

1970—2019 年河南省年内降水分配 非均匀性的时空演变

陈家栋¹, 田宏伟^{2,3}, 黄进⁴, 张金池¹

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

摘要: [目的] 分析河南省年内降水分配非均匀性的时空演变规律, 为区域水资源管理提供依据。[方法] 依托河南省 113 个气象站 1970—2019 年逐月降水数据, 评估了降水季节性指数(PSI)的时空变化。[结果] ①PSI 的空间分布表明河南省北部呈现出较高的降水非均匀性, 超过 28% 的降水集中在 7 月; ②基于主成分分析, 河南省可以划分为 4 个呈现不同 PSI 演变特征的区域, 分别为西部、中东部、北部、南部; ③西部、中东部、及南部地区的 PSI 在 1990 年后呈现出一定的上升趋势, 而北部地区 PSI 呈现出更为强烈的短期振荡; ④河南省大部分地区 PSI 的年代际变化主要受厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)影响; ⑤与其他粮油作物相比, 冬小麦产量的年际波动对 PSI 更为敏感。[结论] 河南省年内降水分配的时空变异性较强, 其与大尺度环流信号的相关性存在显著的区域差异。

关键词: 河南省; 年内降水分配; 非均匀性; 降水季节性指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0342-08

中图分类号: P426.614

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.044; Chen Jiadong, Tian Hongwei, Huangjin, et al. Spatial and temporal evolution of inhomogeneity of intra-annual precipitation distribution in He'nan Province during 1970—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 342-349.

Spatial and Temporal Evolution of Inhomogeneity of Intra-annual Precipitation Distribution in He'nan Province During 1970—2019

Chen Jiadong¹, Tian Hongwei^{2,3}, Huangjin⁴, Zhang Jinchi¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological

Restoration, Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China Jiangsu,

Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. China Meteorological Administrator/

He'nan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou,

He'nan 450003, China; 3. He'nan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

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

Abstract: [Objective] The spatio-temporal variability for inhomogeneity of intra-annual precipitation distribution was analyzed in order to provide the basis for regional water resource management. [Methods] Based on monthly precipitation data during 1970—2019 at 113 stations in He'nan Province, spatio-temporal variability of the precipitation seasonality index (PSI) was evaluated. [Results] ① The spatial distribution of PSI showed that North He'nan Province had higher precipitation inhomogeneity, and more than 28% of precipitation occurred in July; ② He'nan Province could be divided into four sub-regions with different temporal variations in PSI (west, central-east, north, and south areas) by using principal component analysis; ③ After 1990, PSI in west, central-east, and South He'nan Province showed a certain upward trend, while PSI in

收稿日期: 2021-02-06

修回日期: 2021-03-23

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资助项目“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); 江苏省农业科技自主创新项目“典型困难地生态经济防护林营建技术方案”[CX(17)1004]

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

通讯作者: 张金池(1962—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 教授, 博士, 主要从事水土保持及气候变化的研究。Email: zjcforest@163.com。

North He'nan Province showed a stronger short-term oscillation; ④ The interdecadal changes of PSI in most areas of He'nan Province were mainly influenced by ENSO; ⑤ The inter-annual fluctuation of winter wheat yield was more sensitive to PSI than the yield of other grain and oil crops. [Conclusion] The spatial-temporal variability of intra-annual precipitation distribution in He'nan Province was strong, and there were significant regional differences in the correlation between intra-annual distribution and large-scale circulation signals.

Keywords: He'nan Province; intra-annual precipitation distribution; inhomogeneity; precipitation seasonality index (PSI)

伴随着全球气温升高,区域性极端气候事件频发,降水呈现出更为显著的多尺度时空非均匀性,其剧烈的时空变化不断地加剧着区域性气象水文灾害的风险^[1]。区域降水的变化特征通常包含了“降雨量”和“降雨结构”的变化,不同时段内降水量的分配则是反映降水结构的重要内涵^[2]。降水年内分配不均匀,雨量集中到少数月份中,是导致区域旱涝等气象灾害事件发生的重要原因,因此研究降水年内分配非均匀性的时空演变对水资源安全监测和管理有着重要现实意义^[3]。基于月降水量数据,Zhang等^[4]提出的降水集中度(PCD)是中国学者使用最多的一种评估年内降水分配均匀与否的降水指数。近20 a来,PCD指数已应用于陕西^[2]、江苏^[5]、辽宁^[6]、浙江等^[7]诸多省份以及淮河^[3]、珠江^[8]、汉江等^[9]主要流域,其结果定量表征了不同区域降水量在时空场上的非均一性,并探讨了PCD变化趋势的空间分布,进而反映了中国降水季节变率时空演变特征的区域差异。国际上对降水集中性的描述大多采用De Luis等^[10]改进的降水集中指数(PCD)、Walsh等^[11]提出的降水季节性指数(PSI)^[4]。与PCD和PCI等指数相比,PSI的优势是它的计算更为简便,物理意义更直观,且有着良好的分级参考标准^[12]。

河南省为一个农业大省,是中国粮食生产的核心产区,其冬小麦、玉米、花生等重要粮油作物的产量均居全国前列^[13]。由于地处南北气候过渡带,受季风影响,河南省降水年际变异及区域分布差异都极为显著,降水异常引发的旱涝灾害严重影响了区域粮食生产安全和人民生活^[14]。目前,河南省降水变化规律的相关研究主要集中在强度、极值、频次等方面,对降水结构的探求还较少^[15]。鉴于此,本文运用降水季节性指数(PSI)探求年内降水非均匀性的时空演变对评估河南省水资源对气候变化的响应有着重要意义。

1 资料与方法

1.1 基本数据

图1中113个气象观测站1970—2019年的逐月降水资料由河南省气象局提供。基于加拿大环境部

气候研究中心RHtest均一性检验技术,各站点月降水序列均通过了惩罚最大F检验(PMFT)。国家统计局数据库(<http://data.stats.gov.cn/>)提供了全省尺度1970—2019年冬小麦、夏玉米、大豆、花生、油菜籽、芝麻的总产量数据。此外,15种大尺度大气环流指数(large-scale atmospheric circulation indices, LACI)1988—2017年的逐月数据由美国国家大气海洋(NOAA)气候预测中心(<https://www.esrl.noaa.gov>)提供,其分别为太平洋—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)、西半球暖池指数(WHWP)、混合ENSO指数(MEI)、厄尔尼诺-3区的平均海面温度(NINO₃)、厄尔尼诺1+2区的平均海面温度(NINO₁₊₂)、厄尔尼诺-4区的平均海面温度(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)^[16-18]。

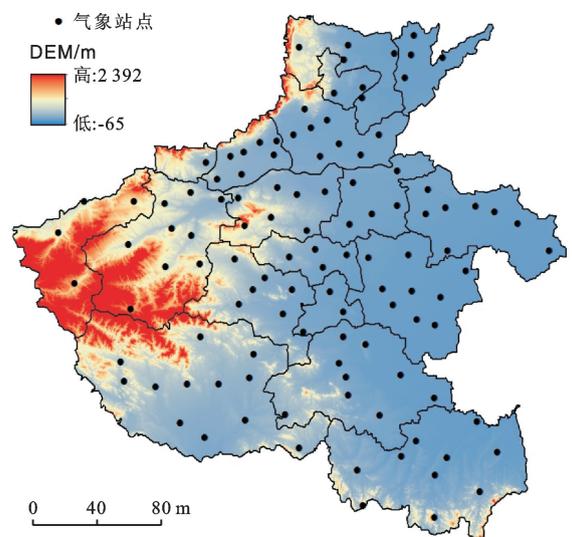


图1 河南省113个气象站点的空间分布

1.2 降水季节性指数(PSI)

降水季节性指数PSI可用公式(1)计算,其中 R 为第 i 年的降水总量(mm), X_n 为该年第 n 月的降水

量(mm)。PSI ≤ 0.19 ,表明年内降水呈现非常均匀分配;PSI位于0.20~0.39区间,表明降水分配较均匀,且有明显的雨季;PSI位于0.40~0.59区间,表明降水分配有一定的季节性,且有短暂的旱季;PSI位于0.60~0.79区间,表明降水分配呈现季节性;PSI位于0.80~0.99区间,表明降水分配呈现极强的季节性,且有较长的旱季;PSI位于1.00~1.19区间,表明降水集中在某3个月份中;PSI ≥ 1.20 ,表明降水分配极不均匀,降水多集中在1~2个月中。

$$PSI_i = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{12} \left| X_n - \frac{R}{12} \right| \quad (1)$$

1.3 PSI的时空分析方法

主成分分析(principal component analysis, PCA)是一种常用的数据降维手段,可以有效识别空间尺度下某种气候指标时序变化特征相似性及分异性^[18]。本研究某给定时段 i 的 k 个变量 $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,k}$,同时有 k 个主成分(principal component, PC) $Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,k}$,它们可表达为各变量的线性关系:

$$\begin{aligned} Y_{i,1} &= a_{11}X_{i,1} + a_{12}X_{i,2} + \dots + a_{1k}X_{i,k} \\ Y_{i,2} &= a_{21}X_{i,1} + a_{22}X_{i,2} + \dots + a_{2k}X_{i,k} \\ &\vdots \\ Y_{i,k} &= a_{k1}X_{i,1} + a_{k2}X_{i,2} + \dots + a_{kk}X_{i,k} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $X_{i,k}$ 指的是PSI时间序列; k 表示气象站点数(113个); i 表示每个站PSI序列的长度,即50(1970—2019年)。由 $X_{i,k}$ 计算得出 $Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,k}$ 的无量纲逐年序列称之为主成分得分序列(principal component scores, PCS),其表征了从原始113列PSI中提取了若干不同演变特征的时序模态。式中线性组合的系数 a_{11}, \dots, a_{kk} 表征了原始PSI序列与不同主成分对应PCS序列的相关性,其归一化后的结果称之为载荷。载荷值越高则表明某一站点PSI序列与某一PCS序列的相关性越高,通过对载荷的空间插值可以完成基于PSI变化特征的空间聚类。本研究中主成分分析过程由统计软件SPSS 21.0中的相关模块完成,而载荷的空间插值则由ArcGIS 10.0中的反距离权插值模块完成。

主成分分析提取的若干PCS序列刻画了不同区域PSI的时序变化情形,近似于无量纲化的PSI区域平均值逐年序列,为快速识别PSI年际变化的区域差异提供了便捷。采用Mann-Kendall趋势和突变检验、集合经验模态分析、交叉小波变换对PCS序列进行的诊断分析。集合经验模态分析(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)广泛应用非线性、非平稳的时间序列的多重周期研究,其将时间

序列分解为有限个不同时间尺度的振荡分量,得到若干个具有不同尺度特征的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),进而准确捕捉原始信号的内在波动特征和趋势变化^[19]。交叉小波变换(cross wavelet transform, XWT)具有较强的信号耦合和分辨能力,可以分析两个时间序列中具有较高共振能量的共振周期及其相位关系^[20]。交叉小波图中箭头表示相位差, \rightarrow 表示两时间序列变化相位一致, \leftarrow 表示两时间序列变化相位相反;背景颜色越接近红色表征相关性越强,越接近蓝色代表相关性越弱;粗黑线勾勒的区域则通过了0.05显著性水平检验^[21]。

2 结果与分析

2.1 PSI的空间分布特征

基于IDW插值法,图2a描绘了各站点降水季节性指数PSI多年均值的空间分布,可以发现河南省PSI呈现出明显的由南向北递增的梯度变化。与之相反,图2b中河南省多年年降水量呈现出明显由南向北递减的梯度变化。这表明河南省降水越丰沛的地区,其年内降水分配的非均匀性越低。南部及西南部地区的PSI在0.64~0.8之间变化,这表明该区域降水的年内分配具有明显的季节性;而河南省中部及北部地区的PSI在0.8~0.97之间变化,这表明该区域的年内降水分配存在着较长历时的旱季。与此同时,降水贡献率(各月降水量占年总降水量的比例)进一步刻画降水分配非均性的区域差异。由图2c可以发现,不同区域的各月降水均呈现出显著的单峰型分布,且年降水主要集中在7月。河南省北部地区呈现出更高的降水集中性,其7月贡献了全年降水量的28.3%,其次8月和6月的贡献率分别为20.5%和11.8%。相较而言,河南省南部地区则呈现较低的降水集中性,其7月降水仅占全年降水的18.1%,且6,7,8这3个月的总降水贡献率不超过46%。其总体而言,河南省北部呈现出较高的年内降水分配非均匀性。此外,图2d表明不同区域的年总降水量均主要集中在中雨事件。相比较下,河南省南部地区暴雨及大暴雨对年年总降水量的贡献率较高。

2.2 基于PSI变化差异的气候分区

依托SPSS 21.0的主成分分析模块,对113列(113个站点) \times 50行(50 a)的PSI矩阵进行降维,以此识别降水分配非均匀性的区域演变差异。图3中前4个主成分累积方差贡献率超过了75%,且各主成分的特征根均大于5,满足提取要求。基于 PC_1, PC_2, PC_3, PC_4 在PSI序列上的载荷(图4)及其对应的 $PCS_1, PCS_2, PCS_3, PCS_4$ 序列(图5),可以从113个站

点 PSI 的时序变化中识别出 4 个典型的时空演变模态。依据载荷值的高低,第 I 模态(PC_1)主要表征了河南省西部地区(区域 I)PSI 的年际变化;第 II 模态(PC_2)主要表征了河南省西部地区(区域 II)PSI 的年际变化;

第 III 模态(PC_3)主要表征了河南省北部地区(区域 III)PSI 的年际变化;第 IV 模态(PC_4)主要主要表征了河南省南部地区(区域 IV)PSI 的年际变化。可以发现这一分区结果呈现出典型的南北、东西差异。

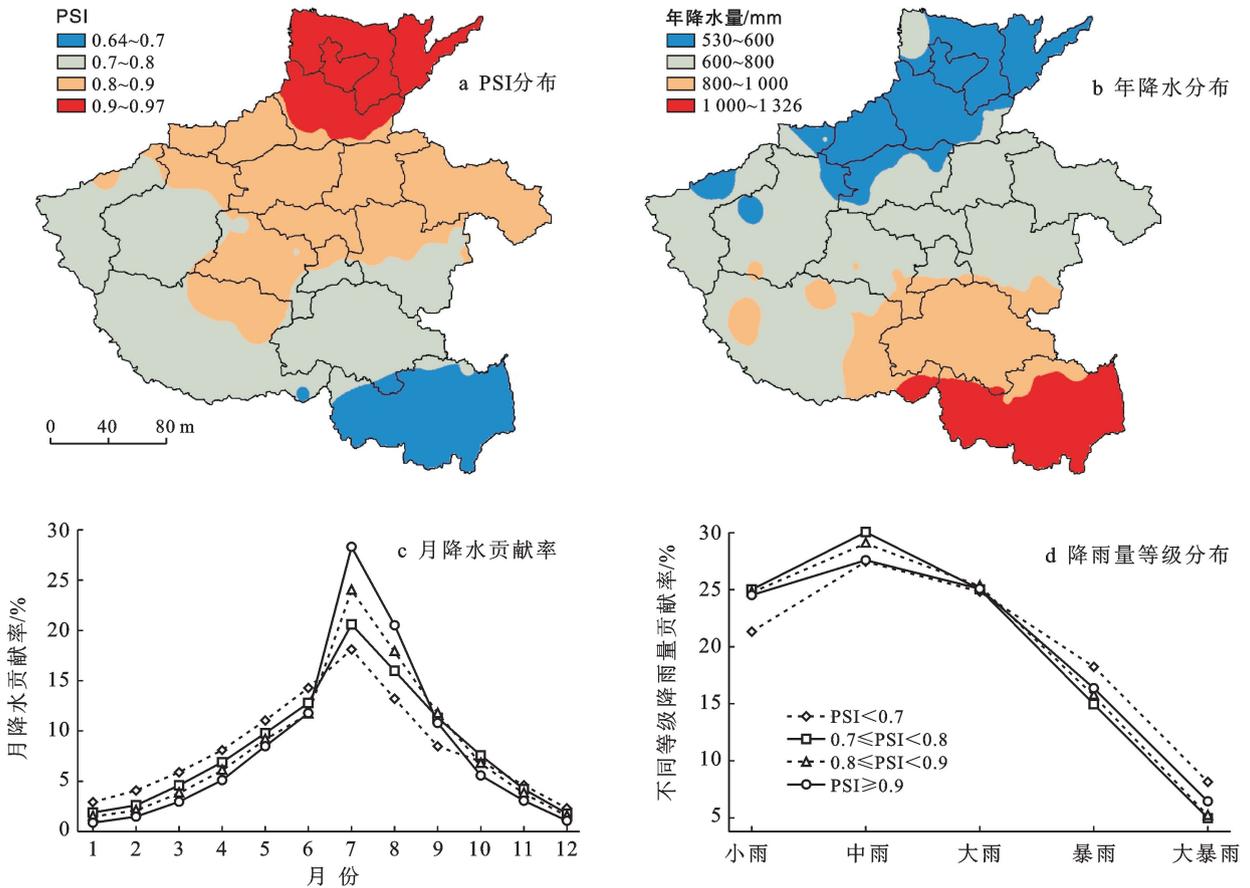


图 2 河南省降水季节性指数 PSI 的空间分布及不同区域降水年内分配特征

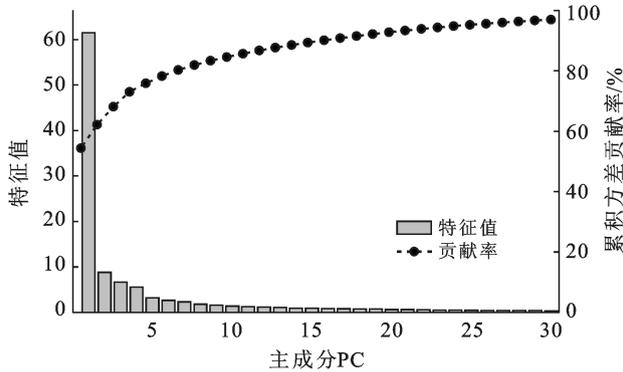
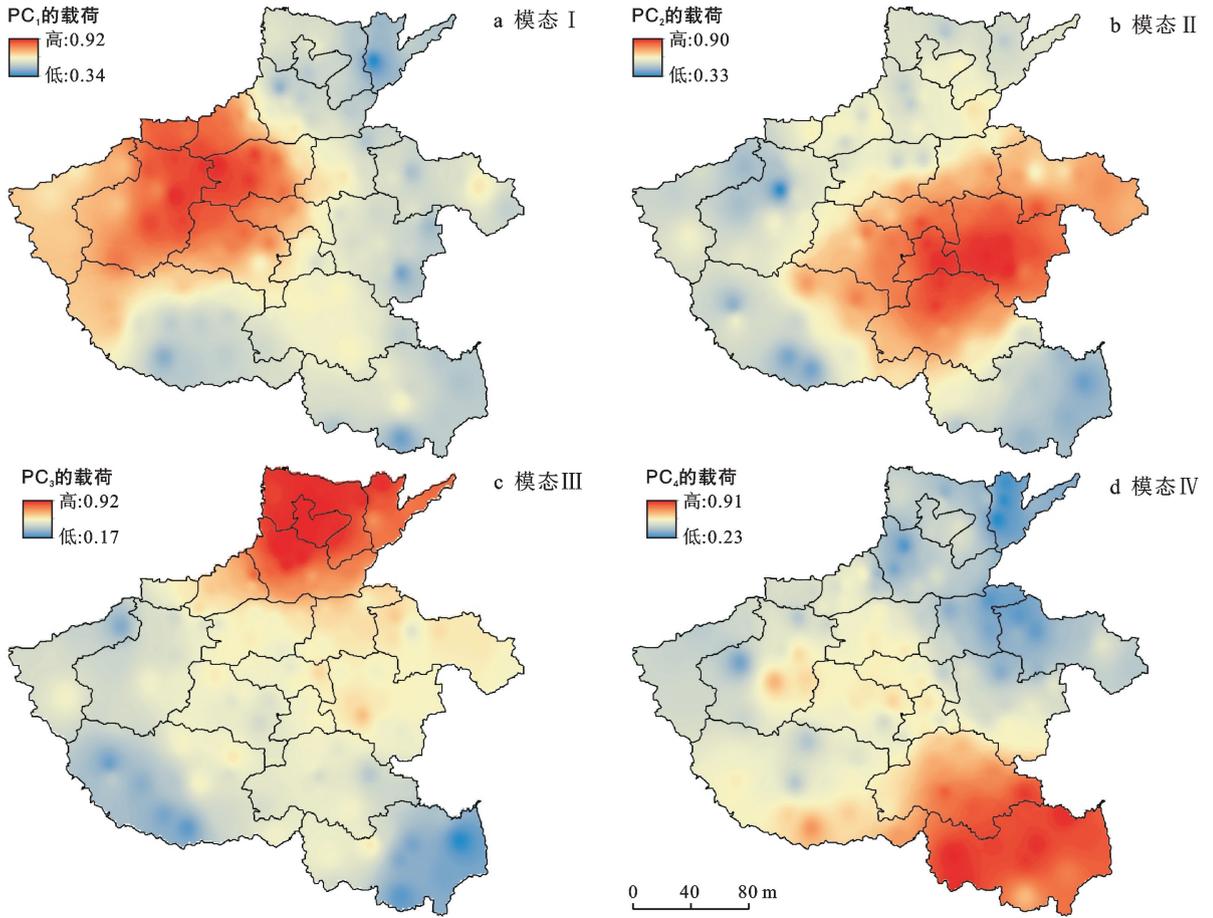


图 3 113 个气象站降水季节性指数 PSI 逐年序列主成分分析结果

2.3 各分区降水季节性指数 PSI 的演变特征

图 5 中 PCS 序列直观地表征了各分区近 50 a PSI 的演变过程。从 Mann-Kendall 趋势检验来看,各 PCS 序列近 50 a 的变化趋势均没有通过显著性检

验,其中西部(区域 I)和南部(区域 IV)的 PCS 呈现出较弱的上升趋势,而中东部(区域 II)和北部(区域 III)的 PCS 呈现出较弱的下降趋势。此外,各 PCS 突变检验生成的 UF/UB 序列进一步刻画了 PSI 的转折性变化。由图 5a 所示,河南省西部地区(区域 I)的 PCS 分别在 1987,1994,2014 年发生了突变,但未通过显著性检验,其大致呈现出先增加—减少—增加的演变过程。图 5b 中河南省西部地区(区域 II)的 PCS 则大致呈现出减少—增加—减少的演变过程,其分别在 1993,2014 年发生突变,但未通过显著性水平。图 5d 中河南省南部地区(区域 IV)的 PCS 在 1982,1997 年的突变仍未通过显著性检验,其整体呈现出增加—减少—增加的演变过程,特别是在 2004 年后其上升趋势较为强烈。相比较区域 I, II, IV 较明显的年代际变化,图 4d 中河南省北部地区(区域 III)的 PCS 存在更多的不显著突变点,其呈现更为明显的短期年际波动。



注: PC_1, PC_2, PC_3, PC_4 为 PSI 的时序变化中识别出 4 个典型的时空演变模态。依据载荷值的高低, 第 I 模态 (PC_1) 主要表征了河南省西部地区 (区域 I) PSI 的年际变化; 第 II 模态 (PC_2) 主要表征了河南省西部地区 (区域 II) PSI 的年际变化; 第 III 模态 (PC_3) 主要表征了河南省北部地区 (区域 III) PSI 的年际变化; 第 IV 模态 (PC_4) 主要主要表征了河南省南部地区 (区域 IV) PSI 的年际变化。下同。

图 4 各主成分对应载荷的空间分布

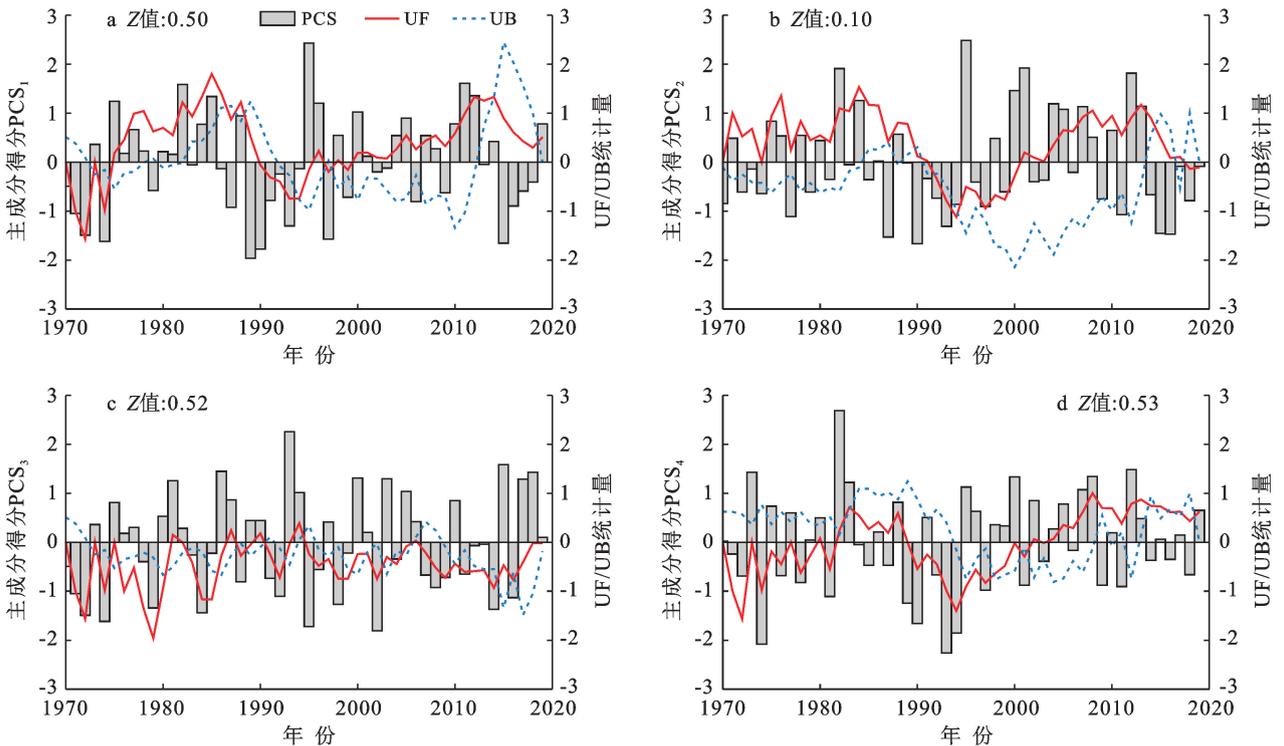


图 5 各分区主成分得分 PCS 序列的 Mann-Kendall 趋势和突变检验

表 1 给出了各分区 PCS 序列的 EEMD 分析结果,以此探求 PSI 的周期性振荡特征。PCS₁, PCS₂, PCS₃, PCS₄ 的 IMF₁ 分量方差贡献率分别为 55.9%, 70.32%, 86.22%, 72.08%, 明显高于其他 IMF 分量,

这表明了 PCS₁, PCS₂, PCS₃, PCS₄ 分别呈现出主周期为 2.94, 2.63, 3.33, 2.63 a 的短期振荡。与上其他 3 个分区相比,河南省北部 PCS 序列的短期振荡更为强烈,其体现在 IMF₁ 的方差贡献率超过了 86%。

表 1 各分区主成分得分 PCS 序列集合经验模态分析 EEMD 分解结果

序列	模态	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅
区域 I PCS ₁	周期/a	2.94	6.25	10.00	25.91	100.41
	方差贡献率/%	55.90	32.06	6.41	4.25	1.37
区域 II PCS ₂	周期/a	2.63	4.55	8.33	23.84	54.26
	方差贡献率/%	70.32	17.13	7.52	4.50	0.53
区域 III PCS ₃	周期/a	3.33	6.25	10.00	22.85	48.74
	方差贡献率/%	86.22	10.11	2.56	0.25	0.86
区域 IV PCS ₄	周期/a	2.63	4.55	10.00	28.98	111.28
	方差贡献率/%	72.08	10.70	13.49	3.13	0.61

注:PCS 为主成分得分序列,其表征了从原始 113 列 PSI 中提取了若干不同演变特征的时序模态;IMF 为固有模态函数。下同。

2.4 各分区 PSI 对大气环流指数的敏感性分析

依托 PCS 序列以及 15 种 LACI 的逐年序列,表 2 通过相关分析和逐步回归分析探求河南省不同区域 PSI 变化的主要驱动力。由表 2 可以发现河南省 PSI 波动对与环流信号的响应存在着显著的区域差异。4 个气候分区中,北部地区(区域 III)PCS₃ 与 LACI 的相关性最为显著,其中 NAO, MEI, NINO₃, NINO₁₊₂, NINO₄, NINO_{3.4} 均对 PCS₃ 有着显著影

响,特别是 PCS₃ 与 NINO₃, NINO₁₊₂ 的负相关性通过了 0.01 显著性水平检验。NAO, MEI, NINO₃, NINO₁₊₂, NINO_{3.4} 也对 PCS₁ 和 PCS₂ 有这显著影响,但负相关性均未通过 0.01 显著性水平检验。反观区域 IV, PCS₄ 与 LACI 的相关性最弱,且均未通过且通过 0.05 显著性水平检验。此外,逐步回归分析指出 NAO, NINO_{3.4}, NINO₃ 分别是影响 PCS₁, PCS₂, PCS₃ 的关键环流因子。

表 2 主成分得分 PCS 与 LACI 的相关分析及多元逐步回归分析

项目	PNA	EP/NP	WP	NAO	SOI	TNA	TSA	WHWP	MEI	NINO ₃	NINO ₁₊₂	NINO ₄	NINO _{3.4}	PDO	NP
PCS ₁	0.15	-0.24	-0.24	-0.35*	0.23	0.17	0.03	-0.12	-0.26	-0.33*	-0.33*	-0.22	-0.31*	-0.14	-0.17
	方程 1: PCS ₁ = -0.97 × NAO - 0.01 (R ² = 0.13) 方程 2: PCS ₁ = -0.88 × NAO - 0.34 × NINO ₁₊₂ + 7.76 (R ² = 0.21)														
PCS ₂	0.00	-0.18	-0.23	-0.19	0.24	0.10	-0.05	-0.16	-0.31*	-0.30*	-0.29*	-0.28	-0.32*	-0.30*	-0.08
	方程 1: PCS ₂ = -0.49 × NINO _{3.4} + 13.24 (R ² = 0.10)														
PCS ₃	0.05	-0.20	-0.14	-0.30*	0.27	0.10	-0.04	-0.12	-0.30*	-0.39**	-0.32*	-0.34*	-0.37**	-0.18	0.00
	方程 1: PCS ₃ = -0.57 × NINO ₃ + 14.81 (R ² = 0.15)														
PCS ₄	0.20	-0.28	-0.15	-0.26	0.07	0.20	0.07	0.06	-0.04	-0.03	-0.03	-0.08	-0.07	-0.14	-0.03
	无														

注:① ** 和 * 表明分别通过了 0.01, 0.05 显著性水平检验; ② 表中各参数符号的意义见正文 1.1 基本数据。下同。

图 6 中交叉小波能量谱进一步刻画了 PCS 与关键环流因子的时频对应关系。图 6a 中 PCS₁ 与 NAO 存在着两个共振周期,两者在 1985—1990 年期间存在着周期为 2~4 a 的负相关性,在 1985—1990 年期间存在着周期为 2~4 a 的负相关性。图 6b 中 PCS₁ 与 NINO_{3.4} 存在着两个共振周期,两者在 1989—1999 年期间存在着周期为 1~4 a 的负相关性,在 1993—2004 年期间存在着周期为 4~6 a 的负相关性。图 6c

中 PCS₃ 与 NINO₃ 存在着 3 个共振周期,两者在 1974—1997 年期间存在着周期为 2~6 a 的负相关性,在 1989—2004 年期间存在着周期为 5~6 a 的负相关性,在 2011—2015 年期间存在着周期为 2~3 a 的负相关性。

通过图 6 中色相及显著性范围的差异可以发现, NINO₃ 对 PCS₃ 有着更为强烈更为持续的影响,这与表 2 中各分区回归方程的 R² 高低相吻合。

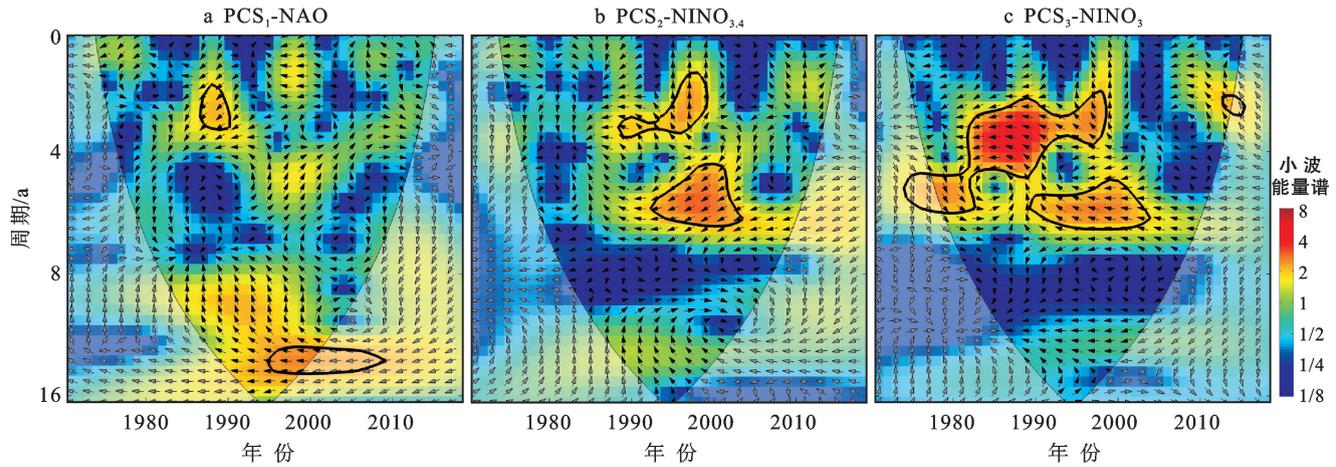


图 6 主成分得分 PCS 序列与关键环流因子的交叉小波变换

2.5 各分区 PSI 对主要粮油作物产量的影响

统计资料记录的作物产量与时间呈现出极显著的正相关性, 逐年的农业投入、技术进步、政策改良等人为因素极大的提高了产量, 因此需要去除人为因素导致的产量增加趋势才能客观的识别气候要素波动的贡献。一阶差分法常应用于产量去趋势处理, 即本年产量值减去前一年的产量值, 并将要分析的气候要素也做一阶差分, 然后将两者对应起来分析^[22]。对全省主要粮油作物总产量序列及 PCS 序列进行一阶差分预处理, 并对它们进行了相关分析, 以此探求全省粮油作物生产安全对 PSI 的响应。除花生外, 其他 5 种作物的产量均与各分区 PCS 呈现出负相关性, 这表明较高的年内降水集中性不利于粮油作物的种植 (表 3)。其中冬小麦的产量波动对 PSI 极为敏感, 其与 PCS₁, PCS₂, PCS₄ 的负相关系数分别为 -0.56, -0.392, -0.371, 且均通过了 0.01 显著性水平检验, 这说明了河南省大部分地区降水集中性年际异常对冬小麦生产安全有着显著的指示作用。

表 3 河南省主要粮油作物总产量与各分区 PCS 的相关分析

项目	PCS ₁	PCS ₂	PCS ₃	PCS ₄
冬小麦产量	-0.560**	-0.218	-0.392**	-0.371**
夏玉米产量	-0.096	-0.139	-0.080	0.038
大豆产量	-0.187	-0.247	-0.124	-0.298*
花生产量	0.138	0.124	0.089	0.212
油菜籽产量	-0.197	-0.078	-0.249	-0.002
芝麻产量	-0.114	-0.228	-0.130	-0.188

注: * 和 ** 表明分别通过了 0.01, 0.05 显著性水平检验。

3 讨论

研究区年内降水分配非均匀性的年际变化呈现出显著的区域差异, 其可划分为西部、中东部、北部、

南部 4 个呈现不同降水季节性指数 (PSI) 演变特征的区域。相类似的空间区划格局还发现在河南省年降水和气温等要素的年际变化^[16-18]。该省自南向北由亚热带向暖温带过渡、自东向西由平原向丘陵山地过渡的双重气候过渡性是造成相关指标时空演变呈现出显著区域差异的重要原因^[17]。特别是河南省北部地区不仅呈现出较高的降水非均性, 且 PSI 呈现出强烈的短期年际波动。这与该省干旱时空分布规律相一致, 由于地处暖温带大陆性季风气候区, 降水异常导致北部地区干旱的发生频率、持续强度均高于其他区域^[23]。河南省大部分地区降水非均匀性主要受基于海表温度的厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO) 指标的影响, 特别是与 NAO, NINO_{3,4}, NINO₃ 等指标有着显著的负相关性。相类似的, 黄淮海平原诸多极端降水指数与 ENSO 指数也存在着显著的负相关性^[24]。现有的研究表明 ENSO 的位相转换对华北季节性降水有着重要影响, 在暖相位的厄尔尼诺年, 春季降水偏多, 夏季和全年偏少; 反之在冷相位的尼娜年, 春季降水偏少, 夏季和全年偏多^[25-27]。因此, 相关 ENSO 指标的数值越高, 则意味着研究区夏季对年降水总量的贡献率偏低, 进而使得年内降水分配更均匀。此外, 冬小麦产量对 PSI 的年际异常较为敏感, 特别是西部地区的 PSI 与小麦产量的相关性达到了 -0.560, 而研究区冬小麦的气候产量与降水、气温等农气指标的相关系数在 -0.39~0.32 间浮动^[17]。因此, PSI 可以作为重要气候指标用来评估由于降水异常导致的灾损。

4 结论

(1) 本研究计算了河南省 113 个站点近 50 a 的降水季节性指数 (PSI), 其多年均值的空间分布表明北部地区呈现出较高的年内降水分配非均匀性。

(2) 研究区可以划分成西部、中东部、北部、南部4个呈现不同降水非均匀性演变特征的子区域,其中北部地区的PSI呈现出更为强烈的短期波动,而其他3个区域的PSI在1990年后呈现出一定的中长期上升趋势。

(3) 北大西洋涛动(NAO)、厄尔尼诺-3区的平均海面温度(NINO_{3.4})、厄尔尼诺-3区的平均海面温度(NINO₃)分别是显著影响西部、中东部、北部PSI的关键环流因子。

(4) 与其他粮油作物相比,冬小麦产量波动对年内降水分配非均匀性更为敏感。

[参 考 文 献]

- [1] 谢鑫昌,杨云川,田忆,等.广西降水非均匀性多尺度特征与综合评价[J].地球科学进展,2019,34(11):1152-1164.
- [2] 刘文莉,张明军,王圣杰,等.1960—2011年陕西省年内降水分配非均匀性特征及预测[J].生态学杂志,2013,32(7):1877-1887.
- [3] 叶正伟,殷鹏.淮河流域汛期候尺度降水集中度与集中期的时序变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):295-299.
- [4] Zhang Lujun, Qian Yongfeng. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2):146-163.
- [5] 王皖,李泽宇,刘瑞翔,等.1961—2014年江苏省降水集中度的非均匀性特征[J].气象与减灾研究,2018,41(1):36-43.
- [6] 戴廷仁,陆忠艳,李广霞,等.近46年辽宁省降水集中度研究[J].气象,2007,33(1):32-37.
- [7] 曹永强,路璐,张亭亭,等.基于降水集中度和集中期的浙江省降水时空变化特征分析[J].资源科学,2013,35(5):1001-1006.
- [8] 郑炎辉,陈晓宏,何艳虎,等.珠江流域降水集中度时空变化特征及成因分析[J].水文,2016,36(5):22-28.
- [9] 起永东,何明琼,郑永宏,等.汉江流域降水结构时空特征及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2830-2838.
- [10] De Luš M, González-Hidalgo J C, Raventós J, et al. Distribucion espacial de la concentracion y agresividad de la lluvia en el territorio de la Comunidad Valenciana [J]. Cuaternario Y Geomorfologia, 1997,11:33-44.
- [11] Walsh R P D, Lawler D M. Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and changes through time [J]. Weather, 1981,36:201-208.
- [12] 段亚雯,朱克云,马柱国,等.中国区域1961—2010年降水集中指数(PCD)的变化及月分配特征[J].大气科学,2014,38(6):1124-1136.
- [13] 张志高,娄延军,张玉,等.2003—2015年河南省粮食增产格局与贡献因素研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(6):28-34.
- [14] 王富强,王雷.基于降水距平百分率的河南省干旱特征分析[J].中国农村水利水电,2014(12):84-88.
- [15] 张志高,耿益新,蔡茂堂,等.近59年河南省汛期降水时空变化特征研究[J].中国农村水利水电,2020(11):14-18,23.
- [16] 田宏伟,邢开成,黄进,等.近30年河南省夏玉米的气象年景波动对大气环流的响应[J].江苏农业学报,2020,36(6):1437-1443.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 孙莉娟,陈金华,徐阳,等.近45年安徽省降雨侵蚀力年内分配特征的时空演变[J].江西农业学报,2020,32(3):112-117.
- [20] 李大鹏,慕鹏飞,白涛,等.基于标准化降水指数SPI的西江流域多尺度干旱特征及其驱动力分析[J].西安理工大学学报,2020,36(1):41-50.
- [21] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.
- [22] 史文娇,陶福祿,张朝.基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展[J].地理学报,2012,67(9):1213-1222.
- [23] 李谢辉,张超,姚佳林.河南省干旱的时空分布规律与趋势分析[J].西北师范大学学报(自然科学版),2015,51(2):85-91,104.
- [24] 房俊哈,郭斌,张振克,等.1960—2013年黄淮海平原极端降水时空变化特征[J].河南大学学报(自然科学版),2018,48(2):160-171.
- [25] 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.
- [26] 楚纯洁,赵景波,安春华.1957—2011年中国中部不同气候带气候变化及其与ENSO的关系[J].地域研究与开发,2015,34(5):121-127.
- [27] 李双双,杨赛霓,刘宪锋.1960—2013年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素[J].地理科学进展,2015,34(3):354-363.