

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.020.

李自闯,董国涛,姚楠. 1982—2015年黄河中游NDVI时空变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2024,31(2):202-210.

Li Zichuang, Dong Guotao, Yao Nan. Analysis of Spatiotemporal Variations and Driving Forces of NDVI in the Middle Reaches of Yellow River During 1982—2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 202-210.

# 1982—2015年黄河中游NDVI时空变化及驱动力分析

李自闯<sup>1</sup>, 董国涛<sup>2,3</sup>, 姚楠<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003; 2.黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3.黑河水资源与生态保护研究中心, 兰州 730030)

**摘要:** [目的]探究黄河中游NDVI时空变化,阐明自然和人为因素对NDVI变化的影响和驱动力,并为黄河中游生态保护与发展提供科学依据。[方法]基于AVHRR GIMMS NDVI数据集,采用线性回归分析、Mann-Kendall检验、地理探测器模型,分析了1982—2015年黄河中游植被NDVI的时空演变特征,并对影响植被NDVI的自然和人为因子进行了驱动力分析。[结果]1982—2015年黄河中游NDVI呈上升趋势,空间上呈东南高西北低分布,植被覆盖改善面积高达70.79%,显著改善面积为49.2%。年降水量是黄河中游NDVI变化的主要驱动因子,植被类型、地貌类型、土地利用类型和土壤类型等因子也能很好地解释黄河中游植被覆盖状况。自然因子对植被变化的影响远高于人为因子,因子交互结果为双因子增强或非线性增强。[结论]黄河中游植被NDVI主要受年降水量影响,34年间在自然和人为因素交互作用下植被显著改善,未来应更加注重人类活动对植被覆盖的影响。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 地理探测器模型; 黄河中游

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0202-09

## Analysis of Spatiotemporal Variations and Driving Forces of NDVI in the Middle Reaches of Yellow River During 1982—2015

Li Zichuang<sup>1</sup>, Dong Guotao<sup>2,3</sup>, Yao Nan<sup>1</sup>

(1.School of Surveying & Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2.Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3.Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the spatiotemporal changes of NDVI in the middle reaches of the Yellow River, to clarify the impact and driving forces of natural and human factors on NDVI changes, and to provide scientific basis for ecological protection and development. [Methods] Based on the AVHRR GIMMS NDVI dataset, linear regression analysis, Mann-Kendall test and Geodetector-mode were used to analyze the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation NDVI in the middle reaches of Yellow River from 1982 to 2015. The driving forces of natural and human factors affecting vegetation NDVI were also analyzed. [Results] From 1982 to 2015, the NDVI of the middle reaches of Yellow River showed upward trend, with spatial distribution of high level in the southeast and low level in the northwest. The improved vegetation coverage area reached to 70.79%, with a significant improvement area of 49.2%. Annual precipitation was the dominant factor affecting NDVI changes in the middle reaches of Yellow River, and factors such as vegetation type, geomorphic type, land use type and soil type could also explain the vegetation cover status in the middle reaches of Yellow River. The impact of natural factors on vegetation change was much higher than that of human factors, and the result of factor interaction was a dual factor enhancement or non-linear enhancement. [Conclusion] The NDVI of the vegetation in the middle reaches of the Yellow River

收稿日期: 2023-03-03

修回日期: 2023-04-11

资助项目: 国家自然科学基金(51779099); 河南省科技攻关项目(232102320247)

第一作者: 李自闯(1998—), 男, 河北石家庄人, 在读硕士研究生, 研究方向为生态遥感。E-mail: lizichuanghpu@163.com

通信作者: 董国涛(1982—), 男, 山东青州人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源遥感研究。E-mail: dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

is mainly affected by annual precipitation, and the vegetation had improved significantly during the 34-year period under the interaction of natural and human factors, and more attention should be paid to the influence of human activities on the vegetation cover in the future.

**Keywords:** NDVI; change of time and space; Geodetector mode; middle reaches of Yellow River

植被是陆地生态系统的核心组成部分,可以促进气候变化、水循环和能量流动<sup>[1-2]</sup>,且被认为是监测区域植被变化和生态环境变化的综合指示器<sup>[3-4]</sup>。归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)常用于研究植被时空变化<sup>[5]</sup>,它综合反映了研究区植被类型、植被生长状况以及覆盖密度<sup>[6]</sup>,与植被分布密度呈线性相关,因而在植被时空尺度动态监测变化研究中得到广泛应用。国内外学者<sup>[7-9]</sup>从多种时间尺度,结合不同影响因子深入研究植被覆盖时空变化和驱动力分析,发现影响NDVI变化的自然因子存在明显的区域差异性,气候因子与土地利用方式等人为因素的交互作用对植被覆盖变化影响显著。

地理探测器<sup>[10]</sup>是一种研究空间异质性的模型,可以定量探测某一时空现象的自然和人为驱动因子以及不同因子之间交互作用<sup>[11-13]</sup>。目前,该模型已被广泛应用于不同区域、不同时间序列的各种影响因子定量探测研究。王伟等<sup>[14]</sup>研究发现中亚地区水分因素主导植被生长格局,潜在蒸散发与高程的协同具有突出解释力;李金珂等<sup>[15]</sup>基于地理探测器量化探测影响NPP的自然和人为因子,发现不同植被类型的NPP对该区域生态系统的贡献具有空间差异;祝聪等<sup>[16]</sup>聚焦于2006—2016年岷江上游植被变化驱动力分析,结果表明海拔、气温、土壤类型和降水对植被覆盖度变化占据主导地位;裴志林等<sup>[17]</sup>研究发现黄河上游气候类环境因素较人类活动因素对植被覆盖的影响更为显著,且降水与土壤类型、土地利用方式的交互作用主导黄河上游FVC空间分布;彭文甫等<sup>[18]</sup>在四川NDVI变化的地理探测中发现,土壤类型对植被状况的可变性有较好解释力。众多研究发现,植被覆盖受到自然变化和人为因素共同影响,探究多种影响因子的潜在驱动力显得尤为重要。

黄河流域生态环境较为脆弱,近年来流域植被覆盖状况得以改善<sup>[19]</sup>。前人对黄河流域植被时空变化特征以及植被与地形地貌、气候变化因素的响应方面开展了一些研究,具有短时间序列或缺少人为因素的特征<sup>[20-22]</sup>。但鲜有学者对囊括黄土高原在内的黄河中游进行自然和人为因素系统性分析和研究,且缺少长时间序列植被覆盖变化及驱动机制定量研究。因此,本研究基于长时间序列NDVI数据,结合线性回归分析和M-K检验分析黄河中游植被覆盖的时空变

化特征,并基于地理探测器模型,选取气候条件、地形地貌、土壤、植被以及人类活动共14种影响因子,定量探测NDVI变化的自然和人为驱动力,以期为该地区的生态保护与治理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概括

黄河中游位于纬度33°—41°E,经度103°—114°N,横跨宁夏、甘肃、陕西、山西、内蒙古、河南6个省市,总面积34.5万km<sup>2</sup>。黄河中游幅员辽阔,山地众多,地势西高东低,平均海拔1000~2000m。流域内不同地区气候差异显著,属大陆性和海洋性混合型季风气候,降水和气温由东南向西北递减。黄河中游地区的降水主要集中在夏季,表现为“雨热同期”的气候特征,光照充足、高温、降水丰沛是黄河中游地区优越的气候条件,也是多年来植被覆盖度快速增长的重要条件。研究区主要植被类型为栽培植被和草原。黄河中游地处黄河的重要生态屏障区,对其进行生态保护对于中国的可持续发展至关重要。

### 1.2 数据和处理

本研究以NDVI为因变量,选取气候、地形、土壤、植被、地貌、人类活动6个类型,14个具有代表性且易于量化的因子作为自变量(表1),探测其对黄河中游NDVI的影响。NDVI数据采用目前时间跨度最长的AVHRR GIMMS数据集,空间分辨率为(1/12)°,时间分辨率为15d。采用最大值合成法(MVC)获取1982—2015年NDVI影像,结合黄河流域植被实际情况,根据NDVI值将植被覆盖度分为5类<sup>[23]</sup>:低覆盖度(<0.2)、中低覆盖度(0.2~0.4)、中覆盖度(0.4~0.6)、中高覆盖度(0.6~0.8)和高覆盖度(>0.8)。

气象数据来自于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)发布的气象背景数据集,基于全国1915个站点的气象数据,采用反距离权重法插值生成,空间分辨率为500m;DEM来自GEE云平台(Google Earth Engine)的SRTM Digital Elevation数据集,空间分辨率为30m;坡度、坡向数据均基于DEM数据在GEE中计算得到;其他数据均通过中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)获取,在ArcGIS 10.7软件利用Arcpy工具对以上数据进行投影、掩膜等批处理。

表 1 探测因子

Table 1 Detection factors

类别	因子	指数	单位	类别	因子	指数	单位
气候	$X_1$	年均温	℃	土壤	$X_8$	土壤类型	
	$X_2$	年降水量	mm	植被	$X_9$	植被类型	
	$X_3$	$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温	℃	地貌	$X_{10}$	地貌类型	
	$X_4$	干燥度指数			$X_{11}$	GDP	万元/ $\text{km}^2$
地形	$X_5$	高程	m	人类活动	$X_{12}$	人口密度	人/ $\text{km}^2$
	$X_6$	坡度	(°)		$X_{13}$	夜间灯光指数	
	$X_7$	坡向	(°)		$X_{14}$	土地利用类型	

注:单位空白表示该因子是无量纲数据。

数据预处理后再将因子进行重分类得到离散量数据<sup>[10]</sup>,后期便于进行地理探测。根据自然断点法<sup>[24]</sup>将年均温、年降水量、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和干燥度指数共 4 种气候因子分为 6 类;高程、坡度和坡向 3 种地形因子分别划分为 9 类、6 类和 9 类;将 GDP、人口密度、夜间灯光指数分为 7 类。采用传统的“土壤发生分类”系统,将土壤类型分为 11 类;植被类型、地貌类型和土地利用类型分别划分为 8 类、6 类和 6 类。然后进行重采样,使其与 9 277 m NDVI 数据图层分辨率一致。利用 ArcGIS 10.7 创建渔网工具,在研究区范围内基于 9 277 m $\times$ 9 277 m 网格生成 5 355 个随机采样点,提取空间属性值。

### 1.3 研究方法

1.3.1 线性回归分析 采用一元线性回归模型,逐像元计算黄河中游 1982—2015 年 NDVI 变化趋势。斜率可由公式(1)求得:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)}{n \times (\sum_{i=1}^n i^2) - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $n$  为研究时间序列(本研究  $n=34$ ); $\text{NDVI}_i$  为第  $i$  年黄河中游 NDVI 值, $i$  取值范围为  $(1 \sim n)$ ;slope 为 NDVI 斜率,当  $\text{slope} > 0$  时,NDVI 呈增长趋势; $\text{slope} < 0$  时,NDVI 呈下降趋势;当  $\text{slope} = 0$  时,NDVI 变化不显著。

1.3.2 Mann-Kendall 检验 (M-K 检验) Mann-Kendall 检验是一种非参数检验方法,作为一元线性回归模型的补充,用来检验时间序列趋势的显著性,且能够排除少数异常值的干扰<sup>[25]</sup>。计算公式如下:

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z$  为检验统计量; $\text{var}$  为方差函数; $S$  为统计量; $\text{sgn}$  为符号函数; $n$  为数据集合长度; $\text{NDVI}_i$  和  $\text{NDVI}_j$  为样本时序数据的集合, $i$  取值范围为  $[1-(n-1)]$ , $j$  取值范围为  $(2 \sim n)$ 。本研究采用通过 95% 的置信度检验,当  $Z$  的绝对值大于 1.96 时,表示趋势通过了置信度为 95% 显著性检验。

1.3.3 地理探测器模型 地理探测器是一种基于因子、交互、风险和生态等探测空间异质性及其驱动影响力的统计方法<sup>[10]</sup>。本研究利用该工具分析黄河中游 1982 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年共 7 期 NDVI 变化的驱动因子单个及其交互关系。

(1) 分异及因子探测。首先探测因变量 NDVI 的空间分质性,再进一步分析自变量  $X$  对 NDVI 的解释力,用  $q$  值度量<sup>[26]</sup>,表达式为:

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

式中: $q$  取值范围为  $[0, 1]$ ;  $L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分类; $h=1, 2, \dots$ ;  $N_h$  和  $N$  分别为  $h$  层和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为  $h$  层和全区  $Y$  的方差。

(2) 交互作用探测。通过比较  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 、 $q(X_1 \cap X_2)$  三者之间的关系确定两因子间交互作用类型,详细分类参考王劲峰等<sup>[10]</sup>。

(3) 风险探测。本研究旨在确定 NDVI 驱动因子的适宜范围或类型,用  $t$  统计量评价不同子区域属性均值是否有显著差异,公式如下:

$$t_{\overline{Y}_{h=1} - \overline{Y}_{h=2}} = \frac{\overline{Y}_{h=1} - \overline{Y}_{h=2}}{\sqrt{\frac{\text{var}(\overline{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{var}(\overline{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}}} \quad (7)$$

式中: $n_h$  为子区域  $h$  内的样本数目; $Y_h$  为子区域  $h$  内的 NDVI 值。

(4) 生态探测。衡量两因子对 NDVI 变化的影响是否存在显著差异,F 统计量计算如下:

$$F=\frac{N_{X_1}(N_{X_2}-1)SSW_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1}-1)SSW_{X_2}}$$

(8)

$$SSW_{X_1}=\sum_{h=1}^{L_1}N_h\sigma_h^2,SSW_{X_2}=\sum_{h=1}^{L_2}N_h\sigma_h^2$$

(9)

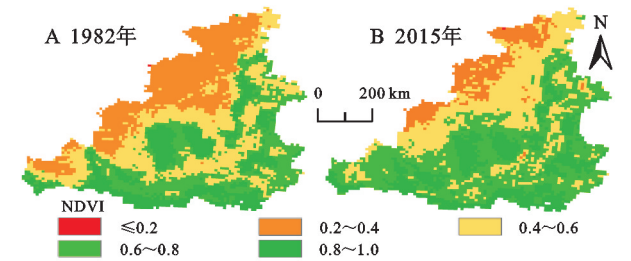
式中: $L_1,L_2$  分别为二者的层数; $SSW_{X_1},SSW_{X_2}$  分别为二者的分层、层内方差之和; $N_{X_1},N_{X_2}$  分别为  $X_1,X_2$  的样本数目。

2 结果与分析

2.1 黄河中游 NDVI 时空变化特征

由图 1 可知,黄河中游 NDVI 总体呈现东南高西北低空间分布特征。其中,中高和高植被覆盖度主要分布于陕西、山西、河南三省大部分地区和甘肃省南部;中植被覆盖度集中于陕西省中部;中低植被覆盖度多位于流域西北部,地处研究区内蒙古自治区、陕西省和甘肃省北部;低植被覆盖度零星分布于流域北部。黄河中游西南部主要为山脉,植被以耕地和草地为主,从 1982 年中低植被覆盖度分布演变为 2015 年的中高植被覆盖度,有较高 NDVI 值;陕西省中部大面积的中度植被覆盖转变为中高植被覆盖,陕西省北

部由中低覆盖演变为中植被覆盖,植被恢复较好;流域北部地处黄土高原受降水限制,外加气温高,植被遭到破坏,虽在生态恢复政策下人为干预植被得到有效恢复,但仍处于中低和中植被覆盖度。

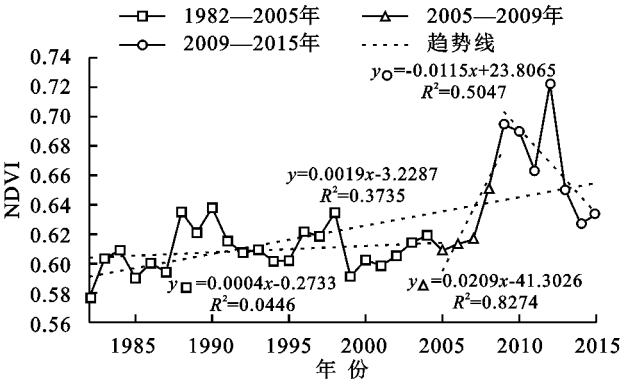


注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4309 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 NDVI 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of NDVI

1982—2015 年 NDVI 范围为 0.578~0.722,NDVI 在研究期间呈波动增长趋势,增幅为 0.019/10 a(图 2),说明植被覆盖度总体较好。与程昌武<sup>[27]</sup> 利用 Theil-Sen Median 方法对黄河流域 1982—2015 年生长季 NDVI 呈现的 0.001 4/a 增长趋势研究结果较为一致。根据 NDVI 年际变化 M-K 突变检验结果,可将 NDVI 变化分为 3 个阶段:1982—2005 年,NDVI 以 0.004/10 a 速率呈缓慢上升趋势;2005—2009 年,NDVI 呈突变性显著上升趋势;2009—2015 年,NDVI 以 0.011 5/a 速率呈显著下降趋势。



注:统计显著性水平为 0.05。

图 2 1982—2015 年最大 NDVI 变化趋势

Fig. 2 Maximum NDVI change trend from 1982 to 2015

2.2 NDVI 时空变化趋势

根据 slope 和 Z 值将 NDVI 变化趋势分为 5 级(图 3),由趋势结果知,1982—2015 年,黄河中游植被覆盖度整体趋势变化向好。黄河中游 NDVI 变化趋势为西部和北部增加,中部、南部和东部减少。由表 2 知,植被覆盖显著增加区域主要分布在陕西北部、甘肃、内蒙古和山西境内,总面积 169 575.80 km<sup>2</sup>,占总面积的 49.20%;植被增加趋势与该区域持续退耕还林、人工造林政策有关,大面积的栽培植被能够增

加水土保持率、缓解水土流失,改善黄河生态环境。植被覆盖轻微改善区域零散分布在整个区域。植被覆盖退化区域主要集中在山西、陕西南部和中部,总面积 100 472.72 km<sup>2</sup>,占总面积的 29.14%。另外,退化区域处于中高以上植被覆盖区域,随着流域南部集聚人群的城镇化扩张,植被遭到破坏而呈现退化状态。

2.3 因子探测分析

根据黄河中游 2015 年因子探测器结果可知,各因子对黄河中游 NDVI 影响力大小如下:年降水量



(0.496) > 植被类型(0.374) > 地貌类型(0.343) > 土地利用类型(0.217) > 土壤类型(0.216) >  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温(0.115) > 坡度(0.093) > 年均温(0.087) > 人口密度(0.048) > 高程(0.037) > 干燥度指数(0.032) > 夜间灯光指数(0.023) > 坡向(0.005) > GDP(0.004)。

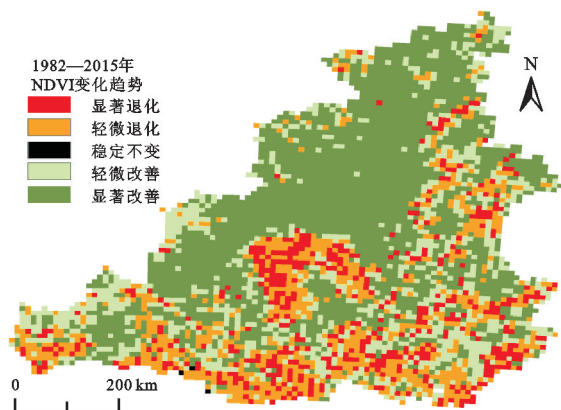


图 3 1982—2015 年 NDVI 变化趋势分布

Fig. 3 NDVI change trend distribution from 1982 to 2015

年降水量  $q$  值最大,解释力高达 49.6%,其影响力远超其他因子,成为黄河中游 NDVI 变化主导驱动因子。其次是植被类型、地貌类型,解释力均大于

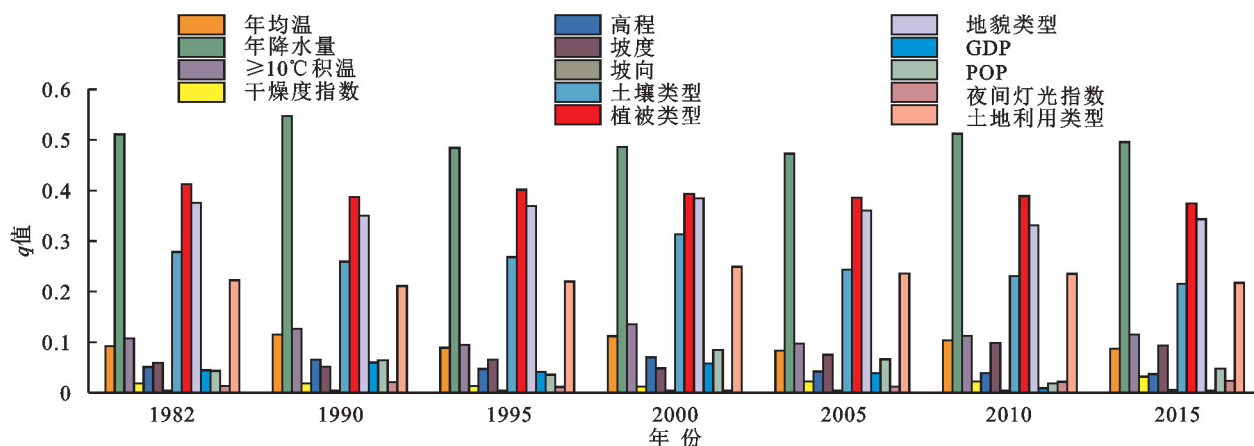


图 4 黄河中游 7 期因子探测结果

Fig. 4 Detection results of seven factors in the midstream of Yellow River

## 2.4 生态探测分析

根据生态探测结果(表 3)可知,年降水量( $X_2$ )与年均温( $X_1$ )对 NDVI 空间分布存在显著差异,与其他因子无显著差异;土壤类型( $X_8$ )、植被类型( $X_9$ )和地貌类型( $X_{10}$ )与年均温( $X_1$ )、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温( $X_3$ )、干燥度指数( $X_4$ )和地形因子[高程( $X_5$ )、坡度( $X_6$ )、坡向( $X_7$ )]对 NDVI 影响存在显著差异,与 4 个人为因子无显著差异,且土壤类型( $X_8$ )与植被类型( $X_9$ )和地貌类型( $X_{10}$ )对 NDVI 空间分布存在显著差异;人口密度与坡向和 GDP 对 NDVI 影响存在显著差异。因子探测结果(图 4)表明,年降水量是黄河中游 NDVI 变化的主要驱动因子,生态探测结果进一步证

明,年降水量对黄河中游 NDVI 的影响大于其他因子。坡向和 GDP 对 NDVI 的影响均不显著,说明在该研究区其对植被的影响不大。

表 2 1982—2015 年 NDVI 变化趋势

Table 2 NDVI change trend from 1982 to 2015

斜率	Z 值	NDVI 趋势	面积/ $\text{m}^2$	百分比/%
$\leq -0.0005$	$< -1.96$	显著退化	63712.58	18.48
$\leq -0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微退化	36760.14	10.66
$-0.0005 \sim 0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	稳定不变	224.60	0.07
$\geq 0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微改善	74418.69	21.59
$\geq 0.0005$	$\geq 1.96$	显著改善	169575.80	49.20

明,年降水量对黄河中游 NDVI 的影响大于其他因子。坡向和 GDP 对 NDVI 的影响均不显著,说明在该研究区其对植被的影响不大。

明,年降水量对黄河中游 NDVI 的影响大于其他因子。坡向和 GDP 对 NDVI 的影响均不显著,说明在该研究区其对植被的影响不大。

## 2.5 交互探测分析

单因子无法全面解释 NDVI 空间变化,需要考虑多种自然和人为因素的协同作用。交互探测结果(表 4)表明,任意两因子的交互作用可增强单因子对 NDVI 的影响。其中,年降水量与其他因子交互后进一步增强降水量的作用,解释力达到 50% 以上。这些高于单因素解释力的年降水量  $q$  值与植被类型、地貌类型和土地利用类型高度互动,高达 61%,说明年降水量是影响黄河中游 NDVI 变化的主要驱动因子,且年降水量与其他因子的交互作用进一步增强对

NDVI 的影响。其次,植被类型和地貌类型与其他因子的交互作用远超单因子解释力。另外,年降水量与年均温交互作用的  $q$  值也达到 60%,这表明水热条

件的良好耦合是植被生长的关键要素。虽然坡向和 GDP 对 NDVI 的影响较小,但它们与其他因子的交互作用极大地增强了对 NDVI 的解释能力。

表 3 生态探测结果

Table 3 Ecological detection results

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
$X_1$														
$X_2$	Y													
$X_3$	N	N												
$X_4$	N	N	N											
$X_5$	N	N	N	N										
$X_6$	N	N	N	Y	Y									
$X_7$	N	N	N	N	N	N								
$X_8$	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y							
$X_9$	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y						
$X_{10}$	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N					
$X_{11}$	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N				
$X_{12}$	N	N	N	N	N	N	Y	N	N	N	Y			
$X_{13}$	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N		
$X_{14}$	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	Y	Y	Y	

注:“Y”表示两因子对 NDVI 变化的影响存在显著差异;“N”表示无显著差异(置信水平为 95%)。

表 4 交互探测结果

Table 4 Interaction detection results

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
$X_1$	0.087													
$X_2$	0.600↑↑	0.496												
$X_3$	0.145↑	0.581↑	0.115											
$X_4$	0.111↑	0.501↑	0.133↑	0.032										
$X_5$	0.151↑↑	0.576↑↑	0.126↑	0.075↑↑	0.037									
$X_6$	0.210↑↑	0.541↑	0.231↑↑	0.118↑	0.171↑↑	0.093								
$X_7$	0.098↑↑	0.505↑↑	0.124↑↑	0.037↑	0.051↑↑	0.105↑↑	0.005							
$X_8$	0.297↑	0.563↑	0.299↑	0.249↑↑	0.268↑↑	0.290↑	0.222↑↑	0.216						
$X_9$	0.438↑	0.620↑	0.450↑	0.397↑	0.419↑↑	0.413↑	0.382↑↑	0.462↑	0.374					
$X_{10}$	0.440↑↑	0.651↑	0.441↑	0.379↑↑	0.406↑↑	0.379↑	0.351↑↑	0.420↑	0.488↑	0.343				
$X_{11}$	0.110↑↑	0.516↑↑	0.131↑↑	0.037↑↑	0.057↑↑	0.109↑↑	0.015↑↑	0.239↑↑	0.397↑↑	0.357↑↑				
$X_{12}$	0.135↑↑	0.534↑	0.154↑	0.086↑↑	0.090↑↑	0.175↑↑	0.056↑↑	0.264↑↑	0.409↑	0.392↑↑	0.094↑↑	0.048		
$X_{13}$	0.115↑↑	0.529↑↑	0.140↑↑	0.053↑	0.070↑↑	0.113↑	0.032↑↑	0.246↑↑	0.396↑	0.359↑	0.031↑↑	0.078↑↑	0.023	
$X_{14}$	0.297↑	0.611↑	0.323↑	0.252↑↑	0.276↑↑	0.292↑	0.225↑↑	0.362↑	0.442↑	0.423↑	0.233↑↑	0.277↑↑	0.234↑	0.217

注:“↑”和“↑↑”分别表示两个因子的双变量增强和非线性增强。

2.6 风险探测分析

由表 5 结果知,在自然因素中,年均温  $-5\sim 1^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在  $708\sim 950\text{ mm}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温在  $0\sim 1\,648^{\circ}\text{C}$ ,干燥度指数在  $1\sim 2$ ,NDVI 均值最高,可达到 0.82 以上,说明植被在良好的水热条件环境中植被覆盖最高。高程在  $2\,500\text{ m}$  以上,坡度  $>35^{\circ}$ ,坡向在  $0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$  和  $337.5^{\circ}\sim 360^{\circ}$ (北坡)时植被覆盖度最高;半淋溶土和淋溶土广泛分布于山地区域,与植被类型中的针叶林、阔叶林,土地利用的林地,地貌类型的中起伏、大起伏山地相对应,说明在山高坡陡的

林区最适合植被自然生长。在人为因素中,GDP 在  $3\,510\sim 10\,591\text{ 万元}/\text{km}^2$ ,人口密度  $190.4\sim 844.4\text{ 人}/\text{km}^2$ ,夜间灯光指数  $0\sim 1.2$  范围内,NDVI 均值最高。其中,夜间灯光指数为  $0\sim 1.2$  的区域占研究区总面积的 93.7%,该区域夜间灯光指数最小,代表该区域人口较分散,植被在人为干扰程度最弱的区域植被覆盖度最高。总体而言,由风险探测可知,气候、植被和地貌因子是影响黄河中游 NDVI 的主要因素,而人类活动通过改变土地利用类型的方式影响植被的分布<sup>[23]</sup>。

表 5 因子的适宜范围或类型  
Table 5 Suitable range or type of factors

因子	适宜范围或类型	NDVI 值
年均温	-5~1℃	0.824
年降水量	708~950 mm	0.845
≥10℃ 积温	0~1648℃	0.836
干燥度指数	1~2	0.873
高程	>2500 m	0.829
坡度	>35°	0.768
坡向	0°~22.5°, 337.5°~360°(北坡)	0.659
土壤类型	半淋溶土、淋溶土	0.893
植被类型	针叶林、阔叶林	0.820, 0.852
地貌类型	中、大起伏山地	0.823, 0.898
GDP	3510~10591 万元/km <sup>2</sup>	0.677
人口密度	190.4~844.4 人/km <sup>2</sup>	0.707
夜间灯光指数	0~1.2	0.656
土地利用类型	林地	0.801

### 3 讨论

1982—2015 年黄河中游 NDVI 呈上升趋势,这一结果与贺振等<sup>[28]</sup>对黄河流域的研究一致。从空间分布上看,NDVI 年最大合成值和变化趋势具有空间分异性,这可能是自然和人为因素共同作用的结果。总体上,黄河中游 NDVI 值高的区域主要集中在南部和东南部,此区域林地生态系统得到显著改善;但由于草地生态环境状况恶化和陕西省西北部地处裸地生态系统,黄河中游西北部的 NDVI 值较低<sup>[29]</sup>。植被覆盖度低的地区位于研究区北部和西北部,可能是由于这些地区处于农牧交错带,土地利用类型为耕地、草地、未利用地。趋势分析发现,34 a 来植被显著退化和中度退化的区域主要分布在陕南、陕中和山西。与 He 等<sup>[30]</sup>对 2001—2020 年黄土高原气候变化和人类活动对 NDVI 的影响结果一致。

气候变化及人类活动共同作用是植被覆盖变化的原因<sup>[31-32]</sup>,气候因素占据主导地位,其中降水是重要的自然因素。研究表明,黄河中游 NDVI 变化的驱动因子存在显著性区域差异,但年降水量是影响区域植被主要驱动因子。黄河中游年降水量和年均温由东南向西北递减,且降水较气温上升趋势更加明显,满足植被生长所需的水分和光照条件,从而促进植被生长。相关研究<sup>[33]</sup>表明,气候的湿润程度在干旱半干旱地区对 NDVI 的变化有较大影响,湿润程度越高,NDVI 值越大。不同土壤类型对雨水再利用效率不同<sup>[23]</sup>,在以降水为主导的黄河中游区域,淋溶土与漠土和干旱土的 NDVI 值存在显著差异。地形地貌影响植被分布<sup>[34]</sup>,中、大起伏山地的 NDVI 值较高。本研究前五影响因子与 He 等<sup>[30]</sup>研究结果一致。

与自然因素相比,人为因素对黄河中游 NDVI 影响较小,人口密度、高程、干燥度指数、夜间灯光指数、坡向、GDP 对 NDVI 变化的影响力不大,但它们的交互作用可以增强解释力,与付含培等<sup>[23]</sup>研究结果类似。地理过程的复杂性表明,多因素的交互作用影响植被的变化<sup>[35]</sup>。结果表明,任意两个因子对 NDVI 的交互影响大于单一因子的交互影响,各驱动因子对 NDVI 的影响主要表现为双因子和非线性增强效应。其他类似研究表明,所有因素之间的交互作用对 NDVI 的影响显著高于单一因素<sup>[36]</sup>。其中,年降水量与地貌类型、植被类型的因子解释力最大,且三者交互作用对 NDVI 影响也最大,可能降水量的变化导致了不同地貌类型和植被类型中植被的差异。两者的协同作用一定程度上促进植被恢复,将自然因素与人为因素综合,定量研究各种因素对植被的影响,对于黄河中游地区的生态保护和可持续发展具有重要意义。

然而,本研究存在一些局限性,为确保研究时间序列完整性和数据一致性,采用空间分辨率为(1/12)°的 AVHRR GIMMS 数据集。NDVI 与其他数据相比分辨率较低,重采样后仍会对结果产生一定影响。对于植被恢复趋势是否具有可持续性,生态工程等人类活动与植被恢复双方的反馈作用,仍需进一步研究<sup>[37]</sup>。

### 4 结论

(1) 黄河中游 NDVI 按照东南高西北低趋势分布;1982—2015 年 NDVI 总体以 0.019/10 a 速率呈增长趋势;植被覆盖改善面积高达 70.79%,显著改善面积达到 49.2%。

(2) 年降水量解释力高达 49.6%,是影响黄河中游 NDVI 变化主要驱动因子;植被类型、地貌类型、土地利用类型和土壤类型的解释力均大于 21%;而其他因子解释力较小。与人为因素相比,自然因素对黄河中游 NDVI 影响更为显著。

(3) 因子交互结果为双因子增强或非线性增强,年降水量与植被类型、地貌类型和土地利用类型高度互动, $q$  值高达 61%,是影响黄河中游 NDVI 变化的主要驱动因子。

#### 参考文献 (References):

- [1] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001—2013 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 143-160.
- [2] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响 [J]. 地理学报, 2018, 73(3): 395-404.
- Zhao J, Du Z Q, Wu Z T, et al. Seasonal variations of

- day and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(3):395-404.
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*, 2003,421(6918):37-42.
- [4] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005,20(9):503-510.
- [5] Zhao L, Dai A G, Dong B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982—2013[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018,249:198-209.
- [6] 苗正红,刘志明,王宗明,等.基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J].*遥感技术与应用*,2010,25(3):387-393.
- Miao Z H, Liu Z M, Wang Z M, et al. Dynamic monitoring of vegetation fraction change in Jilin Province based on MODIS NDVI[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010,25(3):387-393.
- [7] Camacho-De Coca F, García-Haro F J, Gilabert M A, et al. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004,25(17):3451-3476.
- [8] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.黄河源植被覆盖度变化及空间分布自然驱动力分析[J].*生态环境学报*,2022,31(3):429-439.
- Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, et al. Analysis of vegetation coverage changes and natural driving forces of spatial distribution in the source region of the Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(3):429-439.
- [9] 聂桐,董国涛,蒋晓辉,等.榆林地区植被时空分异特征及其影响因素研究[J].*生态环境学报*,2022,31(1):26-36.
- Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal variations and influencing factors of vegetation in Yulin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(1):26-36.
- [10] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [11] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].*生态学报*,2018,38(24):8799-8812.
- Xiao J Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the Karst critical zone of South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(24):8799-8812.
- [12] Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, et al. Quantification of natural and anthropogenic driving forces of vegetation changes in the Three-River Headwater region during 1982—2015 based on Geographical Detector Model[J]. *Remote Sensing*, 2021,13(20):4175.
- [13] Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *Remote Sensing*, 2021,13(4):613.
- [14] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力.基于地理探测器模型的中亚NDVI时空变化特征及其驱动因子分析[J].*国土资源遥感*,2019,31(4):32-40.
- Wang Wei, Alim Samat, Jilili Abuduwalli. Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019,31(4):32-40.
- [15] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近15年植被NPP时空演变特征及自然与人为因子解析[J].*生态学报*,2019,39(22):8504-8515.
- Li J K, Yang Y T, Zhang H R, et al. Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling-Daba Mountains in the past 15 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(22):8504-8515.
- [16] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].*生态学报*,2019,39(5):1583-1594.
- Zhu C, Peng W F, Zhang L F, et al. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(5):1583-1594.
- [17] 裴志林,杨勤科,王春梅,等.黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J].*干旱区研究*,2019,36(3):546-555.
- Pei Z L, Yang Q K, Wang C M, et al. Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2019,36(3):546-555.
- [18] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J].*地理学报*,2019,74(9):1758-1776.
- Peng W F, Zhang D M, Luo Y M, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(9):1758-1776.
- [19] 贺振,贺俊平.基于SPOT-VGT的黄河流域植被覆盖时空演变[J].*生态环境学报*,2012,21(10):1655-1659.
- He Z, He J P. Spatio-temporal variation of vegetation cover based on SPOT-VGT in Yellow River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012,21(10):1655-1659.
- [20] 高海东,庞国伟,李占斌,等.黄土高原植被恢复潜力研究[J].*地理学报*,2017,72(5):863-874.



- Gao H D, Pang G W, Li Z B, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 863-874.
- [21] 贾培培, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河河潼区间 NDVI 变化及其对气候的响应[J]. *人民黄河*, 2019, 41(4): 31-36, 41.
- Jia P P, Xue H Z, Dong G T, et al. Variations of NDVI and its response to climate in Hekouzhen-Tongguan reach of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2019, 41(4): 31-36, 41.
- [22] 高海东, 吴翌. 黄河头道拐: 潼关区间植被恢复及其对水沙过程影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1206-1217.
- Gao H D, Wu Z. Vegetation restoration and its effect on runoff and sediment processes in the Toudaoguai-Tongguan section of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1206-1217.
- [23] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 145-153, 162.
- Fu H P, Wang R H, Wang X J. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the Yellow River Basin during 1999—2018[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 145-153, 162.
- [24] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 161-173.
- Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 161-173.
- [25] Liu Z Z, Wang H, Li N, et al. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2198.
- [26] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [27] 程昌武. 黄河流域 1982—2015 年植被变化及其影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- Cheng C W. Vegetation Dynamics and Its Influential Factors in the Yellow River Basin During 1982 to 2015 [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [28] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 179-185.
- He Z, He J P. Remote Sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982—2013[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 179-185.
- [29] 李晴晴, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4041-4054.
- Li Q Q, Cao Y P, Miao S L. Spatio-temporal variation in vegetation coverage and its response to climate factors in the Yellow River Basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4041-4054.
- [30] He L, Guo J B, Jiang Q, et al. How did the Chinese Loess Plateau turn green from 2001 to 2020: An explanation using satellite data[J]. *Catena*, 2022, 214: 106246.
- [31] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Impact of climate change and human activities on vegetation cover in the Loess Plateau[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [32] Tong S Q, Zhang J Q, Ha S, et al. Dynamics of fractional vegetation coverage and its relationship with climate and human activities in Inner Mongolia, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 776.
- [33] Zhu Z C, Bi J, Pan Y Z, et al. Global data sets of vegetation Leaf Area Index (LAI) 3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) 3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 927-948.
- [34] He Y H Z, Wang L, Niu Z, et al. Vegetation recovery and recent degradation in different karst landforms of southwest China over the past two decades using GEE satellite archives [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 68: 101555.
- [35] 何宏昌, 马炳鑫, 靖娟利, 等. 近 20 年西南喀斯特地区植被 NPP 时空变化及自然因素地理探测[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 172-178, 188.
- He H C, Ma B X, Jing J L, et al. Spatiotemporal changes of NPP and Natural factors in the Southwestern karst areas from 2000 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 172-178, 188.
- [36] Zheng K Y, Tan L S, Sun Y W, et al. Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: Evidence from typical areas in China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107648.
- [37] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205-212.
- Sun G P, Liu X F, Wang X H, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001—2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 205-212.