

基于 SPEI 指数的长江经济带上游干湿时空演变特征分析

张茜^{1,2,3}, 刘冀^{1,2,3}, 魏榕^{1,2,3}, 张特^{1,2,3}, 刘艳丽^{4,5}

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072; 4.水利部 应对气候变化研究中心, 南京 210029; 5.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘 要:长江经济带是我国人口和经济高度聚集的重要经济带之一,也是水资源丰富的地区。研究该区域的干湿时空演变特征对区域经济发展、水资源可持续利用、生态建设具有极其重要的意义。以长江经济带上游的重庆、四川、云南、贵州为研究区,采用 1961—2018 年 87 个气象站逐月气象资料,通过计算标准化降水蒸散指数(SPEI),进而基于 Mann-Kendall(M-K)趋势与突变检验、云模型,揭示研究区年和四季干湿时空演变特征。结果表明:(1) 1961—2018 年长江经济带上游年、夏季、秋季与冬季均呈干旱化趋势,SPEI 倾斜率分别为 $-0.027/10\text{ a}$, $-0.004\ 8/10\text{ a}$, $-0.048/10\text{ a}$ 和 $-0.006\ 7/10\text{ a}$ 。春季呈湿润趋势,SPEI 倾斜率为 $0.031/10\text{ a}$ 。秋季在 1995 年发生由湿到干的突变,其余各时间尺度下 SPEI 无显著突变。(2) 研究区北部以干旱化趋势为主,南部以湿润化为主。春季和冬季分别有 63% 和 53% 的站点呈干旱化趋势,夏季和秋季分别有 50% 和 85% 的站点呈湿润化趋势。(3) 云模型分析表明,58 年来长江经济带上游年与季节多年平均干湿状态均处于正常,SPEI 空间分布的均匀程度比时间分布的均匀程度大。

关键词:SPEI 指数; 云模型; Mann-Kendall 检验; 干湿演变; 时空变化

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0203-09

Analysis on the Spatial and Temporal Characteristics of Dry and Wet Evolution of Economic Belt in the Upper Reaches of Yangtze River Based on SPEI Index

ZHANG Qian^{1,2,3}, LIU Ji^{1,2,3}, WEI Rong^{1,2,3}, ZHANG Te^{1,2,3}, LIU Yanli^{4,5}

(1.Hydrology and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Engineering Research Center for the Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China; 4.Climate Change Research Center, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 5.State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Institute of Hydraulic Research, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Yangtze River Economic Belt is one of the important economic belts where the population and economy are highly concentrated in China, and is the area rich in water resources. Studying the characteristics of the spatial and temporal evolution of dryness and wetness in this region is of great significance for regional economic development, sustainable use of water resources, and ecological construction. Chongqing, Sichuan, Yunnan, and Guizhou in the upper reaches of the Yangtze River Economic Belt were selected as the study area. The monthly meteorological data of 87 weather stations from 1961 to 2018 were used to calculate the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), and to reveal the temporal and spatial evolution characteristics of dryness and wetness in the study area during the year and four seasons based on Mann-Kendall Trend and mutation test, cloud model. The results show that: (1) aridity trends were observed, and the SPEI slope rates were $-0.027/\text{decade}$, $-0.004\ 8/\text{decade}$, $-0.048/\text{decade}$ and $-0.006\ 7/\text{decade}$ in the

收稿日期:2020-09-06

修回日期:2020-09-26

资助项目:国家重点研发计划(2018YFC1508104);国家自然科学基金(51679145,91747103,51609124)

第一作者:张茜(1995—),女,安徽淮南人,硕士研究生,主要从事水文学与水资源方面研究。E-mail:2200414407@qq.com

通信作者:刘冀(1980—),男,河北保定人,博士,副教授,主要从事流域水文模拟与防洪调度研究。E-mail:liuji@ctgu.edu.cn

whole year, summer, autumn and winter in the Economic Belt of the upper reaches of the Yangtze River during the period from 1961 to 2018; the humid tends were observed in the spring, the SPEI slope rate was 0.031/decade; there was an abrupt change from wet to dry levels in the autumn in 1995, and there was no significant change in SPEI on the other time scales; (2) aridity was dominant in the northern part of the study area, and humidification was dominant in the southern part; 63% and 53% of the sites showed the drought trend in spring and winter, 50% and 85% of the sites showed the humidification trend in summer and autumn; (3) cloud model analysis showed that the annual and seasonal multi-year average dry and wet conditions in the upper reaches of the Yangtze River Economic Belt in 58 years were normal, and the spatial distribution of SPEI was more uniform than the temporal distribution.

Keywords: SPEI index; cloud model; Mann-Kendall test; wet and dry evolution; spatiotemporal changes

气候干湿变化对区域水循环与生态环境具有重要影响,同时也影响区域经济发展。区域干湿状态主要体现在大气水分收支的变化,即降水量和潜在蒸散量的变化^[1]。干旱是指供水与用水不相匹配的一种水资源供需失衡状态,是中国主要的气象灾害之一。近年来,在全球变暖的趋势下全国遭受干旱的地区不断扩大,干旱造成的损失日益剧增,且未来几十年旱情可能呈加重趋势^[2]。洪涝是指由于降水过多地表积水不能及时排出而造成的灾害现象。洪涝灾害往往会危及生命,破坏经济和生态环境^[3]。因此定量分析区域干湿时空演变特征对防汛抗旱减灾意义重大,为区域干湿防治和应对提供科学依据。

干湿指数是开展干湿研究的有效工具。帕尔默指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)作为两种经典的干湿指数,得到了广泛应用^[4]。其中 SPI 指数虽具有时间尺度灵活、计算简便的优点,但它仅仅考虑了降水因素,忽略了蒸散发的重要性。PDSI 虽考虑了蒸散发对于水分平衡的影响,但其时间尺度是固定的^[5]。Vicente-Serrano 等^[6]融合 PDSI 和 SPI 的优点提出标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),该指数利用降水和蒸散差额(水分盈亏)进行指数计算,不仅综合考虑了降水和蒸散发对局地干湿状况的影响,也具备多时间尺度的特征,因此近年来被广泛应用于干湿变化及干旱研究中。曹博等^[7]基于 SPEI 对长江中下游流域年尺度干湿时空特征进行分析;王文等^[8]基于综合气象干旱指数和 SPEI 对长江中下游地区季节性干湿进行了分析。

长江经济带上游区域人口密集、经济发达,是我国重要的粮、油、棉生产基地,该区虽水资源丰富,但年内降水时间分布不均且年际变化较大,区域内季节性旱涝时有发生,特别是云南、贵州是我国的干旱多发区和重发区,旱灾几乎连年发生,而重庆四川气候

易导致洪涝灾害,造成的影响不容忽视。目前专门针对长江经济带上游区域干湿演变研究较少,且以往的研究方法忽略了干湿发生的随机性、模糊性和稳定性,缺乏对干湿不确定性的度量。因此,研究分析该地区干湿时空演变特征对长江经济带上游区域生态环境及社会经济影响有重要意义。本文基于 Penman-Monteith 模型的 SPEI 标准化降水指数、Mann-Kendall 趋势突变检验法、云模型分析长江经济带上游干湿时空演变特征。

1 研究区域和资料

1.1 研究区概况

长江经济带是我国重大战略发展区域,其覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 省市,面积约 205 万 km²,人口和生产总值均超过全国的 40%。横跨中国东中西三大区域,具有独特优势和巨大发展潜力。如长江经济带上游(重庆、四川、云南、贵州)位于 98°6′—109°30′E, 21°30′—33°36′N(图 1)。长江经济带上游地理位置优越,河流湖泊众多,自然资源得天独厚,经济发达。研究区多为海拔较低的丘陵和平原,以亚热带季风气候为主,东亚季风活动明显。受大陆性季风气候的影响,从干湿发生频率来看,长江经济带上游干旱呈明显上升趋势。整个长江经济带上游的年平均降水量呈现明显的南多北少趋势,年平均气温呈现明显的南低北高趋势^[9]。

1.2 数据来源

本文数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),采用长江经济带上游 107 个气象站点 1961—2018 年共 58 a 逐月的气象观测资料,包括:降水量(p)、最高气温(T_{\max})、最低气温(T_{\min})、平均气温(T_{ave})、相对湿度(RH)、10 m 风速(U_{10})、大气压强(p)和日照时数(n)。该数据集经过基本的质量控制,包括气候极值范围检查、内部一致性检查和时间

一致性检查,数据可靠性和连续性均能满足研究的需求。为了保证数据在时间上的均一性,舍去数据缺失较多的站点,对于少数缺测数据采用邻近站进行插补,最终采用 87 个站点进行分析。

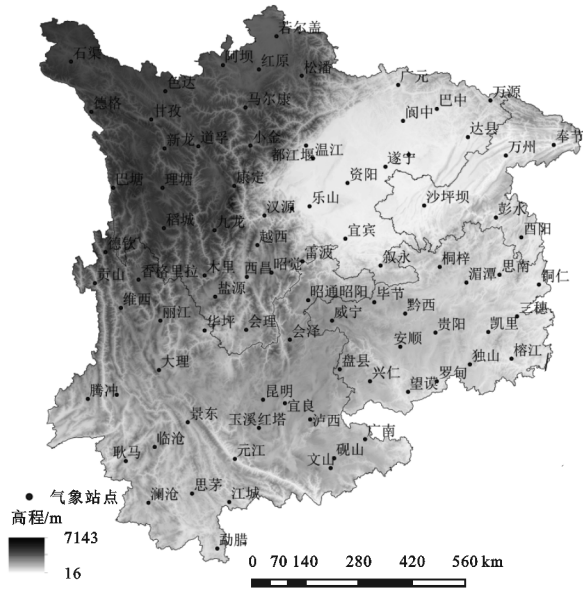


图 1 长江经济带上游气象站点分布

2 研究方法

2.1 标准化降水蒸散指数

标准化降水蒸散指数 SPEI 是 Vicente-Serrano 等在标准化降水指数(SPI)的基础上,考虑水分亏缺和累积效应两个因素,用降水量和潜在蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征干湿^[10],其中潜在蒸散量的算法主要为 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 法,但 Thornthwaite 模型仅考虑了温度因素,计算得到的蒸散量不够准确。Penman-Monteith 法已被推荐为估算蒸散量的标准方法^[11],它结合了能量平衡和质量传递方法,同时考虑阳光、空气温度、湿度和风速对蒸散量的影响,适于各种气候环境。计算步骤如下:

(1) 计算研究区域的蒸散发量(ET)。本文采用理论依据完备、计算精度高并在世界范围广泛使用的 Penman-Monteith 公式,计算公式如下:

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: R_n 为净辐射(MJ/m²); G 为土壤热通量(MJ/m²); γ 为湿度基常数(kPa/°C); T 为平均气温(°C); U_2 为距离地面 2 m 高处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压表示温度曲线斜率(kPa/°C)。

(2) 标准化降水蒸散指数 SPEI 是基于降水量和参

考蒸散发的干湿指数。该方法处理思路为:首先计算逐月降水量与蒸散量的差值,然后建立不同时间尺度的累积水分盈亏序列,采用 Log-logistic 概率分布对累积水分盈亏序列进行正态化,并对分布函数进行标准化处理,最后得到 SPEI 指数。SPEI 指数在(-1,1)范围内为正常年份,小于-1 为干旱,大于 1 为湿润^[12]。

2.2 Mann-Kendall 趋势与突变检验法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验 本文采用 Mann-kendall 法分析年与四季尺度 SPEI 变化趋势及显著性水平。Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数检验,能够检验数据序列的线性或非线性趋势^[13],其计算步骤如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (6)$$

式中: x_i 和 x_j 为时间序列的第 i 和 j 个年份所对应的数据; n 为时间序列的长度; t_i 是第 i 组的数据点的数目。当趋势衡量指标 β 值为正值时,表示时间序列呈上升趋势;当 β 值为负值时,表示时间序列呈下降趋势。当标准化统计量 $|Z_{mk}| > Z_{(1-\alpha/2)}$ 时,表示时间序列数据通过显著性检验,否则不通过显著性检验,并且可以在标准正态分布表中查得 $Z_{(1-\alpha/2)}$ 值,当显著性水平 $\alpha = 5\%$ 时; $Z_{(1-\alpha/2)}$ 值为 1.96。

2.2.2 Mann-Kendall 突变检验 采用 Mann-Kendall 法检验序列突变主要有以下步骤:

(1) 对于具有 n 个样本量的时间序列 X 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (8)$$

式中: s_k 是时间 i 对应的数值大于时间 j 对应的数值所有个数的累加值; n 为时间序列的长度; x_i 和 x_j 为

时间序列的第 i 和 j 个年份所对应的数据。

(2) 在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: $UF_1=0$, $E(s_k)$, $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差,在 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立,且有相同连续分布时,由下式算:

$$E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (10)$$

(3) UF_k 为标准正态分布,给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U_{(\alpha/2)}$,则表明序列存在明显的趋势变化,将时间序列 x 按逆序排列,按照上式计算,同时使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1$ 。

通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k 可以分析序列 x 的趋势变化,而且可以明确突变的时间,指出突变的区域。若 UF_k 值大于 0,则表明序列呈上升趋势;小于 0 则表明呈下降趋势;当他们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 这两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

2.3 云模型

“云”或者“云滴”是云模型的基本单元,“云”是指其在论域上的一个分部,而并不是传统模糊函数中某条确定的隶属曲线。云是由无数个云滴构成,其“厚度”越厚,表示数据越分散,“厚度”越薄,表明数据汇聚性越好。云的“深厚程度”是反映隶属度的随机性,越是靠近概念中心的地方,其随机性越小^[14]。

云模型可以用期望 E_x 熵 E_n 和超熵 H_e 共 3 个参数来表示其特征。期望 E_x 表示云滴在论域空间分布的平均值,它是最可以代表定性概念的点;熵 E_n 是指定性概念的不确定性度量,反映不确定性程度,由概念的离散程度和模糊程度共同决定;超熵 H_e 用来度量熵的不确定性,亦即熵的熵。熵的随机性和模糊性共同决定,反映了云滴的离散程度,超熵越大,云的厚度越大。

云模型算法可分为正向高斯云算法和逆向高斯云算法^[15]。先通过逆向高斯云算法计算其 3 个参数。再通过正向高斯云算法输入计算出的 3 个参数和云滴数得到隶属云图。

逆向高斯云算法计算公式如下:

$$E_x = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (11)$$

式中:样本点 X_i , 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - E_x| \quad (12)$$

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \quad (13)$$

式中: S 为二阶中心距, $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 。

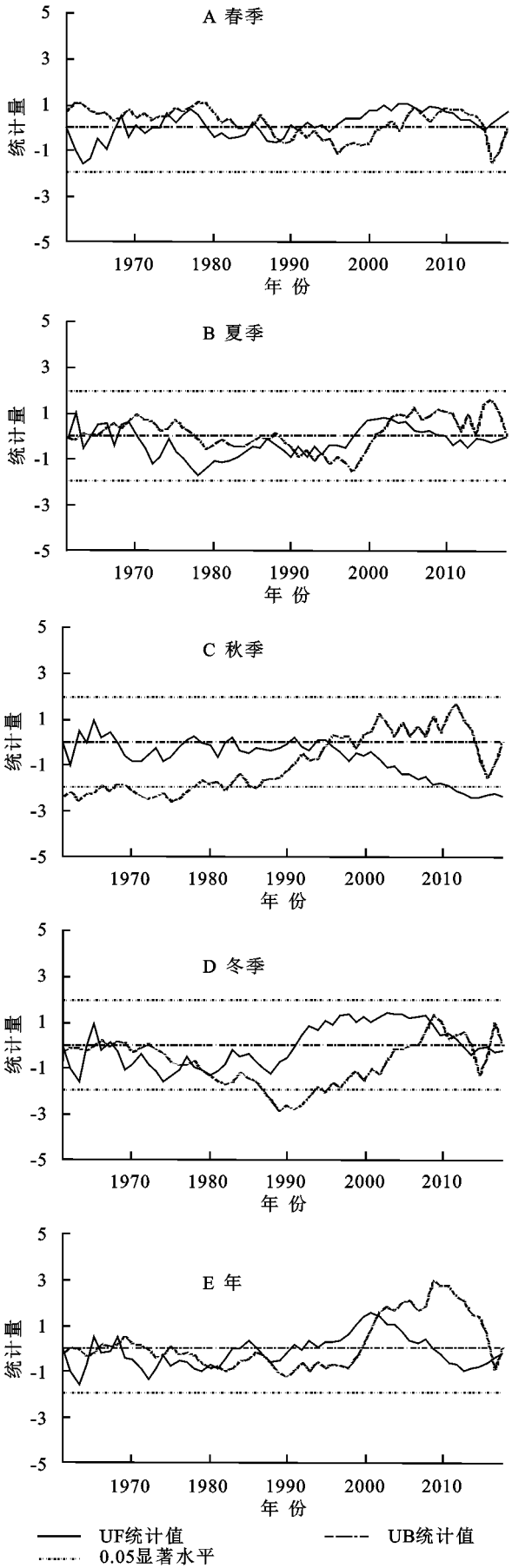
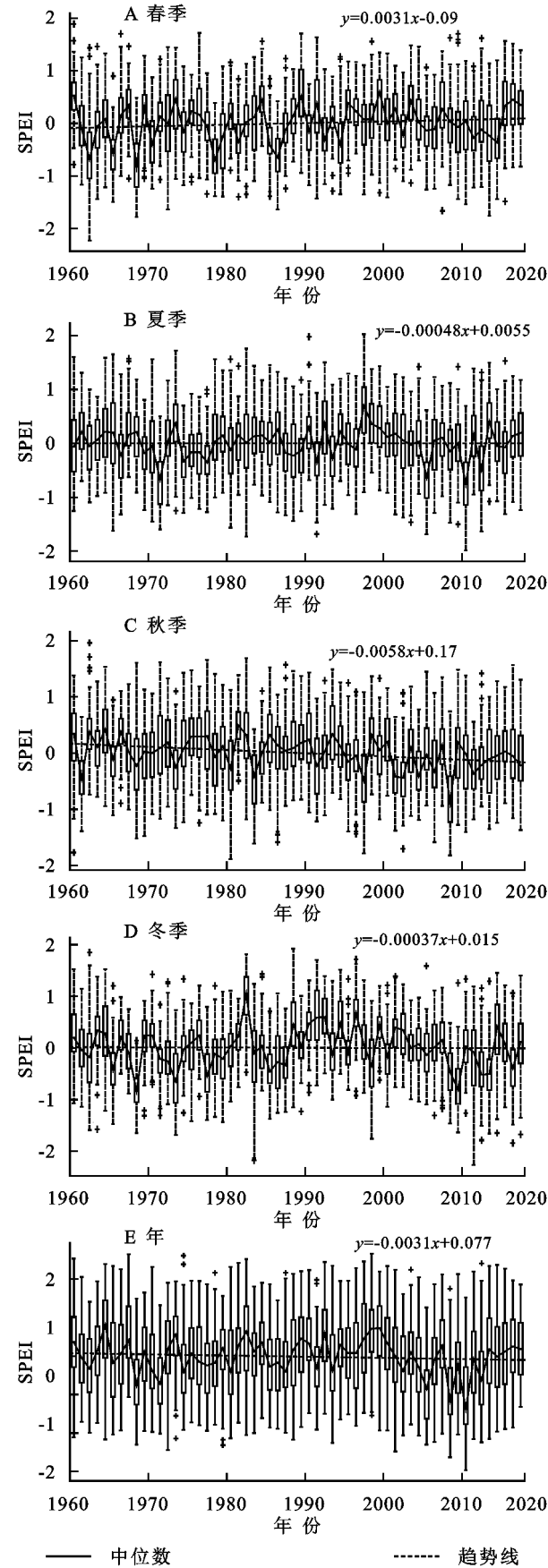
3 结果与分析

3.1 SPEI 时空分布特征

3.1.1 SPEI 年与四季时间变化特征 为了了解长江经济带上游年与季节 SPEI 的平均值,中位数及数据分布差异,绘制研究区年与季节 SPEI 的箱型图。由图 2 可以看出,1961—2018 年长江经济带上游年尺度、夏季、秋季与冬季的 SPEI 均呈下降趋势,即干旱化;倾斜率分别为 $-0.031/10 \text{ a}$, $-0.0048/10 \text{ a}$ 和 $-0.058/10 \text{ a}$ 和 $-0.037/10 \text{ a}$ 。春季 SPEI 呈上升趋势,即湿润化,倾斜率为 $0.031/10 \text{ a}$ 。对比年与季节各站点之间的干湿指数差异较小。图 2A 可以看出研究区春季 1961—1996 年 SPEI 分布较散乱,1997 年后 SPEI 值分布差异较小。图 2B 可以看出夏季整体 SPEI 数值变化不大,分布差异较小。1971 年、2006 年、2010 年和 2012 年 SPEI 值相比前后年份较小。图 2C 可知,秋季 SPEI 值最小值出现在 2008 年,为 -0.89 。图 2D 可知,冬季 SPEI 值最大值出现在 1983 年,为 1.02 ,冬季 SPEI 比春、秋和夏季的分布相比较为散乱。图 2E 可知,从年尺度来看,集中在 2006 年以后,年 SPEI 整体数值下降,呈干旱化趋势。总的来说,1961—2018 年,研究区内夏、秋、冬季呈现干旱化特征,春季呈现湿润化趋势。

为了进一步分析长江经济带上游 SPEI 的年尺度与四季变化的特征,采用 Mann-Kendall 法对其进行突变分析。由图 3E 年尺度 UF, UB 曲线可知:研究时间段内研究区年尺度 SPEI 指数不存在显著突变点。由图(3A—D)四季尺度 UF 曲线可知,研究区春季 1990 年以后 $UF > 0$, SPEI 指数上升,春季出现变湿趋势。春、夏、冬季 UF, UB 曲线相交后 UF 曲线都未通过 0.05 显著性水平的检验,秋季 UF, UB 曲线在 1995 年相交,交点之后 UF 曲线通过 0.05 显著性水平的检验,即 1995 年为显著突变点。图 3D 可知,冬季,研究区 58 a 干旱大致可以分为 3 个阶段:1961—1992 年呈现下降趋势,1993—2012 年呈现上升阶段,2013—2018 年呈下降趋势,发现大多数年份均呈下降趋势,说明长江经济带上游近年来冬季年际干旱呈加重趋势。这是由于冬季发生拉尼娜事件,

会使西太平洋副热带高压势力减弱,暖湿气无法深入长江上游流域,从而造成干旱。



3.1.2 年与四季 SPEI 空间分布 为了分析长江经济带上游干湿状况的空间分布情况,对各气象站点 SPEI 指数采用克里金插值法进行空间插值,并对各站点 1961—2018 年 SPEI 进行 M-K 趋势检验和对 M-K 中衡量趋势大小指标 (Sen 坡度 β) 采用克里金插值,结果见表 1 与图 4,图 5。

表 1 长江经济带上游年与季节站点 SPEI 变化趋势统计

| 趋势比例/ 时间尺度 | 显著上升 | 不显著上升 | 显著下降 | 不显著下降 |
|---------------|------|-------|------|-------|
| 年 | 39 | 2 | 56 | 3 |
| 春 | 63 | 0 | 37 | 0 |
| 夏 | 28 | 22 | 34 | 16 |
| 秋 | 13 | 2 | 79 | 6 |
| 冬 | 52 | 1 | 45 | 2 |

图 4A 反映了长江经济带上游 58 a 以来年平均 SPEI 空间分布特征,整体来看研究区南部以下空间变化不大,即分布较为均匀。从图中可以明显地看出南部 SPEI 大于北部。由图 4B 可以看出,春季 SPEI 值中部偏高,南北两边相对偏小。由图 4C 可以分析得到,夏季整个流域大面积变成了 SPEI 值偏高,这是由于长江经济带上游属于亚热带季风气候,夏季多雨造成 SPEI 值增大,东部地区 SPEI 值相对较小。由图 4D 可以看出,秋季研究区南部 SPEI 值高于北部,由图 4E 分析可得,冬季平均 SPEI 值与春季分布相似,都是中部偏高,南北两边偏低。总体来说,对于年尺度,研究区北部以干旱化趋势为主,南部以湿润化为主。研究区春、冬季呈现干旱化特征,夏、秋两季呈湿润化趋势。

由图 5 和表 1 可知,长江经济带上游年与季节站点上升下降显著和不显著所占比例和 M-K 中衡量趋势大小指标 (Sen 坡度 β) 空间变化。M-K 中 Sen 坡度值大于 0 表示上升趋势,小于 0 表示下降趋势。由表 1 可知研究区站点显著上升与显著下降所占比例明显高于不显著上升和不显著下降。图 5A 可以看出,年尺度分析角度来看,Sen 坡度值大于 0 分布于研究区西北部,小于 0 分布于研究区西南和东南部。其中干旱趋势显著上升站点占 39%,显著下降占 56%。由图 5B 可以看出春季 Sen 坡度值大于 0 分布于研究区西北部,此区域上大多数站点呈现显著上升趋势。Sen 坡度值小于 0 分布于研究区西南部。春季各个站点干旱趋势不管上升还是下降都是显著的。由图 5C 可以分析得到研究区夏季大多数站点由显著上升变成了不显著上升,Sen 坡度插值大致上从南到北逐渐增大。由图 5D 可以看出,在春季、夏季上升的站点大部分转变为下降。其中具有下降趋势的站点占总站点数的 85%。Sen 坡度大于 0 主要分布于研究区西北部,小于 0 主要分布于研究区南部。由图

5E 分析可得,冬季大部分站点干旱趋势显著上升或显著下降,不显著上升和下降一共占总站点数 3%。Sen 坡度值大于 0 主要分布于研究区东北部和南部。

3.2 基于云模型的 SPEI 时空分布特征

3.2.1 时间分布特征的云模型分析 云模型可以把干湿量化,并对其不均匀性的稳定程度进行定量分析^[16]。对各站点不同时间尺度的 SPEI 指数取算术平均值,作为研究区相应时间尺度的 SPEI 指数。以年平均及四季共 5 种时间尺度的流域平均 SPEI 指数作为样本点,选取逆向云发生器算法计算各时间尺度 SPEI 隶属云的数字特征,见表 2,进而根据正向云发生器算法计算云滴,年 SPEI 隶属云见图 6。

表 2 长江经济带上游时间分布隶属云的数字特征值

| 时段 | E_x | E_n | H_e |
|----|---------|--------|--------|
| 年 | -0.0049 | 0.3586 | 0.102 |
| 春 | 0.0051 | 0.3067 | 0.0246 |
| 夏 | 0.0098 | 0.2628 | 0.0890 |
| 秋 | 0.0075 | 0.2600 | 0.0287 |
| 冬 | 0.0053 | 0.3517 | 0.0631 |

云模型中, E_x 越小,即 SPEI 平均值亦越小,干旱程度越重; E_n 越大,SPEI 相对于平均值越分散,即干旱程度波动越大; H_e 越大,干旱程度的不均匀性越不稳定。由图 6,表 2 可知,近 58 a 来长江经济带上游年尺度与四季 SPEI 均值均在 (-1,1) 范围内,进而说明不管是从全年还是季节尺度来看研究区干湿都处于正常年份,不表现为明显干旱或湿润。年尺度上,研究区 SPEI 均值为 -0.004 9,处于正常水平,熵值(E_n)为 0.358 6,结合隶属云图可见,云滴较为分散,表明 SPEI 分布不均匀程度较大;超熵为 0.102,结合隶属云图,同一 SPEI 值对应多个云滴,云层厚度较大,表明干湿变化不均匀程度的稳定性较差。季节尺度上, E_x 在春、冬两季小于夏、秋两季,说明从季节尺度上来看春、冬与夏、秋两季相比较干旱,且春季较为严重。春季的 E_n , H_e 小于冬季,表明春季干旱较为分散,干旱不均匀性较不稳定。秋季的 E_n , H_e 在季节尺度上均为最小值,说明秋季干旱发生集中且干旱趋势化稳定,干旱波动较小。在 5 种时间尺度上,夏季的 E_x 最大,表明夏季最为湿润,这是因为研究区是亚热带季风和季风性湿润气候,夏季高温多雨,冬季温和干燥。

3.2.2 空间分布特征的云模型分析 根据 1961—2018 年各站点年及四季的气象资料计算各站点的 SPEI 并求得各站点算术平均值,以各站点不同时间尺度 SPEI 多年平均值为样本点,分析空间尺度上的干湿演变特征,得到空间隶属云的数字特征(表 3)和隶属云图(图 7)。

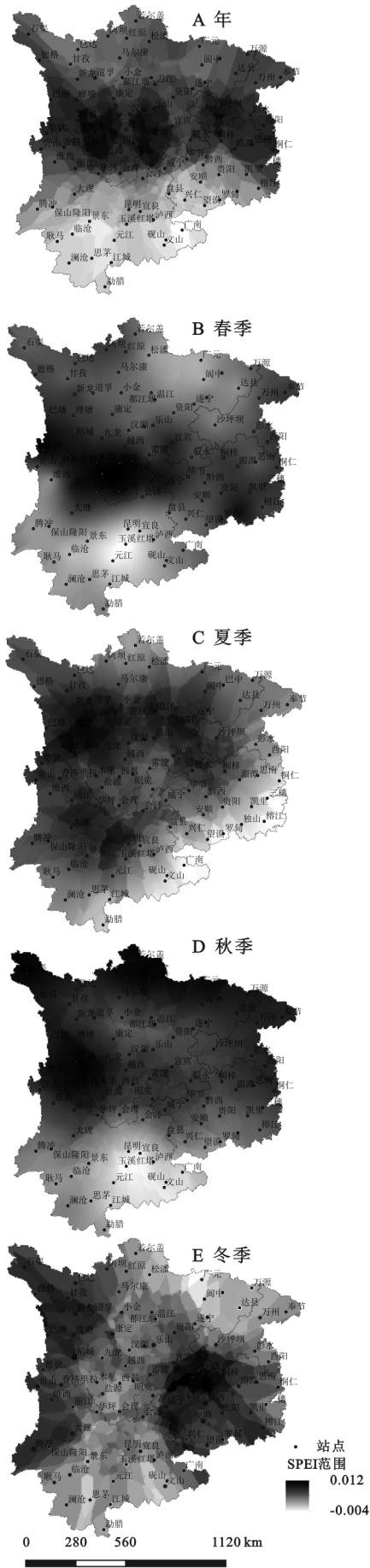


图 4 长江经济带上游各站点年与季节平均 SPEI 空间分布趋势

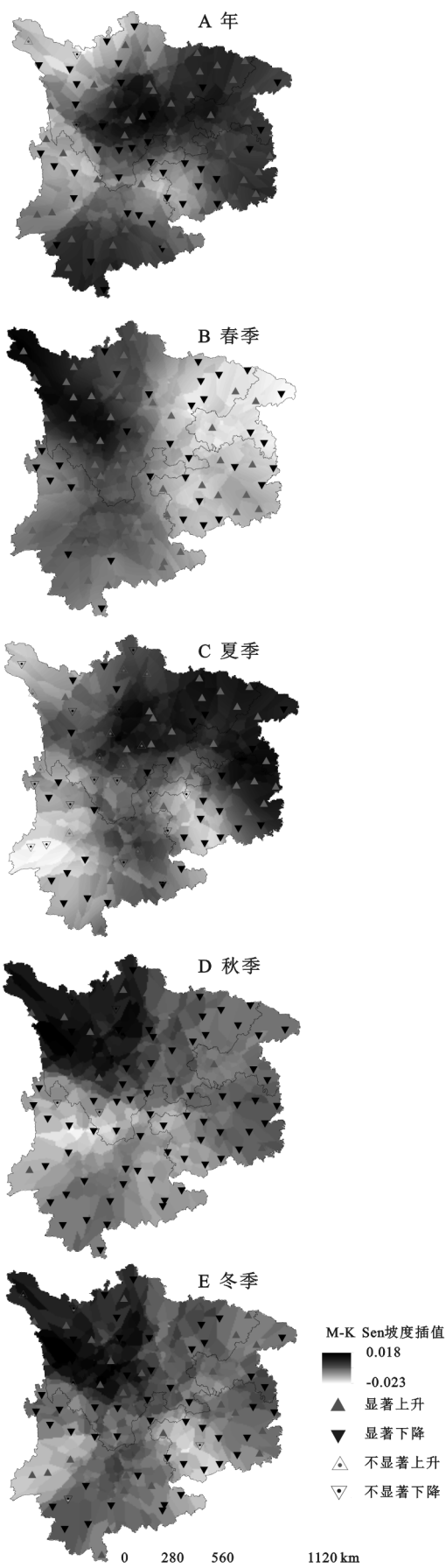


图 5 长江经济带上游年与季节干湿指数 M-K 趋势检验空间变化

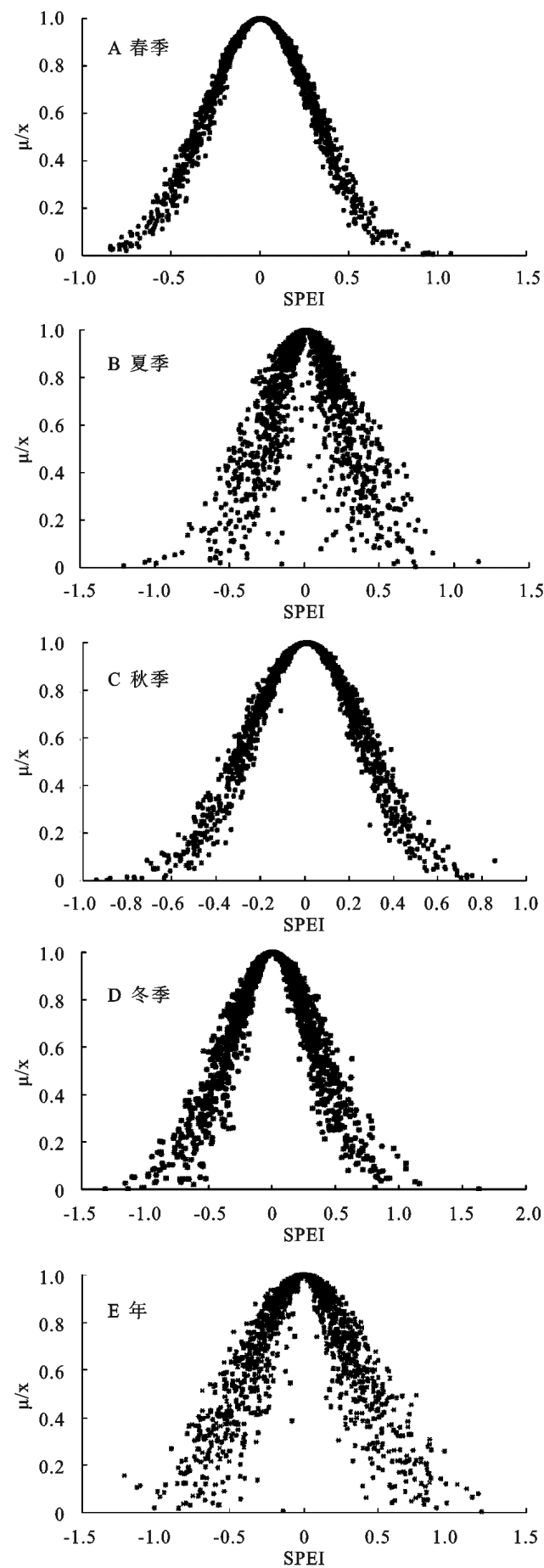


图 6 长江经济带上游年与四季 SPEI 指数时间分布隶属云

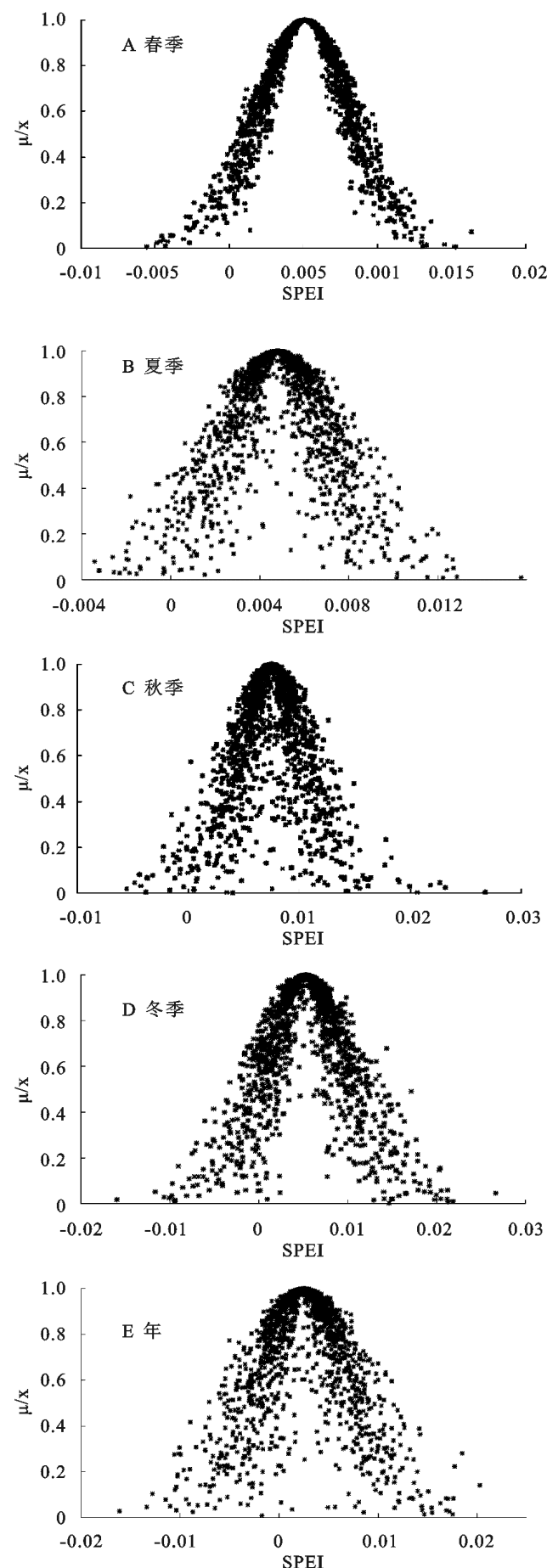


图 7 长江经济带上游 SPEI 空间分布的隶属云

表 3 长江经济带上游空间分布隶属云的数字特征值

| 时段 | E_x | E_n | H_e |
|----|--------|--------|--------|
| 年 | 0.0025 | 0.0045 | 0.0018 |
| 春 | 0.0051 | 0.0031 | 0.0001 |
| 夏 | 0.0048 | 0.0023 | 0.0008 |
| 秋 | 0.0075 | 0.0027 | 0.0012 |
| 冬 | 0.0053 | 0.0046 | 0.0016 |

表 3 反映了长江经济带上游 SPEI 云模型数字特征,从年尺度上来看,熵值(E_n)为 0.004 5,小于时间分布的 0.358 6,说明了各站点年 SPEI 反映的空间干湿变化比时间分布更为集中;超熵值 H_e 为 0.001 8,也小于时间分布的超熵值 0.102,说明研究区 SPEI 空间分布的不均匀程度变化比时间分布小,气候的干湿变化更加稳定。由表 3 可知,季节尺度上,四季空间分布的 E_n 均小于时间分布,即 SPEI 空间分布比时间分布的离散程度小;四季的 H_e 均小于时间分布,表明空间分布的不均匀稳定程度较时间分布更大;春季的 E_n 最小,说明其离散程度小,春季 H_e 为四季中的最小值,说明不均匀程度的稳定性最大。比较图 6 和图 7,相对于时间分布,空间分布的年、春和夏隶属云图的云层厚度更小,云滴也更加集中,表明 SPEI 分布不均匀程度较小,干湿变化不均匀程度的稳定性较好。

4 结论

本文研究分析了长江经济带上游 87 个气象站点 58 年来 5 种时间尺度的 SPEI 指数,结合趋势线、突变检验和云模型分析方法对其干旱时空演变特征进行了深入分析,得到以下结论:

- (1) 1961—2018 年长江经济带上游年尺度、夏季、秋季与冬季的 SPEI 均呈下降趋势,即干旱化;春季 SPEI 呈上升化趋势,即湿润化。M-K 突变分析表明长江经济带上游年、春、夏与冬季尺度 SPEI 无显著突变点,秋季在 1995 年发生了从湿到干突变,主要由夏季到秋季降水量减少引起。
- (2) 年尺度下研究区北部以干旱化为主,南部以湿润化为主,其中 41% 的站点呈湿润化,59% 的站点呈干旱化。春、冬季呈现干旱化特征,夏、秋两季呈湿润化趋势。春季和冬季分别有 63% 和 53% 的站点呈干旱化趋势,夏季和秋季分别有 50% 和 85% 的站点呈湿润化趋势。
- (3) 云模型分析表明,近 58 年来长江经济带上游年尺度与四季 SPEI 均处于正常年份。研究区 SPEI 空间分布不确定性与不稳定性显著低于 SPEI 时间分布。

参考文献:

[1] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等.基于 SPEI 的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2): 227-233.

[2] 刘小刚,冷险险,孙光照,等.基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J].农业机械学报,2018, 49(12):236-245,299.

[3] 曹永强,曹阳,徐丹.1961—2010 年黄淮海流域旱涝时空变化特征[J].资源科学,2015,37(10):2068-2077.

[4] 郭嘉豪,王会肖,赵茹欣.基于最优拟合函数的 SPI 指数的松嫩平原干旱特征分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2020,56(2):240-249.

[5] 于成龙,唐权,郭春玲,等.基于 scPDSI 的东北地区气象干旱时空特征分析[J].气象与环境科学,2020,43(3): 24-32.

[6] Stagge J H, Tallaksen L M, Gudmundsson L, et al. Response to comment on Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)[J]. International Journal of Climatology, 2016,36(4):2132-2138.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 汪曼琳,万新宇,钟平安,等.长江上游降水特征及时空演变规律[J].南水北调与水利科技,2016,14(4):65-71.

[10] Mehr A D, Vaheddoost B. Identification of the trends associated with the SPI and SPEI indices across Ankara, Turkey[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020,139(3):1531-1542.

[11] 张丹,张广涛,王丽学,等.彭曼—蒙特斯公式在参考作物需水量中的应用研究[J].安徽农业科学,2006(18): 4513-4514.

[12] 郭梦,张奇莹,钱会,等.基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J].水资源与水工程学报, 2019,30(3):127-132,138.

[13] 王建新,王健.序列一阶自相关对 MK 突变检验影响的探讨[J].山东理工大学学报:自然科学版,2018,32(2): 66-69.

[14] 孙朋,郭忠臣,刘娜,等.基于云模型的安徽省干湿指数时空分布特征研究[J].农业机械学报,2020,51(4): 147-155.

[15] 金菊良,宋占智,蒋尚明,等.基于云模型的淮北平原参考作物蒸散量时空分布[J].南水北调与水利科技, 2017,15(1):25-32.

[16] 薛黎明,李长明,郑志学,等.基于云理论的综合评价方法[J].系统科学学报,2020,28(2):68-72.