

# 基于SPEI指数的丹寨县干旱气候特征及气象因子分析

盛升旺<sup>1\*</sup>, 马洪燕<sup>2</sup>, 蒋松林<sup>3</sup>, 皮义均<sup>1</sup>, 杨胜忠<sup>4#</sup>

<sup>1</sup>丹寨县气象局, 贵州 丹寨

<sup>2</sup>岑巩县气象局, 贵州 岑巩

<sup>3</sup>剑河县气象局, 贵州 剑河

<sup>4</sup>黔东南州气象局, 贵州 凯里

收稿日期: 2023年8月15日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月21日

## 摘要

基于1960~2022年丹寨县国家气象观测站逐月气象数据, 通过计算月、季、年时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI)的序列变化情况, 采用M-K突变检验和相关分析法分析了丹寨县月、季、年时间尺度的干旱演变特征和各类气象因子与SPEI的相关性。结果表明: 1) 1960~2022年丹寨县月、季、年SPEI值均有年代际的变化, 总体向湿润化方向发展。2) 春旱事件发生频率最高, 秋旱次之, 春、秋季节主要以轻到中旱为主, 重旱高发期主要在夏季和冬季。季节变化气候特征中, 秋季向干旱趋势发展, 春、夏、冬三个季节为向湿润趋势发展。3) 年尺度及季尺度降水量与SPEI相关性最强, 季节尺度的气象因子对SPEI的影响更明显。

## 关键词

SPEI, 干旱, 气候特征, 气象因子

# Analysis of Drought Climate Characteristics and Meteorological Factors in Danzhai County Based on SPEI Index

Shengwang Sheng<sup>1\*</sup>, Hongyan Ma<sup>2</sup>, Songlin Jiang<sup>3</sup>, Yijun Pi<sup>1</sup>, Shengzhong Yang<sup>4#</sup>

<sup>1</sup>Danzhai County Meteorological Bureau, Danzhai Guizhou

<sup>2</sup>Cengong County Meteorological Bureau, Cengong Guizhou

<sup>3</sup>Janhe County Meteorological Bureau, Jianhe Guizhou

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 盛升旺, 马洪燕, 蒋松林, 皮义均, 杨胜忠. 基于SPEI指数的丹寨县干旱气候特征及气象因子分析[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(5): 925-932. DOI: 10.12677/ccrl.2023.125095

<sup>4</sup>Qiandongnan Meteorological Bureau, Kaili Guizhou

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 21<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Based on monthly meteorological data from the National Meteorological Observatory of Danzhai County from 1960 to 2022, the time series changes of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at monthly, seasonal, and annual scales were calculated. The M-K mutation test and correlation analysis were used to analyze the drought evolution characteristics at monthly, seasonal, and annual time scales in Danzhai County, as well as the correlation between various meteorological factors and SPEI. The results show that: 1) From 1960 to 2022, the monthly, quarterly, and annual SPEI values in Danzhai County showed interdecadal changes, and generally developed towards humidification. 2) The frequency of spring drought events is the highest, followed by autumn drought. The spring and autumn seasons are mainly characterized by mild to moderate drought, and the high incidence period of severe drought is mainly in summer and winter. In the climate characteristics of seasonal changes, autumn tends to develop towards drought, while spring, summer, and winter tend to develop towards wetness. 3) Annual and seasonal precipitation have the strongest correlation with SPEI, with seasonal meteorological factors having a more significant impact on SPEI.

## Keywords

SPEI, Drought, Climate Characteristics, Meteorological Factors

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

干旱是重大气象灾害之一,影响范围较大,持续时间长。随着全球气候变暖,干旱灾害发生的频率日益增长,对社会生产、经济发展等产生重大影响。气象干旱指数是用于监测或评价某区域某时间段内由于天气气候异常引起的地表水分短缺的程度[1]。目前较为常用的干旱指数有标准化降水指数(SPI)和帕尔默干旱指数(PDSI)以及标准化降水蒸散指数(SPEI) [2]。丹寨县属亚热带季风湿润气候区,山地气候特征明显,光照少,雨、雾日多,降水时空分布不均,局地性强。杨庆[3]等分析了7种气象干旱指数的区域适用性,得出SPI和SPEI干旱指数在湿润地区的适应性较好。SPEI指数既保留了SPI指数的多尺度特征,又在SPI的基础上加入了温度因子来计算干旱程度,是监测干旱及研究增温影响干旱化过程较为理想的工具[4]。熊光洁[5]研究表明,SPEI指数对西南地区不同时间尺度的干旱有好的表征能力。本文采用M-K突变检验和相关分析法分析了丹寨县月、季、年时间尺度的SPEI干旱演变特征和各类气象因子与SPEI的相关性,为丹寨县农业生产提供一定的参考。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

本文选用1960~2022年丹寨县国家气象观测站逐月的月平均气温和月降水量,数据来源于贵州省气

象数据查询系统。标准化降水蒸散指数干旱等级[1]划分见表 1。

**Table 1.** Standardized precipitation evapotranspiration index drought level classification table  
**表 1.** 标准化降水蒸散指数干旱等级划分表

等级	类型	SPEI
1	无旱	$-0.5 < \text{SPEI}$
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPEI} \leq -2.0$

## 2.2. 研究方法

### 2.2.1. SPEI 指数

SPEI 采用降水与蒸散量的差值，通过正态标准化处理得到，具体计算步骤如下[1]：

1) 计算逐月潜在蒸散量(PET)：

$$PET = 16.0 \times \left( \frac{10T}{H} \right)^A \quad (1)$$

式(1)中  $PET$  为月的潜在蒸散量(mm)； $T$  为月平均气温(°C)； $H$  为年热量指数； $A$  为常数。 $H$ 、 $A$  的计算方法参照 GB/T 20481-2017 [1]。

2) 计算逐月降水量与潜在蒸散量的差值：

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

式(2)中  $D_i$  为降水量与潜在蒸散量的差值； $P_i$  为月降水量。

3) 采用 3 个参数的 log-logistic 概率分布对  $D_i$  数据序列进行函数拟合：

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

式(3)中的参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别采用线性矩的方法拟合获得，即

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{(W_0 - 2W_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \\ \beta &= \frac{(2W_1 - W_0)}{(6W_1 - W_0 - 6W_2)} \\ \gamma &= W_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\Gamma$  为阶乘函数， $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为原始数据  $D_i$  的概率加权矩，计算如下：

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \\ F_i &= \frac{i - 0.35}{N} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中  $N$  为参与计算的月份数。

4) 对累积概率密度进行标准化, 概率为  $P=1-F(x)$ , 概率加权矩为  $W=\sqrt{-2\ln(P)}$ 。

$$SPEI = W - \frac{c_0 - c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}, P \leq 0.5$$

$$SPEI = -\left( W - \frac{c_0 - c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right), P > 0.5$$
(6)

式(6)中  $c_0 = 2.515517$ ;  $c_1 = 0.802853$ ;  $c_2 = 0.010328$ ;  $d_1 = 1.432788$ ;  $d_2 = 0.189269$ ;  $d_3 = 0.001308$ 。

本文分别计算了月尺度(SPEI\_1)、季尺度(SPEI\_3)、年尺度(SPEI\_12)的 SPEI 值, 采用 SPEI\_3 的 5 月、8 月、11 月、次年 2 月分别表示春季、夏季、秋季和冬季。

### 2.2.2. 干旱频率

计算丹寨县 1960 年 1 月~2022 年 12 月 SPEI\_3、SPEI\_12 的干旱频率[6], 即

$$P_j = \frac{\omega_n}{\omega_N} \times 100\%$$
(7)

式(7)中  $P_j$  为干旱频率(%),  $\omega_n$  为时间序列中的干旱次数,  $\omega_N$  为时间序列数。

### 2.2.3. M-K 突变检验

采用 Matlab 实现 Mann-Kendall (M-K) 突变检验, 统计量  $Z > 0$  是上升趋势,  $Z < 0$  是下降趋势, 通过  $Z$  值的绝对值大小判断这种趋势是否显著[6] [7]。用 M-K 算法进行突变检验,  $UF$  为标准正态分布,  $UF > 0$  呈上升趋势,  $UF < 0$  为下降趋势,  $UB$  为  $UF$  的逆序列,  $UB$  与  $UF$  的交点所对应的时间为开始突变的时刻。计算方法参照齐裴[8]等研究。

### 2.2.4. Pearson 相关性

相关关系分析可衡量两个或多个变量间的关系, 相关系数的正负分别代表变量间呈正相关关系或负相关关系, 相关系数绝对值越大相关关系越强, 反之则相关关系越小[9]。本文利用 Pearson 相关性探究平均气温、降水量、潜在蒸散量与不同尺度 SPEI 的相关关系。

## 3. 分析结果

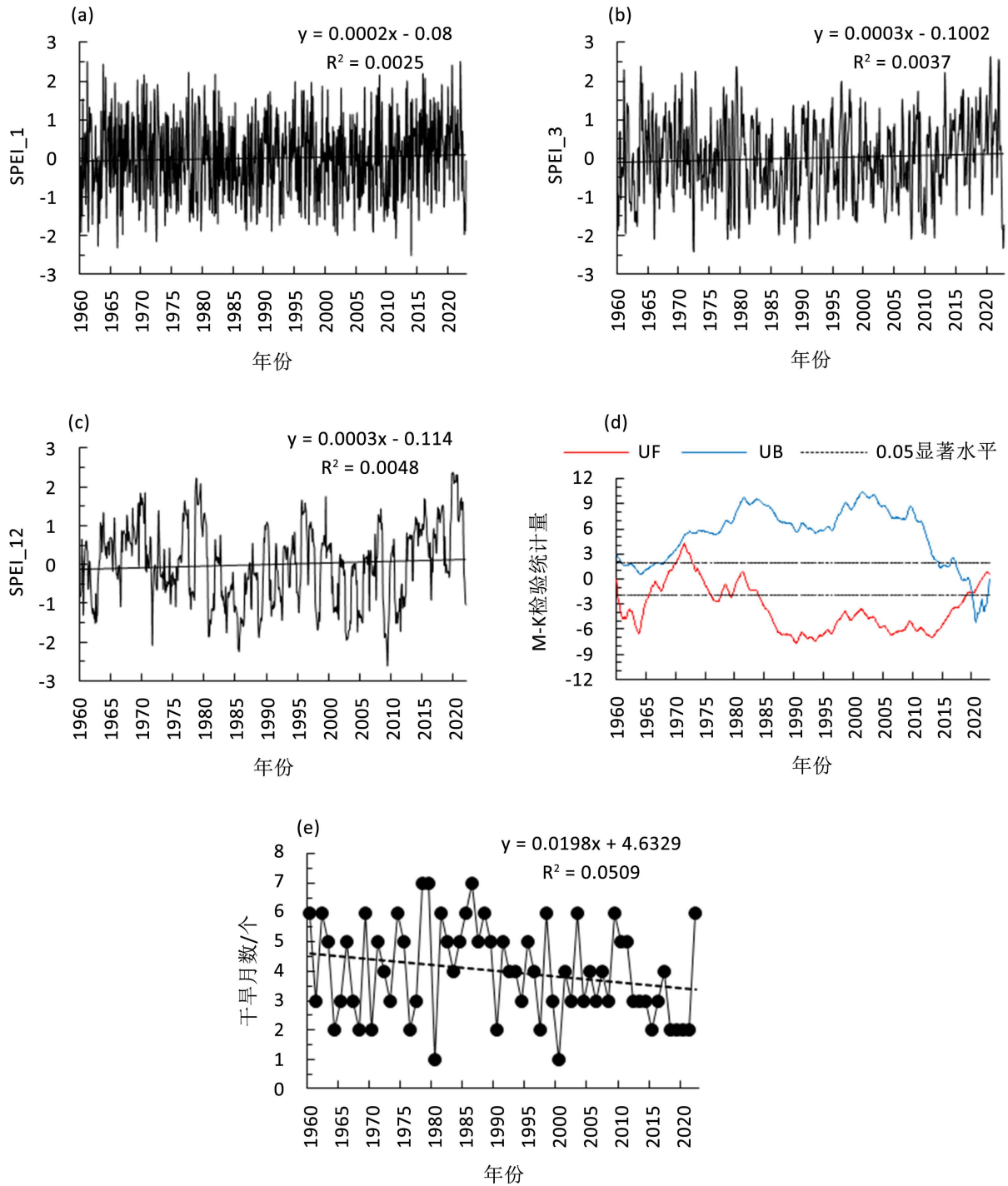
### 3.1. 月特征

丹寨县月尺度的 SPEI\_1 (图 1(a)) 震动频率很高, 大多在  $[-2.5 \sim 2.5]$  之间, 每年均有不同程度的月干旱发生。1960~2022 年间共有 253 个月发生干旱, 其中轻旱占比 42.9%、中旱占比 37.70%、重旱占比 17.46%、特旱占比 1.98%。6 月和 8 月干旱发生次数最多, 1 月干旱发生次数最少。如图 1 所示, 年均干旱月数为 4.0 个月, 1960~2022 年间, 干旱月数最大为 7 个月, 出现在 1978 年、1979 年和 1986 年, 最小值为 1 个月, 出现在 1980 年和 2000 年。从曲线(图 1(e))上看, 干旱月数减少速率为  $0.2 \text{ 月} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , M-K 突变检验计算  $Z$  值为  $-1.98$ , 通过了 0.05 水平的显著性检验, 说明丹寨每年干旱月数呈明显下降趋势。

### 3.2. 季特征

季尺度的 SPEI\_3 (图 1(b)) 反应不同季节的干旱变化情况, 丹寨除了 1990 年、2014 年、2018 年、2020 年外, 其余年份均有旱情发生, 其中轻旱发生 118 次、中旱 74 次、中旱 43 次、特旱 10 次。

从丹寨县 1960~2022 年不同季节不同等级干旱发生频率(表 2)来看, 各季节干旱发生频率相对比较平均。其中春季丹寨县发生干旱有 23 年, 频率为 36.5%, 主要以轻旱和中旱为主, 占比为 82.6%, 重旱占



**Figure 1.** Monthly scale (a), seasonal scale (b), annual scale (c) SPEI sequence diagram and annual scale M-K mutation test curve (d) and annual drought months at SPEI monthly scale (e) of Danzhai County from 1960 to 2022

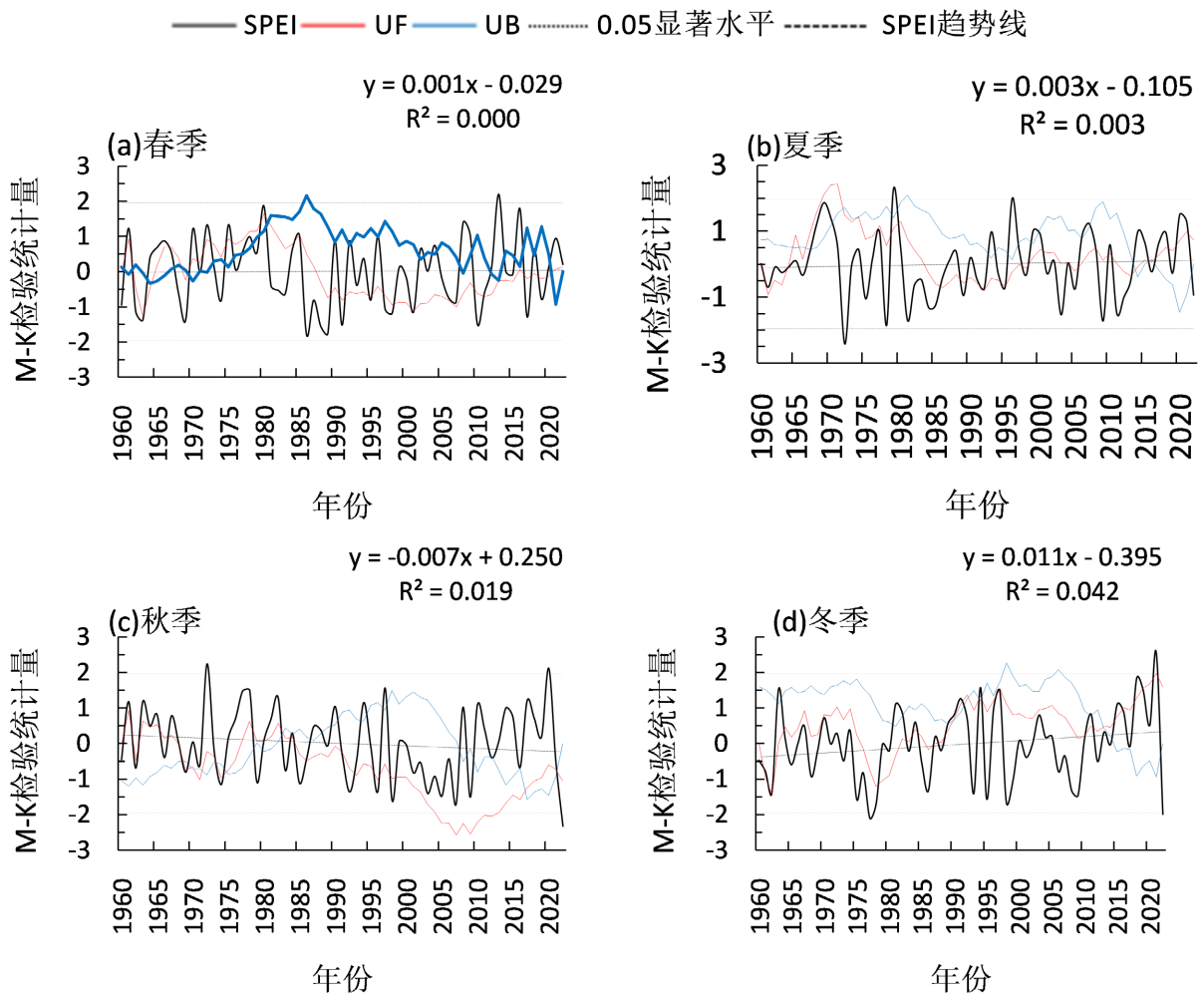
**图 1.** 1960~2022 年丹寨县月尺度(a)、季尺度(b)、年尺度(c) SPEI 序列图和年尺度 M-K 突变检验曲线图(d)与 SPEI 月尺度年干旱月数(e)

比为 17.4%，无特旱发生。图 2(a)中看到，1981 年以前春季干旱与湿润交替出现，震荡较为频繁，1981~2020 年春旱发生频繁，其中 1986~1989 年连续 4 年的春季均出现干旱，其中 3 年为重旱。丹寨县春季干旱指数呈上升趋势，上升速率为  $0.011 \cdot 10a^{-1}$ ，说明丹寨县春季未来向湿润趋势发展。

**Table 2.** Frequency of drought incidents of different seasons and levels in Danzhai County from 1960 to 2022  
**表 2.** 丹寨县 1960~2022 年不同季节不同等级干旱发生频率表

干旱类型	干旱频率	干旱等级			
		轻旱	中旱	重旱	特旱
春旱	36.5%	47.8%	34.8%	17.4%	0
夏旱	28.6%	50.0%	16.7%	27.8%	5.6%
秋旱	31.7%	45.0%	35.0%	15.0%	5.0%
冬旱	30.2%	36.8%	31.6%	26.3%	5.3%

夏季丹寨县 1960~2022 年干旱发生频率相对较低,为 28.6%,但干旱等级较重,其中重旱占比 27.8%,特旱占比为 5.6%。图 2(b)中看到夏季干旱不同年际间变化,1960~1971 年夏季为湿润年,1972~1981 年夏季干旱与湿润转变频繁,1982~1991 年夏季是由干旱向湿润的转变,1992~2002 年湿润显著,2003~2013 年间夏季干旱发生较为频繁,其中 2003 年、2009 年、2011 年的夏季均出现重旱。根据 M-K 趋势检验,夏季干旱 SPEI 的 Z 值为 0.78,说明 1960~2022 年夏季干旱呈下降趋势,但未通过 0.05 的显著性检验,因此丹寨夏季湿润不明显。



**Figure 2.** The trend of SPEI changes and M-K mutation test in Danzhai County from 1960 to 2022 in four seasons  
**图 2.** 1960~2022 年丹寨县四季 SPEI 变化趋势及 M-K 突变检验



秋季丹寨县干旱发生频率为 31.7%，仅次于春旱。轻旱、中旱占比最高为 80%，但也有重旱和特旱的发生，特旱发生在 2022 年。图 2(c)中看到 1960~1973 年秋季气候波幅不大，无明显干湿变化，1974~2000 年干湿振幅明显，2001~2009 年以干旱为主，其中 2007 年和 2009 年秋季出现重旱情况，2010~2020 年基本无干旱现象发生，2021 年出现轻旱，2022 出现了特旱。总体趋势上，秋季 SPEI 值以  $0.077 \cdot 10a^{-1}$  的速率下降，说明丹寨县 1960~2022 年秋季干旱呈发展趋势。

冬季丹寨县 1960~2022 年干旱发生频率为 30.2%，轻旱、中旱、重旱、特旱发生频率分别为 36.8%、31.6%、26.3%、5.3%。图 2(d)中 1964~1975 年冬季湿润显著，1976~1981 年冬季干旱显著，1982 年以后冬季 UK 均为正值，干旱向湿润转变明显，尤其在 2013 年后，冬季湿润转变相当明显。总体趋势上，冬季 SPEI 值以  $0.115 \cdot 10a^{-1}$  的速率上升，其 Z 值为 1.69，未能通过 0.05 显著性 1.96 的检验，但通过了 0.1 显著性 1.645 的检验，说明 1960~2022 年丹寨县冬季向湿润转化趋势相对明显。

总的来看，丹寨县 1960~2022 年间发生春旱频率最高，秋旱次之，而重旱和特旱主要发生在夏季和冬季，春季无特旱发生。跨季节干旱时有发生，1960~2022 年中季节连旱发生有 13a，主要为冬春和夏春连旱，三季连旱发生频率很少，为 3.7%，主要为夏秋冬连旱。季节干旱变化趋势上，秋季为湿润向干旱趋势变化，春、夏、冬季均为向湿润转变，其中冬季干旱减弱趋势通过了 0.1 的显著性检验。

### 3.3. 年特征

从年尺度 SPEI<sub>12</sub> 的时间序列图(图 1(c))看到，年尺度的干湿变化明显，旱涝呈年代纪变化。20 世纪 60 年代到 70 年代由干旱向湿润转变，80 年代到 90 年代期间干旱相对严重，1986 年出现特旱，21 世纪 00 年代旱情较轻微，主要以轻到中旱为主，21 世纪 10 年代初旱情较重，有特旱发生，2013 年至 2021 年无旱情发生，处于较湿润的年代，直到 2022 年才有中旱以上旱情发生。年尺度 M-K 突变检验曲线(图 1(d))图中 UF 和 UB 曲线相交于 2020 年，说明 2020 年是个突变年，即旱涝转折年。

总体来看，丹寨县干旱月、季、年尺度都有明显的周期震荡，月尺度震动的频率最为强烈，年尺度震动较为平缓。M-K 趋势检验月、季、年尺度的 Z 值分别为 1.50、1.80、1.84，都只通过了 0.1 水平的显著性检验，说明丹寨总体趋势是向湿润方向发展，但是不明显。

## 4. SPEI 与气象因子的相关性

### 4.1. 年尺度 SPEI 与气象因子相关性

1960~2022 年丹寨县年尺度 SPEI 与年平均气温、降水量、潜在蒸散量的相关系数分别为 -0.002、0.086、-0.003。明显可见平均气温、和潜在蒸散量与 SPEI 呈负相关关系，降水量与 SPEI 呈正相关关系。根据相关系数，发现单一的气象因子对 SPEI 的相关性不强，但都通过了 0.01 的显著性检验。在平均气温、降水量、潜在蒸散量气象因子中，降水量与 SPEI 的相关性最强。

### 4.2. 季尺度 SPEI 与气象因子相关性

如表 3 所示，平均气温在夏季和秋季与 SPEI 呈负相关关系，在春季和冬季与 SPEI 呈正相关关系；降水量在四季与 SPEI 都呈现的正相关关系；而潜在蒸散发量在四季与 SPEI 均为负相关关系。春季除了降水量，其余气象因子对 SPEI 相关关系影响较弱；夏季平均气温、降水量、潜在蒸散量与 SPEI 相关关系相当；秋季降水量与 SPEI 相关关系非常强；冬季降水量与潜在蒸散量相关关系相当，较强，平均气温对 SPEI 影响很弱。在季尺度中，降水量与 SPEI 相关关系最强，可见降水量是影响季尺度 SPEI 变化的主导因素。另外，季尺度上各气象因子与 SPEI 相关关系明显比年尺度的相关关系更强，可见季尺度的气象因子对 SPEI 的影响更明显。

**Table 3.** Correlation coefficients between seasonal meteorological factors and SPEI  
**表 3.** 季尺度各气象因子与 SPEI 的相关系数

季节	气象因子	平均气温	降水量	潜在蒸散发量
	春	0.03	0.43	-0.13
	夏	-0.35	0.49	-0.39
	秋	-0.33	0.76	-0.16
	冬	0.05	0.30	-0.30

## 5. 结论与讨论

本文基于 1960~2022 年丹寨县国家气象站气象观测资料,采用 M-K 突变检验和相关分析法分析了丹寨县月、季、年时间尺度的 SPEI 干旱演变特征和各类气象因子与 SPEI 的相关性,得出以下结论:

1) 通过对月尺度 SPEI 时间序列值的分析,1960~2022 年间丹寨县每年每月都发生干旱,其中 7 月份最多,干旱月数以  $0.2 \text{ 月} \cdot 10\text{a}^{-1}$  的速率显著减少;季尺度 SPEI 分析得出,63a 中有 59a 均出现不同程度的出现干旱,春旱事件发生频率最高,秋旱次之,而春、秋季节主要以轻到中旱为主,重旱高发期主要在夏季和冬季。63a 中有 13a 有季节连旱,主要为冬春和夏春连旱,三季连旱发生频率很低,均为夏秋冬连旱。秋季多向干旱趋势发展,春、夏、冬三个季节都为向湿润趋势发展。年尺度 SPEI 震荡相对平缓,但也存在明显的年代际变化。2020 年是个突变年,即旱涝转折年。多尺度 SPEI 在时间序列上均为上升趋势,通过了 0.1 水平的显著性检验,即 1960~2022 年间丹寨县有相对明显的向湿润发展的趋势。

2) 季尺度平均气温、降水量和潜在蒸散量与 SPEI 相关关系明显比年尺度的相关关系更强,季节尺度的气象因子对 SPEI 的影响更明显。无论年尺度还是季尺度,降水量与 SPEI 的相关关系均为最强,可见降水量是主导 SPEI 变化的主要因子。

3) 本文基于 SPEI 指数分析的丹寨县干旱气候特征,采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散量,是以月平均气温为主要依据,影响因子单一,计算出的 SPEI 值较粗糙,对气候干旱特征分析有一定的局限性。每个行业对干旱的侧重点不一样,研究中还需要考虑湿度、日照、风速等气象因子,并考虑各气象因子对干旱发展影响的权重系数,更好地呈现气象干旱与各气象因子间的相关性。

## 参考文献

- [1] GB/T 20481-2017. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [2] 张敏, 黄晓荣, 任文辉. 基于 SPEI 指数的金沙江流域气象干旱时空特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 95-101.
- [3] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. 中国科学, 2017, 47(3): 337-353.
- [4] 张景扬, 卢远, 李嘉力, 等. 基于 SPEI 的广西干旱时空变化特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2015, 27(6): 15-24.
- [5] 熊光洁, 王式功, 李崇银, 等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 686-697.
- [6] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923-934.
- [7] 王玉雪, 李波, 王槿妍, 等. 基于 Mann-Kendall 检验法的北运河流域降水和径流变化趋势分析[J]. 北京水务, 2022, 5(1): 24-28.
- [8] 齐斐, 张春强, 刘霞, 等. 基于 M-K 检验和地统计分析的沂蒙山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 146-53.
- [9] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36.