

四川省不同 SPEI 指数计算方法适用性评价

康银红¹ 王嘉驰¹ 宋鑫^{1,2} 武剑飞³ 贺帅¹

(1. 四川农业大学水利水电学院, 雅安 625014; 2. 四川省绵阳市涪城区农业农村局, 绵阳 621000;
3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

摘要: 为探究不同参考作物腾发量(ET_0)算法及相应标准化降水蒸散指数(SPEI)在四川省的适用性,针对四川省3个区域(川西高原、川西南山地和川中盆地),利用34个气象站点1967—2016年的气象资料,以Penman-Monteith(PM)法计算的 ET_0 为标准,对FAO-24 Radiation(FAO-Ra)、Priestley-Taylor(PT)、Makkink(MK)、Hargreaves-Samani(HS)、Blaney-Criddle(BC)、World Meteorological Organization(WMO)、Rohwer(Ro)7种方法的 ET_0 计算结果进行比较,并选取其中综合表现较好的3种方法进行相应的SPEI计算。通过时间序列分析、误差分析、K-S检验及小波分析等方法,探讨各区域不同 ET_0 算法下的SPEI适用性。结果表明:7种方法在不同区域计算精度差异显著,在川西高原及川西南山地,PT法均方根误差(RMSE)均在99.11 mm以下,大部分气象站点的相对误差(RE)介于-3.8%~14.2%之间,适用性最好;MK、Ro法在3个区域的表现均较为稳定。基于PM、MK、Ro、PT 4种方法计算得到的SPEI在同一区域变化趋势一致,在有实际旱情的年份,其最小值均低于0,能够识别历史干旱事件。SPEI_PT和SPEI_PM具有最相似的周期振荡变化,SPEI_Ro和SPEI_PM的周期差距最大。1个月时间尺度的SPEI相关性比3、12个月时间尺度好,在1个月时间尺度下,SPEI_MK与SPEI_PM有更好的相关性,相关系数达到0.99, RMSE仅为0.15。在数据缺失条件下,SPEI_MK可以作为SPEI_PM的替代,该方法可为四川省的干旱监测和防控提供理论依据。

关键词: 参考作物腾发量; 标准化降水蒸散指数; 时空分布; 适用性分析; 泰勒图

中图分类号: P426.616; S166 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)06-0340-10 OSID: 

Application Evaluation of Different SPEI Index Calculation Methods in Sichuan Province

KANG YinHong¹ WANG Jiachi¹ SONG Xin^{1,2} WU Jianfei³ HE Shuai¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China
2. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Fucheng District, Mianyang 621000, China
3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Drought episodes have become the main natural hazards all over the world, resulting in a serious limitation to agricultural production. Based on the daily meteorological data of 34 meteorological stations in Sichuan Province from 1967 to 2016, the reference crop evapotranspiration (ET_0) was calculated by comparing the Penman-Monteith method (PM) and seven simplified ET_0 methods. The simplified ET_0 methods included Hargreaves-Samani (HS) method, Blaney-Criddle (BC) method, Priestley-Taylor (PT) method, Makkink (MK) method, FAO-24 Radiation (FAO-Ra) method, Rohwer (Ro) method and World Meteorological Organization (WMO) method. The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated based on PM and the three ET_0 methods with better performances. To obtain the best calculation methods and assess its adaptability, Sichuan Province was divided into three regions, such as western plateau, southwestern mountain, and central Sichuan basin. The applicability of corresponding SPEI was evaluated with different ET_0 methods in each region by time series analysis, error analysis, K-S test and wavelet analysis. The results showed that there were significant differences in the calculation accuracy of seven methods in different regions. The PT method had the best applicability in western plateau and southwestern mountain although the root

mean square error (RMSE) of PT method was below 99.11 mm and the relative error (RE) of most sites was $-3.8\% \sim 14.2\%$. The MK and Ro methods had the stable performances in three regions since the RMSE of both were below 160 mm. The SPEI calculated on the basis of PM, MK, Ro and PT ET_0 methods had the same trend in the same region. In the year with actual drought event, the minimum values of SPEI were less than 0 so it can identify historical drought events. SPEI_PT and SPEI_PM had the most similar periodic oscillation changes, and the periodic gap between SPEI_Ro and SPEI_PM was the largest. The SPEI correlation at 1-month timescale was better than that at 3-month and 12-month timescales. There was the best correlation between SPEI_MK and SPEI_PM at 1-month timescale, with the correlation coefficient (r) of 0.99 and RMSE of 0.15. Therefore, SPEI_MK can be used as an alternative to SPEI_PM under the condition of missing data. This research can provide a theoretical evidence for drought monitoring and mitigation in Sichuan Province, and it can also give a reference for research in other areas.

Key words: reference crop evapotranspiration; standardized precipitation evapotranspiration index; temporal and spatial distribution; applicability analysis; Taylor diagram

0 引言

干旱是一个地区由于长期降水与蒸散收支不平衡导致水分异常短缺而产生的自然灾害,具有发生频率高、影响范围广、持续时间长等特点,不仅会给当地农业等部门带来直接经济损失,也会对水资源、土地资源及社会资源造成间接影响^[1]。因此,加强干旱研究有助于减轻干旱造成的危害。目前,干旱研究大多基于干旱指数进行^[2-4]。干旱指数能够有效反映地表的干湿情况,是监测、评估干旱的重要参数,也是旱灾研究的基础。因此,开展干旱指数适用性评估,对于干旱预警及资源保护具有重大意义^[5]。

目前干旱评价指标主要有帕默尔干旱指数(PDSI)^[6]、标准化降水指数(SPI)^[7]、标准化降水蒸散指数(SPEI)^[8]等。其中 PDSI 指数虽然考虑了温度对干旱的影响,适用全球变暖背景下的干旱研究,但其时间尺度固定,难以表征短期干旱^[9]。相较于 PDSI 指数,SPI 指数能够在不同空间和时间尺度上评估干旱,但其仅考虑了降水作用,并未考虑蒸散的影响。SPEI 指数综合了前两种指数的优点,不仅可以反映多时间尺度的干湿情况,还通过引入参考作物腾发量(ET_0)评估了其他气象因素对干旱的影响,能更加客观地描述地表干湿变化,适用于气候变暖背景下干旱特征的分析,在国内外应用广泛^[10-12]。

由于 ET_0 的计算精度会影响 SPEI 指数的干旱监测能力,因此在利用 SPEI 监测干旱前,需要考虑 ET_0 的计算精度。Penman-Monteith (PM) 法^[13]是联合国粮农组织 (FAO) 推荐使用的 ET_0 计算方法,具有较高的权威性和准确性。由于 PM 法计算 ET_0 时,需要大量气象参数,对站点的要求较高,所以在某些资料匮乏的地区难以得到有效应用^[14-16]。为此,学者们提出了许多 ET_0 简化算法,但这些方法都

有特定的适用条件,计算 ET_0 时,需要根据不同地区实际情况选用^[17]。目前,针对不同 ET_0 计算方法适用性的研究较多,然而考虑不同 ET_0 算法对 SPEI 影响的研究还相对较少。因此,有必要厘清不同 ET_0 计算方法的适用性及其对 SPEI 的影响。

四川省水资源分布差异显著,区域降水不均、地势复杂,容易发生区域性、季节性干旱。近年来,由于受到全球气候持续变暖的影响,四川省干旱强度及频率有增长趋势^[18]。特别是 2022 年 7 月 28 日—8 月 22 日,持续高温事件综合强度为 1961 年有完整气象观测记录以来最强,部分地区旱情严重,农作物减产,群众饮水困难。因此需要选择适宜的 SPEI 指数对区域降水不均、地势复杂、容易发生干旱的四川省进行准确的干旱监测与评估,并较为准确地研究当地的干旱时空分布情况。本文以 PM 法计算的 ET_0 为标准,通过误差分析、空间插值等方法比较 7 种不同方法的 ET_0 计算结果,并选取其中表现较好的 3 种方法计算得到其对应的 SPEI 指数,通过理论验证、泰勒图等方法找出适合四川省不同时间尺度和不同区域的 SPEI 指数,为全球气候变暖背景下四川省的干旱监测和防控提供理论依据。

1 研究区概况

研究区为四川省 ($26^{\circ}03' \sim 34^{\circ}19'N, 97^{\circ}21' \sim 108^{\circ}33'E$),地形地貌复杂多样,东部为盆地,西部为青藏高原,地势西高东低。根据四川省地形特征将研究区分为川西高原、川西南山地和川中盆地(图 1)。该区地处亚热带,受地理位置及地形条件影响,区域气候差异显著。川中盆地属于亚热带季风气候,气温高、湿度大;川西南山地为亚热带半湿润气候区,气温高、雨量少;川西高原为典型的高原气候,气候立体变化明显。省内水资源丰富,年平均降

水量在 1 000 mm 以上,但区域水资源分布差异显著,降水多集中在夏季,冬春季雨量稀少。

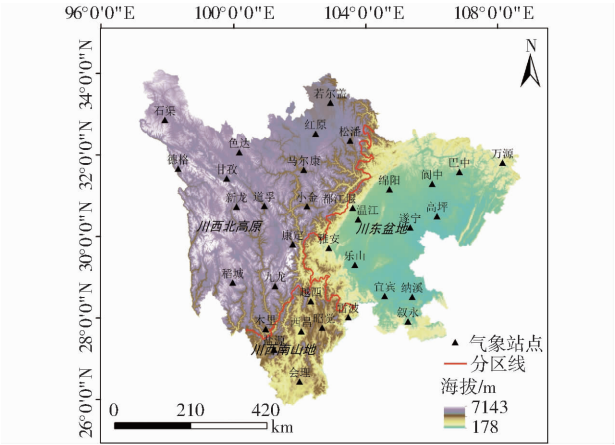


图 1 四川省地形图
Fig. 1 Topographic map of Sichuan Province

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

所需的气象数据主要包括四川省 34 个气象站点 1967—2016 年的平均相对湿度、日照时数、日最高气温、日最低气温、日平均气温、日降水量、高度

10 m 处风速等。数据来自中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(<http://data.cma.cn>),选取的气象站点资料质量控制良好,对资料中部分气象站点的缺失数据通过同时期的临近站点插补处理。四川省历年来的实际旱情数据和相关描述来源于中国气象局国家气候中心(<https://cmdp.ncc-cma.net/>)、《中国气象灾害大典》(四川卷)^[19]、《四川水旱灾害》^[20]等相关统计资料。

2.2 研究方法

2.2.1 ET₀计算方法

本文采用 8 种常用的 ET₀ 计算方法,分别为标准综合算法 PM 法^[13];辐射法中的 FAO-24 Radiation(FAO-Ra)法^[21]、Priestley-Taylor (PT) 法^[22]以及 Makkink (MK) 法^[23];温度法中的 Hargreaves-Samani (HS) 法^[24]和 Blaney-Criddle (BC) 法^[25];物质传输法中的 WMO (World Meteorological Organization) 法^[26]和 Rohwer (Ro) 法^[26]。各计算方法见表 1。通过各方法计算得到 1967—2016 年的日 ET₀,然后将 1—12 月的日 ET₀ 求和作为当年 ET₀,各区域的 ET₀ 由相应区域内各站点的平均值来表示。

表 1 ET₀计算方法

Tab. 1 Calculation methods of reference crop evapotranspiration

类型	方法	计算公式
标准法	Penman-Monteith (PM)	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma_1 \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_1 (1 + 0.34u_2)}$
	Hargreaves-Samani (HS)	$ET_0 = c(T_{max} - T_{min})^e (T_{mean} + t) R_a / \lambda \quad (c = 0.0023, e = 0.5, t = 17.8)$
温度法	Blaney-Criddle (BC)	$ET_0 = kp(0.46T_{mean} + 8.13) \quad (k = 0.85)$
	Priestley-Taylor (PT)	$ET_0 = \alpha_1 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma_1} (R_n - G) / \lambda \quad (\alpha_1 = 1.26)$
	Makkink (MK)	$ET_0 = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma_1} \frac{R_s}{2.45} + b \quad (a = 0.61, b = -0.12)$
辐射法	FAO-24 Radiation (FAO-Ra)	$ET_0 = a + b \frac{\Delta}{\Delta + \gamma_1} R_s$ $b = 1.066 - 0.0013RH_{mean} + 0.045u_2 - 0.0002RH_{mean}u_2 - 0.000031RH_{mean}^2 - 0.001u_2^2 \quad (a = -0.3)$
	Rohwer (Ro)	$ET_0 = (m + nu_2)(e_s - e_a) \quad (m = 3.3, n = 0.891)$
物质传输法	World Meteorological Organization (WMO)	$ET_0 = (m + nu_2)(e_s - e_a) \quad (m = 1.298, n = 0.934)$

注:Δ 为饱和水气压曲线斜率,kPa/℃;R_n为作物表面净辐射,MJ/(m²·d);G 为土壤热通量,MJ/(m²·d);γ₁ 为湿度常数,kPa/℃;λ 为气化潜热,取 2.45 MJ/kg;p 为日昼时数占全年昼长时数百分比,%;u₂ 为高度 2 m 处的风速,m/s;e_s 为饱和水气压,kPa;e_a 为实际水气压,kPa;T_{max}、T_{min} 为最大、最小温度,℃;T、T_{mean} 为空气温度、平均温度,℃;RH_{mean} 为平均相对湿度,%;R_a 为太阳天顶辐射,MJ/(m²·d);R_s 为太阳短波辐射,MJ/(m²·d)。

2.2.2 SPEI 计算方法

利用四川省 34 个气象站点的逐月降水量和 ET₀ 计算 1、3、12 个月时间尺度的 SPEI (SPEI1、SPEI3、SPEI12),12 个月时间尺度的 SPEI 用来进行年际分析,其中第 12 个月 SPEI 被用来监测当年

的干旱状况。以 PM 公式为例,所对应的 SPEI 表示为 SPEI_{PM}。

SPEI 计算过程如下^[8,27]:

首先计算逐月降水量与参考作物腾发量的差值 D_i,计算式为

$$D_i = P_i - ET_0 \tag{1}$$

式中 i ——月数 P_i ——逐月降水量,mm

ET_0 ——月参考作物腾发量,mm

再采用三参数的 log - logistic 概率密度函数对 D_i 数据序列进行拟合,计算式为

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

式中 α ——尺度参数

β ——形状参数

γ ——位置参数

3 个参数可以通过线性矩方法拟合获得。通过概率密度函数得到 D_i 数据序列的累计概率函数,计算式为

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

对 D_i 数据序列的累计概率函数进行正态标准化处理,并求得 SPEI 指数。计算式为

$$P = 1 - F(x) \tag{4}$$

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (P \leq 0.5) \tag{5}$$

其中 $W = \sqrt{-2 \ln P}$

$$SPEI = - \left(W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right) \quad (P > 0.5) \tag{6}$$

其中 $W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)}$

式中系数 $c_0、c_1、c_2、d_1、d_2、d_3$ 分别为 2.515 517、0.802 853、0.010 328、1.432 788、0.189 269、103.66 mm。

四川省各区域 ET_0 计算结果见图 2。由图 2 可知,在川西高原,PM 法多年平均 ET_0 为 931.89 mm,最大值为 977.82 mm,最小值为 882.21 mm。FAO - Ra 法、PT 法、BC 法、HS 法均高估了 ET_0 ,其中 FAO - Ra 法偏差较大,多年 ET_0 变化范围为 1 067.21 ~ 1 195.46 mm,相比 PM 法偏高 166.33 ~ 234.92 mm,PT 法与 PM 法表现出较好的吻合度,多年均值偏差为 72.92 mm,偏差较小;HS 法、BC 法均值则分别偏大 104.26、71.30 mm;MK 法、WMO 法均低估了 ET_0 ,其中 WMO 法偏低较多,偏差范围为 418.57 ~ 483.04 mm,MK 法则偏低 88.78 ~ 151.09 mm;Ro 法年际变化不稳定,多年均值比 PM 法偏低 103.66 mm。

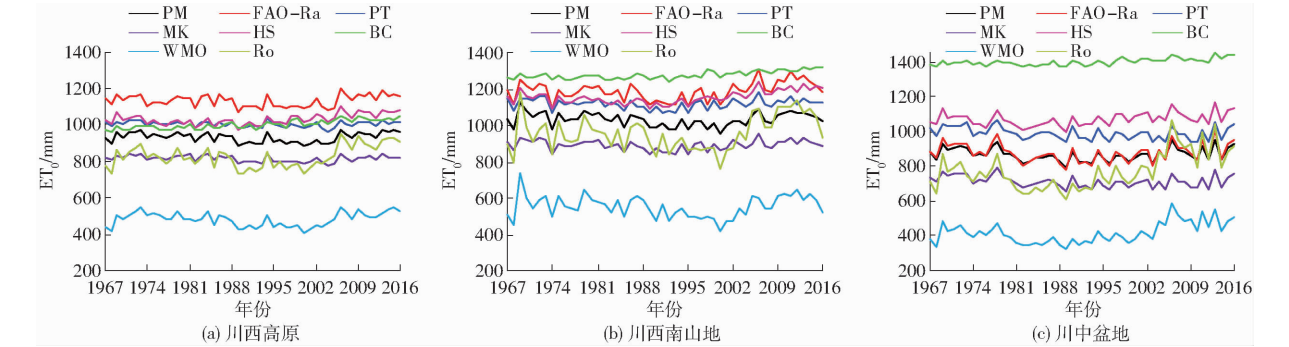


图 2 四川省各区域 ET_0 计算结果

Fig. 2 Calculation results of ET_0 in each region of Sichuan Province

在川西南山地,PM 法多年平均 ET_0 为 1 036.46 mm,最大值为 1 132.88 mm,最小值为 963.02 mm。BC 法在川西南山地计算值最高,多年 ET_0 变化范围为 1 245.12 ~ 1 322.58 mm,相比 PM 法偏高 158.46 ~ 322.44 mm,偏差较大;FAO - Ra 法、HS 法、PT 法与 PM 法年际变化趋势一致,但 FAO - Ra 法出现了较大的偏差,多年均值比 PM 法偏高 155.01 mm,HS

法、PT 法多年均值则分别偏高 121.71、86.44 mm;MK 法、WMO 法同样低估了 ET_0 ,其中 WMO 法偏低最多,为 392.82 ~ 546.74 mm,MK 法则偏低 98.25 ~ 198.18 mm;Ro 法年际变化不稳定,多年均值比 PM 法偏低 75.23 mm。

在川中盆地,各方法计算得到的 ET_0 差异显著。PM 法计算得到的多年平均 ET_0 为 866.38 mm,最大

值为 953.31 mm,最小值为 795.47 mm。PT 法、HS 法、BC 法均比 PM 法计算值高,尤其 BC 法多年 ET_0 变化范围在 1 369.22 ~ 1 451.76 mm 之间,相比 PM 法偏高 469.30 ~ 594.48 mm,精度最差。PT 法、HS 法与 PM 法年际变化基本一致,多年平均 ET_0 较 PM 法分别偏高 123.73、203.68 mm;辐射法中的 FAO - Ra 法与 PM 法计算值最为接近,变化趋势一致,其多年平均 ET_0 为 876.75 mm,偏差范围在 -19.86 ~ 60.15 mm 之间,计算结果最优;MK 法、WMO 法的 ET_0 均比 PM 法偏低,其中 WMO 法低估程度明显较大,偏差范围为 363.35 ~ 504.46 mm,在该地区适用性最差,MK 法则偏低 155.10 mm;Ro 法年际变化不稳定,多年均值比 PM 法偏低 93.39 mm。

3.2 ET_0 计算方法误差

利用 RMSE 来评价四川省各简便方法年 ET_0 差异。各方法在不同区域误差变化见图 3。从图 3 来看,在川西高原,PT 法和 BC 法表现出较好的计算精度,RMSE 均在 76.93 mm 以下;HS 法、Ro 法、MK 法的 RMSE 在 102.09 ~ 116.62 mm 之间,FAO - Ra 法的 RMSE 高达 200.59 mm;WMO 法计算精度最差,RMSE 为 448.25 mm。川西南山地 PT 法和 Ro 法的 RMSE 低于 99.11 mm,计算结果较好,其次为 HS 法、FAO - Ra 法、MK 法,RMSE 变化范围在 125.13 ~ 157.09 mm 之间,BC 法、WMO 法均表现出较大的误差,其中 WMO 法的 RMSE 为 479.90 mm,精度最差。在川中盆地,FAO - Ra 法 RMSE 最小,仅为 18.66 mm,其次为 Ro 法、PT 法、MK 法、HS 法,RMSE 变化范围为 123.62 ~ 204.74 mm,WMO 法和 BC 法误差较大,RMSE 均在 454.08 mm 以上。

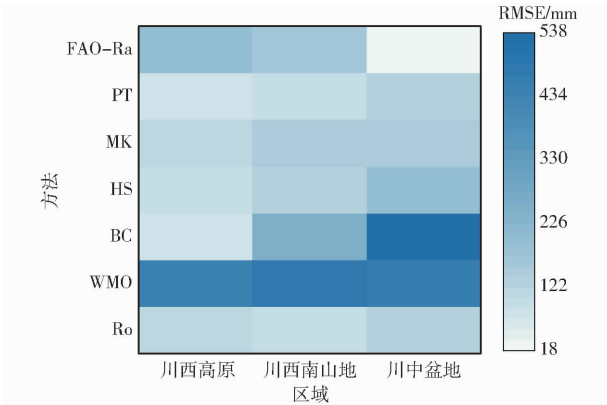


图 3 四川省各区域 ET_0 计算方法的 RMSE

Fig. 3 RMSE of ET_0 calculation methods in each region of Sichuan Province

利用 ArcGIS 中的克里金插值法对四川省 34 个气象站点年 ET_0 的 RE 进行空间插值(图 4),分析不同方法在四川省的空间适用性。

由图 4 可以看出,在川西高原,PT 法的适用性最好,大部分气象站点的 RE 介于 -3.8% ~ 14.2% 之间,只有高原北部的色达、若尔盖及红原一带的 RE 相对较大,在 16.8% ~ 19.3% 间变化。而 WMO 法的 RE 最差,在整个川西高原地区都低估较多,各站点低估区间为 -65.1% ~ -25.7%,其中北部的若尔盖、红原、色达及石渠地区更是低估 -58.4% 以上,适用性最差。在川西南山地,PT 法的适用性仍然最好,除了昭觉和雷波的 RE 在 15.2% 左右外,其余站点 RE 仅在 -1.3% ~ 13.3% 变化;而 WMO 法在整个川西南地区都低估较多,各站点相对低估 -64.5% ~ -28.7%,计算精度最差。在川中盆地,FAO - Ra 法的适用性最佳,除了巴中的 RE 高于

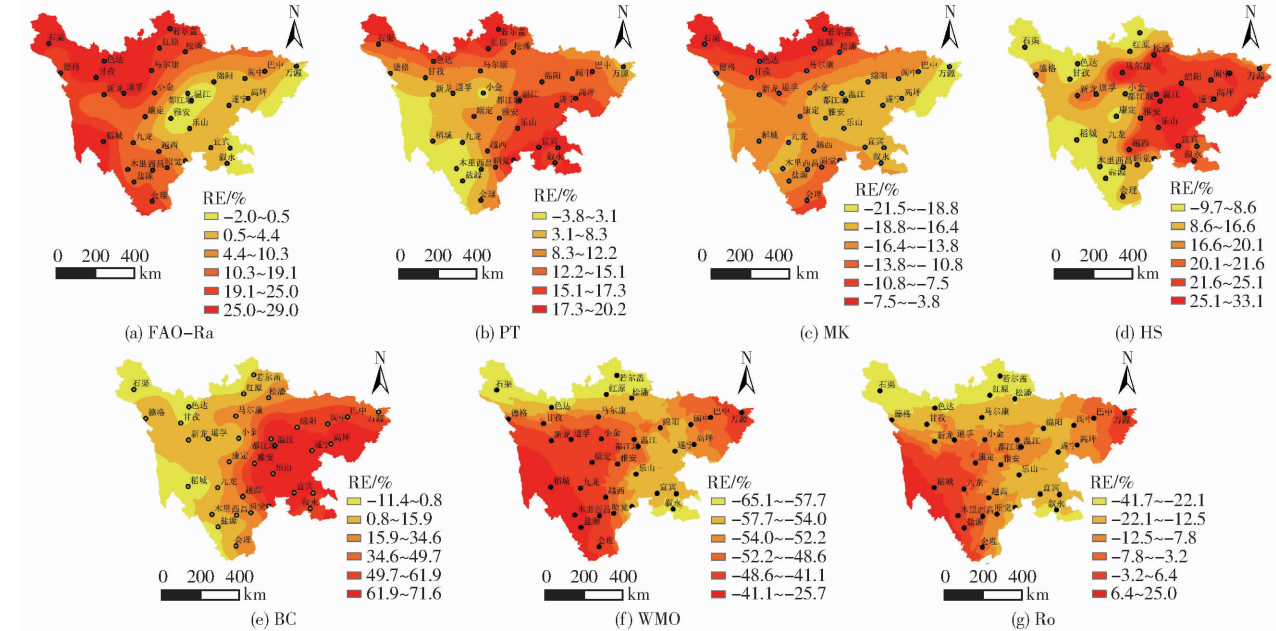


图 4 四川省各区域 ET_0 的 RE 空间分布

Fig. 4 RE spatial distributions of ET_0 in each region of Sichuan Province

6.4% 外,其余各站点的 RE 都相对较小,介于 $-2.2\% \sim 3.3\%$ 之间,而 WMO 法在整个川中盆地都低估较多,除了万源和雅安外,其余各站点均低估 $-62.6\% \sim -48.1\%$,评价效果最差。

由于四川省不同地区存在气候差异,导致各方法在不同地区应用时差异较大。HS 法在纬度较低、平均温度高、辐射强的川西南山地 ET_0 最大,这与 HS 法主要考虑平均温度和昼夜温差影响,同时利用太阳天顶辐射进行计算有关。BC 法随着区域海拔降低,其数值逐渐偏大,这与区域海拔降低,气温逐渐升高有关。PT 法忽略了空气动力学项,仅考虑了辐射项,在四川省 3 个区域均高估了 ET_0 ,这与符娜等^[28]对云南地区进行研究得出 PT 法高估 ET_0 的结论一致。由于忽略了土壤热量, MK 法在四川省 3 个区域均低估了 ET_0 。RAHIMIKHOOB 等^[29]对伊朗北部 8 个气象站点研究也发现, MK 法在所有站点均低估了 ET_0 ,左德鹏等^[30]、李志^[31]也得出类似结论。在湿润的川中盆地, FAO-Ra 法的 ET_0 计算值最接近 PM 法,这是因为 FAO-Ra 法在湿润区的计算效果较优。NANDAGIRI 等^[32]评价了印度 4 个不同气候区的

气象站点逐日 ET_0 ,发现 FAO-Ra 法在湿润区的计算效果优于干旱区。樊军等^[33]的研究也表明 FAO-Ra 法在半干旱地区估算 ET_0 较差。Ro 法与 WMO 法同属于物质传输法,其计算精度对使用的参数变化非常敏感^[26]。尽管 Ro、WMO 法在 3 个区域计算结果一致偏小,但 Ro 法偏差较小, WMO 明显偏差较大,这说明 Ro 法的初始参数在四川省具有较好的适用性,而 WMO 法的参数需要根据天气情况进行调整。

从各项误差指标来看, MK、Ro 法在四川省 3 个区域的表现较为稳定, PT 法在川西南山地和川西高原均表现出较低的误差, WMO 法在各区域适用性最差,综合考虑,选取 PT、MK、Ro 3 种简便方法计算的 ET_0 进行 SPEI 分析。

3.3 基于不同 ET_0 计算方法的多尺度 SPEI 适应性

3.3.1 SPEI 指数理论验证

计算 SPEI 指数的前提是降水量和蒸散量之差 (D_i) 服从三参数对数逻辑分布。因此,在计算指数之前,本文通过 K-S 检验和 NSE 检验探究四川省各气象站点的 D_i 是否服从以上概率分布,结果如表 2 所示。

表 2 D_i 分布检验结果
Tab.2 Distribution test results of D_i

类型	累计尺度	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
K-S 检验	1 个月	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	3 个月	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	12 个月	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
NSE 检验	1 个月	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33
	3 个月	34	34	34	33	34	33	34	34	34	34	34	34
	12 个月	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34

注: K-S 检验结果为通过 0.05 显著性水平检验的站点数; NSE 检验结果为大于 0.95 的站点数。

由表 2 可知,采用三参数的对数逻辑分布函数对 D_i 进行拟合,通过 K-S 检验和 NSE 评估拟合效果,结果发现 34 个站点的 D_i 均通过 K-S 检验,且 NSE 基本都在 0.95 以上,表明三参数对数逻辑分布函数在四川省各月份不同时间尺度下的 D_i 拟合效果都较好,可以用于 SPEI 指数的多时间尺度计算。

3.3.2 时间变化

对四川省不同区域 1967—2016 年 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的年值进行比较(图 5),其中红色图例表示实际旱情。

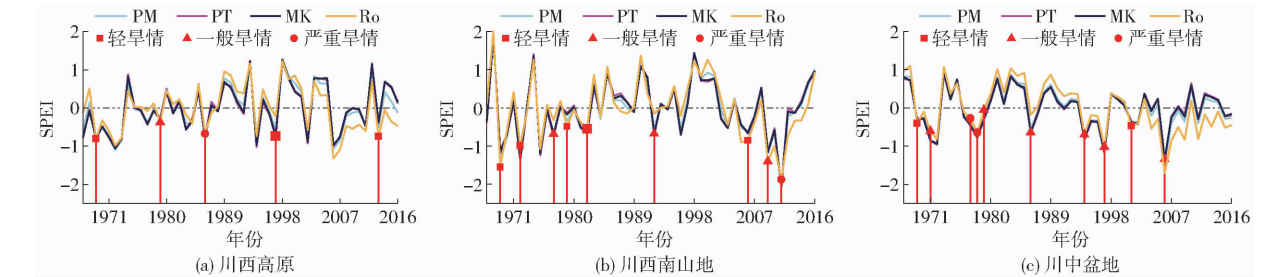


图 5 四川省 1967—2016 年 12 个月时间尺度 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 年际变化曲线
Fig.5 Temporal variations of SPEI_PM, SPEI_PT, SPEI_MK and SPEI_Ro at 12-month timescale in Sichuan Province during 1967—2016

由图 5 可知,在四川省的 3 个区域中,SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 具有与 SPEI_PM 相似的变化情况,其变化值均处于 $-2 \sim 2$ 之间。从四川省各区域的 SPEI 计算结果来看,基于不同 ET_0 方法计算的年 SPEI 差异较小,变化趋势基本一致,4 种方法均显示 1967—2016 年,川西高原、川西南山地的 SPEI 有增加的趋势,川中盆地则存在 SPEI 减小的趋势。虽然 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 最小值不同,但时间分布一致。在有实际旱情的年份,最小值均低于 0,因此 4 种 SPEI 指数都能够识别历史干旱事件。总的来说,在同一区域,不同方法之间会有差异,但 SPEI 几乎都维持在同一水平,干湿情况交替出现。

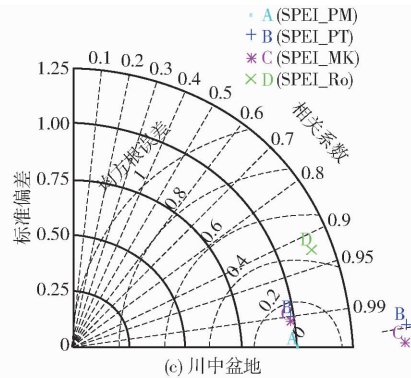
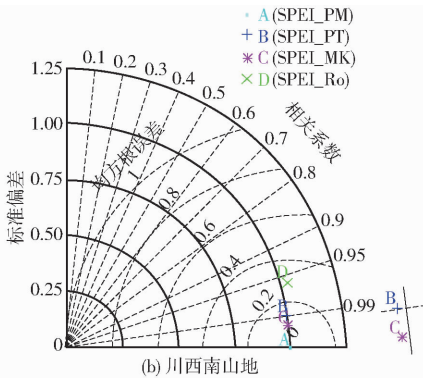
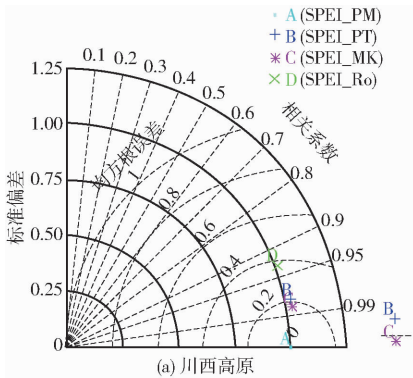


图 6 四川省 12 个月时间尺度 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的泰勒图

Fig. 6 Taylor diagrams of SPEI_PM, SPEI_PT, SPEI_MK and SPEI_Ro at 12-month timescale in Sichuan Province

为 SPEI_PT、SPEI_Ro。综合来看,在四川省全域, SPEI_MK 与 SPEI_PM 有更好的相关性。

相较于川西高原和川西南山地,川中盆地各方法计算的 SPEI 更具敏感性。对川中盆地不同时间尺度下 SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的误差进行分析,如图 7 所示。由图 7 可知,1、3、12 个月时间尺度下,SPEI_PT、SPEI_MK 与 SPEI_PM 都具有较好的相关性,而 SPEI_Ro 与 SPEI_PM 的相关性最差。从

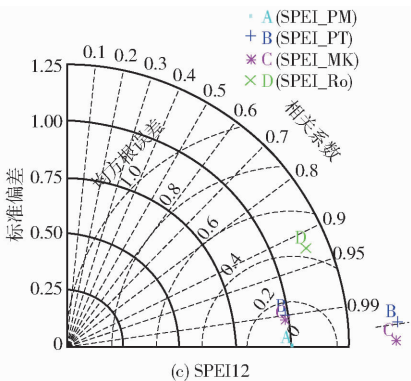
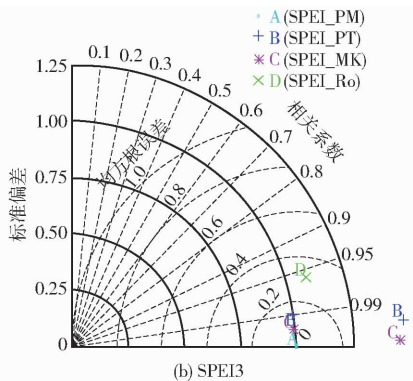
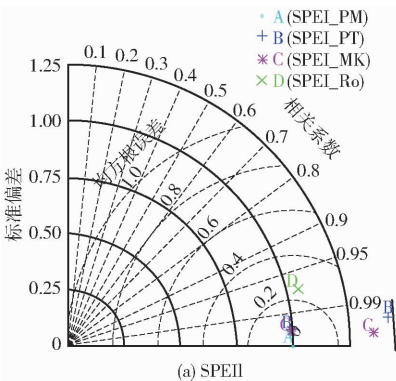


图 7 川中盆地 1、3、12 个月时间尺度 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的泰勒图

Fig. 7 Taylor diagrams of SPEI_PM, SPEI_PT, SPEI_MK and SPEI_Ro at 1-, 3- and 12-month timescales in central Sichuan basin

3.4 周期分析

由于川中盆地各方法计算的 SPEI 更具敏感性,

3.3.3 误差分析

图 6 为四川省 1967—2016 年间 SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的泰勒图,其中点 A 为观测点,代表 SPEI_PM。由图 6 可知,在四川省各区域,12 个月时间尺度下的 SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 均与 SPEI_PM 有较好的相关系数,这是因为 SPEI 是通过历史同期数据的异常来监测干旱,主要与 ET_0 变化情况有关,而受 ET_0 本身的影响较小。从标准偏差来看,SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 在川西高原、川西南山地差别不大,都较接近 1,而在川中盆地,SPEI_Ro 的标准偏差明显大于 SPEI_PT、SPEI_MK,达到 1.14。从 RMSE 来看,SPEI_MK 与 SPEI_PM 的 RMSE 最小,其次依次

RMSE 来看,1、3、12 个月时间尺度 SPEI_PT、SPEI_MK 与 SPEI_PM 的 RMSE 大都集中在 $0.05 \sim 0.20$ 区间内,而 12 个月时间尺度 SPEI_Ro 与 SPEI_PM 的 RMSE 达到 0.44。综合来看,大部分情况下, SPEI1 相关性比 SPEI3、SPEI12 好。1 个月时间尺度下,SPEI_MK 与 SPEI_PM 有更好的相关性,相关系数达到 0.99,RMSE 仅为 0.15,SPEI_Ro 与 SPEI_PM 相关性最差。

因此对川中盆地不同时间尺度下 SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 的小波实部及方差进行分析,其对比

结果如图 8、9 所示。图 8 中等值线的正负代表偏湿润和偏干旱时期,图 9 中小波方差反映 SPEI 时间序列的能量波动随时间尺度的变化特征,峰值对应的

时间尺度为 SPEI 变化的主要周期。

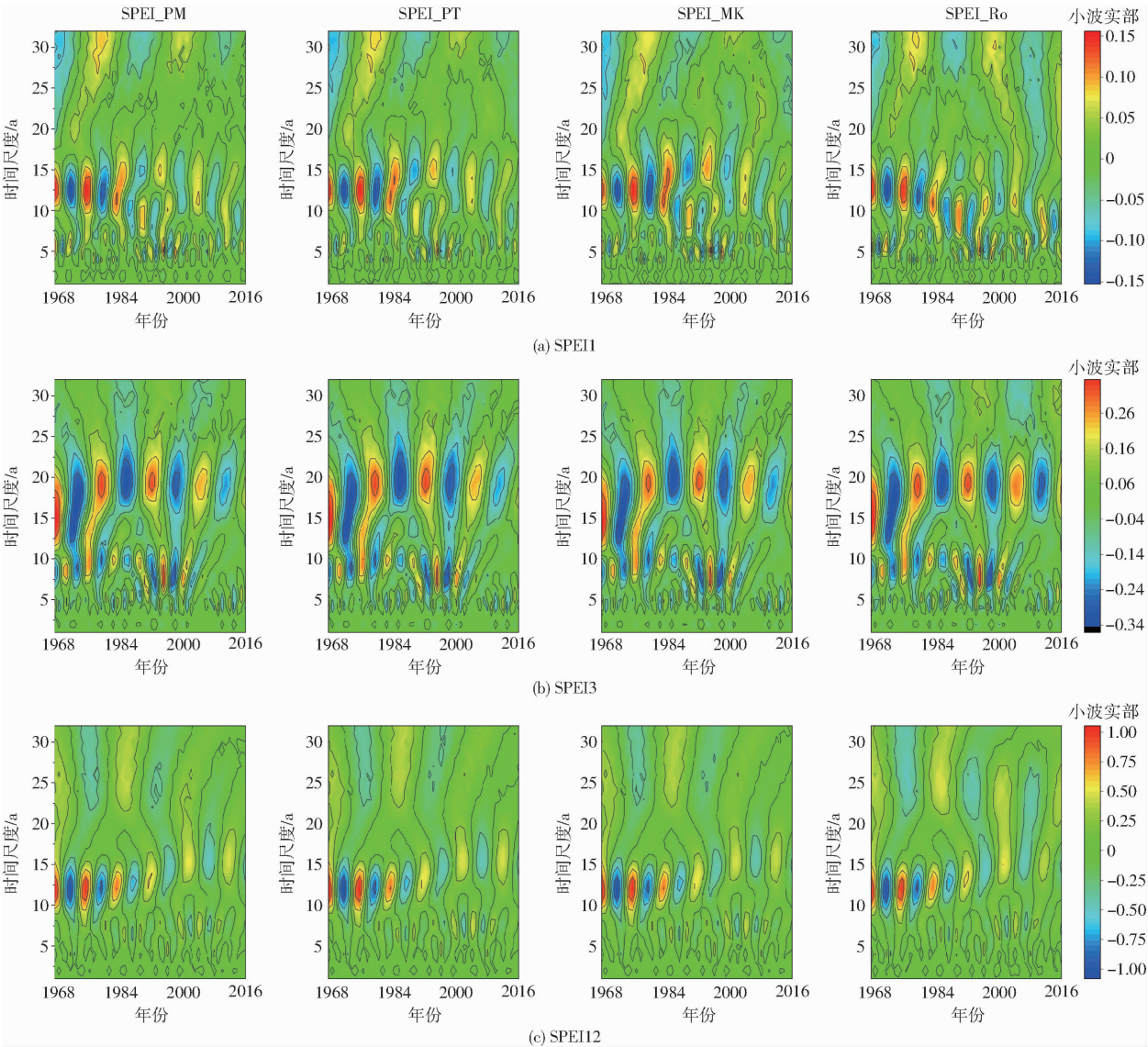


图 8 川中盆地 1、3、12 个月时间尺度 SPEI 小波分析

Fig. 8 Wavelet analysis of SPEI at 1-, 3- and 12-month timescales in central Sichuan basin

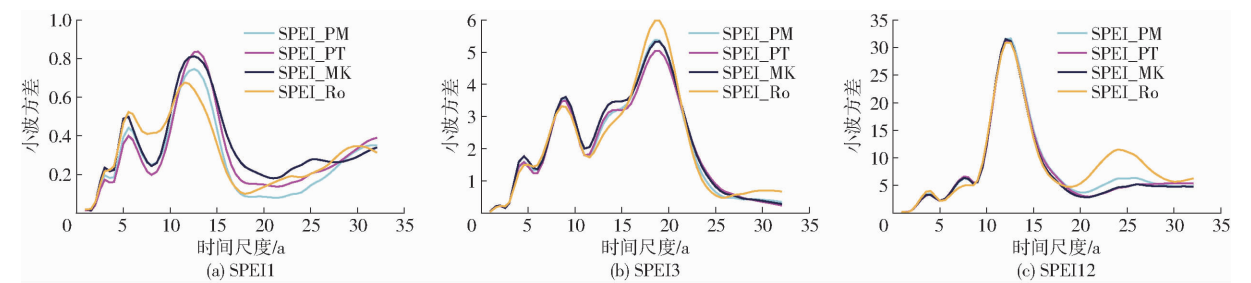


图 9 川中盆地 1、3、12 个月时间尺度 SPEI 小波方差

Fig. 9 Wavelet variances of SPEI at 1-, 3- and 12-month timescales in central Sichuan basin

由图 8 可以看出,在时间尺度 10 ~ 15 a 上,各方法的 SPEI1 周期振荡变化明显,贯穿整个研究时段,经历了 5 次“偏干旱-偏湿润”的交替变化,2016 年等值线小于 0 且向负值中心变化,说明未来一段时间将处于偏干旱时期。在时间尺度 5 ~ 10 a、15 ~

20 a 上,各方法的 SPEI3 周期振荡变化明显。结合图 9 发现,SPEI3 的小波方差峰值出现在 9 a 的 3.5 和 19 a 的 5.5,分别对应第 2 主周期、第 1 主周期。在时间尺度 10 ~ 15 a 上,各方法的 SPEI12 周期振荡变化明显,经历了 5 次“偏干旱-偏湿润”的交替变

化。在 1 个月时间尺度上,SPEI_PT 表现出与 SPEI_PM 较好的一致性,两者第 1 主周期都位于 13 a,小波方差差距最小,SPEI_Ro 则表现出与 SPEI_PM 较为不同的周期性,其第 1 主周期位于 11 a,与 SPEI_PM 差距最大。在 3、12 个月时间尺度上,各方法的 SPEI 都具有相似的第 1 主周期。总体而言,SPEI_PT 和 SPEI_PM 具有最相似的周期振荡变化,SPEI_Ro 和 SPEI_PM 的周期差距最大。

4 结 论

- (1)PT 法等 7 种 ET_0 算法的空间变异性十分明显。在川西高原和川西南山地,PT 法与 PM 法有较好的相关性,适用性较强;在川中盆地,辐射法中的 FAO-Ra 法适用性最好。
- (2)结合历史干旱事件分析,SPEI_PM、SPEI_PT、SPEI_MK、SPEI_Ro 4 种指数都能够识别出四川

- 省大多数干旱事件,具有较好的干旱监测能力,其中 SPEI_MK 监测的干湿情况最接近 SPEI_PM。
- (3)大多数情况下,SPEI1 相关性比 SPEI3、SPEI12 好。1 个月时间尺度下,SPEI_MK 与 SPEI_PM 有更好的相关性,而 SPEI_Ro 与 SPEI_PM 相关性最差。
- (4)SPEI_PT 和 SPEI_PM 具有最相似的周期振荡变化,SPEI_Ro 和 SPEI_PM 的周期差距最大。
- (5)四川省 SPEI_MK 监测的干湿情况最接近 SPEI_PM,数据缺失的条件下,SPEI_MK 可以作为 SPEI_PM 的替代指数,这为四川省的干旱监测和防控提供理论依据,能够减少和预防干旱带来的灾害。由于本文仅研究了 ET_0 计算方法及相应 SPEI 指数在四川省的适用性,下一步可深入探究不同 SPEI 指数监测的气象干旱是否会在干旱传播过程中对水文干旱、农业干旱造成影响。

参 考 文 献

[1] 张棋,许德合,丁严. 基于 SPEI 和时空立方体的中国近 40 年干旱时空模式挖掘[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 194-201.
ZHANG Qi, XU Dehe, DING Yan. Spatio-temporal pattern mining of the last 40 years of drought in China based on SPEI index and spatio-temporal cube[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 194-201. (in Chinese)

[2] 高秉丽,巩杰,李焱,等. 基于 SPEI 的黄河流域多尺度干湿特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 723-733.
GAO Bingli, GONG Jie, LI Yan, et al. Analysis of multi-scalar characteristics of dry and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 723-733. (in Chinese)

[3] 沈国强,郑海峰,雷振锋. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3787-3795.
SHEN Guoqiang, ZHENG Haifeng, LEI Zhenfeng. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3787-3795. (in Chinese)

[4] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等. 基于 SPEI_PM 指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J]. 中国农业气象, 2021, 42(11): 962-974.
YANG Rui, GENG Guangpo, ZHOU Hongkui, et al. Spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Wei River Basin based on SPEI_PM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(11): 962-974. (in Chinese)

[5] 陈家宁,孙怀卫,王建鹏,等. 综合气象干旱指数改进及其适用性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 71-77.
CHEN Jianing, SUN Huaiwei, WANG Jianpeng, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 71-77. (in Chinese)

[6] 宋琳琳,张强,任余龙,等. PDSI 及 sc_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 242-251.
SONG Linlin, ZHANG Qiang, REN Yulong, et al. The applicable analysis of PDSI and self_calibrating PDSI drought indices in southwest China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 242-251. (in Chinese)

[7] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179-183.

[8] 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.

[9] 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)

[10] 史尚渝,王飞,金凯,等. 基于 SPEI 的 1981—2017 年中国北方地区干旱时空分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 215-222.
SHI Shangyu, WANG Fei, JIN Kai, et al. Temporal and spatial characteristics of drought based on SPEI in northern China from 1981 to 2017[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 215-222. (in Chinese)

[11] 张茜,张喜亮,李金建,等. 基于 SPEI 的四川省盆地区季节性干旱时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 242-250, 256.
ZHANG Han, ZHANG Xiliang, LI Jinjian, et al. SPEI-based analysis of temporal and spatial variation characteristics for seasonal drought in Sichuan Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 242-250, 256. (in Chinese)

[12] 王荣江,李谢辉,周任君,等. 三种气象干旱指数在四川省的适用性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3):

734 – 744.

WANG Rongjiang, LI Xiehui, ZHOU Renjun, et al. Applicability analysis of three meteorological drought indices in Sichuan Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 734 – 744. (in Chinese)

[13] ALLEN R G, PEREIRAL L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

[14] 武剑飞, 康银红, 宋鑫, 等. 基于 NARX 模型的参考作物蒸散发预测[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(5): 533 – 540.

WU Jianfei, KANG Yinong, SONG Xin, et al. Prediction of reference crop evapotranspiration based on NARX model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(5): 533 – 540. (in Chinese)

[15] PENG L, LI Y, FENG H. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 5458.

[16] 范留飞, 皮原月, 于洋, 等. 基于辐射和温度的 ETO 模型在吐鲁番地区的比较与修正[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 267 – 275.

FAN Liufei, PI Yuanyue, YU Yang, et al. Comparison and modification of ETO models based on radiation and temperature in Turpan region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 267 – 275. (in Chinese)

[17] 黄彩霞, 赵德明, 王保福. 甘肃中东部半干旱区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 41 – 47.

HUANG Caixia, ZHAO Deming, WANG Baofu. A comparative study on calculation methods of reference crop evapotranspiration in the semi-arid region of Central Eastern Gansu [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 41 – 47. (in Chinese)

[18] 李韵婕, 任福民, 李忆平, 等. 1960—2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 266 – 276.

LI Yunjie, REN Fumin, LI Yiping, et al. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960—2010[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 266 – 276. (in Chinese)

[19] 詹兆淦. 中国气象灾害大典. 四川卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[20] 四川省水利电力厅. 四川水旱灾害[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[21] HAUSER V L, GIMON D M, HORIN J D. Draft protocol for controlling contaminated groundwater by phytostabilization[R]. Prepared for Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division, 1999.

[22] PRIESTLEY C H, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81 – 92.

[23] MAKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. Journal of the Institution of Water Engineers, 1957, (11): 277 – 288.

[24] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985(1): 96 – 99.

[25] BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data[R]. USDA Soil Conserv. Serv. SCS – TP96, 1950.

[26] VALIPOUR M. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration[J]. Applied Water Science, 2017, 7(2): 625 – 635.

[27] 郑健, 鲍婷婷, 王春霞, 等. 考虑气候分区的甘肃省干旱时空分布特征分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 311 – 320.

ZHENG Jian, BAO Tingting, WANG Chunxia, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Gansu Province considering climate zoning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 311 – 320. (in Chinese)

[28] 符娜, 宋孝玉, 夏露, 等. 云南省不同生态水文分区参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 208 – 217.

FU Na, SONG Xiaoyu, XIA Lu, et al. Adaptation evaluation for reference evapotranspiration calculation methods in different eco-hydrological regionalization of Yunnan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 208 – 217. (in Chinese)

[29] RAHIMIKHOOB A, BEHBAHANI M R, FAKHERI J. An evaluation of four reference evapotranspiration models in a subtropical climate[J]. Water Resource Management, 2012, 26(10): 2867 – 2881.

[30] 左德鹏, 徐宗学, 刘兆飞. 基于气温的潜在蒸散发量估算方法在我国西北干旱地区的应用比较[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 123 – 131.

ZUO Depeng, XU Zongxue, LIU Zhaoifei. Comparison of temperature-based methods for estimating potential evapotranspiration in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(10): 123 – 131. (in Chinese)

[31] 李志. 参考作物蒸散简易估算方法在黄土高原的适用性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 106 – 111.

LI Zhi. Applicability of simple estimating method for reference crop evapotranspiration in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 106 – 111. (in Chinese)

[32] NANDAGIRI L, KOVOOR G M. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(3): 238 – 249.

[33] 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 98 – 102.

FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 98 – 102. (in Chinese)