引文格式：王光明,党星海,郝君明,等. 基于kTVDI的三北工程区干旱时空变化及影响因素分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):30-36. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.007

基于kTVDI的三北工程区干旱时空变化及影响因素分析

王光明[1]，党星海[1,2]，郝君明[1*]，屈杰博[1]，杨明航[1]
（1. 兰州理工大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730050；2. 兰州理工大学 建筑勘察设计院，甘肃 兰州 730050）

摘　要：为了控制沙漠化，中国自1978年发起了世界上最大的造林工程——三北防护林工程。目前，三北防护林工程对植被建设的贡献和荒漠化治理的有效性尚不清楚。基于GEE平台利用核归一化植被指数（kernel normalized difference vegetation Index，kNDVI）和地表温度（land surface temperature，LST）构建2000—2022年核温度植被干旱指数（kernel temperature vegetation dryness index，kTVDI），探究了三北工程区干旱时空动态变化特征，运用地理探测器厘清了气候因素、人类活动及地形因素对三北工程区干旱的影响。结果表明：①三北工程区kTVDI空间分布呈现“西南低-东北高”的特征，23年来处于中度干旱水平；②研究区年际kTVDI值呈现下降趋势，约为$9.25\times10^{-4}a^{-1}$；③在交互式探测中，蒸散发和降水的交互作用对三北北工程区生态干旱解释力最强。研究结果为三北工程区抗旱对策和生态环境保护提供了科学依据。

关键词：干旱；kTVDI；地理探测器；三北防护林；趋势分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0030-07

Analysis of Spatio-temporal Changes and Influence Factors of Drought in the Three-north Shelterbelt Project Area Based on kTVDI

WANG Guangming[1], DANG Xinghai[1,2], HAO Junming[1], QU Jiebo[1], YANG Minghang[1]
(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Construction Survey and Design Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to control desertification, China has launched the world's largest afforestation project, named the Sanbei shelterbelt project, since 1978. At present, the contribution of the Three-north shelterbelt project to vegetation construction and the effectiveness of desertification control are still unclear. In this paper, we used the kernel normalized difference vegetation index (kNDVI) and land surface temperature (LST) to construct kernel temperature vegetation dryness index (kTVDI) from 2000 to 2022 based on GEE platform. Then, we explored the spatio-temporal dynamic change characteristics of drought in the Three-north shelterbelt project area, and used GeoDetector to analyze the influence of climatic factors, human activities and topographic factors on drought in the Three-north shelterbelt project area. The results showed that ①the spatial distribution of kTVDI in the Three-north shelterbelt project area showed the characteristics of “low in the southwest and high in the northeast”, and it was at a moderate drought level for 23 years. ②The interannual kTVDI value in the study area showed a downward trend, which was about $9.25\times10^{-4}a^{-1}$. ③Evapotranspiration had the strongest explanatory power for drought in the Three-north shelterbelt project area. In the interactive detection, the interaction between evapotranspiration and precipitation has the strongest explanatory power for ecological drought in the Three-north shelterbelt project area. This study provides a scientific basis for drought resistance and ecological environmental protection in the Three-north shelterbelt project area.

Key words: drought, kTVDI, GeoDetector, the Three-north shelterbelt project, trend analysis

全球气候变暖和人类活动强度增加的影响下，干旱越发频繁，造成植被退化、土壤沙漠化等生态环境破坏现象[1-2]。干旱具有覆盖面广、持续时间长、受灾面积大等特点。为防治植被退化和沙漠化[3]，1978年中国在北方实施了规模最大且最具有代表性的植树造林的生态工程项目——三北防护林。截至2018年，三北防护林生态工程累计造林面积达到$3.0\times10^{7}hm^{2}$，中国北方的植被覆盖度从1979年的5.05%提高到2018年的13.57%[4]。三北防护林工程区（以下简称三北工程区）概念依三北防护林工程而生，其位于干旱半干旱地区，由于气候变化和人类活动的影响[5-6]土地沙漠化及水土流失问题十分严峻，成为了中国沙尘暴的发源地[7-8]。为了厘清三北工程区对植被建设的贡献和荒漠化治理的有效性及驱动机制，有必要开展三北工程区

项目来源：甘肃省自然科学基金资助项目（24JRRA176）。
第一作者简介：王光明（1998—），硕士研究生，主要从事生态遥感监测及分析应用研究工作，E-mail：745490966@qq.com。
通信作者：郝君明（1981—），博士，副教授，主要从事多年冻土区地质灾害识别和土地利用制图等方面研究工作，E-mail：haojm198@lzb.ac.cn。

干旱时空变化的长时序特征监测[9-15]。

本文基于GEE云平台，采用2000—2022年MODIS遥感数据（kNDVI和LST）构建kTVDI这一综合干旱指数，借助一元线性趋势和Sen-mk趋势分析方法分析了三北工程区综合干旱情况干旱年际及不同季节趋势和时空变化特征，运用地理探测器探究了气候变化、人类活动及地形对三北工程区干旱的响应。本研究为三北工程区干旱问题的科学认识和生态环境保护提供依据[16-19]。

1　研究区概况

三北防护林是中国建设的一项大型人工林业生态工程，旨在改善该地区的生态环境，减少风沙危害和水土流失[20]。三北工程区（73~127°E，33~50°N）位于中国西北、北部和东北地区，东起黑龙江的宾县，西至新疆的乌孜别里山口，南北横跨数千公里，总面积达到406.9×10^4 km^2，约占中国国土面积的42.4%，包含新疆、青海、甘肃、内蒙古、黑龙江等多个省、自治区[21]。三北工程区涵盖了温带季风气候和温带大陆性气候，大部分地区的年降水量不足400 mm，相较于其他地区显得较为干旱。研究区土壤多为黄土及沙土，其保水能力较差，在干旱和半干旱条件下，土壤中的水分极易通过蒸发和蒸腾作用流失到大气中[22]。

2　数据与方法

2.1　数据来源

本研究基于GEE（google earth engine）云计算平台调用2000—2022年的MODIS遥感影像，借助质量控制波段对MODIS遥感影像进行坏死像元掩膜，并对每年生长季遥感影像进行中值合成，构建2000—2022年研究区的目标影像。核归一化植被指数产品为MODIS/006/MOD09GA，空间分辨率为500 m，时间周期为16 d。地表温度产品为MOD13Q1，空间分辨率为1 km，时间周期为8 d。基于GEE平台采用Java语言编写计算kTVDI的代码。数据源见表1。

表1　数据源

数据类型	数据集	空间分辨率/m	时间范围	数据源
影像数据	MODIS/006/MOD09GA	500	2000—2022年	谷歌地球引擎（https：//code.earthengine.google.com/）
	MODIS/061/MOD11A2	1 000	2000—2022年	谷歌地球引擎（https：//code.earthengine.google.com/）
	SPEI	1 000	2000—2020年	科学数据银行
基础地理数据	数字高程模型	30	2000年	USGS/SRTMGL1_003
	土地利用	30	2000—2022年	武汉大学土地利用数据（https：//doi.org/10.6084/m9.figshare.11513178.v1）

2.2　研究方法

2.2.1　Ts-kNDVI模型

相比NDVI，kNDVI通过采用机器学习的核方法理论将NDVI线性化，以解决NDVI在植被覆盖较高地区出现的饱和现象，且kNDVI鲁棒性较高[23]。温度植被干旱指数作为一种水分胁迫指标，通过温度植被干旱指数特征空间来提取干湿边方程，该方法能够估测地表土壤湿度，进而对研究区干旱情况进行评估，本研究利用kNDVI和LST构建核温度植被干旱指数。

$$\mathrm{kTVDI}=\frac{T_S-T_{S\min}}{T_{S\max}-T_{S\min}} \tag{1}$$

式中，T_S为任意点像元的地表温度值；$T_{\max}$和$T_{\min}$分别为最大、最小地表温度，构成了特征空间的“干边”、“湿边”；对应干边和湿边方程算式分别为：

$$T_{S\max}=a+b\times\mathrm{kNDVI} \tag{2}$$

$$T_{S\min}=c+b\times\mathrm{kNDVI} \tag{3}$$

式中，a和b为干边线性拟合回归系数；c和d为湿边线性拟合回归系数，分别是干湿边方程的截距和斜率。参考前人研究并结合研究区现状[24-25]和《气象干旱等级标准》[26]，将kTVDI分为以下5个等级，如表2所示。

表2　kTVDI干旱等级划分

等级	类型	kTVDI
1	湿润	0<kTVDI≤0.2
2	适宜	0.2<kTVDI≤0.4
3	轻旱	0.4<kTVDI≤0.6
4	中旱	0.6<kTVDI≤0.8
5	重旱	0.8<kTVDI≤1

2.2.2　Sen+Mann-Kendall趋势分析

采用Theil-Senmedian趋势分析和Mann-Kendall（M-K）检验相结合的方法，对kTVDI年际趋势变化及其显著性水平[27-28]进行探讨。Theil-Senmedian趋势分析方法对于数据分布的要求较低，趋势计算采用非参数统计，并通过计算时间序列的中值，对异常值有较好的抵抗能力，该方法已广泛在分析遥感时序数据中应用。计算公式为：

$$\beta=\mathrm{median}\left(\frac{\mathrm{kTVDI}_i-\mathrm{kTVDI}_j}{i-j}\right),\ 2000<i<j<2022 \tag{4}$$

式中，β为kTVDI的变化趋势；median为取中值函数；kTVDI_i和kTVDI_j分别为第i、j年的kTVDI值。当$\beta<0$时，kTVDI呈下降趋势，反之亦然。

为了进一步表明干旱变化的显著程度，采用样本不需要服从正态分布且不受异常值和缺失值影响，适

合长时间序列数据的M-K非参数显著性检验。M-K检验的计算公式是：

$$Z=\begin{cases}(S+1)/\sqrt{\mathrm{Var}(S)} & ,S>0\\ 0 & ,S=0\\ (S-1)/\sqrt{\mathrm{Var}(S)} & ,S<0\end{cases} \tag{5}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(\mathrm{TVDI}_j-\mathrm{TVDI}_i) \tag{6}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{7}$$

$$\mathrm{sgn}(\mathrm{kTVDI}_j-\mathrm{kTVDI}_i)=\begin{cases}1,\mathrm{kTVDI}_j>\mathrm{kTVDI}_i\\ 0,\mathrm{kTVDI}_j=\mathrm{kTVDI}_i\\ -1,\mathrm{kTVDI}_j<\mathrm{kTVDI}_i\end{cases} \tag{8}$$

式中，Z 为M-K检验的统计量；n 为时间序列跨度，取值为23；$\mathrm{Var}(S)$ 为方差。将Theil-Senmedian趋势分析和M-K检验在ArcGIS10.4上进行叠加，叠加结果分为5类，如表3所示。

表3 Sen+Mann-Kendall趋势变化等级

β	Z	趋势特征
$\beta>0$	$Z>1.96$	显著上升
	$Z<1.96$	轻微上升
$\beta=0$	$Z=0$	稳定不变
$\beta<0$	$Z>-1.96$	轻微下降
	$Z<-1.96$	显著下降

2.2.3 地理探测器

地理探测器是一种空间异质性分析和驱动因素探究的统计工具，通过单因子探测、交互式探测、风险探测及生态探测4个模块来揭示环境变量的解释力[29]。本文参考相关研究[25]，选取了气候变化（降水、蒸散发、气温、最高温度、最低温度）、人类活动及地形因子（DEM、slope、aspect）等9个影响因素探究对三北工程区干旱的响应。

1）单因子探测。采用单因子探测定量化分析了气候变化、人类活动及地形因子对三北工程区干旱空间分布的解释能力的强弱。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h{\sigma^2}_h}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{9}$$

$$\mathrm{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2 \tag{10}$$

$$\mathrm{SST}=N\sigma^2 \tag{11}$$

式中，h 为因变量或者自变量的分层，其中 Nh 和 N 分别为 h 层或整个区域的层数；${\sigma^2}_h$ 和 σ^2 分别为 h 层和整个区域的方差；q 的取值范围为[0，1]。

2）交互式探测。交互式探测能够识别气候变化、人类活动及地形因子对三北工程区干旱空间分布的相互作用，同时还可以评估因子间的相互作用是否增强或者减弱，干旱空间分布的解释力以及这些因子对干旱空间分布的影响是否独立[30-31]。

3）生态探测。生态探测用于评估2个因子对三北工程区空间分布的影响是否存在显著性差异。如果存在显著性差异则记为“Y”，否则为“N”。从而可以判断出哪个因素对干旱空间分布的影响更大。

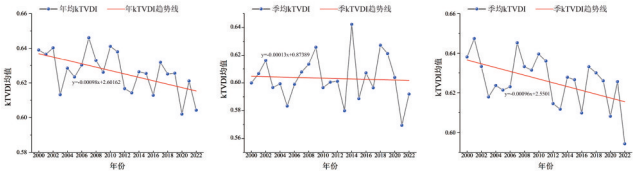
4）风险探测。风险探测可以判断某一驱动因子的范围内干旱是否存在显著差异，并确定每个驱动因子的合适范围或类型。

3 结果与分析

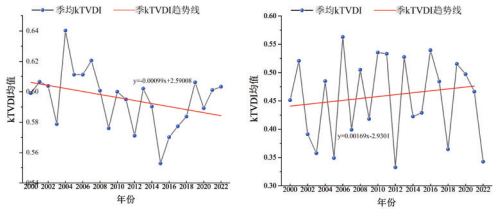
3.1 三北工程区kTVDI时间序列变化

为了更加直观地反映三北工程区干旱的动态变化特征，本文统计了2000—2022年各年份年际以及春夏秋冬四季的kTVDI均值变化及拟合情况结果，如图1所示。2000—2022年，研究区年际kTVDI值呈现下降趋势，速率为$9.80\times10^{-4}a^{-1}$，体现干旱总体呈现减缓状态，kTVDI的最小值为2020年的0.602，最大值为2007年的0.646，多年均值为0.626，整体处于中旱状态，生态环境比较脆弱。通过时间序列分析，可将研究区2000—2022年干旱演变过程划分成2000—2007年为剧烈波动期、2008—2020年为干旱缓解阶段、2020年后为调整恢复期3个特征阶段。在剧烈波动期kTVDI值在0.613~0.646区间内呈现高频振荡特征，年均波动幅度达2.1。在干旱缓解阶段kTVDI值整体呈现下降趋势，年均下降幅度达0.6。值得注意的是，2013年（0.614）和2020年（0.602）相继出现2个显著低值，其中2020年值达到研究期最低点，较2007年峰值下降6.8。在调整恢复期。kTVDI值在0.602~0.621区间内波动，表现出明显的底部震荡特征。这一阶段的变化可能预示着研究区干旱情况进入新的平衡期，但其长期趋势仍需进一步观测验证。从周期特征来看，研究期内共有3个完整的变化周期，平均周期长度约为7 a，上升期平均持续2.3 a，下降期平均持续4.7 a，表现出“缓升急降”的非对称特征。

从春夏秋冬四季的维度来分析三北工程区的干旱变化情况，如表4所示。从图1以及表4可以看出，在变化趋势上，三北工程区在春季、夏季以及秋季3个季节的kTVDI值整体都呈现下降趋势，干旱情况有所缓解，这其中春季的kTVDI值下降趋势较为缓慢，夏季以及秋季的kTVDI值下降趋势最为明显，研究区春季与夏季的干旱情况整体处于中旱状态，秋季整体处



a 年际变化　　b 春季变化　　c 夏季变化



d 秋季变化　　e 冬季变化

图1　研究区2000—2000年kTVDI值及变化情况

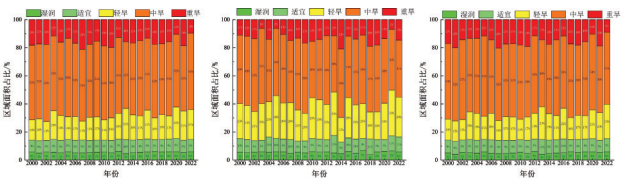
于轻旱状态。而研究区冬季的kTVDI值变化情况最为剧烈，kTVDI值整体上呈现上升状态，但上升趋势不明显，表明干旱情况有轻微加剧，研究区冬季整体上的干旱情况处于轻旱状态。

表4　研究区2000—2022年kTVDI值四季变化情况

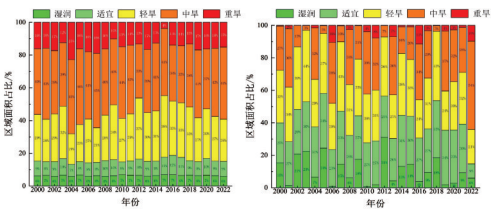
季度	变化趋势	变化速率	最低值	最高值	平均值	干旱状态
春季	下降	$1.30\times10^{-4}a^{-1}$	0.569	0.642	0.603	中旱
夏季	下降	$9.6\times10^{-4}a^{-1}$	0.594	0.647	0.626	中旱
秋季	下降	$9.9\times10^{-4}a^{-1}$	0.552	0.640	0.595	轻旱
冬季	上升	$1.69\times10^{-3}a^{-1}$	0.333	0.562	0.458	轻旱

3.2　三北工程区各类干旱等级占比变化情况

统计研究区从2000—2022年各类干旱等级年际和季度面积占比情况如图2所示，从图可以看出，2000—2000年间，中旱类型是最稳定的干旱等级，年均保持率稳定在84.6%±3.2%，反映了研究区域半干旱本底特性。重旱类型次之，保持率为71.3%±5.1%，但2015年后受生态工程因素或气候因素影响，保持率下降至65.4%（2022年）。而湿润类型的保持率从2005年51.2%提升至2022年68.7%。2000—2022年，三北工程区重旱面积总体下降，多年平均面积占比为15.90%，湿润、适宜、轻旱以及中旱面积占比总体上升，多年平均面积占比分别为5.50%、8.90%、17.5%及52.20%。在春季，湿润、适宜、轻旱以及重旱面积占比总体上升，多年平均面积占比分别为5.50%、9.40%、25.20%以及13.10%，中旱面积占比总体下降，多年平均面积占比为46.70%；在夏季，湿润和轻旱的面积占比总体上升，多年平均面积占比分别为5.20%、17.90%，适宜、中旱以及重旱面积占比总体下降，多年平均面积占比分别为9.30%、52.20%以及15.40%；在秋季，湿润、适宜、轻旱以及重旱面积占比总体下降，多年平均面积占比分别为6.40%、9.2%、29%以及15%，中旱面积占比总体上升，多年平均面积占比为40.5%；在冬季，湿润和轻旱面积占比总体下降，多年平均面积占比分别为31.1%、44%，适宜、中旱以及重旱面积占比总体上升，多年平均面积占比为28.80%、24.10%以及2.80%。总的来说，研究区各干旱等级所占面积呈现出湿润与适宜等级的面积呈现增加趋势，轻旱、中旱与重旱等级的面积呈现减少趋势，这与前文中所得出的研究区的干旱情况总体变化趋势变得越来越湿润相一致。



a 年际变化　　b 春季变化　　c 夏季变化



d 秋季变化　　e 冬季变化

图2　研究区2000—2022年不同干旱等级面积占比情况

3.3　三北工程区kTVDI空间分布变化

2000—2022年三北工程区不同干旱等级的空间分布差异明显。为了直观呈现三北工程区的各类干旱等级所占面积转移情况，绘制了如图3所示的比例弦图反映了总计6期的各类干旱等级所占面积转移变化情况。干旱呈湿润和适宜的面积分别约占研究区总面积的5.75%和8.85%，主要分布于研究区西南边界处以及青海省东北部以及天山山脉周边；轻旱面积约占研究区总面积的17.59%，主要分布于青海省西北和东南部、甘肃省南部、山西省中部以及内蒙古东北部，同时河北省北部、吉林省东南部等地区亦有少量分布；中旱面积约占研究区总面积的53.56%，占据研究区的大部分地区，主要分布在内蒙古中部和东部、吉林省西部和中部、陕西省除中部以外地区以及辽宁省和黑龙江省全境，同时新疆西部和北部亦有少量分布；重旱面积约占研究区总面积的14.25%，主要分布于新疆中部除天山山脉以外的大部分地区、内蒙古西部以及河北省南部。

3.4　干旱趋势变化特征

三北工程区干旱变化趋势在不同地区差异显著，按照干旱趋势变化的速率将其分为5级，其面积占比如图4所示。干旱呈显著下降趋势面积占研究区总面积的26.19%，主要分布于内蒙古自治区、黑龙江、吉林及辽宁省等区域；干旱显著上升趋势面积占研究区总面

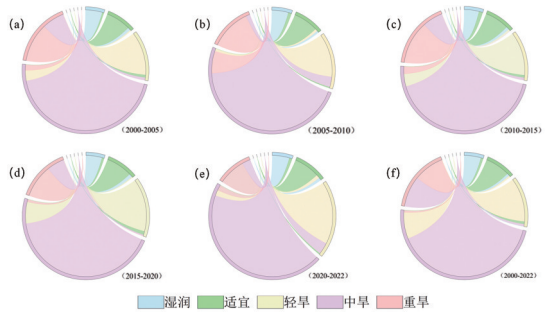


图3 三北工程区2000—2022年各类干旱等级面积转移比例弦图

积的1.80%，远低于显著下降趋势面积的占比，空间分布较为零散；干旱轻微下降趋势面积占研究区总面积的34.04%，分布于青海、甘肃、山西及内蒙古部分区域；干旱轻微上升趋势面积占研究区总面积的34.45%，主要分布在新疆维吾尔自治区及内蒙古、宁夏与甘肃省交界地带；干旱趋势稳定不变的面积占比为3.52%。

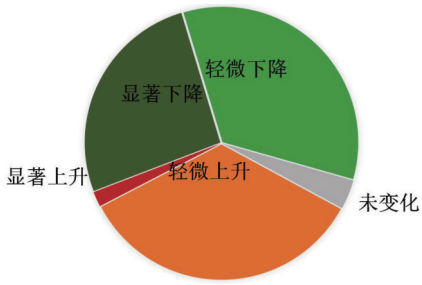


图4 2000—2022年三北防护林干旱趋势变化面积占比

3.5 干旱变化驱动因素分析

为了更好地厘清三北工程区干旱变化情况，参照干旱驱动因素常用因子并结合三北工程区实际情况，选取降水、蒸散发、气温、最高温度、最低温度、DEM、slope、aspect及人类活动9个因子作为自变量，以kTVDI作为因变量，采用地理探测器揭示干旱变化的驱动力。采用ArcGIS10.4.1重采样工具统一各因子尺度，并利用自然间断法进行重分类。从而得到各驱动因子对三北工程区干旱变化的影响。

3.5.1 单因子探测和交互式探测

从单因子探测结果（图5）可知，对2000—2022年三北工程区kTVDI的解释力程度（q值）最强的因子为蒸散发（0.696），解释力程度（q值）最小的为slope（0.002），这表明蒸散发是三北工程区干旱的主导因子。解释力程度（q值）排序依次为：蒸散发>最高气温>气温>最低气温>降水>人类活动足迹>DEM>aspect>slope。

双因子交互作用大于单因子对三北工程区干旱变化的影响（见图6）。2000—2022年三北工程区蒸散发和降水的交互作用对干旱变化的影响最强（0.802），

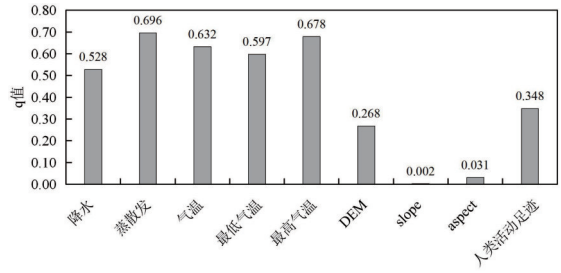


图5 单因子分析

slope和aspect的交互作用对干旱变化的影响最小（0.044）。这一结果表明气候因子对三北工程区干旱变化起到主导作用。

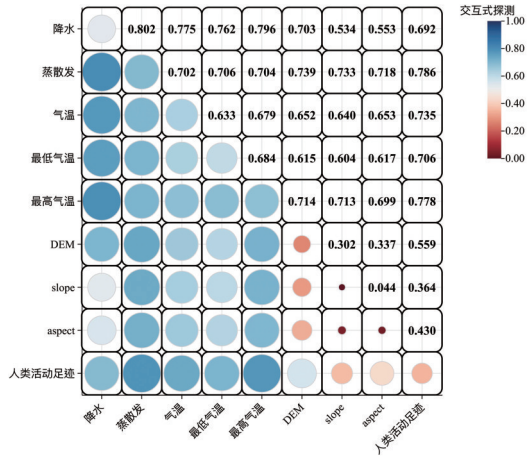


图6 交互式分析

3.5.2 生态探测和风险探测

利用生态探测对三北工程区干旱变化的各驱动因子进行了显著性差异分析（表5）。结果表明，不同驱动因子在干旱的空间分布上存在显著差异。除了蒸散发和最高气温、slope及aspect以外，其他因子均存在显著性差异。

表5 生态探测

	降水	蒸散发	气温	最低气温	最高气温	DEM	slope	aspect
蒸散发	Y							
气温	Y	Y						
最低气温	Y	Y	Y					
最高气温	Y	N	Y	Y				
DEM	Y	Y	Y	Y	Y			
slope	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
aspect	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	
人类活动足迹	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

为了探究不同因子与研究区干旱变化的响应关系，利用风险探测模块探究了研究区干旱变化的驱动因子范围或类别。结果表明（表6），不同因子的范围或类别存在显著差异。随着降水的升高，kTVDI均值呈现下降趋势，当降水超过85.90 mm时，kTVDI开始下降。降水范围在5.05~85.90 mm之间时，干旱最严重（0.69）。随着蒸散发、气温、最高气温及最低气温

的升高，kTVDI呈现上升趋势；随着DEM及slope的增加，kTVDI呈现下降趋势。蒸散发范围为112.20~128.65 mm时，干旱最严重（0.81）；气温在10.62~15.98 ℃时，干旱最严重（0.79）；最高气温和最低气温范围为4.05~10.50 ℃及18.85~23.75 ℃时，干旱最严重（0.77，0.80）；DEM在−157~547 m时，干旱最严重（0.78）。aspect的变化对kTVDI变化影响较小，当slope和aspect在0.03~1.04°和0.41~0.66°时，干旱最严重（0.73，0.64）。随着人类活动足迹变化，kTVDI趋势呈现增加趋势，当人类活动足迹在31.05~38.67之间时，干旱最严重（0.72）。

表6　风险探测

驱动因子	范围或类别	kNDVI均值
降水	5.05~85.90/mm	0.69
蒸散发	112.20~128.65/mm	0.81
气温	10.62~15.98/℃	0.79
最高气温	4.05~10.50/℃	0.77
最低气温	18.85~23.75/℃	0.80
DEM	−157~547/m	0.78
slope	0.03~1.04/(°)	0.73
aspect	0.41~0.66/(°)	0.64
人类活动足迹	31.05~38.67	0.72

4　讨　论

本文基于GEE平台构建kTVDI，对2000—2022年三北工程区的干旱时空变化进行监测。结果表明，该区域干旱整体呈下降趋势，干旱状况有所缓解，与华北、东北及西北地区已有的干旱研究结论相呼应，验证了本研究的科学性。

从季节变化来看，春、夏、秋季的干旱下降速率分别为1.3×10^{-4} a^{-1}、9.6×10^{-4} a^{-1}和9.9×10^{-4} a^{-1}，春季因风蚀较强，缓解较缓。空间上，干旱等级呈现明显地域分异：湿润区位于西南边界及天山周边，中旱区分布于内蒙古中东部、东北平原及黄土高原西部，重旱区集中于新疆中部和阿拉善盟，与相关区域研究一致。

通过地理探测器分析，气候因子对干旱起主导作用，其中蒸散发的影响强于气温和降水。尽管本研究在因子选取与数据质量控制方面进行了优化，但仍未涵盖所有潜在影响因素（如人类活动、植被结构等）。后续将构建多维度因子集，结合机器学习与多源遥感数据，深入探究自然−人文耦合作用下的干旱响应机制，并解决高纬度地区数据缺失问题。

5　结　语

基于GEE平台与kTVDI对2000—2022年三北工程区干旱的分析表明：研究区干旱空间上呈“西南低、东北高”格局，多年平均kTVDI值为0.78，以重旱为主（60.6%）。时段内干旱呈显著缓解趋势，kTVDI以每年9.25×10^{-4}的速率下降，且显著改善面积（60.23%）远大于显著恶化面积（36.25%）。驱动分析揭示，蒸散发是主导因子，其与降水的交互作用解释力最强。核温度植被指数较传统指数更能有效捕捉干旱动态，本研究为区域生态保护与旱情应对提供了科学依据。

参考文献

[1] Li H, Xu F, Li Z, et al. Forest Changes by Precipitation Zones in Northern China After the Three-north Shelterbelt Forest Program in China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4):543

[2] 张文宇，彭舒凡，叶乃夫. 综合多尺度的重点人多维空间数据关联分析[J]. 地理空间信息，2023，21(12):14-20

[3] Qiu B, Chen G, Tang Z, et al. Assessing the Three-north Shelter Forest Program in China by a Novel Framework for Characterizing Vegetation Changes[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 133:75-88

[4] Niu Q, Xiao X, Zhang Y, et al. Ecological Engineering Projects Increased Vegetation Cover, Production, and Biomass in Semiarid and Subhumid Northern China[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(13):1620-1631

[5] Zhang D, Zuo X, Zang C. Assessment of Future Potential Carbon Sequestration and Water Consumption in the Construction Area of the Three-north Shelterbelt Programme in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108377

[6] Jiang H, Xu X, Guan M, et al. Determining the Contributions of Climate Change and Human Activities to Vegetation Dynamics in Agro-pastural Transitional Zone of Northern China from 2000 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718:134871

[7] Zhang X X, Lei J Q, Wu S X, et al. Spatiotemporal Evolution of Aeolian Dust in China:An Insight into the Synoptic Records of 1984—2020 and Nationwide Practices to Combat Desertification[J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(7):2005-2023

[8] Niu L, Shao Q, Ning J, et al. The Assessment of Ecological Restoration Effects on Beijing-tianjin Sandstorm Source Control Project Area During 2000—2019[J]. Ecological Engineering, 2023, 186:106831

[9] 李鹏傲，姜永涛，张珍珍，等. 河南省植被覆盖度时空变化及其原因分析[J]. 地理空间信息，2023，21(11):76-80

[10] Hao Z, Singh V P. Drought Characterization from a Multi-

variate Perspective:A Review[J]. Journal of Hydrology, 2015,527:668-678

[11] Camps-valls G, Campos-taberner M, Moreno-martínez Á, et al. A Unified Vegetation Index for Quantifying the Terrestrial Biosphere[J]. Science Advances,2021,7:eabc7447

[12] Liu Y,Qian J,Yue H. Comparison and Evaluation of Different Dryness Indices Based on Vegetation Indices-land Surface Temperature/Albedo Feature Space[J]. Advances in Space Research,2021,68(7):2791-2803

[13] Xu M, Yao N, Hu A, et al. Evaluating a New Temperature-vegetation-shortwave Infrared Reflectance Dryness Index (TVSDI) in the Continental United States[J]. Journal of Hydrology,2022,610:127785

[14] 尹本酥,李振发,岳蓉,等. 基于温度植被干旱指数的关中地区旱情监测[J/OL]. (2024-09-19)[2025-01-11]. 农业工程学报 https://doi. org/10. 11975/j. issn. 1002-6819

[15] 卢献健,黎振宝,晏红波,等. 基于TVDI的不同类型岩溶区干旱时空演变及其影响因素分析[J]. 遥感技术与应用,2024,39(3):669-678

[16] 沙寅涛,刘戈,赵晓阳,等. 2003—2022年黄河流域TCI、VCI、VHI、TVDI逐年1 km分辨率数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2024,9(2):166-180

[17] 姜凤岐,于占源,曾德慧,等. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略[J]. 生态学杂志,2009,28(9):1702-1705

[18] 张泽秀,刘利民,贾燕,等. 三北地区防护林气候生态适应性分析[J]. 生态学杂志,2009,28(9):1696-1701

[19] Gustau C, Manuel C, Álvaro M, et al. A Unified Vegetation Index for Quantifying the Terrestrial Biosphere[J]. Science Advances,2021,7(9):7447

[20] 朱教君,郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望:基于40年建设综合评估结果[J]. 生态学杂志,2019,38(5):1600-1610

[21] 邵全琴,刘树超,宁佳,等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. 地理学报,2022,77(9):2133-2153

[22] Liang X, Xin Z, Shen H, et al. Deep Soil Water Deficit Causes Populus Simonii Carr Degradation in the Three North Shelterbelt Region of China[J]. Journal of Hydrology,2022,612:128201

[23] Gu Z,Chen X,Ruan W,et al. Quantifying the Direct and Indirect Effects of Terrain, Climate and Human Activity on the Spatial Pattern of kNDVI-based Vegetation Growth:A Case Study from the Minjiang River Basin, Southeast China[J]. Ecological Informatics,2024,80:102493

[24] Hu Y,Li H,Wu D,et al. LAI-indicated Vegetation Dynamic in Ecologically Fragile Region:A Case Study in the Three-north Shelter Forest Program Region of China[J]. Ecological Indicators,2021,120:10693

[25] Li C,Zhang S,Cui M,et al. Improved Vegetation Ecological Quality of the Three-north Shelterbelt Project Region of China During 2000—2020 as Evidenced from Multiple Remotely Sensed Indicators[J]. Remote Sensing,2022,14(22):5708

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级:GB/T 20481-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017

[27] Wang J, Fan Y, Yang Y, et al. Spatial-temporal Evolution Characteristics and Driving Force Analysis of NDVI in the Minjiang River Basin, China, from 2001 to 2020[J]. Water, 2022,14(18):2923

[28] Zhong X, Li J, Wang J, et al. Linear and Nonlinear Characteristics of Long-term NDVI Using Trend Analysis:A Case Study of Lancang-mekong River Basin[J]. Remote Sensing,2022,14(24):6271

[29] 贺鑫,张飞,韩奇笑,等. 基于突变检测法的干旱区城市时空格局演变分析[J]. 地理空间信息,2023,21(8):9-13

[30] Li H,Xu F,Li Z,et al. Forest Changes by Precipitation Zones in Northern China After the Three-north Shelterbelt Forest Program in China[J]. Remote Sensing,2021,13(4):543

[31] Liang W,Quan Q,Wu B,et al. Response of Vegetation Dynamics in the Three-north Region of China to Climate and Human Activities from 1982 to 2018[J]. Sustainability, 2023,15(4):3073

(上接第15页)

四川大学,2023

[31] 韦伯斯特,张播,李晶晶. 产权、公共空间和城市设计[J].国际城市规划,2008,29(6):3-12

[32] Magalhães C D. Public Space and the Contracting Out of Publicness:A Framework for Analysis[J]. Journal of Urban Design,2010(4):559-574

[33] 董嘉维. 基于卷积神经网络技术的城市公共空间评价体系研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2020

[34] 朱常丽,何浩,杜星宇,等. 武汉城市公共空间评估指标体系构建研究[J]. 规划师,2021,37(增刊):117-121

[35] 王淳淳,金云峰. 静态空间与实际访问的城市公共绿地公平对比评估[J]. 智能城市,2024,10(6):1-3

[36] 王思懿,付瑶. 基于PSQAT评估工具的儿童户外游戏空间研究:以沈阳为例[J].华中建筑,2024,42(5):1-5

[37] 李俊桥. 基于数据交叉算法的城市公共空间评估分析[J]. 城市建筑,2024,21(19):157-159

[38] 赵莹,关可汗,宋兆伟. 长春市公园绿地供需服务水平与可达性分析[J].地理空间信息,2024,22(7):18-21