

引用格式:徐飞,张汶海,赵玲玲,王钧,宫清华. 1960—2018年珠江流域极端气温时空变化特征[J]. 山地学报,2022,40(3):343-354.

XU Fei, ZHANG Wenhai, ZHAO Lingling, WANG Jun, GONG Qinghua. Spatio-temporal variability in extreme temperature from 1960 to 2018 in the Pearl River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(3):343-354.

# 1960—2018 年珠江流域极端气温时空变化特征

徐飞<sup>1,2,3</sup>, 张汶海<sup>4</sup>, 赵玲玲<sup>1,2,3\*</sup>, 王钧<sup>1,2,3</sup>, 宫清华<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510070; 2. 广东省遥感与地理信息系统重点实验室, 广州 510070;

3. 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070; 4. 澜湄水资源合作中心, 北京 100038)

**摘 要:** 分析流域尺度极端气温事件时空变化特征及其原因,是区域气象灾害预警与风险防控的科学基础。中国疆域辽阔、气候复杂多变,加之地形与地理位置差异、各地极端气温变化表现不一,极端气候呈现出区域差异性的时空变化特征。珠江流域作为我国经济发展的重要增长区,是气候变化和生态环境的敏感区,极端高温事件频发,造成严重的经济损失。珠江流域极端气温时空变化方面的研究,过去并没有考虑地理因子对极端气温变化特征的影响。本文基于 1960—2018 年珠江流域内 57 个气象站点逐日平均、最高和最低气温资料,采用 12 个极端气温指数分析极端气温时空变化特征,预测其未来变化趋势。研究表明:(1)1960—2018 年珠江流域极端气温暖指数呈增加趋势,而极端气温冷指数减少,并且极端低温变化趋势大于极端高温变化趋势,致使气温日较差下降。极端气温夜晚变化趋势较白天更为剧烈。(2)基于 Hurst 指数分析,所有极端气温指数 Hurst 指数值都大于 0.5,表明未来珠江流域极端气温指数仍将保持目前的趋势方向。(3)珠江流域极端气温指数的变化具有明显的空间差异性,东南部低海拔区增温更为剧烈。(4)极端气温冷指数受涛动指数的影响较大,而极端气温暖指数受夏季风指数影响较大。本研究量化区域极端气温时空变化特征,可为流域极端气温预警决策提供科学指导。

**关键词:** 极端气温;暖指数;冷指数;变化趋势;珠江流域

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

全球极端气候事件发生的频率、强度和持续时间不断增加,给人类社会造成严重影响<sup>[1-4]</sup>。中国幅员辽阔,纬度跨度广,距海远近差距大,加之地势西高东低,导致气候复杂多样,季风气候显著,大陆性气候强,各地极端气温变化表现不一,极端气候呈现出区域差异性的时空变化特征<sup>[5-10]</sup>。例如,1960—2012 年长江流域最高气温最高值、最低值以及最低气温最高值、最低值均显著升高<sup>[10]</sup>;1958—2008 年渭河流域最高气温和最低气温升高,并且最

低气温升高趋势更为剧烈,这种最高气温和最低气温的不对称变化主要是由于太阳活动、大规模大气环流、土壤湿度对最低气温的影响大于对最高气温的影响而导致的<sup>[11]</sup>;1960—2009 年西北地区夏季天数、高温天数、热夜天数显著增加<sup>[12]</sup>;1960—2015 年西安冷昼天数和冷夜天数持续减少,暖昼天数和暖夜天数持续增加,冷持续天数和暖持续天数都减少,但变化趋势不一样,呈现出冷昼天数减少趋势大于暖昼天数上升趋势,冷夜天数减幅大于暖夜天数增幅,冷

**收稿日期** (Received date): 2021-04-21; **改回日期** (Accepted date): 2022-06-01

**基金项目** (Foundation item): 广东省科学院发展专项资金项目 (2020GDASYL-20200301003; 2020GDASYL-20200401001); 国家公园建设项目 (2021GJGY029)。[GDAS' Project of Science and Technology Development (2020GDASYL-20200301003; 2020GDASYL-20200401001); National Park Construction Project (2021GJGY029)]

**作者简介** (Biography): 徐飞 (1989-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 流域水循环模拟。[XU Fei (1989-), male, Ph. D., research assistant, research on water cycle simulation in river basin] E-mail: xufeigz@163.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 赵玲玲 (1980-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向: 流域水循环模拟。[ZHAO Lingling (1980-), female, Ph. D., professor, research on water cycle simulation in river basin] E-mail: linglingzhao@gdas.ac.cn

持续天数减少趋势也大于暖持续天数减少趋势<sup>[13]</sup>。

珠江流域(21°31'~26°49'N, 102°14'~115°53'E)(图1)是中国重要的经济增长区,也是气候变化和生态环境的敏感区。在气候变化和人类活动的影响下,极端气温事件频发,造成严重经济损失。由于珠江流域经纬度跨度大,气候和地形复杂多变,以往研究大多关注珠江流域平均气温<sup>[14-16]</sup>,缺乏地形地理因子对极端气温变化特征差异性的分析,以及未来变化预测。因此,本文选取珠江流域内57个气象站点的1960—2018年逐日气温资料,详尽探究珠江流域近60年极端气温指数的变化特征和空间差异性,探讨地形地理因子对极端气温的影响,并预测未来极端气温变化趋势持续性。以科学认识珠江流域极端气温变化状况,为科学应对极端气温事件提供科学依据。

## 1 研究数据和方法

### 1.1 研究数据

珠江流域57个气象站(图1)的逐日均温、最高和最低气温来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),大多气象站点于1950年代开始监测,考虑到各个站点的起始观测时间不一,本文统一以1960年为起始研究年,研究期为1960年1月1日至2018年12月31日,该时段数据完整,没有缺失值。

收集1960—2018年7个大气环流指数,分析气

候变化对珠江流域极端气温的影响。这7个大气环流指数包括太平洋年代际涛动(PDO)、南方涛动指数(SOI)、北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)涛动指数(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>),以及东亚季风指数(EASM)、南亚夏季季风指数(SASM)和南中国海夏季季风指数(SCSM)<sup>[14]</sup>。

### 1.2 指标定义和研究方法

本文选取世界气象组织推出的一套极端天气指数中的12个极端气温指数供研究(表1),这12个指数可分为两大类:极端气温暖指数(TX<sub>x</sub>、TN<sub>x</sub>、TX90p、TN90p、SU30、WSDI)和极端气温冷指数(TX<sub>n</sub>、TN<sub>n</sub>、TX10p、TN10p、DTR、CSDI)。

使用RClimDex软件计算珠江流域57个气象站的12个极端气温指数,并利用线性倾向率和Mann-Kendall趋势检验法明晰珠江流域极端气温变化特征<sup>[17-19]</sup>,采用相关性分析法分析大气环流指数和地理因子对极端气温的影响<sup>[14, 19]</sup>。此外,采用0.05、0.01、0.001三个显著性水平以表征极端气温指数变化趋势显著性特征。

本文采用基于R/S分析的Hurst指数法预测珠江流域未来极端气温变化。R/S指数法最早是Hurst在1951年提出,并用来分析尼罗河流量时间序列的变化<sup>[20]</sup>。目前该方法已广泛应用于水文气象领域<sup>[4, 12, 21]</sup>。其原理如下:

给定时间序列 $\{x(t)\}$ ,  $t=1, 2, \dots, n$ , 对于任意正整数 $\tau$ , 定义均值序列为:

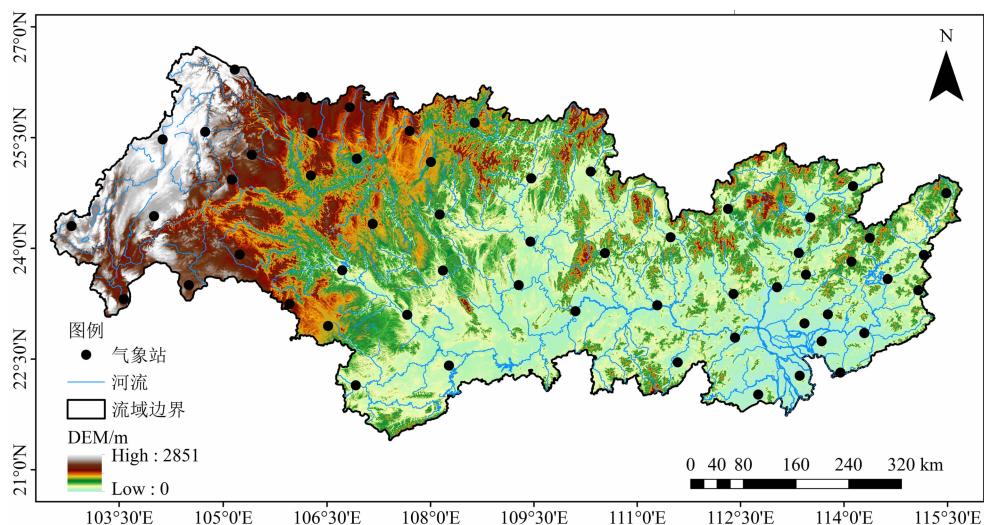


图1 珠江流域

Fig. 1 Plan view of the Pearl River basin

表 1 12 个极端温度指数  
Tab. 1 12 extreme temperature indices

指数缩写	指数名称	指数定义	单位
TXx	日最高气温极大值	每年的日最高气温的最大值	℃
TNx	日最低气温极大值	每年的日最低气温的最大值	℃
TX90p	暖昼日数	日最高气温 > 90% 分位值的日数	d
TN90p	暖夜日数	日最低气温 > 90% 分位值的日数	d
SU30	夏日日数	日最高气温 > 30 ℃ 的日数	d
WSDI	热日持续日数	连续至少 6 天最高气温 > 90% 阈值的日数	d
TXn	日最高气温极小值	每年的日最高气温的最小值	℃
TNn	日最低气温极小值	每年的日最低气温的最小值	℃
TX10p	冷昼日数	日最高气温 < 10% 分位值的日数	d
TN10P	冷夜日数	日最低气温 < 10% 分位值的日数	d
DTR	气温日较差	日最高气温与最低气温差值	℃
CSDI	冷日持续日数	连续至少 6 天最低气温 < 10% 阈值的日数	d

$$\langle x \rangle_t = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

累积离差  $x(t, \tau)$  序列为:

$$x(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^{\tau} (x(\mu) - \langle x \rangle_t) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差  $R(\tau)$  序列为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

标准差  $S(\tau)$  序列为:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - \langle x \rangle_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

通过极差  $R(\tau)$  与标准差  $S(\tau)$  的比值, 定义为  $R/S$ , 使极差“标准化”, 从而消除量纲的影响:

$$R/S = R(\tau)/S(\tau) \quad (5)$$

常用下式估算:

$$R/S \propto \left( \frac{1}{\tau} \right)^H \quad (6)$$

$$H = \frac{\ln\left(\frac{R}{S}\right)}{\ln\left(\frac{\tau}{2}\right)} \quad (7)$$

式中,  $H$  为 Hurst 指数, 在双对数坐标系 ( $\ln \tau$ ,  $\ln R/S$ ) 中用最小二乘法拟合式 (6) 得到  $H$  值。依据该值大小判断极端气温指数时间序列是完全随机的抑或是存在趋势性成分, 并判断趋势性成分方向及其持续性强度大小。将过去极端气温指数变化趋势和 Hurst 指数计算结果结合, 可以预判未来极端气温指数变化趋势方向, 而且也能判断这种方向性的强弱程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 极端气温指数变化趋势

1960—2018 年珠江流域极端气温暖指数 (图 2a ~ 图 2f) 都呈非常显著 ( $p < 0.01$ ) 增加趋势, 只有 WSDI 以 0.26 d/10a 的速率增加 ( $p = 0.1160$ , 图 2f)。TXx 以 0.13 ℃/10a 的速率显著升高 ( $p < 0.01$ , 图 2a)。TNx、TX90p、TN90p 和 SU30 则分别以 0.16 ℃/10a、3.04 d/10a、4.97 d/10a 和 2.07 d/10a 的速率极显著增加 ( $p < 0.001$ , 图 2b ~ 图 2e)。对于珠江流域极端气温冷指数 (图 2g ~ 图 2l), TXn 以 0.17 ℃/10a 趋势升高 ( $p = 0.0827$ , 图 2g), TNn 以 0.41 ℃/10a 速率显著升高 ( $p < 0.001$ , 图 2h)。TX10p 以 -0.57 d/10a 的速率减少 ( $p = 0.3748$ , 图 2i), TN10p 和 DTR 分别以 -3.11 d/10a 和 -0.12 ℃/10a 的速率减少 ( $p < 0.001$ , 图 2j、图 2k), 而 CSDI 则以 -0.46 d/10a 的速率减少 ( $p = 0.1534$ , 图 2l)。说明除 TXn 和 TNn 升高外, 其他极端气温冷指数都呈现减少趋势。

### 2.2 极端气温指数空间分布特征

TXx 变化趋势为 -0.35 ~ 0.45 ℃/10a, 其中 54% 的站点显著升高, 主要集中于流域东南和西部地区 (图 3a)。75% 的站点 TNx 呈现显著升高趋势 (图 3b)。73% 的站点 TX90p 和 82% 的站点 TN90p 显著增加, 尤其是珠江流域东南部增加趋势较大 (图 3c、图 3d)。SU30 变化趋势为 -2.64 ~ 9.37 d/10a, 其中 58% 站点显著增加 (图 3e)。

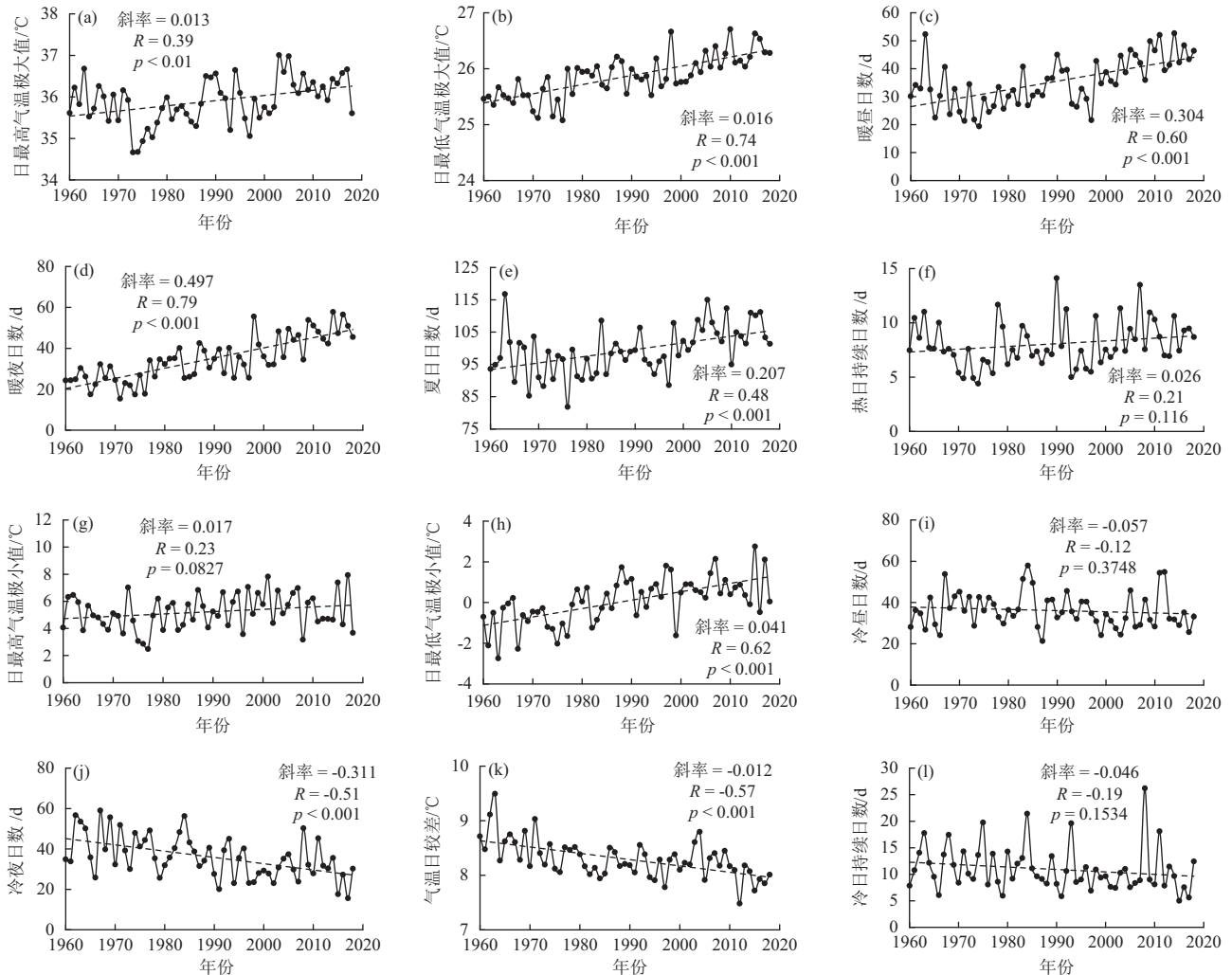


图 2 1960—2018 年珠江流域极端气温变化特征

Fig. 2 Interannual variation of extreme temperature magnitude from 1960 to 2018 in the Pearl River basin

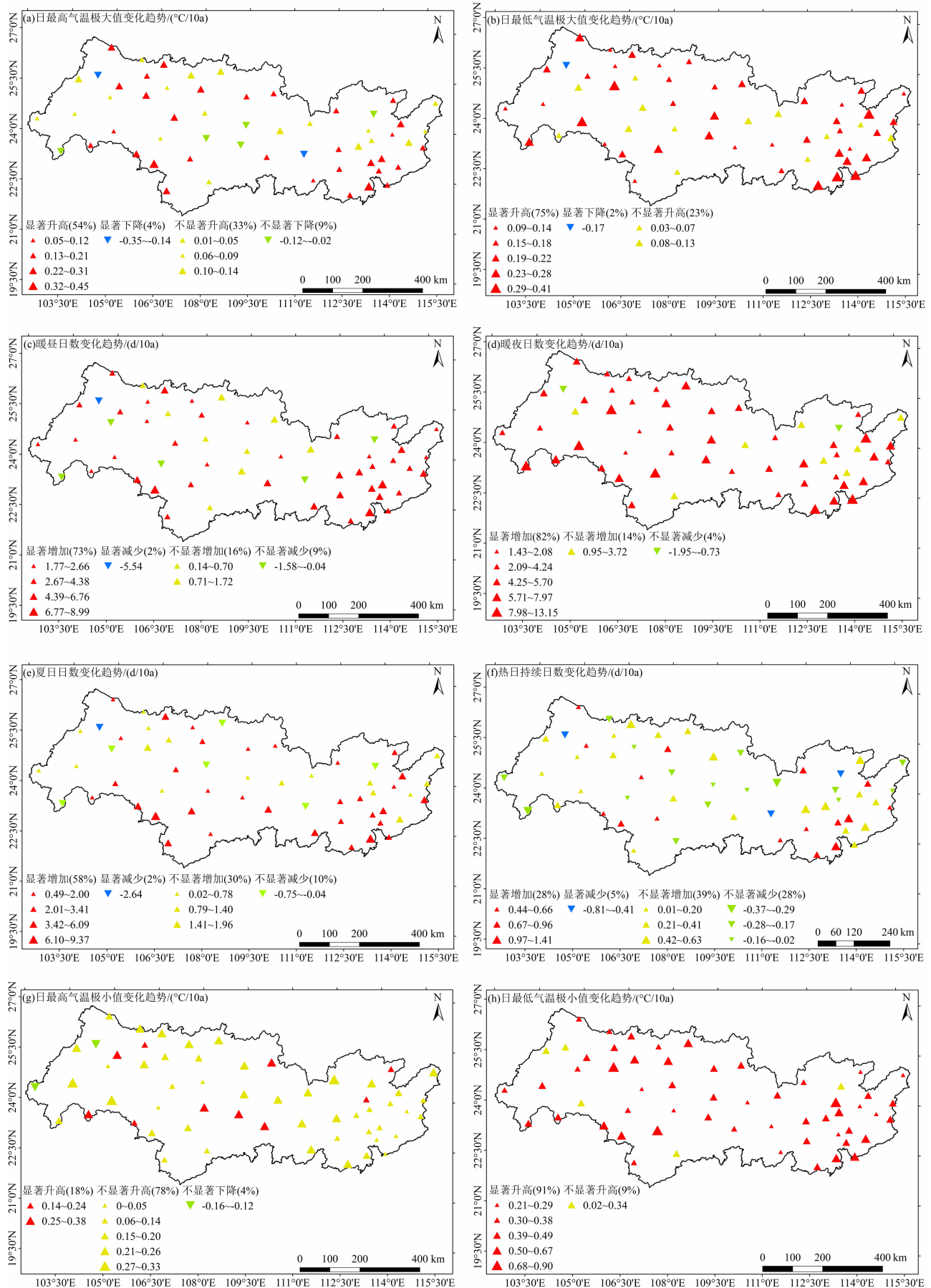
WSDI 变化趋势为  $-0.81 \sim 1.41$  d/10a, 仅有 28% 的站点显著增加, 主要位于流域东南部 and 西部部分区域 (图 3f)。

对于极端气温冷指数, 78% 的站点的 TXn 呈现不显著升高趋势 (图 3g)。91% 的站点的 TNn 显著升高 (图 3h)。TX10p 和 TN10p 变化趋势分别为  $-1.55 \sim 0.44$  d/10a 和  $-9.24 \sim -0.79$  d/10a, 80% 的站点 TX10p 减少不显著, 18% 的站点升高不显著, 主要位于流域东部 (图 3i); 91% 的站点的 TN10p 显著减少, 而只有西部 4 个站点减少不显著 (图 3j)。DTR 变化趋势为  $-0.38 \sim 0.02$  °C/10a, 其中 65% 的站点显著减少 (图 3k)。CSDI 变化趋势为  $-1.85 \sim 0.63$  d/10a, 65% 的站点减少不显著, 12% 的站点呈现增加趋势, 而 23% 的站点显著减少, 主要位于流域东南部 (图 3l)。此外, 从极端气温指数

变化趋势的空间分布图可以发现珠江流域东南区域变化趋势较其他区域大, 说明过去 59 a 该区域经历了更为剧烈的极端气温变化。

### 2.3 极端气温指数与年平均气温的关系

表 2 为极端气温指数相互之间及与年平均气温 (表 2 中 AMT) 的相关系数。除 DTR 外, 极端气温指数与 AMT 相关性较好。极端气温暖指数与 AMT 相关系数为  $0.39 \sim 0.71$ , TN90p 与 AMT 相关系数最高。极端气温冷指数与 AMT 相关性, 除 TXn 和 TNn 外都为负相关性, 其中 TN10p 与 AMT 相关系数最高 ( $R = -0.74$ )。此外, 极端气温指数相互之间相关性较高。极端气温暖指数之间以及和 TXn、TNn 都为正相关, 与其他极端气温冷指数则呈负相关关系, 并且大多指数之间相关关系都未达到 0.05 显著性水平, 而极端气温冷指数相互之间相关性较





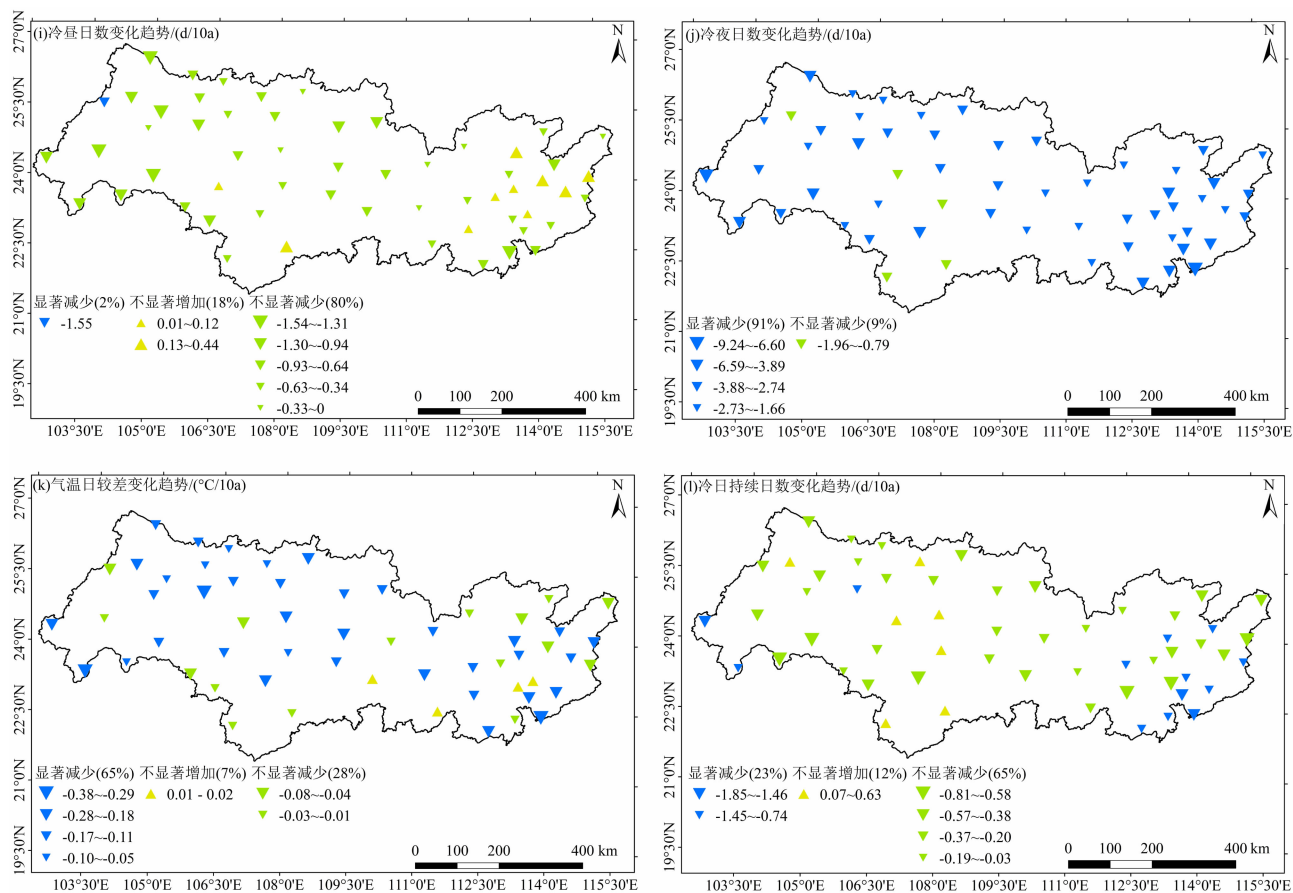


图 3 1960—2018 年珠江流域极端气温空间分布特征

Fig. 3 Spatial distributions of the extreme temperature indices from 1960 to 2018 in the Pearl River basin

表 2 1960—2018 年珠江流域极端气温指数的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of extreme temperature indices from 1960 to 2018 in the Pearl River basin

极端气温指数	AMT	TXx	TNx	TX90p	TN90p	SU30	WSDI	TXn	TNn	TX10p	TN10P	DTR	CSDI
AMT	1												
TXx	0.45 ***	1											
TNx	0.69 ***	0.41 **	1										
TX90p	0.59 ***	0.66 ***	0.66 ***	1									
TN90p	0.71 ***	0.50 ***	0.88 ***	0.79 ***	1								
SU30	0.60 ***	0.56 ***	0.55 ***	0.81 ***	0.68 ***	1							
WSDI	0.39 **	0.52 ***	0.40 **	0.66 ***	0.42 ***	0.43 ***	1						
TXn	0.43 ***	0.24	0.29 *	0.15	0.21	0.08	0.24	1					
TNn	0.47 ***	0.34 **	0.52 ***	0.24	0.42 ***	0.16	0.23	0.42 ***	1				
TX10p	-0.67 ***	-0.11	-0.19	-0.07	-0.17	-0.08	-0.17	-0.43 ***	-0.19	1			
TN10p	-0.74 ***	-0.21	-0.46 ***	-0.19	-0.40 **	-0.10	-0.20	-0.49 ***	-0.59 ***	0.59 ***	1		
DTR	-0.17	0.02	-0.41 **	-0.09	-0.36 **	0.03	0.12	-0.03	-0.43 ***	-0.28 *	0.44 ***	1	
CSDI	-0.45 ***	-0.15	-0.22	-0.10	-0.19	-0.06	-0.16	-0.49 ***	-0.40 **	0.40 **	0.71 ***	0.23	1

注：\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关。

好。说明极端气温指数与 AMT 相关关系较好,可以较好反映年平均气温。

2.4 珠江流域未来极端气温变化预测

表 3 为珠江流域极端气温指数变化的 Hurst 指数,极端气温指数的 Hurst 指数值都大于 0.5,预示未来珠江流域 TXn 和 TNn 仍将升高,而其他极端气温冷指数将持续减少。其中, TXx、TNx、TX90p、TN90p、SU30、TNn 的 Hurst 指数都大于 0.80,说明这些指数的增加趋势的持续性非常强,特别是 TX90p 和 TN90p 的 Hurst 指数甚至大于 0.90,说明

TX90p 和 TN90p 增加趋势的持续性极强。而 TN10p 和 DTR 的 Hurst 指数也大于 0.80,说明 TN10p 和 DTR 减少趋势的持续性非常强。CSDI 的 Hurst 指数为 0.63,是 12 个极端气温指数中的最小值,说明 CSDI 减少趋势的持续性相对较弱。

3 讨论

1960—2018 年珠江流域极端气温指数年际变化趋势说明极端气温暖指数 (TXx、TNx、TX90p、TN90p、SU30、WSDI) 呈增加趋势,而对于极端气温冷指数,除 TXn 和 TNn 呈升高趋势外,其他指数都减少。此外,极端低温变化趋势大于极端高温变化趋势 (TNx > TXx, TNn > TXn),致使 DTR 下降。珠江流域昼夜变化上呈现 TN90p 增加趋势高于 TX90p 增加趋势, TX10p 减少趋势小于 TN10p 减少趋势, WSDI 增加趋势小于 CSDI 减少趋势,说明极端气温夜晚变化趋势较白天更为剧烈。这些研究结果与长江流域<sup>[10]</sup>、渭河流域<sup>[19]</sup>、内蒙古<sup>[6]</sup>、秦岭<sup>[22]</sup>、西安<sup>[13]</sup>一致。

比较本文珠江流域的极端气温指数变化趋势和其他区域的情况(表 4)发现,珠江流域极端气温变化趋势方向和全球、全国以及其他区域表现一致; TXx、TNx、TNn 变化趋势低于其他区域; TX90p、TN90p 和 TN10p 变化趋势低于全球,但高于全国及

表 3 珠江流域极端气温指数的 Hurst 指数  
Tab.3 Hurst Index of extreme temperature indices in the Pearl River basin

极端气温指数	H
TXx	0.82
TNx	0.84
TX90p	0.90
TN90p	0.92
SU30	0.82
WSDI	0.77
TXn	0.71
TNn	0.84
TX10p	0.68
TN10p	0.80
DTR	0.84
CSDI	0.63

表 4 珠江流域极端气温指数变化趋势与其他区域对比  
Tab.4 Comparison of trends in extreme temperature indices

极端气温指数	本文	全球 <sup>[23]</sup>	全国 <sup>[24]</sup>	长江流域 <sup>[8]</sup>	黄河流域 <sup>[25]</sup>	天山地区 <sup>[26]</sup>
	1960—2018 年	1951—2015 年	1961—2011 年	1960—2012 年	1963—2013 年	1960—2015 年
TXx/℃ · 10a <sup>-1</sup>	0.13 *	0.13 *	0.17 *	0.16 *	0.18 *	0.09
TNx/℃ · 10a <sup>-1</sup>	0.16 *	0.19 *	0.28 *	0.19 *	0.25 *	0.34 *
TX90p/d · 10a <sup>-1</sup>	3.04 *	3.95 *	1.26 *	2.24 *	1.56 *	1.73 *
TN90p/d · 10a <sup>-1</sup>	4.97 *	5.34 *	2.34 *	2.86 *	2.22 *	3.67 *
SU/d · 10a <sup>-1</sup>	2.07 *	1.76 *	1.80 *	2.93 *	2.66 *	1.59 *
WSDI/d · 10a <sup>-1</sup>	0.26	—	1.39 *	0.83 *	1.48 *	0.95 *
TXn/℃ · 10a <sup>-1</sup>	0.17	0.28 *	0.27 *	0.32 *	0.27 *	0.29
TNn/℃ · 10a <sup>-1</sup>	0.41 *	0.40 *	0.48 *	0.47 *	0.40 *	0.62 *
TX10p/d · 10a <sup>-1</sup>	-0.57	-2.85 *	-0.94 *	-0.84 *	-0.84 *	-1.23 *
TN10p/d · 10a <sup>-1</sup>	-3.11 *	-4.01 *	-2.30 *	-2.78 *	-1.93 *	-3.56 *
DTR/℃ · 10a <sup>-1</sup>	-0.12 *	—	-0.16 *	-0.07 *	-0.09 *	-0.25 *
CSDI/d · 10a <sup>-1</sup>	-0.46	—	-1.61 *	-0.67 *	-1.12 *	-1.61 *

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关;夏日指数(SU)本文为日最高气温超过 30℃ 的天数,而其他参考文献则是指日最高气温超过 25℃ 的天数。

其他区域;TX10p 变化趋势低于其他区域;SU30 变化趋势高于全球和全国,但高于长江流域和黄河流域;WSDI 变化趋势低于其他区域;DTR 变化趋势低于全国但高于其他区域;CSDI 变化趋势低于全国及其他区域。这主要是珠江流域濒临海洋,升温现象具有海洋性特征,白天升温慢于内陆,晚上升温快于内陆<sup>[19]</sup>。

为了解海拔和地理位置对珠江流域极端气温的影响,依据 57 个气象站点海拔和 12 个极端气温指数近 59 a 的变化趋势,计算了极端气温指数倾向率和海拔、纬度、经度的相关系数(表 5)。珠江流域极端气温指数变化趋势和地理位置的关系表明 TXx、TNx、TX90p、TN90p、SU30、WSDI、TNn、TX10p 和 DTR 都呈现指数变化趋势和海拔、纬度呈反比,和经度呈正比,说明越靠近东南珠三角海拔较低区域,昼夜都呈现增暖趋势,气温日较差缩小。TXn、CSDI 和海拔、纬度呈正比,和经度呈反比,说明海拔越高、越靠近流域西北部,TXn 升高趋势越大,CSDI 减少趋势越大。TN10p 和海拔呈反比,和经纬度呈正比,

说明海拔越低、越靠近东北部,夜晚呈现增暖趋势。珠江流域极端气温指数变化趋势和海拔、经纬度的相关关系说明流域东南部低海拔区增温更剧烈,结合珠江流域极端气温指数变化趋势的空间分布图,可以发现珠三角地区升温趋势相对其他区域更为剧烈,这主要是由于东南部为珠三角地区,城镇密布、人口稠密、社会经济高度发达,城市化热岛效应显著,特别是对最低气温的影响更为显著,从而导致气温日较差缩小<sup>[14, 27]</sup>。

为分析气候变化对珠江流域极端气温指数变化的影响,收集了 1960—2018 年太平洋年代际涛动(PDO)、南方涛动指数(SOI)、北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、东亚季风指数(EASM)、南亚夏季季风指数(SASM)和南中国海夏季季风指数(SCSM)7 个大气环流指数,计算了流域近 59 年极端气温指数和大气环流指数的相关系数(表 6)。极端气温冷指数与 PDO、SOI、AO、NAO 的相关系数普遍高于极端气温暖指数与这 4 个大气环流指数的相关系数,说明极端气温冷指数受 PDO、SOI、AO、NAO

表 5 极端气温指数变化趋势和高程、经纬度的相关系数

Tab.5 Correlation coefficients between change trends of extreme temperature indices with elevation, longitude and latitude

地形地理因子	TXx	TNx	TX90p	TN90p	SU30	WSDI	TXn	TNn	TX10p	TN10p	DTR	CSDI
海拔	-0.11	-0.20	-0.28 *	-0.06	-0.31 *	-0.15	0.03	-0.12	-0.58 ***	-0.09	-0.07	0.03
纬度	-0.09	-0.21	-0.40 * *	-0.25	-0.50 ***	-0.24	0.18	-0.03	-0.20	0.15	-0.08	0.33 *
经度	0.08	0.22	0.35 * *	0.02	0.23	0.21	-0.09	0.01	0.57 * *	0.03	0.10	-0.23

注: \*、\* \*、\*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关。

表 6 1960—2018 年珠江流域极端气温与大气环流的相关系数

Tab.6 Correlation between extreme temperature indices and atmospheric circulation indices in the Pearl River basin during 1960 to 2018

极端气温指数		PDO	SOI	AO	NAO	EASM	SASM	SCSSM
极端气温 暖指数	TXx	0.02	-0.14	0.14	0.02	-0.22	-0.05	-0.17
	TNx	0.41 * *	-0.21	0.08	-0.04	-0.33 * *	-0.43 ***	-0.43 ***
	TX90p	0.04	0.00	0.21	0.10	-0.08	-0.23	-0.17
	TN90p	0.30 *	-0.10	0.09	-0.02	-0.35 * *	-0.35 * *	-0.39 * *
	SU30	0.11	-0.15	0.10	0.03	-0.10	-0.22	-0.12
	WSDI	0.05	-0.12	0.10	0.06	-0.03	-0.08	-0.08
极端气温 冷指数	TXn	0.13	-0.16	0.08	-0.02	-0.01	0.04	-0.16
	TNn	0.34 * *	-0.14	0.17	0.05	-0.34 * *	-0.31 *	-0.41 * *
	TX10p	-0.12	0.16	0.12	0.11	0.07	0.03	0.15
	TN10p	-0.22	0.23	-0.11	-0.05	0.10	0.11	0.24
	DTR	-0.26	0.06	-0.30 *	-0.17	0.06	0.18	0.15
	CSDI	-0.25	0.33 *	0.08	-0.07	-0.03	0.09	0.07

注: \*、\* \*、\*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关。



涛动指数的影响更大。极端气温暖指数与 EASM、SASM、SCSSM 夏季风指数的相关性较强,说明极端气温暖指数升高受 EASM、SASM、SCSSM 夏季风指数影响较大。有研究表明夏季副热带高压增强,导致极端气温升高,冬季西伯利亚冷风减弱,致使极端气温冷指数升高<sup>[28]</sup>。

极端气温指数的 Hurst 值都大于 0.5,预示未来珠江流域极端气温指数变化趋势的方向与过去是一致的,即极端气温暖指数(TX<sub>x</sub>、TN<sub>x</sub>、TX90p、TN90p、SU30、WSDI)、日最高气温极小值(TX<sub>n</sub>)和日最低气温极小值(TN<sub>n</sub>)在未来将持续升高,极端气温冷指数(TX10p、TN10p、DTR、CSDI)在未来将持续减少。这些采用 Hurst 指数结合过去极端气温指数变化趋势预测未来极端气温指数变化趋势的方法所预测的结果与采用气候情景研究结果是一致的。已有研究采用 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候情景,分析了未来时期(2070—2099 年)相比于基准时期(1961—1990 年)珠江流域极端气温指数的变化情况,认为在两种气候情景下,未来珠江流域极端气温暖指数(TX<sub>x</sub>、TX90p、TN90p、SU、WSDI)以及日最低气温极小值(TN<sub>n</sub>)都将升高,而极端气温冷指数(TX10p、TN10p、CSDI)都将减少<sup>[29]</sup>。此外,IPCC 第六次评估报告结果也显示未来全球大部分地区将经历更频繁的暖昼(TX90p)和暖夜(TN<sub>x</sub>)、更少的冷昼(TX10p)和冷夜(TN10p),热浪(SU)频率增加和时段增长<sup>[30]</sup>。因此,未来应采取有效措施以应对极端气温变化所带来的不利影响,如调整作物种植结构和种植分布,控制温室气体排放,积极有效实施“双碳”计划等。

## 4 结论

本文采用 12 个极端气温指数分析 1960—2018 年珠江流域极端气温时空变化特征,主要结论如下:

(1) 1960—2018 年珠江流域极端气温暖指数升高、冷指数减少,并且极端低温倾向率大于极端高温,致使气温日较差下降。珠江流域极端气温夜晚变化趋势较白天更为剧烈。

(2) 极端气温指数与年平均气温相关性较高,可以较好反映年平均气温。

(3) 未来极端气温事件变化趋势与过去一致,

即极端气温暖指数、日最高气温和日最低气温的极小值在未来都将持续升高,极端气温冷指数在未来将持续减少。

(4) 珠江流域极端气温指数的变化趋势具有明显的空间差异性,珠三角地区增温更为剧烈。

(5) 极端气温冷指数受 PDO、SOI、AO、NAO 涛动指数的影响更大,而极端气温暖指数受 EASM、SASM、SCSSM 夏季风指数影响较大。

## 参考文献 (References)

- [1] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts [J]. *Science*, 2000, **289**: 2068–2074. DOI: 10.1126/science.289.5487.2068
- [2] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**: 1–12. DOI: 10.1038/s41467-018-03732-9
- [3] 林思婷, 陈兴伟, 黄婕. 福建省前后汛期最大一日降水量的时空变化 [J]. *山地学报*, 2020, **38** (3): 384–393. [LIN Siting, CHEN Xingwei, HUANG Jie. Temporal and spatial variations of maximum daily precipitation in the first and the second rainy seasons in Fujian province, China [J]. *Mountain Research*, 2020, **38** (3): 384–393] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000518
- [4] 甘露, 刘睿, 冀琴, 等. 四川省极端降水事件时空演变特征 [J]. *山地学报*, 2021, **39** (1): 10–24. [GAN Lu, LIU Rui, JI Qin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics analysis of extreme precipitation in Sichuan province, China [J]. *Mountain Research*, 2021, **39** (1): 10–24] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000572
- [5] 黄强, 陈子燊. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究 [J]. *地球科学进展*, 2014, **29** (8): 956–967. [HUANG Qiang, CHEN Zishen. Regional study on the trends of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29** (8): 956–967] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.08.0956
- [6] GUAN Yinghui, ZHANG Xunchang, ZHENG Fenli, et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960–2012 in the Yangtze River Basin, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, **124**: 79–94. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.008
- [7] LIU Saiyan, HUANG Shengzhi, XIE Yangyang, et al. Spatial-temporal changes of maximum and minimum temperatures in the Wei River Basin, China: Changing patterns, causes and implications [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **204**: 1–11. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.01.006
- [8] TONG Siqin, LI Xiangqian, ZHANG Jiquan, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events

- in Inner Mongolia (China) during 1960—2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 75 – 89. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.262
- [9] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(10): 1720 – 1733. [WANG Baolong, ZHANG Mingjun, WEI Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over northwest China in recent 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(10): 1720 – 1733] DOI: 10.11849/zrzyxb.2012.10.010
- [10] 李富明, 殷淑燕, 殷田园. 1960—2017 年秦巴山地及邻近区域极端气温时空变化特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2020, **59**(6): 80 – 92. [LI Fuming, YIN Shuyan, YIN Tianyuan. The spatial-temporal variations of extreme temperatures in the Qinling-Daba mountains and adjacent areas during 1960 – 2017 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2020, **59**(6): 80 – 92] DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2019.11.14.2019D048
- [11] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. *地理学报*, 2013, **68**(5): 611 – 625. [WANG Qiong, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962—2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(5): 611 – 625]
- [12] LI Zongxing, HE Yuanqing, WANG Puyu, et al. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961—2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, **80** – **81**: 255 – 272. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.06.008
- [13] 高文兰, 李双双, 段克勤, 等. 基于均一化资料的西安极端气温变化特征研究[J]. *地理科学*, 2018, **38**(3): 464 – 473. [GAO Wenlan, LI Shuangshuang, DUAN Keqin, et al. Changes of extreme temperature events in Xi'an city based on homogenized data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(3): 464 – 473] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.017
- [14] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 珠江流域 1960—2012 年极端气温的时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(8): 1356 – 1366. [LIU Qing'e, WU Xiaoping, CHEN Xiaohong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme temperature in the Pearl River Basin during 1960 – 2012 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(8): 1356 – 1366] DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.010
- [15] 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 – 294. [WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, HUANG Guoru. Spatio-temporal change characteristics of mean temperature in the Pearl River Basin during 1961—2000 [J]. *Tropical Geography*, 2007, **27**(4): 289 – 294] DOI: 10.3969/j.issn.1001-5221.2007.04.001
- [16] 谢毅文, 李娟, 陈伟荣, 等. 1959—2013 年珠江流域平均气温时空变化特征[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2016, **55**(3): 30 – 38. [XIE Yiwen, LI Juan, CHEN Weirong, et al. Spatio-temporal variation of average temperature over the Pearl River basin during 1959—2013 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, **55**(3): 30 – 38] DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2016.03.005
- [17] 徐飞, 贾仰文, 牛存稳, 等. 横断山区气温和降水年季月变化特征[J]. *山地学报*, 2018, **36**(2): 171 – 183. [XU Fei, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Variation character of annual, seasonal and monthly temperature and precipitation [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(2): 171 – 183] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000313
- [18] YUE Sheng, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **259**(1): 254 – 271. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7
- [19] 姬霖, 段克勤. 1960—2017 年渭河流域极端气温变化及其对区域增暖的响应[J]. *地理科学*, 2020, **40**(3): 466 – 477. [JI Lin, DUAN Keqin. Variations of extreme temperature and its response on regional warming in the Weihe River Basin during 1960—2017 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(3): 466 – 477] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.03.015
- [20] TONG Siqin, ZHANG Jiquan, BAO Yuhai, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982—2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(5): 595 – 610. DOI: 10.1007/s11442-018-1493-x
- [21] 丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅, 等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素[J]. *地球科学进展*, 2018, **33**(3): 281 – 292. [DING Zhiyong, LU Ruijie, LIU Chang, et al. Temporal change characteristics of climatic and its relationships with atmospheric circulation patterns in Qinghai Lake Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, **33**(3): 281 – 292] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.03.0281
- [22] JIANG Chong, MU Xingmin, WANG Fei, et al. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960—2012 [J]. *Quaternary International*, 2016, **392**: 155 – 167. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.04.018
- [23] ZHANG Panfeng, REN Guoyu, XU Yan, et al. Observed changes in extreme temperature over the global land based on a newly developed station daily dataset [J]. *Journal of Climate*, 2019, **32**(24): 8489 – 8509. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0733.1
- [24] WU Xushu, WANG Zhaoli, ZHOU Xiaowen, et al. Trends in temperature extremes over nine integrated agricultural regions in China, 1961—2011 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, **129**(3-4): 1279 – 1294. DOI: 10.1007/s00704-016-1848-0
- [25] 赵安周, 刘宪峰, 朱秀芳, 等. 1965—2013 年黄土高原地区极端

- 气温趋势变化及空间差异[J]. 地理研究, 2016, **35**(4): 639 – 652. [ZHAO Anzhou, LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013 [J]. Geographical Research, 2016, **35**(4): 639 – 652] DOI: 10.11821/dlyj201604004
- [26] 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960—2015 年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征[J]. 地理科学, 2018, **38**(8): 1379 – 1390. [DING Zhiyong, DONG Yiyang, LU Ruijie, et al. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains area, northwest China, during 1960—2015 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, **38**(8): 1379 – 1390] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.021
- [27] 吴子璇, 张强, 宋长青, 等. 珠三角城市化对气温时空差异性影响[J]. 地理学报, 2019, **74**(11): 2342 – 2357. [WU Zixuan, ZHANG Qiang, SONG Changqing, et al. Impacts of urbanization on spatio-temporal variations of temperature over the Pearl River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(11): 2342 – 2357] DOI: 10.11821/dlxb201911011
- [28] TIAN Jiyang, LIU Jia, WANG Jianhua, et al. Trend analysis of temperature and precipitation extremes in major grain producing area of China [J]. International Journal of Climatology, 2016, **37**(2): 672 – 687. DOI: 10.1002/joc.4732
- [29] XU Kai, WU Chuanhao, HU B X. Projected changes of temperature extremes over nine major basins in China based on the CMIP5 multimodel ensembles [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, **33**(1): 321 – 339. DOI: 10.1007/s00477-018-1569-2
- [30] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, **15**(5): 445 – 456. [ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019, **15**(5): 445 – 456] DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.193

## Spatio-Temporal Variability in Extreme Temperature from 1960 to 2018 in the Pearl River Basin, China

XU Fei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wenhai<sup>4</sup>, ZHAO Lingling<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Jun<sup>1,2,3</sup>, GONG Qinghua<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangzhou 510070, China;

3. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou 510070, China;

4. Lancang-Mekong River Resources Cooperation Center, Beijing 100038, China)

**Abstract:** A clear understanding of the spatio-temporal variability in extreme temperature events at watershed scale and their mechanism can build a scientific foundation for regional meteorological disaster warning and risk prevention and control. China has a vast territory and a complex and variable climate. The regional differences of the Pearl River basin in topographies, geographical locations, along with the large discrepancy in the formation of extreme temperature occurrences, all of them created a pattern of extreme climate characterized by district spatio-temporal. Being an area with high economic growth rate in China, the Pearl River basin is sensitive to climate change and ecological environment. The basin frequently experiences extreme heat events, resulting in significant economic losses. The impacts of geographic factors on the characteristics of extreme temperature changes were not taken into account on the spatiotemporal variability of extreme temperatures in the Pearl River basin. In this study, based on the daily mean, maximum, and minimum temperature data for 1960 to 2018 from 57 meteorological stations within the Pearl River basin, 12 extreme temperature indices were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of extreme temperatures and forecast their future trends. The study found the following results: (1) From 1960 to 2018, the extreme temperature warm indices in the Pearl River basin displayed an increasing trend, while the extreme temperature cold indices showed a decreasing trend. In addition, the extreme

low temperature variation trend was larger than the extreme high temperature variation trend, resulting in a decrease in daily temperature difference. The extreme temperature change trend was more dramatic at night than one in the daytime. (2) The Hurst exponent values of all extreme temperature indices were greater than 0.5, indicating that the extreme climate indices in the Pearl River basin will maintain their current trend directions in the future. (3) The changes of extreme temperature indices in the Pearl River basin showed obvious spatial variability, with more intense temperature increases in the south-eastern low elevation area. (4) Extreme temperature cold indices were influenced by the oscillation index, whereas the extreme temperature warm indices were influenced by the summer wind index. This study can provide scientific information for early warning and decision-making of extreme temperatures in the basin.

**Key words:** extreme temperature; warm indices; cold indices; variation tendency; the Pearl River basin