

基于SPI和SPEI陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应

赵兴凯 李增尧 朱清科

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 通过计算标准化降水指数和标准化降水蒸散指数且借助 Mann-Kendall 检验分析陕北吴起县 1957—2014 年的降水和气温, 并与研究区土壤含水率进行回归分析, 旨在明确陕北吴起县气候特征及其与土壤含水率的关系。结果表明: ① 1957—2014 年吴起县降水年际差异明显且季节变化趋势不同, 平均以 11.17 mm/(10 a) 的幅度减少; 四季气温均显著或极显著升高, 年均气温以 0.01 °C/(10 a) 的幅度升高。降水和气温的变化均具突变现象, 突变开始年份分别为 1972 年前后及 1991 年。② 两指数均能较准确反映陕北吴起县气候特征, 1957—2014 年间吴起县干湿年交替出现, 主要湿润期出现在 20 世纪 60 年代。干旱年和湿润年的年份相当, 均远少于正常年份, 但吴起县仍处于变干旱的趋势中, 且干旱程度加重。③ 研究区 6—10 月份各坡向坡面 0~1 m 深度土壤含水率与月尺度的两指数均有很高的相关性, 存在二次函数关系。

关键词: 陕北黄土区; 气候特征; 土壤水分; 标准化降水指数; 标准化降水蒸散指数

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0155-09

Response of Soil Moisture on Climate Characteristics Based on SPI and SPEI in Loess Region of Northern Shaanxi

Zhao Xingkai Li Zengyao Zhu Qingke

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to exactly figure out the climate characteristics and its relationship with soil water content, precipitation and air temperature characteristics were analyzed by using the standardized precipitation index (SPI) and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) as well as Mann-Kendall tests based on precipitation and air temperature data from Wuqi synoptic station over the period of 1957—2014, and regression analysis of soil water content was also performed. The results showed that: (1) an obvious difference was existed among annual precipitations, and the seasonal precipitation series had different trends. On the whole, precipitation displayed a decreasing trend with value of 11.17 mm/(10 a). Compared with precipitation, significantly increasing trend of air temperature was detected at seasonal scale with a rate of 0.01 °C/(10 a). Significantly changing trends existed in the series of precipitation and air temperature, and the crossing points were 1972 and 1991, respectively. (2) Both SPI and SPEI can accurately reflect the climate characteristics of the study area. In general, wet year alternated with dry year during the period of 1957—2014. The main rainy period was estimated to appear in the 1960s. The occurred chances for wet years and dry years were almost the same, but both of them were far less than normal years. Wuqi county initially exhibited a warming and drying trend, which would be even more serious in future. (3) The relationship between soil water content in 0~1 m soil depth on the slopes of different directions and one month scale SPI/SPEI could be stated with a quadratic function which had high fitting accuracy. SPI-1/SPEI-1 must achieve a certain degree then

收稿日期: 2016-02-19 修回日期: 2016-04-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B02)

作者简介: 赵兴凯(1988—), 男, 博士生, 主要从事林业生态工程研究, E-mail: dz_zxk@bjfu.edu.cn

通信作者: 朱清科(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程及农林复合研究, E-mail: zhuqingke@sohu.com

showed positive correlation with soil water content, and different slopes had different required levels. This research showed that both SPI and SPEI were suitable for application in loess region of northern Shaanxi because of the similar analysis results. This method can be applied to other different parts of the climate change research, especially in arid and semi-arid region; the results can provide reference for climate change in loess region of northern Shaanxi, and provide theoretical basis for promoting vegetation restoration artificially.

Key words: loess region of northern Shaanxi; climate characteristics; soil moisture; standardized precipitation index; standardized precipitation evapotranspiration index

引言

干旱是全球范围内普遍存在的自然灾害,是一种长期水量相对亏缺的自然现象,中国黄土高原是全球干旱的严重地区^[1]。干旱分析研究中,选取的指数通常有帕尔默干旱指数(PDSI)^[2],标准化降水指数(SPI)^[3]和标准化降水蒸散指数(SPEI)^[4]。帕尔默干旱指数(PDSI)是基于水量平衡方程的干湿指标,由PALMER^[5]首先提出使用,是干旱分析指标的里程碑,但计算过程复杂,参数区域性较强。标准化降水指数(SPI)由MCKEE等^[6]提出,是世界气象组织(WMO)推荐使用的干旱指数,SPI计算简单但仅基于降水量数据,未考虑其他可能会影响干旱的变量,如蒸发蒸腾,风速等。VICENTE-SERRANO等^[7]改进SPI的不足,加入温度指标,提出了标准化降水蒸散指数(SPEI)。

气候的变化可能会导致降水模式的改变^[8],气温和降水是气候的主要因素,也是干旱的直接表征量。大气降水是黄土高原土壤水分唯一的补给方式,土壤水分是植物生长所需水分的直接来源^[9],是干旱与半干旱区植物生长和植被构建的主要限制因子,在中国陕北黄土高原沟壑区表现尤为显著^[10]。土壤含水率变化与大气降水量直接相关^[11]。对区域降水量与土壤含水率之间存在的关系进行研究,可以为本区域绿化过程中的植被配置及种植密度设置提供理论基础,促进生态恢复的进程^[12]。采用干旱指数SPI的中国黄土高原地区降水特征研究已有报道^[13-14],而在陕北黄土区基于SPEI的气候变化分析鲜有报道。本文选用SPI和SPEI指标,运用Mann-Kendall趋势检验和突变检验对本地区气温和降水特征进行联合分析,并分别分析土壤含水率与SPI及SPEI的关系,旨在明确研究区气温和降水的变化规律,了解土壤含水率与标准化降水指数和标准化降水蒸散指数之间的响应,为陕北黄土区人工促进植被恢复提供理论基础。

1 材料和研究方法

1.1 研究区概况

以陕西省延安市吴起县为典型,研究陕北黄土区气候特征以及SPI和SPEI对气候特征的响应。吴起县地跨东经 $107^{\circ}38'27'' \sim 108^{\circ}32'49''$,北纬 $36^{\circ}33'33'' \sim 37^{\circ}24'27''$,海拔 $1\,233 \sim 1\,809\text{ m}$,主要属黄土高原丘陵沟壑区,土壤类型主要为绵沙土。降水时空差异显著,夏多冬少,春旱夏涝,1957—2014年平均降水量为 471.61 mm ,年均气温为 8.03°C ,位于中温带半湿润、半干旱区,属温带大陆性季风气候。

1.2 数据来源

本研究中土壤含水率监测点分别定于吴起县合家沟流域典型的阴向坡、阳向坡和半阳向坡,采用TRIME-HD型手持式读表高精度时域反射计,进行总深度为 1 m ,每 20 cm 深度为一层的土壤含水率数据采集,每层重复测定3次取平均值,每次重复探针在水平方向上旋转 120° 。土壤含水率采集时间为2012年的6—10月,每隔 10 d 采集一次,为避免降水对土壤含水率的短期大幅影响,每次观测时间连续 7 d 内无明显降水。为确保测量值的稳定性,每次测量工作在 1 d 内完成。

降水和气温数据由中国气象数据网提供。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数与标准化降水蒸散指数

世界气象组织(WMO)^[15]及已有研究^[4,6,16]均表示,土壤含水率可以反映相对较短时间尺度($1 \sim 2$ 个月)的降水异常, $1 \sim 6$ 个月时间尺度的SPI/SPEI可以反映农业干旱状况,较长时间尺度(6 个月及以上)的SPI/SPEI可以应用于地下水、河流和水库储量等水文干旱的研究。综合应用不同时间尺度的SPI/SPEI可实现对气候变化的综合评估。

不同时间、不同地区降水量变化幅度很大,而且降水分布是一种偏态分布,直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较,所以在降水分析中,采用分布概率来描述降水量的变化,再经过正态标准化求

得 SPI 值。具体的计算方法在多处研究文献中有所涉及^[3,13,17],具体计算方法为

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1} \quad (1)$$

其中 $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$ $S = \begin{cases} 1 & (G(x) > 0.5) \\ -1 & (G(x) \leq 0.5) \end{cases}$

$$G(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \int_0^x x^{\beta-1} e^{-x/\alpha} dx \quad (x > 0) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (4)$$

式中 α ——尺度参数 β ——形状参数

x ——降水量样本

S ——概率密度分布的符号函数

$\Gamma(\beta)$ ——Gamma 函数

$G(x)$ ——Gamma 函数相关的降水分布概率

式中 $c_0 = 2.515\ 517, c_1 = 0.802\ 853, c_2 = 0.010\ 328, d_1 = 1.432\ 788, d_2 = 0.189\ 269, d_3 = 0.001\ 308$ 。

$$w_s = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \left(1 - \frac{l-0.35}{n}\right)^s X_l \quad (s=0,1,2) \quad (5)$$

式中 w_s ——概率权重矩

l ——降水量序列 x 按升序排列的序号

标准化降水蒸散指数 (SPEI) 是 VICENTE - SERRANO 针对 SPI 未考虑温度指标的不足提出的,因此计算 SPEI 时输入变量为月降水量和月平均气温,通过计算月降水量与潜在蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到的。SPEI 既保留了 PDSI 考虑蒸散对温度敏感的特点,又具备 SPI 计算简单,适合多尺度多空间比较的优点^[7]。

SPEI 计算步骤^[7]如下:

(1) 首先采用 Thornthwaite 法计算潜在蒸散发 (PET),即

$$PET = 16 \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{N_{DM}}{30}\right) \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (6)$$

其中 $m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 +$

$$1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (7)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (8)$$

式中 T ——月均气温,℃

N ——月平均日照时数,h

N_{DM} ——各月天数 I ——热量指数

(2) 计算月水分亏缺量

$$D_i = P_i - PET_i \quad (9)$$

式中 P_i ——月降水量,mm

PET_i ——月潜在蒸散发量,mm

(3) 构造不同时间尺度的累积水分亏缺量序列 X

$$X_k^n = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad (n \geq k) \quad (10)$$

式中 n ——时间序列样本个数

k ——时间尺度

(4) 引入三参数 log-logistic 概率分布函数计算累积水分亏缺量序列的概率分布

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]^{-2} \quad (11)$$

其中 $\gamma = w_0 - \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)$ (12)

式中 γ ——位置参数

三参数 log-logistic 概率分布函数为

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (13)$$

(5) 对各月累积水分亏缺量序列的概率分布 $F(x)$ 进行标准正态分布转换,得 SPEI 计算值

$$SPEI = \begin{cases} w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} & (1 - F(x) \leq 0.5) \\ \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} - w & (1 - F(x) > 0.5) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $w = \begin{cases} \sqrt{-2\ln(1-F(x))} & (1-F(x) \leq 0.5) \\ \sqrt{2\ln F(x)} & (1-F(x) > 0.5) \end{cases}$

SPI 和 SPEI 的取值范围与干湿等级划分使用同一标准,如表 1 所示。

表 1 干湿等级划分

Tab. 1 Categories of drought grade

SPI/SPEI	类别
≥ 2.0	极端湿润
1.5 ~ 1.99	非常湿润
1.0 ~ 1.49	中度湿润
-0.99 ~ 0.99	正常
-1.0 ~ -1.49	中度干旱
-1.5 ~ -1.99	严重干旱
≤ -2	极端干旱

1.3.2 Mann-Kendall 检验 (M-K 检验)

(1) Mann-Kendall 趋势检验

在 Mann-Kendall 趋势检验中,原假设 H_0 是 n 个独立的随机变量同分布的时间序列数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) ; 备择假设 H_1 为双边检验:对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j, x_k$ 和 x_j 的分布是不同的,检验的统计变量 S 计算式为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (15)$$

其中,sgn(x) 为符号函数,取值规则为

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k > 0) \\ 0 & (x_j - x_k = 0) \\ -1 & (x_j - x_k < 0) \end{cases} \quad (16)$$

S 为正态分布,其均值为 0,方差 $\operatorname{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$,当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量 Z 计算式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (17)$$

在双边趋势检验中,在给定置信水平 α 上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设 H_0 不可接受,即在 α 置信水平上时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正则序列具有上升或增加趋势; Z 为负则序列具有下降或减少的趋势。若正态统计变量 Z 的绝对值大于或等于 1.28、1.64 和 2.32,分别表示通过了信度 90%、95% 和 99% 的显著性趋势检验。

(2) Mann-Kendall 突变检验

对样本量为 n 的时间序列 x ,构造秩序列

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (18)$$

当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$,当 $x_i < x_j$ 时, $r_i = 0$,其中 $j=1,2,\dots,i$ 。

在时间序列随机独立的假定条件下,定义统计量

$$UF_k = \frac{s_k - \bar{s}_k}{\sqrt{\operatorname{Var}(s_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (19)$$

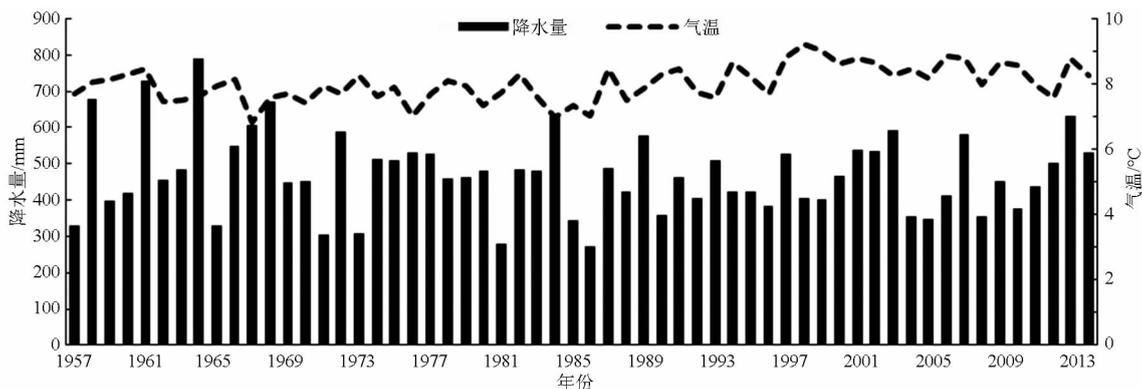


图1 1957—2014年降水量与气温变化

Fig. 1 Precipitation and air temperature of Wuqi county during period of 1957—2014

由 1957—2014 年吴起县春夏秋冬四季降水量与平均气温情况(图 2),可知吴起县降水季节分配不均,年际差异明显,并且降水量的明显增加或减少均有气温的相应变化与之响应。

对图 1 和图 2 中 1957—2014 年吴起县降水和气温数据进行分析并做 M-K 趋势检验,结果见表 2 和表 3。由表 2 可知,1957—2014 年间吴起县

其中 $UF_1 = 0, \bar{s}_k, \operatorname{Var}(s_k)$ 是累积数 s_k 的平均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立且有相同的连续分布时,计算式为

$$\begin{cases} \bar{s}_k = \frac{n(n+1)}{4} \\ \operatorname{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (20)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 的顺序计算出的统计量序列,给定显著水平 α ,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化,按时间序列 x 的逆序重复上述计算过程,并使 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, \dots, 1), UB_1 = 0$ 。 UF_k 大于 0 表示序列呈上升或增加趋势,小于 0 则为下降或减小趋势,超过临界线表明变化趋势显著。若 UF_k 和 UB_k 所形成的两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,则交点对应的的时间即为突变开始的时间。

2 结果与分析

2.1 降水与气温特征分析

1957—2014 年吴起县年均降水量和年均气温变化如图 1 所示。降水量均值为 471.61 mm,标准差为 111.00 mm,变异系数为 0.24;气温均值为 8.03°C,标准差为 0.55°C,变异系数为 0.07。而近 25 a,即 1990—2014 年,年均降水量为 459.52 mm,标准差为 80.77 mm,变异系数为 0.18;气温均值为 8.42°C,标准差为 0.46°C,变异系数为 0.05。表明吴起县降水量有所减小而气温有所增加,且近 25 a 变化趋势均更加稳定。

春季、夏季和秋季 3 个季节的降水量呈现出不同程度的降低趋势,春季降水的减小幅度最大为 5.55 mm/(10 a),且减少趋势通过了 90% 的置信水平检验;冬季降水有平均 0.61 mm/(10 a) 的增加,增加趋势不显著。1957 年以来,吴起县每 10 a 的平均降水量以 11.17 mm 的幅度减少。

对气温数据的分析结果(表 3)表明,1957—

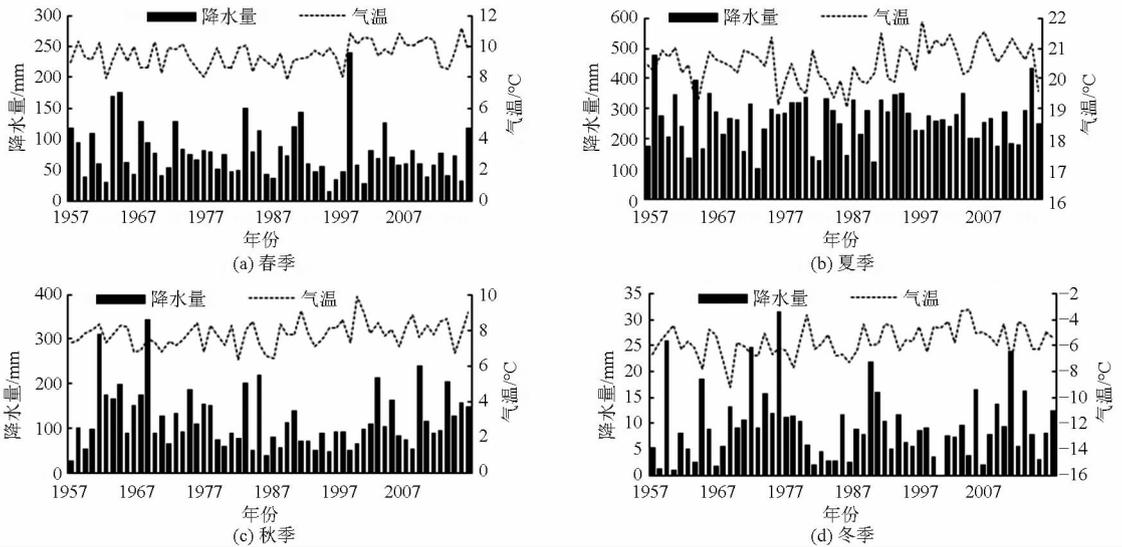


图 2 1957—2014 年四季降水量与气温

Fig. 2 Precipitation and air temperature of four seasons during period of 1957—2014

表 2 1957—2014 年吴起县降水特征

Tab. 2 Precipitation characteristics of Wuqi county during 1957—2014

季节	平均降水量/mm	幅度/ (mm·(10 a) ⁻¹)	标准差	变异系数	MK-Z	置信度/ %
春季	79.03	-5.55	41.81	0.53	-1.60	>90
夏季	263.27	-4.78	77.13	0.29	-0.25	<90
秋季	119.86	-1.36	64.74	0.54	-0.30	<90
冬季	9.45	0.61	6.66	0.70	0.34	<90
年均	471.61	-11.17	111.00	0.24	-0.62	<90

表 3 1957—2014 年吴起县气温特征

Tab. 3 Air temperature characteristics of Wuqi county during 1957—2014

季节	平均气温/°C	幅度/ (mm·(10 a) ⁻¹)	标准差	变异系数	MK-Z	置信度/ %
春季	9.48	0.11	0.81	0.09	2.33	>99
夏季	20.50	0.10	0.65	0.03	1.80	>95
秋季	7.80	0.08	0.72	0.09	2.33	>99
冬季	-5.66	0.07	1.16	-0.20	2.44	>99
年均	8.03	0.01	0.55	0.07	3.37	>99

2014 年吴起县四季平均气温均呈现显著或极显著的增加趋势,春季和夏季的增温幅度接近,大于秋冬季节的增温幅度,年均气温的增温幅度为 0.01℃/(10 a),且通过 99% 置信水平检验。

总体来说,1957—2014 年吴起县年均气温呈上升趋势并通过 99% 的显著性检验,而年均降水量有下降趋势,但趋势不明显。

对吴起县 1957—2014 年年均降水量和年均气温进行 M-K 突变检验,结果如图 3 和图 4 所示。年均降水量 M-K 突变检验分析的结果(图 3)显示,吴起县降水量自 1957—1972 年前后呈现增长趋

势,并在 1964 年达到显著水平 ($|UF_k| > U_{0.05}$),之后转变为不显著的减小趋势,此降水量减小趋势可视为突变现象,根据两曲线交点判断突变开始年份为 1972 年前后。

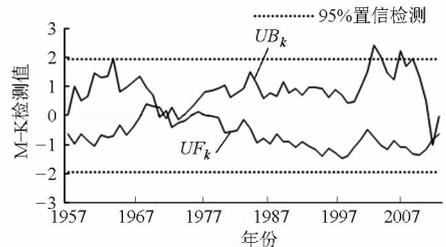


图 3 年均降水量 M-K 突变检验

Fig. 3 M-K mutation test of annual precipitation

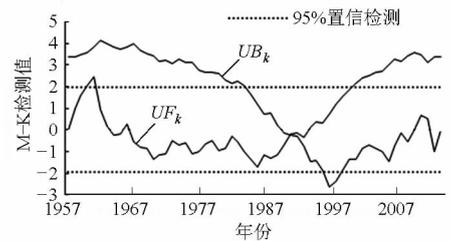


图 4 平均气温 M-K 突变检验

Fig. 4 M-K mutation test of average annual air temperature

对平均气温进行 M-K 突变检验分析的结果显示(图 4),吴起县气温在 1957—1966 年 10 a 间有短暂的升高过程且在 1961 年升高趋势通过 95% 显著水平检验,之后至 1994 年均呈现降低趋势并在 1994 年转变为升高趋势且 2000 年开始 $|UF_k| > U_{0.05}$,气温升高趋势开始显著,根据 UF_k 和 UB_k 曲线交点的位置可判定,吴起县气温升高趋势是一突变现象,突变开始于 1991 年。

2.2 SPI 与 SPEI 分析

图 5 和图 6 显示了 1957—2014 年吴起县不同

时间尺度(1、3、6、12、24个月)的标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)。图5和图6均表明,不同时间尺度干旱期和湿润期持续时间差异显著,相对较短时间尺度(1、3、6个月)的SPI和SPEI值显示了吴起县在研究期间的高频度干湿时期交替。在研究期间吴起县干湿时期交替发生,然而通过12个月时间尺度的SPI和SPEI可知,1957—2014年吴起县主要的湿润时期为20世纪60年代。整体看来,1957—2014年吴起县干旱年与湿润年年数相当,正常年份较多,在长时间尺度内(24个月)SPI和SPEI能更清晰的显示,并且与短时间尺度内SPI和SPEI显示结果较为一致。

根据SPI-12和SPEI-12数值划分出1957—2014年不同时期的干湿年型,其中SPI/SPEI < -1为干旱年,湿润年SPI/SPEI > 1,正常年SPI/SPEI ∈ (-1, 1)^[6]。划分结果如表4所示,可以看出每个时期分别根据SPI-12和SPEI-12划分出的干湿

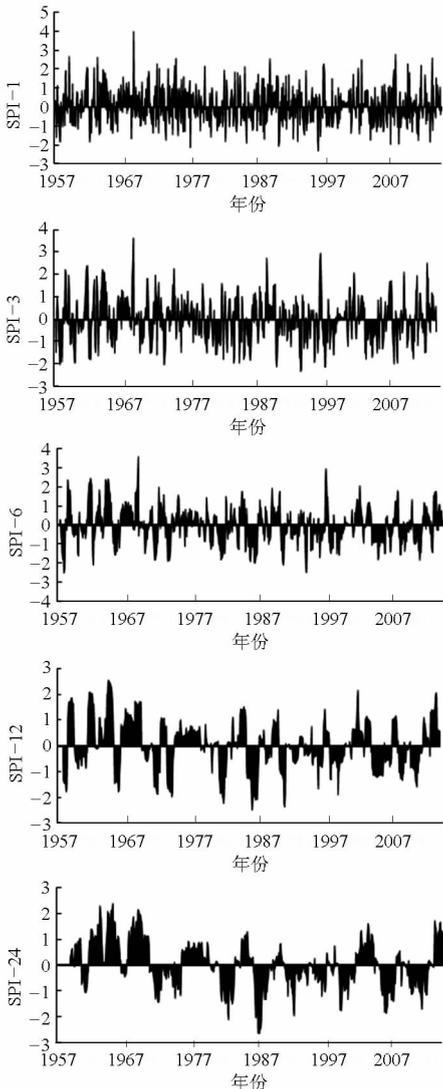


图5 1957—2014年吴起县不同时间尺度SPI
Fig.5 SPI of Wuqi county at different time scales during 1957—2014

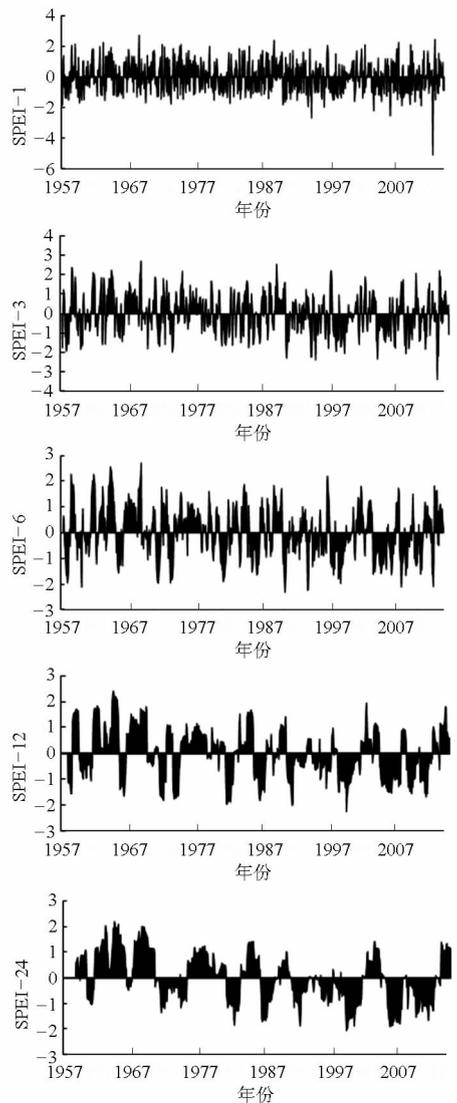


图6 1957—2014年吴起县不同时间尺度SPEI
Fig.6 SPEI of Wuqi county at different time scales during 1957—2014

年数差距很小,总体看来,湿润年:正常年:干旱年分别为10:38:10和11:34:13,并且SPI-12和SPEI-12均判定出了1964年为极端湿润年,分析结果相当接近。虽然SPI-12和SPEI-12所判定的干湿年型存在微小的不同,但判定结果不同的几年(1976年、1989年、1998年、1999年、2007年)各自SPI-12与SPEI-12的数值十分接近。可以说明SPI和SPEI均能很好的表征研究区的气候特征。

对每年和每个季节的SPI和SPEI进行M-K趋势检验。季节趋势分析使用SPI-3/SPEI-3中5月、8月、11月和2月数值分别代表春、夏、秋、冬四季,用SPI-12/SPEI-12数值分析每年趋势。得到统计变量Z值如表5所示,表明吴起县1957—2014年间春季、夏季、秋季的干旱程度均越来越严重,且春季变干旱趋势通过了95%置信水平的检验,冬季则有不显著的变湿润趋势,总体看来,对SPI和SPEI

表 4 依据 12 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 干湿年型划分

Tab. 4 Dry and wet years classification based on SPI-12 and SPEI-12

时期	SPI			SPEI		
	湿润年	正常年	干旱年	湿润年	正常年	干旱年
1957—1970	5	7	2	5	7	2
1971—1980	1	7	2	2	6	2
1981—1990	1	6	3	2	5	3
1991—2000	0	10	0	0	8	2
2001—2014	3	8	3	2	8	4

表 5 SPI 和 SPEI M-K 趋势检验正态统计变量

Tab. 5 M-K trend test of SPI and SPEI

统计值	春	夏	秋	冬	全年
MK- Z_{SPI}	-1.66**	-0.27	-0.30	0.25	-0.62
MK- Z_{SPEI}	-2.04**	-0.56	-0.92	0.23	-1.62*

注: * 表示通过信度 90% 的检验; ** 表示通过信度 95% 的检验。

的 M-K 趋势检验结果均显示 1957—2014 年吴起县有变干旱的趋势, 分析结果与前文分析结果一致, 且干旱程度会加重。

2.3 土壤含水率与 SPI/SPEI 的关系

土壤含水率是陕北黄土丘陵沟壑区植物生长的最主要限制因子, 了解土壤含水率的动态变化规律可以作为本地区植被恢复工作的理论指导, 因此, 明确土壤含水率与 SPI/SPEI 的关系则颇有意义。

为研究土壤水分对较短时间尺度 SPI/SPEI 的响应, 选取吴起县阴向坡(N)、阳向坡(S)和半阳向坡(W), 坡面特征见表 6。分别对每个坡面每月 0~20 cm、0~40 cm、0~60 cm、0~80 cm 和 0~100 cm 平均土壤含水率与相应时间 SPI-1/SPEI-1 进行回归分析(图 7)。根据 SPI 和 SPEI 数值显示, 土壤含水率数据采集年为正常年份, 采集月的干湿类型同时包含正常月份, 湿润月份和干旱月份, 分析结果具有代表性。

表 6 坡面特征

Tab. 6 Characteristics of slopes

编号	坡向	坡度/(°)	海拔高度/m
N	北	40	1404
S	南	33	1456
W	西	43	1385

结果显示, 3 个坡向坡面相同土层深度的土壤含水率大小顺序均依次表现为阳向坡(S)、半阳向坡(W)、阴向坡(N), 且阴向坡和半阳向坡两坡向随着土层深度的增大, 同一监测点平均土壤含水率均会明显增加, 但阳向坡由于长期水分的亏缺以及降水补给深度的问题, 浅层平均土壤含水率明显高于

较深土层深度平均土壤含水率。

3 个坡向坡面土壤水分监测点各土层深度平均土壤含水率与 SPI-1/SPEI-1 拟合程度均很高, 拟合曲线为二次函数, R^2 最小为 0.8297。根据二次函数性质分析图像开口方向和对称轴位置可知, 在陕北吴起县, 6—10 月土壤含水率起初随着 SPI-1 和 SPEI-1 的增大而缓慢降低, 须达到某一程度才与土壤含水率呈现正相关, 不同坡向所要求的程度不同。SPI-1/SPEI-1 与土壤含水率相关关系发生变化的分界值由大到小依次为阴向坡、半阳向坡、阳向坡, 表明在同等气候条件下阳向坡面对降水和气温的变化更加敏感, 更容易引起土壤水分的显著增加。

3 讨论

标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)可消除降水的时空差异, 对干旱变化反应敏感, 能很好地反映不同区域和时段的干旱状况。SPI 是世界气象组织(WMO)推荐使用的干旱指数, 在我国不同区域得到较为广泛的使用。本文基于 SPI 和 SPEI 对研究区不同时间尺度的气候特征进行分析, 结果表明研究区处于变干旱的趋势下, 干旱程度表现为不断加重, 这之前学者^[14, 18-19]基于 SPI 对中国和黄土高原区域干旱变化特征研究结果相同。标准化降水蒸散指数在中国区域适用性的验证^[20-21]结果均表明, SPEI 在本研究区域可以发挥其多时间尺度的特点, 能准确表征干旱特点。在陕北黄土区大气降水量决定土壤水分含量^[11], 标准化降水指数可以反映土壤供水情况, 例如 $SPI < 1$ 和 $SPI \geq 1.5$ 的气候条件下, 土壤分别处于供水状态和储水状态^[22]。气温的高低影响水分蒸发蒸散, 在干旱形成^[23]与土壤含水率变化中的作用不容忽视, 所以加入气温指标分析本区域干湿特征更具有说服力, 结果也更加可靠, 故标准化降水蒸散指数能更好地反映研究区干湿状况。明确标准化降水蒸散指数与土壤含水率之间存在的关系, 即可明确土壤的供水特征, 并可根据水分亏缺程度对水分补给量进行预测, 可为研究区植被恢复和植被构建及合理区域的选择提供决策支撑。

4 结论

基于标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)借助 Mann-Kendall 趋势检验和突变检验对陕北吴起县 1957—2014 年气温和降水特征进行分析, 并对不同坡向不同土层深度的土壤含水率与短时间尺度的 SPI/SPEI 进行回归分析, 得到如下结论:

(1) 吴起县 1957—2014 年降水年际差异明显

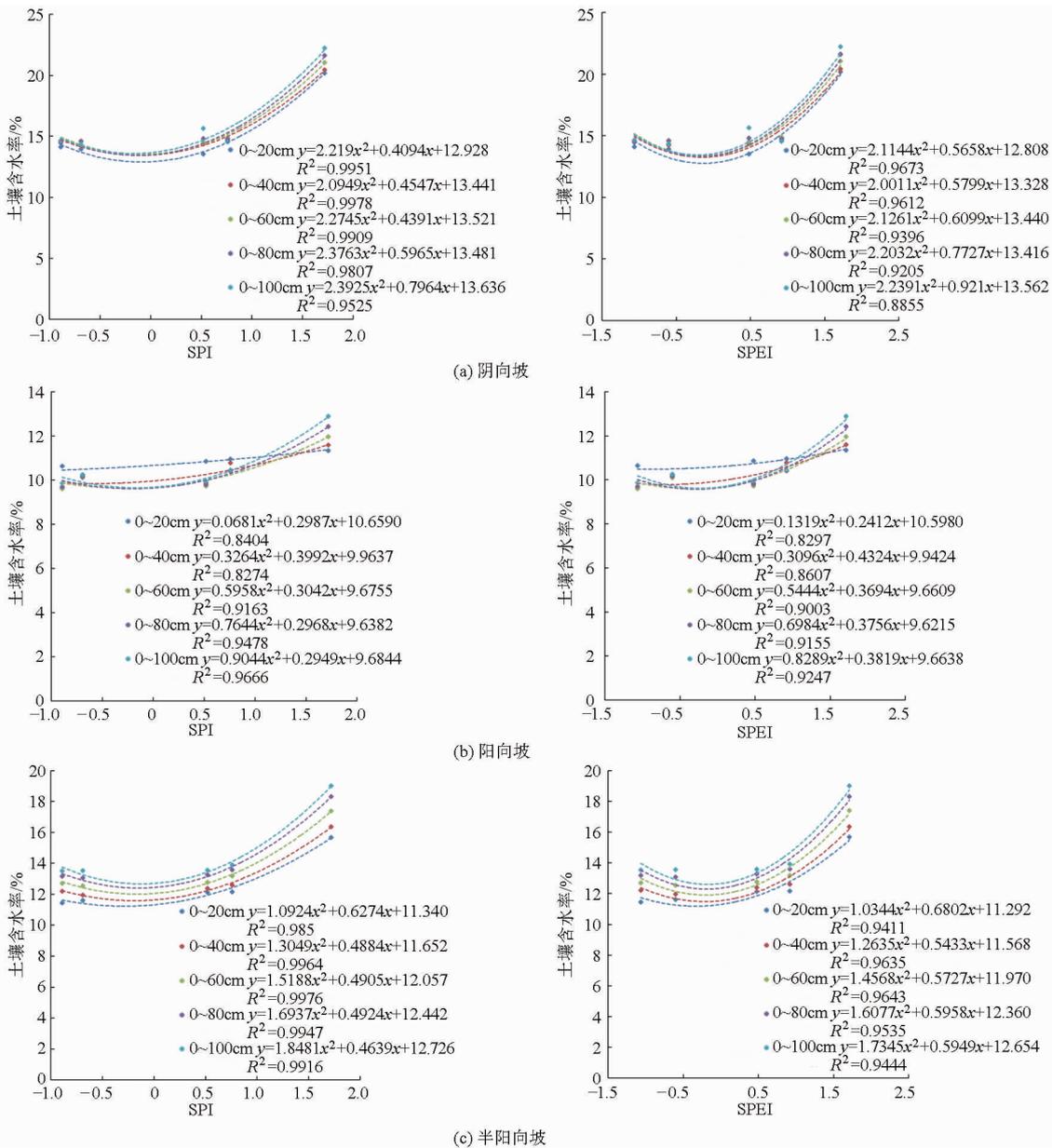


图7 土壤含水率与 SPI-1/SPEI-1 的关系

Fig. 7 Relationship between soil water content and SPI-1/SPEI-1

且季节分配不均。春、夏、秋3个季节降水量呈现不同程度的减少趋势,冬季降水有不显著的增加趋势。总体来看,降水量以11.17 mm/(10 a)的幅度减少;四季气温均显著或极显著升高,年均气温以0.01℃/(10 a)的幅度显著升高。且降水的减少和气温的升高趋势均属于突变现象,突变开始年份分别为1972年前后和1991年。

(2) SPI和SPEI均能较为准确地反映陕北吴起县气候特征,分析结果显示,不同时间尺度的SPI和SPEI反映不同的气候信息。1957—2014年间吴起

县干湿期交替出现,主要的湿润期出现在20世纪60年代。研究期间,吴起县出现干旱年和湿润年的年份相当,均远少于正常年份,但吴起县仍处于变干旱的趋势下,且干旱程度表现为不断加重。

(3) 研究区6—10月0~1 m深度各土层平均土壤含水率与短时间尺度SPI-1/SPEI-1均有很高的拟合程度,拟合曲线为二次函数。SPI-1/SPEI-1须达到某一程度才与土壤含水率呈现正向相关,不同坡向所要求的程度不同。

参 考 文 献

- 1 WANG L N, ZHU Q K, ZHAO W J, et al. The drought trend and its relationship with rainfall intensity in the Loess Plateau of China [J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(1): 479-495.
- 2 FICKLIN D L, LETSINGER S L, GHOLIZADEH H, et al. Incorporation of the Penman-Monteith potential evapotranspiration

- method into a Palmer drought severity index tool[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 85(Part B): 136–141.
- 3 HE Y, YE J Y, YANG X Y. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in the Huai River Basin using the standardized precipitation index[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 166: 120–128.
- 4 STAGGE J H, TALLAKSEN L M, GUDMUNDSSON L, et al. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI)[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(13): 4027–4040.
- 5 PALMER W C. Meteorological droughts [R]. Weather Bureau Research Paper No. 45. U. S. Department of Commerce.
- 6 MCKEE T B, DOESKENN J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179–184.
- 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: 1696–1718.
- 8 GIORGI F, BI X. Regional changes in surface climate interannual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(13): L13701. 1–5.
- 9 MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ J, CEBALLOS A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain [J]. *Soil Science Society of America*, 2003, 67(6): 1647–1656.
- 10 朱清科, 张岩, 赵磊磊, 等. 陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 31, 329.
- 11 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961–4968.
YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4961–4968. (in Chinese)
- 12 赵维军, 马欢, 朱清科, 等. 陕北黄土区微地形土壤水分对降水特征的响应[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 118–124.
ZHAO Weijun, MA Huan, ZHU Qingke, et al. Response of soil moisture of microtopography on precipitation characteristics in the Loess Region of northern Shaanxi [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 118–124. (in Chinese)
- 13 ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N, et al. Spatiotemporal analysis of climate variability (1971–2010) in spring and summer on the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 1689–1702.
- 14 ZHAO W J, YU X Y, MA H, et al. Analysis of precipitation characteristics during 1957–2012 in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Plos One*, 2015, 10(11): e0141662.
- 15 SVOBODA M, HAYES M, WOOD D. Standardized precipitation index user guide [S]. World Meteorological Organization (WMO-No. 1090), 2012.
- 16 LI B Q, ZHOU W, ZHAO Y Y, et al. Using the SPEI to assess recent climate change in the Yarlung Zangbo River Basin, South Tibet [J]. *Water*, 2015, 7(10): 5474–5486.
- 17 GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010 [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 32–42.
- 18 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的 1960–2011 年中国不同时间尺度干旱特征[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 827–834.
WANG Suping, ZHANG Cunjie, LI Yaohui, et al. Analysis of multi-timescale drought variation based on standardized precipitation index in China during 1960–2011 [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 827–834. (in Chinese)
- 19 孙智辉, 王治亮, 曹雪梅, 等. 基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区 1971–2010 年干旱变化特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1560–1567.
SUN Zhihui, WANG Zhiliang, CAO Xuemei, et al. Characteristics of drought change in the Loess Plateau area of Shaanxi based on the standardized precipitation index during 1971–2010 [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1560–1567. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 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)
- 22 邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 196–202.
ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, JIANG Heng, et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in northeast China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 196–202. (in Chinese)
- 23 ZAVALETA E S, THOMAS B D, CHIARIELLO N R, et al. Plants reverse warming effect on ecosystem water balance [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003(100): 9892–9893.