

基于 MSPA 和电路理论的生态安全格局构建研究

——以烟台市福山区为例

陈刚¹, 吴孟泉¹, 王强², 郑雪芹³, 薛明月⁴, 刘龙兴¹, 刘博文¹, 吕金怡¹, 唐疑杰¹

(1.鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264039; 2.烟台市福山区自然资源局, 山东 烟台 265500;
3.烟台正盛土地房地产资产评估有限公司, 山东 烟台 264000; 4.自然资源部北海预报减灾中心, 山东 青岛 266061)

摘要:城市化的快速发展导致森林、草地等生态空间遭受挤压, 生境破碎化加剧, 通过构建合理的生态安全格局可以缓解快速城市化进程中土地利用与生态发展之间的显著矛盾。本研究以烟台市福山区为例, 基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)和景观连通性计算方法识别生态源地, 选取 MSPA 景观要素、土地利用类型、高程、坡度、距河流距离等作为阻力因子构建生态阻力面, 通过电路理论识别生态廊道、生态“夹点”和生态“障碍点”, 综合构建与城市发展相协调的生态安全格局。主要结果如下: (1) 共识别出 13 个生态源地, 面积为 79.56 km², 占研究区总面积的 11.28%, 其中主要生态源地是 11 个, 面积为 76.68 km², 次要生态源地是 2 个, 面积为 2.88 km²; (2) 共提取出生态廊道 18 条, 长度为 83.06 km, 其中主要生态廊道是 4 条, 长度为 46.27 km, 次要生态廊道是 14 条, 长度为 36.79 km; (3) 共筛选出 83 处生态节点, 其中生态“夹点”是 52 处, 生态“障碍点”是 31 处。结合源地、廊道与节点的分布情况, 构建了“一核、一带、三区、多廊、多源、多点”的生态安全格局, 为区域生态修复和国土开发工作提供科学依据。

关键词: MSPA; 景观连通性; 电路理论; 生态安全格局

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2025)02-0145-11

随着城市化的快速发展, 大规模的人类活动和高强度无序的土地开发严重影响了区域生态系统的稳定性, 导致水土流失、生物多样性减少以及水污染等一系列环境问题^[1]。生态安全格局通过识别并保护潜在的生态要素, 缓解城市用地扩张与生态环境保护之间的矛盾, 是实现区域生态安全的重要环节^[2]。构建科学合理的生态安全格局, 提升生态系统服务能力, 对促进城市生态可持续发展具有重要推动作用^[3]。

20 世纪 90 年代, 俞孔坚教授在国际上首次提出生态安全格局概念。经过众多学者的改进和完善, 已基本形成了“生态源地识别—阻力面构建—生态廊道提取”的研究框架^[4]。生态源地是在促进物种迁徙、保持生物多样性和提升区域整体生态健康与复原力方面至关重要的特定栖息地, 对生态源地的识别从传统的人为指定自然保护区或森林

公园, 逐步发展到基于生态系统服务重要性评价^[5]、生境质量评价^[6]和生态敏感性评价^[7]等视角, 更加注重客观性。阻力面是为计算连接目标景观需要克服的空间阻力大小而建立的指标体系^[8], 为克服阻力面构建的主观性, 通过引入夜景灯光数据^[9]、高程等方法对阻力面进行修正^[10]。生态廊道是由植被、水体等自然要素构成的条带状生态用地^[11], 承担着物种交流和贮存的重要功能, 是连接各生态源之间物质和能量流动的重要通道。生态廊道的构建多采用最小累计阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型^[12]、蚁群算法^[13]和电路理论^[14]等方法, 以减少廊道提取中人为因素的干扰, 解决走廊冗余和布局中断问题^[15]。

在生态安全格局构建方法上, MCR 模型基于线性叠加原理, 假设不同景观单元的阻力值对物种迁徙的影响是独立的, 并通过简单相加的方式

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2024-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(42071385); 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(79-Y50-G18-9001-22/23); 山东省科技型中小企业技术创新能力提升工程项目(2022TSGC2371)

通信作者简介: 吴孟泉(1975—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为海洋环境遥感、空间分析及 3S 应用研究。E-mail: ld_wmq@ldu.edu.cn

进行累积,确保物种从源地到目的地迁徙过程中代价最小。但实际生态环境往往是异质的,不同景观单元(如森林、湿地、城市)之间存在复杂的非线性相互作用,这些相互作用可能会导致物种迁徙路径的代价增加或减少,造成模型的实际分析结果出现偏差。电路理论将景观视为电网络,通过模拟电流在网络中的流动来识别生态廊道^[16],相比传统的 MCR 模型,该理论能够更好地处理复杂且异质性强的生态环境,提供更全面更精确的生态廊道构建方案。

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。目前,烟台市的生态源地面积为 668.85 km²,生态廊道总长度达 1 548.36 km,呈现“两横两纵”的空间特征^[17]。福山区位于烟台市东北部,林地和水域分布广泛,森林资源和生物多样性尤为丰富,是国家级、省级公益林集中分布区和重要的水源涵养区,生态基底良好。

近年来,随着福山区城镇规模的快速扩张,导致域内林地、草地、湿地和水体等生态空间遭受挤占,山水林田湖草保护和修复系统性不足,生态要素的质量总体不高,存在较大的优化空间^[18]。本研究以福山区为研究区,基于形态学空间格局分

析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)和景观连通性分析对生态源地进行识别,结合电路理论识别出生态廊道、生态“夹点”和生态“障碍点”等要素,综合构建了与城市发展相协调的生态安全格局,以期为福山区生态修复及生态安全建设工作提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

烟台市位于山东省东北部,是著名的港口城市和旅游胜地,海洋资源和林业资源丰富,是生态宜居的城市之一。福山区隶属于烟台市,西邻栖霞市,东接芝罘区,南面与莱山区接壤,北濒黄海,位置如图 1 所示,总面积为 705.50 km²。地势西南高东北低,以平原、山地和丘陵为主;森林覆盖率较高,占土地总面积 22.04%;拥有自然保护区 2 处,包括银湖省级湿地自然保护区和烟台狮子山地方级森林公园,总面积为 50.68 km²,占土地总面积 7.20%;位于该区的门楼水库,是烟台市主要水源地,承担着重要生态功能。

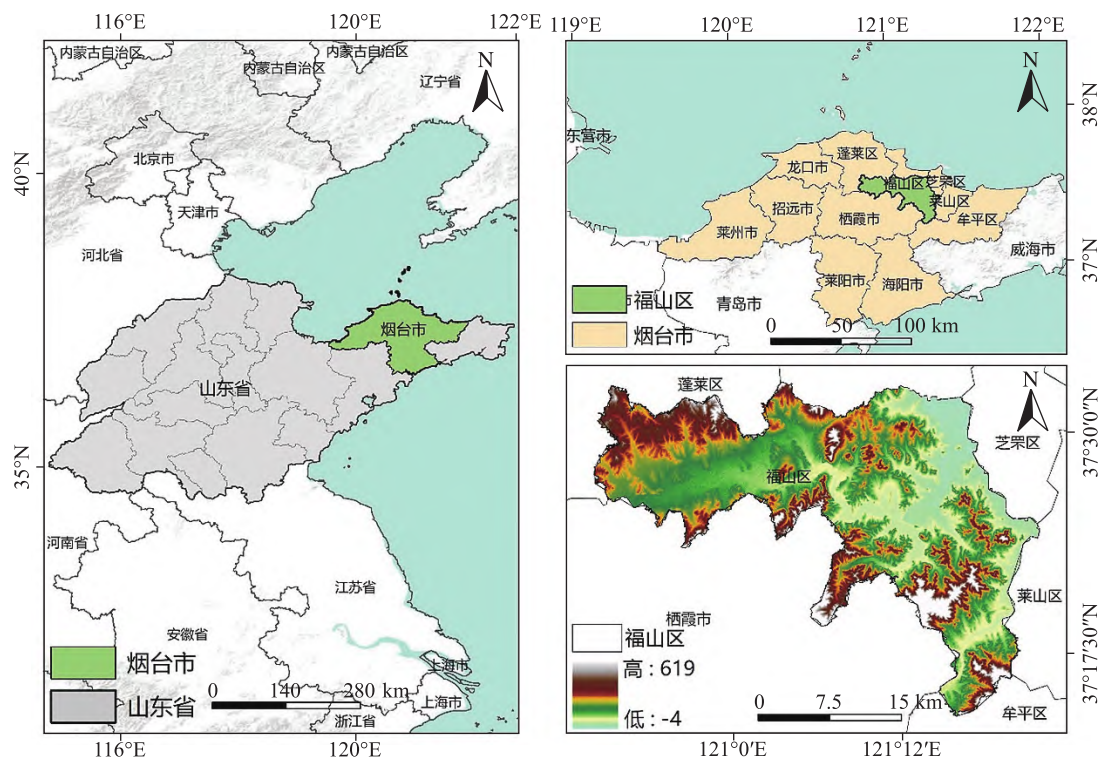


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

注:本图基于国家基础地理信息中心下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图边界无修改。

1.2 数据来源

本研究所使用的 2023 年福山区土地利用数据来自 GlobeLand30 全球地表覆盖数据 (<http://www.globallandcover.com/>), 空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。根据研究需要, 利用 ArcGIS 将土地数据重分类为耕地、林地、草地、建设用地、未利用地和水域 6 类景观类型^[19]; 生态阻力面涉及的道路与河流矢量数据均来自 2023 年开放街道地图 (<https://www.openstreetmap.org/>); 数字高程数据来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 用于提取高程和坡度数据。本研究所使用的数据空间分辨率统一采样为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。

1.3 研究方法

1.3.1 生态源地识别

1) MSPA

MSPA 是一种基于侵蚀、膨胀、开放和封闭等数学形态原理, 测量、识别和分割光栅图像中空间的图像处理方法, 能够准确描绘景观类型和结构^[20]。本研究选取受人类干扰较大的耕地、建设用地、未利用地作为背景, 选取林地、草地、水体等自然生态要素作为前景, 通过 Guidos Toolbox 软件, 运用八邻域方法进行 MSPA 分析, 共分割出核心区、孔隙、桥接区、边缘区、孤岛、环岛和支线^[21]等 7 种景观类型。

2) 源地等级划分

对 MSPA 分析后的结果进行处理, 提取核心区面积最大的前 20 个斑块^[22], 作为后期利用景观连通性指数法筛选重要生态源的初始数据。随后, 利用 Conefor 软件计算核心区斑块的重要性指数 (d_{PC}), 其计算公式为:

$$r_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times P_{ij}^*}{A_L^2}, \quad (1)$$

$$d_{PC} = \frac{r_{PC} - r_{PC}'}{r_{PC}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: r_{PC} 表示可能连通性指数, r_{PC}' 为去除某一斑块后的可能连通性指数; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和 j

的面积, n 为生态斑块数; P_{ij}^* 为物种在斑块 i 和 j 间扩散的最大可能性; A_L 为景观总面积。结合研究区实际情况及文献^[23], 核心斑块之间的连接距离设置为 2.5 km , 连接概率设置为 0.5 ; 选择 $d_{PC} > 0.2$ 的生态源作为重要生态源^[24], 这些生态源与周围地区具有较强的连通性, 可以作为生态网络的核心枢纽。

1.3.2 生态阻力面构建

生态阻力面主要描述地理空间上各种因素对生物迁移、物种扩散或生态过程的阻碍程度。在各种阻力因子中, MSPA 景观要素和土地利用类型在物种生存中具有重要作用; 海拔和坡度影响物种活动的范围; 水体是生物繁衍移动的重要保障, 离水体越近的区域越有利于生物活动; 道路等线性基础设施同样影响着生物活动, 距离越小, 物种迁徙越困难。综合地表覆盖、地形条件和景观类型等因素, 选取 MSPA 景观要素、土地利用类型、高程、坡度、距河流距离等作为阻力因子^[25], 阻力值范围为 $[0, 100]$ 。生态阻力值及其权重参考文献^[26]和福山区实际情况进行设定, 具体见表 1。

1.3.3 生态廊道提取

Linkage Mapper 软件集成了 MCR 模型和电路理论, 使研究人员能够基于生物数据和地理信息系统数据精确地设计和评估生态廊道的连通性和效能。本研究使用 Linkage Mapper 软件构建生态廊道, 通过相关模块连接现有的核心区进行廊道提取。

1.3.4 关键节点识别

生态节点是生态网络中需要加强生态管控的部分, 一般位于生态较为薄弱的地方。通过连接不同的生态源地, 利用 Linkage Mapper 软件计算向其他源地输入的电流。所有电流必须通过的节点被确定为“夹点”, 这些夹点是表征生态服务迁移密度最高的区域, 其扰动可能对整体连通性造成严重影响, 需要重点保护。

生态障碍点是阻碍物种向源地进行迁移扩散的区域, 修复障碍点能够提高景观完整性和连通性。运用 Linkage Mapper 中 Barrier Mapper 模块^[27], 对研究区的生态障碍点进行识别。

表 1 生态阻力值及权重
Tab.1 Ecological resistance values and weights

阻力因子	分级指标	阻力值	权重	阻力因子	分级指标	阻力值	权重
MSPA 景观因素	核心区、岛状斑块	10	0.34	土地利用类型	林地、草地	10	0.26
	边缘区、桥接区	20			水体	20	
	支线、环岛区	30			未利用地	40	
	孔隙	50			耕地	60	
	背景	80			建设用地	80	
海拔高度/m	<15	10	0.03	坡度/(°)	<3	10	0.05
	[15,50]	20			[3,5]	20	
	(50,105]	30			(5,15]	30	
	(105,175]	40			(15,50]	40	
	>175	50			>50	50	
距河流距离/m	<100	10	0.15	距道路距离/m	<250	50	0.17
	[100,200]	20			[250,500]	40	
	(200,500]	30			(500,1000]	30	
	(500,1000]	40			(1000,2000]	20	
	>1000	50			>2000	10	

2 结果与分析

2.1 生态源地

2.1.1 MSPA 识别结果

通过 MSPA 分析,得到了核心区、孤岛和孔隙等 7 种景观类型,具体分类见表 2。由表 2 可知,核心区面积最大,约为 113.94 km²,占生态景观总面积的 57.16%;边缘区位于核心区的外部边界,是核心区与非生态景观类型之间的过渡区域,占生态景观总面积的 19.82%;孔隙位于核心区内部,是核心区与其内部非生态景观类型之间的

过渡区域,占生态景观总面积的 1.43%;孤岛零星分布在研究区域中,面积最小,仅为 0.81 km²,占生态景观总面积的 0.41%。此外,支线、桥接区和环岛区在景观生态格局中均具有连通作用,支线是连接核心区与其他生态景观之间的条带状区域,占生态景观总面积的 10.70%;桥接区是连接各核心区之间的条带状区域,占生态景观总面积的 6.54%;环岛区作为核心区与外界之间的缓冲区,其存在可以减缓外界对核心区的影响,占生态景观总面积的 3.94%。总体来讲,支线、桥接区和环岛区占比相对较小,表明生态要素在核心区与其他生态景观之间的流动和传递受到较大阻碍,连通性较差。

表 2 基于 MSPA 获取的区域景观类型组成统计表
Tab.2 Statistical table of regional landscape type composition obtained based on MSPA

景观类型	面积/km ²	占生态景观面积比例/%	景观类型	面积/km ²	占生态景观面积比例/%
核心区	113.94	57.16	环岛区	7.86	3.94
孤岛	0.81	0.41	桥接区	13.03	6.54
孔隙	2.86	1.43	支线	21.33	10.70
边缘区	39.51	19.82	合计	199.34	100.00

通过 Guidos Toolbox 软件进行 MSPA 分析,得到图 2。由图 2 所示,核心区在中部和东南部呈片状分布,整体性较强,其他地区则表现出零散分布和破碎化的特征。具体来看:在研究区中部的核心区,内部存在多个孔隙,表明该区域非生态景观类型所占面积较多,生态要素在流动和传递过

程中存在一定程度的阻碍;位于东南部的两个核心区之间存在多个弧形孤岛,能够为生态要素流动和传递过程提供短暂的栖息场所,在一定程度上可以作为物种迁徙的中转站,既减少生境斑块之间的距离成本,又间接提高生境斑块之间的连通性。

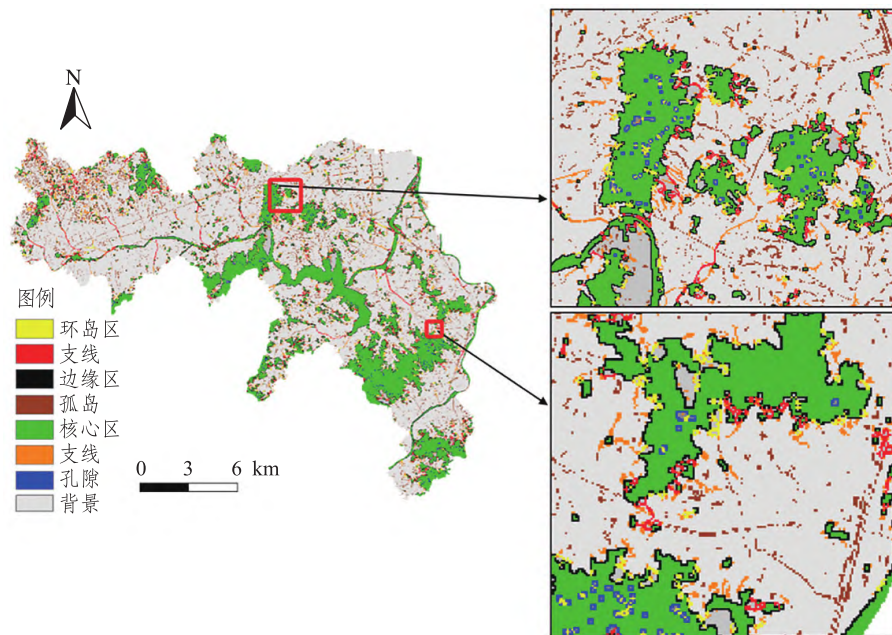


图 2 基于 MSPA 的景观类型空间分布

Fig.2 Spatial distributions of landscape types based on MSPA

2.1.2 生态源地综合识别结果

基于 MSPA 分析结果,共筛选出 13 个面积大于 1 km^2 的核心区斑块作为生态源地(图 3),其面积为 79.56 km^2 ,约占核心区总面积的 69.83%。由于 d_{pc} 值越高的区域生态连通性越好,能够为生态要素流动和交换提供稳定环境,因此通过 Conefor 软件进行景观连通性分析,结果如表 3 所示。根据文献[28]和研究区实际情况,将 $d_{pc} > 0.2$ 的源地列为主要生态源地。由表 3 可见,主要生态源地

的面积为 76.68 km^2 ;而 3 号和 7 号生态源地, $d_{pc} < 0.2$,表明该区域附近生态连通性较差,被列为次要生态源地,面积为 2.88 km^2 。此外,由图 3 可见:生态源地主要分布于研究区的中部和东南部,涵盖银湖省级湿地保护区和狮子山地方级森林公园等生态重点区,土地利用类型以林地和水体为主;而东北部和西部地区以建设用地和耕地为主,受人类活动干扰大,生态源地分布数量少且分散。

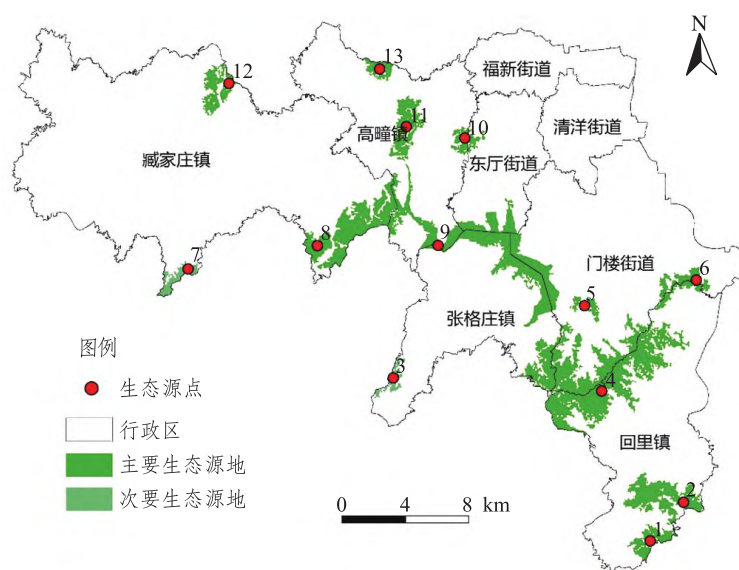


图 3 生态源地的分布情况

Fig.3 Distributions of ecological sources

表 3 景观连通性计算结果
Tab.3 Landscape connectivity calculation results

生态源地类型	编号	面积/km ²	<i>d</i> _{PC}	生态源地类型	编号	面积/km ²	<i>d</i> _{PC}
主要生态源地	1	2.44	0.97	主要生态源地	10	1.71	3.05
	2	6.39	1.95		11	4.05	17.07
	4	26.80	65.93		12	3.02	0.25
	5	1.04	2.85		13	1.44	2.99
	6	2.96	7.48	次要生态源地	3	1.15	0.04
	8	2.07	6.18		7	1.73	0.08
	9	24.76	70.84				

2.2 生态阻力面

由 MSPA 景观要素、土地利用类型、高程、坡度及距河流距离等作为阻力因子,构建生态综合阻力面,各阻力因子及综合阻力面如图 4 所示。由图 4 可见,空间分布整体呈现东北高、南部低的

趋势。高阻力值地区主要集中在清洋街道、福新街道、臧家庄镇等人类活动密集的区域,城镇建设程度高,道路众多,生态稳定性较差;低阻力值地区分布于森林、水体等生态用地附近,城镇建设程度低,受人类干扰小,利于生态要素的流动和传递。

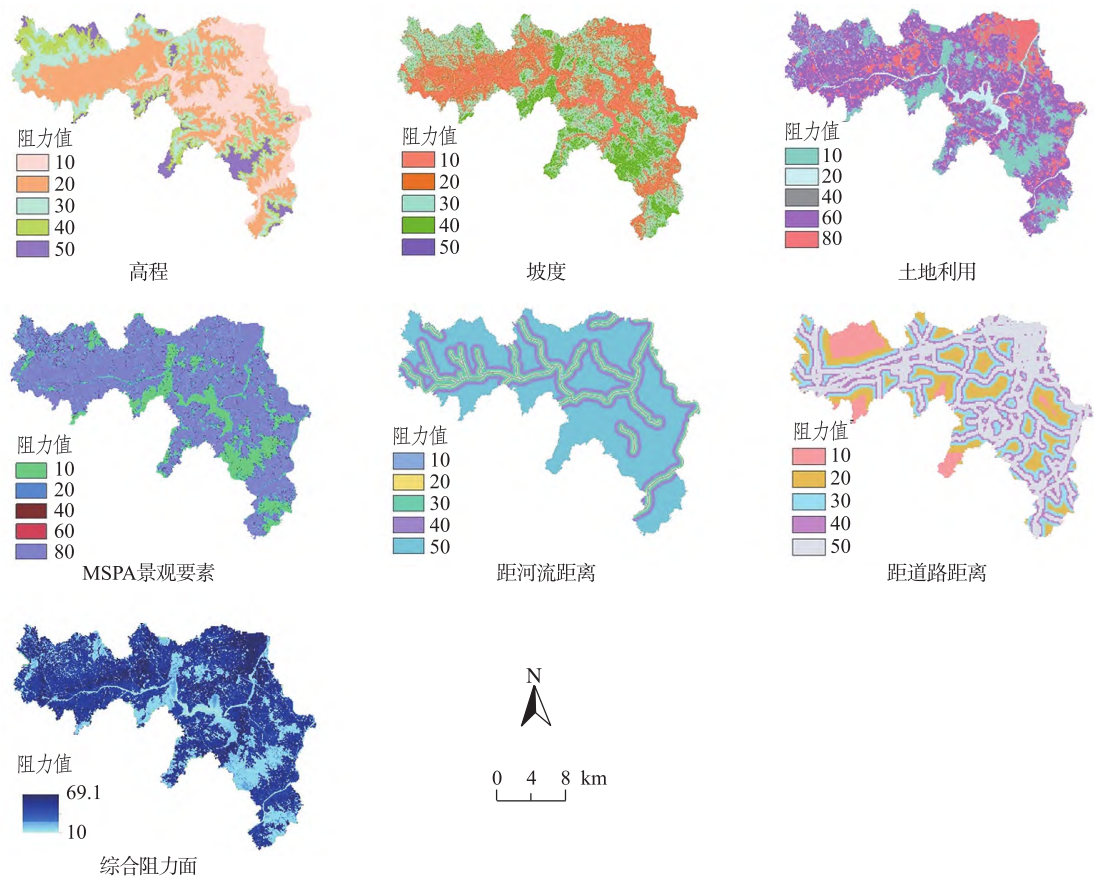


图 4 各阻力因子及综合阻力面的构建

Fig.4 Constructions of each resistance factor and comprehensive resistance surface

2.3 生态廊道

电路理论通过模拟电路中的电流流动,可以识别出最佳的连接点和路径,从而使廊道在生态系统中的连通性和效益最大化。利用 Linkage Mapper 工

具生成最佳廊道,结果如图 5 所示。由图 5 可知,共提取 18 条生态廊道,总长度为 83.06 km。根据通过的电流值大小,将廊道分为主要生态廊道和次要生态廊道^[29],其中,主要生态廊道是 4 条,长度为 46.27 km,次要生态廊道是 14 条,长度为

36.79 km。根据图 5,从分布来看:中部、东南部地区由于生态源地面积广、数量多,廊道短小且密集;东北部和西北部地区由于建设用地及耕地面积分布广泛,受人类活动干扰,廊道较长且稀疏,

易发生断裂风险。此外,廊道多沿河流或小型绿地分布,减小了生物流动过程中的阻力,促进了生态源之间的物质循环。

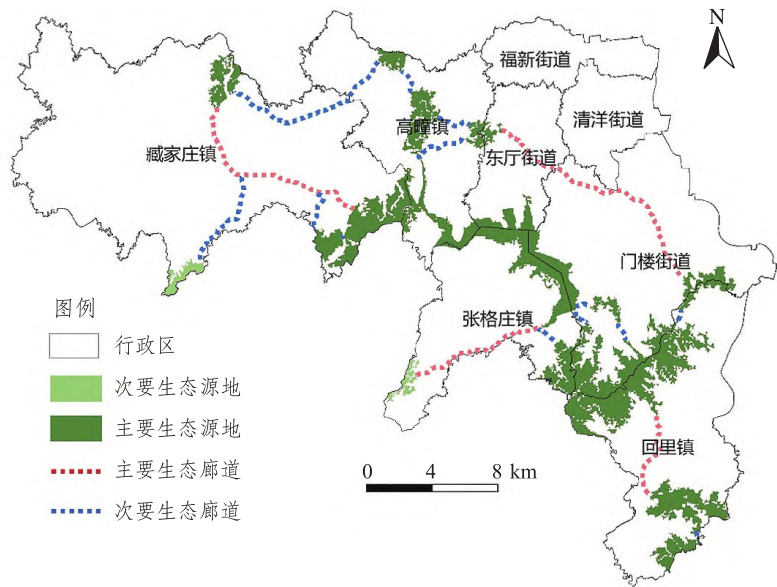


图 5 生态廊道的分布情况
Fig.5 Distributions of ecological corridors

2.4 关键生态节点

生态“夹点”是生态网络内生物迁移和景观连接的重要节点,是生态改善的重点区域。本研究通过 Linkage Mapper 工具共确定 52 处生态夹点(图 6)。由图 6 可知:这些生态夹点主要分布在河流附近,生态流通性高,形成夹点概率较大,

可以通过一定的基于生态保护的景观进行提升,丰富生态网络的景观类型;从土地利用类型来看,生态夹点集中在水体或林地附近,生态阻力值低,周边多被建设用地包裹。由此可见,生态夹点在承担生态功能的同时,也遭受人类活动的干扰,需对夹点区域进行优先保护与治理。

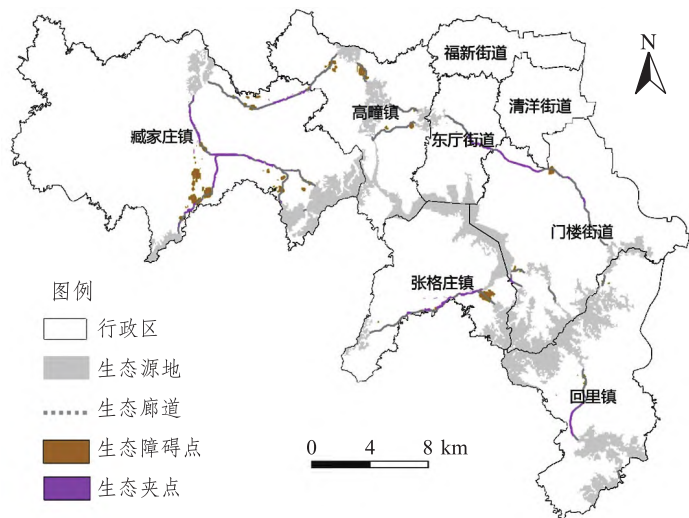


图 6 生态夹点与生态障碍点分布
Fig.6 Distributions of ecological pinch points and ecological barrier points

通过 Barrier Mapper 工具识别生态“障碍点”,共确定 31 处生态障碍点,见图 6。由图 6 可见:从空间分布来看,这些障碍点主要分布在臧家庄镇,几乎都分布在廊道内部;从土地利用类型来看,基本为耕地和建设用地。与生态“夹点”不同,生态“障碍点”呈点状、块状分布,区域分布不连续,呈现破碎化现象。因此,这些地区生态阻力值较高,受人类活动干扰较大,对这些区域进行重点修复可极大提升区域的连通性。

2.5 生态安全格局构建

综合生态源地、生态廊道和关键生态节点分布情况,形成“一核、一带、三区、多廊、多源、多点”的整体空间格局,见图 7。“一核”是指银湖省级自然保护区生态核心,拥有丰富的动植物资源,是众多鸟类和鱼类的栖息地,在保护过程中应适当建立缓冲区,加大对周围地区的风险识别力度

和保护能力;由银湖生态核心向外辐射,连接多个生态源,形成三大生态片区,分别为南部森林保育区、中部湿地保护区、西部生态农业区,这些区域通过从生态核心向外的径向延伸结合在一起,为生物提供了更稳定的生存空间;“一带”是指清洋河生态景观带,由西南向东北流动,贯穿三大生态片区,为生物能量物质流动提供稳定保障;“多廊”是由 Linkage Mapper 提取的 18 条生态廊道,使生态源之间互联互通;“多点”是指通过电路理论提取的 52 处生态“夹点”和 31 处生态“障碍点”,这些点是生态建设重点区域,具有投资少、效率高等特点。总之,要有针对性地保护和恢复这些地区,有效改善廊道连通性,提升生物迁移的效率^[30],使纵横分布的廊道和多个生态源的复杂网络能够修复破碎的生态基质,提升福山区生态系统的稳定性^[31]。

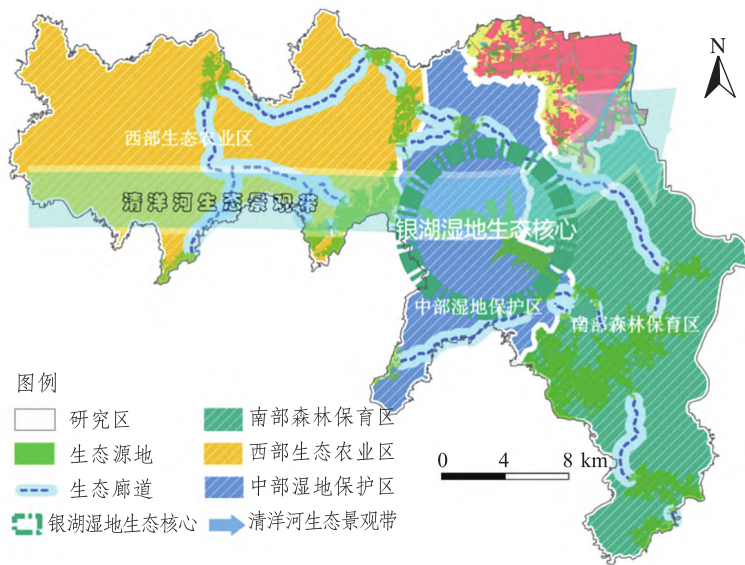


图 7 福山区生态安全格局

Fig.7 Ecological security pattern in Fushan District

3 讨论

生态安全格局的构建不仅能够维护区域内物种迁移和物质能量流动的稳定性,而且可以满足经济发展所需要的生态系统服务^[32],生态源地的识别、生态阻力面的构建和生态廊道的提取是生态安全格局构建过程中的关键环节。

生态源地通常是各种野生动植物的栖息地和

繁殖场所,在维护生态系统的稳定功能、提供生态服务、保护生物多样性以及促进可持续发展等方面发挥着不可替代的作用。基于 MSPA 和 Conefor 的生态源地识别方法,考虑了研究区域生态要素破碎化和斑块连通性对区域生态系统产生的影响,增加了源地选择的科学性。

生态阻力面反映了地理空间上各种因素对生物群落分布、迁移和交流的阻碍程度,本研究在构建阻力面时,除了考虑地形起伏和土地利用类型

外,引入了 MSPA 景观因素。核心区作为生物栖息和繁殖的关键区域,能够提供丰富的资源,具有较低的阻力值,对物种种群稳定性至关重要;边缘区作为核心区与其他景观类型的过渡地带,尽管其环境较不稳定,但仍具备较高的物种多样性和生态连接功能,阻力值较高;桥接区和支线区域则承担连接不同景观片段的功能,有助于生物的迁移与基因流动,促进生态系统的连通性与健康。通过量化这些景观因素的影响,可以更精确地制定生物迁移的管理措施,增强生态系统的健康和稳定。

生态廊道是连接多个生态系统或生物群落的线性地带,在促进生物多样性流动和维持生态系统健康中发挥重要作用。本研究在 MSPA-Conefor-MCR 传统生态网络分析的基础上结合电路理论,基于电子随机游走的特性,以电流强弱模拟物种流动,通过电流值分析识别生态廊道、“夹点”和“障碍点”等空间特征,从而设置生态修复区,这样可以有效降低在生态安全格局构建方面的主观性,为生态修复工作提供更具体的指导。

生态阻力面的构建描述了物种在源地之间的迁徙过程中必须克服的障碍,对构建景观生态模式有重大影响。本研究在阻力因子的选择和权重设置上依赖于以往的研究,这使得方法中可能存在一定的主观性,未来的研究需引入更加科学、标准的量化方法;为进一步提升研究的广泛性和应用价值,未来会考虑将福山区的生态网络与烟台市整体的生态网络进行多尺度比较与分析,以探讨不同空间尺度上生态网络的相互关系和嵌套性。

4 结论

本文以烟台市福山区为研究区,基于 MSPA 和 Conefor 分析识别生态源地,综合 MSPA 景观因素、土地利用类型、距道路距离、距水体距离、高程和坡度等因子构建生态阻力面,并在此基础上通过电路理论模拟电子随机游走的特性识别生态廊道、生态“夹点”以及“障碍点”等生态要素,综合构建生态安全格局,得到以下主要结论。

1) 共识别 13 个生态源地,面积为 79.56 km²,占研究区总面积的 11.28%。其中,包含 11 个主要生态源地和 2 个次要生态源地,面积分别为 76.68、

2.88 km²。

2) 共提取 18 条生态廊道,总长度为 83.06 km。其中,主要生态廊道是 4 条,长度为 46.27 km,次要生态廊道是 14 条,长度为 36.79 km,主要分布在中部和南部地区,能够有效连接各生态源地,提高物种迁移的通道效率。

3) 利用电路理论共识别出 83 处生态节点,其中生态夹点是 52 处,生态障碍点是 31 处。对这些关键节点的保护和修复措施可以优化区域生态网络,提高生态稳定性。

4) 结合源地、廊道与节点的分布情况,综合构建了“一核、一带、三区、多廊、多源、多点”的生态安全格局,为区域生态网络构建及国土开发提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李果,王百田.区域生态修复的空间规划方法探讨[J].水土保持研究,2007(6):284-288.
- [2] 王晓峰,朱梦娜,张欣蓉,等.基于“源地—阻力—廊道”的三江源区生态安全格局构建[J].生态学报,2024,44(11):4609-4623.
- [3] 徐彩瑶,崔铭烨,王宁,等.浙江省生态保护修复优先区识别[J].生态学报,2024,44(8):3223-3240.
- [4] PENG J, YANG Y, LIU Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781-790.
- [5] 李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].生态学报,2024,44(6):2284-2294.
- [6] 肖卫东,渠立权,舒帮荣,等.基于 MSPA 和 InVEST 模型的淮河源生态网络构建[J].国土资源科技管理,2023,40(2):84-96.
- [7] XU A K, HU M J, SHI J, et al. Construction and optimization of ecological network in inland river basin based on circuit theory, complex network and ecological sensitivity: a case study of Gansu section of Heihe River Basin[J]. Ecological Modelling, 2024, 488: 110578.
- [8] AVON C, BERGES L. Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances[J]. Landscape Ecology, 2016, 31: 1551-1565.
- [9] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.

- [10] 史芳宁,刘世梁,安毅,等.基于生态网络的山水林田湖草生物多样性保护研究:以广西左右江为例[J].生态学报,2019,39(23):8930-8938.
- [11] 卢泓杏,赵宇鸾.基于生态安全格局的岩溶山地国土空间生态修复关键区识别:以贵州省关岭县为例[J].中国岩溶,2024,43(2):349-363.
- [12] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784.
- [13] 张立坤,李令军,赵文慧,等.基于形态空间格局分析方法和最小累积阻力模型的北京市平原区造林工程生态格局分析[J].中国环境监测,2023,39(S1):7-18.
- [14] WANG Y, ZHANG L, SONG Y H. Study on the construction of the ecological security pattern of the Lancang River Basin (Yunnan section) based on INVEST-MSPA-circuit theory[J]. Sustainability, 2022, 15(1):477.
- [15] 杨学龙,叶秀英,赵小敏,等.基于MSPA与MCR的生态廊道构建及优化研究:以南昌市新建区为例[J].地域研究与开发,2023,42(3):85-91.
- [16] 汪沁,於冉,储昭君,等.基于生态评价与电路理论的生态安全格局构建及关键区域识别:以安徽省为例[J].水土保持通报,2023,43(6):209-216.
- [17] 方莹,王静,黄隆杨,等.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[J].自然资源学报,2020,35(1):190-203.
- [18] 程研,关颖慧,吴秀芹.基于土地利用变化的喀斯特断陷盆地景观格局演变与生态安全评价[J].生态学报,2023,43(22):9471-9485.
- [19] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4):456-459.
- [20] IWANOWSKI M. Morphological classification of binary image pixels[J]. Machine Graphics and Vision, 2009, 18(2):155-173.
- [21] 许忠洋,王琤,顾彤,等.基于生态网络的生态修复关键区识别:以延安市为例[J].干旱区地理,2024,47(6):1073-1083.
- [22] 李华,郑育桃,黄荷,等.基于MSPA和MCR模型的庐山市生态网络构建[J].中南林业科技大学学报,2024,44(2):98-107.
- [23] XU X, WANG S Y, RONG W Z. Construction of ecological network in Suzhou based on the PLUS and MSPA models[J]. Ecological Indicators, 2023, 154:110740.
- [24] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(3):95-102.
- [25] HUO J G, SHI Z Q, ZHU W B, et al. Construction and optimization of an ecological network in Zhengzhou Metropolitan Area, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(13):8066.
- [26] 樊凡,田国行,刘贺,等.郑州市国土空间生态修复的关键区域识别[J].水土保持通报,2024,44(2):267-276.
- [27] 阚恒,丁冠乔,郭杰,等.基于生态安全格局分析的国土空间生态修复关键区域识别:以环太湖城市群为例[J].应用生态学报,2024,35(8):2217-2227.
- [28] 薛明月,吴孟泉,郑龙啸,等.基于电路理论的县域生态安全格局构建:以山东省栖霞市为例[J].生态学杂志,2024,43(10):3223-3232.
- [29] 黄丽萍,向芳芳,陈荣清.基于生态安全格局的县域国土空间生态保护修复关键区域识别:以抚州市宜黄县为例[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1334-1344.
- [30] 周燕,刘梦瑶,禹佳宁,等.基于生境网络构建优化的生物多样性保护规划途径研究[J].中国园林,2024,40(5):111-117.
- [31] 张海铃,叶长盛,胡梦姗.基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略[J].水土保持研究,2023,30(2):393-402.
- [32] 丁康,王嘉,于淼,等.邯郸市矿业废弃地的生态修复关键区识别:基于生态功能与空间的重要性[J].应用生态学报,2024,35(6):1671-1680.

Construction of Ecological Security Pattern Based on MSPA and Circuit Theory: a Case Study of Fushan District, Yantai City

CHEN Gang¹, WU Mengquan¹, WANG Qiang², ZHENG Xueqin³, XUE Mingyue⁴, LIU Longxing¹,
LIU Bowen¹, LÜ Jinyi¹, TANG Yijie¹

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China;

2.Natural Resources Bureau of Fushan District, Yantai City, Yantai 265500, China;

3.Yantai Zhengsheng Land and Real Estate Asset Appraisal Co., Ltd., Yantai 264000, China;

4.Beihai Disaster Forecasting and Mitigation Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: The rapid urbanization has led to the encroachment of ecological spaces such as forests and grasslands, which exacerbates the habitat fragmentation. By establishing a rational ecological security pattern, the significant conflict between land use and ecological development can be alleviated during the rapid urbanization process. Taking Fushan District in Yantai City as a case study, ecological source areas were identified based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and landscape connectivity methods. MSPA landscape elements, land use types, elevation, slope, and distance to rivers were selected as resistance factors to construct the ecological resistance surface. Ecological corridors, ecological “pinch points”, and ecological “barrier points” were identified by using circuit theory, and an ecological security pattern coordinated with urban development was constructed. The main results are as follows. 1) A total of 13 ecological source areas are identified, which covers an area of 79.56 km² and accounts for 11.28% of the total study area. Among these, 11 primary ecological source areas with an area of 76.68 km², and 2 secondary ecological source areas covering 2.88 km², are identified. 2) 18 ecological corridors with a total length of 83.06 km are extracted, which includes 4 primary ecological corridors with 46.27 km in length and 14 secondary ecological corridors with 36.79 km in length. 3) A total of 83 ecological nodes are selected, which are composed of 52 ecological “pinch points” and 31 ecological “barrier points”. Based on the distributions of source areas, corridors, and nodes, an ecological security pattern of “one core, one belt, three zones, multiple corridors, multiple sources, and multiple points” is constructed to provide a scientific basis for regional ecological restoration and land development.

Keywords: MSPA; landscape connectivity; circuit theory; ecological security pattern