

乌鲁木齐河流域植被覆盖度变化及驱动力研究

卡米兰·阿布力克¹, 杨涵^{1,2*}

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2.新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘要:【目的】分析乌鲁木齐河流域基于 Landsat 数据的植被覆盖度时空分布特征及驱动因素, 为乌鲁木齐河流域生态环境保护、社会生产等方面提供参考。【方法】以乌鲁木齐河流域为研究区, 选取 2000—2020 年中 2000、2005、2010、2015 年和 2020 年 5 个时期 Landsat TM/OLI 遥感影像为数据源, 用像元二分法、植被覆盖度转移矩阵, 选取 2000—2020 年乌鲁木齐河流域植被覆盖度 (FVC) 的时空变化数据, 定量分析了土地利用变化和地形分异特征对其影响程度, 并基于地理探测器模型对流域高程、气温和降水等 8 种影响因子对流域 FVC 空间分异驱动力进行探测。【结果】乌鲁木齐河流域 2000—2020 年植被覆盖度总体上呈先减少后增长趋势, 主要以高、低植被覆盖度为主, 呈现上游极高, 中、下游低的格局。研究区内不同土地利用类型的 FVC 表现为林地>耕地>草地>建设用地>未利用地。植被覆盖度变化受地形因子的影响明显, 随高程升高而有所波动, 高程在 500 m 以下和在 2 000~2 500 m 的植被覆盖度较大; FVC 与坡度负相关, 坡度越高植被覆盖度越低, 并且随坡度增大而急剧减少。因子探测结果表明, 解释力由大到小依次为土地利用>气温>高程>地表温度>降水>土壤湿度>坡度>坡向, 土地利用的 q 值最大, 对 FVC 具有较强影响力; 交互探测结果表明, 双因子交互对 FVC 的影响大于单因子, 其中, 高程和土地利用, 土地利用和地表温度、气温对 FVC 的解释力最大。【结论】乌鲁木齐河流域 2000—2020 年来的 FVC 值在 0.35~0.46 之间波动变化, 表现出显著的空间差异性, 整体上呈上游极高, 中、下游低的格局, 人为因素 (土地利用) 比自然因素 (高程、气温等) 更能解释 FVC 的变化。

关键词: 植被覆盖度; 土地利用; 地形因子; 地理探测器

中图分类号: Q948; TP79

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023008

OSID:



卡米兰·阿布力克, 杨涵. 乌鲁木齐河流域植被覆盖度变化及驱动力研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 96-105.

KAMILAN · Abulike, YANG Han. Change in vegetation coverage in Urumqi River basin and the underlying determinants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 96-105.

0 引言

【研究意义】植被是生态系统的重要组成部分^[1], 是全球环境和生态变化的重要指标之一, 在水土保持、调节气候和减缓温室气体浓度方面发挥着至关重要的作用^[2]。植被覆盖度 (Fractional Vegetation Coverage, FVC) 是指研究区内植被在生长区域范围的垂直投影面积占区域总面积的百分比^[3], 表示植被密度和生长情况^[4], 一定程度上可以量化地表植被状况, 是指示区域生态环境的有效指标^[5]。在干旱区, 流域是人类活动的集中区域, 流域内植被覆盖度的时空变化, 能够准确反映流域生态环境对全球气候变化和人类活动的响应^[6]。因此, 研究干旱区流域植被覆盖度变化并定量识别其变化的驱动力, 可对流域生态环境保护、

人类活动管控、自然灾害防治等提供有效参考^[7]。

【研究进展】随着遥感技术的发展, 在多源遥感数据和地理信息系统手段的支持下, 学者们对全球、我国及干旱区等不同尺度的 FVC 进行了众多研究^[8-9]。已有研究表明, 植被覆盖具有明显的区域差异性, 不同区域、不同尺度的 FVC 受不同因子的影响^[10], 驱动因素大致可以归结为土地利用、高程、土壤水分和温度。流域是山区和平原结合的复杂地理单元, 不同地形地貌的水热组合条件差异显著, 因而对植被生长具有较大影响。地形可通过其外部形态 (如坡度、坡向等) 影响气温、降雨等一系列气候条件, 直接或间接影响植被分布^[11]。此外, 在干旱区, 流域内的人类活动强烈, 对土地の利用方式不同, 在很大程度上也决定了植被覆盖的变化特征, 是不可忽视的影响因素^[12]。

【切入点】虽然近年来, 针对不同地区的植被覆盖度变化的驱动因素进行大量研究^[13-14], 但此方面的研究中诸多学者主要考虑高程、坡度、坡向等自然因素, 探究了植被覆盖在不同地形上的分布规律, 揭示了不

收稿日期: 2023-01-10 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金 (42061007, 42261058)

作者简介: 卡米兰·阿布力克 (1997-), 女, 新疆伊犁人。硕士研究生, 主要从事绿洲资源环境遥感分析研究。E-mail: Kamila_518@163.com

通信作者: 杨涵 (1980-) 女。硕士生导师, 博士, 主要从事干旱区环境遥感方面研究。E-mail: yanghanxjnu@xjnu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

同地区地形对植被覆盖度的影响，也有部分学者展开了土地利用对植被覆盖度影响的研究，而综合研究自然因素和人为因素对植被覆盖变化驱动机制的研究较少。干旱区流域内植被覆盖度变化是自然和人为因素共同作用的结果，流域地区本身地形复杂，在地形较复杂的地区，不同因子的植被覆盖度变化特征仍值得深入发掘。

【拟解决的关键问题】乌鲁木齐河流是新疆天山中部的典型河流^[15-16]，当前，学者们对乌鲁木齐流域的水资源利用、气候变化等方面已进行相关研究^[17-18]，但对整个流域的植被覆盖特征分析的研究罕见报道。因此，本文运用 2000—2020 年的 Landsat TM/OLI 遥感影像数据，采用像元二分法、应用地理探测器模型，分析乌鲁木齐河流域植被覆盖特征及其时空变化规律，并探究土地利用类型、地形等因素对流域内植被覆盖度的影响，以期对乌鲁木齐河流域生态环境的可持续发展与植被保护政策制定提供科学的理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐河发源于 1 号冰川，横穿乌鲁木齐市，最后流入准噶尔盆地南缘米东区的东道海子，全长 214 km，是一条冰雪融水、降水及地下水混合补给的河流^[19]（图 1）。乌鲁木齐河流域位于天山北坡中段，准噶尔盆地南缘，介于 86°—87°E，43°—44°N，流域总面积约 6 639.54 km²^[20]。整个流域地形地貌复杂，上游是山区，中游是城市区，下游主要是耕地和沙漠。乌鲁木齐河流域因远离海洋，空气干燥，降水稀少，蒸发量大，气温年际变化较小，气候差异较大，属于典型的温带大陆性干旱气候^[21]。

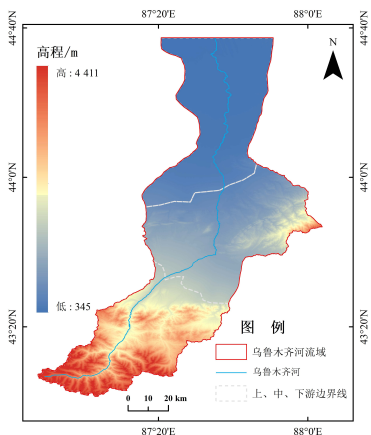


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

遥感数据来自地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>），选取乌鲁木齐河流域 2000、2005、2010、2015 年和 2020 年 5 个时期植被生长季内的 Landsat 系列卫星影像数据（表 1），时间分辨率为 16 d 的 3 种传感器，包括 Landsat5-TM、Landsat7-ETM 和 Landsat8-OLI。数据云量均小于 2% 或无云，图像质量良好，借助 ENVI 5.3 进行辐射定标、大气校正、镶嵌等预处理，然后利用数据估算得到空间分辨率 30 m 的 NDVI 及 FVC 数据集。

高程数据 (DEM) 来自于地理空间数据云平台（<http://www.gscloud.cn/>），空间分辨率 30 m。本文通过 DEM 数据，提取坡度 (Slope) 和坡向 (Aspect)，对此进行了拼接、裁剪，且对高程梯度进行分类。

表 1 研究区 Landsat 遥感影像信息

Tab.1 Landsat remote sensing image information of the study area

监测期数	传感器	获取时间	行列号
2000 年	ETM ⁺ 7	20000813	143,29/143,30
2005 年	TM5	20050807	143,29/143,30
2010 年	TM5	20100820	143,29/143,30
2015 年	OLI	20150818	143,29/143,30
2020 年	OLI	20180802	143,29/143,30

土地利用数据是武汉大学黄析教授团队的中国 30 m 年度土地覆盖产品 (CLCD)，空间分辨率分别为 30 m。该数据包括 9 种土地利用类型，将 9 类土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等 6 种类型（图 2）。降水 (PRE)、气温 (TEM) 数据均来自国家青藏高原科学数据中心（<https://data.tpdc.ac.cn/home>），地表温度数据 (LST) 来自美国国家航空航天局（<https://www.earthdata.nasa.gov/>）官网，土壤湿度 (TVDI) 数据来自国家地球系统科学中心（<http://www.geodata.cn/>），为了完成驱动因子分析，将所有影响因子数据重采样至 30 m 分辨率。

图 2 展示了 2020 年乌鲁木齐河流域的土地利用类型分布。图例显示：耕地（黄色）、林地（绿色）、草地（浅绿色）、水域（蓝色）、建设用地（红色）和未利用地（灰色）。地图上标注了乌鲁木齐市、米东区、水磨沟区、头屯河区、沙依巴克区、五家渠市、新市区、头屯河区、天山山区等区域。

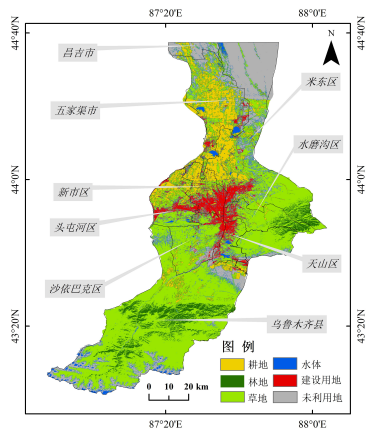


图 2 乌鲁木齐河流域 2020 年土地利用类型

Fig.2 Urumqi River basin 2020 land use types

1.3 植被覆盖度估算

NDVI 定义为反射率之差与反射率之和的比值^[22]，

是评估植被状况的最有效参数,能够很好地反映植被覆盖、生物量及生态系统等植被生长状态的变化^[23]。利用像元二分模型通过归一化植被指数估算植被覆盖度,其公式如(1)所示:

$$FVC=(NDVI-NDVI_{\min})/(NDVI_{\max}-NDVI_{\min}), \quad (1)$$

式中: FVC 为植被覆盖度, $NDVI$ 为植被指数, $NDVI_{\min}$ 为全部由裸土覆盖区域的 $NDVI$ 最小值, $NDVI_{\max}$ 为全部由植被覆盖区域的 $NDVI$ 最大值,本研究分别取 $NDVI$ 的5%和95%代表 $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$;结合研究区实际情况及相关研究,将植被覆盖度划分为5个等级: FVC 值为0~0.2表示极低植被覆盖度、0.2~0.4表示低植被覆盖度、0.4~0.6表示中等植被覆盖度、0.6~0.8高植被覆盖度和0.8~1表示极高植被覆盖度。

1.4 植被覆盖度转移矩阵

基于植被覆盖类型转移矩阵,分析20a的乌鲁木齐河流域植被覆盖度的时空变化,主要采用植被覆盖度矩阵定量描述植被覆盖度的系统状态,表示不同时间点之间各类植被覆盖类型的变化过程及其相互转移量^[24],公式如下:

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: S_{ij} 表示不同时间点的植被覆盖情况, m 、 n 均为植被覆盖度类型,获得2000—2020年的植被覆盖度矩阵。

1.5 地理探测器

地理探测器由王劲峰等^[25]提出,是一种可以用于探测和揭示数据之间空间分异性的工具,其中分异性因子用 q 度量, q 值越大,表明影响因子对植被覆盖度的解释力越强,反之则越弱;本文仅使用因子探测和交互探测两个方面来解释植被覆盖度与不同影响因子之间的关系,公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (3)$$

式中: q 为分异性因子, q 越大表示数据的分异性在空间上更明显; L 为变量类别数, $h=1, 2, \dots, n$,为具体某一类型; N_h 和 N 分别表示 h 类别单元数和全区单元数; σ 和 σ_h 分别为 h 类别的方差和全区的方差。

交互探测是识别两个影响因子共同作用时,会加强还是削弱对植被覆盖度的解释力^[26],交互监测结果可分为非线性减弱 $q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$ 、单因子非线性减弱 $\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$ 、双因子增强 $q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$ 、独立 $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$ 和非线性增强 $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ 。

2 结果分析

2.1 植被覆盖度时空变化特征

乌鲁木齐河流域上游是森林区,中游大部分是城市市区,而下游是耕地和沙漠,上、中、下游的植被类型不一样。为了进一步分析乌鲁木齐河流域年际植被覆盖度的变化趋势,分别分析流域上游、中游、下游的植被覆盖度(图3),结果表明,乌鲁木齐河流域近20a FVC 在0.35~0.46之间呈波动变化,2000年的植被覆盖度最高, FVC 值达0.46,之后10a显著降低,2015年的 FVC 略微增加,值达0.53,但在2020年又呈减少趋势;2000—2020年间,流域上游的 FVC 较理想, FVC 值在0.43~0.51之间波动变化,2015年和2020年的 FVC 接近0.50,分别达到0.51、0.49;流域中游 FVC 较低,在0.24~0.46之间波动变化,2000年的较高;下游 FVC 均值大于0.34,在2000年时接近0.50;总体来看流域近20年的 FVC 呈先减少后增长趋势,森林和农业种植为主要植被类型区域的 FVC 较理想,中游城市区的 FVC 较低。

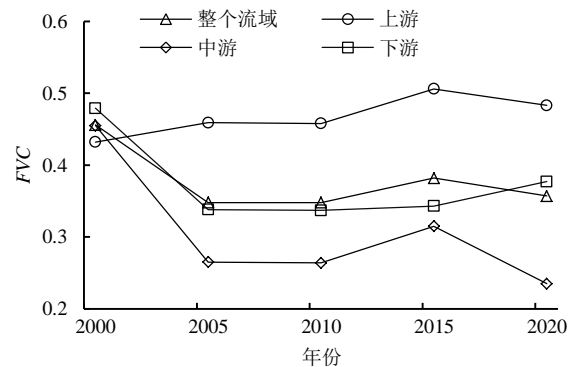


图3 乌鲁木齐河流域2000—2020年植被覆盖度年际变化

Fig.3 Interannual changes in vegetation cover in the Urumqi River basin, 2000—2020

通过2000—2020年乌鲁木齐河流域 FVC 类型分布图(图4)并结合表2可知,乌鲁木齐河流域 FVC 整体上呈现上游极高,中、下游低的格局,类型主要以高和低为主,极高覆盖分布在上游的森林区,中游的水磨沟和米东区,下游的新市区、五家渠市内的农业种植区;低覆盖主要集中分布在上游的冰川和中游的城市周围;极低、中等和高覆盖三类面积依次递减,面积占比10%~15%,主要分布在下游的沙漠区和中游的城市区。由表2可知20a来极低、低植被覆盖地区的变化较大,极低植被覆盖类型转换成高、极高植被类型的面积分别为140.73、80.24 km^2 ,低植被类型转换面积分别为155.84、190.21 km^2 ,研究区20a来极低、低植被覆盖转换成高、极高植被类型的面积逐渐增加,反而高、极高类型转换成极低、低植被覆盖面积大量减少。

表 2 2000—2020 年乌鲁木齐河流域植被覆盖度等级转移矩阵

Tab.2 Vegetation coverage grade transfer matrix in Urumqi River basin 2000 to 2020 km²

植被类型	2020 年						总计	转出
	极低	低	中等	高	极高			
2000 年								
极低	315.59	87.45	97.65	140.73	80.24	721.66	406.07	
低	1 896.29	334.16	173.52	155.84	190.21	2 750.01	2 415.85	
中等	560.69	341.84	191.68	111.34	174.92	1 380.47	1 188.8	
高	195.56	198.65	177.91	192.21	159.48	923.82	731.61	
极高	88.72	129.72	181.14	250.94	213.06	863.57	650.52	
总计	3 056.86	1 091.83	821.89	851.06	817.91	6 639.54	-	
转入	2 741.27	757.66	630.21	658.85	604.86	-	-	

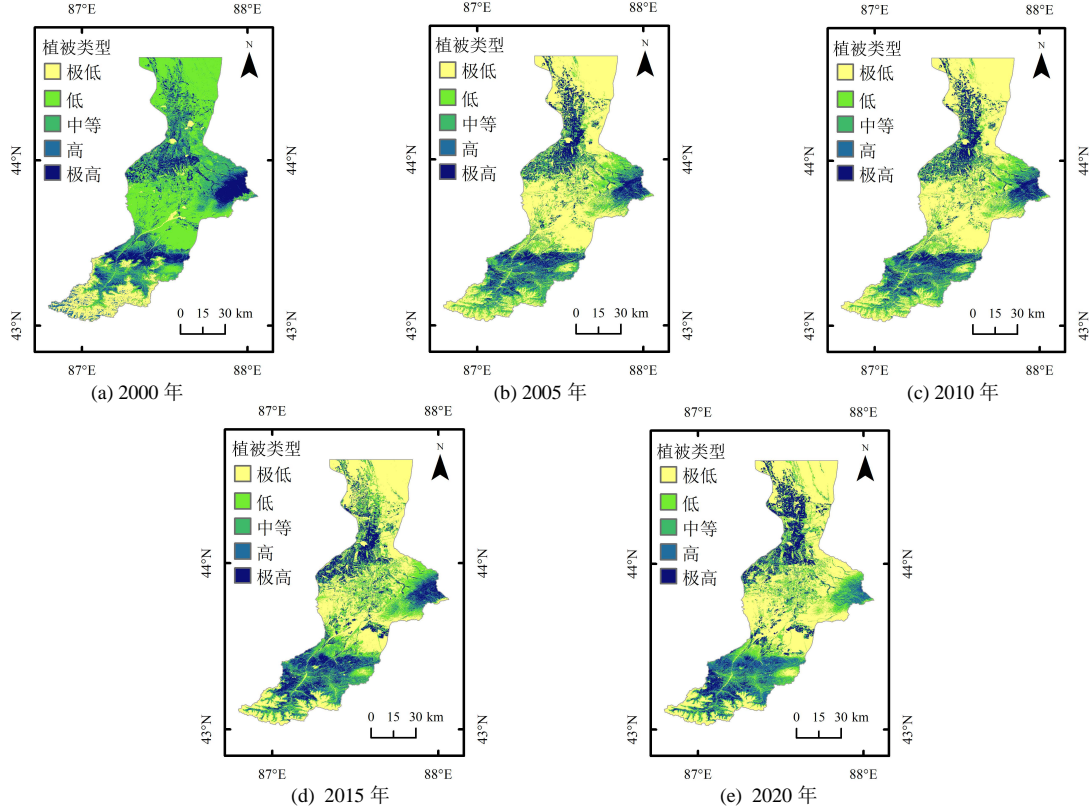


图 4 乌鲁木齐河流域 5 个时期植被覆盖度等级分布

Fig.4 Distribution map of vegetation coverage in different periods in Urumqi River basin

2.2 人为因素对植被覆盖度的影响

不同土地利用类型受到人类的扰动强烈，会对植被覆盖的变化产生影响，也是引起 *FVC* 变化的重要原因。2000—2020 年乌鲁木齐河流域土地利用类型面积变化如表 3 所示，2000 年乌鲁木齐河流域的土地利用类型以草地为主，其次为耕地，而到 2020 年乌鲁木齐河流域仍以草地为主要用地类型。2000—2005 年间研究区耕地面积呈增加趋势，

2005—2020 年间面积减少趋势；近 20 a 来草地面积呈波动减少变化，其中，在 2000—2005 年期间减少较大，减少面积为 107.34 km²，2005—2010 年期间面积有所增加，增加了 67.52 km²，而在 2010—2015 年有少量减少，2015—2020 年呈略微增加趋势；水体和未利用地比例相对稳定，且略有减少；林地和建设用持续增加，增加面积分别为 44.25、199.12 km²，建设用地的增长幅度最大。

表 3 乌鲁木齐河流域 2000—2020 年土地利用类型面积变化

Tab.3 Land use area changes in the Urumqi River basin, 2000—2020 hm²

年份	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
2000	1 117.31	314.61	3 954.01	93.38	231.21	936.02
2005	1 146.86	330.71	3 846.67	92.57	271.41	958.34
2010	1 125.59	345.29	3 914.19	94.22	340.17	827.08
2015	986.81	352.61	3 866.05	94.81	399.36	946.93
2020	861.53	358.86	3 871.91	87.41	430.33	836.51
2000—2005	29.55	16.11	-107.34	-0.81	40.21	22.32
2005—2010	-21.27	14.58	67.52	1.65	68.76	-131.26
2010—2015	-138.78	7.32	-48.14	0.59	59.19	119.85
2015—2020	-125.28	6.25	5.86	-7.41	30.97	-110.42
2000—2020	-255.78	44.25	-82.11	-5.97	199.12	-99.51

为了进一步分析土地利用对 FVC 的影响, 分别统计制得不同土地利用类型的 FVC 进行分析(图 5), 结果表明, 20 a 来乌鲁木齐河流域不同土地利用类型中的植被覆盖表现为林地>耕地>草地>建设用地>未利用地。林地和耕地 FVC 均值较高, FVC 均值在 0.6 以上, 属于高植被覆盖, 其中, 耕地 FVC 在 2000—2010 年的十年间略有减少, 但在 2010—2020 年间呈

显著增加趋势; 林地 FVC 呈波动上升趋势, 2000 年和 2015 年较低, 2020 年达到近 20 a 来的最高值。其次是草地、建设用地和未利用地, 其中, 草地平均 FVC 在 0.31~0.45 之间波动变化, 2005—2000 年处于较低值, 建设用地和未利用地的 FVC 较低, 均小于 0.35, 且变化趋势均表现为在 2000 年最高, 2005 年降至低谷, 2005—2020 年呈现递增趋势。

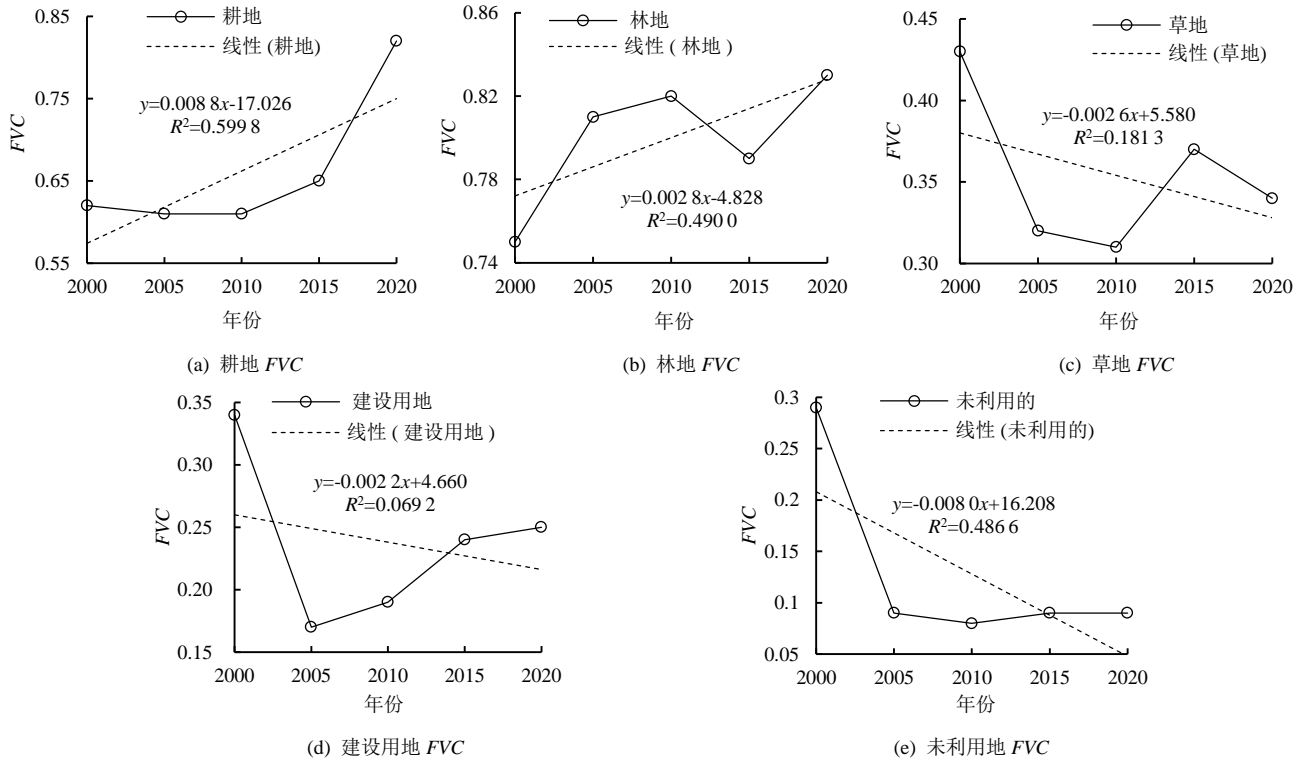


图 5 乌鲁木齐河流域不同年份不同土地覆被类型的 FVC

Fig.5 FVC of different land cover types in Urumqi River basin in different years

为了详细了解研究区土地利用、高程对 FVC 的影响, 本文对研究区土地利用类型和高程数据进行空间叠加分析, 计算出不同高程下各个土地利用类型的 FVC (图 6)。根据研究区高程分布特征, 将其分为小于 500 m (第一段)、550~1 000 m (第二段)、1 000~1 500 m (第三段)、1 500~2 000 m (第四段)、2 000~2 500 m (第五段)、2 500~3 000 m (第六段)、大于 3 000 m (第七段) 等 7 段; 耕地 FVC 随高程呈波动变化, 其中, 在第三、第四段 FVC 值较低, 在 0.51~0.55 之间, 其他段均在 0.65 以上, 其中第六段最高, 达 0.73; 而林地随高程呈抛物线变化, 在第三、第四、第五段较高, 均大于 0.75, 第七段 FVC 最低, 为 0.53; 草地 FVC 在前三段和第七段较低, 值接近 0.3, 在第四、第五、第六段较高, 在 0.5 以上; 建设用地的 FVC 随着高程升高而波动减少, 变化幅度为 0~0.32, 未利用地的 FVC 较低在 0.08~0.17 之间变化。综上可以看出不同土地利用类型和高程对 FVC 的影响不同的, 因此在此方面的研究对流域尺度 FVC 来说十分重要。

2.3 地形因子对植被覆盖度的影响

将研究区的高程可分为以下几个等级: 小于 500 m、500~1 000 m、1 000~1 500 m、1 500~2 000 m、2 000~2 500 m、2 500~3 000 m 和 3 000~4 411 m (图 7), 并分别统计各等级的 FVC (表 4)。由表 4 可知, 研究区 FVC 随高程变化呈波动变化, 其中, 小于 500 m、500~1 000 m 和 1 000~1 500 m 的植被覆盖占比分别为 28.71%、13.94% 和 8.96%, 随高程升高植被呈逐渐减少趋势; 而在 1 500~2 000 m 和 2 000~2 500 m 的植被覆盖占比分别为 11.92%、19.81%, 随高程升高植被呈增长趋势; 当高程在 2 500 m 以上, 随高程升高植被呈减少趋势, 2 500~3 000 m、3 000~4 411 m 时植被覆盖度占比分别为 14.93%、1.73%。总体来看, 乌鲁木齐河流域植被覆盖度在高程小于 500 m 时最好, 在 500~1 500 m 之间植被覆盖度随高程升高而递减, 1 500~2 500 m 之间植被覆盖度随着高程升高递增, 2 500 m 以上的植被覆盖度随着高程的升高而减少。

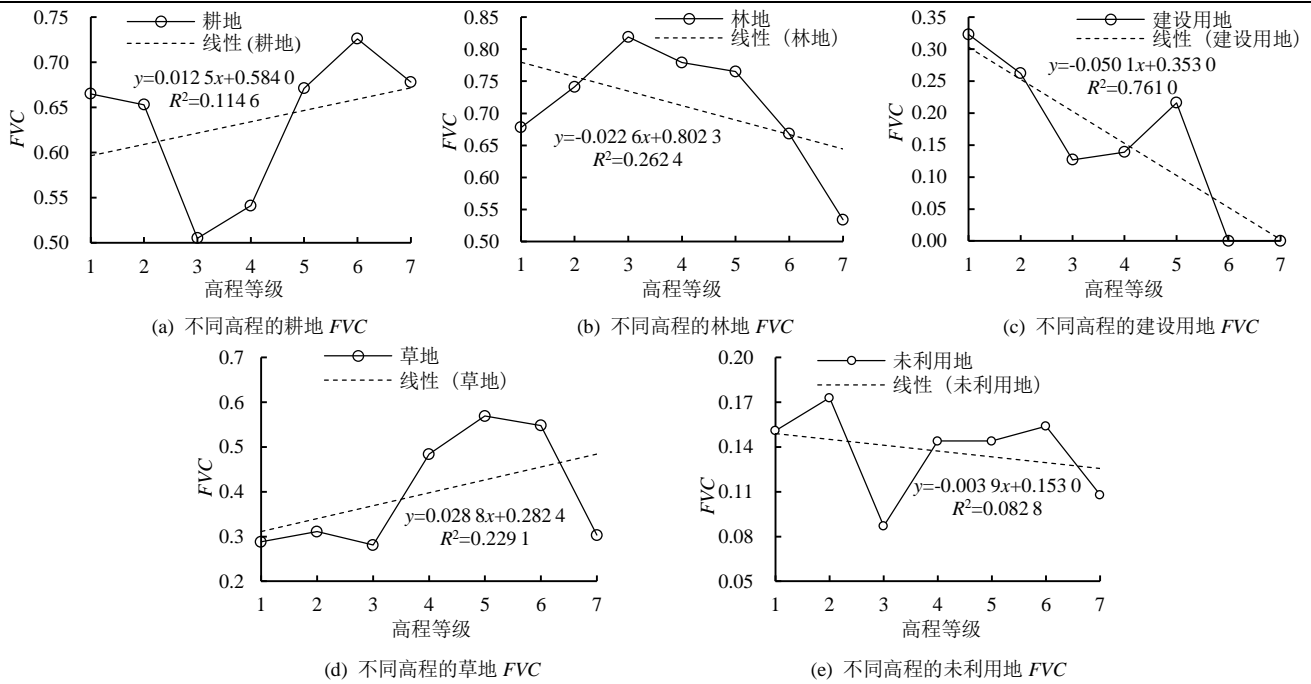


图 6 乌鲁木齐河流域不同高程和土地利用类型的 FVC

Fig.6 FVC of different land cover types at different elevations in the Urumqi River basin

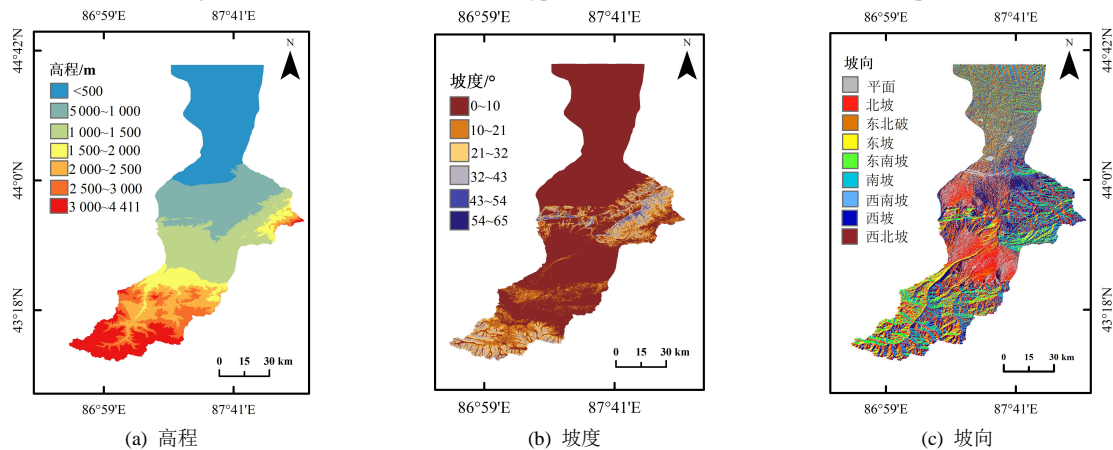


图 7 乌鲁木齐河流域高程、坡度、坡向等级分布

Fig.7 Elevation, slope, and slope direction class distribution in the Urumqi River basin

据乌鲁木齐河流域地形条件，可以划分为 6 个坡度，坡度为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 21^{\circ}$ 、 $21^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 、 $32^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 、 $43^{\circ}\sim 54^{\circ}$ 和 $54^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ；并统计出植被覆盖度随坡度变化。由表 4 可知，随坡度增加，乌鲁木齐河流域的植被覆盖度逐渐减少，在坡度 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间植被覆盖度面积占比最高，占比为 82.35%， $10^{\circ}\sim 21^{\circ}$ 之间面积占比仅为 11.51%， $21^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 之间植被覆盖度更少，为 4.55%，坡度 $32^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 之间最低，不足 2%。

将研究区的坡向等级分别为平面 ($-1^{\circ}\sim 0^{\circ}$)、北坡 ($0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$)、东北坡 ($22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$)、东坡 ($67.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}$)、东南坡 ($112.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}$)、南坡 ($157.5^{\circ}\sim 202.5^{\circ}$)、西南坡 ($202.5^{\circ}\sim 247.5^{\circ}$)、西坡 ($247.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$) 和西北坡 ($292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$)，植被覆盖占比面积分别为 2.43%、12.03%、22.12%、11.01%、7.33%、7.21%、8.51%、12.24% 和 17.12%。研究区东

北破和西北坡的植被覆盖度最优，平面所占的植被面积比例最少，这主要乌鲁木齐流域大都属于洼地地貌，平面很少而且平面区域大多数为建设用地因此导致平原的植被都被强烈的人类活动严重破坏，其他各个坡向对植被覆盖度的影响基本相差不大。

表 4 乌鲁木齐河流域 FVC 面积占比

Tab.4 Percentage of FVC area in the Urumqi River basin

高程/m	FVC 面积 占比/%	坡度/ $^{\circ}$	FVC 面积 占比/%	坡向	FVC 面积 占比/%
<500	28.71	0~10	82.35	平面	2.43
500~1 000	13.94	10~21	11.51	北坡	12.03
1 000~1 500	8.96	21~32	4.55	东北坡	22.12
1 500~2 000	11.92	32~43	1.13	东坡	11.01
2 000~2 500	19.81	43~54	0.31	东南坡	7.33
2 500~3 000	14.93	54~65	0.15	南坡	7.21
3 000~4 411	1.73	-	-	西南坡	8.51
-	-	-	-	西坡	12.24
-	-	-	-	西北坡	17.12

2.4 基于地理探测器的 FVC 相关性研究

利用因子探测器分别探测 2000、2005、2010、2015 年和 2020 年 8 个因子对乌鲁木齐河流域植被覆盖度分布的影响,图 8 所示为 5 个年份植被覆盖度空间分析解释力 q 值指标。结果表明,人为因素作用大于自然因素,平均解释力由大到小依次为土地利用 ($Land\ use$) $0.329 >$ 气温 (TEM) $0.231 >$ 高程 (DEM) $0.212 >$ 地表温度 (LST) $0.201 >$ 降水 (PRE) $0.161 >$ 土壤湿度 ($TVDI$) $0.123 >$ 坡度 ($Slope$) $0.052 >$ 坡向 ($Aspect$) 0.012 ; 土地利用、气温、高程、地表温度是影响乌鲁木齐河流域植被覆盖度的主要因素,降水和土壤湿度也起着重要作用,地形地貌因素中高程的影响较大,坡度的影响较小。

对不同影响因子进行交互探测(图 9),判断两个影响因子相互作用时对 FVC 的解释程度。乌鲁木齐河流域 FVC 的空间分异性并不是由某一个因子控制,两因子在交互作用下大多为双因子增强,表明两因子交互作用对 FVC 的影响大于单因子的影响;研究发现,在流域 FVC 起着主导作用的交互因子主要

为 $DEM \cap Land\ use$ 、 $Land\ use \cap LST$ 以及 $Land\ use \cap TEM$,说明高程和土地利用,土地利用和地表温度、气温解释力最高; $Aspect \cap Slope$ 为非线性增强,坡度和坡向的单因子 q 值均小于 0.1,对 FVC 的解释力较低,但在交互作用下影响力有了很大幅度的提升。乌鲁木齐河流域自然因素与人为因素的结合对 FVC 具有较大影响,通过因子探测可以促进区域生态稳定发展。

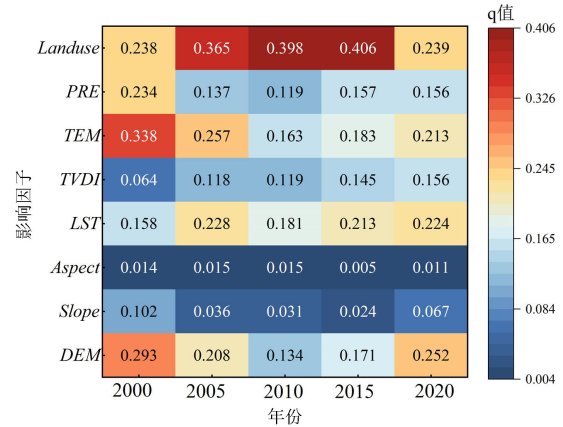
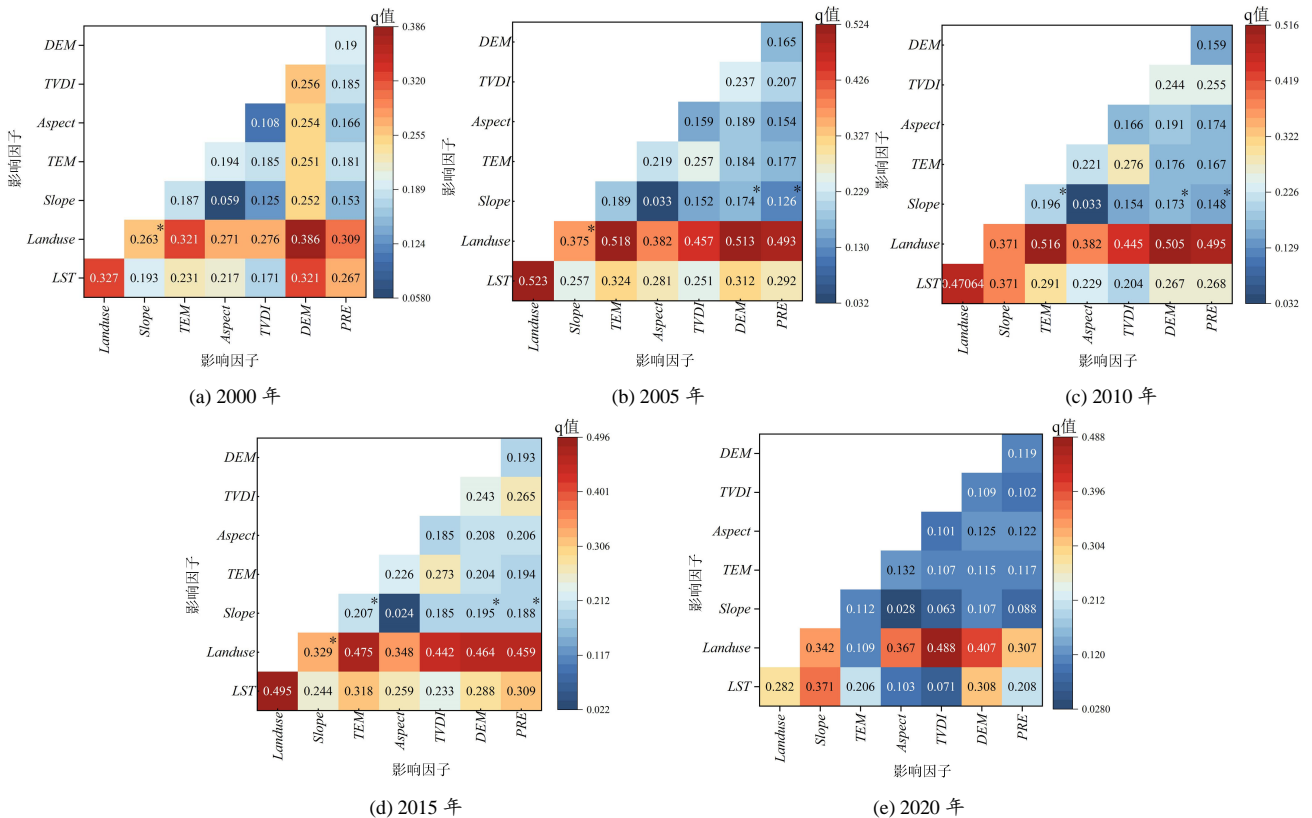


图 8 因子探测 q 值图

Fig.8 Factor detection q -value diagram



注 *为非线性增强;无标记为双因子增强。

图 9 各影响因子交互探测图

Fig.9 Interaction detection diagram of each influence factor

3 讨论

乌鲁木齐河流域在 2000—2020 年间 FVC 整体呈缓慢增加趋势,该结论与陈淑君等^[27]等在中国植被覆

盖度变化特征得出的变化趋势和分布特征结果具有一致性,但是我们的研究表明流域近 20 a 来有几个植被覆盖度较特殊的年份,2005 年和 2010 年整个流域的 FVC 较低,主要是研究区这些年份的降水较低,

平均降水量是 130 mm, 导致 *FVC* 减少。研究区大量天然森林主要分布在南部的天山北麓, 其位置处于河流的上游, 降水和夏季冰雪融水丰富, 因此普遍高于中游和下游的 *FVC*。乌鲁木齐河流域的地理位置特殊, 从南到北地貌类型依次为上游山区、中游绿洲平原区和下游荒漠地区, 为典型的“山地-绿洲-荒漠”地形结的特殊地理环境导致的, 因此对不同高程的植被覆盖度进行详细的分析, 发现我们的研究结果和银朵朵等^[11]内蒙古大青山为研究区的植被覆盖度时空变化及其地形分异的研究结果有所不同, 内蒙古大青山的植被覆盖度随高程升高呈增加趋势, 而本文研究区植被覆盖度随高程升高而有所波动。通过地理探测器模型对乌鲁木齐河流域 *FVC* 影响因素的研究表明, 土地利用是研究区 *FVC* 空间分异的主要解释因素, 虽然土地利用的单因子 *q* 值小于 0.5, 但在交互作用下却达到了双倍的效果, 对 *FVC* 的影响力大大加强; 流域空间分异性并不是由某一单因子控制, 在两因子在交互作用下大多为双因子增强, 表明两因子交互对 *FVC* 的影响远大于单因素的影响。

4 结 论

1) 2000—2020 年乌鲁木齐河流域 *FVC* 先减少后增长, 流域 *FVC* 表现为上游>中游>下游, *FVC* 空间变化存在区域性差异, 上游极高, 中、下游低的格局; 类型以高和低为主, 高、极高植被主要分布在上游的乌鲁木齐县、中游水磨沟区和米东区的部分地区、下游新市区和五家渠市, 低和极低植被主要集中在下游的沙漠、荒漠地区。

2) 乌鲁木齐河流域草地、耕地面积所占的比例比较大, 不同土地利用类型的 *FVC* 表现为林地>耕地>草地>建设用地>未利用地; 耕地的 *FVC* 第六段开始减少, 而林地的第三段开始减少, 草地不同高程段的 *FVC* 特征几乎相似, 建设用地和未利用地的 *FVC* 随着高程升高而减少。

3) 乌鲁木齐河流域植被覆盖度变化受地形因子的影响明显, 植被覆盖度随着高程升高而有所波动, 高程小于 500 m 的区域, 植被覆盖度达到最高; 乌鲁木齐河流域的植被覆盖度与坡度呈显著负相关, 植被覆盖度随坡度增大而急剧减少; 流域东北坡植被覆盖度占比最大, 其次是西北坡; 平面的植被覆盖度低, 东北坡和西北坡的植被覆盖度高, 其他各个坡向对植被覆盖度的影响基本相差不大。

4) 单因子的影响力来看土地利用、气温、高程、地表温度是一直对乌鲁木齐河流域起到至关重要的影响, 其中土地利用对植被覆盖的影响最大; 交互探测结果表明, 高程和土地利用, 土地利用和地表温度、

气温解释力在流域的交互作用对流域的蒸散发过程中起着主导作用。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] LIU Y, LI L H, CHEN X, et al. Temporal-spatial variations and influencing factors of vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI_{3g}[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 169: 145-155.
- [2] WANG X Y, LI Y Q, WANG X Y, et al. Temporal and spatial variations in NDVI and analysis of the driving factors in the desertified areas of Northern China from 1998 to 2015[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 633 020.
- [3] YANG X Y, YANG Q K, YANG M M. Spatio-temporal patterns and driving factors of vegetation change in the pan-third pole region[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4 402.
- [4] FAN M Z, LIAO K, LU D S, et al. Examining vegetation change and associated spatial patterns in Wuyishan National Park at different protection levels[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1 712.
- [5] 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J]. *地理学报*, 2002, 57(6): 679-684.
YANG Shengtian, LIU Changming, SUN Rui. The vegetation cover over last 20 years in Yellow River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 679-684.
- [6] 张皓月, 占车生, 夏军, 等. 黄河流域内蒙古段植被时空变化特征及条带状分布成因[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8 818-8 829.
ZHANG Haoyue, ZHAN Chesheng, XIA Jun, et al. Spatio-temporal variations and strip patterns of vegetation in the Inner Mongolia of Yellow River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8 818-8 829.
- [7] MENG X H, EVANS J P, MCCABE M F. The impact of observed vegetation changes on land-atmosphere feedbacks during drought[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(2): 759-776.
- [8] XU G C, ZHANG J X, LI P, et al. Vegetation restoration projects and their influence on runoff and sediment in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 233-241.
- [9] GUO J T, WANG K B, WANG T J, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its climatic driving forces in global land surface[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(4): 3 541-3 549.
- [10] 林妍敏, 李文慧, 南雄雄, 等. 基于地理探测器的宁夏贺兰山植被覆盖度时空分异及驱动因子[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3 321-3 327.
LIN Yanmin, LI Wenhui, NAN Xiongiong, et al. Spatial-temporal differentiation and driving factors of vegetation coverage in Ningxia Helan Mountain based on geodetector[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3 321-3 327.
- [11] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 1 158-1 167.
YIN Duoduo, WANG Yanhui. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1 158-1 167.
- [12] DING Y B, WANG F Z, MU Q, et al. Estimating land use/land cover change impacts on vegetation response to drought under 'Grain for Green' in the Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(17): 5 083-5 098.
- [13] 刘慧, 乔占明, 赖锋. 可可西里盐湖流域植被覆盖度时空变化[J].

- 测绘科学, 2022, 47(8): 79-85.
- LIU Hui, QIAO Zhanming, LAI Feng. Spatial and temporal variation of vegetation coverage in Hoh Xil Salt Lake Basin[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(8): 79-85.
- [14] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1 439-1 450.
- LI Jing, YAN Xingguang, YAN Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1 439-1 450.
- [15] 丁程锋, 张绘芳, 高亚琪, 等. 天山中部流域尺度森林变化水文响应定量分析: 以乌鲁木齐河流域为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2 034-2 046.
- DING Chengfeng, ZHANG Huifang, GAO Yaqi, et al. Quantitative analysis of hydrological response to forest changes in the middle of the Tianshan Mountains: A case study of the Urumqi River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2 034-2 046.
- [16] 赵永玉, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 等. 基于地理探测器的乌鲁木齐市城区扩展及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1 729-1 739.
- ZHAO Yongyu, Alimujiang KASIM, GAO Pengwen, et al. Quantitative analysis of urban expansion and response factors in Urumqi City based on random forest algorithm and geographical detector[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1 729-1 739.
- [17] 吴素芬, 刘志辉, 韩萍, 等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 703-706.
- WU Sufen, LIU Zhihui, HAN Ping, et al. Impact of climate change on water resources of the Urumqi River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 703-706.
- [18] 张寅生, 康尔泗, 刘潮海. 天山乌鲁木齐河流域山区气候特征分析[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 333-341.
- ZHANG Yinsheng, KANG Ersi, LIU Chaohai. The climatic features of Tianshan Urumqi River valley[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 333-341.
- [19] 邵霜霜, 张毓涛, 师庆东, 等. 乌鲁木齐河流域径流与气候变化的年内相关性分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 350-354.
- SHAO Shuangshuang, ZHANG Yutao, SHI Qingdong, et al. Correlation analysis of the runoff and the climate change regularity in terms of one year period in Urumqi River basin[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 350-354.
- [20] 冯芳, 冯起, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区水化学特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 143-155.
- FENG Fang, FENG Qi, LI Zhongqin, et al. Analysis on the hydrochemical characteristics in the upper reaches of Urumqi River basin, Eastern Tianshan[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 143-155.
- [21] 麦麦提吐逊·麦麦提, 马合木江·艾合买提, 陶洪飞, 等. 基于遥感的疏勒县植被覆盖时空变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 121-129.
- MAIMAITITUXUN Maimaiti, MAHEMUJIANG Aihemaiti, TAO Hongfei, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Shule County based on remote sensing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 121-129.
- [22] 杨艳萍, 陈建军, 覃巧婷, 等. 2000—2018 年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 234-241.
- YANG Yanping, CHEN Jianjun, QIN Qiaoting, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000—2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 234-241.
- [23] 何立恒, 周寅康, 杨强. 延安市 2000—2013 年植被覆盖时空变化及特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 174-179.
- HE Liheng, ZHOU Yinkang, YANG Qiang. Characteristics of spatial-temporal changes in vegetation coverage in Yan'an Region during 2000-2013[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(11): 174-179.
- [24] 高凡, 何兵, 闫正龙, 等. 2000—2016 年叶尔羌河中下游植被覆盖动态变化遥感分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 92-99.
- GAO Fan, HE Bing, YAN Zhenglong, et al. Using remote sensing to unravel spatiotemporal change in vegetation coverage in middle-low reaches of the Yarkant basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 92-99.
- [25] 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.
- [26] 吴东清, 侯伟, 桑会勇, 等. 西藏植被碳源/汇时空变化特征及其影响因子分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(8): 105-113, 134.
- WU Dongqing, HOU Wei, SANG Huiyong, et al. Analysis of spatio-temporal variation of vegetation carbon sources/sinks in Tibet and its impact factors[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(8): 105-113, 134.
- [27] 陈淑君, 许国昌, 吕志平, 等. 中国植被覆盖度时空演变及其对气候变化和城市化的响应[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 742-752.
- CHEN Shujun, XU Guochang, LYU Zhiping, et al. Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover and its response to climate change and urbanization in China[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 742-752.

Change in vegetation coverage in Urumqi River basin and the underlying determinants

KAMILAN · Abulike¹, YANG Han^{1,2*}

(1. Institute of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: **【Objective】** The Urumqi River is one of the most important rivers in northwestern China. The objective of this paper is to study the change in vegetation coverage in its basin and the underlying determinants in attempts to help improve its management. **【Method】** The study is based on the Landsat TM/OLI remote sensing imageries from 2000 to 2020. Spatiotemporal variations in vegetation coverage (*FVC*) in the basin during this period are extracted using the image dichotomy and vegetation cover transfer matrix, from which we analyze the changes in land use and topographic features in the basin. The factors that are responsible for the change in *FVC* in the basin are calculated using the geo-detector model, reclassification and other methods. **【Result】** From 2000 to 2020, vegetation coverage in the basin decreased first and then increased. Vegetation coverage was high in the upper reaches and low in the middle and low reaches. Vegetation coverage in different land usage was ranked in the order of forest land > cropland > grassland > construction land > water bodies > unused land. The change in vegetation coverage was influenced by topographic factors and fluctuated with elevation, with the vegetation coverage being the highest in elevations <500m and between 2 000 to 2 500 m. Across the basin, vegetation coverage was negatively correlated to slope. The results of the factor detection analysis showed that environmental factors that affected vegetation coverage were ranked in the order of land use > air temperature > elevation > surface temperature > precipitation > soil moisture > slope > slope direction. The results of the interaction detection analysis show that elevation-land use, land use-temperature are the coupling factors that influenced vegetation coverages more than coupling of other factors. **【Conclusion】** The average vegetation coverage in the Urumqi River basin varied from 0.348 to 0.456 in 2000—2020; it varied spatially. Overall, it is high in the upper reach and low in the middle and lower reaches. Variation in land use explains the variation in the vegetation coverage more than any other natural factors.

Key words: vegetation coverage; land use; topographic factor; geographic detector

责任编辑：赵宇龙