

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.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.012

## 近 30 年河南省夏玉米的气象年景波动对大气环流的响应

田宏伟<sup>1,2</sup>, 邢开成<sup>3</sup>, 黄 进<sup>1,4</sup>, 张方敏<sup>1,4</sup>

(1.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; 2.河南省气象科学研究所,河南 郑州 450003; 3.河北省气候中心,河北 石家庄 050011; 4.南京信息工程大学应用气象学院,江苏 南京 210044)

**摘要:** 依托河南省 17 个地级市 1988–2017 年夏玉米产量数据及 15 种大尺度大气环流指数 (*LACI*) 资料,运用气候产量指数 (*CDYI*) 评估了研究区夏玉米气象年景对大气环流异常的响应,主要结果如下:(1) 与其他拟合方法相比,HP 滤波法更适用于研究区夏玉米气候产量的提取;(2) 基于主成分分析结果,河南省可以划分为 4 个呈现不同夏玉米 *CDYI* 演变情形的子区域,分别为东南部、北部、中南部、西部,且 2003 年后各分区 *CDYI* 的波动趋于缓和;(3) 与其他分区相比,河南省东南部地区 *CDYI* 与大尺度大气环流指数的线性关系最为显著,特别是 1 月份较高数值的东太平洋/北太平洋涛动指数 (*EP/NP*) 是表征该区域夏玉米减产的重要前兆性信号;(4) 夏玉米气象年景波动对环流信号的响应存在不稳定性 and 阶段性。

**关键词:** 河南省; 夏玉米; 气象年景; 气候产量指数; 大气环流

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)06-1437-07

## Responses of fluctuations of annual meteorological harvest for summer maize to atmospheric circulation in Henan province during recent 30 years

TIAN Hong-wei<sup>1,2</sup>, XING Kai-cheng<sup>3</sup>, HUANG Jin<sup>1,4</sup>, ZHANG Fang-min<sup>1,4</sup>

(1.China Meteorological Administration/Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China; 2.Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China; 3.Hebei Provincial Climate Center, Shijiazhuang 050011, China; 4. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The climate-driven yield index (*CDYI*) was used to evaluate the responses of annual meteorological harvest of summer maize to atmospheric circulation anomalies in the study area, based on the yield data of summer maize from 1988 to 2017 in 17 prefecture-level cities of Henan province and the data of 15 large-scale atmospheric circulation indices (*LACI*). The main results are as follows: firstly, HP filter method was more suitable for extracting the climate-driven yield of summer maize in the study area compared with other fitting methods. Secondly, Henan province could be divided into four sub-regions with different temporal variations of *CDYI* for summer maize such as southeast region, north region, central south region and west region, based on the results of principal component analysis, and the *CDYI* fluctuations in each sub-regions tended to be moderate after 2003. Thirdly, the linear relationship between *CDYI* and *LACI* in southeast region of Henan province was the

most significant compared with other sub-regions, the oscillation index (*EP/NP*) of East Pacific/North Pacific with a relatively higher value was the key precursory signal for yield reduction of summer maize in this region especially in January. Fourthly, there were instabilities and stage features in the response process of annual meteorological harvest fluctuations of summer maize to circulation signals.

收稿日期:2020-04-13

基金项目:中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室  
开放研究基金项目(AFM202006);科技部重大研发计划  
项目(2018YFC1506606)

作者简介:田宏伟(1982-),男,河南永城人,硕士,高级工程师,主要从事农业气象研究。(E-mail)cooperatormuist@163.com

通讯作者:邢开成, (E-mail)sslhj@aliyun.com

**Key words:** Henan province; summer maize; annual meteorological harvest; climate-driven yield index; large-scale atmospheric circulation

中国既是粮食生产消费大国也是全球主要的气候脆弱区之一<sup>[1]</sup>。伴随气候变化,主要产粮区的温、光、水、风等主要农业气候资源要素正发生着显著变化,此外极端气候事件的加剧造成了农业气象灾害频发,这些都给区域甚至国家的粮食安全带来了极大的风险和挑战<sup>[2-3]</sup>。鉴于此,主要粮食作物的气候资源及气象年景已成为相关学科关注的重要研究对象<sup>[4]</sup>。相对气候产量表征的农业气象年景综合反映了作物生长发育和产量形成期间气象要素组合对作物产量的最终影响,科学、准确地预估作物气象年景可以为农业生产的防灾减灾、作物结构调整、应对气候变化提供重要的数据支撑<sup>[5-6]</sup>。

大气环流异常是引发灾害天气、气候异常的主要原因,其通过影响农业气象要素的变化进而影响气象年景的丰歉<sup>[7]</sup>。结合海洋及大气相关信息的大尺度环流指数可以提供区域气候年际变化的前兆信号,大量研究结果表明区域气候要素与环流指数之间存在着显著的时滞相关性<sup>[8]</sup>。因此,构建区域作物气候产量与不同类型大尺度环流指数的线性关系,对气象年景有前兆性指示作用,能够实现较长前置期的产量预测。但目前相关的研究还较少,仅有少数学者针对江苏、辽宁粮食作物气候产量与环流指数的线性关系进行了一定的探索<sup>[1,7]</sup>。

河南省地处华北平原中南部,是中国夏玉米主产区之一,其播种面积约占全国玉米播种面积的 10%,在中国粮食安全中占有重要地位<sup>[9]</sup>。河南省丰富光热资源适宜夏玉米的种植,但是水资源的时空分布不均制约了玉米稳产,使其呈现出旱涝灾害交替发生、单产年际波动大、区域间不平衡的特点<sup>[10]</sup>。鉴于此,探求河南省夏玉米气象年景的时空演变及其对环流指数的响应对保障区域粮食安全有重要价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 基本数据

河南省 18 个地级市夏玉米单位面积产量数据主要来源于河南省统计年鉴,由于 1988 年前的相关记录缺失较多,故本研究计算分析的时段设置为 1988 至 2017 年。由于济源市成立于 1997 年,相关资料年限较短,因此不在研究范围内。此外,1988—

2017 年河南全省尺度农作物总播种面积,及水涝灾害、干旱灾害、风雹灾害、冰冻灾害的受灾和成灾面积数据来源于国家统计局的分省年度农作物资料数据集 (<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>)。其中,受灾面积与总播种面积的比值为受灾率;成灾面积与总播种面积的比值为成灾率;成灾面积与受灾面积的比值为灾害强度。由此获取水涝受灾率( $S_1$ )、干旱受灾率( $S_2$ )、风雹受灾率( $S_3$ )、冰冻受灾率( $S_4$ )、水涝成灾率( $C_1$ )、干旱成灾率( $C_2$ )、风雹成灾率( $C_3$ )、冰冻成灾率( $C_4$ )、水涝强度( $I_1$ )、干旱强度( $I_2$ )、风雹强度( $I_3$ )、冰冻强度( $I_4$ ) 12 种灾害指标的逐年序列。

15 种大尺度大气环流指数(LACI) 1988-2017 年的逐月数据由美国国家大气海洋局(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(NINO<sub>3</sub>)、厄尔尼诺 1+2 区的平均海面温度(NINO<sub>1+2</sub>)、厄尔尼诺 4 区的平均海面温度(NINO<sub>4</sub>)、厄尔尼诺 3.4 区的平均海面温度(NINO<sub>3.4</sub>)、太平洋年代际振荡(PDO)、北太平洋遥相关型(NP)。

### 1.2 气候产量指数

气候产量指数(CDYI)由公式  $CDYI_i = 100 \times (Y_{a_i}/Y_{m_i} - 1)$  计算,其中  $Y_{a_i}$  为作物单产的逐年序列; $Y_{m_i}$  为社会、技术等非气候因素导致的趋势产量序列,其为实际产量序列与年份序列基于数学模型的拟合结果<sup>[11]</sup>。常用于拟合趋势产量的函数模型主要为线性回归、五年滑动平均、指数函数、幂函数、二次函数、Logistic 函数、HP 滤波等。

### 1.3 气候产量指数的时空分析

本研究通过主成分分析与小波功率谱分析识别河南省夏玉米气象年景时空变化特征的区域差异。主成分分析在识别气候变量相似及分异性的区划中有着广泛应用,其作用于多样本(站点)单一指标时间序列构成的矩阵时,新生成的若干主成分得分序列表征了研究区不同类型的年际变化,而不同主成

分在各站点原始序列的载荷可有效地用于空间尺度的气候分区<sup>[12]</sup>。小波功率谱分析在时域和频域两方面均有良好的局部化功能,能揭示不同时间尺度的主要变化周期,复 Morlet 小波为常用的小波函数,其具有较好的震荡性并能够迅速衰减至零<sup>[13-14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区夏玉米 *CDYI* 的提取

作物趋势产量反映了地区生产力水平的长期变化,不同数学拟合模型生成的趋势产量所表征的农业经济增速过程存在着一定的差异,因此对不同拟合模型进行筛选有利于确保最终气候产量的客观性与准确性<sup>[11]</sup>。理论上整个研究区的趋势产量变化特征应该基本一致,且气候产量应与气象灾害发生规律有着

显著的关联性<sup>[15]</sup>。鉴于此,分别对不同拟合模型生成的各市夏玉米 *CDYI* 进行算术平均,以此生成区域 *CDYI*,并与全省尺度下 12 个灾害指标进行相关性分析。由表 1 可见,不同拟合模型生成的区域 *CDYI* 均与  $S_1$ 、 $C_1$  有着极强的负相关性,其相关系数的绝对值均高于 0.4;区域 *CDYI* 与  $C_4$ 、 $I_3$  也存在一定的负相关性,但其相关系数的绝对值均小于 0.25。这与河南省夏玉米单产对气候变化响应的研究结果相一致,成林等<sup>[16]</sup>指出 1988 年以来夏玉米气候产量与降水量呈现出极显著的负相关性,而与其他气候要素的相关性较弱。与其他拟合模型相比,由 HP 滤波生成的区域 *CDYI* 与  $S_1$ 、 $C_1$ 、 $I_3$  的负相关性更为显著,由此本研究甄别出了各市夏玉米分离趋势产量进而提取气候产量的最优方案为 HP 滤波。

表 1 不同拟合模型生成的区域平均 *CDYI* 与灾害指标的相关性分析

Table 1 Analysis on correlation between regional average climate-driven yield index (*CDYI*) generated by different fitting models and disaster indicators

模型	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
五年滑动平均	-0.574 **	-0.097	0.006	-0.126	-0.624 **	-0.209	-0.011	0.046	-0.157	-0.034	-0.204	-0.002
线性回归	-0.501 **	0.018	0.063	-0.123	-0.560 **	-0.108	0.021	0.176	-0.156	-0.001	-0.213	0.107
指数函数	-0.454 *	0.091	0.109	-0.058	-0.510 **	-0.037	0.064	0.217	-0.111	0.032	-0.178	0.131
幂函数	-0.455 *	0.091	0.109	-0.059	-0.511 **	-0.037	0.063	0.217	-0.111	0.032	-0.178	0.131
HP 滤波	-0.578 **	-0.017	-0.031	-0.160	-0.634 **	-0.151	-0.061	0.073	-0.145	-0.020	-0.233	0.036
对数函数	-0.502 **	0.018	0.062	-0.124	-0.561 **	-0.108	0.020	0.175	-0.155	-0.001	-0.212	0.106
二次函数	-0.516 **	-0.015	-0.046	-0.129	-0.607 **	-0.154	-0.061	0.061	-0.153	-0.033	-0.198	0.029

$S_1$ :水涝受灾率; $S_2$ :干旱受灾率; $S_3$ :风雹受灾率; $S_4$ :冰冻受灾率; $C_1$ :水涝成灾率; $C_2$ :干旱成灾率; $C_3$ :风雹成灾率; $C_4$ :冰冻成灾率; $I_1$ :水涝强度; $I_2$ :干旱强度; $I_3$ :风雹强度; $I_4$ :冰冻强度。\* 表明在 0.05 水平上显著相关;\*\* 表明在 0.01 水平上显著相关。

### 2.2 基于各市 *CDYI* 年际变化的气候分区

为了辨识夏玉米气象年景年际变化特征的空间差异,将各地级市夏玉米 *CDYI* 逐年序列构建的 17 列(17 个地级市)×30 行(30 年)的矩阵导入统计软件 SPSS 中进行主成分分析。图 1 中前 4 个主成分(PC)累积方差贡献率接近 80%,且各主成分的特征根均大于 2。鉴于此,17 个市夏玉米 *CDYI* 年际变化情景可以识别出 4 种典型模态。图 2 中的载荷表征了 4 种变化模态与各地级市 *CDYI* 序列的相关性,以载荷值 0.6 为阈值可精准地将研究区划分为与 4 个主成分相对应的子区域。由图 2b 可见,区域 I 对应了开封、漯河、商丘、周口、驻马店、信阳这 6 个地级市所在的河南省东南部;区域 II 对应了安阳、鹤壁、新乡、濮阳、焦作这 5 个地级市所在的河南省北部;区域 III 对应了郑州、许昌、平顶山、南阳这 4 个

地级市所在的河南省中南部;区域 IV 对应了包括三门峡、洛阳这 2 个地级市所在的河南省西部。

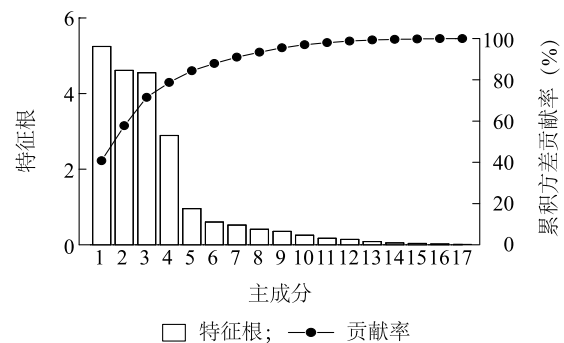


图 1 17 个地级市夏玉米气候产量指数 (*CDYI*) 序列主成分分析结果

Fig.1 Principal component analysis on climate-driven yield index (*CDYI*) series of summer maize in 17 prefecture-level cities

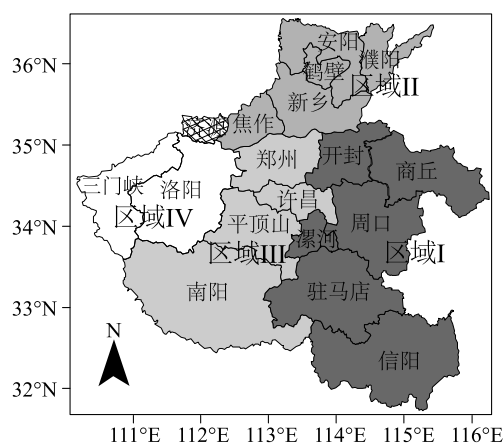
### 2.3 各分区 $CDYI$ 的波动特征

基于图2的区划结果,对各分区所含地级市的  $CDYI$  序列进行算术平均,进而构建了各分区30年夏玉米气象年景的年际变化过程。图3给出了主成分得分( $PCS$ )序列及其对应的区域平均  $CDYI$  序列,可以发现各分区  $PCS$  序列和  $CDYI$  序列间存在极强的线性关系, $R^2$ 均超过0.8,这进一步验证了利用主成分分析识别夏玉米气象年景变化区域差异的可靠性。

	PC1	PC2	PC3	PC4
郑州	0.179	0.434	0.612	0.565
开封	0.864	0.528	0.512	-0.142
洛阳	0.061	-0.101	0.296	0.953
平顶山	0.385	0.541	0.817	0.106
安阳	0.256	0.839	0.451	-0.041
鹤壁	0.117	0.800	0.126	0.069
新乡	0.328	0.862	0.476	-0.172
焦作	0.545	0.681	0.189	0.152
濮阳	0.515	0.721	0.122	-0.282
许昌	0.466	0.529	0.733	0.442
漯河	0.735	0.394	0.584	-0.128
三门峡	0.034	0.031	0.168	0.935
商丘	0.892	0.502	0.502	0.176
周口	0.794	0.008	0.382	0.055
驻马店	0.683	0.081	0.565	0.365
南阳	0.430	0.168	0.874	0.261
信阳	0.627	-0.255	0.161	0.413

a

由图3可以发现,各分区夏玉米  $CDYI$  的年际变化均在2003年前呈现出较大幅度的波动,其振幅大致在 $-20\% \sim 20\%$ ;而2003年后  $CDYI$  的波动明显较小,其振幅大致在 $-10\% \sim 10\%$ 。此外,各分区  $CDYI$  负值所表征的严重减产年也主要发生在2003年以前,特别是东南部(区域I)2003年的  $CDYI$  低于 $-40\%$ ,这与当年洪涝导致的严重灾损相吻合。

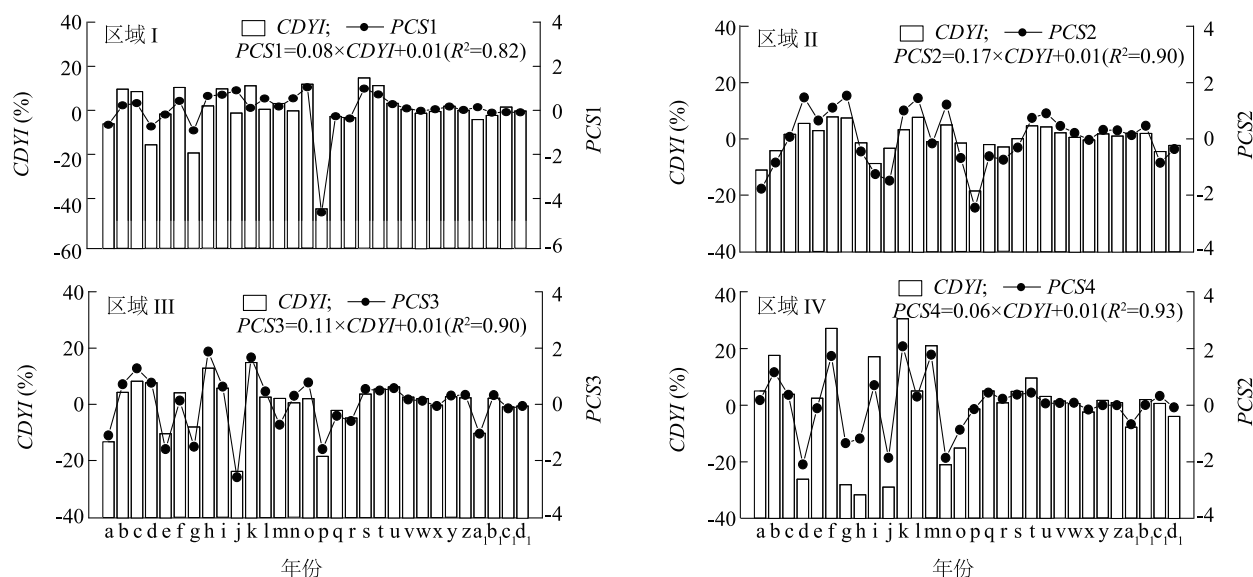


b

a: 各主成分对应的载荷; b: 各分区空间分布。深灰色、中灰色、浅灰色、白色分别对应区域I、区域II、区域III、区域IV。

图2 基于各地级市夏玉米  $CDYI$  变化差异的气候分区

Fig.2 Spatial distribution of climatic zones based on climate-driven yield index ( $CDYI$ ) of summer maize in prefecture-level cities



a: 1988年; b: 1989年; c: 1990年; d: 1991年; e: 1992年; f: 1993年; g: 1994年; h: 1995年; i: 1996年; j: 1997年; k: 1998年; l: 1999年; m: 2000年; n: 2001年; o: 2002年; p: 2003年; q: 2004年; r: 2005年; s: 2006年; t: 2007年; u: 2008年; v: 2009年; w: 2010年; x: 2011年; y: 2012年; z: 2013年; a<sub>1</sub>: 2014年; b<sub>1</sub>: 2015年; c<sub>1</sub>: 2016年; d<sub>1</sub>: 2017年。

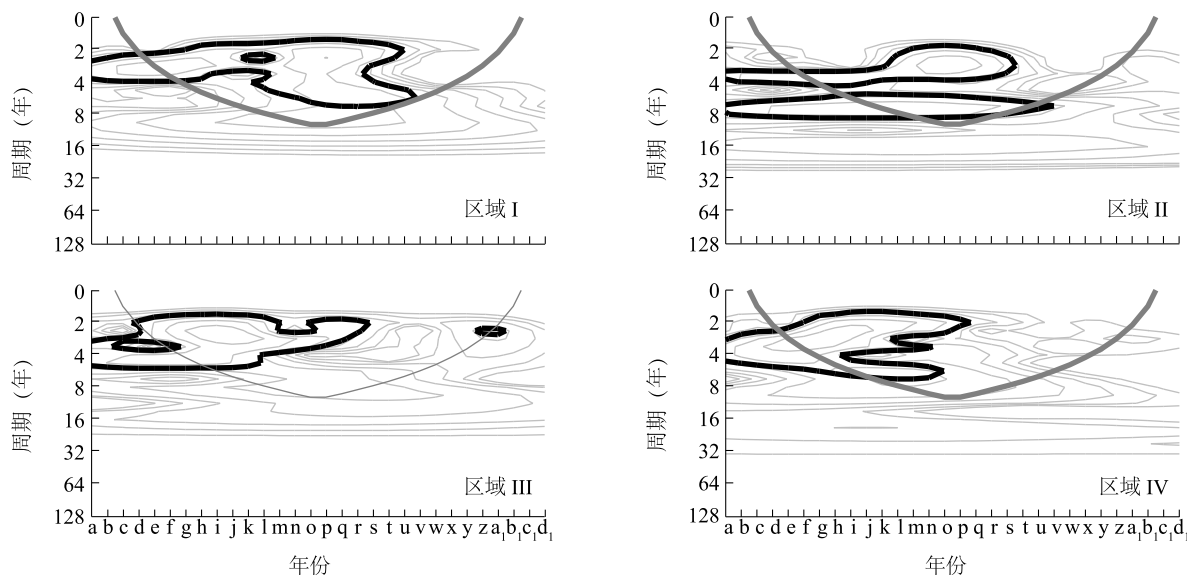
图3 各子区域主成分得分( $PCS$ )序列及对应的气候产量指数( $CDYI$ )序列区

Fig.3 Series of principal component score( $PCS$ ) in sub-regions and related series of climate-driven yield index( $CDYI$ )



由图 4 可知,  $CDYI$  小波分析结果进一步刻画了夏玉米气象年景波动的年际差异。研究区东南部(区域 I)的  $CDYI$  主要在 1988–2008 年间呈现出显著的 2~8 年周期性振荡;北部(区域 II)的  $CDYI$  主要在 1988–2009 年间呈现出显著的 2~8 年周期性振

荡;中南部(区域 III)的  $CDYI$  主要在 1988–2006 年呈现出显著的 2~8 年周期性振荡;西部(区域 IV)的  $CDYI$  在 1988–2003 年呈现出显著的 2~8 年周期性振荡;总体而言, 2003 年后河南省夏玉米气象年景进入了波动相对平缓的阶段。



灰实线为头部影响临界线,黑实线为显著性 0.05 检验标志线。a:1988 年;b:1989 年;c:1990 年;d:1991 年;e:1992 年;f:1993 年;g:1994 年;h:1995 年;i:1996 年;j:1997 年;k:1998 年;l:1999 年;m:2000 年;n:2001 年;o:2002 年;p:2003 年;q:2004 年;r:2005 年;s:2006 年;t:2007 年;u:2008 年;v:2009 年;w:2010 年;x:2011 年;y:2012 年;z:2013 年;a<sub>1</sub>:2014 年;b<sub>1</sub>:2015 年;c<sub>1</sub>:2016 年;d<sub>1</sub>:2017 年。

图 4 各分区气候产量指数 ( $CDYI$ ) 的小波功率谱分析

Fig.4 Power spectrum analysis for climate-driven yield index ( $CDYI$ ) in each region

## 2.4 各分区 $CDYI$ 对大气环流指数的敏感性分析

鉴于河南省夏玉米的生育期大致为 6 月至 9 月,依托各分区  $CDYI$  的逐年序列、1 月至 9 月(共计 9 个月)期间各月份  $LACI$ (共计 15 种)的逐年序列,计算得到了  $CDYI$  与夏玉米播种前及生育期间不同月份  $LACI$  的相关系数。由表 2 可以发现,就生育期间而言,各分区相关系数的绝对值在 0.243 至 0.539 浮动,与  $CDYI$  相关性较显著的环流指数主要为  $WP$ 、 $TSA$  和  $NINO_4$ ;就播种前而言,各分区相关系数的绝对值在 0.222 至 0.600 浮动,与  $CDYI$  相关性较显著的环流指数主要有  $EP/NP$ 、 $NINO_3$ 、 $TSA$  和  $SOI$ 。总体而言,无论是夏玉米生育期间还是播种前的环流指数对夏玉米气象年景均有较强的指示作用。此外,由表 2 还可以发现研究区  $CDYI$  与  $LACI$  间的相关性存在显著的区域差异。4 个气候分区中,东南部地区(区域 I)的  $CDYI$  波动对  $LACI$  的响应更为敏感,特别是  $CDYI$  与 1 月份  $EP/NP$  指数的相关系数达到了 -0.600。与区域 I 相比,中南部(区域 III)和西部(区

域 IV)地区的  $CDYI$  与  $LACI$  的相关性略弱,其相关系数绝对值的最大值分别为 0.539、0.515。反观北部地区(区域 II), $CDYI$  与  $LACI$  的相关性最弱,其相关系数的绝对值均不超过 0.450。

表 2 中采用多元逐步回归来简化  $CDYI$  与  $LACI$  间的线性关系,进而得到各分区  $CDYI$  对关键月份环流指数的敏感性。1 月份的  $EP/NP$  指数 ( $EP/NP_1$ )、5 月份的  $NINO_3$  指数 ( $NINO_3_5$ )、6 月份的  $TSA$  指数 ( $TSA_6$ )、5 月份的  $SOI$  指数 ( $SOI_5$ ) 分别为区域 I、区域 II、区域 III、区域 IV 夏玉米气象年景的关键环流信号。其中,区域 I 的  $CDYI$  与  $EP/NP_1$  线性方程的  $R^2$  超过了 0.3,这进一步说明了前期环流信号对东南部夏玉米单产波动有着更好的指示作用。由表 2 中的方程可知,  $EP/NP_1$  每增加 1 个单位,会导致东南部  $CDYI$  减少 6.65%,而  $NINO_3_5$ 、 $TSA_6$ 、 $SOI_5$  每增加 1 个单位,分别会导致北部、中南部、西部  $CDYI$  增加 3.68%、11.30%、6.61%。

图 5 中  $CDYI$  与关键环流指数的 10 年滑动相关

分析结果表明,夏玉米气象年景波动对环流信号的响应存在不稳定性 and 阶段性。就东南部地区(区域 I)而言, $CDYI$  与  $EP/NP_1$  始终呈现出负相关性,其中 2008–2017 年负相关性的显著性较高,部分滑动相关系数的绝对值超过了 0.8。与东南部地区截然

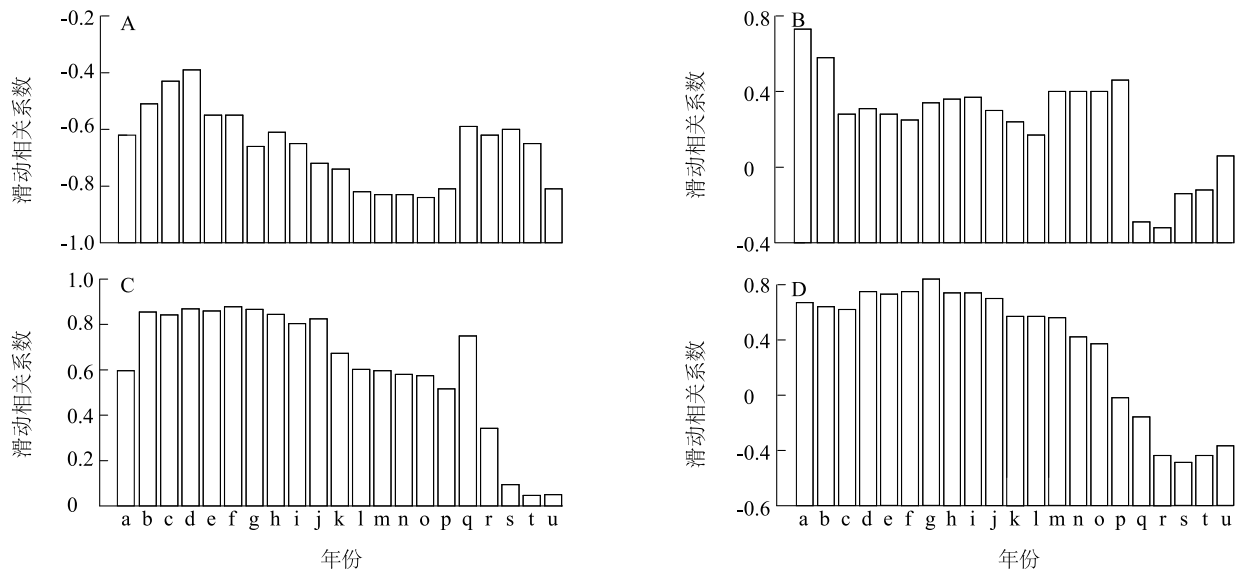
不同,北部地区(区域 II)、中南部地区(区域 III)、西部地区(区域 IV)  $CDYI$  与关键环流指数间的相关性呈现出阶段性递减的态势,特别是 2013–2017 年的滑动相关系数大多在 -0.4 至 0.4 浮动。

表 2 各月份与气候产量指数( $CDYI$ )最显著相关的大气环流指数( $LACI$ )类型

Table 2 Types of large-scale atmospheric circulation indices( $LACI$ ) most significantly related to climate-driven yield index( $CDYI$ ) in each month

	播种前					生育期间			
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
区域 I	$EP/NP$ (-0.600)	$PDO$ (0.245)	$NINO$ (-0.258)	$WP$ (-0.282)	$NINO_{1+2}$ (0.222)	$WP$ (-0.369)	$WP$ (0.298)	$EP/NP$ (0.243)	$WP$ (0.460)
区域 II	$TSA$ (-0.389)	$PDO$ (-0.401)	$PDO$ (-0.368)	$PDO$ (-0.371)	$NINO_3$ (0.449)	$NINO_3$ (0.339)	$SOI$ (-0.308)	$TSA$ (-0.346)	$TSA$ (-0.286)
区域 III	$EP/NP$ (-0.441)	$NINO_{1+2}$ (0.263)	$TSA$ (0.307)	$TSA$ (0.464)	$TSA$ (0.438)	$TSA$ (0.539)	$TSA$ (0.415)	$PDO$ (-0.394)	$WP$ (0.363)
区域 IV	$EP/NP$ (-0.320)	$WHWP$ (0.342)	$NP$ (-0.416)	$NINO_4$ (-0.384)	$SOI$ (0.515)	$NINO_4$ (-0.496)	$NINO_4$ (-0.507)	$NINO_4$ (-0.471)	$SOI$ (0.415)

$EP/NP$ : 东太平洋/北太平洋涛动;  $WHWP$ : 西半球暖池指数;  $NP$ : 北太平洋遥相关型;  $NINO_4$ : 厄尔尼诺 4 区的平均海面温度;  $SOI$ : 南方涛动;  $PDO$ : 太平洋年际振荡;  $WP$ : 西太平洋遥相关型;  $TSA$ : 热带南大西洋海温;  $NINO_3$ : 厄尔尼诺 3 区的平均海面温度;  $NINO_{1+2}$ : 厄尔尼诺 1+2 区的平均海面温度。括号中的数值为相关系数。



A: 区域 I 中  $CDYI$  与  $EP/NP_1$  的滑动相关性; B: 区域 II 中  $CDYI$  与  $NINO_3_5$  的滑动相关性; C: 区域 III 中  $CDYI$  与  $TSA_6$  的滑动相关性; D: 区域 IV 中  $CDYI$  与  $SOI_5$  的滑动相关性。a: 1997 年; b: 1998 年; c: 1999 年; d: 2000 年; e: 2001 年; f: 2002 年; g: 2003 年; h: 2004 年; i: 2005 年; j: 2006 年; k: 2007 年; l: 2008 年; m: 2009 年; n: 2010 年; o: 2011 年; p: 2012 年; q: 2013 年; r: 2014 年; s: 2015 年; t: 2016 年; u: 2017 年。

图 5 各分区  $CDYI$  与关键环流指数的 10 年滑动相关性分析

Fig.5 Ten-year moving correlation analysis for climate-driven yield index( $CDYI$ ) and key large-scale atmospheric circulation indices( $LACI$ ) in each sub-region

### 3 讨论

基于 HP 滤波法提取了河南省 17 个市近 30 年

夏玉米气候产量指数,主成分分析结果指出,研究区可以划分成东南部、北部、中南部、西部这 4 个呈现不同气象年景演变特征的子区域。这与基于河南省

降水年际波动的气候分区结果相似,研究区内自南向北由亚热带向暖温带气候过渡,自东向西由平原向丘陵山地过渡的 2 种典型过渡性是造成相关气候指数年际变化区域差异的主要原因<sup>[17]</sup>。

小波分析的结果表明各分区夏玉米气象年景均呈现出 2~8 年的周期性振荡,且这种周期性振荡在 2003 年之前较为显著。这与研究区农业气象灾害强度的年代际变化规律高度一致,其 1988–2003 年为第一阶段,受灾面积波动较大;2003 年以后为第二阶段,受灾面积波动较平缓<sup>[18]</sup>。

河南省夏玉米 *CDYI* 与 *EP/NP*、*NINO*<sub>3</sub>、*TSA* 和 *SOI* 等环流指数存在着显著的相关性,其相关系数在 -0.600 至 0.539 间浮动。现有研究中河南省夏玉米 *CDYI* 与生育期中降水、气温等气象要素的相关系数在 -0.487 至 0.389 间浮动<sup>[16,19]</sup>,相较而言,大尺度环流指数对夏玉米气象年景波动有着更好更快捷的指示作用,特别是 1 月份 *EP/NP* 对东南部夏玉米产量波动的指示作用尤为显著。华北汛期降水的年代际变化与太平洋海温异常存在着时滞期为半年左右的遥相关性,前期太平洋涛动指数偏高往往是华北汛期降水偏多的重要信号<sup>[20-25]</sup>。此外,东南部地区是连续降水、强降水等导致夏玉米减产的雨涝灾害高风险区。因此,1 月份较高的 *EP/NP* 成为东南部夏玉米气象欠产年景的关键前兆信号。

夏玉米气象年景波动对环流信号的响应存在年际变化,特别是 *NINO*<sub>3</sub>、*TSA* 和 *SOI* 对 *CDYI* 的影响在 2004 年后减弱。这与 *ENSO*(厄尔尼诺-南方涛动)对中国夏季降水年际变化影响的不稳定性特征相吻合,特别是 *ENSO* 相关的环流指数与降水的线性关系在 2000 年后减弱<sup>[25-26]</sup>。因此在今后的研究中运用人工神经网络、支持向量机、机器学习等手段优化环流信号对作物气象年景的指示作用是值得尝试的。

## 参考文献:

- [1] 徐敏,徐经纬,高苹,等.基于海温和大气环流特征量的农业气候年景预测[J].江苏农业科学,2016,44(9):435-439.
- [2] 李建,江晓东,杨沈斌,等.长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化[J].江苏农业学报,2020,36(1):99-107.
- [3] 祁俊青,于文金,谢涛,等.云南省干旱灾害时空变化特征[J].江苏农业学报,2019,35(3):631-638.
- [4] 丁从慧,申双和,陶苏林.江苏省农业气候资源及未来情景预估[J].江苏农业学报,2017,33(6):1309-1315.
- [5] 邱美娟,宋迎波,王建林,等.山东省冬小麦产量动态集成预报方法[J].应用气象学报,2016,27(2):191-200.
- [6] 杨晓强,张志国,代云超,等.黑龙江省甜菜农业气象年景评估方法[J].中国农学通报,2018,34(25):104-108.
- [7] 胡春丽,李荣平,王婷,等.辽宁水稻年景预报模型研究[J].干旱气象,2018,36(3):501-506.
- [8] 李佳佳,贺新光,卢希安.长江流域月降水的 EEMD 多时间尺度遥相关分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1898-1908.
- [9] 余卫东,马志红.近 50 年河南省夏玉米生产潜力及产量差时空变化特征[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):205-212.
- [10] 刘小雪,申双和,刘荣花.河南夏玉米产量灾损的风险区划[J].中国农业气象,2013,34(5):582-587.
- [11] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18.
- [12] 李斌,李丽娟,李海滨,等.澜沧江流域干旱变化的时空特征[J].农业工程学报,2011,27(5):87-92,393.
- [13] 秦榕,李林超,杨霁,等.新疆地区蒸发皿蒸发量变化及基于小波的周期分析[J].干旱区地理,2018,41(5):954-962.
- [14] 刘濛濛,隆永兰,巴音布鲁克.近 58 a 气候变化特征分析[J].干旱区地理,2019,42(4):715-723.
- [15] 王桂芝,陆金帅,陈克垚,等.基于 HP 滤波的气候产量分离方法探讨[J].中国农业气象,2014,35(2):195-199.
- [16] 成林,马志红,李树岩.气候变化对河南省夏玉米单产的影响分析[J].玉米科学,2016,24(1):88-95.
- [17] 焦建丽,康雯瑛.河南省年降水的区域特征分析[J].华北水利水电学院学报,2007,28(4):7-10.
- [18] 李治国.近 40 a 河南省农业气象灾害对粮食生产的影响研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):126-130.
- [19] 李树岩,刘伟昌.基于气象关键因子的河南省夏玉米产量预报研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):223-227.
- [20] 王芬,曹杰,唐浩鹏,等.前期北太平洋海温异常对贵州夏季降水的影响[J].高原气象,2014,33(4):925-936.
- [21] 卢静荣,张济世.海陆温差指数与我国华北地区降水的相关性分析[J].人民长江,2018,49(19):46-52.
- [22] 杨杰,王启光,支蓉,等.动态最优多因子组合的华北汛期降水模式误差估计及预报[J].物理学报,2011,60(2):833-845.
- [23] 成林,刘荣花.河南省夏玉米花期连阴雨灾害风险区划[J].生态学杂志,2012,31(12):3075-3079.
- [24] 李军玲,刘忠阳,邹春辉.基于 GIS 的河南省洪涝灾害风险评估与区划研究[J].气象,2010,36(2):87-92.
- [25] 宗海峰,陈烈庭,张庆云.*ENSO* 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J].大气科学,2010,34(1):184-192.
- [26] ZHENG F, WANG H, LUO H, et al. Decadal change in *ENSO* related seasonal precipitation over southern China under influences of *ENSO* and its combination mode [J]. Climate Dynamics, 2020, 54(3/4): 1973-1986.

(责任编辑:陈海霞)