引文格式：韩沙鸥,周鑫,杨存建. 基于RSEI的九寨沟地震区生态环境质量恢复评价[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 84–89. doi:10. 3969/j.issn. 1672–4623.2025.05.018

基于RSEI的九寨沟地震区生态环境质量恢复评价

韩沙鸥[1]，周　鑫[2]，杨存建[3*]
（1. 四川水利职业技术学院 测绘地理信息学院，四川 崇州 611231；2. 四川省林业勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610081；
3. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室 地理与资源科学学院，四川 成都 610068）

摘　要：九寨沟7.0级地震对生态环境造成较大破坏，评价震后生态环境受损和恢复情况，可为后续生态环境修复提供科学依据。利用九寨沟地震区2015年、2017年、2021年Landsat8 OLI影像构建遥感生态指数（RSEI）模型，监测2015—2021年研究区生态环境质量变化情况。结果表明，2015—2021年研究区75%以上地区的生态环境质量基本不变，且2021年已达到2015年的91.98%，说明区域生态环境稳定性较高、恢复能力较强。地震烈度越高、海拔越高（3 000~3 500 m最大、4 000 m以上趋于平缓）、坡度越陡生态环境质量受损率越大；生态环境质量恢复率则恰好相反，可为判断地震灾害易受损区域提供一定支撑。

关键词：九寨沟地震；RSEI；主成分分析；生态环境；质量恢复评价
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672−4623（2025）05−0084−06

Eco−environmental Quality Restoration Evaluation of Jiuzhaigou Earthquake Area Based on RSEI

HAN Sha'ou[1], ZHOU Xin[2], YANG Cunjian[3]
(1. College of Surveying and Geo-informatics, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou 611231, China;
2. Sichuan Forestry Survey, Design & Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China;
3. Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Faculty of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: The Jiuzhaigou M7.0 earthquake caused great damage to the eco-environment. The damage and restoration evaluation of eco-environment after the earthquake can provide a scientific basis for the subsequent eco-environmental restoration. In this paper, we used Landsat8 OLI images of Jiuzhaigou earthquake area in 2015, 2017 and 2021 to build a remote sensing ecological index (RSEI) model to monitor the changes of eco-environmental quality in the study area from 2015 to 2021. The results showed that the eco-environmental quality of more than 75% of study area remained basically unchanged, and in 2021, it reached 91.98% of that in 2015, indicating that the eco-environment in this area was relatively stable and had strong resilience. The damage rate of eco-environmental quality increases with the increase of intensity, altitude and slope (the damage rate is maximum at 3 000~3 500 m, and tends to be flat above 4000 m). The restoration rate of eco-environmental quality is just the opposite, which can provide some support for the judgment of earthquake-prone areas.

Key words: Jiuzhaigou earthquake, RSEI, principal component analysis, eco-environment, quality restoration evaluation

生态环境质量可反映生态环境对人类生存和社会经济发展的适宜程度，直接影响人类的可持续发展[1]。生态环境质量评价方法包括定性和定量两种[2]，多数学者采用定量法中的综合指数法。该方法首先提取绿度、湿度、干度、热度指标分量，再利用主成分分析法构建遥感生态指数（RSEI），最后利用空间分析和统计方法评价研究区的环境质量。部分学者运用该方法对自然生态环境[3−7]、城市[8−12]、矿区[13−15]等区域进行生态环境质量评价，自然生态环境主要研究从全国范围到小区域流域、湿地、山脉等生态环境质量变化；城市主要研究城市化的扩大和植被建设对环境质量的影响和城市建设发展思路；矿区主要关注矿区生态环境保护和可持续发展。部分学者[16−21]则运用RSEI对自然灾害后尤其是地震后的生态环境进行评价。九寨沟7.0级地震导致四川省、甘肃省8个县受灾，对其自然景观和生态环境造成了较大影响，生态环境质量受损严重。由中国科学院空天信息创新研究院及联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心发布的九寨沟地震后动态变化遥感监测成果可知（http://aircas.cas.cn/dtxw/cmsm/202306/t20230612_6776693.html），2017年

第一作者简介：韩沙鸥（1988—），硕士，副教授，高级工程师，研究方向为遥感和地理信息应用，E-mail：wenj_722@163.com。
通信作者：杨存建（1967—），博士，教授，研究方向为遥感和地理信息应用，E-mail：yangcj2008@126.com。

九寨沟的植被覆盖区占比为82.11%，震后植被覆盖区占比降为79.91%；随着震后恢复重建的开展，2020年、2022年植被覆盖区占比分别提升至81.07%和80.91%，这些数据说明九寨沟植被在逐渐恢复，植被覆盖度接近震前水平。目前针对九寨沟地震前后生态环境的研究较少，且现有大部分评价多以行政区为研究范围[3-22]，因此本文以2017年8月九寨沟地震烈度圈层范围为研究区，基于震前、震后和恢复后3期遥感数据，利用RSEI研究生态环境质量的总体变化以及不同烈度、海拔、坡度的变化，以期能更客观地反映地震导致的生态环境受损和恢复变化规律。

1　研究区概况与数据来源

由于Ⅵ烈度以上才有轻微损坏，因此Ⅰ~Ⅴ烈度本文不作考虑[23]。本文以Ⅵ~Ⅸ度地震烈度圈层为研究范围，包括四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县全县以及部分若尔盖县、红原县、松潘县，绵阳市平武县，甘肃省陇南市文县，甘南藏族自治州舟曲县、迭部县部分区域，拥有大熊猫国家公园、九寨沟国家级自然保护区等多个自然保护地，生态区位极其重要。研究区内地势高亢，垂直气候显著，属亚热带季风性湿润气候。2017年8月8日九寨沟7.0级地震的震中为33.20°N、103.82°E，位于九寨沟国家级自然保护区内，震源深度为20 km，发震断层面走向为151.3°、倾角为84.0°[24]。

根据研究区的海拔和环境，影像获取的最佳时间为11月到次年3月[25]，因此本文采用来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）Landsat8 OLI卫星获取的2015年2月（云量0.85%）、2017年12月（云量8.73%）、2021年2月（云量2.99%）3期遥感影像数据和30 m×30 m分辨率的DEM数据。Landsat8 OLI数据已经过地形校正和几何校正，可直接进行辐射定标和大气校正[26]，精度在0.5个像元内能减小3期影像在大气、光照等方面的误差[27]。根据研究区范围，对校正后的3期遥感影像和DEM进行裁剪。研究区海拔为975~5 558 m，可分为2 000 m以下、2 000~2 500 m、2 500~3 000 m、3 000~3 500 m、3 500~4 000 m、4 000~4 500 m、4 500~5 000 m和5 000 m以上8个等级；根据四川省森林资源规划设计调查技术细则的规定，坡度分为平坡（0~5°）、缓坡（6~15°）、斜坡（16~25°）、陡坡（26~35°）、急坡（36~45°）和险坡（≥46°）。

2　研究方法

本文利用预处理后的3期影像提取绿度、湿度、干度、热度指标，再采用主成分分析法构建研究区RSEI，以评价该地区的生态环境。

2.1　生态环境评价指标计算

1）绿度指标。植被是生态环境的重要指标，以归一化植被指数（NDVI）作为绿度指标，可反映植被的生长分布情况和覆盖度[28]，计算公式为：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{R}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}}}$$

式中，ρ_{NIR}、ρ_{R}分别为近红外、红光波段反射值。

2）湿度指标。通过缨帽变换得到湿度分量作为湿度指标，不仅能有效压缩数据和去除冗余，而且其与生态环境质量密切相关[29]。基于Landsat8 OLI数据，计算公式[30]为：

$$\begin{aligned}\mathrm{Wet}=&0.151\,1\rho_{\mathrm{B}}+0.197\,3\rho_{\mathrm{G}}+0.328\,3\rho_{\mathrm{R}}+\\&0.340\,7\rho_{\mathrm{NIR}}-0.711\,7\rho_{\mathrm{SWIR1}}-0.455\,9\rho_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned}$$

式中，ρ_{B}、ρ_{G}、ρ_{SWIR1}、ρ_{SWIR2}分别为蓝光、绿光、短波红外1、短波红外2波段反射值。

3）干度指标（NDBSI）为城市建筑指数（IBI）和裸土指数（SI）的平均值，值越大，表示越干燥，越危害生态环境[31]。

$$\mathrm{IBI}=\frac{\dfrac{2\rho_{\mathrm{SWIR1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}-\left(\dfrac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}}}+\dfrac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{G}}+\rho_{\mathrm{SWIR1}}}\right)}{\dfrac{2\rho_{\mathrm{SWIR1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}+\left(\dfrac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{R}}}+\dfrac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{G}}+\rho_{\mathrm{SWIR1}}}\right)}$$

$$SI=\frac{\left(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{R}}\right)-\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{B}}\right)}{\left(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{R}}\right)+\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{B}}\right)}$$

4）热度指标。本文选取地表温度作为热度指标[32]，计算公式为：

$$\mathrm{LST}=\frac{K_2}{\ln\left[\dfrac{K_1}{B(TS)}+1\right]}-273$$

$$B(TS)=\frac{\left[L_{10}-L\uparrow-T(1-\varepsilon)L\downarrow\right]}{T\times\varepsilon}$$

$$\varepsilon(\mathrm{surface})=0.962\,5+0.061\,4P_V-0.046\,1P_V^{\,2}$$

$$\varepsilon(\mathrm{building})=0.958\,9+0.086P_V-0.067\,1P_V^{\,2}$$

$$P_V=\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_{\mathrm{soil}}}{\mathrm{NDVI}_{\mathrm{veg}}-\mathrm{NDVI}_{\mathrm{soil}}}$$

式中，K_1、K_2为定标参数，对于Landsat8 OLI，K_1=774.89、K_2=1 321.08；$B(TS)$为温度为T的黑体在热红外波段的辐射亮度；L_{10}为TM影像在第10波段传

感器的辐射值；$L\uparrow$、$L\downarrow$、T分别为大气向上、向下辐射亮度和热红外波段透过率，通过美国地质勘探局发布的大气校正参数计算器查询（http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/）得到2015年2月、2017年12月和2021年2月的具体数值分别为0.08、0.08、0.98，0.98、0.21、0.98，0.19、0.34、0.96；$\varepsilon(\text{surface})$、$\varepsilon(\text{building})$分别为自然表面、城镇的地表辐射率；$P_V$为植被覆盖度；$NDVI_{soil}$为无植被覆盖区域的NDVI值，取经验值0.05；$NDVI_{veg}$为纯植被像元的NDVI值，取经验值0.7[33]。

2.2 RSEI评价模型

1）评价指标标准化。RSEI通过对上述4个指标进行主成分分析得到区域生态环境，因此需对4个指标进行归一化处理[34]，即

$$NI_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

2）RSEI的计算。主成分分析是对上述4个指标进行耦合，根据各指标对第一主成分（PC1）的贡献率确定权重值，避免了主观随意性而导致的偏差[3]，获得的RSEI更加客观可靠。为便于比较，对其进行标准化处理，取值范围为0~1，值越高，生态环境质量越好，反之越差[35]。

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1[f(NDVI, Wet, NDBSI, LST)]\}$$

3 研究结果与分析

3.1 各指标主成分分析

由主成分分析可知（表1），4个指标对PC1均有载荷，PC1整合了4个指标大部分特征性质，说明PC1构建的RSEI能解释九寨沟生态环境变化。分析4个指标和RSEI的均值、标准差以及各指标对PC1载荷值的变化（表2）可知，RSEI均值由0.683 9降至0.677 2，又恢复到0.677 7，说明因地震研究区生态环境受到破坏，随着地震次生灾害的消失，自然与人为修复使得生态环境得到一定恢复；绿度、湿度的特征向量为正值，干度、热度的特征向量为负值，说明绿度、湿度对生态环境产生正向影响，干度、热度产生负向影响。地震后绿度对PC1载荷值由0.629 3升至0.637 6，表明其正向作用略微增加；湿度对PC1载荷值由0.520 9降至0.367 2，表明其的正向作用显著减弱；干度和热度对PC1载荷值的负值均变大，表明其产生的负向作用更大。恢复期绿度对PC1载荷值降至0.594 1，湿度则升至0.448 6，均小于地震前；干度对PC1载荷值升至0.647 0，表明干度对生态环境的负向作用持续加强，而热度则降至0.164 3，说明热度对生态环境质量的负向作用正在减小且小于震前。

表1 研究区主成分分析结果

主成分	2015年2月		2017年12月		2021年2月	
	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%
PC1	0.215 1	89.63	0.210 2	89.83	0.239 4	90.40
PC2	0.018 2	7.60	0.014 8	6.34	0.018 0	6.79
PC3	0.003 7	1.51	0.005 4	2.31	0.004 5	1.69
PC4	0.002 9	1.24	0.003 6	1.52	0.003 0	1.12

表2 2015—2021年研究区4个指标和RSEI指数统计值

年份	参数	NDVI	Wet	NDBSI	LST	RSEI
2015	均值	0.617 9	0.433 1	0.489 7	0.502 6	0.686 9
	标准差	0.096 3	0.054 0	0.115 0	0.134 6	0.150 2
	PC1载荷值	0.629 3	0.520 2	−0.531 3	−0.225 8	
2017	均值	0.596 5	0.529 2	0.464 2	0.407 1	0.677 2
	标准差	0.096 0	0.008 1	0.112 8	0.131 7	0.138 0
	PC1载荷值	0.637 6	0.367 2	−0.534 1	−0.416 1	
2021	均值	0.619 1	0.584 2	0.536 3	0.447 7	0.677 7
	标准差	0.098 1	0.045 7	0.119 8	0.129 3	0.149 4
	PC1载荷值	0.594 1	0.448 6	−0.647 0	−0.164 3	

3.2 生态环境总体变化分析

本文将3期RSEI两两作差，以分析九寨沟震后生态环境质量的受损和恢复情况；并将其差值分为显著变好、轻微变好、无明显变化、略微变差、显著变差5级。由表3可知，2015—2017年生态环境等级不变面积为13 838.42 km^2，说明该区域生态环境较稳定，即使遭受了7级地震，也能保持75%以上的区域生态环境没有遭受破坏，生态转好面积为895.31 km^2，主要表现为轻微变好，而生态等级下降面积为3 603.1 km^2，主要表现为略微变差，说明研究区的生态环境受地震影响而变差；2017—2021年生态环境等级不变面积为14 013.33 km^2，等级下降面积为1 777.46 km^2，主要表现为略微变差，生态转好面积为2 546.04 km^2，主要表现为轻微变好，相较于2015—2017年，生态环境转好比例上升，生态环境变差比例下降，说明研究区的生态环境在逐渐恢复；2015—2021年生态环境等级不变面积为16 867.88 km^2，生态转好面积为309.81 km^2，主要表现为轻微变好，等级下降面积为1 159.14 km^2，主要表现为略微变差，说明2021年研究区生态环境已接近震前水平。综上所述，地震导致研究区近20%的区域生态环境下降，经过3年半的恢复，生态环境基本恢复到震前水平。

3.3 生态环境变化及其影响因子分析

1）生态环境变化与烈度的关系。生态环境变化与烈度的关系见图1，其中受损率和恢复率是指该烈度圈层受损或恢复面积在该烈度圈层的面积占比，可

表3　2015—2021年研究区生态环境等级变化

类别	变化情况	级差	2015—2017年		2017—2021年		2015—2021年	
			面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
变差	显著变差	−4	0.53	0	0.09	0	0.21	0
		−3	45.84	0.25	1.54	0.01	3.85	0.02
	略微变差	−2	500.62	2.73	45.25	0.25	68.03	0.37
		−1	3 056.11	16.67	1 730.58	9.44	1 087.05	5.93
不变	无明显变化	0	13 838.42	75.46	14 013.33	76.41	16 867.88	91.98
变好	轻微变好	1	870.26	4.75	2 100.70	11.46	298.35	1.63
		2	23.57	0.13	419.71	2.29	10.18	0.06
	显著变好	3	1.13	0.01	25.41	0.14	0.94	0.01
		4	0.35	0	0.22	0	0.34	0

以看出，2015—2017年Ⅵ烈度圈层受损率最高，Ⅶ~Ⅸ烈度的受损率随烈度的增加而增加，可能是由于该圈层拥有大面积草本植物和终年不化的积雪所致；2017—2021年生态环境恢复率随烈度的增加而降低，说明烈度越低的圈层生态环境恢复越快；2015—2021年生态环境受损率随烈度的增加而增加。

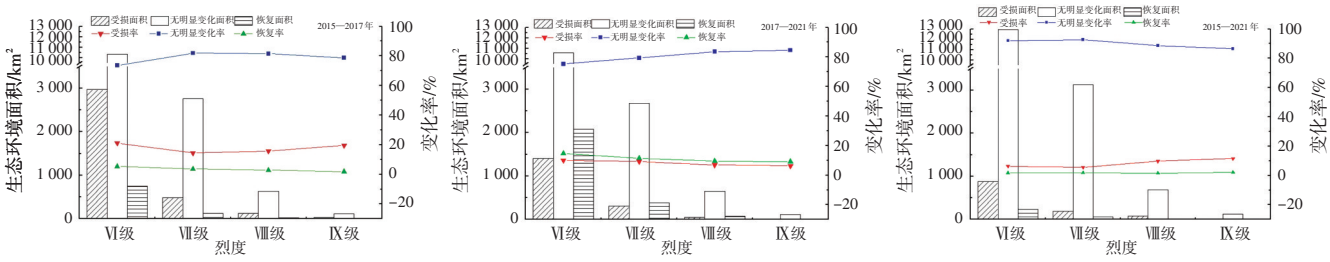


图1　不同地震烈度生态环境的受损率和恢复率

2）生态环境变化与海拔的关系。生态环境变化与海拔的关系见图2，可以看出，2015—2017年生态环境的受损率随海拔的升高先升后降，在海拔3 000~3 500 m达到最大值，在海拔4000 m以上趋于平缓；2017—2021年生态环境的恢复率与2015—2017年的受损率变化趋势一致；2015—2021年的受损率和恢复率均趋于平稳。在恢复期2 000 m以下区域的受损率远大于恢复率，导致最终该区域受损率大于恢复率，可能是由于县城等人为活动密集区域主要分布在海拔2 000 m以下，人工种植使生态环境质量变好，但震后种植区若没有科学管理会导致生态环境退化，因此恢复期生态环境受损率远高于恢复率，也说明人类活动降低了生态系统的稳定性，一旦发生自然灾害，生态环境破坏大、恢复慢。2015—2017年的受损率和2017—2021年的恢复率最大值均在3 000~3 500 m范围，可能是由于该区域植被类型丰富，虽受地震影响较大但恢复能力较强。海拔4 000 m以上的区域以积雪为主，基本不受地震影响，因此其受损率和恢复率的变化不大。

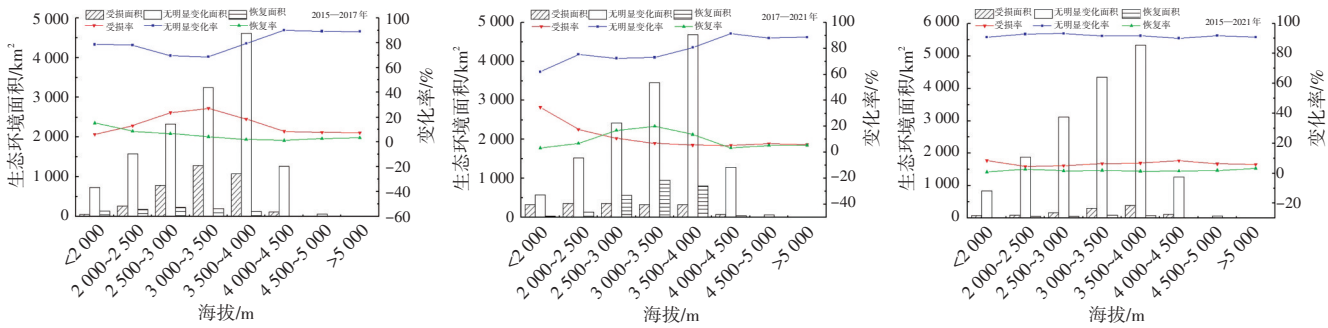


图2　不同海拔生态环境的受损率和恢复率

3）生态环境变化与坡度的关系。生态环境变化与坡度的关系见图3，可以看出，坡度的受损率和恢复率变化幅度小于烈度、海拔，在不同坡度级别上变化平缓，2015—2017年平坡的受损率最大，其余坡度级别受损率约为20%，可能是由于耕地和草地主要分布于平坡和缓坡区域；2017—2021年不同坡度级别的恢复率约为14%，恢复率随坡度的增加而减小；2015—2021年生态环境的受损率随坡度的增加而增

加，恢复率随坡度的增加而减小。

绿度、湿度对PC1的载荷值始终为正值，干度、热度对PC1的载荷值始终为负值，说明绿度、湿度对生态环境质量始终起正向作用，干度、热度始终起负向作用，这与众多研究结果一致[18-23]，但震后绿度的正向作用反而增加了，可能是因为震后遥感数据获取时间为12月，而震前和恢复期为2月，虽属于一个季节，但还是出现了差异。本文选取了同一季节云量较小（小于10%）的3期影像数据，符合前人进行生态环境评价对遥感数据的要求[3-12,16-18]，但震后遥感数据的云量（8.73%）高于震前（0.85%）和恢复期（2.99%），对指标提取的精确度有一定影响。因此，获取多期多源遥感数据，减小外界因素的误差，是本文后续重要的研究方向。

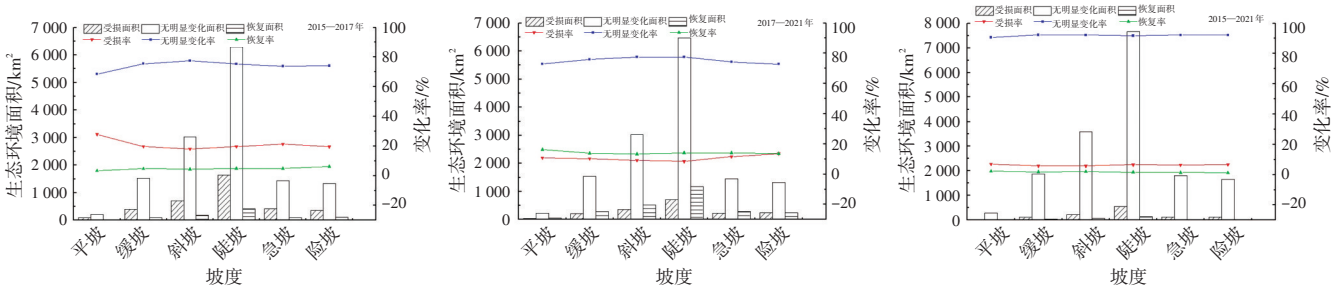


图3 不同坡度生态环境的受损率和恢复率

4 结 论

本文从2015年、2017年、2021年遥感影像中提取绿度、湿度、干度、热度4个指标，利用主成分分析法研究生态环境质量变化，结果表明：①3期RSEI均值分别为0.683 9、0.677 2、0.677 7，说明研究区生态环境因地震受到破坏又得到恢复，但未恢复到震前水平，2015—2017年、2017—2021年、2015—2021年生态环境不变和变好的占比分别为80.35%、90.3%、93.68%，变差和变好主要集中在略微变化等级，说明研究区生态环境稳定性较高，恢复较好；②2015—2017年生态环境的受损率随烈度的增加而增加，2017—2021年生态环境的恢复率随烈度的增加而减少，说明烈度越低生态环境受损越小、恢复越快，反之亦然；③2015—2017年不同海拔生态环境受损率和2017—2021年恢复率的变化趋势一致，均为随海拔的升高先增后减，在3 000~3 500 m达到最大值，4 000 m以上的区域趋于平缓，随着海拔的升高，植被类型从乔木过渡到灌木最终变化到草本，而植被的自我修复速度是草本大于灌木大于乔木，最终表现为不同海拔受损率和恢复率不同；④2015—2021年的受损率和恢复率在不同坡度级别上均较平缓，2015—2017年生态环境的受损率随坡度的增加而增加，2017—2021年生态环境的恢复率随坡度的增加而减小，说明坡度越大生态环境受损越大、恢复越慢。

参考文献

[1] 张春桂,李计英. 基于3S技术的区域生态环境质量监测研究[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2 060-2 071

[2] 刘小燕,崔耀平,董金玮,等. 黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J]. 生态学报,2021,41(20):8 030-8 039

[3] 缪鑫辉,梁勤欧. 基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(2):427-438

[4] 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):2 963-2 972

[5] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the Spatiotemporal Variations in the Eco-environmental Quality in China Based on the Remote Sensing Ecological Index[J]. Remote Sensing,2020,12(15):2 462-2 480

[6] 杨绘婷,徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报,2020,31(2):533-542

[7] 颜科,刘睿,杨远陶. 基于RSEI的大熊猫国家公园生态环境评价[J]. 地理空间信息,2022,20(4):26-30

[8] Zhang T, Yang R Q, Yang Y B, et al. Assessing the Urban Eco-environmental Quality by the Remote-sensing Ecological Index: Application to Tianjin, North China[J]. ISPRS International Journal of Geo-information,2021,10(7):475-492

[9] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco-environmental Quality Assessment in China's 35 Major Cities Based on Remote Sensing Ecological Index[J]. IEEE Access, 2019(7):51 295-51 311

[10] 高蕾,刘一帆,王宁. 宝鸡市生态环境质量评价研究[J]. 地理空间信息,2023,21(8):33-36

[11] 杨应增,周来丰,夏伟,等. 基于遥感生态指数的贵安新区生态质量变化分析[J]. 地理空间信息,2023,21(7):65-70

[12] 李静,雷少华. 长时序RSEI响应生态宜居城市建设[J]. 地理空间信息,2023,21(8):37-40

[13] 胡思汉,姚玉增,付建飞,等. 基于RSEI指数的东北矿区生态质量变化评价:以辽宁弓长岭区为例[J]. 生态学杂志,2021,40(12):4 053-4 060
[14] 岳辉,刘英,朱蓉. 基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测[J]. 水土保持通报,2019,39(2):101-107
[15] 朱冬雨,陈涛,牛瑞卿,等. 利用移动窗口遥感生态指数分析矿区生态环境[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(3):341-347
[16] 胡宝荣. 基于遥感与GIS技术的汶川县地震前后生态环境质量评价[D]. 成都:成都理工大学,2009
[17] 杨斌,曹春香,田蓉,等. 汶川县震后5年生态环境质量恢复评价[J]. 遥感学报,2014,18(4):946-957
[18] 潘洪义,李加安,张琴. 基于RSEI的地震区生态环境质量恢复研究:以汶川县为例[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(3):745-757
[19] 张春敏,王根绪. 不同地震烈度对灾区景观生态破坏程度的评价[J]. 生态学报,2008,28(12):5 938-5 947
[20] 王庆安,张翔,毛竹. 汶川地震生态环境破坏严重区地形高程和起伏度分布特点[J]. 科技导报,2009,27(16):53-59
[21] 欧阳志云,徐卫华,王学志,等. 汶川大地震对生态系统的影响[J]. 生态学报,2008,28(12):5 801-5 809
[22] 胡翔,白文科,董鑫. 四川省九寨沟县地震前后区域生态环境质量评价[J]. 生态学杂志,2020,39(3):969-978
[23] 王德才,倪四道,李俊. 地震烈度快速评估研究现状与分析[J]. 地球物理学进展,2013,28(4):1 772-1 784
[24] 胡晓辉,盛书中,万永革,等. 由余震分布确定2017年九寨沟M_S7.0地震发震断层面参数[J]. 地震研究,2019,42(3):366-371
[25] 王新程,曲婷. 生态环境监测技术[M]. 北京:中国环境出版社,2014:49-50
[26] 闫莉. 遥感图像处理实验教程[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010:27-28
[27] 宋慧敏,薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报,2016,27(12):3 913-3 919
[28] 汪东川,陈星,孙志超,等. 格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测[J]. 生态学报,2022,42(14):5 922-5 933
[29] Huang C Q,Wylie B K,Yang L M,et al. Derivation of a Tasseled Cap Transformation Based on Landsat 7 At-satellite Reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing,2010,23(8):1 741-1 748
[30] 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
[31] Xu H Q. A New Index for Delineating Built-up Land Features in Satellite Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,2008,29(14):4 269-4 276
[32] Masina M, Lambertini A, Irene D, et al. Remote Sensing Analysis of Surface Temperature from Heterogeneous Data in a Maize Filed and Related Water Stress[J]. Remote Sensing,2020,12(15):2-31
[33] 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
[34] 李妍,张国钦,吝涛,等. 乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究:以天津市蓟州区为例[J]. 生态学报,2022,42(2):474-486
[35] 钟欣呈,许泉立. 基于RSEI模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J]. 水土保持研究,2021,28(4):350-357

(上接第79页)

[3] 刘宗巍,张望,陈铭,等. 中国典型城市交通出行特征及未来道路交通演变研究[J]. 现代城市研究,2024(1):107-113
[4] 段滢滢,陆锋. 基于道路结构特征识别的城市交通状态空间自相关分析[J]. 地球信息科学学报,2012,14(6):768-774
[5] 付鑫,孙茂棚,孙皓. 基于GPS数据的出租车通勤识别及时空特征分析[J]. 中国公路学报,2017,30(7):134-143
[6] Rao W M, Xia J X, Lyu W T, et al. Interval Data-based K-means Clustering Method for Traffic State Identification at Urban Intersections[J]. IET Intelligent Transport Systems,2019,13(7):1 106-1 115
[7] 裴玉龙,潘恒彦,郭明鹏,等. 轨道交通对城市公共交通网络可达性的影响:以哈尔滨市为例[J]. 公路交通科技,2020,37(6):104-111
[8] 郭富成,王庆国,万婕. 路网实时交通状态数据采集与分析[J]. 地理空间信息,2021,19(12):84-88
[9] 庄佳芳,余思勤. 基于探索性空间数据分析的我国港口空间格局[J]. 上海海事大学学报,2013,34(3):66-71
[10] 王健,张玉真,詹珉珉. 长三角地区交通运输网络空间格局与空间溢出效应研究[J]. 江苏大学学报(社会科学版),2022,24(5):97-104
[11] 陈绍宽,韦伟,毛保华,等. 基于改进时空Moran's I指数的道路交通状态特征分析[J]. 物理学报,2013,62(14):527-533
[12] 李海蓉,阚瑷珂. 攀枝花市人口分布与道路设施布局空间自相关研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(20):281-285
[13] 赵航,贺席燕,黄红良,等. 基于出租车GPS数据的贵阳市交通状态空间自相关分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(1):19-29
[14] 谷建立,张海涛,陈家赢,等. 基于DEM的县域土地利用空间自相关格局分析[J]. 农业工程学报,2012,28(23):216-224
[15] 许钊,刘耀林,银超慧,等. 广州主城区道路中心性与土地利用格局关系研究[J]. 地理空间信息,2023,21(3):59-65
[16] 徐志红. 基于高地联动的城市快速路交通提升策略研究[J]. 城市道桥与防洪,2023(4):8-10
[17] 卓健,王博睿,沈尧. 重新认识"小街区、密路网"开放街区的绿色交通组织[J]. 时代建筑,2022(1):6-13