

基于修正复合干旱指数的干旱综合 监测及其在湖北省的应用

陈思^{1, 2} 钟无双¹ Muhammad Waseem³ 王润^{1, 21}

(1. 湖北大学 资源环境学院, 湖北 武汉 430062;

2. 湖北大学 水资源与水政策研究中心, 湖北 武汉 430062;

3. 巴基斯坦拉合尔工程技术大学 水资源工程卓越中心, 拉合尔 54890)

【摘要】: 在全球气候变化的大背景下, 干旱的准确监测和综合评估对区域农业的可持续发展具有重要的现实意义。基于干旱发生和发展过程的多因性和复杂性, 综合考虑降水、气温、蒸散发和地表含水量等多个干旱因子构建了修正复合干旱指数(Modified Composite Drought Index, MCDI), 并以湖北省为研究区域对该指数进行计算和验证。通过与广泛应用的单/多变量干旱指数——标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)和综合气象指数(Composite Index, CI)的监测结果进行对比, 验证其干旱监测结果的准确性。结合湖北省干旱事件的历史记录进一步对比发现, MCDI 较 SPI 和 CI 的监测干旱事件准确率分别提高了 33.3%和 50%, 且 MCDI 能更精确地监测到干旱事件的严重程度, 更符合实际旱情。MCDI 指数的提出为综合评估区域性干旱提供了一种新方法。

【关键词】: 干旱监测 多变量 多源数据

【中图分类号】: P339 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)11-2726-10

干旱灾害作为世界上影响人数最多且造成损失最严重的自然灾害之一, 它的影响从气象延伸到农业、水文、环境、经济等领域^[1], 严重制约了干旱地的经济发展和社会进步。据第 5 次政府间气候变化评估报告(IPCCAR5)指出^[2], 从 1880~2012 年间, 地球表面平均气温升高了 0.85℃, 气候变暖提高大气水汽蓄留能力, 加强陆面蒸散, 加快区域水文循环, 导致地表变得更加干燥。在这种气候条件背景下, 全球干旱强度、面积和持续时间呈显著增加趋势, 一些地区干旱发生的频率和严重程度不断攀升历史新高。因此, 准确监测干旱事件的发生、严重程度以及空间范围, 提出合理的防御对策, 是干旱风险评估和水资源管理中至关重要的环节, 也是适应国家防灾减灾, 应对气候变化和保障粮食安全的迫切需求。干旱指数是开展干旱监测预警和评估的重要工具, 目前的干旱指数依据数据来源的不同大致可以分为两类, 一类是基于气象站点观测数据的干旱监测指数, 如标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI)^[3]、帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[4]、Z 指数(Zindex)^[5, 6]、气象干旱综合指数(Comprehensive Index, CI)^[7]等。SPI 是最为广泛使用的监测指数之一, 它计算简便, 拥有在不同时间尺度上的干旱监测能力的优点^[8]。PDSI 是美国及欧洲等地广泛使用的干旱指数, 它综合考虑了降水、气温、土壤有效含水量等影响因子, 能

作者简介: 陈思(1990~), 女, 讲师, 主要研究方向为气候变化与水旱灾害. E-mail:kathryncs123@hotmail.com; 王润, E-mail:rwang@hubu.edu.cn

基金项目: 教育部人文社会科学基金项目(21YJCZH010)

够较为准确地监测旱情^[4]。Z 指数被应用于我国国家气候中心,被验证是一种比较适合我国旱情的监测指数^[9]。CI 既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量气候的异常情况,又反映短时间尺度(影响农作物)水分亏欠情况,适合实时气象干旱监测又可以进行历史同期气象干旱评估^[10]。使用上述气象监测指数所获取的地面信息既准确,又可以从机理上揭示环境、人为等因素对干旱发展过程的影响,具有很强的普适性。然而气象站点存在空间分布不均、站点迁移等问题,导致了数据观测时空尺度不统一,监测结果存在较大的不确定性。而且,由于目前绝大多数气象干旱监测指数是由降水量、温度、蒸散量等信息组合而成,难以保证其实时性^[11]。

另一类是基于遥感数据的遥感干旱监测指数,如地表含水量指数(Surface Water Content Index, SWCI)^[11]、植被供水指数(Vegetation Supply Water Index, VSWI)^[12]等。该类指数所获取的遥感监测的信息因具有高时空分辨率且能获得区域连续空间上的旱情而得以广泛应用。然而,大多数遥感监测指数侧重于土壤、植被等单一因素,从而导致干旱监测结果具有极大的不确定性,易受气候变化等因素的综合影响,并在干旱发生发展过程的监测中表现出较差的能力^[13]。尽管我国遥感技术应用于干旱监测已有很长一段时间,但时间序列短是遥感数据目前面临的最大挑战。利用遥感技术进行长时间干旱时空演化特征的研究报道仍较少,遥感技术在长时间、大范围序列的干旱监测中仍然缺乏广泛应用^[14]。

可见,地面观测数据和空间遥感数据在干旱监测中各有优势。同时,干旱作为一种复杂的自然现象,仅靠单一因子难以准确描述其发生、发展过程和影响范围^[15]。因此,如何集成多源数据和综合考虑多种致旱因子成为提高干旱综合监测水平的科学难题。基于此,近年来,国内外涌现出了一大批综合干旱监测指数,它们以其前沿的研究方法和较强的适应性推动了综合干旱监测的发展^[14]。2010 年, Kao 等^[16]提出了联合干旱指数(Joint Drought Index, JDI),并证实其能够在美国印第安纳州及时地识别干旱的发生与长期干旱。2012 年, Sun 等^[17]提出了一个多指标干旱模型(Multi-index Drought, MID),结合了加拿大农业干旱风险评估的各种干旱指数的优势。2013 年, 杜灵通^[13]利用空间数据挖掘技术中的分类回归树方法,对大量干旱关联因子数据进行模糊挖掘,构建综合干旱监测模型。2015 年, 刘宗元^[18]选用相对湿润度指数(Meteorology Index, MI)和植被水分指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)为输入参量,构建综合干旱监测指数(Comprehensive Drought Monitoring Index, DI)。但是,上述综合干旱监测模型大多难以反映干旱影响因素间的相互作用机制,加之因地域、时间尺度的不同,导致模型普适性较低,监测结果的统一比较较为困难,为准确监测干旱带来困扰^[16]。

因此,有必要构建一个普适性较强的综合干旱监测指数来弥补上述模型的缺陷。本研究充分利用气象站点数据和遥感数据的互补优势,基于降雨量、气温、蒸发量和地表含水量指数构建了修正复合干旱指数(Modified Comprehensive Drought Index, MCDI),并以湖北省为例进行计算与验证,以期为区域干旱综合评估提供一种新方法。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

湖北省地处北半球低纬度地区,属于典型的大陆东岸型(季风型)气候,冬冷夏热、冬干夏湿、雨热同期是该区域的典型特征。降水量充沛,全年降雨量在 800~1600mm 之间,较全国平均水平高,但受季风影响,降雨量时空分布不均。从时间尺度来看,冬季降水量仅有夏季的 1/3, 5~9 月的降雨量约占全年降雨量的 60%,特别受梅雨季节的影响,6 月中旬至 7 月中旬这段时间内降雨量最多,持续时间最长。近 20 年来,湖北省自然灾害频发,大洪、大涝交替出现,形成以洪涝、干旱为主,兼有飓风、冻害等多种气象灾害^[19]。

1.2 数据资料

1.2.1 气象数据的选取及预处理

本研究选取了降水量、气温和蒸发量作为干旱综合监测的气象输入变量,从中国气象局国家气象中心(<http://data.cma.cn/>)收集了位于湖北省内 16 个气象站点 2002~2017 年的观测数据,包括日降雨量、日最低气温、日最高气温、日蒸发量,并对降雨量小于 0.1mm 的微降水日进行查补修正。本文选取上述站点的月累积降水量、月平均气温、月平均蒸发量的观测数据进行指标构建,气象站点的地理位置分布图及相关信息如下图所示。

1.2.2 遥感数据的选取及预处理

地表含水量指数(SWCI)具有综合土壤和植被光谱反射率受水分含量控制的特点,并能灵敏的监测到土壤浅层含水量^[20],可作为表征农业干旱的致旱因子,在干旱综合监测中提供重要的地表信息。地表含水量指数可由中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)遥感数据资料计算得到,计算公式如下:

$$SWCI = \frac{\rho_6 - \rho_7}{\rho_6 + \rho_7} \tag{1}$$

式中: ρ_6 和 ρ_7 分别是 MODIS 第 6(1.628~1.652 μm),第 7(2.105~2.155 μm) 波段与水的吸收低谷和吸收峰值相对应的水的吸收光谱区^[11]。本研究从 NASA 门户网站(<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>)获取 2002~2017 年湖北省 h27v05、h27v06、h28v05、h28v064 个区域(图 1)逐月的 MOD13A3、MOD11A2 和 MOD09A1 影像资料,利用 MRT 工具(MODISReprojectionTool)对 MODIS 数据进行批量的投影转换及拼接,利用 ENVI 数据处理工具对波段进行相应的波段运算得到 ρ_6 和 ρ_7 数据。SWCI 的值越大,地表越湿润;SWCI 的值越小,则地表越干燥^[20]。

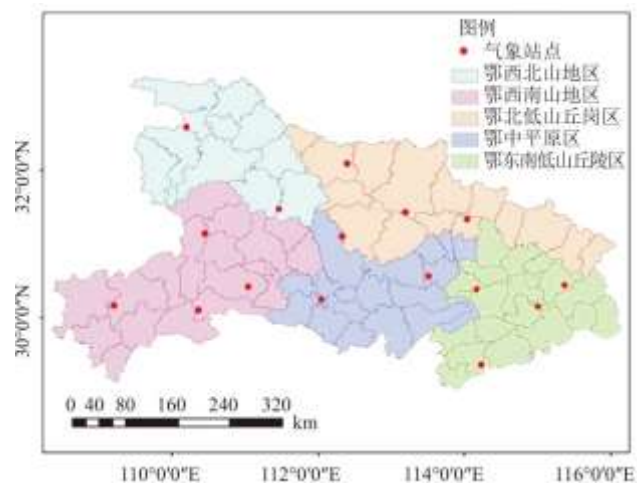


图 1 湖北省地理分区及周边气象站点分布图

表 1 气象站点基础信息表

站号	站点名称	经度(°)	纬度(°)
57251	勋西	110.21	32.59
57279	枣阳	112.40	32.09

57285	桐柏	113.25	32.23
57359	兴山	110.44	31.21
57363	南漳	111.47	31.47
57378	钟祥	112.34	31.10
57395	大悟	114.04	31.34
57447	恩施	109.22	30.16
57458	五峰	110.37	30.10
57461	宜昌	111.05	30.42
57476	荆州	112.09	30.21
57482	孝感	113.51	30.56
57494	武汉	114.17	30.38
57595	通山	114.23	29.36
58402	英山	115.37	30.44
58407	黄石	115.01	30.15

1.3 修正复合干旱指数构建

参考 Waseem 等^[21]构建的综合干旱指数(Composite Drought Index, CDI), 本研究提出的修正复合干旱指数(MCDI)包括两类自变量, 一类是与干旱程度反相关的变量, 把这类变量描述为 x , 另一类是与干旱程度正相关的变量, 把这类变量描述为 y 。本文中所用到的 x 变量包括降水和地表含水量指数, y 变量是气温和蒸散发, 各变量均选用 2002~2017 年的月平均数据。

下面概述计算 MCDI 的逐步计算过程。

所选取的变量 x 、 y 的数据集(对应于年 t_i 的月平均时间序列)排列在 m 行和 n 列矩阵(等式(2))中, 如下所示:

$$N_k = \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \right] \quad (2)$$

式中: k =每月(1, 2, 3, ..., 12 月); t_i 是相应的年份, $i=1, 2, 3, \dots, m$, $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

N_k 包含不同维度的变量, 因此需要进行无量纲化处理(公式(3)), 并将其储存在一个新的矩阵(M_k) (公式(4))中, 其中 M_{ij} 是相应的归一化值。

$$M_{\bar{j}} = \frac{abs(x_{ij})}{\sum_{i=1}^m abs(x_{ij})} \quad M_{ij} = \frac{abs(y_{\bar{j}})}{\sum_{i=1}^m abs(y_{\bar{j}})} \quad (3)$$

$$M_k = \begin{matrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{matrix} \begin{pmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \cdots & M_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

接下来进行权重的计算，基于信息熵计算与 j 变量相对应的权重(公式(5) (6) (7))。1948 年，香农提出的“信息熵”概念解决了信息的量化、度量问题。与方差相比，它可以提供更有效的信息度量和更好的数据表征^[22]。引入熵权不仅可以使变量之间的关系具有平衡性，而且根据数据库中的不同参数的可变性，提供无偏差的相对权重。熵权越大表示特定变量的变化越大。

$$EM_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m M_{ij} \ln(M_{ij}) \quad (5)$$

$$DS_j = 1 - EM_j \quad (6)$$

$$Ew_i = \frac{DS_j}{\sum_{j=1}^n DS_j} \quad (7)$$

式中：E_{wi} 是分配给变量的权重，需要满足公式(8)；D_{s_j} 是第 j 个变量数据之间熵的度量。

$$\sum_{j=1}^n Ew_i = 1 \quad (8)$$

接下来，通过从属于 x 的第 j 个变量的数据库中选择一组最大值和属于 y 的第 j 个变量的数据库中选取一组最小值来分别定义所选区域的最湿润条件(MWC)(公式(9))和最干旱的条件(MDC)(公式 10)。

$$MWC = (A_1^+, A_2^+ \cdots, A_n^+) \quad (9)$$

$$MDC = (A_1^-, A_2^- \cdots, A_n^-) \quad (10)$$

式中：

$$A_j^+ = \{\max M_{\bar{j}}, j \in x; \min M_{\bar{j}}, j \in y\},$$

$$A_j^- = \{\min M_{\bar{j}}, j \in x; \max M_{\bar{j}}, j \in y\}$$

在本文的研究中，采用加权欧氏距离(EQ)^[23]进行如下的计算(11) (12)：

$$S_{ij}^{-} = A_j^{-} - M_{ij} \quad (11a)$$

$$S_{ij}^{+} = A_j^{+} - M_{ij} \quad (11b)$$

$$S_i^{+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n Ew_j (S_{ij}^{+})^2} \quad (12a)$$

$$S_i^{-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n Ew_j (S_{ij}^{-})^2} \quad (12b)$$

式中： S_i^{+} 和 S_i^{-} 分别计算了当前条件与最湿润条件和最干旱条件的加权欧式距离。

最后，MCDI 的值基于当前条件与最湿润条件的相对相似度，计算公式如下所示：

$$MCDI_j = \frac{S_j^{-}}{S_j^{-} + S_j^{+}} \quad (13)$$

MCDI 的值介于 0 和 1 之间，值越大(越接近于 1)表征当前条件越湿润，反之则越干燥。

1.4 基于多指标的干旱等级分类

由以上计算可得 MCDI 的变化范围在 0.0~1.0, 值越大, 表示越湿润; 值越小, 表示越干燥。因此, 根据杨波等定义的标准^[24], 结合 2002~2017 年中国气象灾害年鉴、湖北省统计年鉴, 以及《气象干旱等级 GB/T20481-2017》中 SPI、CI 的干旱等级划分标准, 经过综合分析后得到 MCDI 的干旱等级划分, 如表 2 所示。

表 2 基于多指标的干旱等级分类

干旱等级	MCDI 取值范围	SPI 取值范围	CI 取值范围
特旱	$MCDI < 0.1$	$SPI \leq -2.0$	$CI \leq -2.4$
重旱	$0.1 \leq MCDI < 0.2$	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$-2.4 < CI \leq -1.8$
中旱	$0.2 \leq MCDI < 0.3$	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$-1.8 < CI \leq -1.2$
轻旱	$0.3 \leq MCDI < 0.4$	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$-1.2 < CI \leq -0.6$
无旱	$MCDI > 0.4$	$-0.5 < SPI$	$-0.6 < CI$

同时, 为验证 MCDI 的监测性能, 本文引入广泛使用的干旱指数 SPI 和 CI 与其进行对比分析。在进行 SPI 的计算时, 需要首先对降水量进行正态标准化处理, 即采用 Γ 函数的标准化降水累积频率分布去描述降水量变化, 表征某时段降水量出现的概率, 并以此来划分干旱等级, 具体计算方法如下。

假设某段时间的降水量为变量 x , 则其 Γ 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}} > 0 \quad (14)$$

式中： γ 和 β 分别为函数的形状参数和尺度参数； $\Gamma(\alpha)$ 为伽马函数。

γ 和 β 可通过极大似然估计法求得：

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (15)$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} / \hat{\gamma} \quad (16)$$

式中：

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (17)$$

式中： x_i 为降水量资料样本； $\bar{x}$ 为降水量气候平均值。

对于某段时期的降水量 x_0 ，降水量 x 小于 x_0 的概率为：

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (18)$$

则降水量为 0 的概率为：

$$F(x = 0) = \frac{m}{n} \quad (19)$$

式中： m 是降水量为 0 的样本数； n 为总样本数。

对于伽马分布概率正态标准化处理后得到降水概率的标准化正态分布函数：

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-x^2/2} dx \quad (20)$$

则 SPI 可以进行通过近似求得：

$$SPI = S \left\{ t - \frac{(c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \right\} \quad (21)$$

式中：

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}} \quad (21)$$

式中：F 为求得的概率值；且当 F 大于 0.5 时，F 取 1.0-F，S=1；当 F≤0.5 时，S=-1。c₀=2.515517；c₁=0.802853；c₂=0.010328；d₁=1.432788；d₂=0.189269；d₃=0.001308。基于 SPI 的干旱等级分类情况如表 2 所示^[10]。

CI 的计算方法如下：

$$CI = a Z_{30} + b Z_{90} + c M_{30} \quad (22)$$

式中：Z₃₀、Z₉₀ 分别表示近 30 和近 90d 的 SPI 值；M₃₀ 表示近 30d 的相对湿润度指数；a 为近 30dSPI 的系数，取 0.4；b 为近 90dSPI 的系数，取 0.4；c 为近 30d 相对湿润度指数的系数，取 0.8。基于 CI 的干旱等级分类情况如表 2 所示^[10]。

2 结果分析

2.1 计算实例

本文根据湖北省的地形地势特征选取省内 16 个气象站点来进行 MCDI 的计算。

下面以气象站点 57251(勋西)在 2002~2017 年 4 月的时间序列数据为例来计算相应的 MCDI 值。首先，将 2002~2017 年 4 月的降水量、地表含水量指数、蒸发量和气温的月平均资料整理成 m×n(N_i)的矩阵。如下表 3 所示。

通过归一化公式的计算，可以从 N_i中得到归一化矩阵 M_i，如下表 4 所示。

根据表 2 定义最湿润和最干旱的条件，可以得到 MWC 和 MDC，如表 5 所示。

接下来使用采用加权欧氏距离(EQ)计算权重，2002~2017 年站点 57251 的降水量、地表含水量指数、蒸发量和气温的权重分别为 0.84、0.04、0.10、0.02。

确定权重之后，可根据公式计算出最终的 MCDI 值，如表 6 所示。

基于上述步骤，输入变量降水量、气温、地表含水量指数、蒸发量，可以计算出湖北省 16 个气象站点 2002~2017 年间的修正复合干旱指数。

表 3 4 月输入数据示例

年份	x		y	
	降水量	地表含水量指数	蒸发量	气温
2002	2.58	0.33	3.25	15.73
2003	2.20	0.23	3.17	15.36
2004	0.38	0.33	5.76	18.23
2005	0.39	0.30	5.13	18.71
2006	1.68	0.30	4.09	16.89
2007	0.80	0.32	5.14	16.56
2008	2.16	0.25	4.20	16.11
2009	3.54	0.29	3.69	15.62
2010	2.79	0.23	4.46	14.96
2011	0.65	0.26	6.35	17.93
2012	1.07	0.31	4.93	17.80
2013	1.75	0.34	5.06	16.61
2014	2.67	0.28	3.48	16.56
2015	3.04	0.28	4.24	15.86
2016	1.24	0.33	5.45	18.15
2017	3.60	0.28	4.18	16.24

表 4 与 4 月 N_4 对应的 M_4 示例数据

年份	x		y	
	降水量	地表含水量指数	蒸发量	气温
2002	0.080	0.068	0.042	0.056
2003	0.068	0.046	0.041	0.054
2004	0.012	0.068	0.075	0.065
2005	0.012	0.061	0.067	0.066
2006	0.052	0.061	0.053	0.060

2007	0.025	0.065	0.067	0.059
2008	0.067	0.051	0.055	0.057
2009	0.110	0.059	0.048	0.055
2010	0.087	0.047	0.058	0.053
2011	0.020	0.053	0.083	0.064
2012	0.033	0.064	0.064	0.063
2013	0.054	0.070	0.066	0.059
2014	0.083	0.057	0.045	0.059
2015	0.094	0.058	0.055	0.056
2016	0.039	0.066	0.071	0.064
2017	0.112	0.057	0.054	0.058

表 5 4 月 MWC 和 MDC 的值

MWC	0.112	0.070	0.750	0.660
MDC	0.120	0.046	0.041	0.053

表 6 2002~2017 年 4 月 MCDI 值

年份	Di+	Di-	MCDI
2002	0.029	0.064	0.688
2003	0.041	0.054	0.570
2004	0.093	0.005	0.053
2005	0.092	0.006	0.060
2006	0.055	0.038	0.410
2007	0.081	0.014	0.144
2008	0.042	0.052	0.554
2009	0.004	0.091	0.962
2010	0.024	0.070	0.741

2011	0.086	0.008	0.084
2012	0.073	0.021	0.223
2013	0.054	0.040	0.426
2014	0.027	0.067	0.714
2015	0.017	0.077	0.818
2016	0.068	0.025	0.271
2017	0.005	0.093	0.949

2. 2MCDI 适用性验证

2. 2. 1MCDI 对单个输入变量的响应分析

为了研究 MCDI 受单个输入变量的影响, 下图绘制了所有气象站点 2002~2017 年 MCDI 值的月平均序列, 以及单个输入变量的标准化序列: 降水距平百分比 PA、温度距平百分比 TA、蒸发距平百分比 ETA 和地表含水量指数 SWCI 月序列, 以分析 MCDI 的综合监测效果。

从图中可以看出, MCDI 显示出与 PA 最为相似的变化趋势, 并与 TA 和 ETA 呈现出负相关关系。此外, MCDI 的低值往往出现在 PA 的低值和 ETA 的高值月份, 例如 2004 年 12 月、2008 年 12 月和 2013 年 10 月, 少雨伴随着蒸发量加大导致了湖北省秋冬连旱发生的可能性较大。由图中可知, SWCI 与 MCDI 的相关性较弱, 这可能与 SWCI 明显的季节性有关, 通常 SWCI 的最高值出现在夏季, 而冬季则出现最低值。然而当气象条件发生突变时, 反映地表水含量的 SWCI 会对干旱的综合产生滞后影响。例如 2011 年 1 月, 该月降水距平百分比指出, 降雨量减少了 57.7%, 而 SWCI 则显示地表含水量充足, 数值为 0.215, 最后该月的 MCDI 值为 0.403, 干旱状况为接近正常。由此可以看出, 基于 MCDI 的干旱评估是考虑多个输入变量影响的综合结果。

2. 2. 2 基于典型干旱事件的 MCDI 监测性能验证

根据《中国气象灾害年鉴》记载, 湖北省在 2005、2007、2010、2013、2014 和 2017 年分别发生过严重旱灾, 造成了极大的人员伤亡和经济损失^[25]。为验证 MCDI 的干旱监测性能, 分别计算各事件发生区域的 MCDI 平均值, 并与广泛应用的单/多变量干旱指数—标准化降雨指数 SPI 和气象干旱综合指数 CI 进行对比, 结合三者干旱等级的划分, 得出每次干旱事件的起始点及强度。结果详见下表。

据 2002~2017 年《中国气象灾害年鉴》(下称《年鉴》)第四章分省气象灾害概述中关于湖北省气象灾害的记载^[25], 2005 年 3 月至 6 月上旬, 湖北省极端天气明显, 水旱灾害交替, 荆门、宜昌、十堰、襄樊、随州、黄冈、鄂州、荆州及神农架等 19 个县市遭受旱灾。该区域同期的 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为轻旱、轻旱、中旱。从干旱监测的起点和终点来看, SPI、CI、MCDI 均监测到了此次干旱事件的始末。2007 年 4 月 25 日至 5 月 20 日、6 月上旬、8 月上中旬、9 月 1 日至 10 月 25 日、11 月上旬旱情比较明显, 以十堰、孝感、黄冈、武汉等地为重。本文对 2007 年 8、9 与 10 月的监测数据进行计算, 得出 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为中旱、中旱、特旱。结合《年鉴》中对于旱情的描述, 如: 长江航道水位持续偏低, 发生船舶搁浅事件; 36.2 万人、2.4 万头大牲畜一度出现饮水困难; 农作物绝收面积达 3.4 万 hm^2 , 以及《气象干旱等级(GB/T20481-2017)》中对于特旱的表述, 如: 水分长时间严重不足, 地表植物干枯、死亡, 对人畜饮水产生较大影响等, 可知, MCDI 监测到的结果更为准确。从干旱监测的起点和终点来看, MCDI 完整地监测到了此次干旱事件的始末, SPI 仅在 9 和 10 月监测到干旱的发生, 未

监测到此次干旱事件的始末；CI 则未监测到此次干旱事件的发生。2010 年 11 月至 2011 年 6 月 9 日，湖北省降水异常偏少，出现了历史罕见的冬春连旱。同期的 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为中旱、特旱、特旱。从干旱监测的起点和终点来看，SPI、CI、MCDI 均监测到了此次干旱事件的始末。2013 年 7 月下旬至 8 月下旬，湖北省高温与干旱叠加，52 个县市出现重旱，其中 30 个县市为特旱，全省受灾人数达 1579.5 万人，367 万人饮水困难，1.86.2 万公顷农作物受灾，11.0 万 hm^2 农作物绝收。同期的 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为中旱、轻旱、重旱。

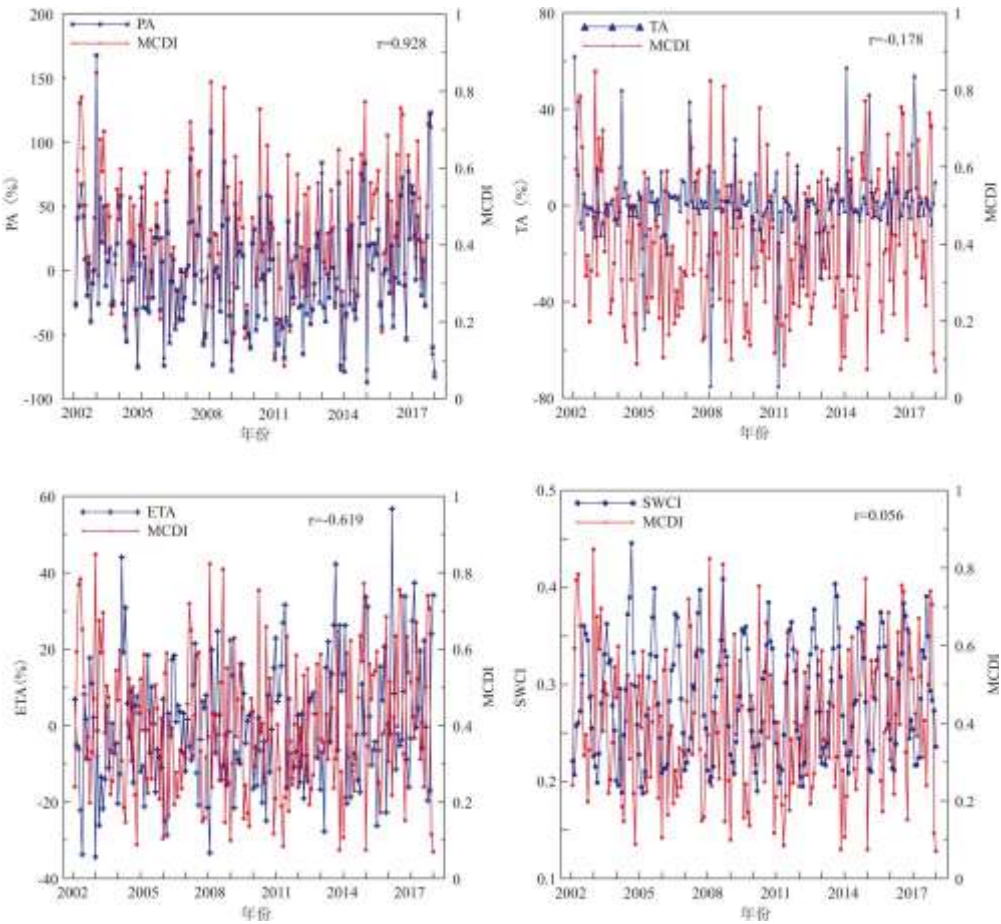


图 2 MCDI 与 PA, TA, ETA, SWCI 的月序列

表 7 历史干旱事件的监测结果

发生时间	区位范围	监测时间(干旱强度)		
		SPI	CI	MCDI
2005 年 3 月至 6 月上旬	荆门、宜昌、十堰、襄樊、随州、黄冈、鄂州、荆州及神农架等 19 个县市	同年 3~6 月 (轻旱)	同年 3~6 月 (轻旱)	同年 3~6 月 (中旱)
2007 年 8 月中上旬、9 月 1 日至 10 月 25 日、11 月上旬	十堰、孝感、黄冈、武汉	同年 9~10 月 (中旱)	同年 9~11 月 (中旱)	同年 8~11 月 (特旱)
2010 年 11 月至 2011 年 6 月 9 日	东部、北部降水量偏少，68 市县创历史新低	同年 11~次年 5 月(中旱)	同年 11~次年 5 月(特旱)	同年 11~次年 5 月(特旱)

2013 年 7 月下旬至 8 月中旬	全省高温极值严重干旱, 52 县市出现重旱、30 县为特旱	同年 7~8 月 (中旱)	同年 7 月(轻旱)	同年 7~8 月 (重旱)
2014 年 5 月至 7 月	鄂北岗地、鄂中丘陵出现重度及以上气象干旱, 重特旱达 13 站	同年 5~6 月 (轻旱)	同年 6 月(轻旱)	同年 5~7 月 (中旱)
2017 年 7 月 11 日至月底	湖北西北部东部、江汉平原东部和湖北东北部局部	同年 7 月(轻旱)	同年 7 月(轻旱)	同年 7 月(重旱)

可见, MCDI 的监测更符合实际旱情。从干旱监测的起点和终点来看, SPI、CI、MCDI 均监测到了此次干旱事件的开始, 但 8 月份 CI 的监测值显示为无旱, 说明其较 SPI、MCDI 监测到此次干旱事件结束的时间更早。2014 年 5~7 月鄂北岗地、鄂中丘陵等地出现重度及以上气象干旱, 其中重特旱达 13 站, 造成 522.5 万人受灾, 97.5 万人饮水困难, 农作物 63.4 万顷受灾。同期的 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为轻旱、轻旱、中旱。《气象干旱等级(GB/T20481-2017)》中对于轻旱的表述为: 降水较常年偏少, 地表空气干燥, 土壤出现水分轻度不足。可见, SPI 和 CI 监测到的干旱情况与实际旱情不符。从干旱监测的起点来看, SPI 和 MCDI 监测到了此次干旱事件的开始, CI 推迟到 6 月才监测到此次干旱事件; 从干旱监测的终点来看, SPI 和 CI 均结束于 6 月, 而 MCDI 在 7 月的监测值为 0.29, 即轻旱, 完整地监测到了此次干旱事件, 符合年鉴记载。2017 年 7 月出梅后, 湖北省 26 站达中等气象干旱, 重旱 9 站, 主要分布在湖北西北部东部、江汉平原东部和湖北东北部局部, 造成 439.6 万人受灾, 饮水困难 9.7 万人, 农作物受灾面积达 62.67hm²。同期 SPI、CI、MCDI 监测的干旱等级分别为轻旱、轻旱、重旱。MCDI 监测到的重旱更加符合年鉴记载。通过比较该年 6 与 8 月各指数的监测结果, 三者均良好地监测到了此次干旱事件。对比可见, 历史记录中的 6 次严重干旱事件中, MCDI 准确监测到 5 次, SPI 和 CI 分别监测到 3 和 2 次, MCDI 较 SPI 和 CI 的监测干旱事件准确率分别提高了 33.3%和 50%, 且 MCDI 能更精确地监测到干旱事件的严重程度。

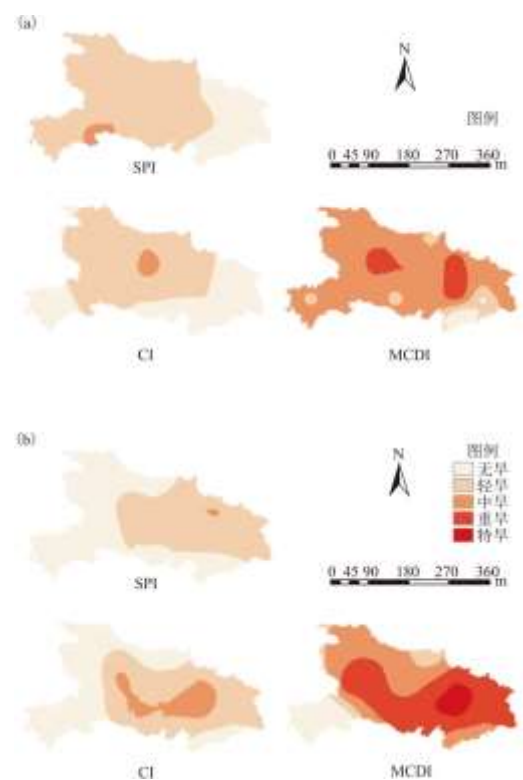


图 3 典型干旱事件中 SPI、CI、MCDI 对比图((a)2014 年 5~7 月, (b)2017 年 7 月)

为验证 MCDI 监测干旱发生范围的准确性,选取表 7 中记录信息较为详细的两个干旱事件(2014 年 5~7 月和 2017 年 7 月)为例,对 SPI、CI 和 MCDI 进行空间插值并分类,得到干旱等级空间分布图如下所示。在 2014 年 5~7 月的干旱事件中, SPI 监测到鄂中和鄂西北部出现轻旱, CI 监测到鄂中部出现中旱, 鄂北部出现轻旱, 均低估了实际旱情。MCDI 监测到鄂中局部区域出现重旱, 鄂中其他地区及鄂北鄂东部出现中旱, 与旱情记载信息相符。在 2017 年 7 月的干旱事件中, SPI 和 CI 并未监测到鄂西北部出现的旱情, 且均低估了鄂北、鄂中及鄂东部的干旱严重程度。MCDI 监测到鄂北部出现了中旱, 且准确地识别出鄂中部出现的重旱和特旱状况, 较 SPI 和 CI 监测的干旱等级和发生范围更为精确。

3 结论

本研究构建了以降水、气温、蒸发和地表含水量指数为输入变量的综合干旱监测指标—修正复合干旱指数(MCDI), 该指标考虑了多个致旱因子的耦合影响, 结合了观测数据和遥感数据的多源信息, 对湖北省 2002~2017 年间旱情开展综合评估。基于结果分析, 得出结论如下:

(1)MCDI 显示出与降水最强的相关性, 并与气温和蒸发呈现出负相关。虽然地表含水量指数与 MCDI 的相关性很弱, 但它对基于 MCDI 的干旱综合评估结果产生影响。MCDI 考虑了多个致旱因子对干旱评估的综合影响。

(2)基于监测结果与历史干旱事件的对比验证可以看出, MCDI 比广泛使用的干旱指数 SPI 和 CI 具有更高的可靠性, 不仅能够准确监测干旱的发生和结束, 还能更加精确地反映干旱严重程度和发生范围, MCDI 的综合干旱监测结果与实际旱情更相符;

(3)MCDI 构建方法简单, 便于在其他区域推广使用。本研究选用湖北省作为研究区域来验证 MCDI 的监测性能, 相关结果可为湖北省建立和健全干旱监测与预警系统提供重要参考, 同时也对其他区域开展干旱综合监测具有很好的借鉴作用。

(4)MCDI 指数构建仍然存在一定的缺陷。由于本文使用到的遥感数据产品的时间较短, 导致计算的 MCDI 时间序列较短, 这势必会影响到结果的精度。在条件允许下, 应采用覆盖所有地貌类型且分布均匀的气象站点来进行计算。同时, 考虑研究区域的气候和地理特性, 也可融合其他关键致旱因子信息来构建 MCDI, 以得到更加准确、全面的监测结果。

参考文献:

- [1]WILHITE D, SVOBODA M, HAYES M. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness[J]. Water Resources Management. 2007, 21 (5), 763-774.
- [2]沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35 (5) :1068-1076.
- [3]McKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[R]. California Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [4]PALMER W C. Meteorological drought[C]. Washington D C: USA Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [5]鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 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, 1997 (1) :27-34.
- [6]王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征[J]. 地理学报, 2003 (S1) :61-68.

-
- [7] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.
- [8] MO K C. Model-based drought indices over the United States[J]. Journal of Hydrometeorological. 2008, 9(6), 1212-1230
- [9] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 10-14+19.
- [10] 中华人民共和国国家治理监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T20481-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 杜晓, 王世新, 周艺, 等. 一种新的基于 MODIS 的地表含水量模型构造与验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007(3): 205-207, 211.
- [12] CARLSON T N, PERRY E M, SCHMUGGE T J. Remote sensing estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields[J]. Agricultural and Forest Meteorology. 1990, 52, 45-69.
- [13] 杜灵通, 田庆久, 王磊, 等. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 126-132.
- [14] 江笑薇, 白建军, 刘宪峰. 基于多源信息的综合干旱监测研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 275-287.
- [15] HAO Z C, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model[J]. Advances in Water Resources, 2013, 57, 12-18.
- [16] KAO S C, GOVINDARAJU R S. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology. 2009, 380(1).
- [17] SUN L, MITCHELL S W, DAVIDSON A. Multiple drought indices for agriculture drought risk assessment on the Canadian prairies[J]. International Journal of Climatology. 2012, 32(11), 1628-1639.
- [18] 刘宗元. 基于多源数据的西南地区综合干旱监测指数研究及其应用[D]. 西南大学, 2015. LIU Z Y.
- [19] 国家统计局. 中国统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计, 2017(11): 2.
- [20] 王正东, 郭鹏, 万红, 等. 基于 MODIS 数据的山东省 2014-2016 年干旱监测分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 330-336.
- [21] WASEEM M, AJMAL M, KIM T W. Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment[J]. Journal of Hydrology, 2015(527): 30-37.
- [22] SHANNON C A. Mathematical theory of communications[J]. Bell System Technology Journal, 1948.
- [23] 董旭, 魏振军. 一种加权欧氏距离聚类方法[J]. 信息工程大学学报, 2005(1): 23-25.

[24] 杨波, 马苏, 王彬武, 等. 基于 MODIS 的湖南省农业干旱监测模型[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10):1788-1796.

[25] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2017.