

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.002

ENSO 影响下安徽省旱涝灾害及农业生产 损失时空变化特征

张 强¹, 孙 鹏^{2,3,4}, 程 辰^{2,3}, 孔冬冬^{4,5}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;
3. 安徽省自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241002; 4. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
5. 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 基于 1961—2014 年 25 个气象站资料, 采用线性趋势法、标准化降水蒸散指数 (SPEI)、M-K 趋势检验以及皮尔逊相关分析法, 分析了 ENSO 影响下安徽省 1961—2014 年近 54 年旱涝时空特征及对农业生产影响。研究表明: ①与 ENSO 事件有关的中度以上干旱 (洪涝) 发生次数占中度以上干旱 (洪涝) 总次数的 68% (83%), 且干旱事件受厄尔尼诺次年及拉尼娜年影响大, 洪涝受厄尔尼诺当年影响更大; ②春、秋季 SPEI 波动幅度大于夏季和冬季, 洪旱灾害风险增大。春季呈干旱化趋势, 冬季在 20 世纪 90 年代湿润化达到最大, 随后趋向于干旱化。与皖北地区相比较, 皖南地区各月份趋势变化大; ③安徽各地区的旱涝指数与 SSTA 的相关性在 ENSO 冷暖事件中不同, ENSO 暖事件对皖南地区相关系数最大达 0.32, 超过 99% 置信度检验, 影响更为显著, 而 ENSO 冷事件对皖北地区相关系数最大达 0.28, 超过 99% 置信度检验, 影响更为显著。随着滞后性月份的增加, 安徽各区域的旱涝指数与 SSTA 的相关系数逐渐增大, 皖南地区与 SSTA 相关性大于皖北地区, SSTA 对未来 3 个月皖南旱涝有明显的影 响; ④近 20 年皖北、皖南地区稻、麦减产主要发生在 ENSO 事件年或者前一年, 且减产率高。皖北地区和江淮地区的小麦减产发生次数较少, 小麦减产率较大, 而皖南地区小麦减产发生年份较多, 小麦减产率较小。ENSO 对农业生产的影响与旱涝分布状况有关, 江淮地区良好的灌溉条件会降低 ENSO 年农业旱涝受灾风险。

关键词: ENSO 事件; 标准化蒸散指数; 相关分析; 灾损率; 安徽省

中图分类号: P426.616 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)06-0006-13

Temporal and spatial variations of ENSO-induced flood and drought disasters and loss in agricultural production in Anhui Province

ZHANG Qiang¹, SUN Peng^{2,3,4}, CHENG Chen^{2,3}, KONG Dongdong^{4,5}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China;

3. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241002, China;

4. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

5. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on daily precipitation data from 25 meteorological stations during the period from 1961 to 2014, the temporal and spatial variations of floods and droughts affected by the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51425903); 安徽省自然科学基金 (1408085MKL23); 安徽省教育厅高校自然科学基金 (KJ2016A851); 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室开放基金

作者简介: 张强 (1974—), 男, 教授, 主要从事气象水文极值理论及应用研究、洪旱灾害过程及机理、灾害信息化及流域水循环与水资源演变等领域研究。E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

related impacts on agricultural production in Anhui Province in the recent 54 years were analyzed using the linear trend method, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), the Mann-Kendall trend test method, and the Pearson correlation analysis method. The results are as follows: (1) ENSO-induced floods and droughts of middle or above levels accounted for 83% and 68% of the total floods and droughts of such levels, respectively, and the droughts were closely related to La Nina events in a same year and El Niño events in the subsequent years, while the floods were closely related to El Niño events. (2) Higher variability was found in the SPEI in the spring and autumn than in the summer and winter, indicating higher flood and drought risks during the spring and autumn. Generally, a drought tendency was identified in the spring, and flood risk in the winter was relatively higher and a drought tendency was then identified. The tendency changes were more significant in the southern Anhui Province than in the northern Anhui Province. (3) Relations between SPEI and SSTA shifted during the warm and cold phases of ENSO. The warm phase of ENSO had larger impacts on SPEI in the southern Anhui Province, with the largest correlation coefficient being 0.32, which was above the 99% confidence level. The cold phase of ENSO had more significant impacts on SPEI variations in the northern Anhui Province, with the largest correlation coefficient being 0.28, which was above the 99% confidence level. The coefficient of correlation between SPEI and SSTA increased with the increasing lag time. The coefficient of correlation between SPEI and SSTA for the southern Anhui Province was larger than that for the northern Anhui Province. SSTA had a great influence on the floods and droughts in the southern Anhui Province in the following three months. (4) Serious reduction of rice and wheat over the recent 20 years in the southern and northern Anhui Province mainly occurred in the ENSO year or in the year prior to the ENSO events. The reduction amount of wheat was larger in the northern Anhui Province and the Jianghuai region with less occurrence frequencies compared to that in the southern Anhui Province. The impact of ENSO on agricultural production was related to the distributions of floods and droughts. The suitable irrigation conditions in the Jianghuai region might reduce the risk of flood and drought disasters in ENSO years.

Key words: ENSO event; SPEI; correlation analysis; hazard loss rate; Anhui Province

ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 事件是赤道太平洋地区大范围海气相互作用后失去平衡的一种气候现象,对太平洋、印度洋及周围大陆等大范围地区气候变化、洪旱灾害等具有重要影响,是迄今为止人类所观测到的全球大气和海洋相互耦合的最强信号之一,是年际尺度最显著的气候信号之一^[1-2]。它的发生会在全球范围内引起严重气候异常,给世界许多地区造成严重的旱涝和低温冻害,给农业生产带来巨大损失,因而受到国内外学者和政府的普遍关注^[3]。ENSO 通过大气环流以“遥相关”的形式间接地影响我国的气候,ENSO 被认为是影响东亚季风年际异常的关键因子^[4]。国内外学者从 ENSO 动力学理论、ENSO 预测方法、ENSO 的年代际变化特征、ENSO 的分类、ENSO 的指标、ENSO 的气候影响和 ENSO 的业务现状等 7 个部分开展相关研究,取得一系列显著性成果^[3]。Zhang 等^[5-6] 研究揭示在 El Niño (La Nina) 年,减弱的东亚夏季风使我国夏季主要季风雨带偏南,导致江淮流域多雨的可能性较大;而王绍武等^[7-9] 揭示在 ENSO 年北方地区,特别是我国华北到河套一带,常出现少雨和干旱;许武成等^[10-11] 研究认为在 El Niño 年东亚冬季风偏弱,我国常出现暖冬冷夏,特别是我国东北地区由于夏季温度偏低,出现低温冷害的可能性较大;杨亚力等^[12] 研究 ENSO 事件对云南春末初夏降水异常的影响与其对华南和江淮流域降水影响有明显的不同,El Niño (La Nina) 年云南大部分地区 4—5 月降

水偏少(多),东部地区相关信号尤其明显。李芬等^[13] 分析了近 56 年山西年及四季降水对 ENSO 事件的响应,发现山西年降水与上年太平洋海温在 Nino3,4 区存在小区域的正相关,上年对应海域海温偏高(低),年降水易偏多(少)。ENSO 事件加剧了降水分布不均匀,给人类的生产、生活带来严重的危害^[14],唐晓春等^[15] 研究发现厄尔尼诺事件的强度、发生的季节以及持续的时间与广东省旱灾的发生有一定关系,中等及强厄尔尼诺事件往往会导致广东省旱灾的发生,春季和秋季发生的厄尔尼诺事件,广东省不易发生旱灾,而夏季发生的厄尔尼诺事件导致广东省易发生旱灾;郑冬晓等^[16] 研究 ENSO 通过影响全球的大气环流,对全球许多地区的气温、降水和由气温、降水异常导致的农业气象灾害(如低温冷害、旱涝灾害等)及农作物生长发育、产量形成产生影响。总之,ENSO 是通过影响东亚季风环流和太平洋副热带高压,对中国从沿海到内陆、从南到北的气候产生不同程度的影响,对我国不同区域影响的程度、方式和结果均有较大差异^[13,17-18]。

安徽省作为中国重要的商品粮产地,是全国重要的粮食主产省和商品粮调出省。安徽省地处长江、淮河中下游地区,为东亚季风湿润区与半湿润区的气候过渡区域,是南北气候、中低纬度和海陆相 3 种过渡带的重叠地区,天气系统复杂多变,形成了区域“无降水旱、有降水涝、强降水洪”的典型区域旱涝特征,由此引发的气象灾害对当地的生产、生活产

生较大影响^[19]。安徽省是我国气候变化的敏感区,气候条件极为复杂,气象灾害种类多、发生频繁,给安徽省国民经济建设和社会发展特别是农业生产造成巨大影响。因此,开展 ENSO 影响下的安徽省旱涝灾害时空分布其对农业生产的影响研究具有重要意义。但目前针对 ENSO 对安徽省气候变化(降水、气温)相关影响的研究较多^[20-22],而关于 ENSO 对安徽省旱涝灾害的影响及滞后性研究较少,特别是其旱涝究竟对 ENSO 事件有何响应、ENSO 事件引起气温、降水异常导致的农业气象灾害等研究较少,因此,本文选择 1961—2014 年安徽省及周边 25 个气象站点数据、ENSO 数据和农业数据,分析了安徽省这 54 年的旱涝和粮食灾损率时空变化特征及其与 ENSO 的关系,揭示 ENSO 事件对安徽省旱涝灾害分布和农业生产的影响,以期对当地的洪旱灾害预测和防灾减灾提供参考。

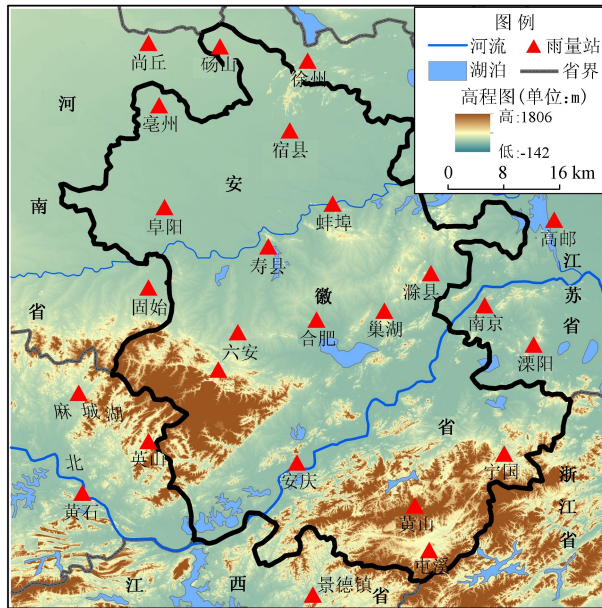


图1 安徽省雨量站点空间分布示意图

1 数据与方法

1.1 数据

本研究选用 1961 年 1 月—2014 年 12 月由中国气象局国家气象信息中心提供的较为完整的安徽省及周边 24 个气象站点逐日降水量、日平均气温以及风速等资料(图 1),如果最大连续缺测数据小于 5 天,用相邻日期线性插值来实现;如果大于 5 天,与最大搜索半径为 400 km 的相邻站点进行线性插值。小麦和稻谷灾损率数据来源于 1989—2010 年《安徽省统计年鉴》和《中国气象灾害大典》(安徽卷)^[23]。Nino3.4 海区海表温度距平(SSTA)数据来自美国海洋大气局(NOAA)(<http://www.noaa.gov>);南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI)数据来自

于美国国家气候预测中心(American National Climate Prediction, CPC)发布的两次标准化序列。本文研究的皖南地区主要包括宣城、芜湖、铜陵、马鞍山、池州和黄山,江淮地区为合肥、安庆、滁州和六安,皖北地区为淮北、亳州、宿州、阜阳、蚌埠和淮南。

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

为了加深了解气温变化对用水需求的影响, Vicente-Serrano 等^[24]提出了用 SPEI 来研究旱涝。SPEI 被设计成同时考虑降水(P)和潜在蒸散发(PET)的影响来监测干旱过程,其中潜在蒸散发指的是在水足够多的情况下所能产生的蒸发和蒸腾总量,采用彭曼公式计算潜在蒸散发。SPEI 计算原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱。具体计算步骤如下:

a. 计算潜在蒸散。

b. 用式(1)计算逐月降水与蒸散的差值

$$D_i = P_i - P_{ET_i} \quad (1)$$

式中: D_i 为降水与蒸散的差值; P_i 为月降水量; P_{ET_i} 为月蒸散量。

c. 与 SPI 方法一致,对 D_i 数据序列进行正态化。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值,所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。log-logistic 概率分布的累积函数为

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (2)$$

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: α 为尺度参数; β 为形状参数; γ 为 origin 参数; $f(x)$ 为概率密度函数; $F(x)$ 为概率分布函数。

d. 对序列进行标准化正态处理,得到相应 SPEI 值:

$$I_{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_2 + C_3 W^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (4)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln P} \quad (5)$$

当 $P \leq 0.5$ 时, $P = F(x)$; 当 $P > 0.5$ 时, $P = 1 - F(x)$ 。其他参数分别为 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。SPEI 按照表 1 标准进行干旱等级划分^[24]。

表 1 SPEI 干旱等级划分

等级	类型	SPEI 值
1	重度洪涝	≥ 2.0
2	中度洪涝	[1.0 2.0)
3	轻度洪涝	[0.5 1.0)
4	正常	[-0.5 0.5)
5	轻度干旱	[-1.0 -0.5)
6	中度干旱	[-2.0 -1.0)
7	重度干旱	< -2.0

1.2.2 M-K 趋势检验

采用非参数 Mann-Kendall (简称 M-K 法) 趋势检验法来研究标准降水指数的趋势变化情况^[25]。M-K 方法广泛应用于检验水文气象资料的趋势成分,是世界气象组织推荐的应用于时间序列分析的方法。国内外许多文献^[26-27]研究了时间序列的自相关性对 M-K 检验结果的影响。Kulkarni 等^[28]建议在进行 M-K 检验之前对时间序列进行“预白化”(prewhiten)处理。所有序列在进行 M-K 分析之前均需要预白化处理。利用 Pearson 相关系数法计算各站点旱涝受灾程度与 ENSO 事件的相关性系数并进行显著性检验。

1.2.3 粮食减产率

农作物最终产量受各种自然因素和人类活动因素的综合影响,相互关系复杂,难量化。根据环境因素的偶然性和人类活动因素的渐进性和相对稳定性的特点,可以认为产量是由趋势项和波动项构成,并可通过统计学方法将其分离。其中,趋势项反映了生产水平的提高;而波动项则主要是由于气候变化造成的。ENSO 年引起研究区域气候异常,进而影响农作物生产的气候要素发生变化,导致农作物产量受到影响,因此,减产率能够较好反映 ENSO 对农业生产的影响。根据前人的研究^[29]结果将农作物产量分解为趋势产量、气象产量和随机产量 3 部分。表达为

$$y = y_t + y_w + \Delta y \quad (6)$$

式中: y 为粮食实际产量, kg/hm^2 ; y_t 为粮食产量趋势, kg/hm^2 ; y_w 为气候变化导致的粮食产量变化项, kg/hm^2 ; Δy 为粮食产量的随机分量, kg/hm^2 。

计算中一般都假定 Δy 可忽略不计。利用安徽省各地市 1989—2009 年粮食产量资料进行分析,对趋势产量进行三次多项式模拟,计算 1989—2009 年各地市的趋势产量。安徽省各地市 88% 的县市的粮食产量曲线通过 95% 显著性检验。冬小麦和水稻减产率是采用逐年的实际产量偏离趋势产量的相对气象产量的负值,计算公式为

$$y_d = \frac{y - y_t}{y_t} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: y_d 为粮食减产率, %; y 为粮食实际产量, kg/hm^2 ; y_t 为粮食趋势产量, kg/hm^2 。

1.2.4 ENSO 年及强度划定

有关 ENSO 事件的定义和强度的划分标准略有不同^[7],本文表征 ENSO 事件的指标主要参考美国国家海洋大气局的指标体系,采用 Nino3.4 海区海表温度距平 (SSTA) 以及南方涛动指数 (SOI)。以海温距平值持续 6 个月以上 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 定义为 1 次

ENSO 事件。根据 SSTA 值高低将 ENSO 事件划分为强 (± 3)、中 (± 2)、弱 (± 1) 以及正常 (0) 等级。据此可知,在 1960—2014 年共发生 26 次 ENSO 事件,其中 El Niño 年共 14 次, La Nina 年共 12 次。对 ENSO 事件进行强度统计,统计得出在此时段内中等及以上强度的 ENSO 事件共计 17 次,占总数的 65%。从持续时间来看, ENSO 事件的强度与持续时间长短并无明显的相关关系 (表 2)。由图 2 中 1961—2014 年发生的 ENSO 事件年际变化来看, ENSO 暖事件 (El Niño) 与 ENSO 冷事件 (La Nina) 往往交替发生,在 1970s 和 1980s 时间内发生强 ENSO 事件最多,达 6 次,占到统计年强 ENSO 事件的 55%。强 El Niño 事件与强 La Nina 时间相继发生总共有两次,一次是 1972 年的强 El Niño 事件后,紧接着发生 1973—1974 年的强 La Nina 事件;另外一次是 1997 年的强 El Niño 事件后,紧接着发生 1998—2000 年的强 La Nina 事件。

表 2 1961—2014 年 ENSO 年统计

El Niño 年	持续月数	事件强度	La Nina 年	持续月数	事件强度
1963	9	强	1962	8	弱
1965	12	中	1964	11	弱
1969	17	弱	1970—1971	19	中
1972	11	强	1973—1974	15	强
1976	6	弱	1975	7	强
1982—1983	14	强	1985	12	弱
1986—1987	7	强	1988	12	强
1991	13	中	1995	7	弱
1994	7	中	1998—2000	21	强
1997	12	强	2007	11	强
2002	10	弱	2010	10	中
2004	19	弱	2011	8	中
2006	20	弱			
2009	10	强			

为了进一步探讨 ENSO 事件下安徽省旱涝灾害是否频发,本文统计了 1961—2014 年和 ENSO 事件年的月 SPEI 的中度以上旱涝统计值,计算得到 ENSO 事件年中度以上旱涝次数占 1961—2014 年中度以上旱涝总次数比 (表 3),洪涝发生在 ENSO 事件年比重大于干旱发生在 ENSO 事件年的比重,安徽大部分地区 50% 以上的洪涝均发生在 ENSO 年,而安徽大部分地区发生在 ENSO 年的干旱也超过了 40%。另外,统计了安徽受灾面积在 50 万 km^2 以上的年份中,结合唐晓春等^[15]对灾害等级划分,1961—2014 年安徽省共发生中度以上干旱 28 次,19 次与 ENSO 事件有关,占中度以上干旱总次数的 68%,其中厄尔尼诺当年共 5 次,厄尔尼诺衰退年及拉尼娜年共 14 次。发生中度以上洪涝共计 23 次,19 次与 ENSO 年有关,占中度以上洪涝总次数的 83%,厄尔尼诺当年 10 次,衰退年及拉尼娜年 9 次。

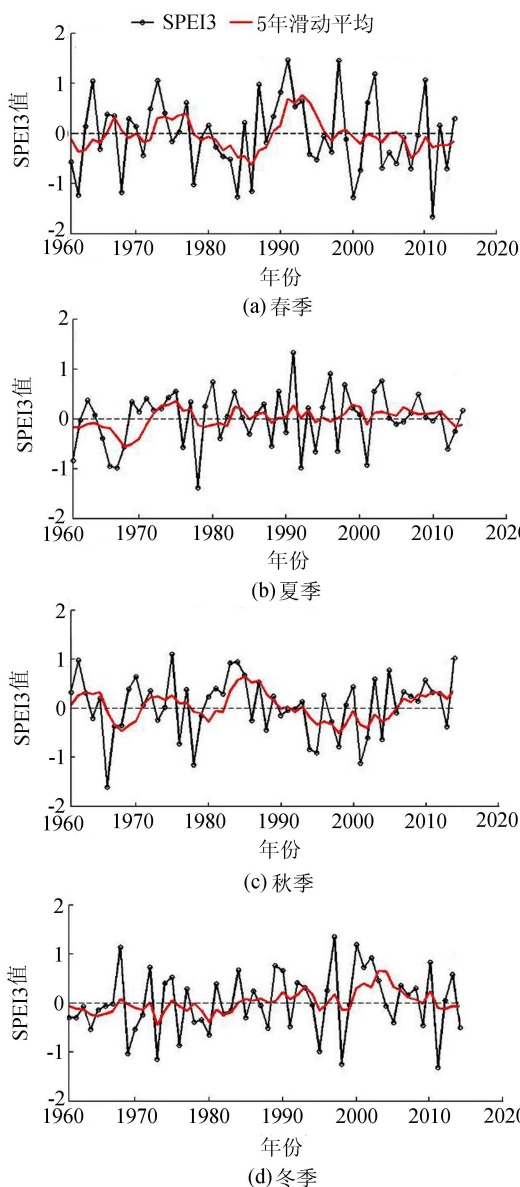


图2 1961—2014年安徽SPEI时间序列图

表3 中度以上旱涝 ENSO 事件年占 1961—2014年总次数比值

地点	洪涝		干旱	
	次数	比值	次数	比值
砀山	64	0.57	50	0.47
亳州	66	0.61	53	0.46
宿县	64	0.55	51	0.46
阜阳	55	0.53	51	0.43
固始	58	0.52	66	0.55
寿县	61	0.54	56	0.51
蚌埠	65	0.54	50	0.45
滁县	57	0.52	56	0.5
六安	61	0.54	71	0.52
霍山	55	0.52	61	0.51
合肥	54	0.47	58	0.51
巢湖	61	0.54	44	0.42
安庆	55	0.52	57	0.47
宁国	48	0.44	59	0.52
黄山	51	0.47	64	0.52
屯溪	62	0.56	50	0.47

因此,与 ENSO 事件有关年份安徽省旱涝发生频率高,且干旱受厄尔尼诺次年及拉尼娜年影响大,洪涝受厄尔尼诺当年影响更大。

2 安徽省旱涝灾害时空特征

本文拟采用标准化降水蒸散指数(SPEI),与常用的 PDSI 以及 SPI 相比,SPEI 相比较 PDSI,其计算更为方便,对资料的需求更低,适用性更广;而相比较 SPI,SPEI 考虑了温度所带来的蒸散发对干旱的影响,对于气温变化明显的地区,其结果更加切合实际^[30]。SPEI 在江淮流域旱涝灾害的适用性得到很好验证,3 个月尺度的 SPEI(SPEI3)对于干旱发展的渐进性及旱涝区域(尤其是旱情发展较严重的区域)表现较为良好^[31],因此本文选择 SPEI3 表征安徽省的旱涝时空变化。

2.1 旱涝灾害季节变化特征

利用 3 个月时间尺度的 SPEI 指数能够较好地反映旱涝季节变化特征。图 2 给出了基于 SPEI 指数近 54 a 的安徽省四季旱涝变化趋势。从图 2 中可知,春、秋季 SPEI 指数波动幅度大于夏季和冬季,春季在 1961—1977 年和 1986—1993 年 SPEI3 指数呈增加趋势,即湿润化趋势增加;其他时段呈干旱化趋势,特别是 1997 年后,SPEI 值由正值转为负值,趋于干旱化(图 2(a))。1970s 之前,安徽夏季呈干旱化状态,其他时段夏季旱涝趋势在不同年代未发生明显波动,处于偏湿润的状态。安徽省秋季在近 54 a 来呈现涝—旱—涝—旱—涝的过程,旱涝不断转变,在 1993—2006 年,安徽秋季处于较长的干旱状态(图 2(c))。相反的,安徽冬季 SPEI3 指数呈增加趋势,尤其是在 20 世纪 90 年代,除 1998 年 SPEI 值小于-1 以外,多数年份 SPEI 值均大于 0.5,表明了安徽省冬季具有较为明显的湿润状态,但是进入 21 世纪 10 年代,有趋向于干旱化趋势。

2.2 旱涝灾害月尺度时空特征

图 3 是 1961—2014 年安徽省 1—12 月的 SPEI3 指数的 M-K 趋势图。从图中可得 1961—2014 年安徽省各月份旱涝变化趋势以及空间格局上具有明显差异,各月份有干旱化和湿润化趋势,但是趋势变化不显著。在春季(3—5 月),3 月份皖北砀山附近地区 M-K 统计值为负值,表明该时期该地区 3 月呈现干旱化趋势,但未通过 0.05 显著性检验,干旱化趋势并不显著。除此以外其他地区均有变湿趋势,其中蚌埠、巢湖、安庆地区通过 0.05 显著性检验,表明洪涝灾害发生概率增加。4 月份整个安徽省出现变干趋势,以江淮及皖北地区的变干趋势明显。5 月份梅雨季节来临之前,全省呈现变干趋势的地区进

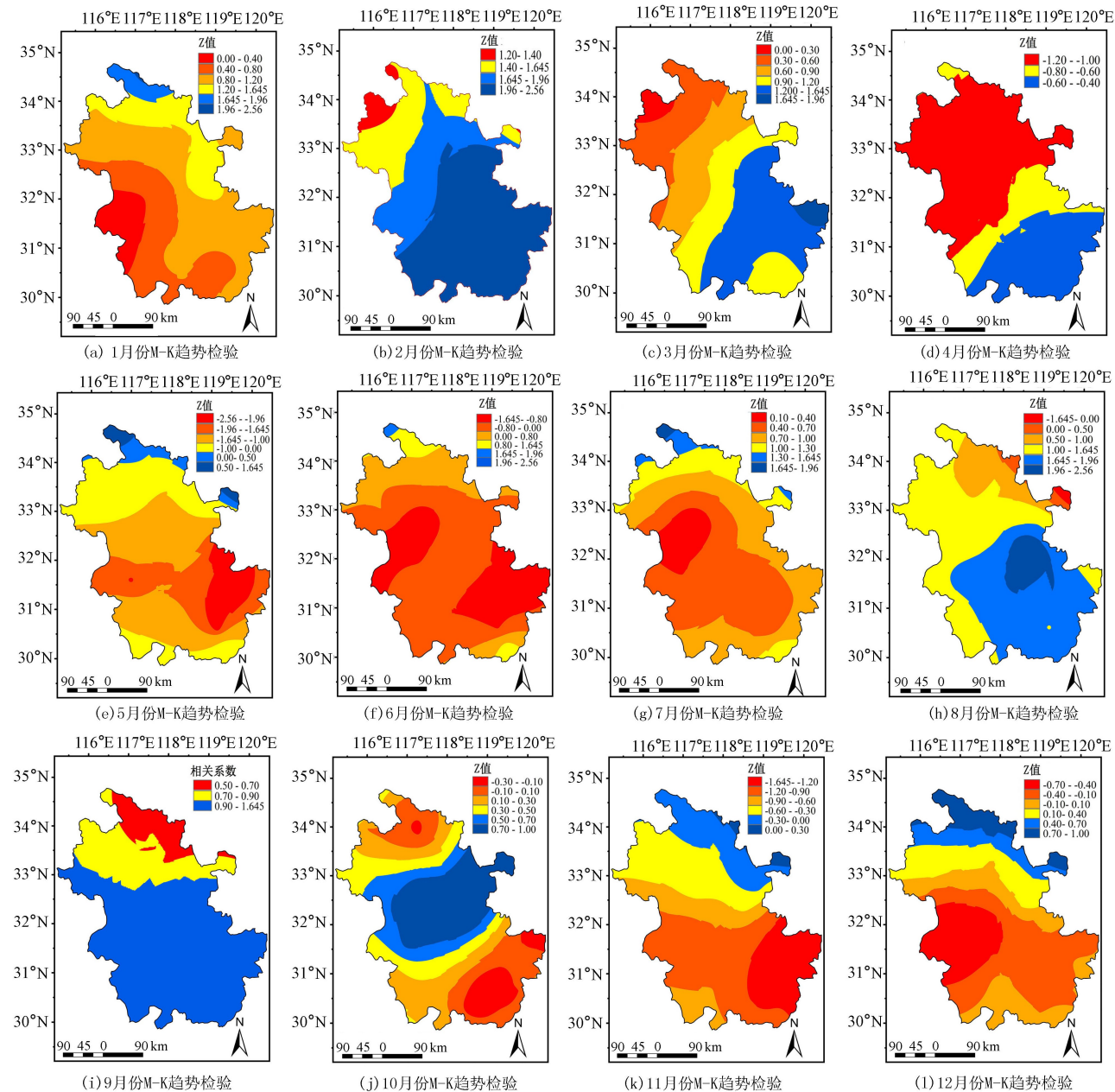


图3 1961—2014年安徽月尺度旱涝变化趋势

一步扩大,干旱程度进一步加剧,全省大部分地区呈现变干趋势,仅有皖东北地区的淮北、滁州呈现变湿趋势。在夏季(6—8月),6月份尽管江淮地区进入梅雨季节,但是6月份安徽全省大部分地区出现干旱化趋势,仅仅皖北地区和皖南南部地区呈现湿润趋势。7月份全省的大部分地区呈现湿润化趋势,但是湿润化趋势不显著。8月份绝大部分呈现地区湿润化趋势,皖南地区,如马鞍山、巢湖、芜湖,通过0.05显著性检验,湿润化趋势显著;而皖东北地区由6—7月份的湿润趋势转为干旱趋势。在秋季(9—11月份),9月份旱涝分布与8月份的类似,全省均呈现湿润化趋势,皖南地区湿润化趋势优于皖北地区;10月份由江淮地区向皖北、皖南方向呈干旱化趋势,黄山市和宿州市的干旱化趋势最为明显;

11月份全省由皖南和皖北干旱化趋势演变为全省的干旱化趋势,皖东南的宣城地区干旱化趋势最为明显。在冬季(12月至次年2月),12月份安徽省总体呈现北湿南干的空间分布特征。皖北地区均呈现湿润化趋势,而除了皖西南局部地区,整个江淮地区以及皖南均呈现干旱化趋势。1月份安徽省绝大部分地区均呈现湿润化趋势,均未通过0.05显著性检验。2月份安徽全省湿润化趋势变化显著,其中江淮地区和皖南地区的湿润化趋势通过0.05显著性检验,变化趋势显著。总体上,4—6月安徽省大部分地区呈干旱化趋势,皖南地区趋势变化较皖北地区明显;1—3月和7—9月大部分地区呈湿润化趋势,同样皖南地区趋势变化较皖北地区明显;10—12月份皖北地区趋于湿润,而皖南地区趋于干旱。

与皖北地区相比较,皖南地区各月份趋势变化大,即皖南地区的降水在各月份极端不均匀。

3 ENSO 影响下安徽省旱涝时空特征

3.1 安徽 SPEI3 与 ENSO 事件指数的相关性分析

3.1.1 安徽 SPEI3 与 SSTA 的相关性分析

为了进一步反映 ENSO 对安徽省区域内部差异影响,利用 1961—2014 年所有发生 ENSO 事件的月份的 Nino3.4 海区海表温度距平 (SSTA) 与同时段安徽及周边 24 个气象站点的逐月 SPEI3 (定义为旱涝指数) 做相关性分析 (图 4),在整个 ENSO 发生时段内,海温距平 (SSTA) 与同期安徽省旱涝指数的相关系数均为正值,二者存在正相关。从图 4(a) 看, SSTA 与安徽旱涝指数相关系数较大的地区主要位于皖南地区和皖北中部地区、特别是长江以南的区域相关性最大,表明该区域的旱涝指数与 SSTA 直接相关。前人研究表明 ENSO 事件对东南亚以及太平洋地区的影响存在数月甚至数年的滞后性,气候异常并非与赤道东太平洋地区海温异常完全同步。因为随着滞后时间增加,相关系数均呈显著性相关,因此本文只列出了图 4(b)~图 5(g) 分别是各站点滞后 1~6 个月的旱涝指数与 SSTA 的相关性分析,由图可知,随着滞后性月份的增加,安徽各区域的旱涝指数与 SSTA 的相关系数逐渐增大,而且相关关系强度

由南往北递减,说明皖南地区与 SSTA 相关性大于皖北地区。区域的旱涝指数与 SSTA 在滞后 3 个月时,安徽各区域的旱涝指数与 SSTA 的相关性最强,表明 SSTA 对未来 3 个月皖南旱涝有明显的影。

3.1.2 安徽 SPEI3 与 SOI 的相关性分析

SOI 是表征 ENSO 事件的传统指标,是目前监测 ENSO 的常规指数。本文 SOI 取自塔希堤与澳大利亚的达尔文站的海平面气压差,图 5 是 SOI 与安徽 25 个气象站点的逐月 SPEI3 相关性分析,因为 SOI 与 SSTA 呈负相关关系,因此安徽旱涝指数与 SOI 的相关关系为负相关。皖北地区和皖东地区的 SOI 与 SPEI3 同时段的相关关系大于皖南地区 (图 5(a)),随着滞后性月份的增加,安徽旱涝指数与 SOI 相关关系大的区域由皖西北向皖东北转移。在滞后 4 个月的安徽旱涝指数与 SOI 相关关系整体达到最大,最大的区域分布于长江以南的区域,该区域与 SSTA 的相关关系也最大。其次,大别山区和巢湖流域旱涝指数与 SOI 相关关系较大。

3.2 安徽 SPEI3 与典型 ENSO 时间年的相关性分析

将 ENSO 暖事件 El Niño 以及 ENSO 冷事件 La Nina 的 SSTA 与旱涝指数的相关性分析结果进行分析并对比 (图略)。在发生 El Niño 事件时, SSTA 与旱涝指数相关性系数较大的地区主要位于皖南,相关系数达 0.32,通过 0.01 置信度检验。在发生

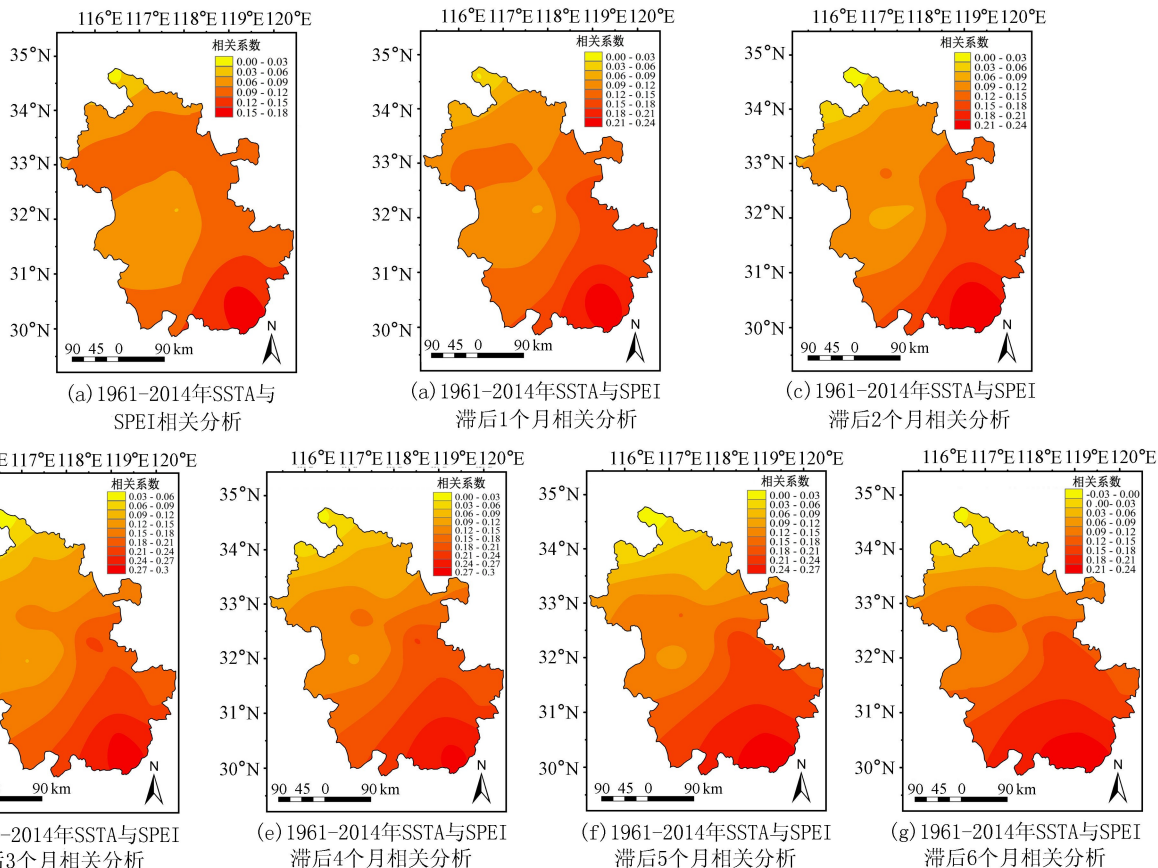


图 4 1961—2014 年 ENSO 事件 SSTA 与 SPEI 指数相关系数空间分布

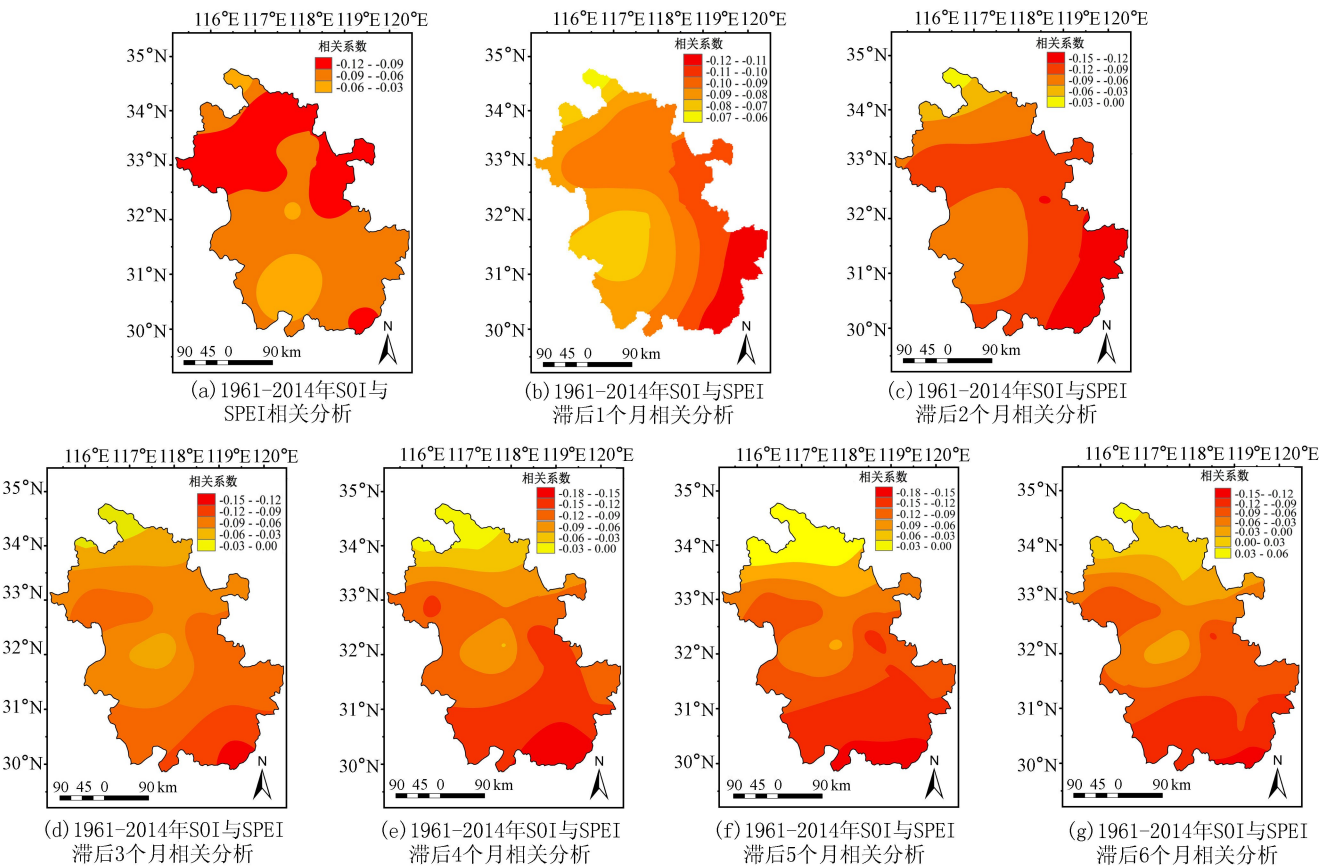


图5 1961—2014年 ENSO 事件 SOI 与 SPEI 相关系数空间分布

La Nina 事件时,皖北地区 SSTA 与旱涝相关性系数较大,皖北地区砀山、亳州、蚌埠相关系数最大达 0.27,通过 0.01 置信度检验。安徽各地区的旱涝指数与 SSTA 的相关关系在 ENSO 冷暖事件中表现不一样,ENSO 暖事件对皖南地区影响更为显著,而 ENSO 冷事件对皖北地区影响更为显著。

为了进一步揭示安徽旱涝指数与 ENSO 的相关性,本文选取了表 2 中典型 ENSO 年的 SSTA 与 SOI 与相应典型 ENSO 年的 SPEI3 旱涝指数进行相关性分析(图 6 和图 7),以揭示安徽旱涝与典型年的相关性。由图 6 知,安徽旱涝指数与同时段典型年 SSTA 的相关关系大的区域是皖南地区,随着滞后月

份增加,相关关系较大的区域由皖南地区向巢湖流域推移,旱涝指数与典型 ENSO 年的 SSTA 相关关系在滞后 3 个月达到最大(图 6(c)),这说明典型 ENSO 事件发生后,对安徽皖南和巢湖流域未来 3 个月的旱涝指数产生影响;而皖北地区旱涝指数对 ENSO 的响应不灵敏。

图 8 是安徽旱涝指数与同时段典型年 SOI 的相关关系呈负相关,相关关系大的区域是皖北地区(图 7(a)),这说明 SOI 表明的典型 ENSO 事件发生后,对同时段皖北地区的旱涝指数产生影响。随着滞后月份增加,相关关系大的区域由皖北地区向皖南地区转移,在滞后 3 个月的时,旱涝指数与典型

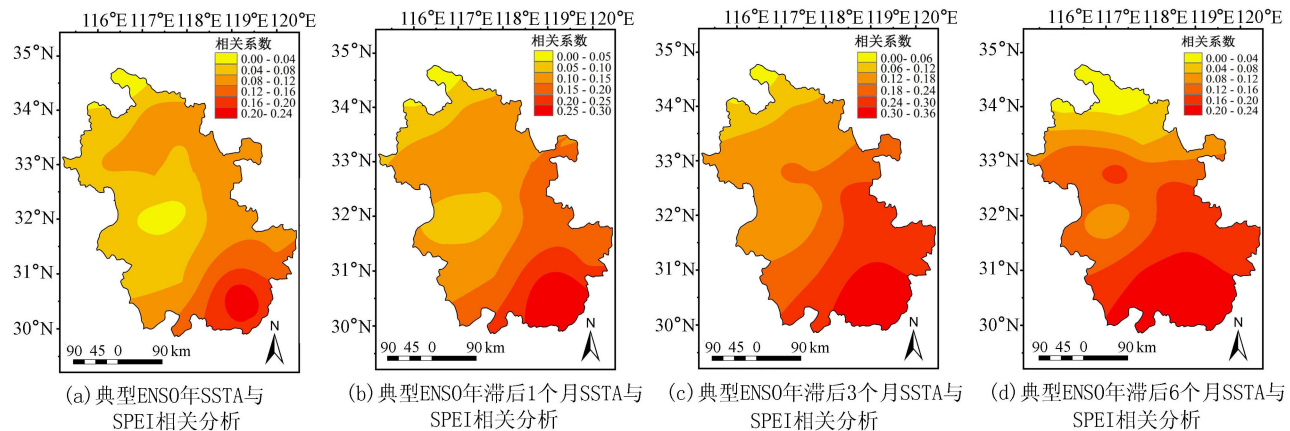


图6 1961—2014年典型 ENSO 事件 SSTA 与 SPEI 相关系数空间分布

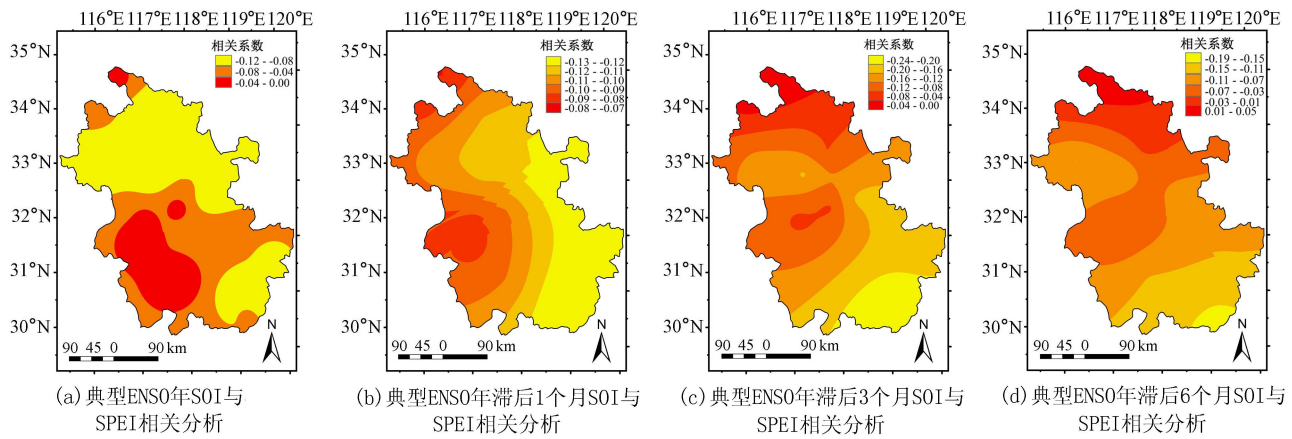


图 7 1961—2014 年典型 ENSO 事件 SOI 与 SPEI 相关系数空间分布

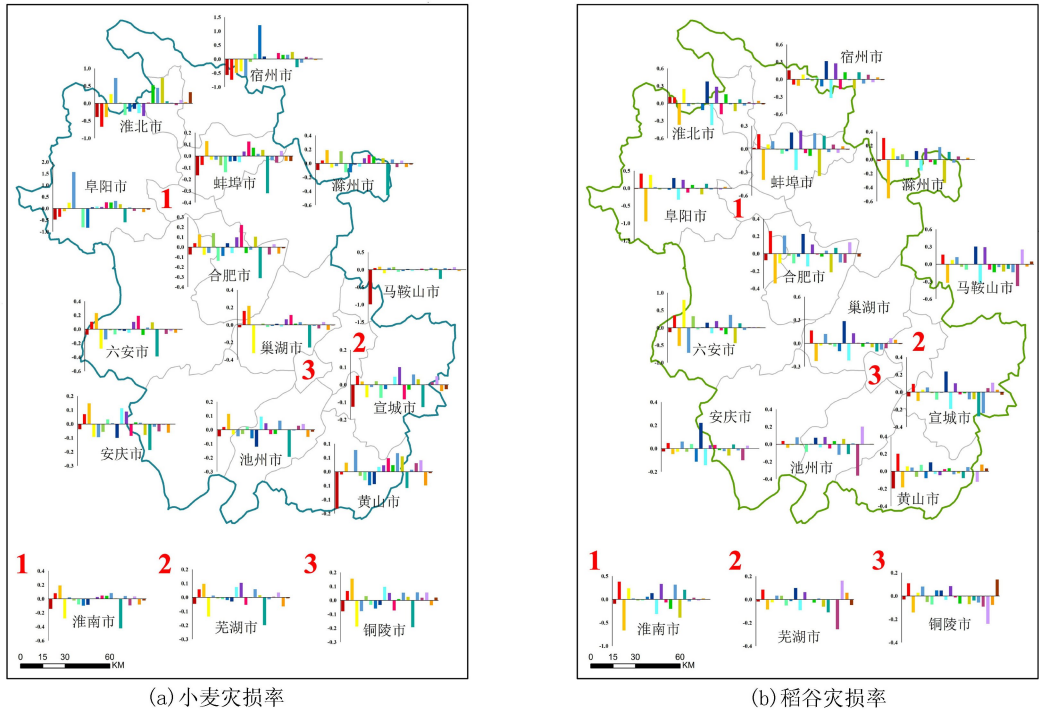


图 8 1989—2009 年安徽小麦和稻谷灾损率时空分布

ENSO 年的 SOI 相关关系最大(图 7(c)),这说明典型 ENSO 事件发生后,对安徽皖南未来 3 个月的旱涝指数产生影响。皖西南地区随着滞后月份增加,相关关系也逐渐增大,在滞后 6 个月相关关系达到最大,说明典型 ENSO 事件发生后,对安徽皖西南未来 6 个月的旱涝指数将受影响。

4 小麦和稻谷灾损率时空分布研究

安徽省主要粮食作物小麦主产区主要分布在皖北地区,稻谷主产区分布在皖南地区。基于式(6)~(7)得到安徽省小麦和稻谷的灾损率时空分布图(图 8),柱状图正值代表产量增加,负值表示产量减少。由图 8(a)可知:从受灾年份和程度来看,1991 年、1997 年、1998 年、1999 年和 2003 年小麦灾损率最大,特别是江淮地区和皖南地区的在上述年份小麦灾损率分别达到了 0.446、0.241、0.261、0.225 和

0.237,其中 1991 年小麦灾损率达到最大。1991 年安徽省小麦有 4 个地级市受灾率在 50% 以上,11 个地级市受灾情况在 10% 以上。据统计,1991 年洪水造成安徽全省受灾人口达 4 800 多万人,占全省总人口近 70%,因灾死亡 267 人,农作物受灾面积 4.3 万 km²,各项直接经济损失近 70 亿元人民币。其次在 1998 年安徽有 12 个地级市受灾率在 10% 以上。在上述小麦灾损率较大的年份中,1991 年、1998 年和 2003 年均发生大洪水,在该年份或者前一年均发生中度以上 ENSO 事件,说明中度以上 ENSO 事件引起全省小麦灾损率高。2004—2009 全省小麦灾损率明显降低,全省平均小麦灾损率在 1% 左右,而 1989—2003 年小麦灾损率在 8% 以上。从受灾区域来看,1989—2009 年小麦因灾减产在 13 次以上的区域主要分布在江淮地区和皖南地区,分别是铜陵、合肥、马鞍山、宣城和安庆。皖南地区和江淮部分地

区在1989—2009年的21年中小麦减产平均达12年,但是小麦灾损率在10%以上年份平均仅为3年,说明皖南地区小麦减产发生年份较多,小麦减产率较小。皖北地区和江淮地区灾损率发生年份仅为10年,但是皖北地区和江淮地区小麦灾损率在10%以上的年份平均有5年,其中合肥发生年份7年是最多的,其次是六安6年。说明皖北地区和江淮地区的小麦减产发生次数较少,小麦减产率较大。

安徽稻谷灾损率小于小麦的灾损率(图8(b)),从受灾年份来看,全省16个地市在1989年、1992年、1995—1997年、2004年和2008—2009年有10个地市以上的稻谷减产,其中1989年全省稻谷全部减产,2004年和2008年全省有15个。从受灾程度上来看,2004年和1989年水稻灾损率最大,分别是0.299和0.218,其次是1992年的0.162。然而2008年尽管受灾面积大,但是稻谷的灾损率仅为0.052,远低于其他年份。由表2可见,导致全省水稻减产的上述年份在发生年或者前一年均发生ENSO事件,比如1988年强La Nina事件导致1989年全省稻谷减产,2007年强La Nina事件导致1989年全省15个地市稻谷减产,说明ENSO事件发生时,均会导致稻谷全省大范围的减产。从受灾区域来看,21年中受灾次数较多的城市有六安、合肥、蚌埠、芜湖和淮南。蚌埠地区受灾次数最多,达14次。稻谷减产率在10%以上的地区主要分布在淮北(32%)、阜阳(35%)、马鞍山(19%)、淮南(12%)

和滁州(10%),淮北和阜阳不属于主产区,但是马鞍山、淮南和滁州地区属于稻谷主产区。

5 讨论与结论

从有效灌溉面积比来看(图9(a)、图9(d)),皖北地区有效灌溉面积比低,在0.40至0.52之间。皖北地区抗旱能力弱,皖北地区如淮北、蚌埠、宿县地区稻谷的灾损率严重。随着年份的增长,淮北市的有效灌溉面积比有明显的提升,上升到0.67至0.83之间。说明淮北市灌溉条件逐渐提高,所以在2008年(ENSO强度高)农作物未受到灾损。从防洪耕地面积比来看(图9(b)、9(e)),滁州市、皖西地区如六安、安庆是低值区,防洪能力弱,安庆市为小麦灾损范围广的地区,六安是灾损率高的地区。皖南地区如宣城、芜湖、铜陵的防洪能力远高于皖北地区。从机械排灌面积比来看,低值区主要有宣城、黄山、安庆、宿县地区,巢湖和马鞍山市排灌面积比较高。图8(a)显示皖北地区和江淮地区的小麦减产发生次数较少,小麦减产率较大,而皖南地区小麦减产发生年份较多,小麦减产率较小。冬小麦产量损失与干旱发生时段密切相关,发生在4—5月的干旱减产最重,持续时间越长,损失越重,尤以冬春连旱对产量影响最大^[19]。皖北地区主要以冬小麦为主,在4—6月份安徽全省呈干旱化趋势,特别是4月份皖北地区干旱化趋势大于皖南地区,这导致皖北地区小麦灾损率较高。安徽水稻主要种植区集中

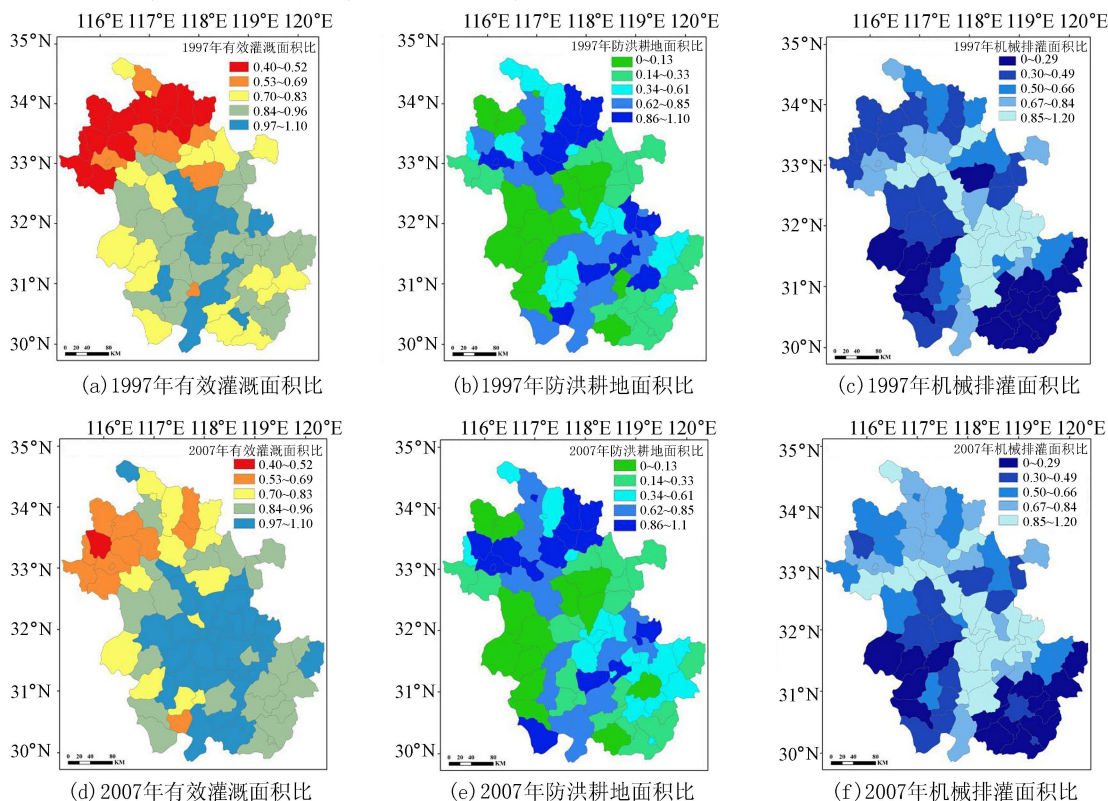


图9 1997年和2007年安徽省有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比分布

在沿淮淮北、江淮之间和沿江江南 3 个区域,研究表明旱灾对安徽省稻谷灾损率影响相对较小,而涝灾造成的一季稻减产损失明显大于旱灾,发生在生长关键期的旱涝灾害对产量的影响大于其他时段^[19]。安徽省稻谷生长时间在 4—7 月和 7—10、11 月,4—7 月以干旱化趋势为主,发生涝灾几率低,稻谷灾损率主要受到干旱威胁;7—11 月安徽以湿润化趋势为主,而且水稻主要种植区内湿润化趋势显著,稻谷灾损率主要受到涝灾威胁。

有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比(简称为减灾指标),这 3 个减灾指标能较好地反映人类活动的抗灾减灾能力,皖北地区和皖南地区的有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比远低于其他地区。通过对 1997 年和 2007 年的相关数据对比分析,发现合肥、六安、马鞍山和滁州的县市的有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比均减小了,这大大降低了区域的抗灾减灾能力,这也是造成该区域小麦和稻谷减产的原因之一。皖南地区和江淮地区的有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比远高于皖北地区,皖南和江淮地区是稻谷的主产区,这也导致稻谷灾损率远低于小麦的灾损率。整体上,安徽全省大部分地区的有效灌溉面积比、防洪耕地面积比和机械排灌面积比呈增加趋势,也是导致从 2003 年以后全省小麦灾损率明显降低。

基于 1961—2014 年安徽省 25 个气象站实测资料,采用线性趋势法、标准化降水蒸散指数(SPEI)、M-K 趋势检验以及皮尔逊相关分析法分析了安徽省近 54 年的旱涝趋势、时空变化特征及其与 ENSO 的关系,并进一步揭示 ENSO 对安徽省农业生产的影响,具体结论如下:

a. 洪涝发生在 ENSO 事件年的比重大于干旱发生在 ENSO 事件年的比重,安徽大部分地区 50% 以上的洪涝均发生在 ENSO 年,而安徽大部分地区发生在 ENSO 年的干旱也超过了 40%。与 ENSO 事件有关年份安徽省旱涝发生频率高,且干旱受厄尔尼诺次年及拉尼娜年影响大,洪涝受厄尔尼诺当年影响更大。

b. 在时间变化上,近 54 年来,安徽省变湿趋势增强。在季尺度上,春季、秋季 SPEI 波动幅度大于夏季和冬季,春季呈干旱化趋势。在月尺度上,4—6 月份安徽省大部分地区呈干旱化趋势,皖南地区趋势变化较皖北地区明显;1—3 月和 7—9 月大部分地区呈湿润化趋势,皖南地区趋势变化较皖北地区明显;10—12 月份皖北地区趋于湿润,而皖南地区趋于干旱。与皖北地区相比较,皖南地区各月份趋势变化大,即皖南地区的降水在各月份极端不均匀。

c. 在安徽省大部分地区,ENSO 事件旱涝指数呈显著性相关,其中 El Niño 与 La Nina 事件与安徽省旱涝相关性显著的地区存在差异,与 El Niño 事件相关性显著的地区主要位于皖西北局部、皖北东部以及皖南大部分地区,与 La Nina 事件相关性显著的地区位于皖北以及皖东南局部。并且安徽省旱涝对 ENSO 事件的响应存在一定的滞后性,在之后的 3 个月,安徽省旱涝指数对 SSTA 的响应在逐渐增强。

d. 随着滞后性月份的增加,安徽各区域的旱涝指数与 SSTA 的相关系数逐渐增大,而且相关性由南往北递减,说明皖南地区与 SSTA 相关性大于皖北地区。在滞后 3 个月时,安徽各区域的旱涝指数与 SSTA 的相关性最强,表明 SSTA 对未来 3 个月皖南旱涝有明显的影晌。

e. 近 20 年皖北、皖南地区稻麦减产主要发生在 ENSO 事件年或者前一年,且减产率高。皖北地区和江淮地区的小麦减产发生次数较少,小麦减产率较大,而皖南地区小麦减产发生年份较多,小麦减产率较小。ENSO 对农业生产的影响与旱涝分布状况有关,江淮地区良好的灌溉条件会降低 ENSO 年农业旱涝受灾风险。

参考文献:

- [1] 朱益民,杨修群,陈晓颖,等. ENSO 与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化[J]. 热带气象学报,2007,23(2): 105-116. (ZHU Yimin, YANG Xiuqun, CHEN Xiaoying, et al. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and summer interannual climate variability in China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(2): 105-116. (in Chinese))
- [2] BRÖNNIMANN S. Impact of El Nino-Southern Oscillation on European climate[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(3): .
- [3] 任福民,袁媛,孙丞虎,等. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾[J]. 气象科技进展,2012,2(3): 17-24. (REN Fumin, YUAN Yuan, SUN Chenghu, et al. Review of progress of ENSO studies in the past three decades [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(3): 17-24. (in Chinese))
- [4] 李崇银,穆穆. ENSO 机理及其预测研究[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 761-781. (LI Chongyin, MU Mu. Mechanism and prediction studies of the ENSO [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 761-781. (in Chinese))
- [5] ZHANG Qiang, WANG Yue, SINGH V P, et al. Impacts of ENSO and ENSO Modoki + A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 308-319.

- [6] 叶正伟,许有鹏,潘光波. 江淮下游汛期降水与 ENSO 冷暖事件的关系[J]. 地理研究,2013,32(10):1824-1832. (YE Zhengwei, XU Youpeng, PAN Guangbo. Relationship between precipitation in flood season and ENSO warm and cold events in the lower reaches of Jianghuai Basin [J]. Geographical Research, 2013, 32(10):1824-1832. (in Chinese))
- [7] 王绍武,龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度[J]. 气象,1999,25(1):9-13. (WANG Shaowu, GONG Daoyi. ENSO events and ENSO strength recent 100 years [J]. Atmosphere, 1999, 25(1):9-13. (in Chinese))
- [8] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J]. 大气科学,2010,34(1):184-192. (ZONG Haifeng, CHEN Lieting, ZHANG Qingyun. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1):184-192. (in Chinese))
- [9] 刘永强,丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J]. 大气科学,1995,19(2):200-208. (LIU Yongqiang, DING Yihui. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. Scientia Atmospherics Sinica, 1995, 19(2):200-208. (in Chinese))
- [10] 许武成,马劲松,王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学,2005,25(2):212-220. (XU Wucheng, MA Jinsong, WANG Wen. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(2):212-220. (in Chinese))
- [11] CHEN Yongli, ZHAO Yongping, FENG Junqiao, et al. ENSO cycle and climate anomaly in China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(6):985-1000.
- [12] 杨亚力,杜岩,陈海山,等. ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的影响[J]. 大气科学,2011,35(4):729-738. (YANG Yali, DU Yan, CHEN Haishan, et al. Influence of ENSO event on rainfall anomaly over Yunnan Province and its neighboring regions during late spring-early summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(4):729-738. (in Chinese))
- [13] 李芬,张建新,郝智文,等. 山西降水与 ENSO 的相关性研究[J]. 地理学报,2015,70(3):420-430. (LI Fen, ZHANG Jianxin, HAO Zhiwen, et al. Correlation analysis of rainfall and ENSO in Shanxi [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3):420-430. (in Chinese))
- [14] 李威,翟盘茂. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系[J]. 气候变化研究进展,2009,5(6):336-342. (LI Wei, ZHAI Panmao. Relationship between ENSO and frequency of extreme precipitation days in China [J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(6):336-342. (in Chinese))
- [15] 唐晓春,袁中友. 近 60 年来厄尔尼诺事件对广东省旱灾的影响[J]. 地理研究,2010,29(11):1933-1934. (TANG Xiaochun, YUAN Zhongyou. The influence of the drought disaster caused by El Nino events in Guangdong Province in recent 60 years [J]. Geographical Research, 2010, 29(11):1933-1934. (in Chinese))
- [16] 郑冬晓,杨晓光. ENSO 对全球及中国农业气象灾害和粮食产量影响研究进展[J]. 气象与环境科学,2014,37(4):90-100. (ZHENG Dongxiao, YANG Xiaoguang. Advance on effect of ENSO on agro-meteorological disaster and crop yields of the world and China [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2014, 37(4):90-100. (in Chinese))
- [17] SHUAI Jiabing, ZHANG Zhao, TAO Fulu, et al. How ENSO affects maize yields in China: understanding the impact mechanisms using a process-based crop model [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1):424-438.
- [18] ZHANG Qiang, ZENG Jian, ZHANG Liyang. Characteristics of land surface thermal-hydrologic processes for different regions over North China during prevailing summer monsoon period [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(1):1-9.
- [19] 张爱民,马晓群,杨太明,等. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量影响[J]. 应用气象学报,2007,18(5):619-626. (ZHANG Aimin, MA Xiaogun, YANG Taiming, et al. The influence of drought and water logging disasters on crop yields in Anhui Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5):619-626. (in Chinese))
- [20] 赵亮,邹力,王成林,等. ENSO 年东亚夏季风异常对中国江、淮流域夏季降水的影响[J]. 热带气象学报,2006,22(4):360-366. (ZHAO Liang, ZOU Li, WANG Chenglin, et al. Impacts of the East Asian summer monsoon anomaly during the ENSO event period on the summer precipitation in the lower-middle reaches of the Yangtze River and Huaihe River Valley [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(4):360-366. (in Chinese))
- [21] 张秉伦,王成兴,曹永忠. 厄尔尼诺与江淮流域旱涝灾害的关系[J]. 自然杂志,1998,20(5):289-293. (ZHANG Binglun, WANG Chengxing, CAO Yongzhong. The relations between El Nino and drought and floods disaster in the Yangtze River and Huaihe River Valley [J]. Chinese Journal of Nature, 1998, 20(5):289-293. (in Chinese))
- [22] 曾婷,杨东,朱小凡,等. ENSO 事件对安徽省气候变化和旱涝灾害的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(1):215-223. (ZENG Ting, YANG Dong, ZHU Xiaofan, et al. Impact of ENSO events on climate change and drought and flood disasters in Anhui province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1):215-223. (in Chinese))
- [23] 翟武全. 中国气象灾害大典(安徽卷) [M]. 北京:气象出版社,2006.

- [24] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A mul-tiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23 (7): 1696-1718.
- [25] ZHANG Qiang, SUN Peng, SINGH V P, et al. Precipitation changes in China (1956—2000): changing patterns and implications [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 82/83: 86-95.
- [26] STORCH V H. Misuses of statistical analysis in climate research [C]//Storch HV, Navarra A. (Eds.). *Analysis of climate variability: application of statistical techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 11-26.
- [27] SANJIV K, VENKATESH M. Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374: 171-183.
- [28] KULKARNI A, STROCH V H. Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 1995, 4(2): 82-85.
- [29] 朱自玺, 刘荣花, 方文松, 等. 华北地区冬小麦干旱评估指标研究 [J]. *自然灾害学报*, 2011, 12(1): 145-150. (ZHU Zixi, LIU Ronghua, FANG Wensong, et al. Preliminary study on drought zonation of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 12(1): 145-150. (in Chinese))
- [30] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 643-649. (LI Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 643-649. (in Chinese))
- [31] 段莹, 王文, 蔡晓军. PDSI, SPEI 及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析 [J]. *高原气象*, 2013, 32(4): 1126-1139. (DUAN Ying, WANG Wen, CAI Xiaojun. Applied analyses on Palmer, SPEI and CI indices of drought process in Yangtze-Huaihe river basins during winter of 2010/spring of 2011 [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(4): 1126-1139. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-07-31 编辑: 徐娟)

(上接第 5 页)

- [10] 杨赵平, 张雄, 刘爱荣. 滇池水生植被调查 [J]. *西南林学院学报*, 2004, 24(1): 27-30. (YANG Zhaoping, ZHANG Xiong, LIU Airong. Study on aquatic vegetation change in Dianchi Lake [J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2004, 24(1): 27-30. (in Chinese))
- [11] 陈开宁. 篦齿眼子菜生物、生态学及其在滇池富营养水体生态修复中的应用研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2002.
- [12] 沈亚强, 王海军, 刘学勤. 滇中五湖水生植物区系及沉水植物群落特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(增刊 1): 111-119. (SHEN Yaqiang, WANG Haijun, LIU Xueqing. Aquatic flora and assemblage characteristics of submerged macrophytes in five lakes of the central Yunnan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19 (sup1): 111-119. (in Chinese))
- [13] 宋任彬, 韩亚平, 潘珉, 等. 滇池外海沉水植物生态环境调查与分布特点分析 [J]. *环境科学导刊*, 2011, 30(3): 61-64. (SONG Renbin, HAN Yaping, PANG Min, et al. Preliminary investigation and analysis on submerged plants ecological environment and distribution characteristics in Outer Dianchi Lake [J]. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(3): 61-64. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-08-19 编辑: 彭桃英)

· 信息播报 ·

《水资源保护》编委会会议即将在广州召开

2016 年度《水资源保护》编委会会议将于 2016 年 12 月 12—14 日在广州与中国水利学会环境水利专业委员会 2016 年年会暨学术研讨会同期召开。有关事项通知如下:

1. 报到时间: 12 月 12 日全天;
2. 报到地点: 燕岭大厦 (地址: 广州市天河区燕岭路 29 号, 电话: 020-37232288, 酒店联系人: 苏雅 15013351810);
3. 会议不接送站, 请参会编委自行到会;
4. 会议统一安排住宿, 费用自理。
5. 会务联系人: 张凯锋 13418076898, 张家福 13580368805 (广东方面); 康珍 13520668825, 张建永 13810223226 (北京方面); 彭桃英 13770823281 (编辑部)
6. 会议报名: 请各位参会编委 2016 年 12 月 1 号前同时向康珍和彭桃英报名确认。康珍邮箱: kangzhen@giwp.org.cn; 彭桃英邮箱: pty892@126.com, 以便安排住宿。

《水资源保护》编辑部
2016-11-10