

2000—2020年阿克苏河流域植被动态变化及驱动机制

许丽¹, 岳胜如^{1,2}, 胡雪菲¹

〔1.塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2.中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074〕

摘要: [目的] 探究阿克苏河流域植被动态特征及其与潜在影响因子的响应关系, 为干旱区生态环境保护和治理提供理论依据。[方法] 基于 MODIS 归一化植被指数(NDVI)、气候、地形、土壤类型及土地利用等数据, 利用趋势分析和地理探测器方法对 2000—2020 年阿克苏河流域植被动态及驱动机制进行分析。[结果] ①2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 呈显著增加趋势, 增速为 0.003 2/a, 且人类活动区增速显著大于非人类活动区。②潜在因子对 NDVI 变化的解释力存在时间和空间差异; 土地利用转化是人类活动区 NDVI 变化重要驱动因子, 海拔、土壤类型、距冰川积雪距离、距水体距离是非人类活动区 NDVI 变化重要驱动因子。因子间交互作用可以提高对 NDVI 变化的解释力, 在人类活动区土地利用转化与土壤类型的相互作用对 NDVI 变化的解释力最强; 背景因子、距补给水源的距离与其他因子的交互是非人类活动区 NDVI 变化的重要因子组合。③2000—2020 年阿克苏河流域超过 10% 的面积发生土地利用转化, 主要表现为裸地和草地的相互转化, 耕地、林地、灌木地、人造地表面积显著增加。[结论] 阿克苏河流域人类活动区和非人类活动区 NDVI 变化时空特征及驱动机制存在差异, 应因地制宜, 合理管理, 促使该流域生态环境良性发展。

关键词: 阿克苏河流域; NDVI; 地理探测器; 驱动机制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0326-09

中图分类号: P237

文献参数: 许丽, 岳胜如, 胡雪菲. 2000—2020 年阿克苏河流域植被动态变化及驱动机制[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 326-334. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.032; Xu Li, Yue Shengru, Hu Xuefei. Dynamics changes and driving mechanisms of vegetation in Aksu River basin from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 326-334.

Dynamics Changes and Driving Mechanisms of Vegetation in Aksu River Basin from 2000 to 2020

Xu Li¹, Yue Shengru^{1,2}, Hu Xuefei¹

〔1.College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2.School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China〕

Abstract: [Objective] The characteristics of vegetation dynamic changes and their response relationship with potential impact factors in the Aksu River basin were determined in order to provide a theoretical basis for ecological environmental protection and governance in arid areas. [Methods] Based on MODIS normalized difference vegetation index (NDVI), climate, topography, soil type, and land use data, the dynamics and driving mechanisms of vegetation changes in Aksu River basin from 2000 to 2020 were analyzed using trend analysis and geographical detector methods. [Results] ① The NDVI of the Aksu River basin showed a significant increasing trend from 2000 to 2020, with a growth rate of 0.003 2/yr. The growth rate in the anthropogenic areas was significantly larger than in the non-anthropogenic areas. ② There were temporal and spatial differences in the explanatory power of potential factors for NDVI changes. Land use conversion was an important driving factor for NDVI changes in anthropogenic areas. Elevation, soil type, distance from glacier snowpack, and distance from water bodies were important driving factors for NDVI changes in non-anthropogenic areas. Interaction among factors increased the explanatory power of NDVI changes, and land

收稿日期: 2023-05-27

修回日期: 2023-08-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“棉花秸秆生物碳对盐渍土中重金属吸附效应及作用机制研究”(21767025); 塔里木大学校长资助项目“基于 3S 技术的沙雅县土壤水盐时空变化监测”(TDZKQN201816)

第一作者: 许丽(1983—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区奇台县人, 本科, 副教授, 主要从事环境遥感方面的研究。Email: 279765343@qq.com.

通信作者: 岳胜如(1988—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化与生态环境遥感方面的研究。Email: nmgndysr@163.com.

use conversion interacting with soil type had the strongest explanatory power of NDVI changes in the anthropogenic areas. The interaction among background factors, distance from recharge water sources and other factors was an important combination of factors for NDVI changes in the anthropogenic areas. ③ More than 10% of the area of the Aksu River basin in 2000—2020 underwent land use conversion, mainly in the form of mutual conversion of bare land and grassland, and a significant increase in the area of cropland, woodland, shrubland, and man-made land surface. [Conclusion] The spatial and temporal characteristics and driving mechanism of NDVI change in human activity area and non-human activity area in Aksu River basin are different. It is necessary to manage the Aksu River basin reasonably according to local conditions to promote the benign development of ecological environment in the basin.

Keywords: Aksu River basin; NDVI; geographical detector; driving mechanisms

植被作为陆地生态系统的主要组成部分,是反映区域和全球生态系统稳定性的重要指标^[1]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)容易获取,可以在一定程度上反映地表植被状况,被广泛应用于区域或全球生态监测^[2-4]。由于气候变暖和降水转移,理解和预测气候变化对植被动态的影响成为全球挑战^[5]。有研究表明,北半球中纬度地区出现显著的绿化趋势,然而对于绿化趋势的驱动力和机制在区域尺度上存在差异^[3,6]。降水和气温是影响植被生长的重要因子,在干旱半干旱地区降水增加对植被有积极作用,温度升高则会延长植被生长期^[7-8]。人类活动对植被变化影响较大,甚至在区域尺度上支配了植被变化趋势^[9-10]。此外,海拔、土壤类型、补给水源距离等背景因素对植被变化的影响亦不可忽略^[11-12]。因此,在全球气候变化及人类活动加剧的背景下,深入了解区域植被动态及驱动机制是开展生态保护的必要前提。

阿克苏河流域是典型的干旱地区内陆河流域,良好的水土条件为各种动植物的生存和发展提供了适宜的生存环境,对维持区域生态稳定和社会可持续发展具有重要意义^[13]。近几十年来,阿克苏河流域经历了明显的暖湿化进程,且人类活动强度增加^[14-15],定量区分潜在因子对植被变化的贡献迫在眉睫。地理探测器是一种可以揭示空间分异性及背后驱动力的统计学方法,用来阐明空间中因变量和驱动因子的内在联系,可以用于植被变化驱动机制研究^[11-12, 16-17]。然而,现有相似研究多从流域的空间尺度上展开讨论^[7, 11-12],针对阿克苏河流域人类活动集中在荒漠绿洲的集聚空间分布特点,现有研究尚存不足。

本研究基于 NDVI 数据、再分析气候数据、背景数据、土地利用数据,结合阿克苏河流域人类活动集聚性特点,分区讨论不同时段植被动态及驱动机制。研究目标如下: ① 2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 变化的时空特征; ② 潜在驱动因子及交互作用

对 NDVI 变化驱动强度的时空变化; ③ 土地利用转化在不同区域内表现形式及强度随时间的变化特点。本研究旨在为深入了解阿克苏河流域植被变化特点及驱动机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿克苏河流域位于新疆南部的天山中南坡西部,塔里木盆地西北边缘(76° 27'—81° 15' E, 39° 59'—42° 05' N),地势西北高东南低,总面积约 $5.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。由于北部天山山脉,来自中亚、西伯利亚和北冰洋的冷空气和水汽不能直接进入东南平原地区,形成典型的温带大陆性干旱气候,降水极少、蒸发强烈、日照充足和极端高温^[18]。阿克苏河径流主要来源于山区冰川积雪融水和山区降水,是典型的中纬度高山河流,由托什干河和库玛拉克河两大支流汇合而成,而后于肖夹克汇入塔里木河,对塔里木河干流的补给约占干流总径流量的 60%^[19-20]。

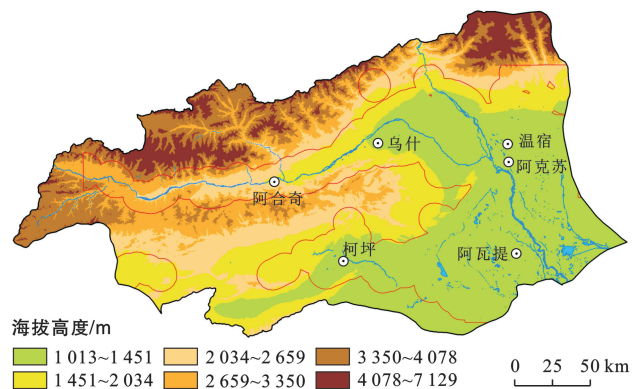


图 1 阿克苏河流域的地形

Fig.1 Topography of Aksu River basin

1.2 数据来源及预处理

研究采用 MOD13A3 NDVI 数据、气候数据(降水、气温)、DEM 数据、土壤类型数据和土地利用数据 5 种数据集,数据来源及说明见表 1。基于 MRT, MATLAB 和 ArcGIS 软件进行数据预处理。NDVI

采用年 NDVI 最大值(逐月最大合成),并计算 2010 较 2000 年,2020 较 2010 年 NDVI 差值为两时段 NDVI 变化量;降水数据采用两时段年累计降水差值,气温为两时段年平均差值;坡度、坡向数据由 DEM 数据在 ArcGIS 软件下处理得到;土壤类型为淋溶土、人为土等 12 种类型;从土地利用数据中提取冰川积雪、水体、人造地表数据并进行欧氏距离处理,

将耕地和人造地表及周边 10 km 缓冲区作为人类活动区,其他区域为非人类活动区。采用自然断点法对 NDVI 变化量及潜在因素进行离散化处理,然后使用 ArcGIS 创建鱼网工具生成 1 km×1 km 网格点,人类活动区和非人类活动区样点数分别为 26 205, 24 944。根据采样点的空间位置,提取变量信息,生成属性表,作为地理探测器分析数据源。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and descriptions

数据	时间分辨率	空间分辨率/m	来源
MOD13A3 NDVI	月	1 000	美国国家航空航天局地球数据, https://www.earthdata.nasa.gov/
降水	月	1 000	国家青藏高原科学数据中心, http://www.tpdc.ac.cn
气温	月	1 000	国家地球系统科学数据中心, http://www.geodata.cn/
DEM		90	地理空间数据云, https://www.gscloud.cn/
土壤类型		1 000	国家冰川冻土沙漠科学数据中心, http://www.ncdc.ac.cn/portal/
土地利用	10 a	30	GLOBELAND30, http://www.globallandcover.com/

1.3 方法

1.3.1 趋势分析 基于线性最小二乘回归方法逐像元计算 NDVI 观测值随时间序列变化趋势,可得到斜率,斜率大于 0 则表示 NDVI 增加,小于 0 则 NDVI 减少,等于 0 则 NDVI 不变,并对回归方程进行显著性检验(置信水平为 95%)。为探究流域尺度上 NDVI 的变化趋势及特征,亦用该方法计算流域 NDVI 距平值(年 NDVI 与多年平均 NDVI 的差值)随时间的变化趋势。斜率计算公式见式(1)。

$$S = \frac{t \times \sum_{i=1}^t i \times f_i - \sum_{i=1}^t i \sum_{i=1}^t f_i}{t \times \sum_{i=1}^t i^2 - (\sum_{i=1}^t i)^2} \quad (1)$$

式中:S 表示 2000—2020 年平均变化率; t 为时间序列长度,取值为 21; i 取值为 1~21,表示 2000—2020 年; f_i 表示第 i 年 NDVI 观测值。

1.3.2 地理探测器 地理探测器是探测空间异质性并量化驱动因素影响的空间统计方法。基本原理是将总样本分成若干个子样本,通过方差判断空间异质性和变量关系。如果子样本方差之和小于所有样本方差之和,则存在空间差异。如果两个变量的空间分布趋于一致,则这两个变量之间存在统计相关性^[16,21],其中因子探测器和交互探测器原理为:

(1) 因子探测器用来进行分异及因子探测,即可以探测因变量 Y 的空间分异性,当 Y 为 2 010 较 2000 年,2020 较 2010 年 NDVI 差值,若对潜在因子 X 多大程度上解释 Y 的空间分异进行探测,用 q 值进行度量。 q 的取值范围 [0, 1], 其值越大说明 Y 的空间分异性越明显。如果分层是由因子 X 生成,则 q 值越

大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱,解释力 F 值表示 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 。 q 值计算见式(2)~(4)。

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

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中: $h=1 \cdots L$ 为因变量 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 和全区的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

(2) 交互探测器可以用来识别不同风险因子之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或两因子是相互独立的。在 $X_1, X_2, X_1 \cap X_2$ 分区的基础上,由公式(2)~(4)计算 $q(X_1), q(X_2)$ 以及 $q(X_1 \cap X_2)$, 并进行比较,两个因子之间的关系可分为以下几类(表 2)。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空变化特征

从人类活动区(图 2a, 2b, 2c, 2d 中红色线条以内)和非人类活动区及 2000—2010, 2010—2020 年 2 个时段的角度探究阿克苏河流域 NDVI 变化特征(见图 2)。2000—2020 年阿克苏河流域平均 NDVI 空间分布特征见图 2a 所示,呈现东高西低空间特征。该区平均 NDVI 值为 0.222, 其中 NDVI 小于 0.200 的裸地、草地占流域面积的 63.2%, NDVI 高值区主要分布在东部绿洲,整体植被覆盖情况较差。

表 2 两个解释变量之间的交互作用及交互影响

Table 2 Interaction and interaction effects between the two explanatory variables

交互结果	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	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

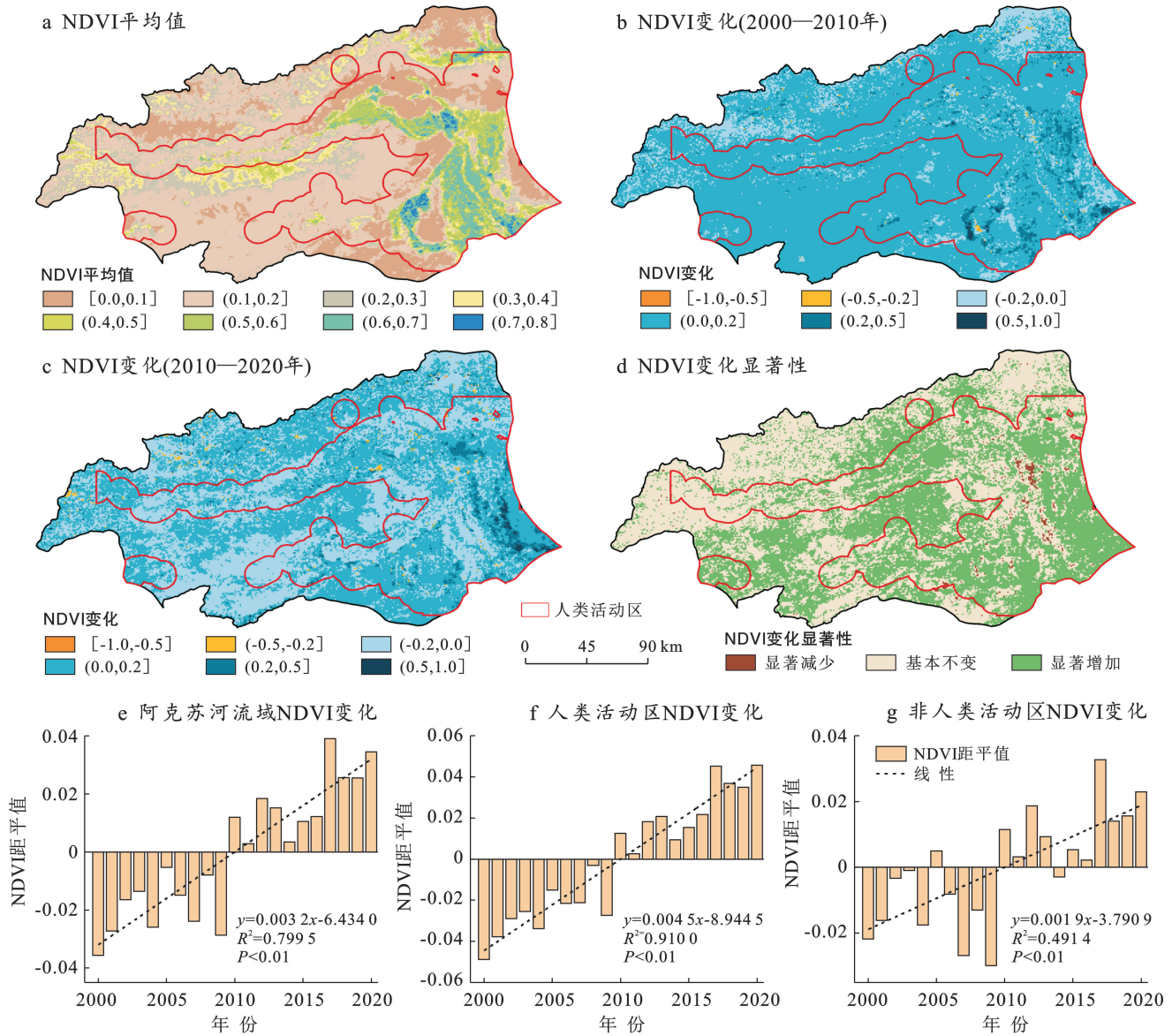


图 2 2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 时空变化特征

Fig.2 Characteristics of spatial and temporal changes of NDVI in Aksu River basin from 2000 to 2020

由图 2b、图 2c 可以看出,2010 较 2000 年 NDVI 主要表现出增加特征,而在研究区东北部、西北部和东南部部分地区减少。而 2020 较 2010 年 NDVI 变化呈现区域集聚性,其中在东南部增幅较高,而在西部、西南、中东部等区域 NDVI 有所下降。2000—2020 年 NDVI 变化显著的区域为 26 070 km²,占

总面积的 50.9%。呈显著上升趋势的区域占总面积的 50.2%(图 2d),仅有 0.7%的区域呈显著下降趋势。研究区西北部、东北部 NDVI 基本不变;显著增加区域则分布在研究区中部和东部;有 87.4%的显著减少区域分布在人类活动区,主要集中分布在研究区东部绿洲。2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 距平

值呈增加趋势,增速为 $0.0032/a$ (图 2e),正负转点出现在 2010 年。人类活动区和非人类活动 NDVI 距平值均呈增加趋势,分别为 $0.0045/a$, $0.0019/a$,人类活动区增速显著高于非人类活动区(图 2f,图 2g)。综上所述,阿克苏河流域近 21 a 间植被变化显著,东部植被状态的大幅度减少可能与人类活动关系密切。

2.2 基于地理探测器的 NDVI 驱动分析

2.2.1 因子探测器 利用地理探测器模型的因子探测器,从空间异质性角度探究 2000—2020 年阿克苏河流域人类活动区和非人类活动区潜在因子对 NDVI 的驱动机制,结果见图 3。 q 值越大,说明该因素对 NDVI 变化的解释力越强,那么具有最大 q 值的因子可定义为支配因子。在人类活动区 2000—2010 和 2010—2020 年的支配因子均为土地利用变化,解释力 F 值分别为 20.5% 和 12.5%;而在非人类活动

区 2000—2010 和 2010—2020 年的支配因子分别为海拔和距冰川积雪距离,且 F 值分别为 14.5% 和 10.8%。

不同区域的不同时段,影响 NDVI 变化的主要因子及其作用强度存在差异。在人类活动区,土地利用变化、土地利用类型及土壤类型对 NDVI 解释力最强,但 2010—2020 较 2000—2010 年而言,土地利用变化、土地利用类型对 NDVI 解释力下降,而土壤类型对 NDVI 变化的解释力增加,这可能与该流域两时段间土地利用转化强度及转化类型有关^[22]。在非人类活动区,影响 NDVI 变化的主要因子由 2000—2010 年的海拔、土壤类型、距冰川积雪距离转变为 2010—2020 年的距冰川积雪距离、距水体距离和距人造地表距离。气候因子(降水、气温)、背景因子(坡度、坡向)对阿克苏河流域 NDVI 变化影响有限。

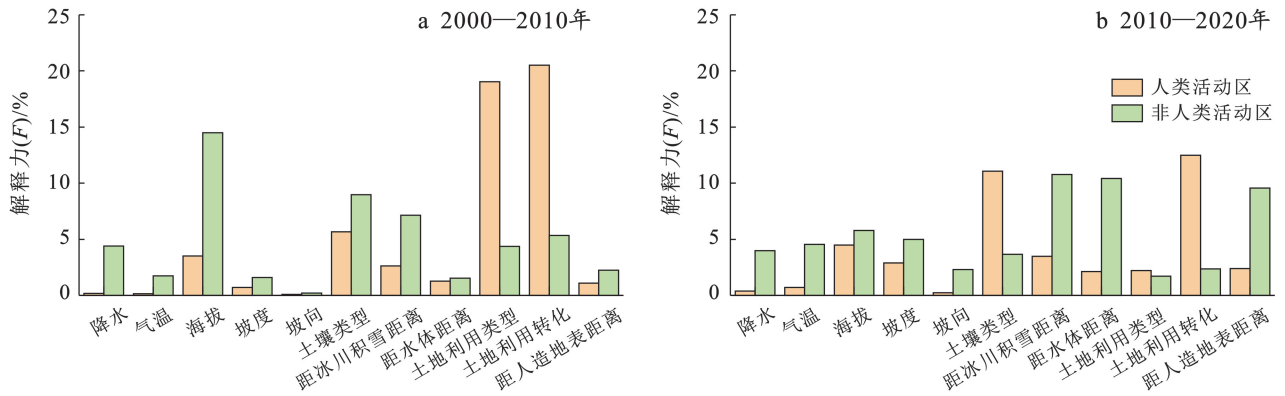


图 3 阿克苏河流域 NDVI 变化的因子探测结果

Fig.3 Factor detection results of NDVI changes in Aksu River basin

2.2.2 交互探测器 对影响 NDVI 变化的潜在因子进行交互作用探测分析发现,两因子在交互作用后表现出非线性增强或双因子增强,这意味着交互作用后的 q 值大于交互作用之前两因子 q 值之和或 q 的最小值。这表明各潜在因子对 NDVI 变化的影响不是独立的,且交互作用强度存在时空异质性,交互作用解释力结果见图 4。人类活动区在 2000—2010 年土地利用类型和土地利用转化与其他因子的交互作用强度较高,其中土地利用转化 \cap 土壤类型对 NDVI 变化的解释力最强,解释力 F 值为 29.3%;而在 2010—2020 年土地利用转化、土壤类型与其他因子的交互作用较高,其中最强烈交互组合仍为土地利用转化 \cap 土壤类型, F 值为 22.1%,较 2000—2010 年作用强度下降。非人类活动区在 2000—2010 年海拔、土壤类型、距冰川积雪距离与其他因子的交互作用较强,其中海拔 \cap 距冰川积雪距离作用强度最高, F 值为 19.0%;2010—2020 年距冰川积雪距离、距水体距离与其他因子的交互作

用较强,其中距水体距离 \cap 土壤类型交互作用强度最高, F 值为 16.2%。

综上所述,在人类活动区土地利用类型、土地利用转化与其他因子的交互作用可以很好地解释 NDVI 变化,而在非人类活动区背景因子(海拔、土壤类型)、距补给水源的距离(距冰川积雪的距离、距水体的距离)与其他因子的交互是引起 NDVI 变化的重要因子组合。

2.3 土地利用转化特征

由上文可知土地利用变化在人类活动区及冰川积雪、水体、人造地表等因素对非人类活动区是影响 NDVI 变化的重要因素,分析土地利用转化特征对探究阿克苏河流域 NDVI 变化驱动机制非常必要。

利用弦图对阿克苏河流域 2000—2020 年土地利用转移矩阵进行可视化处理(见图 5)。2000—2010 年有 10.1% 的人类活动区发生土地利用转化,主要表现为裸地、草地、耕地、水体之间的转化;裸地和草地相互转化面积较大,呈此消彼长的趋势。此外,耕地

转化为人造地表和草地,裸地、草地和人造地表转化为耕地较为显著。2010—2020 年人类活动区土地利用转化强度较 2000—2010 年更加剧烈,15.7% 的区域土地利用类型发生转化;裸地和草地面积减少,而耕地和人造地表面积增加;大量裸地转化为耕地和草地,草地转化为耕地和裸地,且耕地和人造地表之间也存在较强的转化。在非人类活动区土地利用转化

类型和强度存在差异。2000—2010,2010—2020 年发生土地利用转化的面积占非人类活动区总面积的比例分别为 11.1% 和 13.1%。裸地在两时间段内表现出先增加再减少的变化趋势,而草地则先减少后增加,冰川和永久积雪面积先增加后减少,林地和灌木地则保持增加趋势。土地利用转化的分析结果能在一定程度上为因子探测结果提供解释。

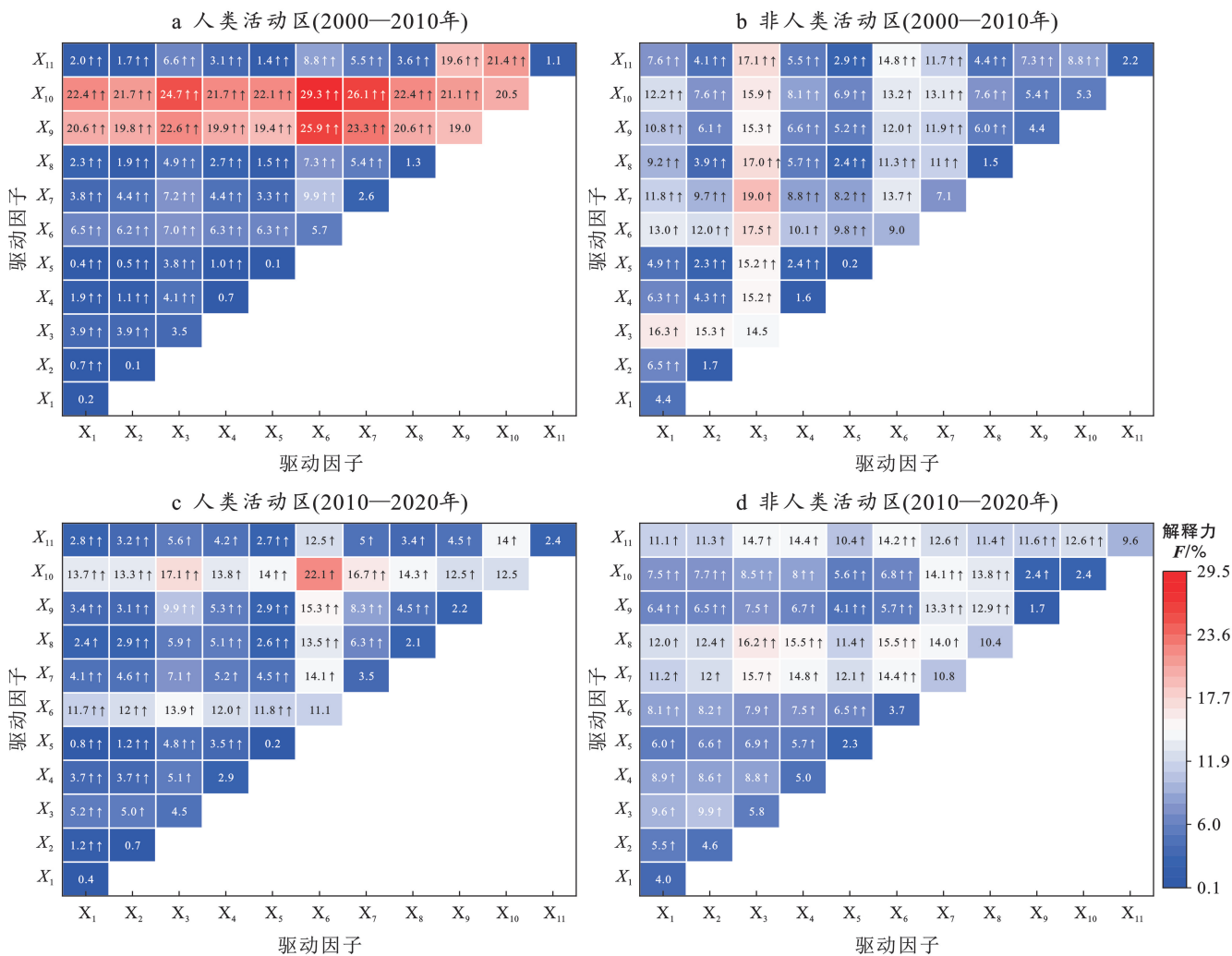


Fig.4 Interaction detection results of potential factors of NDVI changes in Aksu River basin

3 讨论

(1) NDVI 时空变化及驱动响应。研究结果表明,2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 均值较低,且呈显著增加趋势,这与有关学者的研究结果基本一致^[23]。2000—2020 年阿克苏河流域土地利用程度高,相互转化强度剧烈,耕地、人造地表面积显著增加;有研究表明,随着 2002 年退耕还林还草计划在新疆开展并不断完善,2000—2010 年塔里木河流域裸地及其他类型的转移面积为近 40 a 最低水平;然而随着生态输水及

节水灌溉技术和工程的实施,在 2010—2018 年绿洲周围大量草地和裸地开垦为耕地,这与本文结果相吻合^[22]。土地利用转化是解释阿克苏河流域人类活动区 NDVI 变化的重要因子,这在塔里木河流域的相似研究工作中得到证实^[24-25]。此外,在已有的研究中海拔、土壤类型等因素在植被变化中的作用可能被低估,而距补给水源的距离(距冰川积雪的距离)等潜在因素未被充分考虑^[7,26]。在非人类活动区,海拔通过控制降水、气温等因子的分布可以间接的影响土壤类型进而控制植被的空间分布和变化^[27];而在人类

活动区,人类通过水利工程可以改变自然水系的作用范围和强度,这可能是造成距水体距离因子在人类活动区对 NDVI 变化的作用强度低于非人类活动区的原因^[28]。

基于交互探测结果发现,两因子的交互作用表现为双因子增强和非线性增强。即任意两因子的交互作用对 NDVI 变化的影响均大于单一因子的影响,这一结果在相似的研究中可以得到证实^[7]。

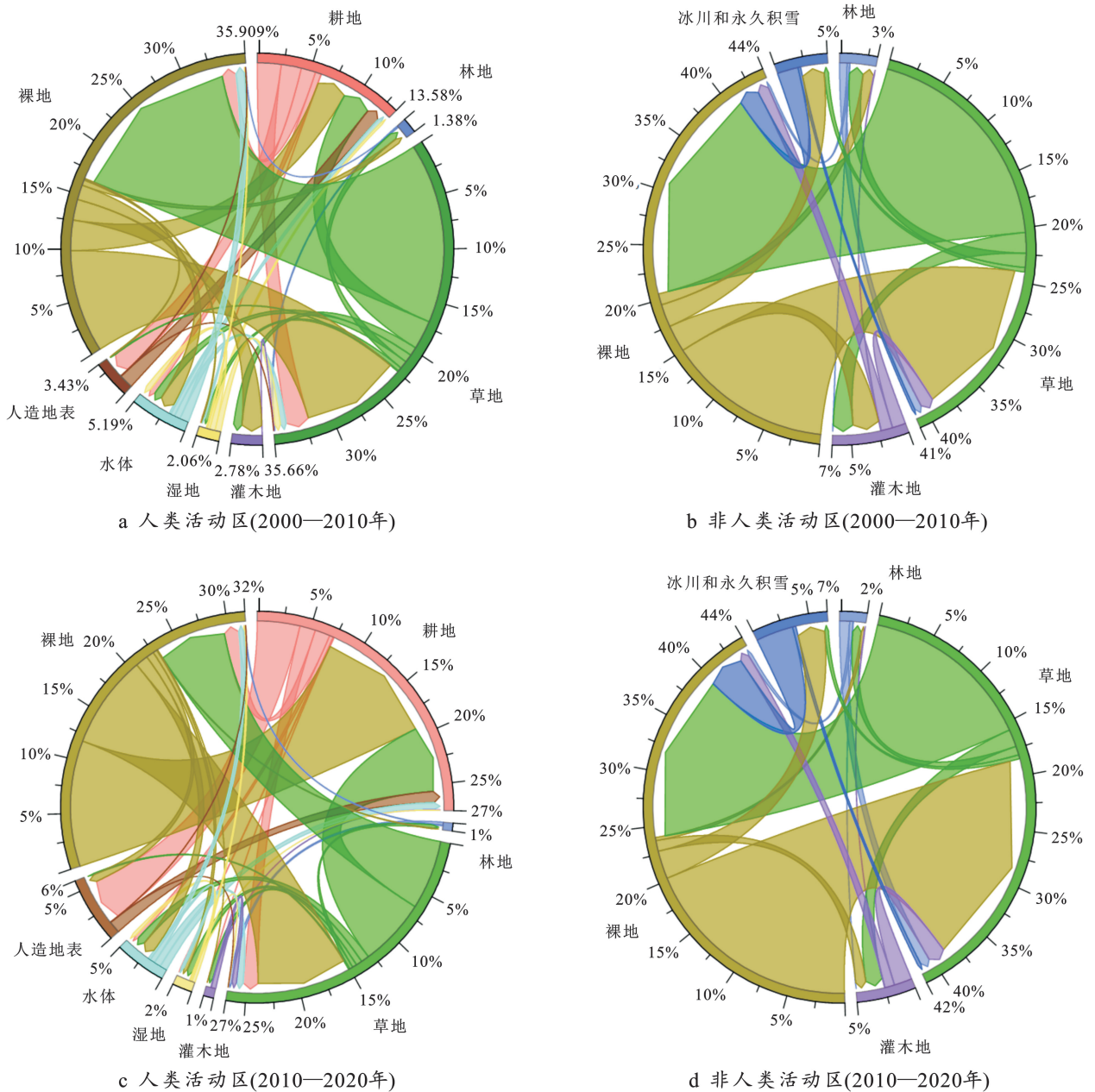


图 5 2000—2020 年阿克苏河流域土地利用转化

Fig.5 Land use conversion in Aksu River basin from 2000 to 2020

(2) 局限性。本文在考虑流域 NDVI 变化具有显著线性关系及距平值正负转折点等因素的基础上,确定 2010 年为间断点,分别探究了 2000—2010, 2010—2020 年两个时间段 NDVI 差值及对应时间尺度的潜在驱动因子对 NDVI 变化的驱动机制,忽略了更详细的过程驱动,这不利于 NDVI 变化驱动机制的准确分析。再者,有研究表明气候因子对植被生长具有重要的累积作用或结转效应,累积效应和结转效应在多年

生植被和一年生植被的表现亦有区别,选择 2000, 2010, 2020 年 3 个时间节点探究 NDVI 变化驱动机制显然忽略了该影响^[29-30]。CO₂ 施肥效应和氮沉降在某些区域促进了植被生长^[31-32],但考虑到数据的获取性和时空特性,本文并未将两因子列入潜在驱动因子,这将会影响结果的准确性和科学性。总之,尽管存在以上不足,本研究依然从一个新的角度分析了阿克苏河流域 NDVI 变化特征及其驱动机制,研究结果

可为该流域生态管理提供一定的科学参考。

4 结论

基于趋势分析和地理探测器方法,分析了阿克苏河流域人类活动区和非人类活动区 NDVI 变化时空特征及潜在因素对 NDVI 变化的驱动机制,得出如下主要结论。

(1) 2000—2020 年阿克苏河流域 NDVI 显著增加,人类活动区 NDVI 增加趋势显著高于非人类活动区,增速分别为 0.004 5,0.001 9/a。

(2) 土地利用转化、土地利用类型和土壤类型是人类活动区 NDVI 变化的重要驱动因子,但作用强度随时间发生变化。海拔、距冰川积雪距离、距水体距离、距人造地表距离是非人类活动区 NDVI 变化重要驱动因子。

(3) 因子的交互作用可以提高对 NDVI 变化的解释力,土地利用转化与土壤类型在人类活动区对 NDVI 变化的解释力最强,但解释力 F 值由 2000—2010 年的 29.3% 下降到 2010—2020 年的 22.1%。在非人类活动区背景因子、距补给水源的距离与其他因子的交互是引起 NDVI 变化的重要驱动因子组合。

(4) 2000—2020 年阿克苏河流域土地利用转化强度剧烈,主要表现为裸地和草地的相互转化,耕地、林地、灌木地、人造地表面积增加显著。

阿克苏河流域人类活动区和非人类活动区 NDVI 变化时空特征及驱动机制存在差异。根据人类活动特征划分研究区域会直接影响主要驱动因素的贡献率,针对主要因素开展生态环境治理是提高效率的方法之一。

[参 考 文 献]

- [1] Piedallu C, Chéret V, Denux J P, et al. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:2874-2885.
- [2] Cao Ruyin, Chen Yang, Shen Miaogen, et al. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217:244-257.
- [3] 孙瑞,张方敏,翁升恒,等.2001—2021 年中国 NDVI 时空格局变化及对气候的响应[J].*中国环境科学*,2023,43(10):5519-5528.
- un Rui, Zhang Fangmin, Weng Shengheng, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2021 [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10):5519-5528.
- [4] Kumari N, Saco P M, Rodriguez J F, et al. The grass is not always greener on the other side: Seasonal reversal of vegetation greenness in aspect-driven semiarid ecosystems [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): e2020GL088918.
- [5] Zhang Ying, Zhang Chaobin, Wang Zhaoqi, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 563/564 210-220.
- [6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300(5625):1560-1563.
- [7] Zhu Lijun, Meng Jijun, Zhu Likai. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117:106545.
- [8] Chu Hongshuai, Venevsky S, Wu Chao, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [9] Liu Ya, Li Yan, Li Shuangcheng, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10):13233-13250.
- [10] Song Wenqi, Feng Yuhao, Wang Zhiheng. Ecological restoration programs dominate vegetation greening in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 848:157729.
- [11] 王一,郝利娜,许强,等.2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J].*生态学报*, 2023, 43(6):2397-2407.
- Wang Yi, Hao Lina, Xu Qiang, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2397-2407.
- [12] 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.
- 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*, 2023, 39(8):284-292.
- [13] 杨振民,刘新平.新疆阿克苏河流域生态承载力监测及

- 安全格局构建[J].干旱区地理,2021,44(5):1489-1499.
- Yang Zhenmin, Liu Xiping. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in the Aksu River Basin, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2021,44(5):1489-1499.
- [14] Wang Yang, Xia Tingting, Shataer R, et al. Analysis of characteristics and driving factors of land-use changes in the Tarim River Basin from 1990 to 2018 [J]. Sustainability, 2021,13(18):10263.
- [15] Aishan T, Halik A, Betz F, et al. Stand structure and height-diameter relationship of a degraded *Populus euphratica* forest in the lower reaches of the Tarim River, Northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(4):544-554.
- [16] 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.
- [17] 凡晚晴,吴华,樊风雷.近 20 年来西藏地区 NPP 时空变化及影响因素[J].水土保持通报,2022,42(6):378-386.
- Fan Wanqing, Wu Hua, Fan Fenglei. Spatial-temporal variation of net primary productivity and its influencing factors in Tibet over past 20 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):378-386.
- [18] Ouyang Rulin, Cheng Weiming, Wang Weisheng, et al. Research on runoff forecast approaches to the Aksu River basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007,50(1):16-25.
- [19] Disse M. Sustainable land and water management of River Oases along the Tarim River [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2016,373:25-29.
- [20] Yang Peng, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. How is the risk of hydrological drought in the Tarim River basin, Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2019,693:133555.
- [21] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [22] 王璐晨,韩海辉,张俊,等.塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J/OL].中国地质(2023-05-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230515.1716.006.html>.
- Wang Luchen, Han Haihui, Zhang Jun, et al. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River basin, Xinjiang [J/OL]. Geology in China (2023-05-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230515.1716.006.html>.
- [23] Jiang Ning, Zhang Qinqin, Zhang Sicong, et al. Spatial and temporal evolutions of vegetation coverage in the Tarim River basin and their responses to phenology [J]. Catena, 2022,217:106489.
- [24] Hou Yifeng, Chen Yaning, Ding Jianli, et al. Ecological impacts of land use change in the arid Tarim River basin of China [J]. Remote Sensing, 2022,14(8):1894.
- [25] Sun Fan, Wang Yi, Chen Yaning, et al. Historic and simulated desert-oasis ecotone changes in the arid Tarim River basin, China [J]. Remote Sensing, 2021, 13(4):647.
- [26] Zhao Ruifeng, Chen Yaning, Shi Peiji, et al. Land use and land cover change and driving mechanism in the arid inland river basin: A case study of Tarim River, Xinjiang, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(2):591-604.
- [27] Dimri A P, Palazzi E, Daloz A S. Elevation dependent precipitation and temperature changes over Indian Himalayan region [J]. Climate Dynamics, 2022, 59(1):1-21.
- [28] 邓铭江,石泉.内陆干旱区水资源管理调控模式[J].地球科学进展,2014,29(9):1046-1054.
- Deng Mingjiang, Shi Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(9):1046-1054.
- [29] Wen Youyue, Liu Xiaoping, Xin Qinchuan, et al. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth [J]. Journal of Geophysical Research (Biogeosciences), 2019,124(4):789-806.
- [30] Lian Xu, Piao Shilong, Chen Anping, et al. Seasonal biological carryover dominates northern vegetation growth [J]. Nature Communications, 2021,12:983.
- [31] 郭梦迪.北半球中高纬植被秋季物候遥感提取及其环境响应机制[D].四川 成都:电子科技大学,2021.
- Guo Mengdi. Vegetation autumn phenology and its responses to environmental changes in the mid-high latitudes of the Northern Hemisphere based on remote sensing data [J]. Chengdu, Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [32] Chen Shaoyuan, Zhang Yulong, Wu Qiaoli, et al. Vegetation structural change and CO₂ fertilization more than offset gross primary production decline caused by reduced solar radiation in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2021,296:108207.