

doi: 10.12029/gc20240606002

刘博, 霍润斌, 李利阳, 秦越强, 靳胜凯, 马明, 殷嘉乐. 2025. 基于 Albedo-NDVI 特征空间的内蒙古化德县荒漠化时空动态监测[J]. 中国地质, 52(4): 1439–1453.

Liu Bo, Huo Runbin, Li Liyang, Qin Yueqiang, Jin Shengkai, Ma Ming, Yin Jiale. 2025. Monitoring the spatio-temporal dynamics of desertification in Huade County, Inner Mongolia based on Albedo-NDVI feature space[J]. Geology in China, 52(4): 1439–1453(in Chinese with English abstract).

基于 Albedo-NDVI 特征空间的内蒙古化德县荒漠化时空动态监测

刘博¹, 霍润斌¹, 李利阳^{1,2}, 秦越强¹, 靳胜凯^{3,4}, 马明¹, 殷嘉乐¹

(1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065099; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产国家重点实验室, 北京 100083; 4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要:【研究目的】土地荒漠化是一个全球性的环境问题, 每年给全世界造成巨大的环境破坏和经济损失。干旱—半干旱地区多易发生荒漠化。内蒙古中部地区作为中国北方干旱和半干旱地区的代表, 其土地荒漠化的问题具有典型性和紧迫性。因此, 对该地区开展荒漠化的动态监测、分析荒漠化发展变化的驱动因素尤为重要。【研究方法】以 10 年作为时间间隔, 以 1990—2020 年化德县四期 Landsat 系列卫星影像为数据源, 提取 NDVI 和 Albedo 数据, 构建 Albedo-NDVI 特征空间, 分析了化德地区土地的荒漠化程度、分布特征和演变规律。通过收集分析相关数据变化趋势, 进一步分析了荒漠化演化的驱动因素。【研究结果】在构建的 Albedo-NDVI 特征空间中, 干边散点拟合的线性模型显示 NDVI 和 Albedo 的相关性较高, 由其拟合计算得出的 DDI 指数对于评价化德县荒漠化程度效果较好。化德县 1990—2020 年间, 荒漠化发展变化趋势分为 2 个阶段: 1990—2010 年为荒漠化程度总体加剧的阶段, 2010—2020 年为荒漠化程度总体改善的阶段。研究区 1990—2020 年荒漠化程度加剧的面积大于改善的面积; 荒漠化加剧主要分布在居住密集区以及牧场附近, 荒漠化得到改善的区域主要分布在季节性淖尔附近。化德县荒漠化发展变化的驱动因素主要包括: 自然因素、人为因素和政策因素。【结论】由 Albedo-NDVI 特征空间拟合计算得出的 DDI 指数对于评价化德县荒漠化程度效果较好, 能够有效分析荒漠化的时空变化、演化趋势。2010—2020 年在一系列生态环境保护、荒漠化治理与植被恢复的政策下, 研究区荒漠化情况有了一定的改善。

关键词: 荒漠化; 植被指数; 反照率; 驱动因素; 环境地质调查工程; 化德; 内蒙古

创新点: (1) 证明了 Albedo-NDVI 特征空间在分析化德县荒漠化的时空演化过程中的适用性。(2) 定性和定量分析了化德县荒漠化发展变化的驱动因素, 将其归纳为自然因素、人为因素以及政策因素。

中图分类号: TP79 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1439-15

Monitoring the spatio-temporal dynamics of desertification in Huade County, Inner Mongolia based on Albedo-NDVI feature space

LIU Bo¹, HUO Runbin¹, LI Liyang^{1,2}, QIN Yueqiang¹, JIN Shengkai^{3,4}, MA Ming¹, YIN Jiale¹

收稿日期: 2024-06-06; 改回日期: 2024-12-28

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230251、DD20208003)资助。

作者简介: 刘博, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事区域地质调查工作; E-mail: liubo33564@163.com。

通信作者: 霍润斌, 男, 1990 年生, 工程师, 主要从事生态环境遥感调查工作; E-mail: huorb1198@163.com。

(1. Langfang Comprehensive Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065099, Hebei, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Land desertification is a global environmental problem, causing huge environmental damage and economic losses to the world every year. Arid and semi-arid areas are prone to desertification. As a representative of arid and semi-arid areas in northern China, the problem of land desertification in the central region of Inner Mongolia is typical and urgent. Therefore, it is particularly important to carry out dynamic monitoring of desertification in the region and analyze the driving factors of desertification development and change. **[Methods]** This paper took 10 years as the time interval, used four Landsat series satellite images of Huade County from 1990 to 2020 as the data source, extracted NDVI and Albedo data, constructed Albedo-NDVI feature space, and analyzed the desertification degree, distribution characteristics and evolution law of land in Huade area. The driving factors of desertification evolution were further analyzed by collecting and analyzing the change trend of relevant data. **[Results]** The linear model by fitting with the dry edge scatter points in the Albedo-NDVI feature space constructed in this study shows that the correlation between NDVI and Albedo is high, and the DDI index calculated by its fitting is better for evaluating the degree of desertification in Huade County. From 1990 to 2020, the development trend of desertification in Huade County have been divided into two stages: 1990–2010 is the stage of overall aggravation of desertification, and 2010–2020 is the stage of overall improvement of desertification. From 1990 to 2020, the area of increased desertification in the study area was greater than the area of improvement; the aggravation of desertification is mainly distributed in densely populated areas and near pastures, and the areas where desertification is improved are mainly distributed near seasonal nur. The driving factors of desertification development and change in Huade County mainly include: natural factors, human factors and policy factors. **[Conclusions]** The DDI index calculated by Albedo-NDVI feature space fitting has a good effect on evaluating the degree of desertification in Huade County, and can effectively analyze the spatial and temporal changes and evolution trends of desertification. From 2010 to 2020, under a series of policies of ecological environment protection, desertification control and vegetation restoration, the desertification situation in the study area has improved to a certain extent.

Key words: desertification; NDVI; Albedo; impact factors; environmental geological survey engineering; Huade County; Inner Mongolia

Highlights: (1) The applicability of Albedo-NDVI space in analyzing the spatio-temporal evolution process of desertification in Huade County was proved. (2) The driving factors of desertification development and change in Huade County were qualitatively and quantitatively analyzed, which were summarized as natural factors, human factors and policy factors.

About the first author: LIU Bo, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in regional geological survey; E-mail: liubo33564@163.com.

About the corresponding author: HUO Runbin, male, born in 1990, engineer, mainly engaged in ecological environment remote sensing survey; E-mail: huorb1198@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20230251, No.DD20208003).

1 引言

土地荒漠化是指包括气候变化和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润地区的土地退化。土地荒漠化是一个全球性的环境问题,每年给全世界造成巨大的环境破坏和经济损失。

中国是世界上荒漠化面积大、分布广、荒漠化危害十分严重的国家之一。国家林业和草原局第六次荒漠化和沙化调查成果显示,截至 2019 年,全国荒漠化土地面积 257.37 万 km², 占国土面积的 26.81%; 沙化土地面积 168.78 万 km², 占国土面积的 17.58%; 具有明显沙化趋势的土地面积 27.92 万 km², 占国土面积的 2.91%。中国干旱—半干旱地区多容易发

生荒漠化(朱震达, 1985; Lu et al., 2013; Yu et al., 2016), 内蒙古化德地区属于半干旱的农牧交错区, 其土地荒漠化的问题具有典型性和紧迫性, 因此对该地区开展荒漠化的动态监测、分析荒漠化发展变化的驱动因素尤为重要, 是有效防止和治理土地荒漠化的基本前提。

基于遥感影像具有实时性、多时相性、高效性和信息丰富等特点, 遥感技术在土地荒漠化监测中起到了不可替代的作用。20 世纪 70 年代开始, 遥感技术开始被应用于荒漠化的监测与评估(王一谋, 1989; 朱震达等, 1996)。许多学者通过植被覆盖度调查、遥感解译或者光谱指标分析的方法, 对荒漠化程度及变化的监测研究取得了一定的效果(Mushtak, 2002; 屠志方等, 2016; Tomasella et al., 2018; 王建华等, 2022; 郑艺文等, 2022; Liu et al., 2023)。但随着遥感数据处理方法的发展和遥感数据类型丰富, 部分学者认为植被覆盖度调查结合遥感解译的方法存在遥感信息的利用率和分类精度较低等问题; 而光谱指标分析的方法存在指标单一的缺点, 无法全面反映荒漠化的信息, 也无法实现对荒漠化程度时空动态监测(Zhou et al., 2023)。目前荒漠化的遥感监测发展趋势特点为多空间尺度、多时相以及综合多指标化定量分析(游宇驰等, 2017); 比较常用方法是通过构造“植被指数(NDVI)—反照率(Albedo)特征空间”来进行荒漠化信息遥感提取(潘竟虎和李天宇, 2010; 毋兆鹏等, 2014; 任艳群等, 2014; 颜华茹等, 2020; 魏伟等, 2021; 李玉等, 2022; 罗杰等, 2022)。植被指数(NDVI)具有时空连续性, 可定量监测地表植被覆盖的动态变化, 是表征植被生长状况的重要指标(袁江龙等, 2024)。通过遥感数据反演的地表反照率(Albedo)是反映地表对太阳短波辐射反射特性的物理参量(曾永年等, 2006), 地表植被覆盖度下降、地表水分减少、地表粗糙度降低, 都会导致地表反照率的变化。因此, Albedo 被广泛应用于土地荒漠化的监测。荒漠化过程及其地表特性的变化能在 Albedo-NDVI 特征空间中得到明显直观的反映, 利用 Albedo-NDVI 指数组合评估荒漠化风险的结果准确性较高(Vorovencii, 2017; 李状等, 2025), 多时相的遥感影像数据的对比研究对荒漠化时空分布与动态变化的定量监测具有重要意义。

化德县地势较平坦, 地形起伏不大, 植被稀疏, 第四纪松散堆积物发育, 人类活动对自然生态环境的破坏强烈, 荒漠化问题具有代表性。针对化德县荒漠化问题的研究, 前人多通过计算植被覆盖度的方法进行分析(陈爱侠, 2010; 汪芳甜, 2018; 吕翔宇, 2020; 王姝惠, 2023), 缺少多时相遥感影像分析、荒漠化最新动态及趋势分析, 不能全面反映该地区荒漠化程度和演变特征等信息。因此, 本文以 Landsat 影像为数据源, 通过多时相、多波段的遥感影像数据, 构建了 Albedo-NDVI 特征空间, 获得了以 10 年为跨度的 4 期荒漠化指数, 对研究区 1990—2020 年间的荒漠化空间分布特征和演化规律进行了时空动态监测研究; 探讨了植被指数(NDVI)与反照率(Albedo)特征空间在遥感信息提取中的应用; 并收集了气象数据、人口及粮食产量等数据, 分析了研究区土地荒漠化影响的各种因素, 为研究区荒漠化监测和防治提供了参考。

2 研究区域与研究数据

2.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区中部的乌兰察布市化德县, 地理坐标介于 $41^{\circ}36'47''\text{N}$ ~ $42^{\circ}17'41''\text{N}$ 、 $113^{\circ}33'04''\text{E}$ ~ $114^{\circ}48'13''\text{E}$ 之间。研究区毗邻 4 个旗、县, 北面与锡林郭勒盟正镶白旗、镶黄旗相连, 西和南面与商都县隔山相望, 东部与河北省张家口市康保县接壤。全县总面积为 2534 km^2 , 南北最长距离约 72 km, 东西最长距离约 109 km(图 1)。县辖 3 个镇、3 个乡, 常住人口为 9.52 万人。研究区地处阴山北麓东端、内蒙古高原中部南缘, 区域上位于北方典型农牧交错带, 生态环境相对脆弱。该地区气候属于半干旱大陆性气候, 春季干旱多风、夏季温热短促、秋季冷凉多雨、冬季漫长寒冷; 年平均风速为 3.30 m/s, 年平均大风日数为 34.70 天; 历年平均气温为 3.60°C ; 年平均降水量 324.30 mm。县域内水系不发育, 主要为季节性低洼处湖淖。

2.2 数据来源

本研究以 10 年作为时间间隔, 采用化德县 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年的 Landsat 系列卫星影像作为数据源(表 1)提取了 NDVI 和 Albedo 作为研究数据, 利用 ENVI 5.3 完成了 Landsat 数据的辐射定标、大气校正、水体信息提取等操作。本

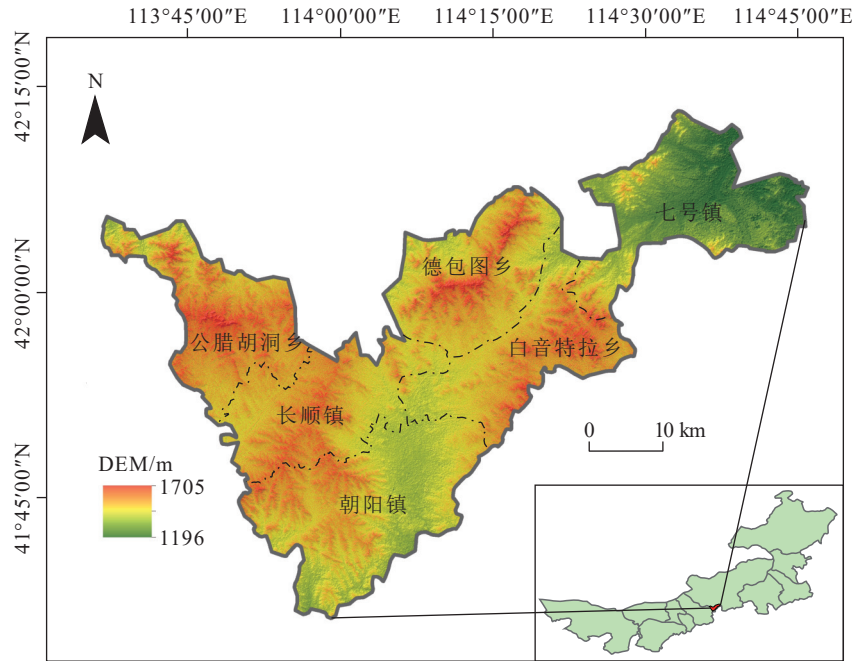


图1 化德县位置区划图

Fig.1 Location of Huade County

表1 遥感数据基本信息

Table 1 Basic information of remote sensing data

	影像编号	传感器类型	行	列	成像时间	云量	大小(M)
1	LT51250311990243BJC02	Landsat5 TM	125	31	1990/8/31	0	625
2	LT51250312000207BJC00	Landsat5 TM	125	31	2000/7/25	0	567
3	LT51250312010186IKR00	Landsat5 TM	125	31	2010/7/5	0	816
4	LO81250312020166BJC00	Landsat8 OLI	125	31	2020/6/14	0.19%	1550

注：影像数据均来源于地理空间数据云，数据下载地址为：<https://www.gscloud.cn>。

文获取的影像数据均来源于地理空间数据云，时间均在6—8月，影像效果及云量可以满足本次研究的精度需求。研究中使用的化德县年平均气温、年平均相对湿度、年平均风速和年平均降水量数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>)，化德县耕地种植面积、人口数、人口密度和粮食产量数据来源于中国经济社会大数据研究平台 (<https://data.cnki.net/>)。

3 研究方法

3.1 Albedo-NDVI 特征空间

NDVI(归一化植被指数)和 Albedo(反照率)计算方法见公式(1)和公式(2)。

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (1)$$

$$Albedo = 0.356\rho_{Blue} + 0.130\rho_{Red} + 0.373\rho_{NIR} + 0.085\rho_{SWIR1} + 0.072\rho_{SWIR2} - 0.0018 \quad (2)$$

式中， ρ_{Blue} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别表示各影像所对应的蓝波段、红波段、近红外波段、短波红外1波段、短波红外2波段的反射率。

由于NDVI(归一化植被指数)和 Albedo(反照率)量纲不一致，要将两者建立线性关系，需进行归一化，公式如下：

$$N = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (3)$$

$$A = (Albedo - Albedo_{min}) / (Albedo_{max} - Albedo_{min}) \quad (4)$$

式中：N和A分别为归一化的NDVI和Albedo； $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 表示NDVI的最大值和最小值， $Albedo_{max}$ 和 $Albedo_{min}$ 表示Albedo的最大值和最小值。

根据前人研究成果可知，Albedo-NDVI特征空间分布图一般呈梯形或三角形，不同地物对应的NDVI和Albedo具有很强的线性负相关性(曾永年等, 2006; 刘英等, 2019; 李嘉豪等, 2023)，AC边为

土壤水分最少的区域,反映一定区域生态环境条件下的干旱程度,称为“干边”,BD 边是地表反照度最低的点,反映在一定区域生态环境条件下的湿润程度,称为“湿边”。一般利用研究区特征空间干边的散点进行线性拟合,即可得到 Albedo-NDVI 特征方程,公式如下:

$$\text{Albedo} = a \times \text{NDVI} + b \quad (5)$$

式中, a 为系数, b 为参数。随着土地荒漠化程度的加剧, NDVI 值逐渐减小, 而 Albedo 逐渐增大, 在 Albedo-NDVI 二维特征空间中, 可以直观地反映荒漠化过程及其地表特征(图 2)。

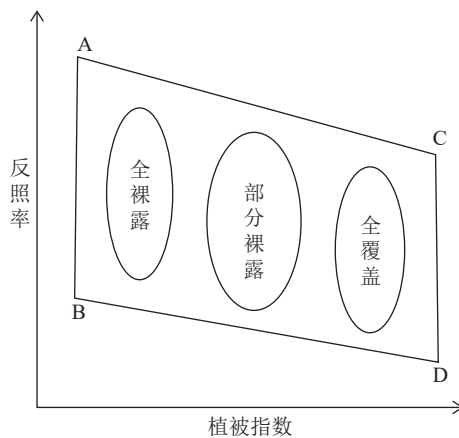


图 2 Albedo-NDVI 特征空间示意图(曾永年等, 2006)

Fig.2 Schematic of Albedo-NDVI feature space (Zeng Yongnian et al., 2006)

3.2 荒漠化差值指数 (DDI)

荒漠化差值指数(DDI, Desertification Difference Index)是在构建 Albedo-NDVI 特征空间的基础上, 被用来指示不同荒漠化程度的指数, 以达到对荒漠化程度的评价和监测, 其公式如下:

$$\text{DDI} = -\frac{1}{a} \times \text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (6)$$

式中, a 为 Albedo 与 NDVI 拟合线的斜率。DDI 越大, 荒漠化越轻; 反之 DDI 越低, 荒漠化越严重。

3.3 区域荒漠化指数 (ADI)

区域荒漠化指数 (ADI, Aeolian Desertification Index) 可以被用来评价区域土地荒漠化发展状况(刘树林等, 2009), 其计算公式如下:

$$\text{ADI} = (S_{sl} + 2S_m + 3S_s + 4S_{es}) / S_A \quad (7)$$

式中: ADI 为荒漠化指数, S_{sl} 为轻度荒漠化土

地面积; S_m 为中度荒漠化土地面积; S_s 为重度荒漠化土地面积; S_{es} 为极重度荒漠化土地面积; S_A 为研究区总土地面积。ADI 值的范围为 0~4, 其值越低表明区域荒漠化程度越轻。

3.4 灰色关联度

灰色关联分析是一种基于灰色系统理论的分析方法。通过将各因子之间的关联度量化为灰色关联度, 从而评估它们对某个问题或某种现象的关联程度(朱杰等, 2020)。该方法对样本较少的情况较为适用, 其公式如下:

$$P_i(k) = [\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)] / [\Delta_i(k) + \rho\Delta(\max)] \quad (8)$$

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_i(k) \quad (9)$$

式中: $P_i(k)$ 为 k 时刻参考数列与比较数列间的关联系数, P_i 为参考数列与比较数列之间的关联度; $\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$ 分别为所有比较数列各时刻的最小绝对差与最大绝对差; $\Delta_i(k)$ 为 k 时刻参考数列与比较数列的绝对差; ρ 为分辨系数, 本文取值为 0.5; n 为时间序列的个数。

4 结果分析

4.1 荒漠化信息提取

4.1.1 Albedo-NDVI 特征空间构建

本研究在本区遥感影像分散随机选取 2000 个样点, 以提取样点对应的 Albedo 值为纵坐标, NDVI 值为横坐标, 以 0.01 为步长, 得到相同 NDVI 的 $\text{Albedo}_{\max}$ 、 $\text{Albedo}_{\min}$ 值, 获取 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年化德县 Albedo-NDVI 特征空间散点图及其干边方程(图 3)。干边拟合方程的 R^2 均大于 0.6, 表明化德县四期遥感数据获得的 NDVI 和 Albedo 具有较强的相关性。

4.1.2 DDI 的荒漠化程度分级

由于采用 Jenks 自然间断点法分级可使各类之间差异化最大(李玉等, 2022), 本研究将荒漠化指数 (DDI) 分为 5 个区间, 分别对应极重度、重度、中度、轻度和未荒漠化 5 类不同荒漠化类型, 荒漠化程度与 DDI 值得关系见表 2。

4.2 荒漠化时空演化特征

4.2.1 时间尺度演化特征

通过上述研究, 笔者得到了四期不同程度荒漠

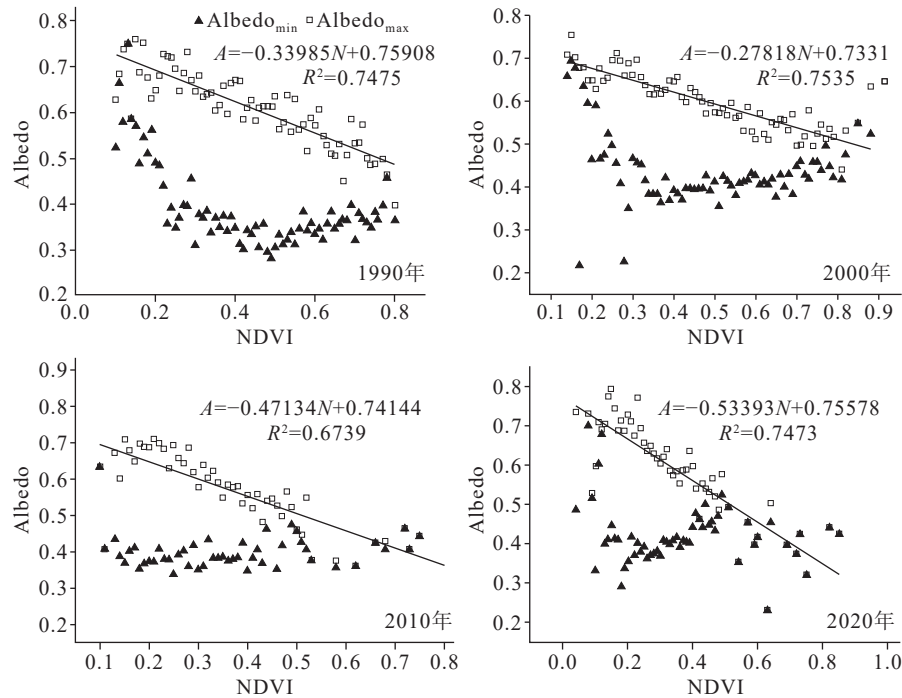


图 3 1990—2020 年化德县 Albedo-NDVI 特征空间散点图
Fig.3 Spatial scatter plot of Albedo-NDVI features in Huade County from 1990 to 2020

表 2 荒漠化程度与 DDI 值的关系

Table 2 DDI value for different desertification level				
类别	1990年	2000年	2010年	2020年
非荒漠化	≥1.347	≥1.823	≥0.550	≥0.308
轻度荒漠化	0.978~1.347	1.373~1.823	0.251~0.550	0.051~0.308
中度荒漠化	0.673~0.978	0.971~1.373	0.055~0.251	-0.090~0.051
重度荒漠化	0.330~0.673	0.597~0.971	-0.110~0.051	-0.231~-0.090
极重度荒漠化	≤0.330	≤0.597	≤-0.110	≤-0.231

化面积数据(表 3)。总体来看,在 1990—2020 年,化德县荒漠化面积(轻度、中度、重度和极重度荒漠化面积之和)变化趋势可分为两个阶段(图 4)。第一个阶段为 1990—2010 年,在此期间化德县荒漠化面积持续增加(由 2258.66 km² 增至 2485.23 km²),

其中极重度荒漠化的面积由 243.96 km² 增加至 687.22 km²,增幅为 181.69%;重度荒漠化的面积由 630.74 km² 增加至 927.44 km²;同期,中度荒漠化和轻度荒漠化的面积都呈现逐渐减少的趋势,分别减少了 151.55 km²、361.84 km²,非荒漠化区域面积减

表 3 1990—2000 年化德县荒漠化类型面积变化 (km²)

Table 3 Changes in the area of desertification types in Huade County from 1990 to 2000 (km ²)								
荒漠化程度	极重度	重度	中度	轻度	未荒漠化	水体	极重度+重度荒漠化	荒漠化总面积
1990年	243.96	630.74	764.55	619.41	258.38	19.01	874.70	2258.66
2000年	408.76	754.99	641.15	497.35	227.47	6.33	1163.75	2302.25
2010年	687.22	927.44	613.00	257.57	47.18	3.64	1614.66	2485.23
2020年	301.07	836.51	871.53	465.30	53.66	7.98	1137.58	2474.41
1990—2000年	变化值	164.80	124.25	-123.40	-122.06	-30.91	-12.67	
	年变化率/%	6.76%	1.97%	-1.61%	-1.97%	-1.20%	-6.67%	
2000—2010年	变化值	278.46	172.45	-28.15	-239.78	-180.29	-2.71	
	年变化率/%	6.81%	2.28%	-0.44%	-4.82%	-7.93%	-4.28%	
2010—2020年	变化值	-386.15	-90.93	258.53	207.73	6.48	4.36	
	年变化率/%	-5.62%	-0.98%	4.22%	8.06%	1.37%	12.04%	

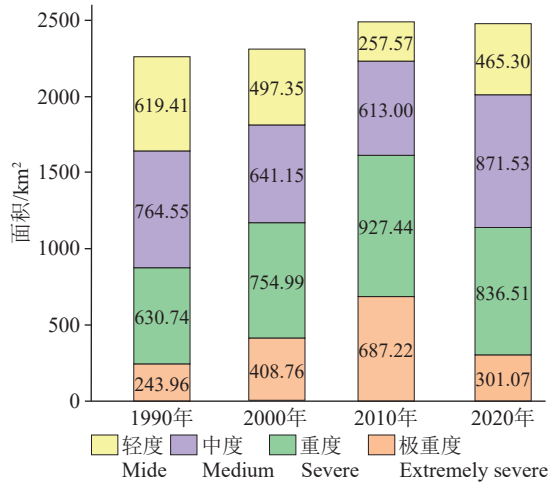


图 4 1990—2020 年化德县不同程度荒漠化面积情况
Fig.4 Area with different degrees of desertification in Huade County from 1990 to 2020

少 226.58 km²。以上数据表明, 在 1990—2010 年, 化德县荒漠化程度加剧, 非荒漠化区域被荒漠化区域占据。第二个阶段为 2010—2020 年, 化德县荒漠化面积减少了 10.82 km², 其中极重度荒漠化面积由 687.22 km² 减少为 301.07 km², 变化速率为

-38.62 km²/a, 重度荒漠化面积由 927.44 km² 减少为 836.51 km², 变化速率为-9.09 km²/a, 中度和轻度荒漠化的面积都呈现增长趋势, 两者面积分别增加了 258.53 km²、207.73 km², 非荒漠化区域面积增加了 6.48 km²。以上变化表明, 在 2010—2020 年, 化德县荒漠化范围缩减, 部分区域荒漠化程度得到改善。

4.2.2 空间尺度演化特征

化德县荒漠化空间分布格局如图 5 所示。1990 年化德县极重度和重度荒漠化区域主要分布在东北部七号镇、西北部公腊胡洞乡和长顺镇西部; 中度荒漠化主要分布在朝阳镇及其南部区域、白音特拉乡东部; 轻度荒漠化和未荒漠化主要分布在长顺镇中部区域。与 1990 年相比, 2000 年化德县极重度荒漠化的范围扩大, 由公腊胡洞乡北部区域向南侧和东侧漫延, 与长顺镇西部的极重度荒漠化区域相接, 而七号镇全区几乎被极重度荒漠化占据; 重度和中度荒漠化主要分布在德包图乡白音特拉乡和化德县西南部; 未荒漠化的区域集中分布在长顺镇和朝阳镇周围。2010 年, 极重度荒漠化范围

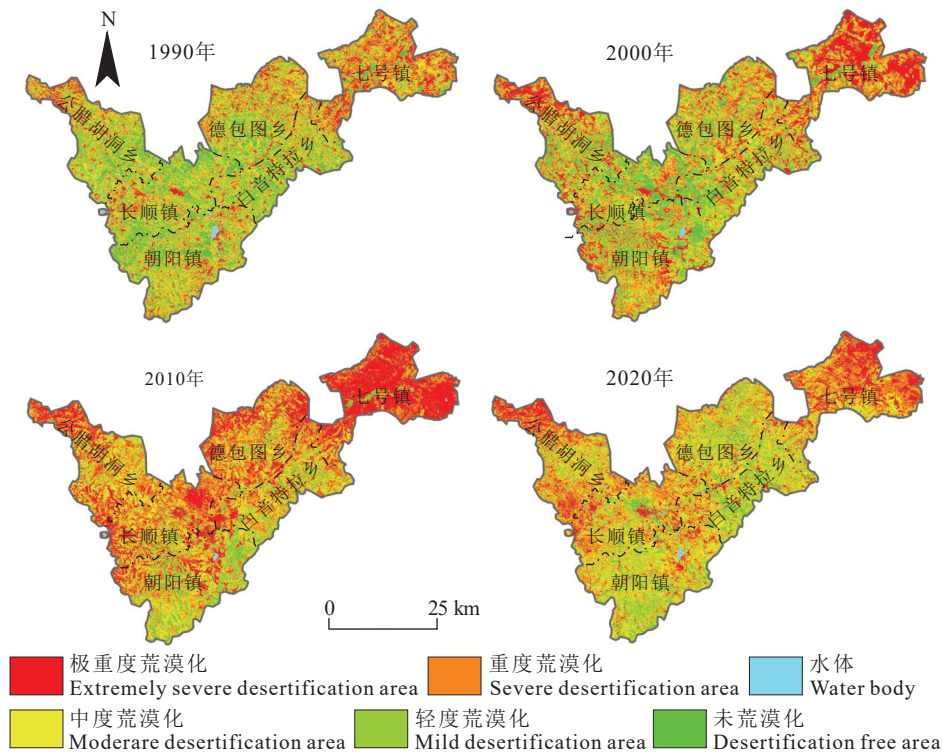


图 5 1990—2020 年化德县荒漠化空间格局
Fig.5 Spatial pattern of desertification in Huade County from 1990 to 2020

持续扩散, 主要分布在长顺镇和朝阳镇中部、德包图乡北部以及七号镇 64% 以上区域; 重度和中度荒漠化主要分布在公腊胡洞乡中部至朝阳镇中西部; 轻度和未荒漠化区域主要分布在朝阳镇南部和白音特拉乡南部。与 2010 年相比, 2020 年化德县极重度和重度荒漠化的范围明显缩减, 主要分布在公腊胡洞乡北部、长顺镇西部、长顺镇和朝阳镇中部及七号镇东部; 中度荒漠化广泛分布在德包图乡北部、白音特拉乡东部和朝阳镇中西部; 轻度和未荒漠化区域主要分布在白音特拉乡南部和朝阳镇南部。总体来看, 化德县东北部七号镇和西北部公腊胡洞乡历年来都是荒漠化剧烈程度较高的区域。通过实地调查结合地质特征来看, 七号镇和公腊胡洞乡地势普遍较低, 地表广泛分布全新统冲洪积物和冲积物, 植被覆盖度低, 是土地荒漠化的易发区。

4.3 荒漠化演化趋势

根据公式(7)计算结果, 化德县 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年荒漠化指数(ADI)的分别为 1.98、2.24、2.77、2.34。荒漠化指数表明, 1990—2020 年间化德县荒漠化程度经历了先加剧后改

善的过程, 其中 2010 年该区域荒漠化程度最高。通过分别对 1990、2000、2010、2020 年每相邻两期荒漠化数据做叠加分析, 得到不同程度荒漠化土地转移变化数据(表 4)及荒漠化程度转化桑基图(图 6)。

在 1990—2000 年, 极重度荒漠化面积转出 136.40 km², 其他程度荒漠化转入极重度荒漠化面积为 296.44 km²(其中由重度转为极重度荒漠化的面积为 184.49 km², 中度转入极重度荒漠化的面积为 91.13 km²); 重度荒漠化转出的面积为 398.38 km², 其他程度荒漠化转入重度荒漠化的面积为 519.96 km²(其中由中度转为重度荒漠化面积为 215.58 km², 轻度转化为重度荒漠化面积为 200.05 km²)。1990—2000 年, 化德县极重度和重度荒漠化面积增加了 281.62 km², 占化德县总面积的 11.1%。2000—2010 年, 化德县极重度荒漠化转出面积为 124.32 km², 其他程度荒漠化转入极重度荒漠化面积为 401.56 km²(其中由重度转为极重度荒漠化的面积为 263.82 km², 中度转为极重度荒漠化的面积为 92.51 km², 轻度转为极重度荒漠化的面积为 33.14 km²); 重度荒漠化

		表 4 1990—2000 年化德县荒漠化土地变化转移矩阵 (km ²)					
		Table 4 Transition matrix of desertification land in Huade County from 1990 to 2000 (km ²)					
		2000年					
		极重度荒漠化	重度荒漠化	中度荒漠化	轻度荒漠化	未荒漠化	转出
1990年	极重度荒漠化	107.28	73.32	41.00	16.94	5.14	136.40
	重度荒漠化	184.49	232.31	130.83	65.76	17.30	398.38
	中度荒漠化	91.13	291.71	215.58	127.99	37.98	548.82
	轻度荒漠化	18.35	139.53	200.05	183.42	77.93	435.85
	未荒漠化	2.46	15.40	51.61	101.48	87.40	170.96
	转入	296.44	519.96	423.48	312.17	138.36	
	总计	403.72	752.27	639.06	495.60	225.75	
		2010年					
		极重度荒漠化	重度荒漠化	中度荒漠化	轻度荒漠化	未荒漠化	转出
2000年	极重度荒漠化	283.78	106.33	16.14	1.72	0.13	124.32
	重度荒漠化	263.82	370.33	105.65	14.08	0.85	384.40
	中度荒漠化	92.51	259.37	209.92	73.25	5.97	431.10
	轻度荒漠化	33.14	136.53	198.47	111.06	18.05	386.19
	未荒漠化	12.09	53.45	82.30	57.35	22.15	205.19
	转入	401.56	555.68	402.56	146.40	25.00	
	总计	685.34	926.01	612.48	257.46	47.15	
		2020年					
		极重度荒漠化	重度荒漠化	中度荒漠化	轻度荒漠化	未荒漠化	转出
2010年	极重度荒漠化	172.24	339.05	152.20	20.33	0.74	512.32
	重度荒漠化	80.51	282.83	394.03	163.52	4.32	642.38
	中度荒漠化	36.90	146.57	219.85	194.82	13.99	392.28
	轻度荒漠化	9.52	59.62	93.42	76.62	18.08	180.64
	未荒漠化	1.35	7.96	11.32	9.93	16.46	30.56
	转入	128.28	553.20	650.97	388.60	37.13	
	总计	300.52	836.03	870.82	465.22	53.59	

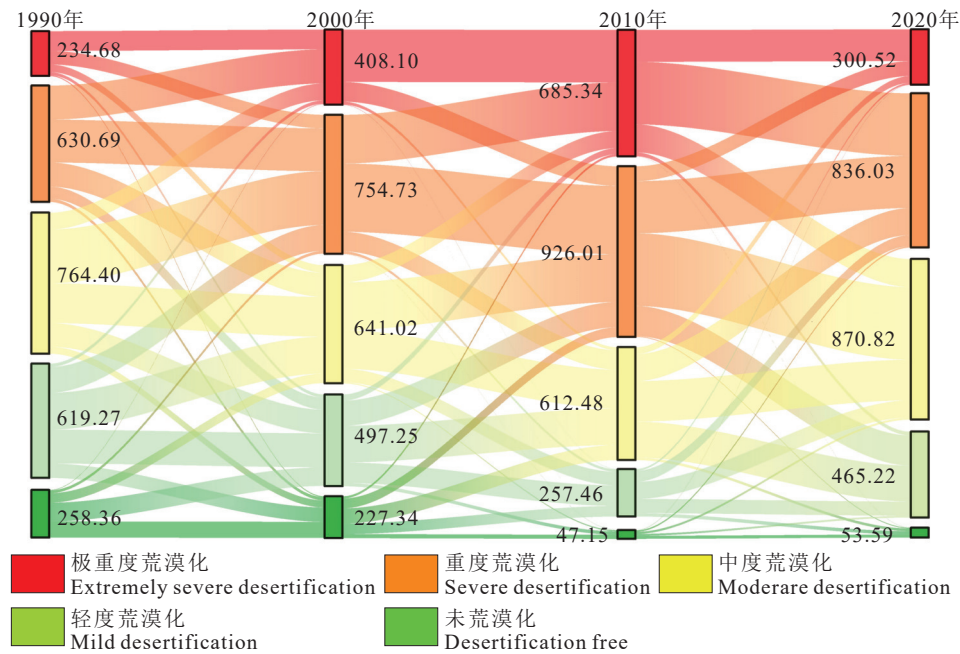


图 6 1990—2020 年化德县荒漠化程度转化桑基图
Fig.6 Sankey diagram of desertification degree transformation in Huade County from 1990 to 2020

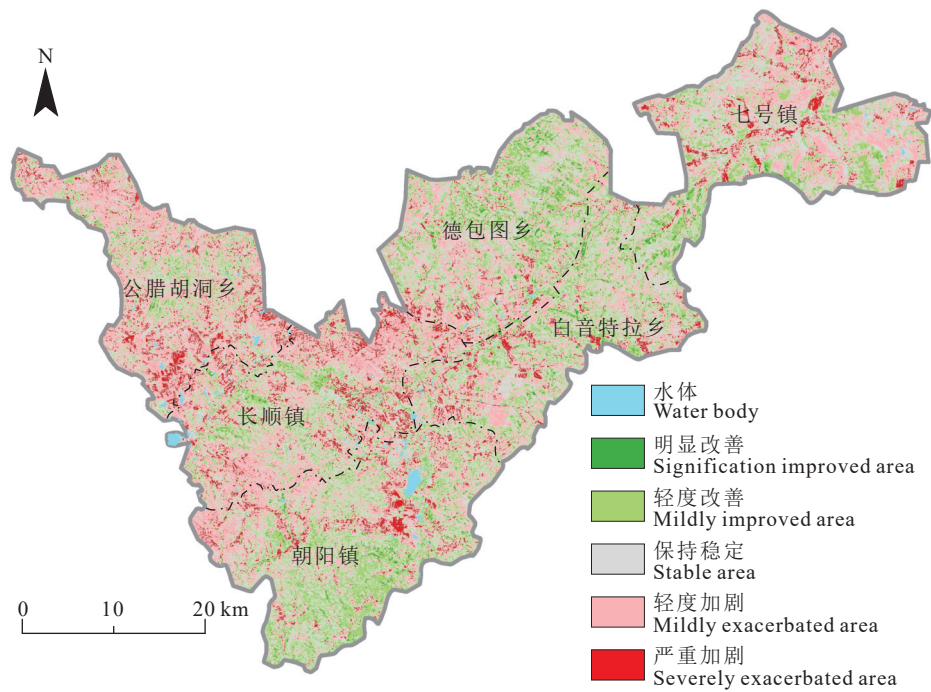


图 7 1990—2020 年化德县荒漠化演化程度图
Fig.7 Map of desertification evolution degree in Huade County from 1990 to 2020

面积转出了 384.40 km², 其他程度荒漠化转入重度荒漠化的面积为 555.68 km²(中度荒漠化转入重度荒漠化的面积为 259.37 km², 轻度荒漠化转为重度荒漠化的面积为 209.92 km²)。2000—2010 年间, 化德县极重度和重度荒漠化面积净增加 448.52 km²。2010—2020 年, 化德县极重度荒漠化转入面积为 128.28 km², 转出为其他程度荒漠化面积为 512.32 km² (其中转出为重度荒漠化面积为 229.05 km², 转出为

中度荒漠化面积为 152.20 km²);化德县重度荒漠化转入面积为 553.20 km²,转出为其他程度荒漠化面积为 642.38 km²(其中转出为中度 and 轻度荒漠化的面积分别为 394.03 km²、163.52 km²)。2010—2020 年间,化德县极重度和重度荒漠化面积净减少 473.22 km²,表明这个时期,化德县荒漠化程度总体得到了一定程度的改善。

从时间尺度上看,化德县的荒漠化程度表现为两个阶段:1990—2010 年为荒漠化程度总体加剧的阶段;2010—2020 年为荒漠化程度总体改善的阶段。从空间分布上看,化德县荒漠化情况严重加剧区域主要集中在公腊胡洞乡、长顺镇和朝阳镇中北部,以及七号镇东北部;荒漠化情况得到改善的区域主要分布在朝阳镇南部、德包图乡东北部和白音特拉乡东北部(图 7)。总体来看,1990—2020 年,化德县荒漠化程度加剧面积为 1118.82 km²,占全县总面积的 44.12%,荒漠化程度改善面积为 593.49 km²,占全县总面积的 23.4%。

5 化德县荒漠化演化影响因素分析

根据多位学者对荒漠化驱动因子分析的结论,中国北方地区荒漠化的演化和发展是自然、人为、政策等多种驱动因素的共同作用的过程(刘平贵和李雪菊,2000;何学慧和张利平,2015;刘庆福,2020)。因此,本研究选取化德县 1990—2020 年间的自然和人为等驱动因素相关数据在一定时间段内的变化趋势,结合化德地区地质特征以及国家和地方的

政策,对化德地区 30 年间荒漠化发展变化的驱动因素进行探讨。其中自然因素包括年均气温、年均降水量、年平均风速、年平均相对湿度 4 个指标,人为因素则包括人口密度(人/平方公里)、粮食播种面积、粮食产量、人口数 4 个指标(表 5),政策因素包括国家和地方在研究区实施的一系列生态保护修复政策和工程。

本次研究将 ADI 作为母序列和其他 8 个特征序列变量数据作均值化处理,分辨系数为 0.5,求得各因子与 ADI 的关联系数(表 6),关联系数结果进行加权处理后得出关联度值结果(图 8)。

5.1 自然因素

研究区属于高原丘陵地带,地形较平缓,地势开阔,分布着平坦广阔的草原,新生界松散堆积层分布较广。该区具有半干旱大陆性气候的特征,夏季炎热干燥,而冬季和春季则寒冷多风,风力大多在 6 级以上;光照时数约 3046.80 h,年平均降水量 324.30 mm,水系不发育,多为季节性湖泊(淖)。以上这些自然条件是本区土地荒漠化发生的基础。

从地质角度看,研究区草地下覆的地层主要是中元古代化德群的千枚岩、板岩、砂岩、粉砂岩以及下二叠统三面井组的砂岩和额里图组的火山碎屑岩(Liu et al., 2024),这些沉积物的特性是黏性低、疏松,易解体成砂土和粉砂土(Dewey et al., 1988)。此外本区第四系沉积物发育,约占全区的 40%,松散的第四系沉积物中的砂质黏土、细砂为荒漠化提供了物源。区内重度荒漠化发育区正是

表 5 气候因素与人为因素指标数据
Table 5 Climate factors and human factors index data

年份	母序列	子序列							
	ADI	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均风速/(m/s)	年均降水量/mm	人口数	人口密度/(人/km ²)	粮食播种面积/hm ²	粮食产量/t
1990年	2.34	3.78	54.22	3.39	300.00	159357	63	40393	6.11
2000年	2.77	3.00	58.00	3.60	410.10	123535	49	35361	4.54
2010年	2.24	3.00	59.00	3.10	301.00	160000	62	45327	8.70
2020年	1.98	3.00	57.00	3.60	402.50	153949	61	52153	6.60

表 6 各因子与区域荒漠化指数 (ADI) 的关联系数
Table 6 The correlation coefficient between each factor and regional desertification index (ADI)

年份	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均风速/(m/s)	年均降水量/mm	人口数	人口密度/(人/km ²)	粮食播种面积/hm ²	粮食产量/t
1990年	0.6017	0.8641	1.0000	0.6433	0.8255	0.8141	0.8154	0.8399
2000年	0.5193	0.6165	0.6739	0.9443	0.4236	0.4280	0.4158	0.3494
2010年	0.9596	0.8076	0.8532	0.7227	0.7205	0.7568	0.7769	0.4099
2020年	0.7656	0.6488	0.5720	0.4787	0.5990	0.5900	0.4265	0.6200

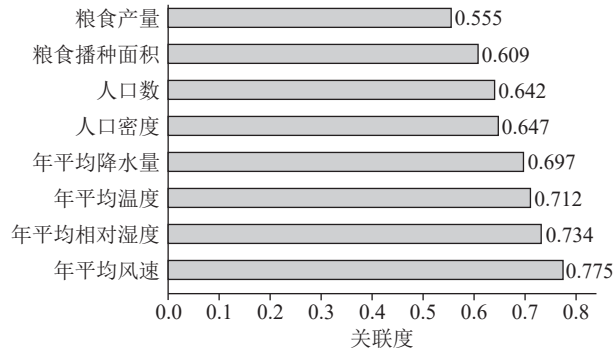


图 8 各指标与化德县荒漠化程度关联度指数
Fig.8 Index of correlation between indicators and the extent of desertification in Huade County

第四系集中分布区也说明了这一点。从气候角度看,研究区半干旱大陆气候导致了干旱、多风,大风天气主要集中在冬、春两季,约占全年总日数的五分之三,而这个时期正是降水稀少的季节,因此干旱且松散的砂质地表极易被大风吹蚀,引起土地荒漠化。干旱和多风以及二者在时间配置上的一致性(图 9)是本区土地荒漠化的重要因素。从图 8 中也可以看出,温度、湿度、风速是与化德县荒漠化程度关联度指数较高的因素。选取的自然因素指标关联度值依次为年平均风速>年平均相对湿度>年

平均温度>年平均降水量。综上所述,本区地质条件为荒漠化提供了物质基础,气候特征提供了动力条件。

5.2 人为因素

本区现代荒漠化的发生、发展与人类近百余年来高强度的经济活动密切相关。化德县荒漠化程度严重的区域多为人口密度较大的地区(图 7)。1990—2010 年,化德县常住人口从 16.00 万人持续增加到 17.76 万人,到 2020 年下降到 15.94 万人(中国经济社会大数据研究平台),人口数量的增加和减少的过程与荒漠化时间尺度上加剧和减轻的阶段相吻合。人口数量、密度、耕种的面积和粮食产量是与化德县荒漠化程度相关联的因素(图 8),关联度值依次为人口密度>人口数>粮食播种面积>粮食产量。

1990—2010 年间,随着化德县区域人口的增长及经济发展,加大了人类对土地资源需求的压力,人们为了生存,开垦草原、过度放牧等,由于载畜量过高和乱耕土地导致草原面积大幅度减少,加重了土地荒漠化的压力。在自然条件下,土壤和植被之间长期相互作用会形成一个较稳定的循环,使土壤

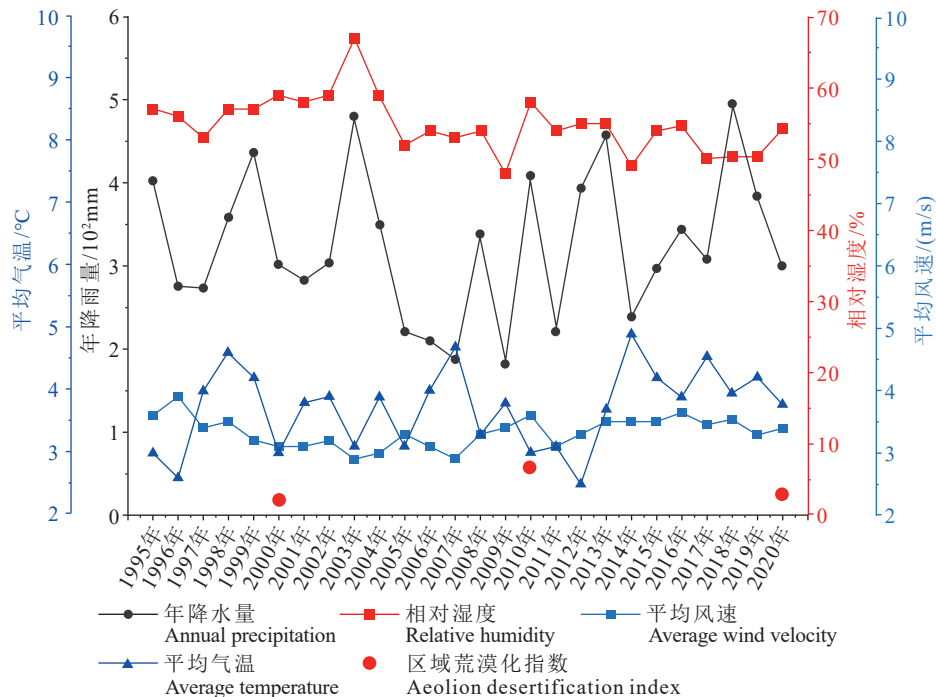


图 9 1995—2020 年化德县气象指标各年度变化情况
Fig.9 Annual changes of meteorological indicators in Huade County from 1995 to 2020

和植被系统朝着适应环境的方向发展。而人口增长带来的粮食需求,促使人们不断开垦土地,增加粮食种植面积,这就打破了旧的土壤和植被平衡系统,使其朝着干旱荒漠的土壤和植被系统发展。区内土壤中坡洪积土壤和风积土壤占主体,主要成分为黏质砂土、黄土状亚砂土及细砂等;这些成分成壤性差,黏粒成分比较少,结构比较松散。土地开垦后,直接破坏地表生态系统和土壤结构,在风蚀作用下,细粒物质(包括营养物质成分)被吹失,在下风方向堆积形成流沙;粗粒物质停留在原地,导致地表粗化。土地耕种导致土壤结构破坏、肥力透支,最终导致荒漠化。土地开垦成耕地后,往往伴随着过度抽取地下水、不合理灌溉等,会导致地下水位下降,土壤盐碱化加剧,植被死亡,进一步促进了荒漠化的发生。过度放牧也是导致本区土地荒漠化的重要人为因素。超载的牲畜量使草地的利用过度并造成破坏,从而发生草地退化并难以恢复,为荒漠化提供发生与发展的条件(李晓英等, 2015)。春季过早放牧,使牧草不能正常发芽;夏季过度放牧,植被不能有效地进行光合作用,植物得不到充足营养,导致生长能力减弱;秋季迟牧,使种子不能正常成熟,植被繁殖能力降低。草原环境退化,鼠类等有害动物日益增多,其将地表破坏后使土壤裸露,从而为风沙运移活动提供沙物质(李敏和杨立, 2021)。随着草原植被的破坏,草原生态系统的平衡被打破,加速了土地荒漠化的进程。

2010—2020 年间,由于化德县人口数量的减少,相应的过度放牧、土地耕种等人类活动减少,有效地缓解了研究区荒漠化情况,使部分区域由极重度、重度荒漠化转变为中、轻度荒漠化,对该地区整体生态环境改善起到了积极作用。

5.3 政策因素

政府的管理与政策的实施在推动生态环境改善中扮演着至关重要的角色,是生态环境变化的驱动因素之一。2000 年开始,我国陆续颁布和实施了《中华人民共和国防沙治沙法》、《退耕还林条例》等一系列生态环境防治的法律和政策。化德县在国家及内蒙古自治区的大力支持下,积极响应国家生态文明建设号召,参与了京津风沙源治理工程和“三北防护林”体系建设,推进了“退耕还林还草”工程,积极落实“禁牧休牧”政策。通过一系列政策引

导、科学规划、精准施策的荒漠化防治措施,2010—2020 年间,化德县的生态环境得到了显著改善,荒漠化状况得到有效控制并逐步逆转。这也反映出在政策的影响下,可以使土地荒漠化的趋势发生逆转。随着国家治理荒漠化和生态修复的力度加大和持续发力,相信化德县荒漠化的状况会持续改善,继续向好的方向发展。

这些成就不仅是对“绿水青山就是金山银山”理念的生动实践,也为其他地区提供了宝贵的经验和启示。相信通过继续深化生态文明建设和各项生态环境政策的有序推进,化德县将探索出更多符合当地实际的绿色发展路径,构建出人与自然和谐共生的美好家园。

6 结论

本文以 10 年作为时间间隔,采用化德县 1990—2020 年共四期 Landsat 系列卫星影像作为数据源,提取 NDVI 和 Albedo 数据,构建了 Albedo-NDVI 特征空间的散点图,并通过其构建的 DDI 指数分析了化德地区土地的荒漠化程度、分布特征和演变规律,探讨了荒漠化发展变化的驱动因素。具体结论如下:

(1)本研究构建了 Albedo-NDVI 特征空间,其中干边散点拟合的线性模型显示 NDVI 和 Albedo 的相关性较高,由其拟合计算得出的 DDI 指数对于评价化德县荒漠化程度效果较好;证明了 Albedo-NDVI 特征空间能够有效分析荒漠化的时空变化、演化趋势。

(2)整体来看,1990—2020 年化德县荒漠化程度加剧的面积大于改善的面积;荒漠化加剧主要分布在居住密集区以及牧场附近,荒漠化得到改善的区域主要分布在季节性淖尔附近。但从时间尺度上来看,化德县 1990—2020 年荒漠化程度变化趋势分为 2 个阶段:1990—2010 年极重度和重度荒漠化面积总体一直保持增加的趋势;2010—2020 年极重度和重度荒漠化面积趋于减少,极重度和重度荒漠化面积的占比也有所下降。可见,近些年化德县荒漠化程度得到了一定改善。

(3)化德县荒漠化发展变化的驱动因素可以归纳为:自然因素、人为因素和政策因素。自然因素主要表现在区内第四系沉积物较为发育,是荒漠化

主要的砂质来源,为荒漠化提供了物质基础;而气候上的干旱、多风及二者在时间上的一致性,对荒漠化的发展和地表形态的塑造提供了动力来源。人为因素主要表现在近百余年来的经济活动对荒漠化的影响,具体包括土地开垦、不合理灌溉、过度放牧以及乱砍乱伐等,人类活动造成的地表植被破坏加剧了土地荒漠化的发展。政策因素对荒漠化的发展也起到了重要作用,在生态系统保护修复、京津风沙源治理、“三北”防护林体系建设等重大工程以及控制过度放牧、退耕还林、地下水超采综合治理等一系列的政策管理和工程治理下,从 2010 年开始,研究区土地荒漠化情况有了一定的改善。

本文采用化德县 30 年间的四期 Landsat 系列卫星遥感数据,构建了 Albedo-NDVI 特征空间,分析了化德县的土地荒漠化程度、分布特征和演变规律,探讨了荒漠化发展变化的影响因素。但本次研究的数据类型、时间跨度和区域有限,对于荒漠化的研究,还需要考虑不同区域的自然地理条件差异性以及生态环境保护和土地利用规划政策的区别。在荒漠化的治理方面,还应根据不同区域荒漠化的产生、扩张规律及驱动因素,采用有针对性的生态环境保护、修复或治理措施。

References

- Chen Aixia. 2010. A Study on the Ecological Environment Protection Technologies Applied in Highway Construction in Desertification Areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 1-143 (in Chinese with English abstract).
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, Sun Y Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 327(1594): 379-413.
- He Xuehui, Zhang Liping. 2015. An analysis of policy factors in the desertification of Northern China from 1949[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 44(4): 64-68 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiahao, Liu Yuguo, Zhao Ziqing, Zhou Yining, Xu Zihan, Chen Xinjun, Cui Ming. 2023. Temporal and spatial dynamic monitoring of land desertification and landscape pattern evolution characteristics in the Xiaoluan River Basin[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 40(6): 1322-1332 (in Chinese with English abstract).
- Li Min, Yang Li. 2021. Rodent control technology in grassland ecological construction and its application suggestions[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 41(35): 52-53 (in Chinese).
- Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Wang Hongwei, Xiao Jianhua. 2015. The driving mechanism of sandy desertification in the Zoige Basin of China[J]. *Journal of Desert Research*, 35(1): 51-59 (in Chinese with English abstract).
- Li Yu, Tao Conghui, Zhao Quanhua. 2022. A remote sensing classification method of land desertification based on EVI-Albedo space[J]. *Remote Sensing Information*, 37(5): 8-14 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhuang, Liu Hongwei, Bai Yaonan, Han Bo, Miao Jinjie, Du Dong, Xu Danhong. 2025. Spatiotemporal dynamic monitoring of desertification in Kangbao County of Zhangjiakou City based on Albedo-NDVI feature space[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 46(2): 409-418 (in Chinese with English abstract).
- Liu B, Jin S K, Tian G H, Li L Y, Qin Y Q, Xie Z Y, Ma M, Yin J L. 2024. Mesoproterozoic (ca. 1.3 Ga) A-type granites on the northern margin of the North China Craton: Response to break-up of the Columbia Supercontinent[J]. *Minerals*, 14(6): 622.
- Liu G D, Wei M H, Yang Z, Xiao H Y, Zhang Y H, Fang N N. 2023. Relationship between spatio-temporal evolution of soil pH and geological environment/surface cover in the eastern Nenjiang River Basin of Northeast China during the past 30 years[J]. *China Geology*, 6(3): 369-382.
- Liu Pinggui, Li Xueju. 2000. Geological environment of land desertification in the northern part of China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 190-197 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingfu. 2020. Desertification Evolution, Restoration Assessment of Aerial Seeding and Impact of Desertification on Ecosystem Services in Mu Us Desert[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 1-114 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shulin, Wang Tao, Qu Jianjun, Chen Guangting. 2009. Aeolian desertification development of grassland in the Northern China and its causes: A case study of Sonid Zuoqi[J]. *Journal of Desert Research*, 29(2): 206-211, 383 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ying, Li Yao, Lu Yang, Yue Hui. 2019. Monitoring of desertification and drought in loess plateau based on NDVI-Albedo space[J]. *Remote Sensing Information*, 34(2): 30-35 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, Yi S W, Xu Z W, Zhou Y L, Zeng L, Zhu F Y, Feng H, Dong L N, Zhuo H X, Yu K. 2013. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2775-2783.
- Luo Jie, Liu Suihua, Ruan Ou, Hu Haitao. 2022. Extraction of rocky desertification information using NDVI-Albedo feature space[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4): 56-60, 82 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiangyu. 2020. A Study on the Ecological Sustainable Development of the Farming-Pastoral Ecotone in Inner Mongolia: Take Huade County of Ulanqab City as the Case[D]. Hohhot: Inner Mongolia University (in Chinese with English abstract), 1-53.
- Mushtak T J. 2002. Desertification risk monitoring for North Shaanxi

- Province, China, using normalized difference vegetation index (NDVI)[J]. *Journal of China University of Geosciences*, (1): 62–70, 98.
- Pan Jinghu, Li Tianyu. 2010. Extracting desertification from Landsat Imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-vegetation feature space[J]. *Journal of Natural Resources*, 25(11): 1960–1969 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yanqun, Liu Hailong, Tang Lixin, Jiang Liangliang, An Xiaoyan. 2014. A study on dynamic changes of desertification in south edge of Junggar Basin based on NDVI-Albedo features[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(2): 267–271 (in Chinese with English abstract).
- Tu Zhifang, Li Mengxian, Sun Tao. 2016. The status and trend analysis of desertification and sandification[J]. *Forest Resources Management*, (1): 1–5, 13 (in Chinese with English abstract).
- Tomasella J, Vieira S, Barbosa A, Rodriguez D, Santana M, Sestini M. 2018. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 197–206.
- Vorovencii I. 2017. Applying the change vector analysis technique to assess the desertification risk in the south-west of Romania in the period 1984–2011[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 189(10): 524.
- Wang Fangtian. 2018. Evaluation of Ecological Effects for the Grain for Green Project in the Farming-pastoral Ecotone of Northern China: A Case Study in the Ulanqab City[D]. Beijing: China Agricultural University, 1–136 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhua, Li Yang, Liang Shuneng, Sun Xiaofei. 2022. The study of land desertification recognition and extraction based on hyperspectral satellite data[J]. *North China Geology*, 45(4): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuhui. 2023. Survey and Analysis of Natural Grassland Resources in Ulanqab, Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 1–82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yimou. 1989. Studies on remote sensing digital image processing of desertification[J]. *Journal of Desert Research*, 9(1): 137–141 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhaopeng, Wang Mingxia, Zhao Xiao. 2014. A study on desertification based on desertification difference index in Jinghe watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 34(4): 188–192 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wei, Yu Xiao, Zhang Mengjuan, Zhang Juan, Liu Chunfang. 2021. Dynamics of desertification in the lower reaches of Shiyang River Basin, Northwest China during 1995–2018[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(6): 2098–2106 (in Chinese with English abstract).
- Yan Huaru, Wang Ranghui, Ning Husen, Peng Qing, Zhou Lu, Li Cheng. 2020. Assessment and compensation mode of ecological environment damage of Tarim River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40(1): 262–268 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- You Yuchi, Li Zhiwei, Huang Chao, Zeng Hang. 2017. Spatial-temporal evolution characteristics of land desertification in the Zoige Plateau in 1990 —2016[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 26(10): 1671–1680 (in Chinese with English abstract).
- Yu K F, Hartmann K, Nottebaum V, Stauch G, Lu H Y, Zeeden C, Yi S W, Wünnemann B, Lehmkuhl F. 2016. Discriminating sediment archives and sedimentary processes in the arid endorheic Ejina Basin, NW China using a robust geochemical approach[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119: 128–144.
- Yuan Jianglong, Zhao Honghui, Liu Xiaohuang, Li Hongyu, Jiang Dong, Zhao Chuanyan, Xing Liyuan, Ya Xinping, Wang Ran, Wang Chao. 2024. Driving force analysis and ecological evaluation of spatiotemporal changes in vegetation cover in the Kunlun Mountains from 2000 to 2020[J]. *Geology in China*, 51(6): 1822–1838 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yongnian, Xiang Nanping, Feng Zhaodong, Xu Huo. 2006. Albedo-NDVI space and remote sensing synthesis index models for desertification monitoring[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 26(1): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yiwen, Li Fujie, Liu Xiaohuang, Chang Ming, Zhao Honghui, Lai Ming, Zhang Zifan. 2022. Temporal and spatial variation of natural resources and their ecological environment effects in Northeast China in the past 30 years under the background of industrialization[J]. *Geology in China*, 49(5): 1361–1373 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Q, Hu Z W, Geng Q Q, Ma J R, Liu J Y, Wang M, Wang Y C. 2023. Monitoring and analysis of desertification surrounding Qinghai Lake (China) using remote sensing big data[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30: 17420–17436.
- Zhu Jie, Gong Jian, Li Jingye. 2020. Spatiotemporal change of habitat quality in ecologically sensitive areas of eastern Qinghai-Tibet Plateau: A case study of the Hehuang Valley, Qinghai Province[J]. *Resources Science*, 42(5): 991–1003 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhenda. 1985. Status and trend of desertification in Northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 5(3): 4–12 (in Chinese).
- Zhu Zhenda, Wu Huanzhong, Cui Shuhong. 1996. Land desertification/land degradation control and environmental protection in China[J]. *Rural Ecological Environment*, 12(3): 1–6 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈爱侠. 2010. 荒漠化区域公路建设生态环境保护技术研究[D]. 西安: 长安大学, 1–143.
- 何学慧, 张利平. 2015. 新中国以来中国北疆荒漠化的政策因素分析——以内蒙古乌兰察布为例[J]. *内蒙古师范大学学报(哲学社会科学版)*, 44(4): 64–68.
- 李嘉豪, 刘玉国, 赵紫晴, 周怡宁, 徐子涵, 陈新均, 崔明. 2023. 小滦

- 河流域土地沙化时空动态监测及景观格局演变特征[J]. 浙江农林大学学报, 40(6): 1322-1332.
- 李敏, 杨立. 2021. 草原生态建设中鼠害治理技术及其应用建议[J]. 农业工程技术, 41(35): 52-53.
- 李晓英, 姚正毅, 王宏伟, 肖建华. 2015. 若尔盖盆地沙漠化驱动机制[J]. 中国沙漠, 35(1): 51-59.
- 李玉, 陶从辉, 赵泉华. 2022. 基于 EVI-Albedo 特征空间的土地荒漠化遥感分类方法[J]. 遥感信息, 37(5): 8-14.
- 李状, 刘宏伟, 白耀楠, 韩博, 苗晋, 杰杜东, 徐丹虹. 2025. 基于 Albedo-NDVI 特征空间的张家口康保县荒漠化时空动态监测[J]. 地球学报, 46(2): 409-418.
- 刘平贵, 李雪菊. 2000. 我国北方土地荒漠化形成的地质环境[J]. 地球学报, 21(2): 190-197.
- 刘庆福. 2020. 毛乌素沙地沙漠化演变、飞播恢复评估及其对生态系统服务的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 1-114.
- 刘树林, 王涛, 屈建军, 陈广庭. 2009. 中国北方草原沙漠化发展过程及其成因分析——以内蒙古苏尼特左旗为例[J]. 中国沙漠, 29(2): 206-211, 383.
- 刘英, 李遥, 鲁杨, 岳辉. 2019. 2000-2016 年黄土高原地区荒漠化遥感分析[J]. 遥感信息, 34(2): 30-35.
- 罗杰, 刘绥华, 阮欧, 胡海涛. 2022. 运用 NDVI-Albedo 特征空间提取石漠化信息[J]. 测绘通报, (4): 56-60, 82.
- 吕翔宇. 2020. 内蒙古农牧交错带生态可持续发展研究——以乌兰察布市化德县为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 1-53.
- 潘竞虎, 李天宇. 2010. 基于光谱混合分析和反照率-植被盖度特征空间的土地荒漠化遥感评价[J]. 自然资源学报, 25(11): 1960-1969.
- 任艳群, 刘海隆, 唐立新, 姜亮亮, 安小燕. 2014. 基于 NDVI-Albedo 特征空间的沙漠化动态变化研究——以准格尔盆地南缘为例[J]. 水土保持通报, 34(2): 267-271.
- 屠志方, 李梦先, 孙涛. 2016. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. 林业资源管理, (1): 1-5, 13.
- 汪芳甜. 2018. 北方农牧交错带退耕还林生态效应评价——以乌兰察布市为例[D]. 北京: 中国农业大学, 1-136.
- 王建华, 李阳, 梁树能, 孙小飞. 2022. 基于高光谱卫星数据的土地沙化识别及提取研究[J]. 华北地质, 45(4): 60-67.
- 王姝惠. 2023. 内蒙古乌兰察布市天然草原资源调查分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 1-82.
- 王一谋. 1989. 沙漠化遥感数字图像处理试验研究[J]. 中国沙漠, 9(1): 137-141.
- 毋兆鹏, 王明霞, 赵晓. 2014. 基于荒漠化差值指数 (DDI) 的精河流域荒漠化研究[J]. 水土保持通报, 34(4): 188-192.
- 魏伟, 俞啸, 张梦真, 张娟, 袁涛, 刘春芳. 2021. 1995-2018 年石羊河流域下游荒漠化动态变化[J]. 应用生态学报, 32(6): 2098-2106.
- 颜华茹, 王让会, 宁虎森, 彭擎, 周露, 李成. 2020. 塔里木河流域荒漠化的生态环境损害赔偿模式[J]. 水土保持通报, 40(1): 262-268.
- 游宇驰, 李志威, 黄草, 曾杭. 2017. 1990-2016 年若尔盖高原荒漠化时空变化分析[J]. 生态环境学报, 26(10): 1671-1680.
- 袁江龙, 赵宏慧, 刘晓煌, 李洪宇, 江东, 赵传燕, 邢莉圆, 雅新萍, 王然, 王超. 2024. 2000-2020 年昆仑山植被覆盖度时空变化驱动力分析及生态评价[J]. 中国地质, 51(6): 1822-1838.
- 曾永年, 向南平, 冯兆东, 徐豁. 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.
- 郑艺文, 李福杰, 刘晓煌, 常铭, 赵宏慧, 赖明, 张子凡. 2022. 工业化背景下 30 年来中国东北地区自然资源时空变化及其生态环境效应[J]. 中国地质, 49(5): 1361-1373.
- 朱杰, 龚健, 李靖业. 2020. 青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征——以青海省河湟谷地为例[J]. 资源科学, 42(5): 991-1003.
- 朱震达. 1985. 中国北方沙漠化现状及发展趋势[J]. 中国沙漠, 5(3): 4-12.
- 朱震达, 吴焕忠, 崔书红. 1996. 中国土地荒漠化/土地退化的防治与环境保护[J]. 农村生态环境, 12(3): 1-6.