

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.01.007

基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化

冯 怡¹, 薛联青¹, 张 敏², 苗智英³, 任 磊¹, 张子沐¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省洪泽湖管理委员会办公室, 江苏 淮安 223100;
3. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于 FAO56 Penman-Monteith 和 Hargreaves-Samani 两种潜在蒸散发计算方法得到了 12 个月尺度的标准化降水蒸散指数 (SPEI), 研究了 1960—2016 年淮河流域干湿时空变化特征以及两种 SPEI 序列对相关气象要素的敏感性。结果表明:两种 SPEI 序列均显示流域呈变湿趋势, 温度距平值与 SPEI 负相关, 与潜在蒸散发距平值正相关;空间上, 流域西北和东部地区呈显著变湿趋势, 中部地区为不显著变干趋势;SPEI 去趋势后, 流域的干湿变化斜率减小, 去趋势过程不改变 SPEI 的趋势变化分布, 只影响流域的干湿变化幅度;气象要素的趋势变化可影响流域干湿变化趋势和干湿等级, 淮河流域干湿变化影响因素由强到弱顺序依次为温度、日照时数、风速和相对湿度。

关键词:潜在蒸散发; 标准化降水蒸散指数; 干湿变化; 敏感性; 淮河流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2019)01-0035-06

Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences // FENG Yi¹, XUE Lianqing¹, ZHANG Min², MIAO Zhiying³, REN Lei¹, ZHANG Zimu¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hongze Lake Management Committee of Jiangsu Province, Huai'an 223100, China; 3. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on two potential evapotranspiration calculation methods of FAO56 Penman-Monteith and Hargreaves-Samani, standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at 12-month scale was obtained. The spatial and temporal variations of dry and wet in Huaihe River Basin from 1960 to 2016 and the sensitivity of two SPEI sequences to related meteorological factors were studied. The results show that both SPEI sequences show a trend of wetting. The temperature anomaly is negatively correlated with SPEI and positively correlated with the potential evapotranspiration anomaly. Spatially, the northwest and east of the basin show a significant trend of wetting, while the central region shows a non-significant trend of drying. After the detrend of SPEI, the slope of dry-wet change in the basin decreases, and the detrend process does not change the trend distribution of SPEI, but only affects the range of dry-wet change in the basin. The trend change of meteorological factors can affect the trend and grade of dry-wet change in the basin. The order of influencing factors of dry-wet change in Huaihe River Basin from strong to weak is temperature, sunshine duration, wind speed and relative humidity.

Key words: potential evapotranspiration; SPEI; dry-wet change; sensitivity; Huaihe River Basin

受气候变化和人类活动的影响,全球水分循环给地区的干湿状况带来了不可忽视的变化,继而对地区的社会经济发展产生了重大影响,因此,区域性的气候干湿状况受到广泛关注。干旱指数是监测、预警、评估干旱的关键参数,可标记干湿发生时间和强度,反映干湿发生机理^[1]。目前标准化降水指数

(standardized precipitation index, SPI) 是国内外用于干湿状况监测最常用的指标之一^[2]。假定所有地点旱涝发生概率相等, SPI 以降水为基础进行区域的干湿变化评价,但无法标识旱涝频发地区,且未考虑以蒸发为主的水分支出。在全球变暖的背景下,气温升高对水量平衡的影响不容忽视。Vicente-

基金项目:江苏省水利科技项目(2017027)

作者简介:冯怡(1994—),女,硕士研究生,研究方向为生态水文。E-mail: 240092738@qq.com

通信作者:薛联青,教授。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

Serrano 等^[3]提出的标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 考虑了蒸散发的水分支出作用,符合自然界的水量平衡关系;对比帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI), SPEI 计算简便,可评估不同时间尺度的干湿程度。凭借概率计算的特点和空间可比性等优点, SPEI 目前已成为干湿特征分析新的理想指标。近年来,国内外已有众多学者采用 SPEI 对区域干湿状况进行计算和分析。Zhu 等^[4]采用不同时间尺度的 SPI 和 SPEI 进行了水文干旱监测的对比分析;Vicente-Serrano 等^[5]基于 SPEI 分析了大气环流指数对欧洲干旱状况的影响程度;陈子燊等^[6]计算了多时间尺度的 SPEI,采用 REOF、Mann-Kendall 趋势检验和小波分析等方法分析了广东 1962—2007 年的干湿时空变化特征;刘珂等^[7]利用两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对全国的干湿变化特征进行了分析。目前基于 SPEI 的干湿变化研究主要从流域的时空变化分析展开,而在整体干湿变化的基础上,不同气象要素对流域干湿变化影响的研究相对较少。

为研究不同气象要素对流域干湿变化的影响程度,深入探究流域的时空干湿变化特征,本文采用基于多种气象要素的 FAO56 Penman-Monteith 法(P-M 法)^[8]和仅考虑温度的 Hargreaves-Samani 法(Har 法)^[9]两种潜在蒸散发的计算方法,基于 12 个月尺度的 SPEI 对洪泽湖以上淮河流域进行年尺度的干湿变化研究,定量分析两种 SPEI 序列对不同气象要素的敏感性,以期对 SPEI 在江淮地区及全国干湿变化研究中的应用提供参考。

1 研究区域概况

淮河流域降水时空分布不均,有些年份夏秋连旱,洪涝和旱灾频发,是典型的“孕灾”区域。选取洪泽湖以上的淮河中上游为研究区域,该区域水系呈典型的扇状分布,汇水面积达 15.8 万 km²^[10-11]。作为整个淮河流域的主要产流区,淮河中上游也是洪泽湖入湖水量的主要来源^[10]。该区域介于长江流域和黄河流域之间,是北亚热带向暖温带过渡区,属大陆性季风气候。降水受夏季风影响,主要出现在汛期(5—9 月),年降水量多为 600 ~ 1400 mm。选取淮河中上游 20 个气象站点 1960—2016 年的降水 P 、平均温度 T 、最高温度 T_{\max} 、最低温度 T_{\min} 、日照时数 S_d 、平均风速 W 和相对湿度 R_h 等日尺度数据,基于两种潜在蒸散发计算方法的 SPEI 序列进行流域干湿时空变化分析和敏感性分析。相关数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。图 1 是包含了 20 个气象站点的洪泽湖以上淮河中上游

流域图。

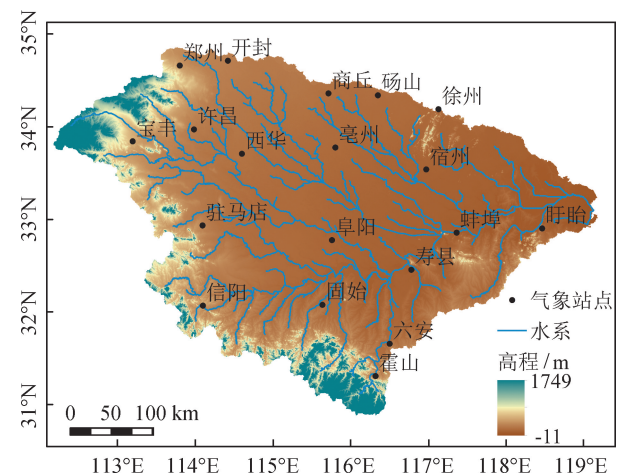


图 1 洪泽湖以上淮河中上游流域及气象站点分布

2 研究方法

2.1 SPEI 计算方法

SPEI 是对降水量与潜在蒸散发的差值序列累积概率值进行正态标准化后的一种指数。本文采用 P-M 法和 Har 法分别计算月潜在蒸散发,然后计算逐月降水与蒸散发的差值,建立不同时间尺度的累积序列,采用 Log-logistic 分布对数据序列进行拟合及标准化转换,得到不同时间尺度的 SPEI。以 12 个月时间尺度的 SPEI 表征研究区域的气象干湿状况,采用算术平均法求得流域平均 SPEI。根据中国气象局制定的 SPEI 干湿等级划分标准(表 1)对流域干湿等级进行划分。

表 1 SPEI 的干湿等级划分及概率

干湿等级	SPEI	概率/%
极端干旱	≤ -2.0	2.28
中等干旱	$(-2.0, -1.0]$	13.59
轻度干旱	$(-1.0, -0.5]$	14.98
正常	$(-0.5, 0.5]$	38.30
轻度湿润	$(0.5, 1.0]$	14.98
中等湿润	$(1.0, 2.0]$	13.59
极端湿润	> 2.0	2.28

2.2 潜在蒸散发计算方法

Hargreaves 和 Samani 在 1985 年推导出基于温差的作物潜在蒸散发计算公式(Hargreaves-Samani 公式,式(1)),基于该公式的 Har 法在缺少气象资料的地区广泛应用,并被证明是一个有效的估算方法,估算时需要温度(平均、最高、最低)和地理位置数据。

$$E_h = 0.0023(T + 17.8)(T_{\max} + T_{\min})0.5R_a/\lambda \quad (1)$$

式中: E_h 为基于 Har 法的潜在蒸散发; T 为平均温度,℃; T_{\min} 为最低温度,℃; T_{\max} 为最高温度,℃; R_a

为大气顶太阳辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; λ 是水汽化潜热, MJ/kg 。

Penman 法是依据能量平衡和紊流扩散原理推导出的计算参考作物蒸散发的方法, 具有坚实的理论基础。经历了漫长的发展历程, 在 Penman 法的基础上, 包含了风函数的 P-M 法成为目前使用最多的潜在蒸散发计算方法, 其计算公式为

$$E_{\text{pm}} = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{J + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: E_{pm} 为基于 P-M 法的潜在蒸散发; Δ 为温度饱和水汽压关系曲线 T 处斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; u_2 为 2 m 高处风速, m/s ; R_n 为净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; γ 为湿度计常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; 各参数具体公式参见文献[12]。基于 Har 法和 P-M 法计算所得的干旱指数记为 SPEI_{h} 、 SPEI_{pm} 。

2.3 去趋势方法

为了定量研究两种潜在蒸散发计算方法所得 SPEI 序列对不同气象要素的敏感性, 采用单一气象要素不变、其他气象要素去趋势的去趋势方法^[13-14], 结合两种潜在蒸散发计算方法得到新的潜在蒸散发序列, 对不同的 SPEI 序列进行分析研究。所有气象要素去趋势情况简称为去趋势, 实测数据未去趋势情况简称为未去趋势, 只保留一种气象要素趋势的情况则为部分去趋势。所有的 SPEI 和气象要素序列均采用非参数 Mann-Kendall 检验法的 Sen's 斜率进行趋势计算^[15]。简单去趋势方法用于消除站点原始气象要素的线性趋势, 可直接应用于空气温度参数, 但对于其他有范围限制的气象要素例如相对湿度 ($0 < R_h < 1$)、风速和日照时数 ($W > 0, S_d > 0$), 先采用简单去趋势方法, 然后结合参数的区间限制条件进行相关处理以避免不合理的结果。温度的去趋势公式为

$$T_{b,i} = T_{a,i} + \alpha(i - 1960) \quad (3)$$

式中: $T_{b,i}$ 为温度 T 在年份 i 的去趋势值; $T_{a,i}$ 为相同年份的最初温度; α 为所选站点的温度趋势值; i 代表年份(1960—2016年)。

对于其余气象要素, 受本身的范围区间影响, 需要对去趋势方法进行改进, 改进公式为

$$F_{b,i} = F_{a,i} + \alpha(i - 1960) \quad (4)$$

$$F'_{b,i} = F'_{a,i} \left(\frac{F_{b,i}}{F_{a,i}} \right) \quad (5)$$

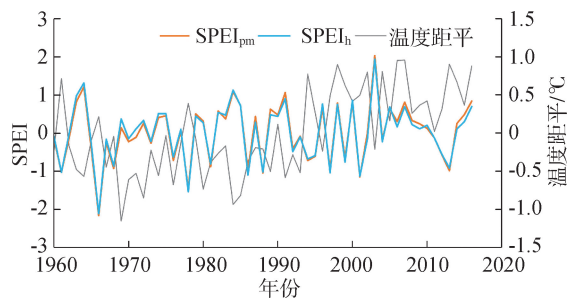
式中: $F_{b,i}$ 为年尺度下气象要素的去趋势值; $F_{a,i}$ 为年尺度下气象要素的实际值; $F'_{b,i}$ 为日尺度下气象

要素的去趋势值; $F'_{a,i}$ 为日尺度下气象要素的实际值; α 为实际气象要素曲线的变化斜率。

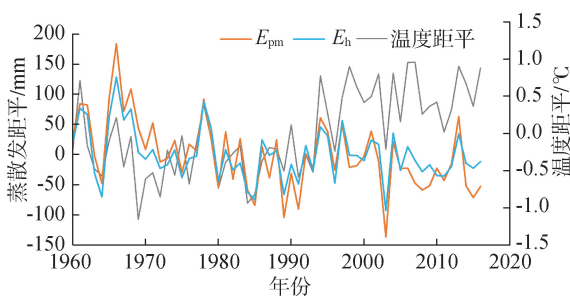
3 结果与讨论

3.1 两种 SPEI 与潜在蒸散发序列的时间对比

图 2 是 1960—2016 年淮河流域两种 SPEI 序列和潜在蒸散发序列对比图。从图 2(a) 可知, 流域的平均温度距平为显著上升趋势, 流域呈增温现象。两种 SPEI 序列差异较小, 线形基本吻合, 流域整体呈现变湿趋势, SPEI 值主要在 $-2 \sim 2$ 之间波动, 根据表 1 的干湿等级, 流域干湿等级主要在中等干旱和中等湿润之间相互转换。两种 SPEI 序列与温度距平的线形走势相反, 温度距平越大, SPEI 越小, 温度距平越小, SPEI 越大, 二者呈负相关关系。SPEI_{pm} 的整体斜率为 0.0085, SPEI_h 的整体斜率为 0.0049, 略低于前者, 研究区呈现变湿趋势, 温度距平曲线的斜率为 0.02, 明显大于 SPEI 曲线的斜率, 说明流域温度变化较干湿变化更明显。SPEI 除受温度影响外, 还受降水等其他气象因素的影响, 因此研究区的干湿变化程度小于温度的变化程度。



(a) SPEI



(b) 潜在蒸散发

图 2 1960—2016 年淮河流域干湿变化和蒸散发变化

不同于 SPEI 序列的高吻合度, 潜在蒸散发整体呈下降趋势(图 2(b)), 与温度距平的上升趋势形成强烈对比, 潜在蒸散发距平随温度距平的变化而变化, 二者为显著负相关关系。E_{pm} 的斜率为 -1.72 , E_h 的斜率为 -0.78 , 前者的下降速率约为后者的 2 倍, 从图 2(b) 可以看出, E_{pm} 距平随温度距平变化较 E_h 更强烈, 说明 E_{pm} 对温度的升高更敏感。潜在蒸散发距平越大, 两种潜在蒸散发距平的差值

越大,例如 1966 年和 2004 年。对照图 2(a)可知,潜在蒸散发距平越大,SPEI 值反而越小,流域呈现干旱状态;反之,潜在蒸散发距平越小,SPEI 值越大,流域呈现湿润状态。

3.2 两种 SPEI 序列的空间分布特征

采用非参数 Mann-Kendall 检验法对两种 SPEI 序列曲线进行斜率计算,分析流域的干湿空间变化情况。图 3 为 1960—2016 年 SPEI 序列曲线的斜率空间分布,对比图 3(a)和(b),流域西北地区(河南境内)的 $SPEI_{pm}$ 曲线斜率大于 0,说明该地区呈现变湿趋势;而 $SPEI_h$ 曲线的斜率分布显示,流域西北大部分地区 and 洪泽湖周边区域均有变湿趋势,河南西华站周边地区的 $SPEI_h$ 曲线斜率小于 0,与 $SPEI_{pm}$ 的分布结果不同。图 3(c)(d)为去趋势后的 SPEI 斜率分布,对比图 3(a)(b),去趋势后的 SPEI 曲线斜率明显减小,说明气象要素去趋势对 SPEI 的斜率有显著影响,但流域干湿变化区域不变,说明去趋势过程不改变 SPEI 在流域各地区的变化趋势,仅影响 SPEI 值的趋势变化幅度。对比图 3(a)和(c), $SPEI_{pm}$ 去趋势后,曲线斜率大于 0 的区域增加,增大的范围主要分布于流域的东部和南部地区, $SPEI_h$ 的变化趋势的分布地区基本不变。去趋势后的 $SPEI_{pm}$ 曲线斜率变化幅度较 $SPEI_h$ 更大,其变化范围从 $-0.0029 \sim 0.0242$ 变为 $-0.0108 \sim 0.0067$,说明去趋势过程对 $SPEI_{pm}$ 影响更大。整个研究区域的 SPEI 曲线斜率变化相对较小,斜率绝对值不大于 0.05,

说明流域未来的干湿情况不会发生显著变化,干湿状况相对稳定。

3.3 SPEI 对不同气象因素的敏感性

图 4 为去趋势、未去趋势及部分去趋势等多种情况的两种 SPEI 序列频数分布(图中 R_h 为只保留相对湿度趋势的情况, S_d 为只保留日照时数趋势的情况, T 为只保留温度趋势的情况, W 为只保留风速趋势的情况),降水去趋势后对 SPEI 没有影响,因此不加以讨论。Har 法只涉及温度,因此 $SPEI_h$ 只有未去趋势、去趋势和只保留温度趋势 3 种结果的对比。

从图 4(a)可以看出,未去趋势情况下,两种 SPEI 序列的概率密度函数曲线大致相同,二者在 SPEI 为 $-1 \sim 1$ 的频数相差较大, $SPEI_{pm}$ 的洪旱正常等级的概率大于 $SPEI_h$ 。而去趋势后的结果与未去趋势不同, $SPEI_h$ 比 $SPEI_{pm}$ 在 $-1 \sim 1$ 的频数更多(图 4(b)),说明 $SPEI_h$ 结果显示的流域正常及轻度洪旱等级的频率高于 $SPEI_{pm}$ 。因此,去趋势前 $SPEI_{pm}$ 显示的洪旱正常概率高于 $SPEI_h$,去趋势后结果相反。从图 4(c) 概率密度函数曲线的吻合度可以看出,仅 $SPEI_h$ 去趋势情况的洪旱正常频数大于另 3 种情况,其余 3 种情况的概率密度函数曲线基本重合,但频数分布直方图相差较大, $SPEI_{pm}$ 去趋势后,其处于 $0.5 \sim 1$ 的频数大于另外两种情况,说明此种情况下的轻度干旱有所增加。只保留日照时数趋势和去趋势的对比结果显示(图 4(c)),后者的正常洪旱概

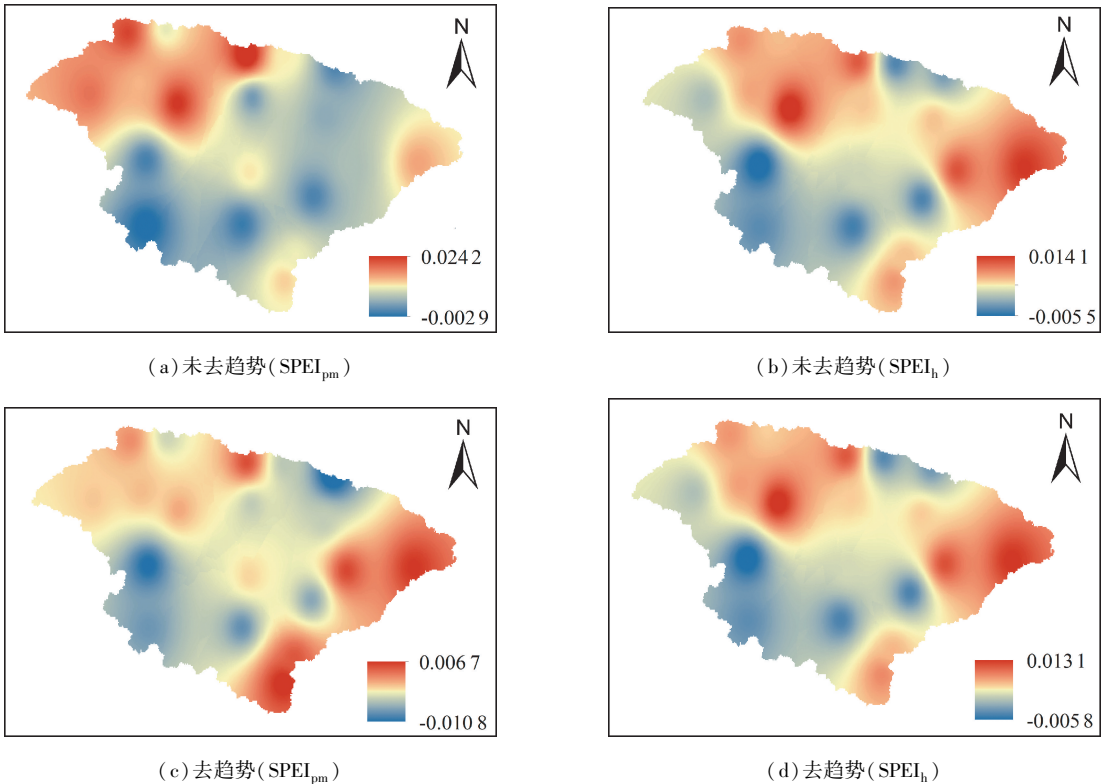


图 3 SPEI 序列曲线的斜率空间分布

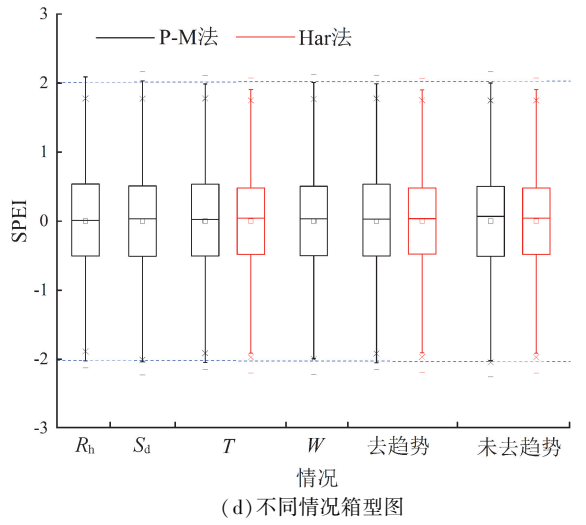
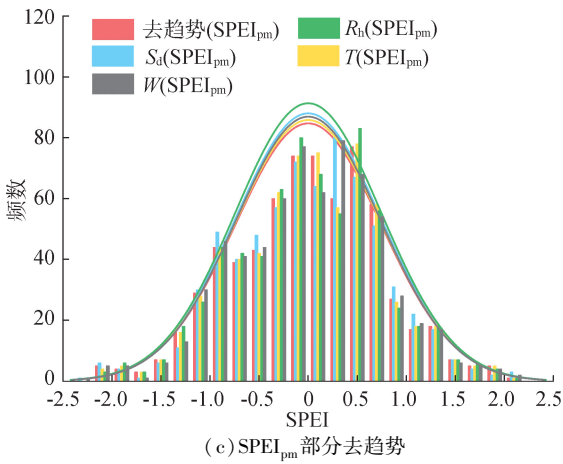
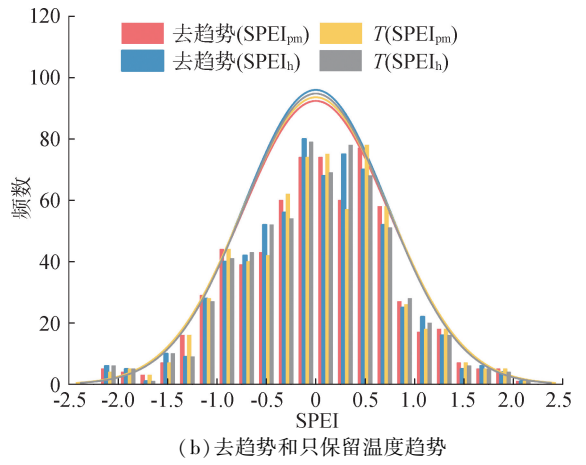
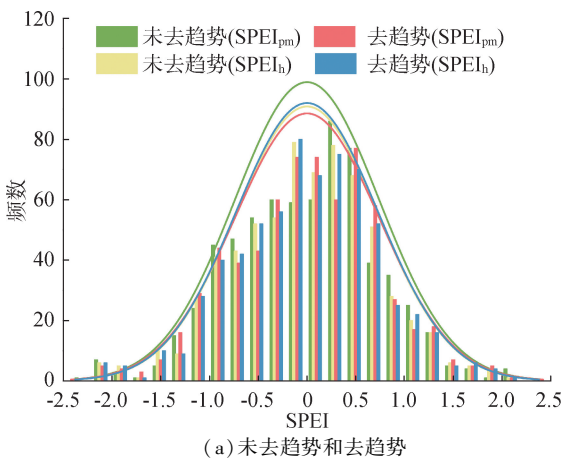


图4 两种 SPEI 序列对多种气象要素的敏感性分析

率略高于前者。由图 4(c) 可知,只保留相对湿度趋势的 $SPEI_{pm}$ 在 $-1 \sim 1$ 的频数明显低于去趋势的 $SPEI_{pm}$,只保留风速趋势的 $SPEI_{pm}$ 在 $-1 \sim 1$ 的频数分布更多,流域将出现更多正常和轻度旱涝现象。

从图 4(d) 的对比可知,多种情况下 SPEI 值的上下边界值、中位数变化不明显。未去趋势情况下,两种序列 SPEI 的上下界相近, $SPEI_{pm}$ 的中位数和平均值略高于 $SPEI_h$ 。与去趋势情况对比,未去趋势 $SPEI_{pm}$ 的中位数和平均值有小幅度的提高,说明去趋势后 SPEI 值整体偏大,但偏大幅度不明显。整体来看,多种情况的上下边界范围在 $-2 \sim 2$,平均值和中位数保持在零左右,说明流域的平均旱涝水平在中等干旱和中等洪涝之间,没有极端的旱涝事件发生,整体干湿状况保持稳定。

表 2 是以上多种情况概率密度函数的 μ 值和 σ 值。可以看出,P-M 法下,只保留温度趋势情况下 $SPEI_{pm}$ 的 μ 值减小了 0.145%,流域的干旱趋势增强,另 3 种去趋势情况下, μ 值分别增加了 0.0007%、0.138% 和 0.121%,说明概率密度函数向右侧偏移,流域有变湿趋势,其中后两种情况的趋势变化更明显。Har 法下,只保留温度趋势情况下

流域的干旱趋势增加,但 $SPEI_h$ 的 μ 值只减小 0.034%,对流域干湿变化影响不明显。除只保留相对湿度趋势的情况外,其余多种情况的 σ 值较去趋势情况均有所增加,流域的正常及轻度旱涝等级概率增加。

表 2 多种情况下 $SPEI_{pm}$ 和 $SPEI_h$ 的变化对比 %

方法	只保留相对湿度趋势		只保留日照时数趋势			
	μ	σ	μ	σ		
P-M 法	0.0007	-0.0242	0.138	2.951		
Har 法						
方法	只保留温度趋势		只保留风速趋势		未去趋势	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
P-M 法	-0.145	6.161	0.121	1.549	0.008	-0.441
Har 法	-0.034	4.984			-0.034	4.984

结合图 4(a)(b)(c) 可知,温度、日照时数和风速为流域旱涝变化的主要因素。温度升高增加干旱概率,减小淮河流域轻度旱涝及以上等级的概率。相对湿度、日照时数和风速的变化趋势是造成流域向湿润发展的气象因素,日照时数和风速的趋势可增加正常及轻度旱涝等级的概率,减小更高等级的旱涝事件出现的概率,而相对湿度的趋势则会增加

流域轻度以上的洪旱概率,不利于地区的发展。综上所述可得,对淮河流域干湿变化影响程度从大到小的因素分别是温度、日照时数、风速、相对湿度。

4 结 论

a. 两种 SPEI 序列均显示淮河中上游存在变湿趋势;SPEI 和温度距平呈负相关关系,潜在蒸散发与温度呈正相关关系。潜在蒸散发距平值越大,SPEI 值越小,流域为变干趋势;反之,潜在蒸散发距平值越小,SPEI 值越大,流域为变湿趋势。流域西北呈变湿趋势、东部洪泽湖地区的干湿变化趋势是两种 SPEI 序列曲线斜率分布图的差异所在;去趋势过程不改变 SPEI 的趋势变化分布,但影响流域的干湿变化强度。整个流域的 SPEI 曲线斜率变化较小,说明流域未来的干湿情况不发生显著改变。

b. 淮河中上游流域干湿变化影响因素由强到弱顺序依次为温度、日照时数、风速和相对湿度。4 种气象要素的趋势变化可影响流域干湿等级的概率分布情况;温度的升高增加流域的干旱趋势,日照时数、相对湿度和风速是造成流域湿润的气象因素。

参考文献:

[1] 薛联青,张竞楠,刘晓群,等. 基于改进的综合气象干旱指数的洞庭湖流域干旱时空特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):1-6. (XUE Lianqing, ZHANG Jingnan, LIU Xiaoqun, et al. Spatial and temporal patterns of droughts in Dongting Lake watershed based on improved meteorological drought composite index [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(1):1-6. (in Chinese))

[2] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Eishth Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993.

[3] VICENTE-SERRANO S M, BEGERÍA S, LÓPEZMORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.

[4] ZHU Ye, WANG Wen, SINGH V P, et al. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection [J]. Science of the Total Environment, 2016, 571:1058-1068.

[5] VICENTE-SERRANO S M, GARCÍA-HERRERA R, BARRIOPEDRO D, et al. The westerly index as complementary indicator of the North Atlantic oscillation in explaining drought variability across Europe [J].

Climate Dynamics, 2016, 47(1/2/3/4):845-863.

[6] 陈子燊,黄强,刘曾美. 1962—2007 年广东干湿时空变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):469-476. (CHEN Zishen, HUANG Qiang, LIU Zengmei. Analyzing the spatial-temporal variation of wet and dry spells during 1962-2007 in Guangdong province [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4):469-476. (in Chinese))

[7] 刘珂,姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1):23-36. (LIU Ke, JIANG Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1):23-36. (in Chinese))

[8] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation, 1998.

[9] 谢平,陈晓宏,刘丙军. 湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):6-9. (XIE Ping, CHEN Xiaohong, LIU Bingjun. Analysis of appropriate calculation models for reference crop evapotranspiration in Zhanjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5):6-9. (in Chinese))

[10] 王苓如,薛联青,王思琪,等. 气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势[J]. 水资源保护, 2015, 31(3):57-62. (WANG Lingru, XUE Lianqing, WANG Siqi, et al. Evolutionary tendency of water resources in the basin above Hongze Lake under the condition of climate change [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):57-62. (in Chinese))

[11] 薛联青,朱祎真,王思琪,等. 基于投影寻踪的湖泊生态健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(2):67-72. (XUE Lianqing, ZHU Yizhen, WANG Siqi, et al. Lake ecosystem health assessment based on projection pursuit [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):67-72. (in Chinese))

[12] ZHANG Jie, SUN Fubao, XU Jijun, et al. Dependence of trends in and sensitivity of drought over China (1961-2013) on potential evaporation model [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(1):206-213.

[13] MAO Y, NIJSSEN B, LETTENMAIER D P. Is climate change implicated in the 2013-2014 California drought? A hydrologic perspective [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8):2805-2813.

[14] REN Lei, XUE Lianqing, LIU Yuanhong, et al. Study on variations in climatic variables and their influence on runoff in the Manas River Basin, China [J]. Water, 2017, 9(4):258.

(收稿日期:2018-03-17 编辑:熊水斌)