

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.045.

丛士翔, 王融融, 常文静, 等. 基于标准化降水指数(SPI)的宁夏中部干旱带旱灾危险性时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 223-232.

Cong Shixiang, Wang Rongrong, Chang Wenjing, et al. Characteristics of Spatial and Temporal Evolution of Drought Hazard in the Middle Arid Zone of Ningxia Based on Standardized Precipitation Index (SPI)[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 223-232.

基于标准化降水指数(SPI)的宁夏中部干旱带旱灾危险性时空演变特征

丛士翔¹, 王融融¹, 常文静¹, 余海龙¹, 黄菊莹²

(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021)

摘要: [目的]揭示宁夏中部干旱带旱灾危险性的时空特征,为宁夏中部干旱带农业生产、农业灾害防治、种植结构调整和农业灌溉指导提供科学依据。[方法]收集宁夏中部干旱带的沙坡头区、中宁县、同心县、盐池县、海原县 5 个气象站点的气象观测资料,采用标准化降水指数(SPI)分析了近 39 年(1981—2019 年)干旱等级的时空变化,并结合 GIS 技术评价其旱灾危险性时空演变特征。[结果]SPI₁₂结果表明代际干旱趋势呈波动中加剧趋势(趋势线斜率范围为 $-0.004 \sim 0.003$)。SPI₃结果表明季尺度旱灾危险性时空分布异质性明显,空间上呈现出南低北高的特征,而时间上则表现为连旱特征突出。春冬两季旱灾发生频率高于 45%;夏、秋两季干旱现象不显著,干旱发生频率处于 10.26%~43.59%之间;旱灾危险性时空演变特征评价结果表明代际旱灾危险性呈现先下降后上升的变化趋势。季尺度旱灾危险性时空差异明显,空间上表现为旱灾危险性由南向北升高,时间上表现为春冬两季旱灾危险性较高,而夏、秋两季旱灾危险性较低。[结论]宁夏中部干旱带季尺度旱灾危险性时空异质性明显,沙坡头区、中宁县旱灾危险性高,未来应加强春、秋、冬三季的旱灾防治。

关键词: 旱灾; 标准化降水指数(SPI); 宁夏中部干旱带; 时空演变特征

中图分类号: S423

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0223-10

Characteristics of Spatial and Temporal Evolution of Drought Hazard in the Middle Arid Zone of Ningxia Based on Standardized Precipitation Index (SPI)

Cong Shixiang¹, Wang Rongrong¹, Chang Wenjing¹, Yu Hailong¹, Huang Juying²

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the spatial and temporal characteristics of drought risk in the central arid zone of Ningxia, and to provide scientific basis for agricultural production, agricultural disaster prevention and control, planting structure adjustment and agricultural irrigation guidance in the central arid zone of Ningxia. [Method] The meteorological observation data of the five meteorological stations including Shapotou, Zhongning County, Tongxin County, Yanchi County, and Haiyuan County in the middle arid zone of Ningxia were collected, and the temporal and spatial variations of drought levels and the spatial-temporal evolution characteristics of drought risk over the past 39 years (1981—2019) was analyzed and evaluated by calculating the Standardized Precipitation Index (SPI) and combining with GIS technology. [Results] The SPI₁₂ results revealed a fluctuating trend with an intensifying tendency in decennial droughts (the slope of the trend line ranged from -0.004 to 0.003). The SPI₃ results demonstrated

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2023-09-15

资助项目: 宁夏自然科学基金“干湿交替对藻结皮生理和生态的影响”(2022AAC03120); 国家自然科学基金“灌丛沙堆演化过程中树干茎流与根区优先流对‘沃岛效应’的影响”(41961001)

第一作者: 丛士翔(1997—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事生物地球化学循环研究。E-mail: CongShixiang1997@163.com

通信作者: 余海龙(1979—), 男, 甘肃酒泉人, 博士, 教授, 主要从事土壤地理及节水灌溉方面的研究。E-mail: yhl@nxu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

a significant spatial heterogeneity in the spatial-temporal distribution of seasonal drought risk featured with a prominent characteristics of a low risk in the south and high risk in the north at spatial scales, and continuous drought at temporal scales. The frequencies of drought in spring and winter exceeded 45%. However, the occurrence of drought in summer and autumn was not significant, with a frequency ranging from 10.26% to 43.59%. The evaluation of the temporal and spatial evolution characteristics of drought risk revealed a fluctuating trend of decennial drought risk, initially decreased and then increased. There were remarkable differences in the spatial-temporal distribution of seasonal drought risk, with a characteristic of increasing risk from south to north spatially and higher risk in spring and winter temporally but lower risk in summer and autumn. [Conclusion] The spatial and temporal heterogeneity of seasonal-scale drought risk in the central arid zone of Ningxia is obvious, with high drought risk in Shapotou District and Zhongning County, and drought prevention and control should be strengthened in the future for the spring, fall and winter seasons.

Keywords: drought, standardized precipitation index (SPI); the middle arid zone of Ningxia; spatial-temporal evolution characteristics

干旱灾害是指因短期水资源供给匮乏并对人类社会造成负面影响的一种自然灾害^[1]。作为一种极端气象灾害,干旱灾害具有季节性、区域性、持续性等特征,不仅对农业生产造成巨大损失,还导致荒漠化加剧、水资源短缺等诸多负面影响^[2-3]。目前,国际上公认的干旱类型主要有气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 类^[4]。其中,气候干旱是其他干旱的基础,并沿着灾害链发生灾情传递和放大^[5]。因此,选择合理的指标科学评估某地区干旱时间的发生强度、范围及其持续时间,可为防灾减灾、指导农业生产工作提供科学的客观依据。

干旱指标是衡量干旱程度的特征量,是旱情描述的数值表达,在干旱分析中起着度量、对比和预测等重要作用,是干旱监测的基础与核心^[6]。国内外很多研究者提出了不同干旱指标来监测干旱程度变化。目前较为常用的有标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、气象干旱综合监测指数(Meteorological drought composite index, MCI)等^[7-9]。其中,相较于其他干旱指标, SPI 具有较好的适用性,时间尺度变化灵活且计算方法简单,对数据要求较低,在空间上的解释与其他几种干旱指数的一致性较高。宁夏位于青藏高原、西北干旱区和东部季风区的交界地带,属我国干旱半干旱气候区。宁夏中部干旱带是典型的内陆型干旱区,暖湿气团不易入侵,是中国荒漠化最严重的地区之一。年降雨量约为 210 mm,而年均蒸发量达到了 2 300 mm,年内降雨时空分布不均,缺水问题同农业生产矛盾突出^[10-11]。关静等^[6]的研究

发现, SPI 能够反映宁夏中部干旱带干旱变化趋势,王洁等^[12]利用 SPI 指数研究宁夏干旱特征,结论显示宁夏干旱存在发生频繁且持续时间长的特点,马国飞等^[13]使用 SPI 指数对宁夏山区干旱特征的分析显示,季尺度干旱发生频率及影响范围处于上升趋势。SPI 具有表征不同地区及时间范围内旱灾危险异质性的能力,对于干旱灾害的发生风险能够进行科学评估,为干旱监测与防灾减灾提供具体指导,但目前宁夏中部干旱带的旱灾危险性时空演变特征鲜有研究。由于旱灾具有发生范围广、致灾程度空间异质性强等特点,而地面站点分布较少以及数据缺失等因素,因而有必要结合 GIS 技术实现旱灾空间分布的危险性评价,以确定旱灾防治的核心区域及其蔓延范围。因此,本文基于 SPI 分析宁夏中部干旱带 1981—2019 年期间旱灾等级、危险性的时空演变特征,兼顾了不同时间尺度,并借助 GIS 技术精细化展示区域旱灾变化趋势的时空分异特征,其结果可为宁夏中部干旱带农业生产、农业灾害防治、种植结构调整和农业灌溉指导提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中部干旱带,包括沙坡头区、中宁县、同心县、盐池县、海原县,该地区年日照时数长,是中国太阳辐射资源最丰富的地区之一。研究区气候类型以温带大陆性气候为主,年均降水量为 200~350 mm,时空分布不均,空间上由南向北递减,降水年内和年际变化大。其中,年内降水主要集中在 7—9 月,约占全年总降水量的 65%,且多表现为暴雨、冰

雹等灾害性降水模式,降水利用率低。结合研究区气候、土壤、植被特征,盐池、同心北部属于毛乌素沙地边缘荒漠草原生态亚区,沙坡头区和中宁县属于平原水旱混合农业开发生态亚区,海原、同心南部则属于黄土高原山地林区生态亚区。

1.2 数据来源

图 1 为宁夏中部干旱带各气象站点分布。分别涵盖沙坡头区、中宁县、盐池县、海原县、同心县 5 个气象站。本研究所用到的气象资料为研究区 1981—2019 年间的逐日降水资料,均源自国家气象信息中心—中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>),缺测的数据采用多年平均值进行线性插补处理。数据时间跨度大,能够反映研究区内多年降水变化情况,具有代表性。

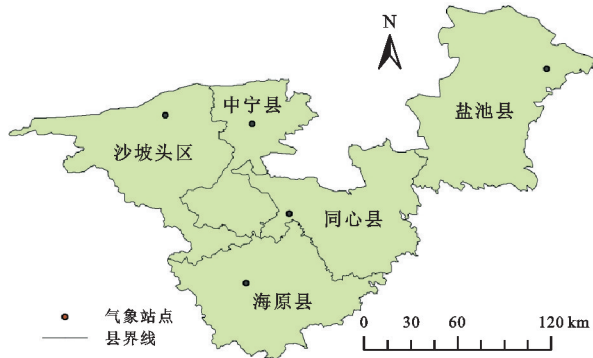


图 1 研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the study area

1.3 研究方法

本文基于 SPI 指数估算研究区的干旱程度,发生频率,采用气候倾向率、Mann-Kendall 非参数检验确定干旱演化趋势和突变点,并结合 GIS 空间分析方法再现 1981—2019 年宁夏中部干旱带的干旱灾害时空格局演变。

1.3.1 标准化降水指数(SPI) 标准化降水指数(SPI)能够较好地反映干旱强度和持续时间,使得用同一干旱指标反映不同时间尺度和区域的干旱状况成为可能,因而得到广泛应用。该指数考虑了降水服从偏态分布的实际,并根据 Gamma 分布概率来描述降水量的变化,将偏态分布的实际降水量进行正态标准化处理以消除降水量的时空分布差异^[14],用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[15]。本研究以 3 个月、12 个月为时间尺度分别计算 SPI 值(分别以 SPI_3 , SPI_{12} 表示),以表征季尺度与年代际尺度下旱灾演变特征。表 1 为基于 SPI 指数的干旱等级划分标准,具体计算公式参见《气象干旱等级标准》^[16]。

1.3.2 旱灾发生频率 本研究中采用干旱发生频率

(P_i)来评价研究区内一段时期中发生各等级干旱的频繁程度和影响范围。

表 1 标准化降水指数干旱等级分类标准

Table 1 Standardized precipitation index drought grade classification standard

SPI	等级	旱灾危险性权重
$1.5 < SPI \leq 2$	严重湿润	
$1 < SPI \leq 1.5$	中等湿润	
$0.5 < SPI \leq 1$	轻微湿润	
$-0.5 < SPI \leq 0.5$	无明显干旱	
$-1.0 < SPI \leq -0.5$	轻微干旱	1
$-1.5 < SPI \leq -1.0$	中等干旱	2
$-2.0 < SPI \leq -1.5$	严重干旱	3
$SPI \leq -2.0$	极端干旱	4

干旱发生频率的表达式为:

$$P_i = \left(\frac{S_i}{N} \right) \times 100\%$$

(1)

式中: N 为累积期; S_i 为 i 站发生干旱现象的次数,根据不同的干旱等级分别计算发生频率。本研究分别计算 3 个月和 12 个月时间尺度的 SPI 序列,并参照表 1 统计各旱灾等级出现次数,计算平均干旱强度,分析轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱等级灾害变化的时空变化规律。其中,3 个月时间尺度可用以分析季节干旱频率变化趋势,而 12 个月时间尺度可用以分析年际干旱频率变化趋势。

1.3.3 气候倾向率 本研究采用气候倾向率表征研究区整体及各气象站点旱灾演变趋势和幅度。通常以各气象站点历年气候要素时间序列拟合直线的斜率(线性回归系数)表征变化趋势。对于 SPI,当变化趋势线斜率为负时,干旱等级即呈现加强趋势,旱灾危险性随之提升;而斜率为正时,干旱等级呈现减弱趋势,旱灾危险性降低。线性回归于 Origin 2019 环境下实现。

1.3.4 显著性检验 本研究采用 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 检验)对 SPI 指数进行变化趋势及突变特征的显著性检验。M-K 检验是一种基于秩的非参数统计检验方法,能够有效检验序列变化趋势,广泛应用于时间序列分析^[17]。在 M-K 检验中,给定一个显著水平 α ,判断样本之间在此水平上是否存在显著差异。本研究中 Mann-Kendall 检验法通过 R 语言实现,显著水平 $\alpha = 0.05$,置信度为 95%,表示若样本通过显著性检验,即在 95%的置信度下,认为样本间存在显著性差异,反之亦然。

1.3.5 旱灾危险性评价 为了进一步分析宁夏中部干旱带不同等级干旱致灾的危险性,本研究通过对不同累积期(SPI_3 , SPI_{12})SPI 进行加权综合,根据研究

期内发生干旱现象的等级赋以不同的权重(见表1),计算出宁夏中部干旱年尺度及季尺度的干旱危险性指数。该方法与空间分析软件 ArcGIS 结合可有效分析各等级旱灾的发生次数、频率并可视化演示旱灾的时空演化规律。本研究计算公式为:

$$H_{ij} = \sum_{j=1}^n (M_{ij} \times W_j) \quad (2)$$

式中: H_{ij} 为旱灾危险性指数,其值越小,旱灾危险性越高; i 为气象站点; j 为干旱等级序号; M_{ij} 为 i 气象站处于干旱等级 j 中的 SPI 均值; W_j 为干旱等级 j 的权重,旱灾危险性权重获取方法参见文献^[18]。Jenks 自然间断点分级方法是基于地图展示的数据分级算法,根据数据本身固有的自然间断分组,在数据差异较大的位置设置分类间隔,使组间差异最大化而组内差异较小,以实现最佳分组^[19],故在 ArcGIS 10.6 中利用自然间断点分级法对宁夏中部干旱带旱灾危险性指数进行等级划分。

2 结果与分析

2.1 基于 SPI₁₂ 的旱灾时空演变特征

SPI 指数在较长的时间尺度上会显示出更加直观的干湿交替过程,反映较长时段内降水量的变化格局^[20]。研究区 1981—2019 年 SPI₁₂ 变化特征如图 2 所示, SPI₁₂ 体现了干旱状况的年际变化, M-K 检验结果表明,宁夏中部干旱带 SPI₁₂ 整体呈显著下降趋势, SPI₁₂ 值变幅为 -1.73 ~ -0.04。其中,中等干旱级别干旱现象发生最频繁。

由图 3 可知,宁夏中部干旱带年代际干旱等级的时空差异明显。年代际尺度上表现为:1980 年代干旱等级以中等干旱为主;1990 年代 SPI₁₂ 值略微上升,干旱情况缓解;2000 年代 SPI₁₂ 值继续上升,干旱等级下降为轻微干旱;2010 年代 SPI₁₂ 值下降明显,干旱等级显著上升,表现出以中等干旱为主的等级特征。M-K 突变检验结果表明,研究区内多地 SPI₁₂ 突变起始于 1980 年代,其中沙坡头区为 1985 年,中宁县为 1983 年,盐池县与海原县均为 1986 年,说明此时期研究区干旱状况发生显著变化,干旱程度加剧。空间尺度上表现为:1980 年代研究区北部区域(沙坡头区、海原县及盐池县)干旱等级较高,均以中等干旱为主,研究区中部区域(中宁县、同心县)存在轻微干旱现象。1990 年代中等干旱范围缩小,研究区的中部(中宁和同心县)、东北部(盐池县)干旱等级下降为轻微干旱。2000 年代研究区干旱状况总体趋于下降,总体呈轻微干旱等级,仅盐池和同心两县的交界地带以中等干旱为主。2010 年代干旱等级急剧升高,出现全域性的中等干旱。

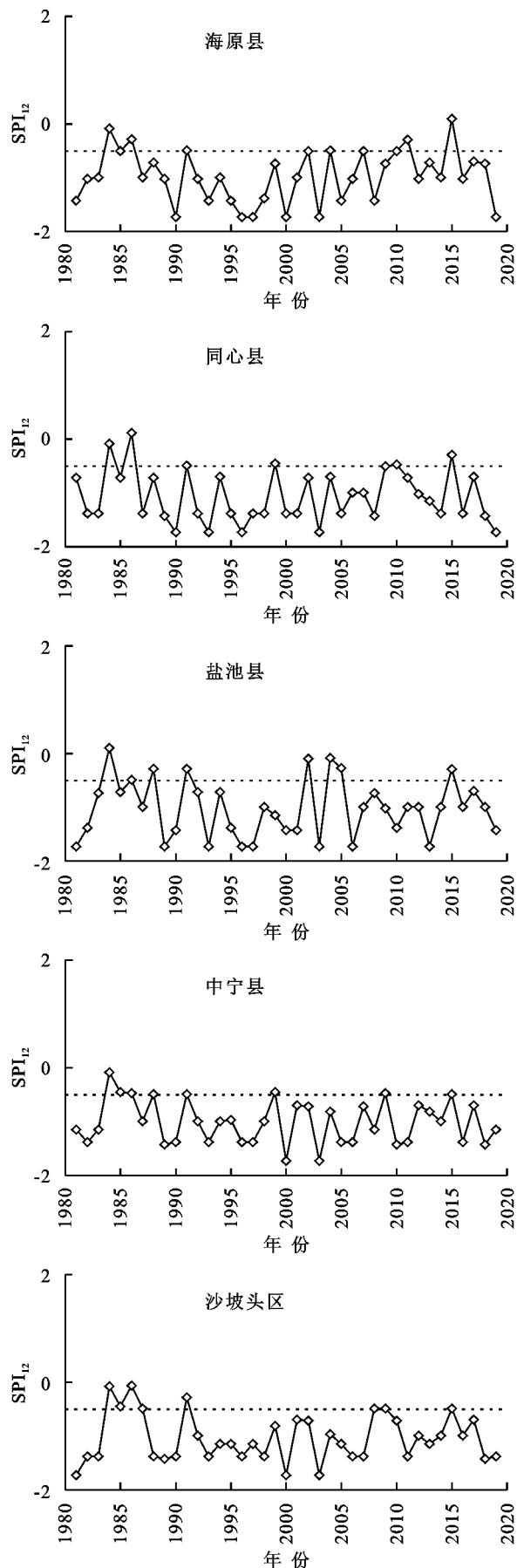


图2 SPI₁₂ 值变化特征

Fig. 2 Characteristics of changes in SPI₁₂ values

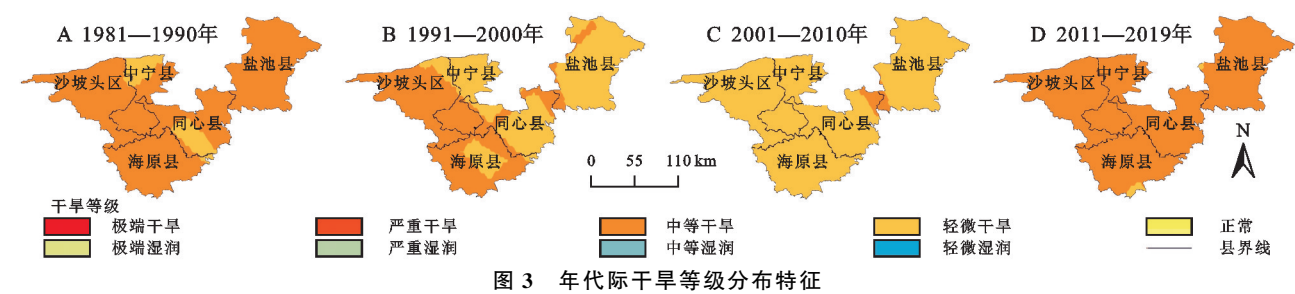


图 3 年代际干旱等级分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of decadal drought grade

年代际干旱频率变化特征见表 2。1980 年代干旱发生总频率高于 60%，干旱频率较高的地区集中在研究区南部(同心县、海原县)，其中，同心县中等及以上等级干旱发生频率较高，达 50%。1990 年代研究区北部地区(沙坡头区、盐池县、海原县)干旱发生频率明显升高，干旱发生总频率高达 90%，干旱强度以中等干旱为主。2000 年代研究区全域性干旱显著，南部地区(同心县、海原县)干旱发生总频率最高，为 90%，干旱等级以轻微干旱为主，北部地区(沙坡头区、盐池县)干旱发生总频率较南部稍低。2010 年代研究区南部的海原县干旱发生总频率降低为 77.78%，其他地区均为 88.89%。由此可见，年代际尺度上旱灾现象反复，1980 年代干旱等级较高，1990—2000 年代干旱程度逐步缓解，2010 年代旱灾加剧，表现出全域性干旱的空间特征。SPI₁₂ 显示，宁夏中部干旱带近年来干旱情势严峻，易出现干旱灾害，研究区全域均属旱灾防范的重点地区。

气候较为缓和，M-K 检验表明夏旱于 1983 年发生突变，SPI₃ 以 -0.006/a 的速率降低，气候干旱化显著。秋季 SPI₃ 值较夏季低，变幅为 -0.88~1.21，对应的干旱等级为轻微干旱—中等湿润。其中，1995 年秋旱最重，2015 年秋季最为湿润，秋旱于 1990 年发生显著突变，气候干旱化显著，秋旱现象加剧，秋季 SPI₃ 以 -0.009/a 的速率下降。冬季干旱程度明显增加，SPI₃ 值变幅为 -1.54~0.30，对应的干旱等级范围为严重干旱—无旱，冬旱最严重的年份为 2011 年，冬旱于 1982 年发生显著突变，SPI₃ 以 -0.008/a 的速率降低，气候趋于干旱化。

2.2 基于 SPI₃ 的旱灾时空演变特征

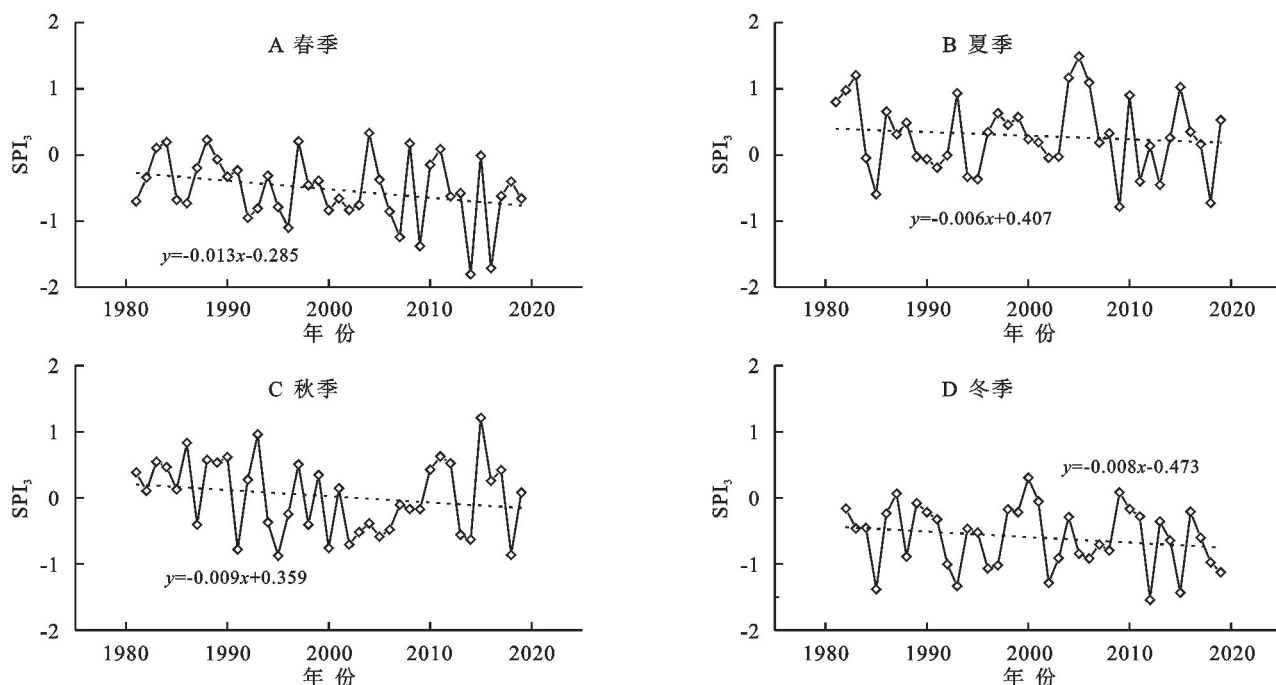
1981—2019 年研究区内 SPI₃ 变化特征如图 4 所示，SPI₃ 表明宁夏中部干旱带旱灾在季尺度上呈加重趋势。1981—2019 年内 SPI₃ 变幅为 -2.70~2.87，最低值出现在 2015 年冬季，达极端干旱级别；最高值出现在 2011 年秋季，达极端湿润级别。SPI 指数在较短的时间尺度上对单次降雨事件反应敏感^[21]，由于宁夏中部干旱带雨旱分明，导致研究区内 SPI₃ 值表现出波动式变化，干旱频率与程度存在明显差异。显著性检验结果表明，研究区 SPI₃ 变化趋势均具有显著性。由图 4 可知，季尺度上 SPI₃ 表现为：春季气候干旱化显著，SPI₃ 变幅为 -1.80~0.33，对应的干旱等级范围为严重干旱—无旱，其中 2014 年与 2016 年为春旱最严重的两年，SPI₃ 值分别为 -1.80，-1.71，达严重干旱级别，春旱程度于 1991 年发生显著突变，以 -0.013/a 的速率降低。夏季 SPI₃ 值变幅为 -0.78~1.49，对应的干旱等级范围为轻微干旱—无旱，SPI₃ 识别出的夏季轻微干旱现象分别为 1985 年、2009 年、2018 年，其余年份 SPI₃ 值处于无明显干旱等级，

表 2 年代际干旱频率变化特征

Table 2 Characteristics of decadal drought frequency changes

%

地区	时间段	轻微干旱 发生频率	中等干旱 发生频率	严重干旱 发生频率	干旱发生 总频率
沙坡头区	1981—1990 年	0	50	10	60
	1991—2000 年	20	60	10	90
	2001—2010 年	40	30	10	80
	2011—2019 年	44.44	44.44	0	88.89
中宁县	1981—1990 年	10	50	0	60
	1991—2000 年	40	30	10	80
	2001—2010 年	40	40	10	90
	2011—2019 年	44.44	44.44	0	88.89
盐池县	1981—1990 年	30	20	20	70
	1991—2000 年	30	30	30	90
	2001—2010 年	20	30	20	70
	2011—2019 年	66.67	11.11	11.11	88.89
同心县	1981—1990 年	30	40	10	80
	1991—2000 年	10	50	20	80
	2001—2010 年	50	30	10	90
	2011—2019 年	22.22	55.56	11.11	88.89
海原县	1981—1990 年	40	30	10	80
	1991—2000 年	20	40	30	90
	2001—2010 年	50	30	10	90
	2011—2019 年	44.44	22.22	11.11	77.78

图 4 SPI₃值变化特征Fig. 4 Characteristics of changes in SPI₃ values

春季研究区南部地区(沙坡头区南部、同心县南部、海原县)及研究区北部的盐池县干旱分布广泛,干旱等级以轻微干旱为主,研究区北部的中宁县及盐池县南部干旱等级较低,无明显干旱现象出现;夏季干旱状况下降明显,研究区全域无明显干旱现象;秋季研究区表现出明显的南北差异,研究区南部(海原县、

同心县南部、盐池县南部)呈轻微湿润等级,研究区北部(沙坡头区、中宁县盐池县北部)无干旱现象出现;冬季干旱范围扩大,沿东南方向蔓延,研究区北部(中宁县、同心县、盐池县北部)干旱等级上升,达中等干旱等级,研究区东南部(海原县南部、同心县东部、盐池县南部)干旱等级较高,达严重干旱等级(图 5)。

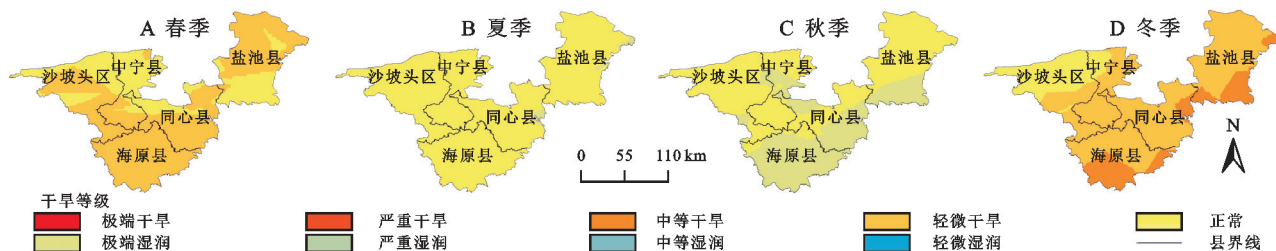


图 5 季度干旱等级变化特征

Fig. 5 Characteristics of seasonal drought levels changes

季度干旱频率变化特征如表 3 所示。季尺度干旱频率在空间上表现出北高南低的特征,在时间上表现出春、冬两季干旱等级高、发生频率高而夏、秋两季干旱等级低、发生频率低的特征。具体表现为:春季研究区全域干旱发生总频率均高于 46.15%,南部地区(同心县、海原县)干旱等级以轻微干旱为主,发生频率为 23.08%,北部地区(沙坡头区、中宁县)干旱等级以中等干旱为主,发生频率为 23.08%;夏季干旱情况较少发生,研究区北部地区(沙坡头区、中宁县、盐池县)干旱发生总频率为 15.38%,略高于南部地区(同心县、海原县);秋季干旱发生频率南北差异较大,研究区北部(沙坡头区、中宁县、盐池县)干旱发生总

频率较夏季上升明显,干旱等级以轻微干旱为主,南部地区(同心县、海原县)干旱发生总频率为 20.51%,等级以轻微干旱为主;冬季研究区全域干旱发生总频率均高于 40%,干旱等级以轻微干旱为主。总体来说,研究区内连旱现象突出,研究区西北部的沙坡头区与中宁县春、秋、冬三季干旱发生频率较高,均超过 40%,易发生三季连旱;东部的盐池县、中部的同心县与南部的海原县春、冬两季干旱发生频率高,易发生两季连旱。由此可见,SPI₃能够较好地反映出旱灾季节性分异。研究区春、冬两季干旱频发,且干旱化趋势显著,是旱灾重点防治季节;夏、秋两季干旱现象不明显,气候较稳定。在空间尺度中,SPI₃指示出干旱

等级具有南北相对的空间异质性,春、冬两季整体呈现出西南高东北低的特征。通过分析可知, SPI_3 对季尺度干旱情况具有良好的判断力,能够准确反映研究区干旱等级的季尺度变化特征及发展趋势,对旱灾防治具有指导作用。

2.4 宁夏中部干旱带旱灾危险性时空演变特征

旱灾危险性评价可以综合表征研究区内的干旱强度和发生范围,能够对区域旱灾风险进行科学评估,对于防灾减灾起重要的指导作用。研究区年代际尺度及季尺度旱灾危险性时空演变特征如图 6 和图 7 所示。图 6 表明,研究期内年代际尺度旱灾危险性在时间尺度上表现出先升高后降低的特征,在空间尺度上呈现西北高东南低的空间差异。年代际旱灾危险性在 1991—2010 年表现出全域性的低危险性等级,在 1980 年代、2010 年代研究区西北部(沙坡头区、中宁县)体现出极低危险性,这是由于这两个地区在此时期内干旱平均等级较低所致,尤其是 SPI_{12} 识别出的极端与严重干旱现象极少。说明基于 SPI_{12} 的旱灾危险性指数在较长时间序列中识别出的旱灾危险性时空演变特征不明显。

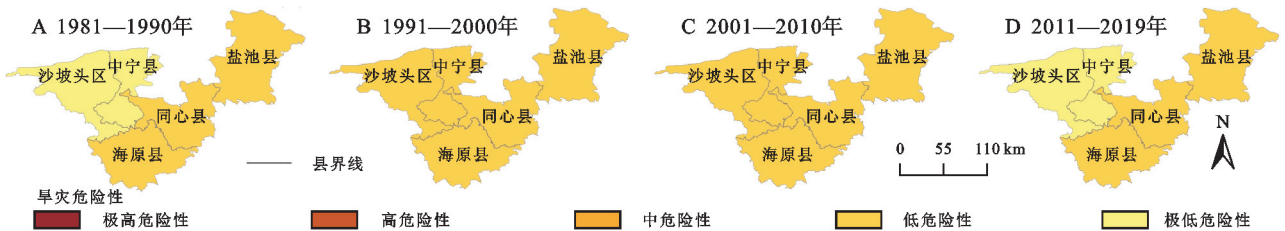


图 6 年代际尺度旱灾危险性分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of drought risk at decadal scale

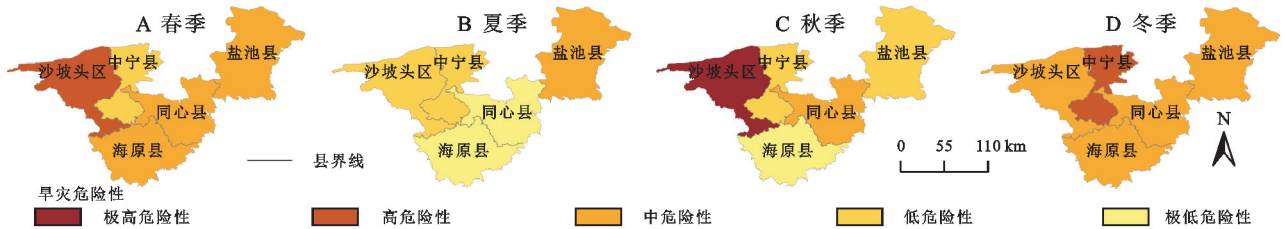


图 7 季尺度旱灾危险性分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of drought risk at seasonal scale

由图 7 可以看出,季尺度旱灾危险性时空异质性显著,空间上表现出西北高东南低的特征。时间上表现出冬春两季旱灾频发、等级高而夏秋两季旱灾少且危险等级低的特征。具体表现为:春季中等干旱及以上等级干旱频发,影响范围大,导致危险性指数高,其中高值区集中分布于研究区西北部(沙坡头区),达高旱灾危险性等级;夏季危险性等级显著降低,旱灾影响范围缩小,仅研究区东北部(盐池县)是夏旱危险性最高的地区,达旱灾中危险性等级;秋季旱灾危险性较夏季急剧升高,由低

表 3 季度干旱频率变化特征
Table 3 Characteristics of seasonal drought frequency changes

地区	季节	%				干旱发生总频率
		轻微干旱发生频率	中等干旱发生频率	严重干旱发生频率	极端干旱发生频率	
沙坡头区	春季	17.95	23.08	7.69	2.56	51.28
	夏季	5.13	7.69	2.56	0	15.38
	秋季	20.51	12.82	7.69	2.56	43.59
	冬季	23.08	20.51	0	2.56	46.15
中宁县	春季	15.38	23.08	5.13	2.56	46.15
	夏季	2.56	5.13	7.69	0	15.38
	秋季	20.51	10.26	10.26	2.56	43.59
	冬季	20.51	10.26	0	10.26	41.03
盐池县	春季	25.64	5.13	15.38	0	46.15
	夏季	12.82	2.56	0	0	15.38
	秋季	10.26	15.38	0	0	25.64
	冬季	12.82	12.82	0	17.95	43.59
同心县	春季	23.08	17.95	7.69	7.69	56.41
	夏季	2.56	7.69	0	0	10.26
	秋季	7.69	7.69	2.56	2.56	20.51
	冬季	25.64	10.26	0	5.13	41.03
海原县	春季	23.08	15.38	7.69	7.69	53.85
	夏季	10.26	0	0	0	10.26
	秋季	12.82	5.13	2.56	0	20.51
	冬季	28.21	10.26	0	2.56	41.03

危险性上升至极高危险性,高值区集中分布于研究区西北部(沙坡头区)和中部地区(同心县),其旱灾危险性分别由中危险性升至极高危险性和由极低危险性升至高危险性等级。冬季旱灾影响范围扩大显著,危险性等级呈全域性的上升趋势,研究区整体上达中危险性及以上等级。总体而言,基于 SPI_3 的旱灾危险性指数能够识别出旱灾的影响范围及具体季节,与 SPI_{12} 反映的旱灾危险性指数相比,更有利于明晰宁夏中部干旱带的旱灾危险性的时空分布演变特征。

3 讨论

本文通过统计基于 SPI 指数的各等级干旱事件的发生频率和站次比分析各等级旱灾的影响范围,结果表明研究区冬春两季干旱事件发生概率高,且干旱等级较高,而夏秋两季则呈降低趋势。这可能和冬春两季增温明显而夏秋两季降水增多有关^[22-23]。

SPI₁₂ 评价结果显示,在 1951—2019 年期间,研究区整体上的干旱状况呈波动中缓慢加剧趋势,这与 Zou 等^[24]的研究结论基本一致。研究区干旱空间格局也与已有研究证实的气候暖干化加剧干旱状况的论点一致^[25]。尽管近 20 年西北地区出现了显著的“增温增湿”现象,但由于增温和增湿的不对称性和季节性不对称,增温导致的蒸散量增加,使区域需水量也增加,从而增大了季节性干旱的发生频率和影响范围,最终导致本研究区并未发生从“暖干”到“暖湿”的气候转型。此外,SPI₃ 反映出的季节性的正负交替频率变化并不能表征更长时间尺度上干旱状况的根本转型,表现为夏秋两季的增湿可能会被冬春两季的暖干抵消,从而使 SPI 指数在更长时间序列上依旧表现为干旱缓慢加剧趋势,这与姚旭阳等^[26]关于西北地区气候转型的研究中关于宁夏的观点一致。SPI₃ 评价结果显示,夏秋两季 SPI₃ 指数呈微弱下降趋势,而冬春两季则呈增大趋势,这与刘杨奕等^[27]和胡悦等^[28]的研究结论一致。说明相较于 SPI₁₂,SPI₃ 评价结果能更好地反映短时间序列上的干旱发生频率和影响范围,具有更好的适用性和准确性,这与 Zhao 等^[21]关于宁夏全域各气候区的评价结论一致。

旱灾的强度和频次决定了旱灾危险性的风险大小^[29]。本研究基于 SPI 指数评价结果并结合 GIS 技术对研究区的旱灾发生频率、强度和范围进行了风险分析。结果表明,研究区旱灾等级和危险性具有一定的时空分异特征。旱灾年代际评价结果表明,1991—2000 年和 2001—2010 年期间,全域性的干旱事件频发,但干旱等级以轻微干旱为主,旱灾危险性等级较低,达低风险等级,这与冯克鹏等^[9]对宁夏中部干旱带年际干旱程度变化的研究结论基本一致。1981—1990 年和 2011—2019 年期间则表现为空间上位于卫宁灌区的沙坡头区及中宁县干旱危险等级较低,而其余区域相对较高。旱灾季尺度评价结果表明,春秋两季的危险性高值区均集中分布在沙坡头区,冬春两季则表现出全域性的高危险性干旱。夏秋两季则高、极高危险性分布区显著减少。这和李双双等^[30]对宁夏全域的旱灾时空分布特征分析结果基本一致。赵佳琪等^[31]通过 SPEI 数据评估了我国旱灾的高风险区,结果表明宁夏中部干旱

带具有高脆弱性及高暴露度,为显著的旱灾高风险区,与本研究的结论相符。谭春萍等^[32]认为宁夏地区气象干旱呈加重趋势,与 SPI 为指标分析所得的干旱变化趋势一致,干旱致灾因子危险性大致呈自南向北逐渐增加的空间格局,这在一定程度上印证了 SPI 在表征宁夏中部干旱带干旱时空特征与识别旱灾危险性方面具有较好的适用性与准确性。

4 结论

(1) 总体上,宁夏中部干旱带干旱呈波动中缓慢加剧的趋势并自北向南蔓延。表现为冬春两季干旱状况呈增强趋势,且连旱现象突出,夏秋两季则呈减轻趋势。整个研究时序范围内仅 2001—2010 年期间旱灾等级呈全域性的显著减轻趋势。

(2) 研究期内年尺度旱灾危险性指数表现出先升高后降低的特征,在空间尺度上呈现西北高东南低的空间差异。

(3) 研究期内季尺度旱灾危险性指数对于旱灾害的时空差异表现更敏感,呈现显著的空间异质性,表现出冬春两季高而夏秋两季低的趋势。在空间尺度上则表现为夏秋两季旱灾影响范围小而冬春两季影响范围大且危险性指数更高的特征。春秋两季沙坡头区旱灾危险性较高,冬季中宁县表现为旱灾高危险性区。

参考文献(References):

- [1] 张翔,韦燕芳,李思宇,等.从干旱灾害到干旱灾害链:进展与挑战[J].干旱气象,2021,39(6):873-883.
Zhang X, Wei Y F, Li S Y, et al. From drought disaster towards drought disaster chain: State of art and challenges[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(6):873-883.
- [2] 穆佳,邱美娟,谷雨,等.5 种干旱指数在吉林省农业干旱评估中的适用性[J].应用生态学报,2018,29(8):2624-2632.
Mu J, Qiu M J, Gu Y, et al. Applicability of five drought indices for agricultural drought evaluation in Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8):2624-2632.
- [3] 柏庆顺,颜鹏程,蔡迪花,等.近 56 a 中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J].干旱气象,2019,37(5):722-728.
Bai Q S, Yan P C, Cai D H, et al. Inter-decadal change characteristics of different grades drought in Northwest China in recent 56 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(5):722-728.
- [4] 袁星,马凤,李华,等.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J].大气科学学报,2020,43(1):225-237.
Yuan X, Ma F, Li H, et al. A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1):225-237.

- [5] 史培军.再论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报, 1996,5(4):6-17.
Shi P J. Theory and practice of disaster study[J]. Journal of Natural Disasters, 1996,5(4):6-17.
- [6] 关静,梁川,赵璐,等.3种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析[J].水土保持研究,2018,25(3):122-127.
Guan J, Liang C, Zhao L, et al. Analysis of applicability of three drought indices in the arid area of central Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(3):122-127.
- [7] 王春林,司建华,赵春彦,等.河西走廊近57年来干旱灾害特征时空演化分析[J].高原气象,2019,38(1):196-205.
Wang C L, Si J H, Zhao C Y, et al. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of drought disasters in the Hexi corridor in recent 57 years[J]. Plateau Meteorology, 2019,38(1):196-205.
- [8] 邱德勋,穆兴民,尹殿胜,等.大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的关系[J].干旱区地理,2021,44(5):1240-1249.
Qiu D X, Mu X M, Yin D S, et al. Variation characteristics of drought and its relationship with the extreme precipitation in Dali River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021,44(5):1240-1249.
- [9] 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.
- [10] 冯克鹏,田军仓.近53 a 宁夏地区多尺度干旱特征分析[J].灌溉排水学报,2016,35(2):50-58.
Feng K P, Tian J C. Analysis of multi-scale drought characteristics in Ningxia in recent 53 years[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016,35(2):50-58.
- [11] 李晨,李王成,董亚萍,等.宁夏地区潜在蒸散发变化特征及成因分析[J].排灌机械工程学报,2021,39(2):186-192.
Li C, Li W C, Dong Y P, et al. Characteristics and causes of potential evapotranspiration in Ningxia region [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021,39(2):186-192.
- [12] 王洁,李王成,李晨,等.基于SPI指数的宁夏干旱特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):528-538.
Wang J, Li W C, Li C, et al. Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021,19(3):528-538.
- [13] 马国飞,张晓煜,段晓风,等.基于标准化降水指数分析宁夏山区干旱演变特征[J].西北农业学报,2010,19(10):101-106.
Ma G F, Zhang X Y, Duan X F, et al. Analysis of drought evolution characteristics based on standardized precipitation index (SPI) in the mountain area of Ningxia [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010,19(10):101-106.
- [14] 李淑萍,侯威,封泰晨.近52年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析[J].大气科学,2015,39(5):885-900.
Li S P, Hou W, Feng T C. Decadal variation of summer dryness/wetness over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the evolution of atmospheric circulation in the last 52 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015,39(5):885-900.
- [15] 于家瑞,艾萍,袁定波,等.基于SPI的黑龙江省干旱时空特征分析[J].干旱区地理,2019,42(5):1059-1068.
Yu J R, Ai P, Yuan D B, et al. Spatial-temporal characteristics of drought in Heilongjiang Province based on standardized precipitation index [J]. Arid Land Geography, 2019,42(5):1059-1068.
- [16] 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:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grades of Meteorological Drought: GB/T 20481-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [17] 梅晓丹,李丹,田静,等.2000—2018年黑龙江省干旱时空特征分析[J].测绘工程,2022,31(3):16-22.
Mei X D, Li D, Tian J, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought in Heilongjiang Province from 2000 to 2018[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2022,31(3):16-22.
- [18] 金令,王永芳,郭恩亮,等.基于SPEIbase v.2.6数据集的内蒙古旱灾危险性评价[J].干旱区地理,2022,45(3):695-705.
Jin L, Wang Y F, Guo E L, et al. Evaluation of drought hazards in Inner Mongolia based on SPEIbase v.2.6 dataset[J]. Arid Land Geography, 2022,45(3):695-705.
- [19] 卢瑜,向平安,余亮.中国有机农业的集聚与空间依赖性[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(3):440-452.
Lu Y, Xiang P A, Yu L. Agglomeration and spatial dependence of organic agriculture in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021,29(3):440-452.
- [20] Belayneh A, Adamowski J, Khalil B, et al. Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models [J]. Journal of Hydrology, 2014,508:418-429.
- [21] Zhao Z Y, Wang H R, Wang C, et al. Impacts of climatic change on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of Ningxia at multi-time scales from 1957 to 2018 [J]. Advances in Meteorology, 2020,

- 2020;3156460.
- [22] 李栋梁,魏丽,蔡英,等.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J].冰川冻土,2003,25(2):135-142.
Li D L, Wei L, Cai Y, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(2):135-142.
- [23] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
Ma Z G, Fu C B. Trend of surface humid index in the arid area of northren China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001,59(6):737-746.
- [24] Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. Variations in droughts over China: 1951—2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(4):353-368.
- [25] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2012 年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J].灾害学,2016,31(1):120-127.
Zhang Y Z, Zhang B, Liu Y Y, et al. Spatial and temporal pattern of strong drought and its influence factors in Ningxia from 1960—2012[J]. Journal of Catastrophology, 2016,31(1):120-127.
- [26] 姚旭阳,张明军,张宇,等.中国西北地区气候转型的新认识[J].干旱区地理,2022,45(3):671-683.
Yao X Y, Zhang M J, Zhang Y, et al. New insights into climate transition in Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022,45(3):671-683.
- [27] 刘杨奕,毛文静,李思琦,等.中国西北地区气象干旱时空演变特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):86-92.
Liu Y Y, Mao W J, Li S Q, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of meteorological droughts in Northwest China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(1):86-92.
- [28] 胡悦,杜灵通,候静,等.基于 SPI 指数的宁夏中部干旱带 1960—2012 年干旱特征研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):255-262.
Hu Y, Du L T, Hou J, et al. Drought characteristics in arid zone of middle Ningxia from 1960 to 2012 base on SPI index[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017,35(2):255-262.
- [29] 张继权,李宁.主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M].北京:北京师范大学出版社,2007.
Zhang J Q, Li N. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2007.
- [30] 李双双,延军平,杨蓉,等.气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J].中国沙漠,2013,33(5):1552-1559.
Li S S, Yan J P, Yang R, et al. Spatial-temporal characteristics of drought and flood disasters under the background of global warming in Ningxia in 1961—2010[J]. Journal of Desert Research, 2013,33(5):1552-1559.
- [31] 赵佳琪,张强,朱秀迪,等.中国旱灾风险定量评估[J].生态学报,2021,41(3):1021-1031.
Zhao J Q, Zhang Q, Zhu X D, et al. Quantitative assessment of drought risk in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):1021-1031.
- [32] 谭春萍,杨建平,杨圆,等.宁夏回族自治区干旱致灾危险性时空变化特征[J].灾害学,2015,30(2):89-93.
Tan C P, Yang J P, Yang Y, et al. Spatial-temporal variation of drought hazard in Ningxia Hui autonomous region, China[J]. Journal of Catastrophology, 2015,30(2):89-93.

(上接第 222 页)

- [22] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007,31(3):413-424.
- [23] 赵杰,杜自强,武志涛,等.中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J].地理学报,2018,73(3):395-404.
Zhao J, Du Z Q, Wu Z T, et al. Seasonal variations of day- and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(3):395-404.
- [24] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.
Zhang G L, Xu X L, Zhou C P, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(1):47-58.
- [25] 徐勇,戴强玉,黄雯婷,等.2000—2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J].环境科学,2023,44(1):323-335.
Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, et al. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in southwest China from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023,44(1):323-335.