

DOI: 10.20103/j.stxb.202304120743

姚昊昕, 李清泉, 赵亮, 吴星麒, 沈新勇, 段春锋, 李畅. 淮河流域暖季极端高温干旱复合事件的演变特征及其与气候和植被的关系. 生态学报, 2024, 44(13): 5596-5608.

Yao H X, Li Q Q, Zhao L, Wu X Q, Shen X Y, Duan C F, Li C. Evolution characteristics of compound drought and heat events during the warm season in the Huaihe River Basin and their relationship with climate and vegetation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5596-5608.

淮河流域暖季极端高温干旱复合事件的演变特征及其与气候和植被的关系

姚昊昕¹, 李清泉^{1, 2, *}, 赵 亮³, 吴星麒^{4, 5}, 沈新勇^{1, 6}, 段春锋⁷, 李 畅¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

4 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

5 南京信息工程大学大气环境中心, 教育部气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044

6 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203

7 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

摘要:使用淮河流域 1981 年至 2020 年的 149 个气象站点的气温和相对湿度数据, 分析了流域暖季极端高温干旱复合事件 (Compound Drought and Heat Events, CDHEs) 的时空演变特征, 并通过趋势分析和相关分析法探讨了 CDHEs 与气候和植被的关系。结果表明: ①CDHEs 的发生日数在年代际尺度上呈现明显的增加趋势, 并且范围扩大, 频发区逐渐向淮河流域中西部移动; ②在年际尺度上, CDHEs 随时间序列呈显著的波动上升趋势, 空间分布上以西北部为中心向四周递减。连续 CDHEs 事件呈年际变化, 最大 2 至 4 天的连续事件存在波动, 2019 年达到高峰, 并且在流域内零散或成片出现; ③在月际尺度上, CDHEs 的发生日数在 6 月最多, 其次是 5 月、7 月、9 月和 8 月。淮河流域入汛前的旱情和入汛后的旱涝急转都容易导致 CDHEs 发生, 而且随着月际变化向南移动; ④CDHEs 对水热条件和大气环流具有特别的敏感性。在 850hPa 反气旋和 500hPa 显著高压异常的控制下, 高温、低湿、高蒸发和降水少的气候背景有利于淮河地区 CDHEs 的形成, 尤其是在淮河中西部地区。因此, CDHEs 的发生与气候变化密切相关; ⑤CDHEs 与植被生长也存在显著关系。CDHEs 与 GPP 呈显著的负相关, 而与 NDVI 呈显著的正相关, 显著地区的土地类型以耕地和城乡、工矿、居民用地为主。GPP 和 NDVI 的不同步可能是因为多种因素的非线性相互作用, 而不仅仅是单一因素的影响。此外, 对于 GPP 和 NDVI 来说, 土壤含水量至关重要。总之, 本文对淮河流域 CDHEs 的时空分布特征进行了深入研究, 并探讨了其与气候和植被的关系。研究结果可以为该地区的气象灾害防御和生态环境保护提供科学依据和参考。

关键词:淮河流域; 极端高温干旱复合事件; 气候变化; 时空分布特征; 植被

Evolution characteristics of compound drought and heat events during the warm season in the Huaihe River Basin and their relationship with climate and vegetation

YAO Haoxin¹, LI Qingquan^{1, 2, *}, ZHAO Liang³, WU Xingqi^{4, 5}, SHEN Xinyong^{1, 6}, DUAN Chunfeng⁷, LI Chang¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative

基金项目:安徽省自然科学基金项目(2208085UQ08); 国家自然科学基金项目(U2242207); 国家重点研发计划项目(2022YFE0136000); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0208)

收稿日期:2023-04-12; **网络出版日期:**2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liqq@cma.gov.cn

Innovation Center in Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 China Meteorological Administration Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081, China

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

5 Joint Laboratory for International Cooperation on Climate and Environmental Change, Ministry of Education, Atmospheric Environment Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

6 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China

7 Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China

Abstract: This article analyzed the spatiotemporal characteristics of Compound Drought and Heat Events (CDHEs) during the warm season in the Huaihe River Basin from 1981 to 2020, using temperature and relative humidity data from 149 meteorological stations in the basin. Through trend analysis and correlation analysis, the relationship between CDHEs and climate and vegetation is explored. The results show that: ① The number of CDHEs has a significant increasing trend on a decade scale, with an expanding range. The frequent has shifted towards the central and western regions of the Huaihe River Basin, indicating a significant trend. ② At the interannual scale, CDHEs show a significant fluctuating upward trend over time, with a spatial distribution centered in the northwest and decreasing towards the periphery. Continuous CDHEs events display interannual variability, with fluctuations in the occurrence of 2 to 4-day consecutive events, peaking in 2019 and scattered or clustered appearances throughout the basin. ③ At the monthly scale, CDHEs occur most frequently in June, followed by May, July, September, and August. These events are often triggered by pre-monsoon droughts and sudden shifts from drought to flood post-monsoon. The southward migration during monthly variations contributes to the occurrence of CDHEs. ④ CDHEs are particularly sensitive to hydrothermal conditions and atmospheric circulation. Under the control of significant anti-cyclones at 850 hPa and significant high-pressure anomalies at 500 hPa, the climate background of high temperature, low humidity, high evaporation, and low precipitation is conducive to the formation of CDHEs in the central and western parts of the Huaihe River Basin. Therefore, the occurrence of CDHEs is closely related to climate change. ⑤ CDHEs have a substantial connection to the growth of vegetation. CDHEs are negatively correlated with gross primary productivity (GPP) and positively correlated with normalized difference vegetation index (NDVI). The significant areas are mainly cultivated land and urban and rural areas, industrial and mining areas, and residential land. The asynchrony between GPP and NDVI may result from complex nonlinear interactions among various factors, rather than the influence of a single factor. Additionally, soil moisture plays a crucial role in both GPP and NDVI dynamics. In summary, this article provides an in-depth study of the spatiotemporal distribution characteristics of CDHEs in the Huaihe River Basin and explores their relationship with climate and vegetation. It also delves into the intricate interplay between CDHEs, climate patterns, and vegetation in the region. The results can serve as a scientific basis and reference for meteorological disaster prevention and ecological environmental protection in the region.

Key Words: Huaihe River Basin; Compound Drought and Heat Events; climate change; spatio-temporal distribution characteristics; vegetation

全球气候变化正在逐步加剧,其中温度的增高更为明显,根据 IPCC 第六次评估报告^[1],最近 10 年全球平均温度可能比 1850—1900 年平均升高约 1.1℃。这导致全球热浪的发生频率普遍增加,干旱现象也呈现出更加严重的趋势^[2-3]。虽然这些极端天气事件单独发生就已经造成了重大不利影响,但是它们的复合出现可能是更加破坏性的^[2]。多个极端事件同时或连续发生通常被称为复合极端事件,而在过去十年中,由于其放大效应,复合极端事件引起了广泛的关注^[3-4]。在全球温室加剧的情况下,极端高温干旱复合事件

(Compound Hot and Dry Extremes, CDHEs)在我国发生的频率更为频繁,而且呈现出频率增加、持续时间延长和影响范围扩大等演变特征^[5-6]。

极端高温和低湿度的并发是一种复杂的天气/气候事件,它会加剧对生态系统和社会的负面影响。CDHEs对生态系统和社会经济造成的不良影响比每个独立事件的影响更为严重^[5-6]。植被是陆地生态系统的主体,它是连接土壤圈、大气圈、生物圈、水圈和岩石圈的桥梁^[7]。在宏观尺度上,气候控制地球上植物和植被的地理分布^[7-8]。植物的光合作用和呼吸作用在一定程度上控制着大气和陆地表面碳、水、微量气体的交换和太阳辐射的吸收。植物和植被的分布对地球气候环境的影响也至关重要^[9-10]。近年来,全球气候变化对植被地理分布和生态功能的影响成为研究的热点^[11-13],但针对复合极端事件的研究相对匮乏,这种事件对植被的影响及其适应和响应气候变化的能力亟待探究。因此,研究极端复合事件和植被相关的问题对于适应和减缓气候变化的影响、应对气候变化的政策和决策制订等具有积极的参考意义。

淮河流域是中国的一个重要经济生产区区域^[14],但由于自然条件的特殊性以及人类活动的影响,该区域经常遭受极端温度和干旱的困扰^[15-16]。淮河流域主要以农业生态系统为主,生态脆弱,对气候变化和人类活动的影响非常敏感^[17]。在极端的炎热和干燥条件下,局部的陆地—大气反馈过程控制区域的温度升高,而气候变化则通过气温变化或者改变水文状况等方式对植被产生影响^[18]。

本文通过结合淮河流域 1981 至 2020 年的 149 个气象站点的气温和相对湿度,研究了该区域不同时间尺度下的暖季淮河流域 CDHEs 的时空变化,并探讨了流域的 CDHEs 与气候和植被的关系。研究结果不仅对淮河流域农业高温和干旱的监测和应对具有重要的理论价值和实践意义,同时该研究以独特的视角综合考虑了气候变量之间的相互作用,这样的研究有助于我们更全面地了解淮河流域的气候和生态变化,为保护该区域的生态环境和促进可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

淮河流域位于湖北、河南、安徽和江苏,介于长江和黄河之间,地理坐标为 $111^{\circ}55'—121^{\circ}25'E$, $30^{\circ}55'—36^{\circ}36'N$ 之间(图 1)。淮河流域是中国东部城市群的重要水源和商品粮基地之一,对中国的经济和社会发展具有重要的战略意义^[14]。淮河流域地形复杂,西部、西南部 and 东北部为山区和丘陵区,其余区域为广阔的平原。整个流域的气候类型以暖温带季风性气候为主,具有明显的季节变化特征^[19]。由于该地区处于南北气候过渡带,同时也受人类活动的干扰,极端温度和干旱的发生频率较高^[15-16]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 气象数据

本研究使用中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的日气温和日相对湿度数据集,该数据集包括淮河流域内的 149 个气象站。为确保数据质量,我们使用 RCLimDex 程序进行了严格的质量检测,并对不合格数据进行了缺测值处理。在数据处理过程中,我们使用了 3 次样条函数内插法来补全缺测值,得到了空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的淮河流域栅格数据,用于计算和分析 CDHEs。

此外,我们选择了欧洲中期天气预报中心发布的第五代全球气候大气再分析网格数据集(<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>)。该数据集是目前最佳的再分析产品之一,适用性已在中国地区得到验证^[20]。本文选取了 1981—2020 年空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 逐月数据集的降水、850hPa 风场、

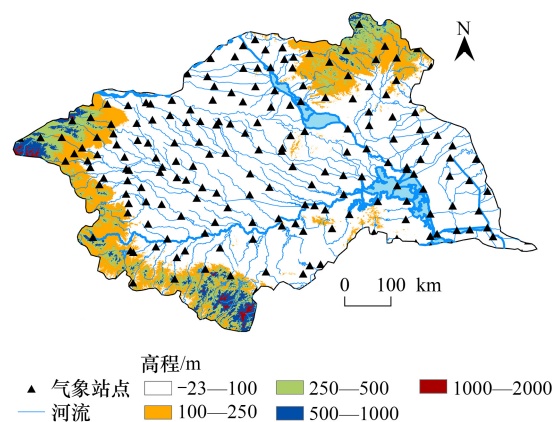


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location map of study area

500hPa 位势高度和垂直速度数据,用于分析水热条件和环流场对 CDHEs 的响应。

1.2.2 植被数据

本研究所使用的 NDVI 数据集为美国宇航局全球检测与模型研究组提供的 Global GIMMS NDVI3g v1 数据集(<https://www.nasa.gov/nex/>)。所选取的数据集时间跨度为 1981 年 7 月至 2015 年 12 月,时间分辨率为 15d,空间分辨率为 $1/12^\circ$ 。该数据集经过校准、轨道漂移、观察几何和火山爆发等处理,以减少噪音的影响,并更适合用于北半球植被活动的研究^[21-22]。

GPP 数据来自国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),时间跨度为 2001 年至 2020 年,时间尺度为 8d,空间分辨率为 0.05° 。该数据采用改进的 EC-LUE 模型,该算法综合考虑了饱和水汽压亏缺、大气 CO_2 浓度以及辐射组分长期变化的影响,可以很好地模拟全球植被生产力的时空变化格局,特别是在模拟植被生产力年际和长期变化方面具有显著的优势^[23]。

本文采用最大值合成方法获取暖季(5—9 月)月尺度的 NDVI 和 GPP 数据,以分析淮河流域植被对 CDHEs 的响应。

1.2.3 土地利用数据

使用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的中国土地利用数据,空间分辨率 1km,将 2000、2010、2015 年三期数据种土地利用类型未发生改变的栅格提取,并按照土地利用类型的一级类型划分为耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地等 6 种类型。本文所有数据首先通过最近邻法将所有数据统一重采样至 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率,并通过平均值计算、栅格裁剪等处理,获得暖季(5—9 月)淮河流域数据。

1.3 研究方法

1.3.1 CDHEs 计算方法

本研究主要研究淮河流域暖季(5 月至 9 月)的 CDHEs。考虑到百分比阈值方法在中国及长江中下游地区的广泛应用^[24],以及其在反映气象条件变化和可比性方面的优势,本研究利用从气象站点数据插值得到的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 淮河流域暖季栅格日气温和日湿度数据,对 1981—2020 年的每一天进行排序并计算第 75%/25% 的温度/湿度阈值。然后,将每个格点上温度高于 75% 阈值且湿度低于 25% 阈值的日记为 1,表示该日发生了一次 CDHEs。如果没有发生,则记为 0,表示当天无复合事件发生。最后,将该方法推广到淮河流域所有格点,计算出 1981—2020 年暖季淮河流域 CDHEs 的发生日数。值得注意的是,在冷季(10 月至次年 4 月),CDHEs 发生日数较少,且植被多处于休眠期,因此本文仅研究暖季 CDHEs。

最大连续 CDHEs 事件次数的计算方法如下:首先,对于每个格点,检测连续 CDHEs 事件,例如,如果某格点仅在 2 天内连续发生 CDHEs,则记录为一次最大连续 2 天 CDHEs 事件。同理,可计算最大连续 3 天和 4 天的事件。然后,对整个流域的所有格点进行相同的计算。事件发生总次数计算方法为:每年流域内所有格点的一次最大连续 CDHEs 事件总和。格点面积占比计算方法为:每年至少发生过一次最大连续事件的格点面积占流域总面积的百分比。这一方法有助于定量分析流域内连续 CDHEs 事件的分布和频率,从而更好地理解极端气候事件的发生规律。

1.3.2 Person 相关分析

使用 Person 相关系数衡量 CDHEs 与气候背景和植被之间的相关程度,相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - AKy - D)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - AKy - D)^2}} \quad (1)$$

式中, r_{xy} 代表相关系数, n 表示研究时序, i 为年序号, x_i 、 y_i 表示第 i 年的值, $\bar{x}$ 、 $AKy - D$ 代表变量的均值。利用 t 检验方法对相关系数进行显著性检验。本文将 34 年 NDVI(1982—2015 年)、20 年 GPP(2001—

2000 年)、40 年气候因子(1981—2020 年)通过信度 $\alpha=0.05$ 显著性检验对应的相关系数临界值依次为 0.34、0.44、0.31,并规定当系数绝对值大于上述临界值时,认为相关系数显著。此步骤通过 NCAR Command Language(NCL)完成。

1.3.3 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

在不同时段内,进一步利用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合的方法得到 CDHEs 的年代际和年际变化趋势。即先使用 Theil-Sen Median 趋势分析计算趋势值,然后使用 Mann-Kendall 非参数检验方法判断趋势显著性^[25]。

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,可以减少数据异常值的影响,其计算公式为:

$$\text{Slope} = \text{Median}\left(\frac{Y_j - Y_i}{j - i}\right), i < j \quad (2)$$

式中, Y_i 、 Y_j 分别为第 i 年和第 j 年的 CDHEs 或气候因子和年均值, $\text{Slope} > 0$ 时, Y 呈增加趋势,反之则呈下降趋势。

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,用来判断趋势的显著性,它无需样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(Y_j - Y_i) \quad (4)$$

$$s(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (5)$$

式中, n 表示时间序列的长度; sgn 是符号函数; S 是 Mann-Kendall 检测需要构建的统计量; $s(S)$ 是 S 的方差; Z 是标准正态变量,在给定显著性水平 α 下,当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时,表示研究序列在 α 水平上存在显著的变化。本文判断在 95% 置信水平下的时间序列变化趋势的显著性。此步骤通过 NCL 完成。

2 结果与分析

2.1 淮河流域暖季 CDHEs 的演变特征

2.1.1 淮河流域暖季 CDHEs 的年代际变化

在 1981 年到 2020 年的不同年代中,淮河流域普遍出现了 CDHEs,并且呈现出频率增加和影响范围扩大的趋势(图 2,图 3)。在 1981 年到 1990 年期间,CDHEs 主要出现在淮河流域中部和北部的大范围地区,平均每年出现的天数约为 5.28d。其中,兖州是受影响最严重的地区之一,平均每年 CDHEs 出现的天数高达 15.15d。随着时间的推移,CDHEs 的影响范围不断扩大,并且向中西部地区集中。在 1991 年到 2000 年期间,CDHEs 的平均出现天数约为 6.72d/a,CDHEs 高值区南移,最大值出现在蚌埠,约为 19.13d/a。在 2001 年到 2010 年期间,CDHEs 以中西部地区为中心大范围地增加,平均每年出现的天数约为 8.98d。其中,寿县受 CDHEs 影响最为严重,平均每年出现的天数高达 23.15d。在 2011 年到 2020 年期间,CDHEs 呈现出明显的以西部地区为中心向四周递减的空间分布特征。平均每年出现的天数约为 10.36d,而许昌是 CDHEs 影响最严重的地区之一,平均每年出现的天数高达 29.13d。

综上所述,CDHE 在 1981 年到 2020 年的发生日数逐渐增多,影响范围也不断扩大。CDHEs 在 20 世纪 10 年代的发生日数约为 19 世纪 80 年代的 5 倍,其高值区逐渐向淮河流域中西部移动。许昌、漯河、周口、商丘、

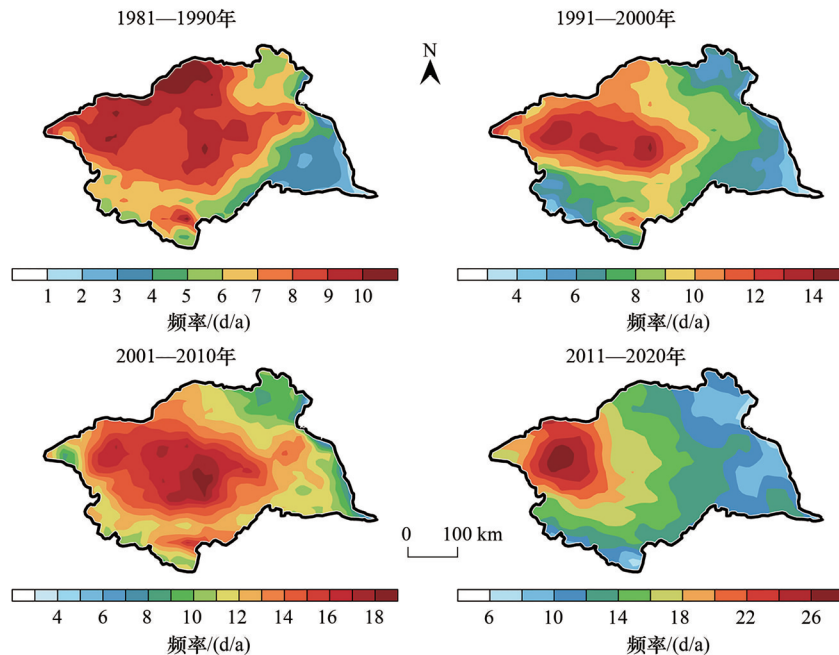


图 2 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 的年代际空间分布

Fig.2 The interdecadal spatial distribution of CDHEs in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020

CDHEs: 极端高温干旱复合事件 Compound drought and heat events

亳州、驻马店、阜阳等淮河流域中西部城市作为我国重要的粮仓,其 CDHEs 在年代际上表现出明显的数量增加和范围扩大的特征,对当地的粮食产量有重要影响。相比之下,淮河流域的东部地区在 1981 年到 2020 年期间 CDHEs 相对较少,这可能与该地区距离海洋较近,受海洋影响较大有关^[18–19]。这个地区的水汽充足,土壤湿润,这抑制了地表气温和湿度对于土壤湿度异常的响应^[26]。而淮河流域的中部和西部地区则相对较多 CDHEs,这可能与该地区降水较少、蒸发大、植被少等因素有关^[27–28]。

2.1.2 淮河流域暖季 CDHEs 的年际变化及趋势

根据图 4,1981 年至 2020 年期间,淮河流域暖季 CDHEs 呈现出年际变化和趋势。从空间分布来看,淮河流域暖季 CDHEs 总体上呈现出以流域西北部为中心向四周递减的特征。而且,中部和南部的平原地区,以及西部的山区和丘陵区是暖季 CDHEs 显著增长的主要集中地区,这些区域的面积占整个流域的 82%。统计数据显示,淮河流域暖季 CDHEs 的趋势率平均值为 0.26d/a,空间异质性相对较小。其中,增长幅度最大值出现在淮河流域西北部,约为 0.58d/a。

从时间序列来看,1981 年至 2020 年期间,淮河流域暖季 CDHEs 总体呈上升趋势,趋势率为 0.17d/a ($P < 0.01$),CDHEs 的变化可以分为 1981 年至 1992 年、1993 年至 2013 年和 2014 年至 2020 年三个阶段。第一阶段,CDHEs 呈波动下降趋势,趋势率为 -0.32d/a ($P < 0.01$),此期间 CDHEs 处于较低水平,其中最小值出现在 1985 年,为 2.44d/a。第二阶段,从 1982 年开始,CDHEs 呈现缓慢上升的趋势,趋势率为 0.18d/a ($P < 0.01$),此

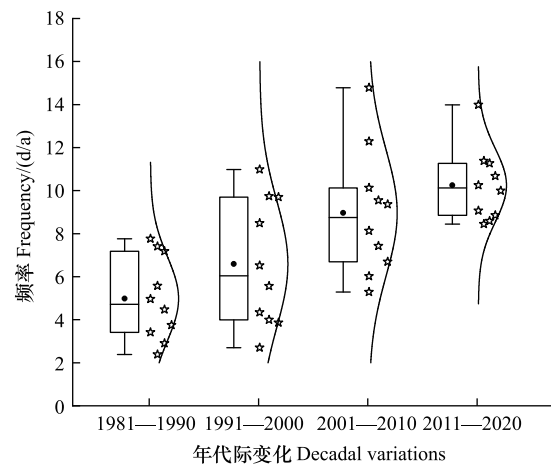


图 3 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 的年代际时间序列

Fig.3 The interdecadal time series of CDHEs in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020

期间 CDHEs 上升到一个较高的水平,其中最大值出现在 2009 年,为 14.88d/a。第三阶段则是 CDHEs 的快速上升期,趋势率为 0.61d/a($P < 0.01$),CDHEs 发生日数均在平均值以上。综上所述,淮河流域暖季 CDHEs 呈现出整体上升趋势,变化趋势明显,其中第三阶段变化速率最快,CDHEs 的年均值为 7.74d/a。

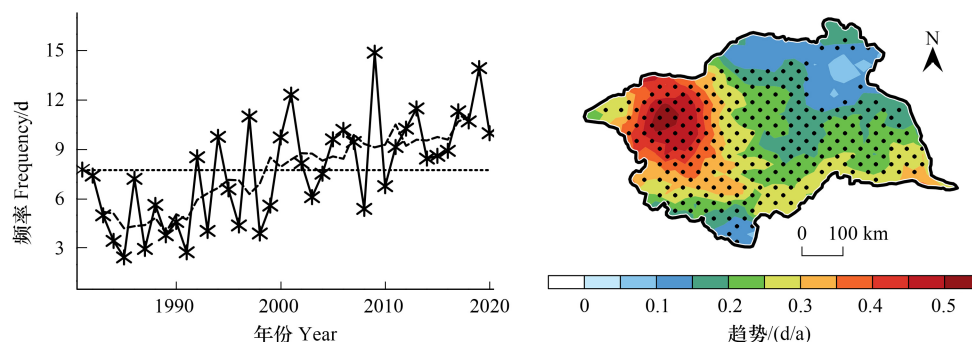


图 4 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 的年际变化及趋势(打点区域表示通过 95%显著性检验)

Fig.4 The interannual variation and trend of CDHEs in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020 (Dotting region indicates the significance at a 95% level of confidence)

在过去 40 年中,淮河流域的连续 CDHEs 表现出明显的年际变化(图 5)。最大连续 2 天的 CDHEs 事件虽然每年都有发生,但发生次数和面积占比存在年际波动,1981、1997、2016、2019 年为极大值。最大连续 3 天的 CDHEs 事件在大多数年份都有出现,尤其在 2019 年达到高峰。最大连续 4 天的 CDHEs 相对较少,面积占比较小。连续 CDHEs 事件对植被和作物有重要影响^[29],导致更严重的干旱和水资源问题,对农业和生活产生更广泛的影响。

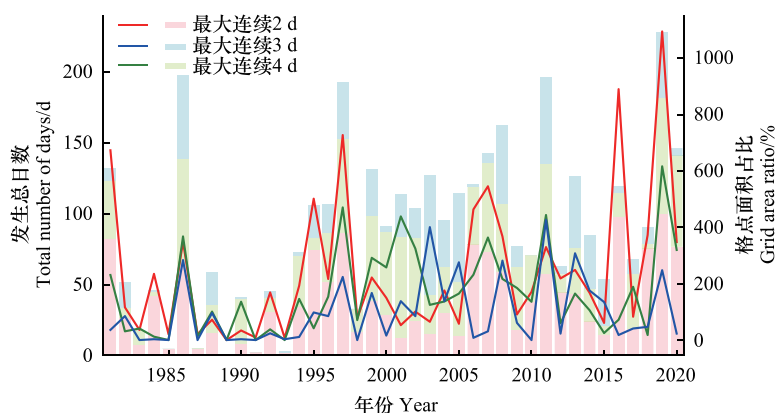


图 5 1981—2020 年淮河流域暖季连续 CDHEs 事件发生的总次数(折线);发生过最大连续事件的格点面积占比(堆叠柱状)

Fig.5 The interannual variation of the total occurrences (left, lines) of CDHEs during the warm season in the Huaihe River Basin from 1981 to 2020, as well as the percentage of grid points within the basin area that have experienced the largest continuous events (right, bars)

2.1.3 淮河流域暖季 CDHEs 的月际变化及趋势

图 6 为 1981 年至 2020 年淮河流域暖季 CDHEs 在时间和空间上的变化趋势。在 5 月份,CDHEs 主要发生在淮河流域中部、西部和西南部地区,平均发生日数为 3.63d/月。这些地区的 CDHEs 呈显著增长趋势,平均趋势率为 0.08d/a。其中,西北部的 CDHEs 发生日数最多,为 5.18d/月,同时也是增长率最大的地区,为 0.15d/a。在 6 月份,CDHEs 主要发生在淮河流域西北部,平均发生日数为 5.80d/月,最大值出现在西北部,为 9.35d/月。整个流域的 CDHEs 总体呈增长趋势,平均趋势率为 0.09d/a。其中,西北部的 CDHEs 呈显著增长趋势,增长率最大为 0.19d/a,其面积占整个流域的 46.23%。在 7 月份,流域 CDHEs 平均发生日数为

0.73d/月,最大值出现在西北部,且呈显著增长趋势,增长率为 0.09d/月。流域东部地区 CDHEs 发生日数相对较少,呈减少趋势,最低增长率为-0.02d/a。在 8 月份,流域 CDHEs 主要发生在西部和南部,平均发生日数为 0.36d/月,最大值出现在西南部,为 1.28d/月。西北部和南部地区的 CDHEs 呈显著增长趋势,平均趋势率为 0.08d/a。在 9 月份,流域 CDHEs 平均发生日数为 0.55d/月,主要发生在西南部,最大值为 1.92d/月。流域北部和西部地区 CDHEs 呈显著增长趋势,其中西南部地区的增长率最大,为 0.10d/a。

综上所述,淮河流域暖季 CDHEs 的月际变化和趋势表现出明显的空间差异。具体而言,5 月和 6 月的 CDHEs 平均发生日数相对较高,并且其高值区域主要位于中西部地区。这可能与淮河流域暖季气温和降水的异常分布特征密切相关^[3]。在 5 月份,淮河流域进入入汛前期,此时副高控制区域内盛行下沉气流^[30-31]。而在入汛后(6—9 月),虽然淮河流域出现了多次降水过程,但旱涝急转也会造成 CDHEs 频繁发生^[32-33],也会造成流域内 CDHEs 频发。因此,7 月、8 月和 9 月的 CDHEs 发生日数逐渐减少,且其高值区向南移动。值得注意的是,淮河流域暖季 CDHEs 的高值区域同时也是 CDHEs 快速增长的区域。综合分析表明,淮河流域暖季 CDHEs 的发生与多种因素密切相关,需要综合考虑气象条件和流域自身特点等多方面因素。

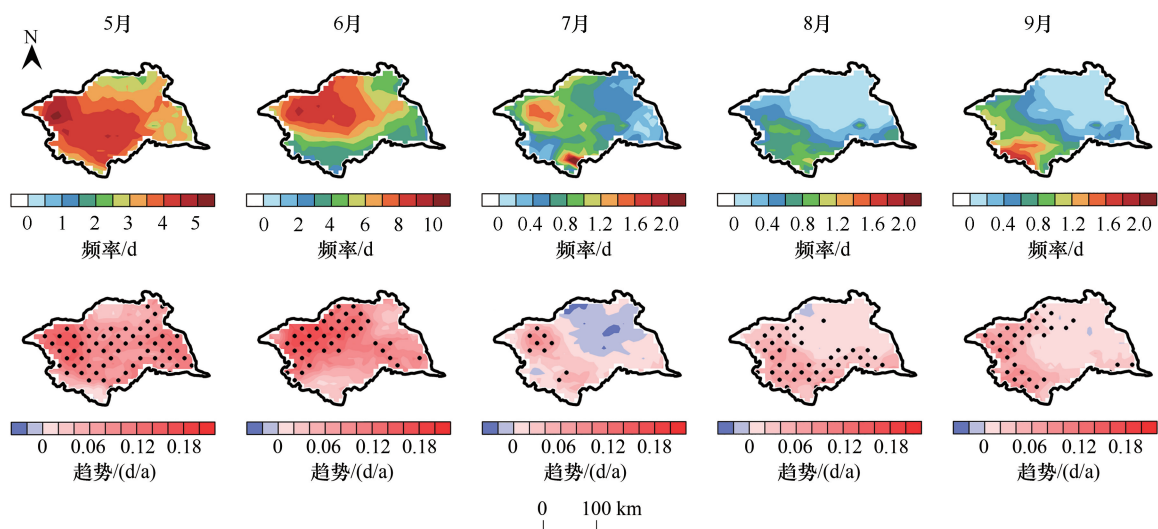


图 6 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 的月际变化及趋势

Fig.6 Monthly variation and trend of CDHEs in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020

2.2 淮河流域暖季 CDHEs 与气候背景的关系

2.2.1 淮河流域暖季 CDHEs 与水热因子的关系

图 7 显示在淮河流域的暖季中,温度、潜在蒸发以及 CDHEs 发生日数呈现正相关关系,而相对湿度和降水量则表现为负相关关系($R^2_{\text{温度}}=0.55, P<0.01$ 、 $R^2_{\text{相对湿度}}=0.65, P<0.01$ 、 $R^2_{\text{潜在蒸发}}=0.61, P<0.01$ 、 $R^2_{\text{降水量}}=0.40, P<0.01$)。这些相关关系经过显著性检验后得到证实,即使在 $P<0.01$ 的显著性水平下也成立。这说明淮河流域暖季 CDHEs 对水热因子十分敏感。

2.2.2 淮河流域暖季 CDHEs 与大气环流场的关系

1981—2020 年淮河流域暖季大气环流场与 CDHEs 发生日数的空间相关如图 8 所示。在地表,CDHEs 与淮河流域的气温呈显著正相关关系,而与相对湿度在淮河流域的西部和南部呈显著负相关关系,在降水量方面也在西部呈显著负相关。这表明,当气温偏高、湿度偏低、降水量偏少时,CDHEs 更容易发生,但这种情况仅限于淮河流域的西部地区。同时,相对于气温,降水对 CDHEs 的相关性较小(图 7),仅在小范围内显著(图 8),因此 CDHEs 对气温的敏感性要大于对降水的敏感性。

在暖季对流层低层,受 850hPa 反气旋环流控制,不利于印度洋和孟加拉湾的水汽向东输送至淮河流域。在暖季对流层中层,500hPa 淮河流域西北部存在显著高压,一方面,在其控制下,对流层中层存在辐散下沉运

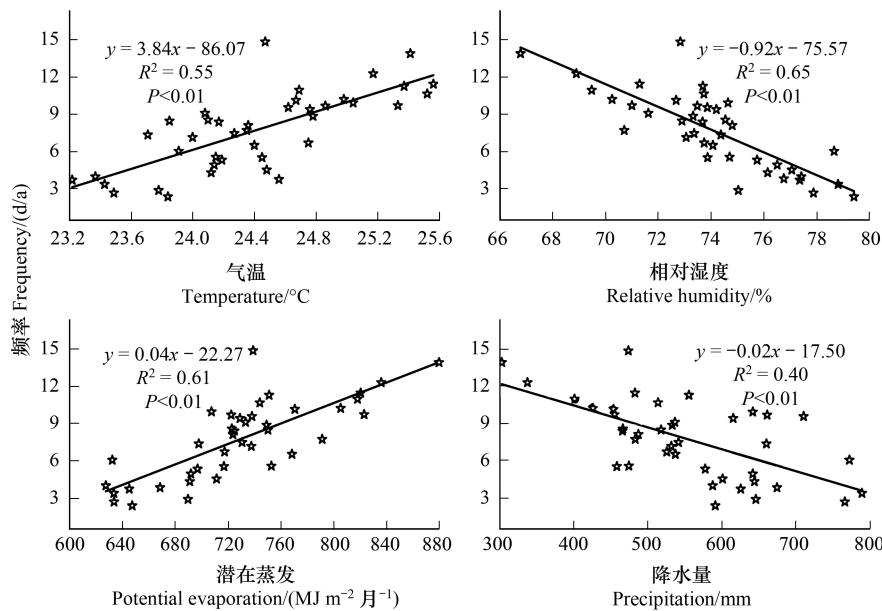


图 7 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 与水热因子的关系

Fig.7 The relationship between CDHEs and hydrothermal factors in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020

动,导致地面增温,且天空不易成云,使得太阳辐射更容易到达地面,另一方面,高压阻挡了北方冷空气南下,不利于冷暖气流交汇形成降水。淮河流域大气环流的协同作用,直接导致气温升高,相对湿度偏少,有利于淮河流域产生 CDHEs。

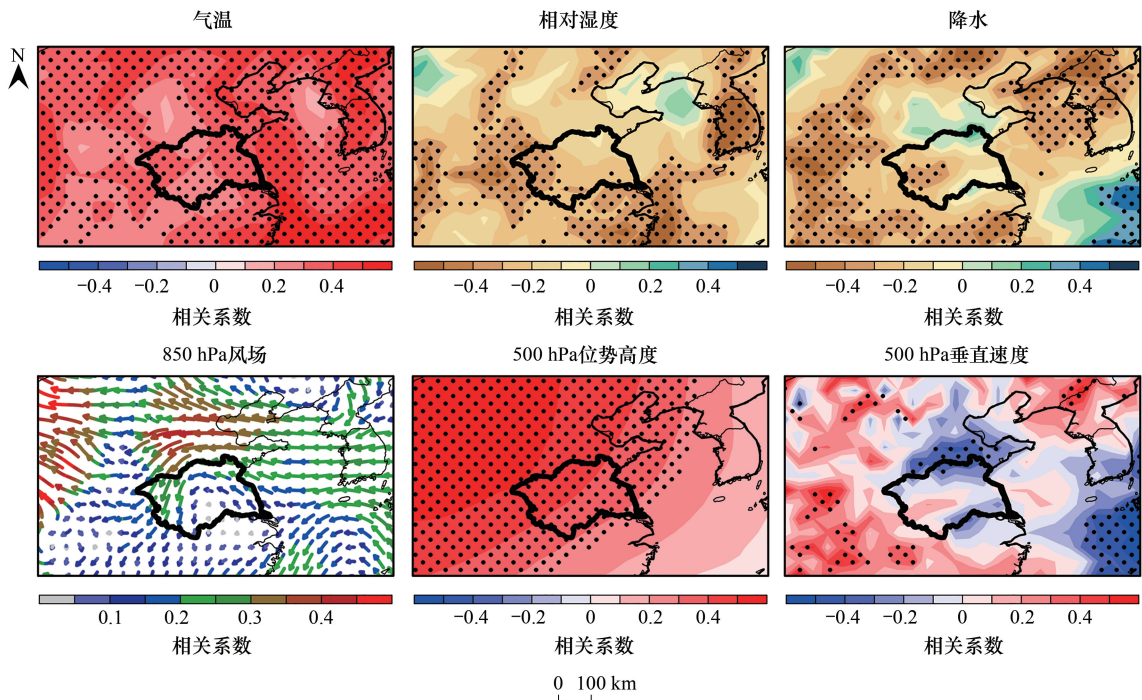


图 8 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 与大气环流场的空间相关

Fig.8 Spatial correlation between CDHEs and atmospheric circulation in the Huaihe River Basin during the warm season from 1981 to 2020

2.3 淮河流域暖季 CDHEs 与植被的关系

淮河流域暖季植被的生长量(GPP)和植被覆盖度(NDVI)与暖季高温干旱复合极端事件(CDHEs)之间存在着显著的相关性。具体来说,GPP 与 CDHEs 呈现出负相关关系,而 NDVI 与 CDHEs 则为正相关关系,这一结果通过了显著性检验($R^2_{\text{GPP}}=0.08, P<0.01, R^2_{\text{NDVI}}=0.25, P<0.01$)(图 9)。温度和湿度是影响植被生长量变化的主要因素,而极端高温和干旱天气则会导致植被生长量下降,特别是在流域中部平原地带。

1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 与植被的空间相关如图 9 所示。从空间分布来看,暖季 CDHEs 与 GPP 在淮河流域大部分地区呈显著负相关,并表现出较高的相关性水平,显著面积占研究区总面积的 46.90%,主要分布于淮河流域中部、北部和南部等地区。温度和湿度的变化是影响植被 GPP 变化的主要因子,极端高温和干旱天气会导致 GPP 下降^[13],尤其是在流域中部平原地带。CDHEs 与 NDVI 在淮河流域大部分地区呈显著正相关,相关性水平较高,显著面积占研究区总面积的 81.62%,集中在流域中部平原地区,表明该区域植被变化极易受温度及湿度变化导致的 CDHEs 的影响。

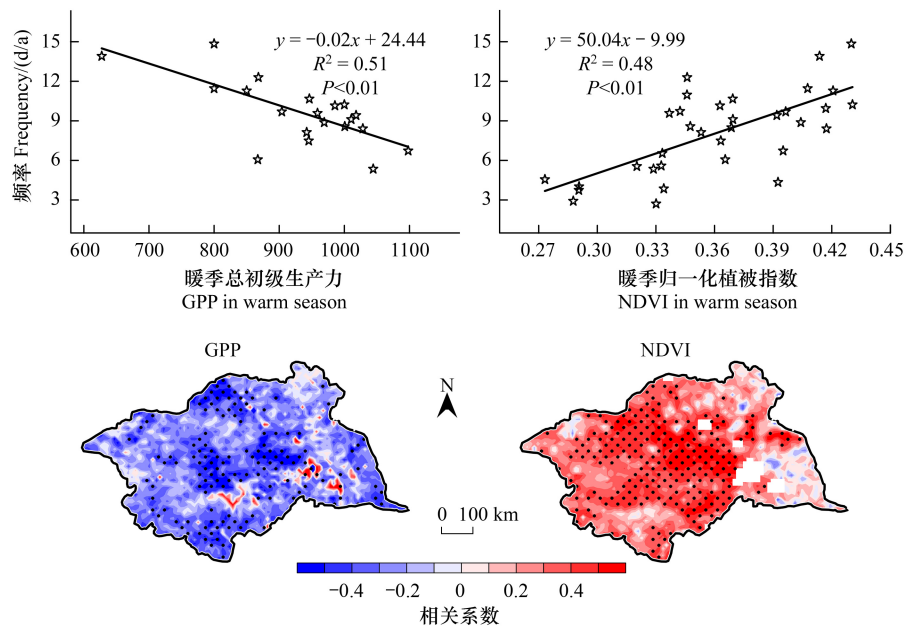


图 9 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 与植被的关系

Fig.9 Spatial correlation between CDHEs and atmospheric circulation in the Huaihe River Basin during the warm season from 1981 to 2020

淮河流域是一个面积广阔的流域,由于土地利用类型的差异,不同地区的 GPP 和 NDVI 分布情况存在显著差异。本文按照一级分类体系,对淮河流域不同土地利用类型的 GPP 和 NDVI 显著占比进行了分类研究。表 1 显示淮河流域耕地的 GPP 显著占比最大,为 71.87%,其次为城乡、工矿和居民用地,占比为 16.58%。水域的 GPP 显著占比为 6.09%,而草地、林地和未利用土地的 GPP 显著占比最少,分别为 3.53%、1.91%和 0.01%。在 NDVI 方面,淮河流域耕地的占比最大,为 77.98%,其次为城乡、工矿和居民用地,占比为 14.85%。水域的 NDVI 显著占比为 3.93%,而林地、草地和未利用土地的 GPP 显著占比最少,分别为 1.80%、1.43%和 0.00%。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)在过去 40 年中,CDHEs 的发生频率和影响范围不断扩大。从 1981 年到 2020 年,CDHEs 的发生日数不断增多,高发区逐渐向中西部地区扩散。特别是在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初期,CDHEs 发生频率和日数

急剧增加,年平均发生日数约为 8.98d。而在 2011 年到 2020 年间,CDHEs 的高发区逐渐向淮河流域中西部转移,平均发生天数约为 10.36d/a。这表明 CDHEs 对中国淮河流域的影响日益加剧,需要引起高度重视。

表 1 1981—2020 年淮河流域暖季 CDHEs 与 GPP、NDVI 相关场的土地利用显著占比/%

Table 1 The significant proportion of land use in the correlation field of CDHEs with GPP and NDVI in the warm season of Huaihe River Basin from 1981 to 2020

土地利用类型 Land use type	总初级生产力 GPP	归一化差值植被指数 NDVI	土地利用类型 Land use type	总初级生产力 GPP	归一化差值植被指数 NDVI
耕地 Cultivated land	71.87	77.98	草地 Grassland	3.53	1.80
城乡、工矿、居民用地 Urban and rural, industrial and mining, residential land	16.58	14.85	林地 Woodland	1.91	1.43
水域 Waters	6.09	3.93	未利用土地 Unused land	0.01	0.00

NDVI:归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation index;GPP:总初级生产力 Gross Primary Productivity

(2)淮河流域暖季 CDHEs 的频率在 1981 年至 2020 年期间呈波动增加趋势,平均趋势速率为 0.26d/a。CDHEs 的增加主要集中在中部和南部平原地区以及西部地区的丘陵地区。暖季 CDHEs 的空间分布从西北向四周地区逐渐下降。暖季 CDHEs 的时间序列变化可以分为三个阶段:第一阶段是从 1981 年到 1992 年,CDHEs 波动减少,趋势速率为-0.32d/a($P<0.01$);第二阶段是从 1993 年到 2013 年,CDHEs 波动缓慢增加,趋势速率为 0.18d/a($P<0.01$);第三阶段是从 2014 年到 2020 年,CDHEs 波动快速增加,趋势速率为 0.61d/a($P<0.01$)。这些发现表明淮河流域暖季 CDHEs 在时间和空间上呈现出不稳定的变化趋势,并且未来可能会持续增加。连续 CDHEs 事件呈年际变化,最大 2 至 4 天的连续事件存在波动,2019 年达到高峰,并且在流域内零散或成片出现。

(3)从 1981 年到 2020 年的统计数据显示,淮河流域暖季的 CDHEs 发生日数最多的月份分别是 5 月和 6 月,平均为每月 3.63d 和 5.80d,主要分布在中部、西部和西南部地区。而 7 月到 9 月 CDHEs 发生日数逐渐减少,分别为每月 0.73d、0.36d 和 0.55d,主要分布在西部和南部地区。这表明在月际时间尺度上,淮河流域暖季 CDHEs 发生的平均日数顺序为 6 月>5 月>7 月>9 月>8 月。淮河流域入汛前的旱情和入汛后的旱涝急转都容易导致 CDHEs 发生,而且随着月际变化向南移动。

(4)淮河流域暖季 CDHEs 的发生与气温和潜在蒸发呈现显著的正相关,而相对湿度和降水量则呈现显著的负相关。在 850hPa 反气旋和 500hPa 显著高压的控制下,高温、低湿、高蒸发和降水少的气候背景有利于 CDHEs 的发生,特别是在淮河中西部。在 850hPa 反气旋和 500hPa 显著高压的控制下,高温、低湿、高蒸发和降水较少的气候背景有利于 CDHEs 的发生,尤其是在淮河中西部地区。这表明淮河地区暖季 CDHEs 对水热因子和大气环流具有特别的敏感性。

(5)根据研究结果,淮河流域暖季的 CDHEs 与 GPP 之间存在显著的负相关关系,表明高温天气对植被的生长和光合作用产生了负面影响。这种负相关关系在淮河流域中部、北部和南部地区表现得尤为显著,覆盖了流域 46.90%的区域。此外,CDHEs 发生日数与 NDVI 之间存在显著的正相关关系,表明在流域中部平原地区,高温天气的影响使流域约 81.62%区域的植被指数增加。这些结果表明淮河流域的植被对气候变化非常敏感,尤其是耕地和城乡、工矿、居民用地。这些地区人类活动和城市化进程对植被的影响比其他地区更为明显。

3.2 讨论

不同的数据和方法可用于有效地识别高温干旱复合极端事件,如武新英等^[6]用标准化降水指数和标准化温度指数识别出中国大部分东部地区以及东北-西南带状地区为高发区。梅梅等^[34]基于逐日气象观测数据和气象干旱综合指数的研究表明,长江中下游干流沿线是高温干旱复合事件的相对影响最大的地区。虽然不同的计算方法得到的高温干旱复合极端事件存在差异,但均能反映出淮河流域 CDHEs 的增加趋势,这与本

研究的结果相符,尤其是在许昌、漯河、周口、商丘、亳州、驻马店、阜阳等中西部城市,复合气候极端事件是高发区,且呈现出快速增长的趋势。因此,淮河流域需要更多关注复合极端气候事件,以便采取有效的措施应对可能带来的不利影响。

以往的研究表明,GPP 和 NDVI 应该是同步的^[16-17],但本研究中的 CDHEs 与 GPP 呈显著负相关,而与 NDVI 呈显著正相关关系。我们认为这可能是由于多因素非线性相互作用引起的,而非简单的单因素影响,而土壤含水量对 GPP 和 NDVI 来说都是至关重要的^[35-36]。在文中,相对湿度应为大气相对湿度,反映了空气中的水分含量,而土壤含水量则涉及到土壤中的水分供应。可能在某些情况下,适度的高温有助于植被生长,尤其是在有充足水资源的情况下。一些植物可能采取了适应性策略,如减少蒸腾速率以保持水分,并增加叶绿素含量以提高光合作用效率,从而增加了 NDVI^[36]。因此,这种反常的关联可能部分归因于这些关键因素之间的复杂相互作用。

尽管本研究未直接考察灌溉对植被的影响,但应该认识到干热事件发生时,如果有灌溉,将影响其与植被之间的关系。通过增加土壤含水量、提高大气湿度等方式,灌溉作为人为措施可能在一定程度上改善植被在干热事件下的生长条件。这种改善可能对植被的生长和生态系统的稳定性产生积极影响,如促进植被生长、增加物种多样性,并在一定程度上维护生态平衡。值得注意的是,灌溉与植被之间存在着复杂而多样的关系。其正面影响可能包括增加土壤水分有利于植被的生长和根系发育。然而,过量的灌溉可能导致土壤盐渍化、水源枯竭等负面影响,从而对生态系统造成不利影响。这种复杂性表明我们需要更深入地研究和理解灌溉对植被和生态系统的多方面影响。在未来的研究中,可以将灌溉纳入考虑范围,以更深入地分析其与植被生长和生态系统功能之间的关系。

参考文献 (References):

- [1] 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. Cambridge: Cambridge University Press. (2021-08) [2022-04-20] <https://www.ipcc.ch/working-group/wg1/>.
- [2] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, Seneviratne S I, Ward P J, Pitman A, AghaKouchak A, Bresch D N, Leonard M, Wahl T, Zhang X B. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 469-477.
- [3] Ribeiro A F S, Russo A, Gouveia C M, Páscoa P, Zscheischler J. Risk of crop failure due to compound dry and hot extremes estimated with nested copulas. *Biogeosciences*, 2020, 17(19): 4815-4830.
- [4] Wu X Y, Hao Z C, Hao F H, Zhang X. Variations of compound precipitation and temperature extremes in China during 1961-2014. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 731-737.
- [5] Overpeck J T. The challenge of hot drought. *Nature*, 2013, 503: 350-351.
- [6] 武新英, 郝增超, 张璇, 郝芳华. 中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势. *水利水电技术: 中英文*, 2021, 52(12): 90-98.
- [7] Tynan E. Simultaneous occurrences. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 912.
- [8] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 14-27.
- [9] Franklin J, Serra-Diaz J M, Syphard A D, Regan H M. Global change and terrestrial plant community dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(14): 3725-3734.
- [10] Lesk C, Coffel E, Winter J, Ray D, Zscheischler J, Seneviratne S I, Horton R. Stronger temperature-moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields. *Nature Food*, 2021, 2: 683-691.
- [11] Huang M T, Piao S L, Ciais P, Peñuelas J, Wang X H, Keenan T F, Peng S S, Berry J A, Wang K, Mao J F, Alkama R, Cescatti A, Cuntz M, De Deurwaerder H, Gao M D, He Y, Liu Y W, Luo Y Q, Myneni R B, Niu S L, Shi X Y, Yuan W P, Verbeeck H, Wang T, Wu J, Janssens I A. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3: 772-779.
- [12] Xu C G, McDowell N G, Fisher R A, Wei L, Sevanto S, Christoffersen B O, Weng E S, Middleton R S. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 948-953.
- [13] Park Williams A, Allen C D, Macalady A K, Griffin D, Woodhouse C A, Meko D M, Swetnam T W, Rauscher S A, Seager R, Grissino-Mayer H D, Dean J S, Cook E R, Gangodagamage C, Cai M, McDowell N G. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 292-297.

- [14] 姜健俊, 万瑞容, 牛战富. 淮河流域主要社会经济指标统计分析研究. 治淮, 2022, 71(1): 34-36.
- [15] 姚筠, 许莹, 马晓群. 淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制. 资源科学, 2017, 39(3): 490-500.
- [16] 王晓东, 马晓群, 许莹, 陈超. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析. 资源科学, 2013, 35(3): 665-672.
- [17] 文佐, 尹义星, 邹睿, 王小军. 淮河流域 1960—2014 年水文、气象干旱指数及其与历史旱灾的关系. 中国农村水利水电, 2021, 63(2): 71-77.
- [18] 孙朋, 渠玮娟, 朱玺, 吴雨纯, 汪静, 张本发, 许梅越, 戴洪宝. 1959~2018 年淮河流域水热格局差异研究. 长江流域资源与环境, 2021, 30(6): 1366-1377.
- [19] 翁升恒, 张方敏, 卢燕宇, 段春锋, 倪婷. 淮河流域蒸散发时空变化与归因分析. 生态学报, 2022, 42(16): 6718-6730.
- [20] Jiao D L, Xu N N, Yang F, Xu K. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 17956.
- [21] Zhu Z C, Bi J, Pan Y Z, Ganguly S, Anav A, Xu L, Samanta A, Piao S L, Nemani R, Myneni R. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI) 3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR) 3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI_{3g}) for the period 1981 to 2011. Remote Sensing, 2013, 5(2): 927-948.
- [22] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 钟睿达, 黄文炜. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186.
- [23] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, Bonnefond J M, Chen J Q, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E, Verma S B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416-1431.
- [24] Wang H M, Zhang G X, Zhang S Y, Shi L J, Su X L, Song S B, Feng K, Zhang T, Fu X L. Development of a novel daily-scale compound dry and hot index and its application across seven climatic regions of China. Atmospheric Research, 2023, 287: 106700.
- [25] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.
- [26] 夏敏, 孙鹏, 张强, 姚蕊, 王友贞, 温庆志. 基于 SPEI 指数的淮河流域干旱时空演变特征及影响研究. 生态学报, 2019, 39(10): 3643-3654.
- [27] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.
- [28] 杨洋, 林朝晖, 骆利峰. 中国区域夏季地表气温与陆面过程耦合强度的分布特征. 气候与环境研究, 2022, 27(3): 333-350.
- [29] Domingues L M, da Rocha H R. Serial droughts and loss of hydrologic resilience in a subtropical basin: the case of water inflow into the Cantareira Reservoir system in Brazil during 2013-2021. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101235.
- [30] 陈小凤, 王再明, 胡军, 王振龙. 淮河流域近 60 年来干旱灾害特征分析. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 20-24.
- [31] 姚天. 近 60 年淮河流域极端气候事件变化特征分析 [D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [32] 章益棋, 袁飞, 张利敏, 宋耀榕, 石佳勇. 基于降水统计方法的江苏省旱涝急转演变特征研究. 水文, 2022, 42(2): 36-41, 29.
- [33] 薛媛, 薛晓萍. 极端降水与干旱同步频发的研究进展. 山东气象, 2022, 42(1): 61-73.
- [34] 梅梅, 高歌, 李莹, 王国复, 代潭龙, 陈逸骁. 1961—2022 年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征. 人民长江, 2023, 54(2): 12-20.
- [35] Chen Z L, Galli M, Gallavotti A. Mechanisms of temperature-regulated growth and thermotolerance in crop species. Current Opinion in Plant Biology, 2022, 65: 102134.
- [36] Li Y, Zhang W, Schwalm C R, Gentile P, Smith W K, Ciais P, Kimball J S, Gazol A, Kannenberg S A, Chen A P, Piao S L, Liu H Y, Chen D L, Wu X C. Widespread spring phenology effects on drought recovery of Northern Hemisphere ecosystems. Nature Climate Change, 2023, 13: 182-188.