

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.161>



塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制

岳胜如^{1,2}, 王伦澈^{1*}, 曹茜¹, 孙嘉¹

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

2. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆阿拉尔 843300

摘要: 塔里木河流域气候极端干旱, 探究该区域植被动态特征并定量评价潜在驱动因素的作用强度对维持生态系统功能、实现可持续发展至关重要。基于长时间序列 NDVI 数据集、气候数据、背景数据及土地利用数据, 探究了塔里木河流域 2000—2020 年植被时空变化趋势和空间自相关性, 并利用地理探测器定量评估了潜在驱动因素对 NDVI 变化的作用强度。结果发现: 2000—2020 年平均 NDVI 为 0.159, 52.63% 的区域呈显著增长趋势, 增长速率为 0.02/10a, NDVI 的全局莫兰指数呈波动上升趋势, 表现为空间集聚性。土地利用转化、土壤类型、距人造地表距离是塔里木河流域植被变化的主要驱动因素, 对 NDVI 变化的解释力分别为 22.20%、8.57%、8.28%。降水是塔里木河流域北部的主导气候因素, 气温在西部和南部对 NDVI 变化的解释力更强, 距冰川和积雪的距离是影响 NDVI 变化不可忽略的因素。任意两因素的交互作用可以提高对 NDVI 变化的解释力, 其中在流域尺度上土地利用转化与土壤类型 ($q=29.44\%$) 解释力最强, 而在子流域尺度上, 解释力最强的交互组合及强度存在差异。本文结果有助于提高对塔里木河流域 NDVI 变化机制的认识, 为干旱半干旱地区生态保护提供科学依据。

关键词: 塔里木河流域; NDVI; 地理探测器; 驱动因素; 植被; 气候变化。

中图分类号: P237

文章编号: 1000-2383(2024)09-3399-12

收稿日期: 2023-05-20

Vegetation Dynamics and Potential Factors Driving Mechanisms in the Tarim River Basin

Yue Shengru^{1,2}, Wang Lunche^{1*}, Cao Qian¹, Sun Jia¹

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. College of Hydraulic and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China

Abstract: Given the extreme aridity of the Tarim River basin, it is critical to explore the characteristics of vegetation dynamics in the region and to quantitatively evaluate the strength of potential drivers to maintain ecosystem function and achieve sustainable development. The spatial and temporal trends and spatial autocorrelation of vegetation cover in the Tarim River basin from 2000 to 2020 are explored, based on long time series NDVI datasets, climate data, background data and land use data, and the strength of potential driving factors on NDVI changes is quantitatively assessed, using geographical detector. It is found that the average NDVI from 2000 to 2020 was 0.159, and 52.63% of the area showed a significant growth trend with a growth rate of 0.02/10a, and the global Moran's index of NDVI showed a fluctuating upward trend and exhibited a spatial agglomeration. Land use conversion, soil type, and distance from the man-made surface were the main driving factors of vegetation change in the Tarim

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41975044, 42001314).

作者简介: 岳胜如 (1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为气候变化与生态环境遥感研究。ORCID: 0009-0008-8879-8817. E-mail: nmgnysr@163.com

* 通讯作者: 王伦澈, E-mail: wang@cug.edu.cn

引用格式: 岳胜如, 王伦澈, 曹茜, 孙嘉, 2024. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制. 地球科学, 49(9): 3399—3410.

Citation: Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, Sun Jia, 2024. Vegetation Dynamics and Potential Factors Driving Mechanisms in the Tarim River Basin. *Earth Science*, 49(9): 3399—3410.

River basin, with explanatory power of 22.20%, 8.57%, and 8.28% for NDVI change, respectively. Precipitation is the dominant climatic factor in the northern part of the Tarim River basin, temperature has a stronger explanatory power for NDVI changes in the west and south, and distance to glaciers and snow is a factor affecting NDVI changes that cannot be ignored. The interaction of any two factors can improve the explanatory power of NDVI changes, among which the strongest explanatory power is found in land use conversion $\cap$ soil type ($q=29.44\%$) at the watershed scale, while there are differences in the combination and intensity of the strongest explanatory interactions at the sub-basin scale. The results help to improve the understanding of NDVI change mechanisms in the Tarim River basin and provide a scientific basis for ecological conservation in arid and semi-arid regions.

Key words: Tarim River basin; NDVI; geographical detector; driving factors; vegetation; climate change.

0 引言

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在物质和能量平衡、全球碳循环、气候稳定性等方面发挥着重要作用,是生态系统健康和土地退化的敏感指标(李霞等, 2022). 近年来诸多学者针对全球和区域尺度,开展了大量的陆地生态系统监测工作,而植被变化的驱动机制研究一直是人们关注的焦点(Jeong *et al.*, 2011; 许丽等, 2023). 研究表明,植被变化受到自然因素和人类活动的综合影响且驱动因素及作用强度存在地域差异(Nemani *et al.*, 2003; Mu *et al.*, 2021). 在干旱和半干旱地区,植被变化对降水很敏感,理论上降水的增加对植被有积极作用(Zhu *et al.*, 2020),另有研究表明气温升高是北半球中高纬度地区植被生长期延长的主要驱动因素(Nemani *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2019). 背景因素对植被变化的影响不可忽视,比如海拔、土壤类型、距补给水源的距离等(Meng *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021a, 2021b; 南富森等, 2023). 随着经济发展和人口增加,人为因素对生态环境的影响日趋增强,甚至在区域尺度上改变了植被变化的趋势(Liu *et al.*, 2015). 在生态环境脆弱的干旱地区区分潜在因素对植被变化的定量贡献对生态环境可持续发展评估非常重要(Huang *et al.*, 2020).

塔里木河流域干旱少雨、蒸发强烈,近年来植被动态和景观格局发生显著改变,荒漠化、生物多样性减少等问题严峻,是典型的生态脆弱区(Jiang *et al.*, 2022; Mu and Shen, 2022). 目前,许多学者从不同角度对塔里木河流域植被变化及驱动因素进行了研究. 例如, Zhang *et al.* (2020) 利用归一化植被指数 NDVI 和植被盖度指数 FC 对塔里木河干流植被生长状态进行监测,发现塔里木河干流植被改善区远大于植被退化区,溢流天数和累积输水量是主导植被覆盖的主要因素. Wang *et al.* (2021a) 采用土地利用转移矩阵、NDVI、区域重心模型和夜间

灯光遥感互校正方法,探讨了土地利用变化的时空特征及其驱动因素,结果显示,1990—2018 年塔里木河流域土地利用类型变化显著,重心向东北方向移动,气候变化与土地利用变化有关,而人类活动对土地利用变化影响最为明显. 王星等(2023)基于 NDVI 数据,采用地理探测器等方法对塔里木河干流植被动态进行监测和评估,发现塔里木河干流植被覆盖度呈波动上升趋势,自然因素和人类活动的共同作用是塔里木河干流植被快速增加和空间差异的主要原因,且人类活动的影响更为直接. 现有研究在植被变化驱动方面主要考虑水胁迫、气候变化、土地利用转化等因素,而距补给水源距离等潜在因素尚未考虑,且多因素及交互作用在不同空间尺度上对植被变化贡献的定量评价尚不充分.

本研究基于 NDVI 数据集和气候因素、背景因素、人类活动指标,在不同空间尺度上探究塔里木河流域植被变化及驱动机制. 研究目标:(1) 分析 2000—2020 年间塔里木河流域 NDVI 变化趋势的时空特征及空间集聚性;(2) 在不同空间尺度上区分和量化潜在影响因素及交互作用对 NDVI 变化的贡献. 研究结果为深入了解塔里木河流域植被变化特征、驱动机制及制定生态环境保护政策提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域(TMB)位于新疆南部, $73^{\circ}10' \sim 94^{\circ}05'E$, $34^{\circ}55' \sim 43^{\circ}08'N$, 天山与帕米尔高原、昆仑山、喀喇昆仑山之间,面积约 $6.85 \times 10^5 \text{ km}^2$ (不含塔克拉玛干沙漠,图 1). 由开都—孔雀河、渭干河、塔里木河干流、阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、克里雅河、车尔臣河 9 个子流域组成. 研究区海拔 780~8 464 m,大部分属极端干旱气候,多年平均气温 $-30.6 \sim 14.5^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 3.6~682.6 mm.

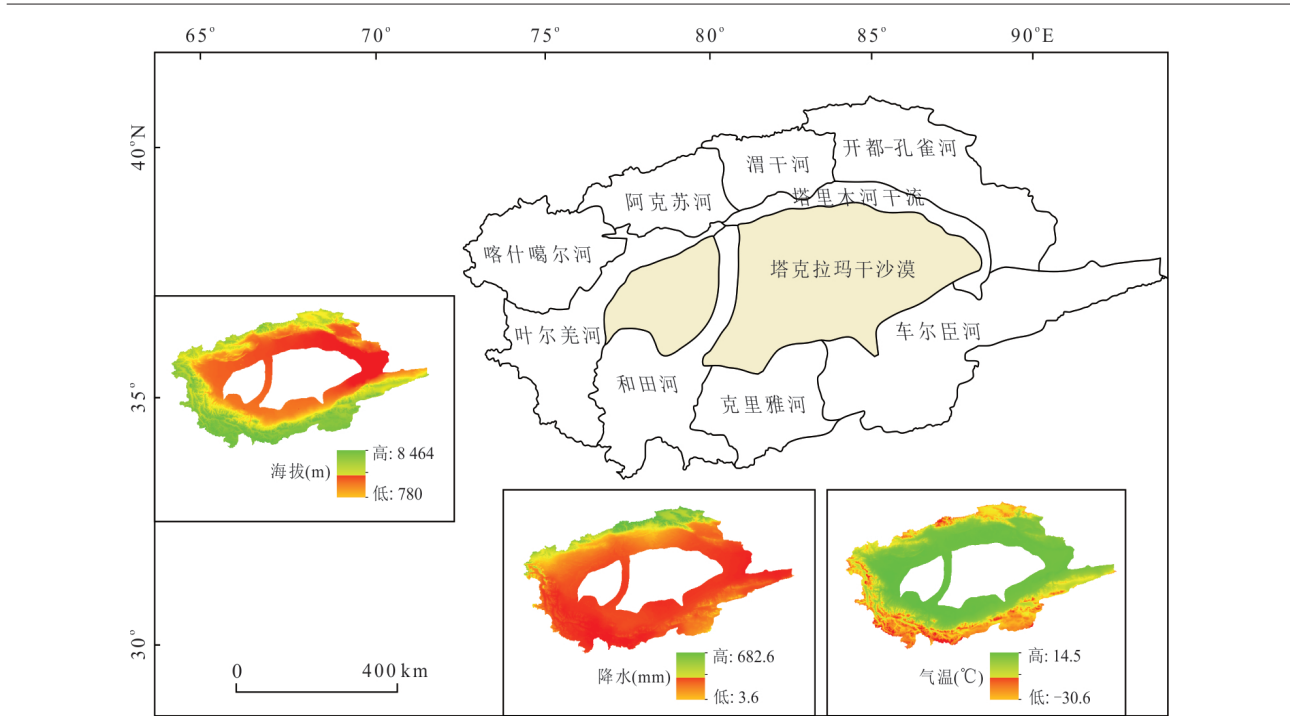


图1 塔里木河流域地理位置及气候特征

Fig.1 Geographical location and climatic characteristics of the Tarim River basin

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and descriptions

产品	数据	编码	时间分辨率	空间分辨率	来源
MOD13 A3	NDVI	Y	month	1 km	https://www.earthdata.nasa.gov/
降水	累计降水	X1	month	1 km	http://www.tpd.cn
气温	平均气温	X2	month	1 km	http://www.geodata.cn/
DEM	海拔	X3	/	90 m	https://www.gscloud.cn/
DEM	坡度	X4	/	90 m	由 DEM 数据处理得到
DEM	坡向	X5	/	90 m	由 DEM 数据处理得到
土壤类型	土壤类型	X6	/	1 km	http://www.ncdc.ac.cn/portal/
GLOBELAND30	距水体距离	X7	10 a	30 m	由土地利用转化数据处理得到
GLOBELAND30	距冰川和积雪距离	X8	10 a	30 m	由土地利用转化数据处理得到
GLOBELAND30	距人造地表距离	X9	10 a	30 m	由土地利用转化数据处理得到
GLOBELAND30	土地利用	X10	10 a	30 m	http://www.globallandcover.com/
GLOBELAND30	土地利用转化	X11	10 a	30 m	由土地利用转化数据处理得到

1.2 数据来源

本研究采用 MOD13 A3 NDVI 数据、再分析气候数据、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,塔里木河流域矢量化数据来自国家青藏高原科学数据中心。利用 MODIS 重投影工具(MRT)进行图像拼接、格式和投影转换,使用 MATLAB、ArcGIS 对数据加工处理。为探究植被对潜在因素响应的敏感度,考虑到气候变化及物候对植被生长的影响,采用最大值

合成方法,生成年最优植被数据。年累计降水、年平均气温采用 2000—2020 年多年平均值。采用 GLOBELAND30 数据中 2000、2020 年两期数据,提取水体、冰川和积雪、人造地表数据进行欧氏距离处理。采用自然断点法对影响 NDVI 变化的潜在因素进行离散化处理,然后使用 ArcGIS 创建鱼网工具生成 3 km×3 km 网格点,共 27 364 个样本。最后,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。

2 研究方法

2.1 线性最小二乘回归

线性最小二乘回归可以用于描述植被变化状况(王春雅等, 2021),采用线性最小二乘回归方法计算逐个像元观测值随时间序列变化趋势,得到趋势线的斜率(*Slope*),其值大于0表示趋势增加,小于0表示趋势减少,等于0表示趋势不变,并对结果显著性进行检验,斜率计算公式为:

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

其中,*Slope*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.

2.2 空间自相关分析

空间自相关可以反映区域单元上的空间特征或数值与相邻单元的相关程度(Ren *et al.*, 2020),是衡量空间域中聚集程度的重要指标.莫兰指数是常用来度量空间相关性的指标之一,被广泛应用于生态科学领域(Wang *et al.*, 2020b, 2021a; Liu *et al.*, 2021a),分为全局莫兰指数(*Global Moran's I*)和局部莫兰指数(*Local Moran's I*).全局莫兰指数计算公式如下:

$$Global\ Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

其中,*w_{ij}*是空间权重矩阵;*x_i*和*x_j*分别是第*i*个和第*j*个采样点的NDVI值;*n*是总采样数; $\bar{x}$ 是变量*x*的平均值.*Global Moran's I*>0、*Global Moran's I*<0和*Global Moran's I*=0分别代表NDVI表现为聚类、离散和随机空间分布(Wang *et al.*, 2021a).

为了分析各区域之间的空间依赖性或差异性,采用局部莫兰指数来表示NDVI的局部聚类特征(Liu *et al.*, 2019).采用局部空间关联指标进行局部空间自相关分析,来表示局部聚类和离散效应.局部莫兰指数计算如下:

$$Local\ Moran's\ I = \frac{(x_i - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \sum_{j \neq i} w_{ij} (x_j - \bar{x}), \quad (3)$$

公式(3)中的变量与公式(2)中的变量相同.根据聚类结果,NDVI值被分为4个等级,包括“高-高”、“低-低”、“高-低”和“低-高”聚类

类型(Zhang *et al.*, 2019).

2.3 地理探测器

多种因素作用下的植被变化过程复杂,并不存在严格统计标准的线性关系,探究多种因素对植被变化的影响具有挑战性.地理探测器是探索空间分化和量化驱动因素的可靠方法(Wang *et al.*, 2010),它阐明了空间中驱动因素和目标变量之间的内部联系,多被用于探索影响植被变化、土地利用变化驱动机制的相关研究(Meng *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020; 王一等, 2023),因子探测器和交互探测器原理(Wang *et al.*, 2010)如下.

(1)因子探测器用于进行分异及因子探测:可以探测因变量*Y*的空间分异性,*Y*为2020年与2000年NDVI差值.再对某潜在因子*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,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2, \quad (5)$$

式中:*h*=1, ..., *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.*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,*q*值表示*X*解释了100×*q*%的*Y*.

(2)交互探测器用于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,或这些因子对*Y*的影响是相互独立的.评估的方法是计算*q*(*X*₁)、*q*(*X*₂)以及*q*(*X*₁∩*X*₂),并进行比较,两个因子之间的关系可以分为以下几类,见表2.

表 2 两个解释变量之间的交互作用及交互影响
Table 2 Interaction between the two explanatory variables and interaction effects

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
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	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

3 结果分析

3.1 NDVI时空变化特征

2000—2020年塔里木河流域多年平均NDVI为0.159,呈北高南低、西高东低的空间特征,差异显著(图2a),其中NDVI小于0.2的区域占整个研究区的77.23%。NDVI大于0.3的区域主要分布在北部高寒草原及流域绿洲区域。各子流域中阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河平均NDVI相对较高,而克里雅河和车尔臣河NDVI较低(图2b)。

近21年来,在流域尺度上NDVI呈显著上升趋势,有90.23%的区域变化斜率大于0,其中52.63%的区域呈显著增加趋势,仅有0.99%的区域呈显著下降趋势,呈下降趋势的区域主要分布在塔里木河干流的中下游及环塔克拉玛干沙漠的绿洲边缘地区(图3a、3b)。2000—2020年,塔里木河流域NDVI平均变化速度为0.020/10a,各子流域中渭干河、塔里木河干流、阿克苏河、喀什噶尔河和叶尔羌河平均NDVI变化速率大于流域总体变化趋势,其中渭干河变化斜率最大,为0.035/10a;而开都-孔雀河、和田河、克里雅河和车尔臣河的变化趋势低于总体趋势,其中车尔臣河变化斜率最小,为0.011/10a,但显著增加面积占比最高,约为67%;斜率变化呈现明显的西高东低的空间特征(图3c)。此外,渭干河、阿克苏河、克里雅河NDVI显著增加区域均超过了50%,而塔里木河干流约7%的区域呈显著减少趋势,其他子流域这一比例仅占1%或接近0%(图3d)。

3.2 NDVI的空间自相关特征

3.2.1 NDVI的空间全局自相关 2000—2020年塔里木河流域全局莫兰指数为正,整体变化呈波动上升趋势(图4a),即研究区NDVI的空间分布具

有空间集聚性。变化过程大致可分为3个阶段:2000—2004年全局莫兰指数整体呈下降趋势,2004—2016年呈上升趋势,2016—2020年则呈下降趋势,流域尺度上的变化拐点出现在2004和2016年,其全局莫兰指数分别为0.774和0.812。

3.2.2 NDVI的空间局部自相关 2000—2020年塔里木河流域大部分地区NDVI的局部空间自相关类型表现为低-低聚类、不显著和高-高聚类,面积占比分别为:58.75%~65.79%、26.82%~32.20%和7.07%~9.80%,而高-低和低-高聚类面积占比少于0.2%,见图4b~4f。变化趋势方面,不显著和高-高聚类有明显的增加趋势,而低-低聚类呈下降趋势,高-低聚类增加,低-高聚类则呈剧烈波动状态,但高-低和低-高占比极小,对流域尺度NDVI变化影响不大。综上所述,近21年间塔里木河流域NDVI有明显提高,向不显著和高-高聚类模式转变。

3.3 基于地理探测器的NDVI驱动分析

3.3.1 因子探测器分析 采用地理探测器模型量化塔里木河流域潜在因素对NDVI的驱动强度(q 值),除坡度外,其余驱动因素对NDVI的影响均显著($P < 0.05$),见图5。土地利用转化是塔里木河流域NDVI变化的最重要驱动因素,解释力为22.20%。有研究表明,2000年以来塔里木河流域土地利用类型发生显著变化,主要表现为草地、裸地、耕地、建设用地等之间的转化;草地和裸地转化为耕地及裸地转化为草地将导致NDVI增加,草地面积减少、裸地面积增加、建设用地增加将导致NDVI减少(Wang *et al.*, 2021b)。土壤类型、距人造地表距离和土地利用对NDVI变化有一定解释力, q 分别为8.57%、8.28%和7.95%。坡度和坡向,对NDVI变化的影响最弱,解释力仅为0.28%和0.19%。降水和气温对NDVI变化的解释力分别为4.77%和

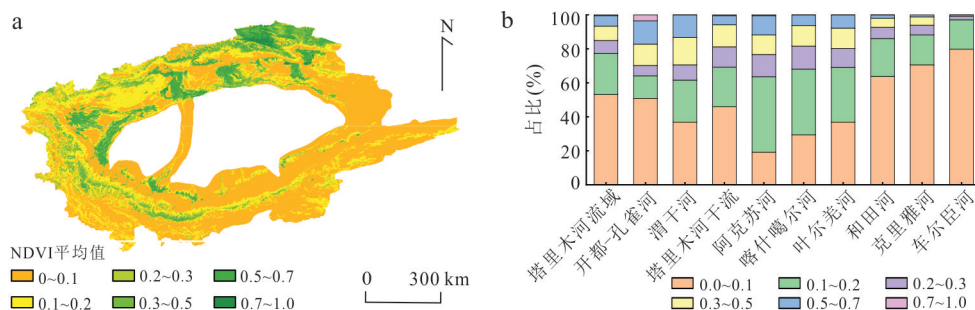


图2 多年平均NDVI空间分布格局

Fig.2 Spatial distribution pattern of multi-year average NDVI

a. 空间分布; b. 各级NDVI在子流域的占比

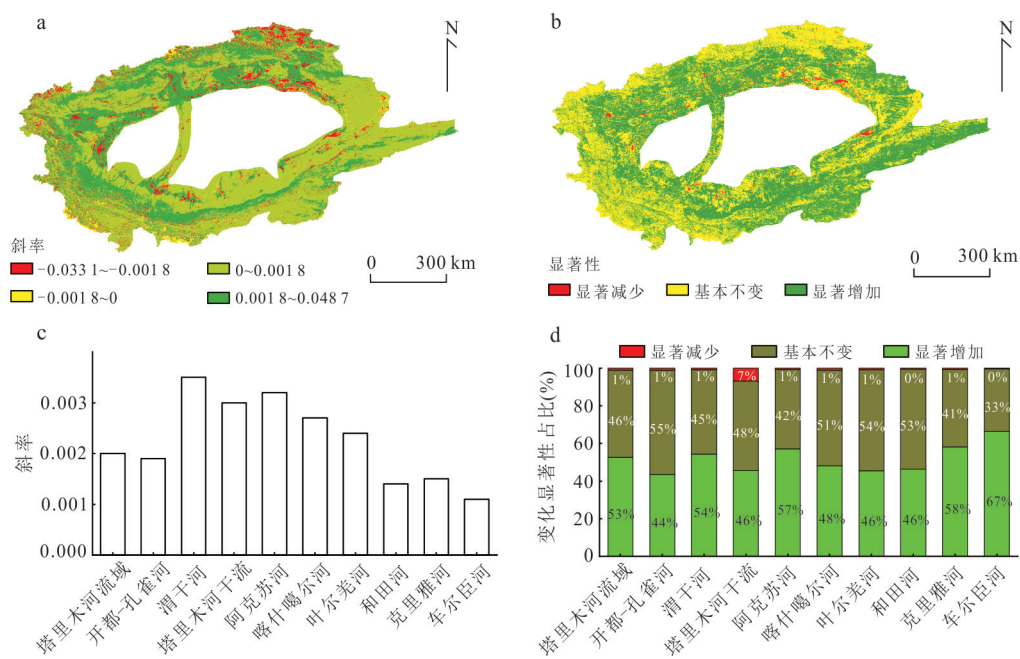


图3 2000—2020年塔里木河流域NDVI时空变化趋势

Fig.3 Spatial and temporal trends of NDVI in the Tarim River basin from 2000 to 2020

a.NDVI变化斜率;b.NDVI变化显著性;c.各子流域平均NDVI变化斜率;d.各子流域NDVI变化显著性占比

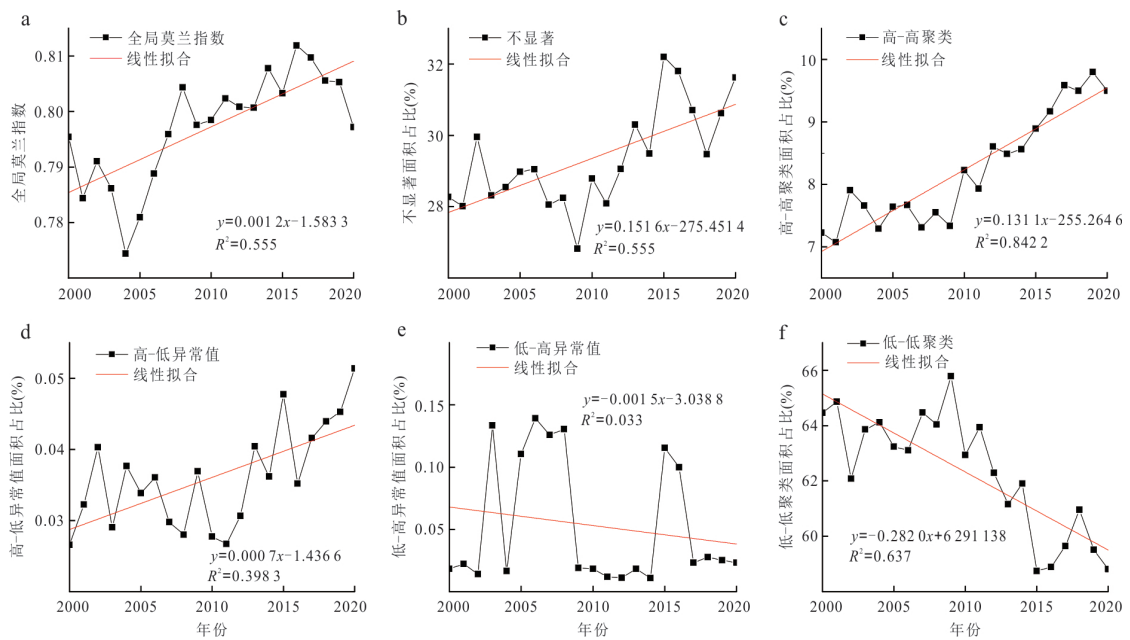


图4 2000—2020年塔里木河流域NDVI空间自相关特征

Fig.4 Spatial autocorrelation characteristics of NDVI in the Tarim River basin from 2000 to 2020

2.54%，降水的影响大于气温，相关研究成果也支持这一结论，对于西北干旱地区而言，当前气候变暖和降水增加总体上促进了植被生长 (Zhang *et al.*，2021b)。

因子探测结果在各子流域表现出一定的空间规律性和异质性(图5)。气候因素方面，降水对研究

区北部的开都-孔雀河、渭干河以及塔里木河干流NDVI变化的驱动强度较大，*q*值分别为17.39%、9.08%和12.43%；而气温对研究区南部和田河、克里雅河和车尔臣河NDVI变化驱动强度高，*q*值分别为15.03%、25.63%和10.99%；降水和气温对NDVI变化驱动呈现明显的南北差异。背景因素方

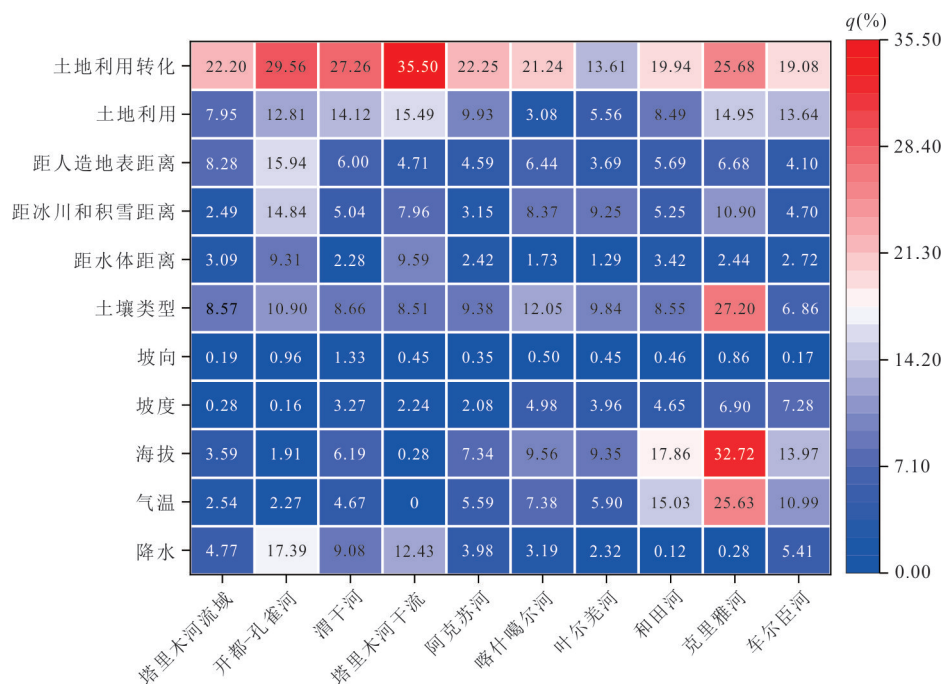


图5 塔里木河流域NDVI变化的因子探测结果

Fig.5 Factor detection results of NDVI changes in the Tarim River basin

面,高程和土壤类型对NDVI变化的驱动强度远高于坡度和坡向.除塔里木河干流和开都-孔雀河外,高程在其余各子流域均对NDVI变化有较强影响,特别是在研究区南部和田河、克里雅河和车尔臣河,其中在克里雅河的 q 值为32.72%,为该子流域最强影响因素.距补给水源距离方面,除塔里木河干流以外,距冰川和积雪的距离对NDVI变化的作用强度均大于距水体距离的作用强度.其他因素方面,除克里雅河以外,土地利用转化在各子流域均为最重要的驱动因素,此外土地利用和距人造地表距离作用强度较其他因素而言相对较高,而三者可看做人类活动及其他因素对NDVI变化影响的最直观指标.总而言之,塔里木河流域NDVI变化是气候、背景因素、补给水源和人类活动等因素耦合作用的结果,且存在显著的空间差异.

3.3.2 交互探测器分析 NDVI变化可能受到多种因素的耦合作用,使用交互探测器对各潜在因素对塔里木河流域NDVI变化影响的交互作用进行探测(图6).结果表明,任何两个因素之间的交互作用对NDVI变化的解释力均大于任何单一因素,交互作用表现为双因素增强和非线性增强两种形式.表现为双因子增强的因素有DEM与气温,距水体距离与土壤类型,距人造地表距离与降水、坡度和土壤类型,土地利用类型与降水、土壤类型、距水体距

离、距人造地表距离,土地利用转化与土壤类型、距水体距离、距人造地表距离和土地利用类型,而其他因素之间的交互作用则表现为非线性增强.土地利用转化与其他因子的交互作用突出,其中土地利用转化 $\cap$ 土壤类型($q=29.44\%$)、土地利用转化 $\cap$ 海拔($q=29.16\%$)、土地利用转化 $\cap$ 降水($q=27.30\%$)解释力最强,这表明土地利用转化、土壤类型、海拔、降水等因素的交互作用是塔里木河流域NDVI变化的主要原因.有研究表明在西北干旱地区一定程度的高程增加不会对植被生长产生消极影响,但当高程超过一定阈值,虽然降水可以满足生长需求,但温度低、土壤质量恶劣,不再适合植被生长(Zhu *et al.*, 2020),其他因素之间亦可能存在相似交互作用.综合其他因素之间交互探测结果可以发现,各驱动因子对NDVI的作用不是独立的,因子交互作用可以更好地解释NDVI变化.

同样的方法对各子流域NDVI变化潜在因素进行交互探测分析,发现各子流域中不同因素之间交互作用也呈现为双因子增强和非线性增强两种形式,但作用强度存在地域差异.在子流域尺度上,土地利用转化与其他因素的交互对NDVI变化的解释力最强,这与全流域规律一致,在各子流域中选取3组交互作用最强的组合,结果如表3所示.与土地利用转化交互的过程中,土壤类型在除塔里木河干

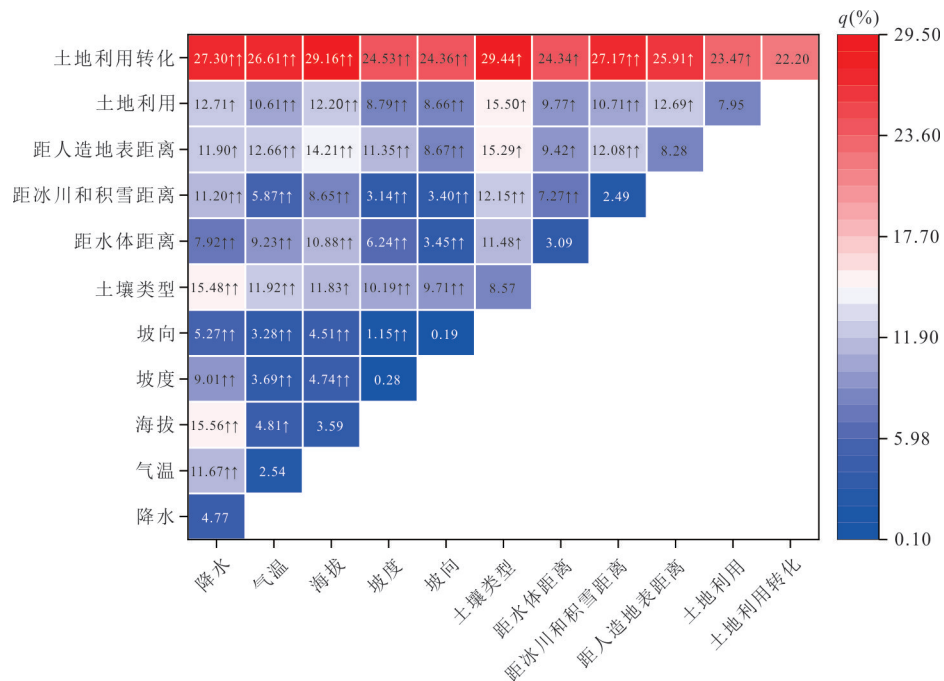


图 6 塔里木河流域 NDVI 变化的因子交互探测结果

Fig.6 Factor interaction detection results of NDVI changes in the Tarim River basin

“↑”和“↑↑”分别表示双因子增强和非线性增强

表 3 各子流域典型因子交互作用结果

流域	交互类型 1	$q(\%)$	交互类型 2	$q(\%)$	交互类型 3	$q(\%)$
塔里木河流域	土地利用转化∩土壤类型	29.44	土地利用转化∩海拔	29.16	土地利用转化∩降水	27.3
开孔河	土地利用转化∩降水	40.95	土地利用转化∩距冰川和积雪距离	38.4	土地利用转化∩土壤类型	37.09
渭干河	土地利用转化∩坡向	34.64	土地利用转化∩土壤类型	33.66	土地利用转化∩降水	33.09
塔里木河干流	土地利用转化∩坡向	46.12	土地利用转化∩距冰川和积雪距离	43.56	土地利用转化∩降水	42.6
阿克苏河	土地利用转化∩土壤类型	32.66	土地利用转化∩坡向	29.35	土地利用转化∩距冰川和积雪距离	27.53
喀什噶尔河	土地利用转化∩土壤类型	29.69	土地利用转化∩海拔	28.92	土地利用转化∩坡向	28.54
叶尔羌河	土地利用转化∩土壤类型	22.46	土地利用转化∩海拔	21.58	土地利用转化∩距冰川和积雪距离	20.55
和田河	土地利用转化∩海拔	36.02	土地利用转化∩气温	31.42	土地利用转化∩距人造地表距离	30.11
克里雅河	土地利用转化∩海拔	46.4	土地利用转化∩土壤类型	43.94	土地利用转化∩气温	42.12
车尔臣河	土地利用转化∩海拔	32.5	土地利用转化∩气温	29.91	土地利用转化∩土壤类型	26.04

流、和田河以外的其他子流域；降水在研究区北部的开都-孔雀河、渭干河和塔里木河干流；坡向在研究区中西部的渭干河、塔里木河干流、阿克苏河、喀什噶尔河；海拔在研究区西部和南部的喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、克里雅河和车尔臣河；气温在研究区南部和田河、克里雅河、车尔臣河；距冰川和积雪距离因子则在开都-孔雀河、塔里木河干流、阿克苏河、叶尔羌河、和田河作用突出。综上所述，在考虑到各子流域面积和空间位置的前提下，土地利用转化、土壤类型是影响 NDVI 变化的全局因素，而降水、坡向、

海拔和气温则是影响 NDVI 变化的局部因素，距冰川和积雪距离是不可忽略的地域特色因素。

4 讨论

4.1 塔里木河流域植被时空变化

研究结果表明，塔里木河流域 NDVI 格局和变化趋势具有空间异质性，这可能是自然和人为因素共同作用下的结果。就空间特征而言，NDVI 较高区域分布在研究北部开都-孔雀河的高寒草场、流域绿洲以及低山草场地区，研究区荒漠和戈壁分布广泛

致使 NDVI 均值较低,这与以往研究结果一致(Jiang *et al.*, 2022).2000—2020 年塔里木河流域 NDVI 呈显著增加趋势,植被改善的区域远大于退化区域,这与其他学者所得结论一致(Jiang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022a).NDVI 变化可能与中国西北地区持续的“暖湿化”进程、耕地面积的增加及生态系统恢复计划有关(Zhang *et al.*, 2021b, 2022b).此外,趋势分析表明,近 21 年植被显著退化在塔里木河干流占比最高达 7%,主要分布在其中下游.这一结果可能是上游用水量急剧增加造成下游断流,大量农田弃耕,原有生态系统遭到破坏所致,虽然 2000 年后进行了塔里木河干流的生态补水计划,但其影响范围有限,远离河道区域的植被退化趋势并没有得到遏制(Zhang *et al.*, 2020).

植被分布及变化呈现明显的区域分化特征,而空间自相关分析方法可以识别植被的空间集聚状态(Li *et al.*, 2020).2000—2020 年塔里木河流域 NDVI 的全局莫兰指数呈现波动上升趋势,这进一步验证了 NDVI 的增加.其中 2000—2004 年全球莫兰指数显著下降,2004 年降至最低,这可能与开都—孔雀河高寒草场的过度放牧及人类活动强度加剧所引起的植被变化有关(Jiang *et al.*, 2022).此外近 21 年间高—高集聚类型面积呈上升趋势,表现出积极的溢出效应;而低—低集聚类型面积逐渐减少,这可能与当地人工绿洲面积的不断增加及经济结构变化有关(Zhang *et al.*, 2022a).

4.2 植被变化主要驱动因素

定量确定植被变化的主导因素可以为生态保护和可持续发展的政策制定提供理论参考.在塔里木河流域,土地利用转化被认为是影响 NDVI 变化的主要驱动因素,相关研究结果支持这一结论(Wang *et al.*, 2021b).此外,在以往研究中土壤类型、高程等因素在塔里木河流域 NDVI 变化过程中的作用可能被低估(Zhao *et al.*, 2013),且各潜在因素作用于植被的过程并非独立(Zhou *et al.*, 2020).本研究表明任意两个因素的交互作用对 NDVI 的影响均大于单一因素的影响,主要表现为非线性和双因子增强效应,这与该区自然环境相似的其他地域研究结论相同(Zhu *et al.*, 2020).具体来说,土地利用转化与土壤类型、高程、降水的相互作用对 NDVI 表现更积极,这可能是因为研究区出现较大面积土地利用转化,即从草地、林地、未利用地和湿地转化为耕地,从耕地转化为建设用地,以及草原、林地和

湿地转化为未利用地,人口增长、经济发展和产业政策是塔里木河流域土地利用转化的驱动因素(Zhao *et al.*, 2013).海拔通过控制降水 and 气温分布间接影响土壤类型及植被的空间分布(Zhang *et al.*, 2021a).坡度、坡向等因素在全流域或子流域尺度上对 NDVI 变化的影响不大,但它们的交互作用可以增强解释力,与以前的研究结果相似(Peng *et al.*, 2019).塔里木河流域海拔南北高中间低,且南部平均海拔相对高于北部,降水北高南低,冰川积雪融水是重要的补给水源,这些因素可能造成了降水对北部 NDVI 变化驱动强度大,而气温对南部 NDVI 影响显著的空间特征.

4.3 局限性和不确定性

本研究采用地理探测器识别塔里木河流域植被变化潜在影响因素的有效性和作用强度,此方法可以探究空间差异,解释潜在变量及其交互作用对植被变化的定量驱动.然而,本研究亦存在一定的局限性.首先,不同地域植被变化主导因子并不相同,因子选择可能受到其他研究成果影响(Wang *et al.*, 2020a).有研究表明,多种机制(如氮沉积、CO₂施肥)促进了植被生长(郭梦迪, 2021; 赵越等, 2023),然而考虑到数据的获取性和时空分辨特征,本研究未将氮沉积、CO₂施肥等因素纳入潜在因子,一定程度上会影响结果的准确性和科学性.其次,利用交互探测器可以得到任意两个因素之间的交互作用强度,然而植被生长可能受到多种因素耦合作用,定量确定多种因素的耦合作用有待进一步研究.最后,本研究分析了 2020 年较 2000 年的植被变化,忽略了过程驱动,这不利于塔里木河流域植被变化机制的精准分析.然而,尽管存在以上不足,本研究仍从一个新的角度分析了塔里木河流域的植被变化及其驱动机制,可为西北内陆干旱半干旱地区的生态保护提供一定的科学支持.

5 结论

本研究采用趋势分析和空间自相关方法,探究了塔里木河流域 2000—2020 年 NDVI 的时空变化特征,并基于地理探测器定量评估了潜在影响因素和交互作用对 NDVI 变化的影响.研究结果显示,2000—2020 年塔里木河流域 NDVI 呈北高南低、西高东低的空间特征,植被增加趋势显著.流域 NDVI 表现出较强的全局自相关性,高—高聚类类型逐步增加,溢出效应明显,低—低聚类逐渐减少,进一步

说明了研究区植被的改善.流域尺度上,土地利用转化、土壤类型、距人造地表距离是影响植被变化的主要因素,对 NDVI 变化的解释力分别为 22.20%、8.57%、8.28%.在子流域尺度上,降水是塔里木河流域北部的主导气候因子,而气温是研究区西部和南部的主要气候因子.较距水体的距离对 NDVI 的影响,距冰川和积雪的距离作用强度更大.土地利用转化、土壤类型是影响 NDVI 变化的全局因子,而降水、坡向、海拔和气温则是影响 NDVI 变化的空间局部因子.此外,任意两因素的交互作用可以提高对 NDVI 变化的解释力,且流域尺度上土地利用转化与土壤类型的交互作用最强.子流域尺度上,解释力最强的交互组合及强度存在差异,研究区北部降水、坡向与土地利用转化交互作用解释力较高,而在研究区南部海拔、气温与土地利用转化的交互作用解释力更强,土地利用转化与土壤类型的交互作用强度空间差异明显.本研究丰富了对塔里木河流域植被变化的认识,揭示了影响 NDVI 变化潜在因素的相对重要性及交互作用强度,可为塔里木河流域植被保护和可持续发展提供理论参考.

References

- Chu, H. S., Venevsky, S., Wu, C., et al., 2019. NDVI-Based Vegetation Dynamics and Its Response to Climate Changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650: 2051–2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>
- Guo, M. D., 2021. Vegetation Autumn Phenology and its Responses Toenvironmental Changes in the Mid-High Latitudes of the Northern Hemisphere Based on Remote Sensing Data (Dissertation). University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. Z., Zheng, X. D., Ma, L., et al., 2020. Quantitative Contribution of Climate Change and Human Activities to Vegetation Cover Variations Based on GA-SVM Model. *Journal of Hydrology*, 584: 124687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124687>
- Jeong, S. J., Ho, C. H., Gim, H. J., et al., 2011. Phenology Shifts at Start vs. End of Growing Season in Temperate Vegetation over the Northern Hemisphere for the Period 1982–2008. *Global Change Biology*, 17(7): 2385–2399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x>
- Jiang, N., Zhang, Q. Q., Zhang, S. C., et al., 2022. Spatial and Temporal Evolutions of Vegetation Coverage in the Tarim River Basin and Their Responses to Phenology. *CATENA*, 217: 106489. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106489>
- Li, R. H., Chen, N. C., Zhang, X., et al., 2020. Quantitative Analysis of Agricultural Drought Propagation Process in the Yangtze River Basin by Using Cross Wavelet Analysis and Spatial Autocorrelation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280: 107809. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107809>
- Li, X., Zhang, G. Z., Chen, Y. H., et al., 2022. Vegetation Cover Change and Driving Factors in the Agro-Pastoral Ecotone of Liaohe River Basin of China from 2010 to 2019. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(22): 63–72 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Li, W. L., Wang, W. Y., et al., 2021a. 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*, 206: 105500. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105500>
- Liu, C. X., Wu, X. L., Wang, L., 2019. Analysis on Land Ecological Security Change and Affect Factors Using RS and GWR in the Danjiangkou Reservoir Area, China. *Applied Geography*, 105: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.02.009>
- Liu, Q. H., Liu, L. S., Zhang, Y. L., et al., 2021b. Identification of Impact Factors for Differentiated Patterns of NDVI Change in the Headwater Source Region of Brahmaputra and Indus, Southwestern Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 125: 107604. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107604>
- Liu, Y., Li, Y., Li, S. C., et al., 2015. Spatial and Temporal Patterns of Global NDVI Trends: Correlations with Climate and Human Factors. *Remote Sensing*, 7(10): 13233–13250. <https://doi.org/10.3390/rs71013233>
- Meng, X. Y., Gao, X., Li, S. Y., et al., 2020. Spatial and Temporal Characteristics of Vegetation NDVI Changes and the Driving Forces in Mongolia during 1982–2015. *Remote Sensing*, 12(4): 603. <https://doi.org/10.3390/rs12040603>
- Mu, B. H., Zhao, X., Wu, D. H., et al., 2021. Vegetation Cover Change and Its Attribution in China from 2001 to 2018. *Remote Sensing*, 13(3): 496. <https://doi.org/10.3390/rs13030496>
- Mu, Y. R., Shen, W., 2022. Mathematical Problems in Engineering Landscape Ecological Security Assessment and Ecological Pattern Optimization of Inland River Ba-

- sins in Arid Regions: A Case Study in Tarim River Basin. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: 9476860. <https://doi.org/10.1155/2022/9476860>
- Nan, F. S., Li, Z. X., Zhang, X. P., et al., 2023. Particle Size Fractal Characteristics of Soils in Desert - Steppe Transition Zone along the Northern Bank of Yellow River Basin in Lanzhou. *Earth Science*, 48(3): 1195—1204 (in Chinese with English abstract).
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., et al., 2003. Climate - Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625): 1560—1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
- Peng, W. F., Kuang, T. T., Tao, S., 2019. Quantifying Influences of Natural Factors on Vegetation NDVI Changes Based on Geographical Detector in Sichuan, Western China. *Journal of Cleaner Production*, 233: 353—367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.355>
- Ren, H. R., Shang, Y. J., Zhang, S., 2020. Measuring the Spatiotemporal Variations of Vegetation Net Primary Productivity in Inner Mongolia Using Spatial Autocorrelation. *Ecological Indicators*, 112: 106108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106108>
- Wang, B., Xu, G. C., Li, P., et al., 2020a. Vegetation Dynamics and Their Relationships with Climatic Factors in the Qinling Mountains of China. *Ecological Indicators*, 108: 105719. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105719>
- Wang, C. Y., Wang, J. N., Cui, X., et al., 2021. Spatio-Temporal Change in Vegetation Patterns and Its Climatic Drivers in the Core Region of Three Parallel Rivers in Southeast Tibet. *Geographical Research*, 40(11): 3191—3207 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Liu, X. M., Zhao, C. Y., et al., 2021a. Spatial-Temporal Pattern Analysis of Landscape Ecological Risk Assessment Based on Land Use/Land Cover Change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 124: 107454. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107454>
- Wang, J. F., Li, X. H., Christakos, G., et al., 2010. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107—127. <https://doi.org/10.1080/13658810802443457>
- Wang, J. M., Ouyang, J. M., Zhang, M., 2020b. Spatial Distribution Characteristics of Soil and Vegetation in a Reclaimed Area in an Opencast Coalmine. *CATENA*, 195: 104773. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104773>
- Wang, X., Huo, A. D., Lü, J. Q., et al., 2023. Dynamic Changes and Driving Factors of Vegetation Coverage in the Mainstream of Tarim River, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(8): 284—292 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Xia, T. T., Shataer, R., et al., 2021b. Analysis of Characteristics and Driving Factors of Land - Use Changes in the Tarim River Basin from 1990 to 2018. *Sustainability*, 13(18): 10263. <https://doi.org/10.3390/su131810263>
- Wang, Y., Hao, L. N., Xu, Q., et al., 2023. Spatio-Temporal Variations of Vegetation Coverage and Its Geographical Factors Analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019. *Acta Ecologica Sinica*, 43(6): 2397—2407 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Gao, G. Y., Wang, X. F., et al., 2023. Quantifying the Contributions of Climate Change and Human Activities to Vegetation greening in the Drylands of Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 43(17): 7274—7283 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Xue, L. Q., Wei, G. H., et al., 2020. Assessing Vegetation Dynamics and Landscape Ecological Risk on the Mainstream of Tarim River, China. *Water*, 12(8): 2156. <https://doi.org/10.3390/w12082156>
- Zhang, J., Chen, H. S., Fu, Z. Y., et al., 2021a. Effects of Vegetation Restoration on Soil Properties along an Elevation Gradient in the Karst Region of Southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 320: 107572. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107572>
- Zhang, M., Wang, J. M., Li, S. J., 2019. Tempo-Spatial Changes and Main Anthropogenic Influence Factors of Vegetation Fractional Coverage in a Large-Scale Opencast Coal Mine Area from 1992 to 2015. *Journal of Cleaner Production*, 232: 940—952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.334>
- Zhang, Q. F., Sun, C. J., Chen, Y. N., et al., 2022a. Recent Oasis Dynamics and Ecological Security in the Tarim River Basin, Central Asia. *Sustainability*, 14(6): 3372. <https://doi.org/10.3390/su14063372>
- Zhang, Q., Yang, J. H., Duan, X. Y., et al., 2022b. The Eastward Expansion of the Climate Humidification Trend in Northwest China and the Synergistic Influences on the Circulation Mechanism. *Climate Dynamics*, 59(7): 2481—2497. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06221-4>
- Zhang, Q., Yang, J. H., Wang, W., et al., 2021b. Climatic

- Warming and Humidification in the Arid Region of Northwest China: Multi-Scale Characteristics and Impacts on Ecological Vegetation. *Journal of Meteorological Research*, 35(1): 113–127. <https://doi.org/10.1007/s13351-021-0105-3>
- Zhao, R. F., Chen, Y. N., Shi, P. J., et al., 2013. Land Use and Land Cover Change and Driving Mechanism in the Arid Inland River Basin: A Case Study of Tarim River, Xinjiang, China. *Environmental Earth Sciences*, 68(2): 591–604. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1763-3>
- Zhao, Y., Li, Z. X., Li, Z. P., et al., 2023. Temporal and Spatial Variation of Wet Deposition of Nitrogen in the Source Region of the Yangtze River. *Earth Science*, 48(3): 1179–1194 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Li, X. H., Liu, Y. S., 2020. Land Use Change and Driving Factors in Rural China during the Period 1995–2015. *Land Use Policy*, 99: 105048. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105048>
- Zhu, L. J., Meng, J. J., Zhu, L. K., 2020. Applying Geodetector to Disentangle the Contributions of Natural and Anthropogenic Factors to NDVI Variations in the Middle Reaches of the Heihe River Basin. *Ecological Indicators*, 117: 106545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106545>
- ### 中文参考文献
- 郭梦迪, 2021. 北半球中高纬植被秋季物候遥感提取及其环境响应机制(硕士学位论文). 成都: 电子科技大学.
- 李霞, 张国壮, 陈永昊, 等, 2022. 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. *农业工程学报*, 38(22): 63–72.
- 南富森, 李宗省, 张小平, 等, 2023. 黄河北岸兰州段荒漠—草原过渡带土壤粒径分形特征. *地球科学*, 48(3): 1195–1204.
- 王春雅, 王金牛, 崔霞, 等, 2021. 藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析. *地理研究*, 40(11): 3191–3207.
- 王星, 霍艾迪, 吕继强, 等, 2023. 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析. *农业工程学报*, 39(8): 284–292.
- 王一, 郝利娜, 许强, 等, 2023. 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. *生态学报*, 43(6): 2397–2407.
- 许丽, 高光耀, 王晓峰, 等, 2023. 气候变化和人类活动对中国北方旱区植被变绿的定量贡献. *生态学报*, 43(17): 7274–7283.
- 赵越, 李宗省, 李中平, 等, 2023. 长江源区大气氮湿沉降时空变化特征. *地球科学*, 48(3): 1179–1194.