

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbkb.2024.0019



引用格式: 李伟光, 侯美亭, 周海霞, 等. 基于实际蒸散量修订标准化降水蒸散干旱指数研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 164-173.

Citation: Li Weiguang, Hou Meiting, Zhou Haixia, et al. Modification of the standardized precipitation evapotranspiration index based on actual evapotranspiration[J]. Journal of Hainan University (Natural Science), 2024, 42(2): 164-173.

基于实际蒸散量修订标准化降水蒸散干旱指数研究

李伟光^{1,2}, 侯美亭³, 周海霞⁴, 张京红^{1,2}, 邹海平^{1,2}, 陈小敏^{1,2}

(1. 海南省气候中心, 海南 海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口 570203; 3. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 4. 海南省三沙市气象局, 海南 三沙 573199)

摘要: 为改进 SPEI 在农业干旱监测中的效果, 从水分平衡的角度提出了一种修订的标准化降水蒸散指数 (MSPEI). 该指数通过计算降水与实际蒸散量的差值, 并基于最长连续干旱时间对差值进行自适应修正, 采用目视检查概率拟合曲线与 Kolmogorov-Smirnov 检验 2 种方法选择适宜分布函数, 最后进行标准化转换生成干旱指数. 干旱指数有效性检验表明: MSPEI 能够准确反映不同季节间干湿状态的差异, 在湿润比例低于 20% 的春季, MSPEI 均低于 -0.5; 在反映干旱趋势时, MSPEI 与 SPEI 具有高度一致性; MSPEI 与植被指数具有稳定且较高的相关性, 在 0.57 ~ 0.78 之间; 在典型干旱过程监测中, MSPEI 对旱灾发生、发展和解除过程的描述更符合实际. MSPEI 适应于不同气候背景, 无需选择时间尺度, 即可较准确地反映农业干旱演化过程.

关键词: 干旱指数; SPEI; 实际蒸散量; MSPEI; 水分平衡

中图分类号: P49

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2024)02-0164-10

干旱是影响自然生态和农业生产最主要的自然灾害^[1]. 为减轻干旱带来的不利影响, 水资源管理者和使用者需要及时了解干旱状况, 以采取有效防御措施并合理安排用水. 研究者基于多种假设开发了诸多干旱指数, 根据所采用的数据和致旱机理的不同, 干旱指数可以分为气象干旱指数、机理模型和遥感指数 3 类^[2-3]. 气象干旱指数由于其数据记录的标准化、记录时间长、计算简单以及更新及时等优势, 长期受到各行业使用者的欢迎^[4].

目前应用广泛的气象干旱指数主要包括帕默尔干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化的干旱指数 (Standardized Precipitation Drought Index, SPI; Standardized Precipitation Evapotranspiration Drought Index, SPEI) 以及综合干旱指数等^[5]. 其中, 物理机理最为明确的是 PDSI 及其衍生出来的自适应帕默尔干旱指数 (self-calibrating Palmer Drought Severity Index, scPDSI). PDSI 从水分平衡的角度, 以降水量与气候适宜降水量之间的差值作为指标计算干旱指数^[5]. 但在计算气候适宜降水量时需要最大径流量, 此参数难以确定, 通常用田间持水量替代, 导致气候适宜降水量产生较大偏差, 使不同气候背景下指数分布偏差大、干旱阈值不稳定. scPDSI 通过将经验得出的气候特征和持续时间因子替换为基于某地历史气候数据自动计算的值, 改进了极端干旱时的表现^[6], 但其在计算过程中仍需要确定土壤持水量、时间尺度等参数校正, 且未弥补最大径流量估算的误差, 其普适性和准确性受到制约.

SPI^[7]、SPEI^[8] 等标准化的干旱指数核心在于正态化降水或降水与潜在蒸散量的差值等偏态分布指

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金 (U21A6001); 国家重点研发计划项目 (2022YFD2301201); 海南省自然科学基金 (421MS101); 海南省院士创新平台科研项目

作者简介: 李伟光 (1981—), 男, 山东莱芜人, 正高级工程师, 研究方向: 气候变化与应用气象, Email: 163great@163.com

通信作者: 侯美亭 (1982—), 男, 河南清丰人, 高级工程师, 研究方向: 气候变化与卫星遥感, Email: houmt@outlook.com

标,优势在于能够比较一段时期干旱状况在历史的排位,反映干旱演变趋势具有良好表现.这类干旱指数的缺点是对前期降水处理为等权重,导致在不同地区、季节(特别是干湿转换的季节)监测干旱时时间尺度无法统一^[9],与植被指数相关性最大的时间尺度又随时间、空间高度可变,给评价干旱严重程度带来一定困扰^[10].而且,其计算过程中采用历史同期月份累计量进行累积概率拟合,如此虽能反映前期降水偏离常态的程度,但不能反映不同季节间降水满足陆地植被需水量的差异,即季节间干旱事件发生频率的差异^[11].通过对前期降水量衰减计算SPI指数,并引入相对湿润度指数加权得到的综合气象干旱指数(Meteorological Comprehensive Drought Index, MCI)^[12-14]能够改进SPI对近期降水的敏感性、增强反应季节性干旱的能力.另有学者设计了气象水文综合干旱指数(Meteorological and Hydrological Drought Index, MHDI)^[15]、基于气象干旱与农业干旱的多变量标准化干旱指数(Multivariate Standardized Drought Index, MS-DI)^[16]等,均在不同程度上减轻了单一指数的弱点.

SPEI从潜在蒸散与降水量平衡的角度评价干旱,不同的蒸散量估计方法是影响其精度和适用性的重要原因^[17-18].农业干旱是作物需水与供给不平衡所致,采用作物系数 K_c 等方式计算实际蒸散量代替潜在蒸散量,能够改善SPEI在评估农业干旱发生次数、受灾面积时的效果^[19-20].目前陆表真实蒸散的遥感反演算法已相对成熟,相关数据集的时间和空间准确性已经满足实际蒸散量估算需求^[21-22].本研究在SPEI的基础上,提出了一种采用遥感反演的地表实际蒸散量修订标准化降水蒸散指数(Modified Standardized Precipitation Evapotranspiration Drought Index, MSPEI)计算方法,以期提高农业干旱监测中的准确性.

1 材料与方法

1.1 数据

一个理想的干旱指数应该具备广泛的气候适应性,能监测不同气候背景下干旱的发生发展.综合考虑国家基准气候站的分布、气候干湿区划^[23]、地表覆盖类型,选取位于肇州、喀什、多伦、大同、元江、宜春6个站点分别代表不同气候类型,开展干旱指数研究.站点分布及气候状况见表1.气象站点观测数据时间范围为1961—2018年,包含月降水量、月平均气温,来自<https://data.cma.cn/>.

表1 代表站点位置及气候状况

站点	省份	气候背景	干湿气候区
肇州	黑龙江	温带大陆性季风气候	半湿润
喀什	新疆	温带大陆性气候	干旱
多伦	内蒙古	温带大陆性气候	半干旱
元江	云南	亚热带季风气候	湿润
大同	山西	温带大陆性季风气候	半湿润
宜春	江西	亚热带季风气候	潮湿

实际蒸散量采用遥感反演的实际蒸散量MOD16A2^[21],时间范围为2000—2018年,空间分辨率为1 km.流域水分平衡检测表明该数据集具有较高的精度^[24].植被指数数据集为GIMMS NDVI3g.v1^[25],时间跨度为1981—2015年,空间分辨率为0.0833°.

1.2 研究方法

1.2.1 修订降水蒸散指标的方法 根据帕默尔对干旱的定义,干旱是一段时间内降水低于气候上所期望的水分供给^[26],本研究将一段时间内降水低于常年植被生长需水量作为反映干旱状况的指标.常年植被生态需水量采用历年同月份蒸散量平均值.计算降水与蒸散量差值序列时,当降水量大于蒸散量时,假定剩余水量下月流失;当降水量小于蒸散量时,差值累计入下月.对得到差值序列进行干旱持续时间校正.最后参照SPEI指数原理,整个差值序列同时进入累积概率分布拟合,正态化转换得到干旱指数.

详细的修订SPEI指数计算方法如下:

第一步,计算逐月蒸散量.采用MOD126A2的实际蒸散量数据集,计算实际蒸散量逐月平均值.

第二步,计算逐月降水与实际蒸散量的差值并调整.

$$D_i = P_i - AET_i \times k, \quad (1)$$

$$MD_i = \begin{cases} D_i & D_{i-1} \geq 0 \\ D_{i-1} + D_i & D_{i-1} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中, D 为当月降水与实际蒸散量的差值, P 为月降水量, AET 为当月实际蒸散量, k 为调整系数. 式(2)中 MD 为降水量与蒸散量的累积差值. i 表示时间序列的序号. 调整 k 系数的原因是实际蒸散量值估计存在误差, 会出现降水永远小于实际蒸散量的情况. 调整依据是假设各地会在一个长期时段内存在水分平衡, 不会一直维持降水不能满足蒸散需求的状态. 将 k 设置为 1, 获取 MD 序列连续低于 0 的长度, 认为该长度为连续干早期. 假设一个地区的最长连续干早期不会长于 48 个月, 按照 0.05 的步长减小 k 系数, 并重新计算 MD 序列, 直到连续干早期在此范围之内, 完成 k 系数自适应调节.

1.2.2 干旱指标的累积概率分布及检验 在标准化干旱指数设计过程中, 假设累积降水量、降水与蒸散量的差值等干旱指标服从于某一累积概率分布函数是标准化的前提. 本研究选择正态分布(Normal)、极值分布(Extreme Value)、对数逻辑分布(log-logistic)^[27]以及广义极值分布(GEV)^[28]对不同气候类型的干旱指标进行检验, 以选择更适合描述修订的干旱指标分布形态的分布函数. 所用正态分布函数累计概率见式(3), 极值分布函数累计概率见式(4), 对数逻辑分布函数累计概率见式(5), 广义极值分布函数累计概率见式(6).

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (3)$$

$$F(x) = e^{-e^{-x/\beta}}, \quad (4)$$

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-\varepsilon) \right]^{1/k}. \quad (6)$$

采用目视检查概率拟合曲线、Kolmogorov-Smirnov 方法^[27]来检验某一组样本数据是否服从某一理论分布. Kolmogorov-Smirnov 方法实现方法为 Matlab 内置的 kstest 函数. 如果返回值 P 值大于 0.05, 无法拒绝原假设, 否则接受这些数据服从该分布.

1.2.3 干旱指标的标准化 对干旱指标的标准化能够消除地区间指数的偏差, 更利于评价地区间干旱出现的频率差异. 根据检验上述 4 种累积概率函数, 选择最优拟合分布函数. 比较发现 log-logistic 概率分布是最优分布函数. log-logistic 概率分布的累积函数(式 5)中, 参数 α 、 β 、 γ 分别采用线性矩的方法拟合获得,

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}, \quad (8)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta), \quad (9)$$

其中, w_0, w_1, w_2 为原始数据序列 D_i 的概率加权矩. 计算方法如下,

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i, \quad (10)$$

$$F_i = \frac{1}{N}(i - 0.35). \quad (11)$$

然后对累积概率密度进行标准化,

$$P = 1 - F(x). \quad (12)$$

当 $P \leq 0.5$ 时,

$$w = \sqrt{-2\ln(P)}, \quad (13)$$

$$MSPEI = w - \frac{c_0 + c_1 + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}, \quad (14)$$

当 $P > 0.5$ 时,

$$P = 1 - P, \tag{15}$$

$$MSPEI = - \left(w - \frac{c_0 + c_1 + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right), \tag{16}$$

其中, $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 分别为 2.515 517、0.802 853、0.010 328、1.432 788、0.189 269、0.001 308。

1.2.4 修订的干旱指数有效性验证 为验证修订标准化降水蒸散指数(MSPEI)的有效性,从以下4个方面进行检验。

(1)反映季节干旱的能力:计算MSPEI与3、6、12个月尺度的SPI、SPEI指数以及scPDSI、PDSI干旱指数在不同季节的算术平均值,对比各指数反映季节干旱的能力^[14]。

(2)描述植被响应的能力:计算MSPEI、SPI、SPEI、scPDSI和PDSI与植被指数(GIMMS NDVI)之间的Pearson相关性.通过比较不同干旱指数与植被指数之间的相关性,验证各指数在描述植被响应时的能力,从而评估它们在反映干旱对生态系统影响方面的准确性^[10, 29-30]。

(3)反映干旱变化趋势的能力:计算MSPEI、3个月的SPEI、scPDSI在1980—2018年的线性趋势^[31],对比各指数在反映干旱变化趋势的能力。

(4)反映典型干旱过程的能力:利用典型干旱过程,检查MSPEI在捕捉干旱过程特征方面的表现,并与其他指数进行对比。

2 结果与讨论

2.1 累积概率分布检验评估 为选择最佳概率分布拟合函数,采用目视检查概率拟合曲线与Kolmogorov-Smirnov检验两种方法来测试4种分布拟合函数的适用性.目视检查拟合曲线与经验累积分布之间差异(图1)可以发现:Extreme Value在低差值区域偏大,而中间区域偏小,是拟合效果最差的方法;Normal、Log-logistic、GEV三种方法效果相近;仔细对比Log-logistic与经验分布最接近,特别是在喀什站两者差异最小。

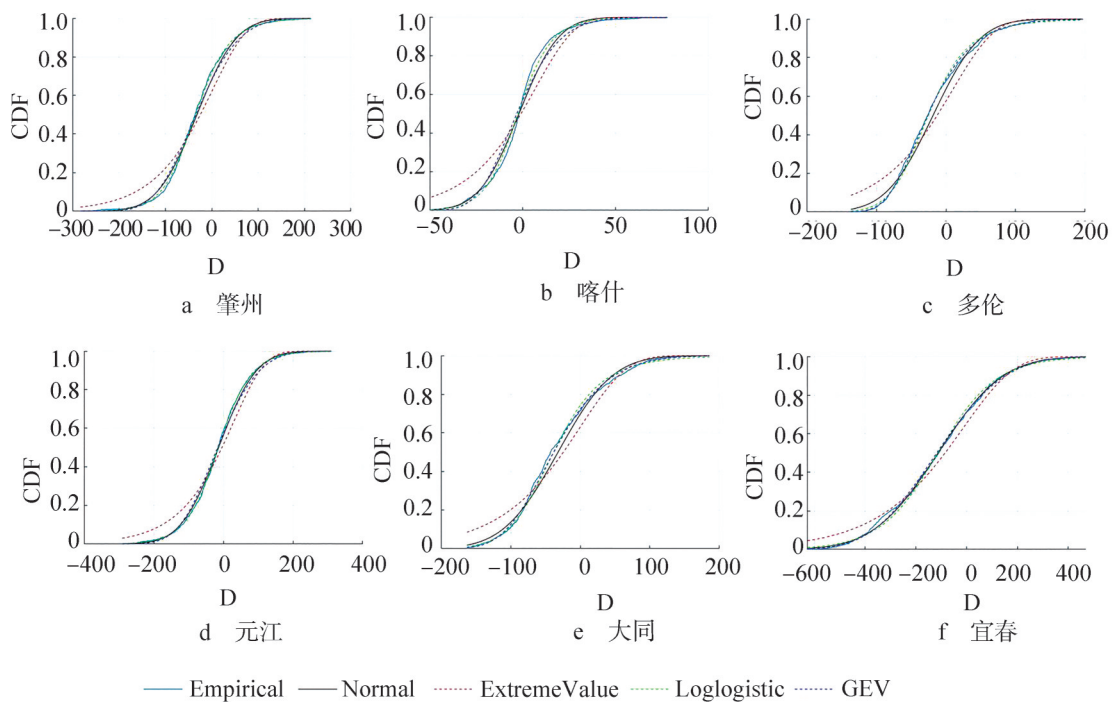


图1 不同气候区代表站点D值拟合曲线

Kolmogorov-Smirnov 检验结果(表2)表明:Extreme Value 函数的拟合效果最差,6个站点均没有通过显著性检验;Normal 函数在分别代表湿润和潮湿区域的元江、宜春站点通过了0.05水平的显著性检验;GEV 函数在多伦、大同、宜春站点通过了0.05水平的显著性检验;Log-logistic 分布函数在5个站点均通过0.05水平的显著性检验.4种分布拟合函数在代表干旱区的喀什站点都没有通过显著性检验.从站点的干湿

程度上看,湿润程度较高的站点分布函数的拟合效果较好;而降水变率较大的干旱区站点集中函数的拟合效果最差.4种分布函数比较来看,Log-logistic的拟合效果最好、适用范围最广.

表2 分布拟合函数Kolmogorov-Smirnov检验的p值

站点	Normal	Extreme Value	Log-logistic	GEV
肇州	3.37E-02	1.57E-08	8.27E-01*	2.80E-02
喀什	1.32E-05	4.80E-16	2.96E-02	1.31E-05
多伦	1.40E-03	7.10E-12	1.20E-01*	5.74E-01*
元江	2.67E-01*	1.33E-06	9.89E-01*	3.61E-02
大同	5.43E-04	5.66E-08	6.37E-02*	3.17E-01*
宜春	3.48E-01*	9.33E-04	9.60E-02*	4.37E-01*

注:*表示通过p=0.05显著性检验.

目视检查概率拟合曲线与Kolmogorov-Smirnov检验两种方法均表明Log-logistic方法对降水与蒸散量累计差值的拟合效果最好.因此,在后续干旱指数计算中采用Log-logistic方法.

2.2 不同干旱指数反映季节干旱的对比 标准化的干旱指数一个大的缺陷在于不能反映出季节性干旱的差异^[18].为检验本研究提出的MSPEI能否反映季节性干旱差异,统计了6个站点、4个季节不同干旱指数的平均值,以及各个季节降水量大于实际蒸散量的比例(湿润比例)(表3).

表3 典型站点不同季节干旱指数平均值

		MSPEI	湿润比例/%	spl3	spl6	spl12	spei3	spei6	spei12	scPDSI	PDSI
肇州	春季	-0.55	14	0.26	0.32	0.07	0.25	0.30	0.09	-0.09	0.27
	夏季	0.22	64	0.08	0.12	0.10	0.08	0.13	0.11	-0.21	0.12
	秋季	0.23	63	-0.01	0.04	0.11	0.00	0.05	0.12	-0.07	-0.06
	冬季	-0.03	82	0.39	0.05	0.08	0.40	0.05	0.09	0.01	0.18
喀什	春季	0.08	17	0.00	0.03	0.09	-0.02	0.01	0.07	-0.59	-0.08
	夏季	0.03	15	0.13	0.06	0.11	0.11	0.05	0.10	-0.48	0.12
	秋季	0.01	23	0.19	0.15	0.11	0.18	0.15	0.10	-0.45	0.06
	冬季	0.05	52	0.13	0.16	0.09	0.09	0.16	0.08	-0.34	0.08
多伦	春季	-0.57	10	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.06	-0.05	-0.19	-0.40
	夏季	0.07	58	0.05	0.06	-0.04	0.04	0.04	-0.06	-0.23	-0.32
	秋季	0.52	52	-0.04	-0.02	-0.02	-0.05	-0.03	-0.04	-0.22	-0.45
	冬季	0.11	38	-0.07	-0.07	-0.03	-0.10	-0.08	-0.04	-0.17	-0.36
元江	春季	-0.85	10	-0.14	-0.10	-0.05	-0.16	-0.11	-0.06	-0.73	-0.50
	夏季	0.10	62	-0.04	-0.08	-0.08	-0.04	-0.09	-0.10	-0.68	-0.58
	秋季	0.33	68	0.00	-0.06	-0.08	-0.01	-0.06	-0.09	-0.68	-0.45
	冬季	0.01	63	-0.06	-0.03	-0.07	-0.07	-0.03	-0.07	-0.79	-0.47
大同	春季	-0.80	14	0.13	0.09	-0.06	0.11	0.07	-0.07	-0.22	-0.08
	夏季	0.40	56	-0.08	-0.01	-0.03	-0.09	-0.03	-0.05	-0.21	-0.18
	秋季	0.53	32	-0.03	-0.08	-0.02	-0.04	-0.08	-0.02	-0.17	-0.15
	冬季	-0.18	9	0.07	-0.02	-0.05	0.05	-0.04	-0.06	-0.16	-0.11
宜春	春季	0.75	97	-0.01	0.00	0.07	-0.04	-0.01	0.07	-0.46	-0.27
	夏季	0.07	70	0.01	0.00	0.07	0.03	-0.01	0.08	-0.24	-0.09
	秋季	-0.60	62	0.15	0.09	0.08	0.14	0.09	0.08	-0.26	-0.13
	冬季	-0.05	90	0.06	0.12	0.07	0.05	0.11	0.06	-0.25	-0.13

由表3可以发现,除潮湿的宜春地区外,其他地区春季降水量大于实际蒸散量的比例普遍在20%以下,说明最易发生春旱.标准化的干旱指数(SPI,SPEI)所有地区、所有季节的平均值都在0上下浮动,在

反映不同季节降水保障蒸散需水量方面表现较差. 由于该类指数设计机理所决定的,指数反映的是当年降水量(或降水与潜在蒸散量的差值)在历史上的位置,指数平均值偏离 0 的原因来自指标偏态分布正态化过程中的拟合误差. PDSI、scPDSI 在绝大多数站点与季节均表现为负值,而且季节性的变化规律性也较差;数值大小与气候背景干湿状况的关联性也不一致. 新设计的 MSPEI 能够反映出季节干旱的差异,在降水量大于实际蒸散量的比例较低的春季,干旱指数的值也比较低,普遍低于 -0.5;而降水量最多的夏季普遍较高. 宜春地区秋季降水满足蒸散蓄水量的比例是 4 个季节中最低的,秋季的 MSPEI 也最低,达到 -0.60. 由此可见,MSPEI 能够反映出季节性干旱的差异,而 SPI、SPEI、帕默尔干旱指数不能够反映.

2.3 不同干旱指数与植被指数之间的相关性 对比不同干旱指数之间的相关性(图 2)显示:6 个典型站点的 SPI 与 SPEI 具有很高的相关性,3、6、12 个月时间尺度下,两个标准化干旱指数之间的相关性超过 0.98,甚至达到 1. PDSI 与 scPDSI 之间的相关性也较高,范围在 0.73 ~ 0.96,气候干燥站点(喀什、多伦)两者之间的相关性更高. SPI、SPEI 与帕默尔干旱指数之间的相关性在 0.60 ~ 0.91. 肇州、喀什、多伦、元江、大同 5 个站点 MSPEI 与 SPI、SPEI 之间的相关性在 0.74 ~ 0.95;MSPEI 与两种帕默尔干旱指数之间的相关性较为稳定,在 0.83 ~ 0.89. 在气候潮湿的宜春站,MSPEI 与 3 个月时间尺度的 SPI、SPEI 相关性达 0.65;随着时间尺度增加,相关性下降;MSPEI 与原始帕默尔干旱指数相关性达 0.72,而与 scPDSI 相关性仅有 0.32.

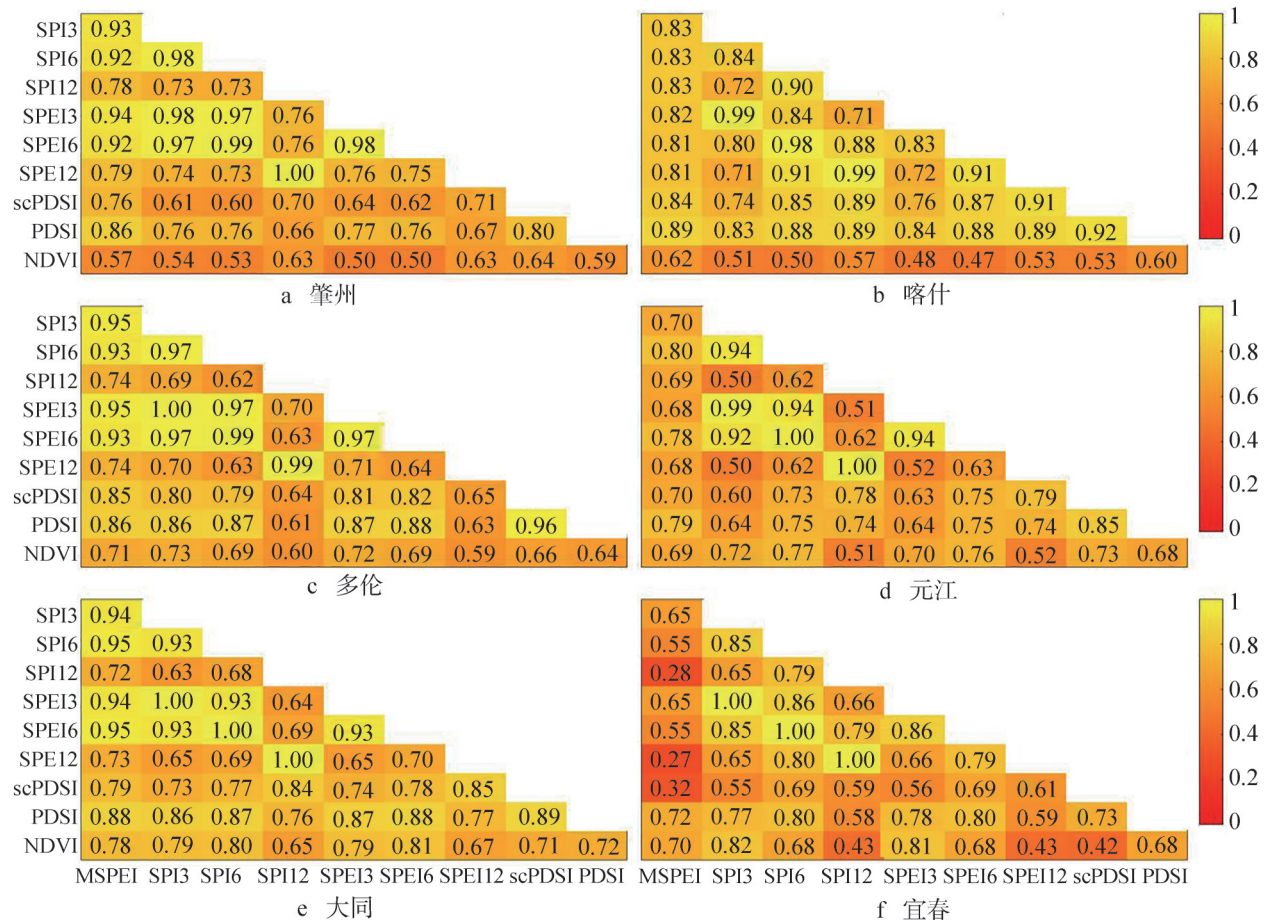


图 2 典型站点 6 月干旱指数与植被指数之间的相关性

干旱对植被的生长具有重要影响,归一化植被指数(NDVI)能够反映出植被对干旱的响应^[19-20]. 统计 1981—2015 年不同干旱指数与 GIMMS NDVI 之间的相关性发现,所有干旱指数均与 NDVI 具有较高的相关性. 在不同站点,与 NDVI 相关性最高的干旱指数并不一致;MSPEI 的表现始终较好. 与不同尺度的 SPI、SPEI 相比,MSPEI 与 NDVI 的相关性能够与相关性最高的时间尺度相近,而高于其他时间尺度. 与 PDSI、scPDSI 比较,MSPEI 与 NDVI 在绝大多数站点也保持较高的相关性. 结果表明:MSPEI 描述不同气候

背景下植被对干旱响应具有较高的准确性.

2.4 MSPEI在反映干旱趋势中的表现 为进一步检验MSPEI在反映干旱演变趋势时的能力,计算了6个典型代表站的逐月MSPEI、SPEI3、scPDSI三种干旱指数的线性倾向率(图3).结果显示:各个典型站点干旱趋势并不一致,MSPEI、SPEI3两者的趋势相近;scPDSI与两者相差较大,scPDSI有放大干旱趋势的倾向.肇州、喀什、元江MSPEI的趋势线在SPEI3与scPDSI之间,靠近SPEI3的位置.多伦、大同、宜春MSPEI的趋势线与SPEI3基本重合,而scPDSI表现出单独趋势,与SPEI3相差较大.说明不同干旱指标在反映干旱趋势时存在偏差,MSPEI的结果能够保留SPEI反映干旱趋势的优势,具有较高的可靠性.

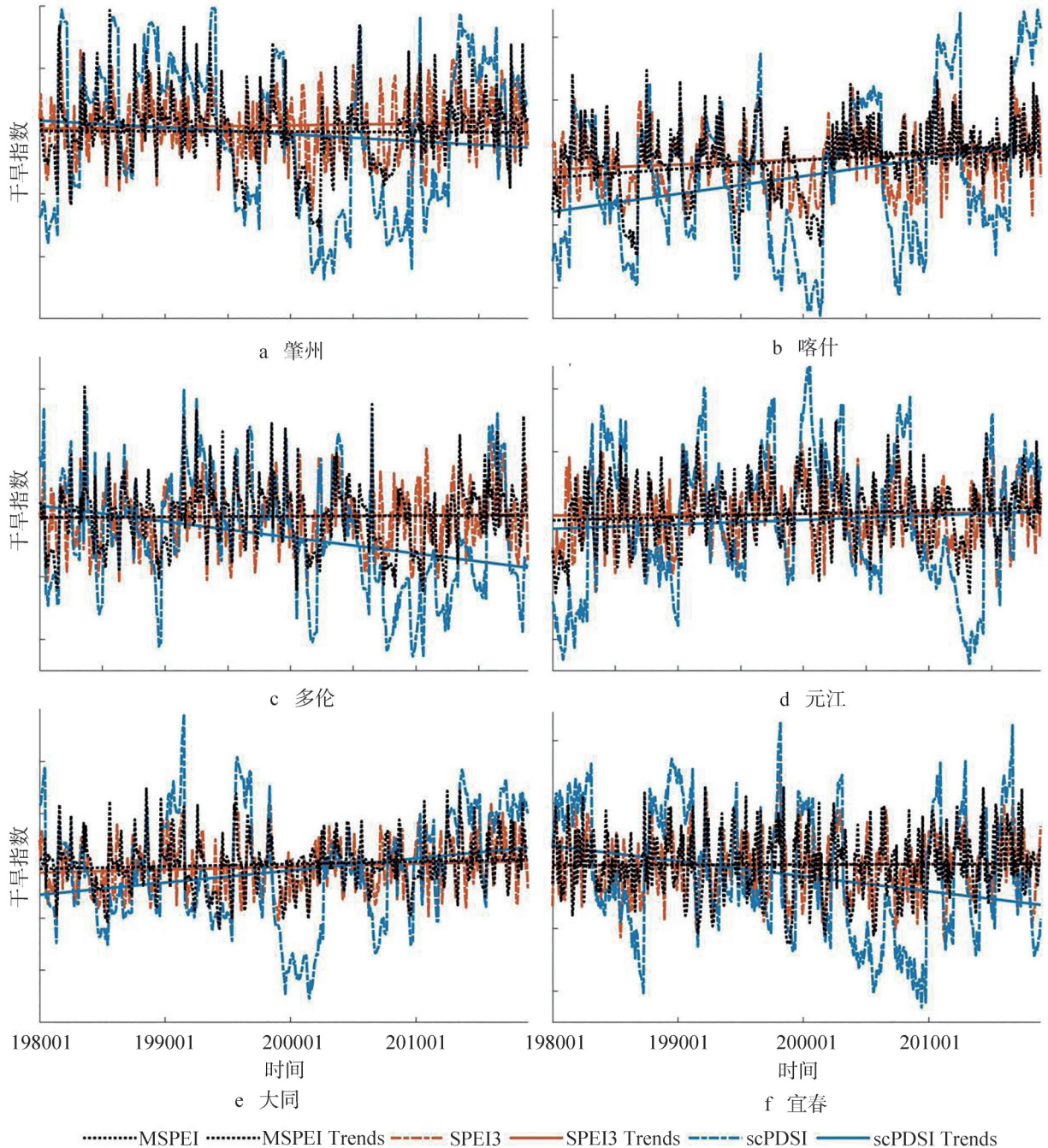


图3 不同干旱指数及其反映的干旱趋势

2.5 典型干旱过程中的应用 2003年宜春气候异常,4~6月全省先后出现了3次集中强降雨过程,赣江、锦河、潦河均发生较大洪水.7~12月久晴少雨出现伏旱、秋冬连旱的典型旱灾^[30].从逐月降水量(图

4a)可以看出:上半年宜春降水量还相对充足,6、7月降水显著偏少,8月与常年相近,随后降水持续偏少.从对应的干旱指数变化(图4b)来看,SPEI3、scPDSI 3月开始就低于0,表现出干旱;4月后继续下降,而此时宜春有强降雨,发生洪水,这两种指数与实际情况相悖.SPEI6在5月降水超过常年平均降水量的情况下由正转负,也悖于常理.SPEI12在1至5月始终保持偏涝状态,10月之后才呈现干旱状态,没有反映出伏旱的发展.相比,MSPEI在上半年为正值,说明偏涝,与发生洪水的状态一致;下半年降水连续偏少,干旱指数转为负值并持续;8月降水超过常年均值,而MSPEI指数敏感地监测到干旱缓解;MSPEI指数变化完整反映出了洪涝、伏旱、秋冬连旱整个干旱过程.从以上典型干旱过程可以说明:MSPEI能敏感准确地反映出干旱发生发展波动过程,具有较高准确率,且不需要考虑时间尺度选择.

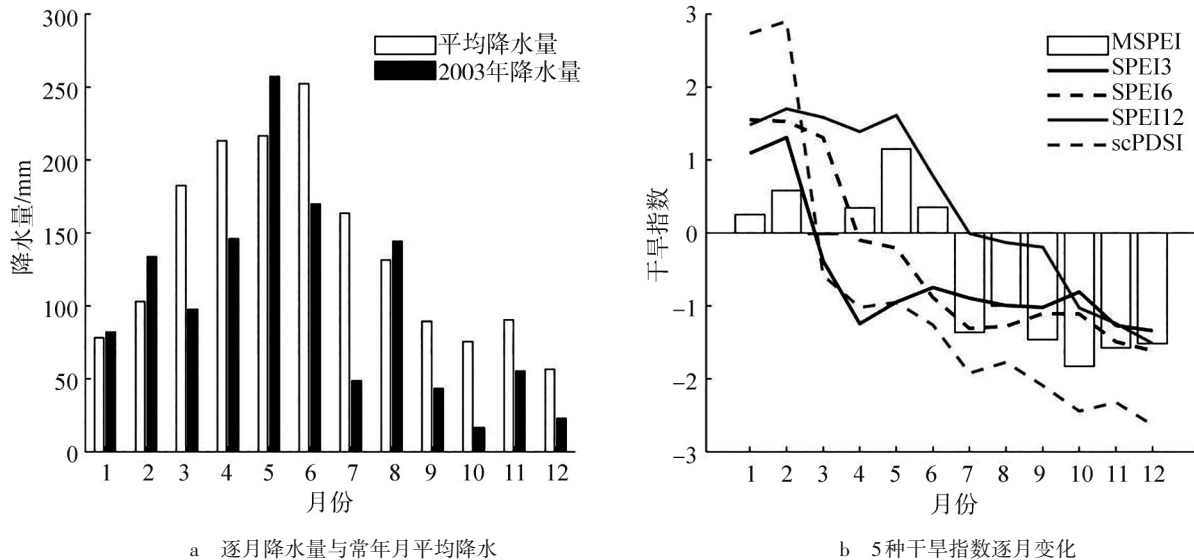


图4 宜春2003年典型干旱过程

3 结论

本研究从水分平衡的角度修订SPEI指数,逐月计算降水与常年实际蒸散量的差值,采用最长连续干旱时间对差值进行自适应修订,然后利用最佳分布函数正态化生成修订的标准化降水蒸散指数MSPEI.从该指数反映季节干旱频率、干旱变化趋势、与植被指数之间的相关性和典型干旱过程时的表现4个方面进行了对比分析.结论如下:

(1) 降水与常年实际蒸散量的差值采用Log-logistic分布拟合效果最好.6个不同气候背景的站点中5个站点通过了0.05水平的显著性检验,即使是在没有通过检验的干旱区喀什站点,该方法也是拟合效果最好的概率分布函数.因此MSPEI采用Log-logistic分布对降水与实际蒸散量差值的累积概率进行拟合.

(2) MSPEI能够准确反映不同季节间干湿状态的差异,而且与植被指数具有较高相关性.在反映干旱趋势方面,MSPEI与SPEI具有高度一致性.在典型干旱过程监测中,MSPEI无需用户选择特定的时间尺度,消除了选择时间尺度的困扰,还能够敏感地监测干旱情况的变化,及时反映暴雨对干旱的缓解.

蒸散量是定量描述干旱过程的重要指标.本研究提出的MSPEI在计算过程中引入了实际蒸散量,消除了参考作物潜在蒸散量与实际蒸散量的偏差在不同气候区之间的不一致,保留了标准化计算过程,使其具备适宜多站点比较及评价干旱趋势的优点,不仅可以反映季节干旱差异,更能及时反映干旱发生、发展、缓解的过程.随着未来实际蒸散量准确性的提高,MSPEI监测干旱的能力有望进一步提升,可作为传统干旱指标的补充.

参考文献:

- [1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[M]. London: Routledge, 2000.
- [2] Purdy A J, Kawata J, Fisher J B, et al. Designing drought indicators[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019,

- 100(11):2327-2341.
- [3] 李伟光,刘少军,侯美亭,等. 气象与农业干旱指数研究进展[J]. 气象与环境科学,2021,44(3):76-82.
- [4] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1-2):202-216.
- [5] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. 应用气象学报,2022,33(5):513-526.
- [6] Wells N, Goddard S, Hayes M J. A self-calibrating palmer drought severity index[J]. Journal of Climate, 2004, 17(12):2335-2351.
- [7] Mckee T B, Doeskin N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[A]. Proceeding of 8th Conference on Applied Climatology[C]. January 17-23, 1993, Anaheim: American Meteorological Society, 179-184.
- [8] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [9] 刘永佳,黄生志,方伟,等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报,2021,52(1):93-102.
- [10] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1):52-57.
- [11] 李伟光,刘少军,韩静,等. 基于遥感蒸散量的我国干旱特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(3):93-99.
- [12] 邹旭恺,任国玉,张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究,2010,15(4):371-378.
- [13] 赵海燕,高歌,张培群,等. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性[J]. 应用气象学报,2011,22(6):698-705.
- [14] 廖要明,张存杰. 基于MCI的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. 气象,2017,43(11):1402-1409.
- [15] 粟晓玲,梁箬. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23.
- [16] Hao Z C, AghaKouchak A. Multivariate Standardized Drought Index: a parametric multi-index model[J]. Advances in Water Resources, 2013, 57:12-18.
- [17] Zhao H Y, Gao G, An W, et al. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 102:48-58.
- [18] Zellou B, El Moçayd N, Bergou E H. Review article: towards improved drought prediction in the Mediterranean region-modeling approaches and future directions[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023, 23(11):3543-3583.
- [19] 马雪晴,胡琦,王靖,等. 基于SPEI-K_c的华北平原小麦玉米周年干旱特征分析[J]. 农业工程学报,2020,36(21):164-174.
- [20] 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(S1):142-151.
- [21] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8):1781-1800.
- [22] Martens B, Miralles D G, Lievens H, et al. GLEAMv3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5):1903-1925.
- [23] 毛飞,孙涵,杨红龙. 干湿气候区划研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(1):17-26.
- [24] 詹云军,章文,严岩,等. 长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素[J]. 生态学报,2021,41(17):6924-6935.
- [25] Pinzon J, Tucker C. A non-stationary 1981-2012 AVHRR NDVI_{3g} time series[J]. Remote Sensing, 2014, 6(8):6929-6960.
- [26] Heim Jr R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(11):1149-1166.
- [27] Noguera I, Vicente-Serrano S M, Domínguez-Castro F, et al. Assessment of parametric approaches to calculate the Evaporative Demand Drought Index[J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(2):834-849.
- [28] 吴子君,张强,石彦军,等. 多种累积降水量分布函数在中国适用性的讨论[J]. 高原气象,2017,36(5):1221-1233.
- [29] 张更喜,粟晓玲,郝丽娜,等. 基于NDVI和scPDSI研究1982-2015年中国植被对干旱的响应[J]. 农业工程学报,2019,35(20):145-151.
- [30] 黄鑑初,熊海源,吴志坚,等. 2003年宜春市旱情评价[J]. 江西水利科技,2005,31(3):160-161,165.
- [31] 李家誉,余敦先,张利平,等. 黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制[J]. 水土保持学报,2022,36(6):

280–289.

Modification of the standardized precipitation evapotranspiration index based on actual evapotranspiration

Li Weiguang^{1,2}, Hou Meiting³, Zhou Haixia⁴, Zhang Jinghong^{1,2}, Zou Haiping^{1,2}, Chen Xiaomin^{1,2}

(1. Climate Center of Hainan Province, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction in South China Sea, Haikou 570203, China; 3. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China;

4. Meteorological Bureau of Sansha, Sansha 573199, China)

Abstract: In the report, to enhance the effectiveness of the SPEI in agricultural drought monitoring, a modified Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (MSPEI) focused on water balance was proposed. The index was calculated by the difference between precipitation and actual evapotranspiration, and which were adaptive corrected based on the duration of the longest consecutive drought period. The visual inspection for probabilistic fitting curves and the Kolmogorov-Smirnov test were used to choose an appropriate distribution function. The drought index was obtained by a standardized transformation. The validity test for the aridity index demonstrated that the MSPEI accurately captures the distinctions under wet and dry conditions across seasons. During spring, when the wetness proportion was below 20%, the MSPEI registered below -0.5. For depicting drought trends, there are strong consistency between the MSPEI exhibited and the SPEI. The correlation between MSPEI and the vegetation index remain stable and high, ranging from 0.57 to 0.78. During the monitoring processes of typical drought, the MSPEI's depiction of the start, development, and the end of drought aligns was more realistic than that of SPEI. MSPEI adapts to various climatic backgrounds and can accurately depict the evolution of agricultural drought processes without requiring a specific time scale.

Keywords: drought index; SPEI; actual evapotranspiration; MSPEI; water balance