

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.029.

王思楠, 王文君, 吴英杰, 等. 基于有效干旱指数的锡林郭勒干旱时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 413-421.

Wang Sinan, Wang Wenjun, Wu Yingjie, et al. Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Drought in Xilin Gol Based on Effective Drought Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 413-421.

基于有效干旱指数的锡林郭勒干旱时空分布特征

王思楠, 王文君, 吴英杰, 李 玮, 张伟杰, 陈泽勋

(中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038)

摘 要: [目的] 识别锡林郭勒草原干旱事件、干旱频率和干旱强度, 明确锡林郭勒气象干旱场, 进而为锡林郭勒减轻干旱引发的环境和经济问题。[方法] 选取 1969—2018 年锡林郭勒地区 9 个气象站点逐月观测数据, 计算有效干旱指数 (effective drought index, EDI), 结合 Mann-Kendall 检验、经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分解、干旱定量表征等方法, 分析了 60 年来锡林郭勒干旱时空格局特征。[结果] 锡林郭勒地区的年平均 EDI 指数以 0.029/10 a 的速度下降, 干旱趋势明显增强, 平均每年发生 0.5 次干旱事件。锡林郭勒正常发生的频率为 67.17%~72.65%, 发生重旱的频率为 0.02%~0.99%, 发生不同干旱的频率差异性较大, 西南部、中部是干旱强度较高的区域。锡林郭勒前 2 个主要特征向量的方差贡献率分别达 52.75% 和 14.38%, 空间模态表现为一致型和东南—西北反位相型。[结论] 考虑有效降水的 EDI 指数在揭示草原干旱时空变化趋势方面更有优势, 可以用来识别气象干旱时空模态的变化情况。

关键词: 有效干旱指数; 干旱; 草地; 干旱事件; 锡林郭勒

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0413-09

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Drought in Xilin Gol Based on Effective Drought Index

Wang Sinan, Wang Wenjun, Wu Yingjie, Li Wei, Zhang Weijie, Chen Zexun

(Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research

Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to identify drought events, drought frequency and drought intensity in grassland of Xilin Gol, to understand the meteorological drought field in Xilin Gol, and then to alleviate the environmental and economic problems caused by drought in Xilin Gol. [Methods] The month-by-month observation data of nine meteorological stations in Xilin Gol region from 1969 to 2018 were selected to calculate the effective drought index (EDI). The spatial and temporal patterns of drought in Xilin Gol over the past 60 years were analyzed by combining Mann-Kendall test, empirical orthogonal function (EOF) decomposition and quantitative drought characterization methods. [Results] The annual average EDI index of Xilin Gol region decreased at the rate of 0.029/decade, and the drought trend increased significantly, with an average of 0.5 drought events per year. The frequency of normal occurrences in Xilin Gol ranged from 67.17 to 72.65%, and the frequency of severe droughts ranged from 0.02 to 0.99%, with a large variability in the frequency of different droughts, and the southwest and central regions being the regions with higher drought intensity. Contribution of variances of the previous two major characteristic vectors of Xilin Gol reached up to 52.75% and 14.38%, respectively, and the spatial mode showed a consistent type and southeast-northwest inversion phase type. [Conclusion] EDI index considering effective precipitation has more advantages in revealing the spatiotemporal variation trend of drought in grassland, and can be used to identify the spatio-

收稿日期: 2023-05-06

修回日期: 2023-05-25

资助项目: 中国水利水电科学研究院基本科研专项 (MK2023J07); 内蒙古自然科学基金 (2023QN05003)

第一作者: 王思楠 (1993—), 男, 山西应县人, 博士, 工程师, 主要从事大范围干旱监测模拟研究。E-mail: nmgnxydx2016@163.com

通信作者: 吴英杰 (1982—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 高级工程师, 主要从事牧区干旱与减灾研究。E-mail: 508188330@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

temporal variation of meteorological drought.

Keywords: effective drought index; drought; grassland; drought event; Xilin Gol

草原是世界上分布最广的植被类型之一,覆盖了地球陆地表面的五分之一,由于气候变化、人口增长和社会经济发展等原因,中国一半以上的草原都出现了不同程度的退化^[1]。草原退化已经减少碳封存并且还导致了严重的环境和社会问题,例如植被生产力下降和土壤质量下降以及沙尘暴^[2]。

干旱是一种常见的自然灾害,有可能发生在任何地区,干旱过程是复杂和自然的^[3]。它对农业、牧业、水资源和社会也有很大的影响。由于全球气候变暖,干旱经常发生,并且有明显的上升趋势。它直接影响内蒙古草原的农牧业发展^[4]。因此,干旱评估和监测对于减少损失和确保人员和财产安全至关重要。虽然干旱现象非常复杂,仍可以通过干旱指数来表征,例如标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[5-7]、标准降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[8-11]、旱侦测指数(reconnaissance drought index, RDI)^[12]、帕尔默干旱严重指数(palmer drought severity index, PDSI)^[13]和有效干旱指数(effective drought index, EDI)^[14]。干旱指数可以通过干旱强度、干旱事件和干旱频率等基本属性来定量描述^[15]。其中 SPI 使用最为广泛,但是 SPI 是通过一段时间降雨的累积概率计算而得到,存在局限性。SPEI 不仅考虑降水因素外,还考虑了潜在蒸散发等因素的影响^[16]。但是,使用不同的潜在蒸散发计算方法会使同一时期产生不同的 SPEI 值。为了克服这些限制,Deo 等^[17]使用 EDI 指数量化干

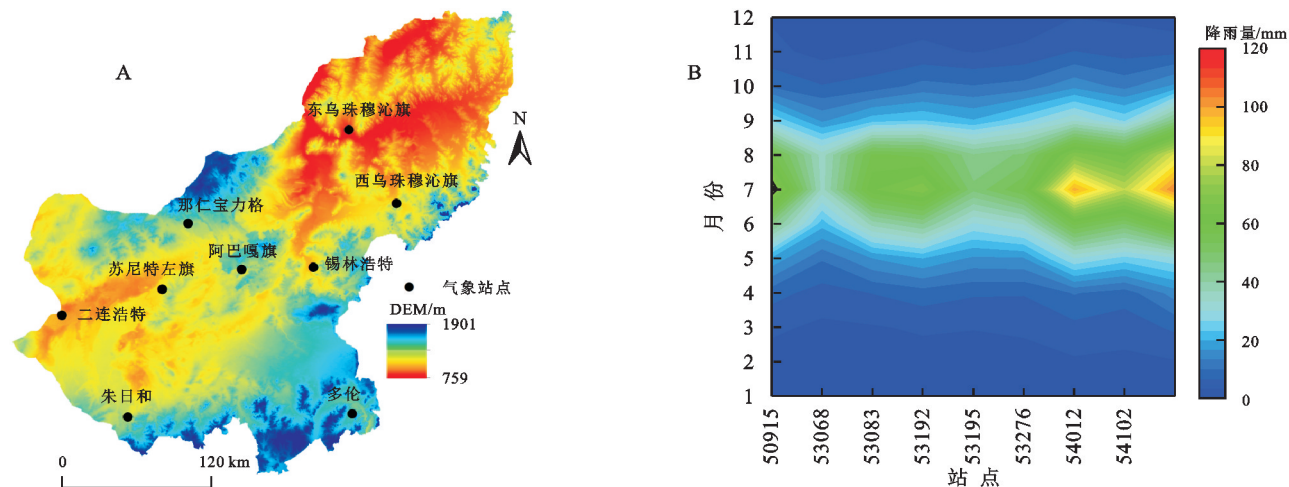
旱严重程度,与其他干旱指数相比,EDI 指数也能够反映受某一时段降水突然增多或减少引起的旱情变化。一些研究已经表明了 EDI 指数的适宜性。特别是 Kamruzzaman 等^[18]在监测孟加拉国长期和短期干旱时,证明 EDI 比 SPI 更有优势。

锡林郭勒草原是生态环境中最脆弱的地区之一,其对干旱的反应也极为敏感。干旱导致地表水和地下水的短缺,从而对草的生长和牲畜的饲养产生破坏性影响。许多学者利用 SPI 和 SPEI 指数对锡林郭勒的干旱特征进行了研究^[19-20],还没有使用 EDI 指数来描述干旱事件的特征。因此,本研究首先利用研究区气象站点的 1969—2018 年逐月降雨数据,选择 EDI 指数作为干旱评价指标,其次从干旱事件、干旱频率和干旱强度入手,深入探究锡林郭勒的干旱时空演变特征,最后利用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)探讨干旱的时空分布模态,以期草原干旱减灾工作提供理论依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原是欧亚草原带的腹地,位于内蒙古自治区中部,介于 111°08′—120°07′E, 41°35′—46°40′N 之间。地势南高北低,以高平原为主,各种地貌相间分布。海拔 700~2 000 m,年降水量约为 340 mm,降水量的月变化较大,降雨主要集中在 6—8 月。气象站点分布如图 1A 所示。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号蒙 S(2017)027 号的标准地图制作,底图未做修改,50915 为东乌珠穆沁旗,53068 为二连浩特,53083 为那仁宝力格,53192 为阿巴嘎旗,53195 为苏尼特左旗,53276 为朱日和,54012 为西乌珠穆沁旗,54102 为锡林浩特。下图同。

图 1 研究区气象站点分布及 1969—2018 年不同气象站月降雨时间变化

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the study area and variation of monthly rainfall time at different meteorological stations during 1969—2018

1.2 数据来源

1969—2018 年 9 个气象站的月降雨数据(图 1B)来自中国国家气象信息中心。

1.3 有效干旱指数

EDI 是由有效降水(effective precipitation, EP)概念监测干旱持续时间和严重程度。他们将有效降水量定义为当月降雨量和前一特定时期的加权降雨量的函数,使用依赖时间的减少函数计算。本研究采用 EDI 计算过程如下:

首先,由于降水而储存的水积累超过一年,同时也考虑了由于蒸发而造成的损失。

$$EP_{n,i} = \sum_{n=1}^i \lceil (\sum_{m=1}^i P_m) / n \rceil \tag{1}$$

式中:EP 为月累计有效降水量; P_m 为该月前 m 个月的降水量; n 为前一个月的持续时间; i 为总降雨持续时间,初始值为 12 个月(总降水持续时间)。因此,实际干旱指数是从降水开始之日起计算一年。例如,如果一个月的降雨量达到 100 mm,那么这个月的降雨量随时间的增加会逐渐减少,12 个月后减少 0 mm。

其次,计算月累计有效降水量与 30 a 同期平均有效降雨量之间的差值,计算公式如下:

$$DEP = EP - MEP \tag{2}$$

式中:MEP 为每个月的平均有效降水量;DEP 为月累计有效降水量与 30 a 同期平均有效降雨量之间的差值。

$$EDI = DEP / ST(DEP) \tag{3}$$

式中:EDI 为有效干旱指数;ST(DEP)为月累计有效降水量与 30 a 同期平均有效降雨量之间差值的标准差。DEP 负值表示这月较平常来说更为干旱。如果 DEP 连续为负的月数超过 12 个月,则重新计算公式(1)和公式(3),干旱等级按照 Deo 等^[17]提出的 EDI 分类方法进行分类(表 1)。除此之外,利用反距离加权插值法(inverse distance weight, IDW)量化了干旱事件、干旱频率和干旱强度的空间分布特征。

表 1 EDI 分类阈值

Table 1 EDI classification threshold

等级	EDI 值
正常	$-1 < EDI \leq 1$
轻度干旱	$-1.5 < EDI \leq -1$
中度干旱	$-2 < EDI \leq -1.5$
重度干旱	$EDI \leq -2$

1.4 Mann-Kendall 趋势检验法

对于样本量为 n 的时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 构造一个统计变量 S_k , S_k 为样本第 i 时刻数值大于 j 时刻数值累计个数:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k = 2, 3, \dots, n \tag{4}$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \tag{5}$$

假设时间序列 X 随机且独立,近似服从正态分布,定义统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \tag{7}$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \tag{8}$$

式中: $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 分别为累积数的均值和方差; UF_k 为标准正态分布。

1.5 经验正交函数分解

经验正交函数分解可以从复杂的干旱变量场中分解出不同的时空模态^[21]。并将干旱指数以矩阵形式给出:

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: m 为观测站; n 为时间序列长度

2 结果与分析

2.1 干旱年际变化及突变检测

锡林郭勒年平均 EDI 值是 9 个气象台站年值的平均值,所有台站均匀分布在锡林郭勒各地区,具有很好的代表性。从图 2A 可以看出,1969—2018 年,锡林郭勒地区的年平均 EDI 指数以 0.029/10 a 的速度下降,干旱趋势明显增强。在 1980—2000 年 EDI 值一般大于 0,处于一个稳定的时期,而在 1970—1980 年变化则十分剧烈,说明这段时间干湿交替比较明显。整体来看,EDI 变化主要在 $-1.5 \sim 1.5$,锡林郭勒 1969—2018 年平均每年发生 0.5 次干旱事件,平均约 2 a 一次,其中 2000 年最为突出,发生中旱、重旱以及总数最多,共 2.3 次。

图 2B 是锡林郭勒有效干旱指数 M-K 检验结果。由图可知,1969—2000 年这一时间段干湿交替出现,正序列曲线 UF 与反序列曲线 UB 有 6 个交点,即 1972 年、1974 年、1978 年、1980 年、1990 年以及 1995 年,然而这些交点都没有超过 0.05 显著线。进一步通过滑动 t 检验发现只有 1995 年为显著的突变年。1995 年的 EDI 值为 0.78。2000 年以后主要为干旱期。

2.2 干旱的空间分布特征

由图 3 可知,锡林郭勒正常发生的频率为 67.17%~

72.65%, 发生重旱的频率为 0.02%~0.99%, 发生不同干旱的频率差异性较大。锡林郭勒西部、西北部、东南部容易发生干旱, 特别是轻旱, 而中部、东北部发生干旱的频率较低, 一般情况, 西北部旱频率大于西部和东

南部, 具有明显的地带特征。轻旱频率高的地方主要在那仁宝力格和朱日和附近; 重旱频率高的地方主要在多伦附近; 重旱频率高的地方主要在多伦和二连浩特。不同干旱等级在频率上出现不同的地方。

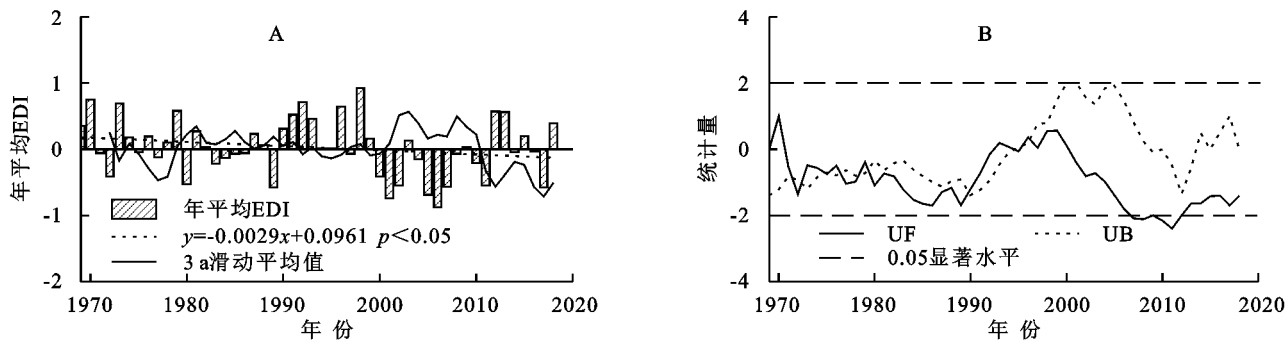


图 2 1969—2018 年有效干旱指数时间变化特征及有效干旱指数 Mann-Kendall 检验

Fig. 2 Temporal variation of effective drought index and Mann-Kendall test of effective drought index during 1969–2018

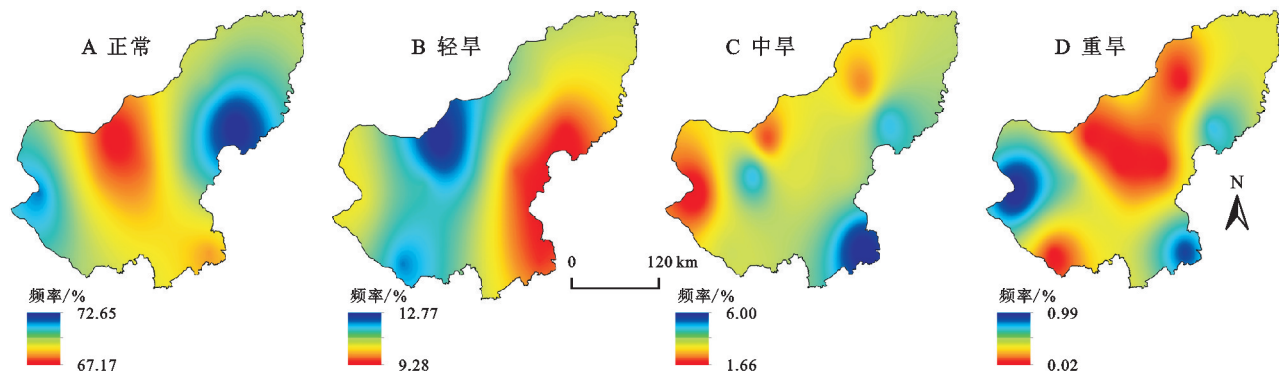


图 3 不同干旱程度下发生的频率结果

Fig. 3 Results of frequency of occurrence under different drought degree

锡林郭勒的西南部、中部是干旱强度较高的区域(图 4)。主要是高纬度环流异常导致气压升高以及东亚季风的年代际减弱, 向北输入的水汽减少, 表现为连续降水日数和降水强度的减少^[22], 最终使得锡林郭勒降水量进一步趋于下降。3—5 月由于降雨量稀少, 土壤蒸发量大, 使其干旱空间分布范围较大。其中 4 月份各气象站点的平均干旱强度为 8.51, 干旱强度在平均值以上的站点个数为 5 个, 占比约为 55.56%, 主要分布在东北部的东乌珠穆沁旗、中部的那仁宝力格、西南部二连浩特、朱日和, 其中那仁宝力格的干旱强度达到了 13.09。6—8 月降水量较多, 而降水的性质主要是对流性降水, 导致干旱呈现出南高北低的分布情况。9—12 月干旱强度空间分布从西南向东北逐渐变低, 干旱强度高值出现在西南部。主要是该时间段降雨量稀少, 其中 12 月份各气象站点的平均干旱强度为 13.65, 干旱强度在平均值以上的站点个数为 4 个, 占比约为 44.44%, 主要分布在中部的那仁宝力格、阿巴嘎旗、苏尼特左旗和南部的朱日和, 其中朱日和的干旱强度达到了 17.24。

2.3 干旱趋势变化

图 5 为锡林郭勒地区 1969—2018 年各月有效干

旱指数趋势变化空间分布图, 负值代表趋于干旱, 正值表示趋于湿润。不同月份有效干旱指数具有一定的差异性。其中 1—3 月, 9—12 月 9 个站点都呈干旱趋势, 9—11 月发生的概率大于 3—5 月, 在整个历史时期表现出非常明显的加重趋势, 10 月份的趋势最大, 线性速率为 $-0.127/10 \text{ a}$; 2 月份的趋势最小, 线性速率为 $-0.091/10 \text{ a}$ 。4—8 月 9 个站点降水较历史时期增多, 既有干旱趋势, 又有湿润趋势, 其中 5—6 月有 8 个湿润的站点分别为东乌珠穆沁旗、二连浩特、阿巴嘎旗、苏尼特左旗、朱日和、西乌珠穆沁旗、锡林浩特和多伦, 锡林浩特的趋势最大, 线性速率为 $0.047/10 \text{ a}$ 。7 月份湿润的站点为多伦, 8 月份湿润的站点为东乌珠穆沁旗和二连浩特。

从有效干旱指数 M-K 趋势检验结果与分析, 锡林郭勒不同月份不同站点干旱呈上升趋势的站点占比 12.03%, 其中那仁宝力格通过显著检验占比最多 5.55%, 通过 0.01 显著水平检验的站点占比 4%, 仅有 6 月份的朱日和与多伦通过的 0.05 显著水平检验, 表明锡林郭勒各站点的干旱上升下降趋势变化大多不显著。

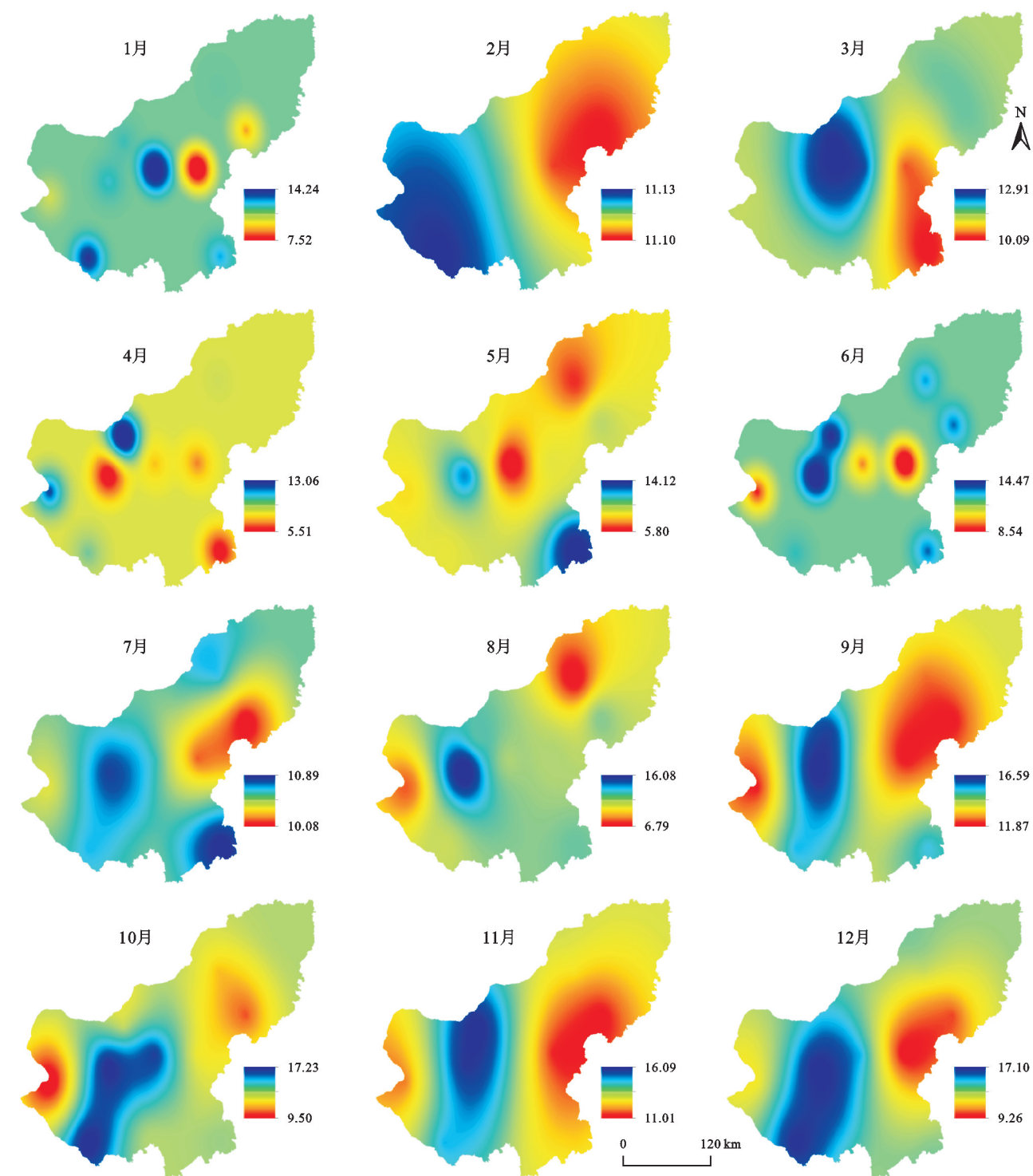


图 4 不同月份干旱强度的空间分布结果

Fig. 4 Spatial distribution results of drought intensity in different months

2.4 干旱时空模态分析

EDI 指数的前 2 个特征值累积方差贡献率接近 70%(表 2),其中模态一中特征向量的方差贡献率达 52.75%,远大于其他模态。模态二中特征向量的方差贡献率为 14.38%,明确锡林郭勒气象干旱场主要有两种类型,即锡林郭勒一致型和东南—西北反位相型。

第 1 个特征向量系数为一致的正值分布且相差

较小,说明各站降水量对于干旱贡献较均衡,较大值主要位于锡林浩特市和阿巴嘎旗的北部。第 2 个特征向量的空间分布总体上表现为由西南部苏尼特右旗、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县和太仆侍旗向北部和东北部旗县干旱逐渐减轻的趋势,最干旱区位于苏尼特右旗(图 6)。

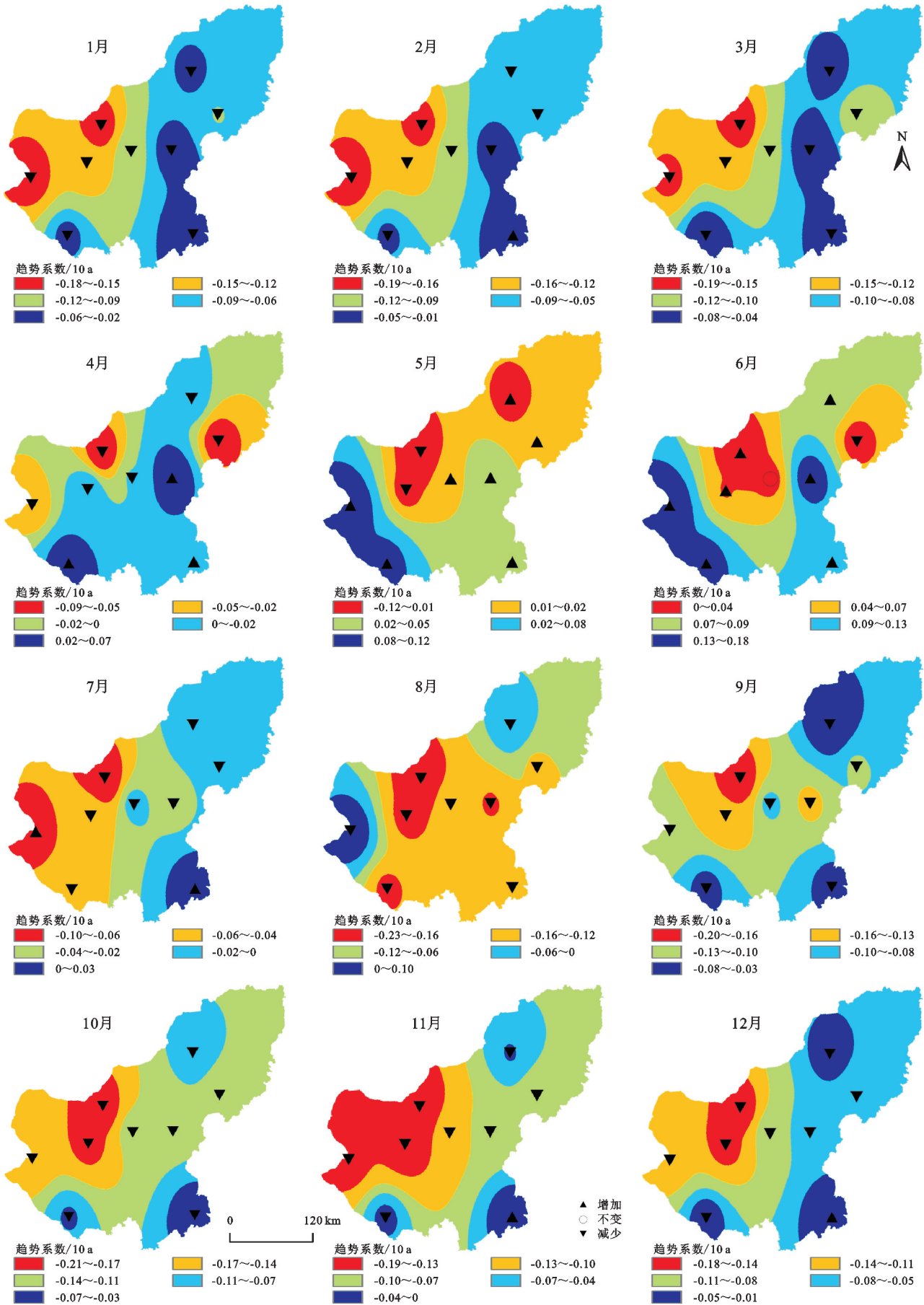


图 5 不同月份干旱趋势变化的空间分布结果

Fig. 5 Spatial distribution results of drought trends in different months

表 2 锡林郭勒年有效干旱指数 EOF 分解的
前 5 个特征向量贡献率

Table 2 Contribution rate of the first 5 eigenvectors to EOF
decomposition of Xilin Gol annual effective drought index

模态	特征值	方差 贡献率/%	累积方差 贡献率/%	特征根 误差范围	
1	1.76	52.75	52.75	0.93	2.59
2	0.48	14.38	67.13	0.25	0.70
3	0.32	9.60	76.73	0.16	0.47
4	0.22	6.76	83.49	0.11	0.33
5	0.17	5.32	88.81	0.09	0.26

第一模态时间序列可以看出(图 7A),整体呈现下降趋势,尤其是 2000—2010 年末十分明显,其标准差为±1.34,该模态具有较大的权重,从个别年份的情况看,1970 年、1992 年、1998 年远远大于 1.34,可以说明这些年份较为湿润,而 2001 年、2005 年、2006 年、2007 年、2011 年的时间序列小于-1.34,干旱较为严重。第

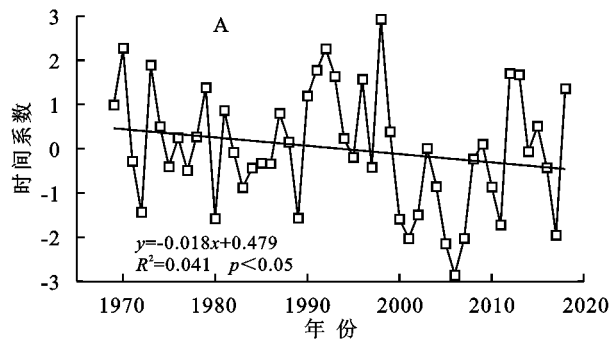


图 7 1969—2018 年 EDI 的前 2 个特征向量所对应的时间系数

Fig. 7 Time coefficients corresponding to the first two eigenvectors of EDI during 1969—2018

3 讨论

内蒙古锡林郭勒地区的气候受季风环流影响,是锡林郭勒地区降水在近十几年的微弱减少、气象干旱增加的主要原因,但整体趋势与张煦庭等^[23]采用标准化降水蒸散指数研究干旱时空分布特征的结果大致相近。锡林郭勒干旱灾害出现频繁、持续时间长,其分布具有一致性的特点,干旱出现的时段主要出现在冬、春及初夏季节,严重时则会出现冬春初夏连旱,而近年来秋季干旱呈频发之势^[24],这是由于当每年 9 月以后干季到来时,受到西风环流的控制,同时海拔较高,形成了气温低,风大,雨少的气候特征。本文通过干旱时空模态分析,得出全锡林郭勒一致型和东南—西北反位相型干旱分布格局,这与张巧凤等^[25]得出的锡林郭勒盟一致性趋势的结果基本一致。但是在模态的数量与方差贡献率的表现有所不同,可能是使用干旱指数的差异与干旱尺度的不同导致的。EDI 指数虽然可以反映锡林郭勒的时空变化特征,但

二模态时间序列呈现出上升趋势(图 7B),其标准差为±0.70,从个别年份看,1989 年、1990 年、2001 年时间序列远远大于 0.84,相对湿润,然而 1973 年、1975 年、1976 年、1979 年、1996 年、2009 年、2010 年时间序列小于-0.70,较为干旱。从《气象灾害大典》的记录来看 1975 年、1976 年、1979 年、2009 年、2010 年均均为锡林郭勒干旱较为严重的年份。

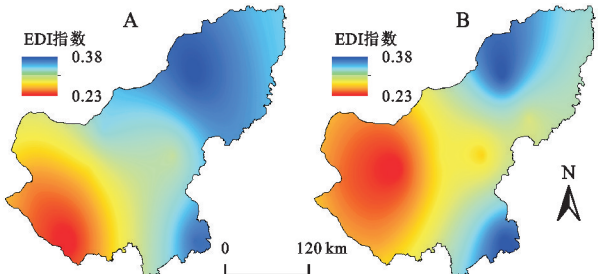
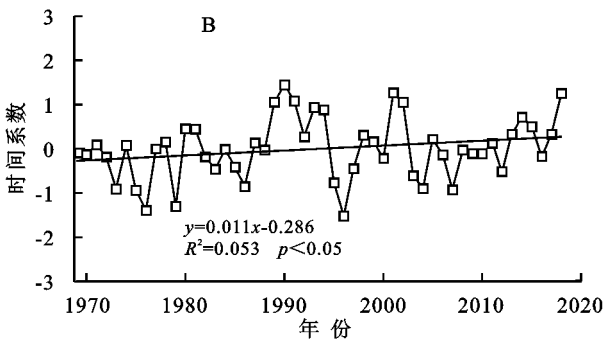


图 6 EDI 指数的干旱时空模态结果
Fig. 6 Temporal and spatial modal results of
drought in EDI index



是 EDI 仍存在一些不足,EDI 以月降水量作为数据基础,不能反映区域的干旱事件的持续日数,尤其是干旱产生和解除的机理。

4 结论

(1) 1969—2018 年,锡林郭勒地区的年平均 EDI 指数以 0.029/10 a 的速度下降,干旱趋势明显增强。在 1970—1980 年 EDI 值变化十分剧烈,说明这段时间干湿交替比较明显。平均每年发生 0.5 次干旱事件,平均约 2 a 一次,其中 2000 年最为突出,发生中旱、重旱以及总数最多,共 2.3 次。

(2) 锡林郭勒正常发生的频率在 67.17%~72.65%,发生重旱的频率在 0.02%~0.99%,西南部、中部是干旱强度较高的区域。

(3) 锡林郭勒在整个历史时期的 1—3 月和 9—12 月 9 个站点都呈干旱趋势,而 4—8 月既有干旱趋势,又有湿润趋势。其中 10 月份的趋势最大,线性速率为-0.127/10 a;2 月份的干旱趋势最小,线性速率为

-0.091/10 a。从 EDI 指数 M-K 趋势检验结果发现不同月份不同站点干旱呈上升趋势的站点占比 12.03%。

(4) 锡林郭勒干旱时空模态空间分布呈现一致型和东南—西北反位相型。

参考文献 (References):

- [1] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1304.
Chen Y N, Li Z, Fan Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [2] 李夏子,赵放,林伟楠.气候变化对牧草生长发育的影响研究综述[J].中国农学通报,2018,34(25):145-152.
Li X Z, Zhao F, Lin W N. Impacts of climate change on growth and development of pasture: A review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(25): 145-152.
- [3] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11):3127-3136.
Zou H, Gao G Y, Fu B J. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [4] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].地球科学进展,2014,29(1):80-91.
Zhang Q, Han L Y, Zhang L Y, et al. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 80-91.
- [5] 吴英杰,李玮,王文君,等.基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J].干旱区研究,2019,36(4):943-952.
Wu Y J, Li W, Wang W J, et al. Drought characteristics in inner Mongolia based on precipitation anomaly percentage[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 943-952.
- [6] 梁守真,隋学艳,王猛,等.基于 SPEI 的黄河流域多时间尺度干湿变化分析[J].水土保持研究,2022,29(1):231-241.
Liang S Z, Sui X Y, Wang M, et al. Multiple time scales analysis of dryness and wetness changes of the Yellow River Basin in the past 50 years based on SPEI data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 231-241.
- [7] 徐一丹,任传友,马熙达,等.基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1250-1262.
Xu Y D, Ren C Y, Ma X D, et al. Change of drought at multiple temporal scales based on SPI/SPEI in Northeast China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1250-1262.
- [8] 张利利,周俊菊,张恒玮,等.基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J].生态学报,2017,37(3):996-1007.
Zhang L L, Zhou J J, Zhang H W, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on Standard Precipitation Index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 996-1007.
- [9] 张钦,唐海萍,崔凤琪,等.基于标准化降水蒸散指数的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J].生态学报,2019,39(19):7110-7123.
Zhang Q, Tang H P, Cui F Q, et al. SPEI-based analysis of drought characteristics and trends in Hulun Buir grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7110-7123.
- [10] 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[J].生态学报,2017,37(11):3787-3795.
Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3787-3795.
- [11] 轩俊伟,郑江华,刘志辉.基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2016,33(2):338-344.
Xuan J W, Zheng J H, Liu Z H. SPEI-based spatio-temporal variation of drought in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 338-344.
- [12] Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI)[J]. Water Resources Management, 2007, 21(5):821-833.
- [13] 尹文杰,张梦琳,胡立堂.柴达木盆地干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2018,35(2):387-394.
Yin W J, Zhang M L, Hu L T. Spatiotemporal variation of drought in the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 387-394.
- [14] Kim D W, Byun H R, Choi K S. Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1/2):1-12.
- [15] 夏敏,孙鹏,张强,等.基于 SPEI 指数的淮河流域干旱时空演变特征及影响研究[J].生态学报,2019,39(10):3643-3654.
Xia M, Sun P, Zhang Q, et al. Temporal and spatial characteristic of drought in Huai River Basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3643-3654.
- [16] 慈晖,张强,白云岗,等.标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J].水资源保护,2015,31(2):7-14.
Ci H, Zhang Q, Bai Y G, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 7-14.
- [17] Deo R C, Byun H R, Adamowski J F, et al. Application of effective drought index for quantification of

- meteorological drought events: A case study in Australia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(1):359-379.
- [18] Kamruzzaman M, Hwang S, Cho J, et al. Evaluating the spatiotemporal characteristics of agricultural drought in Bangladesh using effective drought index[J]. *Water*, 2019, 11(12):2437.
- [19] Ma Q Y, Zhang J Q, Sun C Y, et al. Drought characteristics and prediction during pasture growing season in Xilingol grassland, Northern China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(1):165-178.
- [20] 周凯,王义民.基于 EOF 的渭河流域干旱时空分布特征研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020, 48(1):146-154.
- Zhou K, Wang Y M. Temporal and spatial distribution of drought in the Weihe River Basin based on EOF[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2020, 48(1):146-154.
- [21] Huang J, Sun S L, Xue Y, et al. Changing characteristics of precipitation during 1960—2012 in Inner Mongolia, Northern China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, 127(3):257-271.
- [22] 高继卿,杨晓光,董朝阳,等.气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J].农业工程学报, 2015, 31(12):99-110.
- Gao J Q, Yang X G, Dong C Y, et al. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12):99-110.
- [23] 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.
- Zhang X T, Pan X B, Xu L, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960—2015 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15):190-199.
- [24] Li W, Duan L M, Wang W J, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in a semi-arid grassland over the past 56 years based on the Standardized Precipitation Index[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2021, 133(1):41-54.
- [25] 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.
- Zhang Q F, Liu G X, Yu H B, et al. Analysis of drought characteristics in Xilingol League based on standardized precipitation index[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(5):119-128.
- ~~~~~
- (上接第 412 页)
- [23] 李凯,侯鹰,付奇,等.都市圈“三生空间”协同变化及其对生态系统服务的影响[J].水土保持研究, 2023, 30(3):430-439.
- Li K, Hou Y, Fu Q, et al. Synergistic changes of production-living-ecological space and their influences on ecosystem services in the metropolitan area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3):430-439.
- [24] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报, 2017, 72(7):1290-1304.
- Liu J L, Liu Y S, Li Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7):1290-1304.
- [25] 陈其慎,于汶加,张艳飞,等.矿业发展周期理论与中国矿业发展趋势[J].资源科学, 2015, 37(5):891-899.
- Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Mining development cycle theory and development trends in Chinese mining[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5):891-899.
- [26] 梅思雨,李本智,易海军,等.快速城市化区域的三生空间冲突时空演化特征分析:以浙江省镇海区为例[J].上海国土资源, 2022, 43(3):55-60, 98.
- Mei S Y, Li B Z, Yi H J, et al. The spatio-temporal evolution characteristics of spatial conflict between production-living-ecological spaces in rapidly urbanized regions: A case study of Zhenhai District in Zhejiang Province[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(3):55-60, 98.
- [27] 王志伟,魏宇,李申,等.胶东半岛三生空间的时空演变与冲突测度研究[J].环境工程技术学报, 2023, 13(1):386-393.
- Wang Z W, Wei Y, Li S, et al. Spatio-temporal evolution and conflict measurement of ecological-production-living spaces in Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1):386-393.
- [28] 李争,宋振江,杨俊.“社会-生态”情景视角下矿粮复合区土地利用冲突缓解机制研究[J].中国矿业, 2018, 27(5):13-18, 32.
- Li Z, Song Z J, Yang J. Study on the relief mechanism of land use conflict in mine-grain mixed zone from the perspective of social-ecological system[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(5):13-18, 32.