

基于 TVDI 的河南省土壤湿度时空变化及影响因素分析

王德应,杨永崇,王 涛,李奇虎

(西安科技大学测绘科学与技术学院,西安 710054)

摘 要:河南是我国重要的粮食生产基地,但干旱频发,对社会经济发展产生巨大阻碍。土壤湿度作为反映干旱灾害发生的重要指标,开展土壤湿度动态变化及其与气象因子关系研究,可为科学认识干旱发生发展规律及制定调控措施提供依据。基于 MODIS 增强型植被指数 *EVI* 和校正后的陆地表面温度 *LST* 数据构建双抛物线型 *EVI-LST* 特征空间,根据该特征空间计算温度植被干旱指数 *TVDI*,分析河南省 2000–2019 年土壤湿度的时空变化特征及其对气温降水的响应,结果表明:① *TVDI* 与同期 0–10 cm 土壤相对湿度呈显著负相关 ($P<0.05$),可以有效反映河南省土壤湿度情况,适用于该地区土壤湿度监测。② 20 年间河南省主要土壤湿度类型由湿润变为正常,转折点为 2012 年,干旱每年均有发生,三门峡、洛阳至平顶山的峡谷地区干旱发生频率最高。③ 土壤湿度分布有明显的空间分异性,呈现豫东平原、豫南山区和豫西伏牛山脉较湿润,豫中、豫北山区和豫西浅山丘陵区较干旱的分布特征。研究时段内干旱发生区域向东南扩张,土壤湿度整体呈缓慢变干趋势,湿润趋势和干旱趋势面积占比分别为 29.71% 和 60.27%。④ 气象因子中降水增加引起土壤湿度升高,而气温增加则导致土壤湿度下降,二者中气温对土壤湿度的影响程度更大。

关键词: 土壤湿度;时空变化特征;*TVDI*;气温;降水;河南省

中图分类号: S152.71

文献标识码: A

王德应,杨永崇,王 涛,等. 基于 TVDI 的河南省土壤湿度时空变化及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2022(6):138–146,153.

WANG D Y, YANG Y C, WANG T, et al. Spatial-temporal variation characteristics of soil moisture and its relationship with meteorological factors in henan province based on TVDI[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(6):138–146,153.

Spatial-temporal Variation Characteristics of Soil Moisture and Its Relationship with Meteorological Factors in Henan Province Based on TVDI

WANG De-ying, YANG Yong-chong, WANG Tao, LI Qi-hu

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Henan is an important grain production base in China, but frequent drought has greatly hindered social and economic development. As an important index to reflect drought, the research on the dynamic change of soil moisture and its relationship with meteorological factors can provide a basis for scientifically understanding the occurrence and development law of drought and formulating control measures. Based on MODIS enhanced vegetation index (*EVI*) and corrected land surface temperature (*LST*) data to build a double parabola *EVI-LST* space, according to the characteristic space to calculate *TVDI*. ① The *TVDI* shows a significant negative correlation with 0–10 cm soil relative humidity in the same period ($P<0.05$), which can effectively reflect the soil moisture in Henan Province and can be used for soil moisture monitoring in this area. ② In the past 20 years, the main types of soil moisture in Henan Province changes from humid to normal, the turning point is 2012, and drought occurs every year, among which the drought occurs most frequently in the canyon areas from Sanmenxia,

收稿日期:2021-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41977059,41807503)。

作者简介:王德应(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为资源环境遥感监测与评价。E-mail:2731278364@qq.com。

Luoyang to Pingdingshan. ③ The soil moisture has obvious regional differentiation in space, Eastern Henan Plains, Southern Henan Mountains and Funiu Mountains in western Henan are relatively damp, while central and Northern Henan Mountains and Western Henan hills are arid. During the study period, the drought area expands to the southeast, and the soil moisture shows a slow drying trend as a whole. The areas with wetting trend and drought trend accounts for 29.71% and 60.27% respectively. ④ In meteorological factors, the increase in precipitation leads to the increase in soil moisture, while the increase in temperature leads to the decrease in soil moisture. In both, the influence of temperature on soil moisture is greater.

Key words: soil moisture; spatial-temporal variation characteristics; *TVDI*; temperature; precipitation; Henan Province

0 引 言

土壤湿度是指非饱和土壤中水分的含量^[1],是植物生长发育的主要水分来源,直接影响植被分布与农作物产量,也是陆-气系统中的重要参数,在反映干旱变化方面具有重要作用^[2,3]。传统人工观测土壤湿度具有准确性高的优势,但在反映大尺度、大范围土壤湿度变化方面存在不足。随着遥感技术的发展及遥感数据易获取性增强,遥感数据以其覆盖面广和获取周期短、获取频率高等特点,被广泛应用于大范围、长时期土壤湿度反演与动态监测中,已取得丰富的研究成果^[4,5]。河南省位于我国中东部南北气候过渡带,季风气候明显,境内降水量季节分配不均,区域分布差异较大,干旱灾害频发^[6]。作为农业大省,频发的旱灾直接影响河南省农业生产,造成农作物减产或绝收,对经济发展和社会稳定造成巨大阻力^[7]。因此,开展河南省土壤湿度时空变化特征及其与气温降水关系研究,可为科学认识干旱发生发展规律及调控措施制定提供依据。

1971年,Watson首次利用土壤水分的热特性实现遥感监测土壤湿度^[8]。目前,基于遥感数据反演表层土壤湿度的方法主要有:热惯量法^[9]、植被指数法^[10-13]和微波遥感法^[14]。温度植被干旱指数 *TVDI* 作为植被指数法的一种,以归一化植被指数 *NDVI* 与地表温度 *LST* 为基础进行土壤湿度反演。*TVDI* 因计算简单、数据易获取、反演精度高等特点,被广泛应用于土壤湿度监测^[15,16]。齐述华等^[17]利用 *TVDI* 开展了全国旱情监测并结合气象监测数据进行了验证,认为 *TVDI* 与土壤湿度关系显著,适合于旱情监测。刘英等^[18]研究认为基于双抛物线型特征空间得到的 *TVDI* 能更好的反映地表 10 cm 内的土壤水分状况。由于地表植被对土壤湿度具有一定的影响,国内学者研究表明,在植被覆盖度较高区域,利用对植被生长状况更加敏感的增强型植被指数 *EVI* 替代归一化植被指数 *NDVI*,可降低地表植被对 *TVDI* 的影响^[19-21]。土壤湿度与气候、环境因素关系密切,Liang 等^[22]利用 *TVDI* 研究全国干旱变化趋势与气候变化关系认为,干旱发生与气象因子密不可分,且在不同地区影响干旱的主要气象因子也不相同。庞素菲等^[23]利用 *TVDI* 探讨了甘肃农业干旱的时空变化情况,并认为气温、降水、海拔、坡度、植被类型、土地覆盖类型是农业干旱的主要影响因素。此外,不少学者利用 *TVDI* 反演河南省土壤湿度分布情况,描述其干旱发生特征,张文鸽等^[24]采用高程和纬度校正后的 *TVDI* 描述了河南省 2014 年干旱发生过程,陈少丹等^[25]利用标准化降雨蒸散指数 *SPEI* 和 *TVDI* 反映河南省干旱情况,刘英等^[26]基于改进后的干湿边方程计算 *TVDI* 监测河南省春旱,均取得了较好的结果。

已有研究在长时间序列土壤湿度动态监测和影响因素方面尚存不足,因此,本文使用 2000–2019 年 MODIS 增强型植被指数 *EVI* 和地表温度 *LST* 数据,建立双抛物线型 *EVI*–*LST* 特征空间,计算 *TVDI* 以反映土壤湿度,并利用土壤湿度观测数据进行验证,进而采用 *TVDI* 分析河南省土壤湿度时空变化特征,并结合气象因子分析土壤湿度变化与气温和降水关系,以为河南省科学防旱抗旱提供决策支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河南省位于我国中东部(31° 23' ~36° 22' N, 110° 21' ~116° 39' E),总面积约 16.7 万 km²,是中国地势第二阶梯向第三阶梯过渡带,西高东低,高差悬殊,地表形态复杂多样。河南省东部为黄淮海冲积平原,北、西、南三面环山,沿省界依次为太行山、伏牛山、桐柏山、大别山,西南部间有南阳断陷盆地(图 1)。河南处于半湿润半干旱过渡带,过渡带气候特征明显,南北气候差异较大,东部平原和西部山地气候亦有所不同。全省多年平均气温为 14.37~15.72 °C,多年平均降水量 579.84~1 134.17 mm,均呈由北向南递增趋势。受季风影响,降水量以 6–8 月份最多,多年平均日照时数为 1 848.0~2 488.7 h,且北部多于南部。河南省境内分属海河、黄河、淮河、长江四大水系,耕地面积为 7.90 万 km²^[27],是我国重要的粮食生产区域,频发的干旱灾害严重影响农业生产,威胁粮食安全。

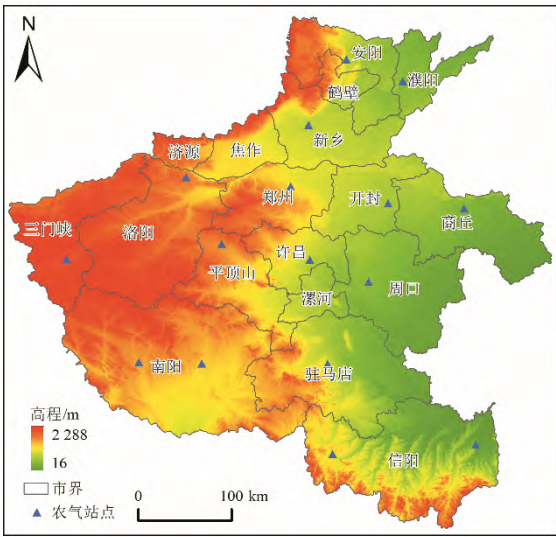


图 1 河南地区概况

Fig.1 General situation of Henan Province

1.2 数据来源与处理

(1)遥感数据。使用的MOD11A2和MOD13Q1数据来源于LAADS DAAC 数据中心 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>), 时间为2000–2019年, 涉及序列号为H27V05。其中地表温度数据LST MOD11A2为8 d合成产品, 空间分辨率为1 km; 植被指数数据EVI MOD13Q1为16 d合成产品, 空间分辨率为250 m, 本文选取EVI与LST构建双抛物线型EVI–LST特征空间。通过投影转换、重采样、最大值合成等方法, 将EVI和LST数据处理为时间分辨率为1年、空间分辨率为250 m的数据。

(2)土壤湿度数据。土壤相对湿度数据为中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)提供的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集。该数据为分布于河南省境内的16个站点实测数据, 观测时间为每旬一次, 土壤相对湿度月数据为三旬数据平均得到, 采样深度包括10、20、50、70、100 cm。

(3)数字高程模型(DEM)。空间分辨率为90 m, 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 通过重采样将其处理为250 m空间分辨率。

(4)气象数据。气象数据来源于资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 包括年均气温和年降水量, 时间为2001–2015年, 空间分辨率为1 km。在相关分析过程中, 将TVDI数据重采样到1 km进行计算。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤湿度反演

TVDI由EVI和LST计算得到, 用于表征土壤湿度情况, 计算公式如下^[15,19]:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (1)$$

式中: LST为地表温度; $LST_{\min}$ 为某一EVI值对应的最小地表温度, 对应湿边方程; LST为任意像元的地表温度; $LST_{\max}$ 为某一EVI值对应的最大地表温度, 即为干边方程; TVDI取值范围为0~1, 其值越大说明越干旱, 反之则越湿润。

刘英等人基于双抛物线型特征空间对干湿边方程进行了改进^[18], 改进后的干湿边方程计算公式如下:

$$LST_{\max} = a_1 EVI^2 + b_1 EVI + c_1 \quad (2)$$

$$LST_{\min} = a_2 EVI^2 + b_2 EVI + c_2 \quad (3)$$

式中: EVI为增强型植被指数; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 为干湿边方程的系数, 由双抛物线型EVI–LST特征空间散点图线性拟合得到。

地表温度受海拔分布影响, 具有气温垂直递减特性。已有研究表明, 受海拔变化影响, 相同条件下海拔高的像元对应的TVDI值有变小, 进而导致土壤湿度值较高的问题^[28,29]。河南省境内地形东西差异较大, 最大高差接近2 400 m, 因此本文对地表温度进行海拔校正。校正公式如下:

$$Td = LST + Ha \quad (4)$$

式中: Td为校正后的地表温度; LST为校正前的地表温度; H为海拔; a是地表温度受气温影响随海拔增加的降低程度, $a = 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 。利用校正后的地表温度重新带入式(1), 计算校正后的TVDI。

1.3.2 分析方法

(1)线性趋势法。利用线性趋势法分析2000–2019年TVDI年际变化趋势, 若为正值则表示TVDI呈现增加趋势, 否则表示下降趋势^[30]。基于像元的线性趋势计算公式如下:

$$Slope = \frac{20 \sum_{j=1}^{20} j TVDI_{ij} - \left(\sum_{j=1}^{20} j \right) \left(\sum_{j=1}^{20} TVDI_{ij} \right)}{20 \sum_{j=1}^{20} j^2 - \left(\sum_{j=1}^{20} j \right)^2} \quad (5)$$

式中: Slope是线性拟合的斜率; j代表年份, 取值范围是1~20; $TVDI_{ij}$ 代表第j年TVDI年值。

(2)重心迁移模型。为进一步研究干旱发生的时空聚集和转移特征, 本文采用重心迁移模型分别计算河南省2000–2019年干旱发生的分布重心, 并通过其重心迁移方向和距离描述河南省干旱发生的总体变化趋势和空间变化特征^[31]。计算公式如下:

$$X_t = \sum_{i=1}^n (W_{it} X_{it}) / \sum_{i=1}^n (W_{it}) \quad (6)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^n (W_{it} Y_{it}) / \sum_{i=1}^n (W_{it}) \quad (7)$$

式中: X_t 、 Y_t 为第t年干旱发生区域重心的经纬度坐标; W_{it} 为第t年第i个像元的TVDI值, X_{it} 、 Y_{it} 分别代表第t年第i个像元的中心经度和纬度。

(3)相关分析。相关分析包括反映2个要素之间相关关系的相关系数和反映3个要素之间相关关系的偏相关系数^[32]。本文利用相关系数和偏相关系数分别计算了TVDI与气温、TVDI与降水的相关系数和偏相关系数。相关系数计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中: R为x和y之间的相关系数; x_i 、 y_i 分别为第i年TVDI和年均气温(或年降水量); $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别为TVDI和年均气温(或年降水量)的多年平均值。

偏相关系数反映的是3个变量中某一变量假定为常数时, 其他两个变量的偏相关关系, 内含了常数变量的交叉影响作用^[33]。计算公式如下:

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13} r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (9)$$

$$r_{13.2} = \frac{r_{13} - r_{12} r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (10)$$

式中: r_{12} 、 r_{13} 、 r_{23} 分别表示TVDI与年均气温、TVDI与年降水量、年均气温与年降水量的相关系数; $r_{12.3}$ 、 $r_{13.2}$ 分别表示TVDI与年均气温、TVDI与年降水量的偏相关系数, 其显著性检验采用t检验。

2 结果分析

2.1 土壤湿度反演结果验证

为了验证TVDI结果的可靠性, 众多学者比较了TVDI与不同土层深度土壤相对湿度之间的关系。薛天翼等^[34]认为TVDI能很好的反映0~10 cm土壤表层湿度状况。刘英等^[26]认为改进后的TVDI对地表10 cm内土壤水分状况更为敏感。因此, 本文选用0~10 cm土壤相对湿度监测数据对TVDI反演结果进行验

证。由于气象站点实测的土壤相对湿度数据存在缺失和无效的情况,另外MODIS产品与实测数据的获取时间存在偏差,经筛选后,选用2005年16个站点各季节中相吻合月份的有效土壤相对湿度数据作为验证数据。结果表明,各季节TVDI与土壤

湿度的相关系数绝对值在0.4~0.6之间,均通过 $P\leq 0.05$ 显著性检验,说明两者具有较好的相关性,并且呈现显著负相关(图2)。这一结果表明采TVDI反演和分析河南省土壤湿度状况具有可行性。

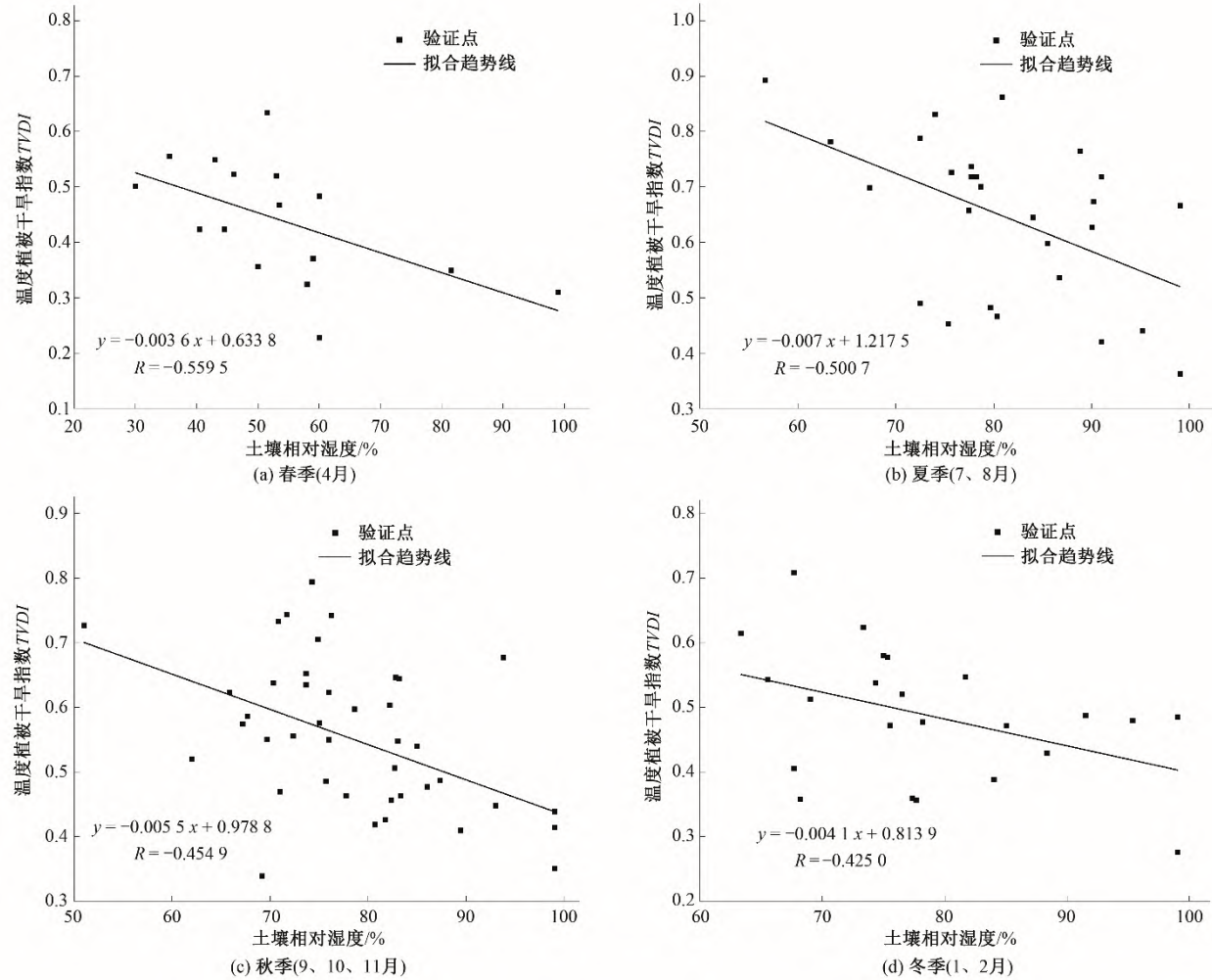


图2 2005年各季节土壤相对湿度与同期TVDI的拟合

Fig.2 Linear Fitting of relative soil moisture to TVDI in 4 seasons in 2005

2.2 土壤湿度时空分布特征

2.2.1 时间变化特征

参阅已有研究中土壤湿度等级划分结果^[35,36],本文根据TVDI数值,将土壤湿度划分为5种类型,分别为:极湿润($0\leq TVDI<0.2$)、湿润($0.2\leq TVDI<0.4$)、一般($0.4\leq TVDI<0.6$)、干旱($0.6\leq TVDI<0.8$)、极干旱($0.8\leq TVDI\leq 1$)。

2000–2019年河南省年均TVDI值介于0.35~0.5之间,多年均值为0.42,表明河南省土壤湿度整体属于一般状态。年均TVDI峰值出现在2015年,为0.50,低值出现在2008年,为0.35。2000–2019年河南省年均TVDI值整体呈小幅上升趋势,依据年均TVDI距平值,研究时段可以2012年为界,划分为2000–2011年的较湿润阶段(年均TVDI距平值为负)和2012–2019年的较干旱阶段(年均TVDI距平值为正),反映出河南省土壤湿度整体呈降低状态(图3)。河南省各土壤湿度类型变化方面,以2012年为节点,2000–2011年河南省土壤表层以湿润类型为主,平均占比为52.39%,最高占比为2008年的65.56%;2012–2019年河

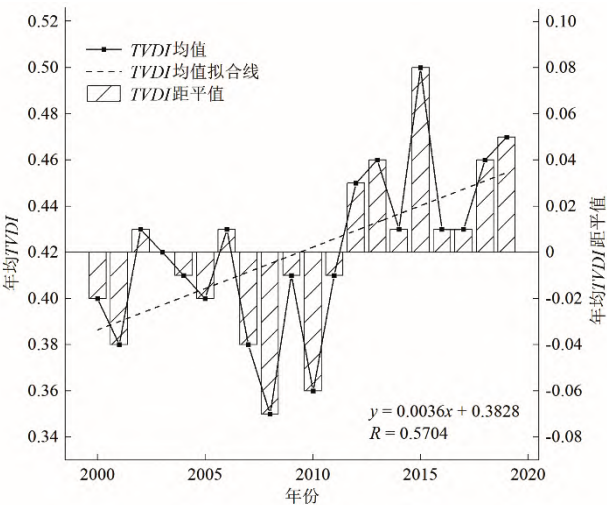


图3 2000–2019年河南省TVDI变化过程

Fig.3 Annual variations of TVDI in Henan Province during 2000–2019

南省主要土壤表层以一般类型为主,平均占比为44.89%,最高占比为2017年的49.57%(图4)。此外,河南省干旱情况持续发生,研究时段内每年均有不同程度的干旱发生,2015年干旱类

型面积占比达到峰值为31.98%。除2015年外,其余各年湿润类型面积占比均大于干旱类型面积占比,2008年二者差值最大,达到60.14%。

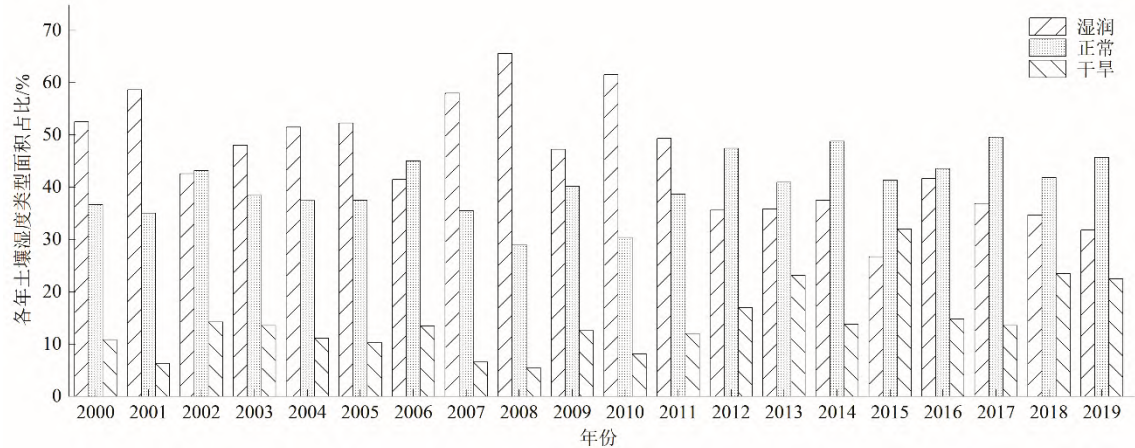


图4 2000–2019年河南省各土壤湿度类型面积百分比
Fig.4 Area percentage of soil moisture types in Henan Province during 2000–2019

2.2.2 空间变化特征

河南省土壤湿度分布具有明显的空间分异特征(图5),呈现豫北、豫西及豫中较干旱,豫南豫东较湿润。豫北干旱地区主要分布在卫河以北的山地中;豫西干旱地区集中在崤山浅山丘陵区、三门峡洛阳至平顶山的峡谷地区以及南阳盆地,同属豫西的伏牛山脉整体情况好于毗邻地区,干旱次数少,程度也明显较轻,多呈湿润状态;豫中平顶山市干旱最为严重,主要分布在伏牛山北脉。豫南干旱区域集中在驻马店市北部平原一带,信阳市则整体湿润;豫东平原整体偏湿润,干旱地区位于商丘永城县境内。

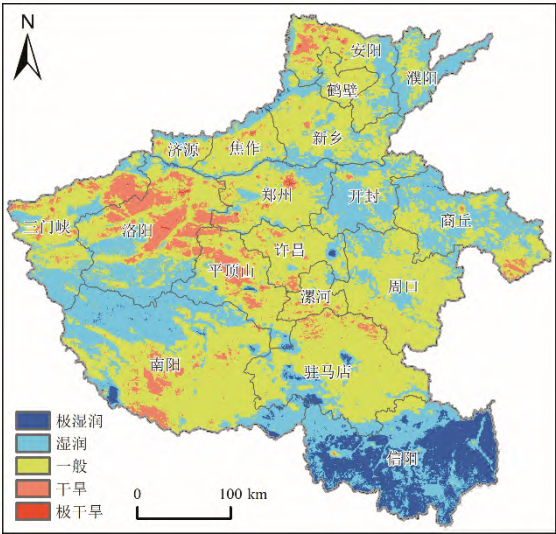


图5 2000–2019年河南省土壤湿度空间分布
Fig.5 Spatial distribution of soil moisture in Henan Province during 2000–2019

基于线性趋势法,在像元尺度上计算2000–2019年河南省TVDI变化趋势,将其分为减小($Slope < -0.001$)、不变($-0.001 \leq Slope \leq 0.001$)和增大($Slope > 0.001$)3类,对回归趋势进行显著性 t 检验,当 $\alpha=0.05$ 时,显著性检验阈值为2.101,根据阈值将显著

性划分为显著($|Z_c| > 2.101$)和不显著($|Z_c| \leq 2.101$)2个类型。利用TVDI变化趋势与显著性叠加结果,将得到的像元尺度TVDI划分为显著变湿、轻微变湿、稳定不变、轻微变干和显著变干5个类型(表1)。如图6所示,2000–2019年河南省土壤湿度显著变干面积占31.59%、轻微变干面积占28.68%,偏向干旱的南阳盆地干旱情况加重,土壤湿度以一般为主的豫东平原也表现出显著变干趋势,而较湿润的伏牛山脉地区土壤湿度也有所降低;土壤湿度呈显著变湿面积占6.03%、轻微变湿的面积占23.68%,湿润的豫南地区和伏牛山东南余脉土壤湿度有进一步增加倾向,原本较干旱的豫西崤山地区情况好转明显,表现为显著变湿。总体而言,20年来河南省变化趋势为:东部北部变化强于西部南部,且东部北部主要是变干,西部南部主要是变湿,另外河南省呈湿润趋势和干旱趋势面积占比分别为29.71%和60.27%,整体上表现为干旱趋势。

表1 土壤湿度变化趋势显著性等级划分
Tab.1 Classification of the significance of soil moisture trend

Slope	Zc	
	$ Z_c \leq 2.101$	$ Z_c > 2.101$
$Slope < -0.001$	轻微变湿	显著变湿
$-0.001 \leq Slope \leq 0.001$	稳定不变	稳定不变
$Slope > 0.001$	轻微变干	显著变干

2.2.3 干旱发生频率

在像元尺度上统计各像元2000–2019年干旱发生频率 F_i ,并依据干旱发生频率将河南省划分为常年无旱区($F_i=0\%$)、常年低发旱区($0\% < F_i < 33.4\%$)、常年中发旱区($33.4\% \leq F_i < 66.67\%$)、常年高发旱区($66.67\% \leq F_i < 100\%$)、常年有旱区5个分区($F_i=100\%$)(图7)。可以看出全省有39.62%的区域土壤湿度较高,常年无旱区集中分布在豫西伏牛山脉及豫南地区;常年低发旱区面积占比最大,为44.73%,主要集中在豫东平原;常年中发旱区以豫中、豫北山地以及南阳盆地为主,面积占比为12.79%;常年高发旱区及常年有旱区面积占比仅为2.86%,主要

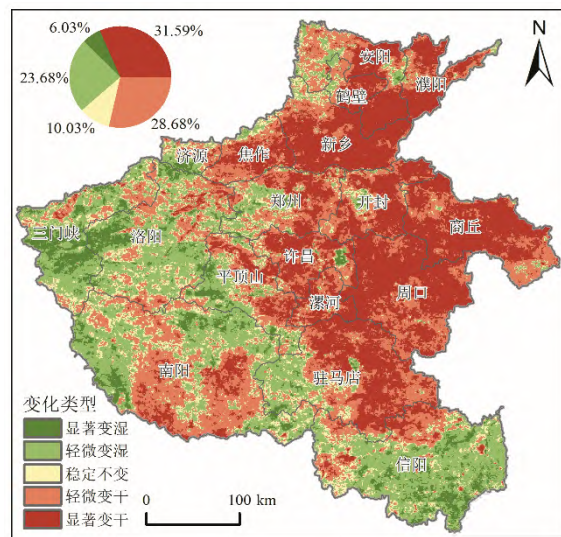


图6 2000-2019年河南省土壤湿度变化趋势空间分布
Fig.6 Spatial distribution of variation trend for soil moisture types in Henan Province during 2000-2019

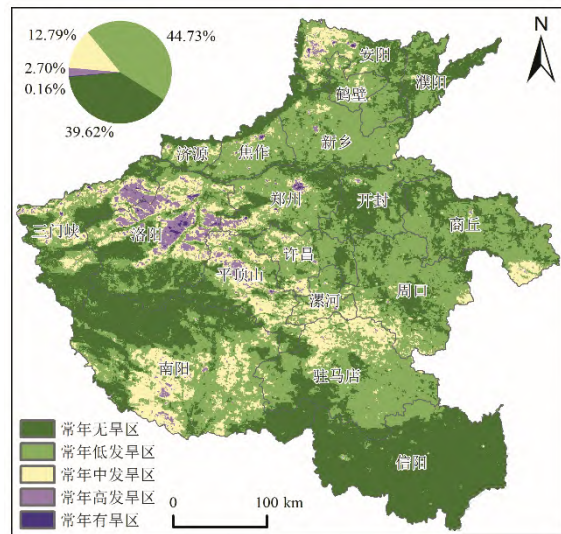


图7 2000-2019年河南省干旱发生频率空间分布
Fig.7 Spatial distribution of drought frequency in Henan Province during 2000-2019

集中熊耳山外方山与嵩山交汇处形成的峡谷地区,其他如郑州、焦作、新乡等城区范围也表现为旱情高发。因此,仅从干旱发生频率来看,河南省干旱灾害主要影响在豫北山地及豫西伏牛山脉周边地区。

2.2.4 干旱重心转移

利用重心迁移模型分别计算2000-2019年河南省干旱重心转移距离和角度,如图8与表2所示,2000年河南省干旱重心位于洛阳市,地理坐标为112°40'2"E,34°42'22"N;2019年南省干旱重心位于许昌市,地理坐标为113°11'37"E,34°11'16"N。2000-2019年河南省干旱重心整体向东偏南49°方向移动,转移的距离为75.12 km,年平均转移速度为3.95 km/a,反映出2000-2019年河南省干旱发生区域整体在向东南变化。研究时段内,2000-2003年河南省干旱重心向南迁移,由洛阳转移至平顶山市;2003-2007年干旱重心再次向北回归,由平顶山转移至洛阳市;2007-2012年则逐渐向东迁移,干旱重心由洛阳转移至平顶山市东部;2012-2019年干旱重心稳定分布在平顶山与许昌市交界处。

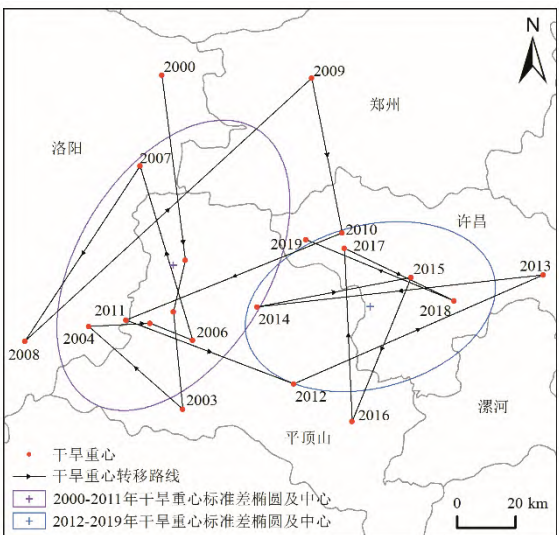


图8 2000-2019年河南省干旱发生重心转移轨迹
Fig.8 Transfer trajectories of the gravity center of drought in Henan Province during 2000-2019

表2 2000-2019年河南省干旱重心迁移特征

Tab.2 Transfer characteristics of the gravity center of drought in Henan Province during 2000-2019

发展阶段	特征参数		发展阶段	特征参数	
	转移距离/km	转移角度/(°)		转移距离/km	转移角度/(°)
2000-2001	64.12	东偏南 83	2010-2011	80.04	西偏南 22
2001-2002	18.10	西偏南 77	2011-2012	61.58	东偏南 21
2002-2003	33.64	东偏南 85	2012-2013	93.57	东偏北 24
2003-2004	42.91	西偏北 41	2013-2014	98.95	西偏南 6
2004-2005	21.09	东偏北 3	2014-2015	53.89	东偏北 11
2005-2006	15.77	东偏南 22	2015-2016	53.51	西偏南 68
2006-2007	62.55	西偏北 73	2016-2017	59.54	西偏北 88
2007-2008	72.04	西偏南 57	2017-2018	41.83	东偏南 26
2008-2009	133.74	东偏北 43	2018-2019	55.14	西偏北 22
2009-2010	54.25	东偏南 79	2000-2019	75.12	东偏南 49

2012年为干旱重心迁移的时间节点,2000–2011年干旱重心主要分布在洛阳与平顶山市交界处,2010–2019年干旱重心则主要分布在许昌与平顶山市交界处。据此将干旱重心分为2000–2011年和2012–2019年两个发展阶段,分别计算各发展阶段干旱重心的标准差椭圆(图8),椭圆参数如表3。结果表明2000–2011年河南省干旱重心呈东北–西南的分布格局,这一阶段干旱重心转移的主要特征为南北迁移,而2012–2019年河南省干旱重心则呈东–西分布格局,主要特征为东西迁移。另一方面,两阶段的椭圆分布范围与椭圆参数均有较大差异,椭圆分布范围在缩小,长轴与短轴均减少,说明第二阶段干旱重心空间分布更加集中,干旱发生区域变化较小,椭圆中心向东南转移,结合图3中2012年以后河南省土壤湿度干旱类型面积增加,反映出2000–2019年干旱发生区域在向东南扩大。

2.3 TVDI与气温降水的相关分析

考虑数据的可获得性,本文选取2001–2015年气象数据与

表3 2000–2019年河南省干旱重心空间分布格局的标准差椭圆参数
Tab.3 Standard deviation ellipse parameters of the gravity center of drought in Henan Province during 2000–2019

发展阶段	中心坐标	长轴/ km	短轴/ km	椭圆面积/ km ²	方位角/ (°)
第一阶段 (2000– 2011年)	112°41'E, 34°06'N	54.87	37.76	5 665.17	31.29
第二阶段 (2012– 2019年)	113°25'E, 33°58'N	43.77	27.94	3 842.30	75.41

TVDI进行相关分析。通过逐像元计算获取2001–2015年TVDI与年降水量、年均气温的相关系数[图9(a)和图9(b)]、偏相关系数*t*检验结果的显著性分布[图9(c)和图9(d)],定量分析了TVDI对气温、降水的响应。

2.3.1 TVDI与年降水量相关分析

2001–2015年河南省TVDI与年降水量相关关系结果表明,

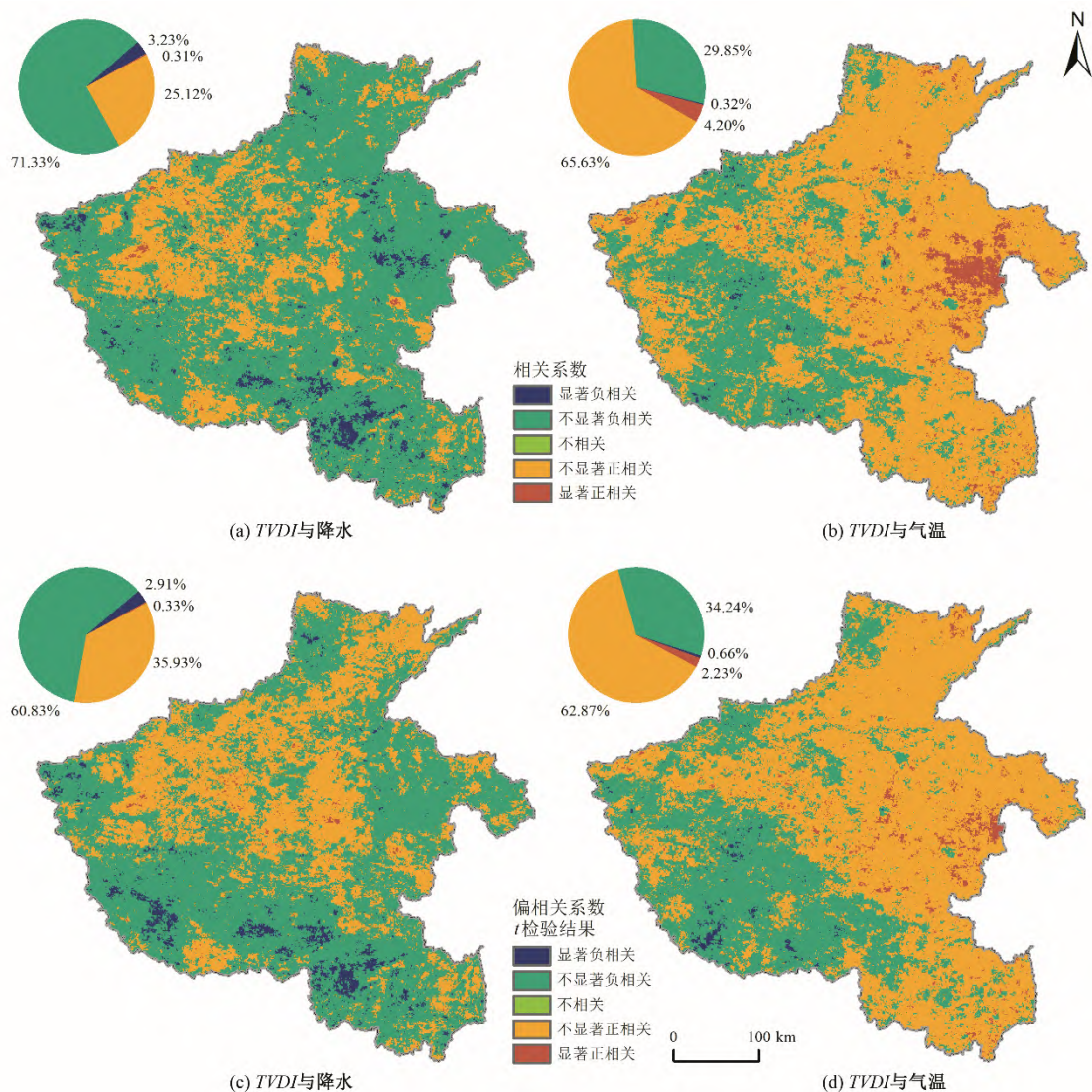


图9 TVDI与年降水量、年均气温的相关系数及偏相关系数*t*检验结果

Fig.9 Correlation partial correlation *t*-test result for TVDI and precipitation, temperature

注:图(a)和(b)为相关系数,在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,阈值为0.532 4,<-0.532 4和>0.532 4表示显著相关,0表示不相关,其他表示不显著;图(c)和(d)为偏相关系数的*t*检验结果,在 $\alpha=0.05$ 显著性水平下,阈值为2.179 0,<-2.179 0和>2.179 0表示显著相关,0表示不相关,其他表示不显著。

两者之间以负相关关系为主,说明随着降水减少,TVDI值变大,则土壤湿度有所降低。相关系数统计结果表明负相关占区域总面积的74.56%,分布范围广,其中显著负相关区域占比为3.23%;正相关区域占比为25.44%,主要分布在豫西(洛阳及南阳市范围)和豫中(郑州及平顶山市范围),其中显著正相关区域占比仅为0.31%[图9(a)]。

从偏相关系数的 t 检验结果来看,TVDI与年降水量同样以负相关关系为主,但又存在差异,负相关区域占全域面积的63.74%,其中显著负相关区域面积占比为2.91%[图9(c)]。相较负相关系数,面积减少10.82%,表明气温在降水对土壤湿度变化的影响中具有10.82%的作用。

以上结果表明,在河南省地区降水对土壤湿度具有促进作用,2001–2015年河南省年降水量呈缓慢下降趋势,土壤湿度也同样表现出下降趋势。同时,也反映出降水、气温对土壤湿度存在交叉作用,仅从相关关系上不能完整表现出年降水量与土壤湿度的作用关系,通过引入偏相关关系可以得到更为客观的结果。

2.3.2 TVDI与年均气温相关分析

2001–2015年河南省TVDI与年均气温相关关系显著性分布、偏相关系数 t 检验结果均表明,年均气温与TVDI值以正相关关系为主,说明随着气温的增加,TVDI值变大,则土壤湿度降低。在相关系数显著性分布统计结果中,正相关区域占全域面积的69.83%,显著正相关的面积占比为4.20%;负相关面积占比为30.17%,主要分布在豫西(南阳市及三门峡市北部范围),其中显著正相关面积占比仅为0.32%[图9(b)]。

偏相关系数的 t 检验结果中,剔除降水因素的影响后,TVDI与年均气温呈正相关区域占面积比为65.10%,其中显著负相关面积占比为2.23%[图9(d)]。相较负相关系数,面积减少4.73%,表明降水在气温对土壤湿度变化的影响中起到4.73%的作用。二者中气温的交叉作用(10.82%)要大于降水的交叉作用(4.73%),说明相对于降水,气温对河南省土壤湿度变化的影响程度更大,其结果与庞素非等的研究结果一致^[23]。

2.3.3 气温降水对河南省土壤湿度变化作用分析

河南省南部降水多于北部,年降水量高值主要在豫西伏牛山脉核心区、豫东黄淮平原和南部大别山区,北部黄河流域降水较少;年均气温存在东西差异,豫西山区年均气温明显低于其他地区(图10)。结合图5河南省土壤湿度空间分布可知,豫北山区和豫西浅山丘陵区气温相对较低,但年降水量也属于全省最低水平,加之地形陡峭大多降水随着沟壑迅速排放,可用于土壤存储的水分较少,因而造成该地区土壤湿度表现为一般或干旱状态。豫西伏牛山脉降水量较高并且年均气温为全省最低,该地区植被以林地为主,保水能力较强,因此伏牛山脉地区整体呈湿润状态。豫东北部黄卫平原原年均气温偏高且降雨量较低,但作为农业种植地区,人工灌溉水源补给较多,因此黄卫平原呈湿润状态。豫东南部黄淮平原及豫西南阳盆地为河南省年均气温峰值地区,土壤水分蒸发量大,土壤湿度整体表现为一般状态甚至局部地区出现干旱情况。豫南地区年均气温高,但年降雨量也远高于其他地区,土壤水分水源补给充足,因而豫南地区总体湿润。

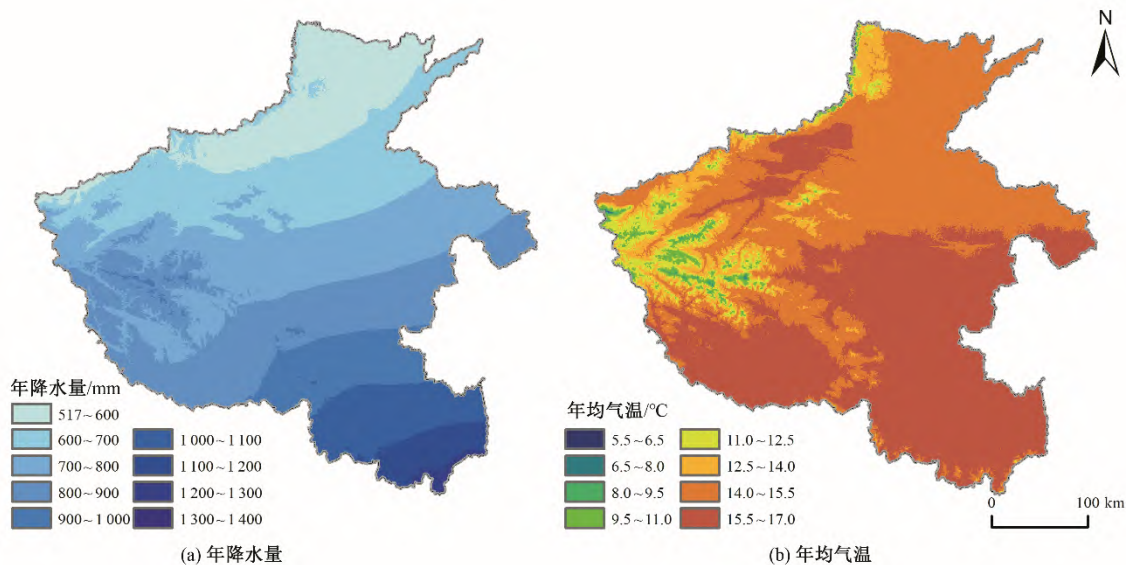


图10 2001–2015年河南省年降水量、年均气温空间分布

Fig.10 Distribution of precipitation and temperature in Henan Province during 2001–2015

2001–2015年河南省年降水量在364.21~1 737.47 mm之间,年均气温在4.69~17.75 °C之间。图11为2001–2015年河南省TVDI、年降水量和年均气温变化趋势,15年间TVDI呈增长趋势,有干旱化倾向,而年降水量以9.09 mm/a的趋势逐渐减少,年均气温则以0.018 °C/a的趋势波动上升。一方面降水量减少,致使土壤水源补给减少,尤其是0~10 cm浅层土壤表现的更为明显;另一方面气温升高影响了土壤温度的升高,并导致土壤

水分蒸发加强,最终河南省土壤湿度表现出降低趋势,具有干旱化倾向。

3 结论与讨论

利用高程数据校正MOD11数据,并使用MOD13和校正后的MOD11数据反演温度植被干旱指数TVDI,分析河南省土壤湿度时空分布特征,并结合2001–2015年气象因子数据,探究了

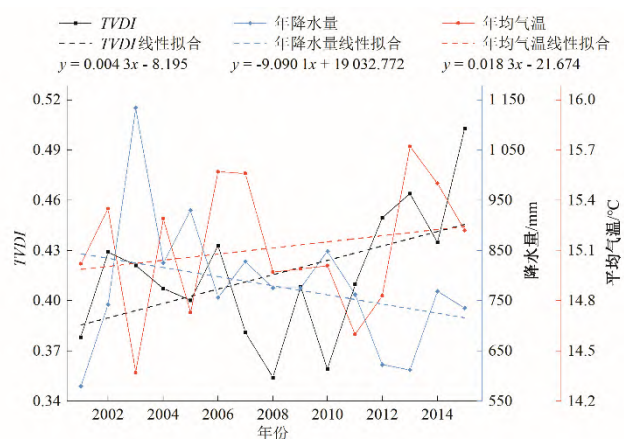


图11 2001-2015年河南省TVDI、降水及气温变化趋势

Fig.11 Variation trend of TVDI, precipitation and temperature in Henan Province during 2001-2015

土壤湿度变化与气温降水变化的关系,主要结论如下。

(1)温度值被干旱指数TVDI反演结果与实测土壤湿度之间具有负相关关系,相关系数通过0.05显著性检验,表明利用MOD11和MOD13数据反演的TVDI指数可用于河南省土壤湿度监测。

(2)2000-2019年,河南省土壤湿度呈轻微变干趋势,2000-2011年整体较湿润(年均TVDI距平值为负),2012-2019年整体较干旱(年均TVDI距平值为正)。土壤湿度分布具有明显空间分异特性,即豫东、豫南较为湿润,豫西、豫北及豫中较为干旱。伏牛山脉、南阳盆地和豫北山地具有变干倾向,而豫东平原则干旱化趋势明显,豫南地区持续变湿,崤山地区土壤湿度好转明显,干旱趋势面积占比(60.27%)大于湿润趋势面积占比(29.71%),河南省土壤湿度总体表现为干旱化趋势。2000-2019年,河南省干旱发生频率最高的区域集中在三门峡至平顶山沿线的峡谷地区,干旱重心由洛阳市转移至许昌市,转移距离为75.12 km,转移速度为3.95 km/a,干旱发生区域在东南方向扩张。

(3)河南省TVDI与年降水量呈负相关关系,与气温呈正相关关系。由于TVDI与土壤湿度呈负相关关系,故降水量下降,则TVDI数值升高,土壤湿度减弱;反之,土壤湿度增加。降水、气温对土壤湿度变化的影响具有交叉作用,其中气温的交叉作用(10.82%)高于降水的作用(4.73%)。2001-2015年,河南省年降水量减少而年均气温增加,二者交叉作用下,河南省整体呈干旱化趋势。

以往基于TVDI指数的土壤湿度监测中,多是对植被生长季或某一特定旱灾进行监测,而没有从长时间序列进行年际变化的监测,不足以表征区域真实的土壤湿度变化情况。基于双抛物线型EVI-LST特征空间计算TVDI,以此反映土壤湿度情况并取得了较好的效果,对河南省近20年土壤湿度变化情况有了系统、客观的认识。河南省部分地区为常年高发旱区或常年有旱区,如宜阳县、渑池县、伊川县等,对此应调整种植结构,发展高效节水特色农业。在土壤湿度影响因素方面,本文探究了利用相关-偏相关分析方法,从时间和空间上定量分析降水、气温对土壤湿度的影响作用。但本文只考虑了气象因素对土壤湿度

的影响,豫东平原和南阳盆地作为河南省主要的旱地耕种区,干旱化趋势明显,而豫西、豫南作为河南省主要的林地及水田分布地区,土壤湿度稳定增加,说明不同土地利用类型对土壤湿度的影响程度亦不相同。因此,下一步工作中将结合土地利用类型、高程、蒸发、人为因素等作为土壤湿度变化的影响因素进行分析。

参考文献:

- [1] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture - climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3-4): 125-161.
- [2] 徐 霞, 孙文彬, 王 振. 基于TVDI的布尔台矿区土壤湿度变化分析[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(4): 285-291.
- [3] 王 娜, 易桂花, 张廷斌, 等. 基于TVDI的青藏高原腹地生长季土壤湿度时空变化及其气候响应[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2185-2197.
- [4] 姚月锋, 李 莉. 基于Landsat 8 TIRS数据与TVDI的流域地表土壤干旱分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 282-289.
- [5] 温国涛, 白建军, 孙嵩松. 基于时间序列遥感数据的陕西省2004-2014年干旱变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 221-229.
- [6] 李谢辉, 王 磊. 河南省历史水旱灾害危险性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1526-1532.
- [7] 朱业玉, 潘 攀, 匡晓燕, 等. 河南省干旱灾害的变化特征和成因分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 311-316.
- [8] WASTON K, ROWAN L, OFFIELD T. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images [J]. Remote Sensing of Environment, 1971, 3: 2017-2041.
- [9] PRICE J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 18(1): 59-73.
- [10] IDSO S B, JACKSON R D, PINTER P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 45-55.
- [11] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J]. 遥感学报, 1994, 36(2): 106-112.
- [12] KOGAN F N. Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655-668.
- [13] BHUIYAN C, SINGH R P, KOGAN F N. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2006, 8(4): 289-302.
- [14] 郑兴明, 赵 凯, 李晓峰, 等. 利用微波遥感土壤水分产品监测东北地区春涝范围和程度[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 334-339.
- [15] SANDHOLT I, RASMUSSEN K. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 213-224.
- [16] 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.
- [17] 齐述华, 王长耀, 牛 铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003(5): 420-427, 436.

(下转第153页)

参考文献:

- [1] HEARNE R R, WILLIAM E K. The economic and financial gains from water markets in chile [J]. *Agricultural Economics*, 1997, 15 (3): 187-199.
- [2] 李 浩, 胡继连. 基于两部门模型的黄河水权转换影响因素研究 [J]. *水利经济*, 2011, 29(1): 27-30, 34, 74.
- [3] GRAFTON R Q, LIBECAP G. D., EDWARDS E. R., et al. Comparative assessment of water markets: insights from the Murray-Darling Basin of australia and the western USA [J]. *Water Policy*, 2012, 14 (2): 175-193.
- [4] MAKSUD B., BHADURI A., CLAUDIA R. Potential Gains from Water Rights Trading in the Aral Sea Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 152: 41-56.
- [5] 潘海英, 朱彬让, 周 婷. 基于实验经济学的水权市场有效性研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(8): 112-121.
- [6] FANG L, WU F-P. Can Water Rights Trading Scheme Promote Regional Water Conservation in China? Evidence from a Time-Varying DID Analysis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(18): 6 679.
- [7] 田贵良, 盛 雨, 卢 曦. 水权交易市场运行对试点地区水资源利用效率影响研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(6): 146-155.
- [8] GRAFTON R Q, LIBECAP G, MCLENNON S, et al. An Integrated Assessment of Water Markets a Cross-Country Comparison [J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2011, 5 (2): 219-239.
- [9] 薛福洋. 中国水权市场运行效果 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2017.
- [10] LIU Y, LI P, ZHANG Z-W. Resilient or Not: A Comparative Case Study of Ten Local Water Markets in China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 1-16.
- [11] 万 峥. 基于水资源可持续利用的水权转换综合效益及生态影响评估研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [12] 甘肃省水文水资源局. 甘肃省水资源公报 [R]. 兰州: 甘肃省水利厅, 2019.
- [13] HUANG G W. From water-constrained to water-driven sustainable development: a case of water policy impact evaluation [J]. *Sustainability*, 2015: 8 950-8 964.
- [14] MOORE S M. The development of water markets in China: progress, peril, and prospects [J]. *Water Policy*, 2015, 17 (2): 253-267.
- [15] PALOMO-IRON S, JOSEGOMEZ-LIMON, LAURARIESGO. Water markets in spain: performance and challenges [J]. *Water*, 2015, 7(2): 652-678.
- [16] 公冶小燕, 林培光, 任威隆, 等. 基于改进的TF-IDF算法及共现词的主题词抽取算法 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2017, 53 (6): 1 072-1 080.
- [17] 施聪莺, 徐朝军, 杨晓江. TFIDF算法研究综述 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(增刊1): 167-170, 180.
- [18] 牛永洁, 田成龙. 融合多因素的TFIDF关键词提取算法研究 [J]. *计算机技术与发展*, 2019, 29(7): 80-83.
- [19] 王舒娅, 姜 娜, 康绍忠. 关于石羊河流域水权制度改革的调查研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(3): 143-146.
- [20] 徐梓曜, 王 寅, 刘云杰, 等. 农业水权市场综合框架体系及案例分析 [J]. *水利经济*, 2017, 35(4): 38-45, 54.
- [21] 王 磊. 石羊河流域水权制度建设探讨 [J]. *甘肃水利水电技术*, 2015, 51(10): 4-5, 16.
- [22] 郑 航, 许婷婷, 李鹏学, 等. 干旱流域自流灌区农户水权交易行为分析 [J]. *水利发展研究*, 2016, 16(5): 11-16.
- [18] 刘 英, 马保东, 吴立新, 等. 基于NDVI-ST双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 55-63.
- [19] 卢 远, 华 瑾, 韦燕飞. 利用MODIS数据进行旱情动态监测研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 55-58.
- [20] 闫 娜, 李登科, 杜继稳, 等. 基于MODIS产品LST/NDVI/EVI的陕西旱情监测 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(4): 178-182.
- [21] 沙 莎, 王 莺, 王丽娟, 等. 土地利用数据在TVDI干旱监测方法中的应用研究: 以甘肃省河东地区为例 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 375-381.
- [22] LIANG L, ZHAO S H, QIN Z H, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010 [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1 501-1 508.
- [23] 庞素菲, 魏 伟, 郭泽呈, 等. 基于TVDI的甘肃省农业旱情特征及其影响因素 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1 849-1 860.
- [24] 张文鸽, 刘 豪, 殷会娟. 基于改进TVDI指数的河南省干旱监测 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(11): 50-53, 144.
- [25] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 126-132.
- [26] 刘 英, 岳 辉, 李 遥, 等. 基于MODIS的河南省春旱遥感监测 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 218-223.
- [27] 杨肖杰, 秦明周, 张鹏岩, 等. 河南省耕地压力与经济发展耦合特征的时空分析 [J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(3): 144-149.
- [28] 冉 琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的DEM订正 [J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 32-36, 50.
- [29] 何建村, 白云岗, 张严俊. 基于MODIS数据新疆土壤干旱特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 735-742.
- [30] 汪 左, 王 芳, 张 运. 基于CWSI的安徽省干旱时空特征及影响因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 853-866.
- [31] 杨育丽, 马明国, 葛 伟. 夜间灯光影像探究北京市城市发展空间特征 [J]. *遥感信息*, 2019, 34(5): 41-50.
- [32] 何 月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被NDVI动态及其对气候的响应 [J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4 352-4 362.
- [33] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 37-70.
- [34] 薛天翼, 白建军. 基于TVDI和气象数据的陕西省春季旱情时空分析 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 240-246.
- [35] 刘 馨, 宋小宁, 冷 佩, 等. 基于MODIS数据的黄河源区土壤干湿状况时空格局变化 [J]. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(2): 178-187.
- [36] 程 伟, 辛晓平. 基于TVDI的内蒙古草地干旱变化特征分析 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2 728-2 742.

(上接第146页)