

苏万峰,汉光昭,叶得力,等.共和盆地生态环境遥感评价及驱动力分析[J].中国沙漠,2023,43(5):74-84.

# 共和盆地生态环境遥感评价及驱动力分析

苏万峰<sup>1</sup>, 汉光昭<sup>1</sup>, 叶得力<sup>2</sup>, 曹广超<sup>1,3</sup>

(1.青海师范大学 地理科学学院 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室/青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008; 2.青海黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008; 3.青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

**摘要:** 科学评估区域生态环境质量是实现可持续发展的前提。基于2000—2020年Landsat遥感影像,构建遥感生态指数(RSEI)分析青藏高原典型高寒沙区共和盆地近20年的生态环境质量时空变化特征,并使用地理探测器量化该区生态环境的主要驱动因子。结果表明:(1)共和盆地RSEI均值在2000—2020年呈增加趋势,平均增幅为7.5%/10a,空间上呈东高西低、南北高中间低的分布特征;(2)2000—2020年,共和盆地生态环境改善区域占比为66.55%,主要分布在中部和东南部,保持不变的区域占比33.15%,退化区域占比0.29%;(3)降水是影响生态环境质量的关键因子,因子交互作用对生态环境质量的解释力更强,合理的土地资源分配能显著促进生态改善。

**关键词:** 共和盆地; 遥感生态指数; 地理探测器; 生态环境质量

**文章编号:** 1000-694X(2023)05-074-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00029

**中图分类号:** X835

**文献标志码:** A

## 0 引言

全球干旱区面积约占陆地总面积的41%,超过1/3的生物多样性保护区分布在干旱区<sup>[1]</sup>。干旱区降水量小、蒸发量大、植被覆盖度低,自然生态系统十分脆弱,气候变化和人类活动对其产生的影响更加显著,生态环境一旦遭到破坏就很难恢复<sup>[2-3]</sup>。近年来,中国干旱区土地荒漠化、盐渍化、草场退化等生态问题日益加剧,已经严重影响到社会经济的高质量发展和人类的健康生活<sup>[4-5]</sup>。因此,监测干旱区生态环境质量变化和分布情况对生态环境的保护与恢复具有重要意义。

生态环境质量指在具体时间和空间范围内生态系统的总体或部分生态环境因子的组合体对人类的生存及社会经济持续发展的适宜程度<sup>[6]</sup>。生态环境是复杂的巨系统,生态环境质量的评价是复杂性和综合性的研究工作<sup>[7]</sup>,常见指数评价法<sup>[8]</sup>、层次分析法<sup>[9]</sup>、生态足迹法<sup>[10]</sup>等。国家环保总局于2006年提出了生态环境状况指数(Ecological Index)以加强生态环境保护,评价中国生态环境状况及变化趋

势<sup>[11]</sup>,但各指数权重皆为人为设定,其合理性以及可操作性有一定局限<sup>[12-13]</sup>。当前,由联合国粮农组织、世界银行、联合国环境规划署和经合组织在20世纪80年代共同开发的压力-状态-响应模型(Pressure-State-Response, PSR)是较为成熟的多指标生态环境评价体系且应用广泛<sup>[14-16]</sup>。不同评价体系因评价重点、指标选取等存在差别导致评价结论存在差异。

随着生态系统网络监测技术(GIS技术、RS技术、GPS技术)的发展,卫星遥感技术以数据易获取、覆盖范围广、大面积同步观测等优点得到广泛应用,与地理信息系统结合后在生态环境评价中获得了较好的效果<sup>[17]</sup>。徐涵秋<sup>[18]</sup>基于遥感技术提出遥感生态指数(Remote sensing ecological index, RSEI),用于定量评价区域生态环境质量。RSEI指数是完全基于自然因子,拥有指标获取简单、无人设定权重、结果可视化等优势的评价指标,缺少人为干扰从而保证评价结果的客观合理<sup>[18-19]</sup>。近年来,RSEI得到不少学者应用以科学评价区域生态环境质量,皆取得良好效果。如何天星等<sup>[20]</sup>构建RSEI

收稿日期:2022-11-23; 改回日期:2023-04-12

资助项目:青海省重大科技专项(2021-SF-A7-1);青海省创新平台建设专项(2020-ZJ-Y06)

作者简介:苏万峰(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: 1085132604@qq.com

通信作者:曹广超(E-mail: caoguangchao@qhnu.edu.cn)

对长三角一体化示范区生态质量进行动态评估；蒋超亮等<sup>[21]</sup>通过 *RSEI* 评估了三峡生态经济走廊的环境变化并确定其对人类活动的反应。

共和盆地是青海省第二大风沙地貌区<sup>[22]</sup>，海拔高、年均气温较低且降水稀少，植被稀疏，草地退化，沙漠化严重，为高原温带半干旱带向干旱荒漠地带过渡性气候，是高寒荒漠生态系统环境变化的敏感地带<sup>[23-24]</sup>。本文通过 Landsat 遥感影像构建 *RSEI*，利用主成分分析法和地理探测器等方法，探究 2000—2020 年共和盆地生态环境质量时空变化特征，进一步分析其变化的驱动因素，为共和盆地生态环境保护 and 可持续发展提供借鉴和参考依据。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

共和盆地位于青藏高原东北部，是昆仑山系与秦岭山系之间的过渡带，盆地地势东宽西窄，是因黄河自西南向东北分割而形成的外泄盆地<sup>[25]</sup>，总面积约 25 500 km<sup>2</sup>，海拔 2 871~3 870 m，属黄河上游半干旱河流盆地沙漠化区，是青海省主要的风沙分布地<sup>[26-27]</sup>（图 1）。盆地年均气温 0.86 °C，年降水量

311~402 mm，年蒸发量 1 528~1 937 mm，气候干燥寒冷，是典型的高寒干旱半干旱大陆性气候<sup>[26]</sup>。自然生态系统主要包括典型草原、高寒草原和荒漠草原<sup>[28]</sup>，塔拉滩和木格滩一带主要为沙地，木格滩是共和盆地内最大的连续风沙带<sup>[29-30]</sup>；地带性土壤有栗钙土和棕钙土，非地带性土壤有风沙土、草甸土和沼泽土等<sup>[31]</sup>；代表性植物有克氏针茅 (*Stipa krylovii*)、紫花针茅 (*Stipa purpurea*)、沙蒿 (*Artemisia desertorum*) 和固沙草 (*Orinus thoro*)<sup>[26]</sup>。

### 1.2 数据来源

文中所用 Landsat5/8 Collection 2 Surface Reflectance 数据调用自 PIE-Engine 平台 (<https://engine.piesat.cn/engine/home>)，采用去云算法和中值合成法将每年 6—9 月的影像合并，分别得到 2000、2010、2020 年 3 期影像。上述方法不仅可以消除云层的影响还能降低时间不一致带来的误差，且均经过大气校正，空间分辨率 30 m；ASTER GDEM 30 m 数字高程数据来自地理数据空间云 (<https://www.gsccloud.cn>)；降水 and 气温栅格数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)，空间分辨率 1 km；土地利用数据和夜间灯光数据来自资源环

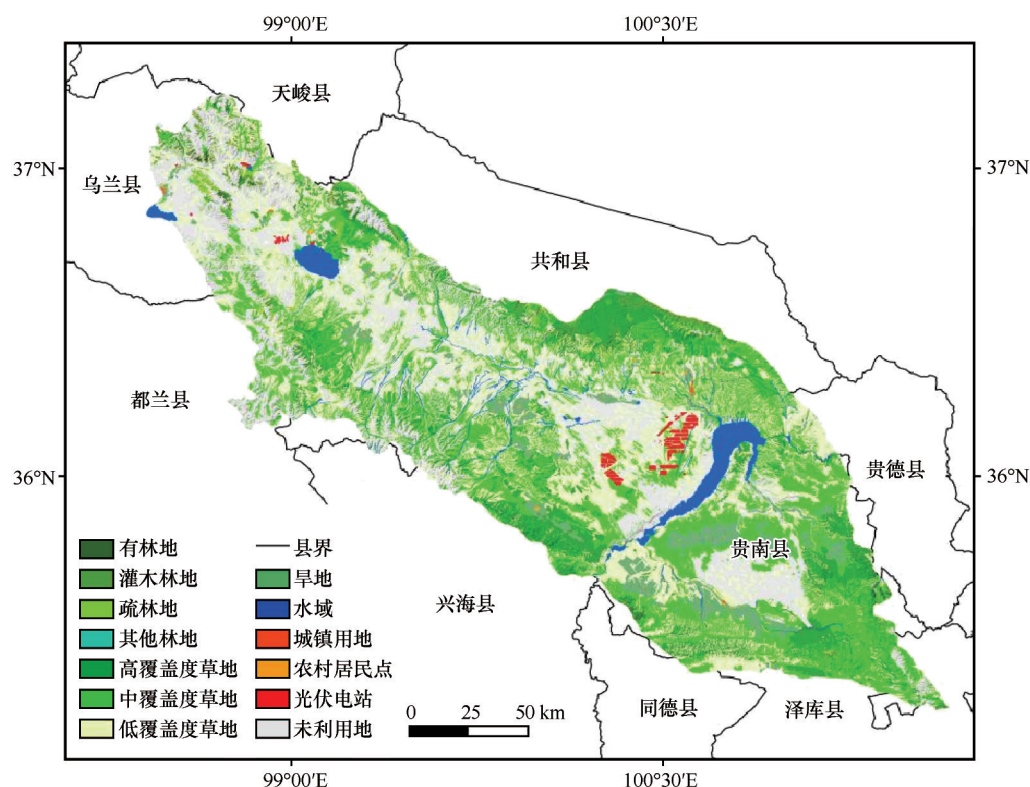


图1 共和盆地区位

Fig.1 Location of the Gonghe basin

境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率1 km。各数据指标均重采样至30 m,利用Arc-GIS将各指标格网化并分级赋值,进行地理探测器分析。

## 2 研究方法

### 2.1 构建遥感生态指数(RSEI)

共和盆地生态环境脆弱,植被覆盖率低,气候干燥寒冷,水土流失严重。基于研究区环境特性,本文选取NDVI、WET、LST和SI 4个指标构建共和盆地的遥感生态指数反映生态质量变化,并参照《生态环境评价技术规范》的分级标准,以0.2为间隔,将生态指数划分为0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8和0.8~1共5个等级,分别代表差、较差、一般、良好、优质<sup>[32]</sup>。

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

式中:RSEI为遥感生态指数;NDVI、WET、LST、SI分别是绿度、湿度、热度和干度。

#### 2.1.1 绿度指标

NDVI作为植被覆盖率的重要指标,反映了环境的变化格局和演变趋势,是衡量健康植被的标准化指标<sup>[33]</sup>。

$$NDVI = \frac{b_{nir} - b_{red}}{b_{nir} + b_{red}} \quad (2)$$

式中:NDVI表示绿度指标; $b_{nir}$ 和 $b_{red}$ 表示Landsat的近红外波段和红色波段反射率。

#### 2.1.2 湿度指标

土壤湿度的高低能够很好地反映区域的生态环境质量状况,是监测地表环境的重要指标。采用缨帽变换能够很好地反演土壤湿度,因此采用缨帽变换中的湿度分量代表湿度指标。不同传感器采用不同的表达式<sup>[34]</sup>。

$$WET_{TM} = 0.0315b_{blue} + 0.2021b_{green} + 0.3012b_{red} + 0.1594b_{nir} - 0.6806b_{swir1} - 0.6109b_{swir2} \quad (3)$$

$$WET_{OLI} = 0.1511b_{blue} + 0.1973b_{green} + 0.3283b_{red} + 0.3407b_{nir} - 0.7117b_{swir1} - 0.4559b_{swir2} \quad (4)$$

式中: $b_{blue}$ 、 $b_{green}$ 、 $b_{red}$ 、 $b_{nir}$ 、 $b_{swir1}$ 和 $b_{swir2}$ 分别是Landsat影像中蓝、绿、红、近红外、短波红外1和短波红外2波段反射率。

#### 2.1.3 热度指标

热度指标选取地表温度表示,Landsat5/8 Col-

lection 2 Surface Reflectance中的第6波段和第10波段为地表温度数据,Landsat 4-8表面温度产品使用罗彻斯特理工学院和NASA喷气推进实验室合作开发的Landsat表面温度算法生成,通过比例因子将其还原为真实值。

$$ST = 0.00341802DN + 149 \quad (5)$$

式中:ST为地表温度(K);DN表示地表反射率。

#### 2.1.4 干度指标

由于RSEI指数的提出主要是针对城市生态环境评价,其中的干度指标是由裸土指数(SI)与建筑指数(IBI)二者合成的<sup>[18]</sup>,考虑研究区中建筑面积占比,因此采用裸土指数表示干度。

$$SI = \frac{(b_{red} + b_{swir1}) - (b_{blue} + b_{nir})}{(b_{red} + b_{swir1}) + (b_{blue} + b_{nir})} \quad (6)$$

式中:SI是干度指标; $b_{red}$ 、 $b_{blue}$ 、 $b_{nir}$ 和 $b_{swir1}$ 分别为Landsat影像中的红、蓝、近红外和短波红外1波段反射率。

#### 2.1.5 水体掩膜

RSEI是面向陆地生态系统开发的生态指数,当研究区有大面积水体时,为使湿度分量能够真正代表实际情况,应通过水体指数将水体掩膜<sup>[35-36]</sup>。

$$MNDWI = \frac{b_{green} - b_{swir1}}{b_{green} + b_{swir1}} \quad (7)$$

式中: $b_{green}$ 和 $b_{swir1}$ 分别是Landsat影像中绿色和短波红外1波段反射率。

#### 2.1.6 主成分分析

由于以上4个指标的量纲互不相同,因此在进行主成分分析之前,必须对它们进行量纲的统一,将4个指标进行归一化,使其值介于0~1<sup>[37]</sup>。

$$A_i = \frac{B_i - B_{min}}{B_{max} - B_{min}} \quad (8)$$

式中: $A_i$ 表示第*i*个指标的归一化值; $B_i$ 、 $B_{min}$ 和 $B_{max}$ 分别表示第*i*个指标原始值、最小值和最大值。

通过主成分分析集成以上指标得到RSEI,将各变量信息最大程度上集中在第一主成分(PCA1),同时无需人为设定权重,避免了主观带来的误差<sup>[38-39]</sup>。

$$RSEI_0 = PC1[f(NDVI, WET, LST, SI)] \quad (9)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0-min}}{RSEI_{0-max} - RSEI_{0-min}} \quad (10)$$

式中: $RSEI_0$ 表示初始遥感生态指数; $RSEI_{0-min}$ 和 $RSEI_{0-max}$ 表示初始遥感生态指数的最小值和最大值; $RSEI$ 表示遥感生态指数,其值越接近1,表示生态环境越好,越接近0说明生态环境越差。



2.2 地理探测器

地理探测器是一种基于因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测 4 个模块,探测空间分异性以及揭示背后驱动因子的新的统计学方法<sup>[40]</sup>。将 *RSEI* 作为因变量,绿度、湿度、干度、热度、降水、气温、高程、土地利用类型及夜间灯光强度 9 个因子为自变量,采用因子探测和交互探测分析各因子对生态环境的影响力水平和交互作用。

2.2.1 因子探测

因子探测用于探测生态环境的空间分异性以及探测各因子对空间分异性的解释力<sup>[41]</sup>。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{11}$$

式中: $h=1,2,\cdots;L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层,即分类或分区; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差。

2.2.2 交互作用探测

交互探测用于识别不同因子之间的交互作用,即评估多因子共同作用下是否增强或减弱对区域生态环境的影响力,或这些因子对生态环境的影响是相互独立的<sup>[41]</sup>。两因子之间的关系可分为以下几类(表 1):

表 1 因子探测交互结果	
Table 1 Results of factors interaction	
判断依据	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

3 结果与分析

3.1 生态环境质量评价结果

研究区 2000—2010 年 *NDVI* 和 *WET* 呈现增加趋势,分别增长了 0.03 和 0.02(表 2)。而对环境起负向作用的 *LST* 和 *SI* 都呈现不同程度的下降,分别减少了 0.07 和 0.12,同时期的 *RSEI* 从 0.40 上升至 0.46,增幅达 15%。2010—2020 年, *NDVI* 和 *WET* 稳定上升,同时 *LST* 也呈现增加趋势, *SI* 依旧保持降低,虽然热度因子相比于前一阶段有所上升,但在环境综合作用下 *RSEI* 并未降低,生态环境持续改

表 2 2000—2020 年共和盆地各指标平均值  
Table 2 Average values of indicators in Gonghe Basin from 2000 to 2020

年份	绿度 <i>NDVI</i>	湿度 <i>WET</i>	热度 <i>LST</i>	干度 <i>SI</i>	遥感生态 指数 <i>RSEI</i>
2000	0.65	0.41	0.61	0.66	0.40
2010	0.68	0.43	0.54	0.54	0.46
2020	0.70	0.44	0.62	0.41	0.55

善, *RSEI* 从 0.46 增长到了 0.55,增幅为 19.5%。*LST* 平均值相对前 10 年增长了 14.8%,但是 *SI* 同比降低了 24.1%,在 *NDVI* 和 *WET* 增长相对稳定的情况下,说明 *SI* 对生态环境的影响更强。

2000 年主成分分析中对生态环境起正面影响的 *NDVI* 和 *WET* 两个指标载荷值为负(表 3),由于软件计算导致的这一现象需要采用“1-PC1”进行还原,以表示真实生态质量<sup>[35]</sup>。2000—2020 年第一主成分特征值贡献率分别是 69.39%、72.99% 和 78.64%,包含了 4 个指标的大部分信息。因此 *RSEI* 指数能够全面反映研究区的生态环境状况,对生态质量评价有较好的普适性。

表 3 2000—2020 年主成分分析  
Table 3 Principal component analysis from 2000 to 2020

年份	主成分	绿度 <i>NDVI</i>	湿度 <i>WET</i>	热度 <i>LST</i>	干度 <i>SI</i>	特征值贡 献率/%
2000	PC1	-0.64	-0.36	0.44	0.52	69.39
2010	PC1	0.65	0.31	-0.36	-0.59	72.99
2020	PC1	0.77	0.18	-0.30	-0.53	78.64

3.2 RSEI 时空变化

2000—2010 年木格滩、龙羊峡水库两岸阶地、塔拉滩、沙珠玉以及茶卡盐湖等地区生态环境质量等级一直较低,但在空间变化中生态环境表现较差的区域面积有一定缩减,其中塔拉滩和木格滩生态环境改善明显(图 2)。而在共和盆地边缘地区,即靠近青海南山、哇洪山和河卡山一带,生态环境明显优于中部地区,且呈现扩张趋势。在后一时期,共和盆地整体生态环境有了较大改观,中间区域的生态环境质量相比前一阶段提升了一个等级,而共和盆地东南侧除木格滩外,生态环境质量等级整体达到良好。目前,共和盆地内的东南地区、青海南山、哇洪山和河卡山一侧,生态环境比盆地其余区域更优。而木格滩和塔拉滩等沙化较为严重地区,

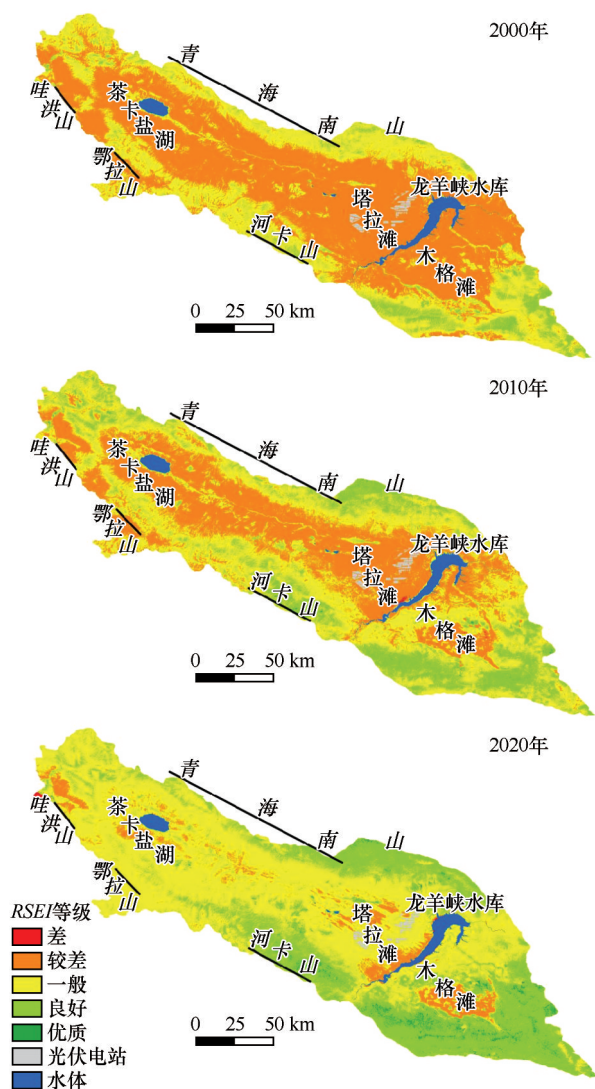


图2 2000—2020年共和盆地生态环境质量等级分布

Fig.2 Distribution of ecological environmental quality levels in the Gonghe Basin from 2000 to 2020

从等级分布图中可以发现生态环境虽得到改善,但一些固定、流动沙丘没有太大变化。

2000—2010年等级为差和较差的区域面积由59.02%下降到了38.44%,生态环境质量一般的区域

面积从35.15%上升到44.74%,几乎占据共和盆地一半的面积,而质量在良好及以上部分也从2000年的5.83%上升到2010年的16.82%,整体生态环境质量向好。在2010—2020年共和盆地生态环境保持好转,等级较差和差的区域面积仅有1 940.33 km<sup>2</sup>,占7.51%,减少了7 995.29 km<sup>2</sup>(表4)。等级一般区域面积扩大至15 284.50 km<sup>2</sup>,占总面积的59.13%。等级良好的区域由4 329.24 km<sup>2</sup>增加至8 173.21 km<sup>2</sup>,约为2010年的1.9倍,而优质区域面积大约是前一时期的22.5倍。人工造林以及围栏禁牧等生态工程的实施与青藏高原气候暖湿化的双重影响下,共和盆地生态环境正在逐步恢复。

### 3.3 RSEI动态

为进一步分析共和盆地生态环境质量的变化趋势,将各年份RSEI进行差值处理,以《生态环境评价技术规范》中的标准为依据,将生态指数变化等级分为5类:恶化、变差、不变、变好和优化。由表5和图3可知,2000—2010年,共和盆地生态环境有19 170.80 km<sup>2</sup>的区域无明显变化,占比74.16%,有6 380.38 km<sup>2</sup>的区域生态环境转好,占比24.68%,主要在龙羊峡水库东南方、临近河卡山一侧、青海南山东侧、贵德黄河两岸以及盆地西北角。生态环境变差的区域零星分布在盆地内,占比0.73%,而优化的区域较少,仅占0.43%。2010—2020年保持不变的区域面积为14 955.20 km<sup>2</sup>,占比57.85%。而变好和优化的区域面积相比前一阶段更明显,占总面积的41.39%,主要围绕龙羊峡水库两岸阶地以及盆地中心部分区域,而恶性发展的区域面积与前10年基本相等,仅占0.76%。整体上看,共和盆地生态环境质量正在不断好转,后10年的生态环境变化更加显著,中部和东部变化明显。而鄂拉山-哇洪山一带、

表4 共和盆地2000—2020年遥感生态指数(RSEI)等级及面积

Table 4 Ecological gradients and area changes in the Gonghe Basin from 2000 to 2020

RSEI等级	2000年		2010年		2020年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
差	0.16	0.00	14.72	0.06	25.36	0.10
较差	15 255.90	59.02	9 920.83	38.38	1 914.97	7.41
一般	9 085.20	35.15	11 565.40	44.74	15 284.50	59.13
良好	1 505.88	5.82	4 329.24	16.74	8 173.21	31.61
优质	2.96	0.01	20.06	0.08	452.26	1.75

表 5 共和盆地 2000—2020 年生态环境等级变化统计

Table 5 Statistics on changes in ecological environment quality levels in the Gonghe Basin from 2000 to 2020

变化等级	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
恶化	3.13	0.01	29.24	0.11	18.83	0.07
变差	185.00	0.72	168.45	0.65	58.10	0.22
不变	19 170.80	74.16	14 955.20	57.85	8 568.24	33.15
变好	6 380.38	24.68	10 615.50	41.07	15 774.10	61.02
优化	110.77	0.43	81.85	0.32	1 430.74	5.53

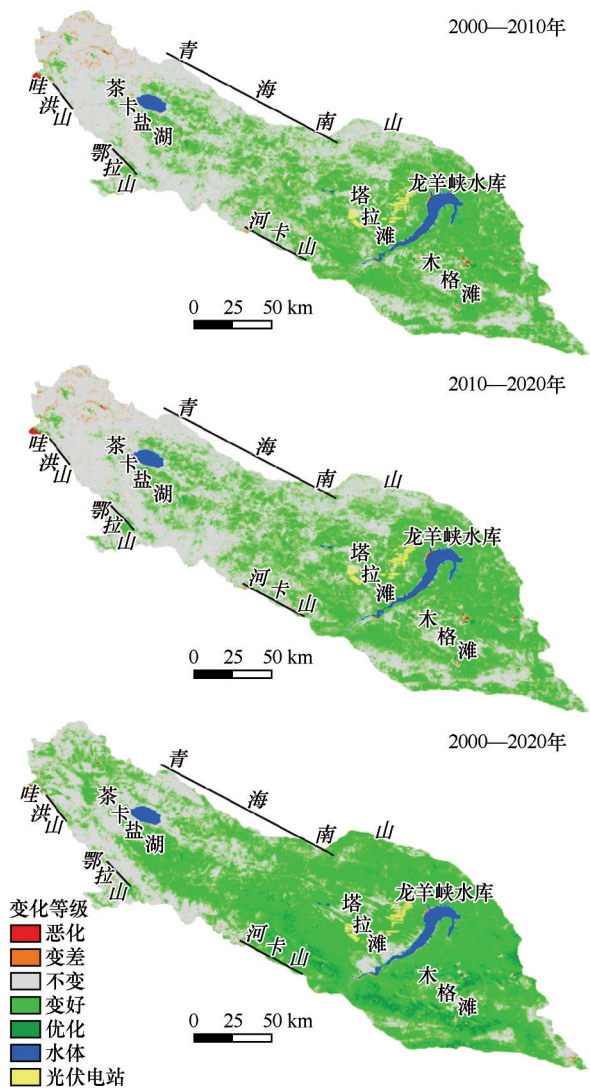


图 3 2000—2020 年共和盆地生态环境质量变化空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of changes ecological environmen-  
tal quality in the Gonghe Basin from 2000 to 2020

盐湖周边区域以及部分严重沙漠化地区沙化程度有所降低但并未完全消除。

3.4 驱动力因素

为探讨共和盆地生态环境空间分异性背后的

驱动因素,以 *NDVI*、*WET*、*SI* 和 *LST* 为基础指标,并考虑气候条件和人为活动对生态环境的影响,选取土地利用类型、气温、降水、夜间灯光强度、高程及坡度等指标作为自变量,*RSEI* 作为因变量,利用地理探测器进行分析。通过 ArcGIS 创建 2.5 km×2.5 km 的格网均匀分布采样,共得到 956 个格网点,将提取的采样点数据导入基于 Excel 的地理探测器模型中分析,探究各因子对共和盆地生态环境空间分异的解释力和交互作用。

3.4.1 单因子探测

在单因子探测结果中,除夜间灯光强度外,其余 9 个因子均在 1% 水平上显著相关(表 6)。夜间灯光数据是城市发展的综合体现,能够很好地作为人类活动表征<sup>[42]</sup>,而探测结果反映出共和盆地的城市发展并未对生态环境产生明显的驱动作用。由于 *RSEI* 是由 *NDVI*、*WET*、*SI* 和 *LST* 耦合而成,因此这 4 个指标对生态环境的影响力明显优于其他因子,*SI* 对生态环境质量影响最大,*NDVI* 对生态环境的影响弱于 *SI*,但也明显强于其余指标。*LST* 在 3 个时期中的解释力都低于其他 3 个指标。从环境和人为驱动因子中看,2000 年高程和气温是区域内生态环境质量空间分布的主要驱动因子,解释力均接近 0.40。其他因子中,降水、坡度和土地利用类型依次减小,土地利用类型的 *q* 值较低,表明共和盆地的生态环境变化与土地利用类型的关系较弱。2010 年各因子解释力强弱基本保持一致,土地利用类型解释力要强于坡度。2020 年降水主导生态环境变化,土地利用类型、高程和气温次之,解释力不到 0.20,而夜间灯光强度的解释力则始终较小。总的来看,20 年期间坡度的解释力在逐年减弱,降水、土地利用类型的解释力在逐年增强,分别由 0.217 增长到 0.325,0.091 提升到 0.192,影响力强度排序也上升



表6 单因子探测结果  
Table 6 Results of single detection

年份 因子	2000年		2010年		2020年	
	<i>q</i> 值	排序	<i>q</i> 值	排序	<i>q</i> 值	排序
<i>NDVI</i>	0.773	2	0.811	2	0.843	2
<i>WET</i>	0.677	3	0.669	3	0.593	3
<i>SI</i>	0.871	1	0.879	1	0.887	1
<i>LST</i>	0.477	4	0.404	4	0.454	4
高程	0.390	5	0.307	5	0.187	7
坡度	0.171	8	0.099	9	0.057	9
气温	0.377	6	0.293	6	0.178	8
降水	0.217	7	0.230	7	0.325	5
夜间灯光强度	0.001	10	0.001	10	0.002	10
土地利用类型	0.091	9	0.163	8	0.192	6

到了第5位和第6位,生态环境正在转变为由降水和土地利用主导的格局。

### 3.4.2 交互探测

由于模型因子本身与生态环境质量关联较大,所以重点分析其他因子的交互作用。探测结果表明,因子间的交互作用均表现为双因子增强和非线性增强,并不存在减弱或相互独立的情况(图4)。因子间的两两交互作用对生态环境产生的影响高于任何单一因子独自产生的效果,更能驱动共和盆地生态环境质量的变化。其中2000年高程 $\cap$ 降水的 $q$ 值最大,高程 $\cap$ 土地利用类型和气温 $\cap$ 降水的交互作用影响次之, $q$ 值均大于0.50,同高程与气温进行交互作用的因子 $q$ 值普遍较高。2010年高程 $\cap$ 土地利用类型影响最强,高程 $\cap$ 降水和气温 $\cap$ 降水的 $q$ 值与之相比相差不大,三者 $q$ 值分别为0.464、0.460、0.457,而气温 $\cap$ 土地利用类型的 $q$ 值是0.444,略低于前三者。2020年气温 $\cap$ 降水、高程 $\cap$ 降水交互作用的 $q$ 值分别是0.517和0.513,而土地利用类型 $\cap$ 降水 $q$ 值也在0.50以上,有较高影响力。从2000—2020年各个因子之间交互探测结果显示:高程、气温和降水对共和盆地影响最为显著。前10年变化中,由高程和气温主导共和盆地的生态环境变化,与降水交互后显著提升了影响力。在后10年的演变过程中降水对生态环境的影响逐渐增强,在因子交互探测结果中,前三均与降水有关。另外,土地利用类型的影响也在日益增强,尽管在单因子探测结果中 $q$ 值并不高,但在与高程、气温和降水的交互作用中起到明显的促进作用。

## 4 讨论

针对共和盆地生态环境的评估,鲜有学者对其整体进行评价而多以局部区域作为研究对象。而关于共和盆地生态本底在以往表现较差的原因,主要归结为过度放牧和不科学的土地管理办法加速了沙漠化进程。超载放牧使牧草得不到休养,而牧草再生能力低和更新缓慢导致地表大面积裸露,无法自我修复,逐渐退化<sup>[43]</sup>。近年来,在政策引导下实行围栏封禁等措施,减少人为破坏的情况下发现自然因素是解释共和盆地生态环境质量格局变化的主要驱动因素,本文因子探测结果也表明气温、降水和海拔是影响生态环境质量的主要因素,这与何盈利等<sup>[44]</sup>得出的结论一致。从内部环境看,共和盆地西北部多分布荒漠、半荒漠类型植被,中东部的滩地和沟谷山地则以高寒草原为主,南部分布着高寒草甸和高寒灌丛,东南部的黄河峡谷地带包括高寒森林以及少量人工灌木林<sup>[45]</sup>,而这种空间分布是由气候和地理环境等自然禀赋差异形成的,与本文得出的共和盆地生态环境质量分布规律具有一致性。

受全球气候变化影响,近60年共和盆地正处于增温增湿阶段,大风天数和沙尘天气减少<sup>[46-48]</sup>,为植被生长提供了有利的条件。但由人类活动造就的生态本底极其脆弱,生态植被破坏严重,仅靠自然作用很难恢复至以往水平。据董光荣等<sup>[49]</sup>研究表明,2030年以前共和盆地可能更加干旱且沙漠化会进一步发展,要使生态系统趋于平衡和稳定必须坚

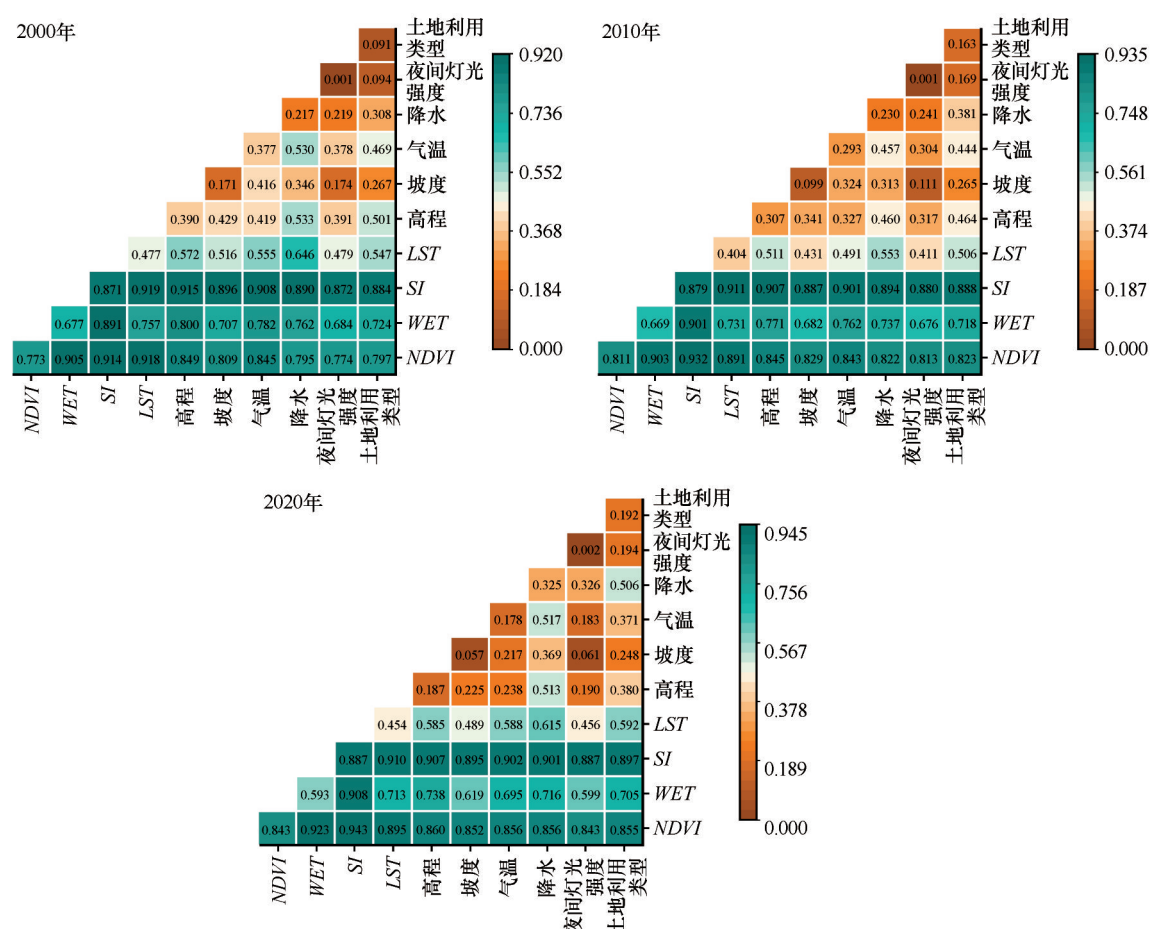


图4 交互探测结果

Fig.4 Interactive detector results

持恢复自然生态系统与全新的人工生态系统相辅相成。事实上,根据青海省“生态立省”的发展理念,海南州实施退耕还林、天然林保护和“三北”防护林生态工程,并对木格滩和塔拉滩等生态环境脆弱敏感的乡镇实施移民搬迁,到2010年底初步抑制了生态环境恶化的趋势,生态环境开始逐步改善<sup>[50-51]</sup>,文中RSEI结果同样表明2000—2010年盆地生态环境有所改善。2012年之后当地开始着力打造新能源产业基地、设立封禁保护区、种植防风固沙植被以及布设草方格,积极治沙防沙,生态恢复效果显著<sup>[52]</sup>。共和盆地RSEI空间变化图显示2010—2020年生态环境质量等级上升,盆地中东地区生态恢复速率加快,其中也包括了新能源产业基地建设的原因,塔拉滩作为青海省主要的光电能源基地,架设的光伏发电设备能降低风速、调节区域微气候,并且定期清洗光伏板还能提供除自然降水外的水分,有效改善土壤水分条件促进植被恢复<sup>[53]</sup>。这也解释了塔拉滩地区生态大幅度改善的原因,但

是新能源产业基地对生态环境变化的贡献有多少,还需要进一步研究。而沙珠玉沙区自1978年被列为“三北”防护林重点区后相继开展了大规模造林和治沙措施,形成了高寒荒漠绿洲示范区。本文交互探测结果显示,土地利用类型的影响也在日益增强,尽管在单因子探测结果中 $q$ 值并不高,但在与高程、气温和降水的交互作用中起到明显的促进作用,在上述政策的实施以及气候变化中都一一得到印证。值得注意的是,在人工造林选种方面需从多方面考虑,否则会出现前期生态效益高,后期出现群落衰退、林下无更新、不具备持续发育的局面<sup>[54]</sup>,应该通过增加生物多样性、丰富度以及完善群落层级结构来稳固生态效益。

准确认知共和盆地生态系统质量状况以及驱动力,对实现生态环境治理、区域规划和生态环境相关的可持续发展目标具有重要意义。此外,当地退耕还林、退耕还草等政策的实施与“十四五”规划中强调要坚持走生态优先的绿色发展道路,始终践



行既要金山银山也要绿水青山的可持续发展理念相呼应<sup>[55]</sup>。

## 5 结论

共和盆地2000—2020年生态质量等级整体脱离较差等级,生态环境显著改善,中部和东部地区改善明显,两滩沙漠化程度减轻,沙珠玉沙区恢复效果显著,总体呈现东高西低、南北高中部低的分布格局。

共和盆地整体环境呈恢复状态,第二阶段恢复面积大于第一阶段。总体改善面积为17 204.84 km<sup>2</sup>,占总面积的66.55%,保持不变的面积占比33.15%,退化面积不到共和盆地的1%。

气温和降水是生态环境恢复的关键因素,双因子交互作用产生的影响大于任意单因子的影响。气候条件决定生态本底在空间上的分布,人为因素影响生态恢复的速度和程度,对土地进行合理的管理可以明显加快生态环境恢复的进程,该结果与区域内实施的土地管理措施以及保护政策相对应。

## 参考文献:

- [1] 陈亚宁,李玉朋,李稚,等.全球气候变化对干旱区影响分析[J].地球科学进展,2022,37(2):111-119.
- [2] 王敏,胡守庚,张绪冰,等.干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析:以张掖绿洲乡镇为例[J].生态学报,2022,42(14):5812-5824.
- [3] 张琳焔,闭建荣,张雪腾,等.黄土高原半干旱区2020年生长季草地土壤呼吸特征及其影响因素[J].干旱气象,2022,40(3):354-363.
- [4] 周玄德,郭华东,夜比布拉·司马义,等.干旱区绿洲城市遥感生态指数变化监测[J].资源科学,2019,41(5):1002-1012.
- [5] 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.
- [6] 叶亚平,刘鲁君.中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J].环境科学研究,2000(3):33-36.
- [7] 宋静,王会肖,王飞.生态环境质量评价研究进展及方法评述[J].环境科学与技术,2013,36(增刊2):448-453.
- [8] 朱国宇,熊伟.模糊评价法与综合指数法在生态影响后评价中的应用比较研究[J].东北农业大学学报,2011,42(2):54-59.
- [9] 张勃,李阳,黄小琴,等.基于层次分析法的银川平原生态环境质量综合评价[J].中国资源综合利用,2022,40(11):143-145.
- [10] 李丹,黄川友,殷彤,等.基于改进生态足迹法的雅奢河源区生态承载力评价及保护措施[J].水电能源科学,2018,36(3):38-41.
- [11] 刘尚钦,张福浩,赵习枝,等.干旱区绿洲遥感生态指数的改进[J].测绘科学,2022,47(6):143-151.
- [12] 柯丽娜,徐佳慧,王楠,等.基于遥感生态指数的滨海湿地生态质量变化评价:以辽东湾北部区为例[J].生态环境学报,2022,31(7):1417-1424.
- [13] 赵晓涛,陶汪海.基于RSEI指数的泾惠渠灌区生态环境质量变化评价[J].中国农村水利水电,2023(1):24-30.
- [14] 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.
- [15] 王同达,曹锦雪,赵永华,等.基于PSR模型的陕西省土地生态系统健康评价[J].应用生态学报,2021,32(5):1563-1572.
- [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.
- [17] Sun J Y, Wang X H, Chen A P, et al. NDVI indicated characteristics of vegetation cover change in China's metropolises over the last three decades [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 179(1/4): 1-14.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 何天星,田宁,周锐,等.基于GEE和RSEI的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J].生态学杂志,2023,42(2):436-444.
- [21] 蒋超亮,吴玲,刘丹,等.干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测:以古尔班通古特沙漠为例[J].应用生态学报,2019,30(3):877-883.
- [22] 车雪华,罗万银,邵梅,等.青海共和盆地不同发育阶段风蚀坑表面气流场与形态反馈研究[J].地球科学进展,2021,36(1):95-109.
- [23] 何凌仙子.青海共和盆地典型固沙植物根系特征及功能研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [24] 周虹,刘雲祥.青海共和盆地人工固沙植被恢复对土壤微生物数量的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):178-185.
- [25] 马玉军,沙占江,陈学俭,等.青海省共和盆地20年来沙漠化土地变化[J].干旱区资源与环境,2016,30(2):176-181.
- [26] 彭强.共和盆地白刺沙堆形成年代及演化过程研究[D].西宁:青海师范大学,2022.
- [27] 李庆,张春来,周娜,等.青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J].中国沙漠,2018,38(4):690-700.
- [28] 胡梦珺,郑登友,吉天琪,等.晚更新世早期共和盆地湖相沉积常量元素地化学特征及环境演变[J].中国沙漠,2022,42(1):147-157.
- [29] 张登山.青海共和盆地土地沙漠化影响因子的定量分析[J].中国沙漠,2000,20(1):60-63.
- [30] 李森,董玉祥,董光荣,等.青藏高原土地沙漠化区划[J].中国沙漠,2001,21(4):103-112.
- [31] 朱雅娟,李虹,赵淑伶,等.共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J].中国沙漠,2014,34(3):841-848.
- [32] 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.
- [33] Xu B, Qi B, Ji K, et al. Emerging hot spot analysis and the spatial-temporal trends of NDVI in the Jing River Basin of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(2): 55.
- [34] Baig M H, Zhang L F, Shuai T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 5(5): 423–431.
- [35] 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.
- [36] Xiong Y, Xu W H, Lu N, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107518.
- [37] An M, Xie P, He W J, et al. Spatiotemporal change of ecologic environment quality and human interaction factors in three gorges ecologic economic corridor, based on RSEI [J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109090.
- [38] 徐涵秋, 施婷婷, 王美雅, 等. 雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6289–6301.
- [39] 冯荣荣, 张凯莉, 韩佳宁, 等. 沔河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 860–871.
- [40] Huo H, Sun C P. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108005.
- [41] 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.
- [42] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于DMSP/OLS数据的中国城市化过程研究: 反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. 遥感学报, 2003(3): 168–175.
- [43] 李晓英, 姚正毅, 董治宝. 青海省共和盆地沙漠化驱动机制[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 337–344.
- [44] 何盈利, 尤南山, 崔耀平, 等. 2000年来中国生态状况时空变化格局[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1176–1185.
- [45] 吴玉虎. 青海茶卡-共和盆地及其毗邻地区种子植物区系[J]. 云南植物研究, 2007(3): 265–276.
- [46] 张亚珍, 陈宗颜, 戴升. 1961–2018年共和盆地沙尘天气变化特征分析[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 57–62.
- [47] 祁英华, 祁栋林, 满晓花. 青海省共和盆地近60年气温变化特征分析[J]. 青海科技, 2020, 27(5): 70–75.
- [48] 陈英玉, 蒋复初. 共和盆地气候变化及其环境响应[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 363–370.
- [49] 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 166–173.
- [50] 魏登贤, 杨德福. 共和盆地防沙治沙对策分析[J]. 现代农业科技, 2011(17): 283–284.
- [51] 欧尔辉, 周鸿玉, 杨秀玲, 等. 共和盆地东缘人工植被演替序列的群落物种多样性格局[J]. 青海大学学报, 2023, 41(1): 1–7.
- [52] 马慧榕, 肖锋军, 董治宝, 等. 2000–2020年青海省共和县土地沙漠化动态及其驱动因素[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 139–148.
- [53] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 西北地区光伏电站植被恢复模式研究综述[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 200–203.
- [54] 李少华, 王学全, 高琪, 等. 植被恢复对高寒沙区土壤性质的影响[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 553–559.
- [55] 刘峥延, 毛显强, 江河. “十四五”时期生态环境保护重点方向和任务研究[J]. 中国环境管理, 2019, 11(3): 40–45.

## Remote sensing evaluation and driving force analysis of ecological environment in Gonghe Basin

Su Wanfeng<sup>1</sup>, Han Guangzhao<sup>1</sup>, Ye Deli<sup>2</sup>, Cao Guangchao<sup>1,3</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation / Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** Scientific assessment of regional ecological environment quality is a prerequisite for achieving sustainable development. In this paper, based on Landsat remote sensing images from 2000 to 2020, remote sensing ecological index (*RSEI*) was constructed to analyze the spatial and temporal variation characteristics of ecological environment quality in the typical alpine sand region of the Qinghai-Tibet Plateau in the past 20 years, and the main driving factors of ecological environment in this region were quantified using geographic detectors. The results showed as follows: (1) The mean *RSEI* of Gonghe Basin increased from 2000 to 2020, with an average increase of 7.5%/10a, showing spatial distribution characteristics of high in the east and low in the west, high in the south and low in the middle. (2) From 2000 to 2020, the proportion of ecological environment improvement areas in Gonghe Basin was 66.55%, mainly distributed in the central and southeastern areas, the proportion of unchanged areas was 33.15%, and the proportion of degraded areas was 0.29%. (3) Precipitation is a key factor affecting ecological and environmental quality, and the interaction of factors has a stronger explanatory power for ecological and environmental quality. Reasonable allocation of land resources can significantly promote ecological improvement.

**Key words:** Gonghe Basin; remote sensing ecological index; geographical detector; ecological environment quality