



基于地理探测器的开都—孔雀河流域植被覆盖度时空变化及驱动力分析

甄慧 汪洋 夏婷婷 王寅 张治超

Spatiotemporal distribution and driving force analysis of fractional vegetation cover in the Kaidu—Kongqi River Basin using the Geodetector model

ZHEN Hui, WANG Yang, XIA Tingting, WANG Yin, ZHANG Zhichao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0605>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于灵活的时空融合模型的植被覆盖度与植被指数关系

Research on relationship between vegetation cover fraction and vegetation index based on flexible spatiotemporal data fusion model

草业科学. 2017, 11(2): 264 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0256>

河西干旱区植被覆盖度时空格局分析

Analysis of the spatio-temporal patterns of vegetation fractional coverage in the Hexi arid area

草业科学. 2019, 36(3): 623 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0236>

基于小型无人机与MODIS数据的草地植被覆盖度研究——以甘南州为例

Grassland fractional vegetation cover analysis using small UAVs and MODIS——A case study in Gannan Prefecture

草业科学. 2017, 11(1): 40 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0046>

基于多光谱数据与小型无人机的甘南草地非生长季植被覆盖度

An analysis of fractional vegetation cover of the Gannan grassland in the non-growing season based on Multispectral data and small UAVs

草业科学. 2019, 36(11): 2742 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0013>

石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化

Grassland cover and ecological service function changes in Shiyang River basin

草业科学. 2019, 36(1): 27 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0041>

元上都遗址土地利用及景观格局变化

Changes in land use and landscape patterns in Xanadu site

草业科学. 2019, 36(3): 906 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0346>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0605

甄慧, 汪洋, 夏婷婷, 王寅, 张治超. 基于地理探测器的开都—孔雀河流域植被覆盖度时空变化及驱动力分析. 草业科学, 2023, 40(5): 1140-1153.

ZHEN H, WANG Y, XIA T T, WANG Y, ZHANG Z C. Spatiotemporal distribution and driving force analysis of fractional vegetation cover in the Kaidu—Kongqi River Basin using the Geodetector model. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1140-1153.



基于地理探测器的开都—孔雀河流域植被覆盖度时空变化及驱动力分析

甄 慧, 汪 洋, 夏婷婷, 王 寅, 张治超

(新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 植被覆盖度 (FVC) 是反映生态环境质量的评价指标, 系统研究植被覆盖变化和驱动机制对区域生态管理至关重要。本研究基于 MODIS 数据, 运用 Sen + Mann-Kendall 趋势分析法、地理探测器模型等方法, 分析新疆开都—孔雀河流域植被覆盖度的演变趋势, 探讨植被覆盖度与驱动因子之间的空间关联, 并识别主导因子。结果表明: 1) 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖整体呈上升趋势, 年增长速率为每 10 年 0.013。2011 年之前植被覆盖度均值略有小幅度波动, 之后植被覆盖度持续增加, 在 2019 年达到最大值 29.0%。空间尺度上, 2020 年极低植被覆盖度分布度最广, 占研究区面积的 51.93%, 21 年间减少了 5 010.31 km², 其次是高植被覆盖度, 占研究区面积的 22.84%。2) 开都—孔雀河流域以极低覆盖度与低覆盖度之间转化为主。研究区植被有轻微的改善趋势, 其中 17.82% 的区域呈极显著 ($P < 0.01$)、显著增加趋势 ($P < 0.05$); 71.90% 的区域变化不显著 ($P > 0.05$)。3) 研究区植被覆盖主要受高程和土地利用类型的影响, 其解释力均在 0.45 以上。两两因子之间的协同作用影响显著高于单个因素, 其中高程和土地利用类型两两相交的解释力最高为 0.743。

关键词: 植被覆盖度; 转移矩阵; Sen + Mann-Kendall 趋势分析; 时空变化; 空间分异; 土地利用类型; 开都—孔雀河流域
文献标志码: A **文章编号:** 1001-0629(2023)05-1140-14

Spatiotemporal distribution and driving force analysis of fractional vegetation cover in the Kaidu—Kongqi River Basin using the Geodetector model

ZHEN Hui, WANG Yang, XIA Tingting, WANG Yin, ZHANG Zhichao

(College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Fractional vegetation cover is an evaluation index that reflects the quality of the ecological environment. The systematic study of changes in vegetation cover and driving mechanisms is crucial for regional ecological management. Based on MODIS data, this study uses Sen + Mann-Kendall trend analysis, a geographical detector (Geodetector) model, and other methods to analyze the evolutionary trend of vegetation coverage in the Kaidu—Kongqi River Basin in Xinjiang, China. It also explores the spatial correlation between vegetation coverage and driving factors and identifies the dominant factor. The results indicate that: 1) From 2000 to 2020, the vegetation coverage in the Kaidu—Kongqi River Basin was trending upward ($0.013 \cdot 10a^{-1}$). The mean coverage fluctuated slightly prior to 2011 and then continued to increase, reaching a maximum value of 29.0% in 2019. Spatially, in 2020, the distribution of extremely low vegetation coverage was the broadest, accounting for 51.93% of the study area. This represents a decrease of 5 010.31 km² over a 21 year period, while

收稿日期: 2022-07-30 接受日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金 (41661015)

第一作者: 甄慧 (1997-), 女, 甘肃民勤人, 在读硕士生, 主要从事草地资源与生态研究。E-mail: zhenhuihuizi@163.com

通信作者: 汪洋 (1987-), 男, 湖北郧西人, 副教授, 博士, 主要从事草地资源与生态研究。E-mail: ktwangyang@163.com

high vegetation coverage accounted for 22.84% of the study area. 2) The conversion from extremely low to low vegetation coverage was dominant in the Kaidu—Kongqi River Basin. There was a slight improvement in the vegetation trend, with 17.82% of the study area showing an extremely significant increased trend, while 71.9% showed non-significant or no change trend. 3) The vegetation coverage is mainly affected by elevation and land use type, and its explanatory power is above 0.45. The synergistic effect between two factors was significantly higher than that of a single factor, and the explanatory power of the intersection between elevation and land use type was the highest at 0.743.

Keywords: fractional vegetation cover; transition matrix; sen + mann-kendall trend analysis; spatiotemporal variation; spatial differentiation; land use types; Kaidu

Corresponding author: WANG Yang E-mail: ktwangyang@163.com

作为陆地生态系统的基本组成部分, 植被充分接触大气、水和土壤, 并通过调节水循环、碳循环和能量循环来推动生态系统服务^[1]。对于制订可持续生态系统管理策略来说, 遥测植被的时空动态变化至关重要^[2]。植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 是指地面植被垂直投射面积与区域总面积的比例^[3], 可以了解地表植被状况以及区域环境所存在的问题^[4]。20 世纪以来, 随着人口增加和城镇化建设的推动, 耕地、建设用地扩张、滥砍滥伐滥牧等人类活动对植被的影响日益显著^[5], 工业、农业生产建设从自然界中获取大量原材料, 导致全球森林与草原植被变化呈现下降趋势, 生态系统的功能和结构遭到严重损害引发的生态危机日益加重^[6]。因此及时准确探测植被覆盖度的时空变化, 对自然资源可持续利用、经济可持续发展和生态恢复都具有重要应用价值^[7], 同时探讨不同驱动因子对地表植被时空变化的影响已成为植被系统方面的重点^[8]。

随着生态文明建设进程的不断推进, 植被变化的驱动力分析已成为国内外学者关注的热点之一, 近年来已有很多结论, 如张一然等^[9]探讨若尔盖湿地植被覆盖时空变化和气候因子的影响机理, 结果表明植被覆盖度变化与气温、降水均呈正相关关系。吉珍霞等^[10]基于长时间序列的 MODIS 数据解析了青藏高原草地物候变化并了解其中的驱动机制, 结果表明影响草地生长季长度的主要作用因素是风速和连续 5 d 最大降雨。以往研究多采用相关系数分析法^[11-12]来定性分析自然因素和人为因素对植被覆盖度时空变化的影响, 但很少定量分析驱动因子间的交互作用对植被覆盖度空间分层异质性的影响, 且研究影响因子之间的协同作用较少^[13]。地理探测器是一种新的分析因子与驱动力的统计方法, 用于度量空间分异性, 定量不同因子及

其交互作用^[14]。近年来, 学者们运用该模型研究植被覆盖变化及驱动机制, 目前主要分为 3 类: 一是辨别主要的影响因素, 如 Yuan 等^[15]研究发现降水量是影响黑河流域归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 变化的主导因素。二是研究驱动因子之间的耦合作用, 如 Liu 等^[16]定量分析潜在驱动因素对青藏高原东北部典型高寒地区的植被动态的影响, 分析得出温度与土壤类型的协同作用对植被变化的影响最强。三是分析各影响因子对植被生长的适宜类型或范围, 如 Wang 等^[17]通过地理探测器模型研究发现促进植被生长的各自然因子最佳范围以及该条件下 FVC 均值具有显著的差异。

开都—孔雀河流域是干旱区内陆河塔里木河“四源一干”的重要源流之一^[18], 也是“丝绸之路经济带”建设的关键区。其气候干旱, 生态环境脆弱, 属于干旱区敏感地带。近年来人口增加^[19], 耕地、城乡工矿居民用地面积大范围扩张^[20-21], 焉耆盆地田间灌水量增加^[22], 导致孔雀河下游水资源短缺^[23], 植被退化严重^[24], 危及到流域的生态系统安全, 并导致一系列严重的生态环境问题。本研究把开都—孔雀河流域作为研究靶区, 通过 Sen + Mann-Kendall 趋势分析法对 2000—2020 年开都—孔雀河流域的 FVC 时空变化特征进行分析, 同时定量分析各种自然和人为因子对植被时空变化的作用机理, 为该流域的植被和生态恢复提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

开都—孔雀河流域位于新疆巴音郭楞蒙古自治州 (简称巴州), 地理坐标为 82°55′~90°25′ E、

39°35′~43°30′ N, 研究区总面积为 115 403.88 km², 行政区包括库尔勒市、尉犁县、轮台县、和硕县、博湖县、焉耆回族自治县、和静县、若羌县 8 个县(市)(图 1)。至 2020 年, 研究区总人口数达 113.67 万人, GDP 达 9 453 671 万元^[25]。该流域由开都河流域、孔雀河流域组成, 开都河是自北向南注入博斯腾湖, 出湖口后流入孔雀河。开都—孔雀河流域处于塔里木盆地东北部, 西接塔克拉玛干沙漠, 东靠库鲁克沙漠, 属于典型的温带大陆性干旱气候, 气候特征表现为昼夜温差大、降水量稀少、蒸发剧烈。

1.2 数据来源

1) 遥感数据: NDVI 数据来源于美国 NASA EOS/MODIS (<https://lpdaac.usgs.gov/api>) 发布的 MOD13Q1 数据产品, 分辨率为 250 m × 250 m, 间隔为 16 d, 研究区覆盖共有两景影像, 分别为 h24v04、h24v05, 每年共计 23 个时相数据。该数据已经过水、云、气溶胶等去除处理, 通过 MODIS Reprojection Tool 工具对数据进行一系列处理, 获得 2000—2020 年 NDVI 数据。

2) 气象数据: 来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 提取研究区内的标准气象站点的月平均数据和月降水数据。根据各气象站点的经纬度信息, 对气象数据进行反距离权重插值, 获得 2020 年的年均气温和年降水量。

3) 地形数据: 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>), 从该数据中提取高程和坡向。

4) 土地利用数据: 选自中国科学院资源科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn>) 公布的 2020 年 30 m 空间分辨率的土地利用数据。

5) 社会经济数据: 均来源于 2020 年的《新疆统计年鉴》^[25], 提取各县(市)的数据, 在 Arcgis 中进行空间关联并生成矢量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度

本研究选择了被广泛用于从 NDVI 计算 FVC 的像元二分模型, 计算公式如下^[26]:

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

式中: $NDVI_{veg}$ 表示纯植被区域的 $NDVI$, $NDVI_{soil}$ 表示纯裸土区域的 $NDVI$ 。根据影像提取结果和实际情况, 本研究选取累积概率是 5% 和 95% 的 $NDVI$ 值。本研究采用陈楠等^[27]的标准进行划分, 将其分为极低植被覆盖度 (0~10%)、低植被覆盖度 (10%~30%)、中植被覆盖度 (30%~60%)、高植被覆盖度 (60%~100%)。

1.3.2 转移矩阵

转移矩阵是植被覆盖度结构转变和变化方向的

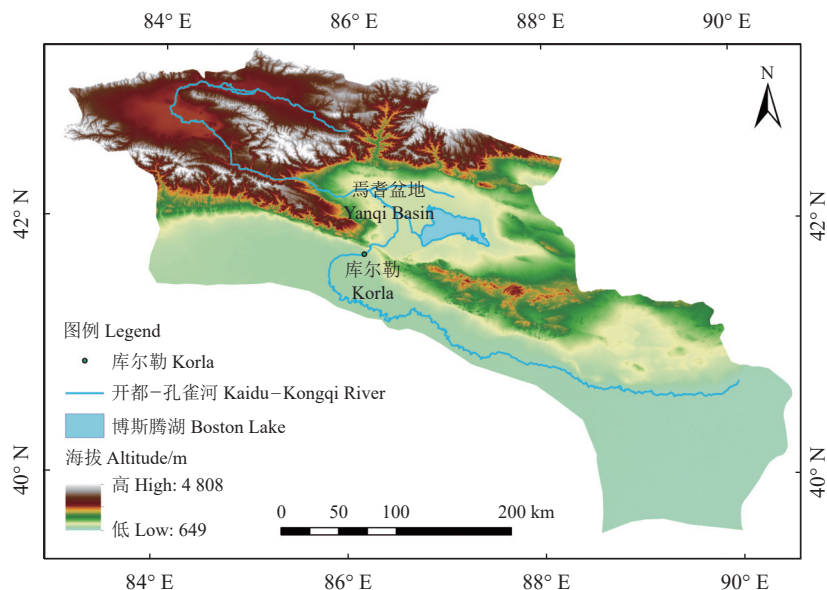


图 1 研究区概况图

Figure 1 Sketch map of the Kaidu—Kongqi River Basin study area

基础,通过转移矩阵模型能够全面刻画出各等级植被覆盖度间的时空演变过程及结构特征^[28]。本研究使用 Arcgis 10.2 软件对 2000—2020 年研究区不同等级植被覆盖度进行叠加运算,后通过 Excel 表格来建立 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖度转移矩阵。

1.3.3 Sen + Mann-Kendall 趋势分析

Sen 趋势度与 Mann-Kendall 检验结合,可以增强长时间序列趋势分析的抗噪能力,提高检验结果准确度^[29]。Sen 趋势度的公式为:

$$\beta = Median\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i. \tag{2}$$

式中:趋势度 β 判断为 FVC 变化趋势的升降; x_i 、 x_j 为 FVC 中的序列数据; i 和 j 为不同时间序列长度。若 $\beta < 0$ 时,时间序列呈下降趋势;反之呈上升趋势。

Mann-Kendall 方法是 FVC 时间序列趋势性检验的方法,其统计检验方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i); \tag{3}$$

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases}; \tag{4}$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}; \tag{5}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & (S > 0) \\ 0, & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & (S < 0) \end{cases}。 \tag{6}$$

式中: x_i 和 x_j 为 FVC 序列数据, sgn 为符号函数, Var 为计算方差函数, θ 为 x_j 与 x_i 的差值。依据 n 值大小的不同,显著性检验统计量的选取也不同。在显著性水平 α 下, $Z_{1-\alpha/2}$ 在正态分布表中所对应的值,结合 β 值和 Z 值,将植被覆盖度趋势变化的显著性分为 7 个等级:当 $\beta > 0$, 且通过 99% 的显著性检验时,表明植被覆盖度呈极显著上升趋势;当 $\beta > 0$, 且通过 95% 的显著性检验时,表明植被覆盖度呈显著上升趋势;当 $\beta > 0$, 通过 90% 的显著性检验时,表明植被覆盖度呈不显著上升趋势;当 $\beta = 0$ 时,表明植被覆盖度未发生变化;同理可得植被覆盖度呈下降趋势。

1.3.4 指标选取及信息提取

1) 指标选取:本研究选取高程、坡向、气温、降水、人口密度、地均 GDP、牲畜年底头数、农业人口密度、土地利用类型 9 个驱动因子对开都—孔雀河植被覆盖度变化的影响(表 1)。

表 1 驱动因子指标
Table 1 Driving factors for fractional vegetation cover in the Kaidu - Kongqi River Basin

类型 Category	影响因子 Factor	单位 Factor unit
地形 Topography	高程(X ₁) Elevation	m
	坡向(X ₂) Aspect	
气候 Climate	气温(X ₃) Temperature	℃
	降水(X ₄) Precipitation	mm
社会经济 Socioeconomic	人口密度(X ₅) Population density	person·km ⁻²
	地均GDP (X ₆) Average land GDP	CNY·km ⁻²
	牲畜年底头数(X ₇) Head count of livestock at the end of the year	10 ⁴ head
	农业人口密度(X ₈) Agricultural population density	person·km ⁻²
	土地利用类型(X ₉) Land use type	

2) 信息提取:地形因子、气象因子、社会经济因子按照自然间断点分级法进行重分类,分别为 9 类、9 类、6 类;土地利用类型按照中国土地利用/土地覆盖数据的分类系统,根据土地资源及其利用属性进行重分类,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;而后在 Arcgis 10.2 软件中利用渔网工具将开孔河流域进行规则网格划分,设置网格大小为 3 km × 3 km,取每个网格的中心点作为采样点,共计 10 688 个。再获取采样点对应各个驱动因子的数据。

1.3.5 地理探测器

地理探测器是一组统计方法,用来检测空间分布上的不均匀性,并揭示 FVC 变化的推动力^[30]。

1) 因子探测器

利用因子探测功能识别影响研究区 FVC 格局

变化的因子, 并分析其解释力。利用方程计算各因子对 FVC 的解释力, 公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2}{n \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST};$$

(7)

$$SSW = \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2, \quad SST = n \sigma^2.$$

(8)

式中: $h = 1, 2, \cdots, L$ 表示变量 Y 或因子 X 的数目; n_h 表示 h 层中的单位量; n 表示总区域内的单位数量。SSW 表示层内方差之和 (within sum of square); SST 表示全区总方差 (total sum of squares)。 q 值在 $[0, 1]$, q 值越大, 说明自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强。

2) 交互探测器

用于识别不同因子 (自变量) 之间的交互作用, 评估方法是首先分别计算两种影响因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值, 比较单因子 q 值、双因子 q 值和两因子相互作用的总和, 并评估双因子对因变量 FVC 的解释力是否有较大的有影响。

3) 生态探测器

用于判断交互因子对植被覆盖度空间变化的影响是否存在显著性差异, 通过 F 统计量检验:

$$F = \frac{N_{x1}(N_{x2}-1)SSW_{x1}}{N_{x2}(N_{x1}-1)SSW_{x2}}.$$

(9)

式中: N_{x1} 和 N_{x2} 表示这两因子的样本量; SSW_{x1} 和 SSW_{x2} 分别表示由 X_1 和 X_2 形成的层内方差之和。

4) 风险探测器

用于判定每个影响因子推进植被生长的合适范

围或类型, 用统计 t 测量:

$$t_{\bar{Y}_{h=1}-\bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{Var(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{Var(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}}.$$

(10)

式中: $\bar{Y}_h$ 是子区域 h 内植被覆盖度属性的平均值; n_h 是子区域 h 内的样本数; Var 是方差。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度时空分布特征

基于开都—孔雀河流域 NDVI 数据集 (2000—2020 年), 通过像元二分模型得出植被覆盖度。该流域植被覆盖度年际变化表明, 21 年来流域植被覆盖度多年均值为 27.1% (图 2), 其中最小值出现在 2001 年, FVC 均值为 25.5%, 而在 2019 年植被覆盖度均值达到最大值, 为 29.0%。21 年间流域内 FVC 总体上呈现缓慢增长趋势, 年增长速率为每 10 年 0.013, 表明该流域植被生长状况呈现轻微变好趋势。2000—2020 年植被覆盖变化前期平稳后期增长: 2000—2011 年, 植被覆盖度均值略有小幅度波动。在 2011 年之后, 相较于前 11 年, 植被 FVC 均值大幅度升高, 到 2020 年共计增加了 2.3%, 说明植被活动朝增强的方向发展, 有相对的提升。

2000—2020 年开孔河流域植被覆盖变化势头比较明显 (图 3), 开孔河流域植被覆盖等级呈现西北高一东南低的走向, 中、高植被覆盖度分布在研究区西北的山区, 低植被覆盖度主要分布在山区边缘以及中部平原, 极低植被覆盖度主要分布在东南部

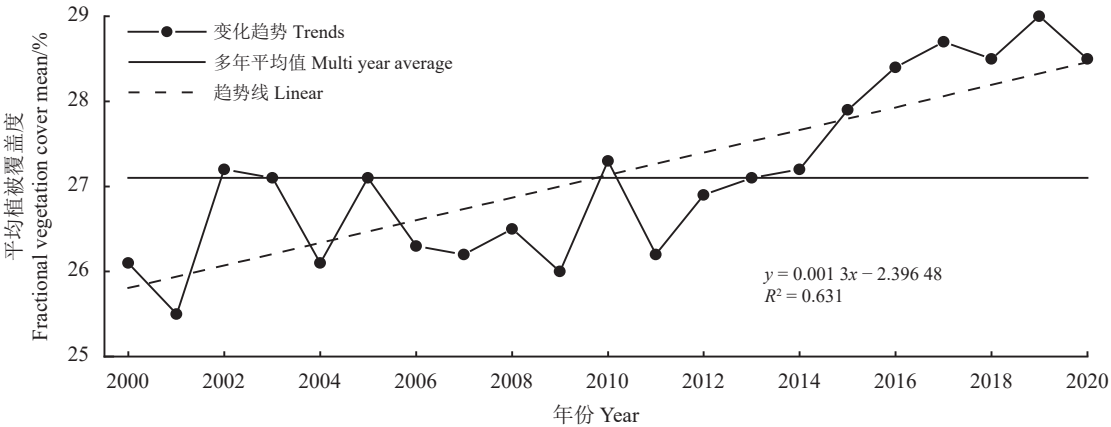


图 2 开都—孔雀河流域植被覆盖度年际变化
Figure 2 Interannual variation of vegetation cover in the Kaidu—Kongqi River Basin from 2000 to 2020

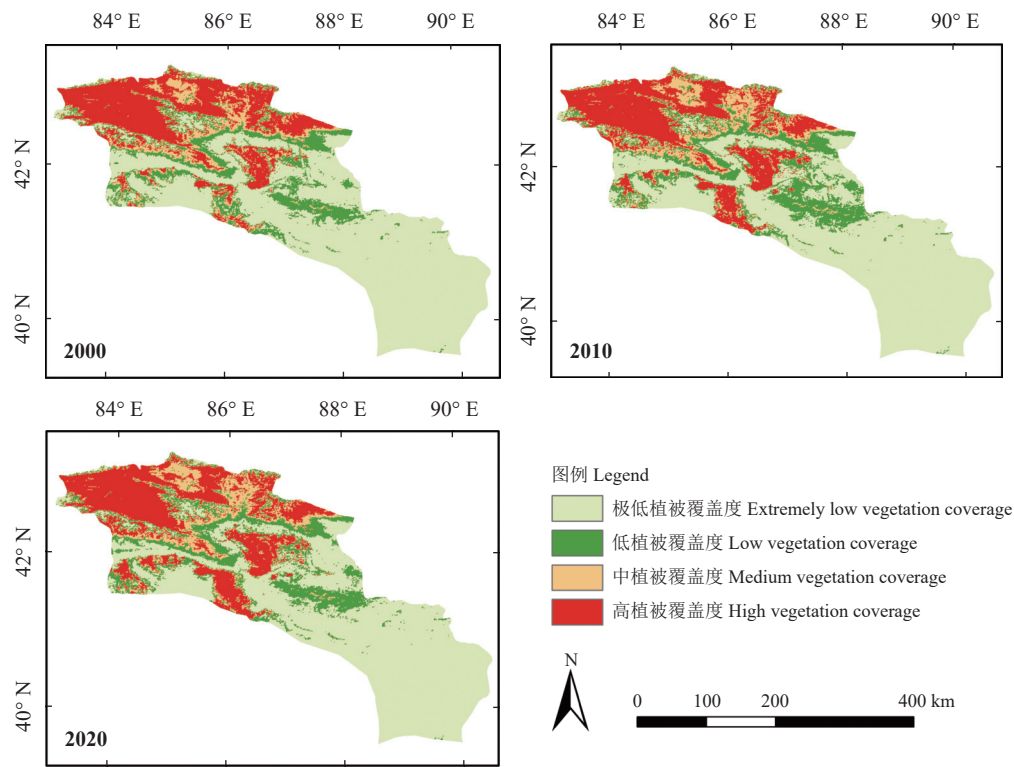


图 3 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖度空间格局

Figure 3 Spatial patterns of vegetation cover in the Kaidu—Kongqi River Basin from 2000 to 2020

的戈壁、荒漠区, 研究区各等级植被覆盖度面积整体占比依次为极低植被覆盖度 > 高植被覆盖度 > 低植被覆盖度 > 中植被覆盖度。根据该流域 2000—2020 年植被覆盖面积变化 (表 2) 可知, 整个研究区的情况呈现出极低覆盖度面积减少, 高、中、低植被覆盖度面积增加的趋势。极低植被覆盖度是研究区覆盖类型分布度最高的一类, 约占研究区面积的 50%。由于极低植被覆盖度面积主要集中在荒漠、裸地区, 受国家实行生态政策的保护, 极低覆盖面

积变化幅度最大, 减少量为 5 010.31 km², 减幅为 7.72%; 低植被覆盖度面积呈先增后减的倒“U”型动态变化, 在 2010 年时低覆盖度的面积较 2000 年的增加 2.16%, 其增加的面积主要出现在博斯腾湖南部, 但在 20 年间共增加 1 253.19 km²; 2000—2020 年高植被覆盖面积增长最多, 增加量为 1 993.13 km², 在 2000 年基础上增长了 8.18%, 其增加的高覆盖度面积主要分布在焉耆盆地; 中覆盖度面积增长次之, 较 2000 年增加了 1 764.00 km², 增幅为 16.31%。

表 2 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖度面积统计

Table 2 Vegetation coverage area of the Kaidu – Kongqi River Basin from 2000 to 2020

覆盖度类型 Coverage type	2000		2010		2020		2000—2020	
	面积 Area/ km ²	比例 Percentage/ %	面积 Area/ km ²	比例 Percentage/ %	面积 Area/ km ²	比例 Percentage/ %	变化量 Variations/ km ²	变化率 Rate of change/%
极低植被覆盖区 Extremely low vegetation coverage	64 941.19	56.27	60 678.69	52.58	59 930.88	51.93	−5 010.31	−7.72
低植被覆盖区 Low vegetation coverage	15 282.75	13.24	17 768.94	15.40	16 535.94	14.33	1 253.19	8.20
中植被覆盖区 Medium vegetation coverage	10 814.56	9.37	12 152.88	10.53	12 578.56	10.90	1 764.00	16.31
高植被覆盖区 High vegetation coverage	24 365.38	21.11	24 803.38	21.49	26 358.50	22.84	1 993.13	8.18

其面积增长主要位于开都河北部周边以及山谷。

2.2 植被覆盖时空变化特征

2.2.1 植被覆盖等级转移矩阵

2000—2020年,植被覆盖度等级之间转化频繁,以极低植被覆盖度与低植被覆盖度之间转化为主。如表3所列,2000—2020年植被覆盖等级总转移面积为16 350.94 km²,其中极低覆盖度转出面积最大为6 123.31 km²,主要转化为低植被覆盖度,转出面积为4 747.75 km²;而其他植被覆盖度等级转为

极低植被覆盖的面积有1 113.00 km²,主要来自于低覆盖度1 099.00 km²。低植被覆盖度转出面积为4 442.88 km²,转出部分主要为中覆盖度、高覆盖度,面积分别占比为11.76%和10.12%;低覆盖度转入面积是2020年植被覆盖度等级中最多的,面积为5 696.06 km²。中植被覆盖度转入总量为5 043.50 km²,主要转入类型为高覆盖度,面积为2 476.81 km²。2020年高植被覆盖度总面积为26 358.50 km²,其中未发生变化的面积为21 860.13 km²,主要转入类型为中覆盖度,转入量为2 345.63 km²。

表3 2000—2020年开都—孔雀河流域植被覆盖度转移矩阵
Table 3 Vegetation coverage transition matrix in the Kaidu - Kongqi River Basin from 2000 to 2020

覆盖度类型 Coverage type	极低植被覆盖度 Extremely low vegetation coverage	低植被覆盖度 Low vegetation coverage	中植被覆盖度 Medium vegetation coverage	高植被覆盖度 High vegetation coverage	2000年总计 Total of 2000	转出 Transfer out
极低植被覆盖度 Extremely low vegetation coverage	58 817.88	4 747.75	768.94	606.63	64 941.19	6 123.31
低植被覆盖度 low vegetation coverage	1 099.00	10 839.88	1 797.75	1 546.13	15 282.75	4 442.88
中植被覆盖度 Medium vegetation coverage	9.00	924.88	7 535.06	2 345.63	10 814.56	3 279.50
高植被覆盖度 High vegetation coverage	5.00	23.44	2 476.81	21 860.13	24 365.38	2 505.25
2020年总计 Total of 2020	59 930.88	16 535.94	12 578.56	26 358.50	115 403.88	16 350.94
转入 Transfer in	1 113.00	5 696.06	5 043.50	4 498.38		

2.2.2 植被覆盖度变化趋势

2000—2020年开孔河流域植被覆盖变化趋势表明,植被覆盖趋势呈无变化的面积为12 736.06 km²,约有41.31%的区域面积呈现减少趋势,还有47.66%的区域面积呈现增加趋势,说明21年来开孔河流域的植被有轻微改善趋势(图4、表4)。极显著增加的面积为12 185.69 km²,约为10.56%,主要分布在开都河中游下部以及博斯腾湖的西北部、东南部;显著与不显著增加的区域基本相同,面积分别为8 375.56和34 438.88 km²,两者分别占7.26%和29.84%,主要分布在研究区西北部和中部博斯腾湖周围;图中不显著减少区域、极显著减少和显著减少的3个区域分布均在一起,其中不显著减少的区域面积为35 799.19 km²,占研究区总面积比例最大为31.02%,主要在开都河上游的周围区域和孔雀河下游的荒漠区分布;极显著减少的区域面积为4 939.31 km²,

其主要在流域东南部分布较多,在研究区北部分布较少,而显著减少区域伴随着极显著减少区域分布,极显著区域面积占比最小为4.28%。

2.3 驱动因素的空间异质性分析

2.3.1 探测因子影响力分析

各驱动因子对植被覆盖变化的影响强弱可以通过因子探测得出的 q 值大小来阐明。因子影响力结果表明,各驱动因子的 q 值排序为高程(0.481)>土地利用类型(0.472)>气温(0.430)>农业人口密度(0.389)=人口密度(0.389)>降水(0.385)>牲畜年底头数(0.381)>地均GDP(0.277)>坡向(0.005)(图5)。因此,影响流域植被覆盖度空间分层差异的主要影响因子是高程和土地利用类型,两个因子的解释力均超过0.45;气温、农业人口密度、人口密度、降水及牲畜年底头数作为次级影响因子,解释力均在

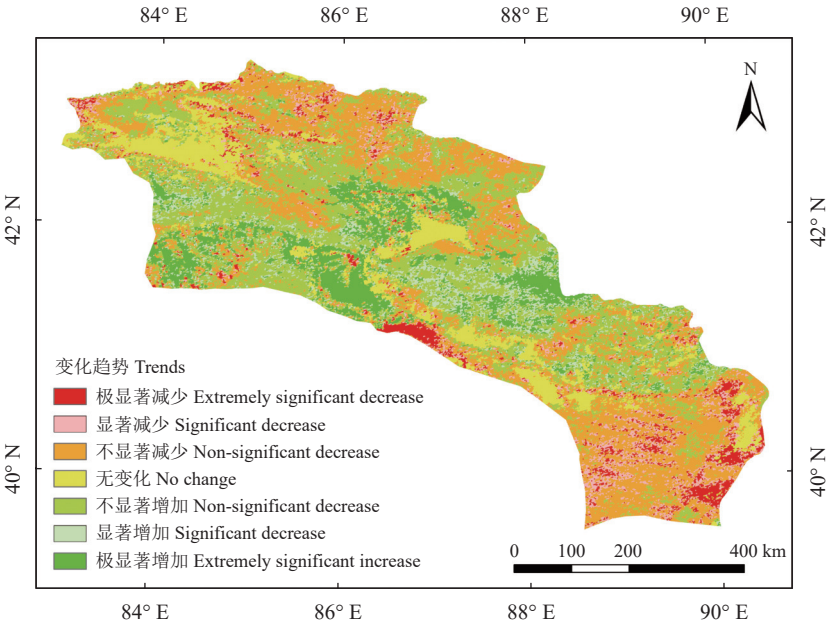


图 4 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖度变化趋势

Figure 4 Vegetation coverage trends in the Kaidu—Kongqi River Basin from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖度变化趋势统计

Table 4 Statistical analysis of vegetation coverage trend changes in the Kaidu – Kongqi River Basin from 2000 to 2020

变化趋势等级 Change trend level	置信度 Confidence/%	面积 Area/km ²	比例 Percentage/%
极显著增加 Extremely significant increase	99	12 185.69	10.56
显著增加 Significant increase	95	8 375.56	7.26
不显著增加 Non-significant increase	90	34 438.88	29.84
无变化 No change	—	12 736.06	11.04
不显著减少 Non-significant decrease	90	35 799.19	31.02
显著减少 Significant decrease	95	6 929.19	6.00
极显著减少 Extremely significant decrease	99	4 939.31	4.28

0.35 以上; 地均 GDP 的解释力超过 0.20; 坡向的单个因素解释力最小。

2.3.2 探测交互作用分析

交互探测器主要是评估两因子共同作用时是否会增加或减少对植被覆盖度的解释力, 所有因子两两交互都增强了对 FVC 变化的贡献力, 其中

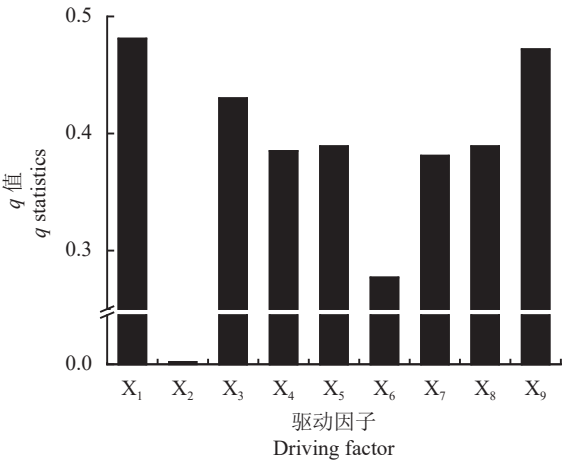


图 5 各驱动因子解释力

Figure 5 Explanatory power of each driving factor

X₁: 高程; X₂: 坡向; X₃: 气温; X₄: 降水; X₅: 人口密度; X₆: 地均 GDP; X₇: 牲畜年底头数; X₈: 农业人口密度; X₉: 土地利用类型。下同。

X₁: elevation; X₂: aspect; X₃: temperature; X₄: precipitation; X₅: population density; X₆: average land GDP; X₇: head count of livestock at the end of the year; X₈: agricultural population density; X₉: land use type. This is applicable for the following tables and figures as well.

除了坡向与其他因子的交互作用呈非线性增强, 其余均呈现双因子增强(图 6)。土地利用类型与除坡向和地均 GDP 的其他驱动因子的交互作用, 解释力在 0.65 以上, 分别为 X₁∩X₉ (0.743)、X₃∩X₉ (0.727)、X₄∩X₉ (0.706)、X₅∩X₉ (0.663)、X₇∩X₉ (0.662)、X₈∩X₉ (0.658), 从解释力角度看, 土地利用

类型与其他驱动因子的协同作用下,显著增强了土地利用类型对植被覆盖度的影响;解释力在 0.50 以上的有 $X_1 \cap X_3$ (0.584)、 $X_1 \cap X_4$ (0.554)、 $X_1 \cap X_5$ (0.599)、 $X_1 \cap X_6$ (0.592)、 $X_1 \cap X_7$ (0.606)、 $X_1 \cap X_8$ (0.603)、 $X_3 \cap X_5$ (0.512)、 $X_3 \cap X_6$ (0.510)、 $X_3 \cap X_7$ (0.510)、 $X_3 \cap X_8$ (0.502)、 $X_4 \cap X_5$ (0.503), 由此看出, 高程、气温分别与各因子之间交互作用对植被覆盖度的影响较为强烈, 同时坡向与各驱动因子之间交互作用比坡向对植被覆盖度的直接影响较大, 说明两因子的叠加效果远大于单一因子对植被覆盖的影响。

2.3.3 探测显著性差异分析

生态因子检测用于判断交互因子在植被 FVC 的空间分布上有无显著性差异, 由探测因子显著性分析结果 (表 5) 可知, 高程和其他因子之间差异不显著 ($P > 0.05$); 坡向与除高程的其余驱动因素对 FVC 空间分布均具有显著差异 ($P < 0.05$); 气温和坡向、土地利用类型之间存在显著性差异, 与其他因子无显著性差异; 降水与高程、气温、人口密度、地均 GDP、牲畜年底头数、农业人口密度之间的共同作用对植被覆盖变化无显著性差异, 与土地利用类型和坡向对植被覆盖度空间变化有显著

差异; 人口密度与坡向、土地利用类型的相互作用对植被覆盖度空间分布存在有显著性差异; 地均 GDP 分别与高程、气温、降水、人口密度的交互作用对植被覆盖时空变化存在无显著性差异; 牲畜年底头数和农业人口密度分别与坡向、地均 GDP、土地利用类型有显著差异, 而与其他因素无显著差异; 土地利用类型与高程的叠加作用下对植被覆盖变化不存在显著性差异, 而与其他因子均具有显著差异。

2.3.4 探测因子适宜性分析

不同驱动因子的植被 FVC 均值差异明显 (表 6)。随高程、降水、人口密度的增加, 研究区内植被覆盖度增高, 分别在 2 932~3 291 m、228.11~270.46 mm、1 人·km⁻² 分区时, FVC 达到最大, 分别为 79.8%、85.0% 和 61.9%; 而随着气温升高, 植被覆盖度呈下降趋势, 在-0.73~2.26 ℃ 的适宜范围内 FVC 达到最大 (85.3%), 说明这个温度范围促进了植被生长; FVC 随地均 GDP、牲畜年底头数、农业人口密度的增加呈先增高后降低的趋势和波动变化, 分别在 99 735~257 254 元·km⁻²、43.1 万~116 万头、1~3 人·km⁻² 分区时, FVC 达到最大, 分别为 50.7%、61.9% 和 61.9%; 坡向为北坡时最适宜植被生长, 植被覆盖

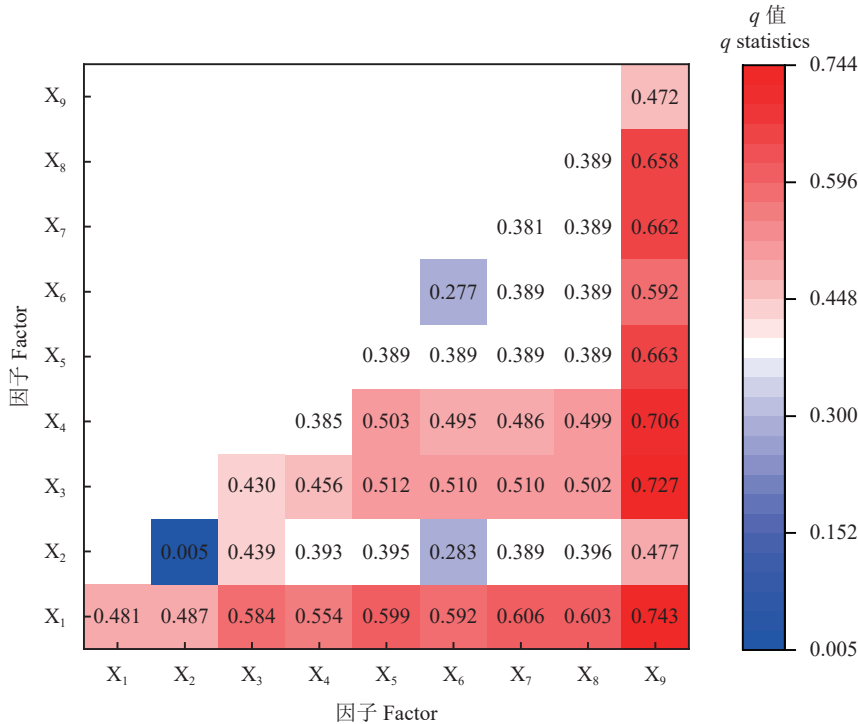


图 6 因子交互作用的解释力
Figure 6 Explanatory power of factor interactions

表 5 探测因子显著性分析 (置信水平 95%)
Table 5 Significance analysis of each detected factor (Confidence level 95%)

因子 Factor	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₁									
X ₂	N								
X ₃	N	Y							
X ₄	N	Y	N						
X ₅	N	Y	N	N					
X ₆	N	Y	N	N	N				
X ₇	N	Y	N	N	N	Y			
X ₈	N	Y	N	N	N	Y	N		
X ₉	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	

N表示在0.05水平上交互因子叠加对FVC变化的影响不存在显著性差异，Y表示有显著性差异。
N: no significant difference in the influence of interaction factors on FVC change at the 0.05 level; Y: significant difference at the 0.05 level.

表 6 驱动因子的适宜类型或范围 (置信水平 95%)
Table 6 Appropriate type or range of driver (Confidence level 95%)

驱动因子 Driving factor	适宜类型或范围 Suitable type or range	植被覆盖度 Fractional vegetation cover/%
高程 Elevation/m	2 932~3 291	79.8
坡向 Aspect	北坡 North slope	36.6
气温 Temperature/℃	-0.73~2.26	85.3
降水 Precipitation/mm	228.11~270.46	85.0
人口密度 Population density/(person·km ⁻²)	1	61.9
地均GDP Average land GDP/(CNY·km ⁻²)	99 735~257 254	50.7
牲畜年底头数 Head count of livestock at the end of the year/(×10 ⁴ head)	43.1~116.0	61.9
农业人口密度 Agricultural population density/(person·km ⁻²)	1~3	61.9
土地利用类型 Land use type	耕地 Cultivated land	78.9

度达到 36.6%; 土地利用类型为耕地时, FVC 达到最大 (78.9%), 这可能由于人为开垦荒地, 导致耕地面积迅速扩张, 使得植被覆盖面积也随之增加。

3 讨论

开都—孔雀河流域植被覆盖等级呈西北高一东南低趋势, 2000—2020 年流域植被生长状况整体呈增长态势, 这与万洪秀等^[31] 研究结果一致。21 年间开孔河流域 FVC 空间上发生明显变化, 巴州曾存在草地退化、过度放牧等生态问题, 2011 年巴州贯彻国家草原生态保护补助奖励机制和禁牧、轮牧、休牧、草蓄平衡制度^[32], 植被覆盖度持续性增加。其

中库尔勒市周围区域植被增加尤为明显, 主要与耕地扩增有关^[33]; 近年来降水量增加、蒸发量减少^[34]使焉耆盆地和博斯腾湖南部区域的植被覆盖度显著增加; 山区降水量减少, 气温降低和平原区气温升高, 降水减少^[35], 是导致开都河东部和孔雀河南部植被退化的主要原因。由此得出, 研究区植被覆盖变化整体呈现轻微改善的趋势, 但仍然存在较大的生态环境问题。

本研究中, 高程和土地利用类型是影响开都—孔雀河流域植被覆盖度变化的主要驱动因子, 气温对植被覆盖度的影响次之, 解释力均在 0.40 以上, 并且影响力表现为高程 > 土地利用类型 > 气

温。高程对植被覆盖变化有着不可忽视的作用,王涛等^[36]研究高程对博斯腾湖流域植被变化影响,发现随着海拔高度增加,植被生长影像呈正态分布。研究区地势落差大,西北部多为山地,海拔较高,主要表现为高、中植被覆盖度;中部和东南部多以平原、荒漠为主,海拔较低且蒸发量大,主要表现为低、极低植被覆盖度。人类活动主要通过改变土地利用类型来影响植被变化,研究期间流域内耕地面积增加较多,其主要分布在库尔勒市区周边以及焉耆盆地^[37],植被覆盖度也随之增加,其中高程与土地利用的交互作用对植被覆盖度时空变化的解释力最大。植被对气候变化较为敏感^[38],尤其在新疆干旱、半干旱区域,降水稀少且蒸发剧烈,但在气温逐渐升高情况下,相较于降水,气温成为限制植被长势的重要因子^[39]。因此,合理地研析和阐明驱动因素及其因子之间的协同作用对植被时空变化的影响,探索驱动因素促进植被生长的适宜范围,从而有助于当地政府在有利范围内干预植被变化,减轻人类发展带来的负面影响,有效地指导植被恢复和保护。

本研究仅对年际 FVC 均值变化进行讨论,尚未对年内 FVC 均值变化,以及未量化政策对植被变化的影响进行研究。在今后的工作中,将深刻探讨开都—孔雀河流域对自然及人类驱动因素的响应,详细阐明植被覆盖度时空变化特征,并对植被变化的驱动机制进行系统地解释。

4 结论

1) 2000—2020 年开都—孔雀河流域植被覆盖

度呈缓慢增加趋势,上升幅度为 $0.013 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 2000—2011 年植被覆盖度变化较为平稳, 2011 年之后,植被覆盖度持续增加。空间上,植被覆盖度呈现从西北向东南递减的空间分布特征。在 20 年间高植被覆盖度面积增加 $1\,993.13 \text{ km}^2$, 主要分布在库尔勒市周边区域和焉耆盆地。

2) 开都—孔雀河流域以极低覆盖度与低覆盖度之间转化为主,其中极低植被覆盖度转出面积远大于转入面积,主要转化为低覆盖度。开孔河流域植被覆有轻微的改善趋势,其中 17.82% 的区域呈极显著、显著增加趋势; 10.28% 的区域呈极显著、显著减少趋势; 71.90% 的区域呈不显著和无变化趋势。

3) 高程和土地利用类型是造成区域内植被分布格局的主要因素,坡向与流域植被覆盖变化的相关性最弱,其中高程和土地利用类型两两相交的解释力最高为 0.743,除了土地利用与坡向的相互作用,与其他驱动因子的共同作用下解释力均超过 0.50,其次高程、气温与其余因子之间交互作用对植被覆盖度的影响较为强烈。

4) 风险因子探测分析发现促进植被生长的各主要因子最适宜范围: 气温为 $-0.73 \sim 2.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 降水为 $228.11 \sim 270.46 \text{ mm}$, 高程为 $2\,932 \sim 3\,291 \text{ m}$, 坡向为北坡适合开孔河流域植被生长,人口密度为 $1 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$, 地均 GDP 为 $99\,735 \sim 257\,254 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2}$, 牲畜年底头数为 $43.1 \text{ 万} \sim 116 \text{ 万头}$, 农业人口密度为 $1 \sim 3 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$, 土地利用类型为耕地,植被覆盖度最大。该成果为该流域植被生长变化的驱动因素分析提供了参考和借鉴。

参考文献 References:

- [1] LI J, WANG J L, ZHANG J, ZHANG J P, KONG H. Dynamic changes of vegetation coverage in China-Myanmar economic corridor over the past 20 years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102378.
- [2] PIAO S L, YIN G D, TAN J G, CHENG L, HUANG M T, LI Y, LIU R G, MAO J F, B. MYNENI R G, PENG S S, POULTER B, SHI X Y, XIAO Z Q, ZENG N, ZENG Z Z, WANG Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [3] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
LI Z, SUN R H, ZHANG J C, ZHANG C. Temporal-spatial analysis of vegetation coverage dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [4] 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析. *生态学报*, 2022, 42(1): 220-235.
LI J, LIU Q L, LIU P Y. Spatio-temporal changes and driving forces of fraction of vegetation coverage in Hulunbuir (1998—2018).

- Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 220-235.
- [5] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响. 生态学报, 2017, 37(21): 7019-7029.
WANG J, ZHOU W Q, XU K P, YAN J L. Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion from 2000 to 2010. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7019-7029.
- [6] TANG J M, BU K, YANG J C, ZHANG S W, CHANG L P. Multitemporal analysis of forest fragmentation in the upstream region of the Nenjiang River Basin, Northeast China. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 597-607.
- [7] 于惠, 吴玉锋, 金毅, 牛莉婷. 河西干旱区植被覆盖度时空格局分析. 草业科学, 2019, 36(3): 623-631.
YU H, WU Y F, JIN Y, NIU L T. Analysis of the spatio-temporal patterns of vegetation fractional coverage in the Hexi arid area. *Pratacultural Science*, 2019, 36(3): 623-631.
- [8] 杨瑞瑞, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 夏杰, 申一林. 2000—2015年若尔盖地区植被覆盖度变化及气候因子驱动分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2822-2835.
YANG R R, YI G H, ZHANG T B, LI J J, BIE X J, XIA J, SHEN Y L. Vegetation coverage change and how it drives climatic factors in the Zoige Region from 2000 to 2015. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12): 2822-2835.
- [9] 张一然, 文小航, 罗斯琼, 李茂善. 近20年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究. 高原气象, 2022, 41(2): 317-327.
ZHANG Y R, WEN X H, LUO S Q, LI M S. Study on the relationship between vegetation cover change and climate factors in Zoige Wetland in recent 20 years. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 317-327.
- [10] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 侯青青, 谢保鹏, 吴华武. 青藏高原草地物候动态及其对驱动因子的响应. 草业科学, 2023, 40(1): 4-14.
JI Z X, PEI T T, CHEN Y, HOU Q Q, XIE B P, WU H W. Grassland phenological dynamics and its response to driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2023, 40(1): 4-14.
- [11] 郑勇, 杨武年, 刘冲, 夏杰, 裴志芳, 杨鑫. 川西高原近20 a植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1447-1456.
ZHENG Y, YANG W N, LIU C, XIA J, PEI Z F, YANG X. Dynamic monitoring and driving force analysis of vegetation cover change in western Sichuan Plateau in recent 20 years. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(6): 1447-1456.
- [12] 屈莹波, 赵媛媛, 丁国栋, 高广磊. 气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响. 干旱区研究, 2021, 38(3): 802-811.
QU Y B, ZHAO Y Y, DING G D, GAO G L. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Xilingol steppe. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 802-811.
- [13] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 张红. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响: 以京津风沙源区为例. 中国环境科学, 2021, 41(2): 826-836.
MENG Q, WU Z T, DU Z Q, ZHANG H. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model: Take the Beijing-Tianjin sand source region as an example. *China Environmental Science*, 2021, 41(2): 826-836.
- [14] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 李占斌, 李鹏, 张星. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析: 基于地理探测器. 生态学报, 2022, 42(8): 3389-3399.
MA X N, REN Z P, XIE M Y, LI Z B, LI P, ZHANG X. Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3389-3399.
- [15] YUAN L H, CHEN X Q, WANG X Y, XIONG Z, SONG C Q. Spatial associations between NDVI and environmental factors in the Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(9): 1548-1564.
- [16] LIU C L, LI W L, WANG W Y, ZHOU H K, LIANG T G, HOU F J, XU J, XUE P F. Quantitative spatial analysis of vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Tibetan Plateau using the Google Earth Engine. *Catena*, 2021, 206: 105500.
- [17] WANG Y M, ZHANG Z X, CHEN X. Quantifying influences of natural and anthropogenic factors on vegetation changes based on geodetector: A case study in the Poyang Lake Basin, China. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5081.
- [18] 肖伟. 开都—孔雀河流域水生态安全与对策研究. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(1): 72-74.
XIAO W. Study on water ecological security and countermeasure in Kaidu—Kongque River Basin. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2021, 4(1): 72-74.
- [19] WANG Y, XIA T T, SJATAER R, ZHANG S, LI Z. Analysis of characteristics and driving factors of land-use changes in the Tarim

- River Basin from 1990 to 2018. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10263.
- [20] MAMAT A, WANG J, MA Y. Impacts of land-use change on ecosystem service value of mountain-oasis-desert ecosystem: A case study of Kaidu-Kongque river basin, Northwest China. *Sustainability*, 2020, 13(1): 140.
- [21] 阿迪莱·如则, 阿依吐尔逊·沙木西, 古丽米热·艾尔肯. 开都-孔雀河流域土地利用转型及其功能变化特征. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 244-251.
- Adilai-Ruze, Ayituexun-Shaximu, Alimire-Aierken. Characteristics of land use transformation and its function change in Kaidu-Kongque River Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 244-251.
- [22] FU A H, CHEN Y N, LI W H. Impact of global warming on water requirement of main crops in oasis irrigated area in yanqi basin. *Advanced Materials Research*, 2014, 955: 3079-3087.
- [23] 李郑淼, 郭媛媛. 巴州开都河-孔雀河生态廊道水生态空间演变分析及生态功能评价. *水利水电工程设计*, 2021, 40(3): 48-50.
- LI Z M, GUO Y Y. Spatial evolution of water ecology and ecological function of Kaidu River Kongque River ecological corridor in Bazhou. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(3): 48-50.
- [24] 刘璐, 陈亚鹏, 李肖杨. 生态输水对孔雀河地下水埋深及植被的影响. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 901-909.
- LIU L, CHEN Y P, LI X Y. Effect of ecological water conveyance on groundwater depth and vegetation in the Kongque River. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 901-909.
- [25] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Statistic Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Xinjiang Statistic Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [26] YANG R, LI X Y, MAO D H, WANG Z M, TIAN Y L, DONG Y L. Examining fractional vegetation cover dynamics in response to climate from 1982 to 2015 in the Amur River basin for SDG 13. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5866.
- [27] 陈楠, 李新国, 刘彬. 基于像元二分模型的开都河流域下游绿洲植被动态变化. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(2): 199-202.
- CHEN N, LI X G, LIU B. Dynamic changes of vegetation coverage in the oasis of the lower reaches of Kaidu River based on dimidiate pixel model. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(2): 199-202.
- [28] 邓椿, 蒋晓辉, 聂桐, 蔡文娟, 何佳瑛. 山西省植被覆盖度多因子探测特征与驱动力分析. *环境科学与技术*, 2022, 45(2): 182-191.
- DENG C, JIANG X H, NIE T, CAI W J, HE J Y. Multi-factor detection characteristics and driving force analysis of vegetation coverage in Shanxi Province. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(2): 182-191.
- [29] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于Sen + Mann-Kendall的北京植被变化趋势分析. *计算机工程与应用*, 2013, 49(5): 13-17.
- WANG D L, LIU W P, HUANG X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen + Mann-Kendall method. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5): 13-17.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 万洪秀, 覃志豪, 徐永明. 基于MODIS数据的博斯腾湖流域植被变化及其与气候因子的关系. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1429-1437.
- WAN H X, QIN Z H, XU Y M. Variation of vegetation cover and its relationship with climatic factors in the Bosten Lake Basin using MODIS data. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(5): 1429-1437.
- [32] 侍伟利. 新疆草原生态保护补奖政策实施的效果评价. *青海草业*, 2017, 26(2): 40-43.
- SHI W L. Implementation effect evaluation of grassland ecological protection award in Xinjiang. *Qinghai Prataculture*, 2017, 26(2): 40-43.
- [33] 张军峰, 孟凡浩, 包安明, 李长春, 齐修东, 刘铁, 张鹏飞. 新疆孔雀河流域人工绿洲近40年土地利用/覆被变化. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 664-672.
- ZHANG J F, MENG F H, BAO A M, LI C C, QI X D, LIU T, ZHANG P F. LUCC analysis of the upstream of the Kongqi River, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(3): 664-672.
- [34] 哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 海米提·依米提. 新疆焉耆盆地人类活动与气候变化的效应机制. *生态学报*, 2016, 36(18): 5750-5758.

- Halidan·Sidike, Yusupujiang·Rusuli, Haimiti·Yimiti. Ecological effects of human activities and climate change in Yanqi Basin, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5750-5758.
- [35] 徐培军, 徐丽萍, 位宏, 李晓蕾. 博斯腾湖流域归一化植被指数变化及其对气候变化的响应. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 86-92.
- XU P J, XU L P, WEI H, LI X L. Changes of NDVI and its response to climate change in Boston Lake Basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 86-92.
- [36] 王涛, 陶辉, 雷刚, 郝宁燕. 博斯腾湖流域植被覆盖变化及驱动因素分析. *中国农学通报*, 2015, 31(4): 228-236.
- WANG T, TAO H, LEI G, HAO N Y. Analysis of vegetation cover changes and its driving forces in Bosten Lake Basin. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(4): 228-236.
- [37] 古丽米热·艾尔肯, 帕茹克·吾斯曼江, 阿依吐尔逊·沙木西. 开孔河流域土地利用/覆被变化的区域生态系统服务价值变化. *江西农业学报*, 2020, 32(8): 118-124.
- Gulimire·Aierken, Paruke·Wusimanjiang, Ayituerxun·Shamuxi. Change of regional ecosystem service value of land use/cover change in Kaikong River Basin. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(8): 118-124.
- [38] GU Z J, DUAN X W, SHI Y D, LI Y, PAN X. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- [39] 何金苹, 徐长春, 李晓菲, 杨童童, 何旦旦, 鲁斯达姆. 开都—孔雀河流域NDVI动态变化及其与气温和降水的联系. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 329-334,415.
- HE J P, XU C C, LI X F, YANG T T, HE D D, Lusidamu. Change trend of NDVI and its response to temperature and precipitation in long time series in Kaidu—Kongqi River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 329-334,415.

(责任编辑 苟燕妮)

2023 年第 5 期《草业科学》审稿专家

安沙舟	班丽萍	包爱科	曹文侠	常生华	陈 超	陈 焘	陈 伟
段伟利	樊小莉	冯琦胜	高广磊	郭 龙	郭彦军	韩云华	韩占江
侯扶江	胡小文	贾倩民	井长青	李凯辉	李 平	李伟斌	李文金
凌 宁	刘 楠	刘 向	柳小妮	芦娟娟	秦立刚	石 凝	孙 涛
孙宗玖	涂雄兵	王虎成	王金牛	王森山	王晓波	王玉祥	王志远
谢文刚	徐浩杰	杨 程	尹红菊	于应文	张 程	张凡凡	张建全
张景慧	张美玲	张 庆	张 胜	张鲜花	朱 昊	朱 慧	宗 宁

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!