

基于 SPEI 指数的鄱阳湖流域近 60a 干旱时空变化特征

谢坤^{1, 3} 丁明军^{1, 2} 张华敏¹ 陈利文¹¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 江西 南昌 330022;

2. 鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

3. 豫章师范学院, 江西 南昌 330103)

【摘要】: 量化研究干旱的时空变化特征, 对区域干旱监测与抗旱减灾有重要的意义。基于鄱阳湖流域 1961~2017 年 26 个气象站点的观测数据, 利用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 定量分析了该流域干旱的时空变化特征及其影响因素。结果表明: (1) 鄱阳湖流域南湿北干, 且四季差异明显。(2) 鄱阳湖流域呈现显著湿润化趋势 ($p < 0.05$), 四季均存在变湿趋势, 且夏季、冬季变湿显著 ($p < 0.05$)。从空间格局上看, 所有站点年尺度均存在变湿趋势, 变湿幅度较大的站点分布在流域中北部; 在季节尺度上, 除春季赣江流域的西北部、饶河流域和信江流域东部部分站点, 以及秋季个别站点 (德兴、遂川和龙南) 呈现干旱化趋势外, 其余站点各季节均呈湿润化趋势, 只是在变湿的幅度和显著水平上存在一定差异。(3) 鄱阳湖流域不同等级干旱的发生存在明显的年代际差异。除 20 世纪 90 年代及最近 10 年干旱发生的频率较低外, 其他年代干旱发生的频率均相对较高, 尤其是 20 世纪 60 年代。(4) 鄱阳湖流域 SPEI 指数与降水呈正相关, 与气温呈负相关, 且与降水的相关性较气温的相关性高。在全球尺度的海气作用的驱动下, 该流域的干湿变化与厄尔尼诺现象/拉尼娜事件之间存在着一定的相关性, 且具有半年的滞后效应。

【关键词】: SPEI 时空变化 鄱阳湖流域

【中图分类号】: P426 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-2015-13

干旱是全球最常见、最普遍的自然灾害, 具有发生频率高、持续时间长、影响范围广的特点^[1]。我国地处东亚季风区, 复杂的地理环境和气候条件, 使得该地区成为世界上气候脆弱区之一^[2]。当前, 气候暖干化日趋明显, 我国未来几十年的旱情可能呈加重趋势^[3, 4]。干旱给区域生态环境、经济发展和人类社会生活带来了巨大的影响^[5]。因此, 量化研究干旱的时空变化特征, 对区域干旱监测与抗旱减灾有重要的意义。

目前, 干旱现象主要是通过干旱指数来进行描述。最常用的干旱指数是帕尔默指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) 和标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)。而由 Vicente-Serrano 等^[6]于 2010 年提出的标准化降水蒸散指

作者简介: 谢坤 (1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为气候变化及其影响. E-mail: xiek0831@126.com

丁明军 E-mail: dingmj@jxnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41761020); 江西省自然科学基金项目 (20151BAB203041)

数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)既继承了 SPI 多时间尺度的特征,又考虑了 PDSI 对潜在蒸散发的响应优势,在考虑区域水分供应下,能从多时间尺度较好地评估干旱的时空变化特征,已被广泛应用于区域的干旱监测研究中^[7~9]。近年来,相关学者基于该指数已对内蒙古^[10,11]、云贵高原^[12,13]、西南地区^[14,15]、黄土高原^[16]、黄河流域^[17]、长江流域^[18]等地区的干旱进行了大量研究,并讨论该指数的区域适用性。熊光洁等^[19]认为考虑水分平衡的 SPEI 指数更适用于干湿季明显的西南地区。刘占明等^[20]研究表明,对于地处湿润地区的广东省而言, SPEI 指数更能准确描述实际干旱的发生。王文等^[21]亦发现, SPEI 指数在长江中下游地区,尤其是对江西、湖南、湖北 5~9 月的干旱具有很强的表征能力。李忆平等^[22]、杨庆等^[23]的研究均表明, SPEI 指数在我国湿润地区具有良好的适用性。

鄱阳湖流域地处湿润地区,是我国重要的商品粮生产基地^[24]。该流域水资源丰富,但降水的时空差异较大,干旱时有发生^[25]。近年来,鄱阳湖流域正经历着显著的人类活动和气候变化过程^[26],气温不断升高,湖区枯水程度加剧,最低水位不断被刷新^[27]。干旱不仅给流域内的农业生产造成重大损失,而且给该流域乃至整个长江下游地区的生态安全带来巨大影响。目前,鄱阳湖流域的干旱研究侧重于区域尺度,在干旱的趋势及空间格局等方面的研究也存在着一定争议。郑太辉等^[28]认为秋季干旱未发生明显变化;而洪兴骏等^[29]则认为秋季具有较为明显的干旱化趋势,同时指出鄱阳湖流域的干旱覆盖面广,流域内的各个区域都可能在不同时期发生干旱;但蔡哲等^[30]研究表明干旱主要发生在流域东部的武夷山西侧和赣南。此外,以往的研究时段主要集中在 20 世纪 60 年代至本世纪初,近 10 年的干旱趋势特征研究相对较少。

因此,本文基于鄱阳湖流域 1961~2017 年 26 个气象站点的观测数据计算获取的 SPEI 时序数据,采用 Sen's 趋势分析和 Mann-Kendall (M-K) 检验、分段线性回归等方法,分析了鄱阳湖流域干旱的时空变化特征及其影响因素,以为该流域的干旱监测与防治提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游南岸,总面积 $16.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,是由鄱阳湖、赣江、抚河、信江、饶河、修河在内的“五河”水系和丘陵山地等构成的独立完整自然地理流域单元^[24]。东、西、南面群山环绕,中部平原、丘陵和盆地交错分布。该流域地处亚热带湿润季风气候区,年均气温 17.1°C ,年均降水量 1600mm,雨量充沛,但降水的季节性和区域差异性明显。基于历史旱灾资料的研究表明,鄱阳湖流域在 1065~1930 年的 866 年间,大小干旱年数 184 次,平均 4.7 年 1 次^[31]。近百年来,该流域发生严重干旱的年份之间的间隔有不断缩短的趋势^[32]。

1.2 数据来源

本文气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),选用鄱阳湖流域 1961~2017 年资料序列较长的 26 个气象站点的逐月气象观测数据。该数据包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、风速和相对湿度。数据处理过程中对个别站点的缺失数据采用均值替换法进行插补^[33]。研究区及气象站点分布如图 1 所示。厄尔尼诺/拉尼娜事件资料来自美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的逐月 Niño 指数(ONI)和南方涛动指数(SOI)(<https://www.climate.gov/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数

标准化降水蒸散指数(SPEI)是对降水量与潜在蒸散发(PET)差值序列的累积概率分布值进行正态标准化后的指数,是全球变化背景下监测和评估干旱的理想指标^[34]。该指数由 Vicente-Serrano 等在 2010 年提出后, Begueria 等于 2014 年进行了改进。

用 Penman-Monteith 方程取代 Thornthwaite 方程计算潜在蒸散发 (PET), 并采用无偏概率加权矩 (Unbiased probability weighted moment) 进行拟合^[35]。本文采用 2014 年修正后的方法计算研究区 SPEI 值, 具体计算步骤参照文献^[36]。参考相关研究^[36]将 SPEI 值分为 9 个干湿等级(表 1)。

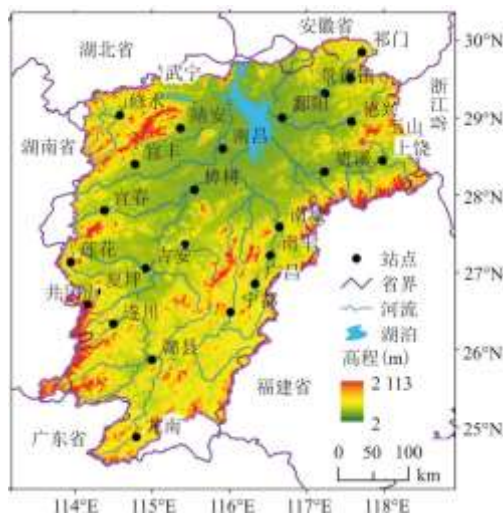


图 1 研究区及气象站点分布

SPEI 指数具有多时间尺度的特征。有研究指出, 12 个月时间尺度的 SPEI 值可以反映干旱的年际发生情况, 3 个月时间尺度的 SPEI 值则体现干湿的季节变化^[3,13]。因此, 本文选用 12 个月时间尺度的 SPEI 值 (SPEI-12) 描述研究区年尺度的干旱时空变化特征, 3 个月时间尺度的 5、8、11 月和次年 2 月的 SPEI 值 (SPEI-3) 表示研究区春、夏、秋、冬季 SPEI 指数, 用于分析季节尺度的干旱时空变化特征^[37]。

表 1 SPEI 值的干湿等级划分标准

等级	等级分类	SPEI 值
1	极端湿润	$SPEI \geq 2.0$
2	重度湿润	$1.5 \leq SPEI < 2.0$
3	中度湿润	$1.0 \leq SPEI < 1.5$
4	轻度湿润	$0.5 \leq SPEI < 1.0$
5	接近正常	$-0.5 < SPEI < 0.5$
6	轻度干旱	$-1.0 < SPEI \leq -0.5$
7	中度干旱	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$
8	重度干旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$
9	极端干旱	$SPEI \leq -2.0$

1.3.2 Sen' s 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

将 Sen' s 趋势分析和 Mann-Kendall 检验相结合, 是判断长时间序列数据变化趋势的重要方法。Sen' s 趋势分析法的优点在于计算过程中数据样本无需服从特定分布, 且计算结果不受少数异常值的干扰, 对数据误差具有较强的规避能力^[38]。目前该方法已被广泛应用于气候变化和水文序列分析。本文使用该方法分析研究区 SPEI 指数的时间变化趋势。计算公式如下:

$$b_{sen} = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中: b_{sen} 为 Sen' s 趋势; x_i 和 x_j 分别为时间序列中 i 和 j 时刻的 SPEI 值; n 为数据的个数。 b_{sen} 为正值表示 SPEI 值存在上升趋势, 负值则表示 SPEI 值有下降趋势。

同时, Sen' s 趋势的显著性水平检验来源于 Mann-Kendall 检验 (M-K 检验)。M-K 检验是一种用于检验时间序列变化趋势的非参数统计检验方法。其优点在于它允许缺测值的存在, 且无需证明数据样本服从一定的分布^[10]。M-K 统计量 Z 值为正值表明有上升趋势, 反之则表示有下降趋势。在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 表示趋势变化显著。

1.3.3 分段线性回归法

分段线性回归法是解决长时间序列气候数据异质性趋势问题的有效工具^[39]。该方法可以揭示异质趋势中的一个或多个变化点, 有效地弥补了简单线性回归的不足。在过去几十年里, 分段线性回归法已在众多领域得到应用^[40]。本文使用该方法判断研究区 1961~2017 年 SPEI 值是否存在断点以及断点前后变化的趋势。计算公式如下:

$$y_i = \begin{cases} a_0 + b_1 x_i + \varepsilon & x_i \leq j \\ a_0 + b_1 x_i + b_2 (x_i - j) + \varepsilon & x_i > j \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_i 为 SPEI 值; x_i 为时间; j 为 y_i 突变发生的时间点; b_1 和 b_2 为回归系数; a_0 为拟合截距; ε 为拟合残差。 y_i 在突变点之前的趋势为 b_1 , 在突变点之后的趋势为 $b_1 + b_2$ 。

1.3.4 干旱频率

本文使用干旱频率来评价某站在某时段干旱发生的频繁程度^[36]。计算公式如下:

$$Fi = \left(\frac{n}{N} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: Fi 为 i 站点的干旱频率; i 为不同站点; n 为该站发生干旱的年数; N 为总年数。

2 结果分析

2.1 鄱阳湖流域 SPEI 多年平均值的空间格局特征

鄱阳湖流域 1961~2017 年的年尺度及季节尺度 SPEI 多年平均值分布存在着一定的空间分异(图 2)。年尺度 SPEI 多年平均值(图 2a)分布呈南高北低的空间格局,即该流域南偏湿、北偏干。具体表现为赣江流域中上游站点偏湿,多个站点 SPEI-12 多年平均值超过 0.01;赣江流域西部、修水流域、信江流域及饶河流域 SPEI-12 多年平均值总体较低,其中武宁站、莲花站和樟树站偏干。该流域多年平均蒸散发从东北向西南逐渐递减^[26],且近几十年水汽向北输送能力有所减弱^[41],在此影响下,可能导致该流域呈现南偏湿、北偏干的空间格局。从季节尺度上看(图 2b~2e),春季和冬季 SPEI-3 相对较低,偏干,春季偏干的站点集中分布在赣江流域西南部,冬季袁河流域的宜春站、樟树站,饶河流域的上饶站较干,其他站点均较湿润且地区差异不明显;夏季和秋季 SPEI-3 相对较高,偏湿润,夏季流域北部站点较湿润,而秋季流域中部较湿润。

2.2 鄱阳湖流域 SPEI 指数的时间变化特征

2.2.1 区域尺度的变化趋势

鄱阳湖流域 1961~2017 年年尺度及季节尺度 SPEI 指数均呈上升态势,存在湿润化趋势(图 3)。由图 3a 可以看出,年尺度的 SPEI-12 呈显著上升趋势,上升幅度为 0.16/10a ($p < 0.05$),湿润化趋势明显。具体而言,20 世纪 60 年代, SPEI-12 连年较低,其中,1963 年为重度干旱;70 年代至 80 年代, SPEI-12 在波动中缓慢上升,呈一定的湿润化;90 年代 SPEI-12 上升较快,多个年份出现轻度以上的湿润状态;21 世纪初, SPEI-12 有所下降,出现一个短暂的干旱时期;最近 10 年, SPEI-12 又恢复上升态势,呈现湿润化。这一变化趋势与长江中下游多年气候变化趋势较为一致^[42, 43]。作为长江流域重要组成部分的鄱阳湖流域,其气候与长江流域的气候保持着高度的一致性。从季节尺度上看(图 3b~3e),四季的 SPEI-3 均呈上升趋势,存在变湿趋势。其中,夏季、冬季湿润化显著,上升幅度分别为 0.16/10a 和 0.14/10a ($p < 0.05$);春、秋季湿润化不明显,尤其是春季, SPEI-3 上升最慢,上升幅度仅为 0.02/10a。

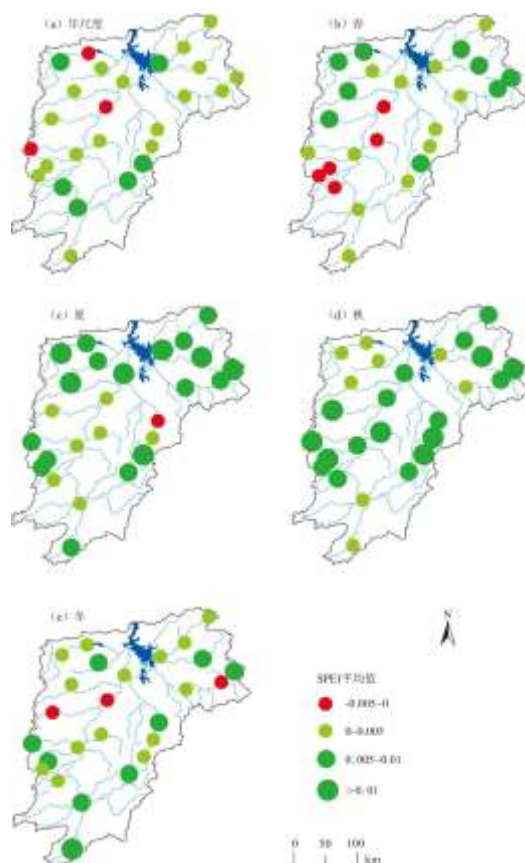


图 2 鄱阳湖流域 1961~2017 年的年尺度及季节尺度 SPEI 多年平均值空间分布

注：圆圈表示该站点的 SPEI 年均值，红色系圆点代表 SPEI 指数低于 0，绿色系圆点代表 SPEI 指数高于 0。

利用分段线性回归分析发现 1961~2017 年的年尺度及季节尺度 SPEI 指数突变特征均未发生显著性突变(图 4)。无论是在年尺度上(图 4a),还是在季节尺度上(图 4b~f),均未发生显著性突变。

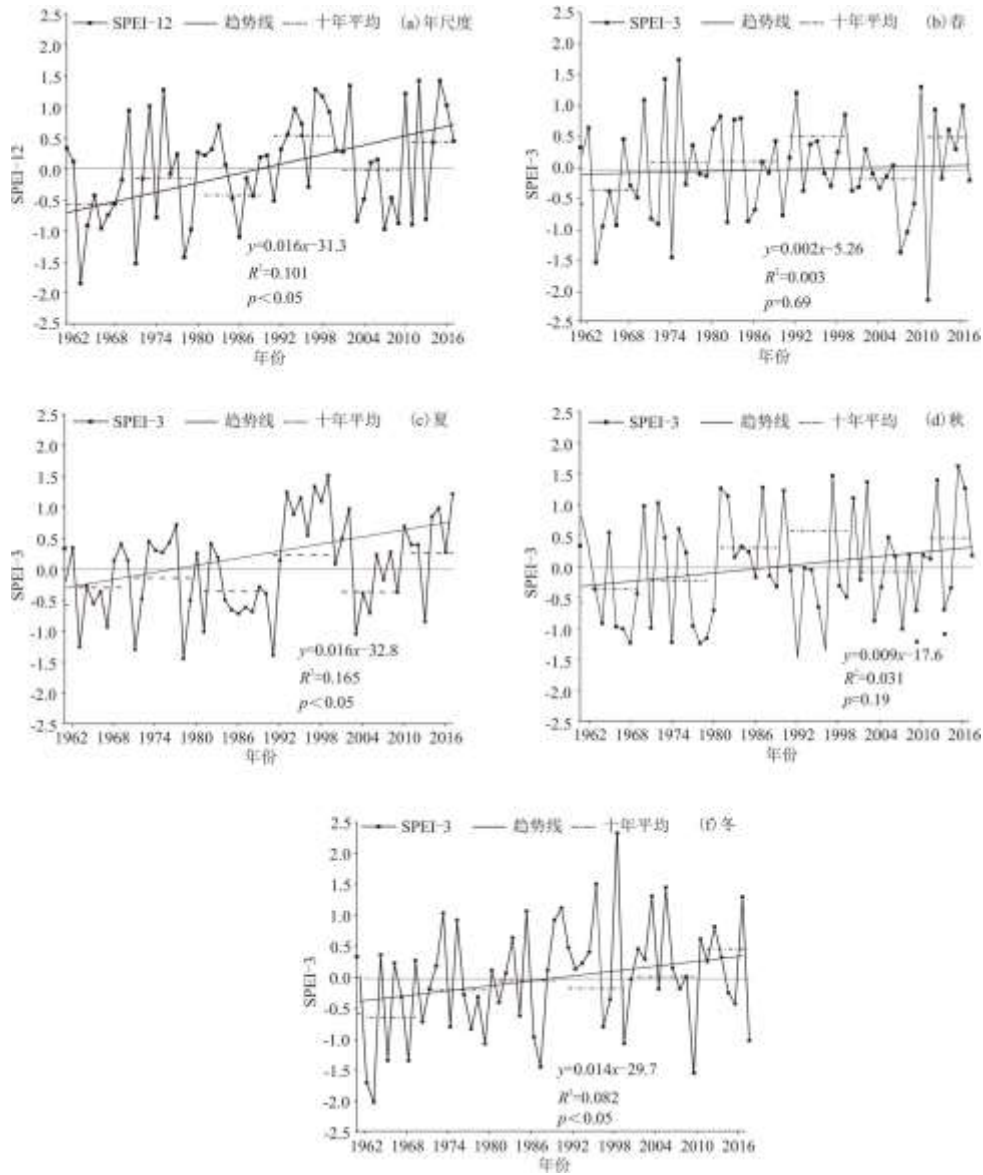


图 3 鄱阳湖流域 1961~2017 年的年尺度及季节尺度 SPEI 指数变化趋势

2.2.2 站点尺度的变化趋势

鄱阳湖流域 1961~2017 年各站点年尺度及季节尺度的 SPEI 指数年际变化存在着一定的空间分异(图 5)。由图 5a 可以看出,所有站点年尺度 SPEI-12 均呈上升态势,即存在变湿趋势,其中,42.3%的站点变湿明显,变湿幅度主要集中在 0.1~0.2/10a

之间。从各站点季节尺度的年际变化上看(图 5b~5e), 春季 26.9%的站点呈干旱化趋势, 变干幅度主要集中在 0~0.1/10a 之间, 主要分布在赣江流域的西北部、饶河流域和信江流域东部; 73.1%的站点呈湿润化趋势, 变湿幅度主要集中在 0~0.1/10a 之间, 主要分布在赣江流域中上游和抚河流域。夏季所有站点均呈湿润化趋势, 变湿幅度主要集中在 0.1~0.2/10a 之间, 其中, 57.7%的站点存在明显湿润化。秋季除德兴站、遂川站和龙南站呈干旱化趋势外, 其余站点均呈湿润化趋势, 变湿幅度主要集中在 0.1~0.2/10a 之间, 但趋势达到显著水平的站点并不多。冬季所有站点均呈湿润化趋势, 变湿幅度主要集中在 0.1~0.2/10a 之间, 变湿幅度大的站点主要集中在流域的中北部。

2.2.3 不同等级干旱发生的年代际变化

鄱阳湖流域不同等级干旱的发生存在明显的年代际差异(图 6)。在 1961~2017 年间, 该流域平均每年发生干旱的站点个数为 3.6 个, 平均每个站点发生干旱的频率为 12.9%。从各年代来看, 20 世纪 60 年代干旱发生最为频繁, 各等级的干旱发生的站点个数最多、发生频率最高; 70 年代, 各等级干旱发生的站点个数、发生频率均有所下降; 80~90 年代, 无极度干旱出现, 轻度干旱、中度干旱和重度干旱发生的站点个数及频率均有所下降, 出现一个持续湿润的过程, 其中, 90 年代干旱发生的站点个数最少、发生频率最低; 21 世纪初, 轻度干旱、中度干旱和重度干旱发生的站点个数及频率有所上升, 出现短暂的干旱化; 最近 10 年, 重度干旱、轻度干旱和中度干旱发生的站点个数及频率急剧减少, 呈现湿润化趋势。

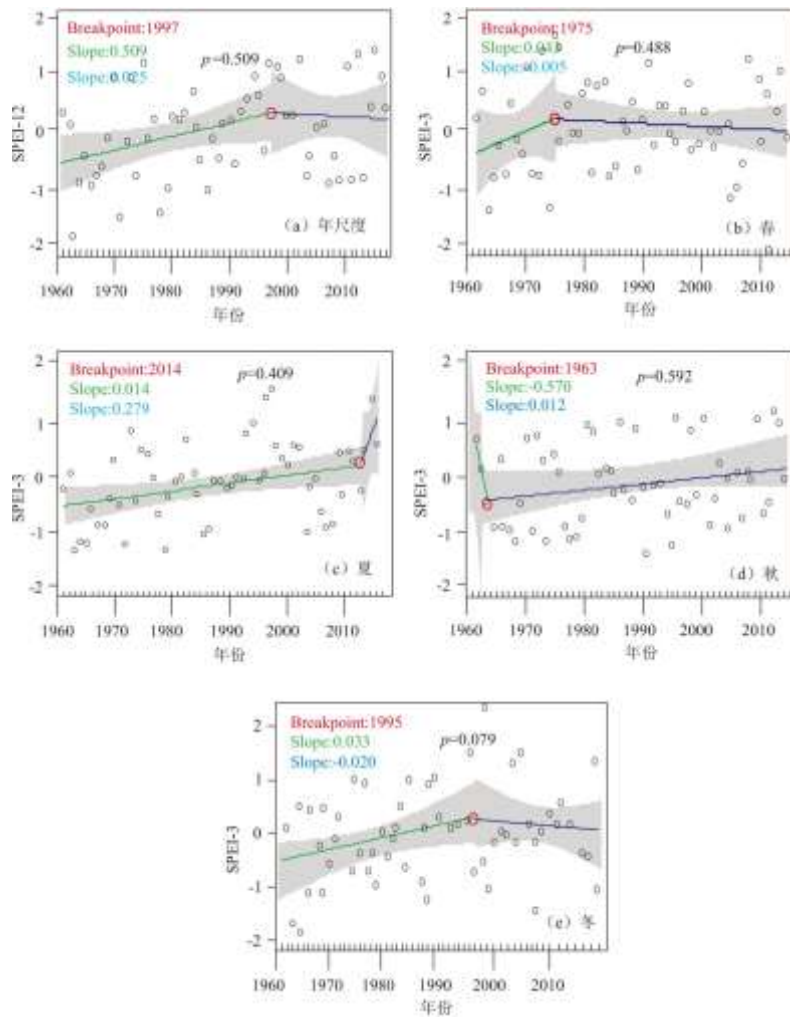


图 4 鄱阳湖流域 1961~2017 年的年尺度及季节尺度 SPEI 指数分段线性回归

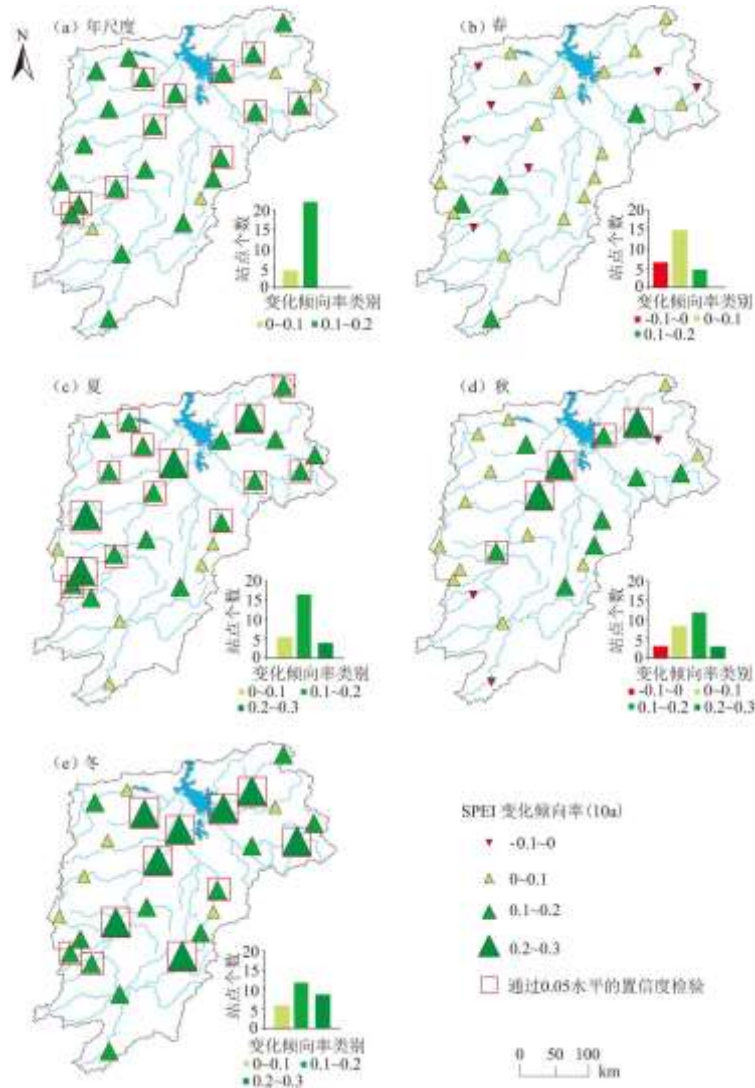


图 5 鄱阳湖流域 1961~2017 年站点尺度 SPEI 指数变化趋势空间分布

3 讨论

从 SPEI 指数与降水、气温之间的关系来看(表 2), 鄱阳湖流域的 SPEI 指数与降水呈正相关, 与气温呈负相关, 尤其是春季和夏季的相关性显著。整体而言, SPEI 指数与降水的相关性较其与温度的相关性高, 说明该流域降水对 SPEI 指数的影响要大于气温。Xu 等^[44]也指出, 湿润地区的 SPEI 指数主要由降水量决定。从降水和气温的变化趋势来看, 该流域 1961~2017 年春季的降水量呈下降趋势, 夏季、秋季和冬季的降水量呈增加趋势, 夏季降水量增加显著 ($p < 0.05$)。该流域 1961~2017 年各个季节气温不断上升, 除夏季外, 其余季节气温上升明显 ($p < 0.05$)。春季降水量的减少和气温的上升可能共同导致了部分站点春季的干旱化; 夏季降水量的显著增加和气温的缓慢上升使得夏季湿润化明显; 秋季、冬季降水量的增加幅度比气温的上升幅度大, 使秋季和冬季也呈现出一定的湿润化。但干旱的发生还涉及地形、植被覆盖和人类活动等多种因素, 发生机理有待进一步深入研究。

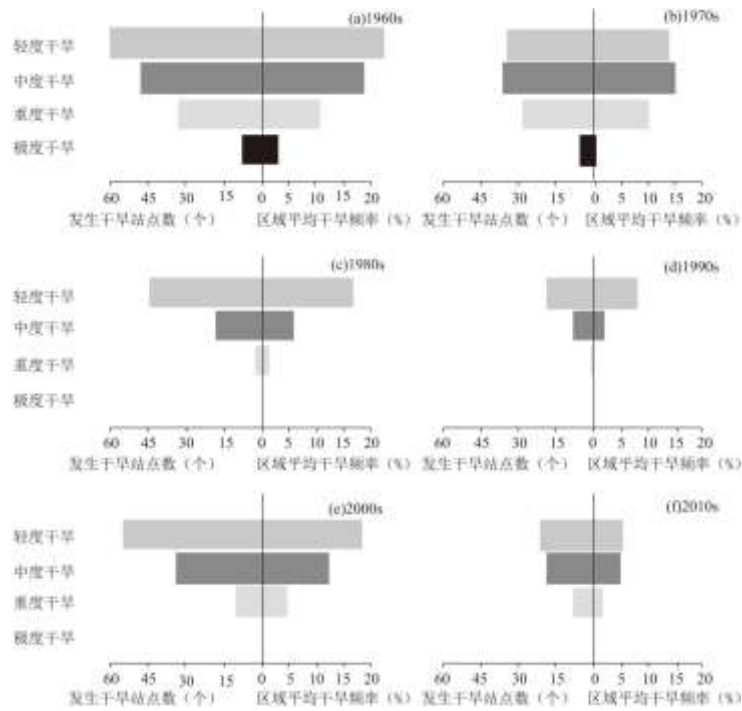


图 6 鄱阳湖流域 1961~2017 年不同等级干旱发生的年代际变化

表 2 鄱阳湖流域 1961~2017 年降水和气温与 SPEI 指数的偏相关及其变化

季节	降水与 SPEI 关系	降水量变化倾向率 (°C/10a)	气温与 SPEI 关系	气温变化倾向率 (mm/10a)
春季	0.985**	-0.324	-0.192*	0.249*
夏季	0.977**	7.982*	-0.392*	0.096
秋季	0.026	0.455	-0.235	0.190*
冬季	0.274*	3.128	-0.183	0.269*

厄尔尼诺/拉尼娜事件与西北太平洋沿岸地区的干湿状况密切相关^[45],其特征值常用反映赤道太平洋中东部海洋表面温度变化的 Niño 指数 (ONI) 及南方涛动指数 (SOI) 表示。当出现厄尔尼诺事件时, ONI 为正值且超过 0.5, SOI 为负值; 当出现拉尼娜事件时, ONI 指数为负值且低于 -0.5, SOI 为正值。本文将鄱阳湖流域 1961~2017 年不同尺度的 SPEI 指数与同期和前期的 ONI、SOI 进行相关性分析, 即分别对 SPEI 指数与同期、前 6 个月和前一年的 ONI、SOI 进行相关性分析 (图 7)。结果发现, SPEI 指数与前 6 个月 ONI 和 SOI 的相关性比同期和前一年的相关性高, 具体表现为, SPEI 指数与 ONI 以正相关为主, 与 SOI 以负相关为主。在全球尺度的海气作用的驱动下, 鄱阳湖流域的干湿变化与厄尔尼诺/拉尼娜事件之间存在着一定的相关性, 且具有半年的滞后效应。当发生厄尔尼诺事件时, SPEI 指数相对较高, 该流域较湿; 发生拉尼娜事件时, SPEI 指数相对较低, 该流域较干。多项研究表明, 海温异常是影响中国南方旱涝年际变率的主要外强迫因子^[46~48]。厄尔尼诺/拉尼娜事件通过大气遥相关, 以及引起其他洋盆海温异常的方式影响东亚季风^[49], 从而影响鄱阳湖流域的干湿变化。大部分厄尔尼诺/拉尼娜事件在秋冬季达到成熟阶段, 随后进入衰减阶段。当厄尔尼诺事件发生半年后, 即次年厄尔尼诺衰减年的夏季, 西太平洋副热带高压的位置异常偏西, 强度增强, 范围扩大, 导致长江中下游地区尤其是在鄱阳湖流域夏季降水持续性延长和降水强度加强^[50]。当拉尼娜事件发生半年后, 即次年拉尼娜衰减年的夏季, 西太平洋副热带高压偏弱, 导致长江中下游流域降水偏少^[49, 51, 52]。

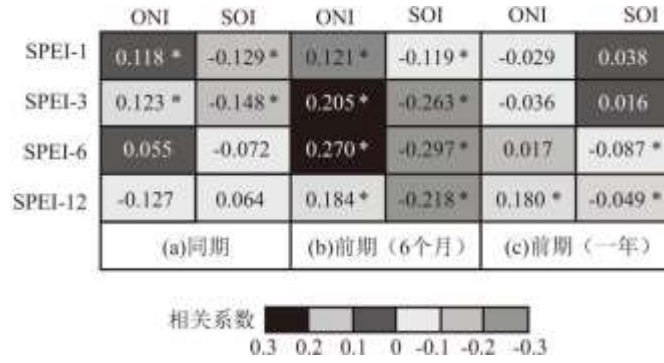


图 7 不同时间尺度 SPEI 指数与同期和前期 ONI 和 SOI 的相关性

注：*表示通过 0.05 水平的置信度检验。

此外，本研究结果显示鄱阳湖流域存在变湿趋势，这与曹博等^[36]研究发现鄱阳湖流域以湿润化趋势为主的结果保持了较好的一致性，但在干旱的季节尺度和空间格局上的研究结论与郑太辉等^[28]、洪兴骏等^[29]、蔡哲等^[30]的研究结果存在一定差异，可能与选择的干旱指数或研究时段不同有关。

4 结论

本文基于鄱阳湖流域的气象站点观测数据，基于 SPEI 指数分析了该流域 1961~2017 年的干旱时空变化特征及其影响因素，主要结论如下：

(1) 从 SPEI 多年平均值的空间格局上看，鄱阳湖流域 SPEI 年均值呈现南高北低的空间格局，即该流域南湿北干；SPEI 的季节均值在空间分布上也存在差异，导致空间上存在干湿差别。春季赣江流域西南部较干，夏季流域北部较为湿润，秋季流域中部较为湿润，冬季地区差异不明显。

(2) 从区域尺度 SPEI 指数变化趋势上看，鄱阳湖流域年尺度 SPEI 指数上升趋势明显 ($p < 0.05$)，即变湿趋势显著；四季 SPEI 指数均呈上升态势，存在变湿趋势，且夏季、冬季变湿显著 ($p < 0.05$)。从站点尺度的 SPEI 指数变化趋势上看，所有站点年尺度 SPEI 指数均呈上升态势，即存在变湿趋势，其中，明显变湿的站点分布在流域中北部；在季节尺度上，除春季赣江流域的西北部、饶河流域和信江流域东部部分站点，以及秋季个别站点(德兴、遂川和龙南)变干外，其余各季节所有站点均呈湿润趋势，只是在变湿的幅度和显著水平上存在一定的差异。

(3) 不同等级干旱的发生存在明显的年代际差异。20 世纪 60 年代，各等级干旱发生的站点个数最多，发生频率最高，70~90 年代，各等级干旱发生的站点个数和频率持续降低，出现持续湿润的过程，21 世纪初，各等级干旱发生的站点个数和频率有所上升，出现短暂的干旱，最近 10 年又转入湿润化。

(4) 鄱阳湖流域 SPEI 指数与降水呈正相关，与气温呈负相关，且与降水的相关性较气温的相关性高。在全球尺度的海气作用的驱动下，该流域的干湿变化与厄尔尼诺现象/拉尼娜事件之间存在一定的相关性，且具有半年的滞后效应。当发生厄尔尼诺事件时，该流域较湿润；发生拉尼娜事件时，该流域较干旱。

参考文献：

-
- [1]夏敏, 孙鹏, 张强, 等. 基于 SPEI 指数的淮河流域干旱时空演变特征及影响研究[J]. 生态学报, 2019, 39(10):3643-3654.
- [2]周磊, 武建军, 吕爱峰, 等. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4):597-607.
- [3]史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8):1547-1558.
- [4]WANG L Y, YUAN X, XIE Z H, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. Scientific Reports, 2016, 6:30571.
- [5]VICENTE-SERRAN S M, QUIRING S M, PENNA-GALLARDO M, et al. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 201:102953.
- [6]VICENTE-SERRAN S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [7]JIANG P, LIU H Y, WU X C, et al. Tree-ring-based SPEI reconstruction in central Tianshan Mountains of China since A. D. 1820 and links to westerly circulation[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(6):2863-2872.
- [8]WU Z T, YU L, DU Z Q, et al. Recent changes in the drought of China from 1960 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(7):3281-3296.
- [9]WU J F, CHEN X H. Spatiotemporal trends of dryness/wetness duration and severity: The respective contribution of precipitation and temperature[J]. Atmospheric Research, 2019, 216:176-185.
- [10]杨舒畅, 杨恒山. 1982-2013 年内蒙古地区干旱变化及植被响应[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(1):175-183.
- [11]张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 等. 基于标准化降水蒸散指数的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2019, 39(19):7110-7123.
- [12]芦佳玉, 延军平, 李英杰. 基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1960-2014 年干旱时空变化特征[J]. 浙江大学学报. 理学版, 2018, 45(3):363-372.
- [13]许玲燕, 王慧敏, 段琪彩, 等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5):1024-1034.
- [14]王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6):1003-1016.
- [15]贾艳青, 张勃. 基于日 SPEI 的近 55a 西南地区极端干旱事件时空演变特征[J]. 地理科学, 2018, 38(3):474-483.
- [16]张永瑞, 张岳军, 靳泽辉, 等. 基于 SPEI 指数的黄土高原夏季干旱时空特征分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7):1322-1331.
- [17]WANG X, ZHUO L, LI C, et al. Temporal and spatial evolution trends of drought in northern Shaanxi of China: 1960-2100[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 139:965-979.

-
- [18]刘君龙,袁喆,许继军,等.长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估[J].长江科学院院报,2020,37(10):28-36.
- [19]熊光洁,王式功,李崇银,等.三种干旱指数对西南地区适用性分析[J].高原气象,2014,33(3):686-697.
- [20]刘占明,陈子燊,黄强,等.7种干旱评估指标在广东北江流域应用中的对比分析[J].资源科学,2013,35(5):1007-1015.
- [21]王文,李亮,蔡晓军.CI指数及SPEI指数在长江中下游地区的适用性分析[J].热带气象学报,2015,31(3):403-416.
- [22]李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].干旱气象,2017,35(5):709-723.
- [23]杨庆,李明星,郑子彦,等.7种气象干旱指数的中国区域适应性[J].中国科学:地球科学,2017,47(3):337-353.
- [24]金斌松,聂明,李琴,等.鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):268-275.
- [25]闵骞.平原湖区也须重视防旱——以鄱阳湖区为例[J].中国减灾,2003(3):39-41.
- [26]刘冲,齐述华,汤林玲,等.植被恢复与气候变化影响下的鄱阳湖流域蒸散时空特征[J].地理研究,2016,35(12):2373-2383.
- [27]唐国华,胡振鹏.气候变化背景下鄱阳湖流域历史水旱灾害变化特征[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1274-1283.
- [28]郑太辉,陈晓安,杨洁.近50a江西省旱、涝变化趋势及驱动因素研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(4):664-670.
- [29]洪兴骏,郭生练,马鸿旭,等.基于SPI的鄱阳湖流域干旱时空演变特征及其与湖水位相关分析[J].水文,2014,34(2):25-31.
- [30]蔡哲,章毅之,何拥凤,等.江西省干旱洪涝的时空变化特征分析[J].自然灾害学报,2013,22(2):144-149.
- [31]胡振鹏,林玉茹.气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策[J].长江流域资源与环境,2012,21(7):897-904.
- [32]陈昌春.变化环境下江西省干旱特征与径流变化研究[D].南京:南京大学,2013:32.
- [33]刘世梁,田韞钰,安南南,等.基于逐月标准化降水蒸散指数的多尺度方法分析气候变化对澜沧江流域归一化植被指数的影响[J].气候与环境研究,2015,20(6):705-714.
- [34]ZHANG H M,DING M J,LI L H,et al.Continuous wetting on the Tibetan Plateau during 1970-2017[J].Water,2019,11(12):2605-2622.
- [35]BSEGUERÍA S,VICENTE-SERRANO S M,REIG F,et al.Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited:parameter fitting,evapotranspiration models,tools,datasets and drought monitoring[J].International Journal of Climatology,2014,34(10):3001-3023.

-
- [36]曹博, 张勃, 马彬, 等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(17):6258-6267.
- [37]柯杭, 王小军, 尹义星, 等. 衡水市 1961~2015 年极端降水和干旱的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 971-980.
- [38]孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960-2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7):1820-1832.
- [39]VERBESSELT J, HYNDMAN R, NEWNHAM G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1):106-115.
- [40]PENG J, TIAN L, LIU Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608:706-714.
- [41]ZHANG Q, LIU Y, YANG G S, et al. Precipitation and hydrological variations and related associations with large-scale circulation in the Poyang Lake basin, China[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(5):740-751.
- [42]黄涛, 徐力刚, 范宏翔, 等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10):1677-1684.
- [43]王文, 许志丽, 蔡晓军, 等. 基于 PDSI 的长江中下游地区干旱分布特征[J]. 高原气象, 2016, 35(3):693-707.
- [44]XU K, YANG D W, YANG H B, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526:253-264.
- [45]MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1-2):202-216.
- [46]丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学, 2013, 37(2):253-280.
- [47]陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5):521-532.
- [48]李崇银, 穆穆, 周广庆, 等. ENSO 机理及其预测研究[J]. 大气科学, 2008, 32(4):761-781.
- [49]李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5):577-591.
- [50]余荣, 翟盘茂. 厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响及其可能机理[J]. 气象学报, 2018, 76(3):408-419.
- [51]JIANG T, ZHANG Q, ZHU D M, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003) [J]. Quaternary International, 2006, 144(1):29-37.
- [52]李磊, 朱春子, 王金星, 等. 典型厄尔尼诺、拉尼娜事件我国雨水情特征分析[J]. 水文, 2019, 39(5):91-95.