

# 江苏省1961—2012年干湿时空变化及 对单季稻产量的潜在影响

徐慧<sup>1</sup>, 张方敏<sup>2</sup>, 黄进<sup>2</sup>

(1. 南京市环境保护科学研究院, 南京 210013; 2. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

**摘要:** 利用江苏省地区52个气象站1961—2012年逐月降水量资料及单季稻产量逐年数据, 计算了1个月尺度的标准化降水指数(SPI), 分析了研究区干湿变化与产量的潜在联系。全省尺度上单季稻生育期各月SPI的趋势检验结果表明江苏省6—8月3个月呈现变湿润趋势, 其中8月份偏涝态势尤为显著; 而5月、9月、10月3个月呈现变干旱趋势, 其中9月份偏旱态势尤为显著。站点尺度上各月干湿变化趋势与全省尺度的结果基本一致, 值得关注的是8月呈显著变湿和9月呈显著变干的站点大都分布在苏南地区。全省尺度上单季稻产量与生育期各月SPI的相关分析结果表明在7—10月4个月中, 江苏省气候越湿润, 则对单季稻产量越不利。站点尺度上的结果表明江苏省单季稻产量与SPI的相关性有着明显的地域差异, 其中苏南地区的单季稻种植对气候干湿变化更为敏感, 特别是7月、8月、10月3个月偏多的雨涝事件将会显著影响苏南地区的产量。

**关键词:** 干湿变化; 江苏省; 单季稻; 标准化降水指数

中图分类号: P426.615

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0250-05

## Spatiotemporal Variation of Dryness/Wetness in Jiangsu Province During 1961—2012 and Its Possible Impacts on Single-Crop Rice Yield

XU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Fangmin<sup>2</sup>, HUANG Jin<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210013, China;

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

**Abstract:** Based on the data of monthly precipitation and single-crop rice yield at 52 meteorological stations in Jiangsu during 1961—2012, the Standardized Precipitation Indexes (SPI) on the 1-month scale were calculated, and the possible relationship between dryness/wetness variability and rice yield was explored. On the provincial scale, the trend test for the SPI in different month during growing periods of single-crop rice indicated that June, July, August had wetting tendency, and the wetting tendency in August was more obvious; however, May, September, October had drying tendency, and the wetting tendency in September was more obvious. The changing tendency of dryness/wetness variability on the station scale was consistent with the results on the provincial scale, and it should be pointed out that the stations with significant wetting tendency in August and drying tendency in September were distributed in south Jiangsu. On the provincial scale, the correlation analyses between the of single-crop rice yield and SPI in different months during growing periods indicated that the wetter the climate in July, August, September, and October was, the lower the yield was. The results on the station scale indicated that the correlation between the single-crop rice yield and SPI had obvious regional difference, the single-crop rice in south Jiangsu was more sensitive to dryness/wetness variability, and the abundant rainfall events would have obvious impacts on the yield.

**Keywords:** dryness/wetness variability; Jiangsu; single-crop rice; SPI

水稻作为我国重要的粮食作物, 在气候变化背景下, 其生长发育及最终产量受各类极端气候事件影响显著。极端气候事件诱发的农业气象灾害已成为制

约水稻稳定生产的重要因素之一, 引起了政府和相关科研机构的广泛重视。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 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>[1]</sup>。鉴于江苏省水稻在全省粮食生产及全国水稻生产中的重要地位,探讨极端气候事件的时空变化及对水稻产量的潜在影响得到了许多学者的关注。近年来,相关研究主要集中水稻高温热害和低温冷害<sup>[2-4]</sup>,而关于降水波动引发的极端干湿事件还少有人问津。目前,评估区域气候干湿状况的指标主要为降水距平百分率、标准化降水指数(SPI)、Z 指数、综合气象干旱指数(CI)、Palmer 干旱指数等<sup>[5-6]</sup>。其中,标准化降水指数(SPI)使用过程中资料要求低,操作便捷,运算稳定,因而在我国不同地区得到广泛和有效的应用<sup>[7]</sup>。本研究以 SPI 指数为依托,分析了江苏省近 50 a 的干湿时空变化,同时探讨干湿波动对单季稻产量的潜在影响。这将为制定气候变化背景下江苏省水稻种植适应政策提供有力的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 基本数据

本研究所用的气象数据来源于江苏省气象局提供的本省 52 个气象观测站 1961—2012 年的逐月降水数据,这 52 个站点的空间分布具体见图 1。与此同时,本研究以多年江苏省农村统计年鉴为依托,匹配、收集、整理了图 1 中各站点所在的 52 个单季稻种植区 1961—2012 年产量数据。

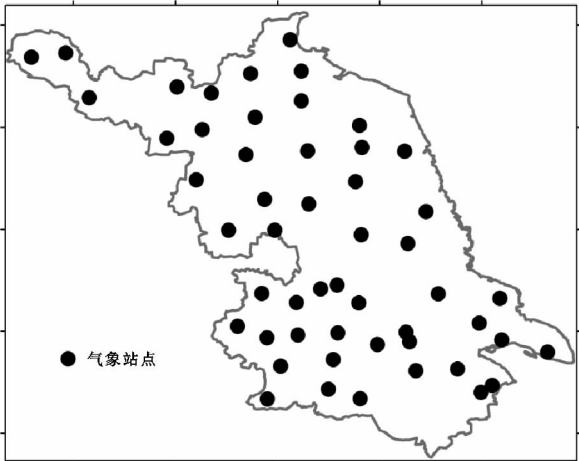


图 1 江苏省 52 个气象站的分布

1.2 标准化降水指数

SPI 是在计算出逐月降水量伽玛分布概率后,由正态标准化得到,再经降水累积频率分布来划分出表 1 中不同强度的干湿事件<sup>[8]</sup>。这样能够消除降水量在时空分布上的差异,使 SPI 能够用于评估于不同区域、不同时间尺度的干湿情况<sup>[9]</sup>。计算短时间尺度(如 1 个月、3 个月、6 个月)的 SPI 可以用于监测短时

期内的水分亏盈情况,进而反映农作物在生长期的水分供需情况,其中 1 个月尺度的 SPI 更是被广泛用于探求农作物生长对气候干湿波动的响应<sup>[10]</sup>。基于此,本文计算了 1 个月尺度下的 SPI 逐月序列,并从中分别提取了 5—10 月 6 个月(单季稻大致生育期)的 SPI 逐年序列用于研究分析。于此同时,采用 Mann-Kendall 趋势检验法探求不同月份干湿变化情形。

1.3 单季稻产量与 SPI 的相关分析

为了剔除非气象因素对产量的影响,仅考虑气象因素与产量的相关性,对单季稻产量( $y_t$ )和干湿指标 SPI ( $x_t$ )资料先进行一阶差分预处理<sup>[11]</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 SPI 差,  $t$  为年份。此后,通过计算  $\Delta y_t$  与不同月份的  $\Delta x_t$  之间的 person 相关系数,进而探讨研究区产量波动与气候干湿变化之间的可能联系。

表 1 SPI 干湿事件等级分类

干旱事件	等级	雨涝事件	等级
$SPI \leq -2.0$	极旱	$SPI \geq 2.0$	极涝
$-2.0 < SPI \leq -1.50$	重旱	$1.50 \leq SPI < 2.0$	重涝
$-1.50 < SPI \leq -1.0$	中旱	$1.0 \leq SPI < 1.50$	中涝

2 结果与分析

2.1 全省尺度上江苏干湿年际变化

首先,对研究区 52 个气象站 1961—2012 年逐月降水量进行算术平均,得到近 52 a 全省尺度上的逐月降水序列。在此基础上,计算出 1 个月时间尺度上江苏省标准化降水指数(SPI1)的逐月序列(共计 624 个月),并依据 SPI 的等级分类标准从中提取出不同强度干湿事件的发生频次。结果表明,单季稻生育期内,不同等级干湿事件的发频次呈现出明显的年际变化。由图 2A 和 2D 可以看出,研究区极旱事件主要出现在 60 年代和 90 年代之后,而极涝事件主要出现在 60 年代和 80 年代。研究区重旱事件主要发生在 80 年代之前,而进入 90 年代后发生频次较少(图 2B)。与重旱事件频次逐年减少相比,重涝事件在 80 年代之后发生的频次较多(图 2E)。中旱和中涝事件频次的年际差异不是很明显,在各个年代均有发生(图 2C 和 2F)。

在全省尺度逐月 SPI 序列基础上,分离出不同月份 SPI 逐年序列,进而分析不同月份江苏省干湿的年际变化。由图 3B,3C,3D 可以看出,6 月、7 月、8 月的 SPI 呈现增加趋势,这表明研究区夏季总体呈现更湿润的趋势。特别是在 8 月份,研究区偏涝的趋势更为明显,5 a 滑动平均结果表明 8 月份的 SPI 自 1970 年代后期呈现出显著增加的态势。我国夏季降水与

东亚夏季风强度的关系密切,自20世纪70年代中后期至今,热带中、东太平洋海温的年代际异常变化引起了东亚夏季风减弱、西太平洋副热带高压偏南、偏西,进而导致亚洲季风北上受阻,季风所携带的大量水汽在长江流域稳定滞留和辐合,故包括江苏省在内中下游多数省份夏季降水呈现增加态势<sup>[12]</sup>。反观图3A,3E,3F,5月、9月、10月的SPI呈现减少趋势,这表明研究区春末和秋季总体呈现更干旱的趋势。特别是在9月份,研究区偏旱的趋势更为明显,5 a滑动

平均结果表明9月份的SPI自1990年代后期大都呈现为负值状态。我国东南地区秋季降水异常主要受东太平洋型El Niño (EP-El Niño) 和中太平洋型El Niño 两类El Niño (CP-El Niño) 事件生消交替的影响,当处于EP-El Niño 主导年,秋季降水较丰沛;而处于处于CP-El Niño 主导年,秋季降水则偏少<sup>[13]</sup>。自20世纪90年代以来,EP-El Niño 事件的频次明显减少,而CP-El Niño 事件的频次显著增加,故我国东南部诸多省份秋季旱呈增加态势<sup>[14]</sup>。

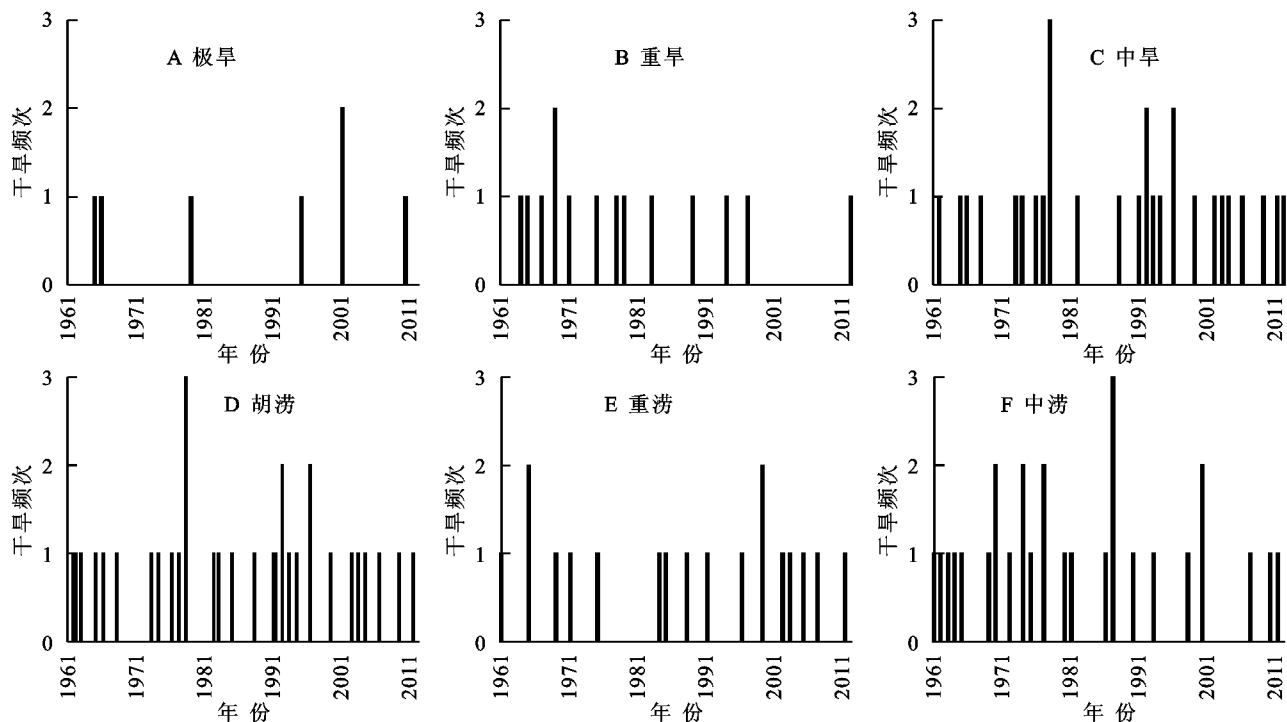


图2 全省尺度上单季稻生育期内不同等级干湿事件频次的年际变化

## 2.2 站点尺度上江苏干湿时空变化

图4给出了各站点不同月份SPI变化趋势的空间分布。对比发现,站点尺度上各月干湿变化情形与图3中全省尺度的结果相一致。在5月份,超过70%站点的SPI呈现出减少趋势,特别是位于东南角的少数站点呈现出显著的变湿趋势(图4A)。在6月,7月,8月份,绝大多数站点的SPI呈现出增加趋势。特别是在8月份,近30%的站点呈现出显著变湿的趋势,而这些站点基本上分布在苏南地区(图4D)。反观6月,7月份,呈现显著变湿趋势的站点很是稀少(图4B和4C)。在9月,10月份,所有站点的SPI均呈现出减少趋势。特别是在9月份,近30%的站点呈现出显著变干的趋势,而这些站点主要分布在苏南地区(图4E)。反观10月份,呈现显著变干趋势的站点较少,且基本分布在苏北地区(图4F)。总体而言,相较江苏北部地区,气候变化背景下江苏南部地区的干湿变化更为显著,8月偏湿和9月偏旱是其突出的特征。江苏属于亚热带和暖温带的过渡区,大致说来,淮河以南

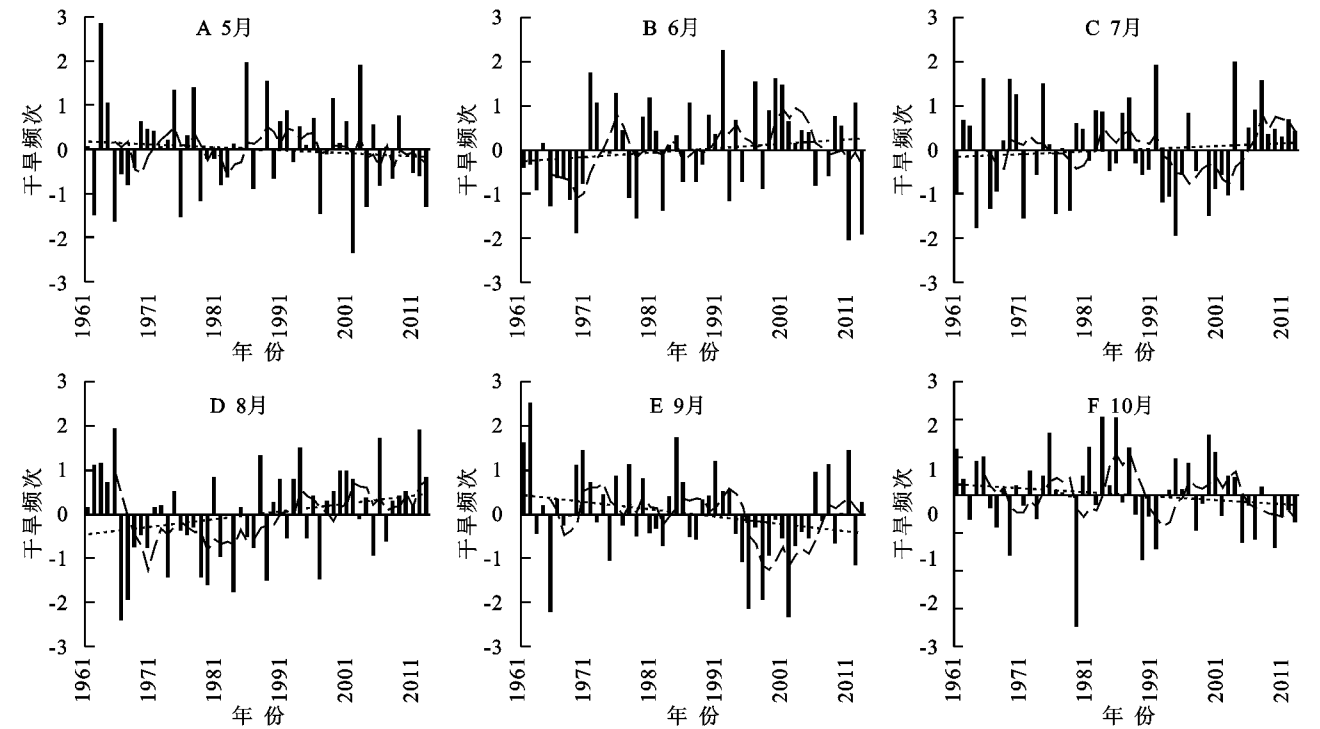
的广大地区属北亚热带湿润季风气候区,淮河以北的地区为南温带半湿润季风气候区<sup>[15-16]</sup>。因此,苏南和苏北的干湿变化有一定的差异。

## 2.3 单季稻产量与不同月份SPI的相关性分析

在一阶差分预处理的基础上,计算了全省尺度和站点尺度上单季稻产量与生育期各月SPI的相关系数,用来探求研究区干湿变化对单季稻产量的可能影响。由表2可以发现,全省尺度下单季稻产量与7—10月4个月的SPI呈负相关,而与5月,6两月的SPI呈正相关。这表明在7—10月4个月中,江苏省气候越湿润,则对单季稻产量越不利,过多的雨涝事件会导致单季稻收成的减产。分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、灌浆结实期是影响单季稻产量最终形成的4个关键阶段,而这4个阶段大致分布在7—10月这4个月份中<sup>[17-18]</sup>。在此期间,强降水引发的淹渍及洪涝会对单季稻生长产生直接的不利影响;此外,连续阴雨天气带来的低温寡照会延缓单季稻生育进程,同时诱发水稻病虫害事件的发生,进而间接影响单季稻最终产量的形成<sup>[19-20]</sup>。在单季稻生

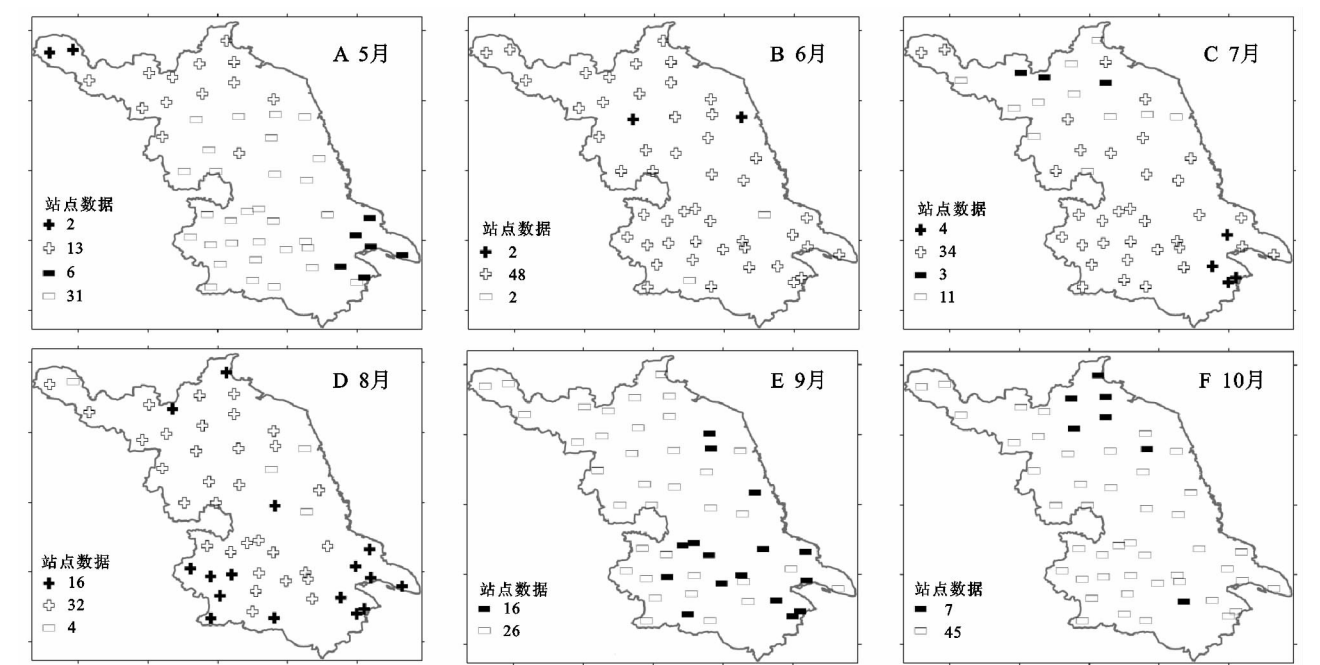
育期的 6 个月中,7 月、8 月两月 SPI 与产量的相关性通过了显著性检验。这表明单季稻产量对 7 月、8 两月的干湿波动更为敏感,且发生在 7 月、8 两月的雨涝事件对

产量有着更为显著地的负效应。基于此,利用 SPI 加强对关键月份干湿波动进行监测及预报,将有利于维护江苏省水稻生产安全。



注:图中灰色柱状图表征 SPI 序列;黑色虚线及回归方程为 SPI 序列的线性趋势;黑色实线为 SPI 序列的五年滑动平均值。

图 3 全省尺度上单季稻生育期各月 SPI 的年际变化



注:实心加号表征显著增加趋势;空心加号表征非显著增加趋势;实心减号表征显著减少趋势;空心减号表征非显著减少趋势。

图 4 江苏省近 52 a 单季稻生育期各月 SPI 变化趋势的空间分布

表 2 全省尺度下单季稻产量与各月 SPI 的相关性

参数	5 月 SPI	6 月 SPI	7 月 SPI	8 月 SPI	9 月 SPI	10 月 SPI
单季稻产量	0.136	0.099	-0.362*	-0.309*	-0.146	-0.258

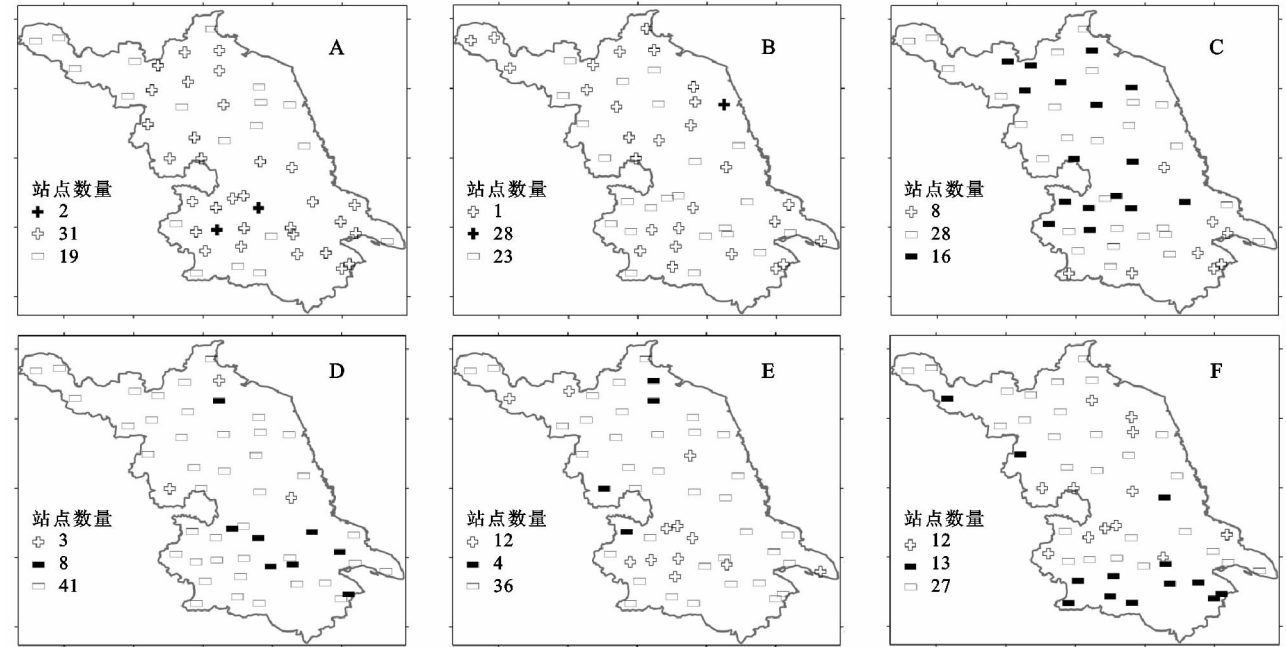
注:\* 指在 0.05 水平上显著相关。

图 5 给出了各站点不同月份 SPI 与单季稻产量相

关性的统计结果。在 5 月,6 月,超过 55%站点的 SPI 与单季稻产量呈现出正相关性,这表明在江苏多数地区 5 月,6 月份气候偏湿润将有利于单季稻的生长,但呈现显著正相关的站点寥寥无几(图 5A 和 5B)。在 7—10 月,超过 55%站点的 SPI 与单季稻产量呈现出负相关性,这

表明在江苏多数地区 7—10 月份气候偏湿润将不利于单季稻的生长。从呈现显著负相关站点的数量来看,7 月雨涝事件对单季稻产量的负效应最为显著,其次为 10 月,再次为 8 月。在 7 月,近 30%站点的 SPI 与单季稻产量呈现出显著显著负相关,而这些站点大都分布在苏北和苏中地区(图 5C)。在 10 月,25%站点的 SPI 与单季稻产量呈现出显著负相关,而这些站点大都分布在苏南地区(图 5F)。在 8 月,约 15%站点的 SPI

与单季稻产量呈现出显著负相关,而这些站点主要集中在苏南地区(图 5D)。总体而言,江苏省单季稻产量与 SPI 的相关性有着明显的地域差异,苏南地区的单季稻种植对气候干湿变化更为敏感,特别是 7 月、8 月、10 月 3 个月偏多的雨涝事件将会严重影响产量。基于此,利用关键月份的 SPI 为评价指标,并对研究区水稻生产进行雨涝灾害风险区划,将会为江苏省水稻生产防灾减灾提供有力支撑。



注:实心加号表征显著正相关;空心加号表征非显著正相关;实心减号表征显著负相关;空心减号表征非显著负相关。

图 5 站点尺度上单季稻产量与各月 SPI 相关性的空间分布

### 3 结论

(1) 全省尺度上单季稻生育期各月 SPI 的线性趋势检验结果表明在 6—8 月 3 个月份中,江苏省呈现变湿润趋势,其中 8 月份的偏湿趋势较为明显;而在 5 月,9 月,10 月 3 个月份中,江苏省呈现变干旱趋势,其中 9 月份的偏旱趋势较为明显。空间尺度上不同月份各站点的干湿变化趋势进一步佐证了全省尺度的结果,值得关注的是 8 月呈显著变湿和 9 月呈显著变干的站点都集中在苏南地区。

(2) 全省尺度和站点尺度上单季稻产量与生育期各月 SPI 的相关分析表明研究区干湿变化对单季稻产量有着一定的影响。单季稻产量与 7—10 月 4 个月的 SPI 呈负相关,江苏省气候越湿润,则对单季稻产量越不利,过多的雨涝事件会导致单季稻收成的减产。站点尺度上的相关分析结果表明单季稻产量对干湿波动的响应有着明显的地域差异,其中苏南地区的单季稻种植对气候干湿变化更为敏感,特别是 7 月、8 月、10 月 3 个月偏多的雨涝事件将会显著影响苏南地区的产量。

#### 参考文献:

[1] 卮军. 近 30 年江苏省水稻生产的时空变化与效益分析[D]. 江苏扬州:扬州大学,2013.

[2] 朱珠,陶福禄,娄运生. 1980—2009 年江苏省气温变化特征及水稻高温热害变化规律[J]. 江苏农业科学, 2013,41(6):311-315.

[3] 任义方,高苹,王春乙. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报,2010,19(5):101-107.

[4] 尹思慧,徐蒋来,朱利群. 近 30 年江苏省水稻抽穗灌浆期低温冷害时空变化及对水稻产量的影响[J]. 江西农业学报,2016,28(5):7-13.

[5] 任建成,现在武,郑宝枝. 基于 SPI 的近 30 年黄河三角洲地区旱涝时空特征[J]. 水土保持研究,2016,23(1):268-271.

[6] 胡彩虹,王金星,王艺璇,等. 水文干旱指标研究进展综述[J]. 人民长江,2013(7):11-15.

[7] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):523-529.

[8] 张启旺,张吉,周涛. 鄱阳湖干旱多尺度特征及其与月均水位的相关性[J]. 人民长江,2016,47(8):23-27.

- 变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10):1713-1725.
- [11] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 488-497.
- [12] Wang Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(8):1398-1412.
- [13] 李林, 王振宇, 秦宁生, 等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 694-700.
- [14] 莫莉, 穆兴民, 王勇, 等. 近50多年来北洛河水沙变化特征及原因分析[J]. 泥沙研究, 2009(6):30-36.
- [15] 柳林云, 纪国强, 李书飞. 长江流域近20年来供水工程调查分析[J]. 人民长江, 2011, 42(18):95-98.
- [16] 方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(1):36-41.
- [17] 谢永宏, 李峰, 陈心胜, 等. 荆江三口入洞庭湖水沙演变及成因分析[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(2):203-206.
- [18] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):296-300.
- [19] 李正最, 谢悦波, 徐冬梅. 洞庭湖水沙变化分析及影响初探[J]. 水文, 2011, 31(1):45-53.
- [20] 覃红燕, 邹冬生, 李峰. 近50余年荆江三口水沙变化特征及驱动力分析[J]. 泥沙研究, 2013, (3):27-33.
- [21] 李晖, 尹辉, 白旸, 等. 近60年洞庭湖区水沙演变特征及趋势预测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):139-142.
- [22] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 三峡工程运行以来洞庭湖水沙过程变异及其影响分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5):170-175.
- [23] 郭彦, 侯素珍, 林秀芝. 近51年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10):176-183.
- [24] 任惠茹, 李国胜, 崔林林, 等. 近60年来黄河入海水沙通量变化的阶段性与多尺度特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5):619-631.
- [25] 尹辉, 杨波, 蒋忠诚, 等. 近60年洞庭湖泊形态与水沙过程的互动响应[J]. 地理研究, 2012, 31(3):471-483.
- [26] 吴作平, 杨国录, 甘明辉. 荆江—洞庭湖水沙关系及调整[J]. 武汉大学学报:工学版, 2002, 35(3):5-8, 16.
- [27] 徐伟平, 康文星, 何介南. 洞庭湖蓄水能力的时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):62-67, 324.
- [28] Ou C, Li J, Zhou Y, et al. Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4):731-745.
- [29] 许全喜, 胡功宇, 袁晶. 近50年来荆江三口分流分沙变化研究[J]. 泥沙研究, 2009(5):1-8.

~~~~~  
(上接第254页)

- [9] 赵伟, 张宇, 张智红. 1981—2010年重庆地区季节性干旱时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 192-198.
- [10] 刘鹏, 杨涛, 师鹏飞, 等. 塔里木河流域干旱态势时空变化规律分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5):5-8.
- [11] 朱珠, 陶福祿, 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.
- [12] 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.
- [13] Zhan W, Jin F F, Turner A. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(11):4020-4026.
- [14] Ji Y, Zhou G, Wang S, et al. Increase in flood and drought disasters during 1500—2000 in Southwest China [J]. Nat Hazards, 2015, 77(3):1853-1861.
- [15] 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.
- [16] 王连喜, 顾嘉熠, 李琪, 等. 江苏省冬小麦适宜度时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):67-75.
- [17] 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.
- [18] 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响[J]. 生态学报, 2015, (12):4155-4167.
- [19] Tao F, Yokozawa M, Liu J, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. Climate Research, 2008, 38(1):83-94.
- [20] Tao F, Zhang Z, Shi W, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981—2009 in China, and late rice was just opposite [J]. Global Change Biology, 2013, 19(10):3200-3209.