

基于 TVDI 的黄土高原干旱时空变化与其影响因素

王 椰^{1,2} 史海静^{1,3} 姜艳敏^{1,4} 吴友福³ 高原^{1,2} 丁成琴³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

4. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探讨黄土高原地区 2001—2020 年间干旱时空变化特征及其影响因素, 利用 MODIS 增强植被指数 (Enhanced vegetation index, EVI) 以及地表温度 (Land surface temperature, LST) 数据, 构建温度植被干旱指数 (Temperature vegetation dryness index, TVDI) 模型, 探究黄土高原地区 2001—2020 年 TVDI 指数时空动态、变化趋势并利用地理探测器模型分析 TVDI 空间分异性的驱动因子。结果表明: 2001—2020 年间黄土高原 TVDI 空间分布具有较强的空间分异性, 总体上呈现从西向东旱情逐渐增加的趋势, 黄土高原多年平均 TVDI 为 0.522, 整体上处于轻旱状态。从 TVDI 多年变化趋势上分析, 超过 64% 的区域有干旱加剧的趋势, 且存在明显的地域分异规律, 黄土高原西北部的内蒙古、宁夏北部以及山西部分地区旱情大多呈加剧趋势, 而旱情缓解区域较为集中, 多分布于陕西中部、宁夏南部和甘肃北部。各土地利用类型的 TVDI 年际变化均呈现不同程度上升的趋势且各土地利用类型年均 TVDI 差异明显, 从大到小依次为: 未利用地 (0.571)、草地 (0.554)、耕地 (0.503)、林地 (0.473) 和建筑用地 (0.462)。黄土高原地区 TVDI 的空间分异主要受高程、土壤类型、植被类型 3 个因子影响, 三者 q 均超过 0.3, 是黄土高原干旱的主要驱动因素; 在多因子交互作用下, 高程与 SIF 组合对黄土高原干旱发生的影响力最强, q 达到 0.709。

关键词: 干旱; 温度植被干旱指数; 黄土高原; 地理探测器; MODIS

中图分类号: S152.7; S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)07-0184-12

OSID:



Spatio-temporal Variation of Drought Characteristics and Its Influencing Factors in Loess Plateau Based on TVDI

WANG Ye^{1,2} SHI Haijing^{1,3} JIANG Yanmin^{1,4} WU Youfu³ GAO Yuan^{1,2} DING Chengqin³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the spatio-temporal variation of drought characteristics in the Loess Plateau from 2001 to 2020 and its influencing factors, MODIS enhanced vegetation index (EVI) and land surface temperature (LST) data was used to establish the temperature vegetation dryness index (TVDI) model. The driving factors of TVDI in the Loess Plateau from 2001 to 2020 were analyzed by using Geodetector Model. The results showed that from 2001 to 2020, the spatial distribution of TVDI in the Loess Plateau had a strong spatial heterogeneity, and the drought increased gradually from west to east. The average TVDI of the Loess Plateau for the past 20 years was 0.522, indicating a light drought on the whole. According to the variation trend of TVDI, more than 64% of the regions showed a drying trend, and there was an obvious regional differentiation. The drought situation in Inner Mongolia, northern Ningxia and

收稿日期: 2022-11-17 修回日期: 2023-01-19

基金项目: 西部青年学者项目 (XAB2020YN04)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040202)、国家自然科学基金项目 (41501055) 和国家科技基础条件平台建设项目 (2005DKA32300)

作者简介: 王椰 (1998—), 男, 博士生, 主要从事环境遥感研究, E-mail: 1341046492@qq.com

通信作者: 史海静 (1983—), 女, 副研究员, 主要从事数字水土保持与大数据研究, E-mail: shihaijingcn@nwfu.edu.cn

parts of Shanxi was mostly intensifying, while the areas of alleviating drought were concentrated, mainly distributed in central Shaanxi, southern Ningxia and northern Gansu. The annual change of TVDI of all land use types showed a rising trend in varying degrees, and the annual average TVDI of each land use type was significantly different, in order from large to small as follows: unused land (0.571), grassland (0.554), cultivated land (0.503), forest land (0.473) and construction land (0.462). The spatial differentiation of TVDI in the Loess Plateau was mainly affected by three factors: elevation, soil type and vegetation type, whose q values were all exceeding 0.3, which were the main driving factors of drought in the Loess Plateau. Under the interaction of multiple factors, the combination of elevation and SIF had the strongest influence on the occurrence of drought in the Loess Plateau, with q value reaching 0.709.

Key words: drought; temperature vegetation dryness index; Loess Plateau; Geodetector; MODIS

0 引言

干旱是人类面临的主要自然灾害之一,干旱的发生会对粮食安全、经济发展等产生严重威胁^[1]。在全球变暖以及人类活动加剧的背景下,干旱等极端气候频繁发生^[2],并在世界范围内产生巨大影响,全球因干旱而造成的经济损失超过千亿美元^[3]。因此,实时高效干旱监测以及预测干旱变化受到世界广泛关注^[4]。

以往对干旱的监测,多基于气象站点或人工测墒的方式来获取点尺度土壤水分数据^[5-6],并以此来表征研究区干旱发生的时空分布及变化趋势,这些方式虽然能以较高精度表示出气象站点附近的土壤湿度,但精度受限于土壤湿度监测点密度,也会消耗大量人力物力^[7],难以进行大范围的干旱监测^[8]。近年来,随着遥感技术的不断发展,实时连续的遥感影像获取以及地表过能量及特征参数的提取,使得大尺度多时相的干旱动态监测成为可能^[9-10]。SANDHOLT 等^[11]利用地表温度(LST)和归一化植被指数(NDVI)构建了Ts-NDVI特征空间,并由此得出温度植被干旱指数(TVDI),该模型与表层土壤湿度具有较高的相关性^[12],且模型构建简单,在遥感干旱研究中应用广泛^[13]。李正国等^[14]基于MODIS数据估算TVDI来表征黄土高原地区干旱状况,证明了该指标对土壤以及植物水分含量具有指示意义。LIANG等^[15]利用MODIS数据为基础得到TVDI,得出2001—2010年间我国干旱时空分布状况,并分析其与气候因子间的关系。刘立文等^[16]在对吉林省的干旱监测研究中证明了TVDI可以很好地对当地旱情进行监测,并发现在不同时期采用特定的植被指数的TVDI模型,经过地形校正后能够更准确地反映干旱状况。以上表明,基于多源遥感数据的TVDI是农业旱情监测与评价可靠且有效的指标之一。

黄土高原是我国四大高原之一,地形复杂,处于干旱半干旱气候区,降水的季节性变化明显,生态环

境脆弱,植被恢复较慢,易受干旱影响^[17]。目前黄土高原基于TVDI的干旱研究以短时期为主^[14,17],而对于黄土高原长时间序列的干旱监测研究中,多针对降水、气温等气象因素对干旱的影响^[15,18-20]进行讨论,较少考虑地形地貌或是人类活动因素对干旱发生及分布的影响力,且在TVDI的计算中多以NDVI为植被参数,在高植被覆盖度的区域可能会出现敏感性下降的问题。

本文利用GEE平台获取黄土高原2001—2020年间MODIS EVI和MODIS LST数据产品,并根据DEM对LST数据进行校正,构建EVI-Ts特征空间,计算得到校正后的温度植被干旱指数TVDI,并利用一元线性回归趋势分析法、地理探测器模型等方式对TVDI值进行分析,以此对黄土高原2001—2020年间TVDI的时空变化特征进行探讨并揭示其干旱发生的驱动因子,明晰TVDI对黄土高原气候、地形因子以及人类活动状况的响应机制,以期为黄土高原地区的生态预警和旱灾防控提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地处黄河流域中部(33°43′~41°16′N, 100°54′~114°33′E),地势西高东低,海拔800~3000 m,起伏较大,涉及山西、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古、青海、河南7个省(区),总面积约 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1a)。黄土高原植被覆盖状况总体上呈东南高西北低的趋势,2010年的耕地、林地、草地、水域、建筑用地、裸地分别占研究区总面积的32.4%、15.2%、41.5%、1.4%、2.6%、6.9%(图1b)。黄土高原属于半干旱与半湿润气候区,年均温空间差异较大(图1c),夏季炎热多暴雨,冬季寒冷干燥,受夏季风影响,黄土高原全年降水较为集中,6—9月降水占全年降水的60%以上。降水的年际变化大,年降雨量为150~800 mm,且由西北向东南递增(图1d)。植被随着降雨量递增,逐步由草原向森林过渡。黄土高原蒸发量普遍高于实际降水量,为1400~

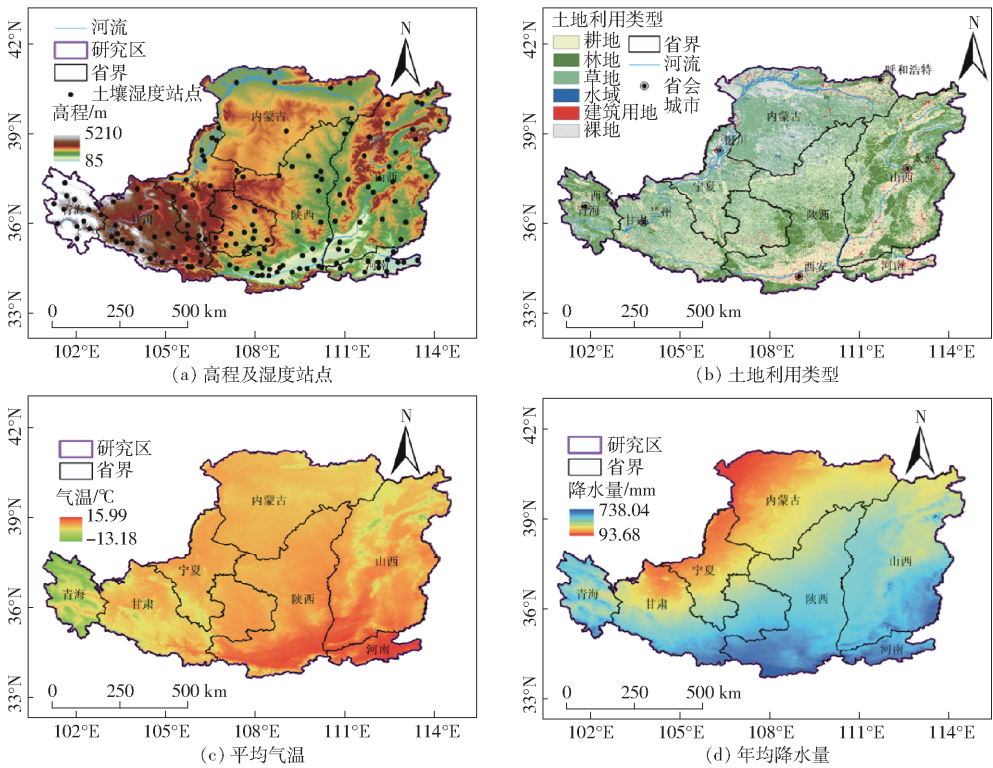


图 1 黄土高原概况
Fig. 1 Overview of Loess Plateau

2 000 mm,由东南向西北递增,整体较为干燥^[20],且近年来大规模的人工林的栽种使得黄土高原土壤水分流失严重,加剧了该地区的干旱状况^[21]。

1.2 数据源与预处理

1.2.1 EVI 和 LST 数据

研究使用的 2001—2020 年的 EVI 数据来源于 Google Earth Engine (GEE) 平台 MODIS/006/MOD13Q1 数据产品,该数据产品存储于 GEE 平台内,且已经过大气校正,时间分辨率 16 d,空间分辨率 250 m,共 456 期影像,将其重采样至 1 km。

所使用的 2001—2020 年的 LST 数据源于 GEE 平台 MODIS/006/MOD11A1 数据产品,时间分辨率 8 d,空间分辨率 1 km,共 913 期影像,对图像进行拼接、裁剪等预处理工作。以上过程均于 GEE 平台完成。

EVI 与 LST 数据有质量控制文件(QC),可以指示研究区内不同区域在不同时间内数据的质量状况及其可靠性。对两种数据产品的质量控制文件(QC)的统计发现,2001—2020 年黄土高原地区的 EVI 与 LST 数据达到中、高等级的像元大多在 95% 以上,表明 EVI 与 LST 数据产品质量整体较好,数据产品可靠性较高。为进一步去除异常值的影响,本研究将未通过质量控制及数值异常的像元删除,并通过最大值合成法将 LST 与 EVI 数据转换为逐月数据。

黄土高原地势较高,大多数地区海拔为 800 ~ 3 000 m,自东向西,地形起伏明显,太阳辐射受高程影响显著,为消除地形的影响,需采用数字高程模型 (Digital elevation model,DEM) 数据对 LST 数据进行修正^[22-23],修正方法为

$$T_{s_2} = T_{s_1} + cH \tag{1}$$

式中 T_{s_2} ——经 DEM 数据校正后的地表温度
 T_{s_1} ——原始 MODIS 地表温度
 H ——高程
 c ——修正系数,取 0.006

1.2.2 DEM 数据

研究所采用的 DEM 数据源于 GEE 平台的 NASA NASADEM Digital Elevation 30 m (NASA/ NASADEM_HGT/001) 数据产品,空间分辨率为 30 m,在 GEE 平台提取该 DEM 数据的坡度和坡向信息,最后对高程、坡度和坡向进行拼接、裁剪等预处理后,将其空间分辨率重采样为 1 km,用于地理探测器驱动因子分析及校正 LST 数据以计算 TVDI 值。

1.2.3 气象数据

黄土高原 2001—2020 年月温度和月总降水量产品源自国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心 (<http://www.loess.geodata.cn/>),该数据集涵盖了中国的主要陆地地区,空间分辨率为 0.008 333 3° (约 1 km)。该数据产品是据 CRU 发布的全球 0.5°

气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成。获取气象数据后,在 ArcMap10.8 中将文件由 nc 格式经转换、裁剪等预处理得到 TIFF 格式的 2001—2020 年黄土高原月均气温和月总降水量的栅格数据。并对数据进行重采样,使得其与 LST 和 EVI 数据具有相同的分辨率,用以研究气候因子对 TVDI 的影响状况等后续工作。

1.2.4 土壤数据

土壤湿度数据源自科学数据银行 (Science Data Bank),该数据集将中国 1 471 个土壤湿度站点的土壤湿度进行筛选,过滤掉低质量站点以保证站点数据的可用性和连续性,并根据站点土壤特征参数将相对含水率转换为体积含水率,最后,将站点的旬值数据取平均得到月值数据。过滤后该数据集保留 732 个站点的 5 个土层 (10、20、50、70、100 cm) 的土壤湿度数据^[24],其中,黄土高原内共有 157 个站点。

1.2.5 资源数据

土地利用数据为 1 km 分辨率的栅格数据,包括 25 个土地利用类型;经济数据为 1 km 网格的中国人口空间分布公里网格数据集;植被类型、土壤类型数据分别根据《1:1 000 000 中国植被图集》以及《1:100 万中华人民共和国土壤图》数字化生成,以上数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。其中,土地利用类型数据依据黄土高原地区实际情况以及研究精度要求对原始数据进行重分类,将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用土地 6 类,空间分辨率为 1 km。人口数据来自 LandScan 人口密度数据集 (<https://landscan.ornl.gov/>),该数据集空间分辨率 1 km,为逐年更新,单位是人/km²。本研究使用的日光诱导叶绿素荧光数据 (SIF) 为 GOSIF 数据集 (<https://globalecology.unh.edu/>),该数据集根据 OCO-2 离散的 SIF 数据与 MODIS 数据和气象数据再分析得到,空间分辨率为 0.05° (约 5.4 km)。

2 研究方法

2.1 温度植被指数 TVDI 计算

研究表明,地表温度 (LST) 和植被指数 (VI) 都可以表示地表和植被的干湿状况,从而实现干旱监测^[25]。当土壤含水率高,植物生长旺盛,蒸腾作用可使地温降低。相应地,当土壤含水率低,植物生长受限,蒸腾作用不强,会使地表温度上升。土壤湿度与地表温度、植被生长状况之间存在一定相关性。SANDHOLT 等^[11]利用地表温度 (LST) 和归一化植

被指数 (NDVI) 构建了 Ts - NDVI 特征空间,并由此提出一种经过简化的温度植被干旱指数 (TVDI), TVDI 与土壤水分状况直接相关,能够表征植物受水分胁迫程度^[13]。TVDI 理论值在 0 ~ 1 之间, TVDI 值越高表征区域旱情越严重,反之则该地越湿润。TVDI 计算公式为

$$TVDI = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \tag{2}$$

其中
$$\begin{cases} T_{max} = a_{max} + b_{max} EVI \\ T_{min} = a_{min} + b_{min} EVI \end{cases} \tag{3}$$

式中 T_{min} ——某一植被指数下,最低地表温度,构成特征空间中的“湿边”

T_{max} ——某一植被指数下,最高地表温度,并构成特征空间中的“干边”

a_{max} 、 b_{max} ——干边线性拟合方程参数

a_{min} 、 b_{min} ——湿边线性拟合方程参数

本研究中,将增强植被指数 (EVI) 作为计算 TVDI 的植被参数,相较于常用的 NDVI^[11,26-27],利用 EVI 合成的 TVDI 与实测土壤湿度的相关性更高^[28-29],原因是 EVI 中加入蓝波段增加了植物特征信号,减小了土壤背景及气溶胶散射影响,能够克服 NDVI 受土壤背景影响大,在高植被覆盖区灵敏度下降等缺点^[30]。

在 EVI 为 [0.05, 0.8] 时,以 0.01 为步长,计算每个 EVI 范围中最大和最小地表温度,得出 20 年间 240 个月的 Ts - EVI 特征空间,并采用最小二乘法对 240 期特征空间的干湿边进行线性拟合,计算得到每期的干湿边拟合方程及其相关系数。然后通过式 (2),得到对应像元的 TVDI 值。

2.2 时间趋势分析法

统计黄土高原 20 年间逐年的 TVDI 平均值,采用 Theil - Sen Median 趋势分析法对 TVDI 年均值趋势变化进行分析,并采用 Mann - Kendall 非参数检验法对得出的变化趋势进行显著性分析。

Theil - Sen Median 趋势分析法是一种非参数统计的趋势计算方法,Sen 趋势分析法对数据的分布没有要求,且对数据异常值具有一定的抵抗能力,该方法已逐渐应用在遥感时序数据的分析中^[31-32]。Sen 斜率计算公式为

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{TVDI_j - TVDI_i}{j - i} \right) \tag{4}$$

式中 β ——TVDI 的年变化值

i 、 j ——年份

$TVDI_i$ 、 $TVDI_j$ ——第 i 、 j 年对应的 TVDI 值

由于 Sen 斜率无法反映 TVDI 变化的显著程度,故采用 Mann - Kendall 非参数检验方法对 Sen

斜率进行显著性检验,其计算公式为

$$Z_c = \begin{cases} (M+1)/\sqrt{\text{Var}(M)} & (M>0) \\ 0 & (M=0) \\ (M+1)/\sqrt{\text{Var}(M)} & (M<0) \end{cases} \quad (5)$$

其中
$$M = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(TVDI_j - TVDI_i) \quad (6)$$

$$\text{Var}(M) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

$$\text{sgn}(TVDI_j - TVDI_i) = \begin{cases} 1 & (TVDI_j > TVDI_i) \\ 0 & (TVDI_j = TVDI_i) \\ -1 & (TVDI_j < TVDI_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中 Z_c ——M-K 检验的标准化统计量

M —— M-K 检验统计量

n ——研究中时间序列总长度,取 20

式(5)中 Z_c 作为 M-K 检验的标准化统计量,服从标准正态分布,在一定的显著性水平 α 下,若 $|Z_c| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则可认定为变化趋势显著,反之,则不显著。当 $|Z_c|$ 大于 1.96 和 2.58 时,则可认为趋势通过 95% 和 99% 的显著性检验,具体的干旱变化趋势及显著性划分见表 1。

表 1 黄土高原旱情变化趋势划分

Tab.1 Division of drought change trend in Loess Plateau

	$ Z_c \leq 1.96$	$1.96 < Z_c \leq 2.58$	$ Z_c > 2.58$
$\beta > 0.001$	轻微变干	显著变干	极显著变干
$-0.001 < \beta \leq 0.001$	基本稳定	基本稳定	基本稳定
$\beta < -0.001$	轻微变湿	显著变湿	极显著变湿

2.3 地理探测器模型

地理探测器^[33]是以空间相关性为基础,通过探测各因子的空间异质性来解释其背后驱动因素的一组统计方法。本研究将 TVDI 值作为因变量,将温度、降雨量、高程、坡度、坡向、GDP、人口密度、土地利用方式、土壤类型、植被类型以及植物光合指标 11 个因子作为自变量,通过地理探测器模型进行计算。应用地理探测器的因子探测模块与交互作用探测器模块,计算黄土高原地区 TVDI 的驱动因子 q 及其不同因子两两交互作用对 TVDI 的影响。其中, q 的表达式为

$$q = 1 - \frac{1}{\sigma^2 N^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (9)$$

式中 q ——各因子对 TVDI 的解释能力强度

h ——自变量因子的分层数

N_h 、 N ——层为 h 的单元数和研究区全部单元数

σ^2 、 σ_h^2 ——不同分级区的方差和全局方差

交互探测器模块则对不同影响因子交互作用对 TVDI 的影响进行探测,从而判断出不同因子共同作用时对 TVDI 的影响情况,判断方式见表 2。本研究采用自然断点法将温度、降雨量、高程、坡度、坡向、GDP、人口密度以及植物光合指标分为 10 类,将土地利用类型分为 6 类,植被类型与土壤类型分为 10 类和 15 类,将黄土高原划分为 5 km × 5 km 的网格,将 25 248 个网格中心作为采样点进行采样,提取采样点各个因子的属性值用于地理探测器的计算。

表 2 温度植被干旱指数影响因子交互作用类型

Tab.2 Interaction types of factors affecting TVDI

判定依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2.4 干旱等级划分

本研究参照文献[14,28,34]利用 TVDI 模型对研究区的旱情等级划分的方法,得出适合于干旱半干旱地区的干旱分类标准(表 2)。通过式(2)~(4)得到黄土高原地区 20 年间 TVDI 均值后,根据表 3 对研究区干旱程度进行划分。

表 3 TVDI 干旱等级划分标准

Tab.3 TVDI drought classification standard

TVDI	等级	干旱特点
0 ~ 0.40	湿润	土层水分充足,地表湿润
0.40 ~ 0.52	正常	植物正常能够生长,无旱象
0.52 ~ 0.71	轻旱	土壤水分不足,植物出现萎蔫迹象
0.71 ~ 0.82	中旱	土壤表层干燥,植物叶片开始萎蔫
0.82 ~ 1	重旱	土壤水分严重不足,植物干枯、死亡

3 结果与分析

3.1 干旱监测指标可信性评价

由 TVDI 的物理意义可知,TVDI 的数值与土壤湿度呈负相关关系,且已有大量研究证明了这一关系^[11,26,35-36],而国家气象局又将深度 20 cm 的土壤含水率作为旱情分级标准^[37],因此国内研究多以 20 cm 的土壤含水率来验证 TVDI 作为干旱监测指标的可靠性^[27,38]。本文选用深度 20 cm 的土壤含水率对 TVDI 监测结果进行可信度评价。由于该土壤湿度数据集存在部分缺失,且逐月验证数据量大,现选用 2012 年 7 月与 2013 年 7 月的土壤湿度数据对

TVDI 进行验证,结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,TVDI 与深度 20 cm 的土壤含水率具有负相关关系,经分析可知,2012、2013 年 TVDI 值与土壤含水率的皮尔逊相关系数分别达到 -0.503 和 -0.536 ,且均通过 $p < 0.01$ 的显著性检验,这说明两者具有良好的相关性。总体来看,TVDI 与土壤含水率线性关系较强,且具有显著的负相关性,因此,基于 MODIS 的 EVI 和 LST 数据计算得到的 TVDI 用于干旱监测具有较高可信度。

3.2 Ts – EVI 特征空间的构建及干湿边方程拟合

表 4 为 2020 年各月干湿边拟合结果,结果表明,干边斜率均小于零且 R^2 的平均值达到 0.82 ,这说明干边拟合效果较好,且随着 EVI 的增大,地表温度呈减小趋势,两者具有强负相关关系。而湿边方程斜率除 7 月外都大于零,说明多数情况下,随着 EVI 的升高地表最低温度呈上升趋势。而湿边方程斜率绝对值以及 R^2 均小于干边,说明干边拟合的地表最高温度比湿边拟合的地表最低温度对 EVI 变化更为敏感,且干边整体的拟合效果好于湿边。

表 4 2020 年内各月 Ts – EVI 特征空间干湿边拟合方程

Tab.4 Dry and wet edge fitting equation of the Ts – EVI space in 2020

月份	干边	湿边
1	$D_y = 36.4 - 45.8x \quad (R^2 = 0.71)$	$W_y = -1.5 + 32.6x \quad (R^2 = 0.81)$
2	$D_y = 45.9 - 45.1x \quad (R^2 = 0.72)$	$W_y = 10.5 + 21.4x \quad (R^2 = 0.67)$
3	$D_y = 52.2 - 40.2x \quad (R^2 = 0.87)$	$W_y = 19.5 + 14.7x \quad (R^2 = 0.42)$
4	$D_y = 62.2 - 40.0x \quad (R^2 = 0.94)$	$W_y = 19.3 + 15.8x \quad (R^2 = 0.38)$
5	$D_y = 68.9 - 34.8x \quad (R^2 = 0.91)$	$W_y = 27.4 + 5.64x \quad (R^2 = 0.36)$
6	$D_y = 69.6 - 28.9x \quad (R^2 = 0.73)$	$W_y = 31.0 + 2.26x \quad (R^2 = 0.21)$
7	$D_y = 68.6 - 26.1x \quad (R^2 = 0.90)$	$W_y = 34.2 - 9.25x \quad (R^2 = 0.20)$
8	$D_y = 69.6 - 34.4x \quad (R^2 = 0.90)$	$W_y = 30.5 + 3.22x \quad (R^2 = 0.03)$
9	$D_y = 58.5 - 30.6x \quad (R^2 = 0.79)$	$W_y = 25.0 + 3.48x \quad (R^2 = 0.12)$
10	$D_y = 53.4 - 56.2x \quad (R^2 = 0.86)$	$W_y = 14.4 + 16.1x \quad (R^2 = 0.28)$
11	$D_y = 45.3 - 46.5x \quad (R^2 = 0.74)$	$W_y = 12.2 + 27.4x \quad (R^2 = 0.69)$
12	$D_y = 36.2 - 51.5x \quad (R^2 = 0.80)$	$W_y = -2.7 + 32.4x \quad (R^2 = 0.76)$

3.3 黄土高原 TVDI 空间分布及年际变化情况

3.3.1 干旱空间分布特征

由图 3 可知,多年以来,黄土高原土壤干湿状况存在明显的空间分异,以区域性干旱为主,旱情呈现出自西向东逐渐缓解的状况。总体上,黄土高原近 20 年来呈现出干旱化趋势,且西部发生干旱的频率和范围要远高于东部。从黄土高原 TVDI 的多年均值来看,黄土高原多年平均 TVDI 值为 0.522 ,达到轻度干旱级别。而轻度干旱也是黄土高原地区的主要干旱类型,其主要分布在宁夏、甘肃、内蒙古和陕西部分地区,这与庞素菲等^[35]和程伟等^[36]结论一致,该地区约占黄土高原总面积的 38.5% ,土地利用类型多为耕地、草地以及荒漠;中旱、重旱区域分别占黄土高原面积的 4.1% 和 1.1% ,多集中于黄土

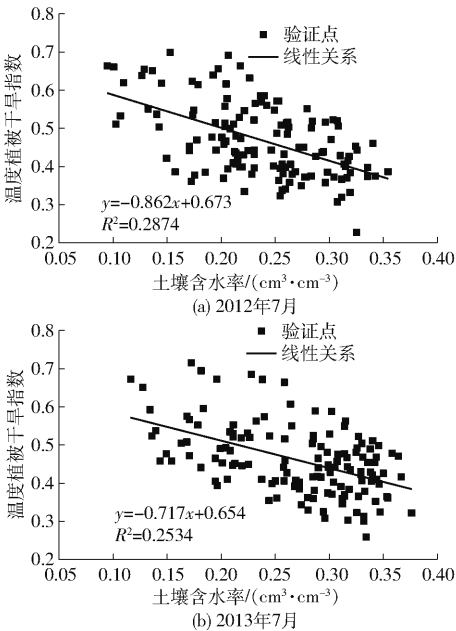


图 2 2012、2013 年 7 月土壤含水率与温度植被干旱指数关系

Fig.2 Relationship between soil moisture and TVDI in July 2012 and 2013

高原西南部的青海部分地区以及甘肃西北部,该地区海拔较高,降雨量少,土壤涵养水分能力较弱,土地利用类型多为疏林地、草地或是荒漠;而湿润和正常区域多分布于黄土高原东部的山西、河南、陕西大部、内蒙古东部等地区,该地区水资源丰富,植被覆盖度相对较高,土地利用类型以耕地和林地为主,分别占黄土高原面积的 11.5% 和 44.7% 。

3.3.2 干旱的年际变化趋势

按照式(4)计算黄土高原 2001—2020 年间逐年平均 TVDI 的 Sen 趋势值 β ,并结合式(5)~(9)进行 Mann – Kendall 趋势显著性检验,将 TVDI 变化趋势图与 TVDI 变化显著性空间分布进行叠加分析,并根据表 1 将黄土高原干旱变化趋势分为极显著缓解、显著缓解、轻微缓解、基本稳定、轻微加重、

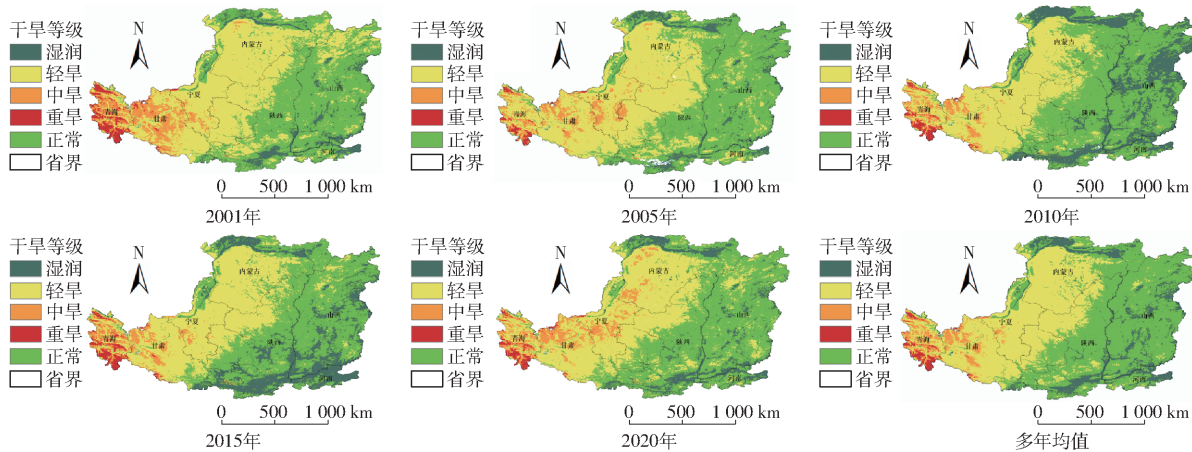


图 3 2001—2020 年间黄土高原干旱等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of drought grade in Loess Plateau from 2001 to 2020

显著加重、极显著加重 7 种类型,得出 2001—2020 年黄土高原干旱变化趋势类型空间分布(图 4a)。从图 4a 可以看出,黄土高原不同地区干旱变化趋势差异明显,经统计发现,2001—2020 年黄土高原大部分区域的干旱情况呈稳定或是轻微变化状态,约占黄土高原总面积的 70%,而其他区域中,呈显著缓解($P < 0.05$)的区域约为 8%,多集中于宁夏南部和甘肃北部以及陕西中部部分地区,而干旱呈显著增加($P < 0.05$)的区域约为 22.4%,多集中在内蒙古与宁夏北部区域。

由图 4b 可知,2001—2020 年黄土高原 TVDI 年际变化的空间分布具有较强的地域分异性,TVDI 年际变化速率的分布区间为 $[-0.03, 0.02]$ (图 4b)。超过 64% 的区域 Sen 斜率大于零,这说明黄土高原大部分区域处于干旱加重状态。毛乌素沙地、内蒙古的库布齐沙漠、宁夏北部以及山西部分地区旱情大多呈加剧趋势,其中,黄土高原北部的内蒙古以及宁夏北部地区旱情增加趋势最为严重,山西、青海部分地区也有轻微增加的趋势,这与文献[35, 39–40]的研究结果一致,该地区土地利用类型多为耕地和荒漠。而旱情缓解区域也较为集中,宁夏南部和甘

肃北部旱情明显缓解,陕西中部、青海部分地区的旱情也有减少趋势,这与文献[41–43]的结论一致,该地区的土地利用类型则以森林以及草地为主。

为直观反映黄土高原地区干旱变化情况,对黄土高原 2001—2020 年间 TVDI 年均值和各干旱等级面积占比进行统计(图 5),不难发现,黄土高原多年平均 TVDI 值约为 0.522,峰值出现在 2005 年(0.542),低值出现在 2003 年(0.478),整体呈波动升高趋势,增速为 $0.018/(10\text{ a})$ 。黄土高原在 20 年间发生着以轻旱为主的干旱,其面积在 32.3%~47.2% 之间,最大值出现在 2005 年(47.2%),在 20 年间有下降趋势;而中旱发生面积在 20 年间均未超过 10%,多年均值为 5.1%,近 20 年整体呈上升趋势;重旱发生面积最小,仅占研究区面积的 0.7%~2.1%,除 2001 年重旱区域占研究区面积最大,达到 2.1%,其余各年均未超过 2%;正常区域所占面积最大,多年占比在 36.8%~46.2% 之间,多年均值为 41.7%,在 20 年间变化不大;湿润区域占比在 6.4%~20.8% 之间,其变化幅度较大,多年间整体呈下降趋势。黄土高原地区的旱灾十分常见,平均每年都有 47% 的区域发生不同程度的干旱,2001

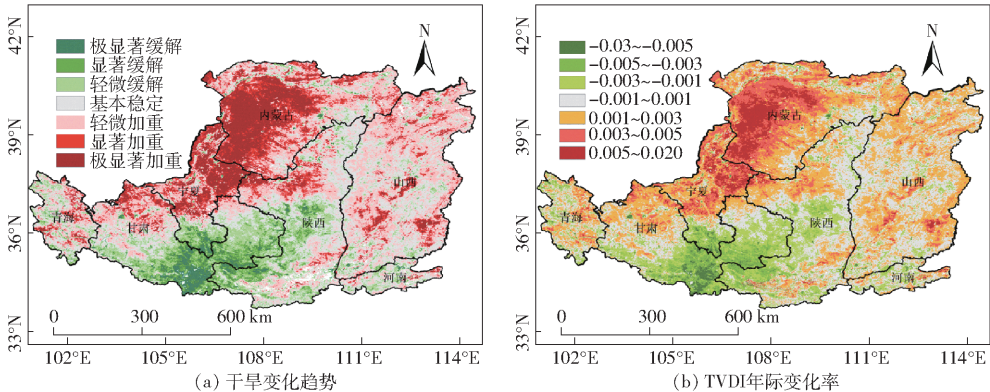


图 4 2001—2020 年黄土高原干旱变化趋势类型及 Sen 变化趋势

Fig. 4 Drought change trend type and Sen change trend in Loess Plateau from 2001 to 2020

年、2005 年和 2016 年的旱灾较为严重,发生旱情面积均超过 50%。

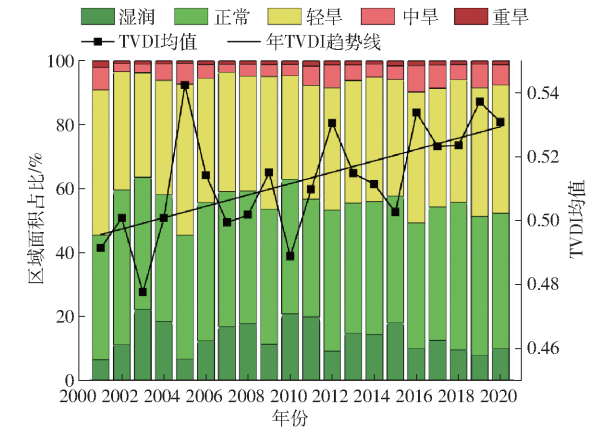


图5 黄土高原 2001—2020 年各干旱等级面积占比及 TVDI 年际变化

Fig.5 Proportion of area of each drought grade and annual variation of TVDI in Loess Plateau from 2001 to 2020

3.4 不同土地利用类型 TVDI 变化特征

3.4.1 年际变化

由图 6 可知,各土地利用类型的年均值 TVDI 变化趋势基本一致,均呈不同程度上升的趋势。但不同土地利用类型年均 TVDI 差异明显,从大到小依次为:未利用地(0.571)、草地(0.554)、耕地(0.503)、林地(0.473)、建筑用地(0.462)。其中,未利用地的 TVDI 值最高,在 20 年间介于 0.51 ~ 0.62 之间,最低值出现在 2003 年,最高值出现在 2012 年,除 2003 年处于正常状态外,其余各年均处于不同程度的干旱状态,且 TVDI 升高速度最快,达到 0.003 3/a。而建筑用地 TVDI 值最低,介于 0.43 ~ 0.49 之间,20 年间未出现干旱情况,最低最高值分别出现在 2003 年和 2005 年,其 TVDI 升高速度也较慢,为 0.001 6/a。草地的 TVDI 均值在 0.51 ~ 0.58 之间波动,TVDI 增长速度均仅次于未利用地,达到 0.001 9/a。耕地 TVDI 处于 0.47 ~ 0.54,在正常状态与轻度干旱(2001 年、2005 年、2016—2020 年)之间波动变化。林地 TVDI 均值介于 0.45 ~ 0.49 之间,TVDI 值较为稳定,20 年间无显著变化,所有年份均为正常状态。总体而言,黄土高原地区干旱等级较高,且除林地干旱变化趋势稳定外,其他各土地利用类型均呈旱情加重趋势。

为进一步分析回归方程的拟合精度及其变化显著性,对 5 个回归方程求算 R^2 并进行趋势变化的显著性检验(表 5)。从变化显著性来看,耕地、草地、建筑用地、未利用地的回归方程均通过 0.05 的显著性检验,且 TVDI 值均呈不同幅度的上升趋势;只有林地未通过显著性检验,但其 TVDI 值也有小幅增长。

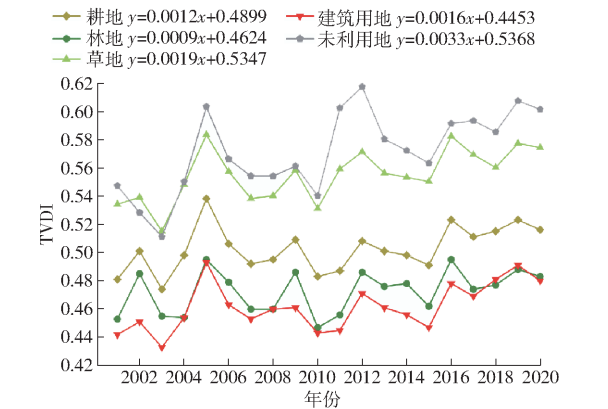


图6 2001—2020 年黄土高原各土地利用类型 TVDI 变化
Fig.6 TVDI changes of land use types in Loess Plateau from 2001 to 2020

表5 不同土地利用类型 TVDI 一元线性回归特征及干旱变化趋势

土地利用类型	回归方程	R^2	显著性	干旱趋势
耕地	$y = 0.001\ 2x + 0.489\ 9$	0.198	$P < 0.05$	增强
林地	$y = 0.000\ 9x + 0.462\ 4$	0.140	不显著	增强
草地	$y = 0.001\ 9x + 0.534\ 7$	0.381	$P < 0.01$	增强
建筑用地	$y = 0.001\ 6x + 0.445\ 3$	0.303	$P < 0.05$	增强
未利用地	$y = 0.003\ 3x + 0.536\ 8$	0.458	$P < 0.01$	增强

3.4.2 年内变化

黄土高原不同土地利用类型的多年月均 TVDI 值变化趋势基本一致(图 7),都呈先升高再降低的“单峰”特征,其 TVDI 值变化具有明显的季节特征。在 1—4 月随着气温升高植被逐渐生长,蒸散量增大,而降水又偏少,导致土壤含水率降低,故各土地利用类型的 TVDI 均呈上升趋势;4—5 月温度进一步升高,TVDI 值达到顶峰,各土地利用类型的 TVDI 值均超过 0.52,达到轻旱水平。在 6—8 月,黄土高原降水开始增多,TVDI 逐渐下降,除未利用地外,其他土地利用类型的 TVDI 值均到达低谷;8—10 月,植被生长旺盛,水分蒸发强烈,且降水开始逐渐减少,故除一些裸土、沙地外,黄土高原 TVDI 又开始缓慢升高;直至 10 月后,随着植被停止生长以及温度降低,TVDI 又逐渐降低。

未利用地和草地在 3—9 月均处于不同程度的干旱状态,其原因主要是两种土地利用类型的植被覆盖度都较小,土壤水分的保持能力都较弱,在气温较高时容易产生干旱现象。而林地以及建筑用地 TVDI 均较小,主要是二者地表覆盖程度均较高,对土壤水分有较好的保持作用。整体上,黄土高原 TVDI 的年内变化规律与其旱情发展规律相符合。这一结论表明,根据 TVDI 变化情况研究黄土高原

旱情发展规律是可靠的。

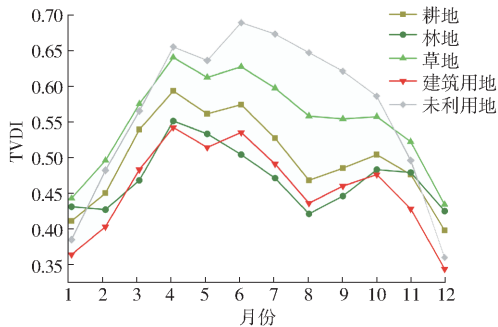


图 7 各土地利用类型 TVDI 年内 (20 年均值) 变化情况
Fig. 7 Changes of TVDI of each land use type within year
(20 years average)

3.5 黄土高原 TVDI 变化驱动因子分析

3.5.1 探测因子影响力分析及其时间变化

利用地理探测器,通过式(9)分别计算黄土高原地区 2001 年、2010 年、2020 年以及 20 年平均值中 11 个探测因子对 TVDI 空间分布的影响(表 6)。从 20 年平均值来看,高程、土壤类型、植被类型 3 个因子的 q 最大,分别达到 0.491、0.337、0.301,这说明高程、土壤类型、植被类型 3 个因子是影响黄土高原 TVDI 分布的主导因子,区域的海拔、生长的植物种类以及下垫面的土壤种类在很大程度上影响干旱的发生;温度、降水、SIF、土地利用方式的 q 分别为 0.283、0.186、0.174、0.107,均超过 0.1,这说明以上 4 个因子对黄土高原 TVDI 变化有一定影响力;而人口密度、GDP、坡度、坡向 4 个因子的 q 均小于 0.08,对黄土高原 TVDI 变化影响较小。

表 6 各驱动因子对黄土高原 TVDI 空间分布的 q				
Tab. 6 q value of each driving factor on spatial distribution of TVDI in Loess Plateau				
探测因子	2001 年	2010 年	2020 年	多年均值
SIF	0.098	0.120	0.256	0.174
植被类型	0.278	0.257	0.328	0.301
土壤类型	0.328	0.327	0.344	0.337
GDP	0.112	0.024	0.123	0.079
人口密度	0.023	0.013	0.033	0.029
土地利用	0.093	0.088	0.125	0.107
温度	0.314	0.231	0.258	0.283
降水	0.023	0.076	0.270	0.186
坡向	0.006	0.006	0.007	0.007
坡度	0.007	0.005	0.002	0.002
高程	0.525	0.487	0.392	0.491

由 2001—2020 年间探测出的 q 可知,高程、土壤类型、植被类型 3 个因子为影响黄土高原 TVDI 分布的主导因素,其影响力略高于其他因子。但不同因子的 q 在时间维度上发生着不同程度的变化,其中,表示植物光合作用的指标 SIF 的影响力从

2001 年的 0.098 达到 2020 年的 0.256,降水量从 2001 年的 0.023 上升为 2020 年的 0.27;而高程因子对黄土高原 TVDI 分布的影响力在减弱,从 2001 年的 0.525 降为 2020 年的 0.392。产生这种变化的原因可能是由于黄土高原地处干旱半干旱地区,干旱的发生受温度、降水量等气候要素影响,气候暖湿化有利于植物生长发育并缓解区域干旱状况,且随着黄土高原地区退耕还林还草政策的实施,黄土高原的生态系统趋于稳定,对于干旱的抵抗性增强,海拔对 TVDI 的影响力减弱,而随着植被的恢复,表征植物光合作用的 SIF 因子对 TVDI 的影响力逐渐增大。

3.5.2 因子交互作用分析

为探究 2000—2020 年多因子交互作用对黄土高原干旱的影响,利用地理探测器的交互探测模块分析各驱动因子间两两交互情况及其对 TVDI 空间分布的解释力(图 8)。根据图 8 可知,11 个因子中,任意两个因子的交互作用对 TVDI 的影响均大于单个因子的独立作用,即非线性增强或双因子增强,不存在相互独立作用的因子。各因子间交互作用对 TVDI 解释力最大的是高程与 SIF,它们的双因子交互 q 为 0.709,高程与土壤类型的交互作用次之,达到 0.671。解释力最弱的是坡度与坡向的交互作用, q 仅为 0.021 7,坡度和坡向本身对 TVDI 的解释力就较弱,这从一定程度上说明,坡度和坡向因子在大尺度下对干旱发生解释力不足。

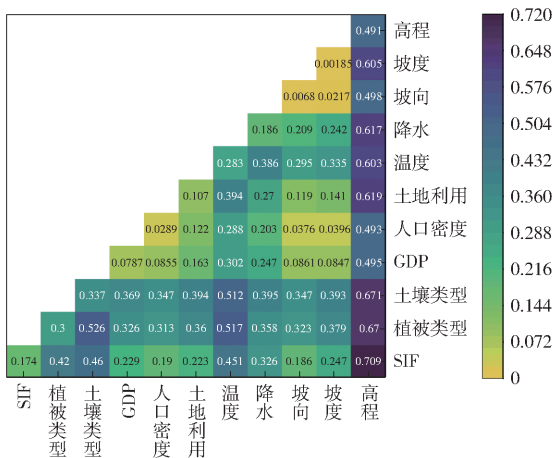


图 8 2001—2020 年 TVDI 驱动因子交互作用探测
Fig. 8 Detection of TVDI driver interaction in 2001—2020

4 结论

(1)2001—2020 年间黄土高原 TVDI 平均值为 0.522,土壤干湿状况存在明显的空间分异,总体上呈现从西向东方向旱情逐渐增加的趋势,20 年间黄土高原发生着不同程度的干旱,且以轻旱为主,其面积在 24.7% ~ 51.6% 之间,而轻度以上干旱发生的

面积比例较少,在 20 年间均未超过 10% ,多年均值为 5.4% 。

(2)2001—2020 年间,黄土高原年 TVDI 变化速率分布区间为[-0.03,0.02] ,超过 64% 的区域 Sen 斜率大于零,黄土高原整体处于变干趋势。黄土高原区域的 TVDI 变化存在明显的地域分异规律,黄土高原西北部的内蒙古、宁夏北部以及山西部分地区旱情大多呈加剧趋势,而旱情缓解区域较为集中,多分布于陕西中部、宁夏南部和甘肃北部。

(3)各土地利用类型 TVDI 年内变化趋势基本一致,都呈现先升高再降低的“单峰”季节特征。各

土地利用类型的 TVDI 年际变化均呈不同程度上升的趋势。各土地利用类型年均 TVDI 差异明显,从大到小依次为:未利用地(0.571)、草地(0.554)、耕地(0.503)、林地(0.473)、建筑用地(0.462)。

(4)黄土高原地区 TVDI 的空间分异受多种因素共同影响,从单因子探测结果来看,高程、土壤类型、植被类型 3 个因子的 q 均超过 0.3,是黄土高原干旱形成的主要驱动因素,但随着时间的变化,高程因子的影响力在不断减弱,而降水量与 SIF 的影响力逐渐增强。在多因子交互作用下,高程与 SIF 组合对黄土高原干旱的影响力最强, q 达到 0.709。

参 考 文 献

- [1] 沙莎,郭妮,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 Sha, GUO Ni, LI Yaohui, et al. Introduction of application of temperature vegetation dryness index in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(1): 128-134. (in Chinese)
- [2] LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Agricultural drought monitoring: progress, challenges, and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(6): 750-767.
- [3] BREWER M J, HEIM R R. International drought workshop series[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(7): 29-31.
- [4] 韩念龙,陈圣波,汪自军,等.被动微波反演裸露区土壤水分综述[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,52(增刊1):155-159.
HAN Nianlong, CHEN Shengbo, WANG Zijun, et al. Review of the bare field soil moisture retrieval from passive microwave [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007, 52(Supp.1): 155-159. (in Chinese)
- [5] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, 17(22): 179-183.
- [6] SERGIO M V, SANTIAGO B, JUAN I L. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [7] ESZTER I, BAUER E N, ZOLTAN B D. Classification of semi-dry grassland vegetation in Hungary[J]. Preslia, 2009, 81(3): 239-260.
- [8] 胡红武,胡梅,龙玲,等.区域干旱遥感监测研究综述[J].安徽农业科学,2008,36(33):14817-14819.
HU Hongwu, HU Mei, LONG Ling, et al. Research on drought monitoring by remote sensing in attachment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(33): 14817-14819. (in Chinese)
- [9] 李华朋,张树清,高自强,等. MODIS 植被指数监测农业干旱的适宜性评价[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3):756-761.
LI Huapeng, ZHANG Shuqing, GAO Ziqiang, et al. Evaluating the utility of MODIS vegetation index for monitoring agricultural drought[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 756-761. (in Chinese)
- [10] 王娇,丁建丽,袁泽,等.基于 Ts-NDVI 特征空间的绿洲土壤水分监测算法改进[J].中国沙漠,2016,36(6):1606-1612.
WANG Jiao, DING Jianli, YUAN Ze, et al. Improvement and comparison of soil moisture monitoring algorithm in oasis based on Ts-NDVI feature space[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1606-1612. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 王纯枝,毛留喜,何延波,等.温度植被干旱指数法(TVDI)在黄淮海平原土壤湿度反演中的应用研究[J].土壤通报,2009,40(5):998-1005.
WANG Chunzhi, MAO Liuxi, HE Yanbo, et al. Application of temperature-vegetation dryness index (TVDI) in estimation of soil moisture in the HHH plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 998-1005. (in Chinese)
- [13] ZORMAND S, JAFARI R, KOUPAEI S S. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands[J]. Natural Hazards, 2017, 86(2): 757-777.
- [14] 李正国,王仰麟,吴健生,等.基于 TVDI 的黄土高原地表干燥度与土地利用的关系研究[J].地理研究,2006,25(5):913-920.
LI Zhengguo, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. Relationship between surface dryness degree and landuse types based on TVDI on Loess Plateau[J]. Geographical Research, 2006, 25(5): 913-920. (in Chinese)
- [15] LIANG Liang, ZHAO Shuhe, QIN Zhihao, 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): 1501-1508.
- [16] 刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J].生态学报,2014,34(13):3704-3711.

- LIU Liwen, ZHANG Wuping, DUAN Yonghong, et al. Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3704–3711. (in Chinese)
- [17] 王力, 赵思妍, 陈元鹏, 等. 基于 GEE 云平台的黄土高原生态修复区植被变化与归因[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 210–223.
- WANG Li, ZHAO Siyan, CHEN Yuanpeng, et al. Vegetation change and attribution in ecological restoration area of Loess Plateau based on GEE cloud platform[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 210–223. (in Chinese)
- [18] 康悦, 文军, 张堂堂, 等. 卫星遥感数据评估黄土高原陆面干湿程度研究[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(8): 2473–2483.
- KANG Yue, WEN Jun, ZHANG Tangtang, et al. Assessment of the land surface wetness by using satellite remote sensing data over the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(8): 2473–2483. (in Chinese)
- [19] 薛少博, 李鹏, 于坤霞, 等. 2002—2020 年黄土高原土壤水变化及其相关性分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 221–226.
- XUE Shaobo, LI Peng, YU Kunxia, et al. Soil water change and its correlation analysis in the Loess Plateau from 2002 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 221–226. (in Chinese)
- [20] 郭永强. 黄土高原植被覆盖变化归因分析及其对水储量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- GUO Yongqiang. Attribution analysis of vegetation coverage change and its impact on water storage on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [21] MARK Z. China's tree-planting drive could falter in a warming world[J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 474–475.
- [22] 郑发美, 白建军. 基于地形因子的 TVDI 修正——以陕西省为例[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1223–1233.
- ZHENG Famei, BAI Jianjun. TVDI modification based on topographic factors: a case study in Shaanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1223–1233. (in Chinese)
- [23] 张钧泳, 丁建丽, 谭娇. 基于 SVM 的绿洲荒漠交错带土壤水分与地下水埋深反演[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 221–230.
- ZHANG Junyong, DING Jianli, TAN Jiao. Inversion of soil moisture and shallow groundwater depth based on SVM in arid oasis-desert ecotone[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 221–230. (in Chinese)
- [24] WANG Aihui, SHI Xueli. A multilayer soil moisture dataset based on the gravimetric method in China and its characteristics [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(8): 1721–1736.
- [25] GILLIES R R, KUSTAS W P, HUMES K S. A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (NDVI) and surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3145–3166.
- [26] 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 Guotao, BAI Jianjun, SUN Songsong. 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. (in Chinese)
- [27] 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.
- LIU Xin, SONG Xiaoning, LENG Pei, et al. Spatiotemporal variation of drought conditions based on MODIS data over the source area of Yellow River[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 36(2): 178–187. (in Chinese)
- [28] 刘一哲, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于 MODIS TVDI 和模糊数学方法的藏北地区旱情等级遥感监测[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 86–96.
- LIU Yizhe, FENG Wenlan, ZHA Xiyangzong, et al. Remote sensing monitoring of drought level in north tibet based on MODIS TVDI and fuzzy mathematics[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 86–96. (in Chinese)
- [29] 陈丙寅, 杨辽, 陈曦, 等. 基于改进型 TVDI 在干旱区旱情监测中的应用研究[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(4): 902–913.
- CHEN Bingyin, YANG Liao, CHEN Xi, et al. Application of modified TVDI in drought monitoring in arid areas[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(4): 902–913. (in Chinese)
- [30] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1–2): 195–213.
- [31] ROSS S L, JOSEPH F K, JAYANTHA E, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(2): 142–154.
- [32] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170–1186.
- CAI Bofeng, YU Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170–1186. (in Chinese)
- [33] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134. (in Chinese)
- [34] 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.
- 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. (in Chinese)
- [35] 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 Sufei,WEI Wei,GUO Zecheng, 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. (in Chinese)

[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):2728 – 2742.
CHENG Wei, XIN Xiaoping. Analysis of spatial-temporal characteristics of drought variation in grassland area of Inner Mongolia based on TVDI[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020,53(13):2728 – 2742. (in Chinese)

[37] GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S]. 2017.

[38] 黄静,张运,汪明秀,等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报,2020,40(3):1077 – 1088.
HUANG Jing, ZHANG Yun, WANG Mingxiu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(3): 1077 – 1088. (in Chinese)

[39] 刘立文,段永红,徐立帅,等. 山西省农业干旱时空变化特征[J]. 灌溉排水学报,2020,39(2):114 – 121.
LIU Liwen, DUAN Yonghong, XU Lishuai, et al. Characteristics of drought spatio-temporal transformation in Shanxi Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 114 – 121. (in Chinese)

[40] 覃艺,张廷斌,易桂花,等. 2000 年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析[J]. 自然资源学报,2021, 36(2):459 – 475.
QIN Yi, ZHANG Tingbin, YI Guihua,et al. Remote sensing monitoring and analysis of influencing factors of drought in Inner Mongolia growing season since 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(2):459 – 475. (in Chinese)

[41] 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 Ying, YUE Hui, HOU Enke. Drought monitoring based on MODIS in Shaanxi [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(2):172 – 179. (in Chinese)

[42] 李毅,张思远,刘庆祝,等. 基于 DSSAT – CERES – Wheat 的黄土高原西部春小麦干旱影响研究[J]. 农业机械学报, 2022,53(6):338 – 348.
LI Yi, ZHANG Siyuan, LIU Qingzhu,et al. Effects of droughts and meteorology on spring wheat in western Loess Plateau based on DSSAT – CERES – Wheat model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):338 – 348. (in Chinese)

[43] 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)

~~~~~

(上接第 110 页)

[21] 魏国梁,张青松,王彪,等. 油菜直播机扣垡犁体参数分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022,52(7):1709 – 1718.  
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, WANG Biao, et al. Analysis and experiment on parameters of plough body of rapeseed direct seeder[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022,52(7):1709 – 1718. (in Chinese)

[22] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69 – 77.  
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69 – 77. (in Chinese)

[23] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 42 – 50.  
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42 – 50. (in Chinese)

[24] 方会敏,姬长英,AHMED Alitagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 – 67.  
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Alitagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw – soil – rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 – 67. (in Chinese)

[25] DU Jun, HENG Yifan, ZHENG Kan, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220:105349

[26] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 33 – 41.  
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 33 – 41. (in Chinese)