

标准化降水实际蒸散指标的构建及其适用性分析

孙勋来¹, 陈家宁^{1,2}, 孙怀卫^{1*}, 阳勇¹, 宋亮¹, 邹朝望³, 廖卫红⁴, 陈皓锐⁴

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074; 2. 盐城市市区防洪工程管理处, 盐城 224006;
3. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为高效准确地开展区域干旱监测, 该研究基于最大熵增原理构建了一种基于实际蒸散发的干旱监测指标 (标准化降水实际蒸散指数, Standardized Precipitation Actual Evapotranspiration Index, SPAEI), 以河南、湖北、湖南为研究对象对 SPAEI 进行了适用性验证, 并采用该指标对华中地区进行了干旱变化趋势和周期性分析。研究结果表明: 1) 由最大熵增蒸散模型计算所得的 SPAEI 指数对华中地区的干旱评估具有较好的适用性; 其中, SPAEI 相比于 SPEI-Th 与 SPEI-PM (分别由 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 方法获得) 更符合历史旱灾中的实际干旱面积 (SPAIE3, 即 3 个月时间尺度 SPAEI) 与受灾面积相关系数 r 为 0.56~0.65)、植被健康状态等特征, 也具有更高的历史旱灾识别率。2) 对华中地区干旱指标的趋势分析表明, 鄂西南恩施地区、湘南衡阳郴州地区的春/冬季、鄂西北和湘西邵阳地区的夏季、鄂西北部分地区的冬季呈现干旱加重的趋势。3) 华中地区存在 16 个月左右的干旱主周期、6~8 个月的短周期以及 6 a 左右的长周期。研究提出的 SPAEI 确定方法预计可为区域干旱监测提供参考, 对农业、气象等方面的监测、预警具有广泛应用潜力。

关键词: 干旱; 降水; 实际蒸散发; SPAEI; K-S 检验; 华中地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.016

中图分类号: X43; TV873

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0142-10

孙勋来, 陈家宁, 孙怀卫, 等. 标准化降水实际蒸散指标的构建及其适用性分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 142-151. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.016 http://www.tcsae.org

Sun Xunlai, Chen Jianing, Sun Huaiwei, et al. Construction and applicability analysis of the standardized precipitation actual evapotranspiration index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 142-151. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.016 http://www.tcsae.org

0 引言

在全球变暖背景下, 干旱、高温等极端天气气候事件发生的频率和强度在多个地区呈现上升趋势^[1-3]。干旱监测事关民生发展大计, 合理的干旱指标可使得干旱监测事半功倍, 是开展干旱监测、评估预警以及旱灾防治的重要基础。因而根据区域特点对干旱指标开展进一步研究非常重要。

干旱指数是量化和评估干旱程度及干旱对农业、水文等影响的重要指标^[3-4]。应用较广泛的干旱指数包括降雨距平指数 (Rainfall Anomaly Index, RAI)、有效干旱指数 (Bhalme-Mooley Drought Index, BMDI)、标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)^[4]以及综合气象干旱指数 (Comprehensive Meteorological Drought Index, CI) 等^[5-6], 虽然降水的亏缺是引发干旱的主要原因, 但近年来许多研究表明蒸散发也是导致干旱的重要因素^[7], 由 Vicente-Serrano 等提出的基于蒸散发的标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 充分考虑了降水与潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET) 之差、气温变化敏感性以及多时

间尺度特征, 对干旱监测和评估具有合理性, 逐渐呈现出较广泛的适用性^[8], 但 PET 计算中未充分考虑下垫面状况、植被覆盖, 也与实际的干湿变化缺乏直接联系; 尤其是对于一些地区的冬季而言, 计算的蒸散发量可能失真, 因此有学者提出应探索新的干旱指数构建方法^[8-10]。实际蒸散发 (Actual Evapotranspiration, AET) 相比于 PET 更好地表征了水循环及大气水分状况, 与土壤含水率联系更密切, 因而得到了一些学者的重视^[9-11]。Rehana 等^[9]尝试在区域尺度上引入实际蒸散发量来进行干旱评估, 但其研究也表明获取可靠的实际蒸散发量尚存在一些困难。

目前国内外已有多种确定实际蒸散发的方法。然而, 传统实际蒸散发依赖于站点观测, 由于所需仪器及其安装维护费用高, 因此难以获取大面积观测数据, 而基于互补相关原理的计算方法多存在输入参数众多、模型不确定性较大等问题^[12]。最大熵增蒸散 (Maximum Entropy Production, MEP) 模型作为一种蒸散发计算方法, 仅需要净辐射、表面温度和空气比湿 3 个要素, 具有输入参数少、参数不敏感的特点, 同传统的 Penman-Monteith、Priestley-Talor 等模型相比具有更高的精度, 对实际蒸散发计算有良好的适用性^[13-14]。

在现行的干旱评价体系下, 气候干旱和农业干旱有着不同的评价标准, 由于全球气候变化, 由气象因子引起的土壤干旱已经逐步成为制约农业发展的主要因素。为此, 本研究结合近年来华中地区旱涝灾害频发、损失严重的现实问题, 通过构建考虑典型区域实际蒸散发量

收稿日期: 2021-11-25 修订日期: 2022-10-17

基金项目: 科技部基础调查专项 (2019FY00205); 国家自然科学基金项目 (52079055, 52011530128, 51879110)

作者简介: 孙勋来, 研究方向为水资源管理与灾害分析。

Email: m202171589@hust.edu.cn

*通信作者: 孙怀卫, 副教授, 研究方向为水资源。Email: hsun@hust.edu.cn

的干旱指标来开展干旱监测、评估，利用基于 MEP 计算得到的 AET，提出一种标准化降水实际蒸散指数（Standardized Precipitation Actual Evapotranspiration Index, SPAEI）的构建方法，并利用华中地区的多种干旱资料对该干旱指标进行适用性分析，以评价 SPAEI 指数在华中地区干旱监测的适用性，并基于 SPAEI 对华中地区干旱变化趋势与周期性进行分析，由此检验 SPAEI 在实际干旱监测及在农业、水文等领域中的应用潜力。

1 材料与方法

1.1 标准化降水实际蒸散指数（SPAEI）

一般认为，AET 相比 PET 能更好地估计实际转移到大气中的水量和描述实际的水需求^[9-10]，因而采用 SPAEI 指数这一类基于 AET 的干旱指标，可以在干旱监测评估中充分考虑其耗水机制。当前较多干旱指标都给出了干湿等级划分标准，如按照标准化正态处理后的 SPEI 计算值可依照百分位数来确定干湿等级，国家标准《气象干旱等级》（国家标准化管理委员会，2017）中对气象干旱综合指数（Meteorological Drought Composite Index, MCI）也给出了干湿等级划分标准。为此，SPAEI 指数的计算也遵循等级划分的原则，主要分为以下 3 个步骤计算：

1) 计算水分亏缺量 D'_i

SPAEI 使用降水量和实际蒸散发之间的累积月差 D' 表示水分的亏缺或剩余，则 i 个月尺度的累积月差 (D'_i , mm) 用式 (1) 计算。

$$D'_i = P_i - \text{AET}_i \quad (1)$$

式中 P_i 为 i 个月的累计降水量，mm； AET_i 为 i 个月的累计实际蒸发量，mm。本文中 AET 数值采用 MEP 计算。

2) 正态标准化处理（拟合 D'_i 的概率分布）

不适当的概率分布可能导致指标值出现偏差，导致对干旱指标的计算不准确^[15]，因此需要确定合适的概率分布函数 $f(x)$ 拟合水分亏缺量，并对函数 $f(x)$ 进行正态标准化处理。

3) 多尺度指标值（SPAEI）计算

根据式 (2) ~ 式 (3) 获得不同时间尺度的 SPAEI：

$$W = \sqrt{-2 \ln P} \quad (2)$$

$$\text{SPAEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (3)$$

式中 P 为超过既定值 D 的概率，当 $P \leq 0.5$ 时， $P=1-f(x)$ ，当 $P > 0.5$ 时， $P=1-P$ ，SPAEI 的符号变号；常数项 $C_0=2.515\ 517$ ， $C_1=0.802\ 853$ ， $C_2=0.010\ 328$ ， $d_1=1.432\ 788$ ， $d_2=0.189\ 269$ ， $d_3=0.001\ 308$ 。

1.2 基于最大熵增蒸散模型的 AET 计算

最大熵增蒸散 (MEP) 模型是 Wang 等^[16]基于最大熵增原理和现代非平衡态热力学理论，建立的计算显热通量、潜热通量（蒸散发）以及地表热通量的新方法。已有研究表明，MEP 模型能在中国区域能够给出较高精度的潜热通量（实际蒸散发）估算值^[12-13]。因此，本文基于 MEP 模型计算实际蒸散发 AET，该模型基于陆地表面的能量平衡方程^[17]，如下式：

$$R_n = H + E + G \quad (4)$$

式中， H 、 E 、 G 分别是显热通量、潜热通量和土壤热通量， W/m^2 ； R_n 为地表净辐射， W/m^2 ，土壤热通量 G 和潜热通量 E 分别为

$$G = \frac{B(\sigma_s) I_s}{\sigma_s I_0} |H|^{-\frac{1}{6}} H \quad (5)$$

$$E = B(\sigma_s) H \quad (6)$$

式中 I_s 和 I_0 分别为土壤热惯量和空气表观热惯量， $\text{W}\cdot\text{m}^2/(\text{K}\cdot\text{s}^{0.5})$ ； σ_s 为无量纲函数，用于表征液态水相变对地表水热状态的影响； $B(\sigma)$ 为波文比的倒数。 I_0 以及 σ_s 、 $B(\sigma)$ 则分别可推求为

$$I_0 = \rho_a c_p \sqrt{C_1 k z} \left(C_2 \frac{k z g}{\rho_a c_p T_0} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

$$\sigma_s = \frac{\lambda^2 q_s}{c_p R_v T_s^2} \quad (8)$$

式中 λ 为水的相变潜热， J/kg ； R_v 为水汽体常数， $461\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； c_p 为空气比热， $103\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； q_s 为地表空气比湿， kg/kg ； T_s 为地表温度， K 。

$$B(\sigma) = 6 \left(\sqrt{1 + \frac{11}{36} \sigma} - 1 \right) \quad (9)$$

式中 ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； T_0 为参考室温，取 $300\ \text{K}$ ； z 为离地表高度； k 为 Von-Karman 常数，取 0.4 。 C_1 和 C_2 为表示温度和风速稳定性的经验常数，其取值详见文献^[18]。

利用 MEP 计算 AET 的过程中也考虑了下垫面的变化。对于裸土，联立以上各式后即可由牛顿法或二分法求得潜热通量^[19]，而对于植被覆盖的地表，Wang 等^[16]人认为土壤热通量相对于对于显热通量和潜热通量可忽略不计，即可令土壤热通量 $G=0$ ，联立式 (4) ~ 式 (9) 即可求得潜热通量，进而得到 AET 值，具体计算过程参考文献^[16]。

1.3 概率分布类型选择

Vicente-Serrano 等^[20]推荐使用三参数的对数逻辑分布 (log - logistic) 对水分亏缺量进行拟合；也有学者认为，在中国 Pearson III 型分布是计算 SPEI 的可靠分布^[21]；此外，Gamma 分布也被广泛用于水文频率分析及干旱指标计算^[22]。因此本文分别采用三参数的 log-logistic 分布、Pearson III 型分布以及 Gamma 分布，分月份对水分亏缺量 D 进行拟合，并采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验 (Kolmogorov-Smirnov test) 方法（显著性水平为 0.05 ）检验测试拟合优度。各分布函数的表达式如下：

$$\text{Gamma 函数: } f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (10)$$

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

$$\text{Pearson III 函数: } f(x) = \frac{1}{a \Gamma(b+1)} \left(\frac{x-\gamma}{a} \right)^b e^{-(x-\gamma/a)} \quad (12)$$

式中 α 、 β 和 γ 分别是比例、形状和原点参数； Γ 为伽马

函数。

此外, 无偏概率加权矩 (Position Weight Matrix, PWM) 估算方法被认为是用于 SPEI 序列计算的首选方法^[23], 本文采用该方法估计分布参数以及数据的分位数:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (13)$$

式中 w_s 是阶数 s 的 PWM; N 是数据点的数量; F_i 是依据概率分布函数对 D_i 的频率估计^[24]。

1.4 干湿等级划分

SPAEI 指数的干旱等级划分参照当前国家标准予以划分^[25]。一些 SPEI 方面的研究也表明, 这一类的干湿等级较好反映了中国区域干旱特征^[2-3]。

不同干湿等级可划分为: SPAEI 指数小于等于 -2 表示极端干旱, 大于 0.5 表示该地区较为潮湿, 二者之间划分了 4 个干旱等级, 分别为: 严重, 即 $\text{SPAEI} \in (-2.0, -1.5]$; 中等, 即 $\text{SPAEI} \in (-1.5, -1.0]$; 轻度, 即 $\text{SPAEI} \in (-1.0, -0.5]$; 正常, 即 $\text{SPAEI} \in (-0.5, 0.5]$ 。

1.5 资料及其来源

1) 本文中气象数据为中国科学院青藏高原研究所开发的 1979-2018 年中国区域地面气象要素驱动数据集 (China Meteorological Forcing Dataset, CMFD, <http://westdc.westgis.ac.cn/>)。该数据集以 GLDAS 资料、Princeton 再分析资料、GEWEX-SRB 辐射资料、TRMM 降水资料为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成, 精度优于已有的其他再分析数据。数据集包含近地面气温、地表气压、向下短波辐射、向下长波辐射、降水率、近地面全风速、以及近地面空气比湿共 7 个要素的月数据, 数据覆盖的范围为 $70^\circ \sim 140^\circ \text{E}$, $15^\circ \text{N} \sim 55^\circ \text{N}$, 空间精度为 0.1° 。

2) 植被健康指数 (Vegetation Health Index, VHI) 是表征植被健康的指标, 广泛用于估算作物产量状况和监测农业干旱^[26]。本文从美国国家海洋与气象局卫星应用与研究 中心 (NOAA, STAR, <https://www.satr.nesdis.noaa.gov/>) 获取了华中地区各省份的 VHI 年数据。

3) 华中地区河南、湖北、湖南 3 个省份 1982-2011 年的旱灾受灾面积资料, 可从中国国家统计局网站 (<https://data.stats.gov.cn/>) 获得。

4) 华中地区三省的历史重大旱灾资料由《中国气象灾害大典》中历年干旱灾害记录整理得到, 资料内容主要包括河南、湖北、湖南三省 1982-2001 年重大旱灾的起止时间。

5) 为对 MEP 计算所得的 AET 数值进行比较, 本文选取基于互补原理所得的中国陆地实际蒸散发数据集 (Terrestrial Evapotranspiration Dataset Across China, TEDAC, <http://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/>)。该数据为 1982-2015 年实际蒸散发数值, 空间分辨率为 0.1° 。

1.6 分析方法

为验证 SPAEI 在干旱评估领域的适用性, 本研究计算了华中地区 SPEI 值作为对照。Thornthwaite 法^[27]和

Penman-Monteith 法^[28]是两种常用计算潜在蒸散量 PET 的方法, 前者通过平均气温估算潜在蒸散量, 后者基于能量和空气动力因素估算蒸散量。SPEI 的原始公式基于计算复杂度和数据需求量使用 Thornthwaite 模型计算潜在蒸散量 PET^[20], 但 Penman-Monteith 方法能够在多个地区和气候条件下提供一致的 PET 值^[29], 并且长期以来被公认为优于其他 PET 计算方法^[30]。SPEI 提出者认为, 将 PET 纳入干旱指数计算的目的是获得时间上的相对估计, 因此用于计算 PET 的方法并不关键^[20], 但鉴于几种不同模型计算的 PET 差异较大, 本文分别基于 Thornthwaite 方法和 Penman-Monteith 方法得出的 PET 计算得到华中地区多个时间尺度的 SPEI (记为 SPEI-Th 和 SPEI-PM)。

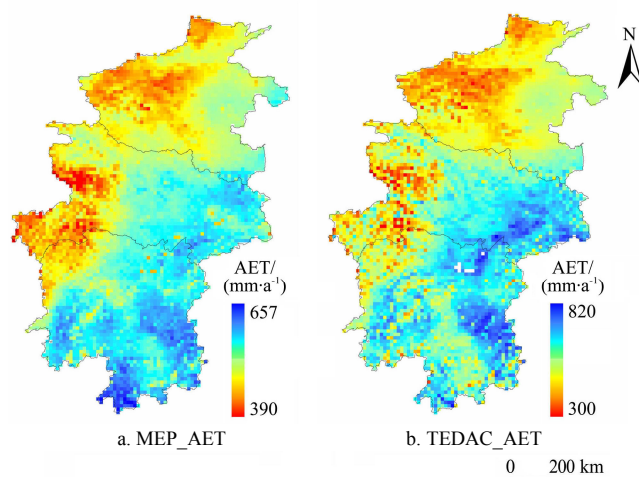
Modified Mann-Kendall (MMK) 趋势检验法是一种非参数统计方法, 能够排除少量异常值的干扰, 定量化程度高^[31]。本文采用 MMK 趋势检验法对华中地区的干旱指标进行分析, 以此得出变化趋势 (取显著性水平为 $\alpha=0.05$)。

小波变换作为一种信号处理的数学方法, 具有多分辨率分析的特点, 并且在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力^[32-33]。本文对 1982-2015 年华中地区的 SPAEI 的月均值进行小波分析 (取显著性水平 $\alpha=0.05$), 以此分析研究期内对应区域的干旱周期性。

2 结果与分析

2.1 基于 MEP 计算的 AET 时空分布及精度分析

利用 MEP 模型获得 1982-2015 年华中实际蒸散发数据集 (AET-MEP) (分布图如图 1a 所示), 相同时段内提取 TEDAC 数据集也得到了华中地区 AET 数值分布 (如图 1b)。



注: MEP-AET 表示通过 MEP 模型计算得到的 AET, TEDAC-AET 表示现有的中国陆地实际蒸散发数据集。

Note: MEP-AET represents the AET calculated by the MEP model and TEDAC-AET represents the available terrestrial evapotranspiration dataset across China.

图 1 华中地区多年平均实际蒸散发空间分布 (1982-2015)

Fig.1 Spatial distribution of multi-year average Actual Evapotranspiration (AET) in central China during 1982-2015

将两个数据集在华中区域的分布进行对比, 发现 AET 年均值均呈现由东南向西北递减的趋势, 虽然 TEDAC 的 AET 相较于 MEP 模型计算的 AET 的极差更

大，但二者的年均值仅相差 46.77 mm (AET_MEP 年均值为 549.68 mm, 而 TEDAC 的 AET 年均值为 596.45 mm, 年均值差值小于 8%), 这也说明 MEP 计算得到的 AET 数值具有可靠性。

为充分比较两种实际蒸散发月数据集在华中地区的异同, 以 TEDAC 为基准, 本文计算了两种数据集在华中

地区各格点间的决定系数 R^2 、平均误差 (Mean Error, ME) 及均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE), 各指标值分布如图 2a~2c 所示。结果表明, 两种数据集间具有很高的相关性 ($R^2=0.92\sim 0.98$)、相同时段的 AET 差异较小 (ME = $-26.61\sim 13.30$ mm) 且 RMSE < 19.24 mm/月 (95%置信区间内)。

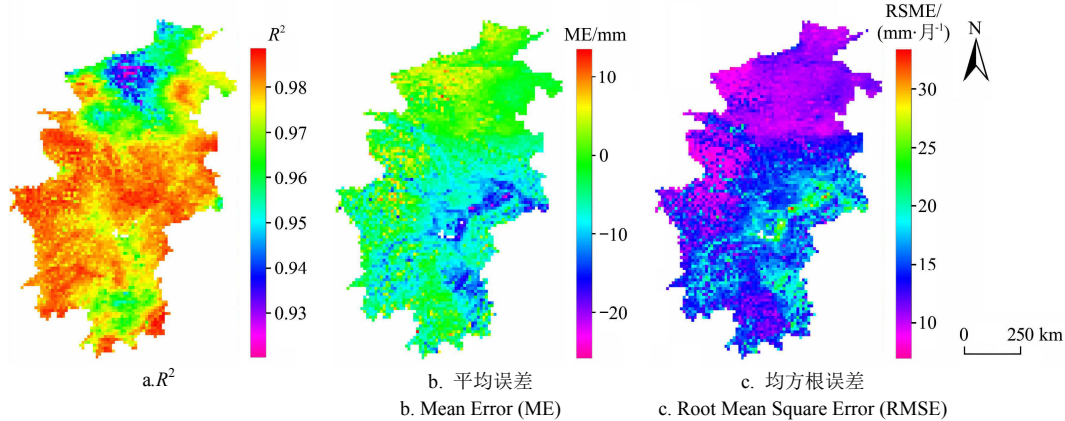


图 2 华中地区 MEP-AET 与 TEDAC-AET 差异空间分布图 (1982-2015)

Fig.2 Spatial map of AET differences between MEP-AET and TEDAC-AET in central China (1982-2015)

2.2 SPAEI 的可行性分析

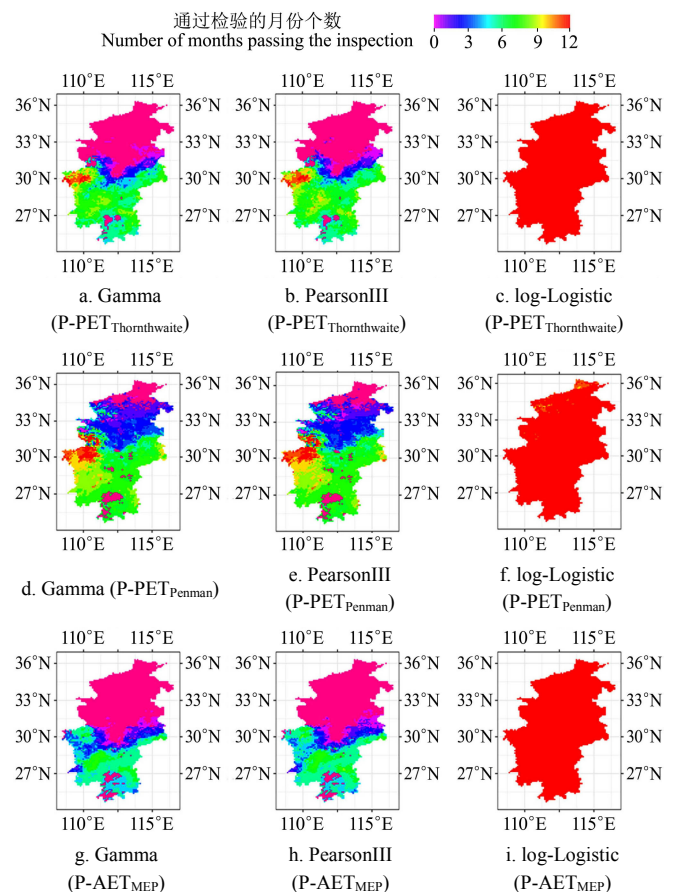
2.2.1 概率分布的拟合优度检验

采用 K-S 检验测试拟合优度, 取显著性水平为 0.05, 各格点对于月份的通过数如图 3 所示。三参数的 log-logistic 分布对几类水分亏缺量的拟合效果最好, 基本上所有格点、所有月份都通过了 K-S 检验; 而 Pearson III 型分布与 Gamma 分布的表现较为接近, 在华中地区北部区域仅有少数月份通过了检验, 南部区域的情况要优于北部, 但多数格点也并非全部月份都能通过拟合优度检验。由此可见, 三参数的 log-logistic 分布是拟合水分亏缺量 D 的合适分布函数。

2.2.2 一致性分析

为开展 SPAEI 指数对其他干旱指标的一致性分析, 将经标准化处理后计算所得的 SPAEI 与 SPEI 进行对比分析, 目前计算 PET 的方法较多^[34-36], 本研究选择较为常用的 Thornwaite 和 Penman-Monteith 方法计算 PET, 从而获取 SPEI。下文中将采用 SPAEI_{*i*}、SPEI_{*i*}-Th、SPEI_{*i*}-PM 分别表示 i 个月尺度的标准化降水实际蒸散指数和基于 Thornthwaite 模型与 Penman-Monteith 模型的 i 个月尺度标准化降水蒸散指数。较多学者认为, 不同时间尺度的干旱指数能够反映出区域不同历时下的干旱状况, 如短尺度的 SPEI 对于短期降水、温度变化比较敏感, 而长尺度的 SPEI 能较好地反映下层土壤水分和河流径流量; 为此, 3 个月尺度的干旱指数可反映季节尺度上的水分状况和分析农业灌溉问题, 6 个月尺度的干旱指数可反映半年尺度上区域干旱状况^[37]。因此, 本研究考虑干旱指标的不同时间尺度, 具体包括 1、3、6、12 个月 ($i=1$ 、 $i=3$ 、 $i=6$ 和 $i=12$)。

利用 log-logistic 分布及水分亏缺量计算结果计算中国区域的不同时间尺度 3 种类型的干旱指标, 并对同一时间尺度的不同干旱指标进行相关性分析 (图 4)。各时

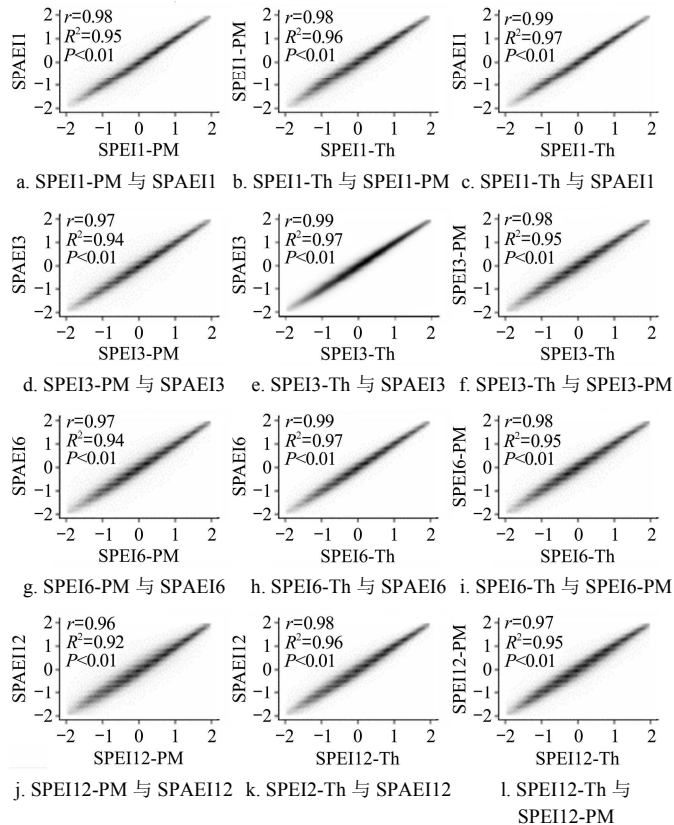


注: P-PET_{Thornthwaite}、P-PET_{Penman} 分别表示降水与通过 Thornthwaite 方法、Penman-Monteith 方法和 MEP 方法计算得到的 PET 的水分亏缺拟合结果; P-AET_{MEP} 表示降水与通过 MEP 模型计算得到的 AET 的水分亏缺拟合结果。
Note: P-PET_{Thornthwaite} and P-PET_{Penman} represent water deficit fitting test result of precipitation and PET calculated by Thornthwaite method and Penman-Monteith method, and P-AET_{MEP} represents water deficit fitting test result of precipitation and AET calculated by MEP model.

图 3 华中地区各网格点水分亏缺量的 K-S 检验

Fig.3 K-S test of water deficit at grid points in central China

间尺度的 SPEI-PM 与 SPEI-Th 和 SPEAI 之间均具有显著的相关关系 ($P < 0.01$), R^2 在 0.92~0.97 之间, 不同类指标随着时间尺度的增加 (从 $i=1$ 、 $i=3$ 到 $i=6$), 相关性降低。图 4 中, 各散点图左下方区域相对右上方更为分散, 即说明随着干旱程度增加, 各指标对于干旱发生及干旱的严重性判断差异在逐渐增大。



注: SPEI-PM 和 SPEI-Th 分别表示通过 Penman-Monteith 方法和 Thornwaite 方法计算时间尺度为 i 的 SPEI; SPAEI i 表示时间尺度为 i 的 SPEAI。SPEI: 标准化降水蒸散指数; SPEAI: 标准化降水实际蒸散指数。下同。
Note: SPEI-PM and SPEI-Th represent SPEI with time scale i calculated by Penman Monteith method and Thornwaite method respectively; SPAEI i represents SPEAI with time scale i . SPEI: standardized precipitation evapotranspiration index; SPEAI: standardized precipitation actual evapotranspiration index. Same below.

图 4 4 种不同时间尺度的 3 种干旱指标间的相关关系

Fig.4 Correlation among three drought indexes of four different time scales

2.3 SPAEI 适用性分析

2.3.1 各指标与实际干旱面积的相关性

为研究干旱指数与实际干旱面积之间的相关性, 将各省份旱灾受灾面积作为实际干旱面积与各干旱指数进行分析, 结果如表 1 所示。除 SPEI3-Th 外, 3 个月尺度的干旱指数与受灾面积之间的相关性均满足 $P < 0.05$ 的显著性检验要求; 对 6 个月尺度的指数也大多呈显著相关关系 (仅 SPEI-PM、SPEI-Th 在湖南省例外), 由此说明就华中地区而言, 3~6 个月的时间尺度对干旱监测评估是较为合适的。

不同干旱指标的比较中, SPAEI 相比 SPEI-PM、SPEI-Th 更加吻合历史干旱受灾面积数据 (如 SPAEI3 与各省份旱灾受灾面积的相关系数 $r = 0.56 \sim 0.65$), 由此说明, SPAEI 在华中地区具有较好适用性。

表 1 干旱指数与干旱面积比例相关系数值

Table 1 Correlation between drought index and Drought Area Ratio (DAR)

地区 Region	指标 Index	$i=1$	$i=3$	$i=6$	$i=12$
河南省 Henan province	SPAEI	0.33	0.59**	0.65**	0.59**
	SPEI-PM	0.17	0.36*	0.43*	0.33
	SPEI-Th	0.16	0.33	0.42*	0.36*
湖北省 Hubei province	SPAEI	0.56**	0.65**	0.65**	0.43*
	SPEI-PM	0.54**	0.65**	0.65**	0.43*
	SPEI-Th	0.54**	0.62**	0.61**	0.41*
湖南省 Hunan province	SPAEI	0.53**	0.56**	0.44*	0.20
	SPEI-PM	0.47**	0.46**	0.31	0.06
	SPEI-Th	0.45**	0.47**	0.32	0.08

注: **表示极显著 ($P < 0.01$), *表示显著 ($P < 0.05$)。

Note: ** represents extremely significant ($P < 0.01$), * represents significant ($P < 0.05$).

2.3.2 基于植被健康指数的评估

气象干旱和植被干旱之间存在着一定的联系, 植被健康指数 (VHI) 是表征植被健康的通用指标。为了评估各指数指示植被干旱的性能, 对河南、湖北、湖南三省不同尺度干旱指标年均值进行计算, 并与 1982–2015 的 VHI 值进行相关分析, 如表 2 所示。

表 2 华中三省干旱指数与植被健康指数相关关系

Table 2 Correlation relationship between drought index and vegetation health index in three provinces of central China

指标 Index	河南省 Henan province		湖北省 Hubei province		湖南省 Hunan province	
	相关系数 Correlation coefficient r	P 值 P value	相关系数 Correlation coefficient r	P 值 P value	相关系数 Correlation coefficient r	P 值 P value
SPAEI1	0.380	0.027	0.181	0.306	0.265	0.129
SPEI1-PM	0.227	0.196	0.114	0.521	0.145	0.413
SPEI1-Th	0.191	0.279	0.111	0.530	0.204	0.246
SPAEI3	0.488	0.003	0.253	0.149	0.227	0.196
SPEI3-PM	0.280	0.109	0.189	0.285	0.089	0.617
SPEI3-Th	0.277	0.113	0.178	0.313	0.150	0.396
SPAEI6	0.429	0.011	0.326	0.060	0.248	0.158
SPEI6-PM	0.256	0.144	0.256	0.145	0.108	0.541
SPEI6-Th	0.235	0.180	0.246	0.161	0.156	0.379
SPAEI12	0.433	0.011	0.302	0.083	0.184	0.299
SPEI12-PM	0.236	0.180	0.187	0.289	0.035	0.844
SPEI12-Th	0.239	0.174	0.184	0.298	0.070	0.696

从指标类型上看, 同种时间尺度的干旱指标中, SPAEI 与 VHI 的相关系数均高于其他类型的干旱指标, 河南省所有时间尺度的 SPAEI 均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 相关关系显著, 然而两种类型的 SPEI 在河南省的表现较差, 无一通过显著性检验。同时在湖北省与湖南省, 虽然 SPAEI 并未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 但其与两省 VHI 相关性均优于两种类型的 SPEI。这也表明相较于 SPEI, SPAEI 能更好指示植被干旱状况。

2.3.3 各指标的旱灾识别能力

基于前文分析, 华中地区几种降水蒸散指标最佳的时间尺度为 3 个月。为探究各指标对旱灾的识别能力, 基于《中国气象灾害大典》提取 1982–2001 年华中三省的各省份的干旱事件及其对应的干旱期, 并构建 3 个月时间尺度的干旱指标月均值的时间序列, 如图 5 所示。

为量化指标的旱灾识别能力，参考干旱指数的干旱等级划分，由于选取的是各省历年重大旱灾，取阈值为-1.0，即在旱灾发生期内，干旱指数均值小于-1.0时，认

为该干旱指能有效识别该次干旱事件，各干旱指标在3个省份的识别率如表3所示。由该表可知，SPAEI对华中三省历史旱灾的识别效果普遍优于SPEI-Th和SPEI-PM。

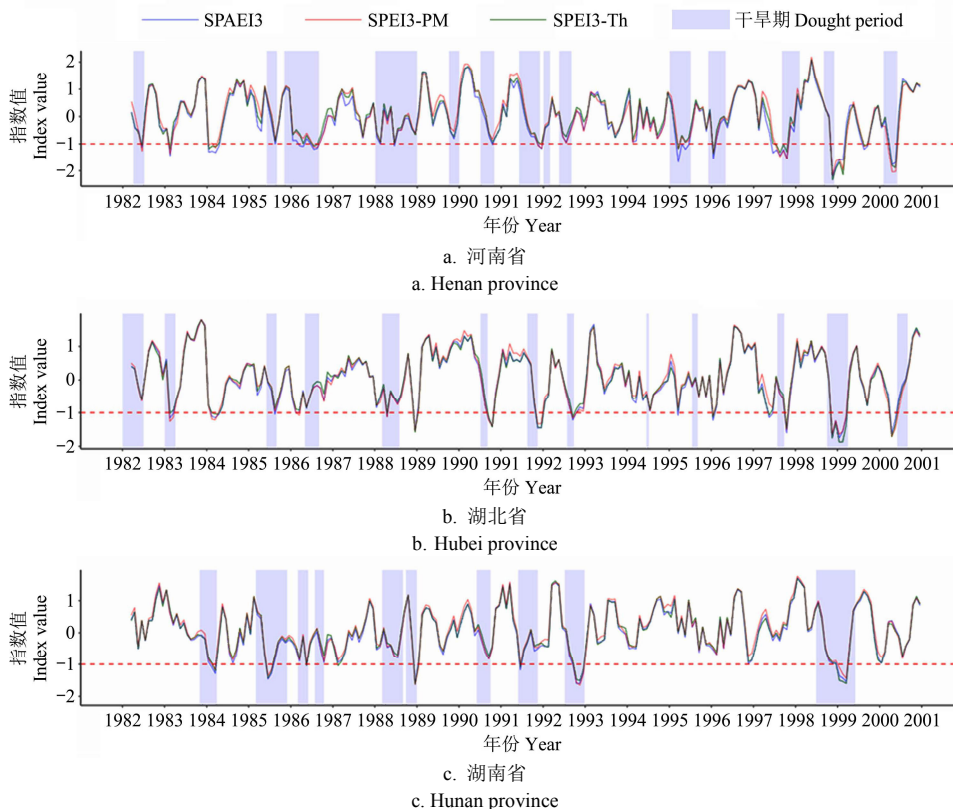


图5 华中三省季尺度干旱指标的旱灾识别能力

Fig.5 Drought identification ability of seasonal drought indexes in three provinces of central China

表3 干旱指标的历史旱灾识别率

Table 3 Historical drought identification rate of drought indexes

指标 Index	河南 Henan	湖北 Hubei	湖南 Hunan
SPAEI3	12/14	9/13	7/10
SPEI3-Th	9/14	8/13	7/10
SPEI3-PM	9/14	8/13	6/10

2.4 华中地区干旱变化趋势分析

基于季时间尺度 ($i=3$) 的 SPAEI 指数 (即 SPAEI3) 对华中地区不同季节所有网格点进行 MMK 趋势检验，

取显著性水平 α 为 0.05，其干旱变化趋势如图6所示。

可以看出，季时间尺度的 SPAEI 指数值显著增大情况主要有湖北中部一带的春季 (3-5 月)、湘南大部分地区的夏季 (6-8 月)、豫北的冬季 (12 月-次年 2 月)，这表明以上地区的相应季节干旱有减缓趋势；季时间尺度的 SPAEI 指数值显著减小的情况主要发生在鄂西南恩施地区全年、湘南衡阳郴州部分地区的春/冬季、鄂西北和湘西邵阳部分地区的夏季、鄂西北部分地区的冬季，表明以上地区相应季节呈现干旱加重趋势。

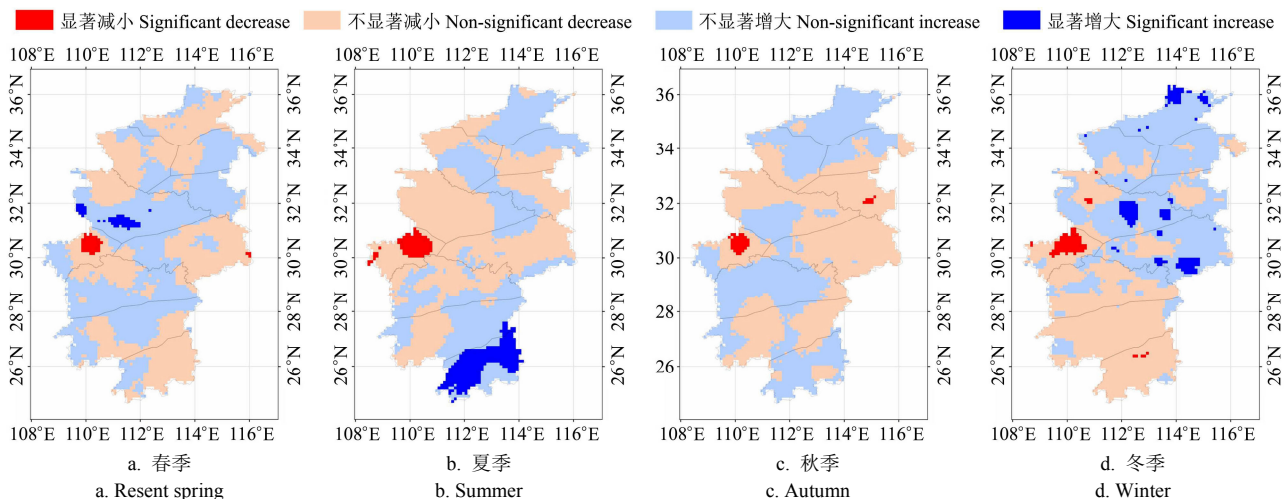


图6 华中地区干旱变化趋势

Fig.6 Variations of drought trend in central China

2.5 华中地区干旱周期性分析

对 1982—2015 年华中各省 SPAEI3 月均值序列进行小波功率分析, 小波功率谱的图像以及整个研究期的小波功率均值如图 7 所示, 取显著性水平 $\alpha=0.05$, 满足显著性检验的平均值在图中用红点标出。可以看出, 河南、湖北、湖南的小波功率均值的峰值分别出现在 15、16、17 个月附近 (均通过显著性检验); 从功率谱中可以看到

较高的功率几乎贯穿了整个研究期, 表明华中地区干旱主周期在 16 个月左右。短期来看, 河南、湖北、湖南还分别存在 6、7、8 个月左右的短周期, 但在功率谱中连续性较差。长期来看, 各省小波功率均值在 6 a 左右 (72 个月) 还具有一个峰值, 并且在河南、湖北的功率谱中连续性较好, 这表明华中地区还存在 6 a 左右的长周期。

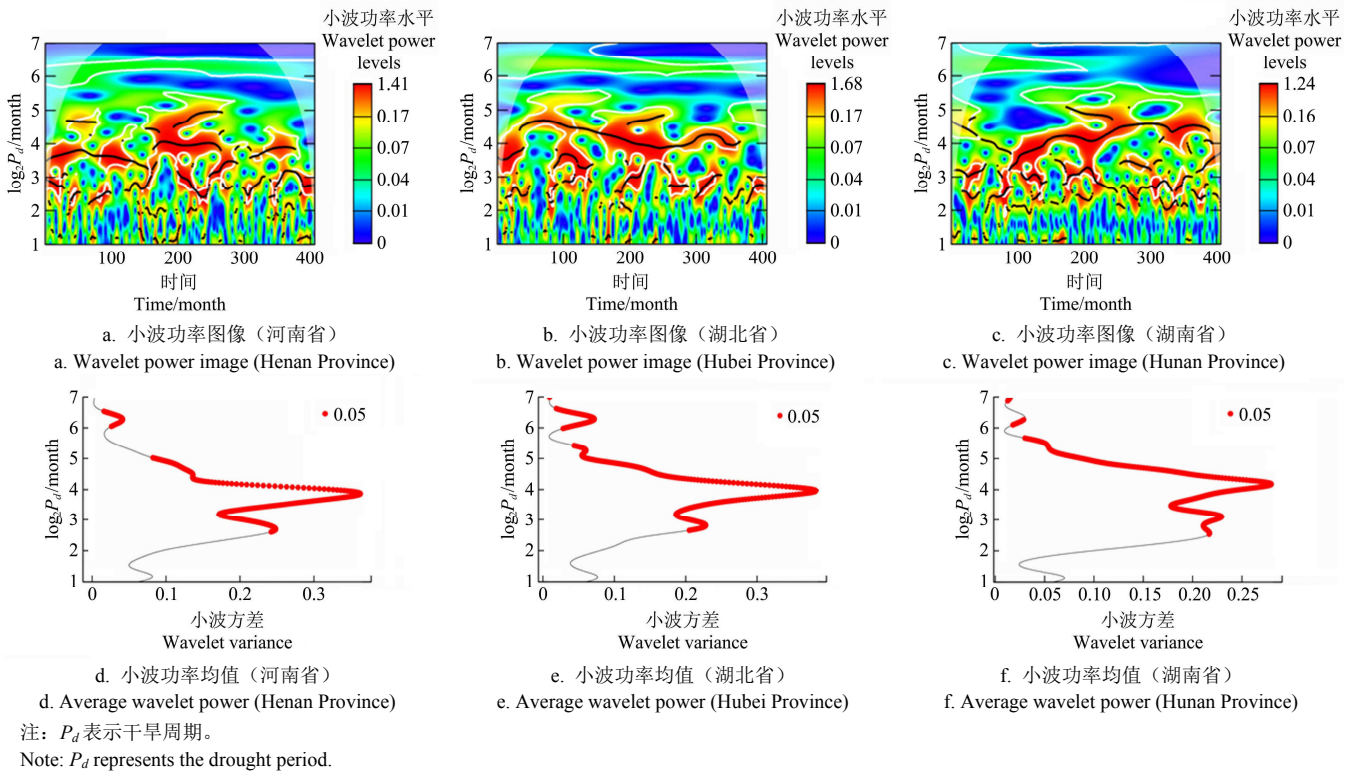


图 7 季时间尺度 SPAEI 小波分析结果

Fig.7 Wavelet analysis results of SPAEI of seasonal time scale

3 讨论

作为目前应用最为广泛的干旱指数, SPEI 通过表征地区干湿偏离状况来分析地区干旱演变趋势, 其可行性也已在许多实证研究中得以验证^[3-4]。从本文的研究和比较中可以发现, SPAEI 指数通过 AET 确定水分亏缺量、正态标准化处理和干湿等级划分等处理与 SPEI 也具有较多相同之处, SPAEI 所具有的多时间尺度特征也能灵活应用于实际干旱监测评估中。但相对而言, SPAEI 中引入的 AET 能更好考虑土壤水分平衡和植被状况, 从而使得 SPAEI 包含了更多考虑水量平衡和实际需水需求的机制。

Liu 等^[8]基于 Budyko 方程计算了 AET, 并验证了 AET 引入干旱评估的可行性, 研究表明 AET 的精度对于干旱监测具有十分重要的意义, 本研究对于 AET 的计算采用了 MEP 模型, 旨在获得更加精确可靠的 AET, AET-MEP 与 TEDAC 数据集的比较表明, MEP 模型计算出的 AET 与互补原理计算出的 AET 在精度和空间分布上高度一致, 具有可观的精度, 但 SPAEI 指标并不局限于使用 MEP 计算 AET, 因此也同样建议使用现有的其他数据集、模型以获取更加精确的 AET 来计算 SPAEI^[38-40]。影响干旱

发生的环境要素众多, 主要包括气温、气压、湿度、风速等, 本研究所使用的计算 AET 的 MEP 模型包含了净辐射、表面温度和空气比湿 3 个要素, 在计算简便的同时也保证了较高的精度, 然而其计算中并未包含风速在内的一部分环境要素, 这可能导致基于 AET 的干旱指数产生一定的不确定性, 后期将尝试改进 MEP 模型, 通过添加其他环境要素来完善 MEP 模型, 以此表征其他环境要素对干旱产生的影响。

本研究通过 MEP 模型获取高精度 AET 数据, 构建了 SPAEI, 为分析 SPAEI 指示植被干旱状态的性能, 对 SPAEI 与华中地区 VHI 指数进行了相关性分析, 研究表明引入 AET 的干旱指数可以较好的指示植被干旱状况, 这与 Kim 等^[41]的研究结果是一致的。

干旱指标的识别率和误报率也是值得关注的问题。从旱灾识别率上来看, 几种类型的干旱指数的月均值和变化趋势较为接近, 均能较好地识别重大历史干旱, 相对而言, SPAEI3 要略胜一筹。Ojeda 等^[42]的研究结果表明基于 AET 的干旱指数足以评估干旱事件, 其结果较 SPI 与 SPEI 来说更佳, 这与本文研究结果一致。需要说明的是, 尽管在部分旱灾发生期内干旱指数均值未降低到

-1.0, 但大都出现了大幅下降或接近于-1.0。同时, 由于省内局部地区发生了严重旱灾, 三种干旱指标在对地区干旱的识别中也出现了误报情况。例如, 1984 年商丘地区全区冬、春连旱(自 1983 年 11 月-1984 年 4 月 1 日降水量为常年同期降水量的 7%~21%)。由于本研究中各指标对旱灾的识别采用的是各省份的季尺度 SPAEI 均值, 研究区域较大, 难以避免出现舍入误差, 进而导致的旱灾识别率偏低, 将季尺度的 SPAEI 对应研究区域缩小可能会显著提高其旱灾识别率。然而, 目前局部的严重旱灾难以界定范围, 相关资料也较为缺乏, 不便统一分析, 故在本文中予以忽略。

尽管 SPAEI 在华中地区的干旱评估研究中表现良好, 部分干旱监测层面甚至优于 SPEI, 然而事实上引入实际蒸散发后也引入了新的不确定性, 具体表现为当区域可供蒸散的水分不足时, SPAEI 难以表征其他环境要素变化对干旱产生的影响。Rehana 等^[9]将区域根据可供蒸散的水分情况划分为水量限制型区域和能量限制型区域, 并在印度进行了实证研究, 对于能量限制型区域, 基于 PET 和 AET 的干旱指数都能提供相似的干旱评估结果, 而对于水量限制型区域, SPEI 会导致对干旱强度的高估。本研究所采用的研究区域位于中国华中三省, 由于降水丰沛, 大部分地区属于能量限制型区域, 因而 AET 的引入导致的不确定性并不会显著影响干旱评估的结果, 这也说明 SPAEI 适用于华中地区的干旱监测。对于 SPAEI 在其他区域的干旱监测表现情况仍需进一步检验, 未来将尝试在中国西北地区进一步验证引入 AET 对干旱指数的不确定性带来的影响。

诚然, 干旱指数的选择和比较较为复杂^[38], 尽管 SPAEI 在华中地区的干旱评估研究中表现良好, 部分干旱监测层面甚至优于 SPEI, 但该指标能否在更大范围内得到应用还需要进一步检验。另外, 在 SPAEI 应用中还需要考虑 AET 的影响因素和其不确定性问题^[6]。

4 结论

本文在最大熵增模型基础上以华中地区为例, 验证了 SPAEI 的可行性与适用性, 并应用季时间尺度的 SPAEI 分析了华中地区干旱变化趋势。结论如下:

1) 取显著性水平为 0.05 时, 三参数下的 log-logistic 分布对几类水分亏缺量的拟合效果最佳, 是拟合水分亏缺量 D 的合适分布函数。4 个不同时间尺度的两种 SPEI 与 SPAEI 之间均具有很强的线性相关性($R^2=0.92\sim 0.97$)。不同类型的指标之间对于湿润的判断较为一致, 但对于干旱的发生及其严重性的判断分歧相对较大。

2) SPAEI 在表征华中地区干旱实际面积、植被干旱状态与旱灾识别上较 SPEI 均具有明显优势, 在基于干旱指数与旱灾实际面积的相关性和旱灾识别率的分析研究中发现, 季时间尺度的 SPAEI 表现良好, 优于其他类干旱指标。综合而言, SPAEI 在华中地区具有良好的适用性。

3) 季时间尺度的 SPAEI 在华中地区的应用分析表明鄂西南恩施地区全年、湘南衡阳郴州部分地区的春季和

冬季、鄂西北和湘西邵阳部分地区的夏季、鄂西北部分地区的冬季干旱有加重的趋势。华中地区存在 16 个月左右的干旱主周期、6~8 个月的短周期, 以及 6 a 左右的长周期。由此表明, 基于 SPAEI 的干旱监测可为华中地区的干旱监测与气候变化分析持续提供有效信息。

[参 考 文 献]

- [1] 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁, 等. 全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述[J]. 地球科学进展, 2018, 33(10): 995-1004.
Guan Xiaodan, Shi Rui, Kong Xiangning, et al. A review of land gas mechanism in semi-arid region under the background of global change[J]. Advance in Earth Science, 2018, 33(10): 995-1004. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度, 频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019, 35(5): 1-10.
Han Lanying, Zhang Qiang, Jia Jianying, et al. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 35(5): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张强, 姚玉璧, 王莺, 等. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7206-7218.
Zhang Qiang, Yao Yubi, Wang Ying, et al. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7206-7218. (in Chinese with English abstract)
- [4] Dai A, Zhao T, Chen J. Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective[J]. Current Climate Change Reports, 2018, 4(3): 301-312.
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 71-77. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王文, 黄瑾, 崔巍. 云贵高原区干旱遥感监测中各干旱指数的应用对比[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 131-139.
Wang Wen, Huang Jin, Cui Wei. Comparison of drought indices for remote sensing drought monitoring in Yunnan-Guizhou Plateau region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 131-139. (in Chinese with English abstract)
- [7] Spinoni J, Barbosa P, de Jager A, et al. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016[J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2019, 22: 100593.
- [8] Liu S, Yan D, Wang H, et al. Standardized water budget index and validation in drought estimation of Haihe River Basin, North China[J]. Advances in Meteorology, 2016, 2016: 9159532.
- [9] Rehana S, Monish N T. Impact of potential and actual evapotranspiration on drought phenomena over water and energy-limited regions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 144(1): 215-238.
- [10] Dai A G. Characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity index during 1900-2008[J]. Journal

- of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116: D12115.
- [11] Joetzjer E, Douville H, Delire C, et al. Evaluation of drought indices at interannual to climate change timescales: A case study over the Amazon and Mississippi river basins[J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2013, 17(12): 4885-4895.
- [12] 阳勇, 孙怀卫, 罗红英. 最大熵增蒸散模型在中国区域的应用及时间尺度对比分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 184-191.
Yang Yong, Sun Huaiwei, Luo Hongying. Application of maximum entropy production model for estimation of evapotranspiration in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 184-191. (in Chinese with English abstract)
- [13] Sun H W, Chen L, Yang Y, et al. Assessing Variations in water use efficiency and linkages with land-use changes using three different data sources: A case study of the Yellow River, China.[J] *Remote Sensing*, 2022, 14: 1065.
- [14] Hajji I, Nadeau D F, Music B, et al. Application of the maximum entropy production model of evapotranspiration over partially vegetated water-limited land surfaces[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(6): 989-1005.
- [15] Donald A W. Drought and water crises: Science, Technology, and Management Issues[M]. Florida: CRC Press, 2005.
- [16] Wang J, Bras R L. A model of surface heat fluxes based on the theory of maximum entropy production[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(11): w11422.
- [17] 李志威, 杨大文, 雷慧闽. 基于最大熵增原理的蒸发蒸腾量模型应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 6(52): 785-790.
Li Zhiwei, Yang Dawen, Lei Huimin. Evapotranspiration model based on the maximum entropy production principle[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2012, 6(52): 785-790. (in Chinese with English abstract)
- [18] Hajji I, Nadeau D F, Music B, et al. Analysis of water vapor fluxes over a seasonal snowpack using the maximum entropy production model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(1): e2020JD033049.
- [19] Monson R, Baldocchi D. Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [20] 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.
- [21] Wang H J, Chen Y N, Pan Y P, et al. Assessment of candidate distributions for SPI/SPEI and sensitivity of drought to climatic variables in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(11): 4392-4412.
- [22] Shiau J. Effects of gamma-distribution variations on SPI-based stationary and nonstationary drought analyses[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34: 2081-2095.
- [23] Alam N M, Sharma G C, Moreira E, et al. Evaluation of drought using SPEI drought class transitions and log-linear models for different agro-ecological regions of India[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 100: 31-43.
- [24] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, 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.
- [25] GB/T 20481-2017, 气象干旱等级[S].
- [26] Pei F S, Wu C J, Liu X P, et al. Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 215-227.
- [27] Donohue R J, McVicar T R, Roderick M L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 386(1/2/3/4): 186-197.
- [28] 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: 136-141.
- [29] Allen R G, Clemmens A J, Burt C M, et al. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 24-36.
- [30] Cai J, Liu Y, Lei T, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(1/2): 22-35.
- [31] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of hydrology*, 1998, 204(1/2/3/4): 182-196.
- [32] Velela D, Montagne R, Araujo M. Cross-wavelet bias corrected by normalizing scales[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(9): 1401-1408.
- [33] Joshi N, Gupta D, Suryavanshi S, et al. Analysis of trends and dominant periodicities in drought variables in India: A wavelet transform based approach[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 200-220.
- [34] Douglas E M, Jacobs J M, Sumner D M, et al. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 373(3/4): 366-376.
- [35] Liu H, Li Y, Zhang R, et al. Evaluation and modification of potential evapotranspiration methods in Beijing, China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, 6(4): 9-18.
- [36] Zhao Q, Sun T, Zhang T, et al. High-Precision Potential Evapotranspiration Model Using GNSS Observation[J] *Remote Sensing*, 2021; 13(23):4848.
- [37] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 气候变化下 SPEI 指数在嘉陵江流域的干旱评估应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 943-948.
Ye Lei, Zhou Jianzhong, Zeng Xiaofan, et al. Application of SPEI in the changes of drought in Jialing River basin under climate change[J]. *Research and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 943-948. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张霞, 段亚雯, 段建平, 等. 基于蒸散发构建的日干旱指数及其对区域干旱事件的表征分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(3): 540-558.
Zhang Xia, Duan Yawen, Duan Jianping, et al. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(3): 540-558. (in Chinese with English abstract)
- [39] Li X, Gemmer M, Zhai J, et al. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration in the Haihe River Basin of the past 50 years[J]. *Quaternary International*, 2013, 304: 133-141.
- [40] Wan Z, Zhang K, Xue X, et al. Water balance-based actual

- evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the conterminous United States[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6485-6499.
- [41] Kim D, Rhee J. A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet hypothesis[J]. *Geophysical Research Letters*. 2016, 43(19): 10277-10285.
- [42] Ojeda M G, Donaire P Y, García T M G, et al. Evaluating the feasibility of using a drought index based on the actual evapotranspiration[C]. Vienna: EGU General Assembly, 2018.

Construction and applicability analysis of the standardized precipitation actual evapotranspiration index

Sun Xunlai¹, Chen Jianing^{1,2}, Sun Huaiwei^{1*}, Yang Yong¹, Song Liang¹, Zou Chaowang³,
Liao Weihong⁴, Chen Haorui⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Yancheng Urban Flood Control Project Management Office, Yancheng 224006, China;

3. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design, Wuhan 430064, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Understanding the drought process and accurately monitoring the drought situation are significant for the people's livelihood and facilitating sustainable social-economic development in China. Due to the vast territory of the whole country and the widespread impacts of drought, there is a lack of a proper drought index for drought monitoring in China. Based on the calculation of actual evapotranspiration and the choice of most suitable distribution types, this study proposed a standardized Precipitation Actual Evapotranspiration Index (SPA EI) to monitor the drought in central China, using methods such as the Maximum Entropy Production theory. Firstly, we introduced the definition of SPA EI. Then the actual evapotranspiration datasets calculated by the Maximum Entropy Production (MEP) model were validated, followed by the Kolmogorov-Smirnov test used to determine the most suitable probability distribution type of fitting water deficit. Also, the SPEI values were calculated by the Thornthwaite method and Penman-Monteith method (referred to as the SPEI-Th and SPEI-PM) with different time scales (monthly, seasonal, semiannual, and yearly) and compared with the SPA EI values calculated by the MEP model. Further, to assess the applicability of SPA EI in central China and the feasibility of the actual evapotranspiration in the field of drought monitoring, we established comprehensive historical data sets with provincial drought statistics data sets, Vegetation Health Index (VHI), and historical drought records. These data sets were used to validate these indexes by correlation analysis and extreme historical drought events. Finally, SPA EI based on the Mann-Kendall trend test and wavelet analysis was used to analyze drought's changing trend and periodicity in central China. The results showed that: 1) In central China, every grid and month based on log-logistic distribution under three parameters passed the K-S test ($P < 0.05$), which indicated log-logistic under three parameters distribution was the suitable distribution function of fitting water deficit. 2) There was a significant correlation between SPEI-Th, SPEI-PM, and SPA EI of all time scales ($P < 0.01$), and a strong linear correlation between the SPEI and SPA EI values ($R^2 = 0.92-0.97$). The correlation coefficient between similar indexes decreased with the increase of time scale. The correlation decreased slightly. The different drought indexes of varying time scales had the same judgment on humidity, but the judgment on drought was relatively different. 3) The comparative analysis of various indexes using relevant drought data showed that the correlation coefficient between SPA EI and VHI were higher than other types of drought indexes among the drought indexes of the same time scale, and SPA EI of seasonal time scale. The correlation between SPA EI of seasonal time scale and drought-affected areas in each province was significant ($r = 0.56-0.65$). Compared with the SPEI values, the SPA EI had better performance to indicate vegetation drought. SPA EI of seasonal time scale had more advantages than other indexes in predicting the actual drought area, vegetation drought performance, and drought identification. 4) The application analysis of seasonal time scale SPA EI in central China showed that the drought in southwest Hubei, northwest Hubei, western Hunan, and southern Hunan had an aggravating trend. The main drought period in central China was about 16 months; the short period was between 6 and 8 months and the long period was about six years. It is indicated in statistics data research that actual evapotranspiration had strong feasibility in the field of drought assessment in China. Our study provided a new drought index for drought monitoring, conducive to the continuous monitoring of drought and water resources management in certain regions. Also, SPA EI could provide a reference for drought monitoring and drought degree quantification in Central China and contribute to the world's understanding of drought monitoring.

Keywords: drought; precipitation; actual evapotranspiration; SPA EI; Kolmogorov-Smirnov test; central China