

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.021.

陈家栋, 田宏伟, 黄进, 等. 基于农业灾情 EEMD 的河南省干旱时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 250-256, 265.

CHEN Jiadong, TIAN Hongwei, HUANG Jin, et al. Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Drought in Henan Province with Using EEMD on the Agricultural Disaster Situation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 250-256, 265.

基于农业灾情 EEMD 的河南省干旱时空演变特征

陈家栋¹, 田宏伟^{2,3}, 黄进⁴, 张金池¹

(1.南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室

南京林业大学 林学院, 南京 210037; 2.中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003;

3.河南省气象科学研究所 郑州 450003; 4.南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘要: [目的] 河南省是我国重要的粮食主产区, 分析其干旱的时空演变特征对保障区域粮食安全有着重要意义。 [方法] 依托研究区 1978—2019 年农业干旱受灾率、成灾率以及逐日降水量等资料, 运用集合经验模态分解 (EEMD) 探求了实际灾情与多种类型干旱指数的可能关系。在此基础上, 分析了关键干旱致灾因子的时空演变特征及其对大尺度海洋—大气环流指数的响应。 [结果] EEMD 精准地从灾情逐年序列分离出由年际及年代际波动表征的气候干旱强度。多种干旱指数与气候干旱强度的相关分析表明夏季干旱对灾情影响最为显著, 其中关键致灾因子识别为 6 月、7 月、8 月份的无雨日天数。关键致灾因子的空间分布表明河南省北部夏季干旱的危险性较高, 其趋势分析指出干旱的危险性呈现出增强趋势。关键致灾因子与北大西洋涛动 (NAO) 等环流指数间存在着显著的时滞相关性。 [结论] 无雨日天数表征的夏季干旱对河南省灾情的贡献更高, 而环流指数为提前预判旱情提供的重要信号。

关键词: 河南省; 干旱; 集合经验模态分解; 环流指数

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0250-07

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Drought in Henan Province with Using EEMD on the Agricultural Disaster Situation

CHEN Jiadong¹, TIAN Hongwei^{2,3}, HUANG Jin⁴, ZHANG Jinchi¹

(1. Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Jiangsu Province, School of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. China Meteorological Administrator/Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China; 4. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: [Objective] Henan Province is an important grain producing area in China, the analysis on the temporal and spatial evolution characteristics of agricultural drought is of great significance to ensure regional food security. [Methods] Based on the data of ratio of area affected by agricultural drought, ratio of area suffering agricultural drought and monthly precipitation in the study area during the period from 1978 to 2019, the possible relationships between the actual disaster situation and various types of drought indexes were explored by using the set empirical mode decomposition (EEMD). On this basis, the temporal and spatial evolution characteristics of key causing-disaster factors and their responses to the large-scale ocean atmospheric circulation indices (LOACI) were analyzed. [Results] The climatic drought intensity characterized by inter-annual and inter-decadal fluctuations were accurately separated from the annual series of disaster

收稿日期: 2022-08-11

修回日期: 2022-08-25

资助项目: 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室开放研究项目“基于市级尺度河南省主要粮油作物气象年景对大气环流指数的响应”(AFM202006)

第一作者: 陈家栋 (1987—), 男, 江苏省南京人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事气候变化的研究。E-mail: shuiziyuan2019@126.com

通信作者: 张金池 (1962—), 男, 山东省安丘人, 教授, 博士, 主要从事水土保持及气候变化的研究。E-mail: zjcforest@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

situation by using EEMD. The correlation analysis between various drought indices and climatic drought intensity showed that summer drought had the most significant impact on the disaster situation, and the number of dry-days in June, July and August were selected as the key causing-disaster factors. The spatial distribution of key causing-disaster factors showed that the risk of summer drought in the north Henan was higher, and the trend analysis indicated that the drought risks presented an intensifying tendency. There were the significant time-lag correlations between the circulation indices such as North Atlantic Oscillation (NAO) and causing-disaster factors. [Conclusion] The summer drought represented by the number of dry-days had the higher contribution to disaster situation in Henan Province, and the circulation indices provided the important signals for predicting drought in advance.

Keywords: Henan Province; drought; empirical mode decomposition; circulation indices

全球气候变暖加剧的干旱灾害已成为我国农业生产的重要制约因素之一,运用不同类型干旱指标探求其时空演变规律受到了广泛重视^[1]。与无雨日指数、标准化降水指数(SPI)、Z 指数等气象资料驱动的代表性干旱指数相比,基于实际统计资料的受灾率等灾情指标直接反映了农业损失的最终结果,更具现实意义^[2]。灾情指标具有自然和社会双重属性,反映了致灾因子强度、承灾体抗灾能力等因素共同作用的结果^[3]。从灾情指标序列中提取出气候驱动成分并与干旱指数进行比较分析,能够规避农业经济等因素的干扰,进而客观准确地刻画灾害的成因及致灾因子的变化特征。集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)则为这种解析提供了基础。与 HP 滤波及最小二乘回归等方法相比,EE-MD 能够根据数据自身的时间尺度特征进行信号分解,能够更为客观和稳定地将作物产量等农情信息分解为气候因素驱动的波动项和非气候因素驱动的趋势项^[4]。与此同时,降水等气候因素与表征海洋—大气环流信息的大尺度环流指数存在着复杂的线性关系^[5]。鉴于此,基于 EEMD 梳理灾情指标、干旱指数、环流指数三者间的可能关系对优化区域干旱监测指标及早期预警有着重要意义。

河南省地跨南北气候过渡带,受季风以及地形差的影响,降水时空分布不均造成的干旱是区域内危害最大、最主要的气象灾害^[6]。河南省是我国传统农业大省,粮食总产量约占全国的 1/10,因此其干旱时空演变规律备受关注^[7]。现有的研究在运用干旱指数探求灾害演变规律方面取得了诸多成果,但相关指数的适用性评估以及对环流指数的响应还缺乏深入研究^[7-10]。鉴于此,本研究在多种数据的支撑下依托 EEMD 筛选出适用于河南省的干旱指数,并构建其对环流指数的响应关系,以为河南省防旱抗旱提供重要依据。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

图 1 中 113 个气象观测站 1978—2019 年的逐日降水量及平均气温数据由河南省气象局提供,且均进行了质量控制。国家统计局数据库(<http://data.stats.gov.cn/>)提供了全省尺度下 1978—2019 年农作物干旱受灾面积、农作物干旱成灾面积、农作物播种面积,由此构建了图 2 中受灾率及成灾率(受灾及成灾面积与播种面积的比值)的逐年变化序列。线性趋势分析的结果表明河南省农业干旱灾损程度呈现出显著的下降趋势,其中受灾率的下降趋势更为显著。

美国国家大气海洋局气候预测中心提供了 1978—2019 年 15 种大尺度海洋—大气环流指数(LOACI)的逐月资料,包含了太平洋—北美遥相关型(PNA)、东太平洋/北太平洋涛动(EP/NP)、西太平洋遥相关型(WP)、北大西洋涛动(NAO)、南方涛动(SOI)、热带北大西洋海温(TNA)、热带南大西洋海温(TSA)、西半球暖池(WHWP)、混合 ENSO 指数(MEI)、厄尔尼诺 3 区平均海面温度(NINO₃)、厄尔尼诺 1+2 区平均海面温度(NINO₁₊₂)、厄尔尼诺 4 区平均海面温度(NINO₄)、厄尔尼诺 3.4 区的平均海面温度(NINO_{3.4})、太平洋年代际振荡(PDO)、北太平洋遥相关型(NP)^[11-12]。

1.2 干旱指数的选取

本研究选取了 5 种应用广泛且计算便捷的干旱指数(表 1)。基于 113 个站点 1978—2019 年的降水及气温数据,构建了各站点 5 种干旱指数的逐月序列,其中 SPI 和 SPEI 使用 1 个月尺度的计算值。在此基础上,通过区域算术平均法生成了全省尺度下各月份干旱指数的逐年序列,进而用于适用性的评估。

1.3 时序特征分析方法

本研究运用集合经验模态分解(EEMD)对受灾率及成灾率的逐年序列进行解析。EEMD 可有效地

由原始信号中不同尺度的振荡(内在的本征模函数,即 IMF)或趋势分量逐级分离出来,并利用方差贡献率衡量每种尺度信号波动频率和振幅对原数据总体特征影响程度,进而准确地检测出非平稳、非线性信号的周期性特征和长期变化趋势^[12]。与此同时,采用线性趋势分析与 Mann-Kendall 非参数趋势检验(M-K 检验)对相关指标的逐年序列进行诊断。此外,重心迁移模型被用于刻画干旱灾害强度空间分布的集聚和位移。

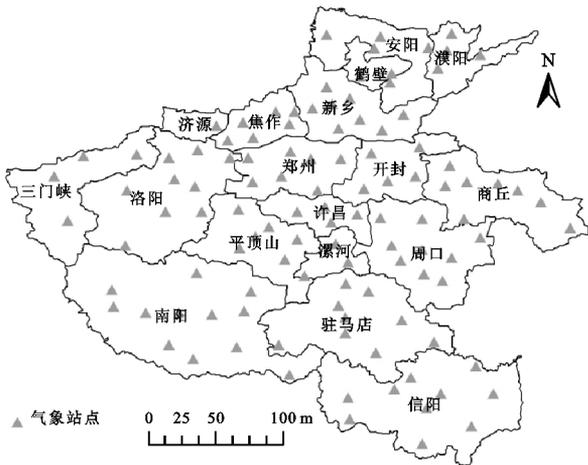


图 1 河南省 113 个气象站的空间分布

2 结果与分析

2.1 干旱灾情序列的 EEMD 解析

基于 EEMD,河南省农业干旱的两组实际灾情序列均被分解成 4 个 IMF 分量和 1 个 Trend 分量(图 3)。

IMF1, IMF2, IMF3 分别表征了受灾率及成灾率的准 2.8 a, 6~7 a, 10.5 a 周期性振荡。IMF4 的周期达到了接近研究期跨度的 38.5~39.2 a, 其在 2000 年之前数值偏高,而在 2000 年之后数值明显较低。与此同时, Trend 也呈现出显著的逐年平滑下降过程。由此可见 IMF4 和 Trend 分量刻画了灾情的长期发展态势,反映了人为因素驱动下的干旱敏感性,而 IMF1, IMF2, IMF3 从不同时间尺度反映了气候异常驱动下干旱致灾强度(气候干旱强度)的年际和年代际变化特征。图 3 中各分量的方差贡献率量化了灾损是气候干旱强度与敏感性共同作用的结果。气候干旱强度对灾损的贡献主要通过 IMF1 表征的准 2.8 a 周期性振荡来体现,其方差贡献率为 29.2%~41.4%;干旱敏感性对灾损的贡献则主要通过 Trend 来体现,其方差贡献率为 30.1%~43.5%。由此可见干旱敏感性同样对灾损的形成有着较高的贡献比重,不断提升的抗灾能力可以有效降低灾损。

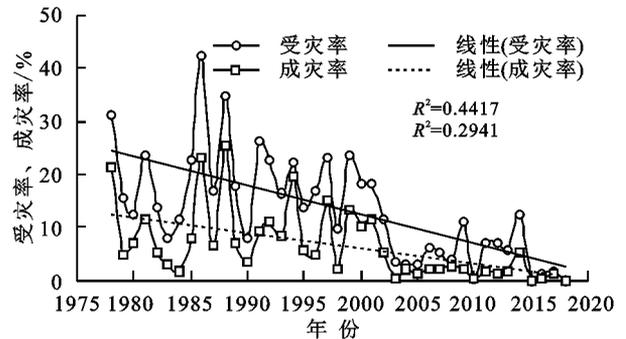


图 2 河南省农业干旱灾情指标的逐年变化

表 1 干旱指数的定义

指数名称	指数简写	指数定义	数据要求
无雨日天数	Number of dry-days (NDD)	某时期内无雨日事件(日降水量小于 1 mm)的总天数	逐日降水量
最长连续无雨日	Consecutive dry-days (CDD)	某时期内连续无雨日事件持续天数的最大值	逐日降水量
降水距平指数	Precipitation anomaly index (PAI)	某时期内降水量偏离同期多年平均值的程度,通过百分率形式反映由降水异常而引起的干旱	逐月降水量
标准化降水指数	Standardized precipitation index (SPI)	SPI 采用 Γ 函数的标准化降水累积频率分布来描述干湿状况	逐月降水量
标准化降水蒸散指数	Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)	SPEI 是对 SPI 的改进,通过实际降水量和潜在蒸发量之间的差值来表征干旱强度	逐月降水量 逐月平均温度

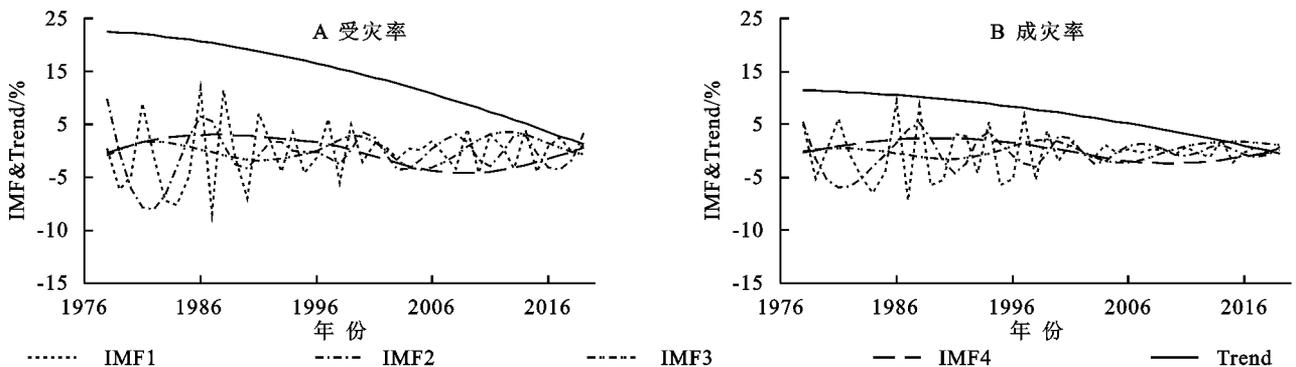


图 3 河南省农业干旱受灾率和成灾率序列的 EEMD 分解

2.2 不同类型干旱指数适用性评估

将灾情指标的 IMF1, IMF2, IMF3 与全省尺度下各月份的干旱指数序列进行相关分析,即每个 IMF 均有 60 个(5 种指数×12 个月份)序列与之对应。表 2 中的相关性及其对应月份不仅可以识别出主导型季节干旱,还为评估干旱指数的适用性提供了重要依据。由表 2 可以发现灾情指标的 IMF1 反映了 6 月份的气候干旱强度,其与多数干旱指数 6 月份序列的相关性更为显著,特别是和 6 月份 NDD (NDD_6)的相关系数达到了 0.451。IMF2 则反映了

8 月份的气候干旱强度,其与 5 种干旱指数 8 月份序列的相关性更为显著,特别是和 8 月份 NDD (NDD_8)的相关系数达到了 0.432。IMF3 与干旱指数的关系较为复杂,其与 7 月份、3 月份、2 月份序列的相关性较显著,特别是和 7 月份 NDD (NDD_7)的相关系数达到了 0.447。总体而言 IMF1, IMF2, IMF3 分别对 6 月、8 月、7 月份干旱指数的响应更为敏感,这表明了研究区农业旱情主要由夏季降水亏缺导致。相较其他指数, NDD_6, NDD_7, NDD_8 与 IMF 的相关性更为显著,可以筛选为关键致灾因子。

表 2 灾情指标的 IMF 与干旱指数的相关分析

参数	NDD		CDD		PAI		SPI		SPEI		
	相关系数	月份	相关系数	月份	相关系数	月份	相关系数	月份	相关系数	月份	
受灾率	IMF1	0.405**	6	0.389*	7	-0.317*	6	-0.346*	6	-0.351*	6
	IMF2	0.432**	8	0.312*	8	-0.423**	8	-0.391*	8	-0.371*	8
	IMF3	0.341*	7	0.330*	7	-0.269	3	-0.290	2	-0.278	2
成灾率	IMF1	0.451**	6	0.393*	7	-0.332*	6	-0.375*	6	-0.381*	6
	IMF2	0.356*	8	0.325*	9	-0.338*	8	-0.298	8	-0.278	8
	IMF3	0.447**	7	0.413**	7	-0.309*	2	-0.282	2	-0.277	2

注:** 表明在 0.01 水平上显著相关;* 表明在 0.05 水平上显著相关。

2.3 关键致灾因子的时空演变特征

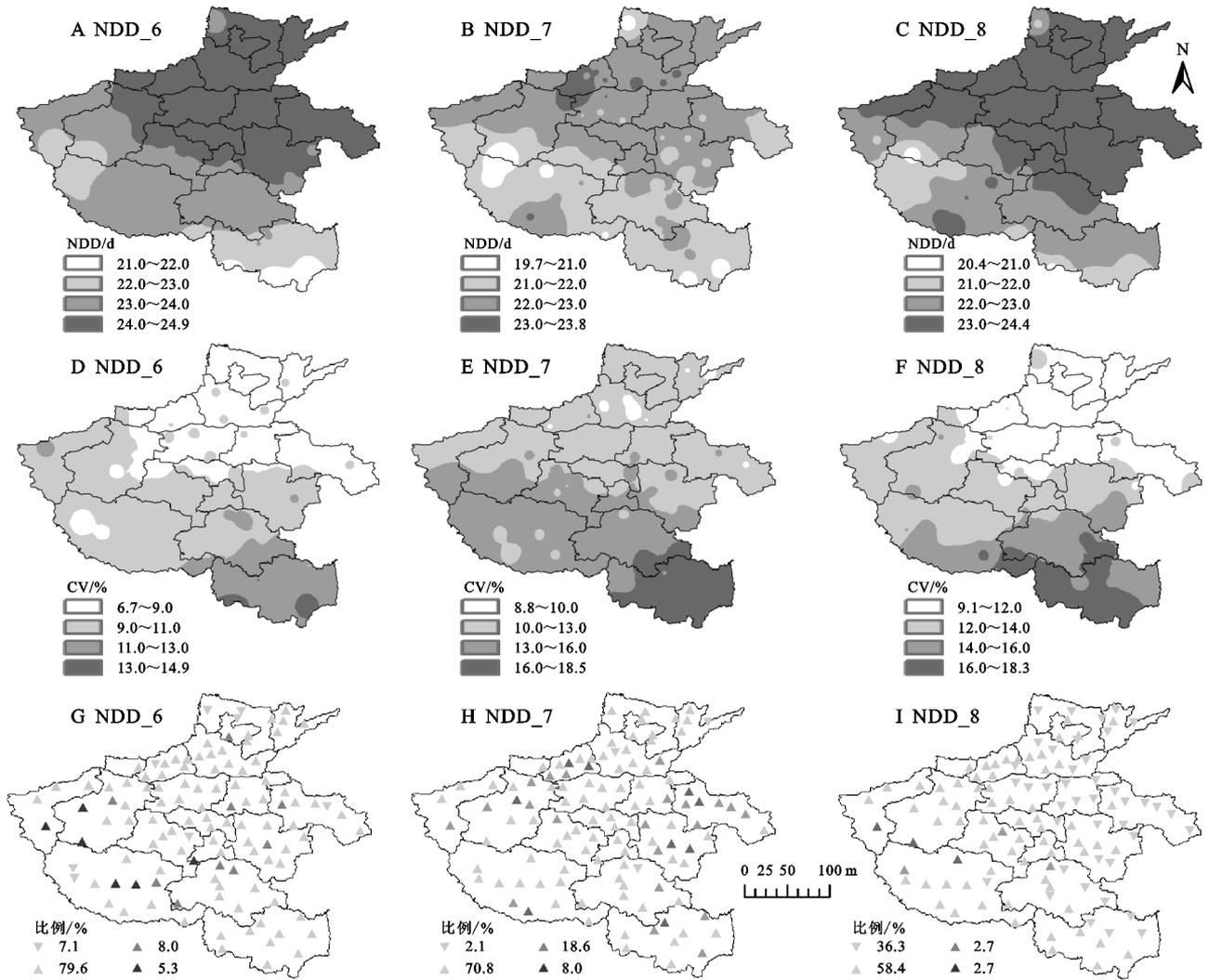
基于各站点 NDD_6, NDD_7, NDD_8 的多年均值、变异系数、变化趋势见图 4,通过反距离权空间插值呈现了河南省夏季干旱致灾因子的时空演变格局。河南省 NDD_6, NDD_7, NDD_8 的多年均值分别在 21.0~24.9 d, 19.7~23.8 d, 20.4~24.4 d 范围内变化,并呈现出明显的由南向北递增的梯度变化。NDD_6 的高值区域主要分布在濮阳、安阳、新乡、郑州、开封、焦作;NDD_7 的高值区域主要分布在焦作、新乡以及洛阳与郑州的交界处;NDD_8 的高值区域主要分布在濮阳、安阳、焦作、新乡。相比之下,3 个致灾因子的低值区域主要分布在西南部洛阳的及南部的信阳。与多年均值由南向北递增的空间分布截然相反,致灾因子在河南省南部地区特别是信阳呈现出较高的变异系数,其数值超过了 15%,而北部多数地区不足 10%。由此可以发现河南省北部地区的夏季干旱常年稳定地保持着较高强度,而南部地区则呈现出更强的年际波动。

在西部的洛阳、北部的焦作、东部的周口和商丘。与 NDD_6 及 NDD_7 有所不同, NDD_8 呈现增加减少的站点所占比例达到了 36.3%,其主要分布在北部及东部的部分地区。

图 5 给出了全省尺度下河南省夏季干旱致灾因子的时序演变特征。由线性拟合结果可知 3 个致灾因子均呈现增加趋势,其中 NDD_7 的增加趋势通过了显著性检验。致灾因子不同时期的多年均值进一步表明了研究区夏季干旱危险性呈现出显著的年代差异。与 1980s, 1990s, 2000s 这 3 个年代相比, 2010 年代的干旱强度相对更高。

NDD_6 呈现增加趋势、显著增加趋势、极显著增加趋势的站点分别占全部站点的 79.6%, 8.0%, 5.3%, 而呈现减少趋势的站点仅占 7.1%, 这表明了河南省 6 月份的干旱危险性总体呈现出增强趋势。相比下, 7 月份干旱危险性增强的趋势更为强烈, 其表现在 NDD_7 呈现增加趋势、显著增加趋势、极显著增加趋势的站点分别占全部站点的 70.8%, 18.6%, 8.0%。从空间尺度来看, NDD_7 呈现显著增加趋势的站点主要集中

根据各站点 1978—2019 年 NDD_6, NDD_7, NDD_8 的数值, 计算得到河南省每年夏季 6 月、7 月、8 月份的旱灾重心坐标。由图 6 所示, 河南省 6 月份旱灾重心经度坐标的最小值和最小值分别为 113.8°和 113.9°, 在整个研究期内其呈现出极其微弱的下降趋势; 河南省 7 月份旱灾重心经度坐标的最小值和最小值分别为 113.7°和 113.9°, 在整个研究期内其呈现出极其微弱的上升趋势; 河南省 8 月份旱灾重心经度坐标的最小值和最小值分别为 113.7°和 113.9°, 在整个研究期内其呈现出强烈的下降趋势并通过了显著性检验。这表明了 7 月份旱灾重心有明显的向西迁移趋势。图 6 中 6 月、7 月、8 月份的旱灾重心纬度坐标均大致在 34.0°~34.2°范围内波动, 其均呈现出未通过显著性检验的微弱下降趋势。这表明了夏季旱灾重心有着一定程度的向南迁移趋势。



注:A—C表示NDD的多年均值;D—F表示NDD的变异系数;G—I表示NDD的变化趋势。

图4 河南省1978—2019年NDD的时空演变特征

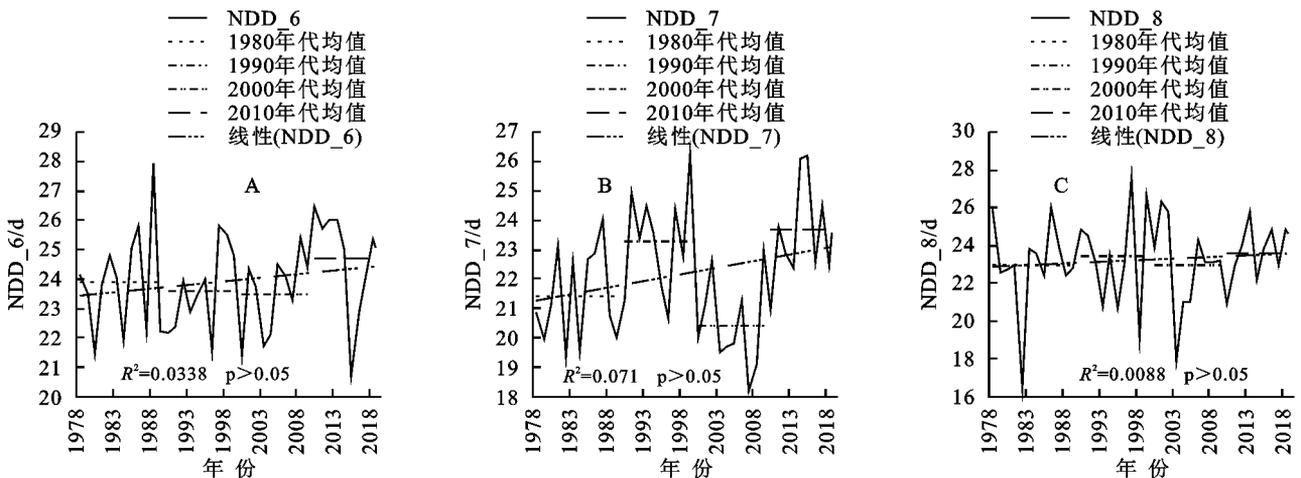


图5 全省尺度下1978—2019年NDD₆,NDD₇,NDD₈的演变特征

2.4 关键致灾因子对环流异常的响应

为了识别显著影响河南省夏季干旱强度的大尺度环流信号,将区域NDD₆,NDD₇,NDD₈逐一与15个LOACI分别进行时滞相关分析,时滞期设置为同期及前期的0~12个月。这个研究将不同时滞下

的同一个指数设定为不同的预报因子,故每一个致灾因子均对应了195(15×13)个独立的环流因子。不同时滞期设置下,表3根据相关系数绝对值的最大值筛选出影响NDD的首要环流指数。NDD₆与LOACI的相关系数在-0.574~0.326浮动,其中PNA,

TSA,NAO 对 NDD_6 的影响较显著,特别是时滞期 12 个月时 NAO 与 NDD_6 的相关系数到达-0.574; NDD_7 与 LOACI 的相关系数在-0.176~0.508 浮动,其中 Nino₃,PNA,MEI 对 NDD_7 的影响较显著,特别是时滞期 1 个月时 MEI 与 NDD_7 的相关系数到达 0.508;NDD_7 与 LOACI 的相关系数在-0.401~-0.207 浮动,其中 PNA,Nino₃,Nino₁₊₂,WP,PDO 对 NDD_8 的影响较显著,特别是时滞期 8 个月时 Nino₃与 NDD_8 的相关系数到达-0.401。由此可知前 1 年 7 月份的 NAO (NAO_前 7)、当年 6 月份的 MEI (MEI_当 6)、前 1 年 12 月份的 Nino₃ (Nino₃_前 12)分别对 NDD_6,NDD_7,NDD_8 年际变化有着较好的指示作用。

灾情指标的 Trend 及 IMF4 随着年份推移呈现出平滑的下降态势,而呈现波动性的 IMF1,IMF2,IMF3 分别与区域 NDD_6,NDD_8,NDD_7 显著相关,且 NDD_6,NDD_8,NDD_7 分别与 NAO_前 7,Nino₃_当 12,MEI_当 6 显著相关。鉴于此,本研究运用多元线性回归方程尝试了两灾情模拟方案,其中模型 I 的 4 个预报因子分别为年份及 NDD_6,NDD_8,NDD_7,而模型 II 的 4 个预报因子分别为年份及 NAO_前 7,Nino₃_当 12,MEI_当 6。从图 7 可以发现模拟值与实测值有着较高的时序同步性,两组模型均较好地模拟出实际灾情的波动下降趋势。模型 I 的输出结果与灾情指标的 R²分别为 0.671,0.572,而模型 II 的输出结果与灾情指标的 R²分别为 0.544,0.423。尽管模型 II 的模拟效果略差,但由于输入的预报因子为前期环流指数,能够在灾情发生期之前的较长时段内实现一定精度的预警。

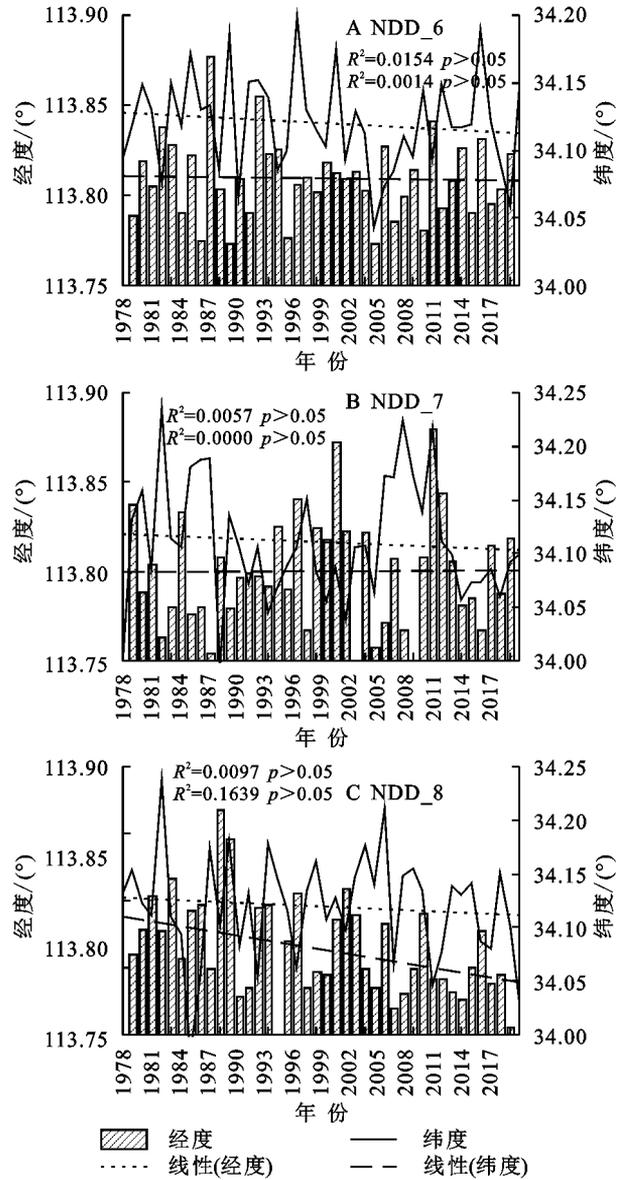
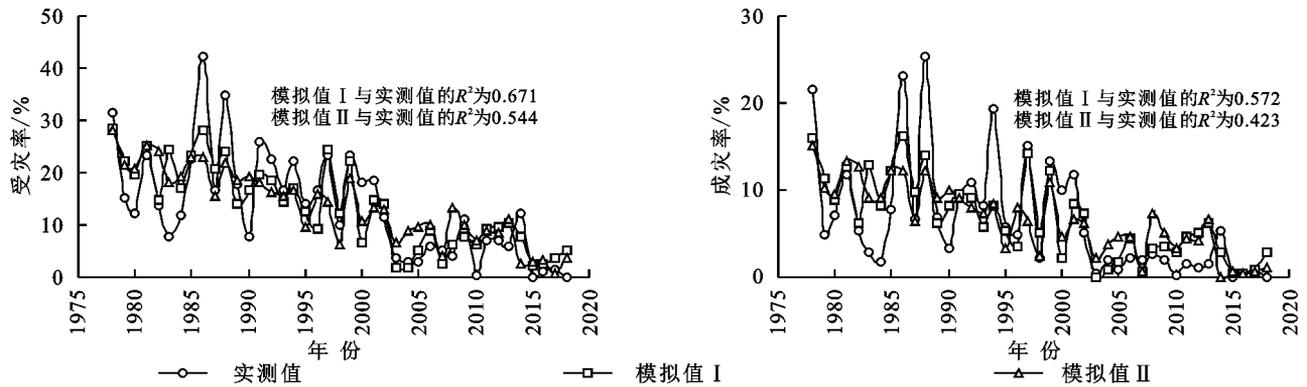


图 6 河南省 1978—2019 年 NDD 重心经纬度的演变特征

表 3 不同滞后期 NDD 与 LOACI 最显著的相关性

时滞期/月	NDD_6		NDD_7		NDD_8	
	LOACI 类型	相关系数	LOACI 类型	相关系数	LOACI 类型	相关系数
0	PNA	0.326*	Nino ₃	0.429**	TNA	-0.207
1	PDO	-0.262	MEI	0.508**	PNA	-0.308*
2	NAO	-0.287	Nino ₃	0.444**	PNA	-0.278
3	EP/NP	-0.269	Nino ₃	0.315*	NAO	0.295
4	NAO	-0.218	TNA	-0.268	WHWP	-0.253
5	NP	-0.237	TNA	-0.210	Nino ₄	-0.260
6	NP	0.271	PNA	0.260	MEI	-0.299
7	TSA	0.312*	PNA	-0.358*	Nino ₃	-0.326*
8	TSA	0.254	EP/NP	0.257	Nino ₁₊₂	-0.401**
9	WP	0.190	PNA	0.092	Nino ₁₊₂	-0.370*
10	NP	0.212	NP	-0.176	WP	0.347*
11	PDO	-0.245	EP/NP	-0.152	PDO	-0.302*
12	NAO	-0.574**	NP	0.226	Nino _{3,4}	-0.272

注:** 表明在 0.01 水平上显著相关;* 表明在 0.05 水平上显著相关。



注:模拟值 I 为模型 I 的输出结果;模拟值 II 为模型 II 的输出结果。

图7 河南省农业干旱灾情的模拟

3 讨论与结论

EEMD 将河南省农业干旱灾情解析为气候干旱强度和干旱敏感性,其中干旱强度呈现出与研究区降水相似的 3~10 a 周期性振荡特征^[12]。而敏感性则呈现出显著的下陷趋势,这与河南省 2000 年以来不断提升的农业综合抗旱能力相吻合^[13]。气候干旱强度与多种类型干旱指数的相关分析表明夏季干旱是该省的首要灾害模式。相类似,朱业玉等^[10]指出河南省旱情最严重的 1986 年、1988 年、1994 年、1999 年、2001 年等典型灾年的夏季均出现了降水严重异常偏少。在高纬度冷暖空气以及西太平洋副热带高压影响下,河南省夏季易出现高温少雨天气,而同期夏玉米等作物的需水量较大,因而初夏旱及伏旱的危害更严重^[14-15]。与其他干旱指数相比,6 月份无雨日天数(NDD₆),7 月份无雨日天数(NDD₇),8 月份无雨日天数(NDD₈)对灾情年代际波动的影响更为显著,被甄别为关键致灾因子。

致灾因子的空间分布表明河南省北部地区夏季干旱的危险性更高。相关研究中 MCI 指数与 CI 指数提取的夏季干旱强度也呈现出类似的空间格局^[8-9]。这与该省自南向北由亚热带向暖温带过渡所形成的降水地域差异相一致^[16]。站点及区域尺度下致灾因子的趋势诊断结果表明河南省夏季干旱的危险性呈现出一定的增强趋势,特别是 2010 年以来的强度较高。1970 年以来、河南省夏季降雨日数特别是 10 mm 内的降水事件呈现减少趋势、而强降水事件对夏季降水量的贡献呈上升趋势,降水分布呈现出的极端化趋势加剧了旱情^[17]。东亚夏季风的强度及辐合作用的减弱导致东部雨带南移可能是造成研究区夏季干旱化趋势的重要原因^[18]。

致灾因子与环流指数之间存在着显著的时滞相关性,其中前 1 年 7 月份 NAO 的数值越低则 NDD₆ 越

高;当年 6 月份 MEI 的数值越高则 NDD₇ 越高;前 1 年 12 月份的 Nino₃ 的数值越低则 NDD₈ 越高。大尺度环流异常特别是厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)的冷暖位相转换对夏季降水的丰歉有着重要影响^[19]。因此,与 ENSO 密切相关的一些海温指数成为了夏季降水异常的重要前兆信号,其中北大西洋涛动(NAO)是影响华北气候变化的强烈信号,能够提前 6~12 个月对降水进行预测^[20]。本文进一步量化了旱情对环流指数的响应,特别是基于 NAO,MEI,Nino₃ 为前期预报因子的多元线性回归模型对实际灾情有着一定的模拟能力,这为提前预判干旱年景提供了思路。

参考文献:

- [1] 楚纯洁,周金凤.河南省 1960—2018 年旱涝演变及其极端与持续性分析[J].水土保持研究,2022,29(3):164-171.
- [2] 王利民,刘佳,张有智,等.我国农业干旱灾害时空格局分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):96-105.
- [3] 田志会,李晓雪.1949—2016 年我国粮食主产区旱灾变化趋势分析[J].中国农业大学学报,2019,24(12):159-167.
- [4] 刘忠,黄峰,李保国.基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素[J].农业工程学报,2015,31(2):7-13.
- [5] 黄进,张方敏,胡正华.基于多指标综合降水指数的安徽省暴雨灾害的时空演变[J].灾害学,2022,37(2):111-116.
- [6] 张志高,张凯昭,蔡茂堂,等.1960—2019 年河南省降水结构时空变化特征[J].水土保持研究,2022,29(4):159-166.
- [7] 商东耀,张志红,岳元,等.基于标准化降水指数的河南省近 45 年干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):162-170.
- [8] 张宇星,智协飞,李凤秀.基于 MCI 的河南干旱时空变化特征分析[J].科学技术与工程,2020,20(9):3420-3426.
- [9] 李树岩,刘荣花,师丽魁,等.基于 CI 指数的河南省近 40 年干旱特征分析[J].干旱气象,2009,27(2):97-102.
- [10] 朱业玉,潘攀,匡晓燕,等.河南省干旱灾害的变化特征和成因分析[J].中国农业气象,2011,32(2):311-316.

(下转第 265 页)

- China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(3/4):2865-2875.
- [23] 李宗盟, 霍兵兵, 朱文敏, 等. 淮河中上游段干支流河道走向特征分析[J]. *信阳师范学院学报:自然科学版*, 2022, 35(2):248-251.
- [24] Wang H, Liu Z Z, Zhu J, et al. Spatio-temporal extraction of surface waterbody and its response of extreme climate along the Upper Huai River [J]. *Sustainability*, 2022, 14(6):3223.
- [25] 张特, 刘冀, 魏榕, 等. 淮河上游植被对气象干旱的响应[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2):213-219.
- [26] 袁开蓉, 王玉英, 刘衍, 等. 不同饱和水汽压计算式对室外湿球温度计算的影响[J]. *工业建筑*, 2020, 50(7):101-106.
- [27] 杨少康, 刘冀, 魏榕等. 长江上游流域生长季气象干旱分异特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(02):184-191.
- [28] 郭晓芳, 李旭东, 程东亚. 云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1):159-163, 170.
- [29] Wang W Y, Li J L, Qu H J, et al. Spatial and temporal drought characteristics in the huanghuaihai plain and its influence on cropland water use efficiency[J]. *Remote Sensing Letters*, 2022, 14(10):2381.
- [30] Guo Y, Huang S Z, Huang Q, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712:136502.
- [31] Hao Z C, Hao F H, Singh V P, et al. Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542:772-780.
- [32] 李京芳, 彭涛, 董晓华, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域水文干旱风险研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3):179-188.
- [33] Pathak A A, Dodamani B. M. Connection between meteorological and groundwater drought with copula-based bivariate frequency analysis[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26(7):05021015.

(上接第 256 页)

- [11] 田宏伟, 胡程达, 黄进, 等. 近 30 年河南省冬小麦气象年景的时空演变及其与大气环流的联系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):346-352.
- [12] 田宏伟, 闵俊杰, 黄进, 等. 基于集合经验模态分解的河南省夏玉米产量波动对大气环流的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4):176-182.
- [13] 韩红, 冯光辉, 邓国取. 基于 ND-GAIN 模型的河南省农业抗灾能力评价[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1):67-74.
- [14] 薛昌颖, 张永涛, 刘伟昌. 1971—2016 年河南省夏玉米生长季极端干旱时空特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(2):258-266.
- [15] 竹磊磊, 常军, 张善强. 河南夏季干旱气候特征分析[J]. *气象与环境科学*, 2012, 35(1):49-55.
- [16] 陈家栋, 田宏伟, 黄进, 等. 1970—2019 年河南省年内降水分配非均匀性的时空演变[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):342-349.
- [17] 王新伟, 平凡, 姬兴杰, 等. 近 40 年河南省夏季降水变化特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(3):219-229.
- [18] 崔童, 张若楠, 郝立生, 等. 华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J]. *大气科学*, 2022, 46(4):903-920.
- [19] 赵树云, 陈丽娟, 崔童. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响[J]. *大气科学*, 2017, 41(4):857-868.
- [20] 范磊, 吕爱锋, 张文翔. 青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(12):60-65.