

# 基于 RSEI 和 MSPA 模型的生境质量时空动态演变分析

——以安徽金寨霍山两县为例

张亚丽<sup>1,2</sup>, 苏子浩<sup>1</sup>, 王妮<sup>1</sup>, 王玉亮<sup>3</sup>

(1. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000; 2. 滁州学院 实景地理环境安徽省重点实验室, 安徽 滁州 239000;

3. 滁州学院 计算机与信息工程学院, 安徽 滁州 239000)

**摘要:**随着城镇化进程的加快,人类社会与自然界联系日益密切的同时,生态环境问题也日趋显著。当前大多数基于遥感的生境研究都是只采用遥感生态指数(remote sensing ecology index, RSEI)评估生境质量,缺少对生境内部结构的评估。为此,提出一套完整的生境质量评估框架,将 RSEI 和形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)结合,从功能和结构 2 个角度综合对研究区进行生态环境监测和评价。以安徽省的金寨、霍山 2 县为研究对象,选取 3 期 Landsat 遥感影像,首先基于随机森林算法(random forest, RF)进行土地利用分类,然后构建 RSEI 评估研究区生境质量,最后以生境质量最高的森林作为主体,采用 MSPA 识别不同景观类型评估森林的结构变化。结果表明,1)研究期间,金寨、霍山 2 县面积占比最大的林地面积其 RSEI 均值先增加后略微减少,建设用地和耕地的面积及其 RSEI 均值一直呈上升趋势;2)研究区的生境质量持续稳定以“优”“良”等级为主,“差”等级区域面积呈减少趋势;3)林地内部的核心区面积呈下降趋势,RSEI 均值总体却呈上升趋势。此外,孤岛、支线区面积增加的同时 RSEI 均值也在提高。据此,研究区的森林内部结构出现破碎化现象,但是生境功能总体呈上升趋势,这与合理的土地利用及森林内部结构的改变联系十分密切。研究结果可为与类似金寨县和霍山县的生态环境建设提供科学的参考价值。

**关键词:**RSEI; MSPA; 生境质量; Landsat

**中图分类号:**X87

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)02-0123-10

Spatiotemporal Dynamic Evolution of Ecological Environment Quality Based on RSEI and MSPA Models: A Case Study of Jinzhai and Huoshan Counties in Anhui Province

ZHANG Ya-li<sup>1,2</sup>, SU Zi-hao<sup>1</sup>, WANG Ni<sup>1</sup>, WANG Yu-liang<sup>3</sup>

(1. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, Anhui, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Physical Geographic Environment, Chuzhou University, Chuzhou 239000, Anhui, China;

3. School of Computer and Information Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, Anhui, China)

**Abstract:** With the acceleration of urbanization process, the relationship between human society and nature is getting closer, while eco-environment problems are becoming more serious. Currently, most studies based on remote sensing only use remote sensing ecology index (RSEI) to assess eco-environment quality (EQ), but they always lacked the assessment of the internal structure of eco-environment. Using RESI and morphological spatial pattern analysis (MSPA), this study proposed a complete framework for EQ assessment, and comprehensively monitored and evaluated EQ from the perspective of function and structure. Specific-

收稿日期: 2023-02-07 修回日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41601455); 安徽省高等学校科学研究重点项目(2022AH051106); 安徽省高等学校科学研究重点项目(2022AH051119); 滁州学院省级大学生创新创业训练计划项目(2022CX1026)。

第一作者: 张亚丽, 博士, 助教。研究方向: 林业遥感。E-mail: zyl930624@163.com

ally, three Landsat remote sensing images were selected for land use classification in Jinzhai and Huoshan counties of Anhui Province based on the random forest algorithm (RF), and then the RSEI was constructed to evaluate EQ. Lastly, the forest with the highest EQ was selected as the main body, and MSPA was used to identify different landscape types to assess forest structural changes. The results showed that 1) the RSEI mean value of the forest land with the largest area proportion increased firstly and then decreased slightly, while the area and the RSEI mean of construction land and cultivated land always showed an ascending tendency during the research period in two counties. 2) EQ in the study area always dominated by 'excellent' and 'good' grades, and the area of 'poor' grade showed a decreasing trend. 3) The forest core area decreased, while the RSEI mean value increased. In addition, RSEI mean value increased with the increase of the areas of island and branch region. Thus, the forest structure in the study area is fragmented, but the eco-environment function was on the rise, which is closely related to the rational land use and the change of forest internal structure. The results of this study can provide scientific reference value for the ecological environment construction of Huoshan and Jinzhai County.

**Key words:** RSEI; MSPA; eco-environment quality; Landsat

生态质量状况良好是一个地方经济实现可持续发展的重要基础条件。进入 21 世纪以来,随着城镇化进程的加快,人类社会与自然界的联系日益密切的同时,人类与资源环境之间所存在的矛盾也逐渐被激化。绿水青山就是金山银山,金寨、霍山 2 县位置相邻,位于大别山腹地,均拥有超过 75% 的森林覆盖资源,同时于 2018 年列入国家重点生态功能区,该地区由森林资源所带来的生态环境效益十分明显,相较于周边其他地区,其地域独特性使得本研究选择金霍两县作为研究区,因此准确对其生境质量状况进行评估,对其城镇化进程的发展方向把握、实现社会经济健康持续发展具有十分重要的指导价值。

遥感因为其可以快速、长时间进行大范围监测的优点,被广泛应用于生态环境监测方面。当前的大多数研究主要选取单一指标进行评价,如构建植被覆盖度对西安市的植被动态监测<sup>[1]</sup>、依据水体指数对柴达木盆地湖泊地区的气候进行分析<sup>[2]</sup>。针对此情况,生态环境部(原名:国家环保总局)在 2006 年向研究学者公布生态环境指数(ecological environment index, EI)应用于生境质量评估,但是 EI 构成系数权重难以合理设置和可操作性低,因此适用性不强。为此,徐涵秋<sup>[3]</sup>于 2013 年向广大研究学者提出 RSEI 指数,它是完全基于遥感图像信息,通过耦合绿度、湿度、干度、热度 4 大指标得来,且其所包含的主成分分析法(principal component analysis, PCA)使得构成参数的权重设置是完全基于图像信息,避免了人的主观性。目前 RSEI 模型已在杭州湾南岸<sup>[4]</sup>、贺兰山<sup>[5]</sup>、祁连山自然保护区<sup>[6]</sup>等多地得到广泛应用。

一个区域土地利用方式的转变过程中,高强度的开发模式除了改变生境质量的功能,也必然会使生境斑块得到破坏,变得破碎化、岛屿化<sup>[7]</sup>,使得生

物多样性减少和生境质量状况下降。因此,分析生态网络的结构现状变得十分重要。构建生态网络的重点在于生态源地的选取。汉瑞英等<sup>[8]</sup>直接将生境质量较好的生态斑块或一些自然保护区作为生态源地,主观性偏强。朱捷等<sup>[9]</sup>以徐州为例,通过构建“属性—功能—结构”三位一体模式,从多个方面达到生态源地识别的目的。近期, MSPA 在生态网络如何合理规划方面得到大量实践运用。 MSPA 主要用形态学原理,从结构角度出发来定量识别生态源地中的核心区,因其具有兼容性及适应性等优点<sup>[10]</sup>,已在秦岭(陕西段)山地<sup>[11]</sup>、厦门市<sup>[12]</sup>、三峡库区林地<sup>[13]</sup>等多地得到应用。

综上,目前的研究很少有结合 RSEI 和 MSPA 2 大模型对研究区的生境功能和结构同时评估。因此,本研究基于 Landsat 8 遥感影像数据,结合 RSEI 和 MSPA 2 大模型,对研究区的生境功能及其结构实现量化和监测,为其生态建设和环境保护提供参考<sup>[14]</sup>。

## 1 研究区概况

金寨与霍山两县相邻,属于六安市,位于安徽省西部,大别山腹地。地理位置为 31°03′—31°48′N, 115°22′—116°32′E(图 1)。其中,金寨县总面积达 3 814 km<sup>2</sup>,地势主要自西南向东北倾斜。霍山县总面积达 2 043 km<sup>2</sup>,地势主要自东南向西北倾斜。研究区的气候类型属于北亚热带湿润季风气候,季风气候显著,全年降雨充足,冷热适中,动植物、矿产资源丰富。其中,金寨县林地面积占全县总面积 76.37%,霍山县森林覆盖率达 75.39%,这一丰富的森林资源既是二者实现绿色发展的重要资源,也是二者城市化进程中的重点保护对象。

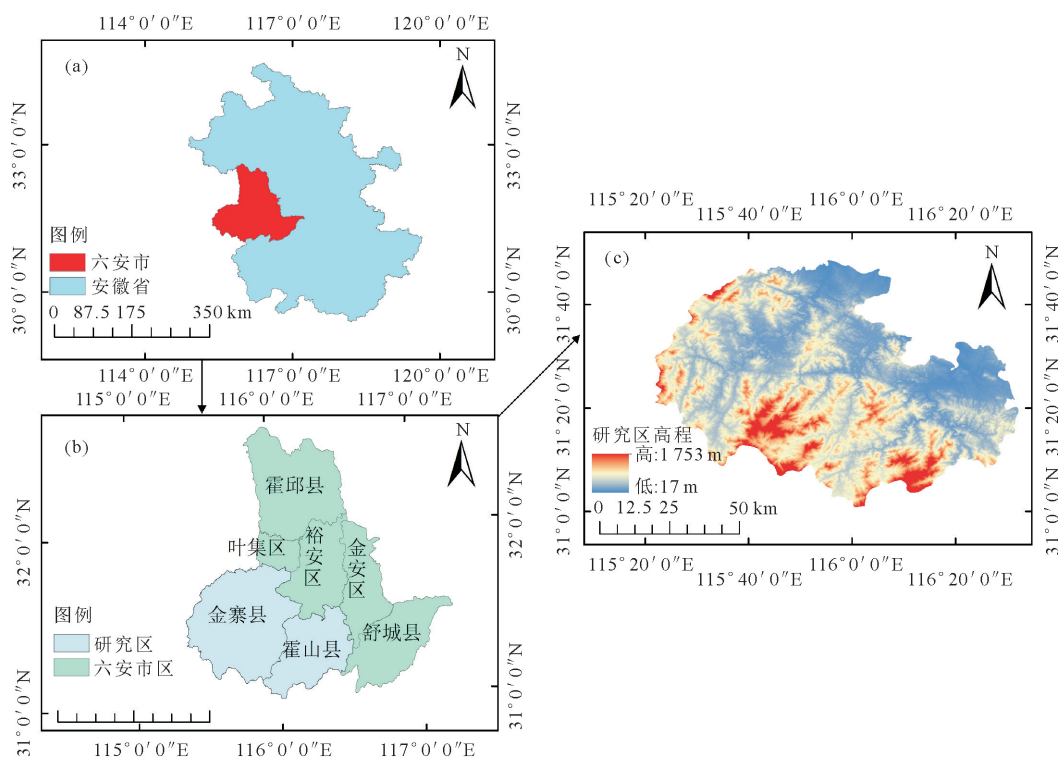


图1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of study area

## 2 数据来源及预处理

本研究使用的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)下载于地理空间数据云的 GDEM V3 30 m 分辨率数字高程数据集。对研究区的两幅 DEM 影像进行拼接,并使用研究区边界进行裁剪得到研究区地势示意图(图 1)。遥感影像数据选择下载于美国地质勘探局的 Landsat 8 地表反射率影像数据(已经经过辐射定标和大气校正)和热红外波段影像数据。为确保结果精度,所选取的 3 幅遥感影像季节相近,研究区域无云覆盖,获取日期分别为 2013 年 5 月 21 日、2018 年 5 月 3 日、2022 年 6 月 15 日。

## 3 研究方法

### 3.1 土地利用类型分类

依据国家发布的《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),对研究区域的土地实现林地、水域、建设用地、耕地、未利用地 5 大种类的划分。这里基于 Landsat 8 的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2 的波段信息、纹理特征和缨帽变换等信息,通过在高空间分辨率影像上选择感兴趣区创建各类地物的解译标志,选择随机森林以及人机交互解译的方法<sup>[15]</sup>,得到研究区域 2013、2018 年和 2022 年 3 期土地利用分类图以及计算各利用类型分类的生产精度(producer's accuracy, PA)、用户精度(user's

accuracy, UA)、总体精度(overall accuracy, OA)和 Kappa 系数。

### 3.2 遥感生态指数构建

本研究采取徐涵秋 2013 年提出的 RSEI 模型<sup>[3]</sup>,区别于传统的生态环境状况指数 EI, RSEI 是完全基于影像的波段信息得到的,操作便捷,获取数据结果效率高,避免了人为因素的影响<sup>[16]</sup>。RSEI 是基于主成分分析法,实现绿度、湿度、干度、热度 4 大生态因子的波段信息合成,从而用于评估研究区的生态质量状况。其中,绿度指标采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI), NDVI 能够广泛反映植物的生长发育情况。湿度指标选择通过缨帽变换方法所获取的湿度指数(WET),能够将地表植被、水体和土壤的湿度状况得到明显体现, WET 与土壤退化、水体污染等生态环境变化联系十分紧密<sup>[17]</sup>。热度指标本研究采用地表温度(land surface temperature index, LST)反演的结果,是衡量地表生态状况的指标之一。研究范围包括了城区和农村 2 种下垫面情况不相同的区域,城区的地表干度由不透水面状况决定<sup>[18]</sup>,而农村地区的地表干度则由裸土状况决定<sup>[19]</sup>,故本研究采取建筑指数(index-based build-up index, IBI)和裸土指数(bare soil index, SI)取平均合成的归一化干度指数(normalized differential building-soil index, NDBSI)来表征干度<sup>[20]</sup>。

### 3.2.1 各分量指标的计算

#### 1) 绿度计算公式

$$N_{DVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{NIR}$  代表近红外的反射波谱;  $\rho_{red}$  代表红光的反射波谱。

#### 2) 湿度计算公式

$$I_{BI} = \frac{\left\{ \frac{2\rho_{SWIR1}}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})} - \left[ \frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} + \frac{\rho_{green}}{(\rho_{green} + \rho_{SWIR1})} \right] \right\}}{\left\{ \frac{2\rho_{SWIR1}}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})} + \left[ \frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} + \frac{\rho_{green}}{(\rho_{green} + \rho_{SWIR1})} \right] \right\}} \quad (4)$$

$$N_{DBSI} = \frac{S_1 + I_{BI}}{2} \quad (5)$$

式(2)~式(5)中:  $\rho_{blue}$  代表蓝光的反射波谱;  $\rho_{green}$  代表绿光的反射波谱;  $\rho_{red}$  代表红光的反射波谱;  $\rho_{NIR}$  代表近红外的反射波谱;  $\rho_{SWIR1}$  代表短波红外 1 的反射波谱;  $\rho_{SWIR2}$  代表短波红外 2 的反射波谱。

#### 4) 热度计算公式

本研究的热度结果是使用大气校正法,对 Landsat8 TIRS 进行地表温度反演操作得到的,主要是基于热红外波段信息,相关公式如下

$$L_{\lambda} = G_{ain} \times D_N + B_{ias} \quad (6)$$

$$B(T_s) = \frac{[L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \epsilon)L_{\downarrow}]}{\tau\epsilon} \quad (7)$$

式中:  $L_{\lambda}$  代表传感器处的热红外辐射亮度值;  $G_{ain}$  代表增益,对于 landsat 8 数据  $G_{ain} = 3.3420 \times 10^{-4} W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $B_{ias}$  代表偏置,  $B_{ias} = 1.18 W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $B(T_s)$  代表黑体热辐射亮度;  $\epsilon$  代表地表比辐射率;  $L_{\uparrow}$ 、 $L_{\downarrow}$  分别代表大气向上辐射亮度、大气向下辐射亮度;  $\tau$  代表大气在热红外波段的透过率,这三者数值可通过美国国家航空航天局公布的 <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> 网站查询得到。

最后利用普朗克公式得到地表真实温度  $T_s$ , 公式为

$$T_s = K_2 / \ln \{ [K_1 / B(T_s)] + 1 \} \quad (8)$$

式中:  $T_s$  代表地表真实温度(K);  $K_1$ 、 $K_2$  为传感器定标参数。对于 Landsat 8 数据,  $K_1 = 774.89 W/(m^2 \cdot s \cdot \mu m)$ ,  $K_2 = 1321.06 K$ 。

3.2.2 指标归一化 在进行主成分分析之前,需要对各指标进行归一化处理,使各指标的量纲属于同一数值波动范围,计算公式为

$$N_1 = \frac{(I - I_{min})}{(I_{max} - I_{min})} \quad (9)$$

式中:  $N_1$  为归一化处理之后的指标;  $I$  为原指标波段信息;  $I_{min}$  为原波段中的最小值;  $I_{max}$  为原波段中

Landsat 8 OLI 传感器湿度计算公式为

$$W_{ETOL1} = 0.1511 \rho_{blue} + 0.1973 \rho_{green} + 0.3283 \rho_{red} + 0.3407 \rho_{NIR} - 0.7117 \rho_{SWIR1} - 0.4559 \rho_{SWIR2} \quad (2)$$

#### 3) 干度( $S_1$ )计算公式

$$S_1 = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})} \quad (3)$$

的最大值。此外,为了消除异常像元和噪声的影响,用直方图统计最大最小值,依据相关学者的统计经验,取 2% 为置信度,即 2% 处值为最小值,98% 处值为最大值<sup>[21]</sup>。

3.2.3 遥感生态指数构建 对归一化处理后的 4 大指标进行波段信息合成,并使用主成分分析法,得到包含特征值信息最多的 PC1。为了更好地展示结果,可用 1 减去 PC1 得到原始的遥感生态指数<sup>[22]</sup>  $RSEI_0$ 。再将其进行归一化处理,使其数值范围在 0~1,进而得到遥感生态指数 RSEI。RSEI(式中记为  $R_{SEI}$ ) 值越接近 1,说明研究区生境质量越好,反之越差。归一化公式如下

$$R_{SEI} = \frac{(R_{SEI0} - R_{SEI0-min})}{(R_{SEI0-max} - R_{SEI0-min})} \quad (10)$$

式中:  $R_{SEI0-min}$  为最小值;  $R_{SEI0-max}$  为最大值。

3.2.4 遥感生态指数指数检验模型 相关度是反映事物之间联系程度的指标,常用相关系数表示<sup>[17]</sup>。若相关系数越接近 1,则表明二者相关程度越高。本研究使用相关系数来判定 RSEI 指数的代表性,若 RSEI 与各指标的总平均相关系数大于各指标之间的总平均相关系数,则说明 RSEI 指数模型适宜用来评估该地生态质量状况。计算公式如下

$$\overline{C_P} = \frac{(|C_P| + |C_Q| + \dots + |C_R|)}{n} \quad (11)$$

式中:  $\overline{C_P}$  为指标 P 的平均相关度;  $C_P$ 、 $C_Q$ 、 $C_R$  分别表示同一时期 P、Q、R 与 P 的相关系数;  $n$  为指标个数。

### 3.3 RSEI 分布的重心转移

为了分析 2013—2022 年研究区的 RSEI 重心空间分布变化情况,本研究采用重心转移模型绘制出各级重心转移路径图。该方法能够更加直观地反映出 RSEI 不同等级的转移方向及距离<sup>[23]</sup>。

### 3.4 基于 MSPA 方法的生态源地识别

近年来,MSPA 在生态网络规划的领域中得到广泛应用。MSPA 是一种定量识别生态源地的方



法,其主要是通过邻域分析对生态源地进行识别和分类,从而得到生态源地分布<sup>[24]</sup>。本研究将林地设置为前景,其他类型设置为背景,利用 Guidos Toolbox 2.8 软件将森林区域分成核心区、孤岛、孔隙、边缘区、环道区、桥接区、支线区等 7 种森林景观类型图,生态学含义<sup>[12]</sup>见表 1。由于 MSPA 对景观的研究宽度十分敏感,通过参考相关学者的研究成果<sup>[25]</sup>、查看边缘地区及内部 RSEI 数值差异情况,决定将研究宽度设置为 180 m。

表 1 MSPA 景观类型及含义

Table 1 The MSPA's landscape types and ecological meanings	
景观类型	生态学含义
核心区	大型自然斑块、动物栖息地、自然保护区等
孤岛	彼此不相连的孤立、破碎的小型自然斑块,能量、物质交流可能性小
孔隙	生态空间核心区内部的建设用地,不具有生态效益
边缘区	核心区和建设用地之间的过渡区域,具有边缘效应
环道区	连接到同一核心区的生态廊道,动植物迁移的主要通道
桥接区	区域绿色基础设施中的廊道,促进区域内部能量、物质交流
支线区	仅与核心区某一侧存在联系的自然斑块,且景观连接度较差

4 结果与分析

4.1 随机森林分类结果

表 2 展示了不同时期的土地覆盖精度,从用户精度和生产精度两方面来看,林地、水域和建设用地的分类结果精度较高,耕地和未利用地则较为一般。所有土地覆盖类型的总体精度均在 97% 以上,Kappa 系数均达到 0.96,说明基于随机森林的分类结果具有一定可靠性。

由表 3 不难看出,林地在研究期间面积呈下降趋势,但占比依旧稳定在 81% 以上,占据主体地位。建设用地和耕地面积出现增加趋势,水域面积总体呈上升趋势,未利用地面积变化幅度不显著。图 2 可以明显看出,建设用地和耕地的区域明显呈扩大趋势,林地面积变化趋势则体现不明显。

4.2 主成分分析结果及 RSEI 模型验证

表 4 为各年份主成分分析结果,不难发现各年份的 PC1 波段的特征值依次为 0.148、0.170、0.163,均高于 PC2、PC3、PC4 波段的特征值,此外这 3 a 的 PC1 特征值贡献率占比依次为 69.93%、73.21%、75.99%,说明 PC1 可以表示出绿度、湿度、热度、干度 4 大生态因子的绝大部分信息。同时,各个年份的绿度与湿度分量指标在 PC1 的载荷值均为正值,干度、热度的载荷值均为负值,这可以理解为绿度、湿度指标对生态环境变化起正向促进

作用,而干度、热度指标则起反面消极作用<sup>[26]</sup>,而在其他主成分波段中,各分量指标的载荷值有正有负,含义无法解释。因此,选用 PC1 来构建研究区的遥感生态指数。

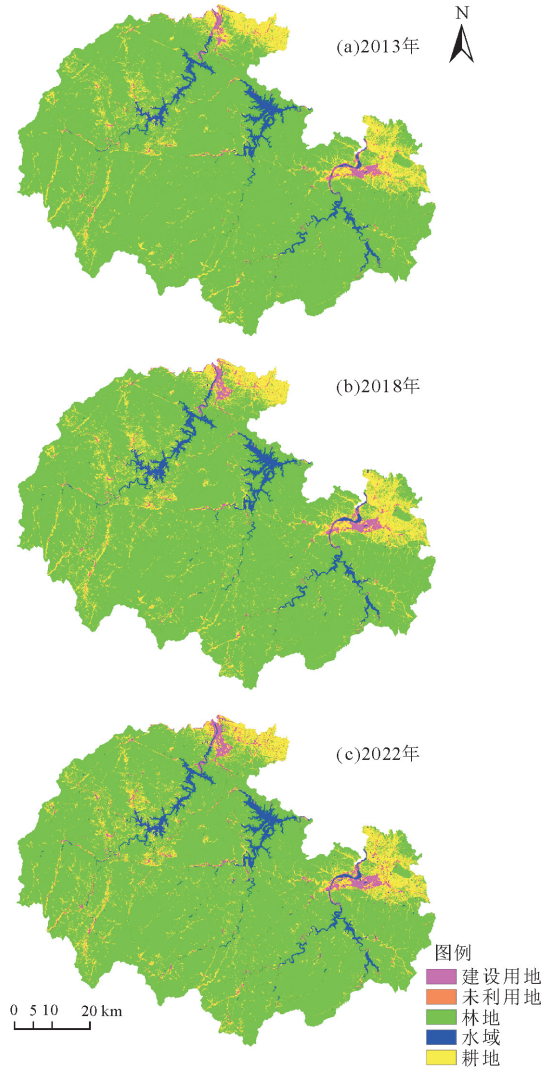


图 2 2013—2022 年土地利用分类

Fig. 2 Land use classification map from 2013 to 2022

表 5 为各分量指标之间及其与 RSEI 的相关系数。研究期间总平均相关系数最高的指标为干度,最低的为热度,指标数值分别为 0.779、0.543。而 RSEI 与 4 大生态因子的总平均相关系数为 0.791,均高于各 4 大生态因子相互之间的总平均相关系数,说明 RSEI 与各指标的相关度更高,能用 RSEI 进行研究区的生态质量评估<sup>[27]</sup>。

4.3 RSEI 的时空变化分析

依据表 6,林地区域的 RSEI 均值最高,建设用地的 RSEI 均值最低。林地的 RSEI 均值自 2013 年的 0.732 增长至 2018 年的 0.791,之后略有下降。建设用地和耕地的 RSEI 均值一直呈上升趋势,未利用地的 RSEI 均值总体呈下降趋势。

依据《生态环境评价技术规范》生态环境分级标

表 2 土地覆盖分类精度评价  
Table 2 Accuracy assessment of land cover classification

类别	2013 年		2018 年		2022 年	
	PA(%)	UA(%)	PA(%)	UA(%)	PA(%)	UA(%)
林地	97.29	98.97	96.97	98.84	96.72	98.86
水域	98.73	99.95	98.65	99.95	98.69	100.00
建设用地	99.24	96.48	98.82	96.59	98.20	96.74
耕地	77.74	61.45	80.33	61.32	81.68	61.96
未利用地	96.49	69.62	97.95	59.26	97.44	40.43
OA(%)	98.01		97.86		97.68	
Kappa 系数	0.97		0.97		0.96	

注:PA. 生产精度;UA. 用户精度;OA. 总体精度。

表 3 2013—2022 年土地利用分类面积  
Table 3 Land use classification area from 2013 to 2022

年份	分类	林地	水域	建设用地	耕地	未利用地
2013	面积/km <sup>2</sup>	5 046.85	153.55	71.72	687.12	1.32
	占比(%)	84.67	2.58	1.20	11.53	0.02
2018	面积/km <sup>2</sup>	4 873.61	171.05	89.04	825.58	1.32
	占比(%)	81.76	2.87	1.49	13.85	0.02
2022	面积/km <sup>2</sup>	4 856.32	169.10	129.20	802.22	1.31
	占比(%)	81.51	2.84	2.17	13.46	0.02

表 4 2013—2022 年主成分分析结果  
Table 4 Principal component analysis results from 2013 to 2022

年份	参量	PC1	PC2	PC3	PC4
2013	NDVI	0.216	0.045	0.109	0.016
	WET	0.168	0.101	−0.082	0.041
	NDBSI	−0.218	0.012	0.031	0.075
	LST	−0.158	0.152	0.020	−0.038
	特征值	0.148	0.035	0.020	0.009
	特征值贡献率(%)	69.63	16.71	9.41	4.25
2018	NDVI	0.227	0.047	0.086	0.017
	WET	0.219	−0.001	−0.091	0.018
	NDBSI	−0.257	−0.009	0.003	0.031
	LST	−0.061	0.206	−0.019	−0.003
	特征值	0.170	0.045	0.016	0.002
	特征值贡献率(%)	73.21	19.23	6.90	0.66
2022	NDVI	0.215	0.071	−0.063	0.039
	WET	0.215	0.063	0.014	−0.067
	NDBSI	−0.225	0.032	−0.070	−0.038
	LST	−0.141	0.153	0.038	0.018
	特征值	0.163	0.033	0.010	0.008
	特征值贡献率(%)	75.99	15.53	4.84	3.64

注:PC1. 主成分分析波段 1;PC2. 主成分分析波段 2;PC3. 主成分分析波段 3;PC4. 主成分分析波段 4。

准<sup>[16]</sup>,将得到的 RSEI 划分为差[0,0.2]、较差[0.2,0.4]、中等[0.4,0.6]、良[0.6,0.8]、优[0.8,1.0]5 个等级,空间分布如图 3 所示。

结合图 2 和图 3,各年份 RSEI“较差”“差”区域主要分布在耕地、建设用地,证实了干度、热度在生态环境中起消极作用。“优”“良”2 级主要分布在林地,“中等”级在少许的耕地、建设用地区域有所分布。依据表 7 的统计结果,研究区主要以“优”“良”

两级区域为主,两者比例之和累积稳定在 72%以上,其中 2013 年研究区以“良”级区域占比为主,占比 40.38%,2018 年和 2022 年,则变化为以“优”级区域占比为主,占比分别为 50.55%、47.75%。从 2013 年到 2022 年“中等”区域的面积比例不断下降。“差”和“较差”等级的面积比例始终<10%。

4.4 RSEI 不同等级重心转移

根据 RSEI 不同等级重心转移示意图(图 4),其

RSEI 分级重心主要在青山镇内转移<sup>[23]</sup>。由图 4 可看出,2013—2022 年,RSEI“优”“差”级重心转移幅度较大,其余分级重心转移幅度较小。分析各级重心迁移路径,主要是由西南向东北移动。

表 5 各分量指标之间及其与 RSEI 的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between each component index and RSEI

年份	参量	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
2013	NDVI	1.000	0.610	−0.731	−0.469	0.980
	WET	0.610	1.000	−0.694	−0.299	0.967
	NDBSI	−0.731	−0.694	1.000	0.654	0.349
	LST	−0.469	−0.299	0.654	1.000	0.614
	平均相关系数	0.703	0.651	0.770	0.606	0.728
2018	NDVI	1.000	0.718	−0.905	−0.114	0.977
	WET	0.718	1.000	−0.910	−0.231	0.975
	NDBSI	−0.905	−0.910	1.000	0.249	−0.979
	LST	−0.114	−0.231	0.249	1.000	0.765
	平均相关系数	0.684	0.715	0.766	0.399	0.924
2022	NDVI	1.000	0.847	−0.755	−0.420	0.987
	WET	0.847	1.000	−0.794	−0.430	0.985
	NDBSI	−0.755	−0.794	1.000	0.651	0.313
	LST	−0.420	−0.430	0.651	1.000	0.603
	平均相关系数	0.756	0.768	0.800	0.625	0.722
总平均相关系数		0.714	0.711	0.779	0.543	0.791

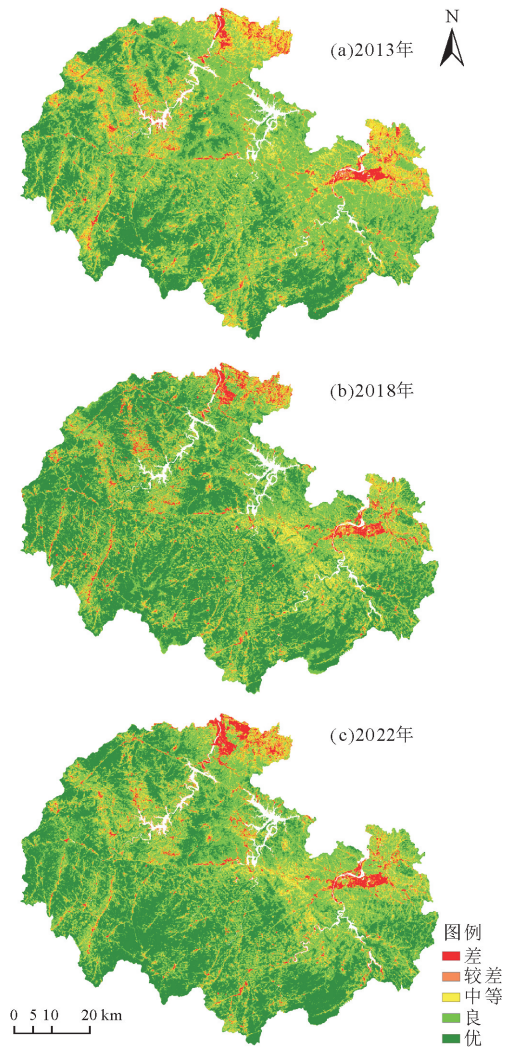


图 3 2013—2022 年 RSEI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of RSEI from 2013 to 2022

表 6 各土地利用类型的 RSEI 均值

Table 6 The RSEI mean value of each land use type

年份	类型	林地	建设用地	耕地	未利用地
2013	均值	0.732	0.203	0.407	0.452
2018	均值	0.791	0.253	0.470	0.500
2022	均值	0.783	0.296	0.480	0.333

表 7 各等级 RSEI 的面积及比例

Table 7 The area and proportion of each RSEI level

等级	2013		2018		2022	
	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	140.69	2.41	146.47	2.51	156.58	2.69
较差	404.32	6.93	345.34	5.92	340.40	5.84
中等	1 060.00	18.18	814.70	13.97	769.57	13.21
良	2 354.53	40.38	1 576.74	27.04	1 777.35	30.51
优	1 871.07	32.09	2 947.37	50.55	2 781.35	47.75

4.5 景观格局分析

由于研究区林地面积始终占据主体地位,其 RSEI 均值占比最大,在生境质量中具有良性重要作用。因此根据研究区土地利用分类图,将林地设置为前景,其余类型设置为背景,基于 MSPA 方法,得到研究区 2013、2018、2022 年 3 期的景观格局分类图(图 5)。核心区作为最重要的生态源地,依据表 8,3 年占比稳定在 51% 以上,在所有类型中占比最高。对比于 2013 年,2022 年核心区的面积呈下降趋势,并且核心区的分布逐渐变得分散、集中程度降低、斑块性特征逐渐明显,但是 RSEI 均值总体却呈上升趋势。桥接区作为核心区之间生物迁徙、流通

的桥梁,2013—2022年,面积呈上升趋势的同时,RSEI均值也在增加。此外,孤岛、支线区在其面积增加的同时,RSEI均值也呈上升趋势。

表8 各景观类型面积和 RSEI 均值

Table 8 The area and mean value of RSEI of each landscape type

年份	分类	面积/km <sup>2</sup>	占比(%)	RSEI 均值
2013	核心区	2 966.21	58.77	0.788
	孤岛	68.12	1.35	0.539
	孔隙	152.90	3.03	0.697
	边缘区	220.50	4.37	0.682
	环道区	438.03	8.68	0.654
	桥接区	1 143.18	22.65	0.640
	支线区	57.91	1.15	0.527
2018	核心区	2 543.53	52.19	0.839
	孤岛	82.56	1.69	0.669
	孔隙	126.13	2.59	0.758
	边缘区	304.82	6.25	0.756
	环道区	365.12	7.49	0.728
	桥接区	1 363.85	27.98	0.731
	支线区	87.60	1.80	0.614
2022	核心区	2 512.38	51.73	0.837
	孤岛	88.37	1.82	0.619
	孔隙	121.68	2.51	0.767
	边缘区	323.60	6.66	0.741
	环道区	349.31	7.19	0.727
	桥接区	1 372.46	28.26	0.722
	支线区	88.52	1.82	0.601

## 5 结论与讨论

1) 研究区 2013—2022 年,面积占比最大的林地区域 RSEI 均值总体呈上升趋势。对生态环境可能造成负面影响的建设用地,在其面积增加的同时 RSEI 均值也呈上升趋势。从 RSEI 分级区域面积统计来看,研究区持续稳定以“优”“良”区域为主,生态质量状况差的区域面积呈减少趋势。说明研究区整体生态质量状况呈上升趋势。也即城镇化进程加速的同时,生态环境治理、管理措施也在积极配套实施,生态环境的治理效果明显,植被多样性在提高,生态环境总体向健康趋势发展<sup>[28]</sup>。

2) RSEI 各分级重心主要在青山镇内迁移,迁移幅度最大的为“差”“优”2 个极端等级,方向主要来自西南向东北。说明青山镇的发展对研究区整体生态质量状况影响较大,同时结合迁移方向变化方面,当地政府需要着重关注迁移趋向区域的经济建设方针、城镇化进程及生态管理措施。

3) 从景观格局分析结果来看,核心区作为最重要的生态源地,面积减少的同时 RSEI 均值却呈上升趋势,说明核心区内部功能改善效果明显。但其破碎化、斑块状的趋势,可能会对生态环境造成负面影响,该地政府需要采取措施缓解这一趋势。桥接区作为森林内部生物迁徙和景观转移的重要廊道,总体生态质量状况改善良好,说明人与自然关系

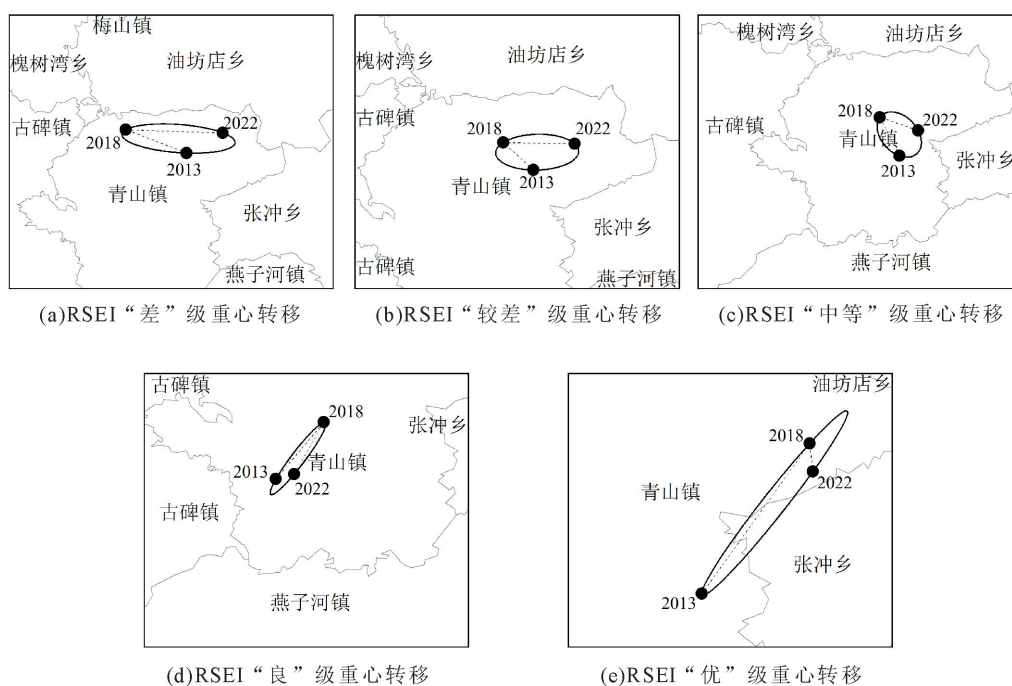


图4 2013—2022年 RSEI 分级重心转移

Fig. 4 Map of centre transfer of each RSEI level from 2013 to 2022





图5 2013—2022年 MSPA 示意图

Fig. 5 The MSPA map from 2013 to 2022

相对和谐。此外,孤岛、支线区在面积增加的同时,RSEI 也在提高,因此增加孤岛的面积、缓解其不相连、孤立的状态,并且增加支线区另一端与森林相连的情况,可以使森林结构和功能协调发展。在当今国家积极推行生态文明建设的背景下,金寨、霍山 2 县应始终秉持“绿水青山就是金山银山”的理念,加强景观连通度保护,注重核心区生态源地的保护,针对生境质量较低的主城区,应加强对绿地面积使用的把控,以改善生境质量退化的区域<sup>[29]</sup>。

综上,金寨、霍山 2 县在研究期间森林内部结构出现破碎化,但是生态功能呈上升趋势,这得益于该地政府的生态保护措施和居民群众环保意识的提升,相关措施可供其他林地占比大的区域借鉴。本研究也存在不足,目前仅选取了 3 个时间点进行生境质量评估,未能逐年对研究区生态质量变化情况进行剖析研究。未来可考虑通过遥感计算云平台对研究区进行长时序的分析,为研究区提供更加科学的生态环境监测结果和治理措施。

## 参考文献:

- [1] 王君,杨晓梅,隋立春,等. 西安市 1995—2016 年植被覆盖度动态变化监测及景观格局分析[J]. 生态科学, 2019, 38(6): 81-91.
- [2] 魏善蓉,金晓媚,王凯霖,等. 基于遥感的柴达木盆地湖泊面积变化与气候响应分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 427-433.
- [3] 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.  
XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862. (in Chinese)
- [4] 刘恺恺,冯秀丽,张驰. 基于 RSEI 模型的滨海围垦区生态环境动态变化分析——以杭州湾南岸为例[J]. 上海国土资源, 2022, 43(2): 60-65.  
LIU K K, FENG X L, ZHANG C. Dynamic change analysis of ecological environment in coastal reclamation area based on RSEI model: a case study of Southern Bank of Hangzhou Bay [J]. Shanghai Land & Resources, 2022, 43(2): 60-65. (in Chinese)
- [5] 李婷婷,马超,郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1154-1165.  
LI T T, MA C, GUO Z C. Ecological quality evaluation and influencing factors analysis of Helan Mountain based on RSEI [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1154-1165. (in Chinese)
- [6] 褚馨德,贾伟,张峻豪,等. 基于 RSEI 模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(1): 38-42.
- [7] 尹海伟,孔繁花,析毅,等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.  
YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10): 2863-2874. (in Chinese)
- [8] 汉瑞英,赵志平,肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 61-67.  
HAN R Y, ZHAO Z P, XIAO N W. The Econetwork construction and optimization in biodiversity conservation priority area—a case study of the Taihang Mountain area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 61-67. (in Chinese)
- [9] 朱捷,苏杰,尹海伟,等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.  
ZHU J, SU J, YIN H W, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multiscale nesting [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(8): 1986-2001. (in Chinese)
- [10] 李恒凯,刘玉婷,李芹,等. 基于 MCR 模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 989-998.
- [11] 陈南南,康帅直,赵永华,等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):

- 1545-1553.
- CHEN N N, KANG S Z, ZHAO Y H, *et al.* Construction of ecological network in Qinling Mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1545-1553. (in Chinese)
- [12] 徐伟振, 黄思颖, 耿建伟, 等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
- XU W Z, HUANG S Y, GENG J W, *et al.* Construction of ecological space network in Xiamen city based on MCR and gravity model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 264-272. (in Chinese)
- [13] 姚采云, 安睿, 窦超, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1953-1962.
- YAO C Y, AN R, DOU C, *et al.* Research on construction and evaluation of forest land ecological network in Three Gorges Reservoir Area based on MSPA and MCR model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1953-1962. (in Chinese)
- [14] 王志超, 何新华. 基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 492-500.
- WANG Z C, HE X H. Assessments of ecological quality in Jinjiang district of Chengdu city using the FVC and RSEI models[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4): 492-500. (in Chinese)
- [15] 周正龙, 沙晋明, 范跃新, 等. 基于随机森林的遥感土地利用分类及景观格局分析[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(2): 40-48.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境状况评价技术规范(试行) HJ/T 192—2006[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2015.
- [17] 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): 3913-3919.
- SONG H M, XUE L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan city, Northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3913-3919. (in Chinese)
- [18] 徐涵秋, 张铁军, 黄绍霖. Landsat-7 ETM+ 与 ASTER 建筑指数的定量比较[J]. 地理研究, 2013, 32(7): 1336-1344.
- [19] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1748-1758.
- ZHANG W Q, SUN C J, LI X G. Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi province based on remote sensing image[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1748-1758. (in Chinese)
- [20] 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.
- XU H Q, SHI T T, WANG M Y, *et al.* Land cover changes in the Xiong'an New Area and a prediction of ecological response to forthcoming regional planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6289-6301. (in Chinese)
- [21] 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.
- KE L N, XU J H, WANG N, *et al.* Evaluation of ecological quality of coastal wetland based on remote sensing ecological index: a case study of Northern Liaodong Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1417-1424. (in Chinese)
- [22] 张方泽, 龚循强, 周秀芳, 等. 基于遥感生态指数的生态环境质量评价——以黎川县为例[J]. 江西科学, 2021, 39(1): 111-114, 133.
- [23] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143-151.
- LI R, CHEN G Q, LI W X, *et al.* Spatiotemporal analysis of ecoenvironmental benefits in Shenfu Dongsheng Mining Area during 1995—2020 based on RSEI[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 143-151. (in Chinese)
- [24] XIAO L, CUI L, JIANG Q, *et al.* Spatial structure of a potential ecological network in Nanping, China, based on ecosystem service functions[J]. Land, 2020, 9(10): 376-382.
- [25] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412.
- ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2406-2412. (in Chinese)
- [26] 聂单南光, 程朋根, 熊秋林. 基于 RSEI 指数的深圳市生态环境遥感评价[J]. 江西科学, 2020, 38(5): 673-679, 715.
- [27] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277-284.
- YANG J Y, WU T, PAN X Y, *et al.* Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 277-284. (in Chinese)
- [28] 曹辰, 杨国林, 锁旭宏, 等. 基于遥感生态指数的阜新市生态环境变化分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 200-207.
- CAO C, YANG G L, SUO X H, *et al.* An analysis of ecological environment change in Fuxin city based on the remote sensing ecological index[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 200-207. (in Chinese)
- [29] 贾艳艳, 于东明, 王明杰, 等. 泰安市景观格局和生境质量时空演变及其关联分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 229-237.
- JIA Y Y, YU D M, WANG M J, *et al.* Spatio-temporal evolution and correlation analysis of landscape pattern and habitat quality in Tai'an city[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 229-237. (in Chinese)