阿拉善左旗飞播林区2001—2024年生境质量时空演变及其驱动因素

董晓宇[1,2], 李 龙[1,2], 田昕冉[1], 赵龙飞[1], 伊丽娜[3]

(1.内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室,
内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统定位观测研究站,
内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.阿拉善盟林草事业发展中心, 内蒙古 阿拉善左旗 750306)

摘 要: [目的] 对阿拉善左旗飞播林区生境质量变化及其驱动因素进行分析,为该飞播林区生态空间格局优化及生态环境保护工作提供科学依据。[方法] 基于遥感生态指数(RSEI),采用Theil-Sen斜率估计、Hurst指数和Mann-Kendall检验等方法分析阿拉善左旗飞播林区2001—2024年生态质量演变趋势,并借助地理探测器对驱动因素进行量化分析。[结果] ①从时间尺度来看,研究区内生态质量处于较低水平,且呈波动下降趋势,RSEI均值从0.054 7下降至0.041 2,总体下降24.68%。从空间尺度来看,生态质量差者主要分布在南部地区,生态质量优者在边缘地区。②研究区内生态质量处于恶化状态,改善区和恶化区分别占11.28%和88.72%。改善区呈斑块分布,恶化区以显著恶化为主,呈大面积分布。未来研究区内生态质量以强持续性退化和弱持续改善为主。③探测结果表明,土地利用类型解释力最大,单因素检测q值为0.445 7,与高程的交互检测q值最大,为0.559 0,表明该区域生态质量的波动与土地利用方式密切相关。[结论] 阿拉善左旗飞播林的生境质量较差,土地利用与高程因素对其的影响最大。

关键词: 遥感生态指数; 生态环境; 驱动因素; 飞播林区; 阿拉善左旗

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0171-11 **中图分类号:** X171.4

文献参数: 董晓宇, 李龙, 田昕冉, 等.阿拉善左旗飞播林区2001—2024年生境质量时空演变及其驱动因素[J].水土保持通报,2026,46(3):171-181. Dong Xiaoyu, Li Long, Tian Xinran, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner and its driving factors from 2001 to 2024 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):171-181.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.028 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.028**

Spatiotemporal evolution of habitat quality in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner and its driving factors from 2001 to 2024

Dong Xiaoyu[1,2], Li Long[1,2], Tian Xinran[1], Zhao Longfei[1], Yi Lina[3]

(1.*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*Inner Mongolia Hanggin Desert Ecosystem National Station, Ordos, Inner Mongolia* 017400, *China*; 3.*Alxa League Forestry and Grassland Development Center, Alxa Left Banner, Inner Mongolia* 750306, *China*)

Abstract: [Objective] The changes in habitat quality and their driving factors in the aerial seeding forest area of Alxa Left Banner were analyzed in order to provide a scientific basis for the optimization of the ecological spatial pattern and the protection of the ecological environment of the study area. [Methods] Based on the remote sensing ecological index (RSEI), this study analyzed the evolution trend of ecological quality in the aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024 using the Theil-Sen slope estimator, Hurst exponent, and Mann-Kendall test, and quantified the driving factors using geodetectors. [Results] ① In terms of temporal scale, the

收稿日期:2025-07-26 **修回日期:**2025-12-02 **采用日期:**2025-12-04

资助项目:内蒙古自治区科技创新重大示范工程"揭榜挂帅"项目"腾格里沙漠锁边林林分结构优化调控技术研究"(2024JBGS0021-4-2); 内蒙古农业大学高层次及优秀博士人才引进科研启动项目(NDYB2023-2)

第一作者:董晓宇(1994—),男(汉族),内蒙古自治区锡林郭勒盟人,博士,讲师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email:dongxiaoyu2019@126.com。

通信作者:李龙(1989—),男(汉族),吉林省桦甸市人,博士,副教授,博士研究生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email:lilongdhr@126.com。

ecological quality in the study area was at a low level and showed a fluctuating downward trend. The average RSEI decreased from 0.054 7 to 0.041 2, with an overall decrease of 24.68%. In terms of spatial scale, poor ecological quality was mainly distributed in the southern region, while high ecological quality was found in the peripheral areas. ② The ecological quality in the study area was in a deteriorating state. The improvement areas and deterioration areas accounted for 11.28% and 88.72%, respectively. The improvement area showed a patch pattern, while the deterioration areas were mainly characterized by significant deterioration and were distributed over large areas. In the future, the ecological quality in the study area was projected to be dominated by strong persistent degradation and weak persistent improvement. ③ The detection results indicated that the explanatory power of land use types was the greatest, with a single-factor detection q value of 0.445 7, and the interaction detection q value with elevation was the largest at 0.559 0, indicating that the variations in ecological quality in this area were closely related to land use pattern. [Conclusion] The habitat quality of the aerial seeding forest in Alxa Left Banner is poor, with land use and elevation having the greatest influences.

Keywords: remote sensing ecological index; ecological environment; driving factors; aerial seeding forest area; Alxa Left Banner

生态环境是社会-经济-自然复合系统,其质量状况是反映人类活动与自然环境相互作用的响应表征,也是区域健康可持续发展的重要保障[1-2]。阿拉善左旗飞播林区生境质量较为脆弱,气候变化和人类活动共同作用于该地区的生境变化过程[3]。对阿拉善左旗飞播林区生态质量的演变及驱动机制进行研究,可为飞播林区生态环境保护提供科学理论依据。生态质量是指在特定的时间和区域条件下,整个系统或组成部分的子系统对人类生存和整体发展的适宜性、协调性和可持续性[1]。生态质量评价是认识和管理自然环境的重要工具。目前,针对生态质量监测和评价有多种方法。如层次分析法[4]、生态足迹法[5]及综合生态指数法等[6]。但在大区域长时序生态环境监测和分析评价中,一些综合生态指标在指标权重的分配和确定方面存在较大挑战,相比之下,卫星遥感技术具有获取便捷、覆盖面积广和空间分辨率高等优点,能够整合多学科知识,已成为环境监测评价、生态调查、资源评估等领域不可或缺的手段[7-9]。国内外学者针对遥感指数监测和评价环境质量的可行性展开了大量研究,如通过归一化植被指数(NDVI)或增强型植被指数(EVI)进行植被生长状态及植被覆盖度监测[10],通过标准化降水蒸散指数进行干旱评估[11],通过地表温度指数进行城市热岛效应研究等[12],但这种基于单一指标的方法一般只关注生态环境的一个特定方面,考虑到自然环境的复杂性,仅仅使用单一指标对区域生态质量进行综合评价不够全面。随着遥感技术和数学模型的深入探索和利用,生态质量评价方法得到了实质性的拓展和完善。遥感生态指数(RSEI)包含4个关键指标:绿度、湿度、干燥度和热度[13]。该方法避免了因个体特征造成的权重定义误差,为更准确地反映区域生态质量的时空变化提供了客观可靠的方法。RSEI模型为不同区域的生态环境评价提供了有价值的工具。然而,这些指标主要适用于自然环境支持人类活动的区域,如城市、郊区、森林、河岸等[14-15],该指标体系难以适配荒漠等极端生境区。为了解决RSEI在实际应用中的局限性,学者们从各个角度对其进行了不断的完善,例如,Firozjaei等[16]在原有指数基础上引入土壤指数(NDSI),构建了干旱区遥感生态指数,对欧洲多个城市生态状况进行评价分析;Chen等[17]引入沙漠化指数(DI);Xu等[18]则引入土地覆盖类型丰度(AI),构建了区域尺度上的遥感生态指数模型,并证实其在中国范围内与生态环境部提供的环境指数高度一致。综合以上研究成果,本研究引入盐度指数(SI)构造遥感生态指数进行阿拉善左旗飞播林区的生态环境监测和评价。

阿拉善左旗地处欧亚大陆腹地,是典型的干旱气候,近年来受气候变化和人类活动的双重影响,土地荒漠化、盐渍化、草地退化等环境问题日益突出[19]。由于飞播造林,阿拉善左旗总体上沙漠化土地面积减少,沙漠化程度降低,但是在局部地区出现了沙漠化程度加深的情况[20]。因此,高效、精确地监测阿拉善左旗飞播林区生态质量环境的时间和空间变异及其驱动因素是实现可持续发展目标的关键。而目前鲜有关于阿拉善左旗飞播林区生态质量影响的研究。生态过程是动态的、开放的、有机的,具有周期性和阶段性,它容易受到全球气候变化和区域活动的影响,造成时间的周期性和波动性[21],因此生态质量研究不应只关注构造RSEI指数的相关数据,而应考虑其他驱动因素,本文通过引入土地利用等

因素,使其可以更好地理解人类活动与生态环境之间复杂的相互作用。

针对上述问题,本研究基于改进后的遥感生态指数,以阿拉善左旗飞播林区作为研究对象,分析2001—2024年生态质量的时空格局和变化趋势,并探讨其驱动因素。研究目标为:①利用Theil-Sen斜率估计和Mann-Kendall检验等方法分析RSEI的时空格局和趋势;②利用Hurst对其未来变化趋势进行预测;③借助地理探测器,探讨自然因素和人为因素对阿拉善左旗飞播林区RSEI的驱动作用。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于阿拉善左旗,地形由东南向西北倾斜,属贺兰山洪积扇边缘,地势开阔,衔接起伏的沙丘,地表风蚀作用强,主要以固定、半固定沙地为主[22];土壤类型以非地带性风沙土为主,土壤质地均为砂土。

研究区气候属典型的温带大陆性气候,该区年均降水量在100～200 mm(6—8月);年均气温为8.7 ℃;年均风速为7.1 m/s,春季和冬季大风天数居多,最大风速可达26 m/s。

研究区原生植被以旱生草本植物为主,主要有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)等。自1984年飞播造林实施以来,该区植被主要以飞播引种的次生植被花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、籽蒿(*Artemisia sieversiana*)等灌木为主,并伴生有蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、针茅(*Stipa capillata*)等。

1.2　数据来源

1.2.1　影像数据

本研究数据大部分来自GEE平台,选取Landsat Collection 2 Level-2数据集。由于干旱区植被稀疏,故选择植被生长较为旺盛的7—9月,云量低于20%的影像。遥感数据处理在GEE平台中进行,大致分3个步骤:①影像前处理,主要包括去除云及阴影、中值合成、水体提取与掩膜、影像裁剪。②RSEI各指标提取。③主成分分析(PCA)。

为进一步了解阿拉善左旗飞播林区生态质量的时空变化,采用自然断点法将RSEI值分为5个等级:差(0,0.2]、一般(0.2,0.4]、中等(0.4,0.6]、良好(0.6,0.8]和优秀(0.8,1]。选取2001,2006,2011,2016,2021和2024年作为代表年份,分析阿拉善左旗飞播林地区的生态质量。

1.2.2　气候数据

温度数据和降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)的中国1 km分辨率逐月降水量数据集和中国1 km分辨率逐月平均气温数据集。该数据集由彭守璋根据CRU发布的全球0.5°气候数据集和WorldClim发布的全球高分辨率气候数据集,并通过Delta空间降尺度方案在中国地区降尺度生成,使用496个独立气候观测点数据进行验证,验证结果可信。

1.2.3　土地利用、地形数据

土地利用和土地覆盖(LULC)数据来源于Yang和Huang[23],空间分辨率为30 m。地形数据由坡度、高程反映,高程数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)的GDEMV2数据,空间分辨率为30 m,其余数据经ArcGIS计算所得。为后续研究方便,本研究将使用的数据重新投影到WGS 1984 UTM Zone 48N(EPSG:32648)坐标系,并将空间尺度统一到30 m。

1.3　研究方法

1.3.1　RSEI计算

RSEI是一种综合性生态指标,主要用于利用遥感数据评估生态环境质量,因其与生态状况紧密相关而备受关注。本研究利用绿度、湿度、干度和盐度在GEE中构建改进的RSEI,然后通过主成分分析(PCA)进行耦合。计算公式为

$$RSEI = f(NDVI, WET, NDBSI, SI) \quad (1)$$

归一化植被指数(NDVI)是反映干旱区植被生长状态的最好指标之一。湿度指数(WET)反映土壤、植被的含水量。土壤盐碱化是中国西北地区植被退化的常见因素之一,因此,本研究使用盐度指数(SI)进行反演。干度指数(NDBSI)基于建筑指数(IBI)与裸土指数(BSI)的平均值计算。各指标计算方法详见表1。

NDVI, WET, NDBSI, SI这4个指标通过主成分分析整合为一个综合指数,大部分信息都集中在第一主成分(PC_1)和第二主成分(PC_2)上,这样就避免了人为因素。在进行主成分分析之前,为消除量纲对分析结果的影响,首先对这些指标进行了极值标准化,将它们的数值范围一致地映射到[0,1]。如果经过主成分分析之后得到的PC_1和PC_2特征值累计贡献率超过了85%,则可以认为PC_1和PC_2整合了这些影像的大部分特征。而值越大代表生态环境质量越差;这与正常的逻辑相反,需要正负值的调换,得

到初始的RSEI，用$RSEI_0$表示为：

$$RSEI_0=1-(PC_1+PC_2) \tag{2}$$

将$RSEI_0$归一化，得到最终的RSEI，可以在宏观上反映区域生态环境质量，计算公式为

$$RSEI=\frac{RSEI_0-RSEI_{0min}}{RSEI_{0max}-RSEI_{0min}} \tag{3}$$

式中：$RSEI_{0max}$，$RSEI_{0min}$分别表示$RSEI_0$的最大值和最小值。

表1 各指标计算公式

Table 1 Formulas for calculating various indicators

指标	计算方法	公式注释
NDVI	$NDVI=\frac{\alpha_{NIR}-\alpha_{Red}}{\alpha_{NIR}+\alpha_{Red}}$	α_{Blue}，α_{Green}，α_{Red}，α_{NIR}，α_{SWIR1}，α_{SWIR2}分别表示Landsat TM，ETM^+，OLI影像的蓝色、绿色、红色、近红外、短波红外1和短波红外2波段的反射率。
WET	$WET_{TM}=0.031\,5\alpha_{Blue}+0.202\,1\alpha_{Green}+0.310\,2\alpha_{Red}+0.159\,4\alpha_{NIR}-0.680\,6\alpha_{SWIR1}-0.610\,9\alpha_{SWIR2}$ $WET_{ETM^+}=0.031\,5\alpha_{Blue}+0.202\,1\alpha_{Green}+0.092\,6\alpha_{Red}+0.065\,6\alpha_{NIR}-0.762\,9\alpha_{SWIR1}-0.538\,8\alpha_{SWIR2}$ $WET_{OLI}=0.151\,1\alpha_{Blue}+0.197\,2\alpha_{Green}+0.328\,3\alpha_{Red}+0.340\,7\alpha_{NIR}-0.711\,7\alpha_{SWIR1}-0.455\,9\alpha_{SWIR2}$	
SI	$SI=\sqrt{\alpha_{Blue}+\alpha_{Red}}$	
NDBSI	$IBI=\frac{\frac{2\alpha_{SWIR1}}{\alpha_{SWIR1}+\alpha_{NIR}}-\left[\frac{\alpha_{NIR}}{\alpha_{NIR}+\alpha_{Red}}+\frac{\alpha_{Green}}{\alpha_{Green}+\alpha_{SWIR1}}\right]}{\frac{2\alpha_{SWIR1}}{\alpha_{SWIR1}+\alpha_{NIR}}+\left[\frac{\alpha_{NIR}}{\alpha_{NIR}+\alpha_{Red}}+\frac{\alpha_{Green}}{\alpha_{Green}+\alpha_{SWIR1}}\right]}$ $BSI=\frac{(\alpha_{SWIR1}+\alpha_{Red})-(\alpha_{Blue}+\alpha_{NIR})}{(\alpha_{SWIR1}+\alpha_{Red})+(\alpha_{Blue}+\alpha_{NIR})}$ $NDBSI=\frac{IBI+BSI}{2}$	

1.3.2 Theil-Sen斜率估计

Theil-Sen斜率估计法是一种鲁棒性强的非参数分析法，不依赖于数据的分布假设，可以有效避免计算时时间序列上数据的缺失和数据分布对结果的影响，对数据误差具有较强的抵抗能力，适用于各种类型的数据，分析结果较为科学和可信。因此本文采用Theil-Sen斜率估计分析阿拉善左旗飞播林区2001—2024年的RSEI时间变化趋势，计算公式为

$$\beta=\text{median}\frac{RSEI_j-RSEI_i}{j-i} \tag{4}$$
$$(2001\leqslant i<j\leqslant 2024)$$

式中：$RSEI_j$，$RSEI_i$分别表示第i年和第j年的RSEI值；median为中位数。当$\beta>0$时，表明RSEI呈改善趋势，反之呈退化趋势。

1.3.3 Mann-Kendall趋势分析

Mann-Kendall是一种非参数统计检验方法，用来判断趋势的显著性，它无需样本服从一定的分布，也不受少数异常值的干扰。

计算公式为

$$Z=\begin{cases}(S-(1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S>0)\\ 0 & (S=0)\\ (S-(1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S<0)\end{cases} \tag{5}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\text{sgn}(RESI_j-RESI_i) \tag{6}$$

$$\text{sgn}(RESI_j-RESI_i)=\begin{cases}1 & (RESI_j-RESI_i>0)\\ 0 & (RESI_j-RESI_i=0)\\ -1 & (RESI_j-RESI_i<0)\end{cases} \tag{7}$$

$$\text{var}(S)=n(n-1,2n+5)/18 \tag{8}$$

式中：n表示时间序列的长度；sgn是符号函数；S是Mann-Kendall检测需要构建的统计量；var(S)是S的方差；Z为标准正态变量，采用显著性水平$a=0.05$进行显著性检验；当$|Z|\geqslant 1.96$时，表示RSEI存在显著的变化，此步骤通过Matlab完成。

1.3.4 Hurst指数

Hurst指数是定量测度长时间序列数据信息依赖性和持续性的方法，即过去的信息对未来的影响程度，可以依据指数判断数据未来变化趋势，具体计算公式为

$$\frac{R}{S}=(c\cdot m)^H \tag{9}$$

式中：R为极差；S为标准差；c为常数，将观测值分为n个子序列$RESI_i$，其中$i=1,2\cdots n$。m为任意正整数且$0<m<n$；H为Hurst指数，极差R的计算公式为

$$R=\max X(t,m)-\min X(t,m) \tag{10}$$

式中：X(t)为累积离差。计算公式为

$$X(t)=\sum_{i=1}^{m}(RESI_i-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}RESI_i) \tag{11}$$

式中：$1<t<m$；标准差S的计算公式为

$$S=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\mathrm{RESI}_i-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\mathrm{RESI}_i)^2} \quad (12)$$

Hurst 指数(H)取值范围为[0,1],当 0<H<0.5 时,表明 RSEI 变化具有反持续性,即未来趋势与过去相反,H 越接近 0,反持续性越强;当 H=0.5 时,表明数据具有随机性;当 0.5<H<1 时,表明 RSEI 具有持续性,未来趋势与过去相同,H 值越接近 1 说明持续性越强。为方便分析,将 H 进行分等定级:强反持续性(<0.35)、弱反持续性(0.35~0.5)、弱持续性(0.5~0.65)和强持续性(>0.65)。

1.3.5　地理探测器

地理探测器可以揭示现象背后的因素,描述自变量对因变量的解释能力。为探究影响 RSEI 空间差异的主导因素,采用单因素检测器揭示各影响因素的空间异质性。计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma^2{}_h}{N\sigma^2} \quad (13)$$

式中:q 为对 RSEI 的解释程度;h=1,2…;L 为变量的分层;N,N_h 分别为全部样本数和 h 类样本数;σ^2,$\sigma^2{}_h$ 分别代表全区域和 h 类的 RSEI 方差;q 取值在[0,1]范围内,它的值大小对应着因变量的空间分异程度,值越大则表示对研究区生态质量的解释力越强

交互探测法可以用于评估不同因子间的交互作用关系,评估不同因子组合对飞播林区生态质量的影响力是否存在变化,具体分类详见表 2。在本研究中,首先计算单个因素对因变量的影响,然后计算两因素相互作用后的 q 值,以确定对因变量的影响。

表 2　生态环境质量相互作用类型

Table 2　Interaction types of ecological environmental quality

判断依据	交互作用类型
$q(X_1\cap X_2)<\min[q(X_1),q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1),q(X_2)]<q(X_1\cap X_2)<\max[q(X_1),q(X_2)]$	单线性减弱
$q(X_1)+q(X_2)>q(X_1\cap X_2)>\max[q(X_1),q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$	相互独立
$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$	非线性增强

结合研究区实际情况和数据可得性,选取与 RSEI 密切相关且易于量化的数据:土地利用(LULC)、降水(PRE)、温度(TMP)、风速(SWS)、高程(DEM)及坡度(SLOP),探讨 RSEI 时空格局演变的驱动机制。根据研究区域的实际情况和地理探测器对数据的要求,采用自然断点法对各种自变量进行重分类。在此基础上,利用 ArcGIS 软件的渔网工具构建 100×100 m 网格,提取每个网格中心点坐标表示的变量值进行分析。

2　结果与分析

2.1　RSEI 的合理性分析

将组成遥感生态指数的 4 个指标进行主成分分析,得到 2001—2024 年第一主成分载荷和贡献率(表 3)。第一主成分最高贡献率为 86.40%,最低贡献率为 80.50%,平均贡献率为 83.54%,说明第一主成分能够集成 4 个指标大部分特征信息,即通过 PC_1 构建 RSEI 评价阿拉善左旗飞播林区生态质量是合理的。在 PC_1 中,NDVI 和 WET 的载荷值始终为正值,表明它们对 RSEI 具有正向促进作用;而 SI 和 NDBSI 的载荷值始终为负值,表明它们对 RSEI 具有负向抑制作用。

2.2　RSEI 的时空分布特征

2.2.1　RSEI 的年际变化特征

2001—2024 年阿拉善左旗飞播林区平均 RSEI 总体呈波动性下降趋势(图 1),线性回归斜率为 -0.58×10^{-3}/a。从阶段性变化来看,RSEI 动态呈现出明显的波动特征:在 2001—2008 年与 2011—2024 年两个时段,RSEI 显著增加,增速分别为 0.005/a,0.001/a;而在 2008—2011 年 RSEI 则转为下降,下降速率为 0.021/a。结果表明,尽管研究期内生境质量在整体上趋于恶化,但过程并非线性,其间存在明显的波动与回调。

2.2.2　RSEI 的空间分布格局

基于遥感生态指数(RSEI)的 2001,2006,2011,2016,2021 和 2024 年阿拉善左旗飞播林区生态质量的时空变化如图 2 所示。在研究区中部地区生态质量一般;在东部地区生态质量较为良好。2001—2024 年生态质量差的等级比例均最多(表 4),多数分布在南部地区,其次是一般,其主要分布在北部地区,而生态质量优秀仅在边缘地区呈现出小部分。总体而言,研究区域的生态质量在 2001—2021 年之间波动,某些区域明显退化,需要采取恢复措施。

表3 第一主成分(PC_1)载荷值及特征值贡献率

Table 3 Loadings of first principal component (PC_1) and contribution rates of eigenvalue

年份	PC_1载荷值				PC_1特征值贡献率/%
	NDVI	WET	SI	NDBSI	
2001	0.52	0.55	−0.15	−0.18	81.20
2002	0.58	0.61	−0.22	−0.25	82.50
2003	0.64	0.67	−0.29	−0.32	83.80
2004	0.7	0.73	−0.36	−0.39	85.10
2005	0.76	0.79	−0.43	−0.46	86.40
2006	0.62	0.65	−0.25	−0.28	82.50
2007	0.68	0.71	−0.32	−0.35	83.80
2008	0.74	0.77	−0.39	−0.42	85.10
2009	0.55	0.58	−0.18	−0.21	81.20
2010	0.61	0.64	−0.25	−0.28	82.50
2011	0.67	0.7	−0.32	−0.35	83.80
2012	0.73	0.76	−0.39	−0.42	85.10
2013	0.79	0.82	−0.46	−0.49	86.40
2014	0.53	0.56	−0.16	−0.19	80.50
2015	0.59	0.62	−0.23	−0.26	81.80
2016	0.65	0.68	−0.3	−0.33	83.10
2017	0.71	0.74	−0.37	−0.4	84.40
2018	0.77	0.8	−0.44	−0.47	85.70
2019	0.57	0.6	−0.2	−0.23	82.50
2020	0.63	0.66	−0.27	−0.3	83.80
2021	0.69	0.72	−0.34	−0.37	85.10
2022	0.75	0.78	−0.41	−0.44	86.40
2023	0.54	0.57	−0.17	−0.2	81.20
2024	0.6	0.63	−0.24	−0.27	81.20
均值	0.65	0.68	−0.30	−0.33	83.54

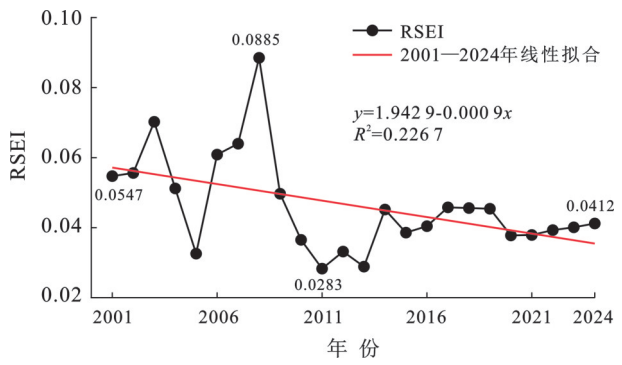


图1 阿拉善左旗飞播林区2001—2024年RSEI年均值变化

Fig.1 Variation in annual mean RSEI in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024

从2001—2024年阿拉善左旗飞播林区RSEI等级的面积比例中可以看出(表4),2024年生态质量一般的面积比例最高(46.79%),生态质量差的面积次之。2001—2024年生境质量为优秀的面积呈下降趋势,从5.02%降低至1.45%。生态质量差的面积比例在逐步增加,从25.59%上升到29.38%。总体来说,生境质量在不同程度上呈恶化趋势。

表4 阿拉善左旗飞播林区2001—2024年RSEI等级面积比例

Table 4 Areas proportion of RSEI grade in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024

单位:%

等级	2001年	2006年	2011年	2016年	2021年	2024年
差	25.59	25.01	29.75	30.59	27.87	29.38
一般	41.09	32.02	51.57	39.27	47.80	46.79
中等	22.29	30.91	10.01	19.33	15.14	18.35
良好	6.01	7.68	4.35	4.33	3.86	4.03
优秀	5.02	4.37	4.32	6.48	5.32	1.45

2.3 RSEI变化趋势分析

图3为2001—2024年阿拉善左旗飞播林区RSEI的变化趋势。由图3可知,研究区整体呈现恶化的趋势。大多数地区的生境质量均出现了极显著恶化和显著恶化的趋势,特别是在中部和北部,但东部边缘地区在2001—2024年却呈现出改善的趋势。南部地区则主要呈现出稳定不变的趋势,与中部和北部地区相比,南部的生境质量较稳定,不易改善。

由表5可知,研究区2001—2024年生境质量呈恶化趋势的面积比例高达72.33%,其中生境质量显著恶化的面积比例最高(27.42%),不显著恶化次之(19.67%),但极显著恶化的面积占总面积的比例也较高,达到11.67%。稳定不变的区域占总区域的18.54%,这些区域需要继续加强保护,防止生境质量恶化;改善区域仅占总面积的11.28%,其中不显著改善的面积比例最大(6.55%)。总体来看,该地区的生境质量处于恶化的趋势,生态环境的改善已成为研究区所必须要解决的主要问题之一。

2.4 RSEI趋势持续性分析

Hurst指数是通过对阿拉善左旗飞播林区2001—2024年RSEI结果的逐像元分析计算得出的(图4a)。Hurst指数小于0.5的区域集中在研究区中部,其面积比例较小。相比之下,Hurst指数在0.5~0.65的地区比例较大,表明这些地区的RSEI变化更为持久,生境质量相对稳定。从图4b可以看出,研究区的未来趋势主要为持续恶化。生境质量恶化的区域主要分布在中部和北部,其中弱持续性退化地区比例最大,东部边缘地区则呈现出稳定不变的趋势,南部呈现出强持续性改善的趋势。在未来的变化中,阿

拉善左旗飞播林区的生境质量主要处于强持续性退化和弱反持续改善的趋势,尤其是在中部和西北部地区,因此未来应加强对这些区域的监测,并且实施长效生态管护措施。

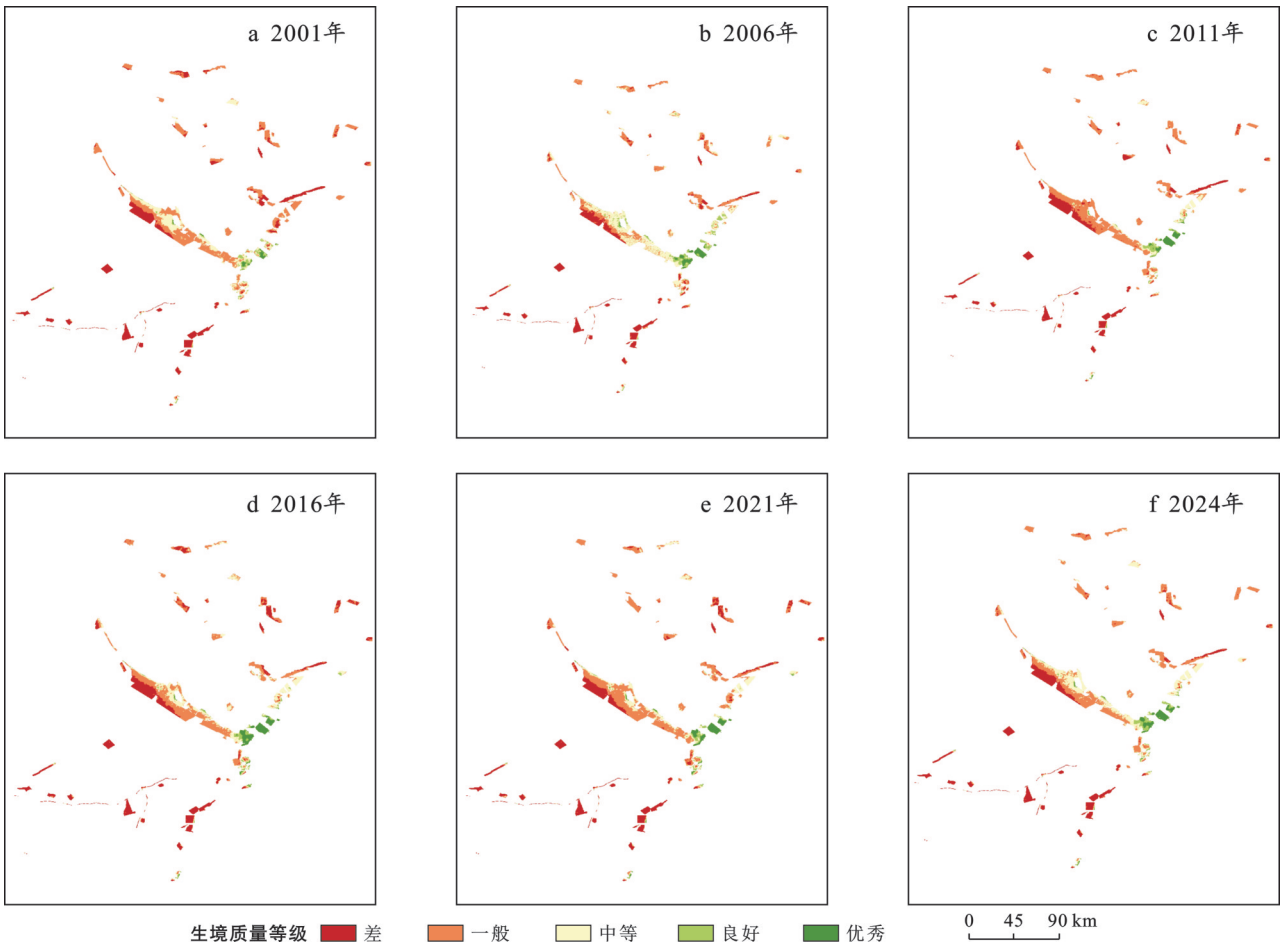


图 2　阿拉善左旗飞播林区 2001—2024 年 RSEI 等级分布

Fig.2　Distribution of RSEI grades in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024

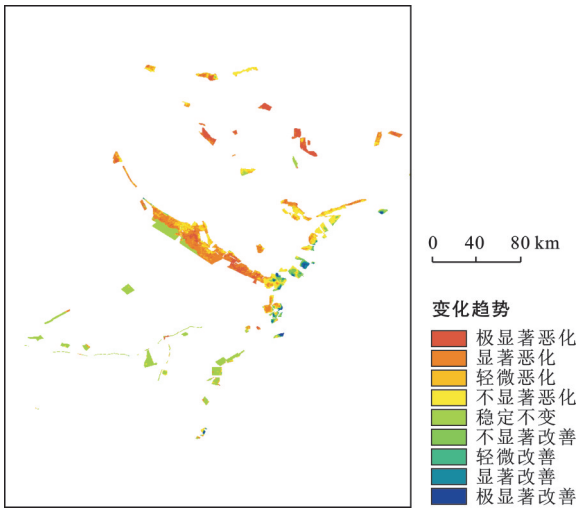


图 3　阿拉善左旗飞播林区 2001—2024 年 RSEI 变化趋势分布

Fig.3　Distribution of RSEI variation trends in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024

表 5　阿拉善左旗飞播林区 2001—2024 年 RSEI 变化趋势

Table 5　Statistics on variation trends of RSEI in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner from 2001 to 2024

判断依据	变化趋势	比例/%
$\beta<0,\lvert Z\rvert\geqslant 2.58$	极显著恶化	11.67
$\beta<0,1.96\leqslant\lvert Z\rvert<2.58$	显著恶化	27.42
$\beta<0,1.645\leqslant\lvert Z\rvert<1.96$	轻微恶化	11.42
$\beta<0,\lvert Z\rvert<1.645$	不显著恶化	19.67
$\beta=0$	稳定不变	18.54
$\beta>0,\lvert Z\rvert\geqslant 2.58$	不显著改善	6.55
$\beta>0,1.96\leqslant\lvert Z\rvert<2.58$	轻微改善	1.85
$\beta>0,1.645\leqslant\lvert Z\rvert<1.96$	显著改善	1.69
$\beta>0,\lvert Z\rvert<1.645$	极显著改善	1.19

2.5　RSEI 驱动因素

2.5.1　单因子检测

各因子对 RSEI 的影响结果如表 6 所示。不同年份的除坡度外其余驱动因子的 q 值均通过 0.001 显著

性检验，表明探测结果可信，各因子对RSEI的空间分异都有较显著的影响，但各因子对RSEI的影响程度不同。

在所有驱动因子中，LULC具有较高解释力，其中2011年的解释力最强，q值达到0.445 7，通过0.001显著性检验。这表明2001—2024年阿拉善左旗飞播林的生态环境变化受人类活动影响很大。RSEI除受人类活动强度的影响外，还受其他因素的影响。具体而言，在2001年，除LULC，DEM和TMP均具有较高的解释力，q值分别为0.113 1和0.063 9；2006，2011年和2021年也有相同趋势。2016年，除LULC外，DEM和PRE也具有较高的解释力，q值分别为0.176 5，0.382 3。相比于其他因素，SLOP，SWS的解释能力排名处于后2位，故仅就单因子分析而言，这2个因素并非阿拉善左旗飞播林生态环境变化的主要驱动力。PRE的q值排名变化最大，由第4位上升到第2位再下降到第3位，说明24 a间阿拉善飞播林的降雨减少和荒漠化土地扩张对当地生态质量的影响较大。未来需要加强阿拉善飞播林区生态红线保护，避免荒漠化土地对生态空间的进一步侵占。

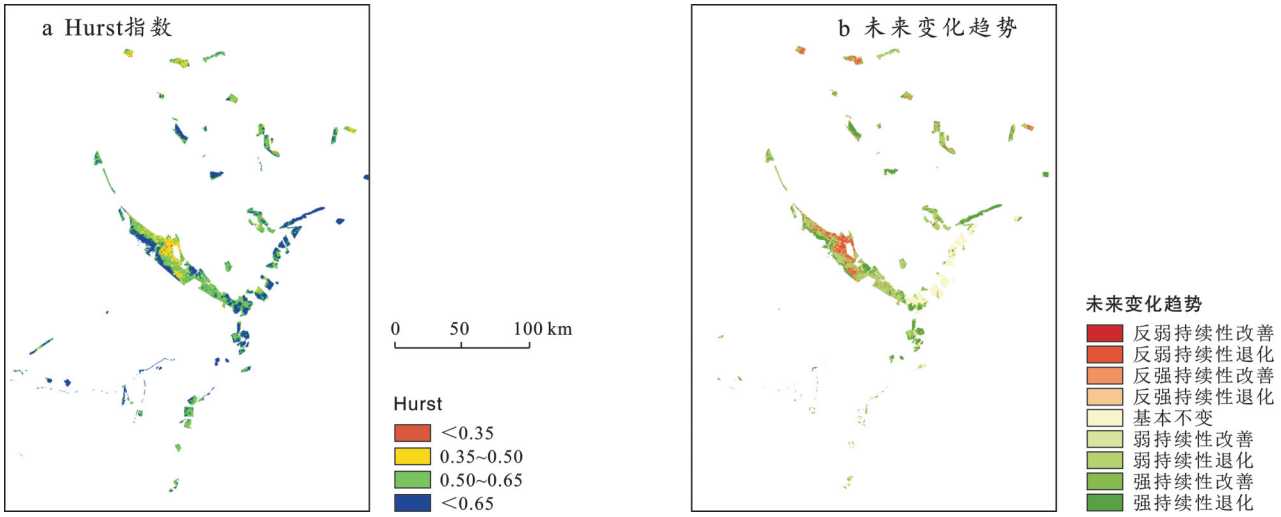


图4 阿拉善左旗飞播林区RSEI的Hurst指数及未来变化趋势

Fig.4 Hurst index of RSEI and its future variation trends in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner

表6 各影响因子的单因素检测结果

Table 6 Single-factor detection results for each influencing factor

年份	高程(DEM)	风速(SWS)	降水(PRE)	温度(TMP)	坡度(SLOP)	土地利用类型(LULC)
2001	0.113 1***	0.029 1***	0.059 8***	0.063 9***	0.003 1	0.169 4***
2006	0.100 9***	0.035 5***	0.118 1***	0.109 6***	0.004 3	0.292 8***
2011	0.245 8***	0.060 4***	0.167 3***	0.230 2***	0.002 2	0.445 7***
2016	0.176 5***	0.050 5***	0.382 3***	0.152 0***	0.002 7	0.411 7***
2021	0.194 8***	0.081 0***	0.110 3***	0.138 9***	0.002 2	0.353 1***
2024	0.214 5***	0.041 6***	0.214 1***	0.105 7***	0.002 6	0.421 9***

注：***表示在$p<0.001$水平显著。

2.5.2 因子交互检测

交互探测结果如图5所示，交互探测结果显示各因子对RSEI的解释能力在交互作用下都得到很大增强，没有出现相互独立或者相互削弱的情况，表明因子交互作用对阿拉善左旗飞播林区生态质量变化的影响高于单因子的单独作用。在所有因子组合中，单因子解释能力最强的LULC和DEM与其他因子交互后均取得了较强的解释力，在2001—2024年阿拉善左旗飞播林区RSEI解释力最强的是DEM和LULC，最大解释力为0.559 0。这说明高程与土地利用方式的交互作用对RSEI影响较大。因此阿拉善左旗飞播林区生态质量是以人为因素为主导的和多因子协同作用下的结果，通过研究不同因子间的交互作用可以更好地反映出各因子对阿拉善左旗飞播林区生态质量的影响。

3 讨 论

3.1 RSEI时空特征

本研究分析了阿拉善左旗飞播林区2001—2024年RSEI的时空演变，并建立了研究区RSEI未来变化

模型。从 2001—2024 年 RSEI 总体呈下降趋势(图 2),2008 年达到峰值。刘宏章等[24]认为,这一峰值与锁边工程(腾格里沙漠锁边生态防护工程)的启动一致,该工程暂时改善了生态质量。然而,生态系统处于早期恢复阶段,人类活动干扰(如农田开垦、工矿建设、土地不合理利用和过度放牧)超过了生态恢复带来的增益,导致 2008—2011 年 RSEI 下降。尽管进行了初步的修复工作,但该地区的生态质量仍在持续下降,这凸显了在项目实施后加强生态系统保护和环境监测预评估的必要性。

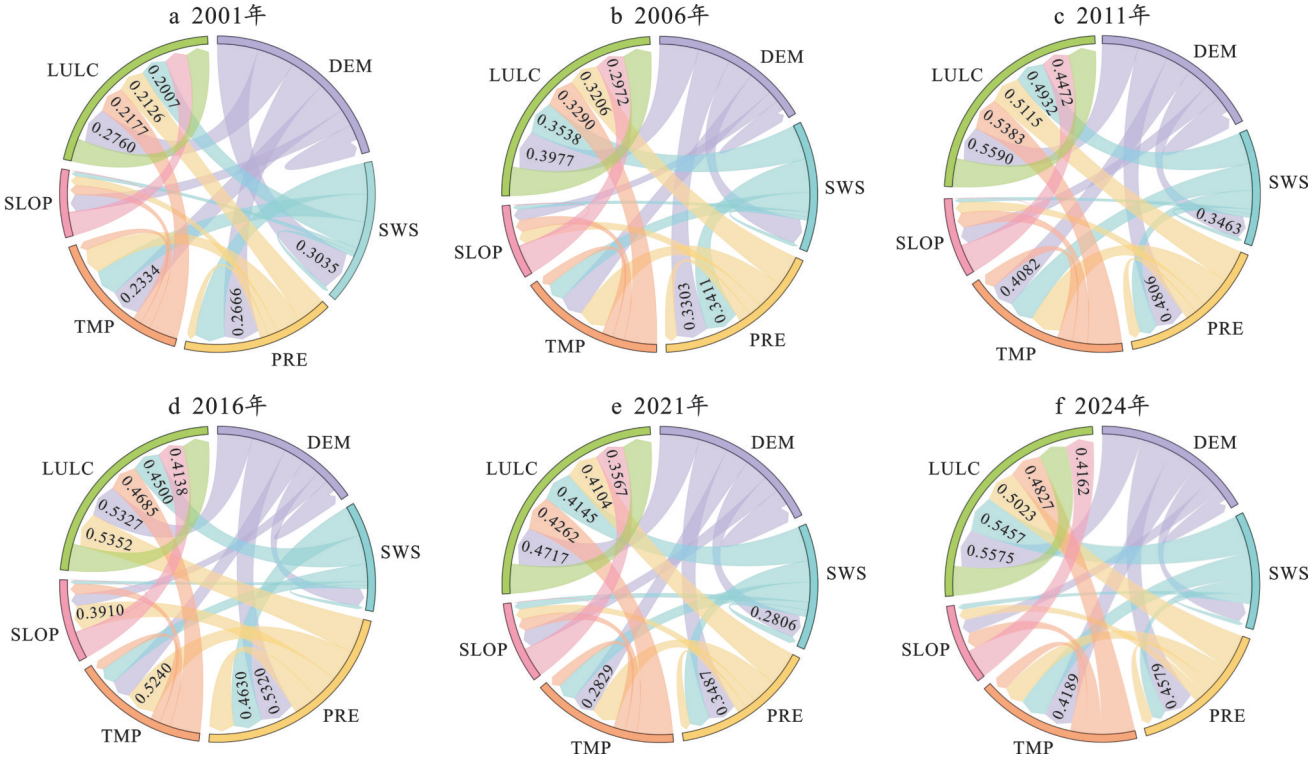


图 5　各影响因子间的交互作用检测结果示意图

Fig.5　Diagram for Interaction detection results among influencing factors

平均气温的上升和降雨量的减少(图 6)造成了蒸发和补水的不平衡,加剧了干旱条件,导致某些年份 RSEI 波动。正如王天宏等[25]研究指出,平均温度、降水和 RSEI 动态之间存在很强的相关性。气温上升使得山区气候更有利于植物生长,导致城镇和山区附近地区的 NDVI 值更高(图 7)。由于 NDVI 在 RSEI 计算中占有重要的权重,这些边缘的 RSEI 较高。此外,阿拉善左旗飞播林区的生态环境预计将在未来恶化,这表明人类活动的变化会使得自然环境的脆弱性日益增加。

3.2　RSEI 的驱动因素

从 geodetector 分析结果来看,LULC 是直接影响 RSEI 变化的重要因素。相关研究[26]指出人为因素是沙漠变化的主要驱动因素,这也与本研究结果一致。本研究进一步量化了土地利用方式的影响,2001—2024 年土地利用方式主要由未利用地转变为耕地,已有的研究[27]结果指出,新耕地农业生产的稳定性不强,这也解释了研究区 2001—2024 年 RSEI 的总体趋势。

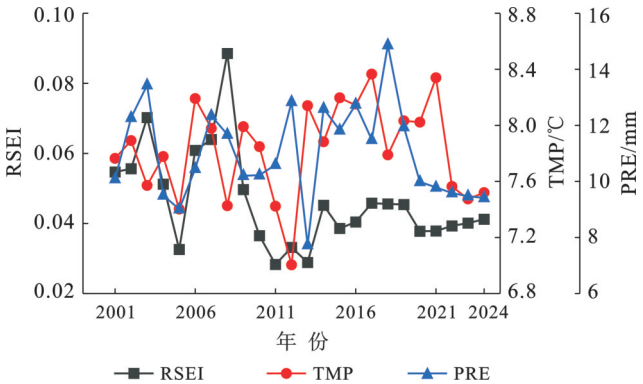


图 6　RSEI 和平均温度(TMP)、平均降水时间序列(PRE)

Fig.6　Time series of RSEI, mean temperature (TMP), and mean precipitation (PRE)

本研究中各因子的交互作用对 RSEI 空间分异的影响强于单一因子,其中 LULC 与 DEM 的交互作用对 RSEI 影响最大,这表明 RSEI 的动态演变同时受到人类活动和地形因素的影响[28]。地形因素对 RSEI 有一定的影响[28]。因为高程对于植物生长所需的光照、湿度、养分等因素具有重要影响,地形通过重新分配水热和地表辐射或形成干扰区域来影响

生态条件，与RSEI指数中的干度、绿度、热度和湿度遥相呼应，不同高程的植被生长情况存在客观差异，因此在因子探测中具有良好的表现[28]。

本研究部分成果对于阿拉善左旗飞播林区生态质量的提升与保护具有重要的指导意义。应该从人类活动方面着手，短期保护应从土地利用优化和重要生态功能区保护等角度出发；中长期保护应该在短期保护的基础上，考虑区域自然本底特征及条件，因地制宜发展旅游经济、生态区域。

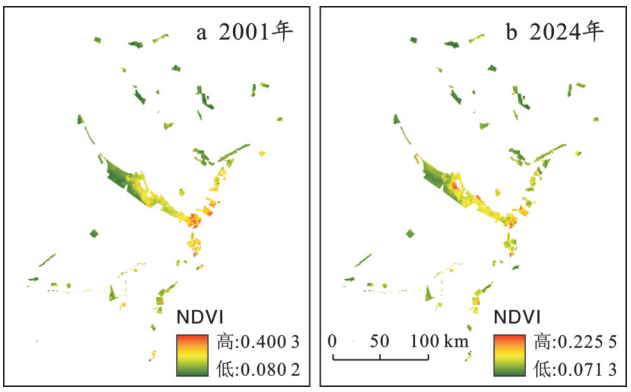


图7 阿拉善左旗飞播林区NDVI变化

Fig.7 NDVI changes in aerial seeding forest area of Alxa Left Banner

4 结 论

（1）从时间尺度上来看，2001—2024年阿拉善左旗飞播林区RSEI呈波动下降的趋势，总体上处于低水平。从空间分布来看，生境质量差的区域主要分布在南部区域，生态质量优在边缘地区。这表明阿拉善左旗飞播林区生态环境仍需治理，还需要政府重视。

（2）2001—2024年阿拉善左旗飞播林区生态质量处于恶化状态，显著恶化的面积最大（27.42%）。改善区域仅占总面积的11.28%，主要分布在研究区域的边缘。此外，研究区的未来趋势主要为强持续性退化和弱反持续改善。

（3）土地利用是影响RSEI的最重要因素（q=0.445 7），表明人类活动是RSEI波动的主要影响因素。各因素对RSEI的影响均有不同程度的影响，其中土地利用与高程的交互作用具有最强的解释力。

参考文献（References）

[1] 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 Jing, Yang Liping, Gong Enjun, 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.

[2] 余慧婕，张方敏，马赫，等.基于遥感生态指数的淮河流域生态环境质量时空演化及其驱动因素分析[J].环境科学，2024，45(7)：4112-4121.
Yu Huijie, Zhang Fangmin, Ma He, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Huaihe River basin based on RSEI [J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4112-4121.

[3] Feng Siyuan, Zhao Wenwu, Yan Jinming, et al. Land degradation neutrality assessment and factors influencing it in China's arid and semiarid regions [J]. Science of the Total Environment, 2024, 925: 171735.

[4] 冯婷婷，郑阳，骆伟，等.基于模糊层次分析的栗子坪国家级自然保护区生态健康评价[J].南京林业大学学报（自然科学版），2025，49(2)：212-220.
Feng Tingting, Zheng Yang, Luo Wei, et al. Ecological health assessment based on fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Liziping National Nature Reserve [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(2): 212-220.

[5] 昌悦，魏登峰，杨慧，等.基于人类足迹的成渝地区双城经济圈生态质量评价[J].环境科学，2025，46(8)：5169-5179.
Chang Yue, Wei Dengfeng Yang Hui, et al. Evaluation of ecological quality in the Chengdu-Chongqing economic circle based on human footprint [J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 5169-5179.

[6] Li Chang, Wu Jing, Li Dehua, et al. Study on the correlation between life expectancy and the ecological environment around the cities along the Belt and Road [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 2147.

[7] Zhang Chengye, Li Feiyue, Li Jun, et al. Assessing the effect, attribution, and potential of vegetation restoration in open-pit coal mines' dumping sites during 2003—2020 utilizing remote sensing [J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111003.

[8] Baird J, Plummer R, Jollineau M, et al. Evaluating ecological outcomes from environmental stewardship initiatives: A comparative analysis of approaches [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 297: 113266.

[9] Corbane C, Lang S, Pipkins K, et al. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status: New opportunities and challenges [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 37: 7-16.

[10] Gao Wande, Zheng Ce, Liu Xiuhua, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us sandy land, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108745.

[11] 武传号,黎梓涛,王赛赛,等.1981—2021年中国季节性干旱与骤发干旱的时空响应关系评估[J].水资源保护,2025,41(2):149-157.
Wu Chuanhao, Li Zitao, Wang Saisai, et al. Evaluation of spatiotemporal response relationship between seasonal drought and flash drought in China from 1981 to 2021 [J]. Water Resources Protection, 2025,41(2):149-157.

[12] 王燕强,杜婷婷,叶希琛,等.基于地表温度和植被指数的郑州市热岛效应分析[J].河南科技学院学报(自然科学版),2020,48(4):56-61.
Wang Yanqiang, Du Tingting, Ye Xichen, et al. Analysis of heat island effect in Zhengzhou based on land surface temperature and vegetation index [J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,48(4):56-61.

[13] 张雨桐,凌成星,刘华,等.基于RSEI模型的大兴安岭区生态质量动态监测与评价[J].遥感技术与应用,2025,40(2):359-367.
Zhang Yutong, Ling Chengxing, Liu Hua, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological quality in Daxing'Anling district based on RSEI model [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025,40(2):359-367.

[14] 魏泽锋,官云兰,王淑婷,等."呼包鄂"城市群生态环境质量时空演变及驱动因素分析[J].环境科学,2025,46(11):7172-7185.
Wei Zefeng, Guan Yunlan, Wang Shuting, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological quality in the "Hohhot-Baotou-Ordos" urban agglomeration [J]. Environmental Science, 2025, 46(11):7172-7185.

[15] Yang Xinyue, Meng Fei, Fu Pingjie, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality in the Yangtze River basin from 2001 to 2019 [J]. Ecological Indicators, 2021,131:108214.

[16] Firozjaei M K, Kiavarz M, Homaee M, et al. A novel method to quantify urban surface ecological poorness zone: A case study of several European cities [J]. Science of the Total Environment, 2021,757:143755.

[17] Chen Wanyuan, Zhao Ruifeng, Lu Haitian. Response of ecological environment quality to land use transition based on dryland oasis ecological index (DOEI) in dryland: A case study of oasis concentration area in middle Heihe River, China [J]. Ecological Indicators, 2024, 165:112214.

[18] Xu Dong, Yang Feng, Yu Le, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,321: 128948.

[19] Lyu Xin, Li Xiaobing, Gong Jirui, et al. Comprehensive grassland degradation monitoring by remote sensing in Xilinhot, Inner Mongolia, China [J]. Sustainability, 2020,12(9):3682.

[20] Su Xiaoling, Singh V P, Niu Jiping, et al. Spatiotemporal trends of aridity index in Shiyang River basin of northwest China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015,29(6):1571-1582.

[21] Han Taotao, Ren Hai, Hui Dafeng, et al. Dominant ecological processes and plant functional strategies change during the succession of a subtropical forest [J]. Ecological Indicators, 2023,146:109885.

[22] 田永祯,司建华,程业森,等.阿拉善沙区飞播造林试验研究初探[J].干旱区资源与环境,2010,24(7):149-153.
Tian Yongzhen, Si Jianhua, Cheng Yesen, et al. Study on the experiment of aerial sowing afforestation in sandy area of Alxa [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(7):149-153.

[23] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[24] 刘宏章,孙海燕."腾格里沙漠锁边生态项目"全面铺开[N].内蒙古日报(汉),2008-04-13(1).
Liu Hongzhang, Sun Haiyan. "Tengger Desert border ecological project" was fully rolled out [N]. Inner Mongolia Daily (Han), 2008-04-13 (1)

[25] 王天宏,蒋馥根,龙依,等.1990—2020年长江源地区生态环境质量动态变化及驱动力分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(3):110-118.
Wang Tianhong, Jiang Fugen, Long Yi, et al. Dynamic changes and driving forces of ecological environment quality in the source region of the Yangtze River from 1990 to 2020 [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(3):110-118.

[26] Zhang Tianju, Chen Yaning, Ali S. Abiotic stress and human activities reduce plant diversity in desert riparian forests [J]. Ecological Indicators, 2023,152:110340.

[27] Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):195-210.

[28] 赵祖伦,赵卫权,苏印,等.1991—2020年贵阳市生态质量演变及空间分异定量归因[J].环境科学,2025,46(1):367-377.
Zhao Zulun, Zhao Weiquan, Su Yin, et al. Spatiotemporal evolution patterns and spatial differentiation attribution of ecological quality in Guiyang from 1991 to 2020 [J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 367-377.