

基于空间计量分析安徽省冬小麦灾损风险的时空分布

徐 慧¹, 陈金华², 黄 进³, 张方敏³

(1.南京市生态环境保护科学研究院, 南京 210013; 2.安徽省农村综合经济信息中心
(安徽省农业气象中心), 合肥 230031; 3.南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:安徽省是我国最重要的冬小麦生产省份之一,研究其灾损风险的时空变化对区域防灾减灾有着重要意义。依托 74 个区县 1973—2014 年冬小麦单产资料构建了气候减产率的逐年序列,采用空间计量分析与气候诊断探讨了灾损风险的时空分布特征。结果表明:(1) 基于多年平均减产率,高灾损区域的空间分布呈现出明显的年代际变化,其中沿淮地区是安徽省冬小麦灾损的首要高风险区域;(2) 基于重心迁移模型,1973—2014 年灾损重心经度的年际变化呈现出强烈的短期振荡,而重心纬度则呈现出显著的减少趋势;(3) 基于 Mann-Kendall 趋势检验与 Hurst 指数,1973—2014 年安徽省北部的冬小麦灾损风险呈现出较强的下降趋势,而南部的灾损风险呈现出上升趋势,且未来短期仍将持续该趋势。总体而言,安徽省冬小麦灾损风险的时空演变呈现出显著的南北差异格局,其中南部将会是灾损的高风险区域。

关键词:冬小麦; 安徽省; 灾损风险; 时空分布

中图分类号:S512;S42

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0383-06

Spatiotemporal Distribution of Risk in Yield Losses for Winter Wheat in Anhui Province Based on Spatial Econometric Analysis

XU Hui¹, CHEN Jinhua², HUANG Jin³, ZHANG Fangmin³

(1.Nanjing Research Institute of Ecology and Environmental Protection, Nanjing, 210013, China; 2.Rural Comprehensive Economic Information Center of Anhui Province/Anhui Agrometeorological Center, Hefei 230031, China; 3.School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Anhui Province is one of the most important winter wheat producing provinces in China. To ensure regional disaster prevention and mitigation, it is of great significance to analyze the temporal and spatial changes in risk of yield losses in Anhui. Based on the the annual series of climate-driven yield reduction rate (CRYRR) resulted from wheat yield from 1973 to 2014 in 74 districts/counties, the temporal and spatial distribution characteristics in risk of yield losses were analyzed by using spatial econometric analysis and climate diagnosis. The main results are as follows. (1) Based on the multi-annual average CRYRR, spatial distribution of the areas with high losses showed obvious interdecadal change, and the area along Huaihe River was identified as the dominant higher-risk area for yield losses. (2) Based on the barycenter migration model, the inter-annual variation of the barycenter longitude of yield losses showed a strong short-term oscillation during 1973—2014, while the barycenter latitude showed a significant decreasing trend. (3) Based on Mann-Kendall trend tests and Hurst index, risk in yield losses for winter wheat during 1973—2014 showed a stronger downward trend in north Anhui Province and showed an upward trend in southern Anhui Province, while the changing trends will continue the existing pattern. In general, the spatial and temporal evolution of risk in yield losses for winter wheat in Anhui Province showed the notable north-south difference, and the southern area will be the high-risk area of yield loss.

Keywords: winter wheat; Anhui Province; risk in yield losses; spatiotemporal distribution

收稿日期:2021-05-13

修回日期:2021-05-28

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与产品研制”(2018YFC1506606)

第一作者:徐慧(1986—),女,江苏泗阳人,高级工程师,硕士,主要从事生态气象研究。E-mail:xuhuisafe@sina.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

我国地处气象灾害多发的东亚季风区,由于农业抗灾基础设施较薄弱,每年农业受灾面积高达 5 000~5 500 万 hm^2 ,占农作物总播面积的 30%~35%,气候要素已成为影响农作物稳产高产的重要因素^[1]。因此,精准评估气候异常和极端灾害事件对农业生产风险的影响得到了我国学者的高度重视。与常规的“四因子”灾害风险评估法所需的繁复数据相比,通过作物单产分离出的气候减产率能够准确、高效、快捷地对气候异常导致的灾损风险进行区划^[2]。相关学者运用该指标完成了对我国不同省份水稻、玉米等农作物灾损风险的有效评估^[2-5]。但这些研究往往关注作物灾损风险值的空间分布,对灾损风险的空间聚集、重心迁移、演变特征等时空动态特征的探求还寥寥无几。因此,基于气候减产率挖掘作物灾损风险的年代际波动特征,进而构建灾损风险的时空演变格局值得我们深入尝试。

冬小麦是安徽省主要粮食作物,种植面积达到 200 万 hm^2 ,约占全省耕地面积的一半,其总产量居全国第四位^[6]。安徽地处我国南北气候过渡带,天气形势复杂多变,强降水、持续干旱、连阴雨等农业气象灾害时有发生,对冬小麦的种植带来了较为不利的影响^[5]。鉴于此,本文拟以安徽省 74 个区县冬小麦 1973—2014 年的单产序列为基础,采用气候产量原理分离出气候减产率,进而运用空间计量分析以及气候诊断方法研究冬小麦灾损风险的时空分布特征。这对气候变化背景下宏观调控研究区冬小麦防灾减灾以及保障区域粮食安全有着重要意义。

1 研究方法

1.1 数据

依托安徽省统计年鉴、安徽省农村经济统计年鉴等资料汇总整理了 74 个区县(图 1)1973—2014 年冬小麦单产数据。此外,国家统计网农作物资料数据集提供了全省尺度下安徽省 1973—2014 年 3 种关键农业生产力指标 I_1 :有效灌溉率(%); I_2 :单位面积农用化肥施用量(万 $\text{t}/\text{千 hm}^2$); I_3 :单位面积投入农业机械动力(万 $\text{kW}/\text{千 hm}^2$)的相关记录。

1.2 冬小麦气候减产率的计算

冬小麦的气候产量(Climate-driven yield, Y_c)由公式(1)计算:

$$Y_c = 100 \times (Y/Y_t - 1) \quad (1)$$

式中: Y 为实际冬小麦单产; Y_t 为农业生产力驱动的趋势产量,其为单产与年份基于线性及非线性方法拟合的结果^[7]。

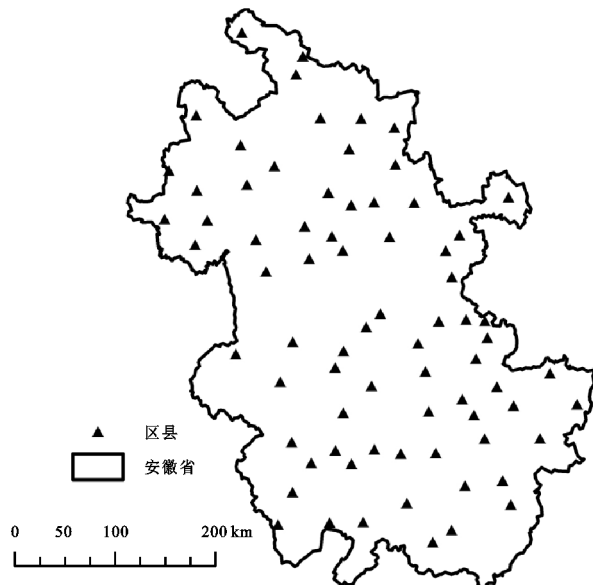


图1 安徽省 73 个冬小麦种植区县的空间分布

理论上 Y_t 应与农业生产力的发展趋势高度吻合,客观的拟合 Y_t 有利于准确的反映 Y_c 的逐年波动^[8]。由于社会经济发展过程较为相近,理论上同一省份内各地趋势产量的提取可以采用相同的方法^[9]。因此,本研究进行如下筛选:(1) 采用线性回归(S_1)、五年滑动平均(S_2)、Logistic 曲线(S_3)、HP 滤波(S_4)、二次函数(S_5)5 种常用方法提取 73 个区县的冬小麦趋势产量序列;(2) 对各区县的趋势产量求平均,进而得到对应 5 种方法的区域趋势产量序列($TY_1, TY_2, TY_3, TY_4, TY_5$);(3) 以 I_1, I_2, I_3 这 3 个驱动粮食作物增产的生产力指标为自变量, TY 为因变量,分别构建 5 组多元线性方程,其回归决定系数分别为 0.954, 0.990, 0.967, 0.992, 0.996。由此可见 TY_5 与生产力指标的线性关系最为显著,这表明利用 S_5 提取的趋势产量与实际生产力发展进程更为一致。基于二次函数拟合提取了各区县 1973—2014 年的冬小麦 y_c 序列。将 y_c 序列中的正值赋值为 0, 负值取绝对值,由此构建出各区县冬小麦气候减产率(Climate-driven yield reduction rate, CDYRR)的逐年序列。CDYRR 大于 0 的年份定义为成灾年,计算某一时期内成灾年份 CDYRR 的平均值,得到相应的平均减产率,进而可以表征冬小麦灾损风险的高低。

1.3 莫兰指数

莫兰指数(Moran's I)分析也称空间自相关分析,通常用来测度研究对象属性值在空间上是否存在集聚特性。Moran's I 介于 $[-1 \sim 1]$ 之间,绝对值越大则表明自相关性越强,若 Moran's I 为负值表示空间单元趋于分散分布;Moran's I 为正值则表示出现规模集聚效应;当 Moran's $I = 0$ 时表示空间上呈随机分布^[10]。计算公式如下:

$$\text{Morlan's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - y)(x_j - y)}{\sum_{i=1}^n (x_i - y) \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中: n 为区县个数; x_i 和 x_j 分别为区县 i 和区县 j 的多年平均 CDYRR; w_{ij} 为空间权重矩阵; y 为各区县 CDYRR 的平均值。

1.4 重心迁移模型

区域发展过程中某地理要素的加权平均中心往往称为重心,重心迁移模型则客观地反映了区域要素空间分布的集聚和位移规律^[11]。本文中冬小麦灾损重心的空间坐标由公式(3)计算。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times \text{CDYRR}_i}{\sum_{i=1}^n \text{CDYRR}_i}; Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times \text{CDYRR}_i}{\sum_{i=1}^n \text{CDYRR}_i} \quad (3)$$

式中: X, Y 为重心坐标; x_i, y_i 分别为第 i 个区县的经、纬度坐标; CDYRR_i 为第 i 个区县的某一年的气候减产率。

1.5 时序特征分析

采用 Mann-Kendall 非参数趋势检验及突变检验、Hurst 指数(H)、集合经验模态分析(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)对相关气候指标的变化趋势、突变情形、长程持续性、振荡周期性等时序特征进行了诊断分析。

2 结果与分析

2.1 冬小麦灾损风险的空间分布特征

图 2A 为安徽省 1973—2014 年平均气候减产率的空间分布。就整个研究期而言,安徽省冬小麦灾损风险的分布具有明显的地域性,其高值区域主要分布

在安徽省北部,特别是沿淮地区。相比较,淮河以南大部分区域的灾损风险较低。图 2B 为安徽省 1973—2014 年气候减产率变异系数的空间分布,与图 2A 相类似,可以发现沿淮地区及东北部减产率的年际波动较强。当整个研究期划分为 4 个时段时,图 3 中冬小麦年均减产率的空间分布呈现出显著的年代际差异。1973—1979 年,冬小麦的灾损风险的高值区域主要为沿淮地区的中东部以及江南地区;1980—1989 年,冬小麦的灾损风险的高值区域主要为安徽省西北部以及西南部;1990—1999 年,冬小麦的灾损风险的高值区域主要为沿淮地区的中西部;2000—2014 年,冬小麦的灾损风险的高值区域主要为沿淮地区以及安徽省的东南部。由图 3 中不同年代平均减产率的极值来看,1990—1999 年安徽省冬小麦灾损风险较高,而 1980—1989 年的灾损风险较低。这与安徽省近 40 a 气象灾害年景的年代际变化相吻合,其中 1991 年、1998 年全省遭遇严重的雨涝灾害,造成了小麦产量严重减产^[12-13]。

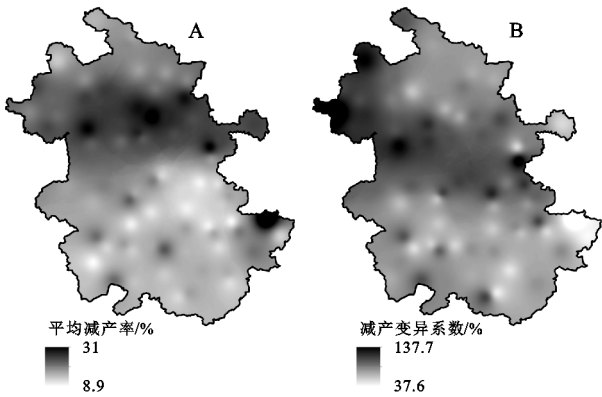


图 2 1973—2014 年安徽省冬小麦平均气候减产率及变异系数的空间分布

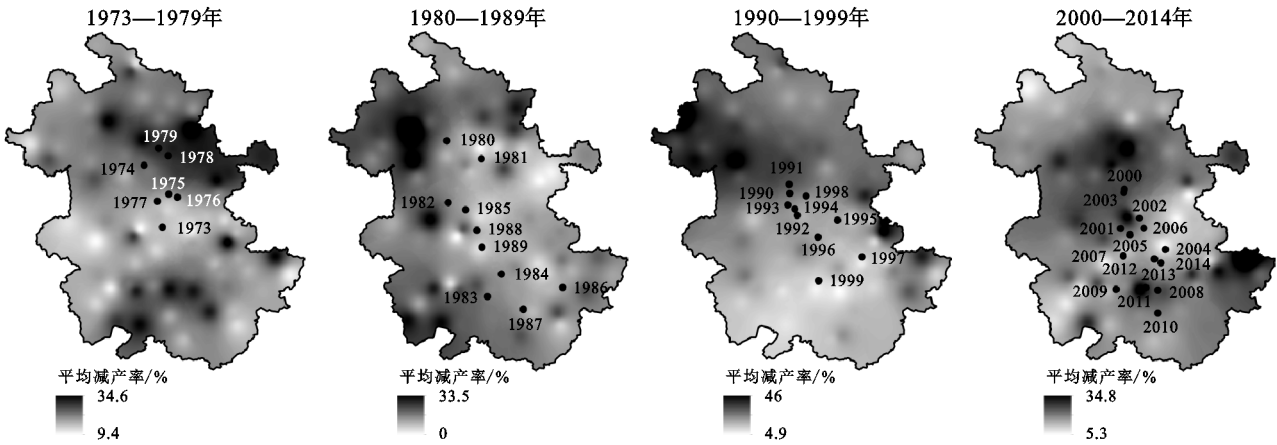


图 3 安徽省不同年代气候减产率与灾损重心的空间分布

对安徽省冬小麦平均减产率进行空间自相关分析,得到 1973—1979 年、1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2014 年共 4 个时段减产率的莫兰指数(图 4)。可

以发现各年代的 Morlan's I 均大于 0,表明安徽省冬小麦灾损风险具有一定的空间聚集性,即风险高(低)的区县,其周边区县的灾损风险也较高(低)。Morlan's I 在

不同年代表现出一定的波动性。其中 1990—1999 年平均减产率的 Morlan' *I* 最高,达到了 0.430,表明了该时段冬小麦灾损风险的空间聚集效应较强。这与图 3C 相吻合,灾损风险的热点主要集中在沿淮地区,并分别向北

部和南部减弱。而 1980—1989 年、2000—2014 年平均减产率的 Morlan's *I* 分别仅为 0.120,0.110,表明了灾损风险空间分布的破碎化程度较高,这与图 3B 和 3D 中出现了多处风险热点相吻合。

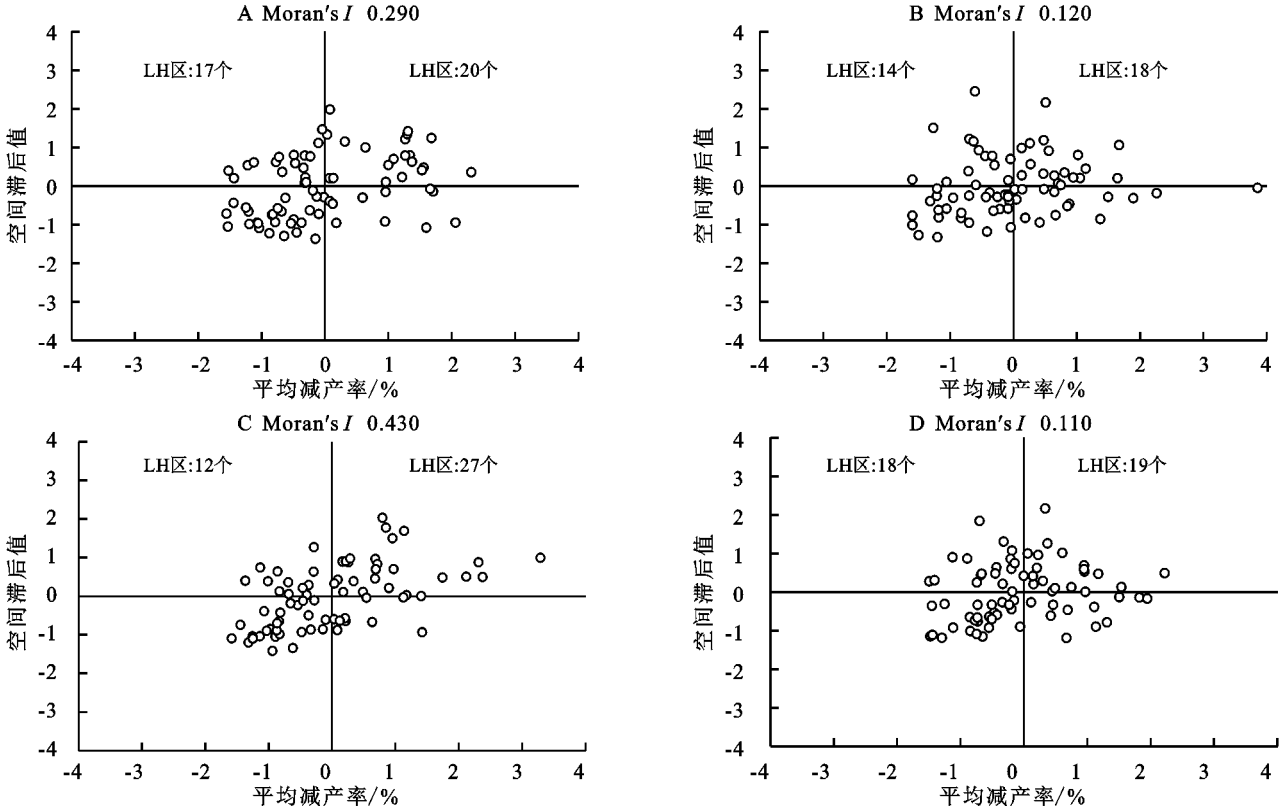


图 4 不同年代气候减产率的 Morlan' *I* 散点图

2.2 冬小麦灾损重心的时空演变特征

1973—1979 年、1990—1999 年灾损风险重心主要在沿淮地区的中部进行小幅的南北浮动。与之不同、1980—1989 年、2000—2014 年灾损风险重心的迁移幅度较大,重心由北向南在淮北地区、江淮地区、江南地区等区域均有所分布。图 5 为重心经纬度的年际变化序列及其时序诊断结果。

由图中 M-K 突变检验的 UF/UB 曲线所示,灾损重心经度的年际变化未发生明显的突变,而灾损重心纬度则在 2001 年发生了突变,此后纬度呈现出较

显著的减小趋势。由图中 M-K 趋势检验的 *Z* 值所示,灾损重心的经度呈现出增大趋势,但未通过 0.05 显著性水平的检验;而灾损重心的纬度则呈现出减小趋势,且通过 0.01 显著性水平的检验。由图中 Hurst 指数(*H*)所示,灾损重心经度的逐年序列呈现出较弱的持续性,而经度的逐年序列则表现出较强的时序长程依赖性,即未来的短期变化与过去的变化趋势相一致。由此可见,1973—2014 年冬小麦灾损重心向安徽省南部移动的趋势较为显著,未来江南地区可能是高灾损风险区域。

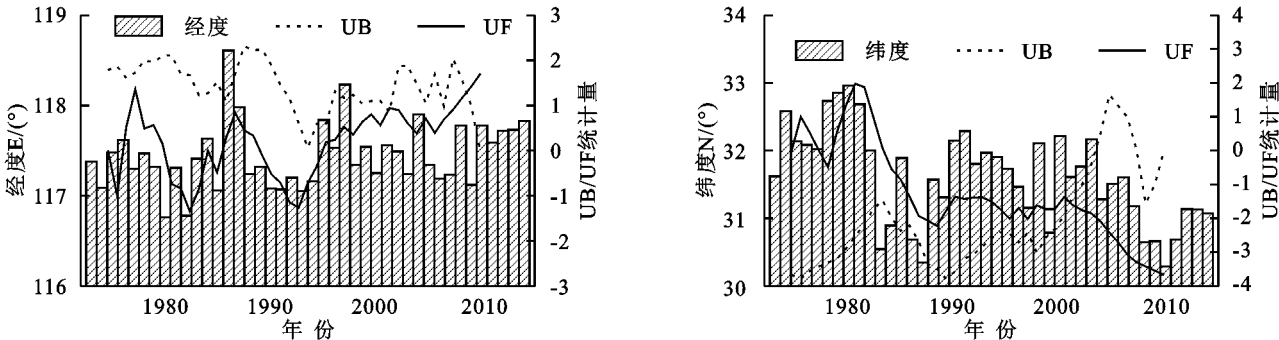


图 5 灾损重心经纬度逐年序列的 M-K 检验及 Hurst 指数

图 6 给出了灾损重心经纬度年际变化序列的 EEMD 分析结果,其中 1973—2014 年经纬度的逐年

序列均可分解成 1 个 Trend 项和 4 个 IMF 项(有限本征模函数, Intrinsic Mode Function)。由图 6A 可见, 灾损重心经度的逐年变化呈现出以 2.6 a 为主周期的高频短期振荡, 体现在其 IMF₁ 分量的方差贡献率达到了 42.7%, 所占比重远高于其他分量。由图 6A 中 IMF₁, IMF₂, IMF₃ 的演变过程可以发现, 重心

经度的年代际波动在 2000 年前呈现出较大幅度的振荡, 而 2000 年后波动的振幅明显较小。与图 6A 不同, 图 6B 中重心纬度的 IMF₁, IMF₂, IMF₃ 分量的方差贡献率均未超过 17%, 而 Trend 项的贡献率达到了 43.1%。这表明了灾损重心纬度呈现出显著减小的演变趋势, 而其年代际波动不是很明显。

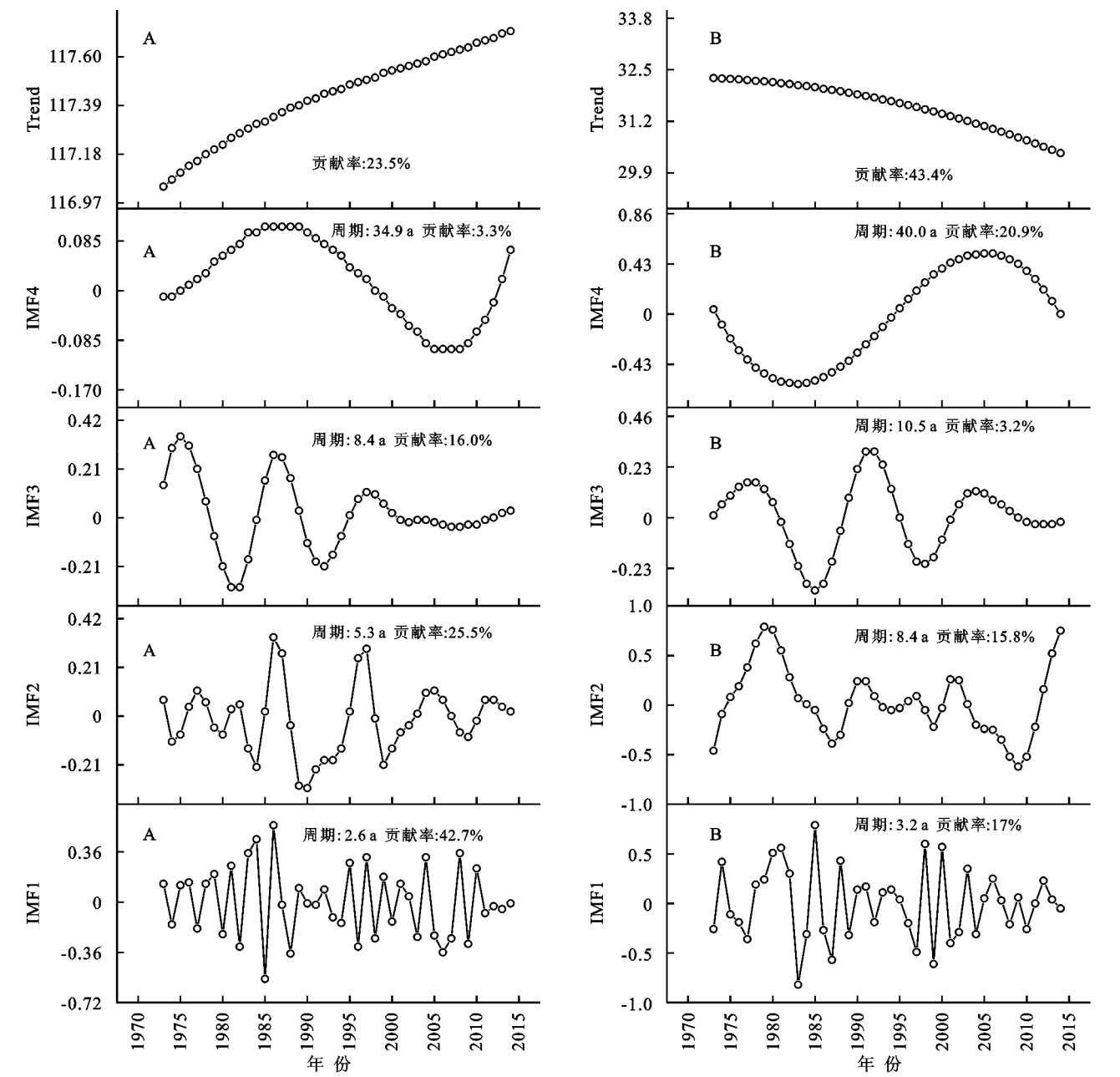


图 6 灾损重心经度(A)和纬度(B)逐年序列的 EEMD 分解

2.3 冬小麦灾损风险变化趋势的空间分布

基于 M-K 趋势检验, 图 7A 给出了各区县冬小麦减产率逐年序列 Z 值的空间分布。安徽省中部及北部大部分地区的冬小麦灾损风险呈现出下降趋势, 特别是淮北中东部地区的下降趋势通过了 0.1 显著性水平的检验。反观安徽省南部, 特别是江南地区, 冬小麦灾损风险呈现出上升趋势, 但并没有通

过 0.1 显著性水平的检验。图 7B 中全省绝大部分地区冬小麦减产率的 H 值均超过 0.5。其中安徽省中部及西北部的 H 值略低, 介于 0.5~0.6 之间, 而淮北的东北部及江南大部分地区的 H 值超过了 0.6。这表明冬小麦气候减产率的年际演变表现出较强的持续性, 未来短期内江南地区冬小麦灾损风险将会持续增加。

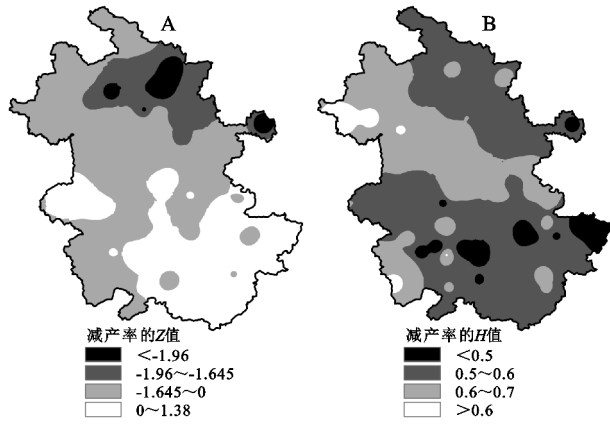


图 7 1973—2014 年安徽省冬小麦气候减产率变化趋势及 H 值的空间分布

3 结论

(1) 基于安徽省 74 个区县的冬小麦 1973—2014 年的单产数据,通过提取不同时期的平均气候减产率,可以发现冬小麦灾损风险的空间分布呈现出明显的年代际变化。总体而言,冬小麦高风险区域主要集中在安徽省北部特别是沿淮地区,而广大江南地区的灾损风险相对较低。这与安徽省冬小麦干旱等气象灾害脆弱性评价结果相吻合^[14]。沿淮地区地处暖温带气候与北亚热带气候的过渡区,为全省降水年际变异最大的区域,其水资源时空分布不均,而土壤蓄水保墒能力较差,且农业经济水平和抗灾减灾能力较落后,因而灾损风险较高^[15-17]。而江南地区降水充沛,土壤肥沃,栽培技术及机械化水平程度较高,因此其冬小麦灾损风险较低^[5]。

(2) 重心迁移模型表明安徽省冬小麦灾损重心有着显著的南移趋势。这与 M-K 趋势检验的结果相一致,安徽省北部,特别是淮北地区中东部的灾损风险呈现出显著的减弱趋势,而广大江南地区则呈现出一定的增强趋势。水分亏缺是安徽省北部地区冬小麦种植的主要不利因素,2000 年以来该区域降水较其他时期偏多,从而降低了农业干旱对小麦生长的不利影响^[18-19]。而降水偏多引发雨涝、湿渍、阴雨寡照是影响南部地区冬小麦生长的主要气象灾害,近十几年来该区域极端降水事件强度及频次的增加使得冬小麦种植风险有所提高^[20-21]。因此,安徽省冬小麦气候灾损风险的时空演变呈现出显著的南北区域差异,这一时空格局应引起我们的高度重视。

参考文献:

[1] 胡亚男,郑金伟,潘根兴,等.1978—2008 年中国十省主要农业气象灾害动态及其影响分析[J].气候变化研究进展,2015,11(2):123-130.

[2] 邓国卫,卿清涛,徐金霞,等.四川省水稻综合气象灾害

风险区划[J].中国生态农业学报,2020,28(5):621-630.

[3] 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.

[4] 刘少军,张京红,蔡大鑫,等.海南岛天然橡胶产量灾损风险区划[J].自然灾害学报,2015,24(2):235-241.

[5] 郭建茂,谢晓燕,吴越,等.安徽省一季稻产量灾损风险评价[J].中国农业气象,2017,38(8):488-495.

[6] 马晓群,张宏群,吴文玉,等.安徽省冬小麦品种生态气候适宜性分析和精细化区划[J].中国农业气象,2012,33(1):86-92.

[7] 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.

[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] 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.

[10] 林树高,陆汝成,叶宗达,等.广西城市土地集约利用与生态文明建设耦合时空分异[J].水土保持研究,2021,28(2):301-308,318.

[11] 卫新东,宋林韩,王箴妮,等.黄河西岸陕西各县市耕地质量时空变化特征及其分异规律[J].水土保持研究,2021,28(2):326-334.

[12] 张强,孙鹏,程辰,等. ENSO 影响下安徽省旱涝灾害及农业生产损失时空变化特征[J].水资源保护,2016,32(6):6-18.

[13] 王胜,沈梅,石磊.安徽省近 33 年农业气象灾害年景评估[J].中国农业大学学报,2013,18(3):192-197.

[14] 张宏群,马晓群,陈晓艺,等.基于 GIS 的安徽省冬小麦农业干旱脆弱性评价[J].中国农学通报,2011,27(33):146-150.

[15] 孙仲益,张继权,王春乙,等.基于网格 GIS 的安徽省旱涝组合风险区划[J].灾害学,2013,28(1):74-78.

[16] 孙朋,金燕婷,郭忠臣,等.1959—2017 年安徽省夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2020,39(2):99-106.

[17] 郭政,董平.安徽省县域经济发展水平评价及时空格局演变研究[J].科技和产业,2017,17(3):57-62.

[18] 顾峰雪,张远东,李威,等.1980—2015 年安徽省降水和干旱的时空变化特征[J].安徽农业科学,2021,49(1):223-228.

[19] 陈柏丽,朱永华,王春艳,等.淮北平原降水量和参考作物蒸散量时空演变规律研究[J].灌溉排水学报,2018,37(6):109-116.

[20] 张浩,马晓群,王晓东.安徽省冬小麦水分盈亏特征及其对产量的影响[J].气象,2015,41(7):899-906.

[21] 孙忠保,程先富,张强,等.1960—2014 年皖江地区极端降水事件时空特征研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2018,54(6):772-780.