

孙雪, 涂玉凤, 孙劭, 等. 闽江流域复合极端气候事件的识别与时空格局特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.001

SUN Xue, TU Yufeng, SUN Shao, et al. Identification and spatiotemporal characteristics of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.001

# 闽江流域复合极端气候事件的识别 与时空格局特征

孙雪<sup>1</sup>, 涂玉凤<sup>1</sup>, 孙劭<sup>2</sup>, 周翔<sup>3</sup>, 姜立智<sup>4</sup>, 郝晓博<sup>5</sup>, 江彩英<sup>6,7</sup>, 高路<sup>1,8</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3. 福建省减灾中心, 福建福州 350001; 4. 福建省灾害天气重点实验室, 福建福州 350001; 5. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建福州 350001; 6. 南平市气象局, 福建南平 353000; 7. 武夷山国家气候观象台, 福建武夷山 354300; 8. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建福州 350007)

**摘要:**【目的】随着全球变暖, 复合极端气候事件对人类发展和生态环境等所造成的负面影响比单一极端气候事件更显著。【方法】基于闽江流域29个气象站点1980—2021年日平均气温和降水数据, 采用百分位法(第90和10个百分位)识别复合极端气候事件, 探讨闽江流域四类复合极端气候事件(暖干、暖湿、冷干和冷湿)的频数、趋势和强度的时空变化特征。【结果】结果表明:(1)闽江流域的复合极端事件以暖干为主, 年均频次最高, 达到76.15 d; 冷干事件次之, 年均频次为53.32 d。季节尺度上, 暖干事件频次最高, 均超过15 d; 冷干事件在秋季和冬季最高, 均超过15 d。暖湿和冷湿事件频次较低。(2)从空间上看, 暖湿事件和暖干事件的频发区均位于建溪流域南部、富屯溪和沙溪流域东部, 以及闽江中下游流域东部和北部; 冷湿事件和冷干事件主要发生于建溪流域北部、富屯溪和沙溪流域西部, 以及闽江中下游流域西南部。(3)暖干事件呈显著上升趋势, 冷干事件呈显著下降趋势。就子流域而言, 沙溪流域的暖干事件增强趋势最大, 达到13.58 d/10 a; 富屯溪流域的冷干事件减小趋势最显著(-7.49 d/10 a)。(4)从强度上看, 暖湿事件虽然频次较低, 但强度较强, 以强等级和中等等级为主, 且中等等级的天数多于强等级。暖干事件以强等级和中等等级为主, 且强等级的天数多于中等等级。【结论】总体上看, 闽江流域的复合极端事件以暖干为主, 强度大且呈增多趋势。冷干事件主要发生在秋冬两季, 趋势逐步减小。极端降水影响下, 暖湿事件的强度较强, 但频次较低。

**关键词:** 极端气候; 复合事件; 频率; 趋势; 强度; 闽江流域; 气候变化; 降水

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.001

中图分类号: P466

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)03-0001-14



与作者互动  
听语音 聊科研

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-10; 录用日期: 2024-07-11; 网络出版日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目“东南沿海山地丘陵区暖季暴雨时空异质性及其致洪效应”(42271030); 福建省科技厅杰青项目“全球升温1.5℃~3℃情景下福建复合极端气候事件的致灾风险预估”(2022J06018); 福建省“雏鹰计划”青年拔尖人才计划

作者简介: 孙雪(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事复合极端气候事件研究。E-mail: xuer\_s16@163.com

通信作者: 高路(1983—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水文气象与灾害风险等研究。E-mail: l.gao@foxmail.com

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

# Identification and spatiotemporal characteristics of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin

SUN Xue<sup>1</sup>, TU Yufeng<sup>1</sup>, SUN Shao<sup>2</sup>, ZHOU Xiang<sup>3</sup>, JIANG Lizhi<sup>4</sup>, HAO Xiaobo<sup>5</sup>,  
JIANG Caiying<sup>6,7</sup>, GAO Lu<sup>1,8</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Fujian Provincial Disaster Reduction Center, Fuzhou 350001, Fujian, China; 4. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Fujian Province, Fuzhou 350001, Fujian, China; 5. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China; 6. Nanping Meteorological Bureau, Nanping 353000, Fujian, China; 7. Wuyi Mountain National Climate Observatory, Wuyishan 354300, Fujian, China; 8. Fujian Provincial Engineering Research Center for Land Disaster Monitoring and Assessment, Fuzhou 350007, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] With global warming, compound extreme climate events pose more significant adverse impacts on human development and ecological environments than single extreme climate events. [Methods] Based on daily average temperature and precipitation data from 29 meteorological stations in the Minjiang River Basin from 1980 to 2021, the percentile method (90th and 10th percentiles) was used to identify compound extreme climate events. The frequency, trend, and intensity of four types of compound extreme climate events (Warm-Dry, Warm-Wet, Cold-Dry, and Cold-Wet) in the Minjiang River Basin were analyzed. [Results] The result indicate that: 1) Warm-Dry events dominate the compound extreme events in the Minjiang River Basin, with the highest annual average frequency of 76.15 days. Cold-Dry events follow, with an annual average frequency of 53.32 days. On a seasonal scale, Warm-Dry events have the highest frequency, each exceeding 15 days. Cold-Dry events are most frequent in autumn and winter, each also exceeding 15 days. The frequencies of Warm-Wet and Cold-Wet events are relatively low. 2) Spatially, high-frequency areas of Warm-Wet and Warm-Dry events are located in the southern Jianxi Basin, eastern Futunxi and Shaxi Basins, and the eastern and northern middle-lower reaches of the Minjiang River Basin. Cold-Wet and Cold-Dry events mainly occur in the northern Jianxi Basin, western Futunxi and Shaxi Basins, and the southwestern middle-lower reaches of the Minjiang River Basin. 3) Warm-Dry events show a significant increasing trend, while Cold-Dry events exhibit a significant decreasing trend. Among sub-basins, the Shaxi Basin shows the most significant increasing trend for Warm-Dry events, at 13.58 days per decade, while the Futunxi Basin shows the most significant decreasing trend for Cold-Dry events, at -7.49 days per decade. 4) In terms of intensity, although Warm-Wet events have a lower frequency, they exhibit higher intensity, predominantly at strong and moderate levels, with more moderate-level days than strong-level days. Warm-Dry events also predominantly occur at strong and moderate levels, with more strong-level days than moderate-level days. [Conclusion] Overall, Warm-Dry events are the most prevalent in the Minjiang River Basin, with high intensity and an increasing trend. Cold-Dry events mainly occur in autumn and winter, with a decreasing trend. Under extreme precipitation impacts, Warm-Wet events exhibit high intensity but low frequency.

**Keywords:** extreme climate; compound events; frequency; trend; intensity; Minjiang River Basin; climate change; precipitation

## 0 引言

近年来,全球气候呈现出以变暖为主要特征的显著变化<sup>[1]</sup>。2023年3月,IPCC发布的《气候变化2023》报告表明,与1850—1900年相比,2011—2020年全球的地表温度上升了1.1℃<sup>[2]</sup>。随着全球变暖的持续加剧,这种导致社会或环境风险的多种气候驱动因素和/或危害的组合通常被称为“复合事件”<sup>[3]</sup>。一般来说,复合极端气候事件对人类健康、作物产量、生态系统和基础设施所造成的风险比单个极端气候事件更大、更强<sup>[4-7]</sup>。例如,2003年欧洲热浪和

2010年俄罗斯热浪是典型高温、干旱、野火和空气污染等多种灾害并发,造成了巨大的经济损失<sup>[8-9]</sup>。多要素、多过程关联关系的复杂性给复合极端事件的研究带来诸多挑战,这不仅成为当前气象水文和灾害风险科学领域亟待解决的重要科学问题<sup>[10]</sup>,而且是减轻全球气候变化负面影响的客观需要<sup>[11-12]</sup>。

国内外越来越多的研究聚焦于复合极端气候事件。根据不同事件因子之间的关系,ZSCHEISCHLER等<sup>[13]</sup>将复合极端事件分为先决条件事件、多变量复合事件、时间复合事件和空间复合事件4种类型。其中,先决条件事件注重的是产生和放大致灾因子影响

的前期气象气候条件;多变量复合事件是指多个致灾因子同时发生在同一个地区发生并导致极端影响的现象;时间复合事件是指受同一气象因子驱动或随机产生的,同一地区多个致灾因子相继发生造成极端影响的现象;空间复合事件是指在一定时间范围内,空间上多个不同位置遭受相同或不同致灾因子的破坏,扩大灾害影响的现象。为进一步聚焦致灾因子发生的时空关系,方建等<sup>[14]</sup>从时间和空间两个维度对复合事件划分了四种类型,分别是时空同步型、同地-继发型、异地-同发型、异地-继发型。

在多变量复合事件中,学者们基于温度和降水数据开展了温湿组合极端事件,包括暖湿、暖干、冷湿和冷干4类事件的研究<sup>[15-20]</sup>。例如,DE MICHELE等<sup>[15]</sup>基于观测站点对欧洲和北美降水构建了干湿二值化的降水网络,进一步分析其空间关联性。BENISTON<sup>[16]</sup>探究了同时发生在欧洲的极端降水和温度事件,并表明冷事件的频率显著减少,而暖事件则急剧增加。同样,HAO等<sup>[17]</sup>也使用相同的组合在全球范围内探究其变化规律。WU等<sup>[18]</sup>发现相对于1961—1987年,1988—2014年暖干和暖湿事件的空间范围也显著增加,而冷干和冷湿事件影响的区域在中国呈现减少趋势。此外,COUASNON等<sup>[19]</sup>对美国休斯顿海湾地区洪潮复合洪水构建了贝叶斯网络模型以用于模拟研究。RIDDER等<sup>[20]</sup>探讨了全球27种复合事件的主要驱动因素,表明主要是因天气系统不同而造成了各类型复合事件分布的区域和季节差异。由此可见,全球变暖可以从根本上改变气候变量的固有变率,导致极端气候事件的频率、强度和空间范围等大幅增加<sup>[1,21]</sup>,并在区域和全球尺度上威胁着人类健康、经济稳定和自然物理环境安全<sup>[22-24]</sup>。HAQIQI等<sup>[25]</sup>研究表明,当高温与高湿相胁迫时,美国玉米的平均产量损失要比原来的严重四倍,且暖湿比暖干事件对玉米造成的损害更大。DAS等<sup>[26]</sup>预测印度在SSP3-7.0情景下,未来的热浪和干旱复合极端事件会严重威胁人们的生命和健康。LIU等<sup>[27]</sup>认为,尽管降水和径流这两个变量本身可能并不极端,但当它们结合在一起时,大量超标的降水和径流就会导致洪水泛滥,例如美国德克萨斯州的复合洪水,其潜在条件(如厄尔尼诺和/或气温升高)的存在会加剧相关的洪水影响。因此,如何科学认识复合极端气候事件的发生演变规律和影响因素,对于有效应对和管理这类事件、保障社会经济稳定与可持续发展具有重要意义<sup>[21]</sup>。

福建省河流众多,水系发达,闽江流域是福建人

口主要聚居地和经济活动区之一。东亚地区独特的季风气候,造成福建江河流域降水量时空分布不均。闽江中上游多为山地丘陵,由于坡陡流急来势凶猛,因而下游极易形成峰高量大的洪涝灾害<sup>[28]</sup>。在全球气候变暖的背景下,极端气候事件发生的概率呈增大趋势,严重威胁着流域内人民生命财产安全和区域经济发展。因此,有必要采取相应措施以减轻灾害损失,这有利于经济稳定增长和人民安居乐业。当前对闽江流域的研究主要集中于流域水文要素变化<sup>[29-30]</sup>、流域生态系统服务<sup>[31-33]</sup>以及流域水文模型<sup>[34-35]</sup>等方面,而对流域复合极端气候事件的研究较少。为此,本文探究1980—2021年闽江流域气温-降水复合极端气候事件的时空分异特征,对闽江流域的水资源管理与灾害风险防范具有重要的科学意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

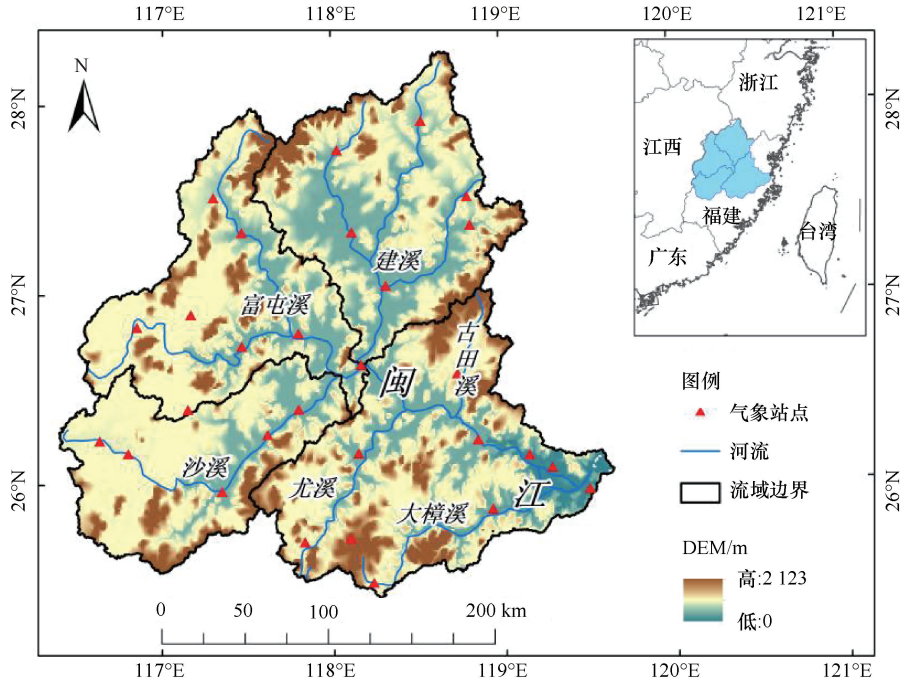
闽江(116°23'E—119°43'E、25°23'N—28°19'N)位于中国东南部,是福建省最大的河流。它发源于福建省和江西省交界的建宁县均口镇,穿过沿海山脉后向东流入东海。全长541 km,流域面积60 992 km<sup>2</sup>,约占福建全省陆域面积一半。闽江流域属亚热带季风气候,气候温暖湿润,年均气温18℃左右,年降水量约为1 700 mm,自然灾害则以暴雨洪涝和台风灾害为主。闽江流域西北部为武夷山,中部和北部为鹫峰山脉,南部为戴云山,东部为低山丘陵和平原,整体地势西北高东南低(见图1)。

### 1.2 研究数据与方法

国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn>)提供了1980—2021年闽江流域内资料完整性较好的29个国家基本气象站的日平均气温和日降水量等观测资料。为确保各站点数据的可信、可靠,本文对资料进行了均一性检查和质量控制,采用10 d滑动平均法填充缺失测数据<sup>[36-37]</sup>。为进一步分析闽江流域复合极端气候事件的时空异质性,将闽江流域划分成4个主要子流域,分别为富屯溪流域、建溪流域、沙溪流域和中下游流域等。利用一元线性回归对闽江流域及其各子流域的变化趋势进行线性估计,采用M-K趋势检验法对闽江流域内各站点复合极端气候事件在95%置信区间下进行显著性检验。

### 1.3 复合极端气候事件的定义

本研究运用累积概率分布函数(Cumulative Density Function)计算闽江流域29个观测站点1980—2021年的逐月平均气温和降水资料的第90和10个百分



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图无修改

图1 闽江流域概况

Fig. 1 Overview of the Minjiang River Basin

位<sup>[17-18]</sup>, 并将其作为气温(降水)的高、低阈值, 若某站某日平均气温(降水)大于等于该月高阈值或某日平均气温(降水)小于等于该月低阈值即为一次极端事件。本文分析的是同时发生极端气温和极端降水的复合极端气候事件, 选取的阈值不同于以往研究<sup>[38]</sup>中对单个站点逐月取阈值, 而是对所有站点取一个总阈值。复合极端气候事件的定义具体如表1

所列。

#### 1.4 复合极端气候事件的强度等级划分

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, 由强到弱依次为强等级、中等级和弱等级。具体划分依据为: 对于某站某日平均气温( $T$ )来说, 在同月10%阈值(记作:  $A_{10\%}$ )和最小值(记作:  $A_{\min}$ )之间取一个平均值(记作:  $A_{\text{avg1}}$ ),

表1 复合极端气候事件定义

Table 1 Definition of compound extreme climate events

类型	名称	定义	单位
暖湿事件	Warm-Wet (WW)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\geq$ 当月 90% 阈值的日数	d
暖干事件	Warm-Dry (WD)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的日数	d
冷湿事件	Cold-Wet (CW)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\geq$ 当月 90% 阈值的日数	d
冷干事件	Cold-Dry (CD)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的日数	d
持续暖湿事件	Consecutive Warm-Wet days (CWWD)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\geq$ 当月 90% 阈值的最长连续日数	d
持续暖干事件	Consecutive Warm-Dry days (CWDD)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的 longest 连续日数	d
持续冷湿事件	Consecutive Cold-Wet days (CCWD)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\geq$ 当年 90% 阈值的 longest 连续日数	d
持续冷干事件	Consecutive Cold-Dry days (CCDD)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的 longest 连续日数	d
持续 $\geq 3$ d 的暖湿事件	3 Consecutive Warm-Wet days (3CWWD)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\geq$ 当月 90% 阈值的持续 3d 以上的次数	t
持续 $\geq 3$ d 的暖干事件	3 Consecutive Warm-Dry days (3CWDD)	日平均气温 $\geq$ 当月 90% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的持续 3d 以上的次数	t
持续 $\geq 3$ d 的冷湿事件	3 Consecutive Cold-Wet days (3CCWD)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\geq$ 当月 90% 阈值的持续 3d 以上的次数	t
持续 $\geq 3$ d 的冷干事件	3 Consecutive Cold-Dry days (3CCDD)	日平均气温 $\leq$ 当月 10% 阈值且日降水量 $\leq$ 当月 10% 阈值的持续 3d 以上的次数	t

表 2 4 类复合极端气候事件的强度等级划分

Table 2 Classification of intensity levels for four types of compound extreme climate events

类 型	强等级	中等级	弱等级
WW	$A_{avg2} \leq T \leq A_{max} \ \& \ B_{avg2} \leq P \leq B_{max}$	$A_{avg2} \leq T \leq A_{max} \ \& \ B_{90\%} \leq P < B_{avg2}$ $A_{90\%} \leq T < A_{avg2} \ \& \ B_{avg2} \leq P \leq B_{max}$	$A_{90\%} \leq T < A_{avg2} \ \& \ B_{90\%} \leq P < B_{avg2}$
WD	$A_{avg2} \leq T \leq A_{max} \ \& \ B_{min} \leq P \leq B_{avg1}$	$A_{avg2} \leq T \leq A_{max} \ \& \ B_{avg1} < P \leq B_{10\%}$ $A_{90\%} \leq T < A_{avg2} \ \& \ B_{min} \leq P \leq B_{avg1}$	$A_{90\%} \leq T < A_{avg2} \ \& \ B_{avg1} < P \leq B_{10\%}$
CW	$A_{min} \leq T \leq A_{avg1} \ \& \ B_{avg2} \leq P \leq B_{max}$	$A_{min} \leq T \leq A_{avg1} \ \& \ B_{90\%} \leq P < B_{avg2}$ $A_{avg1} < T \leq A_{10\%} \ \& \ B_{avg2} \leq P \leq B_{max}$	$A_{avg1} < T \leq A_{10\%} \ \& \ B_{90\%} \leq P < B_{avg2}$
CD	$A_{min} \leq T \leq A_{avg1} \ \& \ B_{min} \leq P \leq B_{avg1}$	$A_{min} \leq T \leq A_{avg1} \ \& \ B_{avg1} < P \leq B_{10\%}$ $A_{avg1} < T \leq A_{10\%} \ \& \ B_{min} \leq P \leq B_{avg1}$	$A_{avg1} < T \leq A_{10\%} \ \& \ B_{avg1} < P \leq B_{10\%}$

并在 90% 阈值(记作:  $A_{90\%}$ )和最大值(记作:  $A_{max}$ )之间取一个平均值(记作:  $A_{avg2}$ ); 对于某站某日降水量( $P$ )来说, 在同月 10% 阈值(记作:  $B_{10\%}$ )和最小值(记作:  $B_{min}$ )之间取一个平均值(记作:  $B_{avg1}$ ), 并在 90% 阈值(记作:  $B_{90\%}$ )和最大值(记作:  $B_{max}$ )之间取一个平均值(记作:  $B_{avg2}$ )。复合极端气候事件的强度等级如表 2 所列。

## 2 结果分析

### 2.1 复合极端气候事件的频数

#### 2.1.1 年际变化

图 2 和表 3 给出了 1980—2021 年均闽江流域复合极端气候事件的频数分布。结果表明, 暖干事件(WD)的年均频次最高, 达到 76.15 d; 冷干事件(CD)次之, 年均频次为 53.32 d; 暖湿事件(WW)最低(9.19 d)。从空间上看, 暖湿事件和暖干事件的频发区均位于建溪流域南部、富屯溪和沙溪流域东部, 以及闽江中下游流域东部和北部。其中暖湿事件的高值区主要位于沙溪流域, 均值为 10.91 d。暖干事件的高值区则大致位于闽江中下游流域, 为 87.53 d。冷湿事件和冷干事件主要发生于建溪流域北部、富屯溪和沙溪流域西部, 以及闽江中下游流域西南部。

冷湿事件和冷干事件的高值区均位于富屯溪流域, 均值分别为 24.91 d 和 59.69 d。持续暖湿事件(CWWD)、持续暖干事件(CWDD)、持续  $\geq 3$  d 的暖湿事件(3CWWD)、持续  $\geq 3$  d 的暖干事件(3CWDD)与暖湿事件、暖干事件的分布范围大致一样, 且持续冷湿事件(CCWD)、持续冷干事件(CCDD)、持续  $\geq 3$  d 的冷湿事件(3CCWD)、持续  $\geq 3$  d 的冷干事件(3CCDD)与冷湿事件、冷干事件的分布范围基本相同。持续暖湿事件和持续  $\geq 3$  d 的暖湿事件在沙溪流域的发生频次最高, 均值分别为 2.22 d 和 0.37 次; 持续暖干事件和持续  $\geq 3$  d 的暖干事件集中发生于

表 3 闽江及其各子流域复合极端气候事件年均频数变化

Table 3 Annual average frequency changes of compound extreme climate events in the Minjiang River basin and its sub-basins

类 型	闽江全流域	建溪流域	富屯溪流域	沙溪流域	中下游流域
WW/d	9.19	8.37	8.46	10.91	9.41
WD/d	76.15	66.95	63.94	83.94	87.53
CW/d	21.81	23.06	24.91	20.06	19.46
CD/d	53.32	57.20	59.69	44.87	50.11
CWWD/d	1.96	1.91	1.93	2.22	1.88
CWDD/d	9.01	8.50	8.05	9.53	9.82
CCWD/d	3.21	3.46	3.55	2.99	2.91
CCDD/d	7.62	8.20	8.62	7.11	6.71
3WW/次	0.27	0.21	0.26	0.37	0.25
3WD/次	10.06	8.61	8.27	11.35	11.72
3CW/次	1.34	1.35	1.59	1.19	1.21
3CD/次	6.65	7.29	7.60	5.47	6.08

闽江中下游流域, 最大均值分别为 9.82 d 和 11.72 次; 持续冷湿事件、持续冷干事件、持续  $\geq 3$  d 的冷湿事件(3CCWD)、持续  $\geq 3$  d 的冷干事件(3CCDD)多发生于富屯溪流域, 均值分别为 3.55 d、8.62 d、1.59 次和 7.60 次。总体上, 闽江流域的复合极端事件以暖干为主, 且暖湿事件、暖干事件与冷湿事件、冷干事件呈现出相反的空间分布格局。

#### 2.1.2 季节变化

由图 3 和图 4 可以得出, 暖湿、暖干、冷湿和冷干事件在四季中均有发生。在春季以暖干事件发生天数最多, 冷干事件次之, 暖湿事件最少。其中, 三类事件依次发生在闽江流域内的均值分别为 20.46 d、14.46 d 和 3.96 d。空间上看, 暖干事件频发于建溪流域南部、富屯溪和沙溪流域东部, 以及闽江中下游流域北部和东部, 其中以沙溪流域最为明显, 平均频次达 25.03 d。冷干事件以闽江中下游流域南部较为明显, 平均频次为 16.33 d。而暖湿和冷湿事件在闽江流域内的时空异质性不大, 暖湿事件的平均频次

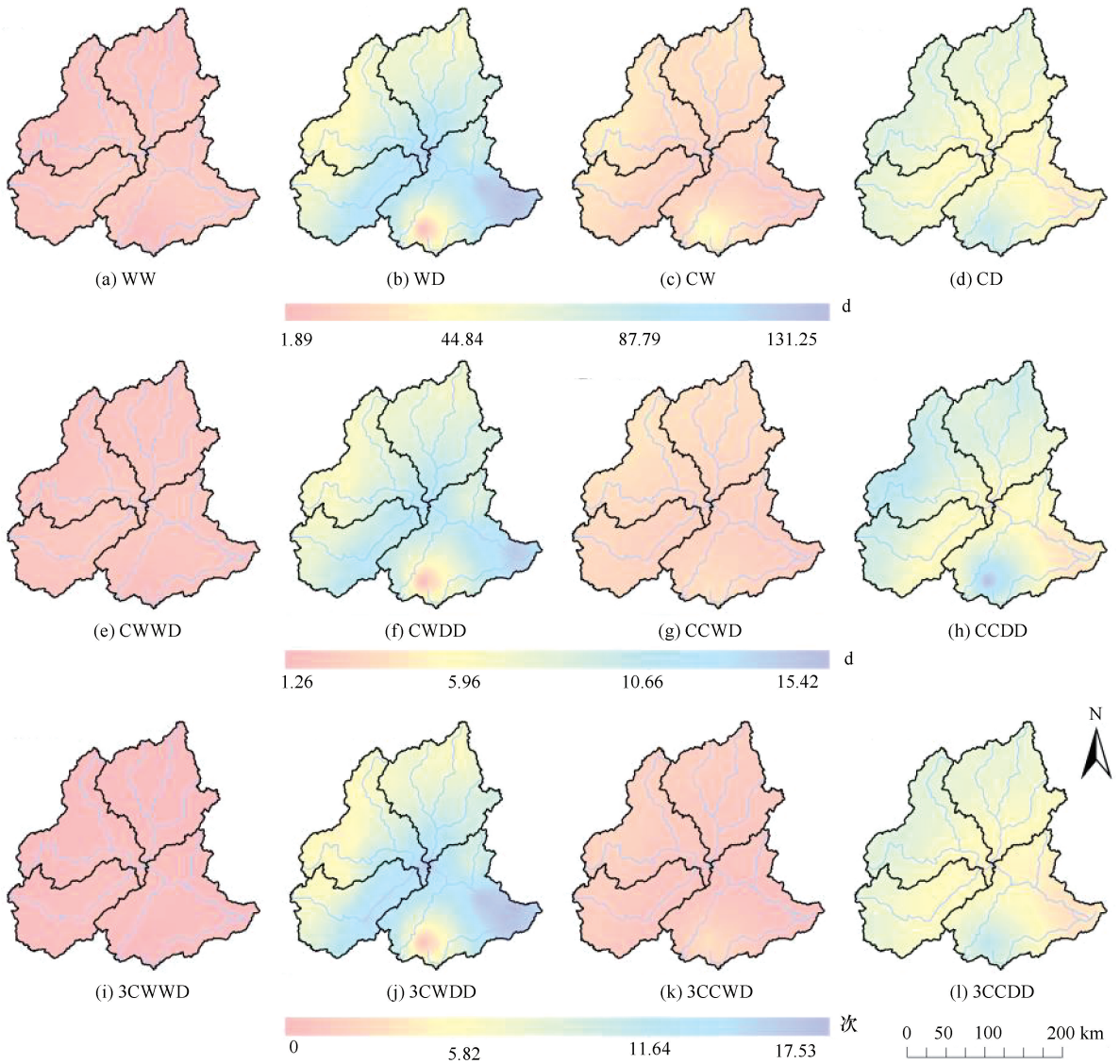


图2 1980—2021 年均闽江流域复合极端气候事件的频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin from 1980 to 2021

在子流域间的差值不超过 3 d, 冷湿事件则不超过 2 d。

暖干事件在夏季发生天数最多, 冷湿事件次之, 暖湿事件最少, 平均频次依次为 21.62 d、8.33 d 和 0.58 d。其中, 暖干事件在闽江中下游流域东部有显著分布, 平均频次为 23.52 d; 冷干事件在闽江流域内的平均频次不超过 15 d, 仅在闽江中下游流域西南部有少量分布; 冷湿事件在富屯溪流域的平均频次最为明显, 值为 8.98 d; 而暖湿事件在闽江流域内则无明显空间差异性, 子流域间平均频次的差值不超过 1 d。

秋季以暖干事件发生天数最为明显, 冷干事件次之, 暖湿事件最少, 平均频次分别为 17.48 d、15.64 d 和 1.88 d。空间上看, 暖干事件以闽江中下游流域东部发生天数较多, 年均频次为 20.75 d; 冷干事件除在闽江中下游流域东部频次较低外, 在其他地区均较为明显; 而暖湿和冷湿事件则无明显空间差

异性, 子流域间年均频次的差值均不超过 1 d。

冬季主要发生暖干和冷干事件, 较少发生暖湿和冷湿事件, 平均频次依次为 16.58 d、15.01 d、2.76 d 和 3.50 d。空间上看, 暖干事件多在闽江中下游流域发生, 平均频次达 22.58 d; 冷干事件的平均频次以建溪流域最为明显, 值为 19.65 d; 而暖湿事件和冷湿事件的空间差异性较小, 两者平均频次在子流域间的差值分别不超过 1 d 和 4d。因此, 季节尺度上, 暖干事件在闽江流域内的平均频次最高, 均超过 15 d; 冷干事件在秋季和冬季最高, 均超过 15 d; 而暖湿和冷湿事件频次则较低。

## 2.2 复合极端气候事件的趋势分析

### 2.2.1 变化趋势空间格局

图 5 给出了 1980—2021 年 8 类复合极端气候事件频数的趋势分布, 整体上看, 闽江流域的暖干事件

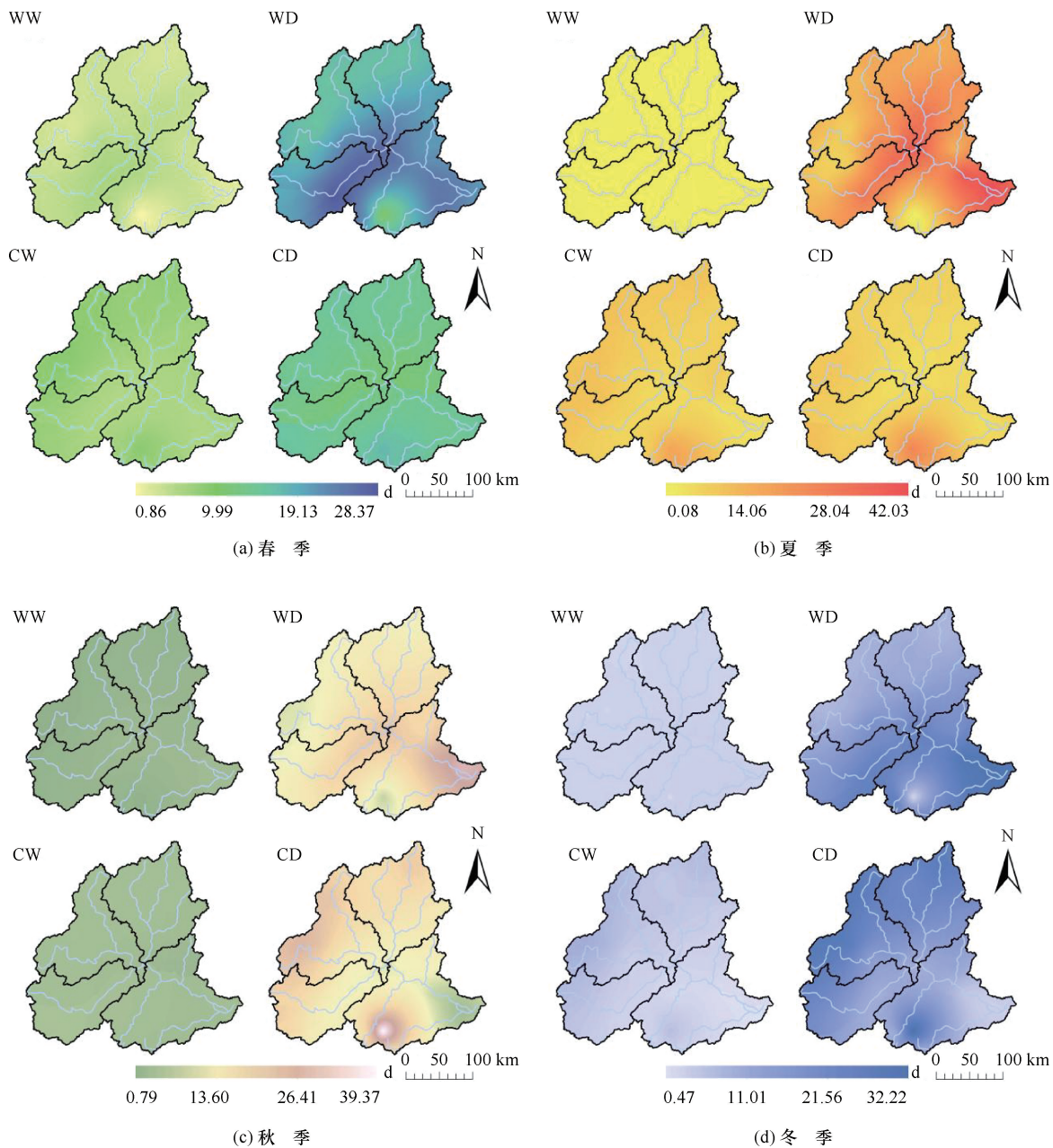


图3 1980—2021年闽江流域4类复合极端气候事件的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of four types of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin from 1980 to 2021

呈显著上升趋势,冷干事件呈显著下降趋势,持续冷湿事件呈不显著趋势,且各类事件区域间的变化速率存在一定差异。

就暖湿事件而言,有12个(41.38%)站点呈显著上升趋势,有17个(58.62%)站点呈不显著趋势,趋势率为0.39~2.36 d/10 a,显著上升趋势主要分布在闽江中下游流域东部和建溪流域,其他区域则为不显著趋势,且不显著趋势的空间范围明显大于显著上升趋势。

暖干事件在研究区内所有站点均呈显著上升趋势,趋势率为8.25~17.05 d/10 a,其中沙溪和闽江

中下游流域东部的上升趋势较大,而建溪、富屯溪和闽江中下游流域西南部的上升趋势较小。

冷湿事件呈较弱的下降趋势,趋势率为-3.02~-1.17 d/10 a,有21个(72.41%)站点呈显著下降趋势,有8个(27.59%)站点呈不显著趋势,其中显著下降趋势的空间范围多于不显著趋势,且以富屯溪流域的下降趋势为主。冷干事件整体上呈下降趋势,趋势率为-9.19~-5.36 d/10 a,下降趋势大致从东南向西北递增。

持续暖湿事件呈较弱的增长趋势,趋势率为0~0.17 d/10 a,有27个(93.1%)站点为不显著趋势,

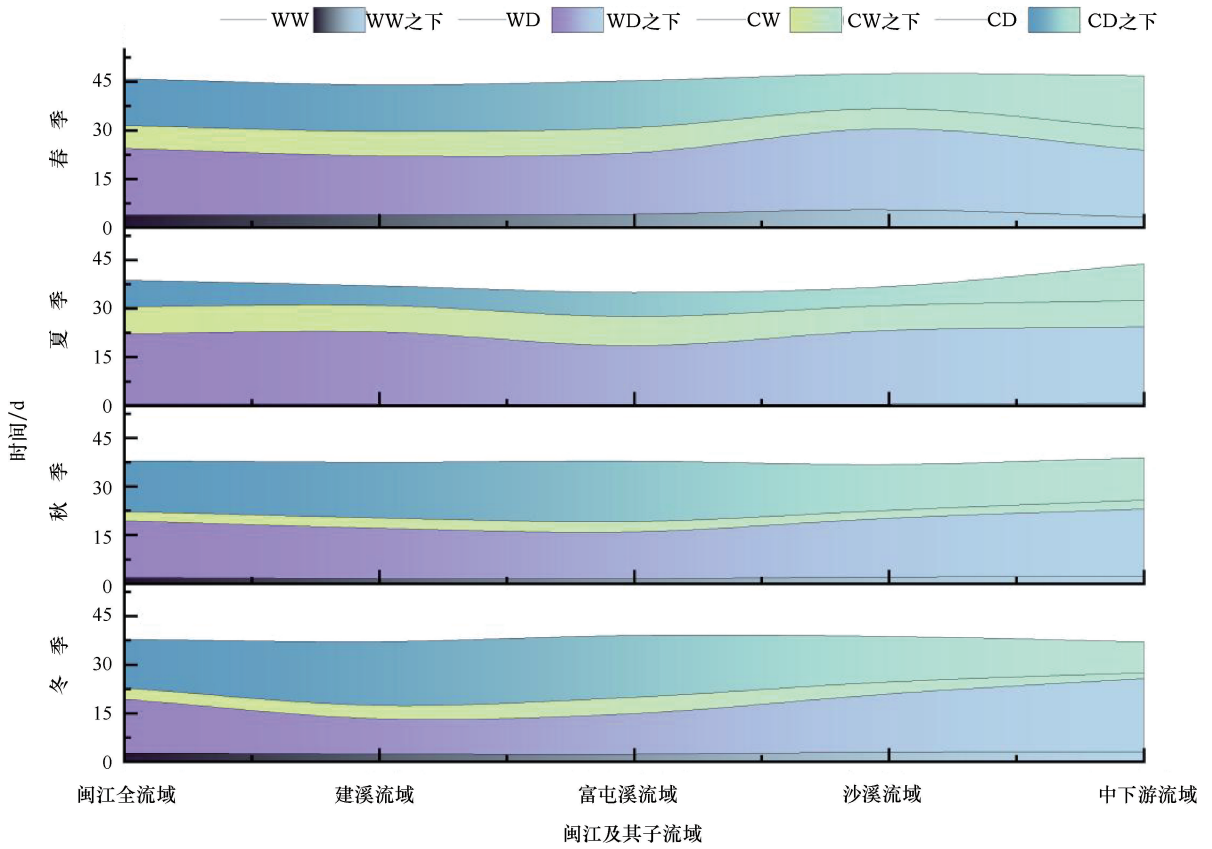


图 4 闽江及其子流域复合极端气候事件平均频数季节变化

Fig. 4 Seasonal variation in the average frequency of compound extreme climate events in the Minjiang River and its sub-basins

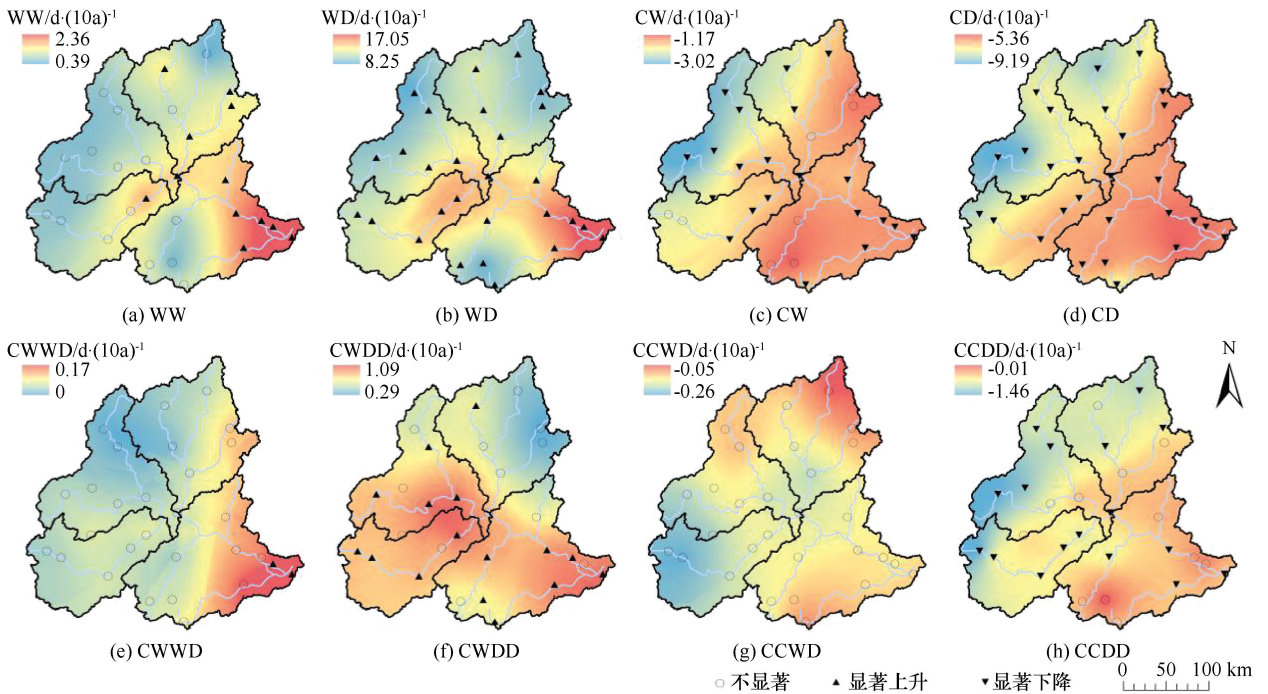


图 5 1980—2021 年闽江流域复合极端气候事件变化趋势的空间分布及显著性

Fig. 5 Spatial distribution and significance of trend changes in compound extreme climate events in the Minjiang River Basin from 1980 to 2021

仅有2个(6.9%)站点呈显著上升趋势,其中以闽江中下游东部地区的上升趋势最为显著。持续暖干事件也呈弱增加趋势,趋势率为0.29~1.09 d/10 a,其中上升趋势的空间范围大于不显著趋势,尤以富屯溪、沙溪和闽江中下游流域最为明显。持续冷湿事件整体上呈不显著趋势,趋势率为-0.26~0.05 d/10 a,趋势表现出东北高、西南低的空间分布特征。持续冷干事件的趋势率为-1.46~-0.01 d/10 a,有17个(58.62%)站点呈显著下降趋势,有12个(41.38%)站点呈不显著趋势,下降趋势呈东南低、西北高的空间分布结构。

### 2.2.2 变化趋势

由表4可知,复合极端气候事件在闽江各流域内的年际趋势变化存在一定差异,其中富屯溪和建溪流域的趋势变化大致相同,沙溪和闽江中下游流域的变化类似。整体上看,暖湿事件、暖干事件、持续暖湿事件和持续暖干事件在闽江及其各子流域内均呈现出增强趋势,而冷湿事件、冷干事件、持续冷湿事件和持续冷干事件均呈现出减小趋势。

表4 闽江及其子流域复合极端气候事件年际趋势

d/10 a

Table 4 Interannual trends of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin and its sub-basins d/10 a

类型	闽江全流域	富屯溪流域	建溪流域	沙溪流域	中下游流域
暖湿事件(WW)	1.09	0.75	0.98	1.10	1.41
暖干事件(WD)	11.45	9.94	9.92	13.58	12.50
冷湿事件(CW)	-1.81	-2.23	-1.68	-2.00	-1.44
冷干事件(CD)	-6.78	-7.49	-7.12	-6.84	-5.99
持续暖湿事件(CWWD)	0.06	0.04	0.05	0.05	0.09
持续暖干事件(CWDD)	0.78	0.85	0.43	0.95	0.86
持续冷湿事件(CCWD)	-0.10	-0.12	-0.07	-0.18	-0.08
持续冷干事件(CCDD)	-0.70	-0.88	-0.77	-0.88	-0.42

暖湿事件和持续暖湿事件在闽江中下游流域的增强趋势均最大,变化趋势分别为1.41 d/10 a和0.09 d/10 a;在富屯溪流域的变化趋势最小,分别为0.75 d/10 a和0.04 d/10 a。暖干事件和持续暖干事件的增强趋势在沙溪流域最大,分别为13.58 d/10 a和0.95 d/10 a;在建溪流域最小,分别为9.92 d/10 a和0.43 d/10 a。

冷湿事件和冷干事件的减小趋势均在富屯溪流域最大,分别为-2.23 d/10 a和-7.49 d/10 a;在闽江中下游流域最小,为-1.44 d/10 a和-5.99 d/10 a。持续冷湿事件在沙溪流域的减小趋势最大(-0.18 d/10 a),在建溪流域最小(-0.07 d/10 a)。持续冷

干事件的减小趋势在富屯溪和沙溪流域较为显著,均为-0.88 d/10 a;在闽江中下游流域最小,为-0.42 d/10 a。总体上看,1980—2021年闽江流域的增强趋势以暖干事件在沙溪流域最大,达到13.58 d/10 a;减小趋势以冷干事件在富屯溪流域最大,为-7.49 d/10 a。

### 2.3 复合极端气候事件的强度特征

由图6可知,暖湿事件和冷干事件的强度等级均以强等级和中等级为主,且中等级的天数多于强等级;暖干事件的强度等级也主要为强等级和中等级,但强等级的天数多于中等级;冷湿事件的强度等级主要为中等级和弱等级,且中等级的天数多于弱等级。可见,暖干事件的等级强度高于暖湿、冷湿和冷干事件。除此之外,暖干事件强等级和中等级的总天数约为暖湿事件的9.6倍,约为冷干事件的1.5倍。

图7给出了暖湿事件、暖干事件、冷湿事件和冷干事件的强度空间分布,三种强度下暖湿事件的天数均以闽江中下游流域较多,而建溪、富屯溪和沙溪流域则相对较少,其中强度等级由强到弱的天数均值分别为3.33 d、4.38 d和1.49 d。暖干事件强度等级由强到弱的天数均值分别为42.66 d、31.61 d和1.88 d,且三种强度等级下的暖干事件也主要发生在闽江中下游流域。冷湿事件由强到弱的天数均值分别为3.87 d、12.86 d和5.08 d,其中强等级和中等级事件均在富屯溪流域西部和闽江中下游流域西南部发生较多,而弱等级事件则较多发生在富屯溪流域西部。冷干事件由强到弱的天数均值分别为14.96 d、34.95 d和3.41 d,其中强等级冷干事件较多发生在闽江中下游流域,中等级事件在建溪、富屯溪和闽江中下游流域西南部均有较多发生,弱等级事件主要发生在建溪和富屯溪流域。

## 3 结果讨论

单一分析极端温度<sup>[39-40]</sup>和极端降水事件<sup>[41-43]</sup>已有较多的研究,而将二者系统结合起来分析复合极端气候事件<sup>[38-44]</sup>的研究相对较少。对闽江流域1980—2021年复合极端气候事件的时空变化特征研究发现,流域内复合极端气候事件在时间和空间上均表现出一定的差异性。

闽江流域的复合极端事件以暖干为主,年均频次最高,达到76.15 d;冷干事件次之,年均频次为53.32 d。这一结论与MARTIN等<sup>[45]</sup>的研究有一定的类似,他们发现,与1961—1987年相比,1988—2014年期间暖干事件发生的频次明显增加,且暖干

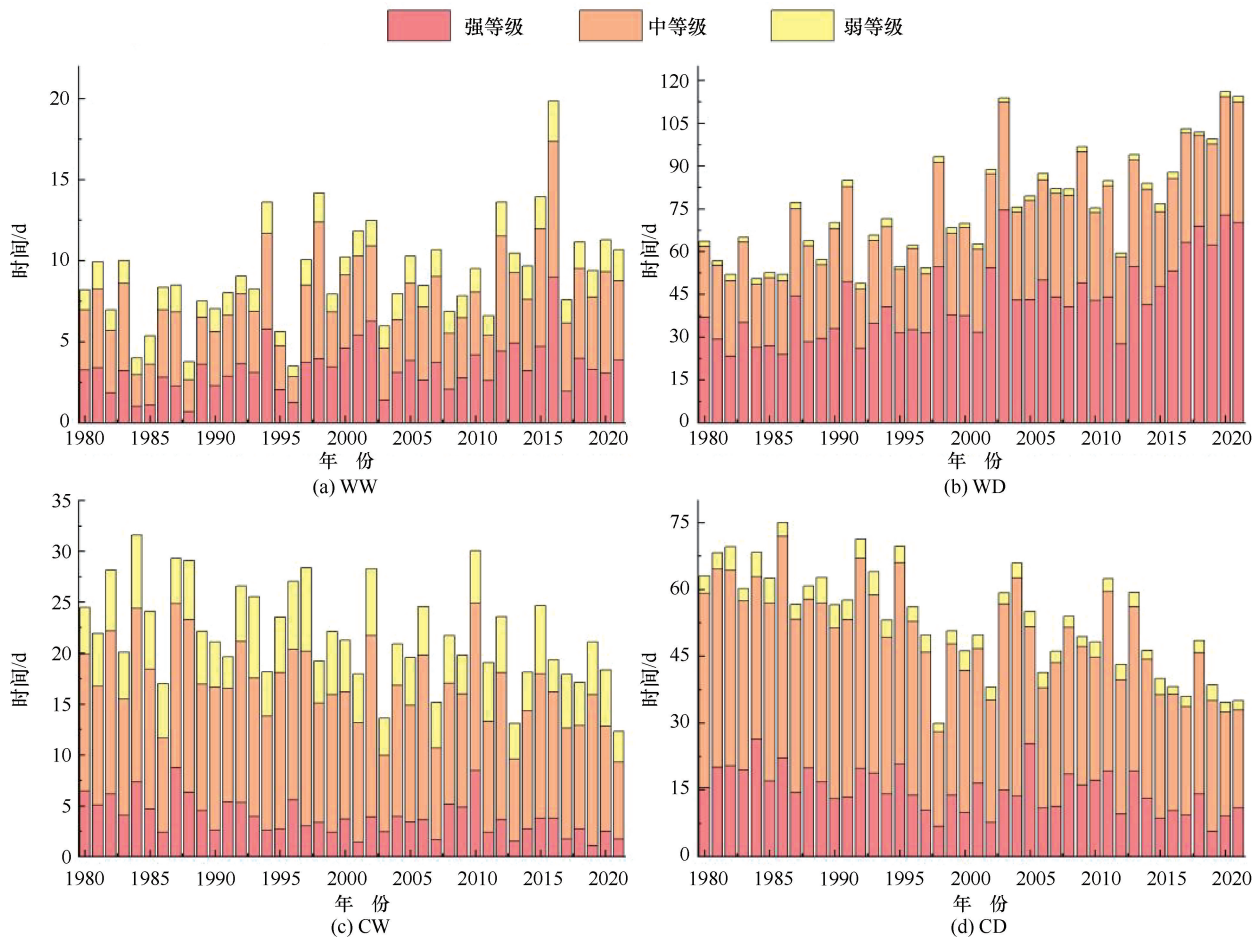


图6 闽江流域4类复合极端气候事件等级

Fig. 6 Grading of four types of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin

事件的空间范围显著增加。就季节变化而言, 暖干事件频次最高, 冷干事件在秋季和冬季最高, 而暖湿和冷湿事件频次则较低, 这在一定程度上可能与大尺度环流模式和地形地貌<sup>[46-47]</sup>有关。肖秀程等发现全国暖湿、暖干事件在春季和夏季频发, 冷湿事件在夏季、秋季和冬季频发, 冷干事件在秋季和冬季频发<sup>[38]</sup>。除此之外, 他们还发现尤其是20世纪90年代后期以来, 中国东部人口密集地区夏季暖干事件呈显著增加趋势。这与本文研究闽江流域趋势变化所得出的暖干事件呈显著上升趋势的特征也基本吻合。同时, LIU等<sup>[27]</sup>发现中国复合暖极端气候事件的上升趋势远远高于全球同期的趋势。而且, WU等<sup>[48]</sup>得出华南等地区的复合极端气候事件的频率和空间范围明显增加。值得注意的是, CHEN等<sup>[49]</sup>预计2021—2080年, 中国大部分地区冬季冷干事件、夏季暖干事件和暖湿事件的发生概率普遍上升, 而冬季发生冷湿事件的概率可能下降。

总体来看, 本文利用多个指标分析了闽江流域

复合极端气候事件的时空异质性特征, 将所有站点的逐月平均气温和降水资料整合后的第90和10个百分位定义为高、低阈值, 并对部分复合极端气候事件的强度等级进行了划分, 等级由高到低依次为: 强等级、中等级和弱等级。尽管本研究有一定发现, 但仍存在一些不足。首先, 本文对复合极端气候事件进行判定时所采用的第90和10个百分位不一定是最佳阈值, 仍具有可探讨性; 其次, 站点数据资料存在较多的缺测值, 填充缺测数据时可能会对结果产生影响。未来研究中, 可借助WRF模式和机器学习等技术手段, 进一步揭示复合极端气候事件变化的物理机理。

## 4 结论

基于1980—2021年闽江流域29个站点的日平均气温和日降水资料, 对全流域及其子流域的复合极端气候事件进行了时空异质性分析, 并探讨了部分复合极端气候事件的强度特征, 得到以下结论。

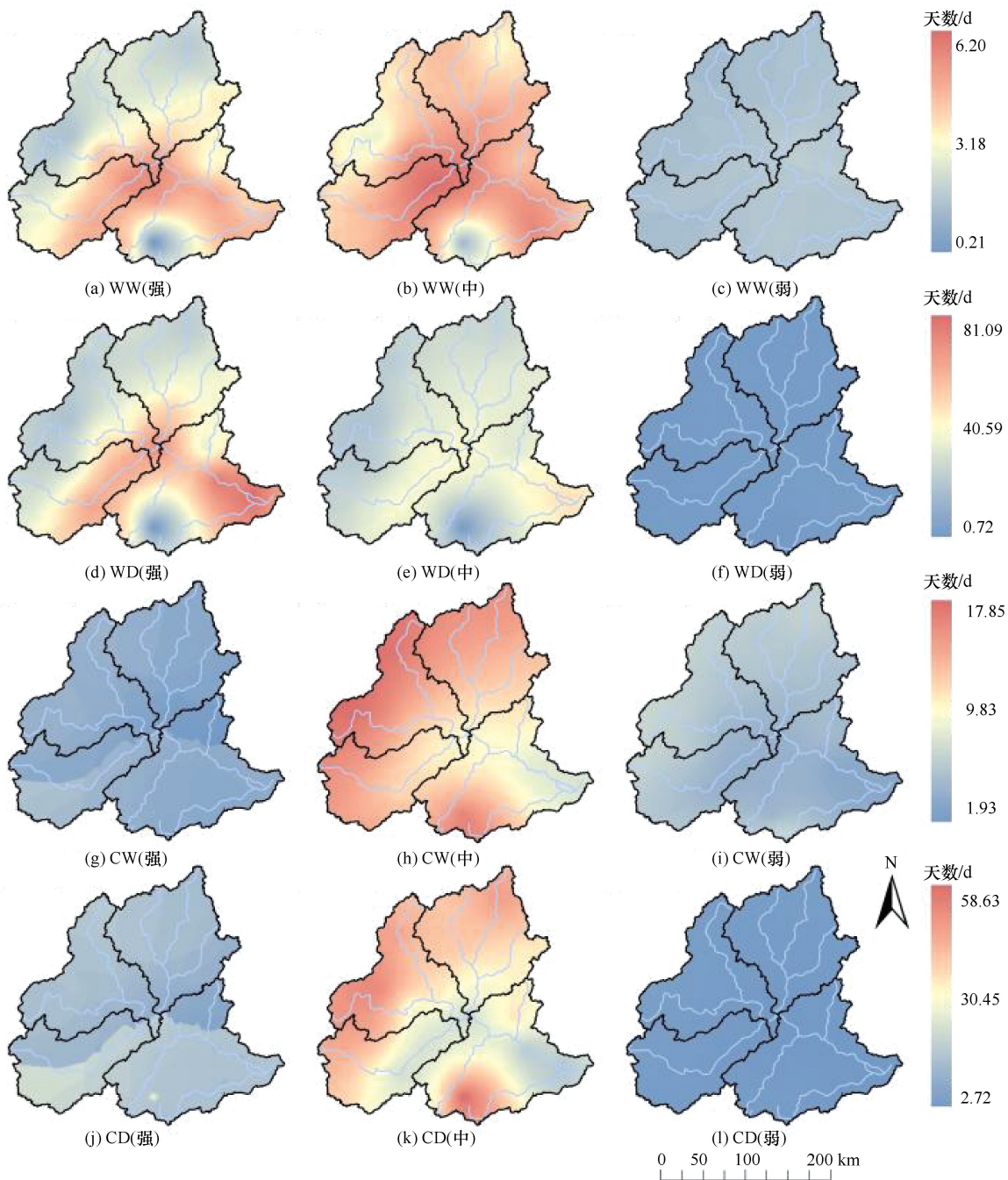


图7 闽江流域4类复合极端气候事件的强度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of intensity of four types of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin

(1)从频数分布来看,闽江流域的暖干事件发生频次最高,冷干事件次之。其中,暖干事件发生的平均频次约为暖湿事件的8.3倍,冷干事件约为冷湿事件的2.4倍,持续 $\geq 3$  d的暖干事件约为持续 $\geq 3$  d的冷干事件的1.5倍。季节尺度上,暖干事件频次最高,均超过15 d;冷干事件在秋季和冬季最高,均超过15 d;暖湿和冷湿事件频次较低。

(2)从趋势变化来看,闽江流域的暖干事件呈显著上升趋势,冷干事件呈显著下降趋势,持续冷湿事

件呈不显著趋势,且各类事件区域间的变化速率存在一定差异。暖湿事件不显著趋势的空间范围明显大于显著上升趋势,而冷湿事件则呈较弱的减少趋势,其中显著下降趋势的空间范围多于不显著趋势。就子流域而言,闽江流域的上升趋势以暖干事件在沙溪流域最大,达到13.58 d/10 a;下降趋势以冷干事件在富屯溪流域最显著(-7.49 d/10 a)。

(3)从强度特征来看,暖湿事件和冷干事件的强度等级均以强等级和中等等级为主,且中等等级的天数多

于强等级; 暖干事件的强度等级也主要为强等级和中等等级, 但强等级的天数多于中等等级; 冷湿事件的强度等级主要为中等等级和弱等级, 且中等等级的天数多于弱等级。暖干事件强等级和中等等级的总天数约为暖湿事件的 9.6 倍, 约为冷干事件的 1.5 倍。闽江流域暖干事件的等级强度高于暖湿、冷湿和冷干事件。

### 参考文献 (References):

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] IPCC. Summary for Policymakers[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

[3] AGHAKOUCHAK A, CHENG L Y, MAZDIYASNI O, et al. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24): 8847-8852.

[4] HE Y L, DENG S Z, CHAK H H, et al. The half-degree matters for heat-related health impacts under the 1.5°C and 2°C warming scenarios: Evidence from ambulance data in Shenzhen, China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(5): 628-637.

[5] LI E, ZHAO J, PULLENS J W M, et al. The compound effects of drought and high temperature stresses will be the main constraints on maize yield in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 812: 7.

[6] LI L F, FAN W Y, KANG X M, et al. Responses of greenhouse gas fluxes to climate extremes in a semiarid grassland[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 142: 32-42.

[7] 周中元, 王涛, 陈玉壮, 等. 南水北调中线工程沿线寒潮及区域极端低温时空变化规律[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1098-1108.

ZHOU Z Y, WANG T, CHEN Y Z, et al. Spatiotemporal variations of cold waves and regional extreme low temperature along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(6): 1098-1108.

[8] TRENBERTH K E, FASULLO J T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2012, 117: D17103.

[9] ABATZOGLOU J T, RUPP D E, O'NEILL L W, et al. Compound extremes drive the Western Oregon wildfires of September 2020[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(8): GL092520.

[10] World Meteorological Organization. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water-related hazards (1970—2021)[R]. Vienna: WMO, 2023.

[11] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, VAN DEN HURK BJJM, et al.

Future climate risk from compound events[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.

[12] 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.

[13] ZSCHEISCHLER J, MARTIUS O, WESTRA S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7): 333-347.

[14] 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. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(3): 587-601.

[15] DE MICHELE C, MERONI V, RAHIMI L, et al. Dependence types in a binarized precipitation network[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(23): e2020GL090196.

[16] BENISTON M. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: 56247079.

[17] HAO Z C, AGHAKOUCHAK A, PHILLIPS T J. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 1402-1416.

[18] 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.

[19] COUASON A, SEBASTIAN A, MORALES-NÁPOLES O. A copula-based Bayesian network for modeling compound flood hazard from riverine and coastal interactions at the catchment scale: An application to the Houston Ship Channel, Texas[J]. *Water*, 2018, 10(9): 326872560.

[20] RIDDER N N, PITMAN A J, WESTRA S, et al. Global hotspots for the occurrence of compound events[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5956.

[21] HORTON D E, JOHNSON N C, SINGH D, et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends[J]. *Nature*, 2015, 522(7557): 465-469.

[22] ZHANG Y, YANG P L, GAO Y, et al. Health and economic impacts of air pollution induced by weather extremes over the continental US[J]. *Environment International*, 2020, 143: 105921.

[23] LIANG X Z. Extreme rainfall slows the global economy[J]. *Nature*, 2022, 601(7892): 193-194.

[24] REICHSTEIN M, RIEDE F, FRANK D. More floods, fires and cyclones-plan for domino effects on sustainability goals[J]. *Nature*, 2021, 592(7854): 347-349.

- [25] HAQIQI I, GROGAN D S, HERTEL T W, et al. Quantifying the impacts of compound extremes on agriculture [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(2): 551-564.
- [26] DAS J, MANIKANTA V, UMAMAHESH NV. Population exposure to compound extreme events in India under different emission and population scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 806: 150424.
- [27] 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.
- [28] 李英娥. 闽江流域自然灾害及减灾初探 [J]. *人民珠江*, 1993(3): 11-13.
- LI Ying'e. Preliminary exploration of natural disasters and disaster reduction in the Minjiang River Basin [J]. *Pearl River*, 1993(3): 11-13.
- [29] 林嘉源, 张帆, 丘丽萍, 等. 不同空间特征尺度下景观格局对水质的影响 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(12): 2998-3007.
- LIN Jiayuan, ZHANG Fan, QIU Liping, et al. Effects of landscape pattern on water quality under different spatial characteristic scales [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(12): 2998-3007.
- [30] 詹拯怡. 基于小波功率谱和 Mann-Kendall 算法的闽江径流量时间变化研究 [J]. *河南水利与南水北调*, 2023, 52(5): 126-127.
- ZHAN Zhengyi. Study on the temporal variation of runoff of Minjiang River based on wavelet power spectrum and Mann-Kendall algorithm [J]. *Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion*, 2023, 52(5): 126-127.
- [31] 程诺, 高文晶, 杨鸿飞, 等. 闽江流域生态环境质量动态变化及其驱动力 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 310-318.
- CHENG Nuo, GAO Wenjing, YANG Hongfei, et al. Dynamic change and driving factors of ecological environment quality in Minjiang River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2): 310-318.
- [32] 蔡楚恒. 延平区闽江流域山水林田湖草生态保护及修复 [J]. *林业勘察设计*, 2022, 42(4): 25-27.
- CAI Chuheng. Ecological protection and restoration of mountains, waters, forests, farmlands, lakes, and grasslands in Minjiang River Basin, Yanping District [J]. *Forestry Prospect and Design*, 2022, 42(4): 25-27.
- [33] 施智勇, 胡晓婷, 谢慧黎, 等. 基于 RSEI 的生态环境质量评价及驱动力分析: 以闽江流域(福州段)为例 [J]. *测绘通报*, 2023(2): 28-33.
- SHI Zhiyong, HU Xiaoting, XIE Huili, et al. Environmental quality assessment and driving force analysis based on remote sensing ecological index (RSEI): A case study of the Minjiang River Basin (Fuzhou section) [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(2): 28-33.
- [34] 项勇, 陈芸芝, 唐丽芳, 等. 基于 EnKS 和 SWAT 模型的闽江流域径流数据同化 [J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(4): 66-75.
- XIANG Yong, CHEN Yunzhi, TANG Lifang, et al. Streamflow data assimilation of the Minjiang River Basin based on EnKS approach and SWAT model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(4): 66-75.
- [35] 林思诺, 张茵驰, 孙劭, 等. WRF 参数化方案与初始场对闽江流域暴雨模拟的敏感性研究 [J]. *人民珠江*, 2023, 44(10): 35-46.
- LIN Sinuo, ZHANG Yincheng, SUN Shao, et al. Study of WRF parameterization schemes and initial fields on rainstorm simulation in Minjiang River Basin [J]. *Pearl River*, 2023, 44(10): 35-46.
- [36] XIA J, SHE D X, ZHANG Y Y, et al. Spatio-temporal trend and statistical distribution of extreme precipitation events in Huaihe River Basin during 1960—2009 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(2): 195-208.
- [37] RUMI M, GREGORIC E, VUJADINOVIC M, et al. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961—2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183: 26-41.
- [38] 肖秀程, 黄丹青, 严佩文. 极端气温和极端降水复合事件的气候特征 [J]. *气象科学*, 2020, 40(6): 744-751.
- XIAO Xiucheng, HUANG Danqing, YAN Peiwen. The climatic characteristics of compound extreme events [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(6): 744-751.
- [39] 回佩晨, 徐旻天, 时延锋, 等. 1977—2020 年沂蒙山区极端气温时空变化特征分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(5): 15-28.
- HUI Peichen, XU Mintian, SHI Yanfeng, et al. Temporal and spatial variation of extreme temperature in Yimeng Mountain area from 1977 to 2020 [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(5): 15-28.
- [40] 吴光伟, 常允新, 王庆兵, 等. 近 55 年来山东省极端气温事件时空分布特征 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 19-32.
- WU Guangwei, CHANG Yunxin, WANG Qingbing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme temperature events in Shandong Province in recent 55 years [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 19-32.
- [41] 郝姣姣. 辽宁中部地区近 63 年极端降水指数变化特征及其与大气环流相关度分析 [J]. *黑龙江水利科技*, 2020, 48(12): 44-47.
- HAO Jiaojiao. Analysis of the characteristics of extreme precipitation index variation and its correlation with atmospheric circulation in Central Liaoning region over the past 63 years [J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2020, 48(12): 44-47.
- [42] 王轩. 上海市极端降水的气候变化响应及风险评估 [D]. 上海: 上海师范大学, 2015.

- WANG Xuan. Extreme Precipitation's Response to Climate Change and Risk Analysis of Shanghai[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.
- [43] 龙彦羲. 中国东部极端降水发生时间特征及其与大气环流异常的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- LONG Yanxi. The Relationship between the Occurrence Time Characteristics of Extreme Precipitation in Eastern China and Atmospheric Circulation Anomalies[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.
- [44] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 II: 影响因素与干旱传播研究展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 654-668.
- ZHI X F, TIAN Y T, CHEN C C, et al. Progress and prospects in drought propagation research part II: Influencing factors and research prospects[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 654-668.
- [45] MARTIN J P, GERMAIN D. Large-scale teleconnection patterns and synoptic climatology of major snow-avalanche winters in the Presidential Range (New Hampshire, USA) [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(S1): 109-123.
- [46] 尚丽君, 廖花妹, 涂浙, 等. 鄱阳湖流域 1960—2018 年极端气温变化及其与大气环流的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(1): 160-171.
- SHANG Lijun, LIAO Huamei, TU Zhe, et al. Variations of temperature extremes in Poyang Lake Basin and its association with atmospheric circulation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(1): 160-171.
- [47] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 等. 1961—2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2501-2513.
- LI Yang, WANG Yuhui, LYU Xiaomin, et al. Spatial distribution and temporal change in extreme weather events in three provinces in Northeast China [J]. Resources Science, 2015, 37(12): 2501-2513.
- [48] WU Y, MIAO C Y, SUN Y, et al. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation[J]. Geohealth, 2021, 5(5): e2021GH000390.
- [49] CHEN Y, LIAO Z, SHI Y, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961—2018[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(6): e2021GL092549.

(责任编辑 王海锋)