

沈诗荐,李金建,马龙云,等.三维视角下中国夏季复合极端高温干旱事件的时空演变特征[J].人民珠江,2026,47(5):63-74.

三维视角下中国夏季复合极端高温干旱事件的时空演变特征

沈诗荐,李金建*,马龙云,孙浩真,陈其航

(复杂地形区域气候变化与资源利用四川省重点实验室/成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站/气象灾害预测预警四川省工程研究中心/成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225)

摘要:在全球变暖背景下,复合高温干旱事件(Compound Droughts and Heatwave events, CDHEs)频发并对生态与社会经济产生严重影响。基于CN05.1逐日最高气温与降水再分析数据,结合三维连通组件(3-D Connected Component, CC3D)算法,从时空复合的三维视角系统识别并分析了1961—2022年中国中东部夏季复合高温干旱事件的时空特征与演变规律。结果表明,近60 a来区域夏季日最高气温显著升高($0.116^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),而降水量虽有增加趋势但并不显著。共识别出297次事件,其质心呈 $30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 沿区域中部的带状集聚特征,四川盆地至江汉平原为核心高发区。长期趋势显示,事件持续时间变化不显著,而覆盖范围和强度均显著增强,风险主要表现为空间扩展与强度加剧。频率分布上,短历时事件占主导,覆盖面积呈局地型与区域型并存的“双峰”格局,强度以中低水平为主但存在少数极端强烈事件。移动特征显示事件以东西向迁移为主,斜向次之,经向不对称性明显。研究结果深化了对区域复合极端事件时空规律的认识,并为灾害风险评估与气候适应提供科学支撑。

关键词:复合高温干旱事件;时空特征;三维特征;中国中东部

中图分类号:TV11 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)05-0063-12

在全球变暖背景下,热浪、干旱、洪水和寒潮等极端气候事件也日益频发^[1]。大量研究表明,不同的极端事件在同一地点同时发生或相继发生可能会对供水、作物产量和牲畜死亡率产生非常不利的影响,其影响程度可能超过了各单一极端事件影响的简单叠加,这种由多个事件导致的大范围影响,通常被称为“复合型极端事件”^[2]。政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告强调,与1850—1900年相比,2011—2020年期间全球地表温度上升了约 1.09°C ,同时全球及区域范围内的复合型极端事件给自然生态系统和人类社会带来了独特的风险^[3]。随着全球气温持续上升,复合型极端事件的风险可

能进一步提高^[4]。其中,在夏季发生的复合极端高温干旱事件(Compound Droughts and Heatwave events, CDHEs)往往会导致树木死亡、农作物减产和野火,产生广泛的社会经济影响^[5],成为业界研究的热点。已有大量研究表明在变暖背景下,不少地区复合高温干旱事件的发生频率、强度等特征都呈现增加趋势,其中包括中亚、澳大利亚、美国西部、西欧和中国东部等地^[6-11]。对于中国,已有研究表明除青藏高原和新疆部分地区以外的中国大部分地区为复合高温干旱事件的高发区^[12],事件的频率、持续时间和严重程度显著增加^[13]。尤其在近20 a,中国中东部频繁遭遇复合高温干旱事件,例如2013、2019和2022年均发生了严重的复合高温干旱

基金项目:四川省科技教育联合基金面上项目(2024NSFSC1986);青海省科技计划项目(2025-ZJ-736)

收稿日期:2025-09-11 **修回日期:**2025-10-22 **网络首发日期:**2025-11-21

作者简介:沈诗荐(2001—),男,硕士研究生,主要从事极端气候研究与气候变化。

通信作者:李金建(1982—),男,博士,教授,主要从事古气候与气候变化。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

事件^[14-16]。其中,2022年夏季,中国中东部发生了一次1961年以来最强的复合高温干旱事件,多地日最高气温打破历史纪录,造成了严重的经济损失和人员伤亡^[17]。作为中国的关键经济带,中国中东部在国家发展战略中占据举足轻重的地位,同时由于地处东亚季风区,四季分明,气候变化带来的影响在该区域尤为明显。当夏季区域处于西太平洋副热带高压控制下时,高温、伏旱频发^[18]。在全球气候变暖的背景下,该区域高温、干旱及复合高温干旱极端事件的时空分布特征也在发生显著变化。

针对复合高温干旱事件的变化特征,前人往往使用日尺度的高温阈值结合月尺度的干旱指数的定义方法,例如,气象干旱的3个月标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)和高温的日百分位阈值是用于识别复合事件的一对常用指数^[19]。干旱指数的这种粗糙尺度以及干旱和高温指数之间的尺度不匹配可能导致对事件的实际生命周期以及严重程度产生一定的认识偏差,进一步影响对事件致灾性的判断^[20]。同时在日尺度上识别高温与干旱事件有助于精确地分析复合高温干旱事件特征的变化。因此,本研究基于SPI在日尺度上识别干旱事件,并开展复合高温干旱事件的研究。同时,已有大量研究基于固定的站点或格点数据分析复合高温干旱事件的持续时间和覆盖面积^[21-22],但实际上事件通常在时间和空间上共同传播,事件的空间覆盖范围在其生命周期中可能会随着时间的推移而变化,表现出时空连续性,传统的基于固定的站点或格点的分析方法往往忽略了事件的时空连续性。因此,本文拟使用一套三维连接组件算法,结合日尺度事件定义,通过跟踪每个事件的生命周期,在纬度-经度-时间的三维视角下探索事件在时间和空间上的可变性。首先分析中国中东部夏季区域平均日最高温度和降水量的年代际变化趋势。然后探讨复合高温干旱事件的空间分布和特征量的时间序列。最后解读三维视角下复合高温干旱事件的移动方向和路径。研究结果将为更好地理解中国中东部复合极端高温干旱事件的发生规律,提升灾害风险评估与应对能力提供科学依据。

1 研究区域概况与研究数据

1.1 研究区域概况

本文选取 $28^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 为研究区域(简称中国中东部,下同),见图1,其总面积约138万 km^2 ,占中国国土面积的14.3%^[23]。该区域地形类型多样,涵盖了青藏高原东南缘、四川盆地以及长江中下游平原,横跨青藏高寒区、西南热带季风区和东部亚热带季风区,气候差异显著。区域内河网密布、水量充沛,养育了中国约1/4的人口,是中国重要的水资源供给区。其西部蕴藏丰富的水能资源,是“西电东输”工程的核心区域^[19]。此外,该区域也是中国主要的粮食产区。随着经济的快速增长,这里已发展成为中国乃至全球人口最为稠密的地区之一,并在中国社会经济发展中发挥着重要的支撑和辐射作用。

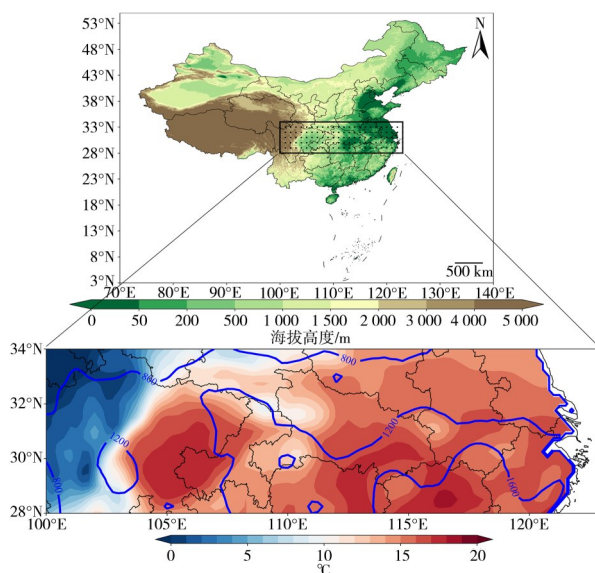


图1 中国中东部地理位置及年平均气温(填色)和年平均降水(等值线,单位:mm)的空间分布特征

Fig. 1 Geographical location of central and eastern China and spatial distribution characteristics of annual average temperature (coloring) and annual average precipitation (contour lines, unit: mm)

图1还展示了中国中东部多年平均气候态的温度与降水空间分布特征。可以看出,温度方面西部高原地区温度较低,而四川盆地和长江中下游平原地区温

度较高。降水方面,则大体呈现由北向南递增的特征。

1.2 数据来源

本文研究采用的逐日最高温度($T_{\max}$)和平均降水量(Pre)资料来自格点化数据集CN05.1,CN05.1数据集基于中国境内2400多个地面气象站的观测资料,使用距平逼近法由气候场和距平场分别插值后叠加得到中国区域的日尺度格点化气象要素再分析数据集,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ [24]。研究选取的时间范围为1961—2022年的夏季(6—8月)。

2 研究方法

2.1 三维视角下时空连续高温热浪事件的定义与识别

传统的高温热浪识别方法大多仅依赖于单个格点或观测站资料,缺乏对事件在时空维度上连续性的刻画。为克服这一不足,本文引入了三维连通组件(3-D Connected Component, CC3D)算法来识别高温热浪过程。CC3D方法是在Rosenfeld和Pfaltz提出的二维图像连通分量标记(Connected Components Labeling, CCL)算法的基础上,扩展至三维场景的一种改进技术[25]。该方法的主要处理流程如下。

a)高温阈值设置。本研究选取1981—2010年作为基准时段,以最高气温($T_{\max}$)的第90百分位值确定极端高温阈值[26]。具体计算时,采用以目标日为中心的15 d滑动窗口方法获得[27]。阈值计算借助R语言中的Climpack工具包完成,该包自带的重新调整程序能够校正因参考期选择而引起的不均一性问题[28]。

b)结合阈值处理原始格点数据。在每年的研究时段(6—8月),首先将原始的三维最高气温($T_{\max}$)数据(纬度-经度-时间)转换为二进制形式。具体而言,若某一格点在对应日期的 $T_{\max}$ 超过预设高温阈值,则赋值为“1”;反之则赋值为“0”[25]。

c)三维连通性设置与事件识别。随后,将得到的“0/1”二进制格点阵列输入CC3D算法,用以识别所有潜在的连通单元,并将连通性设定为26。在该设置下,一个连通单元集合对应于一个时空连续的高温热浪事件。连通性为26的考虑依据是:在一个 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体中,中心格点周围包含前一日的9个格点、当日除中心外的8个格点以及后一日的9

个格点(图2a)。通过允许这26个方向上的“1”单元相互连接,该方法能够构建出三维连续结构,从而实现高温热浪事件在时空上的整体追踪。图2b所示,此次事件在6月1日发源于区域北侧,在6月2日向南移动,控制四川盆地的大部分区域;到了6月3日,事件继续向东向南发展,控制整个四川盆地到华中一带。这样设置可以确保不同的相邻事件在“纬度-经度-时间”空间中不重叠或不接触,即不同事件既不在空间上相邻也不在时间上相邻[25]。本文研究只考虑大型高温热浪,即定义一次三维连续高温热浪事件的持续时间大于等于3 d,所扫过的格点数大于等于100个。

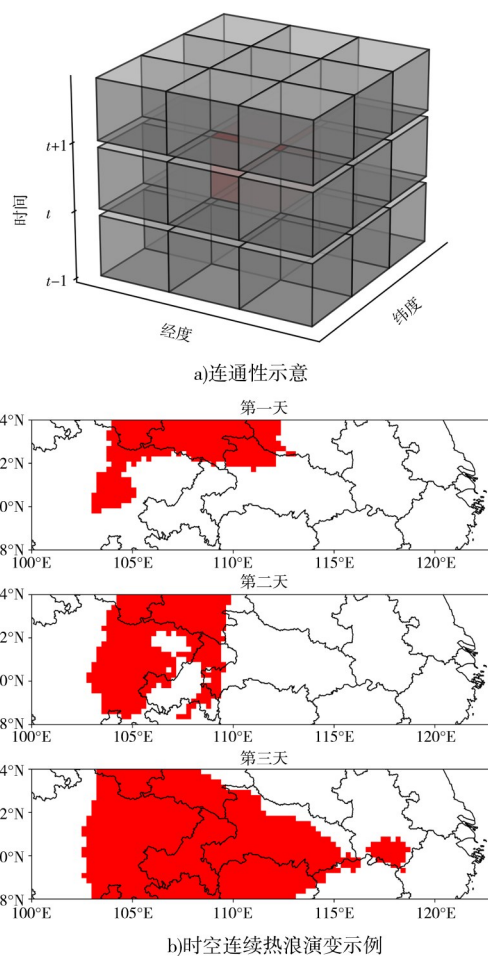


图2 沿纬度、经度和时间($t-1, t, t+1$)跟踪的26个三维连接单元示意图和2008年区域一次时空连续高温热浪事件6月1日到6月3日的三维演变过程

Fig. 2 Schematic diagram of 26 three-dimensional connected units tracked along latitude, longitude, and time ($t-1, t, t+1$) and 3D evolution of a spatiotemporal continuous heatwave event during 1–3 June, 2008

传统的一维视角通常以单个格点或格点的逐日气温序列为基础,只能识别某一地点是否发生连续高温;二维视角则是在每日空间场上识别超阈值区域,但无法保证事件在时间维度上的连续性。相比之下,本研究在三维视角下将每日格点数据堆叠为一个纬度-经度-时间的三维数据体,利用CC3D算法在26邻域内搜索连通体,每个连通体即对应一场在空间和时间上均连续的热浪事件。这一框架不仅能识别事件的持续时间和空间范围,还能追踪事件的移动路径、合并与分裂过程,从而克服了一维和二维方法在事件整体性和演变刻画上的局限^[27]。

2.2 复合高温干旱事件的定义

目前,常用来表征气象干旱的指数包括SPI、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation, Evapotranspiration Index, SPEI)^[9]和气象干旱综合指数(Meteorological Composite Index, MCI)^[11]等多种气象干旱指数,SPI指标具备多时间尺度的特性,被广泛用于干旱监测,能够较好地刻画干旱的强度与持续时间等特征,因而具有较高的适用性。Shan等^[20]在SPI最初计算方式基础上,选择基于gamma分布计算正降水量的累积分布概率,对其进行了修正。本文采用Shan等的修正方法,结合平均降水量资料计算逐日SPI,见式(1)~(4):

$$SP_{m,i} = \begin{cases} \sum_{j=i-N_d+1}^i P_{m,j}, & \text{if } i \geq N_d \\ \sum_{j=1}^i P_{m,j}, & \text{if } i < N_d \end{cases} \quad (1)$$

$$F_i^d(SP_{m,i}) = \begin{cases} F_i^d(0), & \text{if } SP_{m,i} = 0 \\ F_i^d(0) + (1 - F_i^d(0)) \times F_i^Y(SP_{m,i}), & \text{if } SP_{m,i} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_i^d(0) = \frac{Z_i}{62} \quad (3)$$

$$SPI_{m,i} = \Phi^{-1}(F_i^d(SP_{m,i})) \quad (4)$$

式中: i 和 j 表示每年6—8月的日历日(1,2,⋯,92); m 为所考虑的年份(1,2,⋯,62); N_d 为累计窗口的长度, d ; $P_{m,j}$ 为 m 年第 j 天的降水量,mm; $SP_{m,i}$ 为累计窗

口内直至第 i 天(包括第 i 天)的降水量,mm; F_i^Y 为正降水值($SP_{m,i} > 0$)拟合的累积分布函数(CDF); F_i^d 为所有降水值的CDF; $F_i^d(0)$ 为零降水量的概率; Z_i 为62 a内零 $SP_{m,i}$ 值的数量; Φ^{-1} 为逆标准正态CDF; $SPI_{m,i}$ 为第 m 年第 i 天的SPI值。

如图3,对识别出的501次时空连续热浪事件的持续时间进行统计,结果显示事件持续时间主要集中在3~10 d,呈单峰分布特征,其中持续时间为3 d的事件占比最多,为200次。考虑到干旱的发展具有一定的累积效应,而过短的时间窗口(如3 d)难以反映降水持续偏少的信号,过长的时间尺度(如10 d)又可能平滑掉短历时热浪过程中的水分异常,故本研究选取 $N_d=7$,即计算7 d时间尺度的逐日SPI(SPI_{7days}),使干旱过程的累积特征与热浪的典型持续时间相一致^[20]。同时,7 d也对应于气候学上广泛采用的周尺度周期,具有良好的物理意义与业务可解释性。基于上述考虑,本文最终采用 SPI_{7days} 作为干旱指数,用于复合高温干旱事件的界定与识别。

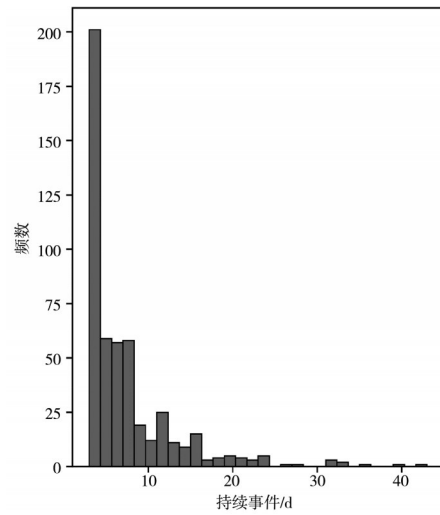


图3 中国中东部1961—2022年夏季高温热浪事件持续时间的概率分布函数(Probability distribution functions, PDFs)

Fig. 3 PDFs of duration of heatwave events in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

在识别到的大尺度三维连续高温热浪事件中,首先计算事件持续期间各格点的逐日平均 SPI_{7days}

值;随后对事件覆盖区域内所有格点的日均 SPI_{7days} 进行空间平均,从而得到该事件整体的 SPI_{7days} 。当该平均值小于或等于 -0.5 时,即将该事件判定为复合高温干旱事件。

2.3 时空连续复合高温干旱事件的特征定义

在三维坐标系中,时空连续的复合高温干旱事件可表现为具有特定属性的三维结构。为刻画其特征,本研究选取了4类指标进行描述,分别为持续时间、强度、最大覆盖面积以及质心(表1)。

表1 用于表征三维时空连续复合高温干旱事件特征的主要指标

Tab. 1 Main indicators for characterizing the characteristics of three-dimensional spatiotemporal continuous CDHES

特征量	单位	定义
持续时间	天	事件从开始日到结束日跨越的天数
强度	℃	事件相关的所有格点单元的温度超过阈值的平均值
最大覆盖面积	$10^5 km^2$	事件经纬度表面的投影面积,即受事件影响的潜在最大面积
质心		事件的强度加权几何中心

2.4 统计方法

通过 Sen's 斜率估计方法对序列进行线性趋势拟合,刻画时间序列的趋势变化,并利用 Mann-Kendall (M-K) 检验对其趋势进行显著性检验。对于时间序列 $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 斜率 β 见式(5):

$$\beta = \text{median} \left(\frac{X_i - X_j}{i - j} \right), 1 \leq j < i \leq n \quad (5)$$

式中, $\beta > 0$ 表示序列呈现增加趋势, $\beta < 0$ 表示序列呈现减少趋势。当显著性水平为 α 时,若统计量 Z 满足 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则说明该序列在 α 水平上具有显著性变化;反之,则认为其变化在该显著性水平下不显著。本文将 $\alpha=0.05$ 下显著的变化趋势视为序列存在显

著变化。

使用 K 均值聚类 (K-Means Clustering) 对复合高温干旱事件的移动方向进行聚类分析,用于识别不同的移动路径模式并抓取主导的模式。 K 均值聚类是一种广泛使用的无监督机器学习算法,它通过将数据集划分为 K 个簇 (cluster), 使得每个簇内的样本之间的相似度最大,而不同簇之间的相似度最小。

3 结果与分析

3.1 中国中东部夏季气温和降水的时间变化特征

图4为中国中东部1961—2022年夏季日最高温度和平均降水量的时间序列和空间分布。在研究期内,区域夏季日最高温度的平均值呈现增加趋势,增幅为每10年 $0.116^\circ C$, 升温趋势显著(通过 0.05 显著性检验)(图4a)。平均降水量也呈现增加趋势,增幅为每10年 $0.102 mm/d$, 但增加趋势并不显著(未通过 0.05 显著性检验)(图4b)。值得注意的是,2022年夏季区域同时出现了历史最高的平均日最高气温和第二低的平均降水量,与 Qian 等^[17] 的研究结果一致,表明区域经历了截至目前最为严重的复合高温干旱事件。

3.2 复合高温干旱事件的空间分布特征

1961—2022年夏季中国中东部总共发生297次时空连续的大型复合高温干旱事件。从图5的质心空间分布看,复合高温干旱事件在区域内呈现显著的带状聚集,主要沿 $30^\circ \sim 32^\circ N$ 展开,共有163次,占事件总数的 54.9% , 形成由东部四川盆地、江汉平原至皖中的连续高发带。说明事件在区域中部更为活跃,相比之下,区域南部($28^\circ \sim 30^\circ N$)和北部($32^\circ \sim 34^\circ N$)的质心数量显著偏少,事件的最大覆盖面积也较小,表明事件发生频率较低且大多为小型事件,但同时事件质心分布在区域北部的频率依旧大于南部。

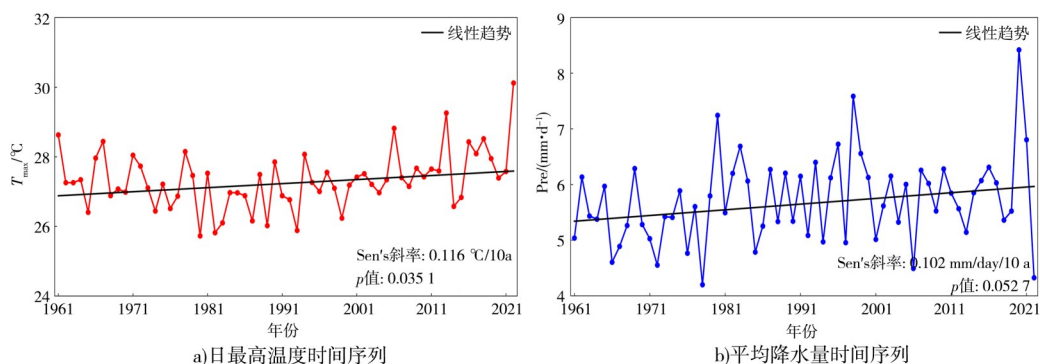
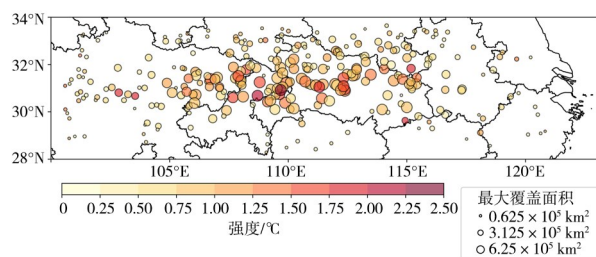


图4 中国中东部1961—2022年夏季日最高温度和平均降水量的时间序列和变化趋势

Fig. 4 Time series and changing trends of daily maximum temperature and average precipitation in summer over central and eastern China from 1961 to 2022



注:气泡颜色和大小分别代表事件的强度和最大覆盖面积

图5 中国中东部1961—2022年夏季复合高温干旱事件的质心分布

Fig. 5 Centroid distribution of CDHEs in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

从经度分布来看,事件质心在 $107^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 区间分布最为密集,共有126次,占事件总数的42.4%,不仅数量最多,而且对应的事件强度和最大覆盖面积也显著偏大,表明该区域是复合高温干旱事件的核心活跃带,向东西两端延伸时($100^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 与 $113^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$),质心分布逐渐稀疏,事件强度与影响范围整体减弱。综合来看,中国中东部复合高温干旱事件的空间格局呈现出中段集聚、北侧多于南侧,中部强于两侧的典型特征。这一分布与西太平洋副热带高压的异常位置及水汽输送条件密切相关^[29]。四川盆地中部至湖北省中部地区($30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $107^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$)是复合高温干旱导致的灾害的高发区,这一地区同时也是人口密集区,农业和水资源承载压力较大,因此夏季复合极端高温干旱事件的发生对区域社会经济和生态安全的影响尤为突出。

3.3 复合高温干旱事件特征指标的长期变化

图6展示了1961—2022年中国中东部夏季复合高温干旱事件在3个关键特征指标上的年际变化趋势,包括持续时间(图6a)、最大覆盖面积(图6b)以及强度(图6c)。散点为逐年观测值,红色实线表示基于Sen's斜率估计的线性趋势,图中同时给出了对应的Sen's斜率(以10 a为尺度)和M-K趋势检验的显著性水平。结果表明:事件的平均持续时间在研究时段内呈现出缓慢上升趋势,增幅为每10年0.389 d,但增加趋势不显著(未通过0.05显著性检验)。这说明尽管事件在持续时间上有增加的迹象,但其长期演变在统计意义上尚不够显著,表明持续性变化幅度较为有限。事件的平均最大覆盖面积表现出显著的增加趋势,增幅为每10 a $0.395\times 10^5\text{ km}^2$ (通过0.05显著性检验)。这表明近60 a来中国中东部受复合高温干旱事件影响的空间范围持续扩大,特别是进入21世纪后,覆盖面积增多,反映了灾害影响范围的显著扩展。事件的平均强度同样呈现显著增加趋势,增幅为每10年 0.039°C (通过0.05显著性检验)。说明事件的平均强度在过去数十年间呈现出逐步增强的特征,高温过程更趋极端化。在以上长期趋势之外,2022年3个指标同时达到极值,凸显其异常性,这与图4中的结果一致。

综上所述,1961—2022年中国中东部夏季复合高温干旱事件表现出明显的演变特征,即事件的持

续时间虽有增加但尚不显著,但最大覆盖面积与强度均呈现显著增强趋势。这意味着该区域复合高温干旱事件的风险主要体现在空间范围的扩大和高温强度的加剧,而非事件持续性的显著延长。上

述特征与近年来区域增暖背景下极端高温过程频率上升的结论相一致,也提示未来该地区在气候变化情境下可能面临更大的复合高温干旱事件灾害风险。

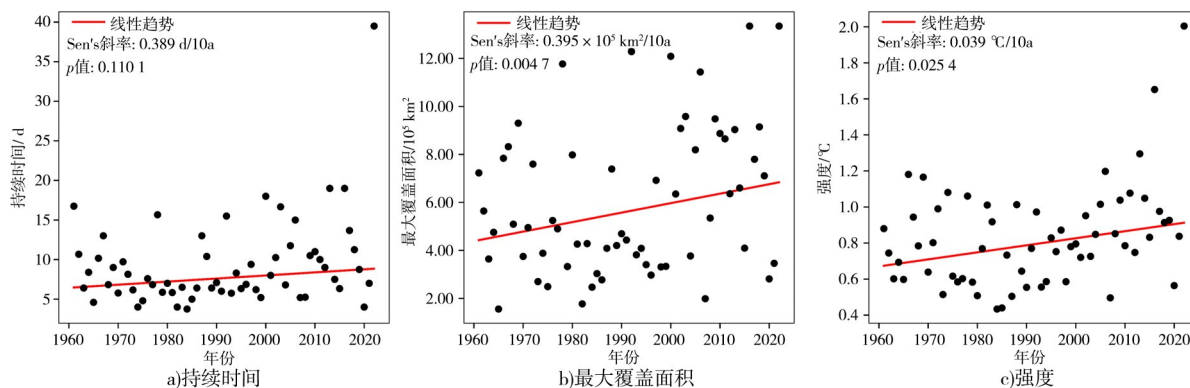


图6 中国中东部1961—2022年夏季复合高温干旱事件的三项主要指标的时间变化趋势

Fig. 6 Temporal trends of three main indicators of CDHEs in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

图7显示了1961—2022年中国中东部夏季复合高温干旱事件的持续时间(图7a)、最大覆盖面积(图7b)以及强度(图7c)的频率分布特征。首先,从

持续时间来看,大多数事件集中在3~8 d,该区间共出现205次,约占全部事件的69.0%。

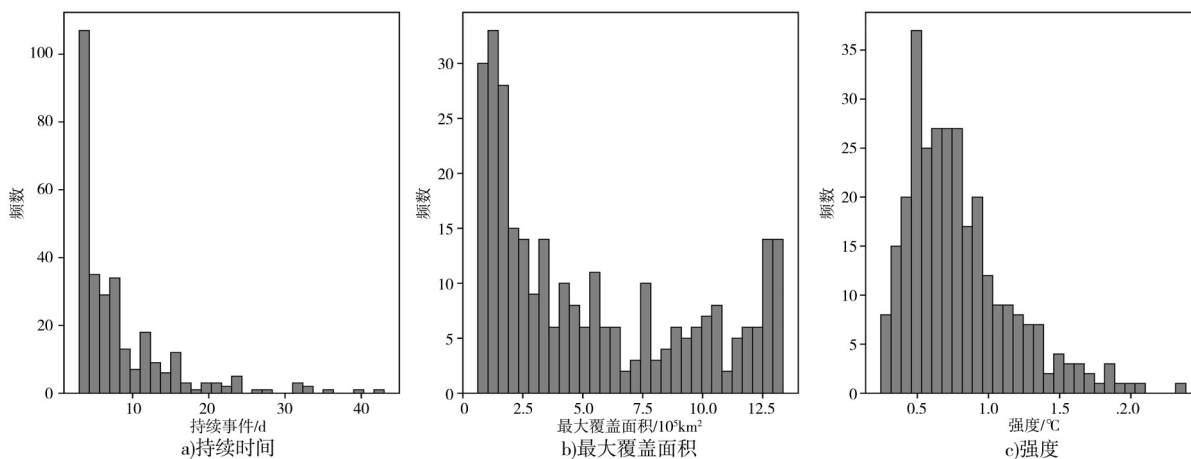


图7 中国中东部1961—2022年夏季复合高温干旱事件的三项主要指标的概率分布函数

Fig. 7 PDFs of three main indicators of CDHEs in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

这一结果表明,短历时事件在研究区占据绝对主导地位,呈现明显的高频特征,而持续时间超过20 d的事件极为少见,仅占总数的不足5%,显示出超长持续干热在该区域为异常现象。其次,就最大覆盖面积而言,事件分布呈现出明显的双峰特征。一方面,约106次(占比36%)事件覆盖面积集中在

$0.625 \times 10^5 \text{ km}^2$ 到 $2.3 \times 10^5 \text{ km}^2$,构成了主要频发区间;另一方面,在分布的右尾部,约28次(占比9.4%)事件覆盖面积超过 $12.5 \times 10^5 \text{ km}^2$,这一双峰格局揭示了事件在空间尺度上的2种典型模式:一类为覆盖范围较小的小型局地性事件,另一类则为覆盖范围显著扩大的大型区域性极端事件。最后,

从强度分布来看,事件强度主要集中在 $0.46^{\circ}\text{C} \sim 0.74^{\circ}\text{C}$,共出现 116 次,约占总数的 39.1%。这说明大多数事件的温度超阈值幅度相对有限,属于中低强度事件。然而,在分布右尾仍可观察到少数超过 1.5°C 的强烈事件,表明研究区虽以中低强度事件为主,但仍存在发生高强度事件的潜在风险。

总体而言,这些结果表明研究区的复合高温干旱事件在时间尺度上以短时过程为主,在空间分布上同时存在局地性与区域性两类典型模式,而在强度方面则以中低强度为主,但不排除个别强烈事件的发生。

3.4 复合高温干旱事件的移动特征

上文提到从三维视角下研究复合高温干旱事件可以跟踪事件的移动。图 8 展示了中国中东部复合高温干旱事件在 3 个指标上的移动方向分布。图中扇形的朝向表示事件的移动方向角,半径长度表

示该方向上事件的出现频率占比,颜色则对应事件本身的属性大小。3 幅图共同表明,事件的迁移方向高度集中在东西向,尤其是正东(E)和正西(W)方向的占比最高,表明复合事件在发生和传播过程中呈现出以东西向为主导的显著迁移特征。其中,向西迁移(包括 S-W 方向)的事件通常具有更长的持续时间和更强的强度(图 8a、8c),这说明其在演变过程中往往更加持久,极端性特征也更为突出;而在最大覆盖面积方面,并未呈现出明显的单一方向偏好,而是在各个方向均存在覆盖范围较大的事件(图 8b),提示区域性大型事件可以在不同迁移路径上发生。这些结果表明虽然复合高温干旱事件的主导迁移方向表现出高度一致性,但其强度、持续时间与空间覆盖范围在不同方向上仍然具有显著差异,反映出复杂的区域性和方向性特征。

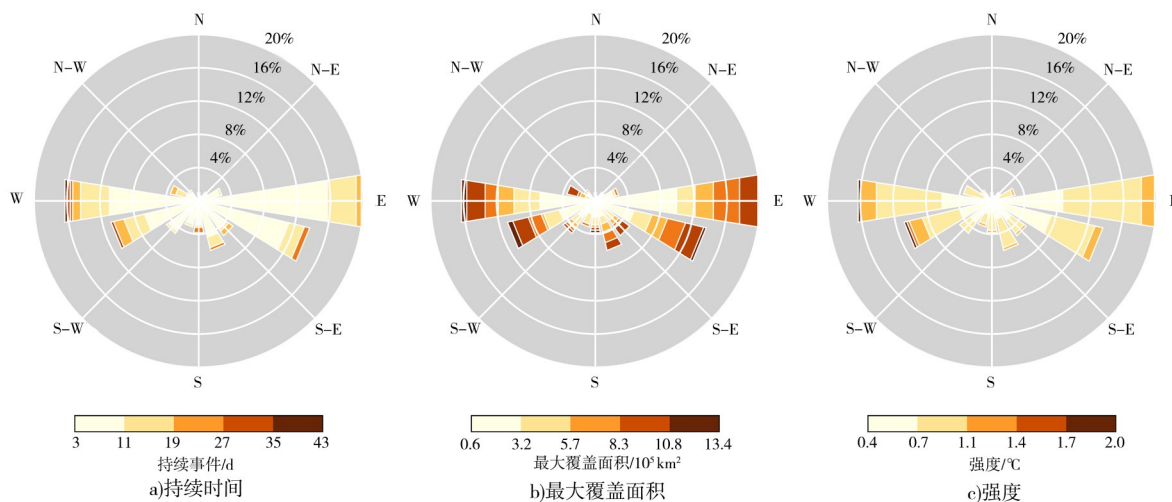


图 8 中国中东部 1961—2022 年夏季复合高温干旱事件持续时间、最大覆盖面积和强度的移动方向角分布的玫瑰图

Fig. 8 Rose diagram of distribution of moving direction angles of duration, maximum coverage area, and intensity of CDHEs in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

图 9 展示了中国中东部复合高温干旱事件的移动路径分型,首先以单次事件前半段与后半段内的质心位置分别代表事件的起点与终点,由此得到事件的位移向量,即图中箭头的起点为前半段质心,终点为后半段质心,从而刻画事件的整体迁移方向与位移特征。随后将所有事件的单位位移向量进行归一化处理并进行聚类分析,在对热浪质心位移

向量进行 K 均值聚类时,将簇数设定为 8,主要依据地理学上常用的 8 个基本方位(东、东南、南、西南、西、西北、北、东北),因此所得 8 个分型可以直观反映事件的主要迁移方向。从整体上看,东西向平移型是区域复合高温干旱事件最为主要的移动模式。其中,第 1 簇(69 次,占 23.2%)和第 7 簇(56 次,占 18.9%)合计占比高达 42.1%。这一结果表明,大多

数事件在演变过程中表现出显著的纬向移动特征,显示出事件迁移轴线的高度一致性。其次,斜向移动型在整体样本中也占有相当比例,主要包括东北—西南向和西北—东南向两个方向,分别对应第2簇(46次,占15.5%)和第5簇(51次,占17.2%),合计占比32.7%。这表明在纬向移动的主导背景下,事件常常叠加一定的经向分量,呈现出倾斜方向的移动特征。

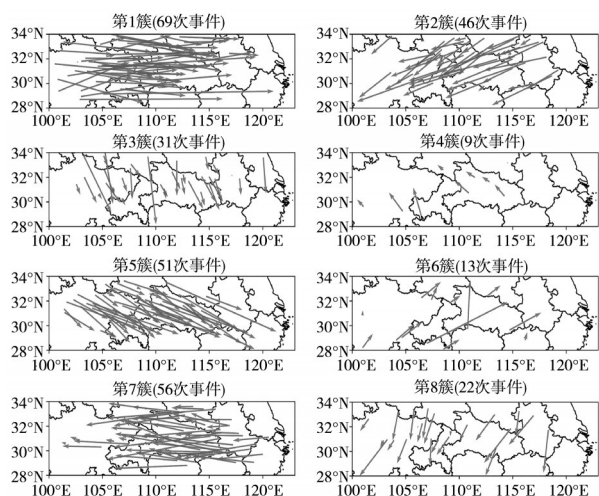


图9 中国中东部1961—2022年夏季复合高温干旱事件的移动路径聚类结果

Fig. 9 Clustering results of movement paths of CDHEs in summer over central and eastern China from 1961 to 2022

此外,由北向南移动型也在聚类结果中有所体现,第3簇事件(31次,占10.4%)呈现出较为典型的由北向南下行的移动轨迹。然而,在整个样本期内,并未出现对应的由南向北移动型,显示出事件在经向分量上的明显不对称性。这种不对称性可能与夏季亚欧大陆中高纬度的波列模态密切相关。例如,亚欧大陆上空对流层中上层常存在自欧洲东北部经中亚向东传递至东亚的波作用通量,形成类似丝绸之路遥相关模态(Silk Road Pattern, SRP)的波列分布。该模态具有显著的纬向导向性,易在东亚下游触发反气旋异常,从而造成高温和降水偏少的背景^[30]。受此影响,复合高温干旱事件更倾向于表现为东西向平移或北向南推进,而缺乏自南向北的移动路径。其余簇中,第4簇(9次,占3.0%)、第

6簇(13次,占4.4%)和第8簇(22次,占7.4%)所包含的事件数量相对较少,迁移方向较为分散,未形成突出的主导型态,因而可视为少数非典型路径。

总的来说,聚类结果清晰地揭示了中国中东部复合高温干旱事件移动路径的统计分型特征:一方面,东西向是绝对主导方向,表明纬向平移是事件演变的基本特征;另一方面,斜向路径次之,经向单一分量相对较弱,特别是缺少由南向北型,体现出显著的不对称性。

4 结论

本文基于1961—2022年CN05.1逐日最高气温和降水数据,利用CC3D方法系统识别并分析了中国中东部夏季复合高温干旱事件。研究揭示了事件的时空分布特征、长期演变趋势以及典型迁移模式。

a)复合高温干旱事件在中国中东部频繁发生,核心高发区集中在30°~32°N中部走廊,尤其是四川盆地至江汉平原一带。事件整体上呈现范围扩展和强度增强的显著趋势,而持续时间增加并不显著。典型频率分布显示,短时过程(3~8 d)占主导,但近年来大型、强烈事件显著增多,2022年更是达到历史极值,凸显气候变暖背景下区域复合极端事件风险的加剧。

b)移动方向分析表明,复合高温干旱事件的移动路径以东西向为主导,事件在纬向上表现出高度一致性;向西移动的事件往往具有更长持续时间和更强强度,而大覆盖面积事件在各方向均可出现。进一步的K均值聚类结果揭示了8类主要迁移模式,其中东西向平移型占比最高(42.1%),东北—西南与西北—东南斜向型次之(32.7%),由北向南下型占比约10%,而缺乏由南向北型,显示出经向分量的不对称性。这一结果表明,尽管事件迁移轨迹存在多样性,但总体上受区域大尺度环流影响,呈现出明显的纬向一致性和复杂的方向差异性。

综上,三维视角下中国中东部复合高温干旱事件在过去六十余年表现为发生频繁、范围扩展、强度增强、移动方向高度一致的特征。这些变化凸

显了气候变暖背景下该区域面临的显著复合高温干旱事件灾害风险。未来研究应进一步结合环流背景和动力机制,探讨副热带高压、季风异常以及下垫面因素在塑造事件时空演变和移动路径中的作用,以为区域防灾减灾和适应气候变化提供更科学的支撑。

参考文献:

- [1] 龚晓,戴长雷,李树岭,等. 近60 a嫩江流域极端气候指数时空分布特征及未来趋势分析[J]. 人民珠江,2025,46(7): 61-73.
- GONG X, DAI C L, LI S L, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and future trend analysis of extreme climate indices in Nenjiang River Basin over the past 60 years [J]. Pearl River, 2025, 46(7): 61-73. (in Chinese)
- [2] HAO Z C, HAO F H, XIA Y L, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [J]. Earth-Science Reviews, 2022, 235. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104241.
- [3] ZHANG Y Q, YOU Q L, CHEN C C, et al. Characteristics of flash droughts and their association with compound meteorological extremes in China: observations and model simulations [J]. Science of The Total Environment, 2024, 916. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170133.
- [4] 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 R, ZHAI P M. Advances in scientific understanding on compound extreme events [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 645-649. (in Chinese)
- [5] BEVAAQUA E, ZAPPA G, LEHNER F, et al. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events [J]. Nature Climate Change, 2022, 12(4): 350-355.
- [6] RIDDER N N, UKKOLA A M, PITMAN A J, et al. Increased occurrence of high impact compound events under climate change [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2022, 5(1). DOI: 10.1038/s41612-021-00224-4.
- [7] WANG C, LI Z, CHEN Y N, et al. Characteristic changes in compound drought and heatwave events under climate change [J]. Atmospheric Research, 2024, 305. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107440.
- [8] TRIPATHY K P, MUKHERJEE S, MISHRA A K, et al. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023, 120 (28). DOI: 10.1073/pnas.2219825120.
- [9] 杨英杰,曹倩,税玥. 中亚复合高温干旱事件识别与特征分析[J]. 干旱气象,2024,42(1):19-26.
- YANG Y J, CAO Q, SHUI Y. Identification and characteristic analysis of compound drought and heat wave event in Central Asia [J]. Journal of Arid Meteorology, 2024, 42 (1) : 19-26. (in Chinese)
- [10] COLLINS B. Frequency of compound hot-dry weather extremes has significantly increased in Australia since 1889 [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2022, 208(6): 941-955.
- [11] HAO Z C, HAO F H, SINGH V P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13 (12). DOI: 10.1088/1748-9326/aace96.
- [12] 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(中英文),2021,52(12):90-98.
- WU X Y, HAO Z C, ZHANG X, et al. Distribution and trends of compound hot and dry events during summer in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 90-98. (in Chinese)
- [13] ZHANG Y, HAO Z C, FENG S F, et al. Comparisons of changes in compound dry and hot events in China based on different drought indicators [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(16): 8133-8145.
- [14] 王文,许金萍,蔡晓军,等. 2013年夏季长江中下游地区高温干旱的大气环流特征及成因分析[J]. 高原气象,2017,36(6): 1595-1607.
- WANG W, XU J P, CAI X J, et al. Analysis of atmospheric circulation characteristics and mechanism of heat wave and drought in summer of 2013 over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin [J]. Plateau Meteorology, 2017, 36 (6) : 1595-1607. (in Chinese)
- [15] 李俊,袁媛,王遵娅,等. 2019年长江中下游伏秋连旱演变特征[J]. 气象,2020,46(12):1641-1650.
- LI J, YUAN Y, WANG Z Y, et al. Evolution characteristics of continuous drought in late summer and autumn in the middle and lower reaches of Yangtze River Vally in 2019 [J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(12): 1641-1650. (in Chinese)
- [16] 唐樱歌,刘伟,高艳红. 长江中下游平原2022年高温干旱复合型极端事件的影响因子分析[J]. 大气科学学报,2024,47(4): 533-540.
- TANG Y G, LIU W, GAO Y H. Analysis of influencing factors of heatwave and drought compound extreme events in 2022 in the

- middle-lower Yangtze Plain [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47(4): 533–540. (in Chinese)
- [17] QIAN Z H, SUN Y X, MA Q R, et al. Understanding changes in heat waves, droughts, and compound events in Yangtze River Valley and the corresponding atmospheric circulation patterns [J]. Climate Dynamics, 2024, 62(1): 539–553.
- [18] 段欣妤, 张强, 张良, 等. 2022年长江流域重大干旱发展过程中西太平洋副热带高压的多维度异常特征[J]. 科学通报, 2024, 69(15): 2081–2092.
- DUAN X Y, ZHANG Q, ZHANG L, et al. The multi-dimensional anomaly characteristics of the western Pacific subtropical high during the development of the 2022 major drought in the Yangtze River Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(15): 2081–2092. (in Chinese)
- [19] 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 Y T, HOU A Z, HAO Z C, et al. Evolution and historical comparison of hot droughts in Yangtze River basin in 2022 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8): 1–9. (in Chinese)
- [20] SHAN B Y, VERHOEST N E C, D B BAETS. Identification of compound drought and heatwave events on a daily scale and across four seasons [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(9): 2065–2080.
- [21] AN X H, SUN S L, MA Q R, et al. Elucidating the varied characteristics of compound hot-drought from two distinctive extreme events in the Yangtze River Valley [J]. International Journal of Climatology, 2025, 45(7). DOI: 10.1002/joc.8809.
- [22] YIN Z J, YANG S, WEI W. Prevalent atmospheric and oceanic signals of the unprecedented heatwaves over the Yangtze River Valley in July–August 2022 [J]. Atmospheric Research, 2023, 295. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107018.
- [23] 孙博, 王会军, 黄艳艳, 等. 2022年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 1–8.
- SUN B, WANG H J, HUANG Y Y, et al. Characteristics and causes of the hot-dry climate anomalies in China during summer of 2022 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 1–8. (in Chinese)
- [24] 徐慧, 江善虎, 任立良, 等. 气候变化背景下赣江流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(4): 1–11.
- XU H, JIANG S H, REN L L, et al. Spatial-temporal variation characteristics of compound hot-dry events in Ganjiang River Basin under climate change [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 1–11. (in Chinese)
- [25] LUO M, LAU N C, LIU Z, et al. An observational investigation of spatiotemporally contiguous heatwaves in China from a 3D perspective [J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(6). DOI: 10.1029/2022GL097714.
- [26] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 70–77.
- JIANG Y T, HAO Z C, FENG S F, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 70–77. (in Chinese)
- [27] LUO M, WU S J, LAU N C, et al. Anthropogenic forcing has increased the risk of longer-traveling and slower-moving large contiguous heatwaves [J]. Science Advances, 2024, 10(13). DOI: 10.1126/sciadv.adl1598.
- [28] PASCOA P, GOUVEIA C M, RIBERIO A F S, et al. Compound drought and hot events assessment in Australia using copula functions [J]. Environmental Research Communications, 2024, 6(3). DOI: 10.1088/2515-7620/ad2bb8.
- [29] 华文剑, 冯慧婷, 崔亚朱, 等. 2022年夏季长江流域极端高温的研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2025, 40(4): 1–17.
- HUA W J, FENG H T, CUI Y Z, et al. 2022 summertime heat extremes in the Yangtze River Basin: review and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2025, 40(4): 1–17. (in Chinese)
- [30] WANG Z Q, LUO H L, YANG S. Different mechanisms for the extremely hot central-eastern China in July–August 2022 from a Eurasian large-scale circulation perspective [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(2). DOI: 10.1088/1748-9326/acb3e5.

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Compound Extreme Droughts and Heatwave Events in Summer over China from a Three-Dimensional Perspective

SHEN Shijian, LI Jinjian, MA Longyun, SUN Haozhen, CHEN Qihang*

(Climate Change and Resource Utilization in Complex Terrain Regions Key Laboratory of Sichuan Province/Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province/Sichuan Engineering Research Center for

Meteorological Disaster Forecasting and Warning/School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology,
Chengdu 610225, China)

Abstract: Against the backdrop of ongoing global warming, compound drought and heatwave events (CDHEs) have emerged as one of the most critical types of compound extreme climate phenomena. These events, characterized by the simultaneous or sequential occurrence of drought and heatwave conditions, are becoming more frequent and intense, posing severe ecological and socioeconomic impacts. Understanding their spatiotemporal behavior is therefore essential for improving climate risk management and enhancing regional adaptation strategies. In this study, we utilized the CN05.1 high-resolution daily maximum temperature and precipitation reanalysis dataset and employed the three-dimensional connected component (CC3D) algorithm to systematically identify and analyze CDHEs across central and eastern China in summer from 1961 to 2022. The CC3D algorithm enabled the recognition of events in a continuous three-dimensional (longitude-latitude-time) domain, allowing us to capture their full spatiotemporal extent and evolution rather than relying solely on two-dimensional or time-independent detection methods. This approach provided a more integrated view of the linkage between temperature extremes and precipitation deficits. The long-term analysis reveals that regional summer maximum temperature has exhibited a statistically significant upward trend of approximately 0.116°C per decade over the past six decades, reflecting the persistent warming signal under climate change. In contrast, precipitation in summer shows a slight increasing tendency that is not statistically significant, indicating a weaker and more variable hydrological response. A total of 297 compound events are identified over the 62 years. Spatially, their centroids display a distinct belt-like distribution concentrated between 30° and 32° N, with the Sichuan Basin and the Jiangnan Plain recognized as the major high-incidence regions. Although the average duration of individual events has remained relatively stable, both their areal coverage and thermal intensity have increased significantly. This intensification manifests mainly through spatial expansion and growing thermal anomalies, implying that CDHE-related risks are being amplified even without a notable lengthening of events. The frequency distribution indicates that short-duration events dominate, yet the overall pattern follows a "bimodal" structure, one corresponding to locally confined outbreaks and another to broader regional-scale events. Event intensity is generally low to moderate, though a limited number of extremely strong cases have occurred in recent decades. Analysis of movement trajectories further reveals that most events tend to migrate along an east-west direction, occasionally showing oblique pathways. A marked north-south asymmetry exists, suggesting that regional circulation influences play key roles in modulating event propagation. Overall, these findings advance our understanding of how CDHEs evolve in space and time under a warming climate. The results provide valuable scientific support for assessing regional climate risks, guiding disaster prevention and mitigation efforts, and formulating adaptive strategies to cope with the increasing likelihood of compound extremes in central and eastern China.

Keywords: compound drought and heatwave event; spatiotemporal characteristic; three-dimensional feature; central and eastern China

(责任编辑:高天扬)