

青海省 2000—2024 年生态环境质量 演变及其驱动因素

聂学敏¹, 王禄^{2,3}, 马艳丽¹, 马超¹, 鲁子豫¹, 李龙⁴, 常秀红²

(1. 青海省生态环境监测中心 青海省生态环境监测与评估重点实验室,
青海 西宁 810007; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃省遥感重点实验室,
甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青海省自然资源遥感中心, 青海 西宁 810000)

摘要: [目的] 系统揭示 2000—2024 年青海省生态环境质量的时空演变规律及其主要驱动因子, 为该区生态保护措施与修复策略的制定提供科学依据。[方法] 基于中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 遥感数据, 在遥感生态指数 (RSEI) 基础上引入盐分指标 (SI_3), 并采用全时序归一化方法, 构建适用于青海省的改进型遥感生态指数 (mRSEI)。以生态功能分区为分析单元, 结合地理探测器和趋势分析法等方法开展研究。[结果] ① 2000—2024 年青海省生态环境质量整体呈缓慢上升趋势, 平均增幅为 0.025/10 a。除藏北高原高寒荒漠草原生态区外, 各生态功能区 mRSEI 均值均有不同程度提升; ② 青海省整体生态环境质量处于中等水平 (mRSEI=0.45), 不同生态区域存在明显差异。其中, 祁连山森林与高寒草原生态区生态质量较优 (mRSEI=0.60), 而柴达木盆地荒漠生态区生态状况较差 (mRSEI=0.22); ③ 不同生态分区生态环境质量的驱动因子存在明显差异, 如祁连山森林与高寒草原生态区的主要驱动因子为总初级生产力 ($q=0.61$)、土壤水分 ($q=0.51$) 和年降雨量 ($q=0.44$), 而藏北高原高寒荒漠草原生态区主要受土壤水分 ($q=0.59$) 驱动。[结论] 总体来看, 青海省生态环境呈改善趋势, 但不同生态功能区的生态状况与驱动机制差异显著。

关键词: 改进型遥感生态指数 (mRSEI); 地理探测器; 驱动因子; 生态功能分区; 青海省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0366-12

中图分类号: X822

文献参数: 聂学敏, 王禄, 马艳丽, 等. 青海省 2000—2024 年生态环境质量演变及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 366-377. Nie Xuemin, Wang Lu, Ma Yanli, et al. Ecological environment quality evolution and its driving factors in Qinghai Province from 2000 to 2024 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 366-377.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.020

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.020

Ecological environment quality evolution and its driving factors in Qinghai Province from 2000 to 2024

Nie Xuemin¹, Wang Lu^{2,3}, Ma Yanli¹, Ma Chao¹, Lu Ziyu¹, Li Long⁴, Chang Xiuhong²

(1. Qinghai Key Laboratory of Eco-Environment Monitoring and Assessment, Qinghai

Province Ecological and Environmental Monitoring Center, Xining, Qinghai 810007, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Remote Sensing, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qinghai Remote Sensing Center for Natural Resources, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns of ecological environment quality and its main driving factors in Qinghai Province from 2000 to 2024 were systematically revealed, in order to provide a scientific basis for the formulation of ecological protection measures and restoration strategies in this region. [Methods] Based on moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) remote sensing data, the salinity index (SI_3) was incorporated into the remote sensing ecological index (RSEI), and a modified remote sensing ecological index (mRSEI) was then constructed using a full time-series normalization method. Ecological function zones were used

收稿日期: 2025-07-29

修回日期: 2025-10-09

采用日期: 2025-10-13

资助项目: 甘肃海智计划项目“高原寒区流域水文-植被-大气互馈机制研究”(GSHZJH12-2025-04)

第一作者: 聂学敏(1980—), 男(土族), 青海省民和县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态监测与评价方面的工作。Email: qhnxm2008@163.com。

通信作者: 王禄(1999—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: wanglu231@mailsucas.ac.cn。

as the analysis units, and methods such as the Geodetector and trend analysis were employed. [Results] ① From 2000 to 2024, the overall ecological environment quality of Qinghai Province showed a slow upward trend, with an average increase of 0.025/10 a. Except for the alpine desert grassland ecological zone in the northern Tibetan Plateau, the average mRSEI values of all ecological function zones increased to varying degrees. ② The overall ecological environment quality of Qinghai Province was at a medium level (mRSEI=0.45), with significant differences observed among different ecological zones. Among them, the forest and alpine grassland ecological zones in Qilian Mountains exhibited relatively better ecological quality (mRSEI=0.60), whereas the desert ecological zone of the Qaidam Basin showed poor ecological conditions (mRSEI=0.22). ③ The driving factors of ecological environment quality differed significantly across different ecological zones. For example, the main driving factors of forest and alpine grassland ecological zones in Qilian Mountains were gross primary productivity ($q=0.61$), soil moisture ($q=0.51$), and annual precipitation ($q=0.44$), while the alpine desert grassland ecological zone in northern Tibetan Plateau was mainly driven by soil moisture ($q=0.59$). [Conclusion] In general, the ecological environment of Qinghai Province shows an improving trend, however the ecological conditions and driving mechanisms differ significantly across different ecological function zones.

Keywords: modified remote sensing ecological index (mRSEI); geodetector; driving factors; ecological function zones; Qinghai Province

生态环境质量以生态学理论为基础,依据设定的评价标准,系统评估一定时空尺度上生态环境质量状况以及变化,从而综合表征其优劣程度,以及对人类社会经济发展的适宜性^[1]。作为衡量自然系统与人类活动协调程度的关键指标,生态环境质量直接关系到区域生态安全与可持续发展能力^[2]。近年来,在气候变化和人类干扰的共同作用下,青藏高原生态系统不同程度受损,草地退化、水土流失等问题日益突出^[3-4]。青海省位于青藏高原核心区,是中国生态安全的重要屏障^[5]。多年来,青海深入推进“生态立省”战略,陆续开展了青藏高原生态整治、湟水流域山水林田湖草沙系统治理等重大工程,在一定程度上遏制了部分地区的生态退化趋势^[4]。然而,受自然地理条件和人类活动强度差异的影响,青海省不同生态功能区生态环境质量表现出明显的空间异质性^[4,6]。因此,开展区域化的定量评估,对于精准识别潜在生态风险区,科学支撑生态保护与修复策略制定具有重要意义。

区域生态环境质量的科学评价依赖于能够全面反映生态系统状况的综合指标。遥感生态指数(RSEI)是一种融合绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)与热度(LST)4个维度的综合性评估模型,自提出以来,因其多指标集成、权重确定客观及结果可视化等优势,在区域生态环境质量评估中得到了广泛应用^[7-9]。然而,标准的RSEI指标体系在应用于青海省高原-干旱-盐渍化复合生态系统时,仍存在一定局限性:①NDBSI指标对青海西部柴达木盆地及东部河湟谷地等区域广泛分布的盐渍化地

表响应不足,难以有效捕捉盐胁迫导致的生态退化过程^[3,10];②长期多时相生态评估受限于数据一致性问题,导致时序对比存在偏差,影响时序演变分析的可靠性^[11]。为提升RSEI在特定区域的适用性,学者们开展了诸多改进研究,例如在干旱区引入盐分指数或水网密度^[3],在荒漠区增加土地退化指标^[10],在城市区域纳入空气质量与人类活动强度^[12];亦有研究通过全时序归一化方法提升长期数据分析的可比性^[13]。然而,能够同时解决指标体系优化和时序一致性提升难题,并针对性应对青海省显著盐渍化问题的研究仍较为欠缺。基于此,本研究旨在构建适用于青海省的改进型遥感生态指数(mRSEI),以科学评估2000—2024年该区域生态环境质量的时空演变及驱动因素。改进主要包括两方面:①指标体系优化。在RSEI原有4个指标基础上,引入对土壤盐分高度敏感的盐分指数(SI₃)。研究证实,SI₃在内蒙古乌拉特前旗及青海柴达木盆地的盐渍化反演中均表现出较高精度^[14-15],可有效弥补RSEI对盐渍化区域识别能力的不足^[16];②时序一致性提升。采用全时序归一化方法处理2000—2024年MODIS数据,以消除因数据源与成像条件差异带来的影响,确保长时序分析结果的可靠性与可比性。通过主成分分析融合上述指标,mRSEI最终输出的综合值可直接表征生态环境质量的优劣,指数升高表明生态质量改善,降低则表明生态退化。因此,本研究对mRSEI时空变化及驱动因素的分析,实质上是对青海省生态环境质量演变规律及成因的深入探讨。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

青海省地处青藏高原东北部(经度 $89^{\circ}35'$ — $103^{\circ}04'E$, 纬度 $31^{\circ}30'$ — $39^{\circ}19'N$), 是长江、黄河和澜沧江等重要河流的发源地, 省内分布有三江源、可可西里、青海湖等多个自然保护区, 在全球生态系统中发挥着关键的调节与稳定作用^[17]。该省地形复杂, 海拔在 $1\ 659\sim 5\ 997\text{ m}$, 空间上呈现西部较高、东部较低, 南北两端较高而中部较低的地势特征。省域内属于典型的高原大陆性气候, 2000—2022年降水量为 351.50 mm 。植被类型丰富, 涵盖草甸、草原、沼泽、荒漠、灌丛、针叶林、阔叶林以及针阔混交林等多种类型^[4, 18]。依据地貌形态、水热条件、植被类型及生态系统特征的综合差异, 青海省可划分为5类生态区域^[4], 分别为祁连山森林-高寒草原生态区(Ⅲ₁)、柴达木盆地荒漠生态区(Ⅲ₂)、帕米尔-昆仑山-阿尔金山高寒荒漠草原生态区(Ⅲ₃)、江河源-甘南高寒草

甸草原生态区(Ⅲ₄)以及藏北高原高寒荒漠草原生态区(Ⅲ₅)。

1.2 数据源

归一化植被指数(NDVI)、地表温度、地表反射率、总初级生产力、蒸散发数据来源于美国国家航空航天局(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)提供的MOD13A1, MOD11A2, MOD09A1, MOD17A3 HGF, MOD16A2 GF产品数据, 其中地表温度的时间分辨率为 1 km ; NDVI、地表反射率、总初级生产力、蒸散发的空间分辨率为 500 m 。为了数据的一致性, 将遥感数据均重采样至 1 km 。除MODIS产品数据外, 本文还收集其他数据, 具体来源详见表1。土壤水分数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 1 km 分辨率逐日全天候地表土壤水分数据集, 产品的均方根偏差(RMSD)的平均值范围为 $0.052\sim 0.059\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。土地利用/覆盖数据来源于武汉大学黄昕团队提供的 30 m 土地覆被产品数据(CLCD), 该产品数据基于Landsat影像得到, 产品精度为 79.31% 。

表1 数据主要来源

Table 1 Primary data sources

数据名称	空间分辨率/m	数据来源
数字高程模型	90	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
土壤水分数据	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)
降水、气温	1 000	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn)
夜间灯光数据	1 000	美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心(http://ngdc.noaa.gov)
人口密度	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/DataSearch.aspx)
生态功能区划数据	—	中国生态系统评估与生态安全数据库(https://www.ecosystem.csdb.cn)
土地利用/覆被数据	30	Google Earth Engine (GEE)

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数

基于Google Earth Engine(GEE)云平台, 本研究通过主成分分析(PCA)集成绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)、干度(NDBSI)和盐度(SI₃)5个关键指标, 构建适用于青海省生态环境质量评估的mRSEI, 分析2000—2024年该区生态环境质量的时空演变特征。为保障mRSEI在时序对比中的敏感性与可比性, 本研究选取每年5—9月的遥感影像作为研究数据^[4, 19]。该选择基于研究区及生态分区一致的物候特征: 5—9月为植被活跃期, NDVI值显著高于其他月份(图1), 能最大限度地捕捉表征生态环境质量的关键信息。在此基础上, 针对各指标的生态学含义, 本研究对绿度指标采用生长季内最大值合成法, 以捕捉最佳植被状况; 湿度、热度、干度和盐度指标则采用生长季影像的均值合成, 以代表该时段

内稳定的水分、热力、干旱胁迫及盐分环境条件。各指标的计算方法详见表2。

由于上述5个指标量纲不一致, 为避免其对分析结果的影响, 在主成分分析之前需对各指标进行归一化处理, 使各指标的值得在 $[0, 1]$ 区间内^[20]。研究基于整体时序数据的最大最小值进行归一化^[12]。计算公式为

$$N_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

式中: N_i 为归一化后的指标值; I_i 为原始指标值; I_{\max} , I_{\min} 分别为5个指标在全时序数据中的最大值和最小值。在对5个归一化指标分量进行PCA后, 提取PC₁作为综合反映生态环境质量的主要特征变量。随后, 对PC₁使用整体时序数据的最大最小值进行归一化处理, 最终构建mRSEI。mRSEI值越大, 表示生态环境质量越优, 反之, 则表示越差。

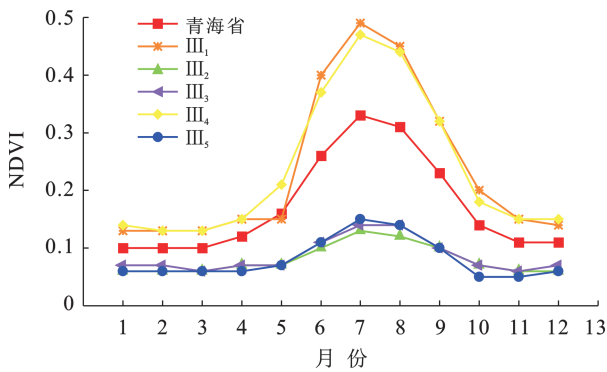
$$\text{mRSEI}_0 = f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI}, \text{SI}_3) \quad (2)$$

表 2 生态指标的计算方法^[4,7,15]

Table 2 Calculation methods of ecological indicators^[4,7,15]

表征	指标	计算方法
绿色	NDVI	$NDVI = (B_N - B_R) / (B_N + B_R)$
湿度	湿度分量(WET)	$WET = 0.1147B_R + 0.2489B_{N1} + 0.2408B_B + 0.3132B_G - 0.3122B_{N2} - 0.6416B_{S1} - 0.5087B_{S2}$
干度	干度指标(NDBSI)	$NDBSI = \frac{(B_R + B_N) - (B_B + B_G)}{(B_R + B_N) + (B_B + B_G)}$
热度	地表温度(LST)	$LST = 0.02 \times DN - 273.15$
盐度	盐分指标(SI ₃)	$SI_3 = \text{Sqrt}(B_G^2 + B_R^2)$

注: $B_R, B_{N1}, B_B, B_G, B_{N2}, B_{S1}, B_{S2}$ 分别为 MOD9A1 影像数据集中的红、近红外 1、蓝、绿、热红外 2、短波红外 1、短波红外 2 波段; DN 为陆地地表温度灰度值。



注: III₁ 为祁连山森林与高寒草原生态区; III₂ 为柴达木盆地荒漠生态区; III₃ 为帕米尔-昆仑山-阿尔金山高寒荒漠草原生态区; III₄ 为江河源区-甘南高寒草甸草原生态区; III₅ 为藏北高原高寒荒漠草原生态区。下同。

图 1 青海省及生态分区 2000—2024 年 NDVI 月均值变化
Fig.1 Variations in monthly average NDVI of Qinghai Province and its ecological zones from 2000 to 2024

$$mRSEI = (mRSEI_0 - mRSEI_{0min}) / (mRSEI_{0max} - mRSEI_{0min}) \quad (3)$$

式中: $f(\cdot)$ 为 PCA 计算; $mRSEI_0$ 为主成分计算结果; NDVI 为绿色指数; WET 为湿度指数; LST 为热度指数; NDBSI 为干度指数; SI_3 为盐分指数; $mRSEI_{0max}, mRSEI_{0min}$ 分别为 PC₁ 全时序数据的最大值和最小值。

1.3.2 趋势分析法

Theil-Sen 中位数趋势分析法是一种常用于时序数据趋势识别的稳健方法,对测量误差和离群数据不敏感^[21]。本研究基于该方法探究青海省 2000—2024 年 mRSEI 的栅格单元变化趋势。采用 Mann-Kendall 非参数检验方法进行显著性检验,显著性水平设定为 0.05, Theil-Sen 与 Mann-Kendall 计算过程参考奥勇等^[22]研究。此外,本文还采用一元线性回归法对 mRSEI 的年际变化趋势进行定量分析。

1.3.3 变异系数

为量化青海省生态环境质量的时序稳定性,本

研究采用变异系数(coefficient of variation, C_v)评估其年际波动特征。变异系数定义为标准差与平均值的比值^[23],其计算公式为

$$C_v = \left(\frac{SD}{mean} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:SD 为标准偏差; mean 为平均值。 C_v 值越高,表明生态环境质量年际波动越大,时序稳定性越低; C_v 值越低,则反映其年际波动越小,系统越趋于稳定。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是一种量化自变量对因变量空间分异影响程度的统计方法^[24]。本研究采用因子探测和交互探测模块,分析影响青海省各生态分区 mRSEI 空间分异的主导因素及其交互作用机制。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 为因子对因变量的影响力; h 为影响因素的分层; N, N_h 分别为全区和第 h 层的样本数; σ^2, σ_h^2 分别为全区和第 h 层的影响因素的方差。

因子探测主要用于评估单一驱动因子对 mRSEI 空间异质性的解释力;而交互探测则侧重于分析不同驱动因子之间的交互作用对 mRSEI 空间分异的影响。交互类型及其判别依据参考田智慧^[8]的研究结果。

2 结果与分析

2.1 青海省生态环境质量的时间变化特征

2000—2024 年,青海省生态环境质量呈现“快速上升—波动下降—稳步上升”的阶段性演变特征(图 2)。具体而言,2000—2009 年为快速提升阶段,生态环境质量由 0.442 显著上升至 0.457,增幅达 3.39%;2009—2016 年转为波动下降阶段,于 2016 年降至 0.440 的低点;2016 年后生态环境质量回升,于

2023年达到0.457的峰值。从不同生态分区来看(图2),2000—2024年各分区生态环境质量演变同样呈现明显的时段性特征。2000—2009年Ⅲ₁区与Ⅲ₅区生态环境质量呈轻微下降趋势,下降速率分别为0.000 4/a和0.000 2/a,其余分区则表现为改善趋势,改善速率依次为:Ⅲ₃区(0.002 6/a) > Ⅲ₄区(0.001 7/a) > Ⅲ₂区(0.000 5/a)。2009—2016年除

Ⅲ₁区外,其余各分区生态环境质量普遍下降,下降速率依次为:Ⅲ₄区 > Ⅲ₅区 > Ⅲ₃区 > Ⅲ₂区。2016—2024年区域分异格局进一步凸显,Ⅲ₂区、Ⅲ₃区和Ⅲ₄区分别以0.000 7/a,0.001 1/a和0.001 6/a的速率改善,而Ⅲ₁区与Ⅲ₅区则呈下降态势。综上所述,青海省生态环境质量在过去20 a经历了复杂的动态演变过程,呈现出明显的阶段性和区域性特征。

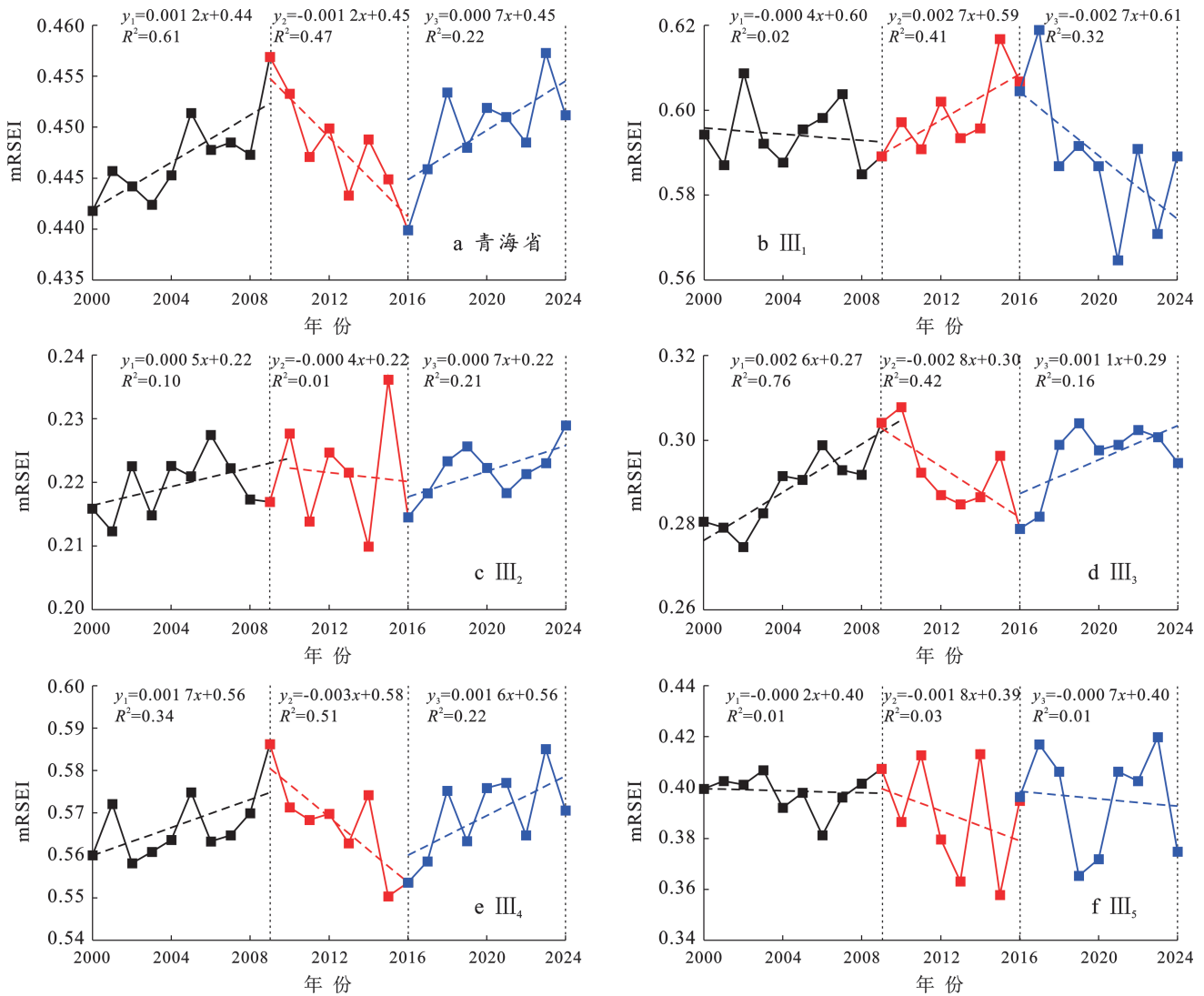


图2 青海省及其不同生态区2000—2024年mRSEI变化

Fig. 2 Changes in mRSEI for Qinghai Province and its ecological zones from 2000 to 2024

2.2 青海省生态环境质量空间分布特征及变化趋势

根据《生态环境状况评价技术规范(试行)(HJ/T 192—2006)》,将青海省多年mRSEI均值划分为优(0.8, 1]、良(0.6, 0.8]、中(0.4, 0.6]、较差(0.2, 0.4]、差[0.0, 0.2]。

青海省生态环境质量整体以中等和较差为主,各等级面积比例分别为优级0.82%,良级27.81%,中等31.33%,较差23.58%,差级16.45%(图3a)。在

空间分布上,生态环境质量呈现出明显的“东南高,西北低”格局(图3b):优和良等级的区域集中分布于东北部与南部;而差和较差等级区域则大面积分布于西北部。从生态分区来看,Ⅲ₁区的生态环境质量最佳,优、良等级面积所占比例合计达53.35%(图4);其次为Ⅲ₄、Ⅲ₅区,优、良等级面积比例总和分别为45.8%和40.6%;而Ⅲ₃和Ⅲ₂区的生态环境质量相对较差,差、较差等级面积比例总和分别高达

77.40%,86.11%。这一分布格局充分体现了青海省生态环境质量受水热条件、地形地貌与植被覆盖的

综合影响,形成了与自然地理特征高度协同的空间分异规律。

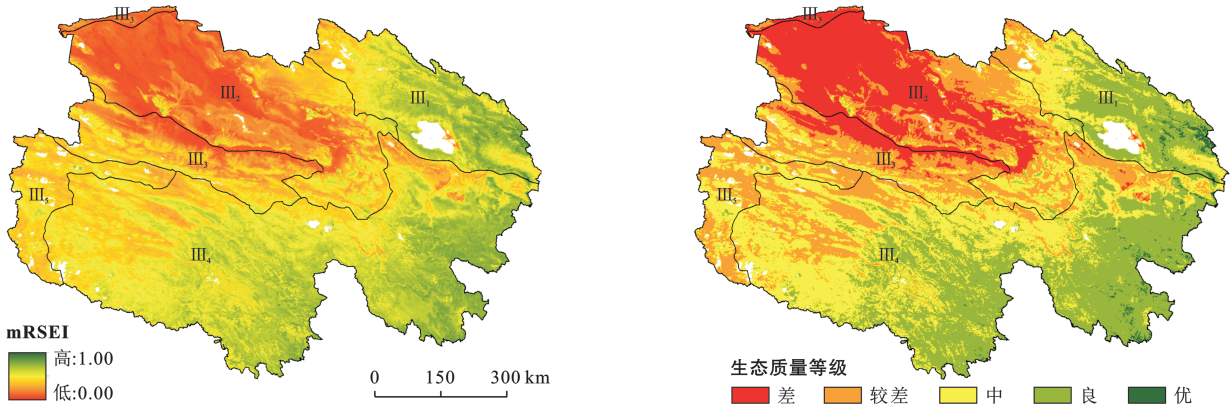


图 3 青海省 2000—2024 年年均 mRSEI 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual average mRSEI in Qinghai Province from 2000 to 2024

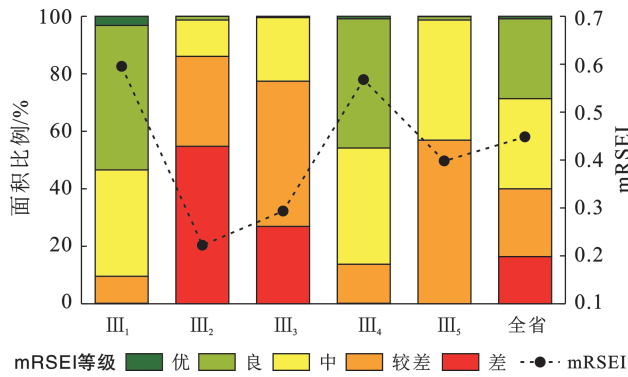


图 4 2000—2024 年不同生态区不同等级 mRSEI 面积比例

Fig.4 Area proportions of different mRSEI levels across ecological zones in Qinghai Province from 2000 to 2024

基于 Sen-MK 趋势检验方法,对青海省 2000—2024 年生态环境质量变化趋势进行定量分析。结果表明(图 5),青海省生态环境质量在空间上呈现出一

定的区域性改善特征。其中,生态环境质量显著改善的区域占总面积的 19.49%,主要呈片状集中分布于中部地区,如海南藏族自治州、果洛州玛多县以及海西州的乌兰县和都兰县等地,反映出这些区域实施的生态保护与恢复措施取得了积极成效。另有 27.98% 的区域呈不显著改善趋势,多分布于显著改善区的外围,可能受周边生态治理与自然恢复过程的辐射带动。相较之下,全省仍有接近半数的区域(合计 49.46%)生态环境质量存在退化现象,表明青海生态恢复整体仍面临较大压力。其中,海西地区生态退化最为明显,是青海省生态变化中需重点关注的区域。从生态功能分区的角度进一步分析发现,III₃与 III₄区整体呈现出以改善为主的趋势,生态系统表现出较强的恢复能力和响应效应。而 III₁, III₅和 III₂区则以退化为主,尤以 III₂区表现最为明显,显著变差区域面积比例最高。

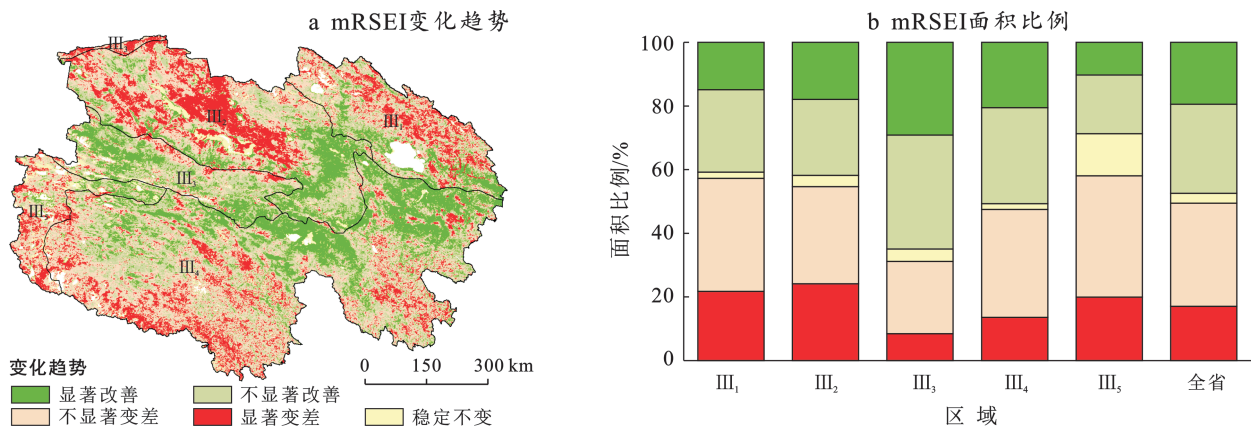


图 5 青海省 2000—2024 年 mRSEI 的变化趋势及面积比例

Fig.5 Change trends and area proportions of mRSEI in Qinghai Province from 2000 to 2024

基于变异系数方法,对青海省 2000—2024 年生态环境质量变化波动程度进行定量分析。结果表明

(图 6),青海省生态环境质量整体以低波动和相对低波动为主,分别占总面积的 35.02% 和 44.33%。稳定

性最强的区域分布在研究区的东北部、南部；稳定性最差的地区集中在西北部与中部。不同生态分区，Ⅲ₁、Ⅲ₄、Ⅲ₅区同样以低波动与相对低波动为主，两者面积比例均超过90%，说明这3个分区生态系统在长时间序列中具备较强的稳定性与恢复力。相比之下，Ⅲ₃区和Ⅲ₂区则以相对低波动与中波动为主，比

例分别为81.79%和69.35%，表明这些区域生态系统受水热条件限制及外界扰动影响更为敏感，生态环境质量波动相对显著。整体来看，青海省生态环境质量的波动性与自然环境本底密切相关，植被覆盖度较高，水分条件较好的区域普遍表现出更强的稳态维持能力。

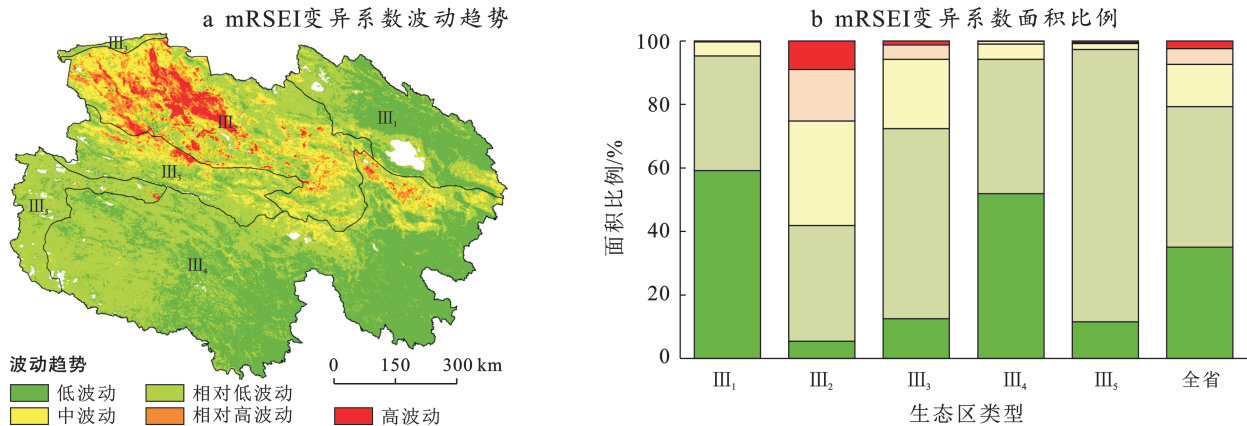


图6 青海省2000—2024年mRSEI的变异系数波动趋势及面积比例

Fig.6 Fluctuation trends of coefficient of variation and area proportions of mRSEI in Qinghai Province from 2000 to 2024

2.3 生态环境质量变化的驱动因子分析

生态环境质量变化受气候、植被、地形、土壤、人类活动等因素的共同影响，各因素相互作用、耦合，共同塑造了生态系统的空间格局与演变特征^[25]。结合青海省的自然地理与社会经济特征，本研究从气候（年平均气温、年降水量、年平均蒸散发）、地形（高程、坡度、坡向）、植被（总初级生产力）、土壤（土壤水分）及人为干扰（夜间灯光数据和人口密度）5个方面共选取10个驱动因子作为自变量X，以综合表征生态环境质量的mRSEI作为因变量Y，探讨各因子对不同生态分区mRSEI空间分异的解释力。由于数据缺失，在Ⅲ₂和Ⅲ₃中，年平均蒸散发和总初级生产力两个因子未被纳入分析。

地理探测器因子探测结果表明，青海省不同生态分区生态环境质量的主导驱动因子及其作用机制存在显著差异（表3）。其中，Ⅲ₁区以总初级生产力（ $q=0.61$ ）、土壤水分（ $q=0.51$ ）和年降水量（ $q=0.44$ ）为核心驱动因子，反映出该区作为森林—草原复合生态系统，其生态环境质量依赖“水分—植被”协同机制，即水分供给能力调控植被固碳过程；Ⅲ₂区主要受年降水量（ $q=0.61$ ）和年均温度（ $q=0.53$ ）驱动，表明在极端干旱背景下水热条件共同构成生态系统的主要限制要素，二者共同决定了荒漠区植被格局与生态功能；Ⅲ₃区中，年均气温（ $q=0.73$ ）、海拔（ $q=0.72$ ）和年降雨量（ $q=0.64$ ）解释力最强，说明在高寒荒漠草原生态系统中，能量条件（温度）通过控制植被生

长期与代谢过程成为生态质量首要控制因子，地形则通过调控局地水热配置进一步强化了生态分异；Ⅲ₄区仍以总初级生产力（ $q=0.59$ ）、土壤水分（ $q=0.58$ ）和年降水量（ $q=0.53$ ）为主导，体现了高寒草甸生态系统中以水分支撑植被生产力为核心的稳态维持机制；而Ⅲ₅区驱动结构最为单一，仅土壤水分（ $q=0.59$ ）具有显著解释力，其余因子影响微弱，反映出该区域生态系统受制于极端水分胁迫，结构简单、生态过程对环境变化高度敏感。

整体上，青海省生态环境质量格局是由水热条件、植被生产力与地形特征共同塑造，但在不同生态区中其作用途径与因子组合呈现明显的梯度特征与机制分异，东部草原生态区以水—植被耦合为主，西北部荒漠生态区表现为水热共控，而西部荒漠草原生态区则分别呈现能量主导型与水分唯一型等不同的响应模式。

交互探测结果进一步显示，各生态分区内任意两个驱动因子的交互作用均可显著增强对生态环境质量空间异质性的解释能力，交互关系主要表现为“双因子增强”或“非线性增强”，表明生态环境质量的形成是多重因子协同耦合作用的结果（图7）。具体来看，Ⅲ₁区总初级生产力与土壤水分的交互作用最强（ $q=0.79$ ），说明植被生长与水分供给的匹配程度是决定该区生态质量的关键。Ⅲ₂区年降水量与土壤水分交互作用显著（ $q=0.76$ ），降水的再分配过程通过土壤水分调控生态系统格局。Ⅲ₃区年降水量与

土壤水分交互解释力进一步提升($q=0.87$),突显该区生态系统对水分输入的极度依赖。Ⅲ₄区仍以总初级生产力与土壤水分的协同作用为主导($q=0.81$),再次印证水分—植被耦合机制在该区的重要性。Ⅲ₅区虽整体交互效应较弱,但土壤水分与年均

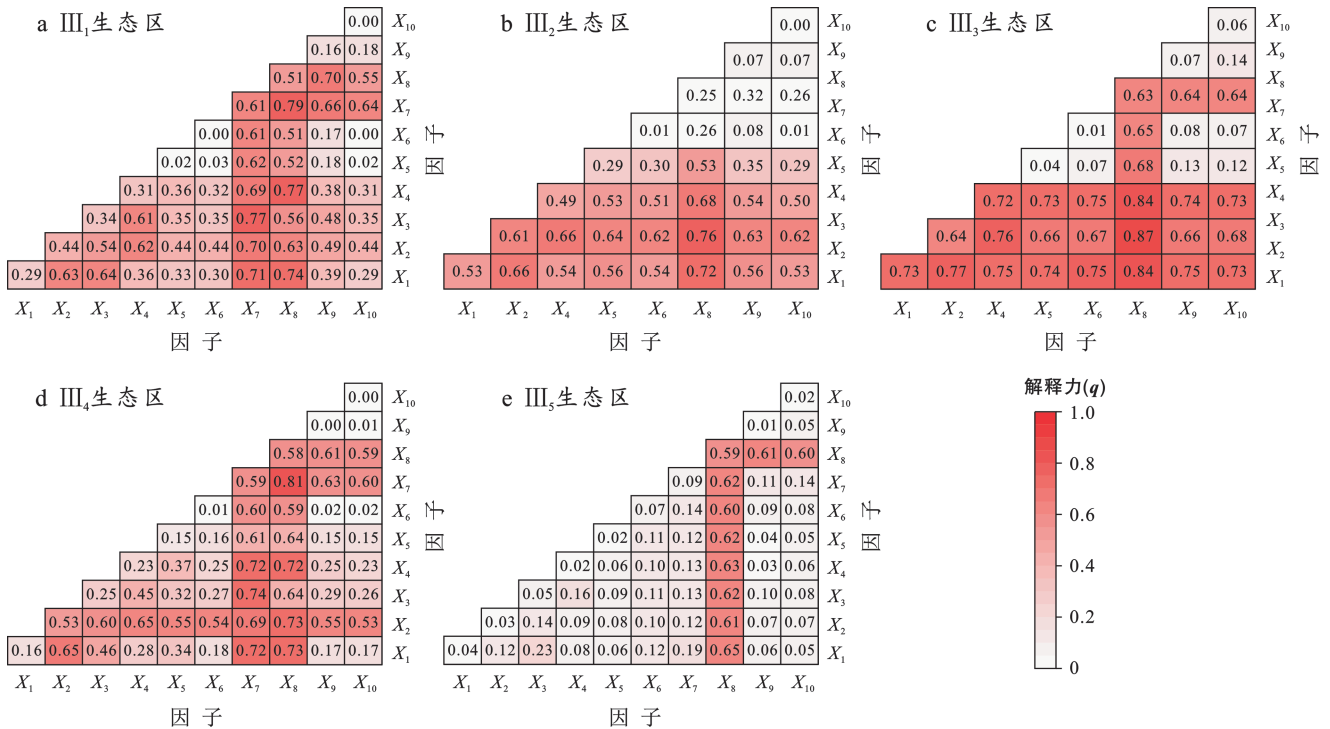
温度的交互($q=0.65$)仍揭示出温度调制下水分因子对该区域生态功能的影响。可见,青海省生态环境质量并非受单一环境因子控制,而主要取决于多因子间的交互作用,其中水分(如土壤水分与降水量)与植被因子的协同效应尤为突出。

表 3 不同生态区生态环境质量变化的驱动因子探测结果

Table 3 Detection results of driving factors of changes in ecological environment quality across different ecological zones

驱动因子	Ⅲ ₁ 生态区		Ⅲ ₂ 生态区		Ⅲ ₃ 生态区		Ⅲ ₄ 生态区		Ⅲ ₅ 生态区	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
年均温度	0.29*	6	0.53*	2	0.73*	1	0.16*	6	0.04*	5
年降水量	0.44*	3	0.61*	1	0.64*	3	0.53*	3	0.03*	6
年均蒸散发	0.34*	4	—	—	—	—	0.25*	4	0.05*	4
海拔	0.31*	5	0.49*	3	0.72*	2	0.23*	5	0.02*	7
坡度	0.02*	8	0.29*	4	0.04*	7	0.15*	7	0.02*	7
坡向	0.00	9	0.01*	7	0.01*	8	0.01*	8	0.07*	3
总初级生产力	0.61*	1	—	—	—	—	0.59*	1	0.09*	2
土壤水分	0.51*	2	0.25*	5	0.63*	4	0.58*	2	0.59*	1
人口密度	0.16*	7	0.07*	6	0.07*	5	0.00*	9	0.01	8
夜间灯光指数	0.00	9	0.00	8	0.06*	6	0.00*	9	0.02*	7

注:*表示 q 值通过 $p=0.05$ 的显著性检验。



注: X_1 表示年均温度; X_2 表示年降水量; X_3 表示年均蒸发量; X_4 表示海拔; X_5 表示坡度; X_6 表示坡向; X_7 表示总初级生产力; X_8 表示土壤水分; X_9 表示人口密度; X_{10} 表示夜间灯光指数。

图 7 不同生态区环境质量变化的驱动因子的交互探测结果

Fig.7 Interaction detection results of driving factors of environmental quality changes in different ecological zones

3 讨论

研究在遥感生态指数(RSEI)基础上引入盐分指

标,以增强模型对青海省盐渍化问题的敏感性^[14,26]。为解决单景影像归一化方法在长时序生态分析中存在的可比性差、计算结果波动大等问题^[12]采用全时

序归一化方法,提升生态指数在时间尺度上的一致性和稳定性。为验证 mRSEI 结果的可靠性,对其 5 个组成指标进行主成分分析(表 4)。结果显示,2000—2024 年第一主成分(PC₁)的特征值贡献率稳定在 70.27%~77.59%,表明 PC₁能够有效整合 5 个指标的主要信息。同时,各指标在 PC₁上的载荷值在不同年份间波动较小,说明其时序稳定性较高。具体而言,NDVI 与 WET 在 PC₁上表现为正载荷,说明植被覆盖和湿度对生态环境质量具有正向作用;而 NDBSI, LST 与 SI₃则为负载荷,反映出裸地干度、地表温度与盐度升高会在一定程度上降低生态质量。此外,空间上青海省生态环境质量呈现显著的分区差异^[4],Ⅲ₁和Ⅲ₄区整体生态状况较好,而Ⅲ₂区生态质量较差。这一差异主要源于Ⅲ₂区降水稀少、蒸发量大,且地表以盐碱地、沙漠和戈壁为主,植被稀疏、生态系统脆弱^[12]。

表 4 青海省 2000—2024 年 mRSEI 各指标主成分分析
Table 4 Principal component analysis of mRSEI indicators in Qinghai Province from 2000 to 2024

年份	PC ₁ 特征值 贡献率/%	PC ₁ 各指标载荷值				
		NDVI	WET	NDBSI	LST	SI ₃
2000	75.34	0.73	0.34	-0.29	-0.38	-0.36
2001	76.47	0.74	0.32	-0.31	-0.39	-0.32
2002	70.27	0.78	0.27	-0.29	-0.35	-0.33
2003	74.05	0.74	0.32	-0.29	-0.40	-0.32
2004	76.95	0.73	0.33	-0.32	-0.40	-0.32
2005	75.59	0.74	0.31	-0.33	-0.40	-0.30
2006	77.27	0.75	0.30	-0.32	-0.36	-0.34
2007	73.09	0.76	0.28	-0.30	-0.36	-0.35
2008	72.45	0.75	0.29	-0.29	-0.40	-0.33
2009	73.64	0.73	0.32	-0.31	-0.39	-0.33
2010	74.18	0.77	0.26	-0.33	-0.34	-0.32
2011	72.87	0.74	0.31	-0.33	-0.38	-0.32
2012	75.49	0.76	0.27	-0.32	-0.37	-0.33
2013	77.59	0.76	0.29	-0.31	-0.36	-0.33
2014	73.06	0.73	0.32	-0.30	-0.41	-0.31
2015	75.60	0.76	0.28	-0.31	-0.34	-0.34
2016	73.74	0.75	0.29	-0.30	-0.37	-0.36
2017	72.19	0.74	0.31	-0.31	-0.39	-0.32
2018	73.58	0.75	0.29	-0.33	-0.39	-0.29
2019	73.81	0.76	0.29	-0.33	-0.37	-0.31
2020	78.28	0.74	0.30	-0.33	-0.38	-0.32

注:NDVI为绿度;WET为湿度分量(湿度);NDBSI为干度指标(干度);LST地表温度(热度);SI₃为盐分指标(盐度)。

尽管本研究基于 mRSEI 指数对青海省多年生态环境质量进行了系统评估,但由于条件所限,未能开

展大规模地面同步观测以对遥感反演结果进行直接验证。为弥补这一不足,增强结论的可靠性,本研究将遥感分析结果与多项基于实地观测的研究成果进行比对讨论。如青海省生态环境厅发布的《2024 年生态环境状况公报》表明,青海省生态质量指数(EQI)为 55.49,三江源、祁连山、青海湖等重点生态功能区生态系统结构稳定,质量状况总体良好。该结论与本研究中生态环境质量高值区集中分布于三江源、祁连山地区的结果高度吻合。张琛悦等^[27]基于 2015 年青海省草原资源清查数据,通过实测地上生物量估算草地碳储量发现三江源地区植被碳储量最高,这与本研究中上述区域 mRSEI 值较高的空间分布特征相一致,从碳汇功能的角度支持了遥感评价结果的合理性。此外,本研究Ⅲ₄区生态环境质量呈现“东南高,西北低”的梯度特征,该格局与王喆等^[28]基于 2003—2022 年青海省生态气象站点监测数据所反映的草地地上生物量空间分异规律高度一致。综上所述,通过与多项基于实地监测的研究结果相互印证,表明本研究构建的 mRSEI 指数在青海省复杂生态系统背景下具有良好的表征能力,能够较为可靠地反映区域生态环境质量的真实状况。

从时间序列来看,2000—2024 年青海省整体生态环境质量呈缓慢上升趋势。其中,2023 年生态质量最佳,其次为 2009 和 2018 年,而 2016 年为最低值,表明该年生态状况相对较差。mRSEI 值的变化与青海省历年来生态保护政策的实施阶段高度契合,尤其是 2008,2017 和 2023 年启动的重大生态工程,对区域生态质量提升发挥了显著作用^[4]。相较之下,2016 年生态质量的下降可能与该年全省年均气温较常年偏高 1.4 °C 密切相关。温度显著升高不仅增强了地表蒸发作用,造成土壤水分亏缺、植被失水压力加大,抑制了植被的生长。同时,高温条件导致 mRSEI 中干度指数上升,湿度指数下降,而干度指数对 mRSEI 具有负向作用、湿度指数具有正向作用,这种双重效应叠加最终使 2016 年的 mRSEI 值显著偏低。

因子探测器与交互探测结果表明,青海省生态环境质量主要受总初级生产力、土壤水分、年降水量、年均温度及海拔等自然因子的驱动,且在不同生态功能分区中呈现显著的地域差异。其中,Ⅲ₁和Ⅲ₄区对 NPP、土壤水分和降水量依赖度较高,表明植被生长状况与水分供给是维系该区域生态质量的关键要素,与主成分分析结果中绿度指数贡献率最高具有一致性(表 2)。已有研究^[29]亦指出,在西北干旱与半干旱地区,土壤水分是限制植被生长的主要因子;

在三江源冻土区,生态环境质量变化主要受降水、气温和土壤湿度等自然因子驱动,人类活动的影响相对较弱^[30]。相比之下,Ⅲ₂区和Ⅲ₃区对气候因子(年均温度、年降水量)和地形因子(海拔)的响应更为显著,这与李倩琳等^[16]在柴达木盆地的研究结果一致,其主要原因在于海拔变化会调节区域水热条件,进而影响mRSEI中的湿度与干度指标,最终改变生态环境质量。值得注意的是,Ⅲ₅区对大多数自然因子的响应较弱,仅土壤水分具有一定解释力,这可能与该区域面积较小,气候与海拔特征差异不显著有关,而土壤水分在多因子共同作用下表现出较强的空间异质性。

人类活动对生态环境质量的探测结果显示(表3),人口密度与夜间灯光指数在各生态分区中的解释力(q 值)普遍较低且排序靠后。进一步分析发现,

人口密度的影响呈现“东高西低”的空间分异特征,Ⅲ₁区因农牧交错与旅游活动影响,人为驱动相对最强,而Ⅲ₄区与Ⅲ₅区因高寒缺氧、人迹罕至,人类活动的影响接近于零。夜间灯光指数在各生态分区的解释力趋近于零。考虑上述两项指标对生态环境质量的解释力较弱,可能由于其空间分辨率不足,难以反映区域内人类活动的精细差异。为弥补这一不足,进一步引入30 m分辨率的土地利用/覆被数据,重点分析耕地扩张,草地退化,不透水面增加及湿地减少等典型变化区域的mRSEI变化趋势。结果表明(图5,图8),这些区域的mRSEI多处于显著或不显著变差状态,说明土地利用/覆被数据能够更精细地刻画人类活动对生态系统的局部影响。综上所述,尽管人类活动对生态环境质量的作用虽总体弱于自然因子,但在局部区域仍是重要驱动力。

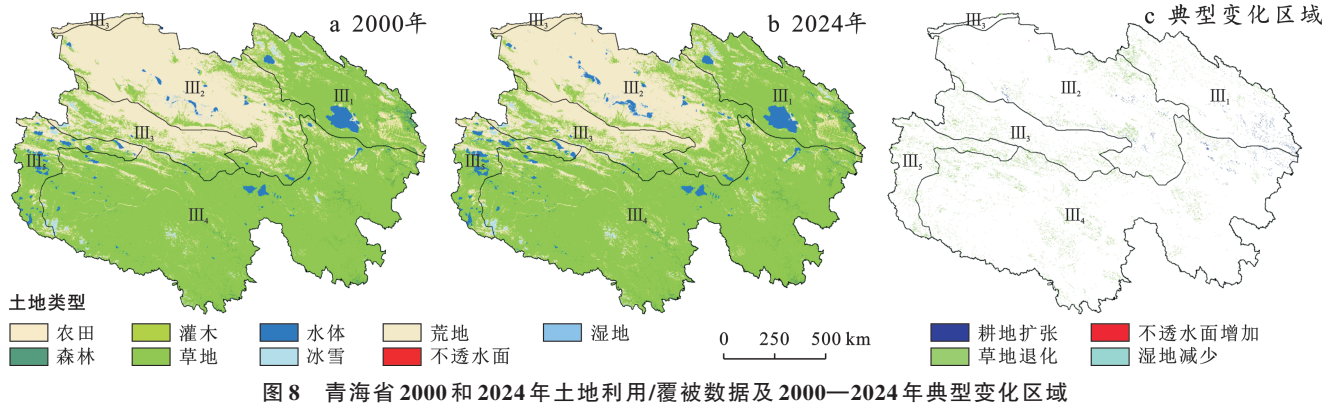


图8 青海省2000和2024年土地利用/覆被数据及2000—2024年典型变化区域

Fig. 8 Land use/cover data in 2000 and 2024, and typical change areas in Qinghai Province during 2000—2024

4 结论

(1) 2000—2024年青海省生态环境质量整体呈缓慢上升趋势,除Ⅲ₅外,其余生态功能区的环境质量均有所改善。

(2) 青海省生态环境质量整体处于“中等”水平,且以低波动与相对低波动为主;从空间格局来看,Ⅲ₁区、Ⅲ₄区与Ⅲ₅区生态质量相对较好且稳定性较高,而Ⅲ₂区则表现为生态质量较低,稳定性相对较弱。

(3) 生态环境质量的驱动因子具有显著的区域差异性:Ⅲ₁和Ⅲ₄区主要由总初级生产力、土壤水分和年降水量驱动;Ⅲ₂和Ⅲ₃区主要受年均温度、海拔和年降水量影响;而Ⅲ₅区的生态质量变化则主要受土壤水分驱动。

本研究基于地理探测器模型,主要识别了青海省生态环境质量空间异质性的自然驱动因子,尚未深入探讨其作用机制。未来研究应引入生态保护工程、生物多样性等关键变量,进一步解析不同生态功

能分区生态环境演变的驱动机制,为区域生态保护与可持续发展提供更具针对性的科学支撑。

参考文献 (References)

- [1] Bai Tingting, Cheng Jie, Zheng Zihao, et al. Drivers of eco-environmental quality in China from 2000 to 2017 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136408.
- [2] 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.
- [3] 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 Wei, Du Peijun, Guo Shanchuan, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(2): 299-317.
- [4] 唐文家, 张紫萍, 张志军, 等. 2000—2020年青海省生态环境质量时空变化[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(5):

- 229-237.
- Tang Wenjia, Zhang Ziping, Zhang Zhijun, et al. Spatial-temporal changes of ecological environment quality in Qinghai Province from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(5):229-237.
- [5] 朱殿珍, 初磊, 马帅, 等. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 308-315.
- Zhu Dianzhen, Chu Lei, Ma Shuai, et al. Tradeoff and synergistic relationship among ecosystem services [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 308-315.
- [6] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望: 以青藏高原为例[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(5):1582-1593.
- Duan Quntao, Luo Lihui. Summary and prospect of spatialization method of human activity intensity: Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5):1582-1593.
- [7] 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.
- [8] 田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(2):816-827.
- Tian Zhihui, Yin Chuanxin, Wang Xiaolei. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2):816-827.
- [9] 武旭, 王勃砚, 任伟, 等. 2000—2022年黄河流域甘肃段生态环境质量与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(2):353-364.
- Wu Xu, Wang Boyan, Ren Wei, et al. Ecological environment quality and the influencing factors in Gansu section of Yellow River basin during 2000—2022 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(2):353-364.
- [10] 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 Jie, Ma Jiali, Xie Feifei, 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.
- [11] Zheng Zihao, Wu Zhifeng, Chen Yingbiao, et al. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814:152595.
- [12] Lu Fangyuan, Zhang Chen, Cao Haoyu, et al. Assessment of ecological environment quality and their drivers in urban agglomeration based on a novel remote sensing ecological index [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113104.
- [13] 温春晖, 龙腾飞. 2000—2022年青藏高原IRSEI指数数据集[J]. *中国科学数据*, 2025, 10(2):89-101.
- Wen Chunhui, Long Tengfei. Improved remote sensing ecological index dataset of the Qinghai Tibet Plateau from 2000 to 2022 [J]. *China Scientific Data*, 2025, 10(2):89-101.
- [14] 张思源, 岳楚, 袁国礼, 等. 基于ENDVI-SI₃特征空间的盐渍化反演模型及风险评估[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(4):136-143.
- Zhang Siyuan, Yue Chu, Yuan Guoli, et al. Salinization inversion model based on ENDVI-SI₃ characteristic space and risk assessment [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(4):136-143.
- [15] 刘丹, 唐嫚. 柴达木盆地土壤盐分空间分布及驱动因子分析[J]. *青海科技*, 2024, 31(6):85-92.
- Liu Dan, Tang Man. Analysis of the spatial distribution and driving factors of soil salinity in Qaidam basin [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2024, 31(6):85-92.
- [16] 李倩琳, 沙占江. 气候变暖背景下柴达木盆地生态环境质量遥感监测[J]. *生态科学*, 2022, 41(6):92-99.
- Li Qianlin, Sha Zhanjiang. Remote sensing monitoring of ecological environment quality in Qaidam Basin under the background of climate warming [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(6):92-99.
- [17] 贾天朝, 胡西武, 杨海娟. 青海省生态安全水平动态演化特征及影响因素研究[J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(3):25-32.
- Jia Tianchao, Hu Xiwu, Yang Haijuan. Dynamic evolution characteristics and influencing factors of ecological security level in Qinghai Province [J]. *Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 40(3):25-32.
- [18] 陈灵芝. 中国植物区系与植被地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Chen Lingzhi. *Flora and Vegetation Geography of China* [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [19] Xu Hanqiu, Wang Yifan, Guan Huade, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2345.
- [20] 康帅直, 穆琪, 赵永华, 等. 黄土高原神府资源开采区生态环境质量时空格局特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2781-2792.
- Kang Shuaizhi, Mu Qi, Zhao Yonghua, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of ecological envi-

- ronmental quality in Shenfu mining area of Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2781-2792.
- [21] 常秀红, 欧巧明, 王方, 等. 黄土高原退耕还林(草)以来土壤保持功能与植被关系探究[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 189-196.
- Chang Xiuhong, Ou Qiaoming, Wang Fang, et al. Exploration of the relationship between soil conservation function and vegetation since the return of farmland to forest (grassland) on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 189-196.
- [22] 奥勇, 汪雅, 王晓峰, 等. 2001—2020年间河南省郑州市生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J]. *自然资源遥感*, 2025, 37(1): 102-112.
- Ao Yong, Wang Ya, Wang Xiaofeng, et al. Spatio-temporal changes of ecological quality and their driving factors in Zhengzhou City over the last 20 years [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2025, 37(1): 102-112.
- [23] 袁江龙, 刘晓煌, 李洪宇, 等. 2000—2022年天山生态环境质量时空变化和驱动力分析[J]. *地质通报*, 2025, 44(8): 1448-1461.
- Yuan Jianglong, Liu Xiaohuang, Li Hongyu, et al. Spatiotemporal dynamics of the ecological condition and the associated affecting factors based on mRSEI in the Tianshan Mountains from 2000 to 2022 [J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(8): 1448-1461.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 徐景丰, 周磊, 窦世卿, 等. 顾及干旱区特征的敦煌市生态环境质量动态监测与评价[J]. *无线电工程*, 2022, 52(9): 1602-1608.
- Xu Jingfeng, Zhou Lei, Dou Shiqing, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment quality in Dunhuang City considering the characteristics of arid area [J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(9): 1602-1608.
- [27] 张琛悦, 赵霞, 辛玉春, 等. 青海省草地生态系统碳储量及其分布特征[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(2): 286-292.
- Zhang Chenyue, Zhao Xia, Xin Yuchun, et al. Carbon storage and distribution of grassland ecosystems in Qinghai Province [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(2): 286-292.
- [28] 王喆, 王镜, 颀耀文, 等. 三江源地区草地地上生物量时空变化及其对气候变化的响应[J]. *草业学报*, 2026, 35(1): 1-12.
- Wang Zhe, Wang Jing, Xie Yaowen, et al. Spatial and temporal variation of grassland above-ground biomass and its response to climate change in the three-river source region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(1): 1-12.
- [29] 高翔, 闫安, 李杰, 等. 基于遥感生态指数改进模型的祁连山国家公园生态环境质量变化[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(6): 744-753.
- Gao Xiang, Yan An, Li Jie, et al. The changes of ecological environment quality in Qilian Mountain National Park based on the improved model of remote sensing ecological index [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, 60(6): 744-753.
- [30] 李姝贞, 赵尚民. 三江源不同冻土区生态环境质量时空演变及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(6): 3747-3759.
- Li Shuzhen, Zhao Shangmin. Analysis on spatial-temporal evolution and driving forces of ecological environment quality in different frozen ground regions of the three-river headwater region [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6): 3747-3759.