

# 气候变化和人类活动对海河流域植被覆盖变化的影响

李慧琳, 谢勇, 田雪茹, 李自闯, 李鹏傲, 邵雯

(南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044)

**摘要:** [目的] 掌握植被覆盖(Fractional Vegetation Cover, FVC)的演变态势, 剖析其与气候变化、人类活动的内在关联, 为实现区域生态系统科学且高效管理提供科学参考。[方法] 基于 MODIS NDVI 遥感数据和气象数据, 采用趋势分析法、时滞偏相关以及残差分析法, 研究了海河流域 2001—2022 年 FVC 时空变化特征及其驱动机制。[结果] (1) 海河流域 FVC 呈微弱上升趋势, 增速为 0.000 3/a, 年均值 0.66~0.73, 空间分布呈西北低, 东南高的分异特征。(2) FVC 与降水相关性(最大偏相关系数 0.83) 强于气温(0.76), 且 FVC 对降水的滞后效应更显著, 平均滞后月份为 2.9 个月。(3) 气候变化与人类活动的协同效应是 FVC 变化的主因, 二者共同驱动植被改善和退化的区域占比分别为 43.58% 和 33.84%。气候变化对植被增长呈现正向贡献的区域为 46.79%, 人类活动则对 45.36% 的区域有积极影响。[结论] 海河流域植被覆盖波动上升, FVC 对气候因子的响应具有显著的时空异质性和滞后效应, 气候变化与人类活动的协同作用主导植被覆盖演变。

**关键词:** 植被覆盖; 气候; 人类活动; 海河流域

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0178-08

## Impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in Haihe River Basin

Li Huilin, Xie Yong, Tian Xueru, Li Zichuang, Li Pengao, Shao Wen

(School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to understand the evolution trend of fractional vegetation cover (FVC) and analyze its intrinsic relationship with climate change and human activities, thereby providing a scientific basis for achieving the science-informed and efficient management of regional ecosystems. [Methods] Based on MODIS NDVI remote sensing data and meteorological data, this study investigated the spatiotemporal variation characteristics and driving mechanisms of FVC in the Haihe River Basin from 2001 to 2022 by utilizing trend analysis, time-lag partial correlation, and residual analysis methods. [Results] (1) The FVC in the Haihe River Basin exhibited a slight upward trend, with a growth rate of 0.000 3/a. The annual mean values ranged from 0.66 to 0.73, and its spatial distribution showed a pattern of being lower in the northwest and higher in the southeast. (2) The correlation between FVC and precipitation (maximum partial correlation coefficient: 0.83) was stronger than that with temperature (0.76). Furthermore, the lag effect of FVC on precipitation was more significant, with an average lag period of 2.9 months. (3) The synergistic effects of climate change and human activities were the main causes of FVC changes. Areas where these two factors jointly contributed to vegetation improvement and degradation accounted for 43.58% and 33.84%, respectively. Climate change exerted positive contributions to vegetation growth in 46.79% of the areas, while human activities had a beneficial impact on 45.36% of the areas.

收稿日期: 2025-04-30

修回日期: 2025-05-25

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3905801); 国家民用空间基础设施资助项目; 国家自然科学基金(42176176)

第一作者: 李慧琳(2000—), 女, 山西原平人, 硕士, 研究方向为植被覆盖遥感监测。E-mail: 202312100009@nuist.edu.cn

通信作者: 谢勇(1977—), 男, 江苏溧阳人, 博士, 教授, 主要从事辐射性能与定量遥感研究。E-mail: xieyong@nuist.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

[**Conclusion**] The vegetation cover in the Haihe River Basin exhibited a fluctuating increase. The response of FVC to climatic factors shows significant spatiotemporal heterogeneity and lag effects, and the synergistic effects of climate change and human activities dominate the evolution of vegetation cover.

**Keywords:** fractional vegetation cover; climate; human activities; Haihe River Basin

全球自然生态系统正面临气候变化持续加剧与人类活动强度激增的双重胁迫<sup>[1]</sup>。在陆地生态系统中,植被对于各圈层能量流动、物质循环以及信息传递等具有重要的调节作用,是表征区域生态质量和响应全球变化的生物“指示器”<sup>[2]</sup>。植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)通过量化冠层垂直投影占比,能够有效表征植被生长态势与生态系统质量,被广泛运用于水文、生态、气候等研究领域<sup>[3]</sup>。因此,掌握植被覆盖度时空变化规律,探索植被覆盖动态变化及其对气候变化以及人类活动等非气候因素的响应已成为全球变化研究的重要内容,对于制定区域生态环境保护与可持续发展相关策略具有重要意义<sup>[4]</sup>。

近年来,植被动态变化及其驱动因素的研究取得显著进展,大量研究表明气候变化和人类活动是植被动态变化的核心驱动力,但主导作用存在显著时空异质性。张心茹等<sup>[5]</sup>研究认为,气候条件的变化和人类活动的干预,共同推动了黄河三角洲植被的生长进程,促进了其生产力水平的提高。贾志峰等<sup>[6]</sup>研究显示,相较于气候变化,人类活动在松辽流域NDVI变化的过程中起主导作用。屈莹波等<sup>[7]</sup>研究发现,锡林郭勒草原植被演变的主要驱动力为人类活动,人类活动和气候变化对植被的主要影响在不同区域表现出显著差异。金凯等<sup>[8]</sup>分析认为,中国植被指数呈现快速增长以及空间分异现象,其主要原因在于气候变化与人类活动的协同影响,而温度和降水作为剖析植被动态变化的关键气候指标,已有研究数据显示,气候因子与植被变化之间的对应关系呈现出空间上的异质特性<sup>[9]</sup>。随着经济快速发展,人类活动对区域生态环境的影响不断扩大,逐渐成为区域植被变化的重要因素,其影响具有双向性。城镇化进程中的土地覆被变化活动,客观上形成植被生境的空间压缩效应,加速了生态系统逆向演替过程;相对地,通过系统实施原始林保育以及喀斯特地貌生态修复等综合治理工程,已实现植被群落结构与功能的渐进式恢复,有效推动植被覆盖的恢复。

海河流域作为京津冀协同发展的核心区域,其生态安全对华北地区可持续发展具有战略意义。然而,高强度的人类活动以及极端气候事件频发,导致流域植被退化、水资源短缺、灾害风险加剧等问题凸显<sup>[10]</sup>。刘芑凯等<sup>[11]</sup>基于地理探测器对海河流域

NDVI进行因子探测,研究发现土地利用类型是驱动NDVI空间异质性分布的主导因子。王庆明等<sup>[12]</sup>通过皮尔逊相关系数法对流域山区水热条件与FVC进行关联分析,结果表明温度与降水等水热因子是调控植被覆盖动态变化的直接因素。尽管已有研究揭示了黄河流域<sup>[13]</sup>、长江经济带<sup>[14]</sup>等区域的植被驱动机制,但海河流域仍存在气候因子与植被变化的滞后效应定量评估不足、气候变化与人类活动综合贡献的空间分异特征不明等科学问题。基于此,本文系统分析2001—2022年海河流域气候与植被的时空变化趋势,通过时滞偏相关分析探究气候因子对植被变化的影响机制,利用残差分析定量评估气候因子以及人类活动对FVC的相对贡献。本文旨在揭示该区域植被覆盖动态演变特征,量化气候变化和人类活动对区域植被的贡献,以期京津冀协同发展中的生态安全格局构建提供理论依据。

## 1 研究区概况

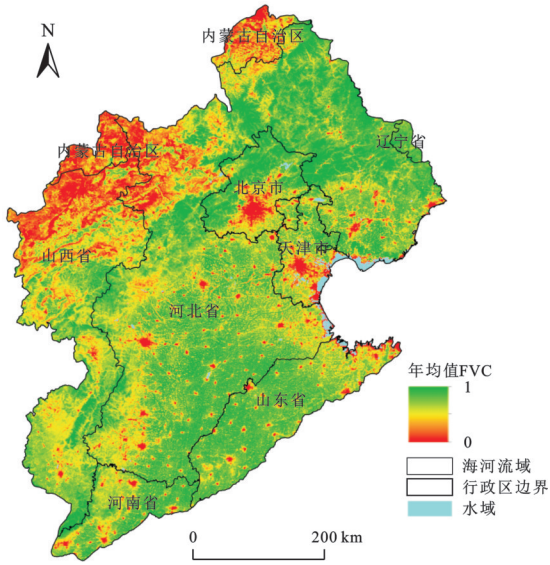
海河流域(112°—120°E, 35°—43°N)地处华北地区核心区域,覆盖北京、天津两大直辖市以及河北、河南等6个省(自治区)的部分地区,流域西倚太行山脉与黄河水系相邻,北抵阴山山脉与内陆河流域接壤,南以黄河北堤为界,东临渤海,流域总面积约31.85万km<sup>2</sup>。水系结构复杂,由海河、滦河、徒骇马颊河三大水系构成。流域属于温带大陆性季风气候区,夏季以东南风为主,冬季盛行北风和西北风。降水的年内分布极为不均,夏季汛期集中了全年5%~95%的降雨量,丰水年与枯水年的雨量相差超过两倍。而流域多年平均水面蒸发量处于1 000~1 400 mm区间,明显高于年降水量,水分亏空显著,使得气象干旱灾害时有发生<sup>[15]</sup>。因此,该区域生态环境脆弱,人地矛盾较为突出(图1)。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源与数据处理

本文选用2001年1月—2022年12月期间的MOD13A1植被遥感数据产品,该数据从美国国家航空航天局官网(<https://www.earthdata.nasa.gov/>)获取,其时间、空间分辨率分别为16 d, 500 m。在研究过程中,通过最大值合成法(Maximum Value Composite,

MVC),将缺失值、水体、云层等可能干扰试验结果的因素予以排除。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,底图未做修改,下同

图 1 年均 FVC 以及行政区划

Fig. 1 Annual mean FVC and administrative divisions

本文选用 2001—2022 年逐月平均气温与累计降水量数据<sup>[16-17]</sup>,来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),其空间分辨率为 1 km。在研究过程中,通过投影变换、重采样、裁剪等基本处理,得到与植被遥感数据产品相同分辨率的平均气温和累计降水月度、年度数据集。

## 2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度估算与趋势分析 像元二分模型是一种操作简单、运用广泛的植被覆盖度遥感估算模型,其原理是假设一个像元的信息是由裸土与绿色植被两部分所贡献,像元中有植被覆盖的面积比例即为该像元的植被覆盖度<sup>[18]</sup>,其计算公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:NDVI 为混合像元的归一化植被指数值;NDVI<sub>veg</sub> 和 NDVI<sub>soil</sub> 分别为绿色植被和裸土像元的 NDVI 值。为消除遥感影像的噪声所带来的误差,本研究选取累积频率为 1% 的 NDVI 值为 NDVI<sub>soil</sub>,累积频率为 99% 的 NDVI 值为 NDVI<sub>veg</sub>。

Theil-Sen Median 趋势分析法是一种较为稳健的非参数估计方法,受异常值影响小,表现出较强的抗噪性,能够科学直观地反映出长时间序列数据在一定时间内的变化趋势,从而揭示其变化规律<sup>[19]</sup>。计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{FVC_i - FVC_j}{i - j} \right) \quad (2)$$

式中:median 为中值; $\beta$  为变化趋势;FVC<sub>i</sub> 和 FVC<sub>j</sub> 分别为第  $i$  年和第  $j$  年时序数据集。若  $\beta > 0$ ,表示 FVC 整体呈现上升趋势,即植被发生改善;反之,则呈现下降趋势,即植被发生退化。若  $\beta = 0$ ,表示植被 FVC 整体基本保持不变,植被覆盖状况趋于稳定状态。

Mann-Kendall 检验是一种非参数时间序列趋势检验法,适用范围广,不需要测量值服从正态分布以及不受少数异常值影响,已被广泛应用于气候学和生态学等领域<sup>[20]</sup>。

2.2.2 时滞偏相关 时滞效应是指某月的气温或降水等气候因子对当前月植被覆盖造成的影响,滞后的时间主要是通过某月的气候因子与某月的植被覆盖之间最大相关性对应的月份数来确定的。已有研究表明,植被对气候因子的滞后时间通常在 3 个月内<sup>[21]</sup>。基于此,本文分别计算 2001—2022 年的月时间尺度 FVC 与当前 3 个月内的气温和降水的偏相关系数,逐像元取最大相关性,最大偏相关系数对应的滞后期则为滞后的月份<sup>[22-23]</sup>。计算过程为:

(1) 计算不同时滞下 FVC 分别与气温和降水之间相关系数

$$R_{FP} = \frac{\sum_{m=1}^{c-k} (P_m - \bar{P}_m)(F_{m+k} - \bar{F}_{m+k})}{\sqrt{\sum_{m=1}^{c-k} (P_m - \bar{P}_m)^2 \sum_{m=1}^{c-k} (F_{m+k} - \bar{F}_{m+k})^2}} \quad (3)$$

$$R_{FT} = \frac{\sum_{m=1}^{c-k} (T_m - \bar{T}_m)(F_{m+k} - \bar{F}_{m+k})}{\sqrt{\sum_{m=1}^{c-k} (T_m - \bar{T}_m)^2 \sum_{m=1}^{c-k} (F_{m+k} - \bar{F}_{m+k})^2}} \quad (4)$$

$$R_{PT} = \frac{\sum_{m=1}^{c-k} (T_m - \bar{T}_m)(P_{m+k} - \bar{P}_{m+k})}{\sqrt{\sum_{m=1}^{c-k} (T_m - \bar{T}_m)^2 \sum_{m=1}^{c-k} (P_{m+k} - \bar{P}_{m+k})^2}} \quad (5)$$

式中: $R_{FT}$  为不同时滞下 FVC 与气温的相关系数; $R_{FP}$  为 FVC 与降水的相关系数; $m$  为时序长度; $F_m$ ,  $T_m$ ,  $P_m$  分别为 FVC、气温和降水的序列; $k$  为滞后时间。本文研究 FVC 的时间序列为 2001—2022 年共计 22 a 的月尺度数据, $c=12$ , $k$  的取值为 0~3。 $\bar{P}_m$  和  $\bar{T}_m$  分别为降水和气温的序列均值; $\bar{F}_{m+k}$  和  $\bar{P}_{m+k}$  分别为第  $(m+k)$  个时滞的 FVC 均值和降水均值。

(2) 利用偏相关计算公式,根据上述相关系数得到不同时滞下的偏相关序列。

$$R_{FP-T} = \frac{R_{FP} - R_{FT}R_{PT}}{\sqrt{(1 - R_{FT}^2)(1 - R_{PT}^2)}} \quad (6)$$

$$R_{FT-P} = \frac{R_{FT} - R_{FP}R_{PT}}{\sqrt{(1 - R_{FP}^2)(1 - R_{PT}^2)}} \quad (7)$$

式中:  $R_{FP-T}$  为不同时滞下 FVC 与降水的偏相关系数;  $R_{FT-P}$  为不同时滞下 FVC 与气温的偏相关系数。偏相关系数的显著性可通过 t 检验进行判断。

2.2.3 残差分析与驱动因素相对贡献率计算 本文建立二元线性回归模型并使用残差分析量化驱动因子(气候变化和人类活动)对海河流域 FVC 的影响及相对贡献<sup>[24]</sup>。具体计算公式如下:

$$FVC_c = a \times T + b \times P + c \quad (8)$$

$$FVC_h = FVC_{obs} - FVC_c \quad (9)$$

式中:  $a, b$  和  $c$  为模型参数;  $T$  为平均气温( $^{\circ}C$ );  $P$  为累计降水量(mm);  $FVC_c$  为运用回归模型所得 FVC 预估数值,即预测值;  $FVC_{obs}$  则是依据遥感影像获取的 FVC 实测数值,即观测值;  $FVC_h$  为残差。

本文利用一元线性回归方程,分别计算  $FVC_c$  和  $FVC_h$  的斜率,该斜率表示变化趋势,即分别表示气候变化和人类活动对 FVC 的影响,如公式(10)所示,当  $slope > 0$  时,视为植被改善区域,反之则为植被退化区。气候变化和人类活动对 FVC 的相对贡献率可以通过  $FVC_c$  和  $FVC_h$  在一定时间段内的变化趋势来衡量。通过表 1 分别计算 FVC 在改善和退化的趋势下,气候变化和人类活动的相对贡献率。具体计算公式如(11)所示:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times FVC_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n FVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i} \quad (10)$$

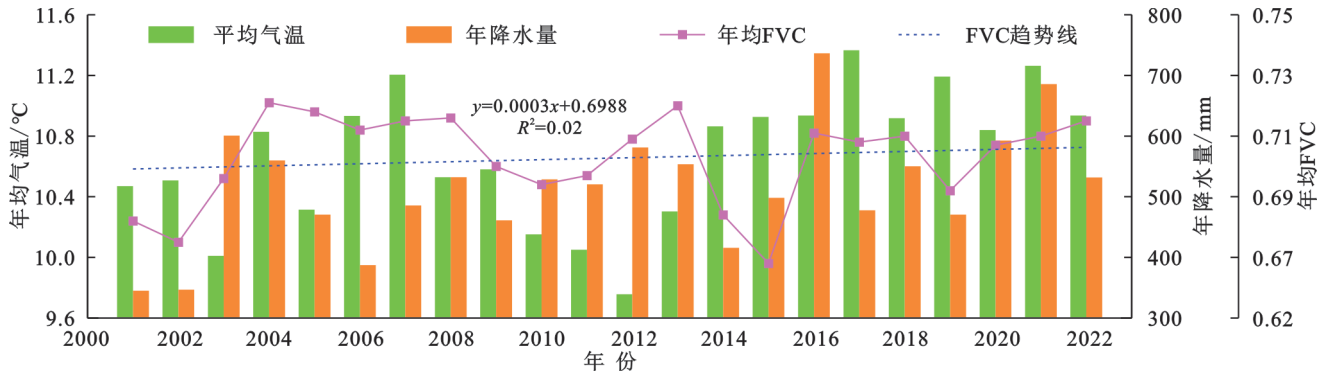


图 2 年均 FVC 以及气温和降水变化

Fig. 2 Annual mean FVC and variations in temperature and precipitation

海河流域的植被覆盖在空间上整体呈现西北低,东南高的分布特征(图 3),其中低植被覆盖、较低植被覆盖面积分别为 1.53 万  $km^2$ , 3.26 万  $km^2$ , 各占流域面积的 4.86%, 10.33%, 主要分布在内蒙古自治区东部、东南部,山西省北部以及北京市和天津市中部地区;中等植被覆盖面积为 7.28 万  $km^2$ , 占流域面积的 23.08%, 主要分布在河北省西部;较高植被覆盖面积为 15.9 万  $km^2$ , 占流域面积的 50.37%, 主要分布在河南省东南部以及山东省;高植被覆盖面积为 3.59 万  $km^2$ , 占流域面积的

$$C_j = \frac{slope_j}{slope} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $slope_j$  为  $j$  的变化率,即气候变化( $FVC_c$ )或者人类活动( $FVC_h$ )的变化率;  $slope$  为 FVC 的变化斜率;  $C_j$  为相对贡献率,即  $C_c$  和  $C_h$  分别为气候变化和人类活动的相对贡献率。

表 1 驱动因子对 FVC 变化的相对贡献确定方法

Table 1 Method for determining relative contributions of driving factors to FVC changes

FVC 变化趋势	驱动因素	斜率		驱动因素贡献率/%	
		$FVC_c$	$FVC_h$	气候变化	人类活动
植被改善	共同作用	>0	>0	$C_c$	$C_h$
	气候因子主导	>0	<0	100	0
	人类活动主导	<0	>0	0	100
植被退化	共同作用	<0	<0	$C_c$	$C_h$
	气候因子主导	<0	>0	100	0
	人类活动主导	>0	<0	0	100

### 3 结果与分析

#### 3.1 时空变化特征分析

在 2001—2022 年海河流域植被覆盖的年均值在 0.66~0.73, 整体增速为 0.000 3/a, 其中最小值出现在 2015 年(0.67), 最大值出现在 2004 年(0.72), 具体变化见图 2。植被覆盖在 2002 年以及 2015 年出现低谷, 其余均呈现微弱上升趋势。

11.35%, 主要分布在北京市以及河北省北部地区。

海河流域植被覆盖整体呈现微弱增加趋势(图 4), 呈增加趋势的面积占比为 51.05%, 其中极显著增加(16.09%)与极显著减少(12.30%)面积占比较为突出, 表明流域内存在强烈的空间异质性, 流域植被覆盖呈减少趋势的面积占比为 44.24%, 基本无变化区域面积占比为 4.71%, 主要分布在内蒙古自治区以及山西省的部分低植被以及较低植被覆盖的区域、北京以及天津市等大中型城镇中心和环渤海一带水

域。流域的植被改善区域多集中于流域北部山地及东部平原生态保护区,而退化区域则主要分布于城

市周围及农业高强度开发区,例如北京、天津市等城市外围区域以及河北省南部、河南省部分地区。

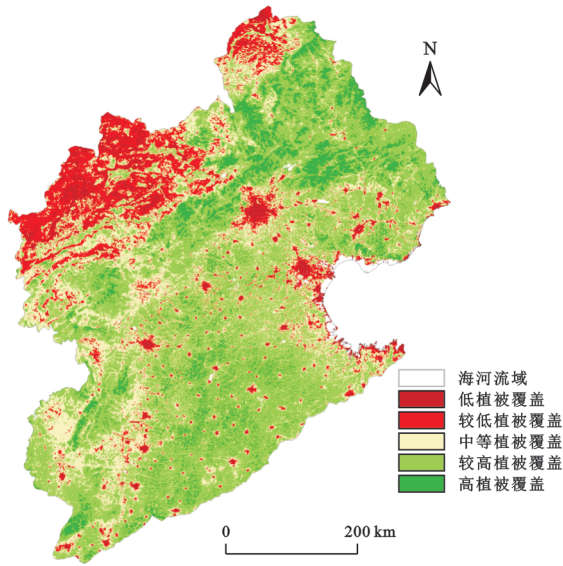


图3 年均FVC等级分布

Fig. 3 Annual mean FVC class distribution

### 3.2 FVC与气候的时滞效应分析

由图5A可知,海河流域FVC对气温的滞后响应并不明显。通过显著性检验的区域占流域面积的74.55%,平均滞后时间约为1.7个月。其中,54.49%的区域不存在滞后效应,滞后一个月和两个月的区域占比分别仅为1.86%,1.45%,滞后3个月的区域相对较大,面积占比为16.75%,主要分布在河北省以及山西省的部分地区。由图5B可知,海河流域FVC对降水的滞后响应较为明显。通过显著性检验的区域占流域面积的79.84%,平均滞后时间约为2.9个月。其中,仅有16.24%的区域不存在滞后效应,主要分布在河南省、山东省等部分地区,而滞后一个月的区域面积为15.18%,主要分布在河北省中部以及北部地区,滞后两个月的区域相对较大,面积占比为37.26%,整体分布较为均匀。滞后3个月的区域面积占比为31.33%,主要分布在山东省和山西省北部以及河北省东部地区。

### 3.3 气候变化和人类活动对FVC的影响

由图6可知,约有43.58%的区域显示海河流域FVC增加的驱动因素是气候变化和人类活动的共同作用,该区域主要分布在山西省、内蒙古自治区的东部地区,单独由气候变化导致的FVC增加的区域面积约占6.97%,单独由人类活动导致的FVC增加的区域面积约占4.03%。此外,海河流域约有33.84%的区域显示海河流域FVC减小的驱动因素是气候变化和人类活动的共同作用,主要分布在河北省、天津市的大部分地区以及河南省的北部、北京市的南部地区,单独由气候变化和人类活动导致的FVC减少的区域面积约为3.00%和8.59%,分布较为分散。总

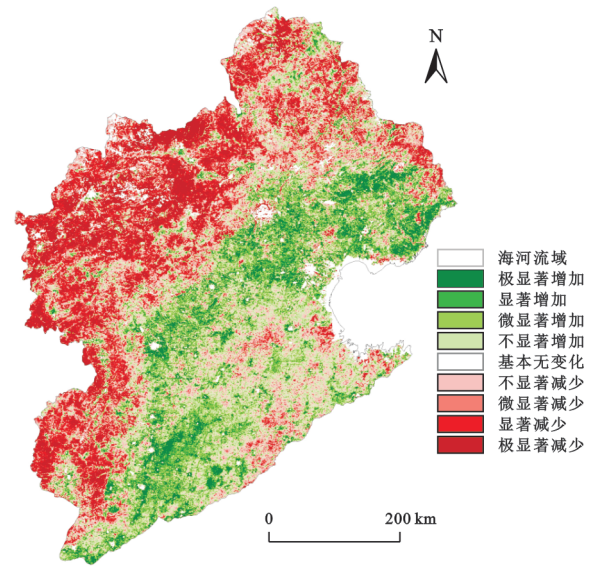


图4 FVC空间趋势分布

Fig. 4 Spatial trend distribution of FVC

体上,海河流域FVC在2001—2022年变化的主要原因是气候变化和人类活动的协同作用。

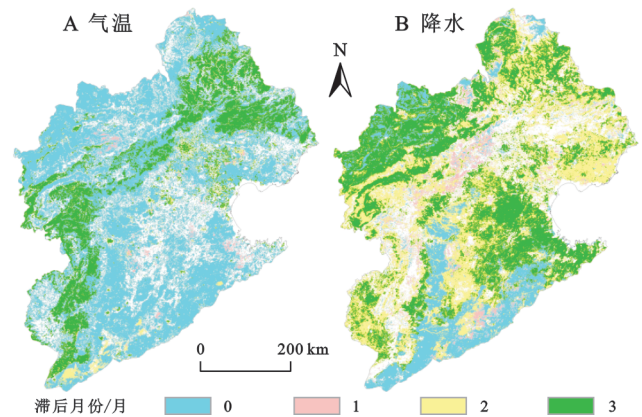


图5 FVC对气温和降水的时滞响应

Fig. 5 Time-lag response of FVC to temperature and precipitation

由图7A表明,气候变化对海河流域FVC呈正向贡献的区域占研究区的46.79%。在正向贡献中,贡献率为20%~40%的区域面积最大,40%~60%的区域面积次之,主要分布在河北省的北部、山西省以及内蒙古自治区的东部地区。贡献率大于80%的面积最小,仅占3.13%。在负向贡献中,贡献率为-60%~-40%和-20%~0的区域面积相对较大,分别为13.50%和18.69%,主要分布在北京市和天津市大部分地区以及河北、河南省北部的区域。

由图7B表明,人类活动对海河流域FVC呈正向贡献的区域占研究区的45.36%。在正向贡献中,贡献率为40%~80%的区域面积相对较大,共占流域面积的29.4%,主要分布在内蒙古自治区、山西省的东部。

贡献率为 0~20% 的区域占比较小,仅为 3.12%。在负向贡献中,贡献率小于 -80% 以及 -60%~-40%

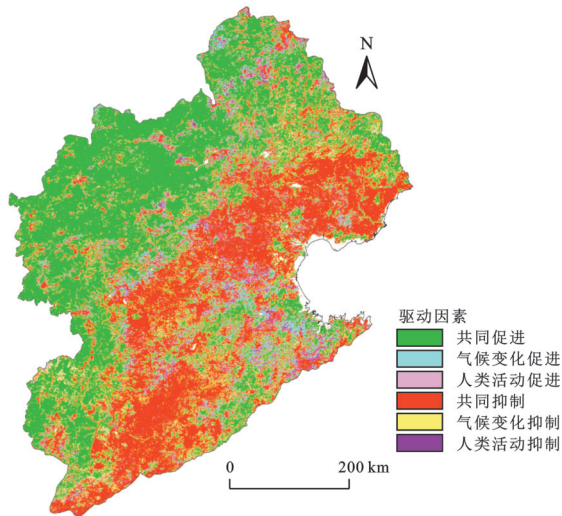


图 6 FVC 驱动力贡献分布

Fig. 6 Spatial distribution of driving factor contributions to FVC

### 4 讨论

海河流域 2001—2022 年 FVC 空间分布呈现西北低、东南高的特征,这与何龙等<sup>[25]</sup>研究的差异源于本研究利用土地利用数据去除渤海湾及其他水域的影响。在 2015 年 FVC 出现最低值可能与该年华北地区极端干旱气候<sup>[26]</sup>及建设用地扩张(图 8)有关。植被改善区集中在山西省南部和河北省北部,退化区则分布于京津城市群外围及河北省南部和河南省部分地区,这种退化趋势可能与城市化进程加快、土地利用变化以及环境污染等因素有关。

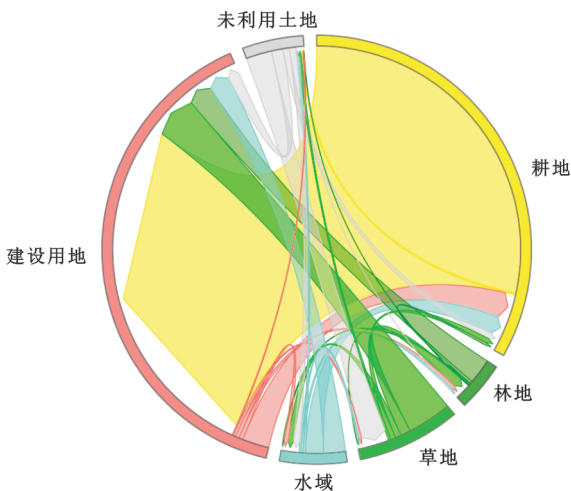


图 8 2005—2015 年土地利用转化

Fig. 8 Land use transfer (2005—2015)

植被生长对降水响应较气温更敏感,这与半干旱区植被生长对水分累积效应的依赖性密切相关,特别是在山东省等区域,降水滞后 3 个月的高相关性

的区域面积相对较大,分别为 13.92% 和 13.08%,主要分布在河北省的大部分地区。

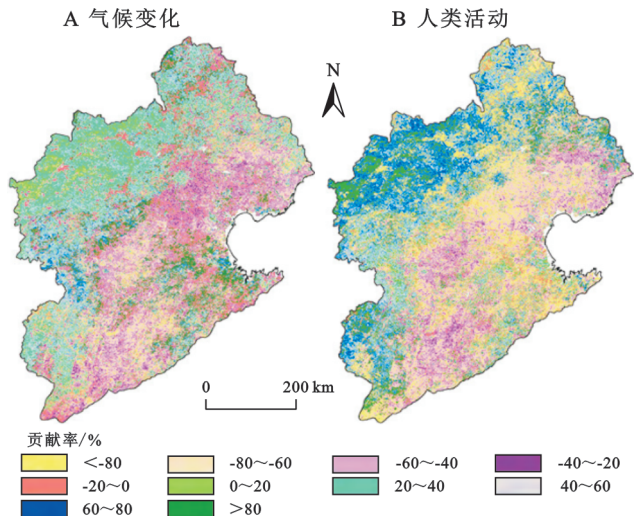


图 7 驱动因子对 FVC 贡献率分布

Fig. 7 Spatial distribution of driving factor contribution rates to FVC

可能源于季风气候下降水再分配与植被物候的耦合作用。西北干旱区的正响应显出热量条件改善促进植被恢复,气温的适宜上升能加强光合作用及延长生长季,加速植被生长<sup>[27]</sup>,而西南部负相关区反映高温胁迫通过增强蒸散耗水引发的生态逆向响应<sup>[28]</sup>。FVC 对降水的响应存在 16.24% 的无滞后效应区域,可能是大规模的灌溉农业通过改变地表水循环削弱了自然降水对植被的调控,这为解析气候-人类活动耦合作用提供了新的证据。

气候变化和人类活动对海河流域 FVC 的影响呈现显著的空间异质性,其分布特征与区域自然禀赋及人为干预强度密切相关。气候变化和人类活动的协同作用主导 FVC 变化,这与流域生态系统的多尺度耦合特征相吻合。正协同区域集中在山西和内蒙古过渡带,可能源于降水增加与生态工程在空间上的叠加效应,负协同区域在京津冀城市群的高度集聚,则可能与气候变化背景下人类高强度开发有关。此外,人类活动单独促进区表明人工干预对局部植被恢复的直接调控能力。人类活动对 FVC 的正向贡献集中分布于内蒙古东部及山西省东南部,这与退耕还林、京津风沙源治理等生态工程措施相一致,表明区域性生态政策对植被恢复的促进作用。人类活动的负向影响在京津冀城市群较为突出,揭示了快速城市化与农业高强度开发对植被的侵占。人类活动对海河流域 FVC 的影响呈现出“生态修复与开发胁迫并存”的特征,未来需要优化土地利用策略,强化生态补偿机制,以缓解人类活动对 FVC 的持续压力。

## 5 结论

(1) 海河流域FVC呈波动上升态势,空间分异显著。2001—2022年植被覆盖年均值为0.66~0.73,整体增速为0.000 3/a,空间上整体呈现西北低、东南高的分布格局。

(2) FVC对气候因子的响应具有显著的时空异质性和滞后效应。FVC与降水的相关性强于气温,且对降水滞后响应更为显著,平均滞后时间约为2.9个月。

(3) 气候变化与人类活动的协同作用主导FVC的演变。在驱动力上,二者共同驱动植被改善和退化的区域分别为43.58%和33.84%。在贡献率上,气候变化和人类活动分别对FVC发挥积极贡献的区域面积为46.79%,45.36%。

### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(4):672-685.
- [3] 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.
- Liu Y, Li C Z, Liu Z H, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19):6198-6208.
- [4] 徐勇,黄雯婷,窦世卿,等.2000—2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征[J].*环境科学*,2022,43(6):3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S Q, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3230-3240.
- [5] 张心茹,曹茜,季舒平,等.气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响[J].*环境科学学报*,2022,42(1):56-69.
- Zhang X R, Cao Q, Ji S P, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamic changes in the Yellow River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1):56-69.
- [6] 贾志峰,刘鹏程,刘宇,等.气候变化和人类活动对松辽流域植被覆盖的影响[J].*生态环境学报*,2023,32(1):1-10.
- Jia Z F, Liu P C, Liu Y, et al. Effects of climatic change and human activities on vegetation cover in Songliao River Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(1):1-10.
- [7] 屈莹波,赵媛媛,丁国栋,等.气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响[J].*干旱区研究*,2021,38(3):802-811.
- Qu Y B, Zhao Y Y, Ding G D, et al. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Xilinqol steppe [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3):802-811.
- [8] 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.
- [9] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16):4015-4020.
- [10] 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.
- Yan D H, Yuan Z, Yang Z Y, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(1):34-41.
- [11] 刘芑凯,饶良懿.海河流域植被变化时空分异及影响因素探测[J].*环境科学*,2025,46(4):2352-2362.
- Liu P K, Rao L Y. Detection of the spatial and temporal differentiation and influencing factors of vegetation changes in the Haihe River Basin [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4):2352-2362.
- [12] 王庆明,张越,杨姗姗,等.海河流域山区植被覆盖度与水热因子关系研究[C]//2022中国水利学术大会论文集:第四分册.北京,2022.
- Wang Q M, Zhang Y, Yang S S, et al. Study on the relationship between vegetation coverage and hydrothermal factors in the mountain areas of the Haihe River basin [C]//Proceedings of the 2022 China hydraulic engineering academic conference: volume IV. Beijing, 2022.
- [13] 张芳宁,杨亮洁,杨永春.1981—2016年黄土高原植被NDVI变化及对气候和人类活动的响应[J].*水土保持研究*,2023,30(2):230-237.
- Zhang F N, Yang L J, Yang Y C. Change of vegetation NDVI and its response to climatic and human activities in the Loess Plateau during 1981-2016 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):230-237.
- [14] 易浪,孙颖,尹少华,等.2000—2019年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素[J].*生态学报*,2023,43(2):798-811.
- Yi L, Sun Y, Yin S H, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the

- Yangtze River Basin from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(2):798-811.
- [15] 黄砺成,莫兴国.海河流域生态系统净初级生产力对气象干旱的响应与弹性[J].*植物生态学报*,2024,48(10):1256-1273.
- Huang L C, Mo X G. Response and resilience of net primary productivity of the Hai River Basin ecosystems under meteorological droughts [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024,48(10):1256-1273.
- [16] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].*Earth System Science Data*, 2019,11(4):1931-1946.
- [17] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100[J]. *Sustainability*, 2020,12(2):477.
- [18] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].*资源科学*,2004,26(4):153-159.
- Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153-159.
- [19] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968,63(324):1379-1389.
- [20] Li P, Wang J, Liu M M, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015[J]. *Catena*, 2021,203:105331.
- [21] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2015,21(9):3520-3531.
- [22] 段艺芳,任志远,孙艺杰.陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应[J].*生态学报*,2020,40(10):3408-3419.
- Duan Y F, Ren Z Y, Sun Y J. Time-lay effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10):3408-3419.
- [23] 王会静,郭玉川,白运保,等.新疆植被动态格局及其对气候的时滞效应[J].*农业工程学报*,2023,39(11):137-145.
- Wang H J, Guo Y C, Bai Y B, et al. Dynamic pattern of vegetation in Xinjiang and its time-lag effect on climate [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(11):137-145.
- [24] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004,57(4):535-554.
- [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.
- He L, Zeng X M, Qian D, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its climatic factors in the Haihe River Basin in recent 17 years [J]. *Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition*, 2020,40(3):54-61,68.
- [26] 翟盘茂,余荣,郭艳君,等.2015/2016年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J].*气象学报*,2016,74(3):309-321.
- Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. The strong El Nino in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(3):309-321.
- [27] 崔利芳,王伦澈,屈赛,等.气温、降水量和人类活动对长江流域植被NDVI的影响[J].*地球科学*,2020,45(6):1905-1917.
- Cui L F, Wang L C, Qu S, et al. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China [J]. *Earth Science*, 2020,45(6):1905-1917.
- [28] 李思楠,赵筱青,谭琨,等.孟加拉国博多河流域NDVI时空变化及其与气候因子的相关性[J].*水土保持研究*,2021,28(1):139-146.
- Li S N, Zhao X Q, Tan K, et al. Spatiotemporal variation of NDVI and its relationship with climate in Padma River Basin of Bangladesh [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(1):139-146.