

# 基于不同参考作物腾发量计算方法的 SPEI 干旱分析

## ——以赤峰地区为例

李英豪<sup>1</sup>, 陈涛涛<sup>1</sup>, 迟道才<sup>1</sup>, 金冶<sup>2</sup>, 张瑞<sup>3</sup>

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁东港市水利局, 辽宁 东港 118300; 3. 吉林农业科技学院, 吉林 吉林 132101)

**摘要:** 标准化降水蒸散指数(SPEI)通过参考作物腾发量( $ET_0$ )与降水的差值表征一个地区干湿状况, 是分析干旱演变趋势的一种具有多尺度、多空间特性的重要指标, 已广泛应用于干旱评估、水资源管理等领域。为了研究不同  $ET_0$  的计算方法对 SPEI 的影响, 根据内蒙古赤峰附近的 6 个气象站 56a 的逐日气象资料, 以 Penman-Monteith 法 (PM 法) 为标准, 分别对基于温度的 Thornthwaite 法 (TW 法) 和基于辐射的 Priestley-Taylor 法 (PT 法) 进行了多重对比分析。结果表明: 在干旱频率方面, 两种方法较 PM 法都低估了旱情。TW 法更接近 PM 法的计算结果。在多时间尺度干旱频率分析方面, PM 法在特旱和正常方面的频率在大部分时间尺度下大于其他两种方法, 而在重旱和干旱方面的频率小于其他两种方法。较 PM 法而言, TW 法和 PT 法对干旱的响应偏弱, 弱化了干旱等级。且随着时间尺度的增加, 3 种方法相互间大小规律整体不变。时间尺度大于 3 个月的情况下, 3 种方法 SPEI 间差异规律更为明显。在干旱历时方面, 两种方法与 PM 法无显著性差异。在平均干旱强度方面, PT 法显著低于 PM 法, 而 TW 法与 PM 法无显著性差异。PT 法低估了干旱强度, TW 法与 PM 法更为接近。U 检验表明 TW 法与 PM 法一致性最好, 在干旱历时和平均干旱强度方面, TW 法与 PM 法间一致性系数 (0.964, 0.353) 均高于 PT 法与 PM 法间的系数 (0.628, 0.279)。

**关键词:** Thornthwaite 法; Priestley-Taylor 法; Penman-Monteith 法; SPEI

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2018)06-0735-07

## Drought Analysis of SPEI Based on Different Evapotranspiration Evaluation Methods ——Taking Chifeng Area as An Example

LI Ying-hao<sup>1</sup>, CHEN Tao-tao<sup>1</sup>, CHI Dao-cai<sup>1</sup>, JIN Ye<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Donggang Water Conservancy Bureau, Donggang Liaoning 118300, China; 3. Jilin Agriculture Science And Technology College, Jilin Jilin 132101, China)

**Abstract:** The standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) is calculated by the deviation between reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) and precipitation for assessing the variability of dryness/wetness conditions. As an important index with the characteristics of multi-scalar and multi-spatial in evolution trend analysis, SPEI has been widely used in drought evaluation and water management. In order to evaluate the influence of different methods of  $ET_0$  calculation to SPEI, three commonly used methods were compared in accordance to datasets from 6 meteorological stations of Chifeng area in the Inner Mongolia province during the period of 1960 to 2015. The temperature and solar radiation as well as energy balance and turbulent diffusion-based Penman-Monteith method (PM method) was used as a standard method to make multiple comparative analysis with Temperature-based Thornthwaite method (TW method) and solar radiation-based Priestley-Taylor method (PT method), respectively. The results showed as followed: Compared with PM method, the other two methods underestimated drought. TW method is closer to PM method compared with PT method. Chi-square test showed the three methods were not significantly different when evaluating frequency of different drought degrees. Compared with PM method, TW method and PT method had a weak response to drought, thus weaken drought grade. With the increase of time scales, the quantity relationship between three methods of different drought degree remained generally unchanged. When time scales were more than 3 months, different methods of SPEI showed more clear regularity. When evaluating drought duration, the other two methods showed no significant difference with PM method. The

收稿日期: 2018-01-20

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项项目(201303125); 国家自然科学基金项目(51679142, 51709173); 辽宁省特聘教授基金项目(2013)

第一作者: 李英豪(1993-), 男, 博士研究生, 从事节水灌溉研究, E-mail: yinghao-li@syau.edu.cn

通信作者: 迟道才(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事灌溉排水理论与技术, E-mail: chidaocai@syau.edu.cn

average drought magnitude of PT method was significantly smaller than PM method, thus PT method underestimated the average drought magnitude. However, TW method was not significantly different from PM method. Mann-Whitney U test showed TW method is more consistent with PM method compared with PT method. Extreme drought and norm frequency of PM method were larger than the other two methods in most of the time scales, while heavy drought and drought frequency of PM method were much smaller than the other two methods. TW method had higher consistency with PM method (0.964, 0.354) compared with PT method and PM method (0.628, 0.279).

**Key words:** Thornthwait method; Priestley-Taylor method; Penman-Monteith method; SPEI

干旱是在一段时间内由于降水不足导致的一种水分亏缺现象<sup>[1]</sup>,是世界上普遍发生的一种气象灾害。干旱具有受害面积大、持续时间长、影响范围广、灾害程度重的特点,尤其对农业生产造成的危害最为严重<sup>[2]</sup>。东北地区是中国最大的商品粮基地和农业生产最具有发展潜力的地区。东北地区气候变化率较大,又是“典型的气候脆弱区”,干旱频发<sup>[3]</sup>。因此,对东北地区进行的干旱研究具有重要意义。在干旱发生的量化研究方面,学者们提出了多种干旱指数。这些指数大体上分为两类,一类是基于降水的单因子指数,另一类是基于降水以及其他气象要素的综合性指数<sup>[4]</sup>。前者以标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)为代表,但是在全球变暖的背景下,气温升高导致的蒸散发作用增强已不容忽视<sup>[5]</sup>。VICENTE-SERRANO 等<sup>[6]</sup>通过在 SPI 的基础上构建了新的气候指数 SPEI,适用于气候变暖背景下多尺度的干旱监测与评估。CHEN 等<sup>[7]</sup>对比分析了 SPEI 和 SPI 指数对辽宁地区的干旱研究,认为 SPEI 指数在判断和分析干旱情况时更为接近实际。有研究指出,在年降水量大于 200mm 的区域中, SPEI 指数能较好的反映区域干旱的监测情况<sup>[8]</sup>,因此用 SPEI 能够敏感地分析位于半干旱地区的赤峰地区干旱变化的时间特征及干旱演变状况。

$ET_0$  是 SPEI 计算中最重要的一个参数,而其计算公式繁多,依据对不同气象资料的偏重程度主要分基于温度的计算法、基于辐射的计算法以及综合计算法三大类<sup>[9]</sup>。尽管联合国粮农组织(FAO)推荐 PM 方法(属于综合法)为  $ET_0$  的标准计算方法<sup>[10-11]</sup>。但 PM 法需要大量气象参数,对于数据缺乏的地区,对数据资料要求少的方法如基于温度的计算法、基于辐射的计算法就显得尤为必要。TW 法(属于温度法)计算  $ET_0$  只需要月平均气温和纬度数据。而 PT 法(属于辐射法)在有气温和日照时数等资料时有着广泛应用<sup>[12]</sup>。为考虑全球变暖背景下干旱的变化特征, VICENTE<sup>[13]</sup>提出基于 TW 法的 SPEI 指数。SPEI 一经提出,便在干旱评估、水资源管理等领域得到广泛的应用。然而,基于 TW 法的 SPEI 指数,仅考虑温度项的影响,在计算  $ET_0$  时忽略了空气动力项和辐射项,而且针对冬季月平均气温小于 0℃的地区无法计算。因此,有必要研究探索其他使用较少气象资料的计算方法,如基于辐射法的 PT 法等对 SPEI 的影响。本研究从 SPEI 值的角度研究三类  $ET_0$  计算方法的差别,以期明确在表示赤峰地区干旱情况时不同方法的适用性,同时为该区域农业生产提供规划依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

赤峰地区位于内蒙古自治区的东部,东南与辽宁省朝阳市接壤。介于 41°17'~45°24'N 和 116°21'~120°58'E 之间。赤峰地区属于半干旱大陆性季风气候。冬季漫长而寒冷,春季干旱多大风,夏季短促炎热、雨水集中,秋季短促、气温下降快、霜冻降临早。大部分地区日照时效为 2800~3100h,日照百分率为 65%~70%。年平均降水量为 381mm,西北部降水较多,东部降水较少。太阳年总辐射量为 6062MJ·m<sup>-2</sup>,生理辐射为 2721MJ·m<sup>-2</sup>。东南部略高于西北部。无霜期从西北向东南递增,为 60~140d。赤峰地区有“十年九旱,年年春旱”的特点,干旱是当地发生最频繁,影响最重的气象灾害,尤以春旱发生频率最高,危害也最重。

### 1.2 数据来源

气象数据是由中国气象局东北区域气象中心提供。选取了赤峰站及其周边林西县站、翁牛特旗站、宝国吐站、朝阳站、建平站 6 个站点的气象数据。其中包括 1960~2015 年的每日最低、平均和最高气温,相对湿度,风速(10m 高度),日照时数,蒸发量和降水量。气象站分布图见图 1,各气象站基本气象条件见表 1。

### 1.3 SPEI 指数旱涝等级划分

SPEI 值计算的原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱<sup>[14]</sup>,是分析干旱

演变趋势的一种具有多尺度、多空间特性的重要指标,已广泛应用于干旱评估、水资源管理等领域。其计算过程详见文献<sup>[6]</sup>。前人对各干旱指数进行了干旱等级的划分,但关于 SPEI 干旱阈值目前还没有一个统一的标准。石崇等<sup>[15]</sup>结合 SPI 指数以及美国气候预报中心关于干旱等级划分的方法,提出了基于 SPEI 指数确定的干旱等级标准:特旱(SPEI 值 $\leq -2.0$ ),重旱( $-2.0 < \text{SPEI 值} \leq -1.5$ ),干旱( $-1.5 < \text{SPEI 值} \leq -1.0$ ),正常( $0 > \text{SPEI 值} > -1.0$ )。本研究参考其干旱等级划分标准。

SPEI 指数在干旱趋势的研究中具有可进行多尺度分析的特点(SPEI-1 表示计算该月 SPEI 时仅考虑当月的水分亏缺情况,SPEI-3 表示计算该月 SPEI 时考虑包括当月在内的之前 3 个月水分亏缺情况,SPEI-12 依次类推),适用于多尺度的干旱研究。

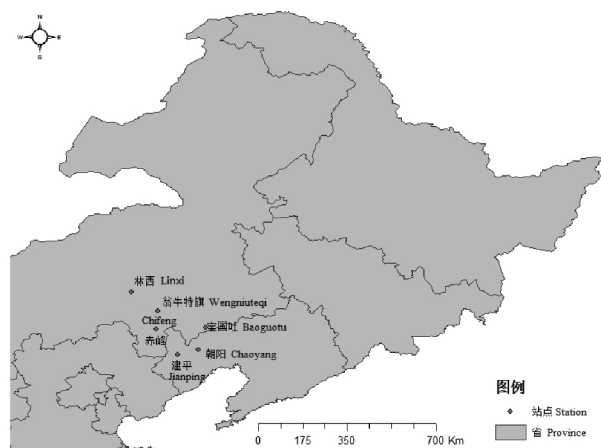


图 1 研究区气象站点分布图  
Figure 1 Map of meteorological stations distribution in research area

表 1 研究区气象站点基本气象条件  
Table 1 The base meteorological conditions of different meteorological stations

站名 Station name	经纬度 Latitude and longitude	日平均气温/ $^{\circ}\text{C}$ Daily mean temperature	年降水量/mm Annual precipitation	海拔/m Altitude	年 $ET_0$ /mm Annual $ET_0$
林西 Linxi	118°04'E,43°36'N	4.89	367.50	799.5	532.20
翁牛特旗 Wengniuteqi	119°01'E,42°56'N	6.43	347.81	634.3	613.44
赤峰 Chifeng	118°56'E,42°16'N	7.50	364.08	568.0	594.90
宝国吐 Baoguotu	120°42'E,42°20'N	7.32	409.66	400.5	632.33
朝阳 Chaoyang	120°27'E,41°33'N	9.14	469.94	169.9	698.71
建平 Jianping	119°42'E,41°23'N	8.57	462.30	420.0	516.98

#### 1.4 3 种 $ET_0$ 计算过程

方法 1: 基于温度的 TW 法, Vicente-Serrano 采用的是 Thornthwaite 法, 是当今使用最广泛的计算  $ET_0$  的方法。该方法为月尺度计算模型, 与 SPEI 计算的最小尺度相同, 所需气象资料为平均温度和纬度。该方法因未考虑风速、空气湿度等因素的影响而低估  $ET_0$ , 故该方法常与乘法系数结合使用以增加其相对值。具体计算公式为:

$$ET_0 = 16K \left( \frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为参考作物腾发量( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T$  为月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $I$  表示热量指数, 是基于月平均温度的式子:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

$M$  为一个基于  $I$  的因子, 计算公式为:

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (3)$$

$K$  为根据纬度和月份计算的校正系数, 计算公式为:

$$K = \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{NDM}{30} \right) \quad (4)$$

式中:  $NDM$  为每月的天数(d);  $N$  为日最大日照时数(h), 计算公式为:

$$N = \left( \frac{24}{\pi} \right) \omega_s \quad (5)$$

式中:  $\omega_s$  为日落时角(rad), 计算公式为:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (6)$$

式中:  $\varphi$  为纬度;  $\delta$  为太阳偏磁角(rad), 计算公式为:

$$\delta=0.409\sin\left(\frac{2\pi J}{365}-1.39\right) \quad (7)$$

式中:  $J$  为月平均天数。

方法 2: 基于辐射的 PT 方法是在假设周围环境湿润的前提下忽略了空气动力学项而得出的简化方程。该方法仅要求气温和日照时数等资料, 因此得到广泛应用。具体计算公式为其计算公式为:

$$ET_0=\frac{1.26}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G) \quad (8)$$

式中:  $\Delta$  为饱和水汽压温度曲线上的斜率( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  为太阳净辐射量( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $\gamma$  为湿度计常数( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $\lambda$  为水的气化潜热( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 计算公式为:

$$\lambda=2.501-0.002361T_{mean} \quad (9)$$

式中:  $T_{mean}$  为平均气温( $^\circ\text{C}$ )。

方法 3: PM 方法以能量平衡和水汽扩散理论为基础, 既考虑了空气动力学和辐射项的作用, 又涉及了作物的生理特征。1998 年联合国粮农组织推荐将其作为计算参考作物腾发量的唯一标准方法。具体计算公式为采用 FAO56 Penman-Monteith 方法:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\cdot\frac{900}{273+T_{mean}}\cdot u_2\cdot(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34\cdot u_2)} \quad (10)$$

式中:  $R_n$  为净辐射( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $u_2$  为距离地面 2m 高处风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $e_s$  为饱和水汽压( $\text{kPa}$ );  $e_a$  为实际水汽压( $\text{kPa}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱频率分析

2.1.1 针对 SPEI-1 干旱频率分析 干旱频率是指多年中干旱发生的频繁程度, 是描述干旱中非常关键的一个因素<sup>[16]</sup>。计算公式为:

$$P=\frac{n}{N}\times 100\% \quad (11)$$

式中:  $N$  为计算的数据序列数;  $n$  为数据序列中干旱发生的次数。

通常, 不同的水文、生态和农业系统采用不同的时间尺度进行研究。SPEI-1 值由于受到每月温度和水分变化的影响, 能更准确地反映土壤含水量的高低, 可适用于农业排水灌溉期的制定<sup>[20]</sup>。本研究主要针对农业的需要, 所以重点研究了 SPEI-1。以 PM 法为标准, 探讨另外两种方法得出的干旱频率的差异。由表 2 知, 两种方法在特旱和重旱频率方面均显著小于 PM 法。干旱频率方面两种方法与 PM 法均无显著性差异。TW 法在正常频率方面显著大于 PM 法。因此两种方法较 PM 法而言, 都低估了旱情。TW 法更接近 PM 法的计算结果。卡方检验是一种用途很广的计数资料的假设检验方法。它属于非参数检验的范畴, 主要是比较两个及两个以上样本率以及两个分类变量的关联性分析<sup>[17]</sup>。采用卡方检验对于不同干旱类型的频率 3 种方法是否具有一致性, 见表 3。统计量  $X^2=1.524$ , 小于临界值  $X(6)^2=12.592$ 。故认为通过卡方检验, 在评价不同干旱等级的频率时, 3 种方法是一致的。

表 2 3 种方法 SPEI-1 值的干旱频率方差分析  
Table 2 Variance analysis of drought frequency of SPEI-1 by three methods

	特旱/%	重旱/%	干旱/%	正常/%
	Extreme drought	Heavy drought	Drought	Norm
TW 法 TW method	1.09 <sup>b</sup>	3.32 <sup>b</sup>	9.85 <sup>b</sup>	36.68 <sup>a</sup>
PT 法 PT method	0.45 <sup>c</sup>	3.20 <sup>b</sup>	12.60 <sup>a</sup>	35.54 <sup>ab</sup>
PM 法 PM method	1.76 <sup>a</sup>	4.49 <sup>a</sup>	10.39 <sup>ab</sup>	33.15 <sup>b</sup>

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $p<0.05$ )。下同。

Note: Different characters mean significant difference between treatments ( $p<0.05$ ). The same below.

2.1.2 多时间尺度 SPEI 干旱频率分析 有研究表明干旱的频率、干旱历时和强度都是由时间尺度所影响的<sup>[11]</sup>。其他尺度干旱分类随时间尺度的变化见图 2。在特旱方面, PM 法所有时间尺度下频率都高于其他两种方法。在重旱和干旱方面, PM 法大部分时间尺度下频率低于其他两种方法。在正常方面, PM 法大部分时间尺度下频率高于其他两种方法。PM 法在特旱和正常方面的频率大于其他两种方法, 而在重旱和干旱方面的频率小于其他两种方法。说明, 较 PM 法而言, TW 法和 PT 法对干旱的响应偏弱, 弱化了干旱等级。且随着时间尺度的增加, 3 种方法相互间大小规律整体不变。时间尺度大于 3 个月的情况下, 3 种方法 SPEI 间规律更为明显。

表 3 3 种方法 SPEI-1 值的干旱频率卡方检验  
Table 3 Chi-square test of drought frequency of SPEI-1 by three methods

	特旱	重旱	干旱	正常	合计
	Extreme drought	Heavy drought	Drought	Norm	Total
TW 法 TW method	0.000	0.033	0.118	0.062	0.213
PT 法 PT method	0.387	0.074	0.182	0.002	0.645
PM 法 PM method	0.395	0.212	0.008	0.044	0.659
合计 Total	0.782	0.319	0.308	0.108	1.517

注:表中数据为  $\chi^2$  值。  
Note: Data in the table is  $\chi^2$  value.

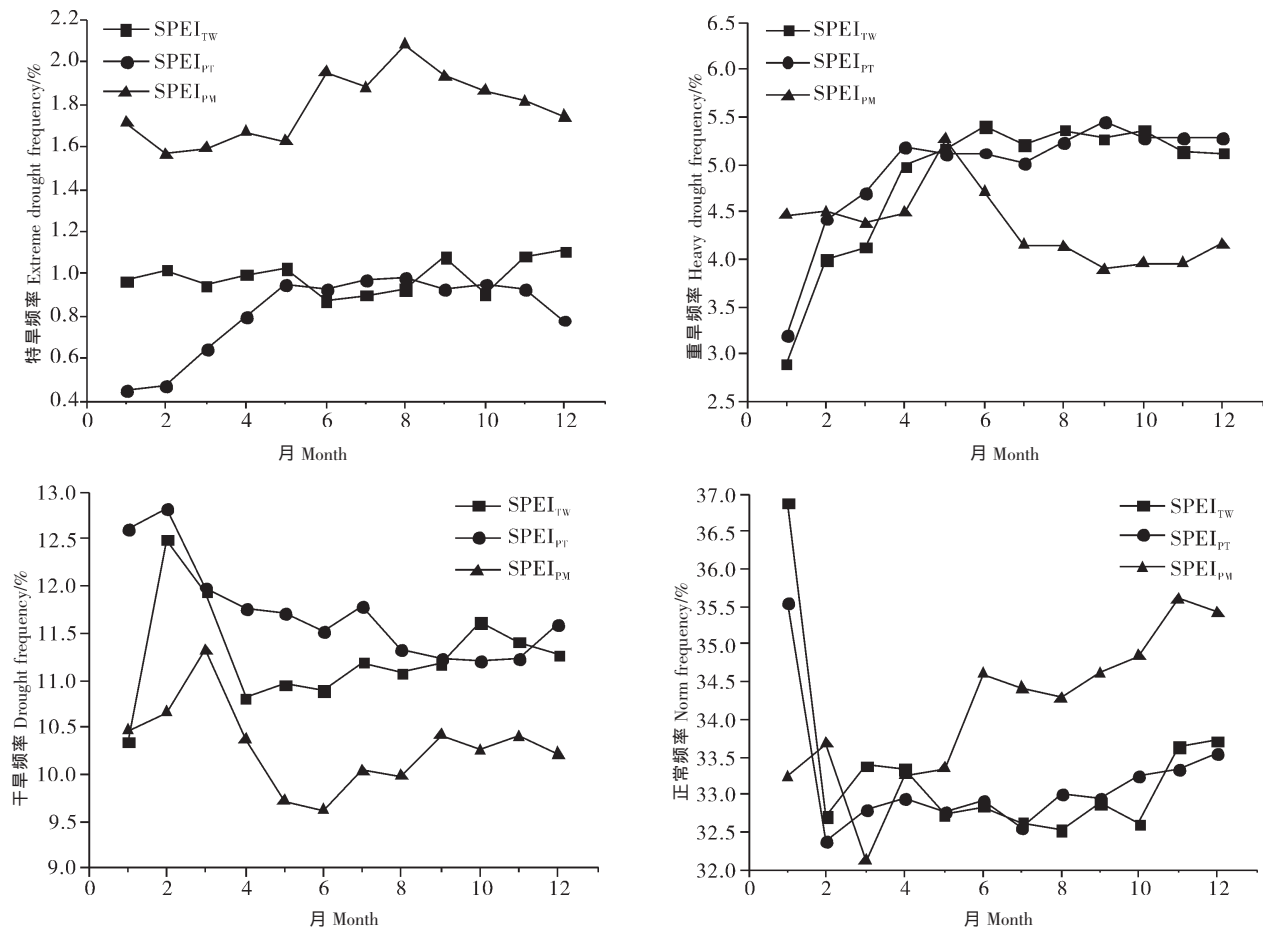


图 2 赤峰地区不同尺度下 3 种方法的不同干旱类型频率  
Figure 2 Different drought types frequency of different time scales in Chifeng area based on three methods

2.2 干旱历时和干旱强度分析

干旱定义本身就具有时间尺度的特性,一般认为水分亏缺持续一定时间,即发生干旱事件。根据本研究对干旱等级的划分,SPEI 值  $\leq -1$  时认为该月发生了干旱。干旱历时(D)是指 SPEI 值连续低于  $-1$  的最长持续时间(月),从 SPEI 值  $\leq -1$  时开始算起至 SPEI 值  $> -1$  时终止。干旱强度(S)是相同干旱历时的 SPEI 累计值<sup>[18]</sup>,计算公式为:

$$S = \sum_1^D \text{SPEI} \quad (12)$$

干旱历时是影响干旱剧烈程度和干旱损失的重要因素。表 4 是根据 3 种方法 SPEI-1 值统计的 56a 赤峰地区 6 个站不同干旱历时的次数和相同干旱历时内平均干旱强度的方差分析表。干旱历时均无超过 4 个月的情况。当历时为 1,2,3 个月时,3 种方法在平均干旱强度方面存在显著性差异。当历时为 4 个月时,由于 TW 法在所有站点均无此项,其他两种方法在大部分站点也无此项,故无法进行显著性比较。在干旱历时次数方面,两



种方法与 PM 法无显著性差异。平均干旱强度方面,PT 法均显著低于 PM 法,TW 法与 PM 法无显著性差异。说明 PT 法低估了干旱强度,而 TW 法与 PM 法更为接近。Mann-Whitney U 检验<sup>[19]</sup>是在非参数检验的基础上,针对独立非成对样本总体间是否存在显著差异而提出来的。由于在干旱历时为 4 个月时,干旱历时和干旱强度等存在空值,所以适合采用此检验。由表 5 得,所有值均大于 0.05,说明两种方法在干旱历时和干旱强度方面与 PM 法均无显著差异。比较而言,TW 法与 PM 法一致性最好。

表 4 3 种方法赤峰地区不同干旱历时及干旱强度方差分析  
Table 4 Variance analysis of different drought durations and drought magnitudes  
in Chifeng area of 3 methods

历时 Duration		1	2	3	4
干旱历时次数 Times of drought duration	TW 法 TW method	68.83 <sup>a</sup>	10.67 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>	0.17
	PT 法 PT method	77.67 <sup>a</sup>	11.00 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>	0.50
	PM 法 PM method	75.00 <sup>a</sup>	14.33 <sup>a</sup>	2.33 <sup>a</sup>	0.33
平均干旱强度 Mean drought magnitude	TW 法 TW method	-1.4515 <sup>b</sup>	-2.8895 <sup>ab</sup>	-4.1338 <sup>ab</sup>	-5.46361
	PT 法 PT method	-1.3266 <sup>a</sup>	-2.6196 <sup>a</sup>	-3.7264 <sup>a</sup>	-5.2628
	PM 法 PM method	-1.4515 <sup>b</sup>	-2.9359 <sup>b</sup>	-4.6722 <sup>b</sup>	-5.4202

表 5 赤峰地区不同干旱历时及平均干旱强度 3 种方法 Mann-Whitney U 检验  
Table 5 Mann-Whitney U test of different drought durations and mean drought magnitudes  
in Chifeng area of 3 methods

方法 Method	干旱历时 Drought duration	平均干旱强度 Mean drought magnitude
TW 法×PT 法 TW method × PT method	0.616	0.860
TW 法×PM 法 TW method × PM method	0.964	0.353
PT 法×PM 法 PT method × PM method	0.628	0.279

注:表中为 Mann-Whitney U 检验系数,均为极显著( $p<0.01$ )。

Note: Data in the table are Mann-Whitney U test coefficients, all are extremely significant( $p<0.01$ ).

### 3 讨论与结论

已有的研究多针对  $ET_0$  本身探讨不同方法的差异,且不同的研究地区,规律不一致。罗健等<sup>[21]</sup>在华北地区对  $ET_0$  的研究表明,辐射法要整体优于温度法,两类方法共同特点是在夏季月份  $ET_0$  比 PM 法偏高,其他季节尤其冬季偏低。刘珂等<sup>[22]</sup>研究表明 TW 法对于月平均气温小于 0 的月份  $ET_0$  计算为 0,因此低估了冬春季的旱情。这与本研究赤峰地区情况类似,但赤峰地区 TW 法和 PM 法 SPEI 的一致性较强,干旱频率、干旱历时和强度方面均无显著性差异,说明对于赤峰地区冬春季节  $ET_0$  的计算偏差不足以显著性影响 SPEI 干旱分析。范丽萍等<sup>[23]</sup>在西安地区的研究表明 PT 法  $ET_0$  与 PM 法表现出相同的变化趋势,但两种方法的数值相差很大,特别是在夏季温度高,相对湿度小的情况;而谢平等<sup>[24]</sup>在广东湛江地区的研究表明 PT 法  $ET_0$  与 PM 的相关性夏季较好。两者在对夏季的  $ET_0$  研究结论不一致,原因可能是 PT 法主要适用于湿润地区,空气动力项在净辐射中所占比例是影响 PT 法在干旱条件下应用好坏的重要决定因素。谢平等<sup>[24]</sup>研究表明 PT 法的  $ET_0$  年均值都显著大于 PM 法。这与本研究结果 PT 法的  $ET_0$  小于 PM 法的结论不一致,原因可能是由于研究地区不同,气候差异大,尤其是温度项差异较大所致。

本研究结果表明,在干旱频率方面,两种方法较 PM 法都低估了旱情,造成这种差异的原因是两种方法对  $ET_0$  的计算值都偏小,导致水分亏缺程度轻。TW 法更接近 PM 法的计算结果;在干旱历时方面,两种方法与 PM 法无显著性差异,在平均干旱强度方面,PT 法显著低于 PM 法,而 TW 法与 PM 法无显著性差异。因此在计算 SPEI 时,许多 PM 法判断为干旱的月份用 PT 法却判断为正常,同时对许多干旱月份 SPEI 值的计算偏小,弱化了干旱等级的同时也弱化了干旱发生月份干旱强度。因此,PT 法低估了平均干旱强度。U 检验表明 TW 法与 PM 法一致性最好;在时间尺度方面,PM 法在特旱和正常方面的频率在大部分时间尺度下大于其他两种方法,而在重旱和干旱方面的频率小于其他两种方法。随着时间尺度的增加,3 种方法频率间大小规律整体不变。

综上所述,一方面 PT 法需要的资料要多于 TW 法,并且实测辐射资料难以获得,需要通过日照时数以及当地纬度计算而得,使得该方法的计算要较温度法复杂一些。另一方面 TW 法相对 PT 法而言描述赤峰地区干旱情况更为准确。所以,推荐采用 TW 法 SPEI 以研究赤峰地区干旱情况。

#### 参考文献:

- [1] THOMAS B, MCKEE, NOLAN J, et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993: 17–22.
- [2] 迟道才, 王子凰, 陈涛涛, 等. ARIMA 和蒙特卡洛方法在预测降水量中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(2): 187–191.
- [3] 梁 丰, 刘丹丹, 王婉昭, 等. 基于 SPEI 的中国东北地区 1961–2014 年干旱时空演变[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 148–156.
- [4] 卫 捷, 陶诗言, 张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(7S): 91–99.
- [5] DAI A. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45–65.
- [6] VICENTE S S M, BEGUERIA S, LOPEZ M J I. A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [7] CHEN T T, XIA G M, CHI D C, et al. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China[J]. Sustainability, 2016, 8(10): 1–16.
- [8] 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.
- [9] 曹金峰, 李玉中, 刘晓英, 等. 四种参考作物蒸散量综合法的比较[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 428–436.
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[J]. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1998, 300(9): 1–15.
- [11] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 5–9.
- [12] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley–Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 32–36.
- [13] VICENTE S S M, BEGUERIA S, LOPEZ M J I, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interact. 2012, 16(10): 1–27.
- [14] 李伟光, 侯美亨, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 84–90.
- [15] 石 崇, 刘晓东. 1947–2006 年东半球陆地干旱化特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1691–1701.
- [16] 赵 林, 于家烁, 薄 岩, 等. 基于 SPEI 的湖北省近 52 年干旱时空格局变化[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1230–1237.
- [17] PEARSON K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling [M]. Breakthroughs in Statistics. Springer New York, 1992: 11–28.
- [18] JANGA R M, POULOMI G. Application of copulas for derivation of drought severity – duration – frequency curves[J]. Hydrological Processes, 2012, 26: 1672–1685.
- [19] GRAEME D R. The unequal variance t –test is an underused alternative to Student’s t –test and the Mann–Whitney U test[J]. Behavioral Ecology, 2006, 17(4): 688–690.
- [20] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1547–1558.
- [21] 罗 健, 荣艳淑. 几种潜在蒸散量经验公式在华北地区的应用评价[OL]. 中国科技论文在线, 2007. <http://www.paper.edu.cn>
- [22] 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.
- [23] 范丽萍, 贾忠华, 罗 玕, 等. 西安地区 Priestley–Taylor 和 Hargreaves 方法应用比较[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(2): 53–61.
- [24] 谢 平, 陈晓宏, 刘丙军. 湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 6–9.

[责任编辑 亓 国]