

基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析

曹永强^{1,2}, 李可欣¹, 任 博¹, 杨雪婷¹, 周姝含¹, 赵 慧¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387)

摘要: 基于 1970—2020 年辽宁省 19 个气象站点逐日气象数据, 计算月、季、年尺度的标准化降水蒸散指数 (SPEI) 变化情况, 分析了辽宁省 1970—2020 年气象干旱时空演变特征及其驱动因素。结果表明: 1970—2020 年辽宁省 SPEI 在月、季、年 3 种尺度上均具有明显的周期性变化规律, 干旱事件交替出现, 总体向湿润化方向发展, 其中 1974 年、1975 年和 2010 年为突变年; 空间上 SPEI 分布区域性明显, 辽西、辽南、辽北干旱发生频率较高, 中部地区干旱发生频率最小, 辽宁省全年大部分地区有轻旱情况存在, 而特旱情况仅发生在清原、彰武地区; 年尺度及季尺度与 SPEI 相关性最强的均为降水量, 潜在蒸散量次之, ENSO 冷暖事件对辽宁省干旱情况有一定影响且暖事件影响更明显。

关键词: 气象干旱; 标准化降水蒸散指数 (SPEI); 潜在蒸散量; 相关性分析; 辽宁省

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)05-0028-09

Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI//CAO Yongqiang^{1,2}, LI Kexin¹, REN Bo¹, YANG Xueting¹, ZHOU Shuhan¹, ZHAO Hui¹ (1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Institute of Beijing-Tianjin-Hebei Ecological Civilization Development, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 19 meteorological stations in Liaoning Province from 1970 to 2020, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) variations at monthly, seasonal and annual scales were calculated to analyze the spatial and temporal evolution characteristics of meteorological drought in Liaoning Province from 1970 to 2020 and its driving factors. The results show that the SPEI of Liaoning Province from 1970 to 2020 has a clear cyclical pattern on monthly, seasonal and annual scales, with alternating drought events and an overall development toward wetting. 1974, 1975 and 2010 are abrupt change years. Spatially, the SPEI distribution is regionally distinct, with droughts occurring more frequently in western, southern and northern Liaoning, and least frequently in central Liaoning. Light drought conditions exist in most areas of Liaoning Province throughout the year, and the special drought conditions only occur in Qingyuan and Zhangwu region. The strongest correlation factors with SPEI in annual and seasonal scales is precipitation, followed by potential evapotranspiration. ENSO cold and warm events have some influence on drought in Liaoning Province, and the influence degree of warm events is more obvious.

Key words: meteorological drought; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); potential evapotranspiration; correlation analysis; Liaoning Province

近年来各类极端气候频发, 由此引发的灾害日益增多且风险日益加大。IPCC 第六次报告指出, 在过去的一个世纪里, 全球气温上升了 1.09℃, 与第五次报告的 0.78℃ 相比又上升了 0.31℃^[1]。全球气候变暖导致我国干旱趋势加重, 旱灾造成的损失呈增加趋势^[2]。作为对人类社会影响最严重的灾害之一, 干旱发生具有缓慢性、持续性及地域广泛性等特点。干旱易造成水资源短缺、土地荒漠化加剧等问题并影响生态系统, 同时随着人口的增加和经济的发展, 干旱引发的水资源短缺必然制约社会经

济的发展。2020 年全国因旱致农作物受灾面积、直接经济损失与 2015—2019 年均值相比分别下降了 44% 和 37%, 云南、辽宁和山西等 6 个省(区)旱情较为严重^[3], 因此加强辽宁省的干旱研究有助于辽宁省对干旱致灾情况做出及时有效的应对。

干旱可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱 4 种^[4]。干旱研究的基础是对干旱的定量识别, 因此干旱指数作为干旱定量分析的重要手段应运而生^[5]。早期研究干旱多注重于降水, 采用降水的负距平来确定发生干旱的时间和强度, 但是

基金项目: 国家自然科学基金(52079060); 辽宁省兴辽英才项目(XLYC2008033, XLYC2007111)
作者简介: 曹永强(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

降水负距平难以建立干旱与社会生产生活的相关性。干旱的强度、范围和持续时间可以通过干旱指数确定,由于不同区域干旱特征的特殊性,干旱发生时对社会及生产生活的影响也不尽相同,因此根据对干旱研究侧重点的不同,不同干旱指数表征同一干旱事件的时空分异特征也会有所不同。目前,常用的气象干旱指数有 50 余种,如 Palmer 干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)、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) 等。PDSI 综合考虑了某时段内研究区的水分亏缺状况,但是该指数中经验参数的取值依赖研究区完备的数据支持且计算复杂^[6]。SPI 在计算时只需考虑降水,时间尺度相对灵活,但是 SPI 对潜在蒸散发、气温和地表状态等的表征存在欠缺。基于此, Vicente-Serrano 等^[7] 提出了 SPEI, SPEI 具有能够有效地描述多时间尺度的水分亏缺,反映不同水资源、降水和蒸散量之间的滞后关系,对温度变化感应灵敏,以及能够进行多时间尺度计算、运算简单、可以进行不同时间空间横向或纵向比较等优点,具有很强的适用性。近年来,我国学者对 SPEI 在我国不同地区及不同降水量情况下的适用性、不同未来气候情景下的 SPEI 进行了分析,并利用 SPEI 对不同地区进行了干旱时空分析。王林等^[8-9] 对我国 SPEI 的适用性进行了分析,指出该指数能够准确描述特大干旱事件出现的地区中心、影响程度及范围,且与 PDSI 相比有计算更便捷的优点。庄少伟等^[10] 分析了全国范围内降水不同时 SPEI 的适用性问题,表明 SPEI 对地表干旱的表征更准确,并探究了增温效应对干旱的影响。刘珂等^[11] 通过两种潜在蒸散发算法计算得出 SPEI 并对 1949—2008 年我国干旱进行了研究,结果表明我国整体上处于变干趋势,春季变干趋势最明显。胡实等^[12] 以 3 种不同未来气候情况为背景研究了我国北方地区干旱情况,得出未来北方地区呈现干旱化趋势,各季节不同干旱程度反差极大。除了对局部地区气象因素对干旱的影响研究外,大尺度的气候因子在干旱形成过程中作用明显。目前大气环流指数与干旱的研究已在我国不同地区展开。由于大气环流的周期性、持续性和可预测性的特点,对干旱的预警预测具有重要意义。

近年来,气候变暖也使辽宁省的气候和环境发生变化,其中制约农业发展的灾害事件频发,其中频繁发生的干旱对辽宁省粮食生产造成了严重的威胁^[13]。本文利用辽宁省内 19 个气象站点 1970—2020 年基础观测资料,采用基于 Penman-Monteith (PM) 法的 SPEI 对辽宁省 1970—2020 年干旱情况进

行统计与分析,探究其时空变化规律;在此基础上分析各气象因子与 SPEI 的相关性,并结合 ENSO 事件对辽宁省干旱进行分析,旨在为辽宁干旱问题的预警以及有效规避干旱情况的发生提供参考。

1 研究区概况

辽宁省位于东北三省最南端 (118°53'E ~ 125°46'E, 38°43'N ~ 43°26'N) (图 1), 东西部为山地丘陵,中部为平原,为温带大陆性季风气候,雨热同期,四季分明。由于辽宁省南临渤海和黄海,深受来自海洋的暖湿气流影响,使该地区海洋性特征明显,年平均降水量为 400 ~ 1 000 mm,年平均气温为 5.2 ~ 11.7℃,年日照时数 2 100 ~ 2 900 h。

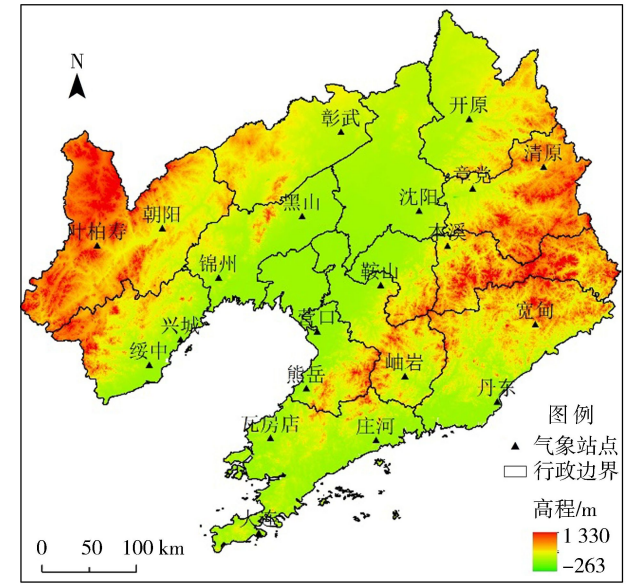


图 1 研究区概况

辽宁省是我国粮食主产区之一,农业发达,具有稻谷、玉米等基础农作物生长的良好条件,不仅属于东北地区早熟单季稻稻区,同时也是东北春播玉米区。2020 年我国粮食总产量为 6 695 亿 kg,比上年增长 56.5 亿 kg,其中,辽宁省粮食总产量为 234 亿 kg,居全国第 12 位,单位面积产量为 6 630 kg/hm²,居全国第 5 位^[14]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

1970—2020 年辽宁省逐日气象数据 (平均风速、平均气温、日照时数、平均相对湿度、最高日气温、最低日气温) 来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。鉴于部分站点在 1970 年后建立,另有部分站点在 2017 年或更早已停止监测,为保证数据的准确性,最终选取分布均匀的 19 个气象站点作为基础气象数据来源。ENSO 数据和海表温度距平

指数(sea surface temperature anomalies, STTA)来源于中国气象局国家气候中心气候监测系统。

2.2 研究方法

2.2.1 潜在蒸散量计算

由于实际蒸散量数据的缺乏,一般参照潜在蒸散量来估算实际蒸散量。PM 法为联合国粮农组织推荐计算潜在蒸散量的方法,此方法通过气温、降水和风速等要素进行综合计算得出潜在蒸散量,计算误差小,结果与作物实际蒸散量相符。潜在蒸散量计算公式为

ET_0 = (0.408Δ(R_n - G) + γ * 900 / (T + 273) * u_2 * (e_s - e_a)) / (Δ + γ * (1 + 0.34u_2)) (1)

式中:ET_0为潜在蒸散量,mm;Δ为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值,kPa/℃;R_n为地面净辐射量,MJ/m²;G为土壤热通量,MJ/(m²·d);γ为湿度计常数,kPa/℃;T为日平均温度,℃;u_2为2m高度处风速,m/s;e_s为饱和水汽压,kPa;e_a为实际水汽压,kPa。式中参数计算及取值可参考GB/T 20481—2017《气象干旱等级》。

2.2.2 SPEI 计算

SPEI 通过对年均降水量和潜在蒸散量二者之间差值的正态标准化处理得到。SPEI 计算方法考虑了气象因子对潜在蒸散量的影响,加之研究区内潜在蒸散量较大,因此适用于辽宁省的干旱评估。具体计算步骤如下:

a. 计算潜在蒸散量与逐月降水量的差值 D_i:

D_i = P_i - ET_i (2)

式中:P_i为第i月的累计降水量,mm;ET_i为第i月的潜在蒸散量,mm,采用PM法计算;D_i为反映第i月水分盈亏状况的参数,mm。

b. 构建水分盈亏累积序列,采用log-logistic 概率分布函数,并对概率密度进行标准化处理,计算出对应的SPEI值:

I = { w - (C_0 + C_1w + C_2w^2) / (1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3) for p ≤ 0.5; - (w - (C_0 + C_1w + C_2w^2) / (1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3)) for p > 0.5 (3)

式中:I为SPEI值;w概率加权矩;p为累积概率;C_0、C_1、C_2、d_1、d_2、d_3为常数项,C_0=2.515517,C_1=0.802853,C_2=0.010328,d_1=1.432788,d_2=0.189269,d_3=0.00130。根据GB/T 20481—2006《气候干旱等级》,SPEI的干旱等级划分标准为:I≤-2.0为特旱,-2.0<I≤-1.5为重旱,-1.5<I≤-1.0为中旱,-1.0<I≤-0.5为轻旱,I>-0.5为无旱。

本文分别计算了3个不同时间尺度的SPEI值,即月尺度(SPEI-1)、季尺度(SPEI-3)和年尺度(SPEI-12)。四季划分标准:3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至次年2月为冬季。分别用SPEI-3的5月表示春季,8月表示夏季,11月表示秋季,次年2月表示冬季。

2.2.3 干旱发生频率

统计辽宁省19个气象站点1970—2020年不同时间尺度I≤-0.5出现的次数n,计算其占总年数N(N=51)的比重,即为各站点干旱发生的频率:

D = n / N * 100% (4)

式中D为干旱发生的频率。

2.2.4 ENSO 事件强度划分

STTA由太平洋月平均海表温度指数与同月多年平均海表温度之差得到。参考文献[15]并结合STTA对ENSO事件强度进行划分,如表1所示。

表1 基于STTA的ENSO事件强度划分标准

ENSO 事件	强度	STTA 值
暖事件	强暖	>1.2
	中暖	(0.85,1.2]
	弱暖	(0.5,0.85]
冷事件	弱冷	(-0.75,-0.5]
	中冷	(-1,-0.75]
	强冷	≤-1

2.2.5 相关分析法

相关性分析可衡量两变量间的关系,相关系数的正负分别代表两因子呈正相关关系或负相关关系,绝对值越大越相关,反之则相关性越小。

3 结果与分析

3.1 辽宁省气象干旱时间演变分析

3.1.1 不同时间尺度 SPEI 变化趋势

基于辽宁省19个气象站点气象资料数据计算得到月、季、年多尺度SPEI值(图2),并通过线性倾向分析辽宁省1970—2020年的干旱变化特征及趋势变化特征。

a. 从月尺度的SPEI(图2(a))可以看出SPEI的变化频繁且剧烈,呈明显的正负振荡,多年来在-1.93~2.38之间变化,反映了月降水对干旱程度的剧烈影响。1970—2020年SPEI-1平均值为-0.04,属于正常范围。总体来看,在月尺度下共发生126次干旱事件,其中轻旱69次,中旱38次,重旱16次,极端干旱事件仅发生了3次,极端干旱事件多发生于夏季及秋季,轻旱、中旱、重旱、特旱在干旱事件中的占比分别为54.76%、30.16%、12.7%和2.38%,随着干旱等级的提升,对应干旱事件比

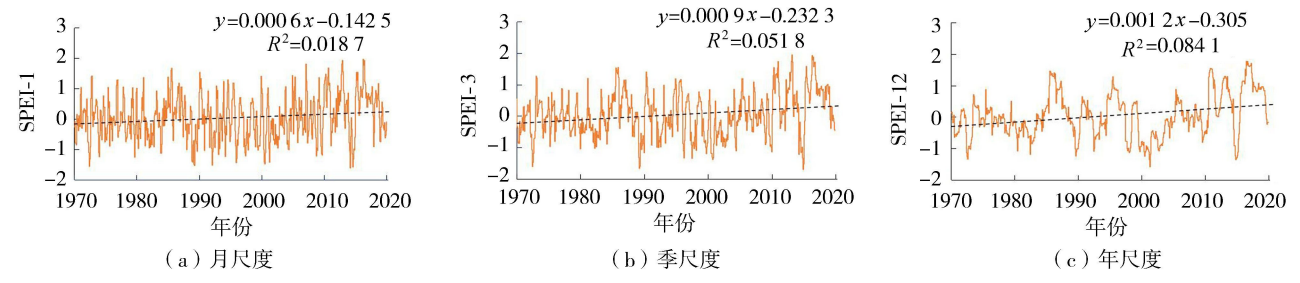


图2 辽宁省不同时间尺度 SPEI 变化

例也随之减小。

b. 从季尺度的 SPEI (图 2(b)) 可以看出,1970—2000 年除少量年份外总体处于偏旱状态,轻旱为主,中旱及以上旱情较少,没有特旱事件发生;2001—2009 年旱情较轻;2009 年之后总体较湿润,仅发生 1 次特旱事件,干旱的变化与气象因子变化有关。

c. 从年尺度的 SPEI (图 2(c)) 可以看出, SPEI-12 曲线最为平滑,全省 1970—2020 年轻旱、中旱、重旱、特旱在干旱事件中的占比分别为 62.83%、34.52%、2.56% 和 0, SPEI-12 值表征正常年份偏多,干旱事件多为轻旱和中旱,重旱事件很少,无特旱事件发生。2010 年为旱涝转折年,2010 年以后除 2014 年发生 1 次干旱事件外都处于湿润状态。

综合比较辽宁省月、季、年尺度 SPEI 变化可知: 3 个时间尺度的 SPEI 都显示出明显的周期振荡,干旱事件发生频繁,其中月尺度的 SPEI 波动幅度最为强烈,说明月尺度 SPEI 相比季尺度和年尺度对短时间内降水和气温变化更为敏感,对短期内的干旱事件反映更准确。季尺度对季节性干旱有很好的反映。年尺度 SPEI 因为时间尺度的增大对气象因子的响应较月尺度 SPEI 相对迟缓,干旱的周期也相对延长,对短期的干旱响应存在误差,但对干旱的持续时间及发展趋势具有明显的指示作用。因此对不同时间尺度 SPEI 值的合理应用有助于对辽宁省干旱进行预警预测。从不同时间尺度的 SPEI 趋势线可知辽宁省未来气候偏湿润,干旱发生频率有所下降,有利于促进农业的发展,但干旱引发的旱情仍需重视。

3.1.2 干旱年际及季节变化特征

为分析辽宁省年尺度 SPEI 的变化及突变情况,对辽宁省年尺度 SPEI 进行 Mann-Kendall (M-K) 突变检验。由图 3 和图 4 可知:1970—2020 年辽宁省的 SPEI 值在零值线上波动变化,根据 UF 线可以看出,其上升下降趋势交替出现,说明 1970—2020 年辽宁省湿润干旱交替出现,1970—1979 年、1986—1999 年和 2010—2020 年为湿润化阶段(除 1972 年),1980—1985 年和 2000—2009 年为干旱化阶段。2000—2002 年干旱化相当明显,这一时期降水少,加之气温升高蒸散量上升,使水分缺失较大。2010—2020 年又处

于湿润化阶段,但 2014 年出现干旱且达到重旱等级,与实际干旱发生情况相符,因此 SPEI 对辽宁省的干旱监测有很好的适用性。1974 年、1975 年和 2010 年为突变年份。2018 年和 2019 年 UF 线超过 0.05 临界线,说明辽宁省湿润化显著,应加强防洪防涝工作。

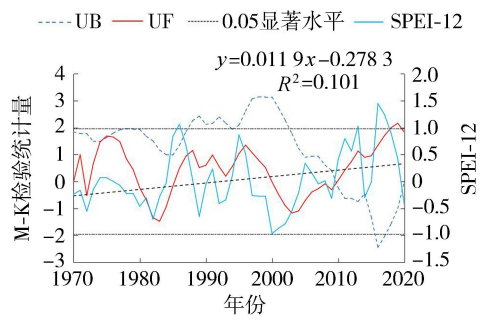


图3 1970—2020 年辽宁省年尺度 SPEI M-K 突变检验曲线

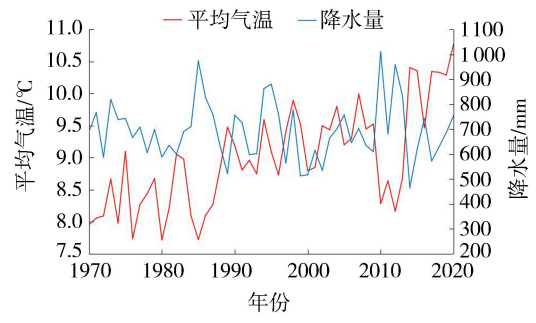


图4 1970—2020 年辽宁省降水量和平均气温发展趋势

为分析辽宁省 SPEI 季尺度特征,利用 SPEI-3 绘制季尺度 SPEI 变化趋势图(图 5)。由图 5 可知: ①季尺度 SPEI 变化趋势中,春夏秋冬线性倾向率都是正值,处于不同程度的上升趋势,冬季为负值,处于下降趋势,说明辽宁省春夏秋冬处于由干旱向湿润阶段发展,冬季趋于干旱,但趋势不明显。②春季 SPEI (图 5(a)) 呈先上升后下降最后上升趋势,2005 年之前 SPEI 大多为负值,说明 1970—2005 年干旱事件频繁,干旱化趋势明显。2005—2020 年 SPEI 多为正值,处于湿润阶段。突变年为 2007 年,处于由干旱向湿润转变阶段,2017 年湿润趋势显著。③夏季 SPEI (图 5(b)) 年际化阶段性明显,1970—1984 年偏旱,1985—1998 年偏涝,1999—

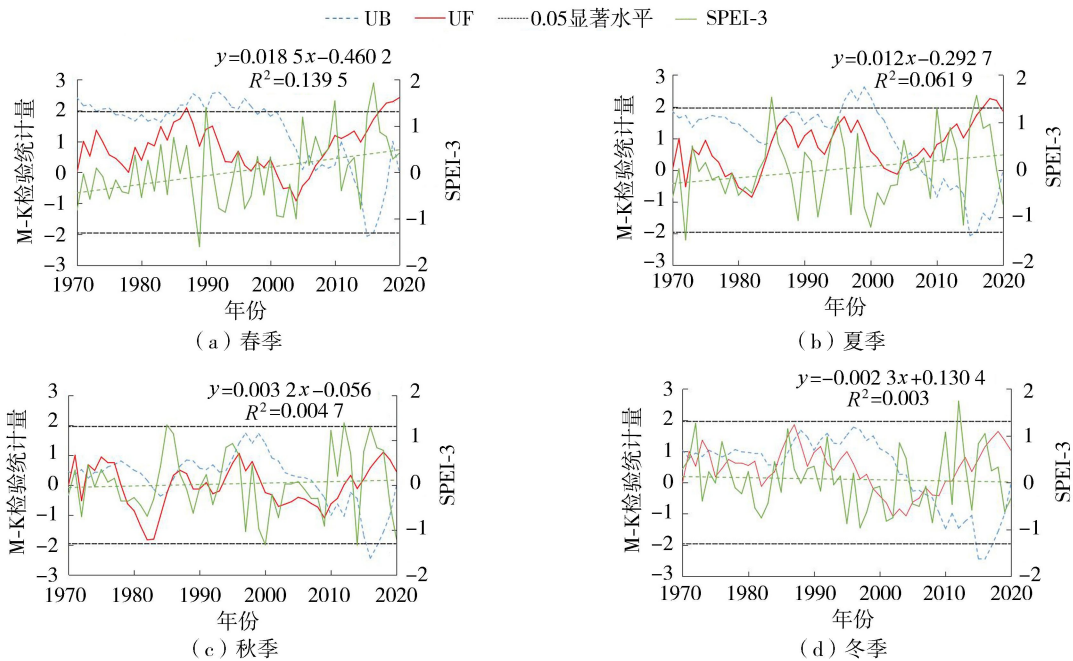


图5 1970—2020 年辽宁省四季 SPEI 变化趋势及 M-K 突变检验

2007 年偏旱,2007 年之后处于湿润阶段。1985 年、1986 年和 2007 年为突变年,均为由旱转涝年。相对春季,夏季旱灾较少但强度较大,旱涝问题突出。④秋季 SPEI(图 5(c)) 上升下降趋势交替出现,但变化趋势不显著,干旱变化不稳定,整体而言秋季变化与春夏两季趋势一致,变化特征总体为湿润干旱交替出现。⑤冬季 SPEI(图 5(d)) 在 1970—2020 年呈下降趋势,1970—1999 年和 2010—2020 年除个别年份为负值外,整体表现为湿润化趋势明显。1999—2009 年干旱化趋势明显,1970—1989 年变化不稳定,在 2007 年之后由于旱转向湿润。与曹永强等^[16]对辽宁省近年来旱涝分析结果较一致,辽宁省四季干旱变化都有阶段性特征。

3.1.3 气象干旱空间变化特征

为分析辽宁省干旱发生频率的空间变化规律,通过对辽宁省 19 个气象站点季尺度 SPEI 和年尺度 SPEI 计算得出季尺度干旱发生频率和年尺度干旱发生频率并进行插值,得到辽宁省干旱发生频率空间分布如图 6 所示。①由图 6(a)可见,辽宁省各地

区干旱发生频率、干旱强度均存在显著差异,1970—2020 年辽宁省夏季干旱发生面积以及频率均为最高,其中彰武、清原、朝阳、丹东、大连 5 个地区四季干旱发生频率均较高;②春季干旱发生频率为 20%~40%的区域占全省总面积的 2/3,清原地区春季干旱发生频率最高,达 92.16%,特旱发生频率为 17.65%,其他地区以轻旱为主,其次则为中旱;③夏季干旱发生频率为 20%~40%的区域占全省面积的 3/4 以上,西部地区干旱分布较为连续,东部地区宽甸、岫岩、开原、沈阳等站点干旱发生频率均低于 20%,清原地区干旱情况最为严重,大连、彰武地区次之;④秋季干旱频率为 0~80%,1/2 地区的干旱发生频率为 32%~48%,宽甸、岫岩秋季干旱发生频率最低;⑤冬季各地干旱发生频率中,仅特旱发生频率为最低,1/3 地区干旱发生频率小于 20%,仅清原地区干旱情况最为严重。

辽宁省年均干旱发生频率为 0~40%,以 16%~24%为主;清原干旱发生频率最高,为 39.54%,彰武、营口次之。1949 年辽宁省干旱发生频率辽西最

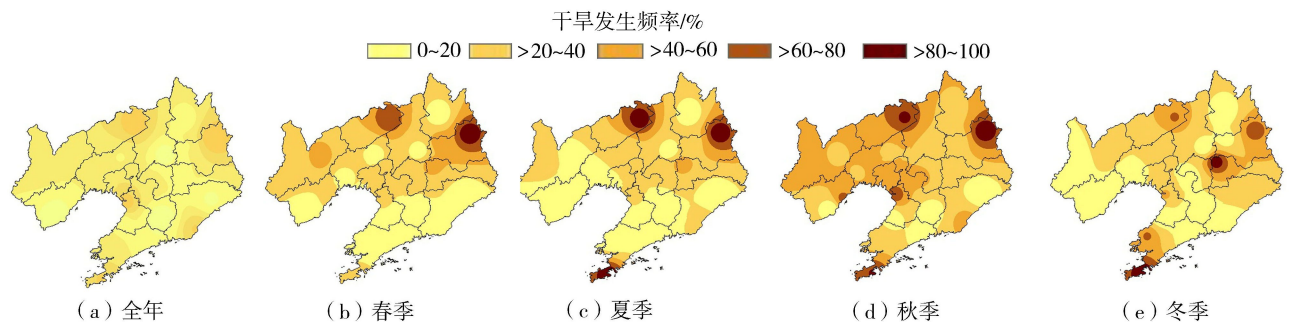


图6 辽宁省 1970—2020 年干旱发生频率空间分布

高、辽南次之且中部地区较低^[17]，与本文研究结论基本一致。辽西地区相比省内其他地区距海较远，使辽西地区获得水分偏少，同时辽西地区土壤以沙土为主，保水能力差，而不合理的开荒种植、开采地下水以及农田水利设施老化淤积，也严重影响对于旱的有效应对。丹东地区位于辽东，干旱发生频率较高的原因主要是降水时空分布不均且年际变化大。受太平洋水汽和西伯利亚冷空气影响，丹东的降雨多集中在夏季，且集中在山地地区，南部平原农耕地缺水严重；丹东地区土层较薄，坡度大，缺乏有效的水利设施，雨水资源利用率低，同时 ENSO 事件的发生使丹东地区干旱发生频率加大。大连市干旱发生频率高主要是因为大连市降雨集中在夏季，春季农作物需水量大，易造成春旱；此外水土流失严重，生产生活用水量增加，以及气温升高和城市化的加快使蒸发量变大也导致干旱风险提高。

3.2 气象干旱驱动因素分析

3.2.1 气象因素多年变化特征

a. 如图 7(a) 所示，1970—2020 年辽宁省年平均气温总体上呈上升趋势。年平均气温在 1983—1988 年和 2008—2013 年两个时间段出现下降趋势，在 2014 年出现大幅度升高，同年辽宁省大部分地区气温异常偏高，且降水也相对较少，这与 2013 年 5 月发生的厄尔尼诺现象导致赤道中部和太平洋大部海温较常年气温平均值偏高有着密切的关系。1970—2020 年大尺度气温总体上升趋势较为平稳，变化波动较小。1970—2020 年辽宁省平均风

速总体呈下降趋势，总体区间为 2 ~ 5 m/s，平均风速为 3.19 m/s，变化幅度较大，具有明显的阶段性特征，1994—2003 年为变化偏弱阶段，其他时段变化强度较大。

b. 如图 7(b) 所示，1970—2020 年辽宁省平均相对湿度变化总体呈下降趋势，总体在 60% ~ 75% 区间内波动，大幅度波动出现在 2015—2020 年，这主要与 2015 年开始平均风速极大值出现以及降水量减少有关，平均相对湿度 50 a 尺度总体变化幅度较大，这同样受到多年来降水与风速不规则变化的影响，由于 1970—2020 年风速呈明显下降趋势，而降水变化较为平稳，二者综合作用导致平均相对湿度有小幅上升趋势。1970—2020 年辽宁省降水量平均值为 695 mm，在 460 ~ 1 100 mm 区间内波动。2010 年夏季辽宁省平均降水量为 475 mm，为 1970—2020 年最高值，该年辽河干流和部分支流水位超过警戒水位，同年辽宁省仅辽西地区降水量较少，其他地区年均降水量均多于该地区多年平均值 1 倍及以上，这种全域性降水量的增多，显然与全球性天气影响有关，即在一定程度上受到大气环流的影响^[18]。1970—2020 年辽宁省潜在蒸散量总体呈上升趋势，多年平均值为 866.68 mm，总体波动幅度较小，2004—2013 年潜在蒸散量数值在趋势线之下，主要是因为这段时间平均气温普遍较低，2013 年后气温明显攀升，潜在蒸散量则升高至趋势线之上。2004—2008 年 SPEI-12 呈明显的先上升后下降的趋势，平均气温与潜在蒸散量则呈现先下降后上升的趋势，由此可以假设平均气温、潜在蒸散量与 SPEI-12 呈负相关关系，与平均风速、平均相对湿度和降水量呈正相关关系，但气象因素与 SPEI 之间相互作用较为复杂，依据“直观”判断并不具备科学依据，要探究辽宁省气象干旱驱动因素具体驱动形式还需进一步分析讨论。

3.2.2 年尺度气象因素与 SPEI 相关关系

以 1970—2020 年各气象站点气象数据为基础，计算得到平均气温、平均风速、平均相对湿度、潜在蒸散量和降水量 5 个气象因素与 SPEI 的相关系数分别为 -0.14、0.045、0.1、-0.527 和 0.792，明显可以看出平均气温、潜在蒸散量与 SPEI 呈显著负相关关系，这与前面假设基本一致。平均风速、平均相对湿度、降水量则与 SPEI 呈正相关关系，在年尺度上各气象因素与 SPEI 相关性中，降水量与 SPEI 相关性最强。

3.2.3 季尺度气象因素与 SPEI 相关关系

如表 2 所示，平均气温在季尺度上与 SPEI 均为负相关关系；平均风速除夏季外均与 SPEI 呈正相关

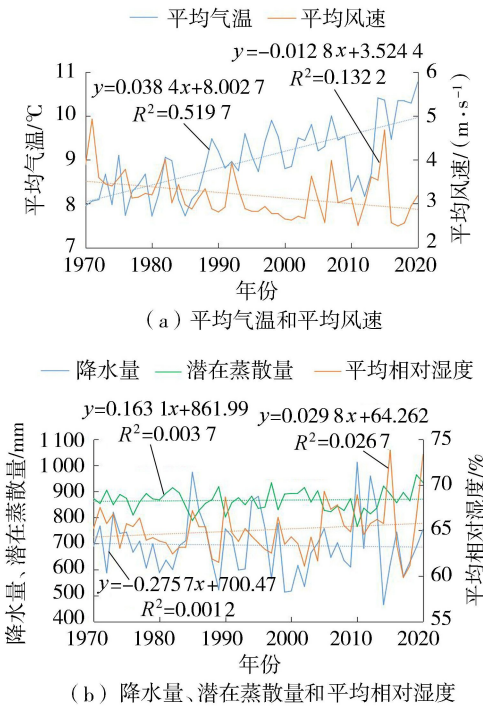


图 7 辽宁省 1970—2020 各气象因素变化规律

关系,而夏季则与 SPEI 呈负相关关系;平均相对湿度在季尺度上均与 SPEI 呈正相关关系;潜在蒸散量除夏季外均与 SPEI 呈正相关关系;降水量在季尺度上均与 SPEI 呈正相关关系。在季尺度中降水量与 SPEI 相关性均为最强,潜在蒸散量次之,可见降水量是影响 SPEI 变化的主导因素,而在春秋冬季潜在蒸散量也可认为是 SPEI 的主导因素之一。季尺度较年尺度各气象因素与 SPEI 的相关性明显升高,可见小时间尺度的气象因素对 SPEI 的影响更明显。平均气温与 SPEI 相关性绝对值在春季为最大,秋季次之,冬季最小。总体上,气温与 SPEI 呈正相关关系。夏季平均风速与 SPEI 呈负相关关系,主要是由于夏季气温高,整体风速较小,不易将空气及土壤中水分消耗,而春季和秋季正值南北冷暖气流运动交汇,使得风速相对较大,水分易消散,平均风速与 SPEI 相关性较小,平均风速不是 SPEI 主导因素。平均相对湿度与 SPEI 相关性在春季和秋季最大,呈显著正相关关系,即平均相对湿度越大,SPEI 值越大,发生干旱的风险就越低。

表 2 季尺度各气象因素与 SPEI 的相关系数

季节	平均气温	平均风速	平均相对湿度	潜在蒸散量	降水量
春	-0.234 *	0.113	0.384 **	0.765 **	0.932 **
夏	-0.117 *	-0.209	0.178	-0.699 **	0.968 **
秋	-0.218	0.121	0.57 **	0.656 **	0.976 **
冬	-0.015 *	0.122	0.145	0.749 **	0.865 **

注:** 通过 0.01 显著性检验;* 通过 0.05 显著性检验。

3.2.4 ENSO 冷暖事件与 SPEI 关系

赵永平等^[19]研究表明,ENSO 事件通过影响季风环流和副热带高压从而对我国的气候产生不同程度的影响。对 1970—2020 年 ENSO 冷暖事件分别进行统计并与年尺度 SPEI 计算结果进行对比,结果如表 3 和表 4 所示,2000 年前暖事件对应的 SPEI 平均值为-0.127 1,辽宁省累计发生干旱的气象站点为 87 个,2000 年前冷事件对应的 SPEI 平均值为 0.197 6,辽宁省累计发生干旱的气象站点为 57 个。通过对比发现,2000 年前 ENSO 对干旱的发生均有影响,但暖事件影响更高。2000 年后暖事件对应的 SPEI 平均值为-0.109 0,辽宁省累计发生干旱的气象站点为 75 个。2000 年后冷事件对应的 SPEI 平均值为 0.472 9,辽宁省累计发生干旱的气象站点为 45 个。可见 2000 年后 ENSO 暖事件对干旱产生的影响大于 ENSO 冷事件。1970—2020 年 ENSO 冷暖事件时期 SPEI 平均值均在正常范围内,但是对干旱事件的响应依然存在,说明干旱历时与干旱发生时期分布不均,且 SPEI 负值能反应干旱程度,1970—2020 年 ENSO 暖事件时期 SPEI 均值都为负,说明 ENSO 暖事件变化对辽宁省干旱有一定程度的影响

表 3 ENSO 暖事件对干旱的影响

开始时间	结束时间	持续时间/月	SPEI-12	发生干旱的气象站点/个
1972 年 5 月	1973 年 3 月	11	-0.908 96	18
1976 年 9 月	1977 年 2 月	6	-0.083 16	7
1977 年 9 月	1978 年 1 月	5	-0.027 82	5
1979 年 10 月	1980 年 2 月	5	-0.182 89	7
1982 年 4 月	1983 年 6 月	15	-0.677 92	17
1986 年 9 月	1988 年 2 月	18	0.662 97	5
1991 年 5 月	1992 年 6 月	14	0.07027	11
1994 年 9 月	1995 年 3 月	7	0.619 93	0
1997 年 5 月	1998 年 5 月	13	-0.616 74	17
2002 年 6 月	2003 年 2 月	9	-0.907 29	17
2004 年 7 月	2005 年 2 月	8	-0.155 80	11
2006 年 9 月	2007 年 1 月	5	-0.069 09	5
2009 年 7 月	2010 年 3 月	9	-0.562 65	17
2014 年 11 月	2016 年 5 月	19	0.166 51	18
2018 年 10 月	2018 年 12 月	3	0.914 06	2
2019 年 11 月	2020 年 5 月	7	-0.148 98	5

表 4 ENSO 冷事件对干旱的影响

开始时间	结束时间	持续时间/月	SPEI-12	发生干旱的气象站点/个
1970 年 7 月	1972 年 1 月	19	-0.119 22	12
1973 年 5 月	1974 年 7 月	15	0.223 35	13
1974 年 10 月	1976 年 4 月	19	0.079 26	10
1983 年 9 月	1984 年 1 月	5	-0.013 84	6
1984 年 10 月	1985 年 8 月	11	0.468 85	3
1988 年 5 月	1989 年 5 月	13	-0.152 56	13
1995 年 8 月	1996 年 3 月	8	0.897 42	0
1998 年 7 月	2001 年 2 月	32	-0.464 02	19
2005 年 11 月	2006 年 3 月	5	0.468 44	0
2007 年 7 月	2008 年 6 月	12	-0.066 04	8
2008 年 11 月	2009 年 3 月	5	-0.050 52	1
2010 年 6 月	2011 年 5 月	12	1.128 18	9
2011 年 7 月	2012 年 3 月	9	0.217 86	5
2016 年 8 月	2016 年 12 月	5	1.664 90	0
2017 年 10 月	2018 年 3 月	6	0.884 57	3

且影响程度较 ENSO 冷事件大。

通过对辽宁省年尺度的 SPEI 与 ENSO 事件强度的相关性分析,结果显示两者的相关系数为-0.25,通过了 0.05 的显著性检验,印证了 ENSO 事件影响着辽宁省干旱的发生,且暖事件发生时出现干旱的可能性更大,暖事件的强度越大,严重干旱的概率越大。将 ENSO 事件强度与辽宁省 SPEI-12 进行对比得到图 8,可见 SPEI-12 基本与 ENSO 事件强度呈负相关关系,与上述分析结果一致。

3.3 讨论

图 2、图 3 和图 5 干旱发展情况与趋势与王学风等^[20]对近年来辽宁省旱涝特征分析的研究结果较一致;干旱发生频率空间分布结果(图 6)与曹永强等^[21]对辽宁省气象干旱研究结果有相似性。本文关于干旱特征的研究中主要分析了干旱的时空分布特征、发展趋势、频率和强度,干旱作为一种极其

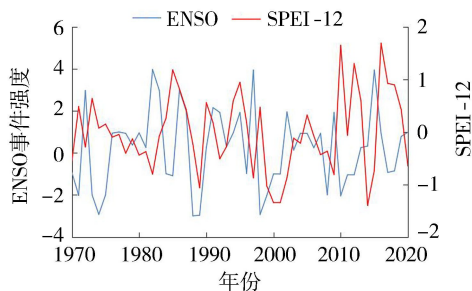


图8 ENSO 事件强度与 SPEI-12 对应关系

复杂的过程,后续研究还需针对干旱历时、烈度、周期性变化规律、干旱指数的适用性等方面对干旱特征进行全面分析,以更好地了解干旱的发生发展规律。

本文 SPEI 相关性研究主要基于基础气象因素,多注重小尺度气象因素研究。在大尺度自然因素与 SPEI 关系方面,冯仕远等^[22]分析了夏季风指数与 SPEI 的相关性;徐乔婷等^[23]研究了 SPEI 与大西洋涛动、北极振荡、太平洋涛动和 ENSO 之间的相互关系,结果表明大尺度的气候因素对干旱的发生起重要作用,同时社会因素也影响着干旱的发生发展。因此,在今后的研究中还需要对不同气候背景下的干旱发展情况与极端气候因素及人类活动的影响进行深入研究分析。

4 结 论

a. 总体上,1970—2020 年辽宁省旱情减少,呈湿润趋势。不同时间尺度的 SPEI 波动变化差异较大,因此不同时间尺度的 SPEI 对干旱的变化表征也有所不同。周期振荡明显且波动较大的月尺度和季尺度 SPEI 对于短期内的干旱变化表征明显,年尺度 SPEI 具有稳定性和明显周期性,可标识持续时间长的干旱。

b. 时间上,1970—2020 年辽宁省 SPEI 在不同时间尺度上均表现出明显的周期性变化规律,随着 SPEI 时间尺度的增大干旱发生频率减小,干旱周期有所延长。干旱湿润现象交替出现,1974 年、1975 年和 2010 年为转折年,干旱湿润趋势发生变化。季尺度发展趋势表明春夏秋冬为湿润趋势,冬季呈干旱趋势。

c. 空间上,1970—2020 年辽宁省 SPEI 呈规律分布,辽西北干旱发生频率最高具有连续性,辽东南部分地区干旱发生频率高,夏季干旱发生的频率以及强度最高。辽宁省全年大部分地区轻旱发生频率最高,极端干旱事件在部分地区发生频率低。

d. 从相关性上看,1970—2020 年辽宁省年尺度及季尺度与 SPEI 相关性最强的均为降水量,潜在蒸散量相关性次之,可以推断降水量与潜在蒸散量

为辽宁省干旱主要驱动因素。ENSO 冷暖事件对辽宁省干旱都有一定影响,呈负相关关系,其中暖事件比冷事件对干旱的影响更大,发生极端干旱事件的概率也更大。

参考文献:

- [1] 姜大膀,王晓欣. 对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. 大气科学学报,2021,44(5):650-653. (JIANG Dabang, WANG Xiaoxin. A brief interpretation of drought change from IPCC Sixth Assessment Report[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 650-653. (in Chinese))
- [2] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等. 气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J]. 中国沙漠,2019,39(6):209-215. (MA Pengli, HAN Lanying, ZHANG Xudong, et al. Regional characteristics of drought in China under the background of climate warming [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6): 209-215. (in Chinese))
- [3] 李方舟,贾宗仁. 自然灾害监测网络建设的背景、现状及对策[J]. 中国矿业,2021,30(增刊1):9-16. (LI Fangzhou, JIA Zongren. The background, current situation and countermeasures of natural disaster monitoring network construction [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Sup1): 9-16. (in Chinese))
- [4] WILHITE D A, HAYES M J. Drought planning in the united states: status and future directions [J]. Springer Netherlands, 1998, 41(2): 33-54.
- [5] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2004,13(4):21-27. (LIU Gengshan, GUO Anhong, AN Shunqing, et al. Research progress in Palmer drought severity index and it's application [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(4): 21-27. (in Chinese))
- [6] PALMER W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index [J]. Weatherwise, 1968(21): 156-161.
- [7] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LORENZO-LACRUZ J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012, 16(10): 1-27.
- [8] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. (WANG Lin, CHEN Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431. (in Chinese))
- [9] 王林,陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 21-26. (WANG Lin, CHEN Wen. Characteristics of multi-timescale variabilities of the drought over last 100 years in Southwest China [J].

- Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(4): 21-26. (in Chinese))
- [10] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625. (ZHUANG Shaowei, ZUO Hongchao, REN Pengcheng, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18 (5): 617-625. (in Chinese))
- [11] 刘珂,姜大膀. 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))
- [12] 胡实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248. (HU Shi, MO Xingguo, LIN Zhonghui. Projections of spatial-temporal variation of drought in north China[J]. Arid Land Geography, 2015, 38 (2): 239-248. (in Chinese))
- [13] 赵春雨,曲晓波,王颖,等. 辽宁气候变化及若干气象灾害的事实分析[J]. 灾害学, 2007(4): 77-80. (ZHAO Chunyu, QU Xiaobo, WANG Ying, et al. Analysis on the climate change and some meteorological disasters in Liaoning Province in 1961-2005 [J]. Journal of Catastrophology, 2007(4): 77-80. (in Chinese))
- [14] 曹永强,冯兴兴,王菲,等. 农业气象灾害对辽宁省粮食产量的影响[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 1-7. (CAO Yongqiang, FENG Xingxing, WANG Fei, et al. Effects of agro-meteorological disasters on the yield of main grain crops in Liaoning Province [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 1-7. (in Chinese))
- [15] 王绍武,龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度[J]. 气象, 1999(1): 10-14. (WANG Shaowu, GONG Daoyi. ENSO events and their intensity in the last 100 years[J]. Meteorology Monthly, 1999(1): 10-14. (in Chinese))
- [16] 曹永强,路洁,李玲慧. 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. (CAO Yongqiang, LU Jie, LI Linghui. Analysis of multi-scale drought and flood characteristics in Liaoning Province based on SPEI [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19 (2): 210-220. (in Chinese))
- [17] 王奉安,韩玺山.《中国气象灾害大典:辽宁卷》出版发行[J]. 辽宁气象, 2005(3): 47. (WANG Feng'an, HAN Xishan. China meteorological disaster dictionary: Liaoning volume published and released [J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 2005(3): 47. (in Chinese))
- [18] 王朋岭,周兵,柳艳菊,等. 2014 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象, 2015, 41(4): 489-496. (WANG Pengling, ZHOU Bing, LIU Yanju, et al. Anomalies of ocean and atmospheric circulation in 2014 and their impacts on climate over China [J]. Meteorology Monthly, 2015, 41(4): 489-496. (in Chinese))
- [19] 赵永平,陈永利. 一百多年来 ENSO 事件分类和 ENSO 循环研究[J]. 海洋湖沼通报, 1998(3): 7-12. (ZHAO Yongping, CHEN Yongli. The classification of ENSO events over recent one hundred plus years [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998(3): 7-12. (in Chinese))
- [20] 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. (WANG Xuefeng, LU Jie, CAO Yongqiang. Analysis of the characteristics of droughts and floods in Liaoning Province in the past 54 years and their impact on the atmospheric circulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1514-1524. (in Chinese))
- [21] 曹永强,李玲慧,路洁,等. 基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7367-7379. (CAO Yongqiang, LI Linghui, LU Jie, et al. Analysis of drought characteristics of maize growth period in Liaoning Province based on SPEI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7367-7379. (in Chinese))
- [22] 冯仕远,初萍萍,姚欣,等. 基于 SPEI 的西北地区干旱时空分布特征及成因分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(10): 38-48. (FENG Shiyuan, CHU Pingping, YAO Xin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and causes of drought in Northwest China based on SPEI [J]. Pearl River, 2021, 42(10): 38-48. (in Chinese))
- [23] 徐乔婷,陈涟,范月华,等. 基于 SPEI 指数的兰州干旱特征与气候指数的关系[J]. 水文, 2021, 41(2): 56-62. (XU Qiaoting, CHEN Lian, FAN Yuehua, et al. Relationship between Lanzhou drought and climate indices based on SPEI index [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2): 56-62. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-12-09 编辑: 熊水斌)

