

# 基于 Landsat 8 的库布齐沙漠 2000—2023 年 沙漠化动态变化分析

姜志伟<sup>1,2,3</sup>, 杨智博<sup>1,2,3</sup>, 杨清<sup>4</sup>, 左合君<sup>1,2,3</sup>, 王召明<sup>5</sup>, 王君芳<sup>5</sup>, 田磊<sup>5</sup>

[1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古农业大学 内蒙古风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3.内蒙古农业大学 内蒙古杭锦旗荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古呼和浩特 010018;

4.乌海市公用事业发展中心, 内蒙古 乌海 016000; 5.蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010030]

**摘要:** [目的] 探究库布齐沙漠 2000—2023 年沙漠化时空动态变化规律, 旨在为库布齐沙漠植被恢复及生态建设提供理论参考和基础数据支持。[方法] 基于 Landsat 遥感影像特征, 采用 EVI 遥感指数灰度分割, 土地沙漠化程度分级、土地利用动态度、多度指数和重要度指数, 研究了库布齐沙漠及其周边地区 2000—2023 年土地沙漠化的时空分布和变化趋势。[结果] 库布齐沙漠的沙漠化总面积从 2000 年的 10 694.6 km<sup>2</sup> 下降到 2023 年 8 837.56 km<sup>2</sup>。极重度沙漠化面积已由当初的 6 272.11 km<sup>2</sup>, 缩减为 1 461.15 km<sup>2</sup>, 重度沙漠化面积由 2000 年的 1 773.97 km<sup>2</sup>, 上升到 2 874.48 km<sup>2</sup>, 中度沙漠化面积由 2000 年的 1 372.16 km<sup>2</sup> 上升到 1 965.84 km<sup>2</sup>, 轻度沙漠化的土地面积由 1 276.35 km<sup>2</sup> 上升到 2 535.58 km<sup>2</sup>。从时间序列角度分析来看, 2000—2023 年间极重度沙漠缩减速率为 3.33%, 重度沙漠化增加速率为 2.70%, 中度沙漠化增加速率为 1.88%, 轻度沙漠化缩减速率为 4.29%。极重度沙漠土地类型面积从 2000 年的 6 272.11 km<sup>2</sup> 下降到 2023 年的 1 461.65 km<sup>2</sup>, 合计流失面积为 4 949.72 km<sup>2</sup>。从空间角度分析, 极重度沙漠类型随时间变化由分布分散变为分布集中, 在 2000—2010 年内在沙漠中占据主导地位; 重度和中度沙漠化类型的多度指数处于 7.69%~16.15% 之间, 说明重、中度沙漠化类型长期分布较为集中; 轻度沙漠化类型随时间变化分散且较为广泛。[结论] 2000—2023 年库布齐沙漠面积总体呈减少趋势, 生态环境有所改善, 未来该区域生态修复重点关注极重度沙漠区域。

**关键词:** 库布齐沙漠; Landsat 数据; EVI; 沙漠化

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)06-0118-11

**中图分类号:** X171.4, P237

**文献参数:** 姜志伟, 杨智博, 杨清, 等. 基于 Landsat 8 的库布齐沙漠 2000—2023 年沙漠化动态变化分析 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 118-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.013; Jiang Zhiwei, Yang Zhibo, Yang Qing, et al. Analysis on dynamic change of desertification in Kubuqi Desert during 2000—2023 based on Landsat 8 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 118-128.

## Analysis on Dynamic Change of Desertification in Kubuqi Desert During 2000—2023 Based on Landsat 8

Jiang Zhiwei<sup>1,2,3</sup>, Yang Zhibo<sup>1,2,3</sup>, Yang Qing<sup>4</sup>, Zuo Hejun<sup>1,2,3</sup>, Wang Zhaoming<sup>5</sup>, Wang Junfang<sup>5</sup>, Tian Lei<sup>5</sup>

[1. School of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia

010018, China; 2. Key Laboratory of Sand Physics and Sand Control Engineering of Inner Mongolia,

Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Inner Mongolia Hangjin

Desert Ecosystem National Positioning Observation Research Station, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 4. Wuhai Public Utilities Development Center, Wuhai, Inner Mongolia

016000, China; 5. Mengcao Ecological Environment (Group) Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010030, China]

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial dynamic changes of desertification in the Kubuqi Desert

收稿日期: 2024-03-01

修回日期: 2024-08-20

资助项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(42161054); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0081); 荒漠化防治与沙区资源保护利用创新团队-BR241301; 沙漠沙地生态保护与治理技术创新团队-NMGIRT2408

第一作者: 姜志伟(1981—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 高级工程师, 主要从事定量遥感、多源数据融合、陆地生态过程模拟等方向研究。Email: zhiweijiang@imau.edu.cn.

通信作者: 杨智博(1998—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区乌海市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治方面的研究。Email: 1119203120@qq.com.

during 2000—2023 were investigated, aiming to provide theoretical references and basic data support for the restoration of vegetation and ecological construction. [Methods] Based on the features of Landsat remote sensing images, the spatial and temporal distribution and change trend of land desertification in the Kubuqi Desert and its surrounding areas from 2000 to 2023 were studied by using enhanced vegetation index (EVI) remote sensing index gray segmentation, land desertification degree classification, land use dynamic attitude, abundance index and importance index. [Results] The total desertification area in the Kubuqi Desert decreased from 10 694.6 km<sup>2</sup> in 2000 to 8 837.56 km<sup>2</sup> in 2023. The area of extreme desertification was reduced from 6 272.11 km<sup>2</sup> to 1 461.15 km<sup>2</sup>, that of severe desertification increased from 1 773.97 km<sup>2</sup> in 2000 to 2 874.48 km<sup>2</sup>, of moderate desertification increased from 1 372.16 km<sup>2</sup> in 2000 to 1 965.84 km<sup>2</sup>, and of mild desertification increased from 1 276.35 km<sup>2</sup> to 2 535.58 km<sup>2</sup>. Considering the perspective of time series, the rate of extremely severe desertification from 2000 to 2023 was 3.33%, that of severe desertification was 2.70%, of moderate desertification was 1.88%, and of mild desertification was 4.29%. The area of extremely severe desert land types decreased from 6 272.11 km<sup>2</sup> in 2000 to 1 461.65 km<sup>2</sup> in 2023, with a total loss area of 4 949.72 km<sup>2</sup>. From the spatial perspective, the distribution of extremely severe desert types changed from distributed over time to concentrated, becoming dominant from 2000 to 2010; the multiple-degree index of severe and moderate desertification types ranged between 7.69% and 16.15%, indicating that the long-term distribution of heavy and moderate desertification types was concentrated; mild desertification types were scattered and extensive over time. [Conclusion] From 2000 to 2023, the area of Kubuqi Desert showed a decreasing trend, and the ecological environment had been improved. In the future, the ecological restoration of this region will focus on the extremely severe desert area.

**Keywords: Kubuqi Desert; Landsat data; enhanced vegetation index (EVI); desertification**

土地沙漠化一直是全球最大的资源和环境问题之一<sup>[1]</sup>。长期以来,沙漠化问题是中国主要的生态环境问题,是关系到社会经济可持续发展的重要因素之一。沙漠化问题会引起区域内植被、土壤、气候和水发生重大变化,从而导致环境问题频发。防治沙漠化对于维护环境安全、改善人民生活条件、促进社会发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。根据第六次全国沙漠化和沙漠化监测结果显示,全国沙漠化土地面积  $2.57 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 占国土面积的 26.81%, 沙化土地面积  $1.69 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 占国土面积的 17.58%<sup>[3]</sup>。内蒙古的沙漠化问题在于,内蒙古有四大沙漠和四大沙地,特别是内蒙古西部区域沙漠较多,导致当地乃至周边地区生态环境恶化,经济发展缓慢<sup>[4-5]</sup>。库布齐沙漠是内蒙古四大沙漠之一,位于黄河几字弯南岸,与黄河几字弯北岸的河套平原地貌形成鲜明对比,每当春季大风来临,从库布齐沙漠卷起的风沙对周边城市环境带来极大危害,其特殊的地理位置和对其周边环境造成的破坏不容忽视。

近年来,一些科学家和专家不断研究内蒙古各地的沙漠化现象,如锡林郭勒草原沙漠、呼伦贝尔草原沙漠化防治、内蒙古阿拉善沙漠化防治、毛乌素沙地等等,关于库布其沙漠化问题的研究相对较少<sup>[6-9]</sup>。为更深入地理解库布齐沙漠农牧交错区的沙漠化过

程,陈雅琳等<sup>[10]</sup>进一步分析该地区土地覆盖变化的驱动因素。研究发现,自然因素如气候变化、风力侵蚀等对沙漠化过程有显著影响,但人类活动,尤其是过度放牧、滥伐森林和不合理的土地利用方式,是导致沙漠化加剧的主要原因。研究团队还指出,1987年至2003年间,库布齐沙漠农牧交错区的植被覆盖度发生了显著变化。它可能与该时期实施的生态恢复工程有关。然而在1995年至2000年间,植被覆盖度又出现下降趋势,表明生态恢复工程的效果并不持久,需要持续的管理和保护措施<sup>[10]</sup>。王翠萍<sup>[11]</sup>以2003,2008和2014年3期遥感影像为信息源,对库布齐沙漠中段沙化土地动态变化进行了分析。结果表明研究区沙化土地处于极缓慢变化状态,但是缓慢变化的速率在加快。由此可见,经过长时间的植树造林工程等相关治理修复工程,库布齐沙漠发生翻天覆地的变化,从荒无人烟的沙漠到如今的沙漠绿洲,沙漠化问题得到一定程度的限制。吴小燕等<sup>[12]</sup>基于归一化植被指数(NDVI)的像元二分法模型,分析了库布齐沙漠自1989年至2019年间植被覆盖度(FVC)的时空动态变化特性。结果显示,库布齐沙漠的植被覆盖度总体上呈现积极改善的趋势。

目前学者们经常以EVI(增强型植被指数)植被指数进行区域植被覆盖度研究应用较为广泛,在提取

长时间序列和大范围植被覆盖度时,其利用植被指数区分无植被覆盖区域和植被覆盖区域,从而估算区域植被覆盖度,通过设定阈值对区域植被覆盖面积进行提取,结果具有较高的精度及科学性<sup>[13-14]</sup>。鉴于此,本研究的重要性在于阐明库布齐沙漠在 2000—2023 年中的沙漠发展过程,利用 EVI 扩展植被指数阐明沙漠化过程中沙漠化的时空分布变化,并提取有效的特征因子。采用沙漠化分级指标,清晰地展现库布齐沙漠的变化特征,科学深入了解库布齐沙漠 2000—2023 年的沙漠化变化趋势,掌握其发展规律,分析其变化因素,为库布齐沙漠生态环境恢复和治理提供科学依据。

## 1 研究区概况

本文选取库布齐沙漠及周边地理环境作为研究区(图 1),地理位置位于鄂尔多斯高原北缘,地跨杭锦旗、达拉特旗、准格尔旗三地。研究区总面积约 18 643 km<sup>2</sup>,地理坐标 107.059°—111.368°E,39.787°—40.913°N,约占 61%,沙丘高 10~60 m,平均海拔约 1 200 m 左右。库布齐沙漠主要气候属于温带大陆性季风气候,昼夜温差大,东部沙漠属于半干旱区,雨量相对较多;西部沙漠属于干旱区,年均气温较高,雨量较少,年均降水量仅为 50~100 mm,植被类型也有区别,西部多为沙漠和荒漠草原植被类型,东部则主要以多年生禾本科植物为主。自 2000 年以来,库布齐沙漠面积逐年递减,沙漠化程度类型面积均有不同程度减少,利用 EVI 增强型植被指数阐明库布齐沙漠沙漠化过程中的时空分布变化。研究采用分层随机抽样的方法在研究区域范围内,依据沙漠化分级的五个级别各抽取 10 个样地,总体抽取 50 个样地,利用 ArcGIS 10.8 中的随机布点函数在 2023 年沙漠化分类结果中进行随机布点。

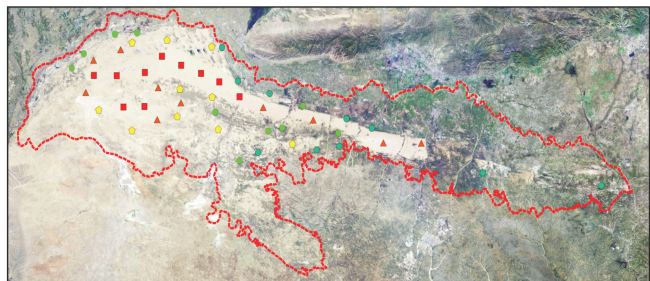


图 1 研究区概况图及样方布设

Fig.1 Overview of study area and sample square layout

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本文为了能够为特征信息提取土地覆盖和沙漠化动态监测提供多光谱、多时间和多空间分辨率的遥感信息,选取了库布齐沙漠 2000—2012 年 Landsat-TM 影像和 2013—2023 年 Landsat-OLI 影像,6 期影像均来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/home>),考虑到研究区夏季较短,植物生长周期短,为了便于目视解译,使得研究结果具有可比性,5 期影像成像时间均选择在时间相距较近的时段,基本在 7—8 月上旬,影像成像效果较好,云量均控制在 3% 以下,解译方法采用 EVI 指数灰度分割。地面调查数据来自野外调查的样方数据,为验证分类实验结果,以植被覆盖度为主要验证指标,样方参照《全国草原监测技术操作手册》(2007)设定,每个样方以样地点为中心坐标向外延伸,布设样方面积为 100 m<sup>2</sup>,采取目视法对样方内的植被盖度进行估算<sup>[15]</sup>。气象及高程等栅格数据来源于资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)。

### 2.2 沙漠化程度分级

$$EVI = 2.5 \left( \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 RED - C_2 BLUE + 1} \right) \quad (1)$$

式中: NIR 代表近红外波段; RED 代表红色波段; BLUE 代表蓝色波段; C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 分别为 6 和 7.5。

研究中的 EVI<sup>[16]</sup>,结合野外采样点实际地物类型,参考野外训练样本,比较分析将沙漠化的阈值范围准确化。根据 ENVI 软件实验结果,本文将 EVI 在绿色植被下的阈值范围设定为 0.2~1.0,在 7—8 月研究区的沙地盐碱滩等裸地的 EVI 值在 0.26 以下,水域的 EVI 值在 0.05 以下,因此可以将 0.06 < EVI < 0.26 作为研究区 7—9 月沙漠化覆盖程度的基线,这与左丽君等发现毛乌素沙地的 EVI 基线值为 0.06 与本研究区很接近<sup>[17]</sup>。根据土地利用信息可以划分出库布齐沙漠的沙漠化区域与未沙漠化区域,将沙漠化区域的数据提取出来进行沙漠化程度时空演变的研究。

本研究利用遥感植被指数 EVI 阈值范围,库布齐沙漠及其周边区域沙漠化程度划分为五个分级,分别为未沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、极重度沙漠化(原生质沙漠)。参照中国沙质沙漠化土地监测评价指标体系<sup>[18]</sup>,建立库布齐沙漠沙漠化分级体系(表 1)。由表 1 可知,利用 EVI 指数针对地表沙漠化进行区分,EVI ≥ 0.26 时呈现未沙漠

化,  $0.22 \leq \text{EVI} < 0.26$  时呈轻度沙漠化,  $0.18 \leq \text{EVI} < 0.22$  属于中度沙漠化,  $0.14 \leq \text{EVI} < 0.18$  属于重度沙漠化,  $0.06 < \text{EVI} < 0.14$  极重度沙漠化,  $-1 < \text{EVI} \leq 0.06$  划分为水域。

表 1 基于 EVI 指数的库布齐沙漠沙漠化分级

Table 1 Grading of desertification based on EVI index in Kubuqi Desert

程度	类型	EVI 阈值	植被覆盖度	地表主要特征
未沙漠化	—	0.26	50%	干旱、半干旱地区无明显的土地退化现象, 植被覆盖度高, 常集中于城镇周边
轻度沙漠化	固定沙地	0.22~0.26	30%~50%	常位于未沙漠化和沙地的过渡地带, 分布较为广泛, 多为固定沙丘以及斑块状流沙、小型沙丘 地表平坦, 风蚀痕迹明显, 有灌丛沙堆
	半裸露沙砾地		10%~30%	
中度沙漠化	半固定沙地	0.18~0.22	10%~30%	分布较为广泛且杂乱, 以非生物措施固定的沙丘或沙地 以半固定沙丘、沙垄和片状风蚀为主, 有较多植被覆盖地表平坦, 布满粗砂和砾石, 有小沙丘零分布, 总体呈戈壁景观
	裸露沙砾地		<10%	
重度沙漠化	半流动沙地	0.14~0.18	5%~10%	主要位于库布齐沙漠西南边, 地表风蚀强烈, 形成比较稀疏的沙丘和风蚀坑、槽、墩, 主要包括平沙地、山坡沙地等, 有少量植被覆盖
极重度沙漠化	流动沙地	0.06~0.14	<5%	位于库布齐沙漠核心地带, 分布且较为集中, 地表风沙活动明显, 几乎无植被覆盖; 沙丘密度极高, 以新月形沙丘、沙丘链及复合型沙丘为主; 以流动沙地、风蚀残丘和劣地为

2.3 研究方法

要定量描述区域土地利用变化率, 需要通过土地利用动态度<sup>[19-20]</sup>, 来反映各类型沙漠化土地随时间的变化情况。它可以用来对比多个时间段土地的利用差异, 有助于发现其中不同类型土地的变化幅度。计算公式为:

$$U_j = U_{j_n} - U_{j_m} \quad (2)$$

$$K_j = (U_j / U_{j_m}) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $U_j$  代表  $j$  类型沙漠面积变化;  $K_j$  为研究时段土地利用的动态度;  $U_{j_m}$  为  $j$  类型荒漠初期沙漠化面积;  $U_{j_n}$  为  $j$  类型荒漠末期沙漠化面积;  $T$  为研究的时段年限。

库布齐沙漠沙漠化程度类型在数量上变化显著, 为研究其在空间上的动态分布特征, 本文引入多度指数及重要度指数来对 2000—2023 年土地沙漠化的空间分布展开深入研究。

多度指数可以用来反映研究区内的沙漠化土地类型的分布程度<sup>[21]</sup>, 多度指数越高, 说明该沙漠化类型在研究区内分布越分散, 斑块数量也就越多。反之, 多度指数越低, 则表明该沙漠化类型在研究区内越集中分布, 斑块数量就减少。重要度指数用以反映该沙漠化土地类型对该研究区的重要程度以及影响程度。重要度指数越高, 表明该沙漠化类型在研究区土地中占据主导地位, 对研究区内的土地类型变化产生较大影响。反之重要度指数越低, 则表明该类型沙漠化土地重要程度低, 对该研究区的土地类型变化影响较小。多度指数及重要度指数公式为:

$$D_j = C_j / C \times 100\% \quad (4)$$

$$V_j = D_j + B_j \quad (5)$$

式中:  $D_j$  为  $j$  类型沙漠的多度指数;  $C$  为总体沙漠化类型的斑块数;  $C_j$  为  $j$  类型沙漠的斑块数;  $V_j$  为  $j$  类型沙漠的重要度;  $B_j$  为  $j$  类型沙漠面积占全部沙漠总面积的百分比。

根据同一地区不同时相的土地覆盖现状的变化关系(表 2)<sup>[22]</sup>, 求得一个二维矩阵。通过对得到的转移矩阵进行分析, 能够得到两个时相, 不同的地类之间相互转化的情况, 它描述了不同的土地利用的类型在不同年份发生变化的土地类别以及发生变化的位置和变化面积。不仅能够反映上述静态的固定区域固定时间的各个地类面积数据, 还能够反映更加丰富的初期各个地类的面积转出以及末期各个地类面积的转入情况。从面积入手, 反映区域土地利用变化, 面积变化首先反映在不同土地利用类型的总量变化上, 通过分析土地利用类型的总量变化, 可了解土地利用变化总的变化趋势和土地利用结构的变化。

表 2 T<sub>1</sub>—T<sub>2</sub> 年土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix from T<sub>1</sub> to T<sub>2</sub>

项目	T <sub>2</sub> 年面积/km <sup>2</sup>				
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	……	A <sub>n</sub>	
T <sub>1</sub> 年 面积/km <sup>2</sup>	A <sub>1</sub>	$P_{11}$	$P_{12}$	……	$P_{1n}$
	A <sub>2</sub>	$P_{21}$	$P_{22}$	……	$P_{2n}$
	……	……	……	……	……
	A <sub>n</sub>	$P_{n1}$	$P_{n2}$	……	$P_{nm}$

注: T<sub>1</sub> 为初始年份; T<sub>2</sub> 为目标年份; A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>……A<sub>n</sub> 为不同的土地利用类型;  $n$  为土地利用类型的个数;  $P_{12}$  为有 A<sub>1</sub> 相 A<sub>2</sub> 转入放入土地面积,  $P_{1n}$  为 A<sub>1</sub> 转入 A<sub>n</sub> 的面积以此类推。

## 2.4 沙漠化分类结果验证

为验证分类结果的精准性,研究采用分层随机抽样的方法在研究区域范围内,依据沙漠化分级的五个级别各抽取10个样地点,总体抽取50个样地点,利用ArcGIS 10.8中的随机布点函数在2023年沙漠化分类结果中进行随机布点,并从中提取各样点的坐标值,便于之后的实地验证。结合研究区沙漠内植物

组成、郁闭度、植被盖度等条件,设置样方大小为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ <sup>[23]</sup>。

依据50个观测样方点坐标位置,在库布齐沙漠进行野外实地考察,参照表1的植被覆盖度分级指标,观测样方内植被覆盖度是否与分级结果一致,并制作混淆矩阵精度评价表(表3)验证分类结果精度。根据验证结果所知,分类结果总体精度为82%。

表3 混淆矩阵精度评价

Table 3 Evaluation of confusion matrix accuracy

分类	极重度沙漠	重度沙漠化	中度沙漠化	轻度沙漠化	未沙漠化	用户精度
极重度沙漠	9	1	0	0	0	90%
重度沙漠化	1	6	0	2	1	60%
中度沙漠化	0	1	9	0	0	90%
轻度沙漠化	0	0	1	8	1	80%
未沙漠化	0	0	0	1	9	90%
生产者精度	90%	75%	90%	73%	82%	—

## 3 结果与分析

### 3.1 土地沙漠化时间趋势特征

通过EVI计算得到2000—2023年6期沙漠化分级影像(图2)基础上,本研究进一步统计了研究区域5个沙漠化分级的土地面积,旨在发现其时间变化规律。

2000—2023年库布齐沙漠及周边区域沙漠化

总面积呈现减少趋势,由2000年的 $10\,694.60\text{ km}^2$ 缩减到2023年的 $8\,837.56\text{ km}^2$ ,线性减少速率达 $565.81\text{ km}^2/\text{a}$ (图3)。其中,极重度沙漠面积减少格外突出,由2000年的 $6\,272.11\text{ km}^2$ 减少到2023年的 $1\,461.65\text{ km}^2$ ,线性减少速率达 $952.83\text{ km}^2/\text{a}$ ,是总沙漠化面积减少的最突出贡献者。重度、中度和轻度沙漠化面积在保有面积基础上总体呈现消长波动上升趋势。

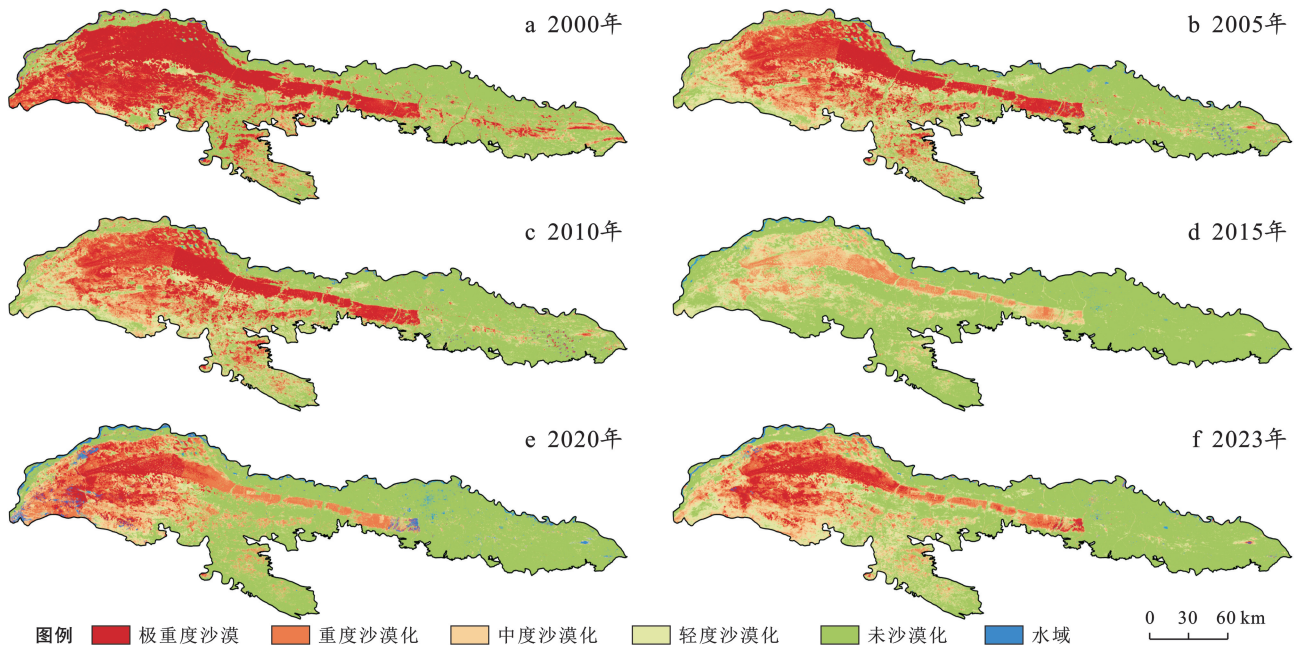


图2 2000—2023年库布齐沙漠沙漠化程度时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of desertification degree in Kubeqi Desert from 2000 to 2023

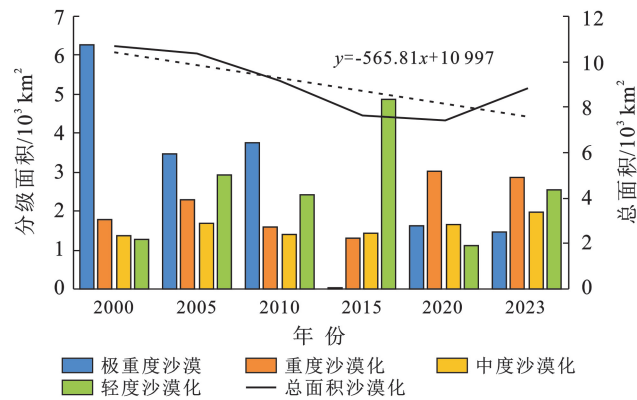


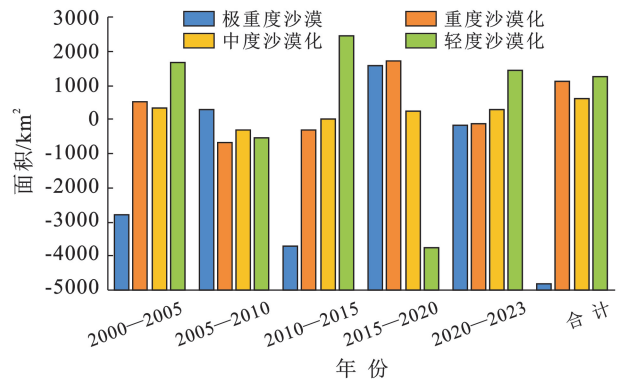
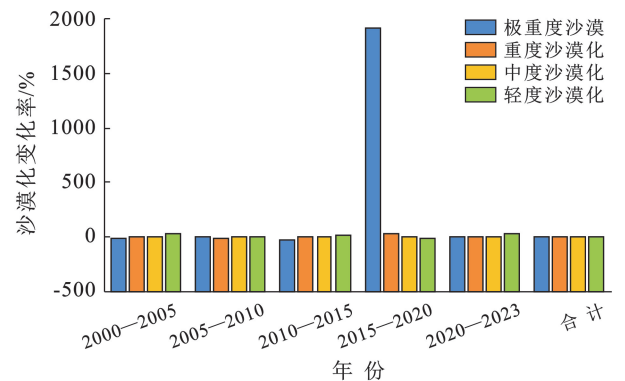
图3 沙漠化面积变化趋势

Fig.3 Changing trend of desertification area of Kubuqi Desert

根据库布齐沙漠土地沙漠化动态变化率可以看出(图4—5),2000—2005年,极重度沙漠类型在数量上呈现明显下降趋势,面积共计减少2804.69 km<sup>2</sup>,缩减速率为8.94%。其他沙漠化类型在数量上均呈小幅度上升趋势,土地沙漠化总面积共计减少304.34 km<sup>2</sup>,缩减速率为0.57%。变化较显著的是重度沙漠化面积和轻度沙漠化面积,增加速率分别为5.75%,4.76%,变化最为显著的是轻度沙漠化面积,增加速率为26.08%,沙漠化治理恢复整体效果显著。2005—2010年,沙漠化面积相较2005年整体减少了1229.33 km<sup>2</sup>,重度、中度、轻度沙漠化面积均呈现减少趋势,重度沙漠化面积减少速率为6.03%,中度沙漠化减少速率为3.40%,轻度沙漠化面积的减少速度最大为3.64%。2010—2015年,沙漠化呈大幅减少趋势,沙漠化面积共计减少1544.46 km<sup>2</sup>,缩减速率为3.37%。主要原因是,极重度沙漠化面积大幅减少,减少了3734 km<sup>2</sup>,重度沙漠化面积也有小幅度的减少,轻度沙漠化面积趋势变化表现为增加,面积增加了2464.3 km<sup>2</sup>,总体增加速率稍小于前期减少速率,最终沙漠化面积稍有减少,但基本维持在稳定范围内。2015—2020年,土地沙漠化面积共计减少217.37 km<sup>2</sup>,缩减速率为0.57%。除轻度沙漠化外,其他沙漠化等级面积均有不同程度地增加,其中极重度沙漠面积上升最为明显,增加速率为1920.74%,极重度沙漠面积大幅度增加。2020—2023年,土地沙漠化面积总体上升1438.46 km<sup>2</sup>,主要原因受三年疫情影响人为因素减少,当地自然气候因素影响增大,土地沙漠化总面积提升,中度沙漠化面积增加295.80 km<sup>2</sup>,轻度沙漠化面积增加1436.91 km<sup>2</sup>。

通过2000—2023年的沙漠化转移矩阵表(表4)可知,极重度沙漠面积从2000年的1322.39 km<sup>2</sup>下降到2023年的1461.65 km<sup>2</sup>,转移面积为4949.72 km<sup>2</sup>,其中转移为重度沙漠化土地面积为2232.89 km<sup>2</sup>,因

此2023年的重度沙漠化土地面积上升至2874.48 km<sup>2</sup>。极重度沙漠土地面积转移为中度沙漠化土地面积为993.66 km<sup>2</sup>,转移为轻度沙漠化土地面积为799.49 km<sup>2</sup>,转移为未沙漠化土地面积为870.6 km<sup>2</sup>。总体来看,沙漠化土地类型结构由极重度沙漠类型为主导向未沙漠化土地类型过渡转移,其余各沙漠化土地类型面积均有不同转移,整体转移趋势向好。

图4 2000—2023年库布齐沙漠及周边区域沙漠化面积变化  
Fig.4 Change of desertification area in Kubuqi Desert and its surrounding areas from 2000 to 2023图5 2000—2023年库布齐沙漠及周边区域沙漠化变化率  
Fig.5 Desertification change rate in Kubuqi Desert and its surrounding areas from 2000 to 2023

### 3.2 土地沙漠化空间主导趋势

2000—2023年间,库布齐沙漠西部、南部等地区,沙漠化面积大幅度减少,东部的条带形沙漠也有一定程度的减少。

由不同时期土地沙漠化多度指数差异变化(图6)结果表明,2000—2023年间,多度指数较低的沙漠化类型是重、中度沙漠化,长期维持在5%~15%左右的变化,说明这两个类型的沙漠在研究区域内属于分布较为分散的沙漠。2000年极重度沙漠类型的多度指数较高,多度指数达到33.64%,说明该类型的沙漠分布较为集中,但多度指数整体呈下降趋势,说明该沙漠类型分布越来越分散,截至2023年,极重度沙漠类型多度指数下降到7.84%。轻度沙漠

化多度指数在 2000—2010 年维持在 6.85%~15.77% 范围内,但是在 2015 年上升到 26.12%,说明该程度沙漠分布随着时间变化,在一定程度上增加了分散趋势,在 2015—2023 年多度指数呈现波动趋势,先下降

到 5.88%,后增长至 13.60%,说明在之后的 8 a 里沙漠又增加了集中趋势。由此可见,说明极重度沙漠类型土地经过了长时间治理,逐渐退化为中、轻度沙漠化,且其分布广泛程度已经得到有效控制。

表 4 库布齐沙漠化类型转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of desertification types in Kubuqi Desert

项目	2023 年面积/km <sup>2</sup>						面积合计/km <sup>2</sup>
	极重度沙漠化	重度沙漠化	中度沙漠化	轻度沙漠化	未沙漠化	水域	
极重度沙漠化	1 322.39	2 232.89	993.66	799.49	870.60	51.63	6 272.11
重度沙漠化	77.05	322.07	388.67	405.86	566.71	12.62	1 773.97
中度沙漠化	23.10	122.52	210.10	348.80	658.64	8.15	1 372.16
轻度沙漠化	9.70	62.50	133.88	295.06	768.48	5.86	1 276.35
未沙漠化	18.77	117.17	228.85	675.54	6 678.90	102.67	7 827.51
水域	10.45	16.50	9.81	9.80	42.45	31.29	120.61
面积合计/km <sup>2</sup>	1 461.65	2 874.48	1 965.84	2 535.58	9 591.16	214.86	
流出面积合计/km <sup>2</sup>	4 949.72	1 451.90	1 162.06	981.30	1 148.61	89.32	

2000—2023 年间沙漠化类型重要度分析结果表明(图 7),研究区域内极重度沙漠在 2000—2010 年内占据主导地位,2010—2015 年间轻度沙漠化重要度提升,逐渐占据主导地位,对土地利用类型变化的影响也最大,2015—2023 年间,各沙漠化类型的重要度指数均有下降趋势,重度沙漠化类型相对占据沙漠区域的主导位置。

面的影响外,人为因素同样是影响沙漠化变化趋势的主要原因,1978 年,为解决中国风沙危害和水土流失等突出问题,党中央决定启动实施“三北”工程,开启了中国大规模治理风沙、改善生态的先河。2000—2023 年,“三北”工程区森林覆盖率由 5.05% 增长到 13.84%,45.00% 以上可治理沙化土地面积被治理。

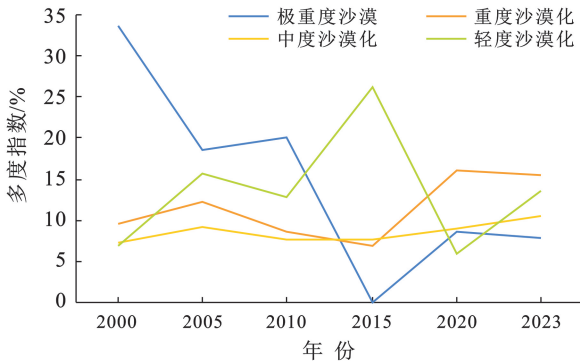


图 6 2000—2023 年库布齐沙漠及周边区域沙漠化类型多度指数  
Fig.6 Desertification index of desertification types in Kubuqi Desert and its surrounding areas from 2000 to 2023

### 3.3 外界因素变化特征

库布齐沙漠地区沙漠化变化趋势主要受自然和人为因素影响。内蒙古自治区气候类型属于温带大陆性季风气候,自西向东依次是干旱区、半干旱区、干旱湿润区、半湿润区,研究区库布齐沙漠横跨干旱区和半干旱区,该区域降水量相对较小,气温相对较高,尤其库布齐沙漠西部核心地段属于干旱区,极重度沙漠面积相对较多,重度沙漠化土地区域分布广泛,地形高程对沙漠的自然演变分布有一定影响。除自然因素方

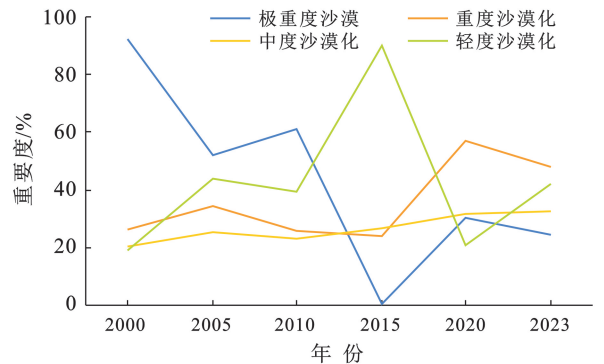


图 7 2000—2023 年库布齐沙漠及周边区域沙漠化类型重要度

Fig.7 Importance of desertification types in Kubuqi Desert and surrounding areas from 2000 to 2023

3.3.1 自然因素变化特征 库布齐沙漠风速时空分布如图 8 所示。2000 年和 2020 年的年均风速分布格局相似,风速由南向北逐渐增加,2000 年年均最高风速可达 2.95 m/s,最低至 1.49 m/s,2020 年年均最高风速可达 3.33 m/s,最低至 1.96 m/s,从图 8 可知,2000—2020 年年均风速上升,高风速区域逐渐收缩。

库布齐沙漠降水时空分布如图 9 所示。2000 年和 2020 年的降水量分布格局相似,且近 20 a 降水量总体呈增加趋势,空间上由西北向东南降水量逐渐增加;2000 年年均最高降水量 300.69 ml,降水高于

200 ml 的地区仅分布在库布齐沙漠东南区域,2020 年年均最高降水量 424.95 ml,并且库布齐沙漠东部大范围面积降水量均有不同程度提升,年均最低降水量从 2000 年的 84.27 ml 提升至 191.11 ml。

库布齐沙漠 2000 和 2020 年间年均温空间分布如图 10 所示。2000 年最高温度为 8.93 °C,最低温度为 5.8 °C,2020 年最高温度为 9.31 °C,最低温度为 6.04 °C。北部气温高于南部,由西北向东南气温逐渐

降低,年均气温较高的区域集中于库布齐沙漠西北核心地带,该区域是极重度沙漠的分布区域,明显呈现高温少雨特征。

依据 GIS 中自然断点分级法,由图 11 可以看出,库布齐沙漠平均海拔较高,以高原为主,地势为南高北低,地势较低的部分位于黄河流域南岸,地势较高的部分位于南部鄂尔多斯高原。海拔最高为 1 566 m,平均海拔为 1 148 m。

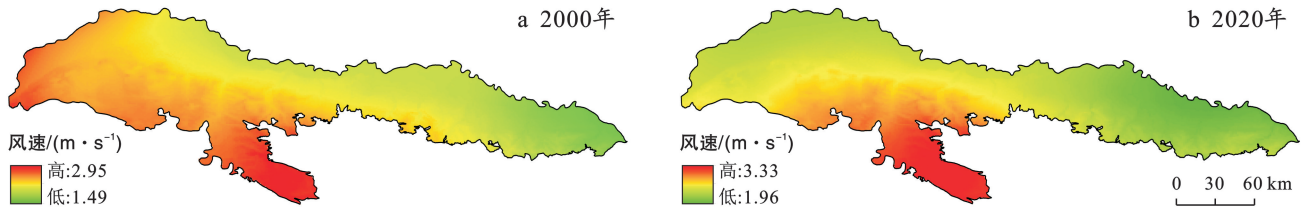


图 8 2000 和 2020 年库布齐沙漠年均风速空间分布

Fig.8 Spatial distribution of annual average wind speed in Kubuqi Desert in 2000 and 2020

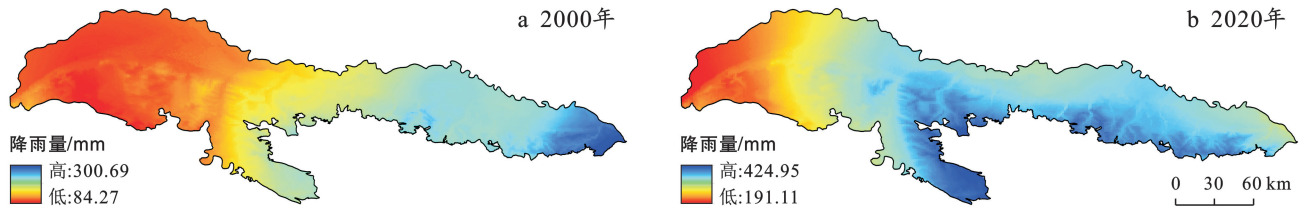


图 9 2000 和 2020 年库布齐沙漠年均降水空间分布

Fig.9 Spatial distribution of average annual precipitation in Kubuqi Desert in 2000 and 2020

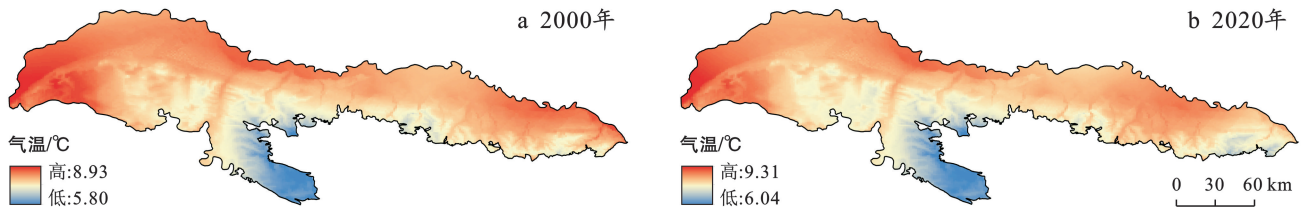


图 10 2000 和 2020 年库布齐沙漠年均气温空间分布

Fig.10 Spatial distribution of average air temperature in Kubuqi Desert in 2000 and 2020

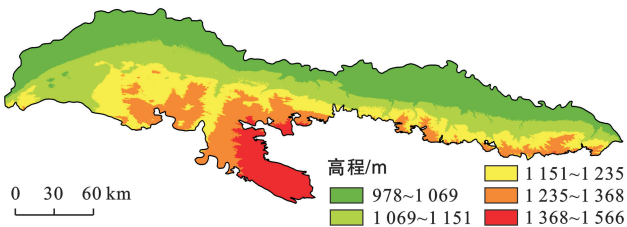


图 11 库布齐沙漠高程空间分布

Fig.11 Spatial distribution of elevation in Kubuqi Desert

3.3.2 人为因素变化特征 自然因素对植被及荒漠化有重要的影响,但随着社会经济的发展,人为因素也成为影响土地荒漠化程度的重要影响因素之一。近些年随着三北防护林体系建设工程等相关工程的开展,内蒙古当地政府部门及生态类企业加大了对荒漠化治理的投入,采取了一系列科学有效的措施来遏

制土地荒漠化的蔓延。除了政府部门和生态类企业的努力外,当地民众也积极参与到了荒漠化治理中来,人民群众通过参与植树造林、保护草场等活动,为改善生态环境贡献了自己的力量。通过多方共同努力的作用下,鄂尔多斯市累计治理荒漠化面积 6 460 km<sup>2</sup>。这一治理成果是通过综合性的生态治理措施实现的,包括但不限于林业生态项目、草原生态建设项目以及河湖连通项目等,在这些项目的开展下,有效地推进了库布齐沙漠的治理工作,实现绿化面积超过 3 200 km<sup>2</sup>,显著改善当地生态环境。

## 4 讨论

本文为分析库布齐沙漠 2000—2023 年沙漠化类型变化,基于 Landsat TM/OLI 数据,在对库布齐沙

漠地区进行充分的野外调查的基础上,首先通过实验探索分析其可行性方法,确定 EVI 遥感指数阈值分割步骤,在此基础上,根据前人的研究成果及沙漠化指标体系,按照程度等级原则细分为轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、极重度沙漠以及未沙漠化 5 个沙漠化等级,其中所划分的轻度、中度沙漠化地区也具有一定程度沙漠化趋势的草地。通过土地覆盖动态度、多度指数以及重要度指数,更加深入地反映库布齐沙漠 2000—2023 年的变化,分别从时间序列和空间序列上分析沙漠变化趋势,掌握沙漠的变化规律。

通过研究发现,库布齐沙漠从 2000—2015 年沙漠化面积逐时期降低,与王翠萍得出库布齐沙漠总体表现呈整体遏制,持续缩减的结论基本一致,但在 2015—2020 年时间段内,总体沙漠化面积降低,极重度沙漠面积呈上升趋势。这可能是因为治理沙漠过程中,深居内陆的沙漠因人烟稀少,人为因素干预减少,导致内部沙漠化程度加剧,而距离城镇较近的沙漠地带因防沙治沙相关的生态修复工程建设,使沙漠化面积进一步地减少。在 2020—2023 年,受疫情影响,人为影响因素大幅度减少,自然影响因素大幅度提升,直接导致沙漠化总面积提升。沙漠化面积变化与陈雅琳等得出 2000—2003 年沙漠化面积减少的研究结果不同,这可能是因为研究区范围不一致以及选取的遥感影像时间不同所导致,其在时序上是以 1987—1995,1995—2000,2000—2003 年,而本文选取每 5 a 一个时期分析沙漠化变化。在空间分布上,轻度沙漠化类型分布分散并占据地形中的主导位置,这与丁雪<sup>[21]</sup>得到 2015 年鄂尔多斯沙区的轻度荒漠化类型多度指数优势明显的研究结果相近,这与本文研究得出的库布齐沙漠轻度沙漠化类型的空间分布特征存在一定关联。通过研究发现,影响库布齐沙漠的主要因素有自然因素和人为因素,其中自然因素包括风速、降水、气温,李朝生等<sup>[24]</sup>同样研究发现影响沙漠中植被生长的主要限制因子是水分,降水的变化对沙漠植被产生较大的影响;气温的变化会对蒸腾作用产生影响,所以在一定程度会影响降水对植被的作用,从而促进沙漠面积的变化;风速在库布齐沙漠西部相对较低,东南部地区风速较高。此结果与本文的研究结果基本一致,极重度沙漠分布集中的地区气候特点呈现出高温少雨,海拔相对较低的特征。

土地沙漠化变化是气候、人为等多种因素共同作用的结果。研究期间黄河“几字湾”攻坚战,“三北防护林体系”“库布齐沙漠生态建设项目”等生态工程项目的建设对研究区沙漠化面积的减少起到一定促进

作用,但是随着经济发展及人口的增多,居民地的增加及城镇化水平的提高在一定程度上造成植被的减少<sup>[25]</sup>,并且人类活动多种多样,对土地变化的影响也较为复杂,所以人为因素对研究区沙漠化动态变化的影响还需进一步研究。

## 5 结论

(1) 库布齐沙漠的沙漠化总面积从 2000 年的 10 694.6 km<sup>2</sup> 下降到 2023 年 8 837.56 km<sup>2</sup>。2000—2023 年间,极重度沙漠化面积已由当初的 6 272.11 km<sup>2</sup>,缩减为 1 461.15 km<sup>2</sup>,重度沙漠化面积由 2000 年的 1 773.97 km<sup>2</sup>,上升到 2 874.48 km<sup>2</sup>,中度沙漠化面积由 2000 年的 1 372.16 km<sup>2</sup> 上升到 2020 年的 1 965.84 km<sup>2</sup>,轻度沙漠化的土地面积由 1 276.35 km<sup>2</sup> 上升到 2 535.58 km<sup>2</sup>。

(2) 2000—2023 年间,从时空序列角度分析来看,极重度沙漠缩减速率为 3.33%,重度沙漠化增加速率为 2.70%,中度沙漠化增加速率为 1.88%,轻度沙漠化增加速率为 4.29%。极重度沙漠土地类型面积从 2000 年的 132 2.39 km<sup>2</sup> 下降到 2023 年的 1 461.65 km<sup>2</sup>,转移面积为 4 949.72 km<sup>2</sup>,其中转移为重度沙漠化土地面积为 2 232.89 km<sup>2</sup>,转移为中度沙漠化土地面积为 993.66 km<sup>2</sup>,转移为轻度沙漠化土地面积为 799.49 km<sup>2</sup>,转移为未沙漠化土地面积为 870.6 km<sup>2</sup>。从空间角度分析,极重度沙漠类型随时间变化由分布分散变为分布集中,且在 2000—2010 年内在沙漠中占据主导地位;重度和中度沙漠化类型的多度指数为 7.69%~16.15%,说明重、中度沙漠化类型长期分布较为集中;轻度沙漠化类型随时间变化分散且较为广泛,并逐渐占据库布齐沙漠的主导位置并容易对周边地物类型产生影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱震达.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,1998,18(2):145-155.  
Zhu Zhenda. Concept, cause and control of desertification in China [J]. Quaternary Sciences, 1998,18(2):145-155.
- [2] 周日平.中国荒漠化分区与时空演变[J].地球信息科学学报,2019,21(5):675-687.  
Zhou Riping. Zonation and spatiotemporal evolution of China's desertification [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019,21(5):675-687.
- [3] 曾国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J].林业资源管理,2023(1):1-7.  
Zan Guosheng, Wang Cuiping, Li Feng, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on

- desertification and sandification [J]. *Forest Resources Management*, 2023(1):1-7.
- [4] 包玉梅. 内蒙古草原荒漠化成因与政府治理对策分析 [D]. 北京: 中央民族大学, 2009.
- Bao Yumei. Analysis on the causes of grassland desertification in Inner Mongolia and the government's countermeasures [D]. Beijing: Minzu University of China, 2009.
- [5] 银山. 内蒙古浑善达克沙地荒漠化动态研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- Yin Shan. Dynamic study of desertification in Hunshandake sandy land of Inner Mongolia [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agriculture University, 2010.
- [6] 李鸿威, 杨小平. 浑善达克沙地近 30 年来土地沙漠化研究进展与问题 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 647-655.
- Li Hongwei, Yang Xiaoping. Advances and problems in the understanding of desertification in the Hunshandake sandy land during the last 30 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6): 647-655.
- [7] 江晨超. 内蒙古阿拉善盟荒漠化防治效益研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- Jiang Chenchao. Research on measurement of benefits of desertification combating in Alax Region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [8] 金红宇. 内蒙古呼伦贝尔地区草原荒漠化治理的问题与对策研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Jin Hongyu. Study on the problems and countermeasures of grassland desertification control in Hulunbuir Region of Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [9] 吴昕. 内蒙古锡林郭勒草原沙质荒漠化的沙源及其地质学成因分析: 以吉尔嘎郎图凹陷小草原为例 [D]. 湖北武汉: 中国地质大学, 2018.
- Wu Xin. Analysis on sand source and its geological origin of desertification in Xilinguole grassland, Inner Mongolia: A case study on the grassland in Jiergalangtu depression [D]. Wuhan, Hubei: China University of Geosciences, 2018.
- [10] 陈雅琳, 常学礼, 崔步礼, 等. 库布齐沙漠典型地区沙漠化动态分析 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 27-34.
- Chen Yalin, Chang Xueli, Cui Buli, et al. Dynamics analysis on development of desertification in Hobq Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 27-34.
- [11] 王翠萍. 库布齐沙漠中段沙化土地动态变化及驱动力分析 [J]. *林业资源管理*, 2018(1): 63-71.
- Wang Cuiping. Analysis on dynamic change of desertification land and driving forces in the middle area of Kubuqi Desert [J]. *Forest Resources Management*, 2018(1): 63-71.
- [12] 吴小燕, 高永, 党晓宏, 等. 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*, 2022, 42(2): 300-306.
- Wu Xiaoyan, Gao Yong, Dang Xiaohong, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage in Kubuqi Desert from 1989 to 2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 300-306.
- [13] 李亚强. NDVI 和 EVI 的云南省植被覆盖变化比较分析 [J]. *现代化农业*, 2021(9): 38-40.
- Li Yaqiang. Comparative analysis of vegetation cover changes in Yunnan province based on NDVI and EVI [J]. *Modernizing Agriculture*, 2021(9): 38-40.
- [14] 王晓爽, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 基于 EVI 植被指数的大尺度草地多源信息综合分类研究 [J]. *草业科学*, 2011, 28(1): 10-17.
- Wang Xiaoshuang, Hu Zhuowei, Zhao Wenji, et al. An integrated classification of grassland in large-scale based on MODIS EVI and multi-source data [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 10-17.
- [15] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- Li Miaomiao. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing [D]. Beijing: Graduate School of China Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Application), 2003.
- [16] 杨怡, 吴世新, 庄庆威, 等. 2000—2018 年古尔班通古特沙漠 EVI 时空变化特征 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1512-1520.
- Yang Yi, Wu Shixin, Zhuang Qingwei, et al. Spatio-temporal change of EVI in the Gurbantunggut Desert from 2000 to 2018 [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(6): 1512-1520.
- [17] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167-172.
- Zuo Lijun, Zhang Zengxiang, Dong Tingting, et al. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 167-172.
- [18] 高尚武, 王葆芳, 朱灵益, 等. 中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系 [J]. *林业科学*, 1998, 34(2): 1-10.
- Gao Shangwu, Wang Baofang, Zhu Lingyi, et al. Monitoring and evaluation indicator system on sandy desertification of China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(2): 1-10.
- [19] 杨光. 基于 3S 的盐池县景观格局及荒漠化动态研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.

- Yang Guang. Study on dynamic change of landscape pattern and desertification in Yanchi County based on 3S [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [20] 尹璐. 扎赉诺尔矿区土地利用格局及其土地退化演变分析[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- Yin Lu. The analysis of land use and degradation changes in Zhalaier mining area [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2016.
- [21] 丁雪. 内蒙古自治区土地荒漠化动态变化研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- Ding Xue. Study on dynamic change of land desertification in Inner Mongolia [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2018.
- [22] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.
- Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [23] 殷炜达, 苏俊伊, 许卓亚, 等. 基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 24-30.
- Yin Weida, Su Junyi, Xu Zhuoya, et al. Estimation and application of urban green space carbon storage based on remote sensing technology [J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 24-30.
- [24] 李朝生, 丁一汇, 李泽椿, 等. 气候变化对库布齐沙漠生态环境的影响及其适应性对策初探[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(5): 1-5.
- Li Chaosheng, Ding Yihui, Li Zechun, et al. The impacts of climate change on eco-environments in Kubuqi Desert and its adaptation countermeasures [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(5): 1-5.
- [25] 刘璐丹, 李晶, 柳彩霞, 等. 2000—2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 330-336.
- Liu Ludan, Li Jing, Liu Caixia, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 330-336.
- ~~~~~
- (上接第 67 页)
- [24] 林立文, 邓羽松, 杨钙仁, 等. 南亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1141-1152.
- Lin Liwen, Deng Yusong, Yang Gairen, et al. Fractal and hydrophysical characteristics of soil particles in different forest stands in south subtropical China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1141-1152.
- [25] Ye Yuqian, Wang Hui, Luan Junwei, et al. Nitrogen-fixing tree species modulate species richness effects on soil aggregate-associated organic carbon fractions [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 546: 121315.
- [26] 许振欣, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带典型人工林土壤饱和和导水率特征及其影响因素研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 100-107.
- Xu Zhenxin, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical plantations in South Subtropical Zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 100-107.
- [27] 张益, 林毅雁, 张杰铭, 等. 北京山区典型植被枯落物和土壤层水文功能[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 160-168.
- Zhang Yi, Lin Yiyuan, Zhang Jieming, et al. Hydrological function of litter and soil layer of typical vegetation in Beijing mountainous area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 160-168.
- [28] 王世清, 冀正欣, 卢龙辉, 等. 张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 131-140.
- Wang Shiqing, Ji Zhengxin, Lu Longhui, et al. Spatio-temporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10): 131-140.
- [29] 安金玲, 牛赟, 车宗玺, 等. 祁连山高寒山区典型植被类型水源涵养功能的灰色关联分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 93-101.
- An Jinling, Niu Yun, Che Zongxi, et al. Grey correlation analysis of water conservation function of typical vegetation types in the alpine region of the Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(8): 93-101.