DOI: 10.5846/stxb201807061481

张钦,唐海萍,崔凤琪,戴路炜.基于 SPEI 的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析.生态学报,2019,39(19): - . Zhang Q, Tang H P, Cui F Q, Dai L W.SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun Buir grassland. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (19): - .

基于 SPEI 的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析

张 钦,唐海萍*,崔凤琪,戴路炜

(北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘要:呼伦贝尔草原是我国北方地区重要的防风固沙和水源涵养生态功能区,在气候变化的背景下,该区的草原畜牧业和旱作 农业深受干旱的影响。研究该区干旱发生的特征及趋势,对当地采取适应气候变化对策具有重要意义。基于 1960—2017 年呼 伦贝尔草原 4 个气象站逐月降水和气温资料,计算标准化降水蒸散指数(SPEI),并采用 Mann-Kendall 突变检验、Morlet 小波分 析和 R/S 分析法分析了近 58 年呼伦贝尔草原年、季尺度的气候变化及干旱特征与趋势,并结合该区实际发生的灾害事件对 SPEI 指数进行了验证。结果表明:1)近 58 年来呼伦贝尔草原在气温显著上升,降水量减少的背景下干旱化趋势显著。2)该区 域年尺度和季节尺度下干旱化特征具有差异性,其中,年尺度下,该区域 SPEI 指数以-0.218×10a⁻¹倾向率呈显著下降趋势, 1998 年是干旱加剧的突变年,未来在 11 年尺度上有持续偏旱的趋势;季节尺度下,冬季 SPEI 指数显著增加,且未来在 17 年尺 度上有持续偏湿的趋势,春、夏和秋季的 SPEI 指数均呈下降趋势,并分别在 22 年、9 年和 15 年尺度上有持续偏旱的趋势。3) 2000 年以来,干旱发生的总频率尤其重旱和极旱的发生频率均显著高于其他年代;4)夏季和秋季分别是发生重旱和极旱次数 最多的季节。5) SPEI 指数在呼伦贝尔草原区的干旱监测与分析中具有较好的适用性。

关键词:干旱;Hurst 指数;SPEI 指数;呼伦贝尔草原

SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun Buir grassland

ZHANG Qin, TANG Haiping*, CUI Fengqi, DAI Luwei

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: With increases in global warming intensity, the frequency and duration of droughts are showing a clear upward trend, and the global terrestrial extreme drought area is expanding, particularly on the Eurasian and African continents. Hulun Buir grassland is an important wind – fixing and water – reserving ecological functioning area in northern China. However, due to the superimposition of climate change effects, such as the frequency of drought, and human activities, the grasslands have gradually degraded to a simpler community structure with reduced species diversity, intensified desertification, and increased pests and diseases. Based on monthly precipitation and temperature data from four meteorological stations in the Hulun Buir grassland from 1960 to 2017, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated. The Mann-Kendall mutation test, Morlet wavelet analysis, and R/S analysis were used to analyze the drought change characteristics and trends on both annual and seasonal scales in the Hulun Buir grassland over the past 58 years, and the SPEI index was verified by the actual disaster events in the area. The results show that: 1) between 1960 and 2017, the temperature of the Hulun Buir grassland increased gradually at a significance level of 0.05, while precipitation showed a slight decrease. In addition, the seasonal variations in temperature and precipitation are

收稿日期:2018-07-06; 网络出版日期:2019-00-00

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500608-3)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tanghp@ bnu.edu.cn

different. Among them, summer precipitation is gradually decreasing, while the other seasons are increasing at different rates. In addition to winter temperatures, the interannual temperature changes in other seasons showed an upward trend at a significance level of 0.05. Among them, the spring temperature rose at the fastest rate, reaching $0.46 \,^{\circ}\text{C} \times 10 \,^{-1}$, followed by summer ($0.39 \,^{\circ}\text{C} \times 10 \,^{-1}$). 2) On the annual scale, the SPEI index of this region showed a downward trend with a tendency of $-0.218 \times 10a^{-1}$ (p<0.01). 1998 is the year of drought intensified in the region, and there is a trend of persistent drought on the 11 a scale for the future; On the seasonal scale, the winter SPEI index increased significantly, and there is a trend of continuous wetness on the 17 a scale for the future. However, the SPEI index in spring. summer, and autumn showed a downward trend, and there was a trend of persistent drought on the 22 a, 9 a and 15 a scales, respectively; 3) The frequency of moderate drought occurrences is the highest among different years and seasons, and that of extreme drought is the lowest. At the beginning of the 21st century, the frequency of drought, especially severe drought and extreme drought, was significantly higher than for the past four decades. 4) Summer and autumn were the seasons with the most frequent occurrences of severe and extreme droughts, respectively. 5) The SPEI index can well characterize the drought characteristics of the Hulun Buir grassland.

Key Words: drought; hurst index; SPEI index; Hulun Buir grassland

干旱作为一种反复出现的极端气候事件,对农牧业、水资源以及自然和社会生态系统产生了许多负面影响^[1]。据国际灾害数据库(International Disaster Database)统计,1960—2016年全球因干旱造成的损失平均每年约2210亿美元。然而,随着全球变暖强度的增加,干旱的发生频率和持续时间正在呈现出明显的上升趋势^[2-3],全球陆地的极端干旱面积也在不断扩大^[4],其中以亚欧大陆和非洲大陆最为显著^[5-6]。大量的事实已经揭示了近几十年中国干旱发生频率、持续时间和范围不断扩大的事实^[7],尤其是发生在我国北方地区的重度和极端干旱事件更加频繁^[8-10]。此外,旱灾的发生区域也开始不断地向我国南部和东部的湿润、半湿润地区扩展^[11],这种趋势可能继续在本世纪持续下去^[12]。有研究发现,如果中国不对干旱灾害给予应有的重视和积极有效的应对,到2030年,仅中国东北地区,就可能造成3500万农民的农业收入损失一半以上^[13]。

干旱指标是干旱监测的基础与核心。为了评估气候干旱的频率、持续时间、严重程度和空间范围,已经开发了数百个干旱指数^[14]。对于同一干旱事件的特征,不同的干旱指数因所需变量和计算方法差异,使其结果也不尽相同。干旱指标均是建立在特定的时空范围内,有其相应的尺度^[15],因为在不同流域和地区,干旱变化特征及表现会因降水、气温、土壤水文等因素的空间分异而存在较大差异,因此,研究干旱指数的区域适用性具有重要的科学意义^[16]。然而,对于何种干旱指数能够充分表征干旱条件方面,学术界目前并未达成共识。但是,有一些干旱指数更受欢迎,例如由 McKee 等人^[17]提出的标准化降水指数 SPI 不仅计算简单,且能较好地反映不同时间尺度和不同区域的干旱状况。然而,在全球变暖的情况下,SPI 仅考虑降水资料,未考虑影响干旱的其他因素如温度、蒸散等,限制了该方法进一步的适用。此外,考虑了温度和前期天气条件对干旱的影响的 Palmer 干旱指数(PDSI),其物理机制较为明确,非常适用于干旱对全球变暖响应的研究^[18],但其计算繁杂,对资料要求较高,部分参数只能靠经验估计,致使计算精度大大降低。加之时间尺度固定(9—12 个月之间)而无法有效地应用于干旱的多时间尺度研究中^[19]。标准化降水蒸散指数(SPEI)是 Vicente-Serrano^[20]为检测全球干旱分布状况,在 SPI 指数的基础上提出的,可以反映干旱的持续时间和积累,拥有多尺度特征和能够衡量温度变化对干旱影响的双重优点,使其成为评估、监测和评估全球变暖背景下干旱的理想指标^[21-23]。已有学者基于 SPEI 方法评价了中国西北^[24-25]、西南^[26]、东北^[27-28]、华中^[29]和华北^[30]等区域的干旱时空格局,并得到了较好的验证。

呼伦贝尔草原作为亚欧大陆草原景观的一部分^[31],拥有森林、草原、疏林沙地和沼泽湿地等多种生态系 统类型,是全球气候变化过程中的生态敏感区和脆弱区^[32-33]。同时,该区也是我国北方地区重要的防风固沙 和水源涵养生态功能区、京津上游的生态屏障区、生物多样性维持区和重要的畜牧业生产基地^[34]。然而,干 旱是生态系统初级生产力变化的重要驱动因素^[35],尤其在干旱和半干旱地区,干旱还可能引发一系列的环境问题^[36-37],以及包括食物安全、环境难民、经济发展等农牧业干旱、水文干旱和社会经济干旱等社会经济问题。近年来呼伦贝尔草原区的气候变化,尤其是干旱的频发对该区草原畜牧业和旱作农业产生了重大影响,集中表现在草地群落结构简单化、物种多样性减少、土地沙化不断扩展、鼠虫害频发等^[34,38]。因此,对呼伦贝尔草原气象干旱发生的特征进行准确、有效的监测,不仅可为该区农牧业干旱、水文干旱和社会经济干旱提供研究背景^[39]和干旱风险的管理依据^[40],还可为该区农牧民生活的改善以及生态环境的保护提供决策支持。

1 研究区概况

呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区东北部,大兴安岭以西,位于47°05′—53°20′N,115°31′—123°00′E。行 政范围包括海拉尔市、满洲里市、陈巴尔虎旗、新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗,总面积约 83350 km²。其中,陈巴尔虎旗、新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗是著名的牧业四旗,四旗的草 原面积占到全市草原总面积的90%以上。

呼伦贝尔草原处于干旱半干旱、季风与非季风以及农区和牧区的过渡地带^[41-42],地形为平坦、辽阔、波状 起伏的高平原,海拔在650—700 m。该区属温带大陆性季风气候,春季干旱少雨,大风频发;夏季温凉短促, 水热集中;秋季降温迅速,日温差大,秋霜早;冬季严寒漫长,冷空气活动频繁。各区域间气候差异较小,年均 温约-1.0—1.0℃,年均降水量250—350 mm。该区植被类型复杂多样,草原植物资源约1000余种,是欧亚草 原的重要组成部分^[31]。该区东部由于受到大兴安岭山地的影响,气候较湿润,属于森林草原交错带;从大兴 安岭西麓向西至呼伦湖方向,植被类型由森林草原,草甸草原过渡到典型草原。呼伦贝尔草原区域分布着额 尔古纳河、根河、海拉尔河、伊敏河等河流,以及零星分布的大小湖泊,河流和湖泊沿岸一般发育各类型草甸或 者沼泽^[43]。

2 数据与方法

2.1 数据

气象及灾情数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/),该数据集已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。本文选取呼伦贝尔典型草原和草甸草原区的4个气象站点(图1)1960—2017年的逐月降水量及月均气温:海拉尔(49.22°N,119.75°E)、满洲里(49.57°N,117.43°E)、新巴尔虎左旗(48.22°N,118.27°E)和新巴尔虎右旗(48.67°N,116.82°E)。此外,为验证本文计算的SPEI指数在呼伦贝尔草原区的有效性,选取了1960—1999年我国重大干旱(重旱、特大旱)灾害事件以及满洲里和鄂温克族自治旗的农业气象灾情旬值数



据和 2005—2016 年《中国气象灾害年鉴》干旱事件发生的记录作为验证。

2.2 方法

2.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

标准化降水蒸散指数(SPEI)是降水量与潜在蒸散发量差值序列的累积概率做正态标准化后的指数。为 了揭示以草原生态系统为主(天然草场面积占研究区总面积的 80%以上)的区域整体干旱特征,对差异较小 的4个气象站点逐月的气温和降水取均值来计算其标准化降水蒸散指数(SPEI)。在验证该指数表征呼伦贝 尔草原区干旱事件发生的有效性时,则分别计算各站点的 SPEI 指数。SPEI 指数是降水量与潜在蒸散发量差 值序列的累积概率做正态标准化后的指数。首先,采用 Thornthwaite 法计算潜在蒸散量,然后计算逐月降水和 蒸散的差值,并建立不同时间尺度的水分盈亏累积序列。由于原始数据序列中可能存在负值,所以,采用 3 参 数的 Log-logistic 概率分布对累积概率密度进行标准化,最终计算得出 SPEI 值,计算过程如下^[19]:

首先,计算潜在蒸散量(PET),Vicente-Serrano 推荐使用 Thornthwaite 方法:

$$PET = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H}\right)^A \tag{1}$$

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$$
(2)

式中,PET 为潜在蒸散量; T_i 为月平均温度; H为年热量指数; A 为常数,由 H 决定, A = 0.49+0.179H-0. 0000771H²+0.000000675H³。

其次,计算逐月降水量与蒸散量的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \tag{3}$$

其中,D_i为降水量与蒸散量的差值,P_i为月降水量,PET_i为月蒸散量。

第三,采用3个参数的Log-logistic 概率分布对D。数据序列进行正态化,计算每个数值对应的SPEI指数:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1}$$
(4)

其中,参数α、β、γ的计算如下:

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\,\omega_1)\,\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\,\Gamma(1 - 1/\beta)} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \tag{6}$$

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\omega}_0 - \alpha \Gamma (1 + 1/\beta) \Gamma (1 - 1/\beta) \tag{7}$$

其中, Γ 为阶乘函数, ω_0 、 ω_1 、 ω_2 为数据序列 D_i 的概率加权矩:

$$\omega_{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (1 - F_{i})^{s} D_{i}$$
(8)

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \tag{9}$$

N 为参与计算的月份数。

最后对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \tag{10}$$

当累计概率 P≤0.5 时:

$$\omega = \sqrt{-2\ln(P)} \tag{11}$$

SPEI =
$$\omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3}$$
 (12)

式中,常数 $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 同 SPI 计算过程, $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308_{\odot}$

由于该方法是基于"历史同月的累积水分亏缺量服从 Log-logistic 分布"这一假设,因此,为了验证呼伦贝 尔草原累积水分亏缺量是否符合 Log-logistic 分布,本文对 1 个、3 个和 12 个月尺度下的累积水分亏缺量序列 与 Log-logistic 分布进行了 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验。结果表明,在 1 个、3 个和 12 个月尺度下,K-S 检验 的概率 P 值(分别为 0.241、0.167、0.508)均大于显著性水平 α=0.05,没有足够理由拒绝零假,即累积水分亏 缺量样本来自 Log-logistic 分布总体。因此,可判定该序列来自 Log-logistic 分布总体,基于该分布的 SPEI 指数 在呼伦贝尔草原干旱表征上具备数学统计理论基础。

此外,为了反映研究区干旱过程的细节与总体特征,分析各个站点月、季以及年际干旱演变特征(分别记作 SPEI-1、SPEI-3和 SPEI-12)。3个月时间尺度 SPEI 与草原生长季的关系密切;12个月时间尺度 SPEI 能较清晰的反映长期干旱变化特征,因此,本文以3个月为时间尺度(SPEI-3)的5月、8月、11月和次年2月作为表征春季、夏季、秋季、冬季,12个月为时间尺度的 SPEI(SPEI-12)表征年际干旱,并参照相关文献^[19,23]对干旱等级进行了划分(表1)。

Table 1 Classification scales of meteorological drought for SPEI							
干旱等级 Drought level	干旱类型 Drought type	SPEI 数值范围 SPEI range	干旱等级 Drought level	干旱类型 Drought type	SPEI 数值范围 SPEI range		
1	无旱	-1.0 <spei< td=""><td>3</td><td>严重干旱</td><td>-2.0<spei≤-1.5< td=""></spei≤-1.5<></td></spei<>	3	严重干旱	-2.0 <spei≤-1.5< td=""></spei≤-1.5<>		
2	中等千旱	-1.5 <spei≤-1.0< td=""><td>4</td><td>极端干旱</td><td>SPEI≤-2.0</td></spei≤-1.0<>	4	极端干旱	SPEI≤-2.0		

表1 标准化降水蒸散指数干旱等级划分

SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

2.2.2 Hurst 指数和 R/S 分析法

Hurst 指数通常是用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程。它是由 Hurst 在分析尼罗河水文数据时提出的,经常用于分析长时间序列相关性。其中,R/S分析法(也被称为重标极差分析法)被广泛用于计算H指数。R/S原理简述如下^[44]:

设有时间序列, {ξ(t)}, t=1,2,3…,对于任意正整数≥1,有均值序列:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \tau = 1, 2, \cdots$$
 (1)

由此求得累计离差:

$$X(t,\tau) = \sum_{u=1}^{t} \left(\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \right), 1 \le t \le \tau$$
(2)

极差 R 定义为:

$$R(\tau) = \max X(t,\tau) - \min(t,\tau) , 1 \le t \le \tau = 1, 2, \cdots$$
(3)

标准差 S 定义为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \left(\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, \cdots$$
(4)

R、S、T满足一般关系式:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = c \times \tau^{H} \tag{5}$$

式中,c为常数;R(\tau)/S(\tau)为重标极差;H为Hurst指数。

H 范围从 0 到 1。当 H=0.5 时,表明该时间序列为随机序列;H>0.5 时表示该过程具有连续特性,并且未 来趋势与过去趋势一致,而 H<0.5 时则表示未来趋势与过去趋势相反。

2.2.3 其他方法

采用气候倾向率法研究 SPEI 的时空变化趋势, Mann-Kendall 统计检验用于研究 SPEI 时间序列的突变, Morlet 小波分析用于计算本研究中干旱发生的周期性。

3 结果分析

3.1 呼伦贝尔草原气候变化趋势

由图 2 可知,1960—2017 年呼伦贝尔草原多年平均降水量为 286.66 mm,且以 3.65 mm · 10a⁻¹的速率呈

不显著减少趋势,其中,1986年和1998年分别是近58 年来该区域降水量最少和最多的两个年份,年均降水量 分别为137.4 mm和567.225 mm。过去58年该区域多 年平均气温为-0.06℃,并以0.35℃ · 10a⁻¹的速率呈上 升趋势(P<0.001),其中,1969年和2007年分别是过去 58年来该区域年平均温度最高和最低的年份,其值分 别为-2.30℃和2.31℃。

由图 3 可知,过去 58 年呼伦贝尔草原春季多年平 均降水量为 32.68 mm,占年平均降水量的 11.40%,并以 1.75 mm · 10a⁻¹的速率呈不显著增多趋势,最低值和最 高值出现的年份分别是 1972 年(6.65 mm)和 2005 年 (68.6 mm)的春季。过去 58 年该区域多年春季平均气 温为 1.58℃,并以 0.46℃ · 10a⁻¹的速率呈上升趋势(*P*< 0.001)。其中,1966 年和 1998 年分别是多年春季平均 气温的最低值和最高值,分别为-1.77℃和 5.08℃。同 样地,夏季多年平均降水量为 202.72 mm,占年平均降



图 2 1960—2017 年呼伦贝尔草原年均降水量与气温变化 Fig.2 Annual average precipitation and temperature changes in Hulun Buir Grassland from 1960 to 2017

水量的 70.72%,过去 58 年以 7.75 mm · 10a⁻¹的速率呈减少趋势,最低值和最高值出现的年份分别是 2016 年 (80.05 mm)和 1998 年(432.68 mm)。该区域夏季多年平均气温为 19.28℃,过去 58 年以 0.39℃ · 10a⁻¹的速率呈上升趋势(*P*<0.001),最低值和最高值出现的年份分别是 1983 年(17.44℃)和 2001 年(22.12℃)的夏季。

秋季多年平均降水量为 43.42 mm,占年平均降水量的 15.15%,过去 58 年以 1.142 mm · 10a⁻¹的速率呈增 加趋势,最低值和最高值出现的年份分别是 1986 年(4.8 mm)和 1998 年(103.55 mm)。该区域秋季多年平均 气温为 0.25℃,过去 58 年以 0.28℃ · 10a⁻¹的速率呈上升趋势(P=0.002),最低值和最高值出现的年份分别是 1981 年(-1.68℃)和 2004 年(2.79℃)。冬季多年平均降水量为 7.82 mm,占年平均降水量的 2.73%,过去 57 年以 1.33 mm · 10a⁻¹的速率呈增加趋势(P<0.001),最低值和最高值出现的年份分别是 1973 年(1.9 mm)和 2012 年(17.925 mm)。该区域冬季多年平均气温为-21.34℃,过去 57 年以 0.24℃ · 10a⁻¹的速率呈不显著上升趋势,最低值和最高值出现的年份分别是 1986 年(-26.59℃)和 2004 年(-17.35℃)。

3.2 SPEI 指数的年际变化特征

图 4 为呼伦贝尔草原平均 SPEI 指数年际变化及其 Mann-Kendall (M-K)检验曲线。呼伦贝尔草原的年尺度的 SPEI 值在 1960—2017 年间呈下降趋势,线性倾向率为-0.218 · 10a⁻¹(*P* <0.01),表明,近 58 年来呼伦贝尔草原呈干旱化趋势,其中,1999 年和 2001 年分别是该地区近 58 年来最湿润和最干旱的两个年份,其 SPEI 值分别为 2.012 和-2.284。UF 曲线显示近 58 年呼伦贝尔草原平均 SPEI 指数经历了下降上升和下降的趋势,其中 UF 值在 1984—1994 年间(除了 1986 和 1987 年)为正值,表明 SPEI 指数在此期间总体呈上升趋势,1984年之前以及 1994 年之后,UF 值均小于 0,尤其是 2004 年之后,UF 曲线超出了 0.05 的置信区间,说明 SPEI 指数下降的趋势显著。在置信区间内,UF 和 UB 曲线相交于 1998 年,说明 1998 年是 SPEI 指数突变的开始,也表明了呼伦贝尔草原自 1998 年之后干旱开始加剧。

图 5 为呼伦贝尔草原季节尺度的 SPEI 指数年际变化及 M-K 突变检验。由春季 SPEI 指数的年际变化可 知,近 58 年来该地区春季呈干旱化趋势,其 SPEI 指数为-0.142 · 10a⁻¹(*P*=0.05),2005 年和 2017 年分别是最 湿润和最干旱的两个年份,其 SPEI 值分别为 1.564 和-2.077。在显著性水平 0.05 的临界线之间,UF、UB 曲 线相交于 1982 年,这是呼伦贝尔草原春季干旱突变的开始。由夏季 SPEI 指数的年际变化可知,1960—2017 年间呼伦贝尔草原夏季呈现显著的干旱化趋势(*P*<0.01)。其中,1998 年和 2006 年的夏季是最湿润和最干旱 的两个年份,其 SPEI 指数分别为 2.023 和-1.9。由 M-K 检验可知,1998 年是呼伦贝尔草原夏季干旱突变的



图 3 1960—2017 年呼伦贝尔草原春、夏、秋、冬季节平均降水量与气温变化

Fig.3 Seasonal precipitation and temperature changes during the spring, summer, autumn, and winter seasons in Hulun Buir Grassland from 1960 to 2017

开始。由秋季 SPEI 指数的年际变化可知, 呼伦贝尔草原近 58 年秋季呈现不显著干旱化趋势。其中, 1970 和 2007 年的秋季是最湿润和最干旱的两个年份, 其 SPEI 指数分别为 1.6 和-2.333。UF 和 UB 曲线交于 1995 年, 可知 1995 年是呼伦贝尔草原秋季干旱突变的开始。由冬季 SPEI 指数的年际变化可知, 呼伦贝尔草原近 58 年冬季呈现湿润化趋势, 其中, 1973 年和 2012 年的冬季分别是最干旱和最湿润的两个年份, 其 SPEI 指数 分别为-1.960 和 1.665。UF 和 UB 曲线交于 1998 年, 可知 1998 年冬季是呼伦贝尔冬季湿润化突变的开始。 3.3 干旱事件频率分析

根据表 1 中 SPEI 指数评估等级,统计了近 58 年呼伦贝尔草原 4 个站点每月的 SPEI 值,得到该区域不同 年代干旱发生的频率和不同季节干旱发生频次(图 6)。容易看出,1960—2017 年呼伦贝尔草原不同等级干 旱发生的频率均呈增加趋势,其中,中旱发生频率最高,重旱次之,极旱最少。此外,在 1960s、1970s、1980s 和 1990s,中旱占同年代发生干旱的比率在 74.16%—78.87%,而在 21 世纪初的 18 年,中旱发生频率的占比下降 到 55.05%,同时,与其他年代相比,该时期也是中旱及以上等级干旱发生频率最高的年代。可见,21 世纪初 期该区域不但干旱发生频率增加,而且发生重旱和极旱的频率显著提高。例如,2000—2017 年极旱发生频率 为 12.96%,显著高于其他年代,而重旱发生频率为 32.41%,是发生最少年代(1970s)的 4 倍。

就不同季节干旱发生频次而言,过去 58 年来,夏季发生的干旱频次最多,为 123 次,其次为冬季(120 次),春季(116 次)和夏季(112 次),但总体而言差异不大。从不同等级干旱在四个季节的分布可以看出,中 旱均是发生频次最多的干旱,重旱次之,极旱最少。此外,冬季是发生中旱次数最多的季节(75 次),夏季是发 生重旱最多的季节(45次),秋季是发生极旱次数最多的季节(21次)。

3.4 干旱趋势分析

3.4.1 Morlet 小波分析

对呼伦贝尔草原 1960—2017 年间的年尺度与季节 尺度的 SPEI 值进行了小波分析,选用了水文气象常用 的 Morlet 连续复小波变换,其中,小波系数大小表示信 号强弱,等值线中心为正表示该年份偏湿(干旱化指数 偏高),为负则表示该年份偏旱。由图 7 的小波系数等 值线图及小波方差图可知,在年尺度上,明显存在着 8—11 年和 17—19 年的短周期和 40—50 年的长周期。 其中,在 17—19 年的时间尺度上出现 4 次明显的旱湿 交替;8—11 年的尺度上有明显的 7 次旱湿交替,40— 50 年尺度上有 1 次明显的旱湿交替。结合小波方差图 得知,在 8 年、11 年、18 年、30 年和 44 年时间尺度上震 荡明显,且 44 年、11 年和 8 年分别为第一主周期和第 二、三周期。由于当前(2017 年)的小波系数图在 44 年 长周期和 11 年短周期上并未闭合,说明呼伦贝尔草原 在 11 年短期内将持续偏旱趋势,而在 44 年长周期上将



图 4 1960—2017 年呼伦贝尔草原平均 SPEI 指数年际变化及 M-K 突变检验

Fig.4 Interannual variation and Mann-Kendall test of average SPEI in Hulun Buir Grassland for 1960—2017

SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; M-K: Mann-Kendall; 在给定显著性水平 *a* = 0.05, 统计量 UF 和 UB 的临界值为±1.96。UF>0, 表示序列呈上 升趋势; 反之, 呈下降趋势, 大于或小于±1.96, 表示上升或下降趋势显著



图 5 1960—2017 年呼伦贝尔草原季节尺度的 SPEI 指数年际变化及 M-K 突变检验

Fig.5 Interannual variation and M-K mutation test of SPEI index at the seasonal scale in Hulun Buir Grasslaland from 1960 to 2017

持续偏湿趋势。





Fig.6 Frequency of drought in different decades and four seasons in Hulun Buir Grasslaland from 1960 to 2017





从图 8 可以发现,呼伦贝尔草原近 58 年的春季 SPEI 在 4—6 年、10—12 年、20—25 年和 43—48 年尺度 上存在着明显的高低值交替现象,且由小波方差可以看出,22 年、4 年和 44 年分别为第一主周期和第二、三周 期。在 22 年的主周期上,1960—2017 年,呼伦贝尔草原春季 SPEI 经历了 4 次旱湿交替的周期,且当前该区春 季正处于旱湿交替的过渡时期,未来短期内仍将有偏旱的趋势。从夏季 SPEI 的小波系数和小波方差图容易 发现,该区明显存着 9 年、17 年和 44 年的震荡周期,其中,在 44 年周期上的信号最强,为第一主周期,9 年和 17 年分别为第二、三周期。在 44 年尺度上,该区域夏季目前处于偏湿期,且有持续偏湿的趋势;在 9 年和 17 年尺度上,该区域夏季正目前处于偏旱期,且未来有持续偏旱的趋势。从秋季 SPEI 的小波系数和小波方差图 容易发现,在 6 年、15 年、29 年和 44 年的周期上存在较明显的震荡现象,其中,29 年尺度的能量最强,为第一 主周期,44 年和 15 年分别为第二、三周期。在 29 年和 44 年的周期上,目前正处于偏湿时期,且有持续偏湿的 趋势。然而,在 15 年尺度上,下一周期有转向偏干的趋势。由呼伦贝尔草原冬季 SPEI 的小波方差图可知,冬 季存在 44 年的第一主周期,29 年和 17 年分别为第二、三周期。在 44 年和 29 年尺度上,目前该区冬季正处于 偏干期,在 17 年尺度上,则处于偏湿期。

3.4.2 基于 Hurst 指数的未来干旱趋势分析

对于呼伦贝尔草原年际干旱的未来趋势运用 R/S 分析法进行预测(表 2),年际 SPEI 的 Hurst 指数 0.834 >0.5, C_M>0,表明时间序列前后具有持续性。未来呼伦贝尔草原的年际 SPEI 指数变化趋势与过去 58 年变化 趋势一致,即 SPEI 指数将继续呈现下降趋势,干旱化的态势也将继续加剧,这与 11 年尺度的小波分析结果较



图 8 1960—2017 年呼伦贝尔草原季节尺度(春、夏、秋、冬) SPEI 指数小波分析图

Fig.8 Wavelet analysis of SPEI index at the seasonal scale (spring, summer, autumn and winter) in Hulun Buir Grasslaland from 1960 to 2017

一致。在季节尺度上, SPEI 的 Hurst 指数均>0.5, 且 C_M>0, 表明未来四季的 SPEI 指数将与过去 58a 变化的趋势一致。然而,不同季节变化趋势的强度不同,其中,冬季的 SPEI 的 Hurst 指数最大(0.920), 持续性变化最强, 表明呼伦贝尔草原未来冬季 SPEI 指数持续上升的可能性高于其他各季,即未来研究区的冬季将呈现湿润的趋势,这与小波分析的第三主周期(17 年尺度)分析的结果也较一致。夏季 SPEI 的 Hurst 指数次之(0.802), 表明该区未来夏季 SPEI 指数将继续呈现下降趋势, 干旱化将加剧, 这与小波分析的第二、三周期(9 年和 17 年尺度)分析的结果较一致。秋季 SPEI 和春季 SPEI 的 Hurst 指数也均大于 0.5, 表明呼伦贝尔草原

未来春季和秋季的干旱趋势将继续加剧,但可能性小于冬季和夏季。秋季 SPEI 的 Hurst 分析结果与其小波 分析的第三主周期(15 年尺度)分析的结果一致,春季 SPEI 与其第一主周期(22 年尺度)的分析结果较一致。

Table 2 Statistics results of R/S analysis							
	Н	C_{M}		Н	C _M		
年际 SPEI Interannual SPEI	0.834	0.590	秋季 SPEI Autumn SPEI	0.712	0.341		
春季 SPEI Spring SPEI	0.665	0.258	冬季 SPEI Winter SPEI	0.920	0.789		
夏季 SPEI Summer SPEI	0.802	0.521					

表 2 R/S 分析结果

H: Hurst 指数;C_M:相关系数

3.5 SPEI 指数在呼伦贝尔草原的适用性分析

SPEI的适用性分析在全国尺度^[45]、东北地区^[46]、西北地区^[23]、长江中下游地区^[47]和内蒙古地区^[48]均进行过探讨,然而,在以草原景观尺度的适用性的研究较少。表 3 为 1960—2016 年来呼伦贝尔草原区典型干旱事件与同期 SPEI 验证结果,可以看出,在本区域实际发生的干旱事件与本文计算得到的同期 SPEI 所表征的干旱事件吻合度较高,表明 SPEI 指数在呼伦贝尔草原区的干旱监测与分析中具有较好的适用性。

	表 3 1960—2016 年来呼伦贝尔草原区典型干旱事件与同期 SPEI 验证比较
Table 3	Verification of drought events and SPEI in Hulun Buir Grasslaland over last 57 years

干旱灾害发生时间 Time of occurrence of drought	标准化降水蒸散指数 SPEI Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
1965年3—6月	新左旗(-1.43,中旱);海拉尔(-1.30,中旱)
1972年6—8月	新左旗(-1.161,中旱);海拉尔(-1.032,中旱)
1992年7—8月	满洲里(-1.900,重旱);新右旗(-1.733,重旱);新左旗(-1.371,中旱);海拉尔(-1.374,中旱)
1993年6—7月	新右旗(-1.091,中旱)
1994年6—7月	满洲里(-1.620,重旱);新左旗(-1.168,中旱)
1995年7—8月	满洲里(-1.033,中旱);新右旗(-1.044,中旱);新左旗(-1.342,中旱);海拉尔(-1.448,中旱)
1998年5—6月	满洲里(-2.220,极旱);新右旗(-1.355,中旱);新左旗(-1.829,重旱);海拉尔(-1.580,重旱)
1999 年 6—9 月	满洲里(-1.314,中旱);新左旗(-1.342,中旱);海拉尔(-1.077,中旱)
2004年6—8月	满洲里(-2.394,极旱);新右旗(-1.853,重旱);新左旗(-1.295,中旱);海拉尔(-1.106,中旱)
2005年9—11月	满洲里(-2.339,极旱);新右旗(-2.715,极旱);新左旗(-1.951,重旱);海拉尔(-2.142,极旱)
2006年4—8月	满洲里(-1.262,中旱);新右旗(-1.602,重旱);新左旗(-1.502,重旱);海拉尔(-1.324,中旱)
2007年6—9月	满洲里(-3.076,极旱);新右旗(-2.369,极旱);新左旗(-2.762,极旱);海拉尔(-2.246,极旱)
2008年3—5月	满洲里(-1.64,重旱);新右旗(-1.755,重旱);新左旗(-1.656,重旱);海拉尔(-1.126,中旱)
2009年4—5月	满洲里(-1.587,重旱);新右旗(-1.970,重旱);新左旗(-2.309,极旱);海拉尔(-1.963,重旱)
2010年6—8月	满洲里(-1.132,中旱);新右旗(-1.568,重旱);新左旗(-2.226,极旱);海拉尔(-1.645,重旱)
2011年6—8月	满洲里(-2.029,极旱);新右旗(-2.144,极旱);新左旗(-1.988,重旱);海拉尔(-1.438,中旱)
2012年3—5月	满洲里(-1.119,中旱);新右旗(-1.356,中旱)
2015 年 6—8 月	满洲里(-1.802,重旱);新右旗(-1.523,重旱);新左旗(-1.222,中旱)

4 讨论

事实上,多个研究表明了气温在干旱变化中所起的重要作用^[20,49],而我国干旱事件持续增加主要和气温 大幅升高、降水变化不显著有关^[50]。其中,中国北方的干旱化趋势与太平洋海温的年代际异常有关,特别是 与太平洋年代际振荡(PDO)存在显著的位相对应关系^[51-52]。在 2000 年以后,PDO 由暖位相开始转换为一个 冷位相,北方降水趋于增多^[51]。然而本文基于 SPEI 指数,对我国北方以呼伦贝尔草原为代表的草原生态系 统的干旱特征的研究结果发现,呼伦贝尔草原在气温显著上升,降水减少的背景下干旱化趋势显著,这虽然与

11

39 卷

我国北方气候变化的大背景是相似的^[8],然而 2000 年以后该区域 SPEI 指数以及所发生的干旱事件均表明, 该区域干旱化趋势更加显著。一方面,该区域降水量总量少,年内分配不均,其中,夏季降水占全年降水总量的 70.72%,可能更易出现旱情^[53]。此外,马柱国等^[50]基于 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 卫星数据反演的陆地水储量(TWS)对中国区域干旱化问题的分析结果发现中国北方降水量从 2001 年以后 有一个增加的趋势,但陆地水储量 TWS 却是减小趋势,说明我国北方干旱化仍在加剧。

值得说明的是,Hurst 指数虽然在一定程度上可以预测呼伦贝尔草原未来的干旱趋势,但并不能预测未来 的干旱趋势所持续的时间。Morlet 小波虽然可以判别时间序列中所包含多时间尺度周期性的大小及这些周 期在时域中的分布,但其结果往往存在着多重时间尺度上的复杂嵌套结构,且在不同的尺度周期中,表现出不 同的干湿振荡规律,造成结果的不确定性。本文将 R/S 与 Morlet 小波分析相结合并考虑时间序列的变化趋势,有利于提高对呼伦贝尔草原未来尤其是近期干旱预测的准确性。

此外,干旱具有发生的隐蔽性、形成的复杂性以及多尺度变化特征,目前开发的任一干旱指标均很难达到 时空上的普适性条件,因为干旱指标大都建立在特定的时间和区域范围内^[30]。因此,这给干旱的评估和预测 带来了严峻挑战。虽然呼伦贝尔草原区过去 58 年发生的干旱事件均通过本文使用的 SPEI 方法得到了一致 的验证,在很大程度上表征了该区域的干旱情况,但反过来,仍存在 SPEI 指数较低的时期,而事实上并未发生 干旱事件的现象。这也恰恰说明了干旱事件的发生不仅取决于温度、降水和蒸散等物理性质,还取决于生态、 社会和经济因素^[54:55]。此外,本文未能揭示该区域干旱发生的物理机制以及受限于气象站点的数量而忽略 了空间异质性,具有一定的局限性。因此,未来可通过使用多种观测数据(包括物理的、社会的和经济的)和 评估方法(如模型的、指标的)为特定区域和生态系统开发综合的干旱指数,并分析不同维度对干旱发生的相 对贡献,以便进一步了解干旱发生的机制。

5 结论

1960—2017年,呼伦贝尔草原的气温呈现显著上升趋势,而降水呈不显著减少趋势。然而,季节性的温度和降水变化趋势差异较大。多年来夏季降水呈减少趋势,其他季节均呈不同速率的增加趋势,其中以冬季增加的趋势最显著,但冬季的气温并未发生显著变化。春、夏和秋季的年际温度变化均呈显著上升趋势,其中春季气温上升速率最快,达到 0.46℃ · 10a⁻¹,夏季次之(0.39℃ · 10a⁻¹)。

对不同年代干旱发生频次及季节分布的分析发现,中旱发生频率在不同年代以及不同季节的分布均是最高的,重旱次之,极旱最少。与其他年代相比,21世纪初(2000—2017),干旱发生的总频率以及重旱和极旱的频率均显著高于其他年代。虽然不同季节发生干旱的总频次差异不大,但不同等级干旱的季节分配差异较大,其中,冬季、夏季和秋季分别是发生中旱、重旱和极旱次数最多的季节。

通过 Morlet 小波和 R/S 分析对呼伦贝尔草原未来干旱趋势的分析发现,该区域在 11 年尺度上呈现旱湿 交替的周期性的可能性较大,且未来几年有持续偏旱趋势。然而,不同季节的周期性和趋势具有差异性,其 中,春季在 22 年尺度上呈现旱湿交替的可能性较大,未来有持续偏旱的趋势。夏季在 9 年尺度上呈现旱湿交 替的可能性较大,未来有持续偏旱的趋势。秋季在 15 年尺度上呈现旱湿交替的可能性较大,未来有持续偏旱 的趋势。冬季在 17 年尺度上呈现旱湿交替的可能性较大,未来有持续偏湿的趋势。此外,SPEI 指数与同期 干旱事件发生的吻合度较高,表明该指数在呼伦贝尔草原区的干旱监测与分析中具有较好的适用性。

参考文献(References):

- Beguería S, Vicenteserrano S M, Angulomartínez M. A Multiscalar Global Drought Dataset: The SPEIbase: A New Gridded Product for the Analysis of Drought Variability and Impacts. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(10):1351-1356.
- [2] Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, Moriondo M, Kostopoulou E, Goodess C M. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. Global and Planetary Change, 2009, 68(3):209-224.
- [3] Guo S J. The Meteorological Disaster Risk Assessment Based on the Diffusion Mechanism. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2012, 2

(2):124-130.

- [4] Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002; Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6):1117-1130.
- [5] 符淙斌,马柱国. 全球变化与区域干旱化. 大气科学,2008,32(4):752-760.
- [6] 马柱国,符淙斌. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. 中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(2):222-233.
- [7] Zhang L X, Zhou T J. Drought over East Asia: A Review. Journal of Climate, 2015, 28(8): 3375-3399.
- [8] 马柱国,符淙斌. 1951-2004年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报,2006,51(20):2429-2439.
- [9] Wang L, Chen W, Zhou W. Assessment of Future Drought in Southwest China Based on CMIP5 Multimodel Projections. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(5):1035-1050.
- [10] 胡实,莫兴国,林忠辉.未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势.干旱区地理,2015,38(2):239-248.
- [11] 尹晗,李耀辉.我国西南干旱研究最新进展综述.干旱气象,2013,31(1):182-193.
- [12] Wang L, Chen W, Zhou W, Huang G. Drought in Southwest China: A Review. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2015,8(6):339-344.
- [13] 王劲松,李耀辉,王润元,冯建英,赵艳霞.我国气象干旱研究进展评述.干旱气象,2012,30(04):497-508.
- [14] Zargar A, Sadiq R, Naser B, Khan F I. A review of drought indices. Environmental Reviews, 2011, 19(NA): 333-349.
- [15] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展.干旱气象,2017,35(5):709-723.
- [16] Mishra A K, Singh V P. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D6): D06120.
- [17] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteor Society, 1993: 179-183.
- [18] Dai A G. Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1):45-65.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. Comment on "Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900—2008" by Aiguo Dai. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D19):D19112.
- [20] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index:comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11 (4):1033-1043.
- [21] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, Svoboda M D, Heim R R. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index:1951-2010? International Journal of Climatology, 2014, 34(3):545-558.
- [22] Hernandez E A, Uddameri V. Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(6):2491-2501.
- [23] 张强,姚玉璧,李耀辉,罗哲贤,张存杰,李栋梁,王润元,王劲松,陈添宇,肖国举,张书余,王式功,郭铌,白虎志,谢金南,杨兴国,董安祥, 邓振镛,柯晓新,徐国昌.中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望.地球科学进展,2015,30(2):196-213.
- [24] 张勃,张耀宗,任培贵,王东,赵一飞,杨尚武. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析. 地理科学,2015,35(8):999-1006.
- [25] 王芝兰,李耀辉,王素萍,冯建英,王劲松. 1901-2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征.中国沙漠,2015,35(6):1666-1673.
- [26] 王东,张勃,安美玲,张调风,季定民,任培贵. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析.自然资源学报,2014,29(6):1003-1016.
- [27] 沈国强,郑海峰,雷振锋.SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析. 生态学报,2017,37(11):3787-3795.
- [28] 沙莎,王勇,沈新勇,李小凡,冯涛. 基于 SPEI 指数的东北春旱频率变化及突变成因分析.自然灾害学报,2017,26(4):180-190.
- [29] 闫研,李忠贤. 基于 SPEI 指数分析华中地区近 40a 干旱时空分布特征. 气象科学, 2015, 35(5): 646-652.
- [30] 杨思遥,孟丹,李小娟,吴新玲. 华北地区 2001-2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应.生态学报,2018,38(3):1028-1039.
- [31] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, Pan Q M, Huang J H, Yang D L, Han X G. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. Ecology, 2008, 89(8):2140-2153.
- [32] 王希平,赵慧颖. 内蒙古呼伦贝尔市林牧农业气候资源与区划. 北京:气象出版社,2006,9-12.
- [33] Hu Q, Pan F F, Pan X B, Zhang D, Li Q Y, Pan Z H, Wei Y R. Spatial analysis of climate change in Inner Mongolia during 1961-2012, China. Applied Geography, 2015, 60:254-260.
- [34] 环境保护部,中国科学院. 全国生态功能区划:修编版. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/W020151126550511267548.pdf
- [35] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1):52-57.
- [36] Indoitu R, Orlovsky L, Orlovsky N. Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. Journal of Arid Environments, 2012, 85:62-70.
- [37] Qi J G, Kulmatov R. An overview of environmental issues in central Asia//Qi J G, Evered K T, eds. Environmental Problems of Central Asia and

their Economic, Social and Security Impacts. Dordrecht: Springer, 2008:3-14.

- [38] 李姣,张春来,李庆,沈亚萍,贾文茹,田金鹭.近15年来呼伦贝尔沙地土地沙漠化发展及其驱动力.北京师范大学学报:自然科学版, 2017, 53(3):323-328.
- [39] 张强,张良,崔显成,曾剑.干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战.地球科学进展,2011,26(7):763-778.
- [40] Xu K, Yang D W, Xu X Y, Lei H M. Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. Journal of Hydrology, 2015, 527:630-640.
- [41] 符淙斌,魏和林,陈明,苏炳凯,赵鸣,郑维忠. 区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟. 大气科学,1998,22(4):522-534.
- [42] 赵哈林,赵学勇,张铜会,周瑞莲.北方农牧交错带的地理界定及其生态问题.地球科学进展,2002,17(5):739-747.
- [43] 杨筑筑,吕晓涛,宋彦涛,贾子金,乌云娜,王正文. 草原植物群落分类方法的比较研究——以呼伦贝尔草原为例. 生态学杂志,2017,36 (8):2375-2384.
- [44] Granero M A S, Segovia J E T, Pérez J G. Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2008, 387(22):5543-5551.
- [45] 李明,王贵文,张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析.干旱区资源与环境,2016,30(6):65-70.
- [46] 庄少伟,左洪超,任鹏程,熊光洁,李邦东,董文成,王利盈. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625.
- [47] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 朱娴韵, 王艳君. 基于 SPEI 的 1961-2012 年东北地区干旱演变特征分析. 中国农业气象, 2014, 35(6):656-662.
- [48] 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. 热带气象学报, 2015, 31(3); 403-416.
- [49] Chen H P, Sun J Q. Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. Journal of Hydrology, 2017, 544: 306-318.
- [50] Liu Z P, Wang Y Q, Shao M A, Jia X X, Li X L. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2016, 534:281-299.
- [51] 马柱国,符淙斌,杨庆,郑子彦,吕美霞,李明星,段亚雯,陈亮.关于我国北方干旱化及其转折性变化.大气科学,2018,42 (4):951 961.
- [52] Yang Q, Ma Z G, Fan X G, Yang Z L, Xu Z F, Wu P L. Decadal modulation of precipitation patterns over eastern China by sea surface temperature anomalies. Journal of Climate, 2017, 30 (17):7017-7033,
- [53] 徐泽华,韩美. 山东省干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性. 中国生态农业学报,2018,26(8):1236-1248
- [54] Adger W N, Kelly P M. Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1999,4(3/4):253-266.
- [55] Mendelsohn R, Dinar A, Williams L. The distributional impact of climate change on rich and poor countries. Environment and Development Economics, 2006,11(2):159-178.