doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.038

基于 TVDI 结合 ARIMA 的河南省土壤旱情监测方法

苏莹莹[1]　卢小平[1]　肖　锋[2]　张向军[3]　李国清[3]　余海坤[3]　王枭轩[1]

(1.河南理工大学自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室，焦作 454003；
2.河南省测绘地理信息技术中心，郑州 450003；3.河南省遥感院，郑州 450003)

摘要：针对河南省土壤旱情灾害频发，地面土壤墒情监测站监测面积有限等问题，将气象干旱指数与遥感监测模型相结合对土壤旱情开展预测研究。以 2012—2021 年间气象资料计算的标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index，SPEI)为依据，对作物缺水指数(Crop water scarcity index，CWSI)、植被供水指数(Vegetation supply water index，VSWI)、温度植被干旱指数(Temperature vegetation drought index，TVDI)和条件植被温度指数(Vegetation temperature condition index，VTCI)4 个指数的干旱监测效果进行适用性评价，然后分析 2012—2021 年间河南省的 TVDI 空间分布规律和变化趋势，最后用 ARIMA(Autoregressive integrated moving average)模型预测 2022 年土壤旱情。结果表明，CWSI、VSWI、VTCI 研究结果不符合实际土壤墒情结果，TVDI 值与实地历史记录的土壤墒情变化趋势整体一致，总体呈现出河南省西北部、中部、北部随时间变化而呈增大趋势，且 ARIMA 模型预测的 2022 年土壤墒情结果效果良好，为河南省的农业生产精准管理提供参考依据。

关键词：土壤旱情；温度植被干旱指数；标准化降水蒸散指数；ARIMA 模型

中图分类号：TP79　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)11-0391-11　　**OSID**：

Soil Drought Monitoring with TVDI and ARIMA in Henan Province

SU Yingying[1]　LU Xiaoping[1]　XIAO Feng[2]　ZHANG Xiangjun[3]　LI Guoqing[3]　YU Haikun[3]　WANG Xiaoxuan[1]

(1. *Key Laboratory of Spatiotemporal Information and Ecological Restoration of Mines*, *MNR*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454003, *China*
2. *Henan Serveying and Mapping Geographic Information Technology Center*, *Zhengzhou* 450003, *China*
3. *Henan Institute of Remote Sensing*, *Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: Aim at the frequent soil drought disasters and the limited monitoring area of ground soil moisture monitoring stations in Henan Province, the meteorological drought index and remote sensing monitoring model were combined to predict soil drought. It was based on the standardized precipitation evapotranspiration index calculated by meteorological data from 2012 to 2021, and the drought monitoring effects of four indices of commonly used remote sensing models, namely crop water scarcity index, vegetation supply water index, temperature vegetation drought index and vegetation temperature condition index were evaluated. Taking 2019 as a typical drought year, the differences among the four indices were compared, and the spatial distribution and change trend of TVDI in Henan Province from 2012 to 2021 were analyzed. Finally, ARIMA model was used to predict soil drought in 2022. The results showed that the research results of CWSI, VSWI and VTCI were different from the actual results. Only the TVDI value was consistent with the change trend of soil moisture recorded in the field, and showed an increasing trend with time in the northwest, central and northern parts of Henan Province. The spatial evolution results showed that the coverage pixels of arid areas in 2019 accounted for 76%, which accounted for the largest proportion in this decade, and the soil moisture predicted by the ARIMA model in 2022 was consistent with the reality. On the basis of soil drought prediction, it can provide reference for the precise management of agricultural production in Henan Province.

Key words: soil drought; temperature vegetation drought index (TVDI); standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); autoregressive moving average model (ARIMA)

收稿日期：2023-12-25　修回日期：2024-03-04

基金项目：河南省自然资源科研项目(2021-11)

作者简介：苏莹莹(1997—)，女，硕士生，主要从事摄影测量与遥感研究，E-mail：1924551296@qq.com

通信作者：李国清(1977—)，男，正高级工程师，博士生导师，主要从事摄影测量与遥感研究，E-mail：jx_lgq@163.com

0 引言

土壤旱情的发生具有涉及范围广、持续时间长和频率高等特点,且影响土壤旱情的因素较多,因此不同土壤旱情监测模型的地域适用性及参数的选择难以确定[1]。河南省是我国重要的粮食主产区,受气候条件、地理位置以及人类自然活动等因素影响,干旱灾害频发所导致的土壤旱情已成为影响农业发展的重要因素。因此,利用遥感技术开展大范围土壤旱情监测可以实现宏观动态监测,将会减轻农业干旱灾害的影响,对保障粮食安全具有重要意义[2]。

卫星遥感技术可以实现高效率大范围监测,单一的气象数据监测土壤旱情存在缺陷,将卫星遥感数据与气象数据结合有助于定量反演地表参数。常用的气象监测指数主要有帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)等[3-9]。地表温度和植被指数与农作物的生理、生长密切相关,目前已有多种基于地表温度和植被指数的旱情监测模型[10-11]。影响农业干旱的因素有植被、降水、地表温度及土壤水分,因此可用蒸散量表征土壤、大气及植被之间能量和水分过程。JACKSON 等[12]提出了作物缺水指数(CWSI),并对该指数的有效性和局限性进行了分析和讨论。CARLSON 等[13]提出使用植被供水指数(VSWI)来评价农业干旱,植被供水指数综合了植被指数和表面温度信息,利用归一化植被指数(NDVI)和热红外温度计算地表土壤含水率;但是 VSWI 指数没有统一标准的干旱阈值划分,需要根据研究区的像元分布统计结果划分 VSWI 的干旱等级。温度植被干旱指数(TVDI)是利用遥感进行监测的常用方法,可实现快速和大面积干旱监测,且适用于监测不同的下垫面,具有参数少、效果好、计算简便等优点[14];DU 等[15]在计算 TVDI 时,存在遥感影像像素不足以来识别不同植被的干湿极值的问题,所以需要通过去除 NDVI 在 0 ~ 0.1 之间的“尾向下”值来优化干边,利用统计分析方法剔除异常值而改变湿边。王鹏新等[16]提出条件植被温度指数(VTCI)的干旱监测指数,弥补了单一遥感指数的缺陷,提高了干旱监测精度,并在陕西关中平原地区冬小麦生长发育干旱监测中取得了良好成效;但是该指数通常用于监测特定地区的土壤旱情情况。ARIMA 模型是一种比较常用的时间序列预测模型,根据时序数据的统计规律对未来变化趋势进行预测,在土壤旱情预测方面具有较好的效果[17],李俐等[18]基于条件植被温度指数对夏玉米生长季干旱进行预测研究,验证出 ARIMA 模型对干旱预测精度稳定性良好。

本文以河南省为例,利用不同干旱监测模型进行土壤旱情的适应性分析及未来预测,基于气象数据和遥感数据更全面地对河南省土壤旱情进行研究,通过 SPEI、CWSI、VSWI、TVDI 和 VTCI 对比研究土壤墒情监测方法,进行时空演变规律分析[19-20],将 ARIMA 预测模型引入到复杂的土壤旱情预测中。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据来源

河南省位于我国中东部、黄河中下游,界于 31°23′ ~ 36°22′N,110°21′ ~ 116°39′E 之间,平原和盆地、山地、丘陵的总面积占比依次为 55.7%、26.6%、17.7%,大部分地区处于暖温带,南部跨亚热带,属于北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候区,同时还具有自东向西由平原向丘陵山地气候过渡的特点,具有雨热同期和气象灾害频发的特点,容易产生干旱,对农作物生长影响较大。

本文以 MODIS 数据、土壤墒情历史记录数据为基础,在模型验证前提下,对研究区监测土壤墒情的适宜指数和干旱时空格局进行分析。研究过程主要分为数据准备、数据预处理、适用性评价、土壤旱情监测结果分析与空间趋势演变结果和土壤旱情预测 5 部分。研究数据主要有气象数据、遥感数据和河南省水利局公布的土壤墒情数据,气象数据为全省 18 个地市气象站点(图 1)逐日的降水量(mm)、逐日最高气温(℃)、逐日最低气温(℃)以及经纬度和场高(m)数据;遥感数据来源于 NASA 的 2012—

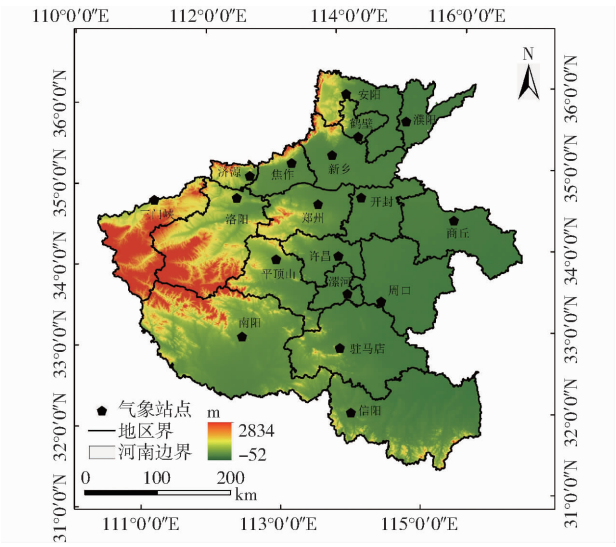

图 1 河南省气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Henan Province

2021 年地表温度数据 MOD11A2（http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/），该数据的时空分辨率分别为 8 d、1 km，将相邻 2 期取平均值，时间分辨率处理为 16 d；归一化植被指数数据 MOD13A3 时空分辨率分别为 30 d、1 km；蒸散发数据 MOD16A2 时空分辨率为 8 d、500 m；河南省水利局土壤墒情数据为每月的土壤墒情发生等级及发生区域。然后将 HDF 格式转换为 Geo-Tiff 格式，正弦投影转为 WGS1984/Geographic 地理坐标系，并进行镶嵌和裁剪，裁剪获得研究区地表温度（Land surface temperature，LST）、归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）、实际蒸散量（Evapotranspiration，ET）和潜在蒸散量（Potential evapotranspiration，PET）数据集。

1.2　研究方法

在 SPEI 评价的基础上，运用 4 种不同的干旱指数对河南省土壤旱情做适用性评价，并利用 ARIMA 预测模型科学预测。

1.2.1　标准化降水蒸散指数（SPEI）

SPEI 是通过计算降水量与潜在蒸散量之间的差值，引入概率模型求得的指数。首先利用 THORNTHWAITE[21] 方法计算获得 PET，结果服从 Log-logistic 概率分布，最后对其进行正态标准化处理计算得到累计概率。

$$SPEI = \begin{cases} w - \dfrac{c_0 - c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} & (P \leqslant 0.5) \\ -\left(w - \dfrac{c_0 - c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right) & (P > 0.5) \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$w = \sqrt{-2\ln(1-P)} \tag{2}$$

式中　P——累计概率加权矩

$SPEI$——标准化降水蒸散指数

w——概率加权矩

$c_0 = 2.515\,517$，$c_1 = 0.802\,853$，$c_2 = 0.010\,328$，$d_1 = 1.432\,788$，$d_2 = 0.189\,269$，$d_3 = 0.001\,308$。

SPEI 具有 1 个月、3 个月、6 个月等多时间尺度，1 个月尺度的 SPEI 值（SPEI－1）波动幅度最大，其次为 3 个月（SPEI－3）、6 个月（SPEI－6），波动幅度最小的是 12 个月的尺度（SPEI－12）[22]。SPEI 在 1 个月时间尺度下可以显著反映农业干旱的严重程度和持续时间，因此选择 1 个月时间尺度的 SPEI 作为因变量，计算出河南省 18 个气象站点的降水和气温数据得到 SPEI－1 的值。按照国家标准划分的 SPEI 干旱等级如表 1 所示[23]。

表 1　基于不同指数的干旱等级划分

Tab. 1　Classification of drought based on different indices

等级	干旱等级	SPEI 值	CWSI 值	VSWI 值	TVDI 值	VTCI 值
1	不干旱	＞－0.5	[0,0.60)	[0.31,1.00)	[0,0.46)	[1.00,0.55)
2	轻度干旱	[－1.0，－0.5)	[0.60,0.70)	[0.25,0.31)	[0.46,0.57)	[0.46,0.55)
3	中度干旱	[－1.5，－1.0)	[0.70,0.80)	[0.18,0.25)	[0.57,0.76)	[0.37,0.46)
4	重度干旱	[－2.0，－1.5)	[0.80,0.90)	[0.12,0.18)	[0.76,0.86)	[0.28,0.37)
5	极端干旱	＜－2.0	[0.90,1.00)	[0,0.12)	[0.86,1.00)	[0,0.28)

1.2.2　作物缺水指数（CWSI）

作物缺水指数是根据地表能量平衡原理，充分考虑下垫面植被覆盖状况和地面风速、水汽压、日照时数、温度等气象要素，JACKSON 等[12] 将 CWSI 定义为

$$CWSI = 1 - ET/PET \tag{3}$$

CWSI 在 0～1 之间，值越大表示区域越干旱缺水，反之越湿润。依据农业干旱等级标准以及相关参考文献，CWSI 的干旱等级的划分如表 1 所示[24]。

1.2.3　植被供水指数（VSWI）

植被生长的土壤水分充沛时，植被生长正常；植被生长的土壤水分缺乏时，植被的生长受到影响，为了降低作物水分蒸腾减少，部分叶面气孔会呈关闭状态，致使植被冠层温度增高。CARLSON 等[13] 将 VSWI 其定义为

$$VSWI = NDVI/T_c \tag{4}$$

式中　T_c——植被冠层温度

由于 T_c 很难获取，所以用 LST 代替 T_c。VSWI 的值处于 0～1 之间，值越小表示对应区域干旱越严重，反之表示干旱程度越轻。依据像元值的统计分布，计算得到 VSWI 的干旱等级如表 1 所示。

1.2.4　温度植被干旱指数（TVDI）

使用植被指数或地表温度其中一种进行干旱监测会影响监测结果的准确性，而 LST 与 NDVI 之间具有明确的负相关关系，两者的结合可以更好地表现出植被生长状况与土壤湿度分布信息，从而提高旱情监测的准确性[25-26]。当研究区植被覆盖度与土壤湿度变化范围大时，LST 与 NDVI 的散点图为三角形分布，在 LST－NDVI 的特征空间有很多等值线，由此提出了 TVDI[27]，其定义为

$$TVDI = \frac{LST - LST_{NDVI,\min}}{LST_{NDVI,\max} - LST_{NDVI,\min}} \tag{5}$$

其中
$$LST_{NDVI,\max} = a_1 + b_1 NDVI \tag{6}$$
$$LST_{NDVI,\min} = a_2 + b_2 NDVI \tag{7}$$

式中 $LST_{NDVI,\min}$——最低地表温度,℃

$LST_{NDVI,\max}$——相同 NDVI 值条件下最高地表温度,℃

a_1、b_1、a_2、b_2——湿边和干边拟合方程系数

式(6)对应的是 LST - NDVI 特征空间中的干边,式(7)对应的是湿边。TVDI 的值介于 0 ~ 1 之间,LST 离湿边越近,TVDI 的值就越小,表示该地区越湿润;相反,LST 越接近于干边,TVDI 的值就越大,说明该地区越干旱缺水。依据文献[28]确定 TVDI 划分标准如表 1 所示。

1.2.5 条件植被温度指数(VTCI)

VTCI 是在 NDVI 和 LST 的散点图(特征空间)的基础上提出的,是在假设研究区域内土壤表层含水量应从萎蔫含水量到田间持水量的基础上进行干旱监测,VTCI 研究了 NDVI 变化的条件下 LST 之间变化,王鹏新等[27]基于 LST - NDVI 特征空间,提出了条件植被温度指数(VTCI)的干旱监测模型。VTCI 定义为

$$VTCI = \frac{LST'_{NDVI,\max} - LST'}{LST'_{NDVI,\max} - LST'_{NDVI,\min}} \tag{8}$$

式中 $LST'_{NDVI,\min}$——NDVI 值等于某一特定值时的地表温度的最小值,℃

$LST'_{NDVI,\max}$——NDVI 值等于某一特定值时的地表温度的最大值,℃

VTCI 的取值范围为 0 ~ 1,VTCI 的值越小,干旱程度越严重;反之,表示干旱程度较轻或者是无干旱发生。根据气象干旱指数的等级划分标准,结合河南省实际土壤墒情将 VTCI 分级,如表 1 所示[29]。

1.2.6 slope 趋势分析方法

河南省 TVDI 年际趋势分析采用一元线性回归分析法,趋势线斜率($TVDI_{slope}$)表示 TVDI 的年际变化率,得到研究区内每个像元的变化趋势,进而反映整个研究区内 TVDI 的时空变化规律[30],计算公式为

$$TVDI_{slope} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} iTVDI_i - \sum_{i=1}^{n} TVDI_i \sum_{i=1}^{n} i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{9}$$

式中 $TVDI_{slope}$——2012—2021 年研究区河南省内各像元回归方程的趋势斜率

n——时序数据的研究时间,a

$TVDI_i$——第 i 年的 TVDI 值

当 $TVDI_{slope}$ 大于 0 时,表示 TVDI 随时间变化呈增大趋势;$TVDI_{slope}$ 小于 0 则表示呈减少趋势。

1.2.7 ARIMA 模型

ARIMA(p, d, q)预测模型是对非平稳时间序列进行差分后的平稳序列,利用自回归移动平均模型 ARMA(p, q)对经过差分处理的平稳时间序列进行未来变化的预测,其中 p 是自回归阶数,d 是差分阶数,q 是移动平均阶数。ARIMA 模型预测的基本步骤为[31]:

(1)对原始时序数据进行平稳性检验及平稳化处理。先检验 TVDI 的时间序列的平稳性,若为含有趋势性的非平稳时间序列,则对其进行 d 阶差分处理将其转换为平稳序列。

(2)建立时间序列模型。对于处理后的平稳化时间序列,需要对自回归阶数 p 和移动平均阶数 q 进行确定(表 2),即可实现时间序列模型的建立,也称为模型定阶。AR 表示自回归部分,I 表示差分部分,MA 表示移动平均部分,ARMA 为一种线性预测模型,由自回归部分和移动平均部分组成。通过自相关函数(Autocorrelation function,ACF)和偏自相关函数(Partial autocorrelation function,PACF)的拖尾或截尾特征建立对应的模型,确定 p 和 q 的取值范围。根据 AIC 准则(Akaike information criterion,AIC)对 p 和 q 进行优选以保障模型的预测精度,AIC 函数达到最小的模型即为最优模型。

表 2 ARIMA 模型定阶条件

Tab. 2 ARMA model fixed-order condition

模型	ACF	PACF
AR(p)	拖尾	p 阶截尾
MA(q)	q 阶截尾	拖尾
ARMA(p,q)	q 阶拖尾	p 阶拖尾

(3)参数估计。模型定阶后,使用极大似然估计法对选定模型中的参数进行估计,并检验参数显著性。

(4)假设检验。根据残差序列是否呈现白噪声特性,检验模型是否充分提取序列信息。采用正态分布检验法,若残差的自相关函数和偏自相关函数值均落在 95% 的置信区间内,则残差序列为白噪声序列,表明拟合模型有效提取了序列信息。否则,需要重新拟合模型。

(5)模型预测。确定最优预测模型,利用 TVDI 不同旱情等级的时间序列运行此最优模型,实现 2022 年 TVDI 不同旱情等级的覆盖像元占比预测。

2 实验与结果分析

通过实验计算河南省 2012—2021 年间 SPEI,

然后将 2019 年作为典型干旱年对 4 个遥感干旱指数监测结果做适用性评价，再根据 TVDI 监测结果分析 10 年间空间变化特征，最后使用 ARIMA 模型预测 2022 年土壤旱情的分布。

2.1　标准化降水蒸散指数(SPEI)计算

SPEI 具有多时间尺度的特征，选择 1 个月时间尺度的 SPEI 值可以更好地反映农业干旱的严重程度与持续时间。基于标准化降水蒸散指数干旱等级划分标准得出的 2012—2021 年之间的年际变化特征如图 2 所示，河南省均匀分布的 18 个站点的土壤旱情如图 3 所示。

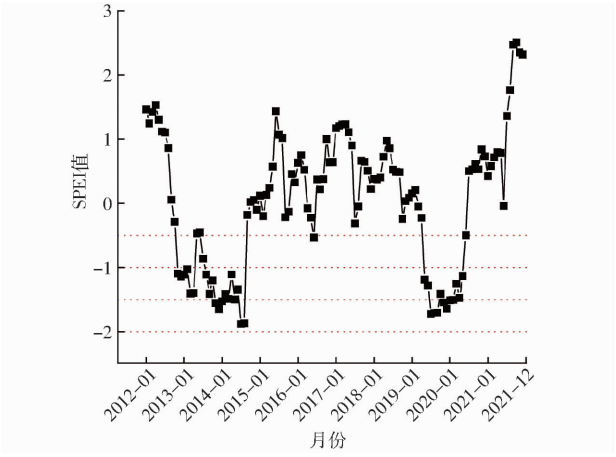

图 2　标准化降水蒸散指数(SPEI)变化曲线

Fig. 2　Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)

从图 2 可知，发生干旱的时间主要集中在 2013 年、2014 年上半年、2019 年，由于 2019 年发生的干旱严重等级程度相对较大，中等干旱发生最为频繁，

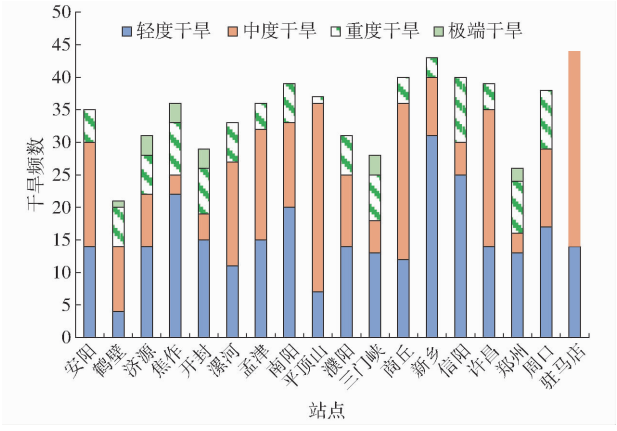

图 3　河南省不同等级干旱频率分布特征

Fig. 3　Characteristics of frequency distribution of different classes of drought in Henan Province

因此选取典型干旱年 2019 年，并选择合适的指数对河南省干旱空间分布及变化特征进行分析。

2.2　遥感干旱指数的适应性评价

为研究 4 个遥感干旱指数对土壤旱情监测的差异，对 2019 年 4 个遥感干旱指数进行土壤旱情监测适用性评价，结果得出 TVDI 的监测结果与实际土壤墒情最符合。

2.2.1　2019 年河南省作物缺水指数分析

作物缺水指数(CWSI)以能量平衡为基础，并且与土壤含水率的相关性较为显著，根据 CWSI 干旱监测模型，得到河南省 2019 年干旱空间分布如图 4 所示。

2.2.2　2019 年河南省植被供水指数分析

植被供水指数(VSWI)将作物冠层表面温度和

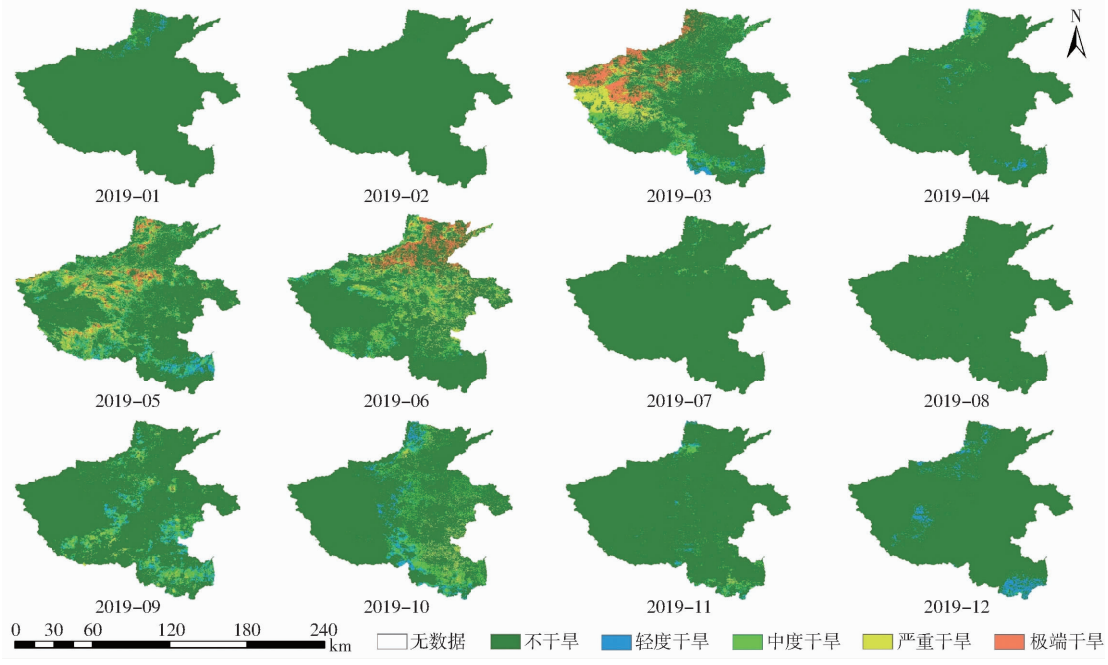

图 4　2019 年河南省作物缺水指数(CWSI)空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of crop water scarcity index (CWSI) in Henan Province in 2019

植被指数作为因子,经计算处理反映作物对水分胁迫的抵抗力和干旱特征之间的不同,图 5 为植被供水指数法监测空间分布。

2.2.3 2019 年河南省温度植被干旱指数分析

温度植被干旱指数(TVDI)将植被指数与地表温度结合,计算出干湿边拟合结果,可有效模拟土壤水分,及时诊断土壤缺水状况,干旱等级空间分布图如图 6 所示,时间上,TVDI 监测结果显示河南省大面积发生干旱等级较高的土壤旱情主要在春季和冬季,夏季干旱等级表现为不干旱的面积占比较大;空间上,春季主要分布在中部和北部地区,冬季主要分布在南部地区。

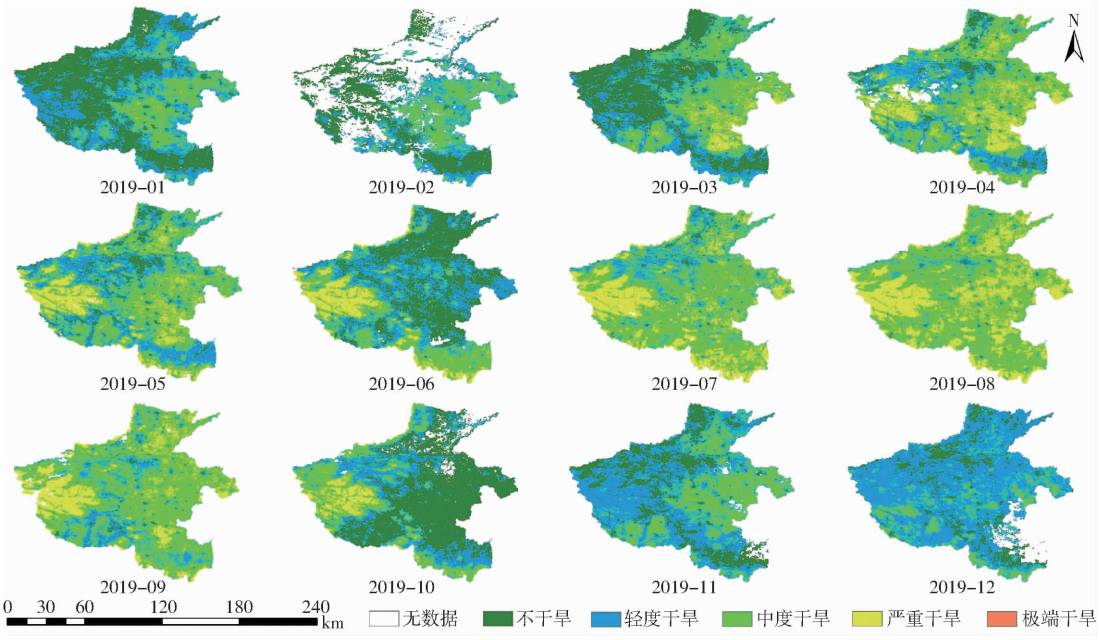

图 5 2019 年河南省植被供水指数(VSWI)空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of vegetation supply water index (VSWI) in Henan Province in 2019

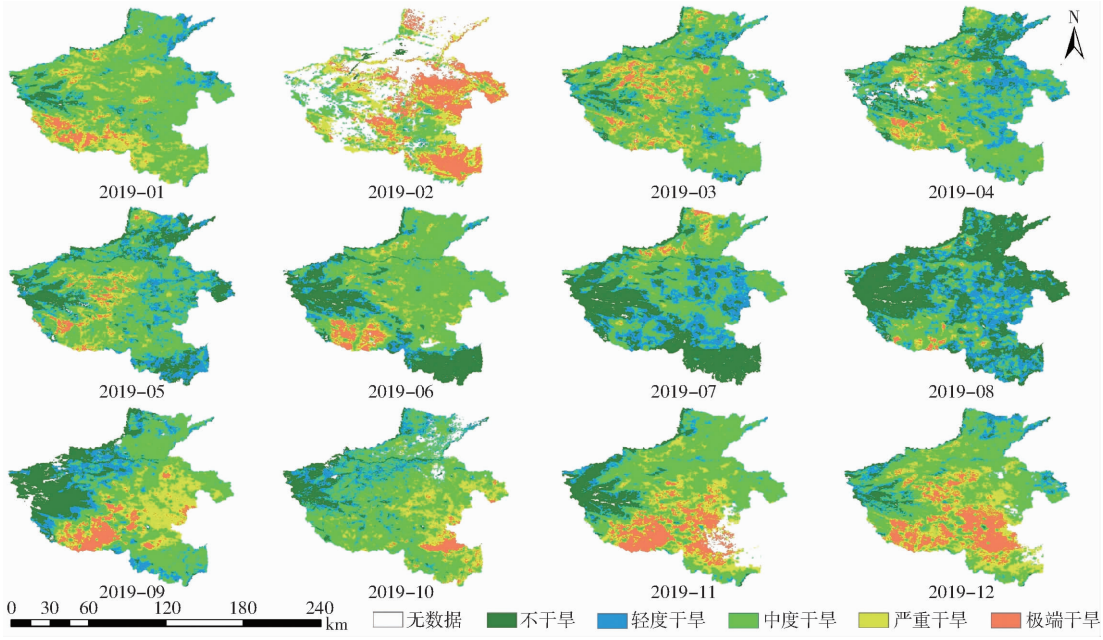

图 6 2019 年河南省温度植被干旱指数(TVDI)空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of temperature vegetation drought index (TVDI) in Henan Province in 2019

2.2.4 2019 年河南省条件植被温度指数分析

条件植被温度指数(VTCI)是基于遥感反演的 LST 和 NDVI 特征空间呈三角形区域分布的特点提出的,主要用于监测作物水分胁迫状况。2019 年河南省 VTCI 监测结果如图 7 所示,时间上,VTCI 监测结果显示发生土壤旱情等级较高的时间主要在春季、冬季;空间上,春季发生土壤旱情等级较高、旱情严重的地区主要分布在河南省中部,冬季主要分布在南部。

2.2.5 遥感干旱监测结果与实际土壤墒情的对比

河南省水利局显示以月为单位的全省土壤墒

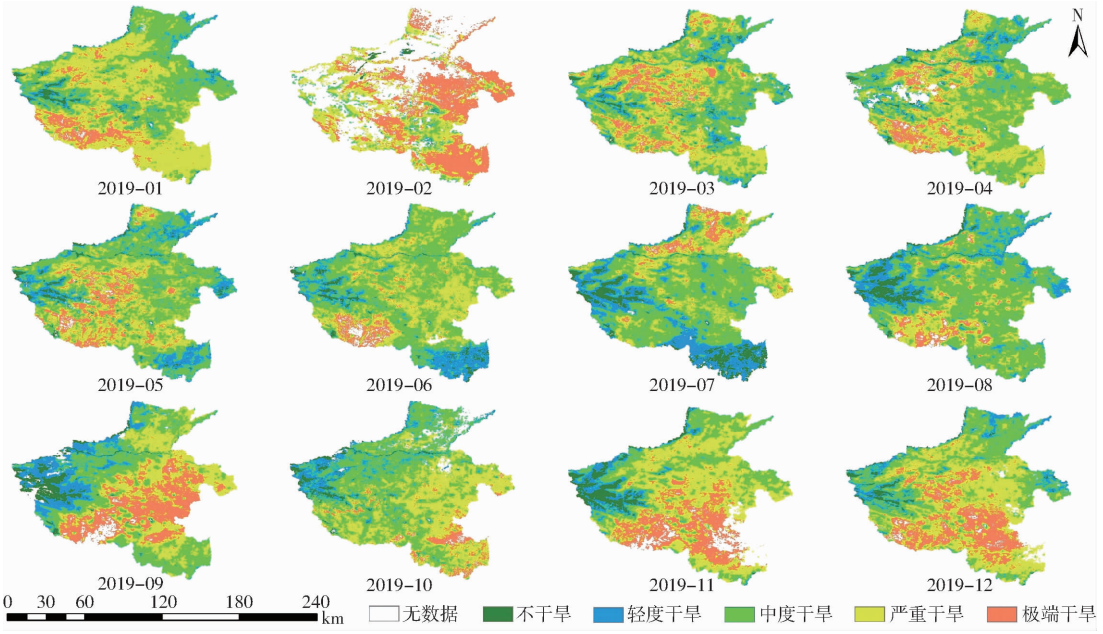

图 7　2019 年河南省条件植被温度指数(VTCI)空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of vegetation temperature condition index (VTCI) in Henan Province in 2019

情分布情况(表 3),通过 4 种植被指数监测结果对比,确定一种符合河南省实际土壤墒情的监测方法。

河南省 2019 年水文水资源中心土壤墒情报告(表 3)详细记录了 2019 年每个月的土壤墒情状况以及旱情等级,将表 3 内容分别与 CWSI、VSWI、TVDI 和 VTCI 模型反演结果对比分析,CWSI 监测结果表明 3 月、5 月和 6 月监测结果与实际相符,这段时期植被长势茂密,但其他月份发生干旱区域未监测出的面积占比较大,表明 CWSI 对农作物敏感度不高,不适用于河南省土壤墒情监测;VSWI 的干旱面积监测结果与实际不相符,1 月河南省东部地区在土壤墒情报告上未发生干旱,而监测结果显示发生了干旱;TVDI 与 VTCI 的土壤墒情面积占比相同,区别在于 VTCI 监测干旱等级要比 TVDI 的旱情等级高,而 TVDI 监测结果(图 6)与河南省水文水资源中心土壤墒情调查报告(表 3)的旱情等级和发生土壤旱情的地市均一致吻合,证明了 TVDI 的监测精度高,与 CWSI、VSWI 和 VTCI 相比,TVDI 对河南省农业的土壤旱情监测更为适宜。

经验证,TVDI 的干湿边拟合方程如表 4 所示。当 $R^2=1$ 时,表示模型完美拟合真实数据;当 $R^2=0$ 时,表示模型无法对数据进行任何解释。因此,决定系数 R^2 越大,说明拟合值与实际值的拟合效果越好,相关性越高,与实际值越接近。从表 4 可以得出,TVDI 的决定系数 R^2 均大于 0.5,再次证明 TVDI 的监测精度高,监测结果具有可靠性。

表 3　河南省 2019 年水文水资源中心土壤墒情报告

Tab. 3　Soil moisture report of Henan Hydrology and Water Resources Center in 2019

月份	旱情等级	不同旱情分布区域
1 月	轻度干旱	三门峡、济源、焦作、洛阳、南阳、郑州
2 月	轻度干旱	济源、郑州、洛阳
3 月	轻度干旱	新乡、焦作、平顶山、洛阳、三门峡、南阳、开封、郑州、商丘
4 月	轻度干旱	焦作、济源、洛阳、郑州、开封、三门峡、平顶山、许昌、周口、漯河、南阳
5 月	轻度干旱	濮阳、开封、郑州、三门峡、洛阳、南阳、平顶山、周口、驻马店
	中度干旱	南阳、平顶山、洛阳、新乡、郑州、商丘、三门峡、漯河
6 月	轻度干旱	鹤壁、新乡、焦作、开封
7 月	轻度干旱	濮阳、安阳、鹤壁、新乡、焦作、济源、郑州、开封、许昌、平顶山、漯河、驻马店、信阳、商丘、周口
	中度干旱	安阳、鹤壁、新乡、焦作、周口
8 月	轻度干旱	鹤壁、开封、新乡、平顶山、商丘、周口、南阳、驻马店、信阳
9 月	轻度干旱	开封、许昌、平顶山、漯河、周口、南阳、信阳
	中度干旱	周口、南阳、驻马店、信阳
10 月	轻度干旱	濮阳、周口、开封、信阳
11 月	轻度干旱	濮阳、鹤壁、三门峡、郑州、开封、周口、商丘、平顶山、漯河、南阳、信阳
	中度干旱	濮阳、平顶山、信阳
	严重干旱	信阳、驻马店、平顶山、南阳、洛阳、三门峡、开封、安阳、濮阳
12 月	轻度干旱	濮阳、鹤壁、新乡、焦作、济源、洛阳、三门峡、南阳、平顶山、漯河、许昌、开封、商丘、周口、驻马店、信阳

表 4 2019 年 TVDI 的干湿边拟合方程

Tab. 4 Dry and wet edge fitting equations of TVDI in 2019

月份	干边		湿边	
	干边方程	决定系数 R^2	湿边方程	决定系数 R^2
1 月	$y=-6.870x+286.909$	0.503	$y=16.510x+264.961$	0.709
2 月	$y=-7.976x+298.233$	0.817	$y=49.302x+236.868$	0.761
3 月	$y=-11.608x+305.509$	0.894	$y=7.726x+280.711$	0.801
4 月	$y=-10.550x+309.996$	0.834	$y=1.063x+288.747$	0.562
5 月	$y=-10.470x+320.006$	0.650	$y=-5.790x+294.797$	0.741
6 月	$y=-9.699x+320.800$	0.900	$y=-4.215x+299.812$	0.717
7 月	$y=-1.682x+316.644$	0.726	$y=-2.797x+299.513$	0.812
8 月	$y=0.471x+311.273$	0.557	$y=-5.484x+301.070$	0.684
9 月	$y=-0.799x+313.170$	0.833	$y=-11.618x+300.514$	0.587
10 月	$y=-19.170x+311.372$	0.893	$y=-8.805x+289.875$	0.574
11 月	$y=-4.538x+294.997$	0.522	$y=12.703x+272.727$	0.809
12 月	$y=-6.280x+291.313$	0.607	$y=12.115x+270.977$	0.593

2.3 TVDI 的空间变化特征分析和 ARIMA 模型预测

由于 TVDI 的监测效果较好，对 2012—2021 年的 TVDI 进行空间变化特征分析，首先对 TVDI 进行空间演变，然后分析 TVDI 的 slope 空间变化趋势和 ARIMA 模型预测，最后分析 TVDI 对不同物候期的农作物影响。

2.3.1 TVDI 的空间演变结果

TVDI 旱情分级是根据土壤相对湿度的农业干旱等级划分标准，对 TVDI 值进行置信空间的统计分析。将 2012—2021 年 10 年间的不同旱情等级覆盖像元以每两年一次进行统计，分别统计 TVDI 的每个干旱等级对应个数占总个数的百分比，河南省 2012—2021 年不同旱情等级分类统计结果如表 5 所示，从表 5 中得出 2019 年发生的干旱地区覆盖像元占比为 76%，在 2012—2021 年达到干旱区域占比最大值；2019 年无旱地区覆盖像元占比最小，总占比为 24%；在研究时间段内无特大干旱灾害发生，结果证明 2019 年在近 10 年中发生的旱情比较严重。

表 5 河南省不同旱情等级覆盖像元占比

Tab. 5 Percentage of image elements covered by different drought levels in Henan Province %

旱情等级	年份				
	2013	2015	2017	2019	2021
不干旱	38	47	47	24	57
轻度干旱	12	11	10	20	7
中度干旱	46	38	43	52	34
严重干旱	4	4	0	4	2
极端干旱	0	0	0	0	0

2.3.2 TVDI 的空间变化趋势

利用 slope 趋势分析方法得到河南省 2012—2021 年的 TVDI 年际变化的显著性，2012—2021 年河南省 TVDI 的 slope 空间变化趋势如图 8 所示。$TVDI_{slope}$ 大于 0 表示该地区的 TVDI 呈增大趋势，$TVDI_{slope}$ 小于 0 表示该地区呈减少趋势。

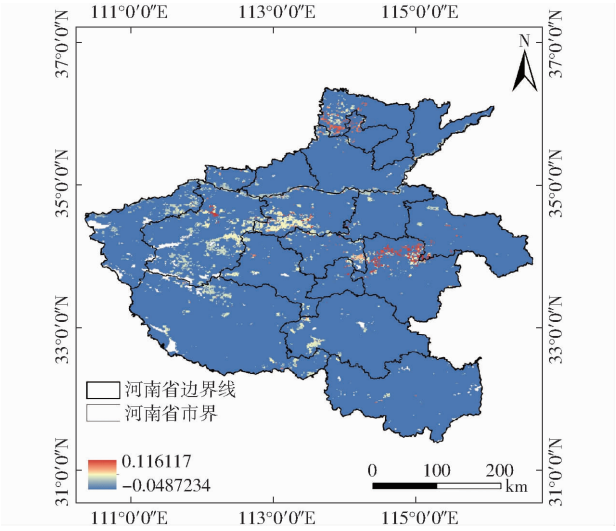

图 8 2012—2021 年河南省 TVDI 的 slope 空间变化趋势

Fig. 8 Trends in slope space of TVDI in Henan Province, 2012—2021

河南省近 10 年 TVDI 值出现较为明显的空间变化趋势分布特征，河南省西北部、中部和北部地区，$TVDI_{slope}$ 明显大于 0，因此这些区域的 TVDI 值随时间变化呈增大趋势，呈现出旱情趋势增加的分布特性；与此同时，$TVDI_{slope}$ 值增加显著的区域主要在河南省中部和北部，由于全省降水分布不均，与其他地市相比中部和北部降雨量偏少且常年高温，导致这些地方的土壤失墒快而发生土壤旱情，因此，$TVDI_{slope}$ 空间变化呈增加趋势。

2.3.3 ARIMA 模型预测分析

根据 ARIMA 模型建模方法，统计 2012—2021

年 TVDI 时序数据，依据 ARIMA 模型预测的基本步骤，得到 ARIMA 模型统计量如表 6 所示，预测出 2022 年河南省不同旱情等级覆盖像元占比结果，如表 7 所示。

表 6　ARIMA 模型统计量

Tab. 6　ARIMA model statistics

旱情等级	预测变量数	模型拟合统计量			Ljung－Box Q(18)		离群值数
		平稳 R^2	R^2	统计量	自由度	P	
不干旱	0	0.549	0.449	48.204	16	0.001	2
轻度干旱	0	0.692	0.571	28.518	16	0.027	0
中度干旱	0	0.771	0.260	20.234	15	0.210	0
重度干旱	0	0.635	0.435	39.947	16	0.004	0
极端干旱	0	0.884	0.398	19.830	15	0.179	2

注：Ljung－Box Q 统计量用于检验某个时间段内的一系列观测值是不是随机的独立观测值。

表 7　ARIMA 模型预测值

Tab. 7　ARIMA model predicted values　%

月份	旱情等级				
	不干旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
1 月	11.24	33.88	36.80	16.55	1.53
2 月	12.01	28.75	39.79	17.45	2.00
3 月	12.39	37.65	30.57	17.62	1.77
4 月	12.58	26.95	39.95	17.65	2.87
5 月	11.06	10.08	55.40	19.88	3.58
6 月	11.82	16.05	44.37	24.21	3.55
7 月	12.74	19.72	36.81	28.06	2.67
8 月	10.49	17.66	43.56	23.67	4.21
9 月	11.22	20.00	47.27	18.25	3.26
10 月	12.76	30.06	38.94	15.79	2.45
11 月	11.98	20.37	42.22	22.47	2.96
12 月	11.12	20.74	43.26	22.01	2.87

经查阅 2022 年土壤墒情历史记录，显示 2022 年 1 月、2 月、3 月、4 月、7 月和 10 月全省土壤墒情良好，根据全省固定墒情监测站资料的详细记录，显示 2022 年 5 月、6 月、8 月、9 月、11 月和 12 月出现不同程度旱情，根据记录绘制出 2022 年 5 月、6 月、8 月、9 月、11 月和 12 月实际土壤墒情分布参考图如图 9 所示。

在 ARIMA 模型预测结果（表 7）的基础上结合 2012—2021 年的 slope 趋势分析（图 8），得到 2022 年的 5 月、6 月、8 月、9 月、11 月和 12 月土壤墒情较差，如图 9 所示，发生不同程度旱情，农作物存在失墒状况，绘制 2022 年 ARIMA 模型预测土壤墒情分布图（图 10），预测结果显示：2022 年土壤墒情较差区域主要发生在豫西和豫中，预测结果豫西为轻度旱情，实则出现中度旱情，11 月的预测结果比实际发生旱情的面积大，其他结果与实际发生的土壤墒情表现相吻合。

2.3.4　TVDI 对不同物候期的农作物影响

通过 TVDI 并结合不同农作物不同的物候期，寻求一种适宜河南省土壤旱情快速评估的方法，及时进行监测，有利于旱情灾害发生时立即做出决策与判断，及时反馈与处理，最大程度上减少旱情对农业的影响以确保粮食丰收。在冬小麦出苗至分蘖期（10—11 月）、返青至拔节期（3—4 月）需水量大幅增加，这两个重要阶段土壤墒情会直接影响到冬小麦生长情况。夏玉米 4 个需水关键期为播种期（5 月下旬）、拔节期（6 月）、抽穗期（7 月下旬—8 月上旬）、灌浆期（8 月），尤其是灌浆期，其成熟期是影响夏玉米产量形成的重要节点，因此，利用 TVDI 指数及时监测土壤墒情，为农业精准管理提供支持。

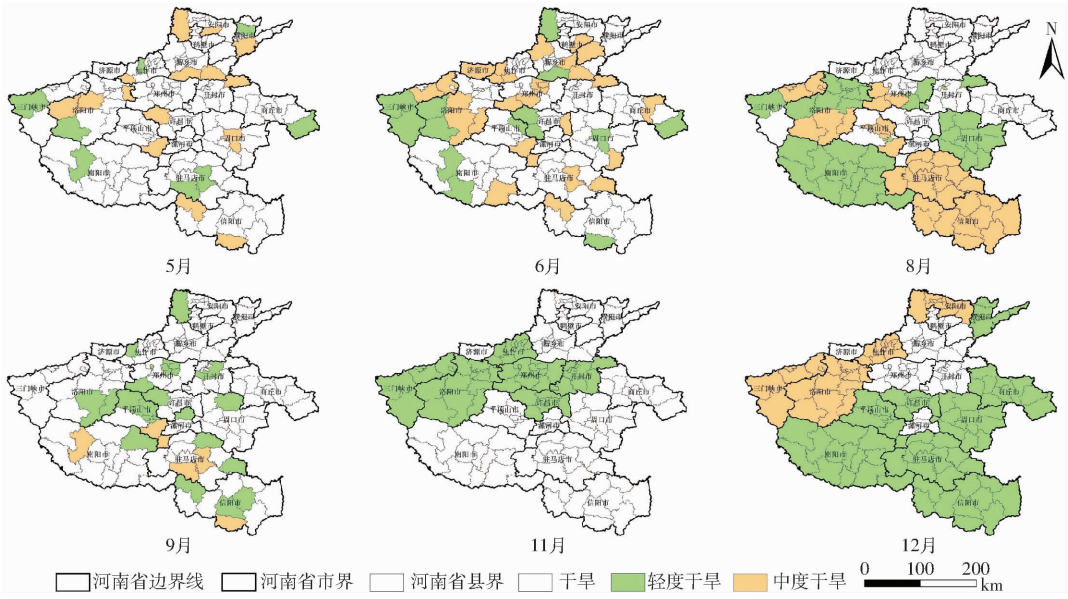

图 9　2022 年实际土壤墒情分布参考图

Fig. 9　Actual soil moisture distribution maps in 2022

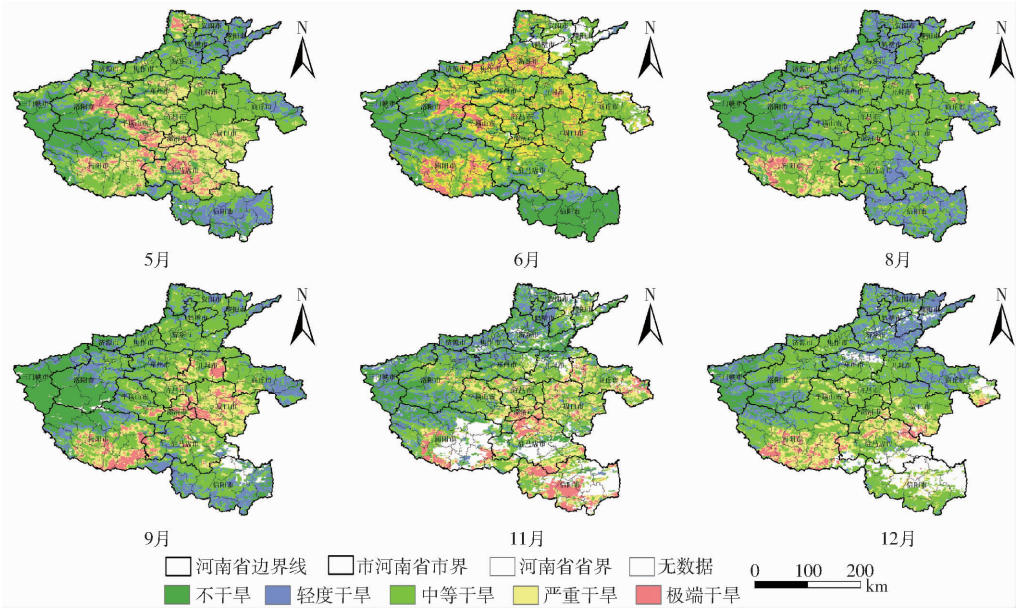

图 10 2022 年 ARIMA 模型预测土壤墒情分布图

Fig. 10 Soil moisture distribution maps predicted by ARIMA model in 2022

3 结论

(1)CWSI、VSWI、TVDI 和 VTCI 进行空间对比分析,CWSI、VSWI 和 VTCI 未能全面准确反映旱情信息,根据河南省水利局地面站点土壤墒情监测数据验证,TVDI 更适合河南省土壤墒情研究监测。

(2)从 2019 年河南省 TVDI 监测结果可知,河南省发生土壤旱情频率从高到低依次为豫中、豫西、豫东、豫北、豫南,与 SPEI 指数计算的河南省不同等级干旱频率分布特征结果一致。

(3)从 2012—2021 年河南省 TVDI 空间演变结果来看,2019 年旱情等级覆盖像元占比最高,TVDI 空间变化趋势表明豫西和豫中呈显著增加趋势;ARIMA 模型预测的 2022 年河南省土壤旱情与 slope 趋势分析和实际结果相一致。

参 考 文 献

[1] 尹国应,张洪艳,张良培. 2001—2019 年长江中下游农业干旱遥感监测及植被敏感性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022,47(8): 1245 - 1256,1270.
YIN Guoying, ZHANG Hongyan, ZHANG Liangpei. Remote sensing monitoring of agricultural drought and vegetation sensitivity analysis in the middle and lower reaches of Yangtze River from 2001 to 2019[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022,47(8): 1245 - 1256,1270. (in Chinese)

[2] NIRANGA A, MAHESH E. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022,13(1):762 - 799.

[3] PALMER W C. Meteorological drought[R]. Research Paper No 45, US Department of Commerce, 1965: 1 - 58.

[4] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scale[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179 - 183.

[5] 王林,陈文. 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, 2014, 33(2): 423 - 431.
WANG Lin, CHEN Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423 - 431. (in Chinese)

[6] STAGGE J H, KOHN I, TALLAKSEN L M, et al. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 37 - 50.

[7] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015,34(8):1547 - 1558.
SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Drought characteristics of Henan Province in 1961—2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Geographical Research, 2015,34(8):1547 - 1558. (in Chinese)

[8] 庄少伟. 基于标准化降水蒸发指数的中国区域干旱化特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013
ZHUANG Shaowei. The drought characteristics in the regions of China based on the standardized precipitation evapotranspiration index[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)

[9] PENG S, WANG Z, LU X, et al. Hybrid inversion of radiative transfer models based on topographically corrected landsat surface reflectance improves leaf area index and aboveground biomass retrievals of grassland on the hilly loess plateau[J].

International Journal of Digital Earth, 2024, 17(1): 2316840.
[10] 薛华柱,李阳阳,董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022,43(11): 923 - 934.
XUE Huazhu, LI Yangyang, DONG Guotao. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI Index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022,43(11):923 - 934. (in Chinese)
[11] 郭铌,王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. 干旱气象, 2015,33(1):1 - 18.
GUO Ni, WANG Xiaoping. Advances and developing opportunities in remote sensing of drought[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015,33(1):1 - 18. (in Chinese)
[12] JACKSON R, IDSO S, REGINATO R, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133 - 1138.
[13] CARLSON T, GILLIES R, PERRY E. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1 - 2): 161 - 173.
[14] 宋扬,房世波,卫亚星. 农业干旱遥感监测指数及其适用性研究进展[J]. 科技导报,2016,34(5):45 - 52.
SONG Yang, FANG Shibo, WEI Yaxing. Comparison of typical remote sensing drought indexes and their adaptability in agriculture[J]. Science & Technology Review,2016,34(5):45 - 52. (in Chinese)
[15] DU L T, SONG N P, LIU K, et al. Comparison of two simulation methods of the temperature vegetation dryness index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing, 2017,9(2):177.
[16] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(5):412 - 418.
WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen. Vegetation-temperature condition index and its application for drought monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001,26(5):412 - 418. (in Chinese)
[17] YANG X N, ZHANG K X, YANG H G, et al. Multiple regression and ARIMA model prediction on the yield of MSW in Xi'an [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020,28(2):37 - 41.
[18] 李俐,许连香,王鹏新,等. 基于条件植被温度指数的夏玉米生长季干旱预测研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 139 - 147.
LI Li, XU Lianxiang, WANG Pengxin, et al. Drought forecasting during maize growing season based on vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):139 - 147. (in Chinese)
[19] 王丹钰,张唯,卢灿炯,等. 融合气象和遥感植被信息的综合干旱指数构建及精度评价[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). http://doi.org/10.13203/j.whugis20220237.
[20] 庄慧敏,张朝,程飞,等. 1992—2018 年中国旱作农田土壤湿度的时空模式及气象驱动因素[J]. 地理学报, 2022, 77(9):2308 - 2321.
ZHUANG Huimin, ZHANG Chao, CHENG Fei, et al. Spatiotemporal pattern of soil moisture and its meteorological driving factors in dry croplands across China from 1992 to 2018[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9):2308 - 2321. (in Chinese)
[21] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55 - 94.
[22] 郑健,鲍婷婷,王春霞,等. 考虑气候分区的甘肃省干旱时空分布特征分析[J]. 农业机械学报, 2023,54(2):311 - 320.
ZHENG Jian, BAO Tingting, WANG Chunxia, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Gansu Province considering climate zoning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):311 - 320. (in Chinese)
[23] 中国气象局. GB/T 20481—2017: 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
[24] MA Z C, SUN P, ZHANG Q, et al. Characterization and evaluation of MODIS-derived crop waler stress index (CWSI) for monitoring drought from 2001 to 2017 over Inner Mongolia[J]. Sustainability, 2021,13(2): 916.
[25] 王凤杰,冯文兰,扎西央宗,等. 基于 FY - 3A/VIRR 和 TERRA/MODIS 数据藏北干旱监测对比[J]. 自然资源学报, 2017,32(7):1229 - 1239.
WANG Fengjie, FENG Wenlan, ZHA Xiyangzong, et al. The comparison of FY - 3A/VIRR and TERRA/MODIS data for drought monitoring[J]. Journal of Natural Resources,2017,32(7):1229 - 1239. (in Chinese)
[26] ZHANG L F, JIAO W Z, ZHANG H M, et al. Studying drought phenomena in the continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190:96 - 106.
[27] 王鹏新,龚健雅,李小文,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展,2003(4):527 - 533.
WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. Advance in Earth Sciences, 2003(4):527 - 533. (in Chinese)
[28] 吴黎. 基于 MODIS 数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 130 - 135,3.
WU Li. Classification of drought grades based on temperature vegetation drought index using the MODIS data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 130 - 135,3. (in Chinese)

(下转第 522 页)

robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(3): 934 - 952.
[18] 李亚鑫, 杜亮, 王宇,等. 波动鳍水陆两栖机器人的设计与运动性能评估[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(3): 58 - 64.
LI Yaxin, DU Liang, WANG Yu, et al. Design and motion performance evaluation of an undulating fins propelled amphibious robot[J]. Machine Design and Research, 2023, 39(3): 58 - 64. (in Chinese)
[19] YIN S, HU Q, ZENG Y, et al. Kinetic analysis and design of a bio-inspired amphibious robot with two undulatory fins[C]// 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2021: 1368 - 1373.
[20] 徐海军, 潘存云, 谢海斌,等. 水下仿生推进器阀控液压摆动关节建模与动态特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 116 - 121.
XU Haijun, PAN Cunyun, XIE Haibin, et al. Modeling and dynamic characteristics analysis of the valve-controlled hydraulic swaying cylinder in bionic underwater thruster[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(6): 116 - 121. (in Chinese)
[21] LIU H, CURET O M. Propulsive performance of an under-actuated robotic ribbon fin[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12: 036015.
[22] LIU H, TAYLOR B, CURET O M. Fin ray stiffness and fin morphology control ribbon-fin-based propulsion[J]. Soft Robotics, 2017, 4(2): 103 - 116.
[23] 陈健. 多波动鳍仿生水下航行器创新设计与分析研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
CHEN Jian. Innovation design and analysis of bionic underwater vehicle propelled by multiple undulatory fins[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
[24] LIU F, LEE K, YANG C. Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design[J]. IEEE - ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(3): 554 - 562.
[25] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
[26] 李慧, 刘星桥, 李景. 异步电动机调速系统自适应辨识的 CMAC - ADRC 算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 358 - 365.
LI Hui, LIU Xingqiao, LI Jing. CMAC - ADRC algorithm based on adaptive parameter identification for asynchronous motor speed control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 358 - 365. (in Chinese)
[27] 朱立成, 赵智宇, 韩振浩,等. 基于自抗扰控制的双重转向运动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 391 - 401.
ZHU Licheng, ZHAO Zhiyu, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of dual-steering control system based on active disturbance rejection control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 391 - 401. (in Chinese)
[28] 王会明, 张扬, 王雪闯. 移动机器人的线性自抗扰控制设计与实验验证[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(7): 1289 - 1296.
WANG Huiming, ZHANG Yang, WANG Xuechuang. Design and implementation of linear active disturbance rejection control for mobile robots[J]. Control Theory and Technology, 2022, 39(7): 1289 - 1296. (in Chinese)
[29] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.

(上接第 401 页)

[29] 张树誉,孙威,王鹏新. 条件植被温度指数干旱监测指标的等级划分[J]. 干旱区研究,2010,27(4):600 - 606.
ZHANG Shuyu, SUN Wei, WANG Pengxin. Classification of drought grades based on vegetation temperature condition index [J]. Arid Zone Research, 2010,27(4):600 - 606. (in Chinese)
[30] 王强,张廷斌,易桂花,等. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报,2017,37(9): 3084 - 3095.
WANG Qiang, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3084 - 3095. (in Chinese)
[31] 闫祥祥. 使用 ARIMA 模型预测公园绿地面积[J]. 计算机科学,2020,47(增刊 2):531 - 534,556.
YAN Xiangxiang. Using ARIMA model to predict green area of park[J]. Computer Science, 2020, 47(Supp. 2):531 - 534, 556. (in Chinese)