

锡林河流域 1981—2016 年干湿变化及其与温度的关系

王慧敏, 朱仲元

(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:为了探清锡林河流域历年干湿变化情况,利用锡林河流域 1981—2016 年共 36 年的降水与气温的逐月数据,在全年尺度和季节尺度上分析了 36 年来的降水与气温的时间变化,并计算了各月不同时间尺度(SPI1, SPI3, SPI6, SPI12)下的标准化降水指数,分析了气温与 SPI 的相关性、不同时间尺度 SPI 的敏感性和干湿事件的年际变化,根据逐月 SPI 序列,在牧草生育期内分离出不同月份的逐年序列来分析生育期内 SPI 的变化情况。结果表明:(1)多年来年降水量的整体变化趋势极不明显,降水量年内分配不均匀,夏季占总降水量的一半还多;气温的年际变化比较显著且呈上升的趋势。(2)随着时间尺度的增加, SPI 序列上升趋势减弱、波动频率减小、旱涝的起止时间延后。在各等级干湿事件发生频次来看,重涝、中涝、重旱与中旱事件表现出了明显的年际变化,而轻涝与轻旱事件每年均有发生,年际变化不明显。(3)生育期内 5 月、6 月、10 月 SPI 序列呈现出上升的趋势,而 7 月、8 月、9 月则呈现出下降趋势,说明春末夏初更为湿润,夏季整体偏旱,进入秋季则呈现出由涝变旱的趋势变化。(4)干湿事件与 5 月份和 12 月份的气温呈现出的是正相关关系,其他各月呈现出的均为负相关关系,且 1 月、6 月、7 月、8 月、11 月呈现出极显著的负相关关系。

关键词:干湿事件; SPI; 趋势变化; 相关关系; 锡林河流域

中图分类号: P426.61⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0178-06

Drought and Moist Changes and Their Relations with Temperature in Xilin River Basin from 1981 to 2016

WANG Huimin¹, ZHU Zhongyuan¹

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

Abstract: In order to find out the drought and moist changes over the years in the Xilin River Basin, using the monthly data of precipitation and temperature in the Xilin River Basin for a total of 36 years from 1981 to 2016, we analyzed the temporal variation of precipitation and temperature in 36 years on annual and seasonal scales. The standardized precipitation indexes at different temporal scales (SPI1, SPI3, SPI6, SPI12) for each month were calculated. The correlation between temperature and SPI, the sensitivity of SPI at different time scales, and the inter-annual variation of drought and moist events were analyzed. According to the monthly SPI sequence, the year-by-year sequence of different months was separated during the growth period of pasture to analyze the changes of SPI during the growth period. The results showed that: (1) the overall change trend of annual precipitation over the years was extremely inconspicuous with uneven distribution of precipitation during the year, precipitation in summer accounted for more than half of the total precipitation; the inter-annual temperature change was more significant and presented the upward trend; (2) with the increase of tempoal scale, the rising trend of SPI series weakened, the frequency of fluctuation decreased, and the start and end times of drought and flood were delayed; in terms of frequency of occurrence of drought and moist events at each level, severe and moderate drought and moist events showed significant inter annual changes, while mild drought and moist events occurred every year with no significant inter annual changes; (3) during the growth period, the SPI sequence showed the upward trend in May, June and October, while it showed the downward trend in July, August and September. It showed that it was more humid at the end of spring and early summer, it was generally dry in the summer, and it showed the trend of shift from wetness to drought in the fall; (4) the drought and moist events were positively correlated with temperature in May and December, and negatively correlated with temperature in the other months, the significant negative correlation between the drought and

收稿日期: 2018-03-27

修回日期: 2018-04-15

资助项目: 国家自然科学基金(51669018, 51779116)

第一作者: 王慧敏(1994—), 女, 内蒙古赤峰市宁城县人, 硕士研究生, 干旱区水资源可持续利用与规划。E-mail: 1710083769@qq.com

通信作者: 朱仲元(1956—), 男, 内蒙古乌兰察布市凉城县人, 教授, 博士生导师, 从事水文水资源与草原生态研究。E-mail: 731011410@qq.com

moist events and temperature was found in January, June, July, August and November.

Keywords: drought and moist event; SPI; trend variations; relation Xilin River Basin

干旱是陆地生态系统生产力下降的驱动因子之一^[1]。作为世界上最为严重的自然灾害之一,干旱出现的频率之高、次数之多、持续时间之长、影响范围之广,给农牧业造成了严重的经济损失。干旱影响了牧草的正常返青与生长发育,使得地上生物量减少。随着全球气候变暖,中国北方地区干旱化趋势明显^[2]。尤其是地处干旱和半干旱气候区的内蒙古自治区,东部及南部与半湿润的东北平原、华北平原及黄土高原接壤,是农牧交错地带,也是不同气候区的过渡带,具有较高的气候敏感性。21 世纪以来,内蒙古东部及东北部地区降水严重偏少^[3]。干旱频繁发生对畜牧业和草原生态环境所造成的经济损失越来越大^[4]。2014 年 8 月中旬,内蒙古中西部牧区有 23 万 km² 可利用的草场受旱,其中阿拉善、鄂尔多斯等地大片草场未返青,部分已返青的牧草也处于枯死状态,牧区生态环境遭到严重破坏^[5]。

干旱的成因复杂,影响因素众多,干旱指标的适用性也会受到区域的限制。本文选择由 McKee 等^[6]在评估美国科罗拉多干旱状况时提出的基于降水量的标准化降水指标(SPI)来进行分析。标准化降水指数(SPI)是利用逐月的降水资料来计算的,其数据比较容易获取,且计算方便,不会涉及到干旱机理问题。SPI 指数的最大优点是具有多时间尺度特性,可以用来表征不同类型的事件^[7]。

在中国部分地区的干旱研究中使用了该方法,证实了其具有较好的适用性^[8-10]。但利用 SPI 对锡林河流域旱涝状况开展的研究却很少。本文中计算了不同时间尺度(SPI1, SPI3, SPI6, SPI12)的标准化降水指数,来研究锡林河流域近 36 a 旱涝变化以及干旱事件的演变特征,为研究区干旱预警及对区域内减轻干旱灾害损失具有重要意义。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

锡林河属锡林郭勒草原上一条内陆河,发源于赤峰市克什克腾旗敖伦诺尔和呼伦诺尔,流域位于 116°02′—117°12′E, 43°26′—44°08′N。本文研究区位于锡林浩特水文站控制的锡林河上游区域,控制流域面积达 3 852 km²。由于锡林河流域具有特殊的季节性和地理性特点,降水和融雪水成为该地区水资源的主要来源^[11]。主要的气候特征为昼夜温差大,流域多年平均径流深为 137.4 mm,蒸发量大。牧草生长所需水分主要来源于大

气降水,水分亏缺是牧草生物量的重要影响因素^[12]。

文中所需要的降水与气温的数据资料来源于中国气象数据共享服网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水指数 由于降水量在不同地区、不同时间内具有很大的变幅,所以在不同时空尺度上相互比较是很难做到的,而且降水分布并不是一种正态分布,所以采用 Γ 分布来描述降水量的变化,再经过正态标准化求得 SPI 值。

计算过程为^[13]假设某一时刻的降水量是 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

式中: α 为形状参数; β 为尺度参数; x 为降水量; $\Gamma(\alpha)$ 是 gamma 函数。最佳的 α, β 估计值可采用极大似然估计方法求得,即:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

式中: n 为计算序列的长度。于是,给定时间尺度的累积概率可计算如下:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

$$\text{令 } t = x/\beta$$

上式可变为不完全的 gamma 方程:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

由于 gamma 方程不包含 $x=0$ 的情况,而实际降水量可以为 0,所以累积概率表示为:

$$H(x) = q + (1-q)G(x)$$

式中: q 是降水量为 0 的概率。如果 m 表示降水时间序列中降水量为 0 的数量,则 $q = m/n$ 。

累积概率 $H(x)$ 可以通过下式转换为标准正态分布函数。

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时:

$$Z = \text{SPI} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right)$$

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{H(x)^2}\right]}$$

当 $0.5 < H(x) < 1$ 时:

$$Z = \text{SPI} = \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

$$t = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[1.0 - H(x)]^2} \right\}}$$

式中： $c_0=2.515\ 517$ ； $c_1=0.802\ 853$ ； $c_2=0.010\ 328$ ； $d_1=1.432\ 788$ ； $d_2=0.189\ 269$ ； $d_3=0.001\ 308$ 。

1.2.2 基于 SPI 的旱涝等级划分 根据 SPI 指数将旱涝等级进行了如下划分^[14]，见表 1。

表 1 SPI 干湿事件的分类

SPI 指数	≥ 2.0	$1.5 \sim 1.99$	$1.0 \sim 1.49$	≤ -2.0	$-1.5 \sim -1.99$	$-1.0 \sim -1.49$
分级	重涝	中涝	轻涝	重旱	中旱	轻旱

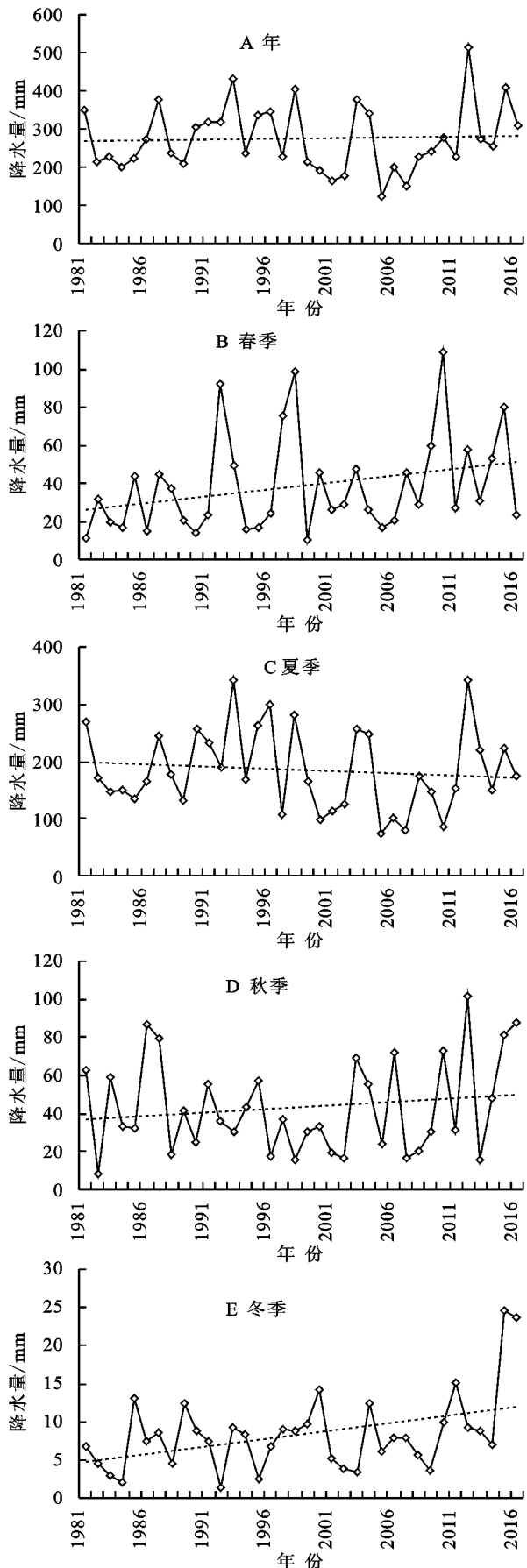
2 结果与分析

2.1 降水的时间变化趋势分析

图 1 表现出年降水量的年际变化大，1981—2016 年 36 a 来年降水量的整体变化趋势极不明显，2012 年降水量最高达到了 514.5 mm，2005 年将降水量最低仅为 121.1 mm。由图 1A—D 可以看出，春季与冬季的降水量呈现出上升的趋势，夏季降水量呈现出下降的趋势，而秋季降水量的趋势变化不明显，基本趋于水平。降水量的年内分配极不均匀，夏季的降水量占全年总降水量的一半还要多。

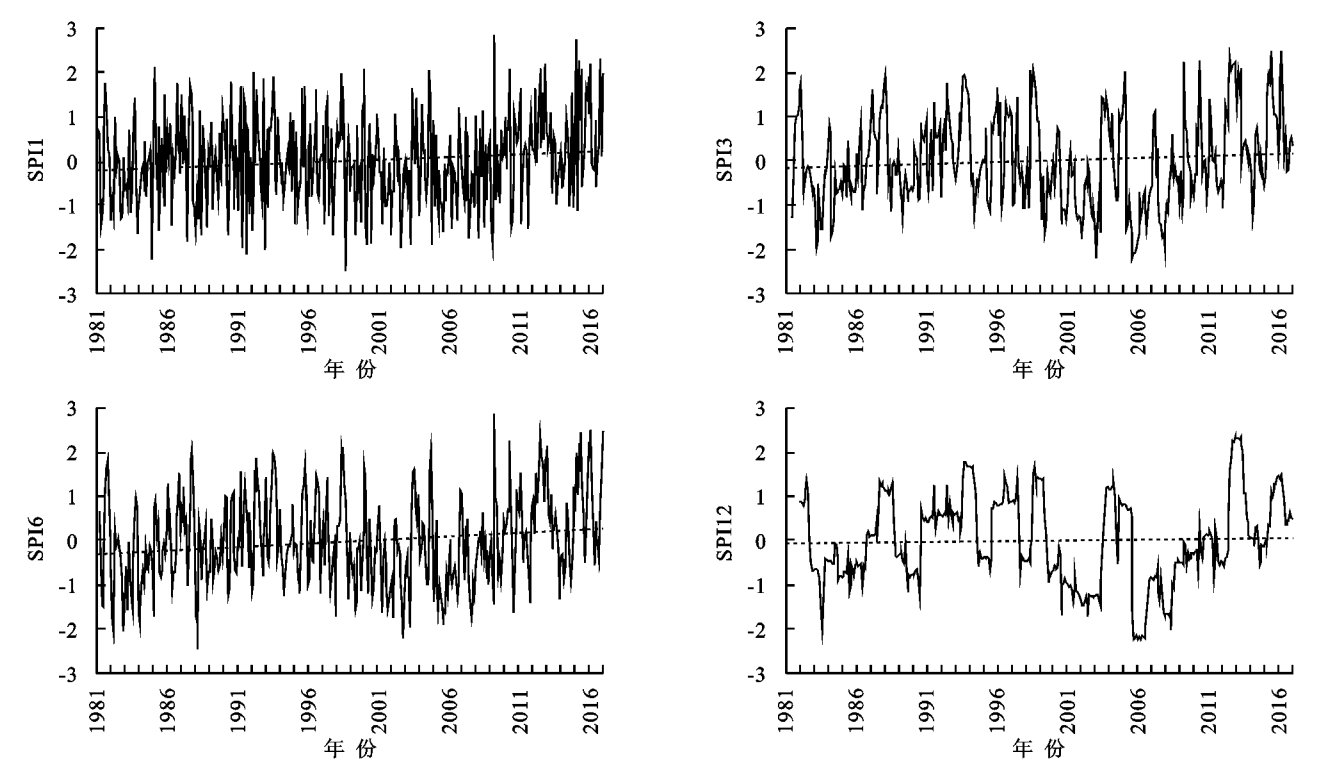
2.2 SPI 变化分析

2.2.1 SPI 在不同时间尺度下的敏感性特征 由图 2 可以看出，SPI 的敏感性随着时间尺度的增加是逐渐减弱的，这可能是由于随着时间尺度的增加，一些极大或者极小降水量对序列的影响有所降低并且有一定的滞后性。图中还可得知，SPI1，SPI3，SPI6 有明显上升的趋势，且随着时间尺度的增加，上升趋势减弱，而 SPI12 基本趋于水平。SPI 的波动频率随着时间尺度的增加逐渐减小。其中 SPI1 波动频率最为强烈，能够反映短期降水不足产生的气象干旱，SPI3 能够反映季节旱涝变化特征，农业干旱与此密切相关^[15]。SPI6 与 SPI12 波动频率较小，与 SPI1 和 SPI3 相比波动也较平缓，能够反映水文干旱。由此可见，将多种时间尺度的 SPI 相结合可以对旱涝进行综合监测。以 1991 年为例，SPI1 表明 1 月为轻旱，3 月为中涝，5 月为中旱，6 月为中涝，7 月为轻涝，8 月为重旱，11 月为轻旱。SPI3 表明 3 月为中涝，4—7 月为轻涝。SPI6 表明 7 月为轻涝。SPI12 表明 6 月为轻涝，其他月份均为正常。就此来看，旱涝的起止时间随着时间尺度的增加而相应延后，旱涝的等级也产生了一定的变化，这说明前期降水变化累计对此产生影响。这与张苗苗^[16]基于 SPI 研究晋北地区旱涝变化的时空特征，车少静等^[17]基于 SPI 分析河北省的旱涝时空变化所得的结论基本一致。



注：图中虚线为趋势线。

图 1 不同年份的降水量变化趋势



注:图中实线为 SPI 序列;虚线为趋势线。

图 2 1981—2016 年不同时间尺度 SPI 变化趋势

2.2.2 干湿事件的年际变化 由图 3 可以看出,在全年尺度内,各个等级的干湿事件发生的频次表现出明显的年际变化。研究区重涝事件主要发生在 2000 年以后。中涝事件的发生主要集中在 1986—1998 年和 2011—

2016 年。重旱事件只出现了 4 次,年份分别为 1984 年、1991 年、1992 年和 1998 年。中旱事件主要发生在 1983—1992 年和 1999—2011 年。轻涝与轻旱事件发生频次的年际差异不是很明显,在各个年份均有发生。

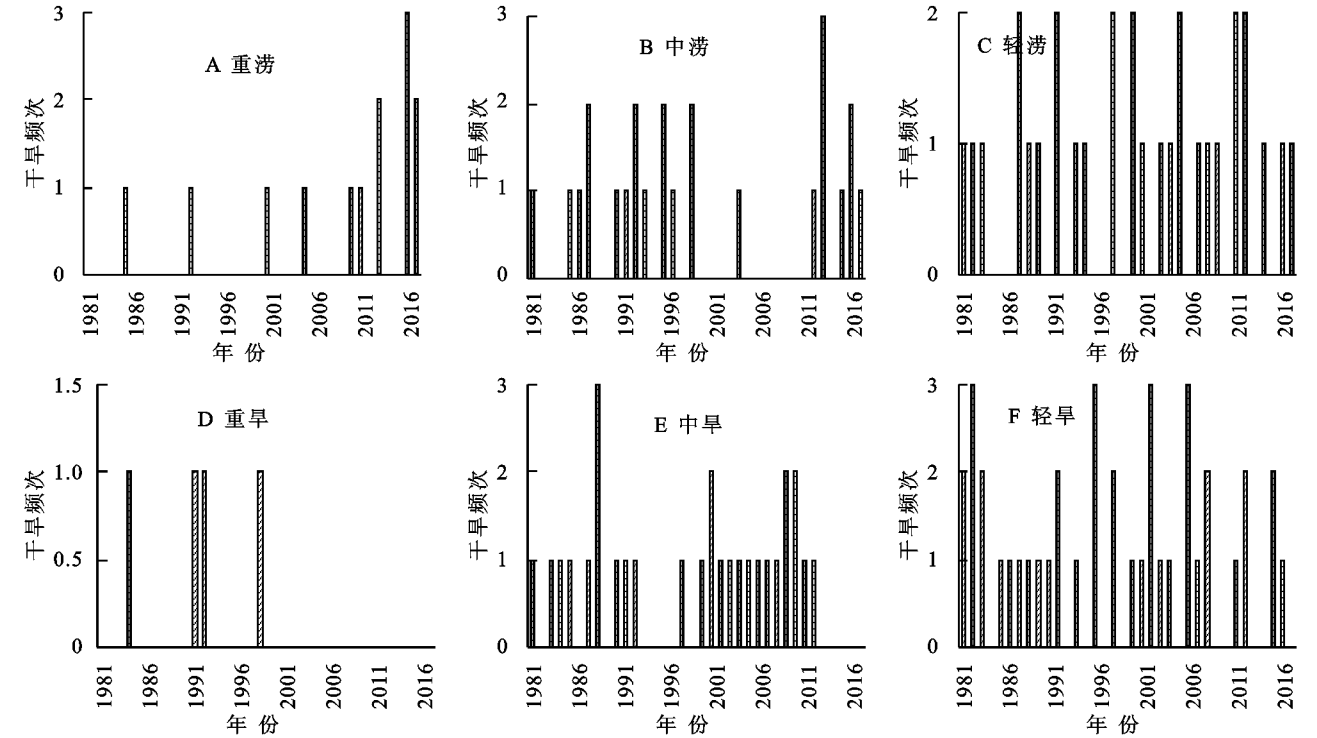


图 3 不同等级干湿事件发生频次的年际变化

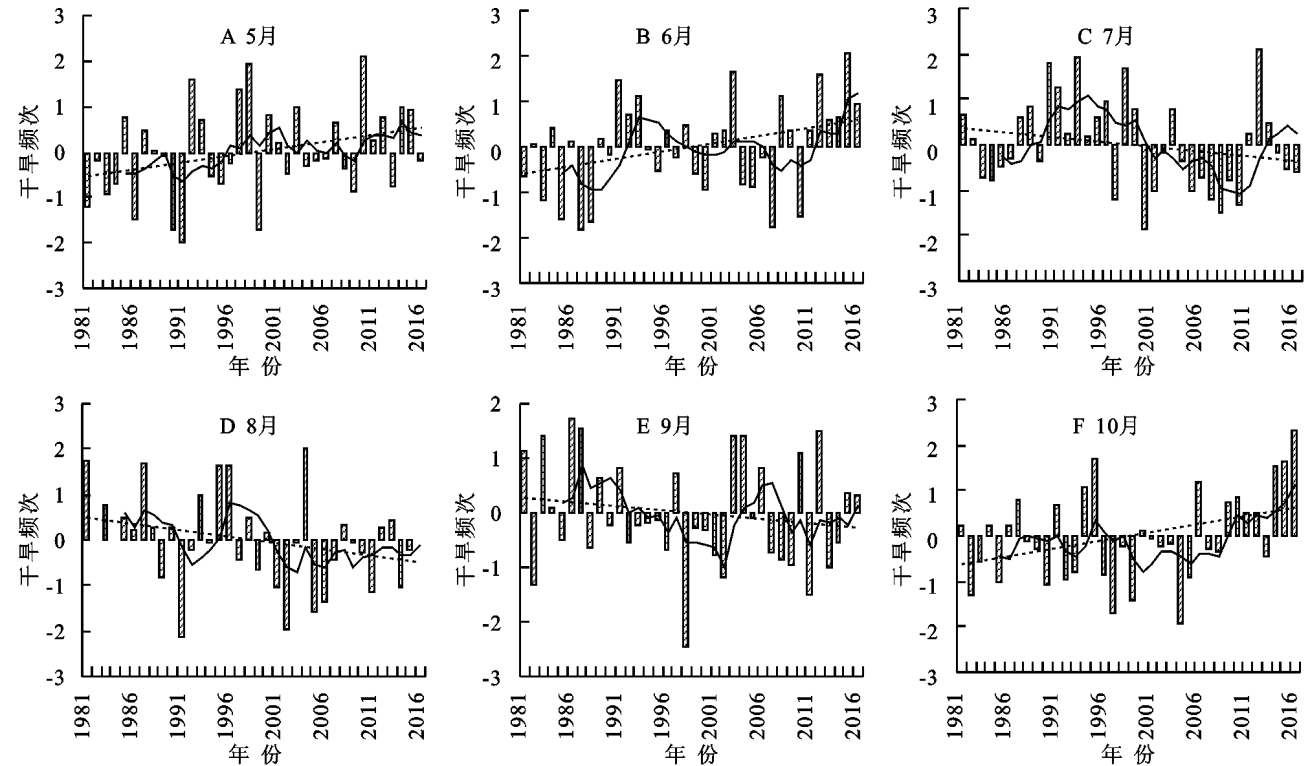
2.2.3 牧草生育期不同月份 SPI 变化 在全盟尺度上,根据逐月 SPI 序列,分离出不同月份的 SPI 逐年

序列,以此来分析不同月份的锡林河流域干湿的年际变化。由图 4 可以看出,5 月、6 月、10 月的 SPI 序列

呈现出增加的趋势,说明春季后期与夏季初期总体上呈现出的是更为湿润的趋势;5 a 滑动平均的结果表明,5 月份的 SPI 整体上呈现出的是增加的趋势。7 月、8 月、9 月的 SPI 序列呈现出减小的趋势,说明夏季整体上呈现出的是更为干旱的趋势,其中,7 月份的 5 a 滑动平均的结果表明,在 1994 年以后,SPI 序列呈现出显著减小的趋势。而对于秋季来说,其总体

上呈现出的是由涝变旱的变化趋势。

对于牧草来说,6 月份开始已经进入了生长旺季,生存条件以及气候条件都能够保证牧草很好的生长,而牧草的生长发育情况就会直接影响牧草的产量,也就是说 6—8 月就是牧草产量的保证期,牧草产量的多少直接由这段时间牧草的生长情况为判断的依据^[18]。由此可见,6—8 月的 SPI 值直接关系到牧草的产量。



注:图中柱状图为 SPI 序列;虚线为趋势线;实线为 SPI 序列的 5 a 滑动平均。

图 4 牧草生育期内各月 SPI 年际变化

2.3 气温的时间变化趋势及与 SPI 的相关性分析

2.3.1 气温的时间变化趋势分析 1981—2016 年的 36 a 间,通过所得到的多年平均气温趋势变化图可以看出,气温的年际变化比较显著且呈上升的趋势,图 5A—D 可知春季与秋季的气温呈现出明显的上升趋势,尤其是在秋季,气温上升趋势更为明显,表明秋季气温的升高对年平均气温的上升起到了主要的作用。而夏季与冬季的气温变化趋势基本趋于水平状态,夏季多年平均气温为 20.19℃,冬季的多年平均气温仅为-16.29℃。

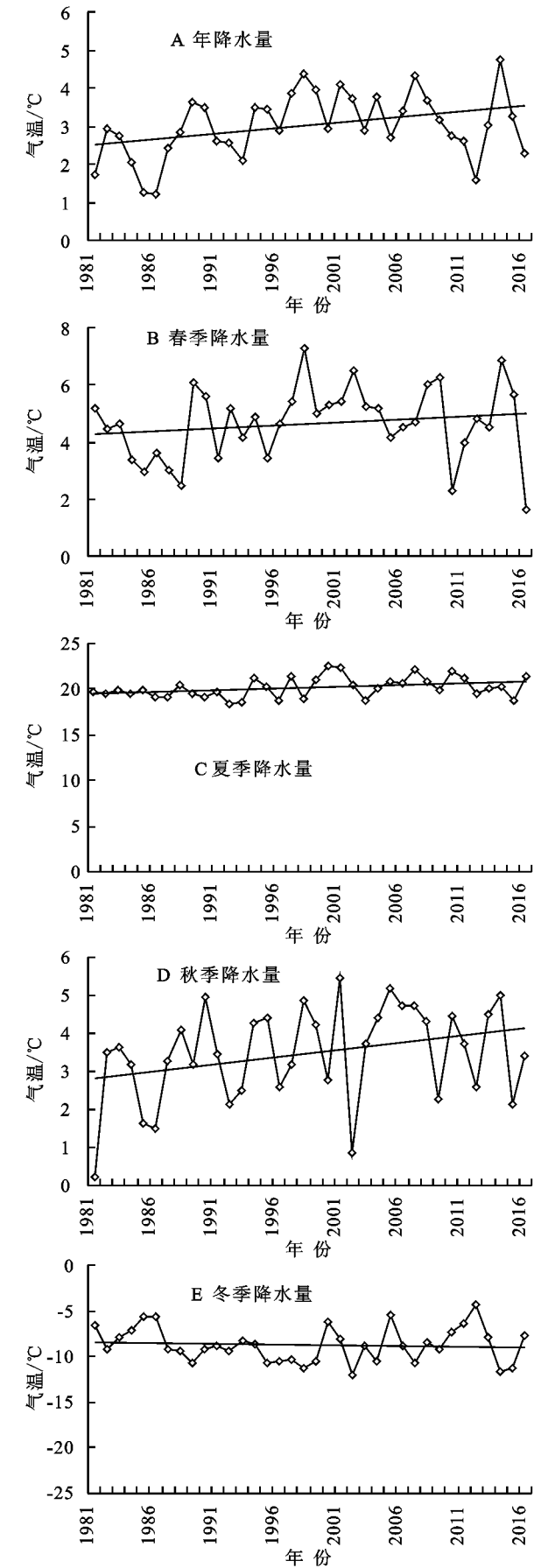
2.3.2 气温与 SPI 的相关性分析 为了探求锡林河流域内气温变化对干湿事件可能产生的影响,计算了

各月 SPI 与气温的相关系数,由表 2 可以发现,在全流域的尺度下,干湿事件与 5 月份和 12 月份的气温呈现出的是正相关关系,这表明在这两月中,锡林河流域的气温越高,则 SPI 的值越大,流域内表现出的是偏湿润的状态。其余各月呈现出的均为负相关关系,且 1 月、6 月、7 月、8 月、11 月份呈现出显著负相关关系,表明气温越高,SPI 值越小,流域内表现出的是偏干旱的状态,尤其是在 1 月、6 月、7 月、8 月、11 月,这种关系更为明显。在牧草生育期内,6 月、7 月、8 月的气温对牧草的生长状况与产量的影响较大,尤其是在 8 月份,气温对牧草生长的影响最大。

表 2 各月 SPI 与气温的相关性

参数	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
SPI	-0.374*	-0.061	-0.145	-0.061	0.042	-0.576**	-0.520**	-0.705**	-0.285	-0.054	-0.553**	0.002

注:* 指在 0.05 水平上显著相关;** 指在 0.01 水平上显著相关。



注:图中虚线为趋势线。

图 5 平均气温时间变化趋势

3 结论

(1) 36 年来年降水量的整体变化趋势极不明显,春季与冬季的降水量呈现出上升的趋势,夏季降水量呈现出下降的趋势,秋季变化不明显。降水量年内分配不均匀。SPI 序列随时间尺度的增加其上升趋势减弱,其波动频率与敏感性逐渐减小,旱涝的起止时间也发生了相应的延后。在全年的尺度内,各个等级的干湿事件发生频次表明,重涝、中涝、重旱和中旱事件表现出明显的年际变化,而轻涝与轻旱事件每年都有发生,年际差异不明显。

(2) 在牧草生育期内,春末夏初为偏湿润的状态,夏季整体偏旱,秋季则是由涝变旱的一个变化。

(3) 36 年间气温的年际变化比较显著且呈上升的趋势,春季与秋季的气温呈现上升趋势,尤其是秋季,气温升高对年平均气温的上升起到了主要的作用,而夏季与冬季气温变化不明显。在全流域的尺度下,干湿事件只与 5 月份的气温呈现出的是正相关关系,在其他月份中,1 月、6 月、7 月、8 月份呈现出极显著的负相关关系,在牧草生育期内,6 月、7 月、8 月的气温对牧草的生长状况与产量的影响较大,其中 8 月份的气温变化对牧草的影响最大。

参考文献:

- [1] 卢洪健,朱冰,胡智丹,等.东北地区植被动态对气象干旱的响应特征研究[J].人民珠江,2018,39(3):26-30.
- [2] 马柱国,符淙斌.1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J].科学通报,2006,51(20):2429-2439.
- [3] 高涛,肖苏君,乌兰.近 47 年(1961—2007 年)内蒙古地区降水和气温的时空变化特征[J].内蒙古气象,2009(1):3-7.
- [4] 李兴华,陈素华.内蒙古草地干旱损失评估方法研究[J].草业科学,2012,29(7):1033-1038.
- [5] 孙远斌.2014 年全国旱灾及抗旱行动情况[J].中国防汛抗旱,2015,25(1):21-24.
- [6] Seiler R A, M Hayes, L Bressan. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2002,22(11):1365-1376.
- [7] 王文,陈林.标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J].高原气象,2014,33(2):423-431.
- [8] 翟禄新,冯起.基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J].自然资源学报,2011,26(5):847-857.
- [9] 熊光洁.近 50 年中国西南地区不同时间尺度干旱气候变化特征及成因研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [10] 闫峰,王艳娇,吴波,等.近 50 年河北省干旱时空分布特征[J].地理研究,2010,29(3):423-430.

- 间分布特征[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 142-146, 211.
- [5] 郭慧, 李栋梁, 林纾, 等. 近 50 多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1165-1175.
- [6] 向亮, 郝立生, 安月改, 等. 51 a 河北省降水时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 56-65.
- [7] 张健, 满志敏, 宋进喜, 等. 1765—2010 年黄河中游 5—10 月面降雨序列重建与特征分析[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1101-1113.
- [8] 徐维新, 古松, 苏文将, 等. 1971—2010 年三江源地区干湿状况变化的空间特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 46-55.
- [9] 王晓, 李佳秀, 石红彦, 等. 1960—2011 年云南省极端气温事件的时空分布及趋势预测[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1816-1824.
- [10] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近 50 年东江流域降雨径流变化趋势研究[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 514-520.
- [11] 杨瑜峰, 江灏, 赵红岩, 等. 兰州雨量谱的气候变化与极端化趋势[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 328-333.
- [12] 郭红霞, 汪艳林, 李瑞雪, 等. 近 57 年兰州市气温降水变化特征及突变分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(1): 34-36.
- [13] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河兰州上游地区降水、气温变化及趋势诊断[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(1): 77-81.
- [14] 唐亦汉, 陈晓宏. 近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 476-482.
- [15] 彭素琴, 杨兴国, 柯晓新, 等. 甘肃河东地区降雨特征分析研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 73-78.
- [16] 李相虎, 张奇, 邵敏. 基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1164-1170.
- [17] 丁祖全, 黎志恒. 兰州市地质灾害与防治[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2009: 3-5.
- [18] 郭军, 任国玉, 李明财. 近 47 年环渤海地区不同级别降水事件变化[J]. 地理研究, 2010, 29(12): 2271-2280.
- [19] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义与检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [20] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 115-116.
- [21] Gaucherel C. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(3): 101-121.
- [22] 刘东, 付强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 380-384.

~~~~~

(上接第 183 页)

- [11] 段超宇. 基于 SWAT 模型的锡林河流域融雪径流模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [12] 陈素华, 闫伟兄, 乌兰巴特尔, 等. 干旱对内蒙古草原牧草生物量损失的评估方法研究[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 32-37.
- [13] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
- [14] 张强, 邹旭凯, 肖凤劲, 等. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-17.
- [15] Patel N R, Chopra P, Dadhwal V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index[J]. Meteorological Applications, 2010, 14(4): 329-336.
- [16] 张苗苗. 基于 SPI 的近 51 a 晋北地区旱涝变化及干旱事件时空特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 138-144.
- [17] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 137-143.
- [18] 刘璇. 气候条件对典型草原牧草生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业, 2017(14): 99-99.