

基于多指数安徽省强降水灾害近 45 年的时空演变

孙莉娟^{1,4}, 陈金华², 徐阳², 黄进³

(1.安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031; 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; 4.淮河流域气象中心, 安徽 合肥 230031)

摘要:强降水事件的频发给人类社会造成了巨大危害,研究其时空变化特征具有重要的现实意义。依托安徽省 77 个气象站点 1973—2017 年逐日降水资料及全省粮食产量数据,运用降水指标群评估了研究区强降水灾害的时空演变格局。结果表明:(1) 基于各站点 11 个降水指数的多年均值,主成分分析表明安徽省强降水的极值和持续性呈现出显著的南北梯度,高值区域主要集中在南部地区;(2) 各站点不同类型降水指数与全省水灾受灾总面积的相关分析表明极端雨天总降水量(P_{95})是表征雨涝灾害最有效的指标;(3) 基于主成分分析,安徽省可以划分为 6 个呈现不同 P_{95} 变化情形的子区域,分别为中南部、中北部、南部、西北角、东北角、最北端,其中大部分区域 2003 年后 P_{95} 增加态势较为强烈;(4) 全省夏、秋量总产量对中北部 P_{95} 的年际异常更为敏感,特别是近 45 年来中北部 P_{95} 的增加趋势给夏粮产量带来了 0.72% 的减产。研究结果对评估气候变化对安徽省粮食生产安全的可能影响具有参考意义。

关键词:强降水; 多指数; 安徽省; 主成分分析

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0128-06

Spatial and Temporal Evolution of Heavy Rainfall Disasters in Anhui Province in Recent 45 Years Based on Multi-indicators

SUN Lijuan^{1,4}, CHEN Jinhua², XU Yang², HUANG Jin³

(1. Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031, 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; 4. Huaihe River Basin Meteorological Center, Hefei 230031, China)

Abstract: The frequent occurrence of heavy rainfalls has caused great harm to human society, and it is important to explore its temporal and spatial characteristics. By using the daily precipitation data of 77 meteorological stations and provincial grain yield records in Anhui province during 1973—2017, the spatio-temporal variability of heavy rainfalls disasters were evaluated with precipitation indicator groups. The main results are as follows. (1) Based on the multi-annual average of 11 precipitation indices of each station, the principal component analysis (PCA) showed that the extreme and persistence of heavy rainfalls in Anhui Province presented a notable north-south gradient, and the high values mainly concentrated in the south area. (2) The correlation analysis between precipitation indices of each station and provincial total area affected by floods indicated that the total precipitation of extreme rainy days (P_{95}) was the most effective indicator for waterlogging disasters. (3) By using PCA, Anhui could be divided into six sub-regions with different temporal variations in P_{95} such as south-central area, north-central area, south area, northwest corner, northeast corner, northernmost area, and most of Anhui had been dominated by the strong increase of P_{95} since 2003. (4) The provincial summer and autumn grain yield was more sensitive to the inter-annual anomalies of P_{95} in north-central area, especially the increasing trend of P_{95} in north-central area during recent 45 years brought the decrease of summer grain yield by 0.72%. The study results can be used as a reference for assessing the possible impact of climate change on food production security in Anhui Province.

Keywords: heavy rainfalls; multi-indicators; Anhui Province; principal component analysis

收稿日期:2019-07-30

修回日期:2019-08-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0300905);淮河流域气象开放研究基金资助项目(HRM201802);安徽省新技术集成项目(AHXJ201706)

第一作者:孙莉娟(1988—),女,江苏泰州人,工程师,硕士,主要从事气候变化的研究。E-mail:sljclimate@163.com

通信作者:陈金华(1981—),男,江西鄱阳人,高级工程师,硕士,主要从事农业气象的研究。E-mail:cjhclimate@sina.com

强降水作为极端天气气候事件的一种,是引发洪涝、内涝、渍涝及泥石流和水土流失等气象、水文、及环境灾害的首要致灾因子^[1]。IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)特别报告指出气候变化会导致强降水事件的频次、强度和持续性发生改变,特别是全球大多地区的特大降雨事件从 20 世纪中叶以来呈现出增加趋势^[2]。强降水事件的频发及其增加的水灾害风险正成为人类社会面临的重大挑战,因此使用多种类型降水指数全面评估强降水变化及其影响的区域差异性,具有重要的科学和现实意义^[3]。安徽省地跨长江、淮河,作为全国重要的粮食产区,南北气候条件差异大,水涝灾害频发,农业经济损失严重^[4]。因此,了解并掌握安徽降水的气候特征,特别是强降水的时空演变格局对积极防灾减灾均有重要指导意义。安徽省现有的研究多侧重于某些单一降水指标的趋势诊断,缺乏多类型指标的综合比对分析,此外针对强降水年际变化对农业影响的量化研究的尝试还很有限^[5-7]。鉴于此,本文从降水极值、暴雨日数、极端连续降水、降水集中性等多个角度全面评估研究区强降水的时空演变,并探讨其对粮食生产的潜在影响。

1 资料与方法

1.1 基本数据

降水资料来源于安徽省气象局提供的 77 个气象观测站 1973—2017 年的逐日降水数据,这 77 个站点的空间分布具体见图 1。此外,国家统计局数据库(<http://data.stats.gov.cn/>)提供了全省尺度 1973—2017 年夏、秋粮的总产量数据以及水灾受灾面积数据。

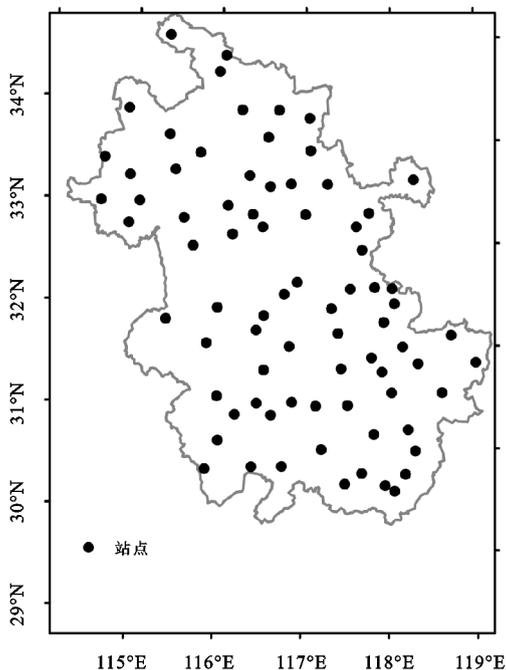


图 1 安徽省 77 个气象站的空间分布

1.2 强降水指数的定义

本文所采用的强水指数(PI)共有 11 种(表 1),其中 P_{\max} , D_{50} , D_{100} , CWD, P_{95} 源自气候变化探测和指标联合专家组织(Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices)设定的极端气候指数。与此同时, $P_{1\sim 2d}$, $P_{3\sim 4d}$, $P_{5\sim 6d}$, $P_{>6d}$ 用来描述不同持续日数的连续降水事件的极值。此外,PCI 与 CI 用来刻画月降水和日降水集中性,其中 PCI 由逐月降水量计算而来,主要用于度量年内降水的非均匀分配;而 CI 由逐日降水数据计算而来,旨在描述某时段内的累积降水量百分比与累积降水天数百分比间的洛伦兹曲线分布,并利用基尼系数评估日降雨分布特性^[8-11]。PCI 与 CI 的值越高,则降水集中性越高,某年发生雨涝灾害的风险也就越大,其计算过程可见徐慧^[8]与邢万秋^[9]的相关工作。本降水指数的计算过程中,日降水量 ≥ 1 mm 被定义为一次降水事件,连续降水事件的最短持续天数为 1 d。

表 1 强降水指数的定义

序号	指数名称	指数定义	单位
1	P_{\max}	单日最大降水量	mm
2	D_{50}	日雨量 50 mm 以上降水事件的天数	d
3	D_{100}	日雨量 100 mm 以上降水事件的天数	d
4	CWD	最长持续降雨事件的天数	d
5	$P_{1\sim 2d}$	持续 1~2 d 降雨事件的最大降水量	mm
6	$P_{3\sim 4d}$	持续 3~4 d 降雨事件的最大降水量	mm
7	$P_{5\sim 6d}$	持续 5~6 d 降雨事件的最大降水量	mm
8	$P_{>6d}$	持续 6 d 以上雨水事件的最大降水量	mm
9	PCI	月降水集中性指数	
10	CI	日降水集中性指数	
11	P_{95}	极端雨天总降水量(日降水大于 95% 阈值的累计量)	mm

1.3 降水指数的时空分析

主成分分析常见于生态环境等领域多指标综合评价的数据降维,其作用于多样本(站点)多指标构成的矩阵时,可以把有一定相关性的多个原始指标通过线性变换为另一组新的不相关的少量指标,新的指标按照方差依次递减的顺序排列,排第一的指标称为第一主成分,依次类推^[12-13]。于此同时,主成分分析在识别气候变量相似及差异性的区划中也有广泛应用,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^[14-15]。此外,“Mann-Kendall 趋势检验”(M-K 检验)以及五年滑动平均处理用来诊断相关气候指标的变化特征。

1.4 强降水对粮食产量的影响量化

为了剔除技术进步及管理等非气候因素对作物产量的影响,本文采用产量与气候要素的一阶差分法(即当年与前一年的差值)对相关指标的年际序列进行预处理^[16]。计算降水指数与粮食总产量间的相关系数,并采

用公式(1) 量化降水指数变化对产量的影响。

$$\Delta \text{Yield} = a \times \Delta \text{PI} + b \quad (1)$$

式中: ΔYield 为粮食产量的一阶差分; ΔPI 为降水指数的一阶差分。产量对降水指数的敏感性(SE)定义为其变化 1 mm 或 1 d 时产量的变化幅度,可由式(1)中的回归系数 a 除以研究期多年平均产量得到,单位为百分比; PI 的年际变化对产量的影响则由研究期 PI 的线性趋势与 SE 相乘得到,单位也为百分比。

2 结果与分析

2.1 强降水的空间分布

首先计算了安徽省各站点 11 种降水指数的多年均

表 3 2 个主成分在各降水指数的载荷

参数	P_{\max}	D_{50}	D_{100}	CWD	$P_{1\sim 2\text{d}}$	$P_{3\sim 4\text{d}}$	$P_{5\sim 6\text{d}}$	$P_{>6\text{d}}$	PCI	CI	P_{95}
PC_1	0.90	0.98	0.89	0.89	0.65	0.94	0.86	0.91	-0.14	-0.22	0.98
PC_2	0.33	0.06	0.34	-0.38	0.59	-0.08	-0.32	-0.22	0.94	0.85	-0.19

SPSS 基于原始指标和主成分的线性关系输出的各站点主成分得分(PCS_1 和 PCS_2)通过 ArcGIS 10 的反距离权插值更为直观的描述了研究区强降水的空间分布格局。图 2A 中研究 PCS_1 呈现出显著的由南向北递减的梯度变化,表明安徽南部的强降水极值要明显高于中部和北部地区。造成这种南北显著差异的原因可能有两个方面:一是由于南部地区山地较多,地形抬升作用易触发强降水;二是南部地区暖湿

值,将其构建的 11 列(11 个降水指标) \times 77 行(77 个站点)的矩阵导入统计软件 SPSS 19.0 中的主成分分析模块。由表 2—3 结果可知,第 1 主成分(PC_1)的方差贡献率最大(65.8%),加上第 2 主成分(PC_2)的方差贡献率,累积方差贡献率超过了 88%,且这 2 个主成分的特征根均大于 2,因此原指标群降维成的 PC_1 和 PC_2 这两个新的综合指标。由表 2 中载荷的高低来看, PC_1 主要表征强降水的频次、持续性、极值,而 PC_2 则表征了降水集中性。

表 2 降水指标群的主成分分析

主成分	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
PC_1	7.24	65.82	65.82
PC_2	2.49	22.68	88.50

气流活跃,当西太平洋副热带高压活动或冷空气扩散南下时易形成强降水^[17]。不同于 PCS_1 ,图 2B 中 PCS_2 的空间分布表明研究区的降水集中性呈现出由中部向南北两端减弱的态势,两个高值区域分别位于最北端和西南部。安徽北部位于暖温带半湿润季风气候区,雨季相对较短,因而降水集中性较高;安徽西南部位于大别山地地形降水区,其暴雨日比重较高,因而降水集中性也较强^[18]。

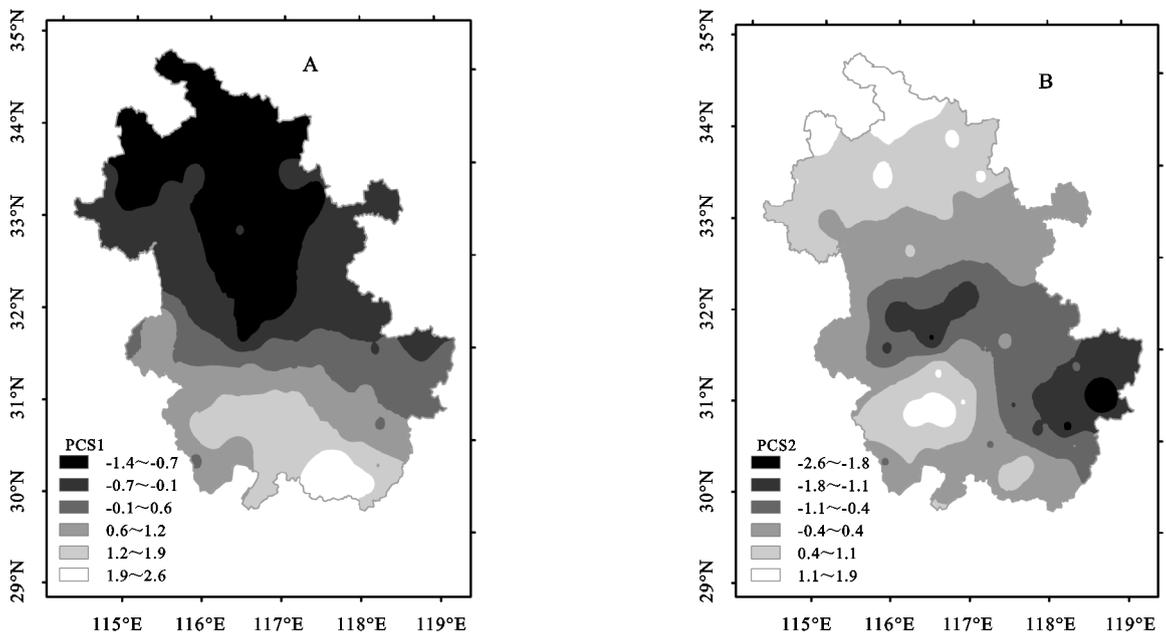


图 2 主成分得分 PCS_1 和 PCS_2 的空间分布

2.2 关键雨灾指标的筛选

表 2 中的降维结果反映了研究区不同类型降水指数之间存在着一定程度的共线性,指标群过于冗繁,因此简化并筛选出关键指标更有利于精准评估研究区雨灾的时空变化。表 4—5 中通过相关分析汇总了各站点某个降水指数与全省水灾受灾面积年际变

化的同步性,相关性越高,同步性越强,则该指数越能表征研究区的雨灾变化。可以发现无论是比较相关系数的均值还是呈显著正相关性站点的数量,极端雨天总降水量(P_{95})明显优于其他降水指数,其对指示研究区水灾具有极强的普适性,应作为表征雨涝灾害的关键指标加以深入分析和探讨。

表 4 各站点相关系数的平均值

P_{max}	D_{50}	D_{100}	CWD	$P_{1\sim 2d}$	$P_{3\sim 4d}$	$P_{5\sim 6d}$	$P_{>6d}$	PCI	CI	P_{95}
0.30	0.40	0.37	0.18	0.14	0.21	0.30	0.23	0.22	0.14	0.47

表 5 各站点呈现显著正相关性站点的数量

P_{max}	D_{50}	D_{100}	CWD	$P_{1\sim 2d}$	$P_{3\sim 4d}$	$P_{5\sim 6d}$	$P_{>6d}$	PCI	CI	P_{95}
20	50	44	16	19	15	34	26	25	15	57

2.3 关键指标 P_{95} 的时空演变

为了辨识关键指标 P_{95} 年际变化的空间差异,将各站点 P_{95} 逐年序列构建的 77 列(77 个站点)×45 行(45 a)的矩阵导入统计软件 SPSS 19.0 中进行主成分分析。图 3 中前 6 个主成分累积方差贡献率超过了 70%,且各主成分的特征根均大于 2。因此,77 个站点的 P_{95} 年际变化可识别出 6 个典型模态,特别是前 3 个主成分代表了研究区最突出的 3 种 P_{95} 变化型。图 4 中的载荷表征了不同模态与各站点 P_{95} 序列的相关性,可有效的将研究区划分为与 6 个主成分相对应的子区域,分别为区域 I(中南部),区域 II(中北部),区域 III(南部),区域 IV(西北角),区域 V(东北角),区域 VI(最北端)。分区结果与安徽省主要自然地形区的分布较吻合,特别是区

域 I、区域 II、区域 III 大致对应了沿江低地区、江淮隆丘区和皖南山区 3 个典型地形区,这进一步说明了复杂多样的地形地貌以及南北气候过渡性是造成研究区强降水变化区域差异的主要原因^[6]。

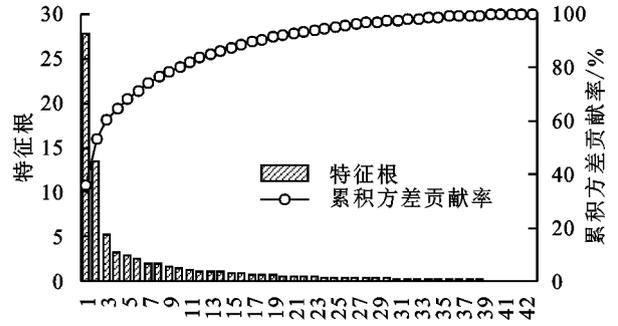


图 3 各站点 P_{95} 主成分分析的碎石图

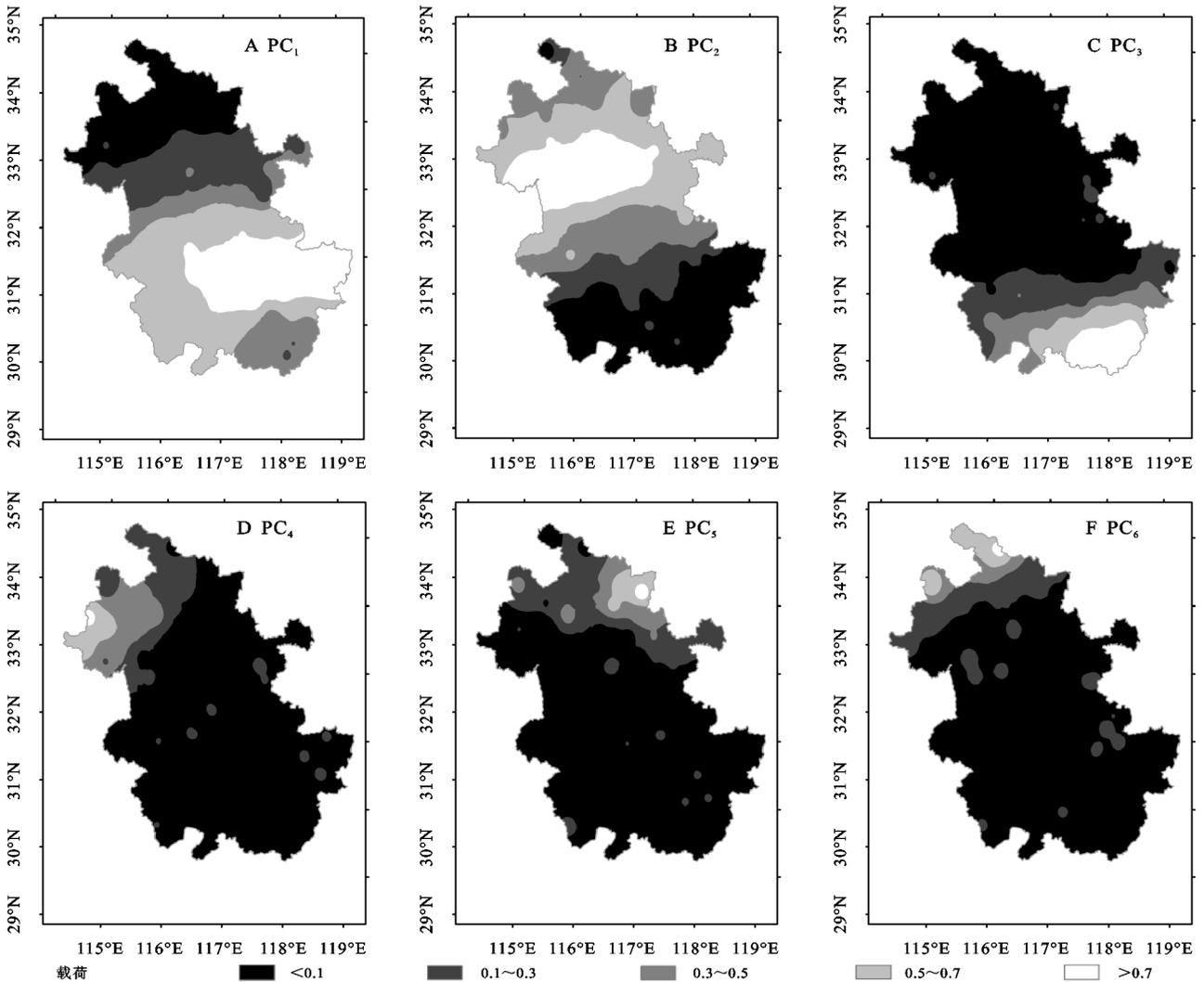
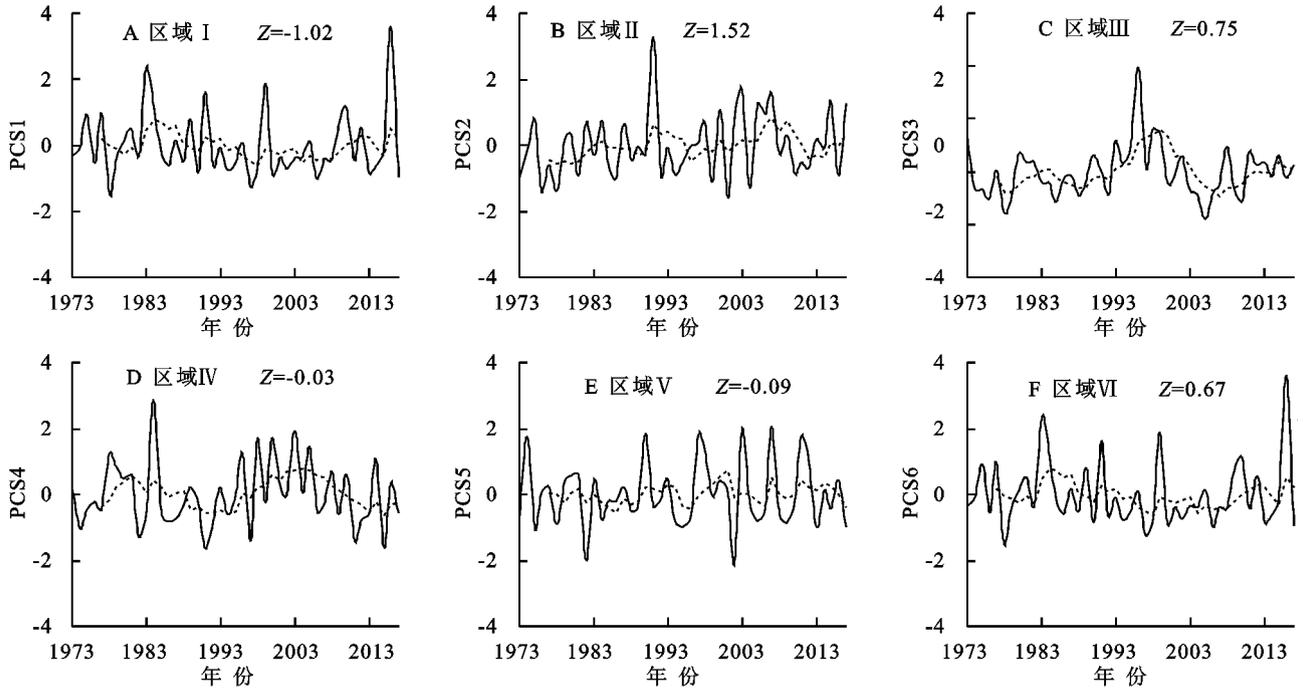


图 4 各主成分对应载荷的空间分布

图 5 中主成分得分序列直观地表征了各子区域近 45 a 的 P_{95} 演变过程。从 M-K 检验结果来看,各序列 1973—2017 年的变化趋势均没有通过显著性检验,其中区域 II 的 P_{95} 上升趋势较强,而区域 I 的 P_{95} 下降趋势较强。此外,各序列的五年滑动平均进一步刻画出了 P_{95} 的波动与振荡。由图 5 所示,区域 I, II, III, IV, VI 的 P_{95} 有着较明显的年代际转折,分别呈现出 $\uparrow \downarrow \uparrow, \uparrow \downarrow \uparrow$



注:灰色实线为 PCS;黑色虚线为 PCS 的 5 a 滑动平均;Z 为 MK 检验结果。

图 5 各子区域主成分得分序列的趋势检验

2.4 粮食产量波动对 P_{95} 的响应

在一阶差分预处理的基础上,计算了全省粮食总产量序列和各子区域 P_{95} 主成分得分序列的相关系数,以此来探求不同区域强降水变化对粮食生产安全的可能影响。由表 6—7 可以看出,PCS₂ 与产量的相关性明显高于其他分区,特别是 PCS₂ 与夏粮产量呈现出极显著的负相关性,这表明安徽省中北部区域 P_{95} 的年际变化对粮食产量波动有着显著的指示作用。 P_{95} 每增加 10 mm,夏粮及秋粮的总产量随之减少 0.7% 和 0.2%。由表 4 还可以发现近 45 a 安徽中北部 P_{95} 的增加趋势导致了夏粮及秋粮的总产量分别减产了 0.72% 和 0.26%。总体而言,安徽省强降水的年际变化对粮食生产是不利的,应加强重点区域 P_{95} 的监测及预报,以降低雨涝灾害导致的粮食损失。

表 6 安徽省粮食总产量与各分区 PCS 的相关分析

季节产量	PCS ₁	PCS ₂	PCS ₃	PCS ₄	PCS ₅	PCS ₆
夏粮产量	-0.205	-0.462**	-0.112	-0.251	0.018	-0.019
秋粮产量	-0.004	-0.244	0.067	-0.079	-0.178	-0.196

注:* * 表明通过了 0.01 显著性水平。

的变化型,而区域 V 的 P_{95} 则呈现出较强烈的年际波动。值得关注的是 2003 年以后区域 I, III 的 P_{95} 上升态势显著,而区域 II 的 P_{95} 在 2010 年后也呈现出较强的上升态势。东亚夏季风的年代际振荡可能是造成安徽省大部分地区近十几年来强降水增加的主要原因^[19]。1990 年代末以来,随着东亚夏季风的增强,雨带开始向北移动至长江以北地区,雨带北界超过 35°N,进而导致江淮流域夏季降水偏多^[20]。

表 7 安徽省粮食总产量对中北部 P_{95} 变化的响应

季节	P_{95} 每增加 10 mm 产量的变化/%	1973—2017 年 P_{95} 的线性趋势/(mm/10 a)	P_{95} 的变化趋势对产量的影响/%
夏粮	-0.7	11.00	-0.72
秋粮	-0.2	11.00	-0.26

3 结论

(1) 本研究计算并提取了安徽省 77 个气象站点的 11 种降水指数,在各指数多年均值的基础上,主成分分析指出研究区强降水的极值、频次、持续性均由南向北递减,而集中性则呈现出中部低、南北高的空间格局。

(2) 各站点不同类型降水指数与全省水灾受灾总面积的相关分析指出极端雨天总降水量(P_{95})与灾害年际波动的同步性最高,可作为表征雨涝灾害的关键指标。

(3) 基于主成分分析,安徽可以划分成中南部、中北部、南部、西北角、东北角、最北端这个 6 个呈现不同 P_{95} 年际变化特征的气候子区域。自 2003 年以来,中南部、中北部、南部地区的 P_{95} 呈现出较为显著

的增加趋势。

(4) 全省粮食总产量对中北部 P_{95} 的年度波动更为敏感,其每增加 10 mm 将导致夏粮及秋粮的总产量分别减少 0.7% 和 0.2%,特别是近 45 a 来中北部 P_{95} 的增加趋势给夏粮产量带来了 0.72% 的减产。

参考文献:

- [1] 袁祝香,杨雪艳,刘玉汐,等.松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征[J].水土保持研究,2019,26(3):199-203.
- [2] 孟清,高翔,白红英,等.1960—2015 年秦岭地区极端降水的时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(6):171-178.
- [3] 李运刚,胡金明,何大明,等.1960—2007 年红河流域强降水事件频次和强度变化及其影响[J].地理研究,2013,32(1):64-72.
- [4] 丁建隆,汪海欧,董召荣,等.1960—2013 年安徽极端降水特征研究[J].干旱气象,2016,34(2):252-260.
- [5] 谢五三,田红.近 50 年安徽省暴雨气候特征[J].气象科技,2011,39(2):160-164.
- [6] 聂兵,沈非,徐光来,等.安徽省近 50 年降水时空变化分析[J].安徽师范大学学报:自然科学版,2017,40(6):574-579.
- [7] 付伟,司红君,程智,等.安徽省极端降水事件的时空分布特征及其对农业生产的动态影响分析[J].中国农学通报,2017,33(15):117-123.
- [8] 徐慧,管蓓,薛艳,等.青海省近 50 年降水集中性的时空变化特征研究[J].水电能源科学,2015,33(3):6-9.
- [9] 邢万秋,王卫光,吴杨青,等.淮河流域降雨集中度的时空演变规律分析[J].水电能源科学,2011,29(5):1-5.
- [10] 唐亦汉,陈晓宏.近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J].地理科学,2015,35(4):476-482.
- [11] 洪美玲,何士华.1961—2010 年怒江流域降雨时空变化[J].水土保持研究,2019,26(3):248-252.
- [12] 张泰,张莉,彭佳红.基于主成分与支持向量机的邵阳县烟草产量预测[J].中国农学通报,2019,35(13):152-156.
- [13] 刘浩然,吴克宁,宋文,等.黑龙江粮食产能及其影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(7):164-170.
- [14] 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.
- [15] 孙科,娄伟平,刘昌杰.1961—2017 年浙江省夏季高温热浪时空变化特征[J].科技通报,2019,35(7):53-58.
- [16] 石晓丽,史文娇.极端高温对黄淮海平原冬小麦产量的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):259-269.
- [17] 杨明,宫宇,吴晓娜,等.安徽省夏季暴雨时空分布特征的成因分析[J].暴雨灾害,2015,34(2):143-152.
- [18] 黄勇,张红,冯妍.近 38 年安徽省夏季降水日数和强度的分布与变化特征[J].长江流域资源与环境,2012,21(2):157-167.
- [19] 周佰铨.基于大尺度环流型的我国江淮流域夏季降水变化归因及情景预估研究[D].北京:中国气象科学研究院,2018.
- [20] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,2018,42(3):533-558.
- [15] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(2): 191-207.
- [16] 张玲,安如,王喆.主/被动微波遥感数据融合的土壤湿度产品的 CDF 改进研究[J].科学技术与工程,2015,15(30):1-8.
- [17] 席承藩,朱克贵,李象榕,等.中国土种志(第二卷)[M].北京:中国农业出版社,1994.
- [18] 席承藩,朱克贵,李象榕,等.中国土种志(第四卷)[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [19] 席承藩,朱克贵,李象榕,等.中国土种志(第五卷)[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [20] 张莘莘.集合卡尔曼滤波方法在密云潮河流域洪水预报中的应用研究[D].北京:中国地质大学,2018.
- [21] 涂启玉,梅亚东. Matlab 遗传算法工具 GUI 率定马斯京根模型参数[J].水文,2008(5):33-35,70.
- [22] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning [M]. Boston: Addison-Wesley, 1989.
- [23] 吴凯,舒红.基于 CCI 资料与 EnKF 方法的单点土壤湿度同化[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):236-243.
- [24] 郭焘,于红博,马梓策,等.基于 MODIS 的土壤含水量时空变化及干旱化程度分析[J].水土保持研究,2019,26(4):185-189.
- [25] 刘苏峡,邢博,袁国富,等.中国根层与表层土壤水分关系分析[J].植物生态学报,2013,37(1):1-17.
- [26] Pan F F, Nieswiadomy M, Qian S. Application of a soil moisture diagnostic equation for estimating root-zone soil moisture in arid and semi-arid regions [J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 296-310.
- [27] Pan F F, Peters-Lidard C D, Sale M J. An analytical method for predicting surface soil moisture from rainfall observations [J]. Water Resources Research, 2003, 39(11): 1314-1334.
- [28] 方秀琴,任立良,李琼芳.近 40 年老哈河流域土地利用变化监测与分析[J].国土资源遥感,2012(2):125-131.

(上接第 127 页)