

张容焱, 庄瑶, 薛峰, 等. 福建气象干旱风险监测预警和评估技术[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 114–122. [ZHANG Rongyan, ZHUANG Yao, XUE Feng, et al. Monitoring, early – warning and assessment techniques of meteorological drought risk in Fujian province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 114–122. doi: 10.3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 022.]

福建气象干旱风险监测预警和评估技术^{*}

张容焱¹, 庄瑶², 薛峰¹, 陈思¹, 林昕¹, 潘航¹

(1. 福建省气候中心, 福建 福州 350001; 2. 福建省气象台, 福建 福州 350001)

摘 要: 利用 1961–2017 年逐日气温、降水、风速气象资料, 根据国家标准“气象干旱等级”中定义的 MCI 指数, 结合干旱历史记载, 采用多年平均值无量纲化处理、百分位数法确定致旱因子权系数和阈值, 构建与国家干旱业务体系相一致的、适合福建的气象干旱监测预警和强度评估体系; 确定全省范围内监测气象干旱可能带来灾害影响的临界阈值, 用于发布干旱预警; 继而根据符合预警的历史干旱过程, 研制了福建全省和 9 地市不同区域气象干旱过程强度量化评估指标, 用于动态的过程强度评估、相似过程比较和历史排位分析等。经过 2018 年实际业务检验、2018 年历史相似年份对比分析和历史重大干旱过程的验证, 表明所确定的指标具有很好的业务应用价值。通过系统平台业务化建设, 实现了对区域气象干旱风险实时动态监测预警、未来一周干旱预估和过程量化评估, 为干旱灾害防御和风险控制提供了科学的依据。

关键词: 气象干旱; 旱灾风险; 监测预警; 量化评估; 福建

中图分类号: X43; XP15.5; P429; S42; TV1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2019)03–0114–09
doi: 10.3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 022

福建省地处亚热带南沿, 东临太平洋, 依山傍海, 九成陆地面积为山地丘陵, 俗称“八山一水一分田”, 森林覆盖率达 65.95%, 居全国首位。年平均降水量 1 400~2 000 mm, 但存在年际间的不均性、季节间的差异性和季内分布的脉冲性, 以及地域分布的复杂性、区域性、季节性干旱发生频繁, 降水严重缺乏时将形成更为严重的季节连旱^[1]。山多地少的福建农业, 以发展特色农业和闽台合作农业为主线, 具有山地立体多样化的生态农业特点, 每年都受到不同程度的洪涝、干旱和病虫等自然灾害影响, 尤其是旱灾发生频率最高、影响最大, 是各种气象灾害中受灾面积最大、最为敏感^[2]的灾种, 制约了福建现代农业的发展。

针对不同的领域, 干旱一般可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱以及经济社会干旱等, 气象干旱是其它类型干旱的起因和监测评估的基础。气象干旱的表征方式很多, 干旱指数是监测预警评估干旱的关键参数。根据世界气象组织统计, 各种应用的干旱指数有 55 种之多, 每种干旱指数都是建立在特定的时间和空间范围内, 有着各自的适用范围和应用效果, 以至于影响了在一个较

大范围内气象干旱特征的可比性^[3–7]。各种气象干旱指数都有自身的优点, 在业务应用中都存在一些问题和难点, 为解决这个问题, 考虑实际业务的需要, 2012 年国家气候中心推行了改进的气象干旱综合指数(MCI), 是综合考虑前期不同时间段降水和蒸散对当前干旱的影响而构建的一种干旱指数^[8–9], 为全国干旱监测与评估业务的规范化和标准化做出了重要贡献。王素萍等^[10]利用西南和华南区域 129 个气象站逐日和逐月气象数据, 计算并对比分析了 7 种干旱监测指标在该区域的适用性, 结果表明: 在干旱监测中, MCI 指数效果较好, 冬、春季 MCI 指数最好; 对干旱演变过程的刻画能力, MCI 指数在干旱缓解阶段存在监测偏重的情况; 综合来看, MCI 指数和 K 指数优于其他指数, K 指数更适用于月尺度干旱监测。

干旱灾害风险评估可以对干旱灾害进行早期预警, 科学指导个体、社会和政府采取针对性的应对措施, 改变水资源的时空分布, 改善水资源的质量, 进行多目标综合管理, 以降低旱灾发生和发展的风险^[11]。通常干旱风险监测预警评估是基于各站点逐日某种干旱指标, 划分一定的阈值,

^{*} 收稿日期: 2019–02–24 修回日期: 2019–04–17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505805; 2018YFC1505906); 国家自然科学基金项目(41575052); 2018 年中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程项目

第一作者简介: 张容焱(1961–), 女, 上海人, 正研级高级工程师, 主要从事气候分析与应用. E-mail: fzzry@163.com

进行单站干旱过程的识别,并对于干旱过程的强度或干旱指数大小、空间范围或干旱站次比、持续时间、发生频率等分别统计^[12]。由于干旱的影响同时取决于强度、范围、持续时间和出现时间,因而针对相关特征量的独立统计难以与历史干旱事件进行时空和强度上的比较^[13]。已有大量的关于应用 Copula 函数进行干旱特征多变量联合分析的研究^[14-16],颜敏等^[17]采用可变模糊理论通过干旱发概率和相应的干旱损失量构造风险度,进行气象干旱风险评估,规避致旱因子选择和权重确定的难点。这些方法主要适用于区域干旱风险表征以及干旱事件后评估,不能满足对正在发生发展的干旱过程及时进行诊断分析和动态评估。王学锋^[18]采用区域内所有站点轻旱等级以上逐日干旱等级累积和的算术平均构建区域动态干旱强度评估指数,是最常用的又最简单的方法;段旭等^[19]提出了干旱时间面积函数,将干旱特征统一在时域上进行客观分析,连续滚动地展现了干旱事件的过程演变和历史排位比较,这些研究为气象干旱发生发展过程和实时动态评估、客观评价干旱过程在历史干旱事件中的地位提供了理论支持和技术思路。

就福建而言,干旱评价长期以来使用的是连旱日数标准^[20],该标准是根据农业需水而拟定的,主要考虑季节年内整体缺水情景,未考虑前期降水逐日累积效应和蒸散量等的影响,随着社会经济飞速发展,该指标的局限性日渐明显^[21]。本文

根据国家标准“气象干旱等级”^[22]中定义的 MCI 指数,分析改进的 MCI 指数在福建的适应性,采用简单的统计方法,构建适合福建的气象干旱监测预警和强度评估指标,在实际业务中实现对区域气象干旱实时动态监测预警和评估,通过 2018 年导致粮食作物受灾程度较重的春夏连旱检验,效果良好。

1 研究区域、资料和方法

1.1 区域和站点选择

全省区域划分为 9 个地市,内陆地区有南平、三明和龙岩;沿海地区有宁德、福州、莆田、泉州、厦门和漳州(表 1)。沿海地区里莆田、厦门站点仅有 2 个,虽然站数少,计算的综合指数远大于其他区域,因考虑莆田处于闽中交界、厦门处于闽南交界,具有一定的代表性,且历史灾情里是作为独立的区域记载的,故不合并到其他区域。

1.2 资料来源

气象资料来源于 1961 年以来 66 个气象观测站(表 1)逐日气温、降水、风速观测资料,干旱灾情资料来源于《中国气象灾害大典福建卷》^[23]和福建省民政部门收集的灾情数据。

根据福建气候特点,四季划分的月份为:春季 3-6 月,夏季 7-9 月,秋季 10-11 月,冬季 12 至翌年 2 月。

表 1 区域划分和区域包含的站点

序号	区域	台站名称	站数
1	宁德	福安,福鼎,古田,宁德,屏南,寿宁,霞浦,柘荣,周宁	9
2	福州	福清,福州,连江,罗源,闽侯,闽清,平潭,永泰,长乐	9
3	泉州	安溪,崇武,德化,晋江,南安,永春	6
4	漳州	东山,华安,龙海,南靖,平和,云霄,漳浦,漳州,长泰,诏安	10
5	龙岩	连城,龙岩,上杭,武平,永定,漳平,长汀	7
6	南平	光泽,建瓯,建阳,南平,浦城,邵武,顺昌,松溪,武夷山,政和	10
7	三明	大田,建宁,将乐,明溪,宁化,清流,三明,沙县,泰宁,永安,尤溪	11
8	厦门	厦门,同安	2
9	莆田	仙游,莆田	2
合计			66

表 2 各季干旱标准

季	项目	小旱	旱	大旱	特旱
春旱	≤2 mm 连旱日数/d	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	≥60
2 月 11 日至梅雨开始	解除雨量 3 或 6 d 总雨量/mm	≥50			
夏旱	≤2 mm 连旱日数/d	16 ~ 25	26 ~ 35	36 ~ 45	≥46
梅雨止至 10 月 10 日	解除雨量 3 d 总雨量/mm	≥20	≥30		
秋冬旱	≤2 mm 连旱日数/d	31 ~ 50	51 ~ 70	71 ~ 90	≥91
10 月 11 日至翌年 2 月 10 日	解除雨量 6 d 总雨量/mm	≥10	≥15		

1.3 方法

1.3.1 连旱日数

定义日雨量≤2 mm 为无有效降雨日，无有效降雨日的长时间持续且累积雨量未达到解除指标的持续少雨过程就是干旱过程(表 2)，其开始日为首个无有效降雨日，结束日为达到解除雨量指标日的前 1d。由于连旱日数侧重于农业耕作制度，季节划分略不同于气候季节。

101. 3.2 MCI 指数和干旱等级

在国家标准 GB/T 20481 - 2017 气象干旱等级^[22]中改进的 MCI 指数：

$$MCI = Ka \times (a \times SPIW_{60} + b \times MI_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150})。$$
 (1)

式中：SPIW₆₀为 60 d 标准化权重降水指数；MI₃₀为 30 d 湿润度指数；SPI₉₀为 90 d 标准化降水指数；SPI₁₅₀为 150 d 标准化降水指数。a、b、c、d 为经验系数，随地区和季节变化调整，秦岭和淮河以南的南方地区，冬春季取：0.3、0.4、0.3、0.2；夏季取：0.5、0.6、0.2、0.1；Ka 为季节调节系数，由不同季节主要农作物生长发育阶段对土壤水分的敏感程度确定。MCI 各分量的算法详见文献[22]。

根据表 3、表 1 和(1)式，计算全省和各地区 4 种类型干旱 1961 年以来逐日站数。

表 3 气象干旱综合指数(MCI)等级划分表

等级	类型	MCI
1	无旱	-0.5 < MCI
2	轻旱	-1.0 < MCI ≤ -0.5
3	中旱	-1.5 < MCI ≤ -1.0
4	重旱	-2.0 < MCI ≤ -1.5
5	特旱	MCI ≤ -2.0

1.3.3 相关性检验、临界阈值划分标准和评估模型权系数确定方法

据全省 66 个气象站 1961 年以来的气象资料，计算各站逐日连旱日数和 MCI 指数，采用线性相关函数：

$$R_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}。$$
 (2)

计算各站逐日连旱日数(x)与 MCI 指数(y)的相关系数，用 t 检验进行统计检验：

$$t = \frac{R_{xy}}{\sqrt{1 - R_{xy}^2}} \sqrt{n - 2}。$$
 (3)

从自由度为 n-2 的 t 分布，若|t|≥t_α，表示两研究对象之间存在显著相关关系。

阈值划分采用百分位数法，即将要素所有记录从大到小(从小到大)排序，分别取 10%，30%，70%，90% 样本数所对应的指数，处于 10% 以内或 90% 以上的数据，表示要素的两个极端区域。例如，以 MCI 负指数来说，从小到大排序的 10%

的样本，表示最大最强的那几个干旱日。

权系数采用多年平均值无量纲化处理方法，简称均值无量化方法，即计算建模因子序列多年平均值，该数的倒数就是权系数。

2 干旱指标适应性研究

由于逐日气象资料的不完整，计算干旱指数出现缺漏，为了真实反映连旱日数与 MCI 之间的关系，采用未插补订正的原始序列进行相关分析，计算的相关系数介于 -0.504 ~ -0.393 之间，呈负相关关系，即连旱日数越多，MCI 指数的负值越大越早。1961 - 2017 年 66 站样本数 18 737 ~ 10 386，|t|介于 77.53 ~ 53.38 之间，查表得知 t_{0.001} = 3.291，|t|≥t_{0.001}，表明全省各站点的连旱日数与 MCI 之间存在显著的相关关系，相关系数偏小的区域主要集中在宁德地区(图 1 左)。再根据连旱日数的季节划分，分析季节中两者之间的关系发现，全省各站秋冬季相关性很稳定，夏季个别站相关系数较低(图 1 右)，但都通过 0.001 的 t 检验。

可见，不论是年还是季节，MCI 指数完全可以替代连旱日数，作为福建气象干旱逐日监测指标，实现与国家标准相一致的业务体系。

3 气象干旱监测预警指标设计

日常业务中，气象干旱分析采用逐日单站 MCI 指数对应的干旱等级空间分布图，或者是逐日区域不同等级干旱的站数演变图(图 2)，很难进行某段时间内区域干旱强度的定量化评价，因为干旱站数的变化还包含了干旱强度的变化，如全省都出现旱情，最多累积站数为 66 个，但是逐日各旱级站数和站点位置不同，导致很难直观评判干旱强度。同时由于降水变化大、分布不均，常导致干旱的空间变化随机，难以描述区域状况并进行历史比较。另外，采用单站过程干旱等级强度的累计值的区域算术平均表示区域干旱强度(最常用的方法)，很难体现区域干旱气候变化的时间和空间双重性。因此，为评价区域逐日 MCI 强度和差异，本文采用逐日干旱等级的历史均值无量纲化方法，计算区域各干旱等级的权重系数，设计任意大小区域的 MCI 综合指数，既能反映干旱区域变动情况，便于区域强度分级和历史比较，又能在一个大范围内实现监测预警。根据王莺等^[24]利用主成分分析中国南方干旱脆弱性评价得到的农业和社会脆弱性贡献最大(54.9%)结论，以历史灾情信息中农业受旱面积为主，兼顾人饮水困难，制定综合指数预警阈值，满足干旱决策服务需求。

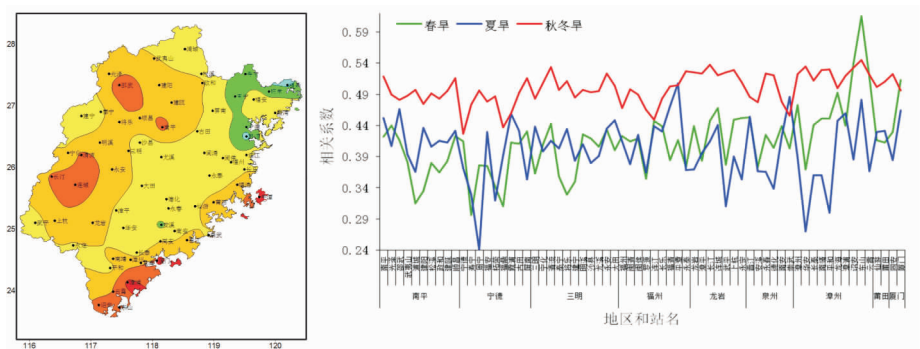


图1 连旱日数与MCI之间年(左)和四季(右)相关系数

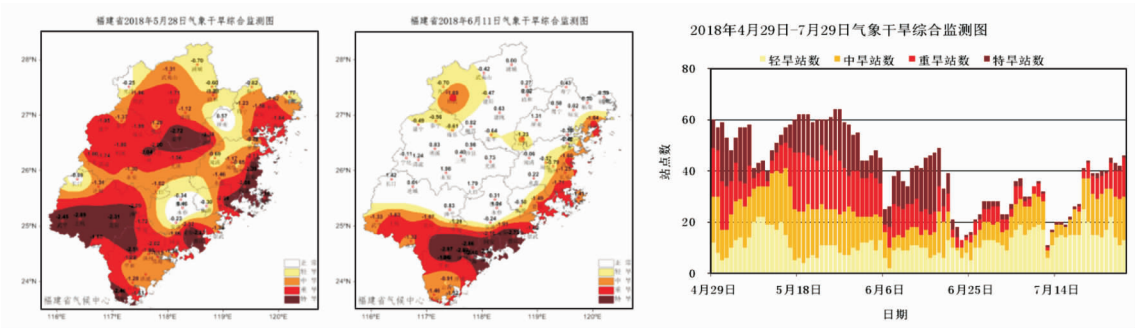


图2 MCI 监测业务产品

表4 区域 MCI 干旱综合指数权重系数和监测预警等级阈值

区域	权系数				预警等级		
	轻旱	中旱	重旱	特旱	3 级(70%)	2 级(30%)	1 级(10%)
全省	0.123	0.183	0.514	1.809	0.98	5.77	14.75
宁德	1.111	1.854	5.333	18.756	2.77	10.15	23.78
福州	0.834	1.336	3.553	9.616	2.50	8.22	20.38
泉州	1.154	1.682	4.861	19.295	2.83	8.50	16.89
漳州	0.684	1.028	2.998	12.341	2.39	7.70	16.09
龙岩	1.148	1.646	4.942	23.055	3.29	9.87	18.76
南平	0.961	1.374	3.711	14.208	2.88	10.30	21.21
三明	0.853	1.153	3.094	8.359	2.85	10.26	22.08
厦门	3.200	4.648	12.939	70.334	6.39	9.29	25.87
莆田	3.593	5.053	15.499	66.079	7.18	10.10	31.00
含义	可能有灾		一定程度灾害		有灾		
颜色							

3.1 综合指数的表达方式

考察历年逐日全省各站 MCI 指数，存在缺漏情况。由于采用多年平均值法计算权重系数，区域内站数资料不完整将导致较大的误差，必须对单站历史序列进行插补订正。采用站点之间相关分析，取相关最好，又具有相同气候特征的站点，插补逐日 MCI 指数，保证单站 MCI 指数序列的完整性。然后按全省和 9 个区域分别统计轻旱、中旱、重旱、特旱 4 类干旱站数多年平均值，得到不同干旱类型的权重系数列于表 4，利用下式求算区域逐日 MCI 综合指数。

$$\text{某区域}j\text{的逐日综合指数} = \sum_{i=1}^n \text{权系数} \times \text{某区域}j\text{的}i\text{类干旱站数}.$$

(4)

式中： $i=2$ 级，3 级，4 级，5 级(轻旱，中旱，重旱，特旱)干旱站数。

3.2 逐日监测预警指标

设计监测预警指标目的提醒人们注意气象干旱的进一步发展可能带来灾害影响，适时采取有效措施趋利避害。福建降水时空分布极不均，一地短时的缺水现象很常见，常表现为断断续续、空间位置变动很大的特点，很难确定小区域过程起始时间。俗话说“水灾一条线，旱灾一大片”，大范围长时间的旱象才是值得我们关注的事件。设计的全省区域综合指数弥补了单点或小区域频繁的时空不连续带来的干扰，再结合实际旱灾事件，确定监测预警阈值。

采用百分位数法，1961 年以来全省逐日 MCI 综

合指数按照从大到小排序，剔除 0 指数，分别取 10% (1 级)，30% (2 级)，70% (3 级) 分位数，组成 3 个等级阈值(表 4)。再以全省 2 级和 3 级临界值的取值范围，分析 MCI 综合指数和灾情严重程度之间的关系，归纳总结，发现当全省逐日 MCI 综合指数 ≥ 5.22 ，且持续 ≥ 17 d (中间允许一次间断 1 d)，气象干旱有可能发展成有影响的干旱事件。

国家气候中心每日滚动下发未来一周 MCI 指数预报，本预警指标可以根据预报，监测未来干旱发展状况发布预警。

3.3 预警指标设计的历史拟合率

为了检验预警指标的敏感性，以全省 3 级预警指标(表 3)截取过程，57 年来一共有 147 个，按预警指标区分为预警过程和非预警过程，符合预警条件的有 73 个，不符合预警条件的有 74 个(不超过 17 d)。

在不符合预警条件的 74 个例中，无受旱面积记载的 67 例，有受旱面积记载的 7 例，判断无旱正确率 90.5%，漏预警率 9.5%。在有受灾面积记载的漏预警 7 例中，6 例发生在上世纪 60 年代，最大的受旱面积为 1965 年的夏旱 1.52 万 hm^2 ，剩下的 1972 年夏旱 1 例，仅宁化有 0.87 万 hm^2 的受灾面积记载。考虑社会经济发展和灾情记载历史原因，可以忽略这些漏预警的过程。

在符合预警条件的 73 个例中，有灾情记载的 61 例，无灾情记载的 12 例，预警正确率 83.6%，空预警率 16.4%。在空预警的 12 例中有 7 例发生在 2010 年以后，考虑灾情上报收集原因和不放过任何可能成灾的过程，空预警率的大小可以忽略。

以上分析表明，监测预警历史拟合率高，没有预警的过程基本上没有灾害，明显的旱灾过程都有预警。

4 气象干旱过程强度评估指标设计

根据气象干旱预警指标验证的 147 个过程分析结果，取符合预警条件的 73 过程作为确定评估指标样本是可行的。为了设计简单、易用的评估指标，过程强度评估指数各地区一律以过程起止时间为准统计平均值，保证处于同一时间尺度下，避免指标因单点或小区域频繁的时空不连续导致干旱过程复杂化，同时保证了设计的指标适用于过程任何时段，达到动态评估或预估干旱发生发展趋势的目的。

4.1 干旱过程起始时间定义

从预警指标可以看出，当气象干旱发展偏向 2 级时候才有可能成灾，应该关注 1~2 级的时段。以全省逐日 MCI 指数超预警(≥ 5.22 ，持续 ≥ 17 d)为基础，跨地区寻找不间断 2 级(橙色)分位数的时段。

开始时间的确定：以全省第一个 2 级开始，往

过去时间查看各地区 2 级情况，若最长的 2 级地区出现了间断，但同日其他某个地区没有出现间断，过程以该某个地区继续向过去查找，直到所有地区都不出现 2 级停止。那么，第一个 2 级日期就是过程开始时间，注意在本地区内若出现 1 d 2 级间断，不作为间断。这样，可以不漏掉预警还没开始，局地已经出现旱象的时段。

结束时间的确定：全省预警结束后，查看各地区 2 级情况，与确定开始时间类似，直到所有地区都不出现 2 级停止，最后一个 2 级对应的日期就是过程结束时间。

在同一个季节里，不同的满足预警条件旱段应该合并成一个过程，以第一个过程的开始时间和最后一个过程的结束时间，作为合并过程的起止时间。

4.2 干旱过程命名规则

严格按照福建气候季节命名，以 3~6 月为春旱，7~9 月为夏旱，10~11 月为秋旱，12 月至翌年 2 月为冬旱，冬旱年份命名以 12 月的年份为冬旱年。

跨季节连旱年份命名规则：以最后一季干旱的年份命名。如：秋冬连旱时间虽然跨入新年，年份命名为上一年的秋冬旱；冬春连旱的年份命名为春旱所在年份，即新年。

4.3 过程强度指数

随着气候变暖，干旱灾害的形成和发展过程更加复杂，从干旱发生到产生灾害或影响的链状传递过程变得更加多样^[25-26]，并非气象干旱强度越强受到的影响就越大。考察 73 个干旱过程，遇着 MCI 综合指数大，持续时间也长的干旱过程，如 2003 年，夏秋冬 3 季连旱，持续时间历史排位第一，据记载受灾面积为 1939 年以来最大；遇着 MCI 综合指数大，但持续时间不长，如 2011 年春旱，持续仅 48 d，却没有形成旱灾；若遇着 MCI 综合指数不强，但时间长，如 1963 年的冬春旱，受旱面积排历史第 4 位；若遇着 MCI 综合指数不强，持续时间也不长的过程，如 2010 年以来的干旱过程，多数没有灾情。

可见，气象干旱风险评估需要同时考虑干旱强度和持续时间，同样的采用平均值无量纲化处理方法，得到 73 个过程的全省和各地区过程平均 MCI 综合指数和持续时间的权重系数(表 5)，过程综合指数 DI 计算方法如下：

某区域某过程干旱综合强度指数 $DI = a \times \text{某区域某过程平均 MCI 综合指数} + b \times \text{某区域某过程持续时间}$ 。(5)

4.4 DI 评估指标

过程综合强度指数 DI 由 2 个因子构成：过程平均 MCI 指数和过程持续时间，采用百分位数法，可以获得综合结果评估和 2 个组成因子的独立评估指标，为了体现异常气象干旱过程，各取 30% 和 10% 分位数表示严重(强、长)和极端严重(强、长)状况的度量(表 6)。

进一步分析过程平均 MCI 综合指数、过程持续时间 和 DI 与实际农业受旱面积之间的关系(图 3),结果表明:过程平均 MCI 综合指数与受旱面 积的关系最差,综合了持续时间的 DI 指数,极大 提高了新构建的评估指标所包含的灾害信息,这 些关联皆通过了 0.001 信度检验。

表 5 区域过程平均 MCI 综合指数与过程持续天数的权系数

	全省	宁德	福州	泉州	漳州	龙岩	南平	三明	厦门	莆田
过程平均 MCI 综 合指数系数(a)	0.0803	0.0796	0.0813	0.0846	0.0901	0.0758	0.0835	0.0758	0.0873	0.0808
过程持续天数系数(b)	0.0152									

表 6 异常气象干旱过程强度 DI 评估指标

区域	过程综合指数(DI)		过程平均 MCI 综合指数		过程持续时间/d	
全省	3.28	2.17	22.86	12.94		
宁德	3.68	2.3	28.87	13.74		
福州	3.47	2.48	27.9	14.04		
泉州	4.07	2.26	20.22	13.38		
漳州	3.72	2.38	22.24	13	112	87
龙岩	3.3	2.37	30.16	13.91		
南平	3.35	2.45	24.83	13.45		
三明	3.23	2.38	28.8	15.14		
厦门	3.74	2.33	26.41	13.37		
莆田	4.04	2.12	29.16	12.41		
样本比例/%	10	30	10	30	10	30
含义	极端严重	严重	极端强	强	极端长	长

表 7 1961 - 2017 年福建严重气象干旱过程综合指数 DI 排序

序号	全省	过程平均 MCI 综合指数	过程持续天数/d	过程综合指数	受旱面积/万 hm ²	干旱类型
1	2003	28.39	217	5.59	89.61	夏秋冬旱
2	1991	26.12	143	4.28	68.33	春夏旱
3	1963	11.01	194	3.84	40.53	冬春旱
4	1986	28.46	101	3.83	46.57	夏秋旱
5	1995	13.95	175	3.79	24.75	夏秋冬旱
6	2002	17.22	132	3.40	13.40	春旱
7	2004	23.65	91	3.29	37.59	春夏旱
8	2011	31.92	45	3.25		春旱
9	1967	12.65	128	2.97	37.07	夏秋冬旱
10	1983	20.14	87	2.94	13.16	秋冬旱
11	2011	18.37	91	2.86		春夏旱
12	1988	18.47	85	2.78	28.13	夏旱
13	1979	11.76	112	2.65	30.19	秋冬旱
14	1983	25.28	40	2.64	35.80	夏旱
15	1993	10.73	106	2.48	22.67	夏秋旱

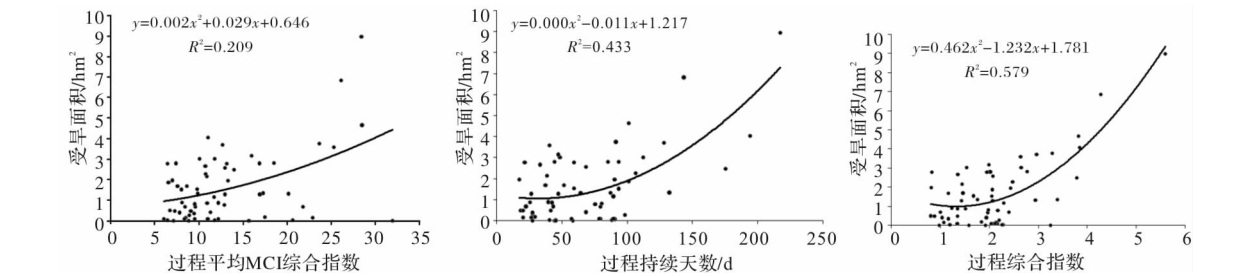


图 3 3 种评估指标与实际受旱面积之间的关系

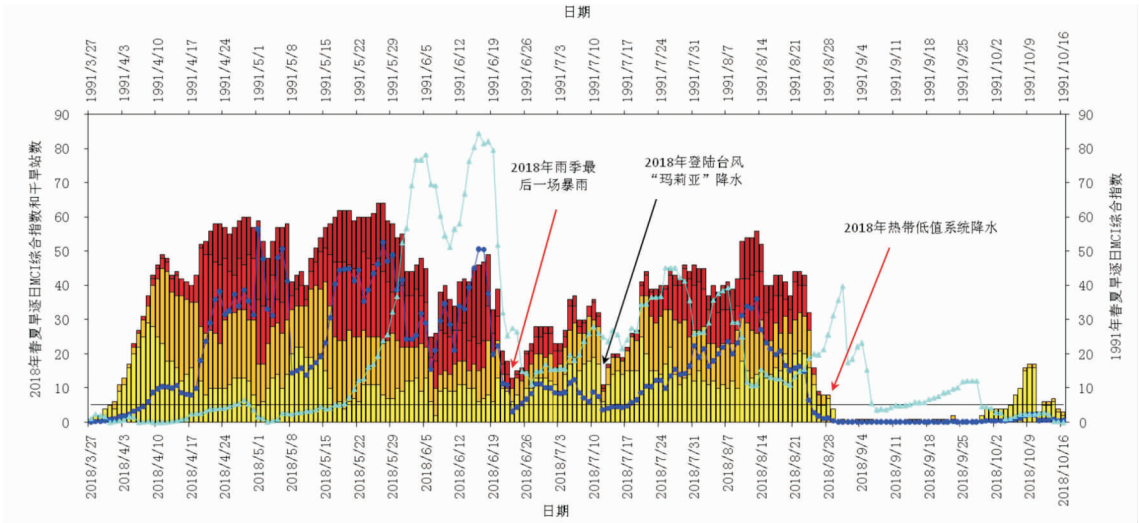


图4 2018年和1991年春夏连旱逐日演变比较

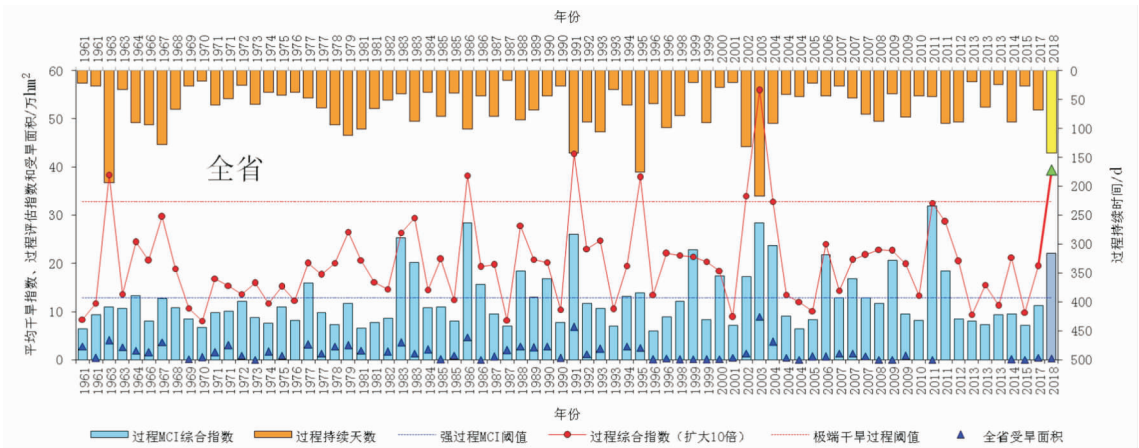


图5 2018年春夏连旱历史比较

5 监测预警和过程强度评估指标客观合理性分析

5.1 业务验证

以不参加统计和评估模型建立的2018年数据作为检验。

根据监测预警指标，4月24日达到预警标准，表示气象干旱发展到有可能影响的程度。按照各地市MCI综合指数强度，监测预警系统逐日制作地区干旱强度预警图。期间，6月23-24日和7月12-17日因受雨季持续性强降水和登陆台风“玛莉亚”影响，预警短暂解除。但是根据过程定义，漳州地区干旱持续为2级以上强度，过程不能中断，构成春夏连旱。8月25日以后，受热带低值系统带来的较强持续性降水过程影响，8月27日干旱预警结束，同时干旱过程彻底解除。根据逐日MCI演变，此次过程开始于3月下旬，终于8月下旬，过程强度评估起止时间为4月8日至8月27日(图4)。

全省过程平均MCI综合指数为22.04，历史排位第8，属强MCI过程；持续时间为142 d，历史排位第5，属极端长过程；计算得干旱过程综合指数DI为3.94，历史排位跃居第3，排在1991春夏旱之后，属于极端严重干旱过程(图5)。各地区过程综合指数DI表明，重旱区位于南部沿海(厦门以南)和内陆地区，其中厦门历史排位第1，漳州历史排位第2，龙岩、南平历史排位第4，三明历史排位第5。

根据收集的灾情信息，4月23日龙岩人民广播电台发布“持续春旱，龙岩中心城区自来水供应能否有保障”的报道，而系统4月24日发布干旱预警，说明系统监测的气象干旱有可能带来影响，预警很及时。

根据水文部门总结，2018年汛情总体平稳，洪次异常偏少、量级异常偏低，仅登陆台风“玛莉亚”和影响台风“山竹”、“玉兔”带来的降雨有影响，个数较常年明显偏少，影响偏轻，洪水量级均不超2年一遇。2018年各主要江河来水量较常年偏少40.0%，主要大中型水库总来水量比多年

均值少 41.2%, 总体属枯水(接近特枯); 其中主汛期(4~7 月)主要水库来水总量比多年平均同期偏少 59.4%, 属特枯。

据农业相关部门评估, 2018 年春夏连旱使粮食作物受灾程度较重, 特别是对早稻播种和秧苗生长不利, 部分地区早稻改种旱地作物, 对中晚稻的移栽和生长发育以及旱作种植造成较大影响, 导致粮食播种面积明显减少。另外据民政部门统计, 南平 9 县(市)受灾人口 14.183 5 万人, 农作物受灾面积 2.39 万 hm^2 , 直接经济损失 10 510.214 万元。据灾情直报, 春旱使龙岩永定农作物受灾面积 0.17 万 hm^2 , 武平县农作物受灾面积 0.2 万 hm^2 , 新罗区农作物受灾面积 0.16 万 hm^2 。

综上所述, 2018 年春夏气象连旱带来的影响严重, 与评估为极端干旱的结论吻合。

5.2 与 2018 年干旱过程相似过程的验证

与 2018 年相似的干旱过程是 1991 年春夏连旱, 1991 年过程平均 MCI 综合指数 26.12, 比 2018 年高了 3.72; 过程持续时间 143 d, 仅比 2018 年多 1 d。从图 4 可见, 2018 年强度明显弱于 1991 年, 尤其是春旱期间 2019 年特别强, 但 2018 年维持时间长, 发生早。1991 年的严重旱区位于中北部沿海(泉州以北)和内陆地区, 对比发现沿海与 2018 年完全不一样。内陆植被和灌溉条件好, 抗旱能力强, 而沿海地质条件差, 抵御旱灾的能力有限, 据 1991 年春夏旱受旱面积为 68.33 万 hm^2 , 重旱区在泉州以北沿海和南平。对比灾情大小, 发现内陆受灾相似, 差异在沿海, 由于闽中、闽北沿海主要农业以田间大宗作物(蔬菜、水稻等)和耐旱作物为主, 闽南沿海以亚热带经济果树和耐旱作物为主, 抗旱能力强于中、北部沿海, 因此 2018 年沿海重旱区漳州地区的农业灾害相对 2019 年闽中北沿海轻。实际上灾情的大小与承灾体有很大的关系, 气象干旱的严重程度能带来多大的灾害不是简单的对应关系, 从相似对比可以看出, 本文的评估方法结论与实际结果基本一致。

5.3 干旱过程历史排位评估验证

本文方法对历史上特大旱灾案例的重新评估与公认的干旱强度是否一致需要验证。

以过程综合指数 DI 排序取前 15 位(21%, 表 7), 以春夏 2 季连旱和夏秋冬 3 季连旱为多。福建宜耕地面积大约 1.4 万 km^2 , 历史上农业受旱面积超过耕地总面积 25% (33 万 hm^2 以上)的 1963、1967、1983、1986、1991 和 2003 年, 皆包含在表 7 内, 可见本项目研制的气象干旱评估指标能够客

观地反映气象干旱强度, 评估结论与历史严重干旱过程基本吻合。

6 结论

本文根据单站 MCI 指数, 采用实际的干旱灾情和简单的统计方法相结合的手段, 获得了福建省气象干旱监测预警指标和干旱过程强度的几种量化评估方法, 经过后续实际业务资料检验、历史相似年份对比分析和历史重大干旱过程的验证, 具有很好的业务应用价值。但是, 本文分析的仅仅是气象干旱, 其目的在于解决气象干旱发展到何种程度时需要提醒有关部门注意, 并且对目前正在发展的干旱强度, 或未来一周干旱趋势, 或干旱结束后整个过程进行定量化(预)评估, 满足了干旱灾害早期预警业务需求。实际上, 干旱带来的灾害影响则受多方面因素的制约, 如承灾体的属性、人类的抗旱能力(灌溉、人工降雨等)、地理环境等等, 为了更好地开展抗旱减灾、合理利用水资源、保护生态环境的决策服务, 迫切需要进行进一步开展行业干旱影响程度的研究, 即针对具体承灾体属性和区域的专题评估方法研究。

参考文献:

- [1] 陈家金, 林晶, 陈惠, 等. 福建省干旱的时空分布及其对农业生产的影响[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 265-269.
- [2] 田贵良, 林志宇. 气象灾害对粮食生产的影响研究—以福建省为例[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 148-152.
- [3] 姚玉碧, 张存杰, 邓振镭, 等. 气象农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 185-189.
- [4] 张调风, 张勃, 王小敏, 等. 基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析—以甘肃省黄土高原区为例[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 12-20.
- [5] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.
- [6] 王春林, 陈慧华, 唐立生, 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.
- [7] 高西宁, 徐庆喆, 丛俊霞, 等. 基于标准化降水指数的辽宁省近 54 年干旱时空规律分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1851-1857.
- [8] 杨帆, 陈波, 张超, 等. 新气象干旱综合监测指数(MCI)在黔东南本地化应用[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(3): 56-61.
- [9] 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.
- [10] 王素萍, 王劲松, 张强, 等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J]. 高原气象, 2015, 34

- (6): 1616–1624.
- [11] 冯金社, 吴建安. 我国旱灾形势和减轻旱灾风险的主要对策[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 34–36.
- [12] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50–59.
- [13] 秦鹏程, 刘敏. 气象干旱诊断评估方法及其在长江中下游地区的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1969–1976.
- [14] 刘晓云, 王劲松, 李耀辉, 等. 基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1080–1091.
- [15] 屈吉鸿, 李岩, 高志鹏, 等. 基于 Copula 函数的河南省干旱特征分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 1–5.
- [16] 于忱, 陈隽, 王红瑞, 等. 多变量 Copula 函数在干旱风险分析中的应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 14–21.
- [17] 颜敏, 方国华, 闻听, 等. 基于可变模糊理论的气象干旱风险评估模型[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 236–241.
- [18] 王学峰. 区域动态气象干旱强度指数及其应用[J]. 气象科技, 2012, 40(4): 601–605.
- [19] 段旭, 陶云, 郑建萌, 等. 气象干旱时空表达方式探讨[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1332–1338.
- [20] 杨月文, 黄文, 邹燕. 基于连旱日数的气象干旱评价方法[J]. 气象研究与应用, 2013, 34(3): 17–21.
- [21] 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.
- [22] 张存杰, 刘海波, 宋艳玲, 等. GB/T 20481–2017 中华人民共和国国家标准——气象干旱等级[M]. 北京: 中国气象出版社, 2017.
- [23] 宋德众, 蔡诗树. 中国气象灾害大典福建卷[M]. 北京: 中国气象出版社, 2007.
- [24] 王莺, 王静, 姚玉璧, 等. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1897–1904.
- [25] 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80–91.
- [26] 姚玉璧, 王莺, 王劲松. 气候变暖背景下中国南方干旱灾害风险特征及对策[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 432–439.

Monitoring, Early-Warning and Assessment Techniques of Meteorological Drought Risk in Fujian Province

ZHANG Rongyan¹, ZHUANG Yao², XUE Feng¹, CHEN Si², LIN Xin¹ and PAN Hang¹

(1. *Climate Center of Fujian Province, Fuzhou 350001, China*;

2. *Meteorological Observatory of Fujian, Fuzhou 350001, China*)

Abstract: Drought, such as agricultural drought, ecological drought, hydrological drought and drought of economical origin, is the concrete manifestation of the transmission of meteorological drought to different stages. If there is no suitable conditions, even the occurrence of meteorological drought will not form drought disasters. Therefore, it is of great practical significance to carry out early monitoring, early warning and pre-evaluation of meteorological drought. By means of the daily temperature, precipitation and wind speed meteorological data from 1961 to 2017, combined with MCI index defined in the national standard “Grads of meteorological drought” and historical records of drought, the meteorological drought monitoring and early warning and intensity assessment system suitable for Fujian Province which was consistent with the National Drought operational system was established which was used to the weight coefficient and thresholds of drought-inducing factors were confirmed by multiyear mean values and dimensionless method. The critical threshold for monitoring the possible disasters effects of meteorological drought in the whole province was determined for issuing drought early warning. Then, according to the historical drought process which accords with the early warning, the quantitative assessment indexes of meteorological drought process intensity in different regions of the province and 9 cities were developed for dynamic process intensity assessment, similar process comparison and historical ranking analysis. After the actual business test, the comparative analysis of the historical similar years in 2018 and the verification of the historical drought process, it shown that the index confirmed by this paper had a good business application value. Through the operational construction of the system platform, the real-time dynamic monitoring and early warning, the prediction of drought in the next week and the quantitative assessment of regional meteorological drought risk were realized, which provided scientific basis for drought disaster prevention and risk control.

Key words: meteorological drought; drought risk; monitoring and early-warning; quantificational evaluation; Fujian