引文格式：贾康,左涛,刘恒,等. 鉴于RSEI与InSAR的彬州市生态质量时空评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):23-26. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.005

鉴于RSEI与InSAR的彬州市生态质量时空评估

贾　康[1]，左　涛[1]，刘　恒[1]，侯朋杰[1]，王若禹[1]
（1. 中煤航测遥感集团有限公司，陕西 西安 710199）

摘　要：以陕西省彬州市为研究对象，Landsat、Sentinel-1 SAR数据以及土地利用类型数据为基础，采用遥感生态指数（remote sensing ecological index）及InSAR（interferometric synthetic aperture radar）沉降监测技术，对彬州市2018年到2022年生态环境质量进行综合评价，深入剖析彬州市生态质量时空变化因素。结果表明：彬州市2018年到2022年生态环境质量呈转好趋势，各年RSEI指数分别为：0.53、0.57、0.52、0.60、0.67，通过Slope趋势分析发现80.24%区域的生态环境不同程度好转。结合InSAR沉降区域发现生态环境质量在沉陷区RSEI主要呈下降趋势，个别沉降区生态环境质量明显好转，可见地下采矿活动对生态环境有明显影响。彬州市主要土地利用类型为耕地，5年占比均在55%以上，5年间草地大范围转出为林地，转移量约为99.41 km^2。实验结果为类似彬州市的工业化城市生态环境监测提供了重要的理论参考。

关键词：遥感生态指数；生态环境质量；InSAR；土地利用；Google Earth Engine
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0023-04

Ecological Quality Spatio-temporal Assessment in Binzhou City Based on RSEI and InSAR

JIA Kang[1], ZUO Tao[1], LIU Heng[1], HOU Pengjie[1], WANG Ruoyu[1]
(1. China Coal Aerial Surveying and Remote Sensing Group Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: Taking Binzhou City in Shaanxi Province as the research subject, based on Landsat, Sentinel-1 SAR data and land-use type data, we used the remote sensing ecological index (RSEI) and InSAR subsidence monitoring techniques to comprehensively evaluate the ecological environment quality of Binzhou City from 2018 to 2022, and conducted an in-depth analysis of the spatio-temporal factors affecting ecological quality in Binzhou City. The results indicate an improving trend in the ecological environment quality of Binzhou City during these years, with RSEI values of 0.53, 0.57, 0.52, 0.60 and 0.67 respectively. The Slope trend analysis reveals that the ecological environment in 80.24% of the area has improved to varying degrees. However, in areas of subsidence detected by InSAR, the RSEI primarily exhibits a declining trend, with a notable improvement in ecological quality in certain areas, which indicates that underground mining activities have a significant impact on the ecological environment. The predominant land-use type in Binzhou City is cultivated land, five-year proportion consistently above 55%, with a significant transition of grasslands into forest over the five years, amounting to approximately 99.41 km². The research can provide important theoretical references for ecological environment monitoring in industrialized cities similar to Binzhou City.

Key words: RSEI, ecological environment quality, InSAR, land-use, Google Earth Engine

RSEI能够综合反映绿度、湿度、干度以及热度等多个关键维度的信息，从而为生态环境的综合评估提供有效的数据支持，被广泛用于生态质量评价[1-3]。在使用RSEI进行生态环境评价时，由于光学影像自身特质，无法监测地表形变对生态环境的影响，InSAR（interferometric synthetic aperture radar）可以实现对地表微小变化的高精度监测，在地震学、火山监测、土地滑坡评估以及人类活动影响分析等多个领域具有极其重要的应用价值[4]。通过InSAR技术获取地表沉降信息，并结合土地利用类型分类数据，可实现生态环境质量的多方位评价。

本研究综合运用RSEI、土地利用类型数据和InSAR沉降数据，对彬州市的生态环境质量进行全面评价。通过这种多源数据的融合分析，揭示彬州市生态环境的当前状况、变化趋势以及人类活动与自然因素对生态环境的综合影响。以期为彬州市生态环境建设治理提供依据。

1　研究区概况

彬州市位于中国陕西省中部，地处陕西省的关中平原，北依子午岭，南靠渭河，属于渭河流域的一部分，位于108°12′~108°54′E，35°3′~35°34′N之间。彬州市地势总体呈现自北向南倾斜，北部是典型的山地和丘陵地形，中部和南部则是较为平坦的平原地带。该

第一作者简介：贾康（1996—），硕士，助理工程师，从事GIS开发、智慧城市工作，E-mail：783754035@qq.com。

地区属于温带半干旱至半湿润的大陆性季风气候，四季分明，雨量适中。夏季温暖湿润，冬季寒冷干燥。

2 研究数据及预处理

本研究选取2018—2022年，美国地质勘探局landsat8及landsat9多光谱卫星数据，轨道重访周期16 d，包括可见光、近红外、短波红外和热红外波段，数据经过大气校正处理。为了更加合理地计算RSEI指数，选取每年6月1日—11月1日植被生长茂盛时间段卫星影像，含云量控制在20%以下，采用最大值合成法提取相关参数。全程操作基于GEE（Google Earth Engine）平台。

2018—2022年土地利用数据使用Landsat卫星遥感数据，采用人机交互目视判读的方式进行构建，使用LUCC分类体系标准，获得30 m分辨率一级分类数据[5]。

2018—2022年InSAR沉降监测采用Sentinel-1卫星C波段SLC数据，分辨率为2.3 m×14.1 m，轨道重访周期12 d，在SARscape中经过干涉处理、极化滤波、相位解缠、轨道精去平及地理编码等处理，最终通过形变解算得到彬州市沉降范围图[6]。为避免降雨导致地物介电常数的改变从而影响InSAR结果，采用每年12月份煤炭开采旺季时期影像，通过对5期InSAR沉降数据栅格叠加，确定开采沉降范围。

3 研究方法

3.1 RSEI指数计算

RSEI指标在某种程度上反映了一个地区的生态环境质量，并对实现可持续发展具有显著作用。将湿度（WET）、绿度（NDVI）、热度（LST）和干度（NDBSI）4个指标综合起来，通过对这些指标进行标准化处理，并运用主成分分析方法计算出RSEI指数[7]。具体的计算方法如下[8]：

$$\mathrm{WET}=0.151\,1\rho_{\mathrm{blue}}+0.197\,3\rho_{\mathrm{green}}+0.328\,3\rho_{\mathrm{red}}+0.340\,7\rho_{\mathrm{NIR}}-0.711\,7\rho_{\mathrm{mirl}}-0.455\,9\rho_{\mathrm{MIR\,2}} \tag{1}$$

式中，ρ_{blue}、ρ_{green}、ρ_{red}、ρ_{NIR}、ρ_{MIR1}、ρ_{MIR2}分别为蓝色波段、绿色波段、红色波段、近红波段、中红外波段1、中红外波段2。

归一化植被指数是一种能够有效描述植被生长状况和覆盖度的指标，它反映了植被的关键物理特性，对于评估植被健康状况和生态环境监测具有重要意义[9]。计算公式如下：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{red}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{red}}} \tag{2}$$

式中，ρ_{NIR}、ρ_{red}分别为近红外波段和红色波段地表反射率。

热度指数揭示了地面的温度条件，是一个关键的气候和环境参数，它与地表覆盖的种类及热岛效应有着紧密的联系[10]。

$$T=\left[\varepsilon\times B\left(T_s\right)+(1-\varepsilon)\times A_2\right]\times\tau+A_1 \tag{3}$$

$$T_S=\frac{K_2}{1+\left(\ln\dfrac{K_1}{\beta\left(T_s\right)}\right)} \tag{4}$$

$$B\left(T_s\right)=\frac{\left[T-A_1-\tau\times(1-\varepsilon)\times A_2\right]}{\tau\times\varepsilon} \tag{5}$$

式中，ε为地表比辐射率；T_s为地表真实温度；$\beta\left(T_s\right)$为黑体热辐射亮度；τ为热红外在大气的通过率；T为传感器接收到的热红外辐射亮度值；A_1为大气向上辐射亮度值；A_2为大气向下辐射亮度值；K_1、K_2为热红外波段参数。干度指数是用来衡量地表干燥程度的指标，通过综合建筑指数[11]和裸土指数[12]来进行计算。

$$SI=\frac{\left(\rho_{\mathrm{MIR}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)-\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{blue}}\right)}{\left(\rho_{\mathrm{MIR}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)-\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{blue}}\right)} \tag{6}$$

$$IBI=\frac{2\rho_{\mathrm{MIR}}/\left(\rho_{\mathrm{MIR}}+\rho_{\mathrm{NIR}}\right)-\left[\rho_{\mathrm{NIR}}/\left(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)+\rho_{\mathrm{green}}/\left(\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{MIR}}\right)\right]}{2\rho_{\mathrm{MIR}}/\left(\rho_{\mathrm{MIR}}+\rho_{\mathrm{NIR}}\right)-\left[\rho_{\mathrm{NIR}}/\left(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)+\rho_{\mathrm{green}}/\left(\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{MIR}}\right)\right]} \tag{7}$$

$$\mathrm{NDBSI}=\frac{(SI+\mathrm{IBI})}{2} \tag{8}$$

式中，ρ_{blue}、ρ_{green}、ρ_{red}、ρ_{NIR}、ρ_{MIR1}、ρ_{MIR2}分别为蓝色波段、绿色波段、红色波段、近红波段、中红外波段1；SI为裸土指数；IBI为建筑指数。

3.2 RSEI指数构建及趋势分析

在RSEI指数的计算过程中，为了避免水体对实验结果的干扰，需对水体进行掩膜处理。通过归一化方法，将湿度、绿度、热度和干度这4个指标因子进行标准化，以消除它们之间的量纲差异。运用主成分分析法提取出第一主成分（PC1），并将其经过归一化处理后，得到最终的RSEI指数。

$$\mathrm{RSEI}_0=1-\mathrm{PC1} \tag{9}$$

$$\mathrm{RSEI}=\left(\mathrm{RSEI}_0-\mathrm{RSEI}_{\min}\right)/\left(\mathrm{RSEI}_{\max}-\mathrm{RSEI}_{\min}\right) \tag{10}$$

采用等间距法对RSEI指数的结果进行重新分类，将其分为5个等级：劣、差、中等、良好和优秀[13]。

采用基于像元的一元线性回归分析方法，通过分析每个像元的RSEI时空变化趋势，计算并统计了每个像

元在多年时间内的线性回归趋势斜率。据此，制作了2018—2022年间RSEI趋势的变化图[14]。计算公式如下：

$$\theta_{\text{slope}}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}iI_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}RI_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{11}$$

式中，θ_{slope} 为趋势线斜率，即RSEI的年际变化速率；RSEI_i 为第 i 年的RSEI值，i 为监测年数；当 $\theta_{\text{slope}}>0$ 时，表示RSEI呈增加趋势，反之则减少。

3.3　InSAR沉降提取

SAR系统通过雷达波照射地表并接收回波，利用雷达波的时间延迟和频率变化来构建地表的高分辨率图像。与传统的光学成像技术不同，SAR能在云层覆盖、夜间以及恶劣天气条件下工作，提供连续的地表观测数据。在InSAR技术中，至少需要两幅同一区域SAR图像进行复共轭相乘，去除平地相位、地形相位、噪声相位、大气相位后，从而获得地物目标形变的相位差，在此基础上精确计算出地物的微小形变。以重轨干涉为例，干涉相位表达式为[14]：

$$\varphi_{\text{int}}=\varphi_{\text{flat}}+\varphi_{\text{topo}}+\varphi_{\text{def}}+\varphi_{\text{atmo}}+\varphi_{\text{noise}} \tag{12}$$

式中，φ_{flat} 为平地相位；φ_{topo} 为地形相位；φ_{def} 为地表形变相位；φ_{atmo} 为大气延迟相位；φ_{noise} 为噪声引起的相位。

3.4　土地利用类型分析

基于2018—2022年间土地利用的变化趋势，通过土地利用转移图谱和转移矩阵，对彬州市的土地利用结构、数量变化以及转移方向进行了详尽的研究。

4　结果及讨论

4.1　遥感生态指数时空变化分析

2018—2022年主成分分析中PC1贡献率最高，均在75%以上，具有很好的代表性。WET指数和NDVI指数特征向量为负值，说明两者与PC1的关系为负相关，其中，在PC1中NDVI的贡献度均高于WET指数贡献度。LST指数和NDBSI指数特征向量为正值，说明两者与PC1的关系呈正相关，其中，在PC1中LST指数的贡献度均高于NDBSI指数贡献度。通过以上指数对RSEI的贡献情况，彬州市NDVI指数和LST指数对其生态环境起着决定性影响。同时，通过各年份RSEI指数均值，可以看出2018—2022年间，彬州市RSEI指数逐渐升高，整体生态环境呈好转趋势。统计可以清晰地看到彬州市生态环境逐年转好。

为更直观地评估彬州市的生态环境质量，制作彬州市生态环境质量的分级图，如图1所示。通过RSEI空间分布图可知，彬州市西南角历年生态环境质量较好，在城市及居民区生态环境质量较差，历年生态环境质量变化最大的区域在彬州市北部，东南角生态环境质量提升明显。

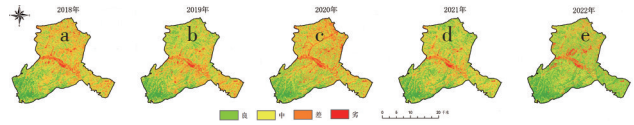


图1　彬州市2018—2022年生态质量等级及变化趋势分布

审图号：GS京(2022)1061号

采用等间距法将RSEI变化趋势图分为6种等级，分别为显著恶化、恶化、轻微恶化、轻微好转、好转、显著好转，统计彬州市生态环境质量变化情况，彬州市2018—2022年间，生态环境质量大面积轻微变好，面积占比达到78.92%。部分轻微变差，面积占比19.31%。生态质量恶化面积占比0.44%，生态质量好转面积占比1.32%。极速恶化以及快速变好面积占比，整体呈下降趋势。通过统计可以看到彬州市生态环境逐年转好。

4.2　地表沉降时空变化特征分析

采用彬州市2018—2022年，每年12月份两幅哨兵一号SAR数据进行干涉，通过处理得到地表沉降图，并对各期沉降数据进行叠加。由图2可知，彬州市主要沉陷区在中北部及西部，该区域主涉及煤矿开采，沉降现象严重，多年沉降区较为集中。通过沉降分布图与RSEI趋势变化图的对比（如图3），发现RSEI变差区域与沉降范围有一定程度的吻合。图中a、b、c区域生态环境恶化明显，与沉降范围有明显重叠，可见地下开采影响地上生态环境变化。c区域生态环境有明显改善，仍与沉降范围有明显重叠，可见矿区在开采之后可能存在明显的修复过程，生态环境质量从而转好。对比RSEI等级分布图，发现各年份在沉降区域的RSEI值并不高，以2022年最为突出，几处RSEI明显低值的区域和沉降范围基本吻合。在整体生态质量好转的情况下，局部沉降区域生态环境明显恶化，由此可知，地表沉降对生态环境有着不可忽略的影响。



图2　2018—2022年彬洲市沉降监测分布图

审图号：GS京(2022)1061号

4.3　土地利用时空变化特征分析

彬州市主要土地类型为耕地，由表1知5 a间的

比例均超过50%，其次是草地和林地，而未利用地几乎为零。从2018—2022年，尽管彬州市的土地利用总体结构保持稳定，但耕地、林地、水体和建设用地的面积比例均有所增加，而草地比例则有所减少，各年土地利用面积如图3所示。在这5 a期间，彬州市土地利用的主要变化表现在草地向其他类型土地的转变上。

表1 2018—2022年土地利用面积占比/%

年份	地类					
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
2018年	56.43	12.40	28.69	0.19	2.30	0.001
2019年	57.13	12.74	27.60	0.20	2.32	0.001
2020年	56.55	13.27	27.55	0.24	2.38	0.001
2021年	56.72	13.98	26.62	0.26	2.42	0.001
2022年	59.85	14.46	22.96	0.25	2.47	0.001

彬州市2018—2022年土地利用变化面积达到277.38 km^2，占研究区总面积的23.58%，各地类之间相互转化，耕地、水体、建设用地和未利用地几年间总体变化甚微，主要变化集中在草地和林地之间。具体表现为草地的大量流失，面积为118.18 km^2；林地的大量增加，面积为117.49 km^2；草地主要流出为耕地和林地，面积分别为63.77、99.41 km^2；林地主要表现为耕地和草地的流入，面积分别为23.97 、99.41 km^2。5年间彬洲市草地面积显著降低，林地面积显著增加，可见彬州市通过植树造林改善了生态环境。

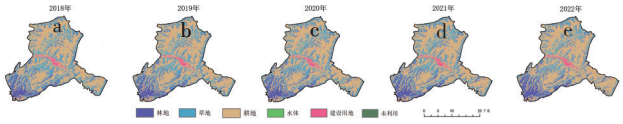


图3 2018—2022年彬州市土地利用类型分布

审图号：GS京(2022)1061号

5 结 语

2018—2022年彬州市生态环境质量呈“整体改善、局部退化”特征，遥感生态指数（RSEI）均值从0.533 6升至0.666 4，80.24%区域生态好转，退化区域集中于沉降区及人类活动密集区。土地利用结构稳定，耕地占比最高，草地向林地转移最显著，水体与建设用地变化微弱。结合冬季InSAR沉降监测分析，发现沉降区RSEI值波动明显：地下开采导致地下水流失与土壤质量下降，加剧局部生态恶化，但部分沉降区因治理措施RSEI值回升，显示恢复潜力。研究建议城市生态评价需结合多源数据（如InSAR与遥感），针对性制定治理策略。彬州市近年通过植树造林提升生态质量，但矿区开采仍对生态造成压力，需加强矿区修复与管控，平衡开发与保护。

参考文献

[1] 张浩斌,王婉,宋妤婧,等. 基于改进遥感生态指数的干旱内流区生态质量评价:以阴山北麓塔布河流域为例[J]. 生态学报,2024,43(2):1-21

[2] 张浩,杜培军,罗洁琼,等. 基于遥感生态指数的南京市生态变化分析[J]. 地理空间信息,2017,15(2):58-62

[3] 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

[4] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733

[5] Liu J, Kuang W, Zhang Z, et al. Spatiotemporal Characteristics, Patterns, and Causes of Land-use Changes in China Since the Late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences,2014,24(8):195-210

[6] Li Z W, Ding X L, Liu G X. Modeling Atmospheric Effects on InSAR with Meteorological and Continuous GPS Observations: Algorithms and Some Test Results[J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics, 2004, 66(11):907-917

[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

[8] Crist E P. A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17:301-306

[9] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature Vegetation Index Measurements an Exploration with the Simplified Simple Biosphere Model [J]. Remote Sensing of Environment,2002,79:225-242

[10] Nichol J. Remote Sensing of Urban Heat Islands by Day and Night [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005,71(6):613-621

[11] 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

[12] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical Forest Cover Density Mapping [J]. Tropical Ecology,2002,43(1):39-47

[13] 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

[14] 刘玉红,张筠,张春华,等. 2000—2015年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2019,38(5):1 464-1 471