doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.012

基于SPEI的鲁西北地区干旱变化特征

菅会成[1,2]，任建成[2*]，卢晓宁[3]
（1. 山东省气象防灾减灾重点实验室，山东 济南 250031；2. 滨州市气象局，山东 滨州 256612；
3. 成都信息工程大学，四川 成都 610225）

摘　要：使用鲁西北地区24个国家气象观测站1981—2017年的气温及降水月值数据，主要通过计算年尺度SPEI指数，采用线性回归、两种突变检验方法以及小波能量谱分析等方法深入分析鲁西北地区干旱的变化规律。鲁西北地区实际发生的干旱事件与同期同时长SPEI值表征的干旱状态较吻合，表明SPEI指数在该地区具有较好的适用性；鲁西北地区整体上呈不显著的湿润化趋势发展，2008年为研究时间段内干旱情况的突变年；鲁西北地区SPEI12指数多年平均值为正常状态，最小值和最大值分别出现在1990年和2002年。鲁西北地区整体上出现轻旱、中旱、重旱，年份数分别为5次、8次、1次，所有年份均未发生特旱；鲁西北地区不同地区发生不同等级干旱灾害的频率差异较大，整体上干旱灾害的发生频率为轻旱>中旱>重旱>特旱；鲁西北地区年尺度干旱的小波波动能量中心共有3个，中心尺度分别为5 a、9~10 a和3 a。

关键词：干旱；标准化降水蒸散指数；变化特征；鲁西北地区
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0062-05

Research on Drought Change Characteristics in Northwest Shandong Province Based on SPEI

JIAN Huicheng[1,2], REN Jiancheng[2], LU Xiaoning[3]
(1. Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Jinan 250031, China;
2. Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 256612, China;
3. Chengdu University of Information Technotogy, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to explore the change characteristics of drought disaster in northwest Shandong Province, we used standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to monitor and analyze the change rule of drought disaster in this area. Based on the monthly temperature and precipitation data of 24 national meteorological stations in northwest Shandong Province from 1981 to 2017, we deeply analyzed the change rule of drought disaster in northwest Shandong Province by calculating the annual scale SPEI, linear regression, two mutation test methods and wavelet energy spectrum analysis. The results show that the actual drought events in northwest Shandong Province are consistent with the drought state characterized by long SPEI value at the same time, indicating that SPEI index has good applicability in this area. The northwest Shandong Province shows an insignificant trend of wetting on the whole, and 2008 is a sudden change year of drought in the study period. The multi-year average value of SPEI12 index in northwest Shandong Province is normal, and the minimum and maximum values appeared in 1990 and 2002 respectively. The years of mild drought, moderate drought and severe drought in northwest Shandong Province are 5 times, 8 times and once respectively, and no special drought occurred in all years. The frequency of drought disasters of different grades varies greatly in different regions of northwest Shandong Province. On the whole, the frequency of drought disasters is light drought > medium drought > heavy drought > special drought. There are three wavelet wave energy centers of annual drought in northwest Shandong Province, and the central scales are 5 a, 9~10 a and 3 a respectively.

Key words: drought, standardized precipitation evapotranspiration index, change characteristic, northwest Shandong Province

目前，关于鲁西北地区气象灾害的研究成果主要集中在常见气象灾害的整体评估，以及旱灾恢复力评估等方面[1-2]，但对于鲁西北地区干旱灾害的规律及特征，尚无较细致的研究[3-7]。鉴于此，本文采用综合考虑降水和蒸散的SPEI干旱指数，针对鲁西北地区干旱的时空特征及其变化规律进行分析和研究，期望在准确揭示干旱时空特征的基础上，为区域干旱的防灾减灾提供针对性较强的科学参考依据[8-10]。

收稿日期：2021-09-19。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41401103）；山东省气象局科学研究项目（2019sdqxm23）。
（*为通信作者）

1　研究区与数据

1.1　研究区域

鲁西北地区是山东省位于黄河以北的地区（图1），包括整个德州市、聊城市以及济南、东营、滨州市黄河以北的地区。该地区位于中纬度，季风气候特征和季节变化都比较显著。年平均降水量550 mm左右，夏季（6—8月）是雨热同期的季节，产生的降水约占全年降水量的70%，局部地区易出现内涝。春季是作物生长季，但降水少于秋季，干旱灾害发生较为频繁，有“十年九春旱”之说[3]。

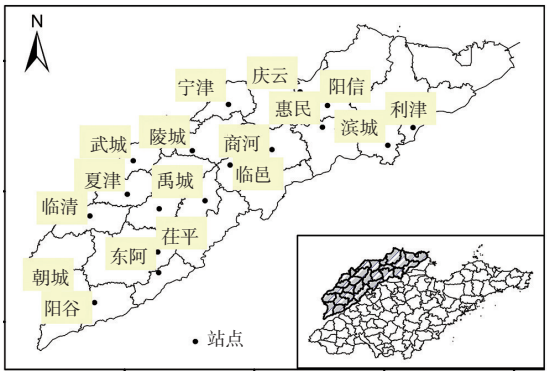


图1　鲁西北地区气象站点分布及方位图

（审图号：鲁SG（2021）013号）

1.2　数据来源

本文采用的数据源于鲁西北地区气象部门，使用鲁西北地区24个国家气象站点1981—2017年的逐月气温和降水数据，研究区域方位及站点分布见图1。

2　研究方法

2.1　标准化降水蒸散指数（SPEI）

标准化降水蒸散指数（SPEI）的计算过程较为复杂，主要步骤如下：

第一步，计算逐月潜在蒸散量，具体公式如下：

$$\mathrm{PET}=16K\left(\frac{10T}{I}\right)\alpha \tag{1}$$

式中，PET为月潜在蒸散量；K为修正系数，$K=\left(\frac{d}{12}\right)\left(\frac{M}{30}\right)$；$d$为月平均日照时数；$M$为每月天数；$T$为月平均气温（℃）；$I$为年总加热指数，等于1a中各月指数$i=\left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$的累加值；$\alpha$为经验指数，由与$I$的函数关系式导出：$\alpha=6.75\times10^{-7}I^3-7.71\times10^{-5}I^2+1.79\times10^{-2}I+0.492$。

第二步，计算逐月降水量与潜在蒸散量的差值。

$$D_i=P_i-\mathrm{PET}_i \tag{2}$$

式中，P_i为月降水量；PET_i为月潜在蒸散量。

第三步，计算概率密度函数$f(x)$。采用三参数的Log-logistic分布对D_i进行拟合用来描述事件概率，得到概率密度函数，具体形式如下：

$$f(x)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{2}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{x-\gamma}{2}\right)^{\beta}\right]^{-2} \tag{3}$$

式中，α、β、γ分别为尺度参数、形状参数、位置参数，此三参数可以采用线性矩（L-moment）方法拟合获得。

$$\beta=\frac{2\omega_1-\omega_0}{6\omega_1-\omega_0-6\omega_2} \tag{4}$$

$$\alpha=\frac{(\omega_0-2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right)} \tag{5}$$

$$\gamma=\omega_0-\alpha\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right) \tag{6}$$

$$\omega_s=\frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left(1-\frac{l-0.35}{n}\right)^{s}X_l \tag{7}$$

式中，ω_s为概率距离权重；$S=0,1,2$；L为累积水分亏缺量序列X按升序排列（$X_1\leqslant X_2,\cdots,\leqslant Xn$）的序数。$\Gamma(\beta)$为关于$\beta$的Camma函数。由此可以得到给定时间尺度的累积概率如下：

$$F(x)=\int_0^x f(t)\mathrm{d}t=\left[1+\left(\frac{\alpha}{\chi-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{8}$$

第四步，$F(x)$序列的标准化正态处理，定义$P=1-F(x)$：

当$P\leqslant0.5$时，$W=\sqrt{-2In(P)}$，

$$\mathrm{SPEI}=W-\frac{C_0+C_1+C_2W^2}{1+d_1W+d_2W^2+d_3W^3} \tag{9}$$

当$p>0.5$时，$W=\sqrt{-2In(1-P)}$，

$$\mathrm{SPEI}=\frac{C_0+C_1+C_2W^2}{1+d_1W+d_2W^2+d_3W^3}-W \tag{10}$$

式中，$C_0=2.515\,517$；$C_1=0.802\,853$；$C_2=0.010\,328$；$d_1=1.432\,788$；$d_2=0.189\,269$；$d_3=0.001\,308$。

国内通用的基于SPEI的干旱等级划分标准见表1。

2.2　研究方法

本文选取年尺度（12个月）SPEI指数（下称SPEI12）分析鲁西北地区干旱的时空变化特征。

2.2.1　干旱趋势分析及突变检测方法

基于计算得到的1981—2017年鲁西北地区SPEI12指数，应用线性回归分析法解释干旱的趋势性

表1 基于SPEI的干旱等级划分标准[22]

SPEI值	干旱等级
SPEI≤−2.0	特旱
−2.0<SPEI≤−1.5	重旱
−1.5<SPEI≤−1.0	中旱
−1.0<SPEI≤−0.5	轻旱
SPEI≥−0.5	无旱

特征；应用Manner-Kendall（下称M-K）突变检验[4-6]及滑动T检验法[7]揭示干旱的突变性。趋势分析及突变检测均采用$\alpha=0.05$的显著性水平。

M-K检验时，当UF（k）或UB（k）的值大于0或小于0，分别表示序列呈上升或下降趋势。若UF（k）或UB（k）的值超过临界线，则表示序列的发展趋势更加显著。如果UF（k），UB（k）曲线相交于临界线之间，交点便是序列突变开始的时间。

滑动t检验的原理是，将一段气候序列按照一定的显著性水平分为两段两段子序列，若两段子序列均值的差异超过了一定的显著性水平，则认为序列发生了突变。

2.2.2 干旱周期分析方法

本文应用连续的Morlet小波变换分析干旱的周期性特征[8]，并对小波系数的模平方进行$\alpha=0.05$显著性检验，用以分析不同周期的震荡能量特征。

2.2.3 干旱频率分析方法

引入干旱频率P_i，用于评估某站点干旱发生的频繁程度。该指标已在多个干旱评估文献中得到应用和验证[9-10]。

$$P_i=\left(\frac{n}{N}\right)\times 100\% \tag{11}$$

式中，n为站点发生干旱灾害的年数；N为研究期总年数；i为某站点。

2.2.4 空间插值方法

运用ArcGIS软件，对研究要素进行克里金插值分析，揭示研究要素的空间特征。

3 结果与分析

3.1 SPEI指数适用性分析

收集研究期内中国天气网、中国气象灾害年鉴中鲁西北地区典型全域干旱事件，并与计算得到的鲁西北各站点同期同时长的SPEI值进行比较，对SPEI指数在本地区的适用性进行验证（表2）。结果表明，在干旱灾害发生时间内，鲁西北各站点SPEI值表征的干旱状态干旱事件平均发生率达到91%，中旱级别以上干旱事件平均发生率达到78%，说明鲁西北地区实际发生的干旱事件与同期同时长SPEI值表征的干旱状态较吻合，表明SPEI指数在本地区具有较好的适用性。

表2 鲁西北地区典型干旱事件与同期同时长SPEI值表征的干旱状态验证比较

干旱灾害发生时间	SPEI指数表征的干旱站点数				
	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
1986年9—11月	13	10	1	0	0
1988年9—11月	3	1	8	12	0
1989年6—8月	4	11	8	1	0
1997年6—7月	0	1	6	8	9
1999年6—9月	3	3	13	5	0
2000年2—6月	2	3	5	7	7
2001年2—5月	0	4	6	11	3
2002年1—3月	0	0	0	1	23
2002年8—9月	1	1	10	11	1
2008年11月—2009年1月	1	1	10	12	0
2010年10月—2011年1月	0	0	11	12	1
2013年12月—2014年1月	0	1	19	4	0

3.2 鲁西北地区干旱的时间变化特征

3.2.1 鲁西北地区SPEI12指数变化趋势

鲁西北地区SPEI12指数多年平均值为0.0，为正常状态。最小值出现在2002年，说明鲁西北地区在2002年干旱最严重，这与2002年鲁西北地区大旱事件是吻合的；最大值出现在1990年，从实际情况来看，鲁西北地区1990年平均降水量为841.9 mm，明显高于该地区多年平均降水量，降水比较丰沛。鲁西北地区整体出现轻旱、中旱、重旱的年份数分别为5次、8次、1次，所有年份均未出现特旱。其中发生轻旱的年份为1981年、1988年、2007年、2008年、2017年；发生中旱的年份分别为1986年、1989年、1992年、1997年、1999年、2001年、2006年、2014年；发生重旱的年份为2002年。

图2表明，鲁西北地区SPEI12指数呈不显著上升趋势（$P>0.05$），趋势率为0.009 8/a，即鲁西北地区呈不显著的湿润化趋势发展。鲁西北地区干旱发展趋

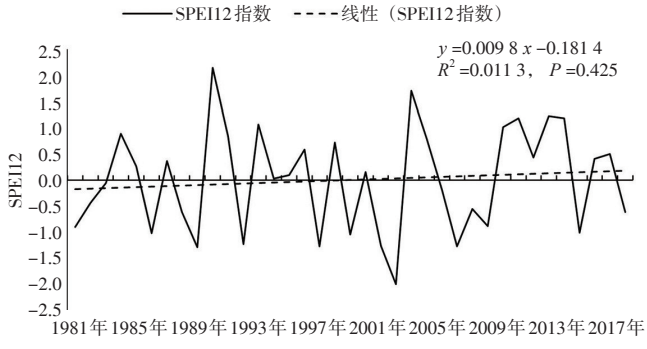
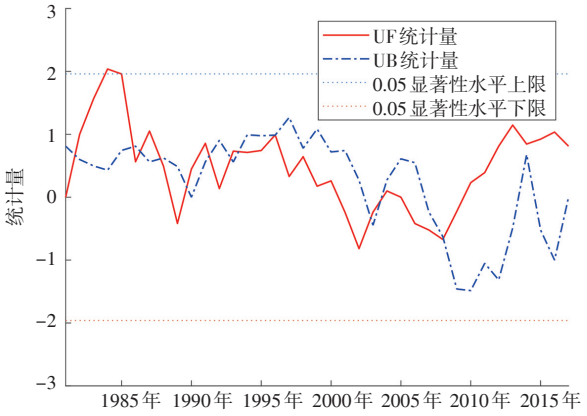


图2 鲁西北地区SPEI12指数变化趋势

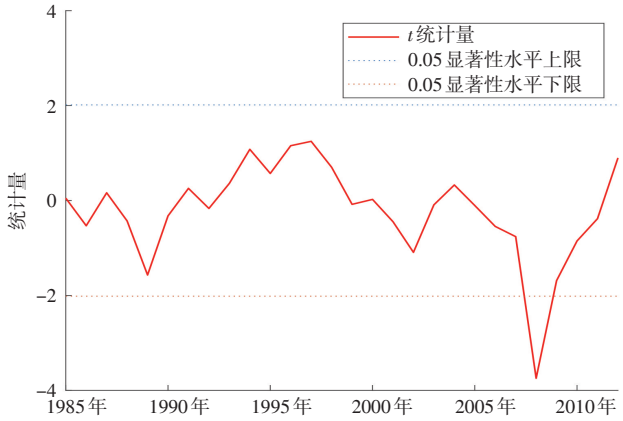
势与我国北方总体趋势并不一致，这可能与研究期内鲁西北地区降水呈增多趋势有关系，对研究期内鲁西北地区年降水量进行趋势分析，该地区年降水量呈不显著增多趋势（$P>0.05$），趋势率为2.573 1 mm/a。

3.2.2　鲁西北地区SPEI12指数突变特征

鲁西北地区SPEI12指数M–K检验结果（图3a）表明UF（k）曲线在1984—1985年通过了$\alpha=0.05$显著性检验（$U_{0.05}=\pm1.96$），说明这段时间内鲁西北地区湿润化比较明显。此外，UF（k）、UB（k）曲线有多个交点，结合滑动t检验（图3b），取滑动步长为5，自由度为8，SPEI12指数序列在2008年出现显著增大的变异点，最终确定2008年为鲁西北地区干旱情况的突变年。



a SPEI12指数M–K曲线



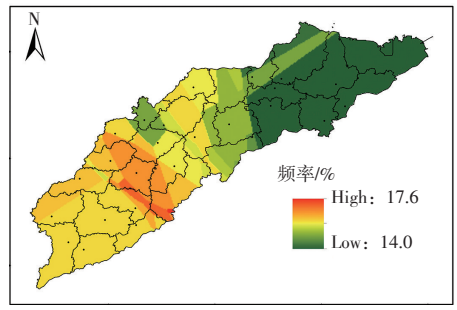
b 滑动t检验曲线

图3　鲁西北地区SPEI12指数M–K曲线

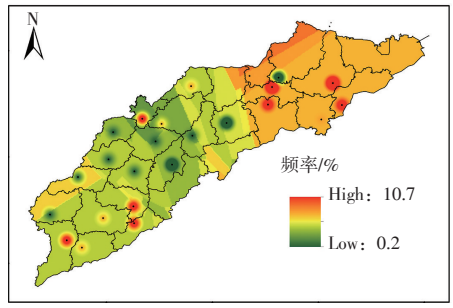
从滑动t检验结果来看，在突变之前，鲁西北地区SPEI12多年平均值为–0.2，为无旱状态；突变后SPEI12多年平均值为0.5，接近轻涝状态，突变前后的差值为0.7，大于一个干旱量级（0.5），且通过了$\alpha=0.05$的显著性检验。从降水实况来看，鲁西北地区在突变前年降水量平均值为527.5 mm，突变后年降水量平均值为619.6 mm，突变前后的差值为92.1 mm，接近100 mm的降水量级。

3.3　鲁西北地区干旱频率的空间分布特征

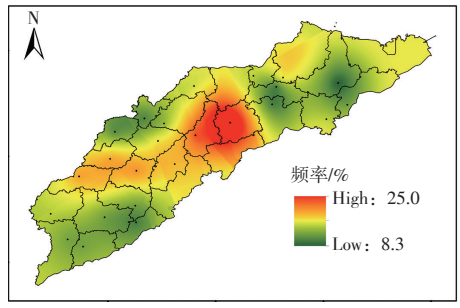
使用ArcGIS软件绘制鲁西北地区年尺度各级别干旱频率空间分布图（图4），可以看出，鲁西北地区近37 a干旱发生频率地区差异较大。其中，轻旱（图5a）在德州市的中部和西南部、庆云县、聊城市大部概率最高；中旱（图5b）在德州市东南部、聊城市的临清县以及济南市的商河县发生的概率最高；重旱（图5c）发生的概率较轻旱和中旱明显偏小，在东



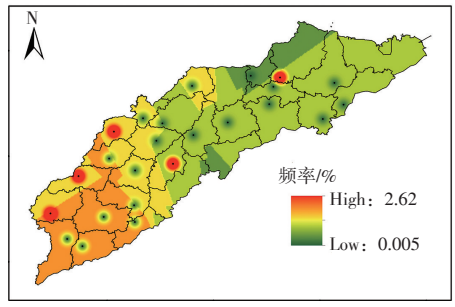
a 轻旱



b 中旱



c 重旱



d 特旱

图4　鲁西北地区轻旱情频率的空间分布

营市、滨州市黄河以北的地区、德州市西北部发生概率相对较高；特旱（图5d）发生概率最低，大部分地区没有发生过特旱事件，而大值中心主要分布在聊城市和德州市西南部。

3.4 鲁西北地区干旱的周期特征

根据鲁西北地区SPEI12指数小波系数模部平方图（图5）可以看出，通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的小波波动能量中心共有3个，中心尺度分别为5a，在1980年代中期到1990年代中期表现最为强烈；中心尺度为9~10 a，在2000年代表现最为强烈；中心尺度为3 a，在1990年代后期到2000年代初期表现最为强烈。可以看到在2002年左右，3 a和10 a尺度的波动周期有重合，这种周期叠加一般会进一步加重区域的干旱趋势，这是造成2002年鲁西北地区百年大旱的原因。

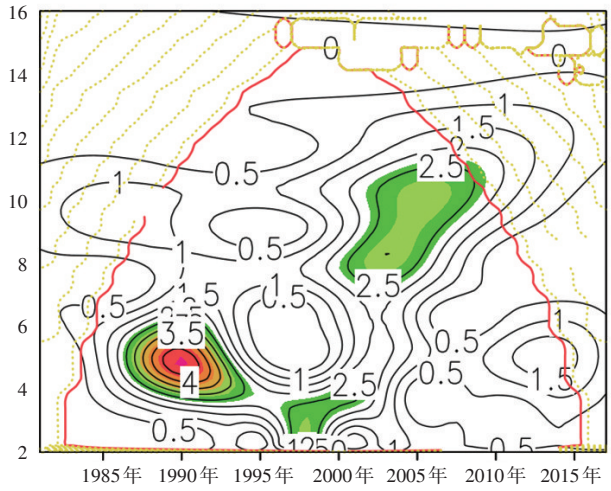


图5 鲁西北地区SPEI12指数小波系数模部平方等值线图

4 结 论

1）鲁西北地区实际发生的干旱事件与同期同时长SPEI值表征的干旱状态较吻合，表明SPEI指数在本地区具有较好的适用性。

2）鲁西北地区SPEI12指数呈不显著上升趋势，说明鲁西北地区呈不显著湿润化趋势发展；鲁西北地区SPEI12指数在2008年出现显著增大的变异点，说明2008年为研究期内干旱情况的突变年。

3）鲁西北地区SPEI12指数多年平均值为0.0，为正常状态，最小值出现在2002年，最大值出现在1990年。鲁西北地区整体出现轻旱、中旱、重旱年份数分别为5次、8次、1次，所有年份均没有出现特旱。

4）鲁西北地区不同地区发生不同等级干旱的频率差异较大，整体上干旱发生频率为轻旱>中旱>重旱>特旱。其中，轻旱在德州市的中部和西南部、庆云县、聊城市大部概率最高；中旱在德州市东南部、聊城市的临清县以及济南市的商河县发生的概率最高；重旱在东营市、滨州市黄河以北的地区、德州市西北部发生概率最高；特旱发生概率最低，大部分地区没有发生过特旱事件，大值中心主要分布在聊城市和德州市西南部。

5）鲁西北地区年尺度干旱的小波波动能量中心共有3个，中心尺度分别为5 a、9~10 a、3 a，分别在1980年代中期到1990年代中期、2000年代、1990年代后期到2000年代初期表现最为强烈。

参考文献

[1] 魏国盼,杨学斌. 鲁西北地区气象灾害特征分析与防御研究[J]. 生物灾害科学,2015,38(2):157-162

[2] 李福夺,杨兴洪. 农业旱灾频发区旱灾恢复力评估方法研究:以鲁西北地区为例[J]. 湖南生态科学学报,2014,1(4):22-27

[3] 杨学斌,代玉田. 鲁西北地区近50年气温和降水量的变化趋势分析[J]. 中国农业气象,2009,30(增刊):25-28

[4] 气象干旱等级:GB/T20481-2017[S].

[5] Mann H B. Non-parametric Test Against Trend[J]. Econom-et-rica,1945,69(13):245-259

[6] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin,1975

[7] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493

[8] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999

[9] 杨晓静,左德鹏,徐宗学. 基于标准化降水指数的云南省近55年旱涝演变特征[J]. 资源科学,2014,36(3):473-480

[10] 黄晓华,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58 a演变特征[J]. 农业工程学报,2010,26(7):50-59

第一作者简介：菅会成（1968—），高级工程师，研究方向为大气物理。