

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.1054

汪孝贤,张秀霞,李旺平,等.基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价[J].生态与农村环境学报,2023,39(7):853-863.

WANG Xiao-xian,ZHANG Xiu-xia,LI Wang-ping,et al.Assessment of Ecological Environment Quality in Qilian Mountain National Nature Reserve Based on Improved RSEI Model[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(7):853-863.

## 基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价

汪孝贤<sup>1,2</sup>,张秀霞<sup>1,2</sup>\*,李旺平<sup>1,2</sup>,程小强<sup>1,2</sup>,凌晴<sup>1,2</sup>,周兆叶<sup>1,2</sup>,郝君明<sup>1,2</sup>,林庆润<sup>1,2</sup>,陈璐<sup>1,2</sup>  
(1.兰州理工大学土木工程学院,甘肃兰州730050;2.兰州理工大学/甘肃省应急测绘工程研究中心,甘肃兰州730050)

**摘要:**针对遥感生态指数(RSEI)模型特征向量方向不唯一性及光学影像存在坏死像元的问题,基于Google Earth Engine平台选择祁连山国家级自然保护区1986—2021年489景Landsat TM/SR可用性遥感影像,采用RSEI改进模型进行生态环境质量评价,并引入地理探测器中单因子分析和交互式探测分析对RSEI的绿色度、湿度、热度、干度、土地利用类型、DEM和人口密度7个影响因子进行成因分析。结果表明:(1)与RSEI模型相比,改进模型避免了特征向量方向的干扰,可以较好地反映生态环境质量变化。1986—2021年保护区生态环境质量呈现先下降后上升的恢复趋势,空间分布呈现东高西低。(2)时空差异分析表明,35 a来保护区生态环境质量以轻度过度、不变和轻度改善为主,恶化区域主要分布在张掖市肃南裕固族自治县北部以及张掖市与武威市交界处等地区。轻度改善区域在保护区分布零散,其中在核心区分布相对较多。(3)从生态环境质量成因分析来看,7个影响因子中绿色度对RSEI的空间分异特征解释力最强,交互式探测结果表明绿色度和干度是研究区生态环境质量的关键驱动因素。研究结果表明祁连山国家级自然保护区生态环境质量近年来逐步改善,保护区的一系列环境保护举措是有效的。

**关键词:**遥感生态指数改进模型;祁连山国家级自然保护区;遥感动态监测;地理探测器;影像可用性分析

**中图分类号:**X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4831(2023)07-0853-11

**Assessment of Ecological Environment Quality in Qilian Mountain National Nature Reserve Based on Improved RSEI Model.** WANG Xiao-xian<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiu-xia<sup>1,2</sup>\*, LI Wang-ping<sup>1,2</sup>, CHENG Xiao-qiang<sup>1,2</sup>, LING Qing<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhao-ye<sup>1,2</sup>, HAO Jun-ming<sup>1,2</sup>, LIN Qing-run<sup>1,2</sup>, CHEN Lu<sup>1,2</sup> (1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou University of Technology/ Gansu Province Emergency Mapping Engineering Research Center, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Aiming at the non uniqueness of feature vector direction of remote sensing ecological index(RSEI) model and the existence of necrotic pixels in optical images, 489 Landsat TM/SR availability remote sensing images of Qilian Mountain National Nature Reserve from 1986 to 2021 were selected in view of Google Earth Engine platform, and the improved remote sensing ecological index model was utilized to assess the ecological environment quality of the reserve. The single factor analysis and interactive detection analysis in geographical detector were applied to analyze the mechanisms of the seven influencing factors (NDVI, WET, LST, NDBSI, land use type, DEM, and population density) of RSEI. The results show that: (1) Compared with remote sensing ecological index model, the improved remote sensing ecological index model avoided the interference of feature vector direction, and could better reflect the changes of ecological environment quality. The ecological environment quality from 1986 to 2021 demonstrated a recovery trend of "first decreasing and then increasing", with a spatial distribution of "high in the east and low in the west". (2) The spatio-temporal differences in

收稿日期:2022-10-10

基金项目:国家自然科学基金(ZZ2022G50500002);甘肃省科技计划(20JR10RA179);甘肃省自然科学基金(21JR7RA242)

① 通信作者 E-mail: zhangxx@lut.edu.cn

the reserve indicate that the ecological environment quality slightly deteriorated, unchanged or slightly improved in the past 35 years. The distribution of slightly deteriorated areas located mainly in the northern part of Sunan Yugur Autonomous County in Zhangye City and the junction of Zhangye City and Wuwei City. The slightly improved areas were scattered in the reserve, while the core areas were relatively more distributed in the reserve. (3) From the analysis of the causes of ecological environment quality, among the seven influencing factors, greenness (NDVI) had the strongest explanatory power on the spatial differentiation characteristics of RSEI. Considering the synergistic effect of multiple factors, the NDVI and ND-BSI were the key driving indicators of ecological environment quality. The results above show that the ecological environment quality in Qilian Mountain Nature Reserve has been gradually improved in recent years, and a series of environment protection measures were effective.

**Key words:** improved remote sensing ecological index; Qilian Mountain National Nature Reserve; remote sensing dynamic monitoring; geographical detector; image availability analysis

祁连山位于青藏、蒙新和黄土三大高原的交界处,其独特的气候条件和地理位置造就了丰富而多样的生物圈。位于祁连山北坡的祁连山国家级自然保护区是黑河、疏勒河和石羊河 3 条主要内陆河的发源地,维系着河西走廊生态平衡和社会的可持续发展<sup>[1]</sup>。长期以来,受气候变迁、超载放牧、人为破坏和保护手段滞后等多种因素的影响,保护区内出现了冰川退缩、水源涵养效能减弱、植被退化严重和水土流失加剧等诸多问题<sup>[2-4]</sup>。由于环境问题多数具有滞后性、长效性、广域性、连锁性和复杂性等特点,其对生态系统的影响涉及多个生态过程,而且往往需要几十年后才可以观测到生态环境问题,短期难以确定其因果关系,因此,有必要开展长时间序列、大空间尺度的保护区生态监测。

近年来,祁连山地区生态环境研究主要集中于利用遥感影像对植被、草地和生态环境质量的动态监测和反演估算。如 GENG 等<sup>[5]</sup>基于 BFAST 模型探讨了人类活动对祁连山植被趋势变化的影响,揭示了影响植被的主要人类活动是放牧和人类引起的土地覆盖变化。DUAN 等<sup>[6]</sup>基于人类足迹法分析了人类活动强度变化对祁连山自然保护区生态系统的影响,结果表明草原、森林是受人类活动影响最大的植被类型。宋伟宏等<sup>[7]</sup>基于 MOD13Q1 和 Landsat 数据采用趋势分析法和相关性分析法探究了草地时空变化及其对气候变化的响应。杨磊等<sup>[8]</sup>基于 2000—2018 年祁连山国家公园内 14 个县(区)遥感、气象和社会经济统计数据构建生态环境质量指数(eco-environmental quality index, EQI),阐明祁连山生态环境质量时空变化规律。张华等<sup>[9-10]</sup>基于遥感生态指数(remote sensing ecological environment index, RSEI)<sup>[11-12]</sup>和 InVEST 模型探究了 1989—2019 年祁连山国家公园生态环境质量时空演变。区域生态环境质量评价是定量测评研究区生态环境的重要手段,也是制定研究区生态环境保

护决策的重要参考依据<sup>[13]</sup>。采用 RSEI 模型评估区域生态环境长时序变化时,特征向量方向不唯一造成 RSEI 模型结果具有不稳定性<sup>[14-15]</sup>。LI 等<sup>[16]</sup>和 JIANG 等<sup>[17]</sup>基于 RSEI 模型通过对主成分中特征向量矩阵取绝对值,避免了特征向量方向变化对 RSEI 模型结果的影响。由于受到天气因素(云、雪、雨和雾)影响,导致单张光学影像数据存在大量坏死像元,造成研究对数据的需求难以得到满足。因此,有必要利用时序影像对坏死像元进行合成弥补。

综上,基于 Google Earth Engine(GEE)云平台,利用遥感技术反演绿度、湿度、干度和热度 4 个生态因子,采用主成分分析构建 RSEI 改进模型对祁连山国家级自然保护区生态环境质量时空格局和演变趋势进行综合分析评价。最后,利用地理信息空间分析技术和地理探测器模型揭示保护区生态环境质量驱动因素,以期明确祁连山自然保护区生态环境质量变化的主要影响因素,为进一步开展保护区生态环境修复、实现可持续发展提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

祁连山国家级自然保护区(97°23'34" N~103°45'49" N, 36°29'57" E~39°43'39" E)是 1988 年经国务院批准成立的森林和野生动物类型自然保护区(图 1),地处武威、金昌和张掖 3 市,西北与张掖市肃南裕固族自治县相接,东南与武威市天祝藏族自治县相连。保护区总面积约  $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,功能区划分为核心区( $5.05 \times 10^3 \text{ km}^2$ )、缓冲区( $3.87 \times 10^3 \text{ km}^2$ )和实验区( $1.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ )。其中,核心区主要位于张掖和金昌市境内,分布有高山冰川、雪山和高山草甸等重要水源涵养林区。缓冲区作为核心区的过渡带,主要位于张掖和金昌市境内,分布有森林和野生动物。实验区主要位于张掖、金昌和武威 3 市,区域内人为活动相对比较频繁<sup>[18]</sup>。保护区

涵盖有森林、草地、河流和冰川等各类生态资源,生物多样性丰富。保护区大部分区域海拔在 3 000~3 500 m 以上,年均降水量在 300~500 mm 之间,年均气温为 1.0~4.0 ℃。祁连山是中国西部重要生态安全屏障,是黄河流域重要水源地,是生物多样性保护重点区域。长期以来,祁连山地区局部生态破坏问题十分显著<sup>[19-21]</sup>。

### 1.2 数据来源与预处理

基于 GEE 云平台在线调用经过大气校正及辐射校正的 Landsat 5 TM/8 SR 数据集,对保护区 1986、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 和 2021 年 6—9 月影像进行最小云量筛选,拼接合成各年遥感影像(表 1)。为防止大面积水体对湿度分量造成干扰,采用归一化水体指数(NDWI)对水体进行掩膜处理。基于 GEE 云平台对 pixel-qa 波段 489 景影像坏死像元进行掩膜,并对各年 6—9 月影像进行像元中值合成,进而构建保护区目标年份影像,利用波段运算获得绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)<sup>[22]</sup>和干度(NDBSI)4 种指数,并进行归

一化处理。采用 java 语言编写主成分分析计算代码,利用主成分分析方法将 4 个指标耦合,得到同时包含 4 个指标信息的 PC1、PC2、PC3 和 PC4 4 个主成分。由于 PC1 集成了 4 个指标的绝大部分信息,因此采用 PC1 计算 RSEI 值。

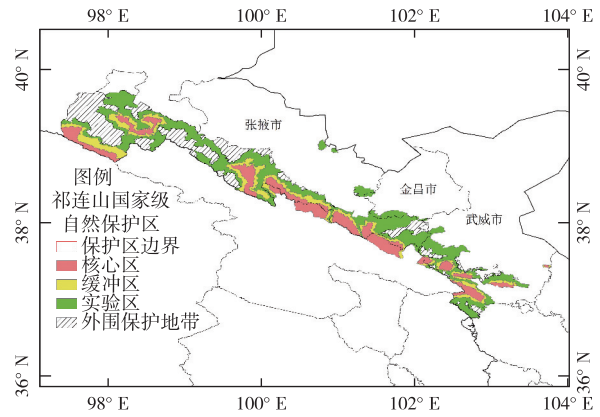


图 1 祁连山国家级自然保护区概况  
Fig. 1 Overview of Qilian Mountain National Nature Reserve

表 1 数据源详细说明

Table 1 Detailed description of data

| 数据类型   | 数据集                   | 空间分辨率 | 时间范围   | 数据源   |
|--------|-----------------------|-------|--|---|
| 影像数据   | Landsat 5 TM          | 30 m  | 1986 年 6—9 月                                 | 美国地质调查局( <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a> )  |
|        |                       |       | 1990 年 6—9 月                                 |   |
|        |                       |       | 1995 年 6—9 月                                 |   |
|        |                       |       | 2000 年 6—9 月                                 |   |
|        |                       |       | 2005 年 6—9 月                                 |   |
|        | 2010 年 6—9 月          |       |  |   |
|        | Landsat 8 SR          | 30 m  | 2015 年 6—9 月<br>2020 年 6—9 月<br>2021 年 6—9 月 | 美国地质调查局( <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a> )  |
| 基础地理数据 | 数字高程模型                | 30 m  | 2000 年                                       | USGS/SRTMGL1_003  |
|        | 土地利用                  | 30 m  | 1985—2020 年                                  | 地球系统科学数据中心( <a href="https://www.earth-system-science-data.net/">https://www.earth-system-science-data.net/</a> ) |
|        | 牲畜数量                  | 市域尺度  | 1980—2020 年                                  | 甘肃省统计年鉴   |
|        | 人口密度                  | 1 km  | 1990—2010 年                                  | 中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )                                      |
|        |                       |       | 2020 年                                       | WordPop 数据库   |
|        | LandsatPathRow (WRS2) |       | 1983 年至今                                     | 北京大学城市与环境学院地理数据平台( <a href="http://geodata.pku.edu.cn">http://geodata.pku.edu.cn</a> )                            |

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 RSEI 改进模型

RSEI 模型由徐涵秋<sup>[12]</sup>基于 NDVI、WET、LST 和 NDBSI 4 个自然因子提出,为生态质量监测和评价提供了一种客观、快速、简便的技术,计算公式为

$$I_{RSEI} = f(I_{NDVI}, W_{ET}, T_{LS}, I_{NDBSI}) \quad (1)$$

式(1)中,  $I_{RSEI}$  为遥感生态指数;  $I_{NDVI}$  为绿度分量;  $W_{ET}$  为湿度分量;  $T_{LS}$  为热度分量;  $I_{NDBSI}$  为干度分量。

随着 RSEI 模型的广泛应用, ZHENG 等<sup>[15]</sup>和 JIANG 等<sup>[17]</sup>研究表明 RSEI 模型在特征向量方向方面存在较大缺陷,当 NDVI 和 WET 为正值时,采用主成分分析后未做归一化的 RSEI 初始值

( $I_{RSE,0}$ ) 等于由“PC1”方法计算得到的 RSEI 值是合理的;当 NDVI 和 WET 特征向量方向为负值时,采用  $I_{RSE,0}$  等于由“1-PC1”方法计算得到的 RSEI 值是合理的。ZHANG 等<sup>[23]</sup>通过大样本测试 RSEI 模型特征向量在时间序列中的演变,发现改变 4 个生态因子的方向也会影响 RSEI 计算结果。植被对区域生态环境能起到促进作用<sup>[24]</sup>,NDVI 与植物生物量、叶面积指数和植被覆盖度密切相关,是反映植被密度和健康状况的指标;WET 反映土壤和植被的湿度,对植被生长、灾害防治和区域生态环境保护有明显正向作用;LST 是反映陆-气能量平衡的重要指标,是影响植被动态的主要因素之一,对区域生态环境起到负向作用<sup>[12]</sup>;而 NDBSI 反映地表“干化”程度。“PC1”与“1-PC1”的区别只是更改了特征向量方向,不改变特征向量值,从而造成 RSEI 结果变化。因此,基于 GEE 平台首先对主成分分析中的 4×4 特征向量矩阵取绝对值,然后对 LST 和 NDBSI 特征向量方向求取负值,最后采用式(2)~(3)计算 RSEI 值,从而避免特征向量方向变化对 RSEI 空间计算结果的影响。

$$I_{RSE,0} = PC1[f(I_{NDV}, W_{ET}, T_{LS}, I_{NDBS})], \quad (2)$$

$$I_{RSE} = \frac{I_{RSE,0} - I_{RSE,min}}{I_{RSE,max} - I_{RSE,min}} \quad (3)$$

式(2)~(3)中, $I_{RSE,0}$ 为主成分分析后未做归一化的 RSEI 初始值; $I_{RSE,min}$ 和  $I_{RSE,max}$ 分别为 RSEI 最小和最大值。

### 1.3.2 地理探测器模型

地理探测器是探测空间分异性及揭示背后驱动因子的一种统计学方法<sup>[25]</sup>,其核心思想是通过分析变量的空间异质性来定量探测自变量对因变量的影响程度,已在社会经济研究<sup>[26]</sup>和生态环境方面<sup>[27]</sup>得到广泛应用。模型包括因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器 4 个探测器,笔者采用因子探测器和交互探测器分析保护区生态环境质量的主要影响因素。

#### (1) 因子探测器

因子探测器主要用于探测因变量 RSEI 值的空间异质性,以及探测某个因子对因变量的空间分异性的解释程度,计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式(4)中, $q$ 为驱动因子对生态环境的影响程度; $L$ 为因变量和自变量的分层或分区数; $N_h$ 和  $N$ 分别为层  $h$  和全区样本数; $\sigma_h^2$ 和  $\sigma^2$ 分别为层  $h$  和全区的

因变量的方差。 $q \in [0, 1]$ , $q$ 越接近 1 表示自变量对因变量 RSEI 值的解释力越强;反之则越弱。

#### (2) 交互探测

交互探测器用于评估各影响因子协同作用时对因变量 RSEI 值的解释力变强还是变弱。评估方法是基于单因子探测得到两个因子的  $q$  值,即  $q(X_1)$  和  $q(X_2)$ ,然后计算两个因子协同作用时的  $q$  值,做比较后得到的结果可分为 5 类(表 2)。

表 2 交互探测分类

Table 2 Classification of interactive detection

| 判据  | 交互作用     |
|---|----------|
| $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$                        | 非线性减弱    |
| $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$ | 单因子非线性减弱 |
| $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$                        | 双因子增强    |
| $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$                             | 独立       |
| $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$                             | 非线性增强    |

$q(X_1)$  和  $q(X_2)$  分别为影响因子  $X_1$  和  $X_2$  的  $q$  值。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态环境各指标分析

基于 GEE 平台进行各指标计算及归一化处理,通过降维方法表现 4 个生态因子的综合信息,最终得到主成分矩阵(表 3)。

表 3 1986—2021 年各指标主成分分析

Table 3 Principal component analysis of each index of RSEI from 1986 to 2021

| 年份   | 指标    | 主成分      |          |          |          |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|
|      |       | PC1      | PC2      | PC3      | PC4      |
| 1986 | NDVI  | 0.975 7  | -0.209 3 | 0.064 4  | -0.008 8 |
|      | WET   | 0.018 5  | 0.364 0  | 0.920 8  | 0.139 2  |
|      | LST   | -0.006 8 | -0.049 9 | -0.130 1 | 0.990 2  |
|      | NDBSI | -0.218 3 | -0.906 2 | 0.362 1  | 0.003 4  |
|      | 特征值   | 0.016 9  | 0.009 5  | 0.000 2  | 0.000 0  |
|      | 贡献率/% | 63.46    | 35.49    | 0.93     | 0.11     |
| 1990 | NDVI  | 0.890 9  | 0.416 6  | 0.177 6  | -0.033 4 |
|      | WET   | 0.085 9  | -0.185 4 | -0.177 0 | -0.962 8 |
|      | LST   | -0.286 3 | 0.815 6  | -0.494 4 | -0.091 7 |
|      | NDBSI | -0.341 9 | 0.356 2  | 0.832 3  | -0.252 1 |
|      | 特征值   | 0.017 7  | 0.014 4  | 0.003 3  | 0.000 1  |
|      | 贡献率/% | 49.87    | 40.64    | 9.17     | 0.31     |
| 1995 | NDVI  | 0.910 7  | 0.273 9  | 0.306 1  | -0.044 1 |
|      | WET   | 0.085 5  | -0.216 2 | -0.198 2 | -0.952 2 |
|      | LST   | -0.095 1 | 0.856 4  | -0.497 7 | -0.099 4 |
|      | NDBSI | -0.392 9 | 0.380 6  | 0.787 0  | -0.285 5 |
|      | 特征值   | 0.022 7  | 0.015 6  | 0.003 5  | 0.000 2  |
|      | 贡献率/% | 54.16    | 37.18    | 8.31     | 0.36     |

续表 3 Table 3 (Continued)

| 年份   | 指标    | 主成分      |          |          |          |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|
|      |       | PC1      | PC2      | PC3      | PC4      |
| 2000 | NDVI  | 0.924 7  | 0.372 3  | 0.079 7  | -0.003 0 |
|      | WET   | 0.065 6  | -0.361 5 | 0.923 0  | -0.114 5 |
|      | LST   | -0.004 9 | 0.028 1  | -0.111 9 | -0.993 3 |
|      | NDBSI | -0.375 0 | 0.854 4  | 0.359 5  | -0.010 0 |
|      | 特征值   | 0.025 6  | 0.004 8  | 0.000 2  | 0.000 0  |
|      | 贡献率/% | 83.60    | 15.80    | 0.58     | 0.01     |
| 2005 | NDVI  | 0.884 9  | 0.391 4  | 0.246 0  | -0.057 2 |
|      | WET   | 0.079 5  | -0.180 0 | -0.223 0 | -0.950 0 |
|      | LST   | -0.250 5 | 0.847 1  | -0.460 0 | -0.071 7 |
|      | NDBSI | -0.384 5 | 0.311 6  | 0.821 8  | -0.282 4 |
|      | 特征值   | 0.021 5  | 0.015 3  | 0.003 2  | 0.000 1  |
|      | 贡献率/% | 53.55    | 38.18    | 7.98     | 0.28     |
| 2010 | NDVI  | 0.840 0  | 0.461 7  | 0.267 9  | -0.077 9 |
|      | WET   | 0.087 5  | -0.179 6 | -0.241 8 | -0.949 5 |
|      | LST   | -0.303 7 | 0.821 4  | -0.478 8 | -0.061 4 |
|      | NDBSI | -0.440 0 | 0.282 7  | 0.800 3  | -0.297 6 |
|      | 特征值   | 0.021 0  | 0.013 0  | 0.003 0  | 0.000 1  |
|      | 贡献率/% | 56.64    | 34.88    | 8.16     | 0.31     |
| 2015 | NDVI  | 0.700 2  | -0.546 2 | -0.408 1 | -0.211 8 |
|      | WET   | 0.221 4  | 0.341 5  | 0.358 7  | -0.840 0 |
|      | LST   | -0.299 0 | -0.753 0 | 0.568 7  | -0.142 1 |
|      | NDBSI | -0.609 4 | -0.134 1 | -0.617 6 | -0.478 9 |
|      | 特征值   | 0.025 5  | 0.013 1  | 0.003 0  | 0.000 3  |
|      | 贡献率/% | 60.96    | 31.25    | 7.12     | 0.67     |
| 2020 | NDVI  | 0.684 1  | 0.574 1  | 0.391 8  | -0.221 2 |
|      | WET   | 0.222 6  | -0.312 7 | -0.400 4 | -0.832 1 |
|      | LST   | -0.402 3 | 0.756 0  | -0.492 6 | -0.154 7 |
|      | NDBSI | -0.566 2 | 0.033 6  | 0.666 0  | -0.484 5 |
|      | 特征值   | 0.026 6  | 0.011 3  | 0.003 0  | 0.000 3  |
|      | 贡献率/% | 64.66    | 27.36    | 7.33     | 0.66     |
| 2021 | NDVI  | 0.703 6  | 0.532 2  | 0.421 5  | -0.210 0 |
|      | WET   | 0.217 8  | -0.307 8 | -0.392 7 | -0.838 8 |
|      | LST   | -0.365 8 | 0.788 0  | -0.466 8 | -0.165 5 |
|      | NDBSI | -0.569 0 | 0.033 7  | 0.670 9  | -0.474 3 |
|      | 特征值   | 0.028 4  | 0.012 2  | 0.003 1  | 0.000 3  |
|      | 贡献率/% | 64.52    | 27.65    | 7.15     | 0.69     |

NDVI 为绿度, WET 为湿度, LST 为热度, NDBSI 为干度。

由表 3 可知, PC1 中, 1986—2021 年研究区 NDVI 和 WET 都为正值, LST 和 NDBSI 为负值, 表明采用 RSEI 改进模型得到的结果较合理, 同时也表明 RSEI 改进模型避免了 4 个生态因子方向的干扰。同时, 各年份 PC1 贡献率均大于 49%, 表明 RSEI 指数可以较好反映研究区生态环境质量变化。

### 2.2 生态环境质量时空变化分析

近 35 a 保护区 RSEI 均值及各等级面积占比变化见图 2。由图 2 可知, 在近 35 a 间, 祁连山自然保护区 RSEI 均值总体呈现先减小再增加的波动趋势, 体现生态环境质量由变差到好转的趋势<sup>[28-29]</sup>。其中, 1986—1995 年 RSEI 均值从 0.64 下降到

0.49, 生态环境趋于恶化, 这与彭擎<sup>[29]</sup> 和张华等<sup>[9-10]</sup> 研究结果相符。据不完全统计, 在保护区成立(1988 年)之前, 因开矿造成环境破坏的面积达 387 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。1995—2000 年 RSEI 均值从 0.49 上升到 0.52, 生态环境呈现好转趋势, 这与彭擎<sup>[29]</sup> 研究结果相符, 这可能与 1995 年研究区被纳入中国“人与生物圈保护”及 1997 年甘肃省颁布《甘肃省祁连山国家级自然保护区管理条例》等政策的实施有关。自 2000 年之后, 林牧矛盾及动植物保护问题较为突出, 2000—2010 年 RSEI 均值从 0.52 下降到 0.42, 生态环境呈现恶化趋势, 这与彭擎等<sup>[29]</sup> 研究结果相符。2010—2021 年 RSEI 均值从 0.42 上升到 2020 年的 0.49, 这与彭擎<sup>[29]</sup> 和 LIU 等<sup>[30]</sup> 研究结果相符, 之后下降到 2021 年的 0.44。总体上, 近 10 多年, 保护区生态环境质量呈现上升趋势, 表明祁连山自然保护区生态环境治理起到显著作用。将保护区生态环境质量划分为优(0.8, 1.0]、良(0.6, 0.8]、一般(0.4, 0.6]、较差(0.2, 0.4]和差(0, 0.2] 5 个等级<sup>[30]</sup>, 参照生态环境规范<sup>[31]</sup> 和王志超等<sup>[32]</sup> 研究结果, 结合研究区实际情况, 对 RSEI 各等级面积变化进行分级。表 4 显示, 1986—2005 年保护区生态环境质量总体呈现下降趋势, 其中, 1986—2005 年差、较差等级面积占比上升 51.99 个百分点, 良、优等级面积占比下降 32.69 个百分点; 2005—2021 年保护区生态环境质量总体呈现上升趋势, 其中, 良、优等级面积占比上升 6.11 个百分点, 差、较差等级面积占比下降 2.91 个百分点。

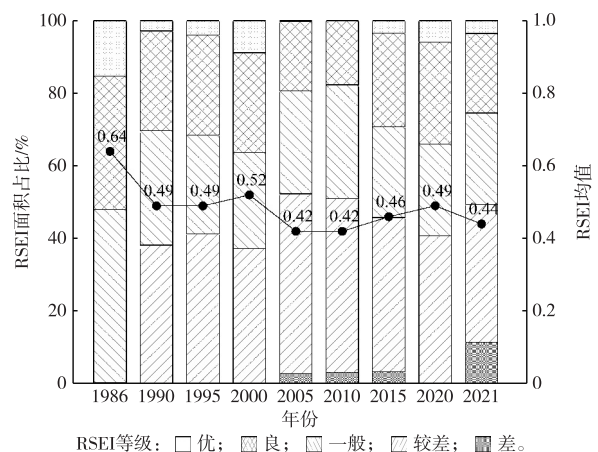


图 2 1986—2021 年祁连山国家级自然保护区 RSEI 均值及各等级面积占比变化

Fig. 2 Changes in RSEI mean value and area proportion of Qilian Mountain National Nature Reserve from 1986 to 2021

表 4 1986—2021 年 RSEI 各等级面积占比变化

Table 4 Change of RSEI area proportion from 1986 to 2021

| RSEI 等级 | 面积占比/% |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 1986 年 | 1990 年 | 1995 年 | 2000 年 | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 | 2020 年 | 2021 年 |
| 较差、差    | 0.31   | 38.18  | 41.22  | 37.16  | 52.30  | 51.05  | 45.75  | 40.08  | 49.39  |
| 一般      | 47.72  | 31.58  | 27.22  | 26.55  | 28.41  | 31.27  | 24.99  | 25.15  | 25.20  |
| 良、优     | 51.98  | 30.24  | 31.55  | 36.30  | 19.29  | 17.68  | 29.26  | 34.05  | 25.40  |

如图 3 所示,1986—2021 年祁连山自然保护区生态环境质量分布基本相似,优、良等级区域主要分布在低海拔地区,较差、一般等级区域主要分布在高海拔地区。具体来看,位于祁连山自然保护区东南部的武威市天祝藏族自治县区域生态环境质量以优等级为主;保护区中部地区张掖市民乐县、

山丹县、永昌县和凉州区生态环境质量以良、一般等级为主;保护区西北部的张掖市肃南裕固族自治县生态环境质量以差、较差等级为主。整体来看,祁连山国家级自然保护区生态环境质量自西北向东南逐步提升。

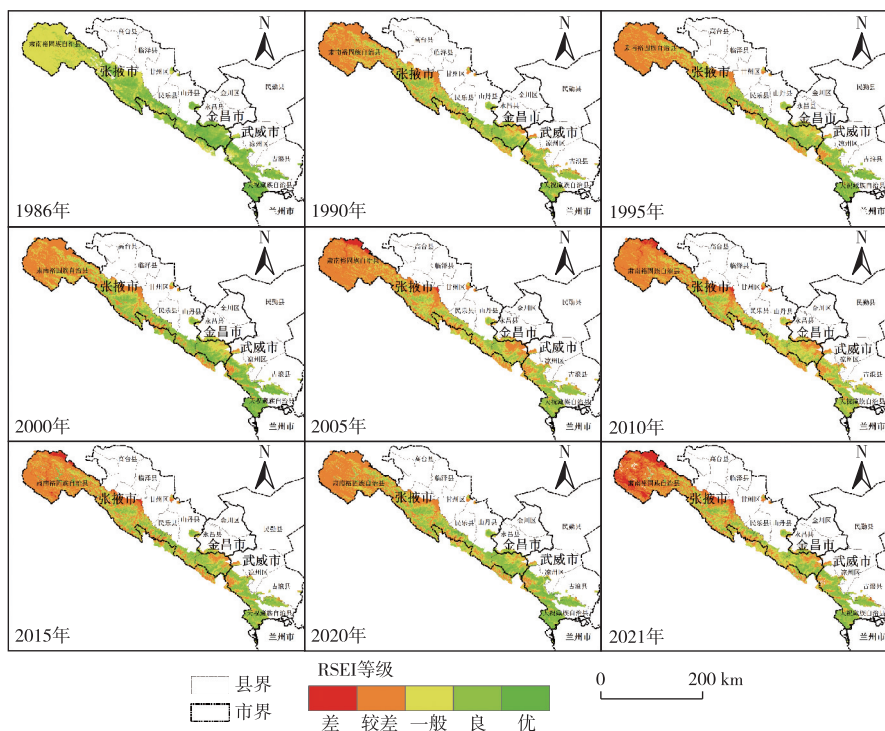


图 3 祁连山国家级自然保护区 RSEI 等级分布

Fig. 3 RSEI grade distribution of Qilian Mountain National Nature Reserve

### 2.3 生态环境质量时空差异分析

为了更好地了解保护区生态环境质量时空变化情况,对 9 期遥感生态指数进行差值分析,参考相关资料<sup>[32]</sup>并结合研究区实际情况,将生态环境变化结果划分为明显恶化(RSEI 下降 3 或 4 个等级)、轻度恶化(RSEI 下降 1 或 2 个等级)、不变(RSEI 等级不变)、轻度改善(RSEI 提高 1 或 2 个等级)、明显改善(RSEI 提高 3 或 4 个等级)。如图 4 所示,1986—1990 年保护区生态质量以轻度恶化为重。1990—2000 年保护区生态质量以不变为重,1995—2000 年

轻度改善区域面积占比较 1990—1995 年增加 6.62 个百分点。2000—2005 年保护区生态质量以不变为重,但轻度恶化区域面积占比较 1995—2000 年增加 38.57 个百分点。2005—2015 年保护区生态质量以不变为重,2010—2015 年轻度改善区域面积占比较 2005—2010 年增加 14.11 个百分点。2015—2021 年保护区生态质量以不变为重,2020—2021 年轻度恶化区域面积占比较 2015—2020 年增加 27.71 个百分点,局部地区生态质量出现恶化。

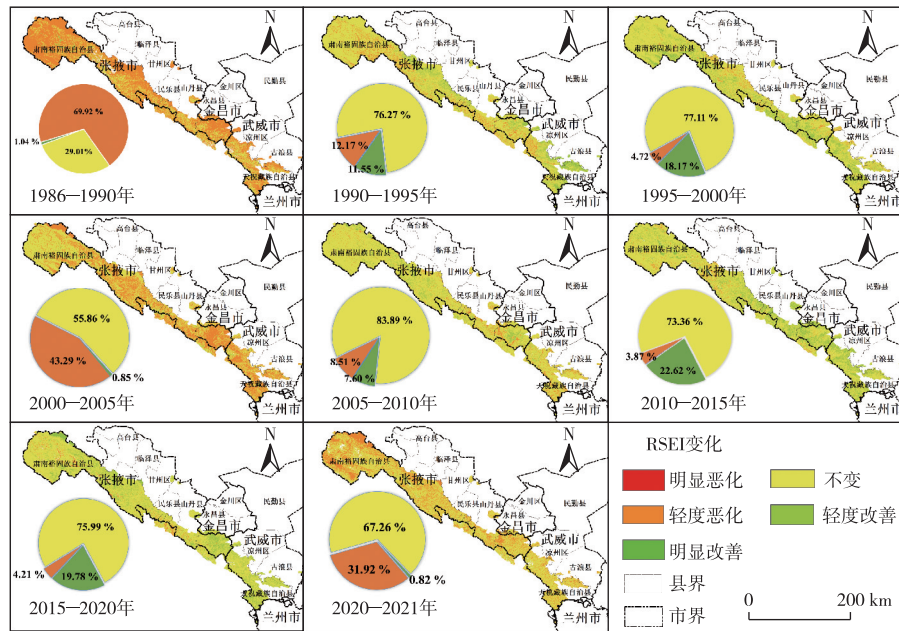


图 4 祁连山国家级自然保护区生态环境变化监测结果

Fig. 4 Monitoring map of ecological environment change in Qilian Mountain National Nature Reserve

### 2.4 生态环境质量成因分析

为更好地分析保护区生态环境质量变化,参照生态环境评价常用因子<sup>[32]</sup>并结合祁连山自然保护区实际情况,选取 NDVI、WET、LST、NDBSI、DEM、土地利用类型和人口密度 7 个因子作为自变量,以 RSEI 值作为因变量,采用地理探测器揭示生态环境质量变化影响因素。采用 ArcGIS 10.4.1 重采样工具统一各因子尺度,并利用自然间断法进行重分类。地理探测器常用空间统计单元为格网。通过多次 ArcGIS 实验结果对比发现,采用 2 km×2 km 的格网能够兼顾模型运算的效率和模型结果的可靠

性。以格网中心点为样本点,共得到 6 672 个样本点。在此基础上,分别提取 1986—2021 年不同样本点因变量和自变量值进行地理探测器分析,从而得到各因子对保护区生态环境的影响程度。

#### 2.4.1 单因子探测分析

由因子探测结果(表 5)可知,所有探测因子  $P$  值均小于 0.05,表明 7 个探测因子均通过显著性检验,可作为影响因素进行空间异质性分析。由  $q$  值可知,1990、2000、2010 和 2020 年保护区 NDVI 的解释力程度( $q$  值)均为最大,这表明保护区 NDVI 是 RSEI 的主导因子。

表 5 祁连山国家级自然保护区影响因子的探测结果( $q$ )

Table 5 Detection results of impact factors in Qilian Mountain Nature Reserve

| 因子    | 1990 年 |       |        | 2000 年 |       |        | 2010 年 |       |        | 2020 年 |       |        |
|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
|       | $q$    | $P$ 值 | $q$ 排序 | $q$    | $P$ 值 | $q$ 排序 | $q$    | $P$ 值 | $q$ 排序 | $q$    | $P$ 值 | $q$ 排序 |
| NDVI  | 0.839  | 0.00  | 1      | 0.929  | 0.00  | 1      | 0.857  | 0.00  | 1      | 0.902  | 0.00  | 1      |
| WET   | 0.274  | 0.00  | 5      | 0.254  | 0.00  | 6      | 0.005  | 0.00  | 7      | 0.441  | 0.00  | 3      |
| LST   | 0.263  | 0.00  | 6      | 0.023  | 0.00  | 7      | 0.249  | 0.00  | 5      | 0.355  | 0.00  | 6      |
| NDBSI | 0.690  | 0.00  | 2      | 0.782  | 0.00  | 2      | 0.794  | 0.00  | 2      | 0.898  | 0.00  | 2      |
| LUC   | 0.387  | 0.00  | 3      | 0.419  | 0.00  | 3      | 0.346  | 0.00  | 4      | 0.424  | 0.00  | 4      |
| DEM   | 0.345  | 0.00  | 4      | 0.402  | 0.00  | 4      | 0.364  | 0.00  | 3      | 0.369  | 0.00  | 5      |
| Pop   | 0.234  | 0.00  | 7      | 0.312  | 0.00  | 5      | 0.237  | 0.00  | 6      | 0.111  | 0.00  | 7      |

NDVI 为绿度, WET 为湿度, LST 为热度, NDBSI 为干度, LUC 为土地利用类型, DEM 为海拔, Pop 为人口密度。

由表 6 可知, 1990—2020 年保护区 NDVI 与 RSEI 变化趋势一致, 呈现先下降后上升趋势。保护区在气候暖湿化背景下, 林线逐渐爬升, 草原状况整体稳定。研究区冰川融化的加剧, 增加了黑河、

石羊河和疏勒河河流径流量, 这也为河流沿岸植被生长提供了有利条件<sup>[19]</sup>, 从而促使保护区生态环境呈现恢复趋势。4 个生态因子与 RSEI 的相关性分析结果(图 5)表明, 随着 NDVI(图 5a)和 WET(图

5b) 的增大, RSEI 也逐渐增大, 进一步说明 NDVI 和 WET 对生态环境起到促进作用。随着 LST 的升高, RSEI 先增大后减小(图 5c); 同时, RSEI 随着 NDBSI 的增大呈现减小趋势(图 5d), 进一步说明 LST 和 NDBSI 对生态环境起到抑制效果。通过分析地形因子与 RSEI 的相关性, 结果表明高程为 2 500~4 000 m 时, RSEI 相对较大(图 5e); 随着人口密度逐渐增大, RSEI 呈现减小趋势(图 5f), 表明过度的人类活动不利于生态环境改善。

### 2.4.2 交互式探测分析

如图 6 所示, 将研究区 1990、2000、2010 和 2020 年因变量 RSEI 与 7 个影响因子分别进行交互式探测, 探测结果呈双因子增强和非线性增强两种, 表明 2 个因子交互式探测作用效果要高于单个因子。

保护区目标年份 NDVI 与 NDBSI 是交互作用最强的组合, 即 NDVI 的显著变化增加了 NDBSI 作为自变量对保护区生态环境的解释力。NDVI 与其他因子交互作用也产生较高的  $q$  值, 这表明保护区生态环境是由多个因子相互作用导致的, 而不是因子之间简单叠加或独立影响。

表 6 1990、2000、2010 和 2020 年 NDVI 与 RSEI 变化  
Table 6 Changes of NDVI and RSEI in 1990, 2000, 2010 and 2020

| 年份   | NDVI 均值 | RSEI 均值 |
|------|---------|---------|
| 1990 | 0.60    | 0.49    |
| 2000 | 0.62    | 0.52    |
| 2010 | 0.57    | 0.42    |
| 2020 | 0.72    | 0.49    |

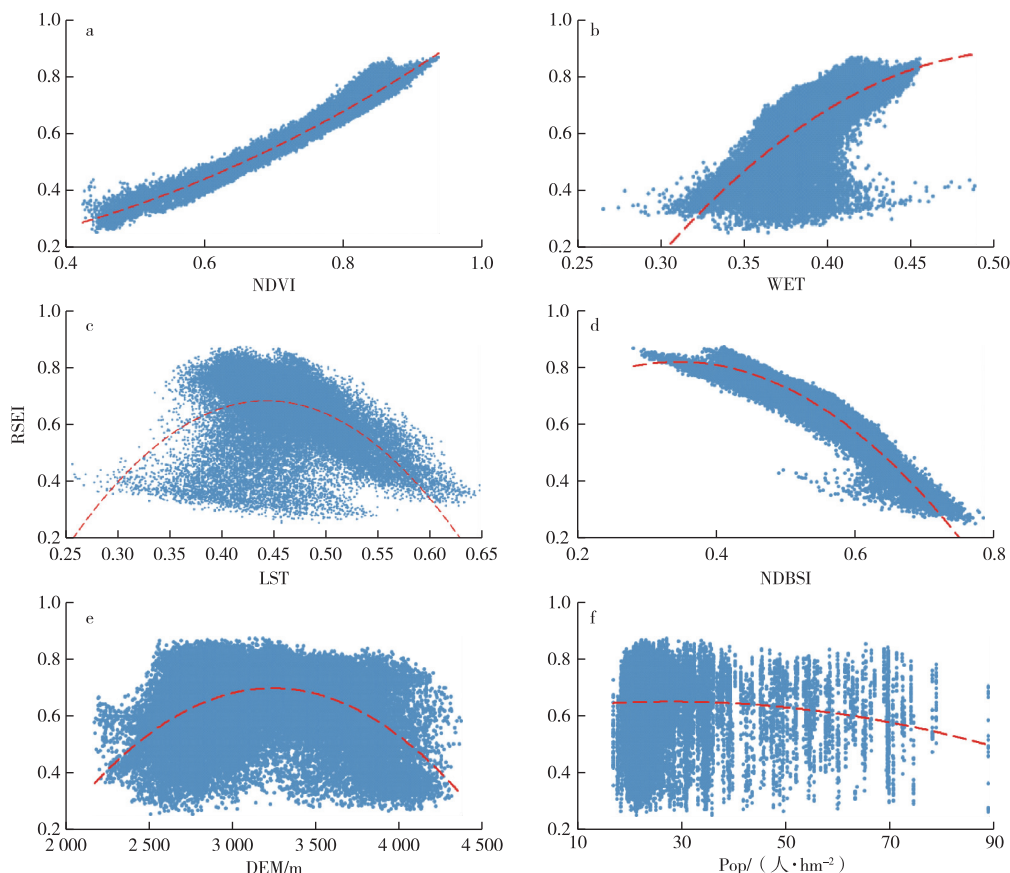


图 5 遥感生态指数 (RSEI) 随绿色度 (NDVI)、湿度 (WET)、热度 (LST)、干度 (NDBSI)、海拔 (DEM) 和人口密度 (Pop) 的变化

Fig. 5 Changes of RSEI with NDVI, WET, LST, NDBSI, DEM and Pop

## 3 讨论

利用 RSEI 改进模型监测祁连山国家级自然保护区 1986—2021 年生态环境质量动态变化, 结果表明研究期内区域生态环境质量总体呈现先下降后上升趋势, 这与其他研究中保护区同时段生态环境

质量演变趋势<sup>[5,9,30]</sup>基本一致。笔者研究数据起始于保护区建立前, 研究时段较长, 从像元尺度分析了保护区生态环境质量变化的时空差异, 结果也能够较好地反映保护区内部生态环境质量空间分异。受云量和成像质量影响, 笔者在近 35 年序列中选择 9 期数据进行研究, 未来可基于多源数据以实现研



究时间的连续性。

笔者研究在保护区生态环境质量影响因素分析方面仍存在一定不足,如对气温气象因子、人类活动及相关政策等信息的量化,导致生态环境质量驱动因素分析尚不够完善。1980—2020 年保护区及周边地区牲畜数量呈显著上升,其中,1986—1995 年保护区及周边地区牲畜数量增幅为 42.75 万头·a<sup>-1</sup>,这与 1986—1995 年保护区生态环境质量变差相符合。1995—2002 年保护区经历连续干旱<sup>[29]</sup>,在干旱累积效应影响下,植被指数呈现下降趋势,导致 1995—2010 年生态环境质量变差。人类活动在 1985—2016 年不断增加<sup>[20]</sup>,于 2016 年达到最大,这与 2000—2015 年保护区生态环境质量变差相对应。2011 年保护区范围内地方各级党委及政府开始实施草原生态保护等相关政策,2016 年开始实施关停

矿山、生态移民等生态环境整治措施,降低人类活动干扰,2015—2021 年保护区生态环境质量逐渐变好,这说明人类活动在保护区生态环境质量维护中起到关键作用<sup>[33]</sup>。祁连山国家级自然保护区生态环境质量近年来逐步改善,保护区已从生态治理阶段转为生态恢复阶段<sup>[34-35]</sup>,说明保护区生态环境修复已取得阶段性成果。因此,在后续研究中还应增加气候和气象要素以及人类活动足迹等数据作为生态环境的影响因子,以便更准确地探究保护区生态环境状况变化驱动原因。已有研究<sup>[36]</sup>表明,代表人类活动因子的土地利用数据精度越高,所包含的分类信息就越准确,对于 RSEI 影响因子的分析结果就越可靠。在下一阶段研究中,需要围绕土地利用数据精度对 RSEI 分析结果的准确性问题进行更加细致的探究。

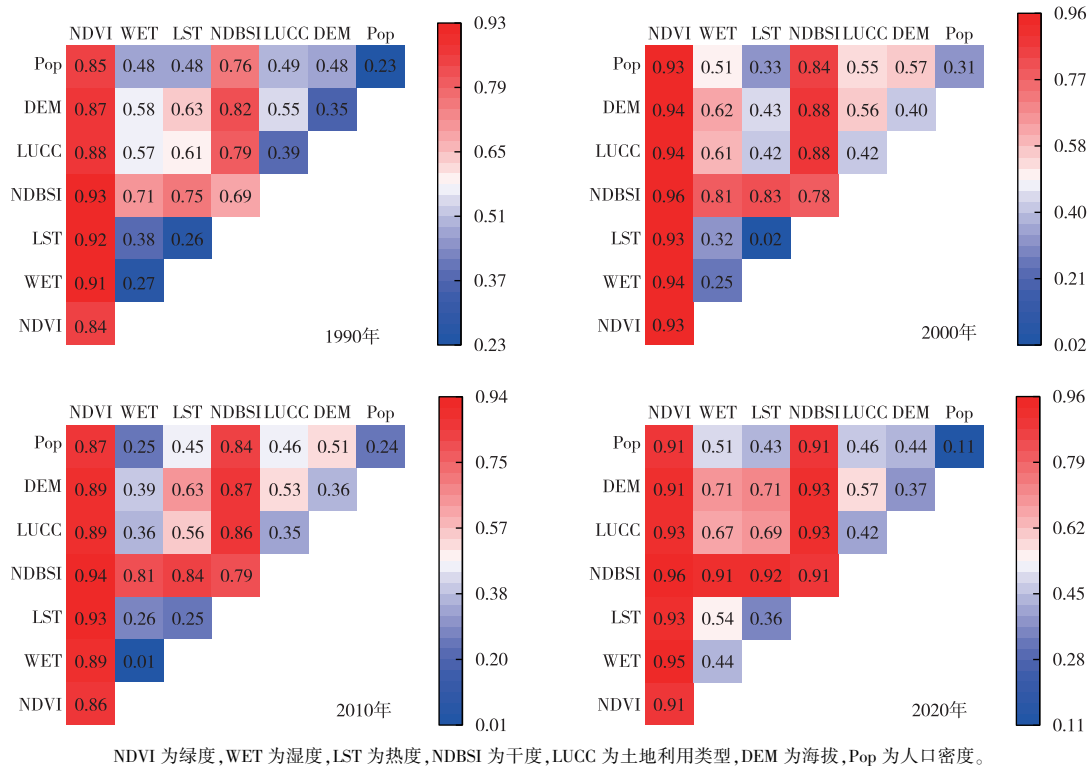


图 6 交互式探测结果

Fig. 6 Interactive detection results

#### 4 结论

基于 GEE 平台对祁连山国家级自然保护区 1986—2021 年 6—9 月影像采用 RSEI 改进模型进行计算,分析保护区生态环境质量变化和时空差异特征,并通过地理探测器研究保护区生态环境质量影响因素,得到以下结论:

(1) 与遥感生态指数模型相比,遥感生态指数改进模型避免了特征向量方向的干扰,可以较好反映研究区生态环境质量变化。时空分析结果表明,1986—2021 年保护区生态环境质量呈现先下降后上升趋势。整体来看,祁连山自然保护区生态环境呈现恢复趋势;从空间分布来看,保护区生态环境质量呈现东高西低的分布格局。

(2) 祁连山自然保护区生态环境质量时空差异表明,1986—2021年生态环境质量主要为轻度恶化、不变和轻度改善,轻度恶化区域主要分布在张掖市肃南裕固族自治县北部地区以及张掖市与武威市交界处等部分区域。轻度改善区域分布零散,在核心区有较多分布。

(3) 从单因子探测和交互式探测结果来看,绿色(NDVI)指标为保护区35年来生态环境质量变化的主要驱动因素。

#### 参考文献:

- [1] 王方. 祁连山自然保护区生态资产价值评估研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [WANG Fang. Study on the Value Evaluation of Qilian Mountain Nature Reserve Ecological Asset [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]
- [2] 左璐, 孙雷刚, 徐全洪, 等. 区域生态环境评价研究综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 806-817. [ZUO Lu, SUN Lei-gang, XU Quan-hong, et al. A Review of the Studies on Regional Ecological Environment Evaluation [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2021, 43(4): 806-817.]
- [3] 刘宽梅. 祁连山自然保护区景观格局变化及其稳定性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [LIU Kuan-mei. Study on the Change and Stability of Landscape Pattern in Qilian Mountain Nature Reserve [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]
- [4] 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229-234. [WANG Tao, GAO Feng, WANG Bao, et al. Status and Suggestions on Ecological Protection and Restoration of Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 229-234.]
- [5] GENG L Y, CHE T, WANG X F, et al. Detecting Spatiotemporal Changes in Vegetation with the BFAST Model in the Qilian Mountain Region during 2000-2017 [J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 103.
- [6] DUAN Q T, LUO L, ZHAO W Z, et al. Mapping and Evaluating Human Pressure Changes in the Qilian Mountains [J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2400.
- [7] 宋伟宏, 王莉娜, 张金龙. 甘肃祁连山自然保护区草地时空变化及其对气候的响应[J]. 草业科学, 2019, 36(9): 2233-2249. [SONG Wei-hong, WANG Li-na, ZHANG Jin-long. Temporal and Spatial Changes in Response to Climate in Grasslands of the Qilian Mountain National Nature Reserve [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(9): 2233-2249.]
- [8] 杨磊, 单姝瑶, 桑晨, 等. 祁连山国家公园生态环境质量综合评价及演变特征分析[J]. 草业科学, 2022, 39(2): 278-289. [YANG Lei, SHAN Shu-yao, SANG Chen, et al. Comprehensive Evaluation and Evolutionary Characteristics of Eco-environment Quality in Qilian Mountain National Park [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 278-289.]
- [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 Jin-yue, 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] 张华, 韩武宏, 宋金岳, 等. 祁连山国家公园生境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1419-1430. [ZHANG Hua, HAN Wu-hong, SONG Jin-yue, et al. Spatial-temporal Variations of Habitat Quality in Qilian Mountain National Park [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5): 1419-1430.]
- [11] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. [XU Han-qiu. A Remote Sensing Urban Ecological Index and Its Application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]
- [12] 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 Han-qiu. A Remote Sensing Index for Assessment of Regional Ecological Changes [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.]
- [13] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于Google Earth Engine平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391. [CHEN Wei, HUANG Hui-ping, TIAN Yi-chen, et al. Monitoring and Assessment of the Eco-environment Quality in the Sanjiangyuan Region Based on Google Earth Engine [J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(9): 1382-1391.]
- [14] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 1-7. [XU Han-qiu, DENG Wen-hui. Rationality Analysis of MRSEI and Its Difference with RSEI [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 1-7.]
- [15] ZHENG Z H, WU Z F, CHEN Y B, 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.
- [16] LI N, WANG J Y, QIN F. The Improvement of Ecological Environment Index Model RSEI [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(11): 403.
- [17] JIANG F, ZHANG Y Q, LI J Y, et al. Research on Remote Sensing Ecological Environmental Assessment Method Optimized by Regional Scale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(48): 68174-68187.
- [18] 郭生祥, 汪有奎, 汪杰, 等. 甘肃祁连山国家级自然保护区功能区划研究[J]. 林业科技通讯, 2015(4): 67-70. [GUO Sheng-xiang, WANG You-kui, WANG Jie, et al. Study on Functional Zoning of Qilian Mountain National Nature Reserve in Gansu Province [J]. Forest Science and Technology, 2015(4): 67-70.]
- [19] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937. [LI Xin, GOU Xiao-hua, WANG Ning-lian, et al. Tightening Ecological Management Facilitates Green Development in the Qilian Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928-2937.]
- [20] 潘欣, 李金文, 郭生祥, 等. 祁连山自然保护区生态环境现状分析与对策建议[J]. 农业与技术, 2020, 40(12): 93-96. [PAN Xin, LI Jin-wen, GUO Sheng-xiang, et al. Analysis on the Present

- Situation of Ecological Environment in Qilian Mountain Nature Reserve and Countermeasures and Suggestions [J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(12): 93-96.]
- [21] 田庆林. 甘肃投资整改祁连山生态环境破坏问题 [N]. *中国工业报*, 2021-09-14(2).
- [22] 徐涵秋. Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(2): 229-235. [XU Han-qi. Change of Landsat 8 TIRS Calibration Parameters and Its Effect on Land Surface Temperature Retrieval [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 229-235.]
- [23] ZHANG Y Q, JIANG F. Developing a Remote Sensing-based Ecological Index Based on Improved Biophysical Features [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 16(1): 012008.
- [24] GUPTA K, KUMAR P, PATHAN S K, *et al.* Urban Neighborhood Green Index: A Measure of Green Spaces in Urban Areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(3): 325-335.
- [25] 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 Jin-feng, XU Cheng-dong. Geodetector: Principle and Prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [26] 梁龙武, 先乐, 陈明星. 改革开放以来中国区域人口与经济重心演进态势及其影响因素 [J]. *经济地理*, 2022, 42(2): 93-103. [LIANG Long-wu, XIAN Yue, CHEN Ming-xing. Evolution Trend and Influencing Factors of Regional Population and Economy Gravity Center in China since the Reform and Opening-up [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 93-103.]
- [27] 胡克宏, 张震. 陕西秦岭山区留坝县生态质量时空特征及影响因素分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6): 751-760. [HU Ke-hong, ZHANG Zhen. Spatio-temporal Characteristics and Driving-factors Analysis of Ecological Quality Change in Qinling Mountains of Shaanxi Province: Case Study in Liuba County, Northwest China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(6): 751-760.]
- [28] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 等. 基于土地利用变化的祁连山地区生境质量时空演变分析 [J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 278-284, 325. [XUE Xiao-yu, WANG Xiao-yun, DUAN Han-ming, *et al.* Analysis on Spatio-temporal Evolution of Habitat Quality in Qilian Mountains Based on Land Use Change [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 278-284, 325.]
- [29] 彭擎. 气候变化背景下祁连山国家公园生态环境模拟及预测 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. [PENG Qing. Simulation and Prediction of Ecological Environment in Qilian Mountain National Park under Climate Change [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.]
- [30] LIU L, SONG W, ZHANG Y J, *et al.* Zoning of Ecological Restoration in the Qilian Mountain Area, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(23): 12417.
- [31] HJ 192—2015, 生态环境状况评价技术规范 [S].
- [32] 王志超, 何新华. 基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(4): 492-500. [WANG Zhi-chao, HE Xin-hua. Assessments of Ecological Quality in Jinjiang District of Chengdu City Using the FVC and RSEI Models [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(4): 492-500.]
- [33] 高妍, 冯起, 李宗省. 祁连山国家公园甘肃片区生态-经济-社会耦合协调发展评价 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1197-1204. [GAO Yan, FENG Qi, LI Zong-xing. An Assessment on the Coordinated Development of Ecology, Economy and Society in Gansu Section of Qilian Mountain National Park [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6): 1197-1204.]
- [34] GUAN Y J, KANG R, LIU J G. Evolution of the Field of Ecological Restoration over the Last Three Decades: A Bibliometric Analysis [J]. *Restoration Ecology*, 2019, 27(3): 647-660.
- [35] 马蓉蓉, 黄雨晗, 周伟, 等. 祁连山山水林田湖草生态保护与修复的探索与实践 [J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8990-8997. [MA Rong-rong, HUANG Yu-han, ZHOU Wei, *et al.* Exploration and Practice of Ecological Protection and Restoration about Mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in the Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8990-8997.]
- [36] YANG Z J, SUN C, YE J W, *et al.* Spatio-temporal Heterogeneity of Ecological Quality in Hangzhou Greater Bay Area (HGBA) of China and Response to Land Use and Cover Change [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5613.

作者简介: 汪孝贤 (1996—), 男, 甘肃天水人, 研究方向为基于 3S 技术的生态环境监测。E-mail: 1259378951@qq.com

(责任编辑: 王昌群)