

2000—2024 年黄河源园区生态环境质量 变化及其驱动因素

韩冰成¹, 魏玉明¹, 党星海^{1,2}, 郝君明¹

(1. 兰州理工大学 土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃建筑职业技术学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: [目的] 探究 2000—2024 年三江源国家公园黄河源园区生态环境质量的变化状况及其驱动因素, 为该区域的生态环境保护 and 可持续发展提供科学依据。[方法] 基于 GEE 平台获取并处理 MODIS 影像, 构建遥感生态指数(RSEI), 监测黄河源园区 2000—2024 年生态环境质量的变化, 并运用地理探测器模型定量分析气候、地形与人类活动因素对其变化的影响。[结果] ① 2000—2024 年, 黄河源园区年均 RSEI 为 0.527~0.689, 生态环境质量呈现波动上升趋势, 上升速率约为 0.003 1/a; 从空间分布上来看, 生态环境质量呈现“北部差, 南部优”的分布格局。② 黄河源园区生态环境质量提高的面积占比为 81.50%, 远高于降低的面积(9.38%), 生态环境显著改善; ③ 单因子探测中降水因子的影响力最大, 其次是温度与 DEM 因子; 交互因子探测中降水与温度交互作用的影响力最大, 降水与 DEM 因子交互作用影响力次之; 气候、地形因子的影响力逐步减弱, 人类活动因子影响力逐步增强。[结论] 黄河源园区 2000—2024 年生态环境不断改善, 降水、温度和 DEM 是影响其生态环境质量变化的主要驱动因素, 人类开展的生态保护与修复工作成效显著, 未来应在保证研究区生态持续改善的基础上逐步推进重难点区域的生态治理。

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数; 地理探测器; 黄河源园区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0167-11

中图分类号: X821, X87

文献参数: 韩冰成, 魏玉明, 党星海, 等. 2000—2024 年黄河源园区生态环境质量变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 167-177. Han Bingcheng, Wei Yuming, Dang Xinghai, et al. Changes and its driving factors of ecological environment quality in Yellow River Source Park from 2000 to 2024 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 167-177.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.031

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.031

Changes and its driving factors of ecological environment quality in Yellow River Source Park from 2000 to 2024

Han Bingcheng¹, Wei Yuming¹, Dang Xinghai^{1,2}, Hao Junming¹

(1. Civil and Hydraulic Engineering College, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Gansu Vocational College of Architecture, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: [Objective] The changes in ecological environment quality and their driving factors in the Yellow River Source Park of the Three-River-Source National Park from 2000 to 2024 were investigated in order to provide a scientific basis for ecological protection and sustainable development in this region. [Methods] Based on the Google Earth Engine platform, MODIS images were acquired and processed to construct remote sensing ecological index (RSEI) for monitoring changes in ecological environment quality in the Yellow River Source Park from 2000 to 2024. Additionally, the geodetector model was utilized to quantitatively analyze the effects of climate, topography, and human activities on these changes. [Results] ① From 2000 to 2024, the annual mean RSEI in the Yellow River Source Park ranged between 0.527 and 0.689, showing a fluctuating upward trend with an average increase rate of approximately 0.003 1 per year. Spatially, the ecological environment quality exhibited

收稿日期: 2025-09-12

修回日期: 2025-11-01

采用日期: 2025-11-03

资助项目: 甘肃省科学技术厅重大专项“黄河上游黄土滑坡智能识别与多因素耦合灾变机理研究”(23ZDFA007); 国家自然科学基金项目“基于 InSAR 技术的祁连山多年冻土区热融滑塌稳定分析和灾害风险预测”(42461019)

第一作者: 韩冰成(2000—), 男(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术集成与应用。Email: 1811849347@qq.com。

通信作者: 党星海(1972—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 硕士, 教授, 主要从事测绘工程与 3S 技术应用等方面的研究。Email: dxh@lut.edu.cn。

a distribution pattern of ‘poor in the north and good in the south’. ② The area with improved ecological environment quality accounted for 81.50%, which was significantly higher than the degraded area (9.38%), indicating remarkable ecological improvement. ③ In single-factor detection, precipitation had the strongest explanatory power, followed by temperature and DEM. In interaction detection, the interaction between precipitation and temperature had the greatest influence, followed by the interaction between precipitation and DEM. The influence of climate and topographic factors gradually weakened, while the impact of human activities progressively strengthened. [Conclusion] From 2000 to 2024, the ecological environment quality in the Yellow River Source Park continuously improved. Precipitation, temperature, and DEM are the main driving factors affecting ecological quality, and the ecological protection and restoration efforts undertaken by humans have achieved remarkable results. Future work should focus on gradually advancing ecological management in key and challenging areas while ensuring the continuous improvement of the ecological environment in the study area.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; geodetector; Yellow River Source Park

随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,冰川消融,空气污染,土地退化及海洋污染等生态环境问题日益严重,生态环境显著恶化。为保障生态安全、推进生态文明建设,构建一套准确、科学且高效的生态环境质量评价体系成为生态环境保护的关键任务之一。遥感技术因其观测范围广,周期性强等优势,成为监测生态环境变化的重要工具^[1-2]。基于遥感技术的单因子生态评价指标(如归一化植被指数、叶面积指数、地表温度指数等)通常仅能反映区域某一方面的生态特征,不能整体性地体现区域生态环境状况^[3]。为此,相关部门与学者开始探索融合多种生态因子的综合型生态评价指标。中国生态环境部发布的《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)中提出了一种适用于县级及以上区域的生态环境综合评价指标(ecological index, EI)。国内有学者基于EI指数在不同区域开展了广泛研究^[4-6],发现EI指数的生态指标在一些复杂区域存在获取难度大,指标权重设置合理性不足等问题^[7]。因此,集生态指标易获取、完全基于遥感技术、权重不受人为因素影响等^[8]优点的遥感生态指数(RSEI)逐渐成为新的研究方向之一。张华等^[9]利用RSEI对祁连山国家公园的生态环境质量进行了评价,发现1989—2019年该区域RSEI呈“先降后升”的变化趋势,畜牧业是影响其生态环境质量变化的重要因素。梁巧玲等^[10]基于Landsat数据构建RSEI,评价了元谋干热河谷2000—2020年的生态环境质量,结果表明生态环境质量呈现“先降后升”的变化趋势,绿度指标和土地利用类型是生态环境质量变化的主要影响因素,且多因子交互作用影响显著大于单因子作用。三江源国家公园黄河源园区作为中国首批设立的国家公园,位于青海省南部、青藏高原腹地,是黄河源头汇水区和中国重要的生态安全屏障,具有极高的

生态和社会价值^[11]。该地区高寒生态系统典型独特、类型多样,加之气候条件差等原因,导致生态环境脆弱、生态修复困难,同时面临草地退化、土地盐碱化及黑土滩等环境问题。然而,针对该地区的生态环境监测研究多集中于植被覆盖度、净初级生产力或单一植被指数等方面^[12-13],综合型的生态环境质量评价研究少之又少。

基于此,本研究以黄河源园区为研究区,运用Google Earth Engine(GEE)平台的MODIS系列遥感影像建立RSEI模型,系统分析该区域2000—2024年(6—9月)生态环境质量的时空变化特征,并借助地理探测器模型探究其生态环境质量变化的驱动因素。研究结果旨在为黄河源园区的生态空间修复、治理和保护工作提供科学支撑,同时也为生态条件相似区域的生态监测和评价提供理论参考。

1 研究区概况

三江源国家公园黄河源园区位于青海省果洛州玛多县境内,地理坐标为 $97^{\circ}01'20''\text{E}$ — $99^{\circ}14'57''\text{E}$, $33^{\circ}55'05''\text{N}$ — $35^{\circ}28'15''\text{N}$ (图1)。园区包括扎陵湖-鄂陵湖和星星海2个保护分区,总面积约 $1.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区地势总体呈现四周高,中间低的特征,中部地区海拔自西向东逐渐下降,高程在4 138~5 186 m之间。黄河源园区河网密布、湖泊众多,降水集中在暖季,年降水量100~200 mm。生态系统以高寒湿地、高寒草甸和高寒草原为主体。全年无绝对无霜期,多年平均气温在 1°C 左右。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

基于GEE平台获取MODIS系列遥感数据,包括地表反射率产品(MOD09A1)、陆地表面温度产品

(MOD11A2)和植被指数产品(MOD13A1),对研究区 2000—2024 年 6—9 月的影像进行云量筛选、裁剪、重采样等预处理,最终拼接合成空间分辨率为 500 m 的逐年遥感影像数据集。为避免黄河源园区

大面积水体对湿度分量的影响,试验在计算各生态指标之前对遥感影像实施了水体掩膜处理^[11]。此外,研究所用数据还包括气候数据、地形数据和人类活动数据三大类,具体数据及来源见表 1。

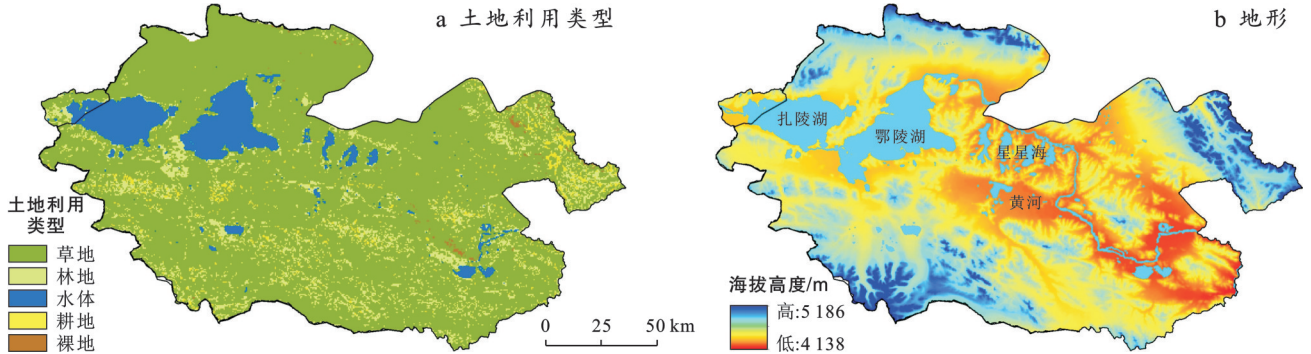


图 1 研究区土地利用类型及地形
Fig.1 Land use types and topography in study area

表 1 数据及来源
Table 1 Data and sources

数据类型	数据名称	空间分辨率/m	年份	数据来源
遥感数据	MOD09A1	500	2000—2024	美国地质调查局(https://www.usgs.gov/)
	MOD11A2	1 000	2000—2024	
	MOD13A1	500	2000—2024	
气候数据	气温	1 000	2000—2020	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)
	降水	1 000	2000—2020	
地形数据 (SRTM)	海拔	30	2000	NASA Earthdata(https://www.earthdata.nasa.gov/)
	坡度	30		
	坡向	30		
人类活动数据	土地利用类型	300	2000—2020	时空三极环境大数据平台(https://poles.tpdc.ac.cn/)
	人口密度	1 000	2000—2020	WorldPop

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数的构建

RSEI是将预处理后的绿色^[14](NDVI)、湿度^[15](WET)、热度^[16](LST)与干度^[17](NDBSI)4个生态因子进行主成分分析耦合,并采用集中了4个生态因子特征信息的PC₁来代表区域生态环境质量的模型,计算公式为

$$RSEI_0 = PC_1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (1)$$

为了便于指标的度量和比较,需对RSEI₀进行正规化处理,正规化公式为

$$XX_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

式中:XX_i为正规化后的单一指标;X_i表示单一指标的原始值;X_{min}和X_{max}分别表示单一指标原始值中的最小值和最大值。

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0min}}{(RSEI_{0max} - RSEI_{0min})} \quad (3)$$

式中:RSEI₀为初始遥感生态指数;PC₁表示主成分分析的第一主成分;RSEI_{0min}和RSEI_{0max}分别表示目标年份RSEI₀的最小值和最大值;RSEI为正规化后的遥感生态指数,取值范围为[0,1],RSEI值越接近1,表示生态环境质量越好。

其中,采用归一化水体指数NDWI进行水体掩膜,绿色因子采用MOD13A1产品,湿度因子和干度因子采用MOD09A1数据的波段计算得出,热度因子采用MOD11A2数据计算得出,计算公式如下:

$$NDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (4)$$

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2} \quad (5)$$

$$SI = \frac{(SWIR1 + Red) - (Blue + NIR1)}{(SWIR1 + Red) + (Blue + NIR1)} \quad (6)$$

$$LST = 0.02DN - 273.15 \quad (7)$$

$$IBI = \frac{\left\{ \frac{2SWIR1}{SWIR1 + NIR1} - \left[\frac{NIR1}{NIR1 + Red} + \frac{Green}{Green + SWIR1} \right] \right\}}{\left\{ \frac{2SWIR1}{SWIR1 + NIR1} + \left[\frac{NIR1}{NIR1 + Red} + \frac{Green}{Green + SWIR1} \right] \right\}} \quad (8)$$

$$WET = 0.1147Red + 0.2489NIR1 + 0.2408Blue + 0.3132Green - 0.3122NIR2 - 0.6416SWIR1 - 0.5087SWIR2 \quad (9)$$

式中: NIR1, NIR2, Red, Blue, Green, SWIR1, SWIR2 分别为 MOD09A1 的近红外 1 波段、近红外 2 波段、红波段、蓝波段、绿波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段; SI 为裸土指数, IBI 为应用建筑指数; DN 为 MOD11A2 的像元灰度值。

2.2.2 主成分分析

主成分分析是一种基于正交线性变换的多变量统计分析技术,其核心在于通过降维处理将多个变量转化为少数几个互不相关的综合指标,即主成分^[18]。本研究使用主成分分析耦合 4 个生态因子,依据各因子对主成分的贡献度来自动确定权重,有效避免了人为确定权重的主观性,确保了评价结果的客观性与科学性。

2.2.3 Theil-Sen 斜率估算+Mann-Kendall 检验

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法对测量误差和离群数据不敏感^[19],且对数据误差具有较强的抵抗能力^[20],适用于长时间序列数据的趋势分析。Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计的时间序列趋势性检验方法,可以作为 Theil-Sen 斜率估计的有效补充,用来判读趋势的统计显著性^[21]。具体计算公式参考文献^[19]。

2.2.4 Pearson 相关性分析

皮尔逊相关性分析是一种用于量化 2 个连续变量之间线性关系强度和方向的统计方法。本研究采

用 Pearson 相关系数来量化 RSEI 与各指标之间的相关性。计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

式中: r 表示变量 X 和 Y 的相关系数; X_i 和 Y_i 分别为 2 个变量的第 i 个观测值; \bar{X} 和 \bar{Y} 为变量的平均值; n 为样本量。 $r > 0$ 表示变量之间呈现正相关,反之为负相关; r 的绝对值越大,表示相关性越强。

2.2.5 地理探测器模型

本研究使用了因子探测和交互作用探测 2 种探测器,因子探测器探测 RSEI 的空间分异性及驱动因子对 RSEI 的解释力强度,用 q 值表示, $q \in [0, 1]$ 。计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \theta_h^2}{N \theta^2} \quad (11)$$

式中: N_h 和 N 分别为层 h 和全区域的样本数; L 为 RSEI 或驱动因子的分层; θ_h^2 和 θ^2 分别为层 h 和全区的 RSEI 方差。

交互探测器是评估不同驱动因子之间是否存在交互作用以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等。交互探测共产生 5 种结果,具体判断依据如表 2 所示。

表 2 双因子交互作用类型

Table 2 Types of two-factor interaction

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
$q(X_1 \cap X_2) > \max [q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$\min [q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max [q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 主成分分析与相关性分析

由表 3 可知,2000—2024 年黄河源园区 4 个指标

的第一主成分(PC₁)呈现以下特征: ①PC₁ 的贡献率均高于 60%,说明其较好地集中了 4 个指标的主要信息。②PC₁ 中的 NDVI 和 WET 结果都为正值, LST 和 NDBSI 结果都为负值,表示绿度和湿度对生态环

境质量起正向作用,热度和干度起负向作用,与现实情况相符。本研究以 6 a 为间隔,计算 PC₁ 中 4 个指标与 RSEI 的 Pearson 相关系数均值矩阵(表 4),结果表明,RSEI 与 NDVI, WET 呈正相关,与 NDBSI, LST 呈负相关;4 个指标之间的相关系数普遍较低,说明因子之间信息重叠度较小,未出现明显冗余。因此,采用 PC₁ 创建 RSEI 能够有效表征黄河源园区的生态环境质量状况。

表 3 黄河源园区主成分分析结果
Table 3 Results of principal component analysis in Yellow River Source Park

年份	PC ₁				贡献率/%
	NDVI	WET	LST	NDBSI	
2000	0.804	0.321	-0.387	-0.002	60.82
2006	0.907	0.177	-0.242	-0.057	62.60
2012	0.827	0.206	-0.418	-0.185	65.38
2018	0.764	0.292	-0.490	-0.063	67.66
2024	0.891	0.178	-0.356	-0.048	72.95

3.2 生态环境质量时空变化特征

基于 RSEI 值将生态环境质量划分为差[0,0.2]、较差(0.2,0.4]、中等(0.4,0.6]、良(0.6,0.8]、优(0.8,1]

5 个等级。从空间分布上来看(图 2),黄河源园区近 25 a 的生态环境质量呈现出“北部差,南部优”的空间格局,北部地区以较差和中等等级为主,南部地区则以良和优等级为主,南部优质生态区域逐渐向北部区域扩张。

表 4 黄河源园区各指标与 RSEI 的相关系数矩阵
Table 4 Correlation matrix between RSEI and different factors in Yellow River Source Park

指标	相关系数				
	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
NDVI	1.000	0.259	-0.677	-0.322	0.922
WET	0.259	1.000	-0.671	-0.551	0.426
NDBSI	-0.677	-0.671	1.000	0.368	-0.794
LST	-0.322	-0.551	0.368	1.000	-0.346

生态环境质量等级统计结果(表 5)表明,研究区生态环境质量以中等和良为主。其中,良等级面积占比为 45.62%~58.79%,整体呈先降后升的变化趋势;中等等级面积占比为 27.14%~42.28%,整体表现为先升后降;差、较差和优等级面积占比相对较小,其中差和较差等级面积占比波动下降,优等级的面积占比呈波动上升趋势。

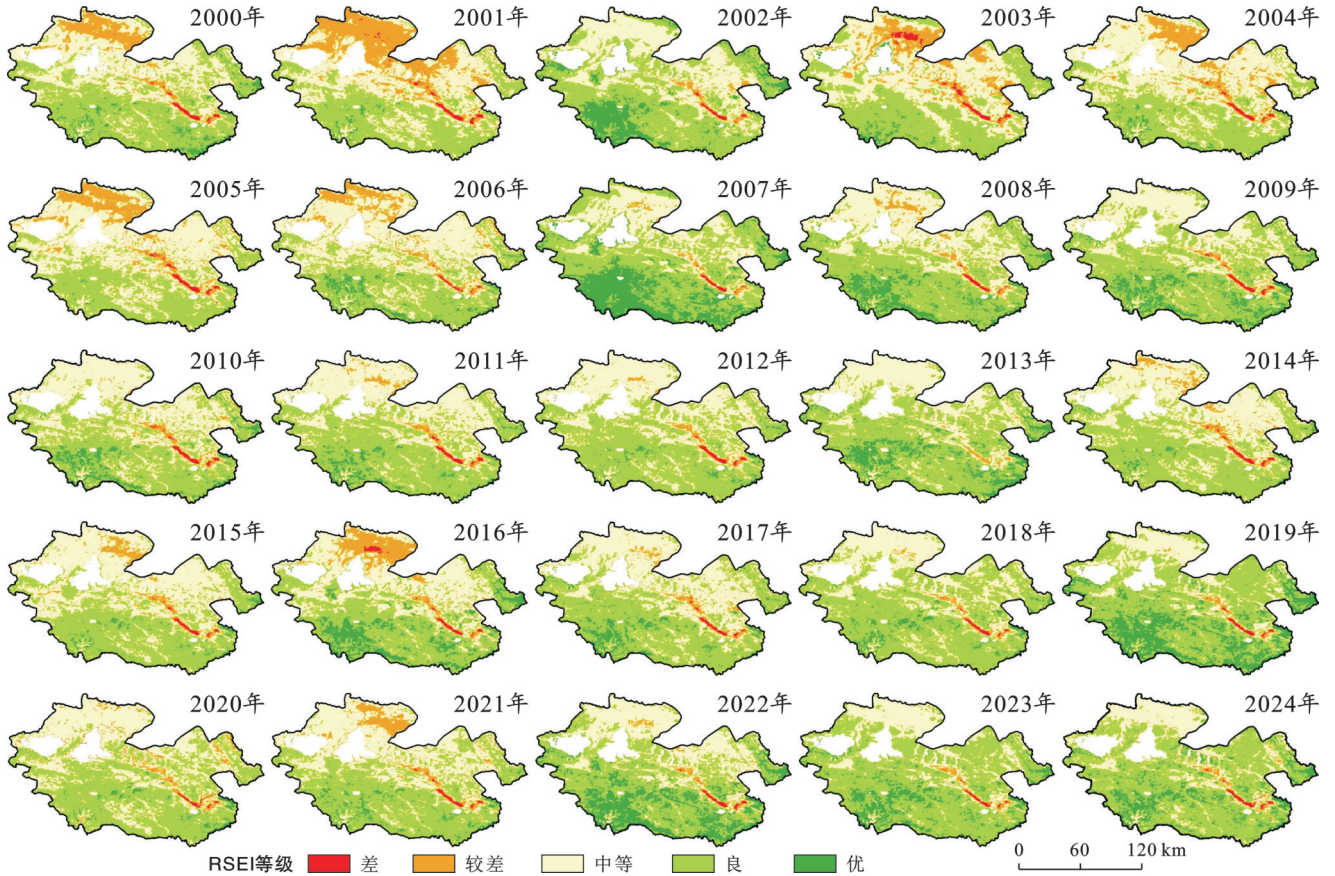


图 2 2000—2024 年黄河源园 RSEI 等级分布

Fig. 2 Distribution of RSEI grades in Yellow River Source Park (2000—2024)

表 5 2000—2024 年黄河源园区生态环境质量等级面积及占比

Table 5 Area and proportion of ecological environment quality grades in Yellow River Source Park (2000—2024)

等级	2000 年		2006 年		2012 年		2018 年		2024 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	135.25	0.62	62.00	0.28	120.25	0.55	88.75	0.41	130.00	0.60
较差	2 163.00	9.84	2 170.00	9.96	525.50	2.42	442.25	2.03	533.00	2.45
中等	8 744.50	39.79	10 525.50	48.31	9 193.50	42.28	7 616.50	35.03	5 896.00	27.14
良	10 025.25	45.62	8 081.75	37.09	11 434.00	52.59	12 612.50	58.01	12 771.00	58.79
优	907.25	4.13	949.50	4.36	470.25	2.16	981.00	4.51	2 393.75	11.02

2000—2024 年研究区的 RSEI 年均值呈现波动上升的变化趋势(图 3), 上升速率为 0.003 1/a。其中, 最低值为 2001 年的 0.527, 最高值为 2019 年的 0.689。总体而言, 黄河源园区在过去 25 a 间生态环境质量改善趋势明显, 整体质量持续提高。

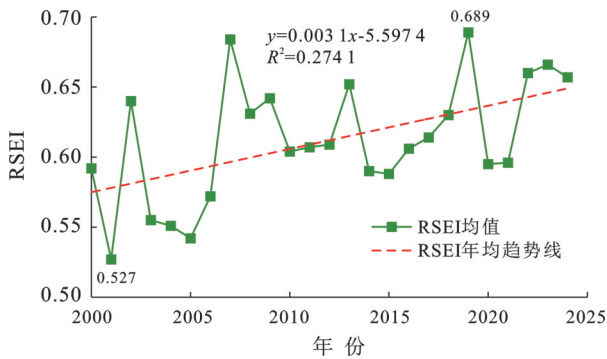


图 3 黄河源园区 2000—2024 年 RSEI 均值变化
Fig.3 Changes in mean RSEI of Yellow River Source Park (2000—2024)

3.3 生态环境质量趋势变化特征

根据 2000—2024 年黄河源园区生态环境质量 (RSEI), 将其变化划分为显著降低、轻微降低、不变、轻微提高与显著提高 5 个等级(表 6)。从趋势变化来看, 研究区生态环境质量呈现提高和降低并存的空间格局(图 4), RSEI 变化类型以轻微提高为主, 面积占比为 58.88%, 主要分布在研究区中部和北部的低海拔地区, 土地覆盖类型以草地为主; 显著提高的区域面积占比为 22.62%, 主要分布在研究区中部靠近水体的低海拔地区, 土地覆盖类型同样以草地为主; 不变、轻微下降和显著下降区域面积较少, 总占比为 18.5%, 零星分布于研究区周边高海拔林地地带。

3.4 生态环境质量演变特征

以 2005 年(建立青海三江源国家级自然保护区)和 2016 年(试行三江源国家公园体制工作)2 个关键年份为节点, 将研究期划分为 4 个阶段: 自然生长阶

段(2000—2005 年)、自然保护区阶段(2005—2016 年)、国家公园阶段(2016—2024 年)和整体阶段(2000—2024 年)。各阶段研究区 RSEI 年均值变化速率分别为 -0.007 5, 0.000 7, 0.005 4, 0.003 1/a, 表明自然保护区与国家公园的设立显著促进了研究区生态环境质量的改善。

表 6 黄河源园区 2000—2024 年 RSEI 趋势变化统计
Table 6 Statistics of RSEI trend changes in Yellow River Source Park (2000—2024)

分类标准	变化类型	面积/km ²	面积占比/%
$\beta < 0, Z < -1.96$	显著降低	51.00	0.24
$\beta < 0, -1.96 < Z$	轻微降低	1 983.50	9.14
$\beta = 0, Z = 0$	不变	1 978.25	9.12
$\beta > 0, -1.96 < Z < 1.96$	轻微提高	12 771.50	58.88
$\beta > 0, Z > 1.96$	显著提高	4 907.00	22.62

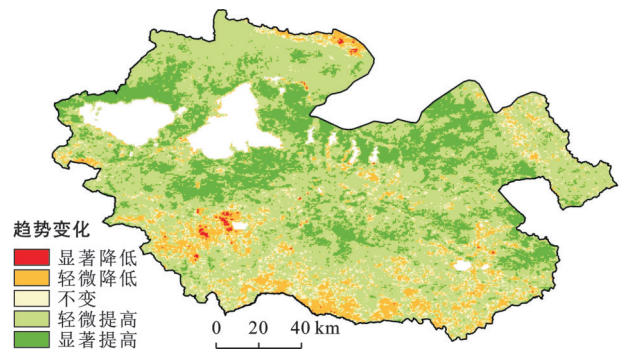


图 4 黄河源园区 2000—2024 年 RSEI 趋势变化频分布
Fig.4 Distribution of trend changes of RSEI in Yellow River Source Park (2000—2024)

不同阶段 RSEI 等级变化(表 7)表明, 2000—2005 年研究区生态环境改善区域面积占比为 1.55%, 恶化区域面积占比 24.10%, 整体呈现显著恶化趋势。空间分布上(图 5a), 改善区域零星分布在研究区西北部, 恶化区域在研究区全境均有分布。这主要归因于 2005 年之前研究区缺乏持续有效的生态保护措施, 加上盲目发展数量型畜牧业及鼠害虫

害频发,导致生态环境整体恶化。2005—2016年,改善区域面积占比上升至34.67%,恶化区域面积占比降至4.43%,研究区生态环境转为显著改善,改善趋势大于上一阶段的恶化趋势。改善区域主要分布在研究区的中南部,北部地区相对较少,恶化区域主要分布在西北部高海拔地区(图5b)。这一转变主要得益于青海省三江源国家级自然保护区的建立以及退耕还林、退牧还草、鼠害防治和封山育林等生态工程治理工作的系统实施,有效抑制了研究区的草地退化与黑土滩扩张,显著促进了生态恢复。2016—2024年(图5c),研究区改善区域面积占比为34.62%,恶化区域面积占比为10.53%,整体仍呈现改善趋势,相比上一阶段改善面积大致相当,但恶化面积有所增长。改善区域集中分布在研究区北部,恶化区域分布在南部与东部的高海拔地带。该阶段

三江源国家公园体制工作的试行,进一步加大了研究区生态保护力度,然而高海拔地区的生态保护工作受制于严寒缺氧的恶劣条件,生态修复难度较大,加上此阶段温度和降水都呈现降低趋势,不利于植被生长,因而形成了生态环境“整体改善,局部恶化”的格局。纵观整个研究期(2000—2024年),研究区改善区域面积占比达37.39%,恶化区域面积占比仅为3.84%,生态环境整体呈现大幅度改善趋势。从空间上看(图5d),改善区域主要分布在研究区的中部和北部,零星见于南部,恶化区域主要分布在南部,少量分布在东部。整体来看,2005年之前生态环境恶化主要受气候波动与人类活动共同影响,而2005年之后持续、严格、科学的生态保护政策逐步成为驱动生态改善的主导因素,气候与地形因子的影响相对减弱。

表 7 2000—2024年黄河源园区生态环境质量等级变化

Table 7 Changes in ecological environment quality grades of Yellow River Source Park (2000—2024)

变化类型	级差	2000—2005年	2005—2016年	2016—2024年	2000—2024年
		面积占比/%	面积占比/%	面积占比/%	面积占比/%
恶化	≤-2	0.01	0.01	0.26	0.03
	-1	24.09	4.42	10.27	3.81
不变	0	74.35	60.90	54.85	58.77
改善	1	1.55	34.15	32.29	36.71
	≥2	0.00	0.52	2.33	0.68

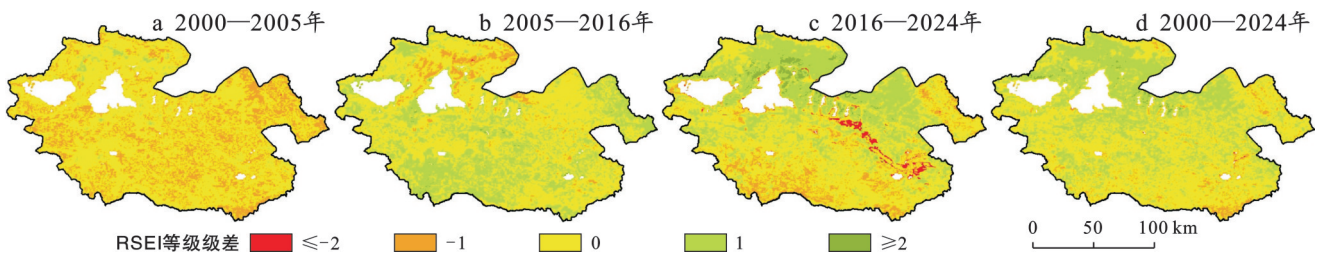


图 5 2000—2024年黄河源园区 RSEI 等级差值分布

Fig.5 Distribution of RSEI grade difference in Yellow River Source Park (2000—2024)

3.5 驱动因素探测

为了探究黄河源园区生态环境质量变化的驱动因素,试验结合生态环境质量变化常用驱动因子及研究区实际状况,从气候、地形与人类活动3类驱动因子进行分析,选取了生长季月平均降水(以下简称降水)、生长季月平均温度(以下简称温度)、DEM(海拔)、坡度、坡向、土地利用类型和人口密度(POP)共计7个驱动因子导入地理探测器,得到单因子探测结果和双因子交互作用探测结果。

3.5.1 单因子探测

由单因子探测结果(表8)可知,2000,2005,

2010,2015,2020年对RSEI解释力强度排名前三的驱动因子均为降水、温度和DEM。其中,降水因子排名第一,平均 q 值为0.294,对RSEI的解释力最强,其次为温度和DEM,平均 q 值分别为0.145和0.089。其余因子的 q 值较低,对RSEI的解释力相对较弱。2000—2020年的地理探测结果表明,驱动因子解释力强度排序均值与上述5个年份的结果一致。从时序变化来看,2000—2020年降水、温度和DEM的解释力强度呈持续减弱趋势,而POP与土地利用类型的解释力强度则逐步增强,坡度与坡向的解释力强度保持相对稳定,表明随着研究区的生

态保护和建设工作的持续推进,人类活动对生态环境改善的影响力日益凸显,气候与地形因子的影响

力则逐步减弱,人类生态保护工作的实施成效显著。

表 8 黄河源园区生态环境质量变化单因子探测结果

Table 8 Single-factor detection results of ecological environment quality changes in Yellow River Source Park

驱动因子	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年		均值	
	q 值	q 排序	q 值	q 排序	q 值	q 排序	q 值	q 排序	q 值	q 排序	q 值	q 排序
温度	0.178	2	0.153	2	0.167	2	0.105	2	0.123	1	0.145	2
降水	0.380	1	0.361	1	0.212	1	0.399	1	0.117	2	0.294	1
DEM	0.104	3	0.104	3	0.115	3	0.077	3	0.089	3	0.098	3
坡度	0.020	6	0.016	6	0.005	6	0.012	7	0.020	7	0.015	6
坡向	0.078	4	0.065	4	0.050	4	0.066	4	0.053	5	0.062	4
土地利用类型	0.040	5	0.039	5	0.039	5	0.035	5	0.063	4	0.043	5
POP	0.006	7	0.011	7	0.003	7	0.014	6	0.022	6	0.011	7

3.5.2 交互作用探测

交互作用探测结果表明,各驱动因子对黄河源园区生态环境质量变化的交互作用均呈现出双因子增强或非线性增强。由图 6 可知,降水与温度的交互作用影响力最大,q 值为 0.325,降水与 DEM 的交互作用影响力次之,q 值为 0.298。综合来看,降水在与其余因子交互作用中贡献最为突出,其次是温度和 DEM,而其余 5 个因子与其他因子交互作用解释力相对较弱,表明降水、温度和 DEM 是驱动生态环境质量变化的主要影响因素。

分布在研究区南部,负相关的区域占 33.68%,主要分布在研究区北部。整体上,RSEI 与降水、温度的相关系数均值分别为 0.076 和 0.058,两者均接近于 0,表明黄河源园区生态环境质量与降水和温度整体呈微弱正相关,但局部相关性存在显著空间差异。

DEM 对生态环境质量变化的影响主要体现在海拔上。图 8 表明,随着海拔升高,RSEI 呈现先增后降的趋势变化。将 DEM 按 300 m 的间隔划分为 <4 400 m,4 400~4 700 m,4 700~5 000 m 及 5 000~5 300 m 4 个高程带,结合 RSEI 趋势变化影像发现,生态环境质量降低的面积占比随着 DEM 的升高由 6.48% 增至 17.91%,生态环境质量不变的面积占比由 6.88% 增至 41.05%,而生态环境质量提高的面积占比由 86.64% 降至 41.04%。由此可见,生态环境改善趋势随着 DEM 的升高逐渐减弱,表明高海拔地区生态治理难度更大,未来应在巩固低海拔地区生态改善成效的基础上稳步推进高海拔区域的生态修复工作。

人类活动对黄河源区生态环境质量影响显著。青海省自 2005 年起开始实施《三江源区生态保护和建设总体规划》,系统推进退牧还草、退耕还林还草、封山育林、鼠害治理及生态移民等项目。截至 2010 年,累计完成退牧还草 6.44×10^6 hm^2 ,封山育林 3.01×10^5 hm^2 ,治理鼠害草地面积约 7.83×10^6 hm^2 ,实施生态移民 1 万余户,因鼠害导致的草地退化面积占比从 1998 年的 58.25% 降至 2010 年的 20.13%,草地退化趋势得到有效遏制。2000—2011 年,尽管三江源地区人口与牲畜数量持续增长,但由于植被盖度、净初级生产力及地上生物量显著提升,畜牧压力指数反而逐年下降。到 2016 年,国家进一步限制三江源地区人类活动与放牧强度,并实施生态补偿机制,逐步

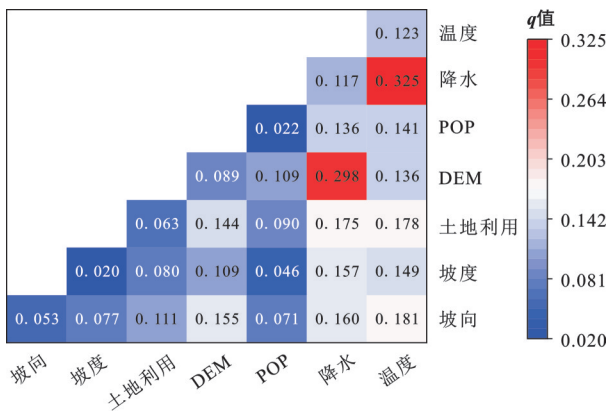


图 6 黄河源园区生态环境质量不同驱动因子的交互探测结果

Fig.6 Interaction detection results of different driving factors of ecological environment quality in Yellow River Source Park

3.5.3 黄河源园区生态环境质量变化驱动因素

基于 2000—2023 年温度与降水影像分别与同期 RSEI 影像进行相关性分析,结果(图 7)表明,RSEI 与降水呈正相关的区域占 67.48%,主要分布在研究区北部,负相关的区域占 32.52%,主要分布在研究区南部;RSEI 与温度呈正相关的区域占 66.32%,主要

实现了生态、经济和社会效益的协调统一,推动区域走向人与自然和谐共处。生态保护工作的持续实施,逐步削弱了气候及不合理人类活动对生态环境质量的主导影响,使其在生态环境改善中的贡献度

日益增强。因此,尽管鼠害与畜牧压力仍可能引发研究区局部草地退化与生态环境质量的降低,但长期系统的生态保护和建设工作有效保障了研究区生态环境的改善趋势。

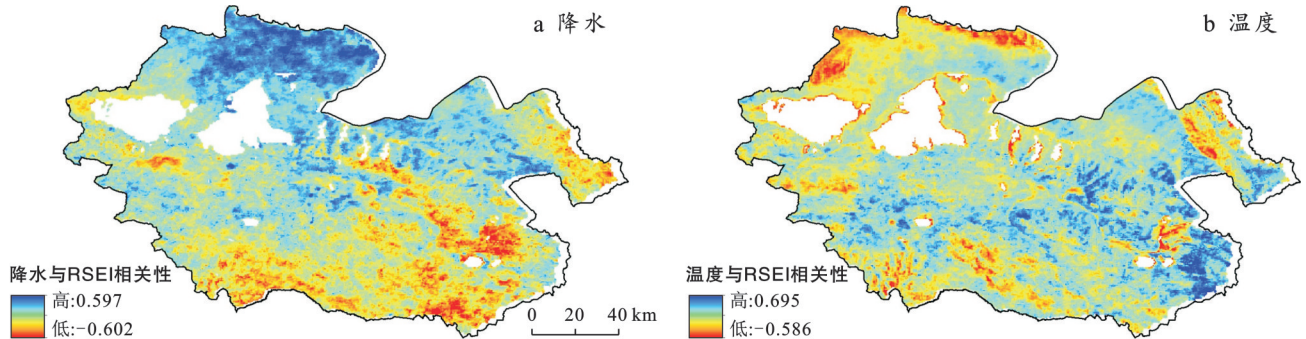


图7 2000—2023年黄河源园区RSEI与气候因子相关性

Fig.7 Correlation between RSEI and climate factors in Yellow River Source Park (2000—2023)

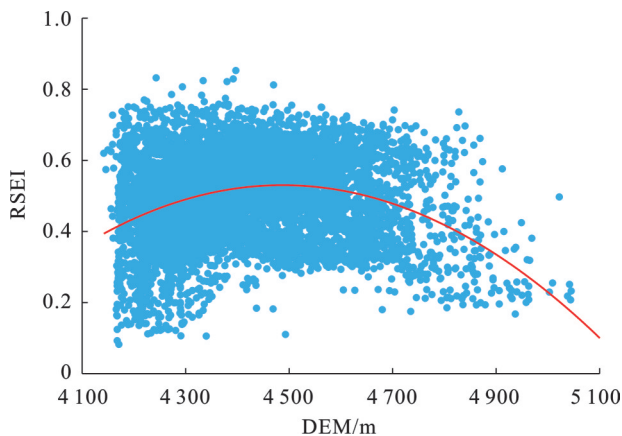


图8 RSEI随DEM的变化

Fig.8 Change of RSEI with DEM

4 讨论

本研究将遥感生态指数(RSEI)应用于黄河源园区生态环境质量变化的分析中,综合多种方法评估了2000—2024年生态环境质量的变化状况,结果显示RSEI整体呈现逐年增长的趋势,研究区生态环境质量持续变好。这一结论与王天宏^[22]对三江源国家公园同时段生态环境质量演变趋势的研究结果基本一致。主成分分析和相关性分析结果表明,第一主成分(PC₁)贡献率均高于60%,且4个生态因子之间不存在明显共线性,说明RSEI模型能够适应黄河源园区这个生态脆弱区^[23]的生态环境质量评价。但本研究中,RSEI模型的生态因子选取存在一定局限性,未能充分体现黄河源园区作为黄河源头汇水区的独特水文特征,随着国家大力推进生态保护工作,研究区湖泊水体面积逐年扩大^[24],现有模型未能将水体这一具有显著正向生态作用的因子纳入模型。

前人在研究区域生态质量变化的影响因素时,多聚焦于气候变化和人类活动两方面^[25],这在地形较小的区域具有一定合理性,但在黄河源园区这种地形复杂、海拔落差较大的区域则忽略了地形因素对生态环境质量的影响^[26]。因此本研究从气候、地形和人类活动三方面进行黄河源园区生态环境质量变化的驱动因素分析。但由于数据受限,研究未能结合畜牧量、鼠害和具体生态保护工程(如退牧还草、封山育林、生态移民等)对生态环境质量的贡献度进行定量评估。后续研究中,将结合黄河源园区的区域特点,综合选取更加符合地区特点的生态因子,进一步完善对该区域生态环境质量的研究。

5 结论

(1) 2000—2024年黄河源园区的生态环境质量呈现波动上升趋势,RSEI均值最低为2001年的0.527,最高为2019年的0.689,上升速率约为0.003 1/a;从空间上来看,研究区生态环境质量呈现“北部差,南部优”的分布格局。

(2) 黄河源园区生态环境质量提高的面积远大于降低的面积,生态环境显著改善。生态环境质量以轻微提高和显著提高为主,该类型主要分布在研究区中部和北部的低海拔地区,土地覆盖类型以草地为主;未变化区域、轻微下降区域和显著下降区域面积较少,主要分布在南部高海拔地区,土地覆盖类型以林地为主。

(3) 黄河源园区生态环境质量呈波动变化。2000—2005年黄河源园区生态环境为显著恶化阶段;2005—2016年为显著改善阶段,改善趋势大于上一阶段的恶化趋势,生态环境质量显著提高;2016—

2024年为整体改善,局部恶化阶段,改善趋势略低于2005—2016年阶段。

(4) 驱动因素探测结果与分析表明,单因子探测中降水的影响力最强,其次是温度与DEM;交互因子探测中降水与温度交互作用的影响力最强,降水与DEM交互作用影响力次之,降水、温度和DEM是生态环境质量变化的主要驱动因素。气候、地形因子的影响力逐步减弱,人类活动影响力逐渐增强,研究区生态环境修复工作成效显著。

参考文献 (References)

- [1] Almar R, Stieglitz T, Addo K A, et al. Coastal zone changes in west Africa: Challenges and opportunities for satellite earth observations [J]. *Surveys in Geophysics*, 2023, 44(1): 249-275.
- [2] Chen Yang, Weng Qihao, Tang Luliang, et al. Developing an intelligent cloud attention network to support global urban green spaces mapping [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 198: 197-209.
- [3] 杜高奇,李自强,赵勇,等.基于RSEI的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):81-93.
Du Gaoqi, Li Ziqiang, Zhao Yong, et al. RSEI-based analysis on eco-environment quality monitoring and driving factors of Yellow River basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(12): 81-93.
- [4] 姚尧,王世新,周艺,等.生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J].遥感信息,2012,27(3):93-98.
Yao Yao, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. The application of ecological environment index model on the national evaluation of ecological environment quality [J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(3): 93-98.
- [5] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧.生态环境承载力评价研究:以河南省为例[J].生态学报,2017,37(21):7039-7047.
Zhu Jiawei, Xie Xiaotong, Li Xinhui. A solution to the problem of ecological environmental carrying capacity evaluation: A case study of Henan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7039-7047.
- [6] 刘丽娜,魏杰,马云霞,等.基于时空变化的黄河流域河南段生态环境评价研究[J].环境科学与管理,2021,46(2):169-173.
Liu Lina, Wei Jie, Ma Yunxia, et al. Temporal and spatial changes for ecological environment of Yellow River in Henan Province [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(2): 169-173.
- [7] 叶有华,梁永贤,沈一青,等.《生态环境状况评价技术规范(试行)》中若干值得商榷的问题[J].热带地理,2009,29(4):404-406.
Ye Youhua, Liang Yongxian, Shen Yiqing, et al. Some issues related to "technical criterion for eco-environmental status evaluation (trial implementation)" [J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(4): 404-406.
- [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] 张华,宋金岳,李明,等.基于GEE的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J].生态学杂志,2021,40(6):1883-1894.
Zhang Hua, Song Jinyue, Li Ming, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1883-1894.
- [10] 梁巧玲,史正涛,陈越豪,等.基于遥感生态指数的元谋干热河谷生态环境动态监测及其驱动力分析[J].水土保持通报,2022,42(6):146-154.
Liang Qiaoling, Shi Zhengtao, Chen Yuehao, et al. Ecological environmental dynamic monitoring and driving force analysis of Yuanmou dry-hot valley based on remote sensing ecological index [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 146-154.
- [11] 张娜,赵雪雁.中国首批国家公园生态系统健康的时空动态及其对人类活动的响应[J].自然资源学报,2025,40(8):2134-2151.
Zhang Na, Zhao Xueyan. Spatio-temporal dynamics of ecosystem health and its response to human activities in China's first batch of national parks [J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(8): 2134-2151.
- [12] 宁晓春,杨明新,曹文强,等.2000—2022年三江源植被覆盖度时空变化格局及其气候驱动机制[J].测绘通报,2024(12):70-76.
Ning Xiaochun, Yang Mingxin, Cao Wenqiang, et al. Spatial-temporal pattern of vegetation coverage and its climate driving mechanism in the three rivers headwaters region from 2000—2022 [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(12): 70-76.
- [13] 左婵,王军邦,张秀娟,等.三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素[J].生态学报,2022,42(14):5559-5573.
Zuo Chan, Wang Junbang, Zhang Xiujian, et al. Changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in the Sanjiangyuan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5559-5573.
- [14] 杨铭鑫,李俊,同小娟,等.2001—2020年中国森林植被EVI对气候因子的响应[J].生态学报,2024,44(23):

- 10850-10863.
- Yang Mingxin, Li Jun, Tong Xiaojuan, et al. Response of forest vegetation enhanced vegetation index to climatic factors in China in 2001—2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(23):10850-10863.
- [15] Huang Sha, Tang Lina, Hupy J P, et al. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021,32(1):1-6.
- [16] Wu Siyi. Land surface temperature change in Hangzhou urban area in recent 20 years based on landsat image [J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2023,11(4):52-63.
- [17] 徐涵秋.一种基于指数的新型遥感建筑用地指数及其生态环境意义[J].*遥感技术与应用*,2007,22(3):301-308.
- Xu Hanqiu. A new index-based built-up index(ABI) and its eco-environmental significance [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007,22(3):301-308.
- [18] 陈创,聂平静,黄凤寸,等.基于RSEI改进模型的生态环境质量评价及驱动机制研究:以湖南省桃江县为例[J].*水土保持通报*,2024,44(3):159-170.
- Chen Chuang, Nie Pingjing, Huang Fengcun, et al. Evaluation and driving mechanism of eco-environmental quality based on improved RSEI model: A case study at Taojiang County, Hunan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(3):159-170.
- [19] 罗清,张靖,鲍雅静,等.基于RSEI的辽河流域生态环境动态变化、归因及分区研究[J].*水土保持通报*,2025,45(2):360-370.
- Luo Qing, Zhang Jing, Bao Yajing, et al. A study on eco-environmental dynamics, causes, and zoning over Liaohe River basin based on remote sensing ecological index (RSEI) [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025,45(2):360-370.
- [20] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*,2013,33(24):7798-7806.
- Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage in the Yellow River basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(24):7798-7806.
- [21] Li Guangchao, Chen Wei, Li Ruren, et al. Assessing the spatiotemporal dynamics of ecosystem water use efficiency across China and the response to natural and human activities [J]. *Ecological Indicators*, 2021,126:107680.
- [22] 王天宏.1990—2020年三江源国家公园生态环境质量遥感动态变化及驱动力分析[D].湖南长沙:中南林业科技大学,2023.
- Wang Tianhong. Remote sensing dynamic change and driving force analysis of ecological environment quality in Sanjiangyuan National Park from 1990 to 2020 [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [23] 韦晶,郭亚敏,孙林,等.三江源地区生态环境脆弱性评价[J].*生态学杂志*,2015,34(7):1968-1975.
- Wei Jing, Guo Yamin, Sun Lin, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015,34(7):1968-1975.
- [24] 祁昌贤,任燕,彭海月,等.基于GEE云平台的三江源湖泊面积提取及动态变化[J].*长江科学院院报*,2023,40(7):179-185.
- Qi Changxian, Ren Yan, Peng Haiyue, et al. Extracting the dynamic change of lake area in the three-river headwaters region based on google earth engine [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023,40(7):179-185.
- [25] 陈永富,刘华,邹文涛,等.三江源湿地变化驱动因子定量研究[J].*林业科学研究*,2012,25(5):545-550.
- Chen Yongfu, Liu Hua, Zou Wentao, et al. Quantitative study on the drive factors of wetland change in three rivers' source area [J]. *Forest Research*, 2012,25(5):545-550.
- [26] 张懿铨,丁明军,张玮,等.三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景[J].*地理研究*,2007,26(3):500-507.
- Zhang Yili, Ding Mingjun, Zhang Wei, et al. Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River in China [J]. *Geographical Research*, 2007,26(3):500-507.