

# 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析

王 星<sup>1,2</sup>, 霍艾迪<sup>1,2,3\*</sup>, 吕继强<sup>1,2</sup>, 赵志欣<sup>1,2</sup>, 陈 建<sup>1,2</sup>, 钟芳倩<sup>1,2</sup>,  
杨璐莹<sup>1,2</sup>, 管文轲<sup>4</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 西安 710054; 4. 新疆国投林草生态研究有限责任公司, 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:** 针对经济发展和全球气候变化给塔里木河干流植被恢复带来的严重威胁, 为加快塔里木河干流植被保护和恢复进程, 对保护成效进行动态监测和准确评估, 该研究选取 2001—2021 年 MODIS 遥感数据分析塔里木河干流植被覆盖度动态变化特征; 采用趋势分析法、变异系数法分析塔里木河干流植被发展趋势及稳定性, 通过相关分析及地理探测器等方法, 研究各驱动因素对植被覆盖变化的影响。结果表明: 塔里木河干流植被覆盖度总体呈现相对稳定的波动上升趋势, 且变化趋势具有明显季节性, 在夏季植被覆盖度高达 28.56%; 植被覆盖度由高到低的顺序为上游、中游、下游, 在空间上存在明显地域差异, 7 月份上游干流区域平均植被覆盖度可达到下游的 3.26 倍; 塔里木河 66.5% 的区域植被覆盖度呈增加趋势, 其中大部分区域 (49.0%) 为显著增加 ( $P < 0.05$ ); 自然因素和人类活动的共同作用是塔里木河干流植被覆盖度呈现快速增加和空间差异的主要原因, 其中又以人类活动对植被覆盖度影响更为直接。研究结果为当地生态环境保护提供科学依据。

**关键词:** 植被; 降水; 植被覆盖度; MODIS 遥感数据; 地理探测器; 塔里木河干流

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303016

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0284-09

王星, 霍艾迪, 吕继强, 等. 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 284-292. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303016 http://www.tcsae.org

WANG Xing, HUO Aidi, LYU Jiqiang, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation coverage in the mainstream of Tarim River, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 284-292. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303016 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

植被是生态系统之间能量传输的重要枢纽, 在涵养水源、气候调节和改善生态环境等方面扮演着不可或缺的角色<sup>[1-3]</sup>。植被覆盖变化对生态环境变化具有重要指示作用, 加强对植被覆盖状况的有效监测, 对区域乃至全球土地资源的合理规划利用以及生态环境保护具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。塔里木河 (简称塔河) 是世界五大内陆河之一, 也是中国最长的内流河, 20 世纪后半世纪由于不合理开发利用导致下游一度断流, 植被退化严重胡杨林大面积死亡, 自 2000 年生态输水工程实施以来, 区域内植被得到了有效恢复。从定量角度掌握塔河干流植被覆盖的时空演变规律并揭示其背后驱动因素, 对于旱区荒漠生态环境建设具有重要现实意义。

长期以来, MODIS 遥感数据因其时间序列完整、易获取、时空分辨率较好等优点在分析植被覆盖方面受到

国内外众多学者的青睐。近年来, 利用 MODIS/NDVI 数据进行植被动态变化特征及其驱动因素分析是众多学者的探讨热点。如张明祥等<sup>[6]</sup>利用贵州省 MODIS 遥感数据和气候数据研究人类活动和气候因子对植被覆盖变化的影响, 发现人类活动是贵州省石漠化区植被变化的主导因素。王琳等<sup>[7]</sup>基于一元线性回归方程和地理探测器等多种方法对黄河流域河南段植被覆盖与气象、地形、土地利用类型等因素的相互关系进行研究, 认为土地利用类型是影响植被覆盖的主要影响因子。李梦华等<sup>[8]</sup>通过趋势分析等方法分析了宁夏近 20 a 间植被覆盖度动态变化及驱动因素, 结果表明气候因素对植被覆盖的解释力较强。

近年来学者们针对塔河流域植被覆盖度特征及影响因素进行了大量研究, 如韦红等<sup>[9]</sup>对塔河流域 11 a 的植被时空动态变化进行分析, 发现从上游至下游植被逐渐减少, 以及植被覆盖率在 8 月份最高, 4 月份最低; 孙天瑶等<sup>[10]</sup>研究发现降水对 NDVI 的影响在气候因素中最为明显, 人类活动产生正向影响的地区主要位于在绿洲和塔河下游等地区附近; 郭继凯等<sup>[11]</sup>采用多种方法分析了人类活动和气候变化对植被覆盖的贡献, 研究表明塔河流域总体植被覆盖呈现明显改善趋势, 人类活动对植被覆盖作用更大。

目前对于塔河流域植被变化的研究大多集中在时空变化特征及气候因素或人类活动与植被覆盖变化的简单

收稿日期: 2023-03-03 修订日期: 2023-04-14

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目 (42261144749); 国家自然科学基金面上项目 (41877232)

作者简介: 王星, 研究方向为水文与水资源。

Email: wangxing199910@163.com

\*通信作者: 霍艾迪, 博士, 教授, 研究方向为遥感在水文生态等。

Email: huoaidi@chd.edu.cn

关联, 忽略了地形要素以及具体人类活动如土地利用、人口密度等影响因素对植被覆盖度的影响, 且对于因素之间的协同和制衡作用研究尚不够深入<sup>[12]</sup>。地理探测器的独特优势就为通过量化的度量值来反映两因素之间的交互作用强弱, 从而更好地判断植被覆盖度受两因子交互作用的影响。而且, 以上研究在空间尺度上多聚焦于塔河流域, 忽略了给予塔河干流, 这一对 2000 年以来生态输水工程效益反映最敏感的区域, 足够的重视。基于此, 本文选取 2001—2021 年 21 a 间塔河干流 MODIS 遥感影像数据, 通过数据预处理、趋势分析、相关分析、地理探测器等方法, 对塔河干流植被覆盖度的时空动态监测及变化特征进行定性和定量研究, 探讨不同因素对塔河干流植被覆盖的影响, 以期为促进塔河干流生态环境修复、经济发展提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

塔河干流 (39.40°~41.60°N, 81.20°~88.50°E) 位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地, 天山以南, 塔克拉玛干沙漠边缘, 如图 1 所示。全长 1321 km, 面积  $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 属于季节性河流<sup>[13]</sup>。塔河干流属暖温带大陆性干旱气候, 干燥少雨, 早晚温度差较大, 生态环境相对脆弱。上世纪由于自然及人为等多重因素的影响, 塔河水源由原先的九大水系缩减为和田河、叶尔羌河、阿克苏河、开都-孔雀河等四条源流, 形成了塔河“四源一干”的格局<sup>[14]</sup>。按地貌特点将塔河干流分为上游、中游、下游三段 (阿拉尔-英巴扎-恰拉-台特玛湖), 长度分别为 495、398、428 km<sup>[15-16]</sup>。根据实地调查选取垂直河道缓冲 15 km 范围作为研究区域。

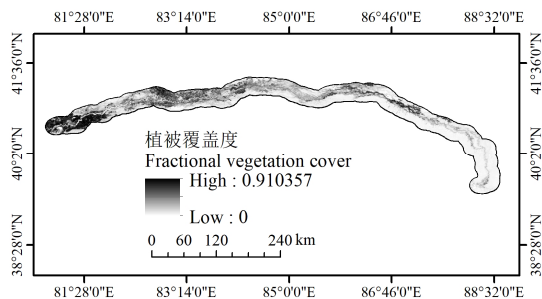


图 1 塔里木河地理位置

Fig.1 Geographical location of Tarim River

### 1.2 数据来源与处理

本文使用的陆地植被数据集 MOD13Q1 从美国国家宇航局 (NASA) 官方网站获取 (<https://landsweb.nascom.nasa.gov/search/>), 共有 12 个波段, 拥有时间分辨率 16 d, 空间分辨率 250 m 的大尺度高时相植被指数栅格数据<sup>[17-18]</sup>。下载研究所需的 2001—2021 年的 h24v04 和 h24v05 两景 MODIS 遥感数据, 利用 MRT 软件对图像进行预处理并对所需植被指数 NDVI 进行提取。降雨及气温数据来源于国家地球系统科学数据中心; 高程数据来源于日本地理空间信息管理局; 土壤类型、GDP 数据和土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中

心; 人口密度数据来源于 WorldPop 人口密度数据。

### 1.3 植被覆盖度估算

植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 是描述地表植被覆盖的重要参数, 依据归一化植被指数 (normalized difference vegetation, NDVI) 估算植被覆盖度目前应用较为广泛<sup>[19-20]</sup>。像元二分模型是一种简单实用的植被覆盖估算模型, 由于塔河流域植被类型较为单一, 采取像元二分模型对于植被覆盖度提取精度的提高具有其独特优势。其计算式如下:

$$F = \frac{I_{\text{NDV}} - I_{\text{NDV, soil}}}{I_{\text{NDV, veg}} - I_{\text{NDV, soil}}} \quad (1)$$

式中  $F$  为植被覆盖度,  $I_{\text{NDV, soil}}$  为完全无植被覆盖区域的 NDVI 值,  $I_{\text{NDV, veg}}$  代表完全被植被覆盖区域的像元 NDVI 值。  $I_{\text{NDV, soil}}$  和  $I_{\text{NDV, veg}}$  理论上为 0 和 1, 但考虑到地表环境的差异, 不能直接赋值。本文通过 ENVI 中的栅格数据统计工具截取一定置信区间内最小 NDVI 值和最大 NDVI 值作为  $I_{\text{NDV, soil}}$  和  $I_{\text{NDV, veg}}$ 。

### 1.4 Slope 趋势分析

对随时间变化的逐像元 FVC 值做一元线性回归分析, 见式 (2)。

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times F_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n F_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中  $S$  为 FVC 随时间变化趋势;  $F_i$  为第  $i$  年的 FVC 值;  $n$  为研究的时间长度, 本文  $n=21$ 。当  $S$  为正时, 植被覆盖改善; 当  $S=0$  时, 表明植被覆盖基本不变; 当  $S$  为负时, 植被覆盖降低。

### 1.5 相关分析

相关系数是反映 2 个变量的线性相关程度的统计指标, 计算式如下:

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n [(F_i - \bar{F})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中  $R_{XY}$  为  $X$ 、 $Y$  两变量的相关系数;  $Y_i$  为第  $i$  年气候因子 (包括年均气温和累积降雨量);  $\bar{F}$  为 21 a 植被覆盖度平均值;  $\bar{Y}$  为 21 a 气候因子平均值。

### 1.6 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等<sup>[21]</sup>提出的一套分析空间分变异的统计模型, 由因子探测、交互探测、风险探测和生态探测 4 个模块组成。基于空间自相关原理, 因子探测和交互探测可有效判断单个自变量及两个自变量之间的相互作用对因变量的影响, 能够定量分析环境变化对于研究区植被变化的影响。因此, 本文主要应用因子探测和交互探测器模块研究塔河植被覆盖度的驱动因子, 引入植被覆盖度 ( $F$ ) 作为因变量  $Y$ , 驱动因子作为自变量  $X$ ,  $q$  值表示某驱动因子  $X$  对植被覆盖度  $Y$  空间分异特征的解釋力。

1) 因子探测: 用于衡量植被覆盖度 (因变量  $Y$ ) 的

空间分异性, 以及确定不同因子 (自变量  $X$ ) 对于因变量  $Y$  的空间分异性的解释程度, 用  $q$  值度量, 计算如下:

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^LN_h\sigma_h^2=1-\frac{W}{T}$$

(4)

$$W=\sum_{h=1}^LN_h\sigma_h^2$$

(5)

$$T=N\sigma^2$$

(6)

式中  $h$  为自变量  $X$  的分层,  $h=1, 2, \dots, L$ ,  $L$  为自变量  $X$  或因变量  $Y$  的分类;  $q$  值的范围为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大表明因变量  $Y$  的空间分异性越强, 自变量  $X$  对因变量  $Y$  的解释力度越强;  $N_h$  和  $N$  分别表示  $h$  层和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别表示层  $h$  和区域内  $Y$  的方差;  $W$  和  $T$  分别表示层内方差总和与区域总方差。

2) 交互探测: 主要用于确定两个不同的自变量  $X$  对因变量  $Y$  的交互影响, 因子间的交互影响类型由  $q$  值  $[q(X_1 \cap X_2)]$  决定, 如表 1 所示。

表 1 植被覆盖度驱动因子 ( $X_1$ 、 $X_2$ ) 交互作用类型

Table 1 Interaction types of influencing factors ( $X_1$ ,  $X_2$ ) of fractional vegetation cover (FVC)

判据区间 Criterion of interval	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	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

注:  $q$  值为因子交互作用解释力。  
Note:  $q$  value is the factor interaction explanatory power.

2 结果与分析

2.1 塔河干流植被覆盖度年内变化特征

本文选取 2001—2021 年的 MODIS 遥感数据, 对 4—10 月植被覆盖进行计算。塔河干流地处中纬度地区, 按天气气候划分四季, 即: 4、5 月份为春季, 6—8 月份为夏季, 9、10 月份为秋季<sup>[22]</sup>。2001—2021 年塔河干流在 4—10 月份的植被覆盖度以及多年平均值如表 2 所示。从表 2 可以看出, 塔河干流植被覆盖度季节差异较为明显, 植被覆盖度在夏季达到峰值, 高达 28.56%, 其次为秋季, 春季最小。

塔河干流 1 a 中最小的植被覆盖度出现在 4 月, 21 a 植被覆盖度均值低至 10.72%, 此时为植被返青期, 随着气温升高植被恢复生长, 4—7 月植被覆盖度总体呈上升趋势, 植被覆盖度最大值出现在 7 月 (29.54%); 随着气温回落 7—10 月植被覆盖开始退化, 10 月植被覆盖度多年均值降至 15.15%。7 月份上游干流区域平均植被覆盖度可达到下游的 3.26 倍。从时间序列上来看, 植被覆盖度最低值多出现于研究初期, 最高值多出现在研究末期, 表明塔河干流植被覆盖度在 2001—2021 年呈明显上升趋势。

2.2 塔河干流植被覆盖度年际变化特征

2001 至 2021 年, 塔河干流、上、中、下游植被覆盖度在夏季的生长趋势均呈现波动状态, 年均增长率为 2.84%。由图 2 可知, 塔河干流植被覆盖度在 2008 和 2009

年以及 2014 和 2015 年前后呈现出明显的下降趋势, 主要是由于这几年塔河源流注水量减少, 且生态输水量明显下降, 植被所需水分持续得不到补给造成植被衰退。2001—2021 年塔河干流植被覆盖度增长趋势明显, 塔河不同河段植被覆盖度存在明显差异, 上游最高, 下游最低。2021 年上游植被覆盖度为下游的 1.91 倍, 为下游的 3.34 倍, 以夏季为例, 2021 年塔河干流植被覆盖度较 2001 年增加了 56.8%, 其中上游植被覆盖度相比 2001 年增加了 62.9%, 中游增加了 39.8%, 下游增加了 58.9%。说明目前采取的诸多生态综合治理效果颇为明显, 严控用水、退耕还林、生态输水、河长制等保护措施在一定程度上改善了干流现状。

表 2 2001-2021 塔里木河干流植被覆盖度生长季对比

Table 2 Growth season comparison of FVC in the mainstream of Tarim River from 2001 to 2021

%

年份 Year	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
2001	8.19	12.72	13.28	20.22	19.03	16.75	12.06
2003	9.24	14.09	18.84	21.90	20.46	21.11	12.75
2005	10.07	15.35	19.19	23.74	22.75	19.47	13.76
2007	11.13	18.37	19.72	23.98	23.05	21.51	14.13
2009	11.23	13.74	18.35	21.96	20.95	19.90	16.15
2011	9.31	15.48	21.06	23.90	24.38	21.13	15.31
2013	11.39	20.37	23.31	27.03	26.5	23.53	15.48
2015	10.99	17.57	22.25	24.46	24.79	22.81	15.54
2017	11.89	20.62	22.26	29.54	28.8	24.53	16.98
2019	12.90	18.68	25.54	29.09	29.18	25.75	18.28
2021	11.58	19.16	26.98	29.47	29.23	25.94	16.16
均值 Average value	10.72	16.92	20.98	25.03	24.47	22.04	15.15

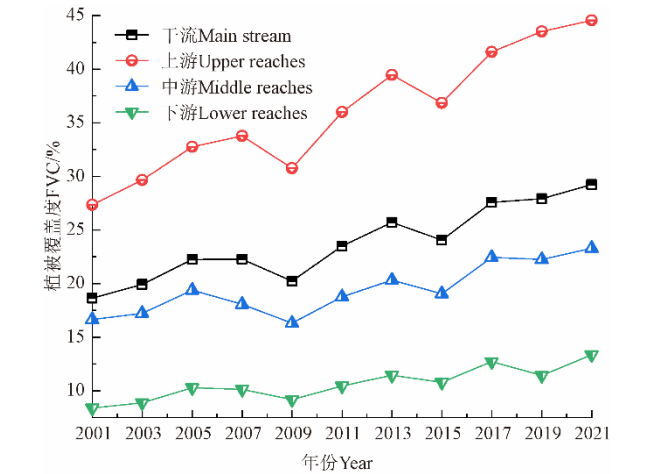


图 2 塔里木河干流植被覆盖度年际变化特征

Fig.2 Interannual variation characteristics of FVC in the mainstream of Tarim River

2.3 植被覆盖度变化趋势分析

将变化趋势分析与  $F$  检验相结合, 逐像元计算塔河干流植被覆盖度指数变化斜率, 并对其进行显著性检验 (图 3)。根据趋势分析塔河植被覆盖度指数变化斜率介于  $-0.09 \sim 0.11$ , 66.5% 区域斜率为正, 33.5% 区域斜率为负, 说明大部分区域植被覆盖度指数呈增加趋势。在显著性检验结果中, 根据塔河干流植被覆盖度指数的变化趋



势及检验结果, 将变化趋势分为显著增加 ( $\leq -0.9165$ )、无显著增加 ( $> -0.9165 \sim 0$ )、显著减少 ( $> 0 \sim 1.0947$ ) 和无显著减少 ( $> 1.0947$ ) 4 个等级。其中显著增加和无显著增加分别占总面积 49.0% 和 17.5%, 表明塔河干流植被覆盖度指数呈现出较好的改善趋势; 植被覆盖度增加区域主要分布在塔河下游, 主要原因可能是当地对塔河下游采取的生态输水等工程措施发挥了很大作用。总体而言, 塔河植被覆盖增加区域明显大于减少区域, 整个区域呈现出良好的改善趋势。

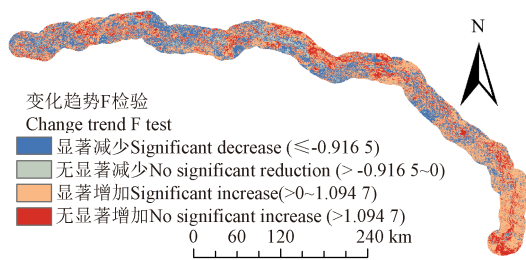


图 3 塔里木河干流植被覆盖变化趋势 F 检验空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of FVC change trend F test in the mainstream of Tarim River

## 2.4 植被覆盖度驱动力分析

### 2.4.1 自然因素影响

气候变化是该地区植被覆盖变化的驱动因素之一, 而温度和降水的变化是气候变化最直接和敏感的驱动因素。

如图 4 所示, 21 a 间 (2001—2021 年) 塔河干流降水量与气温总体呈上升趋势; 塔河干流最大植被覆盖度在 21 a 间呈小幅上升趋势。由文献[23]研究结果可知, 气温和降水的增加对新疆干旱区的植被覆盖具有积极作用, 塔河干流主要补给方式是冰川融水和大气降水, 气温升高有助于塔河干流水资源因冰川消融得到恢复。同时, 2000—2021 年的 22 次生态输水为区域生态修复提供了水资源保障。

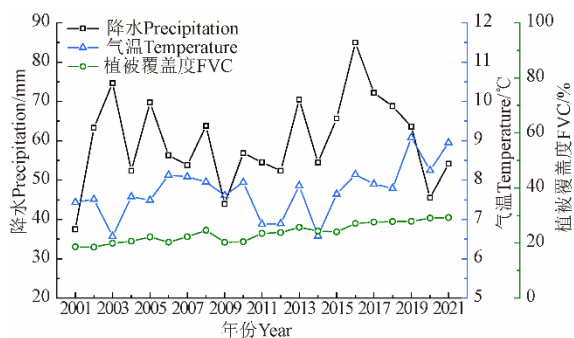


图 4 塔里木河干流降水、气温及植被覆盖变化趋势  
Fig.4 Trend of precipitation, temperature and FVC in the mainstream of Tarim River

图 5 为塔河干流植被覆盖度与降雨、气温的相关分析结果, 由图 5 可知, 植被覆盖度与气温、降水指数在塔河干流大部分区域均处于弱相关。其中, 植被覆盖度与气温呈弱正相关的区域占 60.69%, 主要分布在上游和下游, 表明这些区域气温升高有利于植被生长。塔河植

被覆盖度与气温呈负相关的区域主要分布在中游, 通过塔河干流气温分布发现中游气温较上、下游高, 其中上游和下游 21 a 间年均温度分别为 12.2 和 11.9 °C, 中游年均温度为 12.6 °C。合适的温度可以通过促进植物生长代谢作用从而促进生长, 当气温超过植物适宜温度时会抑制植物生长。因此, 塔河干流的植被覆盖度与气温为负相关关系。塔河干流植被覆盖度与降水量呈正相关的区域 (72.57%) 主要分布在上游, 且相关性普遍较低, 主要由于塔河上游降水与中下游相比较为丰富, 有利于植物生长。

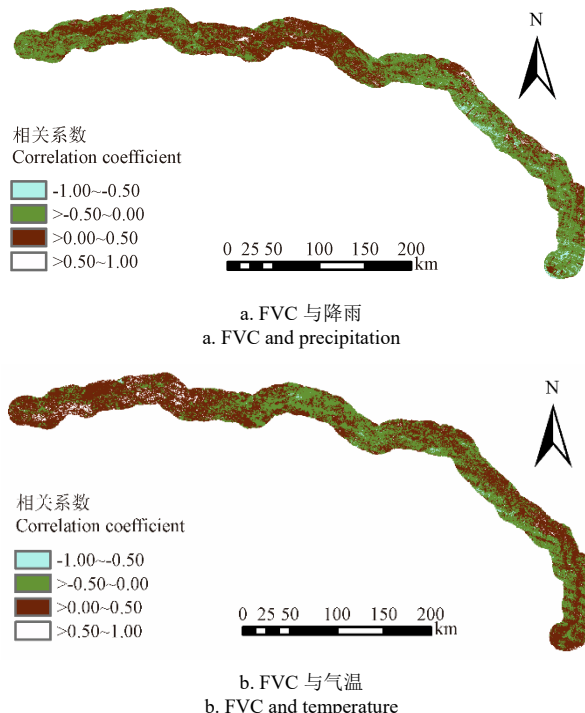


图 5 塔里木河干流植被覆盖度与降雨、气温相关分析  
Fig.5 Correlation analysis of FVC with precipitation and temperature in the mainstream of Tarim River

### 2.4.2 人为因素影响

人为因素影响植被覆盖以土地利用类型变化为主<sup>[24]</sup>。对 2001—2021 年土地利用数据进行预处理, 获得不同地类面积转移矩阵并用于分析塔河干流 2001—2021 年 21 a 间不同地类的面积转化。如表 3 所示, 2021 年比 2001 年新增耕地面积 1 090.94 km<sup>2</sup>、水域面积 79.55 km<sup>2</sup>、建设用地面积 519.73 km<sup>2</sup>、减少草地面积 1 484.49 km<sup>2</sup>、荒地面积 205.73 km<sup>2</sup>。在不同土地类型中, 草地向耕地转化的贡献率最大, 达到 85.82%。研究区耕地以水稻、玉米、小麦和棉花等农作物为主, 其单位面积覆盖度明显大于草地。随着城市化发展从耕地、草地、水域和荒地向建设用地转移, 造成建设用地面积扩大, 可认为是人为因素逆向作用于植被。林地在 21 a 中都是由耕地和草地转化而来, 未利用地转为草地在不同土地类型中的贡献率达到 77.11%, 可认为人为因素对植被覆盖度有积极作用。研究区植被覆盖呈增长趋势, 主要是由于整体上各种土地类型交替转移对植被覆盖产生的正效应超过了逆效应。因此除了自然因素造

成的短期变化外,人类活动对植被覆盖长期演化趋势具 有重大影响。

表 3 2001—2021 年土地利用类型面积转移矩阵

Table 3 Area transfer matrix of land use types from 2001 to 2021									km <sup>2</sup>
土地利用 Land use	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water	冰雪 Snow/Ice	未利用地 Unused land	建设用地 Construction land	总计 Total	
耕地 Cultivated land	2 756.50	0.00	190.55	8.87	0.00	2.47	59.35	3 017.74	
林地 Forest land	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
草地 Grassland	1 160.44	0.01	6 334.63	41.85	0.00	938.03	358.11	8 833.07	
水域 Water	6.17	0.00	41.00	165.33	0.00	10.60	21.05	244.15	
冰雪 Snow/Ice	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
未利用地 Unused land	185.49	0.00	781.83	97.34	0.00	11 887.40	92.40	13 044.46	
建设用地 Construction land	0.07	0.00	0.58	10.30	0.00	0.23	519.27	530.45	
总计 Total	4 108.68	0.01	7 348.59	323.69	0.00	12 838.73	1 050.18	25 669.89	

在 2000 年实施生态输水前,塔河干流植被覆盖率较低且呈现下降趋势。自实施生态输水过程后,塔河干流尤其是下游植被覆盖度呈明显上升趋势,但由于生态输水对植被的恢复具有滞后效应,在输水的开始阶段内植被并没有明显变化,2 a 之后塔河干流生态环境明显改善,植被覆盖有了明显增加。

研究区的植被覆盖度整体处于较为稳定的上升趋势,但在 2009 年和 2015 年迅速下降(图 6),这是由于 2007—2009、2014 年生态输水量急剧减少,导致植被所需水分得不到充分补给,造成植被衰退。由以上结果可以看出生态输水致使植被得到大幅度改善,植被改善程度与输水量关系密切。

2. 4. 3 驱动因素分析

以往研究表明,植被覆盖主要受气候、地形以及社会经济等因素的影响。本文在参考已有文献的基础上,结合实际情况,选取了自然因素(高程(digital elevation model, DEM)、坡度、坡向、土壤、降雨、气温)及人为因素(土地利用、人口密度、国内生产总值(GDP))等 9 个指标来进行对比分析,以确定各驱动因素对塔河干流 FVC 指数空间分布格局的影响。

基于地理探测器对研究区内各因素交互作用对植被覆盖度的解释力  $q$  值进行计算和分析,结果见表 4。各因素对该地区 FVC 的影响如下:土地利用(0.69)>GDP(0.41)>人口密度(0.37)>DEM(0.30)>降雨(0.28)>土壤类型(0.22)>气温(0.16)>坡度(0.04)>坡向(0.01)。

塔河干流植被覆盖度空间分布差异是自然和人为驱动因素共同造成,其中人为因素起主导作用,其  $q$  值均大于 0.30,而降雨、土壤类型、气温等的影响相对较小。利用交互探测分析两两驱动因素之间对植被覆盖度的交互作用影响(表 4)可知:1)任何两个因素的交互作用均大于其单独作用,表现出双因子增强效应;2)土地利用与 GDP 交互作用的  $q$  值达到最高,为 0.74,而与其他因子交互作用的  $q$  值均不低于 0.65;3)降雨和气温、坡向存在非线性增强效应,坡向和土壤类型、DEM、坡度,气温和坡度均存在独立效应。

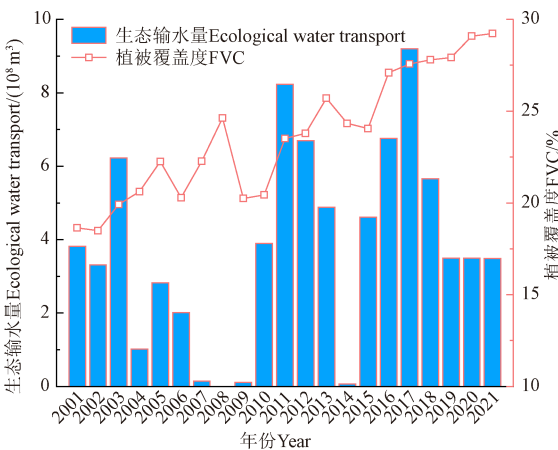


图 6 2001—2021 年植被覆盖度与生态输水量变化  
Fig.6 Change of FVC and ecological water transport from 2001 to 2021

表 4 塔里木河干流植被覆盖度驱动因子交互探测解释力 ( $q$ )

Table 4 Interactive detection explanatory power ( $q$ ) of FVC driving factors in the mainstream of Tarim River										
驱动因子 Driving factor	土壤 Soil	高程 DEM	坡向 Aspect	坡度 Slope	气温 Temperature	降雨 Precipitation	国内生产总值 GDP	土地利用 Land use	人口 Population	
土壤 Soil	0.22									
高程 Digital elevation model (DEM)	0.45	0.30								
坡向 Aspect	0.23	0.31	0.01							
坡度 Slope	0.23	0.32	0.05	0.04						
气温 Temperature	0.37	0.45	0.17	0.20	0.16					
降雨 Precipitation	0.42	0.41	0.30	0.30	0.49	0.28				
国内生产总值 GDP	0.51	0.49	0.42	0.42	0.51	0.55	0.41			
土地利用 Land use	0.71	0.73	0.69	0.69	0.72	0.73	0.74	0.69		
人口 Population	0.49	0.47	0.38	0.38	0.50	0.52	0.47	0.73	0.37	

综上所述,各因素对塔河干流植被覆盖度存在的交互作用呈现双因子增强、非线性增强效应,各驱动因子

交互作用时会增加对植被覆盖度的解释力。以土地利用和 GDP 等为代表的人为因素之间的交互组合在影响该地区 FVC 值的变化中起着关键作用,其影响程度高于自然生长状态和人为因素与自然因素间的交互作用。其中土地利用是影响植被覆盖的主要人为因子,土地利用与其他因子的交互作用处于主导作用。地形因子和环境因子等自然因素的单因子解释力较低,但在与人为因素相互作用之后,对植被覆盖度的解释力有了大幅度的提升,表明塔河干流植被覆盖是各因素综合作用的结果。

### 3 讨 论

塔河干流植被覆盖度自 2000 年来整体呈上升趋势,由于受到人为因素的影响,各分段植被覆盖度的增长幅度有所不同。在上游段,耕地面积的不断扩大大使得植被覆盖度增加趋势较为显著,平均植被覆盖度在 27.34%~44.55%,这与韦红等<sup>[9]</sup>对塔河流域植被动态变化研究结果一致。中游段和下游段的植被覆盖度也呈缓慢增加趋势,平均植被覆盖度分别为 16.65%~23.28%和 8.4%~13.35%。这是由于自 2000 年起塔河流域生态工程措施的有效实施,在一定程度上保障了植被水源供给,改善了植被生境,从而使植被长势持续变好<sup>[10]</sup>。得益于生态输水工程,塔河干流下游段的生态环境有所改善,植被覆盖度有所增加<sup>[25]</sup>,但仍需要探索促进下游段生态修复和生态水高效利用的新路径,以巩固和提升下游段的生态治理效果。

植被覆盖度的变化与人为因素及自然因素密切相关,近年来中国大部分区域植被覆盖均呈现不同速度增长趋势,如北方黄河流域<sup>[26]</sup>、华北平原<sup>[27]</sup>等地,其主导因素是区域大规模生态建设以及合理的农业生产等人类活动。在云南<sup>[28]</sup>、贵州<sup>[29]</sup>等西南地区,自然因素则是区域植被变化的主要影响因子。本文通过对 2000—2021 年间塔河干流段研究得出人为因素为主导因素,其中土地利用和 GDP 对植被覆盖的解释力度相对较大。通过地理探测器方法分析塔河干流植被的驱动因素,不仅考察了单个因素对植被覆盖空间变化的影响,还考察了多个因素交互作用的影响。研究区以耕地、草地和未利用地为主,植被生长发育受不同土地类型影响较大,其次是 GDP、人口密度、DEM、降雨、土壤类型、气温,最后为坡度和坡向。总的来说人为因素对植被覆盖影响较为显著,而降雨、气温等气候因子与植被覆盖相关性较低,这与孙天瑶等<sup>[10]</sup>的研究结果较为一致。随着人口增长、社会经济发展等因素影响,未来人类活动同干流植被覆盖度变化及生态环境演化关系更为密切。

### 4 结 论

本文基于 MODIS 遥感数据,利用像元二分模型提取塔河干流 2001—2021 年植被覆盖度,分析其时空变化特征及其驱动因素。得到以下结论:

1) 塔河干流植被覆盖度随季节由高到低的变化顺序为夏季、秋季、春季。且该干流不同河段植被覆盖存在明显差异,整体呈现上游、中游、下游由高到低的分布

规律。

2) 塔河干流植被覆盖度在 2001—2021 年期间呈现相对稳定的波动上升趋势。除 2009 年和 2015 年年均覆盖度出现下降趋势可能是受到生态输水量的影响。大部分区域(66.5%)的植被覆盖度呈上升趋势,29.9%的区域植被明显下降且分布相对分散。

3) 利用地理探测器分析 FVC 驱动因子贡献率由高到低排序为土地利用、国内生产总值(GDP)、人口密度、高程(DEM)、降雨、土壤类型、气温、坡度、坡向。其中各驱动因子交互作用显著高于单个因子,同时人为因子的影响占主导作用。气候因素对塔河干流植被覆盖变化存在较弱影响,研究区植被覆盖的长期发展及趋势受人类活动因素的影响更为直接,主要与土地利用变化有关。

本文选取多种人为因素和自然因素对塔河干流段植被覆盖度的影响因素进行了研究,分析其对植被覆盖度空间分布的单独和交互作用影响。由于人类活动对塔河干流植被覆盖的影响较为复杂且占据主导因素,而本研究关于人为因素仅仅选取了 GDP、土地利用和人口密度 3 个影响因子,在后续的研究中可以在人为因素方面选取更多的影响因子,进一步深入研究塔河干流植被覆盖度的驱动因素分析。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈效述,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.  
CHEN Xiaoqi, WANG Heng. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(1): 84-94. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李霞,张国壮,陈永昊,等. 农牧交错带辽河流域 2010—2019 年植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 63-72.  
LI Xia, ZHANG Guozhuang, CHEN Yonghao, et al. Vegetation cover change and driving factors in the agro-pastoral ecotone of Liaohe River Basin of China from 2010 to 2019[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(22): 63-72. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘海,黄跃飞,郑粮. 气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 97-105.  
LIU Hai, HUANG Yuefei, ZHENG Liang. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Danjiangkou Water Source Areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 97-105. (in Chinese with English abstract)
- [4] 霍艾迪,康相武,王国梁,等. 基于 MODIS 的沙漠化地区植被覆盖度提取模型的研究[J]. 干旱地区农业研究,

- 2008, 111(6): 217-223.
- HUO Aidi, KANG Xiangwu, WANG Guoliang, et al. Model establishment of vegetation coverage extraction in sandy desertification area based on MODIS image data[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 111(6): 217-223. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马永明, 张利华, 朱志儒, 等. 塔里木河流域划分及其 NDVI 特征分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 290-298.
- MA Yongming, ZHANG Lihua, ZHU Zhiru, et al. Division of Duhe River Basin and analysis of its NDVI characteristics[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2020, 42(2): 290-298. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张明祥, 谷晓平, 廖留峰, 等. 气候变化和人类活动对贵州省石漠化区植被覆盖变化的影响[J]. *地球与环境*, 2023, 51(1): 1-11.
- ZHANG Mingxiang, GU Xiaoping, LIAO Liufeng, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in rocky desertification area of Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王琳, 李娜, 文广超, 等. 黄河流域河南段植被覆盖度变化及驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6): 1-7.
- WANG Lin, LI Na, WEN Guangchao, et al. Vegetation coverage changes and driving forces in He'nan section of Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李梦华, 韩颖娟, 赵慧, 等. 基于地理探测器的宁夏植被覆盖度时空变化特征及其驱动因子分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1317-1325.
- LI Menghua, HAN Yingjuan, ZHAO Hui, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and driving factors of fractional vegetation cover in Ningxia based on geographical detector[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1317-1325. (in Chinese with English abstract)
- [9] 韦红, 霍艾迪, 管文轲, 等. 运用中分辨率成像光谱数据对塔里木河流域植被覆盖度动态变化分析[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(7): 62-67.
- WEI Hong, HUO Aidi, GUAN Wenke, et al. Dynamic changes of vegetation coverage in Tarim River Basin with MODIS data[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(7): 62-67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018 年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 415-424.
- SUN Tianyao, LI Xuemei, XU Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 415-424. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 等. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3): 621-629.
- GUO Jikai, WU Xiuqin, DONG Guihua, et al. Vegetation coverage change and relative effects of driving factors based on MODIS/NDVI in the Tarim River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3): 621-629. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡克宏, 张震, 郜敏, 等. 中国丝绸之路经济带沿线植被覆盖变化及自然影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 149-157.
- HU Kehong, ZHANG Zhen, GAO Min, et al. Variations in vegetation cover and natural factors of provinces in China along Silk Road Economic Belt during 2000-2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(17): 149-157. (in Chinese with English abstract)
- [13] 宋郁冬, 樊自力, 雷志栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.
- [14] 叶朝霞, 何秉宇, 董秀梅. 塔里木河下游生态环境整治与生态效应分析[J]. *新疆地质*, 2005, 23(1): 55-58.
- YE Zhaoxia, HE Bingyu, DONG Xiumei. Ecological environment repair and effective analysis in the lower reaches of Tarim River[J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(1): 55-58. (in Chinese with English abstract)
- [15] 白元, 徐海量, 刘新华, 等. 塔里木河干流荒漠河岸林的空间分布与生态保护[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 776-785.
- BAI Yuan, XU Hailiang, LIU Xinhua, et al. Spatial distribution characteristics and ecological protection of the desert riparian forest in the mainstream of the Tarim River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 776-785. (in Chinese with English abstract)
- [16] 叶朝霞, 陈亚宁, 李卫红. 基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究[J]. *地理学报*, 2007, 74(5): 451-461.
- YE Zhaoxia, CHEN Yaning, LI Weihong. Ecological water demand of vegetation based on eco-hydrological processes in the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Geographica Sinica*,

- 2007, 74(5): 451-461. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王正兴, 刘闯, ALFREDO H. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- WANG Zhengxing, LIU Chuang, ALFREDO H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979-987. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王静, 郭妮. Terra MODIS 和 Aqua MODIS 波段反射率及植被指数比较[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1711-1717.
- WANG Jing, GUO Ni. Comparisons of Terra-and Aqua MODIS in band reflectance and vegetation index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1711-1717. (in Chinese with English abstract)
- [19] 戴保侯, 丁贤荣, 王文种. 基于 MODIS 影像的植被覆盖度提取研究[J]. 遥感信息, 2009, 24(2): 67-70.
- DAI Yuyu, DING Xianrong, WANG Wenzhong. A research on extracting vegetation fraction based on MODIS image[J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(2): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- [20] 沈贝贝, 魏一博, 马磊超, 等. 内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 118-126.
- SHEN Beibei, WEI Yibo, MA Leichao, et al. Spatiotemporal changes and drivers of fractional vegetation cover in Inner Mongolia grassland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 118-126. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 气候和土地利用变化对塔里木河干流区植被覆盖变化的影响[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1389-1397.
- YANG Guanghua, BAO Anming, CHEN Xi, et al. Vegetation cover change with climate and land use variation along main stream of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1389-1397. (in Chinese with English abstract)
- [23] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-125.
- QIN Jingxiu, HAO Xingming, ZHANG Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117-125. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张永升, 马彦军. 1992-2019 年阿拉尔市植被覆盖时空变化分析[J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 62-72, 80.
- ZHANG Yongsheng, MA Yanjun. Spatio-temporal changes analysis of vegetation coverage in Alar City in 1992-2019 years[J]. Grassland and Turf, 2022, 42(5): 62-72, 80. (in Chinese with English abstract)
- [25] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的 2001-2011 年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251-1262.
- HUANG Yue, BAO Anming, WANG Shifei, et al. Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1251-1262. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李雪银, 张志强, 孙爱芝. 1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究[J]. 地球环境学报, 2022, 13(4): 428-436.
- LI Xueyin, ZHANG Zhiqiang, SUN Aizhi. Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982-2021[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(4): 428-436. (in Chinese with English abstract)
- [27] 谷金芝, 宫兆宁. 2001—2015 年华北平原植被覆盖度时空变化特征及影响因素分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(8): 47-51.
- GU Jinzhi, GONG Zhaoning. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and its influencing factors in North China Plain in the past 15 Years (2001—2015)[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(8): 47-51. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王永红, 鲁恒. 2001—2018 年云南省植被变化及驱动力[J]. 山地学报, 2022, 40(4): 531-541.
- WANG Yonghong, LU Heng. Driving force of vegetation cover change in Yunnan Province from 2001 to 2018[J]. Mountain Research, 2022, 40(4): 531-541. (in Chinese with English abstract)
- [29] 代仁丽, 钟九生, 何志远, 等. 气候因子对贵州省植被覆盖度的协同影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 262-268.
- DAI Renli, ZHONG Jiusheng, HE Zhiyuan, et al. Synergistic effects of climate factors on vegetation coverage in Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 262-268. (in Chinese with English abstract)



## Dynamic changes and driving factors of vegetation coverage in the mainstream of Tarim River, China

WANG Xing<sup>1,2</sup>, HUO Aidi<sup>1,2,3\*</sup>, LYU Jiqiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhixin<sup>1,2</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>, ZHONG Fangqian<sup>1,2</sup>,  
YANG Luying<sup>1,2</sup>, GUAN Wenke<sup>4</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China; 4. Xinjiang SDIC Forest and Grass Ecological Research Co., Ltd, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** Tarim River is the longest inland river in China, which irrigates nearly one-third of Xinjiang's land in the last century. The previous unreasonable exploitation and utilization have posed a great threat to the Tarim River, particularly with the economic development and global climate change in recent years. The ecological environment of the Tarim River basin has been improved significantly, after a series of comprehensive ecological control measures, such as ecological water transfer in 2000. However, a serious challenge still remains on the sustainability of ecological restoration in the mainstream of the Tarim River under water transport projects. This study aims to clarify the dynamic change characteristics of vegetation cover in the mainstream of the Tarim River, in order to accelerate the process of vegetation protection and restoration. MODIS data was also collected from 2001 to 2021. Trend analysis and coefficient of variation were used to determine the development trend and stability of vegetation. The influence of driving factors on vegetation coverage was investigated by correlation analysis and geographical detector. The results showed that a relatively stable rising trend was found in the vegetation coverage of the mainstream of Tarim River, particularly with an annual growth rate of 2.84%. The changing trend was outstanding in seasonal fluctuations. The vegetation coverage was as high as 28.56% in summer, especially in August, but the lowest in April. There were obvious regional differences in the vegetation coverage, with the descending order of the upstream, midstream, and downstream. In 2021, the vegetation coverage in the upstream was 1.91 times as much as that in the midstream, and 3.34 times as much as that in the downstream in August. Vegetation coverage increased in 66.5% of Tarim River, most of which (49.0%) increased significantly. The combined effect of natural factors and human activities was the main reason for the rapid increase and spatial difference of vegetation coverage in the mainstream, among which the human activities posed the more direct impact on vegetation coverage. The geographical detector showed that the influence of each driving factor on the vegetation cover was ranked in descending order as follows: Land use (0.69), GDP (0.41), population density (0.37), DEM (0.30), rainfall (0.28), soil type (0.22), temperature (0.16), slope (0.04), slope aspect (0.01). The impact of human factors on the vegetation cover was mainly reflected in the change in land use type. Climatic factors (such as rainfall and temperature) presented a low correlation with the vegetation cover. The spatial distribution characteristics of vegetation cover were attributed to the interaction of multiple influencing factors. Future human activities can be more closely related to the change of vegetation cover and ecological environment evolution in the mainstream, with the influence of population growth, social and economic development. This finding can also provide the scientific basis to further understand the characteristics and driving factors of vegetation cover in the mainstream of Tarim River, particularly for the local ecological environment protection.

**Keywords:** vegetation; precipitation; vegetation coverage; MODIS remote sensing data; geographical detector; the mainstream of Tarim River