

孙莉娟,徐 阳,鲁德金,等. 江苏省单季稻生育期内极端气候事件的分区变化[J]. 江苏农业科学,2019,47(1):299-303.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.01.070

# 江苏省单季稻生育期内极端气候事件的分区变化

孙莉娟<sup>1</sup>, 徐 阳<sup>2</sup>, 鲁德金<sup>1</sup>, 黄 进<sup>3</sup>

(1. 安徽省人工影响天气办公室,安徽合肥 230031; 2. 安徽省农村综合经济信息中心/安徽省农业生态大数据工程实验室,安徽合肥 230031;  
3. 南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044)

**摘要:**利用江苏地区 52 个气象站点 1961—2012 年逐日最高温、最低温、降水资料及单季稻产量逐年数据,提取了单季稻生育期内(5—10 月)的 18 个极端气候指数进行气候分区,分析了不同子区域极端气候事件的变化及对产量的影响。基于各站点极端气候指数的多年均值,主成分和聚类分析的结果表明,江苏省可以划分为苏西北角、苏西北部、苏北部、苏西南部、苏南部和苏东南角 6 个气候子区域;生育期内极端气候指数的 M-K 趋势检验结果表明,多数子区域强降水事件的频次和强度有所加剧,而日最高温和日最低温的极值呈现出显著上升趋势,其中苏南地区的增湿增暖趋势尤为显著。生育期内极端气候指数与单季稻产量的相关分析表明,强降水是影响产量的主要气候要素,其中暴雨日数和极端雨天总雨量对产量的负效应最为显著,6 个子区域中苏西南部和苏南部的产量对降水波动更为敏感。

**关键词:**江苏省;极端气候指数;气候分区;单季稻

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3;S162.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2019)01-0299-05

近百年来,全球气候正经历着一次以气候变暖为主要特征的显著变化<sup>[1]</sup>。随着全球变暖,极端天气气候事件发生的频率或强度可能改变,高温热浪事件的强度、持续时间及频率会增加,干旱少雨地区旱情可能进一步加重,而湿润地区的强降水事件则可能加剧<sup>[2]</sup>。尽管极端气候事件是一种发生概

率较小的天气气候现象,但突发性和危害性强,对社会经济、食物供给、生态环境发展造成严重的损失,带来巨大负面影响,并且威胁人类生命与健康,因此引起了各国政府和学者的重视<sup>[3]</sup>。极端气候事件诱发的气象灾害已成为制约农业稳定生产的重要因素之一,因而引起了社会各界更为广泛的关注。江苏省是中国水稻重要主产区之一,全省以种植单季稻为主,水稻产量占全省粮食总产的 60% 左右,约占全国水稻总产的 10%,单产则常年稳居全国各主产省之首<sup>[4]</sup>。鉴于江苏省对于我国粮食安全的重要地位,探讨极端气候事件的时空变化对研究区气候变化背景下水稻种植的防灾减灾有着重要意义。本研究重点尝试了基于江苏省单季稻生育期内极端

收稿日期:2017-09-05

基金项目:安徽省气象局新技术集成项目(编号:AHXJ201706);江苏省高校自然科学研究面上项目(编号:16KJB170008);安徽省科技攻关项目(编号:1501031078)。

作者简介:孙莉娟(1988—),女,江苏泰州人,硕士,工程师,主要从事农业气象、气候变化的研究。E-mail:sljclimate@163.com。

[8] Fu Y Q, Yin L F, Zhu H Y, et al. Effects of pellet characteristics on L-lactic acid fermentation by *R. oryzae*: pellet morphology, diameter, density, and interior structure [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 174(6): 2019-2030.

[9] Liao W, Liu Y, Frear C, et al. A new approach of pellet formation of a filamentous fungus - *Rhizopus oryzae* [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(18): 3415-3423.

[10] Meyer V, Arentshorst M, Flitter S J, et al. Reconstruction of signaling networks regulating fungal morphogenesis by transcriptomics [J]. Eukaryotic Cell, 2009, 8(11): 1677-1691.

[11] Riquelme M. Tip growth in filamentous fungi: a road trip to the apex [J]. Annual Review of Microbiology, 2013, 67(1): 587-609.

[12] Brody S, Tatum E L. Phosphoglucosylase mutants and morphological changes in *Neurospora crassa* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1967, 58(3): 923-930.

[13] Bai D M, Zhao X M, Li X G, et al. Strain improvement of *Rhizopus oryzae* for over-production of L(+) - lactic acid and metabolic flux analysis of mutants [J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, 18(1): 41-48.

[14] Schmidt C G, Furlong E B. Effect of particle size and ammonium sulfate concentration on rice bran fermentation with the fungus *Rhizopus oryzae* [J]. Bioresource Technology, 2012, 123: 36-41.

[15] Xu Q, Li S, Fu Y, et al. Two-stage utilization of corn straw by *Rhizopus oryzae* for fumaric acid production [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6262-6264.

[16] Maas R H W, Springer J, Eggink G, et al. Xylose metabolism in the fungus *Rhizopus oryzae*: effect of growth and respiration on L(+) - lactic acid production [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2008, 35(6): 569-578.

[17] Pitkanen J P, Aristidou A, Salusjärvi L, et al. Metabolic flux analysis of xylose metabolism in recombinant *Saccharomyces cerevisiae* using continuous culture [J]. Metabolic Engineering, 2003, 5(1): 16-31.

[18] Wright B E, Longacre A, Reimers J. Models of metabolism in *Rhizopus oryzae* [J]. Journal of Theoretical Biology, 1996, 182(3): 453-457.

[19] Fu Y Q, Li S, Zhu H Y, et al. Removal of cadmium(II) by mycelial pellet of *Rhizopus oryzae* from aqueous solution [J]. Asian Journal of Chemistry, 2012, 24(11): 5313-5318.

气候事件的气候分区,并就各气候子区域极端气候事件的年际变化及对产量的潜在影响进行了深入探讨。

1 材料与方法

1.1 基本数据

气象数据来源于江苏省气象局提供的 52 个气象观测站 1961—2012 年的逐日最高气温、最低气温、降水数据,这 52 个站点的空间分布详见图 1。为保证各站点日数据的科学有效,采用加拿大气象研究中心研发的 RClimDex 软件对各站点气象要素资料进行质量控制和均一性检验,结果表明这 52 个站点的数据完整可靠。与此同时,在多年江苏省农村统计年鉴基础上,匹配、收集、整理了图 1 中各站点所在的 52 个典型单季稻种植区 1961—2012 年产量数据。

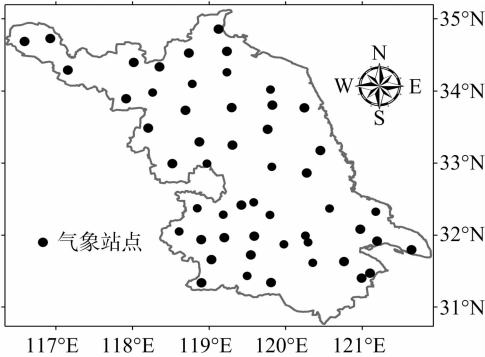


图1 江苏省52个气象站点的分布

1.2 极端气候指数的计算

世界气象组织(WMO)气候变化检测和指标专家系统(Expert Team on Climate Change Detection and Indices,简称ETCCDI)基于日降水、气温数据,定义了 27 个噪声低、显著性强的气候指数,并被广泛应用于评估区域极端气候事件发生频率和强度的演变规律<sup>[5]</sup>。鉴于此,本研究选取了其中 18 个极端气候指数(Extreme Climate Indices,简称 ECI),具体见表 1。降水事件的临界值设定为日降水量 1 mm,这样可以剔除降水资料中微量降水数据给研究带来的不确定性。鉴于江苏省单季稻全生育期大致为 5—10 月<sup>[6]</sup>,本研究提取并构建了 52 个气象站点生育期内各气候指数的逐年序列(1961—2012 年)。

1.3 气候分区

采用主成分分析和聚类分析相结合,是目前区域气候区划的重要手段<sup>[7]</sup>。SPSS 13.0 软件提供的 Principal Component Analysis(主成分分析)通过构造原变量的线性组合,从中筛选出少数几个新变量使他们含有尽可能多的原变量信息,进而实现原评价指标的降维和简化<sup>[8]</sup>。SPSS 13.0 软件提供的 K - Means Cluster(快速聚类法)先给定划分的聚类簇数目,并创建一个初始划分,然后采用迭代重定位技术,尝试通过对对象在划分间的移动来改进分类,进而得到最终聚类结果<sup>[9]</sup>。轮廓系数(Silhouette Coefficient,简称 SC)是 K - Means 聚类效果好坏的一种有效评价方式。SC 的计算如下:

$$SC = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)}。$$
 (1)

式中: $a_i$  为点  $i$  到其所属簇中所有其他点的平均距离; $b_i$  为点  $i$  到其所不在的任何簇的所有点的距离中的最小值;用单个簇

表 1 极端气候指数的定义

定义	指数	单位
总降水量	TP	mm
总降雨日数	DR	d
大雨日数(日降水量≥25 mm 的总天数)	D25	d
暴雨日数(日降水量≥50 mm 的总天数)	D50	d
1 d 最大降水量	MP1d	mm
连续 7 d 最大降水量	MP7d	mm
最长连续降水日数	CWD	d
极端雨天总降水量(日降水大于 95% 阈值的累计量)	P95	mm
日最高气温的最大值	TXx	℃
日最高气温的最小值	TXm	℃
冷昼日数(日最高气温小于 10% 阈值的总天数)	TX10	d
暖昼日数(日最高气温大于 90% 阈值的总天数)	TX90	d
暖持续日数(日最高气温大于 90% 阈值的最长持续天数)	WSDL	d
日最低气温的最大值	TMx	℃
日最低气温的最小值	TMm	℃
冷夜日数(日最低气温小于 10% 阈值的总天数)	TM10	d
暖夜日数(日最低气温大于 90% 阈值的总天数)	TM90	d
冷持续日数(日最低气温小于 10% 阈值的最长持续天数)	CSDL	d

内所有点的轮廓系数的平均值来衡量整个簇的聚类质量,平均值越高,则备选聚类方案的效果越理想<sup>[10]</sup>。本研究中以各气象站点 18 个极端气候指数的多年均值为研究对象,采用主成分分析和 K - Meas 聚类进行气候分区。完成分区后,各子区域气候指数和单季稻产量的年际变化序列由所属分区内各站点数据的算术平均值构建。与此同时,采用 WMO 推荐的非参数检验法“Mann - Kendall 趋势检验”(M - K 检验)来探讨各子区域极端气候指数的变化趋势<sup>[11]</sup>。

1.4 单季稻产量与 ECI 的相关分析

为了规避非气象因素对产量的影响,仅考虑气象因素与作物产量的相关性,对单季稻产量( $y$ )和某个子区域极端气候指数( $x$ )的逐年序列先进行一阶差分预处理<sup>[12]</sup>,即  $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ ;  $\Delta x_t = x_t - x_{t-1}$ 。式中: $\Delta y_t$  为产量差,  $\Delta x_t$  为 ECI 差,  $t$  为年份。此后,通过计算  $\Delta y_t$  与不同气候指数  $\Delta x_t$  之间的 person 相关系数,进而探讨各子区域单季稻产量波动与极端气候事件变化之间的可能联系。

2 结果与分析

2.1 基于 ECI 的气候分区

本研究首先计算了各站点水稻生育期内 18 个极端指数的多年均值,由此构建了 1 个 18 列×52 行的矩阵,并将其导入 SPSS 13.0 软件中的主成分分析模块进行运算。由表 2 可知,第 1 主成分(PC - 1)的方差贡献率最大(42.85%),加上第 2(PC - 2)和第 3 主成分(PC - 3)的方差贡献率,累积方差贡献率超过了 85%,且这 3 个主成分的特征值均大于 1,达到了提取主成分的要求。基于此,初始的 18 个极端气候指数可以降维成 PC - 1、PC - 2、PC - 3 这 3 个新的综合指标。依据表 3 中不同气候指数在各主成分上载荷值的高低来看,PC - 1 主要表征了 DR、D25、CWD、TXm、WSDL、TMx 和 TMm,可以作为研究区雨天及低温指数的综合评估指标;PC - 2 则

表 2 极端气候指数的总方差分析结果

主成分	特征根	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
PC - 1	5.91	42.85	42.85
PC - 2	4.22	28.46	71.31
PC - 3	1.82	14.14	85.46

注:PC - 1、PC - 2、PC - 3 分别表示第 1、第 2、第 3 主成分。下表同。

表 3 极端气候指数主成分分析的因子载荷

主成分	各极端降水指数在 3 个主成分上的载荷							
	TP	DR	D25	D50	MP1d	MP7d	CWD	P95
PC - 1	0.53	0.96 *	0.65 *	-0.38	-0.45	-0.12	0.61 *	0.28
PC - 2	0.76 *	-0.03	0.16	0.86 *	0.81 *	0.91 *	0.22	0.86 *
PC - 3	-0.37	-0.16	-0.28	-0.26	-0.13	-0.28	-0.29	-0.32

主成分	各极端气温指数在 3 个主成分上的载荷									
	TXx	TXm	TX10	TX90	WSDL	TMx	TMm	TM10	TM90	CSDL
PC - 1	0.00	0.93 *	-0.47	-0.12	0.86 *	0.69 *	0.91 *	-0.16	-0.50	-0.12
PC - 2	-0.41	-0.18	0.24	-0.06	-0.05	-0.28	-0.27	0.03	0.30	-0.18
PC - 3	0.88 *	-0.07	0.41	0.17	-0.07	0.47	0.04	0.05	-0.14	0.89 *

注:“\*”表示载荷值较高。

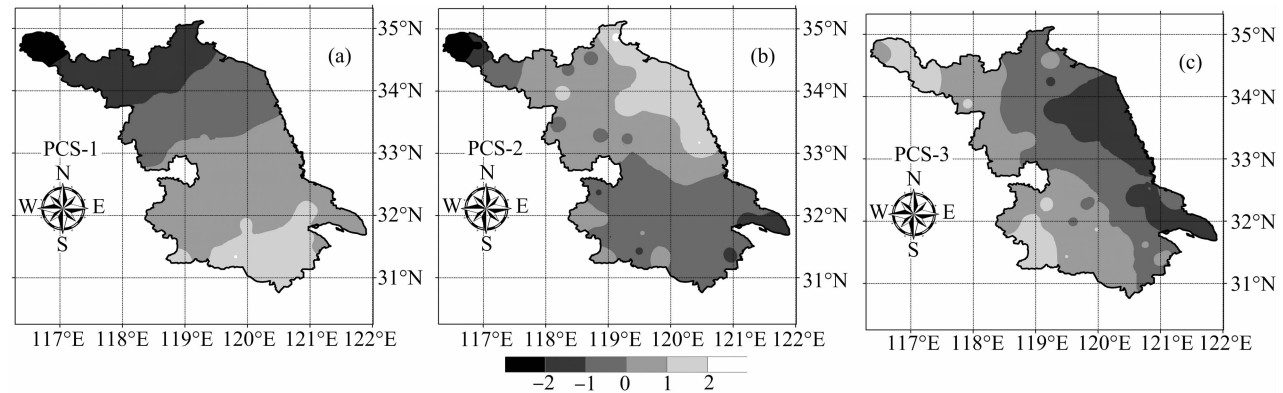


图2 江苏省极端气候指数主成分得分的空间分布

表明苏南地区的雨天日数及低温指数要高于苏北地区。尽管图 2 - b 中 PCS - 2 的变化梯度不是很明显,但依然可以发现 PCS - 2 的高值区主要集中在本省东北部,这表明江苏省东北部强降水事件的频次和强度较高,易于造成雨涝灾害。与 PCS - 1 和 PCS - 2 由南往北减少的分布特征不同,PCS - 3 则呈现出由西向东减少的态势。

依托各站点 PCS - 1、PCS - 2、PCS - 3 所构成的矩阵(3 列×52 行),采用 K - Means 聚类对江苏省进行气候分区,并采用轮廓系数法对分区结果进行评估。由图 3 可知,将江苏省划分为 6 个气候子区域最为合适,此时的轮廓系数(SC)的均值达到最大值。这 6 个子区域分别是苏西北角(Region I)、苏西北部(Region II)、苏北部(Region III)、苏西南部(Region IV)、苏南部(Region V)和苏东南角(Region VI)。其中,3 个子区域位于江苏北方大部,而另 3 个位于江苏南方大部。江苏属于亚热带和暖温带的过渡区,其中淮河以南的广大地区为北亚热带湿润季风气候区,而淮河以北的地区为南温带半湿润季风气候区<sup>[13]</sup>,因而呈现出显著的分区差异。

2.2 各子区域 ECI 的变化趋势

各子区域单季稻生育期内 ECI 的 M - K 检验结果见表

主要表征了 TP、D50、MP1d、MP7d 和 P95,可以作为研究区强降水事件频次及雨量的综合评估指标;而 PC - 3 主要表征了 TXx 和 CSDL。

与此同时,SPSS 13.0 中的相关模块利用多元线性回归法建立原始指标和所提取主成分的线性关系,进而计算出各站点的主成分得分值(PCS),以此可以评估研究区不同站点极端气候事件强度、频次、历时的数值差异。由图 2 - a 可知,研究区 PCS - 1 呈现出明显的由南向北递减的梯度变化,这

4. 苏北地区 3 个子区域的 TP 的 Z 值呈现出微弱的减少趋势,而苏南地区 3 个子区域 TP 的 Z 值呈现出微弱的增加趋势。全省多数子区域 DR、D25 和 CWD 的 Z 值均呈现出减少趋势,特别是苏西北部 DR 的 Z 值的减少趋势较为显著,这表明全省降水天数呈现出一定减少趋势。与之相反,多数子区域 D50、MP1d、MP7d 和 P95 的 Z 值呈现出增加趋势,特别是苏南部 D50 和 MP1d 的增加趋势通过 5% 显著性水平,这表明全省强降水事件的频次和强度有所增加。尽管各子区域降水指数的变化趋势不是很显著,但相较于苏北地区,苏南地区 D50、MP1d、MP7d 和 P95 的 Z 值明显较高,这表明该地区强降水事件加剧的态势更为剧烈。自 20 世纪 80 年代以来,热带中、东太平洋海温的年代际异常导致夏季风减弱、西太平洋副热带高压偏南和偏西,进而使得季风北上推进受阻,季风所携带的大量水汽在淮河以南过多滞留和辐合<sup>[14]</sup>,故江苏省大部特别是苏南的强降水事件呈增加态势。此外,由于苏南地区城市化水平较高,更复杂的大气成分易于形成凝结核,较强烈的城市热岛效应易于诱发对流性天气,而更复杂的城市下垫面阻碍效应使得降水滞留时间加长、强度增大<sup>[15]</sup>。这种城市雨岛效应也促使了苏南地区强降水事件加剧的趋势更为明显。

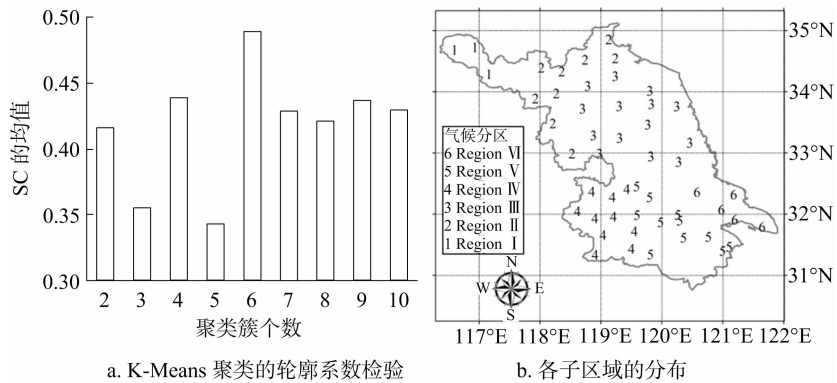


图3 基于各站点主成分得分的江苏省气候分区

与降水相比,研究区极端气温指数的变化更为显著,突出表现在生育期内日最高温和最低温极值的增强。从表 4 可以看出,全省各子区域的 TXx 和 TXm 的 Z 值均呈现出增加趋势,特别是苏南地区 3 个子区域的增加趋势大多通过了 5% 显著性水平,这表明全省 8 月份最高气温呈现较显著的上升态势。20 世纪 90 年代后期,夏季副高脊线位置偏北,西太副高控制我国东部地区,副高中心强度位于长江流域或江南,强而持续的西太副高控制是我国东部省份 8 月份强高温过程偏多的主要原因<sup>[16]</sup>。与 TXx 和 TXm 相比, TMx 和 TMm 的 Z 值

上升趋势更为显著,全省各子区域的上升趋势均通过了 5% 显著性水平,这表明全省 10 月份日最低气温呈现出显著的增加态势。我国秋季气温的年代际变化与喀拉海附近的海冰有着密切联系,一方面,夏季喀拉海附近的海冰减少造成秋季西伯利亚高压减弱,纬向环流加强,东亚大槽减弱,经向环流减弱,冷空气南下受阻,使得我国南方秋季增温显著;另一方面,9 月后的海水结冰过程释放出大量热量,使得从北极到欧亚大陆的低层大气中水汽含量增加,吸收长波辐射增多,导致大气逆辐射增加,进一步造成秋季增温<sup>[17]</sup>。

表 4 各分区 ECI 的 M-K 检验结果

子区域	各极端降水指数 M-K 检验的 Z 值							
	TP	DR	D25	D50	MP1d	MP7d	CWD	P95
Region I	-0.53	-1.31	-0.46	0.06	-0.62	-1.66 *	-0.71	-1.25
Region II	-0.42	-1.81 *	-1.36	0.55	0.64	0.56	-0.57	-0.09
Region III	-0.21	-1.17	-0.68	0.56	0.12	0.28	0.51	0.00
Region IV	0.28	-0.74	-0.11	0.75	1.03	1.10	-0.99	0.50
Region V	0.62	-1.05	-0.43	2.23 **	1.97 **	1.60	-1.40	0.97
Region VI	0.53	-0.43	0.14	0.58	1.10	1.52	-0.13	0.54

子区域	各极端气温指数 M-K 检验的 Z 值									
	TXx	TXm	TX10	TX90	WSDL	TMx	TMm	TM10	TM90	CSDL
Region I	0.32	1.07	0.01	-0.76	-0.46	3.56 **	3.47 **	1.24	0.10	1.10
Region II	0.38	1.53	-0.64	0.51	-1.36	2.34 **	3.41 **	0.34	1.01	-0.58
Region III	1.46	1.56	0.18	0.54	-0.68	2.08 **	3.05 **	1.39	0.84	-0.65
Region IV	2.60 **	1.85 *	0.80	3.12 **	-0.11	3.44 **	3.99 **	-0.86	-0.18	-0.88
Region V	4.17 **	2.66 **	-0.05	0.43	-0.43	4.13 **	4.28 **	-0.12	-0.33	-1.12
Region VI	3.35 **	2.77 **	0.55	-0.04	0.14	2.67 **	3.49 **	-2.08 **	0.59	-1.33

注:“\*”表示趋势通过了 10% 显著性水平;“\*\*”表示趋势通过了 5% 显著性水平。

2.3 各子区域单季稻产量与 ECI 的相关性分析

在一阶差分预处理的基础上,计算了各子区域单季稻产量与生育期内极端气候指数的相关系数,用来探求极端气候事件变化与单季稻产量的可能联系。从表 5 可以看出,全省各子区域单季稻产量与不同降水指数均呈现出负相关性。同时在每个子区域均可以发现,产量与某些降水指数的负相关性通过了显著性水平。这表明极端降水事件对全省单季稻产量有着明显的负效应。此外,单季稻产量与极端降水指数的负相关性还有着一定的地域差异。在苏西南部和苏南部,与产量在 1% 显著性水平上负相关的降水指数达到或超过了 6 个。其次,在苏西北部和苏北部,与产量在 1% 显著性水平上负相关的降水指数也达到或超过了 3 个。而在苏西北角和苏东南角,极端降水对产量的负效应相对较弱,与产量显著负相

关的降水指数不超过 3 个。总体而言,苏南大部地区的单季稻种植对极端降水的负效应更为敏感。对产量和降水指数的相关系数进一步比较发现,在苏西北部、苏北部、苏西南部、苏南部这 4 个地区,产量与 P95 的负相关性最为显著;而在苏西北角和苏东南角,产量与 D50 的负相关性最为显著。与降水指数相比,极端气温事件对单季稻产量的负效应并不显著,仅仅在江苏北部 3 个子区域发现产量与 2 个日最高温极端指数 TX90 和 WSDL 显著负相关,而在江苏南部 3 个子区域没有发现极端气温指数与产量显著相关。因此,苏北地区水稻产量对极端高温事件更为敏感。综上所述可以看出,强降水是制约江苏省单季稻生产的主要极端气候事件,生育期内的 D50 和 P95 应该作为指示单季稻产量波动的关键气象指标加以重视和关注。

表 5 各子区域单季稻产量与极端气候指数的相关性

子区域	产量与各极端降水指数的相关性							
	TP	DR	D25	D50	MP1d	MP7d	CWD	P95
Region I	-0.37 **	-0.28	-0.15	-0.38 **	-0.12	-0.18	-0.15	-0.27
Region II	-0.44 **	-0.45 **	-0.48 **	-0.25	-0.24	-0.26	-0.31 *	-0.50 **
Region III	-0.37 **	-0.33 *	-0.31 *	-0.30 *	-0.17	-0.27	-0.45 **	-0.50 **
Region IV	-0.42 **	-0.36 *	-0.16	-0.40 **	-0.44 **	-0.39 **	-0.44 **	-0.51 **
Region V	-0.41 **	-0.42 **	-0.20	-0.42 **	-0.47 **	-0.41 **	-0.42 **	-0.50 **
Region VI	-0.32 *	-0.25	-0.09	-0.41 **	-0.27	-0.28	-0.22	-0.33 *

子区域	产量与各极端气温指数的相关性									
	TXx	TXm	TX10	TX90	WSDL	TMx	TMm	TM10	TM90	CSDL
Region I	-0.09	0.10	-0.05	-0.32 *	-0.15	-0.17	-0.31	0.19	-0.03	-0.02
Region II	0.02	-0.13	0.09	-0.13	-0.48 **	-0.11	-0.06	0.26	-0.28	0.05
Region III	-0.03	-0.25	0.01	0.02	-0.31 *	-0.15	-0.21	0.05	0.03	0.12
Region IV	0.02	0.17	-0.01	0.13	-0.16	-0.13	-0.01	-0.13	0.10	0.01
Region V	0.27	-0.01	0.11	0.12	-0.20	0.11	-0.08	0.12	-0.13	-0.07
Region VI	0.19	-0.06	-0.18	-0.15	-0.09	0.11	-0.19	0.13	0.16	0.18

注：“\*”表明示相关性通过了 5% 显著性水平；“\*\*”表示相关性通过了 1% 显著性水平。

3 结论

本研究计算提取了江苏省各气象站点单季稻生育期内的极端气候指数,在诸多指数多年均值的基础上,运用主成分分析和聚类分析对全省进行了气候区划,分区结果表明,江苏省可以划分成苏西北角、苏西北部、苏北部、苏西南部、苏南部和苏东南角 6 个气候子区域。

对各子区域单季稻生育期内的极端气候指数采用 M-K 趋势检验发现,全省总降雨天数及最长持续降水天数均呈减少趋势,而 1 d 最大降水量和连续 7 d 最大降水量等表征极端降水事件频次和强度的指数均呈现增加趋势,其中苏南地区的增加趋势更为明显。研究区极端气温事件加剧的趋势极为显著,突出表现在各子区域单季稻生育期内日最低温的最大值和最小值均呈现出显著增加趋势。此外,苏南地区单季稻生育期内日最高温的最大值和最小值也呈现出显著增加趋势。总体而言,苏南地区单季稻生育期内增湿增暖趋势较为显著。

对单季稻产量与生育期内的极端气候指数进行相关分析,结果表明,降水指数与各子区域的单季稻产量均有显著的负相关性,尤其是在苏西南部和苏南部这 2 个区域,极端降水事件对产量的负效应更为显著。诸多降水指数中,暴雨日数和极端雨天总降水量这 2 个指标与产量的关系更为密切,可以作为研究区水稻雨涝灾害风险区划的评估指标加以使用。与极端降水事件相比,极端气温事件的负效应不是很显著,仅在苏北地区发现产量与暖昼日数、暖日持续天数这 2 个指数有显著负相关性。总体而言,生育期内的极端降水事件应作为研究区重要的水稻气象灾害加以监测与评估。

参考文献:

[1] 蔡新玲,吴素良,贺 皓,等. 变暖背景下陕西极端气候事件变化分析[J]. 中国沙漠,2012,32(4):1095-1101.  
[2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge:Cambridge University Press,2014.

[3] 李 洋,王玉辉,吕晓敏,等. 1961—2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J]. 资源科学,2015,37(12):2501-2513.  
[4] 仉 军. 近 30 年江苏省水稻生产的时空变化与效益分析[D]. 扬州:扬州大学,2013.  
[5] 赵翠平,陈 岩,王卫光,等. 黄河流域近 50 年极端降水指数的时空变化[J]. 人民黄河,2015,37(1):18-22.  
[6] 谭孟祥,景元书,曹海宁. 江苏省一季稻生长季气候适宜度及其变化趋势分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):349-353.  
[7] Huang J,Chen X,Zhou L,et al. Statistical analysis of the relationship between climate - induced maize yield and rainy - season precipitation across Inner Mongolia,North China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2017,129(3/4),1145-1156.  
[8] 屈家安,曹 杰. 主成分分析与聚类分析在青岛夏季气温变化研究中的应用[J]. 大气科学学报,2014,37(4):517-520.  
[9] 吴洪颜,商兆堂,程 婷,等. 基于聚类分析的江苏冬小麦农业气候区划研究[J]. 中国农学通报,2012,28(26):119-124.  
[10] 安计勇,高贵阁,史志强,等. 一种改进的 K 均值文本聚类算法[J]. 传感器与微系统,2015,34(5):130-133.  
[11] 殷方圆,殷淑燕. 近 51 年长江中下游与黄河中下游地区夏季降水变化对比[J]. 水土保持通报,2015,35(1):317-322.  
[12] 朱 珠,陶福禄,类运生,等. 1981—2009 年江苏省气候变化趋势及其对水稻产量的影响[J]. 中国农业气象,2012,33(4):567-572.  
[13] 包云轩,孟翠丽,申双和,等. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J]. 地理学报,2011,66(5):599-608.  
[14] 黄荣辉,顾 雷,陈际龙,等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学,2008,32(4):691-719.  
[15] 张尚印,张海东,徐祥德,等. 我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析[J]. 高原气象,2005,24(5):829-835.  
[16] 夏 露,张 强,孙 宁,等. 1960—2012 年江苏省气候变化特征[J]. 冰川冻土,2015,37(6):1480-1489.  
[17] 王 迪,何金海,祁 莉,等. 全球变暖减缓背景下欧亚秋冬温度变化特征和原因[J]. 气象科学,2015,35(5):534-542.