

潘永地, 肖晶晶, 潘彦华, 等. 一种基于累积降水与累积蒸发的气象干旱指数[J]. 干旱气象, 2025, 43(1): 1-10. [PAN Yongdi, XIAO Jingjing, PAN Yanhua, et al. A meteorological drought index based on cumulative precipitation and cumulative evaporation[J]. Journal of Arid Meteorology, 2025, 43(1): 1-10], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639-2025-01-0001

# 一种基于累积降水与累积蒸发的气象干旱指数

潘永地<sup>1,2</sup>, 肖晶晶<sup>3</sup>, 潘彦华<sup>4</sup>, 石 界<sup>5</sup>

(1. 浙江省温州市气象局, 浙江 温州 325027; 2. 温州市台风监测预报技术重点实验室, 浙江 温州 325027; 3. 浙江省气候中心, 浙江 杭州 310052; 4. 浙江省文成县气象局, 浙江 文成 325300; 5. 甘肃省定西市农试站, 甘肃 定西 743000)

**摘 要:** 为了克服传统气象干旱指数在计算时依赖历史同期气候概率数据的不足, 本文建立了能够反映土壤干旱程度但只需当期降水量、蒸发量资料的气象干旱指数。根据土壤水分平衡方程, 结合土壤干旱等级, 利用干土层表土蒸发强度与水面蒸发强度关系和土壤蒸发计算方法, 推导出在累积降水量-累积蒸发量坐标系中的各干旱等级临界线表达式, 4条临界线表达式分别对应轻旱、中旱、重旱、特旱4个干旱等级。通过前向逐日滚动计算, 将累积降水量、累积蒸发量构成的坐标点到相应临界线距离最大的点作为该临界线的最大距离点, 在各临界线最大距离点中以位于最高干旱等级区且离下方最近临界线距离最大的坐标点确定干旱等级, 由该坐标点到各临界线的距离构造土壤干旱等级距离指数, 反映土壤干旱等级。将土壤干旱等级距离指数与土壤水分测量数据和干旱灾情记录进行比较, 发现该指数变化与土壤水分变化高度负相关, 与实际干旱影响有很高的一致性。土壤干旱等级距离指数具有物理意义明确、计算方便、时间尺度短等优点, 对干旱监控实际业务具有重要意义。

**关键词:** 累积降水量; 累积蒸发量; 气象; 干旱指数

**文章编号:** 1006-7639(2025)01-0001-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639-2025-01-0001

**中图分类号:** P63; P404

**文献标志码:** A

## 0 引 言

干旱一般具有范围广、时间长、影响行业多的特点, 是世界上最严重的气象灾害。长时间的干旱对农业生产、粮食安全、水利发电及人民生活 and 动植物生态环境等形成危害。近年来全球每年因干旱造成的损失达60~80亿美元, 超过其他气象灾害损失(宋艳玲, 2022)。我国干旱发生也较为频繁, 如2022年就发生大范围的干旱, 南方大面积区域干旱达特旱等级(杨晓静等, 2023; 宋刚勇等, 2023; 雷声等, 2023; 孙伟等, 2023)。干旱危害影响严重, 其形成因素又较为复杂, 与降水、气温、风速、辐射等气象要素密切相关(潘永地等, 2022), 精准监测干旱出现时间、结束时间, 评估干旱的强度、范围都十分困难。为了准确监测和评估干旱, 广大科技工作者建立了气象、水文、农业等干旱指数。其中, 标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)

(McKee et al., 1993)被广泛使用, 用于描述不同时间尺度上的气象干旱, 通过历年同期降水量确定概率分布曲线, 再由当年该时期内降水量的累积概率确定干旱指数。SPI以一定时间尺度中降水量所处概率等级来计算, 反映当年该时间尺度中降水量与历年同期降水量比较的情况, 多用于分析区域的干旱时空特征(商守卫等, 2022; 唐怡等, 2023; 黄瑶等, 2023; 任至涵等, 2024; 阿帕尔·肉孜等, 2024), 但仅采用降水量作为计算输入要素, 不能体现日照、气温等对蒸散的影响。同时, SPI计算中确定时间尺度具有一定的主观性, 不同时间尺度可能会出现不同结果(李家誉等, 2022; 朱占云等, 2024)。此外, 降水序列并不总是服从Gamma分布, 考虑了分布函数参数随时间变化的非一致性标准化降水指数能更精确反映实际干旱情况(陈灏等, 2023)。标准加权平均降水指数(Standard Weighted Average

收稿日期: 2024-06-07; 改回日期: 2024-07-23

基金项目: 浙江省基础公益计划项目(LGF22D050007)及浙江省气象局重点项目(2022ZD07)共同资助

作者简介: 潘永地(1971—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事农业气象方面研究。E-mail: 648679519@qq.com。

通信作者: 肖晶晶(1984—), 男, 主要从事作物气象及干旱风险研究。E-mail: xiaojingjing2005@163.com。

Precipitation Index, SWAP)在SPI基础上考虑了前期降水对干旱影响的衰减,也就是考虑径流、渗透、蒸散等失水项随着干旱发展而减弱的作用,其在计算累积降水时,加入了权重系数(Lu, 2009),该系数由间隔时间和衰减参数计算。SWAP在计算累积降水时加入了与日期有关的权重,体现出干旱越重,土壤中含水量越小,径流、渗透、蒸散等失水项所受制约越大,较SPI更接近实际情况,但是计算中衰减参数的确定具有经验性,其时间尺度的选择也有一定的主观性,给实际应用增加了困难(杨家伟等, 2019)。

标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI)(Vicente-Serrano et al., 2010)在SPI基础上引入潜在蒸发,以降水量与潜在蒸发的差值累积替换SPI中的累积降水量,较SPI考虑了更多因素,更能反映实际情况,被广泛应用于干旱空间分布和趋势变化分析(周丹等, 2014; 廉泓林等, 2022)。虽然SPEI较SPI更接近实际,但也没有考虑实际蒸散强度与干旱程度有关这一因素,另外在冬季且时间尺度小于3个月时,一些干旱地区的样本不服从Log-logistic分布(王林和陈文, 2014),SPEI应用上有一定制约。帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)(Palmer, 1965)依据土壤水分平衡原理建立,通过计算出某区域气候适宜条件下的月尺度蒸散量、土壤水分补充量、产流量和土壤失水量,得出气候适宜降水量,再计算各月实际降水量与适宜降水量的差值以反映水分盈亏情况,水分盈亏标准化后形成干旱指数。PDSI考虑的因子较全面,包括降水、蒸散、径流等,物理过程清晰,对于一些流域的干旱研究有其优势(王姝等, 2019),但其输入要素的时间尺度为月尺度,对干旱反应较滞后(Alley, 1984)。此外,由于需用要素较多,搜集完整的历史数据序列也容易遇到困难。常年降水百分比指数(Percentage of Normal Precipitation, PNP)以当年某段时间降水量与同期常年降水量的百分比来衡量,计算简单方便,但考虑因素单一,时间尺度不同会得出不同的结果。加权异常标准化降水指数(Weighted Abnormal Standardized Precipitation, WASP)(Lyon, 2004)仅考虑降水偏少引发干旱,以月降水格点数据作为输入项,虽其计算简便,但与PNP一样,未体现蒸发这一干旱形成的重要因素。同时,WASP对于常年干旱或常年湿润地区的情况不能正确描述,有些区域降水格点历史数据不易获得也限制了其使用。为了适应不同的应用,多种类型的农业干旱指数(Palmer, 1968; Hahm et al., 2022)、水文干旱指数(Arslan,

2021; Tareke and Awoke, 2022)、遥感干旱指数(郑超磊等, 2021; Nourani, 2022)相继被建立起来。在这些指数基础上,也出现了一些描述干旱的综合性指数(Zhu et al., 2016; Cammalleri et al., 2021; 吴志勇等, 2021)及用来评估干旱的综合性系统。

目前各种指数各有优点,也各有适用范围(武荣盛等, 2021)。农业干旱指数反映干旱程度比较直接,但数据获取困难;遥感干旱指数客观性较强,但遥感观测容易受云的影响,缺乏短周期间隔的长序列资料,反映干旱雨后缓解也存在及时性不足问题;气象干旱指数计算方便,以概率确定干旱等级,但时间尺度的确定具有主观性,不同的时间尺度会计算出差异性较大的结果(Prajapati et al., 2021),此外气象干旱指数基本上是与历史同期数据相比较,同一指数值在不同地区对应的干旱严重程度可能差异很大。

本文从反映干旱程度的土壤含水量干旱等级划分标准出发,通过理论推导维持土壤干旱等级的累积降水和累积水面蒸发关系,建立计算简便的干旱等级判定和干旱指数模型。该模型可以逐日滚动计算,选取的时间尺度具有客观性和唯一性,不依赖历史气候概率,可以更科学快速地监测干旱的发展。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

目前自动站土壤水分观测数据误差较大,浙江平阳气象站有2013年较完整的土壤水分人工观测资料,所以用该站土壤水分数据做检验。由于2022年温州全市都受干旱影响,温州站作为国家气象观测站更有代表性,典型年份旱情发展检验时用温州站资料;温州站降水和蒸发观测资料序列较长,在历史干旱反演检验中采用温州站资料。具体所用资料:2013年1月18日—9月28日平阳气象站每旬1次的10~20 cm土壤含水率、土壤相对湿度测量数据,用于验证构建的干旱指数与土壤湿度的相关性;2012—2013年平阳气象站逐日降水量、逐日小型蒸发皿蒸发量,用于计算2013年平阳站干旱指数;温州气象站1984—2022年逐日降水量和逐日大型蒸发皿蒸发量,用于计算1985—2022年温州站干旱指数;2022年温州旱情调查情况及1985—2022年温州历年气候影响评价和年鉴中干旱灾情,用于验证构建的干旱指数对干旱的捕捉及反演效果。

### 1.2 方法

从影响作物生长、直观反映干旱程度的土壤相对湿度出发,通过土壤水分平衡方程,推导维持干

旱等级的降水量-水面蒸发量关系,建立各干旱等级维持线表达式;再通过前向逐日滚动计算累积降水量、累积水面蒸发量,由两者确定出坐标位置,计算该坐标点与干旱等级维持线的逐日距离变化。累积降水量、蒸发量计算起始日由具有最大距离的坐标点对应确定,再根据该最大距离计算干旱指数,建立土壤干旱等级距离指数模型。由该干旱指数模型计算平阳站2013年的逐日干旱指数、温州站2022年逐日各干旱等级维持线距离及1985—2022年的逐日干旱指数,将计算结果与土壤湿度观测记录、实际的旱情记录进行对比,证明该干旱指数与土壤湿度存在极强的负相关,对旱情演变的描述与实际情况吻合。

### 1.2.1 干旱等级

植物生长所需水分来源于土壤,以土壤干燥程度划分的干旱等级最能体现农业生产中作物的受影响程度,采用土壤相对湿度干旱等级划分标准(全国气候与气候变化标准化技术委员会,2017)作为建立土壤干旱等级距离指数模型的出发点,土壤相对湿度干旱等级划分见表1。

表1 基于土壤相对湿度的干旱等级划分

Tab. 1 Classification of drought grades based on soil relative moisture

10~20 cm 深度土壤相对湿度( $R$ )	干旱等级
$R > 60\%$	无旱
$50\% < R \leq 60\%$	轻旱
$40\% < R \leq 50\%$	中旱
$30\% < R \leq 40\%$	重旱
$R \leq 30\%$	特旱

建立干旱等级维持线中的干土层厚度与干旱程度的关系,参考以干土层厚度划分的土壤干旱等级(表2)(青海省气象局,2017)。

表2 基于土壤干土层厚度的干旱等级划分

Tab. 2 Classification of drought grades based on dry soil layer thickness

干土层厚度( $H$ )/cm	干旱等级
$H < 5$	无旱
$5 \leq H < 10$	轻旱
$10 \leq H < 15$	中旱
$15 \leq H < 20$	重旱
$H \geq 20$	特旱

### 1.2.2 干旱等级维持线

干旱达到一定程度后,要维持土壤的干旱等级

就必须使土壤中输入输出的水分保持平衡,即

$$D + T + E_s + Q_o = P + Q_i + N \quad (1)$$

式中: $D$ 为渗漏到土层以下的水分, $T$ 为作物蒸腾量, $E_s$ 为土壤水分蒸发量, $Q_o$ 为径流流出水量, $P$ 为降水量, $Q_i$ 为径流流入水量, $N$ 为毛管水上升量。

正常情况下不同的植被覆盖土壤蒸散量差异较大,但在干旱条件下的植被蒸腾远小于水面蒸发,所以本文研究区域忽略植被的蒸腾。故处于干旱状态下,公式(1)中的 $T=0$ , $Q_i=0$ , $Q_o=0$ , $D=0$ ;另外研究土层下界面较深,忽略研究土层毛管水上升的贡献, $N=0$ 。干旱状态下土壤水分平衡方程简化为

$$E_s = P \quad (2)$$

张瑜芳等(1991)研究表明,随着干旱发展,土壤表面形成干土层后,在表层土壤低含水率条件下,土壤蒸发与水面蒸发成线性关系:

$$\frac{E_w}{E_s} = 1.5774 + 0.09H \quad (3)$$

式中: $E_w$ 为水面蒸发量; $H$ 为干土层厚度,单位:cm。

由此可见,在干旱达到土壤表面有干土层后,若维持干土层厚度不变,则土壤蒸发与水面蒸发成正比,其比率是干土层厚度的线性函数。根据公式(2),若增加的降水量要与土壤蒸发量相等,则干旱程度维持不变,所以由公式(2)和(3)得出:

$$\frac{\Delta E_w}{\Delta P} = 1.5774 + 0.09H \quad (4)$$

式中: $\Delta E_w$ 为累积水面蒸发增加量, $\Delta P$ 为累积降水量增加量。

如图1所示,在累积降水量-累积水面蒸发量坐标系中,假设从纵坐标轴上某点开始,向右侧画出一条直线,表示某个干旱等级,则增加的降水量与水面蒸发量沿着该直线变化时将维持该干旱等级不变。该直线斜率的物理意义是维持干旱等级所增加的水面蒸发量与降水量需要满足的比率,斜率的数值与干旱等级(干土层厚度)有关,由公式(4)确定;该直线截距的物理意义是从适宜作物生长的土壤含水量开始持续蒸发失水且无降水补充,达到某干旱等级时对应的累积水面蒸发量,土壤蒸发量与水面蒸发量的一般性关系可参考傅抱璞(1981)研究成果:

$$E_s = \frac{E_w \omega}{\omega_{c1} - \omega_f} \left[ \frac{\omega_{c1}}{(\omega_{c1}^n + \omega^n)^{\frac{1}{n}}} - \frac{\omega_f}{(\omega_{c2}^n + \omega^n)^{\frac{1}{n}}} \right] \quad (5)$$

式中: $E_w$ 为水面蒸发量,单位:mm; $\omega$ 为土壤湿度,单位:%; $\omega_{c1}$ 为土壤蒸发量由第一阶段转入第二阶段

的临界湿度,取 22.0%; $\omega_{c2}$  为第二阶段转入第三阶段的临界湿度,取 15.2%; $\omega_f$  为凋萎湿度,取 11.9%; $n$  是与土壤类型有关的参数,一般取 35。

由适宜含水量下限发展到各干旱等级,土壤中蒸发掉的水分计算公式如下:

$$E_s = 0.01 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} (\theta_1 - \theta_2) h \quad (6)$$

式中: $E_s$  为土壤蒸发量,单位: mm;  $\rho_s$  为土壤密度,单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\rho_w$  为水密度,单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_1$  为初始状态含水量,单位: %;  $\theta_2$  为结束状态含水量,单位: %;  $h$  为土壤湿度变化深度,单位: mm。

根据表 1,取土壤湿度变化深度为 200 mm(吴志勇等, 2021),表层干土含水量为 2%,田间持水量为 30%,适宜作物生长的土壤相对湿度下限取 60%,土壤密度为  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,假设 200 mm 深度与表土湿度为线性过渡。由公式(5)计算出土壤蒸发量与对应的水面蒸发量比值,由公式(6)计算出在无降水补充条件下达到某干旱等级时要蒸发的土壤水分,再得出达到该干旱等级所需要的水面蒸发量,即图 1 中该干旱等级维持线的截距。以各干旱等级土壤湿度代入,分别求出 4 条干旱等级维持线的截距。

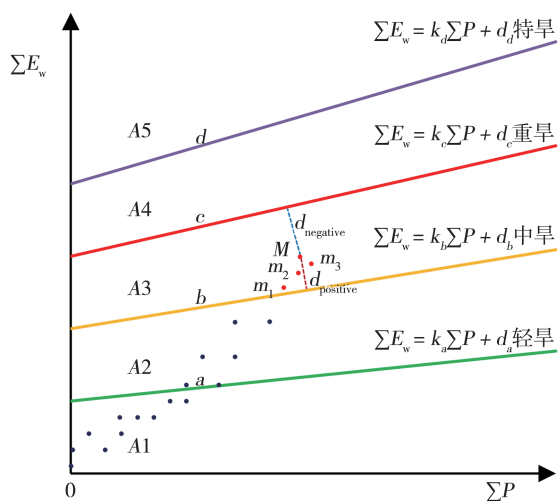


图 1 土壤干旱等级距离指数概念模型示意图

(点、线等说明见文中)

Fig. 1 Schematic diagram of the conceptual model of soil drought grade distance index  
(Points, lines, etc., see the article)

图 1 中直线  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别是轻旱、中旱、重旱、特旱 4 个干旱等级的临界线;  $A1$ 、 $A2$ 、 $A3$ 、 $A4$ 、 $A5$  分别表示无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱区域;  $k_a$ 、 $k_b$ 、 $k_c$ 、 $k_d$  分别是对应临界线的斜率,经计算分别为 2.027 4、2.477 4、2.927 4、3.377 4;  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_c$ 、 $d_d$  分别为对应临界线的截距,经计算分别为 79.3、101.8、123.5、148.5 mm;

$\Sigma E_w$ 、 $\Sigma P$  分别为累积水面蒸发量、累积降水量。干旱等级越高,其临界线对应的截距越大,即,在无降水条件下达到该等级干旱所需的水面蒸发量越大;干旱等级越高,其临界线对应斜率越大,即土壤含水量越低蒸发相同的土壤水分需要对应越大的水面蒸发量。

对于不同地区、不同作物,各干旱等级临界线的截距可以根据实际需要改变,也可以根据干旱指数计算结果与野外考察确定干旱等级来反推截距,而使干旱模型更适用于某地区某作物。

### 1.2.3 累积降水量、累积水面蒸发量

从哪一天开始计算累积降水量、累积水面蒸发量是干旱程度判别的关键,确定的起始日期要有客观性、唯一性,能反映目前干旱对作物造成的影响。采用逐日滚动最大距离法确定累积降水量、累积水面蒸发量。从评估当天开始,往前累加一天得到一个累积降水量和一个累积水面蒸发量,确定一个坐标点;这个点一般在坐标原点附近,该点到干旱等级维持线  $a$  有一个距离,再往前累加一天得到第 2 个点,这个点到直线  $a$  也有一个距离;比较这两个距离,选取大的距离作为准最大距离参与后续比较。以此类推,通过不断往前逐日累加得到新坐标点,并计算新点到直线  $a$  的距离,与前面得出的准最大距离比较,确定出新的准最大距离,直到准最大距离不再被更新(根据实际经验,准最大距离在连续累加 90 d 后就可以停止计算),这个准最大距离点就是直线  $a$  最大距离点,假设是图 1 中的  $m_1$  点。同样地,可以得出  $b$ 、 $c$ 、 $d$  线对应的最大距离点,假设分别为  $m_2$ 、 $m_3$ 、 $M$  点。一般来讲, $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $M$  点可能是重合的,那么这个重合点就是评估日最终的最大距离点;若有不重合,在这 4 个点中,假设  $M$  点位于最高等级干旱区域,并且  $M$  点到下面最近的直线  $b$  距离最大,则将  $M$  点确定为评估日最终的最大距离点。 $M$  点到下方最近的直线  $b$  的距离  $d_{\text{positive}}$  就是评估当期干旱过程的最大距离, $M$  点所对应的累积降水量、累积水面蒸发量决定了点坐标,也就决定了干旱指数计算结果,且该累积量对应的起始日就是当期干旱过程的起始日。前面是为了叙述方便,分开说明如何得出 4 条直线的最大距离点。在实际计算时,可以在每次滚动累加时同时计算出 4 条线的准最大距离点,从而提高效率。

### 1.2.4 土壤干旱等级距离指数

累积降水量、累积水面蒸发量在坐标中的位置  $M$  点(图 1)所处区域对应该区域干旱等级。 $M$  点位

于某临界线之上,该坐标点到临界线的距离为正,反之为负。将轻旱、中旱、重旱、特旱定义为1、2、3、4级,临界线上的干旱指数分别赋值1、2、3、4。

1)  $M$ 点在A2、A3、A4区域的土壤干旱等级距离指数(简称“干旱指数”)  $I$ 定义如下:

$$I = L + d_{\text{positive}} / (d_{\text{positive}} + |d_{\text{negative}}|) \quad (7)$$

式中:  $L$ 为  $M$ 点所处区域的干旱等级,  $d_{\text{positive}}$ 为  $M$ 点到其下方最近临界线距离,  $d_{\text{negative}}$ 为  $M$ 点到其上方最近临界线距离。

2) 为了干旱指数的连续性,当  $M$ 点在A1区域时,下方无临界线,构建的指数如下:

$$I = 1 + d_{\text{negative}} / (|d_{\text{negative}}| + d_a) \quad (8)$$

式中:  $d_a$ 是人为引入的临界线  $a$ 的截距数值。

3)  $M$ 点在A5区域时,上方无临界线,构建指数

如下:

$$I = 4 + d_{\text{positive}} / (d_{\text{positive}} + d_a) \quad (9)$$

式中:  $d_a$ 是人为引入的临界线  $d$ 的截距数值。

这样,构建的土壤干旱等级距离指数  $I$ 数值在(0,5)区间,当  $I$ 在(0,1)区间时无旱,[1,2)区间时轻旱,[2,3)区间时中旱,[3,4)区间时重旱,[4,5)区间时特旱。

## 2 结果和分析

### 2.1 干旱指数模型计算结果与土壤水分测量记录的相关性

计算2013年平阳气象站的逐日土壤干旱指数,并与该站2013年每旬1次的定期土壤水分测量数据进行比较,结果见图2。

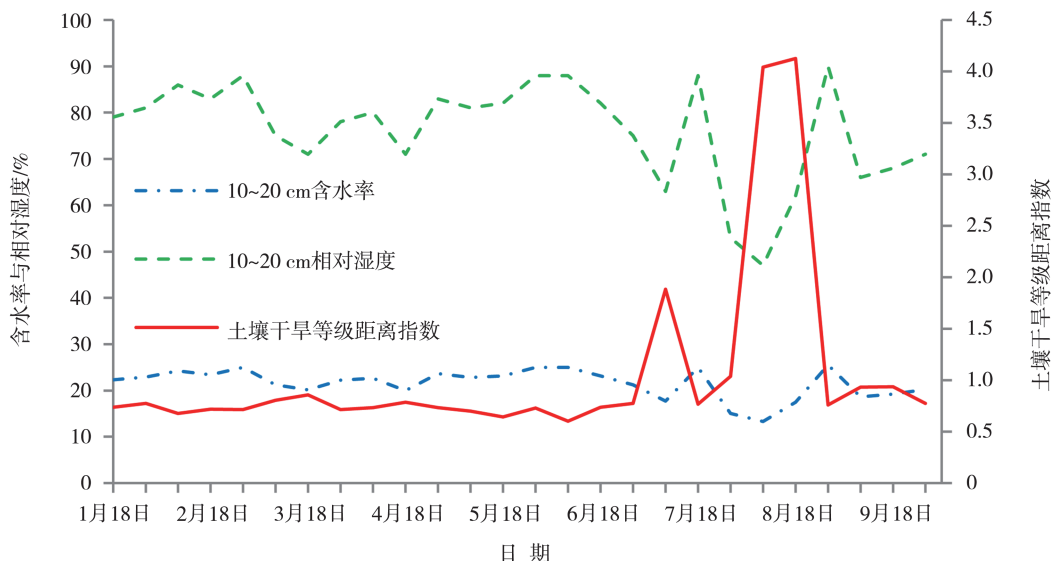


图2 2013年1—9月平阳站土壤干旱等级距离指数与土壤含水率及土壤相对湿度演变

Fig. 2 Evolution of soil drought grade distance index, soil water content, and soil relative moisture at

Pingyang Station from January to September in 2013

由于自动观测的土壤水分资料准确性较低,人工长时期连续观测的土壤水分资料很少,因此以平阳县气象局在安装自动观测仪器前开展的连续9个月每旬1次的土壤观测资料进行检验。从图2看出,用构建的干旱模型计算出的干旱指数与实际测量的土壤含水率及土壤相对湿度变化趋势基本保持相反状态。在干旱过程中,土壤干燥,含水率低,对应的干旱指数就高。经过反正切归一化处理后,干旱指数与10~20 cm土壤相对湿度、含水率的相关系数分别达-0.835、-0.833。通过  $t$  检验,其零假设为真的条件下观察到当前样本数据概率Sig值分别为  $8.27 \times 10^{-7}$ 、 $7.50 \times 10^{-7}$ ,均通过0.001的显著性检验。可见,由本文确定的坐标点(累积降水量,累积蒸发

量)到土壤干旱等级临界线的距离能反映土壤缺水程度,由该距离计算出的土壤干旱等级距离指数可以很好地描述土壤水分的变化趋势,可以客观监测、评估干旱的发展。该指数能够反映土壤干旱的原因在于模型构建时考虑了降水量和蒸发量两个因子的综合作用,并且其确定出的降水和蒸发累积量起始日实质上确定了无有效降水持续期的起始日。贺双燕等(2024)在分析2022年江西省干旱时空演变时发现,20 cm土壤湿度与月尺度的SPI相关系数达0.68,与季尺度的SPI相关系数为0.44,与半年尺度的SPI相关系数为0.56。Oyounalsoud等(2023)分析SPI、PDSI、SPEI、PNP等与深层土壤湿度的相关性,发现相关系数范围为0.2~0.6。传统干

旱指数在选取的时间尺度或应用区域不同时,与土壤湿度的相关性存在较大差异,导致对不同区域、不同季节干旱的监测准确率不同(王莺等,2022),其中一个重要原因是降水亏缺累积时间尺度在不同区域具有差异性(张强等,2024)。土壤干旱等级距离指数选取时间尺度具有客观性,避免了因选取时间尺度不同而造成的相关性变化,并且与10~20 cm土壤湿度的相关性较其他气象干旱指数强,可以更好地用于干旱监测。

## 2.2 临界线距离对干旱过程变化的捕捉

以各干旱临界线为基准,按1.2.3节确定的累积量起始日计算温州站2022年6月6日—12月31日期间逐日的累积降水量、累积蒸发量,确定坐标点,再计算该点到各临界线的距离(图3)。每一日由4条临界线计算出4个距离,若临界线距离能够捕捉干旱变化,则由这些距离计算出的干旱指数必然能反映干旱变化。临界线距离由负转正时表示达到该干旱等级,距离值越大表示干旱越严重;临界线距离由正转负时表示该干旱等级解除。

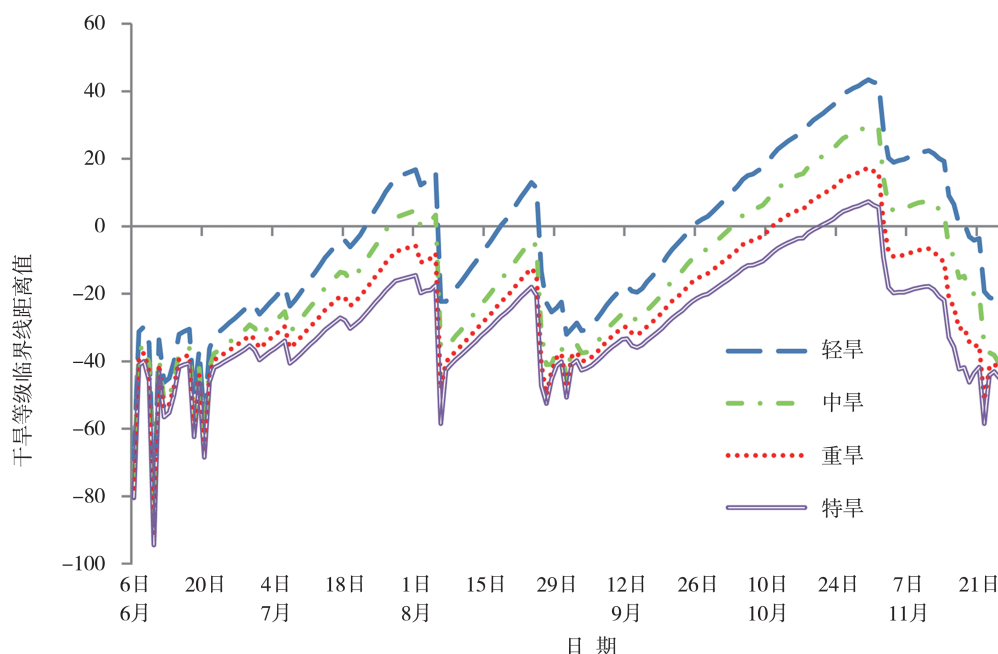


图3 2022年6月6日—12月31日温州站土壤干旱临界线距离逐日变化

Fig. 3 Daily variation of critical line distance for soil drought at Wenzhou Station from June 6 to December 31, 2022

图3可以清晰地描述温州站2022年的干旱演变。2022年5月21日—6月21日,温州站出现持续阴雨天气,其间多暴雨过程,总降水量达380.7 mm,属于典型的梅涝;6月22日后多晴热天气,降水减少,6月30日及7月1、7、18、19日分别出现小雨过程。由于干旱指数模型确定累积蒸发量、累积降水量的起始计算日是6月22日,6月22日—7月22日总降水量为19.3 mm,总蒸发量为121.9 mm;6月22日到7月21日,坐标点到各干旱临界线的距离均为负值,表明未达到轻旱,但逐渐接近0轴,即逐渐接近轻旱;7月22日,到轻旱的距离转为正值,表明开始出现轻旱,但到其他线的距离仍为负值;随着旱情发展,7月27日坐标点到中旱的距离也转为正值,达到中旱,但8月2日出现6.3 mm降水,干旱略有缓解,到中旱的距离又转为负值,旱情回到轻旱,8月3—5日又达到中旱,8月6日出现43.9 mm降水,旱

情解除。临界线距离变化很好地刻画出这次干旱从6月22日逐渐发展,一直到8月3日达到中旱,又在8月6日解除的整个过程。8月8—24日又持续晴朗,8月18日到轻旱临界线距离转正值,达到轻旱。在8—10月,由于出现一些过程性降水,干旱发展过程中多次得到缓解,图3中都有清晰地展现。10月11日重旱临界线距离转为正值,表明旱情发展到重旱;10月21日,到特旱临界线距离转为正值,达到特旱;直到10月31日、11月1日出现小雨才逐渐缓解,11月2日出现中雨,旱情缓解为重旱,11月3日继续出现中雨,干旱等级为中旱;此后多天小到中雨,11月15日缓解为轻旱,11月19日轻旱临界线距离也转为负,表明旱情彻底解除。以上的干旱程度表达与实际的作物表现基本一致。根据温州市农业农村局的调查结果(温州市农业局,2022)显示:截至8月23日,全市共有9 700 hm<sup>2</sup>农作物不同程度受到旱情影

响,包括水稻4 460 hm<sup>2</sup>、其他粮食作物1 307 hm<sup>2</sup>、蔬菜993 hm<sup>2</sup>、茶叶993 hm<sup>2</sup>、水果1 807 hm<sup>2</sup>;全市农作物成灾面积达2 200 hm<sup>2</sup>,绝收面积达553 hm<sup>2</sup>。2022年11月气候影响评价旱情总结(温州市气象局,2022)显示:2022年因干旱造成各地农用灌溉用水缺水严重,乐清、永嘉进行饮用水的限制性供水。其中鹿城区因无水源灌溉造成长期干旱的东魁杨梅果园受灾面积7 hm<sup>2</sup>、受灾茶园面积7 hm<sup>2</sup>;瓯海区因无水源灌溉造成无法播种的油菜面积7 hm<sup>2</sup>,无水源灌溉造成长期干旱的受灾蔬菜面积67 hm<sup>2</sup>、受灾果园面积7 hm<sup>2</sup>;乐清因无水源灌溉造成已播受灾的油菜面积8 hm<sup>2</sup>、无法播种的小麦面积9 hm<sup>2</sup>,无水源灌溉造成长期干旱的受灾蔬菜200 hm<sup>2</sup>、受灾果园(如杨梅、枇杷等)1 333 hm<sup>2</sup>、受灾茶园面积200 hm<sup>2</sup>;

瑞安因无水源灌溉造成长期干旱的受灾蔬菜面积193 hm<sup>2</sup>、受灾果园面积130 hm<sup>2</sup>、受灾茶园面积193 hm<sup>2</sup>;文成因无水源灌溉造成长期干旱的受灾果园杨梅200 hm<sup>2</sup>、柑桔133 hm<sup>2</sup>、猕猴桃67 hm<sup>2</sup>、茶园67 hm<sup>2</sup>;苍南因无水源灌溉造成长期干旱的受灾果园(杨梅、荔枝、猕猴桃、柑橘等)面积210 hm<sup>2</sup>、受灾茶园面积400 hm<sup>2</sup>。本文构建的干旱指数对上述干旱实例的捕捉时间尺度精确到了日,而SPI、SPEI等的时间尺度一般在月以上更为敏感(Zhang et al., 2020),因此该干旱指数可以用于骤旱的识别、监测。

### 2.3 历年逐日土壤干旱等级距离指数与旱情记录

根据图1中建立的土壤干旱等级距离指数概念模型,通过1.2.4节方法计算1985年1月1日—2022年12月31日的逐日干旱指数(图4)。

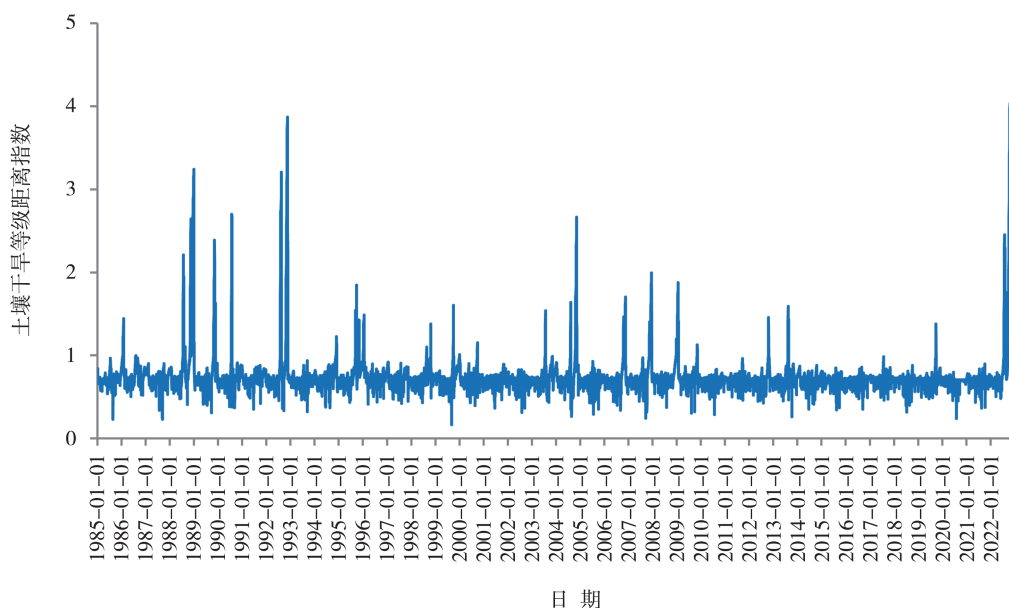


图4 1985—2022年温州站土壤干旱等级距离指数逐日演变

Fig. 4 Daily variation of soil drought grade distance index from 1985 to 2022 at Wenzhou Station

从图4可见,土壤干旱等级距离指数对历史干旱过程的反演结果与实际历史旱情记录基本一致。温州市气候影响综合评价(温州市气象局,1985—2022)显示:温州2022年出现特旱,1988、1992年出现重旱,1989、1990、2004年出现中旱。其中,2022年旱情在前面已有描述。1988年发生秋冬连旱,一些地方生活用水困难,火灾频发,一些水库干涸,柑桔等作物因干旱减产,冬种受到影响;1992年出现夏秋干旱,夏季干旱使早稻断水过早,高温逼熟,造成严重减产,瓜果、蔬菜等产量也受影响,部分晚稻田无水插秧,秋季又出现干旱,晚稻普遍断水过早;1989年出现秋冬连旱,火灾频发,山塘水库蓄水量剧减;1990年7月旱情发展迅速,稻田开裂,高温逼

熟严重,蔬菜、蕃薯等作物因高温干旱而枯萎,晚稻无水移栽,干旱面积达44 000 hm<sup>2</sup>,成灾27 333 hm<sup>2</sup>,直接损失5 215万元人民币;2004年冬旱、夏旱、秋旱断续出现,山塘水库蓄水不足,各地农业灌溉用水紧张,森林防火极为严峻。

土壤干旱等级距离指数不需要人为定义计算时间尺度,输出结果具有唯一性,对于干旱监测、评估相对更为客观。而其他气象干旱指数识别干旱强度可能会随选取的时间尺度变化而变化(张强等,2011;Zhu et al., 2016;王姝等,2019)。

## 3 结论与讨论

本文通过干旱状态下的土壤水分平衡分析,简

化了保持干旱等级不变条件下的土壤水分平衡方程,利用土壤水分平衡方程结合土壤干旱等级划分标准推导出干旱等级维持线的表达式,用逐日滚动最大距离法确定累积降水量、累积蒸发量,最终构建了土壤干旱等级距离指数。

1)指数模型中各干旱等级维持线的截距表示无降水条件下从适宜土壤含水量发展到相应干旱等级所对应的累积水面蒸发量,各干旱等级维持线的斜率表示在维持相应干旱等级条件下水面蒸发增加量与降水增加量的比率。

2)土壤干旱等级距离指数与土壤湿度相关性较好。该干旱指数的构成要素,即通过逐日滚动最大距离法确定的坐标点到各干旱等级维持线距离的变化能够精细描述旱情发展,对历年干旱的反演与实际旱情记录具有较好的一致性。

3)土壤干旱等级距离指数计算过程中的累积降水量和累积水面蒸发量既有明确的物理意义,也有确定累积起始日的客观方法;同时,不需要土壤湿度观测数据却能得到与土壤湿度分布较为一致的旱情评估结果。

4)土壤干旱等级距离指数逐日滚动计算,可以反映逐日干旱变化。

本文构建的土壤干旱等级距离指数所需要素少,只依据蒸发量和降水量数据计算,不依赖历史数据,为缺乏长历史观测数据序列区域的气象干旱监测、评估提供了可能。构建模型中假设的土壤参数与实际土壤可能存在差异,不同区域修改干旱等级对应的干土层厚度、土壤含水量,可以建立局地适应性更强的干旱等级维持线。

#### 参考文献:

阿帕尔·肉孜,阿吉古丽·沙依提,叶尔克江·霍依哈孜,等,2024.基于SPI的1961—2020年昌吉地区作物生长季气象干旱时空特征研究[J].沙漠与绿洲气象,18(2):163-168.

陈灏,张晓琳,胡彩霞,等,2023.基于GAMLSS模型的云南省非一致性标准化降水指数分析[J].水电能源科学,41(4):9-12.

傅抱璞,1981.土壤蒸发的计算[J].气象学报,39(2):226-236.

贺双燕,杨晓静,刘俊钊,等,2024.2022年江西省干旱时空演变特征研究[J].中国水利水电科学研究院学报:中英文,22(1):49-62.

黄瑶,何军,甘薇薇,等,2023.基于SPI的金沙江下游气象干旱时空分布特征及预测方法[J].高原山地气象研究,43(2):81-89.

雷声,全智平,王能耕,2023.2022年江西省极端干旱回顾与思考[J].中国防汛抗旱,33(4):1-6.

李家誉,余敦先,张利平,等,2022.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,36(6):280-289.

廉泓林,韩雪莹,刘雅莉,等,2022.基于标准化降水蒸散指数(SPEI)的毛乌素沙地1981—2020年干旱特征研究[J].中国沙漠,42(4):71-80.

潘永地,潘彦华,王金瑞,等,2022.基于卫星和数值预报产品计算短波辐射[J].亚热带资源与环境学报,17(4):22-28.

青海省气象局,2017.土壤干旱等级:DB63/T1578—2017[S].西宁:青海省气象局.

全国气候与气候变化标准化技术委员会,2017.气象干旱等级:GB/T20481—2017[S].北京:中国标准出版社.

任至涵,倪长健,石莽语,等,2024.基于最优概率分布函数的成都市近63a干旱特征分析[J].干旱气象,42(6):844-853.

商守卫,王银堂,崔婷婷,等,2022.基于标准化降水指数的成都市气象干旱演变特征[J].水电能源科学,40(12):26-29.

宋刚勇,胡洪浩,杨茂松,等,2023.2022年重庆市历史罕见干旱防御实践与思考[J].水利水电快报,44(4):8-13.

宋艳玲,2022.全球干旱指数研究进展[J].应用气象学报,33(5):513-526.

孙伟,裘峰,王丽萍,等,2023.2022年贵州省干旱灾害应对与思考[J].水利水电快报,44(4):24-27.

唐怡,卯昌书,苏建广,2023.基于SPI指数的云南省干旱时空特征分析[J].水利水电快报,44(2):17-23.

王林,陈文,2014.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,33(2):423-431.

王姝,李金建,秦宁生,2019.基于历史帕默尔干旱指数(PDSI)数据集重建的长江源区过去706a径流量[J].中国沙漠,39(3):126-135.

王莺,张强,王劲松,等,2022.21世纪以来干旱研究的若干新进展与展望[J].干旱气象,40(4):549-566.

温州市农业局,2022.温州市2022年干旱情况调查报告[R].温州:温州市气象局.

温州市气象局,1985—2022.温州市气候影响综合评价[R].温州:温州市气象局.

吴志勇,程丹丹,何海,等,2021.综合干旱指数研究进展[J].水资源保护,37(1):36-45.

武荣盛,侯琼,杨玉辉,等,2021.多时间尺度气象干旱指数在内蒙古典典型草原的适应性研究[J].干旱气象,39(2):177-184.

杨家伟,陈华,侯雨坤,等,2019.基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J].地理学报,74(11):2358-2370.

杨晓静,姜田亮,刘燕龙,等,2023.湖南省2022年干旱时空特征及早灾防御策略研究[J].中国防汛抗旱,33(4):

- 7-14.
- 张强,李栋梁,姚玉璧,等,2024.干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J].气象学报,82(1):1-21.
- 张强,张良,崔显成,等,2011.干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J].地球科学进展,26(7):763-778.
- 张瑜芳,蔡树英,蔡美娟,1991.表土低含水率条件下土壤非稳定蒸发研究[J].武汉水利电力学院学报,24(2):157-164.
- 郑超磊,胡光成,陈琪婷,等,2021.遥感土壤水分对蒸散发估算的影响[J].遥感学报,25(4):990-999.
- 周丹,张勃,任培贵,等,2014.基于标准化降水蒸散指数的陕西省近50 a 干旱特征分析[J].自然资源学报,29(4):677-688.
- 朱占云,张露萱,李福刚,等,2024.新安江流域气象干旱和水文干旱特征及两者之间的关系研究[J].干旱气象,42(2):157-165.
- ALLEY W M, 1984. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(7): 1 100-1 109.
- ARSLAN O, 2021. Hydrological drought analysis for Bolu city with streamflow drought index [J]. International Scientific and Vocational Studies Journal, 5(2): 115-123.
- CAMALLERI C, ARIAS-MUÑOZ C, BARBOSA P, et al, 2021. A revision of the combined drought indicator (CDI) used in the European drought observatory (EDO) [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 21(2): 481-495.
- HAHM W J, DRALLE D N, SANDERS M, et al, 2022. Bedrock vadose zone storage dynamics under extreme drought: Consequences for plant water availability, recharge, and runoff[J]. Water Resources Research, 58(4): e2021WR031781.
- TAREKE K A, AWOKE A G, 2022. Comparing surface water supply index and streamflow drought index for hydrological drought analysis in Ethiopia[J]. Heliyon, 8(12): e12000. DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e12000.
- LU E, 2009. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale [J]. Geophysical Research Letters, 36 (12): L12707. DOI 10.1029/2009GL038817.
- LYON B, 2004. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought [J]. Geophysical Research Letters, 31 (21): L21204. DOI:10.1029/2004GL020901.
- MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to times scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA. Boston, MA: American Meteorological Society.
- OYOUNALSOUD M S, ABDALLAH M, GOKHAN YILMAZ A, et al, 2023. A new meteorological drought index based on fuzzy logic: Development and comparative assessment with conventional drought indices [J]. Journal of Hydrology, 619: 129306. DOI:10.1016/j.jhydrol.2023.129306
- NOURANI V, 2022. Application of the artificial intelligence approach and remotely sensed imagery for soil moisture evaluation[J]. Hydrology Research, 53(5): 684-699.
- PALMER W C, 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new cropmoisture index[J]. Weatherwise, 21(4): 156-161.
- PALMER W C, 1965. Meteorological Drought [R]. Research Paper No.45, Washion DC: U S Weather Bureau.
- PRAJAPATI V K, KHANNA M, SINGH M, et al, 2021. Evaluation of time scale of meteorological, hydrological and agricultural drought indices [J]. Natural Hazards, 109 (1): 89-109.
- ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al, 2020. Causes and changes of drought in China: Research progress and prospects [J]. Journal of Meteorological Research, 34 (3): 460-481.
- VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I, 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 23(7): 1 696-1 718.
- ZHU Y, WANG W, SINGH V P, et al, 2016. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection [J]. Science of the Total Environment, 571: 1 058-1 068.

## A meteorological drought index based on cumulative precipitation and cumulative evaporation

PAN Yongdi<sup>1,2</sup>, XIAO Jingjing<sup>3</sup>, PAN Yanhua<sup>4</sup>, SHI Jie<sup>5</sup>

- (1. Wenzhou Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Wenzhou 325027, Zhejiang, China;
2. Wenzhou Key Laboratory of Typhoon Observations & Forecasting, Wenzhou 325027, Zhejiang, China;
3. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310052, China;
4. Wencheng Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Wencheng 325300, Zhejiang, China;
5. Dingxi Agricultural Testing Station, Dingxi 743000, Gansu, China)

**Abstract:** To overcome the limitation of traditional meteorological drought indices, which rely on historical climatic probability data of the same period for calculation, this paper establishes a meteorological drought index that can reflect the degree of soil drought but only requires current precipitation and evaporation data. Based on the soil water balance equation and in conjunction with the standard classification of soil drought levels, this study utilizes the relationship between the evaporation intensity of the dry soil surface layer and the water surface, along with soil evaporation calculation methods, to derive the expressions of the critical lines representing various drought levels within the cumulative precipitation-cumulative evaporation coordinate system. The four derived expressions of critical lines correspond to four drought grades, namely, mild drought, moderate drought, severe drought, and extreme drought, respectively. Through a forward daily rolling calculation, the point where the cumulative precipitation and cumulative evaporation coordinates are farthest from their respective critical line is identified as the maximum distance point for that critical line. The drought level is determined by the coordinate point that is located in the highest drought level region and has the maximum distance from the nearest lower critical line. The drought index is then constructed based on the distances from this coordinate point to each critical line. The drought index established in this study reflects the level of soil drought. The drought index calculated using the soil drought level distance index model presented in this paper is compared with soil moisture measurement data and drought disaster records. The results indicate that the variations in the drought index presented in this paper exhibit a high negative correlation with changes in soil moisture and a strong consistency with actual drought impacts. The drought index proposed in this study possesses advantages such as clear physical meaning, convenient calculation, and short response time scale, making it of great significance for practical drought monitoring operations.

**Key words:** accumulated precipitation; accumulated evaporation; meteorology; drought index

(责任编辑:王涓力;校对:黄小燕)