

近 60 年岷江流域气温变化趋势与突变性分析

甄英¹, 何静² (1. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641199; 2. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川成都 610225)

摘要 利用岷江流域 1955—2014 年的逐月气温资料, 采用线性趋势、距平分析、Mann-Kendall 突变检验及 Morlet 小波变换对该流域上、中、下游的气温变化趋势及突变性与周期性进行分析。结果表明, 近 60 年岷江流域年均气温、最高气温、最低气温均呈上升趋势, 增速从大到小依次为上游、中游、下游; 该流域各季节的年均气温由北向南递增, 但冬季中游比下游略高; 岷江流域年均气温从 20 世纪 80 年代中后期开始整体波动回升, 进入 21 世纪后上升趋势显著, 但上、中、下游的突变时间并不一致; 岷江流域气温出现低温-高温循环变化的规律, 上、中、下游分别以 9、4、4 年左右的周期振荡为主。

关键词 气温; 变化趋势; 突变性; 岷江流域

中图分类号 S161.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)04-0151-05

Analysis on the Variation Trend and Mutability of Temperature in Minjiang River Basin in Recent 60 Years

ZHEN Ying¹, HE Jing² (1. School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641199; 2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225)

Abstract Using the monthly temperature data of the Minjiang River Basin from 1955 to 2014, the variation trend, mutability and periodicity of temperature of upper, middle and lower reaches of the Minjiang River Basin were analyzed by linear trend, anomaly analysis, Mann-Kendall mutation test and Morlet wavelet transform. The results showed that the average temperature, maximum temperature and minimum temperature of the Minjiang River Basin were increasing in the past 60 years, the growth rate was upper > middle > lower. The average annual temperature of the basin was increasing from north to south in each season, but temperature increase of the middle in winter was slightly higher than that of the lower. The annual average temperature of the Minjiang River Basin had been fluctuating since the middle and late 1980s, and the rising trend had been remarkable in the 21st century, but the mutation time in the upper, middle and lower reaches was not consistent. The temperature of Minjiang River Basin showed the law of low temperature and high temperature cycle, and the periodic oscillations of the upper, middle and lower reaches were 9 years, 4 years and 4 years respectively.

Key words Temperature; Variation trend; Mutability; Minjiang River Basin

当前, 气候变化及其对人类环境的影响已成为全球科学界日益重视的重大科学问题。科学研究以及政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告表明, 近百年来全球气候正经历 1 次以全球变暖为主要特征的显著变化, 20 世纪全球平均地表温度增加了 0.6℃左右^[1]。我国近百年来地面气温变化趋势与全球的情况相似, 以气候变暖为主要特征的全球变化已成为一个不争的事实^[2-3]。近年来, 很多学者对我国气候的变化特征及趋势^[4-5]、较大区域气候变化^[6-7]、流域气候^[1, 8-9]等方面做了较为详细的研究, 但是这些研究均针对大范围区域内的气候, 而没有对局部区域的气候进行分析。因此, 将岷江流域分为若干单元, 利用准确的气象观测资料专门分析该流域的气温变化趋势及突变性的特点, 仍然有重要的科学意义。已有很多学者对岷江流域水资源安全^[10]、水资源生态足迹^[11]、水质^[12]、径流和降水^[13-15]等方面做了大量研究, 都是从流域整体或某一部分进行分析, 但将流域分段对其气温的变化进行整体研究的还鲜见报道。笔者利用岷江流域的松潘、都江堰、乐山、宜宾气象观测站 1955—2014 年气温实测数据, 对岷江流域上、中、下游的气温变化特征、突变性和周期性进行分析, 以期对流域生态环境和水资源开发利用提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 岷江发源于岷山南麓松潘县郎架岭, 由西北向东南流经四川盆地, 于宜宾市合江门汇入长江。全长

735 km, 总落差 3 560 m, 流域面积 14 万 km²。岷江是长江上游水量最大的一条支流, 都江堰以上为上游, 都江堰至乐山段为中游, 乐山以下至宜宾为下游。

1.2 资料选取 选用岷江流域的松潘(32°39'N、103°34'E, 2850.7 m)、都江堰(30°59'N、103°40'E, 706.7 m)、乐山(29°34'N、103°45'E, 424.2 m)、宜宾(28°48'N、104°36'E, 340.8 m)这 4 个气象观测站 1955—2014 年的逐年、逐月气温实测数据为样本, 将岷江流域分为上游、中游、下游三部分, 对其气温变化进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 非参数检验。Mann-Kendall 非参数检验(简称 M-K 检验)是一种广泛应用于气温、降水、径流等水文现象的非参数统计检验方法^[16]。M-K 检验法能很好地揭示时间序列的趋势变化及突变特征^[17-18]。在时间序列为随机的假设下, 定义统计量^[19]:

对于具有 n 个样本的时间序列 x , 构造一秩序列:

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

其中, $r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n)$

在时间序列独立的假定下, 定义统计量:

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

其中, $UF_1=0, E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}, \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$ 。

再按时间序列 x 的逆序重复上述过程, 并且令 $UB_k = UF_k \quad (k=n, n-1, \dots, 2, 1), UB_1=0$ 。

基金项目 四川省教育厅项目(16ZB0303)。
作者简介 甄英(1983—), 女, 河北承德人, 讲师, 硕士, 从事资源脆弱区环境保护与利用研究。
收稿日期 2017-11-08

一般取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 那么临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ ^[20]。将 UF_k 和 UB_k 两序列曲线和 ± 1.96 两条直线均绘在一张图上。若 UF_k 和 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著, 超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 2 条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

1.3.2 小波变换。对于给定的小波函数 $\psi(t)$, 离散水文时间序列为取样时间间隔的小波变换为^[21]:

$$WT_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right)$$

(3)

式中, $WT_f(a,b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子; b 为时间因子; $\bar{\psi}(t)$ 为小波函数 $\psi(t)$ 的复共轭函数^[21]。

文中选用复值 Morlet 小波函数: $\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$, 其中 $\omega_0 \geq 5$ 为常数, 取 $\omega_0 = 6$ 。复值小波变换比实数形式的小波变换优越^[20]。它的实部和虚部位相相差 $\pi/2$, 可以消除实数形式的小波变换系数模的振荡, 并且能够把小波变换系数的模和位相分离开来^[21-22]。实线部分是小波变换系数正相位,

虚线是负相位, 零线用标注 0 的粗实线表示, 表明气温发生转变的是突变线^[23-24], 具体反映在研究区气温上表示偏高和偏低的交替变化特性。

1.3.3 小波方差。小波方差 $\text{Var}(a)$ 反映了波动的能量随尺度的分布, 它是指小波变换系数 $WT_f(a,b)$ 的平方在时间域上对 b 的积分, 即^[21]

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |WT_f(a,b)|^2 db$$

(4)

2 结果与分析

2.1 气温变化趋势分析

2.1.1 平均气温年变化。由图 1 可知, 近 60 年岷江流域平均气温整体呈波动上升趋势, 上、中、下游增幅分别为 0.22、0.18 和 0.11 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 且中、下游年均气温与上游年均气温相差较大, 其主要原因是上游所在的地理位置海拔较高, 且与中下游海拔高差相差较大造成。该流域年均气温在 20 世纪 80 年代中后期开始上升, 且上升速度快, 持续时间长, 上、中、下游分别在 1998、1996、1996 年超过年均气温, 这与伍清等^[25]、刘晓冉等^[26]对西南地区气温变化分析的结论一致。

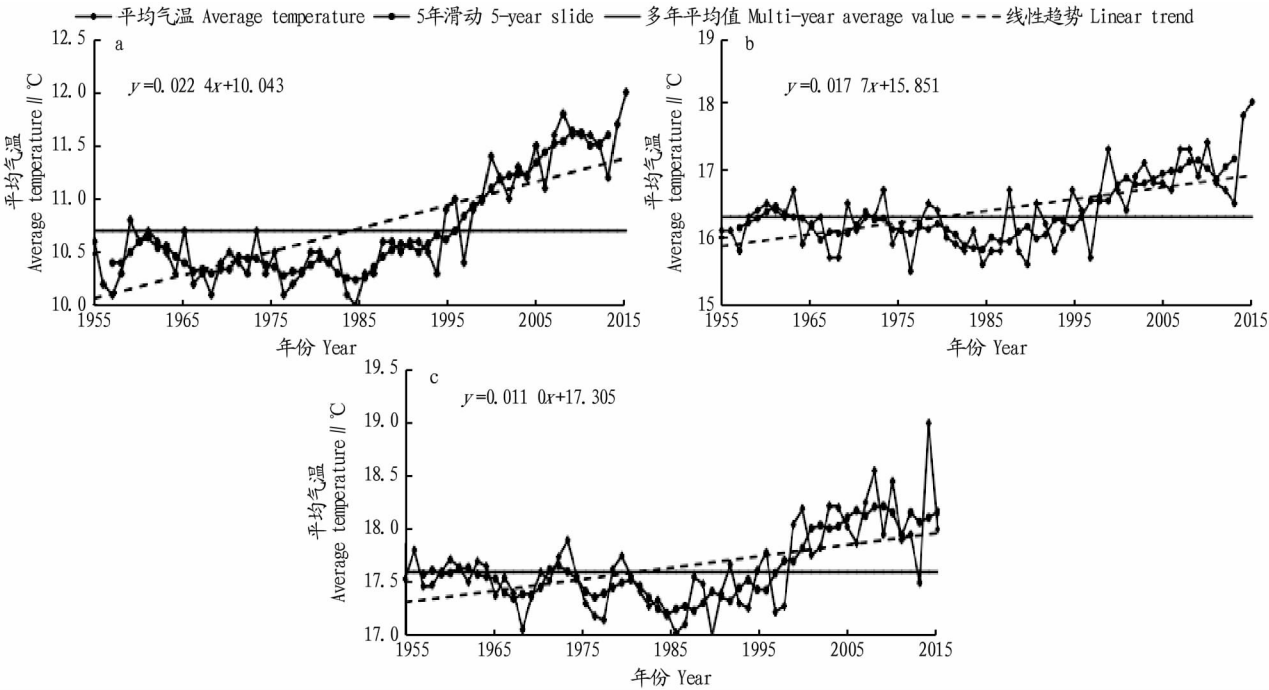


图 1 1955—2014 年岷江流域上游(a)、中游(b)和下游(c)年均气温变化

Fig.1 Annual average temperature changes in the upper reaches(a), middle reaches(b) and lower reaches(c) of Minjiang River Basin from 1955 to 2014

2.1.2 平均气温年代际变化。从图 2 可以看出, 近 60 年岷江流域平均气温年代际变化明显, 主要表现为两部分: 20 世纪 50 年代中期—90 年代末流域上游、中游、下游的年均气温均低于多年平均气温, 且在 80 年代均达到最低值; 21 世纪以来年均气温均高于多年平均气温, 上游、中游在 2010—2014 年达到这 60 年的最大值, 下游在 2000—2009 年达到最大值。由此可见, 近 60 年来该流域上游、中游、下游平均气温年代际间变化并不一致。

2.1.3 平均气温季变化。近 60 年来流域上、中、下游多年

平均气温均在 10.0 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 并以由北向南温度递增的规律变化。上游各季平均气温从高到低依次为夏季、秋季、春季、冬季, 其中夏、冬季平均气温相差 17.0 $^{\circ}\text{C}$, 春秋季平均气温较接近, 仅相差 0.3 $^{\circ}\text{C}$; 中游平均气温从高到低依次为夏季、秋季、春季、冬季, 夏、冬季平均气温相差 17.4 $^{\circ}\text{C}$, 春秋季平均气温相差 0.4 $^{\circ}\text{C}$; 下游平均气温从高到低依次为夏季、春季、秋季、冬季, 夏、冬季平均气温相差 19.2 $^{\circ}\text{C}$, 但冬季比中游平均气温低 0.8 $^{\circ}\text{C}$, 且流域三部分冬季温度与其他季节温差较大。

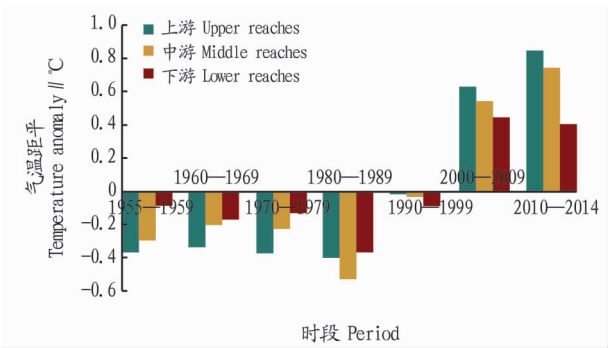
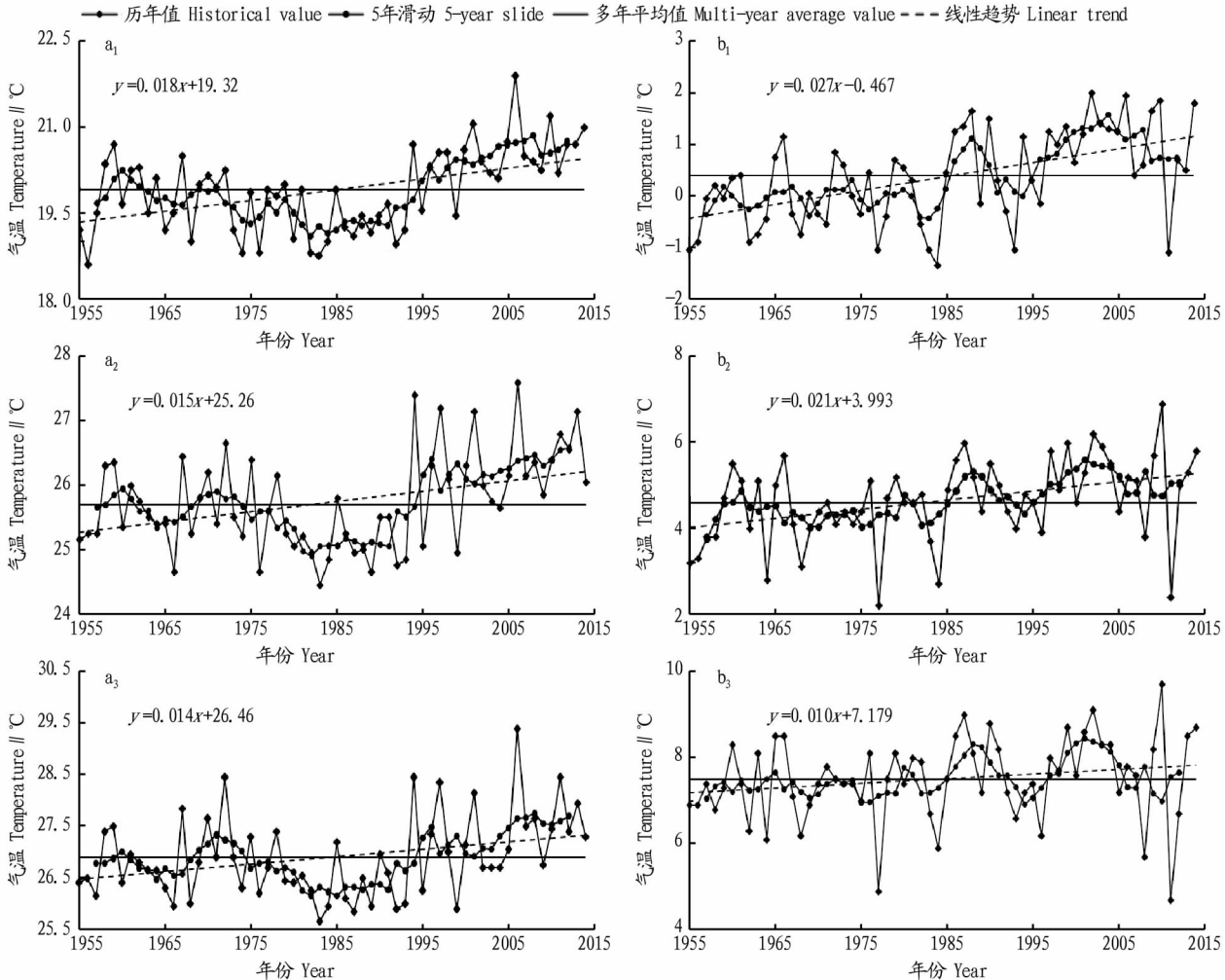


图2 1955—2014年岷江流域年代际气温距平变化

Fig.2 Anomaly change of interdecadal temperature in the Minjiang River Basin from 1955 to 2014



注: a_1 、 b_1 为上游; a_2 、 b_2 为中游; a_3 、 b_3 为下游

Note: a_1 、 b_1 is the upper reaches; a_2 、 b_2 is the middle reaches; a_3 、 b_3 is the lower reaches

图3 1955—2014年岷江流域最高气温(a)和最低气温(b)变化趋势

Fig.3 Change trend of the maximum temperature(a) and minimum temperature(b) in Minjiang River Basin from 1955 to 2014

表1 1955—2014年岷江流域最高、最低气温的变化范围及其增幅

区域 Region	最高气温 Maximum temperature		最低气温 Minimum temperature	
	变化范围	增幅	变化范围	增幅
	Change range//℃	Increasing range//℃/10 a	Change range//℃	Increasing range//℃/10 a
上游 Upper reaches	18.5 ~ 22.5	0.18	-1.5 ~ 2.5	0.27
中游 Middle reaches	24.0 ~ 28.0	0.15	1.0 ~ 8.0	0.21
下游 Lower reaches	25.0 ~ 30.0	0.14	4.0 ~ 10.0	0.10

表 2 1955—2014 年岷江流域季节平均气温

Table 2 Seasonal average temperature in the Minjiang River Basin from 1955 to 2014

区域 Region	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Whole year
上游 Upper reaches	11.1	19.0	11.4	2.0	10.9
中游 Middle reaches	16.7	24.7	17.1	7.3	16.4
下游 Lower reaches	21.8	25.7	18.3	6.5	17.7

2014 年是气温上升突变时间区域($UF>0$);中游 UF 与 UB 曲线在临界线内相交于 1971 和 1999 年,这两点即为气温下降突变的时间点;下游 UF 与 UB 曲线在临界线外相交于 1971、1985 和 1998 年,同样将超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域,即 1957—1958、1968—1972 和 1983—1999 年为气温下降突变时间区域,2009—2014 年为气温上升突变时间区域。综上分析,虽然流域上、中、下游平均气温回暖时间大体一致,但突变时间却不一致。

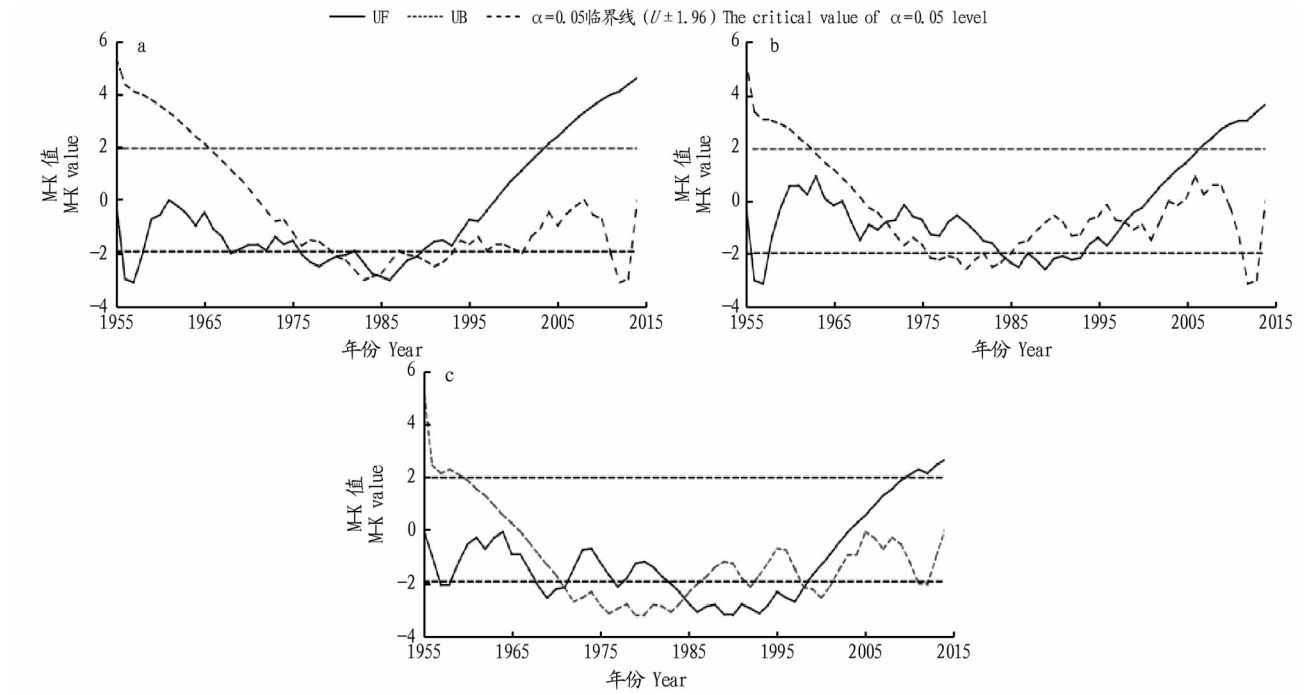


图 4 1955—2014 年岷江流域上游(a)、中游(b)和下游(c)平均气温 M-K 检验

Fig. 4 M-K test of average temperature in the upper reaches(a), middle reaches(b) and lower reaches(c) of Minjiang River Basin from 1955 to 2014

2.3 气温周期分析 从图 5 可看出,近 60 年岷江流域平均气温周期在 23~60 年的低频振荡,上游出现了 3 条突变线,分别出现在 20 世纪 60 年代中后期、80 年代中后期和 21 世纪初,将 60 年的气温分为偏低、偏高、偏低、偏高 4 个时间段;中游有 3 条突变线,分别出现在 20 世纪 60 年代后期、

80 年代初期、90 年代末期,4 个时间段内的气温分别为偏低、偏高、偏低、偏高;下游有 5 条突变线,分别出现在 20 世纪 50 年代末期、60 年代末期、80 年代中期、90 年代末期及 2010 年,6 个时间段内的气温分别为偏低、偏高、偏低、偏高、偏低、偏高。周期在 15~22 年的低频振荡,上游有 5 条突变线,中

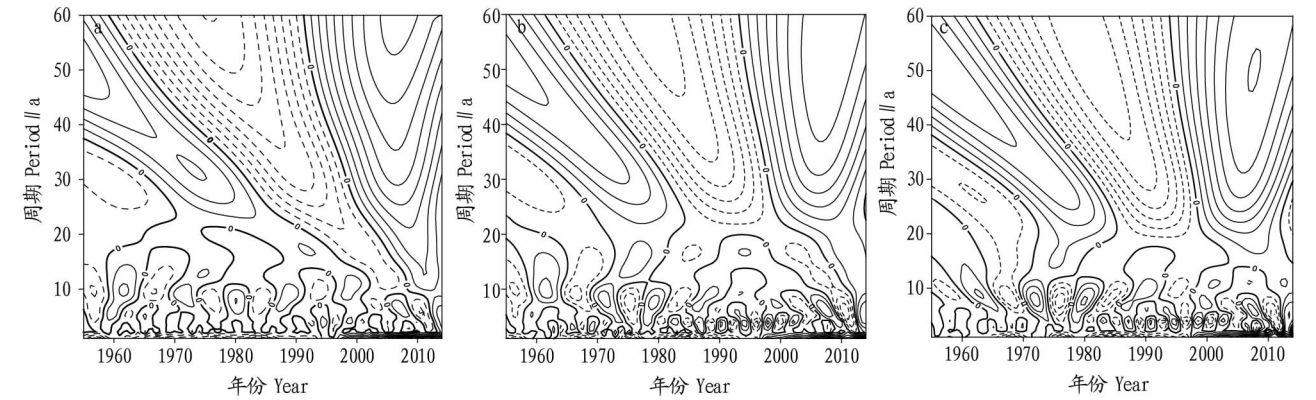


图 5 1955—2014 年岷江流域上游(a)、中游(b)和下游(c)平均气温小波系数时频变换

Fig. 5 Wavelet coefficient time-frequency transform of average temperature in the upper reaches(a), middle reaches(b) and lower reaches(c) of Minjiang River Basin from 1955 to 2014

游、下游有 6 条突变线,气温上、中游在此周期内出现低温 - 高温 - 低温的循环变化规律,下游在此周期内出现高温 - 低温 - 高温的循环变化规律。流域周期在 14 年以下的时间尺度变换中高频振荡位相结构和突变线更加复杂。

为进一步确定岷江流域气温变化的显著周期,对研究期间流域上、中、下游进行小波方差分析。从图 6 可看出,上游流域平均气温存在 1 个较为明显的峰值,对应着 9 年左右时

间尺度,说明 9 年左右时间尺度周期振荡最为强烈,为上游流域气温变化主周期。中、下游流域平均气温均存在 2 个较为明显的峰值,均分别对应着 4 和 7 年左右时间尺度,其中 4 年左右时间尺度峰值最大,说明 4 年左右的周期振荡最为强烈,为中、下游流域气温变化的第一主周期;7 年左右时间尺度峰值次之,为该段流域气温变化的第二主周期。

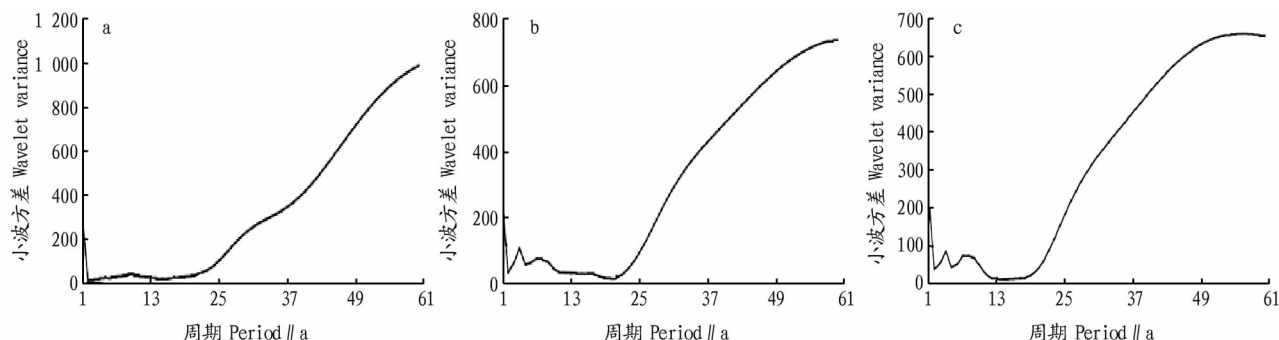


图 6 1955—2014 年岷江流域上游(a)、中游(b)和下游(c)平均气温小波方差

Fig. 6 Wavelet variance of average temperature in the upper reaches (a), middle reaches (b) and lower reaches (c) of Minjiang River Basin from 1955 to 2014

3 结论

(1) 1955—2014 年岷江流域平均气温、最高气温、最低气温整体均呈上升趋势,20 世纪 80 年代中后期尤为明显,增速从大到小依次为上游、中游、下游;流域平均温度年代际升温过程不同步,上、中游 2010—2014 年平均气温达到最大值,下游在 2000—2009 年出现;从季节来看年均温度呈由北向南递增的规律变化,但冬季中游比下游温度高出 0.8℃。

(2) M-K 突变检验发现,在 20 世纪 80 年代中后期平均气温 UF 曲线开始整体上升,21 世纪后上升趋势显著。虽然流域上、中、下游平均气温回升时间大体一致,但突变时间却不一致。

(3) Morlet 小波分析表明,岷江流域上、中、下游存在周期为 23~60 年的低频振荡,分别出现了 3、3、5 条突变线;在周期 15~22 年的低频振荡中,分别出现了 5、6、6 条突变线;周期 14 年以下的时间尺度变换中高频振荡位相结构和突变线更加复杂。通过小波方差进一步确认流域三部分分别以 9、4、4 年左右的周期振荡为主。

参考文献

- [1] 田红,李春,张士洋.近 50 年我国江淮流域气候变化[J].中国海洋大学学报,2005,35(4):539-544.
- [2] 赵宗慈,王绍武,徐影,等.近百年我国地表气温趋势变化的可能原因[J].气候与环境研究,2005,10(4):808-817.
- [3] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.近 54 年中国地面气温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):717-727.
- [4] 韩翠华,郝志新,郑景云.1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J].地理科学进展,2013,32(6):887-896.
- [5] 王澄海,李健,许晓光.中国近 50 年气温变化准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J].高原气象,2012,31(1):126-136.
- [6] 任朝霞,杨达源.近 50a 西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):91-95.
- [7] 高振荣,田庆明,刘晓雪,等.近 58 年河西走廊地区气温变化及突变分

- 析[J].干旱区研究,2010,27(2):194-203.
- [8] 王永财,孙艳玲,张静,等.近 51 年海河流域气候变化特征分析[J].天津师范大学学报(自然科学版),2014,34(4):58-63.
- [9] 李华伟,王建华,黄建云.红河中下游流域气候变化特征分析[J].云南地理环境研究,2011,23(S1):1-7.
- [10] 王渺林.岷江流域水资源安全问题探讨[J].四川水利,2005(4):32-34.
- [11] 赵兵.岷江上游干旱河谷区水资源生态足迹应用研究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2015,41(2):245-250.
- [12] 赵庆绪,侯宝灯,邢冰,等.基于灰色关联分析的岷江上游流域震后水质综合评价[J].四川环境,2010,29(1):61-64.
- [13] 杜华明.岷江流域径流演变及其对气候变化的响应[J].宜宾学院学报,2014,14(12):36-40.
- [14] 周大杰,张明珠,俞烜,等.岷江流域汛期降水时空特征研究[J].水文,2009,29(4):26-29.
- [15] 杜华明,贺胜英.岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J].水土保持研究,2015,22(1):153-157.
- [16] 吴茜,徐莉莉,蔡道明,等.近 52 年来江西省气候变化特征研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2010,44(4):42-46.
- [17] 朱龙腾,陈远生,燕然然,等.1951 年至 2010 年北京市降水和气温的变化特征[J].资源科学,2012,34(7):1287-1297.
- [18] 武胜利,刘强吉.近 50a 新疆巴州地区气温与降水时空变化特征[J].干旱气象,2016,34(4):610-616.
- [19] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014:121-122.
- [20] 朱敏炜,叶成志,彭晶晶,等.湖南省 55a 极端气温事件变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(2):82-88.
- [21] 姜世中.黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析[J].地理研究,2008,27(1):221-228.
- [22] 刘俊萍,田峰巍,黄强.黄河上游河川径流变化多时间尺度分析[J].应用科学学报,2003,21(2):117-121.
- [23] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):14-17.
- [24] 刘晓琼,陈云莎,刘彦随,等.1974—2012 年陕西省榆林市气候变化统计特征[J].中国沙漠,2017,37(2):355-360.
- [25] 伍清,蒋兴文,谢洁. CMIP5 模式对西南地区气温的模拟能力评估[J].高原气象,2017,36(2):358-370.
- [26] 刘晓冉,李国平,范广州,等.西南地区近 40a 气温变化的时空特征分析[J].气象科学,2008,28(1):30-36.