

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.040.

顾倩, 耿广坡, 郑若琳, 等. 渭河流域土壤水分时空变化及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 199-211.

Gu Qian, Geng Guangpo, Zheng Ruolin, et al. Analysis on Spatiotemporal Variation of Soil Moisture and Its Influencing Factors in Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 199-211.

渭河流域土壤水分时空变化及其影响因素分析

顾倩, 耿广坡, 郑若琳, 张保, 何祖鑫

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要: [目的]揭示渭河流域土壤水分时空变化特征,厘清影响土壤水分变化的主要因素,为渭河流域有效监测农业干旱提供科学依据。[方法]基于 2000—2020 年渭河流域 MODIS NDVI、LST 数据、气象数据,综合趋势分析、地理探测器等方法,构建 NDVI-Ts 特征空间,分析了土壤水分时空变化及其驱动因子。[结果]渭河流域近 20 年土壤水分整体以 $0.0049/a$ 的速率呈显著下降趋势,有明显变干的现象。在不同土地利用类型中,近 20 年来土壤水分含量表现为林地>草地>耕地>城市和建设用地。总体干湿等级以正常为主($0.4 \leq TVDI < 0.6$),土壤水分的低值区主要分布在渭河流域西部及北部地区,高值区主要集中在东南以及西北边缘地区。子流域中渭河主流域发生干旱面积占比呈现上升趋势,其中渭河主流域南部关中平原土壤水分下降趋势最为显著。探测因子影响力分析发现高程、平均温度、潜在蒸散发是影响渭河流域土壤水分分布的主导因素,其解释力显著高于其他因子;因子交互作用分析显示平均温度与累计降水量组合对渭河流域土壤水分空间分布有明显的影响。[结论]渭河流域近 20 年土壤水分显著下降,有明显变干的趋势,流域土壤水分变化主要受地形地貌和气象因素的影响。

关键词: 土壤水分; TVDI; 渭河流域; 时空分布; 地理探测器

中图分类号: S152.7⁺¹; S127

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0199-13

Analysis on Spatiotemporal Variation of Soil Moisture and Its Influencing Factors in Weihe River Basin

Gu Qian, Geng Guangpo, Zheng Ruolin, Zhang Bao, He Zuxin

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

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in the Weihe River Basin, to clarify the main factors affecting soil moisture changes, so as to provide scientific basis for effective monitoring of agricultural drought in the Weihe River Basin. [Methods] Based on the MODIS NDVI, LST data and climatic data of Weihe River Basin from 2000 to 2020, integrated trend analysis and geographic detector, the NDVI-Ts characteristic space was constructed, and the spatiotemporal variation of soil moisture and its driving factors were analyzed. [Results] In the past 20 years, the soil moisture in Weihe River Basin showed a significant downward trend at the rate of $0.0049/a$, and there was an obvious drying phenomenon. In different land use types, the soil moisture contents in the past 20 years followed the order: woodland>grassland>cultivated land>urban and construction land. The overall dry and wet grade was mainly normal ($0.4 \leq TVDI < 0.6$). The low value areas of soil moisture mainly distributed in the west and north of Weihe River Basin, and the high value area primarily concentrated in the southeast and northwest edge areas. In the sub-basins, the proportion of drought area in the main basin of Weihe River showed an upward trend, in which the decreasing trend of soil moisture in Guanzhong Plain

收稿日期: 2023-11-20

修回日期: 2023-12-22

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“渭河流域冬小麦旱灾风险及其对气候变化的响应研究”(41807503)

第一作者: 顾倩(1999—), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向为灾害遥感研究。E-mail: 15620532357@163.com

通信作者: 耿广坡(1986—), 男, 河南浚县人, 博士, 副教授, 主要从事区域环境变化与灾害遥感研究。E-mail: gengguangpo@xust.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

located in the south of the main basin of Weihe River was the most significant. According to the influence analysis of detection factors, it was found that elevation, the average temperature and the potential evapotranspiration were the main factors affecting soil moisture distribution in Weihe River Basin, and their explanatory power was significantly higher than that of other factors. Factor interaction analysis showed that the combination of the average temperature and the cumulative precipitation had a significant effect on the spatial distribution of soil moisture in Weihe River Basin. [Conclusion] Soil moisture in Weihe River Basin had decreased significantly in the past 20 years, and there was an obvious drying trend. The change of soil moisture in Weihe River Basin was mainly affected by topography, geomorphology and meteorological factors.

Keywords: soil moisture; TVDI; Weihe River Basin; spatiotemporal distribution; geographic detector

土壤水分是地球水资源和土地生产力的重要组成部分,也是研究水文循环和气候变化的关键因素,大面积土壤水分监测对于陆表水循环、农业旱涝状态评估、作物估产等研究十分重要^[1]。监测土壤水分状况并分析其时空动态变化,对于更好地理解水能量和碳循环以及许多气象、气候和水文应用至关重要^[2]。同时,土壤湿度的研究对改善区域气候和预测区域湿润和干燥期具有重要意义。获取土壤水分信息的方法主要有两种:传统的人工土壤水分观测和利用多源遥感技术。传统的人工土壤水分观测方法以田间实测法为主,在地面站直接测量土壤水分值,并从野外取样^[3]。遥感技术因其观测范围广、采集周期短、采集频率高、可以实时、快速地获取时空变化特点等优点被广泛用于大规模、长期的土壤水分反演和动态监测^[4]。多源遥感技术是土壤水分监测的主流方法,而遥感反演可以提供大尺度和空间上连续的土壤水分信息。热惯量法、植被指数法以及微波遥感法^[5-6]是基于遥感数据进行地表土壤水分反演的常用方法。其中温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)是基于归一化植被指数(NDVI)与地表温度(LST)得到的,具有计算简单、数据易获取、反演精度高等特点,被广泛用于不同空间尺度的土壤水分监测研究和分析^[7]。Peng 等^[8]基于 NDVI 和 LST 计算 TVDI,利用 96 个站点的实际土壤水分测量结果,建立回归模型来估计过渡区的土壤水分,研究发现,TVDI 与土壤水分呈极显著负相关,TVDI 可以较好地反映成都平原的土壤水分状况。Zhao 等^[9]研究 TVDI_{NDVI} 和 TVDI_{EVI} 在大时间尺度土壤水分监测的适用性,发现 TVDI_{NDVI} 适用于监测暖季的土壤水分状况,而 TVDI_{EVI} 更适合监测冷季 0—10 cm 层的土壤湿度。陈明星等^[10]利用 NDVI, EVI 修正土壤调节植被指数(MSAVI)以及比值植被指数(RVI)分别计算 TVDI,并使用土壤湿度和降雨量数据验证其准确性,结果表明,TVDI 值越高,土壤水分值越低。总体上,利用多源遥感技术,通过遥感反演快速获得连

续的土壤水分信息,已被广泛用于研究不同地区、不同尺度的土壤水分反演和动态监测中。以 NDVI 与 LST 为基础,拟合干湿边方程,提取 TVDI 来反演土壤湿度时空变化特征已是监测土壤湿度的重要手段。

土壤水分的影响因素繁多,包括气象(降水、气温)、土壤(土壤质地、地形因子)与植被(植被类型)等环境要素以及人类活动要素。许多学者对土壤水分变化的驱动因素开展了系列研究,主要方法包括 Pearson 相关、偏相关、复相关等,相关分析可以从整体上快速明确各驱动因素对土壤水分影响程度。庞素菲等^[11]基于土壤水分表征干旱,利用 Pearson 相关系数比较各驱动因子与农业干旱的关系,发现海拔、气温、坡度等是影响甘肃省农业干旱的主导驱动因子。刘观鹏等^[12]将气象因素的驱动因子划分成 5 类,采用偏相关性分析和复相关性分析计算 TVDI 与气象因子单一和双重影响下的相关系数,发现气象因子强驱动(降水气温)是 TVDI 变化的主导因素,其次是单一降水。目前,线性回归残差分析、参数最优地理探测器模型等定量化分析法逐渐被运用到土壤水分驱动因子的研究中。王椰等^[13]基于构建的温度植被干旱指数模型,利用参数最优地理探测器研究黄土高原土壤水分变化驱动因子的解释力大小,发现排列前三的是高程、土壤类型以及植被类型。相对于相关性分析方法,参数最优地理探测器可通过比较各驱动因素对土壤水分的解释力大小,从而明确影响土壤水分变化的主导因子,研究结果具有更高的可靠性与实用性。

渭河流域位于中国西北内陆区东缘,地处西部半干旱、半湿润的过渡带,属大陆性季风气候区,在气候变化背景下流域降水波动较大,升温明显,干旱多发,对农业生产以及生态环境造成严重威胁,开展渭河流域土壤水分时空变化及其影响因素分析对准确、有效监测流域农业旱涝状态、作物估产等研究具有重要意义。本文通过获取渭河流域 2001—2020 年 MODIS NDVI, MODIS LST 数据构建 NDVI-Ts 特征空间数

势分析法、参数最优地理探测器模型等方式对 TVDI 值进行分析,以此对渭河流域 2001—2020 年 TVDI 的时空变化特征进行探讨并揭示其空间分异性的驱动因子,明晰 TVDI 对渭河流域自然以及土地表面类型因子的响应机制,以期为渭河流域的生态预警和旱灾防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河流域位于北纬 33°40′—37°30′,东经 104°00′—110°20′,海拔最高达 3 913 m,处于中国地理位置的中部。渭河流域是黄河最大的子流域,流域长度为

818 km,总面积约为 13.47 万 km²;发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,自西向东流经甘肃、陕西、宁夏三省(区),在渭南市潼关县汇入黄河^[14]。渭河有两条主要支流:北洛河和泾河。渭河流域地形复杂,由西向东,地势逐渐变平,河谷变宽。流域西部是陇中高原,流域北部主要是黄土丘陵沟壑区,覆盖面积大,水土流失问题严重;流域中部是关中盆地,南起秦岭,北至北部山区;南部是秦岭,自西向东延伸,横跨关中平原南部(图 1)。渭河流域以耕地为主,其次是草地、林地和城市以及建筑用地,低覆盖地占比几乎为零。该流域复杂的地形给生态环境带来挑战,水土流失和水污染加剧对改善生态环境可持续发展至关重要^[15]。

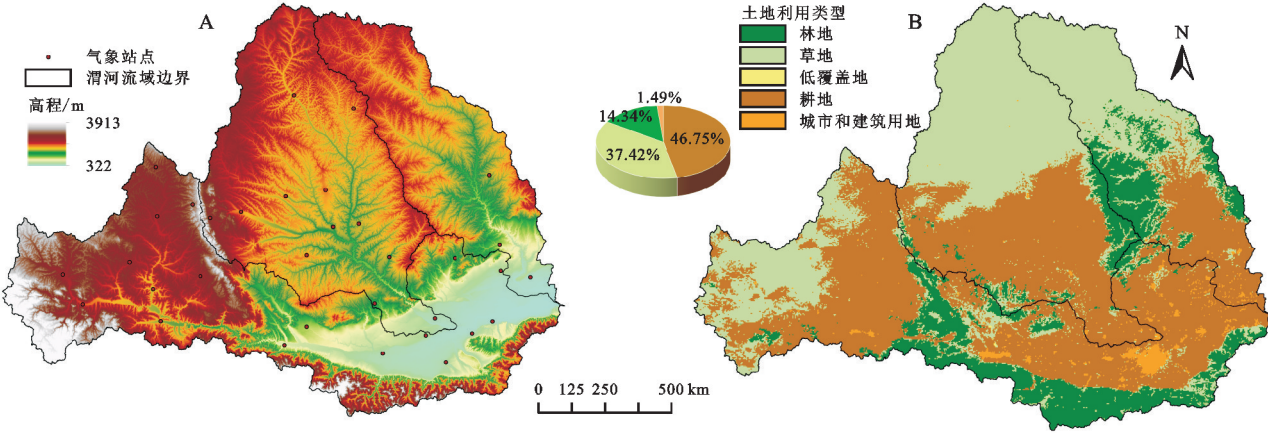


图 1 渭河流域地形和土地利用类型

Fig. 1 Topographic map of Weihe River basin and land use type

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI, LST 数据来源及处理 本次研究中所使用到 2001—2020 年的数据主要来源于 NASA 官网 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) 下载的 MODIS 遥感数据的 MOD11A2 产品和 MOD13A2 产品。其中 MOD11A2 产品是 8 d 合成的地表温度数据,MOD13A2 产品是 16 d 合成的植被指数数据,空间分辨率均为 1 km×1 km^[16]。通过对渭河流域多个不同时段初步分析后,利用最大值合成法(MVC, maximum Value Composites)对地表温度产品(MOD11A2)以及植被指数产品(MOD13A2)进行尺度合成。MVC 能够有效减少大气中云、气溶胶等因素的干扰,提高数据的精确性和稳定性。获得渭河流域 20 年的 NDVI, LST 月值、年值的栅格数据。

1.2.2 气象数据来源及处理 2001—2020 年的月平均气温、月累积降水量以及月潜在蒸散发数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),空间分辨率为 1 km×1 km;该数据根据东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)发布的全

球 0.5°气候数据集以及 WorldClim 发布的高分辨率气候数据集,通过 Delta 空间降尺度方法在中国地区生成^[17-18]。对逐月累积降水进行累加获得年累积降水量数据,对逐月温度与潜在蒸散发数据取平均值得到渭河流域年均温度和年均潜在蒸散发数据,最终获得空间分辨率为 1 km 的渭河流域 2001—2020 年逐月降水、气温和潜在蒸散发栅格数据集。

1.2.3 高程和土壤湿度数据来源及处理 高程数据来自中国科学院资源环境科学数据中心,分辨率为 1 km。土壤相对湿度数据集(AGME_AB2_CHN_TEN)来源于中国农作物生长发育状况资料数据集,基于站点观测,观测时间为每旬一次。本研究所使用的年土壤湿度数据为 0—10 cm 的各旬值数据的平均值。

1.2.4 资源类型数据来源及处理 资源数据包括土壤类型、植被类型、土地利用类型以及土壤持水量数据。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心平台(<http://data.tpdc.ac.cn>)的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)^[19]。植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心平

台^[20](<https://www.resdc.cn/>)。土地利用类型采用 2004 年欧空局全球 1 000 m 分辨率陆地覆盖数据(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>),分类依据为联合国粮食农业组织土地覆盖分类系统(LCCS)^[21]。土壤持水量数据来自国家青藏高原科学数据中心的面向陆面过程模型的中国土壤水文数据集(1980)(<https://doi.org/10.11888/Soil.tpd.c.270.606>),空间分辨率为 30 弧秒(约 1 km)^[22]。

1.3 研究方法

1.3.1 温度植被干旱指数 TVDI 估算 本研究运用 TVDI 模型对遥感数据进行反演^[7]。多项研究表明,LST 与 NDVI 呈现负相关关系,由于植被蒸腾作用,地表温度随着植被覆盖度的增加而降低^[11]。如果地表干燥,缺乏水分,地表温度就会迅速上升;相反,如果表土富含水分,地表温度就会增加很少。Sandholt 等^[23]对 NDVI-LST 特征空间进行简化,提出温度植被干旱指数概念,计算公式如下:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{Smin}}{T_{Smax} - T_{Smin}} \quad (1)$$

式中:TVDI 为温度植被干旱指数; T_s 为地表真实温度(°C); T_{Smax} 为某一 NDVI 对应最高地表温度(°C),即干边; T_{Smin} 为地表最低温度(°C),即湿边。干边与湿边方程分别为:

$$T_{Smax} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$T_{Smin} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

式中: a_1, b_1, a_2, b_2 为干、湿边拟合方程的待定系数,具体值主要通过构建 NDVI- T_s 特征空间获得。 T_s 越接近 T_{Smax} ,TVDI 越大,土壤含水率越低;相反, T_s 越接近 T_{Smin} ,TVDI 越小,则土壤含水率越高。因此,可以通过 TVDI 与土壤含水率的相关性监测干旱情况。TVDI 值介于 0~1 之间,TVDI 值越大,表明该区土壤湿度越低。参考已有研究中土壤湿度等级划分结果^[16],TVDI 数值等级划分见表 1。

表 1 TVDI 干湿等级划分表

Table 1 Drought and wet classification based on TVDI

TVDI 值	干湿等级
$0 \leq TVDI < 0.2$	极湿润
$0.2 \leq TVDI < 0.4$	湿润
$0.4 \leq TVDI < 0.6$	正常
$0.6 \leq TVDI < 0.8$	干旱
$0.8 \leq TVDI \leq 1$	极干旱

1.3.2 趋势分析法 利用趋势分析的方法,计算出研究区内每个像元点 TVDI 的年际变化趋势,若 $slope > 0$,表示 TVDI 呈现增加趋势, $slope < 0$ 则表

示呈下降趋势。计算公式如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times TVDI_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n TVDI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:slope 为线性回归方程的斜率;变量 i 为时间变量; n 为研究的总年数。

1.3.3 相关分析 本研究利用 Pearson 相关系数分析 TVDI 年均值与时间变量的相互关系,探讨 2001—2020 年内不同时期 TVDI 的变化特征。计算公式如下:

$$R = \frac{N \times \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \times \sqrt{N \times \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (5)$$

式中: R 为 Pearson 相关系数; x_i, y_i 分别为第 i 年 TVDI 和时间变量; N 为研究的总年数。 R 的取值范围为 $[-1, 1]$,当 R 大于 0 时呈正相关关系,当 R 小于 0 时呈负相关关系,随着 R 绝对值的增大,且越接近于 1,相关性越强,反之,相关性越弱。本研究将相关系数划分为显著负相关,不显著负相关,不显著正相关,显著正相关共计 4 个部分(表 2)。

表 2 相关系数检验的临界值($\alpha = 0.05$)

Table 2 Critical value of correlation coefficient test ($\alpha = 0.05$)

N	显著负相关	不显著负相关	不显著正相关	显著正相关
10	< -0.632	$-0.632 \sim 0$	$0 \sim 0.632$	> 0.632
20	< -0.444	$-0.444 \sim 0$	$0 \sim 0.444$	> 0.444

1.3.4 参数最优地理探测器 参数最优地理探测器非线性假设,具有优雅的形式和明确的物理含义,已在自然和社会科学多领域应用,它是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法,既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据^[24]。空间分异性是地理现象的基本特点之一。地理探测器是探测和利用空间分异性的工具。利用地理探测器进行土壤水分变化驱动因素分析的主要步骤包括:将驱动因子的栅格数据集(驱动因素数据无需进行归一化处理)提取至渔网点,使用 R 语言的最优离散函数对数据进行离散,选择最优离散方式与分类数,最后运用地理探测器包进行探测。本研究使用地理探测器定量分析渭河流域 2001 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年以及 20 a 年均 TVDI 空间分布的驱动力因素,探究各因子对 TVDI 的单独作用或交互作用(q 值)。其中, q 值的计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (7)$$

式中: h 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差; L 为第 h 层因子的分类个数。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。 q 为探测指标大小,值越大说明自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱。

交互作用探测是识别不同风险因子 X 。交互作用的 q 值,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力^[13]。交互作用可以分为以下几类(表 3)。

2 结果与分析

2.1 NDVI-Ts 特征空间的构建

2.1.1 NDVI-Ts 特征空间及干、湿边拟合 本研究采用 NDVI-Ts 特征空间来拟合干湿边方程,进而获

取 TVDI 模型所需的斜率和截距 2 个参数,通过构建两期影像的 NDVI-Ts 特征空间,并利用 NDVI 确定干、湿边,获得 2001—2020 年渭河流域年际的 NDVI-Ts 特征空间图(图 2)。结果表明,研究区不同时段内的 NDVI 与 LST 的值域各异,但其像元对散点分布呈现较好的关系,因此能够很好地拟合干湿边方程,从而能够较好地利用植被—温度的关系来模拟地表土壤水分。

表 3 自变量交互作用的类型

Table 3 Types of independent variable interactions	
交互作用类型	判断准则
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) \text{ and } q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
单因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ or } q(X_2)$
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ and } q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

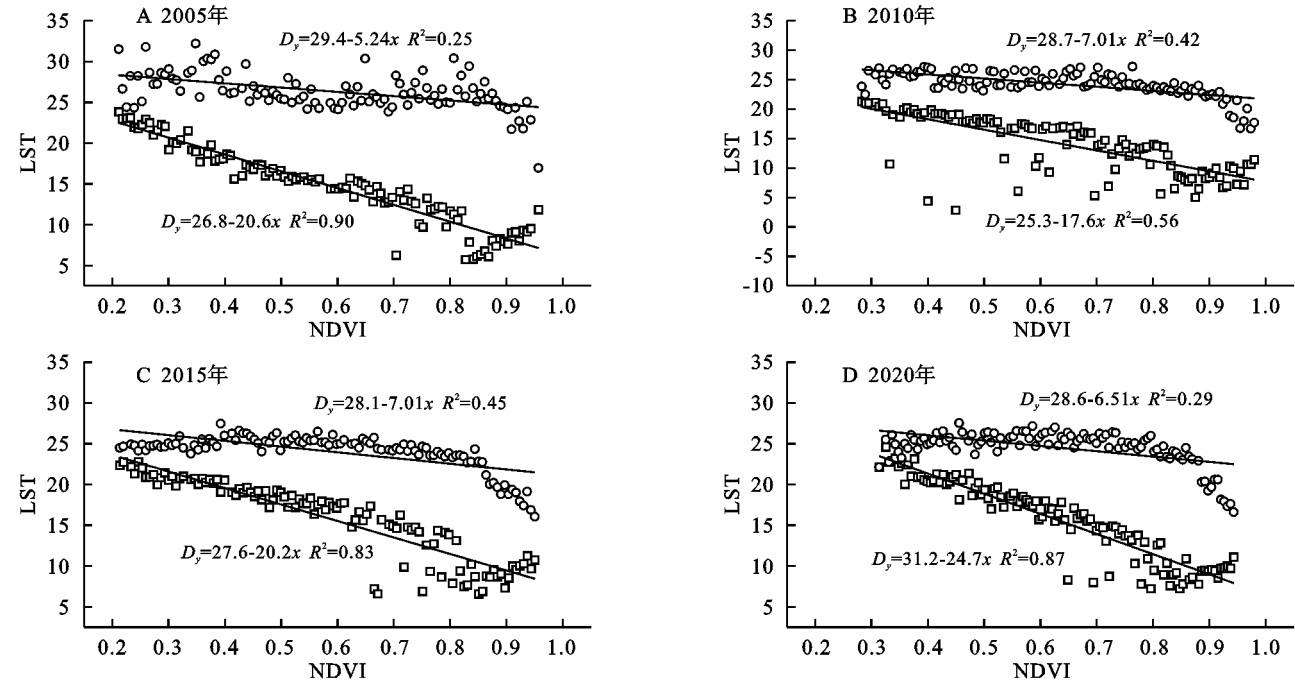


图 2 2001—2020 年渭河流域干湿边拟合结果

Fig. 2 The fitting results of dry and wet edges of Weihe River Basin from 2001 to 2020

2.1.2 土壤湿度反演结果验证 利用渭河流域 32 个气象站的 10 cm 土壤相对湿度数据与相对应的 TVDI 数据进行相关性验证。本次采用 2010 年的年均 TVDI 数据,空间分辨率为 1 km,由于气象站点数据与 MODIS 产品的获取时间存在偏差,同时在关中平原地区存在灌溉的影响,经过筛选,选用 2010 年 23 个站点中相吻合的有效土壤相对湿度数据作为验证数据,构建 TVDI-土壤相对湿度散点图(图 3)。结果表明 TVDI 与表层土壤相对湿度呈现负相关,TVDI 值越大,土壤湿度越小。因此,利用植被干旱指数模型能很好地反演研究区内土壤水分的变化趋势。

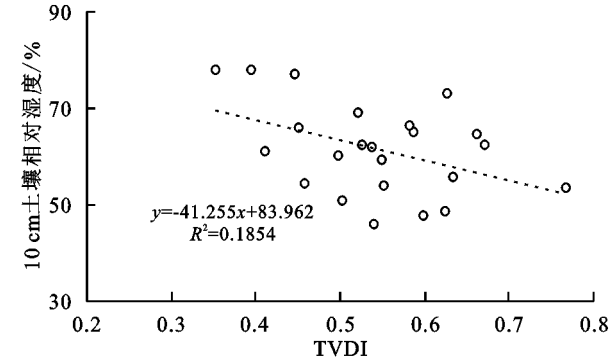


图 3 TVDI-土壤湿度散点图

Fig. 3 The scatter plot of TVDI-soil moisture

2.2 渭河流域土壤水分时间变化特征

2.2.1 渭河流域土壤水分年际变化特征 本次研究统计渭河流域及其子流域 2001—2020 年 TVDI 年均值,绘制其与年份变化的折线图(图 4)以表现和分析 TVDI 的年际变化趋势。从渭河流域整体上来看,其年均 TVDI 值主要在 0.45~0.58 波动,这 20 年来 TVDI 均值大致为 0.51,表明渭河流域土壤湿度整体属于一般状态。结合曲线来看,2001—2020 年渭河流域 TVDI 整体呈现极显著增加趋势($p < 0.01$),增加速度较为缓慢,速度约为 0.049/10 a,说明 20 年来渭河流域土壤水分含量减少,同时有明显变干的趋势。从各研究阶段来看,渭河流域 TVDI 均值并非单一稳定的增长而是呈现波动增长趋势,20 年间土壤水分呈现小范围波动且稳定下降的趋势。在整个研究时间段内,主要有三次大的增幅以及四次较小

的降幅,造成此次波动的原因可能是不同年份的气候条件、退耕还林还草以及人类活动干扰程度的不同导致的。

从渭河流域各子流域近 20 年 TVDI 均值变化可以看出,虽然 2001—2020 年渭河流域 3 个子流域 TVDI 均值的波动变化都较为剧烈,但各子流域总体 TVDI 均呈增加趋势,尤其是渭河主流域和北洛河流域 TVDI 均表现出显著增加趋势($p < 0.05$)。分析渭河流域的 3 个子流域可以看出,泾河流域的 TVDI 均值相比于其他两个子流域来说较小,主要原因在于泾河流域主要分布在区域的西北部的黄土高原部分地区,该地区人口分布较少、气温较低导致 TVDI 均值较小,土壤水分含量相对较高。北洛河流域 TVDI 均值相对较高,主要原因可能是该流域下游受人类活动影响大,土壤水分含量较少。

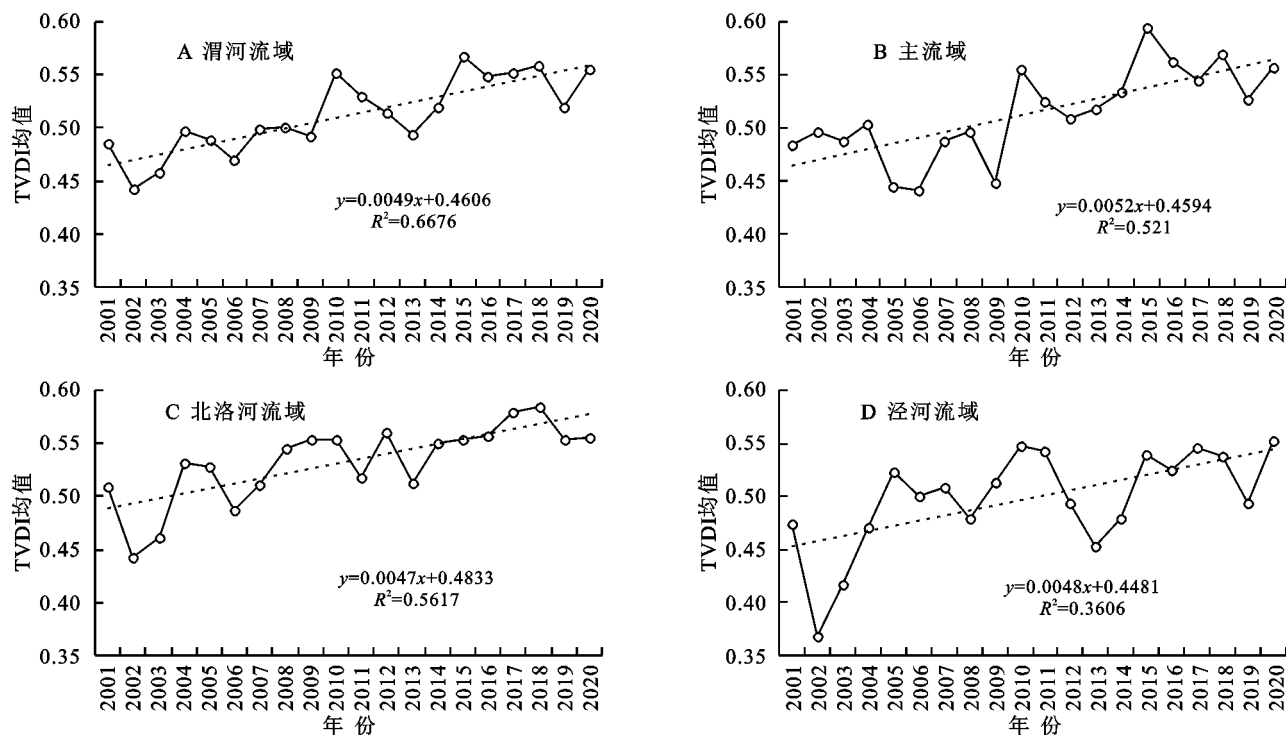


图 4 2001—2020 年渭河流域年 TVDI 均值变化趋势

Fig. 4 The variation trend of annual TVDI mean in Weihe River Basin from 2001 to 2020

2.2.2 渭河流域不同土地利用类型土壤水分变化特征 基于年际 TVDI 以及渭河流域土地利用类型,计算不同土地利用类型下 TVDI 的平均值,从而分析不同类型下 TVDI 的变化特征,得到渭河流域 20 年来不同土地利用类型土壤水分变化图(图 5)。土地利用类型中林地、草地以及耕地的 TVDI 均值均呈现显著上升的趋势,但在低覆盖土地的城市以及建设用地上其 TVDI 均值呈现下降趋势。表明近 20 年来林地以及草地的 TVDI 均值较小,而耕地以及城市及其建设用地的 TVDI 均值较大,主要是因为其受人类活动

的影响大,导致其 TVDI 均值过大,土壤水分含量较少,较为干旱,但在 2018 年这种情况得以改善。

2.3 渭河流域土壤水分空间变化特征

2.3.1 渭河流域土壤水分空间分布变化 基于渭河流域 2001—2020 年 MODIS NDVI 和 LST 数据,通过构建 NDVI 和 LST 的特征空间,计算得到相应的干/湿边方程,获取 2001—2020 年的 TVDI 时间序列,得到渭河流域 TVDI 逐年空间分布图(图 6)。从整体上看,渭河流域近 20 年来土壤水分保持在正常范围内,但空间分布差异非常明显。湿润地区主要分

布在流域西部以及流域北部部分地区,干旱地区则主要集中在流域东南以及西北边缘地区。其中,湿润面积较大的年份主要集中在时间前段,主要是 2001 年、2002 年和 2003 年,这些湿润地区大多分布在流域北部黄土高原以及西部地区。干旱面积较大的年份有:2010 年、2015 年、2017 年以及 2020 年等。红色区域越深代表土壤水分含量越低,代表着这些地方都发生了较为严重干旱。从 2010 年来看,通过统计土壤水分类型面积百分比,发现干旱面积占比较大,主要集

中在渭河流域的东北部以及东南部的关中平原地区。此外,在北洛河流域下游以及渭河主流域下游也有部分地区有干旱发生;从 2015 年来看,干旱区域主要分布在流域的西部部分地区以及渭河主流域下游地区;2017 年干旱则分布在流域的西北部分地区、渭河流域中下游,尤其是关中平原发生了极干旱的情况,干旱类型的面积占比较大;而 2020 年整体来说湿润面积占比较小,正常以及干旱面积比重则较大。其他年份干湿状况主要以正常类型为主。

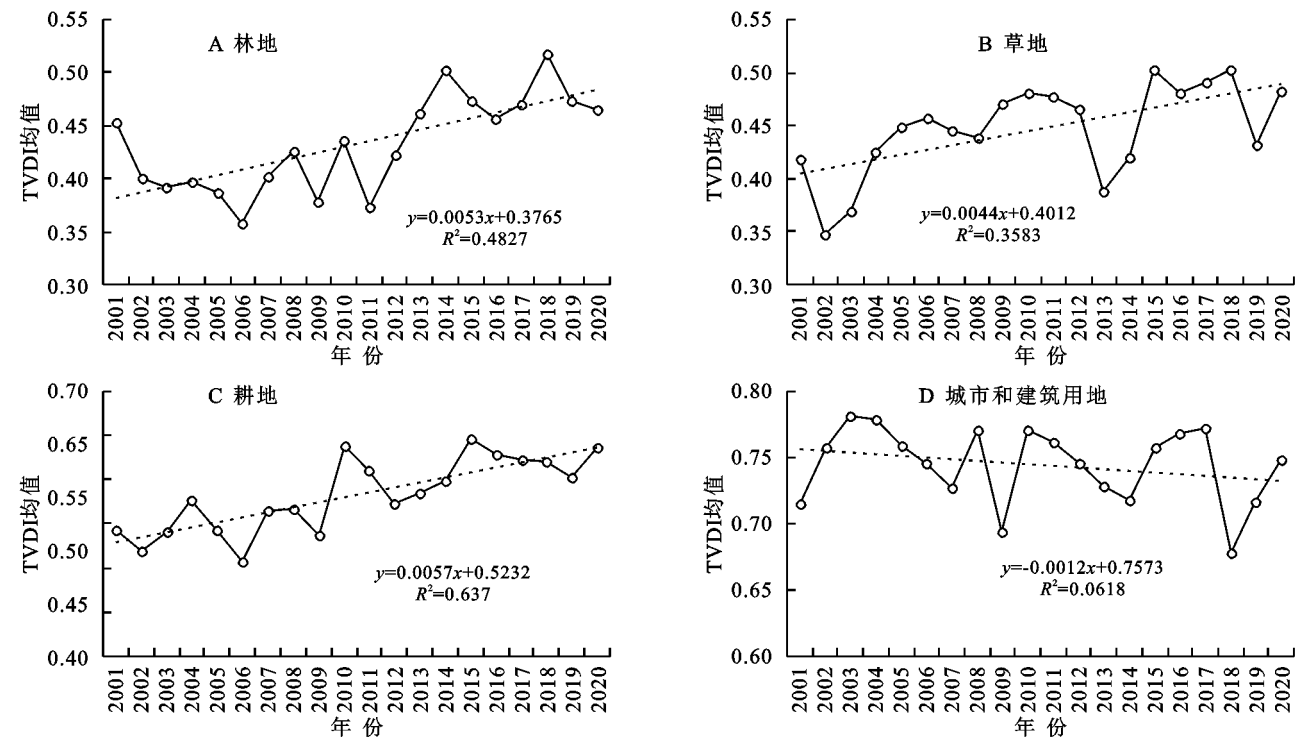


图 5 2001—2020 年渭河流域不同土地利用类型土壤水分变化

Fig. 5 Soil moisture changes of different land use types in Weihe River Basin from 2001 to 2020

利用 TVDI 分级标准(表 1),基于年际 TVDI 空间数据,逐年计算土壤水分类型面积百分比,统计渭河流域及其子流域近 20 年来土壤水分类型面积比例(图 7),分析渭河流域及其子流域干旱的影响范围以及变化程度。从整体来看,渭河流域近 20 年以来以湿润和正常为主,干旱面积呈增加趋势。其中 2002 年、2003 年主要以湿润类型为主,说明这两年是为湿润的年份;其次,渭河流域近 20 年来,每年均发生了不同程度的干旱,其中 2010 年、2011 年、2015 年、2016 年、2017 年、2018 年和 2020 年这 7 年干旱面积比重都较大,说明渭河流域这几年的干旱程度较为严重,其中 2015 年干旱类型的面积比重最大,达到了 39.56%;2015 年、2016 年、2017 年和 2020 年这四年渭河流域发生极端干旱的面积比都超过了 10% (图 7A)。

从 3 个子流域来看,近 20 年以来干湿状况分布差异较大(图 7B,7C,7D)。主流域湿润和干旱面积占比呈现上升趋势,其中极干旱发生面积呈大幅度上升趋势,

而关中平原大部分位于渭河主流域,这对该区域的作物正常生长和产量稳定产生了严重威胁;其中 2005 年(49.39%)和 2006 年(48.93%)以湿润为主,极湿润占比分别达到了 15.66%和 15.05%;2010 年、2015 年和 2018 年发生的干旱面积比分别为 40.81%,48.34%和 43.72%;在 2016 年达到发生极端干旱最高面积比 18.96%。北洛河流域以正常为主,干旱以及极干旱呈上升趋势,湿润呈下降趋势;其中 2015 年、2017 年和 2018 年发生的干旱面积比分别为 31.34%,31.38%和 36.72%;在 2016 年达到发生极端干旱最高面积比 10.15%;仅在 2002 年(7.62%)和 2003 年(3%)极湿润占比较高。泾河流域较北洛河流域湿润面积增加,但仍呈下降趋势,极干旱面积占比较其他流域减少,但仍呈现上升趋势;其中 2002 年(61.34%)和 2003 年(45.51%)以湿润为主,其中极湿润占比分别为 10.81%和 8.49%;2010 年、2011 年和 2020 年发生的干旱面积比分别为 36.81%,42.46%和 34.36%;仅在 2016 年达到发生极端干旱最高面积比 4.29%。

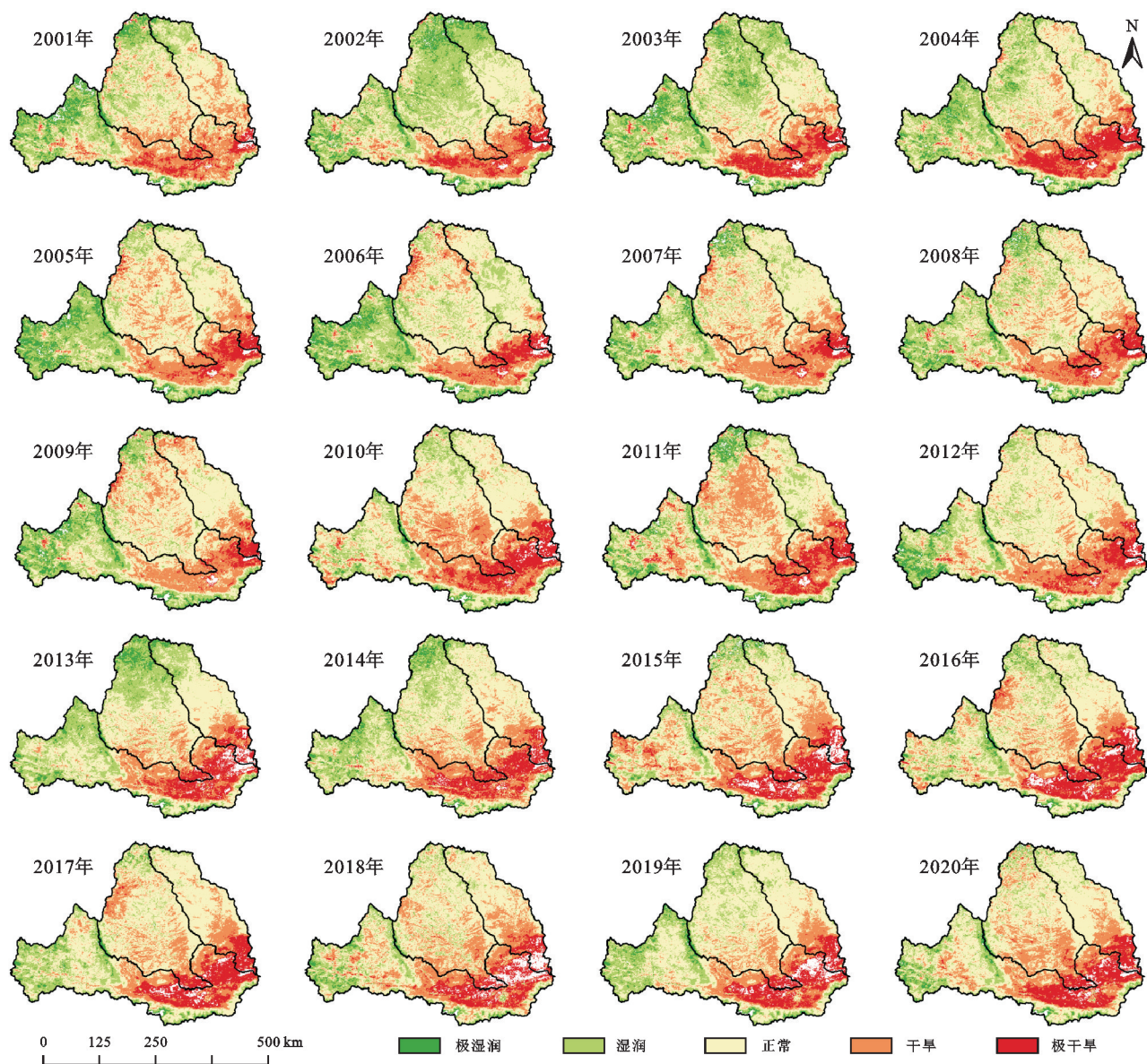


图 6 渭河流域 2001—2020 年土壤水分空间变化图

Fig. 6 Spatial variation map of soil moisture in Weihe River Basin from 2001 to 2020

2.3.2 渭河流域土壤水分空间变化特征 为了进一步探究渭河流域土壤水分的变化趋势,计算 TVDI 的斜率以表征土壤水分变化的方向和强度,同时基于线性趋势法,将其分为减小($Slope < 0$)和增加($Slope > 0$)2 个类型,得到流域不同时期土壤水分的线性变化速率空间分布图(图 8A,8B,8C)。同时,依据表 3 的分级标准对 TVDI 显著性进行划分,Pearson 检验结果值介于临界值的为不显著趋势,反之则为显著趋势,通过 TVDI 的 Pearson 系数运算结果,获取渭河流域 2001—2020 年不同时期 TVDI 显著性检验空间分布图(图 8D,8E,8F),并统计其变化程度的像元个数及其占比(表 4)。

不同时期,TVDI 值均以线性增加为主,说明近 20 年来渭河流域土壤水分含量减少,其干旱程度加强。TVDI 变化速率大于 0 表示该区域 TVDI 值在

增加,土壤水分含量减少;统计发现,前 10 年(2001—2010 年) TVDI 呈显著增加趋势的面积占比 12.96%,主要分布在泾河流域以及北洛河流域北部和南部的部分区域,少部分分布在渭河主流域西部地区;后 10 年(2011—2020 年) TVDI 呈显著增加趋势的面积占比 16.41%,主要分布在北洛河流域以及渭河主流域的东南部地区,少部分分布在泾河流域;整个 20 年(2001—2020 年) TVDI 呈显著增加趋势的面积占比 45.23%,空间分布范围较大,广泛分布于渭河流域,其中主要分布在流域东南部以及西部部分地区。显著减少区域占比最少,不同时期呈显著减少趋势占比分别为 1.89%,2.35%和 3.43%,空间上分别分布在渭河流域南部地区、西北部地区以及穿插分布于轻微增加区域之中。

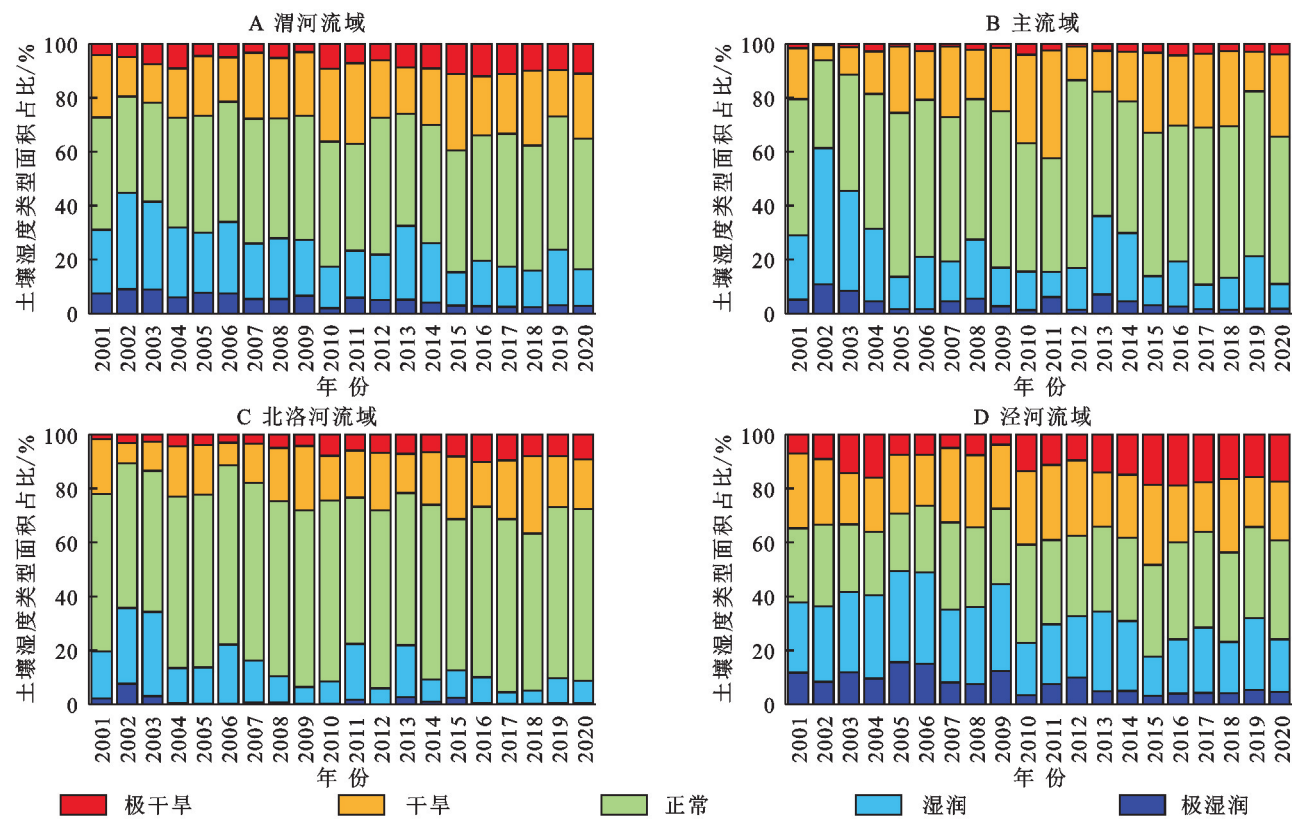


图 7 2001—2020 年渭河流域各土壤水分类型面积百分比

Fig. 7 The area percentage of soil moisture types in Weihe River Basin in 2001—2020

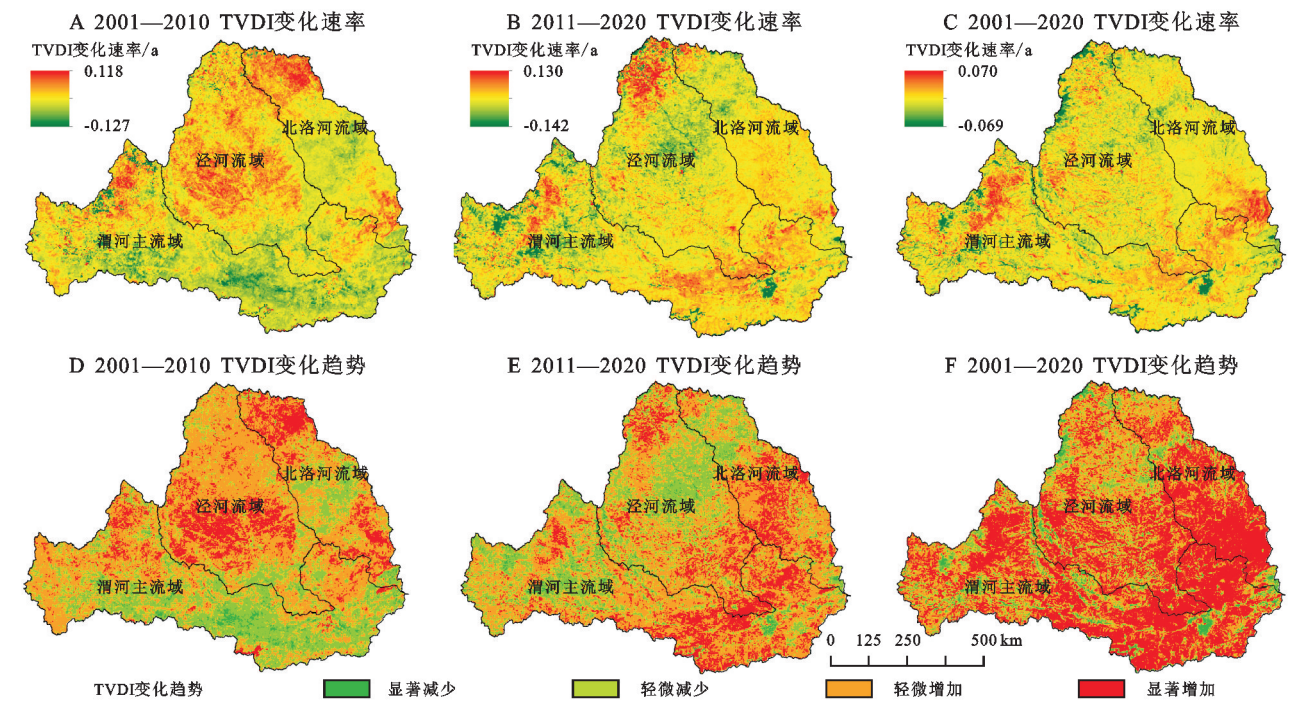


图 8 不同时期渭河流域年 TVDI 变化速率及趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of annual TVDI change rate and trend in Weihe River Basin in different periods

2.4 渭河流域 TVDI 变化影响因素分析

2.4.1 探测因子影响力分析及其时间变化 基于地理探测模型,探究降水、温度、高程、植被类型等 8 个探测因子对 TVDI 空间分布的驱动力(表 5)。总体来看,渭河流域各指标对土壤水分的影响力基本稳

定,各年份的主导因子均为高程、平均温度、潜在蒸散发。其 3 个因子是影响渭河流域土壤水分分布的主导因素,影响力显著高于其他因子;相对而言,土壤类型、土壤持水量、植被类型、土地利用类型的影响较小,部分年份 $q < 0.1$ 。其中分析多年均值 TVDI 与高

程、平均温度、潜在蒸散发 3 个因子的 q 值最大,分别达到了 0.749,0.739,0.722;降水、土壤类型、土壤持水量、植被类型、土地利用类型的 q 值分别为 0.278,0.146,0.139,0.129,0.114,均超过了 0.1,说明以上 5 个因子对渭河流域 TVDI 变化具有一定影响力。

表 4 2001—2020 年不同时期渭河流域年

TVDI 变化趋势统计

Table 4 Statistics of annual TVDI change trend in Weihe River Basin in different periods from 2001 to 2020

变化趋势	显著减少	轻度减少	轻度增加	显著增加
2001—2010	1.89	29.47	55.67	12.96
2011—2020	2.35	28.32	52.92	16.41
2001—2020	3.43	14.54	36.80	45.23

2.4.2 因子交互作用分析 利用地理探测器的交互探测模块探究不同时期各因子的交互作用(图 9)。从整体来看(2001—2020 年),不存在相互独立作用的因子,即任意两个因子的交互作用对土壤水分的影响均大于单个因子的独立作用;平均温度与累计降水

量这一组的交互作用对土壤水分的解释力最大, q 为 0.816,其次是高程与累计降水量(q 为 0.812);土地利用与植被类型一组的解释力最弱, q 仅为 0.202。从不同年份来看,2001 年潜在蒸散发与累计降水量的交互作用对土壤水分的解释力最大, q 为 0.603,2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年平均温度与累计降水量的交互作用对土壤水分的解释力最大, q 分别为 0.717,0.615,0.619,0.681;其次,2001 年平均温度与累计降水量的解释力(q 为 0.596)排列第二,2005,2010,2015 解释力排列第二的均为高程与累计降水量, q 分别为 0.698,0.593,0.590,2020 年潜在蒸散发与高程的解释力(q 为 0.67)排列第二;在不同年份,土地利用与植被类型解释力均为最弱, q 分别为 0.099,0.142,0.222,0.173,0.198,在单一因子影响下,土地利用与植被类型相较于其他探测因子对土壤水分的解释力较弱,所以土地利用与植被类型因子在研究区内对干旱发生解释力不足。总体上,不同年份各因子的交互作用较为一致。

表 5 探测因子对渭河流域 TVDI 空间分布的 q 值

Table 5 q value of detection factors on spatial distribution of TVDI in Weihe River Basin

探测因子	2001 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	多年平均
土地利用	0.043	0.081	0.126	0.087	0.112	0.114
高程	0.515	0.645	0.516	0.490	0.627	0.749
潜在蒸散发	0.561	0.595	0.753	0.574	0.609	0.722
累计降水量	0.131	0.094	0.281	0.264	0.207	0.278
平均温度	0.555	0.656	0.522	0.516	0.639	0.739
土壤类型	0.101	0.101	0.131	0.107	0.090	0.146
土壤持水量	0.090	0.082	0.141	0.142	0.121	0.139
植被类型	0.054	0.092	0.153	0.126	0.133	0.129

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文以 MODIS NDVI, LST 作为反演的基础,拟合相应的干湿边方程,提取温度植被干旱指数(TVDI)作为衡量土壤水分的指标,以渭河流域为研究区,利用气象站的 10 cm 土壤相对湿度数据对 TVDI 进行相关性验证,利用 TVDI 表征土壤湿度情况并取得了较好的效果,对渭河流域近 20 年土壤水分时空变化进行了监测研究。

渭河流域位于中国西北内陆的东部边缘,处于干旱区与湿润地区的过渡地带,生态环境较为脆弱,刘英等^[25]基于 MODIS 数据对比陕西省旱情的时空分布,得到土壤水分较少的地区主要集中在陕北北部黄土高原地区以及关中平原北部地区的结论,与

本研究结果类似。本研究主要利用温度植被指数进行土壤水分反演,由于植被指数对干旱指示具有一定滞后性,且 NDVI 在低值区易受到土壤背景因素的影响,而在高值区对高覆盖植被反应不够敏感,这使低值和高值区域 TVDI 的计算存在一定误差,今后可以考虑用 EVI, SAVI^[26] 指数取代 NDVI,前者可以降低 NDVI 易于饱和对 TVDI 的影响,后者可以提高对高密度植被的敏感性。此外,本文从自然以及土地表面类型这两方面分析了各类因子对土壤水分的影响,得出渭河流域 TVDI 的空间分异主要受高程、平均温、潜在蒸散发 3 个因子的影响,是渭河流域干旱的主要驱动因素,多因子交互作用下,气温与降水量组合的解释力最大。这与程小强等^[27]的研究结果一致,高程和气温是驱动研究区域干旱化的主要影响因素。

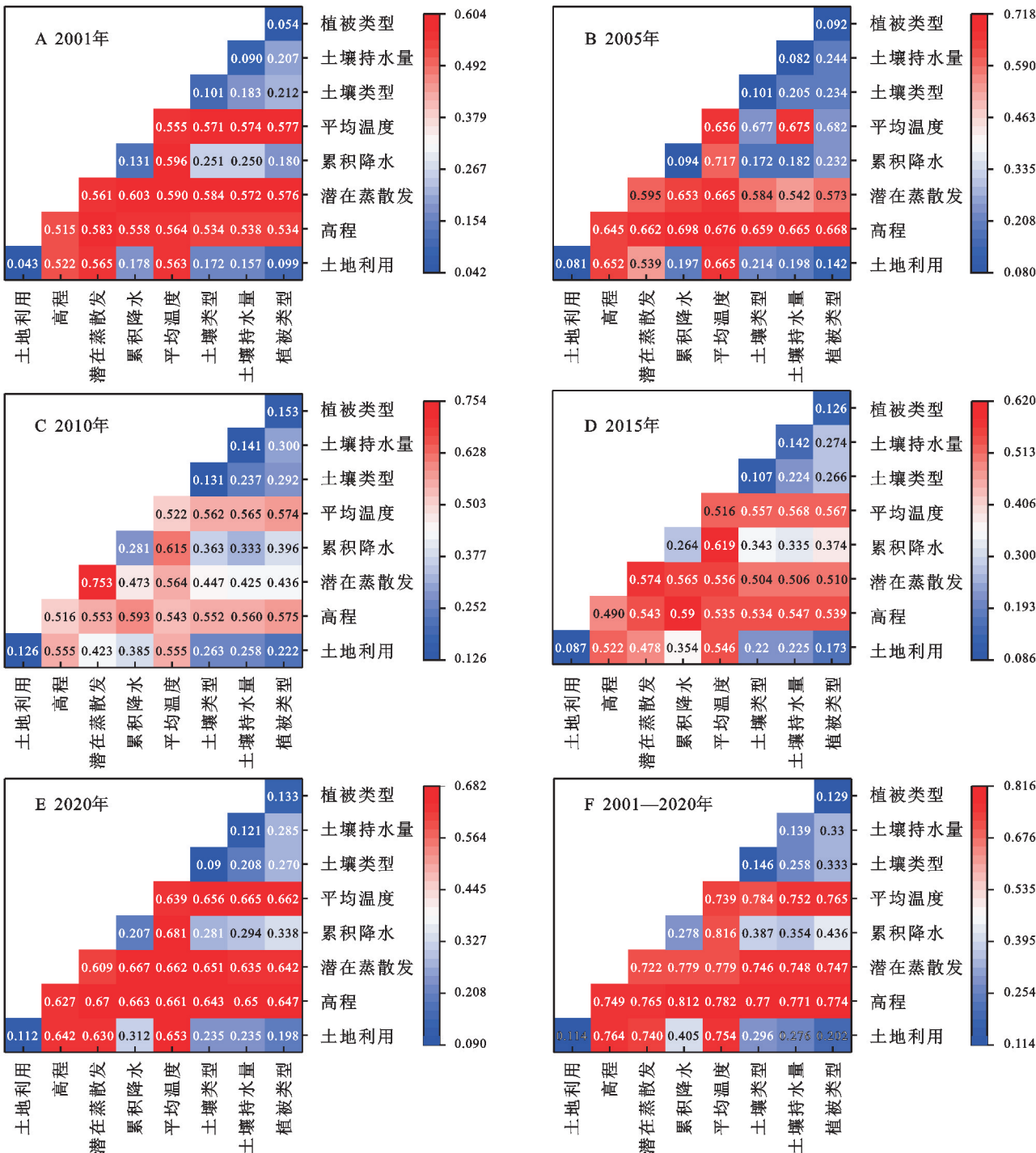


图 9 2001—2020 年 TVDI 驱动因子交互作用探测

Fig. 9 Detection of TVDI driver interaction in 2001–2020

3.2 结论

本文利用渭河流域 2001—2020 年 MODIS NDVI 以及 LST 数据,通过构建基于 NDVI 和 LST 的特征空间,获取 TVDI 时间序列,揭示渭河流域土壤水分时空变化特征,分析驱动因子对土壤水分的影响,结论如下:

(1) 渭河流域近 20 年土壤水分整体呈现极显著下降趋势,下降速率约为 0.004 9/a,多年平均值为 0.51,显著下降的区域占比约 47.84%,出现明显干旱

化的趋势。子流域土壤水分变化情况基本与流域整体保持一致,近 20 年来林地和草地的土壤水分含量较大,而耕地以及城市及其建设用地的土壤水分含量较少。

(2) 渭河流域近 20 年来整体土壤水分保持在正常范围内($0.4 \leq \text{TVDI} < 0.6$),但存在明显的空间分布差异。湿润地区主要分布在流域西部以及流域北部部分地区,干旱地区则主要集中在流域东南以及西北边缘地区,以流域东南部、东北部和西部地区土壤

水分下降趋势最为显著。子流域中渭河主流域发生干旱面积占比呈现上升趋势,其中渭河主流域南部土壤水分下降趋势最为显著。

(3) 渭河流域土壤水分空间分布受多种因素共同影响,从单因子探测结果来看,高程、平均温度、潜在蒸散发是影响渭河流域土壤水分空间分布的主要因子,土壤类型、土壤持水量、植被类型、土地利用类型的影响较小;在多因子交互作用下,平均温度与累计降水量对渭河流域土壤水分影响最强,双因子交互 q 值为 0.816,高程与累计降水量的交互作用次之, q 值达到 0.812。总体上,地形地貌和气象因素是影响流域土壤水分时空变化的关键。

参考文献 (References):

- [1] James A L, Roulet N T. Antecedent moisture conditions and catchment morphology as controls on spatial patterns of runoff generation in small forest catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3/4): 351-366.
- [2] Vereecken H, Huisman J A, Pachepsky Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 76-96.
- [3] Zhang K, Wang Q Q, Chao L J, et al. Ground observation-based analysis of soil moisture spatiotemporal variability across a humid to semi-humid transitional zone in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 903-914.
- [4] 李菁,任义方,戴竹君,等.基于 MODIS 干旱指数与 RBFNN 方法的江苏冬小麦需水关键期土壤水分遥感监测应用 [J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(6): 251-257.
Li J, Ren Y F, Dai Z J, et al. Retrieval of soil moisture at critical period of water demand of winter wheat in Jiangsu Province using MODIS drought index and RBFNN [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(6): 251-257.
- [5] 王佳新,萨楚拉,毛克彪,等.蒙古高原土壤湿度时空变化格局及其对气候变化的响应 [J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(1): 231-239.
Wang J X, Sa C L, Mao K B, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in the Mongolian Plateau and its response to climate change [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(1): 231-239.
- [6] 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.
Wen G T, Bai J J, Sun S S. Variation of drought in Shaanxi from 2004 to 2014 based on remotely sensed data [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 221-229.
- [7] 王美林,姜群鸥,邵雅琪,等.基于 TVDI 的玛曲土壤湿度时空变化及其影响因素 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 141-152.
Wang M L, Jiang Q O, Shao Y Q, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture and analysis on its influencing factors in Maqu County based on TVDI [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 141-152.
- [8] Peng W F, Wang J, Zhang J, et al. Soil moisture estimation in the transition zone from the Chengdu Plain Region to the Longmen Mountains by field measurements and LANDSAT 8 OLI/TIRS-derived indices [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(4): 168.
- [9] Zhao H C, Li Y, Chen X G, et al. Monitoring monthly soil moisture conditions in China with temperature vegetation dryness indexes based on an enhanced vegetation index and normalized difference vegetation index [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 143(1): 159-176.
- [10] 陈明星,张玉虎.基于 4 种植被指数 TVDI 模型的三江平原土壤湿度反演 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 93-100, 107.
Chen M X, Zhang Y H. Retrieval of soil moisture in Sanjiang Plain based on TVDI model with four vegetation indices [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 93-100, 107.
- [11] 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): 1849-1860.
Pang S F, Wei W, Guo Z C, et al. Agricultural drought characteristics and its influencing factors in Gansu Province based on TVDI [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(6): 1849-1860.
- [12] 刘观鹏,樊晶晶,赵彦芳,等.近 20 年中国 TVDI 变化特征及影响因素分析 [J]. *农业技术与装备*, 2023(3): 39-44.
Liu G P, Fan J J, Zhao Y F, et al. Analysis on the spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of China's TVDI in the past 20 years [J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2023(3): 39-44.
- [13] 王椰,史海静,姜艳敏,等.基于 TVDI 的黄土高原干旱时空变化与其影响因素 [J]. *农业机械学报*, 2023, 54(7): 184-195.
Wang Y, Shi H J, Jiang Y M, et al. Spatio-temporal variation of drought characteristics and its influencing factors in Loess Plateau based on TVDI [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 184-195.

- [14] 张冰洁,王灵灵,薛亚莉,等.渭河下游河道造床流量及过洪能力变化分析[J].陕西水利,2018(1):8-9,11.
Zhang B J, Wang L L, Xue Y L, et al. Analysis of the fluvial flow and flooding capability of the lower Weihe River[J]. Shaanxi Water Resources, 2018(1):8-9,11.
- [15] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等.基于 SPEI_PM 指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J].中国农业气象,2021,42(11):962-974.
Yang R, Geng G P, Zhou H K, et al. Spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Wei River Basin based on SPEI_PM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021,42(11):962-974.
- [16] 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.
- [17] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.
- [18] 岳萌,耿广坡,王涛,等.2000—2019 年黄河流域陕西段植被 NDVI 时空变化及其驱动因素分析[J].水土保持研究,2023,30(2):238-246,255.
Yue M, Geng G P, Wang T, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its driving factors in the Shaanxi section of the Yellow River Basin from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):238-246,255.
- [19] 施晨阳,赖文峰,文国卫,等.基于 Maxent 模型预测水曲柳的潜在适生区[J].西北林学院学报,2022,37(2):149-156.
Shi C Y, Lai W F, Wen G W, et al. Prediction of the potentially suitable area of *Fraxinus mandshurica* based on maxent model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022,37(2):149-156.
- [20] 郑维龙,刘珺.基于 NDVI 的黄淮海平原 2001—2010 年植被覆盖变化分析[J].太原理工大学学报,2018,49(3):433-439.
Zheng W L, Liu J. Analysis of vegetation cover change in Huang-Huai-Hai Plain during 2001—2010 based on NDVI[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018,49(3):433-439.
- [21] Ficetola G F, Lunghi E, Canedoli C, et al. Differences between microhabitat and broad-scale patterns of niche evolution in terrestrial salamanders [J]. Scientific Reports, 2018,8(1):10575.
- [22] Dai Y J, Shangguan W, Duan Q Y, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013,14(3):869-887.
- [23] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. 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.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [25] 刘英,岳辉,侯恩科.MODIS 数据在陕西省干旱监测中的应用[J].国土资源遥感,2019,31(2):172-179.
Liu Y, Yue H, Hou E K. Drought monitoring based on MODIS in Shaanxi[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019,31(2):172-179.
- [26] 沙莎,郭锐,李耀辉,等.我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J].干旱气象,2014,32(1):128-134.
Sha S, Guo N, Li Y H, et al. Introduction of application of temperature vegetation dryness index in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014,32(1):128-134.
- [27] 程小强,周兆叶,李旺平,等.基于 MODIS 数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(10):128-137.
Cheng X Q, Zhou Z Y, Li W P, et al. Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(10):128-137.