

# 1993—2022年珠江流域气温与降水 时空变化及其极值预测

刘友存<sup>1</sup>, 徐博锐<sup>1</sup>, 陈旭青<sup>1</sup>, 林斯宜<sup>1</sup>, 姚婉清<sup>2</sup>, 刘涛<sup>1</sup>

(1. 嘉应学院地理科学与旅游学院, 广东梅州 514015; 2. 嘉应学院化学与环境学院, 广东梅州 514015)

**摘要:** [目的] 探讨珠江流域1993—2022年气温与降水量时空变化特征, 同时对其未来极端气候变化进行估算预测, 为该流域气候变化预测和防灾减灾工作提供科学依据。[方法] 选取珠江流域1993—2022年51个气象站点的气温和降水量数据, 运用Mann-Kendall法和普通克里金插值等统计方法, 分析了气温与降水量的变化, 并基于SSP1-2.6(可持续路径下到2100年辐射强迫稳定在 $2.6 \text{ W/m}^2$ )情景模式对2023—2050年的极端气候事件进行了预测。[结果] ①从时间上看, 气温呈现上升趋势, 降水量除全年和夏季外, 亦呈现上升趋势; ②从空间上看, 气温冬季变化较均匀, 其他3季部分地区变化差异明显。降水量总体呈东、东南多, 西、西北少的分布特征; ③在SSP1-2.6情景下, 2023—2050年日最高气温极大值、日最低气温极小值和最多连续无雨日数呈现不显著上升趋势, 而极端湿天降水量则呈现不显著下降趋势; ④空间上, 2023—2050年日最高气温极大值由中部向周围递减, 极端湿天降水量极高值出现中南部。日最低气温极小值由东南向西北地区递减, 而最多连续无雨日数由中南部向其他地区递减。[结论] 1993—2022年珠江流域已呈“暖湿化”趋势; 在SSP1-2.6路径下2023—2050年极端气候事件呈现复杂化、局部突出化的趋势。

**关键词:** 气温; 降水量; 时空演化; 极端气候; 珠江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0255-12

中图分类号: P467

**文献参数:** 刘友存, 徐博锐, 陈旭青, 等. 1993—2022年珠江流域气温与降水时空变化及其极值预测[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 255-266. Liu Youcun, Xu Borui, Chen Xuqing, et al. Spatiotemporal variations in temperature and precipitation from 1993 to 2022 and prediction of their extreme values in Pearl River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 255-266. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.030; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.030.

## Spatiotemporal variations in temperature and precipitation from 1993 to 2022 and prediction of their extreme values in Pearl River basin

Liu Youcun<sup>1</sup>, Xu Borui<sup>1</sup>, Chen Xuqing<sup>1</sup>, Lin Siyi<sup>1</sup>, Yao Wanqing<sup>2</sup>, Liu Tao<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015 China;

2. School of Chemistry and Environment, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015 China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal variation characteristics of temperature and precipitation in the Pearl River basin from 1993 to 2022 were analyzed, and to the future extreme climate changes were estimated and predicted, in order to provide a scientific basis for the prediction of climate change and disaster prevention and mitigation in the basin. [Methods] This study selected temperature and precipitation data from 51 meteorological stations in the Pearl River basin from 1993 to 2022 and used statistical methods such as Mann-Kendall test and ordinary Kriging interpolation to analyze the changes in temperature and precipitation. Based on the shared socioeconomic pathway 1 [SSP1-2.6 (with a radiative forcing level of  $2.6 \text{ W/m}^2$  by 2100)] scenario, extreme climate events during 2023—2050 were predicted. [Results] ① The temperature showed an upward trend temporally, and precipitation also showed an upward trend except annually and during summer. ② Spatially the

收稿日期: 2025-03-27

修回日期: 2025-06-23

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“稀土矿区典型流域水沙过程与氮磷及重金属多界面迁移机制研究(41861002)”; 国家大学生创新创业项目(202410582014; 202410582007); 广东省大学生创新创业项目(S202410582031); 嘉应学院领军人才启动项目(322E1828)

第一作者: 刘友存(1977—), 男(汉族), 河北省迁安市人, 博士, 教授, 主要从事流域水资源与水环境演化方面的教学研究工作。Email: liuyoucun@126.com。

通信作者: 刘涛(1997—), 女(汉族), 广东省梅州市人, 硕士, 助教, 主要从事资源环境遥感方面的研究。Email: taojlr@outlook.com。

temperatures were relatively uniform in winter but exhibited significant regional differences in the other three seasons. Overall, precipitation was higher in the east and southeast and lower in the west and northwest. ③ Under the SSP1-2.6 scenario, the maximum daily temperature extremes and minimum daily temperature extremes and the maximum number of consecutive rainless days showed a non-significant upward trend, and the precipitation on extremely wet days showed a non-significant downward trend during 2023—2025. ④ Spatially, the maximum daily temperature decreased from the central region to the surrounding areas, and extremely high values of precipitation on extremely wet days were observed in the central-southern region during 2023—2025. The minimum daily temperature extremes decrease from the southeast to the northwest, whereas the maximum number of consecutive rainless days decreased from the central-southern regions to other areas. [Conclusion] From 1993 to 2022 the Pearl River basin has shown a ‘warm and humid’ trend; Under the SSP1-2.6 pathway, extreme climate events will be mere complex hybrid and locally prominent during 2023—2025.

**Keywords: temperature; precipitation; spatiotemporal variations; extreme climate; Pearl River basin**

气候与人类社会活动有着密切联系,气候变化必然会对人类社会活动和社会经济发展等产生极大的影响<sup>[1]</sup>。因此,气候变化已成为研究全球变化的核心问题之一,既是人类社会关注的焦点,也是人类社会面临的重要环境问题<sup>[2-3]</sup>。政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第3次评估报告指出,与工业化前水平相比,全球平均温度上升了约1℃,同时,受人类社会活动的影响,热浪和强降水量等极端事件发生的频率也在上升<sup>[3]</sup>。1880年以来,地球表面温度以0.08℃/10 a的速度增长;而到1981年后,地球表面温度则以0.18℃/10 a速度增长<sup>[4]</sup>。Crowley T<sup>[5]</sup>研究指出,1850年以前的温度变化受太阳辐射和火山活动的影响。工业革命之后,全球气温变化的主要原因是人类社会活动所产生的温室气体;如果按照目前的排放率持续下去,2030—2052年气温可能上升约1.5℃<sup>[6]</sup>。全球变暖对降水量产生直接影响,温度上升导致蒸发增加,地表干燥,从而增加干旱的强度和持续时间<sup>[7]</sup>。全球各地降水量的差异不断增加,干旱地区变得更加干旱,亚热带和湿润地区变得更加潮湿,主要发生在中高纬度地区<sup>[7-8]</sup>。

极端气候事件已引起国内外学者的广泛关注,并成为当前研究的热点问题。研究尺度涉及全球、国家和区域,多以极端气候指数作为典型对象进行分析研究,其中世界气象组织推荐的27个极端气候指数应用最为广泛<sup>[9]</sup>。Gvoždiková B等<sup>[10]</sup>研究发现,1961—2013年中欧大部分地区极端降水量事件发生频率增加,主要发生在1977—1986年和2002年之后。Kalyan A等<sup>[11]</sup>发现印度北部戈马蒂河流域极端气温事件发生概率趋于上升,极端降水事件发生频率却显著下降。中国学者在长江和黄河等流域进行了大量的分析研究。张存杰等<sup>[12]</sup>研究发现近60 a来长江流域大部分地区极端高温事件显著增加,尤其

是21世纪以来更加频繁,低温事件显著减少,极端气候事件的综合危险性持续升高。慎璐璐等<sup>[13]</sup>研究发现黄河流域内极端气候事件的发生频率随年份逐渐增加。除了对过去几十年气候变化的研究之外,针对未来不同情景下极端气候事件预测的分析研究也不少。初兴林等<sup>[14]</sup>基于第6次耦合模式比较计划项目(coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)不同气候模式下,分析研究图们江流域在2024—2100年极端高温和极端降水量事件发生的可能性均在增加。任玉玲<sup>[15]</sup>对黄土高原的分析研究发现在未来时期将发生更多极端高温事件和更少极端低温事件。然而,目前针对热带亚热带典型流域的气候时空变化特征和极值预测研究较为缺乏,且缺少对未来极端气候事件进行多样化的分析研究。

珠江流域是我国最重要的工农业产区 and 经济增长区之一,同时也是气候变化和生态环境的敏感区<sup>[16-17]</sup>。本文以珠江流域作为研究区,结合气象站点实测数据,运用一元线性回归、Mann-Kendall检验和普通克里金插值等方法,分析探讨珠江流域1993—2022年气温与降水量时空变化特征,同时对珠江流域未来极端气候变化进行估算预测。

## 1 研究区概况

珠江是中国境内第三大河流,由西江、北江、东江和珠江三角洲诸河流组成<sup>[18]</sup>。流域介于102°14′—115°53′E和21°31′—26°49′N,总面积约4.76×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。流域主要水系为西江、北江和东江,其中珠江的干流西江发源于云南马雄山东麓<sup>[19]</sup>。流域地处热带和亚热带季风气候区,多年平均气温在14~22℃<sup>[20]</sup>;多年平均降水量在1 200~2 200 mm,且集中在4—9月,约占全年降水总量的80%<sup>[21]</sup>。珠江流域地势北高南低,西高东低,整体由西北向东南递减,山地丘陵约占流域总面积的94.5%。

## 2 数据来源

1993—2022年的气温和降水量数据资料来源于国家青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),数据集分别为1901—2023年全国1 km分辨率逐月气温和降水数据,已通过数据原作者使用496个独立气象观测点的数据进行全面验证。未来时期2023—2050年的气温和降水量数据来源于CMIP6官网(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>),数据集为SSP1-2.6情景下数据产品,是由全球多家气候研究中心利用复杂的气候模型基于1961—2014年数据模拟2015—2100年预测数据。珠江流域过去30 a来平均气温和降水量根据51个气象站点位置在ArcMap提取栅格数据到点经算术平均计算得到,其中四季的划分是指春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—2月)<sup>[22]</sup>。

## 3 研究方法

### 3.1 一元线性回归

用一元线性回归方法描述气温和降水量的变化趋势时,设 $y_i$ 为样本量 $n$ 的气象要素, $t_i$ 为 $y$ 所对应的时间,建立 $y_i, t_i$ 的一元的线性方程<sup>[23]</sup>:

$$y_i = at_i + b \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (1)$$

式中: $a$ 代表回归常数; $b$ 代表回归系数; $t$ 代表时间序列。当 $b > 0$ 时,说明气候要素在时间段内呈线性增加趋势,当 $b < 0$ 时,说明气候要素在时间段内呈线性减少趋势。

### 3.2 Mann-Kendall检验

Mann-Kendall方法具有样本不需要服从正态或线性分布以及不受异常值干扰的特点<sup>[24]</sup>。该方法分为趋势检验法和突变检验法,其中,趋势检验法可以检验时间序列的变化趋势。

设 $X_1, X_2 \cdots X_n$ ,代表时间序列变量, $n$ 代表时间序列的长度,统计量 $S$ 被定义为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (2)$$

式中: $S$ 为正态分布,其平均值是0,其方差 $\text{var}(S)$ 为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

标准化统计量 $Z$ 为

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

当 $Z > 0$ 时,表明时间序列呈上升趋势,当 $Z < 0$ 时,则呈下降趋势。当 $|Z| \geq 1.96$ 时,表示通过了95%

的显著性检验,当 $|Z| \geq 2.58$ 时,通过99%的显著性检验<sup>[25]</sup>。

突变检验法用于检验时间序列是否发生突变。首先,对于时间序列 $X$ ,构建一个秩序列 $S_k$ ,计算公式为

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, 4 \cdots n) \quad (5)$$

式中:当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$ ;当 $x_i \leq x_j$ 时, $r_i = 0$ ( $j = 1, 2, 3 \cdots n$ );秩序列 $S_k$ 是第 $i$ 个时刻数值大于 $j$ 时刻时,数值个数的累加。

在时间序列为随机的假设下,定义统计量 $UF_k$ ,其计算公式为

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (6)$$

式中: $UF_1 = 0$ , $E(S_k)$ 为 $S_k$ 的均值, $\text{var}(S_k)$ 为 $S_k$ 的方差,且 $x_1, x_2 \cdots x_n$ 互相独立,它们具有相同连续分布,可以由下式推算出

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (7)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (8)$$

式中: $UF_k$ 为标准正态分布,它是按时间序列 $x$ 的顺序( $x_1, x_2 \cdots x_n$ )计算出的统计量序列,给定显著性水平 $\alpha$ ,查正态分布表,若 $UF_\alpha > U_\alpha$ ,则表明序列存在明显的趋势变化。再按时间序列 $X$ 的逆序( $x_n, x_{n-1}, x_{n-2} \cdots x_1$ ),重复上述过程,令逆统计量 $UB_k$ :

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k & (k = 1, 2, 3 \cdots n) \\ UB_1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

本研究取一般显著性水平为 $\alpha = 0.05$ ,则有临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ ;这是一个用于拒绝原假设的阈值,以平衡检验的敏感性和可靠性<sup>[26]</sup>。若 $UF_k$ 和 $UB_k$ 的值大于0,表示该序列呈现上升的趋势,小于0表示该序列呈现下降的趋势;若超过临界直线时,则表明有显著的上升或下降趋势;若 $UF_k$ 和 $UB_k$ 在临界线之间出现交点,则该交点所对应的时间是突变开始的时间。

### 3.3 普通克里金插值法

普通克里金插值法它以空间自相关为基础,利用原始数据和半方差函数的结构性,对区域化变量的未知采样点进行无偏估值的插值方法,因其计算误差均值与误差均方根较小而被地学研究中广泛使用<sup>[27]</sup>。常见的空间插值方法还有反距离权重法(IDW)、径向基函数插值法(RBF)等;反距离权重法的插值点越近精度越高,而径向基函数插值法可能会在边界出现扭曲的情况<sup>[28-29]</sup>。本文中插值点距离差异较大,且较多处于边界,故采用普通克里金插值法。

其计算公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda Z(x_i) \quad (10)$$

式中:  $Z(x_0)$  为  $x_0$  点的估计值;  $Z(x_i)$  为  $x_i$  点的真实值;  $n$  为样本点个数;  $\lambda$  为克里金权重系数。在 ArcGIS Pro 中, 选定球面模型作为半变异函数拟合模型来表达数据集的空间自相关和空间差异性。

### 2.3.4 极端气候估算方法

在 SSP1-2.6 情景下, 估算珠江流域未来的气候变化。根据世界气象组织气候委员会推荐则使用极端气候指数, 选取两个极端气温指数和两个极端降水量指数<sup>[30]</sup>。其中, 极端气温指数包括日最高气温极大值和日最低气温极小值; 极端降水量指数包括极端湿天降水量和最多连续无雨日数(表 1)。

表 1 极端气温和降水量指数

Table 1 Extreme temperature and precipitation index

分类	代号	指数名称	定义
极端气温指数	TXx	日最高气温极大值/°C	每年的日最高气温的最大值
	TNn	日最低气温极小值/°C	每年的日最低气温的最小值
极端降水量指数	R99 p	极端湿天降水量/mm	日降水量 > 99% 分位值的总降水量
	CDD	最多连续无雨日数/d	日降水量 < 1 mm 的最大持续日数

## 4 结果与分析

### 4.1 气温变化特征

#### 4.1.1 时间变化特征

图 1 为珠江流域 1993—2022 年全年和四季平均气温变化。

由图 1 可知, 1993—2022 年年平均气温为 20.0 °C, 最高值(2023 年)为 20.8 °C, 最低值(1996 年)为 19.3 °C, 变幅达 1.5 °C。流域内年平均气温整体呈

现上升趋势, 升温速率 0.03 °C/a, 且通过 99% Mann-Kendall 显著性检验, 其变化显著。四季平均气温同样呈现上升趋势, 增温速率分别为春季 0.03 °C/a, 夏季 0.03 °C/a, 秋季 0.03 °C/a 和冬季 0.02 °C/a。其中, 春、夏和秋季增温速率相近, 且通过 99% 显著性检验, 其变化显著; 冬季最小, 且未能通过 95% 显著性检验, 其变化不显著。1993—2022 年珠江流域全年与季节平均气温均经历过冷暖交替, 除冬季外, 总体上与平均值之间的差异不大。

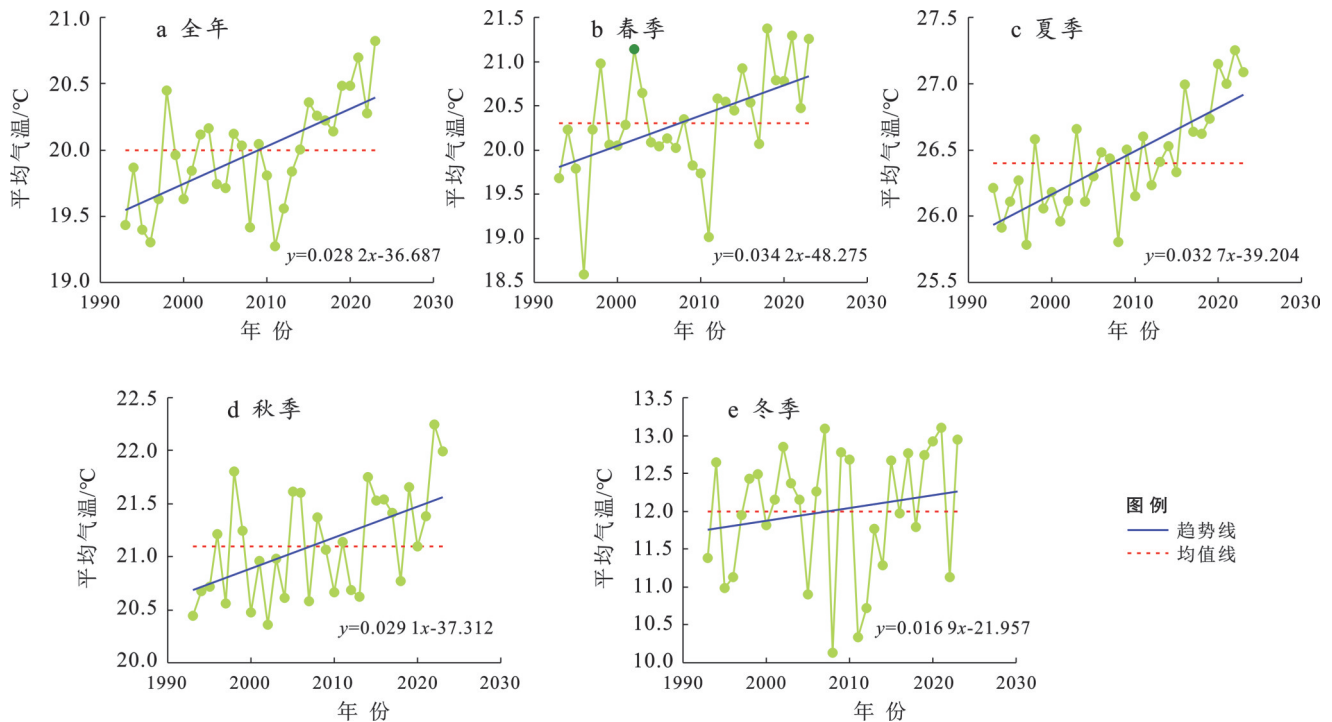


图 1 1993—2022 年珠江流域平均气温变化

Fig.1 Variation of average temperature in Pearl River basin during 1993—2022



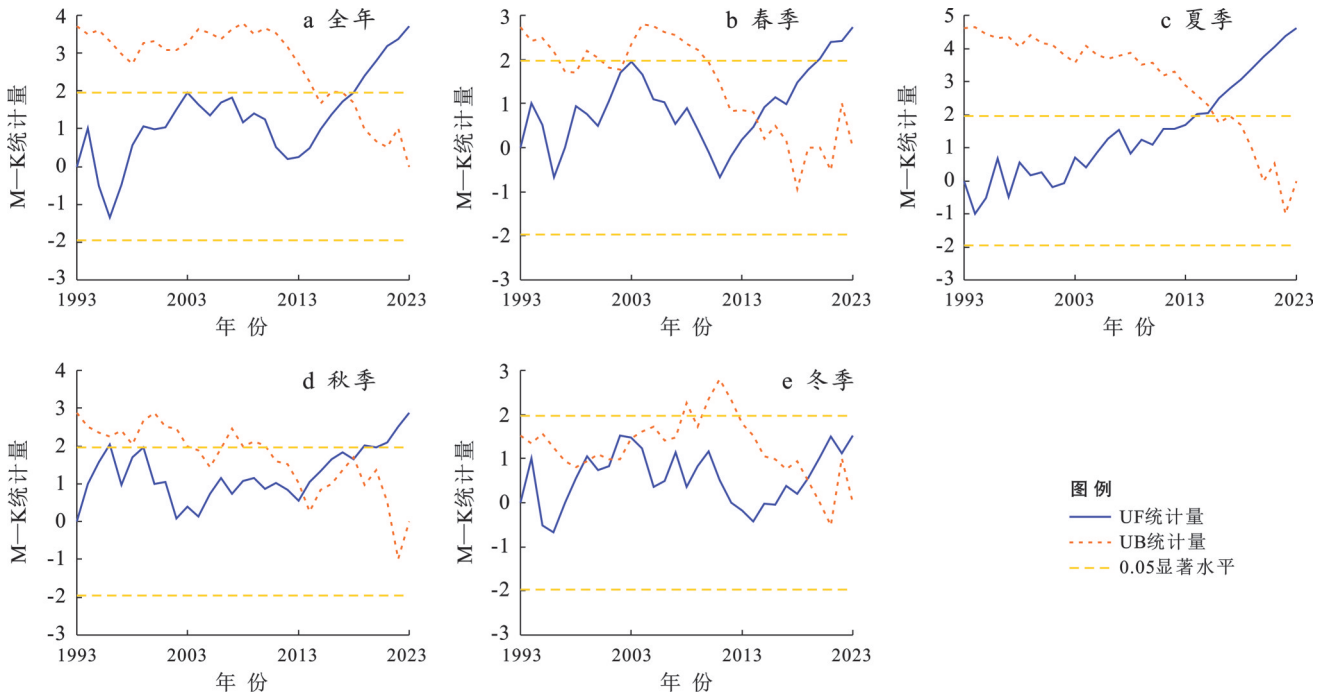


图3 1993—2022年珠江流域平均气温突变检验

Fig.3 Mutation test of average temperature in Pearl River basin during 1993—2022

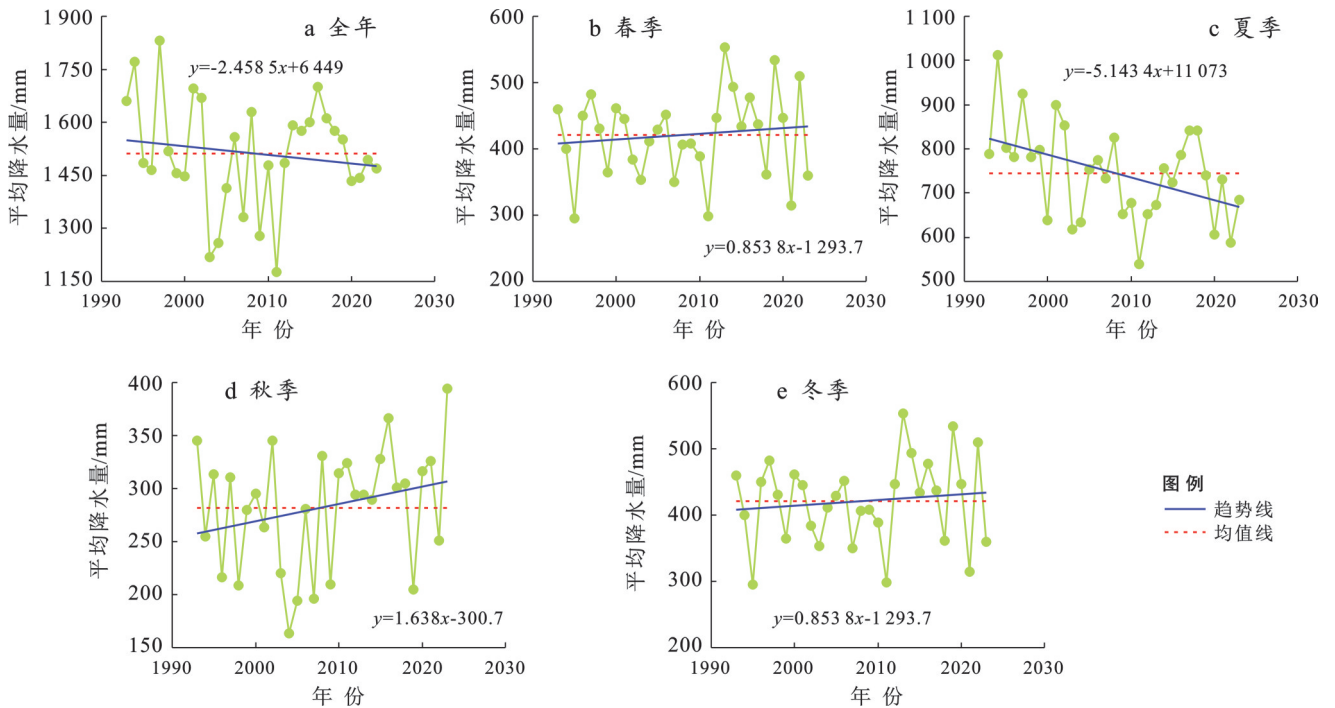


图4 1993—2022年珠江流域平均降水量变化

Fig.4 Variation of average precipitation in Pearl River basin during 1993—2022

4.2.3 突变性检验

图6为珠江流域1993—2022年全年和四季平均降水量突变检验。

由图6可知,全年平均降水量在1994年后呈下降,其余年份呈上升,其中2010—2012年变化显著;降水量突变开始于1994年,另存在5个突变点

(1996,2012,2018,2021和2022年)。春季在1993—1996年、1998—1999年和2001—2013年呈下降,其余年份呈上升,变化不显著;降水量突变开始于1996年,另存在3个突变点(1997,2011和2021年)。夏季在1995年后呈下降,其余年份呈上升,而在2010—2016年其变化显著;降水量突变开始于1999年,另存

在 3 个突变点(2001, 2016 和 2018 年)。秋季在 2014 年后呈上升, 其余年份呈下降, 其变化皆不显著; 降水突变开始于 2014 年, 另存在 2 个突变点(2016 和 2021 年)。冬季在 1995—1996 年和 1998—2021 年呈下降, 其余年份呈上升, 其变化皆不显著; 降水量突

变开始于 1993 年, 另存在 7 个突变点(1995, 1996, 1998, 2015, 2018, 2019 和 2020 年)。综合来看, 只有全年和夏季出现显著的变化, 其他季节的变化皆不显著; 除秋季突变开始于 2008 年外, 全年和其他 3 个季节的突变皆开始于 20 世纪 90 年代。

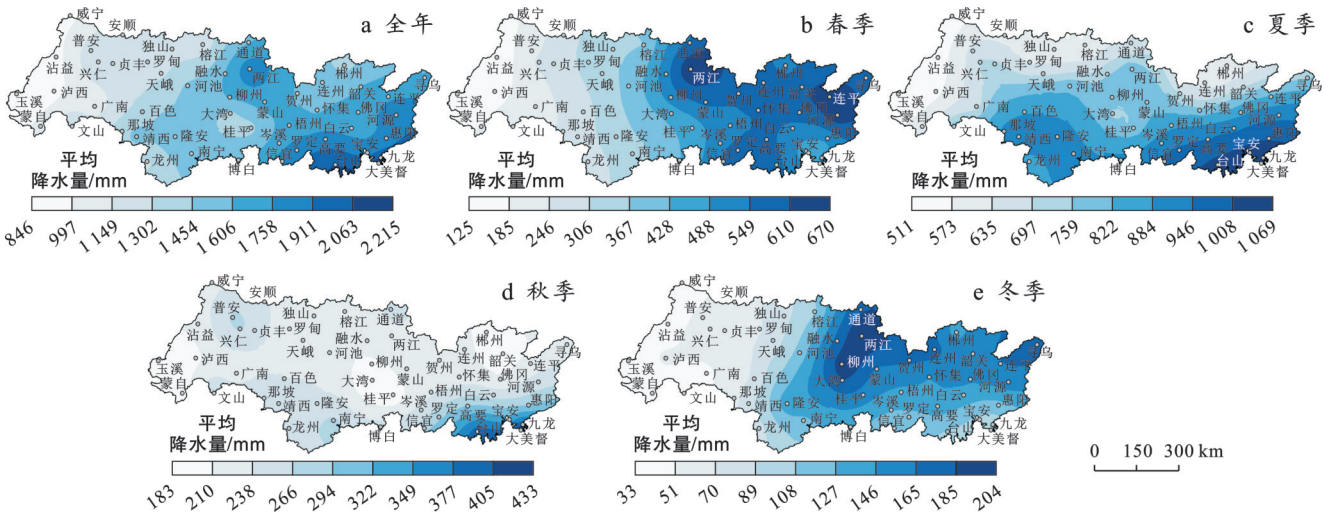


图 5 1993—2022 年珠江流域平均降水量空间变化

Fig.5 Spatial variation of average precipitation in Pearl River basin during 1993—2022

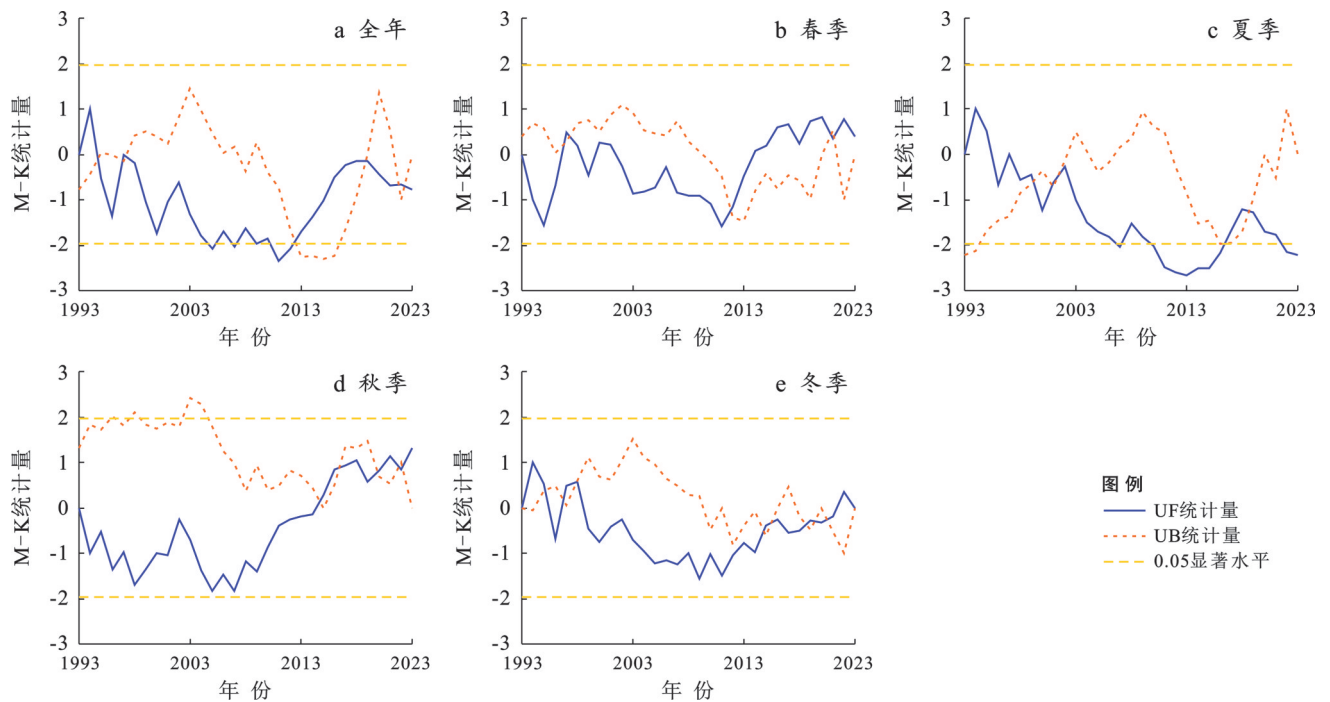


图 6 1993—2022 年珠江流域平均降水量突变检验

Fig.6 Mutation test of average precipitation in Pearl River basin during 1993—2022

### 4.3 极端气候估算

#### 4.3.1 极端气温估算

图 7 为 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端气温变化。由图 7 可知, 日最高气温极大值变化呈上升趋势, 变化率  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ; 与平均值 ( $43.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 之

间的变化幅度波动较大; 且有 14 个年份高于平均值, 说明极端高温事件发生频率在增加; 最高(2029 年)为  $46.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最低(2024 年)为  $40.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。日最低气温极小值变化呈上升趋势, 变化率  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ; 与平均值 ( $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 之间的变化幅度波动较大; 且有 15 个年

份高于平均值,说明极端低温事件发生频率也在增加;最高(2037年)为-2.6℃,最低(2038年)为

-11.3℃。二者共同说明未来气温将会出现高低两极化现象。

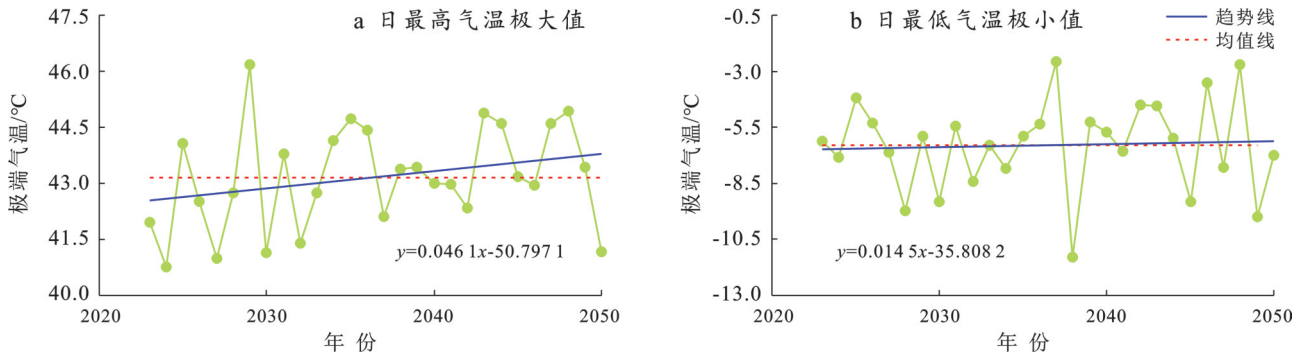


图7 2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端气温变化

Fig.7 Variation of extreme temperature in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

图8为2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端气温空间变化。由图8可知,日最高气温极大值呈中部高东西低;最高(桂平站)为46.1℃,最低(威宁

站)为32.4℃;而西部空间变化差异较大。日最低气温极小值呈西北低东南高;最高(紫金站)为5.2℃,最低(威宁站)为-11.3℃;整体上空间变化差异较小。

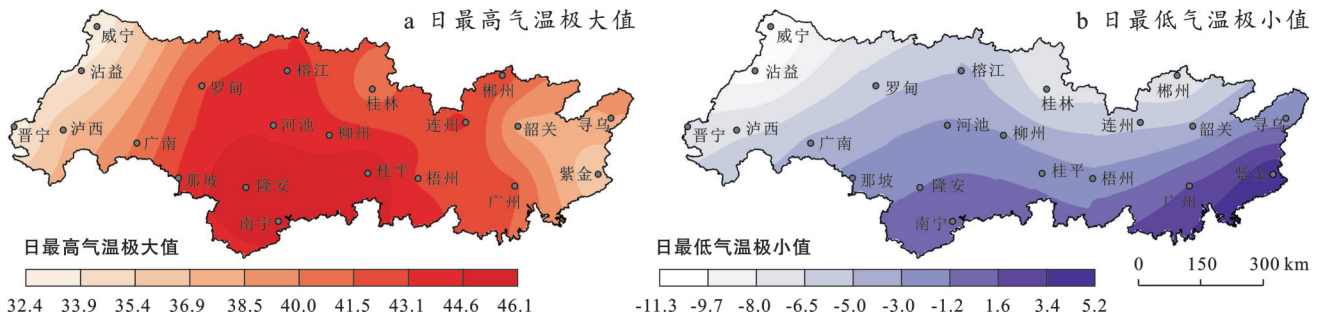


图8 2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端气温空间分布

Fig.8 Spatial variation of extreme temperature in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

图9为2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端气温突变检验。由图9可知,尽管日最高气温极大值变化不显著,但有14个突变点,且突变开始于2023

年。日最高气温极大值变化不显著,但有多达14个突变点,突变开始于2023年。日最低气温极小值也变化不显著,但有多达15个突变点,突变开始于2023年。

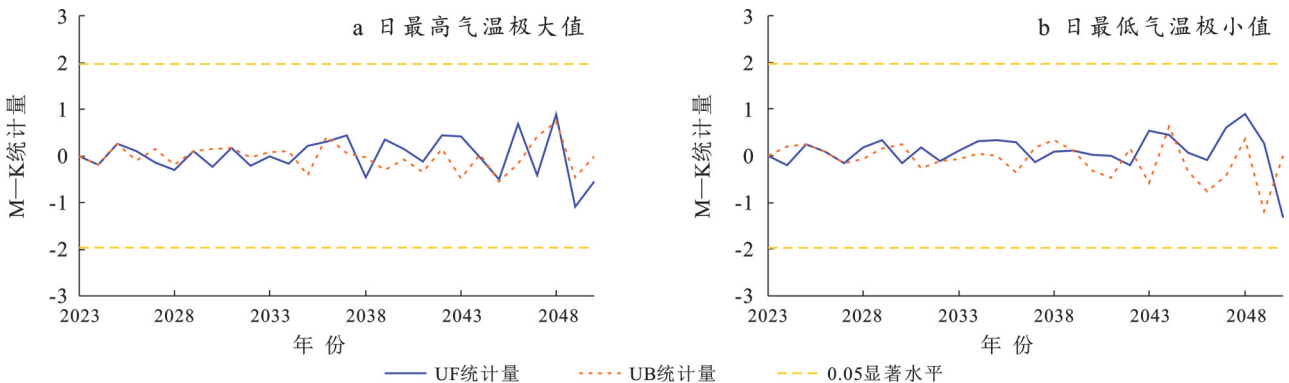


图9 2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端气温突变检验

Fig.9 Mutation test of extreme temperature in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

4.3.2 极端降水量估算

图10为2023—2050年SSP1-2.6情景下珠江流域极端降水量变化。由图10可知,极端湿天降水量呈现下降趋势,变化率为-5.19 mm/a;除个别年份

外,总体上与平均值(739 mm)之间的差异不大;共有17个年份低于平均值,说明极端降水事件频率在降低。最大(2034年)为1 676 mm,最小(2032年)为540 mm。最多连续无雨日数呈现上升趋势,变化率

为 0.69 d/a;与平均值(55 d)之间的变化幅度波动较大;共有 13 个年份高于平均值,最多(2043 年)为

91 d,最少(2027 年)为 31 d。二者共同说明未来雨量会减少,连续干旱时间会变长。

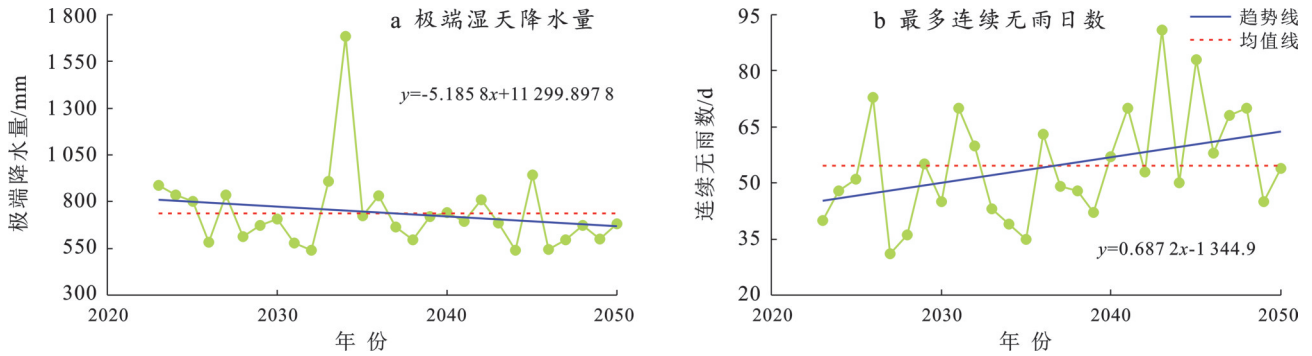


图 10 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端降水量变化

Fig.10 Variation of Extreme precipitation in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

图 11 为 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端降水空间分布。极端湿天降水量呈现局部极高值,其他地区较低,中南部变化差异极大;最高(隆安站)为 1 685 mm,最低(晋宁站)为 247 mm。最多连续无雨日数呈中南高东西低,且东部空间变化差异较大;最多(南宁站)为 88 d,最少(威宁站)为 26 d。

图 12 为 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端降水量突变检验。由图 12 可知,呈现出较为复杂的突变趋势。极端湿天降水量变化不显著,但有多达 11 个突变点,突变开始于 2023 年。最多连续无雨日数变化也不显著,但有多达 15 个突变点,突变开始于 2023 年。

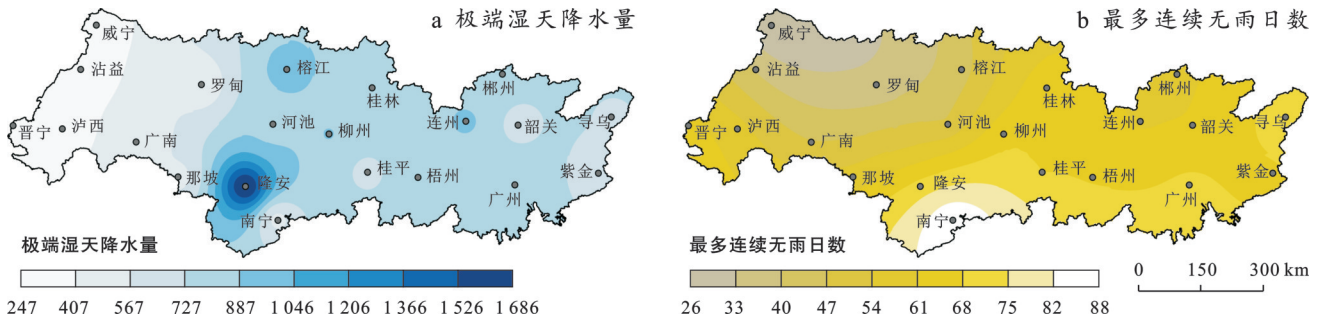


图 11 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端降水量空间分布

Fig.11 Spatial variation of extreme precipitation in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

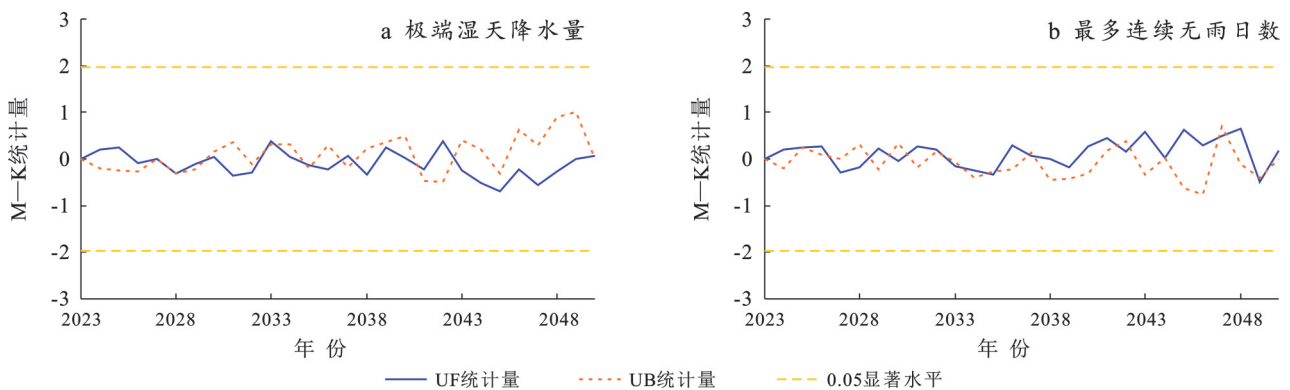


图 12 2023—2050 年 SSP1-2.6 情景下珠江流域极端降水量突变检验

Fig.12 Mutation test of extreme precipitation in Pearl River basin under SSP1-2.6 scenario during 2023—2050

### 5 讨论

通过对珠江流域 51 个气象站点的气温和降水量

数据,运用一元线性回归、Mann-Kendall 检验和普通克里金插值,揭示研究区内长期序列数据的总体变化趋势、判断数据序列变化的显著性和识别突变点

以及对采样气象站点进行无偏估值计算绘制空间差异图,进而分析了1993—2022年珠江流域年和四季平均气温以及平均降水量的时空变化特征。在SSP1-2.6情景下,对2023—2050年珠江流域的极端气候事件进行了估算。

结合地形条件和海陆分布我们不难发现,位于高海拔地区的威宁、沾益、晋宁等站,山地地形使得空气对流较为活跃,热量不易聚积,人为活动较少、植被覆盖较丰富,进而气温常年较低;位于平原地区的中部和西部地区,地势低平,热容量大,升温速率相对较快;而季风在无高大山脉阻挡的情况下容易裹挟海洋水汽由东面和南面进入流域,故降水量远多于西部地区。对比其他学者的相关研究发现,本文分析研究结果与前人研究结果基本一致。如谢志高等<sup>[31]</sup>研究发现珠江流域大部分地区极端降水量年份自20世纪以来呈逐渐增加趋势;舒章康等<sup>[32]</sup>研究发现自1975年开始珠江流域的高温热浪事件发生频率普遍增多。这说明,珠江流域极端气候事件早在20世纪就呈逐渐增多趋势。在研究时段内,通过系统地分析发现气温与降水数据序列中存在多个突变点,数据序列突变现象主要归因于前后时段数据特征差异显著。进一步聚焦研究内容本质,除现实中常规气候变迁因素导致的显著差异外,太阳活动周期性变化亦构成重要影响因子。太阳活动具有约11 a的周期性特征,该周期内将直接导致地球气候系统产生相应响应。特别是在1996—2019年的研究时段内,太阳活动恰处于两个连续的高频、高强度周期阶段,其辐射效应与地球气候系统的相互作用显著增强<sup>[33-34]</sup>,从而在气温与降水数据序列中形成多个突变点,此现象与本文设定的研究时间范围呈现高度吻合。在全球变暖背景下,位于赤道上的哈得来环流减弱,导致热带向亚热带地区输送的水汽减少,因此降水减少<sup>[35]</sup>。与前人研究结果相比较发现,从过去到未来高温中心从东南部逐渐向中南部转移、低温中心则稳居西北部、极端降水中心转移至中南部等独特的空间分布变化;未来气候将呈现更加复杂的变化情况,极端气温与极端降水量波动大,突变频发;通过结合未来趋势与均值的关系,可推测未来极端气候事件出现频率以及变化趋势。

在珠江流域,极端气候事件可能引发多方面的不良影响,对区域的生态环境、农业生产和水资源利用等构成潜在威胁。例如,气候变化导致的气候变暖可能会引发海平面升高,进而致使咸潮上涌,引发土壤盐渍化,对湿地生态系统造成危害;同时,这种变化还可能改变作物的生产周期,提高农业产量的

不稳定性风险;此外,极端降水事件的频率与强度增加,将导致洪水风险随之增加,威胁居民的生命财产安全以及社会经济的稳定发展。鉴于上述极端气候事件可能带来的一系列挑战,本研究对珠江流域的气候时空变化特征和极值预测估算进行深入探讨,并对未来的极端气候事件进行了多样化分析研究,旨在为珠江流域未来气候变化的相关研究以及人类活动如何应对气候变化提供科学依据和基础数据支撑。这不仅有助于我们更好地理解珠江流域的气候变化规律,还能够为制定相应的适应和减缓措施提供可靠的信息,以应对可能出现的生态、农业和水资源等方面的不利影响,从而促进珠江流域的可持续发展。气候变化已然是一个综合性的全球性问题,未来研究工作中需进一步探讨气候变化的驱动因子,并拓展到其他领域。

珠江流域在中国生态安全体系建设和国民经济发展规划中具有重要的战略地位,流域内上、中游地区是生态安全战略格局的关键组成部分,下游是粤港澳大湾区,这对我国生态安全和社会经济发展具有重大贡献。因此,有关单位也在积极利用现代科技手段对珠江流域进行保护和防治,如水利部提出加快推进珠江流域数字孪生水利建设,政府通过基于自然的解决方案来提高适应气候变化的能力。诸如此类的对策还有很多,它们共同构成了一个多元化和多层次的应对体系,旨在从不同角度和层面减轻气候变化带来的影响,通过这些多元化的共同努力,使其能够更好地适应和缓解气候变化的影响,共同治理和保护珠江流域生态环境。

## 6 结论

(1) 时间上,1993—2022年珠江流域平均气温在冬季呈不显著上升趋势,但其他3季和全年均呈显著上升趋势;全年和夏季平均气温突变均始于21世纪初,而春、秋、冬季皆始于20世纪90年代。降水量在全年和夏季呈显著下降趋势,春、秋、冬季呈不显著上升趋势;秋季突变始于2008年,全年和其他3个季节皆开始于20世纪90年代。

(2) 空间上,1993—2022年珠江流域年平均气温在全年和夏季呈西低东高,春、秋、冬季呈南低北高;除冬季变化差异较均匀外,全年和其他季节皆出现部分地区变化差异明显的现象。平均降水量总体上呈东、东南多,西、西北少,变化差异较为复杂,每个时间段都出现局部突出化的特征。

(3) 利用2023—2024年的实测数据,对模型进行精度验证,结果表明预测结果除个别极端差异外,

误差在10%以内。

(4) 在SSP1-2.6情景下,对珠江流域2023—2050年极端气候进行估算,日最高气温极大值与日最低气温极小值呈不显著上升趋势。空间上日最高气温极大值呈中部高东西低,中部变化差异比东西部大;日最低气温极小值呈东南高西北低,变化差异较小;未来极端气温事件频发且波动大。

(5) 极端湿天降水量与最多连续无雨日数呈不显著下降趋势;空间上极端湿天降水量呈局部极高值和其他地区较低,中南部变化差异极大;最多连续无雨日数呈中南高四周低分布,中南部变化差异比其他地区小;未来连续干旱时间会变长。

需要注意的是,CMIP6极端数据始终只是预测数据,具有较大的不确定性,目前大部分有关极端气温和降水的研究成果仍存在不确定性,未来还需要开展更多元化的分析研究,以降低不确定性,从而提供更精准的极端气候预测。

#### 参考文献 (References)

- [1] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2015,5(6):560-564.
- [2] Zhang Wenxia, Zhou Tianjun. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65 (3) : 243-252.
- [3] 马占云,任佳雪,陈海涛,等. IPCC第一工作组评估报告分析及建议[J]. *环境科学研究*, 2022,35(11):2550-2558. Ma Zhanyun, Ren Jiaxue, Chen Haitao, et al. Analysis and recommendations of IPCC working group I assessment report [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022,35(11):2550-2558.
- [4] Malakouti S M. Utilizing time series data from 1961 to 2019 recorded around the world and machine learning to create a Global Temperature Change Prediction Model [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023,7:100312.
- [5] Crowley T. Causes of climate change over the past 1 000 years [J]. *Science*, 2000,289(5477):270-277.
- [6] Fawzy S, Osman A I, Doran J, et al. Strategies for mitigation of climate change: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2020,18(6):2069-2094.
- [7] 刘友存,霍雪丽,郝永红,等. 天山乌鲁木齐河上游径流极值变化分析研究[J]. *冰川冻土*, 2013,35(5):1248-1258. Liu Youcun, Huo Xueli, Hao Yonghong, et al. A study of the variation of extreme runoff in the upstream of the Rümqi River, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013,35(5):1248-1258.
- [8] Antúnez P. Evidence of the variation in the rate of change of temperature and precipitation [J]. *Ecological Informatics*, 2023,73:101928.
- [9] 于水,张晓龙,刘志娟,等. 1961—2020年松花江流域极端气候指数的时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4):1091-1101. Yu Shui, Zhang Xiaolong, Liu Zhijuan, et al. Spatial and temporal variations of extreme climate index in the Songhua River basin during 1961—2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(4):1091-1101.
- [10] Gvoždíková B, Müller M, Kašpar M. Spatial patterns and time distribution of Central European extreme precipitation events between 1961 and 2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2019,39(7):3282-3297.
- [11] Kalyan A, Ghose D K, Thalagapu R, et al. Multiscale spatiotemporal analysis of extreme events in the Gomati River basin, India [J]. *Atmosphere*, 2021,12(4):480.
- [12] 张存杰,肖潺,李帅,等. 极端气候事件综合危险性等级指标构建及近60年来长江流域极端气候综合分析[J]. *地球物理学报*, 2023,66(3):920-938. Zhang Cunjie, Xiao Chan, Li Shuai, et al. Construction of multi-extreme climate events composite grads index and comprehensive analysis of extreme climate in the Yangtze River basin from 1961 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023,66(3):920-938.
- [13] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. *水土保持研究*, 2022,29(2):231-242. Shen Lulu, Yang Yanfen, Wu Jing, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(2):231-242.
- [14] 初兴林,武玮,杨雪琪,等. 近60 a图们江流域极端气候变化及未来趋势预测[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024,55(8):24-37. Chu Xinglin, Wu Wei, Yang Xueqi, et al. Extreme climate change and future trend prediction in the Tumen River basin in recent 60 years [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024,55(8):24-37.
- [15] 任玉玲. 黄土高原极端气候变化及对河流水沙影响的评估与预测[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022. Ren Yuling. Evaluation and projection of extreme climate changes and its impacts on river runoff and sediment load on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [16] 唐亦汉,陈晓宏. 近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. *地理科学*, 2015,35(4):476-482. Tang Yihan, Chen Xiaohong. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River basin during the last 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(4):476-482.
- [17] 刘友存,张水燕,刘伊楠,等. 基于密切值法的梅江流域水资源承载力评价[J]. *中国国土资源经济*, 2023,36

- (6):21-27.  
Liu Youcun, Zhang Shuiyan, Liu Yinan, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Meijiang River basin based on osculation value method [J]. Natural Resource Economics of China, 2023, 36(6): 21-27.
- [18] 郑慧玲,王永红.1960—2020年黄河、长江、珠江入海水沙通量演变特征[J].水土保持通报,2024,44(1):147-157.  
Zheng Huiling, Wang Yonghong. Evolution characteristics of runoff and sediment fluxes of Yellow River, Yangtze River and Pearl River into sea during 1960—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):147-157.
- [19] 孙桂凯,黄瑞,王国帅,等.2001—2018年西江流域水分利用效率时空变化及影响因素[J].水土保持研究,2023,30(3):327-335.  
Sun Guikai, Huang Rui, Wang Guoshuai, et al. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its influencing factors in Xijiang River basin from 2001 to 2018 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):327-335.
- [20] 李军,吴旭树,王兆礼,等.基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究[J].水利学报,2021,52(4):486-497.  
Li Jun, Wu Xushu, Wang Zhaoli, et al. Changes of drought characteristics in future in Pearl River basin describing by a new comprehensive standardized drought index [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4):486-497.
- [21] 王天,涂新军,周宗林,等.基于CMIP6的珠江流域未来干旱时空变化[J].农业工程学报,2022,38(11):81-90.  
Wang Tian, Tu Xinjun, Zhou Zonglin, et al. Spatio-temporal variation of future droughts in the Pearl River basin using CMIP6 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 81-90.
- [22] 林蔚,孙秀宝,任国玉,等.季节划分和变化研究进展[J].地理科学进展,2024,43(4):826-840.  
Lin Wei, Sun Xiubao, Ren Guoyu, et al. A review of seasonal division and change research [J]. Progress in Geography, 2024,43(4):826-840.
- [23] 杜军,黄志诚,程巳阳,等.近40年西藏昼夜降水量时空变化特征[J].气象,2024,50(10):1161-1174.  
Du Jun, Huang Zhicheng, Cheng Siyang, et al. Spatio-temporal variation characteristics of daytime and nighttime precipitation in Xizang from 1981 to 2020 [J]. Meteorological Monthly, 2024,50(10):1161-1174.
- [24] 翟宇坤,李永宏,沈海鸥,等.吉林省水土流失与社会经济空间自相关性特征及影响因素[J].水土保持通报,2024,44(5):144-151.  
Zhai Yukun, Li Yonghong, Shen Haiou, et al. Spatial autocorrelation patterns and influencing factors of soil and water loss and socio-economic development in Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):144-151.
- [25] 吉戴婧琪,元媛,韩剑桥.中国极端降水事件的时空变化及趋势预测[J].中国农村水利水电,2022(10):74-80.  
Ji D, Yuan Yuan, Han Jianqiao. Spatial-temporal changes and trend predictions of extreme precipitation events in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10):74-80.
- [26] Fisher R A. Statistical methods for research workers [J]. Canadian Medical Association Journal, 1925, 15(9):984-986.
- [27] 汪泉娟,孙敬锋,杨英杰,等.克里金方法与深度学习方法用于浅层地下水位估计的对比研究:以深汕特别合作区为例[J].地质科技通报,2024,43(4):291-301.  
Wang Quanjuan, Sun Jingfeng, Yang Yingjie, et al. A comparative study of Kriging and deep learning methods for shallow groundwater level estimation: A case study of the Shenzhen-Shanwei Special Cooperation Zone [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024,43(4):291-301.
- [28] 虞俊,袁晓艾,张毅,等.基于分区的不同尺度降雨空间插值方法研究[J].水力发电,2024,50(11):21-26.  
Tuo Jun, Yuan Xiaoi, Zhang Yi, et al. Research on rainfall spatial interpolation method at multiple scales based on partitioning [J]. Water Power, 2024,50(11): 21-26.
- [29] 刘祥,庞玥,何军,等.不同空间插值方法对重庆地区降水的适用性分析[J].高原山地气象研究,2022,42(2):75-81.  
Liu Xiang, Pang Yue, He Jun, et al. Applicability analysis of different spatial interpolation methods for the precipitation in Chongqing [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022,42(2):75-81.
- [30] 徐飞,张汶海,赵玲玲,等.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, et al. Spatio-temporal variability in extreme temperature from 1960 to 2018 in the Pearl River basin, China [J]. Mountain Research, 2022,40(3):343-354.
- [31] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等.西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J].水利水电科技进展,2023,43(6):128-136.  
Xie Zhigao, Jia Wenhao, Wang Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136.