

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.009

# 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征

姜雨彤,郝增超,冯思芳,张宇,张璇,付永硕,郝芳华

(北京师范大学水科学研究院,北京 100875)

**摘要:**利用1961—2014年月降水与日最高气温数据,定义了3d/90%型和5d/90%型两类复合高温干旱事件,比较分析了长江流域和黄河流域夏季复合高温干旱事件的分布特征与时空变化规律,量化了复合高温干旱事件与单独热浪事件的温度差异。研究表明:复合高温干旱事件在长江流域中下游地区发生频率较高,在黄河流域空间差异不大;两流域复合高温干旱事件频率均呈增加趋势,长江流域3d/90%型和5d/90%型复合高温干旱事件日数增加趋势分别为每10a 0.19d和0.14d,黄河流域的增加趋势分别为每10a 0.29d和0.096d;长江流域复合高温干旱日数在西北部与南部地区增加较多,下游东北部地区有所减少,黄河流域在中部和西部增加较多;两流域1988—2014年复合高温干旱事件影响范围总体上比1961—1987年增加,黄河流域影响范围占比大于长江流域;相比于单独热浪事件,复合高温干旱事件的平均温度更高,长江流域和黄河流域3d/90%(5d/90%)型复合高温干旱事件与单独热浪事件平均气温差值分别为0.65℃和0.64℃(0.54℃和1.21℃)。

**关键词:**干旱;复合高温干旱事件;热浪事件;长江流域;黄河流域

**中图分类号:**P338+.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0070-08

**Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins //** JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, ZHANG Yu, ZHANG Xuan, FU Yongshuo, HAO Fanghua (College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the data of monthly precipitation and daily maximum temperature from 1961 to 2014, the distribution characteristics and spatio-temporal changes in compound hot-dry events in the Yangtze River and Yellow River basins were compared and analyzed based on two types of compound hot-dry events (3d/90% type and 5d/90% type). The temperature difference between compound hot-dry events and single heatwave events was quantified. The results showed that the frequency of compound hot-dry events was relatively high in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, and the spatial difference was not significant in the Yellow River Basin. The frequency of compound hot-dry events in the two basins showed an increasing trend. The number of days of 3d/90% and 5d/90% type compound hot-dry events in the Yangtze River Basin increased by 0.19d and 0.14d per 10a, respectively, and the increase of the Yellow River basin was 0.29d and 0.096d per 10a, respectively. The number of compound hot-dry days in the Yangtze River Basin increased more in the northwest and southern regions, while the frequency in the northeast region of the lower reaches decreased. The number of compound hot-dry days in the Yellow River Basin increased more in the central and western regions. The area impacted by compound hot-dry events in the two basins from 1988 to 2014 was generally higher than that from 1961 to 1987, and the impacted area of the Yellow River Basin was larger than that of the Yangtze River Basin. Compared with the single heatwave events, the average temperature of the compound hot-dry events was higher. The average temperature difference between the 3d/90% (5d/90%) type compound hot-dry events and single heatwave events in the Yangtze River Basin and the Yellow River Basin is 0.65℃ and 0.64℃ (0.54℃ and 1.21℃), respectively.

**Key words:** drought; compound hot-dry events; heatwave events; Yangtze River Basin; Yellow River Basin

**基金项目:**国家重点研发计划(2020YFA0608202)

**作者简介:**姜雨彤(2000—)女,硕士研究生,主要从事干旱与极端事件研究。E-mail:jyt0306@163.com

**通信作者:**郝增超(1982—)男,教授,博士,主要从事干旱与极端事件研究。E-mail:haozc@bnu.edu.cn

在全球气候变暖的背景下,我国的干旱问题日益显著,对农业生产和水资源供给等造成了严重损失<sup>[1]</sup>,高温热浪事件对农业生产和人体健康等造成严重负面影响<sup>[2-3]</sup>。由于环流条件和陆气反馈等机制的影响,干旱和高温热浪之间存在很强的相关性,即干旱通常是高温热浪事件的背景,频繁高温天气加快了土壤水分蒸发,从而进一步加重干旱程度<sup>[4-5]</sup>,导致干旱和高温热浪事件同时发生,称为复合高温干旱事件<sup>[6-7]</sup>。研究表明这种复合型极端事件对水资源和农业生产等部门的影响可能比单一事件更大,对水安全、粮食安全以及社会经济安全构成严重威胁<sup>[6,8]</sup>,有必要加强复合高温干旱事件的研究。

IPCC 第六次评估报告《2021 年气候变化:自然科学基础》强调全球与区域性的复合型极端事件对自然系统和人类社会构成了特殊风险,随着全球升温的进一步加剧,复合型极端事件的风险可能进一步加大<sup>[9-10]</sup>。近年来,很多地区干旱或者高温事件发生频率增加,复合高温干旱事件频率的时空变异特征研究逐步开展起来<sup>[11-12]</sup>,如武新英等<sup>[13]</sup>研究表明,我国大部分地区复合高温干旱事件发生频率呈不同程度的增加趋势。还有一些学者从强度、覆盖面积以及持续时间等多方面分析复合高温干旱事件的演变规律,揭示了该类事件在全球许多区域强度增加、影响范围扩大、持续时间延长的特点<sup>[14-16]</sup>,如 Mukherjee 等<sup>[16]</sup>研究发现,亚洲、欧洲、澳大利亚和北美大陆干旱地区等全球多个区域的复合高温干旱事件频率、持续时间和严重程度都有所上升。

长江流域和黄河流域是我国最大的两个流域。长江流域自西向东横穿中国中部,降水量丰富,大部分地区处于湿润半湿润区,在气候变化背景下干旱等极端事件发生频繁<sup>[17-18]</sup>,对社会经济发展和生态系统造成了严重损失。黄河流域多数地区处于干旱半干旱气候区,降水量较少,具有较为复杂的地理环境和多变的气候特征,近半个世纪以来黄河流域水循环和极端事件发生了显著变化,已成为制约黄河流域高质量发展的主要因素之一<sup>[19-21]</sup>。但目前对两流域的高温 and 干旱研究主要集中在单一极端事件的演变规律<sup>[22-25]</sup>,忽略了复合高温干旱事件对流域社会经济造成的潜在威胁。

鉴于此,本文研究了长江流域和黄河流域夏季复合高温干旱事件的分布特征,分析其频率和影响面积的时空变化规律,并对比分析复合高温干旱事件与单独热浪事件的温度差异,以期提升流域防灾减灾能力提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

长江是我国最长的河流,发源于我国西部的唐古拉山脉,最后汇入东海。长江流域总面积达 180 万  $\text{km}^2$ ,约占我国国土面积的 18.8%,流域横跨青藏高原高寒区、西南热带季风区和华中亚热带季风区,气候条件十分复杂<sup>[26]</sup>。黄河是我国第二大河流,发源于我国西部的巴颜喀拉山脉,向东流经我国 9 省区,整体成“几”字形,最终流入渤海。黄河流域总面积为 79.5 万  $\text{km}^2$ ,占国土面积的 8.3%<sup>[27]</sup>,流域大部分地区位于干旱半干旱区,对气候变化非常敏感。

本文使用国家气象信息中心提供的 1961—2014 年逐月降水数据集([http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_PRE\\_MON\\_GRID\\_0.5.html](http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_PRE_MON_GRID_0.5.html))和逐日最高气温数据集(V2.0)([http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF\\_CLI\\_CHN\\_TEM\\_MON\\_GRID\\_0.5.html](http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_TEM_MON_GRID_0.5.html))计算复合高温干旱事件,该网格数据覆盖全国 2472 个气象站,空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。该数据集经交叉验证和误差分析,质量良好,且数据具有较好的完整性<sup>[28]</sup>。流域的边界数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/DOI:10.12078/2018060101>)。

## 2 研究方法

### 2.1 干旱和热浪指标

干旱评价指标较多<sup>[29-31]</sup>,其中标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)因其时空适应性强等特点,广泛应用于气象干旱监测<sup>[22]</sup>。本文采用 SPI 识别气象干旱,计算方法为:基于韦伯分布计算降水量的累积分布概率,再对其进行正态标准化处理,得到 SPI 值( $I_{\text{SPI}}$ )。为获得较大样本量,采用  $-0.5$  作为 SPI 阈值,即当  $I_{\text{SPI}} \leq -0.5$  时定义为干旱事件。目前对于高温热浪的定义众多,其中基于日最高温度( $T_{\text{max}}$ )的阈值法应用最为广泛,本文采用基于 90 百分位阈值(即  $T > T_{90}$ )定义高温热浪事件。

### 2.2 复合高温干旱事件定义

基于长江流域和黄河流域的气候特点,本文主要研究夏季(6—8 月)复合高温干旱事件。首先基于夏季月降水数据分别计算每个月 SPI,然后计算夏季 3 个月的日最高温度的  $T_{90}$  作为高温阈值<sup>[32]</sup>。高温热浪包括两种情况,将连续不少于 3 d 和连续不少于 5 d 气温高于  $T_{90}$  的事件定义为高温热浪事件。复合高温干旱事件定义为干旱( $I_{\text{SPI}} \leq -0.5$ )和高温热浪( $T > T_{90}$ )同时发生的事件。在此基础上,本文定义了两种复合高温干旱事件,即 3d/90% 型和 5d/90% 型复合高温干旱事件,其含义为  $I_{\text{SPI}} \leq$

-0.5 且连续不少于 3 d 和连续不少于 5 d 气温高于  $T_{90}$  的事件。

2.3 趋势分析

采用 Sen's 斜率估计来反映序列的趋势变化,结合 Mann-Kendall 检验法进行趋势检验<sup>[33-34]</sup>。对于时间序列  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 统计量  $\beta$  的计算公式为

$$\beta = \text{median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right) \quad (1 \leq i < j \leq n) \quad (1)$$

$\beta > 0$  表示序列呈现增加趋势,  $\beta < 0$  表示序列呈现减少趋势。对于显著性水平  $\alpha$  和统计量  $Z$ ,  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  表示该序列在  $\alpha$  水平上存在显著性变化,反之,则认为在该显著水平上变化不显著。本文定义变化趋势在  $\alpha = 0.05$  下显著时,为序列存在显著变化。

3 结果与分析

3.1 两流域夏季降水和气温变化特征

图 1 为长江流域与黄河流域 1961—2014 年夏季降水量和日最高气温变化。研究期内,长江流域夏季平均降水量呈现增加趋势,增幅为每 10 a 4.6 mm(未通过 0.05 的显著性检验);黄河流域夏季平均降水量呈现减少的趋势,减少趋势为每 10 a 1.2 mm(未通过 0.05 显著性检验)。长江与黄河流域夏季日最高气温平均值都呈现增加趋势,增幅分别为每 10 a 0.077℃ 与每 10 a 0.16℃,但长江流域整体升温不显著( $p > 0.05$ )。

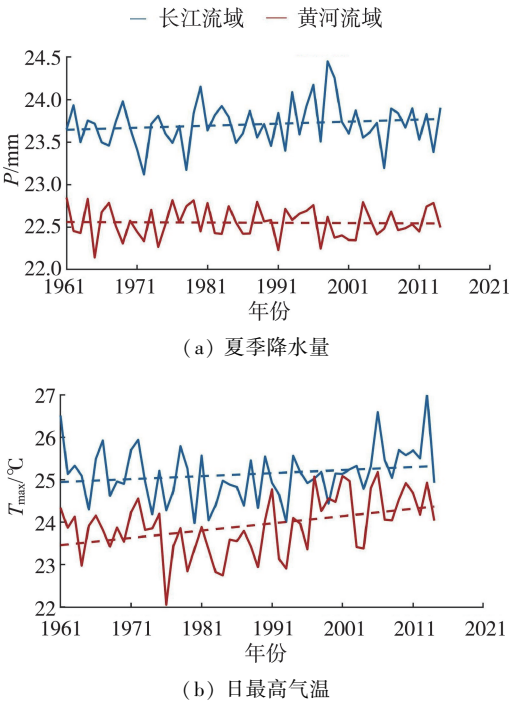


图 1 两流域 1961—2014 年夏季降水量和日最高气温变化  
Fig. 1 Variation of summer precipitation and daily maximum temperature in two basins from 1961 to 2014

图 2 为长江流域与黄河流域 1961—2014 年夏季降水量和日最高气温变化率空间分布(图中黑色标注点为通过 0.05 显著性检验的格点)。研究期内,长江流域的夏季降水量在中部及西南部地区呈现减少趋势,西北部及东部地区呈现增加趋势;黄河流域的西部及南部地区呈现增加趋势(主要在上游地区),西南部及东北部地区呈现减少趋势。研究期内,两流域大部分地区呈现升温,长江流域的夏季平均日最高气温在西部及东北部升高趋势明显,北部小部分地区呈现降低趋势;黄河流域的夏季平均日最高气温在西部及北部地区升高趋势明显,东南部地区呈现降低趋势。

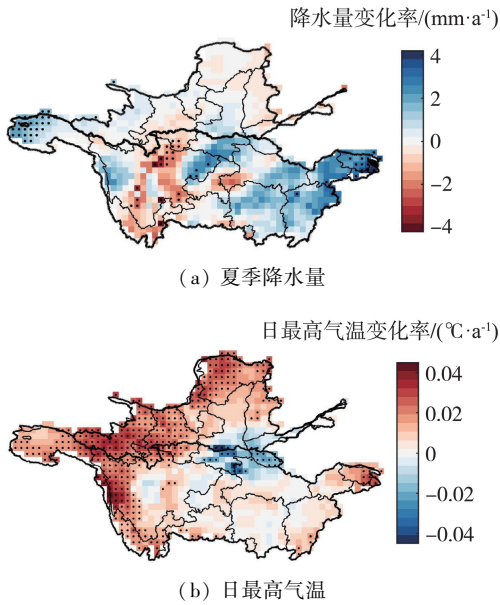


图 2 两流域 1961—2014 年夏季降水量和日最高气温变化率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of summer precipitation and daily maximum temperature change rates in two basins from 1961 to 2014

在降水和温度的协同变化方面,长江流域西部及东北部地区、黄河流域西部地区夏季降水量增加幅度较大,平均气温升高幅度也较大,暖湿化特征明显。而黄河流域中部以及长江流域部分西部地区降水减少的同时气温也有略微升高,呈现暖干化的趋势。在全球气温升高的背景下,流域干旱高温同时出现的概率可能随之增加,复合高温干旱事件的风险较大。

3.2 复合高温干旱事件分布特征

图 3 为长江流域和黄河流域 1961—2014 年夏季两类型复合高温干旱总日数空间分布。可见,长江流域 3d/90% 型和 5d/90% 型复合高温干旱事件总日数在中下游地区较大;黄河流域两类复合高温干旱事件总日数空间差异不大,整体复合高温干旱

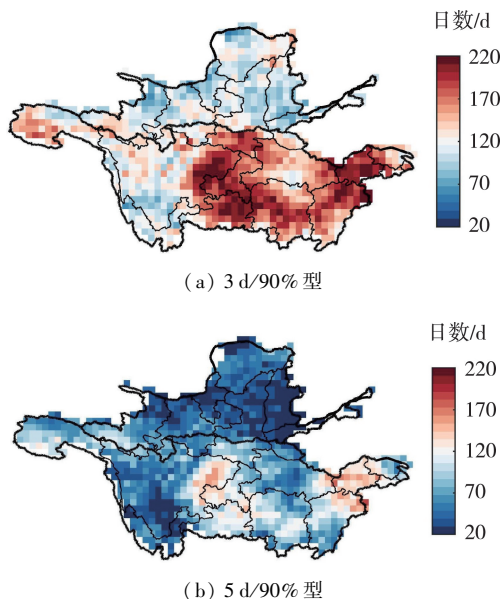


图3 两流域 1961—2014 年夏季两类复合高温干旱总日数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of days for two types of compound hot-dry events in two basins from 1961 to 2014

事件日数少于长江流域。随着热浪阈值的提高,流域整体的复合高温干旱事件总日数明显减少。

### 3.3 复合高温干旱事件频率时空变化

图4为长江流域与黄河流域1961—2014年两类复合高温干旱事件日数随时间变化。可见,长江与黄河流域总体上复合事件频率均呈现增加趋势。长江流域3d/90%型和5d/90%型复合高温干旱事件日数增加趋势分别达到每10a 0.19d和每10a 0.14d,但是总体增加趋势未通过0.05显著性检验( $p$ 值分别为0.26与0.18)。黄河流域两类复合高温干旱事件日数增加趋势分别为每10a 0.29d和每10a 0.10d,均通过0.05的显著性检验( $p$ 值分别为0.032与0.0078),且1990年代以后发生频率明显增加。

根据变化趋势,将研究期分成两个时段:1961—1987年与1988—2014年进行分析,计算复合高温干旱事件的频率变化。频率变化定义为两时段复合高温干旱事件日数之差除以前一时段复合高温干旱事件日数,用百分比表示。长江流域与黄河流域复合高温干旱事件1988—2014年相对于1961—1987年的频率变化空间分布如图5所示。与1961—1987年相比,两流域1988—2014年两种类型复合高温干旱事件频率总体呈现增大趋势,3d/90%型和5d/90%型复合高温干旱事件呈增大趋势的面积占比分别为68.2%、93.6%和62.9%、92.3%。长江流域西北部及南部地区复合高温干旱事件发生频率增加,频率减小区域主要位于流域中下游东北部

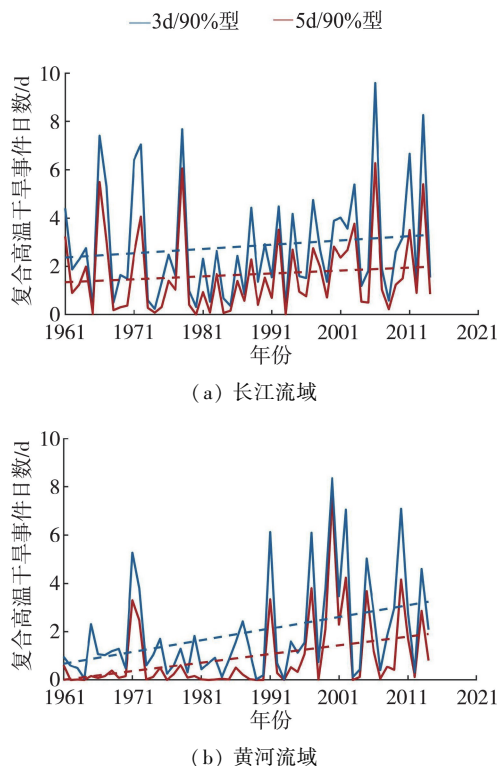


图4 两流域 1961—2014 年两类复合高温干旱事件日数随时间变化

Fig.4 Temporal changes of days for two types of compound hot-dry events in two basins from 1961 to 2014

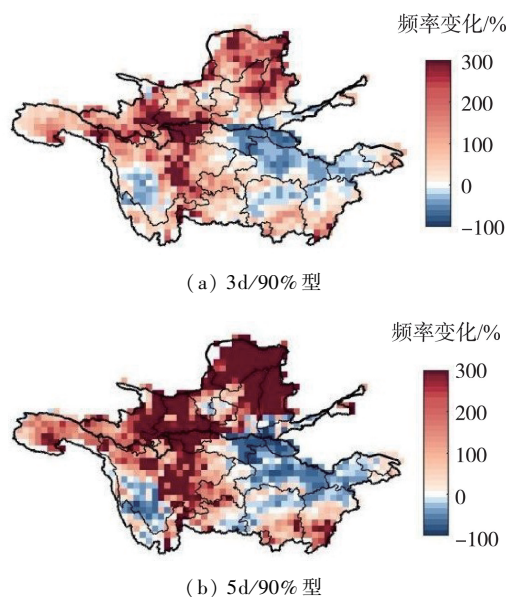


图5 两类型复合高温干旱事件频率变化的空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of frequency variation of two types of compound hot-dry events

地区,可能是由于夏季降水增加及气温降低的共同作用。黄河流域大部分区域复合高温干旱事件频率增加,只有下游小部分区域减少,可能与黄河流域下游气温降低有关。

### 3.4 复合高温干旱事件空间覆盖范围变化

使用经验累积分布函数(experical cumulative

distribution function, ECDF) 进一步分析了长江流域和黄河流域不同类型复合高温干旱事件覆盖范围的变化。长江流域与黄河流域不同类型复合高温干旱事件空间覆盖面积的 ECDF 值如图 6 所示。相比于 1961—1987 年,两流域 1988—2014 年 ECDF 值发生显著偏离,1988—2014 年两流域复合高温干旱事件影响范围更大。与长江流域相比,黄河流域 1988—2014 年复合高温干旱事件的 ECDF 空间范围具有更长的右尾,这表明 1988—2014 年黄河流域更多的面积比例受到复合高温干旱事件的影响。

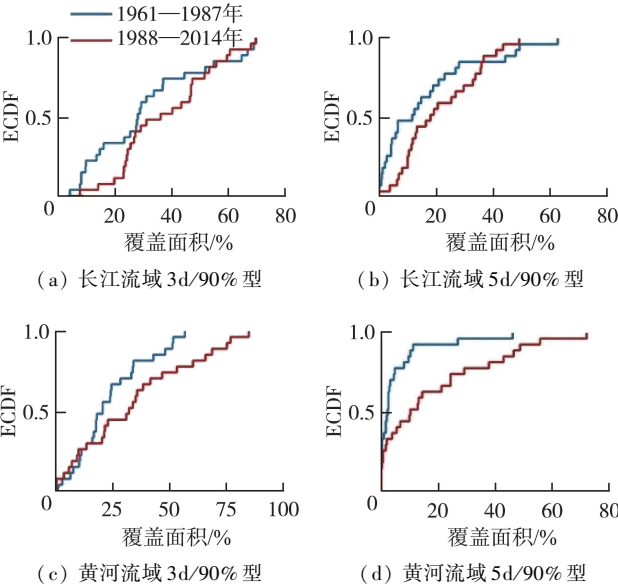


图 6 两流域复合高温干旱事件空间覆盖面积变化  
Fig. 6 Change in covered area of compound hot-dry events in two basins

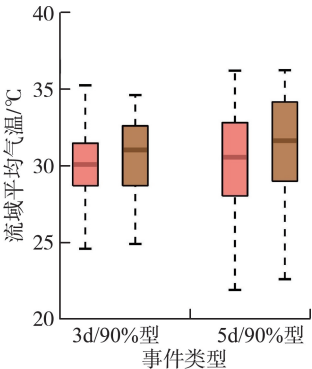
3.5 复合事件与单独热浪事件的气温对比

图 7 为复合高温干旱事件与单独热浪事件气温箱形图。可见,长江流域与黄河流域的复合高温干旱事件多年平均气温均高于单独热浪事件的流域平均气温,这说明相比于单独热浪事件,复合高温干旱事件具有极端事件的灾害放大效应。陆-气相互作用是复合高温干旱事件期间温度升高的关键驱动因素之一<sup>[35]</sup>。具体来说,干旱期间,土壤水分减少导致蒸发冷却减少,引发大气中感热积累和气温升高,进一步促进蒸发,从而导致土壤水分缺失,干旱加剧;与此同时,干旱和热浪之间的潜在正反馈有助于形成深厚的边界层,可能会导致更强烈和持久的热浪<sup>[36]</sup>。

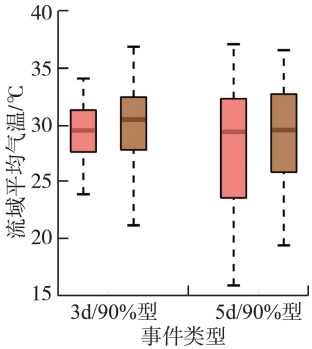
表 1 复合高温干旱事件与单独热浪事件夏季流域平均气温

| 事件类型     | 长江流域   |        |        | 黄河流域   |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 单独热浪/℃ | 复合事件/℃ | 增加比例/% | 单独热浪/℃ | 复合事件/℃ | 增加比例/% |
| 3d/90% 型 | 29.86  | 30.51  | 2.18   | 29.10  | 29.74  | 2.20   |
| 5d/90% 型 | 30.21  | 30.75  | 1.79   | 27.87  | 29.08  | 4.34   |

单独热浪事件 复合高温干旱事件



(a) 长江流域



(b) 黄河流域

图 7 复合高温干旱事件与单独热浪事件气温箱形图  
Fig. 7 Comparisons of basin-average temperature during compound hot-dry events and single heatwave events based on boxplots

表 1 为复合高温干旱事件与单独热浪事件夏季流域平均气温,可见长江流域各类型复合高温干旱事件平均气温均高于黄河流域,主要是由于长江流域位于黄河流域南方,夏季气温总体较黄河流域更高。长江流域 3d/90% 型复合高温干旱事件与单独热浪事件平均气温差值与黄河流域接近,两流域平均气温差值分别为 0.65℃ 与 0.64℃。长江流域的 5d/90% 型复合事件与单独热浪事件平均气温差值低于黄河流域,两流域平均气温差值分别为 0.54℃ 与 1.21℃。与长江流域相比,黄河流域复合高温干旱事件相对单独热浪的温度增加比例更大,这可能由于黄河流域大部分地区位于干旱半干旱区,夏季土壤湿度-温度反馈效应更为显著。

4 结 论

a. 在空间分布上,复合高温干旱事件在长江流

域中下游地区发生频率较高,而在黄河流域空间分布差异不大。在时间变化上,两流域复合高温干旱事件均呈增加趋势,黄河流域增加趋势显著。

**b.** 两流域复合高温干旱事件增加面积均大于减少面积。长江流域上游西北部与南部地区发生频率增加较多,中下游东北部分地区发生频率有所减少;黄河流域大部分地区复合高温干旱事件发生频率增加。

**c.** 与 1961—1987 年相比,两流域 1988—2014 年复合高温干旱事件覆盖面积均有所增加,其中黄河流域受复合高温干旱事件影响范围占比大于长江流域。

**d.** 两流域的复合高温干旱事件平均气温均高于单独热浪事件的平均气温。长江流域 3d/90% 型和 5d/90% 型两类复合高温干旱事件平均气温均高于黄河流域,但是黄河流域复合高温干旱事件相比于单独热浪事件平均温度增加比例大于长江流域。

## 参考文献:

- [ 1 ] 粟晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38 ( 1 ): 34-42. ( SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [ J ]. Water Resources Protection, 2022, 38 ( 1 ): 34-42. ( in Chinese ) )
- [ 2 ] 贾佳, 胡泽勇. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J]. 地球科学进展, 2017, 32 ( 5 ): 546-559. ( JIA Jia, HU Zeyong. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China [ J ]. Advances in Earth Science, 2017, 32 ( 5 ): 546-559. ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 徐金芳, 邓振镛, 陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 2009, 27 ( 2 ): 163-167. ( XU Jinfang, DENG Zhenyong, CHEN Min. A summary of studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China [ J ]. Arid Meteorology, 2009, 27 ( 2 ): 163-167. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] 邓振镛, 文小航, 黄涛, 等. 干旱与高温热浪的区别与联系[J]. 高原气象, 2009, 28 ( 3 ): 702-709. ( DENG Zhenyong, WEN Xiaohang, HUANG Tao, et al. Relationship and difference between drought and high temperature heat waves [ J ]. Plateau Meteorology, 2009, 28 ( 3 ): 702-709. ( in Chinese ) )
- [ 5 ] 马明卫, 韩宇平, 严登华, 等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36 ( 5 ): 11-21. ( MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [ J ]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 5 ): 11-21. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, HURK B, et al. Future climate risk from compound events [ J ]. Nature Climate

Change, 2018, 8 ( 6 ): 469-477.

- [ 7 ] HAO Z C, AGHA KOUCHAK A, PHILLIPS T J. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes [ J ]. Environmental Research Letters, 2013, 8 ( 3 ): 034014.
- [ 8 ] FENG Sifang, HAO Zengchao, ZHANG Xuan, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields [ J ]. Science of The Total Environment, 2019, 689: 1228-1234.
- [ 9 ] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [ R ]. New York: IPCC, 2021.
- [ 10 ] 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 ): 649. ( YU Rong, ZHAI Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events [ J ]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44 ( 5 ): 649. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] CHEN Yang, MOUFOUMA-OKIA W, MASSON-DELMOTTE V, et al. Recent progress and emerging topics on weather and climate extremes since the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [ J ]. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43 ( 1 ): 35-59.
- [ 12 ] HAO Zengchao, HAO Fanghua, XIA Youlong, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [ J ]. Earth-Science Reviews, 2022, 235: 104241.
- [ 13 ] 武新英, 郝增超, 张璇, 等. 中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势 [ J ]. 水利水电技术, 2021, 52 ( 12 ): 90-98. ( WU Xinying, HAO Zengchao, ZHANG Xuan, et al. Distribution and trend of compound hot and dry events during summer in China [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 ( 12 ): 90-98. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] FENG Sifang, WU Xinying, HAO Zengchao, et al. A database for characteristics and variations of global compound dry and hot events [ J ]. Weather and Climate Extremes, 2020, 30: 100299.
- [ 15 ] HAO Zengchao, HAO Fanghua, SINGH Vijay P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas [ J ]. Environmental Research Letters, 2018, 13 ( 12 ): 124022.
- [ 16 ] MUKHERJEE S, MISHRA A K. Increase in compound drought and heatwaves in a warming world [ J ]. Geophysical Research Letters, 2021, 48 ( 1 ): e2020GL090617.
- [ 17 ] 刘君龙, 袁喆, 许继军, 等. 长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估 [ J ]. 长江科学院院报, 2020, 37 ( 10 ): 28-36. ( LIU Junlong, YUAN Zhe, XU Jijun, et al. Meteorological drought evolution characteristics and future trends in the Yangtze river Basin [ J ]. Journal of

- Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37 (10): 28-36. (in Chinese))
- [18] 李晓蕾, 王卫光, 张淑林. 基于 CMIP6 多模式的长江流域未来降水变化趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 1-7. (LI Xiaolei, WANG Weiguang, ZHANG Shulin. A trend analysis of future precipitation in the Yangtze River Basin based on CMIP6 multi-model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 1-7. (in Chinese))
- [19] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048-1058. (HUANG Jianping, ZHANG Guolong, YU Haipeng, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1048-1058. (in Chinese))
- [20] 杨大文, 杨雨亭, 高光耀, 等. 黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 544-551. (YANG Dawen, YANG Yuting, GAO Guangyao, et al. Water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 544-551. (in Chinese))
- [21] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52-60. (MA Zhuguo, FU Congbin, ZHOU Tianjun, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60. (in Chinese))
- [22] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度法和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [23] 王喜元, 闫业超, 岳书平, 等. 1961—2010 年长江流域高温热浪时空变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 602-609. (WANG Xiyuan, YAN Yechao, YUE Shuping, et al. On spatiotemporal variations of heat waves in the Yangtze River Basin from 1961 to 2010[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2016, 38(4): 602-609. (in Chinese))
- [24] 金佳鑫, 肖园园, 金君良, 等. 长江流域极端水文气象事件时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 867-876. (JIN Jiaxin, XIAO Yuanyuan, JIN Junliang, et al. Spatial-temporal variabilities of the contrasting hydrometeorological extremes and the impacts on vegetation growth over the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 867-876. (in Chinese))
- [25] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241. (ZHOU Shuai, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241. (in Chinese))
- [26] 黄涛, 徐力刚, 范宏翔, 等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1677-1684. (HUANG Tao, XU Ligang, FAN Hongxiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1677-1684. (in Chinese))
- [27] 韩兰英, 张强, 马鹏里, 等. 气候变暖背景下黄河流域干旱灾害风险空间特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 225-234. (HAN Lanying, ZHANG Qiang, MA Pengli, et al. Characteristics of drought disasters risk in the Yellow River Basin under the climate warming[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 225-234. (in Chinese))
- [28] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50 a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414-420. (ZHAO Yufei, ZHU Jiang, XU Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(4): 414-420. (in Chinese))
- [29] 朱晓萌, 张泽中, 袁义杰, 等. 基于水分亏缺率的贵州地区烟草干旱指标[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 34-40. (ZHU Xiaomeng, ZHANG Zezhong, YUAN Yijie, et al. Drought index of tobacco based on water deficit rate in Guizhou region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 34-40. (in Chinese))
- [30] 郝增超, 侯爱中, 张璇, 等. 干旱监测与预报研究进展与展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 30-40. (HAO Zengchao, HOU Aizhong, ZHANG Xuan, et al. Research progresses and prospects of drought monitoring and prediction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11): 30-40. (in Chinese))
- [31] 朱烨, 靳鑫桐, 刘懿, 等. 基于短时间尺度自适应帕尔默干旱指数的中国干旱演变特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 38(4): 124-130. (ZHU Ye, JIN Xintong, LIU Yi, et al. Drought characteristics in China based on a short-scalar Palmer drought severity index[J]. Water Resources Protection, 2021, 38(4): 124-130. (in Chinese))
- [32] PERKINS S E, ALEXANDER L V. On the measurement of heat waves[J]. Journal of Climate, 2013, 26(13), 4500-4517.
- [33] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [34] 章斌武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-

496. (ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese))
  - [35] 杨扬, 杨启东, 王芝兰, 等. 中国区域陆气耦合强度的时空分布特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(3): 374-385. (YANG Yang, YANG Qidong, WANG Zhilan, et al. A study of spatial and temporal distribution of land-atmosphere coupling strength in China [J]. Arid Meteorology, 2021, 39(3): 374-385. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-03-25 编辑: 王芳)
- +++++
- (上接第 30 页)
- [8] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近 20a 塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. (LI Lijun, ZHANG Xiaoqing, CHEN Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247. (in Chinese))
  - [9] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiadeng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 120-126. (in Chinese))
  - [10] MIAO Ning, JIAO Peipei, TAO Wenjing, et al. Structural dynamics of *Populus euphratica* forests in different stages in the upper reaches of the Tarim River in China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3196.
  - [11] 贾俊姝, 孟悦, 戴俊生, 等. 生态输水对塔里木河下游地下水时空分布特征的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 81-90. (JIA Junshu, MENG Yue, DAI Junsheng, et al. Affect on characteristic of groundwater spatial and temporal distribution after ecological water transport in the lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 37(5): 81-90. (in Chinese))
  - [12] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726. (DENG Mingjiang, YANG Pengnian, ZHOU Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726. (in Chinese))
  - [13] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 王光焰, 等. 间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5519-5528. (LIU Qianqian, GULIMIRE · Hanati, WANG Guangyan, et al. Simulation of sectional groundwater level variation in the lower reaches of Tarim River under intermittent ecological water conveyance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5519-5528. (in Chinese))
  - [14] 薛联青, 魏卿, 魏光辉. 塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 195-201. (XUE Lianqing, WEI Qing, WEI Guanghui, et al. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 195-201. (in Chinese))
  - [15] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 苏里坦, 等. 塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 979-986. (LIU Qianqian, GULIMIRE · Hanati, SU Litan, et al. Response process of groundwater table to ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River riparian zone [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 979-986. (in Chinese))
  - [16] 薛联青, 廖淑敏, 刘远洪, 等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (XUE Lianqing, LIAO Shumin, LIU Yuanhong, et al. Cumulative effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))
  - [17] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 2000—2014 年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 32-39. (in Chinese))
  - [18] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640. (BAI Yuan, XU Hailiang, ZHANG Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640. (in Chinese))
  - [19] LIAO S M, XUE L Q, DONG Z C, et al. Cumulative ecohydrological response to hydrological processes in arid basins [J]. Ecological Indicators, 2020, 111: 1-14.
  - [20] 肖斌, 许模, 曾科, 等. 基于 Modflow 的岩溶管道概化与模拟探讨[J]. 地下水, 2014, 36(1): 53-55. (XIAO Bin, XU Mo, ZENG Ke, et al. Study on karst conduit generalization and simulation [J]. Ground Water, 2014, 36(1): 53-55. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-01-01 编辑: 俞云利)