

文章编号:1671-4229(2021)01-0078-09

# 近60年来粤港澳大湾区气温变化规律

李佰和, 龚建周\*

(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 文章选取粤港澳大湾区1961-2018年平均气温、平均最高气温、平均最低气温、极端最高气温和极端最低气温为研究对象,用气候倾向率法表示气温的年代际变化趋势和幅度;用气温距平值与气温标准差进行气候异常年份识别;应用两种突变检验方法(Mann-Kendall法、滑动t检验法)对各温度类型的突变状况进行检验,以分析气温的跃变现象.结果表明:①近60年来粤港澳大湾区的气温一直处于周期较短的波动变化当中,气温总体呈弱上升趋势,演变过程较为平缓.其增温率明显低于全中国、中国西北地区以及全球;②湾区内的气温呈现持续的冷暖交替.58年来总体上发生异常的概率为8%~14%,除2000s外其余各年代均出现冷年,暖年多出现于1960s以及2010s;③1月最低气温在2002年发生突变,1月极端最低气温在1981年发生突变,7月最高气温在1997年发生突变,7月极端最低气温在1993年发生突变,其余温度类型经检验均未发生突变.其中7月对于整体气温变暖的贡献更为突出.对各气象因子进行主成分分析以及通过衡量气候因子的变异程度,可知引起气温变化的主要影响因素是气压、相对湿度和蒸发量等,在最冷月时还受风速的影响.气温出现暖异常是受到热带太平洋海表面异常增温以及东亚季风和南海季风转型的影响,此外,西伯利亚高压和大气环流状态的改变引起寒潮,使气温出现冷异常.

**关键词:** 气温变化; 气候异常; 气候突变; Mann-Kendall 检验; 滑动 t 检验

中图分类号: P 463 文献标志码: A

## The variation of temperature in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in recent 60 years

LI Bai-he, GONG Jian-zhou\*

(School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The average temperature, average maximum temperature, average minimum temperature, extreme maximum temperature, and extreme minimum temperature in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2018 are selected as the research objects, and the climate tendency rate method is used to express the interdecadal change trend and range of temperature; The temperature anomaly value and the temperature standard deviation are applied to identify the abnormal climate year; two mutation test methods (Mann-Kendall method, sliding t test method) are used for testing the sudden changes of various temperature types to analyze the jump of temperature phenomenon. The results show that: ① For the past six decades, the temperature in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area has been fluctuating within a short cycle. The temperature has generally shown a weak upward trend and the evolution process has been relatively gentle. Its temperature increase rate is significantly lower than that of China, Northwest China and the world. ② The temperature in the Bay Area presents a continuous alternation between cold and warm. The overall probability of a-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41671175)

作者简介: 李佰和(1996—),女,硕士研究生. E-mail: li\_baihe@foxmail.com

\* 通信作者. E-mail: gongjzh66@126.com

引文格式: 李佰和, 龚建周. 近60年来粤港澳大湾区气温变化规律[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2021, 20(1): 78-86.

nomalies in the past 58 years has been 8% - 14%. Cold years have occurred in all the years except 2000s, and warm years have mostly occurred in the 1960s and 2010s. ③ The minimum temperature has a sudden change in January 2002, the extreme minimum temperature has a sudden change in January 1981, the maximum temperature has a sudden change in July 1997, and the extreme minimum temperature has a sudden change in July 1993. The other temperature types have no abrupt change after examination. The contribution of July to the overall temperature warming is more prominent. Principal component analysis of various meteorological factors and measurement of the degree of variation of climate factors show that the main influencing factors that cause temperature changes are air pressure, relative humidity, and evaporation, which are also affected by wind speed during the coldest month. The warm anomaly of temperature is affected by the abnormal warming of the tropical Pacific ocean surface and the transition of the East Asian monsoon and the South China Sea monsoon. In addition, the Siberian high pressure and changes in the atmospheric circulation state cause cold waves and influence the temperature cold anomalies.

**Key words:** temperature change; climate anomaly; mutation test methods; Mann-Kendall test; moving t-test

全球气候变化已对生态系统、水文循环和农业生产造成了深刻的影响,引起了世界各国政府的密切关注<sup>[1]</sup>. 据现有研究可知,气候变化的形式是多样的:从 IPCC 第五次评估报告中可以看出,在 1880 年至 2012 年间,全球平均地表温度上升了 0.85 °C (从 0.65 °C 上升到 1.06 °C); 1951 年至 2012 年,全球平均地表温度以 0.12 °C/10 年的速率升高,达到了 1880 年以来的 2 倍<sup>[2]</sup>; Victor 等<sup>[3]</sup> 研究发现,寒冷季节相较于温暖季节,其增温率更高;与低海拔地区相比,高海拔地区的增温率更高,这是气候变暖增速的一个重要指标. 但是气温变化并不是始终持续上升的, Knight 等<sup>[4]</sup> 研究指出全球地表平均温度增温速率以 1999 年为节点,后 10 年间明显减小,即全球变暖存在逐渐趋缓现象;曾钦文等<sup>[5]</sup> 研究表明,地表平均温度增速存在阶段特征,并且存在区域差异,如从 1965 年到 2017 年,东江中上游流域的年平均温度的增温速率为 0.17 °C/10 年,整体高于我国南方地区,1910s 后,增温速率达 1.414 °C/10 年,比以前的增温率高出约 8 倍; Collins 等<sup>[6]</sup> 研究发现,全球变暖的“中断”是由于太平洋和印度洋之间的相互作用对热带太平洋地区信风的强度产生影响,近 10 年来信风加剧,使海面温度降低. 此外,气温变化还存在突变现象, Milivoj 等<sup>[7]</sup> 研究表明,1960s 至 1970s 增暖突变还不显著,但 1980s 后所检测的时间序列中有一半以上出现了增暖突变,增温趋势占主导地位;尹云鹤等<sup>[8]</sup> 研究指出,我国平均温度的变化在各个气候区均存在显著突变点,全国整体而言,平均气温在 1980s 后期发生显著突变,但是,东北地区的突变出现较早,温带地区出现在 1980s,南方地区出现突变延迟至 1990s;易湘生等<sup>[9]</sup> 研

究表明,不同季节的平均气温突变时间节点也不尽相同,如在 1990s 后期观察到夏季平均温度出现突变,而在 21 世纪初冬季平均温度产生突变.

本文以粤港澳大湾区为研究区,其以泛珠三角区域为广阔发展腹地,地处我国沿海开放前沿,在“一带一路”建设中具有重要地位;但是,湾区目前面临发展空间瓶颈制约、资源能源约束趋紧和生态环境压力日益增大等问题(自《粤港澳大湾区发展规划纲要》). 目前对粤港澳大湾区气温变化规律的研究仍然缺乏,不利于理解和认知气温变化特征以及区域异质规律. 本文利用气象站资料,采用趋势系数、变化速率和两种突变检验方法(Mann-Kendall 法、滑动 t 检验法)等数理统计方法,探讨 1961 - 2018 年粤港澳大湾区气温变化特征,为进一步揭示该地区气候变化特征作一些探索.

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域

粤港澳大湾区由香港、澳门两个特别行政区和广东省九个城市(珠三角)组成,它是中国最开放、最具经济活力的地区之一,对国家整体发展具有重要作用. 其位于珠江下游,濒临南海,地貌是由西、北、东三江汇聚珠江所挟带的泥沙所形成的冲积平原. 其位于亚热带气候区,且受季风影响显著,还受到海陆风、热岛环流和越南岭南下沉气流等的复合影响,终年温暖湿润、雨热同期,加之土壤肥沃、地势平坦、河道纵横、日照时间长,因而其农牧渔业的发展具有得天独厚之势.

## 1.2 数据

本文利用1961-2018年逐日气象观测数据,进行气温变化特征研究.其中在广东省的湾区内共有29个气象观测站点(包括11个国家基本气象站、18个国家一般气象站),香港选取5个有代表性的自动监测气象站点、澳门选取地球物理气象台2个有代表性的自动气象站.数据最终由中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)提供,两个特别行政区的数据分别由澳门地球物理暨气象局(www.smg.gov.mo)、香港天文台(www.hko.gov.hk)网站下载.

## 1.3 方法

### 1.3.1 气温的长期变化特征

在表达气温长期变化时,计算气温变化倾向率,并绘制气温变化曲线.用气候倾向率法表示气温的年代际变化趋势和幅度,即气温的年际变化速率;计算所有年份气温平均值,再用各年均温减去所有年份平均值,得到气温距平值.气温倾向率计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$a_1 = \frac{dy(t)}{dt} \quad (1)$$

或:

$$y(t) = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

式中, $a_1$ 为气温倾向率,往往用 $10a_1$ 表示气温倾向率,单位 $^{\circ}\text{C}/10$ 年.当 $a_1 > 0$ 时,表示某要素呈递增趋势,否则呈递减趋势; $a_1$ 绝对值越大,表明变化幅度越大;当 $a_1 = 0$ ,则无明显变化趋势. $y(t)$ 为某气象要素的 $t$ 时间序列值,本文分别指1961-2018年间的各年平均气温、7月和1月平均最高/最低气温以及极高/极最低气温; $t$ 的单位为年.

此外,计算气温的标准偏差,根据世界气象组织的气候异常评估标准,若距平值 $\geq 2$ 倍标准偏差,视作气候异常;约为标准偏差的1.5至1.9倍,为接近气候异常; $\leq 1.5$ 倍标准差时气候正常;距平值正、负号分别表示为偏暖异常、偏冷异常<sup>[11]</sup>.

### 1.3.2 气温的突变检验

气候突变是一种中断气候渐进变化过程的现象,即从相对稳定的状态转变为另一相对稳定状态,且统计特征发生明显变化<sup>[12]</sup>.本文采用Mann-Kendall法,配合滑动 $t$ 检验分析了粤港澳大湾区1961-2018年平均气温、1月与7月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、极端最高气温、极端最低气温的突变状况.滑动 $t$ 检验的原理与计算方法见文献<sup>[12]</sup>.Mann-Kendall法是世界气象组织推荐的一种非参数检验方法,这种方法的主要优点是它不需要遵循既定的样本分布,且异常值所产生的干

扰较少,是当前具有较强理论基础且应用广泛的检测方法<sup>[13]</sup>.Mann-Kendall检验法的思路:基于时间序列的秩序量,首先构建2个序列统计量( $UF$ 和 $UB$ );然后绘制这两个统计量的曲线及临界线;最后通过 $UF$ 和 $UB$ 曲线交点与临界线可判断突变发生的时间.具体计算过程如下<sup>[14]</sup>:

(1)依据 $n$ 个时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,构造序列 $S_k$ .

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j, (1 \leq j \leq i, k = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中,序列 $S_k$ 是 $i$ 时刻数值大于 $j$ 时刻数值个数的累计数,易知 $k=1$ 时, $S_1=0$ .

(2)假定所选时间序列随机而且相互独立,定义统计量 $UF_k, UB_k$ .

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, $UF_k$ 为标准正态分布,它是顺序时间序列计算得到的统计序列; $UF_1=0, E(S_k), \text{Var}(S_k)$ 是 $S_k$ 的平均值与方差;当该时间序列均独立,而且连续分布时,可由下式计算得出:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

若再按时间序列 $x$ 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ,再重复上述过程,构造逆序列 $UB_k$ .

(3)绘制M-K统计量变化图,进行气温突变点识别.当 $UF \geq 0$ ,为上升趋势; $\leq 0$ 为下降趋势.当越过临界置信水平线时( $\alpha = 0.05$ ,置信水平线为 $\pm 1.96$ ),表示有显著变化趋势.若 $UF$ 和 $UB$ 曲线出现交点,而且交点位于置信水平线之间,则视该点为可能的突变点;若两曲线的交点在置信水平线之外,则无法肯定该点是否为突变点或在统计上不显著,还需配合滑动 $t$ 检验才可最终确定<sup>[15]</sup>.

### 1.3.3 气温变化影响因子

采用主成分分析法<sup>[16]</sup>,以及通过计算各气象因子的变异系数( $CV$ )<sup>[17]</sup>,以此确定气候因子的变异程度,从而分析影响气温变化的主要气象因子.

## 2 结果

### 2.1 平均气温的变化特征

#### 2.1.1 气温的长期变化

研究区各年、最热和最冷月份平均气温如图1;将气

温倾向率与其它区域的值一起列于表 1(气温数据来自文献[18-20]).可以看出,近 58 年来粤港澳大湾区年平均气温呈弱上升趋势,其增温率明显低于全中国、中国西北地区以及全球的,且与显著增暖的中国西北地区存在明显差异.湾区内 1 月均温甚至呈下降趋势,7 月均温变化倾向率为 0.11 °C/10 年,其增幅最大,对于湾区

内全年整体增温有较大贡献,是全年变化倾向率的 5.5 倍,略低于全国同月增温水平.因受气温总体变化平缓以及部分年份气温偏差较大的影响,各温度变化指标均未达到显著性标准,在总体微弱上升/下降的趋势中表现出波动变化.

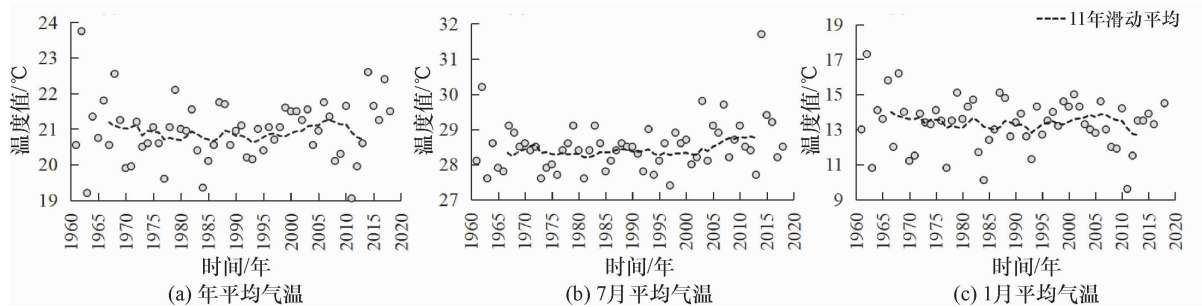


图 1 粤港澳大湾区气温时间序列

Fig. 1 Variations of air temperature in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

从 11 年滑动平均来看,粤港澳大湾区的气温一直处于波动变化当中,平均气温总体呈弱上升趋势.经计算 58 年来平均气温变异系数为 0.041,从数值来看年气温没有显著升降趋势,其总体演变过程较为平缓,除 1962 年,平均气温的距平值均在 ±2 °C 以内,呈短周期的冷暖交替变化.1 月均温的变化过程与年均温相似.7 月均温以 2002 年为节点,此前年际变化十分平缓,此后呈升高趋势.

1961 年以来,粤港澳大湾区最暖的 3 年依次是 1962 年,2014 年和 1968 年(当年平均温度相同,夏季温度高年为先);最冷的 3 年是 2011 年、1963 年和 1984 年(当年平均温度相同,冬季温度低年为先).

表 1 气温倾向率

Table 1 Change rate of average temperature °C/10a			
区域	1 月	7 月	年
粤港澳大湾区	-0.03	0.11	0.02
中国西北部	0.56	0.22	0.37
中国	0.39	0.15	0.25
全球	/	/	0.13

表 2 温度异常年份

Table 2 Year with abnormal average temperature

时间	接近气候异常	气候异常
	1.5 ≤ σ < 2.0	2.0 ≤ σ
1 月	1963 (-) 1966 (+) 1968 (+) 1977 (-)	1962 (+) 1984 (-) 2011 (-) 2017 (+)
7 月	1997 (-) 2003 (+) 2007 (+)	1962 (+) 2014 (+)
年	1968 (+) 1977 (-) 1984 (-) 2017 (+)	1962 (+) 1963 (-) 2011 (-) 2014 (+)

注: + 为偏暖异常, - 为偏冷异常.

2.1.2 气候异常变化特征

利用气温距平值与气温标准差进行气候异常年份识别,结果如表 2.年平均温度的异常(含接近异常,下同)中,除 2000s 外其余各年代均出现冷年,暖年多出现于 1960s 以及 2010s.总体上发生异常的概率为 8% ~ 14%.最冷月和最热月均有异常发生,但后者发生次数少于前者.1960s 发生异常的频次最高(8 次,含年异常,下同),其次是 2010s(6 次),1990s 仅出现一次异常.1962 年在全年、最冷月、最热月均出现异常,这是 58 年来绝无仅有的.

2.2 气温的突变特征

图 2 为各温度指标的时间序列图,结合了 M-K 检验结果与滑动 t 检验结果以分析气温的突变特征.由图 3a 可知,平均气温随着时间变化发生波动下降—上升,UF 和 UB 在 2013 年与 2015 年有交叉点,且在置信区间内,此后 UF 曲线呈上升趋势且大于 0,但两曲线始终没有突破信度线,说明在 0.05 的显著性水平下,平均气温没有发生突变,且湾区内平均气温无显著升降趋势.58 年间,气温呈下降趋势的时段要多于呈上升趋势的时段.

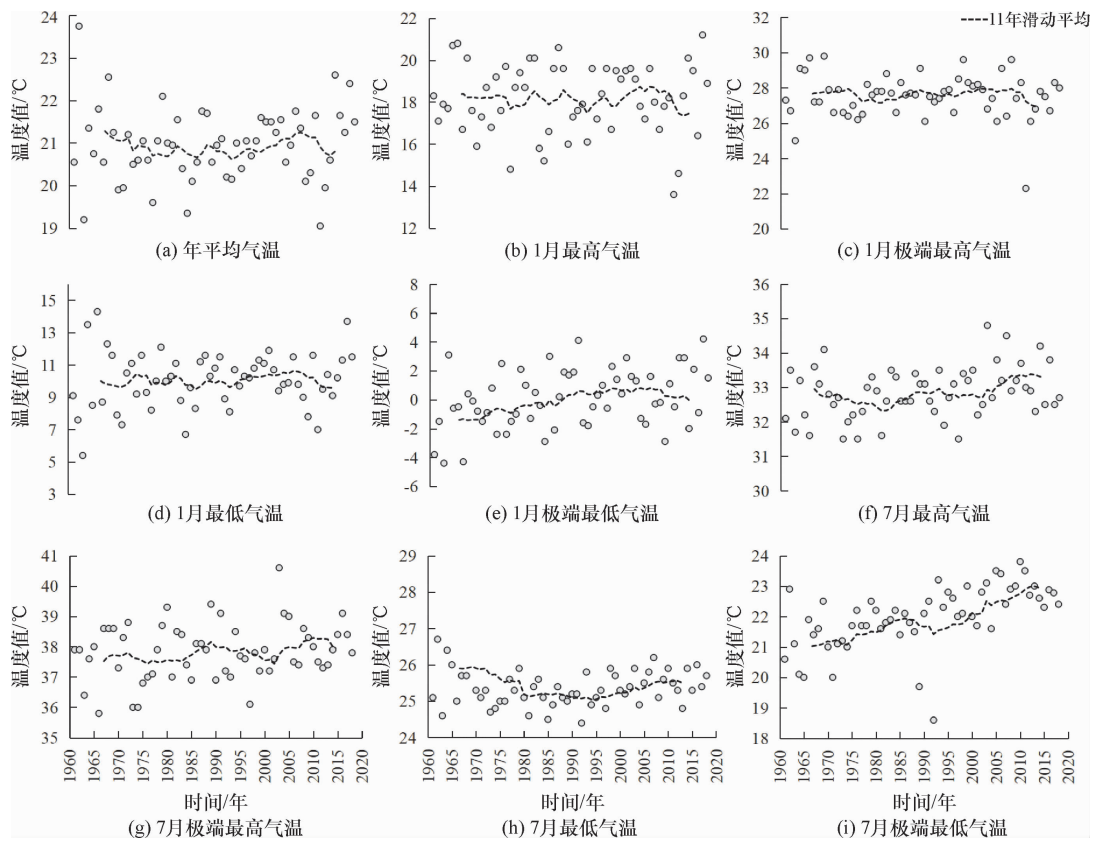


图 2 不同温度指标时间序列

Fig. 2 Time series of various temperature indicators

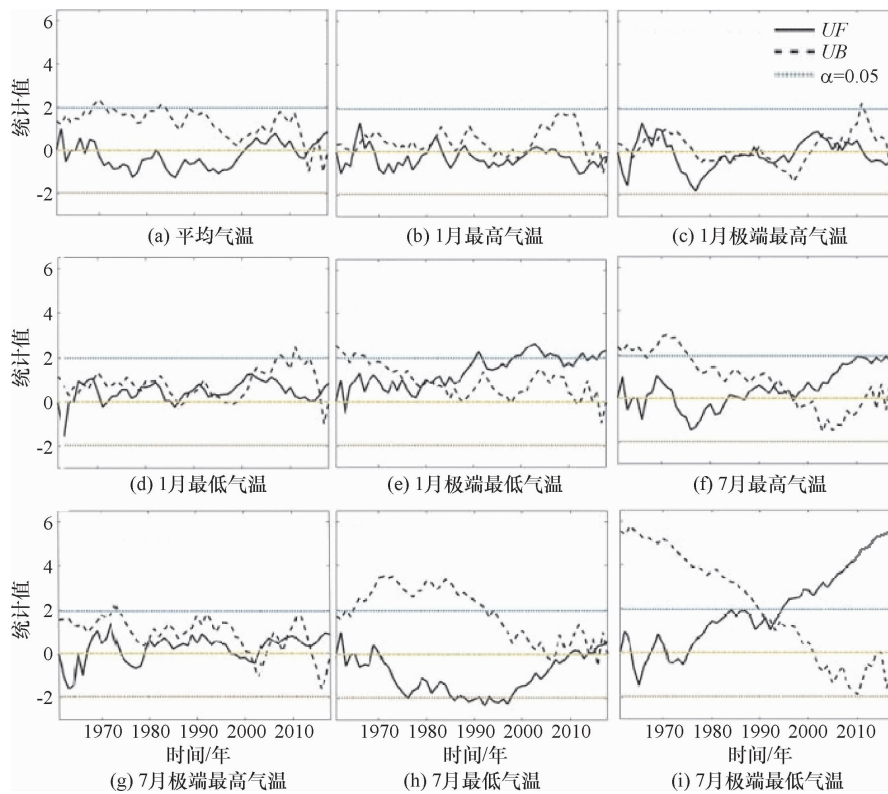


图 3 气温的 M-k 曲线

Fig. 3 M-k test curve of air temperatures

图 4 为滑动 t 统计量曲线. 由图 4b 和图 4c 可知, 1 月的最高气温和极端高温变化相似, 总体均呈缓慢下降趋势. 最高气温的曲线未超过 0.05 显著水平线, 说明湾区内的 1 月最高气温无显著升降趋势,  $UF$  和  $UB$  曲线有多个交点, 但两曲线始终没有突破信度线, 说明在 0.05 的显著性水平下, 1 月最高气温没有发生突变. 极端高温

在 1960s、1980s 和 2000s  $UF$  和  $UB$  曲线有多个交点, 这些交点均在  $\alpha = 0.05$  信度线之内, 但两曲线都没有超过信度线, 在 2008 年前后的交点相交后  $UB$  曲线突破 0.05 显著水平线, 但未通过滑动 t 检验, 如图 4c 所示, 即可判断为没有发生突变. 总体来看, 1 月最高气温和极端高温的升或降趋势所持续的时间基本均等.

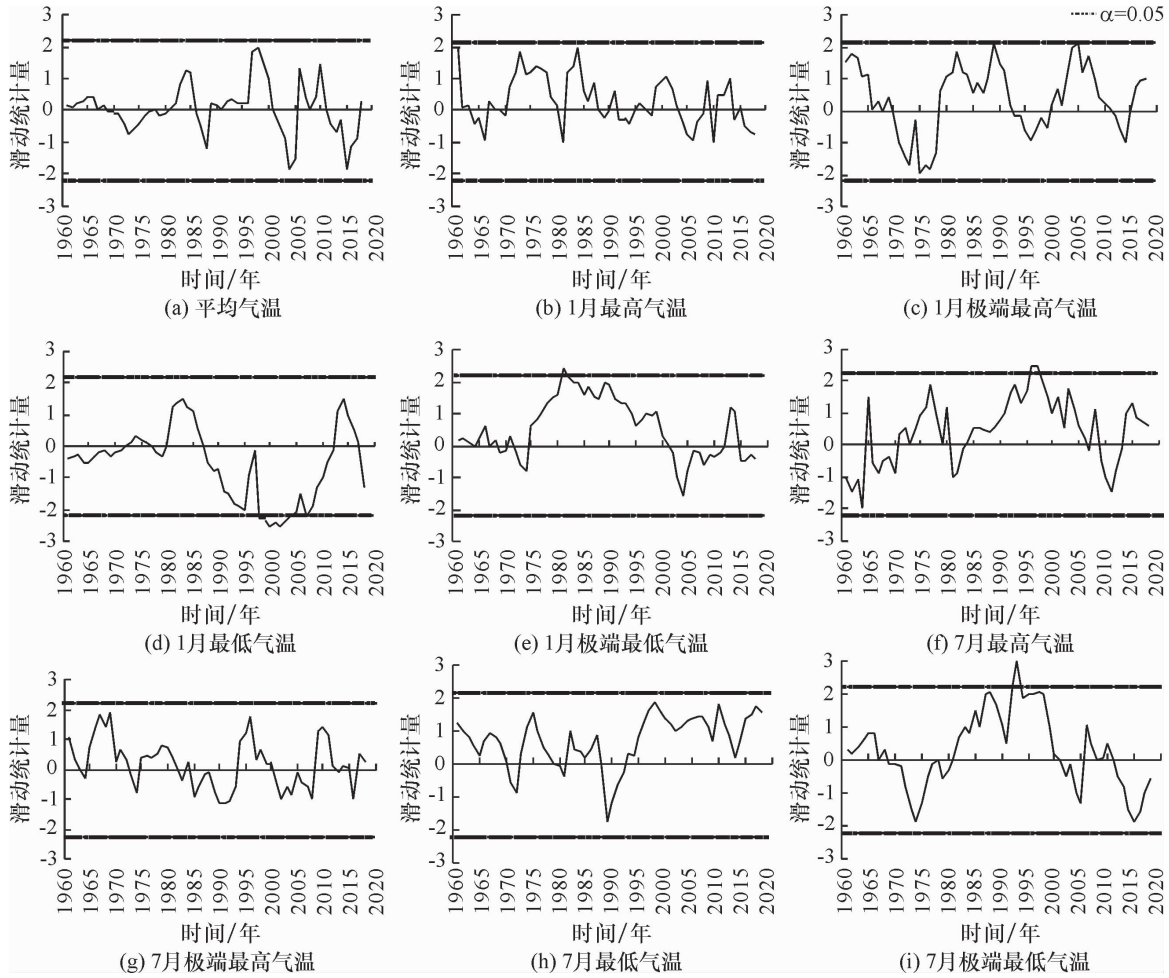


图 4 滑动 t 统计量曲线  
Fig. 4 Moving t test statistic curves

由图 4d 和图 4e 可知, 1 月的最低气温和极端低温总体均呈上升趋势, 极端低温上升趋势较为明显, 在 1991 年、2000s 和 2010s 大部分时间超过 0.05 显著水平线, 说明有显著上升趋势,  $UF$  和  $UB$  在 1980 年前后置信区间内有交叉点, 进而对其作滑动 t 检验, 如图 4e 所示, 当  $n1 = n2 = 10$  时,  $|t_0| > t_\alpha$  通过了  $\alpha = 0.05$  的信度水平检验, 说明湾区内 1 月极端低温在 1981 年发生突变. 最低气温中  $UF$  和  $UB$  曲线有多个交点, 但  $UF$  曲线始终没有突破信度线, 在 2002 年交叉后  $UB$  曲线突破 0.05 显著水平线, 进而对其作滑动 t 检验, 如图 4d 所示, 当  $n1 = n2 = 10$  时,  $|t_0| > t_\alpha$  通过了  $\alpha = 0.05$  的信度水平检验, 说

明 2002 年为可信的突变点.

由图 4f 和图 4g 可知, 7 月的最高气温和极端高温在 58 年间, 气温呈上升趋势的年段要多于呈下降趋势的年段, 极端高温呈缓慢波动上升, 最高气温有下降—上升变化. 最高气温在 2010s 达到 0.05 显著水平线, 说明有显著上升趋势,  $UF$  和  $UB$  在 1997 年置信区间内有交叉点, 进而对其作滑动 t 检验, 如图 4f 所示, 当  $n1 = n2 = 10$  时,  $|t_0| > t_\alpha$  通过了  $\alpha = 0.05$  的信度水平检验, 说明湾区内 7 月最高气温在 1997 年发生突变. 极端高温中  $UF$  和  $UB$  曲线有多个交点, 但两曲线始终没有突破信度线, 说明在 0.05 的显著性水平下, 7 月极端高温没

有发生突变,且无显著升降趋势。

由图4h和图4i可知,7月的最低气温和极端低温变化有很大差异。最低气温总体有下降—上升变化,在58年间大部分时间小于0,即呈下降趋势,在1960s至1980s超过0.05显著水平线,表明在此有显著下降趋势,在2015年前后UF和UB曲线有交点,但两曲线未超过信度线,因而没有发生突变。极端低温中UF曲线大部分时间均大于0,即总体为上升趋势,UF和UB曲线在1993年前后置信区间内有交叉点,进而对其作滑动t检验,如图4n所示,当 $n_1 = n_2 = 10$ 时,  $|t_0| > t_\alpha$  通过了 $\alpha = 0.05$ 的信度水平检验,说明湾区内7月极端低温在1993年发生突变,两年后UF曲线突破0.05显著水平线,表示气温显著上升。

### 3 讨论

#### 3.1 影响气温变化的主要气象因子

对粤港澳大湾区1961—2018年平均气温进行主成分分析,以确定影响气温变化的关键因子。由主成分结果(表3、表4)可看出,前三主成分Z1、Z2、Z3的初始特征值超过1,且前三主成分之和的方差贡献率达到81.216%。在第一主成分Z1中,最重要的气象因子是相

表3 总方差解释

Table 3 Total Variance Explained

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%
Z1	2.145	35.757	35.757	2.145	35.757	35.757
Z2	1.506	25.108	60.865	1.506	25.108	60.865
Z3	1.221	20.351	81.216	1.221	20.351	81.216
Z4	0.872	14.533	95.749	-	-	-
Z5	0.188	3.135	98.884	-	-	-
Z6	0.066	1.116	100.000	-	-	-

表4 成分矩阵

Table 4 Component Matrix

项目	成分		
	1	2	3
蒸发量(EVP)	0.331	-0.301	0.685
降水量(PRE)	-0.322	0.325	0.206
气压(PRS)	0.173	-0.813	-0.219
相对湿度(RHU)	-0.833	0.111	0.194
日照时数(SSD)	0.581	0.363	0.481
风速(WIN)	0.481	0.470	-0.501

对湿度,其载荷绝对值为0.833;在第二主成分Z2中,最重要的气象因子是气压,其载荷绝对值为0.813;在第三主成分Z3中,最重要的气象因子是蒸发量,其载荷绝对值为0.685。前三主成分Z1、Z2、Z3分别所解释的信息量不高,这说明气温的变化是受到多重因素影响的,本文仅从气象因子的角度分析可看出,水分是影响气温变化的关键因子。

由图5可知,在影响粤港澳大湾区平均气温与最热月气温变化的气象因子中,变异系数顺序前三位均为:气压、相对湿度、蒸发量;在影响最冷月气温变化的气象因子中,变异系数顺序前三位为:气压、风速、相对湿度,说明这些因子是粤港澳大湾区气温变化的主要影响因子,且在最冷月时风速取代蒸发量成为主要影响因子,这是由于冬季风主要受到西伯利亚冷高压的影响,高压强劲则风速大;且冬季蒸发量降低,进而对气温的影响减弱。降水量的变异系数最大,显著高于其他因子的变异系数,除降水量与气压外,其他4个气象因子间亦无显著差异。

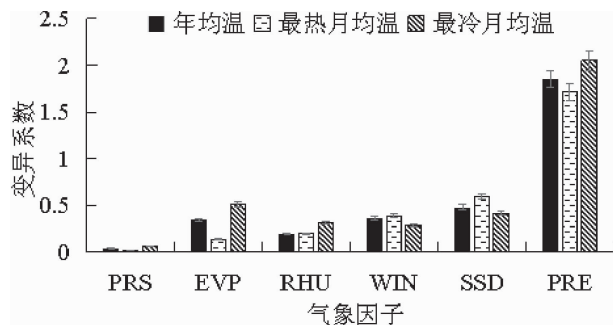


图5 气象因子间变异系数比较

Fig. 5 Comparison of coefficient of variation among meteorological factors

#### 3.2 气温分布及异常的归因探讨

采用克里金插值法作出粤港澳大湾区气温分布图,见图6b和图6c。由图6c可看出,粤港澳大湾区气温依照海岸线由低到高顺序分布,因为大湾区面向海洋,海洋对气温的调节起到主要作用,海陆位置对湾区气候的影响较为明显,加之湾区内山脉走向以东北—西南走向为主,进而形成如图所示的气温分布状况。由图6a和图6b可看出,气温分布与海拔密切相关,两者呈负相关关系。结合上文的研究,此现象的出现与水分密切相关,影响最热月和最冷月气温变化的气象因子均有气压与相对湿度,不同之处在于前者还受到蒸发量的影响,后者还受风速的影响。由于最冷月蒸发量降低,且相对湿度下降,因而水分对气温的调节作用减弱。

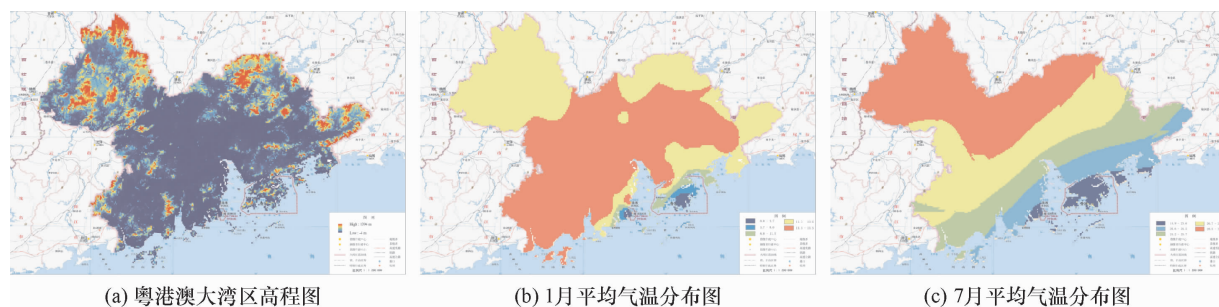


图 6 粤港澳大湾区高程图与气温分布图

Fig. 6 The elevation map and temperature distribution of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

观测资料和数值模拟都清晰表明,亚洲的气候变化受多个环流系统的影响,其中北大西洋涛动 (NAO) 在 20 世纪 70 年代末之后强度增加<sup>[21]</sup>. 70 年代末热带太平洋海表面温度也发生了最强的一次年代际增暖事件,亚洲中纬环流从我国阿勒泰地区到鞑靼海为广阔的槽底区,从而高纬地区的寒冷气流主要呈纬向延伸,难以南下,进而导致暖异常<sup>[22]</sup>. 粤港澳大湾区位于东亚季风区,夏季受季风影响最为明显. 东亚季风和南海季风在上世纪 70 年代和 90 年代发生过 2 次转型,70 年代末东亚季风的夏季风显著减弱,使得华南地区气温迅速升高,此外印度洋海温异常使得暖性开尔文波在副热带太平洋和我国南部上空形成反气旋环流,进而引起夏季气温的异常<sup>[23]</sup>,这与前文研究结果相似. 因气候系统的复杂性,使得湾区内的气温对于气候事件的响应有所延迟. 同时寒潮也在 70 年代末发生频次骤减突变,西伯利亚高压和大气环流状态改变,对湾区内的气温突变产生影响,且湾区位于世界第三极青藏高原东南侧,因高原的地形作用,南、北风系经此后均会发生不同量级的动力作用,从而加强了天气过程及其影响范围,致使副热带西风带的天气能够直下而造成冷冬<sup>[24-25]</sup>,与前文研究结果一致.

研究区内的气温没有显著的升降变化,这是由于在冬季干冷的北风经长途跋涉后明显减弱、变性,因而风速降低、温度升高,使得冬季气温较高. 夏季偏南风受到海洋气团的影响变得温暖潮湿,因湾区受海陆分布的影响较深,构成了一年四季既无严寒又无酷暑,四季宜人的气候. 另外,暖流、寒流、海陆风、湾区境内稠密的河网和大片的植被,对气温的调节也可以起到重要的作用<sup>[26]</sup>.

极端高温的变化趋势与已有研究<sup>[27-28]</sup>的研究结果相似,并出现波状上升变化趋势,其中增温幅度最为显著年份为 2003 年、1989 年和 1980 年,高温变化较为缓和,波动不大,呈下降-上升的趋势,可以说在全球变暖的背景下,在此并没有呈现与全球气温变化一致的现象. 但总体来看,极端低温由 1960s 的  $-1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到

2010s 的  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端高温由 1960s 的  $37.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到 2000s 的  $38.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这与全球变暖的背景一致.

## 4 结 论

近 60 年来粤港澳大湾区的气温一直处于周期较短的波动变化当中,但气温总体呈弱上升趋势,其增温率明显低于全中国、中国西北地区以及全球,平均气温变异系数为 0.041,气温波动不大,演变过程较为平缓. 58 年来湾区内的增温率明显低于全中国、中国西北地区以及全球,且与显著增暖的中国西北地区存在明显差异.

对气候异常年份进行识别,可看出湾区内的气温呈现持续的冷暖交替. 58 年来总体上发生异常的概率为 8%~14%. 年平均温度的异常(含接近异常)中,除 2000s 外其余各年代均出现冷年,暖年多出现于 1960s 以及 2010s. 最冷月中发生异常多于最热月.

应用两种突变检验方法(Mann-Kendall 法、滑动 t 检验法)对粤港澳大湾区 1961-2018 年各温度类型的突变状况进行检验,1 月最低气温在 2002 年发生突变,1 月极端最低气温在 1981 年发生突变,7 月最高气温在 1997 年发生突变,7 月极端最低气温在 1993 年发生突变,这与前人的研究结果一致<sup>[7-9]</sup>. 其余温度类型经检验均未发生突变. 其中呈波动下降-上升变化的有平均气温和 7 月的最低气温;呈显著上升趋势的有 1 月极低气温、7 月最高气温、7 月极低气温;无显著下降的气温类型. 可看出 7 月对于整体气温变暖的贡献更为突出.

对各气象因子进行主成分分析,得出影响气温变化的关键因子为:相对湿度、气压与蒸发量;通过衡量气候因子的变异程度,可知平均气温与最热月气温变化的主要影响因素是气压、相对湿度以及蒸发量;最冷月气温变化的主要影响因素是气压、风速以及相对湿度. 气温出现暖异常是受到热带太平洋海表面异常增温以及东亚季风和南海季风转型的影响,此外,西伯利亚高压和大气环流状态的改变引起寒潮,使气温出现冷异常.

## 参考文献:

- [1] Helen L B, Thomas D W, Keith B G, et al. The case for systems thinking about climate change and mental health[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 21(8): 282-290.
- [2] Thomas S. Report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Computational Geometry*, 2013, 10(1): 10-18.
- [3] Victor O, Phillip O S. Variability of temperature properties over Kenya based on observed and reanalyzed datasets[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 18(4): 145-150.
- [4] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 22-23.
- [5] 曾钦文, 潘心顺, 魏璐, 等. 1965 - 2017 年东江中上游流域气温变化特征分析[J]. *气象与减灾研究*, 2019, 42(1): 24-31.
- [6] Collins M, Shoshiro M, Marcelo B, et al. Challenges and opportunities for improved understanding of regional climate dynamics[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 20(8): 101-108.
- [7] Milivoj B G, Slobodan B M. Assessing average annual air temperature trends using the Mann-Kendall test in Kosovo[J]. *Acta Geographica Slovenica*, 2018, 52(16): 159-167.
- [8] 尹云鹤, 吴绍洪, 陈刚, 等. 1961 - 2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2148-2157.
- [9] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1452-1465.
- [10] Hui Y Z, Li J G. The climate change variations in the northern Greater Khingan Mountains during the past centuries[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(5): 585-602.
- [11] 梅朵, 高原, 马艳, 等. 近 50 a 青海西宁气温变化特征[J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 100-106.
- [12] 符涂斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- [13] Ding J, Lan C. Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963 - 2015[J]. *Nature*, 2018, 8(12): 118-125.
- [14] Julia B, Roberto R. Temporal and spatial variability in surface air temperature and diurnal temperature range in Spain over the period 1950 - 2011[J]. *Climate*, 2019, 7(16): 56-71.
- [15] Qassem Y T. Trends of climate change in Saudi Arabia: Implications on water resources[J]. *Climate*, 2018, 6(8): 24-36.
- [16] Newnham R M. A classification of climate by principal component analysis and its relationship to tree species distribution [J]. *Forest Science*, 1968, 14(3): 254-264.
- [17] Fang J Y, Kyoji Y. Climate and vegetation in China V. Effect of climatic factors on the upper limit of distribution of evergreen broad leaf forest[J]. *Ecological Research*, 1991, 6(12): 113-125.
- [18] Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(7): 12-17.
- [19] 王劲松, 费晓玲, 魏锋. 中国西北近 50 a 来气温变化特征的进一步研究[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 724-732.
- [20] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701-716.
- [21] Chac Y, Ghil M, McWilliams J C. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(15): 2261-2264.
- [22] 李崇银, 李桂龙, 龙振夏. 中国气候年代际变化的大气环流形势对比分析[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(S): 1-8.
- [23] Miki A, Masahide K. Correction to: Simulated interannual variation in summertime atmospheric circulation associated with the East Asian monsoon[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 5(24): 1605-1608.
- [24] Bloomfield H C, Shaffrey L C. A critical assessment of the long-term changes in the wintertime surface Arctic Oscillation and Northern Hemisphere storminess in the ERA20C reanalysis[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 94-104.
- [25] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 559-569.
- [26] 广东省气象局资料室. 广东气候[M]. 广州: 广东科技出版社, 1987.
- [27] 宋艳华, 杨伟民, 顾晓. 1961 - 2008 年广东省极端气温的时空变化特征[J]. *广东气象*, 2012, 34(6): 20-25.
- [28] 黄珍珠, 秦鹏, 胡娅敏. 48 年来广东省不同区域的温度变化特征[J]. *广东气象*, 2008, 30(3): 1-3.

【责任编辑: 孙向荣】