

# 1962 – 2017 年典型半干旱草原区不同 时间尺度干旱特征分析

李 玮, 陈晓俊, 王文君, 吴英杰, 全 强, 周泉成  
(水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘 要:** 干旱是我国北方地区主要的自然灾害之一, 对干旱指标的监测分析可为地区旱情评估、预警以及为制订抗旱减灾对策提供科学依据。以内蒙古高原半干旱草原区 1962 – 2017 年  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  降水格点数据为基础, 分别计算不同时间尺度(年、季)的标准化降水指数(SPI), 通过分析其干旱频次、频率以及站次比的变化, 对研究区 1962 – 2017 年的干旱时空特征进行了分析。结果表明:近年来, 研究区干旱程度有所加剧, 且中南部地区为各类干旱事件的频发区。此外, 轻旱多发生于秋季, 且主要分布于研究区中部及南部, 而特旱事件常在夏季发生, 其高频区位于研究区西部。20 世纪 90 年代各季均出现了大范围轻旱, 夏季分别于 2001 和 2010 年出现全域性中旱及全域性特旱。

**关键词:** 典型半干旱草原区; 干旱特征; 时间尺度; 标准化降水指数; 内蒙古高原

中图分类号: P426.616; P467 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)01-0226-07

## Drought characteristics of a typical semi-arid grassland area at different time scales from 1962 to 2017

LI Wei, CHEN Xiaojun, WANG Wenjun, WU Yingjie, QUAN Qiang, ZHOU Quancheng

(Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Drought is one of the major natural disasters in north China. Monitoring and analyzing the change of drought indices can shed some light on the assessment and early warning analysis of the droughts, as well as the formulation of disaster prevention and mitigation schemes. Here, the gridded precipitation dataset ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) of a semi-arid steppe region in Inner Mongolian Plateau from 1962 to 2017 was used to calculate the standardized precipitation index (SPI) at different time scales (annual and seasonal), then the spatiotemporal variations of drought during this period was studied based on the analysis of the frequency of drought events, drought frequency and station frequency ratio. The result indicate that in recent years, the severity of drought in the study area has worsened, and the south – central regions were the high occurrence areas for different types of drought events. In addition, light droughts occurred mostly in the autumn, which were primarily located in the central and southern regions. Whereas the extreme drought events mostly occurred in the summer, and the high frequency area was located in the west of the study area. Large scale light droughts occurred in all seasons in the 1990s, the domainal moderate drought and the domainal extreme drought occurred in 2001 and 2010 in summer, respectively.

**Key words:** typical semi-arid grassland; drought characteristic; time scale; standardized precipitation index (SPI); Inner Mongolian Plateau

收稿日期:2020-06-28; 修回日期:2020-10-19

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(201802123); 中国水利水电科学研究院科研专项项目(MK2019J09); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2017BS0512)

作者简介:李 玮(1989-),男,山西忻州人,博士,工程师,主要从事半干旱地区水文过程研究。

通讯作者:陈晓俊(1983-),男,山西忻州人,硕士,工程师,主要从事牧区干旱减灾等方面研究。

## 1 研究背景

全球气候变化导致了自然生态系统中水热环节的失衡,由此造成水分缺失进而引发的干旱现象也愈发频繁<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着干旱强度、频率、范围及持续时间的不断扩大,该现象也逐渐成为全球最为严重、对人类社会产生重大影响的水文气象灾害之一<sup>[2]</sup>。据世界气象组织统计报道,全球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%。中国大部分地区受东亚季风的影响,是受干旱灾害较为严重的国家。据民政部统计,仅 2017 年全国受干旱灾害影响的农作物耕地面积就超过了  $980 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,其中  $75.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$  绝收,直接造成经济损失  $375 \times 10^8$  元。

随着世界各地干旱形势日趋严重,我国干旱的时空分布格局近年来也发生了显著的变化<sup>[3]</sup>。为了揭示干旱的发展规律,进而建立高效科学的自然灾害防治体系,业内学者就干旱特征做了大量的分析,而干旱指数的提出与应用使相关研究有了统一的标准。表征干旱的指数通常根据其影响因素类别分为单因子指数和多因子指数,其中,主要通过降水这一关键要素来描述干旱变化的指数通常称为单因子指数,该类指数可以较为准确地刻画干旱时空特征,常用的单因子指数包括降水距平百分率 ( $Pa$ ) 和标准化降水指数 ( $SPI$ );多因子指标主要从干旱形成机理的角度来描述干旱的发生过程,具有较好的物理机制,但该类指标计算复杂且资料输入具有不确定性,会在一定程度上降低指数的敏感性,常见指标有帕默尔干旱指数 ( $PDSI$ )、综合气象干旱指数 ( $CI$ ) 和标准化降水蒸散指数 ( $SPEI$ ) 等<sup>[4-6]</sup>。国内外研究人员结合当地实际旱情对各类指数的适用性进行了检验分析<sup>[7]</sup>,其中,多数学者认为  $SPI$  的应用消除了降水的时空差异,使干旱具有时空可比性<sup>[8]</sup>,同时指出该指标具有参数容易获取、计算特性稳定以及对干旱响应敏感等优势<sup>[9]</sup>。

位于干旱半干旱区的内蒙古草原是生态环境系统最为脆弱的地区之一,其对气候变化的响应也最为敏感<sup>[10]</sup>。气候变化使得该区域多旱少雨的形势更为严峻,严重影响了当地农、牧民的生产和生活,制约了地区的经济发展。之前也有学者就该地区的干旱特征进行过研究,但大多利用当地气象站点的降水监测数据<sup>[11]</sup>,研究精度会受到气象站点不足且分布不均的影响,因此,本研究尝试以格点降水数据为基础,采用  $SPI$  分析内蒙古中部草原区——锡林

郭勒盟在年、季尺度下干旱的时空分布特征,以期为牧区抗旱减灾和生态保护提供理论依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

选取锡林郭勒盟为研究区,该区域位于内蒙古中部,地处东经  $115^{\circ}13' \sim 117^{\circ}06'$ 、北纬  $43^{\circ}02' \sim 44^{\circ}52'$  之间,总面积约  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中草原面积占 95%,是我国农牧交错带的重要组成部分。研究区属于干旱半干旱大陆性气候,且地势高低起伏,降水空间分布差异较大。此外,研究区还经常发生暴雨、干旱、霜冻、风雪等自然灾害,其中尤以干旱为甚。2000 年以后该地区发生连续的四季干旱,使当地遭受了严重的损失。2000 - 2001 年锡林郭勒盟旱情加剧,降水量和土壤水分达到历史最低,致使牧草无法生长、牲畜大量死亡;2006 年研究区遭受了大面积干旱,约有  $2 \times 10^8 \text{ hm}^2$  草场受灾,此次旱灾导致大量牲畜死亡,牧民经济财产损失严重;2018 年 6 月中旬,盟内 9 个牧业旗的  $0.129 \times 10^8 \text{ hm}^2$  草场遭受旱灾,受灾牧民群众达到  $12.6 \times 10^4$  人,受灾牲畜  $651 \times 10^4$  头(只)。在此背景下,研究区草原退化严重,很多河流出现断流等情况。

### 2.2 数据来源

由于研究区锡林郭勒盟具有长序列实测数据的气象站点较少,不能全面覆盖整个研究区,因此,本研究选用 1962 - 2017 年中国地面降水  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  降水格点数据进行干旱特征分布研究。该数据考虑了高程对降水空间分布的影响,由全国 2 400 多个国家气象站实测降水数据插值而成,具有较高的精度<sup>[12]</sup>。同时,本研究选取  $SPI$  来描述研究区干旱的时空分布特征。研究区气象站点和降水格点分布见图 1。

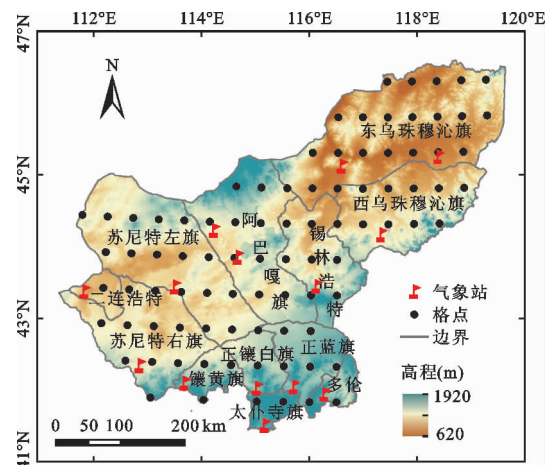


图 1 研究区气象站点和降水格点分布

### 2.3 研究方法

*SPI* 是表征某时段降水量出现概率多少的指标,该指标可以较好地反映不同时空尺度上的干旱强度和持续时间。在 *SPI* 计算过程中,认为序列内降水量变化服从 gamma( $\Gamma$ ) 分布,通过正态标准化处理其降水  $\Gamma$  分布概率后,应用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级<sup>[13]</sup>。计算公式<sup>[14]</sup> 如下:

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

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  分别为形状参数和尺度参数; $\Gamma(\alpha)$  为 gamma 函数。

运用最大似然法估计  $\alpha$  和  $\beta$  值:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{4A} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

式中: $n$  为数据序列长度。

进一步可以得出:

$$G(x) = \int_0^\infty g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (6)$$

当  $t = x/\beta$  时:

$$G(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

实际降水量可以为 0,则累积概率可用方程式 (8) 表示。

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (8)$$

式中: $q$  为降水量为 0 时的概率,即  $q = m/n$ , $m$  为该序列中降水量为 0 的年份。

进一步由方程式 (9) ~ (12) 转换为标准正态分布函数。

当  $0 \leq H(x) \leq 0.5$  时:

$$SPI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{H(x)^2} \right]} \quad (10)$$

当  $0.5 < H(x) \leq 1$  时:

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

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{1 - H(x)^2} \right]} \quad (12)$$

式中: $c_0 = 2.515517$ ;  $c_1 = 0.802853$ ;  $c_2 = 0.010328$ ;

$d_1 = 1.432788$ ;  $d_2 = 0.189269$ ;  $d_3 = 0.001308$ 。

根据 *SPI* 指数的正态分布曲线及干旱等级标准<sup>[15]</sup>,干旱等级划分如表 1 所示。

表 1 标准化降水指数 (*SPI*) 干旱等级

等级	类型	<i>SPI</i> 值
I	无旱	$SPI > -0.5$
II	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
III	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
IV	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
V	特旱	$SPI \leq -2.0$

基于此,通过计算干旱频率和干旱面积率来描述研究区的干旱特征。其中,干旱频率为 1962 - 2017 年某格点达到某级别干旱的年数占总年数的比例;干旱面积率为 1962 - 2017 年达到某级别干旱的格点数与总格点数的比值,并将其影响范围做如下划分:0 ~ 10% 为无明显干旱;10% ~ 25% 为局域性干旱;25% ~ 33% 为部分区域性干旱;33% ~ 50% 为区域性干旱;50% ~ 100% 为全域性干旱<sup>[16]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 年尺度干旱特征分析

通过计算 1962 - 2017 年研究区 88 个降水格点的 *SPI* 值,并进一步识别其对应程度的干旱事件,最终得出的不同时段各类干旱事件的频次及其变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可知,各时段内研究区发生轻旱的频次最高,之后依次为中旱、重旱和特旱。1962 - 2017 年研究区轻旱频次有下降趋势,其中 20 世纪 80 年代轻旱频次最低,1991 - 2010 年其频次有所上升,而 2010 年之后,轻旱频次又有大幅减少的趋势。整个研究序列内中旱频次呈现上升趋势,并在 2001 - 2010 年之间达到最高的 133 频次,其次是 2010 年之后的 69 频次。与此同时,重旱频次也呈上升趋势,且同样在 2001 - 2010 年之间达到最高频次。就特旱而言,其频次也呈上升趋势,但在 1981 - 1990 年间未检测到特旱事件的发生,在此之后,特旱频次大幅上升,并在 2001 - 2010 年间达到最高。总体而言,研究区轻旱频次有所减少,但其余 3 类干旱事件的频次均有增加趋势,且各类干旱事件频次均在 2001 - 2010 年间达到最高,由此可以判定,近年来研究区的干旱程度有所加剧。

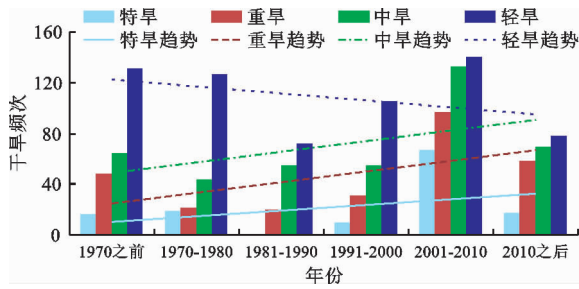


图 2 1962 - 2017 年研究区年尺度不同干旱事件频次及变化趋势

将各格点 1962 - 2017 年的 *SPI* 值进行整体分析,刻画出研究区不同干旱程度的空间分布如图 3 所示。由图 3 可知,研究区各地均发生过轻旱事件,其干旱率在 3.58% ~ 26.76% 之间(图 3(a)),中部区域干旱率较低,而中南部以及南部区域轻旱发生

率相对较高;同样地,中旱事件也覆盖了整个研究区,其干旱率为 1.79% ~ 16.06% (图 3(b)),中旱发生的高频区与低频区空间分布并不集中,中南部地区为中旱相对高发区;与中旱频发区相似,中南部地区也是重旱高发区,其干旱率最高为 12.50%,同时,中部以及东部地区也有重旱事件发生,但并不是整个区域都发生过重旱事件(图 3(c));研究区特旱频率最高为 7.14%,主要集中在西部、中南部和东北部地区(图 3(d)),而北部地区则无特旱事件。从干旱整体空间分布来看,研究区发生轻旱、中旱、重旱以及特旱的频率逐级下降,即各地区更易发生轻旱,发生特旱的区域相对较少。此外,研究区中北部发生各类干旱事件的频率较低,而中南部地区为各类干旱事件的频发区。

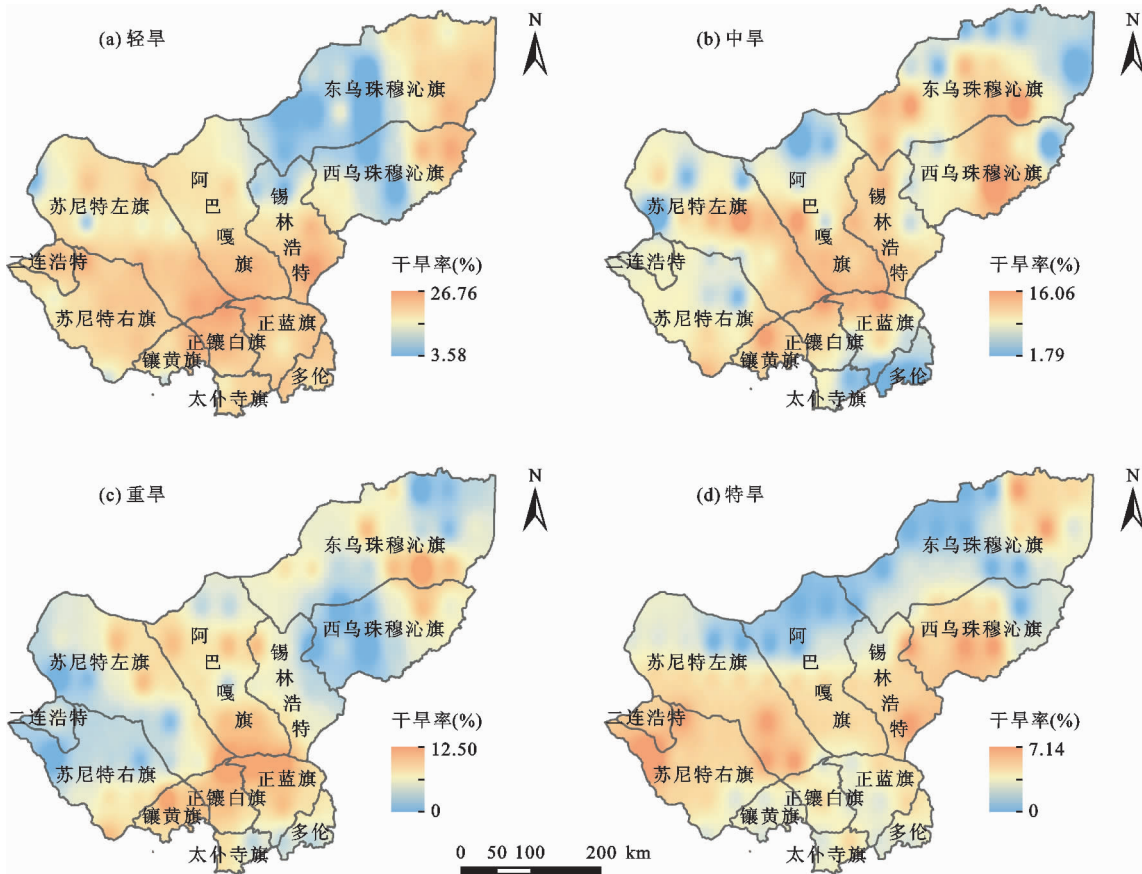


图 3 1962 - 2017 年研究区年尺度不同干旱程度空间分布

### 3.2 季尺度干旱特征分析

基于 *SPI* 的季尺度不同干旱事件随时间变化的趋势如图 4 所示。由图 4 可知,春季特旱频次呈上升趋势,其余 3 类干旱的频次均趋于下降。在 1970 年之前和 1981 - 1990 年间没有特旱事件发生,而到了 2010 年之后,春季特旱达到了 89 频次,超过了同

期轻旱的频次,除此之外,其余各时段轻旱频次都为最高(图 4(a));夏季各类干旱事件的频次均呈上升趋势,研究区 2001 - 2010 年间中旱频次为最高的 162 频次,然后依次为轻旱、特旱以及重旱,且该时段各类干旱事件的频次均高于其余时段相应类型干旱的频次,由此可知,研究区在 2001 - 2010 年夏季

受到干旱影响最为严重(图4(b));秋季除中旱趋势呈下降外,其余3类干旱均呈微弱的上升趋势,且各时段各类干旱事件的频次大小依次为轻旱、中旱、重旱和特旱(图4(c));研究区冬季特旱频次呈微弱的上升趋势,其余类型干旱频次表现为下降趋势。其中,在20世纪70年代中旱频次为最高的159频

次,而在2001-2010年间,重旱为76频次,超过了同期中旱的频次(图4(d))。通过比较各类干旱事件在不同季节的频次可知,研究区轻旱多发生于秋季,该季节轻旱事件平均为136频次;中旱和重旱事件则多发生于冬季,平均分别为84频次和43频次;而特旱事件常在夏季发生,平均为27频次。

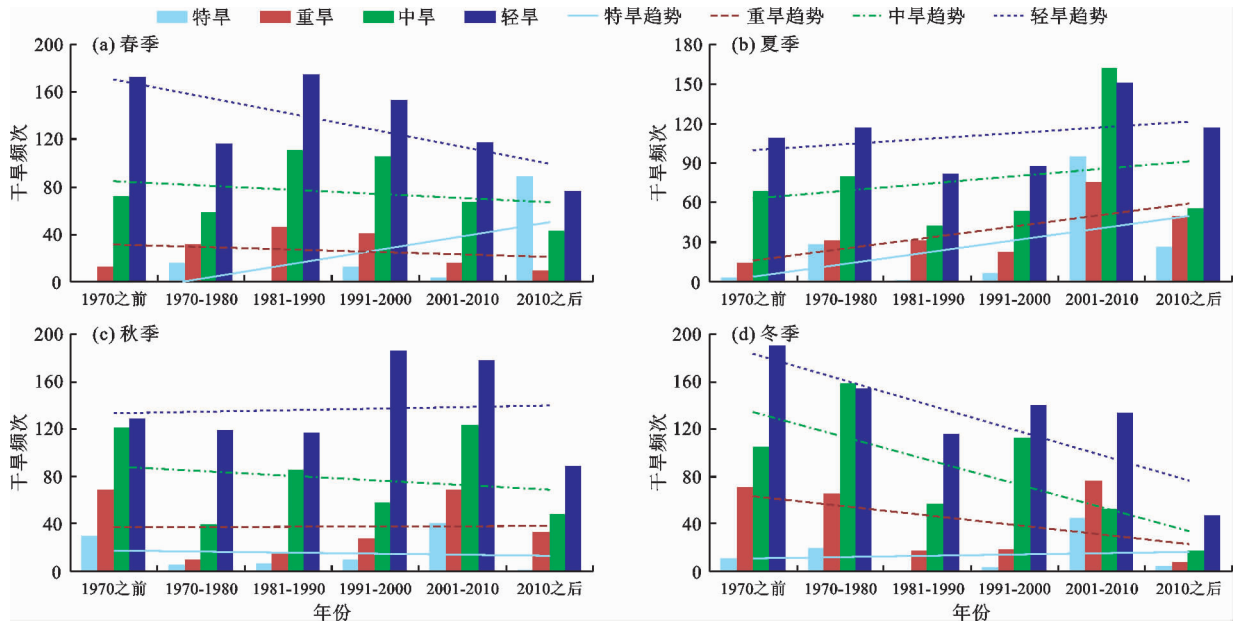


图4 1962-2017年研究区季尺度不同干旱事件频次及变化趋势

1962-2017年研究区季尺度不同干旱程度空间分布见图5,根据图5就不同季节的干旱空间分布进行分析。

春季轻旱多发生于研究区中部和西部,其中西部地区干旱率最高,为28.57%,而东北部地区春季发生轻旱的概率相对较低(图5(a))。春季发生中旱事件的概率在3.57%~17.86%之间,且多发生于中部及西南部地区(图5(b))。春季重旱则多发生于研究区南部,而西部等局部地区并没有重旱事件的发生(图5(c))。春季特旱事件覆盖了整个研究区,但其干旱率较低,尤其在中西部区域,干旱率仅为1.79%,而东北部特旱发生率相对较高,为7.14%(图5(d))。研究区各地在夏季均有轻旱和中旱事件发生,只是其空间分布有所差异,其中轻旱主要分布于北部及东北部,其发生率最高为23.20%,而中旱则主要集中在研究区中部,频率最高为16.06%,低频区的干旱率为1.80%(图5(e)、5(f))。与上述情形不同,重旱和特旱均只发生于局部区域,其中重旱常发生于研究区西部及南部地区,而特旱则主要分布在中部及东北部,其最大干旱

率分别为10.71%与7.14%(图5(g)、5(h))。研究区秋季轻旱频率在3.61%~28.55%之间,其频发区位于研究区中部及南部(图5(i)),与轻旱的空间分布相似,中旱的高频区也在研究区中部及南部,但其干旱率有所下降,在3.57%~17.86%之间(图5(j))。此外,秋季重旱与特旱均未覆盖整个研究区(图5(k)、5(l)),其中,特旱事件的空间分布相对集中,其高频区位于研究区北部及西北部。研究区冬季也常发生干旱,且中旱与重旱的干旱率在四季内均为最高,分别分布在研究区东北部和南部地区,而冬季特旱主要集中在研究区中部,其干旱率最高为5.36%(图5(m)~5(p))。

1962-2017年研究区季尺度不同干旱程度事件站次随时间的变化如图6所示。由图6(a)可知,局域性轻旱在研究序列各季节均较为常见,且于1984年春季发生了全域性轻旱。夏季不仅有19a发生过局域性轻旱,而且还出现了4a部分区域性轻旱及3a区域性轻旱,此外,在2017年夏季还出现了全域性轻旱。秋季和冬季局域性轻旱几乎贯穿整个研究期,冬季在1982年发生全域性轻旱。

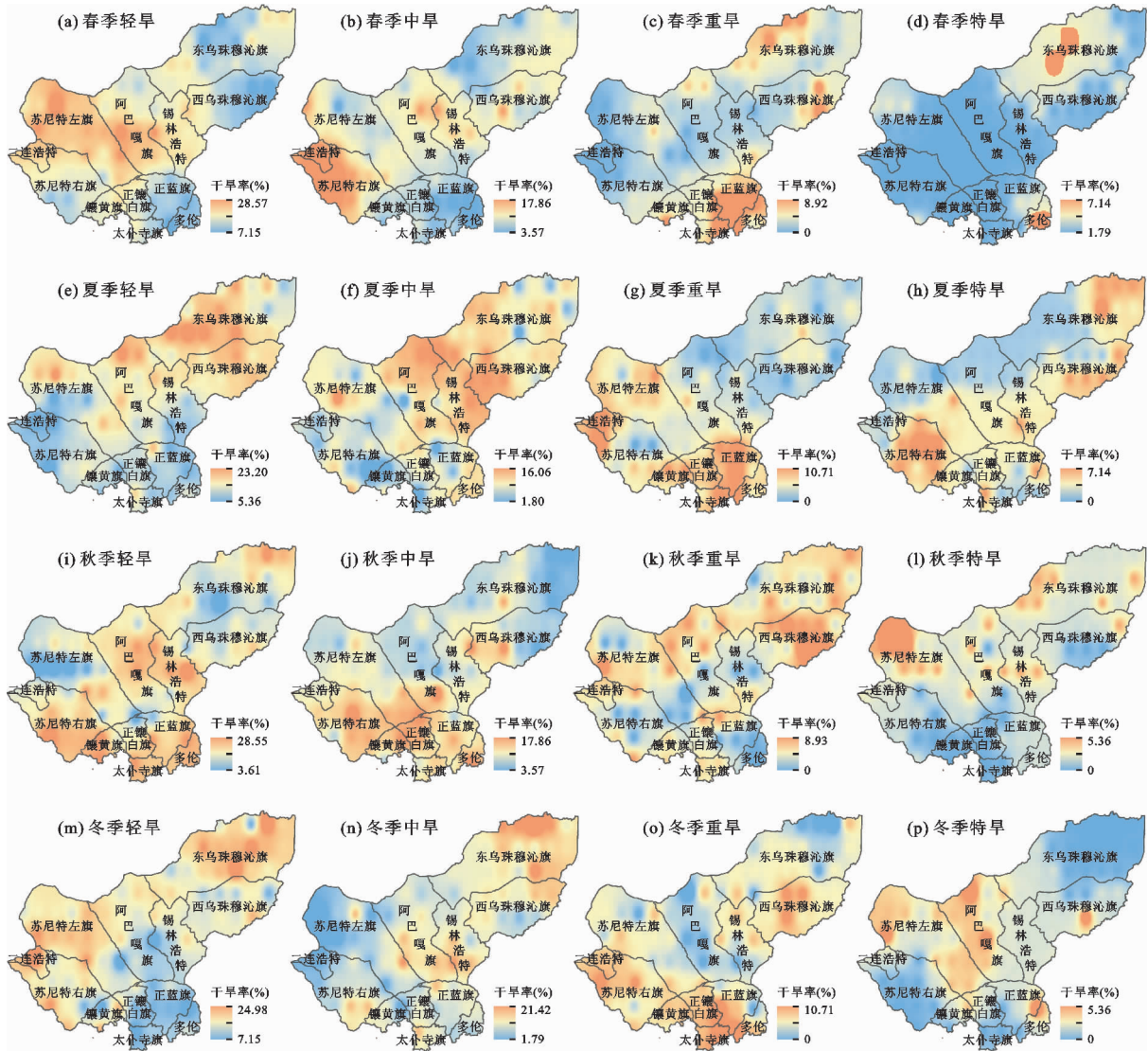


图 5 1962 - 2017 年研究区季尺度不同干旱程度空间分布

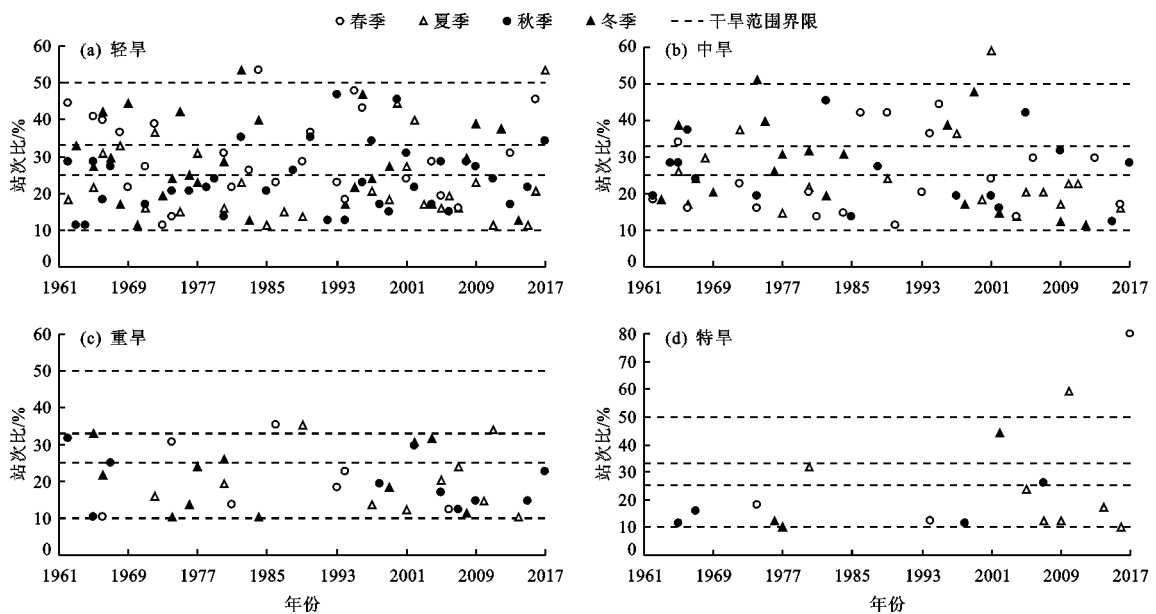


图 6 1962 - 2017 年研究区季尺度不同干旱程度事件站次比

总体来看,各季在20世纪90年代均较为集中地出现了大范围轻旱;就中旱而言(图6(b)),夏冬两季分别在2001和1974年发生过全域性中旱,同时,夏季还在1972和1997年发生过区域性中旱,而春、秋、冬三季分别有5、3和4 a出现区域性中旱,除此之外,研究区冬季还曾在70年代中期到80年代中期发生过4次部分区域性中旱。整个研究期内,夏、冬两季均有10 a发生了局域性中旱,且多数发生在2000年以后;由图6(c)可以看出,研究区各季在1993年之后出现了大范围重旱事件,但并未发生过全域性重旱,只有1986年春季和1989、2011年夏季发生了区域性重旱;由图6(d)可知,夏季有7 a发生了特旱事件,其中在2010年发生了全域性特旱,1980年发生部分区域性特旱,2005、2007、2009、2014及2016年发生局域性特旱,仅冬季在2002年发生过区域性特旱,而春季在1974和1994年发生了局域性特旱,在2017年发生了全域性特旱。

## 4 讨论

锡林郭勒盟位于内蒙古高原,为大兴安岭和阴山山脉所包围,暖湿气流难以入境,从而形成蒸发强烈、降水不足的气候特征<sup>[17]</sup>。1962-2017年研究区的干旱类型主要为轻旱和中旱,其程度有加剧的趋势,这与大多数学者的研究成果一致<sup>[11]</sup>,但在局部地区存在偏差,这可能与所选气象数据有关,传统干旱研究是基于降水站点数据进行分析,而本研究则是基于降水格点数据进行分析,在一定程度上克服了传统站点数据以点概面的缺陷,提高了检验精度。

有研究表明,近几十年来高纬度环流异常导致气压升高以及东亚季风减弱使得水汽向北输送减少,这是我国北方干旱严重的主要原因之一<sup>[18]</sup>。尤其是近30年来,锡林郭勒盟夏季降水量减少趋势显著,导致研究区在该时间段干旱程度加剧<sup>[19]</sup>,这一现象与本研究结果一致。而由于东亚季风发生了由弱到强的年代变化,才使得近年来研究区各季干旱略有缓解<sup>[20]</sup>。此外,人类对流域下垫面改造引起的土地利用与覆被变化作为重要的辐射强迫也会对气候变化产生重要影响,因此,研究区干旱的空间分布差异也与当地生态环境保护措施的实施有一定关系,在以后的研究中应进一步考虑相关因素。文中所选标准化降水指数仅包含了降水这一因子,而导致干旱的因素错综复杂,所以,进一步综合考虑各项水文气象要素来明晰干旱的演变进而对其进行预测

预警将是以后研究的重点。

## 5 结论

本文基于降水格点数据,采用标准化降水指数分析了锡林郭勒盟近1962-2017年不同时间尺度干旱的时空分布,研究结果较好地反映了研究区的干旱演变,主要结论如下:

(1)研究区发生轻旱、中旱、重旱以及特旱的频率在逐级下降,其中,中、南部地区为各类干旱事件的频发区。1962-2017年研究区轻旱频次有所降低,而中旱、重旱以及特旱的频次均有所增加,由此可知,研究区的干旱程度有所加剧。

(2)研究区轻旱多发生于秋季,且主要分布于研究区中部及南部,中旱和重旱则多发生于冬季,分别集中在研究区东北部和南部,而特旱事件常在夏季发生,其高频区位于研究区西部。此外,夏季不同程度干旱事件的频次均呈上升趋势,并在2001-2010年间受到干旱影响最为严重。

(3)研究区20世纪90年代各季均出现了大范围轻旱,其中春、夏、冬三季分别于1984、2017和1982年发生全域性轻旱。夏、冬两季还分别在2001和1974年发生过全域性中旱,而这两季的局域性中旱主要发生在2000年以后。研究区各季节在1993年之后较为集中地发生了大范围重旱事件,并于2010年夏季和2017年春季出现了全域性特旱。

### 参考文献:

- [1] WILHITE D A. Drought: A global assessment[M]. New York: Routledge, 2000.
- [2] 郭梦,张奇莹,钱会,等. 基于SPEI干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 127-132.
- [3] 陈琰,肖伟华,王建华,等. 基于SPEI的三江平原干旱时空分布特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(2): 122-129.
- [4] 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.
- [5] 马琼,张勃,王东,等. 1960-2012年甘肃黄土高原干旱时空变化特征分析——基于标准化降水蒸散指数[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1834-1841.
- [6] 张璐,朱仲元,王慧敏,等. 基于SPEI的锡林河流域气象干旱风险分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 220-226.

(下转第240页)

- [11] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520:157-167.
- [12] HUA Yanyan, CUI Baoshan, HE Wenjie, et al. Identifying potential restoration areas of freshwater wetlands in a river delta[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71:438-448.
- [13] CONG Pifu, CHEN Kexin, QU Limei, et al. Dynamic changes in the wetland landscape pattern of the Yellow River Delta from 1976 to 2016 based on satellite data[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(3):372-381.
- [14] LIU Qingsheng, SONG Hongwei, LIU Gaochuan, et al. Evaluating the potential of multi-seasonal CBERS-04 imagery for mapping the quasi-circular vegetation patches in the Yellow River Delta using random forest[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10):1216.
- [15] 陈琳, 任春颖, 王灿, 等. 6个时期黄河三角洲滨海湿地动态研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(2):179-186.
- [16] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(1):110-118.
- [17] 任玲玲, 栗云召, 于森, 等. 1984-2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4):493-502.
- [18] 孔祥伦, 李云龙, 韩美, 等. 1986-2016年黄河三角洲土地利用/覆被变化及景观格局分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2020, 40(4):122-131.
- [19] 周文佐. 近10a黄河三角洲LUCC及其驱动因素分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):341-345.
- [20] 张成扬, 赵智杰. 近10年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(1):151-158.
- [21] 陈文娇, 翁永玲, 路云阁. 基于多级决策树分类的土地利用与覆盖信息提取[J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(9):63-68+73.
- [22] 李静. 基于遥感和GIS的黄河三角洲土地利用/覆被变化及其驱动力研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2004.
- [23] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 黄河三角洲土地利用/覆盖格局与演化分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5):158-161.

(上接第232页)

- [7] YU Xingyang, HE Xingyuan, ZHENG Haifeng, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China[J]. *Natural Hazards*, 2014, 71:275-289.
- [8] 林慧, 王景才, 黄金柏, 等. 基于SPI和SPEI的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6):59-67.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于SPI指数的1981-2010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.
- [12] 李玮, 段利民, 刘廷玺, 等. 1961-2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(11):2153-2165.
- [13] 张强, 高歌. 我国近50年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. *科技导报*, 2004(7):21-24.
- [14] 任余龙, 石彦军, 王劲松, 等. 1961-2009年西北地区基于SPI指数的干旱时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4):938-948.
- [15] 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/T 20481-2017[S]. 北京:中国质检出版社, 2017.
- [16] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于SPEI的中国西南地区1961-2012年干旱变化特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3):192-198.
- [17] CHEN Jun, WANG Yuhui. Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956-2009[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22):6925-6935.
- [18] 程龙, 刘海文, 周天军, 等. 近30余年来盛夏东亚东南季风和西南季风频率的年代际变化及其与青藏高原积雪的关系[J]. *大气科学*, 2013, 37(6):1326-1336.
- [19] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近30年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(4):86-93.
- [20] 李晓丽, 张成君, 杨奇丽, 等. 定西鲁家沟全新世以来的气候变迁及人地关系演化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(11):88-93.