

基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化

陈竹安^{1,2}, 马彬彬¹, 危小建^{1,2}, 曾令权³, 姜晓桦¹

(1. 东华理工大学 测绘工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 广州番禺职业技术学院, 广东 广州 511483)

摘要: [目的] 构建科学合理的南昌市生态网络, 寻找生态网络中存在的问题及优化对策, 为该市自然生态系统、生物多样性的保护及城市可持续发展规划与管理提供科学依据。[方法] 基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)方法与景观连接度指数进行生态源地选择, 考虑自然、人为因素构建综合阻力面, 利用最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)提取生态廊道, 最终构建南昌市生态网络。[结果] ①基于MSPA与景观连通性指数所提取的生态源地主要分布在西部、北部及东部生境质量较高、连通性较好的地区。②南昌市整体阻力呈现中部高、四周低的特征, 生态廊道空间分布不均且结构单一。基于重力模型识别的重要廊道主要分布于东部、北部城市边缘的林地和水域。[结论] 建议加强对核心生境斑块的保护, 增加生态源地, 修复生态断裂点, 优化网络连接。结合 MSPA 与景观性指数的方法可以有效地将生态质量好、连通性较高的斑块作为生态源地, 在今后的发展还需要注重对生态用地的保护, 提高区域景观连通性。

关键词: 生态网络; 廊道; 生态源地; MSPA; MCR 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)06-0139-09

中图分类号: X171.4

文献参数: 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139-147. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.020; Chen Zhuan, Mabin Bin, Wei Xiaojian, et al. Construction and optimization of ecological network of Nanchang City based on MSPA and MCR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 139-147.

Construction and Optimization of Ecological Network of Nanchang City Based on MSPA and MCR Model

Chen Zhuan^{1,2}, Ma Binbin¹, Wei Xiaojian^{1,2}, Zeng Lingquan³, Jiang Xiaohua¹

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang,

Jiangxi 330013, China; 2. Jiangxi Province Key Laboratory of Digital Land, Nanchang,

Jiangxi 330013, China; 3. Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 511483, China)

Abstract: [Objective] The ecological networks in Nanchang City were constructed scientifically and rationally, and the optimal strategies for the defects of the ecological network were researched, in order to provide a scientific basis for ecological construction and help to guide urban planning for biodiversity conservation. [Methods] Based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and landscape connectivity index, the ecological source was selected, the comprehensive resistance surface was constructed considering natural and human factors, the ecological corridor was extracted by minimum cumulative resistance (MCR), and finally the ecological network of Nanchang City was constructed. [Results] The ecological source areas were mainly distributed in the western, northern and eastern regions with higher habitat quality and better connectivity.

收稿日期: 2021-04-01

修回日期: 2021-06-29

资助项目: 地区科学基金项目“人本视角下“城—绿”空间耦合调控: 作用机制、调控模型与优化路径”(52168010); 东华理工大学研究生创新基金(YC2020-S486)

第一作者: 陈竹安(1978—), 男(汉族), 福建省大田县人, 硕士, 副教授, 主要从事测绘技术、土地信息技术以及遥感数据处理方面的研究。Email: cza53@qq.com。

通讯作者: 马彬彬(1995—), 女(回族), 湖南省武冈市人, 研究生, 研究方向为土地利用与城市生态。Email: 1225088087@qq.com。

The distribution characteristic of resistance value was high in the middle area while low in the fringe areas. The spatial distribution of ecological corridor was uneven and the structure was single. The important corridors identified based on gravity model were mainly distributed in the eastern and northern urban fringe area. [Conclusion] It was suggested to strengthen the protection of core habitat patches, increase ecological sources, repair ecological fracture points and optimize network connection. The combination of MSPA and landscape index can effectively identify ecological sources with good ecological quality and high connectivity. In future, we also need to pay attention to the protection of ecological land and improve the landscape connectivity.

Keywords: ecological network; corridor; ecological sources; MSPA; MCR

随着城市化不断推进,城市用地以不同的形式向四周扩张,在城市扩张过程中导致生态景观发生巨大变化。大型生境斑块被不断侵占、蚕食,连接生态用地间的廊道也被隔断,导致景观之间连通性降低,城市化与生态环境之间冲突愈加凸显,人类正常生产与生活及生物多样性受到严重冲击^[1-2],生态环境问题给当今社会以及城市可持续发展带来了巨大的挑战。目前的研究中,主要通过生态网络构建及其优化分析对区域生态环境进行保护与改善^[3]。通过廊道连接分散于区域内独立的生境斑块,形成联系紧密且复杂的生态网络,提高生态系统调节能力、强化城市生态系统功能。生态网络研究通常以生态用地规划为主,包括生态网络构建^[4]、生态网络规划模式^[5]、生态网络结构分析评价^[6]等。有些研究将景观生态与土地规划^[7]或野生动物保护相结合^[8],有针对性的制定科学规划方案。生态网络构建大多集中在森林、湿地^[9]、集约化土地生态网络^[10]等方面。生态网络构建的基础和关键是合理识别和提取生态源地,但源地选取方面,以往研究多用大型生态斑块(如林地、自然保护区)作为源地,选取过程具有较大主观性^[11-12],忽视了生态斑块的功能和景观连通作用。而形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)与景观连通性指数相结合的方法可以有效地识别出生态价值高且具有连通作用的斑块,有效避免源地提取的主观性^[13-14]。近年来由于绿地景观日益破坏,关于绿地廊道的研究变得深入,研究集中在廊道构建和系统规划等方面^[15],借助于最小累积阻力模型^[16](minimum cumulative resistance, MCR)、图论与电流理论等^[17-18]模拟潜在廊道,了解物种迁徙可能的路径,进而加强对生态廊道修复^[19]。在此基础上,利用重力模型^[20]、图谱理论^[21-22]、相对生态重要性与城镇发展胁迫赋值加权方法等^[23]方法分析廊道重要性,识别出具有重要生态意义的廊道^[24],进而提出生态网络优化和改进方案,改善斑块之间连通性^[25-26]。

随着 2015 年新建县撤县改区,江西省南昌市土地利用广度及强度逐渐加大,威胁区域生态安全,具

有较强典型性。因此,本研究拟对南昌市生态网络进行研究,通过 MSPA 与景观连通性进行生态源地选择,从而避免源地选取的主观性。在兼顾自然、人为因素构建综合阻力面的基础上,基于 MCR 模拟潜在生态廊道,构建研究区生态网络,并利用重力模型识别和提取重要廊道,对生态网络中存在的问题提出优化对策。研究结果有助于保护和提升南昌市自然生态系统功能,为城市可持续发展提供科学依据。

1 研究方法 with 数据

1.1 研究区概况

南昌市地处江西中北部,东经 115°27′—116°35′,北纬 28°09′—29°11′。全境以鄱阳湖平原为主,山、丘、岗、平原相间分布,东南相对平坦,西北丘陵起伏,赣江、抚河、玉带河等多条河流纵横交错,大小湖泊百余个。此外,具备丰富的森林资源,野生动物、植物资源品种繁多。随着南昌市城市化水平的提高,加之新建县撤县设区,城市在快速发展的同时,土地利用广度及强度逐年增大,导致生境斑块面积及其质量均有所衰退,景观破碎化严重,生态系统面临着极大威胁。因此,构建南昌市生态网络体系,是采取合理措施保护生态系统安全的基础和关键。

通过对 Landsat TM 影像(数据来源: <http://www.gscloud.cn/>)预处理及目视解译,并通过最大似然法实施监督分类,提取林地、水域、建设用地、耕地和其他等景观要素,从而获得基础地理信息数据为南昌市 2019 年土地利用类型数据,并与所获取的高精度航拍数据对解译的土地利用进行精度验证,精度达 85% 以上,数据可靠性较高。DEM 数据来源于地理空间数据云(数据来源: <http://www.gscloud.cn/>),其空间分辨率为 30 m×30 m;道路网数据来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/>)数据平台。

1.2 研究方法

构建生态网络包括“源地识别—阻力面构建—廊道模拟”等步骤。

1.2.1 生态源地识别 MSPA 利用数学形态学原理,从空间形态和连通性角度对栅格像元分类,进而识别出对连通性具有重要作用的斑块和廊道,从而提升生态源地选取的科学性和客观性^[27-28]。MSPA 以土地利用类型为基础,将生境斑块作为前景并经过一系列分析处理按照空间形态将其分为互不重叠的 7 大

类(核心区,连接桥,环道,支线,边缘区,孔隙和孤岛)。为保证景观完整性,本文研究尺度为 30 m×30 m。根据研究区土地利用类型重分类结果(耕地、林地、水域、建设用地和其他),将林地、水域等生态服务价值较高且受人为干扰较少的自然景观作为 MSPA 前景,基于 MSPA 八邻域方法进行分析,得到 7 类景观(表 1)。

表 1 基于 MSPA 的研究区景观类型及生态学含义

景观类型	生态学含义
核心区	大型的生境斑块,作为生态过程的“源”
连接桥	连接 2 个及 2 个以上核心区的狭长斑块,是相邻核心区物种迁移和能量流动的通道
孤岛	相互不连接的孤立、破碎斑块,连接度较低
环道	连接同一核心区的生态走廊,是物种迁徙与物质、能量流动的通道
孔隙	核心区内部边缘,是核心区与内部背景间的过渡区域
边缘区	核心区外围边缘,减少外界对核心区干扰
支线	只有一端与边缘区、孔隙、桥接区与环道区相连

景观连接程度作为衡量景观格局与功能的重要指标,可以反映各个斑块对景观连通性的重要程度,定量描述某一景观类型是否有利于物种迁徙,包括整体连通性(II C)、可能连通性(PC)和斑块重要性(dPC)等^[29-30]。

$$II C = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}} \right) / A_L^2 \quad (1)$$

式中: $i \neq j$; n 为林地、水域斑块总数; a_i, a_j 分别表示斑块 i, j 的面积; nl_{ij} 表示斑块 i 和 j 之间的连接数; A_L^2 表示林地景观的总面积。II C 取值范围为 $[0, 1]$ 。II C=0,说明各斑块之间没有连接;当 II C=1,说明整个景观均可以作为生境斑块。

$$PC = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}^* a_i a_j \right) / A_L^2 \quad (2)$$

式中: $i \neq j$; p_{ij}^* 表示斑块 i 和 j 之间所有路径的最大乘积概率。PC 取值范围为 $[0, 1]$,其数值越小,说明斑块之间的连通性越低,越不利于物种交流。

$$dPC = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100\% \quad (3)$$

式中: PC_{remove} 表示斑块剔除之后剩余斑块的指数。dPC 通过 PC 的变化衡量各个斑块对维持景观连通性的重要程度。

本文综合考虑斑块面积和连通性,设置斑块连接性阈值和连通概率,评价核心区斑块的景观连通性,从而识别出对斑块连通性有重要作用的生态源地,避免只考虑面积忽略具有重要连通作用的斑块,保证源地选取的合理性。

1.2.2 景观阻力面构建 景观阻力反映生物在不同空间迁移扩散的难易程度,景观阻力面为区域生态过

程流与景观格局间相互作用的空间表达^[2,31]。本文综合研究区实际情况和数据可获取性,筛选涵盖地貌等自然要素及人类活动因子作为物种迁徙的约束因子。自然要素包括高程、坡度、土地利用类型,人类活动因子包括距铁路距离、距主干道距离、距次干道距离、距高速公路距离。参考相关研究^[32-33],各阻力因子权重详见表 2。

1.2.3 基于最小成本路径的生态廊道构建 廊道是生态网络中的线状或带状区域,具有为物种提供栖息地及迁徙通道的作用。物种在穿越异质景观时需要消耗一定的“成本”,该成本反映物种在迁徙过程中实际消耗的能量。最小累积阻力模型基本公式为:

$$MCR = f \min_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \cdot R_i) \quad (4)$$

式中:MCR 表示物种从源到空间另外一点的最小累积成本;函数 f 反映最小累积阻力模型与变量 $D_{ij} \cdot R_i$ 之间呈单调递增正比函数关系; D_{ij} 表示物种从源 i 到景观 j 的扩散距离; R_i 为景观 i 阻力值。

本文在研究区综合阻力面基础上利用 MCR 计算物种从源斑块出发迁移到目标斑块的最小累积成本路径^[32-33],并对研究区潜在廊道进行模拟,从而构建南昌市生态网络。廊道在生态网络中的重要程度及其对于整体生态网络连通性的有效性取决于源斑块与目标斑块间相互作用强度。因此,本文基于重力模型计算结果,定量评价斑块之间的相互作用强度,判定廊道的重要程度。然后,提取相互作用大于阈值 100 的廊道,作为研究区重要的生态廊道,并有针对性的进行重点保护。

$$G_{ij} = \frac{(N_i \cdot N_j)}{(D_{ij})^2} = \frac{\left(\frac{1}{P_i} \times \ln S_i\right) \left(\frac{1}{P_j} \times \ln S_j\right)}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{\max}}\right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_i \times \ln S_j}{L_{ij}^2 \times P_i \times P_j} \quad (5)$$

式中： G_{ij} 是点*i*和*j*之间的相互作用力，即*i-j*廊道的重要性指数； N_i 和 N_j 是斑*i*和*j*的权重值。 N 值可通过不同的绿地景观斑块的阻力值(P_i)及斑块面积(S_i)获得。 D_{ij} 是从点*i*到*j*潜在廊道标准化累积阻力。 L_{ij} 是点*i*到*j*潜在廊道的累积阻力值， L_{\max} 是研究区最大累积阻力值。

表 2 不同土地利用类型的景观阻力值及其权重

阻力因子	分级指标	阻力值	权重
高程/m	<50	1	0.15
	50~150	2	
	150~250	3	
	250~350	4	
	>350	5	
坡度/(°)	<3	1	0.10
	3~8	2	
	8~15	3	
	15~25	4	
	>25	5	
土地利用类型	林地	1	0.18
	水域	2	
	耕地	3	
	其他	4	
	建设用地	5	
与铁路距离/m	>2 000	1	0.15
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与主干道距离/m	>2 000	1	0.14
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与次干道距离/m	>2 000	1	0.14
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与高速公路距离/m	>2 000	1	0.14
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	

2 结果与分析

2.1 基于 MSPA 与景观连接性的生态源地分析

基于 MSPA 计算结果如图 1 所示。对 7 类景观类型面积与比例进行统计分析。结合图 1 与表 3 可知，核心区所占比例最大，高达 84.58%，在东西部呈聚集性分布，数量较多，而中部地区相对分散。其次为边缘和孔隙，占比分别为 13.11% 和 1.45%，面积相对较小，表明核心区斑块稳定性较低，抗外界干扰能力不强。连接桥作为结构性廊道，具有促进物种迁徙、增加景观连通性的作用，占比仅为 0.11%，表明研究区内连通性较低。支线具有一定的景观连通作用，占比为 0.74%，说明核心区与外界能量交换受到干扰。孤岛作为孤立的生境斑块，在一定程度上可为物种迁徙提供踏脚石作用，占比仅为 0.02%，零星分布于区域中。环道是物种迁移中可供选择的捷径，面积仅为 61 hm²，过少的数量表明物种迁移活动消耗较大，对生物多样性造成不利的影响。

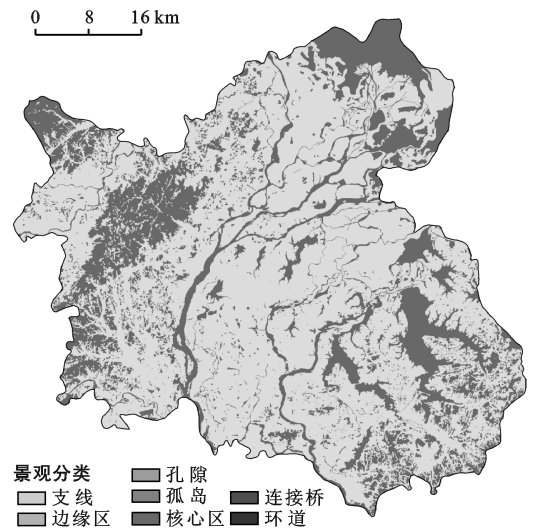


图 1 基于 MSPA 的南昌市景观分类

表 3 南昌市景观类型分类统计

景观类型	面积/hm ²	比例/%
核心区	2 992 177.63	84.58
边缘区	463 681.43	13.11
孔隙	51 284.37	1.45
连接桥	3 890.54	0.11
环道	61.00	0.00
孤岛	707.37	0.02
支线	26 172.71	0.74
总计	3 537 975.05	100

在 MSPA 分析结果基础上，选取面积大于 100 hm² 的核心区斑块计算其景观连通性指数

(表 4), 然后选取 $dPC > 0.5$ ^[36] 的 38 个斑块作为研究区的生态源地(图 2)。由图 2 可见, 生态源地主要位于南昌市西部、北部及东部生境质量较好的地区, 尤其在东部地区分布较为密集, 包括梅岭、赣江、瑶湖、军山湖、青岚湖、抚河等大型的林地、水域。同时, 由

表 4 可知, 斑块面积的大小并不直接影响生态源地斑块的重要程度, 比如 5, 6, 11 号斑块虽然面积相对较小, 但其连通程度较好。因此, 结合 MSPA 与景观连通性指数有效避免只考虑斑块面积而忽略连通重要性的缺陷, 保障了源地提取方面的科学性与客观性。

表 4 生态源地景观连接性指数重要值排序结果

节点	整体连通性(II C)	斑块重要性(dPC)	面积/hm ²	节点	整体连通性(II C)	斑块重要性(dPC)	面积/hm ²
1	52.004 58	46.44	61 922.9	20	0.910 121 8	1.53	1 905.04
2	23.001 18	22.95	40 364.4	21	0.217 323 6	1.49	224.07
3	14.081 07	17.93	24 635.3	22	1.479 468	1.48	8 871.47
4	10.424 85	15.69	13 952.1	23	0.913 741 1	1.40	1 146.30
5	7.243 462	12.26	445.94	24	0.813 284 6	1.22	437.93
6	5.756 219	10.04	148.17	25	0.786 277 6	0.84	2 100.81
7	2.588 133	5.43	940.38	26	0.387 241	0.82	1 102.62
8	2.717 179	5.17	4 265.64	27	0.699 191	0.80	4 057.18
9	3.108 255	4.22	5 524.54	28	0.563 111 3	0.79	707.18
10	2.879 64	3.81	3 562.64	29	0.456 577 3	0.77	741.48
11	2.358 347	3.35	120.23	30	0.524 645 4	0.76	106.56
12	1.714 828	2.81	1 760.93	31	0.550 111 2	0.76	2 179.58
13	1.627 835	2.69	2 866.12	32	0.231 789 7	0.67	683.60
14	2.160 975	2.53	2 693.36	33	0.611 253 1	0.65	154.35
15	1.661 425	2.47	4 619.52	34	0.358 794 9	0.60	660.25
16	1.257 156	2.13	2 789.13	35	0.576 961 4	0.60	143.18
17	0.184 819 3	2.13	323.16	36	0.568 114 6	0.58	697.36
18	0.333 174 8	1.89	459.35	37	0.597 828 5	0.56	1 096.77
19	0.912 157 6	1.73	1 228.67	38	0.395 277 4	0.55	1 205.13

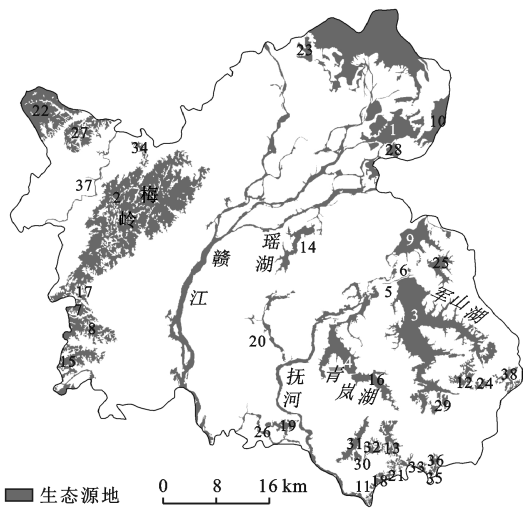


图 2 研究区生态源地及其节点空间分布

2.2 生态阻力面构建

基于 ArcGIS 空间分析, 计算得到南昌市生态综合阻力面(图 3)。研究区整体阻力呈现南高北低、中部高四周低的特征, 该特征对物种迁移和物质能量流动影响较大。由综合阻力面可知, 北部(新建区、进贤

县)阻力值较低, 东部如安义县也存在部分阻力值较低区域。高阻力集中于青山湖区、青云谱区、东湖大部分区域以及进贤县部分地区, 这些地区受交通路网及建设用地影响, 生态斑块遭到破坏, 阻碍动物的生存与迁徙。

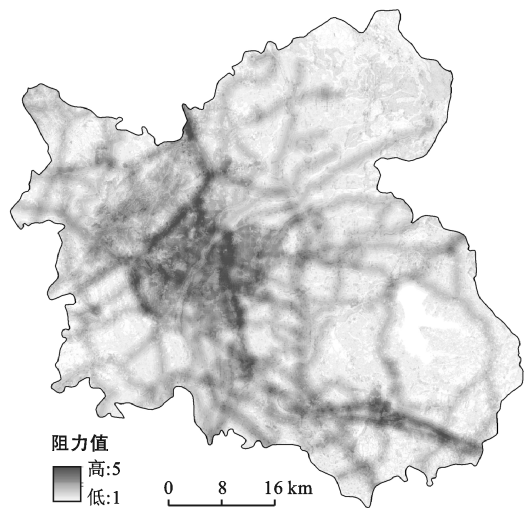


图 3 南昌市综合阻力面

2.3 生态网络结构特征分析

总体而言,南昌市东部地区具有较好的生态环境与较高的斑块连通性,有利于物种生存以及促进生态系统健康与稳定,而其他地区需要不断完善并丰富生态网络,从而整体上提高南昌市生态系统功能。本文基于综合阻力面与 MCR,模拟出 63 条廊道,并结合生态源地构成了南昌市生态网络。由图 4 可知,①生态廊道空间分布不均且较为分散,廊道主要分布于北部与东部。因为东部与北部地区源地分布相对集中且生境质量较好,景观连通性较强。而南北之间以及东西之间出现了廊道的中断现象,破坏了区域整体连通性,物种交流与迁徙造成较大阻碍。②廊道连接单一,易因外界干扰发生断裂而降低网络连通性。

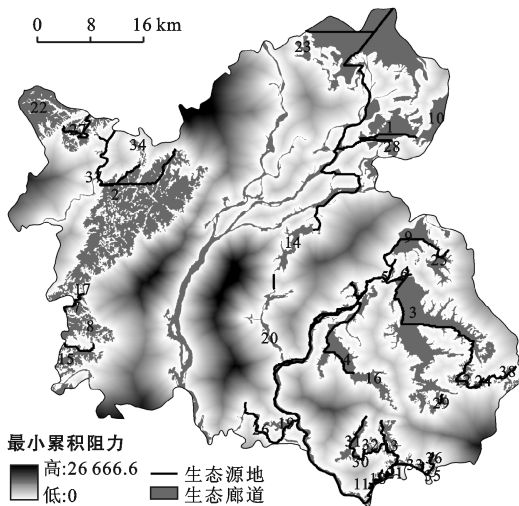


图 4 南昌市生态网络结构

统计不同区域廊道中各景观类型,由表 5 可知:①总体上,廊道中林地、水域等受人类干扰较少且生境质量较高的景观占比超过 90%,而受人类干扰强烈的建设用地占比最小。另外,耕地因具有一定的生境适应性,在廊道中也占据少量比重。②各区域生态廊道景观结构有所差异,新建区与南昌县以水域为主,湾里区以林地为主;而青山湖区以耕地为主,建设用地次之,水域占比较小,生态廊道中没有林地,主要原因可能是青山湖区受人类干扰程度较大,导致廊道中林地缺失,景观结构遭到破坏。此外,安义县与进贤县则以林地与水域为主,耕地次之,建设用地与其他用地较少。综上所述,南昌市生态廊道整体生境适宜性较高,但由于中心城区周边如青山湖区受人类干扰程度相对较大,廊道中林地水域等生态用地极少,廊道生境质量较差,对物种生存与迁徙造成巨大阻碍,急需改善景观结构。

表 5 研究区各区生态廊道景观结构 %

景观类型	林地	水域	建设用地	耕地	其他用地
全市	34.02	64.08	0.11	1.5	0.32
新建区	13.72	85.39	0	0.6	0.29
湾里区	99.16	0.82	0	0.02	0
青山湖区	0	5.17	9.93	84.9	0
南昌县	3.28	95.56	0.23	0.39	0.54
进贤县	45.54	43.52	0	1.8	0.22
安义县	63.36	31.86	0.18	4.57	0.03

为进一步分析廊道重要性,本文利用重力模型计算斑块间的相互作用强度。平均作用强度越大表明源地间联系越紧密,迁移阻力越小,生态廊道重要性越高。由表 6 看出,①斑块间平均相互作用强度自东向西逐渐减少,东部 30 号源地平均作用强度最大,然后依次是 7,1,3,13,4 号源地斑块。平均作用强度较大的斑块分布于东部和北部,因此要加强对该区域内源地斑块的保护。②不同源地间相互作用有较大差距,源地 30,32 之间相互作用程度最大,两个源地联系紧密,物种迁移阻力较小。因此,连接斑块 30,32 可以增加物种迁徙的可能性。应对这两个源地间廊道予以重视并保护,从而维持其在生态网络中的连通作用。而源地 14,20 之间相互作用强度最小,说明这两个源地联系欠佳,不利于物种迁移,因此,生态规划中应加强两个源地间廊道的保护,优化廊道生境质量,强化连通性。

对南昌市生态网络进行重要性分级,将相互作用力大于 100 的廊道作为重要廊道,其余作为一般廊道(图 5)。分级后重要廊道共 19 条,大多位于东部、北部城市边缘的林地和水域,而一般廊道位于城市边缘比较孤立的斑块间。由于重要廊道对维持系统整体功能具有重要意义,建议对其进行重点保护与建设,从而提高生态保护效率。

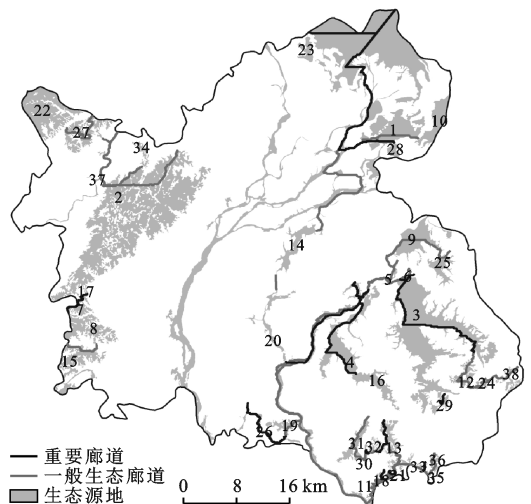


图 5 南昌市生态网络重要性分级

表 6 基于重力模型分析源地间相互作用力强度结果

起点	终点	相互作用力	起点	终点	相互作用力	起点	终点	相互作用力
1	23	1 151.24	4	19	63.24	13	31	5.52
1	28	103.35	4	26	55.17	13	33	4.23
1	10	38.08	4	6	3.18	13	36	2.43
1	14	3.71	4	21	1.95	13	35	2.06
2	17	209.71	4	18	1.49	13	16	1.08
2	7	119.73	4	11	1.43	14	20	0.01
2	8	50.21	4	31	0.58	18	21	320.15
2	34	18.04	5	9	7.15	18	32	61.08
2	37	0.32	5	6	4.49	18	30	42.6
3	12	1 660.84	6	9	1.167	18	31	3.31
3	29	289.61	7	17	1 735.76	19	26	4 839.17
3	6	206.82	7	8	725.70	21	33	5.23
3	24	26.30	8	17	226.62	22	27	10.97
3	4	3.39	8	15	0.86	24	38	0.16
3	16	2.67	9	25	0.55	27	37	0.02
3	9	1.07	10	28	14.94	30	32	20 581.26
3	25	0.16	11	18	26.0	30	31	8.65
3	38	0.088	12	24	60.83	31	32	10.43
4	5	782.76	13	21	1 244.20	33	35	236.82
4	16	654.16	13	32	558.99	35	36	57.27
4	20	189.05	13	18	98.68	36	37	0.47

3 生态网络优化策略与建议

3.1 强化对核心生境斑块的保护

核心斑块作为物种生存和迁徙的重要节点,其数量与质量对生物多样性保护、生态环境改善具有至关重要的作用。研究区水域与林地较为丰富,但分布不均且较为分散,受快速城市化影响,生境斑块出现显著的岛屿化与破碎化现象。因此,应加强赣江、梅岭国家森林公园、青岚湖、军山湖、瑶湖森林公园等生境斑块的保护与建设工作。同时,在保护其完整性基础上加强与周围林地、水域间的统筹与联系,不断扩大斑块面积,提升斑块的生境质量,增强景观连通性与生境适宜性。

3.2 增加核心生态源地,优化网络连接

南昌市东西部之间、南北部之间缺乏廊道连接,导致景观连通性出现中断,考虑到物种迁徙对生态源地的需求,根据核心区 and 廊道的空间分布,优先根据面积与连通性新增源地,共选取 12 个新增源地,根据其空间分布阻力值,建议新增 33 条生态廊道(图 6)。通过新增廊道增强了南北、东西之间有效连通,从而优化研究区生态网络。今后规划管理中应不断提高新增生态源地与廊道的生境质量,提升整体景观连通性,增强生态系统功能。

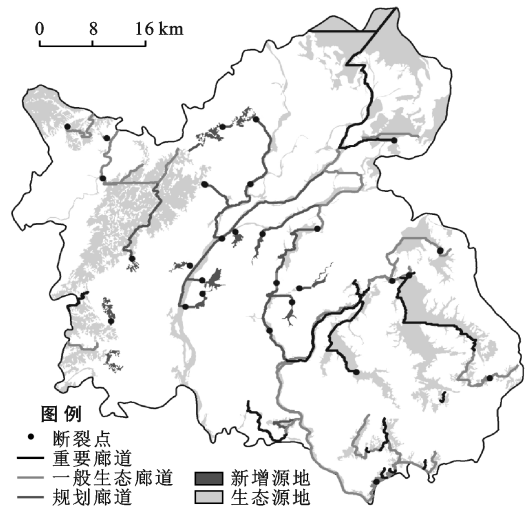


图 6 研究区生态网络优化结果

3.3 加快生态断裂点的修复

路网显著增加带来便捷性的同时也对生态网络造成一定的分割,廊道与交通路线交叉区域形成生态断裂点。断裂点对生物迁徙路径造成阻隔,增加物种迁移难度,甚至造成物种在迁移过程中因车辆撞击而死亡。因而,在生态规划中需要对生态断裂点予以重视,进行必要修复,在建设高等级路网时应该提供动物迁徙的通道,如规划地下通道、隧道、天桥供动物迁徙,从而保障物种交流与扩散。

4 讨论

结合 MSPA 与景观性指数的方法既考虑了斑块面积,又兼顾斑块间的景观连通,更加科学、客观的提取生态源地。本文在源地提取时没有将大型自然保护区或森林公园等作为生态源地,而是结合 MSPA 与景观性指数的方法。通过 MSPA 分析得到生境质量较好、具有生态源地作用的核心区,将生态质量好、连通性较高的斑块作为生态源地。该方法既考虑面积因素,又兼顾了景观要素的结构特征及连通性,有效避免了源地提取的主观性,提高生态源地提取的科学性。

综合考虑自然、人为因素设置景观阻力值,具有一定的科学性。生态网络构建中景观阻力值的设定至关重要,然而目前对景观阻力值设置还未形成统一标准。本文在阻力值设置时,考虑的因素更为全面,既有地形、土地利用类型因素,又有受人为干扰较大的铁路、公路等交通因素,综合考虑对动物迁徙造成阻碍的各方面因素,具有较好的科学性。

本文结合 MSPA 与景观性指数的方法提取生态源地,进而基于 MCR 模型构建生态网络,但仍存在一些不足处:①基于 MSPA 的方法在不同景观尺度具有不同结果^[36]。为避免某些重要景观类型的丢失,本文研究尺度为 30 m×30 m^[37-38],而构建生态网络的最佳尺度还需进一步研究。②在使用 II C 和 PC 计算景观连通性时,需要设定连通距离阈值,当斑块间的距离大于该阈值时,认为斑块不连通。因此,连通距离对斑块的重要性 dPC 值具有重要的影响。本文参考前人研究^[39-40]连通距离阈值为 1 000 m,连通概率为 0.5,存在一定的主观性。③生态阻力面的构建时未考虑不同物种的特性。今后将结合特定物种研究不同距离阈值和景观阻力值对其影响,以期不断完善本文的分析框架与方法体系。

5 结论

(1) 南昌市生态源地主要位于南昌市西部、北部及东部生境质量较高、连通性较好的地区,如赣江、梅岭国家森林公园、军山湖、抚河等林地和水域。

(2) 南昌市整体阻力呈现南高北低、中部高四周低的特征,生态网络空间分布较为分散,闭合环路较少。生态廊道主要集中分布于研究区东部地区,而西部与北部廊道较为单一。此外,重要廊道大多位于东部、北部城市边缘的林地和水域。

(3) 建议增强核心斑块的保护力度,在保护其完整性基础上加强与周围斑块的联系,不断丰富生态网

络。同时,尽快修复生态断裂点,优化及增加不同生态斑块的连通性。

[参 考 文 献]

- [1] Ahmad M, Jiang Ping, 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*, 2020,69:1-10.
- [2] Han Xia, Zhang Wanshun, Wang Hao, et al. Spatial-temporal patterns and characteristics of ecological function between 2009 and 2015 in China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,116:1-15.
- [3] 荣月静,严岩,王辰星,等.基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J].*生态学报*,2020,40(20):7197-7206.
- [4] Chi Yuan, Xie Zuolun, Wang Jing. Establishing archipelagic landscape ecological network with full connectivity at dual spatial scales [J]. *Ecological Modelling*, 2019, 399:54-65.
- [5] Zhao Shuming, Ma Yifei, Wang Jinling, et al. Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126479.
- [6] 张周爱,杜芳,黄超,等.露天矿区的生态网络格局评价:以胜利露天矿区为例[J].*煤炭学报*,2019,44(12):3839-3848.
- [7] Cunha N S, Magalhães M R. Methodology for mapping the national ecological network to mainland Portugal: A planning tool towards a green infrastructure [J]. *Ecological Indicators*, 2019,104:802-818.
- [8] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, et al. Landscape connectivity for wildlife: Development and validation of multispecies linkage maps [J]. *Methods in Ecology & Evolution*, 2014,5(7):626-633.
- [9] 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.
- [10] Dong Jianquan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 199:1-9.
- [11] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].*生态学报*,2013,33(13):4125-4133.
- [12] 谢慧玮,周年兴,关键.江苏省自然遗产地生态网络的构建与优化[J].*生态学报*,2014,34(22):6692-6700.
- [13] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, et al. Mapping landscape corridors [J]. *Ecological Indicators*, 2007,7 (2):481-488.

- [14] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4):456-459.
- [15] 孔繁花,尹海伟.济南城市绿地生态网络构建[J].*生态学报*,2008,28(4):1711-1719.
- [16] 路晓,王金满,李新风,等.基于最小费用距离的土地整治生态网络构建[J].*水土保持通报*,2017,37(4):143-149,346.
- [17] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation [J]. *Landscape ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [18] Mcrae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007,104(50):19885-19890.
- [19] 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.
- [20] Urban D K. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective [J]. *Ecology*, 2001,82(5):1205-1218.
- [21] Zhang Liquan, Wang Haizhen. Planning an ecological network of Xiamen Island(China) using landscape metrics and network analysis [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006,78(4):449-456.
- [22] Zetterberg A, Mörtberg U M, Balfors B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design [J]. *Landscape and urban planning*, 2010, 95(4): 181-191.
- [23] 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.
- [24] Roever C L, Aarde R J V, Leggett K. Functional connectivity within conservation networks: Delineating corridors for African elephants [J]. *Biological Conservation*, 2013,157:128-135.
- [25] Crouzeilles R, Lorini M L, Grelle C E V. The importance of using sustainable use protected areas for functional connectivity [J]. *Biological Conservation*, 2013, 159:450-457.
- [26] Dalang T, Hersperger A M. Trading connectivity improvement for area loss in patch-based biodiversity reserve networks [J]. *Biological Conservation*, 2012,148(1):116-125.
- [27] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2010,94(3/4):186-195.
- [28] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, et al. Mapping landscape corridors [J]. *Ecological Indicators*, 2007,7(2):481-488.
- [29] 吴昌广,周志翔,王鹏程,等.景观连接度的概念、度量及其应用[J].*生态学报*,2010,30(7):1903-1910.
- [30] Mitchell M G E, Bennett E M, Gonzalez A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: Current knowledge and research gaps [J]. *Ecosystems*, 2013,16(5):894-908.
- [31] 刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等.景观生态网络研究进展[J].*生态学报*,2017,37(12):3947-3956.
- [32] 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.
- [33] 李秀全.基于 MCR 与 CA 模型的城市扩张模拟对比分析[D].江西 南昌:东华理工大学,2017.
- [34] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. *Landscape & Urban Planning*, 1992,23(1):1-16.
- [35] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].*生态学报*, 1999,19(1):8-15.
- [36] Ostapowicz K, Vogt P, Riitters K H, et al. Impact of scale on morphological spatial pattern of forest [J]. *Landscape Ecology*, 2008,23(9):1107-1117.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 梁艳艳,赵银娣.基于景观分析的西安市生态网络构建与优化[J].*应用生态学报*,2020,31(11):3767-3776.
- [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.