

三种复合干旱指数在我国三大农业主产区的适用性分析

王思琪^{1,2}, 张翔^{1,2}, 陈能成^{2,3}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020;

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 3. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

摘要:利用多源遥感数据, 通过与 SPI-3 的线性相关分析及实际旱情的对比, 研究了三种复合干旱指数 (PADI、OVDI、TVDI) 在我国三类 (冬小麦、夏玉米、水稻) 农业主产区的适用性。结果表明: 三种复合干旱指数不适用于水稻区的干旱监测; 在三类农业区的干旱监测中, 指数 PADI、TVDI 对干旱量化结果较为准确 (干旱持续时间、严重程度、空间分布等), OVDI 对旱情严重程度的判断偏重; 指数 TVDI、OVDI 适合大范围的旱情监测, 且 TVDI 监测结果更为准确; PADI 指数由于结合了作物信息, 对干旱的量化更全面, 适宜于小范围的旱情监测, 但对输入信息的要求较高。

关键词: 农业干旱; 复合干旱指数; 农业主产区; 冬小麦; 夏玉米; 水稻; 适用性分析

中图分类号: S423 **文献标志码:** A

Applicability analysis of three compound drought indexes in three major agricultural production areas in China

WANG Siqi^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, CHEN Nengcheng^{2,3}

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

3. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: In this paper, the applicability of three compound drought indexes (PADI, OVDI, and TVDI) in three main agricultural production areas (winter wheat, summer corn, and rice) in China was analyzed using multi-source remote sensing data, through the linear correlation analysis with SPI-3 and comparison with the actual drought situation. The results showed that: (1) The three kinds of compound drought indexes were not suitable for drought monitoring in rice region. (2) In the drought monitoring of three types of agricultural areas, PADI and TVDI were more accurate in quantifying the drought situation (E.g. duration, severity, and spatial distribution), while OVDI was overvalued in judging the severity of drought. (3) TVDI and OVDI were suitable for large-scale drought monitoring, while the monitoring results of TVDI were more accurate. (4) Because of the combination of crop information, PADI was more comprehensive in drought quantification and suitable for small-range drought monitoring, which requires higher input information.

Keywords: agricultural drought; compound drought indexes; agricultural major production area; winter-wheat; summer-corn; rice; applicability analysis

在我国,因干旱造成的作物减产占据一半以上的气象灾害粮食减产量,年均受旱面积达 0.2 亿 hm^2 ^[1]。2009—2012 年^[2],我国西南、华北、黄淮和长江中游等农业主产区发生了 60 年来最严重的旱灾,经济损失严重。因此,对农业干旱进行监测分析,有助于开展农业受旱分析,并提供科学的决策支持。

基于干旱指数开展干旱研究,不仅能更好地了解干旱的发生过程,还有助于开展干旱指数的综合分析。目前多数的指数对比研究集中于单一的地理区域^[3],这些地区具有相似的气候条件及生产水平等。而上述指数的整体表现(敏感性、鲁棒性)往往受到多种因素的综合影响,因此在不同地理区域的旱情描述能力存在较大的差异,尤其是结合了多种干旱信息的复合干旱指数。而目前学术界提出的干旱指数有着不同的计算复杂度和建模特点,具有一定的适用范围^[4-8]。刘英等^[9]分析了 PDI、MPDI、SMMI、MSMMI 4 种复合干旱指数在关中平原的有效性;吴黎^[10]利用 TVDI 对黑龙江省的旱情进行了动态监测,并对监测结果的准确性进行了对比分析;李红梅等^[11]比较了 CI、CI_{new} 两种干旱指数在陕西省的适用性。在这些研究中,关于我国三大农业主产区应选用哪些干旱指标来进行农业干旱的监测还没有系统性的论述。

因此,本文利用降水、土壤湿度、地表温度、植被状态及作物信息数据,计算了降水条件指数(PCI)、土壤湿度指数(SMCI)、温度条件指数(TCI)及植被状态指数(VCI)。基于此,进一步计算了温度植被干旱指数(TVDI)、优化的植被干旱指数(OVDI)、基于过程的累积干旱指数(PADI)3 种复合干旱指数,通过与 SPI-3 的线性相关分析以及中国水利部及干旱气象期刊统计的农业干旱实况的对比^[12-19],研究了 3 种指数在我国三大农业主产区干旱易发区的适用性,以期为中国典型农业区的干旱监测和评估工作提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

根据不同地区气候条件、地理位置及其在农业生产中的作用,综合考虑不同地区的干旱发生情况,以 4 个典型农业区作为研究区(图 1)。研究区地处黄淮海平原及长江中下游地区,属于干旱易发

区^[20],因此多次被选为研究对象^[21-24]。此外,研究区包括亚热带、暖温带和中温带,达到了农作物活跃生长的基本热量要求,种植的主要粮食作物有水稻、玉米、小麦等,是我国重要的农产品输出地^[25]。本文研究的五次典型干旱事件具体包括:冬小麦区,河南 2011 年春冬连旱、安徽 2012 年干旱;夏玉米区,河北 2010 年干旱、河南 2011 年夏旱;水稻区,湖北 2011 年干旱。

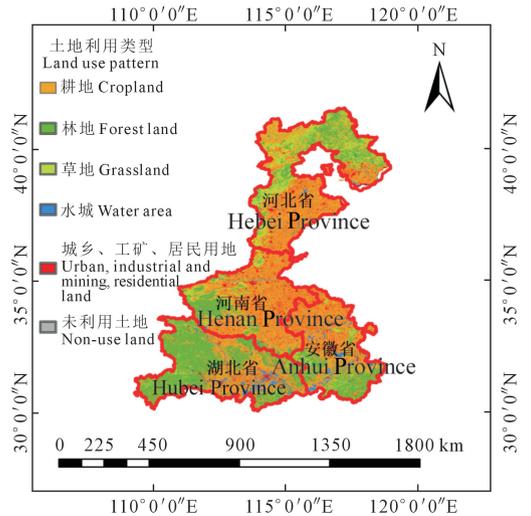


图 1 研究区域位置示意图

Fig.1 The location of study area

1.2 数据来源

所用数据包括遥感数据、作物生理参数数据及实际灾情数据(表 1)。遥感数据包括降水数据、根区土壤水分数据、NDVI 数据及地表温度数据,主要用于干旱指数的计算,涉及的数据集有 TRMM3B43、GLDAS_NOAH025_M2.1、GIMMS3g_V0、MODLT1M、MODND1MI 及 GPCCV7 共 6 个。这些数据集已在不同地区的干旱研究中得到了应用^[26-30]。此外,作物生理参数数据可从传统作物学的文献中查到^[31-33]。实际灾情数据来自中国水利部及干旱气象期刊统计的农业干旱发生实况^[12-19],以及各省级气象部门公布的灾情数据。为便于描述,将表中的 PCI、SMCI、TCI、VCI 统称为单一干旱指数,指数 TVDI、PADI、OVDI 统称为复合干旱指数。

1.3 研究方法

1.3.1 研究内容 主要分三部分:(1)复合干旱指数的计算。基于 4 种单一干旱指数,通过最优权重组合的方式,计算了 OVDI。其次,利用归一化植被指数(NDVI)和地表温度数据,计算了 TVDI。最后,

利用基于演化过程的多传感器协同监测方法 (EPMC) 及作物生理参数数据, 计算了 PADI 指数。(2) 3 种复合干旱指数的适用性分析。其中评估指标包括实际灾情数据及 SPI。由于 SPI 可通过不同的时间尺度而成为不同干旱类型的指标^[34], 因此本文以 3 个月时间尺度的 SPI 值 (SPI-3) 作为农业干旱指数的评估指标。(3) 适用性分析分为两部分: 首先是各指数与 SPI-3 的线性相关分析, 得到相关系数 (R) 及置信水平 (C)。其次, 借助实际灾情数据对指数的监测结果 (包括干旱的发生时间、发展过程和严重程度等方面) 进行评估 (图 2)。

1.3.2 农业干旱演化过程判别 基于演化过程的多传感器协同监测方法 (EPMC) 是一种基于演化过程的多传感器协同的农业旱情监测方法。该方法通过多传感器协同实现了农业干旱 (一般持续几个

月甚至几年) 演变过程的量化分析, 并为 PADI 指数的计算提供输入。在 EPMC 中, 一次农业干旱灾害的演变过程被量化为 4 个阶段, 包括潜伏期 (P1)、开始期 (P2)、发展期 (P3) 和消亡期 (P4), 各阶段对应农业干旱生命周期中的一次典型变化, 通过关注不同的环境变量 (降水、根区土壤水分和植被状态) 来实现演化过程的精确监测 (图 3)。在前 3 个阶段, 干旱的严重程度逐步递增, 在消亡期干旱逐步缓解。方法的详细介绍见参考文献 [35]。

1.3.3 干旱指数介绍 涉及到的干旱指数有 PCI、SMCI、VCI、TCI、TVDI、OVDI、PADI 和 SPI。单一干旱指数是复合干旱指数的计算基础, 是对降水、土壤湿度、植被状态、地表温度的简单量化, 其计算步骤详见参考文献 [36]~[37]。干旱等级划分标准见表 2。

表 1 本文所采用的数据
Table 1 Datasets used in this study

序号 No.	指标 Index	变量 Variable	数据集名称 Dataset	时间范围 Time range	时间分辨率 Temporal resolution	原空间分辨率 Spatial resolution
1	PCI	降水 Precipitation	TRMM3B43	1998—2017	月 Monthly	0.25°×0.25°
2	SMCI	土壤湿度 Soil moisture	GLDAS_NOAH025_M2.1	2000—2017	月 Monthly	0.25°×0.25°
3	VCI	归一化植被指数 NDVI	GIMMS3g_V0	1983—2013	半月 Two weeks	0.083°×0.083°
4	TCI	地表温度 LST	MODLT1M	2000—2016	月 Monthly	0.006°×0.006°
5	TVDI	归一化植被指数 NDVI	MODND1M1	2009—2013	月 Monthly	0.003°×0.003°
		地表温度 LST	MODLT1M	2009—2013	月 Monthly	0.006°×0.006°
6	SPI	降水 Precipitation	GPCCV7	1901—2013	月 Monthly	0.5°×0.5°
		降水 Precipitation	TRMM3B43	1998—2017	月 Monthly	0.25°×0.25°
		土壤湿度 Soil moisture	GLDAS_NOAH025_M2.1	2001—2013	月 Monthly	0.25°×0.25°
		归一化植被指数 NDVI	GIMMS3g_V0	2001—2013	半月 Two weeks	0.083°×0.083°
7	OVDI	地表温度 LST	MODLT1M	2001—2013	月 Monthly	0.006°×0.006°
		PCI	TRMM3B43	2010—2012	月 Monthly	0.25°×0.25°
		EPMC SMCI	GLDAS_NOAH025_M2.1	2010—2012	月 Monthly	0.25°×0.25°
		VCI	GIMMS3g_V0	2010—2012	半月 Two weeks	0.083°×0.083°
8	PADI	作物水分敏感系数 Crop water sensitivity 作物主要生育期划分 Crop growth stage		文献资料 [31]—[33] Literature material		
9	实际灾情 Actual disaster data	中国水利部每年公布的《中国水利灾害公报》 ^[12-13] 、干旱气象期刊每年公布的全国干旱综述 ^[14-19] 、各省级气象部门公布的灾情数据等 “Bulletin of Flood and Drought Disaster in China” ^[12-13] published by the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, the national drought summary published by the journal of drought meteorology ^[14-19] , and the disaster data released by provincial meteorological departments.				

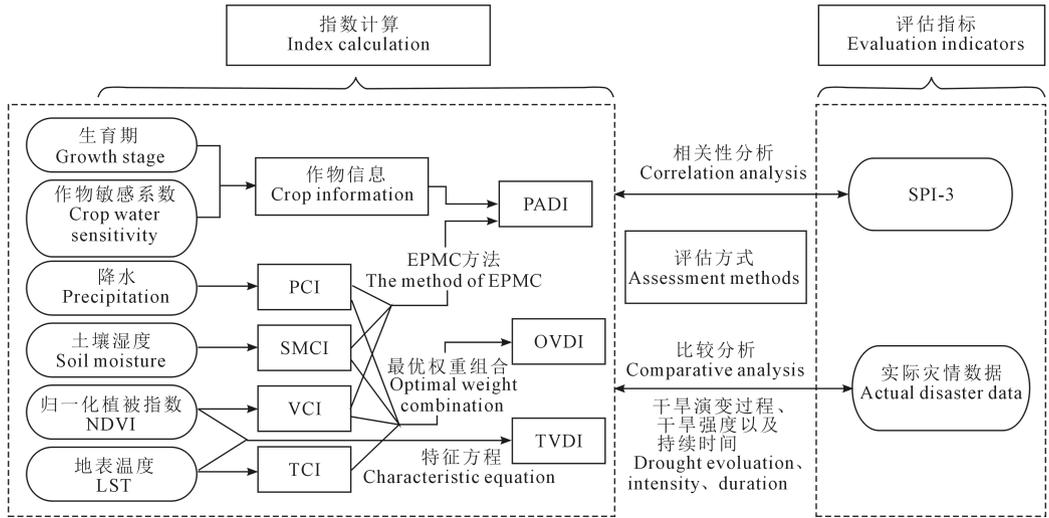


图 2 适用性分析方法流程

Fig.2 Flowchart of applicability analysis method

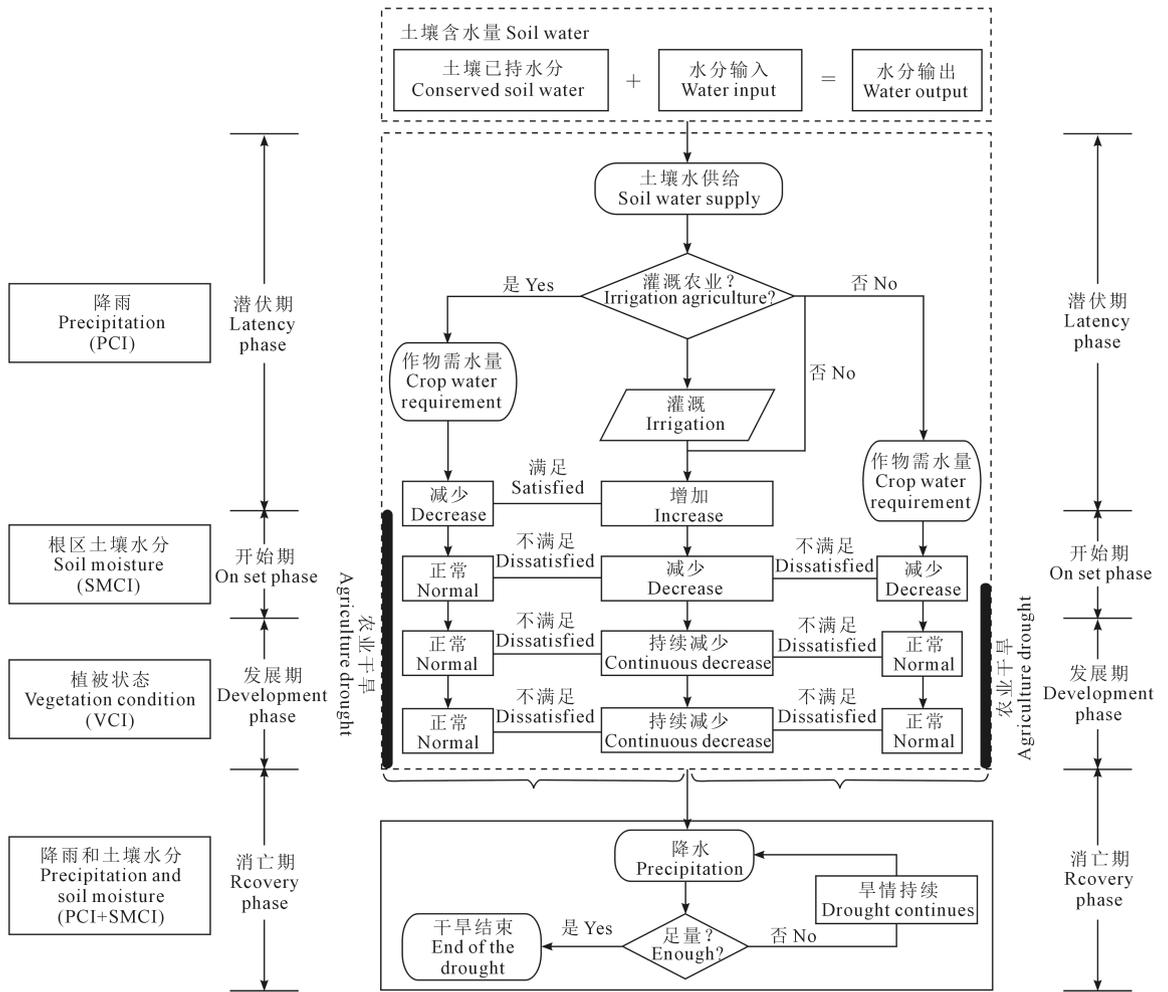


图 3 基于 EPMC 方法的农业干旱演化过程判别

Fig.3 Analysis of agricultural drought evolution process based on EPMC method

TVDI 是一种基于光学与热红外遥感通道数据进行植被覆盖区域表层土壤水分反演的方法^[38], 可用于干旱监测研究^[39]。TVDI 的值越大, 表示土壤湿度越低, 干旱强度越大; 反之亦然。其计算公

式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} \quad (1)$$

$$TVDI = \frac{T_s - (a_1 + b_1 NDVI)}{(a_1 + b_2 NDVI) - (a_1 + b_1 NDVI)} \quad (2)$$

式中, T_s 为特征空间内给定像元的地表温度, $T_{s_{min}}$ 、 $T_{s_{max}}$ 为特定 $NDVI$ 值的最低、最高温度。 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别为 $T_{s_{min}}$ 、 $T_{s_{max}}$ 的线性拟合参数。

OVDI 是对 4 个单一干旱指数的最优权重组合结果^[40], 是一个综合性的干旱指数。OVDI 的值越小, 旱情越严重。其计算公式为:

目标函数:

$$f(x, y) = \max \left(\frac{E[(X - \mu_x) \times (Y - \mu_y)]}{\sigma_x \times \sigma_y} \right) \quad (3)$$

$$X = SPI \quad (4)$$

$$Y = \alpha TCI + \beta PCI + \gamma SMCI + (1 - \alpha - \beta - \gamma) VCI \quad (5)$$

约束条件:

$$\alpha \in (0, 1); \quad \beta \in (0, 1); \quad \gamma \in (0, 1) \quad (6)$$

$$PADI_t = PADI_{t-1} + \frac{\sum_{i=1}^n [(T \cap S_i \cap P_2) \times \lambda_i \times (1 - SMCI_t) + (T \cap S_i \cap P_3) \times (1 - VCI_t)]}{PADI_{max}} \quad (7)$$

$$PADI_{max} = \sum_{i=1}^n [(S_i \cap P_2) \times 1 + (S_i \cap P_3) \times 1] \quad (8)$$

式中, $PADI_t$ 为 t 时刻的 $PADI$ 值, T 为某一评价周期 (本文取 $T = 7$ d)。 S_i 代表不同的作物各生育期, n 为全部生育期的个数。 P_2 、 P_3 为农业干旱的开始期和发展期。 $T \cap S_i \cap P_2$ 代表当前评价周期与作物各生育期 i 并且与 P_2 的相交天数, $T \cap S_i \cap P_3$ 同理。 λ_i 代表在分生育期 i 时作物的水分敏感系数, 即土壤水分胁迫对不同阶段作物的影响程度。 $SMCI_t$ 和 VCI_t 分别代表 $T \cap S_i \cap P_2$ 、 $T \cap S_i \cap P_3$ 时期的 $SMCI$ 、 VCI 值。 $PADI$ 值的不断累加反映了干旱在作物生长过程的累积影响。作物的生长完全处于极端干旱时, 计算得到的 $PADI$ 值将达到最大, 即 $PADI_{max}$ 。

表 2 基于 TVDI、OVDI 的干旱等级划分

Table 2 Classification of drought scales based on TVDI and OVDI

干旱等级 Drought grade	TVDI 取值范围 The range for TVDI	OVDI 取值范围 The range for OVDI	备注 Note
1	<0.2	>0.8	极湿润/轻度干旱 Extreme wet/mild drought
2	0.2~0.4	0.6~0.8	湿润/中度干旱 Wet/moderate drought
3	0.4~0.6	0.4~0.6	正常/重度干旱 Normal/severe drought
4	0.6~0.8	0.2~0.4	干旱/极端干旱 Drought/extreme drought
5	>0.8	<0.2	极干旱/异常干旱 Extreme drought/ exceptional drought

式中, X 为 $SPI - 1$, Y 为 $OVDI$, α 、 β 和 γ 为 TCI 、 PCI 、 $SMCI$ 的优化参数。 $f(x, y)$ 表示 X 、 Y 之间相关性最大的情况, σ_x 、 σ_y 、 μ_x 、 μ_y 为 X 、 Y 的标准偏差和均值, E 为数学期望。在计算 $OVDI$ 时, 需将单一干旱指数计算数据的空间分辨率进行统一, 本文统一采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

$PADI$ 指数是对土壤水分、植被状态以及作物生长阶段的累积受旱程度的综合量化^[41]。其核心思想是: 以一次农业干旱事件发生发展的过程和作物的生长过程相交的时段为核心, 以基于遥感获取的根区土壤水分、植被状态指数和作物生理参数为输入, 计算作物生长期内干旱状态对作物产生的累计影响。因此, $PADI$ 值越大, 代表作物累积受干旱影响越大。首先需根据 $EPMC$ 方法对农业干旱的演变过程进行量化, 再基于此, 综合作物信息来计算 $PADI$ 指数。其计算公式如下:

表 3 基于 $PADI$ 的干旱等级划分

Table 3 Classification of drought scales based on $PADI$

干旱等级 Drought grade	$PADI$ 取值范围 The range for $PADI$	备注 Note
1	0.0~0.2	轻度干旱 Mild drought
2	0.2~0.4	中度干旱 Moderate drought
3	0.4~0.6	重度干旱 Severe drought
4	0.6~0.8	极端干旱 Extreme drought
5	0.8~1.0	异常干旱 Exceptional drought

2 结果与分析

2.1 基于 $EPMC$ 方法的干旱演变过程监测

基于 $EPMC$ 方法对研究区的农业干旱监测结果见图 4~8。由图 4 可知, 2010 年 10 月河南的降水偏低 ($PCI = 0.04$), 农业干旱进入潜伏期, 预示着 2011 年河南冬春连旱的开始。同年 11 月降水偏少导致土壤水分亏缺, 10—11 月 $SMCI$ 的值由 0.70 降至 0.56, 水分亏缺未得到及时改善, 农业干旱进入开始期。11—12 月 VCI 值不断增加, 2011 年 1 月初降为 0.45, 农业干旱进入发展期。2 月初旱区出现有效降水, 旱情得到缓解 ($PCI = 0.69$); 下旬 VCI 的值增加, 农业干旱进入消亡期。总之, 此次干旱从 2010 年 11 月 1 日—2011 年 2 月 15 日主要影响河南冬小麦在苗期~越冬、返青期间的生长。

由图 5 可知, 2012 年 4 月安徽省的降水偏少 ($PCI = 0.30$), 农业干旱进入潜伏期。4—5 月降水

偏少引发土壤水分亏缺,SMCI 的值由 0.65 降至 0.59,农业干旱进入开始期。5—6 月旱情进一步加剧,VCI 的值由 0.77 降至 0.46,农业干旱进入发展期。7 月初旱区出现有效降水(PCI=0.51),土壤水分得到补充(SMCI=0.54),作物受旱状态初步解除,农业干旱进入消亡期。总之,此次干旱从 2012 年 5 月 1 日—7 月 1 日影响了安徽冬小麦在乳熟~成熟、孕穗~扬花期间的生长。

由图 6 可知,2010 年 5 月河北省的降水偏少(PCI=0.52),农业干旱进入潜伏期。6 月降水偏少引发土壤水分亏缺(SMCI=0.23),农业干旱进入开始期。6 月下旬作物受干旱的长时间影响,VCI 的值出现小幅度增加随即又减小,农业干旱进入发展期。8 月旱区出现有效降水(PCI=0.71),土壤水分得到补充(SMCI=0.62),农业干旱进入消亡期。总之,此次干旱从 2010 年 6 月 1 日—8 月 1 日影响了河北夏玉米在拔节、抽穗、成熟期间的生长。

由图 7 可知,2011 年 2—3 月,河南降水偏少,

PCI 的值降为 0.17,农业干旱进入潜伏期。4 月土壤水分出现异常(SMCI=0.32),农业干旱进入开始期。6 月初作物生长受到明显影响(VCI=0.51),农业干旱进入发展期。7—8 月降水逐渐增加(PCI=0.36),土壤水分得到补充(SMCI=0.45),至 2011 年 8 月 11 日,PCI 达到 0.36,SMCI 达到 0.45,此后农业干旱进入消亡期。总之,此次干旱从 2011 年 4 月 1 日—8 月 1 日影响了河南夏玉米在苗期、拔节、抽穗期间的生长。

由图 8 可知,2011 年 1 月湖北降水偏少(PCI=0.14),农业干旱进入潜伏期。3 月持续少雨最终表现为土壤水分降低(SMCI=0.17),农业干旱进入开始期。4 月作物的生长受到显著影响(VCI=0.40),农业干旱进入发展期。6 月旱区虽出现强降水(PCI=0.60),但土壤水分亏缺未得到明显改善(SMCI=0.11)。9 月 1 日 PCI、SMCI 的值分别增至 0.42 和 0.39,农业干旱才进入消亡期。总之,此次干旱从 2011 年 3 月 1 日—9 月 1 日影响了水稻在拔节、返青~分蘖、抽穗期间的生长。

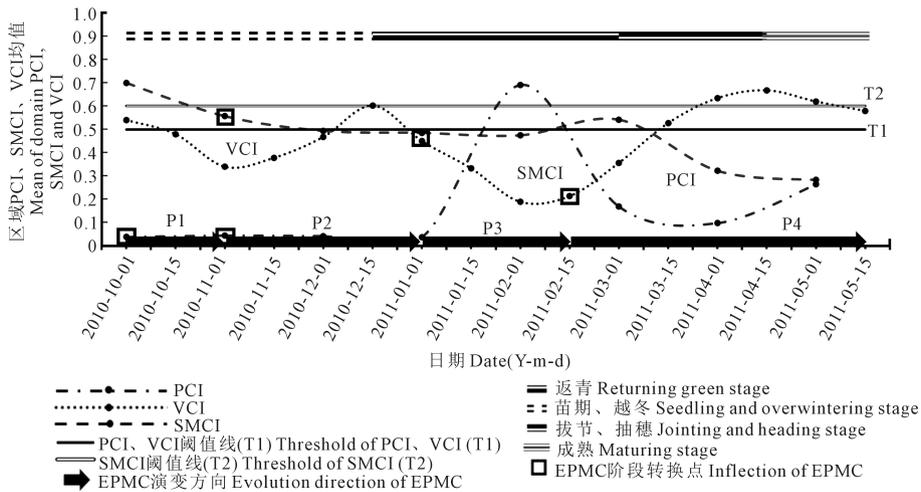


图 4 EPMC 方法对河南 2011 年春冬连旱的监测结果(冬小麦)

Fig.4 Monitoring results of autumn drought in Henan Province in 2011 by EPMC method (winter wheat area)

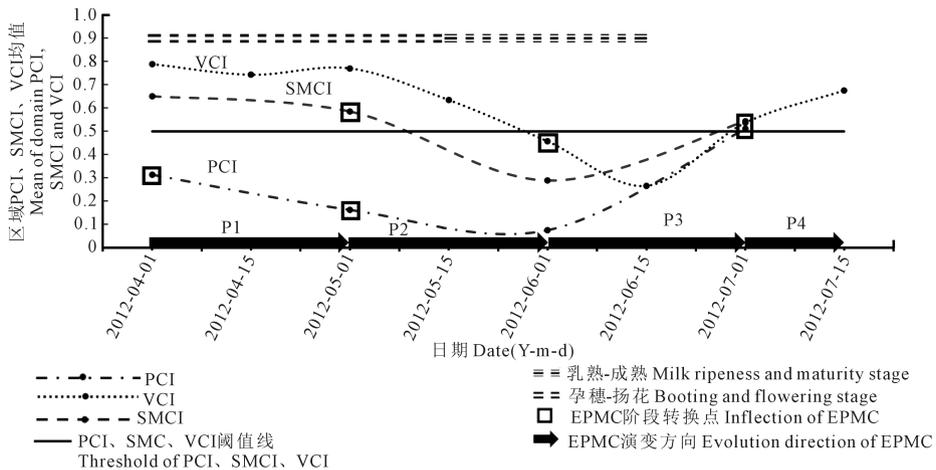


图 5 EPMC 方法对安徽 2012 年干旱的监测结果(冬小麦)

Fig.5 Monitoring results of drought in Anhui Province in 2012 by EPMC method (winter wheat area)

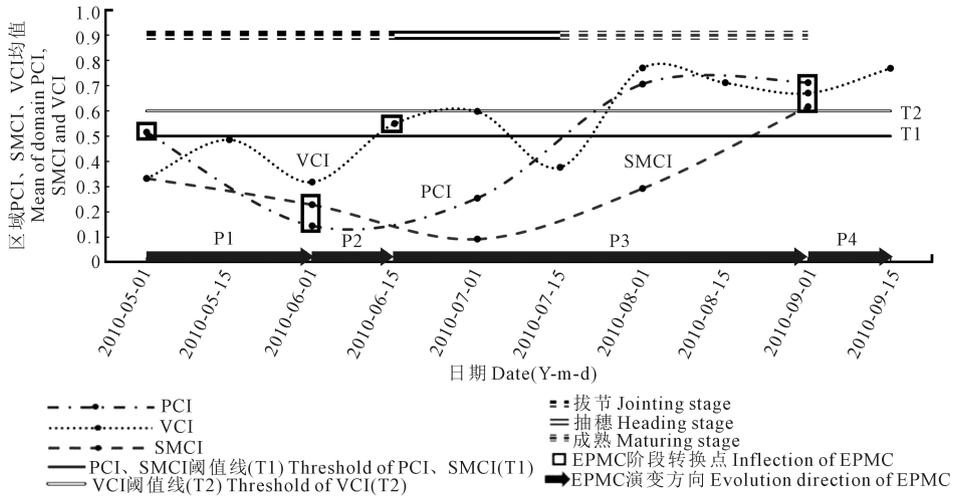


图 6 EPMC 方法对河北 2010 年干旱的监测结果(夏玉米)

Fig.6 Monitoring results of drought in Hebei Province in 2010 by EPMC method (summer corn area)

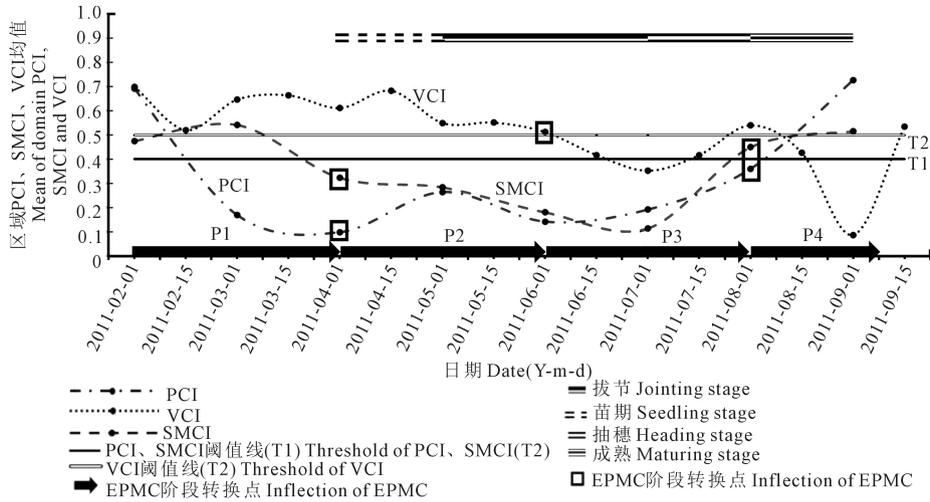


图 7 EPMC 方法对河南 2011 年夏旱的监测结果(夏玉米)

Fig.7 Monitoring results of summer drought in Henan Province in 2011 by EPMC method (summer corn area)

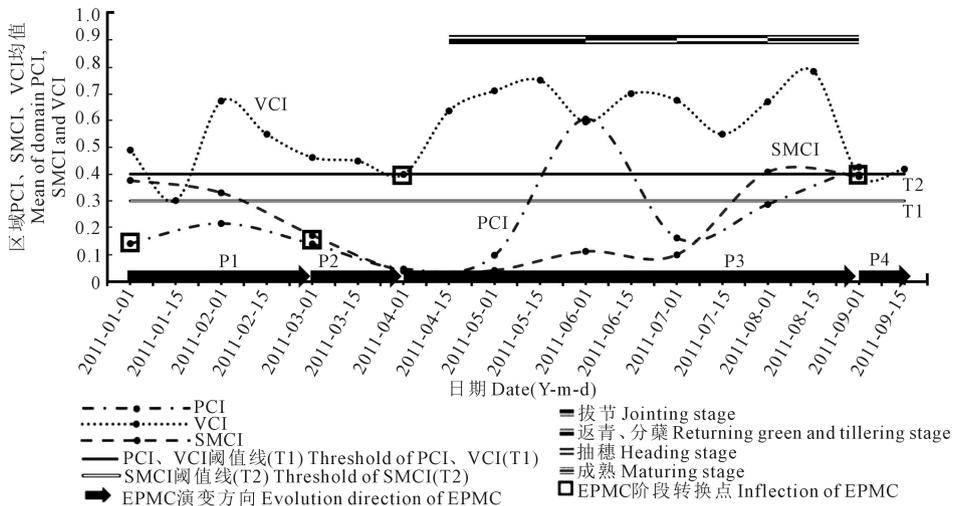


图 8 EPMC 方法对湖北 2011 年干旱的监测结果(水稻区)

Fig.8 Monitoring results of drought in Hubei Province in 2011 by EPMC method (rice area)

2.2 干旱指数与 SPI-3 的相关性分析

以各地市在干旱开始期及发展期的指数均值作为单个样本点,分析了 SPI-3 与各指数的相关性(表 4)。与其余单一干旱指数相比,TCI 与 SPI-3 的相关性偏低($R \leq 0.336$),且在三类主产区均出现了这一现象,表明温度会加速或减缓干旱的发生,但不是关键因素,降水、土壤湿度才是引起三类农业区发生干旱的主要因素。具体而言,降水和土壤湿度的极端变化会引起作物的自主调节来降低自身的实际蒸散发量,尤其是在作物的关键生长期,若无灌溉或突发降水等情况的出现,这一影响将最终表现为作物叶面积的减小,从而导致作物的减产及特定时期的植被覆盖率异常(如非收割期的植被覆盖率极低等),农业干旱发生。此外,与组成它的各单一干旱指数相比,复合干旱指数的监测效果无显著提升(表 4)。下面具体讨论复合干旱指数在不同农业区的应用情况。

冬小麦区研究结果表明,OVDI 与 SPI-3 的线性关系是显著的,而 TVDI 和 PADI 与 SPI-3 的线性关系的显著性存在区域差异,这可能与不同省份在气候条件等方面存在差异有关。檀竹平等^[42]的研究得出,与南方冬小麦区相比,北方冬小麦区具有良好的自然资源条件(如地势平坦、河湖多、土壤肥力好等)和经济条件(机械化水平等),抗旱能力较强。由于 SPI-3 主要反映的是区域降水的变化,忽略了其余气候因素和经济条件的影响,而复合干旱指数是多种环境信息的综合,因此,在非降水主导的农业干旱事件中,SPI-3 可能与复合干旱指数之间存在非线性的关系,这一问题也是作者后续需要深入探讨的内容。总之,在冬小麦区指数 OVDI 对

农业干旱的监测结果更为稳健。其次,在相对可靠的情况下($C \geq 63.0\%$),即播种冬小麦的不同产区在气候条件等方面的差异可忽略不计(下同),TVDI、PADI 对农业干旱的评估更为准确,这一结果在与实际灾情进行对比时得到了验证。

部分夏玉米区(河南)的研究结果表明,PADI 与 SPI-3 的线性关系是显著的($C = 97.75\%$),而 TVDI 和 OVDI 与 SPI-3 的线性关系的显著性存在区域差异,特别是 OVDI。结果表明,PADI 适合大部分夏玉米区的农业干旱监测,张翔等^[41]在美国中西部玉米区的干旱研究中也得到了类似结论。其次,OVDI 在夏玉米区的鲁棒性较差,但在河北的农业干旱监测中表现出绝对优势($R = 0.764, C = 99.9\%$)。而 TVDI 在夏玉米区的农业干旱监测中未体现太大优势。最后,在水稻区的研究表明各类复合干旱指数在水稻区的运用效果均不佳($|R| \leq 0.333$),这可能与水稻生长环境的特殊性有关,即土壤水分可能长期充足。

2.3 三种复合干旱指数监测结果与实际旱情的对比分析

本部分将复合干旱指数的监测结果与 2010—2012 年期间的《中国水旱灾害公报》^[12-13]、干旱评述^[14-19]统计的旱情状态进行了对比。其中 PADI 的监测结果见图 4~图 9,TVDI、OVDI 的监测结果见图 10~图 14。

TVDI 的监测结果表明(图 10),此次干旱主要发生在 2010 年 10 月—2011 年 2 月。2011 年 2 月—4 月,全省各地旱情逐步结束,旱区状况逐步稳定,与实际旱情一致^[12]。其次,指数 OVDI 对干旱的发生时间判断为 2010 年 10 月—2011 年 3 月。2011

表 4 SPI-3 与各指数的相关性分析

Table 4 The correlation analysis results between SPI-3 and each index

干旱事件 Drought event	相关性参数 Correlation parameter	PCI	SMCI	VCI	TCI	PADI	OVDI	TVDI
河南 2011 年春冬连旱(冬小麦) A drought of Henan in the spring and winter of 2011 (winter wheat)	Spearman 相关系数(R) Spearman correlation coefficient	0.385	0.377	0.402	-0.221	-0.213	0.194	-0.333
	置信度(C) Confidence/%	97.25	98.03	68.77	82.77	63.00	85.86	64.01
安徽 2012 年干旱(冬小麦) A drought of Anhui in 2012(winter wheat)	Spearman 相关系数(R) Spearman correlation coefficient	0.777	0.799	0.446	0.360	-0.762	0.598	-0.637
	置信度(C) Confidence/%	100.00	100.00	97.36	84.04	100.00	100.00	99.91
河北 2010 年干旱(夏玉米) A drought of Hebei in 2010(summer corn)	Spearman 相关系数(R) Spearman correlation coefficient	0.782	0.482	0.445	-0.336	-0.564	0.764	-0.600
	置信度(C) Confidence/%	99.99	88.84	82.18	78.14	89.62	99.92	76.04
河南 2011 年夏旱(夏玉米) A drought of Henan in summer of 2011(summer corn)	Spearman 相关系数(R) Spearman correlation coefficient	0.162	0.167	0.684	-0.287	-0.721	-0.022	-0.473
	置信度(C) Confidence/%	69.59	72.66	99.47	75.01	97.75	35.88	89.11
湖北 2011 年干旱(水稻) A drought of Hubei in 2011(rice)	Spearman 相关系数(R) Spearman correlation coefficient	0.010	-0.277	0.620	0.044	-0.233	0.083	-0.333
	置信度(C) Confidence/%	95.08	30.59	99.91	12.70	97.13	93.67	99.95

年 2 月旱情突缓,3 月又再次加重。同年 4 月,干旱逐步结束,该指数对干旱严重程度的评估比实际旱情严重^[12]。EPMC 的监测结果表明(图 4),干旱主要发生在 2010 年 10 月—2011 年 2 月,各阶段的开始时间为 2010 年 10 月(P1)—2010 年 11 月(P2)—2010 年 12 月(P3)—2011 年 2 月中、下旬(P4)。PADI 指数统计的累积干旱严重程度表明(图 7),河南西部地区的累积受旱强度高于东部,与实际旱情一致^[14]。

TVDI 的监测结果表明(图 11),此次干旱主要发生在 2012 年 4—8 月。6 月安徽北部出现重到特旱,7 月有所缓解,直至 8 月才完全解除,与实际旱情基本一致^[15]。其中 OVDI 对干旱发生时间的判断与 TVDI 一致(图 11)。5 月安徽北部降水比常年同期偏少 5~8 成^[15],北部地区率先出现干旱。6 月蔓延至全省(特旱),对干旱严重程度的评估比实际旱情严重^[15]。其次,EPMC 的监测结果表明(图

5),此次干旱主要发生在 2012 年 4—6 月,各阶段的开始时间为 2012 年 4 月(P1)—5 月(P2)—6 月(P3)—7 月(P4)。此外,安徽北部地区的累积受旱程度为异常干旱(图 9),与实际旱情一致^[16]。

TVDI 和 OVDI 的监测结果均表明(图 12),河北 2010 年干旱的发生时段为 2010 年 6—8 月,对干旱发生时段判定与实况一致^[13]。其中,TVDI 的监测结果表明,河北 2010 年夏旱的主旱区集中在西南地区,与实际旱情一致^[13]。OVDI 的监测结果表明,6—7 月河南为极旱,与实际旱情不符(中旱)^[17],表明 OVDI 对干旱等级的评定偏重。EPMC 的监测结果表明(图 6),此次干旱主要发生在 2010 年 5—9 月,各阶段的开始时间为 2010 年 5 月(P1)—6 月(P2)—6 月中、旬(P3)—9 月(P4)。此外,河北西南部的累积受旱程度更重(图 9),该结果与河北西南地区是夏季干旱多发区相符^[17]。

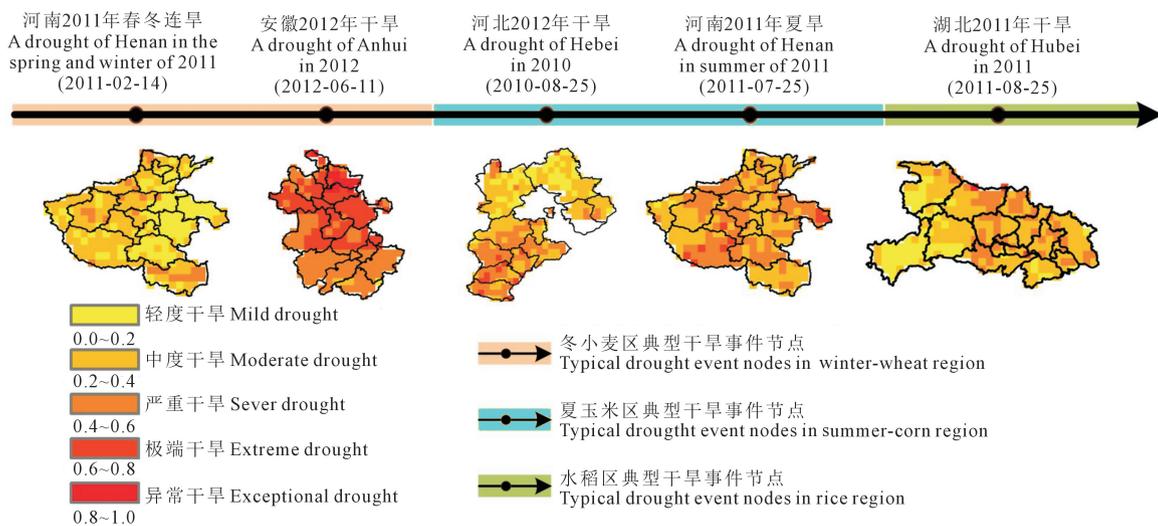
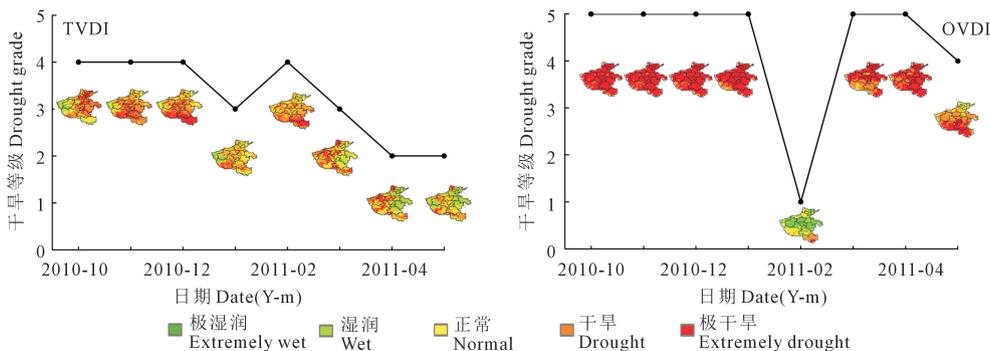


图 9 以 PADI 表征的典型干旱事件
Fig.9 Typical drought event maps shown by PADI



注:干旱等级的取值考虑了各等级面积的权重,下同。

Note: In the division of drought grade, the weight of each grade was considered. The same below.

图 10 以 TVDI、OVDI 表征的河南 2010—2011 年春冬连旱演变过程

Fig.10 The evolution process of spring-winter drought in Henan Province in 2011 is shown by TVDI and OVDI

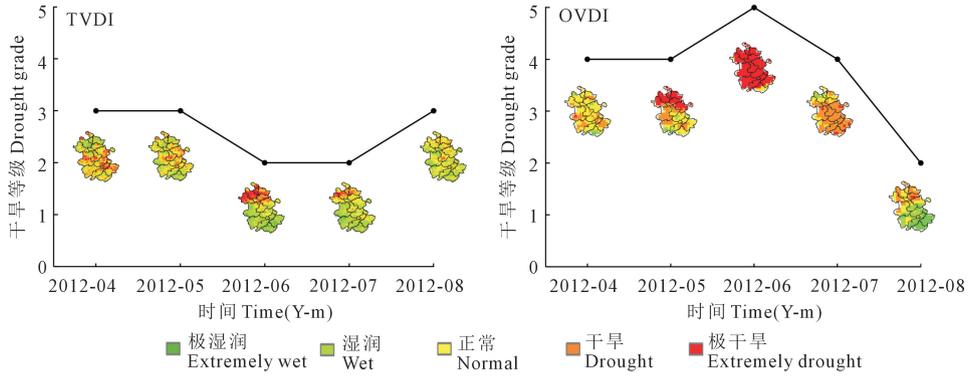


图 11 以 TVDI、OVDI 表征的安徽 2012 年干旱演变过程

Fig.11 The evolution process of drought in Anhui Province in 2012 is shown by TVDI and OVDI

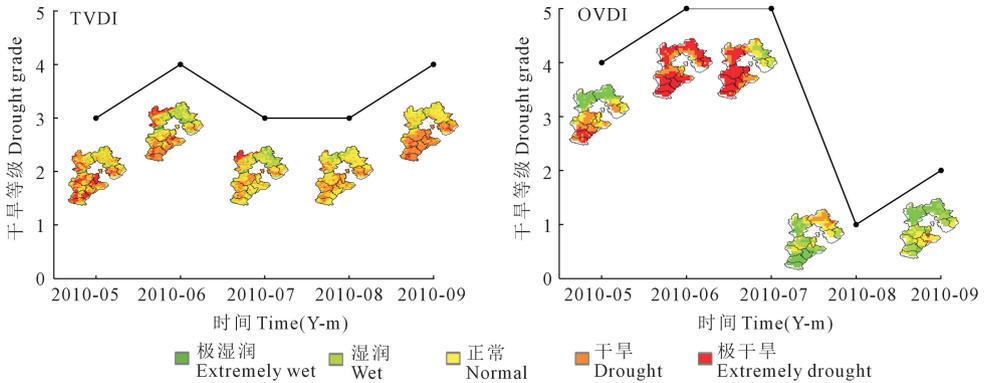


图 12 以 TVDI、OVDI 表征的河北 2010 年干旱演变过程

Fig.12 The evolution process of drought in Hebei Province in 2010 is shown by TVDI and OVDI

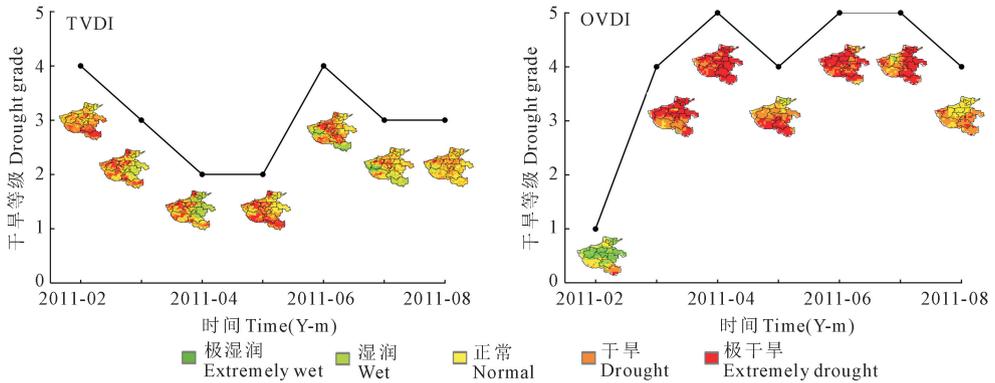


图 13 以 TVDI、OVDI 表征的河南 2011 年夏旱演变过程(夏玉米)

Fig.13 The evolution process of summer drought in Henan Province in 2011 is shown by TVDI and OVDI (summer corn)

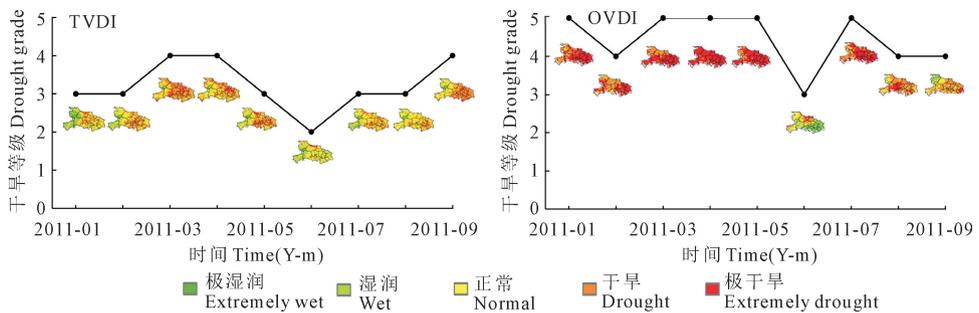


图 14 以 TVDI、OVDI 表征的湖北 2011 年干旱演变过程图(水稻)

Fig.14 The evolution process of drought in Hubei Province in 2011 is shown by TVDI and OVDI (rice)

TVDI 的监测结果表明(图 13),2011 年 2—6 月河南发生了夏旱。其中中部地区的旱情较重,出现了极度干旱,与实际旱情一致^[18]。由 OVDI 的监测结果可知(图 13),在 2011 年 3—8 月河南出现了极度干旱。8 月全省大部分地区的旱情得到缓解,但中部地区的旱情持续。总之,OVDI 对干旱发生时段的判断与实际旱情不太一致^[18],干旱持续时间长于实际旱情,且对干旱等级的判定明显高于实际旱情,从而导致 7 月的旱情缓解未被及时监测。最后,EPMC 的监测结果表明(图 7),此次干旱主要发生在 2011 年 2—8 月,各阶段的开始时间为 2011 年 2 月(P1)—4 月(P2)—6 月(P3)—8 月(P4)。此外,在此次夏旱中,河南全省的干旱累积程度基本一致(图 9),介于中度~严重干旱之间,与实际旱情基本一致^[18]。最后,此次干旱的累积受旱程度比同年发生春冬连旱严重(图 9)。

TVDI 的监测结果表明(图 14),湖北 2011 年的干旱发生时段为 3—5 月。1 月湖北中部的部分地区出现初旱。3 月全省大部出现旱情,中部部分地区出现极旱。4—6 月各地旱情逐步解除,这可能与 6 月的旱涝急转有关,与实际旱情一致^[12]。其次,OVDI 对此次干旱发生时段的判断为 2011 年 3—8 月。3 月湖北省大部分地区出现重旱,各地重旱持续到 6 月才缓解。7—8 月旱情经历了再次发展蔓延及缓解。因此,OVDI 对此次干旱的评估结果(干旱的持续时间、严重程度、波及范围)均比实际旱情严重^[12],其余两个农业区也出现了类似结果。EPMC 的监测结果表明(图 8),湖北 2011 年干旱主要发生在 3—8 月,各阶段的开始时间为 2011 年 1 月(P1)—3 月(P2)—4 月(P3)—9 月(P4)。4—8 月旱情达到高峰,9 月各地旱情开始缓解。监测结果表明,PADI 未能及时监测到此次干旱的缓解,这可能与 6 月 3 日后的旱涝急转有关^[12]。6 月湖北发生了一次大范围降水(图 8),但土壤水分并未及时恢复正常(SMCI<0.4),从而导致当月的旱情缓解未被及时监测。因此,如何提高 EPMC 方法对农业干旱量化结果的准确性是后续需深入展开的工作。另外,全省总体旱情介于中旱~重旱之间(图 9),重旱主要发生在中部部分地区,这可能与中部地区干旱持续时间过长有关。总之,PADI 对干旱发生时段的判断比实际长,但对于累积干旱程度的评估与实际旱情一致^[12]。

3 讨论

本文计算了 3 种复合干旱指数在我国三大农业

主产区的干旱易发区开展了适用性分析研究,定性、定量地分析了不同指数在不同农业区的运用效果,从而对复合干旱指数的选取提出建议。本部分将重点讨论研究结果中一些特殊的现象及情况,对比 3 种复合干旱指数的适用性,并分析其原因。

EPMC 是 PADI 指数干旱监测中的重要组成部分,借助该方法可对农业干旱的演变进行简单量化。其次,该方法在我国三类农业区的表现表明,在对水稻区(湖北)2011 年的干旱进行监测的过程中,该方法未能对旱情缓解的节点进行准确识别,这可能与水稻生长环境的特殊性有关。EPMC 对干旱消亡期的判断的关键是旱区是否出现有效降水(土壤水分恢复正常),而水稻的生长环境长期处于水分充足的情况下,从而导致在水稻区的监测效果并不理想。在其余两种复合干旱指数的监测过程中也有类似情况出现。EPMC 方法如何根据不同农业区的区域特性来自适应地选取判定指标/阈值,也是该方法可改进之处。

为定量评价各指数在三类农业区的适用性,分析了各指数与 SPI-3 的线性相关性,结果表明:(1)与组成各复合干旱指数的单一干旱指数相比,复合干旱指数的提升效果不明显,具体取决于研究区的地理位置。首先,OVDI 在冬小麦区的鲁棒性较好,但不是最佳干旱指数。此外,在冬小麦区 PADI 指数适合安徽的干旱监测,却不是河南的最佳指数,这表明复合干旱指数在种植冬小麦的不同省份的监测效果存在差异。因此,干旱指数的选取除了需考虑主要种植作物外,气候条件、生产水平等也是无法忽略的关键因素。(2)在冬小麦—夏玉米的复合耕作地区(河南),对于发生在不同季节的干旱事件,PADI 指数的运用效果存在明显的差别。从分析结果来看,PADI 指数对河南 2011 年夏旱的监测效果优于同年同地区的春冬连旱,这可能与综合的作物信息有关。在 2010—2011 年河南发生干旱的时段中,冬小麦部分生长期虽受到了干旱的影响,但由于及时的人工干预措施(灌溉),使得冬小麦的生长并未受到显著影响。因此,在利用 PADI 指数进行干旱监测时,选择正确的受灾作物十分关键。(3)在水稻区,复合干旱指数与 SPI-3 呈显著不相关,这可能与水稻生长环境的特殊性以及区域气候特性有关(旱涝频发)。

复合干旱指数监测结果与实际旱情的对比结果表明:(1)对干旱事件关键节点(如高峰期、消亡期)的判定中,指数 TVDI、PADI 在三类主产区的运用效果较好,符合实际旱情。而 OVDI 在水稻区的

运用效果不佳,无法直接反映水稻受环境胁迫状态,这可能与 OVDI 结合了过多的降水信息有关。(2)从对干旱发生的严重程度来看,TVDI 对局部干旱严重程度的量化结果符合实际旱情,而 OVDI 对干旱严重程度的评定结果比实际旱情更严重。其次,PADI 指数是基于 EPMC 方法及作物生长信息来实现对作物累积受旱程度的量化,因此评估较为全面,但对输入信息的要求较高。(3)TVDI、PADI 对三类主产区的干旱演变及干旱严重程度的评估更符合实际旱情,而 OVDI 不适用于水稻区的旱情监测。

4 结 论

通过对研究结果的讨论和分析,得到以下几点结论和建议:

1)PADI 指数的计算模型较为全面,可在一定程度上反映作物的累积受旱情况,但对输入信息的要求较高。综合来看,由于我国不同农业主产区的作物种植情况存在较大差异,且作物信息库不够全面,故不建议将该指数用于中国农业主产区的大范围干旱监测。

2)OVDI 指数从纯数学的角度,对干旱形成过程中涉及的主要干旱信息进行了最优组合,输入信息易于获取,且在与 SPI-3 的定量分析结果中效果较好。但对实际旱情的评估效果不够稳定和准确,对干旱严重程度的判断偏高。

3)TVDI 计算简单,输入信息易获取,可在一定程度上反映实际旱情。与 PADI 指数相比,TVDI 对旱情的评估不够全面。因此,对干旱评估的要求较为简单时(干旱发生时间、严重程度),建议使用指数 TVDI 进行大范围的干旱监测。

致谢:感谢中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)、美国国家航空航天局数据和信息中心(<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)等提供的数据。

参 考 文 献:

[1] 黄荣辉,周连童.我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究[J].自然灾害学报,2002,11(1):1-9.

[2] 黄荣辉,刘永,王林,等.2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学,2012,36(3):443-457.

[3] 段莹.三种干旱指标在江淮及长江中下游地区的适应性研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.

[4] 贺音,王钊,贺皓.三种不同干旱动态监测指数在陕西省的适用性研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):242-249+274.

[5] 聂云,周继先,罗俊,等多种干旱指数在三穗县干旱分析中的比较[J].贵州气象,2016,40(4):23-28.

[6] 杨庆,李明星,郑子彦,等.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,2017,47(3):337-353.

[7] 冯怡,薛联青,张洛晨.三种气象干旱指数在塔里木河流域应用的对比分析[J].水电能源科学,2018,36(9):23-26+142.

[8] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,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+211.

[9] 刘英,鲁杨,李遥,等.关中平原干旱遥感监测指数对比和应用研究[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):201-207.

[10] 吴黎.基于温度植被干旱指数的黑龙江省旱情动态研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):276-282.

[11] 李红梅,王钊,高茂盛. 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,2015,33(3):260-266.

[12] 国家防汛抗旱总指挥部.中国水旱灾害公报(2011)[M].北京:中国水利水电出版社,2012.

[13] 国家防汛抗旱总指挥部.中国水旱灾害公报(2010)[M].北京:中国水利水电出版社,2011.

[14] 段海霞,王素萍,冯建英.2011 年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2012,30(1):136-147.

[15] 王素萍,段海霞,冯建英.2012 年春季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2012,30(2):298-304.

[16] 段海霞,王素萍,冯建英.2012 年夏季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2012,30(3):482-487.

[17] 王素萍,段海霞,冯建英.2010 年夏季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2010,28(3):367-373.

[18] 段海霞,王素萍,冯建英.2011 年夏季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2011,29(3):392-400.

[19] 王素萍,段海霞,冯建英.2011 年春季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2011,29(2):261-268.

[20] 康蕾,张红旗.我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J].中国生态农业学报,2014,22(8):928-937.

[21] 王文,段莹.2011 年长江中下游冬春连旱土壤的湿度变化[J].干旱气象,2012,30(3):305-314.

[22] 彭亮,蔡娟.长江中下游地区季节性连旱的概率及特征分析[J].南方农业,2018,12(26):160-161.

[23] 刘笑,何学敏,游松财.1986-2015 年华北平原农业气象灾害的变化特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):257-263.

[24] 文彦君,方修琦,李屹凯,等.华北地区 1876-1879 年旱灾研究文献综述[J].灾害学,2019,34(1):172-180.

[25] 全国农业区划委员会《中国综合农业区划》编写组.中国综合农业区划[M].北京:农业出版社,1981.

[26] 朴梅花.基于 TRMM 数据的吉林省旱涝时空特征分析[D].长春:东北师范大学,2014.

[27] Spennemann P C, Rivera J A, Saulo A C, et al. A comparison of GLDAS soil moisture anomalies against standardized precipitation index and multi-satellite estimations over south america [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1):158-171.

[28] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(80):429-438.

[29] 邓明珊,孟宪红,马英赛,等.基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J].干旱气象,2018,36(4):595-602.

[30] Quiring S M, Ganesh S. Evaluating the utility of the vegetation condition index (VCI) for monitoring meteorological drought in texas [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(3):330-339.