

曹婉颖,段翰晨,贾晓鹏.基于kNDVI-Albedo-SWCI三维特征空间与XGBoost-SHAP的科尔沁沙地沙漠化时空格局与驱动因素分析[J].中国沙漠,2026,46(4):204-216.

基于 kNDVI-Albedo-SWCI 三维特征空间与 XGBoost-SHAP 的科尔沁沙地沙漠化 时空格局与驱动因素分析

曹婉颖^{1,2}, 段翰晨¹, 贾晓鹏¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 科尔沁沙地是中国北方典型的农牧交错区,也是“三北”防护林工程的重要实施区域,其沙漠化演变过程复杂,是开展沙漠化研究的典型区域。为精准揭示科尔沁沙地沙漠化时空演变规律及其驱动机制,本研究创新性地构建了kNDVI-Albedo-SWCI三维特征空间模型,实现对科尔沁沙地沙漠化的时空动态监测。在此基础上,引入XGBoost模型对沙漠化驱动因子进行解析,并结合SHAP方法定量分析各自然与人为因子对沙漠化演变的相对贡献。结果表明:(1)引入湿度分量后,kNDVI-Albedo-SWCI三维特征空间模型能够综合表征植被、反照率与地表水分信息,有助于刻画复杂地表环境下的沙漠化特征。(2)基于kNDVI-Albedo-SWCI的三维特征空间模型能够实现对科尔沁沙地沙漠化程度的有效识别,沙漠化分类总体精度为0.80,Kappa系数为0.75,表明该模型在沙漠化信息提取中具有较好的稳定性与可靠性。(3)从时序变化特征来看,2000—2025年科尔沁沙地沙漠化面积总体呈减少趋势,沙漠化逆转特征明显,反映出区域生态修复措施取得了积极成效。(4)基于XGBoost-SHAP的驱动力分析结果表明,土壤质地和实际蒸散发在各驱动因子中重要性占比较高,是影响科尔沁沙地沙漠化演变的关键因素。本研究构建的三维特征空间模型与XGBoost-SHAP可解释机器学习方法相结合,可为干旱半干旱区沙漠化动态监测、驱动机制分析及防沙治沙工程成效评估提供可靠的技术支撑。

关键词: 三维特征空间; XGBoost-SHAP; 沙漠化监测; 驱动因素; 科尔沁沙地

文章编号: 1000-694X(2026)04-204-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00055

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

沙漠化是全球干旱半干旱区面临的重大生态环境问题,直接威胁区域生态安全与社会经济可持续发展。在干旱和半干旱地区,沙漠化导致土地生产力下降、生物多样性减少,引发沙尘暴等灾害^[1]。沙漠化动态监测对于理解景观退化、生态系统演变以及人类活动对自然环境的影响至关重要^[2]。为了落实2030年可持续发展目标,推动土地退化零增长,开展快速、精准的沙漠化监测已成为当前科学

治沙的重要手段^[3]。通过持续监测沙漠化的演变过程及其时空趋势,可为定量评估土地退化程度、识别关键驱动因素以及优化防沙治沙措施提供科学依据^[4]。

特征空间模型以其物理意义明确、操作简单的优势在沙漠化监测领域得到广泛的应用^[5]。当前研究主要采用二维特征空间模型实现对沙漠化信息的提取^[6]。传统二维特征空间模型主要依赖于植被参数和地表参数两类指标,这种方法虽然可以实现大范围快速监测,但是忽略了温度、湿度等周围环

收稿日期:2026-01-07; 改回日期:2026-04-05

资助项目:国家自然科学基金项目(42271316);中国科学院“西部之光”计划项目(E5290202);干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室青年交叉创新团队项目(E4500125)

作者简介:曹婉颖(2002—),女,河南许昌人,硕士研究生,主要从事干旱半干旱区沙漠化遥感监测研究。E-mail: caowy2023@163.com

通信作者:贾晓鹏(E-mail: jiaxp@lzb.ac.cn)

境信息。近年来,三维特征空间方法已在盐渍化和石漠化研究中得到应用,为区域退化识别与监测提供了量化手段。丁建丽等^[7]最早构建了MSAVI-WISI特征空间模型用于土壤盐渍化监测,刘盼盼等^[8]对比选择最优三维特征空间模型分析西南山区石漠化演变过程。这些研究为构建三维特征空间实施沙漠化监测提供了很好的理论支撑。由于不同地区的地理环境、气候条件和植被类型差异显著,特征空间模型需要根据区域特点进行优化。基于此,本文考虑引入地表水分含量指数(Soil Water Content Index, SWCI)作为湿度指标,构建kNDVI-Albedo-SWCI三维特征空间模型,以增强特征空间对地表湿度信息的表达能力,提高沙漠化类型区分的结构完整性与判别能力。相较于传统二维特征空间,三维特征空间通过引入湿度信息,更好地考虑了复杂的地表环境特征^[9]。此外,沙漠化过程往往受到自然和人为多重因素的共同影响。因此,有效量化沙漠化动态演变过程的驱动因素十分必要。XGBoost-SHAP模型为沙漠化驱动因素定量探究提供了有效的解决方案。XGBoost-SHAP模型不仅具有强大的预测能力,能够处理高维、多变量数据,并捕捉沙漠化过程中各环境因子之间的复杂非线性关系^[10]。同时,SHAP值能够量化每个驱动因子对模型预测的贡献,清晰揭示自然因素与人为因素的相对重要性^[11]。此外,该模型还支持可视化分析,使研究人员可以直观了解沙漠化驱动机制,为沙漠化科学防治和政策制定提供可靠依据。

科尔沁沙地作为中国北方干旱半干旱农牧交错的典型区域,气候变化敏感,生态环境脆弱^[12]。同时,沙地内部和周边人口分布密集,春秋季节沙尘暴等极端天气频发,直接威胁附近居民的生产生活和区域的环境安全,导致沙漠化形势长期严峻^[13]。过度开垦、过度放牧等不合理的人类活动造成土地退化问题日益突出^[14]。“三北”防护林工程的实施在改善区域生态环境方面发挥了重要的作用,但是在不同阶段实施效果有显著差异。因此,在防沙治沙和生态修复工程实施过程中,持续开展沙漠化动态监测能够提供及时的科学依据,支持工程调整和效果评估^[15]。在此基础上,借助XGBoost-SHAP模型量化自然和人为因子在沙漠化动态变化中的驱动作用,为防控沙漠化、实现土地退化零增长提供科学依据。

1 研究区概况

科尔沁沙地位于中国东北平原向内蒙古高原的过渡地带,是北方半干旱区典型沙漠化集中地区,涵盖14个旗县,总面积约12.06万km²。区域内地势西高东低(图1),海拔86~2 017 m,属温带大陆性季风气候,年降水量300~450 mm^[16]。植被以沙生植被和草原植被为主,但长期受自然因素和人类活动影响,植被覆盖度低,生态系统脆弱,土地易退化,是“三北”防护林工程的重点治理区域^[17]。科尔沁沙地沙漠化类型丰富,包括固定、半固定及流动沙地,其脆弱的生态环境和显著的沙漠化特征使其成为国内外长期关注的沙漠化研究典型区^[18]。

2 数据与方法

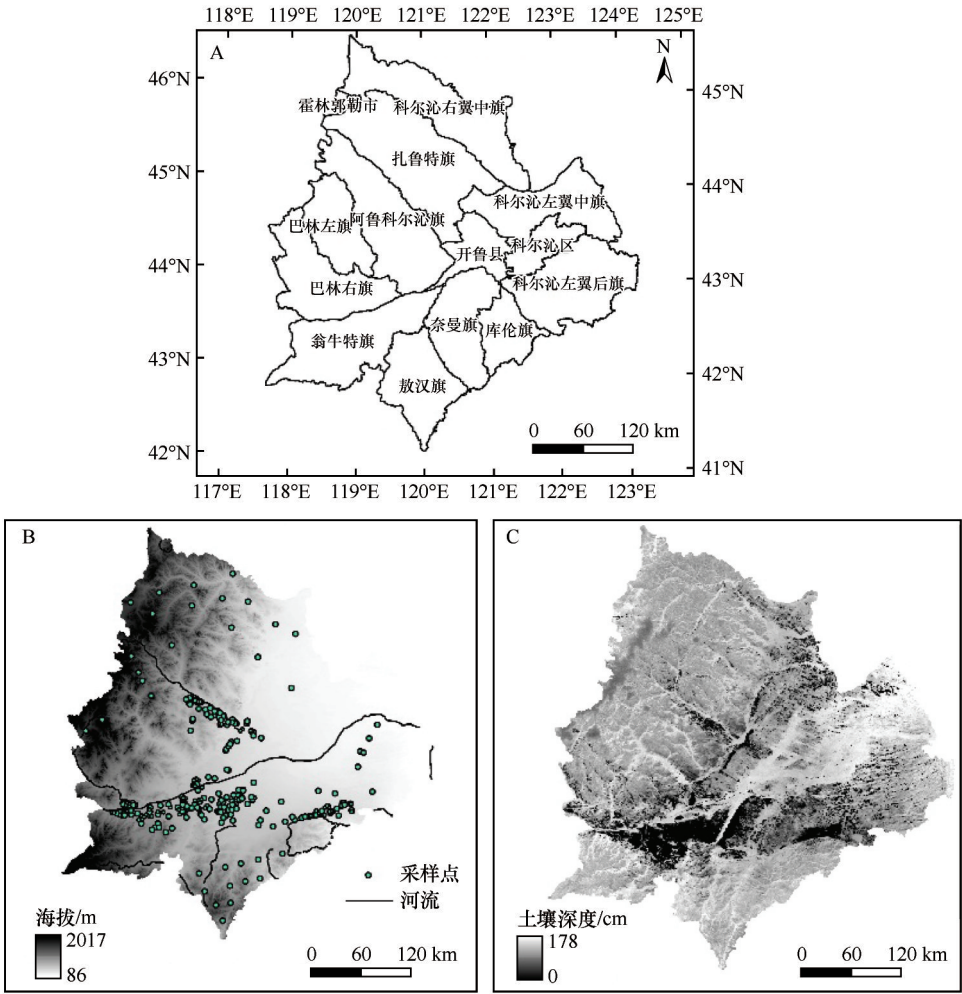
2.1 数据来源

2.1.1 遥感数据

本文基于Google Earth Engine(GEE)云计算平台(<https://earthengine.google.com/>),选取Landsat 5与Landsat 8地表反射率数据,提取2000、2005、2010、2015、2020、2025年科尔沁沙地30 m分辨率沙漠化监测指标,进而用于沙漠化信息提取。为保证时序连续性,每期影像均由邻近3 a平均值(如1999—2001、2004—2006、2009—2011、2014—2016、2019—2021、2023—2025年)的生长季(7—9月)数据构建。数据预处理采用质量评估波段(QA_PIXEL与QA_RADSAT)剔除云、云阴影及饱和像素的影响,并结合JRC全球地表水数据集(JRC Global Surface Water Mapping Layers)掩膜水体区域。随后,采用多时相中值合成方法生成高质量影像,并计算kNDVI、Albedo和SWCI遥感指标(表1),所有指标均经过归一化处理,保证可比性与稳定性。最终得到多期30 m空间分辨率影像,为沙漠化信息提取提供数据基础。

2.1.2 驱动因子数据

本文从自然因素和人为因素两方面考虑,共选取了10个驱动因子探究科尔沁沙地沙漠化动态演变过程的驱动机制^[19](表2)。整体来看,所选因子综合覆盖了气候、土壤、地形及人类活动等关键维度,能够较为全面地表征沙漠化发生发展的主要影响因素^[20];同时,指标体系的构建参考了已有相关研究成果^[21],从而增强了本研究方法的科学性与结



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2022)4309号标准地图制作，底图边界无修改

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

表 1 沙漠化现状与动态监测关键指标

Table 1 Key indicators for aeolian desertification status and dynamic monitoring

指标	公式
$kNDVI$	$kNDVI = \tan h \left[\left(\frac{NIR - RED}{2\sigma} \right)^2 \right]$
$Albedo$	$Albedo = 0.356BLUE + 0.13RED + 0.373NIR + 0.085SWIR1 + 0.072SWIR2 - 0.0018$
$SWCI$	$SWCI = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2}$

果的可靠性。其中,自然因子包括土壤质地、土壤深度、坡度、坡向、海拔、降水量、实际蒸散发、年平均温度。人类活动因子包括人类足迹和土地利用。受时间限制,本研究以 2022 年数据替代 2025 年人类足迹数据。土地利用数据采用武汉大学杨杰、黄昕团队开发的 2000—2023 年中国土地利用/覆盖数

据集(CLCD),该数据集具有较高的时空一致性与精度,同样因时间限制以 2023 年数据替代 2025 年土地利用数据。所有数据统一处理为 1 km 空间分辨率,并使用 GCS_WGS_1984 地理坐标系和 WGS_1984_Albers 投影坐标系。

2.2 研究方法

2.2.1 kNDVI-Albedo-SWCI 三维特征空间模型构建

沙漠化过程表现为植被退化、地表裸露增强以及水分条件恶化等生态环境要素的协同变化,因此单一指标或简单组合往往难以全面揭示其内在物理机制。基于此,本文从绿度、亮度和湿度 3 个维度出发,分别选取核归一化植被指数(kNDVI)、地表反照率(Albedo)和地表水分含量指数(SWCI),构建具有明确物理意义的三维特征空间指标体系,整体研究框架如图 2 所示。其中,kNDVI 主要反映地表

表 2 沙漠化驱动因子数据来源
Table 2 Data sources of aeolian desertification driving factors

类型	驱动因子	年份	空间分辨率	数据来源
自然环境	坡度	2000—2025	1 km	地理空间数据云
	坡向	2000—2025	1 km	地理空间数据云
	海拔	2000—2025	1 km	地理空间数据云
	土壤质地	2000—2025	1 km	国家地球系统科学数据中心
	土壤深度	2000—2025	1 km	国家青藏高原科学数据中心
	降水量	2000—2025	1 km	Terra Climate 全球高分辨率气候数据集
	实际蒸散发	2000—2025	1 km	Terra Climate 全球高分辨率气候数据集
	年平均温度	2000—2025	1 km	Terra Climate 全球高分辨率气候数据集
人类活动	人类足迹	2000—2022	1 km	中国农业大学土地科学与技术学院 UEMM 团队全球逐年人类足迹数据(GHF)
	土地利用	2000—2023	1 km	武汉大学杨杰、黄昕团队中国土地利用/覆盖数据集(CLCD)

植被覆盖状况,是表征植被变化的重要指标;Albedo 表征地表对太阳辐射的反射能力,通常在沙化加剧时显著升高;SWCI 则反映地表及近地表土壤水分状况,是衡量生态环境干湿程度的关键参数。在沙漠化加剧过程中,通常表现为kNDVI 下降、Albedo 升高、SWCI 降低。由此可见,植被状况(绿色)、地表能量特征(亮度)与水分条件(湿度)分别从地表植被特征、地表物理属性和地表水分环境 3 个层面反映土地退化状态,共同构成刻画沙漠化动态演变的物理基础。基于这一绿色-亮度-湿度协同变化

性,并实现沙漠化的精确分类,本文引入空间距离模型来构建三维特征空间的数学描述。空间距离模型以欧氏距离为基础,通过测量多维空间中点与点之间的几何距离,能够反映样点在特征空间中的相对位置关系。在欧几里得距离的基础上,将kNDVI、Albedo、SWCI 组合在一起,构建三维沙漠化综合指数 TDDI (Three-dimensional Desertification Degradation Index),用于综合表征研究区的沙漠化程度。

在三维特征空间中(图 2),点 M 和点 N 分别表示沙漠化程度最高和最低的点,两点之间连线为沙漠化边缘地区。其中,M 点代表最高的地表反照率、最低的植被覆盖度和地表水分含量。N 点代表最低的地表反照率、最高的植被覆盖度和地表水分含量。MN 的长度即为 TDDI 的范围,值为 $0\sim\sqrt{3}$ 。该方法能够综合考虑绿色、亮度和湿度三方面的差异,从而有效揭示不同采样点在沙漠化特征上的整体变化。在分级过程中,首先采用自然断点法对 TDDI 年度数据进行初步分级,以识别数据分布中的显著结构差异;随后结合实地样本点 TDDI 指数空间中的分布区间,对分级界限进行客观校验,以确保各等级与实际沙漠化状态之间保持相对稳定的对应关系^[22]。尽管各年份分级阈值存在一定程度的波动,但不同等级之间的相对排序关系始终保持一致,从而保证了多时相结果在横向比较中的一致性、可比性。根据最终得到的值域范围将研究区域内的沙漠化程度划分为极重度、重度、中度、轻度和非沙漠化五级(表 3)。

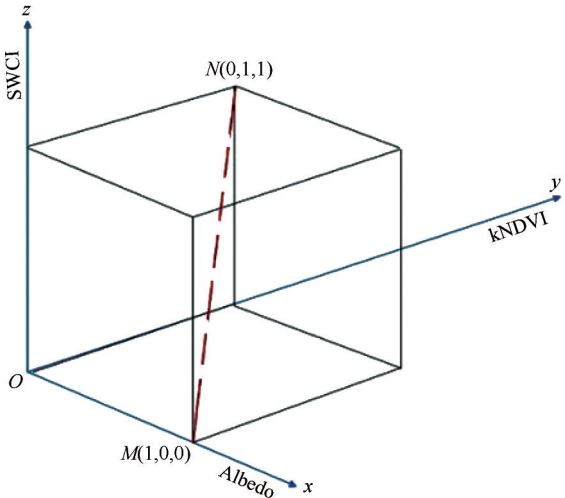


图 2 kNDVI-Albedo-SWCI 三维特征空间示意图
Fig.2 kNDVI-Albedo-SWCI 3D feature space
model schematic

机制,本文构建了kNDVI-Albedo-SWCI 三维特征空间模型,用于综合刻画沙漠化程度及其动态变化特征。为定量刻画不同采样点之间的相似性与差异

表 3 2000—2025 年科尔沁沙地三维沙漠化综合指数(TDDI)分级
Table 3 TDDI classification of the Horqin Sandy Land from 2000 to 2025

年份	沙漠化程度				
	极重度沙漠化	重度沙漠化	中度沙漠化	轻度沙漠化	非沙漠化
2000	≤0.84	0.84~0.90	0.90~0.95	0.95~0.96	≥0.96
2005	≤0.78	0.78~0.87	0.87~0.92	0.92~0.93	≥0.93
2010	≤0.64	0.64~0.71	0.71~0.78	0.78~0.80	≥0.80
2015	≤0.75	0.75~0.83	0.83~0.89	0.89~0.94	≥0.94
2020	≤1.15	1.15~1.20	1.20~1.23	1.23~1.25	≥1.25
2025	≤0.79	0.79~0.80	0.80~0.82	0.82~0.83	≥0.83

2.2.2 沙漠化分类结果精度验证

本文基于 66 个实地验证点和 265 个 Google Earth 影像验证点构建混淆矩阵,验证 2025 年三维特征空间沙漠化分类精度。混淆矩阵是多分类问题中常用的性能评估方法,通过统计各类别正确分类和错误分类的样本数量或比例可以有效评估。利用混淆矩阵生成模型的总体精度和 Kappa 系数,直观呈现模型在科尔沁沙地沙漠化监测中的准确性。

2.2.3 XGBoost-SHAP 模型

为定量解析自然因子与人为因子在科尔沁沙地沙漠化动态演变中的相对作用,本文引入 XGBoost-SHAP 模型,以三维特征空间分类结果作为因变量,不同的自然和人为因子作为自变量,构建 XGBoost 分类预测模型。该模型通过迭代训练决策树并优化目标函数,有效捕捉多因子的非线性关系和交互效应,从而保证分类精度。进一步利用 SHAP 方法计算每个因子在模型预测中的边际贡献,明确各自然因子与人为因子对沙漠化演变的重要性,实现对黑箱模型的可解释化分析。

3 结果与分析

3.1 科尔沁沙地沙漠化时间变化特征

采用混淆矩阵对 kNDVI-Albedo-SWCI 特征空间模型的分类结果进行评价,准确率为 0.80, Kappa 系数为 0.75。2000—2025 年,科尔沁沙地以中度和轻度沙漠化为主,沙漠化等级结构逐步向低等级演变,非沙漠化面积稳步增加,整体呈现由退化向恢复转变的演进态势。如图 3 所示,2000—2010 年,中度沙漠化地区占据优势地位,在所有沙漠化程度中沙漠化面积占比最高。2005—2010 年重度沙漠化

面积显著减少,轻度沙漠化面积显著增加。2015—2025 年各程度沙漠化面积基本趋于稳定。极重度、重度、中度沙漠化面积占比分别为 1%、3%、6%,在比例上保持稳定,生态系统逐渐趋于稳定状态。在此期间,轻度沙漠化面积占比逐期减小,非沙漠化面积占比逐期增加,生态修复效果得到有效巩固。

科尔沁沙地沙漠化转移桑基图清晰呈现了不同沙漠化等级的相互转移状况(图 4)。2000—2005 年,沙漠化等级整体呈现较高等级向较低等级转变趋势,中度沙漠化向轻度沙漠化的转移量明显增加,表明该阶段沙漠化等级结构发生显著优化。从总体上看,沙漠化土地向非沙漠化土地转变明显。具体来看,2000—2010 年,沙漠化逆转的主要类型体现为中度沙漠化向轻度沙漠化以及非沙漠化土地的转变,此阶段科尔沁沙地的沙漠化土地呈现出显著的恢复态势,说明该阶段沙漠化逆转,“三北”防护林工程初见成效。至 2015 年,轻度沙漠化面积在各类沙漠化土地中占比最高,表明生态环境逐步改善,轻度退化土地成为主要程度。2010—2015 年,轻度沙漠化面积持续上升,中度沙漠化面积下降,显示沙漠化逆转效果明显,这反映出生态治理和植被恢复对沙化土地起到了明显缓解作用。2015—2025 年,各程度沙漠化面积基本稳定,轻度沙漠化土地逐步向非沙漠化转化,区域生态系统趋于稳定,说明经过多年治理与自然恢复的共同作用,区域生态状态趋于平衡,沙漠化趋势得到有效控制。

3.2 科尔沁沙地沙漠化空间变化特征

基于三维特征空间模型,构建了 2000、2005、2010、2015、2020、2025 年科尔沁沙地沙漠化数据

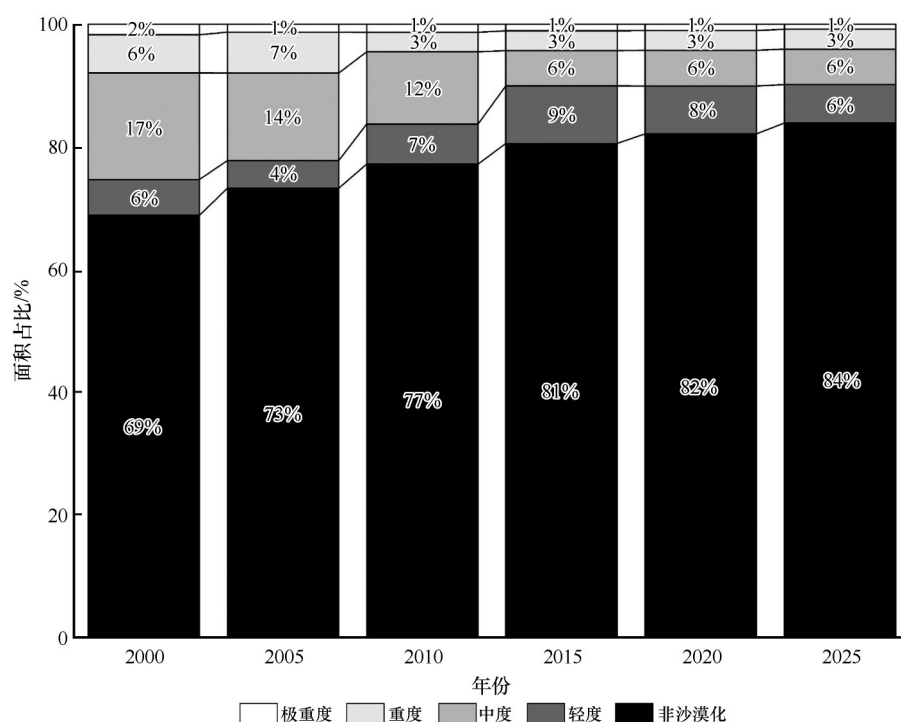


图3 2000—2025年科尔沁沙地各沙漠化程度面积占比

Fig.3 Proportion of each aeolian desertification type area in the Horqin Sandy Land from 2000 to 2025

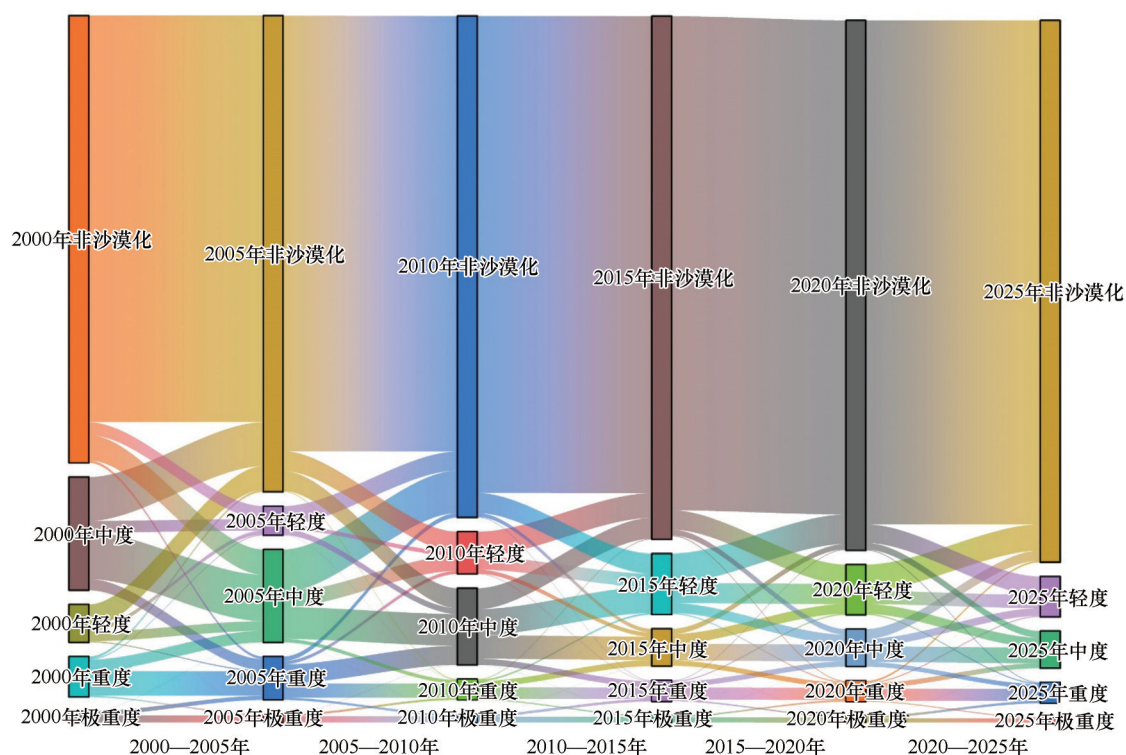
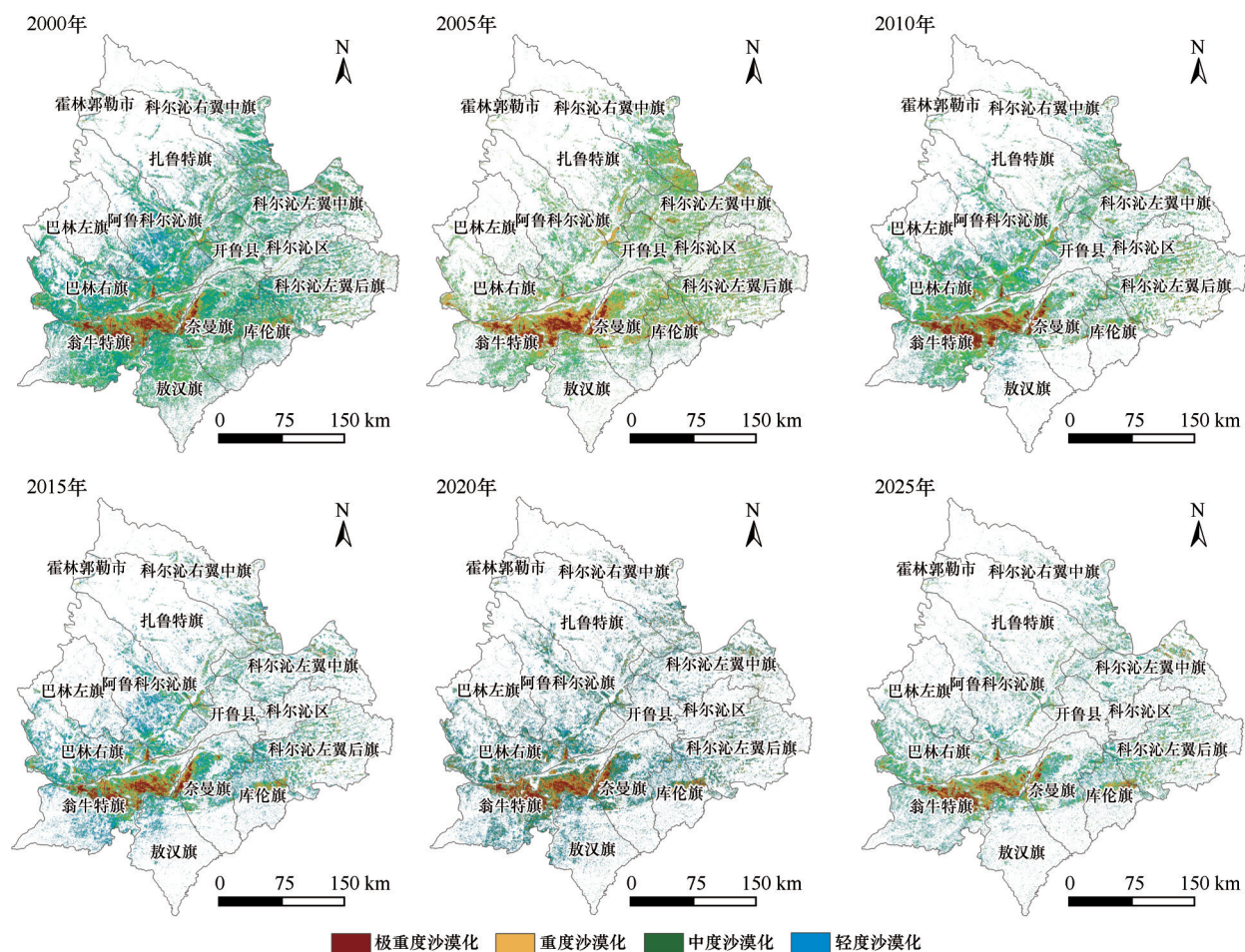


图4 2000—2025年科尔沁沙地沙漠化土地转移变化

Fig.4 Changes of aeolian desertification land transfer in the Horqin Sandy Land from 2000 to 2025

集,并系统分析了2000—2025年沙漠化空间分布格局(图5)。整体上,中度和轻度沙漠化为主导;极重度和重度沙漠化主要集中于老哈河两岸的奈曼旗西北部及翁牛特旗中东部地区,为“三北”防护林工

程重点治理区域。轻度沙漠化在巴林右旗、阿鲁科尔沁旗、科尔沁左翼中旗和科尔沁左翼后旗呈连片分布,经长期治理后其空间范围明显收缩,部分区域已转化为非沙漠化。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2022)4309号标准地图制作,底图边界无修改

图5 2000—2025年科尔沁沙地土地沙漠化时空分布

Fig.5 Spatiotemporal distribution of aeolian desertification in the Horqin Sandy Land from 2000 to 2025

2000—2005年科尔沁沙地轻度沙漠化面积大范围缩小,其中敖汉旗、巴林左旗、巴林右旗、阿鲁科尔沁旗变化最明显;2005—2010年科尔沁左翼中旗、科尔沁左翼后旗、库伦旗和奈曼旗沙漠化面积有所减小,中度沙漠化向轻度沙漠化的转移范围扩大,区域沙漠化强度整体呈减轻趋势;2010—2015年翁牛特旗沙漠化强度整体呈减轻趋势;2015—2020年沙漠化整体趋于稳定,科尔沁沙地内沙漠化程度基本保持不变;2020—2025年科尔沁沙地沙漠化分布保持稳定状态,不同程度沙漠化分布区域都有所收缩,沙漠化逆转趋势明显。总体来看,近25年来,科尔沁沙地沙漠化发展趋于稳定,区域生态修复效果显著,沙漠化不断改善。

通过对不同时期沙漠化空间分布结果的叠加分析,得到科尔沁沙地沙漠化空间动态变化情况(图6)。2000—2005年沙漠化恢复和显著恢复区域

主要分布在阿鲁科尔沁旗东南部、巴林右旗、奈曼旗、翁牛特旗和敖汉旗西北部区域。科尔沁左翼中旗和科尔沁左翼右旗呈退化趋势。2005—2010年科尔沁右翼中旗、科尔沁左翼后旗、奈曼旗和库伦旗区域沙漠化恢复效果显著,是主要逆转区域,巴林右旗、阿鲁科尔沁旗南部区域退化明显。2010—2015年以逆转为主,巴林右旗和翁牛特旗为主要逆转区域。2015—2020年沙漠化整体稳定,其中西南部的巴林右旗和翁牛特旗有轻微逆转。2020—2025年沙漠化呈西南部逆转,东部有轻微退化趋势,沙漠化变化整体稳定。2000—2025年科尔沁沙地沙漠化空间变化整体可以分为两个阶段。2000—2015年快速恢复阶段,沙漠化改善迅速。2015—2025年为恢复稳定阶段,改善态势趋于稳定。总体而言,沙漠化空间变化格局总体呈现出大范围逆转、局部退化的特征。

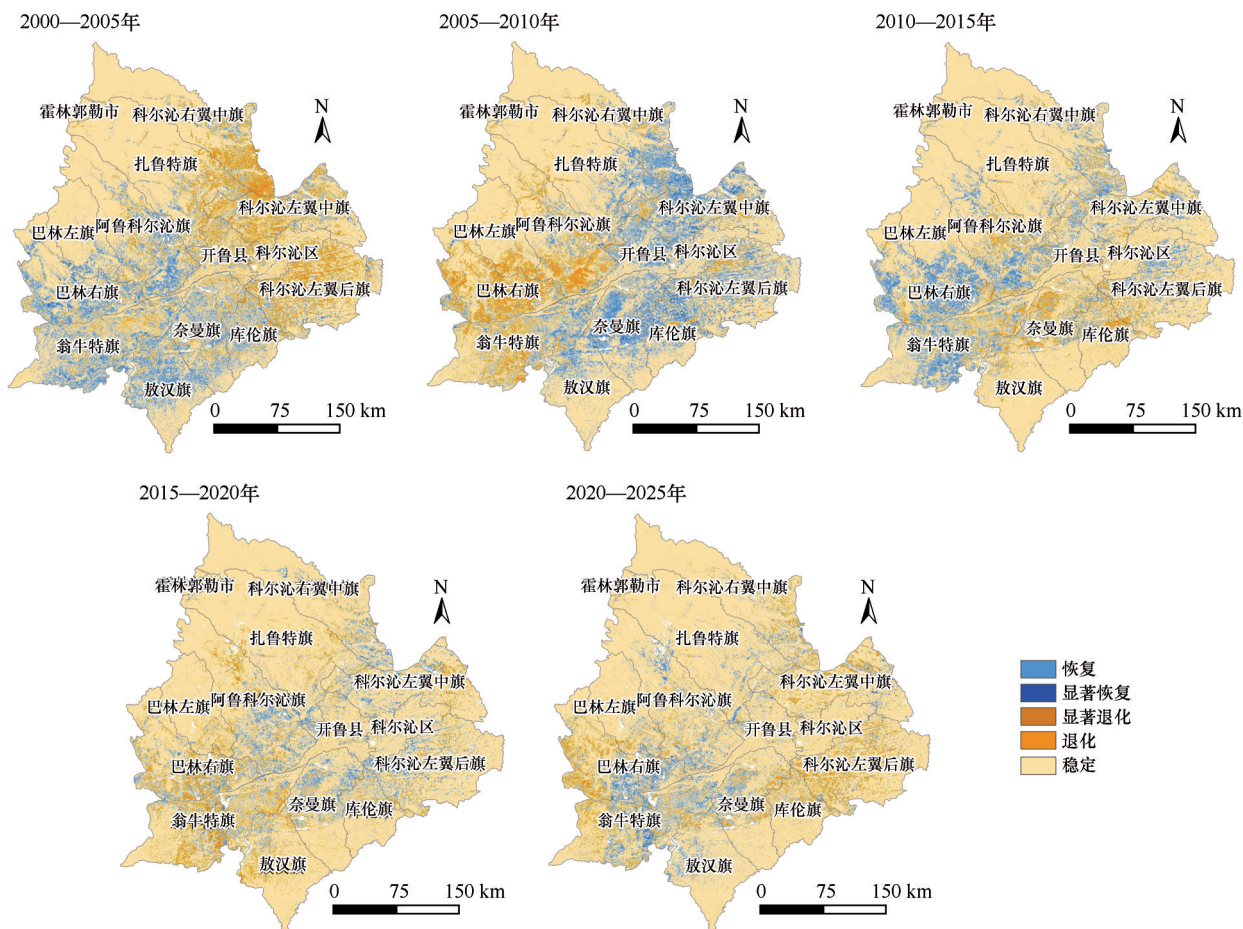


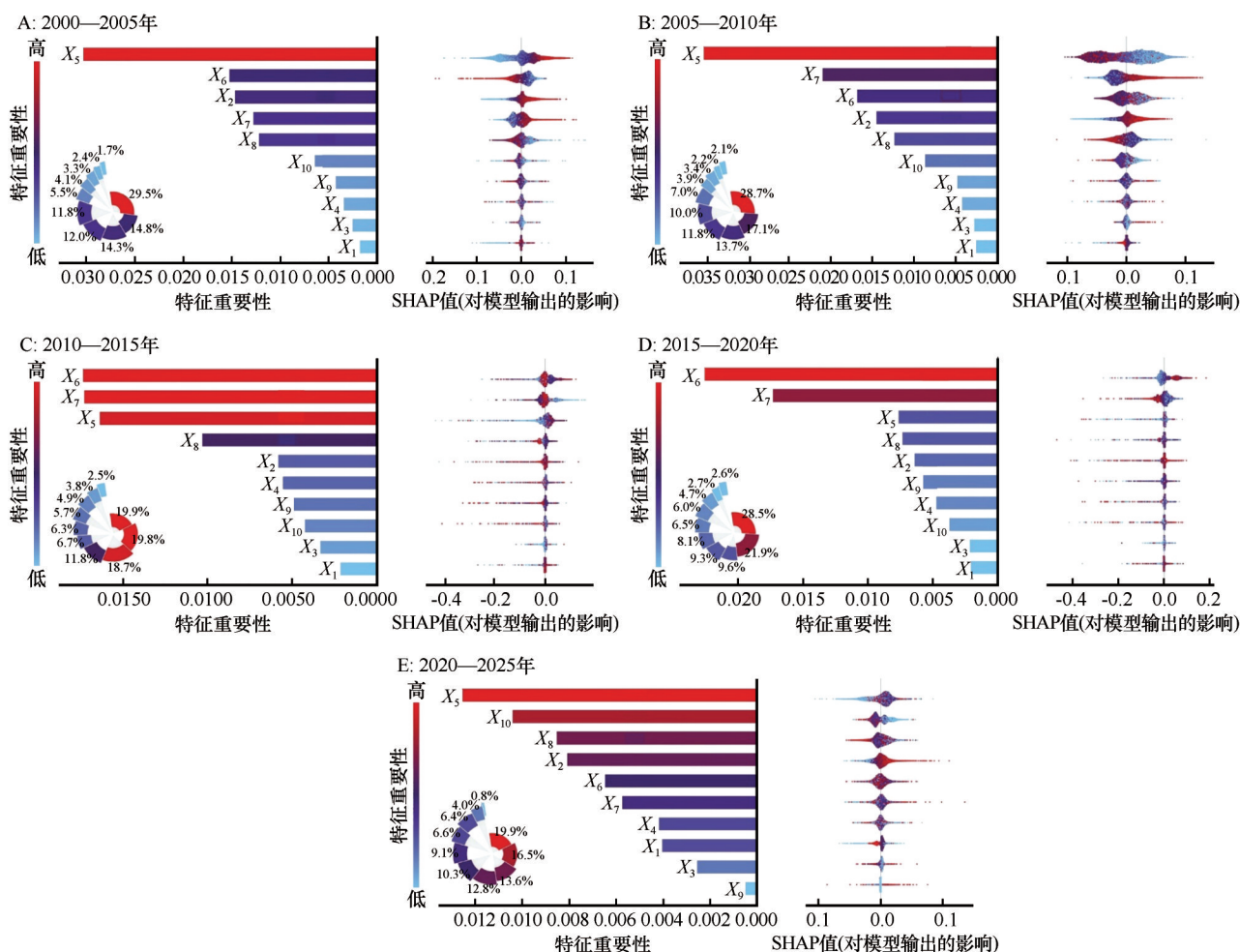
图6 2000—2025年科尔沁沙地沙漠化变化趋势

Fig.6 Aeolian desertification trends in the Horqin Sandy Land from 2000 to 2025

3.3 基于XGBoost-SHAP的驱动机制解析

采用XGBoost-SHAP组合方法,分析了自然因子与人为因子两类驱动因素在沙漠化动态演变过程中的作用机制。其中,SHAP值用于量化各驱动因子对模型输出结果的贡献大小,其绝对值越大,表示该因子对沙漠化变化的影响程度越高,从而有助于直观揭示不同因子的驱动作用。结果表明,不同时间阶段驱动因子的相对重要性存在差异,但该差异主要体现为阶段性相对贡献权重的变化。由图7可知,2000—2005年和2005—2010年两个时期各驱动因子对科尔沁沙地沙漠化的影响相对一致,土壤质地是驱动沙漠化动态变化的主导因子,实际蒸散发、降水量、年平均温度和土壤厚度作为主要驱动因子对科尔沁沙地沙漠化演变产生影响。土地利用和人类活动在该阶段对于沙漠化演变的影响较弱。坡度、坡向、海拔因素在沙漠化演变过程中的作用最弱。这说明在该阶段,区域沙漠化演变主要受自然环境背景条件控制。2010—2015年实

际蒸散发、降水量和土壤质地对科尔沁沙地沙漠化动态变化的影响极为强烈,特征重要性占比分别为19.9%、19.8%和18.7%,该时期是科尔沁沙地沙漠化逆转的关键时期,丰富的降水量可为土壤提供充足的水分补给,有利于植被的生长,提升砂质土壤的保水抗蚀能力,从而增强地表稳定性,抑制沙漠化的发生发展。此阶段驱动机制表现为气候因子与土壤基础条件的协同增强。2015—2020年实际蒸散发和降水量占据主导地位,土壤质地、年平均温度和土壤厚度对沙漠化演变的影响次之。人类足迹、坡向、土地利用、坡度、海拔的驱动力最小,特征重要性占比均在7%以下。因此,在区域尺度上,自然水热条件仍是影响沙漠化格局变化的核心因素,而人类活动对整体空间格局的解释力相对有限。2020—2025年自然和人为驱动因子对沙漠化的驱动力呈梯度减小趋势。该时期沙漠化显著逆转,生态环境趋于稳定状态,土壤质地成为驱动沙漠化演变的主导因子。同时,“三北”防护林工程的



注: X_1 : 海拔; X_2 : 土壤厚度; X_3 : 坡度; X_4 : 坡向; X_5 : 土壤质地; X_6 : 实际蒸散发; X_7 : 降水量; X_8 : 年平均温度; X_9 : 人类足迹; X_{10} : 土地利用

图7 基于XGBoost模型的SHAP可解释分析

Fig.7 SHAP explainable analysis based on the XGBoost model

有效实施使区域内土地利用类型不断变化,对沙漠化的逆转产生了重要影响。年平均温度、土壤厚度、实际蒸散发和降水量对科尔沁沙漠化的驱动因素较强。坡向、海拔、坡度、人类活动的驱动力最弱。总体而言,沙漠化演变是自然环境与人类活动共同作用的结果。不同阶段驱动因子的重要性存在差异,但这种差异主要表现为相对贡献权重的阶段性调整。

4 讨论

4.1 沙漠化精细化提取模型优化

曾永年等^[1]提出的二维特征空间模型为沙漠化快速监测提供了高效而便捷的技术途径。传统NDVI-Albedo特征空间通过植被覆盖指数与地表反照率的组合,能够有效反映地表能量与植被状态的变

化,从而表征土地沙漠化程度。该模型在青藏高原^[5]、河西走廊^[23]等典型干旱地区的沙漠化监测中得到了广泛应用与验证^[24]。改进型二维特征空间模型MSAVI-Albedo有效减弱了土壤背景值对植被指数的干扰,显著提升了模型在稀疏植被覆盖区对地表信息的表征能力,为沙漠化监测的稳定性与精度提供了更可靠的基础^[25]。

然而,二维特征空间模型仅依赖植被指数与地表反照率两个特征指标来反映地表状况,对于空间异质性较高或水分差异显著的地区,其监测精度仍存在一定不足^[26]。特别是在地表类型复杂、沙漠化过程受多种环境因子共同影响的区域,二维特征空间模型难以全面揭示地表退化的多维特征^[27]。由于科尔沁沙地靠近中国东北地区,干旱半干旱的气候特点使得区域内的沙地含水量较高^[28]。因此,针对科尔沁沙地的自然地理特征和沙漠化发展规律,

本文在传统二维特征空间模型的基础上,引入能够反映地表水分状况的湿度分量,构建适用于区域特征的三维特征空间模型,更好地反映区域地表沙漠化的真实情况,实现沙漠化信息的精细化提取和更高精度的监测。湿度因子能够有效反映沙质土壤的水分分布,为不同类型沙地的识别提供了关键补充,使模型在空间异质性较高的区域仍保持较高的监测准确率^[29]。精细化提取的沙漠化信息不仅可为科尔沁沙地防沙治沙、退化土地修复提供科学依据,也可对未来区域生态管理和土地利用规划提供决策支持^[30]。

4.2 三维特征空间模型的区域适用性与驱动机制尺度差异

沙漠化的形成和演变是自然环境约束和人类活动干扰共同作用的结果^[3]。土壤质地作为地表物质基础,直接决定土壤抗风蚀能力与水分保持特征;而降水与蒸散发等水热条件则通过调节植被生长与地表覆盖度间接影响风沙活动强度。土地利用方式及政策调整通过改变地表结构和资源利用格局,对区域沙漠化进程产生阶段性影响。从区域尺度来看,沙漠化驱动机制具有明显的时空差异性。在长时间尺度与大空间尺度下,自然因子(如土壤质地与水热条件)构成稳定的环境背景约束,对地表过程起主导作用,其影响具有持续性和结构性特征;而在较短时间尺度与较小空间范围内,人类活动的扰动效应更为显著,例如土地利用变化、放牧强度调整以及区域政策实施等,往往能够在短期内改变地表覆盖结构与生态状态,从而增强人为因素在驱动分析中的解释力。因此,自然与人为因素的主导程度是随时间尺度与空间尺度的变化而呈现动态变化特征^[31]。

科尔沁沙地位于中国干旱半干旱地区农牧交错带,是中国沙地类型中人类活动干扰较强、生态治理工程实施较为集中的典型区域,在地理位置上有其典型性和特殊性^[32]。一方面,受季风气候控制,降水年际波动明显,水热条件对植被与地表稳定性具有高度敏感性;另一方面农业开垦、放牧利用与生态修复工程长期叠加影响,人地耦合关系复杂^[33]。在实地野外调查中发现,科尔沁沙地的地表异质性极强,这就为我们研究高空间异质性复杂地表情况下的沙漠化动态监测提供了理想化的研究

场地^[34]。在此背景下进一步评估模型的区域适用性与可移植性时,需要同时考虑气候背景差异与人为扰动结构差异对驱动因子体系的影响。

三维特征空间模型的关键改进在于引入湿度分量,使地表水分情况成为判别沙漠化等级的重要维度。在半干旱区,降水年际波动较大,蒸散发对气候变化响应敏感,水热条件对植被生长和地表稳定性的影响较为显著,因此湿度分量在区分不同退化阶段时具有较强的解释力。然而,在更为干旱的典型沙漠区,如巴丹吉林沙漠,水分长期匮乏、植被覆盖稀疏,人类活动类型与强度也存在差异,驱动因子之间的作用关系可能随之发生调整。在局地尺度上,人为干扰,如放牧或工程措施,往往会在短期内对地表状态产生直接影响,使人为因素的解释力相对增强;而在区域尺度上,自然因子仍然构成长期稳定的背景约束。因此,本研究关于驱动因子阶段性权重变化的结论,主要适用于区域尺度下的人地系统综合分析,在推广应用时需结合具体尺度与区域背景进行合理解释。

4.3 沙漠化动态监测对区域生态治理决策的启示

科尔沁沙地作为中国典型的农牧交错带,高强度、持续性的土地利用使人类活动成为驱动沙漠化演变的关键因素^[35]。在脆弱的自然环境基础上,长期农业开垦、过度放牧以及地下水超采使区域生态承载力被严重透支,导致沙漠化进程对人类扰动极为敏感。在此背景下,开展系统、连续的区域生态监测显得尤为重要^[36]。基于对过去25年沙漠化状况的动态监测,可以清晰识别出翁牛特旗、奈曼旗等沙漠化持续扩张或呈波动恶化趋势的重点治理区域,为地方政府分区分类施策提供科学依据。此外,不同程度的沙漠化区域往往叠加在不同类型的土地利用格局中^[37]。因此,生态修复工程应该根据区域特征采取差异化治理措施。在极重度、重度沙漠化地区实施严格的封禁管理,禁止放牧或农业活动,防止沙源继续扩散。在轻度沙漠化的草地区域,植被群落尚具恢复潜力,采取短期封育、轮牧与补播本地耐旱草种可以在较低成本下实现快速恢复^[38]。监测结果可以帮助政府部门实现分区治理与精准施策,提升科尔沁沙地的防沙治沙、生态修复效率与可持续管理的成效^[19]。

4.4 研究局限性与未来研究方向

三维特征模型虽然在沙漠化精细化提取中有显著优势,但对于同样有较高反照率、低植被覆盖度的盐渍化土地、河流和湖泊沙地仍存在一定的混淆风险,容易误判为极重度沙漠化地区,从而导致局部分类误差的产生。然而,特征空间模型物理意义明确,操作简便的优势明显,是大尺度区域内快速监测中不可或缺的沙漠化信息提取方式。本模型在类似半干旱沙地具有较好推广潜力,但在极端干旱区或人为扰动模式差异较大的区域需结合本地特征进行调整,以提升结论的普适性与指导性。需要明确的是,自然断点的分类方式仅依赖于三维沙漠化指数TDDI本身的统计特征,断点的阈值与最终分类的结果高度相关^[39]。因此,实现更加客观、稳定的沙漠化程度分级,仍需结合野外实测样点与高分辨率解译结果进行辅助校准与验证^[40]。本文仅考虑使用单一水分指标SWCI在三维特征空间中的表现,未来研究中可以考虑引入更多的水分指标反映湿度分量,构建三维特征空间指标体系,从而不断提高沙漠化监测精度。此外,在驱动因素分析方面,本研究仍存在一定的时间尺度局限。受数据更新周期限制,人类足迹与土地利用数据未能覆盖至最新年份,可能对近期变化特征的刻画产生一定滞后影响,未来可在2025年及后续数据发布后开展时序更新与动态校正。

5 结论

构建的kNDVI-Albedo-SWCI三维特征空间模型能够有效刻画沙漠化过程中植被状况、地表反照特征与水分状态的综合变化特征。基于三维沙漠化综合指数(TDDI)实现了沙漠化等级的定量表征,模型总体精度为0.80,Kappa系数为0.75,表明该方法具有较好的分类精度与稳定性,为沙漠化信息提取提供了更加系统全面的技术路径。

2000—2025年,科尔沁沙地沙漠化总体呈现逆转趋势。区域生态环境整体改善,但局部区域仍存在阶段性波动,说明沙漠化防治具有长期性与复杂性特征。

科尔沁沙地沙漠化演变是自然因素与人为因素协同作用的结果。在长时间与大空间尺度上自然因子占主导地位,而在短时间与局地尺度上人为扰动的影响更加突出。

参考文献:

- [1] 曾永年,向南平,冯兆东,等. Albedo-NDVI特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 75-81.
- [2] 郭瑞霞,管晓丹,张艳婷. 我国荒漠化主要研究进展[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 505-513.
- [3] 傅伯杰,刘焱序,王帅,等. 科学改善荒漠化地区人与自然关系[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(12): 2027-2036.
- [4] 康文平,刘树林. 沙漠化遥感监测与定量评价研究综述[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1222-1229.
- [5] Zhi Y, Liu S, Wang T, et al. Extraction of desertification information and spatiotemporal change in the Qinghai-Tibetan Plateau based on optimal feature space combination [J]. Land Degradation & Development, 2025, 36(8): 2746-2763.
- [6] 赵鸿雁,颜长珍,李森,等. 黄河流域2000-2020年土地沙漠化遥感监测及驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 127-137.
- [7] 丁建丽,姚远,王飞. 基于三维光谱特征空间的干旱区土壤盐渍化遥感定量研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 853-861.
- [8] 刘盼盼,郭兵. 基于随机森林-三维特征空间法的西南山区石漠化演变格局及主导因子分析[J]. 生态学报, 2026, 46(4): 1731-1751.
- [9] Guo B, Xu M, Zhang R, et al. Dynamic monitoring of rocky desertification utilizing a novel model based on Sentinel-2 images and KNDVI[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2024, 15(1): 2399659.
- [10] 何思璇,杨杰皓,张国有,等. 基于XGBoost-SHAP模型的滇中典型区采矿损毁地植被变化及影响因子分析[J]. 测绘通报, 2025(7): 58-65.
- [11] 谭洁,危千骏,廖朝阳,等. 基于XGBoost-SHAP可解释机器学习模型的城市形态与地表温度的关系[J]. 应用生态学报, 2025, 36(3): 659-670.
- [12] 赵学勇,张春民,左小安,等. 科尔沁沙地沙漠化土地恢复面临的挑战[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1559-1564.
- [13] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 我国西北干旱区的荒漠化过程及其空间分异规律[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 1-8.
- [14] Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Dynamic monitoring of aeolian desertification based on multiple indicators in Horqin Sandy Land, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2374-2388.
- [15] 常学礼,蔡明玉,张继平,等. 科尔沁沙地典型地区人工造林对沙漠化过程的影响[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 611-616.
- [16] 龚相文,李玉强,王旭洋,等. 近20年科尔沁地区植被净初级生产力时空动态及其影响因素定量评估[J]. 地球科学进展, 2025, 40(12): 1333-1349.
- [17] 任雨,张勃,陈曦东. 科尔沁沙地土地荒漠化敏感性评估[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 159-169.
- [18] 常嘉乐,石昊,李方昊,等. 科尔沁沙地土壤沙化进程与风蚀驱动因子关系[J]. 地理学报, 2026, 81(1): 48-63.
- [19] Li H, Hu Y F, Ao Z D. Identification of critical drought thresh-

- olds affecting vegetation on the Mongolian Plateau[J].*Ecological Indicators*, 2024, 166: 111234.
- [20] 于静,高亚敏,付铭.科尔沁草原NDVI时空变化特征及其对气候的响应[J].*中国草地学报*, 2020, 42(6): 82-90.
- [21] 段翰晨,黄背英.基于AHP与改进型MEDALUS模型耦合的科尔沁沙地土地沙漠化敏感性综合评价[J].*中国沙漠*, 2024, 44(4): 137-148.
- [22] 刘永杰,杜鹤强,范亚伟,等.基于Google Earth Engine(GEE)的毛乌素沙地风蚀荒漠化过程监测[J].*中国沙漠*, 2025, 45(2): 262-274.
- [23] Shao W Y, Wang Q Z, Guan Q Y, et al. Environmental sensitivity assessment of land desertification in the Hexi Corridor, China [J].*Catena*, 2023, 220: 106728.
- [24] Song X, Wang T, Xue X, et al. Monitoring and analysis of aeolian desertification dynamics from 1975 to 2010 in the Heihe River Basin, northwestern China [J].*Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(4): 3123-3133.
- [25] 岳辉,刘英.基于NDVI-Albedo特征空间的陕西省干旱与荒漠化遥感监测[J].*西北林学院学报*, 2019, 34(1): 198-205.
- [26] 任艳群,刘海隆,唐立新,等.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*, 2014, 34(2): 267-271.
- [27] 赵哈林,苏永中,周瑞莲.我国北方沙区退化植被的恢复机理[J].*中国沙漠*, 2006, 26(3): 323-328.
- [28] 段翰晨,王涛,薛娟,等.基于RS与GIS的科尔沁沙地沙漠化时空演变[J].*中国沙漠*, 2013, 33(2): 470-477.
- [29] Chen Q, Fu H, Li X M, et al. Classification of karst rocky desertification levels in Jinsha County using a feature space method based on SDGSAT-1 multispectral data [J].*Remote Sensing*, 2024, 16(24): 4786.
- [30] 刘俊壕,周海盛,郭群.中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J].*中国沙漠*, 2023, 43(5): 204-213.
- [31] 花婷,王训明.东亚干旱半干旱区沙漠化与气候变化相互影响研究进展[J].*地理科学进展*, 2014, 33(6): 841-852.
- [32] 连杰,赵学勇,左小安,等.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*, 2012, 32(1): 210-218.
- [33] 张铃,张方敏,卢琦,等.生态工程对科尔沁沙地主要生态服务功能的影响[J].*水土保持通报*, 2021, 41(5): 154-159.
- [34] 金海珍,于德永,郝蕊芳,等.科尔沁沙地关键生态系统服务的约束关系分析[J].*生态学报*, 2021, 41(18): 7249-7259.
- [35] 罗永清,白浩江,贾豪,等.科尔沁沙地生态恢复研究进展与思考[J].*中国沙漠*, 2025, 45(4): 75-84.
- [36] 王永芳.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, 2016.
- [37] 勿吉斯古冷,那日苏,丽娜,等.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*, 2025, 48(5): 825-837.
- [38] 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.
- [39] 李乃强,徐贵阳.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*, 2020(4): 106-110.
- [40] Zhi Y, Liu S, Wang T, et al. Quantifying the impact of natural and human activity factors on desertification in the Qinghai-Tibetan Plateau [J].*Catena*, 2024, 246: 108392.

Spatiotemporal patterns and driving factors of aeolian desertification in the Horqin Sandy Land based on kNDVI-Albedo-SWCI three-dimensional feature space and XGBoost-SHAP analysis

Cao Wanying^{1,2}, Duan Hanchen¹, Jia Xiaopeng¹

(1. State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Horqin Sandy Land, located in northern China, represents a quintessential agro-pastoral ecotone and serves as a critical area for the implementation of the Three-North Shelter Forest Program. Due to its intricate desertification evolution processes, it is an exemplary region for conducting desertification research. In order to precisely elucidate the spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of desertification within the Horqin Sandy Land, this study introduces an innovative three-dimensional feature space model, denoted as kNDVI-Albedo-SWCI, to facilitate the dynamic monitoring of desertification across spatial and temporal dimensions. Building upon this framework, the XGBoost model is employed to examine the driving factors of desertification, and the SHAP method is utilized to quantitatively assess the relative contributions of both natural and anthropogenic factors to the evolution of desertification. The findings indicate that: (1) The incorporation of the moisture component within the kNDVI-Albedo-SWCI three-dimensional feature space model enables a comprehensive characterization of vegetation, albedo, and surface water information, thereby enhancing the depiction of desertification characteristics in complex surface environments. (2) The three-dimensional feature space model, utilizing kNDVI-Albedo-SWCI, demonstrates a robust capability in accurately identifying the degree of desertification in the Horqin Sandy Land, achieving an overall classification accuracy of 0.80 and a Kappa coefficient of 0.75. This indicates the model's substantial stability and reliability in extracting desertification information. (3) From a temporal perspective, the desertified area within the Horqin Sandy Land has generally exhibited a declining trend from 2000 to 2025, with marked signs of desertification reversal, suggesting that regional ecological restoration initiatives have yielded positive outcomes. (4) The driving force analysis, conducted using XGBoost-SHAP, highlights that soil texture and actual evapotranspiration are among the most significant driving factors, playing a crucial role in influencing the desertification dynamics of the Horqin Sandy Land. The integration of the three-dimensional feature space model developed in this study with the interpretable machine learning approach of XGBoost-SHAP offers reliable technical support for dynamic monitoring of desertification, analysis of driving mechanisms, and evaluation of the effectiveness of sand prevention and control projects in arid and semi-arid regions.

Key words: three-dimensional feature space; XGBoost-SHAP; aeolian desertification monitoring; driving factors; Horqin Sandy Land