河流域近50年最高最低气温变化分析[J].干旱区地理,2010,33(6):879-888.
- [11] 刘光生,王根绪,胡宏昌,等.长江黄河源区近45年气候变化特征分析[J].资源科学,2010,32(8):1486-1492.
- [12] 翟劲焱,张建云,刘九夫,等.海河流域近50年降水变化多时间尺度分析[J].海水水利,2009(1):1-3.
- [13] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509.
- [14] 冯明.气候变化对水文水资源的影响研究[D].武汉:武汉大学,2004.
- [15] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [16] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气候变化与环境研究,2005,10(4):701-716.