

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230089

淮河流域最长连续无雨日特征及其与环流指数的关系

马宏伟^{a,b}, 张 铃^{a,b}, 黄 进^{a,b}, 张方敏^{a,b}

(南京信息工程大学 a. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心; b. 应用气象学院
江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 基于淮河流域 1961~2020 年 38 个气象站点的逐日降水数据, 筛选出最长连续无雨日(CDD), 采用 M-K 趋势检验、主成分分析、时滞相关分析、交叉小波变换等方法分析了淮河流域 CDD 的变化特征及其对 12 个环流指数的响应。结果表明, 淮河流域 CDD 空间分布有明显的季节特征。夏季表现为西高东低分布特征, 春季、秋季和冬季表现为北高南低分布特征; 60 年来, 不同季节的 CDD 变化亦不同, 其中秋季大部分站点 CDD 增加, 流域有变干趋势, 而冬季全部站点 CDD 减小, 流域干旱减缓; 不同时滞的 CDD 与 WP、SOI 和 Nino4 具有较好的相关性, 与 Nino4 的相关性最强, Nino4 对滞后 4、5 个月的 CDD 有明显增强作用, 对滞后 10、11 个月的 CDD 有明显减弱作用; Nino4 对 CDD 的显著影响主要集中在 10~15 个月共振周期上, 且主要呈 Nino4 超前于 CDD 的显著负相关关系。研究结果对今后干旱预测防御及水资源管理具有一定参考意义。

关键词: 淮河流域; 最长连续无雨日; 环流指数; 主成分分析

中图分类号: P426.6; P467

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0001-04

1 概况

淮河流域位于中国南北地理分界线及气候过渡区, 对全球气候变化十分敏感, 特殊的地理位置和气候特征也使得淮河流域极端降水事件频发^[1-2]。淮河流域还是我国重要的粮食基地, 干旱的发生必然会对该流域的生态安全及农业生产造成较大的威胁^[3-4]。1970~1990 年代淮河流域干旱频率逐渐上升, 且在未来年干旱频率会高于历史水平^[5]。最长连续无雨日(CDD)是评价极端降水持续时间的重要气候指标之一, 在一定程度上反映了一个地区的干旱程度^[6]。因此, 开展淮河流域 CDD 的研究对认识该区域干旱特征具有重要的参考意义。研究表明^[7-8], CDD 的时空变化特征与大气环流有关, 但不同的大气环流对 CDD 的影响方式和相关程度会由于时间和地区的差异而有所不同。目前对淮河流域干旱的研究集中在极端降水的频率和强度^[8], 但对极端降水的持续性或连续性也不容忽视。鉴于此, 本文选取淮河流域附近的 38 个有效气象站点 1961~2020 年逐日

降水实测资料, 采用 M-K 趋势检验、主成分分析、时滞相关分析、交叉小波变换等方法, 从月季尺度研究淮河流域最长连续无雨日的时空变化特征, 并进一步探究与环流指数的关系, 筛选出影响淮河流域 CDD 的主要环流指数, 以期为今后该区域干旱预测防御及水资源管理提供参考。

2 数据资料与研究方法

2.1 数据资料

降水数据选取了分布在淮河流域附近的 55 个站点, 其中包含 38 个有效气象站点, 时间尺度为 1961~2020 年的逐日降水数据, 数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)实测数据。根据 CDD 的定义(日降水量小于 1 mm 的最长日数)统计出 CDD, 构建各站点 CDD 的时间序列。

12 个环流指数数据来源于美国国家大气海洋局(NOAA)气候预测中心(<https://www.psl.noaa.gov>)提供的 1961~2020 年月尺度数据, 分别是西太平洋遥相关型(WP)、北极涛动(AO)、

收稿日期: 2023-01-19, **修回日期:** 2023-02-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1506606); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BK20220017)

作者简介: 马宏伟(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为应用气象学, E-mail: 1248534375@qq.com

通讯作者: 张方敏(1983-), 女, 教授, 研究方向为应用气象学, E-mail: fmin.zhang@nuist.edu.cn

热带北大西洋指数(TNA)、南方涛动(SOI)、太平洋年代际涛动(PDO)、太平洋—北美遥相关型(PNA)、大西洋年代际涛动(AMO)、北大西洋涛动(NAO)、热带太平洋中部海温(Nino4)、热带太平洋东部海温(Nino3*)、热带太平洋最东部海温(Nino1+2)、热带太平洋中东部海温(Nino3.4)。

2.2 研究方法

(1)趋势检验。M-K 趋势检验为一种非参数统计检验方法,假设样本时间序列为随机独立,样本可无需遵从特定的分布,且不受少数异常值的影响^[9]。本文采用 M-K 趋势检验分析 CDD 的变化趋势。

(2)主成分分析。主成分分析法是将原始多个变量指标转化为少数几个综合指标的一种统计分析方法^[10-11],通过降维的方法将多变量指标简化为能较准确反映原来变量信息且互不相关的少量指标,新的指标按照方差依次递减的顺序排列,排第一的指标称为第一主成分,依次类推。本文利用主成分分析探究 CDD 的空间变异性。

(3)时滞相关。运用时滞相关分析 CDD 与环流指数之间不同滞后时间的相关性。时滞相关分析的具体计算公式^[12]为:

$$s(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} (x_t - \bar{x})(x_{t+\tau} - \bar{x}) \quad (1)$$

$$r(\tau) = \frac{s(\tau)}{s^2} = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} \frac{x_t - \bar{x}}{s} \frac{x_{t+\tau} - \bar{x}}{s} \quad (2)$$

式中, $s(\tau)$ 为时间序列的自协方差; $\tau(\tau = t_2 - t_1, \text{设 } t_2 > t_1)$ 为时间间隔,也称为时间落后步长; $x_t(t = 1, 2, \dots, n)$ 为时间序列; \bar{x} 为样本的平均值; r 为相关系数,介于-1、1之间,绝对值越接近1,说明这两个序列相关程度越高。

(4)交叉小波变换(CWT)。交叉小波变换是探索两个时间序列之间多尺度相关性的一种方法,可在时频空间中找到时间序列里周期性强度一致的区域^[13]。因此,可利用交叉小波变换分析 CDD 与环流指数之间的周期关系。

3 结果与分析

3.1 CDD 时空变化特征

图 1 为 CDD 不同季节空间分布及变化趋势。由图 1 可看出:①淮河流域 CDD 在不同月份的空间分布差异明显,呈现一定的季节变化。CDD 低值主要集中在夏季,CDD 为 13~16 日,呈由东向西递增的西高东低的分布特征;CDD 高值主要集中在冬季,CDD 为 26~58 日,呈由东南、西南向

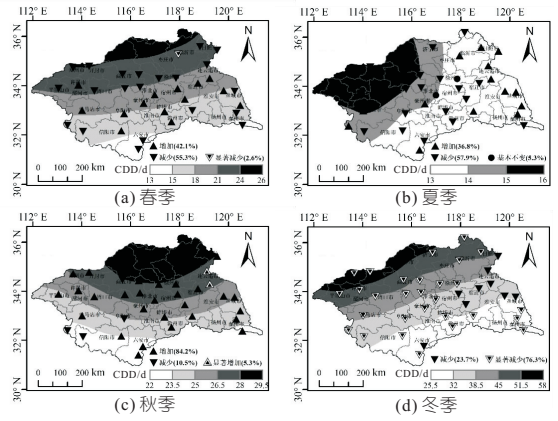


图 1 CDD 不同季节空间分布及变化趋势

Fig. 1 Spatial distribution and trend of CDD in different seasons

西北、东北递增的北高南低的分布特征;春季、秋季的 CDD 介于夏季、冬季之间,但春季 CDD 空间分布和冬季类似,秋季 CDD 则表现为从西南向东南递增的北高南低的分布特征。由此说明,淮河流域干旱分布有明显的季节特征。②1961~2020 年淮河流域各站点的 CDD 的时间变化趋势有明显的季节特征。在春季,42.1%的站点表现为增加趋势,57.9%为减少趋势,分布比较零散。在夏季,36.8%的站点为增加趋势,主要分布在东部;57.9%为减少趋势,主要分布在中部和西部。在秋季,除西南外,其他 89.5%的站点均表现为增加趋势。在冬季,全部站点均表现为增加趋势。但在春、夏、秋季 95%的站点未通过 0.05 显著性检验,而在冬季,除中东部外的其他 76.3%的站点均通过 0.05 显著性水平,说明淮河流域春夏季无明显的干湿变化,而冬季干旱水平显著下降,但秋季有干旱增加的趋势。

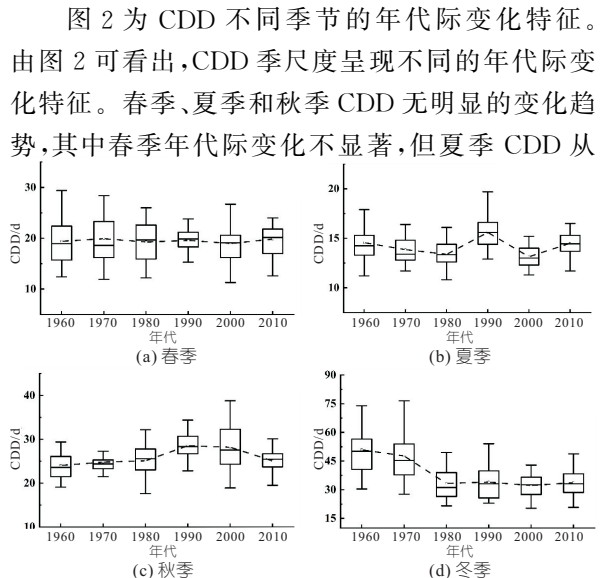


图 2 CDD 不同季节的年代际变化特征

Fig. 2 Interdecadal variation of CDD in different seasons

1960 年代到 1980 年代为下降趋势,随后增加在 1990 年代达最大,而后在 2000 年代又下降,在 2010 年代又反弹;而秋季 CDD 从 1960 年代增加至 2000 年代达最大,随后下降。冬季 CDD 从 1970 年代到 1980 年代呈显著减少趋势,之后趋于平缓,进一步验证了淮河流域冬季干旱趋于缓和。

通过主成分分析发现,CDD 变化的第一模态最强烈。由第一模态空间分布(图 3)可看出,第一模态呈“环状”的变化特征,整体表现为高度一致。高载荷区域分布在流域的中心位置,主要集中在亳州市、淮北市、徐州市、宿州市、蚌埠市及宿迁市,载荷值大于 0.87;低载荷区域分布在四周,其中六安市和泰州市载荷最低,载荷值小于 0.81,表明淮河流域中部地区干旱程度高于周边地区。

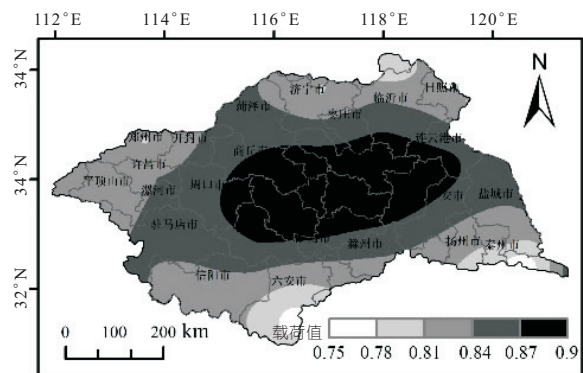


图 3 CDD 第一模态对应的载荷空间分布

Fig. 3 The load spatial distribution corresponding to the first mode of CDD

3.2 CDD 与环流指数的关系

为了解 CDD 变化与环流之间的联系,将 CDD 第一模态分别与 12 个大气环流指数进行时滞相关分析,CDD 的发生滞后于大气环流指数的时间设置为 0~12 个月,得到时滞相关图见图 4。由图 4 可看出,AO 和 AMO 对不同时滞 CDD 基本呈一致的减弱作用;而 WP、SOI、Nino4 与不同时滞 CDD 之间有较好的相关性,其中,与 Nino4

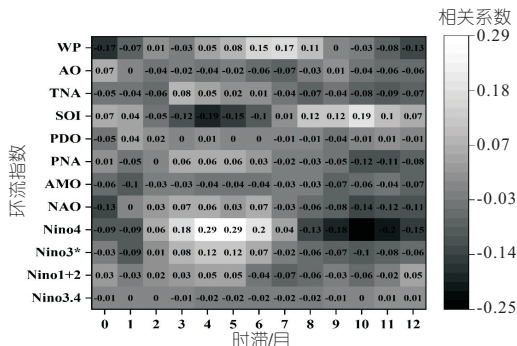


图 4 CDD 第一模态与 12 个环流指数的滞后相关

Fig. 4 The lag correlations between the first mode of CDD and 12 circulation indices

相关性最好,且 Nino4 和 SOI 对不同时滞的 CDD 的作用呈现相反的趋势。WP 对同期 CDD 具有减弱作用,对滞后 7 个月的 CDD 具有增强作用;SOI 对滞后 4 个月的 CDD 有减弱作用,对滞后 10 个月的 CDD 有增强作用;Nino4 对滞后 4、5 个月的 CDD 有较明显的增强作用,对滞后 10、11 个月的 CDD 有较强的减弱作用。

通过分析可知,Nino4 与 CDD 相关性最强,因此,对 Nino4 与 CDD 第一模态进行交叉小波变换分析,见图 5。图 5 中箭头表示相位关系,向右箭头表示两信号呈同相位变化,向左箭头表示气候指数与 CDD 呈负相关关系,向下表示气候指数超前 CDD 变化约 90°,向上表示气候指数落后 CDD 变化约 90°;黑色细实线表示小波边界效应影响锥,黑色粗实线表示通过 95% 显著性水平,两者显著相关。由图 5 可看出,Nino4 对 CDD 的显著影响主要集中在 10~15 个月共振周期上,其能量谱表现出“条带状”分布特征。其中,在 1961~1997、1999~2001 年呈显著负相关关系,两者之间的相位差为 135°,即 Nino4 超前于 CDD 约 3/8 个周期。

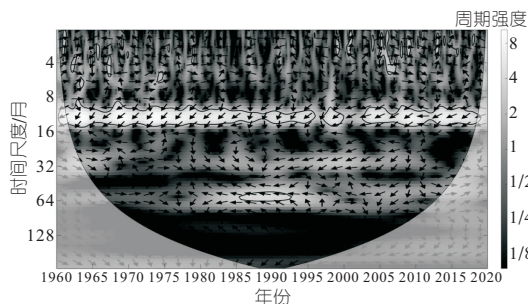


图 5 Nino4 和 CDD 第一模态的交叉小波能量谱(CWT)的时间变化图

Fig. 5 Temporal changes of Cross Wavelet Transform (CWT) of Nino4 and the first mode of CDD

4 结论

a. 淮河流域 CDD 空间分布差异显著,呈现一定的季节特征。CDD 低值主要集中在夏季,高值主要集中在冬季。春季、秋季、冬季 CDD 基本表现为北高南低的分布特征,而夏季则表现为西高东低的分布特征。

b. 1961~2020 年间淮河流域 CDD 的变化有明显的区域特征,其中秋季大部分站点 CDD 增加,冬季全部站点 CDD 下降,且 76.3% 的站点均通过 0.05 显著性水平,说明流域冬季干旱水平显著减缓,但秋季有干旱增加的趋势。

c. 不同时滞的 CDD 与 WP、SOI、Nino4 具有较好的相关性,与 Nino4 的相关性最强,Nino4 对滞后 4、5 个月的 CDD 有明显增强作用,对滞后 10、11 个月的 CDD 有明显减弱作用。Nino4 对 CDD 的显著影响主要集中在 10~15 个月共振周期上,且主要呈 Nino4 超前于 CDD 的显著负相关关系。

参考文献:

[1] 史晓亮,尚雨,陈冲,等. 淮河流域植被 NDVI 与干旱条件的相关性[J]. 西安科技大学学报,2019,39(6):1033-1040,1064.

[2] 潘欣,尹义星,王小军. 1960—2014 年淮河流域极端降水发生时间的时空特征[J]. 高原气象,2019,38(2):377-385.

[3] 严四英,翁白莎,景兰舒,等. 淮河流域干旱的时空分布特征[J]. 中国农村水利水电,2021(4):160-165,170.

[4] 黄进,林彬,徐兴祝,等. 我国粮食主产区农业水灾波动特征对环流异常的响应[J]. 水电能源科学,2022,40(12):22-25.

[5] 林慧,王景才,黄金柏,等. 气候变化情景下淮河流域气候干旱化研究[J]. 中国农村水利水电,2020(6):21-26,35.

[6] FRICH P ALEXANDER, LV DELLA-MARTA, P GLEASON, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate research,2002,19(3):193-212.

[7] WANG X, HOU X, ZHAO Y. Changes in consecutive dry/wet days and their relationships with local and remote climate drivers in the coastal area of China[J]. Atmospheric research,2020:105138.

[8] SHI J, CUI L, WEN K, et al. Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961-2015[J]. Environmental research,2018,161:381-391.

[9] 李小丽,敖天其,黎小东,古蔺县近 50 年来降水序列趋势分析[J]. 水土保持研究,2016,23(6):140-144.

[10] 李佳秀,徐长春,王晓,等. 新疆极端降水事件时空变化特征研究[J]. 人民黄河,2015,37(2):33-37.

[11] 孙莉娟,陈金华,徐阳,等. 基于多指数安徽省强降水灾害近 45 年的时空演变[J]. 水土保持研究,2020,27(3):128-133.

[12] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,1990.

[13] 徐乔婷,陈涟,范月华,等. 基于 SPEI 指数的兰州干旱特征与气候指数的关系[J]. 水文,2021,41(2):56-62.

Characteristics of Consecutive Dry Days and Its Relationship with Circulation Index in the Huaihe River Basin

MA Hong-wei^{a,b}, ZHANG Qian^{a,b}, HUANG Jin^{a,b}, ZHANG Fang-min^{a,b}

(a. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters; b. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 38 meteorological stations in the Huaihe River Basin from 1961 to 2020, the consecutive dry days (CDD) were selected. The variation characteristics of CDD and its response to 12 circulation index at different time scales were analyzed by using M-K trend test, principal component analysis, the lag correlation analysis and cross wavelet transform. The results indicate that the spatial distribution of CDD in Huaihe River Basin had obvious seasonal characteristics. It was high in the west and low in the east in summer, and high in the north and low in the south in spring, autumn and winter. In the past 60 years, the changes of CDD in different seasons were also different. The CDD increased in most stations and the basin tended to become dry in autumn, but the CDD decreased in all stations and drought slowed down in the basin in winter. The CDD with different time lags had good correlations with the WP, SOI and Nino4, and the strongest correlation with Nino4. The Nino4 had a significant strengthening effect on the CDD with a lag of 4 and 5 months, and a significant weakening effect on the CDD with a lag of 10 and 11 months. The significant influence of Nino4 on CDD was mainly concentrated in the resonance period of 10-15 months, and there was a significant negative correlation between Nino4 and CDD. The finding is prone to useful for drought prediction and water resources management in the future.

Key words: Huaihe River Basin; consecutive dry days; circulation index; principal component analysis