

黄 进, 王锦旗, 张方敏. 基于时序聚类的河南省冬小麦单产演变区域差异及其对气候干湿变化的响应[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 73-80.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.009

基于时序聚类的河南省冬小麦单产演变区域差异及其对气候干湿变化的响应

黄 进, 王锦旗, 张方敏

(南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 依托 17 个地级市 1988–2017 年单产资料, 运用时序聚类方法对河南省冬小麦产量变化模式进行了空间区域划分。在气候产量提取的基础上, 运用标准化降水指数 (*SPI*) 分析了不同区域冬小麦产量对气候干湿变化的响应。结果显示: 基于单产时序特征的差异, 通过 *K* 均值聚类将河南省划分成西部、中西部、中北部、东部 4 个子区域; 中北部和东部地区冬小麦的稳产、增产、高产水平较高, 而西部地区冬小麦的气候灾害损失风险较高; 2 月 *SPI* 对西部及中西部地区的冬小麦产量有着显著的正向效应, 而 5 月和 12 月的 *SPI* 分别对东部、中北部地区的冬小麦产量有着显著的负向效应; 西部地区冬小麦产量对关键月份气候干湿变化的响应更为敏感。

关键词: 冬小麦; 河南省; 单产; 时序聚类; 标准化降水指数

中图分类号: S162.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0073-08

Region difference of yield variability of winter wheat in Henan province based on temporal clustering and its response to climatic dry and wet variations

HUANG Jin, WANG Jin-qi, ZHANG Fang-min

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the data of yield per unit area in 17 cities from 1988 to 2017, the spatial division of winter wheat yield changing modes in Henan province was carried out by using temporal clustering. On the basis of extraction of climatic yield, the responses of winter wheat yield to climatic dry and wet variations in different regions were explored by using standardized precipitation index (*SPI*). The results showed that Henan province was divided into four sub-regions (western area, central-western area, central-northern area and eastern area) by *K*-means clustering based on the difference of temporal characteristics of yield per unit area. The level of stable production, increasing production and high production of winter wheat was higher in central-northern and eastern areas, while the risk of climate disaster loss was higher in western area. The *SPI* in February had significantly positive effects on the yield of winter wheat in western and central-western areas, while the *SPI* in May and *SPI* in December had significantly negative effects on the yield of winter wheat in eastern and central-northern areas, respectively. Winter wheat yield in western area was more sensitive to climatic dry and wet variations.

收稿日期: 2022-03-16

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
开放基金项目 (AFM202006)

作者简介: 黄 进 (1983–), 男, 江苏镇江人, 博士, 讲师, 主要从事农业气象灾害评估研究。 (E-mail) hjtyforlove@aliyun.com

通讯作者: 张方敏, (E-mail) nfuecology@aliyun.com

Key words: winter wheat; Henan province; yield per unit area; temporal clustering; standardized precipitation index

粮食稳产与高产是国家粮食安全、国民社会稳

定、资源与环境可持续发展的重要基础与保障^[1]。作物单产和播种面积是影响总产量的 2 个基本要素,而当前城市化、工业化和国民基础建设的快速发展导致大量耕地被侵占,粮食生产面积萎缩,这使得提高作物单产成为未来粮食增产的关键途径^[2]。因此,系统深入地分析粮食作物单产的时空演变格局,对指导粮食生产的布局优化、结构调整以及制定相关政策有着重要参考意义。伴随数据资料的丰富与完善,中国学者围绕粮食作物产量的变化速率、增产幅度、波动特征、振荡周期等指标展开了卓有成效的研究,但整合这些特征信息进而实现作物生产风险区划的研究还较少^[3-5]。

全球气候系统正经历以变暖为主要特征的变化,同时变暖也导致了全球范围内降水的变化。降水异常导致雨涝、干旱对粮食安全的影响越发显著,因此较为准确地判定粮食产量对气候干湿异常的响应对降低粮食危机风险十分必要^[6-7]。河南省是中国冬小麦最主要的产区,种植面积约占全国小麦总面积的 22.05%,其产量达到了全国冬小麦总产量的 26.26%^[8]。水资源的时空分布不均影响着河南省冬小麦的种植安全。现有的研究着重探讨了生育期内干旱事件的时空演变特征,但冬小麦对气候干湿响应的区域差异性和季节差异性还鲜有人研究,特别是影响产量的重要干湿信号尚不明确^[7-10]。这不利于结合局部地区气候特点对冬小麦农情作出合理诊断与生产决策。

本研究拟以 1988–2017 年河南省 17 个地级市冬小麦单产数据为基础,运用时序聚类分析深入发掘冬小麦单产时空演变特征的区域差异,并采用标准化降水指数(*SPI*)构建河南省不同区域产量波动对气候干湿变化的响应关系,为研究区冬小麦生产风险评估、关键农业气象指标的甄别,以及合理灌溉、旱涝监测和稳产增产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省地理位置为北纬 31°23′~36°22′、东经 110°21′~116°39′,地势西高东低,为暖温带-亚热带、湿润-半湿润季风气候。年均气温 13~16℃,年均降水 500~900 mm。

1.2 数据来源

河南省 17 个地级市(不包括济源市)1988–2017 年冬小麦单产数据来源于河南省多年统计年鉴。此外,河南省气象局提供了各地级市 1987–2017 年的逐月降水量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 时序聚类分析 时序聚类分析被广泛应用于气象水文等领域,其核心是提取时间序列的统计特征值、时域特征值、频域特征值,并构建相应矩阵进行聚类分析,进而快速识别出某指标时序演变特征的空间尺度相似性及差异性^[11]。时序聚类提供了一种灵活、快捷且识别度高的空间区划方法,可有效满足不同研究需要。王栋等^[12]基于干旱指数多年均值、枯水年份降水量负距平百分率、年降水变差系数等指标,运用 *K* 均值聚类实现了云南省干旱自然分区。张国栋等^[13]基于年降水量、年径流深、年水面蒸发量等 6 项水文因子的特征值,运用主成分-聚类分析实现了青海省水文分区。张洪波等^[14]基于流量变化改变率、频率等生态水文改变指标,运用层次聚类法较为合理地识别出渭河生态水文联系的变异分区。参考现有的研究成果,本研究构建了表 1 中的时序特征指标群。考虑到指标之间可能存在着共线性和冗余性,将 13 列(13 种指标)×17 行(17 个地级市)的特征值矩阵导入统计软件 SPSS 21.0 中进行主成分分析(*PCA*),以达到指标群降维的目的。前 3 个主成分(*PC1*、*PC2*、*PC3*)的累积方差贡献率超过 89%,且特征根均大于 1,满足提取要求。表 1 中 *PC1* 在 *Z* 统计量(*Z Statistic*)、赫斯特指数(*H Index*)、短周期振荡分量方差贡献率(*CIMF1*)、长周期振荡分量方差贡献率(*CIMF3*)、趋势分量方差贡献率(*CTrend*)这 5 个指标上的载荷较高,表征了单产序列的持续性趋势特征;*PC2* 在极差(*Range*)、标准偏差(*STD*)、变异系数(*CV*)、Sen's 斜率(*Sen's Slope*)这 4 个指标上的载荷较高,表征了单产的跃迁幅度;*PC3* 在最小值(*Min*)、最大值(*Max*)、平均值(*Average*)这 3 个指标上的载荷较高,表征了产量水平的高低差异。以新生成的主成分得分作为待评对象,运用 *K* 均值聚类实现基于单产演变特征的分类,并通过轮廓系数和空间分布连续性准则对区划结果进行筛选。

表 1 时序特征指标的定义及其对应各主成分的载荷

Table 1 Definition of temporal characteristic indicators and the loading corresponding to each principal component

指标分类	指标	载荷		
		PC1	PC2	PC3
统计特征	<i>Min</i> (最小值)	0.51	-0.33	0.82
	<i>Max</i> (最大值)	0.51	0.59	0.90
	<i>Average</i> (平均值)	0.52	0.37	0.98
	<i>Range</i> (极差)	0.14	0.96	0.30
	<i>STD</i> (标准偏差)	0.23	0.98	0.35
	<i>CV</i> (变异系数)	-0.14	0.85	-0.32
时域特征	<i>Z Statistic</i> (<i>Z</i> 统计量, Mann-Kendall 非参数检验中表征趋势显著性的指标)	0.93	0.36	0.66
	<i>Sen's Slope</i> (<i>Sen's</i> 斜率, 变化趋势的估计斜率)	0.51	0.92	0.46
	<i>H Index</i> (赫斯特指数, 表征时间序列持续性强弱)	0.86	0.32	0.71
频域特征	<i>CIMF1</i> [集合经验模态分解提取出 IMF1(短周期振荡分量)的方差贡献率]	-0.90	-0.07	-0.63
	<i>CIMF2</i> [集合经验模态分解提取出 IMF2(中周期振荡分量)的方差贡献率]	-0.57	-0.49	-0.21
	<i>CIMF3</i> [集合经验模态分解提取出 IMF3(长周期振荡分量)的方差贡献率]	-0.84	0.08	-0.29
	<i>CTrend</i> [集合经验模态分解提取出 Trend(趋势分量)的方差贡献率]	0.98	0.17	0.60

1.3.2 冬小麦单产对气候干湿异常的响应分析
SPI 由逐月降水量伽玛分布概率的正态标准化得到, 计算 1 个月、3 个月、6 个月尺度的 *SPI* 可以有效监测评估月、季节内的水分亏盈情况, 特别是 1 个月尺度的 *SPI* 更是被广泛用于探求作物产量对气候干湿异常的响应^[15]。基于冬小麦单产时序聚类的时间区划结果, 通过区域平均构建不同分区的月降水序列。由此计算各分区 1 个月尺度下的 *SPI* 逐月序列, 并从中提取生育期内(当年 10 月至来年 5 月)每个月的 *SPI* 逐年序列。

长时间序列的作物产量与气候因子关系的统计研究中, 一般将作物实际产量等同于趋势产量与气候产量之和, 而趋势产量为实际产量通过线性或非线性模型生成的拟合值。本研究分别运用集合经验模态分解(EEMD)、线性回归、Logistic 函数、HP 滤波提取各分区的冬小麦气候产量与 8 组 *SPI* 序列进行相关分析, 比较并筛选出显著影响产量的关键月份 *SPI*。将气候产量和关键 *SPI* 经 Min-Max 标准化处理后的逐年序列分别记作 *Y* 和 *X*, 通过两者的线性方程 $Y=a \times X+b$ 来量化气候干湿变化对产量的可能影响。*b* 为常数项; 系数 *a* 表征产量对 *SPI* 变化的敏感性, 及 *SPI* 每增加 1% 时产量的变化幅度。某一时期内, *SPI* 变化对产量产生的影响由 *X* 的线性

趋势、年数、*a* 这三者相乘得出, 其结果也用百分数表达。

2 结果与分析

2.1 基于河南省冬小麦单产演变特征的空间区划

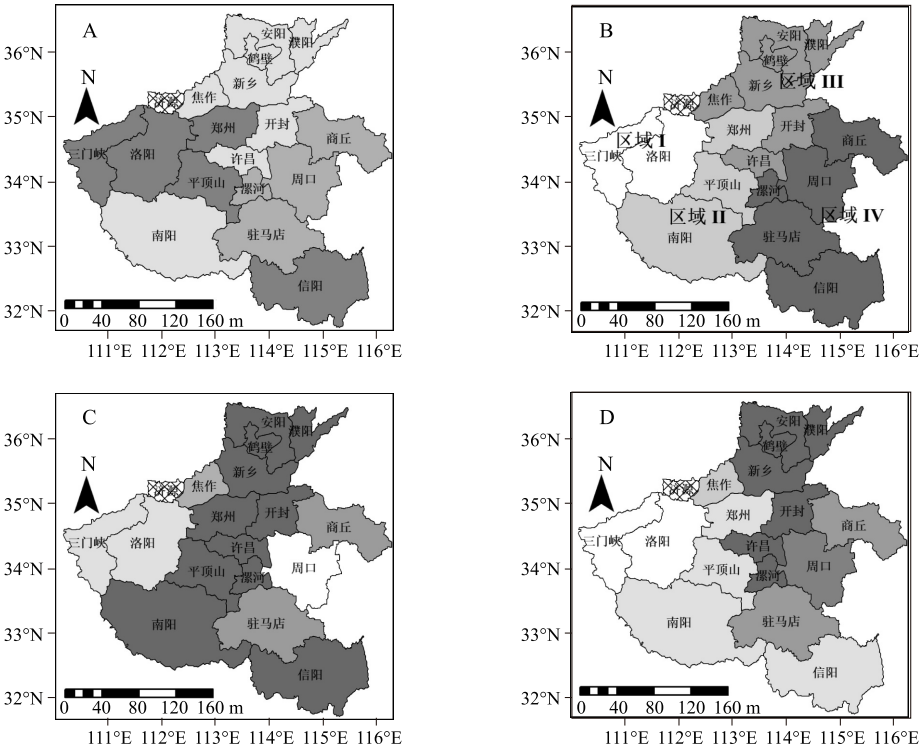
将主成分分析生成各市对应 PC1、PC2、PC3 的得分为待评价样本, 构建成 3 列×17 行的矩阵导入 SPSS 的 *K* 均值聚类模块, 并采用轮廓系数法对分区结果进行评估。基于冬小麦单产时序特征, 河南省 17 个地级市划分为 3 类、4 类、5 类、6 类时的轮廓系数分别为 0.32、0.40、0.36、0.33。图 1 中聚类结果表明划分为 4 类时的空间分布连续性最好, 几乎没有出现孤立的地级市。因此, 基于 *K* 均值聚类河南省 17 个地级市可以划分为 4 个呈现不同冬小麦单产时序演变特征的子区域, 大致为西部的三门峡市、洛阳市(区域 I), 中西部的郑州市、平顶山市、南阳市(区域 II), 中北部的许昌市、开封市、焦作市、新乡市、鹤壁市、濮阳市、安阳市(区域 III), 东部的漯河市、商丘市、周口市、驻马店市、信阳市(区域 IV)。

2.2 河南省冬小麦单产演变特征的区域差异

不同分区冬小麦单产时序特征指标的统计值见表 2。就产量趋势而言, 中北部(区域 III)与东部(区域 IV)的 *Z Statistic* 分别高达 6.9 和 6.5, 而中西部

(区域Ⅱ)与西部(区域Ⅰ)分别为5.2和4.2。这表明中北部及东部冬小麦单产的增加趋势更为明显。就表征产量增幅的指标 *Range* 而言,东部地区最高(4 736.9 kg/hm²),其次为中北部地区(3 561.2 kg/hm²),再次为西部地区(2 951.0 kg/hm²),最后为中西部地区(2 543.8 kg/hm²)。就表征产量水平

的指标 *Average* 而言,中北部地区最高(5 770.9 kg/hm²),其次为东部地区(5 091.3 kg/hm²),再次为中西部地区(4 023.1 kg/hm²),最后为西部地区(3 536.3 kg/hm²)。总体而言,河南省中北部及东部地区冬小麦种植的稳产、增产、高产水平要明显高于中西部及西部地区。



相同颜色的城市归为一类分区,图 A、B、C、D 中分区数量分别为 3、4、5、6。

图 1 基于不同聚类结果的河南省空间区划

Fig.1 Spatial zoning of Henan province based on different clustering results

表 2 河南省不同区域冬小麦单产时序特征指标

Table 2 Temporal characteristic indicators of winter wheat yield in different regions of Henan province

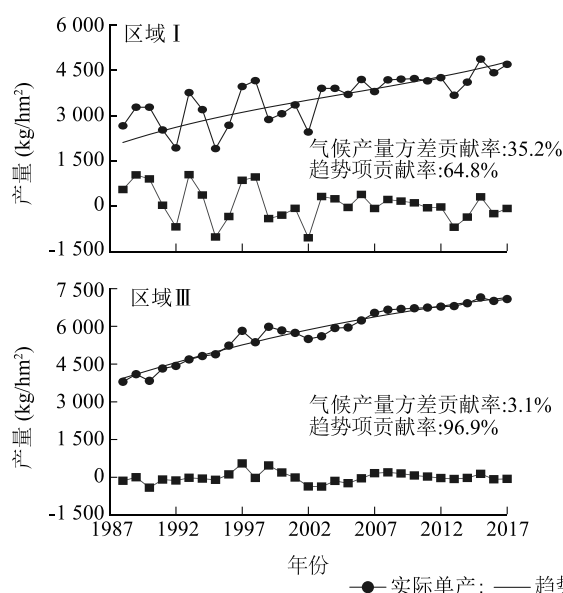
区域	Min (kg/hm ²)	Max (kg/hm ²)	Average (kg/hm ²)	Range (kg/hm ²)	STD	CV (%)	Z Statistic	Sen's Slope [kg/(hm ² ·a)]	H index	CIMF1 (%)	CIMF2 (%)	CIMF3 (%)	CTrend (%)
区域Ⅰ	1 861.0	4 812.0	3 536.3	2 951.0	796.0	22.5	4.2	62.2	0.7	26.9	5.8	3.4	63.9
区域Ⅱ	2 554.3	5 098.1	4 023.1	2 543.8	710.1	17.8	5.2	63.3	0.8	16.8	4.4	2.4	76.4
区域Ⅲ	3 592.8	7 154.0	5 770.9	3 561.2	1 048.8	18.3	6.9	111.5	0.8	2.3	2.6	1.1	94.0
区域Ⅳ	2 118.3	6 855.2	5 091.3	4 736.9	1 416.1	27.8	6.5	138.1	0.8	11.2	2.6	2.5	83.8

区域Ⅰ:西部的三门峡市、洛阳市;区域Ⅱ:中西部的郑州市、平顶山市、南阳市;区域Ⅲ:中北部的许昌市、开封市、焦作市、新乡市、鹤壁市、濮阳市、安阳市;区域Ⅳ:东部的漯河市、商丘市、周口市、驻马店市、信阳市。各指标定义见表 1。

对各分区所属地级市某一年的冬小麦单产计算平均值,进而由各年平均值构建出区域尺度下单产的逐年演变过程(图 2)。通过 EEMD 分析将图 2 中的单产逐年序列解析为 3 个本征模函数(IMF)项和 1 个趋势项。各分区单产的趋势项均呈现出不同幅度

的稳步逐年上升态势,其对实际单产的方差贡献率达到了64.8%~96.9%,这反映了技术革新、政策优化、农业建设等带来的生产力逐年提升是冬小麦单产持续增加的主要驱动力。西部、中西部、中北部、东部 4 个分区冬小麦气候产量对实际单产的方差贡献率分别

为 35.2%、11.5%、3.1%、7.9%。西部地区产量的 $CTrend$ 为 63.9%, 明显低于其他区域(表 2)。这表明气候变化对河南省冬小麦产量的影响具有明显的区域差异, 西部地区冬小麦单产对气候波动更为敏感。



各分区见表 2 注。

图 2 各分区冬小麦单产及气候产量的年际变化

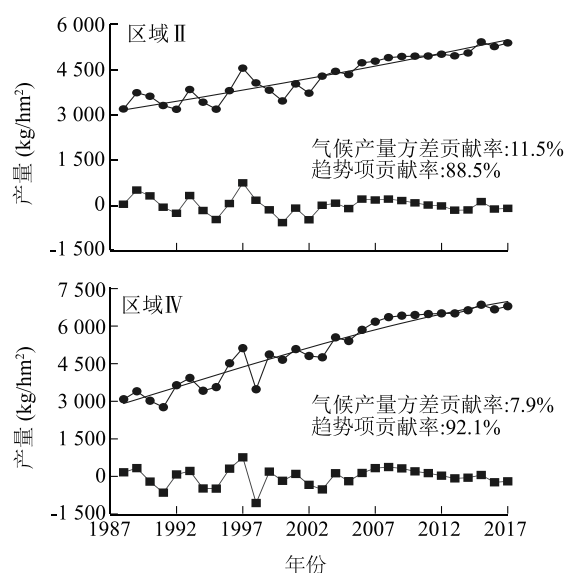
Fig.2 Inter-annual variation of yield per unit area and climatic yield of winter wheat in each region

2.3 河南省冬小麦单产对气候干湿异常的响应

不同分区冬小麦气候产量与生育期内各月份 SPI 相关分析结果(表 3)显示, 与线性回归、Logistic 函数、HP 滤波这 3 种常用方法相比, EEMD 方法生成的气候产量与 SPI 的相关性最为显著, 且有更多的 SPI 与之显著相关。1 月、2 月、3 月的 SPI 对区域 I 的气候产量有着显著的正向效应, 其 SPI 值越高则产量越高。相类似, 2 月、3 月的 SPI 越高, 区域 II 的气候产量越高。这表明 1 至 3 月份气候越湿润越有利于西部及中西部地区的冬小麦生产。12 月 SPI 与 5 月 SPI 分别对区域 III 和区域 IV 的气候产量有显著的负向效应, 其 SPI 值越高则产量越低。这表明 12 月份气候越湿润则越不利于中北部地区冬小麦的产量形成, 而 5 月份气候越湿润则越不利于东部地区冬小麦的产量形成。总体而言, 关键月份的水分亏缺制约着西部及中西部地区的冬小麦生产, 而水分偏多则不利于中北部及东部地区的冬小麦生产。

基于表 3 中相关系数的数值高低, 筛选出 2 月、12 月、5 月的 SPI (分别记做 SPI_2 、 SPI_{12} 、 SPI_5) 作为指示各分区冬小麦产量波动的关键干湿指标,

此外, 图 2 显示, 西部地区冬小麦气候产量的波动幅度最大 ($-1\ 041.30 \sim 1\ 019.56\ \text{kg}/\text{hm}^2$), 其中气候产量小于 $-650.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的成灾年次数高达 4 次。这也说明西部地区冬小麦的气候灾损风险更高。



对产量响应 SPI 变化进行量化(表 4)。就整个研究期而言, 区域 I 冬小麦产量对 SPI 的变化最为敏感, 其次为区域 II, 再次为区域 III, 最后为区域 IV。 SPI_2 每增加 1% 导致西部与中西部地区产量分别增加 0.66% 和 0.46%, 而 SPI_{12} 与 SPI_5 每增加 1% 分别导致中北部与东部地区减产 0.35% 和 0.30%。关键月份 SPI 近 30 年微弱变化带来的产量影响较小, SPI_2 的微弱减少导致西部与中西部地区分别减产 0.06% 和 0.04%, SPI_{12} 的微弱减少导致中北部地区增产 0.05%, SPI_5 的微弱增加导致东部地区减产 0.01%。

将研究期划分为 1988–1999 年、2000–2009 年、2010–2017 年 3 个阶段, 发现西部及中西部地区产量对 SPI_2 的响应呈现更明显的年代际差异。伴随冬小麦产量对 SPI_2 敏感性的逐年代递减, SPI_2 变化对产量的影响也逐年代减弱。在西部地区, 1988–1999 年 SPI_2 的显著减少导致了减产 0.56%, 2000–2009 年 SPI_2 的显著增加导致增产 0.19%, 而 2010–2017 年 SPI_2 微弱变化带来的影响可以忽略。在中西部地区, 1988–1999 年 SPI_2

的显著减少导致减产 0.31%, 2000–2009 年 SPI_2 的微弱增加导致增产 0.06%, 2010–2017 年 SPI_2 微弱增加导致增产 0.01%。与西部及中西部地区相比, 干湿异常对中北部及东部地区冬小麦产量的

影响明显较弱, 3 个阶段内 SPI 变化对产量的影响均在 $-0.05\% \sim 0.07\%$ 范围内浮动。总体而言, 河南省西部地区冬小麦产量对气候干湿异常的响应更为敏感, 但这种响应在 2010 年后明显减弱。

表 3 不同分区冬小麦气候产量与各月份 SPI 的相关分析

Table 3 Correlation analysis between climatic yield of winter wheat in different regions and monthly standardized precipitation index (SPI)

区域	气候产量类型	气候产量与各月份 SPI 的相关系数							
		10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
区域 I	EEMD	-0.09	0.08	-0.06	0.47 **	0.65 **	0.35 *	0.18	0.20
	线性回归	-0.07	0.17	-0.12	0.44 *	0.62 **	0.21	0.20	0.24
	Logistic 函数	-0.07	0.14	-0.11	0.45 *	0.61 **	0.22	0.18	0.22
	HP 滤波	-0.06	0.16	-0.13	0.45 *	0.60 **	0.20	0.20	0.23
区域 II	EEMD	0	0.01	-0.11	0.28	0.54 **	0.36 *	0.04	0.17
	线性回归	0.02	0.05	-0.14	0.25	0.54 **	0.30	0.10	0.18
	Logistic 函数	0	0.03	-0.11	0.23	0.52 **	0.29	0.07	0.17
	HP 滤波	0.02	0.04	-0.12	0.25	0.53 **	0.29	0.08	0.18
区域 III	EEMD	0	-0.10	-0.50 **	-0.16	-0.18	0.02	0.12	-0.27
	线性回归	0	-0.15	-0.33	-0.15	-0.21	0.04	0.05	-0.29
	Logistic 函数	-0.02	-0.19	-0.22	-0.12	-0.21	0.10	-0.01	-0.27
	HP 滤波	-0.01	-0.13	-0.45 *	-0.15	-0.20	0.06	0.09	-0.28
区域 IV	EEMD	0.22	-0.22	-0.29	-0.11	-0.03	-0.08	-0.26	-0.38 *
	线性回归	0.19	-0.26	-0.23	-0.11	-0.05	-0.07	-0.24	-0.34
	Logistic 函数	0.13	-0.29	-0.10	-0.10	-0.09	-0.03	-0.23	-0.34
	HP 滤波	0.21	-0.24	-0.27	-0.10	-0.04	-0.06	-0.24	-0.35

各区域见表 2 注。EEMD: 集合经验模态分解。** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。

表 4 不同时期冬小麦气候产量对关键月份 SPI 变化的响应

Table 4 Response of climatic yield of winter wheat in different periods to SPI change in key months

区域	气候产量波动对 SPI 的响应	1988–1999 年	2000–2009 年	2010–2017 年	1988–2017 年
区域 I	SPI_2 每增加 1% 导致的产量变化 (%)	0.940 ($R^2 = 0.68$)	0.640 ($R^2 = 0.57$)	0.080 ($R^2 = 0.02$)	0.660 ($R^2 = 0.41$)
	SPI_2 的线性趋势 (%/a)	-0.050 ($R^2 = 0.30$)	0.030 ($R^2 = 0.16$)	0.003 ($R^2 = 0$)	-0.003 ($R^2 = 0.01$)
	SPI_2 的历史变化导致的产量变化 (%)	-0.560	0.190	0	-0.060
区域 II	SPI_2 每增加 1% 导致的产量变化 (%)	0.650 ($R^2 = 0.57$)	0.560 ($R^2 = 0.24$)	0.090 ($R^2 = 0.06$)	0.460 ($R^2 = 0.29$)
	SPI_2 的线性趋势 (%/a)	-0.040 ($R^2 = 0.21$)	0.010 ($R^2 = 0.03$)	0.010 ($R^2 = 0$)	-0.003 ($R^2 = 0.01$)
	SPI_2 的历史变化导致的产量变化 (%)	-0.310	0.060	0.010	-0.040
区域 III	SPI_{12} 每增加 1% 导致的产量变化 (%)	-0.330 ($R^2 = 0.16$)	-0.650 ($R^2 = 0.65$)	-0.130 ($R^2 = 0.24$)	-0.350 ($R^2 = 0.26$)
	SPI_{12} 的线性趋势 (%/a)	-0.010 ($R^2 = 0.01$)	-0.010 ($R^2 = 0.02$)	0.050 ($R^2 = 0.14$)	-0.005 ($R^2 = 0.02$)
	SPI_{12} 的历史变化导致的产量变化 (%)	0.040	0.070	-0.050	0.050
区域 IV	SPI_5 每增加 1% 导致的产量变化 (%)	-0.530 ($R^2 = 0.25$)	-0.020 ($R^2 = 0$)	-0.020 ($R^2 = 0.02$)	-0.300 ($R^2 = 0.11$)
	SPI_5 的线性趋势 (%/a)	-0.010 ($R^2 = 0.01$)	0.040 ($R^2 = 0.25$)	0.010 ($R^2 = 0.01$)	0.001 ($R^2 = 0$)
	SPI_5 的历史变化导致的产量变化 (%)	0.060	-0.010	0	-0.010

各区域见表 2 注。

3 讨 论

基于冬小麦单产时序特征的聚类分析将河南省划分成4个子区域,其中中北部和东部地区冬小麦稳产、增产、高产的水平较高,而中西部和西部地区的水平相对较低,特别是西部地区冬小麦单产对气候波动更为敏感。河南省西部地区有太行山、伏牛山等山脉环绕分布,较高的地势和山地地形限制了农业机械的规模化使用,加之山区气候复杂、耕地质量较差和灌溉水平较低,因而冬小麦的生产受到了一定制约^[16]。王天慧^[17]使用作物气象效率灰色投入产出模型以及张荣荣等^[6]采用面板非线性回归模型均发现河南省西部地区为冬小麦种植的气候高敏感区域。相较而言,基于单产时序特征的 K 均值聚类分析对数据要求简单,操作快捷,结果可靠,为气候变化背景下作物生产风险区划提供了新的思路。

2月、5月、12月的 SPI 是指示研究区冬小麦气候产量波动的关键指标,其中2月 SPI 与西部及中西部地区的产量呈显著正相关,而5月和12月的 SPI 分别与东部、中北部地区的产量呈显著负相关。年内降水分配不均导致河南省冬小麦返青期缺水较为严重,其干旱风险自西向东逐渐降低,因此2月 SPI 越高则西部及中西部地区的产量越高^[8-9]。春季雨涝、湿渍灾害多发生于河南省东部地区,灌浆期气候偏湿不利于麦穗形成,这导致5月 SPI 越高则东部地区的产量越低^[18-19]。越冬期低温冷害是河南省北部地区冬小麦种植的主要不利因素,多雨偏湿会加剧低温寡照等不利天气,因而12月 SPI 越高则中北部地区的产量越低^[20]。

各分区冬小麦气候产量与关键月份 SPI 的线性关系量化了单产对于干湿变化响应的区域差异,其中,西部地区产量波动对2月 SPI 的响应最为敏感。关键月份干湿变化对单产的影响在西部、中西部、东部呈现出逐年递减态势,这种减弱趋势在西部地区尤为明显。2010年以来西部地区2月份较为平缓的干湿变化以及稳步提升的农业抗旱能力共同减轻干旱灾害对冬小麦产量的影响^[21-22]。

加大农田水利等农业基础投入有效降低了冬小麦低产区的气候风险。与其他分区不同,2010-2017年中北部地区12月份显著的变湿趋势给单产带来了不利影响。鉴于此,加强初冬期干湿状况特别是连续阴雨事件的监测和预报,并完善田间水分管理和“三沟”配套,有助于降低小麦湿渍灾害风险。

参考文献:

- [1] 文 倩,孙江涛,范利瑶,等. 基于熵权 TOPSIS 的河南省农业水土资源承载力时空分异与关联分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29 (1): 333-338.
- [2] 于元赫,吴 健,李子君,等. 山东省粮食生产时空格局演变及安全评价[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 176-186.
- [3] 温 静,张 超,张丽君,等. 气候变化下中国粮食生产时空演变及影响因素[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50 (6): 652-665.
- [4] 吴静芬,李 丁,刘笑杰,等. 长江经济带粮食生产时空动态演变及影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(3): 407-417.
- [5] 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.
- [6] 张荣荣,宁晓菊,秦耀辰,等. 1980 年以来河南省主要粮食作物产量对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 137-149.
- [7] 赵强强,陈 财,张菲菲,等. 淮河流域冬小麦干旱时空分布特征[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 373-381.
- [8] 白芳芳,乔冬梅,庞 颖,等. 河南省冬小麦各生育期水分亏缺的空间分布及降水量突变检验[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36 (6): 100-108.
- [9] 颜玉倩,何赵祥睿,朱克云. 河南省冬小麦干旱指数特征分析及风险评估[J]. 农学学报, 2021, 11(3): 12-19.
- [10] 王连喜,王 田,李 琪,等. 基于作物水分亏缺指数的河南省冬小麦干旱时空特征分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 83-88.
- [11] 宋 辞,裴 韬. 基于特征的时间序列聚类方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 31(10): 1307-1317.
- [12] 王 栋,梁忠民,王 军,等. 基于主成分聚类分析的云南省干旱自然分区[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 15-21, 28.
- [13] 张国栋,樊东方,李其江. 基于主成分聚类分析的青海省水文分区研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(12): 33-38.
- [14] 张洪波,顾 磊,陈克宇,等. 渭河生态水文联系变异分区研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 210-220.

- [15] 徐 慧,张方敏,黄 进. 江苏省 1961-2012 年干湿时空变化及对单季稻产量的潜在影响[J]. 水土保持研究,2017,24(6): 250-254,261.
- [16] 闫宇航,岑云峰,张鹏岩,等. 基于 SFA 模型的河南省粮食产量时空变化及投入要素影响[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(5): 76-86.
- [17] 王天慧. 基于灰色模型技术的气象因素对粮食生产影响的量化分析[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
- [18] 鲁 坦,徐文明,俞小鼎,等. 2003-2014 年河南春季暴雨特征及影响系统分析[J]. 气象与环境科学,2017,40(2): 92-99.
- [19] 余卫东,杨君健. 河南省优质小麦适宜种植区及未来变化趋势[J]. 中国农业大学学报,2021,26(9): 42-51.
- [20] 张 弘. 河南省冬小麦越冬冻害气候风险区划[J]. 江苏农业科学,2016,44(9): 443-446.
- [21] 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.
- [22] 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.

(责任编辑:张震林)