

基于多源遥感的塔克拉玛干沙漠边缘生态屏障 植被演替格局

王籽福

山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月19日

摘要

塔克拉玛干沙漠是中国最大的流动性沙漠, 评估其边缘“绿色长城”生态屏障的长期演替格局, 对极端干旱区生态工程的可持续管理具有重要意义。本研究以塔克拉玛干沙漠边缘生态屏障为对象, 构建1990~2024年多源归一化植被指数(NDVI)数据集, 以联合国防治荒漠化公约(UNCCD)推荐的土地生产力退化监测框架为核心方法, 按工程建设进程分为四个阶段识别绿化核心区与退化区的时空格局。结果表明: (1) 1990~2024年研究区植被演替呈显著四阶段特征, 整体经历了由“块”到“片”再到“带”的空间扩张过程, 2017年后扩张明显放缓。(2) 绿化成效具有显著空间非均质性, 北缘和西缘优于南缘和东南缘。(3) 国家生态工程政策与区域水资源禀赋共同塑造了植被演替的时空格局。本研究旨在为客观评价“绿色长城”生态成效与优化后续治理策略提供遥感定量依据。

关键词

塔克拉玛干沙漠, 生态屏障, 归一化植被指数(NDVI), 植被演替

Patterns of Vegetation Succession in the Ecological Barrier along the Taklamakan Desert Based on Multi-Source Remote Sensing

Zifu Wang

College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong

Received: April 13, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

The Taklamakan Desert is the largest mobile desert in China. Assessing the long-term succession patterns of the “Great Green Wall” ecological barrier along its margins is of great significance for the sustainable management of ecological projects in extremely arid regions. This study focuses on the ecological barrier along the Taklamakan Desert. A multi-source Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dataset spanning from 1990 to 2024 was constructed, and the land productivity degradation monitoring framework recommended by the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) was adopted as the core methodology. The study period was divided into four stages according to the progression of project construction to identify the spatiotemporal patterns of core greening areas and degraded areas. The results show that: (1) Vegetation succession in the study area from 1990 to 2024 exhibited distinct four-stage characteristics, undergoing an overall spatial expansion process from “patches” to “clusters” and further to “belts”, with expansion notably decelerating after 2017. (2) Greening effectiveness displayed significant spatial heterogeneity, with the northern and western margins outperforming the southern and southeastern margins. (3) National ecological project policies and regional water resource endowments jointly shaped the spatiotemporal patterns of vegetation succession. This study aims to provide a quantitative remote sensing basis for objectively evaluating the ecological effectiveness of the “Great Green Wall” and optimizing subsequent governance strategies.

Keywords

Taklamakan Desert, Ecological Barrier, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Succession

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

荒漠化是全球面临的最严峻生态环境问题之一，严重制约区域生态安全与经济社会发展。中国是世界上荒漠化最严重的国家之一，北方分布有八大沙漠和四大沙地，荒漠化土地面积 257 万平方公里，占国土面积的 26.81%，防治任务极为艰巨。塔克拉玛干沙漠作为中国面积最大、世界第二大流动性沙漠，生态环境极为脆弱，是中国荒漠化防治的重中之重。为遏制沙害，中国自 1978 年起实施“三北”防护林等系列国家级生态工程，历经四十余年在沙漠边缘构建起全长 3046 公里的“绿色长城”生态屏障，实现了局部区域从“沙进人退”到“人进沙退”的历史性转变。

遥感技术凭借其大尺度、长时序的观测优势，已成为评估宏观生态治理成效的核心手段。早在 20 世纪 90 年代，王涛等[1]便基于多时相陆地卫星影像构建了沙质荒漠化程度分级与遥感判别指标体系，为中国北方大型生态工程的遥感评估奠定了方法基础。归一化植被指数(NDVI)作为反映植被覆盖状况的核心遥感指标，也已被广泛应用于区域植被变化研究。近年来，基于长时序 NDVI 数据的研究从多个尺度证实了中国的“变绿”趋势及其人为驱动性。金凯等[2]的研究表明，1982~2015 年中国植被整体呈显著恢复趋势，人类活动对植被 NDVI 增加的贡献率(60%)超过气候变化(40%)。聚焦到塔克拉玛干沙漠及其边缘地带的植被变化，在沙漠中心，Peng 等[3]以达里雅布依绿洲为对象，使用 NDVI 数据发现 2000~2020

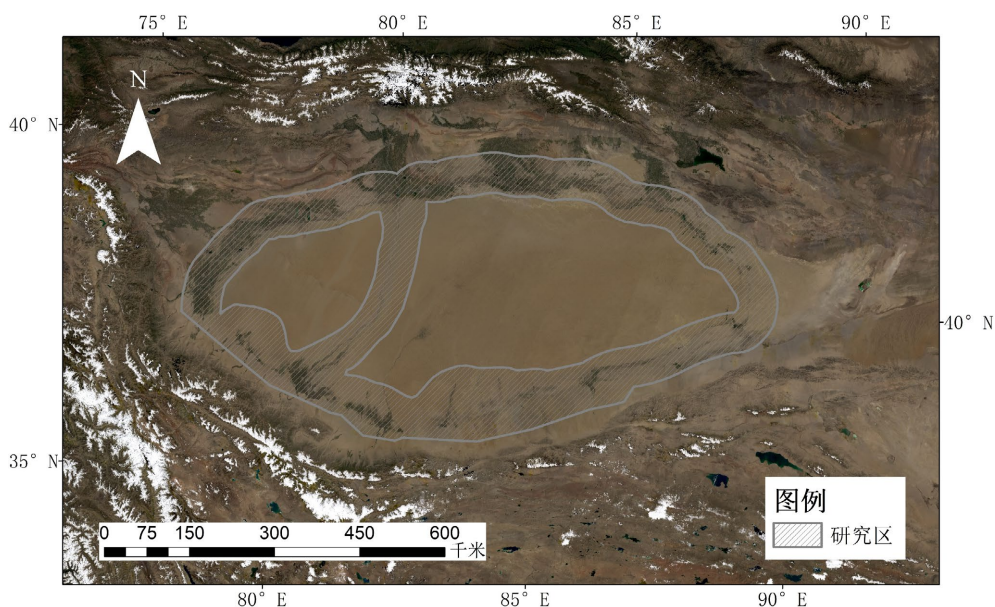
年绿洲植被整体呈变绿趋势；在沙漠北缘，Ding 等[4]基于 2000~2019 年 NDVI 数据的分析表明，阿克苏河流域植被覆盖在此期间显著增加。上述研究从不同角度证实了塔克拉玛干及其边缘植被状况的改善态势，但多聚焦于某一局部或单一时段，尚未对覆盖整个“绿色长城”生态屏障、跨越工程完整建设周期的长时序演变过程进行系统刻画。

鉴于此，本研究以塔克拉玛干沙漠边缘区域为研究对象，依托 Google Earth Engine (GEE)平台，整合 1990~2024 年 Landsat 与 MODIS 多源遥感数据，系统开展“绿色长城”的长时序演替评估。为突破单一指标的评估局限，本研究引入联合国防治荒漠化公约(United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD)推荐的土地生产力指标监测体系，从趋势(Trend)、状态(State)和绩效(Performance)三个维度进行综合评估[5]。该多维框架已在半干旱非洲、欧亚草原、内蒙古等区域的监测实践中得到验证，能够准确捕捉植被覆盖变化[6]-[8]。在此基础上，本研究依据工程建设进程，定量识别四个阶段下绿化核心区与退化区的时空格局，旨在为客观评价极端干旱区“绿色长城”的长期生态成效与优化后续治理策略提供遥感定量依据。

2. 研究区域与数据概况

2.1. 研究区概况

塔克拉玛干沙漠地处新疆塔里木盆地，南依昆仑-阿尔金山，北靠天山，西起帕米尔高原，东至罗布泊，东西长约 1000 千米，南北宽约 400 千米，整体面积达 33 万多平方公里，是中国最大的沙漠。该区域属极端干旱大陆性气候，平均年降水约 10~80 毫米，平均蒸发量极高，生态系统结构简单且对外部干扰高度敏感。受极端恶劣的环境制约，沙漠周缘的绿洲生态安全长期面临严重威胁。为此，本研究将环塔克拉玛干沙漠的“绿色长城”生态屏障作为核心评估对象(图 1)。在空间分布上，该屏障主要位于沙漠边缘的“荒漠-绿洲过渡带”上；在构成上，它是由大规模人工防风固沙林与天然耐旱植被等共同交织而成的环状复合生态系统。



注：影像来源于 Landsat-8，通过 Google Earth Engine 平台获取，图 2 同。

Figure 1. Study area location map

图 1. 研究区位图

2.2. 数据来源与预处理

为对该屏障 1990~2024 年植被演替过程进行长时序监测,本研究整合了多源遥感影像数据。主体分析采用 MODIS MOD13Q1 数据集(空间分辨率 250 米) [9],用于 2000~2017 年时段的核心 NDVI 时序分析。1990~2000 年时段由于 MODIS 尚未投入运行,改用 Landsat Collection 2 Tier 1 Level 2 32-Day NDVI Composite 数据集(基于 Landsat-5,空间分辨率 30 米) [10] 补全。2017~2024 年近期时段,鉴于 MODIS 后期因传感器老化与轨道漂移存在数据质量退化风险 [11] [12],本阶段改用 Landsat-8(空间分辨率 30 米) [13] 替代。为消除多源数据的时空尺度差异,依托 GEE 平台,将 Landsat 数据重采样至 250 m,并结合辐射定标、最大值合成法(MVC)与阈值约束构建了标准化的年际 NDVI 数据集。为评估多源传感器在长时序监测中的一致性,本研究在两个数据衔接节点(2000~2002 年、2013~2016 年)开展了重叠期像元级交叉验证,结果显示两个节点的 Pearson 相关系数均大于 0.92。此外,本研究在各评估阶段内均独立使用单一传感器数据计算各指标,未进行跨传感器的时间序列直接拼接。综上,本研究构建的 NDVI 时序数据集可满足分阶段准确识别绿化核心区与退化区的精度需求。

3. 方法

为准确评估植被的长期变化,本研究依据“绿色长城”的建设进程,将 1990~2024 年划分为四个阶段(1990~2000 年、2000~2010 年、2010~2017 年、2017~2024 年)。在此时间框架下,以 NDVI 为基础变量,采用 UNCCD 推荐的土地退化监测体系,从以下三个维度量化像元的土地生产力特征:

(1) 趋势(Trend): 采用 Sen 斜率与 Mann-Kendall 检验法,量化评估每个像元植被在时间序列上的长期变化趋势及其显著性。当 $Sen\ Slope$ (Sen 斜率值) > 0 且 $MK\ Zscore$ (Mann-Kendall 检验 Z 统计量) > 1.96 时像元被归类为“改善”,当 $Sen\ Slope < 0$ 且 $MK\ Zscore < -1.96$ 时像元被归类为“退化”。

(2) 状态(State): 通过计算目标时段与基准时段年均 NDVI 的标准化差异($State\ Zscore$, 状态 Z 统计量),判断植被状况是否发生了统计学上显著的改善或退化。当 $State\ Zscore > 1.96$ 时像元被归为“改善”, $State\ Zscore < -1.96$ 时像元被归为“退化”。

(3) 绩效(Performance): 计算目标期实际观测 NDVI 与同类生态区第 90 百分位 NDVI 的比值,评估当前植被生产力相对于生态潜力的实现程度。当 $Performance$ (绩效比值) < 0.5 时像素被归类为“退化”。

当某一区域同时满足 $Sen\ Slope > 0$ 、 $MK\ Zscore > 1.96$ 且 $State\ Zscore > 1.96$ 时,判定为绿化核心区;当区域同时满足 $Sen\ Slope < 0$ 、 $MK\ Zscore < -1.96$ 、 $State\ Zscore < -1.96$ 且 $Performance < 0.5$ 时,判定为退化区。

4. 结果

基于 UNCCD 土地生产力退化监测框架,本研究从趋势、状态和绩效三个维度综合识别了 1990~2024 年研究区绿化核心区与退化区的时空格局。结果显示,研究区植被演替呈现显著的阶段性特征,绿化成效在空间上表现出明显的非均质性(图 2)。以下按工程建设进程分四个阶段逐期呈现。

第一阶段(1990~2000 年): 绿化核心区面积为 12,497 km²,占研究区总面积的 6.31%,以孤立斑块形式分散分布于沙漠北缘和西缘水源条件相对较好的地区,各斑块之间空间连通性较弱,尚未形成连片的防护体系。

第二阶段(2000~2010 年): 绿化核心区面积急剧扩大至 16,145 km²,占研究区总面积的 8.15%,较上一阶段增加约 3648 km²,为四个阶段中绿化面积最大的时期。北缘绿带显著加宽并向东延伸,西缘、南缘及东缘绿化斑块数量明显增多,初步呈现出环绕沙漠边缘的带状分布雏形。

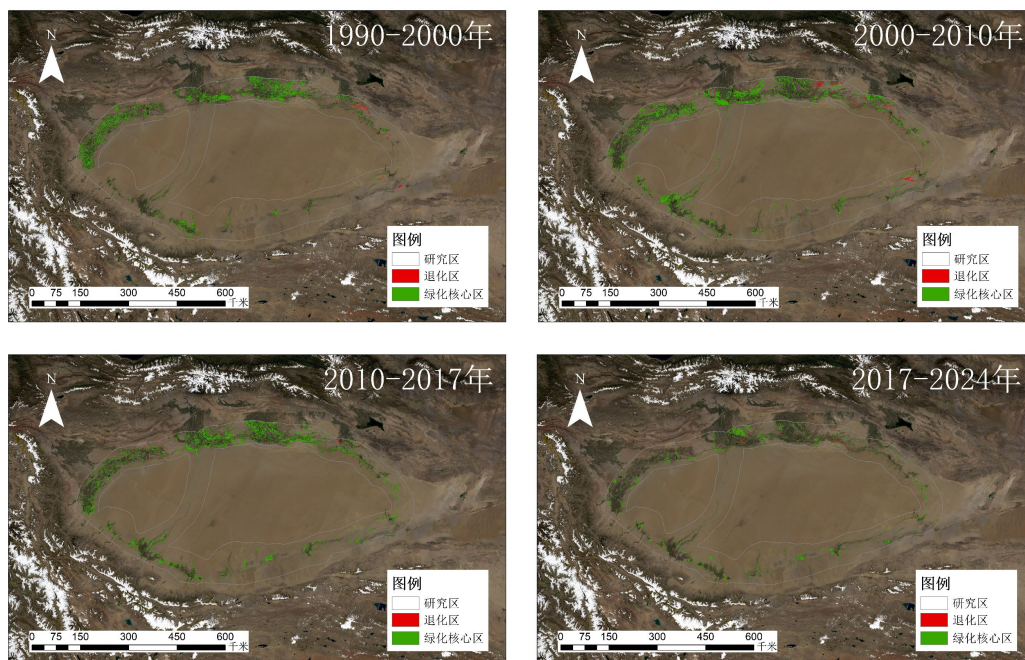


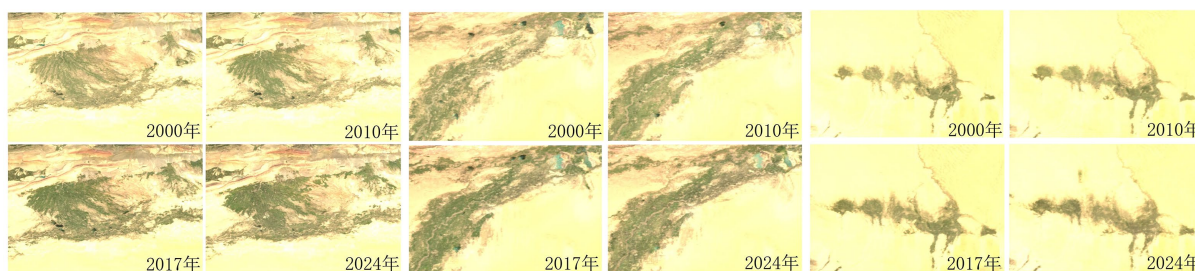
Figure 2. Spatial distribution of core greening and degraded areas across four stages (1990~2024)
图 2. 1990~2024 年研究区绿化核心区与退化区四阶段空间分布图

第三阶段(2010~2017年): 绿化核心区面积为 14,686 km², 占研究区总面积的 7.42%, 较上一阶段略有回落, 但空间连通性显著提升。北缘形成较完整的東西向绿色廊道, 各缘斑块连通性增强, “绿色长城”环状骨架基本成形, 工程进入体系化巩固阶段。

第四阶段(2017~2024年): 绿化核心区面积大幅收缩至 6854 km², 占研究区总面积的 3.46%, 绿化核心区向沙漠腹地的空间扩张速度明显放缓。

综上, 沙漠北缘和西缘是整个研究期内绿化成效最显著、最连续的区域; 南缘和东南缘亦有明显绿化斑块, 但空间连续性相对较弱。退化区在整个研究期内始终零星存在, 占比维持在 0.30%, 未随绿化工程的扩展而同步扩张。

典型区域验证



注: 左侧为研究区北缘库车市, 中间为西缘巴楚县, 右侧为南缘策勒县。

Figure 3. Visual validation of vegetation changes in typical sample areas
图 3. 典型样区植被变化目视验证图

为进一步验证基于 NDVI 识别的植被演替格局, 本研究选取研究区北缘库车市、西缘巴楚县及南缘策勒县为代表, 利用多时相遥感真彩色影像进行目视对比(图 3)。影像显示, 库车与巴楚在 2000~2024 年

间, 植被覆盖由斑块状显著扩张为连续的绿洲外缘防护带, 视觉变化与所识别出的绿化核心区空间分布图高度吻合。相比之下, 策勒县在此时段内绿化扩张范围有限, 部分防护林带呈现稀疏、不连续特征, 印证了南缘生态修复的长期性与艰巨性。此外, 由于严格的判定标准研究区内退化像元呈零星、动态分布且不具规模化趋势, 故不作重点展示。

5. 讨论

本研究识别的四阶段植被演替格局, 是国家生态治理工程投入与干旱区水资源刚性约束共同塑造的综合结果。

首先, 在时序演进上, 国家宏观政策与工程重点的转移主导了植被扩张的节奏。2000年之前研究区绿化核心区呈孤立斑块形态, 这与三北防护林一至三期工程(1978~2000年)为建设起步阶段直接对应, 这一时期塔克拉玛干沙漠边缘尚未形成有组织的连片防护体系。2000~2017年间, 随着西部大开发战略的深入推进与三北防护林四期、五期工程的实施, 生态治理进入规模化推进阶段。本研究观测到绿化核心区在此阶段(特别是2000~2010年)出现剧烈的面积跃升, 并于2010~2017年进一步实现带状连接。这一遥感观测规律与前人实证研究高度吻合, 例如陈亚宁等[14]指出, 2000年塔里木河下游实施生态输水后, 沿岸浅层地下水位持续抬升, 为天然植被的存活与横向扩张提供了关键水分; 罗敏等[15]在流域尺度的研究也证实了2000~2013年人类活动是平原绿洲植被生长的主要驱动力。2017年以后绿化核心区空间扩张速度的显著放缓, 并非工程的停滞, 而是治理模式从“增量扩张”向“艰难攻坚”与“存量提质”转变的直接反映。这表明, 在适宜造林空间趋于饱和的背景下, 生态工程已实质性进入质量巩固与格局优化的新阶段。

其次, 在空间格局上, 依据水源补给类型, 可将研究区边缘大致划分为冰雪融水补给主导的北缘与西缘(邻近天山南麓与帕米尔高原), 以及地表径流相对匮乏的南缘与东南缘(昆仑山北麓及罗布泊方向)。这两类水文单元的绿化成效差异在本研究的遥感结果中得到了清晰体现: 北缘和西缘的绿化成效明显优于南缘和东南缘。这种空间分异主要受制于区域水资源本底的限制。相关研究表明, 新疆水资源整体呈现“北多南少、西多东少”的分布特征[16], 受降水量和冰雪融水等水分条件的影响, 新疆植被覆盖度总体从西北向东南逐渐下降, 植被显著改善区域主要分布在天山南北麓、塔克拉玛干沙漠绿洲边缘等各绿洲外围地带[17]。这一文献交叉证据不仅印证了本研究的观测结果, 也为揭示绿化核心区空间分布的内在水文驱动机制提供了重要支撑。具体而言, 北缘和西缘邻近天山南麓和帕米尔高原, 冰雪融水与山地径流形成相对充裕的水源补给, 为植被定植和存活提供了必要的水文基础; 而南部和东南缘径流补给量明显不足, 地下水位较低, 即便人工造林投入充足, 植被恢复的成活率和持续性均面临更大挑战。马森等[18]对塔里木河流域的研究进一步在实证层面印证了这一规律, 流域NDVI的空间分布整体呈“北部大于南部、西部大于东部”的梯度特征, 与本研究遥感识别的绿化核心区空间格局高度吻合。

尽管自然水分梯度设定了宏观格局, 但人工干预的介入正在局部重塑绿化空间的边界。在极端缺水的南缘和田地区、且末县等地的滴灌造林实践表明, 技术介入可在局部区域取得显著成效; 但这种依赖人工干预的绿化模式面临双重限制: 一方面是超高的前期建设与后期管护成本限制了其大规模的空间连续扩展; 另一方面, 大规模抽取地下水维持人工林, 极易诱发如孙帆等[19]所揭示的因水位下降导致的天然植被衰减风险, 进而阻碍荒漠生态系统的自然更新。因此, 南缘和东南缘绿化斑块连续性较弱的现象, 本质上是水资源匮乏背景下, 技术经济成本与生态安全阈值共同作用的必然结果。从更宏观的可持续性视角审视, 本研究识别的绿化成效与空间扩张放缓并存的格局揭示了一个根本性张力: 以高强度人工补水维持的绿化扩张, 在短期内可产生显著的防沙固土与生态服务效益, 但其长期可持续性取决于区域水资源总量的硬约束。当抽取地下水的速率超过自然补给速率时, 绿化成效本身将成为加速水资源耗

竭的因素之一，形成“绿化-耗水-原生植被退化”的潜在负反馈。因此，评价“绿色长城”的生态成效，不能仅以绿化面积为单一指标，还需将水资源消耗代价纳入综合核算体系，以确保生态工程在水资源承载力范围内实现真正意义上的长期稳定。

综上所述，本研究基于长时序遥感观测揭示的四阶段植被演替格局表明，水资源的空间可达性是制约极端干旱区生态修复工程成效的首要约束条件。工程规划应以区域水文基础为前提，在人工修复与自然恢复之间寻求平衡，以确保生态治理成效在资源环境承载力范围内的长期稳定。同时后续监测的重点亦应从绿化面积的增量扩张转向现有植被斑块的连通性与长期稳定性评估。

6. 结论

本文通过对塔克拉玛干沙漠边缘长时序植被演替格局的监测与分析，得出以下主要结论：

(1) 研究区植被演替呈现显著的四个阶段特征。1990~2000 年绿化核心区以孤立斑块状分布；2000~2010 年规模化扩张，带状雏形显现；2010~2017 年体系化骨架成形，空间连通性增强；2017 年后扩张速度明显放缓。

(2) 绿化成效具有显著的空间非均质性。北缘和西缘的绿化成效明显优于南缘和东南缘。

(3) 国家政策导向与水资源刚性约束共同决定了植被演化的时空格局。重大生态工程投入是驱动植被时序扩张的核心动力，区域水分梯度差异是制约空间分异的内在机制。

致 谢

感谢 Google Earth Engine 平台提供的数据与计算支持。同时，感谢匿名审稿人对本文提出的宝贵建议与修改意见。

参考文献

- [1] 王涛, 吴薇, 王熙章. 沙质荒漠化的遥感监测与评估——以中国北方沙质荒漠化区内的实践为例[J]. 第四纪研究, 1998(2): 108-118.
- [2] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982-2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [3] Peng, L., Wan, Y., Shi, H., Anwaier, A. and Shi, Q. (2023) Influence of Climate, Topography, and Hydrology on Vegetation Distribution Patterns-Oasis in the Taklamakan Desert Hinterland. *Remote Sensing*, **15**, Article 5299. <https://doi.org/10.3390/rs15225299>
- [4] Ding, Y., Feng, Y., Chen, K. and Zhang, X. (2024) Analysis of Spatial and Temporal Changes in Vegetation Cover and Its Drivers in the Aksu River Basin, China. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 10165. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60575-9>
- [5] Sims, N., Newnham, G., England, J., Guerschman, J., Cox, S., *et al.* (2021) Good Practice Guidance. Sdg Indicator 15.3.1: Proportion of Land That Is Degraded over Total Land Area. Version 2.0.
- [6] Reith, J., Ghazaryan, G., Muthoni, F. and Dubovyk, O. (2021) Assessment of Land Degradation in Semiarid Tanzania—Using Multiscale Remote Sensing Datasets to Support Sustainable Development Goal 15.3. *Remote Sensing*, **13**, Article 1754. <https://doi.org/10.3390/rs13091754>
- [7] Du, Z., Yu, L., Chen, X., Gao, B., Yang, J., Fu, H., *et al.* (2024) Land Use/cover and Land Degradation across the Eurasian Steppe: Dynamics, Patterns and Driving Factors. *Science of the Total Environment*, **909**, Article 168593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168593>
- [8] Zhao, L., Jia, K., Liu, X., Li, J. and Xia, M. (2023) Assessment of Land Degradation in Inner Mongolia between 2000 and 2020 Based on Remote Sensing Data. *Geography and Sustainability*, **4**, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.01.003>
- [9] Didan, K. (2015) MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data Set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
- [10] Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (2020) Landsat 4-5 Thematic Mapper Level-2, Collection 2

- [Dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9IAXOVV>
- [11] Wang, D., Morton, D., Masek, J., Wu, A., Nagol, J., Xiong, X., *et al.* (2012) Impact of Sensor Degradation on the MODIS NDVI Time Series. *Remote Sensing of Environment*, **119**, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.001>
- [12] Twedt, K.A., Xiong, X., Geng, X., Wilson, T. and Mu, Q. (2023) Impact of Satellite Orbit Drift on MODIS Earth Scene Observations Used in Calibration of the Reflective Solar Bands. *Earth Observing Systems XXVIII*, 12685, Article 1268500. <https://doi.org/10.1117/12.2676873>
- [13] Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (2020) Landsat 8-9 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [Dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>
- [14] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水对植被的影响[J]. 地理学报, 2003(4): 542-549.
- [15] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000-2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63.
- [16] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331-1341.
- [17] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966.
- [18] 马森, 张代青, 张惠, 等. 塔里木河流域 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(4): 76-83.
- [19] 孙帆, 王弋, 陈亚宁. 塔里木盆地荒漠-绿洲过渡带动态变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3397-3407.