

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

田宏伟^{1,2}, 胡程达², 黄进^{1,3}, 张方敏^{1,3}

(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, 郑州 450003; 2.河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 3.南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:为了探讨冬小麦气象年景对大气环流异常的响应,依托河南省 17 个市 1988—2017 年冬小麦产量数据及 15 种大尺度大气环流指数(LACI)资料,运用气候产量指数(CDYI)评估了研究区冬小麦气象年景的时空演变格局。结果表明:(1) 基于主成分分析,河南省可以划分为 4 个呈现不同 CDYI 演变情形的子区域,分别为中东部、西部、北部、南部,且 2000 年后各分区 CDYI 的波动趋于缓和;(2) 与其他分区相比,河南省北部地区 CDYI 的年代际振荡更为强烈,其呈现出增加—减少—增加—减少的波浪型演变;(3) 与其他分区相比,河南省中东部地区 CDYI 与大尺度大气环流指数的线性关系最为显著;(4) 诸多环流指数中,12 月份厄尔尼诺 1+2 区的平均海面温度是表征河南省中东部地区冬小麦气象年景的关键前兆性信号,其每增加 1%会导致产量减少 0.56%。总体而言,依托前期环流指数异常能够较好地实现粮食作物气象年景的提前预判。

关键词:河南省; 冬小麦; 气象年景; 气候产量指数

中图分类号:S162.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0346-07

Spatial and Temporal Evolution of Annual Meteorological Harvest of Winter Wheat and Its Relationship with Atmospheric Circulation in Henan Province in Recent 30 Years

TIAN Hongwei^{1,2}, HU Chengda², HUANG Jin^{1,3}, ZHANG Fangmin^{1,3}

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

Abstract: The objective of this study is to explore the responses of annual meteorological harvest of winter wheat to atmospheric circulation anomalies. Based on the yield record of winter wheat during 1988—2017 in 17 cites of Henan Province and the data of large-scale atmospheric circulation indices (LACI), the spatiotemporal variability of annual meteorological harvest of winter wheat was evaluated with climate-driven yield index (CDYI), and the main results are as follows. (1) By using principal component analysis, Henan could be divided into four sub-regions with different temporal variations in CDYI such as central-east, west, north, and south areas, and the fluctuation of CDYI in each sub-regions tended to moderate after 2000. (2) Compared with other sub-regions, the interdecadal oscillation of CDYI in north Henan was stronger, showing a increasing-decreasing-increasing-decreasing wavelike evolution. (3) Compared with other sub-regions, the linear relationship between CDYI and LACI in central Henan was the most significant. (4) Among different LACI, the average SST of El Nino₁₊₂ region in December was the key precursor signal for annual meteorological harvest of winter wheat in central-east Henan, and every 1% increase in SST would lead to the yield decrease in 0.56%. In general, the antecedent LACI anomalies can be well used to predict the annual meteorological harvest of grain crops.

Keywords: Henan Province; winter wheat; annual meteorological harvest; climate-driven yield index

收稿日期:2020-02-21

修回日期:2020-03-02

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)

第一作者:田宏伟(1982—),男,河南永城人,高级工程师,硕士,主要从事农业气象研究。E-mail:cooperatornuist@163.com

通信作者:张方敏(1983—),女,河南漯河人,教授,博士,主要从事气候变化研究。E-mail:nfuecology@aliyun.com

伴随着全球气候变暖,许多地区地表太阳辐射呈显著减弱趋势,同时降水年际波动增大,洪涝干旱等极端水文事件频繁发生,这些都给农业生产特别是粮食安全带来了极大的风险和挑战^[1]。地处东亚季风区,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,日益加剧的气候变化对农业生产构成的威胁越来越大^[2]。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候条件组合对收成的最终影响,解析并预估气象年景可以有效地为农业生产提供丰、平、欠产等重要信息,使之合理调整种植计划并采取有效农技措施,进而保障农作物的丰产稳产^[3]。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^[4]。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,大量研究表明区域气候要素与环流指数之间存在着显著的时滞遥相关性^[5]。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,对气象年景有着前兆性指示作用,能够实现较长前置期的产量预测。但目前针对作物气候产量与环流指数的研究相对较少。河南省是我国农业大省,是我国粮食生产的核心产区,尤其是其冬小麦的产量与种植面积均为全国第一^[6]。鉴于此,探求河南省冬小麦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着重要价值。

1 资料与方法

1.1 基本数据

河南省 18 个市冬小麦单位面积产量及相关灾情数据主要来源于年河南省统计年鉴、河南省农村统计年鉴、中国气象灾害大典河南卷等资料,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—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。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(SOD)、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)。

1.2 冬小麦气候产量指数的提取

气候产量指数(Climate-driven yield index, CDYI)由公式 $CDYI_i = 100 \times (Y_{ai}/Y_{mi} - 1)$ 计算,其中 Y_{ai} 为作物单产的逐年序列; Y_{mi} 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^[7]。常用于分离趋势产量的拟合模型有线性回归、5 年滑动平均、指数函数、幂函数、二次函数、Logistic 函数、HP 滤波等。作物趋势产量反映了地区生产力水平的长期变化,与农业投入、作物品种更新、社会经济变革等因素密切相关,不同地级市间农业经济增速水平的差异会导致趋势产量的年际变化存在着一定区域差异。因此对不同拟合模型生成的趋势产量曲线进行筛选有利于确保最终气候产量的准确性^[8]。理论上气候产量应与综合农业气象条件高度相关^[7],通过比对不同拟合模型生成的气候产量和历史灾情数据间关联性,本文甄别出了各市冬小麦分离趋势产量进而提取气候产量的最优方案,其结果如下:线性回归适用于郑州、洛阳、平顶山、焦作、南阳这 5 个市;HP 滤波适用于开封、濮阳、许昌、漯河、商丘这 5 个市;二次函数适用于安阳、新乡、鹤壁、三门峡这 4 个市;滑动 5 年平均适用于信阳、驻马店;指数函数适用于周口。

1.3 气候产量指数的时空分析方法

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,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^[9]。集合经验模态分析(EEMD, Ensemble Empirical Mode Decomposition)可以有效地从离散无序的信号序列中提取各尺度趋势分量,剥离出的有限本征模函数 IMF (Intrinsic Mode Function)分量体现了基于不同时间尺度的原信号序列的局部特征^[10]。滑动 T 检验是把一连串的时间序列分成若干个子序列(子序列的长度一般设置为 5 a),通过考察相邻两个子序列均值有无显著差异来检验气候指标序列是否发生突变^[11-12]。

2 结果与分析

2.1 基于各市冬小麦 CDYI 年际变化的气候分区

为了辨识冬小麦气象年景年际变化特征的空间差异,将各地级市冬小麦气候产量指数(CDYI)逐年序列构建的 17 列(17 个地级市)×45 行(30 a)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)累积方差贡献率超过了 80%,且

各主成分的特征根均大于 2。鉴于此,17 个地级市冬小麦 CDYI 年际变化情形可以识别出 4 个典型模态。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,以载荷值高于 0.7 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。其中,区域 I 对应了濮阳、开封、商丘、许昌、周口、平顶山、漯河这个 7 个城市所在的中东部;区域 II 对应了郑州、洛阳、三门峡、南阳这 4 个城市所在的西部;区域 III 对应了包括安阳、鹤壁、新乡、焦作这 4 个城市所在的北部;区域 IV 对应了包括驻马店、信阳这 2 个城市所在的南部。这一区划结果与河南省主要地形的空间分布较一致,特别是区域 I、II 分别对应了黄河、淮河淤积而成的黄淮海平原区以及黄土高原东侧

的山地丘陵区^[13]。研究区境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气候过渡的 2 种过渡性是造成相关气候指数年际变化区域差异主要原因^[14]。

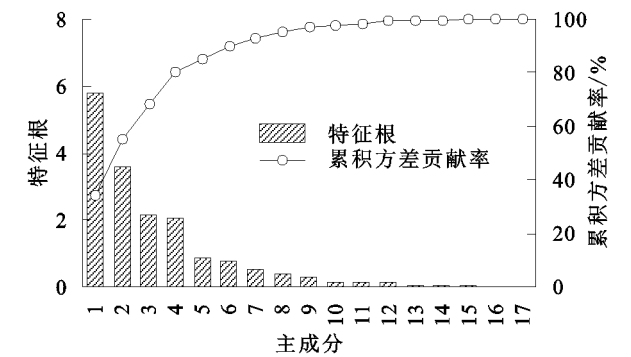


图 1 17 个市冬小麦 CDYI 序列主成分分析结果

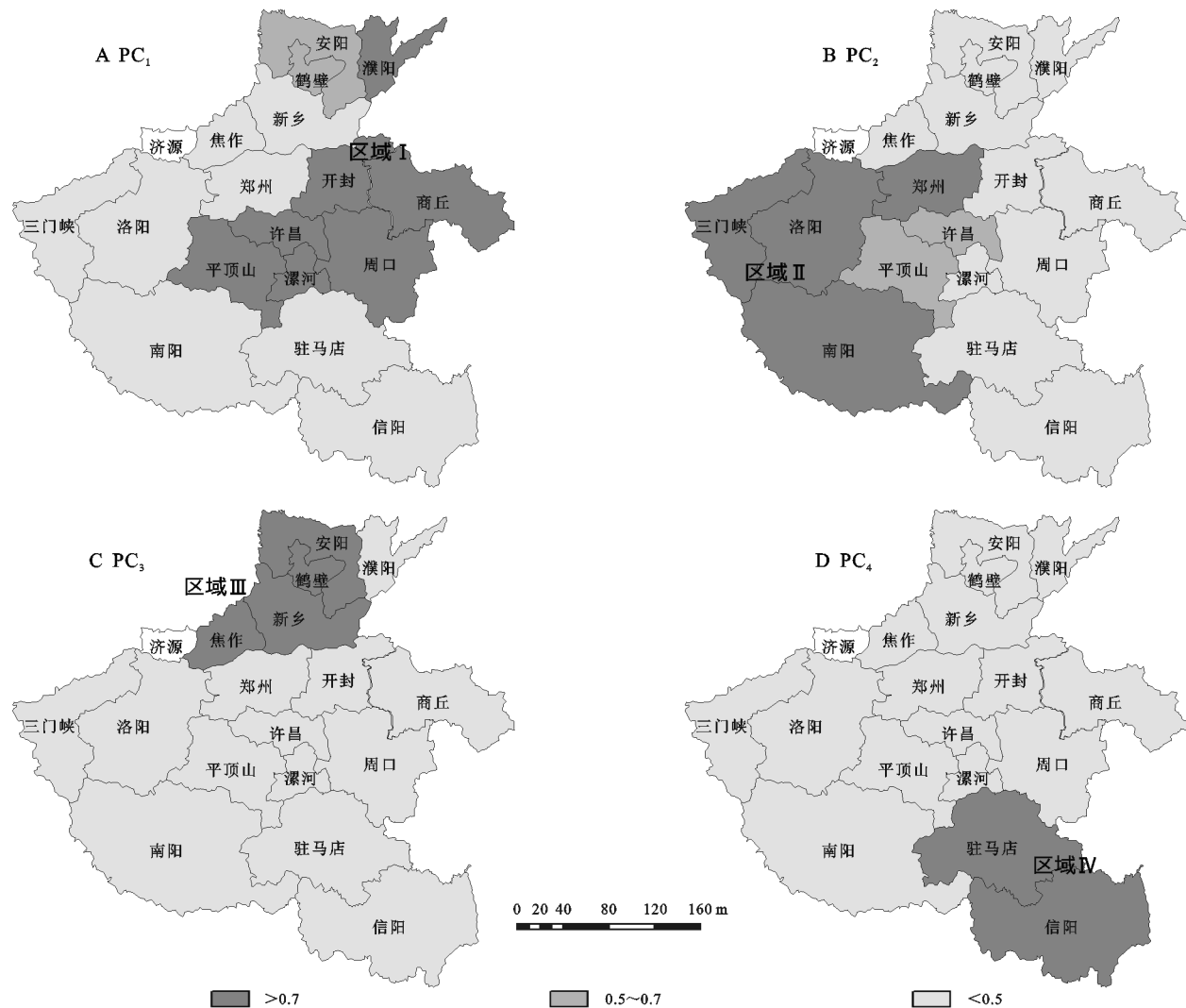


图 2 各主成分对应载荷的空间分布

基于图 2 的区划结果,对各分区所含城市的 CDYI 序列求区域平均,进而得到各分区近 30 a 冬小麦气象年景的年际变化过程。图 3 给出了主成分得分序列(PCS)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 均超过了 0.95,这进一步验证了利用主成分分析识别冬小麦气象年景变化区域差异的可靠性。由图 3 可以发现,各分区冬小麦 CDYI 的年际变化均在 2000 年前呈现出较大幅度的波动,而在 2000 年后 CDYI 的波动明显较小。这与河南省主要农业

气象灾害受灾及成灾面积的演变过程高度吻合,其1988—2002年为第一阶段,受灾面积波动均较大;2003年以后为第二阶段,受灾面积波动较平缓^[15]。此外,各分区 CDYI 负值所表征的严重减产年也分布

在2000年以前,这与研究区受灾率和成灾率年代际变化相一致,其1980s和1990s相对较高,而2000s较低^[16]。总体而言,2000年后河南省冬小麦气象年景进入了波动相对平缓的阶段。

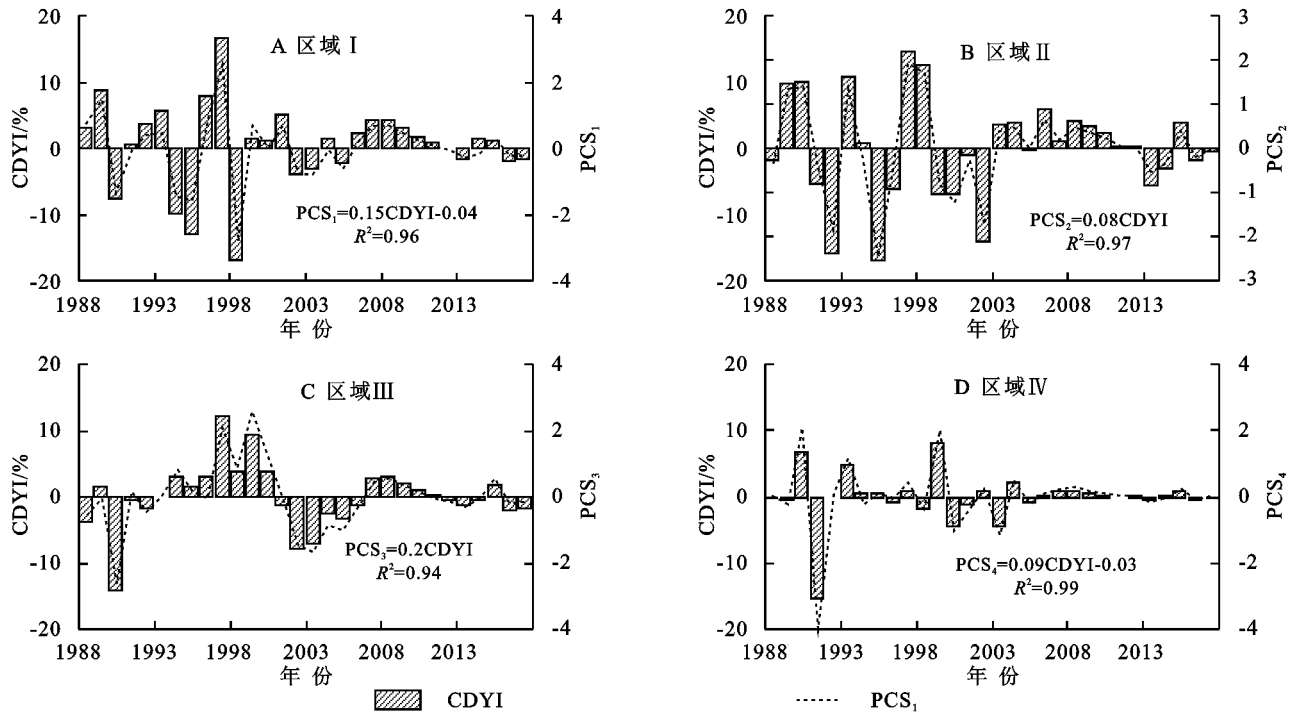


图3 各子区域 PCS 序列及对应的 CDYI 序列

2.2 各分区冬小麦 CDYI 的突变特征

图3给出了各分区冬小麦 CDYI 滑动 T 检验的结果,以此描述研究区冬小麦气象年景的突变特征。如图4A所示,河南省中东部地区(区域I)的 CDYI 分别在2006年、2011年发生的显著突变,并呈现出先增加后减少的变化过程。图4B中河南省西部地区的 CDYI 也呈现出先增加后减少的演变过程,其分别在2003年、2011年发生突变,但 T 检验统计量只是接近并未通过显著性水平。图3C中河南省北部地区 CDYI 的突变检验结果尤为显著,1995年、2001年、2006年、2011年这4个转折点的统计量均通过了显著性水平,其呈现出增加—减少—增加—减少的波浪型演变。相比较其他3个分区,图4D中河南省南部地区的 CDYI 呈现极为平缓的变化,其突变点均没有通过检验水平,且 T 统计量仅在-1.5~1.5的区间中浮动。总体而言,河南省北部地区冬小麦的气象年景呈现更为剧烈的年代际波动。这一区域差异与该省冬小麦主要农业气象灾害综合风险评估的区划结果相一致,河南省北部是多灾种综合危险性的高值区,其危险性由北往南呈减少态势^[17]。

2.3 各分区冬小麦 CDYI 的周期特征

图5给出了各分区冬小麦 CDYI 的 EEMD 分析

结果,以此描述研究区冬小麦气象年景的周期性特征。如图5A,5B,5D所示,河南省中东部、西部、南部地区 CDYI 的演变均呈现出以3a为主周期的高频振荡,体现在各分区 CDYI 的 IMF₁ 分量的方差贡献率均接超过了65%,所占比重为最高。与上述3个分区不同的是河南省北部 CDYI 序列呈现出周期为7.5年的中频振荡,其对应 IMF₂ 分量的方差贡献率均达到了63.3%。总体而言,河南省冬小麦气象年景的周期性与这其降水量 Morlet 小波分析的结果相接近,均存在着3~8a的振荡周期^[18]。

2.4 各分区冬小麦 CDYI 对大气环流指数的敏感性分析

鉴于河南省冬小麦的生育期大致为前年9月—当年5月,依托 CDYI 的逐年序列、前年7月—当年5月(共计11个月)期间各月份 LACI(共计15种)的逐年序列,计算得到了 CDYI 与生育期前后不同月份 LACI 的相关系数(每个 CDYI 序列对应了15×11个 LACI 序列)。由表1可以发现,河南省冬小麦气象年景与大尺度环流指数间的相关性存在显著的区域差异。4个气候分区中,中东部地区(区域I) CDYI 与 LACI 的相关性最为显著,其中48组相关性通过了0.05显著性水平,更有15组相关性通过了

0.01 显著性水平。值得指出的是中东部地区 CDYI 与各月 WHWP, MEI, NINO₃, NINO₁₊₂, NINO₄, NINO_{3.4} 相关系数的均值在 -0.3~-0.4 间浮动,特别是与 NINO₁₊₂ 的负相关系数高达 -0.57。反观其他 3 个分区,CDYI 与 LACI 的相关性明显较弱,其中相关系数绝对值的最大值在 0.32~0.49 间浮动,

且通过 0.05 显著性水平的相关性更是不超过 2 组。现有研究中河南省冬小麦气候产量与生育期中降水、气温等气象要素的相关系数在 -0.39~0.32 间浮动^[19-20],相较而言,大尺度环流指数对冬小麦产量波动有着更好的指示作用,特别是 ENSO 信号对河南省中东部地区冬小麦产量有着较好的预估效果。

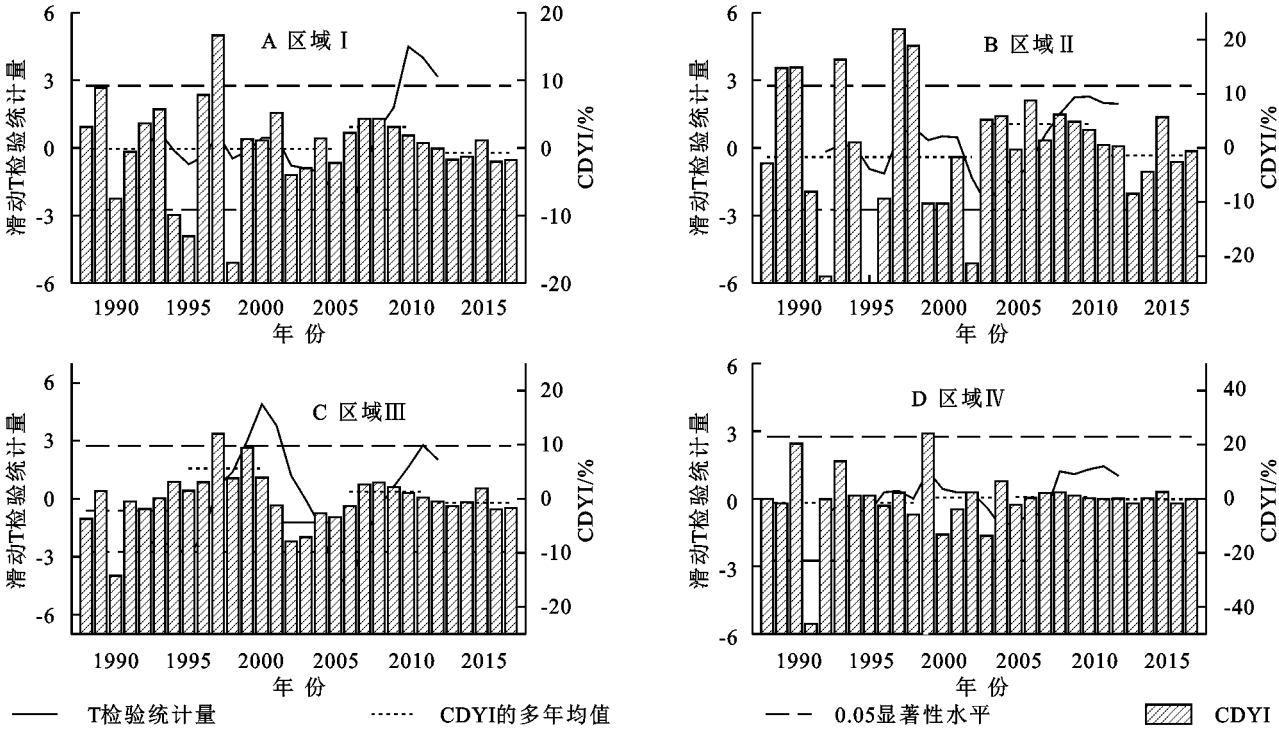


图 4 各分区冬小麦 CDYI 序列滑动 T 检验结果

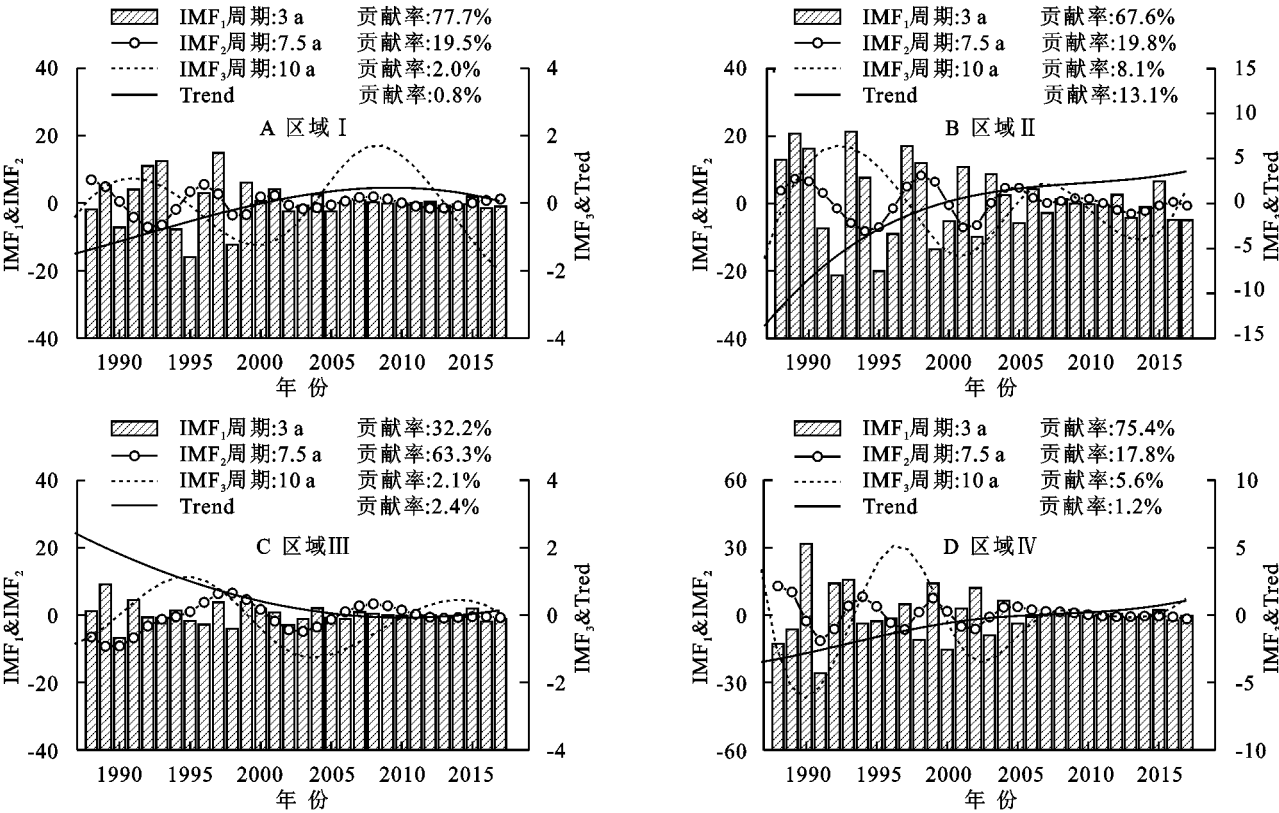


图 5 各分区 CDYI 序列 EEMD 分解结果

表 1 各分区 CDYI 与生育期前后不同月份 LACI 的相关系数汇总

分区	项目	PNA	EP/NP	WP	NAO	SOI	TNA	TSA	WHWP	MEI	NINO ₃	NINO ₁₊₂	NINO ₄	NINO _{3,4}	PDO	NP
区域 I	平均值	0.03	0.01	-0.15	-0.03	-0.15	-0.02	-0.20	-0.31	-0.44	-0.41	-0.35	-0.31	-0.40	-0.13	0.05
	最大值	0.37	0.34	0.19	0.35	0.01	0.18	0.38	-0.16	-0.25	-0.12	0.01	-0.18	-0.16	0.01	0.27
	最小值	-0.31	-0.41	-0.40	-0.26	-0.39	-0.12	-0.43	-0.53	-0.49	-0.49	-0.57	-0.36	-0.45	-0.24	-0.21
	相关性通过 0.01 显著性水平的组数为 15;相关性通过 0.05 显著性水平的组数为 48															
区域 II	平均值	0.04	0.01	0.02	-0.04	-0.06	0.02	0.04	0.07	-0.01	0.06	0.14	-0.10	-0.03	0.22	0.00
	最大值	0.28	0.29	0.35	0.22	0.11	0.24	0.27	0.25	0.09	0.23	0.22	-0.03	0.10	0.35	0.23
	最小值	-0.17	-0.23	-0.30	-0.27	-0.19	-0.14	-0.16	-0.13	-0.06	-0.03	0.05	-0.17	-0.08	0.05	-0.11
	相关性通过 0.01 显著性水平的组数为 0;相关性通过 0.05 显著性水平的组数为 1															
区域 III	平均值	0.04	-0.01	-0.01	-0.07	0.03	-0.06	0.04	0.01	-0.16	-0.13	0.07	-0.27	-0.22	-0.05	0.04
	最大值	0.28	0.24	0.23	0.17	0.15	0.03	0.22	0.13	0.00	0.06	0.20	-0.20	-0.07	0.10	0.24
	最小值	-0.27	-0.23	-0.30	-0.49	-0.10	-0.17	-0.18	-0.13	-0.27	-0.21	-0.06	-0.36	-0.27	-0.17	-0.33
	相关性通过 0.01 显著性水平的组数为 1;相关性通过 0.05 显著性水平的组数为 2															
区域 IV	平均值	0.03	-0.02	0.03	-0.01	0.07	0.02	-0.05	-0.05	-0.08	-0.09	0.01	-0.17	-0.14	0.08	0.03
	最大值	0.30	0.28	0.31	0.21	0.32	0.16	0.19	0.13	-0.01	0.00	0.07	-0.11	-0.03	0.23	0.28
	最小值	-0.32	-0.20	-0.16	-0.19	-0.18	-0.10	-0.25	-0.16	-0.12	-0.15	-0.06	-0.22	-0.20	-0.09	-0.21
	相关性通过 0.01 显著性水平的组数为 0;相关性通过 0.05 显著性水平的组数为 0															

对冬小麦 CDYI 与生育期前后不同月份 LACI 进行归一化处理,并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波动的敏感性。由表 2 可知,NINO₁₊₂_Dec,PDO_Dec,NAO_Apr,SOI_Jan 分别为影响区域I,II,III,IV冬小麦气象年景的关键环流指数。其中,NINO₁₊₂_Dec 每增加 1%,会导致中东部 CDYI 减产 0.56%;PDO_Dec 每增加 1%,会导致西部 CDYI 增产 0.37%;NAO_Apr 每增加 1%,会导致北部 CDYI 减产 0.34%;PDO_Jan 每增加 1%,会导致中西部 CDYI 增产 0.21%。表 2 中 R²的差异进一步说明了环流信

号对中东部地区冬小麦的气象年景有着更好的指示作用。一方面,春季降水过多及其诱发的低温寡照是制约平原地区冬小麦产量的主要不利因素^[21]。另一方面,前冬期 ESNO 异常对华北春季降水有较好的指示意义,春季降水和前冬期 NINO 区海温指数存在显著的正相关性;当前冬 NINO 区海温负异常时,春季降水偏少;而正异常时,春季降水偏多^[22]。因此中东部冬小麦的 CDYI 与前年 12 月份 NINO₁₊₂有着极显著的负相关性。相比较而言,河南西部、北部、南部这 3 个分区复杂的山地丘陵地形可能导致了 CDYI 与 LACI 的线性关系较弱。

表 2 各分区 CDYI 关键 LACI 的线性关系

分区	关键 LACI 的类型	关键月份	CDYI 与关键 LACI 的线性方程	关键 LACI 每增加 1% 产量的变化/%
区域 I	NINO ₁₊₂	12(Dec.)	CDYI=−0.56NINO ₁₊₂ _Dec+67.0(R ² =0.32)	−0.56
区域 II	PDO	12(Dec.)	CDYI=0.37PDO_Dec+36.4(R ² =0.13)	0.37
区域 III	NAO	4(Apr.)	CDYI=−0.34NAO_Apr+36.4(R ² =0.25)	−0.34
区域 IV	SOI	1(Jan.)	CDYI=0.21SOI_Jan+53(R ² =0.13)	0.21

3 结论

(1) 本研究计算并提取了河南省 17 个市近 30 a 冬小麦气 CDYI,主成分分析指出研究区以划分成中东部、西部、南部、北部这 4 个呈现不同气象年景演变特征的子区域。

(2) 河南省中东部与西部冬小麦的气象年景呈现出先增加后减少的演变过程;北部冬小麦的气象年景呈

现出增加—减少—增加—减少的波浪型振荡;南部地区冬小麦的气象年景则呈现出较为平缓的年代际波动。

(3) NINO₁₊₂_Dec,PDO_Dec,NAO_Apr,SOI_Jan 分别为影响中东部、西部、南部、北部冬小麦气象年景的关键大气环流指数。

(4) 中东部冬小麦的气象年景对环流指数异常更为敏感,NINO₁₊₂_Dec 每增加 1%会导致小麦产量减产 0.56%。

参考文献:

- [1] 赵彦茜,肖登攀,唐建昭,等.气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J].水土保持研究,2019,26(6):317-326.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1961—2013 年河南省极端降水事件时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(6):115-120.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等.1960—2015 年青海三江源地区降水时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1803-1820.
- [11] 郭彦,侯素珍,林秀芝.近 51 年西柳沟流域水沙变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):176-183.
- [12] 张应华,宋献方.水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J].干旱区地理,2015,38(4):652-665.
- [13] 任圆圆,张学雷.以地形为基础的河南省域土壤多样性的格局[J].土壤通报,2017,48(1):22-31.
- [14] 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.
- [15] 魏亚刚,陈思.23 年来河南省主要气象灾害对农业的影响及时空分布特征[J].云南地理环境研究,2015,27(3):65-71.
- [16] 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.
- [17] 王田.河南省冬小麦主要农业气象灾害综合风险评估[D].南京:南京信息工程大学,2018.
- [18] 孙卫国,程炳岩,顾万龙.河南省气候变化与北极涛动的多时间尺度相关[J].高原气象,2008(2):430-441.
- [19] 杨蓉蓉.基于人工神经网络的河南省冬小麦气候产量研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [20] 檀艳静.1981—2016 年河南省冬小麦产量对气象因素变化的响应[J].气象与环境科学,2018,41(4):108-116.
- [21] Song Y, Linderholm HW, Wang C, et al. The influence of excess precipitation on winter wheat under climate change in China from 1961 to 2017[J]. Science of the Total Environment, 2019,690:189-196.
- [22] 吴璐,常军,徐岩岩.华北地区春季降水与 ENSO 的关系[J].气象与环境科学,2017,40(1):21-25.

~~~~~  
(上接第 345 页)

- [35] Deininger M, Fohlmeister J, Scholz D, et al. Isotope disequilibrium effects: The influence of evaporation and ventilation effects on the carbon and oxygen isotope composition of speleothems: A model approach[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012,96:57-79.
- [36] Haibo H E, Jing T, Shuhua L, et al. Spatial and temporal variation of environments and influencing factors in Loufang Cave, Northeast of Sichuan Province[J]. Tropical Geography, 2014,34(5):696-703..
- [37] Smithson P A. Inter-relationships between cave and outside air temperatures[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1991,44(1):65-73.
- [38] Daniel O, Breecker, Ashley E, et al. The sources and sinks of CO<sub>2</sub> in caves under mixed woodland and grassland vegetation [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012,96:230-246.
- [39] Troester J W, White W B. Seasonal fluctuations in the carbon dioxide partial pressure in a cave atmosphere [J]. Water Resources Research, 1984,20(1):153-156.
- [40] Kowalczyk A J, Froelich P N. Cave air ventilation and CO<sub>2</sub> outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe[J]. Earth & Planet Sci Lett, 2010,289:209-219.
- [41] 陈琳,黄嘉仪,刘淑华,等.广东英德宝晶宫洞穴微环境时空变化特征及其主要影响因素探究[J].地球与环境,2017,45(2):164-170.