

基于 SPEI 指数泾河流域近 50 年干旱时空演变特征

陈淑红^{1,2}, 刘宇⁴, 刘招^{2,3}, 曹林顺⁵, 余玉聪^{1,2}, 杨舟^{1,2}

(1.长安大学水利与环境学院,西安 710054;2.长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,西安 710054;3.长安大学水与发展研究院,西安 710054;4.中国水利水电科学研究院水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038;5.陕西省引汉济渭建设工程有限公司,西安 710054)

摘要: 基于泾河流域内外 14 个国家气象站 1971—2019 年逐日气象资料,使用降水和潜在蒸散数据得到不同时间尺度标准化降水蒸散指标(SPEI),并结合反距离权重插值(IDW)、Mann—Kendall 趋势检验、Morlet 小波分析等方法,分析了泾河流域干旱时空演变特征。结果表明:近 50 年来泾河流域总体较干旱,但年际及春夏干旱趋势有所减轻,干旱事件易发生的季节次序为秋季>春季>夏季>冬季;年干旱在 2011 年发生突变,春、秋、冬干旱分别在 1994 年、2010 年、1996 年发生显著突变($P<0.05$);跨越夏秋季的持续性干旱事件发生次数最多,其中秋季持续性干旱事件发生概率最大。研究结果对泾河流域抗旱预警工作以及社会经济发展具有重要意义。

关键词: 干旱; SPEI 指数; 趋势分析; 时空演变; 潜在蒸散; 泾河流域

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0181-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.02.024

Temporal and Spatial Characteristics of Drought in the Jinghe River Basin in the Past 50 Years Based on the SPEI Index

CHEN Shuhong^{1,2}, LIU Yu⁴, LIU Zhao^{2,3}, CAO Linshun⁵, YU Yucong^{1,2}, YANG Zhou^{1,2}

(1.School of Water Conservancy and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054; 2.Key Laboratory of Arid Land Hydrology and Ecological Effects of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054;

3.Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an 710054; 4.China Water Resources Hydropower Research Institute, Ministry of Water Resources, Flood Control and Drought Relief Engineering Technology Research

Center, Beijing 100038; 5.Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Xi'an 710054)

Abstract: Based on daily meteorological data from 14 national meteorological stations inside and outside the Jinghe River Basin from 1971 to 2019, the standardized precipitation evapotranspiration indicators (SPEI) were obtained using the precipitation and potential evapotranspiration data at different time scales. Through the inverse distance weighted interpolation (IDW) and Mann-Kendall trends Test, Morlet wavelet analysis and other methods, the temporal and spatial evolution characteristics of drought in the Jinghe River Basin were analyzed. The results showed that in the past 50 years, the Jinghe River Basin was generally arid, but the drought degree had been reduced. The seasons drought events occurred possibly was autumn>spring>summer>winter. The annual drought had an abrupt change in 2011, while the spring, autumn and winter droughts mutated significantly respectively in 1994, 2010, and 1996 ($P<0.05$). The number of persistent drought events spanning summer and autumn occurred the most, and the probability of persistent drought events in autumn was the greatest. These findings are of great significance for the early warning of drought resistance and agricultural development in the Jinghe River basin.

Keywords: drought; SPEI index; trend analysis; temporal and spatial evolution; potential evapotranspiration; Jinghe River Basin

在全球气候变暖的背景下,极端气象事件频发,干旱作为自然界最为普遍的自然灾害,其具有影响范

围广、危害大等特点^[1-2]。依据 IPCC(Intergovernment Panel on Climate Change)第五次评估报告:在

收稿日期:2021-09-12

资助项目:陕西省自然科学基金会联合基金项目(2021JLM-54);陕西省重点研发计划项目(2019SF-237);国家 111 引智计划项目(B08039)

第一作者:陈淑红(1996—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 1720639632@qq.com

通信作者:刘招(1975—),男,陕西礼泉人,教授,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: lz975@163.com

2010—2014 年大气中的 CO_2 浓度首次超过 4×10^{-4} ，且在过去的 130 年里全球平均气温升高 $0.85\text{ }^\circ\text{C}$ ，在中纬度的大部分地区未来极端降水增大的可能性较大^[3]。受气温和降水等气象因素的共同作用，干旱往往具有较强的不确定性^[4]。因此，如何定量描述干旱时空演变规律，并对其未来变化进行动态监测已成为目前研究的热点与难点。

近年来，国内外已有众多学者针对干旱时空演变规律的研究提出不同的评价方法^[5]。如 McKee 等^[6]提出的湿润度指数 (moisture index, MI) 和 Azhdari 等^[7]提出的标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、等，虽然能较好地表示区域不同时间尺度的干旱情况，且计算较简单^[8]，但由于只考虑土壤湿润或者降水等单个因素，未考虑蒸散、气温等因素，从而具有不全面性^[9]；Palmer^[10]利用温度和降水通过 2 层模型估算土壤水分供给和需求，制定帕尔默干旱指数 (palmer drought severity index, PDSI)，这是第一个较全面评估一个地区总水分状况的指标^[11]，但已有多项研究^[12]证明，PDSI 的主观性太强，参数很难获取，具有显著局限性，因此对于干旱的评估说服力不足。Vicent-Serrano 等^[13]在 2010 年提出标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)，结合 PDSI 指数和 SPI 指数的优点，不仅可以从多尺度进行计算，还考虑对降水与蒸散发的响应^[14]，因此，SPEI 指数近年来被广泛应用于与干旱相关的研究^[15]。

泾河是黄河的一级支流——渭河的最大支流，也是西北地区干旱事件的高发区^[16]，且灾害影响巨大，给区域生态环境、农业以及社会发展均带来深远影响^[17]。流域下垫面随着社会经济发展和人类活动的加剧而发生巨大改变^[18]，同时受到如降水、蒸发和气温等气象因素的影响，使得流域内产汇流模式和河流水文情况均受到极大扰动^[19]。在多变的气候环境下，干旱会持续多久，以往的干旱情况是否会发生改变，干旱范围有多广，诸如此类问题均待研究。已有学者对西北地区干旱进行相关研究，然而基于 SPEI 指数的泾河流域全域性研究有所欠缺，故本文以期为泾河流域乃至整个西北地区的气象灾害预警工作以及管理方案提供一定的数据基础和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾河是渭河的最大支流，是黄河的二级支流，位于东经 $106^\circ 14' - 108^\circ 42'$ ，北纬 $34^\circ 46' - 37^\circ 19'$ 。泾河流域位于黄土高原中部，发源于宁夏回族自治区，经源县六盘山东麓^[20]，流经陕西、甘肃、宁夏 3 省于陕西省西安市陈家滩注入渭河^[21]。本研究选取泾河

流域内及周边 14 个国家级气象站点 (图 1) 1971—2019 年逐日气象资料，资料来源于中国气象数据共享服务中心 (<http://cdc.nmic.cn/>)，包括降水量、相对湿度、日照时间、风速、逐日平均气温、最高气温和最低气温等。

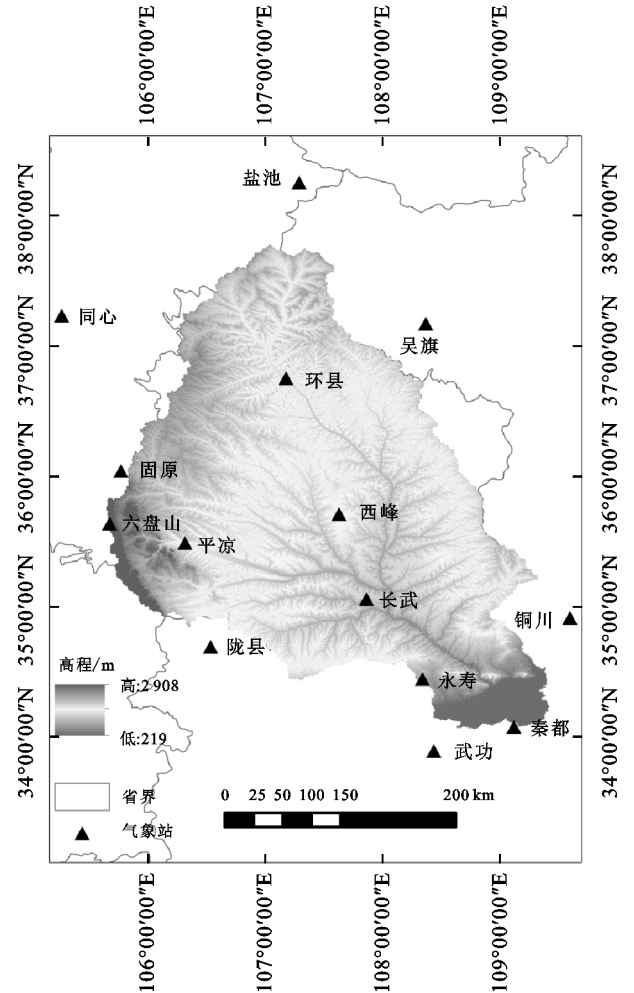


图 1 泾河流域高程及气象站点分布

1.2 研究方法

目前，国内外众多学者^[22]已对表征干旱状况的指数进行了研究，提出多种可以表征干旱状况的指数，而区域干旱易受自然和人为因素的影响，因此考虑到多种因素的综合性干旱指标更能反映客观实际状况^[23]，本文采用 SPEI 指数对泾河流域干旱情况进行分析。

潜在蒸发蒸腾 (potential evapotranspiration, PET) 指在水量充足条件下的蒸发量与蒸腾量，目前常用的计算 PET 的方法有 Penman-Monteith、Thornthwaite 和 Hargreaves 方程，本研究采用联合国农粮组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 方法计算 PET：

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} u_2 (e_3 - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + G_a u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发量(mm); R_n 为净辐射(MJ/($m^2 \cdot d$)); T 为日平均温度($^{\circ}C$); G 为热通量密度(MJ/($m^2 \cdot d$)); u_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_a 为空气水汽压(kPa/ $^{\circ}C$); e_s 为饱和空气水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压—温度曲线的梯度; γ 为湿度计常数; G_n 取 900, G_d 取 0.34。

计算蒸散量与降水量的插值(D_i):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中: P_i 为月降水量(mm); PET_i 为第 i 个月的潜在蒸散量(mm); D_i 为水分盈亏状况(mm)。

将降水量和潜在蒸散量的差值正态化处理后,采用 log-logistic 概率分布函数,对概率密度进行标准化处理,计算出不同时间尺度下对应的 SPEI 值。

当累积概率 $U \leq 0.5$ 时:

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

当累积概率 $U \geq 0.5$ 时:

$$SPEI = -\left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}\right) \quad (4)$$

式中: c_0 取 2.515 517; c_1 取 0.802 853; c_2 取 0.010 380; d_1 取 0.432 788; d_2 取 0.189 269; d_3 取 0.001 308。

本文参考气候干旱等级(GB/T 20481—2017)^[12],将 SPEI 指数划分为 5 级:无干旱($SPEI > -0.5$),轻度干旱($-1 < SPEI \leq -0.5$),中度干旱($-1.5 < SPEI \leq -1$),重度干旱($-2 < SPEI \leq -1.5$),极端干旱($SPEI \leq -2$)。在季节性干旱分析时,本研究以 3—5 月表征春季,6—8 月表征夏季,9—12 月表征秋季,12 月—翌年 1 月表征冬季。

此外,在进行干旱状况时间上的分析时采用泰森多边形法求出不同时间尺度泾河流域 SPEI 指数,在分析年和四季 SPEI 指数的变化趋势时采用线性回归法和 10 年滑动平均法,在空间分析上采用反距离权重插值法,在突变检验上采用 Mann—Kendall (M—K) 检验、Pettitt(P) 检验等方法^[24]。

2 结果与分析

2.1 干旱时间变化特征

2.1.1 不同时间尺度 SPEI 指数趋势变化 为分析泾河流域不同时间尺度 SPEI 指数的变化特征,利用 ArcGIS 10.4 软件 Create Thessen Polygons 模块进行计算,得到流域 1971—2019 年 SPEI—1、SPEI—3、SPEI—6、SPEI—12 值(图 2)。由图 2 可知,短时间尺度的 SPEI 指数波动幅度最大,随着时间尺度的增大,SPEI 指数的波动幅度相对于短时间尺度表现得更加平稳,表明短时间尺度的 SPEI 指数相对于长时间尺度的 SPEI 指数对降水量以及气温等因素的变化更加敏感。由 SPEI—1 可知,1971—2019 年间,

所有干旱事件中无干旱所占百分比为 74.12%,轻度干旱为 18.82%,中度干旱为 6.22%,重度干旱为 0.84%,极端干旱为 0。由此可见,随着干旱等级的增大,相应干旱强度的百分比随之减小。

季时间尺度 SPEI 指数主要受季节气候因素的影响,体现季节干旱特征。从季时间尺度可以看出,1983—1998 年间 SPEI 指数正负波动最大,而 1971—2019 年整体 SPEI 值呈下降趋势,干旱等级有所加重。随着干旱等级的加重,其对应的干旱比例也逐渐减少。从年时间尺度 SPEI 值可以看出,1983—1998 年 SPEI 指数正负波动最大,1971—2019 年整体 SPEI 值呈上升趋势,上升速率为 0.000 35/a,即此期间气候变湿润。相比于短时间尺度,年时间尺度 SPEI 指数中无干旱年份相对偏多,1996—2002 年发生中旱和重旱事件次数较多,而不论从月、季、半年、年尺度中均可看出,泾河流域近 50 年 SPEI 指数均未小于 -2.0。此外,泾河流域近 50 年整体 SPEI—1 指数和 SPEI—3 指数均呈下降趋势,SPEI—6 指数和 SPEI—12 指数呈上升趋势,即短时间尺度表明泾河流域干旱有所加重,而长时间尺度表明干旱有所减轻。为具体分析泾河流域干旱时空变化,本文将分析季尺度和年尺度变化。

2.1.2 干旱年际及季节变化特征 1971—2019 年泾河流域 SPEI—12 指数年际变化特征见图 3。1971—2019 年 SPEI 值呈波动趋势,经历“上升—下降—上升”的变化趋势,这表明泾河流域近 50 年来气候变化经历“干旱—湿润—干旱—湿润”的过程。由 10 年滑动平均曲线(图 3)可以看出,2003—2010 年 SPEI 指数大部分为负值,为干旱状态,其中 1971 年、1997 年干旱强度较大,年平均 SPEI 值分别为 -0.99(轻度干旱)和 -1.33(中度干旱);1983—1990 年 SPEI 指数大多为正值,比较湿润,其中 1983 年、1988 年 SPEI 指数分别为 1.08,1.16。由线性拟合可以看出,整体以 0.004 33/a 的速率上升,表明泾河流域气候近 50 年来整体干旱有所减轻。

为进一步分析泾河流域 1971—2019 年 SPEI 指数的四季变化特征,以 SPEI—3 为依据绘制不同季节 SPEI—3 指数的年际变化图(图 4)。由图 4 可以看出,春季和冬季呈下降趋势,下降速率分别为 0.005 5,0.007 2/a,夏季和秋季呈上升趋势,上升速率分别为 0.007 5,0.009 5/a。

春季(图 4a) SPEI 指数呈“上升—下降—上升”的变化趋势,即泾河流域春季气候经历“湿润—干旱—湿润”的过程;夏季(图 4b) SPEI 指数呈相对稳定的状态,基本未出现大幅度波动;秋季(图 4c) SPEI

指数呈现“先下降后上升”的趋势,1985 年以前 SPEI 指数正负波动较明显,1986—1998 年呈现相对干旱的状态;冬季(图 4d)SPEI 指数呈现“上升—下降—

上升”的趋势,湿润期主要集中在 1987—1989 年,其中 1987 年 SPEI 值为 1.93,1988 年 SPEI 值为 1.37。总体来看,泾河流域春夏季与年际变化趋势相似。

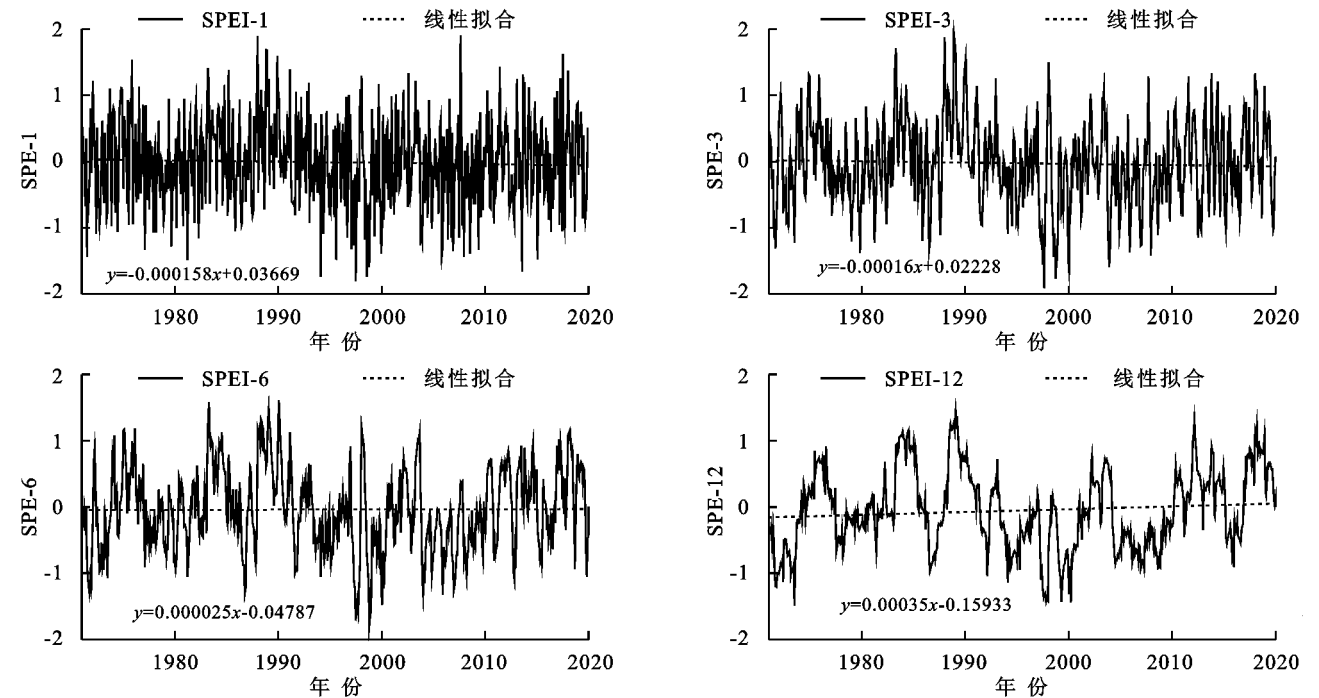


图 2 泾河流域 1971—2019 年不同时间尺度 SPEI 变化

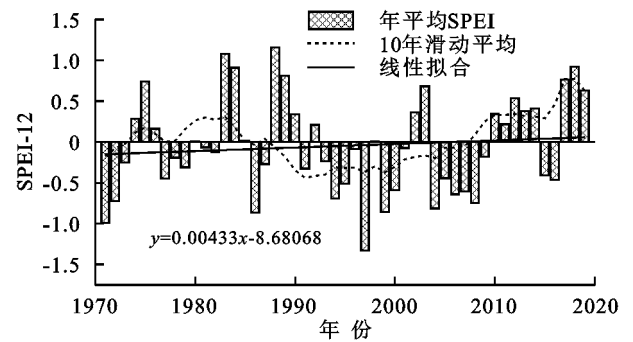


图 3 1971—2019 年泾河流域年平均 SPEI 值年际变化

2.2 干旱频率时空变化特征

2.2.1 干旱频率时间变化特征 为分析泾河流域近 50 年来干旱频率的时间变化特征,依据 SPEI 指数等级划分标准,统计近 50 年泾河流域内外 14 个气象站点的年际及季节 SPEI 值,绘制不同年代及不同季节干旱发生的频率(图 5)。由图 5a 可知,不同年代整体干旱频率差异较大,其中 2000s 干旱发生频率最大,干旱发生频率为 45.71%,1980s 干旱发生频率最小,干旱发生频率为 23.57%;1990s 严重干旱甚至极端干旱发生频率最高,严重干旱发生频率为 10.71%,极端干旱发生频率为 9.29%。

不同等级干旱发生频率的季节分布(图 5b)可知,泾河流域整体干旱事件发生的频率为秋季>春季>夏季>冬季。其中,夏季和秋季发生极端干旱的频率最高,分别达到 2.98%和 3.53%。轻度干旱和重

度干旱在秋季出现频率最高,分别为 16.62%和 11.37%。总体而言,干旱等级越大发生频率越小。

2.2.2 干旱频率空间变化特征 以年时间尺度为例,运用 arcGIS 10.4 工具箱中的“反距离权重插值法”对泾河流域不同等级干旱发生频率进行空间插值,得到该流域空间上的分布规律(图 6)。由图 6 可知,在空间分布上,泾河流域不同等级干旱发生频率表现出较大的差异性。轻度干旱发生频率自南向北呈现“逐渐降低”的分布趋势;中度干旱发生的频率自南向北呈现“逐渐升高”的分布规律,其中环县中度干旱发生的频率最高;重度干旱发生的频率呈现自西向东“逐渐降低”的分布趋势,其中固原、六盘山、平凉和陇县等地重度干旱发生的频率最高;极度干旱发生的频率自西向东“逐渐升高”,其中西峰、永寿、武功和秦都等发生极端干旱的频率最高。

2.3 干旱突变分析

为判断泾河流域年尺度 SPEI 指数的突变情况,对流域 SPEI—12 指数进行 M—K 检验和 P 检验(图 7)。由图 7a 可知,UF 值在 1971—1996 年均大于 0,这表明 SPEI—12 指数在此时间段内呈“上升”趋势,即处于相对湿润期,在 $\alpha = 0.05$ 置信区间内,UF 和 UB 交于 1972 年、1986 年、1989 年、2011 年。为进一步确定突变年份,采用 P 检验(图 7b),结果表明,流域在 2011 年发生突变。综合 2 种方法考虑可认为,泾河流域年际干旱自 2011 年开始加剧。

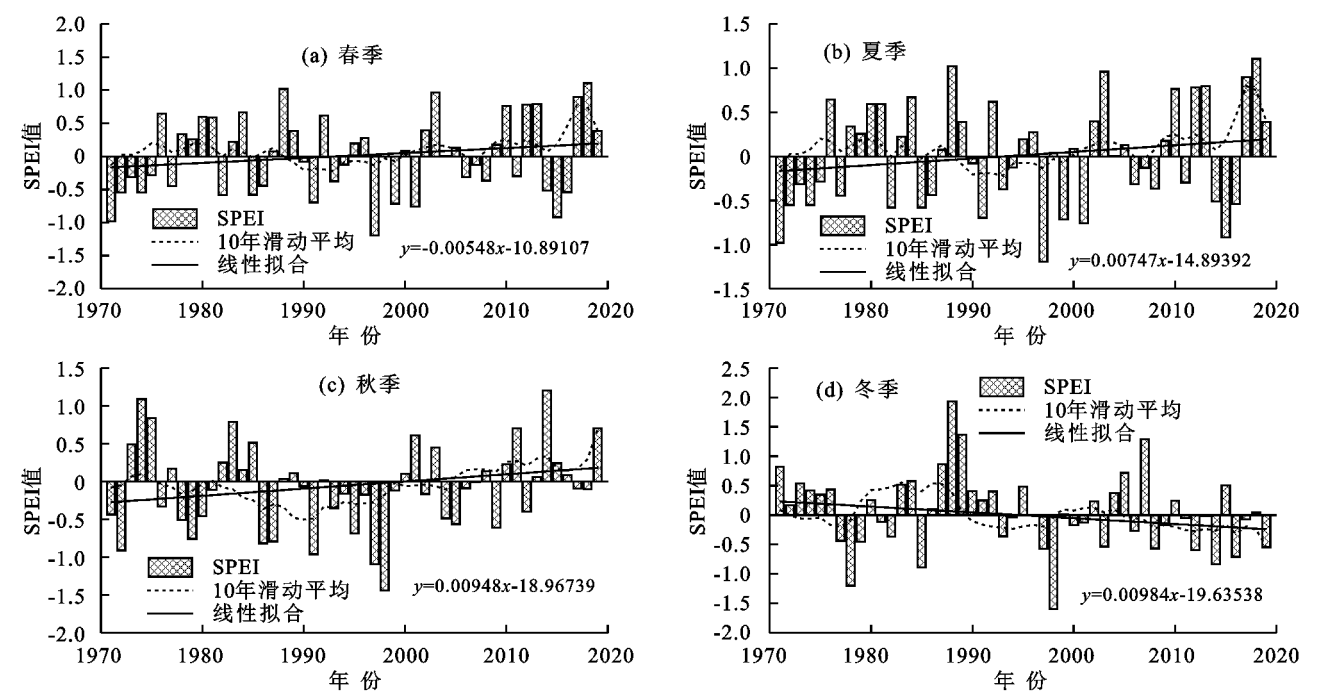


图 4 1971—2019 年泾河流域四季 SPEI 指数年际变化

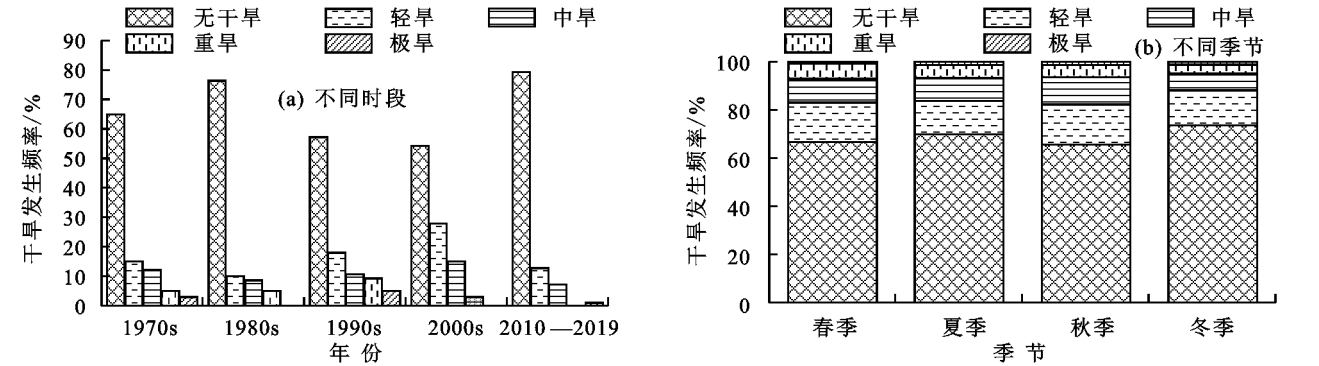


图 5 1971—2019 年泾河流域不同时段和不同季节干旱发生频率

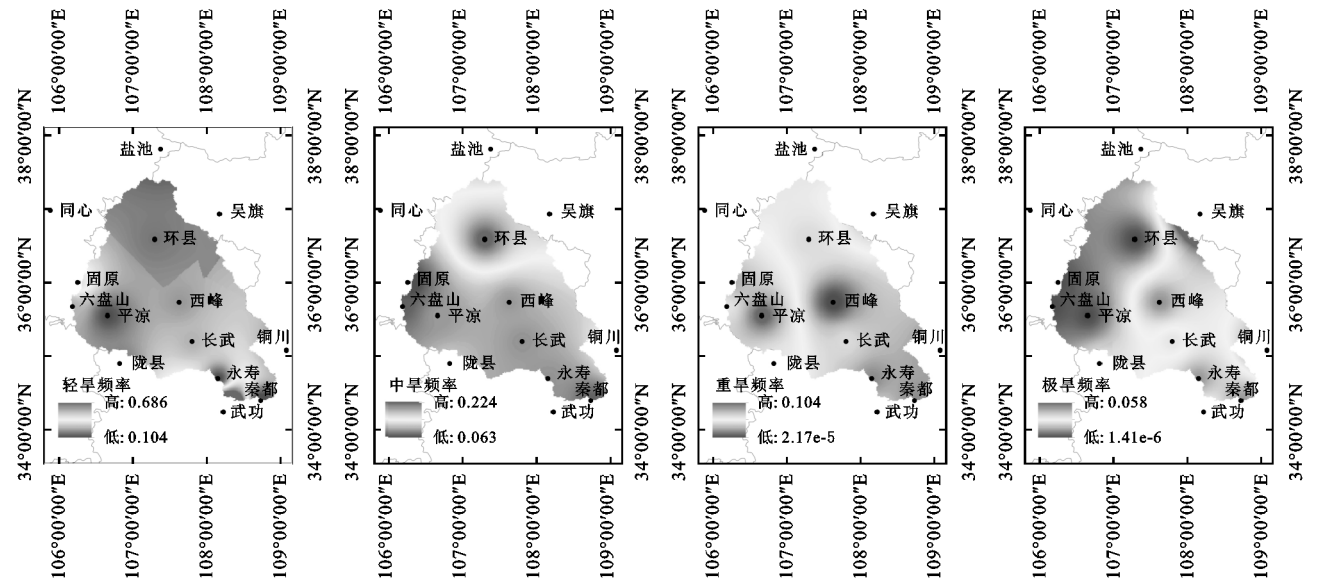


图 6 1971—2019 泾河流域各等级干旱频率空间分布

绘制泾河流域四季 SPEI-3 指数变化检验曲线 (图 8 和图 9)。

由春季 SPEI-3 指数年际变化(图 8a)可知,在 $\alpha=0.05$ 显著水平内,UF 和 UB 相交于 1994 年和 1997 年,进而由 P 检验(图 9a)可知,1994 年超过 $\alpha=0.05$ 显著水平线,即自 1994 年开始,泾河流域春季干

旱开始加剧;图 8b 中,除 2001 年外,UF 曲线均为正值,其中 1977—1981 年超过 $\alpha=0.05$ 显著水平线,呈显著上升趋势,UF 和 UB 相交于 1993 年、2002 年和 2010 年,由 P 检验(图 9b)可知,夏季 SPEI-3 指数均未超过 0.05 显著水平线,则未发生显著突变;图 8c 中,UF 曲线基本位于显著水平线内,UF 和 UB 相交

于 1973 年、1976 年和 2010 年,进行 P 检验(图 9c)可知,在 2010 年干旱加剧;冬季 SPEI-3 指数的 UF 和 UB 出现交点较多,分别为 1978 年、1982 年、1996 年和 2004 年等,在 P 检验(图 9d)中,突变年份确定为 1996 年,即泾河流域冬季 SPEI-3 指数在 1996 年干旱发生显著突变。

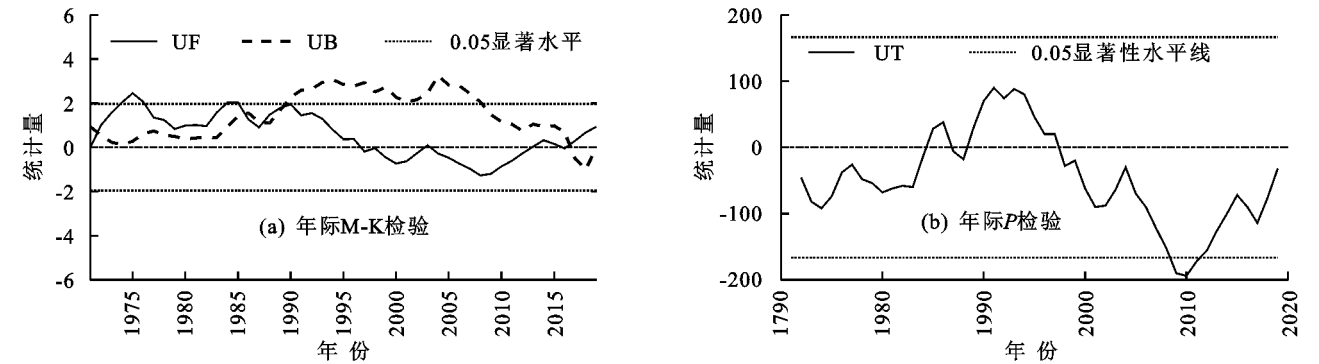


图 7 1971—2019 年泾河流域 SPEI-12 年际突变检验

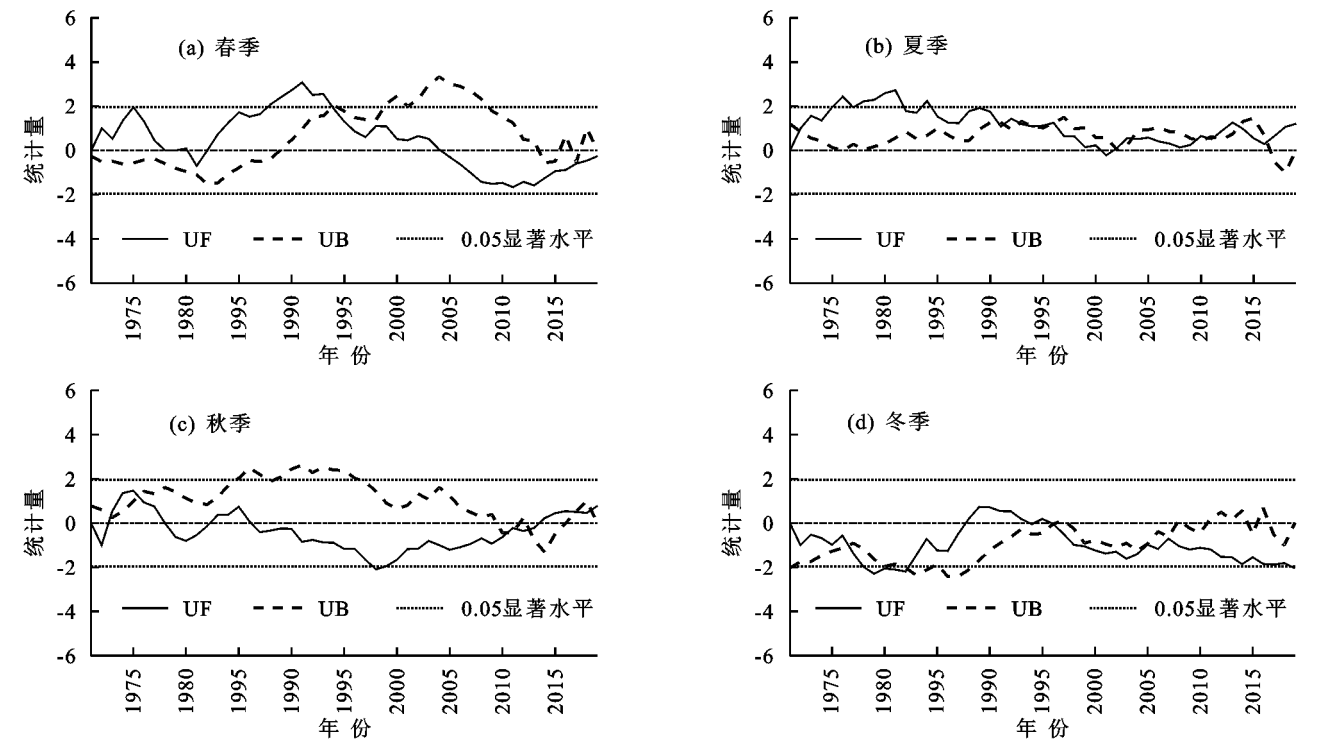


图 8 1971—2019 年泾河流域四季 SPEI 指数变化 M-K 检验

2.4 干旱持续性分析

干旱事件对当地的农业生产以及经济社会发展均带来严重影响,而持续性干旱事件的发生无疑将带来更加严重的损失^[25]。在以往研究^[26]的基础上,采用月时间尺度 SPEI 指数,依据本文的划分标准,将持续 3 个月及以上发生 $SPEI \leq -0.5$ 的干旱事件定义为一次连续干旱过程,将该过程 SPEI 指数的平均值作为此次干旱过程的 SPEI 值,该过程最小 SPEI 值为持续性干旱事件发生的强度,且干旱发生的严重程度和干旱持续性时间成正比。本研究对泾河流域干旱事件发生的时间持续在 3 个月及以上进行统计(表 1)。

从表 1 可以看出,泾河流域近 50 年来持续性干旱事件共发生 9 次,其中跨越夏秋季发生次数最多,冬春季次之;从持续时间分析,最长干旱时间达到 5 个月,1970s 发生 3 次持续性干旱事件;从干旱强度分析,泾河流域 1998 年 11 月开始的持续性干旱事件,其累计干旱指数最小,为-5.38,其最小干旱指数也为 9 次中的最小值,发生在 1999 年 2 月,2000—2004 年的干旱事件发生程度也较强,其累计 SPEI 指数均小于-3,1971—2019 年泾河流域持续性干旱强度呈现“先增大后减小”的分布规律;从持续性干旱时间季节分布分析,秋季发生 6 次,夏季发生 5 次,说明

泾河流域持续性秋旱发生概率最大,其次为夏季,持

续性干旱事件发生在秋季的概率最小。

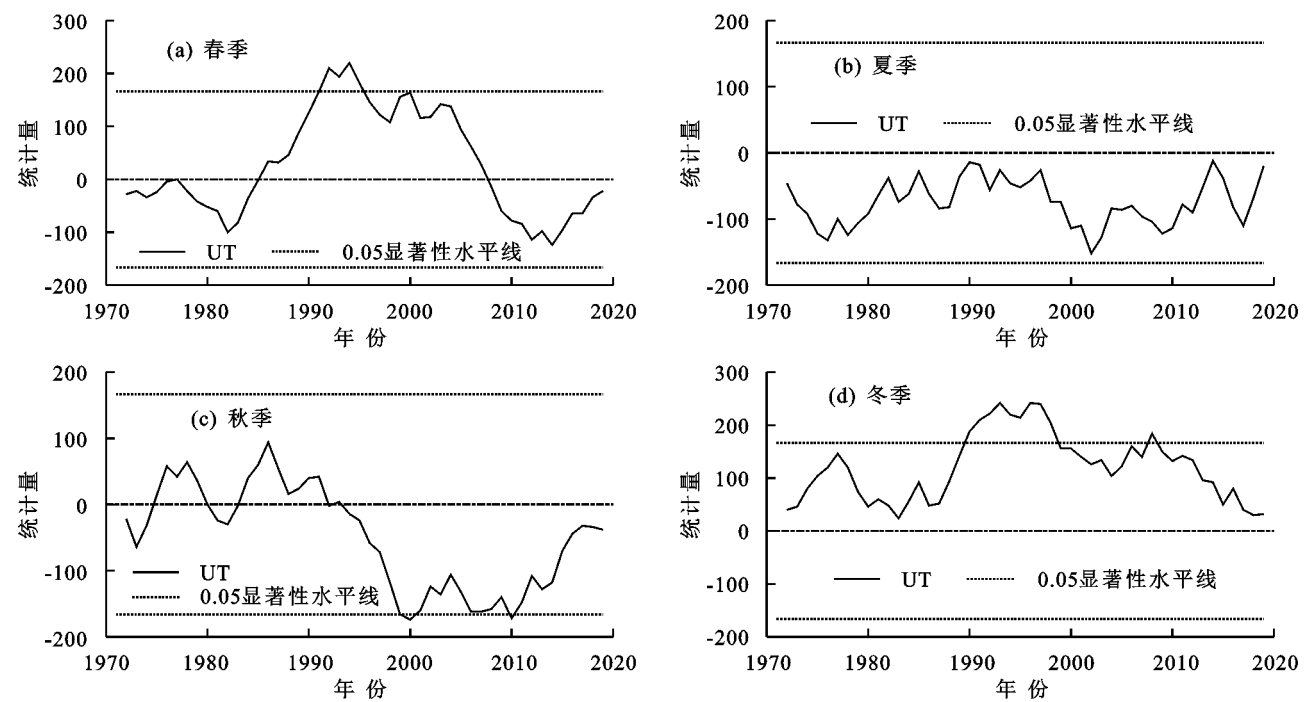


图 9 1971—2019 年泾河流域四季 SPEI 指数变化 P 检验

表 1 1971—2019 年泾河流域持续性干旱特征					
开始时间/ (年—月)	跨越 季节	持续 时间/月	最小 SPEI 值	累计 SPEI 值	月均 SPEI 值
1971—07	夏秋	3	−1.43	−2.62	−0.87
1972—08	夏秋	4	−0.95	−2.84	−0.71
1978—12	冬	3	−0.90	−2.32	−0.77
1986—07	夏秋	3	−0.97	−2.46	−0.82
1987—08	夏秋	3	−0.82	−2.25	−0.75
1991—07	夏秋	5	−0.80	−3.28	−0.66
1998—11	秋冬春	5	−1.59	−5.35	−1.07
2000—02	冬春	4	−1.39	−3.71	−0.93
2004—02	冬春	3	−1.15	−3.4	−1.13

2.5 干旱时间周期分析

为研究泾河流域干旱的时间周期变化特征,对年

尺度 SPEI 值进行小波分析,得到小波系数实部图和方差图(图 10)。从小波方差系数实部图(图 10b)可以看出,泾河流域的气候演化过程在不同时间尺度上呈现出明显的干湿周期性变化特征。近 50 年中,在 3~15 年的时间尺度上出现 7 次干湿震荡,在 16~40 年的时间尺度上出现了 2 次明显的干湿震荡,其中在大时间尺度上的干湿演化周期性变化表现十分稳定。小波方差图显示,年尺度 SPEI 指数在 3~15,16~40 年尺度上出现 2 个明显的峰值,分别对应 6 年时间尺度和 25 年时间尺度。25 年时间尺度的峰值显著高于 6 年,为流域气候变化主周期,6 年时间尺度为第 2 周期。从小波分析结果可知,泾河流域每 6 年经历 1 次小尺度干湿变化,每 25 年经过 1 次大尺度干湿变化,目前泾河流域仍将处于相对湿润状态。

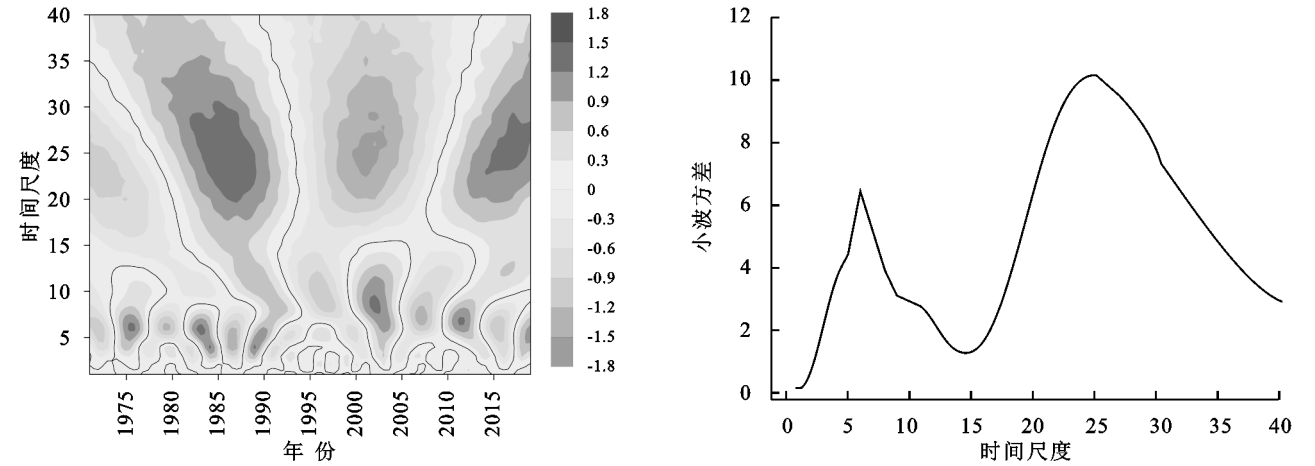


图 10 小波系数实部和小波方差

3 结 论

(1)由整体分析,SPEI—1 指数和 SPEI—3 指数的变化幅度波动较大,能够反映短时间干旱特征,SPEI—6 指数和 SPEI—12 指数反映比较稳定的干旱变化特征,也体现出比较明显的周期性,这对长期干旱的持续时间有着显著标识作用。泾河流域春夏季干旱趋势与年际干旱趋势较相似,均表现为干旱情况有所减轻的趋势。

(2)从 SPEI 指数时间分析来看,季节变化呈现春冬季变化趋势相似、夏秋季变化趋势相似的特征,年际干旱自 2011 年开始加剧,春、秋、冬季干旱分别在 1994 年、2010 年、1996 年发生显著突变($P<0.05$)。全流域旱情 2000s 发生频率最大,1980s 干旱发生频率最小,1990s 严重干旱及极端干旱发生频率最高;在空间变化上,泾河流域西部的固原、六盘山、平凉和陇县重度干旱发生的频率最高,中部以及南部的西峰、永寿、武功和秦都等发生极端干旱的频率最高。

(3)从干旱的持续性分析上看,1971—2019 年泾河流域持续干旱事件发生时间最长达到 5 个月,干旱强度先增大后减小,其中,持续性干旱事件发生概率最大的季节为秋季,其次是夏季,冬季和春季发生持续性干旱的概率相对最小。

(4)Morlet 小波分析时间周期性显示,泾河流域干旱发生时间呈现 6 年和 25 年的变化周期。

参考文献:

[1] 刘维,侯英雨,吴门新,等.WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价[J].气象与环境科学,2017,40(3):7-14.

[2] 李军,吴旭树,王兆礼,等.基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究[J].水利学报,2021,52(4):486-497.

[3] 高佳佳,徐薇,边央,登.基于 FAO Penman-Monteith 方法的西藏春青稞干旱趋势研究[J].中国农学通报,2021,37(11):79-86.

[4] 杨建堂,霍治国,王培娟,等.中国北方苹果干旱等级指标构建及危险性评价[J].应用气象学报,2021,32(1):25-37.

[5] 江姗姗,张增信,王玮琳,等.江苏省植被动态演变规律及其与极端气候事件的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):74-80.

[6] McKee T B, Doesken N J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [M]. Preprints Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993, 17(22): 179-183.

[7] Azhdari Z, Bazrafshan O, Zamani H, et al. Hydro-me-

teorological drought risk assessment using linear and nonlinear multivariate methods[J].Physics and Chemistry of the Earth,2021,123:e103046.

[8] 刘维,李祎君,何亮,等.基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):121-127.

[9] Nazila I, Babaei B F, Maleki A, et al. STIM1, STIM2, and PDI participate in cellular fate decisions in low energy availability induced by 3-NP in male rats[J].Neurotoxicity Research,2021,39:1459-1469.

[10] Palmer W C. Meteorological drought[M].Washington D. C.: US Department of Commerce, Weather Bureau,1965.

[11] 王晓丹,张勃,马彬,等.基于日值 SPEI 东北地区近 58 a 干旱时空演变特征[J].高原气象,2021,40:e203105117857.

[12] 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.气候干旱等级 GB/T 20481—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[13] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate,2010,23(7):1696-1718.

[14] 高晓光,蒋凤玲.河南黄河流域生态保护和高质量发展路径研究[J].南方农机,2021,52(13):59-61.

[15] 司瑞,刘冰,朱钊岑,等.西北干旱区甜高粱种植水肥配比模式研究[J].灌溉排水学报,2021,40(5):54-61.

[16] 曹永强,路洁,李玲慧,等.基于 SPEI 指数的辽宁省多尺度旱涝特征分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):210-220.

[17] 刘宇,李雯晴,刘招,等.基于 SPEI 渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J].水土保持研究,2021,28(1):109-117.

[18] 岳东霞,杜军,刘俊艳,等.基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价[J].生态学报,2011,31(9):746-756.

[19] 张洪波,顾磊,辛琛,等.泾河流域干旱特征时空变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(3):1-10.

[20] 朱红艳,韩彩波,贾志峰,等.泾河张家山水文站水沙特征分析及工程实例[J].农业工程学报,2012,28(19): 2550-2558.

[21] Xu D H, Zhang Q, Ding Y, et al. Application of a hybrid ARIMA-LSTM model based on the SPEI for drought forecasting[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(3):4128-4144.

[22] 杨金虎,张强,王劲松,等.近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J].地理科学,2015,35(10):1333-1340.

- 被及土壤理化性质的研究[J].植物研究,2017,37(2):200-210.
- [15] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J].土壤学报,2014,51(4):806-815.
- [16] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363.
- [17] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.
- [18] 赵玉丽.人工降雨条件下林木对截留和产流产沙的影响[D].北京:北京林业大学,2013.
- [19] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):141-149.
- [20] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J].林业科学,2018,54(10):20-30.
- [21] 卜瑞瑛,梁文俊,魏曦,等.不同林分密度华北落叶松林的土壤养分特征[J].森林与环境学报,2021,41(2):140-147.
- [22] 任丽娜,王海燕,丁国栋,等.林分密度对华北土石山区油松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J].干旱区地理,2012,35(3):456-464.
- [23] 王岩松,马保明,高海平,等.晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J].北京林业大学学报,2020,42(8):81-93.
- [24] 王晓康,张毓涛,张新平,等.天山中部不同林分对产流产沙影响的灰色关联分析[J].干旱区研究,2014,31(4):696-701.
- [25] 吕婧娴,王得祥,张宋智,等.小陇山林区不同密度油松人工林林下物种多样性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(11):49-56.
- [26] 卢妮妮,许昊,廖文超,等.杉木及其混交林的结构与功能模型:以福建省将乐国有林场为例[J].中国水土保持科学,2016,14(2):74-80.
- [27] 贺山峰,王娟,邱兰兰,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落保育土壤作用的研究[J].水土保持通报,2009,29(3):73-77.
- [28] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [29] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(3):981-988.
- [30] 董威,刘泰瑞,覃志杰,等.不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究[J].生态环境学报,2019,28(1):65-72.
- [31] 周娅,陈宇轩,邹瑞,等.北京八达岭不同密度油松土壤团聚体特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(2):25-30.
- [32] 李民义,张建军,郭宝妮,等.晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J].生态学杂志,2013,32(5):1083-1090.
- [33] 赵广亮,王继兴,王秀珍,等.油松人工林密度与养分循环关系的研究[J].北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.
- [34] 贺康宁,张建军,朱金兆.晋西黄土残塬沟壑区水土保持林坡面径流规律研究[J].北京林业大学学报,1997,19(4):3-8.
- (上接第 188 页)
- [23] 曹永强,宁月,李玲慧,等.基于 SPEI 指数的河北省多尺度旱涝特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(3):76-85.
- [24] Zhang Q, Cui F Q, Dai L W, et al. Pastoralists' perception of and adaptation strategies for climate change: Associations with observed climate variability[J]. Natural Hazards,2019,96(3):1387-1412.
- [25] 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.
- [26] 王学风,路洁,曹永强.辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J].水利学报,2020,51(12):1514-1524.