

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1002

基于 MSPA 和电路理论的海湾村域绿色基础设施网络构建

——以宁波市环蟹钳港区域为例

傅雯清^{1,2}, 黄颖颖^{1,2}, 周浩³, 马静武^{2,3}, 马仁锋^{1,2*}, 李加林^{1,2}

(1. 宁波大学 陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211; 3. 温州市国土整治中心, 浙江 温州 325027)

摘要: 生态环境的健康和稳定是乡村振兴和可持续发展的重要支撑, 海湾乡村因其特殊的地理位置和生态环境, 对绿色基础设施的需求尤为迫切。构建绿色基础设施网络能够有效促进区域之间生态流动, 加强海湾村域的生态韧性。选取宁波市象山县环蟹钳港区域为研究区, 结合形态学空间格局分析方法和景观连通性评价识别生态源地, 利用最小累积阻力模型建立综合生态阻力面, 并基于电路理论提取连接廊道, 综合构建绿色基础设施网络。结果表明: (1) 环蟹钳港区域生态源地总面积为 73.86 km², 其中有 16 个一级生态源地, 4 个二级生态源地, 以林地为主; (2) 综合生态阻力整体较高, 高阻力区集中于中部、南部及东南部, 受农渔产业与文旅游乐融合的复杂影响, 面临污染与过度开发问题, 低阻力区主要位于研究区东北部及东部, 以林地、果蔬苗木和康体养生基地为主; (3) 共识别出 39 条生态廊道, 总长 70.37 km, 其中有 35 条重要生态廊道, 4 条一般生态廊道。研究结果对于提升环蟹钳港区域的生境质量具有突出的现实意义, 可为海湾乡村绿色基础设施网络构建提供参考。

关键词: 绿色基础设施网络; 形态学空间格局分析; 最小累积阻力模型; 电路理论; 海湾村域

中图分类号: K921

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 04-0077-09

乡村是生态涵养的主体区, 生态是乡村最大的发展优势, 山水林田湖草沙是构建生态经济体系的重要支撑^[1]。近年来, 乡村振兴战略的推进为乡村经济的发展带来了新机遇, 但是城镇化进程的加快不可避免地导致了生态环境恶化以及区域景观格局脆弱性增强等问题。绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI) 被认为是维护区域生态安全格局、支撑生态文明建设的重要途径。绿色基础设施是由森林、农田、生物栖息地、湿地等自然区域及其他绿色开放空间组成的相互连通的自然生命支撑系统, 其为城镇及居民提供可持续的生态服务功能^[2-4]。绿色基础设施在改善人居环境^[5]、实现生态

系统服务供需平衡^[6]、构建生态安全格局^[7]、推动可持续发展和建设生态文明^[8]等生态环境方面发挥着重要作用。GI 网络是由网络中心 (hub) 和连接廊道 (link) 共同构成的网络体系^[9]。国内外学者主要借助形态学空间格局分析 (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA) 方法进行网络构建^[10-11], 分析网络结构特征以及时空格局的演变过程^[12-13]。MSPA 方法具有可操作性强、数据需求量大、数据处理高效、分析结果可视化、分析结果解释性强等优势^[14-15]。最小累积阻力 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 模型以阻力面权重为基础, 生成最小成本路径, 识别潜在生态廊道^[16],

收稿日期: 2024-10-16

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市“科技创新 2025”重大专项 (2022Z181)

第一作者: 傅雯清, 硕士研究生, 主要研究方向为城市地理与区域规划。E-mail: 2574481340@qq.com

*通信作者: 马仁锋, 博导/教授, 主要研究方向为经济地理学与陆海国土空间统筹治理。E-mail: marenfeng@nbu.edu.cn

其优势在于所需数据量小、可解释性强、分析结果可视化^[17]。电路理论基于随机运动理论,将电路和运动生态学联系起来,研究表明,不同景观要素对于物种在不同生态源地间进行基因交流的阻力是不同的^[18]。Linkage Mapper 以电路理论为基础,通过邻接关系和距离数据识别并连接相邻的生态源地,构建区域性的生态源地网络;然后计算阻力面上各栅格到生态源地的成本加权距离,并将数据与生态源地进行叠加,找出生态源地间累积成本最小的路径,即潜在的生态廊道^[19]。

宁波市象山县坐落于东海之滨,位于长三角地区南缘,是典型的丘陵海岛县,三面环海,两港相拥,拥有发达的海洋产业、得天独厚的港口条件和丰富的渔业资源。蟹钳港作为我国东部沿海狭长形、淤泥质半封闭海湾的典型性代表,其地理特征和生态环境具有显著的海湾区域特色。随着城镇化进程持续推进,乡村生态环境恶化、资源枯竭、生态服务功能减弱等问题突出,亟须寻找优化乡村生态空间格局的途径^[20]。环蟹钳港区域海湾生态系统受人类活动影响显著,对其进行深入研究有助于揭示人类活动对海湾生态系统的影响机制,为海湾生态系统的保护和修复提供科学依据,对于推动海洋科学的发展、促进区域经济的可持续发展具有重要意义。本文以宁波市象山县环蟹钳港区域为例,运用 MSPA 方法识别网络中心,运用 MCR 模型构建生态阻力面,基于电路理论提取潜在的生态廊道,构建海湾乡村 GI 网络,以期环蟹钳港区域绿色基础设施网络的科学构建提供理论支撑,对其他海湾乡村的生态文明建设具有借鉴意义。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

环蟹钳港区域(29°16'N—29°26'N, 121°42'E—121°55'E)位于浙江省宁波市象山县中部地区,地处象山半岛内港片区,由茅洋乡、泗洲头镇、新桥镇三个乡镇构成,总面积为 237 km²。蟹钳港主体岸线呈“几”字形分布,形成了独特的海湾地貌景观。全域山形秀丽,滩涂广阔,田园宜人,岸线优美,具有典型的“山海相依、田林相望”的海湾风光,景观独特,形态丰富,是极具潮隐气质的山海渔乡片区。

三乡镇产业以农业、渔业、花木业、林业等第一产业为主,农渔养殖、果树种植、民宿旅游和影视娱乐等乡村产业兴旺发达,海洋、民俗、影视和红色多元文化在此交融,非物质文化遗产底蕴深厚。新桥镇围绕影视城发展民宿、文娱产业初见成效;茅洋乡乡村旅游及民宿产业基础雄厚;泗洲头镇文旅民宿及农渔景观趋向融合发展。然而,在经济发展的同时,开山造田、围垦养殖、旅游开发和垃圾排放等人为活动持续威胁环蟹钳港区域的生态环境,出现了环港山体破损严重、海岸水域污染加剧、自然岸线不断减少等一系列问题,对该区域可持续发展形成巨大障碍。

1.2 数据来源与处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m;植被 NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的 MOD13A3 产品影像,空间分辨率为 1 km;DEM 高程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。

使用 ArcGIS 10.8.1 软件对土地利用数据进行预处理,裁剪得到研究区土地覆盖数据。结合研究区实际情况和研究目的,将环蟹钳港区域土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地和海洋 7 类(图 1)。

2 研究方法

2.1 基于 MSPA 的景观格局分析

形态学空间格局分析法是由 Soille 等学者提出的一种基于数学形态学原理的栅格图像分类方法,与传统生态理论的粗提取方式不同的是,该方法基于腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等数学形态学原理识别和分割二值栅格图像,可以快速识别并精确分辨出景观的类型与结构。本文基于研究区的土地利用分类数据,在 ArcGIS 10.8.1 中提取林地作为前景数据(赋值为 2),耕地、草地、水域、建设用地、未利用土地和海洋作为背景数据(赋值为 1)。在 Guidos Toolbox 3.0 中采用八领域图像细化分析法对二值栅格数据进行形态学空间格局分析,得到核心区(Core)、孤岛(Islet)、孔隙(Perforation)、边缘(Edge)、桥接区(Bridge)、环道区(Loop)、支线(Branch) 7 种景观类型。

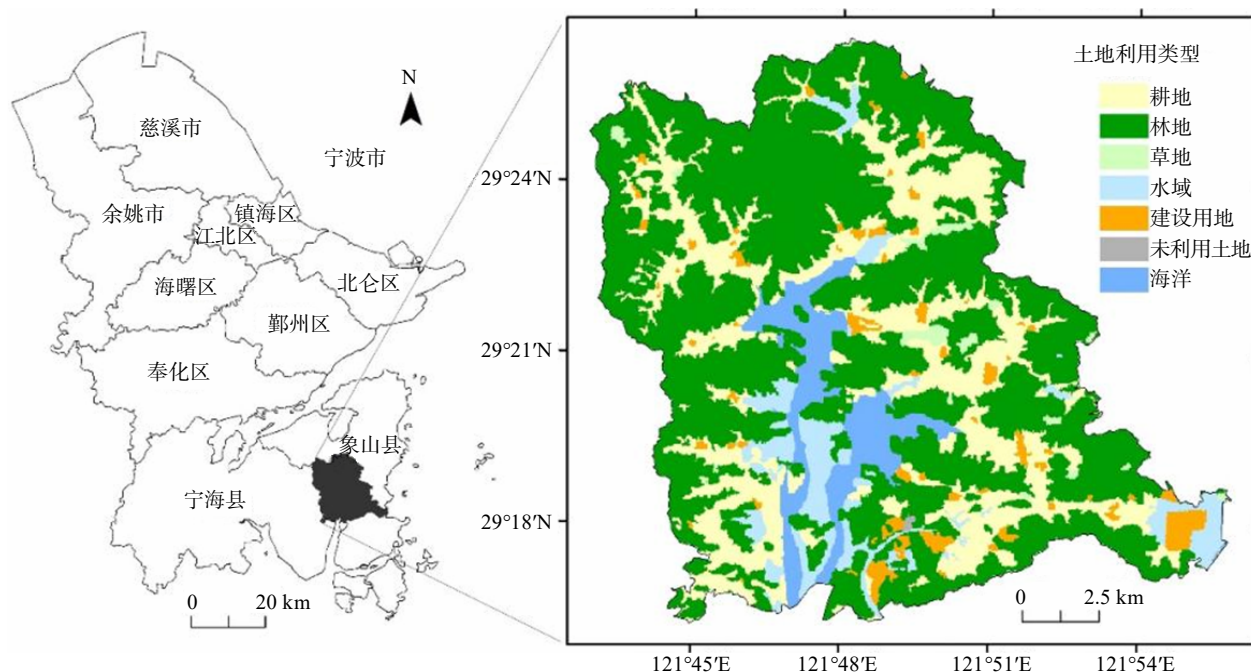


图1 研究区区位及土地利用现状

2.2 基于景观连通性评价的生态源地识别

景观连通性作为衡量生态系统中不同空间单元间连续性的重要指标^[21],反映了景观中各种要素(如栖息地、生境、走廊等)对于物质、能量和生物的传输、迁移以及相互联系的程度。景观连通性评价常采用一系列指标来量化不同景观要素之间的连通性强弱,包括计算整体连通性指数(IIC)、可能连通性指数(PC)和斑块重要性指数(dPC)等^[22],3种指标的计算公式^[23]分别为

$$\text{IIC: } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + l_{ij}}}{A_L^2}$$

$$\text{PC: } C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}}{A_L^2}$$

$$\text{dPC: } d = \frac{C - C_{\text{remove}}}{C}$$

式中: n 为区域内斑块总数; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 和 j 的面积; l_{ij} 为 i 和 j 之间的连接数量; A_L 为景观总面积; P_{ij} 为 i 和 j 之间全部路径概率的乘积最大值; C_{remove} 为斑块剔除后的可能连通性指数。

本文基于 Conefor 2.6 软件,将核心区斑块连通距离阈值设置为 500 m,连通概率设置为 0.5,选用斑块重要性指数对具有关键连通作用的生态

源地进行景观连通性评价,提取重要生态源地和一般生态源地。

2.3 生态阻力面构建

考虑到景观单元的类型组成、空间布局及其所承载的生态系统功能对斑块生态功能阻力的直接影响^[24],需要综合评价不同景观类型的生态功能价值、景观格局等多种指标,对不同景观类型赋予相应的阻力值,构建生态阻力面^[25]。

最小累积阻力模型是基于 GIS 技术计算生态源物种在不同景观中迁移时所需克服的总阻力模型,具体计算公式为

$$R = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$

式中: D_{ij} 表示从源点 j 到空间单元 i 的空间距离; R_i 表示空间单元 i 的阻力系数。

本文以 MSPA 与景观连通性分析所得的重要生态源地为基础,选取植被覆盖度(NDVI)、坡度、高程(DEM)、土地利用类型、距建设用地距离、距道路距离和距水系距离为阻力因子构建阻力面体系^[26-29],利用 ArcGIS 10.8.1 软件分别对各项数据进行重分类处理,并通过专家打分法确定阻力因子权重和阻力值(表1),基于 Spatial Analyst 分析功能,构建研究区最小累积阻力面。

表 1 阻力因子等级及权重

阻力因子	权重	分级	阻力值
NDVI	0.2	<0.2	5
		0.2~<0.4	4
		0.4~<0.6	3
		0.6~0.8	2
		>0.8	1
坡度/(°)	0.1	<5	1
		5~<10	2
		10~<15	3
		15~30	4
		>30	5
高程/m	0.1	<50	1
		50~<100	2
		100~<200	3
		200~300	4
		>300	5
土地利用类型	0.2	林地	1
		草地、耕地	2
		未利用地	3
		水体	4
		建设用地	5
距建设用地距离/m	0.15	<500	5
		500~<1 000	4
		1 000~<1 500	3
		1 500~2 000	2
		>2 000	1
距道路距离/m	0.15	<500	5
		500~<1 000	4
		1 000~<1 500	3
		1 500~2 000	2
		>2 000	1
距水系距离/m	0.1	<500	5
		500~<1 000	4
		1 000~<1 500	3
		1 500~2 000	2
		>2 000	1

2.4 生态廊道提取

生态廊道是不同生态源地间物种迁移的重要通道。本文以电路理论为基础，这一理论基于随机运动理论将电路和运动生态学联系起来，旨在识别生态廊道。研究发现，物种在不同生态源地间进行交流时，不同景观要素作为电导体所呈现出的移动

阻力存在显著差异。具体而言，阻力较低的景观类型有利于物种间的频繁交流；相反，阻力较高的景观类型则会在某种程度上阻碍物种的运动或者基因交流。Linkage Mapper 是一款基于 ArcGIS 平台的工具，用于创建环境连接图，其能够利用 MCR 阻力面数据来分析和模拟物种的迁移、扩散和种群遗传等过程，进而生成生态廊道、生态夹点和生态障碍点。其优势在于无须手动剔除重复冗余的廊道，即可通过设定廊道长度阈值等操作获取含有一定宽度信息的生态廊道。

3 结果与分析

3.1 景观格局分析

研究区形态学空间格局如图 2 所示，统计结果见表 2。基于 MSPA 的环蟹钳港区域总面积为 237 km²，7 种景观类型的总面积为 140.20 km²，占研究区总面积 59.13%。其中核心区是前景中面积最大的生态斑块，为 75.09 km²，占前景总面积 53.56%，占研究区总面积 31.67%。研究区北部的核心区呈面积较大的连片分布，景观类型主要为林地，以泗洲头镇的金家岙村、张岙村、象山林场二分场、东联村片区和茅洋乡的南冲村、溪东村、徐家岙村、兴坑村片区为主，整体性较好，物质循环和能量流动顺畅；景观破碎度较低，景观结构较稳定，能够为生物提供较大的生态栖息地。研究区东南部的核心区呈零散分布，景观破碎度较高，整体性不强。边缘是核心区与其外部非生态景观之间的过渡空间，具有缓冲功能，是核心区的保护屏障，面积为 37.64 km²，仅次于核心区，占前景总面积 26.85%，占研究区总面积 15.88%。边缘区面积较大，表明研究区内存在斑块破碎化现象，需要增加核心区斑块间的连通性，促进物质交换与能量流通，发挥生态边缘效应。孔隙是核心区与其内部非生态景观之间的过渡空间，也具有边缘效应，面积为 1.36 km²，占前景总面积 0.97%，占研究区总面积 0.57%。孤岛是景观中独立存在的小型自然斑块，是区域生态斑块破碎的体现，零星分布于研究区，面积为 1.80 km²，占前景总面积 1.27%，占研究区总面积 0.76%，可以作为斑块间生物能量流动和物种迁徙的暂栖地，扮演踏脚石角色，增强生态斑块间的连通性^[21]。支线、桥接区、环道区分别是

连接核心区及外围景观、连接相邻核心区、连接同一核心区内部的廊道。其中,支线是核心区与其他区域的连通廊道,面积为 12.08 km²,占前景总面积 8.62%,占研究区总面积 5.09%;桥接区作为生态网络的结构性廊道,是维护物种多样性的重要条件,面积为 7.70 km²,占前景总面积 5.50%,占研究区总面积 3.25%,可作为防护绿地的潜在选点,提供一定缓冲空间;环道区为核心区内部的物种和物质提供迁移和流动通道,面积为 4.53 km²,占前景总面积 3.23%,占研究区总面积 1.91%。

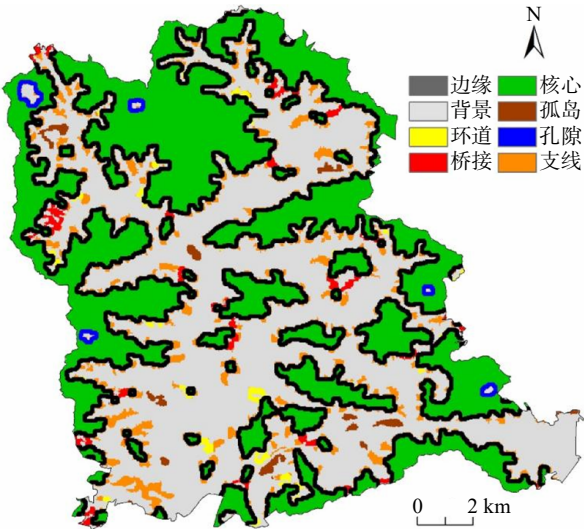


图2 研究区形态学空间格局

表2 形态学空间格局分类统计

景观类型	面积/km ²	占生态景观面积比例/%	占研究区面积比例/%
核心区	75.09	53.56	31.67
孤岛	1.80	1.27	0.76
孔隙	1.36	0.97	0.57
边缘	37.64	26.85	15.88
桥接区	7.70	5.50	3.25
环道区	4.53	3.23	1.91
支线	12.08	8.62	5.09
总计	140.20	100.00	59.13

3.2 生态源地识别分析

基于 MSPA 结果,提取核心区面积较大的 20 个斑块。基于 Conefor 软件对 20 个核心区斑块进行景观连通性分析,根据连通性重要程度对核心区斑块进行排序并划分为两个等级:一级核心源地(dPC 大于等于 1)和二级核心源地(dPC 小于 1)。

生态源地空间分布如图 3 所示,计算结果见表 3。

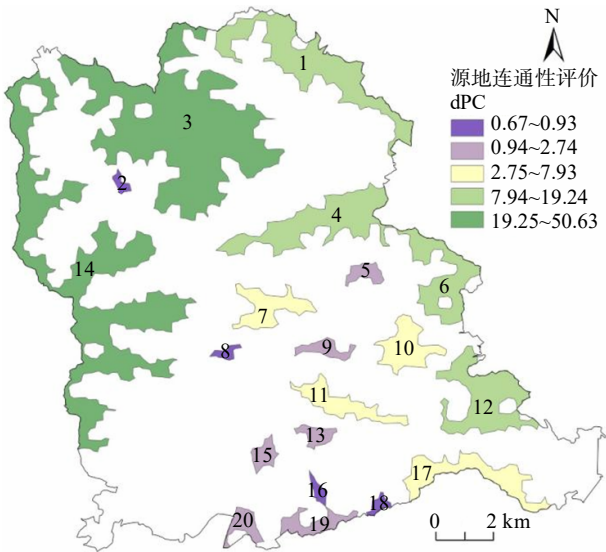


图3 研究区生态源地空间分布

表3 景观连通性计算结果

编号	面积/km ²	dPC
1	7.00	18.51
2	0.24	0.67
3	20.25	50.63
4	5.54	19.24
5	0.64	1.60
6	3.52	12.91
7	2.08	5.27
8	0.26	0.67
9	0.72	1.83
10	2.27	6.47
11	2.04	4.96
12	4.77	13.08
13	0.63	1.51
14	17.44	41.82
15	0.66	1.35
16	0.30	0.69
17	3.23	7.93
18	0.30	0.93
19	1.15	2.74
20	0.82	1.64

由图 3 和表 3 可知,环蟹钳港区域连通性较好的核心斑块主要集中在西北部 and 西部泗洲头镇片区,表明这些源地生态价值高,以林地为主,有利于物种的扩散与保护;茅洋乡东北部和南部、新桥

镇东北部和东部次之,土地类型也以林地为主;研究区南部和东南部连通性较差,景观破碎较为严重,主要为新桥镇的耕地和建设用地,受人为干扰严重。总体而言,研究区南北源地景观连通性呈两极分化状态,生物的能量流动及物质循环难以持续,需要在中部建立踏脚石以加强南北的连接;在未来乡村发展过程中,对于重要程度较大的源地3和源地14要加以保护,以确保其生态功能的完整性和稳定性,对于重要程度一般的源地,则需要通过构建全面连贯的生态网络来提升其生态价值。

3.3 生态阻力面构建分析

本文在 ArcGIS 中依据各阻力评价因子及其权重,逐一建立相应的阻力因子图层,再利用栅格计算器功能对各阻力因子进行加权求和,从而在确保研究区内独特的生态特征基础上,得到综合生态阻力面。

研究区各项阻力因子统计和综合阻力面如图4所示。研究区生态阻力值整体较高,阻力高值区主要分布在中部、南部及东南部,阻力低值区主要分布在东北部及东部。中部两镇一乡交界处的海湾区域作为生态敏感地带,能够维系丰富的生物多样性,调节气候系统,支撑人类经济活动,近年来农渔产业与文旅游乐的深度融合导致该区域建设用地呈现出无序分布和破碎化现象,对生态要素流动和传递造成了强烈的干扰;南部环港区域作为连接陆地与海洋的重要生态走廊,对整个生态系统的稳

定性和健康发挥着关键调控作用,然而随着水产养殖、旅游民宿和影视文化产业的发展,环港区域面临着水体污染、垃圾堆积以及对海洋资源过度开发等问题,不仅破坏了海域生态环境,还阻碍了生态要素的流通;东南部的七林湾村由于水域和建设用地占比较大,生态空间被进一步压缩,对生态系统的流动有着显著阻碍。相较之下,阻力低值区主要分布在研究区的东北部及东部,主要位于茅洋乡和新桥镇,在泗洲头镇的上马岙村也有少量分布,以林地、果蔬苗木基地和康养养生基地为主,对生态系统的流动性影响较小,为生物多样性保护和生态平衡维持提供了有利条件。

3.4 生态廊道提取分析

生态廊道作为生态单元联系和沟通的桥梁,具有连接破碎生境、保护生物多样性的功能。基于电路理论提取生态廊道,利用 Linkage Mapper 的 Build Network and Map Linkages 工具处理得到 39 条生态廊道,通过成本加权距离与最小成本路径之比,对生态廊道连通性进行分级,比值越小则廊道连通性越强。据此识别出 35 条重要生态廊道,4 条一般生态廊道。研究区内生态廊道总长为 70.37 km,如图5所示。从廊道分布情况看,新桥镇生态源地之间的廊道较为密集,有多条廊道经过,其中潜在廊道主要分布在韩升村、海台村、兴海村和崇垅村;茅洋乡廊道较为孤立,与其他两镇之间无廊道连接,且仅有两条廊道。

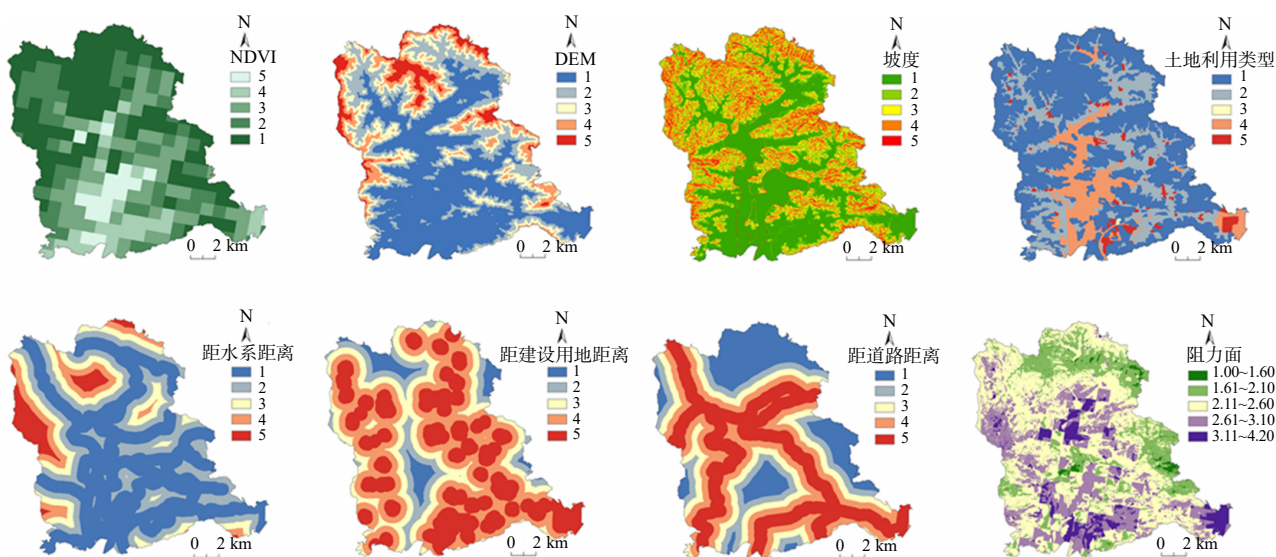


图4 各项阻力因子统计和综合生态阻力面

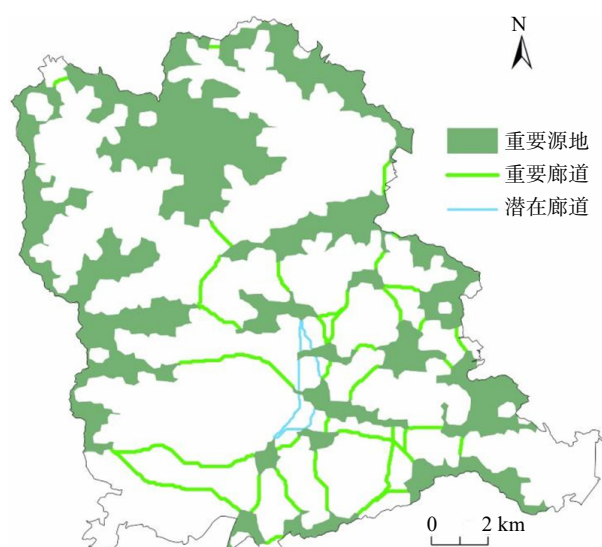


图5 研究区绿色基础设施网络构建

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以宁波市象山县环蟹钳港区域为研究对象,基于土地利用类型数据、植被 NDVI 数据和 DEM 高程数据,结合 MSPA 方法和景观连通性指数识别生态源地,通过最小累积阻力模型建立综合生态阻力面,最后基于电路理论提取廊道,综合构建绿色基础设施网络,主要结论如下:

(1) 通过 MSPA 得到环蟹钳港区域景观类型总面积为 140.20 km^2 ,构成要素以林地为主,其中核心区面积为 75.09 km^2 ,占研究区总面积 31.67%。北部核心区呈面积较大的连片分布,景观结构较稳定;东南部核心区呈零散分布,景观破碎度较高。通过景观连通性分析提取一级生态源地 16 个,面积约为 72.76 km^2 ,主要集中在西北部和西部泗洲头镇片区;二级生态源地 4 个,面积约为 1.10 km^2 ,生态源地总面积为 73.86 km^2 。中部和南部缺少重要生态源地,导致研究区生态廊道分布不均衡。

(2) 基于 MCR 模型建立生态阻力面,综合生态阻力值整体较高。高阻力区集中在中部、南部及东南部,其中中部海湾农渔产业与文旅游乐的融合导致建设用地呈现无序与破碎化状态,严重干扰了生态要素的流动与传递;南部环港区域因产业活动频繁,引发了水体污染、垃圾堆积及海洋资源的过度开发,破坏了海域生态平衡;东南部七林湾村也以水域和建设用地为主导,对生态系统的流动性

构成了阻碍。而低阻力区主要位于研究区东北部及东部,以林地、果蔬苗木和康体养生基地为主,对生态流动性影响较小。

(3) 基于电路理论,利用 Linkage Mapper 工具共识别出 39 条生态廊道,总长为 70.37 km ,其中有重要生态廊道 35 条,一般生态廊道 4 条。新桥镇生态源地之间的廊道较为密集,有多条廊道经过,其中潜在廊道主要分布在韩升村、海台村、兴海村和崇垵村;茅洋乡廊道较为孤立,与其他两镇之间无廊道连接,且仅有两条廊道。

4.2 讨论

本文从空间聚集形态的角度出发,以连通性为主要依据,综合应用 MSPA 方法、MCR 模型和电路理论,识别生态源地和廊道,由此构建环蟹钳港区域绿色基础设施网络。海湾村域绿色基础设施网络构建过程面临着诸多难点,主要集中在生态敏感性与保护需求、自然灾害抵御能力、水资源管理三个方面。海湾村域通常拥有独特的生态系统,如红树林、滨海湿地等,构建绿色基础设施网络时须特别注重生态保护,避免对敏感生态系统的破坏。海湾村域易受台风、海啸等自然灾害的影响。构建绿色基础设施网络时,须考虑如何增强乡村地区的自然灾害抵御能力。海湾村域水资源丰富,但易受海水入侵、水质污染等问题困扰。构建绿色基础设施网络时,须注重水资源管理。因此,与内陆区域相比,海湾村域绿色基础设施网络构建须综合考虑生态系统类型、自然灾害类型、水资源管理等因素,注重生态保护与恢复,提高抵御自然灾害的能力,实现水资源的可持续利用,促进乡村地区的可持续发展。

为进一步优化环蟹钳港区域绿色基础设施空间分布格局并充分提高生态系统服务能力,进而有效发挥其生态效益,本文提出如下建议:

(1) 加强生态源地保护和建设。环蟹钳港区域是典型的建设空间紧约束片区,为保证区域内生态源地的完整性和稳定性,须加强土地利用管控,严格限制非必要的建设活动;构建完善的生态保护机制,实现对生态边界的有效管理和监控。同时,考虑到重要性和脆弱程度的差异,在重要生态源地设立相关管理机构,明确保护目标和措施,建立监测和评估体系;在一般生态源地实行可持续开发模

式,力求开发活动对当地生态系统的影响最小化。

(2) 提升生态廊道的结构连通性。明确生态廊道的走向、范围和重要节点,同时考虑与周边自然和人文景观的协调融合,确保其在乡村绿色基础设施网络中发挥有效的连接作用。在生态廊道沿线进行必要的基础设施建设,如步道、自行车道、观景台等,以提升其使用便捷性和吸引力,同时结合环蟹钳港区域自然特色和文化元素,打造具有地方特色的生态廊道,增强连通性。对生态廊道沿线的自然生态系统进行恢复和保护,包括栖息地的恢复、植被保护及水体净化等措施,以维护生态系统完整性,促进物种多样性和生物迁徙。

本文构建了环蟹钳港区域绿色基础设施网络,对于提升环蟹钳港区域的生境质量具有突出的现实意义,研究结果可以为海湾乡村绿色基础设施网络构建提供参考。未来研究可进一步关注以下两个方面:首先,本文仅对绿色基础设施网络的初步构建进行了探讨,未来的研究工作应当着重于有针对性地制定与完善生态环境保护与修复策略,并充分考虑其在不同地区、不同生态系统类型和不同尺度下的适用性,以期更好地推动绿色基础设施的发展与运用;其次,本文仅基于截面数据对当前研究区进行了初步探索,未来研究可考虑进行多维度、多尺度、多时序的横向与纵向对比分析,从而更全面地揭示研究区绿色基础设施网络的动态特征与发展规律,为制定更具针对性的发展策略提供有效的支持与指导。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 乡村振兴战略规划(2018—2022 年)[R/OL]. [2024-08-16]. https://www.gov.cn/zhengce/2018-09/26/content_5325534.htm.
- [2] 栾博,柴民伟,王鑫. 绿色基础设施研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(15):5246-5261.
- [3] 贾行飞,戴菲. 我国绿色基础设施研究进展综述[J]. 风景园林, 2015, 22(8):118-124.
- [4] BENEDICT M A, MCMAHON E. Green infrastructure: linking landscapes and communities[M]. Washington, DC: Island Press, 2006.
- [5] 张晓鹏. 社区尺度的绿色基础设施的近自然设计方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [6] 王云才,申佳可,彭震伟,等. 适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化[J]. 中国园林, 2018, 34(10): 45-49.
- [7] 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[J]. 地理研究, 2017, 36(3):407-419.
- [8] 谷树忠,胡咏君,周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学, 2013, 35(1):2-13.
- [9] BENEDICT M A, MCMAHON E. Green infrastructure: linking landscapes and communities[M]. Washington, DC: Island Press, 2006.
- [10] 丁金华,孙琦,钱晶. 基于 MSPA-InVEST 模型的水网乡村绿色基础设施网络构建研究:以吴江东北片区为例[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6):183-191.
- [11] 倪雨淳,殷敏,魏家星. 基于 MSPA 模型的丘陵乡村绿色基础设施构建[J]. 中国城市林业, 2023, 21(3):139-145.
- [12] 马银,郑敏睿,郑新奇,等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析:以京津冀城市群为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16):6785-6797.
- [13] 陈炯臻,季翔,葛希辰,等. 基于 MSPA 和空间句法的县域绿色基础设施网络时空格局演变分析:以徐州市睢宁县为例[J]. 现代城市研究, 2022, 37(10):101-107.
- [14] 姚瑶,余俏,夏超,等. 基于 MSPA 的山地城市生境网络构建与优化研究[C]//人民城市,规划赋能:2022 中国城市规划年会论文集(15 山地城乡规划), 2023:139-148.
- [15] WANG J X, XU C, PAULEIT S, et al. Spatial patterns of urban green infrastructure for equity: a novel exploration [J]. Journal of cleaner production, 2019, 238:117858.
- [16] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. Pattern recognition letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [17] 秦子博,玄锦,黄柳菁,等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的海岛型城市生态网络构建:以福建省平潭岛为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):303-311.
- [18] 刘佳. 基于电路理论的南京市主城区绿色基础设施格局优化研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [19] 费勇强,黄爱民,罗义,等. 基于 Maxent 模型与电路理论的大熊猫栖息地内废弃矿山生态修复研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2):622-632.
- [20] 费文君,赵梦琴. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络构建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3):50-56.
- [21] 岳邦瑞. 图解景观生态规划设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [22] 刘小琼,何鹏飞,韩继财,等. 长江经济带生态安全格局演化及多情景模拟预测[J]. 经济地理, 2023, 43(12): 192-203.
- [23] 陈竹安,况达,危小建,等. 基于 MSPA 与 MCR 模型

- 的余江县生态网络构建[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8):1199-1207.
- [24] 郭宏斌, 黄义雄, 叶功富, 等. 厦门城市生态功能网络评价及其优化研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1):71-79.
- [25] 古璠, 黄义雄, 陈传明, 等. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3):1013-1020.
- [26] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6):1608-1616.
- [27] 张雯, 郑天, 刘永超, 等. 基于电路理论的浙江省生态保护修复关键区域识别[J]. 生态环境学报, 2024, 33(9):1482-1494.
- [28] 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.
- [29] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 等. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10):3367-3376.

Construction of GI network in bay village area based on MSPA and circuit theory: a case study of Xieqian Harbor area in Xiangshan, Ningbo

FU Wenqing^{1,2}, HUANG Yingying^{1,2}, ZHOU Hao³, MA Jingwu^{2,3}, MA Renfeng^{1,2}, LI Jialin^{1,2}

(1.Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research,

Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Donghai Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3.Territorial Management Center of Wenzhou Municipal Natural Resources and Planning Bureau, Wenzhou 325027, China)

Abstract: The health and stability of the ecological environment is an important support for rural revitalization and sustainable development. Bay villages, due to their special geographical location and ecological environment, have a particularly urgent need for green infrastructure. The construction of GI (green infrastructure) network can effectively promote ecological flow between regions and strengthen the ecological resilience of bay villages. Taking Xieqian Harbor area in Xiangshan county, Ningbo city as the research area, the ecological source was identified by using MSPA (morphological spatial pattern analysis) method and landscape connectivity evaluation, and the comprehensive ecological resistance surface was established by using minimum cumulative resistance (MCR) model, followed by extracting the connecting corridors based on circuit theory to comprehensively construct the GI network. The results show that: (1) The total area of the ecological source was 73.86 km², including 16 first-level ecological sources and 4 second-level ecological sources, mainly forest land; (2) The comprehensive ecological resistance value was relatively high, and the high resistance area was concentrated in the central, southern and southeastern parts of the study area, which was affected by complex integration of agriculture, fishing industry, as well as culture, tourism and leisure, which in turn was faced with pollution and overdevelopment problems. The low resistance area was mainly located in the northeastern and eastern parts of the study area, which were mainly consisted of forest land, fruit and vegetable seedlings and health and fitness bases. (3) A total of 39 ecological corridors were identified, with a total length being 70.37 km, including 35 important ecological corridors and 4 general ecological corridors. The research results have outstanding practical significance for improving the habitat quality of Xieqian Harbor area, and can provide reference for the construction of GI network in bay villages.

Keywords: green infrastructure networks; morphological spatial pattern analysis; minimum cumulative resistance model; circuit theory; bay villages

(责任编辑 韩 超)