

李泽虹, 吴青松, 李茜, 等, 2025. 基于 IRSEI 的生态环境质量评价与影响因素分析: 以攀枝花南部为例[J]. 沉 积与特提斯地质, 45(2): 446-458. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09006 LI Z H, WU Q S, LI Q, et al., 2025. Evaluation of ecological environment quality and analysis of influencing fac-

tors based on IRSEI: A case study of the southern region of Panzhihua[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(2): 446–458. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09006

基于 IRSEI 的生态环境质量评价与影响因素分析: 以攀枝花南部为例

李泽虹1, 吴青松2*, 李 茜2, 周学铖2

(1. 成都工业职业技术学院,四川 成都 610213; 2. 中国地质调查局军民融合地质调查中心,四川 成都 610059)

摘要: 矿业活动区生态环境脆弱,水土流失、植被破坏、生物多样性降低等生态环境问题频现。为深层次、多样化评价矿 业活动区生态环境质量,本文提出一种改进型遥感生态指数(IRSEI),它在原有遥感生态指数(RSEI)基础上,引入生 物多样性指数,更好地描述了生态环境的多样性和复杂性。本文以攀枝花南部地区为例,利用陆地卫星(Landsat)影像和 数字高程模型(DEM)数据计算了2000—2022年的IRSEI值,基于转移路径和局部空间自相关指标分析了生态环境质量 时空分布和变化特征,并采用地理探测器开展了成因分析。结果表明,研究区生态环境质量呈现出明显两极分化趋势,生 态质量优良和较差的区域面积均呈现增加趋势,而中等生态质量区域面积减少。研究区生态环境质量在空间上呈现出显著 聚集性,高度聚集区主要分布在北部和东部的山区,低度聚集区主要分布在金沙江两岸和城镇区。影响生态环境质量的主 要因素是归一化植被指数(NDVI)、干度指数(NDBSI)和生物多样性指数(BI),而热度指数(LST)的影响较小。生 态环境质量改善主要归因于植被覆盖度提高和生物多样性增加,而生态环境质量恶化主要受到矿业开发、石漠化和城市扩 张影响。本文为区域生态环境监测和保护提供了一种新的方法和参考。

关 键 词: 遥感生态指数; 生物多样性; 攀枝花; 生态环境质量; 矿业区 中图分类号: X826 **文献标识码:** A

Evaluation of ecological environment quality and analysis of influencing factors based on IRSEI: A case study of the southern region of Panzhihua

LI Zehong¹, WU Qingsong^{2*}, LI Qian², ZHOU Xuecheng²

(1. Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu 610213, China; 2. Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610059, China)

Abstract: The ecological environment in mining activity areas is fragile, with frequent ecological problems such as soil erosion, vegetation damage, and reduced biodiversity. To provide a comprehensive and diverse evaluation of ecological environment quality in mining areas, this paper presents an improved remote sensing ecological index (IRSEI). By incorporating a biodiversity index into the original remote sensing ecological index (RSEI), it better depicts the diversity and complexity of the ecological environment. Taking the southern region of Panzhihua as a case study, IRSEI values were calculated for the years 2000 to 2022 utilizing landsat images

收稿日期: 2024-02-03; 改回日期: 2024-05-23; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 刘洪

作者简介: 李泽虹(1977—), 女, 硕士, 教授, 从事生态科技研究。E-mail: 956011673@qq.com

通信作者: 吴青松 (1979—),男,博士研究生,高级工程师,从事生态遥感技术与应用研究。E-mail: 645510982@qq.com

资助项目: 中国地质调查局"攀西冕宁—德昌地区稀土及多金属矿产地质调查"项目(ZD20220301)

and digital elevation model (DEM) data. Based on transfer path analysis and local spatial autocorrelation indicators, the spatiotemporal distribution and change characteristics of ecological environment quality were analyzed. Additionally, causality analysis was conducted using geographic detectors. The results show that there is a clear polarization trend in the ecological environment quality of the study area. Areas with excellent and poor ecological quality both exhibit an increasing trend in area, while areas with moderate ecological quality are decreasing. The spatial distribution of ecological environment quality in the study area shows significant clustering. Highly clustered areas are mainly distributed in the mountainous regions in the north and east, while lowly clustered areas are mainly distributed along the banks of the Jinsha River and in urban areas. The main factors influencing the ecological environment quality are normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference built-up and soil index (NDBSI), and biodiversity index (BI), while the influence of land surface temperature (LST) is relatively minor. The improvement in ecological environment quality is mainly attributed to increased vegetation coverage and biodiversity. Conversely, the deterioration of ecological environment quality is mainly affected by mining development, rocky desertification, and urban expansion. This paper provides a new method and reference for regional ecological environment monitoring and protection.

Key words: remote sensing ecological index; biodiversity; Panzhihua; ecological environment quality; mining area

0 引言

良好的生态环境不仅是人类生存和发展的基 石,更是推动区域社会经济可持续发展的关键所在, 科学精准认识区域生态环境状况十分必要。攀枝 花市是重要的矿业城市,其生态环境问题突出,区 内矿业活动推动社会经济发展的同时也影响了生 态环境质量,如何在矿产资源稳定开发的同时实现 生态环境保护是当前面临的一项重大挑战(丁俊等, 2005;高苇等,2018;赵银兵等,2022)。对生态环境 变化实施动态监测,改善生态环境质量和建立生态 保护机制,实现生态环境可持续发展已经成为攀枝 花城市发展的新要求。

早期矿业城市生态环境质量监测方法以人工 监测为主,实施过程耗时长,成本高。相较于传统 评估生态环境质量的方法,遥感技术凭借其快速、 实时、大规模监测以及数据开放获取等诸多优势, 在生态环境领域得到广泛应用(陈博明, 2020)。目 前,遥感生态环境监测模型有两大类:一是单一指 数模型;二是综合指数模型(张景华等,2024)。单 一指数模型在计算上相对简易,但一个指标难以全 面反映生态环境的系统性变化。遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI)能够客观、 综合地反映生态环境质量,具有时空连续性和高效 性,为生态环境保护和可持续发展提供有力支持 (徐涵秋等, 2013), 自提出后经众多学者推广应用 (高鹏等, 2017; 吴映瞳等, 2020; 刘虎等, 2021; 李妍 等, 2022; 罗镕基等, 2023; 秦璐等, 2023), 取得一定 成效,但有两个方面还有待改进:一是对于作为生

态系统重要指标的生物多样性已有较多研究(谢余 初等,2018),但 RSEI 未考虑生物多样性的影响,仅 依赖植被指数,难以全面反映生态系统的多样性和 复杂性;二是 RSEI 计算基于像元信息,忽略了地物 之间的空间关联性,导致评价结果可能遗漏生态环 境的整体性和连续性特征,存在不确定性。

针对上述问题,本文提出一种改进型遥感生态 指数(improved remote sensing ecological index, IRSEI),该指数在RSEI基础上引入生物多样性指 数(biodiversity index, BI),可以更好描述生态环境 的多样性和复杂性。本文以攀枝花市南部为研究 区,应用IRSEI开展自2000年至2022年间的生态 质量监测,基于转移路径和局部空间自相关指标分 析研究区生态质量时空分布和变化特征,并采用地 理探测器开展了成因分析,从而进一步探讨生态环 境质量与矿业活动、城市发展的关系,本文研究成 果为矿区生态环境保护和修复提供了科学依据,为 推动绿色矿山建设做出了新的探索。

1 研究区概况与数据情况

1.1 研究区概况

研究区位于四川省攀枝花市南部川滇两省交 界处的攀西裂谷中南段,面积2571km²。区内主 要以侵蚀剥蚀中山、丘陵和山原峡谷地貌为主,地 势由西北向东南倾斜,山脉走向近于南北。研究区 属南方亚热带为基带的立体气候类型,具有旱、雨 季分明,昼夜温差大,日照长等特点(李晶瑜等, 2018)。区内植被垂直地带性明显,从山麓到山顶 的植被类型依次为灌草丛、阔叶林、针叶林、高山 灌丛、高山草甸。研究区主要种植水稻、玉米等粮 食作物以及各种经济作物。

研究区地处扬子地台西缘、康滇地轴北段,受 川滇南北向构造带和滇藏"歹"字形构造带的复 合影响(图1)。区内地层出露相对齐全,中生界、 古生界和元古界地层发育较好,新生界零星分布, 岩性主要为砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等。此外, 区内发育大量岩浆岩和变质岩,岩浆岩具有分布不 均、多期性特点(罗健等,2022)。研究区构造整体 呈现出南北向发育的特征,构造形迹主要以褶皱和 断裂为主,包括安宁河断裂带、昔格达断裂带、攀 枝花断裂等一系列深大断裂和褶皱带。区域内有 丰富的煤炭、铁矿、石灰石等矿产资源,煤炭和铁矿 是支撑当地经济发展的重要资源(周春兰等,2008)。

2 研究方法

2.1 数据源及处理

本研究 Landsat 遥感数据来自美国谷歌公司地

理计算云平台(google earth engine, GEE), DEM下 载于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)(表1)。 在数据时相上,选择冬季12月和1月数据,以规避 夏季降雨对研究结果的潜在影响。在数据处理阶 段,运用遥感软件对 Landsat 数据进行处理。首先, 进行辐射定标,以确保数据的准确性和可靠性;接 着,开展 FLAASH 大气校正,以消除大气散射和吸 收对图像质量影响;最后,通过裁剪获得研究所需 图像。在此基础上,进行指标计算,提取关键生态 参数,为后续研究提供基础数据。

2.2 遥感生态指数

通过遥感技术获取与生态有关的指数包括绿度、湿度、干度和热度,就这四个指数进行主成分分析,并将第一分量称之为遥感生态指数(RSEI)(徐涵秋等,2013)。

RSEI 计算如下:

RS EI = *f*(*NDVI*, *WET*, *NDBSI*, *LST*) (1) 式中, NDVI 为归一化植被指数, 计算公式为:



图 1 研究区地理位置图(a),构造纲要图(b,据刘洪等,2020修改)和研究区岩性简图¹⁰(c) Fig. 1 Geographic location map (a), structural outline map (b, modified after Liu et al., 2020) and lithological sketch map¹⁰ (c) of the study area

表 1 研究区数据源信息表 Table 1 Data source information table for the study area

数据类型	获取时间	空间分辨率	数据质量	数据来源
TM	2000年12月19日	30 m	无云,沿河有水汽影响	
	2005年1月31日	30 m	无云,质量好	
	2010年1月29日	30 m	无云,质量好	遙感影像数据米源于GEE、 DEM数据下载于地理究词数据三
OLI	2015年1月27日	30 m 15 m	无云,质量好	- DEM级据下载 J 地理工问 数据云 (ASTER GDEM)
	2022年1月30日	30 m 15 m	无云,质量好	
DEM	2010年	30 m	/	-
	$\rho_{\rm Nir} - \rho_{\rm P}$	ed (- >	

(2)

$$NDVI = \frac{\rho_{\rm Nir} - \rho_{\rm Red}}{\rho_{\rm Nir} + \rho_{\rm Red}}$$

WET 为湿度指数,计算公式为:

 $WET = c_1 \rho_{\text{Blue}} + c_2 \rho_{\text{Green}} + c_3 \rho_{\text{Red}} + c_4 \rho_{\text{Nir}} + c_5 \rho_{\text{Swir1}} + c_6 \rho_{\text{Swir2}}$ (3)

 ρ 分别对应波段反射率,TM中 $c_1 \sim c_6$ 分别为 0.0315、0.2021、0.3012、0.1594、-0.6806、-0.6109; OLI中 $c_1 \sim c_6$ 分别为0.1511、0.1973、0.3283、0.3407、 -0.7117、-0.4559。

NDBSI为干度指数,计算公式为:

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{\text{Swir1}}}{\rho_{\text{Swir1}} + \rho_{\text{Nir}}} - \left(\frac{\rho_{\text{Nir}}}{\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Red}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{Swir1}}}\right)}{\frac{2\rho_{\text{Swir1}}}{\rho_{\text{Swir1}}} + \left(\frac{\rho_{\text{Nir}}}{\rho_{\text{Nir}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}}}\right)} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{Swirl}} + \rho_{\text{Nir}} \left(\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Red}} \rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{Swirl}} \right)$$

$$SI = \frac{(\rho_{\text{Swirl}} + \rho_{\text{Red}}) - (\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Blue}})}{(5)}$$

$$(\rho_{\text{Swirl}} + \rho_{\text{Red}}) + (\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{Blue}})$$

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2}$$
(6)

LST 为热度指数,计算公式为:

$$LST = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{BT} + 1)} - 273$$
 (7)

$$BT = \frac{(L_{6/10} - L_{u} - \tau(1 - \varepsilon)L_{d})}{\tau\varepsilon}$$
(8)

上式中, SI 为裸土指数, IBI 为建筑指数, ε 、 L_{610} 、 L_{u} 、 L_{d} 、 τ 分别代表比辐射率、热红外波段辐射值、大 气上行参数、大气下行参数以及大气透过率, K_1 和 K_2 是常数(宋挺等, 2015)。对于比辐射率,本文使 用分类回归决策树对地表进行分类,依据分类结果 对自然表面的比辐射率估计方法来进行地表比辐射率估算(覃志豪, 2004)。

2.3 生物多样性指数

基于遥感技术进行生物多样性指数评估已有 许多研究(李文杰等, 2010;杨海军等, 2015;张斌, 2023)。其中,刘少阳提出以生境质量指数(habitat quality index, HQI)、净初生产力(net primary productivity, NPP)、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)、生境面积百分比(Sp)和香 农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)为 基本指标,通过归一化加权求和的方式获取研究区 生物多样性指数(刘少阳等, 2020)。该方法与本文 研究思路吻合,其计算公式如下:

$$BI = HQI_{gy}a_1 + NPP_{gy}a_2 + EVI_{gy}a_3 + S_{p-gy}a_{14} + SHDI_{gy}a_5$$
(9)

式中, *a*₁~*a*₅表示各指数权重值, 下标gy表示对各指数进行最大值归一化。指数权重值基于层次分析法结合《区域生物多样性评价标准》确定, 见表 2。

2.4 改进型遥感生态指数(IRSEI)

矿业活动对矿区及其周边生态环境产生严重 影响,作为重要矿业城市,研究区矿业活动对生态 影响尤其显著。在遥感生态指数基础上结合生物 多样性指数有助于进一步反映研究区生态环境特 征,进而探索影响生态环境变化的内在驱动力。鉴 于此,本文构建了一个改进型遥感生态指数,该指 数以原 RSEI 指数为基础,新增生物多样性指数,对

	1.	ible 2 Weight table of bloary	crisity multators	
序号	BI指标	数据来源	计算方法	指标值权重
1	HQI	土地利用数据	InVEST软件	0.35
2	NPP	TM与OLI	CASA软件	0.25
3	EVI	TM与OLI	遥感软件	0.15
4	SP	土地利用数据	Fragstats软件	0.1
5	SHDI	土地利用数据	Fragstats软件	0.15

表 2 生物多样性指标权重表(刘少阳等, 2020) Table 2 Weight table of biodiversity indicators

各指数归一化后通过主成分分析,选取第一分量作 为新的遥感生态指数。计算公式如下:

IRS EI = f(NDVI, WET, NDBSI, LST, BI) (10)

3 结果与分析

3.1 生态质量时空分布与变化

基于上述方法,本文对研究区 2000—2022 年 生态质量进行了评价,采用等间距法(徐涵秋,2013) 将计算结果分为差、较差、中等、良、优 5 个等级 (图 2)。评价可知,研究区生态环境质量分布表现 为河谷相对较低、两侧山区相对较高的特征。沿 着河谷分布的地区生态质量较差,涉及格里坪镇、 太平乡北部、天宝鼎街道、攀枝花市区、金江镇、 红格镇南部和平地镇东部;研究区北部同德镇、布 德镇、务本乡以及南部中坝乡、大田镇、啊喇彝族 乡和平地镇的高海拔地区生态质量较好。

研究区的生态质量面积按照等级依次排列为 良>优>中等>较差>差。具体而言,在五个年度 中,生态质量优良的比例均超过了75%,表明研究 区的生态质量整体良好。从表3可以看出,研究区 在 2000 年至 2022 年期间, 生态环境质量呈现出一 种规律性变化趋势。各类生态质量类别的面积在 不同时间节点上均有所波动,表明生态环境质量受 到多种因素的影响,包括自然因素和人为因素。具 体来说,对于"差"类别的生态质量,其面积在 2000年仅为13.69 km², 2005年增长到88.23 km², 随后几年,"差"类别的面积虽有波动,但变化不 大。对于"较差"类别生态质量,面积在2000年 至 2010 年期间呈现出持续上升趋势, 从 90.11 km² 增加到 181.68 km², 在随后时间段, "较差"类别 面积有所下降,但下降幅度较小。"中等"类别生 态质量面积在 2000 年至 2010 年期间呈现下降趋 势,从 300.00 km² 下降到 271.55 km²,但随后几年 又有所回升。对于"良"类别的生态质量,其面积 在2000年至2005年期间出现了明显下降,从 1420.59 km²下降到1076.60 km²,但随后时间段小 幅回升。最后,在"优"类别生态质量方面,其面 积在 2000 年至 2022 年期间呈现出波动上升的趋 势,从 748.72 km² 增加到 903.64 km²。

在研究各个时段生态质量的基础上,本文基于 转移路径对研究区 2000—2022 年间生态环境质量 迁移进行了分析,研究发现,生态环境质量变化主 要发生在相邻等级之间。具体来说,这种迁移呈现 出一种渐进式的特点,即生态环境质量在大多数情况下是从一个等级逐渐转变到相邻等级,而不是发 生跨越多个等级的突变(图 3)。

综上所述,研究区在 2000 年至 2022 年期间, 生态环境质量整体上呈现出一种规律性变化趋势。 其中,"差"和"较差"类别生态质量面积总体上 呈现出上升趋势;而"优"类别生态质量面积呈现 出波动上升趋势。

3.2 总体空间集聚特征

为深入探索研究区生态环境质量空间集聚特征,结合研究区实际情况,同时确保尺度内信息完整性和定量评价准确性,本文采用 500 m×500 m 的 网格进行图像重采样,并从 2022 年图像中收集了 10 290 个样本点,对分析结果进行空间自相关分析 (何刚等, 2020)。

分析显示,研究区生态环境质量在空间域呈现 明显聚集性特征。具体而言,2022年的莫兰指数 (Moran's index)为正,数值为 0.425,表明研究区生 态质量具有显著空间自相关特征。标准差(Z)值 为 60.38,远远大于 1.65,同样说明研究区生态质量 具有显著相关性。此外,显著性水平(P)值小于 0.001,拒绝了原假设,进一步证明生态质量在空间 上具有相关性。

局部空间自相关分析则反映了各个网格单元 之间的空间聚集特征(图 4)。可以看出,高高聚集 区显示出显著的高值集聚特征,主要分布在北部同 德镇、布德镇、务本乡、桐子林镇,以及东部和爱 彝族乡和南部的中坝乡、啊喇彝族乡等地区。这 些区域林地连片发育,生态环境质量呈现出成片性 良好的特点。与此形成对比的是低低聚集区,其空 间特征呈条带状分布,生态环境质量在这些区域内 呈现明显的低值,该区域主要沿金沙江两岸分布, 还分布于益民乡和新九乡等地。研究区高低聚集 区主要分布在低低聚集区外围,高低聚集区相对分 散且分布面积较小。

3.3 成因分析

为进一步明确研究区生态环境质量变化的驱动力因素,本文利用地理探测器(王劲峰等,2017) 对构成 IRSEI 的 5 个指标进行分析:一是对监测年份的指标图像进行重采样,将其调整为 500 m× 500 m 的网格,并在每个图像中生成 10 290 个采样点;二是以生态环境质量数据点作为自变量,选择上述 5 个指标作为因变量,通过对生态环境质量数



图 2 研究区 2000—2022 年生态质量等级分布图 Fig. 2 Distribution map of ecological quality levels in the study area from 2000 to 2022

据点与这5个指标进行因子检测和交互检测分析。 由表4可知,所有探测因子P值均小于0.001,

这表明所选探测因子在显著性检验中通过,可以被 视为影响因素并用于成因分析。具体而言,在 表 3 研究区 2000-2022 年生态质量面积统计表

	Table 3Statistical	table of ecologic	al quality area in	the study area fr	om 2000 to 2022	
时间	面积及占比	差	较差	中等	良	优
2000年	面积/km ²	13.69	90.11	300.00	1 420.59	748.72
2000平	占比/%	0.53	3.50	11.66	55.21	29.10
2005年	面积/km ²	88.23	178.88	314.22	1 076.60	915.16
2005-	占比/%	3.43	6.95	12.21	41.84	35.57
2010年	面积/km ²	81.19	181.68	271.55	1 194.07	844.61
2010平	占比/%	3.16	7.06	10.55	46.41	32.82
2015年	面积/km ²	72.73	144.79	283.39	1 194.70	877.48
2015-	占比/%	2.83	5.63	11.01	46.43	34.10
2022年	面积/km ²	120.20	162.64	282.46	1 104.15	903.64
2022-	占比/%	4.67	6.32	10.98	42.91	35.12



图 3 不同等级生态质量迁移路径

Fig. 3 Transfer paths of ecological quality at different levels

2000年、2005年、2010年、2015年和2022年,研究区 NDVI、NDBSI和 BI 被确定为生态环境质量的主导因子,LST 的解释力最低,影响力有限。在2000年到2022年的时间段内,研究区的 NDVI、 NDBSI和 BI 都有所提高,而 WET和 LST 的变化相对较小。研究区生态环境质量较好的区域,生态环境质量的改善主要是由植被覆盖度提高和生物多样性增加所致;而生态环境质量较差的区域,生态环境质量的恶化主要是由干度指数(由建筑指数和裸土指数组成)升高所引起。

进一步通过交互式探测,总共得到 15 种不同 结果,分为双因子和非线性增强两类,表明交互式 探测的效果较单个因子作用更为显著(图 5)。研 究区 5 个时期影像中,NDVI 和 BI 的组合是交互作 用最为显著的组合,其空间分异解释能力(q)值最



图 4 研究区生态质量局部自相关情况

Fig. 4 Local spatial autocorrelation of ecological quality in the study area

高达 0.971。这意味着 NDVI 的显著变化对于 BI 作为自变量对生态环境的解释力产生了显著影响。 此外, NDVI 与其他因子的交互作用也产生了较高 的 q 值, 这表明研究区生态环境质量受多个因素相 互作用的影响, 而不仅仅是这些因素的简单叠加或 独立影响。

4 讨论

4.1 RSEI 与 IRSEI 对比分析

生物多样性作为生态系统稳定性的重要指标,

表 4 研究区各期生态因子解释力探测结果 Table 4 Results of ecological factor interpretation detection in the study area

					_					
中大国乙	2000年		2005年		2010年		2015年		2022年	
王心囚]	P值	q值								
NDVI	< 0.001	0.874	< 0.001	0.893	< 0.001	0.910	< 0.001	0.849	< 0.001	0.908
WET	< 0.001	0.624	< 0.001	0.587	< 0.001	0.614	< 0.001	0.576	< 0.001	0.625
NDBSI	< 0.001	0.758	< 0.001	0.852	< 0.001	0.836	< 0.001	0.847	< 0.001	0.903
LST	< 0.001	0.378	< 0.001	0.271	< 0.001	0.187	< 0.001	0.416	< 0.001	0.355
BI	< 0.001	0.851	< 0.001	0.863	< 0.001	0.921	< 0.001	0.857	< 0.001	0.912





对于全面评估生态环境质量具有重要意义(李文杰 等,2010)。生物多样性指数能够反映生物种类的 丰富度和生态系统的复杂性,从而更全面地评估生 态环境的质量(刘少阳等,2020)。RSEI 指数在反 映生态环境状况方面具有较高的敏感性和实用性, 但在反映生物多样性方面存在不足。通过将生物 多样性纳入 IRSEI 中,可以更准确地揭示矿业活动 对生态环境的影响,并为生态环境保护提供更为科 学的依据。为了深入探究 IRSEI 和 RSEI 在反映生 态质量方面的准确性,本文对比了两种指数方法下 的 PC1 信息量。从表 5 的数据可以看出,在研究 区域内,采用 RSEI 和 IRSEI 两种指数获取的 PC1 特征值贡献率存在规律性差异。IRSEI 的 PC1 值 均高于 RSEI 的 PC1 值(在研究区提高了 5.62%~ 10.10%)。这一结果表明, IRSEI 在信息量上相较 于 RSEI 更为丰富。因此,可以认为 IRSEI 在反映 攀枝花生态质量状况时,相比 RSEI 更具优势,更能 客观、准确地揭示生态质量实际情况。

图 6 为大田镇南官坝村,从 2022 年影像上可 以看出,该村群山环绕,植被覆盖密集,村内沿沟谷 两侧为居民点,近居民点缓坡为农业用地。该村远 离城镇,总体生态质量良好。RSEI 和 IRSEI 评价 结果对于连片林地覆盖区监测效果基本一致,但对 于地表覆盖类型复杂且小斑块镶嵌的居民点区域 和周围低植被覆盖的过渡地段,IRSEI 表现更准确。 IRSEI 评价图上,农业用地评价等级为"良",而 RSEI 评价图上农业用地评价为"中",相比而言, IRSEI 与遥感影像定性反映的生态质量符合度较高。

4.2 城市与矿山扩张影响

对于生态质量下降的区域,可以将其分为两个

	Table 5	Percentages of	the first principal com	ponent (PC1)	derived from RSEI and IRSEI	
之 》	•			PC1值		
万法		2000年	2005年	2010年	2015年	2022年
RSEI		78.1%	80.34%	77.59%	79.2%	83.12%
IRSEI		85.14%	86.84%	86.87%	89.1%	88.74%

RSEL和 IRSEL 第一主成分(PC1)的百分比 表 5



a. OLI 影像图; b. 高分 2 号影像图; c. RSEI 评价图; d. IRSEI 评价图 图 6 基于 RSEI 与 IRSEI 的生态质量图 Fig. 6 Ecological quality maps based on RSEI and IRSEI

主要类型。

第一类是矿山扩建导致生态环境基本面减少。 攀枝花地区煤、铁资源丰富,煤矿多位于金沙江右 岸,如田堡煤矿、几子湾煤矿、花山煤矿、太平煤 矿、宝鼎煤矿、桐麻湾煤矿和华阳三煤矿等(李晶 瑜等, 2018; 王子正等, 2012)。据不完全统计, 仅宝 鼎煤矿周边矿山占地面积就有 6.27 km²,其中包括 采场 0.11 km²、中转场地 1.98 km²、固体废弃物 2.29 km²、矿山建筑 0.36 km²以及采空塌陷区 1.53 km²,这些矿山开采过程中造成的采空区、矸 石堆、粉尘、废水等导致周边生态环境持续恶化; 铁矿主要位于攀枝花东部,如兰尖朱家包包铁矿和 红格铁矿,这些铁矿以露天开采为主(周春兰等, 2008)。20年来开采面不断延伸, 矿山规模不断扩 大,尾矿库、排土场等大量增加,严重影响了矿区 周边的生态环境,造成小区域生态环境质量总体降 低。图 7 为兰尖朱家包包铁矿和红格铁矿近 20 年

生态质量变化情况,遥感图像和生态质量评价结果 显示, 矿山活动是导致该区域生态环境质量下降的 直接原因。

第二类是城市扩张导致生态环境基本面减少。 攀枝花市作为一个地理位置特殊且城镇建设适宜 区面积有限的城市,面临着日趋紧迫的城市扩展需 要与适宜城镇建设土地资源不足的矛盾。近年来, 随着招商引资政策不断刺激,各类产业投资从省外 引入(唐子晴, 2022)。仅在 2022年,攀枝花市引入 了 820.50 亿元的投资,城市开始迅速扩张,房屋施 工面积达到 726.88 万平方米。受地理环境的限制, 城市扩张只能向原本生态环境相对良好的山地发 展,在这一过程中,原本自然生长的植被被大量砍 伐,动物栖息地遭到破坏,山地的生态平衡被打破。 同时,城市建设中产生的粉尘和废水废料等污染物 也加剧了生态环境的恶化。图7展示了城市扩张 的过程以及生态环境质量的变化情况。



A、a行图像分别为2000—2022年朱家包包铁矿生态质量图和遥感图; B、b行图像分别为2000—2022年红格铁矿生态 质量图和遥感图; C、c行图像分别为2000—2022年攀枝花城市扩张过程生态质量图和遥感图

图 7 研究区 5 个时期生态质量变化图及对应的遥感影像图

Fig. 7 Ecological quality change maps and corresponding remote sensing images of the study area in five periods

4.3 生态质量为"差"区域的地质条件分析

截至 2022 年, 研究区生态质量为"差"的区域面积达到 120.2 km², 主要分布于金沙江两侧和 新九乡、益民乡、红格镇北部, 涉及的岩浆岩主要 有花岗岩、闪长岩等, 沉积岩主要有白云岩、泥岩、 砾岩、石英砂岩等,变质岩主要有斜长角闪岩、混合片麻岩、变粒岩、浅粒岩、大理岩等,详见图 8。

本文按空间集聚情况将研究区生态质量为 "差"的区域划分为4个片区,分别为金沙江上段 福田镇一带,金沙江中段,金沙江下段,新九乡、益



图 8 生态质量为"差"的区域各类岩性分布比例

Fig. 8 Distribution proportion of various lithologies in areas with poor ecological quality

表 6 生态质量为"差"的区域地质因素分析表

Table 6	Distribution	of regions	with poor	ecological	quality and	l their stratigraphic	lithology
					1 1		

序号	区块	成因	地质环境条件	面积
1	研究区金沙江上段福田镇一带	煤矿开采	以含煤沉积岩为主	20.42 km^2
2	研究区入沙江中仍	城市扩张	各岩类均有覆盖,以变质岩占比最多	6.17 km^2
	研九区金沙江中权	铁矿开采	以岩浆岩和变质岩为主	30.00 km^2
3	研究区金沙江下段	石漠化	以碳酸盐岩为主	32.03 km ²
4	新九乡、益民乡、红格镇北部	煤矿开采	以含煤沉积岩为主	18.48 km ²

民乡、红格镇北部地区。各片区的地质背景及与 对应生态质量的关系见表 6。

由表 6 可知, 研究区生态质量为"差"的区域 岩石主要以含煤沉积岩和铁矿赋矿围岩(岩浆岩和 变质岩)为主, 占比达 57.32%, 这也印证了矿产资 源开发对研究区生态环境的负面影响作用; 此外, 研究区金沙江下段岩性总体为白云岩, 岩石可溶性 矿物含量高, 溶蚀风化强烈, 水土保持能力弱、调 蓄能力差, 土壤淋溶流失严重, 进而导致植被发育 条件不佳, 引发区域石漠化现象, 这也是致使研究 区生态环境质量下降的一大因素; 相比之下, 城市 扩张和岩石类别相关性一般, 对生态环境质量造成 负面影响的面积也相对较小。

5 结论

(1)IRSEI的 PC1 特征值贡献率高于 RSEI, 信息量更丰富, 能更客观、准确地揭示研究区的生态

质量状况,相较于 RSEI,在反映生态质量方面更具 优势。

(2)研究区 2000—2022 年生态环境质量整体 转好,但呈现两极分化特征,生态质量下降主要受 矿产资源开发、石漠化和城市扩张影响,生态质量 转好区域主要位于邻近高海拔林区但海拔稍低 地区。

(3)NDVI、NDBSI和BI是影响研究区生态环境质量的主要因素,研究区生态环境质量优良的区域,生态环境质量的改善主要是由植被覆盖度提高和生物多样性增加所致;而生态环境质量较差的区域,生态环境质量的恶化主要是由干度指数升高所引起。

注释:

中国地质调查局,2001.中华人民共和国1:50万数字地质图数据 库[DB].

References

- Chen B M, 2020. Progress in the application of remote sensing technology to ecological environment monitoring and law enforcement supervision[J]. Mining Engineering, 40 (4) : 165 – 168+173 (in Chinese with English abstract).
- Ding J, Ni S J, Wei L W, et al., 2005. Thoughts on urban environmental geological survey in southwest China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25 (4) : 108 – 110 (in Chinese with English abstract).
- Gao P, Xu Z G, Chen S J, et al., 2017. Evaluation of land cover and ecological change of Yongding Hakka Tulou World Heritage Protection Area using remote sensing image[J]. Bulletin of Science and Technology, 33 (10) : 58 - 63 (in Chinese with English abstract).
- Gao W, 2018. Research on green mining development under the environmental regulation in China[D]. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- He G, Yang J W, Bao K Y, et al., 2020. Analysis for the spatial correlation and the impact of the newly urbanized trend on the regional eco-environment quality[J]. Journal of Safety and Environment, 20 (5) : 1958 – 1966 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Ye H, Zhang T B, et al., 2018. Land cover change and its environmental impact assessment in Panzhihua coal mine concentrated area from 1995 to 2016[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 41 (8) : 89 – 92+96+107 (in Chinese with English abstract).
- Li W J, Zhang S H, 2010. Research progress on GIS and remote sensing's application in ecological security assessment and biodiversity conservation [J]. Acta Ecologica Sinica, 30 (23) : 6674 6681 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Zhang G Q, Lin T, et al., 2022. The spatiotemporal changes of remote sensing ecological index in towns and the influencing factors:
 A case study of Jizhou District, Tianjin[J]. Acta Ecologica Sinica, 42 (2): 474 486 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Jiang Y, Xia M Y, et al., 2021. Ecological environment changes of mining area with 30 years' remote sensing monitoring: A case study around Nansihu Lake, Shandong Province [J]. Metal Mine (4): 197-206 (in Chinese with English abstract).
- Liu S Y, Bai J J, Chen J, 2020. Identification and quantitative assessment of important sites for biodiversity based on remote sensing for SDG 15.1. 2 at county scale: A case study of Deqing County[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 29 (1) : 232 242 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al., 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethys Geology, 40 (1) : 91 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Luo J, Miao R L, Luo X P, et al., 2022. Distribution characteristics and genesis of groundwater and geothermal resources in west district of Panzhihua City[J]. Mineralogy and Petrology, 42 (4) : 128 – 140 (in Chinese with English abstract).

- Luo R J, Wang H T, Wang C, 2023. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index [J]. Arid Land Geography, 46 (4) : 539 – 549 (in Chinese with English abstract).
- Qin L, Chen B Q, Yu Y, et al., 2023. Study on the spatiotemporal variation regularity of ecological environment before and after mine closure based on remote sensing ecological index[J]. Metal Mine (3): 242 249 (in Chinese with English abstract).
- Song T, Duan Z, Liu J Z, et al., 2015. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. National Remote Sensing Bulletin, 19 (3) : 451 – 464 (in Chinese with English abstract).
- Qin Z H, Li W J, Xu B, et al., 2004. The estimation of land surface emissivity for landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 16 (3) : 28 – 32 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z Q, 2022. Panzhihua rings the "marching drum" for attracting investment and investment [N]. Sichuan Daily, 2022-07-15 (008).
- Wang J F, Xu C D, 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 72 (1) : 116 – 134 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z Z, Fan W Y, Gao J H, et al., 2012. Geology and exploration of the iron metallogenic belts in the Panzhihua Xichang zone, southwestern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 32 (1): 97 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y T, Liu C H, Zhao T T, 2020. Research on ecological environment quality of yimin mining area based on RSEI technology from the perspective of Xi Jinping's thought of ecological civilization [J]. Northern Horticulture (13) : 91 – 98 (in Chinese with English abstract).
- Xie Y C, Gong J, Zhang S X, et al., 2018. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on InVEST model and remote sensing technology in the Bailong River Watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 38 (6) : 979 – 986 (in Chinese with English abstract).
- Xu H Q, 2013. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 33 (5): 889 897 (in Chinese with English abstract).
- Yang H J, Li Y, Hong Y F, et al., 2015. Biodiversity monitoring and assessment using remote sensing technology at county's scale[J].
 Remote Sensing Technology and Application, 30 (6): 1138 1145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B, 2023. Evaluation for biodiversity and habitat suitability based on remote sensing at the living area of amur tiger and amur leopard[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Zhang J L, Ouyang Y, et al., 2024. Sensitivity evaluation of Karst rock desertification based on its formation mechanism: A case study of Qianxi County in Guizhou Province [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44 (1) : 162 – 171 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y B, Ni Z Y, Ouyang Y, et al., 2022. Research progress of ecogeological environment carrying capacity[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42 (4) : 529 – 541 (in Chinese with English abstract).

Zhou C L, Yang W N, Shao H Y, 2008. Dynamic monitoring of mining land use using remote sensing: A case study of Panzhihua iron mine area[J]. Science and Technology Innovation Herald (6): 24+26.

附中文参考文献

- 陈博明,2020.遥感技术在生态环境监测及执法中的应用进展[J]. 矿冶工程,40(4):165-168+173.
- 丁俊, 倪师军, 魏伦武, 等, 2005. 西南地区城市环境地质调查工作的思考[J]. 沉积与特提斯地质, 25 (4): 108-110.
- 高鹏,徐志刚,陈绍杰,等,2017.基于遥感生态指数的永定客家 土楼遗产地生态评价[J].科技通报,33(10):58-63.
- 高苇, 2018.环境规制下我国绿色矿业发展研究[D].中国地质大学.
- 何刚,杨静雯,鲍珂宇,等,2020.新型城镇化对区域生态环境质量的空间相关性及效应分析[J].安全与环境学报,20(5):1958-1966.
- 李晶瑜,叶红,张廷斌,等,2018.近20年攀枝花煤矿集中区地表 覆被变化及其环境影响浅析[J].测绘与空间地理信息,41(8): 89-92+96+107.
- 李文杰,张时煌,2010. GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多 样性保护中的应用[J]. 生态学报,30(23):6674-6681.
- 李妍,张国钦, 吝涛,等, 2022. 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, 42 (2): 474-486.
- 刘虎,姜岳,夏明宇,等,2021.基于30年遥感监测的矿区生态环 境变化——以南四湖周边矿区为例[J].金属矿山(4):197-206.
- 刘少阳,白建军,陈军,2020.面向县域尺度 SDG 15.1.2 的生物多 样性重要区域遥感识别和量化评估——以德清县为例[J].长江 流域资源与环境,29 (1):232-242.
- 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等,2020.基于地质建造的土壤地质调查 及应用前景分析——以大凉山区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯 地质,40(1):91-105.
- 罗健, 苗如霖, 罗小平, 等, 2022. 攀枝花西区地下水和地热分布

特征及成因分析[J].矿物岩石, 42(4): 128-140.

- 罗镕基, 王宏涛, 王成, 2023.基于改进遥感生态指数的甘肃省古 浪县生态质量评价[J].干旱区地理, 46(4):539-549.
- 秦璐,陈炳乾,于洋,等,2023.基于遥感生态指数的矿井关闭前 后生态环境时空变化规律研究[J].金属矿山(3):242-249.
- 宋挺,段峥,刘军志,等,2015. Landsat 8 数据地表温度反演算法 对比[J].遥感学报,19(3):451-464.
- 覃志豪,李文娟,徐斌,等,2004.陆地卫星TM6波段范围内地表 比辐射率的估计[J].国土资源遥感,16(3):28-32.
- 唐子晴, 2022.攀枝花擂响招商引资"进军鼓" [N].四川日报, 2022-07-15 (008).
- 王劲峰,徐成东,2017. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,72 (1):116-134.
- 王子正,范文玉,高建华,等,2012.攀西铁矿成矿带地质矿产特 征及找矿方向[J].沉积与特提斯地质,32(1):97-105.
- 吴映瞳,刘春晖,赵婷婷,2020. 习近平生态文明视阈下基于 RSEI 技术的伊敏矿区生态环境质量研究[J].北方园艺(13):91-98.
- 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等, 2018. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙 江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. 地理科学, 38(6): 979-986.
- 徐涵秋,2013. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学,33(5):889-897.
- 杨海军,李营,洪运富,等,2015.县域尺度生物多样遥感监测与 评价研究[J].遥感技术与应用,30(6):1138-1145.
- 张斌,2023.东北虎豹生存区域生物多样性与生境适宜性遥感评价 [D].长春:吉林大学.
- 张景华,张建龙,欧阳渊,等,2024.基于形成机理的石漠化敏感 性评价:以贵州省黔西县为例[J].沉积与特提斯地质,44(1): 162-171.
- 赵银兵, 倪忠云, 欧阳渊, 等, 2022. 生态地质环境承载力研究进 展[J]. 沉积与特提斯地质, 42(4): 529-541.
- 周春兰,杨武年,邵怀勇,2008.矿山土地利用遥感动态监测一以攀枝花铁矿区为例[J].科技创新导报(6):24+26.