

王敏丽,张慧聪,董丽瑶,等.太行山-燕山地区植被覆盖时空异质性及其驱动力[J].中国环境科学,2025,45(5):2792-2805.

Wang M L, Zhang H C, Dong L Y, et al. Spatio-temporal heterogeneity of vegetation cover and its driving forces in the Taihangshan-Yanshan Region [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2792-2805.

## 太行山-燕山地区植被覆盖时空异质性及其驱动力

王敏丽<sup>1,2</sup>,张慧聪<sup>1</sup>,董丽瑶<sup>1</sup>,李佳蕊<sup>1</sup>,庞娇<sup>3\*</sup>,闫丰<sup>1,4</sup>,何玲<sup>1</sup>(1.河北农业大学国土资源学院,河北保定071001; 2.中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京100083; 3.河北农业大学渤海学院,河北黄骅061100; 4.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京100083)

**摘要:**太行山-燕山地区是京津冀重要的生态屏障区,探究其植被生长的时空格局和影响因素对生态保护修复等决策的实施具有重要意义.依托谷歌地球引擎(GEE)获取MOD13A2.061NDVI数据集并进一步计算核归一化指数(kNDVI),采用Theil-Sen Median法、变异系数法和Hurst指数法等方法分析太行山-燕山地区植被覆盖的时空异质性特征,进而采用参数最优地理探测器法(OPGD)厘清了其时空分异的多元驱动机制.结果表明:2001~2020年研究区kNDVI的变化春夏秋三季呈缓慢上升的趋势,而冬季具有下降趋势,kNDVI年均值空间分布上呈"北部和南部高,中部低"的特点,空间差异性较大;kNDVI增加区域(66.36%)大于减少区域(33.64%),弱反向持续性和弱正向持续性并存,两者区域面积占比高达99.26%,近80%的区域kNDVI波动性在中等及以下水平;OPGD结果显示,驱动太行山-燕山地区kNDVI变化的主要因子有蒸散发量、地表温度、土地利用类型、土壤类型和植被类型( $q$ 值均大于0.20),地表温度与年平均气温和地表温度与累计降水的交互作用解释力更是超过了0.50和0.47.蒸散发量在(634mm,814mm)区间、地表温度在[5.2°C,11.2°C]区间和城镇人口在(21.6万人,28万人)区间时,kNDVI表现更高.

**关键词:**核归一化植被指数(kNDVI); 时空演替; 驱动力; 最优参数地理探测器(OPGD); 太行山-燕山地区

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2792-14

**Spatio-temporal heterogeneity of vegetation cover and its driving forces in the Taihangshan-Yanshan Region.** WANG Min-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui-cong<sup>1</sup>, DONG Li-yao<sup>1</sup>, LI Jia-rui<sup>1</sup>, PANG Jiao<sup>3\*</sup>, YAN Feng<sup>1,4</sup>, HE Ling<sup>1</sup>(1.College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3.Bohai College, Hebei Agricultural University, Huanghua 061100, China; 4.College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2792~2805

**Abstract:** The Taihangshan-Yanshan region serves as a crucial ecological barrier for the Beijing-Tianjin-Hebei area. Investigating the spatiotemporal patterns of vegetation growth and their influencing factors holds significant importance for implementing ecological conservation and restoration decisions. The MOD13A2.061NDVI dataset was obtained through the Google Earth Engine (GEE) platform, and the kernel Normalized Difference Vegetation Index (kNDVI) was further calculated. The spatiotemporal heterogeneity of vegetation cover was analyzed using the Theil-Sen Median method, coefficient of variation method, and Hurst index method. Subsequently, the optimal parameter geographical detector (OPGD) method was employed to identify the multivariate driving mechanisms behind its spatiotemporal differentiation. Results demonstrated that: From 2001 to 2020, the kNDVI in the study area showed a gradual increasing trend during spring, summer, and autumn, while exhibiting a decreasing trend in winter. The annual mean kNDVI displayed a spatial distribution pattern characterized by "higher values in northern and southern regions, lower in central areas", with significant spatial variability. The area with increased kNDVI (66.36%) was larger than that with decreased kNDVI (33.64%). Weak anti-persistence and weak positive persistence coexisted, collectively accounting for 99.26% of the total area. Approximately 80% of the region maintained kNDVI fluctuations at moderate or lower levels. OPGD analysis revealed that the primary drivers of kNDVI changes included evapotranspiration, land surface temperature, land use type, soil type, and vegetation type (all with  $q$ -values greater than 0.20). The interaction effects between land surface temperature and annual average temperature, and between land surface temperature and cumulative precipitation demonstrated particularly strong explanatory power, exceeding 0.50 and 0.47 respectively. Higher kNDVI values were observed when evapotranspiration ranged within (634mm, 814mm], land surface temperature fell within [5.2°C, 11.2°C], and urban population remained in (216000, 280000).

收稿日期: 2024-10-12

基金项目: 河北农业大学大学生创新创业训练计划资助项目(S202410086004);河北省社会科学基金项目(HB24YJ007)

\* 责任作者, 讲师, pangjiao0218@163.com

**Key words:** kernel-Normalized Vegetation Index (kNDVI); spatial and temporal succession; driving forces; Optimal Parameters-based Geographical Detectors (OPGD); Taihangshan-Yanshan region

监测区域植被生长变化和了解潜在的驱动机制信息对于区域生态保育和生态系统可持续发展具有重要帮助<sup>[1]</sup>,特别是对京津冀具有生态屏障作用的太行山-燕山等生态意义重大的地区.植被覆盖度最早应用目测估计法等传统地面统计法测算<sup>[2]</sup>,近年来,遥感监测植被生长覆盖已成为主流方法<sup>[3-4]</sup>.其中包括归一化植被指数(NDVI)和植被覆盖度(FVC)等指标被大量应用于区域植被生长的研究中<sup>[5]</sup>.然而,运用较多的 NDVI 指标具有一定不足,主要为 NDVI 与生物物理参数不成线性关系和在土壤背景和饱和度的处理上具有一定误差以及植被指数对光合作用本身没有反应<sup>[6-7]</sup>.同时 FVC 受遥感图像分辨率的影响较大<sup>[8]</sup>,且未考虑植被的结构和功能<sup>[9]</sup>.在此背景下核归一化植被指数(kNDVI)被引入<sup>[7]</sup>,它是一种将植被指数非线性化的方法<sup>[10]</sup>.在不同生物群落和气候带的应用评估中,kNDVI 比 NDVI 对饱和和复杂物候循环等的抵抗力更强,在空间和时间尺度上表现出增强的稳定性<sup>[7]</sup>.已有学者验证 kNDVI 比 NDVI 在更精细的时间分辨率下更具竞争力<sup>[11]</sup>,同时 kNDVI 也可分离出可归因于植被的反射率比例,对于山地森林区域可以更有效的解开混合像素问题<sup>[7]</sup>.因此,选用 kNDVI 指标来探究区域植被生长时空格局及其驱动作用.

另一方面,受到区域气候变化、水土状况、人类活动和地形差异等因素的干扰,植被覆盖会出现复杂的空间异质性演变<sup>[12]</sup>.研究植被覆盖时空异质性特征能够明晰生态系统区域差异,据此进一步探究原因即植被覆盖的不同驱动因子具有时空异质性<sup>[13]</sup>.由于区域地理位置和发展要求等的差异,区域间和区域局部植被活动的主导因子往往不同,同时可能具有因子交互对植被活动的影响程度超过主导因子的现象,且与单因子相比,多因子交互作用可以更好的解释植被覆盖的时空分异性<sup>[14-15]</sup>.当前多数研究采用多元回归残差分析分离了气候因素和人类活动对植被生长的综合影响<sup>[16-18]</sup>,但缺少其他因素(地形条件、土壤因子和土壤类型等)对植被生长的综合分析,从而夸大人类活动对于植被覆盖的影响程度.线性统计方法对于多元共线性问题分析具有一定偏差,使得植被变化

与驱动因子之间复杂关系的解释较为不准<sup>[19-20]</sup>.基于最优参数的地理探测器(OPGD)<sup>[21]</sup>可检测多种因子对 kNDVI 变化复杂作用,规避了自变量间的多重共线性问题,并且实现连续型因子的自动离散化处理,可更好识别因子之间的相对重要性和非线性相互作用<sup>[22]</sup>.太行山-燕山是我国重要的生态区,植被类型丰富,其"土易失、水易流"的情况影响植被的生长<sup>[23-24]</sup>.植被变化不仅影响生态系统的稳定,还对农业生产和社会经济发展等产生深远影响<sup>[25]</sup>.已有部分学者对于太行山-燕山局部地区的植被动态及驱动力进行了研究<sup>[26-27]</sup>,且研究大多停留在单一自然因素或人类活动的驱动分析<sup>[28-29]</sup>,而在利用 kNDVI 进行主导因子和多因子耦合对区域植被变化的影响方面研究相对匮乏.其次,植被覆盖时空非均质性及其驱动力的研究可为提升生态系统适应能力提供理论依据,在一定程度上反映太行山-燕山生态功能和植被服务等情况.

综上所述,目前针对太行山-燕山地区植被覆盖的时空异质性特征研究依然不足,同时对于解析植被覆盖变化格局的驱动力仍缺乏系统性研究.本文以太行山-燕山地区为研究区,依托 GEE 云平台,对 kNDVI 指数采取 Sen 趋势和变异系数等方法研究植被生长空间格局和变化,应用 OPGD 模型细化 20 个因子对植被 kNDVI 的影响值,从而揭示 kNDVI 对驱动因子响应的区域差异性及其机制,为该地区植被动态监测提供参考.

## 1 研究区概况

研究区是京津冀的水源涵养区,涉及太行山山脉与燕山山脉,其中太行山山脉位于华北板块的中部(图 1),地理位置为 34°35'~40°19'N,110°15'~116°27'E,呈东北-西南方向延伸,总面积约 12.7 万 km<sup>2</sup>,地势东陡西缓,太行山南部地区属暖温带半湿润气候区,北部地区属于暖温带半干旱气候区,年均温度约为 10℃,年降水量约为 500mm;燕山山脉位于中国河北平原北侧,地理位置为 39°40'~42°10'N,115°45'~119°50'E,呈东西走向,长约 300km,地势西北高,东南低,处于暖温带大陆性季风气候区,年均温

6~10℃,植被以落叶阔叶林为主.

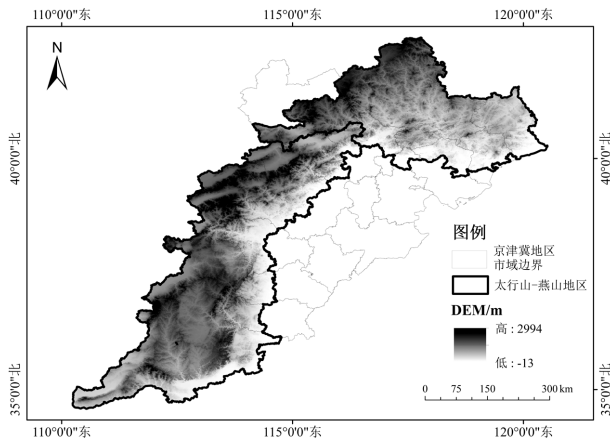


图1 太行山-燕山地区 DEM

Fig.1 DEM of the Taihangshan-Yanshan region

基于自然资源部标准地图服务网站下线的审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作,底图无修改

## 2 材料与方 法

### 2.1 数据来源及预处理

GEE 云平台中获取的 NDVI 数值来源于 MODIS 传感器的 MOD13A2.061 数据集,利用 GEE 平台完成几何校正及大气校正等初步处理,通过逐像素计算 GEE 平台上的 NDVI 数据,最终从 2001~2022 年每年获取 22 张 kNDVI 图像以及每季度 88 张 kNDVI 图像.kNDVI 的计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$kNDVI = \tanh\left(\left(\frac{NIR-red}{2\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 是在每个特定应用程序中指定的长度尺度参数,表示指数对稀疏/茂密植被区域的敏感性,取  $\sigma = 0.5(NIR+red)$ ,kNDVI 的计算公式简化如下:

$$kNDVI = \tanh(NDVI^2) \quad (2)$$

气象数据:气温和降水等气象因子数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),空间分辨率为 0.0083333°(约 1km),其中气温分辨率为 0.1℃,降水量分辨率为 0.1mm.原始数据经过数据筛选、数据订正、数据校验和质量控制等初步处理后,再按照研究区进行掩膜和重采样等处理方法得到所需数据.

土壤水分数据:来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>),空间分辨率为 0.0083333°(约 1km).

土壤数据:包括土壤类型数据,来源于中国科学

院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>).

表 1 解释变量名称及代号

Table 1 Explanatory variable names and codes

一级指标	二级指标	单位	代号
社会经济数据	城镇人口	万人	X1
	第一产 GDP 占比	%	X2
	第二产 GDP 占比	%	X3
	第三产 GDP 占比	%	X4
	人口密度	人/km <sup>2</sup>	X5
	GDP 密度	万元/km <sup>2</sup>	X6
	土地利用类型	类型变量	X15
气候条件	夜间灯光强度	lm/m <sup>2</sup>	X7
	年累积降水	mm	X8
	年平均气温	℃	X9
	地表温度 LST	℃	X14
	蒸散发量 ET	mm	X13
	土壤水分 SM	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	X20
	地形条件	海拔	m
坡度		°	X11
坡向		类型变量	X12
经度		°	X18
纬度		°	X19
土壤类型		类型变量	X16
植被和土壤类型	植被类型	类型变量	X17

植被数据:包括植被类型数据,来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>).

地形数据:包括高程、坡度和坡向.DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),提供 1km 的空间分辨率.坡度和坡向数据通过 ArcGIS 提取.

社会数据:包括 GDP 密度、人口密度和土地利用类型等,来源于 EPS 数据平台(<https://www.epsnet.com.cn/>)和地市的统计年鉴.

选择代表社会经济、气候条件、地形条件、植被和土壤类型等 4 类数据的具体 20 个指标作为解释变量(表 1),分析太行山-燕山地区 kNDVI 对各因子的响应机制.

## 2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 法 Theil-Sen Median 是一种非参数统计的趋势统计方法,被广泛适用于植被动态趋势研究中<sup>[30]</sup>,其计算公式为式(3):

$$\rho = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) (1 < i < j < n) \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为 kNDVI 的趋势程度; $n$ 为时间序列长度; $x_j$ 和  $x_i$ 分别为 kNDVI 时间序列中第  $j$  和  $i$  年的平均值;median 为中值函数. $\rho > 0$  时植被变化呈上升趋势.

势,  $\rho < 0$  时植被变化呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验是一种被广泛使用的非参数检验方法,可以有效检验时间序列的显著性,其显著性划分标准见文献[30].具体检验公式为式(4)~(7):

$$S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{kNDVI}_j - \text{kNDVI}_i) \quad (4)$$

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

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{sgn}(\text{kNDVI}_j - \text{kNDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{kNDVI}_j - \text{kNDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{kNDVI}_j - \text{kNDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{kNDVI}_j - \text{kNDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:Var 为方差;sgn 为符号函数;kNDVI<sub>j</sub> 和 kNDVI<sub>i</sub> 分别为第 j 和第 i 年的 kNDVI 平均值;S 为检验统计量;Z 为标准化后的检验统计量。

2.2.2 变异系数法 变异系数可以在反映变量的波动程度的基础上,检验变量在时间序列上是否具有稳定性.本文利用变异系数 CV 来分析太行山-燕山地区 kNDVI 的稳定性,并进行分级<sup>[31]</sup>.其计算公式如式(8):

$$\text{CV} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{kNDVI}_i - \overline{\text{kNDVI}})^2}{n-1}}}{\overline{\text{kNDVI}}} \quad (8)$$

式中:CV 为变异系数;n 为时间序列长度;kNDVI<sub>i</sub> 为第 i 年的 kNDVI 平均值; $\overline{\text{kNDVI}}$  为 22 年内 kNDVI 的均值.变异系数越小,说明 kNDVI 稳定性越强,反之则说明稳定性越弱。

2.2.3 Hurst 指数法 Hurst 指数是一个基于重标极差(R/S)分析方法来衡量时间序列长期记忆性和自相似性的统计量,在分析植被的时空格局中具有独特的优势.H 值的范围为 0~1,其中:H=0.5 表示 kNDVI 时间序列为随机游走,不具备时间相关性;0.5<H<1 表示时间序列具有持久性,未来趋势可能会继续过去的趋势;0<H<0.5 表示时间序列具有反持久性,未来趋势可能会逆转过去的趋势.其计算步骤如下:

设存在时间序列 { $\xi(t)$ },  $t=1,2,3,\dots$ , 并由此得到累计离差  $x(t, \tau)$ , 根据定义计算出极差  $R(\tau)$  与标准差

$S(\tau)$ .

$R, S, \tau$  存在以下关系(9):

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = C \times \tau^H \quad (9)$$

$$\lg\left(\frac{R(\tau)}{S(\tau)}\right) = \lg C + H \times \lg \tau \quad (10)$$

式中: $\frac{R(\tau)}{S(\tau)}$  为重标极差;H 为 Hurst 指数;C 为常数。

通过公式(10)用最小二乘法即可得出 Hurst 指数的估算值。

2.2.4 参数最优地理探测器法 地理探测器旨在探测地理现象的空间分异性并揭示其驱动力,传统的地理探测器受离散方法与分级数的限制,而 OPGD 可通过算法自动选择最佳的离散化参数组合,以优化地理探测器在数据分析中的可靠性.OPGD 对于分离各驱动因子的影响及明晰双因子作用等分析更加准确,其由因子探测器、因子交互作用探测器和风险探测器等组成。

(1)因子探测器

通过计算 q 值来度量某一因子对 kNDVI 变化的影响程度.q 值越大,表示该因子对 kNDVI 变化的影响越大<sup>[32]</sup>。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (11)$$

式中:L 是变量(Y)或因子(X)的分层; $N_h$  和 N 分别是层 h 和整个区域的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层 h 和整个区域 kNDVI 的方差.q 值范围为[0,1],其值越大,表明因子(X)对变量(Y)的解释力越强。

(2)交互探测器

交互作用探测的主要目的是识别不同风险因子(X)之间的交互作用,即评估因子 X1 和 X2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 kNDVI 的解释力(表 2),或这些因子对 kNDVI 的影响是相互独立的<sup>[33]</sup>。

(3)风险探测器

使用地理探测器进行风险探测判断影响因子的子区域间 kNDVI 均值是否存在显著差别,风险探测用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\sqrt{\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}}} \quad (12)$$

式中:分子中的  $Y$  是指子区域  $h$  内的植被 kNDVI 的属性均值; $n_h$  是子区域  $h$  内样本数量;Var 表示方差.

表2 自变量交互类型与描述  
Table 2 Independent variable interaction type and description

交互类型	描述	解释
双因子增强型	$q(X1 \cap X2) > \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	这两个因子之间存在正向的交互作用,即它们共同作用时能够增强对 kNDVI 的解释力
非线性增强	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	这两个因子的交互作用具有非线性的特征
独立	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	这两个因子对变量的影响是相互独立的
非线性减弱型	$q(X1 \cap X2) < \text{Min}[q(X1), q(X2)]$	因素相互作用时,它们影响力相对于它们单独作用时有所降低或减弱的现象

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被覆盖的时空分布特征

3.1.1 时间变化特征 由图 2 可以看出,22 年间研究区 kNDVI 值春、夏、秋季呈现缓慢上升的趋势,冬季呈缓慢下降的趋势.其中夏季 kNDVI 值最高[0.552,0.622],秋季 kNDVI 值较高[0.514,0.582],

冬季 kNDVI 值最低[0.312,0.437].从拟合曲线方差来看,冬季 kNDVI 值在 2001~2022 年间波动最大,秋季 kNDVI 值波动最小.从拟合曲线斜率来看,在这期间,kNDVI 值在春季上升最快,在冬季下降最快.在这 22 年中,kNDVI 在春季的拟合曲线与年均值的拟合曲线几乎重合,春冬两季 kNDVI 值变化显著.

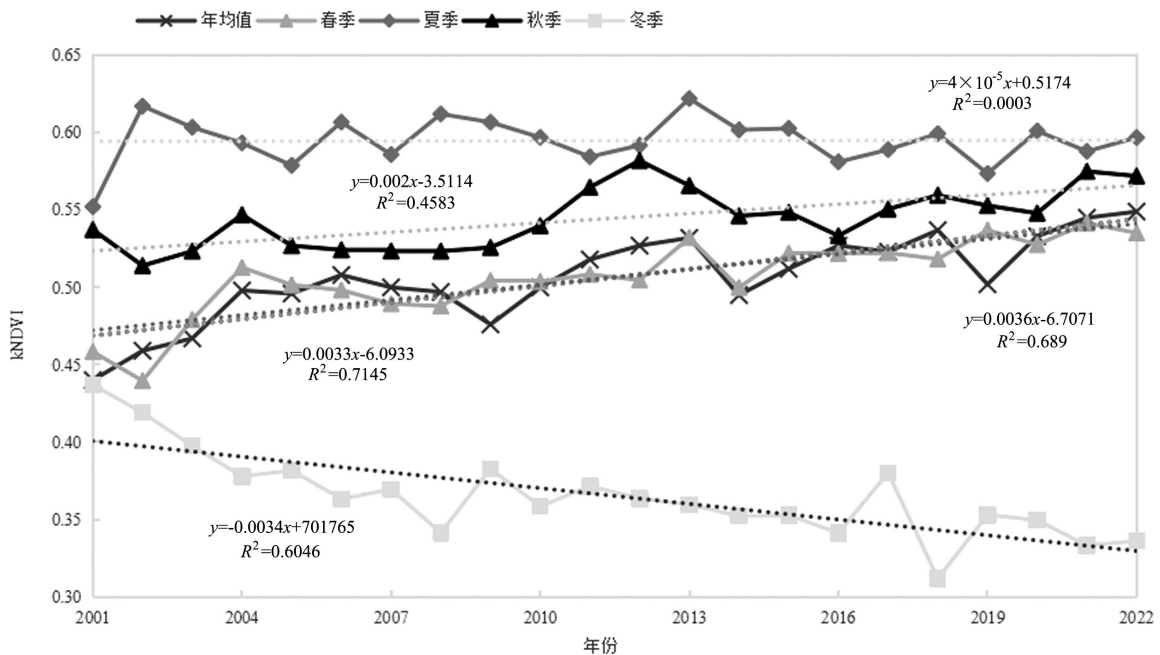


图2 太行山-燕山地区 kNDVI 的年拟合变化和春夏秋冬四季拟合变化

Fig.2 Annual and seasonal (spring, summer, autumn, winter) fitted variations of kNDVI in the Taihangshan-Yanshan region

3.1.2 空间分布特征 太行山-燕山地区 kNDVI 年均值空间分布(图 3(a))呈现"北部和南部高,中部低"的特点,空间差异性较大,并介于 0~0.701 之间,闻喜县、霍州市和怀安日等地 kNDVI 较低,而垣曲县、阳城县和围场满族蒙古族自治县等地 kNDVI 较高.

进一步分析 kNDVI 春夏秋冬四季均值的空间分布特征(图 3(b)、(c)、(d)和(e)),其中春季和秋季的 kNDVI 均值与空间分布较为相似,夏季的 kNDVI 均

值最高,而冬季则有明显下降.春季 kNDVI 均值在 0~0.670 之间,高值区主要在垣曲县、阳城县和怀柔区等地.秋季 kNDVI 均值有所减少,太行山东南部安阳县、卫辉市等地 kNDVI 减少明显.夏季 kNDVI 均值有一定增加,变化范围为 0~0.701,太行山南部、燕山大部分地区 kNDVI 增加明显,但和顺县等少部分地区 kNDVI 有所下降.冬季 kNDVI 均值最小,变化范围为 0~0.500,研究大部分地区表现为低值,只有太行山南侧与西侧少部分地区表现为高值.

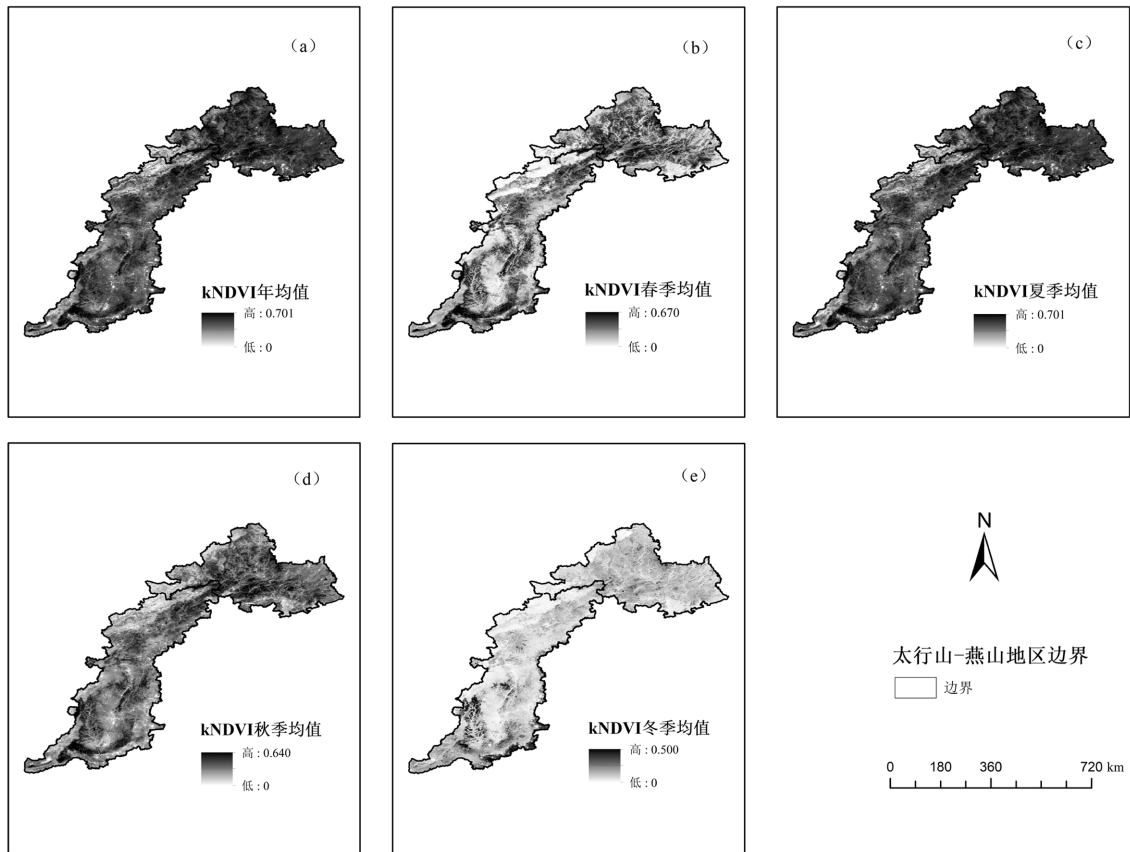


图 3 太行山-燕山地区 kNDVI 多年均值以及春夏秋冬四季均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of multi-year mean kNDVI and seasonal (spring, summer, autumn, winter) means in the Taihangshan-Yanshan Region

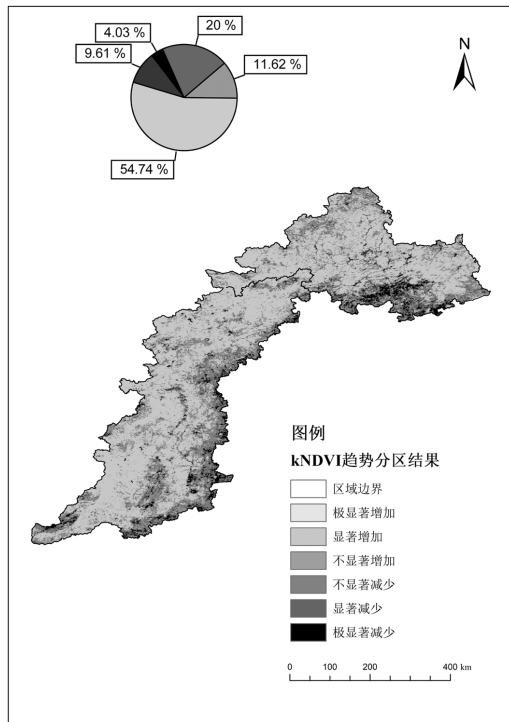


图 4 太行山-燕山地区年 kNDVI 变化趋势显著性分区

Fig.4 Significance classification of annual kNDVI trends in the Taihangshan-Yanshan region

3.1.3 变化趋势显著性 根据图 4 可知,22 年间研究区年 kNDVI 表现为增加与减少趋势的像元数之比约为 1.97:1.kNDVI 增加区域占总面积的 66.36%,其中显著增加占 54.74%,不显著增加占 11.62%,主要分布在燕山北部和东部、太行山西部和北部地区,两区域多镶嵌分布;kNDVI 减少区域占总面积的 33.64%,其中极显著减少仅占 4.03%,显著减少占 9.61%,不显著减少占 20.00%,主要分布在燕山东南部和太行山东侧、南侧地区,少部分位于燕山北侧地区和太行山西南侧地区.总体上,研究区内 kNDVI 增加区域大于减少区域,表明研究区植被情况得到改善与恢复.

3.1.4 未来变化的可持续性 根据逐像元计算 Hurst 指数的结果如图 5(a)显示,处于强反向持续性和强正向持续性的区域较少,两者面积之和仅占研究区的 0.74%;呈弱反向持续性的区域占 67.39%,说明植被覆盖存在波动或者是下降的趋势;弱正向持续性的地区呈破碎分布状分布于燕山地带,占研究区 31.87%,植被状况有所改善或者保持稳定.

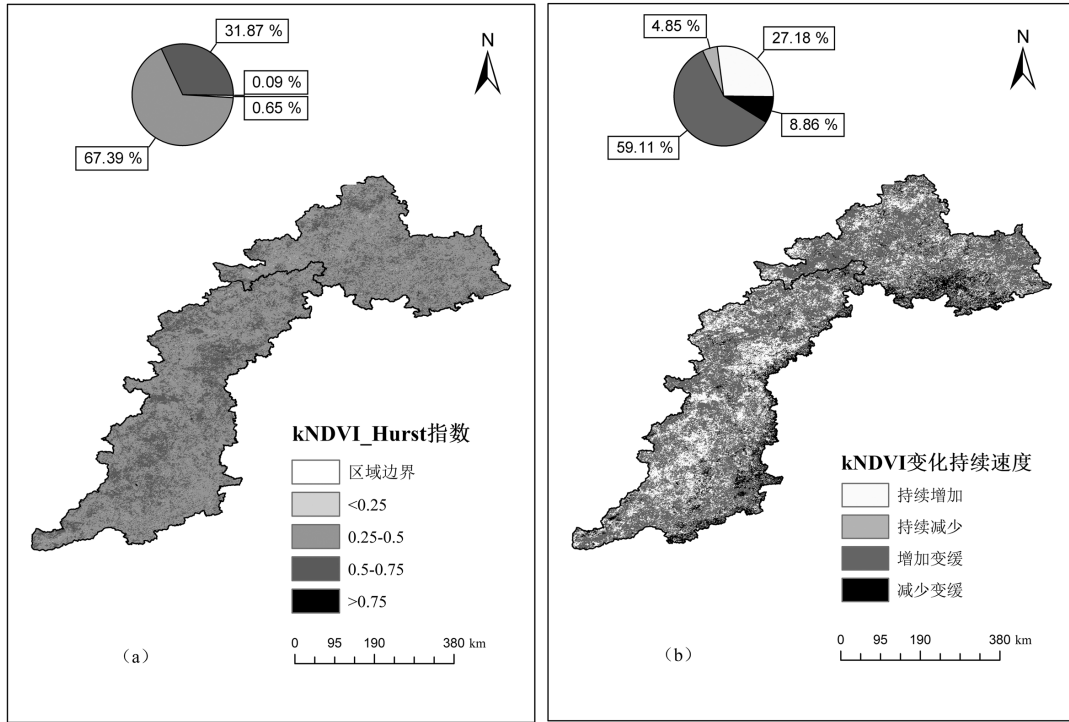


图 5 太行山-燕山地区 kNDVI\_Hurst 指数以及 kNDVI 变化持续速度

Fig.5 Hurst exponent of kNDVI and persistence rate of kNDVI changes in the Taihangshan-Yanshan region

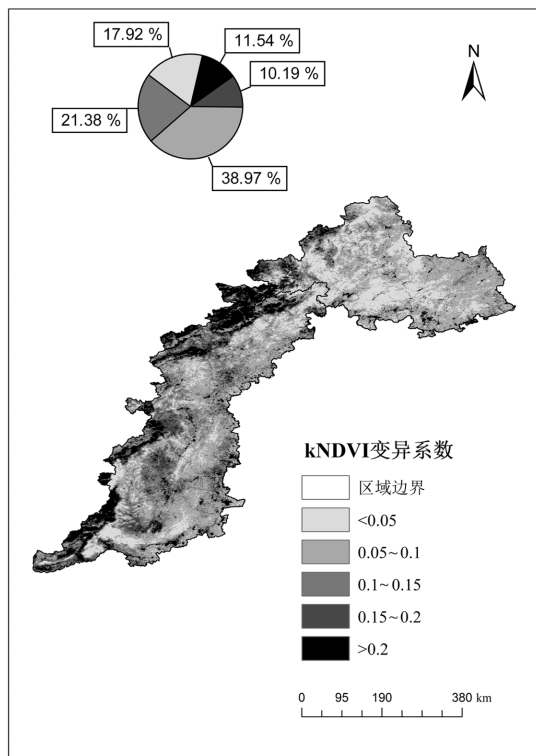


图 6 太行山-燕山地区 kNDVI 变异系数

Fig.6 Coefficient of variation of kNDVI in Taihangshan-Yanshan region

进一步分析 kNDVI 变化规律,将 kNDVI 的变化趋势  $K_H$  与其 Hurst 值进行叠加分析(图 5(b)).处于持

续增加与增加变缓趋势的区域占 86.29%,大面积分布于太行山北部、西部和南部以及燕山北部、西部和东部地区;呈持续减少趋势的区域仅占 4.85%,零散分布于太行山西南角和东侧地区以及燕山南部地区;表现为减少变缓趋势的区域主要呈带状分布于太行山东侧地区以及燕山南侧地区。

总体来说,研究区 kNDVI 的弱反向持续性和弱正向持续性并存,且大部分地区 kNDVI 呈现持续增加和增加变缓的趋势,表明该区域植被状况具有改善的趋势,但也存在一些问题和挑战。

3.1.5 变化稳定性 根据变异系数将变异程度分为 5 级(图 6),研究区 kNDVI 总体上呈现低态势的波动状态。高波动状态区域主要分布在燕山地带的北部边缘地区,区域占 11.54%,可能由于燕山北部地区的气候条件较为严酷、生态环境相对脆弱会受到人类活动等情况的影响大;较高波动区域主要分布在燕山地带的中部地区,区域占 10.19%。中等以下的波动状态区域占 78.27%,在全区均有分布,少数存在于燕山北部地区。

总体来说,太行山-燕山地区多呈现中等以下的波动状态,说明京津冀生态屏障区植被状态整体趋向稳定,但仍存在高态势的波动状况,存在一定程度上的不稳定性。

3.2 基于 OPGD 模型的多元驱动力分析

3.2.1 参数离散化 由表 3 和图 7 可知,各解释变量离散化过程中所使用方法与间隔数存在差异;对于 X13(ET)使用自然间距分级法,在间断等级为 9 时  $q$  值最大,对 kNDVI 的解释力最强,故分类数为 9 类;其他连续性因子离散化原理相同,其中 X1(城镇人口)、X2(第一产 GDP 占比)、X5(人口密度)、X8(年累积降水)、X20(第一产 GDP 占比)、X5(人口密度)、X8(年累积

降水)和 X20(SM)建议选用几何间距分级法,且间隔数分别为 8、8、7 和 9 时解释力最强,故按几何间距分级法分为 8、8、7 和 9 类;X10(海拔)、X18(经度)建议选用等间距分级法,且间隔数分别为 7、8 时解释力最强;X3(第二产 GDP 占比)、X6(GDP 密度)、X7(夜间灯光强度)、X9(年平均气温)和 X14(LST)建议选用自然间距,且间隔数为 9 时解释力最强。

表 3 参数离散化过程

Table 3 Parameter discretisation process

变量因子	代号	中断类型	中断数量	变量因子	代号	中断类型	中断数量
城镇人口	X1	几何间距	8	第二产 GDP 占比	X3	自然间距	9
第一产 GDP 占比	X2		8	GDP 密度	X6		9
人口密度	X5		7	夜间灯光强度	X7		9
年累积降水	X8		9	年平均气温	X9		9
SM	X20		9	坡度	X11		7
海拔	X10	等间距	7	ET	X13	自然间距	9
经度	X18		8	LST	X14		9
第三产 GDP 占比	X4	分位数间距	9				
纬度	X19		9				

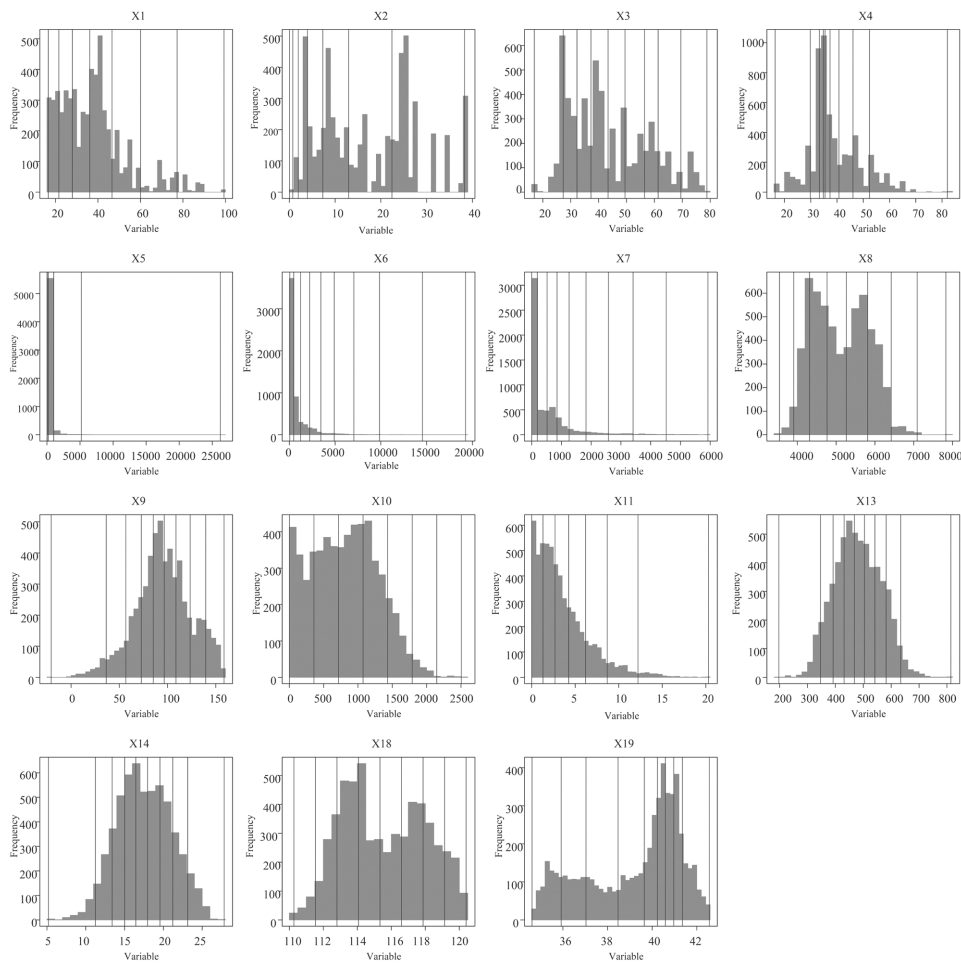


图 7 参数离散化结果

Fig.7 Parameter discretisation results

3.2.2 因子探测分析 单因子探测的结果为各因子对太行山-燕山地区 kNDVI 的解释度(图 8).从  $q$  值来看,对太行山-燕山地区 kNDVI 的主导驱动因子是 X13 蒸散发量(0.7434),而其他因子的解释力较蒸散发量显著降低.其中,X14 地表温度、X15 土地利用类型、X16 土壤类型和 X17 植被类型解释力较强,对太行山-燕山地区 kNDVI 解释程度均超过了 20%.X6GDP 密度( $q=0.0487$ )和 X10 海拔( $q=0.0351$ )对太行山-燕山地区 kNDVI 的解释力最弱,不足 5%.

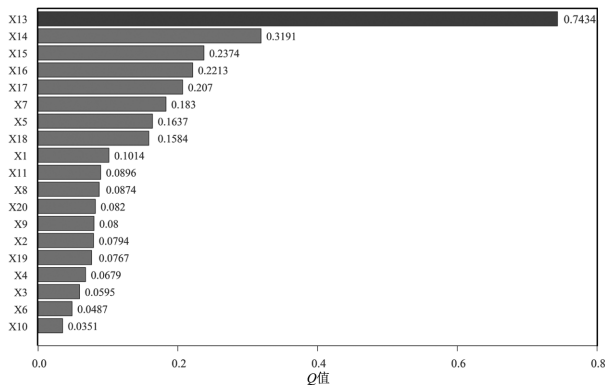


图 8 单因子探测

Fig.8 Single factor detection

总体上,蒸散发量与地表温度对太行山-燕山地区 kNDVI 的解释力度最强.社会经济因素(如 GDP 密度)和其他自然地理因素如植被类型、坡度等也对 kNDVI 有不同程度的影响.

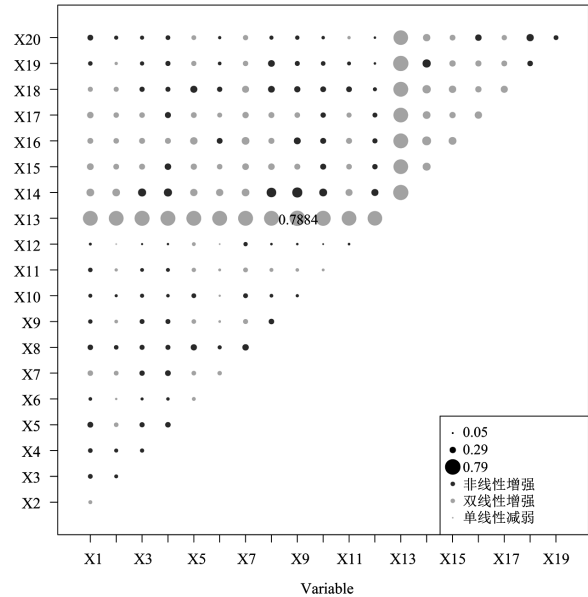


图 9 因子交互作用

Fig.9 Factor interactions

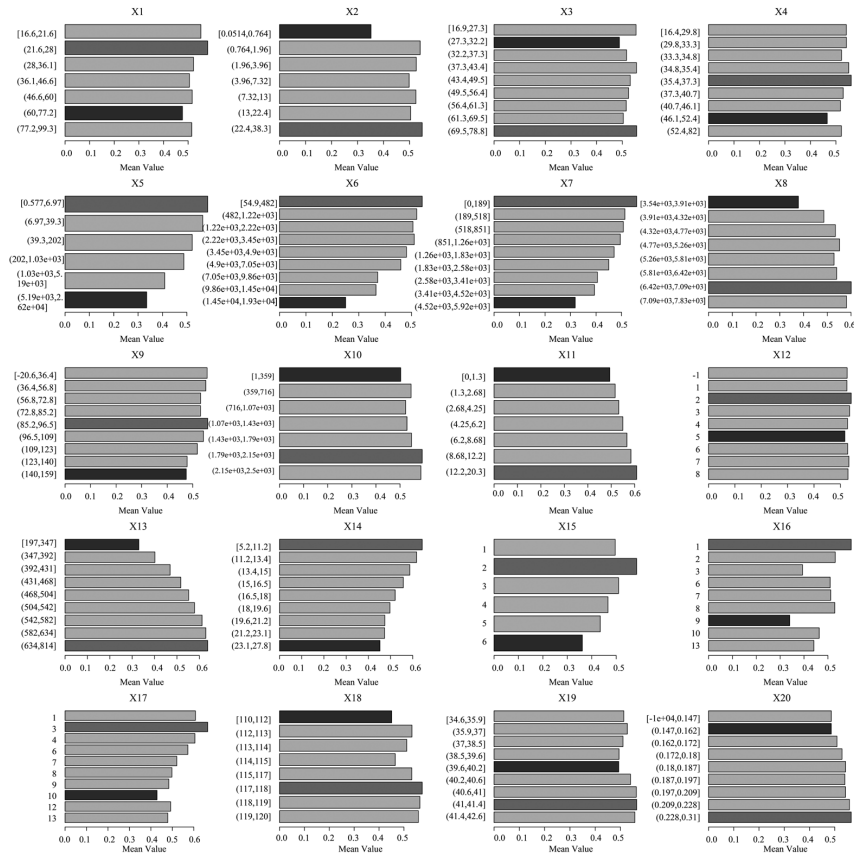


图 10 风险探测均值

Fig.10 Risk detection averages

**3.2.3 交互探测分析** 根据图 9 得到在所考虑的因子之间都存在交互作用,0.6%的组合表现为单线性减弱的现象;99.4%的组合表现为增强的现象,其中 56.52%的组合为双因子增强,43.48%的组合为非线性增强,交互作用影响最大为 X13 蒸散发量 $\cap$ X9 年平均气温(0.7884),说明两者综合显著影响着 kNDVI 的变化,且 X13 与其他因子(如 GDP、植被类型、坡度和土壤类型等)的相互作用同样显著。其次 X14 地表温度 $\cap$ X9 年平均气温(0.50)、X14 地表温度 $\cap$ X8 年累计降水(0.47),相互作用最小的是 X12 坡向 $\cap$ X2 第一产 GDP 占比(0.05)且呈现单线性减弱现象。

综上所述,大多数因子组合在共同作用下对 kNDVI 的影响表现为增强,ET 与其他因素的相互作用尤为显著。坡向与第一产 GDP 占比在某些特定条件下的组合可能对 kNDVI 产生减弱影响。

**3.2.4 风险探测分析** 风险探测结果表明(图 10),城镇人口、人口密度和夜间灯光强度因子分别处于(21.6 万人,28 万人)、[0.557 人/km<sup>2</sup>,6.97 人/km<sup>2</sup>]和 [0lm/m<sup>2</sup>,189lm/m<sup>2</sup>]区间时,kNDVI 达到最大,随着区间的增大 kNDVI 指数而减小,说明过多的人口和过亮的夜间照明可能会对该区域地表植被生长产生抑制效应。蒸散发量在(634mm,814mm)区间和土壤水分在(0.228m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,0.31m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)区间时 kNDVI 最大且与其呈正相关关系,而地表温度在[5.2℃,11.2℃]区间 kNDVI 最大且与其呈负相关关系,表明植被的增多可使蒸散发量和土壤水分得到提升进而调节区域小气候,过高的地表温度则不利于植物生长发育。除了上述因子、第三产业 GDP 占比和年平均气温,该地区的 kNDVI 基本上都表现为随各个区间值增加而增加,其中第一、二产业 GDP 对 kNDVI 影响相对明显,其值增大更适合植被的生长。

## 4 讨论

### 4.1 时空格局分析

本研究分析了 2001~2022 年太行山-燕山地区 kNDVI 的时空变化。时间上,22 年间研究区 kNDVI 年均值以及春、夏和秋季均值整体呈现波动上升的趋势,2009~2013 年和 2016~2020 年年均 kNDVI 出现一定幅度的快速增长,揭示近年来“以粮换绿”项目、燕山山地生态综合治理工程等的大力推进取得

一定成果,研究区植被得到持续改善<sup>[34]</sup>。空间上,太行山南部、西部地区以及燕山大部分地区 kNDVI 较高,这主要由于海拔较高,使西北气流与水汽在此辐合,形成增强降雨的作用,气候较为湿润,同时受人类活动干扰较少,有利于森林的保护与生长。太行山地区 kNDVI 的空间异质性较大,蔚县、阳原县等地区处于农牧、林牧、农林等复合交错带,生态环境相对脆弱,kNDVI 较低;垣曲县、阳城县和围场满族蒙古族自治县等地受地形气候以及天然林保护政策的影响<sup>[35]</sup>,kNDVI 较高。夏季植被茂密,其 kNDVI 均值为一年中最高,而冬季研究区植被落叶进入休眠期其 kNDVI 则有明显下降,反映出四季植被变化以及植被生长等情况<sup>[36]</sup>,在一定程度上折射出太行山-燕山小气候向气温上升、降雨增加的趋势发展,与全球气候变化趋势一致。与以往研究结果相比,植被数据总体上仍呈现稳定且呈上升趋势<sup>[37]</sup>。

在研究区未来变化分类中,显著增加的区域 kNDVI 占比最大,植被覆盖呈增长改善趋势,这与鲁军景等<sup>[38]</sup>的结果一致。呈现显著减少与持续减少趋势的区域 kNDVI 占比最小,且增加趋势约为减少区域的 6 倍,表明近年来研究区植被覆盖率显著增加,京津冀生态保障区植被情况持续向好<sup>[39]</sup>。研究区植被变化趋势及持续性主要得益于近年来“三北防护林”工程、退耕还林还草、太行山燕山绿化政策等项目的实施<sup>[40-41]</sup>。然而,仍有一些地区显示出极显著减少与高波动,这些区域海拔较低受到人为干扰多,对植被有显著负面影响,太行山-燕山地区仍存在着一些生态环境问题。

### 4.2 驱动机制分析

相关研究表明<sup>[42]</sup>,京津冀生态分区中植被变化主要受地理因子调控,植被覆盖与降水呈正相关关系,而人类活动对植被影响以负向影响为主。根据交互探测分析结果可知,太行山-燕山地区 kNDVI 的变化受蒸散发量、地表温度、土地利用类型、土壤类型和植被类型等多种因子共同作用的影响,且多数因子两两组合对 kNDVI 的解释力度呈增强状态。在青海湖流域的研究中,气温和高程是植被变化的主导因子,与距水系距离和降水量等交互作用后,解释力显著增大,说明自然因素制约着青海湖流域的植被活动<sup>[43]</sup>。对于大兴安岭生态功能区,年平均降水和国内生产总值交互作用对 kNDVI 变化的解释能

力最高<sup>[14]</sup>。蒸散发量与年平均气温两因子交互作用对太行山-燕山植被覆盖影响最大,这可能是因为研究区 ET 对气温变化的敏感性较大,气温是 ET 变化的主导因素<sup>[44]</sup>,进而影响植被覆盖。据单因子探测结果可知,自然地理因素对研究区 kNDVI 的影响较为显著,这与孟琪等<sup>[45]</sup>对京津风沙源区植被覆盖研究结果一致。蒸散发量与地表温度是 kNDVI 变化的主导因子,即蒸散发量与地表温度对植被状态影响显著<sup>[46]</sup>,蒸散发量的增加可能会增强土壤层中微生物活性,从而加快土壤有机质分解速率,有利于植被根系生长<sup>[47]</sup>,当与其他因素(如土壤、气候等)共同作用时,其对植被生长的影响会被进一步放大进而影响 kNDVI 值。土壤类型和坡度作为地形因素,影响了水分保持和养分供应,进而影响了植被的生长条件<sup>[48]</sup>。在人为因素中排在首位的是土地利用类型,土地覆盖变化是人类活动与自然环境之间最直接的相互作用,与人类社会经济活动的活跃程度密切相关<sup>[49]</sup>。另外需要指出的是坡向与第一产业 GDP 占比交互呈现单线性减弱的现象,阳坡与阴坡、迎风坡与背风坡,其环境皆有差别,植被生长情况不同,植被生长少、人类活动少,植被覆盖度降低<sup>[50]</sup>。研究区的 kNDVI 与地表温度成正向相关,这说明温度对于植被的影响有促进作用,这与徐悦等<sup>[51]</sup>研究相一致,而与陈澍祺等<sup>[42]</sup>对京津冀植被覆盖的研究结果相反,这可能由于京津冀地区拥有多种地形地貌和较高等度的城市化使得地表温度对于植被覆盖具有一定抑制性。主导驱动因子蒸散发量在区间数值高时,kNDVI 达到最大值,但值得注意的是,未来 80 年我国气温和蒸散发量仍处于上升趋势<sup>[52-53]</sup>,加之人类活动的不断干扰和太行山-燕山地区的复杂性,研究区植被覆盖变化具有极大不确定性。不同区域间的生态系统各有不同,但本文研究可对 kNDVI 对驱动因子的相关性分析提供参考依据。

#### 4.3 局限性和未来工作

虽然本研究对太行山-燕山地区植被变化趋势和空间特征进行了分析,预测了植被动态的可持续性,同时深入探讨了气候条件、地形条件、植被和土壤类型以及人类活动对研究区植被空间分布的影响。研究结果为有效监测植被变化提供了一定贡献,但本研究也存在一些局限。

首先,本文只使用了 2001~2022 年 1km 空间分

辨率的 MODIS 产品计算了 kNDVI,单一的遥感数据使用具有传感器误差,同时不足以反映细致的植被变化和长期植被监测的需求。因此,未来研究可结合高分辨率的多源遥感数据对更长时间序列的植被变化进行监测。其次,采用 Hurst 指数分析植被变化可持续性不能直观反映其可持续时长,并且缺少对年内 kNDVI 均值变化趋势显著性、未来变化可持续性和变化稳定性进行研究。因此,未来研究可探寻更加全面反映植被变化持续性的方法,来提高植被监测的预测准确性,应深刻探讨太行山-燕山地区年内均值 kNDVI 变化特征。最后,本研究同时评估了气候、地形、植被和土壤以及人类活动的驱动作用,但植被变化的驱动因子更复杂的相互作用仍需继续探索。

## 5 结论

5.1 2001~2022 年,研究区年均 kNDVI 与春夏秋三季 kNDVI 均值整体呈缓慢上升趋势,冬季 kNDVI 均值以 0.0034 的速率波动下降。kNDVI 年均值空间分布具有"北部和南部高,中部低"的分布特点,空间差异性较大;春季和秋季的 kNDVI 均值与空间分布具有较高相似度,夏季 kNDVI 均值最高,达 0~0.701,冬季 kNDVI 均值降至 0~0.500。

5.2 研究区 kNDVI 大部分区域呈增加状态(66.36%),且持续增加与增加变缓趋势的区域占总面积的近 87%,近 80%的区域植被变化呈中等以下的波动状态,西部边缘地区波动性较高,东部波动性较低,仍具有一定程度上的不稳定性。

5.3 OPGD 结果表明,对太行山-燕山地区 kNDVI 的解释力  $ET > LST > 土地利用类型 > 土壤类型 > 植被类型$ ,均超过 0.2,蒸散发量解释力度超 0.7;因子的交互作用多呈现增强趋势且存在线性和非线性两种方式,ET 与其他因素的交互作用尤为显著;在影响因子 ET 为(634mm,814mm)、LST 为[5.2°C,11.2°C]、城镇人口为(21.6 万人,28 万人)和夜间灯光强度为[0lm/m<sup>2</sup>,189lm/m<sup>2</sup>]的子区域内,研究区 kNDVI 表现为高值。

#### 参考文献:

- [1] 效存德,史培军,李小雁,等.地表过程与可持续发展研究进展与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022,58(3):476-490.

- Xiao C D, Shi P J, Li X Y, et al. Research progress and prospects of land surface processes and sustainable development [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2022,58(3):476-490.
- [2] 何 诚,冯仲科,韩 旭,等.基于多光谱数据的永定河流域植被生物量反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012,32(12):3353-3357.
- He C, Feng Z K, Han X, et al. Inversion of vegetation biomass in Yongding River Basin based on multispectral data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012,32(12):3353-3357.
- [3] Sun B, Li Z, Gao Z, et al. Grassland degradation and restoration monitoring and driving forces analysis based on long time-series remote sensing data in Xilin Gol League [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(4):219-228.
- [4] Li L, Xin X, Zhao J, et al. Remote sensing monitoring and assessment of global vegetation status and changes during 2016-2020 [J]. *Sensors*, 2023,23(20):8452.
- [5] Feng X, Tian J, Wang Y, et al. Spatio-temporal variation and climatic driving factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin from 2001 to 2020 Based on kNDVI [J]. *Forests*, 2023,14(3):620-620.
- [6] Wang Q, Moreno-Martínez Á, Muñoz-Marí J, et al. Estimation of vegetation traits with kernel NDVI [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023,195:408-417.
- [7] 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(9):eabc7447.
- [8] 梁顺林,白 瑞,陈晓娜,等.2019 年中国陆表定量遥感发展综述 [J]. *遥感学报*, 2020,24(6):618-671.
- Liang S L, Bai R, Chen X N, et al. Review of the development of quantitative remote sensing of land surface in China in 2019 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020,24(6):618-671.
- [9] Lyu X, Li X, Gong J, et al. Comprehensive grassland degradation monitoring by remote sensing in Xilinhot, Inner Mongolia, China [J]. *Sustainability*, 2020,12(9):3682.
- [10] Rojo-Álvarez J L, Martínez-Ramón M, Muñoz-Marí J, et al. Digital signal processing with Kernel methods [M]. John Wiley & Sons, 2018.
- [11] Pabon-Moreno D E, Migliavacca M, Reichstein M, et al. On the potential of Sentinel-2 for estimating Gross Primary Production [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022,60:1-12.
- [12] 李泳君,陈青长,方 贺,等.基于MGWR的长江流域植被演化及其影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(1):352-362.
- Li Y J, Chen Q C, Feng H, et al. Vegetation evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin based on MGWR [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(1):352-362.
- [13] 宋小龙,马明德,王 鹏,等.2000-2022 年宁夏不同地理分区生长季植被覆盖度时空非平稳性特征 [J]. *生态环境学报*, 2024,33(6):853-868.
- Song X L, Ma M D, Wang P, et al. Spatiotemporal nonstationary characteristics of vegetation coverage in the growing season in different geographical regions of Ningxia from 2000 to 2022 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024,33(6):853-868.
- [14] 王栋华,田义超,张亚丽,等.峰丛洼地流域植被覆盖度时空演变及其归因 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):4274-4284.
- Wang D H, Tian Y C, Zhang Y L, et al. Spatiotemporal evolution and attribution of vegetation coverage in the peak-cluster depression basins [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):4274-4284.
- [15] 孟 琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(2):826-836.
- Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional vegetation coverage based on geographic detectors: A case study of Beijing-Tianjin aeolian sand source area [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(2):826-836.
- [16] 金 凯,王 飞,韩剑桥,等.1982-2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响 [J]. *地理学报*, 2020,75(5):961-974.
- Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(5):961-974.
- [17] 梁 植,孙若辰,段青云.黄河水源涵养区植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因子 [J]. *地理科学进展*, 2023,42(9):1717-1732.
- Liang Z, Sun R C, Duan Q Y. Spatiotemporal variation of NDVI in the Yellow River water conservation zone and its driving factors [J]. *Progress in Geography*, 2023,42(9):1717-1732.
- [18] 戴强玉,徐 勇,赵 纯,卢云贵,等.四川盆地植被 EVI 动态变化及其驱动机制 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(8):4292-4304.
- Dai Q Y, Xu Y, Zhao C, et al. Dynamic variation of vegetation EVI and its driving mechanism in the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(8):4292-4304.
- [19] 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.
- [20] 冯 飞,杨 鑫,贾宝全,等.中国 328 个城市的植被覆盖度长期变化特征及其驱动因子 [J]. *中国科学:地球科学*, 2024,54(2):486-502.
- Feng F, Yang X, Jia B Q, et al. Long-term variation characteristics and driving factors of vegetation cover in 328 cities in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024,54(2):486-502.
- [21] Song Y, Wang J, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020,57(5):593-610.
- [22] 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.
- [23] 杨文静,赵建世,赵 勇,等.基于结构方程模型的蒸散发归因分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022,62(3):581-588.
- Yang W J, Zhao J S, Zhao Y, et al. Evapotranspiration attribution analysis based on structural equation model [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2022,62(3):581-588.
- [24] 陈福军,沈彦俊,胡乔利,等.海河流域 NDVI 对气候变化的响应研究 [J]. *遥感学报*, 2011,15(2):401-414.
- Chen F J, Shen Y J, Hu Q L, et al. Research on the response of NDVI in the Haihe River Basin to climate change [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011,15(2):401-414.

- [25] Quamar M F. Vegetation dynamics in response to climate change from the wetlands of Western Himalaya, India: Holocene Indian Summer Monsoon variability [J]. *The Holocene*, 2019,29(2):345-362.
- [26] 刘征,赵旭阳,米林迪.基于 3S 技术的河北省山区植被净初级生产力估算及空间格局研究 [J]. *水土保持研究*, 2014,21(4):143-147, 153.  
Liu Z, Zhao X Y, Mi L D. Study on estimation and spatial pattern of vegetation Net Primary Productivity in mountainous area of Hebei Province based on 3S [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(4):143-147,153.
- [27] 陈艳梅,高吉喜,年蔚,等.风域视角京津冀生态廊道空间格局识别 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(7):3418-3426.  
Chen Y M, Gao J X, Nian W, et al. Identification of ecological corridors' spatial pattern in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of wind domain [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7):3418-3426.
- [28] 张永蓉,张霞,尚国珩,等.京津冀地区植被覆盖时空变化研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2023,46(1):81-85.  
Zhang Y R, Zhang X, Shang G Q, et al. Spatiotemporal variation of vegetation cover in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Surveying, Mapping and Geospatial Information*, 2023,46(1):81-85.
- [29] 程琳琳,李玉虎,孙海元,等.京津冀 MODIS 长时序增强型植被指数拟合重建方法适用性研究 [J]. *农业工程学报*, 2019,35(11):148-158.  
Cheng L L, Li Y H, Sun H Y, et al. Study on applicability of long-time series enhanced vegetation index fitting reconstruction method in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(11):148-158.
- [30] 曾兴兰,陈田田.西南地区植被动态变化的驱动力解析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(12):6561-6570.  
Zeng X L, Chen T T. Analysis of the driving forces of vegetation dynamic changes in southwest China [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(12):6561-6570.
- [31] Liu Y, Zhang Z, Tong L, et al. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe [J]. *Ecological Indicators*, 2019,106: 105504.
- [32] 李霞,张乐艺,吴晨.基于 GEE 和地理探测器的河南省不同流域植被变化及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2024,35(7):1887-1896.  
Li X, Zhang L Y, Wu C. Vegetation change and influencing factors in different watersheds in Henan Province based on GEE and geographic detectors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(7):1887-1896.
- [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 J F, Xu C D. Geographic detectors: Principles and prospects [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [34] 冀正欣,许月卿,黄安,等.冀北山区“三生”空间识别与演化特征分析——以张家口市为例 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1):123-134.  
Ji Z X, Xu Y Q, Huang A, et al. Spatial identification and evolution characteristics of production-living-ecological industries in Northern Hebei Mountainous Area: A case study of Zhangjiakou City [J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2022,58(1): 123-134.
- [35] Liu J, Liu S, Tang X, et al. The response of land surface temperature changes to the vegetation dynamics in the Yangtze River Basin [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(20):5093.
- [36] 王成武,罗俊杰,汪宙峰,等.基于 MGWR 模型的太行山脉自然保护地空间格局评价及空间优化 [J]. *生态学杂志*, 2025,44(1):325-336.  
Wang C W, Luo J J, Wang Z F, et al. Spatial pattern evaluation and spatial optimization of nature reserves in Taihang Mountains based on MGWR model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025,44(1):325-336.
- [37] Fang Y, Hu R, Meng F, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its ecological security barrier with Inner Mongolia [J]. *Atmosphere*, 2024,15(1):76.
- [38] 鲁军景,孙雷刚,左璐,等.基于京津冀功能分区的植被覆盖度时空演变特征及其影响因子 [J]. *自然资源遥感*, 2024,36(4):242-253.  
Lu J J, Sun L G, Zuo L, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of vegetation coverage based on functional zoning in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Remote Sensing of Natural Resources*, 2024,36(4):242-253.
- [39] 梁玉琦,危小建,江平,等.基于力学平衡模型的生态系统服务协同与权衡关系研究——以长江中游城市群为例 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(11):5974-5986.  
Liang Y Q, Wei X J, Jiang P, et al. Study on trade-offs and synergies of ecosystem services based on mechanical equilibrium model: A case of the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(11):5974-5986.
- [40] 侯静,侯鹏,高海峰,等.中国森林类自然保护区植被时空变化及对气候变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 2024,43(8):2365-2372.  
Hou J, Hou P, Gao H F, et al. Spatiotemporal changes of vegetation in forest nature reserves in China and their response to climate change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024,43(8):2365-2372.
- [41] Chen Y, Zhai Y, Gao J. Spatial patterns in ecosystem services supply and demand in the Jing-Jin-Ji region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,361:132177.
- [42] 陈澍祺,何玲,闫丰.京津冀植被覆盖度时空演变及其对自然人为变化的响应 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(7):3931-3944.  
Chen S Q, He L, Yan F. Spatiotemporal evolution of vegetation cover in Beijing-Tianjin-Hebei region and its response to natural anthropogenic changes [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(7): 3931-3944.
- [43] 周美林,刘家宏,刘希胜,等.青海湖流域植被动态变化驱动力及空间粒度效应 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(3):1497-1506.  
Zhou M L, Liu J H, Liu X S, et al. Driving force and spatial granularity effect of vegetation dynamics in Qinghai Lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(3):1497-1506.
- [44] 白鹏,蔡常鑫.1982~2019 年中国陆地蒸散发变化的归因分析 [J]. *地理学报*, 2023,78(11):2750-2762.  
Bai P, Cai C X. Attribution analysis of land evapotranspiration changes in China from 1982 to 2019 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11):2750-2762.
- [45] 孟琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(2): 826-836.

- Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional vegetation coverage based on geographic detector: A case study of Beijing-Tianjin aeolian sand source area [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(2):826-836.
- [46] 吴万民,刘涛,陈鑫.西北干旱半干旱区 NDVI 季节性变化及其影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2023,40(12):1969-1981.
- Wu W M, Liu T, Chen X. Seasonal variation and influencing factors of NDVI in arid and semi-arid regions of Northwest China [J]. *Arid Zone Research*, 2023,40(12):1969-1981.
- [47] 冶兆霞,张洪波,杨志芳,等.陕北黄土高原气象要素对植被覆盖的空间分异影响及风险探测 [J]. *生态学报*, 2024,44(6):2379-2395.
- Ye Z X, Zhang H B, Yang Z F, et al. Spatial differentiation of meteorological elements on vegetation cover and risk detection on the Loess Plateau in northern Shaanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6):2379-2395.
- [48] Likus-Ciešlik J, Józefowska A, Frouz J, et al. Relationships between soil properties, vegetation and soil biota in extremely sulfurized mine soils [J]. *Ecological Engineering*, 2023,186:106836.
- [49] Zhang S, Guan Z, Liu Y, et al. Land use/cover change and its relationship with regional development in Xixian New Area, China [J]. *Sustainability*, 2022,14(11):6889.
- [50] 朱利欣,袁金国.京津冀地区植被净初级生产力时空分布及其与地形因子的关系 [J]. *科技通报*, 2019,35(6):197-203.
- Zhu L X, Yuan J G. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity and its relationship with topographic factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science and Technology Bulletin*, 2019,35(6):197-203.
- [51] 徐悦,李佳潼,郭齐韵,等.南昌市 NDVI 时空演化特征及其气候驱动因子分析 [J]. *森林工程*, 2024,40(5):50-61.
- Xu Y, Li J T, Guo Q Y, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of NDVI and its climate driving factors in Nanchang City [J]. *Forest Engineering*, 2024,40(5):50-61.
- [52] 巢清尘,李柔珂,崔童,等.中国气候变化科学认识进展及未来展望——中国《第四次气候变化国家评估报告·第一部分》解读 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2023,33(1):74-79.
- Chao Q C, Li R K, Cui T, et al. Progress in scientific understanding of climate change in China and future prospects: Interpretation of China's Fourth national assessment report on climate change Part I [J]. *Chinese Population, Resources and Environment*, 2023,33(1):74-79.
- [53] Hansen J, Kharecha P, Sato M. Climate forcing growth rates: doubling down on our Faustian bargain [J]. *Environmental Research Letters*, 2013,8(1):011006.

**作者简介:** 王敏丽(2002-),女,河北农业大学本科生,主要研究方向为植被动态遥感监测与生态修复.发表论文 3 篇.wangminli1128@163.com.