

基于 SPEI 的陕北黄土丘陵区干旱特征及影响因素分析

郭旭新¹, 赵 英¹, 高志永¹, 汪有科^{2*}

(1. 杨凌职业技术学院 水利工程分院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院/教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探讨陕北黄土丘陵区干旱特征及其影响因素,借助绥德 2000—2014 年逐日的气象数据,基于 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 蒸散模型及同一套降水资料计算,获得不同时间尺度(月、半年和年)3 种标准化降水蒸散指数(SPEI),对比分析上述 3 种 SPEI 的差异并选取适宜于陕北黄土丘陵区的 SPEI,而后采用 SPEI 分析干旱特征,并利用通径法分析气象因子对 SPEI 敏感性。结果表明:1)基于 Penman-Monteith 蒸散模型的 SPEI(SPEI-PM)能够准确反映陕北黄土丘陵区干旱事件,与 SPEI-PM 相比,基于 Hargreaves 和 Thornthwaite 的 SPEI 值偏低,计算误差为 0.26~0.38;2)干旱变化呈现减弱趋势,短时间尺度上(1 和 6 个月)SPEI-PM 值变化频繁,长时间尺度上(12、18 和 24 个月)SPEI-PM 值变化幅度小且变化周期长;3)在月、半年和年尺度上对 SPEI-PM 影响程度最大的气象因素分别为气温和相对湿度。

关键词:SPEI;黄土丘陵区;干旱;气象因素

中图分类号:S728.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)01-0069-08

SPEI Based Drought Characters and Factors in Loess Hilly Regions of Northern Shaanxi

GUO Xu-xin¹, ZHAO Ying¹, GAO Zhi-yong¹, WANG You-ke^{2*}

(1. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational & Technological College, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the drought characteristics and influencing factors in loess hilly region of Northern Shaanxi Province, three types of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI-HG, SPEI-TW, SPEI-PM) in different time scales (month, half year and year) were calculated using precipitation and three sets of potential evapotranspiration (ET) data based on daily climatic data collected from meteorological station of Suide in Shaanxi during 2000 to 2014. The ET was calculated by Hargreaves, Thornthwaite and Penman-Monteith formulae, respectively. Differences between the three types of SPEI were compared and an appropriate SPEI was selected. The drought characteristics were analyzed by the selected SPEI, and the sensitivity of meteorological factors to the selected SPEI was analyzed by path analysis. The results showed that 1) SPEI-PM could accurately describe drought events in loess hilly region of Northern Shaanxi Province. Compared with SPEI-PM, the SPEI-HG and SPEI-TW underestimate drought and the mean absolute errors were 0.26~0.38. 2) Drought change showed a decreasing trend, SPEI-PM fluctuation was frequent in short time scale, and stable in long time scale. 3) Meteorological factors that mainly affected SPEI-PM on the scale of monthly, half-year and year were the temperature, temperature and relative humidity, respectively.

Key words: SPEI; loess hilly region; drought; meteorological factor

收稿日期:2018-03-27 修回日期:2018-07-15

基金项目:国家支撑计划项目(2015BAC01B03);杨凌职业技术学院科学研究基金项目(A2013029)。

作者简介:郭旭新,男,副教授,研究方向:节水灌溉研究。E-mail: sxgxx2004@163.com

* 通信作者:汪有科,男,研究员,博士生导师,研究方向:水资源高效利用。E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

干旱是水资源收支不平衡诱发的自然现象,该现象是全球最严重的灾害之一^[1],因干旱发生面积广,持续时间长,影响范围大而受到学者广泛关注,是目前研究的热点问题^[2]。干旱对农业生产、社会经济、生态环境等产生重要影响。据统计,我国每年因干旱灾害损失粮食 250 亿~300 亿 kg,占自然灾害损失总量的 60%,每年农作物受灾面积达 0.2 亿 hm^2 ,占耕地总面积 1/6,造成经济损失为 2 000 亿元,而且干旱受灾面积以 $22 \text{ 万 } \text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率显著增加^[3]。此外,随着全球气候变暖,极端气候事件频发,破坏程度增强,应对难度加大,严重威胁着人类生存和社会经济发展^[4]。因此,研究干旱特征对于制定防旱减灾措施、建立防旱策略、降低干旱风险对实施经济和农业可持续发展具有重要指导意义。

陕西地处西北内陆腹地,多地属于干旱半干旱地区,雨量稀少,年均降雨量由南向北递减,加之生态环境脆弱,地貌复杂,气候多变,导致旱灾频发。进入 20 世纪,随着工农业及城镇用水量增加,出现水环境恶化,可用水资源缩减,干旱程度加重影响到陕西省农业及经济可持续性发展^[5-7]。针对陕西省干旱问题,乔丽^[8]等研究表明利用帕默尔干旱指数(PDSI)能够反映干旱状况,PDSI 基于水量平衡,是反映降水和蒸发的综合指标,但较难比较不同时空尺度效应^[9];谭学志^[10]等基于标准化降水指数(SPI)对关中地区干旱时空特征进行了分析,SPI 在不同的时空尺度上能够评价干旱,但仅考虑了降水对干旱的影响,难以描述气候变暖情况干旱的变化趋势^[11];周丹^[12]等和贺音^[13]等基于 Thornthwaite 蒸散发模型的标准化降水蒸散指数(SPEI)进行了干旱时空特征和变化趋势分析,SPEI 基于降水和蒸散发,被广泛应用于全世界的干旱研究^[14]。Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 蒸散模型是 SPEI 中计算潜在蒸散发的常用模型,然而 SPEI 指数会因蒸散模型不同而产生差异^[15]。

本研究利用绥德 2000—2014 年气象监测长序列逐日气象数据,分别采用 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 蒸散模型计算蒸散发,得到基于 3 种潜在蒸散发资料和同一套降水资料的 SPEI 值。从干旱事件特征、变化趋势及模型准确度方面对比分析三者的差异。此外,探讨干旱演变特征,并借助通径分析法揭示干旱影响因子,以期寻求适宜于陕北黄土丘陵干旱监测和预警的可靠指数,也为该地区科学、合理地防御干旱提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

绥德县总面积 $1\,878 \text{ km}^2$,属于典型的黄土高原

丘陵沟壑区。该地区为温带大陆性半干旱气候,年均降雨量 486 mm,年最大降雨量 747.5 mm,最小降雨量 235.0 mm,多集中于 7—9 月,占多年平均降雨量 61%。年平均气温 9.7°C ,气温年差为 31.5°C ,年极端最高气温 38.4°C ,年极端最低气温为 -25.4°C ,无霜期 165 d。

1.2 数据来源

本研究气象数据为绥德气象站 2000—2014 年逐日监测气象数据,包括日降水量 P 、气温 T_m 、最高气温 T_{\max} 、最低气温 T_{\min} 、日平均相对湿度 RH 、日照时数 SD 、日平均风速 u 数据。

1.3 研究方法

1.3.1 SPEI 指数 SPEI(standardized precipitation evapotranspiration index)能够综合反映蒸发、蒸腾和降水的作用,并且能够在多种时间尺度上进行评价干旱的干湿指数,它是通过计算逐月降水量和潜在蒸散发量差值的正态标准化处理而获得^[11],计算步骤如下:

1) 为对比蒸散发模型差异,利用 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 蒸散模型计算潜在蒸散发 ET_0 ;

Hargreaves 模型:

$$ET_0 = 0.002\,3 \frac{R_a}{\lambda} \left(\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} + 17.8 \right) \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (1)$$

式中, ET_0 为 Hargreaves 模型计算的潜在蒸腾量; R_a 为大气顶层辐射; λ 为水汽化潜热; $T_{\max} - T_{\min}$ 分别为最高和最低气温。

Thornthwaite 模型:

$$ET_0 = 16 \cdot \left(\frac{10T_i}{H} \right)^A \quad (2)$$

式中, T_i 为月平均气温; H 为热量指数; A 为常数。

Penman-Monteith 蒸散模型:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \lambda(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中, R_n 是植物表面净辐射; G 是土壤热通量; Δ 是饱和水汽压与温度曲线斜率; γ 是温度计常数; u_2 是 2 米处风速; $e_s - e_a$ 是饱和水汽压差。

2) 计算逐月降水量与蒸散发量的差值 D_i :

$$D_i = P_i - (ET_0)_i \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_{i,j}^k = \sum_{i=13-k+j}^{12} D_{i-1,n} + \sum_{n=1}^j D_{i,n} & j < k \\ D_{i,j}^k = \sum_{n=j-k+1}^j D_{i,n} & j \geq k \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_i 是时间尺度内降水与蒸散发差额的累计值, $D_{i,j}^k$ 为第 i 年 第 j 个月开始, k 个月内的累积降水蒸

散差值。

3)采用 3 参数的 Log-Logistic 概率分布函数对 D_i 数据序列进行拟合:

$$f(x)=\frac{\beta}{\alpha}(\frac{x-\gamma}{\alpha})^{\beta-1}\left[1+(\frac{x-\gamma}{\alpha})^{\beta}\right]^{-2}\tag{6}$$

式中, α,β,γ 为参数,该参数可以利用线性矩(L-moment)方法拟合获得:

$$\alpha=\frac{(\omega_0-2\omega_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)},\beta=\frac{2\omega_1-\omega_0}{6\omega_1-\omega_0-6\omega_2},\gamma=\omega_0-\alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)$$

D_i 概率密度的累计概率密度函数 $F(x)$:

$$F(x)=\left[1+\left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1}\tag{7}$$

4)对累计概率密度函数 $F(x)$ 进行正态标准化:

当累计概率 $P\leqslant 0.5$ 时,

$$\text{SPEI}=\omega-\frac{c_0+c_1\omega+c_2\omega^2}{1+d_1\omega+d_2\omega^2+d_3\omega^2}\tag{8}$$

当累计概率 $P>0.5$ 时,

表 1 SPEI 干旱等级划分
Table 1 Drought classifications based on SPEI

项目	极端干旱	严重干旱	中等干旱	正常年份	中等湿润	严重湿润	极端湿润
SPEI	$\leqslant -2.0$	$-2.0\sim-1.5$	$-1.5\sim-1.0$	$-1.0\sim1.0$	$1.0\sim1.5$	$1.5\sim2.0$	$\geqslant 2.0$
概率/%	2.3	4.4	9.2	68.2	9.2	4.4	2.3

1.3.3 通径分析 通径分析法克服了相关分析和多元回归分析的不足,能够全面反映自变量对因变量的效应^[17]。采用该方法分析不同时间尺度气象因子对干旱指数影响程度。该方法^[18]首先建立自变量 $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 与因变量 y 形如 $y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_nx_n$ 的线性方程,其次求解自变量与自变量简单相关系数 r_{x_i,x_j} 和自变量与因变量的简单相关系数 $r_{x_i,y}$ 并建立正规方程组,用矩阵解方程求出通径系数 P_{yx_i} ,即为自变量 x_i 对因变量 y 的直接作用效应, $r_{x_jx_i}P_{yx_j}$ 为自变量 x_i 通过自变量 x_j 对因变量 y 的间接作用效应。 E 为回归方程估计的可靠程度, $E=r_{x_1y}P_{x_1y}+r_{x_2y}P_{x_2y}+\cdots+r_{x_ny}P_{x_ny}$ 。

1.3.4 评价指标 为了分析 SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 精确度,选取拟合指数(W)和置性指数(C)反映模型计算干旱指数的精度和准确度,利用平均偏离差(MBE)和平均离差(MAE)评价偏离方向和误差幅度,其计算公式如下^[19-20]。

$$W=1-\frac{\sum_{i=1}^n(E_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^n(|E'_i|-|O'_i|)^2}\tag{10}$$

$$C=W\cdot\sqrt{R^2}\tag{11}$$

$$\text{SPEI}=-\left(\omega-\frac{c_0+c_1\omega+c_2\omega^2}{1+d_1\omega+d_2\omega^2+d_3\omega^2}\right)\tag{9}$$

式 $d_1=1.432\ 788;d_2=0.189\ 269;d_3=0.001\ 308$;
 $c_0=2.515\ 517;c_1=0.802\ 853;c_2=0.013\ 028;\omega=\sqrt{2-\ln(p)};p=1-F(x)$ 。SPEI 指数可用于计算多时间尺度的干旱指标,其等级划分见表 1^[11]。本研究采用基于 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 蒸散模型的标准化降水蒸散指数(SPEI-HG、SPEI-TW、SPEI-PM)分别计算月(1 个月)、半年(6 个月)和年(12 个月)时间尺度 SPEI。

1.3.2 线性倾向估计 线性倾向估计是描述变化趋势的有效方法,采用最小二乘法计算干旱指数与时间线性回归系数斜率和截距,以斜率的 10 倍作为干旱指数变化趋势,表示干旱指数每 10 a 的变化规律^[16],其中正值表示干旱指数呈增加趋势,负值呈减少趋势。

$$\text{MBE}=\frac{\sum_{i=1}^n(E_i-O_i)}{n}\tag{12}$$

$$\text{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^n|E_i-O_i|}{n}\tag{13}$$

式中, E_i 为 SPEI-HG 或 SPEI-TW 计算值; O_i 为 SPEI-PM 计算值; E'_i 为 SPEI-HG 或 SPEI-TW 计算值的离均差(h); O'_i 为 SPEI-PM 计算值的离均差; n 为样本数; R^2 为决定系数。

1.4 数据处理

采用 Spass 18.0、Excel 2010 和 R 进行数据处理,利用 Origin 2016 进行绘图。

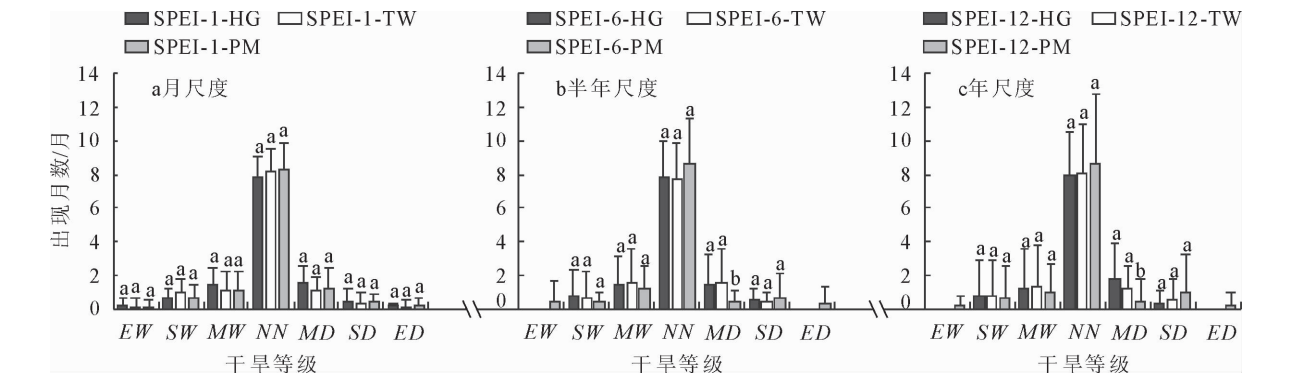
2 结果与分析

2.1 SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 比较分析

2.1.1 干旱事件发生特征 图 1 为不同时间尺度干旱事件年内出现的月数。可以看出,在月、半年和年尺度上,每年正常事件出现的月数分别为 8.09、8.07 和 8.22 个月,达最大;每年干旱事件出现的月数分别为 1.87、1.78 和 1.8 个月。在月尺度上采用 SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 判断同一干旱事件发生的月数无显著差异($P>0.05$,图 1a);在半年和年尺度上利用 SPEI-PM 判断中度干旱事件发生

的月数与 SPEI-HG、SPEI-TW 判断效果存在显著差异,借助 SPEI-PM 判断中度干旱月数显著低于后者 0.93~1.33 个月 ($P<0.05$,图 1b、c)。此外,

SPEI-PM 与 SPEI-HG 和 SPEI-TW 相比,在同一时间尺度上能够判断出极端事件(图 1b、c)。



注:图中 EW、SW、MW、NN、MD、SD、ED 分别表示干旱等级中的极端湿润、严重湿润、中度湿润、正常、中度干旱、严重干旱、极端干旱。图中同一干旱事件不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。SPEI-1-HG、SPEI-6-HG 和 SPEI-12-HG 分别表示月、半年和年尺度上基于 Hargreaves 蒸散模型的标准化降水蒸散指数,其他含义与此相同,下同。

图 1 2000—2014 年绥德年均干旱事件发生月数

Fig. 1 The average monthly number of annual drought events in Suide during 2000—2014

2.1.2 干旱指数变化趋势 在月、半年和年尺度上 SPEI-HG、SPEI-TW、SPEI-PM 变化趋势见表 2。线性回归方程斜率 >0 表明干旱指数呈上升趋势,即湿润化,反之,趋于干旱。由表 2 可见,同一模型干旱指数的斜率随着时间尺度增大而变大;在不同时间尺度上,SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 干旱指数回归方程的斜率均 >0 ;说明绥德地区干旱呈现减弱趋势,该结果与已有的关于陕西地区干旱研

究结论一致^[12-13],这可能与局地强降水和极端天气有关。此外,无论是同一模型在不同时间尺度还是不同模型在同一时间尺度上,干旱指数变化呈现上升趋势,表明 3 种模型在反映干旱指数的变化趋势上效果相同,但描述趋势大小存在不同,如 SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 年尺度上干旱指数分别以 0.003 95/10a、0.004 13/10a 和 0.004 92/10a 增加。

表 2 不同时间尺度干旱指数线性倾向估计

Table 2 Tend of drought index using linear tendency estimation at different time scales

时间尺度	SPEI-HG		SPEI-TW		SPEI-PM	
	斜率(10^{-4})	截距	斜率(10^{-4})	截距	斜率(10^{-4})	截距
月	0.62	147.72	0.61	148.11	0.72	160.77
半年	2.77	−681.89	2.99	734.20	3.37	−827.71
年	3.95	−969.57	4.13	−1014.20	4.92	−1208.81

2.1.3 干旱指数评价 在月、半年及年时间尺度上 SPEI-HG、SPEI-TW 和 SPEI-PM 的散点图、线性回归方程及决定系数(R^2)见图 2。可以看出,不同时间尺度上,SPEI-HG 和 SPEI-TW 与 SPEI-PM 回归方程的斜率接近 1,但 <1 ,其变化范围为 0.83~0.92;除月尺度 SPEI-HG 和 SPEI-PM 回归方程的决定系数 R^2 为 0.85,达到极显著水平外 ($P<0.001$),其他时间尺度上 R^2 变化范围为 0.66~0.75,达到显著水平 ($P<0.05$)。

为进一步探讨不同时间尺度 SPEI-HG 和 SPEI-TW 的精度,以 SPEI-PM 为标准,计算 W、C、MBE 和 MAE(表 3)。在月尺度上,SPEI-HG 的 W 和 C 值高于 SPEI-TW 0.07 和 0.11;SPEI-HG 的误差幅度低于 SPEI-TW 0.1;说明基于 Hargreaves

蒸散模型计算标准化降水蒸散指数精准度高于 Thornthwaite。在半年和年尺度上,SPEI-HG 和 SPEI-TW 的 W、C、MAE 和 MBE 值接近,说明基于 Hargreaves 与 Thornthwaite 蒸散模型计算标准化降水蒸散指数精准度相当。此外,对不同时间尺度上基于 Hargreaves 与 Thornthwaite 蒸散模型计算的干旱指数低于基于 Penman-Monteith 蒸散模型计算的干旱指数,计算误差为 0.26~0.38(表 3)。

2.2 干旱演变特征

干旱演变特征以多时间尺度来体现^[21-22]。为反映干旱演变特征,根据 2.1 分析的结果,我们借助 Penman-Monteith 蒸散模型计算 1、6、12、18 和 24 个月时间尺度上的 SPEI 并绘制干旱演变图(图 3)。在上述 5 个时间尺度上,干旱发生的频率分别为

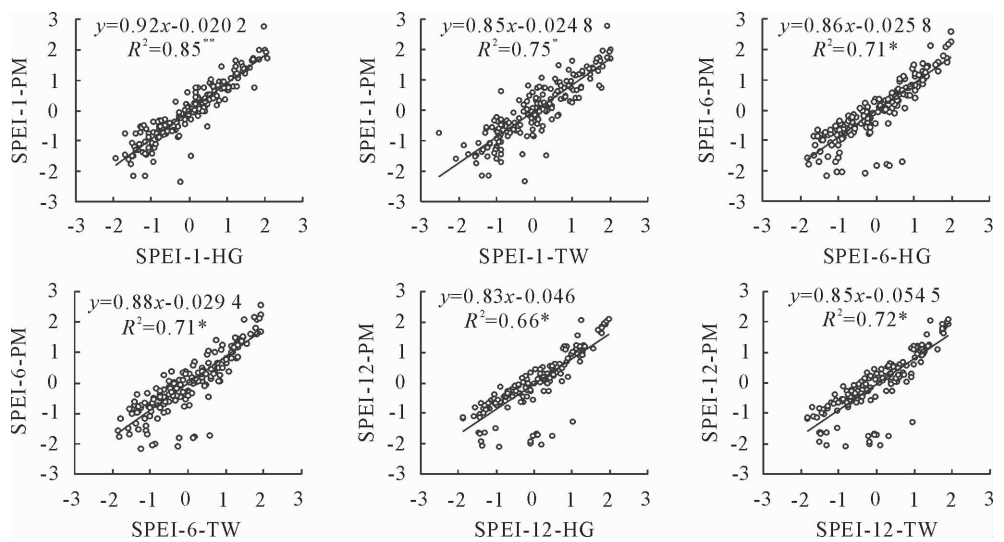


图 2 不同时间尺度干旱指数关系

Fig. 2 Drought index calculated by SPEI at different time scales

表 3 不同时间尺度 SPEI-HG 和 SPEI-TW 计算精度对比

Table 3 Calculation accuracy comparison of SPEI-HG and SPEI-TW at different time scales

时间 尺度	W		C		MAE		MBE	
	SPEI-HG	SPEI-TW	SPEI-HG	SPEI-TW	SPEI-HG	SPEI-TW	SPEI-HG	SPEI-TW
月	0.91	0.84	0.84	0.73	0.26	0.36	−0.02	−0.03
半年	0.85	0.84	0.71	0.70	0.33	0.36	−0.03	−0.03
年	0.78	0.80	0.63	0.68	0.38	0.37	−0.05	−0.05

16%、12%、14%、15% 和 17%；最大干旱发生在 2000 年,持续时长分别为 3、7、19、19、19 个月。短时间尺度(1 和 6 个月)干旱指数频繁波动,反映降水对干旱的影响;长时间尺度(12、18 和 24 个月)干旱指数波动稳定,而且波动周期长,体现降水的滞后性和蒸散发的季节性变化,更能反映干旱的年际演变特点(图 3)。

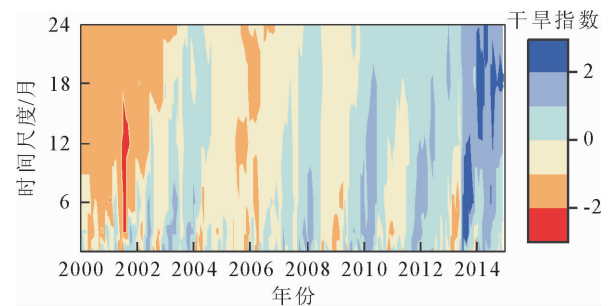


图 3 不同时间尺度干旱历史演变

Fig. 3 Spatiotemporal evolution of drought at different time scales

2.3 干旱指数影响因素

建立不同时间尺度 SPEI-PM 与气象因子的多元线性回归方程,求解气象因子关于干旱指数通径系数的正规方程组,计算气象因子对于干旱指数的通径系数和间接作用(表 4~表 6)。在月尺度上, T_m 、

RH 和 u 对 SPEI-PM 通径系数的绝对值较大,分别为 -0.52 、 0.64 、 0.48 (表 4),说明较低的 T_m 与 RH 和较大的 u 促使区域干旱加剧;在半年尺度上, P 、 T_m 和 SD 对 SPEI-PM 通径系数的绝对值较大,分别为 0.68 、 -0.91 和 -0.46 (表 5),说明较大 P 和较小的 T_m 与 SD 使得区域偏向湿润;在年尺度上, P 、 T_m 和 SD 对 SPEI-PM 的影响作用与半年尺度相同(表 6);从间接作用来看,同一时间尺度各气象因子之间相互作用,相互影响,对区域干旱具有共同影响作用。

在通径分析中利用减少气象因子的方法,通过观测回归方程估测可靠程度 E 来确定气象因子对 SPEI-PM 影响的敏感次序,从中确定影响干旱指数气象因子的大小次序。逐步剔除不同时间尺度不敏感项对 SPEI-PM 的通径分析结果(表 7~表 9)。在月尺度上,与 5 个气象因子的结果相比,逐步剔除气象因子后, E 值从小到大为 0.36 、 0.39 、 0.42 、 0.43 和 0.49 (表 7),则 5 种气象因子对 SPEI-PM 影响敏感次序为 $T_m > RH > P > u > SD$;在半年尺度上,与 5 个气象因子的结果相比,剔除 T_m 、 SD 、 P 、 u 和 RH , E 由小变大,其变化范围为 $0.53 \sim 0.73$ (表 8),5 种气象因子对 SPEI-PM 影响敏感次序为 $T_m >$

表 4 月尺度气象因子对干旱指数的通径分析

Table 4 Path analysis of drought index on monthly scale meteorological factors

气象因子	通径系数	间接作用					
		<i>P</i>	<i>T_m</i>	<i>RH</i>	<i>u</i>	<i>SD</i>	间接和
<i>P</i>	0.43		−0.30	0.33	−0.06	0.01	−0.02
<i>T_m</i>	−0.52	0.25		0.07	0.13	−0.01	0.45
<i>RH</i>	0.64	0.22	−0.06		−0.33	0.02	−0.15
<i>u</i>	0.48	−0.06	−0.02	−0.07		−0.15	−0.30
<i>SD</i>	−0.15	−0.02	−0.02	−0.07	−0.01		−0.12

注:表中*P*表示降水量,*T_m*为气温,*RH*为日平均相对湿度,*u*日平均风速,*SD*为日照时数。下同。

表 5 半年尺度气象因子对干旱指数的通径分析

Table 5 Path analysis of drought index on half year scale meteorological factors

气象因子	通径系数	间接作用					
		<i>P</i>	<i>T_m</i>	<i>RH</i>	<i>u</i>	<i>SD</i>	间接和
<i>P</i>	0.68		−0.66	0.10	0.32	−0.05	−0.28
<i>T_m</i>	−0.91	0.49		0.09	0.36	−0.13	0.82
<i>RH</i>	0.12	0.57	−0.71		0.37	−0.05	0.18
<i>u</i>	−0.43	−0.52	0.77	−0.10		0.08	0.22
<i>SD</i>	−0.46	0.07	−0.26	0.01	0.07		−0.10

表 6 年尺度气象因子对干旱指数的通径分析

Table 6 Path analysis of drought index on year scale meteorological factors

气象因子	通径系数	间接作用					
		<i>P</i>	<i>T_m</i>	<i>RH</i>	<i>u</i>	<i>SD</i>	间接和
<i>P</i>	0.35		−0.07	−0.01	0.08	0.13	0.14
<i>T_m</i>	−0.30	0.08		0.01	0.05	−0.12	0.02
<i>RH</i>	−0.02	0.10	0.07		0.07	0.27	0.52
<i>u</i>	−0.27	−0.11	0.06	0.01		−0.11	−0.15
<i>SD</i>	−0.49	−0.10	−0.07	0.01	−0.06		−0.21

表 7 逐步剔除不敏感气象因子对月尺度干旱指数的通径分析

Table 7 Results of path analysis by gradually excluding insensitive variable for SPEI in month scale

指标数	<i>P</i>		<i>T_m</i>		<i>RH</i>		<i>u</i>		<i>SD</i>		<i>E</i>
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	
5	0.43	−0.02	−0.52	0.45	0.64	−0.15	0.48	−0.30	−0.15	−0.12	0.75
4(<i>P</i>)			−0.31	0.24	0.87	−0.37	0.52	−0.67	−0.15	−0.12	0.42
4(<i>T_m</i>)	0.14	0.27			0.58	−0.08	0.26	−0.60	−0.20	−0.07	0.36
4(<i>RH</i>)	0.68	−0.26	−0.50	0.37			0.09	−0.24	−0.21	−0.05	0.39
4(<i>u</i>)	0.47	−0.06	−0.37	0.25	0.24	0.25			−0.21	−0.06	0.43
4(<i>SD</i>)	0.43	−0.02	−0.53	0.41	0.64	−0.14	0.51	−0.66			0.49

$SD>P>u>RH$;在年尺度上,与 5 个气象因子的结果相比,剔除 RH 、 SD 、 P 、 T_m 和 u , E 由小到大分别为 0.49、0.55、0.60、0.63 和 0.64(表 9),5 种气象因子对 SPEI-PM 影响敏感次序为 $RH>SD>P>T_m>u$ 。

随着尺度增加,气象因子对干旱指数的敏感性

强弱发生变化,显示出不同的尺度效应。可见,不同时间尺度影响干旱指数敏感性大小结论不能进行上推或下推。在月、半年和年尺度上温度和相对湿度是影响干旱指数的关键性气象因子,气温的升高,蒸发蒸腾加大,相对湿度降低,降水时间和强度变异幅度加大,干旱灾害频发,影响作物潜在产量。

表 8 逐步剔除不敏感气象因子对半年尺度干旱指数的通径分析

Table 8 Results of path analysis by gradually excluding insensitive variable for SPEI in half year scale

指标数	<i>P</i>		<i>T_m</i>		<i>RH</i>		<i>u</i>		<i>SD</i>		<i>E</i>
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	
5	0.68	−0.28	−0.91	0.82	0.12	0.18	−0.43	0.22	−0.46	−0.10	0.85
4(<i>P</i>)			−0.79	0.70	0.59	−0.29	−0.44	0.24	−0.47	−0.08	0.60
4(<i>T_m</i>)	0.54	−0.14			0.01	0.29	0.11	−1.01	−0.59	0.04	0.53
4(<i>RH</i>)	0.73	−0.33	−0.90	0.81			−0.49	0.28	−0.46	−0.10	0.73
4(<i>u</i>)	0.68	−0.28	−0.72	0.63	0.34	−0.04			−0.46	−0.10	0.70
4(<i>SD</i>)	0.72	−0.32	−1.16	1.07	0.21	0.09	−0.46	0.25			0.55

表 9 逐步剔除不敏感气象因子对年尺度干旱指数的通径分析

Table 9 Results of path analysis by gradually excluding insensitive variable for SPEI in year scale

指标数	<i>P</i>		<i>T_m</i>		<i>RH</i>		<i>u</i>		<i>SD</i>		<i>E</i>
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	
5	0.35	0.14	−0.30	0.02	−0.02	0.52	−0.27	−0.15	−0.49	−0.21	0.78
4(<i>P</i>)			−0.20	−0.08	0.04	0.45	−0.32	−0.10	−0.56	−0.14	0.60
4(<i>T_m</i>)	0.27	0.23			0.06	0.44	−0.19	−0.65	−0.55	−0.15	0.63
4(<i>RH</i>)	0.35	−0.06	−0.29	0.34			−0.26	0.06	−0.48	0.00	0.49
4(<i>u</i>)	0.40	0.10	−0.23	−0.04	0.04	0.46			−0.51	−0.18	0.64
4(<i>SD</i>)	0.43	0.07	−0.38	0.11	0.20	0.30	−0.30	−0.12			0.55

3 结论与讨论

本研究分别采用 Hargreaves、Thornthwaite 和 Penman-Monteith 模型计算了绥德 2000—2014 年潜在蒸散发量,以此计算得到标准化蒸散指数 SPEI,并对这 3 种指数进行了对比,进而对干旱特征及影响因子进行了分析。研究结果显示,在月尺度上,利用 SPEI-PM、SPEI-HG 和 SPEI-TW 判断干旱事件发生的月数效果相当;在半年和年尺度上,SPEI-PM 与 SPEI-HG 和 SPEI-TW 判断中度干旱事件发生的月数存在显著差异($P<0.05$),SPEI-PM 能够反映极端事件;与 SPEI-PM 相比,SPEI-HG 和 SPEI-TW 计算的干旱指数值偏低,误差为 0.26~0.38。其主要原因是 Hargreaves 和 Thornthwaite 蒸散模型仅考虑热量,只需温度参数,Penman-Monteith 蒸散模型综合考虑热量和空气动力 2 个因子对潜在蒸散发的影响,虽然热量因子对潜在蒸散发的影响较大,但随着气候变暖,我国北方地区空气动力因子对总潜在蒸散发贡献增加^[23],采用 Penman-Monteith 较 Hargreaves 和 Thornthwaite 模型计算绥德地区潜在蒸散量月均值高 23.00 mm 和 56.25 mm,因此,在计算北方地区潜在蒸散发时,不可忽略热量和空气动力 2 个因子对潜在蒸发的影响,在气象资料完整的条件下,采用基于 Penman-Monteith 蒸散模型计算的干旱指数能够准确描述陕北黄土丘陵区干旱状况。

不同时间尺度气象因子对 SPEI-PM 影响的敏感性次序不同。在月、半年和年尺度上,气象因子对 SPEI-PM 敏感次序分别为 $T_m>RH>P>u>SD$ 、 $T_m>SD>P>u>RH$ 和 $RH>SD>P>T_m>u$ 。 T_m 在月和半年尺度上对 SPEI-PM 敏感性表现出最强,SD 在半年和年尺度上对 SPEI-PM 敏感性大小次序均位列第 2,即 T_m 在月和半年尺度上或 SD 在半年和年尺度上对 SPEI-PM 敏感性强弱不会随时间尺度发生变化,而其他气象因子对 SPEI-PM 敏感性显示出不同的时间尺度效应。此外,通过增减自变量观察直接间接作用发现,各气象因子与 SPEI-PM 之间并不是简单的相关关系,而是与其他因子共同作用直接或间接的影响着 SPEI-PM。

从干旱指数演变特征看,陕北黄土丘陵区干旱呈减弱趋势,干旱最大持续时发生在 2000 年,时长达 19 个月。此外,短时间尺度(1 和 6 个月)干旱指数值频繁波动;长时间尺度(12、18 和 24 个月)干旱指数值变化幅度小,而且变化周期长,反映干旱的年际演变特点。

参考文献:

[1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[J]. Drought A Global Assessment, 2000, 1: 3-18.
[2] SENEVIRATNE S I. Climate science: historical drought trends revisited[J]. Nature, 2012, 491(7424): 338-9.
[3] 邱海军,曹明明,郝俊卿,等. 1950—2010 年中国干旱灾情频率-规模关系分析[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 576-580.

QIU H J, CAO M M, HAO J Q, *et al.* Relationship between frequency and magnitude of drought damage in China in 1950-2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 576-580. (in Chinese)

[4] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11.

[5] 刘引鸽, 缪启龙. 西北地区农业旱灾与预测研究[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(4): 564-569.

[6] 肖军, 赵景波. 陕西省 54a 来农业干旱灾害特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(5): 201-204.

[7] 于玲玲, 成敏, 廖允成, 等. 马尔科夫链法在分析旱灾规律中的应用[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(5): 52-56.

YU L L, CHENG M, LIAO Y C, *et al.* Application of markov-chain in drought disaster[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(5): 52-56. (in Chinese)

[8] 乔丽, 江志红, 李青. Palmer 干旱指数与降水距平在陕西对比应用[J]. *陕西气象*, 2008(2): 9-12.

[9] RICHARD R, HEIM J. A review of twentieth-century drought indices used in the united states[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149-1165.

[10] 谭学志, 栗晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 224-229.

TAN X Z, SU X L, SHAO D G. Analysis of spatial and temporal characteristics of meteorological drought in guanzhong region of Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 224-229. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.

ZHOU D, ZHANG B, REN P G, *et al.* Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 677-688. (in Chinese)

[13] 贺音, 张聪娥, 张黎. 基于 SPEI 的陕西近 40 年干旱时空特性分析[J]. *陕西气象*, 2014(5): 26-32.

[14] SERGIO M V, BEGUERÍA S, JORGE L, *et al.* Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. *Earth Interactions*, 2012, 16(10): 1-27.

[15] BEGUERÍA S, VICENTE-SERRANO S M, FERGUS R, *et al.* Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited; parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3001-3023.

[16] 沈瑱, 曾燕, 肖卉, 等. 江苏省日照时数的气候特征分析[J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 425-429.

[17] 高志永, 汪有科, 周玉红, 等. 微观时间尺度气象因子影响露水量的通径分析[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(5): 12-18, 41.

GAO Z Y, WANG Y K, ZHOU Y H, *et al.* Path analysis on sensitivity of meteorological factors to dew amount in micro-scale[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(5): 12-18, 41. (in Chinese)

[18] 崔党群, 林德光. 通径分析的矩阵算法[J]. *生物数学学报*, 1994(1): 71-76.

[19] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 香港: 天马图书有限公司, 2004: 215-241.

[20] SENTELHAS P C, GILLESPIE T J, SANTOS E A. Leaf wetness duration measurement; comparison of cylindrical and flat plate sensors under different field conditons[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2007, 51(4): 265-273.

[21] MICHAEL H, MARK S, WILHITE D A. Monitoring drought using the standardized precipitation index [M]. London: Drought A Global Assessment, 2000: 168-180.

[22] THOMAS B M, NOLAN J D, JOHN K. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. Eight Conference on Applied Climatology, Anahaim, California, 1993: 179-184.

[23] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. *大气科学*, 2015, 39(1): 23-36.

(上接第 24 页)

[28] STARK S, MÄNNISTÖ M K, ESKELINEN A. Nutrient availability and pH jointly constrain microbial extracellular enzyme activities in nutrient-poor tundra soils[J]. *Plant & Soil*, 2014, 383(1/2): 373-385.

[29] TRASAR-CEPEDA M A C, GIL-SOTRES F. Kinetics of acid phosphatase activity in various soils of galicia (NW Spain) [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20(3): 275-280.

[30] SKOPP J, JAWSON M D, DORAN J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil-water content[J]. *Soilless Science Society of America Journal*, 1990, 54(Supp. 1): 1619-1625.

[31] DAKORA F D, PHILLIPS D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments[J]. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 201-213.

[32] NANNIPIERI P, KANDELER E, RUGGIERO P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil [M]. New York: Marcel Dekke Inc., 2002: 1-33.

[33] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P Stoichiometry in soil; is there a “redfield ratio” for the microbial biomass[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.

[34] 苏少华. 黄土高原丘陵区土壤磷素及其组成对植被恢复过程的响应[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2008.