基于 MSPA 与电路理论的水网地区生态网络构建

丁金华 褚 涵 孙 琦

苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215001

摘要：快速城镇化背景下，城镇化扩张导致水网区域生境斑块日益破碎化和孤岛化，科学构建水网地区生态网络是有效连接生境斑块的重要手段，对保障区域生态系统连通性和稳定性具有关键意义。文中以苏州市吴江区为例，运用 MSPA 与景观连通性评价综合识别生态源地，基于 MCR 模型叠加多因子构建综合阻力面，利用电路理论提取生态廊道和节点，依据“生态源地识别—综合阻力面构建—生态廊道提取—生态节点选取”模式构建吴江区生态网络体系。结果表明：研究区内识别重要生态源地与一般生态源地共 30 个，总面积 196.73 km^2，景观构成要素以湖泊、湿地等用地类型为主；最优生态廊道 42 条，平均长度 6.53 km，潜在生态廊道 27 条，平均长度 4.28 km，但廊道空间分布不均匀，密度呈现由东北向西南逐渐降低的态势；通过保护与修复 17 处生态夹点和 26 处生态障碍点，有效提升区域景观连通性，增强生态网络稳定性。基于研究结果，提出加强生态源地保护、提高生态廊道连通性、优化与修复生态节点的生态网络优化策略，以期促进水网地区生态环境保护与生境质量提升。

关键词：生态网络；水网地区；MSPA；电路理论；苏州吴江区

DOI：10.12169/zgcsly.2023.02.28.0003

Ecological Network Constructionat Water Network Area Based on MSPA and Circuit Theory

Ding Jinhua Chu Han Sun Qi

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215001, Jiangsu, China)

Abstract: Under the background of rapid urbanization, urban sprawling leads to increasingly fragmented and isolated regional habitat patches. Science-based construction of ecological networks is an important means to effectively connect habitat patches, which has a key significance to ensure the connectivity and stability of regional ecosystems. Taking Wujiang District of Suzhou City as an example, the paper uses MSPA and landscape connectivity evaluation to identify the ecological source area, and the comprehensive resistance surface is constructed based on MCR model superposition of multiple factors. Ecological corridors and nodes are extracted based on circuit theory, and ecological network is constructed for Wujiang District according to the pattern of “ecological source area identification - comprehensive resistance surface construction - ecological corridor extraction - ecological node selection”. The results show that a total of 30 important and general ecological sources areas is identified in the study area, with a total area of 196.73 km^2. The elements constituting landscape are mainly ecological land such as lakes and wetlands. There are 42 optimal ecological corridors with an average length of 6.53 km, and 27 potential ecological corridors with an average length of 4.28 km. The spatial distribution of corridors is uneven, with the density gradually downward from northeast to southwest. The protection and restoration of 17 ecological pinch points and 26 ecological barrier points can effectively improve regional landscape connectivity and

收稿日期：2023-02-28

* 基金项目：国家自然科学基金项目（41301191）；江苏省高校品牌专业建设工程二期项目（风景园林）；“十四五”江苏省重点学科（风景园林学）

第一作者：丁金华（1973-），女，教授，硕士生导师，研究方向为城乡环境生态规划与设计。E-mail：yzdingjh@163.com

enhance the stability of ecological networks. It is proposed to enhance the protection of ecological source areas, improve the connectivity of ecological corridors, and develop the strategy to optimize and restore the ecological nodes, aiming to ameliorate the eco-environment conservation and habitat quality in water network areas.

Keywords: ecological network; water network area; MSPA; circuit theory; Wujiang District of Suzhou

随着新型城镇化的快速发展，建设用地不断扩张，引发水网地区生态格局破碎化加剧、生态系统稳定性降低等一系列生态问题[1-2]。生态网络是由各类生态斑块、生态廊道以及节点构成的保证区域物质循环与生态流通的复合型网络，对连接水网地区破碎生境斑块，提高区域景观连通性具有重要作用[3]。

目前，生态网络构建主要遵循“生态源地识别-综合阻力面构建—生态廊道提取-生态节点选取”的模式[3-5]。生态网络构建的应用研究涵盖生物多样性保护、生态系统空间结构的提升以及生态系统服务的耦合等方面[4-6]，生态网络研究区也多为国土空间、自然保护区、城市等较大空间尺度范围[7-9]，针对具有水网地区特殊生境条件的较小区域范围的生态网络构建还尚不多。

近年来，生态网络构建方法逐渐由定性分析走向定性与定量相结合。MSPA 方法主要结合图形学定量识别景观要素的空间形态属性，能为识别生态源地提供客观依据，但是其在辨识生境的能量流、物质流等生态功能流通性方面相对较弱[8-9]。而电路理论从功能角度模拟生态流通过程，在识别廊道宽度、确定节点位置方面具有明显优势和较多应用[9-12]，但其主要考虑生境的生态连通性，对区域整体生态空间属性反馈不足[13-14]。因此，综合 MSPA 与电路理论构建生态网络，可以有效评价景观要素的生态结构和功能属性，提升生态网络构建科学性。

苏州吴江区位于苏南水网地区，水体资源丰富，作为长三角生态绿色一体化发展示范区，在城镇化水平快速发展过程中出现的景观破碎化程度增强、景观连通性下降、生态环境脆弱等生态问题具备一定的典型性。研究以具有典型水网地域生态特征的苏州市吴江区为例，通过 MSPA 分析识别研究区域的景观要素，利用景观连通性评价量化斑块的重要性以实现不同等级的生态源地提取，采用电路理论模型提取研究区域生态廊道与生态节点并构建生态网络，在此基础上总结生态网络特征并与实际地理要素进行对应，以期促进水网地区生态环境保护与生境质量提升。

1　研究区概况

吴江区（30°45′36″—31°13′41″N，120°21′04″—120°53′59″E）位于江苏省苏州市东南部，区域面积 1 176 km^2。研究区气候温和，雨量充沛，境内地势平坦，河道纵横，湖荡密布，具有典型的苏南水网地区特征。

吴江区是新型城镇化建设的先行区，2020 年吴江区城镇化率总体已达到 81.07%，但是 2000—2020 年，吴江区建设用地增加 182.51 km^2，水域面积下降 11.5 km^2，面积减少率为 3.45%。建设用地的快速扩张导致水域面积退化，生境质量下降等问题。如何保护良好的水网格局，优化生境空间的布局，修复地区生态环境，完善生态网络体系显得尤为重要。

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

研究选取 2020 年吴江区土地利用/覆被数据（LUCC），这些数据来源于欧空局（https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover），空间分辨率为 10 m。结合 Google Earth 高清遥感影像及吴江区土地利用实际情况，参考《土地利用现状分类》（GB/T 21010—2017），将研究区土地利用类型划分为湖泊、河流、湿地、林地、草地、耕地、建设用地 7 类。

2.2　生态源地识别

生态源地是是构建生态网络的基础。研究基于 MSPA 与景观连通性评价综合提取生态源地。

2.2.1　MSPA 分析

MSPA 分析方法是基于数学形态运算，从像元层面分辨景观类型和结构的方法，能够快速识别各景观要素并充分考虑其空间分布关系[5]。研

究运用 Guidos Toolbox 软件，将生境质量良好的湖泊、河流、湿地、林地、草地划为前景，耕地、建设用地作为背景，对两种栅格数据进行二值化处理，得到研究区生态网络结构要素分布概况，其中核心区为物种提供较大的栖息地，是生态网络中的生态源地。生境斑块的面积大小和连通程度对维护区域生物多样性有重要意义，结合研究区尺度范围并参考相关研究[8,14-15]，提取面积大于 2 km^2的核心区作为具有生态源地潜力的生境斑块。

2.2.2 景观连通性评价

景观连通性评价通过不同生境斑块的连通性程度判断其重要性，能够较客观地准确识别生态源地[4,14]。目前较常用的景观连通性指数包括整体连通性指数（IIC）和可能连通性指数（PC），能较为合理地反映研究区内生态斑块的连通性水平，在此基础上，研究利用斑块重要性指数（dPC）衡量各个生态斑块的重要程度并提取源地[12]。

研究运用 Conefor2.6 软件，参考已有研究并结合水网乡村生境特点[5,16-17]，设置连接概率为 0.5，分别选取 500、1 000、1 500、2 000、2 500 m 距离阈值进行计算分析，结果表明连接阈值为 1 000 m 时斑块组分数较稳定。在此阈值下计算具有生态源地潜力的核心区斑块的 dPC 值，识别连通性较高的生境斑块为研究区生态源地，采用自然断点法对提取出的生态源地进行重要性排序与分级。

2.3 综合阻力面构建

综合阻力面反映了物种在不同景观单元类型之间迁移的难易程度[15]，是识别生态廊道的前提。研究基于 MCR 模型，结合 ArcGIS 栅格计算器构建综合阻力面，参考已有研究成果并结合水网地区生态特征，选取土地利用类型、归一化植被指数（NDVI）、距道路距离、坡度、距水域距离为主要阻力因子并进行分级赋值（表 1），加权叠加各单因子阻力面得到综合生态阻力面[9-10,15,18]。

表 1 阻力因子赋值与权重

阻力因子	类型	阻力值	权重	阻力因子	类型	阻力值	权重
土地利用类型	耕地	100	0.41	距道路距离/m	<500	800	0.05
	草地	50			500~1 000	500	
	林地	10			1 000~1 500	300	
	河流	20			1 500~2 000	100	
	湖泊	10			>2 000	10	
	湿地	50		距水系距离/m	<300	50	0.18
	建设用地	900			300~600	200	
归一化植被指数(NDVI)	<0.2	800	0.29		600~900	300	
	0.2~0.4	500			900~1 200	500	
	0.4~0.6	300			>1 200	700	
	0.6~0.8	100		坡度/°	<5	5	0.07
	0.8~1.0	10			5~20	200	
					>20	500	

2.4 生态廊道提取

生态廊道是斑块间生态流通的重要路径，在生态源地斑块之间起到纽带连接作用[10]。研究运用电路理论 Circuitscape 软件 Linkage Mapper 工具，使用 LinkagePathway 模块，基于栅格阻力值，绘制核心区斑块间最低成本路径，通过计算源地间电流强度大小，提取最优廊道及潜在廊道。

2.5 生态节点选取

生态节点是指斑块间进行物质能量转换或极易受到干扰破坏的关键位置，是保障区域生态网络连通的关键[7]。研究基于电路理论 Circuitscape 软件选取生态夹点与生态障碍点两类生态节点。

生态夹点是指生态流通过可能性大、物种丰富度高的区域。研究使用 Linkage Mapper 工具 Pinchpoint Mapper 模块，设定与潜在廊道相同的宽度阈值，选取电流高度密集区域作为生态夹点。

生态障碍点指生态流在生境斑块间运动受到阻碍的区域，修复这些区域可显著提高生态源地间的连通性[9]。研究运用 Linkage Mapper 工具 Barrier Mapper 模块，通过计算移除障碍点后的累

计电流恢复值表征障碍点移除后连通性的恢复情况，将生境内数值较大的区域识别为生态障碍点[10]。

3　结果与分析

3.1　生态源地识别

3.1.1　景观要素分析

基于 MSPA 模型识别出的景观要素总面积约 541.49 km^2，占研究区总面积的 46.05%（表 2、图 1）。其中，核心区面积最大，占前景要素面积的 57.31%，空间上呈聚集连片状分布，多集中于元荡、长漾、北麻漾等大型湖荡片区，这些斑块面积较大、连通性较好，能够为生物栖息提供足够的空间。位于核心区外部的边缘区是核心区的保护屏障，面积仅次于核心区，占整个前景要素面积的 22.61%，可以较大程度地 降低外部景观对核心区的干扰，表明核心区周围存在区域缓冲面积，可作为核心区的补充生态资源。桥接区对促进生物迁移扩散和物质流动循环有重要作用[2]，占前景面积的 3.06%，占比相对较小，且分布较为破碎，表明核心区斑块之间连通性有待提升。整体来说，研究区总体生态情况较好，但存在一定的大型生境斑块，其破碎化程度较高，空间分布差异明显。

表 2　MSPA 景观要素统计

景观类型	景观面积/km^2	占前景要素面积/%	占研究区面积/%
核心区	310.33	57.31	26.39
边缘	122.43	22.61	10.41
孤岛	48.30	8.92	4.10
分支	31.14	5.75	2.65
桥接区	16.57	3.06	1.42
环岛	7.85	1.45	0.67
穿孔	4.87	0.90	0.41
总计	541.49	100	46.05

3.1.2　生态源地识别

对 MSPA 分析结果中具有生境潜力的核心区斑块进行连通性评价，综合考虑连通性结果，将 dPC>0.1 的核心区斑块识别为生态源地，并采用自然间断点分级法划分为重要生态源地和一般生态源地（图 2、表 3）。研究区共识别 30 个生态源地，总面积 196.73 km^2。总体来看，研究区生态源地分布并不均匀，受水网地区景观特征的影响，dPC 值较高的斑块由湖泊坑塘和少部分湿地、林地构成，较多分布于研究区东北部同里湖、石头潭片区，表明水域对生态连通性的贡献较大；中部及西南地区生态源地较少，虽然具有一定生境面积，但源地间连接度较低，受城镇用地扩张威胁，生物迁徙流动容易受到阻碍干扰，一定程度上削弱了区域生态网络的稳定性和完整性。

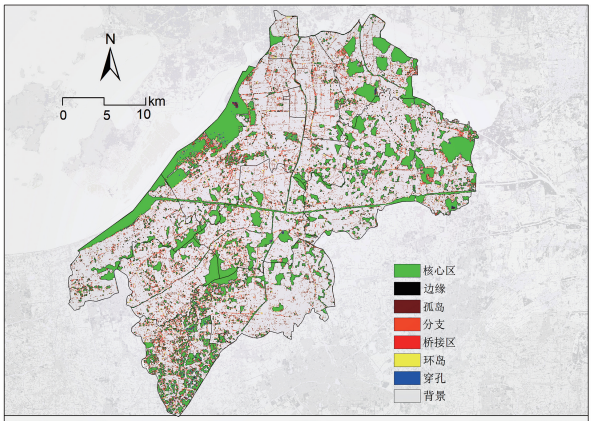


图 1　MSPA 景观要素分析

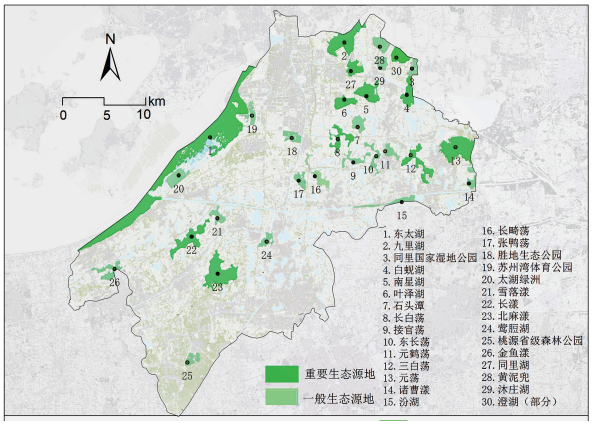


图 2　吴江区生态源地识别

表 3　吴江区生态源地重要性排序

重要程度	源地编号	dIIC	dPC	源地编号	dIIC	dPC
重要生态源地	1	81.35	81.86	27	3.24	4.63
	13	6.52	11.37	4	1.89	3.38
	2	5.99	7.36	6	1.93	3.22
	23	3.63	6.33	30	2.11	2.80
	22	3.55	5.14	12	2.16	2.72
	5	4.25	4.66	8	1.67	2.63
一般生态源地	14	1.44	2.35	29	0.96	0.92
	3	1.61	2.27	16	1.07	0.85
	7	1.29	1.95	19	0.71	0.65
	11	1.89	1.71	20	0.41	0.62
	21	0.98	1.56	24	0.54	0.59
	10	1.12	1.22	18	0.31	0.44
	9	1.11	1.04	28	0.26	0.31
	15	1.19	1.00	26	0.30	0.30
	17	0.90	0.98	25	0.19	0.17

3.2 生态廊道提取

3.2.1 综合阻力面构建

基于 MCR 模型与栅格计算器，构建吴江区综合阻力面（图 3）。依据自然间断点分级法将阻力值划分为 3 级：高阻力区域［427.690 9～819）、中等阻力区域［196.754 5～427.690 9）、低阻力区域（1.1～196.754 5）。研究区阻力值分布与土地利用类型相关性较高。由于水网地区湖荡密布，整体阻力值均质化分布，河流、湖泊等生态资源所在区域附近阻力值较小，大部分耕地、林地地区呈现出中等偏低阻力。高阻力区域分布于盛泽镇、经济技术开发区等建设用地较为密集地区，受人为活动影响较大。

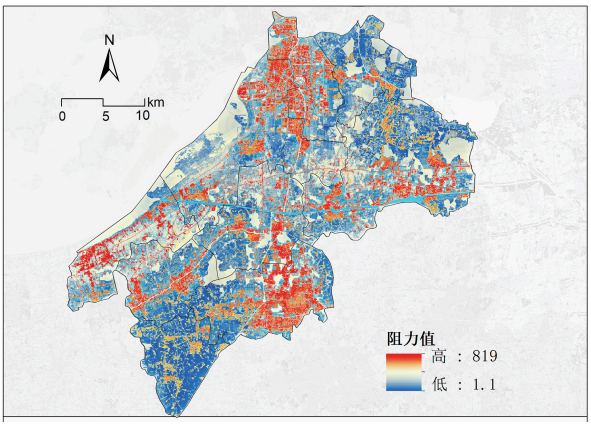


图 3 吴江区综合阻力面构建

3.2.2 最优廊道提取

研究区共识别最优廊道 42 条（图 4），总长 274.37 km，平均长度 6.53 km。最优廊道受生态源地空间分布的影响在研究区东北部分布密度较高，说明东北部地区生态空间连接良好，生态信息流动较为通畅；南部地区的源地之间距离较远，不利于能量和物质的交流，其中金鱼漾-北麻漾、胜地生态公园-雪落漾等廊道涵盖多个土地利用类型，相比于其他生态廊道更为脆弱，更容易形成生态断裂点。

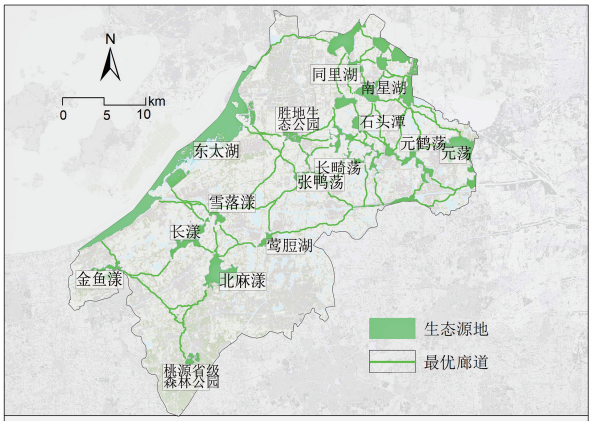


图 4 吴江区最优廊道提取

3.2.3 潜在廊道提取

由图 5 可知，研究区东北部同里湖片区附近的潜在生态廊道较宽，南部桃源镇、七都镇以及

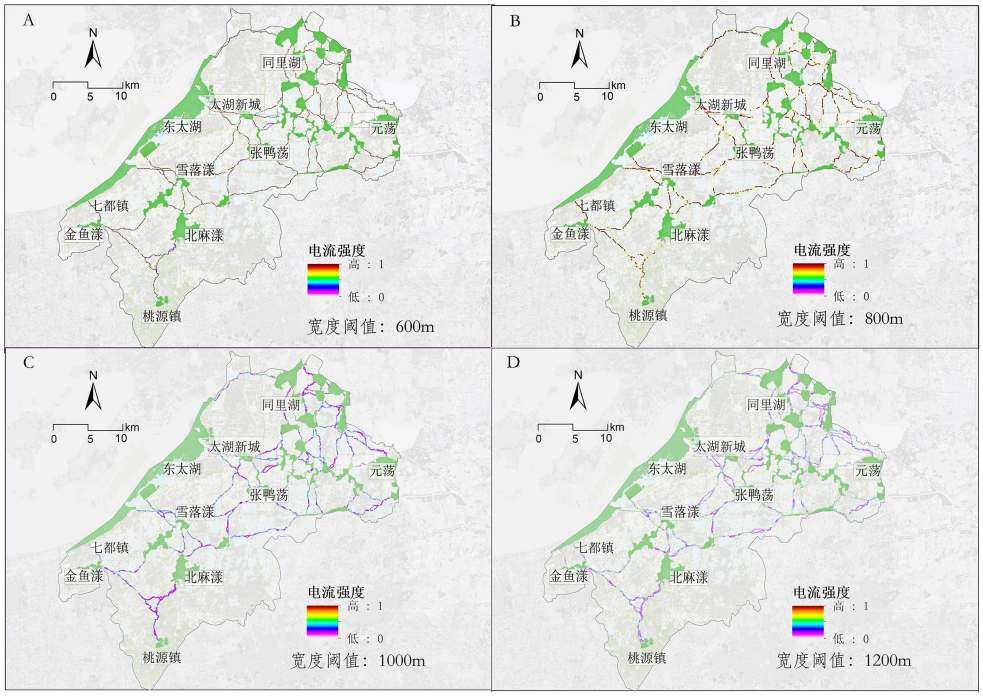


图 5 不同宽度阈值下吴江区潜在廊道提取

西部太湖新城区域的潜在生态廊道较窄，表明东北部地区生态流通可选择的路径更多，生态流动较西南部区域较为频繁。参照相关研究[7]，结合研究区生态特征，分别选择 600、800、1 000、1 200 m 阈值分析潜在廊道，根据分析结果确定 1 000 m 作为研究区潜在廊道最适宜宽度阈值，此阈值潜在生态廊道建设成本相对较低，且能较好满足物质和能量流动的生态需求。最终识别潜在生态廊道 27 条，总长 115.6 km，平均长度 4.28 km。

3.3　节点选取

3.3.1　生态夹点选取

研究共识别生态夹点 17 处（图 6），面积共计 8.47 km^2，用地类型主要为坑塘湿地，多呈狭长条带状分布。研究区东部石头潭片区生态夹点数量较多，分布相对集中，利于生态流动，生态源地间连通性较好。

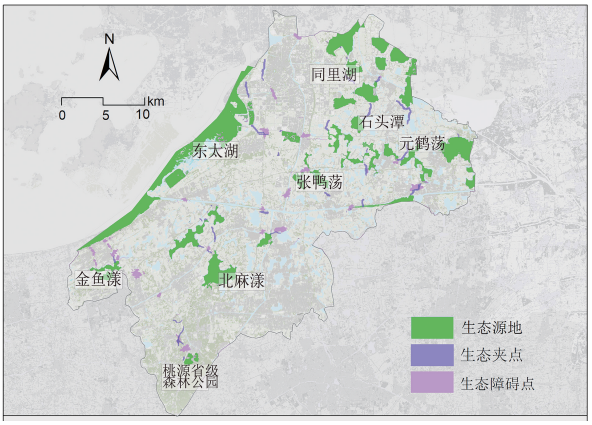


图 6　吴江区生态节点选取

3.3.2 生态障碍点选取

研究共识别 26 处生态障碍点（图 6），面积共计 15.05 km^2。从用地类型看，生态障碍点以建设用地为主，其次为耕地，生态障碍点对于周边生态源地的物质和能量交流具有一定阻碍，应因地制宜清除影响连通性的阻碍要素，提高生态网络连通性。从分布特征看，生态障碍点主要沿最优廊道的走向分布，较多出现在建设强度较高区域，是加强景观连通性生态修复的重点地区。

3.4　生态网络构建

研究综合 MSPA 和景观连通性评价识别生态源地，基于电路理论提取生态廊道、选取生态节点，构建水网地区生态网络（图 7）。

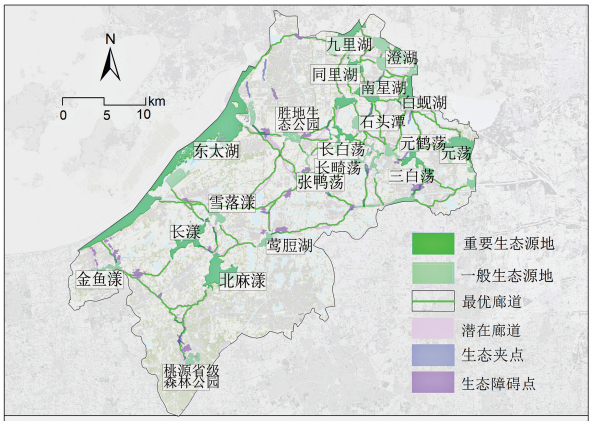


图 7　吴江区生态网络构建

4　优化策略

4.1　加强生态源地保护

在生态源地建设方面应首先加强对水网生态资源的保护力度，重点维护具有较高连通性的大面积湖荡、林地等区域[19]；同时，加强对九里湖、南星湖、北麻漾等重要生态源地的空间管控，降低城镇用地扩张对源地的干扰，最大限度地保证生境面积和斑块完整性。

4.2　提高生态廊道连通性

廊道建设应注重整体性的连通，保障连续的水网空间[17]。在考虑源地间连通程度和距离因素上，严格管控金鱼漾–北麻漾、元鹤荡–三白荡等最优廊道内部的建设开发活动；同时，加强北麻漾–桃源省级森林公园、张鸭荡–胜地生态公园等区域的潜在廊道生态优化，充分发挥廊道作为线性生境的连通功能，促进源地间的有效连接，形成连通、完整的生态网络[19-20]。

4.3　优化与修复生态节点

生态夹点区域承载较高的景观连通性，对生态夹点区域的优化应依托水网地区独特的自然景观资源，将湖荡与周边林地、草地等生态要素整合，从而提升生态功能；生态障碍点对生态流动具有一定阻碍，应加强生态修复，优化生态要素配置，改善生态障碍点地区生态环境质量[9-10]。

5　讨论

研究表明，生态网络的构建能有效减少景观破碎化，有效连接孤立的斑块生境，便于物种迁移扩散，保护生物多样性[21]，本研究引入 MSPA

与电路理论，综合景观要素的结构特性与功能连通性构建苏南水网地区特殊生境生态网络。从景观类型角度出发，生态网络构成要素以湖泊、湿地为主，越靠近建设用地，斑块破碎化程度越高，表明建设用地扩张对生态环境带来了一定干扰，与王玉莹等[15]的研究结果一致。

基地东太湖附近虽然受到一定城镇化建设影响，但是在生态修复政策指导下，湖体面积较大且与与周边生态公园、湿地等保持较好的连通性，生态源地和生态廊道数量高于其他建设区域，仍然是较为重要的生态源地，该结论与王雪然团队的研究结果一致[4]，也与金爱博等[22]对平原水网地区的生态网络构建结果趋同，从生态网络空间分布而言，吴江区生态网络分布不均匀，呈现北密南疏的态势，其主要原因为北部区域水域、耕地等生态资源丰富，南部地区则以建设用地占较大比例，这与李瑾等[19]的研究结果一致。

目前已有生态网络研究多是侧重源地间相互作用强度评价生态网络结构[1,14,17]，且研究对象多为城市（群）、区域、自然流域等空间尺度，较少从具有特殊生境与景观格局特征的水网地区展开探讨和分析[4-6,14]。与同类研究相比，本研究具有以下改进与创新：1）MSPA 基于空间形态与结构特性识别生态源地，电路理论强调从功能角度模拟生态网络整体连接情况，MSPA 与电路理论结合能够综合评价景观要素的结构特性与功能连通性，对生态网络构建具有积极意义。2）研究考虑水网地区河湖密布的特殊生境条件，选取具有针对性的距水体距离等分析因子，更精准指导水网地区生态网络构建，为水网地区景观格局优化提供参考。

研究仍存在需要完善的地方，首先，基于 MSPA 和景观连通性评价识别生态源地侧重于反映生境斑块的景观结构，未来可以结合生境质量评价、生态敏感性评价等方法提升生态源地评价综合性，使生态源地的识别标准更加完善[5,20]；其次，研究侧重于吴江区行政范围内的生态要素，在后续研究中应综合考量研究区外部能量流动和物质循环对研究区内部影响[4,14,23]，构建水网地区整体性的网络，提升研究结果的科学性和全面性。

6 结论

研究区内共识别生态源地 30 个，提取最优生态廊道 42 条、潜在生态廊道 27 条，选取生态夹点 17 处、生态障碍点 26 处。研究基于 MSPA 与景观连通性评价综合识别生态源地、提取生态廊道、选取生态节点，既考虑了斑块面积，又兼顾斑块间的结构连通；不仅有效避免了人为选取生态源地的主观性，还可以量化识别具有精确位置的生态节点，有利于提升生态网络连通性和整体性。

参考文献

[1]叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.

[2]AHMAD M,JIANG P,MAJEED A,et al.The dynamic impact of natural resources,technological innovations and economic growth on ecological footprint:An advanced panel data estimation[J].Resources Policy,2020,69:101817.

[3]齐松,罗志军,陈瑶瑶,等.基于 MSPA 与最小路径方法的袁州区生态网络构建与优化[J].农业现代化研究,2020,41(2):351-360.

[4]王雪然,万荣荣,潘佩佩.太湖流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学-最小累积阻力模型[J].生态学报,2022,42(5):1968-1980.

[5]宋利利,夏艺菲.基于 MSPA 的郑州市城区绿地生态网络构建及优化[J].中国城市林业,2022,20(6):57-63.

[6]肖华斌,张慧莹,郭妍馨,等.服务高效导向下泰山区域山水林田湖草生命共同体生态网络构建研究[J].中国园林,2021,37(8):103-108.

[7]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.

[8]罗言云,谭小昱,何柳燕,等.大熊猫国家公园邛崃山-大相岭片区生态网络构建及优化[J].风景园林,2022,29(8):93-101.

[9]宁琦,朱梓铭,覃盟琳,等.基于 MSPA 和电路理论的南宁市国土空间生态网络优化研究[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(2):306-318.

[10]李涛,巩雅博,戈健宅,等.基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J].应用生态学报,2021,32(7):2555-2564.

[11]VOGT P,FERRARI J R,LOOKINGBILL T R,et al.Mapping functional connectivity[J].Ecological Indicators,2009,9(1):64-71.

[12]MCRAE B H,DICKSON B G,KEITT T H,et al.Using circuit

theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J].Ecology,2008,89(10):2712-2724.

[13]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.

[14]冯舒,唐正宇,俞露,等.城市群生态网络协同构建场景要素与路径分析:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2022,42(20):8223-8237.

[15]王玉莹,沈春竹,金晓斌,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的江苏省生态网络构建与优化[J].生态科学,2019,38(2):138-145.

[16]MINOR E S,URBAN D L.Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning[J].Ecological Applications,2007,17(6):1771-1782.

[17]KANG W M,PARK C R.Corridor and network analyses of forest bird habitats in a metropolitan area of South Korea[J].Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology,2015,17(3):191-201.

[18]袁轶男,金云峰,聂晓嘉,等.基于生态安全格局的城市森林生态网络优化[J].中国城市林业,2020,18(6):78-83.

[19]李瑾,金晓斌,孙瑞,等.江南水网区域复合型生态网络构建初探:以常州市金坛区为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(11):2427-2435.

[20]LI H L,LI D H,LI T,et al.Application of least-cost path model to identify a giant pandadispersal corridor network after the Wenchuan earthquake:Case study of Wolong Nature Reserve in China[J].Ecological Modelling,2010,221(6):944-952.

[21]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.

[22]金爱博,张诗阳,王向荣.宁绍平原绿地生态网络时空格局与优化研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(11):1415-1426.

[23]SHI X M,QIN M Z.Research on the optimization of regional green infrastructure network[J].Sustainability,2018,10(12):4649.