

基于 *SPEI* 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析

郭梦^{1,2}, 张奇莹^{1,2}, 钱会^{1,2}, 徐盼盼^{1,2}, 陈垚^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 陕西省属于生态脆弱区且旱灾频发。基于陕西省 1956–2016 年 18 个气象站点的实测气象资料, 利用 Penman–Monteith 模型计算年尺度标准降水蒸散指数 (*SPEI*), 并结合滑动平均、MK 检验、小波分析和 Kring 空间插值法等方法探讨了陕西省 61 年来的干旱时空变化特征。结果表明: 从时间变化上看, 陕西省 *SPEI* 指数呈现在波动中下降趋势, 表明全省正在向干旱化发展, 但总体变化趋势不显著; 全省干旱影响范围自 1986 年起呈现显著扩大化趋势; *SPEI* 指数在 1980 年出现突然减小的变异点; *SPEI* 指数周期存在多时间尺度特征, 具有 5、16 和 30a 的三个主震荡周期; 从空间变化上看, 全省有不同程度干旱发生, 各站点分布差异较大且不均衡, 干旱频率由大到小依次为中旱 > 轻旱 > 特旱 > 重旱, 重旱发生频率最低, 高值中心位于延安站, 中旱发生频率最高且分布范围最大, 高值中心位于略阳站和汉中站。此研究可为全省防灾防旱, 农业生产以及政策制定提供科学依据。

关键词: *SPEI* 干旱指数; Penman–Monteith 模型; 突变分析; 干旱演变; 干旱频率; 时空分布特征

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0127-06

Analysis on the drought temporal-spatial distribution characteristics of Shaanxi Province based on *SPEI*

GUO Meng^{1,2}, ZHANG Qiying^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}, XU Panpan^{1,2}, CHEN Yao^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710064, China)

Abstract: Shaanxi Province is an ecologically fragile and drought-prone area. Based on the measured data of 18 meteorological stations from 1956 to 2016, the annual scale standard precipitation evapotranspiration index (*SPEI*) was calculated using the Penman-Monteith model. The drought temporal-spatial distribution characteristics of Shaanxi Province during the past 61 years was discussed by combining with sliding average, MK method, wavelet analysis and Kriging spatial interpolation method. The results showed that the *SPEI* of Shaanxi Province is decreasing in fluctuation from the perspective of time process, indicating an inconspicuous trend that Shaanxi Province is gripped by more severe droughts. In addition, the drought extent in Shaanxi Province has shown a significant expansion trend since 1986. The *SPEI* shows a aberrance point that suddenly decrease in 1980 and the *SPEI* cycle has three main oscillation periods of five years, 16 years and 30 years. There are different degrees of drought over the spatial variations, and the difference of station distribution is both big and uneven. The frequency of drought from big to small is moderate drought, mild drought, extreme drought and heavy drought. The frequency of heavy drought is the lowest, whose high value center is located at Yan'an Station, whereas the frequency of moderate drought is the highest and its distribution range is the largest, whose high value center is located at Lueyang Station and Hanzhong Station. This study provides a scientific basis for drought disaster prevention, agricultural production and policy formulation in whole Shaanxi Province.

Key words: standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*); penman-monteith model; mutation analysis; drought evolution; drought frequency; spatial distribution characteristics

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201301084)

作者简介: 郭梦 (1994-), 女, 新疆哈密人, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。

通讯作者: 钱会 (1963-), 男, 陕西泾阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质方面的研究。

1 研究背景

近年来,全球气温明显升高,IPCC 第五次评估报告指出全球气候变暖已成为事实^[1]。在过去的 100 多年,全球升温 0.85℃,陆地的增温速率明显高于海洋^[2],气候变暖使得各地干旱问题日趋严重,干旱已成为全球影响最严重的灾害之一。干旱有着发生面积广、持续时间长、影响范围大的特点^[3],据统计,世界上超过 120 个国家在不同程度上存在干旱问题,而我国 70% 的气象灾害中,近一半为干旱灾害,局地或区域性的干旱灾害时常发生,每年因干旱造成的损失可达 9.1×10^{10} 元^[4-6]。干旱问题近年来成为学者研究的热点问题,目前学者们大多用干旱指数描述区域干旱程度,相继提出了帕默尔干旱指数 *PDSI* (Palmer, 1965)、标准化降水指数 *SPI* (McKee 等, 1993) 和标准化降水蒸散指数 *SPEI* (Vicente - Serrano 等, 2010) 等指标,其中 *PDSI* 指数和 *SPI* 指数运用较广泛,但 *PDSI* 指数、*SPI* 指数都有其缺陷,如 *PDSI* 指数在干旱等级的界定上主观性较强^[7],*SPI* 仅考虑降水因素而忽略了温度等因素对其本身的影响^[8],而 *SPEI* 指数融合了 *PDSI* 和 *SPI* 的优点,不仅保留了 *PDSI* 考虑蒸散量对温度敏感的优点,又可表现出 *SPI* 的多尺度特征且计算结果较为可靠,因此被广泛应用于世界各地的干旱研究中。

SPEI 指数中计算参考作物蒸散量主要有两种方法,一种是仅考虑温度因素的 Thornthwaite 模型,另一种是考虑众多因素的 Penman - Monteith 方法。采用 Thornthwaite 方法计算参考作物蒸散量仅需月平均气温及纬度资料,该方法因输入参数少、对数据要求低且计算相对简单而使得应用较为广泛,如蔡思扬等^[9]应用 *SPEI* 分析东北地区干旱特征,发现东北地区干旱发生范围随时间尺度增加而逐渐扩大,且东北三省在春、夏季和秋季均有干旱事件发生;熊光洁等^[10]利用 *SPEI* 指标研究了中国西南地区 12 个月尺度、6 个月尺度和 3 个月尺度的干旱变化特征,结果表明西南地区 12 个月尺度的干旱变化较为复杂,12 个月尺度干旱频率呈现上升趋势的区域较多,6 个月尺度的干旱频率在全区显著增加,3 个月尺度的干旱频率在秋冬季显著增加;任启伟等^[11]应用 *SPEI* 识别位于东南部的广东省干旱发生情况,结果表明 3 个月和 6 个月时间尺度的 *SPEI* 较准确地识别出了广东省春旱、秋旱以及冬春连旱的年份。

由于 Vicente - Serrano 的研究区域中未包含干

旱区,Thornthwaite 方法仅在湿润地区蒸散量的计算中适用性较好,并不适用于我国广大的干旱半干旱地区,而采用 FAO Penman - Monteith 法计算参考作物腾发量弥补了传统 Thornthwaite 法在我国干旱半干旱区干旱评估能力较差的缺点,更适用于我国干旱半干旱地区的干旱评估^[12]。如徐晗^[13]基于 Penman - Monteith 法计算了位于西北地区的陕西省 *SPEI* 指数,并结合《陕西省干旱统计年鉴》记录的实际情况进行验证,证实了基于 Penman - Monteith 法的 *SPEI* 指数适用性更好;郭旭新等^[14]基于 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman - Monteith 蒸散模型计算了陕北黄土丘陵区不同时间尺度的 *SPEI* 指数,结果发现基于 Penman - Monteith 法的 *SPEI* 指数能够准确反映陕北黄土丘陵区干旱事件,而基于 Hargreaves 和 Thornthwaite 的 *SPEI* 值偏低;轩俊伟等^[15]基于 Penman - Monteith 模型计算了近 50 年来新疆 12 个月时间尺度的 *SPEI* 序列,结果表明该方法在新疆适用性较好,该地区自 1987 年由旱期转为湿润期,但近 10 年又出现显著的变干趋势,预示着新疆有可能会重新进入旱期。此外,由于干旱半干旱地区无降水月份偏多,而参考作物腾发量多为 0,在计算短时间尺度的水分亏缺量时使得 *SPEI* 值偏大,无法表征干旱半干旱地区的实际干旱程度,降低了 *SPEI* 在干旱半干旱区域小尺度分析的适用性^[16]。庄少伟等^[17]等研究发现,短时间尺度的 *SPEI* 在干旱区适用性较差,只有大于 12 个月的大尺度 *SPEI* 适用较好;赵静等^[12]也发现对于典型干旱年的识别能力,12 个月尺度的 *SPEI* 较强,而短尺度的 *SPEI* 较弱。综上所述,本文采用适用于干旱半干旱地区的 Penman - Monteith 法计算参考作物蒸散量,并借鉴前人的研究成果,以尺度较长的 12 个月尺度为指标来计算陕西省标准化降水蒸散指数 (*SPEI*)。

陕西作为典型的生态脆弱区^[18],对于气候的变化十分敏感,研究该区域在全球气候变暖背景下的干旱特征及其演变趋势就显得尤为重要,本文将 *SPEI* 指数应用于陕西省干旱的时空特征研究中,确定陕西省干旱现状,为全省干旱防治、农业生产和制定应对政策提供依据。

2 研究区概况

陕西省位于我国中西部地区,在 105°29' ~ 111°15'E, 31°42' ~ 39°35'N 间,省内山地、高原、平原交错,南北狭长,根据地理气候可由北向南分为陕北、

关中和陕南三大区域。受大陆性季风气候的影响,全省的年平均降水量呈现明显的南多北少趋势,多年平均降水量为 666.9mm;年平均气温呈现明显的南低北高趋势,多年平均气温 5.9~15.7℃,极端气温相差悬殊。

3 资料与方法

3.1 资料来源

选取中国气象科学数据共享服务网提供的 1956–2016 年陕西省 18 个气象观测站的逐月观测资料,分别位于陕北(榆林、吴旗、横山、绥德、延安、洛川)、关中(长武、铜川、武功、西安、宝鸡、华山)和陕南(汉中、略阳、佛坪、商州、镇安、安康),各台站均匀分布于全省各地区,对陕西省气候变化具有很好的区域代表性。观测资料主要有气温、降水量、湿度等,少数站点部分年份气象资料缺失,建立相邻站点月降水量相关关系进行插补处理。陕西省气象站点分布图见图 1。

3.2 研究方法

3.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI) 标准化降水蒸散指数(SPEI)是指对降水量与参考作物蒸散量差值序列的累积概率值进行正态标准化,通过在 SPI 干旱指数的基础上引入参考作物蒸散量得出。该指数基于降水、气温、湿度等资料计算蒸散量,用降水量和蒸散量之间的差值与其平均状态的偏离程度来揭示区域的干旱特征^[13]。陕西全年蒸散量较大,而该方法考虑到了多种气象因子对蒸散量的影响,更适用于全省的干旱评估。SPEI 干旱程度划分见表 1。

表 1 基于 SPEI 的干旱等级划分标准

干旱等级	SPEI 值
特旱	$SPEI \leq -2.0$
重旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$
中旱	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$
轻旱	$-1.0 < SPEI \leq -0.5$
无旱	$SPEI > -0.5$

3.2.2 其他方法 计算出 SPEI 标准化降水蒸散指数(SPEI)后,结合线性回归、滑动平均、M-K 突变检验以及滑动 T 检验来分析全省的 SPEI 变化趋势^[19];用干旱频率来评价全省发生干旱的频繁程度;用干旱站次比来表示干旱影响范围的大小^[13];用 Morlet 小波分析研究全省 SPEI 的变化周期^[20]。

4 结果与分析

4.1 干旱的时间特征分析

4.1.1 SPEI 变化趋势 计算陕西省 1956–2016 年的标准化降水蒸散指数,并利用线性回归、5 年滑动平均分析其变化趋势,绘制变化趋势图见图 2。

从图 2 可以看出,陕西省 61 a SPEI 指数年代间差异较大,线性趋势以 0.001/a 的速度减少,未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,说明下降趋势不显著,但总体呈现干旱化趋势。SPEI 指数值显示全省在 1956–2016 年中整体并未出现中旱及以上的干旱灾害。全省 18 个气象站点的年 SPEI 指数多年平均值为 0.17,61 a 中 SPEI 值较小的 3 个年份分别为 1964、1985 以及 1988 年,最小值出现在 1964 年,说明全省在 1964 年干旱程度最大;SPEI 值较大的 3 个年份分别为 1959、1977 以及 1997 年,最大值出现在 1997 年,说明全省在 1997 年无旱程度最大,且 1997 年与 1964 年 SPEI 值的极值差为 2.7,1997 年偏离临界线($SPEI = -0.5$)的程度要大于 1964 年。陕西省干旱变化在 20 世纪较 21 世纪明显,20 世纪 90 年代以前,全省的 SPEI 数值处于波动状态,从 90 年代到 21 世纪开始,除 1997 年外基本呈现由无旱向干旱转变态势。5 a 滑动平均曲线也表明,陕西省标准化降水蒸散指数是在波动中逐渐下降的,其中 1960–1977 年、1981–1990 年呈上升趋势,其余时段均呈下降趋势,且 1990 年以后下降趋势较为稳定,表明全省自 20 世纪 90 年代后开始慢慢向干旱化发展。

为进一步说明干旱变化趋势,利用干旱站次比来描述陕西省 61 a 干旱的影响范围变化,干旱站次比越大则影响范围越大。陕西省 1956–2016 年干旱影响范围变化趋势见图 3,从图 3 看出,全省干旱影响范围在 0~72% 之间变化,年际差异大,干旱影响范围在 1964 年出现最高值(72%),在 1997 和 2004 年出现最低值(0),干旱影响范围较大的年份(1964、1985 和 2003 年)与 SPEI 计算的干旱年份结果基本一致,表明随干旱程度增大,干旱影响范围也相应扩大。此外,对 1956–2016 年陕西省干旱站次比,以每 10 a 取一次平均值来分析其变化趋势。结果表明,全省干旱影响范围的 10 a 平均值在 61 a 间呈现下降–上升–下降–上升的变化趋势,自 1986 年起连续上升,上升速率为 6.11/10a,相关系数达 0.98,表明自 1986 年全省干旱影响范围呈现显著扩大趋势。

4.1.2 突变特征 采用 M-K 突变检验结合滑动 T 检验来分析各时段的突变情况,两种方法均采用 95% 的置信水平(图 4、5)。

从图 4 可以看出,1956-1976 年、1980-1993 年以及 2008-2016 年 UF 曲线小于 0,呈下降趋势,且在 1960-1968 年间 UF 曲线超过了 0.05 显著性水平线,说明此时间段内全省 $SPEI$ 指数下降趋势显著;1976-1980 年、1993-2008 年 UF 曲线大于 0,呈上升趋势,但曲线未超过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平线,说明上升趋势不显著,可见全省 $SPEI$ 指数总体上呈现在波动中下降的干旱化趋势。此外, M-K 检验的 UF 、 UB 曲线有多个交点,结合滑动 T 检验(图 5),取滑动步长为 10,自由度为 18, $SPEI$ 序列在 1980 年出现显著减小的变异点,最终确定 1980 年为陕西省 $SPEI$ 干旱指数的突变年。

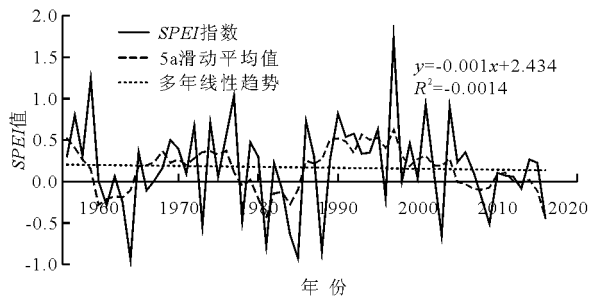


图2 陕西省1956-2016年 $SPEI$ 指数及滑动平均变化趋势

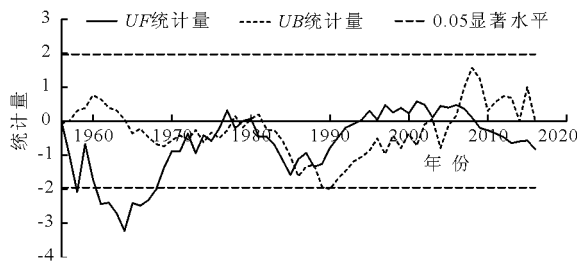


图4 陕西省1956-2016年 $SPEI$ 序列 M-K 曲线

4.2 干旱的空间特征分析

4.2.1 陕西省各站点不同程度干旱发生频率分析 为进一步分析陕西省各个地区的干旱状况,绘制各个站点不同程度干旱频率变化图,见图 6。

图 6 表明,陕西省各个站点 61 a 发生干旱的频率为中旱 > 轻旱 > 特旱 > 重旱,重旱所占比例最低,各站点发生重旱的比例均未超过 10%,在以榆林、横山、绥德、吴起、延安和洛川为代表的陕北一带发生频率相对较高,最大值发生在延安站(7%);中旱所占比例最高,在陕南一带发生频率相对最高,最大值发生在汉中站(31%),其中,有 15 个站点发生中旱的频率超过了 50%,所占比例最大的为榆林站和

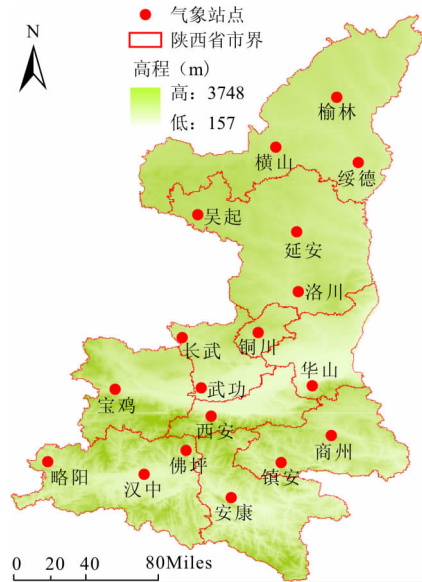


图1 陕西省气象站点分布图

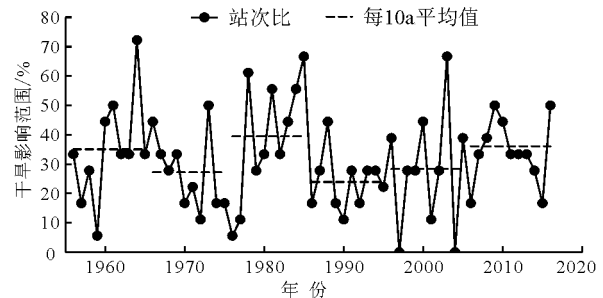


图3 陕西省1956-2016年干旱影响范围变化趋势

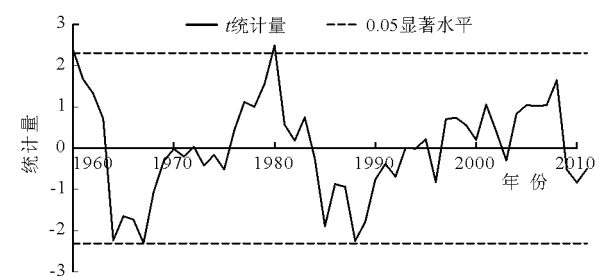


图5 陕西省1956-2016年 $SPEI$ 序列滑动 T 检验曲线

洛川站,均超过了 80%。其次,由图 6 中看出,陕北地区干旱以特旱、中旱、重旱为主,而轻旱频率较低,说明陕北地区干旱一旦发生等级都较高。

4.2.2 陕西省不同程度干旱频率空间分布特征 全省各个等级的干旱频率空间分布图(图 7)表明,陕西省 61 a 来干旱发生频率地区差异较大且分布不平衡,干旱程度从无旱-特旱均存在。其中,特旱主要分布在陕北中部、关中西部以及陕南西部,高值中心位于武功地区,发生频率达 11%(图 7(a));重旱分布较集中,主要在陕北一带,以延安站最高,陕南和关中地区重旱发生频率较低(图 7(b));中旱分布范围较其他几种干旱大,主要分布在陕南北

部、关中及陕南西部,以略阳、汉中发生频率最高,分别为 30% 和 31%,而关中除西安站外其余各站均有不同程度的中旱发生(图 7(c));轻旱主要分布在关中东部及陕南,关中的高值中心位于华山(13%),陕南的高值中心位于略阳(13%),陕北西部有轻微轻旱发生(图 7(d))。由此可见,位于西北地区的陕西省常年因降水稀少而蒸散量相对较大导致干旱频发。

4.3 干旱周期特征

为揭示陕西省干旱的周期规律,对 SPEI 干旱频率进行 Morlet 小波分析。小波分析可反映陕西省 SPEI 指数的多尺度周期特征,采用小波变换系数和小波方差图来确定区域干旱的主要周期以及各时间尺度的波动能量随该尺度的分布情况^[21]。小波系数实部等值线图和其方差图见图 8、9 所示。

由图 8 知,陕西省 1956 – 2016 年的 SPEI 指数包含了不同尺度的周期变化,全省在年际和年代际上均可看出较明显的周期变化。在年际上存在 4 ~ 7 a 周期的小尺度信号,在年代际上存在 15 ~ 20 a 和 28 ~ 32 a 的大尺度信号,3 个尺度正负相位周期

明显,均具有全域性且表现稳定。其中,4 ~ 7 a 周期的时间尺度上经历了 18.5 个干湿交替过程,震荡中心在 1971 年逐渐减小,在 1980 年由 4 a 尺度又逐渐向上偏移至 7 a 尺度,震荡能量由弱到强;15 ~ 20 a 周期的时间尺度上经历了 4.5 个干湿交替过程,1997 年由 15 a 尺度向上偏移至 20 a 尺度,且在 2000 年后震荡能量较弱;27 ~ 32 a 的时间尺度上,随着时间的推移,震荡周期中心时间尺度越来越大,在 2006 年由 27 a 尺度扩大至 32 a 尺度,经历了 3.5 个干湿交替过程,该周期在 2011 年以前表现的较为稳定,震荡能量后期较弱。

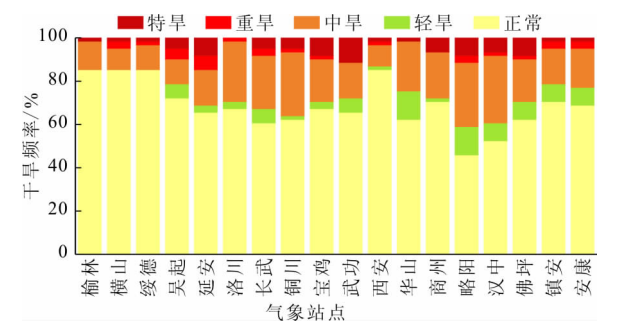


图 6 陕西省各个站点不同程度干旱频率

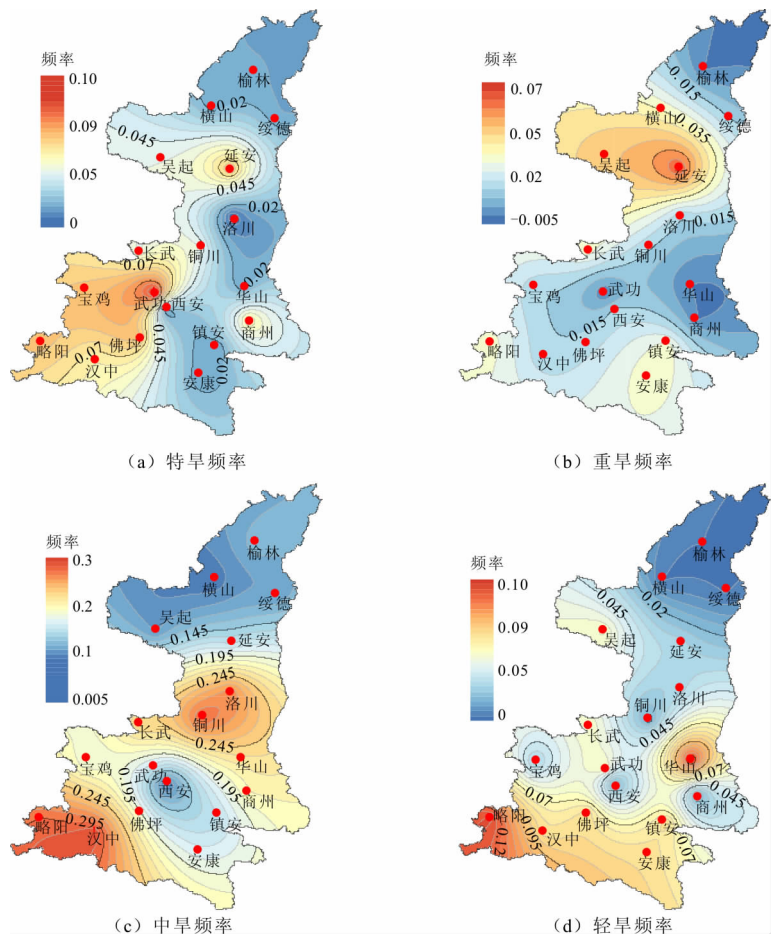


图 7 陕西省不同等级干旱频率的空间分布

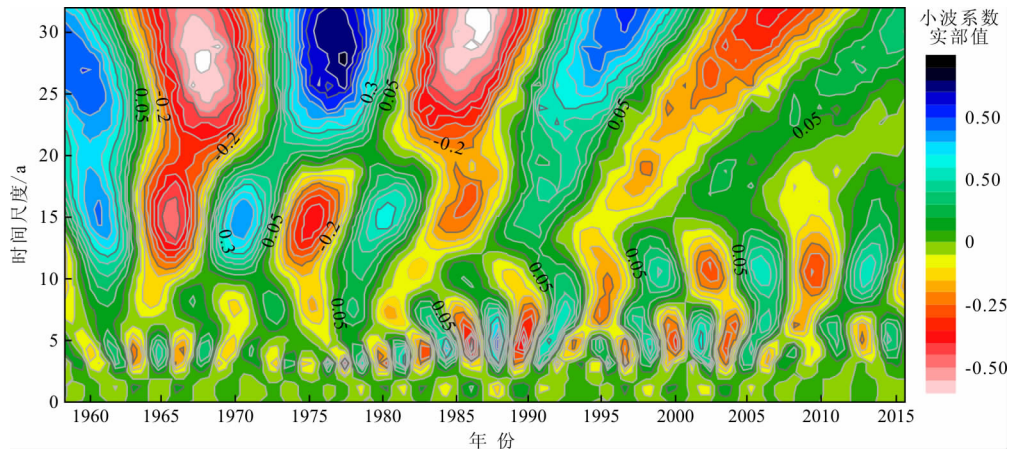


图8 陕西省1956–2016年SPEI小波系数实部等值线图

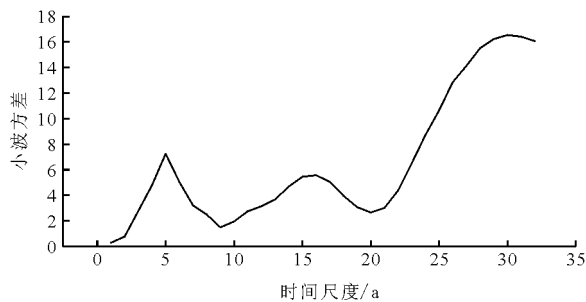


图9 陕西省年尺度SPEI小波系数实部方差图

由图9知, *SPEI* 指数小波实部方差图中共有3个峰值, 分别对应的时间尺度为5、16和30 a, 表明这3个周期在陕西省61 a的干旱变化中起主要作用。其中, 第一峰值为30 a的时间尺度, 该尺度周期波动能量最强, 且存在 *SPEI* 指数正负循环交替变化, 对干旱的影响最强烈, 30 a的时间尺度为全省干旱变化的第一主周期; 5 a时间尺度对应着第二峰值, 为第二主周期; 第三峰值对应着16 a的时间尺度, 为第三主周期, 上述3个周期的波动控制着陕西省整个时间域内干旱变化特征。

5 结 论

本文以陕西省18个气象站点61 a的逐月气温、降水、湿度、日照等资料作为原始数据, 计算了 *SPEI* 干旱指数, 并结合滑动平均、突变检验和 Morlet 小波分析等方法对其干旱时空演变特征进行了深入分析, 得到以下几点结论:

(1) 陕西省1956–2016年 *SPEI* 指数年代差异较大, 总体呈在波动中下降的趋势, 线性趋势和滑动平均值均表明全省自20世纪90年代后慢慢向干旱化发展。此外, 陕西省年干旱影响范围在0~72%之间变化, 全省干旱影响范围的10 a平均值在61 a

间呈现下降–上升–下降–上升的变化趋势。

(2) M–K 突变检验显示全省 *SPEI* 有多个突变点, 但总体上呈现波动中缓慢下降的干旱化趋势, 滑动 T 检验结果表明 *SPEI* 序列在1980年出现显著减小的变异点, 由此确定1980年为陕西省年 *SPEI* 干旱指数的突变年。

(3) 全省各站点干旱发生频率中重旱所占比例最低, 中旱所占比例最高; 全省干旱发生频率地区差异较大且分布不均衡, 大范围干旱与局部干旱均存在, 其中, 相较于其他几种干旱等级, 中旱分布范围较大, 主要分布在陕北南部、关中及陕南西部, 重旱分布较集中, 主要在陕北一带。

(5) 小波方差图表明全省存在着3个主周期, 分别为30 a左右的第一主周期, 5 a左右的第二主周期和16 a左右的第三主周期。此外, 全省在年代和年际上共存在3个时间尺度信号, 且3个时间尺度信号均具有全域性, 表现较为稳定。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis, summary for policy makers[R]. Paris: IPCC WGI Fourth Report, 2007, 195–199.
- [2] 秦大河, STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1–6.
- [3] 王晨, 黄馨, 黄晓军. 西北地区城市干旱脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 114–121.
- [4] 陈学凯. 贵州省多时间尺度气象干旱时空变化特征研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [5] 张建华, 王志豪, 王玉贵. 基于 *SPEI* 指数的甘肃河东地区近56年干旱时空变化分析[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(13): 41–43.

(下转第138页)

- [4] 杜 懿,麻荣永.不同改进灰色模型在广西年用水量预测中的应用研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):87-90.
- [5] 李晓英,苏志伟,田佳乐,等.基于 GRA-MEA-BP 耦合模型的城市需水预测研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):50-54.
- [6] 宋 帆,杨晓华,武翡翠,等.灰色关联-集对聚类预测模型在吉林省用水量预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):28-33.
- [7] 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.
- [8] LI Jichao, ZHAO Danling, GE Bingfeng, et al. A link prediction method for heterogeneous networks based on BP neural network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 495: 1-17.
- [9] 王乃珍,王福田.基于灰色区间预测模型的轨道不平顺状态预测[J].铁路计算机应用,2015,24(1):1-3+7.
- [10] 侯 珺,周金龙,曾妍妍,等.石河子地区地下水“三氮”空间分布特征及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):1-8.
- [11] SUN Guidong, GUAN Xin, YI Xiao, et al. Grey relational analysis between hesitant fuzzy sets with applications to pattern recognition[J]. Expert Systems With Applications, 2018, 92: 521-532.
- [12] 吴梦烟,杨 侃,刘 朗,等.基于灰色局势决策和组合赋权法的再生水评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):111-117.
- [13] 高 颖,方国华,林泽昕.投影寻踪和 BP 网络在农村饮用水水质评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):115-119.
- [14] 时 佳,薛联青,陈新芳,等.基于综合赋权法的叶尔羌河流域水资源承载力可变模糊综合评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):32-36.
- [15] 杨红霞,蔡 昕.基于 WDO-PP 模型的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):68-75.
- [16] 于增知,于宏兵,郑力燕.松花江流域冷水鱼潜在分布预测模型研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):48-54.
- [17] 刘佩瑶,郝振纯,王国庆,等.新安江模型和改进 BP 神经网络模型在闽江水文预报中的应用[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):40-44.
- [18] 王庆杰,岳春芳,李艺珍.基于 MAGA-PPC 模型的水资源配置方案综合评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):105-110.

(上接第 132 页)

- [6] 何 鑫,吴吉东,李 颖,等.基于 SPEI 的辽西地区气象干旱时空分布特征[J].干旱区地理,2017,40(2):340-347.
- [7] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [8] 郭树龙,温 季,姜 新.基于 SPEI 的 1960-2015 年江汉平原旱涝规律分析及预测[J].灌溉排水学报,2018,37(9):108-115.
- [9] 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.
- [10] 熊光洁,张博凯,李崇银,等.基于 SPEI 的中国西南地区 1961-2012 年干旱变化特征分析[J].气候变化研究进展,2013,9(3):192-198.
- [11] 任启伟,李鑫华,尹小玲,等.广东省干旱灾害识别及变化趋势[J].热带地理,2017,37(4):494-500.
- [12] 赵 静,严登华,杨志勇,等.标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价[J].物理学报,2015,64(4):382-390.
- [13] 徐 晗.陕西省干旱时空演变特征分析及脆弱性评价[D].西安:长安大学,2018.
- [14] 郭旭新,赵 英,高志永,等.基于 SPEI 的陕北黄土丘陵区干旱特征及影响因素分析[J].西北林学院学报,2019,34(1):69-76.
- [15] 轩俊伟,郑江华,刘志辉.基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2016,33(2):338-344.
- [16] 赵 静.黄淮海流域天然植被对干旱的响应及耐旱特征[D].上海:东华大学,2015.
- [17] 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.
- [18] 李英杰.陕西省旱涝灾害多时空尺度特征与趋势判断[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [19] 陈学凯.贵州省多时间尺度气象干旱时空变化特征研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- [20] 张 钰,孙 涛,方国华,等.新乡市城区近 64 年气温和降水量特征分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):94-99.
- [21] 夏 伟,周维博,李文溢,等.气候变化和人类活动对泮河流域径流量影响的定量评估[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):47-52.