

DOI: 10.5846/stxb202006051458

陈艺, 蔡海生, 张学玲, 曾珩, 邵晖, 洪士林. 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异. 生态学报, 2021, 41(6): 2236-2247.  
Chen Y, Cai H S, Zhang X L, Zeng H, Shao H, Hong T L. Comprehensive evaluation of spatially ecological quality of Rao River Basin and its spatial differentiation based on multi-objective comprehensive evaluation method. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2236-2247.

# 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异

陈 艺<sup>1</sup>, 蔡海生<sup>1,2,\*</sup>, 张学玲<sup>1</sup>, 曾 珩<sup>3</sup>, 邵 晖<sup>3</sup>, 洪士林<sup>1,3</sup>

1 江西农业大学鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/江西农业大学富硒农业产业发展研究中心, 南昌 330045

2 江西旅游商贸职业学院, 南昌 330100

3 江西省土地开发整理中心, 南昌 330002

**摘要:**开展国土空间生态调查与评价, 摸清区域三类空间生态现状与问题所在, 是进行区域国土空间生态修复、空间格局优化等工作的必要前提。基于城镇、农业和生态空间自身的结构、功能和效应, 构建国土空间生态质量综合评价体系, 以饶河流域所涉县市为研究区域, 采用多目标综合评价法开展国土空间生态质量综合评价研究并进行分区, 探究结果的空间分异特征。结果表明: (1) 研究区国土空间生态质量整体水平良好, 中等以上区域占比 70.6%。(2) I 级和 II 级分区主要分布于研究区东北部, 该区域的生态环境、生态效益与社会经济呈协同发展态势。(3) 研究区国土空间生态质量存在较强的空间相关性和聚集性特征, 冷点和热点区域面积基本持平。(4) 结合综合评估及障碍度诊断结果, 建议依据研究区自然优势, 调整社会经济结构, 推进工业健康转型, 改善城镇空间人居环境, 整体提高生态效益水平。研究可为研究区国土空间规划、生态修复、生态-经济-社会可持续发展等提供科学依据和参考价值。

**关键词:**生态评价; 国土空间; 生态质量; 空间分异

## Comprehensive evaluation of spatially ecological quality of Rao River Basin and its spatial differentiation based on multi-objective comprehensive evaluation method

CHEN Yi<sup>1</sup>, CAI Haisheng<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Xueling<sup>1</sup>, ZENG Heng<sup>3</sup>, SHAO Hui<sup>3</sup>, HONG Tulin<sup>1,3</sup>

1 Key Laboratory of Po-yang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology / Development Research Center of Selenium-rich Agricultural Industry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Jiangxi Tourism and Commerce Vocational College, Nanchang 330100, China

3 Jiangxi Land Development and Consolidation Center, Nanchang 330002, China

**Abstract:** Understanding clearly the ecological status and problems of three types of region space through the ecological survey and evaluation is a necessary prerequisite for regional land and space ecological restoration and spatial pattern optimization. Taking the counties and cities in the Rao River basin as an example, this study constructed a comprehensive evaluation system for the ecological quality of territorial space. Based on the multi-objective comprehensive evaluation method, this study conducted a comprehensive evaluation and zoning of the ecological quality of territorial space in the study area, and explored the spatial differentiation characteristics of each zone. The results showed that: (1) The overall ecological quality level of the study area was good, and the area above the middle level accounted for 70.6%. (2) Level I

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31660140, 31560150); 江西省十三五社科规划项目(17YJ11); 江西省土地开发整理中心项目(2019-026)

**收稿日期:**2020-06-05; **网络出版日期:**2021-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caihsh@263.net

and Level II were mainly distributed in the northeast of the study area, and the ecological environment, ecological benefits and social economy in these areas were in a coordinated development trend. (3) The ecological quality of the territorial space was characterized by strongly spatial correlation and aggregation, and the area of cold spots and hot spots was basically equal. (4) Combined with the results of the comprehensive evaluation and obstacle degree diagnosis, it was recommended to adjust the social and economic structure, promote the healthy transformation of industry, improve the urban residential environment, and improve the overall level of ecological benefits based on the natural advantages of the study area. This study can provide scientific basis and reference value for land space planning, ecological restoration, ecological-economic-social sustainable development of the study area.

**Key Words:** ecological evaluation; territorial space; ecological quality; space differentiation

国土空间作为人类和社会经济活动的主要空间载体,对于维持粮食安全、生态系统健康、土地资源优化配置、社会协调发展等起着举足轻重的作用。但在社会经济和工业化的飞速发展进程中,建设空间肆意扩张、农业用地利用强度增大、景观破碎化程度增加等现象日益凸显,致使区域生境质量的抗干扰能力下降,进而对农业产出效率和居民生活质量造成一定影响,国土空间生态质量的优劣逐渐成为制约人与社会和谐发展、资源可持续利用的主要因素<sup>[1-3]</sup>。与此同时,国家出台有关政策明确开展“五级三类”体系的国土空间规划工作,并将国土空间生态修复提升为国家战略工程,先后多次提及生态文明建设方针政策<sup>[4-5]</sup>。在此背景下进行国土空间土地生态质量调查与综合评价研究,能够精准地识别出国土空间土地生态优劣差异情况,可为后续开展国土空间规划、生态修复等提供有针对性的科学参考依据,对于促进生态-社会-经济和谐发展具有十分重要的现实意义。

20 世纪 40 年代末美国环保主义者奥尔多·利奥伯德率先提出“土地健康”概念<sup>[6]</sup>,随着环境管理和资源保护意识的提高,土地生态评价研究得到广泛关注<sup>[7-8]</sup>。目前国内外关于土地质量的研究多集中于土地生态安全评价<sup>[8-12]</sup>、生态风险评价<sup>[13-14]</sup>、生态脆弱性评价<sup>[15-18]</sup>、生态敏感性评价<sup>[19]</sup>、生态系统健康评价<sup>[20]</sup>、生态适宜性评价<sup>[21]</sup>等研究角度,运用压力-状态-响应模型<sup>[10,22-23]</sup>、改进 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 模型<sup>[24]</sup>、多目标综合评价 (Multi-objective comprehensive evaluation, MCE) 模型<sup>[8,18]</sup>等研究方法,融合数理统计、GIS 空间分析技术和景观生态学<sup>[25-26]</sup>等学科知识,从不同的研究尺度开展土地生态环境定量评价、空间差异以及内外在影响机制等的研究。这些现有研究多集中于土地本底条件和社会经济属性的综合评估,研究视角较为单一,缺乏以国土空间综合特性为出发点的土地生态质量评估实例研究。

国土空间生态质量的优劣受到自然和社会等多方面因素的制约,因此需要构建多维度多层次的综合评估体系。多目标综合评价法能够围绕研究目的构建多准则综合评价体系,定量测算出准确的评价结果,原理易懂,操作简便,现已广泛运用于资源承载力评价、土地开发利用适宜评价等多个研究领域。本研究结合国土空间规划思想,以饶河流域涉及的县市为研究区域,着眼于该区域城镇空间、农业空间和生态空间自身的结构、功能和效应,从自然基础属性、生态结构特征、生态胁迫压力与生态效益水平四个层面构建国土空间生态质量综合评价指标体系,基于多种数据分析软件,结合多目标综合评价法对饶河流域国土空间土地生态质量进行综合评估,探究饶河流域土地生态质量现状及空间分异特征,并定量诊断影响区域土地生态质量的障碍因素,综合评价和障碍度诊断结果提出提升研究区生态质量的改进措施,以期研究区国土空间土地整治、空间规划、生态修复等工程项目的实施提供切实可行、科学合理的参考建议,促进研究区人-自然-社会三者的和谐发展,为进一步优化研究区国土空间生态安全格局打下良好基础。

## 1 研究区概况

饶河流域为鄱阳湖五大流域之一,地处江西省东北部,涉及鄱阳县、万年县、婺源县、弋阳县、德兴市、景德镇市等地区,本研究以饶河流域所涉县市的 127 个乡镇为研究区域(图 1),该区域国土总面积为

1716064.12  $\text{hm}^2$ ,截止 2018 年末,研究区总人口 483.85 万人,地区生产总值达 1589.87 亿元。境内主要地形为山地和丘陵,约占 70%,整体地势东北部高,西南部及中部地势较低,土壤类型以红壤和水稻土为主,各占比 68.85%和 23.22%。境内光照充足,年均降水量 1070.47 mm,年均气温 19.7℃,属于亚热带季风性湿润气候区。国家高度重视长江经济带的生态环境保护,为此江西省相继开展了山水林田湖草生态保护修复、森林湿地湖泊生态保护和修复、矿山地质环境修复治理等试点工程,研究区各县市积极响应,水土流失面积持续减少,矿区水质得到明显改善。工业化和社会经济的飞速发展,以及国土空间规划浪潮的来袭,使得研究区国土空间面临着生态安全、资源利用效率以及人与自然和谐共生等多重考验。

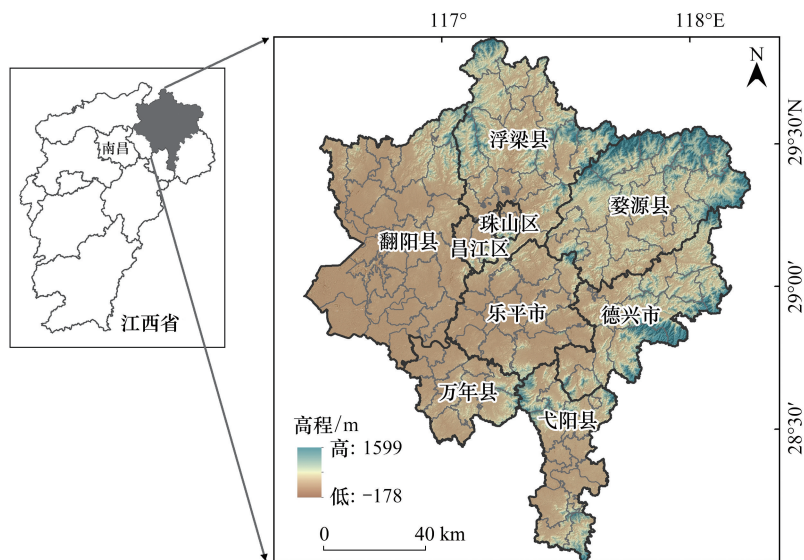


图 1 研究区地理位置及行政区划示意图

Fig.1 Geographical location and administrative division of the study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

研究数据主要包括矢量数据、栅格数据以及统计数据三类。2018 年土地利用现状矢量数据来自于六个县市自然资源局以及江西省土地整理中心提供,按照土地利用代码表,基于 ArcGIS 10.2 软件重新划分为农用地、建设用地、水域湿地、其他土地四种土地利用类型,参考相关文献进一步划分出生产用地、生活用地和生态用地三生空间用地类型。栅格数据包括遥感影像和 DEM 数据,均是从地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载得来,运用 ENVI 5.3 软件进行图像预处理操作。统计数据包括社会经济数据、气象数据和土壤样点检测数据,社会经济数据来源于 2018 年六个县市统计年鉴以及国民发展与社会经济统计公报;气象数据来源于江西省气象局提供的 2018 年气象数据,基于 ArcGIS 10.2 软件进行空间插值得到气象基础数据;土壤样点数据来源于 2018 年江西省耕地质量等别数据,共有 528 个土壤样点,参照《农用地土壤污染风险管控标准》和内梅罗综合污染指数法,基于 ArcGIS 10.2 软件对数据进行空间插值,得到土壤污染、土壤质地等基础数据。

### 2.2 指标体系构建与权重确定

#### 2.2.1 评价指标体系构建

评价指标的选取应遵循科学性、综合性、代表性、可获得性等原则,本研究以农业空间、城镇空间和生态空间为研究视角,着眼于这三类空间自身的结构、功能和效应,从自然基础、生态结构、生态胁迫和生态效益四个方面选取 25 个指标,构建研究区国土空间生态质量评价指标体系(表 1)。

表 1 研究区国土空间生态质量综合评价指标体系

| Table 1 The comprehensive evaluation index system of the ecological quality of the land space in the study area |                   |                  |                    |                  |                         |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| 目标层<br>The target layer                                                                                         | 准则层<br>Rule layer | 权重<br>The weight | 指标层<br>Index layer | 权重<br>The weight | 数据来源<br>The data source | 指标性质<br>Index properties |
| 农业空间<br>Agricultural space                                                                                      | 自然基础              | 0.2802           | 坡度                 | 0.0781           | 栅格数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 高程                 | 0.0403           | 栅格数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 有效土层厚度             | 0.0809           | 统计数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 土壤有机质含量            | 0.0809           | 统计数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 生产用地比重             | 0.0192           | 矢量数据                    | -                        |
| 城镇空间<br>Urban space                                                                                             | 生态结构              | 0.0192           | 耕地年退化率             | 0.0283           | 矢量数据                    | -                        |
|                                                                                                                 | 生态胁迫              | 0.1385           | 土壤污染综合指数           | 0.1102           | 统计数据                    | -                        |
|                                                                                                                 | 生态效益              | 0.0069           | 人均粮食产量             | 0.0069           | 统计数据                    | +                        |
|                                                                                                                 | 生态结构              | 0.034            | 生活用地比重             | 0.0340           | 矢量数据                    | -                        |
|                                                                                                                 | 生态胁迫              | 0.0632           | 人口密度               | 0.0090           | 统计数据                    | -                        |
| 生态空间<br>Ecological space                                                                                        | 自然基础              | 0.0950           | 城镇化率               | 0.0156           | 统计数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | GDP 增长率            | 0.0386           | 统计数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 人均林草地面积            | 0.0335           | 矢量数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 年均降水量              | 0.0207           | 统计数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 水网密度               | 0.0207           | 矢量数据                    | +                        |
|                                                                                                                 | 生态结构              | 0.1783           | 植被覆盖度指数            | 0.0536           | 栅格数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 生态用地比重             | 0.0354           | 矢量数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 景观多样性指数            | 0.0492           | 栅格数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 斑块密度               | 0.0292           | 栅格数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 景观聚集度              | 0.0307           | 栅格数据                    | +                        |
|                                                                                                                 | 生态胁迫              | 0.1154           | 景观破碎度              | 0.0338           | 栅格数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 林地年退化率             | 0.0234           | 矢量数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 草地年退化率             | 0.0920           | 矢量数据                    | -                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 水域湿地增加率            | 0.0187           | 矢量数据                    | +                        |
|                                                                                                                 |                   |                  | 生态用地增加率            | 0.0172           | 矢量数据                    | +                        |

2.2.2 评价单元及指标权重确定

运用 ArcGIS 10.2 的创建渔网工具将研究区行政边界划分为 3 km×3 km 格网作为评价单元,共计 1905 个。土地利用、水文、土地退化/恢复等矢量因子数据,通过 Fragstats 4.2 的景观格局指数计算以及 ArcGIS 10.2 的提取分析、转换、分区统计等操作得到相应数值。

指标赋权的方法有层次分析法、德尔菲法、熵权法等,本研究结合层次分析法和德尔菲法来确定指标权重,由于指标具有不同的性质和量级,在确定权重之前首先参考极差归一化法对指标数据进行归一化处理,公式详见参考文献<sup>[8]</sup>,计算得到每个评价指标的权重值(表 1)。

2.3 国土空间生态质量综合评价

本研究采取多目标综合评价法,对饶河流域国土空间生态质量进行综合评估,公式如下:

$$TEI = \sum_{i=1}^q y_{ij} W_j$$

(1)

式中,TEI 为国土空间生态质量综合指数,  $y_{ij}$  为指标归一化后的数值,  $W_j$  为第  $j$  项指标的权重。

2.4 空间统计分析

探索性空间数据统计分析可以用来描述特定位置现象或事物属性值空间分布格局的相关性特征及规律,通常采用 Moran 's  $I$  指数来进行全局和布局的空间自相关分析,指数值的范围在-1—1 之间,绝对值越高,空

间相关性越大,大于0表示呈现空间正相关,小于0表示呈现空间负相关,采用 $G_i^*$ 来探究属性值的空间分布格局特征(即冷热点分析)<sup>[27-28]</sup>。本研究运用Geoda1.12软件进行空间权重和单变量局部Moran's  $I$ 指数的计算(公式见参考文献<sup>[27]</sup>),并绘制局部空间自相关(Local indicators of Spatial association, LISA)聚集图,来分析饶河流域国土空间生态质量评价结果的高值区和低值区的空间分异规律,聚类结果中“高-高”、“低-低”区域表示评价单元自身与周围的生态质量都较高或较低,差异较小,具有较高的空间相关性,“高-低”、“低-高”区域表示自身评价单元与周围生态质量差异较大,空间相关性较低。运用ArcGIS 10.2软件的空间统计分析工具,分析四个准则层综合指数的高值和低值区(即冷热点区)格局分布特征。

2.5 国土空间生态质量分区

本研究运用SPSS 24.0软件对评价单元的生态质量评价结果进行K均值聚类分析,将研究区国土空间生态质量划分为5个等级,并结合ArcGIS 10.2将结果空间化展示,划分标准如表2所示。

表 2 研究区国土空间生态质量等级划分标准  
Table 2 Classification criteria of spatial ecological quality of the study area

| 综合分值<br>Comprehensive score | 质量等级<br>Quality grade | 表现<br>The performance                                  |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------|
| ≥0.5819                     | I 级                   | 地表覆被茂盛、土壤条件优异、几乎不存在土壤污染、景观格局丰富多样、土地几乎不存在退化情况、生态环境状况良好。 |
| 0.5509—0.5818               | II 级                  | 地表覆被较多、土壤条件较好、景观多样性较高、土地不存在明显退化、生态环境状况较好。              |
| 0.5179—0.5508               | III 级                 | 地表覆被正常、土壤条件一般、景观格局具有一定多样性、土地退化较少、生态环境状况一般。             |
| 0.4816—0.5178               | IV 级                  | 地表覆被较少、土壤条件较差、景观格局不够多样化、土地存在一定程度的退化、生态环境状况存在问题。        |
| <0.4816                     | V 级                   | 地表覆被稀疏、土壤条件差、景观格局单一、土地退化明显、生态环境状况恶劣。                   |

2.6 障碍度诊断

定量识别影响国土空间生态质量的主要因素,可为制定精准的国土空间生态建设管控措施提供科学依据。本研究引入因子贡献度 $F_j$ 、指标偏离度 $I_j$ 、障碍度( $O_j$ 、 $U_i$ )3个指标进行分析诊断,公式详见参考文献<sup>[29-30]</sup>。

3 结果分析

3.1 国土空间生态质量空间分异

3.1.1 准则层评价结果空间分异

研究区国土空间生态质量准则层的评价结果如图2所示。自然基础综合分值处于0.1017—0.2811之间,呈现东北西南高、西北东南低的分布态势。其中万年县东部、浮梁县北部、婺源县北部和东北部、鄱阳县南部地区自然条件良好,基础分值较高;生态结构综合分值处于0.1018—0.1588之间,高值区主要分布于婺源县、浮梁县、鄱阳县西部、弋阳县北部地区,总体呈现环绕分布,这些地区生态用地比例较大,生态环境优良,景观类型较为丰富;生态胁迫综合分值处于0.1125—0.2622之间,乐平市、昌江区、珠山区和浮梁县的分值较高,东北部的婺源县、南部的弋阳县、万年县胁迫分值相对较低,主要是受土壤重金属污染以及社会压力的影响,其中昌江区、珠山区和乐平市主要源于人口密度和社会城镇化率较大,浮梁县生态压力主要源于草地退化;生态效益综合分值处于0.0085—0.0511之间,相比于其他三个准则层指标,该准则层分值偏低,呈现东北高西南低状分布,浮梁县和婺源县整体较高,该区域生态建设和生态效益状况较好,生态保护意识和自然恢复能力较强,德兴市、弋阳县、万年县次之,而昌江区较弱,主城区需加强粮食安全保障,增加林草地建设工程,提高人们的生态保护意识。

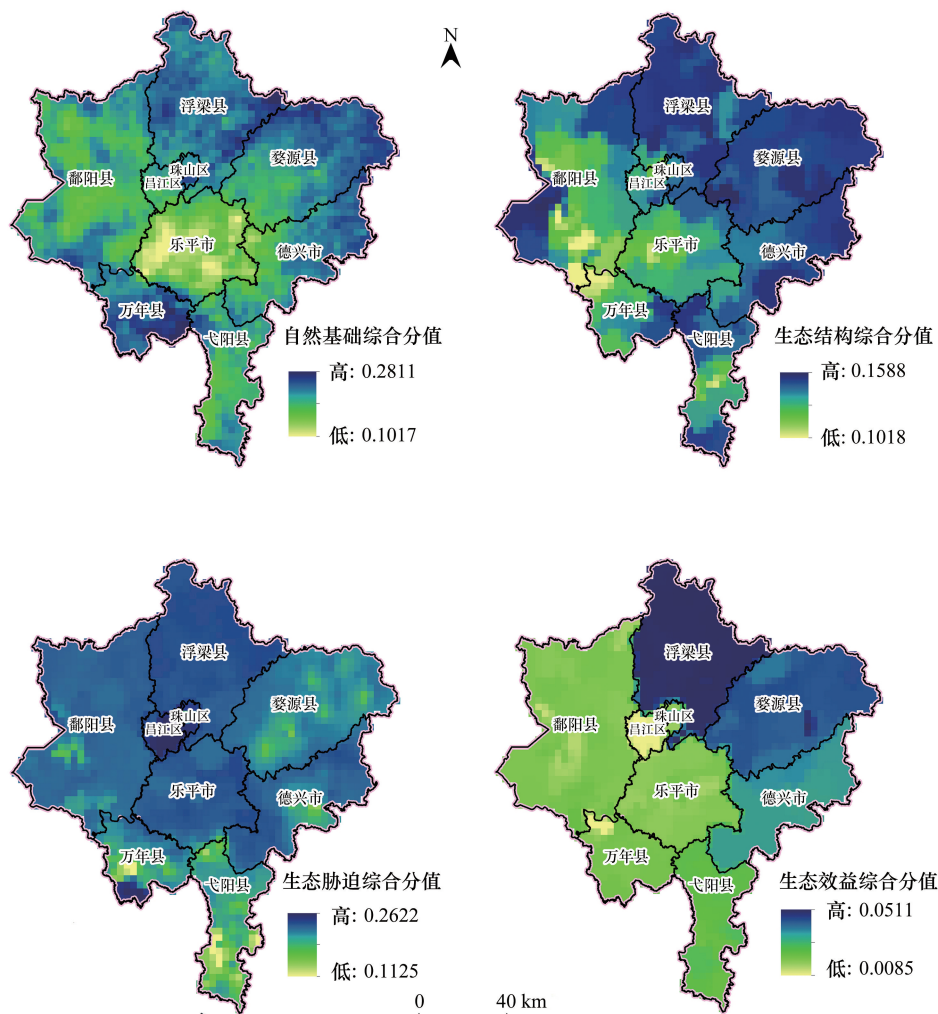


图 2 研究区国土空间生态质量准则层指标综合指数空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land space ecological quality criterion layer index composite index in the study area

### 3.1.2 生态质量综合指数空间分异

研究区国土空间生态质量综合分值空间分布如图 3 所示。从整体来看,东北部地区的国土空间生态质量高于西南部地区,生态质量综合指数范围在 0.3939—0.6489 之间,均值为 0.5425,最高值栅格位于浮梁县瑶里镇,最低值栅格位于乐平市清湖乡。其中浮梁县瑶里镇、黄坛乡、鹅湖镇分值较高,生态质量综合指数均值分别为 0.6210、0.6037、0.6001,婺源县的沱川乡、德兴市的昝大乡的国土空间生态质量分值仅次于浮梁县,均值分别为 0.5954、0.5877。低值区主要集中在弋阳县的清湖乡、乐平市的后港镇和主城区,均值分别为 0.4409、0.4594、0.4602。

## 3.2 生态质量综合指数空间统计分析

### 3.2.1 空间自相关分析

基于 Geoda 1.12 软件的空间分析功能,分别在 Queen 邻接、Rook 邻接和 K-近邻三种不同的空间权重下,研究区国土空间生态质量四个准则层评价结果的 Moran's  $I$  指数如表 3 所示。三种空间权重矩阵下,自然基础、生态结构、生态胁迫、生态效益四个准则层以及生态质量综合分值的 Moran's  $I$  指数均处于 0.8—1 之间,表明准则层和综合评价结果在空间上均存在较高的正相关性,具有明显的聚集性特征。准则层 Moran's  $I$  指数值由高到低依次是生态效益(0.9400)>自然基础(0.9096)>生态胁迫(0.8750)>生态结构(0.8542),生态质量

综合评价结果的 Moran's *I* 指数为 0.9311。

研究区国土空间生态质量综合指数局部空间自相关 LISA 聚集图如图 4 所示,图中仅出现“高-高”、“低-低”两种聚类结果,有 25.77%的区域为“高-高”聚集的高值区,总面积为 442229.72 hm<sup>2</sup>,其中近八成分布于浮梁县境内,还有少量分布于婺源县北部、德兴市东部和万年县南部;“低-低”聚集的低值区占比 20.31%,总面积为 348532.62 hm<sup>2</sup>,主要分布于乐平市、弋阳县以及鄱阳县部分地区。

表 3 研究区国土空间生态质量评价结果 Moran's *I* 指数  
Table 3 Moran's *I* index of land space ecological quality assessment results in the study area

| 权重类型<br>Weight type      | 自然基础<br>The natural basis | 生态结构<br>The ecological structure | 生态胁迫<br>The ecological stress | 生态效益<br>Ecological benefits | 综合评价<br>Comprehensive evaluation |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Queen 邻接 Queen adjacency | 0.8955                    | 0.8352                           | 0.8563                        | 0.9322                      | 0.9196                           |
| Rook 邻接 Rook adjacency   | 0.9176                    | 0.8692                           | 0.8881                        | 0.9457                      | 0.9381                           |
| K-近邻 K-nearest neighbor  | 0.9158                    | 0.8582                           | 0.8807                        | 0.9422                      | 0.9356                           |
| I 均值 I mean              | 0.9096                    | 0.8542                           | 0.8750                        | 0.9400                      | 0.9311                           |

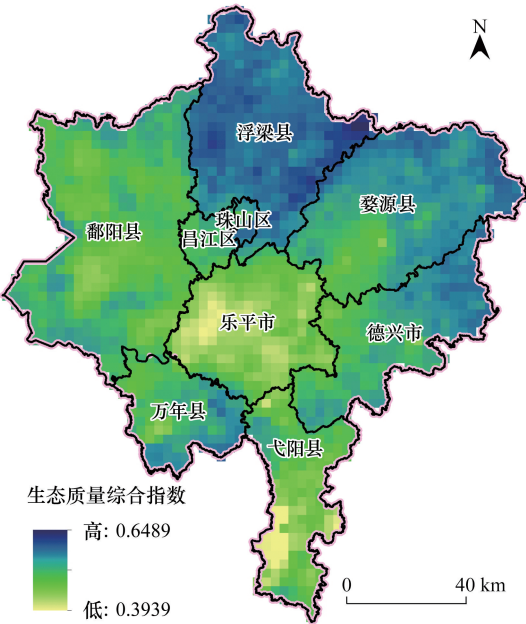


图 3 研究区国土空间生态质量综合评价结果空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of spatial ecological quality evaluation results in the study area

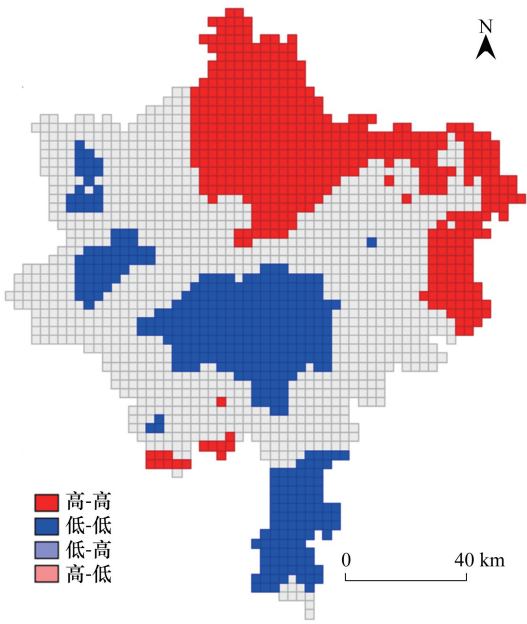


图 4 研究区国土空间生态质量综合评价 LISA 聚集图  
Fig.4 Spatial aggregation map of local indexes for comprehensive ecological quality assessment of the study area

3.2.2 冷热点分析

准则层和综合评价分值变化冷热点分布结果如表 4、图 5 和图 6 所示。结果显示准则层和综合评价的冷点和热点区域面积基本持平,自然基础和生态结构准则层的热点区域面积多于冷点区域面积,生态胁迫和生态效益准则层与之相反。自然基础准则层的热点区域栅格数为 460 个,占比 24.14%,主要集中分布于万年县中南部、婺源县东部和北部地区、浮梁县东部和西部部分地区,冷点区域栅格数为 383 个,占比 20.08%,主要集中分布于乐平市境内;生态结构准则层的热点区域相对于其他准则层占比最大,占比 39.37%,主要集中分布与婺源县和浮梁县境内;生态胁迫准则层冷热点面积占比最小,且分布较为分散,热点地区占比仅为 11.55%,主要分布于昌江区的鲇鱼山镇、万年县的苏桥镇以及浮梁县,冷点区域分布于弋阳县、万年县的齐埠镇、德兴市和婺源县的部分地区;生态效益准则层冷热点分布相对来说最为集中,且占比最大,34.44%为热点

区域,主要集中分布于研究区东北部的浮梁县、婺源县以及德兴市部分地区,冷点地区占比 37.28%,主要集中分布于研究区西部的鄱阳县、景德镇市和万年县。饶河流域国土空间生态质量综合评价结果的冷热点区域共 1341962.14 hm<sup>2</sup>,其中热点区域占比 23.04%,近六成分布于浮梁县境内,冷点区域占比 55.16%,主要集中分布于乐平市和弋阳县。

表 4 研究区国土空间生态质量综合评价冷热点区面积比例/%

| Table 4 The proportion of cold hot spots in the comprehensive evaluation of spatial ecological quality of the study area |                           |                                  |                               |                             |                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 区域<br>Area                                                                                                               | 自然基础<br>The natural basis | 生态结构<br>The ecological structure | 生态胁迫<br>The ecological stress | 生态效益<br>Ecological benefits | 综合评价<br>Comprehensive evaluation |
| 热点-99%置信度 Hot spot -99% confidence                                                                                       | 7.15                      | 15.31                            | 2.51                          | 28.58                       | 12.60                            |
| 热点-95%置信度 Hot spot -95% confidence                                                                                       | 10.67                     | 15.86                            | 1.88                          | 4.69                        | 9.34                             |
| 热点-90%置信度 Hot spot -90% confidence                                                                                       | 6.32                      | 9.46                             | 7.15                          | 1.17                        | 5.77                             |
| 冷点-99%置信度 Cold -99% confidence                                                                                           | 3.26                      | 3.89                             | 2.47                          | 5.82                        | 12.49                            |
| 冷点-95%置信度 Cold -95% confidence                                                                                           | 5.27                      | 2.30                             | 4.23                          | 8.16                        | 6.77                             |
| 冷点-90%置信度 Cold -90% confidence                                                                                           | 11.55                     | 15.86                            | 9.21                          | 23.31                       | 3.78                             |
| 无显著性 There was no significant                                                                                            | 55.77                     | 37.32                            | 72.55                         | 28.28                       | 49.24                            |

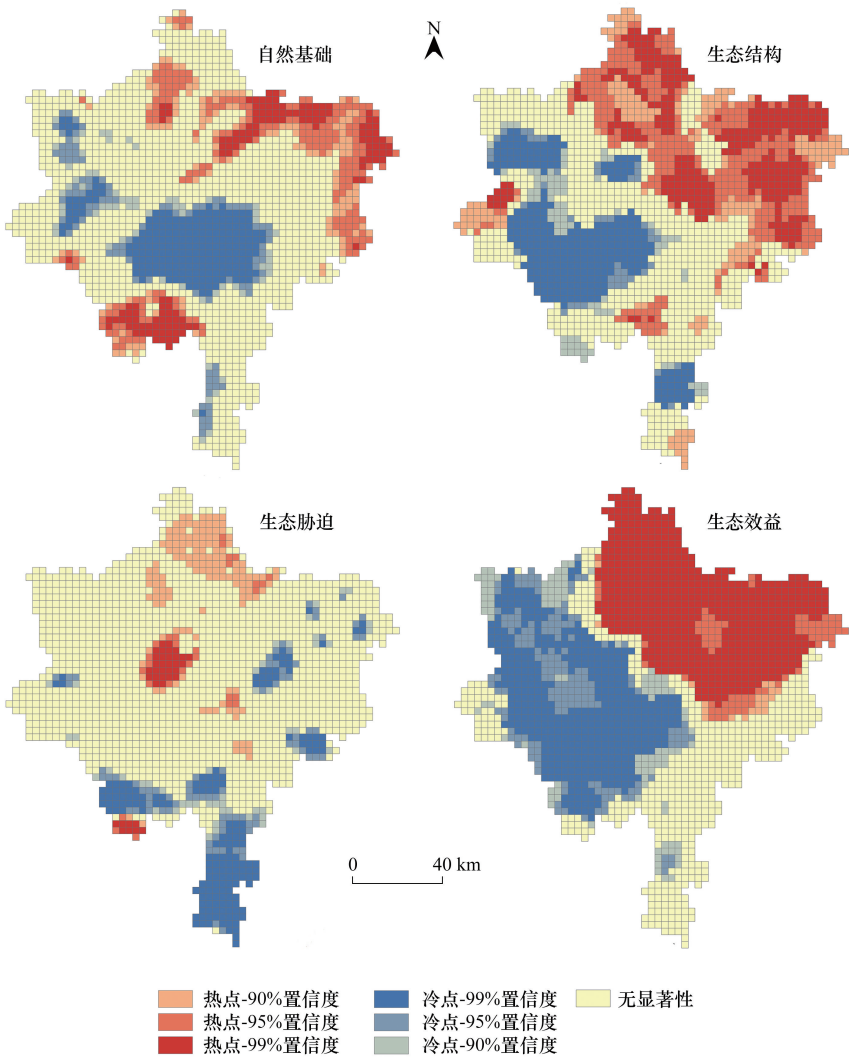


图 5 研究区国土空间生态质量准则层分值变化冷热点分布图

Fig.5 Distribution map of cold hot spots of spatial ecological quality criterion layer score variation in the study area

### 3.3 国土空间生态分区及治理措施

研究区国土空间生态质量分区结果以及障碍度指数测算结果如表 5、表 6、表 7 和图 7 所示。研究区国土空间生态质量综合指数均值为 0.5425, 其中Ⅲ级生态分区面积最大, 占比 26.19%, V 级分区面积最小, 仅占 8.71%, 其他等级区占比分别为 I 级 22.26%、II 级 22.15%、IV 级 20.68%。经测算, 各分区中坡度、有效土层厚度、土壤有机质含量、草地退化率、GDP 增长率、景观格局指数指标的障碍度指数较高, 均值分别为 13.40、11.31、9.71、8.56、7.64、5.58, 这六个因素是制约饶河流域国土空间生态质量主导因素; 自然基础准则层对研究区国土空间生态质量的障碍度都远远高于其他三者, 障碍度指数均值为 43.73, 生态结构与生态胁迫对研究区国土空间生态质量的障碍度相近, 生态效益的障碍度最小。

I 级生态分区包含 424 个评价单元, 总面积为 381995.87  $\text{hm}^2$ , 占比 22.26%, 生态质量综合指数均值为 0.5972, 其中 66.51% 分布于浮梁县境内, 婺源县东北部、德兴市东北部也有少量分布, 占比分别为 19.81%、9.67%, 生态质量综合指数最高的栅格位于浮梁县瑶里镇, 分值达到 0.6489。该区域拥有植被覆盖率高、规模大、景观斑块连接度好的生态用地, 整体生态质量水平最优, 在涵养水源、水土保持等方面有着很高的生态服务价值, 区域内拥有得天独厚的自然风光, 且已经拥有国内著名的旅游景点, 生态管控措施相对比较完善, 人为活动对于生态环境质量的干扰度较小, 交通便利。可通过招商引资来进一步扩大旅游影响力, 打造知名旅游品牌, 在保障该区域生态环境质量的同时, 保证其生态空间格局, 并通过提供特色生态产品和发展现代生态旅游来提升生态经济效益水平, 严禁毁林开垦、建设污染企业等破坏自然生态质量的工程, 促进一二三产绿色发展。

II 级质量生态分区包含 422 个单元, 总面积为 380108.20  $\text{hm}^2$ , 占比 22.15%, 生态质量综合指数均值为 0.5666, 主要分布于婺源县中部和东北部、德兴市东北部和西南部、鄱阳县南部和北部、万年县南部和东部, 占比分别为 37.91%、20.62%、17.54%、10.43%。该区域的森林覆盖面积较广, 生境质量较好, 社会经济压力小, 斑块多以农用地为主, 但该区域生态景观布局紊乱, 综合生态效益水平较低。该区域应注意提升生态空间景观格局, 完善生态廊道建设, 加大林地的养护治理工作, 注重多类型生态用地相互连接的区域保护, 丰富区域的生态结构, 根据实际情况建设生态养护工程, 推广健康农业种植技术, 积极响应乡村振兴战略, 挖掘和发展当地特色农业来推动当地经济发展。

III 级生态分区包含 499 个评价单元, 总面积为 449437.19  $\text{hm}^2$ , 所占比重大, 为 26.19%, 生态质量综合指数均值为 0.5348, 主要分布于鄱阳县东北和西南、德兴市东部、婺源县西南部、万年县西北部, 占比分别为 43.89%、15.83%、13.43%、10.22%; IV 级分区包含 394 个评价单元, 生态质量综合指数均值为 0.5019, 主要分布于鄱阳县中部和西北部、乐平市北部和南部、弋阳县北部和南部。III 级和 IV 级分区主要位于城镇集中建设区周围, 自然基础状况欠佳, 景观破碎度较高, 人类活动和工业化影响较为强烈, 生态用地斑块相对较少。该地区在追求社会化发展的同时, 应遵循自然环境发展的客观规律, 因地制宜提出相应的管制措施, 在生态文明相关政策理念的指导下, 积极开展土地整治、生态建设等工程, 确保城镇-农业-生态空间和谐统一发展, 努力提升生态空间效益, 营造人民安居乐业的城镇空间氛围, 打造产出高效的绿色农业生产格局。

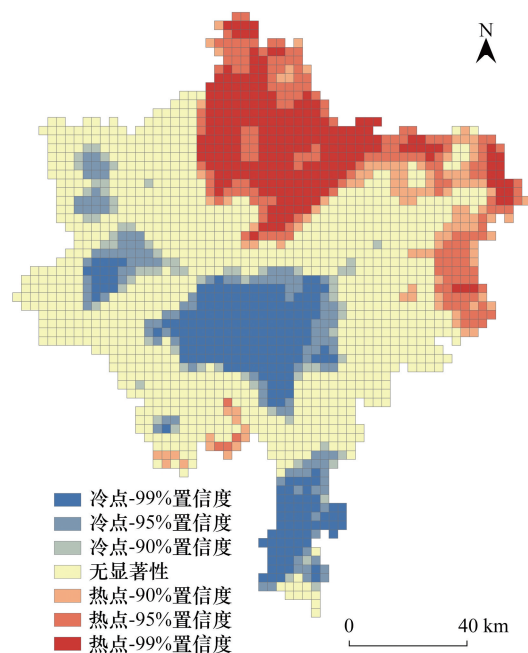


图 6 研究区国土空间生态质量综合评价冷热点分布图

Fig.6 Distribution map of cold and hot spots for comprehensive evaluation of spatial ecological quality of the study area

表 5 研究区国土空间生态质量等级划分情况统计表

Table 5 Statistical table of spatial ecological quality classification of the study area

| 生态分区<br>Ecological zoning | 平均分值<br>The average score | 栅格总数<br>Total number of grids | 总面积<br>Total area/hm <sup>2</sup> | 占比<br>Percentage/% | 主要分布区域<br>Main distribution area                           |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------|
| I                         | 0.5972                    | 424                           | 381995.87                         | 22.26              | 浮梁县(瑶里镇等)、婺源县(沱川乡等)、德兴市(新岗山镇等)、珠山区                         |
| II                        | 0.5666                    | 422                           | 380108.2                          | 22.15              | 婺源县(段莘乡等)、德兴市(海口镇等)、万年县(大源镇等)、鄱阳县(饶丰镇等)                    |
| III                       | 0.5348                    | 499                           | 449437.19                         | 26.19              | 鄱阳县(侯家岗镇等)、昌江区、万年县(石镇镇等)、弋阳县(中畈乡等)、德兴市(黄坡乡等)、婺源县(中云镇等)     |
| IV                        | 0.5019                    | 394                           | 354882.06                         | 20.68              | 鄱阳县(谢家滩镇等)、万年县(湖云乡等)、乐平市(礼林镇等)、弋阳县(曹溪镇等)、婺源县(许村镇)、浮梁县(江村乡) |
| V                         | 0.4617                    | 166                           | 149640.79                         | 8.72               | 乐平市(后港镇等)、弋阳县(清湖乡等)、鄱阳县(白沙洲乡等)                             |

表 6 研究区国土空间生态质量分区障碍因素诊断结果

Table 6 Diagnostic results of barriers to partition of spatial ecological quality in the study area

| 指标<br>Indicators                                 | 分区等级 Partition level |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                  | I                    | II    | III   | IV    | V     |
| 高程 Elevation                                     | 2.29                 | 1.60  | 0.82  | 0.49  | 0.27  |
| 坡度 Slope                                         | 11.67                | 12.44 | 14.17 | 14.42 | 14.30 |
| 有效土层厚度 Effective soil thickness                  | 11.77                | 8.68  | 9.68  | 12.67 | 13.73 |
| 土壤有机质 Soil organic matter                        | 8.40                 | 10.54 | 9.50  | 8.75  | 11.37 |
| 生产用地比重 Proportion of productive land             | 0.59                 | 0.98  | 1.53  | 1.83  | 1.88  |
| 耕地退化 Land degradation                            | 2.12                 | 1.93  | 1.71  | 1.62  | 1.53  |
| 土壤污染综合指数 Soil pollution composite index          | 0.87                 | 2.56  | 2.09  | 2.27  | 3.66  |
| 生活用地比重 Proportion of living land                 | 0.29                 | 0.46  | 0.59  | 0.63  | 0.79  |
| 人口密度 The population density                      | 0.51                 | 0.54  | 0.62  | 0.61  | 0.62  |
| 城镇化率 Urbanization rate                           | 1.49                 | 0.96  | 0.71  | 0.69  | 1.18  |
| GDP 增长率 The GDP growth rate                      | 8.35                 | 8.45  | 7.72  | 7.48  | 6.18  |
| 人均林地草地面积 Area of forest and grassland per capita | 0.95                 | 3.84  | 5.89  | 6.20  | 5.88  |
| 人均粮食产量 Per capita food production                | 0.70                 | 0.81  | 0.48  | 0.34  | 0.45  |
| 年均降水量 Average annual precipitation               | 2.37                 | 2.02  | 1.92  | 1.59  | 1.38  |
| 水网密度 Water network density                       | 3.21                 | 3.16  | 3.49  | 3.31  | 2.42  |
| 植被覆盖度指数 Vegetation coverage                      | 2.85                 | 3.02  | 3.48  | 3.42  | 3.44  |
| 生态用地比重 Vegetation coverage index                 | 1.16                 | 1.98  | 3.01  | 3.53  | 3.77  |
| 景观多样性指数 Landscape diversity                      | 9.64                 | 7.28  | 5.05  | 3.49  | 2.42  |
| 斑块密度 Patch density                               | 6.94                 | 6.05  | 4.91  | 3.96  | 3.09  |
| 景观聚集度指数 Landscape aggregation index              | 3.30                 | 3.72  | 4.32  | 4.89  | 4.91  |
| 景观破碎度指数 Landscape fragmentation index            | 2.13                 | 2.23  | 2.72  | 3.14  | 3.45  |
| 林地年退化率 Annual degradation rate of forest land    | 1.03                 | 1.01  | 0.96  | 0.94  | 0.82  |
| 草地年退化率 Annual grassland degradation rate         | 9.98                 | 9.00  | 8.45  | 8.01  | 7.36  |
| 水域湿地增加率 Increase rate of water area wetland      | 3.88                 | 3.53  | 3.22  | 2.98  | 2.61  |
| 生态用地增加率 Increase rate of ecological land use     | 3.53                 | 3.23  | 2.96  | 2.75  | 2.48  |

V 级分区的占比最小,仅占总面积的 8.72%,生态质量综合指数均值为 0.4617,主要分布于乐平市中部和西部、弋阳县西南部,其中弋阳县清湖乡分值最低。该区域主要分布于主城区及工业园区周边,建设用地的增加导致土壤环境和植被覆盖率的下降,生态用地比例严重不足,人类活动对自然景观和生态环境的干扰极大。

该区域应加快生态建设的步伐,以节约资源、保护环境为前提调整产业结构,加强工业三废治理力度,制定生态管控措施,加快退化植被的修复工作,积极统筹并开展山水林田湖草综合治理工程,增加绿地公园、湿地公园等自然生态景观建设,确保区域粮食安全,建设生态宜居的城镇生活环境,逐步提高区域生态效益水平,协调好人类经济社会发展的需要与生态环境保护之间的关系。

表 7 研究区国土空间生态质量准则层障碍度

Table 7 Obstacle degree of spatial ecological quality criterion level in the study area

| 分区<br>Partition level | 自然基础<br>The natural basis | 生态结构<br>The ecological structure | 生态胁迫<br>The ecological stress | 生态效益<br>Ecological benefits |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| I                     | 42.55                     | 24.04                            | 24.35                         | 9.06                        |
| II                    | 41.46                     | 22.69                            | 24.45                         | 11.4                        |
| III                   | 43.06                     | 22.13                            | 22.26                         | 12.56                       |
| IV                    | 44.65                     | 21.46                            | 21.61                         | 12.27                       |
| V                     | 46.91                     | 20.31                            | 21.36                         | 11.43                       |

4 结论与讨论

4.1 结论

基于多种空间分析软件,着眼于农业、城镇、生态三类空间的现实需求,选取自然基础属性、生态结构、生态胁迫和生态效益作为四个准则层,构建饶河流域国土空间生态质量评价指标体系,对饶河流域国土空间生态质量状况进行综合评估及空间分异研究,结论如下:

(1)研究区东北部丘陵地区的国土空间生态质量高于西南部平原地区,其中浮梁县瑶里镇分值较高,乐平市和弋阳县部分地区的分值较低。准则层分值和生态质量综合指数分布均具有高度空间自相关性,生态效益准则层的冷热点分布空间聚集性最大。

(2)研究区国土空间生态质量 I 级分区生态质量均值为 0.5972,占比 22.26%,有近七成分布于浮梁县;V 级生态分区面积最少,仅占 8.71%,生态质量均值为 0.4617,主要分布于乐平市和弋阳县境内,工业化的飞速发展导致开发建设强度相对较大,附近地区受到不同程度的辐射影响,植被受到破坏,土壤环境污染程度相对较高,此区域的生态问题最为突出。

(3)结合综合评价和障碍度测算结果,研究区应依据地形地势、土壤等自然基础条件,调整社会经济结构,加大建设生态项目工程力度,在生态质量状况急需改善的区域,应以绿色发展为前提推进工业健康转型,统筹并落实生态修复工程的实施,合理调整土地用途,强化耕地保护,确保农业空间的高效绿色运作,增加自然景观建造,优化城镇空间人居环境,整体提高饶河流域的生态效益水平。

4.2 讨论

健康的土地生态系统是维持经济社会稳步发展的环境基础,也是国土空间规划项目落地实施首要考虑的环境因素,生态质量的优劣受到内在本底属性和外部因素的多重影响。本研究在系统地收集和分析研究区自然基础条件和社会经济建设资料的基础上,立足农业、城镇和生态三类空间的结构、功能、效应和胁迫特征,选取土地利用/覆被、气候、地形坡度、土壤、生产能力、社会压力等因子,构建国土空间生态质量综合评价指标体系,探究研究区国土空间生态质量空间分异特征及主导障碍因素,针对不同生态分区的现实情况提出不同的

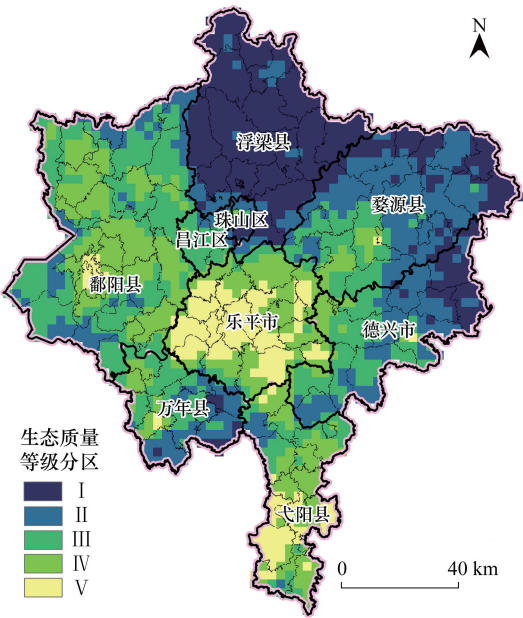


图 7 研究区国土空间生态质量等级分区示意图

Fig.7 Schematic diagram of land space ecological quality classification in the study area

质量提升策略,研究视角较有新意,研究结果符合实际,可为研究区下一步开展国土空间规划、生态修复、山水林田湖草综合治理等工作提供基础数据支撑。但仍存在以下不足之处:(1)指标选取稍有欠缺,除了社会压力外,频发的自然灾害也对生态质量带来威胁,但由于数据获取存在困难,没有将气象灾害、水土保持等自然压力纳入其中,仅考虑了社会压力,所使用的社会经济数据多以县域为单元,在一定程度上削弱了评价结果的区域差异性,并且在选取指标时没有进行相关性分析,多是参考相关研究文献而来,在后续的研究中需注重评价指标的代表性、差异性和综合性。(2)评价模型方面,本研究使用层次分析法和德尔菲法计算指标权重存在较强的主观性,后续研究应采取主客观结合的赋权方法,来降低单一主观性带来的偏差,可结合多期综合评价结果进一步运用预测模型,对区域国土空间生态质量进行模拟预测。(3)本研究未涉及研究结果应用方面内容,后续研究将在完善评价指标体系的基础之上,进行多期数据的综合评价,并预测未来国土空间生态质量趋势,结合区域规划、生态修复等理论方法,为研究区实施国土空间规划、生态修复分区等项目提供科学可靠的数据支撑和建议。

### 参考文献 (References):

- [1] 于婧,陈艳红,彭婕,李翼云,聂艳. 基于 GIS 和 Fragstats 的土地生态质量综合评价——以湖北省仙桃市为例. 生态学报, 2020, 40(9): 2932-2943.
- [2] 曾毅,项广鑫,蒋星祥,李慎鹏,张建新. 基于国土空间自然适宜性的三类空间划分方法——以湖南省为例. 地质通报, 2020, 39(1): 138-145.
- [3] 刘鹏飞,孙斌栋. 中国城市生产、生活、生态空间质量水平格局与相关因素分析. 地理研究, 2020, 39(1): 13-24.
- [4] 魏超. 基于生态文明理念的国土空间利用协调发展研究. 武汉:中国地质大学, 2019.
- [5] 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,李艺博,李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [6] Westing A H. The environmental component of comprehensive security. Bulletin of Peace Proposals, 1989, 20(2): 129-134.
- [7] 杜婉莹,杨子生. 我国城市土地生态安全研究进展. 安徽农学通报, 2020, 26(6): 105-109.
- [8] 余文波,蔡海生,张莹,曾君乔. 基于 RS 及 GIS 的南昌市土地生态安全动态评价及分区. 水土保持研究, 2018, 25(4): 244-249, 256-256.
- [9] Li J X, Chen Y N, Xu C C, Li Z. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 664-677.
- [10] 滕佳霏,周腾禹. 基于 DPSIR 模型的沈阳市土地生态安全评价. 国土与自然资源研究, 2020(3): 36-37.
- [11] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,邓薇. 基于 DPSIR-EES-TOPSIS 模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异. 水土保持研究, 2019, 26(6): 249-258, 266-266.
- [12] 韩宗伟,焦胜,胡亮,杨宇民,蔡青,黎贝,周敏. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256.
- [13] 虞燕娜,朱江,吴绍华,周生路,李保杰. 多风险源驱动下的土地生态风险评价——以江苏省射阳县为例. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1264-1274.
- [14] 叶长盛,冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价. 农业工程学报, 2013, 29(19): 224-232.
- [15] De Lange H J, Sala S, Vighi M, Faber J H. Ecological vulnerability in risk assessment - A review and perspectives. Science of The Total Environment, 2010, 408(18): 3871-3879.
- [16] 林明水,林金煌,王开泳,陈田,伍世代. 基于 RM 的福建省旅游扶贫重点村生态脆弱性风险评价. 地理研究, 2018, 37(12): 2517-2527.
- [17] 张莹,张学玲,蔡海生. 基于景观格局的武功山生态脆弱性动态演变与调控对策研究. 江西农业大学学报, 2018, 40(5): 1021-1029.
- [18] 张正昱,金贵,郭柏枢,董寅,陈坤. 基于多准则决策的长江经济带国土空间脆弱性与恢复力研究. 自然资源学报, 2020, 35(1): 95-105.
- [19] 吴昆,彭红霞,李江凤,陈万旭. 基于变异系数法的灵宝市土地生态敏感性分析. 湖北农业科学, 2018, 57(14): 32-37.
- [20] Thomsen M, Faber J H, Sorensen P B. Soil ecosystem health and services - Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. Ecological Indicators, 2012, 16: 67-75.
- [21] 付野,艾东,王数,方一舒. 基于反规划和最小累积阻力模型的土地生态适宜性评价——以昆明市为例. 中国农业大学学报, 2019, 24(12): 136-144.
- [22] 谢玲,严士强,高一薄. 基于 PSR 模型的广西石漠化地区土地生态安全动态评价. 水土保持通报, 2018, 38(6): 315-321.
- [23] 郭宇伦,师学义,璩路路,刘畅. 基于 PSR-CPM 模型的市域土地生态安全评价. 水土保持研究, 2017, 24(4): 108-112.
- [24] 洪惠坤,廖和平,魏朝富,李涛,谢德体. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价. 生态学报, 2015, 35(24): 8016-8027.
- [25] 和春兰,普军伟,沈金祥. 2005-2018 年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素. 水土保持通报, 2020, 40(4): 219-227.
- [26] 杨晓俊,方传珊,侯叶子. 基于生态足迹的西安城市生态游憩空间优化研究. 地理研究, 2018, 37(2): 281-291.
- [27] 陈英,冯定邦,蔡立群,裴婷婷. 耕作层土壤养分含量的空间自相关分析——以秦安县郭嘉镇为例. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 66-73, 107-107.
- [28] 雷金睿,陈宗铸,陈小花,李苑菱,吴庭天. 1980-2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [29] 雷勋平, Qiu R, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- [30] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 945-951.