

近30年塔克尔莫乎尔沙漠化土地的 时空格局演变及影响因子*

宋英¹, 来风兵^{1,2}, 黄凯铃¹, 庄筱芃¹, 祖拜代·吾布艾山¹

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要:塔克尔莫乎尔沙漠是伊犁河流域面积最大的沙漠,为我国典型西风带气候影响下发育的固定、半固定沙漠。基于GEE平台和Landsat影像,构建塔克尔莫乎尔沙漠1992—2023年Albedo-NDVI特征空间模型,并利用地理探测器模型定量分析影响其沙漠化演变的驱动力因素。结果表明:1)1992—1997年为发展期,以极重度沙漠化土地面积增加和重度沙漠化土地面积减少为主,1997—2023年为逆转期,以极重度及重度沙漠化土地面积减少和轻度及非沙漠化土地面积增加为主;2)沙漠化土地空间分布差异明显,极重度和重度沙漠化土地面积逐渐减少,轻度和非沙漠化土地面积明显增加,中西部沙漠化演化速度较快,东部沙漠化表现为极重度和重度沙漠化交替;3)塔克尔莫乎尔沙漠的演化受自然因子和人为因子共同作用,地形决定了其沙漠化土地的空间分布格局,政策因素发挥了重要作用。土地利用及覆盖变化(LUCC, land use and land cover change)、坡度、降水量的因子解释量排名靠前,分别为0.502、0.118和0.082,是主要驱动因素,且交互因子的作用明显大于单因子,表现出明显的非线性增强或双因子增强,无减弱或相互独立的形式。

关键词:塔克尔莫乎尔沙漠;沙漠化;Albedo-NDVI特征空间;地理探测器

中图分类号:K909 文献标志码:A 文章编号:2097-0137(2025)06-0149-11

Evolution of spatial-temporal patterns and driving factors of desertification in the Takermohuer Desert over the past 30 years

SONG Ying¹, LAI Fengbing^{1,2}, HUANG Kailing¹, ZHUANG Xiaopeng¹, ZUBAIDAI Wubuaishan¹

1. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China
2. Xinjiang Arid Area Lake Environment and Resources Laboratory, Urumqi 830054, China

Abstract: The Takermohuer Desert is the largest desert in the Ili River Basin and exemplifies a typical fixed and semi-fixed desert in China, formed under prevailing westerly climate influences. Using the Google Earth Engine (GEE) platform and Landsat imagery, this study developed an Albedo-NDVI feature space model for the Takermohuer Desert from 1992 to 2023 and applied the Geodetector model to analyze the driving factors behind desertification evolution quantitatively. The results show that: 1) From 1992 to 1997, the region experienced a development phase, marked by expanding extremely severe desertified land and shrinking severely desertified areas. Conversely, from 1997 to 2023, it entered a reversal phase, with decreases in extremely severe and severe desertified land, and increases

* 收稿日期:2025-05-07

录用日期:2025-08-01

网络首发日期:2025-10-22

基金项目:国家自然科学基金(42061003)

作者简介:宋英(2001年生),男;研究方向:资源环境遥感;E-mail:107622024210589@stu.xjnu.edu.cn

通信作者:来风兵(1977年生),男;研究方向:地理信息、资源环境遥感;E-mail:laifengbing@xjnu.edu.cn

全文阅读



ZR20250078

in mildly and non-desertified areas. 2) The spatial distribution of desertification varies significantly: areas with extremely severe and severe desertification gradually declined, while mild and non-desertified zones expanded significantly. Desertification progressed more rapidly in the central and western regions, while the eastern part displayed alternating phases of extremely severe and severe desertification. 3) The evolution of desertification was influenced by both natural and anthropogenic factors. Topography determined the spatial distribution pattern of desertified land, and policy factors play an important role. Land use and land cover change (LUCC), slope, and precipitation emerged as the main driving factors, with explanatory powers of 0.502, 0.118 and 0.082, respectively. The interaction between these factors was significantly stronger than individual effects, demonstrating either nonlinear or two-factor enhancements, without any weakening or independent influences.

Key words: Takermohuer Desert; desertification; Albedo-NDVI feature space; geodetector

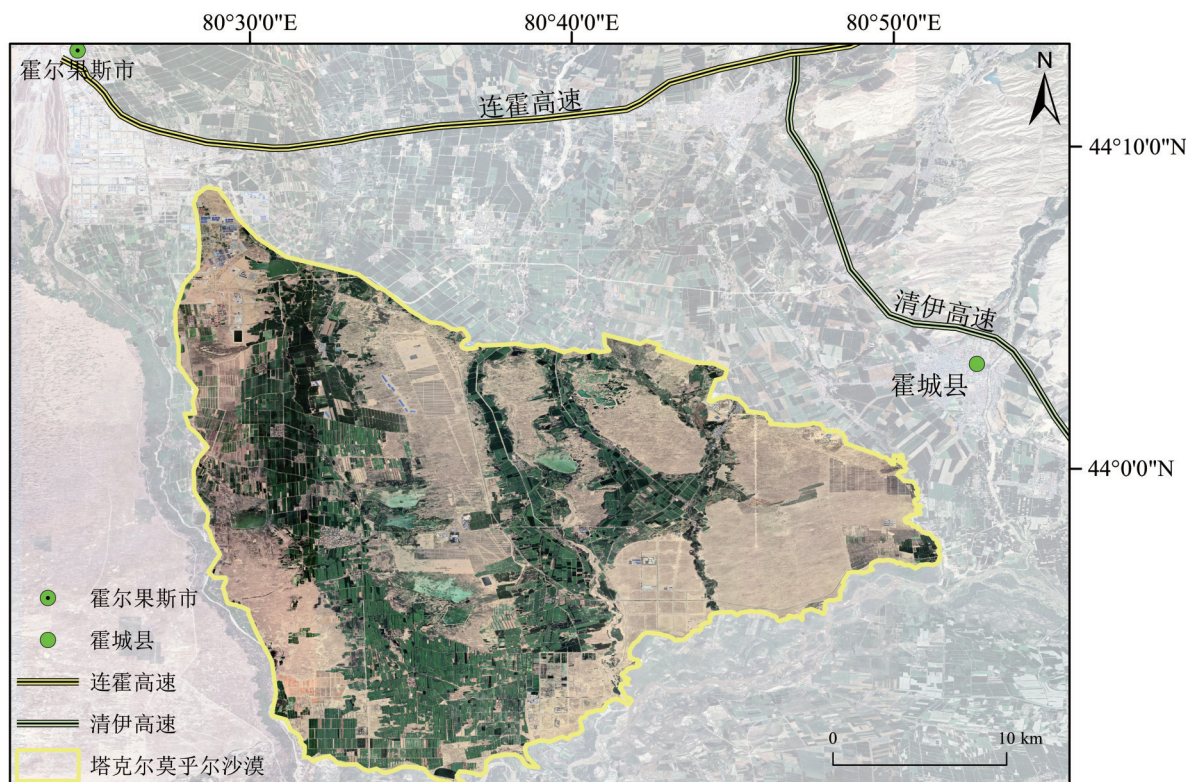
土地沙漠化一直都是全球性资源环境问题之一(朱震达,1998)。土地沙漠化是脆弱生态带内环境退化的主要表现形式,而沙漠化的发展又进一步加剧了脆弱生态带内生态平衡失调,对人类经济发展和生存环境构成严重威胁(朱震达,1991)。长期以来,沙漠化问题是中国主要的环境生态问题,是影响社会经济可持续发展的重要因素。防治沙漠化对维护环境安全、改善人民生活条件、促进社会发展具有重要意义(周日平,2019)。

随着高光谱遥感技术的突破,通过多源遥感数据协同反演关键地表参数,构建的荒漠化评价指标体系,实现了区域沙漠化时空动态的精准监测(康文平等,2014)。传统的沙漠化遥感监测方法以目视解译和人机交互解译等方法为主(王永芳,2016)。近年来,随着遥感光谱特征识别技术的发展,利用指标进行沙漠化监测的方法得到广泛应用。以往主要选取单一的地表参量如植被覆盖度(FVC, fractional vegetation cover)、地表反照率(Albedo)、归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)等作为沙漠化监测指标(吴小燕等,2022;刘三超等,2003;王莉雯等,2007),根据指标特征对不同区域进行沙漠化监测。这些指标可以在一定程度上反映区域的自然地理状况,但由于沙漠化演变原因的复杂性,由单一地表协变量构建的沙漠化指标并不能准确、全面地反映研究区域的沙漠化信息。因此,曾永年等(2006)提出将归一化植被指数和地表反照率进行拟合分析的方法,构建沙漠化遥感监测差值指数(DDI, desertification difference index)。该模型具有较高的沙漠化分类精度,为准确分析区域沙漠化的驱动因素提供了可靠依据(Ma et al.,2011)。

塔克尔莫乎尔沙漠为伊犁河流域面积最大的沙漠,是在西风带控制下形成的固定、半固定河谷型沙漠,人类活动导致其地表植被退化和土地沙化严重。目前,对于塔克尔莫乎尔沙漠关注较少,仅见于对塔克尔莫乎尔沙漠的发育模式(李志忠等,2008)、沉积环境(朱元璞等,2020)、沙丘形态(曾雅娟,2008)、粒度特征(凌智永等,2014)、土地利用和覆盖变化(LUCC, land use and land cover change)(刘巍,2009)等方面的少量研究。因此,本文以塔克尔莫乎尔沙漠为研究对象,构建Albedo-NDVI特征空间,结合沙漠化转移矩阵,利用地理探测器模型,探究1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠化土地的时空演变动态及自然、人为因素对其格局和演变的影响,为当地的沙漠治理和生态修复提供科技支撑。

1 研究区概况

塔克尔莫乎尔沙漠位于 $80^{\circ}27'00''\text{E}$ — $80^{\circ}51'28''\text{E}$ 、 $43^{\circ}55'18''\text{N}$ — $44^{\circ}01'28''\text{N}$,总面积约 485 km^2 ,由霍尔果斯沙漠、巴基泰沙漠、图开沙漠和惠远南沙窝等几个小沙漠构成(图1)。该区域属温带大陆性荒漠气候,年平均气温约 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均日温差 $13\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $140\sim 450\text{ mm}$,年均蒸发量 $1\ 400\sim 1\ 900\text{ mm}$,年均日照时数 $2\ 550\sim 3\ 000\text{ h}$,全年风速约 5 m/s ,风向以西南西风(WSW)为主(王佩等,2022),主要地貌有风蚀和风积2种类型。早期,人类活动(任意开垦、过度放牧、无休樵采等)导致沙漠植被日益减少(李学斌,1987),而后在伊犁河谷西部长期的沙漠生态治理过程中,霍城县和兵团坚持以植树造林防风治沙技术为根本措施,取得了良好的生态效益(张燕等,2014)。



审图号为GS(2024)0650号,底图边界无修改。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 沙漠化监测数据 本研究基于GEE平台,选用Landsat 5 TM地表反射率数据集(LANDSAT/LT05/C01/T1_SR)和Landsat 8 OLI地表反射率数据集(LANDSAT/LC08/C01/T1_SR),空间分辨率为30 m。为精准提取土地覆盖与沙漠化动态监测所需的特征信息,结合塔克尔莫乎尔沙漠实际情况和1992—2023年的遥感影像分析,以更直观地体现出研究区域内的沙漠化时空格局演变,本研究选取塔克尔莫乎尔沙漠1992、1997、2006和2011年的Landsat-TM影像,以及2017和2023年的Landsat-OLI影像,共6期具有代表性的年份。为保证目视判读的便利性和研究结果的可比性,所有图像的成像时间集中在7月上中旬至9月,在此期间图像成像质量较好,云量控制在3%以下。在完成遥感影像的遴选后,计算归一化植被指数与反照率。

2.1.2 驱动因子数据 本研究数据来源及分辨率如表1所示。由于研究区位于干旱区,本研究结合其他相关参考文献构建指标体系,主要包括地形、气候、气象和社会经济数据。地形数据通过下载

2023年高程获得,其中高程数据共下载4景,利用高程对研究区坡度和坡向数据进行提取;气候、气象数据包括气温、降水量、蒸散发量(气温和降水量分别指年平均气温和年降水量);社会经济数据包括GDP和LUCC,GDP数据由1990—2015年和2014—2020年2部分构成并分段使用,由于缺少2023年的GDP数据,因此采用相近年份代替。其中除GDP和LUCC选用1992、1997、2006、2011、2017、2020年的6期数据,其余因子均选用与遥感影像相对应年份进行分析。所有数据均用ArcGIS10.8进行裁剪、重采样、投影、重分类等方法进行预处理。年平均气温基于气象站点的经纬度,以及气象站点的逐日的平均气温数值,插值(反距离权重法插值)得到逐日的平均气温栅格图,统计出逐日的平均气温数值,基于此计算逐月的平均气温和逐年的平均气温。年降水量通过对逐月降水量的栅格值进行求和处理,得到逐年降水总量数据。土地利用类型根据研究区自然条件进行重分类,共分为沙地、耕地、林地、草地、水域、住宅区6类;坡度依次分为 $0^{\circ}\sim 2.31^{\circ}$ 、 $2.31^{\circ}\sim 4.46^{\circ}$ 、 $4.46^{\circ}\sim 7.93^{\circ}$ 、 $7.93^{\circ}\sim 13.55^{\circ}$ 、 $13.55^{\circ}\sim 42.13^{\circ}$,共5类;坡向依次分为 $-1^{\circ}\sim 38.58^{\circ}$ 、 $38.58^{\circ}\sim 82.41^{\circ}$ 、 $82.41^{\circ}\sim 129.06^{\circ}$ 、 $129.06^{\circ}\sim 177.12^{\circ}$ 、 $177.12^{\circ}\sim 225.19^{\circ}$ 、 $225.19^{\circ}\sim$

271.84°、271.84°~315.66°、315.66°~359.48°,共 8 类,其余因子依据研究区自然状况条件和原始数据分布特征,采用自然断点法进行重分类,分为 5 级。

表 1 驱动因子评估数据源

Table 1 Data sources for the assessment of driving factors

驱动因子	分辨率	时间范围	数据名称	数据来源
高程(海拔) 坡度/坡向	30 m	2023 年	数字高程模型(DEM)数据	https://www.gscloud.cn
气温	0.008 3°	1990—2023 年	中国逐年平均气温数据	https://www.ncei.noaa.gov
降水量	0.008 3°	1990—2023 年	中国逐月降水量数据集 (Peng et al., 2017)	https://data.tpdc.ac.cn
蒸散发量	1 km	1990—2023 年	逐月潜在蒸散发栅格数据 (Peng et al., 2017)	https://data.tpdc.ac.cn
GDP	1 km	1990—2015 年	全国逐年 GDP 栅格数据 (王灿等, 2022)	https://data.tpdc.ac.cn
	1 km	2014—2020 年	中国 GDP 栅格数据 (Zhao et al., 2017)	https://github.com
LUCC	30 m	1990—2020 年	土地覆盖类型产品数据 (徐新良等, 2018)	https://www.resdc.cn

2.2 研究方法

2.2.1 遥感指数计算 归一化植被指数能有效反映植被生产力,是监测区域沙漠化的最常用遥感指数,也是有效评价监测区生态环境动态变化的最佳指标(Duan et al., 2019):

$$I_{NDVI} = (N - R) / (N + R), \quad (1)$$

式中 I_{NDVI} 表示归一化植被指数, N 表示近红外波段的反射率, R 表示红波段的反射率。

地表反照率能有效反映地表状态和覆被类型(肖登攀等, 2011)。Liang 等(2001)通过多波段加权计算建立的地表反照率反演模型能够高效、准确地估算地表反照率。基于此,本研究采用 Liang (2001)建立的地表反照率反演模型估算塔克尔莫乎尔沙漠的地表反照率,表达式为:

$$A_{Albedo} = 0.356B + 0.13R + 0.373N + 0.085S_1 + 0.072S_2 - 0.0018, \quad (2)$$

式中 A_{Albedo} 表示地表反照率, B 表示蓝波段的反射率, S_1 和 S_2 分别表示 2 个中红外波段的反射率。

对塔克尔莫呼尔的 NDVI 和 Albedo 进行数据归一化处理:

$$A = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}), \quad (3)$$

式中 A 分别为归一化的 I_{NDVI} 和 A_{Albedo} , X_{max} 和 X_{min} 分别表示 I_{NDVI} 和 A_{Albedo} 的最大值和最小值。

2.2.2 构建 Albedo-NDVI 特征空间 根据曾永年等(2006)提出的方法构建塔克尔莫乎尔沙漠

Albedo-NDVI 特征空间。其上边界是高反照率线,表示干旱程度;下边界是低反照率线,表示最大的湿度条件,表达式为:

$$A_{Albedo} = a \times I_{NDVI} + b, \quad (4)$$

式中 a 和 b 分别为特征方程的系数和截距。

2.2.3 沙漠化差值指数计算 在 Albedo-NDVI 特征空间中,各类沙漠化土地所对应的 NDVI 与 Albedo 之间展现出显著的线性负相关关系。依据 Verstraete et al.(1996)的研究结论,可通过 Albedo-NDVI 特征空间干边的不同斜率划分出不同类型沙漠化土地,即利用干边斜率计算得到沙漠遥感监测差值指数模型。其中,干边斜率为 a ,按 $a \times k = -1$ 计算出 k 值,得出沙漠化差值指数(I_{DDI} , desertification difference index):

$$I_{DDI} = k \times I_{NDVI} - A_{Albedo}, \quad (5)$$

式中 k 为 A_{Albedo} 与 I_{NDVI} 拟合线的斜率。

2.2.4 沙漠化程度分级 Jenks 自然间断点法分级法可根据最优值法得出分界点,并自动选择方差值最小的分类情况,得到最优分类结果(李乃强等, 2020)。由于各年份遥感影像时相不同,计算得出的 I_{DDI} 存在一定差异。因此,利用自然间断点分级法结合谷歌高清影像来确定 I_{DDI} 阈值,可避免不同年份、不同分级标准造成的长时间序列数据不具有可比性的问题。本研究把塔克尔莫乎尔沙漠历年

的 I_{DDI} 结果分为极重度沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化、轻度沙漠化以及无沙漠化5个等级(表2)。

表2 塔克尔莫乎尔沙漠 I_{DDI} 分级

Table 2 I_{DDI} classification for the Takermohuer Desert

年份	I_{DDI}				
	极重度	重度	中度	轻度	无
1992	0~0.50	0.50~0.56	0.56~0.65	0.65~0.75	≥ 0.75
1997	0~0.22	0.22~0.35	0.35~0.50	0.50~0.66	≥ 0.66
2006	0~0.21	0.21~0.34	0.34~0.50	0.50~0.67	≥ 0.67
2011	0~0.22	0.22~0.37	0.37~0.54	0.54~0.70	≥ 0.70
2017	0~0.36	0.36~0.49	0.49~0.63	0.63~0.76	≥ 0.76
2023	0~0.28	0.28~0.39	0.39~0.50	0.50~0.61	≥ 0.61

2.3 沙漠化土地转移矩阵

沙漠化土地转移矩阵的原理主要源于马尔科夫模型,其能通过计算沙漠化土地类型之间相互转化的转移概率矩阵,来定量揭示各沙漠化土地类型之间相互转化的状况(宁龙梅等,2004):

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 i 和 j 分别为研究初期与末期沙漠化土地类型,对角线值 P_{ii} 表示初期地类保持不变的概率,非对角线值 P_{ij} 表示初期地类 i 的土地末期转变为地类 j 的概率, n 为沙漠化土地类型数量。

2.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法(王劲峰等,2017)。本文主要使用因子探测器和交互探测器,因子探测可表示为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{SSW}}{S_{SST}}, \quad (7)$$

$$S_{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad (8)$$

$$S_{SST} = N \sigma^2, \quad (9)$$

式中 h 、 L 表示驱动因子的分类, N_h 和 N 分别为类 h 和全区的单元数, σ_h^2 和 σ^2 分别是类 h 和全区的因变量的方差, S_{SSW} 和 S_{SST} 分别为类内方差之和与全区总方差。

交互探测器可以研究2种不同的驱动因子对因变量 Y 的交互作用,通过与单因子探测时的 q 值进行比较,评估双因子交互作用对因变量的解释量。

双因子之间的交互作用类型引自王劲峰等(2017)的分类标准,可依次分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强共5种。

本研究以土地沙漠化差值指数为因变量(Y),地形、气候气象和社会经济作为自变量(X),样本均匀性是确保数据无偏性的基础前提,为了避免稀疏网格导致的空间信息缺失和过密网格产生的冗余数据,确保样本点均匀分布在研究区内,本研究创建了行列数 100×100 的渔网,共生成5317个均匀分布的样本点,经过异常值处理后,最终有效使用5012个样本。

3 结果与分析

3.1 监测信息验证

基于 Albedo-NDVI 特征空间模型,本研究获取了塔克尔莫乎尔沙漠6期的沙漠化土地分类结果。考虑到早期年份分类结果的验证难度较大,本研究仅对2023年的沙漠化分类结果进行精度验证。通过 ArcGIS10.8 随机创建120个样本点,样本点均匀分布在塔克尔莫乎尔沙漠中。同时,结合 Google Earth 提供的同时期高分辨率影像,对检验点进行目视解译。基于2023年 Albedo-NDVI 特征空间的沙漠化土地分类结果,构建精度评价混淆矩阵(表3),并分析不同沙漠化类型的生产精度、用户精度以及总体精度的差异。

依据混淆矩阵的精度评价结果显示,沙漠化等级分类正确的样本点数为105个。各沙漠化等级的用户精度范围介于80%~96.43%,生产者精度范围介于80%~100%,总体分类精度达到87.50%,Kappa系数为0.8429。结果表明,本研究采用的分类方法与沙漠化差异指数的分类结果高度一致,分类效果较为理想,验证了该方法在沙漠化土地范围分类中的可行性和可靠性。

3.2 沙漠化时空演变

3.2.1 沙漠化时间变化 塔克尔莫乎尔沙漠占地面积约485 km²,1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠以极重度和重度沙漠化土地类型为主,各类沙漠化面积整体有所减少。1997年之前由于对沙漠保护的忽视和不合理利用,导致沙漠面积不断扩大,之后霍城县实施的各项林业重点生态工程使其生态治理取得了显著效果。因此,1992—2023年,沙漠化呈现出先发展后逆转的趋势(图2)。

在此期间,极重度沙漠化面积从190.04 km²缩减至151.81 km²,重度沙漠化面积从198.36 km²缩减

表3 2023年沙漠化分类精度验证混淆矩阵¹⁾

Table 3 Confusion matrix for accuracy validation of desertification classification in 2023

类别	极重度	重度	中度	轻度	未沙漠化	总计	用户精度/%
极重度	27	1	0	0	0	28	96.43
重度	2	20	1	0	0	23	86.96
中度	0	2	17	2	0	21	80.95
轻度	0	1	3	23	0	27	85.19
未沙漠化	0	0	0	3	18	21	85.71
总计	29	24	21	28	18	120	—
生产精度/%	93.10	83.33	80.95	82.14	100.00	—	—
总体精度/%	87.50						
Kappa系数	0.8429						

1)空白表示无此项或未测量,“—”表示测量过而未发现。

至 110.78 km²,极重度和重度荒漠化面积持续减少,各沙漠化类型之间互相转化,但主要以极重度向重度转化、重度向中度和轻度转化为主,轻度和无沙漠化土地面积分别增加了 69.48 和 49.44 km²,中度沙漠化面积也略有增加,增幅为 6.35 km²(表 4、图 3)。具体来看,1992—1997年,极重度沙漠化土地动态度达到 7.06%,表明该时段内极重度沙漠化面积增加(增加了 67.09 km²),但是重度荒漠化面积减少了 75.20 km²,同时轻度和无沙漠化面积分别增加了 6.47 和 7.93 km²,整体反映出沙漠化扩张的趋势。然而,1997—2006年,沙漠化土地净减少了 32.92 km²,其中 15.48%的极重度沙漠化土地转为中度沙漠化土地,非沙漠化面积显著增加,其主要原因是 1997年后防护林生态工程取得了显著效果,进一步证实沙漠化逆转的趋势。

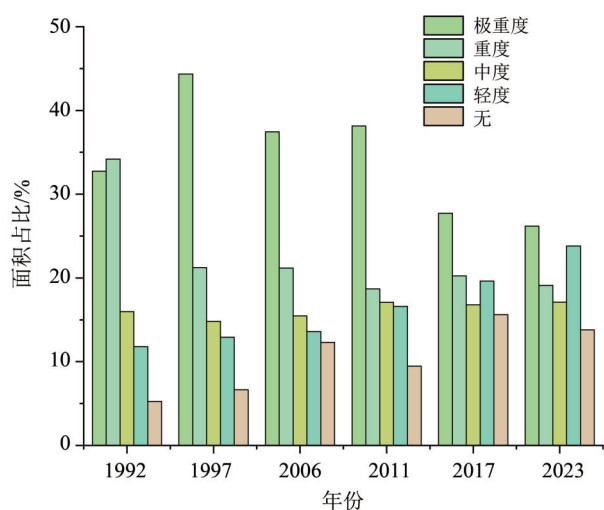


图2 各沙漠化类型面积占比

Fig. 2 Area proportion of desertification types

2006—2011年,塔克尔莫乎尔沙漠的重度和无沙漠化土地动态度分别为-2.47%和-4.69%,表明这两类土地面积分别减少 15.17 和 16.75 km²;与此同时,轻度沙漠化面积增加 16.44 km²,反映出该时段内沙漠化呈现扩张趋势。然而,2011—2017年,沙漠化土地净减少了 60.71 km²,其中主要逆转类型为极重度沙漠化土地,同时非沙漠化面积显著增加了 35.81 km²,表明该时段沙漠化呈现明显的恢复态势。2017—2023年,极重度和重度沙漠化土地动态度分别为-0.92%和-0.94%,其面积分别减少了 8.84 和 6.63 km²;而轻度和中度沙漠化土地动态度均为正值,面积分别增加了 1.82 和 24.30 km²,说明该时段沙漠化持续恢复并趋于稳定。综上所述,1992—2023年,塔克尔莫乎尔沙漠的沙漠化整体呈现先发展后逆转的趋势。

3.2.2 沙漠化空间变化 1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠以中度和轻度沙漠化类型为主,且主要分布在其中部,极重度沙漠化主要分布在西部、南部边缘处,重度沙漠化土地面积较小且呈零星分布(图 4)。

1992—1997年,塔克尔莫乎尔沙漠的轻度和非沙漠化土地分布范围缩小,沙漠化程度整体加重,极重度沙漠化土地分布范围显著扩大。1997—2006年,极重度和重度沙漠化土地面积显著减少,沙漠化程度明显改善,研究区域东部图开沙漠的极重度沙漠化土地面积减少,整体以中度和轻度沙漠化类型为主。2006—2011年,塔克尔莫乎尔沙漠中东部极重度沙漠化土地分布范围明显扩大,轻度与无沙漠化土地面积呈现增长态势,而重度、中度荒漠化土地面积仅出现小幅扩张,整体沙漠化治理成

表4 沙漠化土地面积动态变化
Table 4 Changes of desertified land area

年份	类型	极重度	重度	中度	轻度	未沙漠化
1992—1997年	面积变化/km ²	67.09	-75.20	-6.83	6.47	7.93
	动态度/%	7.06	-7.58	-1.47	1.89	5.19
1997—2006年	面积变化/km ²	-39.78	-0.18	3.80	3.96	32.92
	动态度/%	-1.72	-0.02	0.49	0.59	9.51
2006—2011年	面积变化/km ²	2.71	-15.17	8.86	16.77	-16.75
	动态度/%	0.25	-2.47	1.98	4.25	-4.69
2011—2017年	面积变化/km ²	-59.41	9.60	-1.30	17.98	35.81
	动态度/%	-4.50	1.48	-0.22	3.13	10.92
2017—2023年	面积变化/km ²	-8.84	-6.63	1.82	24.30	-10.47
	动态度/%	-0.92	-0.94	0.31	3.56	-1.93
1992—2023年	面积变化/km ²	-38.22	-87.58	6.35	69.48	49.44
	动态度/%	-0.65	-1.42	0.22	3.27	5.22

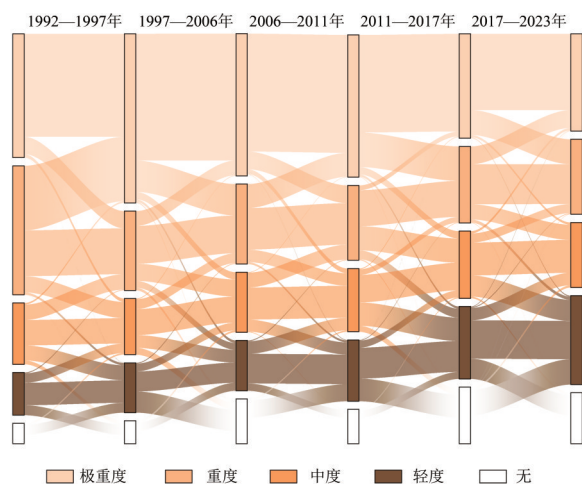


图3 沙漠化土地转变

Fig. 3 Transformation of desertified land

效显现,沙漠化趋势持续向良性方向发展。2011—2017年和2017—2023年,塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化治理进展加快,东南部极重度沙漠化土地面积逐年减少,主要转化为轻度和无沙漠化土地,重度和中度沙漠化土地面积也呈现整体减少趋势。

综上所述,1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化状况总体呈改善趋势,主要表现为极重度和重度沙漠化土地转化为轻度和非沙漠化土地,中度沙漠化土地显著减少,表明塔克尔莫乎尔沙漠的生态环境状况趋于改善,土地沙漠化发展较为稳定,并持续向良性方向发展。

3.3 塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化驱动因子分析

3.3.1 单因子分析 根据地理探测器因子探测结果(图5),1992年,各因子对塔克尔莫乎尔沙漠土地

沙漠化的解释量 $LUCC > 坡度 > 蒸散发量 > 气温 > GDP > 降水量 > 高程 > 坡向$,其中LUCC、坡度以及蒸散发量的解释量明显高于其他因子, q 值分别为0.433 1、0.087 2、0.075 5,可见塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化受人类活动、地形因素和蒸散发量影响较大。1997和2006年解释量均为 $LUCC > 坡度 > 蒸散发量 > 降水量 > 气温$,虽然比上一年各影响因子的 q 值有所不同,但解释量最强的因子仍为LUCC和坡度。2011年和2017年相较前几年,降水量的 q 值有所增加,分别为0.101 9、0.089 1,2个年份的前四 q 值排序为 $LUCC > 坡度 > 降水量 > 蒸散发量$,虽然降水量的 q 值有所增加,但解释量最强的因子还是LUCC,值得注意GDP是这两年解释量最低的因子。2023年,各因子对塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化的解释量按 q 值排序为 $LUCC > 降水量 > 蒸散发量 > 坡度 > 高程 > 气温 > GDP > 坡向$,LUCC的解释量持续稳定,但降水量的 q 值为0.108 0仅次于LUCC,其他因子的解释量虽然有所增加,但LUCC和降水量是主要的驱动因子。各年份LUCC均为解释量最高的因子,其 q 值平均值为0.502 0远高于其他因子,这与塔克尔莫乎尔沙漠实际情况相符,人类活动占据了主导地位。

综合来看,不同驱动因子在不同时期对塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化影响存在较大差异,但LUCC、坡度、蒸散发量和降水量在各个时期的解释量均较大,逐渐成为影响该区域的主要驱动因子,也表明该区域土地沙漠化是多重影响因子综合作用的结果。

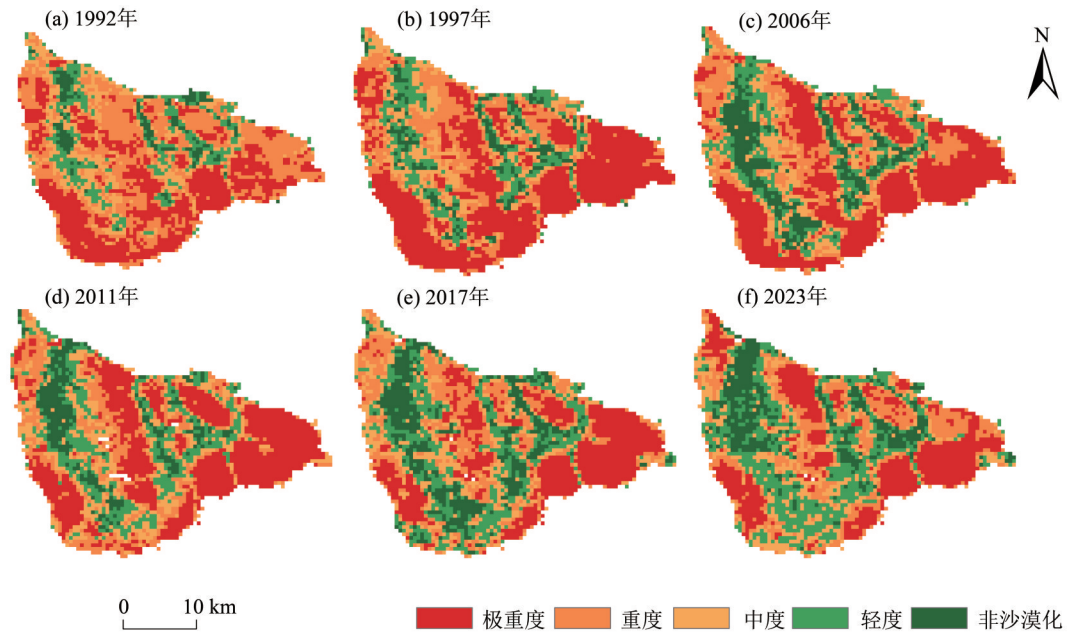


图4 土地沙漠化时空分布

Fig. 4 Spatial-temporal distribution of land desertification

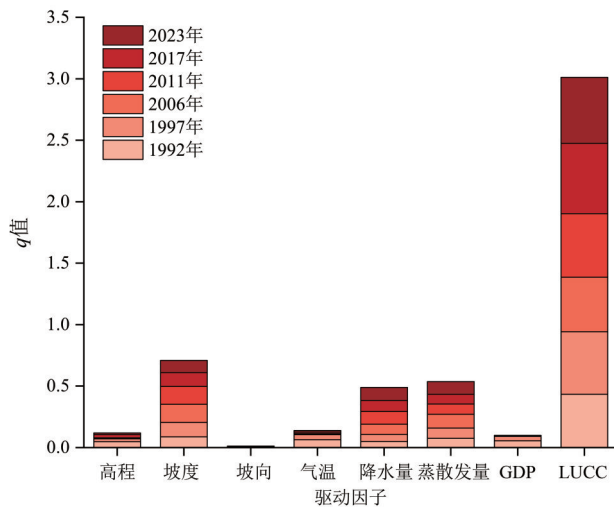


图5 沙漠化单因子探测

Fig. 5 Single-factor detection of desertification

3.3.2 交互因子分析 分别用高程(DEM)、坡度(SLP)、坡向(ASP)、气温(TEMP)、降水量(PRCP)、蒸散发量(ET)、GDP、土地利用变化(LUCC)等驱动因子进行两两交互,结果显示各因子间交互作用后对塔克尔莫乎尔沙漠化演变过程的解释量均大于单因子作用且均表现为非线性增强或双因子增强,不存在减弱或相互独立形式(图6)。

1992年,DEM∩LUCC和TEMP∩LUCC因子的解释量最大,2个时段的q值分别为0.5540和0.5480。这说明此时段地形、气候条件与社会经济发展水平是塔克尔莫乎尔沙漠化的主导因素,与单因素分析结果相似。1997年,TEMP∩ET、PRCP∩ET在

该时段位于前列,表明此时段内气候因素中的气温变化与降水量逐渐成为塔克尔莫乎尔沙漠化演变的主要因素。1997—2011年相较前几年交互作用后的q值有上升趋势,TEMP∩LUCC、ET∩LUCC排在前列,同时段内单因子q值也呈上升趋势,尤其是ET∩LUCC的q值达到0.5660,说明在该时段内气候因素的变化已经稳定影响塔克尔莫乎尔沙漠的沙漠化演变。2017年相较于1997年主要驱动因子相似,TEMP∩LUCC、ET∩LUCC为主要驱动因素,与1997年不同的是q值明显增加,同时其他双因子交互的q值也呈上升趋势。2023年ET∩LUCC的q值仍为主要驱动因子,但DEM∩LUCC的q值相较前几年又重新占据主导地位,其余各交互因子的q值普遍有所下降,所以此时段地形又变为塔克尔莫乎尔沙漠化土地沙漠化的主导因素。

总的来说,1992—2023年沙漠化的发展演化是在自然条件不利的背景下,由于人类活动所带来结果,不同时期由于不同原因主要驱动因子均有所变化,进一步说明了塔克尔莫乎尔沙漠化演化过程的复杂程度。

4 讨论

4.1 土地沙漠化时空分布格局特征

时间上,1992—2023年,塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化主要体现为极重度和重度沙漠化面积有所减少,而轻度和无沙漠化面积显著增加,即塔克

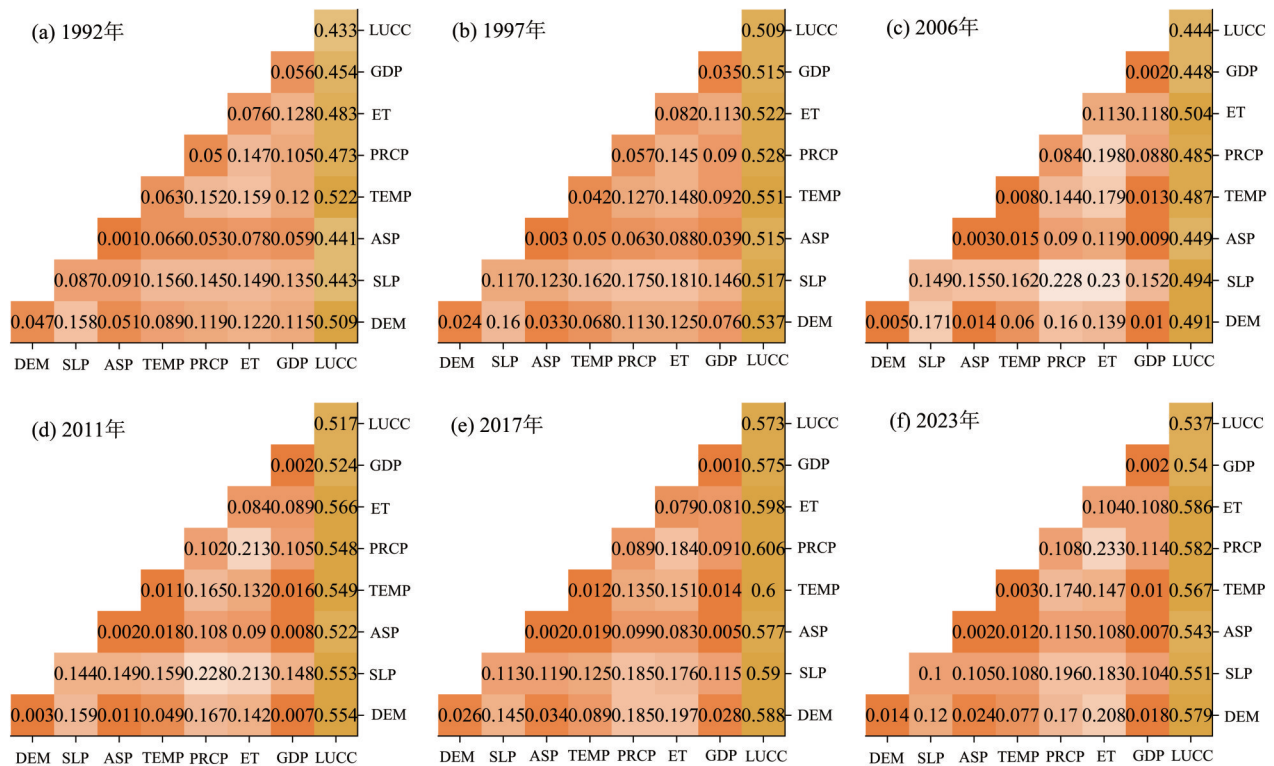


图6 塔克尔莫乎尔沙漠驱动因子交互探测

Fig. 6 Interactive detection of drivers in the Takermohuer Desert

尔莫乎尔沙漠土地沙漠化程度呈整体逆转趋势。值得注意的是1997年之前,重度和中度沙漠化类型占主要面积,但1997年极重度沙漠化面积比重却持续增加。主要原因是长期以来人们忽视对沙漠的保护和不合理利用,造成沙尘暴频发,沙漠面积不断扩大(李学斌,1987)。1987年后,霍城县在实施三北防护林工程、防沙治沙工程、退耕还林工程等林业重点生态工程中取得了显著成效(王友文等,2014)。截至2011年,霍城县的绿化覆盖率达到38.61%,绿地率为34.38%(张铁,2011)。在干旱半干旱的生态环境背景下(年均降水量 ≤ 300 mm,蒸发量 ≥ 2000 mm),霍城县通过系统性植被恢复与绿地建设工程,实现了区域绿量的显著提升。正是通过对塔克尔莫乎尔沙漠实施一系列生态修复工程、综合治理和精准施策,才使得其沙漠化发展呈逆转趋势。

空间上,塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化呈现明显的空间差异性,和东部地区相比较,中西部沙漠化程度较轻且整体改善趋势明显,而东部则表现为极重度和重度沙漠化交替。主要原因在于地形和人类活动的影响,东部地区受到人类活动的干扰程度更大,原本植被条件也远远低于中西部,进而呈现出明显的空间差异性。但是塔克尔莫乎尔沙漠

分布在山前河谷地带,且霍城县气候比较湿润、水资源丰富、地表径流多(钱亦兵,1985),同时近年来国家一系列规划、制度相继出台,构建起完备、高效的防沙、治沙法治体系,相关执法力度不断增强;“三北”防护林体系建设、退耕还林还草、沙化土地封禁保护修复等一批重点工程得以实施(杨梦帆,2025),所以塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化趋势得以改善并趋于稳定向良性发展。总的来说,塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化趋势的改善是人为和自然因素综合作用的结果,二者缺一不可。

4.2 塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化驱动因素

本研究通过地理探测器驱动因子探测分析结果,得出1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化演化的主要驱动因素为人类活动、坡度和降水量:

1) 人类活动主导。从空间上看,中西部沙漠化程度较轻且整体沙漠化改善趋势明显,东部地区表现为极重度和重度沙漠化交替。从时间上看,主要发生变化的地类有耕地、草地、和沙地,主要的流向为沙地、草地向耕地转化以及耕地向农村居民点转化(刘巍,2009),说明人类活动在塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化演变中起主导作用。这与连杰等(2012)的结论一致,认为由于人类生产力及科技水

平的增长,现代沙漠化过程对人为因子的响应快于自然因子。D'Odorico et al.(2013)也认为相较于自然因子,人类活动能够在短时间内影响沙漠化的动态趋势,对沙漠化的影响具有双重性。

2)地形约束空间格局。从单因子和双因子探测分析结果可知,1992—2023年坡度的 q 值排名稳定且逐年增加,其 q 值平均值为0.118 2,是影响塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化的主要驱动因子。通过对比遥感影像图,发现坡度的空间分布与塔克尔莫乎尔沙漠土地沙漠化空间分布高度相似,说明地形因子对于其土地沙漠化空间分布具有决定性。这与李志忠等(2008)发现塔克尔莫乎尔沙漠受伊犁河谷地形干扰一致,勿吉斯古冷等(2025)也认为地形因素能通过影响水分分布和水土流失间接影响沙漠化进程。

3)降水提高恢复契机。本研究发现,1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠整体呈现增温、增湿的趋势,整体降水量空间分布差异不大,降水量分布较为稳定,但蒸散发量与沙漠化土地分布基本一致,东部地区蒸散发量相较于中西部较大,极重度和重度沙漠化土地较为集中。干旱、半干旱区降水量的变化是影响沙漠化的关键因子之一(郭瑞霞等,2015),降水量对干旱、半干旱地区植被的生长起着关键作用,对其沙漠化的恢复有重要影响。Hu et al.(2020)通过研究影响哈萨克斯坦土地沙漠化原因,发现降水量减少、气温升高及高强度的农作物种植是驱动沙漠化的关键因素。

综上所述,1992—2023年塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化演化主要受人类活动、地形和气候变化的交替影响,其中LUCC、坡度和降水量是主要驱动因子,说明在塔克尔莫乎尔沙漠的土地沙漠化演化过程中气候变化、人类活动及地形贡献较大。

参考文献:

- 郭瑞霞,管晓丹,张艳婷,2015.我国荒漠化主要研究进展[J].干旱气象,33(3):505-513.
- 康文平,刘树林,2014.沙漠化遥感监测与定量评价研究综述[J].中国沙漠,34(5):1222-1229.
- 李乃强,徐贵阳,2020.基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J].测绘通报(4):106-110+156.
- 李学斌,1987.大面积围栏封沙育林育草的探讨[J].新疆农业科技(1):44-45.

5 结论

本研究通过GEE平台,应用构建NDVI-Albedo特征空间方法,并利用地理探测器结合自然因子和人为因子进行分析。得出以下结论:

1)在研究时段内,塔克尔莫乎尔沙漠沙漠化经历了先发展后逆转的演变过程。1992—1997年为发展期,极重度沙漠化面积增加了67.09 km²,重度荒漠化面积减少了75.20 km²,在沙漠化发展时期以极重度沙漠化土地面积增加和重度沙漠化土地面积的减少为主,2种沙漠化土地的动力度分别为7.06%和-7.58%。1997—2023年为逆转期,表现为以极重度和重度沙漠化土地面积减少,轻度及非沙漠化土地面积增加为主的特征。

2)塔克尔莫乎尔沙漠的沙漠化土地空间分布差异明显,极重度和重度沙漠化面积逐渐减少,轻度和非沙漠化面积则明显增加且呈上升趋势,中西部沙漠化进程演化速度较快,东部地区沙漠化表现为极重度和重度沙漠化交替。

3)塔克尔莫乎尔沙漠的沙漠化演化受自然因子和人为因子的共同作用。其中,地形决定了研究区沙漠化土地的空间分布格局,政策通过调控LUCC间接影响沙漠化。从单因子分析来看,LUCC、坡度和降水量因子解释量排名位居前列, q 值平均值均高于其他因子,分别为0.502、0.118和0.082,是影响其沙漠化演变的主要驱动因素。从交互因子分析来看,交互因子的作用明显大于单因子,表现出明显的非线性增强或双因子增强,无减弱或相互独立形式。

受研究时间和条件限制,本研究仅讨论了塔克尔莫乎尔沙漠的时空格局演化及其影响因子,长时间尺度的沙漠化监测、形成机制及与中亚地区沙漠化之间存在的联系等问题,有待进一步深入研究。

- 李志忠,武胜利,陈蜀江,等,2008.伊犁塔克尔莫乎尔沙漠风沙地貌初步研究[J].新疆农业科学,45(S3):113-118.
- 连杰,赵学勇,左小安,等,2012.科尔沁沙地水域景观格局的时空动态——以奈曼旗为例[J].中国沙漠,32(1):210-218.
- 凌智永,李志忠,李廷伟,等,2014.塔克尔莫乎尔沙漠抛物线形沙丘的粒度分布模式[J].中国沙漠,34(2):

- 325-331.
- 刘三超,张万昌,蒋建军,等,2003.用TM影像和DEM获取黑河流域地表反射率和反照率[J].地理科学,23(5):585-591.
- 刘巍,2009.基于RS与GIS的伊犁塔克尔莫乎尔沙漠绿洲交错带土地利用/覆盖变化研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学.
- 宁龙梅,王学雷,胡望斌,2004.利用马尔科夫过程模拟和预测武汉市湿地景观的动态演变[J].华中师范大学学报(自然科学版),38(2):255-258.
- 钱亦兵,1985.新疆伊犁塔克尔穆库尔沙漠砂的特征与沙源的关系[J].中国沙漠,5(2):38-45.
- 王灿,王嘉琛,2022.中国历史GDP空间分布公里网格数据集(1990—2015)[EB/OL].(2022-07-25)[2024-04-21].<https://doi.org/10.12078/2017121102>.
- 王劲峰,徐成东,2017.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,72(1):116-134.
- 王莉雯,牛铮,卫亚星,2007.基于MODIS NDVI的新疆土地覆盖类型划分与潜在荒漠化区域探测[J].干旱区地理,30(4):573-578.
- 王佩,马倩,朱元璞,等,2022.新疆塔克尔莫乎尔沙漠北缘灌丛沙堆表层沉积物粒度特征[J].甘肃农业大学学报,57(1):139-144+153.
- 王永芳,2016.基于多源数据融合与DPSIR模型的科尔沁沙地沙漠化生态风险评价[D].长春:东北师范大学.
- 王友文,张燕,2014.新疆伊犁河谷西部沙漠生态治理与民生改善互动的实证分析[J].实事求是(6):81-84.
- 勿吉斯古冷,那日苏,丽娜,等,2025.2001—2020年呼伦贝尔草原土地沙漠化敏感性时空格局演化[J].干旱区地理,48(5):825-837.
- 吴小燕,高永,党晓宏,等,2022.1989—2019年库布齐沙漠植被覆盖度的时空变化[J].水土保持通报,42(2):300-306.
- 肖登攀,陶福祿,MOIWO J P,2011.全球变化下地表反照率研究进展[J].地球科学进展,26(11):1217-1224.
- 徐新良,刘纪远,张树文,等,2018.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL].(2018-07-02)[2024-04-21].<http://www.resdc.cn/DOI>.
- 杨梦帆,2025.塔克拉玛干沙漠被锁记[N].农民日报,2025-03-12(8).
- 曾雅娟,2008.基于DEM的伊犁塔克尔莫乎尔沙漠抛物线沙丘形态及其成因研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学.
- 曾永年,向南平,冯兆东,等,2006.Albedo-NDVI特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J].地理科学,26(1):75-81.
- 张铁,2011.开发建设为树草让路[N].伊犁日报(汉),2011-04-14(2).
- 张燕,王友文,2014.民生视角下的塔克尔莫乎尔沙漠生态治理——传统技术与新型技术比较研究[J].生态经济,30(11):156-160+164.
- 周日平,2019.中国荒漠化分区与时空演变[J].地球信息科学学报,21(5):675-687.
- 朱元璞,马倩,吉小芳,2020.新疆塔克尔莫乎尔沙漠表层沉积物磁化率特征及环境意义[J].干旱区资源与环境,34(6):124-130.
- 朱震达,1991.中国的脆弱生态带与土地荒漠化[J].中国沙漠,11(4):11-22.
- 朱震达,1998.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,18(2):145-155.
- D'ODORICO P, BHATTACHAN A, DAVIS K F, et al, 2013. Global desertification: Drivers and feedbacks [J]. *Adv Water Resour*, 51: 326-344.
- DUAN H, WANG T, XUE X, et al, 2019. Dynamic monitoring of aeolian desertification based on multiple indicators in Horqin Sandy Land, China [J]. *Sci Total Environ*, 650: 2374-2388.
- HU Y, HAN Y, ZHANG Y, 2020. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan [J]. *J Arid Environ*, 180: 104203.
- LIANG S, 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms [J]. *Remote Sens Environ*, 76(2): 213-238.
- MA Z, XIE Y, JIAO J, et al, 2011. The construction and application of an albedo-NDVI based desertification monitoring model [J]. *Procedia Environ Sci*, 10: 2029-2035.
- PENG S, DING Y, WEN Z, et al, 2017. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. *Agric For Meteor*, 233: 183-194.
- VERSTRAETE M M, PINTY B, 1996. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 34(5): 1254-1265.
- ZHAO N, LIU Y, CAO G, et al, 2017. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images [J]. *GISci Remote Sens*, 54(3): 407-425.