

周彪, 温姗姗, 蒋富霜, 等. 1961—2020年珠江流域极端气温和降水复合事件的时空演变特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 1-18. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.001

ZHOU Biao, WEN Shanshan, JIANG Fushuang, et al. Spatiotemporal variations of compound extreme temperature and precipitation events in Pearl River Basin from 1961 to 2020[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 1-18. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.001

1961—2020年珠江流域极端气温和降水复合事件的时空演变特征分析

周彪, 温姗姗, 蒋富霜, 汪辰钰

(安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002)

摘要:【目的】珠江流域是中国重要的经济与人口密集区, 然而经常受到极端气温和极端降水事件的影响。仅分析单一变量可能低估这些极端事件对区域的实际影响。因此, 研究极端气温和极端降水的复合灾害事件的变化趋势和特征, 对准确评估其潜在灾害影响具有重要的科学意义。【方法】基于1961—2020年的气象观测数据, 采用相对阈值法和标准化降水蒸散指数(SPEI), 识别出热干、热湿、冷干和冷湿四类复合事件, 通过趋势分析和空间分布研究, 揭示这些复合事件的时空分布特征及其变化趋势。【结果】结果显示: 1961—2020年期间, 气温与SPEI呈显著负相关, 尤其在夏季和冬季, 西部和南部地区的相关性尤为突出。珠江流域热湿事件显著增加, 冷干事件显著减少, 尤其在21世纪初期变化最为明显。热湿事件主要集中在流域东南部及南部沿海地区, 热干事件多发于西部和南部, 冷湿事件在西北部频繁发生, 冷干事件则在东北部较为常见。强度方面, 热干事件主要表现为强等级和中等级, 其天数远超热湿、冷湿和冷干事件。1991—2020年, 热湿和热干事件的发生频数分别增加了24%和99%, 而冷湿和冷干事件的频数则分别减少了9%和41%。在区域分布上, 热干事件在平原和丘陵地带, 尤其是海南岛及南海诸岛区域最为频繁; 而冷湿事件在中山和高山地带更为显著。这些变化揭示了区域气候的显著转变。【结论】结果表明: 珠江流域内热干和热湿事件的频数显著增加, 尤其在南部和西部地区更为明显, 反映出这些区域在未来气候变暖背景下面临高风险; 相对而言, 冷干和冷湿事件的减少趋势表明, 区域气候正向暖湿化转变。通过深入分析复合极端事件的时空变化特征及其演变规律, 研究成果为珠江流域的气候预估、复合灾害事件应对策略的制定以及防灾减灾能力提升提供了重要的科学依据和参考。

关键词: 复合事件; 极端气温; 极端降水; 珠江流域; 时空演变; 气候变化; 时空分布; 干旱

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.001

中图分类号: P467

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2025)08-0001-18



收稿日期: 2024-12-20; 修回日期: 2025-02-06; 录用日期: 2025-02-07; 网络出版日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(42005126)

作者简介: 周彪(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事气候变化影响研究。E-mail: 2321011580@ahnu.edu.cn

通信作者: 温姗姗(1989—), 女, 讲师, 博士, 主要从事气候变化影响研究。E-mail: wenss@ahnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal variations of compound extreme temperature and precipitation events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

ZHOU Biao, WEN Shanshan, JIANG Fushuang, WANG Chenyu

(School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China)

Abstract: [Objective] The Pearl River Basin is an important economic and densely populated area in China, frequently affected by extreme temperature and precipitation events. Studying the spatiotemporal variations of compound extreme events is vital for regional climate adaptation management. [Methods] Based on meteorological observation data from 1961 to 2020, this study employs the relative threshold method and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) to identify four types of compound extreme events: hot-dry, hot-wet, cold-dry, and cold-wet. Trend analysis and spatial distribution studies were conducted to reveal the spatiotemporal distribution characteristics and trends of these compound events. [Results] The result indicate a significant negative correlation between temperature and *SPEI* in the Pearl River Basin from 1961 to 2020, particularly prominent in the western and southern regions during summer and winter. Notably, there has been a substantial increase in hot-wet events and a significant decrease in cold-dry events, with the most pronounced changes occurring in the early 21st century. Hot-wet events were mainly concentrated in the southeastern and southern coastal areas of the basin, and hot-dry events frequently occur in the western and southern regions. Cold-wet events are common in the northwest, and cold-dry events are most frequent in the northeast. In terms of intensity, hot-dry events are mainly classified as strong or medium, with their duration far exceeding that of hot-wet, cold-wet, and cold-dry events. From 1991 to 2020, the occurrence frequencies of hot-wet and hot-dry events increased by 24% and 99%, respectively, while those of cold-wet and cold-dry events decreased by 9% and 41%. Regionally, hot-dry events are most frequent in plains and hilly areas, particularly in Hainan Island and the South China Sea Islands, whereas cold-wet events are more prominent in mid-altitude and high-altitude areas. The changes reveal a significant transformation in the regional climate. [Conclusion] The findings indicate a notable increase in the frequency of hot-dry and hot-wet events in the Pearl River Basin, especially in the southern and western regions, reflecting high-risk exposure in these areas under future climate warming. Conversely, the decreasing trend of cold-dry and cold-wet events suggests a shift toward a warmer and wetter climate. Through an in-depth analysis of the spatiotemporal characteristics and evolution of compound extreme events, this study provides important scientific evidence and references for climate prediction, response strategies to compound disaster events, and enhancing disaster prevention and mitigation capabilities in the Pearl River Basin.

Keywords: compound events; extreme temperature; extreme precipitation; Pearl River Basin; spatiotemporal variation; climate change; spatiotemporal distribution; drought

0 引言

极端天气气候事件通常表现为某地气候状态显著偏离长期平均,具有突发性、难预测性和强破坏性等特点^[1-2]。近年来,包括极端降水、高温和低温在内的极端事件频繁发生,对众多地区的人类生活和生态系统造成了严重影响。两个或多个极端事件同时或者相继发生的现象通常被称为复合极端事件^[3]。2012年IPCC特别报告《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应》中首次正式提出了复合事件的概念,最新的IPCC AR6报告进一步强调了其研究的重要性^[4]。研究表明,多个极端事件的复合效应通常高于单一极端事件的简单叠加效应。伴随全球变暖,预计未来复合极端事件的发生将更加频繁^[5],并且这些事件涉及多个时间和空间尺度上的多变量极端情况,可能进一步加剧单一极端事件的风险和影响^[6]。

因此,加强对复合极端事件时空特征的研究,对区域乃至全国范围内的复合极端气候风险预估和灾害评估具有重要意义。

复合极端事件可能造成严重的灾害性影响。在极端气温与降水的复合灾害中,当高温与水分胁迫同时发生时,农作物的平均产量损失可能高达正常情况下的四倍^[7];热浪与干旱的复合极端事件的增加,可能对居民的生命和健康构成更为严峻的威胁^[8];降水与地表径流的联合作用,以及厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)与全球气温升高所导致的温度条件之间的复合效应,往往引发更具灾难性的复合洪水事件^[9]。

中国气候复杂多样,近年来,各类复合极端事件在全国范围内愈发显著^[5],极端气温和降水已成为最频繁和广泛的灾害,相关的复合灾害研究也日益受到重视^[10-12]。1961—2014年,中国各地极端气温与

降水的复合事件在频率和空间分布上经历了显著变化^[12-14]。全国范围内, 热湿和热干事件的频数呈现上升趋势, 主要集中在春夏季节^[12], 尤其自 20 世纪 90 年代末, 城市化水平较高的东部地区夏季热干事件的增加尤为显著^[15]; 自 2000 年以来, 南部、西北部和东北地区的洪水-热浪复合极端事件发生概率也显著提升^[16]。此外, 冷湿事件在西藏东北部的频数有所增加^[12]。随着全球温升的加剧, 预计中国复合极端事件的发生概率还将大幅增加, 尤其是东南部和西南部可能会经历前所未有的高温-洪水复合极端事件^[17]。复合灾害的演变特征仍具有较大不确定性^[6]。

珠江流域作为中国的重要经济增长区, 同时也是气候变化和生态环境的敏感区, 近年来, 随着气候变化的加剧, 该地区的极端气候事件频发, 带来了显著的危害风险。因此, 已有大量研究聚焦于珠江流域的气候灾害特征, 尤其是极端气温和降水事件。然而, 现有研究多集中于单一的极端气温或降水事件分析^[18-19], 或者探讨特定类型的复合事件, 如热干或热湿事件^[20-21]。针对极端气温和降水的复合灾害的综合演变特征及其区域差异, 仍然缺乏深入的系统研究。

关于复合极端事件的分析, 已有多种方法被提出和应用^[21-25]。其中基于 Copula 的多变量联合概率分布方法在复合极端事件评估研究中得到了广泛应用^[22-23]。作为处理多变量相关性的有效工具, Copula 理论不仅能够量化变量间的相关程度, 还可通过多种 Copula 函数精确刻画变量间的依赖结构特征。研究者通常采用降水和温度的组合来构建新的指数, 例如利用标准化气温和干旱指数构建的标准化干热指数。然而, 这种方法虽然能够反映气温和降水的协同效应, 但可能存在过度识别复合极端事件的风险, 即将非极端降水和非极端高温条件误判为复合极端事件, 从而影响结果的准确性^[24]。此外, 还可以通过相对阈值法和干旱指数分别判定极端气温和极端降水事件, 并在时间或空间维度上寻找其交集^[12,25], 进一步分析复合极端事件的发生和演变规律。不过, 极端气温和极端降水的判定标准尚未统一, 复合极端事件的识别存在多种组合标准, 不同的判定标准可能导致结果的差异。因此, 选择适当的判定标准组合至关重要。根据实际需求调整判定标准, 既体现了该方法的灵活性, 也能提高研究结果的针对性和适用性。

在本文的研究中, 采用相对阈值法和干旱指数方法, 系统分析了珠江流域中极端气温与降水构成的各类复合事件。研究涵盖热湿、热干、冷湿和冷干四类

复合事件, 重点分析了其时空分布特征与演变趋势。本研究旨在全面揭示该流域极端气温与降水复合极端事件的变化规律, 为评估灾害对该地区的潜在影响提供科学依据, 同时为流域及全国防灾减灾策略制定和应对气候变化提供重要参考。

1 研究资料与方法

1.1 研究区概况

珠江流域(见图 1)位于我国东南部, 介于东经 102°14'—115°53'、北纬 18°10'—26°49' 之间, 主要由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河等四个水系组成, 覆盖云南、贵州、广西、广东、湖南、江西、福建、海南等 8 省(自治区)以及香港、澳门特别行政区, 总面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该流域地形以山地和丘陵为主, 地势西北高东南低。珠江流域属亚热带季风气候, 年平均气温 14~22 °C, 多年平均降水量 1 200~2 200 mm^[26]。尽管水资源丰富, 但受季风影响, 其时空分布不均, 导致珠江流域长期面临极端降水和高温灾害的威胁。

1.2 研究数据

本文使用的气象数据包括珠江流域的日降水、日平均气温、最高和最低日气温, 数据来源于 CN05.1 格点化数据集^[27], 时间范围为 1961—2020 年, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。该数据集通过距平逼近法进行插值, 质量优良, 具有完整性和可靠性, 已在珠江流域的研究中得到验证和应用^[18,28]。数字高程模型 (DEM) 数据下载自中国科学院“地理空间数据云”(http://www.gscloud.cn)的 SRTM-3DEM, 空间分辨率为 90 m。根据 2009 年出版的《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》以及珠江流域的实际地形特征, 本文将高程划分为五个等级(见表 1)。

表 1 珠江流域高程等级统计

Table 1 Statistics of elevation classification in Pearl River Basin

等级	高程/m	描述	占比/%
1	<200	平原	35.8
2	200~500	丘陵	26.1
3	500~1 000	低山	18.5
4	1 000~2 000	中山	16.3
5	>2 000	高山	3.2

1.3 研究方法

1.3.1 复合极端事件识别

针对 1961—2020 年各站点逐日最高和最低气温资料, 本文将第 90 个百分位对应的日最高气温值设定为高阈值, 第 10 个百分位对应的日最低气温值

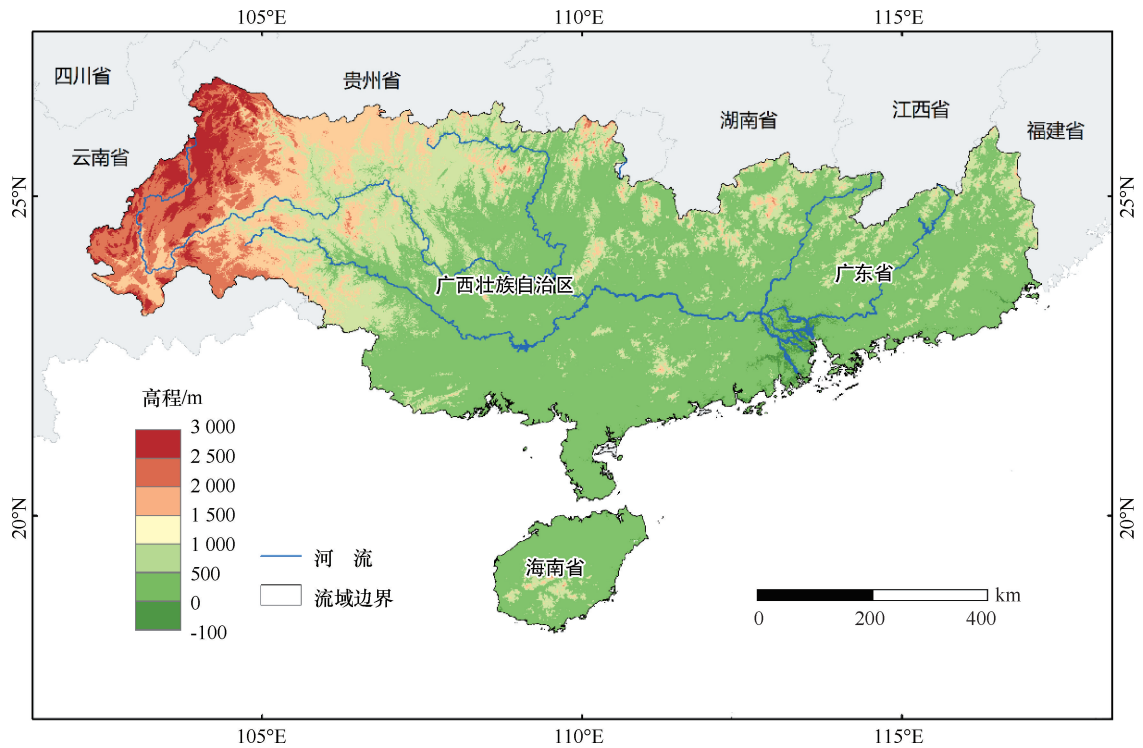


图 1 珠江流域地理位置

Fig. 1 Geographic location of Pearl River Basin

设定为低阈值。当某站某日的最高气温大于等于高阈值或最低气温小于等于低阈值时,记录为一次极端高温或低温事件^[29]。

本研究采用标准化降水蒸散指数(*SPEI*)来界定极端干旱和极端湿润事件。*SPEI*综合考虑了降水和蒸发对干旱的影响,结合了标准化降水指数(*SPI*)和帕尔默干旱指数(*PDSI*)的优点,因此在干旱灾害的识别和影响研究中具有广泛应用^[30-35]。在本研究中,研究目的是反映1961—2020年期间复合极端事件的时空分布。针对极端气温和极端降水事件的不同特性,采用了不同时间尺度:极端气温(高温和低温)使用日尺度数据,以捕捉其瞬时变化和峰值强度;而极端降水(干旱和湿润)使用月尺度数据,以更好地反映其长期累积效应和持续性特征。这种时间尺度的选择是为了更准确地刻画两类极端事件的不同统计规律。尽管时间尺度存在差异,只要空间分布上具有重叠性,仍能有效揭示复合极端事件的时空分布特征,并为进一步分析提供重要依据。因此在本研究中,*SPEI*使用的是月时间尺度,其中*SPEI*值低于-0.5的月份被视为极端干旱月份;而当*SPEI*值高于0.5的月份被视为极端湿润月份。而日气温数据能够反映气温的日变化和短期波动,可以更准确地识别极端高温或低温事件,因此为了将每日气温数据与月*SPEI*

数据相匹配,将每个月*SPEI*值与该月的每一天相关联^[36]。

*SPEI*是对月降水量与潜在蒸散差值序列的累积概率值进行正态标准化得到的,计算公式为

$$\begin{cases} SPEI = W - \frac{C_0 - C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W + d_3W} & P \leq 0.5 \\ W = \sqrt{-2\ln P} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} SPEI = W - \frac{C_0 - C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W + d_3W} & P > 0.5 \\ W = \sqrt{-2\ln(1 - P)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $C_0 = 2.515517$; $C_1 = 0.802853$; $C_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$; P 为累计概率,由累计函数计算得

$$P = 1 - F(x) \quad (3)$$

累积函数可采用3个参数的Log-Logistic概率分布计算

$$F(x) = \left[1 + \frac{\alpha^\beta}{x - \gamma} \right]^{-1} \quad (4)$$

参数 α 、 β 、 γ 分别采用线性矩法拟合获得,计算公式为

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (6)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (7)$$

式中, Γ 为阶乘函数; w_0 、 w_1 、 w_2 为水量盈缺量 D 的概率加权矩, D 公式为

$$D_i = P_i - PET_i \quad (8)$$

式中, D_i 为 i 月的水量盈缺量(mm); P_i 为 i 月的降雨量(mm); PET_i 为 i 月的潜在蒸散量(mm), 计算公式为

$$PET = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H}\right)^A \quad (9)$$

$$H = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (10)$$

$$A = 6.75 \times 10^{-7}H^3 - 7.71 \times 10^{-5}H^2 + 1.792 \times 10^{-2}H + 0.49 \quad (11)$$

式中, PET 为月潜在蒸散量(mm); T_i 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$); H 为年热量指数($^{\circ}\text{C}$); i 为月份; A 是常数。

复合极端事件指的是两个或多个极端事件同时或相继发生的现象, 或者是由多个极端事件的组合或放大效应引起的极端影响^[35-38]。在本文中, 若某站某月的 $SPEI$ 大于 0.5 (或小于 -0.5), 且该站点某日的气温超过 (或低于) 设定的高 (或低) 阈值, 则判定为一次复合极端事件。这种判定方法有助于识别和分析不同类型的极端气候交互作用。

本研究采用相对阈值法与 $SPEI$ 干旱指数识别复合极端事件, 在珠江流域的复合事件识别中具有一定的优势: (1) 相对阈值法通过独立定义气温与降水极端阈值, 并动态设定区域气候基准值, 能够有效消除

地理差异对极端事件判定的干扰, 特别适用于气候异质性显著的珠江流域。该方法对局地气候特征的自适应能力, 能够灵活区分四类复合极端事件类型, 契合珠江流域季风气候下降水集中但高温频发的特征^[21]。(2) 采用月尺度 $SPEI$ 与日气温数据的嵌套匹配^[36], 既保留了降水累积效应, 又捕捉了高温的瞬时冲击, 精准解析流域内“缓旱-骤热”型复合事件的跨尺度驱动机制, 避免单一时间分辨率导致的信号漏检。(3) $SPEI$ 通过耦合降水与潜在蒸散 (PET), 可更真实反映水分盈亏状态^[30], 有效修正珠江流域因高温蒸散增强导致的干旱评估偏差, 克服传统降水指数 (如 SPI) 在湿润区水分平衡表征中的不足^[32]。

为了对所定义的复合极端气候事件进行量化分析, 故对其强度进行划分, 由弱到强依次为弱等级、中等级和强等级。具体划分依据为: 对于某站某日平均气温 (T) 来说, 在高温阈值 (T_{90}) 和温度最大值 (T_{\max}) 之间取高温区间平均值 (T_{mv1}), 并在低温阈值 (T_{10}) 和温度最小值 (T_{\min}) 之间计算低温区间平均值 (T_{mv2}); 对于某站的降水量而言, 其划分依据则依据 $SPEI$ 来确定, $SPEI$ 在 -0.5 阈值和最小值 (P_{\min}) 之间取干旱区间平均值 (P_{mv1}), 并在 0.5 阈值和最大值 (P_{\max}) 之间计算湿润区间平均值 (P_{mv2})。复合极端事件的强度等级划分如表 2 所列。

1.3.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (MK) 检验是一种用于分析时间序列数据趋势和突变点的气候诊断与预测技术。该方法通过比较每个数据点与其之前数据点的大小, 以检测时间序列中的单调趋势 (如上升、下降或无趋势)。MK 检验基于假设检验, 通过计算统计量来判断是否拒绝原假设, 即时间序列数据不存在单调趋势。对于给定的时间序列 x_i , i 为时间顺序, MK 检验统计量的计算式为

表 2 复合极端事件强度等级划分

Table 2 Classification of intensity levels for compound extreme events

类型	弱等级	中等级	强等级
热 湿	$T_{90} \leq T < T_{mv1} \ \& \ 0.5 \leq SPEI < P_{mv2}$	$T_{mv1} \leq T \leq T_{\max} \ \& \ 0.5 \leq SPEI < P_{mv2}$ $T_{90} < T < T_{mv1} \ \& \ P_{mv2} \leq SPEI \leq P_{\max}$	$T_{mv1} \leq T \leq T_{\max} \ \& \ P_{mv2} \leq SPEI \leq P_{\max}$
热 干	$T_{90} \leq T < T_{mv1} \ \& \ P_{mv2} < SPEI \leq -0.5$	$T_{mv1} \leq T \leq T_{\max} \ \& \ P_{mv1} < SPEI \leq -0.5$ $T_{90} \leq T < T_{mv1} \ \& \ P_{\min} \leq SPEI \leq P_{mv1}$	$T_{mv1} \leq T \leq T_{\max} \ \& \ P_{\min} \leq SPEI \leq P_{mv1}$
冷 湿	$T_{mv2} < T \leq T_{10} \ \& \ 0.5 \leq SPEI < P_{mv2}$	$T_{mv2} < T \leq T_{10} \ \& \ P_{mv2} \leq SPEI \leq P_{\max}$ $T_{\min} \leq T \leq T_{mv2} \ \& \ 0.5 \leq SPEI < P_{mv2}$	$T_{\min} \leq T \leq T_{mv2} \ \& \ P_{mv2} \leq SPEI \leq P_{\max}$
冷 干	$T_{mv2} < T \leq T_{10} \ \& \ P_{mv1} < SPEI \leq -0.5$	$T_{mv2} < T \leq T_{10} \ \& \ P_{mv1} < SPEI \leq -0.5$ $T_{\min} \leq T \leq T_{mv2} \ \& \ P_{\min} \leq SPEI \leq P_{mv1}$	$T_{\min} \leq T \leq T_{mv2} \ \& \ P_{\min} \leq SPEI \leq P_{mv1}$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (12)$$

式中, sgn 为符号函数; i 为时间顺序; n 为时间长度。

在 x_i 是一个独立同分布随机变量的零假设条件下, 统计量 S 近似服从正态分布, 均值为 0, 方差计算式为

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^j j(j-1)(2i+5) \right] \quad (13)$$

式中, j 为时间序列中相同数值的个数。

在零假设条件下, 统计量 S 与标准差的比值 Z 近似服从标准正态分布。因此, 在双边检验中, 当显著性水平为 0.05 (即 95% 置信度) 时, 若 Z 绝对值的统计值 P 小于或等于 0.025, 则可以拒绝零假设, 表明时间序列 x_i 具有显著的时间变化趋势。通过把 S 变换为检验统计量 Z_{MK} , 可以使得对于大样本的数据, Z_{MK} 近似满足标准正态分布, 其计算公式为

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, 计算的 Z_{MK} 为正值, 则可认为时间序列具有持续增加的趋势; Z_{MK} 为 0, 则时间序列不具有变化趋势; Z_{MK} 为负值, 则时间序列具有持续减少的趋势。

MK 非参数检验对数据分布无假设要求^[39], 尤其适用于珠江流域极端气候事件序列的偏态分布特征^[40]。该方法通过秩次比较而非数值大小判断趋势方向, 能够抵抗 ENSO 相位转换、快速城市化等干扰因子引起的异常值影响^[41], 并稳健识别复合事件的长期演变规律及空间异质性。此外, MK 检验的双边特性支持同步捕捉高温事件与低温事件增减的差异^[42], 可为厘清自然变率与人类活动对复合极端事件的贡献提供统计支撑。

2 结果分析

2.1 极端气温和极端降水事件

1961—2020 年珠江流域高温、低温、湿润与干旱事件时间变化和时空分布如图 2 所示。高温事件以 4.4 d/10 a 的速率呈现显著上升趋势 (通过 0.05 显著性水平检验), 且这一趋势在 21 世纪初期表现出明显的加速特征, 低温事件呈显著下降趋势, 速率大约为 -3.8 d/10 a (通过 0.05 显著性水平检验)。湿润事

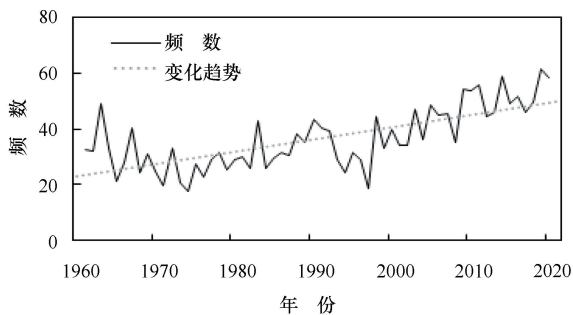
件和干旱事件的月数变化趋势相对平缓, 尽管存在一定的年际波动, 但整体上未呈现显著的增加或减少趋势。从空间分布格局来看, 在流域西部和南部地区会发生超过 50 d 的高温事件, 而北部地区则相对较少。低温事件的空间分布特征表现为: 西北部和南部地区分布较为广泛, 其中频数超过 29 d 的区域面积占比达 9.6%。干旱事件的空间分布具有明显的区域差异性, 高发区主要集中于西南部和东南沿海地区, 这些区域年干旱月数普遍超过 2 个月。湿润事件则呈现出中部低、四周高的空间分布特征, 其中西北部和西南部地区发生频率最高。

图 3 展示了不同季节珠江流域气温与 SPEI (标准化降水蒸散指数) 相关系数的空间分布特征。整体上, 珠江流域大部分地区的气温与 SPEI 呈负相关关系, 表明气温升高往往伴随着干旱程度的加剧。分季节来看, 负相关性的空间分布及其显著性水平存在显著差异: 春季有 34.8% 的区域表现出显著的负相关性 (在 0.05 显著性水平下), 主要集中在流域西部和南部; 夏季负相关性最为显著, 整个区域均通过显著性检验 (在 0.05 显著性水平下), 其中西部和南部地区的相关系数超过 -0.5, 显示出极强的负相关关系; 秋季仅有 0.3% 的区域呈现显著负相关, 表明该季节气温与 SPEI 的相关性较弱; 冬季则有 98.5% 的区域表现出显著负相关, 西部和南部地区的相关系数同样超过 -0.5, 显示出强烈的负相关关系。

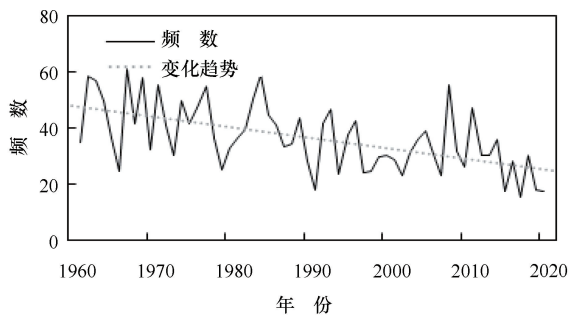
2.2 复合极端事件时间演变和突变分析

1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷干、冷湿四类复合极端事件的频数变化时间序列结果 (见图 4) 显示, 热湿事件的频数显著增加, 平均每 10 年增加 1.3 d (在 0.01 显著性水平下), 这一趋势在 21 世纪初期尤为显著, 2017 年达到 35 d 的峰值。相比之下, 冷干事件频数显著下降, 平均每 10 年减少 1.6 d, 反映了区域气候变暖的影响, 特别是在冬季气温上升的背景下。热干和冷湿事件的频数变化趋势相对较弱, 尽管存在波动, 但整体未表现出显著增加或减少的趋势。

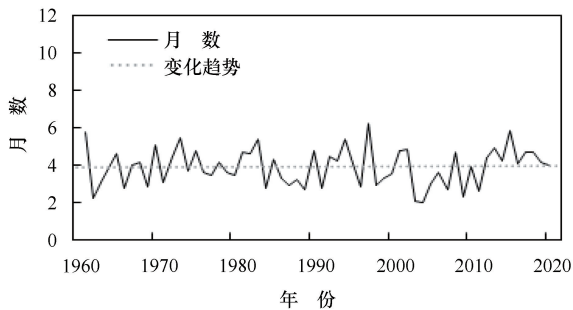
从图 5 可以看出, 1961—2020 年珠江流域四类复合极端事件的最大连续日变化存在显著差异, 其中, 热湿事件以 0.5 d/10 a 的趋势显著增加 (在 0.05 显著性水平下), 尤其在 2010 年以后, 其最大连续日明显增加。冷湿事件多年以 -0.6 d/10 a 的速度持续下降 (在 0.05 显著性水平下), 自 1966 年起, 其最大连续日均低于 13 d。热干事件和冷湿事件整体表现出较为明显的波动性, 尽管整体上呈现减少趋势, 但



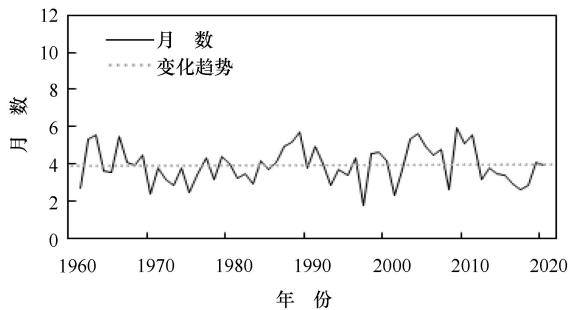
(a) 高温事件时间变化



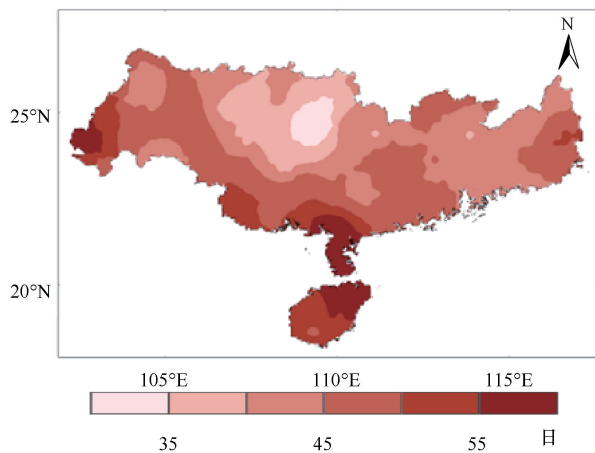
(b) 低温事件时间变化



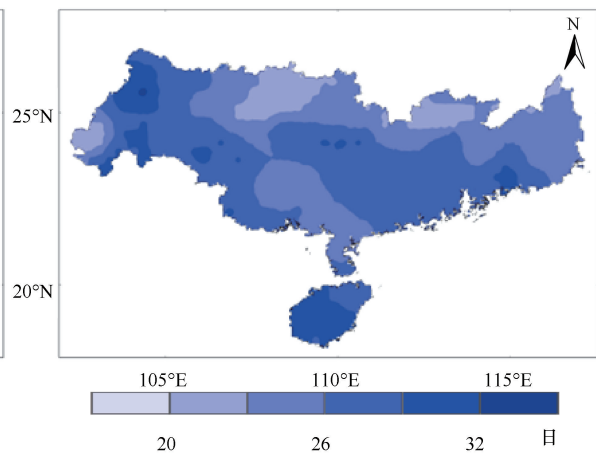
(c) 湿润事件时间变化



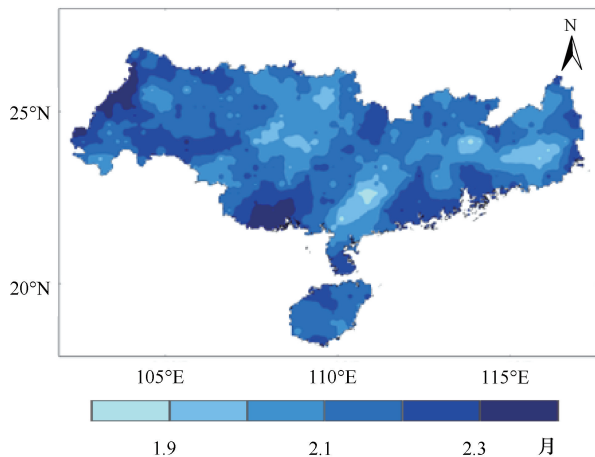
(d) 干旱事件时间变化



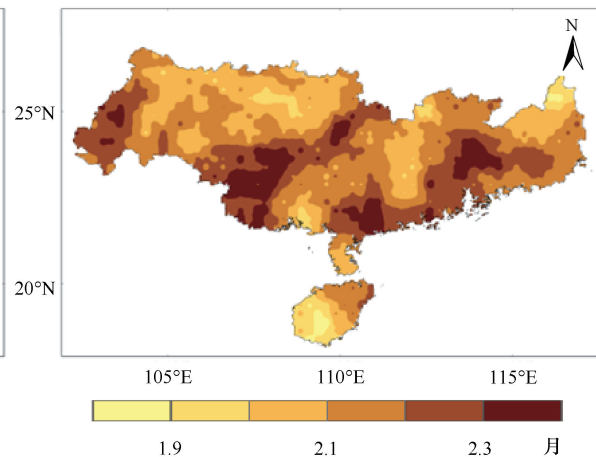
(e) 高温事件空间分布



(f) 低温事件空间分布



(g) 湿润事件空间分布



(h) 干旱事件空间分布

图 2 1961—2020 年珠江流域高温、低温、湿润与干旱事件时间变化和空间分布

Fig. 2 Temporal variations and spatial distribution of high-temperature, low-temperature, wet and drought events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

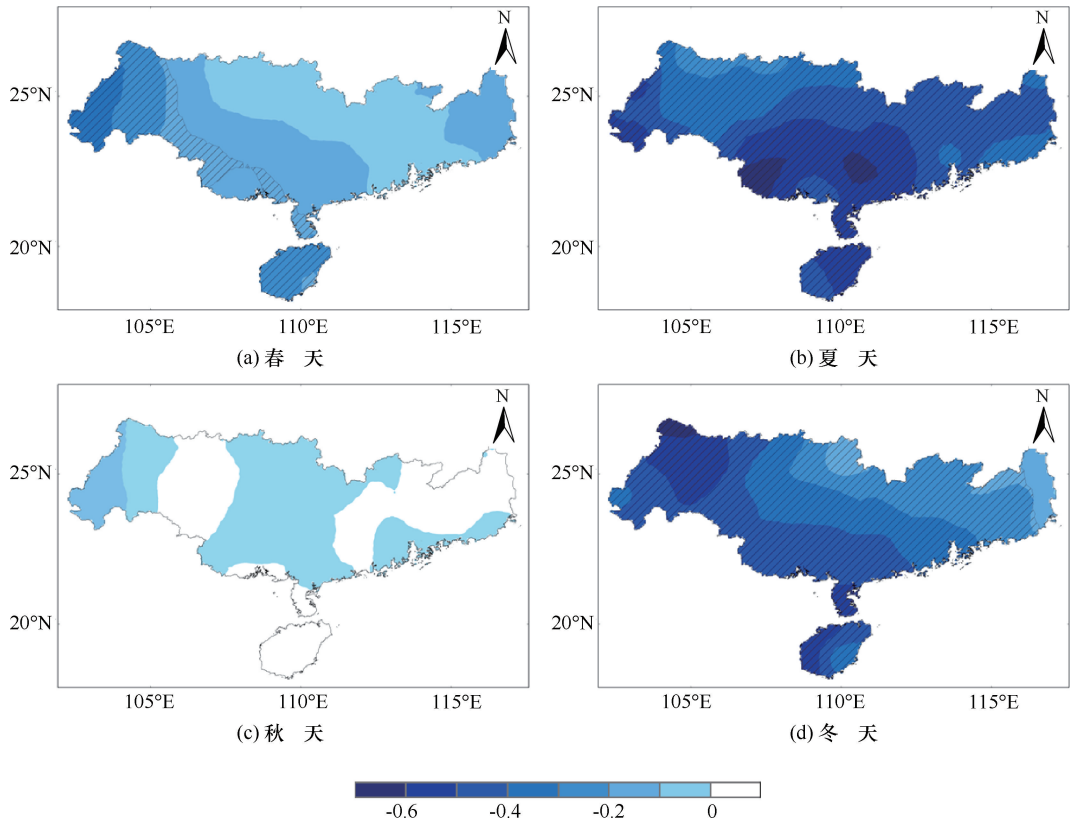


图 3 1961—2020 年珠江流域四季气温和 *SPEI* 的相关系数 (阴影部分表示相关性在 0.05 水平上显著)

Fig. 3 Correlation coefficients between temperature and *SPEI* in four seasons of Pearl River Basin from 1961 to 2020 (shaded areas indicate significance at 0.05 level)

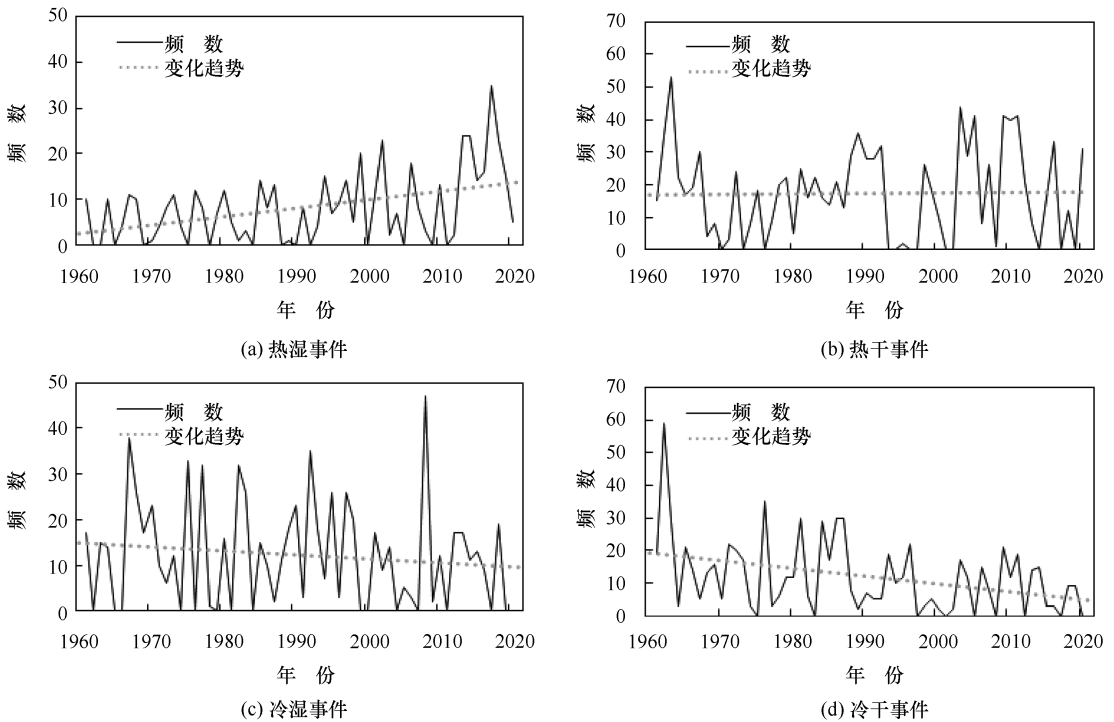


图 4 1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件频数变化特征

Fig. 4 Characteristics of frequency variations in Pearl River Basin for hot-wet, hot-dry, cold-wet, and cold-dry events from 1961 to 2020

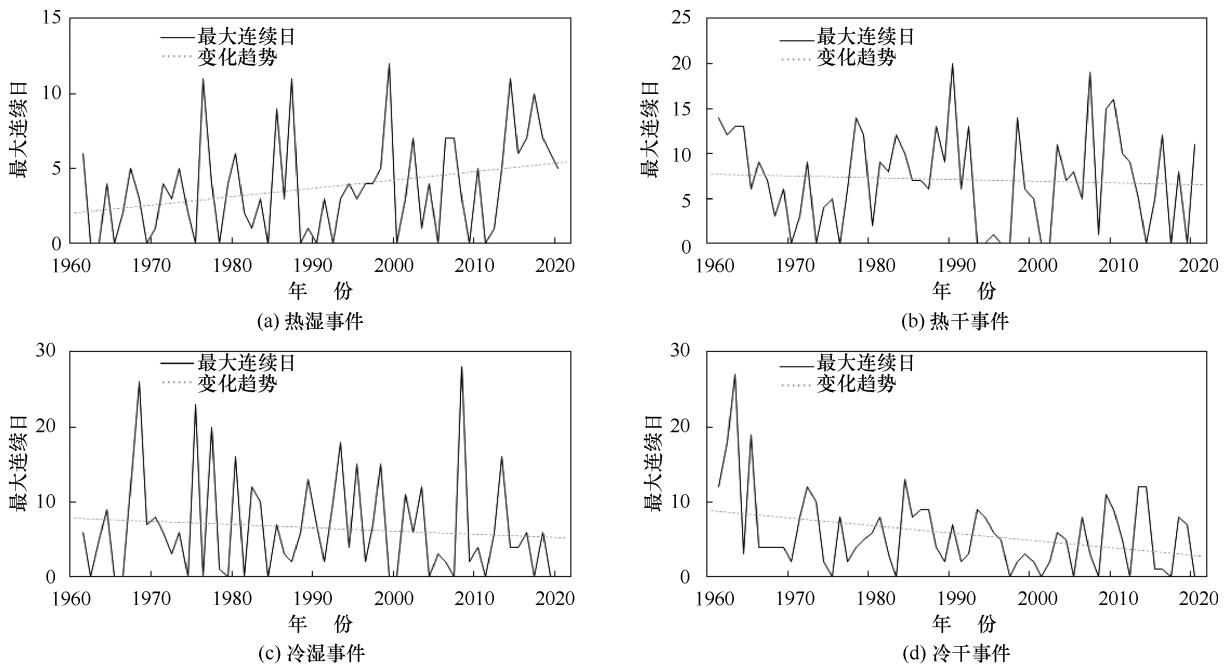


图5 1961—2020年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件最大连续日变化特征

Fig. 5 Variations in maximum consecutive days of hot-wet, hot-dry, cold-wet, and cold-dry events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

未通过显著性水平检验。

从1961—2020年月度分布[见图6(a)]来看, 热干事件在全年最为频繁, 尤其在7月份达到峰值, 月平均发生天数达6.1 d。热湿事件则与热干事件发生时间几乎同步, 集中在7月和8月, 月平均发生天数约为3天。冷湿和冷干事件则集中在1月和12月,

随后气温回升天数迅速减少。对比1961—1990年[见图6(b)], 1991—2020年[见图6(c)]热干在6月、7月显著减少, 其中7月总减少天数达79 d, 但其他月份均有所增加。热湿事件则是各个月份均表现增加趋势, 尤其是在7月, 增加天数超过50天。冷湿和冷干事件则总体表现出显著的减少趋势, 除了1月和

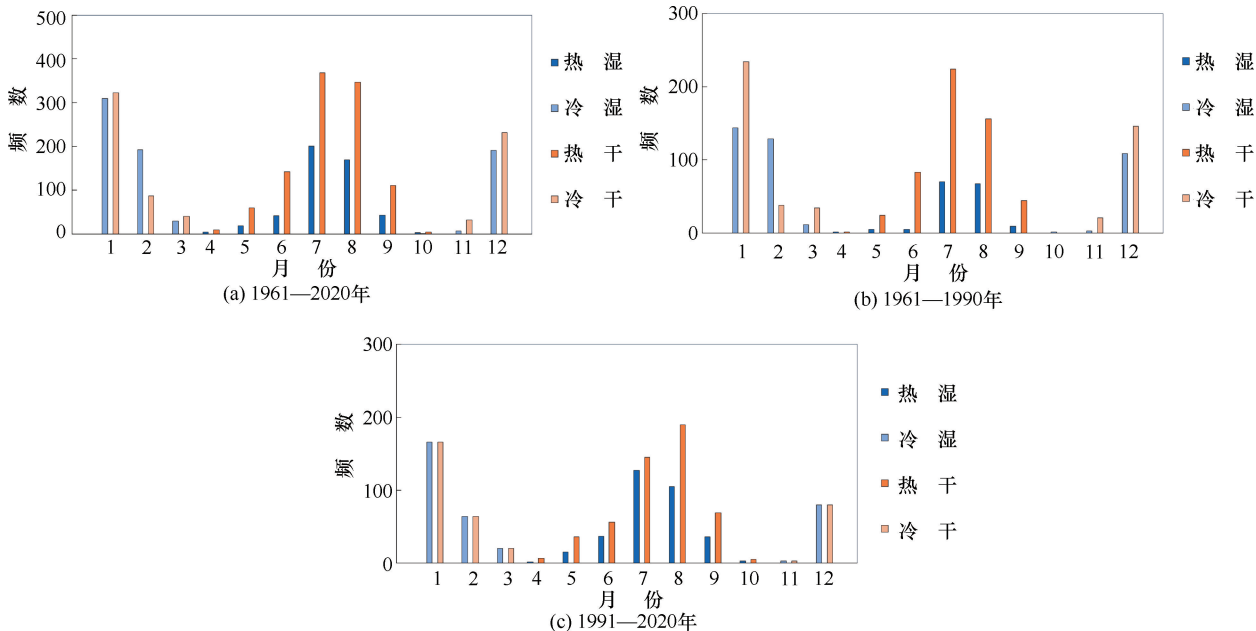


图6 珠江流域复合极端事件月变化特征

Fig. 6 Monthly variation characteristics of compound extreme events in Pearl River Basin

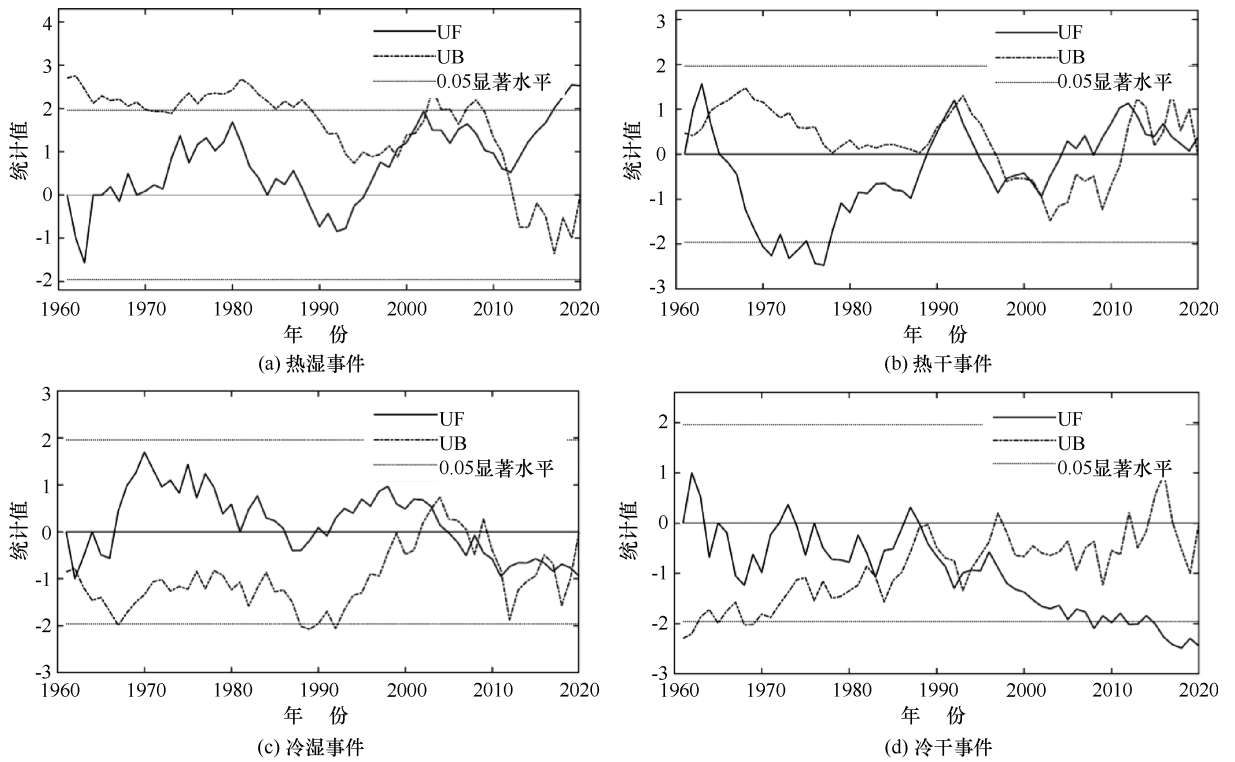


图7 1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件的 MK 突变检验分析

Fig. 7 Mann-Kendall (MK) abrupt change test for hot-wet, hot-dry, cold-wet and cold-dry events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

3月略有增加,其余月份多数减少在30天以上。反映出近年来珠江流域在湿热和干热条件下的持续性暴露。

四类复合事件变化趋势的突变分析如图7所示。热湿事件自1999年起首次显现显著变化,标志着该类事件频数在21世纪初期显著增加,反映出气候条件的湿热趋势。热干事件自1964年起经历显著波动,尽管1970—1978年间频数多次下降,但自90年代起波动趋于平稳,未再出现显著变化。冷湿事件在2002—2019年间多次变化,但未呈现显著的长期趋势,表明其发生相对稳定。冷干事件则在1988年经历显著变化,随后频数持续减少,特别在21世纪初期,下降趋势进一步加速。

2.3 复合极端事件空间分布特征和趋势

图8展示了1961—2020年珠江流域四类复合极端事件发生频数的空间分布特征及其变化趋势。热湿事件主要集中在流域南部沿海地区(如珠江三角洲),部分区域的频数超过500 d,约占流域总面积的7%,西部地区的频数相对较低,可能是受到西部地势较高的影响。热干事件则在流域西部和南部分布广泛,超过1100 d的区域占5.8%。冷湿事件主要集中在西北部,频数在800 d以上的区域占比超过7%,呈现由

西向东逐渐减少的趋势。冷干事件在东北部的发生频率最高,大部分区域的频数超过800 d,而西部的冷干事件频数较少,通常低于500 d。总体来看,珠江流域受到高温干燥气候的影响时间较长。

变化趋势方面,各类复合极端事件在空间上的发展趋势存在显著差异。热湿事件在流域的南部和东南部表现出显著增加趋势,增长速率在2.7 d/10 a左右,约43%的区域超过了平均变化率。热干事件的增加趋势在西部、南部和东北部地区尤为突出,增长速率高达3.2 d/10 a,这些区域占流域总面积的10.2%。相比之下,冷干事件整体上呈现减少趋势,57.7%的区域减少幅度超过了平均变化率,尤其在东北部地区,减少速率达到-2.7 d/10 a。冷湿事件也呈减少趋势,但显著减少的区域仅占流域面积的2.1%,平均减少速率为-2.1 d/10 a。

热湿事件[见图9(a)]和热干事件[见图9(b)]在珠江流域西南部(如广西、贵州)和中部及东南部(如广东、广西交界处)均表现出较高的持续性,最大连续日数超过34 d。冷湿事件[见图9(c)]在西南部(如云南、广西)连续日数超过26 d,显示这些地区在冷湿条件下的较强持续性影响,可能导致农业和基础设施的长期压力。冷干事件[见图9(d)]的连续

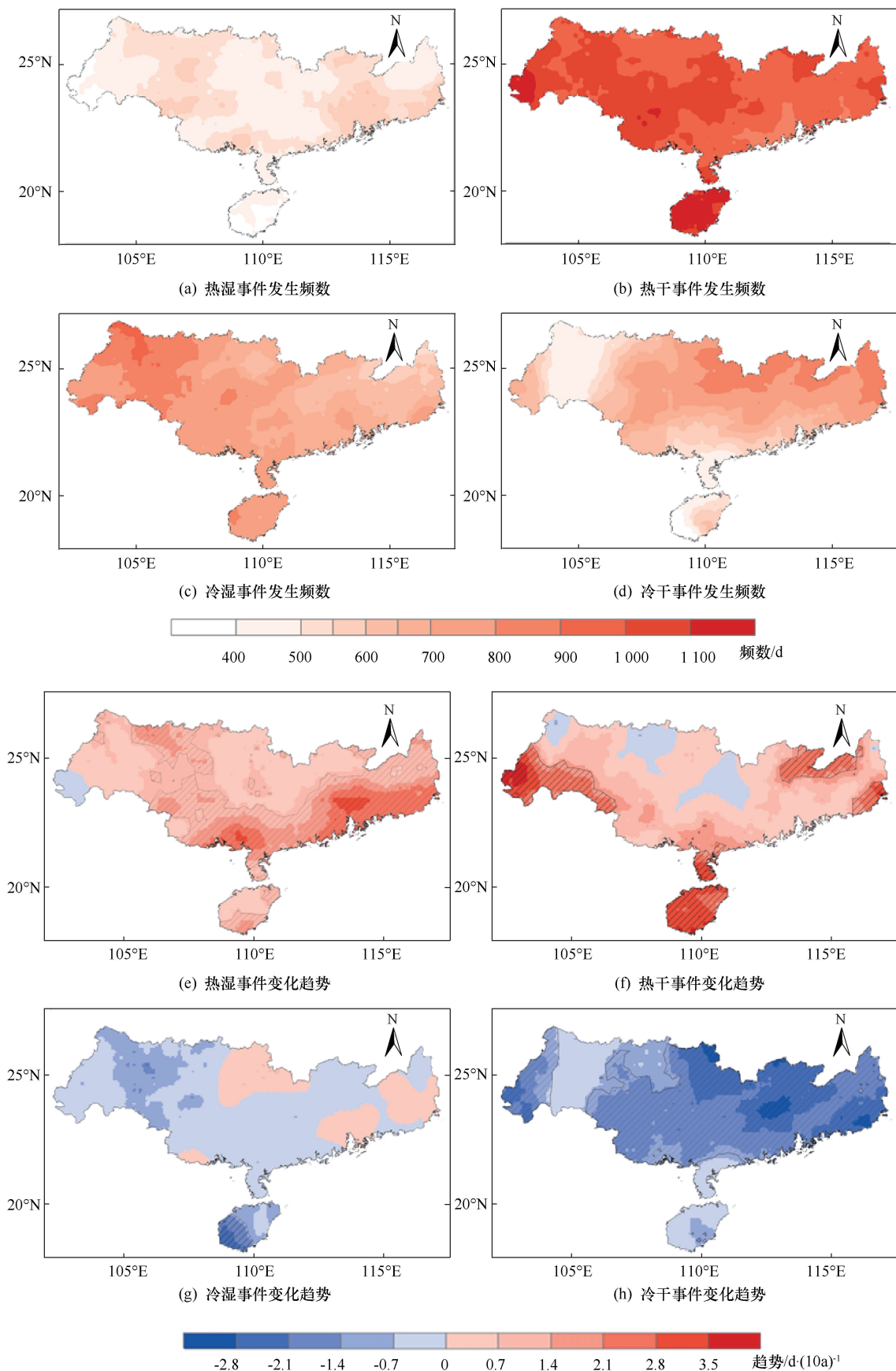


图 8 1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件发生频数及变化趋势

Fig. 8 Frequency and trend changes of hot-wet, hot-dry, cold-wet and cold-dry events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

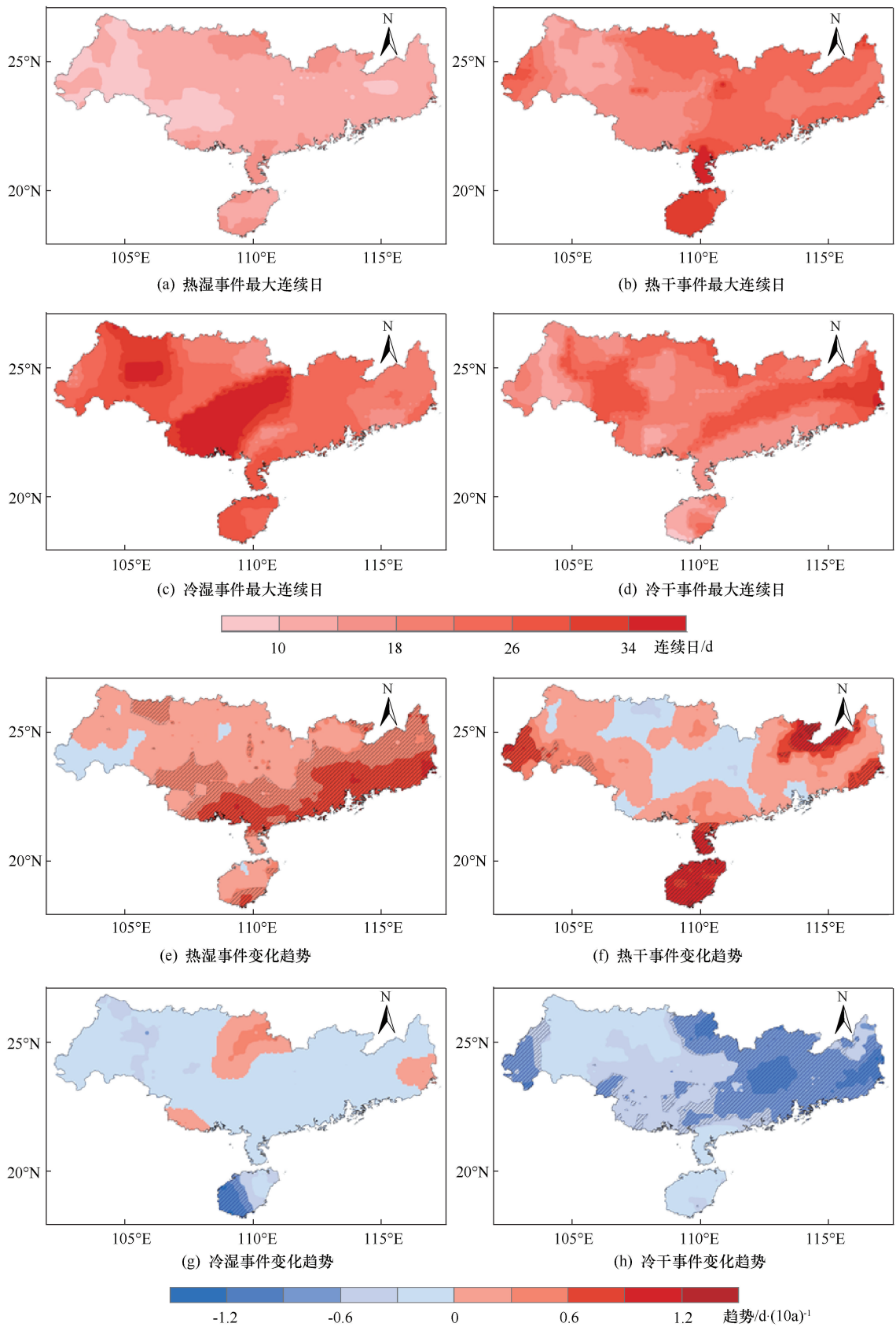


图 9 1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件最大连续日及变化趋势

Fig. 9 Maximum consecutive days and trend changes of hot-wet, hot-dry, cold-wet and cold-dry events in Pearl River Basin from 1961 to 2020

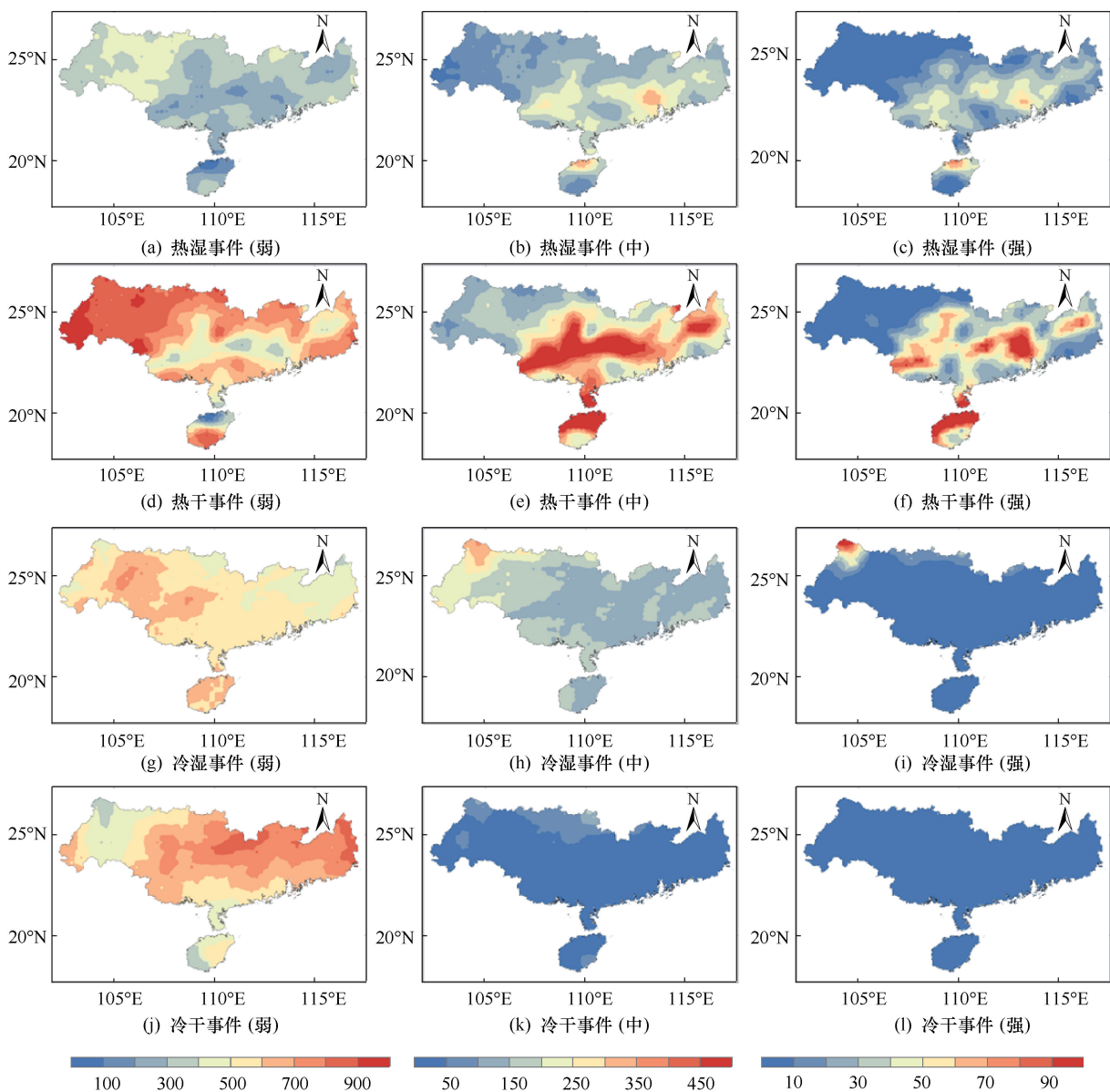


图 10 1961—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件强度等级分布(单位: d)

Fig. 10 Distribution of intensity levels of hot-wet, hot-dry, cold-wet and cold-dry events in Pearl River Basin from 1961 to 2020(Unit: d)

日数相对较短,主要集中在北部和西部,持续时间一般在 10~18 d。

在长期变化趋势方面,最大连续日与频数变化趋势类似[见图 9(e)—(h)]。热湿事件在东南部增长较显著,平均增长速率超过 0.9 d/10 a,约 48% 的区域超过了流域平均增长趋势。热干事件增长最显著的地区分布在西部、南部和东北部,均达到 1.2 d/10 a 以上,约 37% 的区域超过平均增长速率。冷干事件整体呈减少趋势,其中显著减少区域约占流域面积的 40%,平均减少幅度达到 -0.8 d/10 a。冷湿事件大部分地区呈减少趋势,但仅南部部分地区通过了显著性趋势检验,约占流域面积的 3%,平均减少速率

为 -0.9 d/10 a。

不同强度等级下的复合事件在珠江流域内呈现显著的区域性分布特征(见图 10)。三种强度下热湿事件的天数均较少,仅在珠江三角洲部分地区发生相对较多,强度等级由弱到强的天数均值分别为 324 d、150 d 和 19 d。相较之下,热干事件在整个流域表现出较高的发生频率,其中强度等级由弱到强的天数均值分别为 680 d、286 d 和 34 d。弱等级强度下主要集中在珠江流域的西北部,中程度和强程度下集中在流域中部和东南部,表明这些地区在干旱与高温环境下更容易出现极端事件。冷湿事件由弱到强的天数均值分别为 557 d、162 d 和 3d,高频区则主要分布于珠

江流域的西部, 在强等级下云南和贵州的部分地区发生天数超过 90 d, 反映了这些区域在低温与湿润条件下极端事件的多发性。冷干事件在强等级下流域几乎没有发生, 弱程度和中程度天数均值分别为 628 d 和 27 d, 主要集中于珠江流域的北部和东部, 其中东北部部分地区在弱等级下发生天数年均 800 d, 突显了这些区域在低温干旱气候条件下极端事件的高发生频率。

图 11 展示了 1961—2020 年珠江流域各水系区域平均复合极端事件的空间分布特征。从图 11 中可以看出, 不同水系在四类复合极端事件的暴露程度上存在显著差异。热干事件在所有水系中发生频数最高, 尤其是在海南岛及南海各岛诸河, 平均频数高达 1 125 d, 意味着平均每个月发生 2~3 d。其次是红柳江和北江地区, 显示出这些区域在干热气候条件下的高暴露性。热湿事件主要集中在珠江三角洲和东江流域, 平均频数超过 560 d, 可能与这些地区快速的城市化进程和城市热岛效应有关。冷湿事件则主要集中在南北盘江地区, 频数最高达到 830 d, 而海南岛及南海各岛诸河的频数相对较低, 平均小于 500 d。冷干事件的分布相对更均匀, 北江和西江的冷干事件频数较高, 分别为 794 d 和 700 d 以上, 表明这些区域在冷干气候条件下的极端事件发生频率较高。

高程的变化对环境水分、热量以及气温的分布具有显著影响, 是气候系统空间分异的重要驱动因素。珠江流域高程分级及各级平均复合极端事件分布

结果如图 12 所示。流域地形以平原为主(占 35.8%), 主要分布在广西中部、东南部及广东中南部等城市城市化程度较高地区, 热干事件频数较高(达到 1 000 d), 其空间分布可能受地形和城市化程度的共同影响; 丘陵地区(占 26.1%)主要分布在广西西部和流域东北部边缘, 其特殊地形导致冷干事件频发(731 d), 反映出丘陵地区在干旱条件下的脆弱性; 低山地貌(占 18.5%)集中于广西与云南接壤地带, 热湿事件频数较高(超过 500 d), 显示出低海拔山区在湿热气候下的暴露度; 中山地带(占 16.3%)主要分布在云南省中部, 冷湿事件频数随海拔升高显著增加(超过 800 d), 体现了中海拔山区对湿冷气候的敏感性; 高山地区(占 3.2%)则表现出最显著的冷湿事件特征, 凸显高海拔区域独特的气候响应模式。

2.4 复合极端事件年代际变化特征

在过去六十年(1961—2020 年)里, 珠江流域的四类复合极端事件年代际变化(见图 13)表现出显著差异, 反映出气候变化对区域极端事件的深刻影响。年代际变化分析揭示了高温事件和低温事件在 1961—1990 年与 1991—2020 年两个阶段之间的显著变化。1991—2020 年间, 热湿事件和热干事件的发生频数显著增加, 特别是热干事件, 其增长率高达 99%。这些变化在珠江流域的东南部、南部和西部地区尤为突出, 部分地区的热干事件频数增加了 350 d。与此相反, 冷湿事件和冷干事件的发生频数则呈现

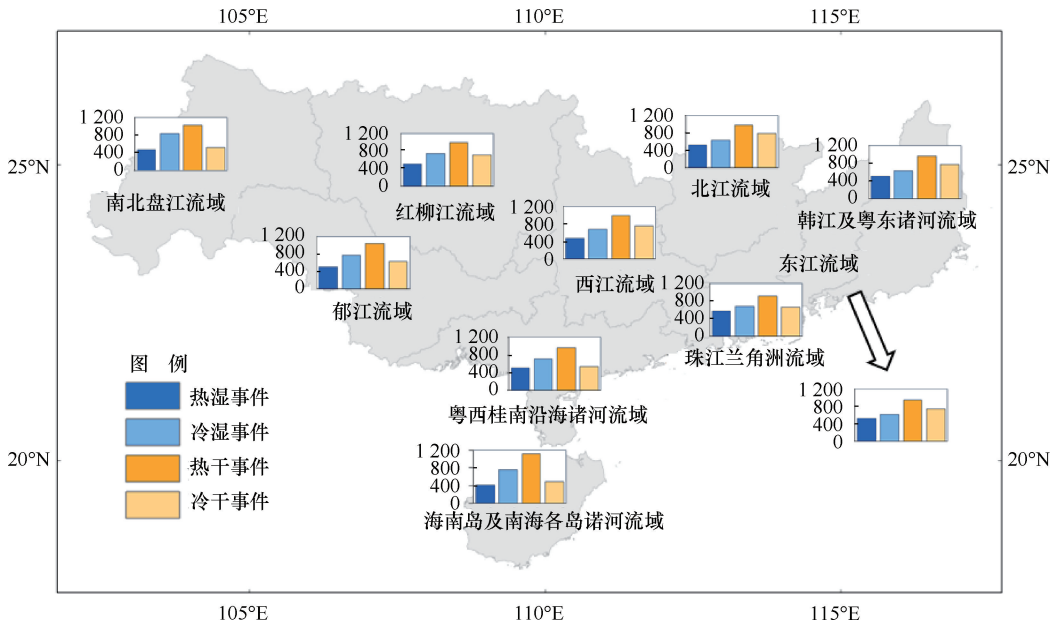


图 11 1961—2020 年珠江流域各子流域复合极端事件的空间分布(单位: d)

Fig. 11 Spatial distribution of compound extreme events in different sub-basins of Pearl River Basin from 1961 to 2020 (Unit: d)

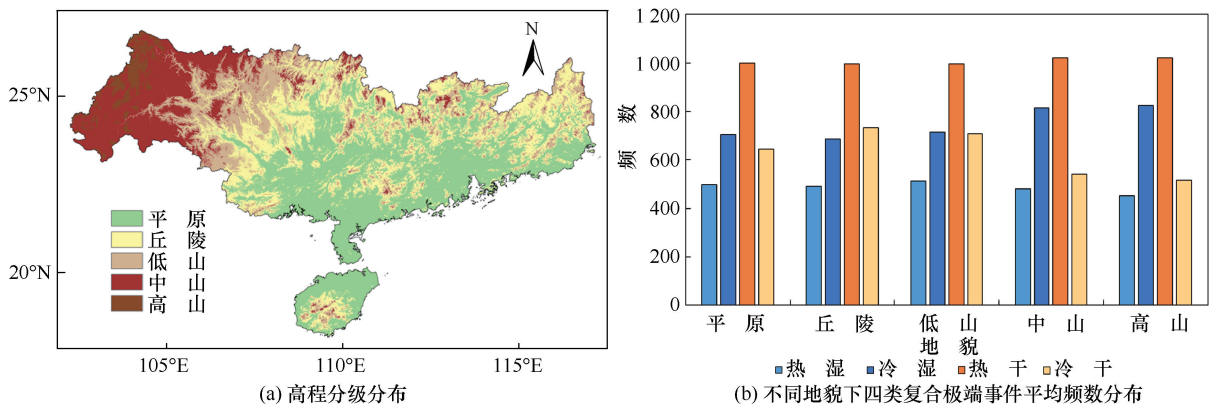


图 12 1961—2020 年珠江流域高程分级分布和不同地貌下四类复合极端事件平均频数分布

Fig. 12 Distribution of elevation classification and average frequency of four types of compound extreme events under different landforms in Pearl River Basin from 1961 to 2020

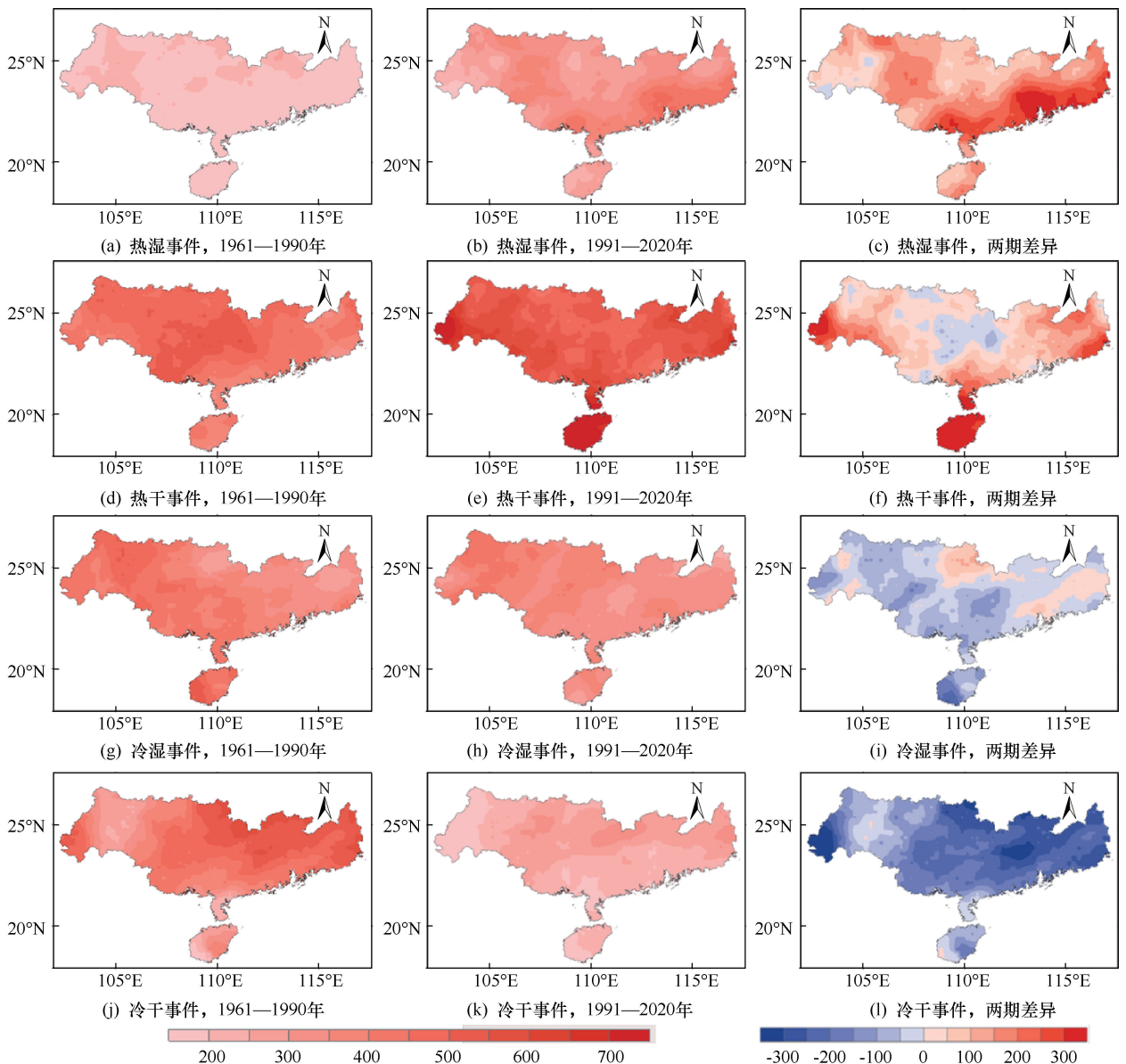


图 13 1961—1990 年与 1991—2020 年珠江流域热湿、热干、冷湿和冷干事件的空间变化特征及两期差异(单位: d)

Fig. 13 Spatial variation characteristics and differences of hot-wet, hot-dry, cold-wet and cold-dry events between two periods (1961—1990 and 1991—2020) in Pearl River Basin (Unit: d)

出减少趋势, 尤其是冷干事件在西部和东北部的减少最为明显, 部分地区减少超过 300 d, 反映出这些地区气候条件的显著转变。

3 结果讨论

珠江流域极端气温和降水复合事件分析结果表明, 热干事件在该流域的发生频率最高, 强度最大, 发生区域最广, 这与肖秀程等^[12]通过相对阈值法计算得出华南地区热干事件频发结果一致。此外, 本文发现 8 月份的热干事件最为严重, 这一结论的可靠性得益于方法体系的优化: 相较于单一使用 *SPI* 指数, 本研究采用的 *SPEI* 指数通过耦合潜在蒸散发 (*PET*) 量化了高温对干旱的放大效应, 同时计算结果表明, 珠江流域大部分地区气温与降水在一定程度上存在显著的负相关关系, 这种关系在前人的研究中亦有所体现^[25, 43], 并为热干事件频发的原因提供了一定解释。

在过去半个多世纪里, 珠江流域总体呈现出极端高温事件增多和低温事件减少的趋势^[44], 这一趋势与本文得出的结论相一致, 即在 21 世纪初, 极端高温事件显著增多, 而低温事件频率则在 20 世纪 90 年代显著增加, 随后在 21 世纪初出现大幅减少。张灵等^[26]和王天等^[45]通过 *SPEI* 和 *SPI* 计算得出的珠江流域干旱化趋势增强的结果, 也在一定程度上反映了热干事件的持续增加, 与本文研究结果相吻合。

相较于单一指数方法, 本文通过结合相对阈值法和 *SPEI* 指数的方法, 避免了引入新的复合指数可能带来的不确定性, 从而增强了研究结果的可靠性, 并且更适用于多类型复合事件研究、不同时空尺度分析, 以及与其他研究的对比验证。通过引入年代际和区域变化分析, 本文揭示了珠江流域整体在时间和空间上复合极端事件分布的不均匀性, 弥补了以往研究在时间尺度和空间分辨率上的不足。

然而, 尽管月时间尺度的 *SPEI* 指数能够较好地识别干旱事件, 复合极端事件对整个流域的影响程度仍然与其发生时间密切相关^[46]。因此, 当前方法可能难以捕捉短时间内发生的复合极端事件, 未来的研究应进一步细化时间尺度, 开展日时间尺度的分析, 以更精确地描述复合极端事件的发生过程和影响机制^[47]。同时, 本文在空间分辨率上仍有改进空间, 未来可结合更高分辨率的观测数据或模型模拟, 特别是在考虑城市用地类型和下垫面特征的变化基础上, 进一步揭示复合极端事件的局地特征及其驱动机制, 为应对气候变化和防灾减灾提供更有力的科学支持。

4 结论

本文基于 1961—2020 年珠江流域的气象观测数据, 采用相对阈值法和标准化降水蒸散指数 (*SPEI*) 揭示了四类复合极端事件的时空演变规律, 主要结论如下。

(1) 珠江流域气温与 *SPEI* 呈显著负相关(夏季相关系数达-0.5), 表明升温加剧干旱风险。这一耦合关系在西部和南部尤为突出, 解释了热干事件高频发生的物理机制。

(2) 热干事件是流域内频数最高(年均超过 1 000 d)、持续性最强(最大连续日超过 34 d)的复合类型, 尤其在平原和丘陵区(占流域 62%), 其强度等级以中-强为主。热湿事件虽频数较低, 但 1990 年后以 1.3 d/10 a 速率显著增加, 且突变特征(1999 年)与全球变暖加速期吻合。

(3) 冷干和冷湿事件频数分别以-1.6 d/10 a 和-0.9 d/10 a 速率减少, 冷干事件在 1988 年发生突变后加速衰退。冷湿事件集中于西北部中山区(超过 800 d), 其减少趋势为-2.1 d/10 a。

(4) 从年代际特征上看, 1991—2020 年较前 30 年, 热干事件频数增长 99%, 热湿事件增长 24%, 而冷干事件减少 41%。空间上, 呈现“西扩南进”特征, 热干事件向西部和南部扩张, 热湿事件在珠江三角洲加剧, 与城市化进程和季风减弱背景下“湿热更湿、干热更干”的分异特征一致。

(5) 在地形与水系上, 低海拔平原区(如珠江三角洲流域)热干和热湿事件频发, 中山区(如南北盘江流域)冷湿事件集中。各水系中, 海南岛诸河流域热干事件暴露度最高(1 125 d), 北江流域冷干事件频数突出(794 d)。

参考文献 (References):

- [1] 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象, 2014, 40(7): 860-874.
REN Fumin, GAO Hui, LIU Liliu, et al. Research progress and application overview of monitoring and prediction of extreme weather and climate events[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(7): 860-874.
- [2] 蒋帅, 张黎, 景元书, 等. 1981—2015 年中国区域极端气候事件的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 295-306.
JIANG Shuai, ZHANG Li, JING Yuanshu, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of extreme climate events in China from 1981 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 295-306.

- [3] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 645-649.
YU Rong, ZHAI Panmao. New insights and implications of compound extreme events[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 645-649.
- [4] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [5] MYHRE G, ALTERSKJÆR K, STJERN C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16063.
- [6] 郝增超, 陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(2): 360-393.
HAO Zengchao, CHEN Yang. Research progress and prospects of multi-sphere compound extreme events from the perspective of earth system science[J]. Science China: Earth Sciences, 2024, 54(2): 360-393.
- [7] HAQIQI I, GROGAN D S, HERTEL T W. Quantifying the impacts of compound extremes on agriculture[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 551-564.
- [8] DAS J, MANIKANTA V, UMAMAHESH N V. Population exposure to compound extreme events in India under different emission and population scenarios[J]. The Science of the total environment, 2021, 806: 150424.
- [9] LIU Z Y, CHENG L Y, HAO Z C, et al. A framework for exploring joint effects of conditional factors on compound floods[J]. Water Resources Research, 2018, 54(4): 2681-2696.
- [10] PENG T T, ZHAO L, ZHANG L, et al. Changes in temperature-precipitation compound extreme events in China during the past 119 years[J]. Earth and Space Science, 2023, 10(8): e2022EA002777.
- [11] WU X, HAO Z C, HAO F, et al. Spatial and temporal variations of compound droughts and hot extremes in China [J]. Atmosphere, 2019, 10(2): 95.
- [12] 秦国帅. 极端水文事件对水安全保障的影响及应对措施[J]. 水利发展研究, 2022, 22(9): 10-13.
QIN Guoshuai. Impact of extreme hydrological events on water security and countermeasures [J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(9): 10-13.
- [13] WU X Y, HAO Z C, HAO F H, et al. Variations of compound precipitation and temperature extremes in China during 1961—2014 [J]. Science of The Total Environment, 2019, 663: 731-737.
- [14] 郑芳, 李芳然, 甘义群, 等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 67-79.
ZHENG F, LI F R, GAN Y Q, et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 67-79.
- [15] YU R, ZHAI P M. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China [J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 30: 100295.
- [16] YANG C, ZHEN L, YAN S, et al. Detectable increases in sequential flood: Heatwave events across China during 1961—2018 [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(6): e2021GL092549.
- [17] LIAO Z, CHEN Y, LI W, et al. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(18): e2021GL094505.
- [18] 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. Spatiotemporal variations of extreme temperature in the Pearl River Basin from 1960 to 2018 [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 40(3): 343-354.
- [19] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9.
WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Spatiotemporal characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9.
- [20] ZHANG H, WU C, HU X B. Recent intensification of short-term concurrent hot and dry extremes over the Pearl River basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(13): 4924-4937.
- [21] QI Z X, SUN L, CAI Y P, et al. Spatial-temporal dynamics of population exposure to compound extreme heat-precipitation events under multiple scenarios for Pearl River Basin, China [J]. Climate Services, 2024, 34: 100477.
- [22] WU X Y, HAO Z C, HAO F H, et al. Variations of compound precipitation and temperature extremes in China during 1961—2014 [J]. Science of The Total Environment, 2019, 663: 731-737.
- [23] WU X Y, HAO Z C, ZHANG X, et al. Evaluation of severity changes of compound dry and hot events in China based on a multivariate multi-index approach [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124580.
- [24] HU Y J, WANG W, WANG P, et al. Spatial-temporal variations and drivers of the compound dry-hot event in China [J]. Atmospheric Research, 2024, 299: 107160.
- [25] 姜雨彤, 侯爱中, 郝增超, 等. 长江流域 2022 年高温干旱事件演变及历史对比 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(8): 1-9.
JIANG Yutong, HOU Aizhong, HAO Zengchao, et al. Evolution and historical comparison of the high temperature and drought event in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8): 1-9.
- [26] 张灵, 吴恩捷, 潘浩桦, 等. 1960—2020 年珠江流域跨季节尺度干旱时空变化 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 77-84.
ZHANG Ling, WU Enjie, PAN Haohua, et al. Temporal and spatial variations of drought across seasons in the Pearl River basin from 1960 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(13): 77-84.
- [27] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111.
WU Jia, GAO Xuejie. A set of gridded daily observational data over China and its comparison with other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.

- [28] 梁曼琳, 刘丙军, 李旦. 珠江流域旱涝急转事件识别指数优选研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 57-64.
LIANG Manlin, LIU Bingjun, LI Dan. Study on optimal selection of identification indices for abrupt change between drought and flood in the Pearl River Basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 57-64.
- [29] 周晶, 孙燕, 齐雅静. 中国春季复合极端低温多雨事件的年代际变化及成因分析[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(1): 1-9.
ZHOU Jing, SUN Yan, QI Yajing. Interdecadal variations and causes of compound extreme cold and rainy events in spring over China[J]. Advances in Climate Change Research, 2024, 20(1): 1-9.
- [30] VINCENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LOPEZ-MORENO J I, et al. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1719.
- [31] EMANUELE B, GIUSEPPE Z, FLAVIO L, et al. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(4): 350-355.
- [32] 褚彦琪, 杨的山, 王星明, 等. 基于 SPEI 指数分析 1980—2019 年漓江流域干旱特征[J]. 节水灌溉, 2024(1): 77-86.
ZHU Yanqi, YANG Deshan, WANG Xingming, et al. Analysis of drought characteristics in the Lijiang River Basin from 1980 to 2019 based on SPEI index[J]. Water Saving Irrigation, 2024(1): 77-86.
- [33] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 46-52.
HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and countermeasures of the compound heatwave and drought event in the Yangtze River Basin during summer 2022 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 46-52.
- [34] 刘珂, 姜大胜. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23-36.
LIU Ke, JIANG Dabang. Analysis of dry and wet changes in China based on SPEI with two potential evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 23-36.
- [35] 方建, 陶凯, 牟莎, 等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 587-601.
FANG Jian, TAO Kai, MU Sha, et al. Research progress on compound extreme events and their risk assessment[J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 587-601.
- [36] RIDDER N N, PITMAN A J, UKKOLA A M. High impact compound events in Australia[J]. Weather and Climate Extremes, 2022, 36: 100457.
- [37] 张书惠, 华维, 陈活泼. 1961—2020 年中国复合湿热的变化特征[J]. 大气科学学报, 2024, 47(2): 300-312.
ZHANG Shuhui, HUA Wei, CHEN Huopo. Characteristics of compound hot and humid events in China from 1961 to 2020[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47(2): 300-312.
- [38] 夏军. 变化环境下长江流域滨海城市供水安全与适应性对策[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 209-214.
XIA J. Water security and adaptive management for coastal cities of Yangtze River basin under changing environment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 209-214.
- [39] HAMED H K. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [40] ZHAO Y F, ZOU X Q, CAO L G, et al. Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960—2012[J]. Quaternary International, 2014, 333: 26-39.
- [41] HU C X, FUNG K Y, TAM C Y, et al. Urbanization impacts on pearl river delta extreme rainfall sensitivity to land cover change versus anthropogenic heat [J]. Earth and Space Science, 2021, 8(3): e2020EA001536.
- [42] SHI C, JIANG H Z, CHEN L W, et al. Changes in temperature extremes over China under 1.5 °C and 2 °C global warming targets [J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(2): 120-129.
- [43] ADLER F R, GU G, WANG J, et al. Relationships between global precipitation and surface temperature on interannual and longer timescales (1979—2006) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D22.
- [44] 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. A regional study on the spatiotemporal variations of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River Basin under the background of global warming [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 956-967.
- [45] 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. Spatiotemporal variations of future drought in the Pearl River Basin based on CMIP6 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 81-90.
- [46] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(2): 13-20.
TANG Qiuhong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 13-20.
- [47] TAN X Z, WU X X, HUANG Z Q, et al. Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2796.

(责任编辑 王海锋)