

# 长江上游典型石漠化地区生态环境质量评价

周斯怡<sup>1</sup>, 殷晓洁<sup>1</sup>, 汤瑞权<sup>1</sup>, 吴鹏飞<sup>2</sup>

(1. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院 林业科技信息研究所, 北京 100091)

**摘要:** 【目的】长江上游石漠化地区影响着整个长江流域的生态安全, 在国家大力推行石漠化综合防治下, 石漠化形势有明显缓解, 但目前缺乏石漠化地区的生态环境质量评价方法, 无法实时、定量地进行生态评价。【方法】以长江上游典型石漠化地区云南省会泽县 2002、2010、2018 年 Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8 卫星影像数据为基础, 划分研究区石漠化等级, 利用遥感生态指数 (RSEI) 法对研究区生态环境质量进行定量评价与分析。【结果】① 2002—2018 年, 会泽县石漠化状况整体明显改善, 石漠化面积减少 583.33 km<sup>2</sup>。② 石漠化与生态环境质量呈显著正相关 ( $r^2$  为 0.688~0.873), 表明 RSEI 法评价石漠化地区生态环境质量效果较好。③ 2002、2010、2018 年研究区遥感生态指数均值分别为 0.458、0.490、0.488, 生态环境质量整体表现为中等水平, 16 年间生态环境质量优化面积占全县面积的 27.42%, 生态变差的地区面积占 15.09%。④ 干度指标对遥感生态指数的贡献度不断增加, 第一主成分载荷值由 -0.029 变为 -0.622, 是制约会泽县生态环境质量优化的重要因素。【结论】2002—2018 年, 会泽县石漠化状况得到明显改善, 生态环境质量呈中等水平, 干度是制约生态环境质量优化的重要因素。今后应着重石漠化严重地区的保护。表 8 参 28

**关键词:** 石漠化; 遥感生态指数 (RSEI); 生态环境质量; 定量评价; 会泽县

中图分类号: S719; S714.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0783-09

## Evaluation of eco-environmental quality in typical rocky desertification areas in the upper reaches of the Yangtze River

ZHOU Siyi<sup>1</sup>, YIN Xiaojie<sup>1</sup>, TANG Ruiquan<sup>1</sup>, WU Pengfei<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] The rocky desertification area in the upper reaches of the Yangtze River affects the ecological security of the whole basin. Under the comprehensive control of rocky desertification vigorously implemented by the state, the situation of rocky desertification has been significantly alleviated. But at present, there's no evaluation method for eco-environmental quality in rocky desertification areas. The objective of this study is to carry out the real-time and quantitative evaluation of eco-environmental quality in rocky desertification areas. [Method] Based on Landsat 5, Landsat 7, and Landsat 8 satellite image data of Huize County, Yunnan Province in 2002, 2010, and 2018, the rocky desertification grades of the study area were divided, and the remote sensing ecological index (RSEI) was used to quantitatively evaluate and analyze the eco-environmental quality of the study area. [Result] (1) From 2002 to 2018, the overall rocky desertification situation in Huize County was significantly improved, and the rocky desertification area decreased by 583.33 km<sup>2</sup>. (2) There was a significant positive correlation between rocky desertification and eco-environmental quality

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 云南省农业基础研究联合专项 (2018FG001-065); 云南省科技厅应用基础研究计划项目 (2018FD048)

作者简介: 周斯怡 (ORCID: 0000-0001-7082-9795), 从事石漠化生态变化研究。E-mail: siyi-zhou@outlook.com。通信作者: 殷晓洁 (ORCID: 0000-0003-1424-0112), 讲师, 博士, 从事石漠化生态系统变化、全球生态研究。E-mail: xjyinnan@163.com

( $r^2 = 0.688-0.873$ ), indicating that RSEI was effective in evaluating eco-environmental quality in rocky desertification areas. (3) In 2002, 2010, and 2018, the average RSEI value in the study area was 0.458, 0.490, and 0.488 respectively, and the overall eco-environmental quality was at a medium level. The area of eco-environmental quality optimization in 16 years accounted for 27.42% of the total county area, and the area of ecological deterioration accounted for 15.09%. (4) The contribution of dryness index to RSEI was increasing, and the first principal component load value changed from  $-0.029$  to  $-0.622$ , which was an important factor restricting the optimization of eco-environmental quality of Huize County. [Conclusion] From 2002 to 2018, the rocky desertification situation in Huize County was significantly improved, and the eco-environmental quality was at a medium level. The dryness index was an important factor restricting the optimization of eco-environmental quality. The protection of rocky desertification areas should be emphasized in the future. [Ch, 8 tab. 28 ref.]

**Key words:** rocky desertification; remote sensing ecological index (RSEI); eco-environmental quality; quantitative evaluation; Huize Country

西南石漠化、西北荒漠化和黄土地区水土流失并称为中国最严重的三大生态问题<sup>[1]</sup>, 其中石漠化主要发生在中国的西南喀斯特区。这些地区本身土层较薄、涵养水源能力较差, 加上不合理的人为活动, 水土流失加剧、岩石出露加重、土地进一步退化<sup>[2]</sup>。位于长江上游的西南喀斯特区关乎整个长江流域的水安全、生物多样性安全, 具有重要的生态屏障意义, 而石漠化导致的当地生态系统功能退化, 威胁了西南地区甚至整个长江流域的生态安全。因此, 长江上游石漠化地区的生态环境问题是急需解决的重要议题。解决生态环境问题首先需要进行生态环境质量评价, 进而分析具体情况找到解决方法。近年来, 国内外研究学者针对生态环境质量评价进行了一系列研究<sup>[3-6]</sup>。自 2013 年徐秋涵<sup>[7]</sup>提出遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI) 以来, RSEI 法已应用于城市、矿区、湿地、荒漠化和水土流失等地区的生态变化评价研究, 在各类研究中均表现出很强的适用性<sup>[8-14]</sup>。使用 RSEI 法研究石漠化地区的生态环境质量, 可为石漠化地区的定量化生态评价与监测提供借鉴, 有助于及时调控人类活动的方向、强度、方式, 对石漠化地区因地制宜的治理恢复有较强的指导意义。

国家林业和草原局第 3 次石漠化监测报告表明: 目前中国石漠化主要涉及 8 个省份, 集中分布在贵州、云南、广西 3 省(自治区)<sup>[15]</sup>。云南省曲靖市地处珠江和长江上游, 是长江、珠江水系的分水岭, 生态区位十分重要。本研究以长江上游典型石漠化地区曲靖市会泽县为研究区, 基于 2002、2010、2018 年遥感影像数据, 采用 RSEI 法监测与评价研究区生态变化, 结合不同等级石漠化空间分布数据, 分析各等级石漠化地区的生态环境质量, 以期为石漠化地区的定量化生态评价提供方法借鉴, 为研究区石漠化治理和恢复生态环境提供数据支持。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

云南省曲靖市会泽县 ( $25^{\circ}48' \sim 27^{\circ}04'N$ ,  $103^{\circ}03' \sim 103^{\circ}55'E$ ) 位于云南省东北部、金沙江东岸、曲靖市西北部, 是石漠化综合治理试点县和石漠化重点监测县。全县地势西高东低, 由西向东阶梯状递减, 平均海拔为 2 220 m。立体气候分布明显, 同时存在温带高原季风气候和南亚热带气候至寒温带气候, 年平均气温为  $12.7^{\circ}C$ , 年降水量为 800 mm。境内植被以亚高山灌丛、草甸、阔叶类混交林、亚热带稀树草原旱生植被为主。县境内碳酸盐岩分布广泛, 多为灰岩和白云岩, 为典型的喀斯特山区。

### 1.2 数据源及预处理

遥感数据为 2002 年 2 月 25 日 Landsat-7 ETM+、2010 年 2 月 7 日 Landsat-5 TM、2018 年 3 月 1 日 Landsat-8 OLI\_TIRS 等卫星影像数据。数字高程模型数据来自于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)。云南省地质图来自于中国科学院地球化学研究所 (<http://www.gyig.cas.cn/>) 的喀斯特数据中心。对原始影像进行辐射校正、大气校正、几何校正等预处理, 结合行政区划矢量数据拼接影像并裁剪出研究区。

### 1.3 石漠化分级

基于植被覆盖度 ( $V_F$ )、岩石裸露率 ( $R_B$ )、坡度 ( $s$ ) 等 3 个指标, 通过综合分析法构建石漠化遥感监测指标体系<sup>[16-18]</sup>。计算归一化植被指数、归一化岩石指数, 并采用像元二分模型分别计算植被覆盖度和岩石裸露率。按照表 1 分别对植被覆盖度、岩石裸露率、坡度赋值, 依据公式计算石漠化综合指标 ( $I_R$ ):  $I_R=0.4V_F+0.4R_B+0.2s$ 。采用决策树分类法划分石漠化等级:  $0 \leq I_R \leq 1$  为无石漠化、 $1 < I_R \leq 2$  为潜在石漠化、 $2 < I_R \leq 4$  为轻度石漠化、 $4 < I_R \leq 6$  为中度石漠化、 $6 < I_R \leq 8$  为强度石漠化、 $8 < I_R \leq 10$  为极强度石漠化<sup>[18]</sup>。依据云南省地质图剔除非喀斯特区, 得到石漠化等级分布图。

表 1 石漠化分级指标赋值

Table 1 Assignment of rocky desertification classification index

赋值	分级指标			赋值	分级指标		
	植被覆盖度	岩石裸露率	坡度/(°)		植被覆盖度	岩石裸露率	坡度/(°)
0	0.70~1.00	0.0~0.3	0~15	6	0.25~0.50	0.5~0.7	22~25
2	0.60~0.70	0.3~0.4	15~18	8	0.10~0.25	0.7~0.8	25~30
4	0.50~0.60	0.4~0.5	18~22	10	0.00~0.10	0.8~1.0	30~90

### 1.4 遥感生态指数

采用遥感生态指数 ( $I_{RSE}$ ) 进行生态环境质量评价<sup>[7]</sup>, 该指数耦合了绿度、湿度、干度、热度 4 个指标, 分别用归一化植被指数、湿度分量、建筑裸土指数、地表温度表示, 通过主成分分析评价当地生态环境。

1.4.1 绿度指标 植被状况是生态环境质量评价的重要方面。归一化植被指数 ( $I_{NDV}$ ) 作为应用最广的植被指数, 能够很好地反映土地上的植被覆盖状况<sup>[19]</sup>。计算公式为:  $I_{NDV}=(\rho_{NIR}-\rho_R)/(\rho_{NIR}+\rho_R)$ 。其中:  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_R$  分别为卫星影像数据的近红外和红外波段的反射率。

1.4.2 湿度指标 缨帽变换得到的第三分量 (湿度分量) 与植被湿度、土壤湿度紧密相关<sup>[20]</sup>。利用湿度分量 ( $W$ ) 代表湿度指标, 计算公式为:  $W=C_1\rho_B+C_2\rho_G+C_3\rho_R+C_4\rho_{NIR}+C_5\rho_{SWIR1}+C_6\rho_{SWIR2}$ 。其中:  $\rho_B$ 、 $\rho_G$ 、 $\rho_R$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$  分别为卫星影像数据的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段的反射率。 $C_1 \sim C_6$  为湿度分量的计算系数, 对于 TM<sup>[21]</sup>,  $C_1=0.0315$ ,  $C_2=0.2021$ ,  $C_3=0.3102$ ,  $C_4=0.1594$ ,  $C_5=-0.6806$ ,  $C_6=-0.6109$ ; 对于 ETM+<sup>[22]</sup>,  $C_1=0.2626$ ,  $C_2=0.2141$ ,  $C_3=0.0926$ ,  $C_4=0.0656$ ,  $C_5=-0.7629$ ,  $C_6=-0.5388$ ; 对于 OLI<sup>[23]</sup>,  $C_1=0.1511$ ,  $C_2=0.1973$ ,  $C_3=0.3283$ ,  $C_4=0.3407$ ,  $C_5=-0.7117$ ,  $C_6=-0.4559$ 。

1.4.3 干度指标 研究区存在大量石漠化裸土地区, 因此干度指标以裸土指数 ( $I_S$ ) 与建筑指数 ( $I_{IB}$ ) 的均值表示, 记为建筑裸土指数 ( $I_{NDBS}$ )<sup>[24-25]</sup>。干度指标对生态环境质量起负面作用。计算公式为:

$$I_S = [(\rho_{SWIR1} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)];$$

$$I_{IB} = \frac{[2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - \rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_R) - \rho_G / (\rho_G + \rho_{SWIR1})]}{[2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + \rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_R) + \rho_G / (\rho_G + \rho_{SWIR1})]}$$

$$I_{NDBS} = (I_S + I_{IB}) / 2。$$

1.4.4 热度指标 地表温度与植被的生长发育、城市热岛效应等密切相关, 因此本研究采用地表温度表示热度指标。热度指标对生态环境质量起负面作用。地表温度的反演采用大气校正法<sup>[26]</sup>。把卫星传感器接收的辐射亮度  $L_\lambda$  分为大气向上辐射亮度  $L^\uparrow$ 、地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量、大气向下辐射到达地面后反射的能量  $L_\downarrow$ , 得到公式:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_S) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L^\uparrow。$$

其中:  $\varepsilon$  为地表比辐射率;  $T_S$  卫星传感器处的辐射亮度值;  $B(T_S)$  为  $T_S$  下的黑体辐射亮度值;  $\tau$  为大气在热红外波段的透过率。黑体辐射亮度  $B(T_S)$  的计算公式为:

$$B(T_S) = [L_\lambda - L^\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon。$$

地表比辐射率( $\epsilon$ )的计算公式根据植被覆盖度( $F_v$ )分为水体、城镇、自然3部分<sup>[27]</sup>,  $\epsilon_{\text{water}}$ 为水体地表比辐射率;  $\epsilon_{\text{building}}$ 为城镇地表比辐射率;  $\epsilon_{\text{natural}}$ 为自然地表比辐射率。

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{water}} &= 0.9950, \quad I_{\text{NDV}} \leq 0; \\ \epsilon_{\text{building}} &= 0.9589 + 0.0860F_v - 0.0671F_v^2, \quad 0 < I_{\text{NDV}} < 0.7; \\ \epsilon_{\text{natural}} &= 0.9625 + 0.0614F_v - 0.0461F_v^2, \quad I_{\text{NDV}} \geq 0.7.\end{aligned}$$

地表真实温度( $T_{\text{LS}}$ )通过普朗克公式求得:

$$T_{\text{LS}} = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1].$$

其中:  $K_1$ 、 $K_2$ 分别为定标参数。对于TM数据,  $K_1=607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2=1260.56 \text{ K}$ ; 对于ETM+数据,  $K_1=666.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2=1282.71 \text{ K}$ ; 对于TIRS band10数据,  $K_1=774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2=1321.08 \text{ K}$ 。

1.4.5 遥感生态指数的构建 分别将绿度、湿度、干度、热度4个生态指标正规化,减少因数值大小不同带来的影响,使其值位于[0, 1]。采用主成分变换分析集合4个指标的新影像,计算得到第一主成分载荷值( $P_{C1}$ )及相关统计结果。为了便于结果的对比分析,用 $1-P_{C1}$ ,获得初始遥感生态指数 $I_{\text{RSE0}}$ ,并将其正规化得到遥感生态指数 $I_{\text{RSE}}$ 。 $I_{\text{RSE}}$ 值越大,生态环境质量越好,反之越差。即:

$$\begin{aligned}I_{\text{RSE0}} &= 1 - \{P_{C1} [f(I_{\text{NDV}}, W, I_{\text{NDBS}}, T_{\text{LS}})]\}; \\ I_{\text{RSE}} &= (I_{\text{RSE0}} - I_{\text{RSE0\_min}}) / (I_{\text{RSE0\_max}} - I_{\text{RSE0\_min}}).\end{aligned}$$

以0.2为间隔将 $I_{\text{RSE}}$ 划分为5个区间<sup>[7]</sup>,分别代表生态环境质量差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、良好(0.6~0.8)、优(0.8~1.0)。

## 1.5 石漠化与生态环境质量的相关性

使用ArcGIS对会泽县进行均匀采样(1 km×1 km),去除非喀斯特地区后,共得到2366个采样点,获得对应点位的 $I_{\text{R}}$ 与 $I_{\text{RSE}}$ 。为使石漠化综合指标大的值代表石漠化程度较低地区,对 $I_{\text{R}}$ 进行归一化,用1减去归一化后的 $I_{\text{R}}$ ,得到转换后的石漠化综合指标( $I_{\text{R0}}$ ),对 $I_{\text{R0}}$ 与 $I_{\text{RSE}}$ 进行相关性分析。

## 2 结果分析

### 2.1 石漠化状况分析

由表2可知:2002—2018年,研究区已石漠化地区(极强度、强度、中度、轻度石漠化)面积减少了583.33 km<sup>2</sup>,占全域面积的24.57%;无石漠化、潜在石漠化面积增加,轻度石漠化面积减少,中度、强度、极强度石漠化面积先增加后减少,研究区内石漠化程度整体得到改善。具体来看,2002—2010年,已石漠化地区面积总体减少了253.22 km<sup>2</sup>,主要为轻度石漠化面积减少(432.73 km<sup>2</sup>),年均降率为8.58%。2010—2018年,无石漠化面积显著增加,达284.48 km<sup>2</sup>,年均增率为10.13%;极强度石漠化面积减少了28.38 km<sup>2</sup>,年均降率为8.23%。

表2 会泽县2002—2018年石漠化面积变化

Table 2 Area dynamics of different grade rocky desertification in rocky desertification of Huize Country

石漠化等级	面积/km <sup>2</sup>			面积变化/km <sup>2</sup>			年均增长/%		
	2002	2010	2018	2002—2010	2010—2018	2002—2018	2002—2010	2010—2018	2002—2018年
极强度石漠化	50.78	57.12	28.74	6.34	-28.38	-22.04	1.48	-8.23	-6.87
强度石漠化	535.23	578.16	462.16	42.93	-116.00	-73.07	0.97	-2.76	-1.82
中度石漠化	669.23	799.47	679.75	130.24	-119.72	10.52	2.25	-2.01	0.20
轻度石漠化	844.86	412.13	346.12	-432.73	-66.01	-498.74	-8.58	-2.16	-10.56
潜在石漠化	170.52	282.77	328.40	112.25	45.63	157.88	6.53	1.89	8.54
无石漠化	103.47	244.44	528.92	140.97	284.48	425.45	11.34	10.13	22.62

### 2.2 生态环境质量总体评价

2002—2018年研究区 $I_{\text{RSE}}$ 均值变化幅度不大,整体呈上升趋势,生态环境质量总体呈中等水平(表3)。



16 a 间生态等级为优和差的地区均有增加。与 2012 年相比，2018 年研究区  $I_{RSE}$  略有所下降，其中绿度指标、湿度指标均为正值，提示此两者对生态环境起到了积极的作用；干度指标、热度指标均为负值，提示此两者对环境起到了消极作用。同时，2002、2010 年绿度、湿度的  $P_{CI}$  之和大于干度、热度  $P_{CI}$  之和的绝对值，表明绿度、湿度对生态环境的改善作用强于干度、热度的负面作用。2018 年绿度、湿度的  $P_{CI}$  之和小于干度、热度  $P_{CI}$  之和的绝对值，表明干度、热度的负面作用强于绿度、湿度的改善作用。16 a 间，负面作用的加强主要来自于干度指标，其  $P_{CI}$  由 -0.029 变为 -0.622。

表 3 不同年份研究区生态指标及载荷

Table 3 Ecological indicators and loading scores in different years

年份	绿度		湿度		干度		热度		遥感生态指数
	均值±标准差	$P_{CI}$	均值±标准差	$P_{CI}$	均值±标准差	$P_{CI}$	均值±标准差	$P_{CI}$	
2002	0.680±0.092	0.387	0.484±0.102	0.608	0.569±0.010	-0.029	0.495±0.112	-0.693	0.458±0.127
2010	0.696±0.087	0.311	0.541±0.146	0.698	0.710±0.086	-0.348	0.498±0.125	-0.544	0.490±0.136
2018	0.719±0.095	0.427	0.585±0.079	0.361	0.601±0.123	-0.622	0.462±0.124	-0.548	0.488±0.171

对不同年份不同生态环境等级地区进行面积统计(表 4)可知：16 a 间研究区生态环境恶化与优化并存，中等、较差和良好等级地区占比之和均超过了 90%，但区域等级异动较大，优和差等级比例不断提高。其中，中等生态等级面积占比始终最高，但近年来呈减少趋势，16 a 间降率达 14.53%。较差及以下等级面积先减少后增加，但整体变化幅度不大。良好及优等级面积增加，增幅达 12.92%。由表 5 可知：2018 年，生态等级为差的区域主要分布在迤车镇、马路乡、火红乡、矿山镇、者海镇、大井镇、娜姑镇、大海乡，优等级主要分布在老厂乡、五星乡、金钟镇、新街回族乡、待补镇、鲁纳乡。

表 4 2002—2018 年研究区生态评价等级面积

Table 4 Area of leveled ecological assessment in the study area from 2002 to 2018

生态环境质量等级	2002		2010		2018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/%
差	79.95	1.37	68.34	1.17	102.09	1.74
较差	1 943.54	33.20	1 552.29	26.52	2 015.82	34.44
中等	2 970.32	50.74	2 855.37	48.77	2 119.90	36.21
良好	841.53	14.37	1 360.49	23.24	1 368.87	23.38
优	18.69	0.32	17.54	0.30	247.35	4.23

表 5 研究区各乡镇 2018 年生态评价等级面积

Table 5 Leveled ecological assessment area of each town in 2018

乡镇	各等级面积/km <sup>2</sup>					乡镇	各等级面积/km <sup>2</sup>				
	差	较差	中等	良好	优		差	较差	中等	良好	优
金钟镇	5.83	156.34	200.83	153.60	45.70	架车乡	1.22	118.83	107.67	51.38	8.84
待补镇	2.92	90.38	117.22	100.62	26.36	纸厂乡	0.74	27.50	39.97	22.78	8.58
老厂乡	0.98	33.13	70.37	40.40	21.61	者海镇	6.41	117.84	120.26	116.91	7.31
新街回族乡	1.05	55.99	103.23	94.65	19.10	上村乡	0.77	57.07	109.57	98.15	5.61
五星乡	1.15	80.31	63.50	47.08	16.03	雨碌乡	2.62	72.16	93.82	64.03	5.17
娜姑镇	6.06	133.47	79.70	25.70	13.00	火红乡	9.72	121.34	90.26	42.37	4.99
迤车镇	15.52	203.46	154.62	76.36	11.38	乐业镇	4.68	143.64	141.66	68.86	3.60
大桥乡	2.02	68.56	78.74	56.37	11.19	田坝乡	0.62	105.33	142.85	79.65	2.63
大海乡	10.71	143.69	106.51	35.19	10.28	马路乡	12.92	75.81	69.63	31.39	2.11
鲁纳乡	0.48	33.94	62.61	71.44	13.36	大井镇	6.03	86.68	99.28	48.80	1.19
矿山镇	9.64	90.35	67.60	43.14	9.31						

### 2.3 生态环境质量动态监测

2.3.1 会泽县生态状况变化总体分析 基于遥感生态指数的 5 个等级，对会泽县 2002 和 2018 年遥感生态指数进行差值变化检测，按照级差符号的正、0、负依次归为生态变好、不变、变差。由表 6 可知：2002—2018 年，研究区生态环境质量等级变好面积为 1 605.37 km<sup>2</sup>，占全域面积的 27.42%；生态变差地

区面积为 883.58 km<sup>2</sup>, 占全域面积的 15.09%, 可见研究区生态环境总体呈变好趋势。由表 7 可知: 生态环境质量等级变好地区主要分布在老厂乡、五星乡、金钟镇、新街回族乡、待补镇、纳鲁乡、上村乡、架车乡、田坝乡等地。这些乡镇海拔较高, 人类活动相对较少, 全县范围内大力实施生态环境保护, 如天然林保护、公益林补植补造、石漠化治理等, 使得生态环境得到了极大改善<sup>[28]</sup>。生态环境质量等级变差地区主要分布在研究区东北部及西南部等地势较平坦的乡镇, 包括纸厂乡、迤车镇、马路乡、火红乡、乐业镇、矿山镇、者海镇、大井镇、娜姑镇、大海乡。这些乡镇大力发展三大产业, 国内生产总值猛增, 城镇化发展迅速, 建设用地激增, 一定程度上影响了当地生态状况<sup>[28]</sup>。

表 6 2002—2018 年遥感生态指数变化

Table 6 Change of remote sensing ecological index in Huize Country from 2002 to 2018

类别	级差	级面积/ km <sup>2</sup>	类面积/km <sup>2</sup>	类占比/%	类别	级差	级面积/ km <sup>2</sup>	类面积/km <sup>2</sup>	类占比/%		
变好	4	0.04	1 605.37	27.42	不变	0	3 365.08	3 365.08	57.48		
	3	5.53			-1	877.95	变差	-2	5.63	883.58	15.09
	2	136.80			-3	0.01					
	1	1 463.00									

表 7 2002—2018 年乡镇遥感生态指数变化的面积和占比

Table 7 Area and percentage change of each remote sensing ecological index level in each town from 2002 to 2018

乡镇	变好		不变		变差		乡镇	变好		不变		变差	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
金钟镇	206.47	36.72	309.49	55.04	46.34	8.24	架车乡	97.85	33.98	169.07	58.72	21.02	7.30
待补镇	136.32	40.39	170.60	50.55	30.58	9.06	纸厂乡	17.38	17.46	58.64	58.89	23.55	23.65
老厂乡	62.87	37.76	91.42	54.91	12.20	7.33	者海镇	113.05	30.66	196.07	53.17	59.61	16.17
新街回族乡	113.88	41.56	141.21	51.53	18.93	6.91	上村乡	97.09	35.81	154.55	56.99	19.53	7.20
五星乡	76.96	36.99	106.10	50.99	25.01	12.02	雨碌乡	72.54	30.50	138.09	58.07	27.17	11.43
娜姑镇	40.83	15.83	166.91	64.71	50.19	19.46	火红乡	37.10	13.81	169.22	62.98	62.36	23.21
迤车镇	62.66	13.58	258.89	56.12	139.79	30.30	乐业镇	64.83	17.89	218.08	60.17	79.53	21.94
大桥乡	69.99	32.27	121.86	56.19	25.03	11.54	田坝乡	112.07	33.85	199.07	60.13	19.94	6.02
大海乡	58.66	19.15	190.74	62.25	56.98	18.60	马路乡	19.64	10.24	115.04	59.96	57.18	29.80
鲁纳乡	71.23	39.17	99.05	54.48	11.55	6.35	大井镇	25.03	10.34	161.41	66.71	55.54	22.95
矿山镇	48.92	22.23	129.57	58.89	41.55	18.88							

2.3.2 不同等级石漠化地区生态状况变化 由表 8 可知: 极强度石漠化地区, 生态环境质量总体较差, 强度、中度石漠化地区遥感生态指数等级以较差、中等为主, 轻度、潜在石漠化地区等级主要表现为中等、良好, 无石漠化地区, 生态环境质量主要为良好, 而非喀斯特地区, 较差、中等、良好等级的占比均较大。可见石漠化与生态环境之间存在一定相关性。2002—2018 年, 无、潜在、轻度石漠化地区, 生态环境均明显好转。其中, 无石漠化和潜在石漠化地区, 生态环境主要由中等、良好转为良好、优; 轻度石漠化地区, 生态环境主要由较差、中等、良好转为中等、良好。反之, 强度、极强度石漠化地区生态环境质量逐步变差。其中, 极强度石漠化地区, 生态环境质量为差等级的面积增率达 28.11%。这可能与干旱有关。16 a 间研究区干度指标的  $P_{CI}$  由 -0.029 变为 -0.622, 而湿度指标  $P_{CI}$  由 0.608 下降为 0.361 (表 3), 均对  $I_{RSE}$  产生负面作用, 从而表现为以强度、极强度石漠化为代表的干旱地区生态环境质量恶化。因此, 在生产建设、生态环境恢复中, 应进一步注意石漠化严重地区的保护, 减少人为破坏干扰。

分别计算 2002、2010、2018 年转换后  $I_{R0}$  与  $I_{RSE}$  的相关性系数可知: 2002 年两者相关性系数为 0.688, 2010 年为 0.750, 2018 年为 0.873, 3 期均在 0.01 水平上显著相关。可见, 生态环境质量与石漠化之间存在正相关, 随着石漠化改善, 生态环境质量逐渐向好, 即通过 RSEI 法进行石漠化地区生态环境质量评价具有很好的效果。

表 8 不同石漠化等级下研究区遥感生态指数变化

Table 8 Remote sensing ecological index changes under different rocky desertification grades in the study area

年份	等级	极强度石漠化		强度石漠化		中度石漠化		轻度石漠化	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
2002	差	2.97	5.85	9.72	1.82	2.92	0.44	1.34	0.16
	较差	34.32	67.59	277.76	51.90	228.80	34.19	145.61	17.23
	中等	11.61	22.86	207.10	38.69	341.36	51.01	491.45	58.17
	良好	1.80	3.54	39.99	7.47	94.17	14.07	202.98	24.03
	优	0.08	0.16	0.66	0.12	1.98	0.29	3.48	0.41
2010	差	10.81	18.93	9.36	1.62	0.15	0.02	0.00	0.00
	较差	36.32	63.59	303.82	52.55	171.90	21.50	2.51	0.61
	中等	8.85	15.49	212.10	36.69	518.79	64.89	225.13	54.62
	良好	1.14	1.99	52.85	9.14	108.43	13.56	183.63	44.56
	优	0.00	0.00	0.03	0.00	0.20	0.03	0.86	0.21
2018	差	9.76	33.96	24.58	5.32	0.86	0.13	0.00	0.00
	较差	14.24	49.55	290.26	62.80	276.22	40.63	5.85	1.69
	中等	4.70	16.35	135.33	29.28	346.45	50.97	202.41	58.48
	良好	0.04	0.14	11.86	2.57	55.77	8.20	134.79	38.94
	优	0.00	0.00	0.13	0.03	0.45	0.07	3.07	0.89

  

年份	等级	潜在石漠化		无石漠化		非喀斯特	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积 /km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
2002	差	0.03	0.02	0.06	0.06	57.74	1.65
	较差	10.64	6.24	7.19	6.95	1 256.30	35.76
	中等	83.47	48.95	43.87	42.40	1 817.59	51.74
	良好	74.91	43.93	51.85	50.11	376.65	10.72
	优	1.47	0.86	0.50	0.48	4.56	0.13
2010	差	0.00	0.00	0.00	0.00	44.10	1.26
	较差	0.13	0.04	0.05	0.02	1 047.88	29.83
	中等	72.58	25.67	29.50	12.07	1 812.34	51.59
	良好	203.67	72.03	213.76	87.45	604.67	17.21
	优	6.39	2.26	1.13	0.46	3.85	0.11
2018	差	0.00	0.00	0.00	0.00	63.18	1.80
	较差	0.35	0.11	0.66	0.12	1 443.74	41.10
	中等	47.96	14.60	58.44	11.05	1 342.83	38.22
	良好	217.78	66.32	386.57	73.09	568.28	16.18
	优	62.31	18.97	83.25	15.74	94.81	2.70

### 3 结论

本研究基于 2002—2018 年 Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8 卫星影像数据，划分会泽县石漠化等级，并利用遥感生态指数法定量评价会泽县生态环境质量。结果表明：①会泽县石漠化状况整体得到改善，已石漠化地区总面积减少了 583.33 km<sup>2</sup>，其中，轻度石漠化地区面积减少 432.73 km<sup>2</sup>。②干度指标的载荷值绝对值不断增大， $P_{Cl}$  载荷值由 -0.029 变为 -0.622，对  $I_{RSE}$  的贡献度不断增加，主要为地势平坦地区的城镇化建设用地增加，成为制约会泽县生态环境质量优化的重要因素。③ 2002、2010、2018 年遥感生态指数均值分别为 0.458、0.490、0.488，生态环境质量整体表现为中等，生态环境呈优化趋势。④会泽县内生态环境质量优化面积占总面积的 27.42%，主要分布在老厂乡、五星乡、金钟镇、新

街回族乡、待补镇、纳鲁乡、上村乡、架车乡、田坝乡；生态环境质量变差地区面积占总面积的15.09%，分布在纸厂乡、迤车镇、马路乡、火红乡、乐业镇、矿山镇、者海镇、大井镇、娜姑镇、大海乡。⑤石漠化与生态环境质量呈显著正相关，相关性指数为0.688~0.873，表明通过遥感生态指数法评价长江上游典型石漠化地区的生态环境质量效果较好。

#### 4 参考文献

- [1] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(1): 76 – 84.  
YAO Yonghui. Progress and prospect of karst rocky desertification research in southwest China [J]. *Prog Geogr*, 2014, **33**(1): 76 – 84.
- [2] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. *生态学报*, 2014, **34**(18): 5328 – 5341.  
SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, *et al.* Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(18): 5328 – 5341.
- [3] 颜梅春, 王元超. 区域生态环境质量评价研究进展与展望[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(10): 1781 – 1788.  
YAN Meichun, WANG Yuanchao. Advances in the evaluation of ecological environmental quality [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **21**(10): 1781 – 1788.
- [4] BADRELDIN N, GOOSSENS R. A satellite-based disturbance index algorithm for monitoring mitigation strategies effects on desertification change in an arid environment [J]. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 2015, **20**(2): 263 – 276.
- [5] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. *地理学报*, 2019, **74**(7): 1438 – 1449.  
WU Yijin, ZHAO Xingshuang, XI Yue, *et al.* Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006–2016 [J]. *Acta Geogr Sin*, 2019, **74**(7): 1438 – 1449.
- [6] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 等. 新疆生态质量变化趋势遥感分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(9): 2907 – 2919.  
ZHOU Ziyan, WANG Xiaoqin, DING Zhe, *et al.* Remote sensing analysis of ecological quality change in Xinjiang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(9): 2907 – 2919.
- [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 Environ Sci*, 2013, **33**(5): 889 – 897.
- [8] 罗春, 刘辉, 戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估: 以常宁市为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, **26**(4): 145 – 150.  
LUO Chun, LIU Hui, QI Luyue. Ecological changes assessment based on remote sensing indices: a case study of Changning City [J]. *Remote Sensing Land Resour*, 2014, **26**(4): 145 – 150.
- [9] 周玄德, 郭华东, 孜比布拉·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.  
ZHOU Xuande, GUO Huadong, Zhibibula Simayi, *et al.* Change of remote sensing ecological index of an oasis city in the arid area [J]. *Resour Sci*, 2019, **41**(5): 1002 – 1012.
- [10] 吴志杰, 王猛猛, 陈绍杰, 等. 基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价[J]. *生态科学*, 2016, **35**(5): 200 – 207.  
WU Zhijie, WANG Mengmeng, CHEN Shaojie, *et al.* Monitoring and evaluation of ecological environment's spatio-temporal variation in mine based on RSEI in Yongding Mine [J]. *Ecol Sci*, 2016, **35**(5): 200 – 207.
- [11] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2963 – 2972.  
WANG Lichun, JIAO Li, LAI Fengbing, *et al.* Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake Wetland, Xinjiang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(8): 2963 – 2972.
- [12] 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.  
JIANG Chaoliang, WU Ling, LIU Dan, *et al.* Dynamic monitoring of eco-environmental quality in arid desert area by remote sensing: taking the Gurbantunggut Desert China as an example [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(3): 877 – 883.



- [13] 李粉玲, 常庆瑞, 申健, 等. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测: 以陕西省富县为例[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(12): 3811 – 3817.  
LI Fenling, CHANG Qingrui, SHEN Jian, *et al.* Dynamic monitoring of ecological environment in loess hilly and gully region of Loess Plateau based on remote sensing: a case study on Fuxian County in Shaanxi Province, northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(12): 3811 – 3817.
- [14] 杨凤海, 宋佳佳, 赵焯荣, 等. 东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(9): 1580 – 1587.  
YANG Fenghai, SONG Jiajia, ZHAO Yerong, *et al.* Dynamic monitoring of ecological environment in black soil erosion area of northeast China based on remote sensing [J]. *Res Environ Sci*, 2018, **31**(9): 1580 – 1587.
- [15] 国家林业与草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[EB/OL]. (2018-12-14). <http://www.forestry.gov.cn/main/195/20181214/104340783851386.html>.  
National Forestry and Grassland Administration. *The Status in Karst Rocky Desertification Area in China* [EB/OL]. (2018-12-14). <http://www.forestry.gov.cn/main/195/20181214/104340783851386.html>.
- [16] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感: GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.  
XIONG Kangning, LI Ping, ZHOU Zhongfa, *et al.* *Study on Rocky Desertification Based on Remote Sensing and GIS: A Case of Guizhou* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [17] 习慧鹏, 王世杰, 白晓永, 等. 西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征——以贵州省普定县为例[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8919 – 8933.  
XI Huiping, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, *et al.* Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical karst areas of southwest China: a case study of Puding County, Guizhou Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(24): 8919 – 8933.
- [18] 甘淑, 袁希平. 滇东南岩溶山地环境遥感调查综合分析研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013: 30 – 32.  
GAN Shu, YUAN Xiping. *A Comprehensive Analysis of Remote Sensing Survey of Karst Mountain Environment in Southeast Yunnan* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013: 30 – 32.
- [19] GOWARD S N, XUE Y, CZAJKOWSKI K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements [J]. *Remote Sensing Environ*, 2002, **79**(2): 225 – 242.
- [20] TODD S W, HOFFER R M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background [J]. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 1998, **64**(9): 915 – 921.
- [21] CRIST E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote Sensing Environ*, 1985, **17**(3): 301 – 306.
- [22] HUANG C, WYLIE B, YANG L, *et al.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. *Int J Remote Sensing*, 2002, **23**(8): 1741 – 1748.
- [23] BAIG M, ZHANG L, TONG S, *et al.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. *Remote Sensing Lett*, 2014, **5**(5): 423 – 431.
- [24] RIKIMARU A, ROY P S, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical Ecol*, 2002, **43**(1): 39 – 47.
- [25] 徐涵秋, 杜丽萍. 遥感建筑用地信息的快速提取[J]. 地球信息科学学报, 2010, **12**(4): 574 – 579.  
XU Hanqiu, DU Liping. Fast extraction of built up land information from remote sensing imagery [J]. *J Inf Sci*, 2010, **12**(4): 574 – 579.
- [26] NICHOL J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 2005, **71**(5): 613 – 622.
- [27] RAISSOUNI N, SOBRINO J A. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco [J]. *Int J Remote Sensing*, 2000, **21**(2): 353 – 366.
- [28] 李鹏. 会泽年鉴[M]. 昆明: 云南人民出版社, 2018: 41 – 48.  
LI Peng. *Huize Yearbook* [M]. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 2018: 41 – 48.