

考虑气候分区的甘肃省干旱时空分布特征分析

郑健^{1,2} 鲍婷婷^{1,2} 王春霞³ 赵雨露^{1,2} 陈娅^{1,2} 王燕^{1,4}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050;
3. 临夏回族自治州水利科学研究院, 临夏 731100; 4. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050)

摘要: 甘肃省地处生态脆弱区, 气候条件复杂, 干旱发生概率高、范围广。为了更好地研究甘肃省干旱时空变化特征, 综合考虑甘肃省气候类型和地理特征将其划分为4个气候分区(Ⅰ区, 河西大陆性气候区; Ⅱ区, 陇中北部季风气候区; Ⅲ区, 陇南-陇中南部季风气候区; Ⅳ区, 甘南高寒气候区), 并采用甘肃省26个国家气象站点的气象资料, 计算其近60年(1960—2019年)的月、季和年尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12), 结合气候倾向率、Mann-Kendall突变检验、空间插值等方法探讨甘肃省近60年的干旱时空演变特征。结果表明: 从时间变化角度看, 不同时间尺度的SPEI均呈减小变化趋势, 且随时间尺度的增大, SPEI波动幅度越小; 在四季变化上, 春、夏、秋季SPEI在甘肃省各气候分区都呈现在波动中下降的趋势, 且下降趋势明显, 表明干旱趋势显著, 冬季SPEI在各气候分区呈现在波动中上升的趋势, 表明有湿润化的趋势。从空间变化角度看, 甘肃省Ⅰ区呈干旱减缓趋势, Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区呈干旱加剧趋势, 且春季各气候分区干旱加剧趋势明显, 夏、秋季次之, 而冬季基本上都呈现干旱减缓趋势; 甘肃省不同气候分区不同等级干旱发生频率分布差异大且不均衡, 干旱频率由小到大依次为: 特旱、中旱、重旱、轻旱。

关键词: 干旱; 标准化降水蒸散指数; 时空分布特征; 甘肃省

中图分类号: P49; S166 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0311-10 OSID: 

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Drought in Gansu Province Considering Climate Zoning

ZHENG Jian^{1,2} BAO Tingting^{1,2} WANG Chunxia³ ZHAO Yulu^{1,2} CHEN Ya^{1,2} WANG Yan^{1,4}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. Key Laboratory of the System of Biomass Energy and Solar Energy Complementary Energy Supply System in Gansu, Lanzhou 730050, China
3. Water Conservancy Research Institute of Linxia Hui Autonomous Prefecture, Linxia 731100, China
4. Collaborative Innovation Center of Key Technology for Northwest Low Carbon Urbanization, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Gansu Province is located in an ecologically fragile area, with complex climate conditions, high probability and wide range of drought. In order to better study the temporal and spatial variation characteristics of drought in Gansu Province, it was divided into four climate zones according to the climate type and geographical characteristics: the continental climate area of Hexi (Region I), the monsoon climate area in the northern of Longzhong (Region II), the monsoon climate area of Longnan and the south of Longzhong (Region III) and the alpine climate area of Gannan (Region IV). The meteorological data of 26 national meteorological stations in Gansu Province were used to calculate the standardized precipitation evapotranspiration index on monthly, quarterly and annual scales (SPEI-1, SPEI-3 and SPEI-12) in the past 60 years (1960—2019). The spatiotemporal evolution characteristics of drought in Gansu Province in recent 60 years were discussed by means of climate tendency rate, Mann-Kendall mutation test and spatial interpolation. The results showed that the SPEI values of different time scales showed a decreasing trend from the perspective of time process, and the fluctuation range of SPEI values was smaller as the time scale was increased. For seasonal factor, in spring, summer and autumn,

the SPEI values showed a downward trend in fluctuations in all climate regions of Gansu Province. And the downward trend was obvious, indicating a significant drying trend. In winter, the SPEI values showed a rising trend in fluctuations in various climate regions, indicating a trend of wetting. Spatially, it showed a humid trend in Region I of Gansu Province, but it was dire in Region II, III and IV of Gansu Province. And in spring, the drought in various climate regions of Gansu Province had an obvious trend of aggravation, followed by summer and autumn, while in winter, the drought was basically slowed down. The frequency of occurrence of different levels of drought in different climate regions of Gansu Province was very different and uneven, and the drought frequency from smallest to largest was extreme drought, moderate drought, heavy drought and mild drought.

Key words: drought; standardized precipitation evapotranspiration index; spatial distribution characteristics; Gansu Province

0 引言

干旱是当今世界人类面临的主要自然灾害之一^[1-2],对不同地区、不同时期的农业、经济和社会都会造成严重和多样化的影响^[3],研究不同气候类型和地理特征下的干旱时空变化,可为防灾减灾以及建立旱情预警、监测等提供有效可靠的科学依据。中国西北地区干旱发生时波及范围广、持续时间长、不可控因素多,对生态系统、农业生产和社会经济都造成了不可估量的后果^[4]。甘肃省地处西北,东西跨度大、气候类型复杂多样^[5],是我国自然生态类型最为复杂和脆弱的地区之一^[6]。准确分析甘肃省干旱灾害的演变规律,明确干旱时空演变特征是区域灾害管理的重要组成部分,对于构建和完善地区干旱风险评价体系与管理机制具有重要意义。

评估干旱最常用的有标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)^[7]、帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)^[8]和标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[9],研究表明, SPI 计算简单,能够很好地描述某些区域的干旱特征,但该指数只考虑了降水这一因素,并且在全球变暖的大背景下忽略了温度变化带来的潜在影响,所以 SPI 有一定的局限性;PDSI 考虑了温度变化对干旱特征的影响,适合全球变暖下各地区干旱的研究,但该指数所涉及的各项参数较难获取,且 PDSI 在划分干旱等级时易受主观意愿的影响^[10]。而 VICENT-SERRANO 等^[11]提出的 SPEI 指数不仅考虑了 SPI 指数未考虑的潜在蒸散发,并从多时间尺度描述干旱,还避免了 PDSI 指数在干旱等级划分时的主观性,结合了上述两者优点的 SPEI 适用性好,能更好地对干旱进行监测^[12]。文献[3, 12-14]都利用 SPEI 指数对不同区域的干旱进行了研究,证明了 SPEI 指数有较好的地区适用性。甘肃省是一个多气候区共存的省份,李栋梁等^[15]、郑健等^[16]都对甘

肃省进行过区域划分,但前者由于各气候区划分得比较细,国家气象站点目前尚未完全覆盖所有气候区,后者则在划分气候区时未考虑甘肃省主要的四大气候类型,而气候类型和地理特征是干旱形成的重要影响因素。因此,本文综合考虑上述因素将甘肃省划分为河西大陆性气候区(I区)、陇中北部季风气候区(II区)、陇南-陇中南部季风气候区(III区)和甘南高寒气候区(IV区)。考虑气候分区的 SPEI 能在不同气候类型下更准确地识别干旱的发生特征和影响因素。

本文基于划分的 4 个气候分区,以中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中甘肃省 26 个国家气象站点 1960—2019 年逐日气象观测数据为基础,通过 Mann-Kendall 突变检验、气候倾向率、干旱站次比等干旱指标分析甘肃地区 1960—2019 年的干旱演变规律及干旱现状,以期为甘肃省的旱灾预警评估和旱灾防控提供依据和指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域及气象数据资料

甘肃省位于中国西北内陆地区(32°11'~42°57'N, 92°13'~108°46'E),横跨黄土、青藏和内蒙古三大高原,幅员辽阔且地形呈狭长型,东西蜿蜒约1 659 km,南北跨度约 530 km,总面积约 4.258 × 10⁵ km²(图 1)。得天独厚的自然环境和气候类型,使甘肃省形成了山地、平川、高原、沙漠、隔壁等多种地形地貌以及耕牧交错的特色农牧业生态系统。甘肃省年均降水量为 300 mm 左右,但整体在时间和空间上分布不均,导致甘肃省极易发生干旱灾害。

甘肃省 1960—2019 年的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),包括 26 个国家气象站点的逐日降水量、气温(日平均气温、日最高气温、日最低气温)、日照时数、日相对湿度等气象资料。图 1 是甘肃省各气象站点及气候分区分布图。为了提高 SPEI 计算结果的准确性和科学性,利

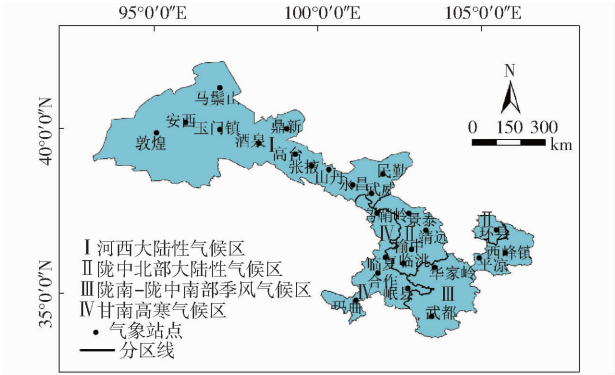


图1 甘肃省气象站点及气候分区分布图

Fig.1 Distribution of meteorological stations and climatic divisions in Gansu Province

用数据插补法对缺失数据进行插补,具体方法见文献[17]。

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降雨蒸散指数计算方法

首先采用 Penman - Monteith 法计算潜在蒸散量^[18-21],计算过程详见文献[22-23]。再利用 Penman - Monteith 法计算的潜在蒸散量来计算 SPEI,SPEI 详细计算过程如下^[24-25]：

计算逐月降雨量与潜在蒸散量的差值 D_i ,计算公式为

$$D_i = P_i - PET_i \tag{1}$$

式中 P_i ——第 i 月的降雨量,mm

PET_i ——用 Penman - Monteith 法计算得到的第 i 月的潜在蒸散量,mm

计算不同时间尺度的 SPEI,本文计算 1、3、12 个月尺度的 SPEI,计算式为

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad (n \geq k) \tag{2}$$

式中 k ——月时间尺度

n ——计算次数

采用拟合效果较好的 log - logistic 概率密度分布函数 $f(\chi)$ 对 D 进行拟合,即

$$f(\chi) = \frac{\beta}{\alpha'} \left(\frac{\chi - \gamma}{\alpha'} \right)^{\beta - 1} \left[1 + \left(\frac{\chi - \gamma}{\alpha'} \right)^{\beta} \right]^{-1} \tag{3}$$

$$F(\chi) = \left[1 + \left(\frac{\alpha'}{\chi - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \tag{4}$$

式中 α' ——尺度参数

β ——形状参数

γ ——位置参数

$F(\chi)$ ——累计概率分布函数

以上各参数可通过线性矩估计的方法获得。

最后对累计概率密度进行标准化,得到 SPEI,计算式为

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \tag{5}$$

其中 $w = \sqrt{-2 \ln P}$ (6)

$$P = \begin{cases} F(\chi) & (P \leq 0.5) \\ 1 - F(\chi) & (P > 0.5) \end{cases} \tag{7}$$

式中 w ——参数 P ——累计概率

其中常数 $c_0 = 2.515\ 517, c_1 = 0.802\ 853, c_2 = 0.010\ 328, d_1 = 1.432\ 788, d_2 = 0.189\ 269, d_3 = 0.001\ 308$ 。

SPEI 具有多时间尺度的特性,本文分别计算了甘肃省 26 个国家气象站点 1 个月(月尺度)、3 个月(季尺度)、12 个月(年尺度)时间尺度的 SPEI,依次记为 SPEI - 1、SPEI - 3、SPEI - 12。SPEI - 3 可以描述干旱的季节发生规律(春季(3—5 月)由 5 月的 SPEI - 3 表示、夏季(6—8 月)由 8 月的 SPEI - 3 表示、秋季(9—11 月)由 11 月的 SPEI - 3 表示、冬季(12—2 月)由次年 2 月的 SPEI - 3 表示)、SPEI - 12 可以描述干旱的年际发生规律^[26],本文主要分析 SPEI - 3 和 SPEI - 12,而 SPEI - 1 主要用于对甘肃省典型干旱事件进行比较与验证。

本文参考国家气象干旱等级相关标准^[27]和其他学者^[18,28]对干旱阈值的分级,根据 SPEI 的计算结果将干旱分为特旱、重旱、中旱、轻旱和正常 5 个不同的等级,如表 1 所示。

表 1 SPEI 干旱等级划分

Tab.1 Drought classification based on SPEI

干旱等级	SPEI
特旱	≤ -2.0
重旱	$(-2.0, -1.5]$
中旱	$(-1.5, -1.0]$
轻旱	$(-1.0, -0.5]$
正常	$(-0.5, 0.5]$

用于与同期 SPEI 验证比较的典型干旱事件资料来源于《中国气象灾害大典:甘肃卷》^[29]和中国气象数据网上记载的甘肃省各气候分区发生的典型干旱事件,本文整理了甘肃省 1960—2019 年 17 次较大的旱灾事件,如表 2 所示。

1.2.2 Mann - Kendall 突变检验

Mann - Kendall 突变检验是一种趋势检验法,可以直观地判断序列的变化趋势是上升还是下降,并且其计算结果比较稳定,少数异常值对其基本没有干扰,便于应用且计算简单,是检验时间序列变化趋势及时间序列何时发生突变的一种有效方法,其中顺序统计量 UF 和逆序统计量 UK 小于零时,表明序列呈下降趋势,反之则呈上升趋势,当它们超过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线时,表明变化趋势显著,当 UF 和 UK 在临界线之间相交时,则此时就是突变开始的时刻。其具体计算过程见文献[30]。

表 2 近年来甘肃省各气候分区典型干旱事件与 SPEI 干旱指数比较与验证

Tab.2 Comparison and verification of typical drought events and SPEI drought index in different climatic zones of Gansu Province in recent years

发生时间	发生范围	灾害描述	SPEI
1990 年 4 月下旬—7 月	Ⅱ 区、Ⅲ 区	轻旱	-0.54(靖远 5—7 月)、-0.52(景泰 4—7 月)、 -0.63(武都 5—7 月)
1991 年 6 月中旬—8 月上旬	Ⅰ 区、Ⅲ 区(局部区域)	轻旱到重旱	-0.94(酒泉 7—8 月)、-1.32(平凉 6—8 月)、 -1.64(西峰镇 6—8 月)
1992 年 2—6 月	Ⅲ 区	轻旱到重旱	-0.65(武都 2—6 月)
1994 年 7 月中旬—9 月	Ⅱ 区、Ⅲ 区、Ⅳ 区(局部区域)	轻旱到重旱	-1.01(靖远 7—8 月)、-1.50(平凉 7—9 月)、 -1.43(岷县 7—9 月)
1995 年 3—6 月	Ⅰ 区(局部区域)、Ⅲ 区、Ⅳ 区(局部区域)	降雨量为有气象记录以来的最小值或次小值	-1.21(安西 3—6 月)、-1.97(武都 3—6 月)、 -2.17(岷县 4—6 月)、-1.87(平凉 3—6 月)
1997 年夏季	Ⅰ 区(东部)、Ⅱ 区、Ⅲ 区(局部区域)	近 60 年来干旱范围最大、旱情最重的一年	-1.86(永昌 7—8 月)、-2.09(靖远 5—7 月)、 -2.61(西峰 6—7 月)、-1.82(武都 6—8 月)
1999 年 2 月上旬—4 月下旬	Ⅰ 区	中旱	-1.21(敦煌 2—4 月)、-1.43(玉门镇 2—4 月)
1999 年 7 月上旬—9 月下旬	Ⅰ 区(局部区域)、Ⅲ 区、Ⅳ 区(局部区域)	大范围的伏秋连旱	-1.68(敦煌 8—9 月)、-1.29(平凉 7—9 月)、 -1.89(武都 7—9 月)
2000 年 5—8 月	Ⅱ 区(局部区域)、Ⅲ 区(局部区域)	中旱到重旱	-1.72(环县 5—8 月)、-1.96(西峰镇 6—8 月)
2001 年 5—8 月	Ⅰ 区(局部区域)、Ⅲ 区	中旱到重旱	-1.75(张掖 5—8 月)、-1.29(平凉 5—6 月)、 -1.33(西峰镇 5—7 月)
2004 年 4—7 月	Ⅰ 区(局部区域)、Ⅲ 区	轻旱到中旱	-1.11(鼎新 5—7 月)、-0.59(平凉 4—7 月)
2007 年 4—7 月	Ⅲ 区	中旱到重旱	-1.73(平凉 4—7 月)、-2.01(西峰镇 5—7 月)
2008 年 6—8 月	Ⅱ 区、Ⅲ 区、Ⅳ 区(局部区域)	中旱	-1.26(环县 6—8 月)、-1.01(玛曲 6—8 月)、 -1.24(西峰镇 5—7 月)
2009 年 5—8 月	Ⅱ 区、Ⅲ 区	轻旱到重旱	-1.47(榆中 7—8 月)、-2.01(平凉 5—8 月)
2011 年 4—6 月	Ⅱ 区(局部区域)、Ⅲ 区	轻旱到重旱	-2.37(环县 3—4 月)、-2.03(平凉 4—6 月)
2013 年 1—3 月下旬	Ⅰ 区(东部)、Ⅲ 区	轻旱到重旱	-1.92(民勤 1—3 月)、-1.55(武都 1—3 月)、 -1.62(西峰镇 2—3 月)
2015 年 7 月下旬—12 月	Ⅱ 区、Ⅲ 区	轻旱到中旱	-0.65(临洮 8—9 月)、-1.16(华家岭 8—12 月)

1.2.3 气候倾向率

气候倾向率是通过各气候要素与时间序列之间建立的一元线性回归方程实现,能在一定程度上反映各气候要素的变化趋势,假设 X_i 为样本量为 m 的某一气候变量, t_i 为相对应的时间,建立 X_i 和 t_i 之间的一元线性回归方程^[30]

$$X_i=a+bt_i\quad(i=1,2,\cdots,m)$$

(8)

式中 a ——回归常数 b ——回归系数

其中 a 和 b 都用最小二乘法估计,将 $10b$ 作为气候倾向率。

1.2.4 干旱评价指标

利用干旱站次比描述甘肃省各气候分区干旱发生范围;利用干旱发生频率描述甘肃省干旱发生的频繁程度。计算公式分别为^[19,31]

$$P_j=\frac{m'}{M}\times100\%$$

(9)

$$P_k=\frac{n'}{N}\times100\%$$

(10)

式中 P_j ——干旱站次比,%
 m' ——某区域发生干旱的气象站点数
 M ——某区域内总气象站点数
 P_k ——干旱发生频率,%
 n' ——序列中某一站点发生干旱的总年数
 N ——序列总年数

2 结果与分析

2.1 甘肃省干旱时间格局特征

2.1.1 不同时间尺度下 SPEI 变化特征

SPEI 具有多时间尺度的特性。图 2 为不同时间尺度 SPEI(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12)的变化规律。由图 2 可知,不同时间尺度的 SPEI 波动频率由高到低依次为 SPEI-1、SPEI-3 和 SPEI-12;SPEI-1 沿着 0 值上下波动频繁,表明月尺度的 SPEI 对干旱的响应最为显著,并且时间尺度越大,即年尺度的 SPEI 对干旱的响应存在延迟,但却能整体把握干旱变化规律和走势,且反映的干旱变化规

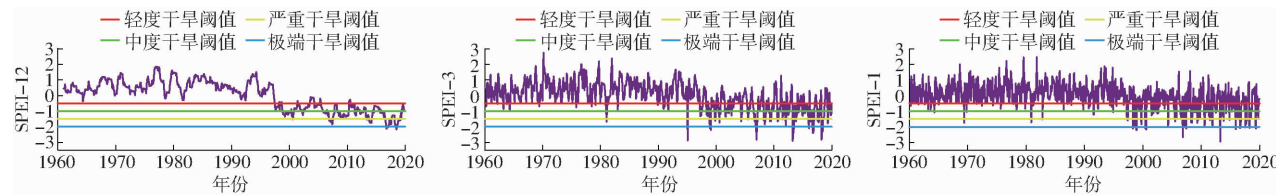


图 2 1960—2019 年甘肃省不同时间尺度下 SPEI 演变特征

Fig. 2 Characteristics of SPEI evolution at different time scales in Gansu Province from 1960 to 2019

律也越稳定。进一步分析图 2 还可以看出,甘肃省从 1960—2019 年 SPEI 呈下降趋势,表明近年来甘肃省的气候正逐渐转变为干旱的情形,干早期主要集中在 1997—2019 年,以中旱和重旱为主,这种干旱发展趋势不利于农牧业及社会经济的发展,需要因地制宜制定抗旱策略。

2.1.2 SPEI 年际变化及 Mann-Kendall 突变检验

为了进一步研究甘肃省各气候分区 SPEI 的四季变化规律,对其进行 Mann-Kendall 突变检验,如图 3(图中 CI_{up} 、 CI_{low} 分别为显著性水平 $\alpha=0.05$ 的上限和下限)所示。由图 3 可知,春、夏、秋季甘肃省各气候分区在 20 世纪 60 年代到 20 世纪 90 年代

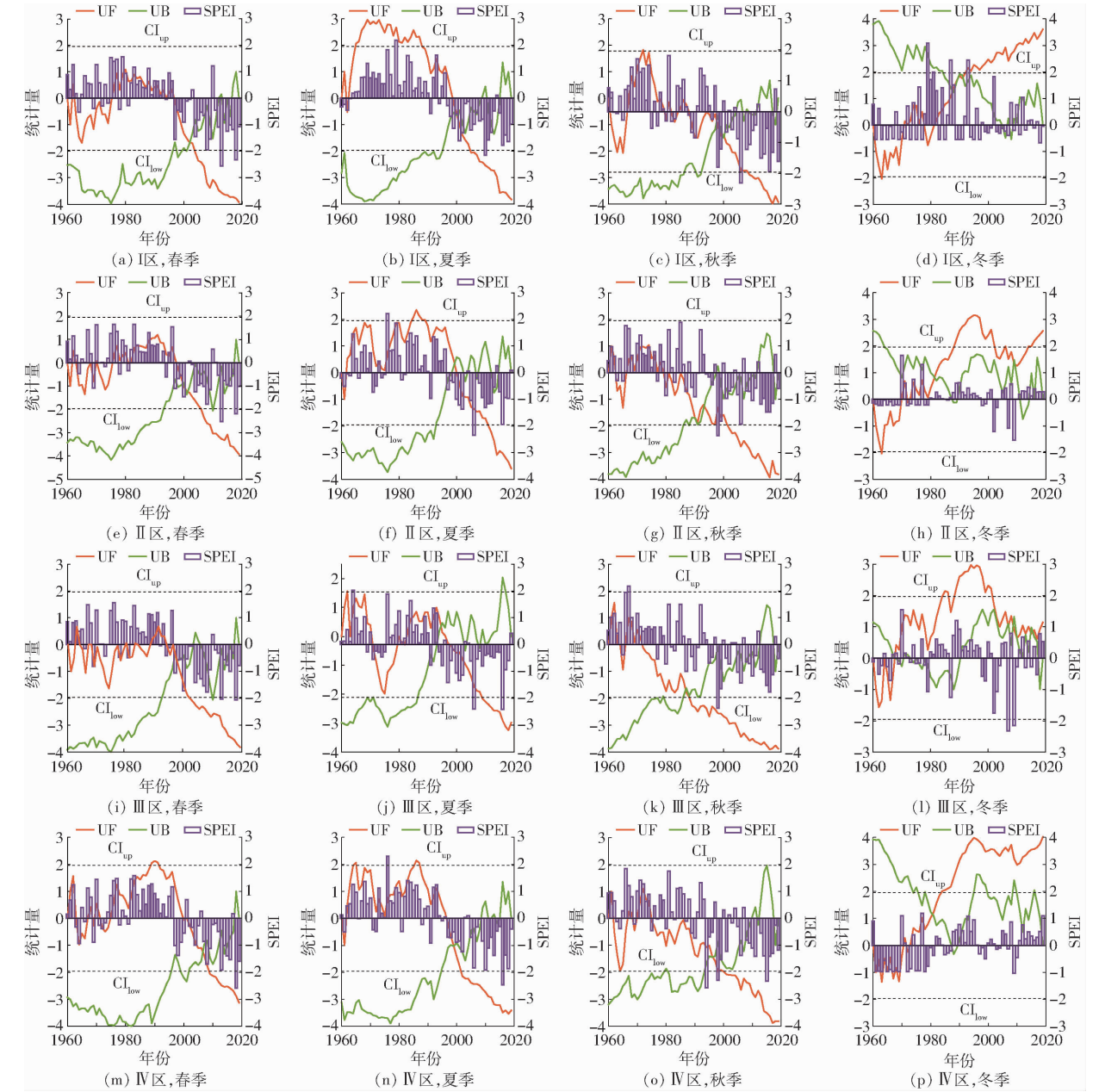


图 3 1960—2019 年甘肃省不同气候分区四季 SPEI 及 Mann-Kendall 突变检验曲线

Fig. 3 Four seasons SPEI value and Mann-Kendall test results of different climate zones in Gansu Province from 1960 to 2019

中期 UF 曲线基本上都是先小于 0 再大于 0,表明 SPEI 先呈下降趋势再呈上升趋势,各地湿润化趋势明显,但在 20 世纪 90 年代中期到 21 世纪 10 年代 UF 曲线在各气候分区都小于 0,并且 UF 曲线在 21 世纪初期到 21 世纪 10 年代超过了 0.05 显著性水平线,表明 SPEI 呈下降趋势并且下降趋势明显,可知各气候分区干旱越来越显著,并且在春季,Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区由湿润转变为干旱的突变年分别为 2001、2000、1997、2007 年;夏季Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区由湿润转变为干旱的突变年分别为 2000、1999、1995、1997 年;秋季,Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区由湿润转变为干旱的突变年分别为 1998、1990、1988、1997 年。冬季各气候分区在 20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代初期 UF 曲线均小于 0,20 世纪 70 年代中后期到 21 世纪 10 年代 UF 曲线大于 0,表明 SPEI 先呈下降趋势再呈上升趋势,且 UF 曲线在上升过程中都超过了 0.05 显著性水平线,表明上升趋势明显,可知冬季各气候分区湿润化趋势显著,并且Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅳ区由于干旱转变为湿润的突变年分别为 1988、1982、1981 年;Ⅲ区 UF 和 UB 曲线有多个交点,表明旱涝变化极不稳定。由以上分析可知甘肃省各气候分区在春夏秋三季都处于变干旱的趋

势,从 20 世纪 60 年代到 20 世纪 90 年代中期,SPEI 大多呈现为正指数,表明较为湿润,但从 20 世纪 90 年代后期到 21 世纪 10 年代,SPEI 大多呈现负指数,表明干旱程度总体偏重;但甘肃省各气候分区在冬季是处于变湿的趋势,且湿润程度总体偏轻。

2.1.3 干旱范围演变特征

从干旱的影响范围来描述干旱,可以更全面阐明甘肃省 1960—2019 年的干旱演变特征。本文利用干旱站次比来反映干旱发生的范围,干旱站次比越大则干旱发生的范围越大。表 3 为甘肃省各气候分区干旱影响范围的不同等级干旱发生次数,可以看出各气候分区干旱发生的范围基本上呈两极分化的趋势,发生的都是全域性干旱($P_j \geq 50\%$)和无明显干旱($P_j < 10\%$);近 60 年,区域性干旱($33\% \leq P_j < 50\%$)在Ⅰ区发生过 1 年、在Ⅳ区发生过 4 年;部分区域性干旱($25\% \leq P_j < 33\%$)在Ⅲ区发生过 9 年;局域性干旱($10\% \leq P_j < 25\%$)在Ⅱ区和Ⅳ区都发生过 5 年。并且在 1960—1999 年,各气候分区普遍发生的都是无明显干旱,而 2000—2019 年,各气候分区普遍发生的都是全域性干旱,表明从 1960—2019 年的 60 年时间内甘肃省先呈现的是无明显干旱的趋势,从 20 世纪 90 年代发生转变,开始变得极度干旱,区域性干旱趋势显著。

表 3 1960—2019 年甘肃省不同气候分区干旱影响范围的不同等级发生次数

Tab.3 Occurrence times of drought at different levels in different climate zones of Gansu Province from 1960 to 2019								
区域	发生范围	1960—1969 年	1970—1979 年	1980—1989 年	1990—1999 年	2000—2009 年	2010—2019 年	合计
Ⅰ区	全域性干旱	0	0	0	3	9	10	22
	区域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	部分区域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	局域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	无明显干旱	10	10	10	7	1	0	38
Ⅱ区	全域性干旱	0	0	0	3	8	10	21
	区域性干旱	0	0	0	0	1	0	1
	部分区域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	局域性干旱	3	1	1	0	0	0	5
	无明显干旱	7	9	9	7	1	0	33
Ⅲ区	全域性干旱	1	0	0	5	9	7	22
	区域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	部分区域性干旱	0	3	3	0	0	3	9
	局域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	无明显干旱	9	7	7	5	1	0	29
Ⅳ区	全域性干旱	0	0	0	3	6	10	19
	区域性干旱	1	0	0	0	3	0	4
	部分区域性干旱	0	0	0	0	0	0	0
	局域性干旱	2	0	0	2	1	0	5
	无明显干旱	7	10	10	5	0	0	32

2.2 甘肃省干旱空间格局特征

2.2.1 SPEI 气候倾向率空间分布

从空间角度分析干旱分布状况可以更全面、更

直观地了解甘肃省近 60 年的干旱演变规律,本文应用 ArcGIS 10.4 软件对甘肃地区各站点的 SPEI 气候倾向率进行反距离权重插值,得到不同气候分区

四季和年际 SPEI 气候倾向率空间分布图(图 4)。由图可知,春(图 4a)、夏(图 4b)、秋(图 4c)三季

SPEI 气候倾向率在空间分布上与冬季(图 4d)差异十分显著,春季甘肃省各气候分区干旱加剧趋势非常显著,尤其在 I 区和 II 区,SPEI 气候倾向率平均为 $-0.31(10\text{ a})^{-1}$,且 SPEI 气候倾向率最低的站点是环县,为 $-0.38(10\text{ a})^{-1}$;夏季甘肃省各气候分区除 III 区的西峰镇是干旱减轻的趋势,SPEI 气候倾向率为 $0.05(10\text{ a})^{-1}$,其余地区都呈现干旱加剧的变化趋势,SPEI 气候倾向率处于 $-0.37 \sim -0.23(10\text{ a})^{-1}$ 之间;秋季甘肃省各气候分区也是干旱加剧的趋势,但相对于春季和夏季加剧趋势有所减轻,除安西和西峰站点外,整体上 SPEI 气候倾

向率均处于 $-0.34 \sim -0.22(10\text{ a})^{-1}$;不同于其他季节,冬季甘肃省各气候分区均呈干旱减轻的趋势,SPEI 气候倾向率平均为 $0.12(10\text{ a})^{-1}$,尤其是在 I 区、IV 区和 III 区的华家岭干旱减轻趋势非常明显,SPEI 气候倾向率最高可达 $0.30(10\text{ a})^{-1}$,考虑可能是因为冬季气温相对比较低,蒸散量比较小。进一步分析图 4e 可知,甘肃省各气候分区全年 SPEI 气候倾向率空间分布差异明显, I 区除民勤、武威和马鬃山地区干旱呈加剧的趋势外,其他地区都呈干旱减缓的趋势,尤其是 I 区的鼎新,干旱减缓趋势显著,SPEI 气候倾向率为 $0.25(10\text{ a})^{-1}$; II 区、III 区和 IV 区呈干旱加剧的变化趋势,尤其在华家岭,SPEI 气候倾向率可达 $-0.38(10\text{ a})^{-1}$ 。

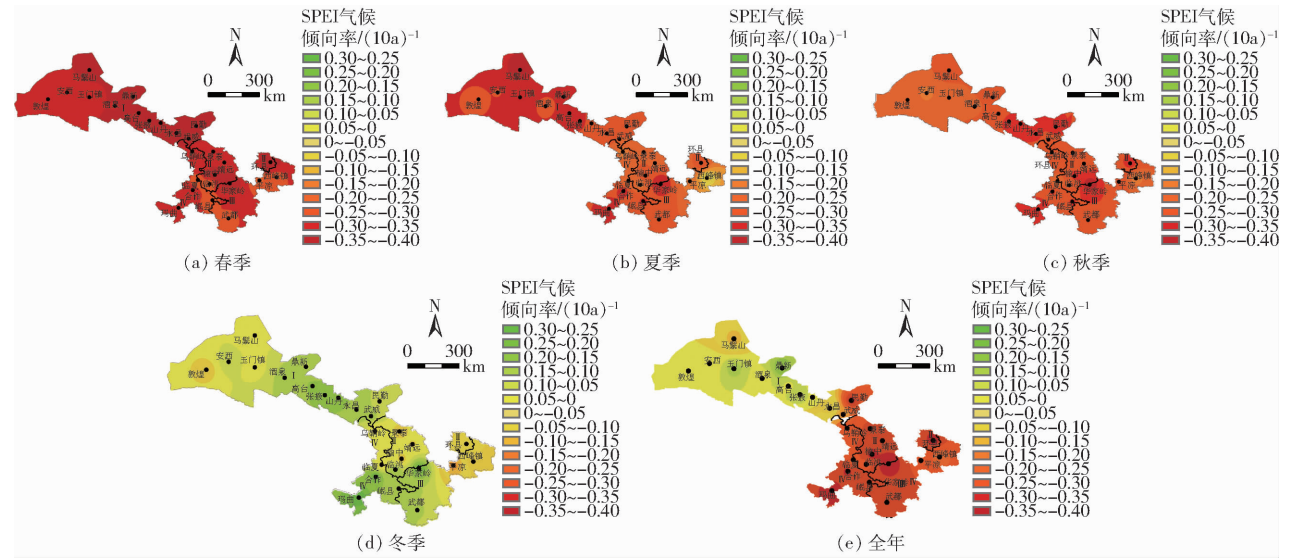


图 4 1960—2019 年甘肃省不同气候分区四季和年际 SPEI 气候倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of four seasons and interannual SPEI climate tendency in different climate zones of Gansu Province from 1960 to 2019

2.2.2 不同等级干旱发生频率空间分布

为进一步分析甘肃省不同气候分区的干旱状况,绘制不同干旱等级发生频率空间分布图。由图 5 可以看出,甘肃省近 60 年不同干旱等级发生频率空间分布差异较大,且轻旱和重旱发生频率相对较高,特旱发生频率最低,中旱发生频率居中;轻旱在 II 区发生频率最高,在 13.33% ~ 19.50% 之间,轻旱发生频率相对较低地区有 I 区的永昌、民勤,III 区的西峰镇,发生频率在 3.33% ~ 8.34% 之间;重旱发生频率较高,在除了鼎新外的 I 区、II 区的环县、III 区的华家岭,发生频率在 11.67% ~ 18.33% 之间,重旱发生频率相对较低的地区有 I 区的鼎新、III 区的武都、IV 区的玛曲和临夏,发生频率在 6.67% ~ 8.33% 之间;中旱发生频率较低且发生频率分布较规律,呈自东南向西北逐渐增大的变化趋势,且干旱频率控制在 3.33% ~ 11.67% 之间,中旱

在 I 区发生频率最大,在 3.33% ~ 11.67% 之间, II 区发生频率最小,在 3.33% ~ 6.67% 之间;不同气候分区内特旱发生频率最低,尤其是在 I 区的敦煌、安西、马鬃山、玉门镇、鼎新和酒泉地区发生频率为 0。因此,甘肃省不同干旱等级发生频率由小到大依次为:特旱、中旱、重旱、轻旱。

3 讨论

基于气候类型和地理特征将甘肃省划分为 4 个气候分区,采用基于 Penman - Monteith 法计算的 SPEI 干旱指数分析甘肃省近 60 年来的干旱时空格局特征,发现在不同气候变化背景下,甘肃西部地区(I 区)近年来呈干旱缓解趋势,而甘肃东南部地区(II 区、III 区和 IV 区)呈干旱加剧趋势,甘肃省整体呈现干旱化的变化趋势,这一结论与李亮等^[17]和任培贵等^[32]对甘肃省及中国西北地区气象干旱变化

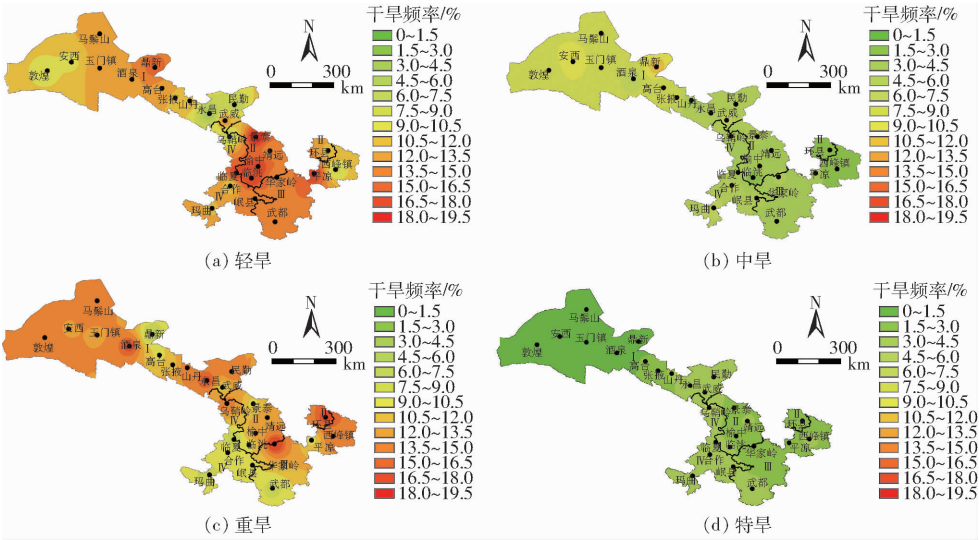


图5 1960—2019年甘肃省不同气候分区不同干旱等级发生频率空间分布

Fig.5 Spatial distributions of different drought degrees in different climate zones of Gansu Province from 1960 to 2019

趋势的分析结果基本上一致,但在干旱影响范围和不同等级干旱发生频率空间分布上与上述学者的研究有一定的差异,主要可能是本文把甘肃省划分了4个气候分区,在一定程度上提高了干旱影响范围的准确性,而不同等级干旱发生频率空间分布上的差异考虑可能是所选的气象站点不同导致的,在后续研究中可适当增加一些省级气象站点的气象数据以及采用空间分辨率较高的栅格数据来提高计算结果的精度。

甘肃省四季干旱发生规律也不尽相同,研究表明春、夏、秋季呈干旱加剧的演变趋势,而冬季则呈干旱缓解的演变趋势,这与刘杨奕等^[33]在对中国西北地区气象干旱时空演变特征研究时所得出的结论一致。主要原因为:甘肃省是中国主要的农作物种植区和畜牧区,需水量极大,但年平均降水量只有300 mm左右,且四季分布不均,随着全球变暖,蒸发蒸腾量也随之变高,因此甘肃省春、夏、秋季干旱情势比较严重。

利用 SPEI 指数对全中国^[19]、中国西南地区^[34]、黄河流域^[35]和长江中下游地区^[36]的研究比较多,但对甘肃地区的研究比较少,尤其是基于气候分区的甘肃省干旱的研究。同时,从 SPEI 的计算机理上来说,该指数不仅对温度变化敏感,又具有 SPI 的多尺度特性,适用于气候变暖条件下干旱的描述,能更客观地反映区域内的干湿状况,因此 SPEI 相较于其他干旱指数计算结果更为可靠^[17];并且从甘肃省各气候分区发生的典型干旱事件(表2)与同期 SPEI 的验证与比较中可以看出,干旱的发生时间、发生的区域及干旱的发生强度和 SPEI 值基本上一致,表现出了较高的可靠性。以上所述证明在采用

本文分区条件下,SPEI 干旱指数对研究甘肃省干旱时空分布特征具有较好的可靠性和准确性。

本文对甘肃省近60年来的干旱时空分布特征进行了探讨,但对于干旱的演变成因研究还显不足,干旱的发生不仅与该地区的降雨和气温等气象因素有关,而且人类活动、大气环流异常、地形、植被等都可能对干旱的发生产生影响。将会在后续的工作中进一步探讨与研究,以期对甘肃省旱灾防治提供更加科学实用的理论依据。

4 结论

(1)甘肃省不同时间尺度的 SPEI 波动规律不同,SPEI-1 波动幅度最小,SPEI-12 波动幅度最大,SPEI-3 居中,但各时间尺度的 SPEI 都呈现出明显的干旱化趋势。

(2)甘肃省各气候分区春、夏与秋季干旱化趋势明显,冬季湿润化趋势明显,Mann-Kendall 突变检验显示全省各气候分区由湿润转变为干旱的突变年份基本集中在1990—2006年,由干旱转变为湿润的突变年基本集中在1980—1990年。

(3)在干旱影响范围上,甘肃省各气候分区在1960—1999年普遍发生的都是无明显干旱,而在2000—2019年普遍发生的都是全域性干旱。

(4)在空间分布上,春季Ⅰ区和Ⅱ区 SPEI 气候倾向率最低,平均为 $-0.31(10\text{ a})^{-1}$,表明干旱加剧趋势明显,冬季全省 SPEI 气候倾向率最高,平均为 $0.12(10\text{ a})^{-1}$,表明呈干旱缓解趋势,总体上甘肃省全年Ⅰ区呈干旱减缓,Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区呈干旱加剧趋势;甘肃省不同等级干旱发生频率由小到大依次为:特旱、中旱、重旱、轻旱。

参 考 文 献

- [1] 韩兰英, 张强, 程英, 等. 农业干旱灾害风险研究进展及前景分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 97–102.
HAN Lanying, ZHANG Qiang, CHENG Ying, et al. Research progress of agriculture drought disaster risk and prospect[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 97–102. (in Chinese)
- [2] 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 Min, SUN Peng, ZHANG Qiang, 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. (in Chinese)
- [3] LI M H, VU T M, CHEN P Y. Multiple drought indices and their teleconnections with ENSO in various spatiotemporal scales over the Mekong River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2023, 854: 158589.
- [4] 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, 138.
GUO Meng, ZHANG Qiyong, QIAN Hui, et al. Analysis on the drought temporal-spatial distribution characteristics of Shaanxi Province based on SPEI[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 127–132, 138. (in Chinese)
- [5] HU Q, PAN F, PAN X, et al. Spatial analysis of climate change in Inner Mongolia during 1961–2012, China[J]. Applied Geography, 2015, 60: 254–260.
- [6] 陈晓雨婧, 吴燕红, 夏建新. 甘肃省资源环境承载力监测预警[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2378–2388.
CHEN Xiaoyujing, WU Yanhong, XIA Jianxin. Dynamic monitoring and early warning of resources and environment carrying capacity in Gansu, China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2378–2388. (in Chinese)
- [7] SOBRAL B S, DE OLIVEIRA-JUNIOR J F, DE GOIS G, et al. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO[J]. Atmospheric Research, 2019, 220(5): 141–154.
- [8] ZHANG J, SUN F, LAI W, et al. Attributing changes in future extreme droughts based on PDSI in China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 607–615.
- [9] YANG Y, GAN T Y, TAN X. Spatiotemporal changes of drought characteristics and their dynamic drivers in Canada[J]. Atmospheric Research, 2020, 232: 104695.
- [10] 查木哈, 卢志宏, 翟继武, 等. 双隐含层 BP 神经网络模型在老哈河水质预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 56–61.
CHA Muha, LU Zhihong, ZHAI Jiwu, et al. Using double-suppressed BP neural network model to predict water quality in Laoha River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 56–61. (in Chinese)
- [11] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, ANGULO-MARTINEZ M, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033–1043.
- [12] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于 SPEI 和 TVDI 的河南省干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 126–132.
CHEN Shaodan, ZHANG Liping, TANG Rouxin, et al. Analysis on temporal and spatial variation of drought in Henan Province based on SPEI and TVDI[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 126–132. (in Chinese)
- [13] MUSEI S K, NYAGA J M, DUBOW A Z. SPEI-based spatial and temporal evaluation of drought in Somalia[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 184(1): 104296.
- [14] KIM B S, SUNG J H, KANG H S, et al. Assessment of drought severity over South Korea using standardized precipitation evapo-transpiration index (SPEI)[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2012, 45(9): 887–900.
- [15] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [16] 郑健, 马静, 王燕, 等. 基于气候分区的甘肃省参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 240–247.
ZHENG Jian, MA Jing, WANG Yan, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu based on climatic zones[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1): 240–247. (in Chinese)
- [17] 李亮, PICH Linvolak, 蔡焕杰. 基于标准化降水蒸散指数的甘肃省干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 256–266.
LI Liang, PICH Linvolak, CAI Huanjie. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 256–266. (in Chinese)
- [18] 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 Xuting, PAN Xuebiao, XU Lin, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960–2015[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 190–199. (in Chinese)
- [19] 刘珂, 姜大勝. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23–36.
LIU Ke, JIANG Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 23–36. (in Chinese)

Chinese)

[20] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55–94.

[21] WANG W, ZHU Y, XU R, et al. Drought severity change in China during 1961—2012 indicated by SPI and SPEI[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2437–2451.

[22] PERERA K C, WESTER A W, NAWARATHNA B, et al. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 148(31): 84–96.

[23] 焦醒, 刘广全, 匡尚富, 等. Penman – Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. *水利学报*, 2010, 41(2): 245–252. JIAO Xing, LIU Guangquan, KUANG Shangfu, et al. Review on application of Penman – Monteith equation to studying forest vegetation evapotranspiration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(2): 245–252. (in Chinese)

[24] BEGUERIA S, VICENTE-SERRANO S M, LOPEZ-MORENO J I, et al. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.

[25] 李毅, 张思远, 刘庆祝, 等. 基于 DSSAT – CERES – Wheat 的黄土高原西部春小麦干旱影响研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 338–348. LI Yi, ZHANG Siyuan, LIU Qingzhu, et al. Effects of droughts and meteorology on spring wheat in Western Loess Plateau based on DSSAT – CERES – Wheat model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 338–348. (in Chinese)

[26] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. *地理研究*, 2015, 34(8): 1547–1558. SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Spatial and temporal variations of drought in Henan Province over a 53-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(8): 1547–1558. (in Chinese)

[27] GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S]. 2006.

[28] 田甜, 黄强, 郭爱军, 等. 基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(2): 16–27. TIAN Tian, HUANG Qiang, GUO Aijun, et al. Drought evolution characteristics in Wei River basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(2): 16–27. (in Chinese)

[29] 温克刚, 董安祥. 中国气象灾害大典: 甘肃卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005.

[30] 王晓东, 陈金华, 陈曦, 等. 淮河流域农田旱涝逐日监测指标优化及适用性分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 117–126. WANG Xiaodong, CHEN Jinhua, CHEN Xi, et al. Optimization and applicability analysis of daily farmland drought and flood monitoring index in Huaihe River Basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(23): 117–126. (in Chinese)

[31] 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 58a 演变特征[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50–59. HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 50–59. (in Chinese)

[32] 任培贵, 张勃, 张调风, 等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 182–187. REN Peigui, ZHANG Bo, ZHANG Tiaofeng, et al. Trend analysis of meteorological drought change in Northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1): 182–187. (in Chinese)

[33] 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 Yangyi, MAO Wenjing, LI Siqi, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of meteorological droughts in Northwest China[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(1): 86–92. (in Chinese)

[34] 史晓亮, 吴梦月, 丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 184–192. SHI Xiaoliang, WU Mengyue, DING Hao. Difference analysis of SPEI and vegetation remote sensing information in drought monitoring in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 184–192. (in Chinese)

[35] 高秉丽, 巩杰, 李焱, 等. 基于 SPEI 的黄河流域多尺度干湿特征分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 723–733. GAO Bingli, GONG Jie, LI Yan, et al. Analysis of multi-scale characteristics of dry and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3): 723–733. (in Chinese)

[36] 张茜, 刘冀, 魏榕, 等. 基于 SPEI 指数的长江经济带上游干湿时空演变特征分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 203–211. ZHAN Qian, LIU Ji, WEI Rong, et al. Analysis on the spatial and temporal characteristics of dry and wet evolution of economic belt in the upper reaches of Yangtze River based on SPEI index[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 203–211. (in Chinese)