文章编号:1000-7601(2023)05-0293-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.05.31

日尺度标准化前期降水蒸散指数在大豆 旱涝评估中的适用性分析

董秋婷1,张淑杰2,刁 军1,姜 珊3,贺明慧1,刘 敏2,4

(1.辽宁省沈阳市浑南区气象局,辽宁 沈阳 110180;2.中国气象局沈阳大气环境研究所/辽宁省农业气象灾害重点实验室, 辽宁 沈阳 110166;3.辽宁省沈阳市气象局,辽宁 沈阳 110180;4.辽宁省铁岭市气象局,辽宁 铁岭 112000)

摘要:为监测评价影响大豆丰产增收的旱涝灾害,利用 1961—2020年辽宁省 51 个气象站逐日气象观测资料和土壤水分数据,通过对前期累积降水与蒸散差值指数(Antecedent precipitation evapotranspiration index, APEI)序列 值进行三参数的 log-Logistic 概率分布拟合,建立日尺度标准化前期降水蒸散指数(Standardized antecedent precipitation evapotranspiration index, SAPEI),选取辽宁省 4 个大豆主产区代表站,对 SAPEI 在辽宁省大豆旱涝监测评 估中的可行性和适用性进行分析。结果表明:不同代表站的 log-Logistic 概率分布函数与经验概率分布曲线高度拟 合, SAPEI 曲线能够表征辽宁省大豆的每日农田水分盈亏状况。在 2014 年 8—9 月旱涝转变实例分析中, SAPEI 旱涝 演变特征、旱涝等级与同期土壤水分监测数据具有很好的一致性和同步性,大豆生育期旱涝积指数累年平均值空间 分布趋势与辽宁旱涝分布趋势基本一致,表明日尺度 SAPEI 及旱涝积指数能够反映降水时间、日雨量大小对农田旱 涝的影响,可精准描述辽宁省不同区域日尺度的旱涝变化过程及其累积效应,在辽宁省大豆旱涝逐日监测中具有较 好的适用性。

关键词:标准化前期降水蒸散指数;大豆;旱涝积指数;日尺度;log-Logistic;辽宁省 中图分类号:S565.1;S166 文献标志码:A

Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in the evaluation of soybean drought and flood in Liaoning Province

DONG Qiuting¹, ZHANG Shujie², DIAO Jun¹, JIANG Shan³, HE Minghui¹, Liu Min^{2,4}

(1. Meteorological Bureau of Hunnan District in Shenyang City, Shenyang, Liaoning 110180, China;

2. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Key laboratory of Agrometeorological Disasters, Shenyang, Liaoning 110166, China;

3. Meteorological Bureau of Shenyang District, Shenyang, Liaoning 110180, China;

4. Meteorological Bureau of Tieling District, Tieling, Liaoning 112000, China)

Abstract: Agricultural drought and waterlogging are two of the most compelling problems affecting agricultural productivity and efficiency. Based on the daily meteorological observation data and soil moisture data of 51 meteorological stations in Liaoning from 1961 to 2020, a daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (*SAPEI*) was constructed by fitting the daily antecedent precipitation evapotranspiration index (*APEI*) series with 3-parameter log-Logistic distribution. In addition, the feasibility and applicability of *SAPEI* were analyzed in 4 representative stations that were selected in main soybean producing areas of Liaoning. The results showed that the log-Logistic probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability of showed that the log-Logistic probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability of showed that the log-Logistic probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of representative stations highly corresponded with the empirical probability distribution curve of the probability distribution curve distribution curve of the probability distribution curve

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费(2020SYIAEHZ1);中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金(2021SYIAEKFMS30)

作者简介:董秋婷(1985-),女,辽宁沈阳人,副高级工程师,主要从事综合气象观测和气象服务研究。E-mail:2213dqt@163.com

收稿日期:2022-10-08 修回日期:2023-03-29

通信作者:张淑杰(1971-),女,黑龙江巴彦人,正高级工程师,主要从事农业气象灾害监测、预测及影响评估研究。E-mail:Zhangshujie_a@ 163.com

刘敏(1971-),女,辽宁建平人,高级工程师,主要从事农业气象灾害监测、精细化气象为农服务技术研究。E-mail:261740536@qq.com

ity distribution curve. Representative stations' daily *SAPEI* curve described the change in farmland water budget of soybean in Liaoning Province. In the case of the change in drought and flood from August to September in 2014, *SAPEI*'s drought and waterlogging grades and change characteristics were in good agreement with soil moisture in the same period. Spatial distribution of drought, waterlogging accumulation, and annual mean values of accumulated index based on soybean whole development stage's *SAPEI* were primarily distributed latitudinally. These distribution characteristics conformed to the actual distribution of drought and waterlogging in Liaoning. Therefore, the daily scale *SAPEI* and antecedent drought and waterlogging, accurately depicting the daily scale changes and process cumulative effects of drought and flood in different regions of Liaoning. As a result, the *SAPEI* can be applied to daily dynamically monitoring the service of soybean drought and flood in Liaoning.

Keywords: standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI); soybean; antecedent drought and waterlogging index; daily scale; log-Logistic; Liaoning Province

旱涝灾害是影响农业生产较为严重的气象灾 害之一,具有影响范围广、发生频率高、持续时间 长、造成经济损失大等特点^[1]。《2020年全球粮食 危机报告》指出干旱和洪涝等极端灾害性天气是影 响粮食安全的重要驱动因素之一^[2]。辽宁省位于 我国东北地区,濒临黄海与渤海,受季风气候影响 降水时空分布不均,导致旱涝灾害频发,一年中常 出现旱涝交替、旱涝并存的情况^[3]。如2013年5月 降水异常偏少,出现严重春旱,而7月降水异常偏 多,省内出现旱转涝的情况;2014年辽宁省发生夏 秋连旱,农作物受灾面积达195万 hm²,辽西及大连 北部最为严重^[4];2016年辽宁省共出现6次暴雨过 程,造成农作物受灾面积9.6万 hm²。因此,在气候 变化的背景下,加强旱涝灾害监测预警是减少农业 损失、保障粮食安全的重要而有效手段之—^[5]。

旱涝指标是开展农业旱涝研究的基础,目前常 用的旱涝指标有综合气象干旱指数(Comprehensive meteorological drought index, CI)、帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水 指数(Standardized precipitation index, SPI) 和标准化 降水蒸散指数(Standardized precipitation-evapotranspiration index, SPEI)等。很多专家学者利用不同的 旱涝指标对不同地区旱涝灾害特征进行了分析研 究,主要集中在旱涝灾害时空演变特征^[6]、旱涝强 度与发生频率[7-8]、旱涝灾害风险区划与评估[9-10] 及对农作物的影响^[11]等方面。由于 SPEI 指数融合 了 SPI 与 PDSI 指数的优点,既具有多时间尺度的特 性,又综合了温度对干旱的影响,很好地弥补了这 两个干旱指数的不足。近年来,国内外专家学者利 用 SPEI 对各区域的适应性和应用做了相关研究工 作。例如 Vicente-Serrano 等^[12-14]利用 SPEI 指数同

时考虑了降水和温度的影响,发现全球7个气候区 SPEI 指数序列与 sc-PDSI 指数在各时间尺度和不 同地区具有较好的一致性,能够较好地表征地表干 湿变化特征,表明 SPEI 指数在全球变暖的背景下对 旱涝灾害的监测更为灵活和可靠。Sien 等^[15]利用 SPEI 指数对缅甸的干旱时空分布特征及对农作物 的影响进行了研究,研究表明缅甸农业生态区干湿 空间分布不均匀,且在不同时间尺度上存在差异。 Dukat 等^[16]利用 SPI 和 SPEI 指数估算了 1951— 2015年中纬度欧洲干旱发生的严重程度和变化趋 势,研究发现欧洲出现的干旱的严重程度、频率和 长度均在增加。我国学者利用 SPEI 指数对不同气 候区开展相关研究工作,发现 SPEI 指数在东北、西 北、华北和华南等我国大部分地区都具有很好的适 用性^[17-21]。综合目前国内外关于 SPEI 指数在世界 及中国不同地区适用性的研究发现,主要集中于 月、季时间尺度来评估旱涝状况,容易忽略掉一些 短时间突发的旱涝灾害,出现低估或无法识别旱涝 灾害的情况^[22-24],不能真实有效地反映农田旱涝的 变化,为了更准确地识别日时间尺度的旱涝发生情 况,很多学者对 SPEI 指数进行改进和优化^[5,24],将 其定义为日尺度标准化前期降水蒸散指数(Standardized antecedent precipitation evapotranspiration index, SAPEI), 在西南地区^[25]和江淮地区^[5,24]进行了 适用性分析,该指数在辽宁地区的适应性有待于进 一步评估验证。由于 SAPEI 指数是由标准化降水 蒸散指数(SPEI)改进而来^[5,12],优点主要有:①考 虑了农田前期土壤水分变化和降水量对旱涝灾害 的影响:②优化了作物不同发育期的需水特征:③ 能够实现对农田日尺度旱涝变化情况的监 测^[5,24-25]。因此,本文引入日尺度标准化前期降水 蒸散指数对辽宁大豆旱涝发生情况进行识别判断, 利用 SAPEI 指数选择典型年对日尺度旱涝过程进 行识别验证,提出大豆旱涝过程识别方法,同时采 用旱积指数和渍积指数分别从干旱过程和渍涝过 程进一步验证该指数在辽宁省大豆农田旱涝监测 评估中的可行性和适用性,以期为辽宁省旱涝预测 预警和防灾减灾提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省位于东北地区南部,地处 38°43′~43°29′ N和118°50′~125°47′E之间,南邻黄、渤二海。辽 宁省地势自东、西、北三面向中部和南部倾斜,东西 两侧为丘陵山地,中部为自东北向西南倾斜的辽河 平原,具有山、平、洼等多种多样的地势类型。辽宁 省地处中纬度,属温带大陆性季风气候,年降水量 为400~1100 mm,主要集中在夏季,受地理位置和 季风影响,降水时空分布不均,局地、短时强降水时 有发生,且年际间差异大,以致旱涝灾害频发^[1,3]。 辽宁省是我国重要的商品粮生产基地,是东北春大 豆种植区的最南端,生育期长,积温高,光、热、水等 气候资源优越,具有较高的大豆生产潜力区。

1.2 数据来源

本研究所用资料为辽宁地区 51 个气象站 1961—2020年的日平均气温、日最高气温、日最低 气温、日降水量、日日照时数、日水汽压、日平均风 速资料以及新民、海城、锦州和昌图 4 个农业气象观 测站的大豆发育期资料。土壤水分数据来源于辽 宁省各观测站土壤墒情观测数据。

1.3 日尺度标准化前期降水蒸散指数(SAPEI)

日尺度标准化前期降水蒸散指数(SAPEI)^[5]既 考虑了前期土壤中水分的影响,又能反映出日降水 量和降水时间对当日旱涝的影响,该指数可以用于 日尺度对旱涝的监测。

SAPEI 指数的计算过程如下:

(1)日农田水分收支量(ΔW)计算。根据土壤水分平衡方程,在忽略灌溉、地表径流和地下水的 情况下,可简化为:

$$\Delta W = P - ET_c \tag{1}$$

$$ET_{\rm c} = K_{\rm c} ET_0 \tag{2}$$

式中,P为降水量; ET_e 为作物需水量; ET_0 为参考作物素散量,利用联合国粮农组织(FAO 1998)推荐的 Penman-Monteith公式计算而得; K_e 为作物系数,采 用单作物系数法计算^[26], K_{c-ini} 、 K_{c-mid} 、 K_{c-end} ,即大豆 出苗~分枝期、分枝~鼓粒期、鼓粒~成熟期分别取 0.40、1.15、0.55。

(2)考虑农田日水分供应能力与前期农田水分 状况有关,计算前期累积降水与蒸散差值指数(Antecedent precipitation evapotranspiration index, *APEI*)^[5]:

$$APEI = \sum_{i=0}^{m} \left(K^{i} \times \Delta W_{i} \right)$$
(3)

式中,*m* 为前推天数,取值 100;*i* 为前推日序数(当日为 0);*K* 为衰减系数,取 0.955;Δ*W*_i为第 *i* 日农田水分收支量。

(3)对 APEI 构成的数据序列进行标准化,并采 用三参数的 log-Logistic 概率分布 F(x)进行正态化 拟合。得到对应的 F(x) 日值。

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1}$$
(4)

式中:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \tag{6}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha \Gamma (1 + 1/\beta) \Gamma (1 - 1/\beta)$$
(7)

$$w_{s} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{n} \left(1 - \frac{1 - 0.35}{n} \right)^{s} x_{l}$$
(8)

式中, w_s 为概率权重矩,s=0,1,2;l为x按升序排列的序数; Γ 为 Gamma 函数。

(4) 对累积概率进行标准化, 进而求得标准化 变量 SAPEI 值。

$$P = 1 - F(x) \tag{9}$$

当累积概率 P≤0.5 时,概率加权矩

$$w = \sqrt{-2\ln(1-P)}$$

SAPEI = $w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3}$ (10)

当累积概率 P>0.5 时,概率加权矩

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

SAPEI = $-\left(w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3}\right)$ (11)

式中,常数 $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308_{\odot}$

1.4 旱涝等级划分

SAPEI 指数等级分类标准综合参照 SAPEI 及 SPEI 有关文献^[5,17]。各等级旱涝等级标准、数值范 围及理论累积概率、土壤相对湿度阈值如表 1 所示。

表 1 基于标准化前期降水蒸散指数(SAPEI)旱涝等级标准	
--------------------------------	--

Table 1 Standard for drought and flood grades based on standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI)

等级序号 Grade serial number	干旱等级 Dry grade	SAPEI 范围 SAPEI scope	累积概率 Cumulative probability/%	土壤相对湿度(<i>RH</i>) Soil relative humidity
4	严重湿润 Extremely wet	>2.0	2.3	$RH \ge 100\%$
3	重度湿润 Severe wet	$1.5 < SAPEI \leq 2.0$	4.4	$95\% < RH \le 100\%$
2	中度湿润 Moderate wet	$1.0 < SAPEI \le 1.5$	9.2	$90\% < RH \le 95\%$
1	轻度湿润 Mild wet	$0.5 < SAPEI \le 1.0$	15.0	$80\% < RH \le 90\%$
0	正常 Normal	$-0.5 < SAPEI \leq 0.5$	38.2	$65\% < RH \le 80\%$
-1	轻度干旱 Mild drought	$-0.1 < SAPEI \leq -0.5$	15.0	$55\% < RH \le 65\%$
-2	中度干旱 Moderate drought	$-1.5 < SAPEI \leq -1.0$	9.2	$45\% < \!\!RH \le 55\%$
-3	重度干旱 Severe drought	$-2.0 < SAPEI \leq -1.5$	4.4	$35\% < RH \le 45\%$
-4	严重干旱 Extremely drought	$SAPEI \leq -2.0$	2.3	<i>RH</i> ≤35%

1.5 SAPEI 指数农业旱涝适用性评价

作物全生育期的干旱强度与干旱所处阶段、发 生次数及持续时间有关。因此,使用基于干旱过程 的旱积指数(Q_d)来表示^[5],即:

$$Q_{\rm d} = \sum_{i=1}^{n} \left[\sum_{j=1}^{m} (SAPEI_j - SAPEI_{\rm d0}) \right]$$
(12)

式中,n 为干旱过崔数;m 为某一次干旱过程持续天数; $SAPEI_{j}$ 为第j 天 SAPEI 值; $SAPEI_{a0}$ 为干旱发生界限值, 为-0.5。

同理,渍积指数 Q_w可表示为:

$$Q_{w} = \sum_{i=1}^{n} \left[\sum_{j=1}^{m} (SAPEI_{j} - SAPEI_{w0}) \right]$$
(13)

式中,SAPEI_{w0}为涝渍害发生界限值,为0.5。

2 结果与分析

2.1 SAPEI 模型检验

SAPEI 是基于假设某一时间尺度的前期累积降 水与蒸散差值指数(APEI)序列服从 log-Logistic 概 率分布。因此,当日尺度 APEI 序列的经验概率分 布与 log-Logistic 理论概率分布曲线大致相似时,即 认为日尺度 SAPEI 分析适用于该序列^[5]。为检验 日尺度 SAPEI 在辽宁地区的适应性,将日尺度 APEI 序列的经验概率分布与三参数 log-Logistic 理论概 率 F(x)分布进行对比分析。综合考虑辽宁省气候 区划和大豆种植分布的情况,选取了新民、海城、锦 州和昌图4个大豆主产区站点作为验证代表站(图 1)。从图 1 可以看出,不同区域代表站点的 APEI 序列的 log-Logistic 理论概率 F(x) 与经验概率分布 曲线重合度较高,变化趋势比较一致,说明日尺度 APEI 序列服从 log-Logistic 理论概率分布。因此, SAPEI 能够表征辽宁省大豆农田由降水和蒸散盈亏 引起的旱涝状况。

2.2 SAPEI 对旱涝过程的描述能力

据《中国气象灾害年鉴》及相关部门统计分析,

2014年辽宁省发生大旱,农作物受灾面积达195万 hm²,干枯和重旱面积125万hm²,粮食因灾减产500 万 t 左右^[3-4]。因此,分别对新民、海城、锦州和昌图 4个大豆主产区代表站 2014 年 SAPEI 逐日变化及 降水的动态响应情况进行分析(图 2)。2014年进 入春季后,持续无降水,出现春旱,旱情一直持续到 4月下旬, SAPEI 值持续降低反映了旱情的发展与 持续。进入6月份,降水量增多,SAPEI 值逐渐回 升,并出现短期涝情。7月中下旬持续无有效降水 并伴随高温天气,大豆进入开花结荚期,需水量增 大,SAPEI 值迅速而持续下降。随着 8 月下旬降雨 再次增多,SAPEI 值的旱涝等级也相应提升,9月份 旱情得到有效缓解并解除。结果表明,4个代表站 在无降水或降水持续偏少时, SAPEI 呈现平滑而缓 慢的下降趋势,并没有出现 CI、SPI 等指标用于监测 逐日干旱时常出现的"不合理干旱加剧"的问 题^[7,27]:在出现降水时, SAPEI 能够及时响应与降水 量增加相匹配,反映降水对旱情的缓解作用。可 见,SAPEI曲线呈现典型的"锯齿型"波动特征,能 够精细的刻画旱涝情况发生、发展、持续和结束 过程。

进一步对比分析了 2014 年 8 月 8 日、9 月 3 日 旱情明显缓解前后的土壤墒情数据与 SAPEI 数据 旱涝空间分布情况。结果显示:8 月 8 日土壤相对 湿度与 SAPEI 指数在辽西和辽中地区均显示出现 了不同程度旱情,辽东地区无旱情或轻度涝渍害。9 月 3 日二者监测数据均显示出辽西和辽中地区旱情 得到明显缓解或解除,辽南地区出现轻度涝渍,辽 东地区涝渍范围明显扩大(图 3)。因此,应用 SAPEI 对农田旱涝监测,能够较为真实地反映农田 的旱涝变化特征。从二者对比来看,在水分缺少的 情况下,SAPEI 监测的干旱情况重于实际土壤墒情, 可见 SAPEI 数据监测结果偏干;在水分有盈余的情 况下,除辽宁北部外,SAPEI 监测的涝渍情况轻于实际土壤墒情,SAPEI 数据监测结果偏干。SAPEI 数据结果偏干,主要是由于在土壤墒情观测的农田存

在人为干预的可能性,不能排除在出现干旱时前期进行灌溉;而在设计 SAPEI 指数时,日降水量中未 剔除径流参数。



图 1 代表站 APEI 序列经验概率与 log-Logistic 理论概率分布对比



distribution for APEI series in representative stations



图 2 辽宁省 4 个代表站点 2014 年 4—9 月 SAPEI 对降水的响应 Fig.2 Response of SAPEI to rainfall at representative stations for 4 representative

stations from Apr. to Sept. 2014 in Liaoning Province

2.3 SAPEI 指数监测大豆旱涝的适用性分析

利用 SAPEI 指数,计算 60 年(1961—2020 年) 辽宁省 51 个站大豆全生育期(4月 27日—9月 24 日)旱积指数 Q_d累年平均值、干旱发生频率,渍积指 数 Q_w累年平均值、涝渍发生频率。结果表明,旱积 指数 Q_d绝对值总体呈现北高东低的分布特征,变化 幅度为-45.40~-14.64,即辽北地区干旱重于辽东地 区,其中辽北地区旱积指数范围在-45.40~-34.09之 间,辽东地区旱积指数范围在-27.75~-14.64 之间 (图 4a)。干旱发生频率全省范围在 14.15% ~ 30.87%之间,其中辽北地区最高,辽西次之,辽南和 辽东地区最小(图 4b)。渍积指数 Q_w变化幅度为 53.02~70.97,呈现东高北低分布,即渍害辽东地区 重于辽北地区(图 4c);涝渍发生频率范围在 44.09% ~63.07%之间,辽西北地区低于辽东地区(图 4d)。

3 讨 论

本文以优化后的 SAPEI 指数作为辽宁地区大 豆农田旱涝监测指标,该指标充分考虑了前期农田 水分收支影响,并解决了大部分旱涝指标时效性不 高的问题,实现了旱涝逐日监测,时效性与精细化 水平得到提升。通过选取典型干旱年识别验证,发 现逐日大豆旱涝监测与实际土壤墒情及典型年旱 涝灾情信息记载的旱涝等级一致性程度较高,具有 很好的区域适用性,与葛东^[19]、王晓丹^[22]、沈国 强^[28]等的研究结果一致,充分说明其在辽宁乃至东 北地区的适用性。

有学者^[19-20,29]在对我国北方地区各类干旱指 数适用性分析中研究发现,干旱灾害时间尺度灵 活,因而同一种干旱指数,时间尺度的不同也会产 生较大的差异。曹永强等^[17]利用多时间尺度 SPEI 指数研究辽宁省旱涝特征发现,年值 SPEI 旱涝变化 稳定、周期性明显,季值、月值 SPEI 波动变化大,能 够反映短期旱涝特征;沈国强等^[28]利用月值 SPEI 指数监测东北地区干旱,认为东北地区干旱在降水 充足的夏季反而干旱更为普遍、更加严重;王晓丹 等^[22]使用日值 SPEI 监测干旱发现东北地区西部干 旱持续时间长强度高,东部时间短强度低;也有部 分专家^[7-8,27]指出利用季、月值 SPEI 监测干旱时因 只考虑累计降水而忽视当前降水,容易出现"不合理



图 3 辽宁省 2014 年 8 月 8 日(旱情缓解前)、9 月 3 日(旱情缓解后) SAPEI 与 0~20 cm 土壤墒情旱涝监测对比 Fig.3 Comparison between SAPEI and soil relative humidity of 0~20 cm layer on Aug. 8, 2014

(before drought relief) and Sept. 3, 2014 (after drought relief) in Liaoning Province







index for soybean in Liaoning Province

旱情加剧"而旱涝表征不合理等问题。而在 SPEI 基础上优化后的 SAPEI 做为旱涝监测指标^[5],充分 考虑了前期农田水分平衡和当日的干湿状况[24-25]. 避免了无法有效监测旱涝事件和时效性不高的问 题^[30]。本文利用 SAPEI 指数对 2014 年大豆生长季 逐日旱涝过程进行评估时,发现该指数能较为准确 地获取站点旱涝灾害开始和结束的时间,确定旱涝 灾害的持续时长,可以简单评估灾害过程总体发生 程度以及旱涝灾害过程变化趋势(加重或缓解),尤 其在评估跨月旱涝灾害过程时,与月、年等旱涝评 估指标相比,在评估效果和准确性方面有明显的优 势。SAPEI 指数既可以反映降水时间、次数、日雨量 对农田旱涝的影响,又能够体现无量纲 SAPEI 指数 具有较好的区域适应性的优点。因此, SAPEI 指数 能够真实有效地监测辽宁不同干湿区域农田水分 变化而引起的农田旱涝变化,实现农田日尺度干旱 过程、涝渍过程和旱涝急转的识别。

在进行逐日 SAPEI 与实际土壤相对湿度监测 的旱涝等级对比分析时,发现总体一致性较好,但 部分地区出现了 SAPEI 监测的干旱程度重于实际 土壤墒情的情况,即表现为缺水时旱情偏重,SAPEI 数据结果偏干的现象。陈金华^[5]、王晓东^[24]等研究 发现了安徽省、江淮流域的逐日农田 SAPEI 旱情监测结果普遍重于土壤相对湿度的情况。其一方面 是由于土壤墒情观测的农田有人为干预的因素,另 一方面也存在设计 SAPEI 指数时,对日降水量未做 有效降水量处理而直接参与计算的原因,同时也未 考虑土壤持水能力^[29]。另外,旱涝风险程度与旱涝 灾害发生时所处作物生育期、旱涝持续时间长短等 有关。应用 SAPEI 指数对农田旱涝影响进行评估 时,简单以旱涝积指数来表示旱涝过程的综合强 度,具有一定的局限性。因此,需要从机理方面进 一步完善 SAPEI 指数。

4 结 论

1) 通过大豆主产区 4 个站点概率曲线对比,基 于三参数 log-Logistic 概率分布的拟合方法计算的 SAPEI 指数适用于辽宁地区, SAPEI 指数能够表征 辽宁省大豆农田由降水蒸散盈亏引起的旱涝状况。

2) 典型站点 SAPEI 指数时间序列曲线呈现典型的"锯齿型"波动特征, SAPEI 指数能够真实客观地反映降水的出现对大豆农田干旱过程和渍涝过程的影响,能够精细的刻画旱涝发生、发展、持续、缓解和结束过程。2014 年 8 月 8 日和 9 月 3 日 SA-PEI 指数评估的辽宁地区旱涝等级与实际土壤墒情 等级具有一致性和同步性,表明该指数能够描述大 豆生育期内旱涝变化过程。

3) 基于 SAPEI 指数的大豆全生育期旱涝积指数计算结果显示,旱积指数 Q_d变化幅度为-14.64~-45.40,辽北地区干旱重于辽东地区;干旱发生频率范围在 14.15%~30.87%之间,其中辽北最高;渍积指数 Q_w变化幅度为 53.02~70.97,渍害辽东地区重于辽北地区;涝渍发生频率范围在 44.09%~63.07%之间,其中辽东最高。

参考文献:

- 王蔚丹,孙丽,裴志远,等.东北三省地区生长季旱涝对春玉米产量的影响[J].智慧农业(中英文),2021,3(2):126-137.
 WANG W D, SUN L, PEI Z Y, et al. Effect of growing season drought and flood on yield of spring maize in three Northeast provinces of China [J]. Smart Agriculture (Chinese and English), 2021, 3(2): 126-137.
- Global Network Against Food Crisis. Global report on food crises 2020
 [R]. Brussels: Food Security Information Network, 2020.
- [3] 王学凤,路洁,曹永强.辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气 环流响应研究[J].水利学报,2020,51(12):1514-1524.
 WANG X F, LU J, CAO Y Q. Analysis of drought and flood characteristics in Liaoning Province and its response to atmospheric circulation in the last 54 years [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (12): 1514-1524.
- [4] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴-2015[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 8-14.

China Meteorological Administration. China meteorological disaster yearbook-2015[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016: 8-14.

[5] 陈金华,余卫国,刘瑞娜,等. 日尺度标准化前期降水蒸散指数及 其在安徽省的适用性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 919-928.

CHEN J H, YU W G, LIU R N, et al. Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2019, 27(6): 919-928.

- [6] 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 S Y, WANG F, JIN K, 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.
- [7] 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 L, CHEN W. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in droughtmonitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2):423-431.
- [8] 王春林,陈慧华,唐力生,等.基于前期降水指数的气象干旱指标 及其应用[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 157-163.
 WANG C L, CHEN H H, TANG L S, et al. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and itsspatial-temporal variation[J]. Climate Change Research, 2012, 8(3): 157-163.
- [9] 蔡福,张淑杰,纪瑞鹏,等.近30年辽宁玉米水分适宜度时空演变特征及农业干旱评估[J].应用生态学报,2015,26(1):233-240. CAIF,ZHANGSJ,JIRP, et al. Spatiotemporal dynamics of maize water suitability and assessment of agricultural drought in Liaoning

Province, China from 1981 to 2010[J]. Chinese Journal of Applied E-cology, 2015, 26(1): 233-240.

- [10] 乌日娜,张兴东,曹永强,等. 辽宁省玉米旱灾时空分布特征及综合风险评价[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6731-6744.
 WU R N, ZHANG X D, CAO Y Q, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and comprehensive risk assessment of maize drought disaster in Liaoning Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6731-6744.
- [11] 赵玉兵,孙东磊,贾秋兰,等. 基于 SPEI 指数的河北省南部夏玉 米生长季干旱特征分析[J]. 气象科技,2020,48(5):766-773.
 ZHAO Y B, SUN D L, JIA Q L, et al. SPEI-based characteristic analysis of summer corn drought in growing season in southern Hebei Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(5): 766-773.
- [12] 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.
- [13] VICENTE-SERRANO S M, LÓPEZ-MORENO J I, LORENZO-LA-CRUZ J, et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region [M]//VICENTE-SERRANO S M, TRIGO R M. Hydrological, socioeconomic and ecological impacts of the north Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. Dordrecht: Springer, 2011: 23-40.
- [14] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [15] SEINZ M M, ZHI X F, OGOU F K, et al. Spatio-temporal analysis of drought variability in Myanmar based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and its impact on crop production [J]. Agronomy, 2021, 11(9): 1691.
- [16] DUKAT P, BEDNORZ E, ZIEMBLINSKA K, et al. Trends in drought occurrence and severity at mid-latitude European stations (1951 - 2015) estimated using standardized precipitation (SPI) and precipitation and evapotranspiration (SPEI) indices[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2022, 134(1): 20.
- [17] 曹永强,路洁,李玲慧. 基于 SPEI 指数的辽宁省多尺度旱涝特征 分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):210-220.
 CAO Y Q, LU J, LI L H. Analysis of multi-scale drought and flood characteristics in Liaoning Province based on SPEI[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(2): 210-220.
- [18] 罗漫雅,耿广坡,周洪奎,等.常用气象干旱指数 SPEI 和 SPI 在 陕北地区的适用性研究[J].湖北农业科学,2020,59(21):42-50.
 LUO M Y, GENG G P, ZHOU H K, et al. Adaptability research on the common meteorological drought indexes of SPEI and SPI in the northern Shaanxi Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59 (21): 42-50.
- [19] 葛东,魏新光,景竹然,等.基于 SPEI 指数的东北玉米种植区春 玉米生长季干旱演变特征[J].水利与建筑工程学报,2020,18 (4):41-47.

GE D, WEI X G, JING Z R, et al. Characteristics of drought evolution in spring maize growingseason in northeast maize planting area based on SPEI[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(4): 41-47.

[20] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强 度的特征及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192-202.

- [21] 彭窈, 彭劲洪, 何彬, 等. 基于 SPEI 指数的华南春季旱涝时空特征[J]. 广东气象, 2022, 44(1): 30-33, 37.
 PENG Y, PENG J H, HE B, et al. Spatiotemporal characteristics of springtime drought and flood in southern China based on the SPE index[J]. Guangdong Meteorology, 2022, 44(1): 30-33, 37.
- [22] 王晓丹,张勃,马彬,等. 基于日值 SPEI 东北地区近 58 a 干旱时 空演变特征[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 721-732.
 WANG X D, ZHANG B, MA B, et al. Spatial and temporal evolution of drought in Northeast China in recent 58 years based on daily SPEI [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3): 721-732.
- [23] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2823-2829.
- [24] 王晓东,陈金华,陈曦,等.淮河流域农田旱涝逐日监测指标优 化及适用性分析[J].农业工程学报,2021,37(23):117-126.
 WANG X D, CHEN J H, CHEN X, et al. Optimization and applicability analysis of daily farmland drought and flood monitoring index in Huaihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23):117-126.
- [25] 高雅文,邓可楠,张月,等.基于农业旱涝指标的湖北省棉花生 育期内旱涝急转特征分析[J].灌溉排水学报,2021,40(2): 101-110.

GAO Y W, DENG K N, ZHANG Y, et al. Using agro-meteorologicalindexes to analyze variation in abrupt drought-flooding alternation during cotton growth season in Hubei Province [J]. Journal of

(上接第282页)

- [9] KAPUSTA R, ZHU H Y, LYDEN C. Sampling circuits that break the Kt/C thermal noise limit [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2014, 49(8): 1694-1701.
- [10] SHU Y, LI C, WANG Z, et al. A pressure sensing system for heart rate monitoring with polymer-based pressure sensors and an anti-interference post processing circuit[J]. Sensors, 2015, 15(2): 3224-3235.
- [11] 李林会,李琳. 动态定量称量包装系统滤波算法[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 201-205.
 LI L H, LI L. Filtering algorithm of dynamic quantitative weighing packaging system [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 201-205.
- [12] 褚志刚,吴洋俊,熊敏,等. 锤击法固有频率在线检测系统的开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 31-37.
 CHU Z G, WU Y J, XIONG M, et al. Development of online detection system for natural frequency using impact test[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1): 31-37.
- [13] 耿兴华,王克欣,钱希兴,等.基于 STM32 的电机控制实验平台 设计与实现[J].实验室科学,2022,25(3):66-69,74.
 GENG X H, WANG K X, QIAN X X, et al. Design and implementation of motor control experimental platform based on STM32[J]. Laboratory Science, 2022, 25(3):66-69,74.
- [14] PIETRZAK P. Dynamic mass measurement using a discrete time-variant filter[C]//2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Eilat, Israel; IEEE, 2010; 151-155.
- [15] 庞轶环, 胡志忠. 一种分数阶巴特沃斯滤波器的有源电路设计 [J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1160-1165.

Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 101-110.

- [26] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage[R]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 15-64.
- [27] 杨丽慧,高建芸,苏汝波,等.改进的综合气象干旱指数在福建 省的适用性分析[J].中国农业气象,2012,33(4):603-608. YANG L H, GAO J Y, SU R B, et al. Analysis on the suitability of improved comprehensive meteorological drought index in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4):603-608.
- [28] 沈国强,郑海峰,雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961-2014 年东北地 区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.
 SHEN G Q, ZHENG H F, LEI Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961-2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [29] 王素萍,王劲松,张强,等. 多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J]. 高原气象,2020,39(3):628-640.
 WANG S P, WANG J S, ZHANG Q, et al. Applicability evaluation of drought indices in northern China and the reasons for their differences[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3):628-640.
- [30] LI J, WANG Z L, WU X S, et al. Toward monitoring short-term droughts using a novel daily scale, standardized antecedent precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(5): 891-908.

PANG Y H, HU Z Z. Active circuit design of a fractional order Butterworth filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1160-1165.

- [16] 文常保, 戚一娉, 宿建斌, 等. 基于新型卡尔曼滤波算法的称重 系统实现研究[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(2): 52-56.
 WEN C B, QI Y P, SU J B, et al. Research on implementation of weighing system based on novel Kalman filter algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2020, 35(2): 52-56.
- [17] ZONG C F, HU D, ZHENG H Y. Dual extended Kalman filter for combined estimation of vehicle state and road friction [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2): 313-324.
- [18] PENG X Y, ZHANG B, RONG L H. A robust unscented Kalman filter and its application in estimating dynamic positioning ship motion states[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24(4): 1265-1279.
- [19] LIU C Y, SHUI P L, LI S. Unscented extended Kalman filter for target tracking [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(2): 188-192.
- [20] 王林,孙芳. 利用狄克松判别法剔除观测数据粗差[J]. 江西测 绘, 2016,(4): 18-20.
 WANG L, SUN F.Eliminating gross errors in observational data using Dixon discriminant method [J]. Jiangxi Surveying and Mapping, 2016,(4): 18-20.
- [21] NIEDZWIECKI M, PIETRZAK P. High-precision FIR-model-based dynamic weighing system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10): 2349-2359.