

基于生态分区的1980—2015年内蒙古干旱动态

道日娜¹, 包玉海^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘要:为研究内蒙古干旱时空分布特征,将内蒙古地区分为荒漠生态分区、草原生态分区和森林生态分区,选用标准化降水指数为气象干旱评价因子,对1980—2015年内蒙古降水数据进行了动态分析。结果表明:(1)1980—2015年,内蒙古草原和森林区的SPI12有轻微减小趋势,而荒漠区的SPI12有增加趋势。(2)荒漠区干旱强度主要为中旱和轻旱,草原区以轻旱为主,森林区发生不明显干旱、轻旱和中旱的频率一样。荒漠和草原区干旱影响范围主要为无明显干旱和全域性干旱,而森林区主要为无明显干旱和区域性干旱。(3)春季3个区的SPI都有明显增加趋势。夏季3个区的SPI均有减小趋势。秋季荒漠区的SPI有增加趋势,草原区变化趋势不明显,而森林区SPI有减小趋势。冬季森林和草原区的SPI有增大趋势,而荒漠区SPI无明显变化趋势。(4)春季3个区多数站点的SPI值均有增加趋势。夏季3个区多数站点的SPI值都呈减小趋势。内蒙古秋季SPI变化趋势率表现为西部地区增大,东部地区减小。冬季荒漠生态分区SPI有增加趋势的站点多数分布于西部,有减小趋势的站点多分布于东部,草原区SPI有增大趋势的站点数较多,森林区的全部站点的SPI值都有增大的趋势。研究结论可为内蒙古地区干旱的监测预警和防灾减灾提供理论依据。

关键词:干旱;生态分区;标准化降水指数;内蒙古

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0159-07

Dynamic of the Drought Based on the Ecological Partition in Inner Mongolia During 1980—2015

DAO Rina¹, BAO Yuhai^{1,2}

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

2. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System, Hohhot 010022, China)

Abstract: In order to study the spatial and temporal distribution characteristics of drought in Inner Mongolia, Inner Mongolia region is divided into desert ecological zones, grassland ecological partitions and forest ecological zones. Using standardized precipitation index as meteorological drought evaluation factor, the precipitation data of Inner Mongolia from 1980 to 2015 were analyzed. The results showed that: (1) from 1980 to 2015, SPI12 in grassland and forest areas showed a slight decreasing trend, while SPI12 in desert areas of Inner Mongolia showed an increasing trend; (2) the drought intensity in the desert areas was mainly moderate drought and light drought, while it was mainly light drought in the grassland areas; the frequency of non-obvious drought, light drought and moderate drought in forest areas were the same; the drought scope in desert and grassland areas was mainly affected by no obvious drought and regional drought, while the drought scope in forest areas was mainly affected by no obvious drought and regional drought; (3) SPI in all three regions showed a significant increase trend in spring; SPI decreased in all three regions in summer; SPI in desert areas tended to increase in autumn, and the change trend of SPI in grassland areas is not obvious, while SPI in forest areas tended to decrease; in winter, SPI in forest and grassland areas tended to increase, while SPI in desert areas showed no obvious trend; (4) SPI values of most sites in the three regions showed an increasing trend in spring; SPI values at most sites in the three regions showed a decreasing trend in summer; the trend rate of SPI change in Inner Mongolia in autumn was increasing in the west and decreasing in the east; most of the sites with

收稿日期:2018-06-19

修回日期:2018-07-24

资助项目:国家自然科学基金资助项目(61631011);科技基础资源调查专项子课题项目(2017FY101301-4)

第一作者:道日娜(1994—),女(蒙古族),内蒙古通辽人,硕士,主要从事遥感与地理信息系统应用方面的研究。E-mail:1092787977@qq.com

通信作者:包玉海(1965—),男(蒙古族),内蒙古科右中旗人,博士,教授,主要从事土地利用/覆盖变化,自然灾害遥感监测与风险评估研究。

E-mail: baoyuhai@imnu.edu.cn

increasing tend of SPI in desert ecosystem area in winter were distributed in the west, and the stations with decreasing trend mostly distributed in the east, there are more sites with increasing trend of SPI in grassland area, and the SPI values of all sites in the forest area had an increasing trend. The results can provide theoretical basis for drought monitoring, early warning, and disaster prevention and reduction in Inner Mongolia.

Keywords: drought; ecological zoning; standardized precipitation index; Inner Mongolia

在全球变暖的背景下,中国的地表年平均气温在过去的 100 a 里有了显著的增长,变暖幅度约为 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。在过去的 50 a 里,温度的升高更为明显,全国年平均地表温度上升了 1.1°C ,变暖速率为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,明显高于同期全球平均升温速率^[1]。在这个背景下,全球范围内特大干旱、高温等极端天气气候事件发生频率和强度呈增加趋势^[2-3]。据世界气象组织的统计数据,气象灾害约占自然灾害的 70%,而干旱灾害又占气象灾害的 50% 以上^[4]。干旱是全球范围内发生的一种自然灾害,对经济发展和社会生活的影响超出了其他任何一种自然灾害^[5]。

中国北方地区干旱化问题一直是学术界关注的焦点^[6],内蒙古自治区是中国重要的农牧业生产基地,生态环境脆弱,也是全球气候变化最敏感的地区之一^[7]。干旱会对内蒙古地区草原和农业生态系统环境以及草原畜牧业和旱作农业经济产生重大影响^[8]。过去的多数干旱研究以内蒙古全区为研究区^[4,9-10],没有考虑不同生态类型之间的差异,不同生态分区之间的干旱差异难以体现。干旱形成的原因较复杂,所以干旱评估指标的适用性会受到时间尺度和研究区域的限制^[9]。目前的干旱指标大致可以分为 2 类:一类是从干旱机理上研究的指标,一类是研究导致干旱的气象学指标,也有些指标综合考虑了这些因素^[11]。在众多干旱指标中,标准化降水指数(SPI)较为常用。由于 SPI 标准化处理后的数据在多时间尺度、多地域上具有可比性,且只需降水量数据^[12],使得 SPI 适用于研究内蒙古地区干旱时空变化特征。

内蒙古植被类型按照降雨量和温度的梯度变化,沿西南—东北依次可以分为荒漠、草原和森林^[13]。因此,本文将内蒙古地区分为荒漠生态分区、草原生态分区和森林生态分区,选用标准化降水指数(SPI)为干旱分析指标,对 1980—2015 年的内蒙古降水数据进行动态分析,可为全球变暖背景下的内蒙古地区 3 个生态分区的干旱监测和防灾减灾提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究使用的内蒙古 47 个站点 1980—2015 年逐月降水数据来源于中国气象资料共享服务网([http://cdc.](http://cdc.cma.gov.cn/)

[cma.gov.cn/](http://cdc.cma.gov.cn/)),剔除了缺测较多的吉河德、杭锦后旗、伊金霍洛旗等 3 个站点,对个别站点的缺测数据采用均值替换法进行了插补处理,以保证数据的完整性^[14]。

1.2 研究方法

标准化降水指数(SPI)是由 McKee 等人在 1993 年提出的表征某时段降水量出现概率多少的指标,有只需要较长时间的降水数据(一般超过 30 a),便可计算出不同时间尺度的干旱指数的基本特点^[15]。本研究采用了世界气象组织认可的美国内布拉斯加大学的计算程序计算了内蒙古地区标准化降水指数。标准化降水指数(SPI)的具体计算公式如下^[16-18]:

$$\text{SPI} = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \quad (1)$$

式中: $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$; $G(x)$ 为与 Γ 函数相关的降水分布概率; x 为年或季降水量样本; S 为概率密度正负系数。

当 $G(x) > 0.5$ 时, $G(x) = 1.0 - G(x)$, $S = 1$; 当 $G(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $G(x)$ 由 Γ 分布函数概率密度积分公式计算,计算公式如下:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x t^{\gamma-1} e^{-t/\beta} dt, \quad x > 0 \quad (2)$$

式中: γ, β 分别为 Γ 分布函数的形状和尺度参数; c_0, c_1, c_2 和 d_1, d_2, d_3 分别为 Γ 分布函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数,其中 $c_0 = 2.515\ 517$; $c_1 = 0.802\ 853$; $c_2 = 0.010\ 328$; $d_1 = 1.432\ 788$; $d_2 = 0.189\ 269$; $d_3 = 0.001\ 308$ ^[10]。

1.3 干旱评价指标

本文从干旱频率、干旱站次比、干旱强度和干旱变化趋势率等 4 个方面对内蒙古 1980—2015 年将近 40 a 来的干旱变化特征进行了评估。具体指标解释如下:

(1) 干旱频率(P_i):用于评价某站有资料年份内发生干旱频率程度,计算公式为:

$$P_i = n/N \times 100\% \quad (3)$$

式中: N 为某站有气象资料的年数; n 为该站发生干旱的总年数;下标 i 为不同站代号。可按不同程度的干旱发生年数计算不同程度干旱频率。为了便于比较,本文把轻旱(含轻旱以上)发生的年份均算为干旱,中旱(含中旱以上)发生的年份均记为中旱,重旱(含重旱以上)发生的年份记为重旱,特旱发生的年份记为特旱。

(2) 干旱站次比(P_j):用某一区域内干旱发生站数多少占全部站数的比例来评价干旱影响范围的大小,计算公式为:

$$P_j = m/M \times 100\% \tag{4}$$

式中: M 代表研究区总气象站数; m 为发生干旱的站数; j 代表不同年份。

干旱的影响范围定义:

当 $P_j \geq 50\%$ 时,为全域性干旱;当 $50\% > P_j \geq 33\%$ 时,为区域性干旱;当 $33\% > P_j \geq 25\%$ 时,为部分区域性干旱;当 $25\% > P_j \geq 10\%$ 时,为局域性干旱;当 $P_j < 10\%$ 时,可认为无明显干旱发生^[19]。

(3) 干旱强度(S_{ij}):单站某时段内的干旱强度可由 SPI 值反映,用于评价干旱的严重程度。计算公式为:

$$S_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |S_{PI_i}| \tag{5}$$

式中: $|S_{PI_i}|$ 为发生干旱时 SPI 的绝对值; m 为发生干旱的站数。当 $S_{ij} \geq 1.5$ 时为重度干旱,当 $1.5 > S_{ij} \geq 1$ 时为中度干旱,当 $1 > S_{ij} \geq 0.5$ 时为轻度干旱,当 $S_{ij} < 0.5$ 时为干旱强度不明显^[4]。

(4) 变化趋势率:变化趋势率即气候倾向率,为历年气候要素数据序列拟合直线的斜率,乘以 10 来表示多年气候数据序列变化倾向率^[20]。

2 结果与分析

2.1 年降水量的变化特征

本文用年尺度的 SPI(SPI12) 平均值分析了 1981—2015 年内蒙古年尺度上的干旱变化特征。由图 1 可知,内蒙古 1981—2015 年平均 SPI12 最大值在 1998 年,最小值在 2001 年。共发生了 8 次干旱,分别发生在 1982 年、1999—2001 年、2005 年、2007 年、2009 年和 2011 年。从干旱频率来看,内蒙古大约 4 到 5 a 会发生一次干旱,SPI12 有轻微减小趋势。

1980—2015 年内蒙古草原生态分区 SPI12 最大值为 1.70,最小值为 -1.05。近 40 a 内共发生了 8 次干旱,分别在 1980 年、2000—2001 年、2005—2007 年、2009 年、2011 年,大约 4~5 a 发生一次干旱。荒漠生态分区 SPI12 最大值为 1.42,最小值为 -1.13。1980—2015 年共发生了 10 次干旱,分别在 1980 年、1982 年、1986—1987 年、1987 年、1989—2001 年、2005 年、2009 年、2011 年,大约 3~4 a 发生一次干旱。森林生态分区 SPI 最大值为 1.82,最小值为 -1.52。共发生了 7 次干旱,分别在 1982 年、1999—2002 年、2004 年、2007 年,大约 5~6 a 发生一次干旱。1980—2015 年,草原生态分区和森林生态分区的 SPI12 均有轻微的减小趋势,而荒漠生态分区的 SPI12 有增加趋势。3 个生态

分区发生干旱的频率从大到小依次为荒漠生态分区、草原生态分区和森林生态分区。由于本文采用的是各站 SPI12 的平均值,所以反映出的只是全区干旱的平均状况,无法反映各个站点的干旱状况^[21](图 2)。

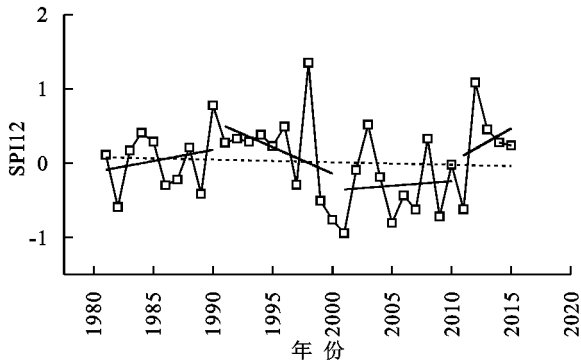


图 1 内蒙古 SPI12 变化

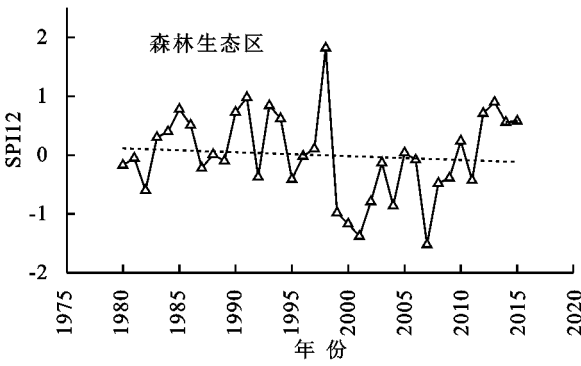
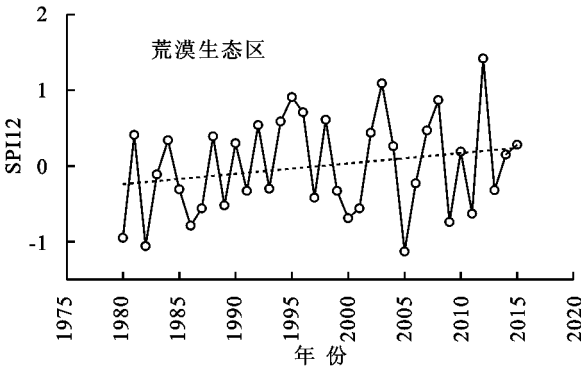
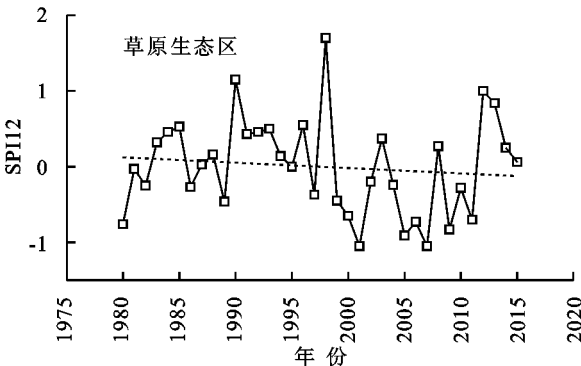


图 2 内蒙古各生态分区 SPI12 变化

2.2 干旱强度与干旱占次比变化特征

1980—2015 年,内蒙古干旱强度在 0~1.47 之间,仅 2012 年内蒙古干旱强度不明显,有 15 a 发生了轻度干旱,20 a 发生了中度干旱。干旱强度以中旱为主,占 56%,其

次为轻旱,占42%。干旱强度有减小趋势(图3A)。

内蒙古地区1980—2015年干旱站次比在0%~73%之间波动变化。2001年在年尺度上发生干旱的站点最多,共34个站点发生了干旱,干旱站次达到了72.34%。2012年在年尺度上没有站点发生干旱,干旱站次比为0%。内蒙古1980—2015年共有5 a无明显干旱发生,分别为2012年、1984年、1990年、1994年和1998年。发生局域性干旱、部分区域性干旱、区域性干旱和全域性干旱的年数分别为11 a、6 a、3 a和10 a。1980—2015年,内蒙古主要以局域性干旱和全域性干旱为主,干旱频率主要分布在20%~30%之间。新巴尔虎右旗、朱日和和鄂托克旗站干旱频率较大,均大于29%。干旱频率较小的站点为扎兰屯、博克图、海力素、化德和多伦站,均小于20%。干旱站次比变化趋势不明显(图3B)。

从图4—5可以看出:荒漠生态分区1980—2015年干旱强度值在0~2.14之间,有4 a干旱强度不明显,发生轻旱和重旱的年数分别为12 a和19 a,仅在2005年发生了重度干旱。干旱强度以中旱和轻旱为主,分别占53%和33%。干旱强度有减小趋势,变化倾向率为 $-0.082/10$ a。干旱站次比在0%~82%之间波动变化。其中,1995年、2003年、2008年、2012年等4年无站点发生干旱。1980年、1982年分别有75%和81.25%的站点发生了干旱。有10 a无明显干旱发生,发生局域性干旱、部分区域性干旱、区域性干旱和全域性干旱的年数分别为7、5、2、12 a。荒漠

生态分区发生全域性干旱和无明显干旱的比例较高,分别占33%和28%。干旱站次比有减小趋势。

草原生态分区1980—2015年干旱强度值在0~1.73之间,其中有5 a干旱强度不明显,共有17 a发生了轻旱,有13 a发生了中旱,仅在1988年发生了重旱。干旱强度以轻旱为主,占47%,干旱强度有减小趋势,变化倾向率为 $-0.025/10$ a。干旱站次比在0%~82%之间。1985年、1990年、1998年和2012年等4 a无站点发生干旱。2005年和2006年有81.82%的站点发生了干旱。发生无明显干旱、局域性干旱、部分区域性干旱、区域性干旱和全域性干旱的年数分别为11、4、7、3、11 a。草原生态分区主要以无明显干旱和全域性干旱为主,各占31%。干旱站次比有增大趋势。

森林生态分区1980—2015年干旱强度值在0~1.5之间,其中有11 a干旱强度不明显,11 a发生轻旱、11 a发生中旱,3 a发生重旱。发生干旱强度不明显、轻度干旱和中度干旱的频率一样。与其他两个生态分区相比,发生干旱强度不明显和重度干旱的比例较大。森林生态分区干旱强度有减小趋势,变化倾向率为 $-0.058/10$ a。干旱站次比在0%~100%之间波动变化。其中有11 a无站点发生干旱,发生无明显干旱、局域性干旱、部分区域性干旱、区域性干旱和全域性干旱的年数分别为11、8、0、9、8 a,发生无明显干旱、局域性干旱、区域性干旱和全域性干旱的年数相差不多,其中发生无明显干旱的年数较多,发生频率为31%。干旱站次比有增大趋势。

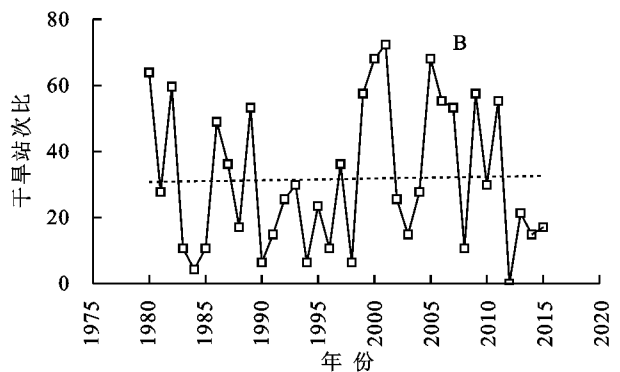
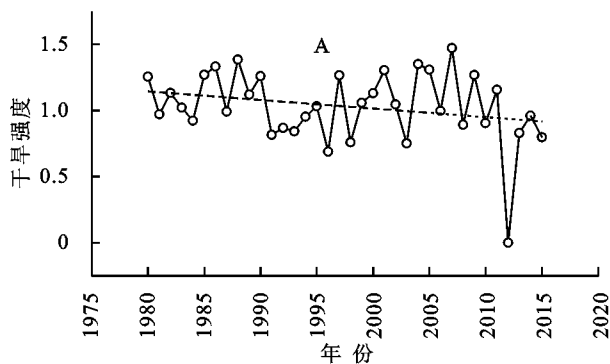


图3 内蒙古1980—2015年干旱强度与干旱站次比逐年变化

2.3 各生态分区SPI季节变化

本文用内蒙古3—5月、6—8月、9—11月、12月至翌年2月的降水量数据,分别代表内蒙古春、夏、秋、冬的降水量来计算各个季节的SPI值(图6—7)。

春季草原生态分区、森林生态分区和荒漠生态分区SPI最大值分别为1.51、1.13、1.49,最小值分别为-1.29、-1.19和-1.13。1980—2015年,3个生态分区春季SPI的平均值均为正值。春季平均SPI的线性倾向率相差不大,荒漠、草原和森林生态分区的SPI线性

倾向率分别为 $0.152/10$ a、 $0.174/10$ a和 $0.158/10$ a,表明春季3个生态分区SPI都有明显的增加趋势。

夏季草原生态分区、森林生态分区和荒漠生态分区SPI最大值分别为1.53、1.79、1.21,最小值分别为-1.50、-1.42和-1.53。1980—2015年,3个生态分区夏季SPI均有减小趋势,其中草原生态分区的SPI减小趋势较明显,线性倾向率为 $-0.169/10$ a,森林生态分区和荒漠生态分区的SPI线性倾向率分别为 $-0.095/10$ a和 $-0.066/10$ a。

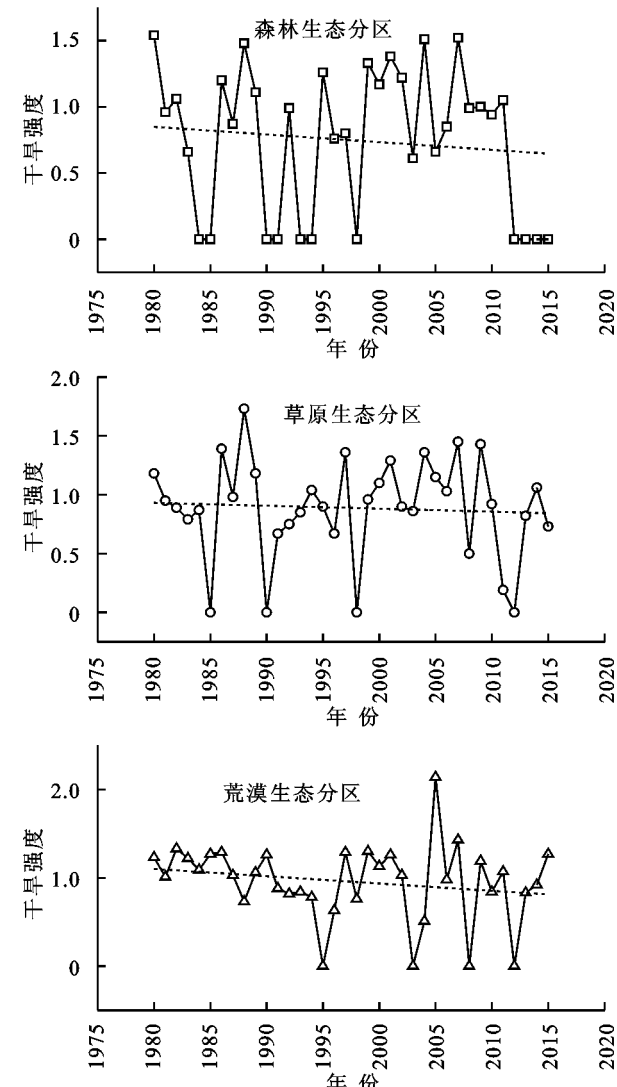


图 4 内蒙古各生态分区干旱强度变化

秋季草原生态分区、森林生态分区和荒漠生态分区 SPI 最大值分别为 1.24, 1.65, 1.68, 最小值分别为 -1.08, -1.27 和 -1.33。1980—2015 年,荒漠和草原生态分区的 SPI 都有增加趋势,其中荒漠生态分区的增加趋势更明显, SPI 线性倾向率为 0.298/10 a。草原生态分区线性倾向率为 0.049/10 a, 增加趋势不明显。森林生态分区 SPI 有减小趋势, 线性倾向率为 -0.096/10 a, 与其他两个生态分区相反。

冬季草原生态分区、森林生态分区和荒漠生态分区的 SPI 最大值分别为 1.06, 1.20, 1.17, 最小值分别为 -1.16, -1.25 和 -1.12。1980—2015 年,森林和草原生态分区的 SPI 均有增加趋势, 线性倾向率分别为 0.256/10 a 和 0.131/10 a, 其中森林生态分区增加趋势更明显。荒漠生态分区 SPI 线性倾向率为 -0.002/10 a, 无明显变化趋势。

1980—2015 年春季内蒙古荒漠生态分区除吉兰太站以外, 其余各站点的 SPI 均有增大趋势。草原生态分区仅呼和浩特站的 SPI 有减少趋势, 森林生态分

区仅宝国图站的 SPI 有减小趋势。春季 3 个生态分区多数站点的 SPI 均有增加趋势。

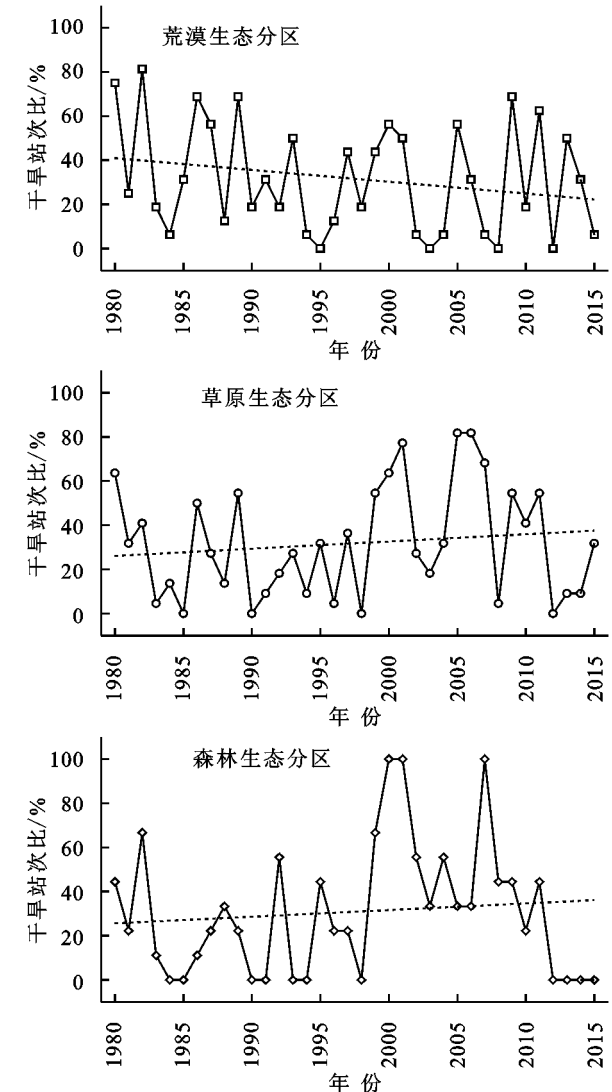


图 5 内蒙古各生态分区干旱站次比变化

夏季内蒙古荒漠生态分区只有白音毛道和苏尼特左旗两个站点 SPI 有增大趋势。草原生态分区除了阿尔山站以外, 其余站点都有减小趋势。森林生态分区仅赤峰和扎兰屯站 SPI 有增大趋势。夏季 3 个生态分区多数站点的 SPI 值都呈减小趋势, 与春季正好相反, 夏季 3 个生态分区都有干旱化趋势。

秋季荒漠生态分区除了东北部的二连浩特和苏尼特左旗两个站点外, 其余站点的 SPI 值都有增大趋势。草原生态分区的 SPI 呈增大和减小趋势的站点数相差不多, SPI 有增大趋势的站点多数分布在西部, SPI 有减小趋势的站点多数分布在东部, 表明草原生态分区秋季 SPI 变化趋势有较大的区域差异。秋季森林生态分区除了赤峰和宝国图两个站点的 SPI 有增大趋势外, 其余站点的 SPI 都有下降趋势。内蒙古秋季 SPI 变化趋势有明显的地域差异, 表现为西部地区 SPI 增大, 东部地区 SPI 减小。

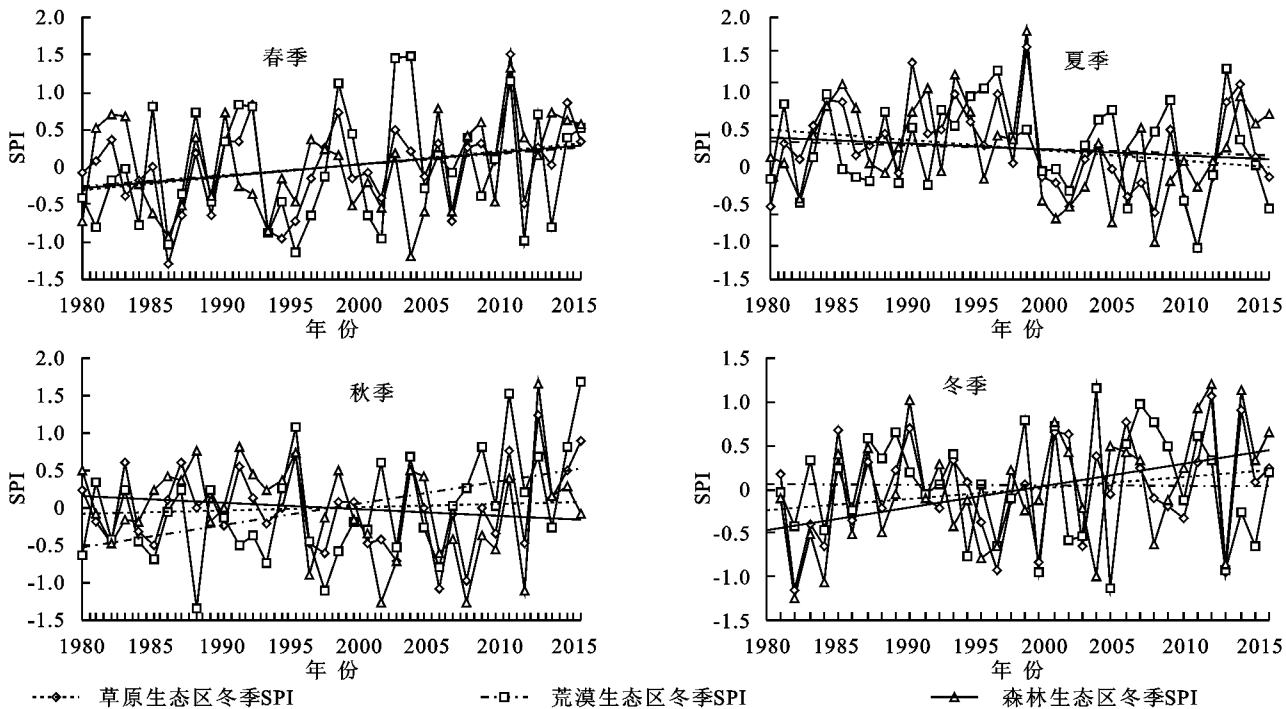


图 6 内蒙古各生态分区 SPI 季节变化

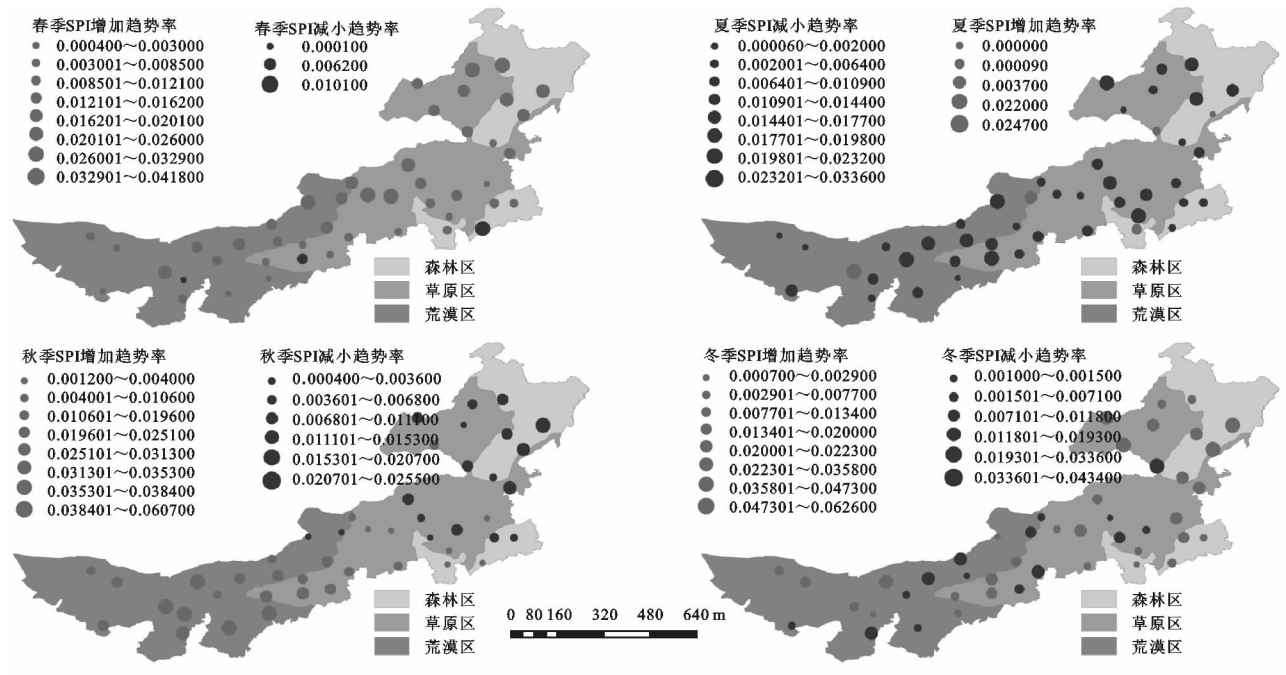


图 7 1980—2015 年内蒙古 SPI 季节变化趋势

冬季荒漠生态分区 SPI 有增大和减小趋势的站点数相等, SPI 有增大趋势的站点多数分布于西部, 而 SPI 有减小趋势的站点大多分布在东部。草原生态区 SPI 有增大趋势的站点数较多, 总体上 SPI 有增大趋势。森林生态区全部站点的 SPI 值都呈增大趋势, 冬季森林生态分区降水量有增加趋势。

3 讨论

本文基于标准化降水指数, 计算分析了内蒙古 1980—2015 年基于 3 个生态分区的干旱频率、干旱

站次比、干旱强度和干旱变化趋势率等 4 个指标的变化特征。得到草原生态分区和森林生态分区的 SPI12 有轻微的减小趋势, 而荒漠生态分区的 SPI12 有增加趋势, 此结果与那音台和张熙庭等^[6,8]得到的结论基本一致。春季内蒙古 3 个生态分区多数站点的 SPI 值均有增加趋势, 夏季与春季正好相反, 秋季内蒙古 SPI 变化趋势表现为西部地区增大, 东部地区减小。该结论与白美兰等^[22]的研究结果一致。从上述分析可以了解到, 在全球气候变暖背景下, 内蒙古 3 个生态分区对于干旱化的响应具有明显的差异。

本研究还有一些不足之处。影响干旱时空分布的因素较多,而本研究所使用的标准化降水指数只考虑了降水因素,未考虑温度、土壤相对湿度、蒸发、连续无雨日数等因素。因此,本研究得到的结果与真实值可能会有误差,内蒙古地区的干旱变化特征还有待结合其他旱涝指标来进一步分析。

4 结论

(1) 1980—2015年,从干旱频率来看,内蒙古大约4~5 a发生一次干旱。SPI12有轻微减小趋势。草原生态分区和森林生态分区的SPI12有轻微的减小趋势,而荒漠生态分区的SPI12有增加趋势。

(2) 内蒙古全区干旱强度以中旱为主,干旱影响范围以局域性干旱和全域性干旱为主。荒漠生态分区干旱强度以中旱和轻旱为主,草原生态分区以轻旱为主,森林生态分区发生不明显干旱、轻旱和中旱的频率一样。荒漠和草原生态分区干旱影响范围以无明显干旱和全域性干旱为主,而森林生态分区以无明显干旱和区域性干旱为主。

(3) 1980—2015年,春季3个生态分区SPI的变化没有明显差别,都有明显增加趋势。夏季3个生态分区SPI均有减小趋势,其中草原生态分区的SPI减小趋势最明显。秋季荒漠生态分区和草原生态分区的SPI都有增加趋势,其中,草原生态分区增加趋势不明显,森林生态分区SPI有减小趋势,与其他两个生态分区相反。冬季森林和草原生态分区SPI均有增大趋势,其中森林生态分区SPI增加趋势更明显。冬季荒漠生态分区的SPI无明显变化趋势。

(4) 1980—2015年,春季内蒙古3个生态分区多数站点的SPI值均有增加趋势。夏季3个生态分区多数站点的SPI都呈减小趋势,与春季正好相反。秋季内蒙古SPI变化趋势表现为西部地区增大,东部地区减小。冬季荒漠生态分区SPI有增大趋势的站点多数分布于西部,有减小趋势的站点大多分布在东部,草原生态分区SPI有增大趋势的站点数较多,森林生态分区全部站点的SPI值都有增大趋势。

参考文献:

[1] 郭灵辉,吴绍洪,赵东升,等.近50年内蒙古地区生长季变化趋势[J].地理科学,2013,33(4):505-512.
[2] 王莺,李耀辉,胡田田.基于SPI指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J].中国沙漠,2014,34(1):244-253.
[3] 沙莉,李施,沙莎,等.基于SPI指数甘肃省河东地区干旱特征分析[J].气象与环境学报,2016,32(5):122-130.

[4] 周扬,李宁,吴吉东.内蒙古地区近30年干旱特征及其成灾原因[J].灾害学,2013,28(4):67-73.
[5] 李芬,于文金,张建新,等.干旱灾害评估研究进展[J].地理科学进展,2011,30(7):891-898.
[6] 那音台.基于SPI指数的近50 a内蒙古地区干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):161-166.
[7] 穆少杰,周可新,齐杨,等.内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素[J].植物生态学报,2014,38(1):1-16.
[8] 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.
[9] 周扬,李宁,吉中会,等.基于SPI指数的1980—2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
[10] 韩志慧,刘小刚,郝琨,等.基于SPI指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J].排灌机械工程学报,2017,35(5):430-439.
[11] 袁雷,刘依兰,马鹏飞.基于标准化降水指数的1981—2013年西藏干旱时空特征分析[J].中国农学通报,2015,31(25):228-234.
[12] 詹存,梁川,赵璐.川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J].农业工程学报,2013,29(21):82-90.
[13] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
[14] 王晓峰,胡春艳,卫伟,等.基于SPI的渭北黄土高原干旱时空特征[J].生态环境学报,2016,25(3):415-421.
[15] 李树军,袁静,肖清华,等.基于SPI的潍坊市近50年的干湿特征分析[J].中国农学通报,2011,27(26):293-298.
[16] 冯禹,崔宁博,徐燕梅,等.贵州省干旱时空分布特征研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(8):82-86.
[17] 赵林,武建军,吕爱锋,等.黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析:基于标准化降雨指数[J].资源科学,2011,33(3):470-476.
[18] 赵伟,张宇,张智红,等.1981—2010年重庆地区季节性干旱时空变化特征分析[J].水土保持研究,2016,23(3):192-203.
[19] 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.
[20] 张巧凤,刘桂香,于红博,等.基于标准化降水指数的锡林郭勒盟干旱特征分析[J].自然灾害学报,2015,24(5):119-128.
[21] 高西宁,徐庆喆,丛俊霞,等.基于标准化降水指数的辽宁省近54年干旱时空规律分析[J].生态环境学报,2015,24(11):1851-1857.
[22] 白美兰,李金田,李喜仓,等.近50年内蒙古中东部地区春夏季干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):131-136.