

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.037.

铃会冉, 翟家齐, 马梦阳, 等. 海河流域生长季植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 309-317.

QIAN Huiran, ZHAI Jiaqi, MA Mengyang, et al. Temporal and Spatial Variation of Vegetation Coverage and Its Driving Forces During the Growing Season in Haihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 309-317.

# 海河流域生长季植被覆盖度时空变化及驱动力分析

铃会冉<sup>1,2</sup>, 翟家齐<sup>2</sup>, 马梦阳<sup>2</sup>, 赵勇<sup>2</sup>, 凌敏华<sup>1</sup>, 王庆明<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001;

2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** [目的] 了解海河流域生长季植被覆盖度(FVC)的时空变化及其驱动力, 以为海河流域的生态保护、建设与可持续发展提供参考。[方法] 基于 MODIS NDVI 遥感数据和同时期的 18 种影响因子, 采用趋势分析法和 M-K 显著性检验分析了 2001—2019 年海河流域生长季植被覆盖度的时空变化特征; 并利用地理探测器探讨了其空间分异特征与驱动力。[结果] 2001—2019 年海河流域生长季植被覆盖度总体呈显著上升趋势, 线性倾向率为 0.063/10 a, 2011 年之后增速减缓。空间分布差异明显, 植被覆盖度总体较高, 仅环渤海湾地带和一些城市区域植被覆盖率较低。改善区域的面积远大于退化面积, 其中改善部分以极显著改善为主, 占流域总面积的 60.42%。海河流域生长季植被覆盖度的空间分布差异主要由林地比例和林草混合地比例所决定, 解释力均在 30% 以上。对海河流域生长季植被覆盖度交互作用解释力最强的是林草混合地比例和农田比例。[结论] 海河流域植被覆盖度总体显著上升, 空间分布差异主要驱动力为林地比例和林草混合地比例。

**关键词:** 植被覆盖度(FVC); 生长季; 地理探测器; 海河流域

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0309-09

## Temporal and Spatial Variation of Vegetation Coverage and Its Driving Forces During the Growing Season in Haihe River Basin

QIAN Huiran<sup>1,2</sup>, ZHAI Jiaqi<sup>2</sup>, MA Mengyang<sup>2</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, LING Minhua<sup>1</sup>, WANG Qingming<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University,

Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water

Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide reference for ecological protection, construction and sustainable development of Haihe River Basin, the temporal and spatial changes of vegetation coverage (FVC) in growing season and its driving forces were investigated. [Methods] Based on MODIS NDVI remote sensing data and 18 influencing factors of the same period, trend analysis and M-K significance test were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of vegetation coverage during the growing season of Haihe River Basin from 2001 to 2019. The spatial differentiation characteristics and driving forces are discussed by means of geographic detector. [Results] During the growing season of Haihe River Basin from 2001 to 2019, the vegetation coverage showed a significant upward trend, with a linear tendency rate of 0.063/decade, and the growth rate slowed down after 2011. The vegetation coverage was relatively high in the Bohai Bay area and some urban areas. The area of improvement area was much larger than that of degradation area, and the

收稿日期: 2022-06-07

修回日期: 2022-07-06

资助项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自由探索课题(SKL2022TS01); 国家重点研发计划(2021YFC3200200); 国家自然科学基金(52025093, 51979284)

第一作者: 铃会冉(1997—), 女, 河南清丰县人, 硕士, 研究方向为水文水资源研究。E-mail: qianhuiran123@163.com

通信作者: 翟家齐(1984—), 男, 河南信阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事平原区水循环模拟、农业节水潜力评估、区域干旱评估研究。E-mail: jiaqizhai@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

improvement part was dominated by extremely significant improvement, accounting for 60.42% of the total basin area. The spatial variation of vegetation coverage in Haihe River Basin during the growing season was mainly determined by the proportion of forest land and the proportion of mixed forest-grass land, and the explanatory power was more than 30%. The strongest explanation for the interaction of vegetation coverage in Haihe River Basin during the growing season was the ratio of mixed forest and grass land and the ratio of farmland. [Conclusion] Overall vegetation coverage increased significantly in Haihe River Basin, and the main driving force was the proportion of forest land and the proportion of mixed forest and grass land.

**Keywords:** fractional vegetation coverage (FVC); growing season; geographical detector; Haihe River Basin

植被作为陆地生态系统中一个重要的组成部分,在陆地生态系统物质循环、能量流动、信息传递等方面起到了重要的枢纽作用<sup>[1]</sup>,既能促进地球生态系统平衡、水循环、气候变化<sup>[2-3]</sup>,还可以用来监测生态环境变化<sup>[4]</sup>。植被覆盖度(fractional vegetation coverage, FVC)指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占观测区总面积的百分比<sup>[5]</sup>,其变化能够直接或间接改变陆地地表下垫面属性,进而对气候调节、水土保持以及生态系统的稳定性等产生影响<sup>[6]</sup>。因此,开展流域尺度植被覆盖变化研究以及揭示其驱动力机制,有利于深刻认识陆地生态系统内部的相互作用,对进一步掌握生态系统恢复成效具有极大意义<sup>[7]</sup>。

目前,国内外学者深入研究了不同区域尺度的植被覆盖时空变化规律,主要集中于海河流域、黄土高原地区等植被变化显著的区域<sup>[8]</sup>,多年来一直是生态环境等领域研究的热点。对于植被覆盖度时空变化驱动力的研究主要运用多元线性回归分析、相关性分析等传统数学统计方法。为弥补仅把气温、降水等气候因子作为驱动因素来进行归因分析的片面性,国内外学者先后提出了残差趋势法<sup>[9]</sup>、回归模型法<sup>[10]</sup>、基于生物物理过程的模型方法<sup>[11]</sup>和地理探测器法<sup>[12]</sup>等,来定量分解气温、降水等自然因素和人类活动强度等人为因素对植被变化的相对贡献。其中,地理探测器法以统计学原理的空间方差分析为基础,对变量无限性假设,不仅能够检验气候、地形、人类活动、土壤等多种因子是否是形成植被覆盖时空格局的原因,还可以量化不同因子之间的交互作用对植被覆盖空间分布及其变化的影响程度,并且对数据要求低、运算速度较快且精确度高,能够极大程度提高归因分析的全面性,被广泛应用于植被 NDVI 驱动因子的探测中<sup>[13-19]</sup>。

海河流域不仅是重要的工农业生产基地,还是我国的政治文化中心,其战略地位十分重要。近年来由于气候变化以及人类活动加强等原因,导致其自然灾害频发,生态系统十分脆弱<sup>[20]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来,持续大规模封山育林育草、退耕还林还草、坡改

梯、淤地坝等水土保持措施,使得海河流域的植被覆盖度大幅度提升。目前,已有学者对该流域植被变化进行了相关研究<sup>[21-25]</sup>,并且,王永财<sup>[26]</sup>和陈福军<sup>[27]</sup>等分别利用 1998—2011 年的 SPOT/NDVI 数据和 2000—2016 年 MODIS/NDVI 数据对海河流域植被变化及其与气候因子的相关性进行了研究,对海河流域植被变化特征及其与气候的关系有了一定的认识,但对于人类活动、地形和土壤性质对植被覆盖的空间分布差异的影响等综合问题缺乏进一步解析。因此,本文利用 2001—2019 年 MODIS/NDVI 数据和同时期 18 种因子,分析海河流域生长季(4—10 月)植被覆盖度的时空变化特征,并利用地理探测器探讨其空间分异特征与驱动力,以期对海河流域的生态保护、建设与可持续发展提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区概况

海河流域位于 112°—120°E, 35°—43°N, 西以山西高原与黄河区交界,北以蒙古高原与内陆河交界,南界黄河,东临渤海。流域总面积  $3.182 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全国总面积的 3.3%, 属于半湿润半干旱的温带东亚季风气候区。地势总体上为西北高东南低,流域年平均气温 1.5~14℃,年平均相对湿度 50%~70%;年平均降水量 539 mm,属半湿润半干旱地带;流域由海河、滦河、徒骇马颊河三大水系、七大河系和十条骨干河流组成。其中,海河水系是主要水系,由北部的蓟运河、潮白河、北运河、永定河和南部的大清河、子牙河、漳卫河组成;滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河;徒骇马颊河水系位于流域最南部,为单独入海的平原河道。土壤类型以褐土和棕壤为主。土地利用类型见图 1。

### 1.2 数据来源及预处理

植被 NDVI 数据为美国国家航空航天局(NASA)提供的 MODIS MOD13A3 产品,时间分辨率为月,空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。选取的数据年份范围为 2001—2019 年,利用 ArcGIS 10.8 对其进行镶嵌、格

式和定义投影等操作,本研究为最大程度消除云、雾、大气以及非生长季的影响,选取植被生长最为旺盛的生长季(4—10 月)作为研究时段。利用最大值合成法合成年 NDVI 数据;计算植被覆盖度所需要的 LAI 数据来自于中分辨率成像光谱仪 MODIS 的 500 m 分辨率 8 d 合成产品(MOD15A2H)。

研究共选定的 18 种生长季植被覆盖度空间分布变化潜在影响因子,涵盖气候、地形、人类活动、土壤性质 4 个方面,数据类型、来源及简要说明见表 1。为使各因子与 NDVI 数据具有相同的投影坐标并保持像元大小一致,对其进行裁剪和重采样等预处理。按照 5 km×5 km 格网,利用 ArcGIS 10.8 中的渔网工具生成 12 818 个采样点,并获取采样点对应地理位置的气候、人类活动、土壤和地形数据。为有效地避免人为因素的干扰,利用 ArcGIS 中的自然间断法将各因子分为 10 类。

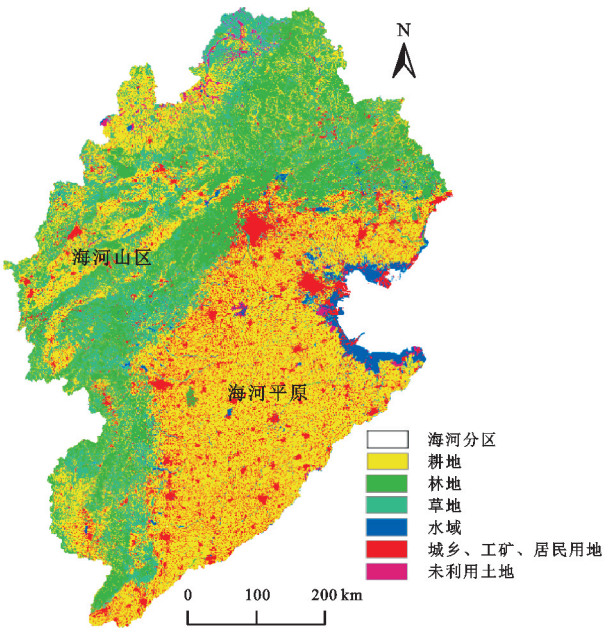


图 1 海河流域 2018 年土地利用类型

表 1 影响因子数据来源及处理

因子类型	因子	符号	单位	数据来源及处理
气候	年均降水	PRE	mm	中国气象数据网( <a href="http://data.cma.cn/data/">http://data.cma.cn/data/</a> )
	年均温	T	℃	
	年潜在蒸散发	PE	mm/a	
人类活动	GDP	GDP	万元/km <sup>2</sup>	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	人口密度	POP	人/km <sup>2</sup>	
	林地比例	FO	%	美国国家航空航天局(NASA)提供的 2001—2019 年国际地圈-生物圈计划(IGBP)分类、空间分辨率为 500 m 的 MODIS 土地覆盖类型产品(MCD12Q1),计算百分比
	灌丛比例	BU	%	
	农田比例	FA	%	
	草地比例	GA	%	
	林草混合地比例	SA	%	
	城镇比例	UB	%	中国科学院资源环境科学与数据中( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
地形	DEM	DEM	m	
	坡度	Slope	(°)	
土壤性质	黏土比例	Clay	%	联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界和谐土壤数据库(Harmonized World Soil Database)(HWSD)
	沙土比例	Sand	%	
	壤土比例	Silt	%	
	有机碳含量	OC	%	
	碎石含量	Gravel	%	

1.3 研究方法

1.3.1 像元二分模型 采用改进像元二分模型<sup>[28]</sup>估算海河流域生长季的植被覆盖度。假设 NDVI 只有植被和土壤两部分组成,

$$NDVI=M \cdot NDVI_v-NDVI_s$$
 (1)

$$\begin{cases} M=\frac{NDVI-NDVI_s}{NDVI_v-NDVI_s} & LAI>3 \\ M=\frac{NDVI-NDVI_s}{NDVI_v-NDVI_s}^2 & LAI\leqslant3 \end{cases}$$
 (2)

式中:NDVI<sub>v</sub>为纯植被覆盖部分的 NDVI 值;NDVI<sub>s</sub>为纯土壤覆盖部分的 NDVI 值;M 为植被覆盖度;LAI 为叶面积指数。

根据《土壤侵蚀分级分类标准》(SL190—2007)对计

算得到的生长季植被覆盖度进行分级<sup>[29]</sup>,见表 2。  
1.3.2 线性趋势分析 采用一元线性回归分析法,逐像元分析海河流域生长季 FVC 的变化趋势,计算公式如下:

$$Slope=\frac{\sum_{i=1}^n(i-\bar{l})(NDVI_i-\overline{NDVI})}{\sum_{i=1}^n(i-\bar{l})^2}$$
 (3)

式中:Slope 为生长季 FVC 的斜率。若值为正,表示海河流域生长季 FVC 呈增加趋势;若值为负,则相反;若值为 0,则表示没有变化。*n* 为所研究年份的时间跨度,本文 *n* = 19;*i* 为年份; $\bar{l}$  为平均年份;NDVI<sub>*i*</sub> 为第 *i* 年的 NDVI 值; $\overline{NDVI}$  为年均 NDVI 值。



表2 植被覆盖度等级分类

等级	裸地(Ⅰ)	低覆盖度(Ⅱ)	中低覆盖度(Ⅲ)	中等覆盖度(Ⅳ)	中高覆盖度(Ⅴ)	高覆盖度(Ⅵ)
植被覆盖度	$\leq 0.1$	0.1~0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	0.6~0.75	$\geq 0.75$

采用 Manna-Kendall 检验(M-K 检验)判断趋势的显著性,其优点为能够排除少数异常值对数据的干扰<sup>[30]</sup>。因此,本文将 Manna-Kendall 检验与线性趋势分析相结合,根据趋势显著性检验结果将 Slope 趋势分为以下 5 个等级:极显著退化( $\text{Slope} < 0, p < 0.01$ );显著退化( $\text{Slope} < 0, 0.01 \leq p \leq 0.05$ ),无显著变化( $p > 0.05$ );显著改善( $0 < \text{Slope}, 0.01 \leq p \leq 0.05$ );极显著改善( $0 < \text{Slope}, p < 0.01$ )。

1.3.3 地理探测器 地理探测器<sup>[31]</sup>是通过探测事件空间分层异质性来揭示其背后驱动因子的一种统计学方法,空间分层异质性是指区域总方差大于层内方差之和的现象。该方法的核心思想为:如果某个自变量  $X$  对因变量  $Y$  有重要影响,那么自变量  $X$  与因变量  $Y$  的空间分布就具有一致性。地理探测器共有 4 个模块,分别为:因子探测器、交互作用探测器、风险探测器和生态探测器。本文主要应用地理探测器的因子探测器和交互作用探测器模块。

利用因子探测器量化气候、人类活动、地形和土壤等各因子对海河流域生长季 FVC 的空间分异性的解释程度,其解释力大小用  $q$  值衡量,在生成  $q$  值的同时会对其进行显著性检验,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (4)$$

其中:

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: $h$  为自变量  $X$  的分层; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  内和区域内的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为第  $h$  层的方差和因变量  $Y$  的方差;SSW 为层内方差之和;SST 为区域总方差。 $q$  的取值范围为 0~1。 $q$  值越大表明因变量  $Y$  的空间分层异质性越强,自变量  $X$  对因变量  $Y$  的解释力也越强。根据  $q$  值大小可分析出各因子对海河流域生长季 FVC 影响的大小,能够直观地判断影响生长季 FVC 的主导因子。

利用交互探测器识别不同因子之间的交互作用,即评估两个因子共同对生长季 FVC 的空间分布作用时,其解释力是增强还是减弱,或这些因子对生长季 FVC 空间分布的影响是相互独立的。评估方法是首先分别计算两种影响因素  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的  $q$  值,然后再计算它们交互作用时的  $q$  值,对三者之间的  $q$  值大小进行比较,主要结果为 5 种<sup>[32]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长季 FVC 的时空动态变化

2.1.1 生长季 FVC 年际变化特征 选取每年的生长季 FVC 平均值代表当年植被覆盖状况,制作生长季 FVC 年际变化图,见图 2。2001—2019 年海河流域生长季 FVC 值在 0.30~0.48 波动,多年生长季 FVC 值平均值为 0.41,最大值出现在 2018 年为 0.46,2001 年最小,其值为 0.318,总体呈显著上升趋势,线性倾向率为 0.063/10 a。2001—2010 年,生长季 FVC 整体上呈现明显的上升趋势,达到了多年均值水平,线性倾向率为 0.087/10 a,但在 2006 年和 2010 年出现低谷,原因主要是由于该年降水量偏低。2011 年之后,生长季 FVC 增速减缓,均超过多年均值水平。图 2 表明,海河流域生长季植被覆盖度  $\leq 0.1$  的裸地面积占比由 2001 年 9.85%降低到 2019 年的 3.22%;低覆盖度的面积占比由 2001 年的 30.37%降低到 2019 年的 20.50%;中低植被覆盖度和中等植被覆盖度多年平均面积占比分别为 32.87%,27.39%,是研究区生长季植被覆盖度的两种主要类型;中高覆盖度和高覆盖度呈现显著的增加趋势,分别由 2001 年的 1.38%增加到 2019 年的 17.64%和由 2001 年的 0.00%增加到 2019 年的 7.26%。总体来说,自海河流域实施持续大规模封山育林育草、退耕还林还草、坡改梯、淤地坝等水土保持措施以来,生长季 FVC 一直呈增长趋势,后期出现增速减缓,主要是因为植被自然演替过程中,自然因素起主导作用。

2.1.2 生长季 FVC 空间分布及变化特征 海河流域生长季植被覆盖度空间分布差异明显(图 3A),高覆盖度区域零星分布,主要分布于流域的东北部和彰卫河山区的南部,占流域总面积的 1.27%;中高覆盖度区域主要为高产草地、密林地用地,面积  $3.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的 9.79%,集中分布于流域东北部、太行山一带;中等覆盖度区域主要为中高产草地、林地、农田用地,主要分布于大清河淀西平原、子牙河平原、彰卫河平原以及徒骇马颊河区域,面积为  $9.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的 30.66%;中低覆盖度区域由中产草地、农田和低郁闭度林地组成,在大清河淀东平原、滦河平原和彰卫河山区广泛分布、黑龙港及运东平原,子牙河山区、大清河山区等均有分布,面积为  $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的 33.47%;低覆盖度区域主要分布于永定河山区、滦河山区的西北部,面积  $7.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占流域总面积

的 22.57%；海河流域生长季植被覆盖度小于 0.1 的裸地区域主要为城市工矿、居民用地，面积为  $7.17 \times 10^3 \text{ km}^2$ ，占流域总面积的 2.24%，主要分布于环渤海湾地区以及一些城市中心区域。总体来说生长季 FVC 大于 0.3 的区域面积占流域面积的 75.19%，植被覆盖度总体较高。从图 3B—C 可以看出，2001—2019 年各植被覆盖度等级之间相互转化明显，主要

为裸地、中等、中低植被覆盖度等级转为中等至高覆盖度等级。其中永定河山区的植被覆盖度得到明显改善，植被覆盖度由 2001 年的 0.14，提升到 2019 年的 0.35，说明山丘区人工生态修复及水土保持工程对提升植被覆盖度作用十分显著。综上可知，研究区 19 年间生长季植被覆盖度总体较高，仅环渤海湾地带和一些城市中心区域生长季植被覆盖度较低。

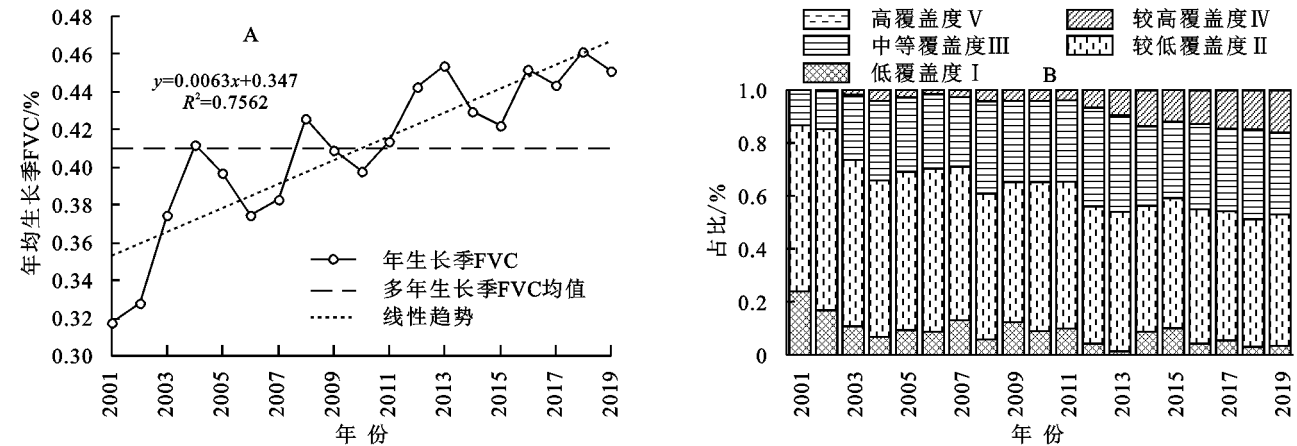


图 2 2001—2019 年海河流域生长季 FVC 年际变化

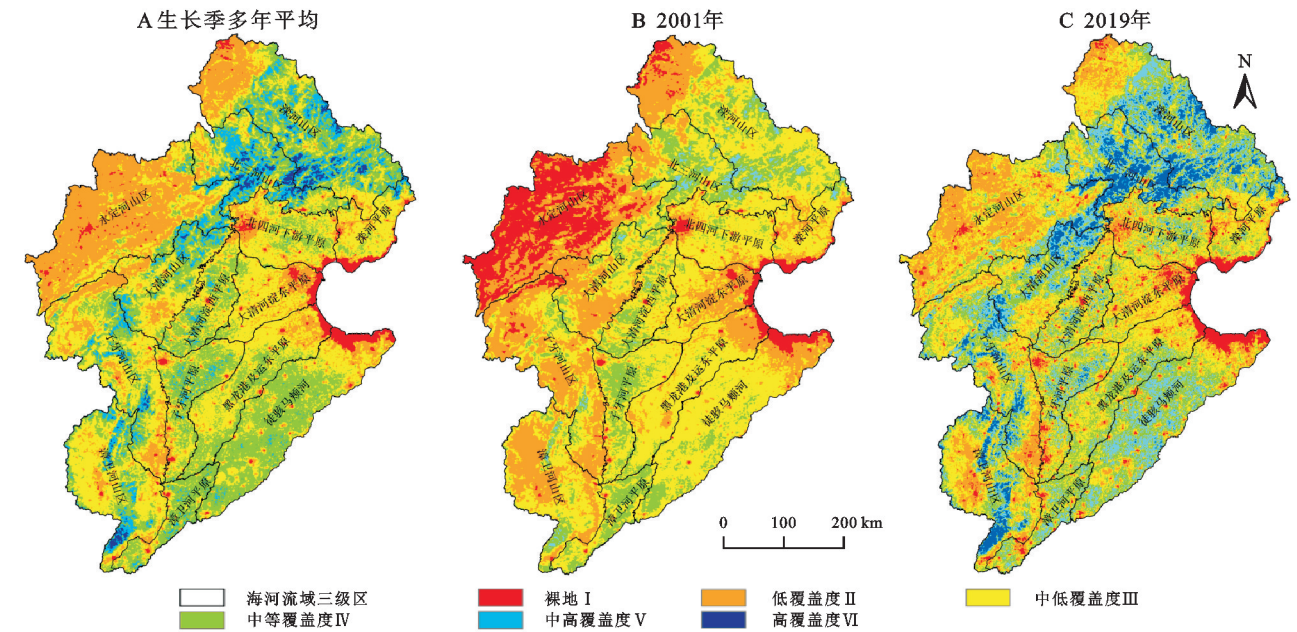


图 3 海河流域生长季 FVC 空间分布

采用 slope 趋势分析，对研究区生长季植被覆盖度变化趋势进行分析(图 4)，slope 的值域为  $-0.447 \sim 0.347$ ，表明植被变化趋势存在着明显的空间差异，变化速率以  $0 \sim 0.2$  为主，占流域总面积的 81.51%。对变化趋势进行 M-K 显著性检验(图 5)，海河流域生长季 FVC 改善区域的面积为  $2.15 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占流域的 67.28%，远大于退化面积，其中改善部分以极显著改善为主，占流域总面积的 60.42%；退化区域占流域的总面积的 8.28%，主要位于城市的周围。变化不显著的区域主要分布于改善区域和退化区域之间，面积占流域总面积的 23.90%。综上可知，研究区大部分

地区的植被得到了明显改善，但受城市扩张等因素的影响，城市外围区域的植被退化现象较为严重。

2.2 生长季 FVC 空间分异的驱动力分析

2.2.1 因子影响力探测分析 利用因子探测器计算各因子的  $q$  值以量化其对海河流域生长季 FVC 空间分布的解释程度。由结果可见(图 6)，不同因子对海河流域生长季 FVC 空间分布的解释能力如下：林地比例(0.342 7) > 林草混合地比例(0.334 6) > 年均降水(0.202) > 灌丛比例(0.197) > 草地比例(0.184) > 坡度(0.134) > 年潜在蒸散发(0.114) > 年均温(0.107) > 城镇比例(0.094) > 高程(0.089) > GDP(0.074) > 壤土比例(0.066) > 人口密度



(0.064)>沙土比例(0.062)>黏土比例(0.053)>碎石含量(0.051)>有机碳比例(0.040)>农田比例(0.027)。各因子对应显著性 $p$ 值均小于0.01,通过显著性检验。综合分析可见:(1)林地比例和林草混合地比例的 $q$ 值最大,分别达0.342 7,0.334 6,解释力均在30%以上,因此林地比例和稀疏草地比例是影响海河流域生长季植被覆盖度空间分布的主要影响因子;(2)海河流域的山区和平原区的生长季FVC空间分布的主要影响因子不同。林草混合地 and 林地比例对海河山区生长季植被覆盖度影响最大,解释力均在50%以上,GDP影响最小;农田比例和年潜在蒸散发对海河平原区植被覆盖度的分布影响最大,影响最小的因子是坡度;(3)整体来看,人类活动对海河流域生长季植被覆盖度空间分布的影响是最大的,其次是气候、地形,影响最小的是土壤性质。

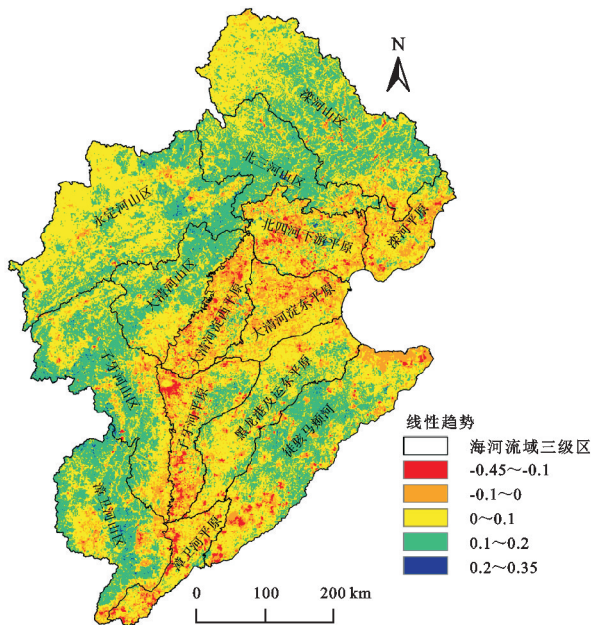


图4 2001—2019年海河流域生长季FVC线性趋势

**2.2.2 因子交互作用探测分析** 本文进一步对海河流域以及其山区、平原区空间分布影响因子进行交互作用探测(表3—5),结果表明,在研究区域,任意两因子的叠加均会增强单因子对海河流域生长季FVC空间分布的解释能力,呈非线性增强或双因子增强作用,不存在独立关系,说明植被生长与生存往往并非受制于单一因素,而是多种因素协同作用的结果。由表3可见,交互作用解释力最强的是林草混合地比例和农田比例,它们双因子交互 $q$ 值达到了0.58,其次是林草混合地比例和人口密度, $q$ 值达到了0.50。同时,林地比例、林草混合地比例和降水量与大多数因子相结合均呈现非线性增强,表明三者对海河流域生长季FVC空间分布影响程度占据主导地位。年均降水、年均温和年潜在蒸散发与其他因子的交互作用解释力均有显著增加,尤其是与林地比例等人类活动因子的交互作用。因此,气候因子与人类活动因子共同作用将使生长季

FVC空间分布受到更大的影响力度。

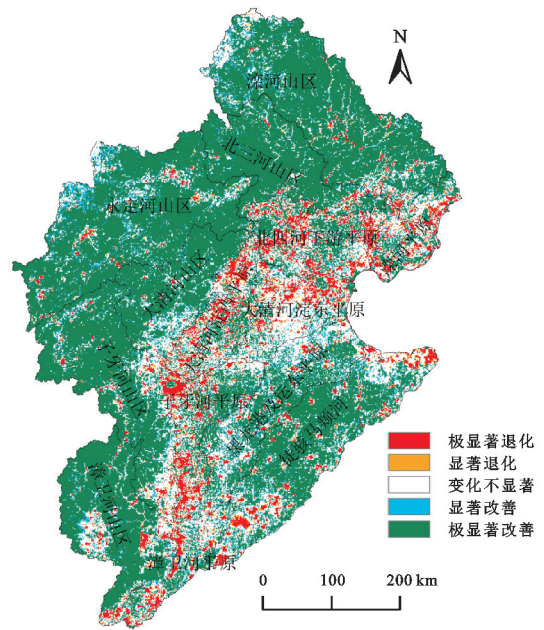


图5 2001—2019年生长季FVC线性趋势显著性

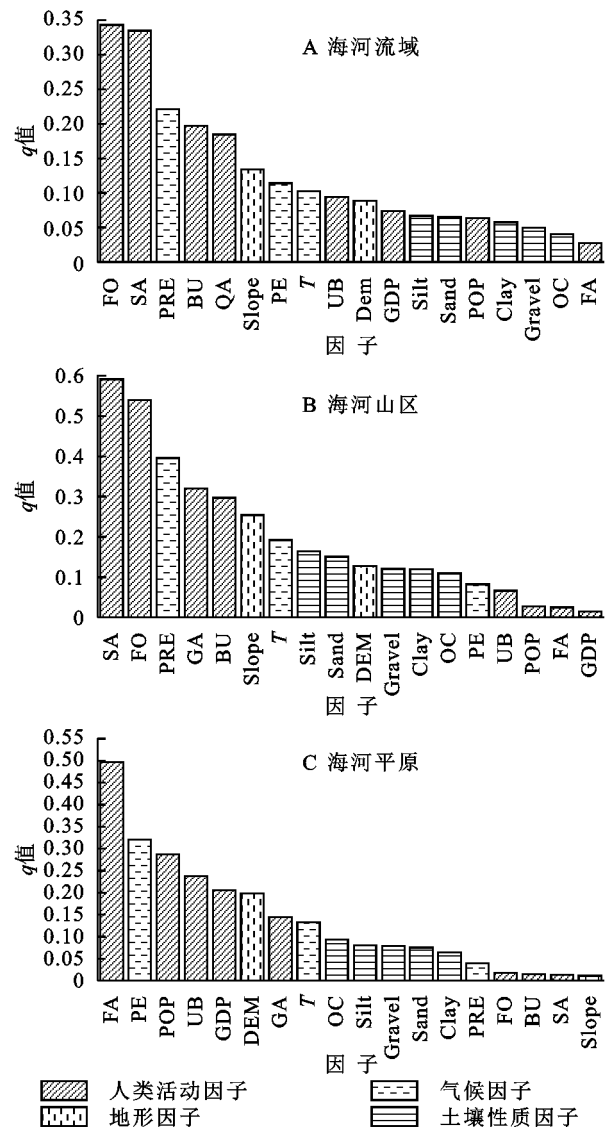


图6 因子探测器结果

表 3 海河流域因子交互作用探测器结果

因子	PRE	T	PE	GDP	POP	FO	BU	FA	GA	SA	UB	DEM	Slope	Clay	Sand	Silt	OC	Gravel
PRE	0.22																	
T	0.33	0.10																
PE	0.40	0.32	0.11															
GDP	0.36	0.23	0.19	0.07														
POP	0.37	0.27	0.21	0.11	0.06													
FO	0.50	0.44	0.42	0.43	0.45	0.34												
BU	0.36	0.26	0.29	0.27	0.28	0.37	0.20											
FA	0.32	0.28	0.23	0.12	0.13	0.49	0.30	0.03										
GA	0.30	0.28	0.33	0.32	0.33	0.45	0.33	0.39	0.18									
SA	0.47	0.46	0.41	0.46	0.50	0.41	0.35	0.58	0.47	0.33								
UB	0.37	0.25	0.20	0.12	0.14	0.42	0.27	0.15	0.36	0.43	0.09							
DEM	0.35	0.22	0.26	0.20	0.24	0.42	0.25	0.31	0.30	0.44	0.23	0.09						
Slope	0.37	0.27	0.26	0.24	0.28	0.37	0.24	0.38	0.39	0.38	0.23	0.27	0.13					
Clay	0.32	0.24	0.20	0.16	0.17	0.36	0.23	0.16	0.26	0.38	0.17	0.20	0.20	0.06				
Sand	0.30	0.26	0.20	0.17	0.18	0.36	0.23	0.17	0.27	0.36	0.18	0.24	0.21	0.14	0.07			
Silt	0.30	0.26	0.23	0.17	0.18	0.37	0.25	0.17	0.26	0.38	0.18	0.24	0.22	0.16	0.12	0.07		
OC	0.28	0.20	0.20	0.13	0.14	0.37	0.23	0.11	0.24	0.38	0.15	0.18	0.20	0.20	0.23	0.21	0.04	
Gravel	0.28	0.22	0.18	0.15	0.14	0.37	0.24	0.11	0.24	0.38	0.16	0.19	0.20	0.17	0.19	0.15	0.15	0.05

表 4 海河山区因子交互作用探测器结果

因子	PRE	T	PE	GDP	POP	FO	BU	FA	GA	SA	UB	DEM	Slope	Clay	Sand	Silt	OC	Gravel
PRE	0.40																	
T	0.48	0.19																
PE	0.47	0.39	0.08															
GDP	0.52	0.29	0.14	0.02														
POP	0.53	0.38	0.18	0.05	0.03													
FO	0.71	0.63	0.58	0.55	0.55	0.54												
BU	0.52	0.39	0.37	0.31	0.32	0.60	0.30											
FA	0.58	0.34	0.19	0.06	0.07	0.58	0.33	0.02										
GA	0.48	0.38	0.38	0.40	0.47	0.64	0.48	0.59	0.32									
SA	0.68	0.66	0.61	0.60	0.61	0.70	0.62	0.66	0.65	0.59								
UB	0.50	0.28	0.14	0.08	0.08	0.56	0.33	0.10	0.45	0.61	0.07							
DEM	0.50	0.34	0.26	0.19	0.24	0.61	0.36	0.23	0.39	0.63	0.23	0.13						
Slope	0.53	0.40	0.33	0.27	0.27	0.61	0.42	0.34	0.53	0.63	0.28	0.39	0.25					
Clay	0.49	0.34	0.21	0.15	0.16	0.56	0.38	0.16	0.42	0.62	0.18	0.27	0.32	0.12				
Sand	0.48	0.34	0.24	0.19	0.21	0.58	0.39	0.22	0.42	0.62	0.21	0.30	0.33	0.24	0.15			
Silt	0.49	0.36	0.27	0.21	0.23	0.58	0.41	0.23	0.43	0.63	0.22	0.31	0.35	0.27	0.22	0.16		
OC	0.44	0.28	0.22	0.14	0.18	0.58	0.35	0.17	0.37	0.61	0.17	0.23	0.32	0.30	0.29	0.31	0.11	
Gravel	0.48	0.36	0.22	0.15	0.17	0.57	0.37	0.16	0.41	0.62	0.17	0.28	0.33	0.26	0.28	0.28	0.29	0.12

在海河山区中,降雨、林地比例和林草混合地比例与各因子交互均有很强的非线性增强。因子间交互作用对海河山区生长季植被覆盖空间分异性解释力大小前六项依次为:降雨∩林地比例(0.71)>林草混合地比例∩林地比例(0.70)>林草混合地比例∩降雨(0.68)>林草混合地比例∩农田比例(0.66)>林草混合地比例∩年均温(0.655)>林草混合地比例∩草地比例(0.65);表明:人类活动对海河流域山区生长季植被覆盖度空间

分布具有重要影响,一方面通过退耕还林还草、生态保护修复等措施可促进植被覆盖,另一方面通过城镇化建设、资源过度开发等行为可破坏植被覆盖<sup>[33]</sup>。在海河平原中,因子间交互作用对生长季植被覆盖空间分异性解释力大小前六项依次为:农田比例∩高程(0.653)>农田比例∩年潜在蒸散发(0.649)>农田比例∩草地比例(0.573)>农田比例∩降雨(0.568)>农田比例∩坡度(0.560)>农田比例∩林地比例(0.558)。

表 5 海河平原区因子交互作用探测器结果

因子	PRE	T	PE	GDP	POP	FO	BU	FA	GA	SA	UB	DEM	Slope	Clay	Sand	Silt	OC	Gravel
PRE	0.04																	
T	0.34	0.13																
PE	0.39	0.42	0.32															
GDP	0.27	0.33	0.44	0.21														
POP	0.39	0.43	0.48	0.40	0.29													
FO	0.06	0.15	0.34	0.22	0.33	0.02												
BU	0.06	0.15	0.34	0.22	0.32	0.02	0.01											
FA	0.57	0.60	0.65	0.51	0.54	0.56	0.55	0.50										
GA	0.20	0.29	0.40	0.35	0.38	0.19	0.18	0.57	0.14									
SA	0.07	0.17	0.35	0.22	0.34	0.03	0.02	0.55	0.19	0.01								
UB	0.30	0.39	0.51	0.30	0.40	0.26	0.25	0.53	0.38	0.26	0.24							
DEM	0.26	0.31	0.39	0.41	0.46	0.21	0.20	0.65	0.29	0.22	0.46	0.20						
Slope	0.07	0.16	0.35	0.22	0.33	0.03	0.02	0.56	0.20	0.03	0.26	0.21	0.01					
Clay	0.16	0.26	0.40	0.27	0.38	0.08	0.08	0.53	0.23	0.09	0.34	0.29	0.09	0.06				
Sand	0.13	0.26	0.38	0.27	0.37	0.09	0.09	0.53	0.25	0.10	0.34	0.27	0.10	0.14	0.08			
Silt	0.19	0.28	0.41	0.28	0.37	0.10	0.10	0.53	0.24	0.11	0.35	0.29	0.11	0.20	0.20	0.08		
OC	0.20	0.26	0.41	0.29	0.40	0.11	0.11	0.54	0.26	0.12	0.35	0.31	0.11	0.24	0.23	0.23	0.09	
Gravel	0.16	0.24	0.37	0.27	0.36	0.10	0.10	0.54	0.24	0.10	0.32	0.27	0.10	0.14	0.15	0.18	0.16	0.08

3 讨论和结论

3.1 讨论

本研究基于地理探测器,对海河流域生长季植被覆盖度空间分布的影响因素进行量化归因分析,结果表明人类活动对海河流域生长季植被覆盖度空间分布的影响是最大的,其次是气候、地形,影响最小的是土壤性质。海河流域自 1980 年以来,实施“三北”防护林工程、京津风沙源治理工程、退耕还林还草工程等一系列生态恢复工程、农业化开发和城镇化,使得当地土地利用/覆盖发生剧烈变化,主要表现为海河山区森林面积占比上升,草地和农田面积占比下降,海河平原区农田比例上升,人口密度上升。这些人类活动显著影响了植被覆盖度的空间分异规律,并显著增加了植被覆盖度。林草混合地比例、林地比例和草地比例主要影响了海河山区生长季植被覆盖度空间分布;农田比例、人口密度和城镇比例这些人类活动因子主要影响了海河平原区生长季植被覆盖度空间分布。年均降水、年均温和年潜在蒸散发这些气候因子的动态变化主要决定了生长季植被覆盖度的年际变化;坡度、坡向通过影响坡面接受的太阳辐射量和日照时数从而对植被的生长有一定的影响,土壤性质也主要决定了植被覆盖度的空间分异规律。各因子交互作用呈双因子增强和非线性增强两种类型,不存在相互独立作用,关于因子间交互作用是如何增强对生长季 FVC 空间分异的解释能力还需进行更加深入的讨论。

3.2 结论

- (1) 年际变化分析显示,2001—2019 年海河流域生长季 FVC 总体呈显著上升趋势,线性倾向率为 0.063/10 a,各等级植被覆盖度转化明显,中高覆盖度和高覆盖度的面积占比呈现显著的增加趋势;
- (2) 空间变化分析显示,生长季 FVC 总体较高,仅环渤海湾地带和一些城市区域植被覆盖率较低,海河流域生长季 FVC 改善区域的面积为  $2.15 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占流域的 67.28%,远大于退化面积,其中改善部分以极显著改善为主;
- (3) 因子探测发现,林地比例和稀疏草地比例是影响海河流域生长季 FVC 空间分布的主要影响因子;海河流域的山区和平原区的生长季 FVC 空间分布的主要影响因子不同;人类活动对海河流域生长季植被覆盖度空间分布的影响是最大的;
- (4) 交互探测发现,2001—2019 年,各因子对海河流域生长季植被覆盖变化存在呈双因子增强和非线性增强两种类型的交互作用,不存在相互独立作用或对植被覆盖变化解释力减弱的交互因子。

参考文献:

[1] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,233:353-367.

[2] Gong Z, Zhao S, Gu J. 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.
- [3] 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.
- [4] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918):37-42.
- [5] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1):76-87.
- [6] 刘洋,李诚志,刘志辉,等.1982—2013年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J].*生态学报*, 2016, 36(19):6198-6208.
- [7] He B, Chen A f, Jiang W G, et al. The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(7):801-816.
- [8] 陶帅,邝婷婷,彭文甫,等.2000—2015年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力:以宜宾市为例[J].*生态学报*, 2020, 40(14):5029-5043.
- [9] Chen T, Bao A, Jiapaer G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982—2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653(25):1311-1325.
- [10] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13233-13250.
- [11] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92:251-259.
- [12] 陈宽,杨晨晨,白力嘎,等.基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响[J].*生态学报*, 2021, 41(12):4963-4975.
- [13] 姜萍,胡列群,肖静,等.新疆植被 NDVI 时空变化及定量归因[J].*水土保持研究*, 2022, 29(2):212-220, 242.
- [14] 祁鹏卫,张贤.2000—2019年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素分析[J].*生态学报*, 2022, 42(13): 5427-5436.
- [15] 李晓丽,曹敏,茆杨.基于地理探测器的西南岩溶槽谷区近 20 年 NDVI 变化特征及影响因素[J].*水土保持学报*, 2021, 35(6):38-44, 54.
- [16] 张华,李明,宋金岳,等.基于地理探测器的祁连山国家公园植被 NDVI 变化驱动因素分析[J].*生态学杂志*, 2021, 40(8):2530-2540.
- [17] 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.
- [18] 刘逸滨,刘宝元,成城,等.退耕还林草 20 年来榆林市植被覆盖度时空变化及影响因素分析[J].*水土保持学报*, 2022, 36(2):197-208, 218.
- [19] 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.
- [20] 严登华,袁喆,杨志勇,等.1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J].*水科学进展*, 2013, 24(1):34-41.
- [21] 杨艳丽,孙艳玲,王中良.2000—2013 年海河流域植被覆盖的时空变化[J].*干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 65-70.
- [22] 吴云,曾源,赵炎,等.基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J].*资源科学*, 2010, 32(7):1417-1424.
- [23] 申丽娜,景悦,孙艳玲,等.基于 SPOT 数据的海河流域植被覆盖度变化图谱特征[J].*天津师范大学学报:自然科学版*, 2018, 38(4):60-67.
- [24] 申丽娜,景悦,孙艳玲,等.海河流域植被覆盖度变化的图谱特征及其地形梯度差异分析[J].*天津师范大学学报:自然科学版*, 2017, 37(6):43-49, 54.
- [25] 何龙,曾晓明,钱达,等.海河流域近 17 年植被时空变化及其气候影响因素[J].*天津师范大学学报:自然科学版*, 2020, 40(3):54-61, 68.
- [26] 王永财,孙艳玲,王中良.1998—2011 年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].*资源科学*, 2014, 36(3):594-602.
- [27] 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.
- [28] Su T, Zhang B, He X, et al. Rational planning of land use can maintain water yield without damaging ecological stability in upstream of inland river: Case study in the Hei River Basin of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2020, 125(18):e2020JD032727.
- [29] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 GB/SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [30] 温晓金,刘焱序,杨新军.恢复力视角下生态型城市植被恢复空间分异及其影响因素:以陕南商洛市为例[J].*生态学报*, 2015, 35(13):4377-4389.
- [31] 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.
- [32] 祁鹏卫,张贤.2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素[J].*生态学报*, 2022, 42(13):5427-5436.
- [33] 杨灿,魏天兴,李亦然,等.黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J].*生态学杂志*, 2021, 40(6):1830-1838.