

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0138

邢广君,崔弼峰.贵州省干旱变化特征及其与大气环流关系[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):75-85. XING G J, CUI B F. Drought characteristics variations and its relationship with atmospheric circulation in Guizhou Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 75-85. (in Chinese)

贵州省干旱变化特征及其与大气环流关系

邢广君¹, 崔弼峰²

(1. 河南水利职业技术学院, 河南 开封 475002; 2. 河南城建学院 市政与环境工程学院, 河南 平顶山 467000)

摘要:根据贵州省1960—2018年17个气象站点的月降水量和平均气温数据,采用标准化降水蒸散指数(SPEI)定量表征干旱,利用M-K趋势检验及R/S法分析了贵州省近59年干旱变化趋势及未来变化趋势的持续性,采用连续小波变换和交叉小波变换分析贵州省SPEI和4种环流因子(MEI、NAO、AO、PDO)的振荡周期特征及其之间在时频域中的共同特征和相关关系。结果表明:贵州省月、春、秋和年SPEI序列呈显著下降趋势(通过显著性检验),即贵州省春旱和秋旱逐步加剧,其中秋季下降速率最大为 $-0.108/(10a)$,而夏旱和冬旱的增加趋势未通过显著性检验;未来春旱和秋旱将保持上升趋势,干旱程度可能愈发严重,而未来夏旱和冬旱强度存在减弱的可能性;干旱事件具有显著的16~48个月的年际振荡周期特征,干旱和四种环流因子的年际共振周期为24~110个月,年代际共振周期为128~250个月,SPEI与NAO、AO之间呈滞后的正相关关系;整体上,MEI主要影响贵州省干旱较短的年际周期变化,PDO和AO主要影响干旱较长的年代际周期变化,而NAO的影响较小。

关键词:干旱;SPEI;大气环流;交叉小波;连续小波;R/S分析

中图分类号:P429 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Drought characteristics variations and its relationship with atmospheric circulation in Guizhou Province

XING Guangjun¹, CUI Bifeng²

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475002, China; 2. College of Municipal and Environmental Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was used to quantitatively characterize the drought conditions based on monthly precipitation and mean temperature data obtained from 17 meteorological stations from 1960-2018 in Guizhou Province. The M-K trend test and R/S analysis were used to analyze the drought trend in Guizhou Province in the past 59 years. The continuous wavelet transform and cross wavelet transform were used to analyze the characteristics of oscillation period of SPEI and four circulation factors (MEI, NAO, AO, PDO), their common characteristics and correlation in time and frequency domain. The results showed that the monthly, spring, autumn and annual SPEI series showed a significant downward trend and the decline $-0.108/(10a)$ for autumn SPEI compared to other series, which indicated that spring and autumn drought gradually intensify in Guizhou Province. The spring and autumn drought may upward in future and the intensity may become more severe, while the intensity of summer and winter drought expressed a weakened possibility. The SPEI had 16-48 months inter-annual oscillation period, and there was a common patterns of 24-110 month at inter-annual and 128-250 month at inter-decadal oscillation circles between SPEI and MEI, NAO, AO, PDO, while a lag positive correlation existed between SPEI and NAO, AO. Overall, MEI mainly affected the inter-annual cycle variation of drought, while PDO and AO mainly affected the longer inter-decadal cycle variation of drought.

收稿日期:2019-03-04 修回日期:2019-08-22 网络出版时间:2019-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190912.1447.003.html>

作者简介:邢广君(1977—),女,河南开封人,讲师,主要从事区域水资源优化配置、水生态安全管理方面研究。E-mail:zfy12367@163.com

通信作者:崔弼峰(1990—),男,河南濮阳人,助教,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:792737179@qq.com

Key words: drought; SPEI; atmospheric circulation; cross wavelet; continuous wavelet; R/S analysis

近年来,随着全球气候的持续变暖及人类活动的加剧,极端自然灾害发生频繁,干旱发生频率尤为突出^[1],据统计,自然灾害损失中气象灾害损失占比 61%,而气象灾害损失中旱灾损失占比 55%。干旱是指蒸发量大于降水量导致水分收支不平衡,而造成水分短缺,它具有发生频率高、波及范围广等显著特点^[2],严重威胁社会经济的可持续发展以及我国的粮食安全。

干旱指数作为准确评价干旱状况的有效工具得到广泛应用,如帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)等。其中,PDSI 基于地表水分平衡原理,综合考虑前期水分状况,但计算复杂、参数具有区域性以及时间尺度单一等弊端限制了其推广应用;SPI 计算简便兼具多时间尺度优点,但忽视了干旱形成过程中温度的作用。在气候变暖的情况下,综合考虑降水和温度在干旱评估中的共同效应十分必要,Vicente-Serrano 等于 2010 年提出了 SPEI,该指数兼具 PDSI 和 SPI 的优点,在区域干旱研究中表现效果良好^[3]。赵平伟等^[4]在滇西南地区干旱演变研究中对 SPEI 和 SPI 的应用效果进行了对比,结果显示气候变化条件下,SPEI 在区域干旱监测中表现较为理想。干旱成因方面,大多数研究主要针对单一的气候因子(降水、温度等)以及区域陆地大气相互作用对干旱形成的影响,人们逐渐意识到全球海洋温度变化以及大尺度环流因子(厄尔尼诺-南方涛动、北极震荡、北大西洋涛动等)在干旱形成上也起着至关重要的作用^[5]。

贵州省位于我国西南云贵高原东部,热带湿润季风气候显著,干旱发生不规律。前人针对西南地区气象要素、干旱时空变化特征以及气象要素(降水、温度)变化成因已有研究,如贺新春等^[6]利用气象水文要素分析了黔西南地区 1985—2015 年的降水及干旱变化特征;芦佳玉等^[7]基于 SPEI 研究了云贵地区 1960—2014 年干旱时空变化特征;黄荣生等^[8]的研究揭示了西南地区降水长期偏少的原因,热带西太平洋和热带印度洋在 2009 年秋至 2010 年春季处于升温状态,反气旋异常环流在其上空形成;王嘉媛等^[9]的研究表明 2009 年、2012 年秋冬季,西南地区受到强烈的下沉运动作用,热带印度洋海表温度异常升高导致来自孟加拉湾的水汽输送较弱,影响了降水。上述研究主要集中在气象要素、干

旱指数的变化以及大气环流因子对区域气候因素(降水、气温等)的影响,目前仍缺少针对贵州省干旱形成机理的研究。与贵州省相关的有关干旱指数与不同大气环流因子之间相关关系以及干旱成因的研究,包括有:徐大红等^[10]研究表明 2009—2010 年黔东北地区特大干旱与大气环流异常之间有很大关系;熊光洁^[11]研究发现当 NAO 持续处于负相位时促进我国西南地区干旱的发生;黄荣辉等^[12]研究了 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因,结果表明当 AO 为很大的负值时造成了西南地区持续的严重干旱;高琳慧^[13]研究表明 ENSO 的出现会影响中国南方秋季旱涝变化。

借鉴上述研究结果,本文选取了对西南地区影响较大的 4 种大气环流因子,即多元 ENSO 指数(MEI)、北大西洋涛动指数(North Atlantic Oscillation, NAO)、北极振荡指数(Arctic Oscillation, AO)以及太平洋十年涛动指数(Pacific Decadal Oscillation, PDO),同时,基于干旱指数 SPEI 研究贵州省 1960—2018 年干旱变化趋势及未来趋势特征,利用连续小波变化在时频域内分析干旱指数及环流因子的振荡周期特征,基于交叉小波变换探讨贵州省干旱状况与四种环流因子之间的共同特征及多尺度相关关系,为贵州省干旱评估及预测提供理论依据。

1 研究区概况和数据来源

贵州省地处我国西南部的云贵高原($103^{\circ}\sim 109^{\circ}35'E, 24^{\circ}37'\sim 29^{\circ}13'N$),国土面积约 17.6 万 km^2 。地形复杂多变,山地和丘陵面积占比 92.5%,地势东低西高,雨养农业区面积大,年内降水分布的均匀性严重影响粮食生产。贵州省亚热带湿润季风气候显著,气候温暖湿润,雨热同季,多年平均降雨量 1 179 mm,年均气温 $15^{\circ}C$ 左右。受大气环流及地形等影响,气候地域性差异很大,灾害性天气较多,干旱等灾害频度大,对农业生产危害严重^[14]。

本文基于贵州省 1960—2018 年 17 个气象站点的月均降水和气温数据计算干旱指数 SPEI,气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),对数据序列进行核查,严格把控数据质量,确保计算结果的准确性。研究区概况及站点分布见图 1。

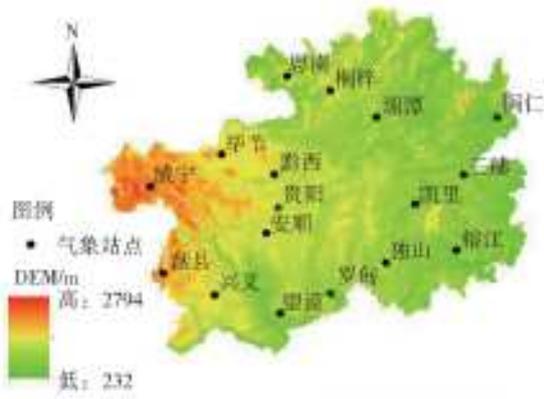


图1 研究区地形及气象站点分布

Fig.1 The topography and distribution of meteorological stations in the study area

本文选取的大气环流因子包括综合监测、表征 ENSO 事件的多元 ENSO 指数 (MEI)、北大西洋涛动指数 (NAO)、北极振荡指数 (AO) 以及太平洋十年涛动指数 (PDO)。本文使用的 MEI 指数由 Volter 等提出, PDO 指数由 Mantua 提出, 1960—2018 年逐月 MEI 和 PDO 数据来自于美国海洋暨大气总署 (NOAA) 地球系统研究实验室 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>; NAO 和 AO 指数数据均来自于美国海洋暨大气总署气候预测中心 (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/index>), NAO 指数由 Li 等^[15] 提出。

2 研究方法

2.1 干旱指数 SPEI

本研究选用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 定量评价研究区气象干旱状况, 其原理是利用降水量与蒸散量之间的差异程度来代表区域干旱状况^[16], 气候变暖条件下, SPEI 指数对气象干旱状况的评价结果较为理想。首先, 计算降水量和潜在蒸发量之间的差额, 然后对差值序列进行拟合求得累积概率密度函数, 最后将其转化为标准正态分布求得 SPEI 值。由于大气压、平均水汽压等气象参数数据缺失, 使用 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散量 PET。SPEI 具体计算步骤及干旱分级标准 (表 1) 见参考文献^[17]。

2.2 M-K 趋势检验

降水、径流、气温等要素的时间序列趋势分析中 Mann-Kendall (后文简称 M-K) 趋势检验法使用较多^[18]。M-K 检验不要求样本服从特定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 对水文、气象等非正态分布的时间序列十分适用, 且计算简便, 在干旱研究中也得到广泛应用^[19]。

表 1 标准化降水蒸散指数 SPEI 干旱等级划分

Tab.1 Standardized precipitation evapotranspiration index SPEI drought classification

等级	干旱类型	SPEI 值
I	无旱	$-0.5 < \text{SPEI}$
II	轻旱	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
III	中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
IV	重旱	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
V	特旱	$\text{SPEI} \leq -2.0$

假定 x_1, x_2, \dots, x_n 为一组时间序列的变量, n 为该变量时间序列的样本个数, 检验的统计量 S 计算公式为

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (1)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases}$$

式中: S 为正态分布, 均值为 0; $x(j)$ 、 $x(k)$ 分别为 j 、 k 年变量的实测值。

标准正态分布统计量计算见式为

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, 方差 Var 计算公式为

$$\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

在特定的 α 置信区间, 若出现 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝原假设, 即在 α 置信区间, 时间序列上升或下降趋势显著。如统计量 Z 大于 0, 则呈现上升趋势; 如统计量 Z 小于 0, 则呈现下降趋势。 $|Z| \geq 1.64$ (1.96、2.58) 时, 则表示通过了信度 90% (95%、99%) 的显著性检验。

2.3 R/S 分析法

水文学家 Hurst 于 1965 年提出了 R/S 分析法, 也称重标极差分析法, 同时引入了 Hurst 指数统计量。Hurst 指数常用于分析时间序列的分形特征和长期记忆过程, 目前在时间序列变化趋势的持续性或反持续性强度判断方面得到广泛引用^[20]。Hurst 指数的大小用来反映时间序列的持续性以及对过去状态的记忆程度^[21], 主要存在以下几种情况: $0 < \text{Hurst} < 0.5$, 表明时间序列未来变化趋势呈现出与过去状态相反的趋势, 且越接近于 0, 反持续性越强; $\text{Hurst} = 0.5$, 表明时间序列是一个前后变化没有关系的独立随机过程; $0.5 < \text{Hurst} < 1.0$, 表

明时间序列未来变化趋势与过去状态保持一致,且越接近于 1,持续性越强。

2.4 交叉小波变化

交叉小波变换融合了小波变换和交叉谱分析,能够呈现两时间序列在时频域中的相关关系^[22]。连续小波变化只是针对单个因子进行时频特征分析,交叉小波可以解释两个变量间周期特征的相似性,但交叉小波变换只是统计高能区两变量间的共同特征,对时频域内变量间的低能区解析不足^[23],而小波凝聚谱能够较好的分析变量间低能区的显著相关关系^[24-25]。

假设有两个时间序列 x 和 y ,其连续小波变换分别为 W_n^x 和 W_n^y ,则它们之间的交叉小波变换表示为

$$W_n^{xy}(s) = W_n^x(s)W_n^{y*}(s) \quad (4)$$

式中: W_n^{y*} 表示 W_n^y 的复共轭; s 表示时滞。交叉小波功率谱用 $|W_n^{xy}(s)|$ 表示,其中包含有时间、频率、振幅信息,值越大说明两序列间的相关性越好。交叉小波的标准化形式可用小波互相关系数表示为

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i^x(s) - \overline{W_i^x(s)}) (W_i^y(s) - \overline{W_i^y(s)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i^x(s) - \overline{W_i^x(s)})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i^y(s) - \overline{W_i^y(s)})^2}} \quad (5)$$

交叉小波变换(XWT)能够展现两序列整体上的共同特征及相位关系,小波凝聚谱(WTC)能够反映两时间序列时频范围内的局部相关密切程度

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{xy}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^x(s)|^2)S(s^{-1}|W_n^y(s)|^2)} \quad (6)$$

式中: S 表示平滑器,即 $S(W) = S_{scale}(S_{time}(W_n(s)))$ 。其中, S_{scale} 为沿着小波伸缩尺度轴平滑; S_{time}

为沿着小波时间平移轴平滑。通常,Morlet 小波的平滑器可表示为

$$S_{time}(W)|_s = (W_n(s)c_1^{-t^2/2s^2})|_s \quad (7)$$

$$S_{scale}(W)|_s = (W_n(s)c_2 \Pi(0.6s))|_s \quad (8)$$

式中: c_1 和 c_2 为标准化常数; Π 为矩形函数; t 为时间长度。

小波变换中采用 Morlet 小波基,交叉小波能量谱和小波凝聚谱图中细黑线表示小波影响锥线边界;粗实线区域表示通过 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验;箭头表示两者间的相位关系, \rightarrow 表示环流因子与 SPEI 之间变化呈正相关关系, \leftarrow 表示两者之间为负相关关系, \downarrow 表示环流因子变化落后 SPEI 变化 90° 即 3 个月, \uparrow 表示环流因子变化超前 SPEI 变化 90° 。

3 结果分析与讨论

3.1 干旱时间变化特征

贵州省 1960—2018 年月、季、年尺度 SPEI 序列变化情况见图 2,各尺度 SPEI 序列均是全省 17 个气象站点 SPEI 值的平均值。整体上,研究时段内短时间尺度(月)SPEI 序列波动较为频繁,长时间尺度(季、年)SPEI 序列波动频率较小。时间尺度反映了 SPEI 对前期降水、气温变化的敏感程度,短期的降水和气温变化导致区域短时间内干湿交替频繁,因此短时间尺度 SPEI 对其反映敏感,而长时间尺度 SPEI 对其响应减缓,波动频率降低。随着时间尺度的增加,SPEI 对前期降水、气温变化响应时长增加,短期内的变化很难改变其状态,只有持续变化的降水和气温变化才会对其造成影响,能够较为合理的体现长期水分变化状况。

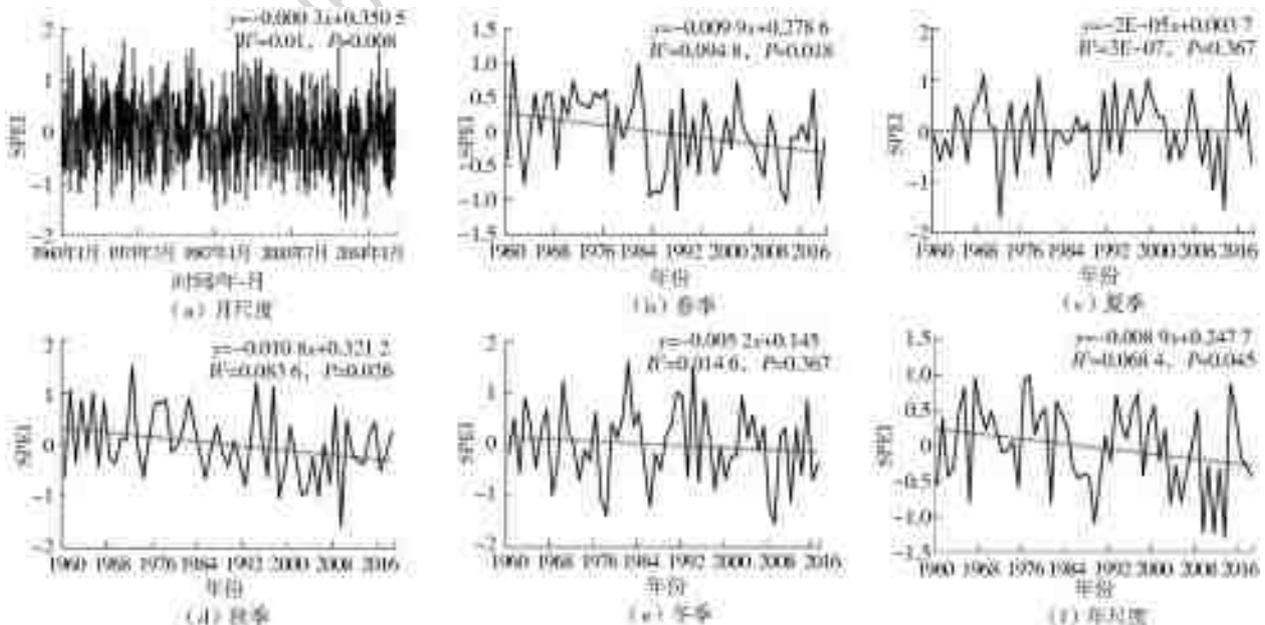


图 2 贵州省不同时间尺度干旱时间变化特征

Fig. 2 Temporal characteristics of drought variation at different time scales in Guizhou Province

由图中线性趋势线可得,贵州省月、季节以及年尺度 SPEI 均呈波动下降趋势,干旱呈现增加趋势。月 SPEI 序列倾向率为 $-0.003/(10a)$,四季 SPEI 序列倾向率分别为 $-0.099/(10a)$ 、 $-0.0002/(10a)$ 、 $-0.108/(10a)$ 及 $-0.052/(10a)$,年 SPEI 序列倾向率为 $-0.089/(10a)$,其中秋季 SPEI 序列下降速率最大,且月尺度 SPEI 变化通过置信度 99% 的显著性检验,春、秋季以及年尺度 SPEI 变化通过置信度 95% 的显著性检验。李月等^[26]关于贵州省 1960—2013 年的干旱时空特征分析结果同样表明近 60 年来贵州省四季以及年尺度 SPEI 指数均呈现不同程度的下降趋势,即呈干旱化趋势,与本研究结果完全一致。

如图 2(b)所示,当 SPEI 值小于 -0.5 时判断该年春季发生干旱,深入分析可知近 59 年贵州省共发生 15 次春旱,分别为 1963、1969、1979、1986—1989、1991、1993、1995、1998、2007、2010—2011、2017 年。其中:1991 年 SPEI 值最小为 -1.15 ,说明 2011 年的春旱最为严重,达到中旱级别;2011 年 SPEI 值为 -1.04 ,为中旱级别。吴建锋等^[27]研究结果表明,贵州省近 54 年发生春旱的年份有 1963、1979、1986—1989、1995、2007、2010 和 2011 年,全部包含在本文所确定的干旱年份内。

根据 1949 年以来记载的统计资料,对贵州危害最大的是夏旱,春旱和秋旱次之^[28]。且 1960—2018,1963、1966、1972、1975、1978、1981、1990、1991—1993、1995、1999、2001—2003、2005—2006、2009—2011 年的受旱面积均大于 $4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。此外,由图 2 统计到 59 年间共发生 15 次春旱,14 次夏旱,13 次秋旱和 15 次冬旱,并且 14 次夏旱中包括了所有历史记录发生旱灾的年份。吴建锋等^[27]关于贵州省干旱时空分布的研究表明近 54 年贵州省共发生 14 次夏旱事件,与本研究结论基本一致。贵州省在 2009 年秋季到 2010 年春季的西南地区严

重的秋冬春三季连旱中受灾较为严重^[29],从图 2(d)、2(e)也可看出 2009—2010 年左右 SEPI 值达到最低点,旱情为最为严重。上述分析表明不同尺度的 SPEI 序列与历史记录干旱事件有良好的对应关系,能够准确地反映贵州省干旱状况。

3.2 干旱变化趋势及未来趋势分析

分别利用 M-K 检验法和 R/S 分析法计算趋势特征值 U 和赫斯特指数 H 来判别不同时间尺度 SPEI 序列的过去趋势及未来趋势,结果见表 2。由表 2 可知,贵州省 1960—2018 年共 59 年的月、四季以及年尺度 SPEI 序列均呈下降趋势。其中:月、春、秋和年 SPEI 序列下降趋势通过显著性检验,说明贵州省春旱和秋旱逐步加剧,造成的影响也愈加严重;夏季和冬季 SPEI 序列的下降趋势未通过显著性检验。前人关于贵州干旱特征的研究成果也印证了上述干旱变化,且结果基本保持一致:陆军等^[30]基于 SPI 分析了贵州省旱涝变化特征,结果表明春季和秋季呈现干旱化趋势;吴建锋等^[29]关于贵州省近 54 年干旱时空特征分析的结果表明贵州省年际、四季干旱呈现增加趋势;冯禹等^[31]关于贵州省干旱时空分布特征的研究同样表明年尺度干旱指数序列呈波动减小趋势,干旱呈增加趋势。

据表 2 中赫斯特指数 H 可知:贵州省年、月尺度以及春季和秋季 SPEI 序列 H 指数均大于 0.5,说明未来 SPEI 序列依然保持下降趋势,且具有较强的持续性,干旱程度可能愈发严重;夏季和冬季 SPEI 序列 H 指数小于 0.5,说明夏季和冬季 SPEI 序列具有反持续性,即 SPEI 序列将呈现上升趋势,未来干旱强度存在减弱的可能性。这种趋势需要引起高度重视,春、秋旱如若继续保持这种发展趋势,将会对贵州省社会、经济、农业可持续发展造成严重影响,因此当地政府部门需提高警惕,提前采取有效措施应对干旱可能加重的情况。

表 2 不同尺度 SPEI 序列过去及未来变化趋势结果

Tab. 2 Past and future trends of SPEI at different time scales

SPEI 序列	赫斯特指数 H	M-K 检验特征值 U	过去趋势	持续性及未来趋势
月尺度	0.58	-2.55	显著下降趋势	具有持续性:下降趋势
春季	0.64	-2.57	显著下降趋势	具有持续性:下降趋势
夏季	0.49	-0.05	下降趋势	具有反持续性:上升趋势
秋季	0.59	-1.84	显著下降趋势	具有持续性:下降趋势
冬季	0.48	-0.95	下降趋势	具有反持续性:上升趋势
年尺度	0.58	-1.66	显著下降趋势	具有持续性:下降趋势

据上述结论可知,贵州省整体上未来的干旱变化趋势将与过去保持一致,即干旱化将持续增强,而夏旱和冬旱变化在未来具有反持续性特点,即干旱

过去具有增强特征,未来可能减弱。造成这种状况的原因可能与降水以及气温的变化特征有直接关系。贵州省夏季和冬季的降水和气温变化趋势统

计结果见表 3。由表可知,贵州省夏季降水呈现下降趋势气温呈现上升趋势,导致 SPEI 表现出减小趋势,干旱化严重,而未来降水持续下降,气温可能出现下降,且气温的反持续性要强于降水的持续性,因此未来的 SPEI 序列可能会表现出上升趋

势,干旱严重程度可能降低。冬季的降水未来可能出现上升趋势,气温可能出现下降趋势,均与过去呈相反状态,这就可能造成 SPEI 由过去的下降趋势变为未来的上升趋势,即干旱严重程度具有减弱的可能性。

表 3 降水及气温序列过去及未来变化特征

Tab. 3 Past and future changes in precipitation and temperature series

参数	夏季		冬季	
	降水	气温	降水	气温
赫斯特指数 H	0.54	0.41	0.49	0.46
M-K 检验特征值 U	-0.75	1.38	-1.03	1.30
过去趋势	下降	显著上升	下降	显著上升
持续性及未来趋势	具有持续性 下降趋势	具有反持续性 下降趋势	具有反持续性 上升趋势	具有反持续性 下降趋势

3.3 干旱指数和环流因子振荡特征及相关关系

3.3.1 连续小波变换分析

贵州省 1960—2018 年月尺度 SPEI 序列及 4 个大尺度环流因子的连续小波转换功率谱见图 3,在不同的时域中表现出不同强度的振荡周期特征。

由图 3 可以得知,贵州省月尺度 SPEI 序列存在 4 个显著性周期,分别为 1960—1972 年的 30~48 个月周期 1980—1994 年的 128~192 个月周期、以及 2007—2015 年的 16~30 个月周期,此外,2010—2011 年叠加着约 48 个月周期;表征 ENSO 的 MEI 在 1963—1993 年表现出 16~64 个月的年际振荡特征,且振荡幅度较大,1995—2010 年呈现出显著的 8~50 个月的年代际振荡,1975—2000 年存在未通过显著性检验的 120~160 个月的高频区;相对而言,NAO 和 AO 呈现的周期信号相对较弱,NAO

仅在 1969—1971 年和 2012—2014 年表现出 26~32 个月的显著性振荡周期,AO 存在 4 个显著性周期,分别为 32~35 个月周期(1965—1970 年)、28~32 个月周期(1993—1998 年)、150~250 个月周期(1980—1995 年)以及叠加在 1981—1995 年的准 108 个月周期;PDO 在 1990—2008 年呈现出显著的 8~14 个月的年代际振荡周期,1996—2005 年的 48~128 个月显著性周期;月尺度 SPEI、MEI、NAO、AO 以及 PDO 在 1960—2018 年均表现出了显著的 0~8 个月间歇性振荡周期。结果显示,月尺度 SPEI 序列和四种环流因子之间在时频域内存在相近的显著性周期,时频结构在一定程度上具有相似性,尤其是 SPEI 和 MEI、NAO、AO 间的 30~32 个月振荡周期在时域上具有较高的一致性,均出现在 1962—1972 年。

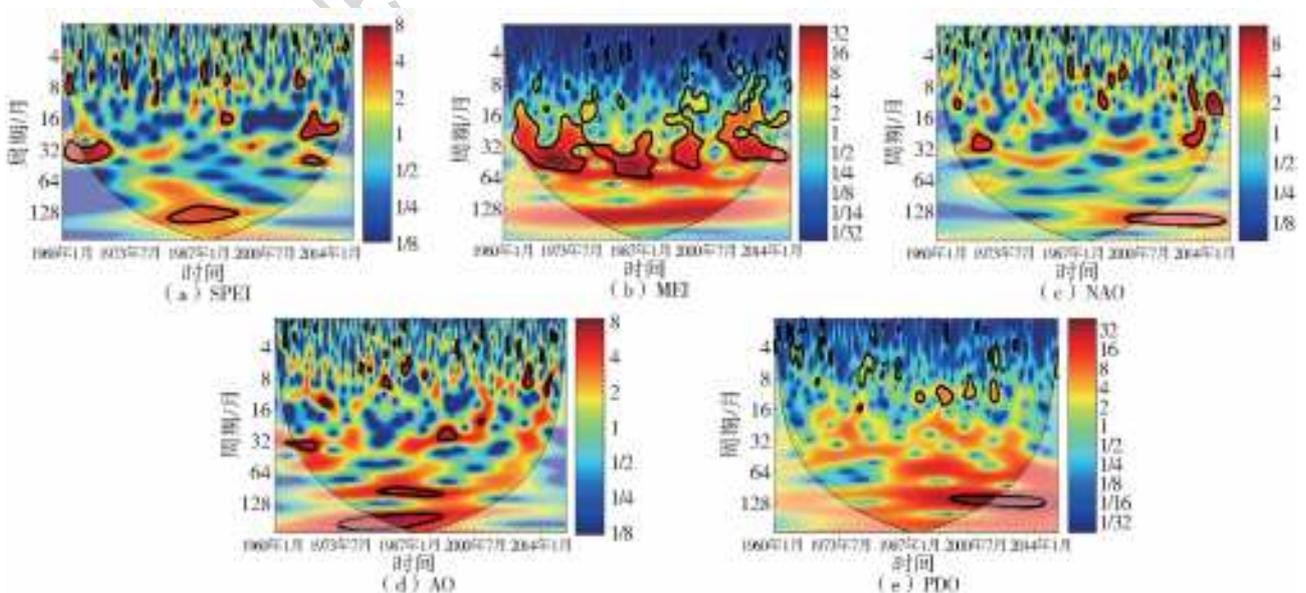


图 3 贵州省 SPEI、MEI、NAO、AO 及 PDO 的连续小波转换功率谱

Fig. 3 Continuous wavelet transform characteristics of SPEI, MEI, NAO, AO and PDO in Guizhou Province

3.3.2 交叉小波变换分析

本文结合小波能量谱和小波凝聚谱对贵州省1960—2018年月尺度SPEI序列和4个大尺度环流因子在时频域中的共同特征及相关关系进行讨论。

图4给出了贵州省SPEI1与环流因子MEI、NAO、AO、PDO的交叉小波能量谱。从图中可以看出,SPEI1与MEI间存在5个显著性共振周期,分别为1963—1986年的12~48个月周期、1985—1995年的170个月周期,1992—1995年的14~20个月周期、1994—2001年的24~40个月周期和2004—2016年的10~48个月周期;前者高能区沿着时间序列呈带状分布,且1963—1968年的12~24个月周期的相位关系表明SPEI1和MEI间呈正相关关系,1965—1982年间的位相关系由 -90° 变为 90° ,表明两变量间由负相关关系转变为正相关关系;后者高能区的相位关系表明SPEI1与MEI之间呈负相关关系;同时,1985年之前及1995年之后均表现出较强的正相位的170个月左右的共振周期,但未通过显著性检验。

SPEI1与NAO间存在5个相对较短的显著共振周期,24~36个月共振周期主要表现在1965—1972年,平均位相角接近垂直向上 90° ,表明SPEI1显著的滞后于NAO;1975—1980年存在准36个月

周期,位相关系表明SPEI1显著的滞后NAO约3个月;1988—2002年的准128个月的共振周期,1996—2003年的30~34个月的共振周期,SPEI1与NAO呈正相关关系,平均位相角约 45° 表明平均滞后1.5个月,2007—2017年的24~32个月的显著共振周期。

SPEI1与AO间具有30~36个月共振周期主要集中在1965—1971年和1993—2002年,且通过显著性检验,两序列在该频段上表现出正相关关系,平均位相角约为 45° ,表明SPEI1滞后AO约1.5个月;1979—1995年存在64~110个月和128~250个月的叠加显著性共振周期,前一频段内位相关系表明SPEI1月AO呈正相关关系,SPEI1滞后AO平均约1.5个月(平均位相角约 45°),后一频段内SPEI1与AO的位相角为 135° ,表明两序列呈负相关关系。

SPEI1与PDO间仅存在1个显著的共振周期,为1988—2002年的准128个月的共振周期,平均相位角为 -45° ,表明SPEI1和PDO间呈正相关,SPEI1超前PDO约1.5个月。

此外,在2~16个月频段内,SPEI1序列与4种环流因子间的交叉小波能量强度间断的通过显著性检验,保持时间较短且位相关系随时域变化较大,没有呈现稳定的相关关系。

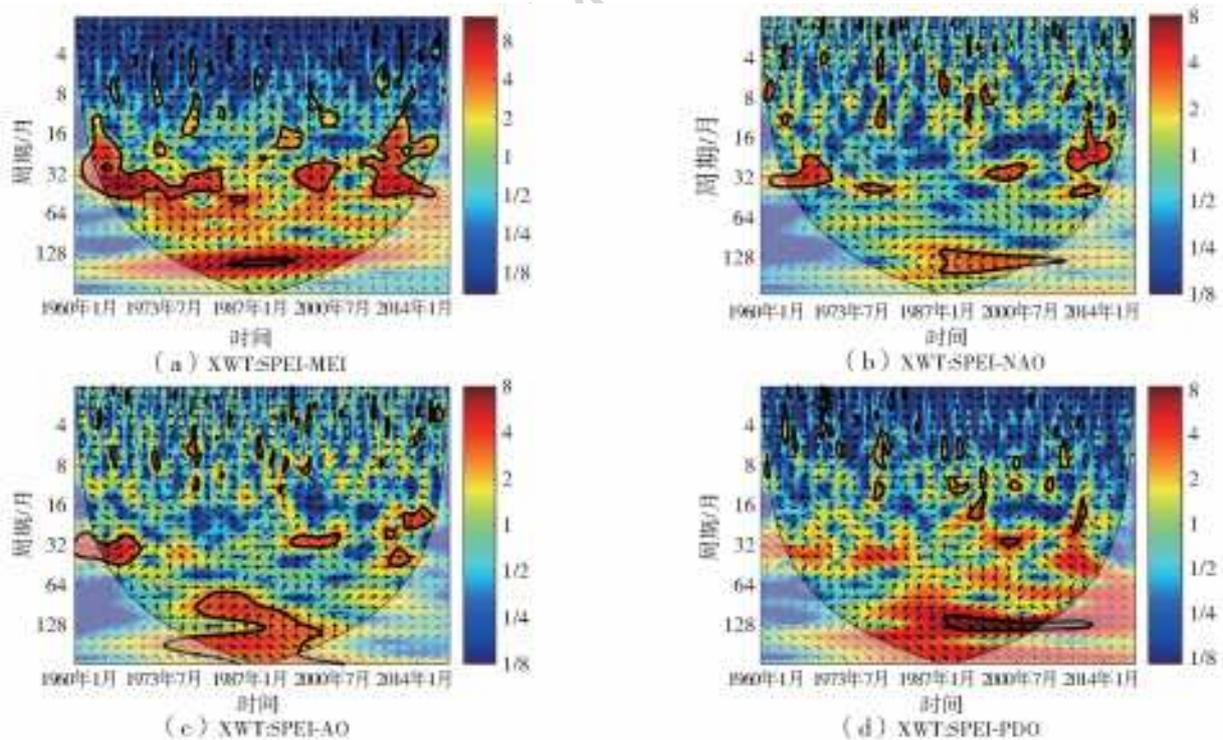


图4 贵州省SPEI1和MEI、NAO、AO及PDO的交叉小波能量谱

Fig. 4 The XWT characteristics of SPEI1, MEI, NAO, AO and PDO in Guizhou Province

图5给出了贵州省SPEI1与环流因子MEI、NAO、AO、PDO的小波凝聚谱,表明各序列在低能

区的共同特征及相关关系。由图可知,SPEI1与MEI间存在4个显著的共振周期,12~20个月的周

期主要表现在 1963—1967 年, 16~24 个月的周期主要表现在 1988—1995 年, 24~34 个月的周期主要表现在 1994—2003 年以及 170 个月左右的共振周期几乎穿越整个时间段, 这四个频段位相关系数均表明 SPEI1 与 MEI 之间呈正相关关系; SPEI1 与 NAO 间的 32~48 个月的最显著共振周期主要集中在 1973—1975 年, 16~48 个月的主共振周期主要表现在 1995—2003 年, 且通过显著性检验, 其相位

差表明两序列间呈正相关关系, 约 128 个月的共振周期主要集中在 1989—2007 年; SPEI1 与 AO 间存在 3 个显著的共振周期, 分别为 1966—1971 年、1997—2002 年的 24~38 个月周期和 1981—2004 年的 64~98 个月周期, 相位差表明两序列间呈正相关关系; 此外, 1960—2019 年 SPEI1 与 4 个大尺度环流因子之间存在间歇性 2~16 个月共振周期, 相关关系不明显。

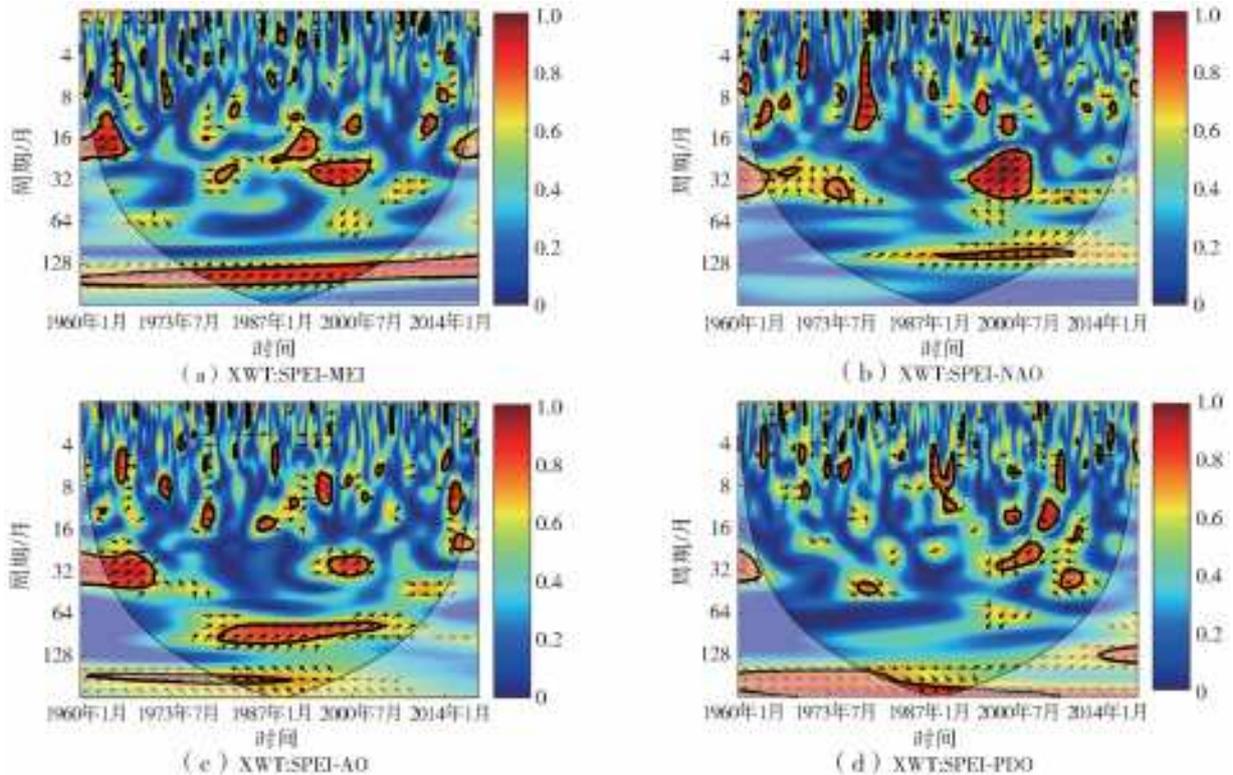


图 5 贵州省 SPEI1 和 MEI、NAO、AO 及 PDO 的小波凝聚谱

Fig. 5 The WTC characteristics of SPEI1, MEI, NAO, AO and PDO in Guizhou Province

厄尔尼诺和南方涛动合称为 ENSO, 对赤道太平洋地区甚至全球范围气候变化具有强烈的影响^[32], 本文采用 MEI 来表征 ENSO, 且分析了 1960—2018 年月 MEI 的周期特征, 结果表明 MEI 具有显著的年际特征以及不显著的年代际特征(图 3), SPEI 和 MEI 之间主要存在 10~50 个月年际尺度正相关关系, ENSO 对贵州省干旱短周期的年际交替影响较大。此外, SPEI 和 MEI 在约 160 个月的年代际尺度上也具有高强度共振周期, 但未通过显著性检验。

AO 和 PDO 均具有显著的年际和年代际振荡周期, 与贵州省干旱条件之间存在显著的多时间尺度相关振荡, 年代际尺度周期的相关程度要大于年际尺度周期的相关程度, 小波互相关系数在时域中具有明显的周期性分布特征, 表明 AO 和 PDO 对贵州省干旱变化具有显著影响, 且与 SPEI 呈正相关

关系。Gong 等^[33]的研究结果显示当 AO 增强时, 我国大部分地区冬季降水增多, 气温也升高, 共同结果可以缓解干旱程度, 这与本研究结论一致。

从分析结果来看, 交叉小波可以较好的反映 SPEI 和 MEI、NAO、AO、PDO 之间的相关关系及滞后时间随振荡频率变化的细部特征, 有助于分析他们之间共同的振荡周期特征, 很好地反映了 MEI、NAO、AO、PDO 大气环流指数对于干旱时域变化特征的影响状况。

4 结 论

本文利用贵州省 17 个气象站点 1960—2018 年月降水、平均气温资料计算 SPEI 来表征干旱状况, 利用 M-K 趋势检验、R/S 分析法, 讨论不同时间尺度下干旱时间变化趋势及未来趋势, 基于连续小波变换和交叉小波变换, 分析了 SPEI 和 MEI、NAO、

AO、PDO 的周期特征及它们之间的相关关系,结论如下。

(1)贵州省月、四季以及年尺度 SPEI 序列均呈现波动下降趋势,倾向率分别为 $-0.003/(10a)$ 、 $-0.099/(10a)$ 、 $-0.0002/(10a)$ 、 $-0.108/1(10a)$ 、 $-0.052/(10a)$ 以及 $-0.089/(10a)$,其中秋季下降速率最大;且月、春、秋和年 SPEI 序列下降趋势通过显著性检验,贵州省春旱和秋旱逐步加剧。

(2)未来春季和秋季 SPEI 序列依然保持下降趋势,且具有较强的持续性,未来春旱和秋旱将保持上升趋势,干旱程度可能愈发严重,而夏季和冬季 SPEI 序列具有反持续性,将呈现增大趋势,即贵州省未来夏旱和冬旱强度存在减弱的可能性。

(3)近 59 年的贵州省干旱变化具有显著的 16~48 个月年际振荡周期,贵州省干旱与 4 种环流因子间均有 24~110 月的年际共振周期,且 1980 年之前 SPEI 与 MEI 相关性较大,之后 SPEI 与 AO 相关性较大;同时,贵州省干旱与四种环流指数间还存在 128~250 个月的年代际共振周期,且 SPEI 与 AO、PDO 相关性最显著,SPEI 与 NAO、AO 之间呈滞后的正相关关系。

(4)整体上看,MEI 主要影响贵州省干旱较短的年际周期变化,PDO 和 AO 主要影响贵州省干旱较长的年代际周期变化,NAO 的影响较小。

参考文献(References):

- [1] 潘妮,卫仁娟,詹存,等. 干旱指数在四川省的适用性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 71278. (PAN N, WEI R J, ZHAN C, et al. Applicability analysis of drought indexes in Sichuan Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 71-78. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 04. 013.
- [2] CHANG J X, LI Y Y, WANG Y M, et al. Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 824-834. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 06. 064.
- [3] 蔡思扬,左德鹏,徐宗学,等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 15-21. (CAI S Y, ZUO D P, XU Z X, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in northeast China based on SPEI [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 15-21. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 05. 003.
- [4] 赵平伟,郭萍,李立印,等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 142-149. (ZHAO P W, GUO P, LI L Y, et al. Comparison of SPEI and SPI index on account of the droughts of the southwest Yunnan area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1): 142-149. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: CJLY. 0. 2017-01-017.
- [5] DAI AG. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65. DOI: 10. 1002/wcc. 81.
- [6] 贺新春,张志学,邱凌辉. 黔西南州降水及干旱特征分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(9): 76-78. (HE X C, ZHANG X Z, QIU L H. Characteristics analysis of precipitation and drought in southwestern Guizhou autonomous prefecture [J]. Pearl River, 2018, 39(9): 76-78. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9235. 2018. 09. 017.
- [7] 芦佳玉,延军平,李英杰. 基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1960—2014 年干旱时空变化特征[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018, 45(3): 363-372. (LU J Y, YAN J P, LI Y J. The temporal variation characteristics of drought in Yunnan-Guizhou area during 1960 to 2014 based on SPEI and run-length theory [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2018, 45(3): 363-372. (in Chinese)) DOI: 10. 3785/j. issn. 1008-9497. 2018. 03. 013.
- [8] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457. (HUANG R H, LIU Y, WANG L, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(3): 443-457. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2011. 11101.
- [9] 王嘉媛,胡学平,许平平,等. 西南地区 2 次秋冬春季持续严重干旱气候成因对比[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 202-212. (WANG J Y, HU X P, XU P P, et al. Comparative analysis of climatic cause about Two continuous aevere drought events in southwest China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 202-212. (in Chinese)) DOI: 10. 11755/j. issn. 1006-7639(2015)-02-0202.
- [10] 徐大红,牛广山,周长志,等. 2009-2010 年黔东南地区夏秋冬连旱成因分析[J]. 贵州气象, 2010, 34(S1): 7-9, 16. (XU D H, NIU G S, ZHOU C Z, et al. An analysis of the causes of successive summer, autumn and winter droughts in northeast guizhou from 2009 to 2010 [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2010, 34(S1): 7-9, 16. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6598. 2010. z1. 001.

- [11] 熊光洁. 近 50 年中国西南地区不同时间尺度干旱气候变化特征及成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (XIONG G J. Studies on characteristics and causes of drought climate change with different time scales in southwest China in the past 50 Years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))
- [12] 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457. (HUANG R H, LIU Y, WANG L, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(3): 443-457. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2011. 11111.
- [13] 高琳慧. 基于 SPEI 的中国南方秋季干旱变化特征及其可能原因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017. (GAO L H. Variation characteristics of autumn drought in southwest China based on SPEI and the possible causes [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] 陈学凯, 徐建新, 雷宏军, 等. 贵州省干旱时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 72-81. (CHEN X K, XU J X, LEI H J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its regional response to climate change in Guizhou Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8): 72-81. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2015. 08. 015.
- [15] LI J P, WANG J X L. A new north atlantic oscillation index and its variability[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20 (5) : 661-676. DOI: 10. 1007/bf02915394.
- [16] MING B, GUO Y Q, TAO H B, et al. SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 660-669. DOI: 10. 1016/S2095-3119(14) 60778-4.
- [17] 高瑞, 王龙, 杨茂灵, 等. 基于 SPEI 的南盘江流域近 40 年冬春干旱时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 67-70. (GAO R, WANG L, YANG M L, et al. Spatio-temporal characteristic of winter and spring drought based on Standardized Precipitation Evapo-transpiration Index in Nanpanjiang basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32 (3) : 67-70. (in Chinese)) DOI: 10. 7631/j. issn. 1672-3317. 2013. 03. 015.
- [18] 刘丽红, 颜冰, 肖柏青, 等. 1960 年-2010 年淮河流域降水量时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 43-47, 66. (LIU L H, YAN B, XIAO B Q, et al. Characteristics of precipitation variation in Huaihe River basin during 1960-2010 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14 (3) : 43-47, 66. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 008.
- [19] 张子凡, 姜帅, 李娇娇, 等. 基于 SPI 指数的惠州市干季干旱趋势分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(31): 135-139. (ZHANG Z F, JIANG S, LI J J, et al. Drought tendency of the dry season in Huizhou; analysis based on SPI [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(31): 135-139. (in Chinese))
- [20] 丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅, 等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素[J]. 地球科学进展, 2018, 33 (3) : 281-292. (DING Z Y, LU R J, LIU C, et al. Temporal change characteristics of climatic and its relationships with atmospheric circulation patterns in Qinghai Lake basin [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33 (3) : 281-292. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN;DXJZ. 0. 2018-03-009.
- [21] 刘晓芳, 黄河清, 樊金生. 汉道演变的水沙过程影响分析-以监利河段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 01-08. (LIU X F, HUANG H Q, FAN J S. Impacts of variations of flow and sediment series on main channel switches; A case study on Jianli reach [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 01-08. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 05. 001.
- [22] 张兵, 王中良. 天津地区降水和气温的变化趋势及多尺度交叉小波分析[J]. 天津师范大学学报(自然版), 2016, 36(1): 32-39. (ZHANG B, WANG Z L. Trend and multi-time scale cross-wavelet analysis on precipitation and temperature in Tianjin area [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2016, 36 (1) : 32-39. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1114. 2016. 01. 009.
- [23] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1137-1146. (LIU Z F, LIU Y C, HAO Y H, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2014. 06. 006.
- [24] 董林垚, 陈建耀, 付丛生, 等. 西江流域径流与气象要素多时间尺度关联性研究[J]. 地理科学, 2013, 33 (2) : 209-215. (DONG L Y, CHEN J Y, FU C S, et al. Recognition on the relationship between runoff and regional meteorological factors of the Xijiang River in multi-time scales [J]. Scientia Geographica Sinica,

- 2013,33(2):209-215. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2013.02.017.
- [25] ADAMOWSKI J, PROKOPH A. Determining the amplitude and timing of streamflow discontinuities; A cross wavelet analysis approach [J]. Hydrological Processes, 2014, 28 (5): 2782-2793. DOI: 10.1002/hyp.9843.
- [26] 李月,白晓永,周运超,等. 基于 SPEI 的贵州省近 60 年干旱时空特征分析[J]. 中国水土保持, 2015 (7): 57-60. (LI Y, BAI X Y, ZHOU Y C, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in Guizhou province in recent 60 years based on SPEI[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015 (7): 57-60. (in Chinese)) DOI:10.14123/j.cnki.swcc.2015.0195.
- [27] 吴建峰,张凤太,卢海芬,等. 基于标准化降水指数的贵州省近 54 年干旱时空特征分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 207-214. (WU J F, ZHANG F T, LU H F, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of drought in Guizhou Province in recent 54 years based on standardized precipitation index[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15): 207-214. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2018.15.030.
- [28] 王飞. 贵州干旱特征及预警模型研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016. (WANG F. Drought characteristics and early warning model in Guizhou Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016. (in Chinese)) DOI:CNKI;CDMD;2.1016.274946.
- [29] 刘建刚,万金红,谭徐明,等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区干旱及与历史场次干旱对比分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(2): 196-200. (LIU J G, WAN J H, TAN X M, et al. Drought in Southwest China from Autumn 2009 to Spring 2010 and its comparative analysis with historical drought events [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31 (2): 196-200. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-2132.2011.02.012.
- [30] 陈军,李小兰,喻义军,等. 贵州旱涝变化特征及其与西太平洋副高和海温的联系[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 440-447. (CHEN J, LI X L, YU Y J, et al. Variation features of drought and flood in Guizhou Province and their relationships with WPSH and SST [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34 (3): 440-447. (in Chinese)) DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0440.
- [31] 冯禹,崔宁博,徐燕梅,等. 贵州省干旱时空分布特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (8): 82-86. (FENG Y, CUI N B, XU H Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of meteorological drought in Guizhou Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 82-86. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2015.261.
- [32] 苏宏新,李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475. (SU H X, LI G Q. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201111071684.
- [33] GONG D Y, WANG S W. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58 (4): 559-568. DOI: 10.1007/bf02837460.