水文地質工程地質
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

基于地理探测器的张承地区表层土壤湿度变化的驱动因素分析

郑金涛，金晓媚，李　晴，殷秀兰，金爱芳

Driving factors analysis of surface soil moisture variation in Zhangjiakou-Chengde district based on geodetector

ZHENG Jintao, JIN Xiaomei, LI Qing, YIN Xiulan, and JIN Aifang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309007

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏　水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆　水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析

Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based ontime series NDVI data

贺军亮, 韦锐, 李丽, 金雁琳　水文地质工程地质. 2020, 47(6): 91-98

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕　水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

霍城县地下水资源构成变化及驱动力分析

An analysis of groundwater resources composition and driving force in Huocheng county

霍世璐, 王文科, 段磊, 李瑛, 张琛, 刘明明, 曾磊　水文地质工程地质. 2020, 47(2): 51-59

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅　水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309007

郑金涛, 金晓媚, 李晴, 等. 基于地理探测器的张承地区表层土壤湿度变化的驱动因素分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 204-214.

ZHENG Jintao, JIN Xiaomei, LI Qing, et al. Driving factors analysis of surface soil moisture variation in Zhangjiakou-Chengde district based on geodetector[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 204-214.

基于地理探测器的张承地区表层土壤湿度变化的驱动因素分析

郑金涛[1], 金晓媚[1], 李　晴[1], 殷秀兰[2], 金爱芳[3]

（1. 中国地质大学（北京）水资源与环境学院, 北京　100083; 2. 中国地质环境监测院, 北京　100081; 3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京　100055）

摘要：河北张家口、承德地区(以下简称“张承地区”)作为京津冀地区的生态屏障、重要的水源保护地和风沙阻隔区, 近年来开展了一系列生态治理工程。土壤湿度作为综合反映气候、植被覆盖、土壤性质的重要指标, 在大气水—地表水—地下水的循环中至关重要。但张承地区地处半干旱区, 水资源相对匮乏, 且现有研究忽视了对其土壤湿度空间变化特征及驱动因素的分析。研究以中等分辨率成像光谱仪数据、全球陆地数据同化系统数据集等为基础, 基于温度-植被干旱指数模型反演并分析张承地区 2001—2021 年土壤湿度及时空变化特征, 利用地理探测器方法分析 8 个驱动因子对张承地区土壤湿度时空异质性的解释力。结果表明: (1)2001—2021 年张承地区的土壤湿度呈现波动上升趋势, 土壤湿度分布为东部高, 西部低, 张家口低于承德; 空间上, 研究区 83.09% 区域的土壤湿度呈现逐年上升的趋势; (2)研究区土壤湿度的驱动因素解释力大小排序为: 归一化植被指数>土壤类型>年均降水>土地利用类型>坡度>高程>年均气温>坡向, 其中归一化植被指数和土壤类型的解释力均高于 30%, 为主导驱动因素; (3)在交互作用分析中, 多因子共同作用的影响大于单因子作用, 归一化植被指数与高程的交互影响作用最强。研究结果对于张承地区水资源的高效利用及生态环境保护具有重要的参考作用。

关键词：地理探测器; 温度-植被干旱指数模型; 土壤湿度; 驱动因子; 张承地区

中图分类号：S152.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-3665(2024)02-0204-11

Driving factors analysis of surface soil moisture variation in Zhangjiakou-Chengde district based on geodetector

ZHENG Jintao[1], JIN Xiaomei[1], LI Qing[1], YIN Xiulan[2], JIN Aifang[3]

(1. *School of Water Resources and Environment*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing*　100083, *China*; 2. *China Institute of Geo-Environment Monitoring*, *Beijing*　100081, *China*; 3. *Natural Resources Comprehensive Survey Command Center*, *China Geological Survey*, *Beijing*　100055, *China*)

Abstract: As an important water conservation and sand-windy barrier, Zhangjiakou and Chengde (Zhang-Cheng) district of Hebei Province is very important for ecological protection in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The soil moisture is an important comprehensive indicator for climate, vegetation cover, and soil property, and is essential in the cycle of atmospheric−surface water−underground water. However, few studies focused on the soil moisture

收稿日期：2023-09-04; **修订日期：**2023-10-16　　**投稿网址：**www.swdzgcdz.com

基金项目：国家自然科学基金项目(41372250); 行政事业类专项项目(121201014000150003)

第一作者：郑金涛(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文地质与水环境遥感等研究。E-mail: 870428401@qq.com

通讯作者：金晓媚(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事生态水文地质与水环境遥感等研究。E-mail: jinxm@cugb.edu.cn

change and its impact factors in the Zhang-Cheng district, an area with semi-arid climate and scarce water resources. Based on moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and global land data assimilation system data (GLDAS), the spatiotemporal variation of surface soil moisture in Zhang-Cheng district was simulated during the period of 2001−2021 using temperature vegetation dryness index (TVDI) model. Moreover, the geodetector method was also employed to identify the contribution of 8 impact factors on soil moisture. The results indicate that the soil moisture is generally fluctuating increase during the period of 2001−2021. Spatially, the soil moisture is higher in the east and lower in the west part of the study area and approximately 83.09% of the the study area experienced a progressive increase in soil moisture. In terms of driving factors, normalized difference vegetation index (NDVI), soil type, annual precipitation, land use type, slope, elevation, annual temperature, and aspect were analyzed in descending order of their effect on soil moisture variation. NDVI and soil type are the dominant drivers, with each contribution exceeding 30%. As to interaction analysis, it indicates that the effect of multiple factors is greater than that of individual factor. The synergistic interaction between NDVI and elevation is the largest influence on soil moisture. This study has great significance for efficient utilization of water resources and eco-environmental protection in the Zhang-Cheng district.

Keywords: geodetector；TVDI model； soil moisture；driving factors；Zhang-Cheng district

土壤湿度作为构成陆地表面水循环系统的必要组分,同时也在很大程度上参与了陆-气系统中水分和能量的交换,在水文、气象、农业等领域被广泛研究[1]。因此,对土壤湿度的研究有利于解决气候变化、生态环境和农业生产领域等诸多方面的问题[2]。

目前,土壤湿度遥感监测方法主要有温度-植被干旱指数法(temperature vegetation dryness index, TVDI)[3]、热惯量法[4−5]、微波遥感法[6]等。其中 TVDI 方法是采用遥感监测土壤湿度的方法中较为成熟且广泛应用的方法之一[7]。根据土壤含水量影响植被生长状况从而引起植被光谱信息发生变化的特性,学者们提出利用各种植被指数,如:归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)[8−9]、植被状况指数(vegetation condition index, VCI)[10−11]以及增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)[12]等植被指数进行干旱监测。地表温度(land surface temperature, LST)是植被、大气、土壤组成的能量系统参与水循环进行能量交换的重要组分。在长时间的研究应用中发现单一的使用植被指数或 LST 都具有很大的局限性,但将二者结合后可以获得更多关于土壤和植被水分的信息,进而更有效地监测干旱情况的变化[13]。

地理探测器法是一种新型的空间统计方法,由王劲峰等[14]在 2010 年首次提出。地理探测器可以探索数值、定性数据,并且能够探索自变量之间交互作用的优点,所以被广泛应用在土地利用、环境科学[15]以及区域经济、区域规划[16]等方面。将地理探测器应用在土壤湿度驱动因子的探测上,通过研究不同因子的解释力及其交互影响,可以更好地解释土壤湿度的时空异质性。

张家口、承德地区(以下简称“张承地区”)位于森林和草原的生态过渡带,与农牧交错区相邻。研究区构成京津冀地区的生态屏障[17],是重要的水源保护区和风沙阻隔区,对于北京周边地区大气环境的改善、自然资源保护起到了难以替代的关键作用[18]。近年来,张承地区深入开展了“水源涵养林”、“三个林场工程”等生态治理工程,在减少水土流失等方面成效显著,但区域环境问题还没有彻底解决,并且在少部分地区开始出现生态退化的现象[19]。目前,有学者对华北地区的土壤湿度进行了研究,一些研究偏向于比较土壤湿度的季节性变化[20−21],缺少对较长时间序列土壤湿度空间变化的研究;另有一些研究偏向于探索适合反演华北地区土壤湿度的 TVDI 改进模型,忽视了影响土壤湿度的驱动因素[22],或者更多偏向于探究单一因素的影响[23],对华北地区尤其是张承地区的土壤湿度驱动分析较少。因此,本文以中等分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据、全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)数据集为基础,基于 TVDI 模型反演并分析张承地区 2001—2021 年土壤湿度及时空变化特征,利用地理探测器方法分析 NDVI、年均气温、年均降水、高程、坡度、坡向、土壤类型、土地利用类型等 8 个驱动因子对张承地区土壤湿度时空异质性的解释力。本研究对于张承地区进行干旱预警、合理灌溉、作物布局、确保生产生活可持续发展、促进生态环境保护等工作具有非常重要的现实意义。

1 研究区概况

张承地区包括张家口市和承德市，位于河北省北部（图 1）。张承地区北与内蒙古高原相靠，南与华北平原相连，西与山西省为邻，东与辽宁省相接，总面积为 7.6×10^4 km^2，整体呈现西北高、向东南逐渐倾斜的地势特点。张承地区以横贯中部的阴山山脉为界，分为坝上和坝下两大地区，坝上主要以高原地貌为主，地形复杂，地势高低起伏显著；坝下主要以山地和丘陵地貌为主。

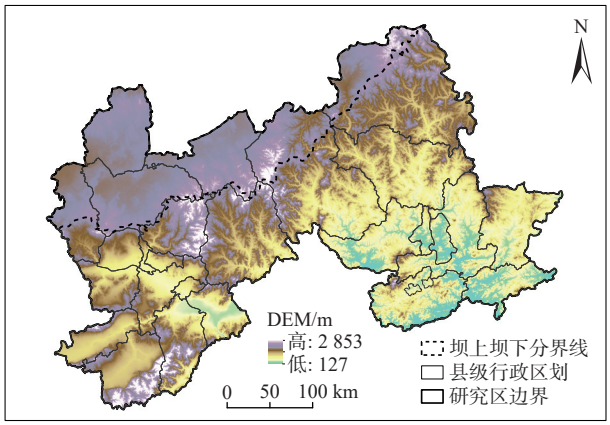

图 1 张承地区地貌图

Fig. 1 Landform map of Zhang-Cheng district

全区均属温带大陆性季风气候，四季分明。全区雨热同期，年均气温 9 ~ 12 °C，年均降水量为 460 mm，年均日照率为 60%。坝上高原地区由于地势和地形因素的影响，年均气温−1 ~ 2 °C，年均降水量在 300 ~ 400 mm；坝下地区气温变化规律呈现由北到南逐渐升高的趋势，年均气温为 5 ~ 9 °C，年均降水量在 400 ~ 600 mm 之间。

2 数据与方法

2.1 研究方法

2.1.1 TVDI 计算

TVDI 方法是由 Sandholt 等[24] 首先提出，用来估算土壤湿度的一种方法。TVDI 的取值范围为 0 ~ 1，根据已有研究中[2, 25 − 27] 土壤湿度等级划分标准，将土壤湿度按照 TVDI 值划分为 5 个等级，并结合土壤湿度实测数据进一步量化每个等级的土壤含水率范围，如表 1 所示。

TVDI 方法的计算公式如下：

$$I_{\mathrm{TVDI}} = \frac{T_{\mathrm{S}} - T_{\mathrm{S_{min}}}}{T_{\mathrm{S_{max}}} - T_{\mathrm{S_{min}}}} \tag{1}$$

表 1 土壤湿度等级划分标准

Table 1 Standard for classification of soil moisture levels

I_{TVDI}值	土壤湿度等级	实测土壤含水率区间/%
$0<I_{\mathrm{TVDI}}\leqslant 0.2$	极湿润	30 ~ 32
$0.2<I_{\mathrm{TVDI}}\leqslant 0.4$	湿润	24 ~ 31
$0.4<I_{\mathrm{TVDI}}\leqslant 0.6$	正常	16 ~ 25
$0.6<I_{\mathrm{TVDI}}\leqslant 0.8$	干旱	10 ~ 18
$0.8<I_{\mathrm{TVDI}}\leqslant 1$	极干旱	

注：表中“I_{TVDI}”为TVDI值；空白为无数据，是由于实测土壤湿度的测量季节为夏季，受季节和测量位置影响，测量位置的I_{TVDI}值均<0.8，因此无极干旱等级实测土壤含水率数据。

式中：I_{TVDI}——TVDI 值；

T_{S}——研究区内某任一像元的地表温度/°C；

$T_{\mathrm{S_{max}}}$——某植被指数对应下的地表温度最大值/°C，也称为 VI-*T*s 特征空间的干边；

$T_{\mathrm{S_{min}}}$——某植被指数对应下的地表温度最小值/°C，也称为 VI-*T*s 特征空间的湿边。

VI-*T*s 特征空间的干边和湿边计算公式如下：

$$T_{\mathrm{S_{max}}} = a_1 + b_1 \cdot I_{\mathrm{VI}} \tag{2}$$

$$T_{\mathrm{S_{min}}} = a_2 + b_2 \cdot I_{\mathrm{VI}} \tag{3}$$

式中：I_{VI}——植被指数值；

a_1、b_1——干边拟合方程的拟合系数；

a_2、b_2——湿边拟合方程的拟合系数。

传统的 TVDI 计算通常采用 NDVI 和 LST 数据计算[28]，但在植被覆盖度较高的区域，NDVI 自身存在易饱和等缺点[29]，而 EVI 在计算时加入了蓝光波段，增强了对植被信号的探测能力，可以缓解由于气溶胶散射所带来的影响[30 − 31]。因此本研究选择采用 EVI 和 LST 计算 TVDI。EVI 取值为 0.2 ~ 0.8，计算步长取值为 0.01。提取 EVI 范围对应的陆面温度最大值和最小值，得到特征空间并拟合出干、湿边方程，并逐像元计算研究区 2001—2021 年 TVDI 空间分布。

2.1.2 Sen+ Mann-Kendall 趋势分析法

Sen+ Mann-Kendall 趋势分析法是一种广泛应用于气象要素时间序列趋势分析的非参数统计检验方法[32]。在 Sen+ Mann-Kendall 趋势分析法中，首先根据 Sen 趋势度（β）判断序列的趋势变化，再对序列进行 Mann-Kendall 检验。检验统计量定义为：

$$S = \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} sign(X_i - X_j) \tag{4}$$

式中：S——Mann-Kendall 检验统计量；

n——样本数量；

i、j——数据个数；

$sign$——符号函数;

X_i、X_j——时间序列数据。

检验统计量的均值为 0, 其方差为:

$$\mathrm{Var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18 \tag{5}$$

式中: $\mathrm{Var}(S)$——检验统计量方差。

当 $i\geqslant 10$ 时, S 近似正态分布, 因此可以用 Mann-Kendall 检验统计量进行检验, 计算公式为:

$$\begin{cases} Z=(S-1)\sqrt{\dfrac{n(n-1)(2n+5)}{18}}, & S>0 \\ Z=0, & S=0 \\ Z=(S+1)\sqrt{\dfrac{n(n-1)(2n+5)}{18}}, & S<0 \end{cases} \tag{6}$$

其中, Z 表示标准化后的 Mann-Kendall 检验统计量, 其绝对值的显著性检验见表 2, $Z>0$ 表示上升趋势, $Z<0$ 表示下降趋势。

表 2　Z 绝对值的显著性检验表

Table 2　Significance test table of absolute value of Z

$\lvert Z\rvert$	≥1.64	≥1.96	≥2.58
信度/%	90	95	99

2.1.3　地理探测器法

地理探测器法是一种新型的空间统计方法, 能够探测研究区域的异质性并探究其影响的解释力。地理探测器主要由分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器及生态探测器构成, 本研究运用了前 2 种探测器进行研究。

(1)分异及因子探测器

分异及因子探测器能够展示因变量(TVDI)的时空分异性, 并给出自变量(其他驱动因子)对因变量的解释程度。解释程度称为解释力, 其值越大代表 TVDI 的分异性越高, 驱动因子的解释力也越大, 其表达式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{7}$$

式中: q——解释力, 取值范围为 [0, 1];

h——因变量(TVDI)或自变量(其他驱动因子)的分层数, h=1, 2, ⋯, L;

L——因变量(TVDI)或自变量(其他驱动因子)的分层总数;

N——单元数;

N_h——层 h 的单元数;

σ_h^2——层 h 的因变量值的方差;

σ^2——全区的因变量值的方差。

(2)交互作用探测器

交互作用探测器用来探测不同自变量因子之间的交互作用[33], 探测当多个因子共同作用时, 是否会对 TVDI 的解释力产生影响, 或者探测这些因子之间的独立关系。自变量因子之间的交互关系见表 3。

表 3　交互作用类型

Table 3　Interaction types

判据	交互作用
$q(X1\cap X2)<\mathrm{Min}(q(X1),q(X2))$	非线性减弱
$\mathrm{Min}(q(X1),q(X2))<q(X1\cap X2)<\mathrm{Max}(q(X1),q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1\cap X2)>\mathrm{Max}(q(X1),q(X2))$	双因子增强
$q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)$	独立
$q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)$	非线性增强

注: 表中“Min”为取最小值; “Max”为取最大值; “$X1$”、“$X2$”分别为2个不同的驱动因子。

2.2　数据及预处理

2.2.1　数据选取

选取 2001—2021 年共 21 a 的 EVI 数据(选自 MOD13A1.061)和 LST 数据(选自 MOD11A1.061)。其中, EVI 数据的时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 500 m; LST 数据的时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 1 km。气温和降水数据来自 GLDAS 数据集, 数据的空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 1 a 。MODIS 数据和 GLDAS 数据均下载于谷歌地球引擎(Google Earth engine, GEE)。DEM 高程数据来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)中的 GDEMV3 数字高程数据, 其空间分辨率为 30 m。土地利用类型数据、土壤类型分布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为 2020 年 1 km 空间分辨率的中国土地利用数据, 土壤类型分布数据为中国 1∶100 万土壤类型数据。土壤湿度实测数据为 2021年 7 月 7 日至 8 月 2 日张承地区地表 10 cm 土壤湿度实测数据, 实测土壤湿度数据共 64 个样点。

所有数据均使用 ArcGIS 和 GEE 进行空缺值填补、裁剪、计算及重采样。EVI 数据、LST 数据统一合成为月尺度。所有栅格数据使用双线性插值法重采样至 500 m。

2.2.2　驱动因子选取

研究主要从植被覆盖、气候、地形、土壤以及人类活动(用地类型)等几个方面来综合分析影响区域土壤水分变化的主要因素。因此选择了 NDVI、年均气温、年均降水、高程、坡度、坡向、土壤类型、土地利用类型等 8 个驱动因子, 定量分析了 8 个驱动因子

对张承地区 2001—2021 年土壤湿度时空异质性的解释力。其中，NDVI 是反映植被生长和覆盖的重要指标，而植被通过蒸发、蒸腾作用等改善土壤结构，对土壤湿度产生重要的影响；气候因素中气温和降水对于土壤湿度的影响是最直接的，也是影响土壤湿度的重要指标；高程对气温和降水分布有影响；较大的坡度可能会导致水分流失和土壤侵蚀；不同坡向会受到不同程度的日照，受降水的影响不同，进而影响土壤湿度；不同土壤类型具有不同的水分保持能力、透水性能和水分传递速率，这些因素将直接影响土壤湿度的分布和变化；土地利用类型可以较全面、直接的分析人类活动对土壤湿度的影响。NDVI、年均气温、年均降水、高程均采用自然间断点分级法（Jenks）分级，除 NDVI 分为 5 个等级外，其余 3 个驱动因子分为 6 个等级；坡度和坡向采用等间距法分别分为 6 个等级、9 个等级；土壤类型、土地利用类型按照标准分为 9 个等级、6 个等级（图 2）。

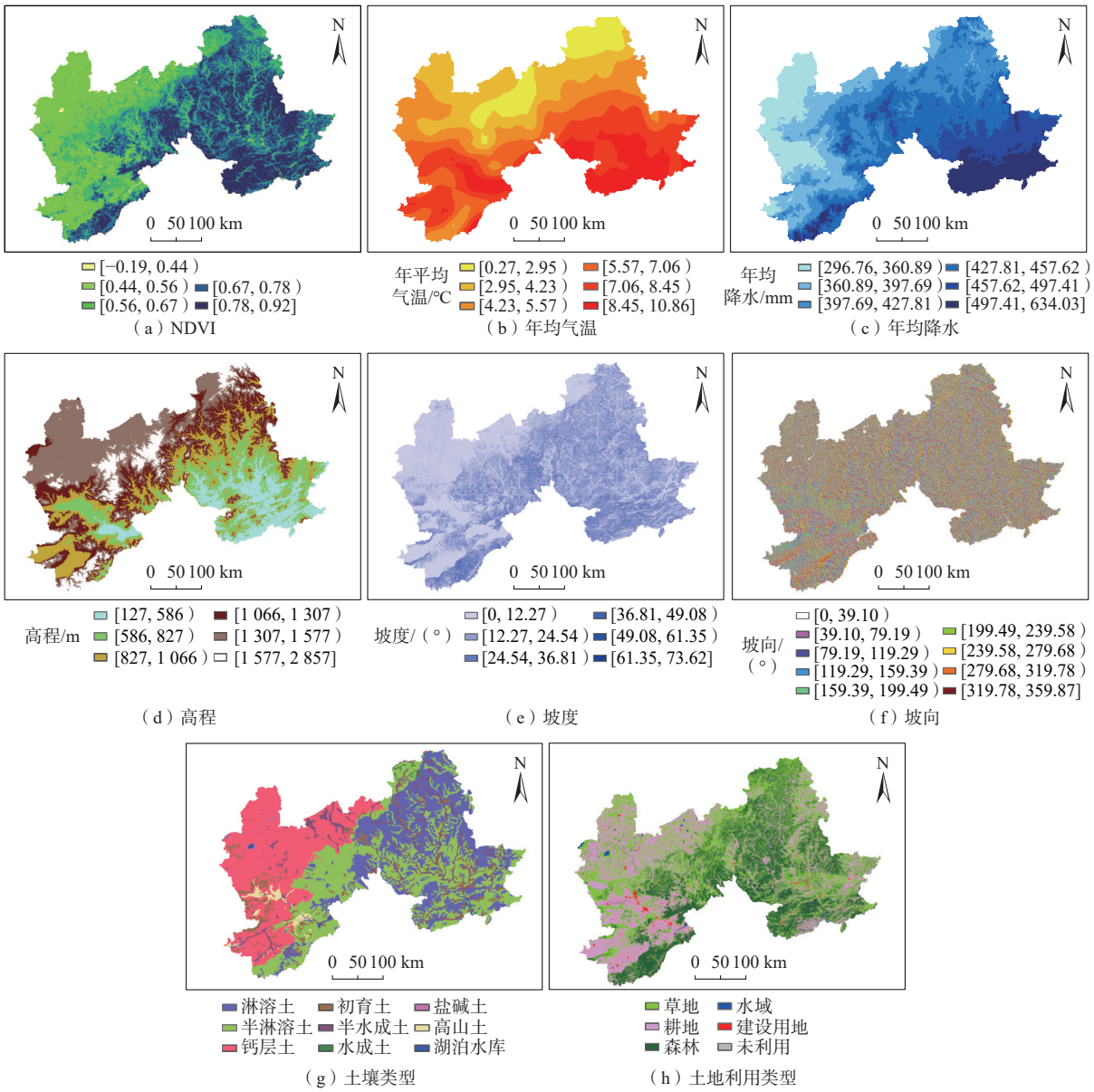

图 2　地理探测器驱动因子空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of driving factors for geodetectors

利用 ArcGIS 按照 20 km×20 km 设置格网大小，创建采样点。将 8 个重分类后的驱动因子数据带入 1 330 个采样点中，导出采样点数据，输入地理探测器进行运算。

3　结果

3.1　TVDI 反演土壤湿度可信性评价

以 TVDI 值为横坐标，土壤含水率为纵坐标，建立张承地区地表 10 cm 土壤湿度实测数据与 TVDI 值的散点图并分析线性关系，结果如图 3 所示。

p 值为统计学置信度检验值，当 $p<0.05$ 时，说明通过置信度 95% 的检验。张承地区地表 10 cm 土壤湿度实测数据与同期反演 TVDI 值通过了 95% 的显著性检验，呈现显著负相关关系，即 TVDI 值越大，土壤湿度越低。实测土壤湿度与 TVDI 值的相关系数为 −0.781，相关性较好。总体来讲，本研究采用的 TVDI 值与张承地区土壤湿度具有较高的相关性，能够反映张承地区土壤湿度的变化趋势，因此可以采用 TVDI 值反演并分析张承地区土壤湿度特征。

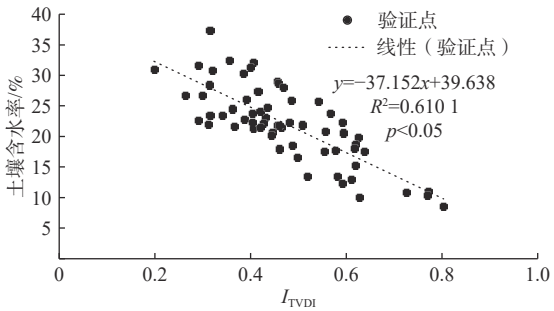

图 3　张承地区地表 10 cm 土壤含水率实测数据与 TVDI 值的关系

Fig. 3　Relationship between the field measurement of 10 cm soil moisture and the simulated I_{TVDI} in Zhang-Cheng district

3.2　TVDI 值时空分布特征

从空间分布（图 4）来看，张承地区整体土壤湿度偏低，土壤湿度的空间分布规律为东部高，西部低，张家口土壤湿度整体低于承德。土壤湿度为干旱和极干旱等级面积占比之和为 43.93%，主要分布在坝上地区西北部和坝下地区西部，少部分分布在坝下地区东南部；其中极干旱等级面积占比为 11.54%，主要分布在坝下地区西部的蔚县和阳原县、张家口市区黄土丘陵地区，零星分布在坝下地区承德市和平泉市的山地地区；土壤湿度为湿润和极湿润等级面积占比之和为 18.84%，主要分布在坝上地区东北部的塞罕坝林场及坝下地区西南部蔚县的小五台国家自然保护区、东部平泉市辽河源国家森林公园和东南部兴隆县雾灵山国家级自然保护区附近。

从年际变化（图 5）看，2001—2021 年张承地区年均 TVDI 值变化范围为 0.52 ~ 0.67，最小值出现在 2018 年，最大值出现在 2004 年。TVDI 值变化趋势呈现波动下降，趋势变化率为−0.051/10 a，说明土壤湿度呈现波动上升趋势。TVDI 值大于 0.6 的年份共 6 个，分别为 2001—2004 年、2007 年、2009 年，平均土壤湿度水平达到干旱等级，其他年份均处在正常等级。从各个土壤湿度等级的面积占比可知，不同年份的土壤湿度等级面积占比差异变化不大，2001—2021 年大部分年份正常等级面积占比最高，个别年份干旱等级面积占比最高。

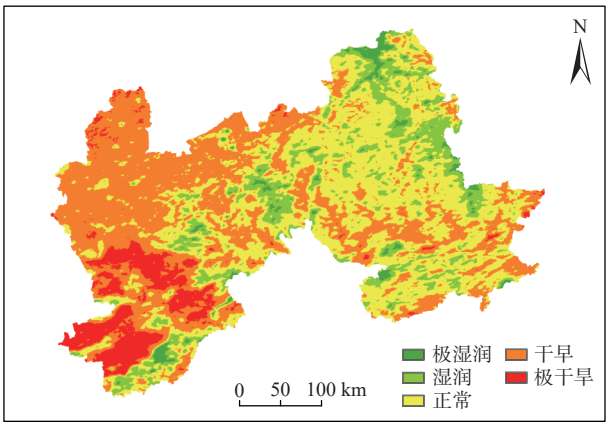

图 4　张承地区多年平均 TVDI 值空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of multi-year average I_{TVDI} in Zhang-Cheng district

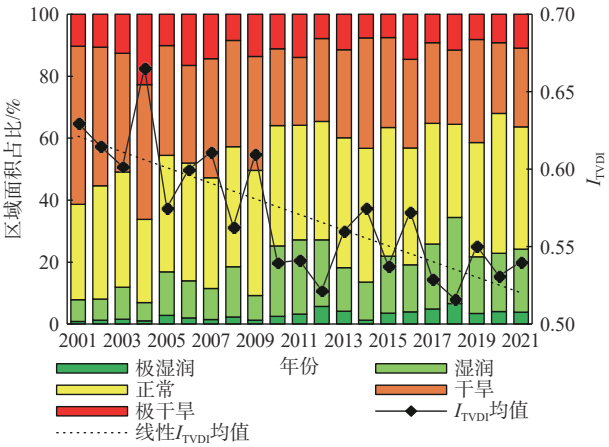

图 5　张承地区 2001—2021 年各土壤湿度等级面积占比及 TVDI 值年际变化

Fig. 5　The area proportion of each grade and interannual changes in I_{TVDI} in Zhang-Cheng district from 2001 to 2021

从各个土壤湿度等级随年份变化的趋势中可以得知，张承地区极湿润、湿润和正常面积占比上升趋势显著，干旱、极干旱面积占比呈现下降趋势，其中干旱面积占比下降趋势显著。由此可知 21 a 来张承地区土壤湿润、极湿润地区面积逐渐扩大，干旱的面积逐渐缩小，但总体来看，土壤湿度低的地区面积占比仍然较高。

为进一步研究土壤湿度的变化趋势，采用 Sen+Mann-Kendall 方法（置信度为 95%）对张承地区 2001—2021 年 TVDI 数据进行逐像元分析，得到张承地区 2001—2021 年 TVDI 值变化趋势空间分布图（图 6）和 TVDI 值变化趋势分析结果（表 4）。

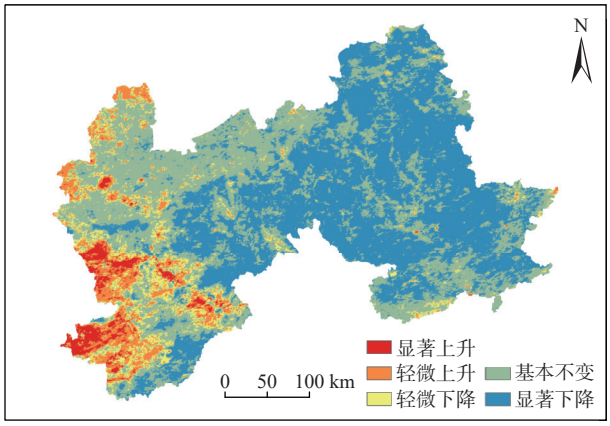

图 6 TVDI 值空间变化趋势分级图

Fig. 6 I_{TVDI} spatial change trend classification chart

表 4 TVDI 值空间变化趋势面积统计

Table 4 Areal statistics of spatial change in I_{TVDI}

TVDI值变化趋势	等级	面积占比/%
$\beta<0.001, \lvert Z\rvert>1.96$	显著下降	45.16
$\beta<0.001, \lvert Z\rvert\leqslant 1.96$	轻微下降	37.93
$-0.001\leqslant\beta\leqslant 0.001$	基本不变	7.62
$\beta>0.001, \lvert Z\rvert\leqslant 1.96$	轻微上升	6.92
$\beta>0.001, \lvert Z\rvert>1.96$	显著上升	2.38

张承地区 21 a TVDI 值空间变化分布呈现出西部上升，中部和东部下降的趋势。TVDI 值呈现下降趋势的面积占比最大，占总面积的 83.09%，其中通过 0.05 显著性水平检验的显著下降面积占 45.16%，主要分布在承德的大部分地区和张家口的崇礼、赤城以及涿鹿南部一带；TVDI 值上升面积占比 9.30%，分布地区主要在坝下地区西部，零星分布在坝上地区北部，其中通过 0.05 显著性水平检验的显著上升面积占 2.38%，分布地区主要集中在张家口西部的万全、阳原的大部分地区以及张家口市区—宣化—下花园—怀来城市带一线。TVDI 值基本不变的地区占研究区总面积的 7.62%，主要分布在张家口西部地区。因此，张承地区除坝下地区西部少部分地区外，其他地区的土壤湿度均呈现逐年上升趋势，尤其是坝上地区东部与坝下地区东北部的承德市附近，土壤湿度上升趋势显著。

3.3 TVDI 值变化驱动因素探测结果

3.3.1 分异及因子探测器探测结果

分异及因子探测器能够展示因变量（TVDI）的空间分异性，并给出自变量（其他 8 个驱动因子）对因变量的解释程度。当 $p>0.05$ 时，说明未通过置信度为 95% 的检验。分异及因子探测器探测结果如表 5 所示。

表 5 分异及因子探测器探测结果

Table 5 Detection results of differentiation and factor detectors

驱动因子	p值	q值	q值排序
NDVI	0.000	0.417	1
年均气温	0.000	0.098	7
年均降水	0.000	0.297	3
高程	0.000	0.146	6
坡度	0.000	0.154	5
坡向	0.506	0.006	8
土壤类型	0.000	0.369	2
土地利用类型	0.000	0.274	4

根据分异及因子探测器的探测结果可知，8 个驱动因子按照 q 值排序分别为 NDVI（0.417）>土壤类型（0.369）>年均降水（0.297）>土地利用类型（0.274）>坡度（0.154）>高程（0.146）>年均气温（0.098）>坡向（0.006）。其中 NDVI 解释力为 0.417，是张承地区土壤湿度变化的最大驱动因子；坡向的解释力最低，为 0.006，且其未通过置信度为 95% 的显著性检验，因此可以将 NDVI、年均气温、年均降水、高程、坡度、土壤类型、土地利用类型这 7 个驱动因子作为张承地区异质性分析的驱动因子继续进行探测分析。

3.3.2 交互作用探测器探测结果

对影响张承地区土壤湿度的 7 个因子进行交互作用探测，探测结果如表 6 所示。非线性增强是指 2 个驱动因子相互作用时的解释力大于 2 个驱动因子单独作用时的解释力之和；双因子增强是指 2 个驱动因子相互作用时的解释力大于每个驱动因子单独作用时的解释力，其解释力稍小于非线性增强（表 3）。

影响张承地区土壤湿度的 7 个因子间的交互作用均为增强型作用，因此 7 个因子之间并非相互独立的关系，而是相互作用且增强。在得到的 28 个交互探测结果中，NDVI 与年均气温、高程，年均气温与年均降水、坡度、土壤类型、土地利用类型，年均降水与高程、土壤类型、土地利用类型，高程与土壤类型之间均呈现非线性增强型交互作用，交互作用解释力强；其他因子两两之间均为双因子增强交互作用，交互作用解释力稍弱。NDVI 与高程交互作用对土壤湿度的解释力最强（0.615）；坡度和土地利用类型交互作用对土壤湿度的解释力最弱（0.301）。年均气温与 NDVI、年均降水、土壤类型、土地利用类型交互后的解释力提升明显。

表 6　交互作用探测器探测结果

Table 6　Detection results of interaction detector

驱动因子	NDVI	年均气温	年均降水	高程	坡度	土壤类型	土地利用类型
NDVI	0.417						
年均气温	0.584	0.098					
年均降水	0.470	0.534	0.297				
高程	0.615	0.239	0.529	0.146			
坡度	0.427	0.304	0.339	0.294	0.154		
土壤类型	0.509	0.512	0.453	0.580	0.409	0.369	
土地利用类型	0.472	0.397	0.422	0.403	0.301	0.466	0.274

注: 绿色代表非线性增强, 黄色代表双因子增强。

4　讨论

2001 年, 为缓解风沙肆虐的严峻局势, “三个林场”项目实施。截至 2019 年底, 造林绿化项目已累计完成总规划的 81.5%, 有效改善了京津地区的生态环境。从土壤湿度时空分布特征来看, 自 2001 年开始, 张承地区整体的平均土壤湿度呈现波动上升趋势, 总体上升趋势明显, 这与王嘉杰等[23] 的研究结果一致。空间上, 处于研究区东部的承德地区土壤湿度大于西部的张家口地区, 结合地理探测器结果可知, 植被分布对于张承地区土壤湿度的解释力最高, 因此土壤湿度的空间分布同样与植被分布“西北低, 东南高”的特点[34] 相对应。

以往对于影响因素的分析更多采用相关系数、偏相关系数方法, 但这种方法的弊端在于在实际土壤湿度的变化过程中, 单一驱动因子的变化和土壤湿度的变化并非呈现严格的线性关系[35], 并且土壤湿度的变化通常是由多个因子共同作用导致的。本研究利用的地理探测器方法不仅可以探究单因子对土壤湿度的影响, 还可以通过因子间的交互探测, 探测 2 个因子相互作用对土壤湿度的共同影响, 并确定出每个驱动因子的影响特征。根据分异及因子探测器所得到的解释力结果, 对张承地区土壤湿度影响最大的是 NDVI, 其解释力为 0.417, 是张承地区土壤湿度变化的最大驱动因子; 其次是土壤类型, 其解释力为 0.369, 二者解释力均高于 0.3, 说明 NDVI 和土壤类型是影响张承地区土壤湿度的主导因素。年均降水、土地利用类型、坡度、高程和气温的解释力分别为 0.297, 0.274, 0.154, 0. 146, 0.098, 说明这 5 个驱动因子对张承地区的土壤湿度也有重要作用。坡向的解释力最低, 为 0.006, 且其未通过置信度为 95% 的显著性检验, 说明坡向对于张承地区的土壤湿度影响微乎其微, 可以忽略不计。NDVI 与土壤类型为主导因素, 坡向的影响忽略不计, 这与马梓策[36] 在华北地区使用地理探测器探测影响干旱的因子解释力结果(土壤类型>植被类型>气温>降水>海拔>河流密度>城市距离>坡度>道路距离>人口密度>地均 GDP>坡向)相近。

在交互作用探测器分析中, NDVI 与高程交互作用对土壤湿度的解释力最强(0.615), 说明高程的改变能够影响植被的分布情况, 从而显著增加 NDVI 作为自变量对张承地区土壤湿度空间分布的解释力。年均气温与其他因子交互后对研究区土壤湿度的解释力明显增强, 尤其与 NDVI、年均降水、土壤类型、土地利用类型交互后的解释力提升明显, 可能由于气温改变会影响植被的生长与分布, 从而对 NDVI 产生影响, 而植被的分布改变又会反向作用于气温, 使气温也受到一定的调节作用; 气温变化会改变土壤母质和土壤中矿物的风化沉积, 会对有机质的分解合成产生影响, 从而影响土壤类型的形成, 不同的土壤类型由于其导热率和热容量大小具有差异, 从而对气温也会产生影响; 降水和气温也会相互作用、相互影响; 土地利用类型的改变是由于改变下垫面特征, 从而对区域能量平衡产生影响, 进而影响气候条件。因此, 年均气温与这些因子交互后的解释力会明显增强。

5　结论

(1)年际变化上, 2001—2021 年土壤湿度呈现波动上升趋势。空间分布上, 2001—2021 年平均土壤湿度的空间分布规律为东部高, 西部低; 干旱和极干旱面积占比最高, 但随年份变化, 湿润、极湿润地区面积逐渐扩大, 干旱的面积逐渐缩小。

(2)研究区土壤湿度的空间变化趋势为绝大部分地区呈现逐年上升趋势, 占总面积的 83.09%, 坝下西部部分地区呈现下降趋势。

(3)研究区土壤湿度的空间分异性受到多个驱动因子共同作用。NDVI 和土壤类型的解释力均高于

0.3, 是影响张承地区土壤湿度的主导驱动因素。在交互作用分析中, 多因子共同作用的影响大于单因子作用, 影响张承地区土壤湿度因子间的交互作用均为非线性或双因子增强型作用, 其中, NDVI 与高程交互作用最强。

参考文献（References）：

[1] 程梦园, 曹广超, 赵美亮, 等. 香日德-柴达木河流域土壤湿度时空变化特征及其影响因素 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 615 − 624. [CHENG Mengyuan, CAO Guangchao, ZHAO Meiliang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencial factors of soil moisture in the Xiangride-Qaidam River Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 615 − 624. (in Chinese with English abstract)]

[2] 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. [WANG Deying, YANG Yongchong, WANG Tao, 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. (in Chinese with English abstract)]

[3] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1205 − 1216. [YANG Xi, WU Jianjun, YAN Feng, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1205 − 1216. (in Chinese with English abstract)]

[4] LIU Yi, LI Peng, ZHANG Zhiwei. Resilient or not: A comparative case study of ten local water markets in China[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4020.

[5] HUANG Guangwei. From water-constrained to water-driven sustainable development: A case of water policy impact evaluation[J]. Sustainability, 2015, 7(7): 8950 − 8964.

[6] MOORE S M. The development of water markets in China: Progress, peril, and prospects[J]. Water Policy, 2015, 17(2): 253 − 267.

[7] 梁韶卿. 温度植被干旱指数(TVDI)的优化与评价 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021. [LIANG Shaoqing. Optimization and evaluation of temperature vegetation drought index (TVDI)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]

[8] 郭铌, 李栋梁, 蔡晓军, 等. 1995 年中国西北东部特大干旱的气候诊断与卫星监测 [J]. 干旱区地理, 1997, 20(3): 69 − 74. [GUO Ni, LI Dongliang, Cai Xiaojun, et al. Climatic diagnosis and satellite monitoring of a severe drought over eastern Northwest China in 1995[J]. Arid Land Geography, 1997, 20(3): 69 − 74. (in Chinese with English abstract)]

[9] 刘泽, 陈建平. 北京植被时空变化与气候因子相关性 [J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2159 − 2166. [LIU Ze, CHEN Jianping. Correlation between temporal-spatial changes of vegetation and climate factors in Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2159 − 2166. (in Chinese with English abstract)]

[10] KOGAN F, SULLIVAN J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(5): 219 − 222.

[11] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的土壤湿度遥感方法研究 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 81 − 88. [FENG Qiang, TIAN Guoliang, WANG Angsheng, et al. Remote sensing monitoring of soil humidity using vegetation condition index[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 81 − 88. (in Chinese with English abstract)]

[12] Liu Huiqing, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 457 − 465.

[13] 杨文杰. 基于 Landsat 8 生长时序遥感信息的玉米干旱监测研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2017. [YANG Wenjie. The research of monitoring on drought of maize based on landsat 8 growing time series remote sensing data[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese with English abstract)]

[14] 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 Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 − 134. (in Chinese with English abstract)]

[15] 覃星铭, 马国斌, 蒋忠诚, 等. 典型石漠化峰丛洼地土壤重金属的空间分异特征及其影响因素 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 283 − 292. [QIN Xingming, MA Guobin, JIANG Zhongcheng, et al. Spatial variations and influencing factors analysis of heavy metals in the soil of typical rocky desertification peak cluster depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 283 − 292. (in Chinese with English abstract)]

[16] 胡清清, 杨晓霞. 我国地质文化村(镇)空间分布特征及影响因素研究 [J]. 地质论评, 2024, 70(1): 277 − 286. [HU Qingqing, YANG Xiaoxia. Spatial distribution characteristics and influencing factors of Geological Culture Villages (Towns) in China[J]. Geological Review, 2024, 70(1): 277 − 286. (in Chinese with English abstract)]

[17] 马靖宣, 金晓媚, 张绪财, 等. 基于 InVEST 模型的张承地区水源涵养功能时空变化特征 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 54 − 64. [MA Jingxuan, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district based on the InVEST model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 54 − 64. (in Chinese with English abstract)]

[18] 邵雅琪, 姜群鸥, 胡中民, 等. 张承地区植被指数时空演变特征及其与气候因子的关系 [J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(7): 96 − 106. [SHAO Yaqi, JIANG Qunou, HU Zhongmin, et al. Spatio-temporal evolution of the vegetation index and its relationship with climatic factors in the Zhangjiakou-Chengde Region[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 96 − 106. (in Chinese with English abstract)]

[19] 王盛, 李亚文, 李庆, 等. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5391 − 5403. [WANG Sheng, LI Yawen, LI Qing, et al. Water and soil conservation and their trade-off and synergistic relationship under changing environment in Zhangjiakou-Chengde Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5391 − 5403. (in Chinese with English abstract)]

[20] 闫峰, 王艳姣, 武建军. 基于 Ts-EVI 特征空间的春旱遥感监测——以河北省为例 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 769 − 775. [YAN Feng, WANG Yanjiao, WU Jianjun. Application of Ts-EVI character space to monitor spring drought: A case study in Hebei China[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 769 − 775. (in Chinese with English abstract)]

[21] 薄燕飞, 白建军, 刘永林. 基于 TVDI 及气象干旱指数的河北省春旱时空变化特征 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 188 − 195. [BO Yanfei, BAI Jianjun, LIU Yonglin. The spatial-temporal variations of spring drought in Hebei Province based on TVDI and meteorological drought index[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(2): 188 − 195. (in Chinese with English abstract)]

[22] 朱彦儒, 赵红莉, 黄艳艳, 等. 基于双指数联合模型的土壤含水量反演——以河北省为例 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 71 − 80. [ZHU Yanru, ZHAO Hongli, HUANG Yanyan, et al. Soil water content inversion based on double-index combined model: Taking Hebei Province as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 71 − 80. (in Chinese with English abstract)]

[23] 王嘉杰. 基于 TVDI 的河北省干旱监测及其滞后性研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022. [WANG Jiajie. Study on drought monitoring and its lag in Hebei Province based on TVDI[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022. (in Chinese with English abstract)]

[24] 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.

[25] 沙莎, 郭铌, 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 with English abstract)]

[26] 孙振蓉. 京津冀地区冬小麦面积估算和旱情遥感监测研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [SUN Zhenrong. Estimation of winter wheat area and drought monitoring research based on remote sensing data in Beijing-Tianjin-Hebei Region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese with English abstract)]

[27] 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 with English abstract)]

[28] 唐海, 张代磊, 周文纳. 广东阳江盆地遥感数据地温反演及地热异常靶区圈定 [J]. 地质论评, 2022, 68(6): 2396 − 2404. [TANG Hai, ZHANG Dailei, ZHOU Wenna. Inversion of ground temperature from remote sensing data and delineation of geothermal anomaly targets in Yangjiang Basin, Guangdong Province[J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2396 − 2404. (in Chinese with English abstract)]

[29] 陈振，刘涛，梁守真，等. 基于 Modis-TVDI 方法的山东小麦生长季旱情遥感监测 [J]. 江苏农业科学，2018，46(19)：323 − 328. [CHEN Zhen, LIU Tao, LIANG Shouzhen, et al. Remote sensing monitoring of drought in wheat growing season in Shandong Province based on Modis-TVDI method[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(19)：323 − 328. (in Chinese with English abstract)]

[30] 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 with English abstract)]

[31] 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 with English abstract)]

[32] 林楠，姜然哲，刘强，等. 近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析 [J]. 中国地质，2021，48(5)：1392 − 1407. [LIN Nan, JIANG Ranzhe, LIU Qiang, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years[J]. Geology in China, 2021, 48(5)：1392 − 1407. (in Chinese with English abstract)]

[33] 童威，郎丰铠. 基于地理探测器的武汉市土地利用变化及其驱动机制探讨 [J]. 水利水电技术(中英文)，2021，52(4)：45 − 56. [TONG Wei, LANG Fengkai. Geodetector-based analysis on land-use variation and its driving force in Wuhan[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4)：45 − 56. (in Chinese with English abstract)]

[34] 王倩，金晓媚，张绪财，等. 河北省张承地区 2001—2020 年植被动态变化及驱动因素分析 [J]. 现代地质，2023，37(4)：881 − 891. [WANG Qian, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Vegetation dynamics and driving factors in Zhangjiakou-Chengde Area of Hebei Province from 2001 to 2020[J]. Geoscience, 2023, 37(4)：881 − 891. (in Chinese with English abstract)]

[35] HEIN L, DE RIDDER N, HIERNAUX P, et al. Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(11)：1164 − 1172.

[36] 马梓策. 华北地区干旱时空变化特征及其影响因素分析 [D]. 呼和浩特：内蒙古师范大学. [MA Zice. Spatial and temporal characteristics of drought and its influencing factors in north china[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University. (in Chinese with English abstract)]

编辑：宗 爽