

基于生态安全格局的国土空间生态保护修复 关键区域诊断与识别 ——以烟台市为例

方莹, 王静, 黄隆杨, 翟天林

(武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 山水林田湖草系统生态保护修复是维护国家生态安全的重要保障。当前国土空间生态保护修复研究缺乏从生态系统的完整性和结构连通性角度对国土空间生态保护修复关键区域进行诊断和识别。烟台市作为我国典型滨海城市, 湿地退化, 生境类型单一造成景观稳定性差, 国土空间生态保护修复刻不容缓。为全面识别烟台市国土空间生态保护修复关键区域, 利用生境质量模型、生境风险评估模型、粒度反推法、最小累积阻力模型和电路理论, 通过构建区域生态安全格局, 诊断生态“夹点”、生态障碍点、生态断裂点等, 识别和确定研究区域的国土空间生态保护修复关键区域。研究发现: (1) 烟台市生态源地共计 668.85 km², 主要为林地、水域, 源间廊道共计 1548.36 km, 呈现“两横两纵”的空间特征; (2) 基于生态安全格局识别烟台生态保护修复关键区域, 包括 13 处生态“夹点”区域、8 处生态障碍点区域、39 处生态断裂点区域、破碎生态空间 1308.66 km²; (3) 结合各类生态保护修复关键区域的空间分布特征、土地利用现状, 分别提出修复提升方向。研究可为国土空间生态保护修复关键区域识别、生态系统整体修复提升提供科学指导。

关键词: 国土空间生态保护修复; 关键区域识别; 生态安全格局; 生态“夹点”; 生态障碍点; 生态断裂点

国土空间生态保护修复是协助受损生态系统恢复或大体恢复到原有结构和功能状态的过程^[1], 起源于 20 世纪初欧美国家^[2]。随着全球和区域社会经济的迅猛发展, 不断加剧的人类活动已对自然资源和生态环境可持续发展构成了巨大威胁。因此, 需要自然或者人为干预开展生态修复与生态建设活动, 生态修复逐渐成为研究热点^[2-5]。十八大以来, 人与自然和谐共生是新时代发展中国特色社会主义的总体方略, 生态文明建设上升为国家战略, 国土空间生态保护修复纳入自然资源部新职责, 将国土空间优化与生态保护修复放在前所未有的位置, 山水林田湖草系统生态保护修复受到高度关注^[6,7]。山水林田湖草是相互依存、相互影响的系统, 如何从生态系统整体性、均衡性出发, 落实山水林田湖草生命共同体理念, 因地制宜地推进生态系统修复和综合治理, 识别生态安全关键区域并加强生态保护提升生态系统服务整体功能, 构建国土空间生态保护修复格局, 是当前国土空间生态保护修复系统工程面临的严峻挑战, 对系统维护国家生态安全具有重要意义。

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871203); 自然资源部项目 (DD20190518)

作者简介: 方莹 (1995-), 女, 浙江衢州人, 硕士, 研究方向为土地生态与土地资源可持续利用。

E-mail: yingfang@whu.edu.cn

通讯作者: 王静 (1966-), 女, 浙江天台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地生态系统管理与土地资源可持续利用。E-mail: wangjing-whu@whu.edu.cn

当前, 国土空间生态保护修复研究主要侧重于小尺度受损空间的生态修复研究, 包括矿山煤矿废弃地复垦与生态恢复、河流湖泊等的富营养化治理、重金属污染场地修复、水土流失治理等^[2-5], 多以试点为主, 由于空间布局缺乏系统性考虑, 局部取得了良好效果而整体效应弱, 生态系统功能整体提升研究相对较少^[7]。有关宏观尺度研究侧重于国家生态保护和建设工程技术方法实施与工程效果评估, 中观尺度的研究主要落实区域的生态保护建设与修复工程, 较少从维持生态系统完整性角度进行研究。而针对受损空间和待修复区域的识别和诊断, 均基于站点观测和实测野外调查数据或者实践工作要求^[2-5], 缺乏基于生态系统的完整性和结构连通性来识别生态系统内部功能低下、连通性差的生态保护修复关键区域等方面的研究。

生态安全格局是对区域生态空间进行国土空间格局优化的空间配置方案, 对维护景观格局整体性及区域生态安全具有重要意义^[8,9]。景观生态恢复与重建是构建生态安全格局的关键^[10], 故基于生态安全格局识别国土空间待修复关键区域更具系统性和生态学价值。当前, 生态安全格局研究已形成“源地—阻力面—生态廊道”的研究范式^[8], 亦有学者将生态断裂点^[11]、生态“夹点”纳入此领域研究中^[12]。如何科学地识别源地^[13,14]、修正阻力面^[15]、确定廊道范围^[16]是近年来研究重点, 其研究成果主要应用于城市规划、城市增长边界划定^[17]、城市绿色基础设施网络构建^[18]与生态保护红线划定等^[15,19,20]。生态廊道表征了源地间生物流通的通道, 生态“夹点”刻画了廊道中不可替代的关键区域^[12,21], 生态断裂点、生态障碍点是生态廊道中阻碍生物流动的区域^[11,22-25], 均是国土空间生态保护与修复关键区域。而目前基于生态廊道、生态“夹点”、生态断裂点和生态障碍点识别方法, 开展国土空间生态保护修复关键区域诊断和识别等方面研究仍较少。

烟台市为我国典型海湾城市, 陆海交错, 气候条件复杂, 沿岸地区受海水侵蚀严重, 生态景观稳定性较低。随着建设用地的快速扩张和掠夺性围垦, 城市绿色空间减少, 海湾湿地功能退化, 市域生境类型不断趋于简单化, 生物多样性严重受损, 生态环境自我修复能力不断减弱, 国土空间生态保护修复工作刻不容缓, 而如何从景观生态整体性出发, 准确识别生态保护修复关键区域更是工作的重点。故本文在总结分析国内外已有生态空间修复研究基础上, 选择烟台市为典型区域, 基于景观生态学理念, 从生境质量和生境风险出发, 结合电路理论, 构建生态廊道, 识别生态“夹点”、生态障碍点、生态断裂点, 在构建生态安全格局框架下, 识别烟台市内国土生态保护修复关键区域, 提出相应的生态空间保护修复方式与策略, 以期为国土空间生态保护修复提供借鉴和参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

烟台市地处山东半岛东部, 位于 $119^{\circ}34' \sim 121^{\circ}57'E$ 、 $36^{\circ}16' \sim 38^{\circ}23'N$ 之间, 下辖四区、七市、一县, 总面积 13853.84 km^2 , 常住人口708.94万人。烟台市区域内地形复杂, 属典型山地—丘陵—平原复合区, 北部沿海地区以平原和低丘为主, 中部为山地丘陵区, 南部为平原丘陵区。全市生态空间占国土面积的25.6%, 各类林地、草地等基础性生态用地主要分布于中部低山丘陵区以及东部的牟平区。市域内海域和海岸带空间资源丰富, 北临黄海、渤海, 南临黄海, 海域面积 2.6 万 km^2 , 海岸线长 1037.93 km , 全域

属暖温带大陆性季风气候，同时也具有明显的海洋性气候特征。

1.2 数据来源及处理

本文涉及到的数据包括土地利用数据、DEM数据及交通数据等。其中，土地利用数据来自烟台市2017年土地利用变更调查数据库。将湿地、林地、草地和水域等划为生态用地。DEM数据来自地理空间数据云GDEM产品（分辨率为30 m×30 m）。交通数据为烟台市高速公路、铁路分布数据，来源于Open Street Map数据平台。

1.3 研究方法

1.3.1 研究框架

本文基于生态学理论，利用生态安全格局从景观层面识别国土空间生态保护修复关键区域。生态源地确定中，综合了生境质量、生境风险、景观连通性、生态系统服务价值四个方面：首先基于InVEST模型中生物多样性服务价值模块^[26,27]、生境风险模块^[28]测算烟台市生态用地的生境质量和生境风险系数，以生境风险修正生境质量得到综合生境质量；其次，采用粒度反推法^[29]确定生境连通性最好的景观粒度，确定初步生态源地；最后，基于谢高地等^[30]制定生态系统服务价值计算标准测算生态系统服务价值，选取生态系统服务价值高的区域作为生态源地，生态系统服务价值较低的生境破碎区域作为生态保护修复关键区域之一。构建生态阻力面时，为更准确地模拟阻力面分布，除传统基于景观类别的显性阻力面外，借鉴相关研究，引入隐性阻力面、坡度、起伏度因子，测算综合阻力面^[29,31]。以生态源地、综合生态阻力面为基础，利用Circuitscape插件构建生态廊道，识别待修复生态“夹点”区域、生态障碍点区域及生态断裂点区域，结合低生态系统服务价值的景观破碎区域，共同构成研究区内亟需生态保护修复的关键区域。

1.3.2 生境质量模型(Habitat Quality Model)

InVEST模型中的生境质量模型通过栖息地受人类活动干扰程度计算生境质量值^[26,27]。本文主要从三个方面考虑威胁源对生境斑块的干扰程度，即每个威胁的相对影响，每种生境类型对每种威胁的相对敏感度，栖息地与威胁来源之间的距离。

根据InVSET模型指南、相关研究及烟台市自然条件^[26,27]，确定湿地、林地、草地和水域为生境，其他用地为非生境；将城镇建设用地、农村居民点、公路、铁路和农村道路定义为生境的威胁源；根据模型推荐的参考值及相关文献，确定模型的各类参数。生境质量计算公式如下：

$$Q_{xy} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中： Q_{xy} 为地类 j 中栅格 x 的生境质量指数； H_j 为地类 j 的生境适宜度； D_{xy} 为地类 j 中栅格 x 的生境退化度； k 为半饱和常数，即退化度最大值的一半； z 为模型默认参数。

1.3.3 生境风险评估模型(Habitat Risk Assessment Model)

HRA模型常用于评价人类活动对海域生态系统健康的影响^[28]，但其对生境风险的模拟同样适用于陆地生态系统。HRA基于生态风险理论与空间叠加分析，结合生境威胁因子威胁的频率和程度、生境因子受影响的程度以及自我恢复能力来模拟和评估生态用地受到的风险划分等级^[28]。在本文中，生境因子和威胁源的选取与生境质量评估模型保持一致，并按照HRA模型指南设置基础参数，暴露、影响及风险的计算公式如下：

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{d_i \times w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \times w_i}} \quad (2)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{d_i \times w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \times w_i}} \quad (3)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(E-1)^2 + (C-1)^2} \quad (4)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^J R_{ij} \quad (5)$$

式中: E 表示暴露; C 表示影响; R_{ij} 表示由生态威胁因子 j 造成的生境 i 的风险; R_i 为生境 i 的生境风险值; e_i 为该威胁地类所有斑块的平均生态威胁影响得分; N 为每种生境评价标准数量; d_i 为数据质量得分; w_i 为每个栅格的威胁得分; c_i 为生境因子所有斑块受影响程度得分。

1.3.4 粒度反推法

粒度反推法基于反证法思想, 通过测算不同粒度下景观格局指数确定最优景观组分, 从而根据该景观组分反选生态源地^[29]。本文选取斑块数、斑块密度、景观形状指数、蔓延度、连接度、斑块结合度六大指标表征景观整体性和连通性, 以提取的生态用地为基础, 生成100 m、200 m、400 m、600 m、800 m、1000 m、1200 m不同粒度栅格图, 利用Fragstats软件计算各粒度水平下的六大景观格局指数, 通过分析景观整体性和连通性选取最优景观组分的栅格粒度大小, 以该粒度水平为依据与生态用地相交得到初步生态源地。

1.3.5 生态阻力面和廊道构建

传统的阻力面构建主要根据斑块土地利用特征模拟生态阻力, 不能准确模拟阻力面分布, 本文借鉴相关研究, 除显性阻力面外, 利用Kriging插值法生成不易直观判断的隐性生态阻力值并计算累积值得到隐性阻力面, 同时选取代表地貌条件的指标共同构建综合生态阻力面^[29,31], 各因子及权重设置主要参考已有研究, 如表1所示。最小累积阻力模型原理如下:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (6)$$

式中: MCR 为空间内某一景观到源的累积阻力值; f 反映累积阻力值与景观生态过程的正相关关系; \min 表示取累积阻力最小值; D_{ij} 表示空间景观单元 i 到源 j 的空间距离; R_i 表示景观单元 i 对某目标单元运动扩散的阻力系数。本文利用Circuitscape插件中的Linkage Mapper模块构建生态廊道。

1.3.6 生态“夹点”识别

生态“夹点”是由McRae等^[21]基于电路理论提出的概念, 是表征生境连通性的景观关键点。在Circuitscape建模中, 生态“夹点”为电流高度密集的区域, 表明该区域替代路径极少或不存在, 栖息地的退化或损失极大可能切断生境的连通性^[12,20,24], 故生态“夹点”可代表防止栖息地退化/改变的关键位置, 需优先考虑栖息地保护。若生态“夹点”

表1 综合生态阻力面因子权重与系数

Table 1 Weights and coefficients of comprehensive ecological resistance surface

阻力因子		权重	指标	阻力系数		
景观类型	显性阻力	0.40	湿地、林地	1		
			水域	10		
			耕地、草地	100		
			风景名胜区	200		
			园地	300		
			村庄用地、农村道路	600		
			干线公路	700		
			水利设施用地	800		
			城镇工矿建设用地	1000		
			其他用地	500		
地貌因子	隐性阻力	0.18	Kriging 插值	—		
			坡度	0.21	<8°	1
	8~15°	10				
	15~25°	50				
	25~35°	75				
	>35°	100				
	起伏度	0.21			<25°	1
					25~50°	10
					50~70°	50
			70~100°	75		
			>100°	100		

恰好处于生态阻力高值区，则表明该区域退化/损失的概率较大，应作为生态保护修复的关键区域。本文利用Circuitscape插件的Pinchpoint Mapper模块识别生态“夹点”。

1.3.7 生态障碍点识别

生态障碍点是指生物在生境斑块间运动受到阻碍的区域，移除这些区域会增加生态重要区间连通的可能性^[24,25]。本文使用Circuitscape插件的Barrier Mapper模块识别生态障碍点，并与土地利用现状叠加，确定障碍点土地利用及与基础设施相交状况，有针对性地提出生态保护修复措施。该工具通过计算清除障碍点后连通性恢复值的大小来识别生境内的对连通性影响最大的区域，其中连通性恢复值由累积电流恢复值表征，累积电流恢复值与区域对景观连通性的阻碍成正比^[24,25]。

2 结果分析

2.1 生态源地诊断与识别

利用生境质量和生境风险评估模型综合确定烟台市综合生境质量如图1所示。烟台市综合生境质量较高，平均值为0.90，最低值为0.50，低于0.60的不足0.03%，总体呈现出以城区为中心向外增高的趋势，其中质量高的区域主要位于市内的各大森林公园，低值区零星镶嵌于高值区周围，以蓬莱市、莱山区南部、莱州市南部最多。

利用Fragstats计算得不同粒度水平下景观格局指数，如图2所示，400 m粒度是各景

观指数发生突变的关键点（连接度指数除外），大于400 m后各指数均逐渐稳定，连接度指数在400 m时达到最高，即为该粒度时烟台市生态景观组分的整体性和连通性最佳，故选取该粒度下的景观组分作为初步生态源地。

生态源地选取应兼顾斑块自身价值和不同生境在景观中的功能、结构，生境质量、生境风险测算均基于栅格尺度，主要考虑斑块自身的生态价值，故本文在此基础上测算初步生态源地各斑块的生态系统服务价值并采用自然断点法划分等级，选取生态系统服务价值前两级作为最终的生态源地（图3）。烟台市生态源地面积共计668.85 km²，包括湿地、林地、水域，占生态用地面积的19.46%，其中有林地为主要生态源地，占生态源地总面积的82.52%。生态源地以牟平区最多，达234.03 km²，莱山市、芝罘区和蓬莱市的生态源地面积最小，均小于15 km²。

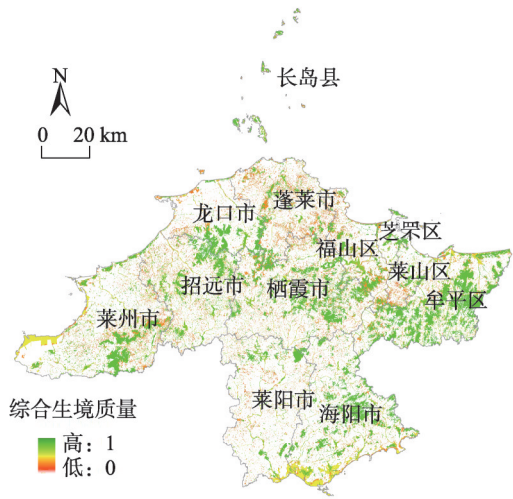


图1 烟台市综合生境质量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of comprehensive habitat quality in Yantai city

2.2 区域基础生态安全格局构建

基于表1构建综合阻力面，利用Linkage Mapper模块构建生态廊道，形成由生态源地和生态廊道构成的基础生态安全格局，如图4所示。烟台市高阻力值区域集中分布于龙口市、蓬莱市、福山区及芝罘区北部沿海地区、莱阳市西部地区和莱州市西南角，主要受城市建设用地、交通用地的阻尼作用。生态源地主要包括昆嵛山、招虎山、牙山、罗山四大国家森林公园、门楼水库、沐浴水库和莱州西部沿海滩涂等。生态廊道连接各大生态源地，呈现出两横两纵的空间特征，共计1548.36 km，其中河流廊道主要包括五龙河、大沽夹河、鱼鸟河、富水河等河流的部分河段。

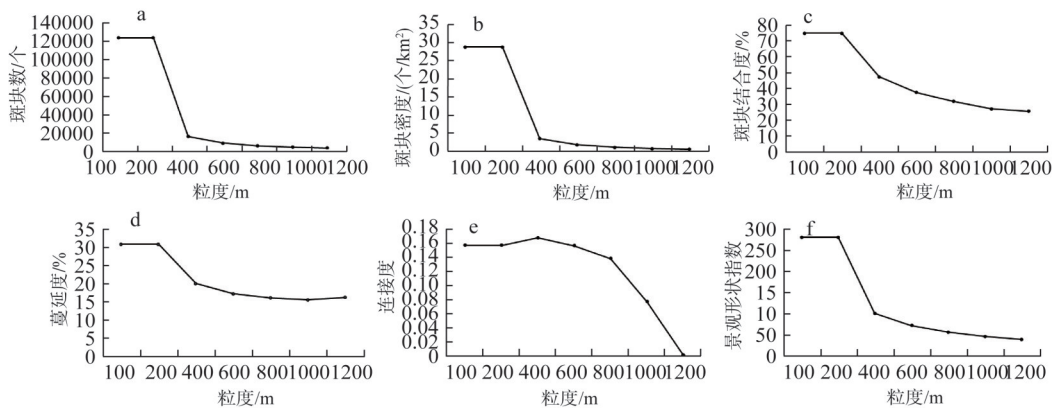


图2 烟台市景观格局指数

Fig. 2 Landscape indices in Yantai city

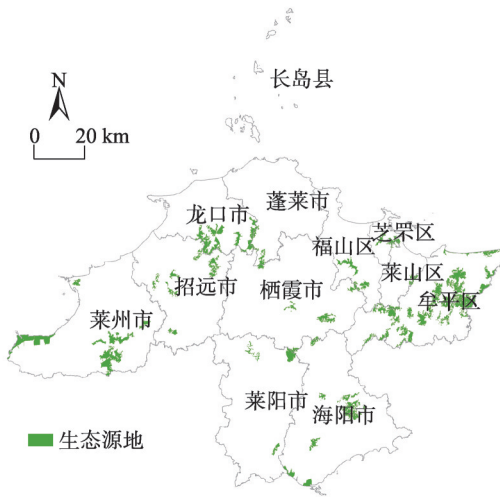


图3 烟台市生态源地空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of ecological hubs in Yantai city

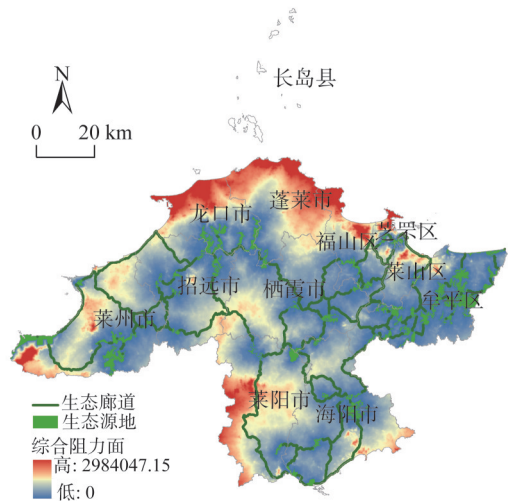


图4 烟台市基础生态安全格局空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of basic ecological security pattern in Yantai city

2.3 国土空间生态保护修复关键区域识别

2.3.1 待修复生态“夹点”区域识别

基于基础安全格局识别生态“夹点”。烟台市内生态廊道的电流强度（即物质流动强度）分布如图5a所示，其中电流强度由绿色到深红色逐步增强，深红色区域均为生态“夹点”，对生态景观的重要性极高。叠加综合阻力面，发现处于高阻力区域的生态“夹点”。即待修复的生态“夹点”区域共有13处（图5b），共计90.40 km。其中最长为36.11 km，分布于莱阳市西部，最短为0.73 km，位于莱州市西北角处。待修复的13处生态“夹点”区域中，11处位于河流廊道上，具体包括莱阳市2处、福山区1处、海阳市

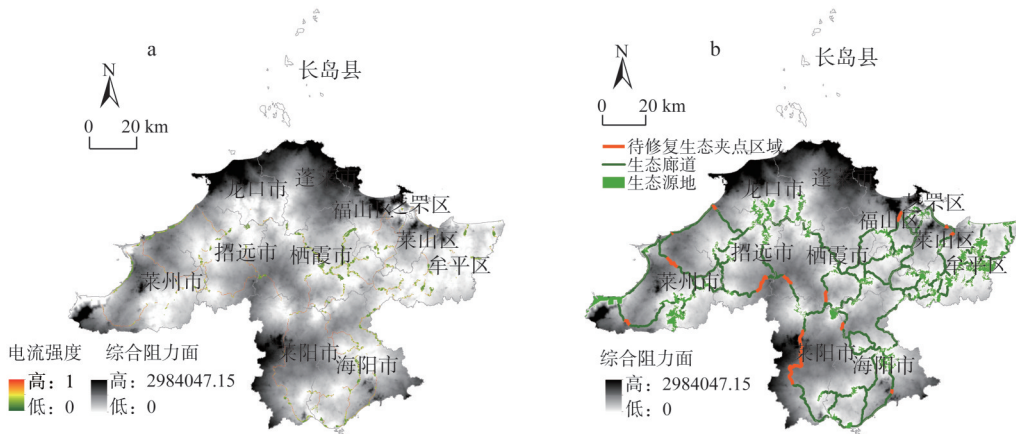


图5 烟台市待修复生态“夹点”区域空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of ecological pinch points to be remediated in Yantai city

1处、莱山区1处、招远市1处、莱州市2处、招远市、栖霞市2处(表2)。河流廊道作为天然廊道,不可替代性极强,受到建设用地侵占、填河造田等影响,河流逐渐萎缩、狭窄,加之部分工厂污染物的排放超过河流纳污能力,二者共同造成河流廊道的风险高。在待修复的河流廊道“夹点”区域应加强河流修复治理,进行污染治理和清淤、建立河流保护区,同时强化河流保护监督工作,严禁任何破坏河流生态环境行为。河流入海口还应加强入海口整治,做好土壤治理与保护。另有2处待修复的生态“夹点”区域位于莱山区北部的马山寨高尔夫俱乐部和招远市北部海北咀村渔港,破坏了原有岸线资源,对沿海滩涂间大量的生物流动造成巨大的潜在威胁。高尔夫球场耗水量高、水污染严重,对生态环境和生物流动的影响极大,维护球场内生态环境、控制污染物排放、做好整治清理以保障区域生态环境质量不下降是该区域生态保护修复的首要工作。渔港地区应加强生态污染治理,严格控制发展规模、人口规模、产业布局,减少生活和生产污染。

2.3.2 待修复生态障碍点区域识别

研究识别待修复生态障碍点区域8处,如图6所示,其中芝罘区3处、莱州市3处、栖霞市1处、莱阳市1处。空间分布上,8处生态障碍点区域均处于低阻力值与高阻力值相交区域,其中6处位于生态廊道与生态源地接壤处,是廊道与源地的连通关键位置,生态障碍点区域的保护修复对生态系统连通性和整体功能具有重要意义;从土地利用类

表2 烟台市国土空间生态保护修复关键区域

Table 2 Key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning in Yantai city

修复区域	土地利用现状	具体分布	建议修复方向	
生态“夹点”区域	河流	莱阳市	五龙河城厢街道、古柳街道、姜疃镇河段,富水河山前店镇河段	河流污染治理、清淤;建立河流保护区;河流违法监督
		福山区	清洋河清扬街道河段	
		海阳市	东村河凤城街道河段	
		莱山区	辛安河解甲庄街道河段	
		招远市	界河辛庄镇与黄山馆镇交界河段,城子水库支流毕郭镇河段	
		莱州市	沙河长胜村至于家村河段,王河平里店镇河段	
	栖霞市	清水河蛇窝泊镇河段,龙门口水库支流官道镇河段		
	莱山区	马山寨高尔夫俱乐部	整治清理、控制污染物排放	
招远市	海北咀村渔港	生态污染治理;控制发展规模,减少生活和生产污染		
生态障碍点区域	城镇建设用地	芝罘区中部	城市绿地建设、提高植被丰度;退耕还林、退耕还湖	
	城镇建设用地、耕地、其他用地	莱州市西北部		
	耕地	栖霞市南部		
	耕地	莱阳市北部		
生态断裂点区域	铁路	23处廊道—铁路交叉点	建立管状涵洞、桥下涵洞、“过街天桥”等野生动物通道;竖立警示牌;开展野生动物通道监测	
	高速公路	19处廊道—高速公路交叉点		
破碎生态空间	生态用地	—	地形修复、岸线维护;实行异地复绿工程	

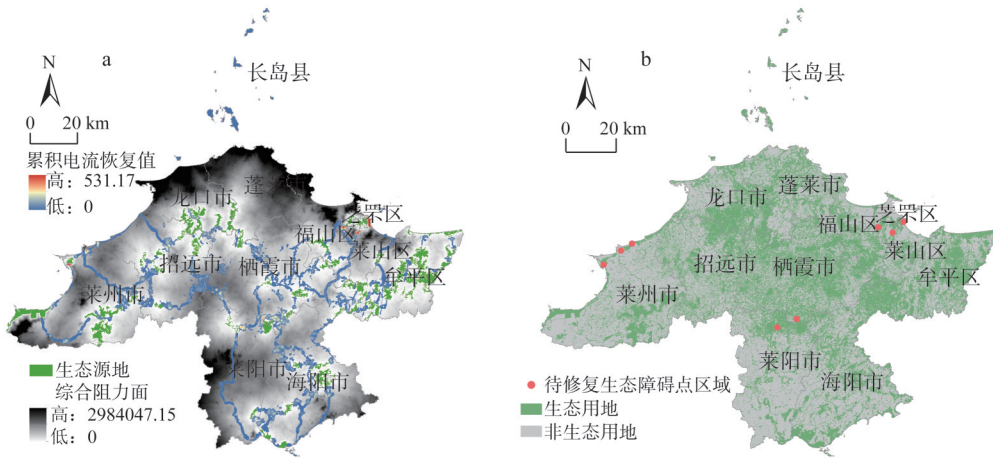


图6 烟台市待修复生态障碍点区域空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ecological barrier points to be remediated in Yantai city

型来看，待修复生态障碍点区域土地利用现状均为非生态用地，主要为城市建设用地与耕地。故而在修复时可针对生态障碍点类别分类进行：对于城镇内部建设用地，可加强绿带、绿心等城市绿地建设，增加植被丰度^[22]，保障城市内部生态系统连续性；对于滨海地区，可拆除部分建筑，同时沿岸线种植生态防护林，恢复岸线资源；对于耕地区域，可开展退耕还林、退耕还湖，加强源地—廊道连接的生态稳定性。

2.3.3 待修复生态断裂点区域识别

本文待修复生态断裂点区域识别主要考虑大型交通道路（铁路和高速公路）对生态廊道的阻隔。纵横交错的交通设施加剧景观破碎化，与廊道相交处直接或部分切断了景观连接度，对生物流动的畅通和安全性造成威胁^[32]。如图7所示，烟台市内生态断裂点区域共39处，集中分布于芝罘、福山、莱山交界处，其中与铁路相交23处，与高速公路相交19处，有3处因铁路、公路并行且相隔距离较近，生态廊道与二者同时相交。铁路、高速公路均为重要交通设施，不可直接拆除，故应在生态断裂点处因地制宜地建立相关改良设施，如管状涵洞、桥下涵洞、“过街天桥”等野生动物通道，并于通道旁竖立警示牌，保证野生动物流动的畅通性，同时定期开展野生动物通道监测，及时排除干扰因素。



图7 烟台市待修复生态断裂点区域空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecological break points to be remediated in Yantai city

2.3.4 待修复破碎生态空间识别

初步生态源地中生态系统服务价值低

的区域也应作为关键区域进行保护和修复。低质量破碎生态空间共 1308.66 km²，镶嵌于耕地和园地中，以栖霞市、海阳市分布最广，分别为 251.76 km²、219.36 km²（图 8）。破碎生态空间由交通用地切割、地质灾害、城市建设侵占等多方面因素引起，景观斑块分散，难以统一进行修复，应结合市（区）发展规划重组生态用地，如可选取区域内斑块较大区域进行地形修复和岸线维护等，以逐步恢复生态景观的连续性；若区内生态用地过于分散无法集中修复，可通过相关规划，采取异地造林、异地复绿等措施整合绿地资源。

2.4 国土空间生态保护修复关键区域的生态修复策略

如图 9 所示，基于生态安全格局，结合生态阻力面、生态障碍点等相关概念，识别出烟台市生态保护修复的关键区域，汇总如表 2 所示。烟台市待修复生态“夹点”区域、生态断裂点区域及生态障碍点区域多处有重叠或相交，生态断裂点区域基本位于待修复生态“夹点”区域中，而生态障碍点区域大多处于生态源地与源间廊道接壤处，三大类节点区域是保证生物在源间流通关键位置。整合修复三大类节点区域和破碎生态空间，提高城市绿地、湿地等生态用地间的生态网络完整性^[33,34]，可保障和提高烟台市生态基质和生态空间的稳定性，提升生态系统服务供给能力^[35]。

考虑国土空间生态保护修复关键区域利用现状，提出分类修复建议如下：关键区域中受损水域主要包含河流“夹点”区域和破碎生态空间中沿海湿地等，可开展湿地腾退工程、入河排污口综合整治工程、湿地恢复重建工程、水生态系统保护与修复工程、水源地保护工程以及水资源保护监测工程等生态保护修复项目，并加强沿河绿道、湿地绿化工程建设，全面清污截污，提高受损河流和湿地的生态水平；针对铁路、公路上的待修复生态断裂点区域，可因地制宜建设野生动物通道并开展野生动物通道监测，杜绝破

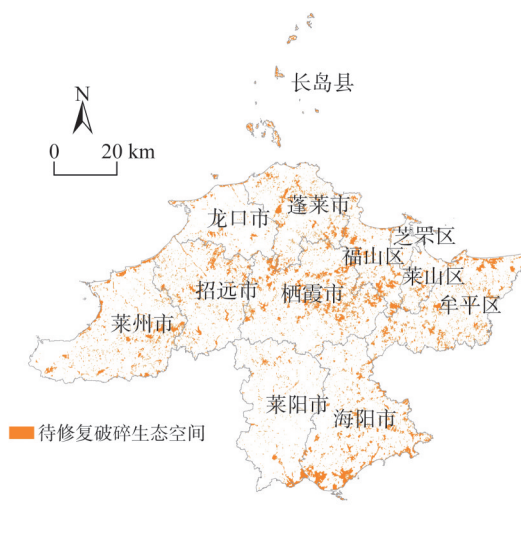


图 8 烟台市破碎生态空间空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of fragmented ecological functional land in Yantai city



图 9 烟台市国土空间生态保护修复关键区域空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning in Yantai city

坏通道、猎杀野生动物行为；城镇地区生态保护修复除上文提及绿地、绿心建设外，可通过开展垃圾、污水处理等综合整治工程，建立环境监测网络，提高建成区生态环境品质；针对耕地，基本农田保护区外耕地可适当退耕还林、还湖，基本农田保护区内耕地可加强农田整治工程、防护林建设工程等环境建设，并充分发挥耕地的生态功能，改善区域内生态环境。

同时，为保证生态保护修复效果，可建立长期生态监测体系，及时发现各类生态用地恢复中的问题并完善生态修复手段；建立面向公众的生态修复交流和信息分享平台，发展生态教育，提高人们的生态保护意识；加强社区保护，保障生态修复区域居民的利益，提高居民生态保护意愿等。

3 结论与讨论

本文以我国典型海湾城市烟台为研究区，基于景观生态学，采用InVEST中生境质量、生境风险评估模型评估烟台综合生境质量和风险，结合粒度反推法、生态系统服务价值评估识别生态源地和破碎生态空间，构建综合阻力面，识别生态廊道、生态“夹点”、生态障碍点、生态断裂点，创新性地利用生态安全格局识别市域国土空间生态保护修复关键区域，并针对各类关键修复区域提出生态保护修复措施。得到结论如下：

(1) 烟台市生态源地共计668.85 km²，占生态用地面积的19.46%，主要为林地和水域；源间廊道包括河流廊道和人工廊道，共计1548.36 km，呈现“两横两纵”的空间特征。

(2) 研究识别出烟台生态保护修复关键区域包括：待修复生态“夹点”区域13处，其中11处位于河流廊道；待修复生态障碍点区域8处，均处于低阻力值与高阻力值相交区域；待修复生态断裂点区域39处，集中分布于芝罘、福山、莱山交界处，与铁路相交23处，与高速公路相交19处，有3处与铁路、公路同时相交；破碎生态空间以栖霞市、海阳市分布最广，共1308.66 km²。

(3) 结合各类生态保护修复关键区域的空间分布特征、土地利用现状，分别提出针对各类生态保护修复关键区域的修复提升方向和待修复生态空间各类用地的针对性修复工程和长期监测工程等。

本文基于生态安全格局理论识别生态保护修复关键区域，融入景观格局优化理念，全面考虑了生态系统的整体性和连通性，相较传统的针对某一具体待修复区域设立生态保护修复工程更具全局性、系统性和理论性；生态源地选取上，生境质量、生境风险、粒度反推法和生态系统服务价值评估的综合运用测算了生态用地为人类提供的服务和遭受风险的大小，全面考虑了斑块自身价值、斑块大小、粒度水平对生态源地选取的影响；待修复生态“夹点”区域、生态障碍点区域、生态断裂点区域均为景观格局中的关键区域，对山水林田湖草生态系统修复和综合治理具有重要意义。最后，需指出本文存在的一些问题：识别了生态断裂点、生态“夹点”、生态障碍点三类关键待修复区域，修复这些区域后景观连通性的提升程度仍有待进一步研究；同时本文未确定生态保护修复关键区域的修复优先顺序，今后应结合关键区域的地理位置、社会经济条件及生态需求，明确关键区域生态保护修复的先后顺序，以期达到更高效的生态保护修复效果。

参考文献(References):

- [1] 彭少麟. 恢复生态学. 北京: 气象出版社, 2004: 497-511. [PENG S L. Restoration Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 497-511.]
- [2] 曹永强, 郭明, 刘思然, 等. 基于文献计量分析的生态修复现状研究. 生态学报, 2016, 36(8): 2442-2450. [CAO Y Q, GUO M, LIU S R, et al. Current status of ecological restoration based on bibliometric analysis. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2442-2450.]
- [3] 杨艳平, 罗福周, 王博俊. 基于朴门设计的煤矿废弃地生态修复规划研究. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1080-1091. [YANG Y P, LUO F Z, WANG B J. Research on ecological restoration planning of coal mine wasteland based on Permaculture Design. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1080-1091.]
- [4] 王志强, 崔爱花, 缪建群, 等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6253-6264. [WANG Z Q, CUI A H, MIU J Q, et al. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6253-6264.]
- [5] 刘国彬, 王兵, 卫伟, 等. 黄土高原水土流失综合治理技术及示范. 生态学报, 2016, 36(22): 7074-7077. [LIU G B, WANG B, WEI W, et al. Technique and demonstration of water and soil loss comprehensive harness on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7074-7077.]
- [6] 邹长新, 王燕, 王文林, 等. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 961-967. [ZOU C X, WANG Y, WANG W L, et al. Theory of Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grass System and ecological protection and restoration research. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(11): 961-967.]
- [7] 王夏辉, 何军, 饶胜, 等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. 环境保护, 2018, 46(s1): 17-20. [WANG X H, HE J, RAO S, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements. Environmental Protection, 2018, 46(s1): 17-20.]
- [8] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [9] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569. [CHEN Y, HA K, HE W L, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of Northwest Hebei Mountains: A case study of Huailai county, Hebei province. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 556-569.]
- [10] 关文彬, 谢春华, 马克明, 等. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径. 生态学报, 2003, 23(1): 64-75. [GUAN W B, XIE C H, MA K M, et al. A vital method for constructing regional ecological security pattern: Landscape ecological restoration and rehabilitation. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 64-75.]
- [11] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1611-1618. [CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1611-1618.]
- [12] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 等. 基于“质量—风险—需求”框架的武汉市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(2): 615-626. [HUANG L Y, LIU S H, FANG Y, et al. Construction of Wuhan's ecological security pattern under the "quality-risk-requirement" framework. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 615-626.]
- [13] 彭建, 汪安, 刘焱序, 等. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(2): 333-346. [PENG J, WANG A, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(2): 333-346.]
- [14] PENG J, PAN Y J, LIU Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. Habitat International, 2018, 71(7): 110-124.
- [15] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [PENG J, LI H L, LIU Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701-710.]
- [16] PENG J, ZHAO S Q, DONG J Q, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. Environmental Modelling & Software, 2019, 117(7): 214-222.

- [17] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 等. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定: 以天水市规划区(2015-2030年)为例. 自然资源学报, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 14-26.]
- [18] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372. [LIU J, YIN H W, KONG F H, et al. Structure optimization of circuit theory: Based green infrastructure in Nanjing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4363-4372.]
- [19] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 等. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248-257. [CHENG Y X, WANG H M, LIU G S, et al. Spatial layout optimization for ecological land based on minimum cumulative resistance model. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(16): 248-257.]
- [20] 钟式玉, 吴箐, 李宇, 等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构: 以广州市新塘镇为例. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3173-3179. [ZHONG S Y, WU Q, LI Y, et al. Reconstruction of urban land space based on minimum cumulative resistance model: A case study of Xintang town, Guangzhou city. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3173-3179.]
- [21] MCRAE B H, DICKSON B G, KEITT T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [22] 徐威杰, 陈晨, 张哲, 等. 基于重要生态节点独流减河流域生态廊道构建. 环境科学研究, 2018, 31(5): 805-813. [XU W J, CHEN C, ZHANG Z, et al. Ecological corridor construction based on important ecological nodes in Duliujian River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 805-813.]
- [23] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 青海省保护地生态网络构建与优化. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1910-1916. [SHI N N, HAN Y, WANG Q, et al. Construction and optimization of ecological network for protected areas in Qinghai province. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1910-1916.]
- [24] MCRAE B H, HALL S A, BEIER P, et al. Where to restore ecological connectivity?: Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *Plos One*, 2012, 7(12): e52604, Doi: 10.1371/journal.pone.0052604.
- [25] MCRAE B H, SHAH V B, MOHAPATRA T K. 2013. Circuitscape 4 User Guide. The Nature Conservancy. <http://www.circuitscape.org.2014-03-28>.
- [26] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [27] 吴健生, 毛家颖, 林倩, 等. 基于生境质量的城市增长边界研究: 以长三角地区为例. 地理科学, 2017, 37(1): 28-36. [WU J S, MAO J Y, LIN Q, et al. Urban growth boundary based on the evaluation of habitat quality: Taking the Yangtze River Delta as an example. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(1): 28-36.]
- [28] 陈晔倩, 李杨帆, 祁新华, 等. 基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价: 以闽三角为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4214-4225. [CHEN Y Q, LI Y F, QI X H, et al. Assessing ecosystem risk in coastal wetland of the South Fujian Golden Delta using a habitat risk assessment model based on the land-use effect on tidal flat wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4214-4225.]
- [29] 陆禹, 余济云, 陈彩虹, 等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化: 以海口市秀英区为例. 生态学报, 2015, 35(19): 6384-6393. [LU Y, SHE J Y, CHEN C H, et al. Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method: A case study in Xiuying district, Haikou. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6384-6393.]
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [31] 蒙古军, 王晓东, 周朕. 干旱区景观格局综合优化: 黑河中游案例. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 451-461. [MENG J J, WANG X D, ZHOU Z. Integrated landscape pattern optimization in arid region: A case study of Middle Reaches of Heihe River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(3): 451-461.]
- [32] 邬建国. 景观生态学: 格局过程尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007: 17-23. [WU J G. *Landscape Ecology Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 17-23.]
- [33] WANG J, HE T, LIN Y F. Changes in ecological, agricultural, and urban land space in 1984-2012 in China: Land policies and regional social-economical drivers. *Habitat International*, 2018, 71: 1-13.

- [34] WANG J, LIN Y F, ZHAI T L, et al. The role of human activity in decreasing ecologically sound land use in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 446-460.
- [35] WANG J, ZHAI T L, LIN Y F, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 781-791.

Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai city

FANG Ying, WANG Jing, HUANG Long-yang, ZHAI Tian-lin
(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Ecosystem preservation and restoration of Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grass System is very important for national ecological security. Current researches on ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning lack the determination and identification of key areas from a perspective of ecosystem integrity and landscape connectivity. Due to wetland degradation and homogeneity of habitat types that resulted in the low ecosystem resilience, it is urgent for in Yantai, a typical bay city in China, to restore degraded ecosystem and preserve natural resources. In the study, a regional ecological security pattern was proposed and key areas of ecosystem preservation and restoration including pinch points, barrier points, break points and fragmented ecological functional land were identified using habitat quality model, habitat risk assessment model, granularity inverse method, minimum cumulative resistance model and circuit theory. The results showed that the ecological hubs covered an area of 668.85 km², with a total of 1548.36 km corridors between them, and most of the hubs were water body and forests. All of them constructed a "two horizontal and two vertical" ecological security pattern. Key areas of ecosystem preservation and restoration were identified based on the ecological security pattern, including a total of 13 ecological pinch points, 8 ecological barrier points, 39 ecological break points, and 1308.66 km² of fragmented ecological land. Suggestions of restoration were proposed, with a combination of the spatial distribution characteristics and land use status of various key areas of ecosystem preservation and restoration. It would help to provide scientific guidance for identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning and sustainable ecosystem management.

Keywords: land space ecological restoration; identification of key areas; ecological security pattern; ecological pinch point; ecological barrier point; ecological break point