

毛乌素沙地生态环境质量时空演变及驱动因素

屈楠, 卢杰, 王子明, 靳昕宇

(陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西西安 710075)

摘要: [目的] 探究毛乌素沙地生态环境质量的动态特征及驱动因素, 为该生态脆弱区的治理与可持续发展提供科学依据。[方法] 基于GEE(Google Earth Engine)平台, 利用2000—2023年MODIS遥感数据构建遥感生态指数RSEI(remote sensing ecological index), 通过BFAST(breaks for additive season and trend)突变检测和地理探测器方法, 对毛乌素沙地生态环境质量的时空演变特征及驱动因素进行系统分析。[结果] ①RSEI模型在毛乌素沙地表现出良好的适用性, 主成分贡献率均大于70%, 可有效反映研究区生态环境演变过程; ②BFAST检验结果表明, 2000—2023年研究区生态环境质量在空间上存在显著异质性, 其中单调型增加(无突变)占沙地总面积43.4%, 集中分布在沙地东部, 而单调型减少(无突变)则占33.6%, 主要分布于沙地西部及南部边缘地带。RSEI突变年份在空间上呈现“局部聚集, 整体分散”并存的分布特征, 其中2019年为突变最频繁年份; ③地理探测器分析表明土壤湿度是影响生态环境质量空间分异的主导因子, 同时突变发生最多的2019年, 气温和降水与其他因素的交互作用明显增强。[结论] 毛乌素沙地的生态环境演变规律受气候变化与人类活动的双重驱动, 区域生态治理与政策制定应考虑综合因素的影响。

关键词: 遥感生态指数; 生态环境质量; 时空演变; 驱动因素; BFAST突变检验; 毛乌素沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0336-11

中图分类号: X171.1

文献参数: 屈楠, 卢杰, 王子明, 等. 毛乌素沙地生态环境质量时空演变及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 336-346. Qu Nan, Lu Jie, Wang Ziming, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 336-346. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.041; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.041.

Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in Mu Us sandy land

Qu Nan, Lu Jie, Wang Ziming, Jie Xinyu

(Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: [Objective] The dynamic characteristics and driving factors of ecological environmental quality in the Mu Us sandy land are investigated, aiming to provide a scientific basis for the restoration and sustainable development of this ecologically fragile area. [Methods] Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, MODIS remote sensing data from 2000 to 2023 were used to construct the remote sensing ecological index (RSEI). Through breaks for additive season and trend (BFAST) abrupt change detection and geodetector method, the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of ecological environmental quality in the Mu Us sandy land were systematically analyzed. [Results] ① The RSEI model had good applicability in the Mu Us sandy land, with the principal component contribution rates all exceeding 70%, effectively reflecting the evolution process of ecological environment in the study area. ② The BFAST detection results showed that the ecological environmental quality in the study area exhibited significant spatial heterogeneity from 2000 to 2023. The monotonic increase type (without abrupt change) accounted for 43.4% of the total sandy land area, primarily distributed in the eastern part of the sandy land, while the monotonic decrease type (without abrupt change) accounted for 33.6%, mainly located in the western and southern marginal areas. The spatial distribution of RSEI

收稿日期: 2025-05-07

修回日期: 2025-07-20

采用日期: 2025-07-22

资助项目: 陕西省土地工程建设集团有限责任公司2024年度集团内部科研项目“陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作对土壤微生物群落的影响机制”(DJNY2024-50)。

第一作者: 屈楠(1990—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 本科, 工程师, 主要从事土地工程、土木工程方面的工作。Email: 382946018@qq.com。

abrupt change years demonstrated a pattern of “localized clustering and overall dispersion”, with 2019 being the year with the highest frequency of abrupt changes. ③ The geodetector analysis showed that soil moisture was the dominant factor affecting the spatial differentiation of ecological environmental quality. Meanwhile, in 2019, the year with the most frequent abrupt changes, the interaction between temperature, precipitation, and other factors was significantly enhanced. [Conclusion] The ecological environment evolution patterns of the Mu Us sandy land are driven by both climate change and human activities. Regional ecological restoration and policy formulation should consider the influence of multiple factors.

Keywords: remote sensing ecological index; ecological environmental quality; spatiotemporal evolution; driving factors; BFAST abrupt change detection; Mu Us sandy land

生态环境质量是生态系统在特定时空尺度上结构与功能的综合反映,主要涵盖植被、土壤、水资源和气候等核心要素^[1]。它是衡量区域生态健康与可持续发展能力的重要指标,直接关系到人类生存环境的优劣及社会经济的长期稳定发展。随着全球气候变化和人类活动的加剧,生态环境质量的长时序动态演变特征识别愈发重要^[2]。开展生态环境质量演变特征分析及其驱动要素识别,对于推动区域生态修复与环境保护政策制定,促进人与自然和谐共生,实现生态系统可持续发展具有重要意义^[3]。

国内外学者在生态环境质量评估方面开展了大量研究,研究对象从特定生态系统扩展到区域乃至全球尺度,研究手段也从单一植被指数逐步转向多种指标耦合评价^[4-5]。近年来,遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)作为一种综合性强、覆盖范围广的评估工具,被广泛应用于生态环境质量的动态监测^[6-7]。RSEI通过集成植被指数(NDVI)、湿度分量(WET)、地表温度(LST)和建筑指数(NDBSI)等多个生态指标,能够全面反映区域生态环境的变化趋势^[8]。例如,Zhang Leyi等^[9]利用基于GEE平台得到的RSEI对中国三北防护林及其子区域的生态环境质量进行了评估,揭示了由生态项目驱动的土地利用变化对生态质量的影响;Wang Jinjie等^[10]分析了2000—2020年新疆地区RSEI的时空动态,并利用随机森林算法对不同环境因素进行了评估,结果表明研究区生态环境质量的显著改善主要受到气候和土地利用情况的影响;Gong Cheng等^[11]利用MODIS数据建立了RSEI模型,用于评估山西省2000—2020年的生态系统质量,研究表明影响生态系统质量的主要因素是温度和坡度等自然地理因素,同时以GDP为代表的社会经济因素的负面影响不断加剧。

毛乌素沙地是中国西北地区典型的生态脆弱区,地处半干旱与半湿润气候过渡带,生态环境敏感且易受外界干扰。近年来,受气候变化和人类活动的双重影响,该区域面临严重的沙漠化、水土流失等

生态问题,导致其生态环境质量呈现出显著的时空分异特征。作为黄河流域重要的生态屏障,毛乌素沙地的生态健康状况不仅影响区域可持续发展,还对黄河中下游的生态安全具有重要影响^[12]。然而,在进行生态要素长时间序列的趋势分析时,传统方法未能充分考虑到整体走势掩盖下的局部突变。此外,现有研究多聚焦于特定区域分析,往往仅考虑降水和植被覆盖等表层指标,缺乏对于干旱半干旱区其他水分来源这类关键生态因子的系统考察。特别是在毛乌素沙地这类生态脆弱区,土壤水分的时空异质性对生态系统稳定性的影响尚未得到充分揭示。

基于此,本研究以毛乌素沙地为研究区,利用GEE平台,结合2000—2023年的MODIS遥感数据,构建了长时间序列的RSEI模型,系统评估了该区域生态环境质量的时空动态变化。与此同时,本研究还引入BFAST算法对RSEI时间序列进行突变检测,揭示生态环境变化的突变特征及其时空分布规律。最后,通过地理探测器方法,定量分析了土壤湿度(SM)、土地利用/覆盖变化(LUCC)等环境因子对RSEI时空分异的影响及其交互作用,以揭示生态环境变化的主要驱动因素。本研究的主要目标包括:①评估毛乌素沙地2000—2023年生态环境质量的时空演变特征;②揭示生态环境变化的突变特征及其时空分布规律;③定量分析环境因子对生态环境变化的驱动作用及其交互效应。通过多角度、多方法的综合分析,本研究旨在为毛乌素沙地的生态治理和可持续发展提供科学依据,同时也为其他生态脆弱区的生态环境监测与评估提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图1所示,研究区毛乌素沙地位于中国西北部(36°49′—40°01′N,106°11′—110°54′E),地跨陕西、内蒙古和宁夏三省区,总面积约 $9.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区域地处黄河“几”字湾内,涵盖榆阳区、神木市、横山区、靖边县、定边县、伊金霍洛旗、乌审旗、鄂托克旗、

鄂托克前旗、盐池县、灵武市 11 个县级行政单元,是黄河流域水土流失和沙漠化问题突出的典型区域。气候上属于温带大陆性季风气候,处于半干旱与半湿润区的过渡带,季节变化显著:春季干旱少雨且多风沙,夏季受东南季风影响降水集中,秋季气温骤降,冬季寒冷干燥。独特的地理位置和气候特征使其成为生态环境脆弱性研究的典型区域^[13]。近年来,受气候变化和人类活动的双重影响,沙地生态环境质量呈现明显的时空分异,为揭示其演变规律及驱动机制提供了重要的研究场景。

1.2 数据来源及方法

1.2.1 数据来源

本研究基于 GEE 平台,利用 MODIS 卫星影像数据构建了 RSEI 模型。选取研究区 2000—2023 年 5—8 月的 MOD09A1,MOD11A2 和 MOD13A1 数据,并对提取数据进行预处理,包括云掩膜处理和水体掩膜生成,以避免对后续分析造成干扰。随后,计算 NDVI, LST, WET 和 NDBSI。通过标准化处理和数据主成分分析(PCA),提取第一主成分(PC₁)作为 RSEI 的基础,并对其进行标准化处理得到 RSEI 值。根据 RSEI 值,将生态环境质量分为差(0~0.2)、较差

(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较好(0.6~0.8)和优(0.8~1)5 级^[14]。

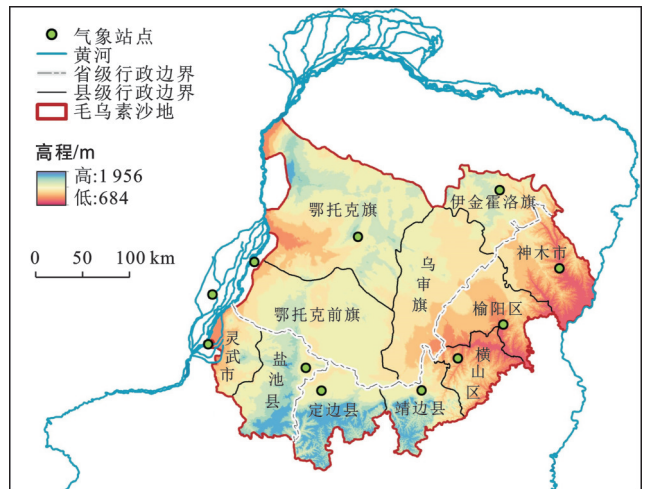


图 1 毛乌素沙地概况

Fig.1 Overview of Mu Us sandy land

此外,本文还研究了诸多环境因子对 RSEI 时空变化的影响,包含气温、降水、高程、坡度、坡向、土壤水分、土地利用、人口密度、国内生产总值情况,数据来源详见表 1。此外,所有数据均通过重采样统一至 500 m 空间分辨率以确保分析的一致性。

表 1 数据类型和数据来源
Table1 Data types and sources

数据(简称)	时间	分辨率	数据来源
MOD09A1(合成 WET & NDBSI)	2000—2023 年	500 m	GEE(https://developers.google.com)
MOD11A2 V6(合成 LST)	2000—2023 年	1 000 m	
MOD13A1 V6(NDVI)	2000—2023 年	500 m	
土地利用数据(LUCC)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年	30 m	中国气象数据网(https://data.cma.cn)
气温 & 降水量(T & P)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年		
高程(DEM)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
人口密度(POP)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年		Landscan 人口密度数据集(https://landscan.ornl.gov/)
国内生产总值(GDP)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年		地理遥感生态网(https://www.gisrs.cn/)
土壤水分(地表)(SM)	2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年	1 000 m	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)

1.2.2 研究方法

(1) 遥感生态指数构建。基于 GEE 的 RSEI 是一种综合反映区域生态环境质量的指数,它通过集成多个遥感生态指标(如植被覆盖、湿度、地表温度和建筑指数等),利用 PCA 构建而成。具体公式如下^[8]:

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

其中 NDVI 使用 MOD13A1 V6 数据集,此外:

$$WET = 0.1147\rho_{Red} + 0.2489\rho_{NIR1} + 0.2408\rho_{Blue} + 0.3132\rho_{Green} - 0.3122\rho_{NIR2} - 0.6416\rho_{SWIR1} - 0.5087\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

$$NDBSI = \frac{SI + IBI}{2} \quad (3)$$

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})} \quad (4)$$

$$IBI = \frac{2 \frac{\rho_{SWIR2}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}} \right]}{2 \frac{\rho_{SWIR2}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}} \right]} \quad (5)$$

$$LST = DN \times 0.02 - 273.15 \quad (6)$$

式中: $\rho_{Red}, \rho_{NIR1}, \rho_{Blue}, \rho_{Green}, \rho_{NIR2}, \rho_{SWIR1}, \rho_{SWIR2}$ 分别为

红波段、近红外 1 波段、蓝波段、绿波段、近红外 2 波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段。

(2) BFAST 算法。BFAST 算法是一种广泛应用于气象和生态等领域的时间序列分解模型,主要用于捕捉时间序列中的结构变化,特别是趋势的振幅或方向在外部干扰下发生的显著且剧烈的变化。BFAST 通过迭代将时间序列(Y_t)分解为趋势项(T_t)、季节项(S_t)和残差项(ϵ_t),计算公式为^[15]:

$$Y_t = T_t + S_t + \epsilon_t, \quad t = 1 \dots n \quad (7)$$

BFAST01 是 BFAST 的改进形式,用于识别趋势中的显著突变点,将趋势划分为两个明显阶段。在年度数据中,BFAST01 忽略季节项,仅分解为趋势和残差成分,并最终将 BFAST01 检测得到的趋势类型分为 8 类(如图 2 所示)。为探究毛乌素沙地 2000—2023 年 RSEI 的突变情况,本文采用该算法对时间序列进行检测,上述操作均在 R 语言中进行。

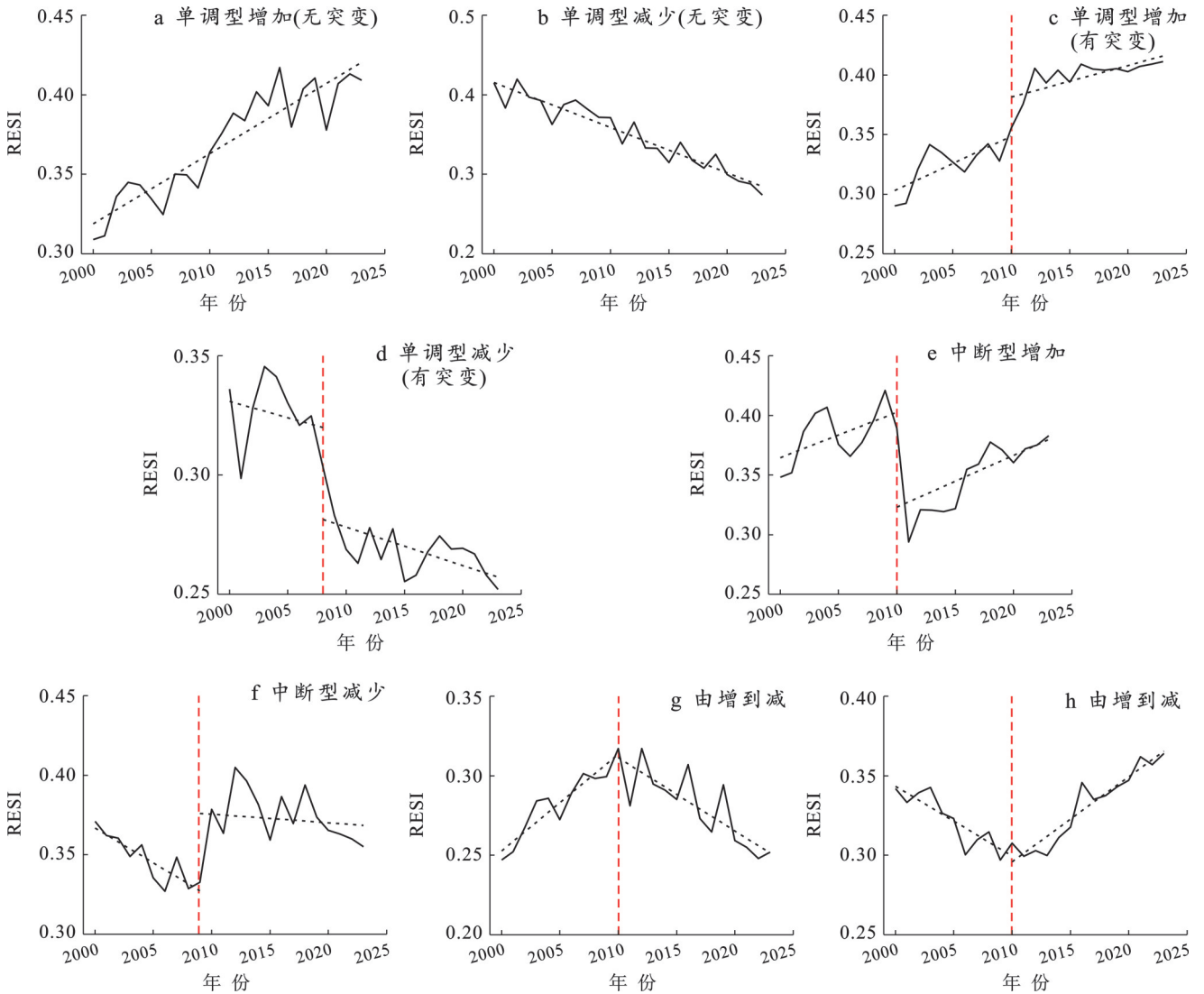


图 2 BFAST 检测到 RSEI 变化趋势类型示意图

Fig.2 Schematic diagram of RSEI change trend types detected by BFAST

(3) 地理探测器。地理探测器是一种空间分析方法,能够有效识别空间分异性的存在及其程度,并通过定量化手段评估不同因子对空间分异性的贡献程度^[16]。该方法在驱动力分析和因子分析领域应用广泛,是研究空间现象与过程的重要工具^[17]。

基于研究需求,本文主要采用以下两种探测功能来分析空间分层异质性。

① 因子探测:用于评估某一因子对地理现象空间分异性的解释能力。通过计算 q 值量化因子的解释力, q 值范围为 $[0, 1]$, 值越接近 1, 表明因子对空间分异的解释能力越强;反之则越弱。 q 值计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中: L 为变量类别总数; h 为某一类别; N_h, N 分别为类别 h 的单元数和全区单元数; σ_h, σ 分别为 h 类别和全区的方差。

②交互作用探测:用于分析不同风险因子之间的交互作用,判断其对地理现象的综合影响。各交互作用类型及其影响详见表2。

表2 双因子对变量交互作用的类型

Table 2 Types of two-factor interaction on variables

类型	判别依据	交互作用
I	$q(X_i \cap X_j) > q(X_i) + q(X_j)$	非线性增强
II	$q(X_i \cap X_j) > \max[q(X_i), q(X_j)]$	双因子增强
III	$q(X_i \cap X_j) > q(X_i) + q(X_j)$	独立
IV	$q(X_i \cap X_j) < \min[q(X_i), q(X_j)]$	非线性减弱
V	$\min[q(X_i), q(X_j)] < q(X_i \cap X_j) < \max[q(X_i), q(X_j)]$	单因子非线性减弱

2 结果与分析

2.1 RSEI模型表现

为确保研究结果的可靠性和科学性,RSEI的主成分贡献率及其与4项生态指标之间的相关性需满足一定统计要求^[18]。由表3可知,本研究所构建的RSEI模型主成分贡献率均高于70%,具备较强的综合表征能力,相较于其他单一指标能更有效反映区域生态环境状况。从4个指标系数来看,不同年份NDVI和WET均为正,而NDBSI和LST均为负,表明绿度和湿度有助于促进生态环境改善,而干度和热度则起抑制作用。此外,SEI与4项生态因子间的相关性分析显示,NDVI与WET与RSEI之间呈显著正相关,而LST和NDBSI则均为负相关,且均通过了 $p < 0.01$ 的显著性检验。

2.2 毛乌素沙地RSEI时空动态特征分析

基于RSEI模型表现构建的RSEI指数,得到2000—2023年不同年份毛乌素沙地RSEI的等级空间分布图(图3)。结果显示,毛乌素沙地生态质量时空分布呈现明显异质性。2000年,沙地西部和北部以“劣”和“差”等级为主,反映出这些区域生态质量较差,这主要是受沙漠化、干旱等自然因素影响,这些地区主要受沙漠化程度高,干旱少雨,风沙活动频繁等不利自然因素影响,限制了植被生长与生态系统稳定性的维持。相比之下,东部和南部相对生态质量较好,其“中”等级及以上等级区域比例较高,这可能与该区域地形平缓、水源相对充足等有利生态因子有关,为植被生长和生态系统恢复提供了良好条件。2005年,“劣”等级区域有所扩展,所占比例从10.3%增至14.7%,尤其在西北边缘地带,生态质量有恶化趋势。这一变化可能与当时不合理的人类活动有关,如过度放牧等,超出了当地生态系统的承载

能力,再加上生态保护措施初步实施,尚未取得明显成效,进而导致生态环境的恶化。2010年,“劣”等级区域有所收缩,“中”等级区域有所增加,所占比例从27.4%升至39.0%,生态质量有一定的改善迹象,这得益于20世纪初实施的一系列生态治理措施,植树造林、退耕还林还草等措施初见成效,有效遏制了沙漠化的发展,促进了生态环境的恢复^[19]。2015年,“劣”等级区域又有一定程度扩张,所占比例从2.8%回升至14.7%,回升了11.9%,生态质量出现波动。一方面可能是因为部分退耕还林区进入生态恢复瓶颈期^[20],另一方面2010—2015年研究区极端气候事件频发^[21],这些都对前期的治理成果造成了一定冲击。2020年,“差”等级区域所占比例从43.6%变为44.5%,有小幅度增加,但“劣”等级区域所占比例从14.7%降至5.9%，“良”等级区域显著增加,所占比例从10.8%升至18.4%,整体生态质量持续改善。这是长期坚持生态治理的结果,随着生态保护政策的不断完善和执行力度的加强,生态系统的自我修复能力逐渐增强,植被覆盖度进一步提高,尽管可能存在局部小波动,但整体生态向好的趋势未变。2023年,整体生态质量继续维持改善态势,“中”等级区域所占比例从30.5%升至34.3%，“优”等级区域所占比例从1.0%升至3.4%,有所增加,“劣”等级区域所占比例从5.9%降至5.5%,进一步减少。这充分体现了多年来生态治理工作的成效,生态环境持续向好,生态系统更加稳定和健康,同时也反映出当地生态保护意识的进一步提高和治理措施的持续优化。

总体而言,2000—2023年毛乌素沙地生态环境质量虽存在一定波动性,但整体呈现逐步改善趋势,反映出各类生态治理与修复措施在长期实施过程中具备一定成效。然而,生态系统的稳定性仍面临一定不确定性。

表3 毛乌素沙地2000—2023年RSEI各生态指标系数及相关性

Table 3 Coefficients and correlations of RSEI ecological indicators in Mu Us sandy land from 2000 to 2023

年份	主成分贡献率	NDVI		LST		WET		NDBSI	
		系数	相关性	系数	相关性	系数	相关性	系数	相关性
2000	75.76	0.52	0.90	-0.44	-0.74	0.54	0.92	-0.50	-0.92
2001	73.20	0.53	0.89	-0.37	-0.65	0.54	0.90	-0.54	-0.95
2002	80.95	0.52	0.92	-0.46	-0.81	0.51	0.92	-0.51	-0.95
2003	76.03	0.50	0.86	-0.45	-0.78	0.54	0.92	-0.51	-0.93
2004	74.55	0.52	0.89	-0.44	-0.73	0.52	0.89	-0.52	-0.94
2005	82.09	0.51	0.92	-0.47	-0.84	0.51	0.91	-0.51	-0.96
2006	78.83	0.50	0.89	-0.46	-0.81	0.53	0.93	-0.51	-0.92
2007	76.56	0.52	0.90	-0.45	-0.78	0.52	0.90	-0.50	-0.92
2008	74.50	0.53	0.90	-0.44	-0.75	0.51	0.87	-0.51	-0.93
2009	79.92	0.53	0.93	-0.44	-0.79	0.51	0.90	-0.52	-0.95
2010	76.85	0.53	0.92	-0.45	-0.78	0.49	0.86	-0.52	-0.94
2011	77.95	0.53	0.92	-0.46	-0.79	0.50	0.88	-0.51	-0.94
2012	73.03	0.54	0.92	-0.40	-0.67	0.50	0.85	-0.55	-0.95
2013	83.48	0.51	0.93	-0.47	-0.86	0.50	0.92	-0.51	-0.94
2014	72.89	0.55	0.93	-0.40	-0.67	0.50	0.86	-0.53	-0.94
2015	77.15	0.53	0.92	-0.47	-0.80	0.51	0.88	-0.49	-0.91
2016	77.11	0.52	0.91	-0.45	-0.79	0.50	0.89	-0.53	-0.93
2017	82.10	0.52	0.94	-0.46	-0.83	0.51	0.92	-0.51	-0.94
2018	71.41	0.54	0.90	-0.37	-0.63	0.53	0.89	-0.55	-0.93
2019	81.22	0.52	0.94	-0.47	-0.84	0.49	0.89	-0.51	-0.94
2020	80.24	0.52	0.92	-0.47	-0.83	0.50	0.90	-0.51	-0.94
2021	78.50	0.52	0.91	-0.46	-0.80	0.51	0.90	-0.51	-0.94
2022	81.36	0.52	0.93	-0.46	-0.82	0.50	0.91	-0.52	-0.94
2023	79.90	0.53	0.93	-0.46	-0.81	0.50	0.90	-0.50	-0.93

2.3 毛乌素沙地RSEI突变特征

基于BFAST算法,对毛乌素沙地2000—2023年RSEI的变化类型进行分析,结果如图4a所示。在诸多变化类型中,6种主要类型占据主导地位,累计面积占比高达99.3%,而其余两种类型仅占0.7%。①单调型增加(无突变)。该类型占沙地总面积的43.4%,在沙地内广泛分布,在沙地东部更为集中,这表明在2000—2023年期间,这些地区的生态状况持续改善,且未发生显著突变事件;②单调型减少(无突变)。所占比例为33.6%,主要分布于沙地西部及南部边缘地带,这表明这些区域生态状况持续退化,且无明显突变情况;③中断型增加。比例为8.6%,主要位于沙地西南部各县区交界处,说明这些区域生态状况总体呈改善趋势,但在过程中存在阶段性变化或干扰事件,致使生态改善进程出现中断;④由增到减。所占比例5.3%,集中分布于沙地东部,且越靠近东部其聚集程度越高,反映出该区域在研究前期生态有所改善,后期出现退化,可能与后期环境变化、人为活动等因素相关;⑤中断型减少。所占比例为4.4%,主要分布于沙地南部边缘和鄂托克前旗,表示

这些区域生态状况总体呈退化趋势,但在退化过程中存在生态状况短暂改善或稳定的阶段;⑥由减到增。比例为4.0%,在沙地内呈零散分布。说明在研究时段内,这些零散区域前期生态退化,后期有所改善。此外,沙地中还存在少量单调型增加(有突变)区域,所占比例仅0.70%,即部分区域生态虽总体改善,但期间存在明显突变事件,对生态变化产生影响。

图4b显示,毛乌素沙地RSEI时间序列突变主要发生在2003—2019年之间,突变年份在空间上呈现“局部聚集-整体分散”并存的分布特征。部分区域突变频次较高,在多个年份均发生显著变化,反映出复杂的生态演变过程,例如乌审旗等地;而另一些区域的突变年份则相对集中,例如沙地西南部大片区域突变主要集中于2016年,盐池县北部突变高发于2019年。

为了解突变类型和突变年份的综合情况,本研究基于两者进行了相关统计分析,结果表明(图5a),毛乌素沙地所有像元的突变年份均匀分布在2003—2019年,其中突变发生最多的年份为2019年,随后是2004,2003,2008和2015年。

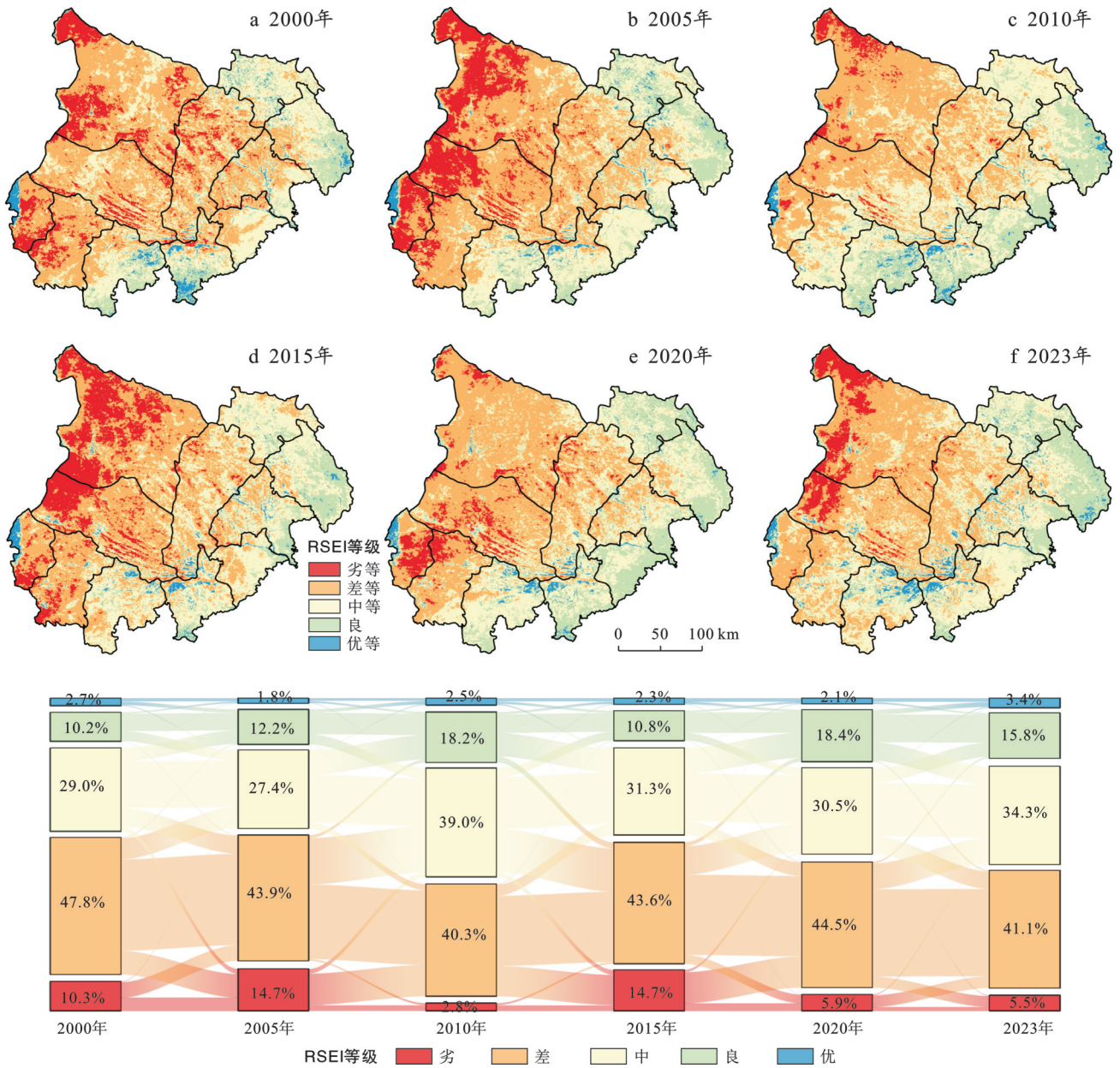


图3 毛乌素沙地 2000—2023年 RSEI 空间分布及其变化情况
 Fig.3 Distribution and changes of RSEI in Mu Us sandy land from 2000 to 2023

不同变化类型突变发生的主要年份有所差异(图 5b)。其中,RSEI呈中断型增加趋势的区域突变主要集中在 2019年;呈由增到减趋势的像元突变主要集中在 2013年;呈中断型减少趋势的像元中,绝大部分在 2016和 2008年发生突变;呈由减到增趋势的像元中,绝大部分在 2004和 2019年发生突变。

2.4 毛乌素沙地 RSEI 影响因素

由于上文 RSEI 突变情况的分析结果显示 2008, 2015, 2019 年为突变发生较多的年份,因此在利用地理探测器探究不同环境因素对 RSEI 空间分异性影响变化过程时,分别对 2000, 2008, 2015, 2019, 2023 年的数据进行了探测,结果如图 6 所示。

就整体情况来看,单因子探测结果表明,所选择的 9 种环境因子对研究区 RSEI 均有显著影响($p < 0.01$),但不同因子对 RSEI 空间分异的解释程度存在明显差异。相较于本次研究所选取的其他环境因子,SM 对 RSEI 变化的解释力明显较高,2023 年达到 0.547。同时,POP, LUCC 对 RSEI 变化的解释力也较强,仅次于 SM。此外,研究时段内 Aspect 的解释度均很小,不到 0.005。

不同时期因子对 RSEI 空间分异的解释程度存在明显差异,尤其是突变发生较多的 2019 年,许多因子的表现与其他年份截然不同,在其他年份影响并不突出的 T 因素成为 q 值最大的因素,而在其他年份

明显更为突出的 SM 反而退居第二,另外 DEM 和 Slope 的解释度高于其年份。2015 和 2019 年, P 的解

释度相比其他年份也更加凸显。此外,2023 年 POP 的解释度相较其他年份有了明显增长。

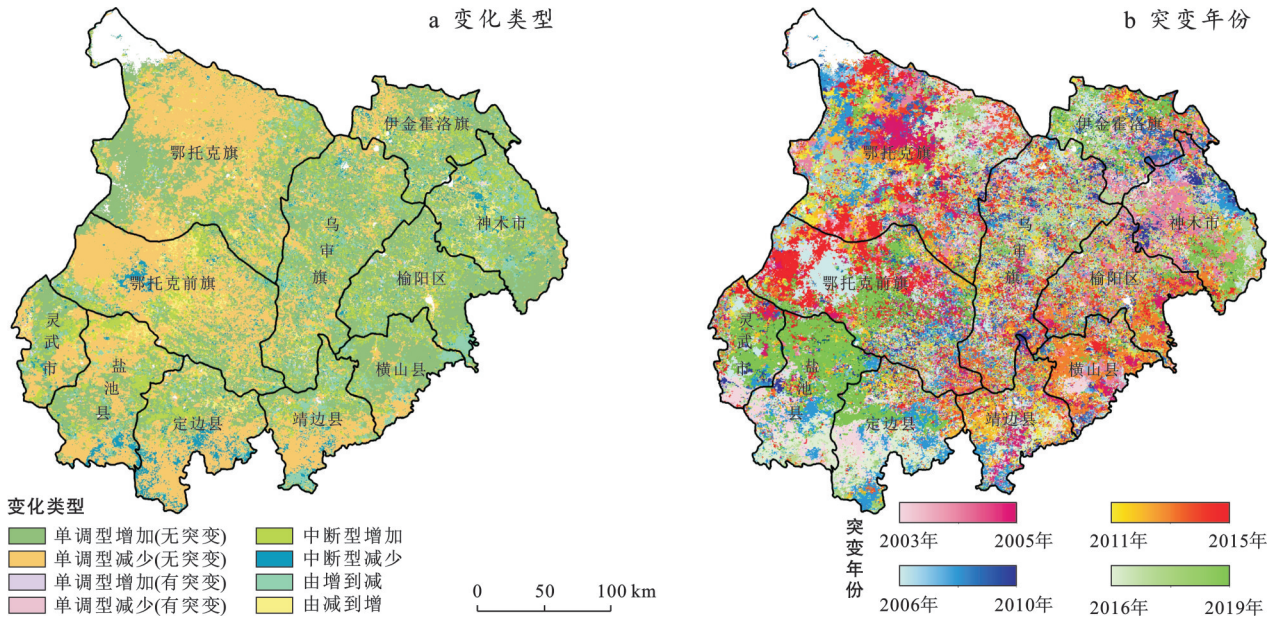


图 4 毛乌素沙地 2000—2023 年 RSEI 变化类型与突变年份

Fig.4 Change types and abrupt change years of RSEI in Mu Us sandy land from 2000 to 2023

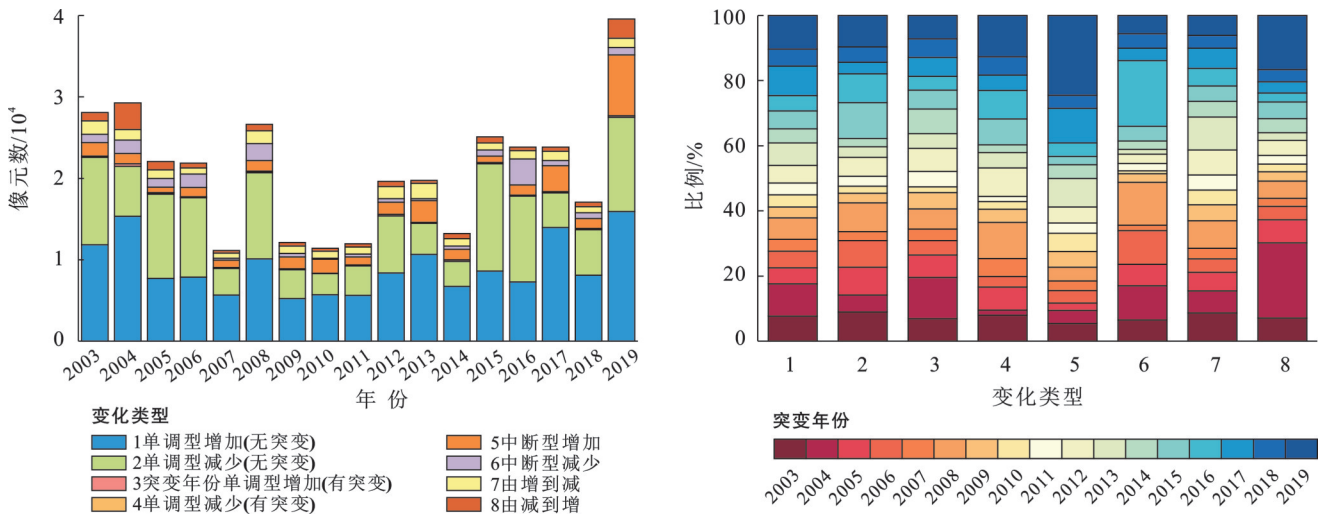


图 5 毛乌素沙地 2000—2023 年 RSEI 变化类型和突变年份统计情况

Fig.5 Statistics of RSEI change types and abrupt change years in Mu Us sandy land from 2000 to 2023

通过交互探测探究各环境因子对 RSEI 的交互作用情况(图 7),结果表明环境因素对 RSEI 变化的影响不是独立的,绝大多数情况下,双因子对 RSEI 的交互作用解释力高于单因子,主要表现为双因子增强,且不同时期各因子的解释程度既有相似之处,又存在一定差异。其中,SM∩其他因素的解释力较大,2023 年更是全部达到了 0.5 以上,2000,2008,2015,2019 和 2023 年解释度最高的 3 组交互作用分别为 SM∩P, SM∩LUCC, SM∩P, SM∩P 和 SM∩POP,均为双因子增强。此外,LUCC/POP∩其他因

素也呈现较高的解释度。值得注意的是,2019 年各因素的解释度与其他年份相比有较大差异,各交互作用解释度明显增强,尤其是 T∩其他因素和 P∩其他因素。

3 讨论

首先,RSEI 模型在毛乌素沙地生态环境质量评估中表现出良好的适用性。主成分分析结果显示,第一主成分贡献率均大于 70%,能有效综合 NDVI, WET, LST 和 NDBSI4 个生态指标信息,验证了

RSEI模型在生态脆弱区评估中的可靠性。

其次,研究揭示了毛乌素沙地生态环境质量呈现明显的时空分异特征。整体来看,2000—2023年生态环境质量虽有波动但呈现改善趋势,其中东部地区改善最为显著,而西部地区仍存在退化现象。这种空间分异主要受自然因素和人类活动的共同影响。一方面,退耕还林还草等生态工程的实施显著提升了植被覆盖度^[22-23];另一方面,气候变化导致的水资源分布格局改变加剧了部分区域的生态退化,相关研究指出,黄河流域近20 a的降水量和气温虽然同步上升,但蒸散发量的显著增加反而导致净水资源量减少,这种水热平衡的变化使得流域实际产流能力下降,进而制约了生态系统的自然恢复能力^[24]。值得注意的是,生态修复工程的有效性很大程度上取决于可用水资源量,而气候变化引起的水文格局调整,通过改变土壤水分条件和植被需水量,直接调控着生态环境的恢复进程与质量。

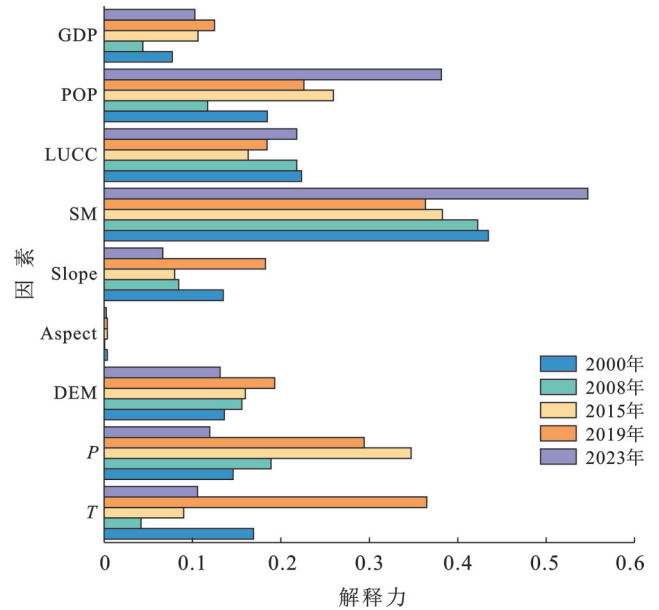


图6 毛乌素沙地不同环境因素单因子探测结果
Fig.6 Single factor detection results of different environmental factors in Mu Us sandy land

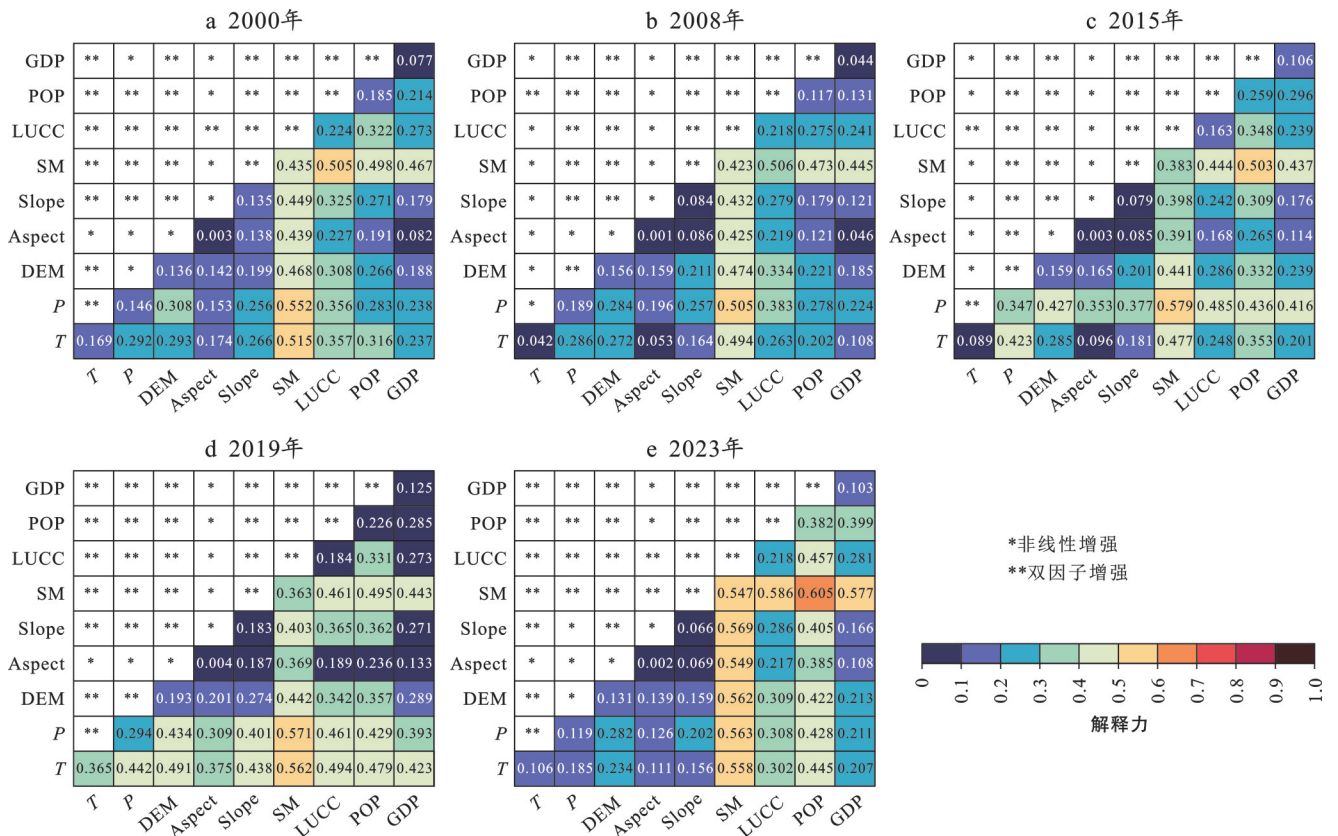


图7 毛乌素沙地不同环境因素交互作用探测结果

Fig.7 Detection results of interaction of different environmental factors in Mu Us sandy land

另外,BFAST算法检测到的突变特征为理解生态系统演变提供了新视角。研究发现不同区域表现出不同的突变类型:东部地区以持续改善型为主,集中分布于生态工程重点实施区,反映长期治理的累积效应^[25];西部地区则以持续退化型为主导,与干旱

中心所在区域高度重合^[26],暗示气候条件的重要影响。特别值得注意的是,西南部行政交界区表现出明显的阶段性改善特征,其突变时间与极端气候事件高度吻合^[27]。这些空间分异特征揭示了毛乌素沙地生态系统响应的复杂性:一方面,持续性的生态工

程能够有效促进系统恢复;另一方面,系统对气候变化和人为干扰表现出显著的非线性响应特征,特别是在生态脆弱区和行政交界带。这一认识为制定差异化的生态恢复策略提供了重要依据,强调在持续推进生态工程的同时,需特别关注气候变化敏感区和跨行政边界的协同治理。

最后,地理探测器分析明确了环境因子的驱动机制。结果表明,SM是影响RSEI空间分异的最主要因子,凸显了土壤水分条件在干旱区生态系统中的关键作用。值得注意的是,2019年成为突变事件最频繁的年份,这一现象可能与全球变暖背景下极端高温事件频发有关^[28]。《2019年中国气候公报》显示^[29],当年全国平均气温较常年偏高0.75℃,这一观测结果与本研究中T解释力的显著增强高度吻合。与广受关注的T和P的单因子解释力相比,两者与SM的交互作用更强,这在一定程度上说明在毛乌素沙地这样的干旱地区,T和P更多通过影响SM来间接影响生态环境质量,但值得注意的是,本次研究所使用的SM数据为浅层土壤水分,对T和P的响应较快,并不能完全代表深层土壤水分对区域生态环境质量的影响^[30]。此外,因子交互作用分析显示,SM∩其他因素的双因子增强效应最为显著,表明生态恢复工程需要与水资源管理协同推进才能取得最佳效果。

本研究也存在一定局限性。本研究使用的土壤湿度数据仅涉及到土壤浅层,缺乏对于包气带水和地下水的考量;在评估人类活动的影响时,对社会经济因素的考虑相对不足。未来研究可融合更高分辨率的遥感数据,并构建“自然-社会”耦合模型,以更全面地揭示生态环境变化的驱动机制。尽管如此,本研究为毛乌素沙地生态治理提供了科学依据,所采用的方法体系也可类似生态脆弱区的监测评估提供参考。

4 结论

(1) 2000—2023年,毛乌素沙地生态环境质量呈现明显的时空异质性。整体上,生态环境质量虽有波动,但呈现改善趋势,尤其是东部地区生态质量显著提升,而西部地区和部分边缘地带的生态质量仍存在退化现象。

(2) 基于BFAST算法的突变分析表明,2000—2023年毛乌素沙地RSEI变化类型以单调型增加(无突变)和单调型减少(无突变)为主,分别占总面积的43.4%和33.6%。突变事件主要集中在2003—2019年,其中2019年为突变发生最频繁的年份。不同变化类型的突变年份分布存在差异,反映了生态环境变化的复杂性和区域性特征。

(3) 地理探测器的结果表明,SM是影响RSEI空间分异的主导因素,尤其是在2023年,SM对RSEI变化的解释力达到0.547。此外,环境因子之间的交互作用对RSEI变化的影响显著,双因子交互作用的解释力普遍高于单因子,其中SM与其他因子的交互作用解释力最强。2019年作为突变发生最频繁的年份,环境因子的解释力与其他年份相比存在显著差异,T∩其他因素和P∩其他因素解释度明显增强。

参考文献(References)

- [1] Gupta J, Liverman D, Prodan K, et al. Earth system justice needed to identify and live within earth system boundaries [J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(6):630-638.
- [2] 陈云飞,刘祖钰,刘秀花,等.EMD及其扩展方法在水文学中的研究进展及应用综述[J].*灌溉排水学报*, 2025, 44(2):101-112.
Chen Yunfei, Liu Zuyu, Liu Xiuhua, et al. Advances and applications of empirical mode decomposition and its variants in hydrology: A review [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(2):101-112.
- [3] 刘婷,包广道,翟畅,等.生态脆弱区生态环境质量变化及其驱动力分析[J].*吉林林业科技*, 2020, 49(1):18-25.
Liu Ting, Bao Guangdao, Zhai Chang, et al. Analysis on the change and driving force of ecological environment quality in ecological fragile area [J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2020, 49(1):18-25.
- [4] Li Shiji, Liu Chunli, Ge Changzi, et al. Ecosystem health assessment using PSR model and obstacle factor diagnosis for Haizhou Bay, China [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 250:107024.
- [5] Jiang Luguang, Liu Ye, Wu Si, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129:107933.
- [6] 马林,梁勇,张雅芹,等.基于RSEI的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J].*水土保持研究*, 2024, 31(2):389-400.
Ma Lin, Liang Yong, Zhang Yaqin, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality of different land covers in Shandong Province based on RSEI [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2):389-400.
- [7] 余欢,李鹏,王孝康,等.2000—2020年渭河流域生态环境质量时空变化及其驱动因素[J].*水土保持通报*, 2025, 45(1):317-326.
She Huan, Li Peng, Wang Xiaokang, et al. Spatial and temporal changes and its driving factors of ecological environment quality in Weihe River basin from 2000 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45

- (1):317-326.
- [8] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5):889-897.
Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.
- [9] Zhang Leyi, Li Xia, Liu Xiuhua, et al. Dynamic monitoring and drivers of ecological environmental quality in the three-north region, China: Insights based on remote sensing ecological index [J]. Ecological Informatics, 2025, 85:102936.
- [10] Wang Jinjie, Ding Jianli, Ge Xiangyu, et al. Assessment of ecological quality in Northwest China (2000—2020) using the Google Earth Engine platform: Climate factors and land use/land cover contribute to ecological quality [J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(11):1196-1211.
- [11] Gong Cheng, Lyu Feinan, Wang Yilei. Spatiotemporal change and drivers of ecosystem quality in the Loess Plateau based on RSEI: A case study of Shanxi, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 155:111060.
- [12] 贺军奇, 赵同强, 陈云飞, 等. 毛乌素沙区地下水对植被盖度空间格局影响分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):90-99.
He Junqi, Zhao Tongqiang, Chen Yunfei, et al. Effect of subsurface water on spatial pattern of vegetation coverage in Mu Us sandy area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):90-99.
- [13] 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.
- [14] 李琪, 党国锋, 鱼腾飞, 等. 基于GEE的干旱区县域生态环境质量时空变化及驱动力分析: 以阿拉善左旗为例[J]. 干旱区研究, 2025, 42(2):360-371.
Li Qi, Dang Guofeng, Yu Tengfei, et al. Spatial-temporal variation and driving forces analysis of ecological environment quality in arid counties based on GEE: A case study of Alxa Left Banner [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(2):360-371.
- [15] 罗爽, 刘会玉, 龚海波. 1982—2018年中国植被覆盖变化非线性趋势及其格局分析[J]. 生态学报, 2022, 42(20):8331-8342.
Luo Shuang, Liu Huiyu, Gong Haibo. Nonlinear trends and spatial pattern analysis of vegetation cover change in China from 1982 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20):8331-8342.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.
- [17] 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.
- [18] 苏嘉亮, 晏晨然, 雷雨, 等. 陕西省生态环境质量长时序动态监测[J]. 生态学报, 2023, 43(2):554-568.
Su Jialiang, Yan Chenran, Lei Yu, et al. Long time series dynamic monitoring of eco-environmental quality in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2):554-568.
- [19] 江笑薇. 黄土高原地区干旱及土地利用变化对植被净初级生产力影响的量化研究[D]. 陕西西安: 陕西师范大学, 2021.
Jiang Xiaowei. Quantitative study on the influence of drought and land use change on net primary productivity of vegetation in Loess Plateau [D]. Xi'an, Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2021.
- [20] 肖建明, 石长春, 魏道伟, 等. 毛乌素沙地退化防护林成因分析与修复改造建议[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(增刊1):34-38.
Xiao Jianming, Shi Changchun, Wei Daowei, et al. Analysis of cause of degradation shelterbelt and suggestions for restoration in Mu Us sandy land [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Suppl.1):34-38.
- [21] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6):1456-1466.
Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6):1456-1466.
- [22] 刘子凡, 成钰, 赵尚林. 我国四大沙地生态环境质量时空变化分析[J]. 林业科技通讯, 2025(1):6-10.
Liu Zifan, Cheng Yu, Zhao Shanglin. Analysis of spatial and temporal changes in ecological environment quality of 4 major sandy areas in China [J]. Forest Science and Technology, 2025(1):6-10.
- [23] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望: 基于40年建设综合评估结果[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5):1600-1610.
Zhu Jiaojun, Zheng Xiao. The prospects of development of the three-north afforestation program (TNAP): On the basis of the results of the 40-year construction general assessment of the TNAP [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5):1600-1610.