

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

田宏伟^{1,2}, 闵俊杰³, 黄进^{4,1}, 张方敏^{4,1}

(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. 国电环境保护研究院有限公司, 江苏 南京 210031; 4. 南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要: [目的] 探究河南省夏玉米产量波动对大气环流的响应, 为区域粮食安全保障提供理论支撑。[方法] 依托河南省 17 个市 1988—2017 年夏玉米产量数据及 15 种大尺度大气环流指数资料, 评估研究区夏玉米产量的时空演变格局。[结果] ① 基于主成分分析结果, 河南省可以划分为 4 个呈现不同产量演变特征的子区域, 分别为北部、东南部、西部、中部; ② 基于集合经验模态分解, 研究区产量序列存在着准 2.5~3.3, 5~6, 7.5~10 a 的周期性振荡, 且各分区 2004 年后产量的短期波动趋于缓和; ③ 各分区产量的周期性振荡均与环流指数存在着显著的相关性; ④ 基于前期环流指数与年份的线性模型对产量预报的平均相对误差为 4.6%~9.3%; ⑤ 河南省东南部和中部的产量波动对环流指数更为敏感, 其中 10, 11 月份较高的太平洋年代际振荡 (PDO) 是来年产量减少的关键前兆性信号。[结论] 前期环流异常对研究区夏玉米产量波动有着重要的指示作用, 它可以有效用于产量预报。

关键词: 产量波动; 集合经验模态分解; 大气环流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)04-0176-07

中图分类号: S162.5, P426

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.024; Tian Hongwei, Min Junjie, Huang Jin, et al. Responses of summer maize yield to atmospheric circulation in He'nan Province based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 176-182.

Responses of Summer Maize Yield to Atmospheric Circulation in He'nan Province Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition

Tian Hongwei^{1,2}, Min Junjie³, Huang Jin^{4,1}, Zhang Fangmin^{4,1}

(1. China Meteorological Administrator/He'nan Provincial Key Laboratory of

Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

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

Company of State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210031;

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

Abstract: [Objective] The responses of summer maize yield to atmospheric circulation in He'nan Province was studied in order to provide the theoretical support for regional food security. [Methods] Based on the summer maize yield data in 17 cities of He'nan Province during 1988—2017 and 15 kinds of large-scale atmospheric circulation indices (LACI) data, the spatio-temporal variability of summer maize yield were evaluated. [Results] ① By using principal component analysis, He'nan Province could be divided into four sub-regions with different evolution characteristics of unit yield, such as north, southeast, west, and central regions. ② Based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD), there were periodic oscillations of 2.5—3.3, 5—6, 7.5—10 years for yield series in the study area, and the short-term fluctuation in each sub-regions tended to moderate after 2004. ③ There were significant correlations between the periodic

收稿日期: 2020-03-15

修回日期: 2020-04-19

资助项目: 科技部重大研发计划项目“多源气象资料融合技术研究与产品研制”(2018YFC1506606); 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资助项目 (AFM202006)

第一作者: 田宏伟(1982—), 男(汉族), 河南省永城县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业气象研究。Email: cooperatormuist@163.com。

通讯作者: 张方敏(1983—), 女(汉族), 河南省漯河市人, 博士, 教授, 主要从事气候气候变化研究。Email: nfuecology@aliyun.com。

oscillation of yield and LACI in each sub-region. ④ The average relative error of the linear model based on previous LACI and year was ranged from 4.6%~9.3%. ⑤ The yield fluctuations in southeast and central areas were more sensitive to LACI, and the higher Pacific interdecadal oscillation (PDO) in October and November was the key precursor signal for yield reduction in the coming years. [Conclusion] The early atmospheric circulation anomalies has an important indicative effect on the fluctuation of summer maize yield in the study area, which can be effectively used for yield forecasting.

Keywords: yield fluctuations; ensemble empirical mode decomposition; atmospheric circulation

日益加剧的气候变化导致中国主要农区水热资源、农业气象灾害、农业病虫害的时空分布格局发生了变化,进而引发粮食产量波动,威胁到区域甚至国家的粮食安全^[1]。1952年以来中国粮食总产的增加基本可以归结为作物产量的提高,探求粮食作物产量波动的时空演变规律对农业生产的防灾减灾、种植结构调整、以及应对气候变化有着重要意义^[2]。与 HP 滤波、最小二乘回归、小波分析等产量波动分析方法相比,集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)可以依据数据自身时序特征进行自适应的信号分解,并且能够客观稳定的描述产量总体趋势及其多时间尺度振荡特征,因而受到相关学者青睐^[2-3]。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进而影响作物产量的丰歉^[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]。鉴于此,探求区域作物产量与不同类型大尺度环流指数的可能联系,能够完成一定前置期的产量预测,进而实现农作物年景的提前预判,但目前国内相关的研究还极少^[4,6]。河南省位于中国中东部、黄河中下游,属于中国第二阶梯和第三级阶梯过渡地带,是全国重要的农业大省和粮食生产大省,夏玉米是河南省仅次于小麦的重要粮食作物,占全国播种面积的 1/10^[7-8]。河南省丰富光热资源有适于夏玉米的种植,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、产量年际波动大、区域间不平衡的特点^[9]。现有的研究表明海表温度指数(SSTA)、南方涛动指数(SOI)、北极涛动指数(AO)的年代际变化对河南省降水、气温、乃至干旱有着不同程度的影响^[10-12]。鉴于此,本文拟基于集合经验模态分解,探求河南省夏玉米产量的时空演变对环流指数的响应,旨在为保障区域粮食安全服务。

1 资料与方法

1.1 基本数据

河南省 18 个市夏玉米单位面积产量(产量)数据

主要来源于年河南省统计年鉴,鉴于 1988 年前的相关记录缺失较多,故本研究的时段设置为 1988—2017 年间。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。1988—2017 年,15 种大尺度大气环流指数(Large-scale atmospheric circulation indices, LACI)的逐月时间序列来源于美国国家大气海洋局(NOAA)气候预测中心(<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>),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)。

1.2 产量序列的分析方法

主成分分析(principal component analysis, PCA)在识别气候等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的用于空间尺度的气候分区^[13]。集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)是一种高效处理非平稳数据序列的方法,可以将信号不同频率的波动和趋势逐级分解出来,非常适合具有线性与非线性特征的经济系统时间序列的分析^[14]。EEMD 剥离出的波动项通过有限本征模函数(intrinsic mode function, IMF)分量来描述,其表征了不同年际、年代际、和数年代际等时间尺度的振荡特征;而趋势项则通过单调或均值函数来描述,其表征了信号的长期变化趋势^[15]。

2 结果与分析

2.1 基于各市夏玉米产量年际变化差异的分区

为了辨识夏玉米产量年际变化特征的空间差异,

将各市产量逐年序列构建的 17 列(17 个地级市) × 30 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 3。鉴于此,17 个夏玉米产量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产量序列的相关性,以载荷值高于 0.6 为阈值可较好的将研究区划分为与 4 个主成分相对应的子区域。其中,区域 I 对应了濮阳、安阳、鹤壁、新乡和焦作市这个 5 个城市所在的北部;区域 II 对应了商丘、周口、漯河、驻马店和信阳市这 5 个城市所在的东南部;区域 III 对应了包括郑州、洛阳、三门峡和南阳市这 4 个城市所在的西部;区域 IV 对应了包括开封、许昌、平顶山这 3 个城市所在的中部。对各分区所含城市的产量序列求区域平均,进而构建了各分区近 30 a 夏玉米产量的年际变化过程。由图 3 可以发现,各分

区的主成分得分(PCS)序列和产量序列呈现出较好的同步性,且两者间存在极强的线性关系, R^2 在 0.4 ~ 0.7 之间浮动。这进一步验证了利用主成分分析识别夏玉米产量年际变化区域差异的可靠性。

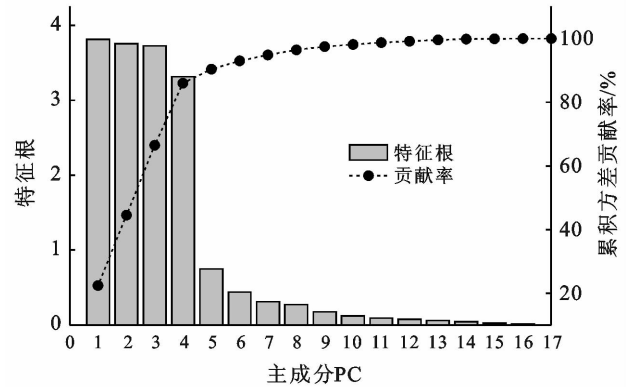


图 1 17 个市夏玉米产量序列主成分分析结果

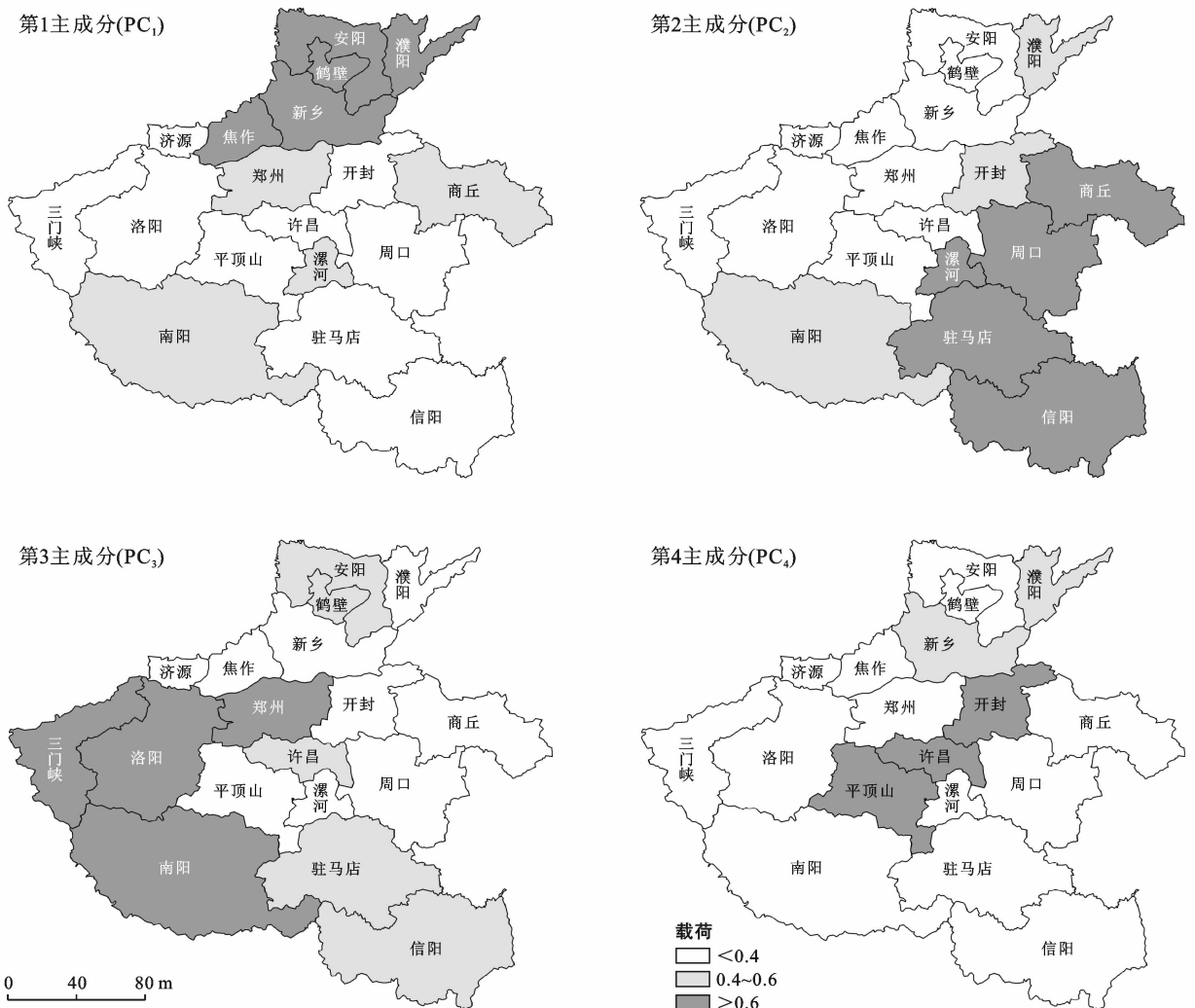


图 2 河南省各主成分对应载荷的空间分布

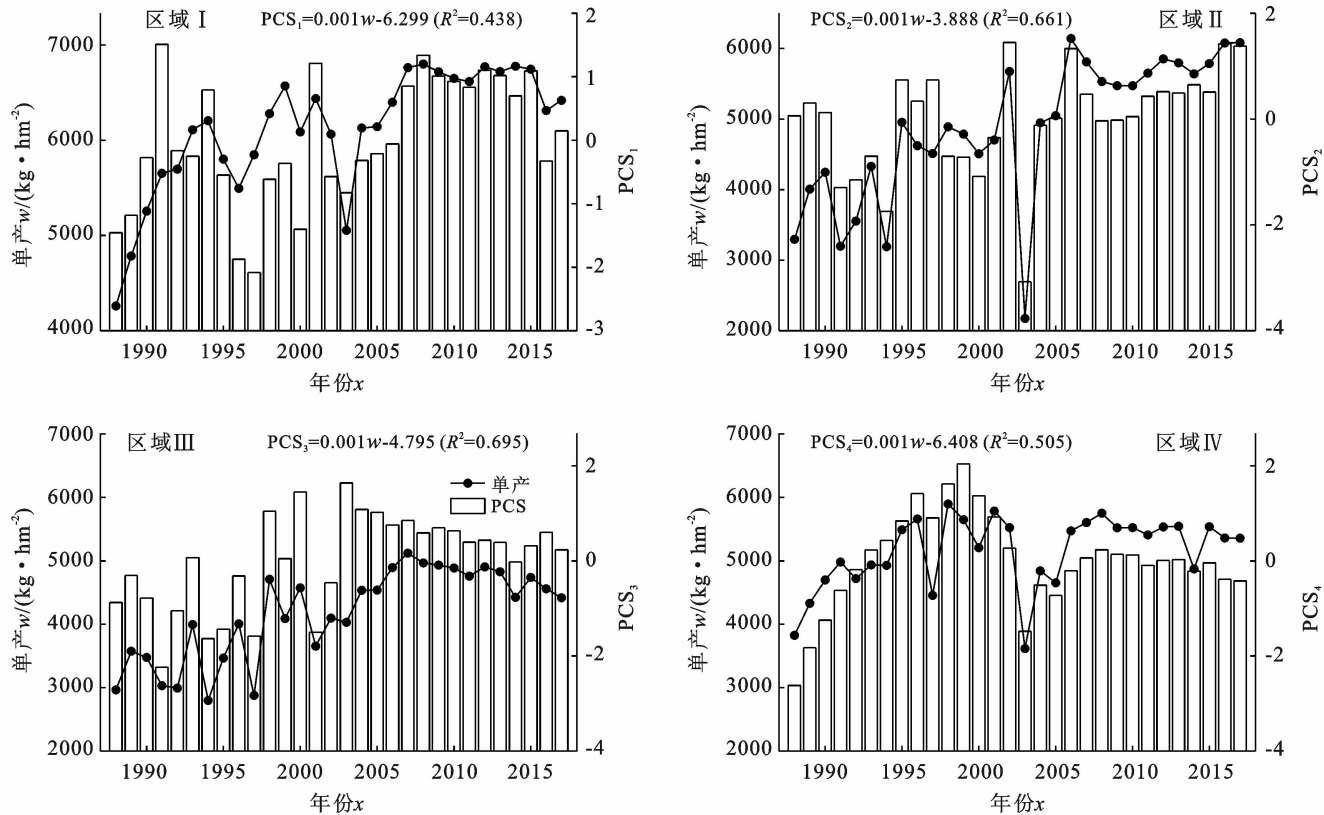


图3 各子区域主成分得分(PCS)序列及对应的产量序列

2.2 夏玉米产量波动的 EEMD 分析

图4给出了各分区夏玉米产量序列的EEMD分析结果。1988—2017年间,河南省各区夏玉米产量逐年序列可分解为3个IMF项和1个Trend项。其中,各分区的Trend项均呈现出不同幅度的逐年上升态势,这反映了技术革新、农水建设、化肥施放、政策引导等农业经济因素增产效应的区域差异。IMF₁, IMF₂, IMF₃分别表征了夏玉米产量波动的准2.5~3.3, 5~6, 7.5~10 a周期性振荡,这与研究区降水、气温等气候要素3~12 a的振荡周期相一致,说明了产量的短、中期及年代际变化与气候波动关系密切^[12]。从各分量的方差贡献率来看,区域I, II, III趋势项的方差贡献率到达了59%~66.3%,这表明北部、东南部、西部夏玉米产量波动的首要驱动力为社会经济等非气候要素。相比之下,河南省中部(区域IV)产量趋势项的方差贡献率仅为22.8,而IMF₁和IMF₂的贡献率分别超过了30%,这表明中部的夏玉米产量对气候波动更为敏感。此外,由图4中IMF₁的演变过程可以发现,各分区夏玉米产量的短期波动均在2004年前呈现出较大幅度的振荡,而2004年后波动的振幅明显较小。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一致,其1988—2004年为第一阶段,受灾面积波动均较大;

2004年以后为第二阶段,受灾面积波动较小^[16]。总体而言,2004年后气候变化导致的夏玉米产量波动进入了相对平缓阶段。

2.3 夏玉米产量 IMF 分量与环流指数的相关分析

依托各分区产量IMF分量的逐年序列、生育期内(6—9月)及生育期之前(去年秋季至当年春季)13个月份15种环流指数的逐年序列,对IMF分量与环流指数进行相关分析(每1个IMF序列对应了13×15个环流指数序列),以期获取影响夏玉米产量波动的重要环流信号。表1给出了与IMF分量相关性最显著的环流指数类型及其对应月份。从各组相关系数来看,环流指数对IMF₁, IMF₂, IMF₃的影响存在着一定的差异。各分区IMF₁分量与环流指数的相关性相对较弱,其相关系数绝对值的最大值在0.414~0.438间浮动。各分区IMF₂, IMF₃分量与环流指数的相关性更为显著,其相关系数绝对值的最大值分别在0.526~0.610, 0.487~0.597间浮动。这表明环流指数对夏玉米产量的中期及年代际波动有着更强的指示作用。就生育期内而言,各分区相关系数绝对值的最大值在0.268~0.610间浮动,与IMF分量相关性较显著的环流指数主要为TSA, NINO, PDO, NAO;就生育期之前而言,各分区相关系数绝对值的最大值在0.360~0.597间浮动,与

IMF 分量相关性较显著的环流指数主要为 EP/NP, PDO, TNA。总体而言,无论是同期还是前期,环流

指数对气候变化引发的夏玉米产量波动均有较强的指示作用。

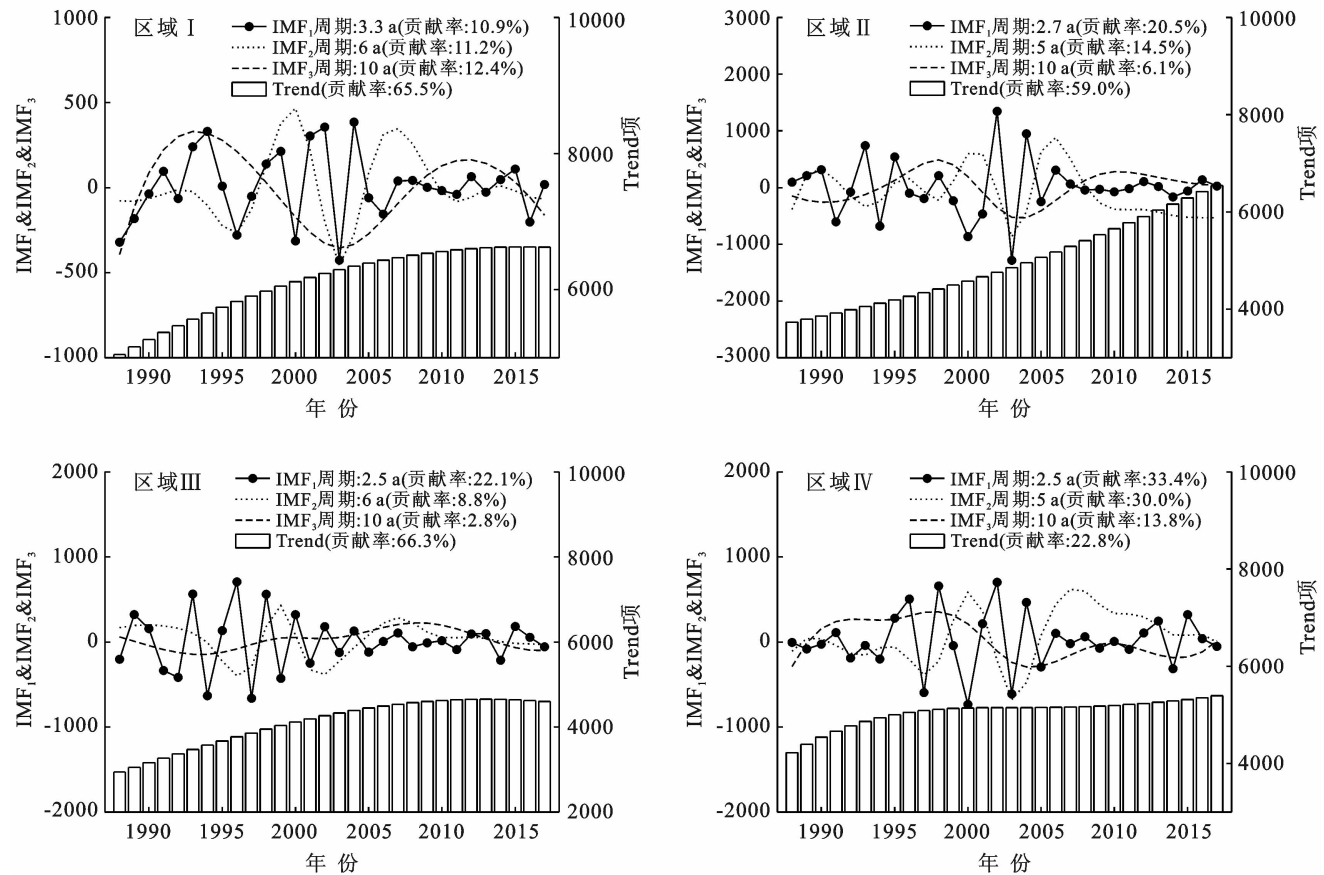


图 4 各分区夏玉米产量序列的 EEMD 分解

表 1 各分区与 IMF 分量最显著相关的环流指数类型及其对应月份

月份	生育期前的秋季			生育期前的冬季			生育期前的春季			生育期			
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
区域 I										NINO3(0.381)			SOI(-0.414)
IMF ₁													
IMF ₂					EP/NP(-0.526)						NINO4(-0.400)		
IMF ₃					PNA(-0.445)							TSA(-0.487)	
区域 II													
IMF ₁										EP/NP(0.428)			PDO(0.268)
IMF ₂				PDO(-0.538)							WHWP(-0.333)		
IMF ₃										NINO1+2(0.372)			NINO4(-0.421)
区域 III													
IMF ₁									TSA(0.360)			TSA(0.438)	
IMF ₂					WP(0.394)							NINO4(-0.447)	
IMF ₃									PDO(-0.597)		PDO(-0.585)		
区域 IV													
IMF ₁	NP(-0.377)										TSA(0.433)		
IMF ₂		PDO(-0.548)											PDO(-0.610)
IMF ₃	TNA(-0.571)												NAO(0.524)

注:括号中的数值为相关系数。

2.4 基于前期环流信号的夏玉米产量预报模型

鉴于夏玉米产量的 Trend 分量呈现出逐年上升态势,而各 IMF 分量与前期环流指数显著相关,进而构建了表 2 中基于年份及前期 3 个关键环流指数的区域夏

玉米产量预报模型。从表 2 可以发现,研究区 4 因子产量预报模型的 R^2 在 0.427~0.692 间浮动,其中中部产量预报模型的 R^2 最低。从图 5 中可以发现,研究区 4 因子产量预报模型生成的模拟值与实测值有着较高的

同步性,高值误差主要发生在 1990 年,2000 年代。各分区中,北部产量模型预报精度最高,其平均相对误差仅为 4.6%。而东南部产量预报模型的精度较低,其平均相对误差达到了 9.3%,特别是 2004 年的预报误差超过 60%,这可能与东南部是洪涝灾害高风险区有关,由于简易预报模型所含因子较少,对 2004 年夏季洪

涝导致的严重灾损预估效果较差^[17]。表 2 中逐步回归模型对各分区产量主导因素的筛选结果来看东南部、中部的产量波动对前期环流信号更为敏感,特别是 11 月份 PDO 每增加 1 个单位,会导致来年东南部产量减少 231.3 kg/hm²;10 月份 PDO 指数每增加 1 个单位,会导致来年中部产量减少 184.1 kg/hm²。

表 2 各分区夏玉米产量与关键环流指数的线性关系(“-”加数字表征了环流指数对应的月份)

分区	产量预报模型	R ²	P	
区域 I	多元回归模型	$w=52.6x+233.7 \times \text{NINO}_{3.5}-116.8 \times \text{EP/NP}_1-43.6 \times \text{PNA}_{12}-105\ 544.7$	0.685	0.000
	逐步回归模型 1	$w=55.3x-104\ 595$	0.573	0.000
区域 II	多元回归模型	$w=87.3x+114.6 \times \text{EP/NP}_5-245.6 \times \text{PDO}_{11}+96.8 \times \text{NINO}_{1+2_5}-172\ 262.1$	0.687	0.000
	逐步回归模型 1	$w=88.3x-171941$	0.584	0.000
	逐步回归模型 2	$w=87.3x-231.3 \times \text{PDO}_{11}-172\ 125.1$	0.655	0.000
区域 III	多元回归模型	$w=60.5x+410.3 \times \text{TSA}_4+2.2 \times \text{WP}_1-133.3 \times \text{PDO}_5-117\ 099.3$	0.692	0.000
	逐步回归模型 1	$w=64.4x-124\ 762.4$	0.614	0.000
区域 IV	多元回归模型	$w=32x-116.3 \times \text{NP}_9-173.5 \times \text{PDO}_{10}-132.4 \times \text{TNA}_9+58\ 926.8$	0.427	0.006
	逐步回归模型 1	$w=28.8x-52\ 436.1$	0.196	0.014
	逐步回归模型 2	$w=28.8x-184.1 \times \text{PDO}_{10}-52\ 582.8$	0.339	0.004

注:w 表示产量;x 表示年份。

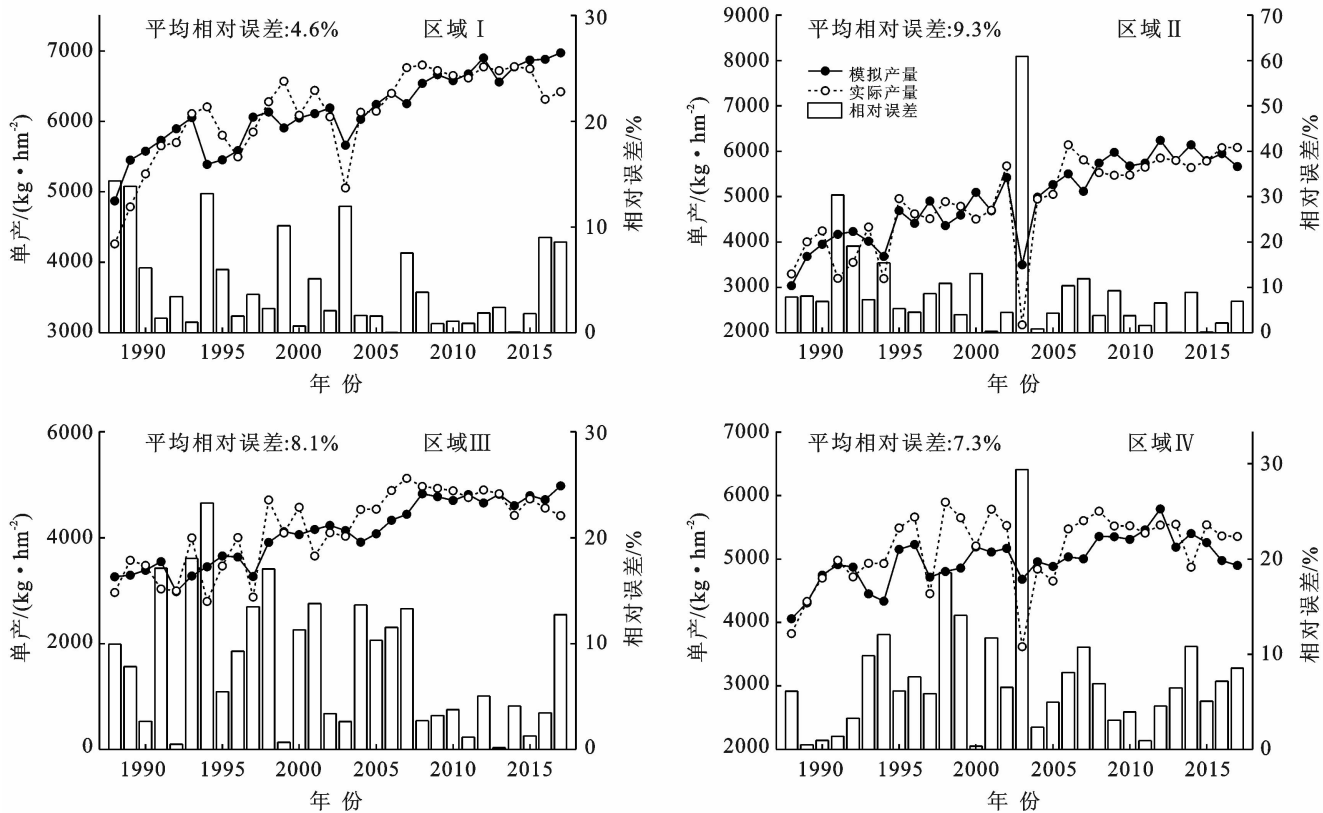


图 5 基于年份及前期 3 个关键环流指数的夏玉米产量预报效果

3 讨论

本文发现河南省夏玉米产量与环流指数间存在

着显著的线性关系,特别是前一年秋季 PDO 对东南部、中部的产量波动有着较好的前期预报作用,这与现有的研究相吻合。成林等^[18]基于气候产量法探讨

了气候变化对河南省夏玉米产量的影响,其研究指出了 1988 年以来相对气候产量与生育期气温及日照的相关性较弱,而与降水量呈现出极显著的负相关性。PDO 对北方大多数地区降水的年代际变化有着明显的调制作用,夏季降水量与 PDO 存在着多时间尺度的显著相关性,其中黄淮海平原的夏季降水与 PDO 存在着时滞期半年以上的显著正相关性^[19-21]。因此,前期秋季较高的 PDO 可能是导致夏玉米产量降低的雨涝灾害的重要前兆信号。李树岩等^[22-23]基于生育期内各阶段关键气象因子和气候适宜度的产量预报模型对夏玉米气候产量的模拟准确率为 87.5%~94.6%,而本文中基于年份及前期 3 个关键环流指数的产量预报模型的平均相对误差为 4.6%~9.3%。相比之下,基于环流指数的产量预报模型操作更为便捷,其不仅规避了气候产量提取的不确定性,而且能够在生育期之前的较长时段内实现对实际产量的高精度预报。

4 结论

基于 PCA 与 EEMD 分析,近 30 a 河南省夏玉米产量变化呈现出显著的区域差异,北部、东南部、西部地区的产量波动均以趋势性增长为主,其方差贡献率分别为 65.5%,59.0%,66.3%;而中部地区的产量波动以短、中期振荡而为主,其方差贡献率均超过了 30%。大尺度大气环流异常对各分区夏玉米产量的短、中期及年代际振荡均有显著的影响,TSA,TNA,NINO,PDO,NAO,EP/NP 被甄选为表征产量周期性振荡的关键环流指数,其与 IMF 分量相关系数的绝对值在 0.42~0.61 间浮动。由年份及前期关键环流指数构建的多元线性模型对各分区夏玉米产量均有较好的预报效果,其平均相对误差不超过 10%。PDO 指数对东南部和中部地区夏玉米产量的提前预报作用尤为显著,其 10 月,11 月的数值每增加 1 个单位表征了来年产量减产 184.1~231.3 kg/hm²。

[参 考 文 献]

- [1] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等.气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J].中国农业资源与区划,2013,34(5):1-7.
- [2] 蒋尚明,金菊良,许浒,等.基于经验模态分解和集对分析的粮食产量波动影响分析[J].农业工程学报,2013,29(4):213-221.
- [3] 刘忠,黄峰,李保国.基于经验模态分解的中国粮食产量波动特征及影响因素[J].农业工程学报,2015,31(2):7-13.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 田宏伟,李树岩.河南省夏玉米干旱综合风险精细化区划[J].干旱气象,2016,34(5):852-859.
- [8] 张维诚,许朗.基于 ArcGIS 的河南省夏玉米旱灾承灾体脆弱性研究[J].水土保持研究,2018,25(2):228-234.
- [9] 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.
- [10] 周丹.1961—2013 年华北地区气象干旱时空变化及其成因分析[D].甘肃兰州:西北师范大学,2015.
- [11] 朱玉周,张录军,廖荣伟,等.1970—2012 年河南省初秋降水特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(6):93-100.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李宝富,熊黑钢,廉丽姝,等.沂河径流非线性变化特征对气候变化的响应[J].水土保持通报,2016,36(4):169-174,181.
- [15] 李新旺,许峰.河北省粮食产量趋势性的影响因素定量研究[J].水土保持通报,2019,39(2):221-226.
- [16] 李治国.近 40 年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] 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.
- [18] 成林,马志红,李树岩.气候变化对河南省夏玉米产量的影响分析[J].玉米科学,2016,24(1):88-95.
- [19] 从靖,赵天保,马玉霞.中国北方干旱半干旱区降水的年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系[J].气候与环境研究,2017,22(6):643-657.
- [20] 赵一飞,邹欣庆,张勃,等.黄土高原甘肃省降水变化与气候指数关系[J].地理科学,2015,35(10):1325-1332.
- [21] Ouyang R, Liu W, Fu G, et al. Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18(9):3651-3661.
- [22] 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.
- [23] 李树岩,余卫东.基于气候适宜度的河南省夏玉米产量预报研究[J].河南农业大学学报,2015,49(1):27-34.