

基于 SPEI 的锡林河流域气象干旱风险分析

张璐, 朱仲元, 王慧敏, 王飞, 张鹏

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:为研究气候因子变化下的锡林河流域干旱风险,并为当地水资源与生态管理提供有效依据。通过计算锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站点 1982—2018 年不同时间尺度(1,3,6,12 个月)的标准化降水蒸散指数(SPEI),分析了锡林河流域年、季、月尺度上的干旱发生的频率和干旱强度,揭示了锡林河流域多年来的干旱时空演变特征。结果表明:近 37 a 来锡林河流域 SPEI 整体呈现增长趋势,特、重旱的发生频率在逐年减小,轻、中旱的发生频率有波动起伏的不确定性,且存在发生季节性集中干旱的可能。从空间分析来看,锡林河流域在年、季、月尺度上均有干旱发生,在季节变化方面,干旱出现既有冬季的大范围干旱,也有春季的局部干旱,总体分布特征是西多北少;干旱呈现出夏季最为严重,秋季次之的特点,总体分布从西北到东南表现为弱—严重—弱的特点。

关键词:SPEI; 锡林河流域; 干旱强度; 干旱频率

中图分类号:P462.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0220-07

Analysis on Risk of Meteorological Drought of the Upstream Xilin River Basin Based on SPEI

ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, WANG Huimin, WANG Fei, ZHANG Peng

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: To study the drought risk of the Xilin River Basin under the change of climatic factors, and provide an effective basis for local water resources and ecological management, by calculating the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) of 11 meteorological stations in Xilinhot and Dongwuzhumuqi from different time scales (1, 3, 6 and 12 months) from 1982 to 2018, the frequency of drought and the intensity of drought on the annual, seasonal and monthly scales were analyzed to reveal the characteristics of drought and space-time evolution over the years in the Xilin River Basin. The results showed that the SPEI of the Xilin River Basin presented the growing trend in the past 37 years, the frequency of special and severe droughts had been decreasing year by year, the frequency of light and moderate droughts had the fluctuating uncertainty, and the seasonal concentrated drought occurred; from the perspective of spatial analysis, the droughts in Xilin River Basin occurred on the annual, seasonal and monthly scales, in terms of seasonal changes, large-scale droughts occurred in winter and local droughts occurred in spring, the overall distribution of drought was characterized as that the frequency of drought was low in the north is and high in the west; the drought was the most severe in summer, and followed by the autumn, the overall distribution was weak-severe-weak pattern from northwest to southeast.

Keywords: SPEI; Xilin River Basin; drought intensity; drought frequency

干旱是一个发展较慢但持续时间较长的极端气候事件^[1]。干旱从古至今都是人类面临的主要自然灾害,随着人类的社会经济发展,水资源短缺日益严重,干旱已经成为全球关注的热点问题。在内蒙古的典型草原区,干旱是主要的自然灾害,也是导致草原

退化的重要因素。干旱风险分析有助于揭示干旱变化趋势,对干旱进行准确定量。世界气象组织承认的干旱类型是气象干旱、水文干旱和农业干旱等,其中气象干旱被认为是导致其他各类干旱发生的主要原因,因此探明气象干旱的发生规律,对合理有效地监

收稿日期:2019-05-21

修回日期:2019-06-03

资助项目:国家自然科学基金(51779116);地区科学资助项目(51669018,51869015)

第一作者:张璐(1995—),女,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,研究方向为干旱半干旱区水文生态干旱。E-mail:971568173@qq.com

通信作者:朱仲元(1956—),男,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,教授,主要从事水文水资源与草原生态研究。E-mail:731011410@qq.com

测和预警各类干旱有极大的帮助^[2]。近年来,研究学者们普遍使用干旱指数定量评价干旱程度,常用的干旱指数有:标准化降水指数(SPI)^[3]、气象综合指数(PDSI)^[4]、SPEI^[5]等,其中 SPEI 在考虑降雨条件影响的同时,也考虑了温度波动对干旱的影响,这样比单纯考虑降水的标准化降水指数、降水距平指数等对干旱的反映具有更强的实际意义^[6]。张煦庭等^[7]以 SPEI 作为气象干旱表征指数,对内蒙古自治区 1960—2015 年干旱时空分布特征进行了研究;杨思遥等^[8]基于 SPEI 分析了华北地区植被对干旱的多尺度响应。我国是一个干旱频发的国家,特定的季风气候和自然地理条件决定了我国干旱和旱灾发生的严重性,SPEI 的出现和使用对研究干旱事件具有科学意义。

1 研究区概况

锡林河,蒙语称锡林郭勒,属锡林郭勒草原上一条内陆河,河水起源于赤峰市克什克腾旗境内,绕锡林浩特市而过。本文研究区为锡林河流域,经纬度范围为 115°18′—117°08′E,43°02′—44°57′N,控制流域面积达 14 788 km²,地势南高北低,平均海拔为 988.6 m,属中温带半干旱大陆性气候。由于锡林河流域具有独特的地理环境,该地区水资源的主要来源为大气降水和冰雪融化。锡林河流域昼夜温差大,蒸发量大,流域年降水量在 121.1~511.7 mm,无霜期 110 d,动物资源多样,草原类型齐全。

2 数据与方法

2.1 数据来源

选用 1982—2018 年锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站气温、降水等数据资料均来源于中国气象数据共享服网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。本文通过计算锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站点不同时间尺度的 SPEI,以年、季、月作为研究尺度,利用反距离权重插值法分析锡林河流域 37 a 来的干旱变化特征以及干旱发生频率和干旱强度的时空分布特征。根据锡林河流域当地气候特征,将季节定义为:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,当年的 1—2 月和上一年的 12 月为冬季。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水蒸散指数 SPEI 计算方法原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱^[9]。本文采用 Thornthwaite 方法计算各站各月潜在蒸散量,进而计算气候水分平衡(BAL),即逐月降水与蒸散的差值。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中: D_i 为降水量与蒸散量的差(mm); P_i 为降水量(mm); PET_i 为潜在蒸散量(mm)。

对 D_i 数据序列进行正态化。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值,所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。Log-logistic 概率分布的累积函数为:

$$F(x) = I + \left[\left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (2)$$

式中:参数 α, β, γ 分别采用线性矩的方法拟合获得。

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (4)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha \cdot \Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \quad (5)$$

式中: Γ 为阶乘函数; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 为原始数据序列 D_i 的概率加权矩。计算方法如下:

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (6)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (7)$$

式中: N 为参与计算的月份数。

然后对累积概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (8)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$\omega = \sqrt{-2 \ln P} \quad (9)$$

$$\text{SPEI} = \omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3} \quad (10)$$

式中: $c_0 = 2.515517$; $c_1 = 0.802853$; $c_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$ 。

当 $P > 0.5$ 时,以 $1 - P$ 表示 P 。

$$\text{SPEI} = - \left(\omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3} \right) \quad (11)$$

SPEI 具有多时间尺度的特征。其中,1 个月时间尺度的干旱指数可以比较清楚地反映旱涝的细微性变化,3 个月时间尺度可以清晰地反映季节的干旱状况^[10-11]。故本文计算 1, 3, 6, 12 个月 4 个尺度的 SPEI 值,用 $\text{SPEI}_1, \text{SPEI}_3, \text{SPEI}_6, \text{SPEI}_{12}$ 表示。

2.2.2 干旱强度 《气象干旱等级》中关于气象干旱发生强度的诠释为:所有天或月的综合气象干旱指数值在干旱过程内为轻度以上的干旱等级之和^[12]。

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^m |\text{SPEI}_i| \quad (12)$$

式中: j 为年份; i 为不同站号; m 为发生干旱的站数; $|\text{SPEI}_i|$ 为 j 年 i 站发生干旱时 SPEI 的绝对值。其值越小,干旱程度越强^[13]。当连续 3 个月 SPEI 月尺度数值为轻度干旱以上时,则确定为发生一次连

续干旱过程^[14]。

2.2.3 干旱频率 用于评价某站在某时段干旱发生的频繁程度^[15]。

$$F_i = (n/N) \times 100\%$$

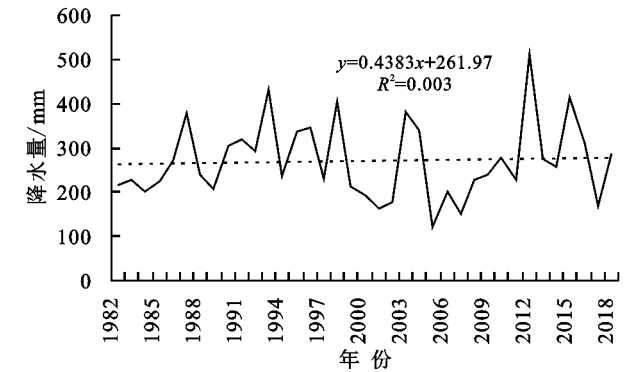
(13)

式中： n 为该站实际发生干旱的年数。

根据中国气象局制定的气象干旱等级划分标准^[16]，将 SPEI 划分为 5 个等级，分别为无旱、轻微干旱、中等干旱、严重干旱和极端干旱(表 1)。

表 1 SPEI 干旱等级划分

项目	无旱	轻微干旱	中等干旱	严重干旱	极端干旱
SPEI	>-0.5	$-1.0\sim-0.5$	$-1.5\sim-1.0$	$-2.0\sim-1.5$	≤-2
累积概率/%	62.39	16.22	18.92	2.48	0



3 结果与分析

3.1 降水 and 气温的时间变化趋势分析

锡林河流域多年降水量变化年际差异较大，整体呈现较大的增长趋势，趋势线斜率为 0.438(图 1A)。多年平均降水量为 270 mm，2012 年降水量为 37 a 中最大值，为 511.7 mm，多年降水量年际变化较有规律性，呈现多年平稳增长趋势。2005 年的降水量为 37 a 中最小值，仅为 121.1 mm，直到 2009 年降水量出现增长的趋势。37 a 间锡林河流域气温整体呈现较小的增长趋势，趋势线斜率为 0.039，多年平均气温为 3.16℃，1986 年年平均气温低至 1.21℃，2014 年年平均气温高至 4.66℃(图 1B)。

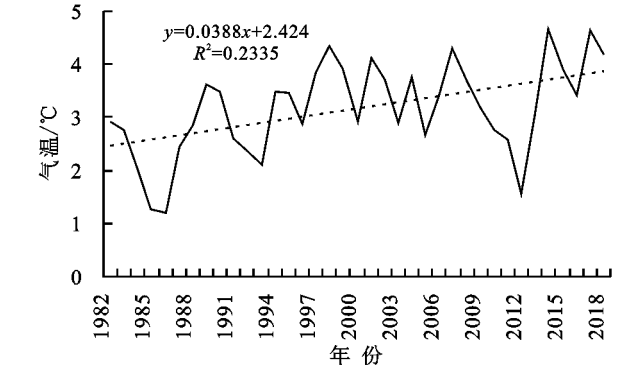


图 1 1982—2018 年降水量和气温变化趋势

3.2 不同时间尺度 SPEI 对比分析

利用 1982—2018 年的降水、平均气温、平均风速等数据计算得到不同时间尺度 SPEI(图 2)。不同时间尺度的 SPEI 值随时间变化存在明显不同，时间尺度越小，SPEI 沿着 0 值上下剧烈波动，反映了单月降水对于干旱程度的影响。如 SPEI₁ 波动频率较快，反映了各月部分气象要素对干旱的影响；SPEI₃ 和 SPEI₆ 波动周期较长，体现了锡林河流域季节性的干旱变化；SPEI₁₂ 各年值相对集中，较为清晰地反映了锡林河流域多年干旱变化趋势，尤其在 1989 年、2006 年附近的年份明显产生了较为严重的干旱。整体上来看，不同时间尺度的 SPEI 值呈现出明显增大的趋势。

3.3 短、中期 SPEI 变化分析

本文将 1982—2018 年整个时期分为 4 个时段，对应的时间段为 1982—1988 年、1989—1998 年、1999—2008 年和 2009—2018 年(图 3)。对不同时段的 SPEI 值按月份进行处理，各月 SPEI 值为时段内该月多年平均值，由于 SPEI₁₂ 季节性变化不明显，故本文只分析 SPEI₁，SPEI₃，SPEI₆。SPEI₁ 从 1982—1988 年时段到 1989—1998 年时段年均 SPEI₁ 有增大趋势，如 1982—1988 年 12 月平均 SPEI₁ 为 -0.67，而 1989—1998 年 12 月平均 SPEI₁ 减小到 -0.01；1989 年—1998 年—

1999 年—2008 年，SPEI₁ 出现了减小趋势，5 月、7 月平均 SPEI₁ 分别为 -0.07，-0.18，而 1999—2008 年 5 月、7 月平均 SPEI₁ 减小到 -0.52，-0.46。减小趋势最大出现在晚春和初夏。此外，SPEI₁ 从 2009—2018 年整体呈现增大趋势，表明近几年旱情较以往有所缓解。尤其从 SPEI₃，SPEI₆ 来看 1982—2018 年 SPEI 有明显的波动，1982—1988 年干旱出现在冬季和早春；1989—1998 年旱情逐渐得到缓解；1999—2018 年干旱集中发生于晚春、夏季和早冬，2009—2018 年 SPEI 整体大幅增长。这种现象的出现与近几年来气温、降水等气象要素有明显相关性。

3.4 不同时间尺度干旱发生频率分析

本文统计了 1982—2018 年 4 个时间段不同程度干旱发生的频率(表 2)。在频率统计过程中发现：SPEI₁ 和 SPEI₃ 未出现特旱值，但 SPEI₆ 值在 1988 年出现 4 次(3 月、4 月、5 月、7 月)特旱值；1999 年出现 2 次(10 月、11 月)特旱值；2005 年出现 2 次(8 月、9 月)特旱值。SPEI₁₂ 在 1988 年出现 4 次(7 月、9 月、10 月、11 月)特旱值，且都在中旱及以上；2005 年出现 3 次(9 月、10 月、12 月)特旱值；2006 年出现 3 次(1 月、2 月、3 月)特旱值。据统计数据来看，特、重旱的发生频率在逐年减小，轻、中早有波动起伏的不确定

性,在干旱预防中,应该注意长时间连续的轻、中旱的发生。不同程度干旱发生频率年际差异较大,近 10 a 来,不同程度干旱发生频率有显著的减小趋势,主要

因为受到气象因素的影响。从整体上来看,不同程度干旱发生频率呈现下降趋势,表明该地区生态环境有调节和缓解干旱的可能。

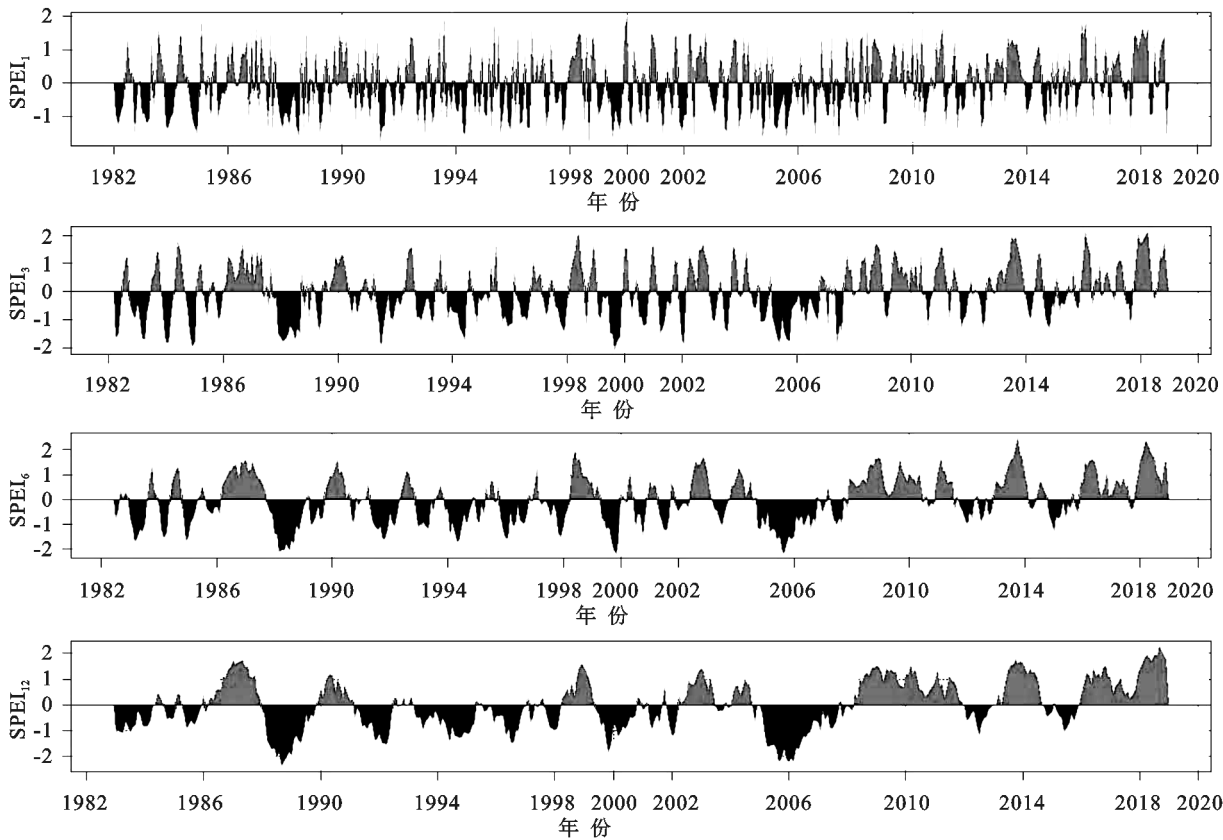


图 2 1982—2018 年不同时间尺度 SPEI 变化

表 2 不同时间尺度 SPEI 的不同程度干旱发生频率

			%						
年份	尺度	轻旱	中旱	重旱	尺度	轻旱	中旱	重旱	特旱
1982—1988	SPEI ₁	16.67	25.00	1.19	SPEI ₆	13.75	11.25	10.00	5.00
1989—1998		15.83	20.83	2.50		22.50	14.17	5.83	0.00
1999—2008		20.00	19.17	5.00		19.17	15.83	4.17	3.33
2009—2018		12.50	12.50	0.83		10.83	1.67	0.00	0.00
1982—1988	SPEI ₃	12.20	12.20	15.85	SPEI ₁₂	23.29	6.85	5.48	5.48
1989—1998		20.83	15.00	0.83		20.83	20.00	1.67	0.00
1999—2008		12.50	16.67	8.33		20.00	9.17	8.33	5.00
2009—2018		8.33	6.67	0.00		5.83	1.67	0.00	0.00

3.5 干旱事件的空间变化特征

3.5.1 干旱发生频率分布特征 本文根据锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站逐月 SPEI 值及不同级别的 SPEI 干旱指数,统计了 1982—2018 年各站年、季、月尺度的轻度以上干旱发生频率,采用反距离权重插值法进行插值分析,得到锡林河流域不同时段干旱发生频率的空间分布。研究发现:锡林河上游轻度以上的干旱出现次数总体呈现西多东少的特点(图 4A),这与当地降水和气温的变化规律有很大的关系,西部的干旱发生频率为 51.28%~53.21%,东部的干旱发生频率为 49.35%~51.28%,年干旱发生频率具有区域的趋势性。春季的旱

情主要出现在锡林河流域的中部地区(图 4B),干旱发生频率差异较大,干旱发生面积较大,中部干旱发生频率为 11.30%~13.51%,周边干旱发生频率为 9.08%~11.30%。锡林河流域地处寒旱区,具有独特地理气候环境,该地区水资源的主要来源是夏季降雨和春季融雪^[17],春旱与春季融雪径流有很大的关系。夏旱主要有可能发生在锡林河流域南部以及西部边缘地区(图 4C),干旱发生频率为 12.34%~12.95%,东北部干旱发生频率较小,为 11.72%~12.34%,干旱发生频率具有分界性,这与当地夏季降水有极大关系。秋季干旱频率由夏季的东北少西南多逐渐向锡林河

流域中部移动(图 4D),秋旱主要发生在锡林河流域北部和西部的部分地区,为 11.86%~12.91%,锡林河流域中部干旱发生频率最少,低至 10.81%~11.86%。冬季干旱发生频率普遍较大(图 4E),干旱发生频率为 9.36%~10.81%,只有北部部分地区干旱发生频率较

小,为 7.91%~9.36%。月尺度的干旱发生频率与春季的干旱发生频率出现了明显的反差现象(图 4F),且干旱发生频率差异较大,锡林河流域中部干旱发生频率较低,为 18.92%~23.94%,锡林河流域周边干旱发生频率较高,为 23.94%~28.95%。

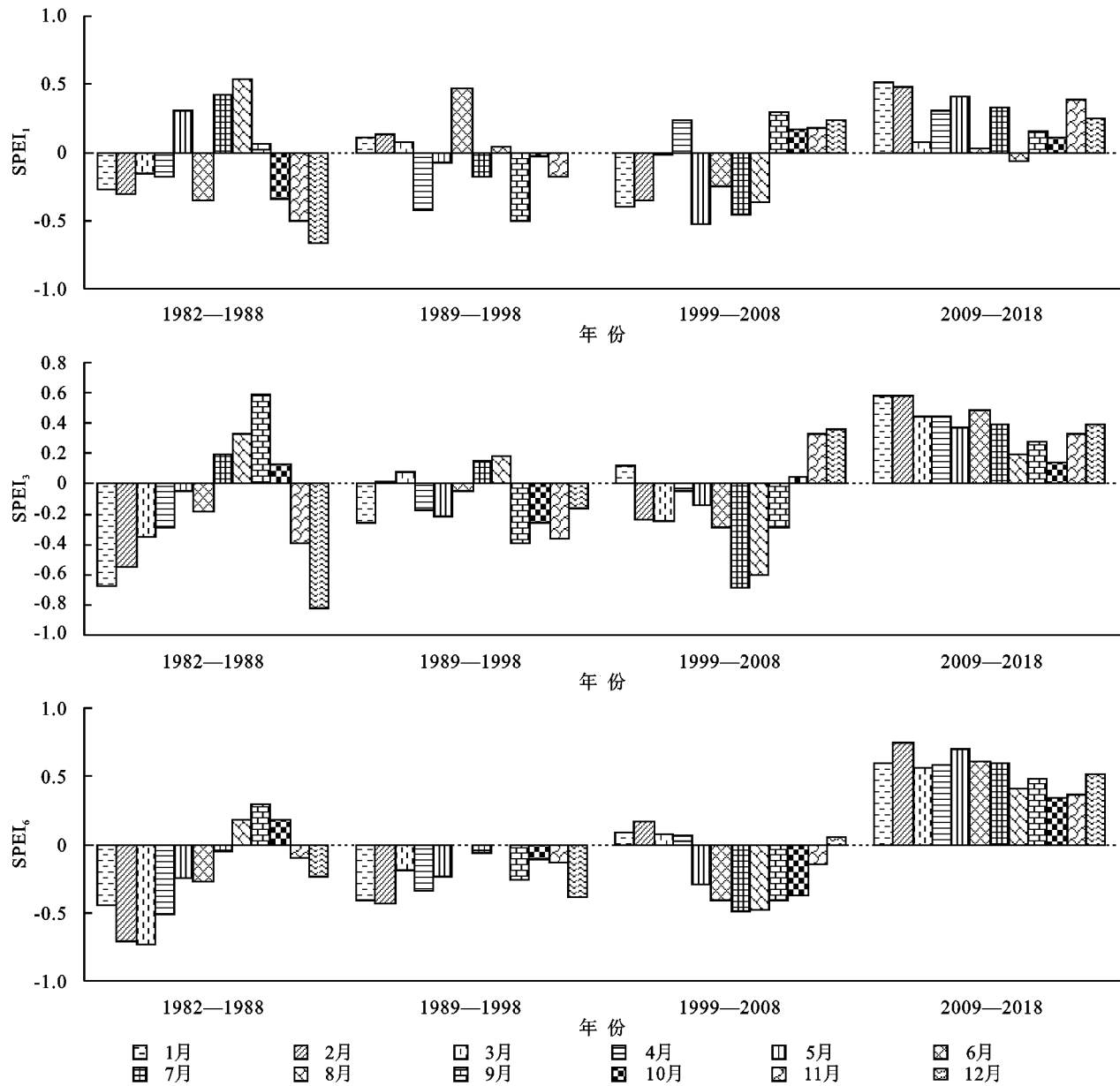


图 3 不同时间尺度各时段 SPEI 均值变化

3.5.2 干旱强度空间分布特征 本文计算了 1982—2018 年锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站逐月 SPEI 值及不同级别的 SPEI 干旱指数,统计了 1982—2018 年各站年、季、月尺度的轻度以上干旱强度。年干旱强度由西北到东南呈现高一低一高的趋势(图 5A),表明干旱严重区出现在锡林河流域中部,为 15.64~12.95。春季干旱严重区出现在锡林河流域的四周(图 5B),为 5.83~4.86。夏季锡林河流域的干旱强度普遍较小(图 5C),该锡林河流域夏季干旱较为严重,仅有锡

林河流域北部部分地区干旱严重程度较低,为 6.40~5.96。秋季干旱强度分布图与春季干旱强度分布图有明显的反差(图 5D),秋季锡林河流域中部出现严重的干旱现象,干旱强度为 4.85~3.90。冬季干旱强度有增加的趋势(图 5E),干旱的分布范围有减小的趋势,仅有东南部地区干旱强度较小,为 4.86~3.90。月尺度的干旱强度分布与春季的干旱强度分布较为相似(图 5F),锡林河流域四周干旱严重程度高于锡林河流域中部,可见,月尺度的干旱强度分布主要受到春季干旱强度的影响。

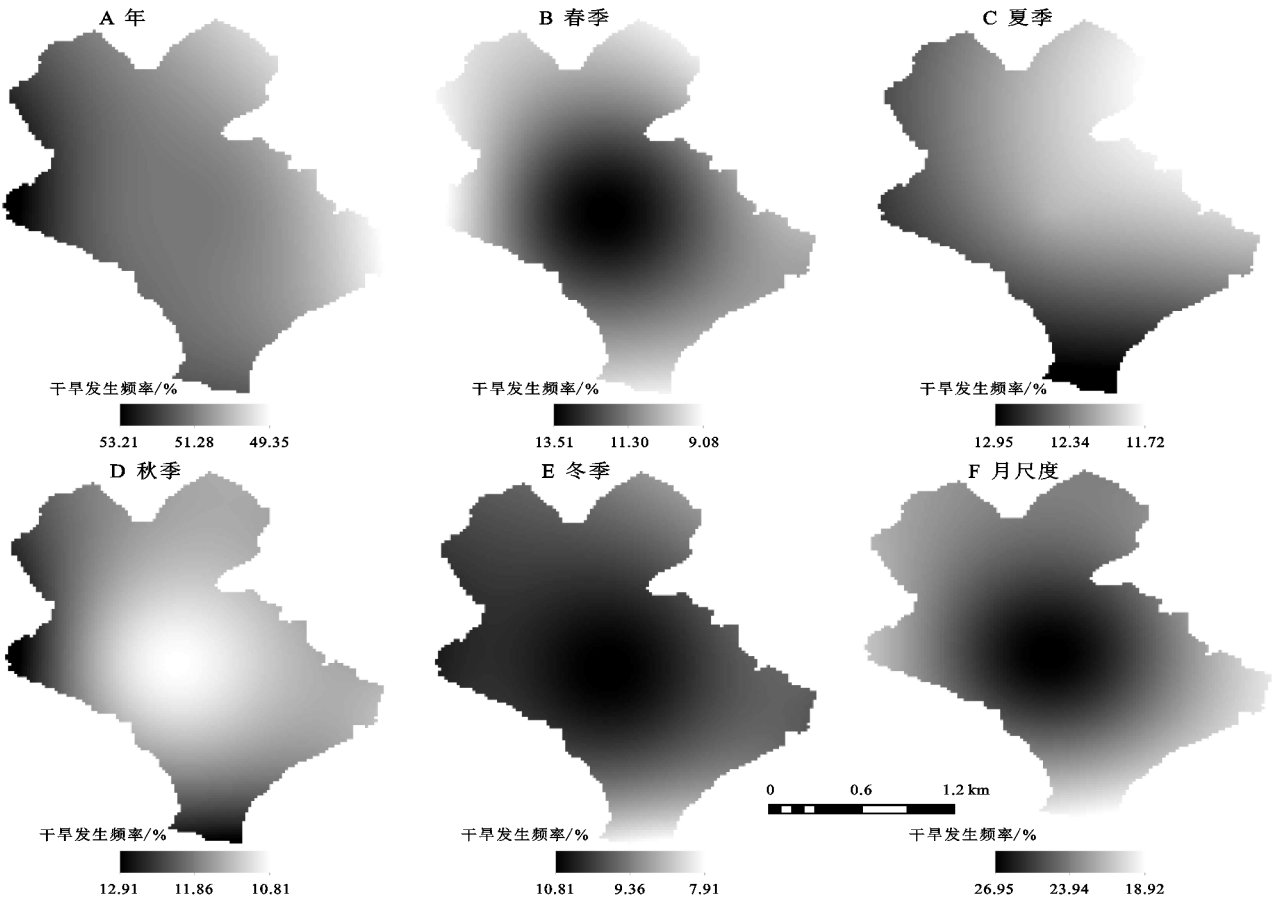


图 4 不同时间尺度锡林河流域干旱发生频率的时空分布

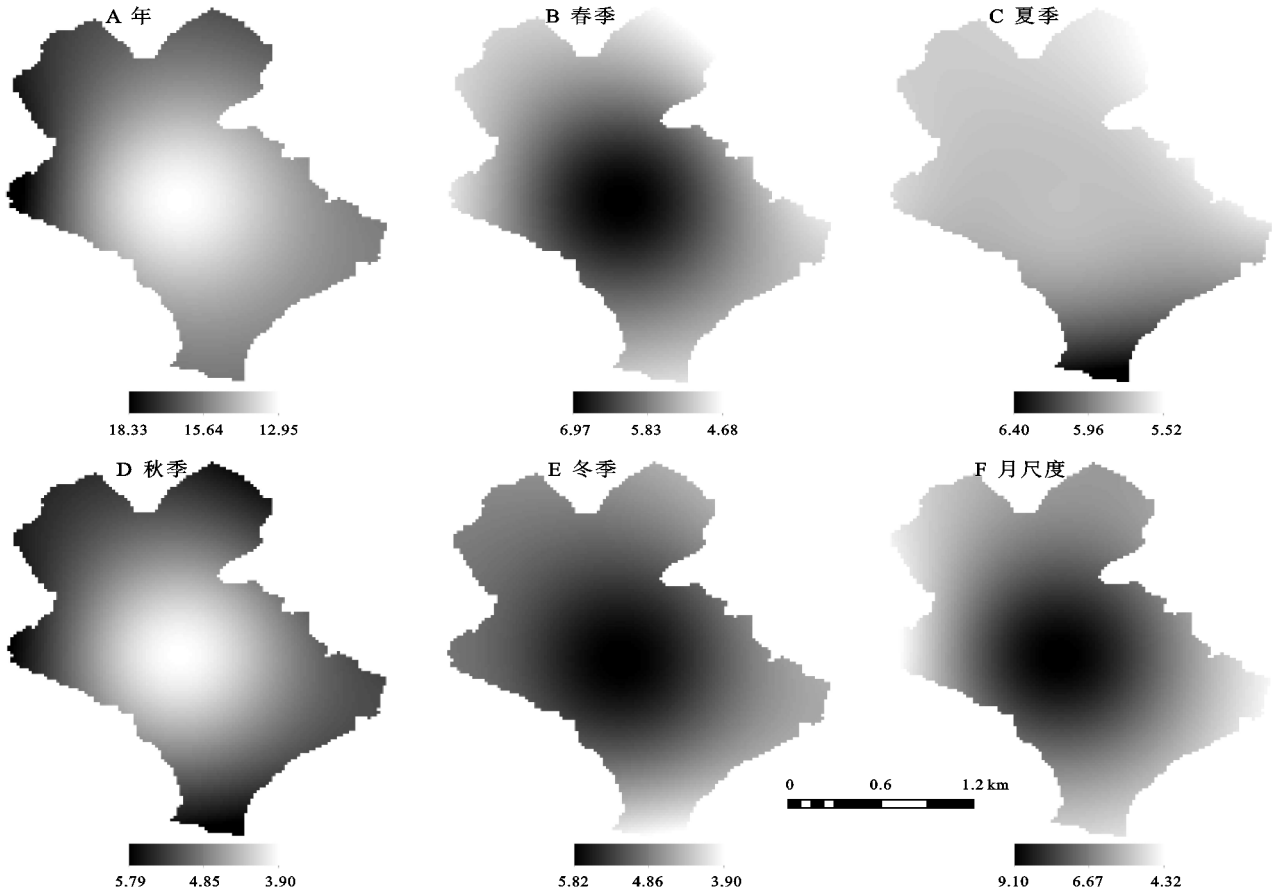


图 5 锡林河流域不同时间尺度干旱强度分布

4 结 论

(1) 本文计算了锡林浩特、东乌珠穆沁旗等 11 个气象站点 1982—2018 年不同时间尺度的 SPEI。1989 年、2006 年附近年份明显产生了较为严重的干旱,不同时间尺度的 SPEI 整体均有增大的趋势,表明锡林河流域干旱情况有所缓解。SPEI 短、中期的干旱分析表明,特、重旱的发生频率在逐年减小,轻、中早有波动起伏的不确定性,在干旱预警中,应该注意长时间连续的轻、中旱的发生,且存在发生季节性集中干旱的可能。

(2) 年尺度的干旱频率表现为西多东少的特点,干旱强度从西北到东南表现为弱—严重—弱的特点;春季干旱多发地位于锡林河流域中部,而四周却是干旱严重区域;夏季干旱多发生于锡林河流域西南角,而这期间锡林河流域有可能发生大部分严重干旱;秋季干旱在西、南部区域频率最高,而干旱最严重的区域在中部;冬季锡林河流域大部分干旱发生的频率较高,干旱严重区在锡林河流域南部。总体而言,锡林河流域西部与南部是干旱频发且严重地区。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周丹,张勃,任培贵,等.基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析[J].自然资源学报,2014,29(4):677-688.
- [3] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, USA: American Meteorological Society, 1993.
- [4] 曹永强,张兰霞,张岳军,等.基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析[J].资源科学,2012,34(2):265-272.
- [5] Vicente-Serrano 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.
- [6] 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.
- [7] 张熙庭,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.
- [8] 杨思遥,孟丹,李小娟,等.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[J].生态学报,2018,38(3):1028-1039.
- [9] 周丹.1961—2013 年华北地区气象干旱时空变化及其成因分析[D].兰州:西北师范大学,2015.
- [10] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等.标准化降水指数在海南岛干旱监测中的应用分析[J].中国生态农业学报,2009,17(1):178-182.
- [11] 张调风,张勃,王小敏,等.基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析:以甘肃省黄土高原区为例[J].生态环境学报,2012,21(4):13-20.
- [12] 国家气候中心,中国气象局预报与网络司,中国气象局兰州干旱气象研究所.气象干旱等级 GB/T20481-2017 [S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2017.
- [13] 万红莲,王静.多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系[J].生态学报,2018,38(19):6941-6952.
- [14] 包云轩,孟翠丽,申双和,等.基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J].地理学报,2011,66(5):599-608.
- [15] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [16] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等.标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J].中国生态农业学报,2009,17(1):178-182.
- [17] 席小康,朱仲元,宋小园,等.锡林河流域融雪径流时间变化特征与成因分析[J].水土保持研究,2016,23(6):150-153,159.