
基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建^{*1}

陈竹安^{1, 2, 3, 4} 况达^{1, 2, 3*} 危小建^{1, 2, 3} 张立亭^{1, 2, 3}

(1. 东华理工大学测绘工程学院, 江西南昌 330013;

2. 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江西南昌 330013;

3. 江西省数字国土重点实验室, 江西南昌 330013;

4. 江西生态文明建设制度研究中心, 江西南昌 330013)

【摘要】:在我国社会经济快速发展的背景下,城市化进程的不断推进导致城市生态斑块日益减少,生态环境问题正在逐年增加,构建生态网络是改善城市生态环境与服务功能的有效方法之一。以余江县为研究区,采用形态学空间格局分析(MSPA)方法和景观指数法,提取对生态网络具有重要意义的生态源地,并基于MCR模型构建综合阻力面,采用最小成本路径方法生成潜在廊道,再基于重力模型、中介中心度等对关键廊道及踏脚石斑块进行识别并提取,从而构建研究区潜在生态网络。结果表明:MSPA方法能够与MCR模型有机的结合,通过定量的分析识别出研究区潜在生态廊道,并根据斑块的中介作用选定踏脚石斑块,明确研究区景观要素的保护优先度,将景观中的潜在生态源地及廊道作为生态网络构建的主要依据,能够更加科学地为余江县生态网络的构建提供指导,同时也可与其他区域提供参考。

【关键词】:MSPA; MCR; 生态网络; 景观连通性; 余江县

【中图分类号】:X171.4 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)08-1199-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201708010

随着我国城市化日趋加快,城市空间持续扩张,快速发展的过程在带来经济大幅度增长的同时,也使得区域内维持生态功

¹ 收稿日期:2016-12-11; 修回日期:2017-02-23

基金项目:江西省高校人文社会科学课题(GL1501) [Jiangxi College Humanities and Social Science Subjects(GL1501)]; 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室资助课题(WE2016018) [Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring NASG(WE2016018)]; 东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金项目(DLLJ201720) [Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology (DLLJ201720)]

作者简介:陈竹安(1978~), 男, 副教授, 主要研究方向为测绘技术、土地信息技术以及遥感数据处理. E-mail:cza53@qq.com

***通讯作者** E-mail:kuang3171@163.com

能稳定的大型生境斑块变得被逐渐破碎，斑块之间的连接出现弱化，城市的生态系统服务和可持续发展能力被逐渐削弱^[1, 2]，从而导致城市内部的生境斑块面积不断减少。斑块“孤岛化”现象日益严重，使正常景观生态过程的运转和调控能力受到了阻碍，并且生态廊道遭到破坏，使得生物物种的迁移及物质能量的传播受到了阻碍，对生态系统的服务功能产生影响^[3~5]。构建生态网络是增加区域大型生态斑块连接度的有效方法之一，通过境内潜在的廊道和踏脚石(Stepping Stone)将孤立破碎的生态斑块连接起来，形成完整的生态网络，改善破碎化景观对生物多样性的影响，促进斑块间基因及物种的交流，增强生境网络的功能型连通性，有效地改善区域自然生态系统服务功能，具有重要的生态意义^[6~10]。

自 20 世纪 90 年代以来，学术界对生态网络的研究逐渐增多，其中能够综合考虑区域内地形、地貌、环境、人为干扰等多方面因素的最小累积阻力模型(MCR, Minimal Cumulative Resistance Model)，通过构建区域累积阻力面从而较为科学地判断并模拟生成潜在的生态廊道，但对于廊道的相对重要程度还需通过重力模型、图谱理论等进行定量分析^[11~13]。然而，生态源地的选择是 MCR 模型的关键，目前大多数研究直接选取生态服务价值较好的森林公园或自然保护区作为生态源地，主观性干扰较大，忽视了斑块在景观中的连接性作用^[14~17]。

近年，有专家学者在研究城市景观格局时引入形态学分析方法，通过形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)探索景观格局分析的新思路^[18~21]。该方法由 Vogt 等^[22, 23]专家学者基于膨胀、腐蚀、开闭运算等数学形态学原理而提出，能够更为精准的对栅格图像的空间格局在功能型结构上进行分类。区别于传统的仅选取自然保护区和森林公园为源地的方式，本文采用的形态学空间格局分析方法是从小像元层面上识别出对景观连通性有重要作用的区域(如:生境斑块和廊道等)^[24, 25]。该方法仅依赖于土地利用数据，将重分类后栅格图像分别设置前景(foreground)与背景(background)，并根据前景像元按其结构形态，通过多种图像处理方法将其分为各具功能的七类(表 1)，进而能够识别出具有不同生态学意义的景观类型，增加生态源地选取的科学性^[26, 27]。

表 1 MSPA 景观类型及生态学含义

Tab. 1 Landscape Types and Ecological Implications of MSPA

景观类型	生态学含义
核心区	可作为多种生态过程的“源”，多为斑块面积较大的森林公园、大型林场等，对物种繁衍及保护生物多样性具有重要意义
连接桥	连接不同核心区斑块的狭长区域，且具有生态廊道的特征，多为呈带状的绿化带，有利于物种迁徙以及境内景观的连接作用
边缘区	处于核心区的边缘地带，与外围非绿色景观区域之间的过渡区域，可减少外界环境及人为干扰带来的冲击，通常为森林公园、大型林场等的外围林带
支线	只有一端与主要斑块相连的区域，主要为绿色空间的延伸区域，是其与外围景观进行物种扩散和能量交流的通道
环岛	同一核心区斑块进行物质能量交流的的内部通道，是核心区内部物质能量交流的捷径
孤岛	处于相互独立且连接度较低的小型斑块，与其他斑块进行物质、能量交流的可能性较小，多为城市或农村的小型绿地
孔隙	作为一个过渡区域同样具有边缘效应，存在于核心区斑块与其内部非绿色空间之间

以余江县为研究区，基于 MSPA 方法识别并提取出研究区域内生态功能最好的核心区景观类型。根据景观指数中的整体连通性(IIC)、可能连通性(PC)、斑块重要性(dPC)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生态源地；通过 MCR 模型使用最小路径方法生成生态廊道，并基于重力模型判定廊道的相对重要性；再通过中介中心度识别中介作用较好的斑块作为踏脚石，并规划研究区内潜在廊道，从而构建生态网络。研究结果可为余江县生态网络建设与城市规划提供依据，对其他城市生态系统建设与规划也具有一定的参考价值。

1 研究区概况

余江县隶属于鹰潭市，地处江西省东北部，东与月湖区接壤，南和金溪县毗邻，西界东乡县，北靠万年县。位于 116° 41' ~

117° 09' E, 28° 04' ~28° 37' N之间。全县南北长达 75km, 东西宽 28.65km, 地势主要为南北居高, 并逐渐向中部倾斜, 地貌类型以低丘岗地为主, 南北有少量丘陵, 中部为河谷平原, 气候类型属亚热带湿润季风气候, 雨水充沛, 日照充足, 境内交通便利, 铁路、高速公路纵横交错。

2 数据与方法

2.1 数据与处理

本研究所采用的主要数据有:余江县 2013 年土地利用数据、余江县 DEM 数据(来源于地理空间数据云网站)、余江县路网数据(来源于 Open-Street Map 网站)。按照实际情况和研究目的, 将余江县土地利用类型划分为耕地、林地、水域、建筑用地和其他用地 5 类, 最终得到栅格单元大小为 30m×30m 的栅格类型土地利用类型图(图 1)。

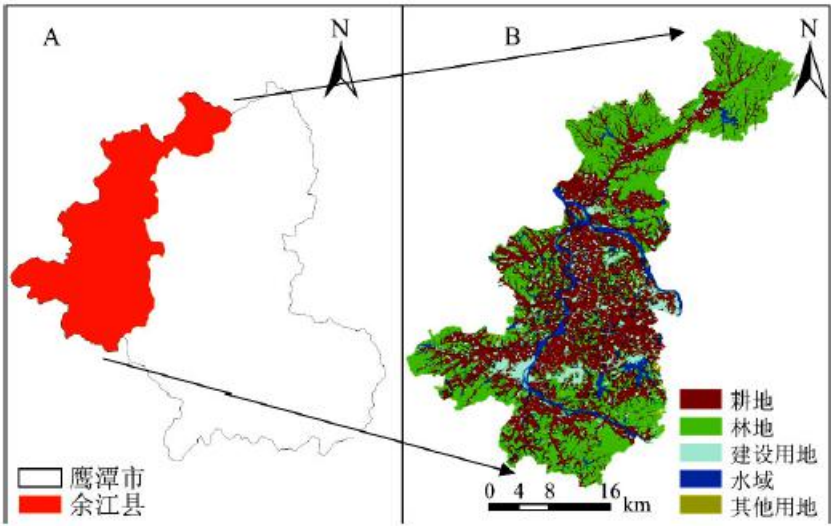


图 1 研究区地理位置图(A)与土地利用类型图(B)

Fig. 1 Location of Study Area (A), and Land Use (B)

2.2 研究方法

2.2.1 基于 MSPA 方法的景观格局分析

首先, 将研究区土地利用数据转换为栅格类型土地利用类型图, 将 5 类用地中的林地作为研究区 MSPA 分析的前景, 其余用地类型作为背景。由于研究区为余江县总面积为 932.8km², 县域面积较小, 因此选择使用使用栅格单元大小为 30m×30m, 能够较好地保留研究区细小但却重要的景观要素, 使研究数据精度达到要求。其次, 运用 Guidos Toolbox 分析软件对栅格数据进行 MSPA 分析, 通过腐蚀计算得到核心区斑块, 在对其进行一系列的扩张重建、骨架抽取等数学运算分别获得其余 6 类景观, 由此可得到功能类型不同的 7 类景观(图 2, 表 1), 并统计其分析结果(表 2)。

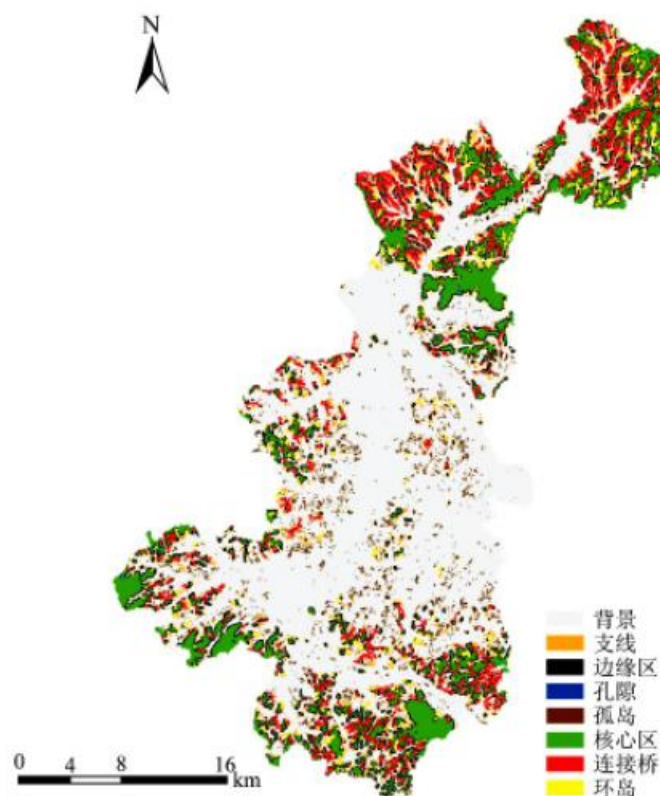


图 2 MSPA 分析结果图

Fig. 2 Analysis Results of MSPA

表 2 MSPA 分类统计表

Tab. 2 Classification Statistics Table of MSPA

景观类型	面积 (hm^2)	占林地景观总面积 (%)	占总面积 (%)
核心区	11 842.78	34.44	12.70
连接桥	7 360.37	21.41	7.89
边缘区	7 306.40	21.35	7.83
支线	3 219.33	9.36	3.45
环岛	2 156.69	6.27	2.31
孤岛	2 414.43	7.02	2.59
孔隙	81.96	0.25	0.09

2.2.2 研究区景观连通性评价

区域内景观连接度水平能够对某一景观类型是否适宜物种交流及迁移进行定量的表征，对于生物多样性的保护以及生态系统的平衡，景观连通性都具有重要的意义^[28, 29]。

目前，在景观连通性评价方面，整体连通性连接指数(IIC，公式 1)、可能连通性连接指数(PC，公式 2)以及斑块重要性指数(dPC，公式 3)等是国内外常用的景观连接度评价指数，作为衡量景观格局与功能的重要指标，能够较好地反映出区域内核心斑块间的连接度水平。

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \tag{1}$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A_L^2} \tag{2}$$

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

式中:n表示区域内斑块的总数； a_i 和 a_j 分别为斑块*i*和*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；PC表示某一斑块在研究区景观中的可能连接度指数， $0 \leq PC \leq 1$ ，PC值越大，意味斑块连接程度越高；dPC表示斑块的重要性， PC_{remove} 表示去除该斑块后的可能连接度指数。

选用 Conefor 软件，通过 IIC、PC 和 dPC 景观指数，对研究区内的核心区斑块进行景观连接度评价。并将得到的 dPC 值大于 5 的 10 个核心区斑块作为生物物种发展及繁衍的源地(表 3)。

表 3 基于景观连通性的核心区重要度排序
Tab. 3 Ranking of the Importance of Core Area
Based on Landscape Connectivity

排序	编号	dPC	dIIC
1	5	26.05	15.98
2	4	21.99	13.25
3	7	19.35	13.55
4	2	17.64	8.37
5	1	14.30	5.40
6	9	14.25	15.47
7	6	12.94	6.61
8	3	8.85	2.90
9	10	5.62	7.61
10	8	5.58	6.37

2. 2. 3 基于 MCR 模型的生态网络构建

最小累积阻力 (MCR, Minimal Cumulative Resistance Model) 模型由俞孔坚引入国内, 具有构建的简易性、要素的可拓性及应用的广泛性的特点, 能够通过计算源与目标之间的最小累积阻力距离来确定路径, 从而较好地反映景观中的物质能量及生物物种在各生境斑块间的运动可能性和趋向性^[30]。最小累积阻力模型经过多位专家修改后公式如下:

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

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。

MCR 模型建立的关键是源的选取和阻力面体系的构建, 其核心过程是源在阻力面体系下对周围空间单元的竞争性扩散过程。本文结合 MSPA 及景观连接度分析评价结果, 按照核心区斑块 dPC 值大小选取了 10 个生态过程的源地, 并选取高程、坡度、用地类型、与铁路距离以及与其他道路距离等阻力因子通过“综合加权指数和法”构建综合阻力面。

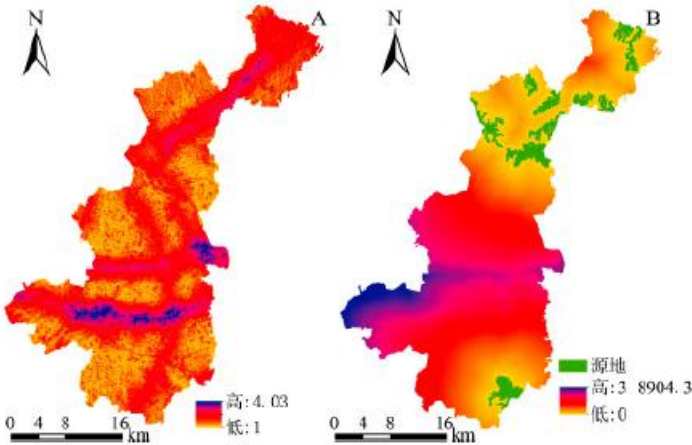


图3 研究区综合阻力面(A)与最小累积阻力面(B)
Fig. 3 Comprehensive Resistance Surface (A), and
Minimal Cumulative Resistance Surface (B)

参考国内外相关研究成果, 采用专家打分法确定各因子的阻力分值及权重, 构建阻力体系, 共分 5 个阻力分值, 分值越高表示生物物种的扩散过程的阻力越大(表 4)。采用 30m×30m 的栅格单元大小, 使用栅格计算器得出综合阻力面, 作为 MCR 模型的成本数据。

表 4 阻力因子分级赋值及权重

Tab. 4 Score and Weight of Resistance Factors

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	0.17
	3~8	2	
	8~15	3	
	15~25	4	
	>25	5	
土地利用类型	林地	1	0.15
	耕地	2	
	其他用地	3	
	水域	4	
	建设用地	5	
与铁路距离 (m)	>2 000	1	0.14
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	
与主干道距离 (m)	>2 000	1	0.13
	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	0.13
	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	0.13
	1 500~2 000	2	
	1 000~1 500	3	
	500~1 000	4	
	<500	5	

然后, 基于 ArcGIS 软件平台, 通过使用 Distance 中的 Cost Distance 模块, 利用生态源地和综合阻力面计算每个像元到成本面上最近单元的最小累积成本距离, 再使用 Distance 中的 Cost Path 模块计算从源到目标斑块的最小成本路径, 从而生成了研究区的 45 条潜在廊道(图 4), 通过重力模型, 计算 10 个生态源地斑块间的相互作用矩阵(表 5), 以量化的方式评价各源地斑块间的相互作用强度, 从而能够更为科学地判断区域内潜在廊道的相对重要程度, 并结合研究区实际情况, 得到研究区生态

网络图(图 4)。

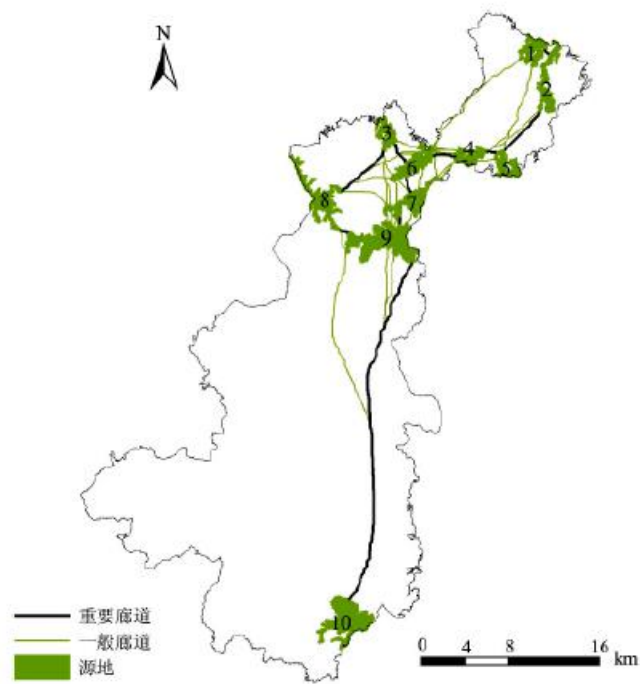


图 4 研究区潜在生态廊道图
Fig. 4 Study Area Potential Ecological Corridor Map

表 5 基于重力模型的斑块间相互作用矩阵
Tab. 5 Interaction Matrix Based on the Gravity Model

斑块编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1 080.79	1.77	4.00	5.01	0.54	0.82	0.42	0.17	0.03
2		0	2.03	12.06	25.47	1.37	1.46	0.47	0.24	0.04
3			0	17.40	8.27	130.42	15.40	19.38	2.91	0.11
4				0	1 383.81	37.57	37.03	2.28	1.35	0.08
5					0	7.73	8.40	1.54	0.85	0.09
6						0	51.08	7.00	2.66	0.05
7							0	6.45	427.55	0.07
8								0	54.54	0.06
9									0	0.04
10										0

重力模型公式如下：

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

$$= \frac{L_{\max}^2 \ln(S_i S_j)}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (5)$$

式中: G_{ij} 是斑块 i 与斑块 j 之间的相互作用强度; N_i 与 N_j 分别为斑块 i 与斑块 j 的权重系数; D_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间潜在廊道的标准化阻力值大小; P_i 为斑块 i 的整体阻力值; S_i 为斑块 i 的面积; L_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间潜在廊道的累积阻力值; $L_{\max}$ 为研究区内所有廊道的最大阻力值。

最后, 通过 GIS 软件中的 Matrix Green 分析工具中的 Betweenness Centrality 模块, 通过中介中心度计算得出在生态网络中中介作用较好的绿地斑块, 依据其分值高低规划 10 个绿地斑块为踏脚石斑块以构建生态网络(图 5)。

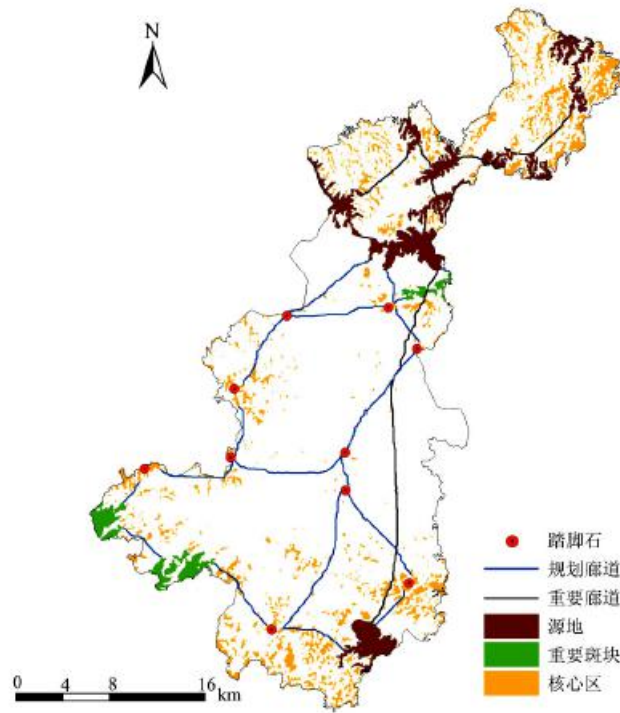


图 5 生态网络规划图
Fig. 5 Ecological Network Planning Map

中介中心度公式如下:

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1; k=1; j \neq k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (6)$$

式中: N 为网络中的节点个数; N_{jk} 节点 j 与节点 k 间的最短路径的条数; $n_{jk}(i)$ 为两节点 j 与节点 k 间的最短路径经过节点 i 的条数。在生态网络中,中介中心度越高的节点,在网络中起到枢纽的作用也就越明显,可作为重要的踏脚石斑块。

3 结果分析

3.1 基于 MSPA 方法的景观格局分析

由图 2、表 2 可以看出,研究区内核心区景观面积约为 11842.78hm²,占林地总面积的 34.44%,其主要密集分布在研究区北部及南部区域,中部区域较为稀少,导致研究区南北部景观连通性较差,不利于核心区斑块间的生物及物质的扩散与交流。连接桥面积约为 7360.37hm²,占林地总面积的 21.41%,对研究区内核心斑块之间的物质与能量的交流具有重要意义。作为核心区与外围非绿色景观区域之间的过度区域,边缘区约占林地总面积的 21.35%,具有边缘效应,可减少由于外界因素干扰带来的冲击。孤岛斑块主要散落分布在研究区的中部位置,约占林地总面积的 7.02%,因其面积较小,可作为生物的踏脚石。在核心斑块内部起廊道作用的环岛约占林地总面积的 6.27%,具有一定连通作用的支线以及斑块内部边用孔隙分别占占林地总面积的 9.36%、0.25%。

3.2 研究区景观连接性分析

由表 3、图 4 可知,按照核心区 dPC 值大小选取了 10 个生态过程的源地,其主要是研究区内的大型林场,如云峰林场(斑块 8)、鸿塘镇林场(斑块 9)、管坊林场(斑块 10)等,表明连通性较好的核心斑块主要集中分布在研究区的北部,相对于中部及南部地区,北部地区的生境斑块更适宜生物物种的迁移与物质能量交流,能够更好地为物种提供栖息地和源地。然而研究区整体连通性较差,南北区域断层十分严重,南部区域仅有一个评分较高的绿地斑块,就整体而言,十分需要在中部及南部地区建设踏脚石绿地斑块,从而维持研究区生态服务功能的良好发展以及生态系统的平衡,需要重点保护。

3.3 生态网络构建结果分析

由图 4、表 5 可见,基于重力模型生成的斑块间相互作用矩阵可以通过量化的方式测度斑块之间联系的强弱,进而可推断出斑块之间廊道在区域内对生态系统的重要程度。如斑块 4 与斑块 5 之间的相互作用最强,表明两斑块之间的关联性最强,生物物种克服阻力进行迁移的可能性较大,两斑块之间物质能量的交流与传播也更为简单,因此须加强此廊道的保护工作,避免由于建设用地的扩张而遭到破坏。由于斑块 9 到斑块 10 的距离最远,因此两斑块之间进行交流的可能性最小,但是从整体上来看,在生态网络规划当中,由于研究区南部和北部区域连接较弱,需要架起南北区域间进行物质能量交流的桥梁,以保证研究区的整体景观连通性,因此,斑块 9 与斑块 10 之间的廊道显得尤为重要,保护好此廊道有利于研究区南北区域之间的物种迁移,对研究区整体生态网络的构建具有重要意义。

如图 5 所示,由于南部区域与北部区域景观连通性较差,因此,增加踏脚石斑块的构建具有重要的意义,本文将 MSPA 方法提取的核心区斑块的空间位置分布,并综合考虑其斑块重要程度,将 dPC 值较大的 3 个斑块选取为研究区生态建设的重要斑块,需对其重点保护,使之可发展成为南部及中部地区的生态源地;通过中介中心度选出分值较高的 10 个绿地斑块作为踏脚石斑块,主要是境内山区、林场、森林公园等,如马岗岭森林公园、坞桥林场等,对提升生物物种在迁移过程中的成活率以及生态服务价值的改善尤为重要;并规划根据斑块间阻力值及空间分布出 19 条廊道以增加斑块间廊道连接得到有效性,采用网络分析法中网络闭合度指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)、网络连通率指数(γ 指数)对研究区规划前后的生态网络质量进行计算^[10, 31]。规划前 α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.48、1.96、0.65,规划后为 0.89、2.78、0.93,经统计,规划后生态斑块连接的有效性有了明显的提高,表明生态网络的规划对研究区网络连接水平具有重要的意义。

4 结论与讨论

本文以江西省余江县为研究区，从生态景观规划的角度出发，针对如何科学确定生态源地与定量评价源地与廊道重要性问题，基于 MSPA 方法及 MCR 模型构建研究区生态网络，对保护生态斑块和物种的生存环境具有重要意义：

(1) 本文采用 MSPA 方法对研究区内林地景观进行分析，在生态源地选取的方式上，不仅考虑到生态服务价值，还从强调结构性连接的角度出发，通过形态学原理识别出具有重要生态意义的核心区景观类型，通过 PC 和 IIC 两个景观指数，定量地评价研究区核心斑块的重要程度，在一定程度上改变以往人工选取生态源地的主观性，在生态源地选取方式上有所改进；

(2) 基于 MCR 模型综合考虑多种阻力因素，通过综合指数加权法构建生态阻力面，生成研究区生态源地间的最小阻力廊道，并根据源地间相互作用强度，通过重力模型评价廊道的重要程度，定量地分析了廊道的优先保护顺序；

(3) 通过中介中心度定量地评价斑块的中介作用，从而选取对网络连接具有重要意义的踏脚石斑块，增强斑块间的连接性，规划出研究区生态网络。研究结果表明：MSPA 方法与 MCR 模型能够有机的统一，是生态网络规划的一种新思路，可对城市生态网络的建设提供参考。

使用 MSPA 方法对景观进行分析时，研究尺度较为敏感，粒度的变化通常会对 MSPA 的分析结果产生影响。选择合适的尺度是 MSPA 研究的一项重要内容^[32, 33]。本文研究区域为余江县，县域面积小，较大的粒度会导致一些连通作用较好的小型斑块丢失，因此设定粒度大小为 30m。

此外，生态阻力值的设定对构建生态网络影响较大，但是目前国内外并没有形成公认的标准，由于缺少研究区详细的生态资料，并没有具体考虑某个物种的生活特性而构建生态网络。本文试图改善并提高研究区生境斑块的连接性，完善区域内生态系统的服务功能，使生态环境质量加以改善，避免由于城市扩张而导致的生态系统破坏，实现保护与增长的有机统一^[22]。

最后，在使用 Conefor 软件计算景观连通性时，设置连通距离阈值为 500m，连通概率为 0.5，而阈值的设定会对连通性指数的计算有一定的影响，对于阈值大小的科学性还需更为详细的研究^[34]。

参考文献：

- [1] 尹海伟，孔繁花，祈毅，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.
- 【YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (10) : 2863—2874. 】
- [2] 张琳琳，孔繁花，尹海伟，等. 基于景观空间指标与移动窗口的济南城市空间格局变化 [J]. 生态学杂志，2010，29(08)：1591—1598.
- 【ZHANG L L, KONG F H, YIN H W, et al. Spatial pattern change of Jinan City based on landscape metrics and moving window method [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(08) : 1591—1598. 】
- [3] 丁立仲，徐高福，卢剑波，等. 景观破碎化及其对生物多样性的影响 [J]. 江苏林业科技，2005，32 (04)：45—49, 57.
- 【DING L Z, XU G F, LU J B, et al. Landscape fragmentation and its effect on biodiversity [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2005, 32(04) : 45—49, 57—57. 】

[4] 王亚明, 薛亚东, 夏友福. 滇西北滇金丝猴栖息地景观格局分析及其破碎化评价[J]. 林业调查规划, 2011, 36(02) : 34—37.

【WANG Y M, XUE Y D, XIA Y F. Landscape Pattern and Its Fragmentation Evaluation of Habitat of *Rhinopithecus bieti* in Northwest Yunnan [J]. Forest Inventory and Planning, 2011, 36(02) : 34—37. 】

[5] 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(07) : 1903—1910.

【WU C G, ZHOU Z X, WANG P C, et al. The concept and measurement of landscape connectivity and its applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(07) : 1903—1910. 】

[6] HARGROVE W W, HOFFMAN F M, EFROYMSON R A. A practical map-analysis tool for detecting potential dispersal corridors [J]. Landscape Ecology, 2005, 20(4) : 361—373.

[7] PAETKAU D, WAITTS L P, CLARKSON P L, et al. Variation in genetic diversity across the range of North American brown bears [J]. Conservation Biology, 1998, 12(02) : 418—429.

[8] COOK E A. Urban landscape networks: an ecological planning framework [J]. Landscape Research, 1991, 16(3) : 7—15.

[9] 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(04) : 1711—1719.

【KONG F H, YIN H W. Developing green space ecological networks in Jinan City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(04) : 1711—1719. 】

[10] 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(01) : 144—152.

【WANG H Z, ZHANG L Q. A GIS, Landscape pattern and network analysis based planning of ecological networks for xiamen island [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(01) : 144—152. 】

[11] ZHANG L, WANG H. Planning an ecological network of Xiamen Island (China) using landscape metrics and network analysis [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 78: 449—456.

[12] KONG F, YIN H, NOBUKAZU N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling [J]. Land-scape and Urban Planning, 2010, 95: 16—27.

[13] ZETTERBERG A, M RTBERG U M, BALFORS B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 95: 181—191.

[14] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例 [J]. 生态学报, 2010, 30(05) : 1157—1166.

【SUN X B, LIU H Y. Optimization of wetland landscape patterns based on ecological function evaluation: a case study on the coastal wetlands of Yancheng, Jiangsu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5) : 1157—1166. 】

[15] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划 [J]. 生态学报, 2011, 31(20) : 5928—5936.

【LI H, YIN, YAO W J, WANG S Q, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20) : 5928—5936. 】

[16] 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.

【WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (13) :4125—4133. 】

[17] 王思易, 欧名豪. 基于景观安全格局的建设用地管制分区 [J]. 生态学报, 2013, 33(14) : 4425—4435.

【WANG S Y, OU M H. Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14) : 4425—4435. 】

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

[19] SAURA S, VOGT P, VEL ZQUEZ J, HERNANDO A, et al. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2) : 150—160.

[20] WICKHAM JD, RIITERS KH, WADE TG, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4) : 186—195.

[21] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns [J]. Recognition Letters, 2009, 30(4) : 456—459.

[22] 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.

【XU F, YIN H W, KONG F H, et al. Developing ecological networks based on mspa and the least-cost path method: a case study in bazhong western new district [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19) : 6425—6434. 】

[23] 邱瑶, 常青, 王静. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施网络规划_以深圳市为例 [J]. 中国园林, 2013, 29(5) :104—108.

-
- 【QIU Y, CHANG Q, WANG J. A MSPA-based Planning of Urban Green Infrastructure Network—A Case of Shenzhen [J]. Chinese Landscape Architecture, 2013, 29 (05) : 104 —108. 】
- [24] 郭诗怡. 基于生态网络构建的海淀区绿地景观格局优化 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016
- 【GUO S Y. Optimizing landscape pattern in Haidian District, based on ecological network construction [D]. Beijing : Beijing Forestry University, 2016】
- [25] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 等. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究[J]. 生态学报, 2015, 35 (02) : 526 —536.
- 【CAO Y K, FU M C, XIE M M, et al. Landscape connectivity dynamics of urban green landscape based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and linear spectral mixture model (LSMM) in Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (2) : 526—536. 】
- [26] SUN J, SOUTHWORTH J. Indicating structural connectivity in Amazonian rainforests from 1986 to 2010 using morphological image processing analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34: 5187—5200.
- [27] 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 (07) : 2119—2127.
- 【YU Y P, YIN H W, KONG F H, et al. Scale effect of Nanjing urban green infrastructure network pattern and connectivity analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (07) : 2119—2127. 】
- [28] CLERGEAU P, BUREL F. The role of spatio-temporal patch connectivity at the landscape level: an example in a bird distribution [J]. Landscape Urban Planning, 1997, 38 (1/2) : 37—43.
- [29] TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure [J]. Oikos, 1993, 68 (3) : 571—573.
- [30] 黄丽明, 陈健飞. 广州市花都区城镇建设用地适宜性评价研究——基于 MCR 面特征提取 [J]. 资源科学, 2014, 36 (07) : 1347—1355.
- 【HUANG L M, CHEN J F. Suitability Evaluation of Urban Construction Land Based on Features Extraction of a MCR Surface [J]. Resources Science, 2014, 36 (07) : 1347—1355. 】
- [31] 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 (06) : 1608—1616.
- 【YU Y P, YIN H W, KONG F H, et al. Analysis of the temporal and spatial pattern of the green infrastructure network in Nanjing, based on MSPA [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35 (06) : 1608—1616. 】
- [32] 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.

[33] 周婷, 彭少麟. 边缘效应的空间尺度与测度 [J] . 生态学报, 2008, 28(07) : 3322—3333.

【ZHOU T, PENG S L. Spatial scale an measurement of edge effect in ecology [J] . Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(07) :3322—3333. 】

[34] 刘常富, 周彬, 何兴元, 等. 沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择 [J] . 应用生态学报, 2010, 21(10) : 2508—2516.

【LIU C F, ZHOU B, HE X Y, et al. Selection of distance thresholds of urban forest landscape connectivity in Shenyang City [J] . Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10) :2508—2516. 】