

# 基于 SPEI 的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析

罗登泽<sup>1,2</sup>, 靳晓言<sup>1,2</sup>, 强皓凡<sup>1,2</sup>, 梁川<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066)

**摘要:**若尔盖湿地是黄河上游重要的水源补给地,也是我国重要的沼泽分布区,明确其干湿时空演变特征,对进一步研究湿地气候与环境变化具有重要意义。基于若尔盖地区 19 个气象站 1961—2016 年逐日气象资料,计算了不同时间尺度下的标准化降水蒸散指数(SPEI),结合云模型、Mann-Kendall 检验、经验正交函数 EOF 等方法,分析了若尔盖湿地近 56 a 来干湿时空演变特征。结果表明:(1)近 56 年若尔盖湿地干湿演变大致呈“偏湿—偏干—偏湿—偏干”4 个阶段,以 1969 年、1975 年、1999 年为变化节点,且在 1995 年后干旱发生的情况增多。M-K 趋势检验显示无显著突变点。(2)云模型分析表明,湿地 SPEI 空间分布的均匀程度比时间分布的均匀程度大,气候的干湿变化也更加稳定。湿地各季节干湿变化亦呈现不同的强度、离散度和稳定度,其中春季干旱最为严重,冬季次之且冬季干湿变化最为集中和稳定。(3)EOF 分析得到的特征向量及对应的时间系数反映了若尔盖湿地干旱的时空演变主要特征。受大尺度天气系统的影响,第一模态表现为全区一致的干旱趋势,南北反向差异和东西反向差异分别为第二模态和第三模态,反映了纬度、经度对 SPEI 指数的影响。

**关键词:**SPEI 指数;云模型;Mann-Kendall 检验;EOF 分解;若尔盖湿地

**中图分类号:**P467

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)02-0227-07

## Analysis on the Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Dry-wet Conditions in Zoige Wetland Based on SPEI

LUO Dengze<sup>1,2</sup>, JIN Xiaoyan<sup>1,2</sup>, QIANG Haofan<sup>1,2</sup>, LIANG Chuan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hilly Areas of South China, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** Zoige Wetland is an important source of water supply in the upper reaches of the Yellow River, and is also a major area of marsh distribution in China. Knowledge of the spatiotemporal evolution characteristics of dry-wet conditions is essential for the further studies on climate and environmental changes in Zoige Wetland. Based on the daily meteorological data from 19 meteorological stations in the Zoige area from 1961 to 2016, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) on different time scales was calculated. By using the cloud model, Mann-Kendall test, empirical orthogonal function (EOF) and other methods, the characteristics of spatiotemporal evolution of dry-wet conditions in Zoige Wetland during the past 56 years were analyzed. The results showed that: (1) the dry-wet evolution could be roughly divided into such four stages as humid-arid-humid-arid stage in the past 56 years, while the turning points were observed in 1969, 1975 and 1999 and drought occurred more frequently after 1995; Mann-Kendall test showed that there was no significant mutation of dry-wet condition in Zoige wetland; (2) cloud model analysis showed that the spatial distribution of SPEI was more uniform than the time distribution, and the spatial dry-wet evolution was more stable; dry-wet changes in different seasons showed the different intensity, dispersion and stability; the most serious drought occurred in spring followed by winter, drought was most uniform and stable in winter; (3) the eigenvectors obtained by EOF analysis and the corresponding time coefficients reflected the main characteristics of the spatiotemporal evolution of drought in Zoige Wetland. As a result of the influence of

large scale climate systems, the first mode of EOF showed a uniform drought trend in the entire region. The differences between the north-south reverse and east-west reverse were the second and third mode, which reflected the influence of latitude and longitude on SPEI index.

**Keywords:** SPEI index; cloud model; Mann-Kendall text; EOF decomposition; Zoige Wetland

水分盈亏对陆地生态系统影响重大,而水分亏缺引起的干旱现象,是目前全球最为严重的气象水文灾害之一<sup>[1]</sup>。在全球变暖的趋势下,区域气候的干湿状况将发生变化,进一步加剧干旱进程<sup>[2]</sup>。我国干旱具有普遍性、连续性、季节性、地域性等特征,其不仅直接影响我国的粮食安全,还进一步影响水循环及其伴生水环境、水生态和水沙过程<sup>[3]</sup>。近年来,我国西南地区近年干旱频发,如 2003 年西南伏秋旱、2005 年云南春旱、2006 年川渝伏旱、2009 年西南秋冬春连旱等<sup>[4-6]</sup>,对当地生态环境、经济发展造成了严重影响。定量分析干湿的时空演变特征对区域抗旱减灾意义重大<sup>[7]</sup>。

目前,描述干旱现象主要通过干旱指数进行。常用的干旱指数有 Palmer 干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)、综合气象干旱指数(CI)以及相对湿度指数 M 等<sup>[8]</sup>。其中,Vicente-Serrano 等<sup>[9]</sup>于 2010 年提出的标准化降水蒸散指数(SPEI)同时考虑了温度与降水对干旱的影响,并继承了 SPI 多时间尺度的应用性,在我国年均降水量大于 200 mm 的地区有良好适用性<sup>[10]</sup>,近年来得到广泛应用。如张艳芳等<sup>[11]</sup>利用 SPEI 讨论了黄河源区干旱时空变化特征,发现源区近 10 a 来干旱程度减弱,呈暖湿化趋势。王东等<sup>[6]</sup>应用 SPEI 对西南地区干旱时空特征进行研究,指出西南地区近 53 a 来呈干旱化趋势。王丽茜等<sup>[12]</sup>基于 SPEI 对长江上游干旱变化趋势进行研究,发现长江上游东部地区干旱趋势严重,而西北地区趋湿。

若尔盖湿地地处青藏高原东北部,是世界上面积最大的高原湿地,其主导功能是水源涵养,兼具径流调节、生态多样性保护、沙化控制、调节局部小气候、环境自净及固碳等辅助生态功能<sup>[13]</sup>。若尔盖湿地位于长江、黄河上游源区,素有黄河“蓄水池”之称,其兴衰对长江、黄河的水源涵养、生态保护至关重要<sup>[14]</sup>。随着近年来全球变暖与人为活动的影响,湿地面积不断减小,导致生态环境不断恶化及黄河上游径流量持续减小<sup>[15]</sup>。因此,研究分析该区域干湿时空演变特征意义重大。目前专门针对若尔盖湿地干湿演变的研究较少,且以往的研究方法忽略了干旱发生的随机性、模糊性和稳定性,缺乏对干旱不确定性的度量。云模型考虑了定性概念的随机性与模糊性,并实现了与定量值的相互转换,为干湿时空演变特征提供了新的研究方法<sup>[16-17]</sup>。为此,本文基于标准化降水蒸散指

数(SPEI),采用 Mann-Kendall 检验法、云模型、经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)等方法分析若尔盖湿地干湿时空演变特征,以期为江河源区干旱进程变化及湿地生态维护提供依据。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况与资料

若尔盖湿地(32°20′—34°00′N, 101°36′—103°30′E)地处青藏高原东缘(图 1),是我国特有的沼泽分布区,还是全球面积最大的高原湿地,生态研究意义重大。该区域属大陆性高原气候,寒冷湿润,霜冻期长,日温差大,平均海拔 3 500 m,年均降水量 600~800 mm,年平均气温 1℃左右<sup>[18]</sup>。

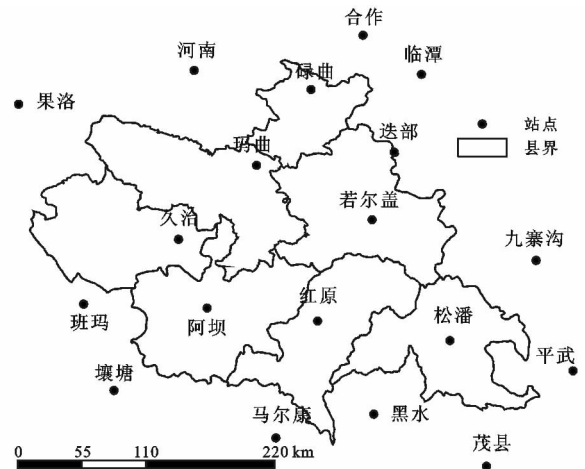


图 1 若尔盖湿地及其周边气象站分布

本文气象数据由中国气象数据共享服务网提供(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),由于研究区站点较少,选取若尔盖湿地及其周边地区共 19 个气象站 1961—2016 年逐日气象资料,包括降水量( $P$ )、最高气温( $T_{\max}$ )、最低气温( $T_{\min}$ )、平均气温( $T_{\text{mean}}$ )、相对湿度(RH), 10 m 风速( $U_{10}$ )、大气压强( $p$ )和日照时数( $n$ )。

### 1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数计算 SPEI 指数通过计算降水量与蒸散量的差值,比较其与平均状态的离散程度并以此来反映某地区的干旱状态<sup>[12]</sup>,具体计算步骤如下:

(1) 计算研究区域的潜在蒸散量(PET)。本文采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量。P-M 公式计算的潜在蒸散量考虑了温度、风速、气压和相对湿度等要素,与干旱区或湿润区

的实际参考作物蒸散量均较为符合<sup>[19]</sup>,其计算公式如下<sup>[20]</sup>:

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

(1)

式中:Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃);γ 为干湿计常数(kPa/℃);U<sub>2</sub> 为 2 m 高处风速(m/s);R<sub>n</sub> 为净辐射(MJ/m);G 为土壤热通量(MJ/m<sup>2</sup>);T 为平均气温(℃);e<sub>s</sub> 为饱和水汽压(kPa);e<sub>a</sub> 为实际水汽压(kPa)。除净辐射 R<sub>n</sub> 应进行地区校正外,各变量根据 FAO 方法计算<sup>[21]</sup>。本文采用 Yin 等<sup>[20]</sup>辐射矫正的经验系数计算 R<sub>n</sub>。

(2) 计算逐月降水量与蒸散量的差值:

$$D_j=P_j-\text{PET}_j$$

(2)

式中:D<sub>j</sub> 为某月水分盈亏情况;P<sub>j</sub> 为某月降水量;PET<sub>j</sub> 为某月潜在蒸散量。

(3) 建立不同时间尺度下(如 12 月)气候学意义的水分盈/亏累积序列 X<sub>i,j</sub><sup>k</sup>:

$$\begin{cases} X_{i,j}^k=\sum_{l=13-k+j}^{12}D_{i-1,l}+\sum_{l=1}^jD_{i,l} & j<k \\ X_{i,j}^k=\sum_{l=j-k+1}^jD_{i,l} & j\geq k \end{cases}$$

(3)

式中:X<sub>i,j</sub><sup>k</sup> 为时间尺度 k(3 月、6 月、12 月等)下第 i 年、第 j 月的累积差;D<sub>i,l</sub> 为第 i 年、第 l 月的月尺度水分盈亏。

(4) 采用 Log-logistic 概率分布对 X<sub>i,j</sub><sup>k</sup> 数据序列进行正态化,得到累计函数 F(x):

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

(4)

式中:F(x) 为概率分布函数;参数 α,β,γ 依次为尺度参数、形状参数和位置参数,通过线性矩拟合得到。

(5) 对 X<sub>i,j</sub><sup>k</sup> 数据序列的概率分布 F(x) 进行标准化处理。将累积概率密度标准化,即令 p=1-F(x),获得相应的 SPEI:

$$W=\sqrt{-2\ln p} \quad p\leq 0.5$$

(5)

$$\text{SPEI}=W-\frac{C_0+C_1W+C_2W^2}{1+D_1W+D_2W^2+D_3W^3}$$

(6)

式中:C<sub>0</sub>=2.515517;C<sub>1</sub>=0.802853;C<sub>2</sub>=0.010328;D<sub>1</sub>=1.432788;D<sub>2</sub>=0.189269;D<sub>3</sub>=0.001308。当 p>0.5 时,将 p 替代为 1-p 并且 SPEI 取负值。

SPEI 具有多时间尺度(可取 1 月、3 月、6 月、9 月、12 月、24 月等)特征,文中主要分析 12 个月时间尺度下的 SPEI 指数。参考《气象干旱等级》<sup>[22]</sup>及刘珂<sup>[2]</sup>、庄少伟<sup>[10]</sup>等对 SPEI 干湿等级的划分,将干旱划分为 7 个等级,见表 1。

表 1 SPEI 指数干旱等级划分

干旱等级	SPEI 指数范围
极端湿润	≥2
严重湿润	1.5~1.99
轻度湿润	1.0~1.49
正常年份	-0.99~0.99
轻度干旱	-1.0~-1.49
严重干旱	-1.5~-1.99
极端干旱	≤-2

1.2.2 云模型 设 U 是一个精确数值量表示的论域,C 为 U 上的定性概念,对于任一论域中的元素 x,存在一个有稳定倾向的随机数 u(x)∈[0,1],称为 x 对 C 的隶属度,则 x 在 U 上分布称为云,每个 x 称为一个云滴,即对定性概念的定量描述。采用期望 E<sub>x</sub>、熵 E<sub>n</sub> 和超熵 H<sub>e</sub> 来描述云模型的数字特征。其中,期望 E<sub>x</sub> 表示定性概念平均值的大小;熵 E<sub>n</sub> 表示定性概念的不确定度,即对应云滴相对于平均值的离散程度;超熵 H<sub>e</sub> 是熵 E<sub>n</sub> 的熵,反映了熵的稳定程度,即云滴的凝聚性,亦即云层的厚度<sup>[17]</sup>。采用逆向云发生器计算 E<sub>x</sub>,E<sub>n</sub> 和 H<sub>e</sub>,实现定量数值到定性概念的转化<sup>[23]</sup>。

1.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 趋势检验法(简称 M-K 法)是广泛应用于水文和气象随机序列趋势分析的非参数检验方法,无需样本服从特定分布,且不受少数异常值的干扰<sup>[7]</sup>。本文采用 M-K 法分析若尔盖湿地年尺度 SPEI 变化趋势及显著性水平。

1.2.4 经验正交函数分解 经验正交函数 EOF 分解是分析气候时空演变特征时常用的方法。其原理是以矩阵的形式表示研究地区各站点不同时序气候要素的观测资料(m 为该地区观测站,n 观测时序):

$$X_{m\times n}=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1n}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2n}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\x_{m1}&x_{m2}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix}$$

(7)

将变量 X<sub>m×n</sub> 看作是 k 个空间特征向量和对应时间权重系数的线性组合:

$$X_{m\times n}=V_{m\times k}\cdot T_{k\times n}$$

(8)

式中:T 为时间系数;V 为空间特征向量,又称空间模态。这一过程将变量场的主要信息集中由几个典型特征向量表现出来<sup>[24]</sup>。本文对年尺度 SPEI 指数的年均变量场进行 EOF 分解,提取并分析典型特征向量,以此研究若尔盖湿地干湿时空变化规律。

2 结果与分析

2.1 干湿时间分布特征的云模型分析

云模型能有效地描述干湿变化状况,且能把干旱

量化,并对其不均匀性的稳定程度进行定量分析<sup>[17]</sup>。根据 1961—2016 年若尔盖湿地各站点年及季度气象资料计算各站点 SPEI,对各站点不同时间尺度的 SPEI 指数取算术平均值,作为该研究区相应时间尺度的面 SPEI 指数。以每年年、春、夏、秋、冬不同时间尺度的面 SPEI 指数作为样本点,选取逆向云发生器算法计算不同时间尺度 SPEI 隶属云的数字特征(表 2),然后根据正向云发生器算法计算云滴得到年 SPEI 隶属云图(图 2)。

表 2 若尔盖湿地 SPEI 时间分布隶属云的数字特征值

时段	$E_x$	$E_n$	$H_c$
年	0.008	1.078	0.336
春	-1.306	0.356	0.047
夏	0.977	0.490	0.158
秋	1.005	0.524	0.140
冬	-0.769	0.140	0.024

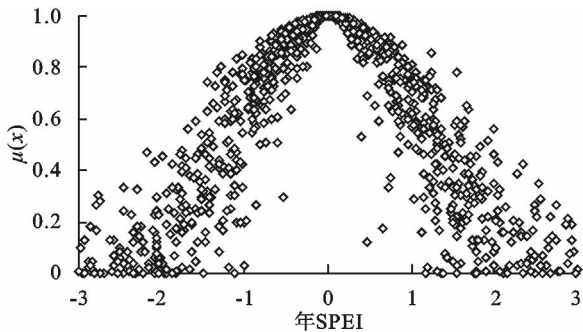


图 2 若尔盖湿地年尺度 SPEI 指数时间分布隶属云

云模型中, $E_x$  越小,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; $H_c$  越大,干旱程度的不均匀性越不稳定。由图 2、表 2 可知,近 56 a 来若尔盖湿地 SPEI 均值为 0.008,说明全年来看若尔盖湿地处于正常水平,不表现为明显干旱或湿润;熵值( $E_n$ )为 1.078,结合隶属云图可知,云滴分布较为分散,表明 SPEI 分布不均匀程度较大;超熵值( $H_c$ )为 0.336,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。由表 2 可知,季节尺度上, $E_x$  在春、冬两季为负值,且春季(-1.306)小于冬季(-0.769),说明若尔盖湿地在春、冬两季存在明显干旱情况,且春季更为严重,多年平均水平表现为中度干旱;冬季的  $E_n$ 、 $H_c$  为最小值,说明冬季干旱发生集中,且干旱趋势化稳定;春季的  $E_n$ 、 $H_c$  值大于冬季,但小于夏季和秋季,表明春季干旱较为集中,干旱不均匀性较为稳定;夏、秋两季  $E_x$  为正值,说明夏季和秋季不干早,秋季较夏季干湿变化更为分散,且变化的不均匀性更加稳定。

## 2.2 SPEI 的年际变化特征及 M-K 趋势检验

从 SPEI 指数年际变化趋势(图 3A)可以看出,

若尔盖湿地 SPEI 变化区间为 -2.417~1.950,存在较多干旱或湿润年。年 SPEI 以 -0.142/10 a 倾向率呈波动下降趋势,表明湿地呈干旱化趋势;其中 SPEI 最小值出现在 2002 年,为 -2.417,属极端干旱,且研究时段内有 1 a 发生重度干旱,10 a 发生轻度干旱。进一步根据累计距平曲线可知,近 56 a 来,湿地年 SPEI 总体大致呈“高一低—高一低”变化趋势,即“偏湿—偏干—偏湿—偏干”的阶段变化特征,4 个阶段分别为 1961—1968 年、1969—1974 年、1975—1994 年、1995—2016 年,各阶段平均年 SPEI 为 0.869, -0.860, 0.270, -0.306。1995 年后,SPEI 频繁出现负值,干旱发生情况明显增多,这与王东等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。自 2010 年开始,年 SPEI 变化趋于平缓,湿地无明显干旱或湿润年。

为进一步分析若尔盖湿地 SPEI 的年际变化特征,采用 Mann-Kendall 法对其进行趋势显著性检验和突变分析,见图 3B。年 SPEI 除 1964 年与 1967 年左右呈上升趋势外,其余年份均呈下降趋势,说明湿地近年来年际干旱呈加重趋势。在 0.05 显著性临界线内,UF、UB 曲线于 1969 年、1975 年、1978 年、1980 年、1985 年、1988 年、1992 年相交,交点之后 UF 线未通过 0.05 显著性水平检验,为进一步确认突变点是否可信,对年 SPEI 进行 Pettitt 检验,结果显示各点均未达到 0.05 显著性水平,表明在 1961—2016 年期间,湿地年尺度 SPEI 指数无显著突变点。

## 2.3 SPEI 空间分布特征的云模型分析

根据 1961—2016 年各站点年及季度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 4)。

图 4 反映了若尔盖湿地年尺度 SPEI 云模型数字特征,其中熵值( $E_n$ )为 0.880,小于时间分布的 1.078,说明了湿地各站点多年 SPEI 反映的干湿变化比时间分布更为集中;超熵值( $H_c$ )为 0.230,也小于时间分布的超熵值 0.336,说明湿地 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。比较图 2 与图 4,相对于时间分布,空间分布的隶属云图云层厚度更小,云滴也更加集中。由表 3 可知,季节尺度上,春、夏、秋三季空间分布的  $E_n$  均小于时间分布,即 SPEI 空间分布比时间分布的离散程度小;夏、秋两季的  $H_c$  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;秋季的  $E_n$ 、 $H_c$  为四季中的最小值,说明其离散程度小,且不均匀程度的稳定性最大。

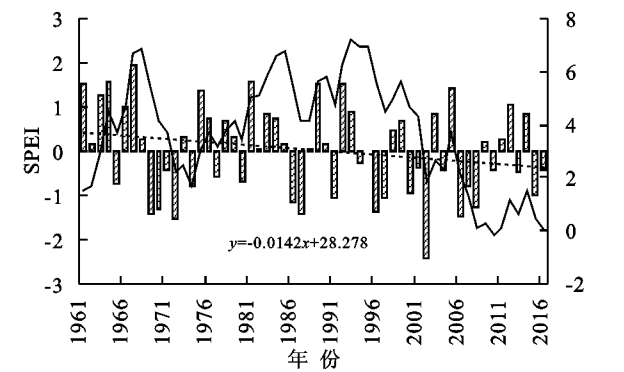


图 3 若尔盖湿地 SPEI 值年际变化和 M-K 突变检验曲线

表 3 若尔盖湿地 SPEI 空间分布隶属云的数字特征值

时段	$E_x$	$E_n$	$H_e$
年	0.003	0.880	0.230
春	-1.124	0.209	0.089
夏	0.784	0.281	0.110
秋	0.866	0.123	0.060
冬	-0.598	0.300	0.128

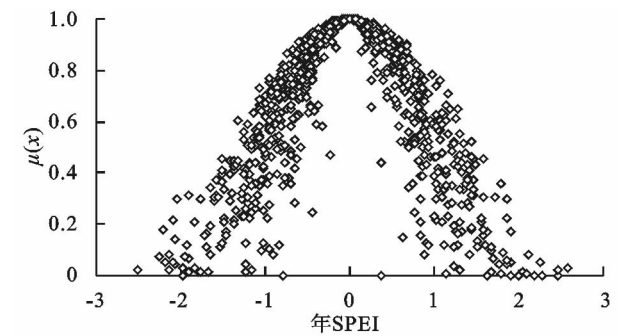
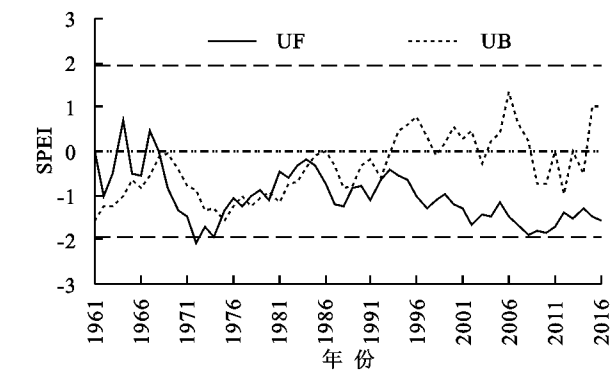
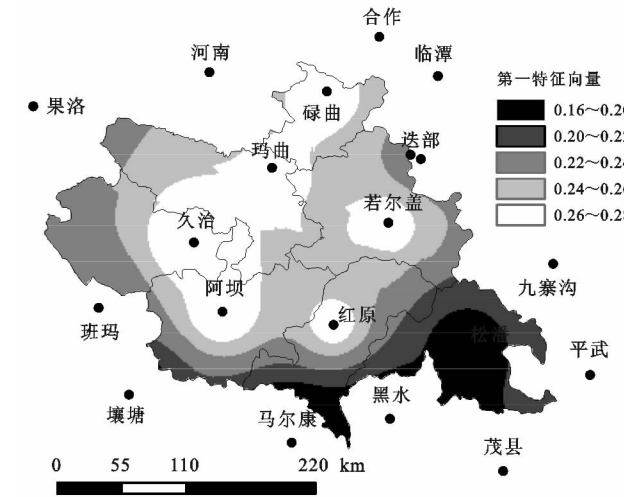


图 4 若尔盖湿地年尺度 SPEI 空间分布的隶属云

2.4 SPEI 空间分布特征的 EOF 分析

为进一步分析若尔盖湿地干湿变化的空间分布特征,对 19 个气象站点 1961—2016 年的 SPEI 距平矩阵进行 EOF 分解,得到代表湿地干旱空间分布类型的相互正交特征向量。特征向量的方差贡献率越



大,其代表的旱涝空间分布形式越典型。每一模态的极大值所在区域即为湿地干湿变化最为敏感的地区。而时间系数反映了各时序在该种干湿空间分布形式下权重的大小;时间系数的绝对值越大,该年分布形式越典型<sup>[25]</sup>。湿地 EOF 分解结果表明,特征值最大的前 3 个特征向量累计方差贡献率达 67.37%,已能反映湿地干湿变化的主要空间分布特征。其后的特征向量方差贡献率均较小,对应的旱涝分布形式不典型,因此取前 3 个特征向量进行分析。

第一特征向量方差贡献率为 43.43%,代表了湿地干湿状况变化的最主要特征。如图 5 所示,第一特征向量均为正值,空间分布上具有很好的一致性,说明若尔盖湿地干湿变化在全区一致。第一特征向量高值位于若尔盖湿地北部及中部,说明碌曲—阿坝一线及若尔盖、红原等地对干湿变化的反应最为敏感。其时间系数在波动中呈下降趋势,说明全区干旱化趋势明显。由于第一模态空间系数均为正,则时间系数为正值年份二者乘积也为正,表示该年属于全区偏湿型,如 1965 年。相反,时间系数为负表示该年属全区偏干型,严重干旱年份主要出现在 1994 年后,其中 2002 年为全区偏干最典型年。

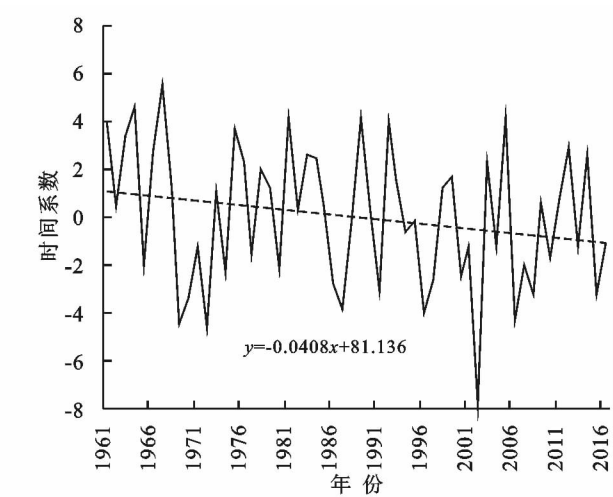


图 5 若尔盖湿地 SPEI 第一模态空间分布及第一模态对应的时间系数

第二特征向量方差贡献率为 15.38%，为若尔盖湿地干湿空间分布的重要形式。

如图 6 所示，第二特征向量在-0.28~0.37 间变化，空间系数数值北负南正的纬向分布特征表明南、北地区干湿具有反相位变化的空间特征，即北部 SPEI 偏高(偏湿)时，南部 SPEI 偏小(偏干)，反之亦

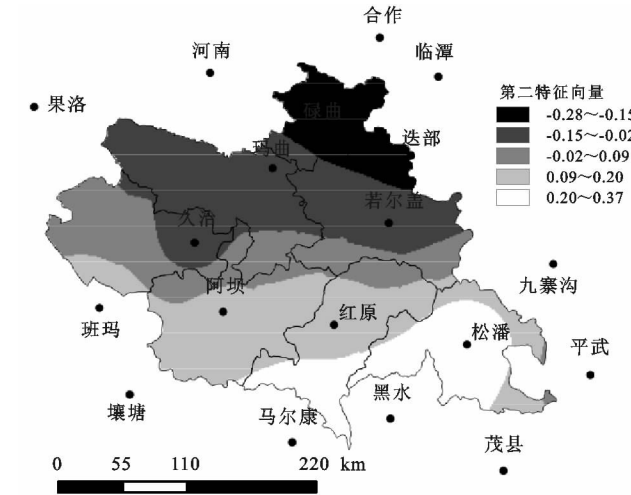


图 6 若尔盖湿地 SPEI 第二模态空间分布及第二模态对应的时间系数

第三特征向量特征贡献率为 8.56%，也能对若尔盖湿地干湿空间分布做出一定解释。由图 7 所示，第三特征向量呈西高东低的分布形式，表明东、西地区具有干湿反相位变化的经向分布空间特征。第三

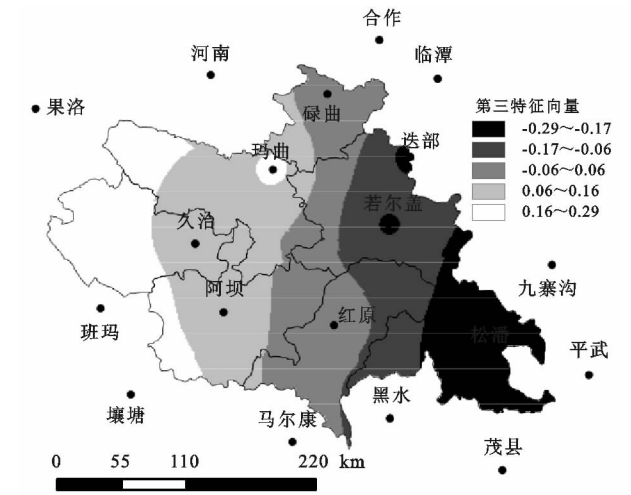
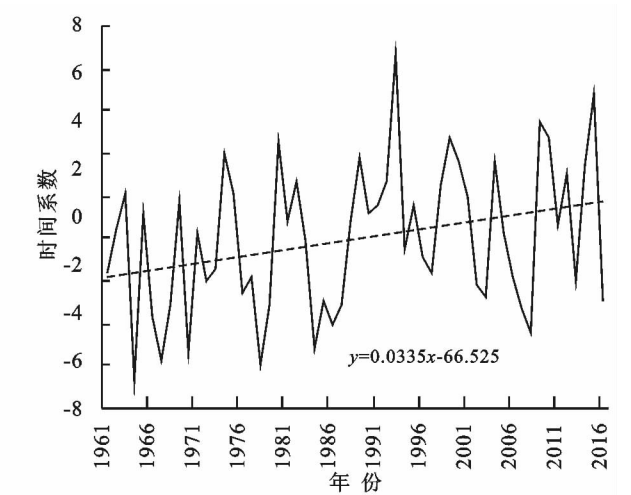


图 7 若尔盖湿地 SPEI 第三模态的空间分布及第三模态对应的时间系数

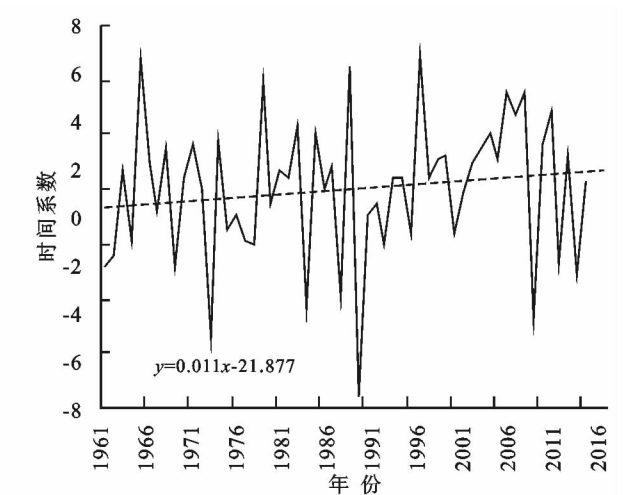
### 3 结论

(1) 近 56 a 若尔盖湿地干湿演变大致呈“偏湿—偏干—偏湿—偏干”4 个阶段，以 1969 年、1975 年、1999 年为变化节点；年 SPEI 以-0.142/10 a 倾向率呈波动下降趋势，表明湿地呈干旱化趋势，且在 1995 年后干旱发生的情况增多。经 M-K 检验，湿地 SPEI 无显著突变点。

然。第二特征向量的时间系数呈上升趋势，其中，1961—1987 年，时间系数在负值区波动，表明湿地南部相对干旱而北部相对湿润；1987 年后时间系数在正值区波动，说明若湿地在 1987 年后北部地区由相对湿润转为相对干旱，南部地区则由相对干旱转化为相对湿润。



特征向量的时间系数呈缓慢上升趋势，其中，东部相对干旱而西部相对湿润的年份主要有 1965 年、1979 年、1989 年、1997 年，东部相对湿润而西部相对干旱的年份主要有 1973 年、1990 年、2010 年。



(2) 云模型分析表明，湿地 SPEI 空间分布的均匀程度比时间分布的均匀程度大，气候的干湿变化也更加稳定。相对于时间分布，空间分布的隶属云图云层厚度更小，云滴也更加集中。湿地各季节干湿变化亦呈现不同的强度、离散度和稳定度。

(3) EOF 分析得到的特征向量及对应的时间系数反映了若尔盖湿地干旱的时空演变主要特征。从 SPEI-12 的空间分布特征来看，受大尺度的天气系统

影响,第一特征向量表现为全区一致的干旱趋势;南北反向差异和东西反向差异分别为第二和第三特征向量,反映了纬度、经度对 SPEI 指数的影响。

#### 参考文献:

- [1] 张煦庭,潘学标,徐琳,等. 基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J]. 农业工程学报,2017,33(15):190-199.
- [2] 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.
- [3] 翁白莎,严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. 资源科学,2010,32(2):309-316.
- [4] 李韵婕,任福民,李忆平. 1960—2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报,2014,72(2):266-276.
- [5] 张家发,唐文坚,李少龙. 中国西南易旱地区识别的探讨[J]. 中国水利,2012(5):18-21,39.
- [6] 王东,张勃,安美玲,等. 基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报,2014,29(6):1003-1016.
- [7] 王飞,丁建丽,魏阳. “一带一路”国家和地区百年尺度干旱化特征分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(11):1442-1455.
- [8] Zargar A, Sadiq R, Naser B, et al. A review of drought indices[J]. Dossiers Environnement, 2011,19(1):333-349.
- [9] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. Amultiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [10] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究,2013,18(5):617-625.
- [11] 张艳芳,吴春玲,张宏远,等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征[J]. 山地学报,2017,35(2):142-150.
- [12] 王丽茜,杨肖丽,任立良,等. 长江上游气温、降水和干旱的变化趋势研究[J]. 人民长江,2017,48(20):39-44.
- [13] 张秋劲. 若尔盖国家级生态功能保护区可持续发展研究[D]. 成都:四川大学,2004.
- [14] 李志威,王兆印,张晨笛,等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. 水科学进展,2014,25(2):172-180.
- [15] 强皓凡,靳晓言,赵璐,等. 基于相对湿润度指数的近 56 年若尔盖湿地干湿变化[J]. 水土保持研究,2018,25(1):172-182.
- [16] 詹存,梁川,赵璐,等. 基于云模型的江河源区降雨时空分布特征分析[J]. 长江科学院院报,2014,31(8):23-28.
- [17] 龙贻东,梁川,景楠,等. 基于云模型和相对湿润度指数的干旱时空分布特征分析[J]. 灌溉排水学报,2015,34(8):67-71.
- [18] 李志威,孙萌,游宇驰,等. 若尔盖高原实际蒸散量变化规律研究[J]. 生态环境学报,2017,26(8):1317-1324.
- [19] Wang Wen, Zhu Ye, Xu Rengui, et al. Drought severity change in China during 1961—2012 indicated by SPI and SPEI[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2437-2451.
- [20] Yin Y, Wu S, Zheng D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. Agricultural Water Management, 2008,95(1):77-84.
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [Z]. Rome: Fao-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级 GB/T20481—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [23] 刘德地,陈晓宏,楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报,2009,40(7):850-857.
- [24] 沈国强,郑海峰,雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报,2017,37(17):5882-5893.
- [25] 张玉静,王春乙,张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析[J]. 生态学报,2015,35(21):7097-7107.