

伊犁河流域植被覆盖时空变化趋势及驱动力*

金晓亮^{1,2}, 孙慧兰^{1,2}, 叶茂^{1,2}, 苏骅³, 杨涵¹, 吴芳¹

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054
3. 保山学院资源环境学院, 云南 保山 678000

摘要: 伊犁河流域作为中亚保存最完好的干旱半干旱区生态景观之一, 其植被覆盖影响区域的生态平衡和气候变化。本文基于MODIS NDVI数据集和像元二分模型、Hurst指数和BFAST模型对2001—2022年伊犁河流域植被覆盖度(FVC)时空变化和持续性进行分析。结果得出: 1) 伊犁河流域近22年期间植被覆盖总体上呈波动上升趋势, 平均植被覆盖度为0.18, 以较低植被覆盖为主。植被分布具有很大的空间差异性, 上游和中游植被覆盖度明显高于下游区域。2) BFAST模型分析表明伊犁河流域植被覆盖增加和退化分别占比47.3%和52.7%, 植被退化趋势略微高于植被增长趋势; Hurst指数表明未来植被呈正向增加趋势和逆向减少趋势分别占比62.42%和16.84%。BFAST模型和Hurst指数耦合叠加17种结果分析得出植被覆盖未来趋势, 总体上呈正向增加趋势(65.22%)占比大于逆向减少(15.07%)和占比19.71%的区域无法预测(不确定)。整体上未来植被呈正向增加趋势。3) 基于地理探测器模型分析表明, 整个流域降水和气温对植被覆盖影响最大, 对于各个子区域而言, 上游地区地形以河谷为主, 主要影响因子为海拔高低, 中游地区以气温和GDP两个因素为主, 下游地区以气温和降水为主。本文研究结果对伊犁河流域生态环境平衡和未来植被变化趋势提供科学技术支持。

关键词: 植被覆盖; 像元二分模型; Hurst指数; BFAST模型; 伊犁河流域

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)02-0042-14

The spatiotemporal change trends and driving forces of vegetation coverage in the Ili River Basin

JIN Xiaoliang^{1,2}, SUN Huilan^{1,2}, YE Mao^{1,2}, SU Hua³, YANG Han¹, WU Fang¹

1. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China
2. Xinjiang Arid Area Lake Environment and Resources Laboratory, Urumqi 830054, China
3. School of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan 678000, China

Abstract: The Ili River Basin is one of the best-preserved arid and semi-arid ecological landscapes in Central Asia, its vegetation coverage affects the regional ecological balance and climate change. Based on the MODIS NDVI dataset and the binary pixel model, the Hurst index and BFAST model are used to analyze the spatiotemporal changes and persistence of the Fractional Vegetation Cover (FVC) in the Ili River Basin from 2001 to 2022. The results are as follows: 1) Over the past 22 years, the vegetation coverage in the Ili River Basin has generally shown a fluctuating upward trend. The average vegetation

* 收稿日期: 2024-05-20 录用日期: 2024-06-18 网络首发日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(41761004); 第三次新疆综合科学考察专题(2021xjkk0406); 新疆师范大学青年拔尖人才项目(XJNUQB2023-11)

作者简介: 金晓亮(1998年生), 男; 研究方向: 自然资源开发与规划;
E-mail: jinxiao1310@163.com

通信作者: 孙慧兰(1982年生), 女; 研究方向: 自然资源开发与规划;
E-mail: huilsunxjnu@sina.com

增强出版



ZR20240167

全文阅读



ZR20240167

coverage from 2001 to 2022 was 0.18, with low vegetation coverage being the main feature. The distribution of vegetation has significant spatial variability, with the vegetation coverage in the upstream and midstream areas being significantly higher than that in the downstream areas. 2) The BFAST model analysis shows that the increase and degradation of vegetation coverage in the Ili River Basin accounted for 47.3% and 52.7% respectively. The trend of vegetation degradation is slightly higher than that of vegetation growth. The Hurst index indicates that the future vegetation increasing trend accounts for 62.42% while the decreasing trend accounts for 16.84%. The superposition of 17 results from the BFAST model and Hurst index analysis shows that the future trend of vegetation coverage has an increasing trend of 65.22%, which is much greater than the decreasing trend (15.07%) and the unpredictable areas of 19.71%. Overall, the future vegetation shows an increasing trend. 3) Geodetector-based analyses show that precipitation, and temperature have the greatest influence on vegetation cover in the whole basin. For each sub-region, the topography of the upper reaches is dominated by river valleys, and the main influencing factor is altitude; while in the middle reaches, temperature and GDP are two dominant factors; in the lower reaches, temperature and precipitation are dominant. The results of this paper provide scientific and technical support for the ecological balance of the Ili River Basin and future trends in vegetation change.

Key words: vegetation coverage; pixel bisection model; Hurst index; BFAST model; Ili River Basin

植被覆盖度是衡量生态系统动态及其对环境变化响应方式的重要生态系数(He et al., 2023; Morellato et al., 2016), 在生态系统水碳循环及平衡环节上具有重要影响(Penuelas et al., 2016; Bai et al., 2020)。社会经济的快速发展加剧了对自然资源的开发(Kang et al., 2018), 人类活动对区域生态环境施加了压力, 造成了一系列环境问题(Chen et al., 2021), 威胁到自然系统与人类生产之间的平衡和区域的可持续性(Gonçalves et al., 2020; 肖笃宁等, 2002)。特别是干旱区植被覆盖度直接关系到土壤水分分布、生态系统的水资源利用以及水文循环的稳定性(Caparrós-Santiago et al., 2020)。对于干旱区植被变化对自然和人文因素的响应定性、定量分析鲜有研究。伊犁河流域作为中亚地区重要的水源地之一, 其植被状况演变对该地区水文循环和生态环境产生了深远的影响。

目前用于估算植被覆盖度的技术和方法有深度学习、激光雷达、多源数据融合、无人机技术、高光谱遥感、机器学习等(Zhong et al., 2022)。一些学者集中在一方面或多方面因素构建一个或多个指标: 冯金杰等(2016)研究表明降水量和温度对伊犁河谷植被覆盖的影响具有显著的空间非平稳性特征, 不同区域的植被覆盖驱动因素也有所不同。其中MODIS NDVI数据集产品被大量学者用于植被覆盖度的计算及其动态变化的定量分析。已有学者使用BFAST模型对区域植被(Li et al.,

2019)、气温和降水变化(Brakhasi et al., 2021)等领域的研究, 对研究表现出很好的适用性。像元二分模型是常用的FVC估算方法, 其操作较为简单(Yan., 2022; 钟旭珍等, 2023)。可直接利用NDVI数据来进行计算(Li et al., 2022; Yang, 2022)。徐虹等(2022)和李加顺等(2023)通过统计学方法分析了海拔高程影响下NDVI空间变化特征, 表明在海拔4 000 m以下NDVI随海拔升高有增加趋势, 4 000 m以上NDVI下降, 自然因素对植被覆盖具有主要作用。王劲峰等(2017)提出地理探测器模型, 该模型通过检测不同区域变量的方差来分析变量之间的关系, 能够有效地识别空间分布的驱动因素和交互效应。

综上, 本文基于Landsat系列数据, 采用像元二分模型、Hurst指数与BFAST模型, 结合地理探测器方法, 试图定量分析2001—2022年伊犁河流域植被覆盖的变化趋势、可持续性, 识别和评估不同区域内植被覆盖的主要驱动因子, 为流域生态保护和管理提供科学依据。

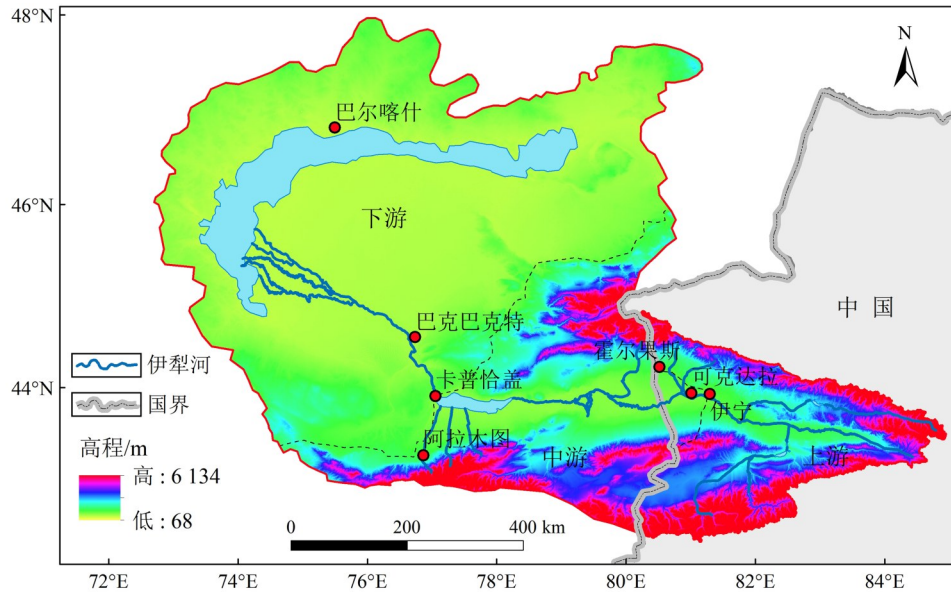
1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

伊犁河流域位于中国新疆西部、哈萨克斯坦东南部, 属于半干旱气候类型, 水资源主要来源于中国, 消耗于哈萨克斯坦共和国(梁红闪等, 2020)。是中亚重要的跨境河流, 横跨多个气候带

与生态区,地形和土地利用方式差异显著。是目前世界上保存最完好的半干旱区域生态景观之一(王洪亮等,2018)。根据王姣妍等(2009)的研究,将源头至伊宁市划分为上游,伊宁市至卡普恰盖水库尾端为中游,卡普恰盖水库至巴尔喀什湖为下游(图1),以此将流域分区作为数据分析的基

础。伊犁河流域具有复杂的地形和多样的生态环境,不同区域的自然条件和人类活动存在显著差异。这些差异可能导致各区域植被覆盖的时空变化规律及其驱动因子有很大不同。为了更精确地理解和管理流域内的植被覆盖变化,本文分别对全流域、上游、中游和下游进行了分析。



审图号为GS(2023)2767号,底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 NDVI数据 采用NASA Terra 卫星搭载的MODIS 仪器获得的 2001—2022 年 MOD13Q1、MOD13A1 数据集,通过GEE 遥感大数据平台进行调用、预处理和下载,使用ArcGIS10.6进行拼接、镶嵌、投影转换和裁剪等预处理,消除云和大气效应,在GEE 云平台上使用中值滤波法,通过在每个像素周围的邻域中选择最大值合成法来替换该像素的值,进行NDVI数据的提取与合成,下载后数据使用ENVI5.3处理,使用像元二分模型来计算数据集的月度及年度FVC。

1.2.2 地形数据 DEM 高程数据来自 2020 年 USGS Earth Explorer: SRTM 3 Arc-Second Global, 高程分辨率为 30 m,一共下载 107 景,使用ArcGIS10.6进行镶嵌及裁剪,为研究区海拔、坡度和坡向进行提取。

1.2.3 土地覆盖数据 土地覆盖数据(LULC)来自 Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, Sentinel-2 10 m Land Cover Time Se-

ries, 该产品空间分辨率为 10 m, 将土地覆盖类型分为 10 类, 本文将此数据作为植被覆盖驱动因素的人为因子, 真彩色影像来自 ESRI。

1.2.4 高空地面气象数据 来自 Copernicus Climate Data Store ERA5 陆地再分析数据集。平均 2 m 气温数据单位为 K, 降水数据集单位为 mm, 空间分辨率为 0.05°, 时间分辨率为 1 个月。蒸发(ET)数据集来自 ERA5-Land, 植被蒸腾产生的蒸发量, 此变量从预测时间开始到预测步骤结束累积, 因此选取该指标为其驱动因子之一。在使用 ERA5 数据时, 已仔细阅读相关的文档和使用条款。气候类型数据集来自 World maps of Köppen-Geiger climate classification, 空间分辨率为 0.1°。地面气象站数据来自中国气象数据网。

1.2.5 人类活动及其他数据 研究区哈萨克斯坦人口格网数据来自 World People, 空间分辨率 1 000 m, 单位为每 km² 人数。区域 GDP 数据来自 Github, 空间分辨率 0.5°; 中国人口、GDP 数据来自地球资源数据云平台, 空间分辨率 1 000 m, 其

他数据如行政区划数据和流域分区数据来自 Hydro-Sheds 网站, 将其作为植被覆盖影响因子指标, 数据来源见增强出版: 附表 1, 植被覆盖驱动因子见图 2。最终使用 ArcGIS 统一其各项栅格数据分辨率。

2 研究方法

2.1 像元二分模型(DPM)

像元二分模型(DPM)通常指的是在遥感领域中应用的一种像元级别的分类方法, 其中地表被划分为两个类别。这种方法通常被用于遥感图像中的二元分类问题, 例如植被与非植被、水域与非水域等。该模型将每个像元视为一个独立的单元, 并为每个像元分配一个类别标签。像元二分模型适用于许多应用类型, 包括土地覆盖分类、

植被监测等。植被覆盖值(FVC)通常用于介于 0~1 的数值表示, 其中 0 表示没有植被, 地表完全裸露; 1 表示地表完全被植被覆盖

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中 NDVI 为归一化植被指数, $NDVI_{soil}$ 为全部裸地的栅格像元, $NDVI_{veg}$ 为全部为植被的像元。受栅格本身的影响, 实际情况下两者不可能为 0 和 1。参考 Li et al.(2021)和冯莉莉等(2014)的研究, 对 MODIS NDVI 图像进行频率直方图统计, 去除异常值和归一化处理, 使用 S-G 滤波法对本研究所使用的时间序列数据进行平滑处理, 以改善数据的可读性和降低噪声的影响。按照以上公式计算流域内 FVC 值。

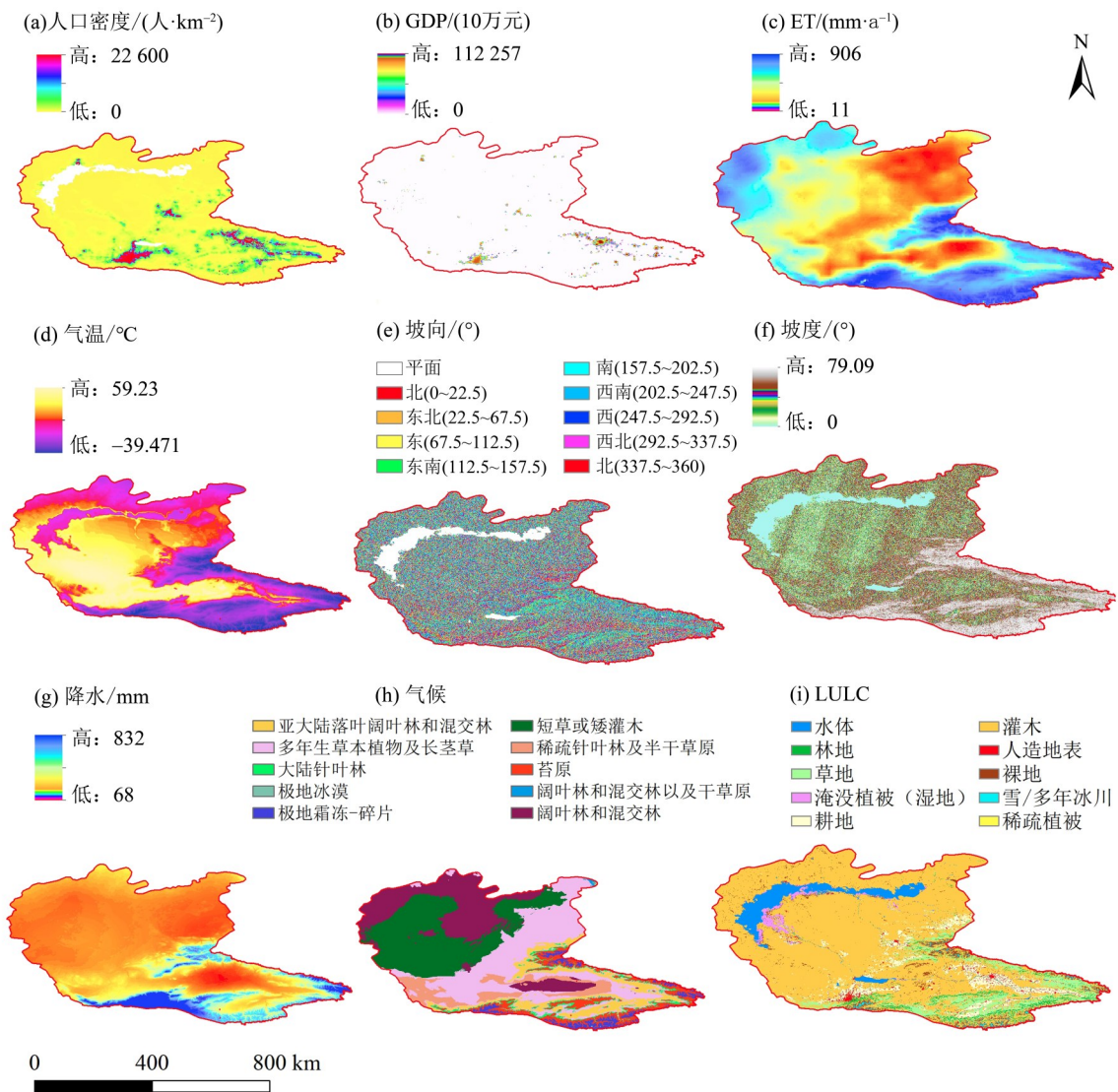


图 2 伊犁河流域植被覆盖影响因素空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of factors affecting vegetation coverage in the Ili River Basin

2.2 Hurst 指数

Hurst 指数(H)用于描述时间序列长期记忆性或长程相关性的统计量,本文利用 Python 分析出植被覆盖 Hurst 指数,根据 Geng et al.(2022)的研究成果, H 在 0~1 之间: $H < 0.5$ 表明时间序列存在负相关性,即在序列中的较小值更可能跟在其他较小值之后, $H = 0.5$ 表明时间序列是随机游走,即过去的值与未来的值无关; $H > 0.5$ 表明时间序列存在正相关性,即在序列中的较大值更可能跟在其他较大值之后(Li et al., 2021)。通过计算 FVC 时间序列的重标度范围来实现,涉及到计算序列的均值、标准差,然后通过不同的时间尺度对序列进行分解,计算重标度范围。

2.3 BFAST 模型

Verbesselt et al.(2010, 2012)对该方法进行了比较完整的描述和介绍, BFAST(breaks for additive seasonal and trend)模型包括以下主要元素:①趋势项(trend),描述时间序列的长期趋势,可以是线性或非线性趋势;②季节性项(seasonal),描述时间序列的季节性变化,通常通过周期性的模式来建模;③突变点(breaks),描述时间序列中发生的结构性变化。BFAST 趋势分量和季节分量通过以下分解公式得到

$$Y_t = T_t + S_t + E_t, \quad t = 1, 2, \dots, n,$$

式中 Y_t 为 t 时观测到的值, T_t 为趋势组分, S_t 为季节性组分, E_t 为残差组分。其中趋势组分

$$T_t = a_t + b_t t, \quad t = 1, 2, \dots, n,$$

式中 a_t 和 b_t 为趋势项系数;季节性组分

$$S_t = \gamma_j \sin\left(\frac{2\pi j t}{f} = \delta_j\right), \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

式中 γ_j 为振幅, δ_j 为分段数量, f 为频率,其中振幅、分段数量为未知项,频率为已知项。

BFAST 模型的主要步骤:①拟合趋势和季节性:使用传统的时间序列分解方法,例如 LOESS

或 STL,来拟合时间序列的趋势和季节性成分;②检测突变点:对拟合的趋势和季节性成分进行突变点检测,识别可能的结构性变化;③模型参数估计:对每个突变点附近的时间窗口进行 BFAST 模型的参数估计,包括趋势项和季节性项;④突变点验证:对检测到的突变点进行验证和排除,确保它们不是由噪声引起的虚假信号。本研究利用 RStudio 加载最新的 BFAST 包,进行突变统计分析(R core team, 2018)。根据已有研究(Bra-khasi et al., 2021; Higginbottom et al., 2020),使用此模型提取出 FVC 的趋势显著性、趋势断点、发生时间、和突变类型、突变年份和次数(钟旭珍等, 2023),非线性变化趋势见增强出版:附表 2。

2.4 地理探测器

地理探测器(GeoDetector)是一种用于探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的统计学方法(王劲峰等, 2017)。本文主要使用因子探测器和交互探测器,两者主要为探测某因子 X 多大程度上解释了变量 Y 的空间分异,用 q 值度量($0 \leq q \leq 1$),如果影响因子的 q 值约接近 1,说明该因子对 FVC 的解释性更强;反之则弱,或者是影响因子具有独立性。因子探测可表示为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2,$$

式中 $h = 1, 2, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区 Y 值的方差。

交互探测用于识别不同解释变量之间的交互作用,评估 2 个因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力,或这些因子对其影响是否相互独立,首先分别计算 2 种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 计算其交互时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$, 并对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较,其交互方式见表 1。本文主要选取伊犁河流域的 10 个影响因子数据

表 1 地理探测器交互类型

Table 1 Geodetector interaction types

| 判断依据 | 交互方式 |
|--|----------|
| $q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}(q(X_1), q(X_2))$ | 非线性减弱 |
| $\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1) + q(X_2))$ | 单因子非线性减弱 |
| $q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$ | 双因子增强 |
| $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ | 独立 |
| $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ | 非线性增强 |

作为自变量, 相应时期的FVC作为因变量进行交互式探测。本文将对伊犁河流域的全流域及其上游、中游和下游区域, 分别进行时空规律挖掘和驱动因子探测。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空特征分析

3.1.1 空间分布特征 通过像元二分模型计算伊犁河流域植被覆盖值, 在 ArcMap 中进行可视化(图3), 伊犁河流域FVC分布具有明显的地域差

异, 伊犁河流域植被覆盖呈现出上游 > 中游 > 下游的趋势。FVC总体上东南(中国境内)高西北(哈萨克斯坦境内)低, 其多年平均FVC值为0.18, 结合研究区土地覆盖图分析得出: 低植被覆盖区域主要分布着戈壁、水域、永久积雪和荒漠, 中等植被覆盖区主要分布着耕地、草原和低矮灌木, 高植被覆盖区主要分布着灌木、针叶林、落叶阔叶林和草原森林, 土地覆盖以荒漠、草地、林地和耕地为主。

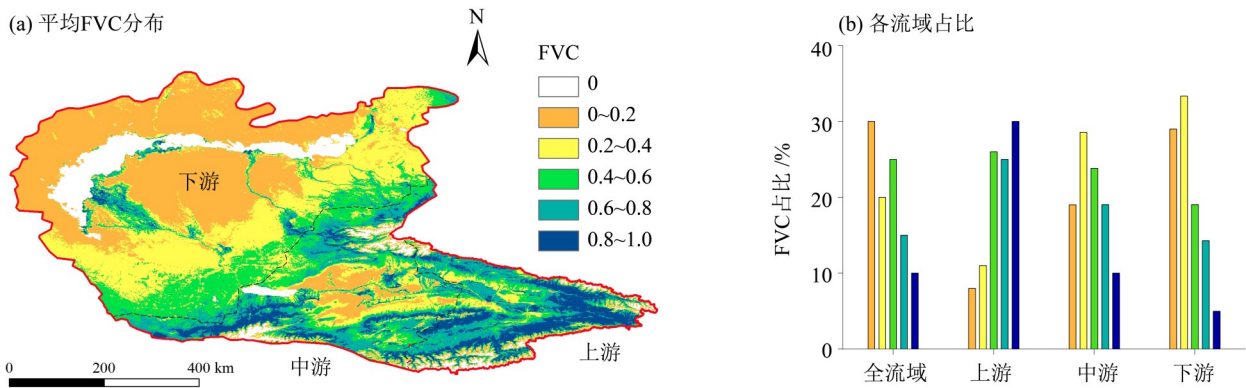


图3 2001—2022年伊犁河流域平均FVC分布

Fig. 3 Distribution of average FVC in the Ili River Basin and share of each basin from 2001 to 2022

3.1.2 时间变化特征 对伊犁河流域FVC统计分析得出该区域年、季节以及月平均值, 并进行可视化制作出月变化折线图(图4), 得出2001—2022年FVC年际变化(图5), 年内季节变化和月度变化, 结果得出伊犁河流域植被覆盖整体上呈现缓慢波动增加, FVC最低值出现在2012和2014年, 最高值出现在2016年, 2003—2015年波动趋势平稳。由于研究区地处中亚干旱区, 降水较少, 除上游之外, 植被大多为荒漠草原的低矮灌丛, 这与研究区多种小区域气候类型具有明显相关性。从图4可知, 7月FVC值最高, 12月FVC值最低, 2~7月FVC值随时间增加逐渐上升, 随后呈现下降趋势, 7~11月FVC值随时间逐渐降低。伊犁河流域整体上春夏季植被覆盖情况比秋冬季植被覆盖情况好(图5), 不同季节FVC值随时间变化出现大范围波动, 主要季节波动为春季至夏季期间以及秋季至冬季之间的过渡时期, 据年际变化来看较为稳定, 季节波动较为明显。

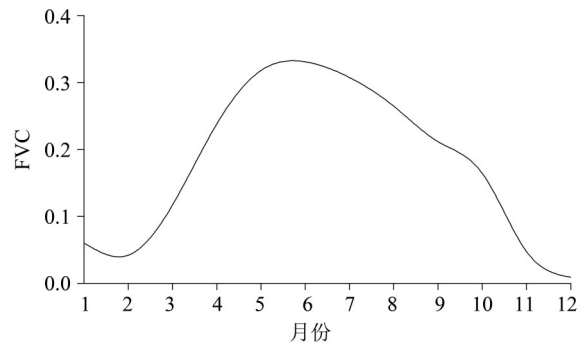


图4 伊犁河流域月FVC变化

Fig. 4 Monthly FVC changes in the Ili River Basin

3.2 植被覆盖非线性趋势特征

运用BFAST模型改进算法BFAST01, 对2001—2022年伊犁河流域FVC进行突变点监测, 得到伊

犁河流域FVC值的非线性图(图6), 伊犁河流域分为8种非线性变化趋势类型(图6b), 在本研究中, 趋势类型为单调递减占比16.8%, 为占比最高, 集中分布于流域中、上游地区; 单调递增主要分布于流域源头及下游地区; “单调递增+”主要也是分布于中、上游地区; “单调递减-”分布于哈萨克斯坦和我国交界区域; “中断-+”主要分布于流域上游和中游伊犁州境内; “中断+-”主要分布于流域下游哈萨克斯坦境内巴尔喀什湖东南侧; “反转+-”主要分布于流域中游卡普恰盖水库周围;

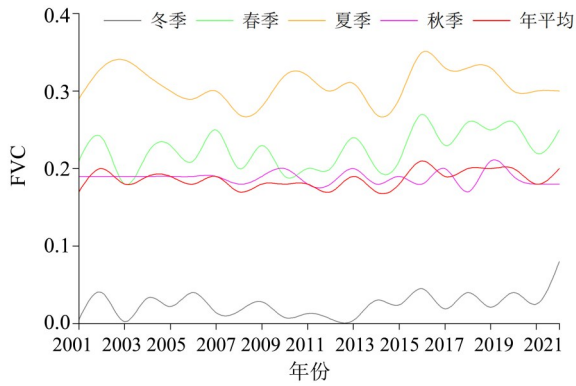


图 5 伊犁河流域FVC时间变化

Fig. 5 Temporal changes in FVC in the Ili River Basin

“反转-+”分布于上游偏南位置和中游偏北位置。研究发现，整体趋势表现为增加的占比(47.3%)小于整体趋势为减少(52.7%)，说明流域内植被覆盖发展趋势轻微减弱。显著性检测结果得出(图 6c)，呈现显著占比 37.9%，不显著占比 62.1%。本研究由 GEE 提取出 NDVI 突变时间，流域发生突变主要集中在 2003—2014 年，产生断点的年份主要集中在 2011 年，像元面积占比 22.6%，其次还有 2006 和 2013 年。将各个趋势类型基于年份横向上分为：2001—2006 年，2007—2014 年，2015—2020 年，2021—2022 年共 4 个阶段发生突变的差异，“反转-+”和“中断+”是发生突变最多的类型，主要集中在 2015—2020 年阶段，占比 19.2% 和 23.6%，其他突变类型占比较为均匀；在下游沙漠无植被区未检测到突变。

根据流域 FVC 时间变化趋势，2017 年开始上中下游区域最大突变面积缓慢减少。流域植被覆盖数据得出，年内植被覆盖具有很强的季节性，断点主要发生在 11 月，季节性断点主要发生集中在 2002—2005 年。此外，流域突变断点发生次数占比：1 次(42.6%)，2 次(8.5%)，3 次(11.6%)和 4 次(37.3%)。据图 7 可知，发生 1 次占比最多，其主要分布于上游伊犁州境内，2 次占比最少，主要分布于巴尔喀什湖周围，3 次主要分布于中游哈萨克斯坦阿拉木图境内，4 次主要分布于中哈两国之间卡普恰盖水库上游区域和中游区域。流域中游和下游断点次数以发生 3 次和 4 次为主，上游地区发生 1 次断点的较多。全流域为发生 1 次和 4 次断点的居多，主要集中于上游和中游高海拔地区以及巴尔喀什湖东南侧湿地。

3.3 植被覆盖未来趋势及可持续性

为探究清伊犁河流域植被覆盖的可持续性趋势，本研究同时也分析出流域植被覆盖(FVC)的

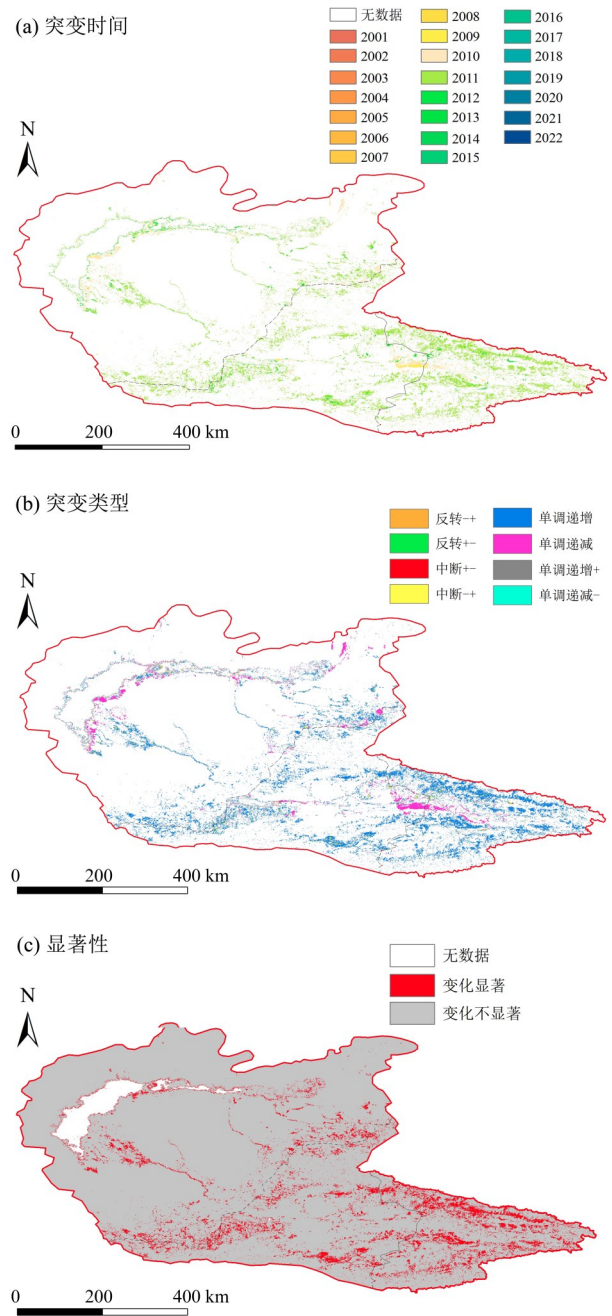


图 6 BFAST01 模型检测 FVC 突变结果

Fig. 6 BFAST01 model for detecting FVC mutation results

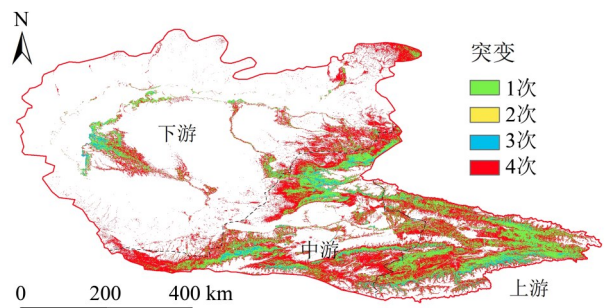


图 7 FVC 突变频率分布

Fig. 7 Vegetation cover mutation frequency distribution

Hurst 指数(图 8a), 通过统计分析, 使用最小二乘法拟合得出, $H < 0.5$ 的区域(占比 16.84%), 植被增加趋势在未来可能会有降低的趋势; 植被降低的趋势会在未来呈增加的趋势。 $H > 0.5$ 的区域(62.42%)植被覆盖具有正向持续性, 未来具有较

好的正向发展趋势; $H = 0.5$ 的区域(20.74%)植被覆盖未来发展趋势具有不稳定及不确定性(包括水体和永久积雪区域)。Hurst 指数分析结果得出, 伊犁河流域 FVC 未来整体发展较为积极, 发展趋势为正向增加, 少部分区域未来发展趋势不稳定。

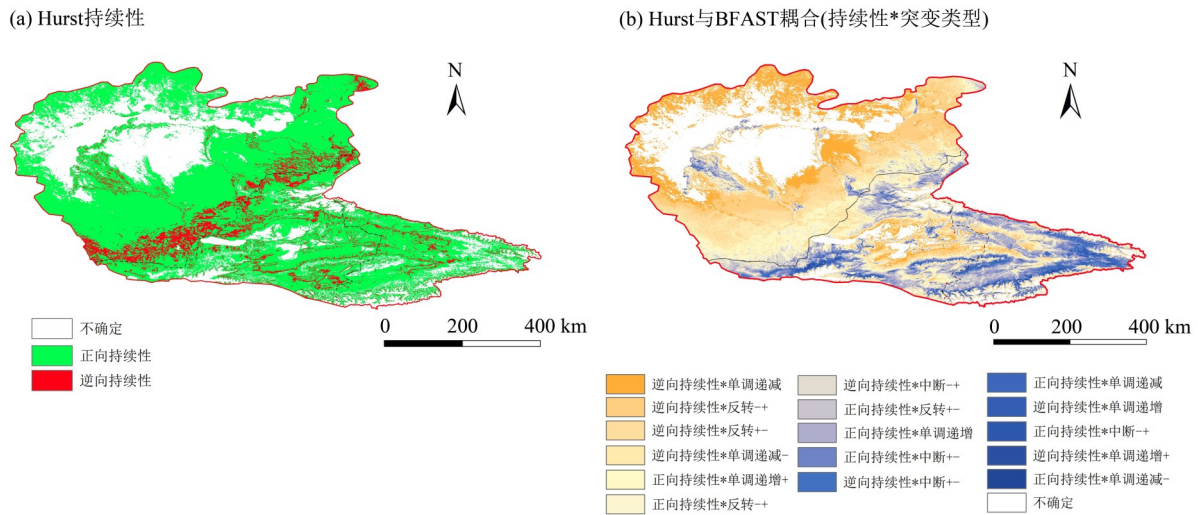


图 8 伊犁河植被覆盖发展耦合结果

Fig. 8 Coupled results of vegetation cover development in the Ili River

为进一步分析伊犁河流域植被覆盖发展趋势非线性特征和未来可持续性, 本研究将 Hurst 指数可持续性分析结果和 BFAST01 模型非线性分析结果(图 6b)相结合, 得到一个可持续分析和非线性分析耦合结果(图 8b), 本次耦合有 17 种结果, 此耦合结果比较详细地分析了伊犁河流域植被覆盖未来发展的趋势, 未来植被覆盖呈正向增加趋势面积占比 65.22%, 这些区域主要分布在流域上游和中游, 在流域内面积占比较大, 未来可持续发展趋势明显。未来植被覆盖成逆向减少(植被退化)面积占比 15.07%, 这些区域主要分布在流域中游和下游区域, 面积占比较低。最后 19.71% 的区域无法预测其植被覆盖发展趋势(不确定), 这些区域主要分布在流域中游和上游交界及下游沙漠区域(表 2)。

3.4 植被覆盖驱动因子探测

通过地理探测器因子探测得到不同因子对伊犁河流域植被覆盖空间分异的影响程度, 对 10 个影响因子进行分析。在 ArcGIS10.6 中创建渔网, 运用其工具箱中的采样工具, 输入 R 处理好的重分类 X 和 Y 栅格数据, 将 X 和 Y 提取到点, 作为交互探测数据。利用前面提到的 2 类探测器, 得到伊犁河流域植被覆盖驱动因子分析结果(图 9)。对 10 个因子进行分析, 得出单个因子解释力 q(表 3)。

表 2 Hurst 指数与 BFAST 模型耦合类型统计

Table 2 Statistics of coupling types between Hurst index and BFAST model

| Hurst 持续性 | BFAST 突变类型 | 占比/% | 总占比/% |
|------------------------|------------|-------|-------|
| 正向持续性 $0.5 < H < 1$ | 单调递增 | 18.61 | 65.22 |
| | 单调递减 | 6.21 | |
| | 单调递增+ | 7.33 | |
| | 单调递减- | 5.14 | |
| | 中断-+ | 4.32 | |
| | 中断+- | 5.41 | |
| | 反转+- | 7.33 | |
| 逆向持续性 $0 < H < 0.5$ | 反转-+ | 7.87 | 15.07 |
| | 单调递增 | 3.41 | |
| | 单调递减 | 2.31 | |
| | 单调递增+ | 2.03 | |
| | 单调递减- | 1.12 | |
| 不确定性 | 中断-+ | 1.88 | 19.71 |
| | 中断+- | 1.16 | |
| | 反转+- | 1.65 | |
| | 反转-+ | 1.51 | |
| 不确定 | 不确定 | 19.71 | 19.71 |

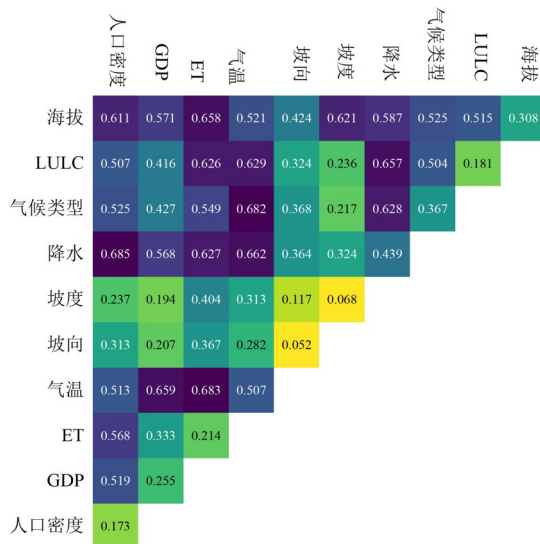


图9 地理探测器交互式探测结果

Fig. 9 Geodetector interactive detection results

基于因子和交互探测器分析整个伊犁河流域及其上中下游植被覆盖驱动因子，根据表3可知，整体上伊犁河流域植被覆盖驱动力因子主要为气温、降水等气象因子，其次为海拔、气候类型、GDP、LULC和人口密度等因子。上中下各流域影响因子各有差异，基于影响因子方面分析，气温和降水对上游和中游区域植被覆盖影响较大，略高于下游区域，气温和GDP对中游和下游区域影响较大。基于各区域分析，上游区域影响最大的是海拔：海拔1500m以下植被覆盖度较高，1500~3000m处植被覆盖度开始降低，海拔3000~4000m植被覆盖度变化较为复杂，4000m以上几乎无植被覆盖。海拔是一个综合性指标，其变化会引起一系列环境因子的变化，例如气温、降水、土壤性质和光照等；其次是气温；坡向、坡度影响最小。对于中游区域，对植被覆盖影响最大的是气温，其次是GDP和降水，坡度坡向影响最小；最后下游区域，地势较为平坦，其影响最大的是气温和降水，其次为气候类型，坡度和

坡向影响最小。在交互式探测中2个因子交互探测影响力会大于单个因子探测影响力，全流域10种驱动因子交互探测结果显示(图9)，每个因子和气温交互时值会变大，与表3的因子探测结果具有相似性。

4 讨论

4.1 植被覆盖时空总体特征

在中亚干旱半干旱地区，国内外许多学者对植被覆盖、地表覆被变化的评估与预测做了大量的研究，本文从整个伊犁河流域出发，基于Landsat5、7、8的MODIS的NDVI数据，利用气象、DEM，人文因素等类型数据，选用像元二分模型、Hurst指数和改进的BFAST模型，对2001—2022年伊犁河流域植被覆盖进行非线性分析、突变检测和可持续性预测。得到该流域平均FVC值为0.18，和部分文献研究结果相近(刘春静,2016;塞米热·吾斯曼等,2024;郝鑫怡等,2024)，但与略低于刘天弋等(2023)的研究。这可能由于伊犁河谷雨量充沛，植被生长发育良好，植被覆盖率要高于整个伊犁河流域的平均值。伊犁河流域区域位置特殊，上中下游地区经纬度，海拔，气温和降水差异明显，区域FVC空间分布特征与数值差异对比明显。

从FVC时间变化特征上看(图10)，伊犁河流域植被覆盖在2008年以前增长趋势不明显，并且在2008年出现过大幅度降低，之后的6年呈缓慢降低趋势，2014年开始波动增加，2014和2015年出现一个降低的拐点。上游平均FVC=0.61，植被覆盖度较好，但在2008和2014年各出现过一次降低的拐点，变化趋势和全流域相似；中游在2002年出现了一个增加的拐点，2008和2014年出现降低的拐点；下游植被覆盖度较低，其中2008年出现降低拐点，2014年出现上升拐点，后期变化较为平稳。近30年中亚地区极端复合事件的总频次

表3 地理探测器驱动因子探测结果

Table 3 Geographic detector impact factor detection results

| q值 | 人口密度 | GDP | ET | 气温 | 坡向 | 坡度 | 降水 | 气候类型 | LULC | 海拔 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 全流域 | 0.173 2 | 0.255 3 | 0.214 4 | 0.507 2 | 0.052 1 | 0.068 1 | 0.573 2 | 0.521 5 | 0.181 3 | 0.308 3 |
| 上游 | 0.188 3 | 0.264 8 | 0.240 1 | 0.461 2 | 0.007 1 | 0.024 2 | 0.382 4 | 0.246 3 | 0.258 1 | 0.551 3 |
| 中游 | 0.214 8 | 0.400 2 | 0.221 7 | 0.521 3 | 0.185 1 | 0.176 3 | 0.384 6 | 0.335 7 | 0.198 3 | 0.317 4 |
| 下游 | 0.146 7 | 0.182 3 | 0.124 6 | 0.482 1 | 0.001 4 | 0.014 2 | 0.416 7 | 0.364 2 | 0.101 2 | 0.068 2 |

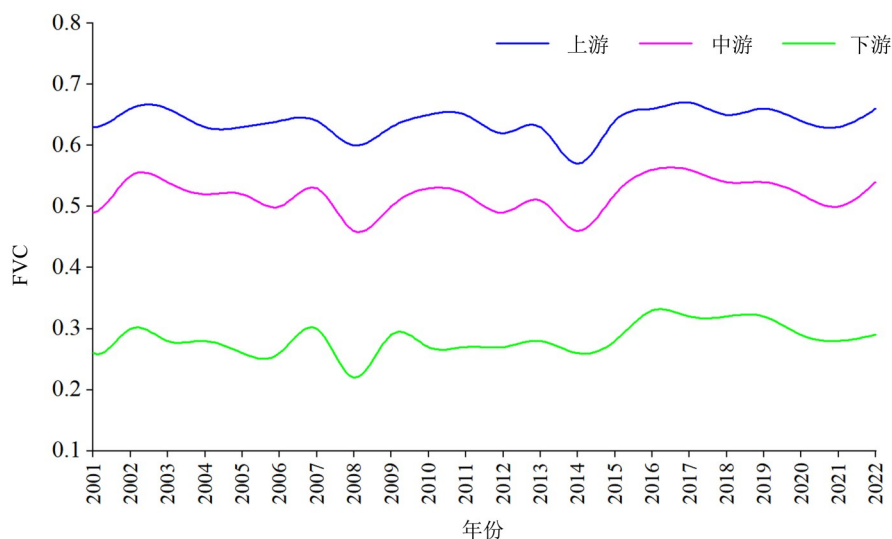


图10 伊犁河流域年际FVC变化特征

Fig. 10 Interannual FVC variation characteristics in the Ili River Basin

(tsum)高达总热浪事件频次的0.5倍,且以每年0.17的速率增长(金红梅等,2019)。平均气温异常(TAH, SPEI<-0.5)受季节的影响较大,在冬季、春季的增长幅度大于夏季、秋季的增长幅度。在中亚西北部及东部,发生热浪(SPEI<-0.5)累计的热量平均每年以15~30倍的趋势增长(Wang et al., 2022)。干热气象事件已威胁到植被的生长与存活,也是导致FVC值出现拐点的原因。下游地区的陶库姆沙漠和萨雷依希克特劳沙漠的两大荒漠区、气候变化和区域农业转型、基础设施建设等因素可能导致的FVC偏低(王春雅等,2021)。

4.2 植被覆盖非线性特征

伊犁河流域植被覆盖度变化受多种因素影响(Zhong et al., 2022)。伊犁河流域范围大,研究时间序列较长,本文在研究植被变化趋势时考虑到非线性特征。基于改进的BFAST模型来分析其植被覆盖的演变趋势和非线性特征,此模型适用于本区域进行突变检测(Mendes et al., 2022)。前面分析了伊犁河流域FVC的突变时间,突变类型、突变次数和突变显著性。FVC突变时间从2001—2022年,统计突变类型(增强出版:附表2)和断点突变次数(图8)。通过BFAST模型和Hurst指数的耦合叠加分析发现(表2),比较Hurst指数大于0.5(表明未来趋势可能持续)的时间段和BFAST模型识别出的趋势上升阶段,分析未来植被覆盖的正向增加趋势。两者叠加可以更加全面和准确地揭示植被覆盖的非线性特征和未来变化趋势。BFAST模型更侧重于检测过去数据中的突变点和趋势变化,这些变化受过去事件的影响较大。

Hurst指数则更注重时间序列的持久性,可能反映出更长时间尺度上的趋势,较少受短期波动的影响。虽然BFAST模型显示了过去有较多的减少趋势,但这些减少趋势可能是短期或阶段性的波动。而Hurst指数表明,从长期来看,未来的植被覆盖更可能呈现持续增加的趋势。这种突变可能是由于短期减少趋势的反转以及长期生态恢复措施和自然过程共同作用的结果。本文分析结果显示,植被覆盖呈现正向增加趋势的区域占比显著大于逆向减少区域,发现Hurst指数和BFAST模型叠加分析对于本区域研究具有很好的适用性。为进一步验证统计的准确性,本文基于Google Earth Engine Timelapse进行流域内突变前后的年份遥感影像对比(图11)。

本文从伊犁河流域上中下游分别取局部区域进行分析对比,上游区域选取“单调递减-”,突变时间为2016年,上游局部区域草地和灌木类型植被变为建设用地,图中FVC也可以识别到此区域颜色变得深黄,说明FVC值在变小,植被在减少,和突变类型为“单调递减-”表示特征相符;中游区域选取“单调递增+”,突变时间为2012年,局部区域裸地变为草地或草地和半灌木,识别到此区域FVC的颜色变为深绿,FVC值增加,也和类型为“单调递增+”表示特征相符;下游地区选择类型为“中断-+”,从图像变化特征上看下游局部区域在2009年出现减少,即为负断点,2018年随即增加,即FVC值先减小后增加,通过图像对比验证,BFAST01时间序列对植被覆盖非线性突变检测适用,分析结果也具有准确性。

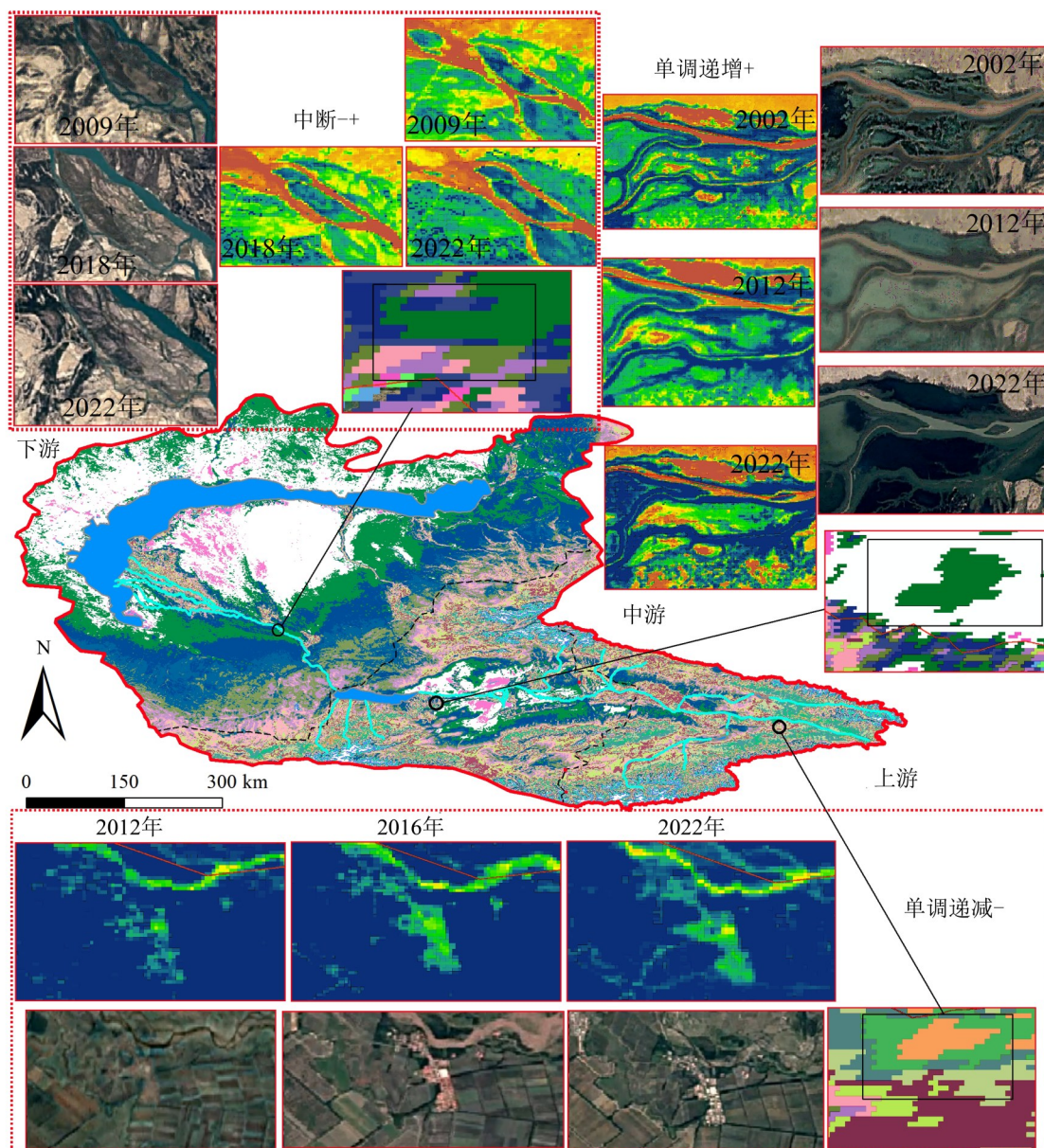


图 11 突变年前后FVC及Google Earth Engine Timelapse验证

Fig. 11 FVC and Google Earth Engine Timelapse verification before and after mutation

4.3 植被覆盖驱动力

为了更加准确分析流域的植被覆盖影响因子,考虑到研究区地跨中哈两国、区域土地利用方式和社会经济等人文因素以及地形地貌的差异性,本文基于地理探测器对流域植被覆盖影响因子进行更有针对性的分析,降水是全流域最大的影响因子。研究区处在中亚干旱半干旱区,区内东(中国境内)、西(哈萨克斯坦境内)降水量差异较大,对气温和气候带起着宏观调控的作用,对植被的生长及分布有着重要影响。气温,海拔,蒸散量等自然因素也有较大影响,这些方面与一些现实情况和一些学者分析也相符(刘亮等,2022)。当地植被受气候影响也较大,特别是研究区域面积较

大,经纬度跨度较大,气候类型复杂,也对植被类型与分布具有显著影响;自然因素中,坡度和坡向对本区域植被覆盖影响最小;人文因素中,GDP和LULC对植被覆盖影响最大,相比之下,人文因子对植被覆盖影响程度比自然因素低。原因是整个流域面积广阔,其中较大区域为荒漠无人区和草原灌木区,人口经济主要分布于沿河湖水资源较为充足区域。特别是温度较高降水较少区域,人类活动很难影响到这些区域的植被覆盖情况。人文因素中土地利用能很好的反应人活动因素,更能表现出植被覆盖的变化和识别植被覆盖增加或减少。

对于整个流域, 植被覆盖影响因素具有很大的差异性: 上游区域气温对 FVC 的影响大于降水, 原因是上游区域地处伊犁河谷境内, 整个区域降水量较为充足和均匀。此外, 此区域海拔差异较为明显, 海拔高低直接影响到气温的垂直分布, 因此也影响到植被覆盖的分布。人文因素中土地利用方式和区域人口密度改变了上游的土地利用结构和水资源保有量, 特别是建设用地和耕地对植被覆盖产生的影响。中游区域: 由于此区域位于哈萨克斯坦境内, 自然因素中地形较上游平缓, 降水较少, 气温差异较大, 对植被覆盖影响较大; 人文因素中, 哈萨克斯坦首都阿拉木图为此区域经济发达地区, 因此 GDP 和人口密度对植被覆盖影响较大。下游区域: 此区域深居内陆降水较少, 地形平坦, 沿伊犁河、巴尔喀什湖有城市分布, 人类活动频繁, 并且境内两大沙漠分布于此, 气温、降水、气候类型和 GDP 成为此区域植被覆盖的重要影响因素, 与上游和中游不同, 地形地貌对本区域植被覆盖影响微弱。

总之, 由于伊犁河流域地理位置的独特性和区域内环境的复杂性, 各种环境因素对其植被覆

盖的影响也存在差异性。因此, 对于影响伊犁河流域植被覆盖的因素和各个因素的关联性, 明确植被覆盖的制约因素, 因地制宜, 因时制宜制定生态恢复措施。2001—2022 年期间植被显著变化根据图 12 可知, 对于上游区域: 位于中国伊犁州境内, 植被覆盖度较中下游高, 未来植被增长趋势占比最高, 防治植被退化的同时加强生态建设, 促进自然保护区建设, 优化土地利用结构, 建设生态农业, 合理规划耕地利用, 确保生态环境不被破坏。对于中游区域: 位于阿拉木图州境内, 植被覆盖度相较于上游略低, 影响植被覆盖的因素主要为气温和降水, 人文因素也具有较大影响, 未来植被呈增长趋势的占比 80% 以上, 当地政府也大力推进流域生态环境建设, 确保保护好现有资源的同时, 维护好生态系统的稳定性和持续性。下游区域: 位于巴尔喀什湖周边, 包括伊犁河三角洲和巴尔喀什市等地区, 植被覆盖度较中上游低, 区域经济发展的同时应当稳定本区域生态环境可持续发展。同时加强对极端气候的预防, 防止气候变化造成的植被退化。

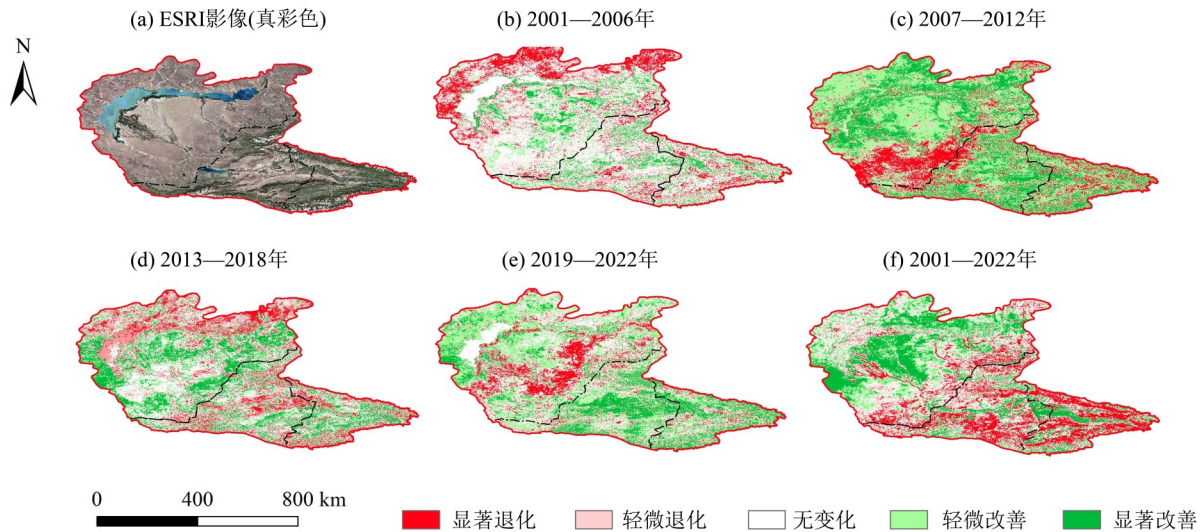


图 12 伊犁河流域植被覆盖变化趋势

Fig. 12 Vegetation coverage change trend in the Ili River Basin

5 结 论

本文基于 2001—2022 年 MODIS NDVI 数据集, 分析伊犁河流域 FVC 影响因子和持续性得到如下结论:

1) 植被覆盖变化的潜在机制形成了一种依赖性, 上中下游不同区域植被覆盖对气候变化和人

类活动的响应和适应机制并不相同。对伊犁河流域区域尺度上植被变化的结构信息的探索, 将大规模的植被研究范式应用到中亚伊犁河流域地区。

2) BFAST 模型趋势分析得出, 伊犁河流域植被覆盖趋势表现为增加和减少分别占比 47.3% 和 52.7%, 说明研究区有较轻微的植被退化。Hurst 指数分析表明伊犁河流域未来植被属于正向增加趋

势和逆向减少趋势占比分别为 62.42% 和 16.84%，说明此区域植被覆盖未来趋势为正向增加，BFAST 模型和 Hurst 指数耦合叠加分析未来植被覆盖非线性特征，结果得出呈正向增加趋势(65.22%)占比大于逆向减少(15.07%)。

3) 地理探测器分析结果表明各流域植被覆盖影响因子存在差异性，全流域降水、气温和气候

类型对植被覆盖影响较大，说明此区域气温和降水对植被覆盖具有密切关系，对于各个子区域而言，上游植被覆盖主要影响因子为海拔和气温，中游地区以气温和 GDP 为主，下游地区以气温和降水为主。应因地制宜对不同区域制定相应政策，采取不同措施，合理保护植被。

参考文献:

- 丁文荣. 2016. 滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 36(6): 252-257.
- 冯金杰, 张辉国, 胡锡健, 等. 2016. 降水量和温度对植被覆盖指数影响的空间非平稳性特征——以新疆伊犁河谷地区为例[J]. 生态学报, 36(15): 4626-4634.
- 冯莉莉, 何贞铭, 刘学锋, 等. 2014. 基于 MODIS-NDVI 数据的吉林省植被覆盖度及其时空动态变化[J]. 中国科学院大学学报, 31(4): 492-499+536.
- 郝鑫怡, 张喆, 郑浩, 等. 2024. 天山北坡经济带植被覆盖度动态变化研究[J]. 中国环境科学, 44(2): 1020-1031.
- 金红梅, 颜鹏程, 柏庆顺, 等. 2019. 近 70a 来中亚极端高温事件时空分布[J]. 干旱气象, 37(4): 550-556.
- 李加顺, 刘丽. 2023. 2000—2020 年云南省植被时空变化及影响因素分析[J]. 草地学报, 31(11): 3503-3513.
- 梁红闪, 王丹, 郑江华. 2020. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 39(7): 100-110.
- 刘春静. 2016. 中亚干旱区植被退化及典型流域生态环境遥感监测[D]. 泰安: 山东农业大学.
- 刘亮, 关靖云, 穆晨, 等. 2022. 2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征[J]. 生态学报, 42(12): 4861-4871.
- 刘天弋, 孙慧兰, 卢宝宝, 等. 2023. 1998—2018 年新疆伊犁河谷植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 东北林业大学学报, 51(4): 68-74+79.
- 塞米热·吾斯曼, 杨涵, 钟瑞森, 等. 2024. 伊犁河三角洲植被覆盖度时空变化特征及影响因素[J/OL]. 水生态学杂志, DOI:10.15928/j.1674-3075.202312150382.
- 王春雅, 王金牛, 崔霞等. 2021. 藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析[J]. 地理研究, 40(11): 3191-3207.
- 王洪亮, 冯爱萍, 高彦华, 等. 2018. 伊犁河流域最大植被覆盖度的时空动态变化[J]. 环境科学与技术, 41(6): 161-167.
- 王姣妍, 路京选. 2009. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析[J]. 自然资源学报, 24(7): 1297-1307.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134.
- 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 2002. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 13(3): 354-358.
- 徐虹, 刘琴. 2022. 2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 29(1): 162-168.
- 钟旭珍, 王金亮, 邓云程, 等. 2023. 怒江-萨尔温江流域植被覆盖时空变化趋势及驱动力研究[J]. 生态学报, 43(24): 10182-10201.
- BAI P, LIU X, ZHANG Y, et al. 2020. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. [J]. Water Resour Res, 56(10): 2019WR027019.
- BRAKHASI F, HAJEB M, MIELONEN T, et al. 2021. Investigating aerosol vertical distribution using CALIPSO time series over the Middle East and North Africa (MENA), Europe, and India; A BFAST-based gradual and abrupt change detection [J]. Remote Sens Environ, 264: 112619.
- CAPARROS-SANTIAGO J A, RODRIGUEZ-GALIANO V, DASH J. 2021. Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review [J]. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 171: 330-347.
- CHEN S, HUANG Y, WANG G. 2021. Detecting drought-induced GPP spatiotemporal variabilities with Sun-induced chlorophyll fluorescence during the 2009/2010 droughts in China. [J]. Ecol Indic, 121: 107092.
- GENG S, ZHANG H, XIE F, et al. 2022. Vegetation dynamics under rapid urbanization in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area urban agglomeration during the past two decades [J]. Remote Sens, 14(16): 3993.
- GONÇALVES N B, LOPES A P, DALAGNOL R, et al. 2020. Both near-surface and satellite remote sensing confirm drought legacy effect on tropical forest leaf phenology after 2015/2016 ENSO drought [J]. Remote Sens Environ, 237: 111489.

- HE J, LYU D, HE L, et al, 2022. Combining object-oriented and deep learning methods to estimate photosynthetic and non-photosynthetic vegetation cover in the desert from unmanned aerial vehicle images with consideration of shadows.[J].Remote Sens, 15(1):105.
- HIGGINBOTTOM T P, SYMEONAKIS E, 2020. Identifying ecosystem function shifts in Africa using breakpoint analysis of long-term NDVI and RUE data [J]. Remote Sens, 12(11): 1894.
- KANG W, WANG T, LIU S, 2018. The response of vegetation phenology and productivity to drought in semi-arid regions of northern China [J]. Remote Sens, 10(5): 727.
- LI L H, ZHANG Y L, LIU Q H, et al, 2019. Regional differences in shifts of temperature trends across China between 1980 and 2017[J].Int J Climatol, 39(3): 1157-1165.
- LI J, WANG J, ZHANG J, et al, 2022. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. Ecol Indic, 136: 108620.
- LI J G, WANG J L, ZHANG J, et al, 2021. Dynamic changes of vegetation coverage in China-Myanmar economic corridor over the past 20 years [J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 102: 102378.
- MENDES M P, RODRIGUEZ-GALIANO V, ARAGONES D, 2022. Evaluating the BFAST method to detect and characterise changing trends in water time series: A case study on the impact of droughts on the Mediterranean climate[J].Sci Total Environ, 846: 157428.
- MORELLATO L, ALBERTON B, ALVARADO S T, et al, 2016. Linking plant phenology to conservation biology [J]. Biol Conserv, 195: 60-72.
- PENUELAS J, RUTISHAUSER T, FILELLA I, 2009. Phenology feedbacks on climate change [J]. Science, 324(5929):887-888.
- R CORE TEAM. 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna [CP/OL]. <https://www.R-project.org>.
- VERBESSELT J, HYNDMAN R, ZEILEIS A, et al, 2010. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series [J]. Remote Sens Environ, 114(12): 2970-2980.
- VERBESSELT J, ZEILEIS A, HEROLD M, 2012. Near real-time disturbance detection using satellite image time series [J]. Remote Sens Environ, 123: 98-108.
- WANG C, LI Z, CHEN Y, et al, 2022. Increased compound droughts and heatwaves in a double pack in central Asia [J]. Remote Sens, 14(13): 2959.
- YAN K, GAO S, CHI H J, et al, 2022. Evaluation of the vegetation-index-based dimidiate pixel model for fractional vegetation cover estimation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 60: 4400514.
- YANG S, SONG S, LI F, et al, 2022. Vegetation coverage changes driven by a combination of climate change and human activities in Ethiopia, 2003-2018 [J]. Ecol Inform, 71: 101776.
- ZHONG X Z, LI J, WANG J, et al, 2022. Linear and nonlinear characteristics of long-term NDVI using trend analysis: A case study of Lancang-Mekong river basin [J]. Remote Sens, 14: 6271.

(责任编辑 秦社彩)