

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.043; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.043.

杨霞, 乌吉木吉, 朝力格尔. 半干旱区草原生态环境质量时空变化及其驱动因素研究: 以锡林郭勒为例[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 231-240.
Yang Xia, Wujimuji, Chaoligeer. Research on the spatiotemporal change of ecological environment quality and its driving factors in semi-arid grasslands: a case study of Xilingol[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 231-240.

半干旱区草原生态环境质量时空变化及其 驱动因素研究

——以锡林郭勒为例

杨霞^{1,2}, 乌吉木吉^{1,2}, 朝力格尔¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018;

2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 准确评估半干旱区草原生态环境质量对我国半干旱区草原的可持续发展至关重要。[方法] 以中国北方典型半干旱草原锡林郭勒盟为研究区, 基于谷歌地球引擎, 综合绿度、湿度、干度、热度、表土粒度和草地退化 6 个指标, 构建改进型遥感生态指数(MRSEI), 并利用一元线性回归、皮尔逊相关性分析和 Hurst 指数等方法, 评估 2000—2023 年生态环境质量, 揭示其时空演变特征及驱动因素。[结果] MRSEI 的第 1 主成分平均贡献率 83.5%, 特征值均值为 0.222, 构建的 MRSEI 能够有效整合多项生态指标, 引入的表土粒度和草地退化指标在半干旱草原生态评价中发挥了重要作用。2000—2023 年, 研究区 MRSEI 波动范围为 0.273~0.395, 整体呈轻微改善趋势。其中, 中部和东北部典型草原生态环境显著提升, 提升面积占 62.1%; 而沙漠及森林周边草地生态环境有所下降, 下降面积占 32.9%。未来生态环境可能持续恶化或变化不确定的区域面积占 66.3%, 需划定生态预警区加强保护。生态环境质量对降水的响应最为敏感, 显著相关区域面积占 33.8%; 气温次之, 占 8%。人类活动亦对生态环境质量产生了显著影响。[结论] 锡林郭勒草原生态环境质量整体上升过程当中, 降水量是主要气候驱动因素, 气温影响次之, 同时人类活动同样具有显著影响。

关键词: 生态环境质量; 改进型遥感生态指数; 气候变化; 锡林郭勒盟

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0231-10

Research on the spatiotemporal change of ecological environment quality and its driving factors in semi-arid grasslands —a case study of Xilingol

Yang Xia^{1,2}, Wujimuji^{1,2}, Chaoligeer¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forestry and Grassland Administration of China, Hohhot 010018, China)

Abstract: [Objective] Accurate assessment of ecological environment quality in semi-arid grasslands is crucial for their sustainable development in China. [Methods] Using Xilingol League, a typical semi-arid grassland in northern China, as the research area, a modified remote sensing ecological index (MRSEI) based on Google Earth Engine was developed, integrating six indicators: greenness, humidity, dryness, heat, topsoil grain size, and grassland degradation. The ecological environment quality from 2000 to 2023 was evaluated using methods including univariate linear regression, Pearson correlation analysis, and Hurst index, revealing its spatiotemporal evolution characteristics and driving factors. [Results] The average contribution rate of the first principal

收稿日期: 2024-10-20

修回日期: 2024-11-15

接受日期: 2024-12-02

资助项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目“锡林郭勒草原区产业布局与土地生态状况协调性研究”(NJSY21459); 内蒙古农业大学高层次人才/优秀博士引进人才科研启动项目“自然资源调查评价与国土空间规划”(NDYB2019-23)

第一作者: 杨霞(1980—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士, 高级工程师, 主要从事自然资源调查与规划研究。E-mail: yangxia@imau.edu.cn

<http://stbcjy.paperonice.org>

component of MRSEI was 83.5%, and the average eigenvalue was 0.222. The MRSEI developed in this study effectively integrated multiple ecological indicators, and the indicators of topsoil grain size and grassland degradation played a key role in the ecological assessment of semi-arid grasslands. From 2000 to 2023, the fluctuation range of MRSEI in the study area was 0.273~0.395, indicating a slight overall improvement. Among them, the ecological environment of typical grasslands in the central and northeastern regions significantly improved, representing 62.1% of the area, while the ecological environment of grasslands around the desert and forest deteriorated, affecting 32.9% of the area. Areas where ecological environment may continue to deteriorate or remain uncertain in the future accounted for 66.3%, highlighting the need to designate ecological early warning zones for protection. Ecological environment quality was most sensitive to precipitation, with 33.8% of the area showing significant correlation, followed by temperature, accounting for 8%. Human activities also had a significant impact on ecological environment quality. [Conclusion] During the overall improvement in ecological environment quality of Xilingol grasslands, precipitation is the primary climatic driving factor, followed by temperature. Human activities also significantly influence ecological environment quality.

Keywords: ecological environment quality; modified remote sensing ecological index; climate change; Xilingol League

半干旱区是全球生态系统最脆弱区域,也是对气候变化和人类活动最敏感地区之一,在维持全球环境平衡中具有不可替代的作用^[1-2]。研究表明,全球半干旱地区的面积仍在扩张^[3]。由于植被稀疏,半干旱区草原的生态环境面临荒漠化和草地退化等问题,且极易受到气候变化和人类活动的影响,生态环境威胁日益加剧^[4]。2023年,习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调全面推进美丽中国建设,加快推进人与自然和谐共生的现代化^[5]。因此,准确评估半干旱区的生态环境质量,可为我国半干旱区草原的生态保护和修复提供理论依据。

生态环境质量评价研究为生态治理、区域规划和资源开发提供了重要参考^[6-7]。自20世纪60年代以来,生态环境评价逐步从单一指标转向多指标综合评价,从定性评价发展为定量评价,使结果更加科学和客观^[8]。随着遥感技术的不断成熟,逐渐被广泛应用于生态环境质量评价中。目前的研究主要利用遥感技术提取绿度、湿度、干度和热度4个指标,针对城市地区提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)。由于其客观、快速、简便的优点,RSEI在城市生态环境评价中应用广泛^[9-10]。然而,缺乏对城市以外地区典型生态特征的表征,使得评价的准确性存在局限。为解决这一问题,部分学者在RSEI模型基础上引入气溶胶光学厚度、景观多样性指数和大气环境质量指标,提出了多种改进型遥感生态指数,用于评价城市以外地区,展现了良好的适用性^[11-13]。同时,针对干旱、半干旱区的特点,相关研究也提出了多种改进模型^[14-15]。针对荒漠化严重的地区,有研究引入表土粒度指数构建了表土遥感生态指

数(topsoil remote sensing ecological index, TRSEI),研究了阴山北麓武川县1990—2020年的生态环境质量变化,结果表明荒漠化是该区域生态环境恶化的主要因素^[16]。此外,还有研究将干度指标替换为盐度指标,构建干旱遥感生态指数(arid remote sensing ecological index, ARSEI),评价了内蒙古乌兰布和沙漠2000—2019年的生态环境质量,结果显示土地利用类型对生态环境有显著影响,模型对干旱区更具针对性和适用性^[17]。虽然上述研究为干旱、半干旱区生态环境评价提供了新的视角和方法,但仅考虑荒漠化、盐碱化等因素无法准确反映草地退化严重的半干旱区草原生态环境质量。因此,如何准确评估半干旱草原草地退化程度,是其生态环境质量评价中必须要解决的问题。

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区东中部,是典型的半干旱草原及生态安全屏障^[18]。21世纪初,全盟风蚀沙化占全盟草原总面积的64%,轻度以上的水土流失面积占总土地面积的81.2%;其中浑善达克沙地从1949—1995年沙漠化面积由0.57万km²增加到3.05万km²,平均每年以约100km²的速度增加^[19]。可见受气候变化和人类活动影响,该区域的荒漠化和草地退化问题日趋严重^[20]。当前,锡林郭勒草原的生态环境质量评价多采用RSEI模型,但其难以有效表征该地区日益严重的荒漠化和草地退化问题,因此需要适当改进模型以提升对半干旱区的适用性^[21]。研究表明,表土粒度指数(topsoil grain size index, TGSI)能够准确评估干旱半干旱区实际荒漠化程度^[16];叶面积指数(leaf area index, LAI)是衡量植被的重要指标,是描述植被状况的关键参数,并已用于评估植被动态、构

建地表模型等,能够较好地评估半干旱区草场植被退化程度^[22]。基于此,本文利用谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)和MODIS遥感影像,在RSEI模型的基础上引入表土粒度指数和叶面积指数,构建改进型遥感生态指数(modified remote sensing ecological index, MRSEI),动态监测锡林郭勒草原2000—2023年植被生长季的生态环境质量时空变化,并通过相关性分析,探讨生态环境质量变化与气候因素及人类活动的关系,为我国半干旱区典型草原的生态修复与治理提供理论支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中部(41°35′—46°46′N, 111°9′—119°58′E),总面积为20.3万km²。该地区地势南高北低,东南部为低山丘陵,盆地交错分布,属于大兴安岭向西和阴山山脉向东延伸的余脉。草原面积占内蒙古草原总面积的1/4,草原类型自西向东分别为草甸草原、典型草原和荒漠草原,是北方重要的天然草场之一,也是我国重要的畜牧业基地。锡林郭勒盟属于典型的温带大陆性气候,特点为干旱、寒冷且风力较大,年降水量约295 mm,降水量自东南向西北逐渐减少。土壤类型以栗钙土、棕钙土和风沙土为主。2023年,锡林郭勒盟人口为111.65万人,生产总值达到1 184.78亿元。由于持续干旱和过度开发,草地退化和荒漠化问题日益严重,已成为京津冀城市群沙尘天气的主要来源之一。

1.2 数据来源及预处理

本研究使用的遥感影像数据来源于GEE平台的MCD19 A1地表反射率数据产品(<https://earthengine.google.com/>),空间分辨率为500 m,时间分辨率为8 d。筛选目标年份6—9月的影像,通过去云技术处理得到最小云量影像,并采用MNDWI方法去除水体信息,以消除大量水体对湿度指标及主成分分析结果的影响。土地利用数据来自中国资源科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为30 m。地表温度(LST)和叶面积指数(LAI)数据同样来自GEE平台的MOD11A2和MOD15A2 H产品,空间分辨率分别为1 000 m和500 m。此外,研究数据还包括中国1 km分辨率逐月降水量和平均气温数据,以及1 km中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集,均来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),最终利用ArcGIS 10.8软件的重采样、重投影等工具转换至与遥感影像数据一致的空间分辨率和投影坐标系(WGS 84 UTM zone 49 N),以便后续分析。

2 研究方法

2.1 遥感生态指数的改进

遥感生态指数(RSEI)可有效评估区域生态环境质量,由基于遥感影像数据解译的绿色、湿度、干度和热度4个指标耦合计算^[9]。其公式为:

$$RSEI=f(NDVI, Wet, NDSI, LST) \quad (1)$$

在此基础上,本研究引入荒漠化指数(以表土粒度指数表征)和草地退化指数(以叶面积指数表征),通过主成分分析法构建绿色、湿度、干度、热度、荒漠化指数和叶面积指数6个指标的改进型遥感生态指数(MRSEI),旨在更全面评估锡林郭勒盟的生态环境质量。其计算公式为:

$$MRSEI=f(NDVI, Wet, LAI, NDSI, LST, TGSI) \quad (2)$$

式中:NDVI为绿色;Wet为湿度;NDSI为干度;LST为热度。土壤荒漠化是半干旱区生态健康的主要制约因素之一,表土粒度指数(TGSI)通过砂粒含量反映荒漠化程度,弥补了传统方法对降水变化过度依赖的不足^[23]。因此,本研究采用TGSI表征研究区的土壤荒漠化状况。草地是半干旱区的主要生态系统,研究区以畜牧业为主,过度放牧导致草场植被退化和产草量大幅下降^[19]。叶面积指数(LAI)是反映植物群体生长的重要指标,其数值直接影响最终产量,因此本研究采用LAI表征研究区的植被生长状况^[24]。以上指数均通过遥感影像数据解译得出,各生态指数的计算公式及参数说明详见表1。依据《生态环境状况评价技术规范》^[25],生态环境质量等级从低到高分为:差[0, 0.2)、较差[0.2, 0.4)、一般[0.4, 0.6)、良[0.6, 0.8)和优[0.8, 1.0]。

2.2 一元线性回归趋势分析

一元线性回归分析可有效拟合研究时段的栅格数据,去除异常因素干扰^[26]。本研究采用一元线性回归模型拟合2000—2023年锡林郭勒盟生态环境质量的变化趋势,计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times MRSEI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n MRSEI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为年份; i 表示年序号(本研究 n 为24); $MRSEI_i$ 为第 i 年的改进遥感生态指数; θ_{slope} 表示回归方程的斜率。

采用F检验法对MRSEI变化趋势进行显著性检验,其计算公式为:

$$F = \frac{U(n-2)}{Q} \quad (4)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (6)$$

式中： U 为误差平方和； Q 为回归平方和； y_i 为第*i*年MRSEI像元值； \hat{y}_i 为其回归值； \bar{y}_i 为研究时段MRSEI年均值； n 为研究年数。综合斜率Slope和F检验法将MRSEI变化趋势划分为4个等级，如表2所示。

表 1 生态指标计算方法

Table 1 Calculation methods for ecological indicators

指标	计算方法	描述
NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$	
Wet	$Wet = 0.1511\rho_{blue} + 0.1972\rho_{green} + 0.3283\rho_{NIR} - 0.3407\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$	
LAI	$LAI = 0.1 \times DN_1$	ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别表示蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外1和短波红外2波段的反射率； DN_1 、 DN_2 分别表示叶面积指数和陆地表面温度影像的灰度值
NDSI	$NDSI = (SI + IBI) / 2$ $SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{blue})]$ $IBI = IBI_1 / IBI_2$ $IBI_1 = 2\rho_{SWIR2} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [(\rho_{NIR} / (\rho_{red} + \rho_{NIR}) + \rho_{green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{green}))]$ $IBI_2 = 2\rho_{SWIR2} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [(\rho_{NIR} / (\rho_{red} + \rho_{NIR}) + \rho_{green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{green}))]$	
LST	$LST = 0.02 \times DN_2 - 273.5$	
TGSI	$TGSI = (\rho_{red} - \rho_{blue}) / (\rho_{red} + \rho_{green} + \rho_{blue})$	

注：NDVI表示归一化植被指数；Wet表示湿度；LAI表示叶面积指数；NDSI表示归一化土壤指数；IBI表示建筑用地指数；SI表示裸土指数；LST表示地表温度；TGSI表示表土粒度指数。下同。

表 2 MRSEI变化趋势等级划分

Table 2 Classification of MRSEI change trends

划分范围	等级	划分范围	等级
$Slope < 0, 0 < \rho < 0.05$	显著恶化	$Slope > 0, 0 < \rho < 0.05$	显著改善
$Slope < 0, \rho > 0.05$	轻微恶化	$Slope > 0, \rho > 0.05$	轻微改善

2.3 相关性分析

基于像元尺度，采用Pearson相关系数探讨MRSEI与气候因子以及人类活动之间的相关性，并进行显著性检验^[28]。其计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中： r_{xy} 为变量*x*、*y*的皮尔逊相关系数； $r_{xy} > 0$ 时为正相关， $r_{xy} < 0$ 时为负相关， $|r_{xy}|$ 越大*x*、*y*之间的相关性越强。

2.4 Hurst指数预测分析

本文采用Hurst指数法预测锡林郭勒盟MRSEI的未来变化特征，具体计算过程参见文献^[27]。Hurst指数(*H*值)可取3种形式：当 $0.5 < H < 1$ 时，表明

MRSEI时间序列为持续型序列，未来变化趋势与过去一致，*H*值越接近1，持续性越强；若 $H = 0.5$ ，说明MRSEI时间序列为随机序列，未来变化趋势不确定；若 $0 < H < 0.5$ ，表明MRSEI时间序列具有反持续性，*H*值越接近0，反持续性越强。

3 结果与分析

3.1 基于MRSEI的生态环境质量的时空分布特征

基于6个生态指标(绿度、湿度、干度、热度、表土粒度、草地退化)的主成分分析结果显示，第1主成分(PC1)的特征值平均贡献率为83.46%，特征值均值为0.222，表明PC1涵盖了6个指标中大部分生态指标的信息，能够有效整合这些指标的特征(表3)。分析结果还表明，NDVI、Wet和LAI的载荷值为正，表明它们对生态环境质量评价具有正面贡献；而NDSI、LST和TGSI的载荷值为负，表明它们对生态环境质量评价产生负面影响，这与研究区的实际情况相符。因此，MRSEI模型能够有效评估研究区的生态环境质量。

表 3 主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis

年份	第一主成分						特征值	贡献率/%
	NDVI	Wet	LAL	NDSI	TGSI	LST		
2000	0.476	0.404	0.390	-0.384	-0.399	-0.390	0.192	78.6
2005	0.481	0.432	0.376	-0.386	-0.387	-0.377	0.244	84.6
2010	0.474	0.422	0.383	-0.377	-0.421	-0.363	0.200	81.8
2015	0.482	0.405	0.360	-0.374	-0.413	-0.405	0.238	85.6
2020	0.478	0.411	0.368	-0.373	-0.407	-0.402	0.218	84.0
2023	0.487	0.392	0.360	-0.375	-0.426	-0.396	0.238	86.1

2000—2023年,锡林郭勒盟MRSEI表现出显著的空间差异(图1)。整体上,东北部地区MRSEI数值较高,而西北部则相对较低。生态环境质量为“差”和“较差”的区域面积显著减少(表4),分别由78 564 km²,70 437 km²下降至68 807 km²和60 922 km²,主要集中在苏尼特旗、镶黄旗、阿巴嘎旗和锡林浩特市的草地区域。同时,“中等”及以上等级的区域面积有所增加。其中,“中等”水平区域面积从33 116 km²增加至46 425 km²,”良”和“优”等级的总面

积则从18 615 km²显著增长至24 968 km²。这些高等级区域主要分布在乌珠穆沁旗的林地和草地、锡林浩特市东南部草地以及太仆寺旗和多伦县的耕地区域。尤其是多伦县,在研究期间生态环境质量提升显著,成为改善的典型代表。整体来看,锡林郭勒盟生态环境质量正逐步向积极方向发展。这一改善归因于生态保护工程的实施和西部高原气候逐渐暖湿化的共同作用,为区域生态环境的持续优化提供了强有力的支持。

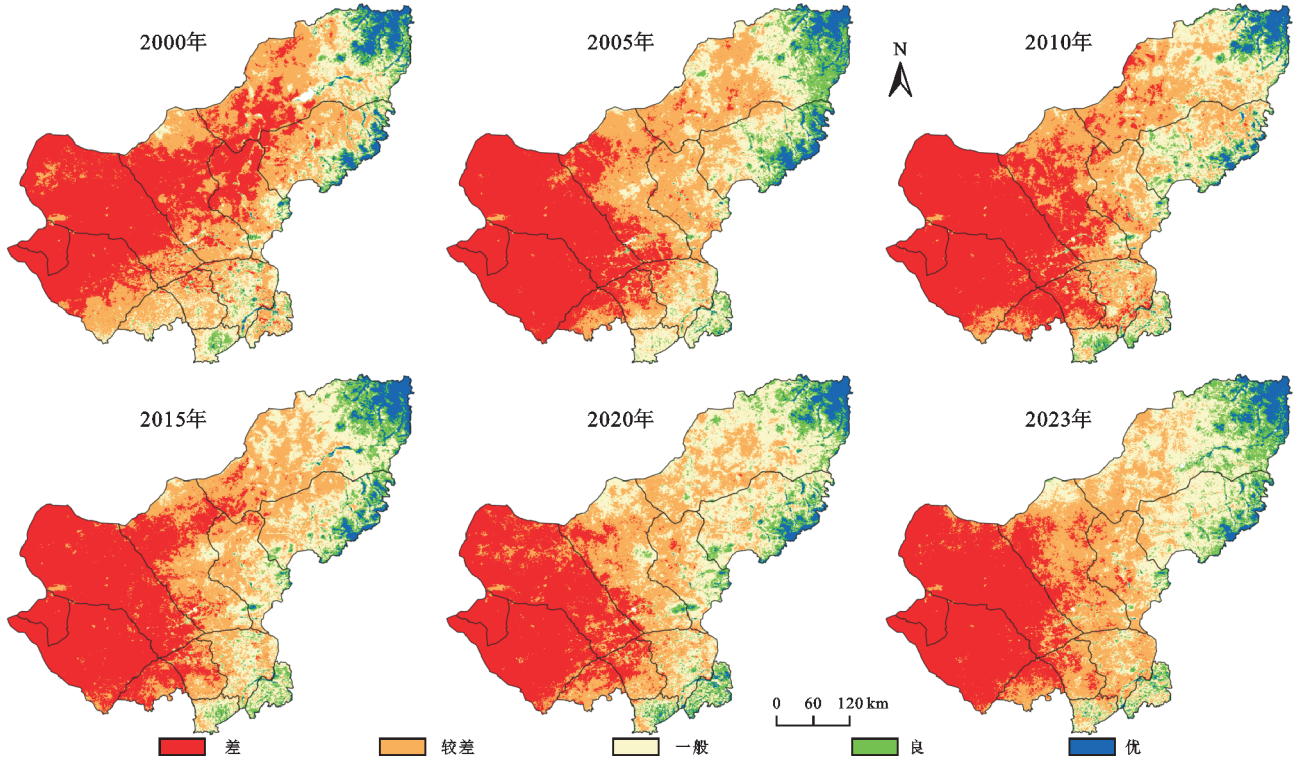


图1 锡林郭勒盟2000—2023年MRSEI等级分布

Fig. 1 Distribution of MRSEI grades in Xilingol League from 2000 to 2023

表4 2000—2023年锡林郭勒盟MRSEI等级面积
Table 4 Areas of different MRSEI grades in Xilingol League from 2000 to 2023

MRSEI 等级	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
差	78564	75094	80809	75327	62837	68807
较差	70437	63039	66494	60562	59970	60922
中等	33116	39916	36902	42435	54109	46425
良	10822	15333	10717	14815	16830	17138
优	7793	7857	6354	8074	7523	7830

由图2A可以看出,锡林郭勒盟MRSEI值总体呈轻微上升趋势,年均变化率为0.001。东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、锡林浩特市、阿巴嘎旗北部以及多伦县的生态环境质量改善较快,这与该地区丰富的森林、草地和水源直接相关。而浑善达克沙漠周边地区生态环境质量恶化较快,这些地区以戈壁和荒漠为主,年降水量较少,导致生态环境质量下降。

由图2B可以看出,锡林郭勒盟生态环境质量变化具有明显的空间异质性。统计结果显示,生态环境质量提升的面积占总面积的62.1%,其中显著提升的面积占8.1%。生态环境质量降低的面积占总面积的37.9%,其中显著降低的面积占3.9%。总体来看,提升的面积比降低的面积多出24.3%,整体呈现轻微提升的变化趋势。

3.2 锡林郭勒盟生态环境质量变化驱动力

计算MRSEI与降水、气温和夜间灯光的相关系数,以解释气候变化和人类活动对生态环境质量的驱动力(图3)。结果显示,MRSEI与气温的平均相关系数为0.08,显著性检验($p < 0.05$)通过的面积占比为8%,呈现不显著正相关(图3B)。MRSEI与降水量的相关性更为显著,年降水量相关系数通过显著性检验的面积比例为33.8%,大部分区域表现为显著正相关(图3A)。MRSEI与夜间灯光的平均相关系数为

0.02,显著性检验通过的面积占比为 5.95%(图 3C)。

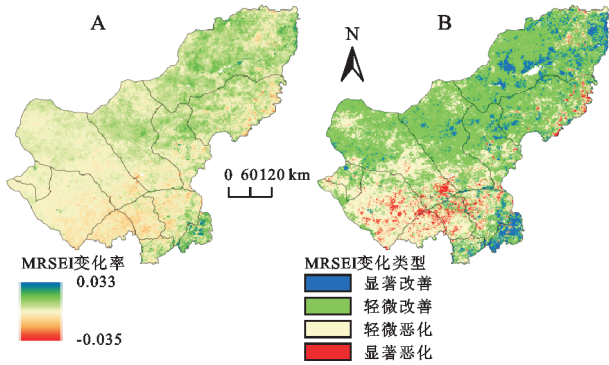


图2 2000—2023年锡林郭勒盟MRSEI变化速率及变化类型
Fig. 2 Change rate and change types of MRSEI in Xilingol League from 2000 to 2023

综合分析表明,降水对生态环境质量的驱动力显著高于气温,研究区生态环境质量对降水的响应

更为敏感。相较气候因素,人类活动对MRSEI的相关性较弱,但在沙地区域,人类活动与MRSEI表现为显著负相关,其空间分布与MRSEI和气温的相关性规律一致,说明气候变化与建设用地扩张、过度放牧及砍伐等人类活动的叠加影响导致该区域生态环境质量持续退化。此外,在多伦多县中部地区,MRSEI与降水、气温和人类活动均呈显著正相关,表明人类活动对生态环境的影响具有双重性,既可能产生负面效应,也可能与气候变化协同发挥积极作用。特别是21世纪以来,退耕还林还草、“三北”防护林体系建设和京津风沙源治理等重大生态工程的实施,有效推动了锡林郭勒盟生态环境质量的显著提升,进一步验证了生态保护工程对区域生态环境改善的积极作用。

A MRSEI与降水相关系数

B MRSEI与气温相关系数

C MRSEI与夜间灯光相关系数

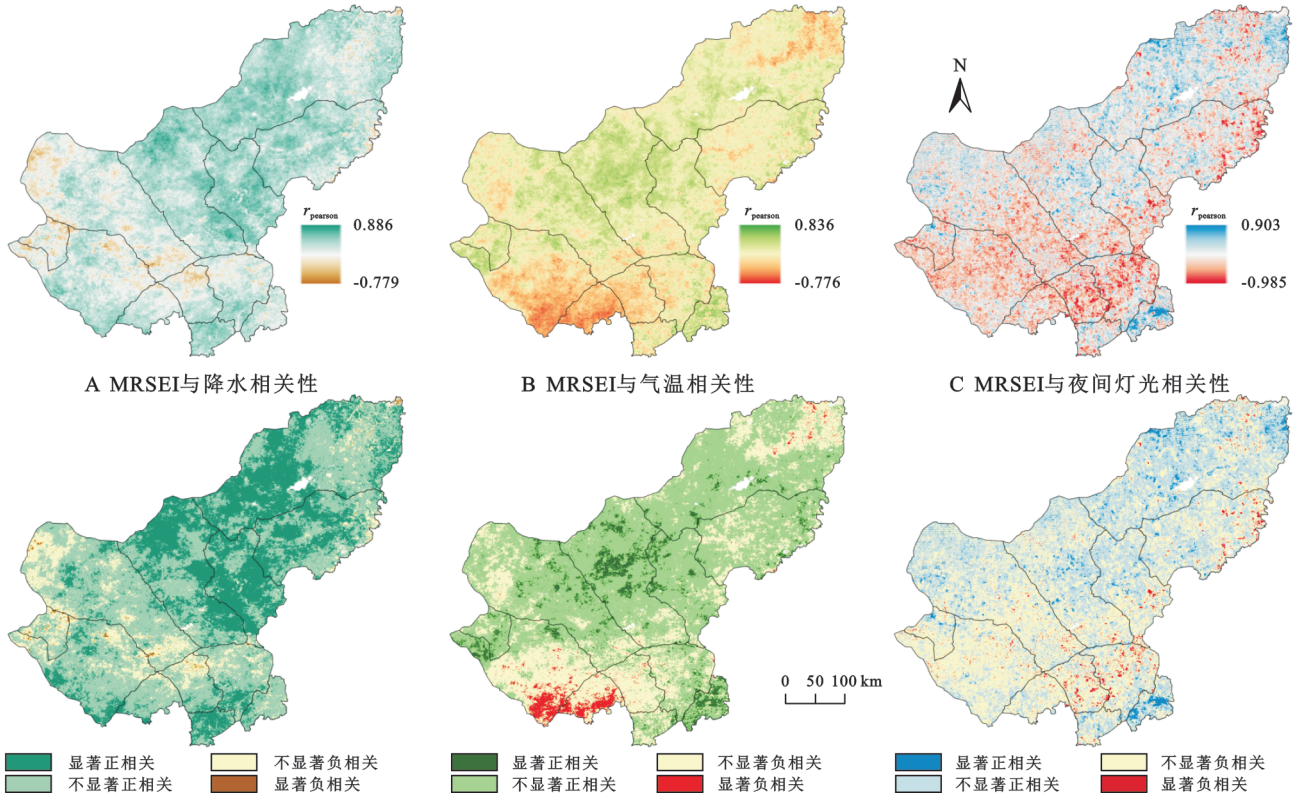


图3 锡林郭勒盟MRSEI与降水、气温以及夜间灯光的皮尔逊相关性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Pearson correlation between MRSEI and precipitation, temperature, and nighttime light in Xilingol League

3.3 锡林郭勒盟生态预警区识别

将锡林郭勒盟2000—2023年的MRSEI变化趋势与Hurst指数值相叠加,未来MRSEI变化趋势分为3种类型:未来持续改善、未来持续恶化和未来变化未知(图4)。结果表明,锡林郭勒盟的Hurst指数均值为0.504,MRSEI未来变化趋势具有较大随机性。其中未来持续改善和未来持续恶化面积比分别为33.7%和17.6%。值得注意的是未来变化未知面积占比达48.7%。这一数据表明,66.3%的区域未来

生态环境质量有恶化的风险,这些区域的生态平衡相对脆弱,城市化进程加快和森林资源开采的扰动加剧,使生态系统承受巨大负荷。因此,需将生态环境质量未来持续下降的区域设为生态预警区,强化监管和治理。

4 讨论

4.1 MRSEI模型适用性分析

RSEI与MRSEI的年度变化趋势如图5所示。结

果显示,两者均呈上升趋势,表明研究区生态环境总体有所改善。2000—2003年,RSEI值略高于MRSEI,表明荒漠化和草地退化对生态环境的不利影响尚不显著;而在2003—2023年,MRSEI值始终低于RSEI,反映这些因素的不利影响逐渐显现并具有持续性。从差值变化来看,2000—2007年两者差值逐渐增大,2007—2023年差值逐渐减小,这与当地生态环境治理政策密切相关。2007年,两者差值达到顶峰(0.024),表明两者在数值上接近。尽管RSEI和MRSEI的生态等级均为较差,但MRSEI数值更低,说明荒漠化和草地退化对研究区生态环境质量产生了长期负面影响。

为进一步揭示RSEI与MRSEI的空间差异,分别选取4种典型土地利用类型进行局部对比(图6)。结果显示,林地的RSEI与MRSEI空间差异较小,而其他地类区域差异较大。图6A为草原区域,RSEI和MRSEI均值分别为0.424,0.410,MRSEI更能突出放牧导致的草地退化对生态环境的不利影响。图6B为戈壁区域,两者均值差异较小(分别为0.555,0.552),

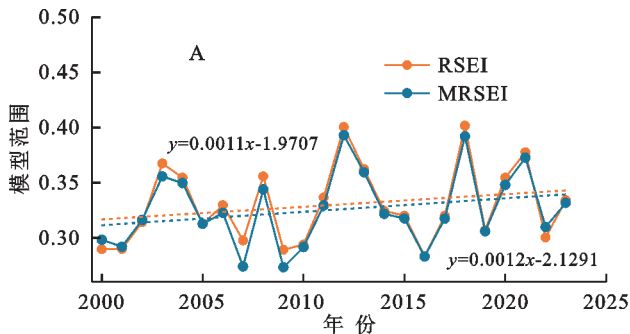


图5 RSEI与MRSEI的结果对比

Fig. 5 Comparison of RSEI and MRSEI results

TGSI指数通过弥补植被覆盖度评估荒漠化时对降水依赖过大的不足,在生态环境质量评价中表现出重要作用,并已在以往研究中得到验证^[17,23]。研究区草地退化严重,叶面积指数(LAI)能够有效表征植被生长状况^[24]。因此,本文在RSEI模型基础上引入TGSI和LAI,以更精准地反映荒漠化和草地退化的典型特征。从变化趋势看,RSEI与MRSEI均能反映研究区生态环境质量的改善趋势,但MRSEI数值更低;从空间上看,MRSEI能够更全面地反映森林健康发展,以及荒漠化、土壤侵蚀和人类活动对半干旱草原生态环境质量的影响。这表明,土地荒漠化和草地退化是制约半干旱草原地区生态环境可持续发展的主要因素,同时也进一步验证了MRSEI在半干旱区草原生态环境质量监测中的有效性。

4.2 生态环境质量时空分布格局

锡林郭勒草原是中国典型的半干旱草原,自20世

纪50年代以来,由于畜牧业快速发展和农业用地扩张,外界干扰加剧,草地生态遭到破坏,成为我国北方天然草原生态演替的典型区域之一^[28]。本文基于GEE平台构建MRSEI模型,分析了锡林郭勒盟生态环境质量的时空变化。结果显示,2000—2023年锡林郭勒盟MRSEI均值为0.33,生态环境质量差与较差区域的面积逐步减少,整体质量呈轻微上升趋势,但稳定性较差,与前人研究结果一致^[22]。从空间分布来看,锡林郭勒盟生态环境质量总体呈现“东北高、西部低”的分布格局。东北部林地区域因地势较高,植被类型以森林为主,人类活动干扰较少,气候条件相对湿润,生态系统的自我修复能力较强,使得该区域生态环境质量水平显著高于其他地区。此外,林地区域较少受到土地开发和资源过度利用的影响,其稳定的植被覆盖为防止水土流失和改善区域气候条件提供了重要保障。相比之下,中部和西南部的浑善达克沙

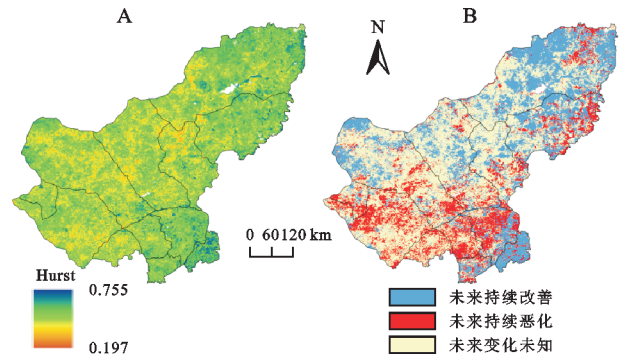
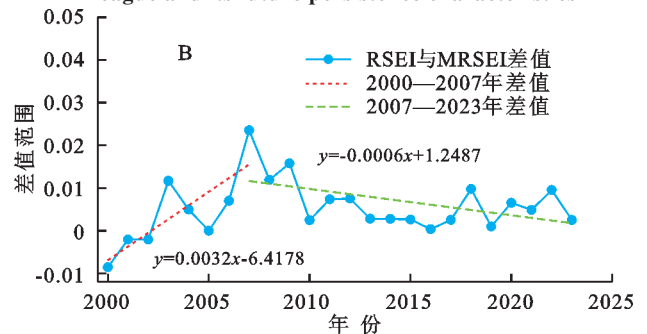


图4 锡林郭勒盟MRSEI的Hurst指数分布及其未来持续性特征

Fig. 4 Hurst index distribution of MRSEI in Xilingol League and its future persistence characteristics



纪50年代以来,由于畜牧业快速发展和农业用地扩张,外界干扰加剧,草地生态遭到破坏,成为我国北方天然草原生态演替的典型区域之一^[28]。本文基于GEE平台构建MRSEI模型,分析了锡林郭勒盟生态环境质量的时空变化。结果显示,2000—2023年锡林郭勒盟MRSEI均值为0.33,生态环境质量差与较差区域的面积逐步减少,整体质量呈轻微上升趋势,但稳定性较差,与前人研究结果一致^[22]。从空间分布来看,锡林郭勒盟生态环境质量总体呈现“东北高、西部低”的分布格局。东北部林地区域因地势较高,植被类型以森林为主,人类活动干扰较少,气候条件相对湿润,生态系统的自我修复能力较强,使得该区域生态环境质量水平显著高于其他地区。此外,林地区域较少受到土地开发和资源过度利用的影响,其稳定的植被覆盖为防止水土流失和改善区域气候条件提供了重要保障。相比之下,中部和西南部的浑善达克沙

地区生态环境质量较低,主要原因在于该区域气候干旱,风沙活动频繁,水资源短缺,同时长期过度放牧和土地利用不合理进一步加剧了荒漠化进程。沙丘

扩张和土壤侵蚀不仅对植被生长造成严重破坏,还显著降低了区域的生态系统服务能力,生态环境质量受多重因素叠加影响,脆弱性明显高于东北部林地。

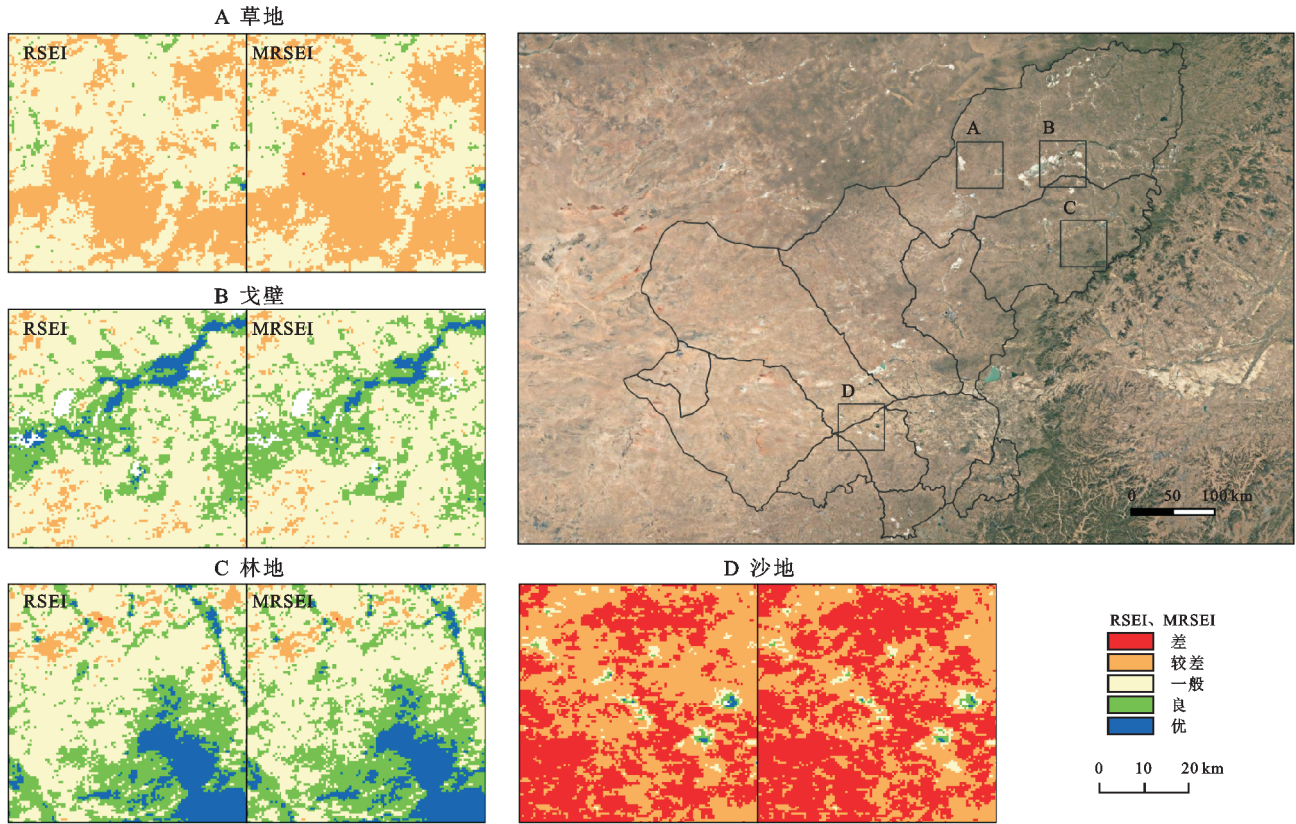


图 6 RSEI 和 MRSEI 的局部细节比较

Fig. 6 Comparison of local details between RSEI and MRSEI

4.3 生态环境质量时空变化驱动因素及其相关建议

半干旱草原生态环境脆弱,对气候变化和人类活动的响应极为敏感。以往研究指出,锡林郭勒草原植被变化与降水量显著正相关,而与气温的相关性不明显。本文研究结果与之相符,降水量被证实为研究区生态环境质量变化的主要驱动因素^[29]。同时,退耕还林、风沙治理、休牧禁牧等恢复措施对生态环境质量的改善起到了重要作用。根据全国第六次荒漠化沙化土地监测结果,锡林郭勒盟沙化土地面积显著减少,草原平均植被盖度达到 41%,标志着“绿进沙退”的重大转折^[30]。然而,持续性分析表明,未来生态环境质量可能持续下降的区域被划定为生态预警区,占研究区面积的 66.3%。这些高风险区域主要集中在草地、沙漠和人口较为密集的地区,其生态系统较为脆弱,面临较大的环境压力。城市化的快速推进导致大量自然生态系统被转变为建设用地,频繁的人类活动与过度放牧对草原生态系统造成破坏,短期内难以恢复。因此,需要进一步加强对这些区域的监测和保护。针对这一问题,可从以下方面开展工作:

(1) 东北部林地区域作为研究区生态稳定核心,应设立封山育林区,严格实施禁牧、禁伐与轮牧政策,开展植被补种与生态修复,建立高效监测与预警体系,持续提升区域生态系统的稳定性和健康水平。

(2) 针对浑善达克沙地荒漠化,应建设人工防风固沙林,结合生物与机械固沙技术,阻止荒漠化扩展。加强地方社区参与,推广沙产业模式,实现生态治理与经济协调发展的协调统一。

(3) 优化土地利用与资源开发:合理调整农林牧业结构,推广草畜平衡制度与节水农业技术。对矿产资源开发严格管控,强化环境恢复措施。同时,推动绿色产业发展,减少土地滥用对生态系统的破坏。

5 结论

(1) 构建的 MRSEI 综合集成了绿色、湿度、干度、热度、表土粒度和草场退化 6 个生态指标,相较于传统 RSEI,进一步凸显了荒漠化和草地退化对生态环境质量的影响,为半干旱区草原生态环境的长时序动态监测提供了科学依据。

(2) 2000—2023 年,研究区生态环境质量整体呈

波动上升趋势。耕地与草地的生态环境有所改善,而裸地与建设用地的生态环境持续恶化,应将这些区域划定为生态预警区,并采取更加严格的保护与管理措施。

(3)降水量是锡林郭勒半干旱草原生态环境质量变化的主要气候驱动因素,气温影响次之。同时,人类活动对生态环境质量的影响显著。未来生态治理需综合考虑自然条件与人为因素的协同作用,进一步完善草原保护与修复制度,优化资源利用方式,加强草原管理,推动北方半干旱草原的绿色可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Chen Y N, Zhang X Q, Fang G H, et al. Potential risks and challenges of climate change in the arid region of Northwestern China[J]. *Regional Sustainability*, 2020, 1(1):20-30.
- [2] Hua D, Hao X M. Spatiotemporal change and drivers analysis of desertification in the arid region of Northwest China based on geographic detector[J]. *Environmental Challenges*, 2021, 4:100082.
- [3] Yan X Y, Cheng P, Zhang Q, et al. Comparisons of climate change characteristics in typical arid regions of the Northern Hemisphere[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:1033326.
- [4] Shao W Y, Zhang Z P, Guan Q Y, et al. Comprehensive assessment of land degradation in the arid and semi-arid area based on the optimal land degradation index model[J]. *Catena*, 2024, 234:107563.
- [5] 李闽.为推进人与自然和谐共生的美丽江苏建设贡献自然资源力量[J].*唯实*, 2024(1):64-67.
Li M. Contribute natural resources to the construction of beautiful Jiangsu where man and nature coexist harmoniously[J]. *Truths and Facts*, 2024(1):64-67.
- [6] 马广文,张凤英,牛丽楠,等.中国生态环境质量现状及2016—2023年动态变化分析[J].*中国环境监测*, 2024, 40(3):1-11.
Ma G W, Zhang F Y, Niu L N, et al. Analysis on current situation of the eco-environment quality and its dynamic changes from 2016 to 2023 in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2024, 40(3):1-11.
- [7] Shan W, Jin X B, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239:118126.
- [8] 颜梅春,王元超.区域生态环境质量评价研究进展与展望[J].*生态环境学报*, 2012, 21(10):1781-1788.
Yan M C, Wang Y C. Advances in the evaluation of ecological environmental quality[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(10):1781-1788.
- [9] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].*生态学报*, 2013, 33(24):7853-7862.
- Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7853-7862.
- [10] 宋慧敏,薛亮.基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J].*应用生态学报*, 2016, 27(12):3913-3919.
Song H M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12):3913-3919.
- [11] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].*生态学报*, 2023, 43(5):2114-2127.
Zhang J, Yang L P, Gong E J, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):2114-2127.
- [12] 董春媛,乔荣荣,杨智程,等.基于改进遥感生态指数的宁夏沿黄平原区生态环境质量评价[J].*生态学报*, 2023, 43(16):6706-6715.
Dong C Y, Qiao R R, Yang Z C, et al. Eco-environmental quality assessment of the Ningxia plain along the Yellow River based on the modified remote sensing ecological index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16):6706-6715.
- [13] 冯自贤,余璐,王秀慧,等.基于改进遥感生态指数的宁夏生态环境质量时空变化[J].*生态环境学报*, 2024, 33(1):131-143.
Feng Z X, She L, Wang X H, et al. Spatial and temporal variations of ecological environment quality in Ningxia based on improved remote sensing ecological index[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(1):131-143.
- [14] 张伟,杜培军,郭山川,等.改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J].*遥感学报*, 2023, 27(2):299-317.
Zhang W, Du P J, Guo S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(2):299-317.
- [15] 罗镛基,王宏涛,王成.基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J].*干旱区地理*, 2023, 46(4):539-549.
Luo R J, Wang H T, Wang C. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(4):539-549.
- [16] 朝力格勒,兴安,阿如早,等.基于改进型遥感生态指数的干旱区生态环境评价:以阴山北麓内蒙古武川县为例[J].*应用生态学报*, 2024, 35(7):1907-1914.
Chaoligeer, Xing A, AR H, et al. Assessment of eco-

- logical environment in arid region based on the improved remote sensing ecological index: A case study of Wuchuan County, Inner Mongolia at the northern foot of Yin Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(7):1907-1914.
- [17] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 等. 干旱地区遥感生态指数的改进: 以乌兰布和沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11):3795-3804.
- Wang J, Ma J L, Xie F F, et al. Improvement of remote sensing ecological index in arid regions: Taking ulan buh desert as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11):3795-3804.
- [18] Xu G C, Kang M Y, Jiang Y. Adaptation to the policy-oriented livelihood change in xilingol grassland, Northern China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13:1668-1683.
- [19] 连浩宇, 李愈哲. 退耕还草对锡林郭勒草原总初级生产力变化的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(23):9733-9744.
- Lian H Y, Li Y Z. Changes of gross primary productivity induced by returning farmland to grassland in Xilin Gol Grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23):9733-9744.
- [20] Shiyomi M, Akiyama T, Wang S P, et al. A grassland ecosystem model of the Xilingol steppe, Inner Mongolia, China [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(13):2073-2083.
- [21] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6):1521-1527.
- Song M J, Luo Y Y, Duan L M. Evaluation of ecological environment in the Xilin gol steppe based on modified remote sensing ecological index model [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(6):1521-1527.
- [22] Li H, Zhou Y Y, Zhao X, et al. A dataset of 0.05-degree leaf area index in China during 1983-2100 based on deep learning network [J]. *Scientific Data*, 2024, 11(1):1122.
- [23] Lamchin M, Lee J Y, Lee W K, et al. Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(1):64-77.
- [24] Ma Y Y, Wang W Y, Jin S K, et al. Spatiotemporal variation of LAI in different vegetation types and its response to climate change in China from 2001 to 2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156:111101.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范(HJ192-2015)[M]. 北京: 中国科学出版社, 2015.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical Specifications for Ecological and Environmental Status Assessment(HJ192-2015) [M]. Beijing: Science Press(China), 2015.
- [26] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 基于改进遥感生态指数的吐鲁番-哈密地区生态环境质量评价及驱动机制分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(9):3911-3923.
- Fu K X, Jia G D, Yu X X, et al. Evaluation of ecological environment quality and analysis of driving mechanism in Tulufan-Hami region based on improved remote sensing ecological indices [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9):3911-3923.
- [27] Tran T V, Tran D X, Nguyen H, et al. Characterising spatiotemporal vegetation variations using LANDSAT time-series and Hurst exponent index in the Mekong River Delta [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(13):3507-3523.
- [28] 乌尼图, 刘桂香, 刘爱军, 等. 天然草原净初级生产力变化监测与驱动力分析: 以锡林郭勒草原为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4):1233-1240.
- Wu N T, Liu G X, Liu A J, et al. Monitoring and driving force analysis of net primary productivity in native grassland: A case study in xilingol steppe, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1233-1240.
- [29] 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 基于MODIS NDVI的锡林郭勒草原近10年的时空动态[J]. *草业科学*, 2014, 31(8):1416-1423.
- Zhang S W, Zhao H B, Zhang F, et al. Temporal and spatial dynamic of Xilingol steppe based on MODIS NDVI in recent ten years [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(8):1416-1423.
- [30] 锡林郭勒盟林业和草原局. 第六次荒漠化和沙化土地监测数据 [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://lcj.xlgl.gov.cn/lcj/zllh/2023072615153816459/index.Html>.
- Xilingol League Forestry and Grassland Bureau. Data from the Sixth Desertification and Land Degradation Monitoring [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://lcj.xlgl.gov.cn/lcj/zllh/2023072615153816459/index.Html>.