

左冰洁,孙玉军,2019. 福建省几种气象干旱指数的对比分析[J]. 气象,45(5):685-694. Zuo B J, Sun Y J, 2019. Comparative analysis of several drought indices to use in Fujian Province[J]. Meteor Mon,45(5):685-694(in Chinese).

# 福建省几种气象干旱指数的对比分析\*

左冰洁 孙玉军

北京林业大学森林资源和环境管理国家林业局重点开放性实验室,北京 100083

**提 要:** 选用合理的干旱指数对干旱进行监测一直是干旱研究的难点之一,对不同指数的适用性进行研究可以为干旱监测提供一定的参考依据。基于 1960—2017 年福建省气象站的逐日气象观测数据,采用频率累积法对五种干旱指数的阈值进行修正,利用层次分析法计算不同等级干旱事件的权重,结合 120 个典型历史干旱事件,对降水距平百分率(Pa)、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、相对湿度指数(MI)、改进综合气象干旱指数(CI<sub>new</sub>)在福建省的适用性进行了分析。结果表明:CI<sub>new</sub>适用于春秋冬季和年际的干旱监测,MI适用于夏秋季的干旱监测,这两种指数对重旱和特旱事件的监测效果比较好,SPI和SPEI对中旱和轻旱事件的监测效果比较好。五种指数均能比较好地描述干旱的发展过程,CI<sub>new</sub>的监测结果更贴合实际,并且较符合干旱发生的机制。因此CI<sub>new</sub>在福建省的干旱监测中比较适用,MI次之。

**关键词:** 干旱指数,适用性,对比分析,福建省

**中图分类号:** P429

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.010

## Comparative Analysis of Several Drought Indices to Use in Fujian Province

ZUO Bingjie SUN Yujun

State Forestry Administration Key Laboratory of Forestry Resources & Environmental Management,  
Beijing Forestry University, Beijing 100083

**Abstract:** Using reasonable drought index to monitor drought has always been one of the difficulties in drought research. The study of the applicability of different indices can provide a certain reference for drought monitoring. Based on the daily meteorological observation data of the Fujian provincial meteorological stations during 1960—2017, we compare the applicability of the percentage of precipitation anomalies (Pa), the standardized precipitation index (SPI), standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), relative humidity index (MI) and improved comprehensive meteorological drought index (CI<sub>new</sub>) in Fujian Province with 120 typical historical drought events. Besides, we correct the thresholds of the five drought indices by using the frequency accumulation method and also calculate weights of drought events at different levels by Analytic Hierarchy Process. The results show that: CI<sub>new</sub> is suitable for the monitoring of the spring, autumn, winter and annual droughts and MI is suitable for the monitoring of the summer, autumn and winter droughts. The two indices have better monitoring effect on severe drought and specially severe drought events. SPI and SPEI are suitable for moderate drought and light drought events. All the five indices can describe the development process of drought events. CI<sub>new</sub>'s monitoring results are more

\* 国家林业局‘948’项目(2015-4-31)资助

2018年5月5日收稿; 2019年2月26日收修定稿

第一作者:左冰洁,主要从事森林经理研究. Email:1715353593@qq.com

通信作者:孙玉军,主要从事森林资源监测与评价研究. Email:sunyj@bjfu.edu.cn

close to reality and more consistent with the mechanism of drought. Therefore,  $CI_{new}$  is more suitable for drought monitoring in Fujian Province, followed by MI.

**Key words:** drought index, applicability, comparative analysis, Fujian Province

## 引 言

干旱是人类社会中最严重的自然灾害之一,其影响范围大,持续时间长,形成原因复杂,会给社会经济的发展带来巨大的损失,因此对干旱的有效监测和预防备受学者们关注。张景书(1993)将干旱定义为在降水极少或者没有的情况下土壤水分匮乏,从而导致无法正常供应作物生长的气候现象。American Meteorological Society(1997)将干旱分为四大类:气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱,气象干旱主要是由气象因素引起,主要表现为降水和蒸散不均衡而导致的干旱现象;水文干旱通常与径流有关,表现为由于径流低于正常值或者水位降低而引发的干旱;农业干旱是以作物的生长形态为判断标准,当土壤的含水量不足以供给作物生长时则会发生干旱,其干旱程度表现为土壤对作物生长供水的能力大小;社会经济干旱则表现在干旱对人类生产活动产生的影响上(张强等,2011)。在这四种干旱中,气象干旱是发生最普遍和最基本的干旱类型,一定程度的气象干旱会引起其他几种干旱的发生,尤其表现在当降水明显减少时,作物的生长会受到抑制,河流的径流和水位会明显下降,人类的用水资源会出现短缺(谢应齐,1993)。对气象干旱的有效监测,可以对其他几种干旱做到有效的预警。

由于干旱的复杂性,根据不同的目的,学者们构建了不同的干旱指数来对干旱事件进行描述。近年来普遍被用来监测干旱情况的干旱指数通常被分为两大类,一类是只考虑单一因素的干旱指数,这类指数的核心是降水,以水盈亏偏离正常值的程度来表示,常用的指数有降水距平百分率(Pa)、标准化降水指数(SPI)、有效干旱指数(EDI)、Z指数等。这一类干旱指标考虑了降水的时空分布不均匀性,可以反映干旱的变化趋势,但由于未考虑其他干旱因素,对于某一时段的干旱描述性不强。另一类是结合多要素考虑的干旱指数,这一类指标除了考虑降水之外,还将与干旱有关的气温、蒸发等要素考虑在内,常用的指数有相对湿润指数(MI)、标准化降

水蒸散指数(SPEI)、综合气象干旱指数(CI)、帕默尔干旱指数(PDSI)等。这一类指数计算比较复杂,对干旱的影响因素考虑比较全面(李忆平和李耀辉,2017)。

干旱指数存在多样性,但是对不同地区干旱的描述目前并没有一个统一适用的干旱指数,不同的干旱指数对同一地区的干旱监测可能会存在一定的差异,因此在对区域进行干旱监测时对干旱指数进行适用性分析是十分必要的(Sheffield et al,2012)。近年来许多学者针对不同干旱指数的区域适用性进行了大量的研究(Bayissa et al,2018;李秀芬等,2017;杨庆等,2017)。陈莹和陈兴伟(2011)基于标准化降水指数对福建省的旱涝特征进行了分析,结果表明福建省整体旱涝发展趋势是逐渐向涝发展,并且旱涝的变率在逐步变大。包云轩等(2011)基于CI对江苏省的干旱时空分布特征进行了分析。廖要明和张存杰(2017)基于MCI对中国的干旱时空进行了分析,发现中国平均年干旱日数总体呈增加趋势。王春林等(2011)、李奇临等(2016)分别改进了CI,克服了原CI的不合理的跳跃现象。后经过诸多学者的应用和验证,认为改进后的综合干旱监测指数 $CI_{new}$ 具有良好的区域适应性和监测效果(环海军等,2017;李红梅等,2015;杨丽慧等,2012;赵海燕等,2011)。侯威等(2013)构建了可以反映某一时段内气象旱涝强度的标准化阶段气象旱涝强度指数和阶段气象旱涝时间分布状态的标准化阶段气象旱涝空间分布差异指数,为阶段干旱指数的构建提供了参考方法。梁丰等(2018)比较了SPEI\_TH、SPEI\_PM、scPDSI\_PM三种指数集对东北地区干旱的描述能力,发现在对于旱年进行描述时SPEI\_TH、scPDSI\_PM的描述性比较好。赵新来等(2017)比较Pa、SPI、SPEI指数对高寒草地的响应情况,发现SPI6、SPEI6对于定量研究高寒草地比较有效。穆佳等(2018)对五种干旱指数在吉林农业干旱评估中的适应性进行了评价,结果表明相对湿润指数(MI)对吉林农业干旱的描述性最好。谢五三等(2014)对比分析了降水距平Pa、Z指数、SPI、MI、CI和改进的 $CI_{new}$ 在淮河流域的适用性,结果表明在淮河流域的干旱监测中CI和 $CI_{new}$ 的适用

性明显优于其他指数。学者们的研究结果均表明在不同的地区不同的时间尺度下,最适用的干旱指数均不尽相同(环海军等,2017;刘敏等,2013;王景红等,2013;王理萍等,2017;谢五三等,2011;谢五三和田红,2011;徐一丹,2017)。

目前,对于干旱指数的适用性研究多集中在干旱区和半干旱区,对湿润区的研究比较少。基于以上研究,本文以福建省气象干旱变化特征为研究对象,利用1960—2017年逐日的气象观测资料对Pa、SPI、SPEI、MI、 $CI_{new}$ 气象干旱指数进行比较,分析各指数对福建省气象干旱特征的适应性,为更好地监测福建省干旱状况提供科学依据,也为湿润区的干旱监测提供一定的理论依据。

## 1 研究区域概况

福建省地处中国东南部,位于 $23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20'N$ 、 $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40'E$ 。地形比较破碎,年平均降雨量为1400~2000 mm,但是降雨量在年际、季节间和季内不均,气候的区域性差异比较大,所以干旱比较频发。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

本文气象资料主要来源于中国气象数据网提供的福建气象站1960—2017年的逐日观测数据,包括降水、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、平均风速、平均相对湿度、平均水汽压等。对气象站进行筛选,选取了数据资料长度相当,分布比较均匀的22个站点作为研究对象(图1)。所使用的气象数据均进行质量控制,剔除异常数据,对缺失数据用同期多年平均值代替。福建省干旱资料源于《中国气象灾害大典(福建卷)》(温克刚,2007)和《中国气象灾害年鉴》(宋连春,2014;2012)。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 干旱指数的计算

本文选择Pa、SPI、SPEI、MI和 $CI_{new}$ 进行对比分析。指数的计算方法见《气象干旱等级》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2006),潜在蒸散量用FAO

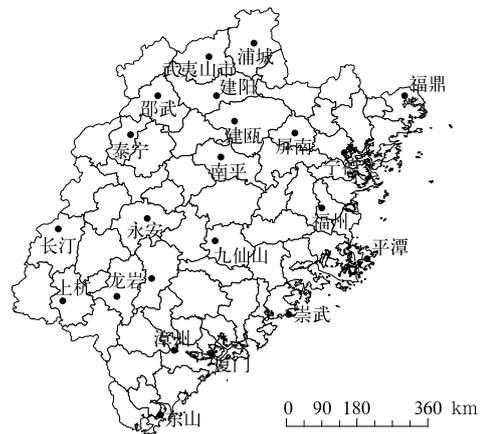


图1 福建省代表站点分布  
Fig. 1 Distribution of representative weather station in Fujian Province

Penman-Monteith方法计算。指数的计算是以当前日为基准,向前滚动30 d计算30 d尺度的各气象干旱指数,得到逐日的月尺度的干旱数值,每月的干旱指数本文使用日干旱数值平均得来。

传统的CI在进行干旱监测时监测结果常常会出现不合理的跳跃现象,针对这种情况对CI中的SPI和MI进行改进,将SPI的等权重累积降水用非线性不等权重累积替代,MI用旬累积湿润方法改进。

$$CI_{new} = aZ_{30(new)} + bZ_{90(new)} + cM_{30(new)}$$

式中, $Z_{30(new)}$ 、 $Z_{90(new)}$ 分别为近30 d和近90 d的不等权重标准化降水指数SPI值, $M_{30(new)}$ 为改进的近30 d相对湿度指数。

SPI采用Erlu方法进行改进,用某时间段内不等权重降水累积来代替等权重降水(Lu,2009;赵一磊等,2013)。

$$f(N) = \sum_{n=0}^N e^{-bn} P_{-n}$$

式中, $f(N)$ 表示N天内的不等权重降水加权, $e^{-bn}$ 为前n天的日降水权重系数, $P_{-n}$ 为前n天的日降水量。假设在N天前的降水对当日降水的影响降低到1%,由此可以计算b的值。此式中将 $f(N)$ 代

替 $\sum_{n=0}^N P_{-n}$ ,计算 $Z_{30}$ 和 $Z_{90}$ 。

$M_{30(new)}$ 计算将一个月分成三旬:

$$MI = a \frac{P_i - pe_i}{pe_i} + \frac{2}{3}(1-a) \frac{P_{i-1} - pe_{i-1}}{pe_{i-1}} + \frac{1}{3}(1-a) \frac{P_{i-2} - pe_{i-2}}{pe_{i-2}}$$

式中,  $P$  表示降水量,  $pe$  表示蒸散量,  $i$  表示当旬,  $i-1$  表示上旬,  $i-2$  表示上上旬, 夏季降水比较多  $a=0.7$ , 其他季节  $a=0.5$  (冯建设等, 2011)。

### 2.2.2 指数的阈值修正

由于中国幅员辽阔, 不同地区气候差异很大, 因此干旱指数的等级阈值的区域使用会存在地区上的差别。为了使干旱指数更准确地反映福建省的实际干旱情况, 需要对各个等级的干旱阈值进行修正。本文采用国内外使用较多的累积频率法 (鞠笑生等, 1997; 张强等, 1998) 对五种干旱指数的阈值进行修正。各干旱等级的累积频率如表 1。

表 1 干旱指数各干旱等级对应的干旱频率  
Table 1 Drought frequency corresponding to various drought levels of drought index

干旱等级	干旱程度	所占比重/%	累积频率/%
5	特旱	2	0~2
4	重旱	5	2~7
3	中旱	8	7~15
2	轻旱	15	15~30
1	无旱	70	30~100

利用日值气象数据, 分别五个干旱指数, 计算 57 年 22 个代表站点的逐日干旱数值。将计算的每个指数的所有站点的日值数据整合, 约 46 万个样本数, 按从大到小的顺序排列, 结合表 1 的累计频率, 对五种指数的阈值分别进行修正。

### 2.2.3 干旱指数的比较方法

为了尽可能准确客观地反映各干旱指数的干旱监测能力, 避免由于个别实例所带来的片面影响, 根据历史资料对福建省的干旱事件进行分析。干旱事件的干旱等级的划分是根据温克刚 (2007) 福建的干旱标准来确定, 以日降水量  $< 2$  mm 的连旱日来确定。春季, 日降水量  $< 2$  mm 的连旱日在 16~30 d 为轻旱, 在 31~45 d 为中旱, 在 46~60 d 为重旱,  $> 60$  d 为特旱; 夏季, 日降水量  $< 2$  mm 的连旱日在 16

~25 d 为轻旱, 在 26~35 d 为中旱, 在 36~45 d 为重旱,  $> 45$  d 为特旱; 秋、冬季日降水量  $< 2$  mm 的连旱日在 31~50 d 为轻旱, 在 51~70 d 为中旱, 在 71~90 d 为重旱,  $> 90$  d 为特旱。从历史干旱事件中选取了 120 个比较典型的干旱事件, 其中春旱、夏旱、秋旱、冬旱事件各 30 件, 并且在每个季度的干旱事件中均包含相当数量的特旱、重旱、中旱、轻旱事件, 干旱事件的选取遵循干旱发生地点分布均匀的原则。比较各指数对典型干旱事件发生的监测能力和在干旱过程中的监测能力。

不同等级的干旱对农业生产的危害程度不同, 干旱等级越高, 对农业的危害越大。为了对不同指数监测干旱事件的优劣性进行综合比较, 对比 120 个干旱事件中不同干旱等级事件所造成的经济损失大小, 采用层次分析法 (AHP) (曾建权, 2004; 牛振荣, 2015) 确定不同干旱等级的权重, 以期对各指数对干旱事件的描述能力进行综合评价。干旱指数的评分标准如表 2。

表 2 干旱指数的描述结果的评价标准

Table 2 Evaluation criteria for descriptive results of drought index

监测结果	吻合	相差一级	相差两级	相差三级	漏测
监测效果	优	良	中	较差	差
评分	5	4	3	2	1

## 3 结果与分析

### 3.1 干旱指数的阈值修正及干旱等级权重

对于干旱指数的阈值修正结果 (表 3),  $Pa$ 、 $SPI$ 、 $SPEI$  和  $MI$  的修正结果与原值基本一致, 说明《气象干旱等级》的标准在福建省适用, 可用于福建省的气象干旱监测业务, 但  $CI_{new}$  的修正后结果较  $CI$  的

表 3 福建省干旱指数的阈值的原值和修正

Table 3 Original value and correction value of drought index threshold in Fujian Province

干旱等级	干旱程度	$Pa$		$SPI$		$SPEI$		$MI$		$CI_{new}$	
		原值	修正值	原值	修正值	原值	修正值	原值	修正值	原值	修正值
1	无旱	$> -40$	$> -41$	$> -0.5$	$> -0.5$	$> -0.5$	$> -0.5$	$> -0.40$	$> -0.36$	$> -0.6$	$> -1.37$
2	轻旱	$(-60, -40]$	$(-65, -41]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-0.65, -0.40]$	$(-0.74, -0.36]$	$(-1.2, -0.6]$	$(-1.91, -1.37]$
3	中旱	$(-80, -60]$	$(-84, -65]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.4, -1.0]$	$(-0.8, -0.65]$	$(-0.91, -0.74]$	$(-1.8, -1.2]$	$(-2.34, -1.91]$
4	重旱	$(-95, -80]$	$(97, -84]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-2.1, -1.5]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-1.9, -1.4]$	$(-0.95, -0.80]$	$(-0.98, -0.91]$	$(-2.4, -1.8]$	$(-2.88, -2.34]$
5	特旱	$\leq -95$	$\leq -97$	$\leq -2.0$	$\leq -2.1$	$\leq -2.0$	$\leq -1.9$	$\leq -0.95$	$\leq -0.98$	$\leq -2.4$	$\leq -2.88$

原值偏小,主要是因为  $CI_{new}$  采用 30 d 和 90 d 不等权重累积降水来替代等权重累积降水,该方法认为越靠近日前的降水量对干旱的作用越大,导致修正后的阈值普遍偏小,所以需对  $CI_{new}$  的阈值进行调整。修正阈值是使用福建省的实况资料计算所得,更适合福建省的气候平均态。因此本文采用修正后的各干旱指数的阈值来划分干旱指数的干旱等级。

利用层次分析法计算各等级干旱事件的权重分配大小如表 4。其中特旱事件和重旱事件的权重比较大,在干旱事件中,这两种干旱类型造成的经济损失也较大,占 75% 左右。因此采用干旱指数进行干旱监测时,需要重点关注干旱指数对这两种干旱的描述能力。

表 4 不同干旱等级权重分配

Table 4 Weight distribution of different drought levels

干旱等级	特旱	重旱	中旱	轻旱
权重	0.47	0.28	0.16	0.09

### 3.2 干旱指数在不同季节的监测能力对比

对五种指数在不同季节和全年的干旱监测能力进行比较。考虑到不同干旱等级干旱事件的致灾程度大小,在对干旱指数的监测能力进行评价时,根据表 4 中的不同干旱等级的权重分配对四种干旱等级的评分结果进行加权,得到该指数对干旱事件的评分结果。指数的评分越高代表该指数的适用性越好。对五种指数在 120 个历史典型干旱事件的描述能力评分结果如表 5。对不同的季节进行干旱监测时,五种指数对春季和冬季干旱事件的监测效果均比较好,除 MI 外,其他指数的评分结果均在 3.5 以上,对夏季干旱事件的评分较低,监测效果比较差。 $CI_{new}$  在春、秋、冬季对干旱事件的监测能力均比较好,对夏旱的监测能力最差;MI 对夏、秋、冬季干旱事件的监测能力较其他指数好,但是在春季的监测能力比较差;Pa 在对不同季节的干旱进行描述时,

表 5 干旱指数对历史干旱事件描述的评价结果

Table 5 Drought index evaluation results of historical drought events

季节	干旱等级	$Pa$	$SPI$	$SPEI$	$MI$	$CI_{new}$
春	特旱	3.50	3.75	3.75	3.63	4.50
	重旱	4.33	4.17	4.50	3.83	4.17
	中旱	3.50	3.25	3.50	1.75	3.00
	轻旱	2.75	4.50	4.25	3.00	3.00
	干旱事件评分	3.66	3.86	3.97	3.33	4.03
夏	特旱	3.08	2.92	2.83	3.25	2.92
	重旱	2.83	2.33	2.83	3.67	3.33
	中旱	3.86	3.86	3.86	4.29	3.14
	轻旱	2.60	3.40	3.20	3.40	2.00
	干旱事件评分	3.09	2.95	3.03	3.55	2.99
秋	特旱	3.91	2.91	2.82	4.09	3.91
	重旱	3.71	3.64	3.36	3.86	4.07
	中旱	3.29	3.93	3.79	3.14	3.50
	轻旱	3.29	2.57	3.43	2.29	3.14
	干旱事件评分	3.70	3.25	3.18	3.71	3.82
冬	特旱	4.88	3.63	4.00	5.00	4.88
	重旱	4.25	3.50	3.75	4.63	4.75
	中旱	3.50	4.50	4.75	3.50	3.50
	轻旱	3.71	3.07	3.93	3.57	3.36
	干旱事件评分	4.38	3.68	4.04	4.53	4.49
全年	特旱	3.84	3.30	3.35	3.99	4.05
	重旱	3.78	3.41	3.61	4.00	4.08
	中旱	3.54	3.89	3.98	3.17	3.29
	轻旱	3.09	3.39	3.70	3.07	2.88
	干旱事件评分	3.71	3.43	3.55	3.78	3.83

注:干旱事件评分是根据不同干旱等级的评分结果和干旱等级权重加权而得。

Note: The drought event score is weighted according to the scores of different drought levels and the drought grade weights.

评分均比较高,对四季干旱事件均有比较好的描述性;SPI 和 SPEI 在不同季节的评分结果均比较一致,对于干旱事件的评分结果较其他三种指数低。从年际尺度进行对比时,指数的监测效果: $CI_{new}$ (评分 3.83) > MI(评分 3.78) > Pa(评分 3.71) > SPEI(评分 3.55) > SPI(评分 3.43), $CI_{new}$  和 MI 在全年的适用性均比较好。 $CI_{new}$ 、MI 和 Pa 对特旱事件和重旱事件的监测能力比较好,适用于对重度干旱事件进行监测,SPEI 和 SPI 对中旱和轻旱事件的监测能力最好,评分基本在 3.5 以上,适用于对轻度干旱进行监测。

### 3.3 干旱指数监测干旱过程的对比

在评价干旱指数对区域干旱的适用性时,不仅要考虑干旱指数对干旱的监测能力,也要对干旱指数在干旱过程中的描述能力进行对比。干旱的发生

是一个旱情逐渐变重的过程,当一段时间内持续无降水或降水偏少时则会发生干旱。干旱的发生是一个连续的过程,不存在跳跃现象,但是干旱的解除则不然,当出现一次大降水干旱就能解除。本文将在相邻的两个时间段内,干旱指数监测的干旱等级相差两个及以上的级别时的现象定义为一次不合理的跳跃。

由于福建省地理位置特殊,南部沿海,北边内陆,所以选择福建省南部平潭县、中部的南平和北部泰宁三个站点,对三个站点五种指数监测的 1960—2017 年干旱等级结果的不合理跳跃次数进行统计见表 6。三个站点的统计结果显示,五种指数跳跃等级为两级的均比较多,MI 和  $CI_{new}$  跳跃级数为两级以上的次数明显较其他指数少,符合干旱发生的机制。

表 6 1960—2017 年各指数不合理跳跃次数统计

Table 6 Statistics of unreasonable jumps for various indices from 1960 to 2017

站点	跳跃等级	Pa	SPI	SPEI	MI	$CI_{new}$
平潭	4	17	10	5	16	3
	3	31	28	21	26	15
	2	64	42	68	45	47
南平	4	7	11	9	6	5
	3	22	32	28	12	24
	2	36	37	51	26	33
泰宁	4	5	9	9	4	3
	3	22	27	22	12	18
	2	28	46	51	22	43

以 1977 年春旱为例,对比分析各个干旱指数在监测一次干旱过程中的月变化情况,将各站点的干旱指数数值用反距离权重法进行插值得到福建省的干旱分布(图 2),各指数的月尺度干旱指数是由月内的逐日干旱数值平均得来。福建省 1977 年 2 月全省开始出现轻旱,3 月旱情发展,部分地区达到特旱级别,4 月干旱基本解除,旱情最重的是闽江以南地区。由图 2 可知,在对干旱的过程描述中,SPI、SPEI、MI 和 Pa 都很好地描述了干旱的起始、发展和解除的过程,而  $CI_{new}$  指数在 2 月则表示无干旱发生,这不符合干旱发生的机制,MI 指数在 2 月干旱起始时描述偏轻。SPI 和 SPEI、MI 和  $CI_{new}$  描述干旱发展的趋势时基本相同,Pa、MI 和  $CI_{new}$  描述的 3 月闽江以南广大地区旱情开始变重与事实相符,但是对干旱等级的描述 Pa 和 MI 偏轻,特别是漏测了

特旱事件。相反  $CI_{new}$  则很好地监测了特旱事件的发生,但是该指数对干旱的描述比实际情况偏重。SPI 和 SPEI 对干旱区域的描述与现实情况存在一些差异。在月尺度上  $CI_{new}$  的监测效果较好。

结合以上情况分析, $CI_{new}$  在干旱监测显示中 2 月无旱,可能是由于选择的月时间尺度过长导致的长时间序列平均状态下区域显示无旱。针对这种情况,本文以候(5 d)为时间步序,展示  $CI_{new}$  在一次干旱监测中旱情的变化过程(图 3)。在 2 月下旬福建省西南部开始出现干旱,并逐步向北蔓延,3 月旱情最中,在 3 月中旬基本全省达到特旱级别,到 3 月下旬干旱开始逐渐向西南消退,到 4 月中下旬干旱基本解除。对比一次干旱监测过程发现  $CI_{new}$  在对一次干旱的发展过程中的监测均优于其他指数。

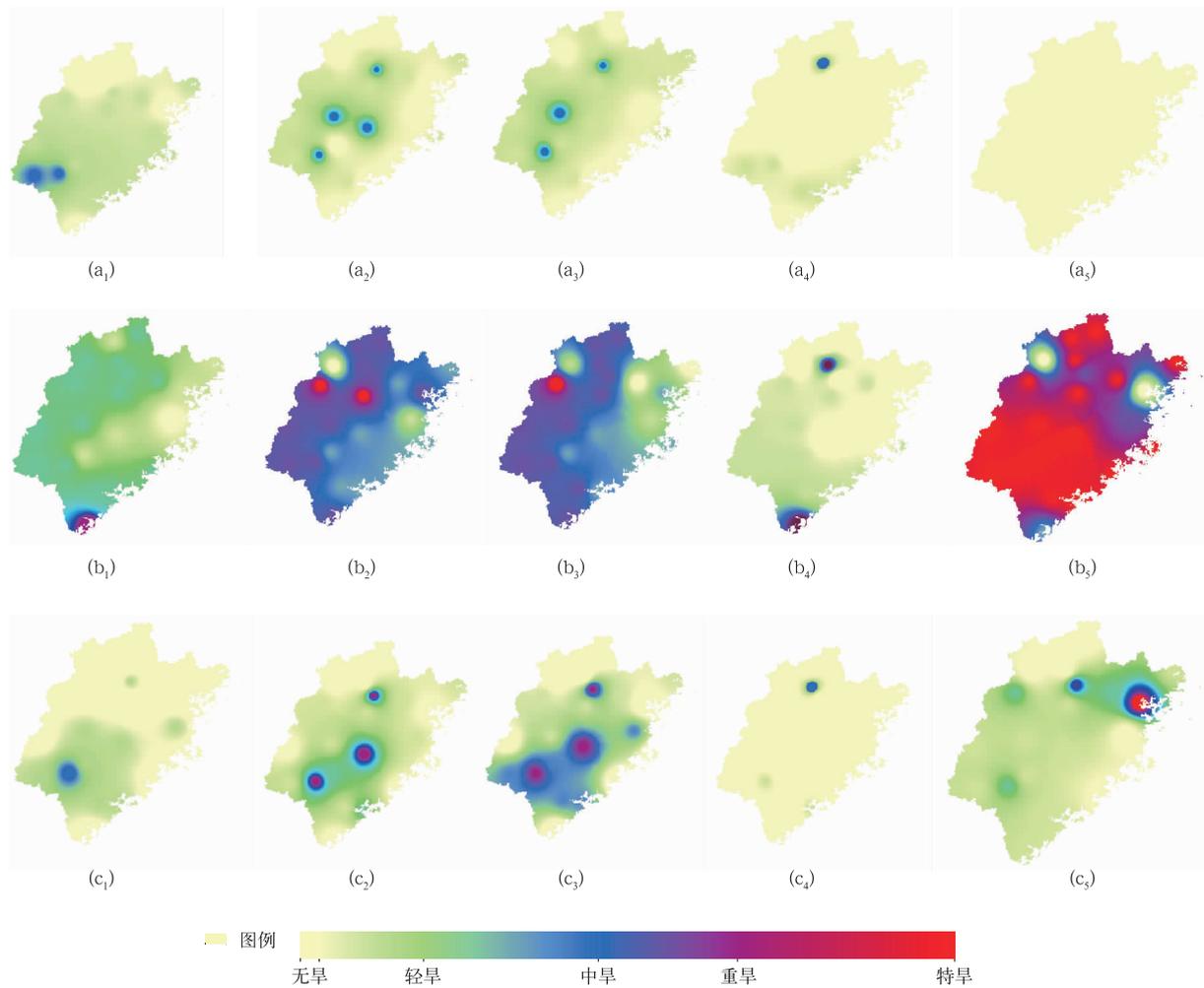


图 2 1977 年 2 月 (a), 3 月 (b) 和 4 月 (c) 不同干旱指数在福建省的监测结果  
 (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) Pa, (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) SPI, (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) SPEI, (a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) MI, (a<sub>5</sub>, b<sub>5</sub>, c<sub>5</sub>) CI<sub>new</sub>  
 Fig. 2 Monitoring results of different drought indexes in February (a), March (b),  
 April (c) 1977 in Fujian Province  
 (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) Pa, (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) SPI, (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) SPEI, (a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) MI, (a<sub>5</sub>, b<sub>5</sub>, c<sub>5</sub>) CI<sub>new</sub>

### 4 结论与讨论

干旱是福建省常发的气象灾害之一,评价不同的干旱指数在福建省的适用性,为福建省找出最适用的干旱指标是保证农业生产正常和当地经济发展稳定的重要手段之一。利用 1960—2017 年的逐日气象观测数据,选用五种常用的气象干旱指数,利用福建省的历史典型干旱事件对五种指数的适用性进行分析,主要得到以下结论:

(1) 通过对比干旱指数在不同季节及年际对不同等级干旱事件的干旱监测能力时发现,CI<sub>new</sub> 在年

际和四季的监测效果均比较好,适用于对春、秋、冬季的干旱事件进行监测,并且对全年干旱事件的监测能力均优于其他指数。MI 适用于对夏、秋、冬季的干旱进行监测。Pa 在四季对干旱的监测效果虽不如 CI<sub>new</sub> 和 MI,但其在四季和年际对干旱的评分均比较好,这主要是因为 Pa 直接反映的是由降水量减少引起的干旱,而降水量减少是导致干旱的最主要因素之一,所以 Pa 在四季的适用性均比较好。SPI 和 SPEI 对四季和年际的干旱监测能力最差。对于重旱和特旱事件,CI<sub>new</sub>、MI 和 Pa 的描述性均比较好,这与各个指数在干旱事件的综合评分结果基本一致。因为通过层次分析法计算得到的重旱事

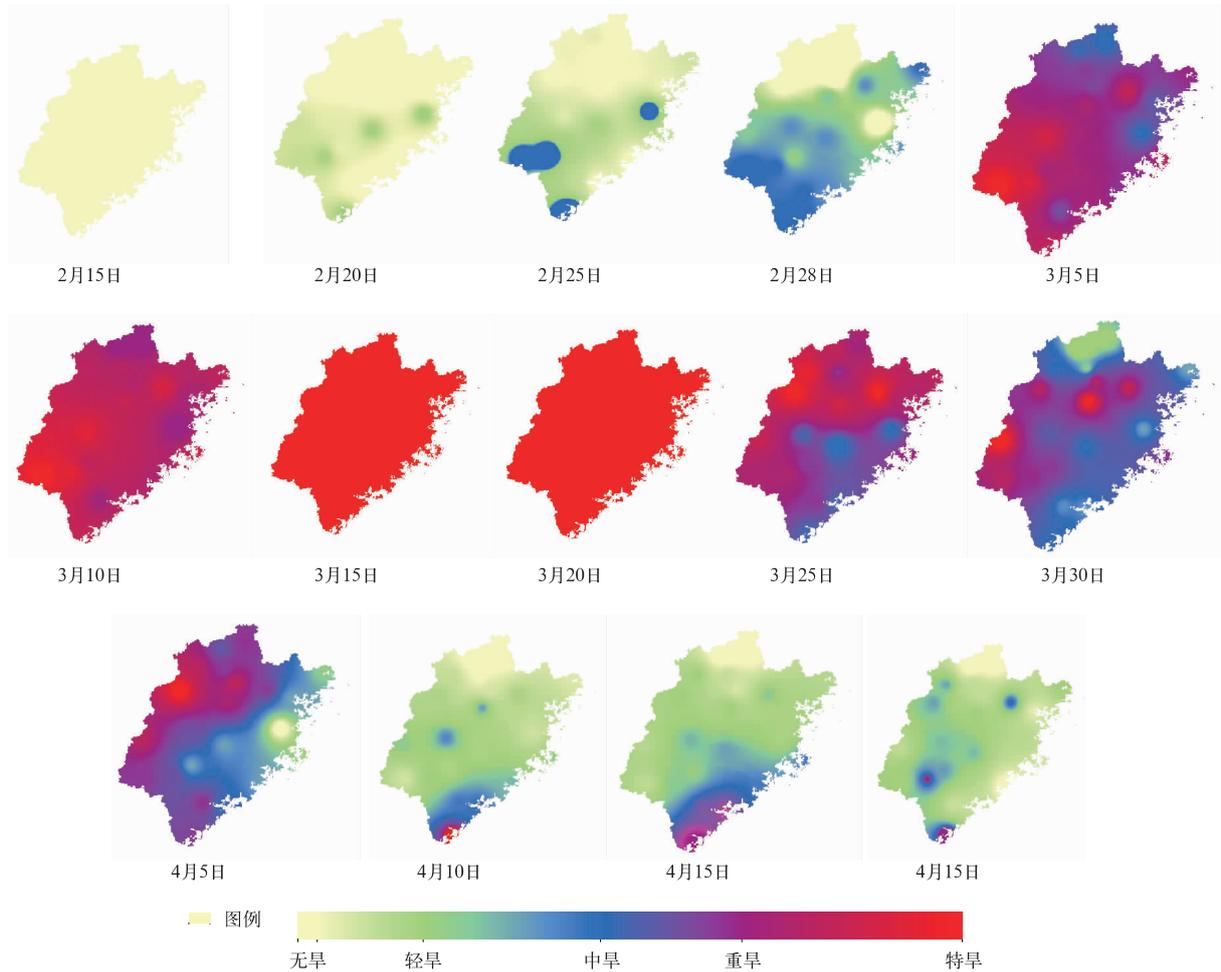


图 3  $CI_{new}$  监测 1977 年春旱的发展过程

Fig. 3  $CI_{new}$  Monitors the development of spring drought in 1977

件和特旱事件的权重比较大,若指数对重旱事件和特旱事件的描述效果好,基本上代表了该指数对于旱事件的描述性比较好。SPI 和 SPEI 则对中旱和轻旱事件的描述评分比较高,这两种指数适用于对于旱程度比较轻的干旱事件进行监测。

(2) 用干旱指数描述干旱事件要符合干旱发生的机制。对各指数在监测 1960—2017 年干旱的不合理跳跃次数进行统计发现,MI 和  $CI_{new}$  在进行干旱监测时不合理跳跃次数明显较其他指数少,在五种指数不合理跳跃次数的统计中,跳跃等级为两级的比较多,主要是因为各干旱指数都是以月尺度为单位进行统计的,当某个月的降水急剧减少,会发生两级以上的跳跃。

(3) 在对 1977 年全省春旱的监测过程中,月尺度上五种指数均较好地描述了干旱的发展过程,但是  $CI_{new}$  和 MI 对于旱起始的描述则不是很理想,

而在候尺度  $CI_{new}$  则很好地展示了一次干旱的发展过程。 $CI_{new}$  描述干旱的发展较其他四种指数更贴合实际,最适合福建省的干旱监测。

对比五种干旱指数在干旱发生的监测能力和干旱过程的监测能力时发现, $CI_{new}$  在福建省的干旱监测中的适用性最好,MI 指数次之。但是对不同等级的干旱事件进行监测时发现,不同指数的监测效果均不相同。因此可以将不同指数结合起来形成一个更合理的综合干旱监测指数体系,从而更有效地对于旱进行监测,这可以作为本研究的后续进行探索。

#### 参考文献

- 包云轩,孟翠丽,申双和,等,2011. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J]. 地理学报,66(5):599-608. Bao Y X, Meng C L, Shen S H, et al, 2011. Temporal and spatial patterns of droughts for recent 50 years in Jiangsu based on meteorological drought composite index[J]. Acta Geograph Sin, 66(5):599-

- 608(in Chinese).
- 陈莹,陈兴伟,2011.福建省近50年旱涝时空特征演变—基于标准化降水指数分析[J].自然灾害学报,20(3):57-63. Chen Y, Chen X W, 2011. Evolution of spatiotemporal characteristics of flood and drought in Fujian Province for recent 50 years: an SPI-based analysis[J]. J Nat Dis, 20(3): 57-63(in Chinese).
- 冯建设,王建源,王新堂,等,2011.相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用[J].应用气象学报,22(6):766-772. Feng J S, Wang J Y, Wang X T, et al, 2011. The application of relative humidity index to agricultural drought monitoring[J]. J Appl Meteor Sci, 22(6): 766-772(in Chinese).
- 侯威,杨杰,赵俊虎,2013.不同时间尺度下气象旱涝强度评估指数[J].应用气象学报,24(6):695-703. Hou W, Yang J, Zhao J H, 2013. Staged meteorological drought index based on boltzmann function[J]. J Appl Meteor Sci, 24(6): 695-703(in Chinese).
- 环海军,姚丹丹,刘岩,等,2017.基于不同干旱指数鲁中地区干旱变化规律研究[J].气象与环境学报,33(3):80-87. Huan H J, Yao D D, Liu Y, et al, 2017. Research on the variation of drought in the middle of Shandong Province based on different drought indices[J]. J Meteor Environ, 33(3): 80-87(in Chinese).
- 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等,1997.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,8(1):26-33. Ju X S, Yang X W, Chen L J, et al, 1997. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. J Appl Meteor Sci, 8(1): 26-33(in Chinese).
- 李红梅,王钊,高茂盛,2015. CI 指数的改进及其在陕西省的适用性分析[J].干旱地区农业研究,33(3):260-266. Li H M, Wang Z, Gao M S, 2015. The improved of comprehensive meteorological drought index and its application in Shaanxi Province[J]. Agri Res Arid Areas, 33(3): 260-266(in Chinese).
- 李奇临,范广洲,周定文,等,2016.综合气象干旱指数在西南地区的修正[J].西南师范大学学报(自然科学版),41(1):138-146. Li Q L, Fan G Z, Zhou D W, et al, 2016. On modification of meteorological drought composite index in Southwest China[J]. J Southwest China Normal Unive(Natural Science Edition), 41(1): 138-146(in Chinese).
- 李秀芬,马树庆,姜丽霞,等,2017.两种常用的春玉米干旱等级指标在东北区域的适用性检验[J].气象,43(11):1420-1430. Li X F, Ma S Q, Jiang L X, et al, 2017. Applicability test of two common indexes for spring maize drought grade in Northeast China[J]. Meteor Mon, 43(11): 1420-1430(in Chinese).
- 李亿平,李耀辉,2017.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].干旱气象,35(5):709-723. Li Y P, Li Y H, 2017. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. J Arid Meteor, 35(5): 709-723(in Chinese).
- 梁丰,刘丹丹,徐红梅,等,2018.不同干旱指数集对1961—2009年东北地区干旱描述的比较[J].水土保持研究,25(1):183-189. Liang F, Liu D D, Xu H M, et al, 2018. Comparison of drought variation in Northeast China from 1961 to 2009 by using three drought index datasets[J]. Res Soil Water Conserv, 25(1): 183-189(in Chinese).
- 廖要明,张存杰,2017.基于MCI的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J].气象,43(11):1402-1409. Liao Y M, Zhang C J, 2017. Spatio-temporal-distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. Meteor Mon, 43(11): 1402-1409(in Chinese).
- 刘敏,秦鹏程,刘可群,等,2013.洪湖水位对不同时间尺度SPEI/SPI干旱指数的响应研究[J].气象,39(9):1163-1170. Liu M, Qin P C, Liu K Q, et al, 2013. Response of lake water level of Honghu Lake to SPEI/SPI drought indices at different time scales[J]. Meteor Mon, 39(9): 1163-1170(in Chinese).
- 穆佳,邱美娟,谷雨,等,2018.5种干旱指数在吉林省农业干旱评估中的适用性[J].应用生态学报,29(8):2624-2632. Mu J, Qiu M J, Gu Y, et al, 2018. Applicability of five drought indices for agricultural drought evaluation in Jilin Province[J]. J Appl Ecol, 29(8): 2624-2632(in Chinese).
- 牛振荣,2015.基于层次分析法的天保工程综合效益评估——以乌拉特中旗为例[J].内蒙古林业,22(3):12-14. Niu Z R, 2015. Comprehensive benefit evaluation of natural forest protection engineering based on analytic hierarchy process—taking Urad Middle Banner as an example[J]. Inner Mongolia Forestry, 22(3): 12-14(in Chinese).
- 宋连春,2012.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社:15-117. Song L C, 2012. China Meteorological Disaster Yearbook[M]. Beijing: China Meteorological Press: 15-117(in Chinese).
- 宋连春,2014.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社:20-123. Song L C, 2014. China Meteorological Disaster Yearbook[M]. Beijing: China Meteorological Press: 20-123(in Chinese).
- 王春林,郭晶,薛丽芳,等,2011.改进的综合气象干旱指数CI<sub>new</sub>及其适用性分析[J].中国农业气象,32(4):621-626, 631. Wang C L, Guo J, Xue L F, et al, 2011. An improved comprehensive meteorological drought index CI<sub>new</sub> and its applicability analysis[J]. Chin J Agrometeor, 32(4): 621-626, 631(in Chinese).
- 王景红,张勇,刘璐,2013.基于多尺度标准化降水指数的陕西苹果主产区气象干旱分析[J].气象,39(12):1656-1662. Wang J H, Zhang Y, Liu L, 2013. Drought analysis based on multi scale standardized precipitation index of apple production area in Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 39(12): 1656-1662(in Chinese).
- 王理萍,王树仿,王新华,等,2017.五种干旱指数在云南省的适用性分析[J].灌溉排水学报,36(7):117-124. Wang L P, Wang S F, Wang X H, et al, 2017. Feasibility study of five drought indices for use in Yunnan Province[J]. J Irrigation Drainage, 36(7): 117-124(in Chinese).
- 温克刚,2007.中国气象灾害大典(福建卷)[M].北京:气象出版社:201-297. Wen K G, 2007. China Meteorological Disaster Code. Fujian[M]. Beijing: China Meteorological Press: 201-297(in Chinese).
- 谢五三,田红,2011.五种干旱指标在安徽省应用研究[J].气象,37(4):503-507. Xie W S, Tian H, 2011. Study on the application of five drought indexes in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 37(4): 503-507(in Chinese).

- 谢五三,田红,王胜,2011.改进的CI指数在安徽省应用研究[J].气象,37(11):1402-1408. Xie W S, Tian H, Wang S, 2011. Study on the application of the improved CI index in Anhui Province [J]. Meteor Mon, 37(11):1402-1408(in Chinese).
- 谢五三,王胜,唐为安,等,2014.干旱指数在淮河流域的适用性对比[J].应用气象学报,25(2):176-184. Xie W S, Wang S, Tang W A, et al, 2014. Comparative analysis on the applicability of drought indexes in the Huaihe River Basin[J]. J Appl Meteor Sci, 25(2):176-184(in Chinese).
- 谢应齐,1993.关于干旱指标的研究[J].自然灾害学报,2(2):55-62. Xie Y Q, 1993. Study on the drought index[J]. J Nat Dis, 2(2): 55-62(in Chinese).
- 徐一丹,2017.基于四种干旱指数的东北地区多时间尺度干旱特征对比分析[D].沈阳:沈阳农业大学. Xu Y D, 2017. Comparative analysis of multi-time scales drought characteristics based on four drought indices in Northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University(in Chinese).
- 杨丽慧,高建芸,苏汝波,等,2012.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,33(4):603-608. Yang L H, Gao J Y, Su R B, et al, 2012. Analysis on the suitability of improved comprehensive meteorological drought index in Fujian Province[J]. Chin J Agrometeor, 33(4):603-608(in Chinese).
- 杨庆,李明星,郑子彦,等,2017.7种气象干旱指数的中国区域适应性[J].中国科学:地球科学,47(3):337-353. Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, et al, 2017. China's regional adaptability of seven meteorological drought indices[J]. Sci China: Earth Sci, 47(3): 337-353(in Chinese).
- 曾建权,2004.层次分析法在确定企业家评价指标权重中的应用[J].南京理工大学学报,28(1):99-104. Zeng J Q, 2004. Application of analytic hierarchy process to determining entrepreneur evaluation index weight[J]. J Nanjing Univ Sci Technol, 28(1):99-104(in Chinese).
- 张景书,1993.干旱的定义及其逻辑分析[J].干旱地区农业研究,11(3):97-100. Zhang J S, 1993. The definition of drought and its logic analysis[J]. Agricul Res Arid Areas, 11(3):97-100(in Chinese).
- 张强,鞠笑生,李淑华,1998.三种干旱指标的比较和新指标的确定[J].气象科技,(2):48-52. Zhang Q, Ju X S, Li S H, 1998. Comparison of three drought indicators and determination of new indicators[J]. Meteor Sci Technol, (2):48-52(in Chinese).
- 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. Zhang Q, Zhang L, Cui X C, et al, 2011. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Adv Earth Sci, 26(7):763-778(in Chinese).
- 赵海燕,高歌,张培群,等,2011.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,22(6):698-705. Zhao H Y, Gao G, Zhang P Q, et al, 2011. The modification of meteorological drought composite index and its application in Southwest China [J]. J Appl Meteor Sci, 22(6):698-705(in Chinese).
- 赵新来,李文龙,Guo X L,等,2017. Pa, SPI 和 SPEI 干旱指数对青藏高原东部高寒草地干旱的响应比较[J].草业科学,34(2):273-282. Zhao X L, Li W L, Guo X L, et al, 2017. The responses of Pa, SPI, and SPEI to dry climate in alpine meadows of eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacult Sci, 34(2):273-282(in Chinese).
- 赵一磊,任福民,李栋梁,等,2013.基于有效降水干旱指数的改进研究[J].气象,39(5):600-607. Zhao Y L, Ren F M, Li D L, et al, 2013. Study on improvement of drought index based on effective precipitation[J]. Meteor Mon, 39(5):600-607(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2006.气象干旱等级:GB/T 20481-2006[S].北京:中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2006. Classification of Meteorological Drought:GB/T 20481-2006[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- American Meteorological Society, 1997. Meteorological drought-policy statement[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78:847-849.
- Bayissa Y, Maskey S, Tadesse T, et al, 2018. Comparison of the performance of six drought indices in characterizing historical drought for the upper blue Nile basin, Ethiopia[J]. Geosciences, 8(3):81.
- Lu E, 2009. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: rationale [J]. Geophys Res Lett, 36(12):L12707.
- Sheffield J, Wood E F, Roderick M L, 2012. Little change in global drought over the past 60 years[J]. Nature, 491(7424):435-438.