

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.052.

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[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 303-311.

QIN Zibo, XUAN Jin, HUANG Liujing, et al. Ecological Network Construction of Sea-Island City Based on MSPA and MCR Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 303-311.

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

秦子博, 玄锦, 黄柳菁, 刘兴诏

(福建农林大学 园林学院, 福州 350000)

摘要:为解决快速发展导致的生态环境问题,探究平衡海岛型城市发展与生态保护的有效途径,以福建省平潭岛为研究区,采用形态学空间格局分析模型(MSPA)、最小累积阻力模型(MCR)和重力模型构建平潭岛生态网络,通过构建踏脚石斑块对生态网络进行优化。结果表明:(1)初步构建的生态网络包括20个重要生态源地和190条生态廊道,重要生态源地主要分布在西部和东北部,生态廊道在中部和南部地区分布较少。(2)阻力较大的地区主要分布在平潭县城及研究区南部和中部。这些地区几乎都是建成区,很大程度上阻碍了生态系统的流动,导致研究区生态网络体系不完整。(3)增加了8个踏脚石斑块作为补充重要生态源地,同时也新增加188条生态廊道,以实现生态网络的优化。(4)优化后的生态网络连通性提高,网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)和网络连通率指数(γ 指数)分别增加了1.99, 4.1, 3.33。研究能够阐明构建踏脚石在海岛型城市生态网络完善中的实践路径,并为平潭岛未来生态规划及城市健康发展提供有效的理论支撑,同时也为其他海岛型城市的生态保护和优化提供参考。

关键词:生态网络;生态源地;形态学空间格局分析(MSPA);最小累积阻力模型(MCR);平潭岛

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0303-09

Ecological Network Construction of Sea-Island City Based on MSPA and MCR Model —A Case Study of Pingtan Island in Fujian Province

QIN Zibo, XUAN Jin, HUANG Liujing, LIU Xingzhao

(College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In order to solve the ecological environment problems caused by the rapid development, an effective way to balance the development of sea-island city and ecological protection was explored. Taking Pingtan Island in Fujian Province as the study area, we used morphological spatial pattern analysis model (MSPA), minimum cumulative resistance model (MCR) and gravity model to construct the ecological network of Pingtan Island, and the ecological network was optimized by constructing stepping stone patches. The results showed that: (1) the ecological network consisted of 20 important ecological sources and 190 ecological corridors; the important ecological sources mainly distributed in the west and northeast, while the ecological corridors less distributed in the central and southern regions; (2) the areas with greater resistance mainly distributed in Pingtan County and the southern and central part of the research area; these areas were almost all built-up areas, which hindered the flow of ecosystem to a large extent, leading to the incomplete ecological network system in the study area; (3) therefore, 8 stepping stone patches were added to supplement the important ecological sources, and 188 ecological corridors were added to optimize the ecological network;

收稿日期:2022-01-19

修回日期:2022-02-19

资助项目:国家自然科学基金面上项目(32071578);福建省自然科学基金面上项目(2021J01133);福建农林大学学科交叉融合项目(YSYL-xkjc-8)

第一作者:秦子博(1999—),男,河南洛阳人,硕士,研究方向为景观规划与生态环境保护。E-mail:1275960790@qq.com

通信作者:黄柳菁(1985—),女,广东肇庆人,博士,副教授,主要从事生态系统服务/功能评价研究。E-mail:huanglj@fafu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

(4) after optimization, the connectivity of ecological network was improved, and the network closure index (α index), network connectivity index (β index) and network connectivity index (γ index) were increased by 1.99, 4, and 1.33, respectively. This study can clarify the practice path of building stepping stone in the improvement of ecological network of sea-island cities, provide effective theoretical support for the future ecological planning and urban healthy development of Pingtan Island, and also provide reference for the ecological protection and optimization of other sea-island cities.

Keywords: ecological network; ecological source; morphological spatial pattern analysis; minimum cumulative resistance model; Pingtan Island

快速城市化能够促进社会经济的发展,可以满足人们的精神和物质需求,但是在经济快速发展过程中,自然环境会遭到不同程度的破坏^[1]。具有较强生态功能的土地类型逐渐被建设用地所侵蚀,导致生态斑块破碎化严重,生态廊道断裂,生态系统的完整性以及生态网络的整体性都会受到干扰,进而导致城市生态系统服务功能以及生物多样性下降^[2-3],在《平潭综合试验区总体规划(2018—2035年)》中提到,要在主岛规划“一主,四辅”城市组团,在城市组团规划建设过程中,城市中的土地被高强度利用开发,导致平潭岛中部生态源地消失。通过构建生态网络能够有效地提高生态斑块间的连通性,完善生态网络,最大程度地发挥生态系统服务功能。

从20世纪70年代起,生态网络研究逐渐被国外学者关注,在模型构建、景观规划与生态环境保护等方面进行了较多的研究和探索^[4-5]。景观生态学理论和方法成为生态空间网络格局的研究热点,因其能够发现不同生态系统的相似性和差异性,所以展现出了较好的应用潜力^[6],基于GIS最小路径方法被国内外学者广泛采用,因其考虑了景观的地理信息和生物体的行为特征,能够直观反映景观格局与水平生态过程^[7-10]。我国对生态网络构建研究起步较晚,但也有不同学者在不同领域进行研究,如市域空间^[4,11]和乡村景观^[12-13]等。在现有多数研究中,研究者根据生态服务价值等生态指标体系选择源地^[12,14],存在一定的主观性。该研究在确定生态源地时,利用形态学空间格局分析法和基于Conefor软件计算景观连接指数,确定出生态源地,更具有科学性。针对平潭岛生态网络研究^[15-16],只是完成了研究区内的潜在生态网络构建,没有增设生态踏脚石斑块,完善生态网络。该研究将会在潜在生态网络基础上,增设生态踏脚石斑块,进一步完善生态网络,并提出重点保护的生态区域和生态廊道线。在研究方法上,形态学空间格局分析(Morphological spatial pattern analysis, MSPA)基于图形学原理,结合栅格运算方式在像元级尺度识

别生态源地^[17-20]。生态廊道提取通常基于土地利用类型、坡度、高程等因素赋予权重,并构建综合阻力面及最小累积阻力面,表征了地表景观类型对生态流动的阻力影响。最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型通过阻力面的权重生成最佳路径,用于提取潜在生态廊道,但是局限在于不能识别斑块间的作用力,区分廊道级别^[4]。利用重力模型可以识别出斑块间的作用力,后来也被应用于城市经济、区域环境间相互作用结构^[21]研究。

本文以福建省平潭岛为研究区,根据遥感影像解译土地利用类型,采用MSPA方法识别并提取出核心区景观类型。根据景观指数中的整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)、可能连通性指数(Probability of Connectivity, PC)、斑块重要性指数(可能连通性指数变化量 the Delta values for Probability index of Connectivity, DPC)这3个指标对核心区斑块进行定量评价,从而选取研究区内的重要生态源地。通过MCR模型构建生态廊道,并基于重力模型对廊道等级进行划分,通过构建踏脚石完善生态网络,有效增加网络连通性和完整性,为平潭岛的生态规划与发展提供理论支撑,对其他海岛型城市生态网络研究具有借鉴意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

平潭岛位于福州市东南部,东濒台湾海峡,西隔海坛海峡与长乐、福清相望,南北长30 km,东西宽约19 km,面积274.33 km²,大约位于北纬25°15′—25°45′,东经119°32′—120°10′,平潭岛属亚热带常绿阔叶林植被地带。地势南、北高、中部低,最高点君山海拔438.7 m。随着平潭综合试验区的设立,平潭迎来了快速发展时期。然而,经济在大发展的同时,房地产开发、国际旅游度假区的建设、道路修建等人为活动不断威胁着平潭岛的生态环境^[22],出现了原生植被遭破坏、沙滩岸线后退、海岸严重侵蚀、沿海防护林

破坏等生态环境问题^[23]。亟需制定措施解决以上问题,致力于修复平潭岛生态环境,完善生态网络体系。

1.2 数据来源及处理

本文数据主要采用 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数字产品 2020 年 6 月 13 日分辨率为 30 m 的遥感影像,云量小于 5%(http://www.gscloud.cn/search), 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数字高程数据(http://www.gscloud.cn/search)和平潭岛行政边界 shp 数据。基于 ENVI 软件,通过辐射定标、裁剪、大气校正进行数据预处理,然后运用支持向量机法进行监督分类,提取出林地、耕地、草地、湿地、建设用地、交通用地、其他用地等,通过 ArcGIS 10.5 软件完成研究区土地利用类型图的制作(图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 MSPA 景观格局分析 形态学空间格局分析法(MSPA)不同于传统生态理论的粗提取方式,而是通过数学方法对栅格图像进行识别、分割^[24],并解译研究区地类要素,从而得出像元层面的景观生态斑块。根据平潭岛土地利用分类数据,在 ArcGIS 10.5 中提取林地、湿地、草地作为 MSPA 分析前景数据并赋值 2,其余用地作为背景数据并赋值 1,将二值化栅格数据导入 Guidos Toolbox 分析软件,采用八邻域图

像细化分析方法进行 MSPA 分析,得到 7 种景观类型^[25](表 1),分别为核心区(Core)、桥接区(Bridge)、边缘区(Edge)、环道区(Loop)、孔隙(Perforation)、支线(Branch)、岛状斑块(Islet),并且对分析结果的面积及占前景和研究区面积的比例进行统计。提取核心区作为景观连通性指数分析的源数据。

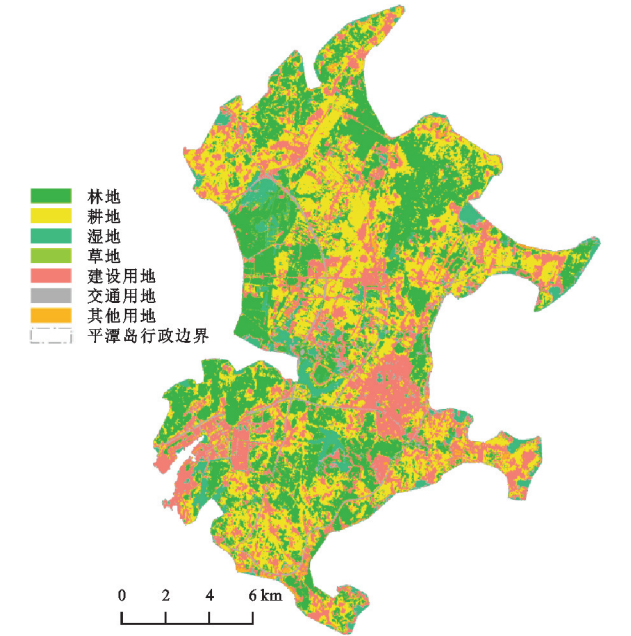


图 1 平潭岛 2020 年土地利用类型

表 1 MSPA 的景观类型及生态学意义

景观类型	生态学意义
核心区	前景像元中较大的生境斑块,可以为物种提供较大的栖息地,对生物多样性的保护具有重要意义,是生态网络中的生态源地
桥接区	连通核心区的狭长区域,代表生态网络中斑块连接的廊道,对生物迁移和景观连接具有重要的意义
边缘区	是核心区和主要非绿色景观区域之间的过渡区域
环道区	连接同一核心区的廊道,是同一核心区内物种迁移的捷径
孔隙	核心区和非绿色景观斑块之间的过渡区域,即内部斑块边缘
支线	只有一端与边缘区、桥接区、环道区或者孔隙相连的区域
岛状斑块	彼此不相连的孤立、破碎的小斑块,斑块之间的连接度比较低,内部物质、能量交流和传递的可能性比较小

1.3.2 景观连通性指数法识别重要生态源地 景观连通性是指景观要素在空间单元之间的相互连续性,能够量化表征某要素在生态源地之间物质扩散和迁移的难易程度^[4]。常用的景观连通性指数包括整体连通性指数(IIC,公式 1)、可能连通性指数(PC,公式 2)、斑块重要性指数(dPC,公式 3)^[26]。

$$IIC=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\frac{a_ia_j}{1+nl_{ij}}}{A_L^2}$$
 (1)

$$PC=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^na_ia_jP_{ij}^*}{A_L^2}$$
 (2)

$$dPC=\frac{PC-PC_{remove}}{PC}$$
 (3)

式中: n 表示区域内斑块总数; a_i 为斑块 i 的面积; a_j 为斑块 j 的面积; P_{ij}^* 为斑块 i 与斑块 j 之间全部路径概率的乘积最大值; A_L 为研究区景观的总面积;IIC 表示斑块整体连通性指数;PC 表示斑块可能连通性指数;dPC 表示斑块的重要性; PC_{remove} 表示在景观中除去某要素后景观可能连接度指数^[1,4]。

本研究参考文献^[27-28],基于 conefor 软件将核心区斑块间连通距离设为 500 m,连通概率设为 0.5,通过 conefor 软件计算得到斑块重要性指数(dPC)值,由大到小进行排序并编号,提取重要生态源地和一般生态源地,在 ArcGIS 10.5 中将重要生态源地转为生态源点,为构建生态网络做基础。

1.3.3 基于最小累计阻力模型构建潜在生态网络

最小累计阻力模型(MCR)是在 GIS 的基础上,以生态源地作为出发点,通过建立阻力面计算生态源地之间通过阻力值不同的景观克服阻力所做的功^[29-30],得到生物迁徙交流避免外界干扰的最佳路径^[11]。最小阻力模型公式如下:

$$MCR=f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij}R_i)$$
 (4)

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

根据 MSPA 分析得到的重要生态源地结合阻力面体系开展基于 MCR 模型的生态网络构建,在阻力面体系构建过程中,该研究选取高程、坡度、土地利用类型三大阻力因子,在 ArcGIS 10.5 中利用重分类工具分别对平潭岛 DEM 数据、坡度、土地利用类型重分类,根据专家打分法确定阻力值及权重(表 2),构建高程阻力面、坡度阻力面、土地利用类型阻力面,利用栅格计算器将 3 个阻力面按权重叠加得到综合阻力面,利用 ArcGIS 10.5 中 Cost Distance 工具构建研究区最小累积阻力面。

表 2 阻力因子赋值及权重

阻力因子	分级指标	阻力值	权重
高程/m	<50	1	0.22
	50~150	2	
	150~250	3	
	250~350	4	
	>350	5	
坡度/(°)	<4	1	0.18
	4~8	2	
	8~15	3	
	15~25	4	
	>25	5	
土地利用类型	林地	1	0.6
	草地	2	
	耕地	3	
	湿地	4	
	其他用地	5	
	交通用地	6	
	建设用地	7	

基于 ArcGIS 10.5 软件,使用 Spatial Analyst 模块中的 Cost Distance 工具,得到每个重要生态源地到其他重要生态源地的成本距离和成本回溯链接数据,再使用 Cost Path 工具,得到该源地到其他源地的最小成本路径,从而得到平潭岛范围内的潜在生态廊道。

1.3.4 基于重力模型的重要生态廊道识别 19 世

纪,学者将重力模型引入到地理空间中用于城市系统的相互作用研究,并用于分析城市之间贸易的相互作用以及国家之间贸易交流形式的研究^[4]。本文利用重力模型定量评价源地斑块间的相互作用强度,得到斑块间相互作用矩阵,根据作用力大小来判定潜在生态廊道的相对重要性^[31-33],重力模型公式为:

$$G_{ij}=\frac{N_iN_j}{D_{ij}^2}=\frac{\frac{\ln a_i}{P_i}\frac{\ln a_j}{P_j}}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}}\right)^2}=\frac{L_{\max}^2\ln a_i\ln a_j}{L_{ij}^2P_iP_j}$$
 (5)

式中: G_{ij} 表示斑块 i,j 之间的生态引力; N_i,N_j 表示斑块 i,j 的权重; a_i,a_j 斑块 i,j 的面积; P_i,P_j 表示斑块 i,j 的阻力; L_{ij} 表示斑块 i 到 j 之间廊道的累计阻力; L_{\max} 表示研究区所有廊道中阻力最大值。

基于斑块间的相互作用力矩阵,两源地之间作用力值越大,表明源地之间的联系越紧密,能量传递和物质迁移就越频繁。

1.3.5 生态廊道网络连接度分析 网络连接度能够定量反映研究区生态网络的连接程度^[12],本文利用网络分析法对构建的潜在生态网络结构进行连通性评价,通过计算研究区生态网络优化前后的网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)、网络连通率指数(γ 指数),得到生态网络优化前和优化后网络结构指数,通过对比分析可定量验证生态网络是否得到优化^[14,34],计算公式如下:

$$\alpha=\frac{L-V+1}{2V-5}$$
 (6)

$$\beta=\frac{L}{V}$$
 (7)

$$\gamma=\frac{L}{3(V-2)}$$
 (8)

式中: L 为生态廊道数; V 为生态节点数。

2 结果与分析

2.1 基于 MSPA 的景观格局分析

如图 2 和表 3 所示,基于 MSPA 分析的平潭岛景观类型总面积为 119.10 km²,7 种景观类型的总面积占研究区总面积 42.12%。其中核心区面积为 62.80 km²,占前景总面积 52.73%,占研究区总面积 22.21%,在所有景观类型中面积最大,主要分布在平潭岛东北部、西部以及东南部,东北部和西部成聚集状态,面积较大,稳定性较强,以湖山村、山门村、鱼屿村、君山村、潭水村片区和芦南村、马腿村片区为主。岛状斑块面积为 6.01 km²,占前景总面积 5.04%,占研

究区总面积 2.12%，零散的分布在研究区各处，可以作为生态要素流动的临时栖息地，未来可规划为踏脚石，提高生态斑块间的连通性。其中桥接区面积为 6.78 km²，占前景总面积 5.70%，占研究区总面积 2.40%，作为生态网络中斑块连接的廊道，出现在每个核心区斑块附近，如潭城地面水库、山利村附近。边缘区面积为 26.54 km²，在所有景观类型中居第二，占前景总面积 22.28%，占研究区总面积 9.38%，边缘区面积较大，进一步证明平潭岛内存在斑块破碎化严重现象，需要增加斑块间的连通性，促进生态流动。环道区面积为 6.78 km²，占前景总面积 3.57%，占研究区总面积 1.50%。孔隙面积为 3.08 km²，占前景总面积 2.58%，占研究区总面积 1.09%。支线面积为 9.64 km²，占前景总面积 8.10%，占研究区总面积 3.41%。

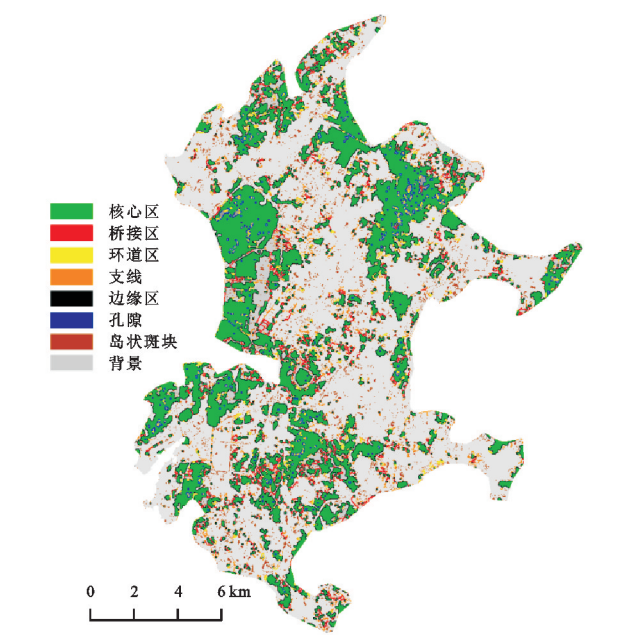


图 2 MSPA 景观分析图

表 3 MSPA 分类统计表

景观类型	面积/km ²	占林地、湿地、草地总面积比例/%	占研究区面积比例/%
核心区	62.80	52.73	22.21
桥接区	6.78	5.70	2.40
环道区	4.25	3.57	1.50
孔隙	3.08	2.58	1.09
边缘区	26.54	22.28	9.38
支线	9.64	8.10	3.41
岛状斑块	6.01	5.04	2.12
总计	119.10	100.00	42.12

2.2 重要生态源地识别与评价分析

基于 Conefor 软件进行景观指数分析，以斑块重要性指数(dPC)为衡量标准，选取 dPC>2.5 的 20 块

核心区斑块为重要生态源地^[36-38](表 4)，其余为一般生态源地。由表 4 和图 3 可知，重要生态源地主要分布在平潭岛东北部、西部、南部区域，都是生态价值较高的土地类型，以林地、湿地为主，但是南北源地较为孤立，距离较远，连通性差，中间区域缺少，比如源地 1 到源地 4,6,7,18,20，即矾屿村与平潭海岛国家森林公园连线为分界线，产生严重的生态流动断面；源地 1 的 dIIC(整体连通性指数变化量 the Delta values for Integral index of Connectivity)和 dPC 最大，分别为 46.44,35.62，面积为 12.18 km²，主要包括君山、二角山、仑山、杨梅山、虎头山、长江澳风力田景区等；源地 2 的 dIIC 和 dPC 分别为 20.96,24.77，面积为 6.22 km²，主要包括平原蛤场苏平路与中山大道围合的区域；其他源地大部分都是以自然林地和湿地为基底，重要程度相差不大，如源地 3 以马腿村大片林地和湿地为主，源地 4 以潭城地面水库为主，源地 11 以南后澳见峰山自然风景区为主。重要程度较大的源地 1 和源地 2 在未来城市发展过程中要加以保护，重要程度相对一般的源地则需要通过构建完整的生态网络增加其生态价值。

表 4 重要生态源地景观连通性指数与面积统计

编号	面积/km ²	d IIC	dPC
1	12.18	46.44	35.62
2	6.22	20.96	24.77
3	2.85	11.76	23.07
4	1.12	10.10	21.68
5	0.58	10.43	20.53
6	1.99	7.52	15.80
7	0.72	5.16	14.64
8	2.91	11.82	12.78
9	1.05	3.69	9.38
10	0.71	3.47	8.15
11	1.83	4.65	5.42
12	1.91	6.20	5.26
13	0.74	4.40	5.20
14	0.14	2.39	4.27
15	0.93	3.00	3.98
16	0.74	2.27	3.39
17	0.10	1.04	2.90
18	0.74	2.56	2.87
19	0.37	0.96	2.73
20	0.61	1.60	2.60

2.3 基于 MCR 的潜在生态廊道构建分析

由研究区综合阻力面(图 4)可知，阻力较小的地区主要分布在研究区西部、北部、东北部，以君山、二角山、杨梅山、羊来山、牛寨山、南寨山等自然山体为

主,阻力较大的地区主要分布在平潭县城、南部的娘官村和红山村、中部的中楼乡等。由图 4 可看出,阻力较大的地区几乎都是建成区,很大程度上阻碍了生态系统的流动,尤其是中部地区,建成区分布散乱,破碎化严重,阻隔了生态信息的流动,对于生态价值较高的一些自然林地可通过设置防护林等加以保护,通过拆除建筑、在中部构建踏脚石等措施,缓解中部的生态断流现象。在 ArcGIS 10.5 软件中,针对 20 块重要生态源地共构建 190 条潜在生态廊道(图 5),从图中可以看出,由于中部重要生态源地较少,导致生

态廊道也较少,造成了生态断流的现象;南部滨海部分生态廊道较少,未能融入研究区整体生态网络,中部和南部地区在未来生态规划中要作为重点建设对象。在三十六脚湖水库和潭城地面水库以及西部的马腿村和芦南村、北部的上攀村和南盘村等生态廊道分布较密集,生态流通性较好,主要原因在于重要生态源地斑块距离较近,流动路径阻力较小,便于流通,这也进一步证明在生态连通性较差的区域,通过构建踏脚石,使得斑块之间的距离缩短,能够促进生态信息的流动。

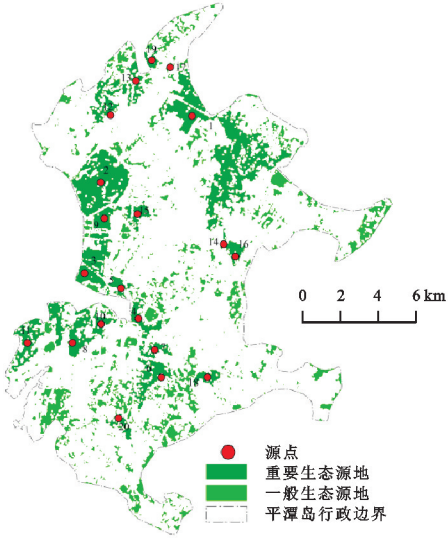


图 3 平潭岛生态源地分布

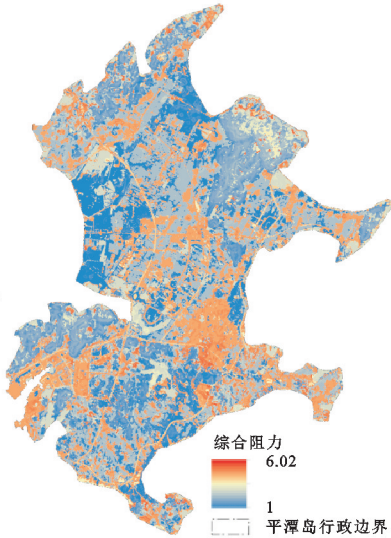


图 4 平潭岛综合阻力面

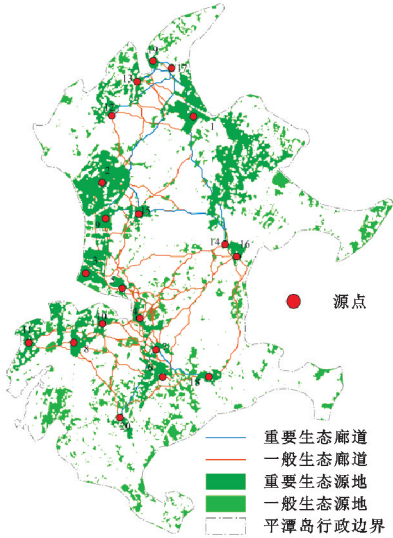


图 5 平潭岛生态源地与生态廊道构建图

2.4 基于重力模型的重要生态廊道提取分析

通过重力模型计算出来的斑块间相互作用力矩阵(表 5)和生态廊道等级图(图 5),提取斑块间相互作用力大于 0.005 为重要廊道,其余为一般廊道,共得到重要生态廊道 13 条,一般生态廊道 177 条。可以看出,平潭岛现存生态网络中北部与南部连通性较差,重要生态廊道分为南北两部分,并且中部区域几乎不存在生态源地。城中土地被高强度利用开发,导致区域内生境斑块破碎化、岛屿化是造成该现象的主要原因^[39]。源地 17(剑湖村山体)和源地 19(烟堆山)之间相互作用力最大,为 0.464 70,两地形成的廊道长度为 1.27 km;源地 14(老孟山)和源地 16(上楼山)之间相互作用力次之,为 0.381 50,两地之间形成的廊道长度为 0.99 km,都是研究区内自然保护林地,表明源地之间的连通性最强,物质流和能量流的迁移更加频繁,在今后的规划中应重点保护。源地 1 和源地 2,3,4,6,7,8,10,11,18,20 之间相互作用力相对较小,说明景观阻力大,生态廊道之间的物质交换能力困难,必将导致物质流和能量流无法迁移,在未来规划建设中,应在景观阻力大的源地之间,增设

踏脚石,发展源地或者拆除相应的建筑设施,增加斑块间的连通性。从图 5 可以看出,在南部滨海部分缺少重要生态源地,只有一些生态价值较低的一般源地,导致最南部不存在生态廊道,进而导致研究区内生态网络不完整,不能够实现研究区内部生态循环和流动。所以中部和南部需要在今后增补生态源地来完善整体网络,如拆除建筑设施改建绿地、增设公园、林地等,加强研究区内部生态联系,促进生态循环,缓解城市发展与环境保护之间的矛盾。

2.5 生态网络优化

在平潭岛生态网络初步构建分析中,通过斑块重要性指数和最小累积阻力模型共提取出的 20 个重要生态源地和 190 条生态廊道,计算得到平潭岛生态网络优化前 α, β, γ 指数分别为 4.89, 9.50, 3.52。结合前期 MSPA 分析得出的核心区斑块,从一般生态源地中选取斑块作为踏脚石,在未来规划建设中进一步提高踏脚石斑块的重要性,通过构建新增生态廊道完善研究区生态网络体系。本文根据一般生态源地重要性程度和位置分布情况^[40],选取 8 处补充重要生态源地作为踏脚石斑块,北部 2 处,中部 2 处,南部 2

处,东部 2 处,结合原有的重要生态源地进行补充计算,得出新增 188 条规划生态廊道(图 6)。优化后研究区内存在 28 个重要生态源地和 378 条生态廊道,

代入公式计算得到平潭岛生态网络优化后 α,β,γ 指数分别为 6.88,13.5,4.85,较优化前生态网络连通性有较大提升,实现了生态网络的优化。

表 5 基于重力模型的生态源地间相互作用矩阵

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.00002	0.00002	0.00001	0.00003	0	0.00002	0	0.00009	0
2		0	0.00018	0.00005	0.00019	0.00002	0.00009	0.00001	0.00272	0
3			0	0.00036	0.00331	0.00008	0.00051	0.00006	0.00336	0
4				0	0.00194	0.00040	0.00415	0.00024	0.00055	0
5					0	0.00029	0.00203	0.00020	0.00268	0
6						0	0.00479	0.00009	0.00017	0.00055
7							0	0.00049	0.00093	0.00401
8								0	0.00012	0.00293
9									0	0.00000
10										0

编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0.00006	0.00034	0.00041	0.00012	0.00007	0.00536	0.00002	0.00053	0.00002
2	0.00001	0.00015	0.00019	0.00053	0.00167	0.00010	0.00122	0.00005	0.00022	0.00006
3	0.00005	0.00011	0.00021	0.00126	0.00197	0.00024	0.00143	0.00025	0.00028	0.00026
4	0.00015	0.00006	0.00013	0.00210	0.00061	0.00044	0.00087	0.00087	0.00017	0.00089
5	0.00016	0.00017	0.00034	0.00324	0.00273	0.00068	0.00231	0.00080	0.00045	0.00080
6	0.00007	0.00003	0.00006	0.00077	0.00019	0.00017	0.00041	0.00288	0.00008	0.00201
7	0.00032	0.00013	0.00027	0.00424	0.00106	0.00098	0.00190	0.00756	0.00038	0.00578
8	0.00053	0.00002	0.00004	0.00047	0.00014	0.00010	0.00031	0.00022	0.00006	0.00050
9	0.00012	0.00064	0.00103	0.00448	0.03129	0.00080	0.00681	0.00052	0.00125	0.00054
10	0.00093	0.00010	0.00023	0.00277	0.00084	0.00059	0.00158	0.00132	0.00032	0.00222
11	0	0.00002	0.00005	0.00048	0.00014	0.00010	0.00036	0.00018	0.00008	0.00034
12		0	0.00395	0.00086	0.00076	0.00016	0.00889	0.00009	0.00250	0.00010
13			0	0.00286	0.00129	0.00053	0.09264	0.00020	0.04113	0.00022
14				0	0.00785	0.38150	0.02581	0.00406	0.00447	0.00245
15					0	0.00135	0.00847	0.00060	0.00155	0.00062
16						0	0.00474	0.00107	0.00084	0.00055
17							0	0.00155	0.46470	0.00153
18								0	0.00030	0.00296
19									0	0.00031
20										0

3 讨论与结论

3.1 讨论

在平潭岛现有研究中^[15-16],还未有通过构建踏脚石斑块完善优化生态网络。该研究通过构建潜在生态网络后,又进一步优化了生态网络,对于平潭岛未来发展具有一定的指引意义。在其他海岛型城市类似研究中^[41-42],通过构建和优化生态网络,大都是为了解决城市在发展中造成的生态环境问题,东山岛和平潭岛都是由于政策导向,加快岛内城市化进程,导致出现生态问题。该研究对海岛型城市生态网络

构建及优化处于探索阶段,还存在以下不足之处:在景观连接度指数分析中,有的距离阈值设置为 1 000 m^[43],有的设置为 500 m^[2,36],在不同类型研究区采用的距离阈值还有待分析;在平潭岛其他类似研究中生态源地选择数量分别为 30 个^[4]、10 个^[3,25],该研究选择的生态源地为 20 个,那么最终得到的生态廊道数量也不相同,生态源地数量的选择未来还需进一步研究;阻力面的构建缺乏对人口迁移、与道路距离等影响因子的考虑,在未来研究需要更加完善。针对海岛型城市,科学的构建生态网络是能够解决面临的生态问题。

3.2 结论

生态网络的建设能够实现城市发展与生态保护同时进行。本研究采用 MSPA 方法提取核心区斑块,进行景观连接度评价识别生态源地,之后利用 MCR 模型识别平潭岛潜在生态廊道,并根据重力模型确定生态廊道的重要程度,最后通过增设踏脚石对生态网络进行优化。结果表明:

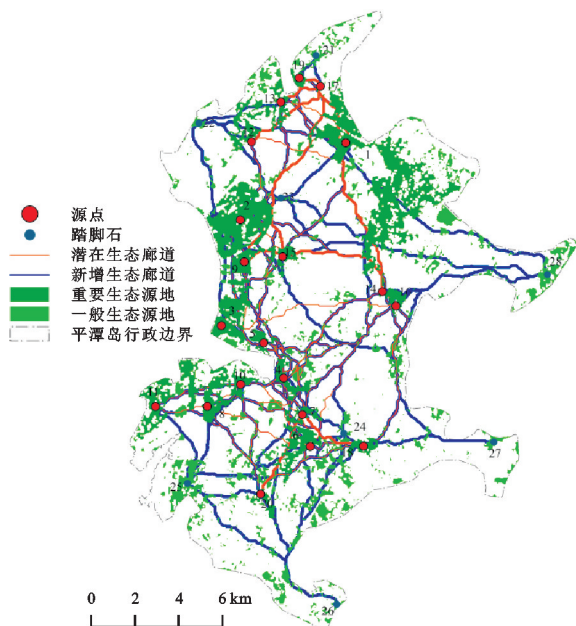


图6 优化后平潭岛生态网络体系

(1) 通过 MSPA 分析得到平潭岛景观类型总面积为 119.10 km²,其中核心区面积为 62.80 km²,占研究区总面积 22.21%,在东北部和西部成聚集状态,面积最大,稳定性较强。通过景观指数分析提取 20 块重要生态源地,以湿地、林地为主,主要分布在研究区西部和东北部,在南部、中部以及东部缺少重要生态源地,致使研究区生态网络体系不完整和生态廊道分布不均衡。

(2) 基于 MCR 模型共构建 190 条潜在生态廊道,在中部几乎都是阻力较大的建成区,很大程度上阻碍了生态系统的流动,导致生态廊道也较少;其中阻力较小的地区主要分布在研究区西部、北部、东北部,生态廊道分布较密集。

(3) 基于重力模型提取重要生态廊道 13 条,但重要生态廊道分为南北两部分,最重要的原因就是中部区域几乎不存在生态源地,无法构成生态廊道。在源地 17(剑湖村山体)和源地 19(烟堆山)之间廊道最为重要,两地都是自然保护林,表明生态价值高的地方,生态流动更加频繁。重要生态廊道更适合生物迁徙,应优先进行保护和建设,避免遭到破坏。

(4) 通过构建踏脚石实现研究区生态网络的优化,共增加 8 个重要生态源地和 188 条生态廊道。优

化后生态网络连通性提高, α 指数、 β 指数和 γ 指数分别增加了 1.99, 4, 1.33。优化了生态网络结构,增加了生态网络体系的完整性,促进平潭岛内生态信息的流动,提升生态系统价值,丰富生物多样性。

参考文献:

- [1] 金贵,吴锋,李兆华,等.快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析[J].生态学报,2017,37(23):8048-8057.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郭家新,胡振琪,李海霞,等.基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建[J].农业机械学报,2021,52(3):275-284.
- [5] Silvia Pili, Pere Serra, Luca Salvati. Landscape and the city: Agro-forest systems, land fragmentation and the ecological network in Rome, Italy[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019,41:230-237.
- [6] Andrea De Montis, Amedeo Ganciu, Matteo Cabras, et al. Comparative ecological network analysis: An application to Italy[J]. Land Use Policy, 2019,81(1):714-724.
- [7] 尹海伟,孔繁花,析毅,等.湖南省城市群生态网络构建与优化[J].生态学报,2011,31(10):2863-2874.
- [8] 王海珍,张利权.基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J].植物生态学报,2005,29(1):144-152.
- [9] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure Assessment: Development of a comprehensive approach to land conservation[J]. Landscape and Urban Planning, 2006,77(1/2):94-110.
- [10] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling [J]. Landscape and Urban Planning, 2010,95(1/2):16-27.
- [11] 刘一丁,何政伟,陈俊华,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究:以南充市为例[J].西南农业学报,2021,34(2):354-363.
- [12] 黄雪飞,吴次芳,游和远,等.基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建[J].农业工程学报,2019,35(10):243-251.
- [13] 郑洋,郝润梅,吴晓光,等.基于 MCR 模型的村庄“三生空间”格局优化研究[J].水土保持研究,2021,28(5):362-367.
- [14] 孔阳,王思元.基于 MSPA 模型的北京市延庆区城乡生态网络构建[J].北京林业大学学报,2020,42(7):113-121.

- [15] 陈鹏,吴剑,傅世锋,等.基于生态网络功能辨识的海坛岛生态保护和修复策略[J].应用海洋学学报,2021,40(1):82-90.
- [16] 高雅玲,黄河,李治慧,等.基于 MSPA 的平潭岛生态网络构建[J].福建农林大学学报:自然科学版,2019,48(5):640-648.
- [17] Santiago Saura, Lucía Pascual-Hortal. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2007,83(2-3):91-103.
- [18] Santiago Saura, Christine Estreguil, Coralie Mouton, et al. Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests(1990—2000) [J]. Ecological Indicators, 2010,11(2):407-416.
- [19] Santiago Saura, Lidón Rubio. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape[J]. Ecography, 2010,33(3):523-537.
- [20] Örjan Bodin, Santiago Saura. Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments[J]. Ecological Modelling, 2010,221(19):2393-2405.
- [21] 王戈,于强, YANG Di,等.基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J].农业机械学报,2019,50(7):258-266,312.
- [22] 李碧珍,张南旭.平潭综合试验区开放开发的四大维度建设探析[J].福建农林大学学报:哲学社会科学版,2012,15(2):19-24.
- [23] 杨小庆,陈淳,曹力玮,等.我国海岛生态减灾修复效果评价指标研究:以平潭岛为例[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会:环境工程技术创新与应用分会场论文集(三),2021:677-681.
- [24] Pierre Soille, Peter Vogt. Morphological segmentation of binary patterns[J]. Pattern Recognition Letters, 2009,30(4):456-459.
- [25] 许峰,尹海伟,孔繁花,等.基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J].生态学报,2015,35(19):6425-6434.
- [26] 黄河,平潇菡,高雅玲,等.基于 MSPA 与电路理论的城市绿色基础设施网络构建与优化研究:以福州市为例[C].中国风景园林学会 2020 年会论文集(上册),2020:660-667.
- [27] 刘乙斐.基于 MSPA 和 MCR 模型生态网络构建优化研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [28] 史瑶.基于 MSPA 和 MCR 模型的资兴市生态网络构建研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [29] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):10-17.
- [30] Knaapen Jan P, Scheffer Marten, Harms Bert. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Elsevier, 1992,23(1):1-16.
- [31] 李山,王铮,钟章奇.旅游空间相互作用的引力模型及其应用[J].地理学报,2012,67(4):526-544.
- [32] Wang Haijun, Zhang Bin, Liu Yaolin, et al. Urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020,30(2):297-318.
- [33] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应[J].应用生态学报,2016,27(7):2119-2127.
- [34] Urban Dean L, minor Emily S, Treml Eric A, et al. Graph models of habitat mosaics[J]. Ecology Letters, 2009,12(3):260-273.
- [35] 陈小平,陈文波.鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J].应用生态学报,2016,27(5):1611-1618.
- [36] 谢婧,李文,贾佳,等.齐齐哈尔市主城区生态网络构建与优化[J].水土保持研究,2021,28(6):308-315.
- [37] 何建华,潘越,刘殿锋.生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析[J].生态学报,2020,40(11):3590-3601.
- [38] 高宇,木皓可,张云路,等.基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究:以招远市为例[J].生态学报,2019,39(20):7547-7556.
- [39] 郑群明,扈嘉辉,申明智.基于 MSPA 和 MCR 模型的湖南省生态网络构建[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(5):1-10.
- [40] 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.
- [41] 池源,石洪华,丰爱平.典型海岛景观生态网络构建:以崇明岛为例[J].海洋环境科学,2015,34(3):433-440.
- [42] 张亚丽,尹伟特,胡希军,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的资源节约型生态网络构建:以福建省东山岛为例[J].西北林学院学报,2021,36(5):254-261.
- [43] 陈瑶瑶,罗志军,齐松,等.基于生态敏感性与生态网络的南昌市生态安全格局构建[J].水土保持研究,2021,28(4):342-349.