

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

杨志广 蒋志云* 郭程轩 杨晓晶 许晓君 李 潇 胡中民 周厚云

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘 要 构建生态网络对改善快速城市化背景下城市生态环境问题具有重要作用.本研究以广州市为研究区,采用形态学空间分析方法(MSPA)和景观指数法,提取景观连通性较好的核心区作为生态源地,并基于最小累积阻力模型(MCR)构建广州市生态廊道网络,通过重力模型和连通性指数定量分析生态网络结构,最后提出生态网络的优化对策.结果表明:广州市共有10块核心区可作为生态源地,重要廊道有18条,一般廊道有27条,主要分布在研究区东北部;优化后的生态网络增加了5个生态源地和13条规划廊道,其结构指数有所改善;林地是生态廊道的主要组成景观,重要廊道的适宜宽度为60~100 m,规划廊道的适宜宽度为30~60 m.研究结果可为城市生态廊道规划提供科学参考.

关键词 生态廊道;生态阻力面;形态空间格局分析(MSPA);最小累积阻力模型(MCR);景观格局指数

Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou City, China. YANG Zhi-guang, JIANG Zhi-yun*, GUO Cheng-xuan, YANG Xiao-jing, XU Xiao-jun, LI Xiao, HU Zhong-min, ZHOU Hou-yun (School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China).

Abstract: Construction of ecological network is important for improving urban ecological environment under the scenarios of rapid urbanization. We extracted the core area with good connectivity as the ecological sources with the methods of morphological spatial pattern analysis (MSPA) and landscape index with Guangzhou City as the study area. The ecological network was then constructed by minimal cumulative resistance (MCR) model and was quantitatively analyzed by gravity model and connectivity indices. After that, an optimized ecological network was finally constructed. The results showed that ten core patches could be used as ecological sources. In addition, eighteen important corridors as well as twenty-seven general corridors were identified, which were mainly distributed in the northeast part of the city. Five more ecological sources and thirteen more planning corridors were suggested under the optimized ecological network. Our results indicated that forests were the main composition of ecological corridors. The appropriate width for the important corridor and planning corridor was 60-100 m and 30-60 m, respectively. Our results provide scientific guidance for designing urban ecological network.

Key words: ecological corridor; ecological resistance surface; morphological spatial pattern analysis (MSPA); minimal cumulative resistance (MCR); landscape pattern index.

随着城市化的快速推进,城市景观中自然景观要素不断减少,生态斑块破碎化现象更加明显,严重

影响生物多样性保护和城市可持续发展^[1-2].生态网络是一种在开敞空间中利用各种廊道、将景观中的资源斑块进行有机连接,形成连续空间结构的网络体系^[3],主要由生态源、生态廊道、生态节点和景观基质等基本要素构成.生态网络可以通过生态廊道有效地连接破碎化斑块,形成连续的空间结构,减轻

本文由广东省自然科学基金博士科研启动项目(8S0198)资助 This work was supported by the PhD Start-up Project of Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (8S0198).

2018-03-21 Received, 2018-07-20 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyjiang@senu.edu.cn

生境破碎化的危害,有利于生物多样性的保护与区域生态质量的改善,因此,合理建设城市生态网络,对于推动城市生态文明建设和可持续发展具有重要意义^[4]。

20世纪90年代以来,国内外许多学者从景观生态学角度,尝试构建不同空间尺度下的生态网络,产生了许多模型和方法,其中最常见的方法有最小累积阻力(MCR)模型、图论方法与电流理论。MCR模型是一种基于GIS技术,能够计算物种从生态源地不同景观土地利用类型所消耗的费用模拟最小累积阻力路径,从而构建生态网络,目前在相关研究领域已得到广泛应用^[5]。MCR模型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,且具有数据量少、结果以地图表达等优势。该模型通常结合重力模型、图谱理论和连接指数等来定量评价和优化生态网络^[6-7]。国内学者利用MCR模型在南京都市区^[8]、安徽省宁国市^[9]和鄂尔多斯市准格尔旗^[10]等开展了一系列生态网络规划研究,使该模型在生态网络构建方面的研究理论更加完备。生态源地的选择是MCR模型构建生态网络的关键,但在目前的相关研究中,生态源地的选取存在一定主观性,忽视了斑块在景观中的连通作用^[11]。近年来有学者通过形态学空间格局分析(MSPA)的方法,对余江县和巴中西部新城的生态网络进行分析^[7,11],避免了直接将面积较大或生态服务价值较高的自然保护区和森林公园作为生态源地所带来的主观性,弥补了MCR模型的不足,使生态源地的选取和生态廊道的网络构建更具科学性。这一方法在城市绿色基础设施构建方面也逐步得到应用^[3,12]。

广州市自改革开放以来,在经济社会快速发展的同时,城市建设用地不断扩张,城市内重要的生境斑块面临极大威胁。对此,广州市提出了相应的生态网络的规划建设方案。1984年广州的总体规划第一次提出了“生态隔离”的概念,2009年广州市战略规划中明确提出“区域-组团-单元”三级生态廊道体系,而在2016年出台的《广州市生态文明建设规划纲要(2016—2020年)》^[13]中,广州市政府提出打造都会区生态廊道,形成“三纵五横”生态廊道网络系统。关英敏^[14]对广州市天河区城市生态廊道的建设进行相关研究,提出了城市生态廊道建设的层次结构、总体布局等规划构想;蒋思敏等^[15]利用MCR模型构建了广州市绿地生态网络体系,并对其进行了评价。但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,主观性较强。

本研究基于MSPA和MCR模型构建广州市生态网络,旨在通过MSPA模型选取生态源地,避免生态源地选取的主观性;结合广州市不同土地利用类型的景观格局指数和生态服务价值生成阻力面,基于MCR模型构建适合广州市的生态网络;通过重力模型和连通性指数定量分析生态网络结构,最后提出生态网络的优化对策,以为广州市生态网络的构建提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

广州市地处我国南部、广东省中南部、珠江三角洲中北缘(22°26′—23°56′N,112°57′—114°3′E),市辖越秀、海珠、荔湾、天河、白云、黄埔、南沙、番禺、花都、从化和增城11个区。总面积为7434.4 km²,占全省陆地面积4.2%。广州市属于典型的南亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,地势东北高、西南低,北部和东北部是山区,中部为丘陵、盆地,南部为珠三角沿海冲积平原。境内水系发达,珠江及其支流贯穿整个广州,全市水域面积744 km²,占全市土地面积的10.1%。

广州市是我国最早对外开放的沿海城市之一,是我国南方最大的滨海城市,素有中国“南大门”之称。2016年地区生产总值达19610.94亿元,居广东省第一位。广州市人口众多,2016年广州市常住人口达1404.35万,全市常住人口密度为1889人·km⁻²。大量聚集的人口和经济活动,给广州市的城市生态环境带来巨大压力。

1.2 数据来源与预处理

本研究数据主要有2016年2月7日Landsat8 OLI多光谱遥感影像和30 m分辨率的ASTER GDEM数字高程数据(数据来源: <http://www.gscloud.cn/>)。

利用ENVI 5.2软件对遥感图像进行几何校正、大气校正,采用支持向量机的方法进行监督分类。根据研究需要将广州市土地利用类型划分为林地、耕地、水域、建设用地和其他用地共5种。通过ArcGIS 10.2随机生成200个点,结合同年高分辨率谷歌地球影像和实地考察进行精度检验,解译精度达86%,基本满足研究需要。

1.3 研究方法

1.3.1 基于MSPA方法的生态源地识别 MSPA是Soille等^[16]基于腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等数学形态学原理对栅格图像的空间进行度量、识别与分

割的一种图像处理方法,能够更好地识别研究区内重要的生境斑块^[17]。

首先,基于 2016 年广州市 Landsat8 OLI 多光谱遥感影像解译结果,将研究区 5 类土地利用类型中的林地作为研究区 MSPA 分析的前景,其余土地利用类型作为背景,然后将数据转换为 30 m×30 m 的 TIFF 格式二值栅格数据,最后,基于 Guidos 2.6 软件,采用八邻域分析方法,对数据进行 MSPA 分析。MSPA 能够识别目标像元集与结构要素之间的空间拓扑关系,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后,分别获得研究区的背景、支线、边缘区、孔隙、孤岛、连接桥和环线等其余 6 类不同的景观^[7],并对其分析结果进行统计。

1.3.2 景观连接度评价 核心区为大型自然生境,其中存在某些关键性的局部或元素对维护景观生态功能具有主要意义。根据景观生态学理论,斑块面积和连接度是维持景观生态功能的重要载体^[18-19]。常用的景观连接指数包括整体连通性(IIC)、可能连通性(PC)和斑块重要性指数(dPC),其中,dPC表示斑块的重要性,能够较好评价区域内核心斑块间的连接水平。因此,本研究通过核心区斑块面积和dPC,识别广州市生态源地。

首先,提取核心区中面积最大的 40 个林地斑块;然后,利用 Conefor 2.6 软件,参考以往的研究^[20-21],将斑块连通距离阈值设置为 1000 m,连通的概率设置为 0.5,分别对 40 个斑块进行景观连接度评价,并将 dPC 最大的 10 个林地斑块作为物种栖息及繁衍的生态源地;最后利用 ArcGIS 10.2 软件计算出生态源地的几何中心作为源/汇点。

1.3.3 生态阻力面构建 由于景观单元的类型组成、空间配置及其生态系统功能直接决定了斑块的生态功能阻力^[22]。因此,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,对不同景观类型进行阻力赋值,构建生态阻力面^[23]。

选取斑块类型面积(CA)、斑块密度指数(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、散布与并列指数(IJI)、斑块结合度指数(COHESION)和聚集指数(AI) 7 类景观格局指数,采用 Costanza 等^[24]对生态系统服务价值估算方法,参考谢高地等^[25]编制的单位面积生态系统服务价值当量表,计算各类斑块的生态服务价值当量。由于建设用地受人工干扰较大,将建设用地的生态服务价值当量设为 0;本研究主要考虑陆地生态系统中物种的迁移,水域起

到阻碍作用,因此将水域的生态服务价值当量设为 0。

生态系统是一种耗散结构系统^[26]。采用熵值法确定指标权重,既可以克服主观赋权法无法避免的随机性、臆断性问题,还可以有效解决多指标变量间信息重叠问题^[27]。因此,本研究采用熵值法,基于广州市的景观格局指数和生态服务价值 8 类指标的评价结果,得出不同土地利用类型的生态景观阻力权重。利用 ArcGIS 10.2 软件,对生态景观阻力的栅格数据进行重分类,赋值大小为 1~5,赋值越大表示生态景观阻力值越大,参考以往的研究^[15],对广州各类阻力因子的权重赋值,将土地利用、高程和坡度分别赋予 0.65、0.06 和 0.29 的权重值,最后结合各指标权重叠加得到生态景观功能阻力数据。

1.3.4 基于 MCR 的生态网络构建 采用最小累积阻力模型(MCR)构建广州市生态阻力面,公式如下:

$$MCR = f \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

式中:MCR 为最小累积阻力模型; D_{ij} 为物种从源地*j*到景观单元*i*的空间距离; R_i 为景观单元*i*的生态阻力系数; f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系^[28]。

借助 ArcGIS 10.2 中的 Distance 模块进行模拟,按照广州市生态阻力系数利用成本距离模块生成生态阻力面,将已识别的生态源地的几何中心作为源/汇点,依次计算每个源/汇点到达其他生态源/汇点的最小耗费路径,构建生态廊道。通过重力模型,计算 10 个生态源地之间的相互作用矩阵,将相互作用强度超过 0.3 的生态廊道作为重要廊道^[29],其余生态廊道作为一般廊道,构建符合研究区域实际情况的生态网络。

重力模型公式如下:

$$G_{ab} = k \times \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: G_{ab} 是斑块 a 和 b 之间的相互作用力; k 值取 104; N_a 和 N_b 分别是两斑块的权重值; D_{ab} 是 a 和 b 两斑块间潜在廊道阻力的标准化值^[29]。

选取常用的廊道网络结构分析中的网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)和网络连通率指数(γ 指数)对生态网络进行评价。这些指数揭示了生态景观空间结构中生态源地与生态廊道连接数量的关系,可反映生态结构的复杂程度和生态效能,数值越大,生态廊道的连接性越好^[2],所发挥的

生态效益就越好.计算公式如下:

$$\alpha = \frac{L-V+1}{2V-5} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{L}{V} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V-2)} \quad (5)$$

式中: L 为来廊道数; V 为节点数.

1.3.5 生态廊道景观结构分析 基于最小阻力模型生成的生态廊道不具有宽度,而宽度对廊道生态功能的发挥有着重要作用,适当增加廊道宽度有利于区域生物多样性的维持^[8].本研究基于朱强等^[30]对生态廊道宽度的研究,为保护生物多样性,选取30、60、100、200和600 m作为广州市生态廊道的识别宽度.通过 ArcGIS 对识别的生态廊道进行缓冲区分析,得到研究区域的生态廊道,分别计算重要廊道和规划廊道中各种土地利用类型的面积,分析生态廊道的景观结构,选取符合研究区实际情况的生态廊道宽度.

2 结果与分析

2.1 基于 MSPA 方法的景观格局

由图1、表1可以看出,研究区内核心区景观面积为289956.99 hm^2 ,占林地总面积的77.3%,主要分布在研究区域的北部与中部,南部稀少.核心区景观南北距离较远,斑块间的连通性较差.边缘区面积为37208.77 hm^2 ,占林地总面积的9.9%,孔隙占林地总面积的4.7%,两者面积仅次于核心区,表明研究区的林地具有较好的边缘效应.支线面积占林

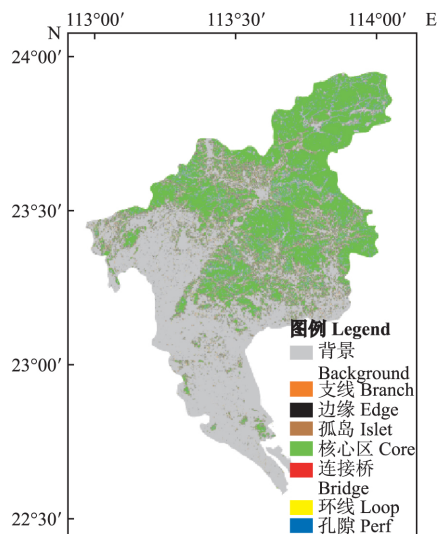


图1 基于 MSPA 的研究区景观类型

Fig.1 Landscape types of the study area based on MSPA.

表1 MSPA 分类统计结果

Table 1 Statistics of MSPA

景观类型 Landscape type	总面积 Total area (hm^2)	占林地总面积比例 Percentage in the forest	占研究区 总面积比例 Percentage in the study area
核心区 Core	289956.99	77.3	40.6
孤岛 Islet	8284.49	2.2	1.2
孔隙 Perf	17425.99	4.7	2.4
边缘区 Edge	37208.77	9.9	5.2
环线 Loop	5356.35	1.4	0.8
连接桥 Bridge	5927.69	1.6	0.8
支线 Branch	11212.62	3.0	1.6

地总面积的3.0%,具有一定的连通作用.连接桥面积仅占林地总面积的1.6%,难以为能量交换和物质流动提供迁移通道.孤岛斑块面积占林地总面积的2.2%,面积较小.环线可以便利物种在斑块内部移动,占林地总面积的1.4%.

2.2 景观连通性

按照斑块重要性(dPC)值的大小选取10个生态源地,基本涵盖了研究区内一级生态管控区(表2).连通性较好的核心斑块主要集中在研究区北部的山地地区(图2).不同生态源地之间的dPC值差距较大,因此,需要构建生态网络,以提高生境的适宜性和增加景观连通性.南部没有连通性较好的核心区斑块,表明研究区内生态源地分布不均,南北连通性差.

2.3 生态景观阻力评价

在生态景观阻力评价过程中,基于熵值法对不

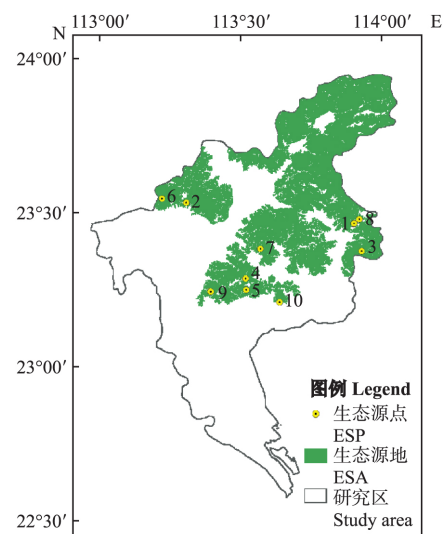


图2 研究区生态源地分布

Fig.2 Distribution of ecological sources in the study area.

ESP: Ecological source point; ESA: Ecological source area. 下同 The same below.

表 2 生态源地景观连通性指数重要程度排序
Table 2 Sequence of the landscape connectivity index of the ecological sources

排序 Rank	斑块编号 Patch number	dPC
1	20	96.02
2	8	2.08
3	24	0.73
4	31	0.44
5	34	0.29
6	9	0.17
7	26	0.12
8	21	0.10
9	30	0.04
10	36	0.04

各编号斑块对应的位置见图 2 Each numbered patch was shown in figure 2.

同土地利用类型的阻力进行权重赋值(表 3),得到更符合研究区生态特点的阻力面(图 3),以此构建生态廊道.

由表 4 可以看出,研究区林地面积最大,其次为

表 3 生态阻力值
Table 3 Value of ecological resistance

阻力因子 Resistance factor	分级指标 Classification index	阻力值 Resistance value	权重 Weight
土地利用类型 Land use type	林地 Forest	1.35	0.65
	建设用地 Construction land	3.31	
	耕地 Cropland	2.46	
	水域 Water	4.20	
	其他 Others	4.55	
高程 Elevation (m)	<200	1	0.06
	200~399	2	
	400~799	3	
	800~999	4	
	≥1000	5	
坡度 Slope (°)	<8	1	0.29
	8~14	2	
	15~24	3	
	25~34	4	
	≥35	5	

表 4 研究区景观格局指数和生态系统服务价值
Table 4 Landscape pattern index and ecosystem service value of the study area

景观类型 Landscape type	斑块类型面积 CA (hm ²)	斑块密度指数 PD	景观形状指数 LSI	最大斑块指数 LPI	散布与并列指数 IJI	斑块结合度指数 COHESION	聚集指数 AI	生态服务价值 Ecosystem service value (yuan)
林地 Forest	375336.77	4.79	149.33	27.17	48.64	99.91	96.37	8613927.12
耕地 Cropland	89442.38	9.73	329.65	0.33	69.20	97.40	83.51	347930.87
水域 Water	29156.24	1.38	80.57	1.35	37.78	99.01	93.00	0.00
建设用地 Construction land	219590.21	6.18	243.37	22.41	58.57	99.94	92.24	0.00
其他 Others	654.19	0.20	40.60	0.00	60.61	84.04	76.57	130.84

建设用地.林地斑块较大,可以为陆地生物提供较好的栖息地,而随着城市化进程的加快,研究区内建设用地的面积仅次于林地,不利于城市生态环境的可持续发展.耕地和其他用地的斑块密度较大,破碎程度小.耕地的形状指数最大,建设用地次之,表明耕地和其他用地的形状边缘复杂.林地、水域和其他用地斑块密度和形状指数较小,斑块保持原有自然面貌.林地的最大斑块指数最高,在各类景观中具有较好的优势度和丰富性.耕地和其他用地的散布与并列指数最大,表明耕地和其他用地与其他类型的景观接触较多,连通性大.林地的结合度指数仅次于建设用地,聚集度指数最大,表明林地分布较为集中,分离程度小.林地的生态服务价值最高,耕地次之,其他用地最小.

综上可知,林地的斑块面积、最大斑块指数、聚集指数和生态服务价值在各类景观中的评价结果最好,可以为研究区的物种提供良好的生境,对城市生态系统的稳定发挥了较大作用.

在对景观格局指数和生态服务价值分析的基础上,修正广州市各类土地利用类型的生态景观阻力,各土地利用类型的阻力由大到小分别为其他、水域、建设用地、耕地和林地.

2.4 生态网络构建

基于 MCR 模型识别出研究区的生态网络(图 4),共识别出生态廊道 45 条.采用重力模型构建生态源地之间的相互作用矩阵(表 5),将相互作用强度超过 0.3 的生态廊道作为重要廊道,其中,重要廊道 18 条,一般廊道 27 条.由表 4 可知,斑块 1 与 8 之间的相互作用最强,为 9.7324,表明两个斑块距离较近,两者之间的景观阻力较小,斑块间关联度较高,生物在斑块间迁移的可能性大.因此在景观规划中,需要加强斑块 1 与 8 之间生态廊道的保护,以保证两个斑块的连通性,保障物质和能量的流动.在重要廊道中,斑块 6 与 8 之间的相互作用力最弱,为

表 5 基于重力模型构建的生态源地相互作用矩阵
Table 5 Ecological source interaction matrix based on the gravity model

生态源地编号 Ecological source number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.0005	0.0284	0.0029	0.0034	0.0013	0.0073	9.7324	0.0046	0.0114
2		0	0.0052	0.0281	0.0276	0.4594	0.0653	0.1482	0.056	0.0528
3			0	0.0255	0.0324	0.0122	0.0659	6.7008	0.0425	0.1433
4				0	0.0000	0.0546	0.9000	0.7719	1.1124	1.097
5					0	0.0564	0.6187	0.9258	1.2399	2.9937
6						0	0.1214	0.3534	0.1382	0.1139
7							0	1.9364	0.7828	0.9345
8								0	1.2666	2.9937
9									0	0.8244
10										0

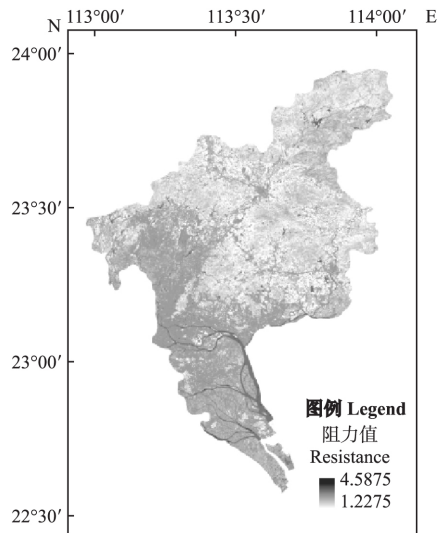


图 3 研究区生态阻力面
Fig.3 Ecological resistance surface of the study area.

0.3534; 两斑块的生态源地位于研究区东西两侧, 距离较远, 景观阻力大, 物种迁移的可能性小. 由图 3 可知, 生态网络密集分布在研究区东北部, 表明东部和北部的斑块间的连通性较好; 而西部和南部连通性较差, 生态网络不够完善. 因此, 从维护生态系统稳定发展的角度看, 应该在研究区西部和南部重新规划构建新的生态源地和生态廊道来优化生态网络系统.

基于 MSPA 和 MCR 模型构建的生态网络, 南北间的连通性较差, 南部缺少适合生物栖息的生态源地. 在综合考虑研究区林地斑块的分布格局, 参考《广州市生态文明建设规划纲要(2016—2020年)》^[13]中关于广州市生态安全格局的规划, 选取从化北部、花都西部、白云山、大夫山、黄山鲁 5 个林地斑块作为生态源地, 增加 13 条规划生态廊道(图 5), 优化构建的生态网络.

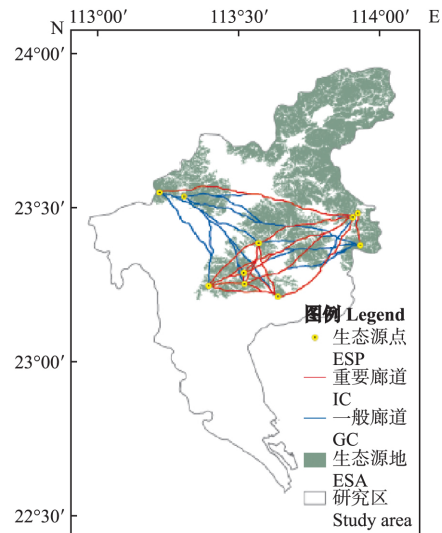


图 4 研究区生态网络
Fig.4 Ecological network of the study area.
IC: Important corridor; GC: General corridor. 下同 The same below.

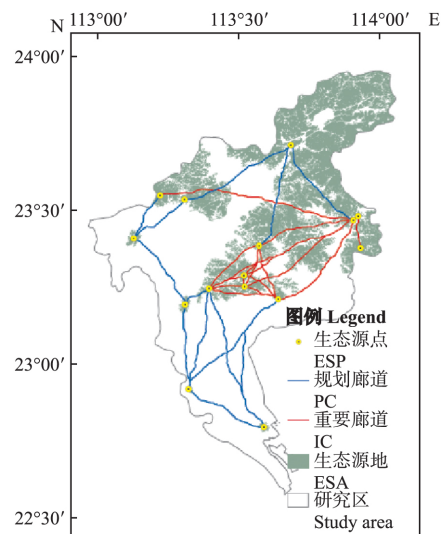


图 5 生态网络规划图
Fig.5 Ecological network planning map.
PC: Planning corridor.

表 6 生态廊道景观构成

Table 6 Landscape component of ecological corridors

宽度 Width (m)	廊道类型 Corridor type	项目 Item	林地 Forest	耕地 Cropland	水域 Water	建设用地 Construction land	其他 Others	总和 Sum
30	重要廊道	面积 Area (hm ²)	2227.16	107.03	5.63	129.76	0.11	2469.69
	Important corridor	百分比 Percentage (%)	90.2	4.3	0.2	5.3	0.0	100.0
	规划廊道	面积 Area (hm ²)	1587.31	343.67	53.93	556.56	0.20	2541.67
60	重要廊道	面积 Area (hm ²)	4410.99	286.07	16.45	405.14	1.80	5120.44
	Important corridor	百分比 Percentage (%)	86.1	5.6	0.3	7.9	0.04	100.0
	规划廊道	面积 Area (hm ²)	3054.60	719.08	125.73	1423.87	1.69	5324.96
100	重要廊道	面积 Area (hm ²)	7043.33	555.77	37.46	828.88	5.83	8471.27
	Important corridor	百分比 Percentage (%)	83.1	6.6	0.4	9.8	0.1	100.0
	规划廊道	面积 Area (hm ²)	4776.41	1187.37	229.73	2683.73	4.30	8881.54
200	重要廊道	面积 Area (hm ²)	13233.69	1272.31	97.94	2005.27	17.01	16626.22
	Important corridor	百分比 Percentage (%)	79.6	7.7	0.6	12.1	0.1	100.0
	规划廊道	面积 Area (hm ²)	8788.50	2301.98	509.60	6046.97	11.63	17658.68
600	重要廊道	面积 Area (hm ²)	34666.02	4057.97	358.34	6796.89	57.04	45936.25
	Important corridor	百分比 Percentage (%)	75.5	8.8	0.8	14.8	0.1	100.0
	规划廊道	面积 Area (hm ²)	23250.98	6517.04	1631.00	19707.10	47.77	51153.89
	Planning corridor	百分比 Percentage (%)	45.5	12.7	3.2	38.5	0.1	100.0

选取常用的廊道网络结构分析中的网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)和网络连通率指数(γ 指数)对优化前后的生态网络进行评价。结果表明,优化前生态网络 α 、 β 和 γ 指数分别为0.6、1.8和0.75,优化后为0.68、2.07和0.79,表明生态网络的结构得到优化,规划的生态网络提高了生态源地的连接水平,增强了网络的有效性。

2.5 生态廊道的景观结构

生态廊道景观结构分析结果表明,当宽度为30 m时,重要廊道面积为2469.69 hm²,约占研究区总面积的0.3%,一般廊道面积为2541.67 hm²,约占研究区总面积的0.3%(表6)。林地是构成重要廊道的主要景观类型,面积为2227.16 hm²,约占重要廊道总面积的90.2%,表明林地对物种的扩散和迁移起着重要的连接作用,也是物种重要的栖息场所。其次是建设用地,面积为129.76 hm²,约占重要廊道总面积的5.3%。建设用地受人为干扰程度较大,植被覆盖率低,严重阻碍了物种的迁移。因此,需要对生态廊道中的建设用地进行优化。耕地、水域和其他用地占比较小,约占廊道总面积的4.3%、0.2%和0.0%。水域对陆生生物起到隔离作用,因此,在生态廊道构建中,应避免穿越过多水域。

随着生态网络宽度的增加,林地面积占生态网

络总面积的比率不断下降,建设用地面积占廊道总面积的比率不断上升,大面积的建设用地不利于生物在生态源地之间进行迁移和扩散,同时也加大了建设生态廊道难度^[31]。重要廊道宽度小于100 m时,林地面积占廊道总面积的比例均大于80%,建设用地占廊道总面积的比例小于10%,修建难度小且适合网络中物质和能量的流动。相关研究表明,当生态廊道宽度为60~100 m时,基本满足动植物迁移和传播以及生物多样性保护的功能,对草本植物和鸟类而言,具有较大的多样性和内部种^[30]。因此,研究区重要廊道的合适宽度为60~100 m。而规划廊道的宽度为100 m时,建设用地面积占廊道总面积的比率超过30%,已不适合生态网络建设。当生态廊道宽度为30~60 m时,能够保护鱼类、小型哺乳动物、爬行和两栖类动物,含较多草本植物和鸟类边缘种。因此,规划廊道的修建宽度应为30~60 m。

3 讨 论

3.1 广州市景观格局特征

城市中景观空间结构是根据人类特定的需要形成的,景观组成复杂多样,斑块数量繁多,人工景观占绝大部分^[22]。本研究结果表明,广州市林地斑块面积最大、聚集指数最高,适合生物在其中繁衍生

存,但林地集中分布在北部,中部与南部基本没有大型林地斑块分布。近年来,广州市居民点及工矿用地、交通过地等建设用地面积持续扩张,主要集中在番禺、花都、从化等市郊区域^[32]。建设用地的形状指数仅次于耕地,结合度指数最高,建设用地的扩张和交通路网的延伸与交织,使各景观类型被严重分割,破碎化加强^[33]。合理构建生态网络,能够缓解快速城镇化带来的自然景观破碎化问题,可在一定程度上改善城市生态环境。

景观连接度水平能够定量评价某一景观是否有利于源地斑块内的物种迁移^[34]。基于 MSPA 方法提取核心区,利用景观连通性指数分析广州市的林地斑块,结果表明,连通性最高的林地斑块集中在北部山地地区,表明该区域受人类活动影响较少,核心斑块形状较为完整且连通性好,适合生物的栖息和迁移。但南北斑块间的连通性较差,物质和能量难以在南北区域之间流动,应加强对南部核心区的保护,建设适宜生物栖息的生境斑块,构建生态网络,促进生态系统的可持续发展。

3.2 生态阻力面分析

在生态阻力赋值的方法上,以往的研究多采取专家打分法^[2]或参考相关的研究资料^[15, 23],对不同景观类型进行赋值;部分研究者则针对研究区特定物种的迁移需求,确定不同景观类型的阻力因子及系数^[5, 35]。本研究采用熵值法,基于不同景观类型的景观格局与生态服务价值的评价结果,对不同景观类型进行赋值,再综合考虑高程和坡度的影响,构建符合广州市生态环境特点的生态阻力面。采用熵值法确定权重,可以减少各指标权重计算的人为干扰,使赋值结果更符合研究区的实际情况,具有一定的客观性^[36]。研究区其他用地、水域和建设用地的生态阻力值较高,原因在于其他用地和建设用地受人力干扰大,不利于物种的栖息和扩散;水域被视为陆地生物迁移的主要阻力因素^[8],阻力值较高。

3.3 广州市生态网络构建

优化后的广州市生态网络呈现“三纵两横”的基本框架,其中,“三纵”为:从化北部山地-花都西部林地-白云山-大夫山-黄山鲁,从化北部山地-城区东部山地-帽峰山-黄山鲁,从化北部山地-增城北部山地-帽峰山-黄山鲁。“两横”为:花都西部林地-帽峰山-从化北部山地-增城北部山地,白云山-帽峰山。重要廊道主要集中在研究区的东北部,连接北部主要的生态源地,能够有效缓解快速城镇化带来的生境破碎化问题,是城市建设过程中应重点保护的区域。

而规划廊道主要分布在中南部,起到沟通南北、优化生态网络整体结构的作用,这与广州市生态文明建设规划纲要的基本形态一致。《广州市生态文明建设规划纲要(2016—2020年)》^[13]中提出,充分利用广州市域北部向南部延伸的指状山体绿地和南部向北部渗透的河流水系,构建“六廊多带”的生态网络空间体系。本研究构建的生态网络体系呈现“三纵两横”的基本格局,在广州市东、中、西部各构建一条纵向廊道,连通南北的林地斑块,这在一定程度上弥补了已有研究的不足。蒋思敏等^[15]基于 MCR 模型构建广州市生态网络,其优化生态网络的横向生态廊道与本研究结果类似,但在纵向生态廊道上,仅有中间的生态廊道贯穿南北,东西两侧没有构建纵向的生态廊道;在生态源地选取上,依然采用直接将自然保护区、森林公园等动植物群落完整的区域作为生态源地的方法,存在一定主观性。张剑波^[37]采用 DPSIR-LM 模型,构建并优化了广州陆域生物多样性保护生态安全格局,其构建的广州市综合生态安全格局考虑了多种因素的影响,在源、阻力评价及优化结果上更加精确,但构建的生态廊道体系较为复杂,廊道数量较多,没有区分保护的优先度。

4 结 论

生态网络的构建,对于保护快速城市化地区的生态环境及维护区域生态系统的稳定具有现实意义。本研究采用形态学空间分析(MSPA)方法和景观指数法,提取 dPC 值最大的 10 块核心区作为生态源地;利用景观格局指数和生态服务价值修正各类生态景观的阻力系数,综合考虑高程和坡度因子,构建更符合研究区生态环境特点的生态阻力面;基于最小累积阻力模型(MCR)构建广州市生态廊道网络,通过重力模型和连通性指数对生态网络的结构进行定量分析,划分重要廊道和一般廊道,为生态网络保护的优先度提供了一定的科学依据;根据研究区的林地斑块分布特点,增加 5 个生态源地以及 13 条生态廊道,优化生态网络的结构,并对不同宽度生态网络的景观构成进行分析,结果表明,林地是研究区生态廊道重要的组成部分,建议研究区重要廊道的修建宽度为 60~100 m,规划廊道的建设宽度为 30~60 m,并为生态网络的构建提出了具体而可行的方案。研究结果可以为广州市生态网络构建提供科学参考,对其他快速城市化地区的生态网络构建也具有一定的指导意义和实践价值。

本研究在计算景观连接度指数时,连通距离阈

值为 1000 m, 连通概率为 0.5, 阈值的设定参考前人研究, 今后应根据研究区的实际情况进行阈值设置; 生态阻力面的构建未考虑道路等其他人为因素以及研究区具体的生物保护状况的影响, 存在一定局限性, 需要结合更加翔实的数据进行综合分析; 对网络的优化中, 生态源地和生态廊道的构建主要基于研究区已构建的生态网络的不足进行补充, 存在主观因素的影响。

参考文献

- [1] Wang H-Z (王海珍), Zhang L-Q (张利权). A GIS, landscape pattern and network analysis based planning of ecological networks for Xiamen island. *Acta Phytocoologica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(1): 144-152 (in Chinese)
- [2] Chen X-P (陈小平), Chen W-B (陈文波). Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(5): 1611-1618 (in Chinese)
- [3] Liu S-L (刘世梁), Hou X-Y (侯笑云), Yin Y-J (尹艺洁), et al. Research progress on landscape ecological networks. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(12): 3947-3956 (in Chinese)
- [4] Kong FH, Yin HW, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2009, **95**: 16-27
- [5] Jia Z-Y (贾振毅), Chen C-D (陈春娣), Tong X-X (童笑笑), et al. Developing and optimizing ecological networks for the towns along the Three Gorges Reservoir: A case of Kaizhou New Town, Chongqing. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(3): 782-791 (in Chinese)
- [6] Knaapen JP, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, **23**: 1-16
- [7] Chen Z-A (陈竹安), Kuang D (况达), Wei X-J (危小建), et al. Developing ecological networks based on MSPA and MCR: A case study in Yujiang County. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2017, **26**(8): 1199-1207 (in Chinese)
- [8] Xu W-B (徐文彬), Yin H-Y (尹海伟), Kong F-H (孔繁花). Development of ecological control boundaries in Nanjing metropolis district based on ecological security patterns. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(12): 4019-4028 (in Chinese)
- [9] Wang Q (王琦), Fu M-D (付梦娣), Wei L (魏来), et al. Urban ecological security pattern based on source-sink landscape theory and MCR model: A case study of Ningguo City, Anhui Province. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2016, **36**(12): 4546-4554 (in Chinese)
- [10] Li J (李晶), Meng J-J (蒙吉军), Mao X-Y (毛熙彦). MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报: 自然科学版), 2013, **49**(4): 707-715 (in Chinese)
- [11] Xu F (许峰), Yin H-W (尹海伟), Kong F-H (孔繁花), et al. Developing ecological networks based on mspa and the least-cost path method: A case study in Bazhong Western New District. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(19): 6425-6434 (in Chinese)
- [12] Yu Y-P (于亚平), Yin H-W (尹海伟), Kong F-H (孔繁花), et al. Analysis of the temporal and spatial pattern of the green infrastructure network in Nanjing, based on MSPA. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2016, **35**(6): 1608-1616 (in Chinese)
- [13] Guangzhou Environmental Protection Bureau (广州市环境保护局). Planning Outline of Ecological Civilization Construction in Guangzhou (2016-2020) [EB/OL]. (2016-08-10) [2018-03-21]. http://www.gzepb.gov.cn/zwgk/gs/fzgh/201609/t20160906_87766.htm (in Chinese)
- [14] Guan Y-M (关英敏). A Study on Construction of Urban Ecological Corridor. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2003 (in Chinese)
- [15] Jiang S-M (蒋思敏), Zhang Q-N (张青年), Tao H-C (陶华超). Construction and evaluation of green space ecological network in Guangzhou. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (中山大学学报: 自然科学版), 2016, **55**(4): 162-170 (in Chinese)
- [16] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**: 456-459
- [17] Guo S-Y (郭诗怡). Optimizing Landscape Pattern in Haidian District Based on Ecological Network Construction. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2016 (in Chinese)
- [18] Qiu Y (邱瑶), Chang Q (常青), Wang J (王静). A MSPA-based planning of green infrastructure network: A case of Shenzhen. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2013, **29**(5): 104-108 (in Chinese)
- [19] Fu B-J (傅伯杰). The Principle and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [20] Jiang L (姜磊), Yue D-P (岳德鹏), Cao R (曹睿), et al. Research on distance thresholds of landscape connectivity in Chaoyang District of Beijing. *Forest Inventory and Planning* (林业调查规划), 2012, **37**(2): 18-22 (in Chinese)
- [21] Wu Y-P (吴银鹏), Wang Q-N (王倩娜), Luo Y-Y (罗言云). MSPA methodology-based research on the green infrastructure network structure in Chengdu. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2017, **32**(4): 260-265 (in Chinese)
- [22] Guo H-B (郭宏斌), Huang Y-X (黄义雄), Ye G-F

- (叶功富), *et al.* A study on the evaluation and optimization of urban ecological function network in Xiamen. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2010, **25**(1): 71-79 (in Chinese)
- [23] Gu F (古 璠), Huang Y-X (黄义雄), Chen C-M (陈传明), *et al.* Construction and optimization of ecological network for nature reserves in Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(3): 1013-1020 (in Chinese)
- [24] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260
- [25] Xie G-D (谢高地), Zhang C-X (张彩霞), Zhang L-M (张雷明), *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2015, **30**(8): 1243-1254 (in Chinese)
- [26] Yu X-X (余新晓), Niu J-Z (牛健植), Guan W-B (关文彬), *et al.* Landscape Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2004 (in Chinese)
- [27] Wang F-X (王富喜), Mao A-H (毛爱华), Li H-L (李赫龙), *et al.* Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong Province based on the entropy method. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2013, **33**(11): 1323-1329 (in Chinese)
- [28] Meng J-J (蒙吉军), Wang Y (王 雅), Wang X-D (王晓东), *et al.* Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2016, **25**(7): 1052-1061 (in Chinese)
- [29] Kong F-H (孔繁花), Yin H-W (尹海伟). Developing green space ecological networks in Jinan City. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(4): 1711-1719 (in Chinese)
- [30] Zhu Q (朱 强), Yu K-J (俞孔坚), Li D-H (李迪华). The width of ecological corridor in landscape planning. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(9): 2406-2412 (in Chinese)
- [31] Chi Y (池 源), Shi H-H (石洪华), Feng A-P (丰爱平). Typical island landscape ecological network establishment: A case study of Chongming Island. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2015, **34**(3): 433-440 (in Chinese)
- [32] Lai H-F (赖慧芳), Chen F-G (陈凤桂). Trends and driving mechanism of land use change in Guangzhou. *Tropical Geography* (热带地理), 2008, **28**(5): 455-460 (in Chinese)
- [33] Zou Y (邹 月), Zhou Z-X (周忠学). Impact of landscape pattern change on ecosystem service value of Xi'an City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(8): 2629-2639 (in Chinese)
- [34] Taylor PD, Fahrig L, Henein K, *et al.* Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993, **68**: 571-573
- [35] Deng J-J (邓金杰), Chen L-X (陈柳新), Yang C-Y (杨成轲), *et al.* Significance evaluation of ecological corridor in an highly-urbanized area: A case study of Shenzhen. *Geographical Research* (地理研究), 2017, **36**(3): 573-582 (in Chinese)
- [36] Zhang L (张 蕾), Su L (苏 里), Wang J-K (汪景宽), *et al.* Establishment of ecological network based on landscape ecology in Anshan. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(5): 1337-1343 (in Chinese)
- [37] Zhang J-B (张剑波). Research on the Construction of Ecological Security Pattern of Biodiversity in the Land Area of Guangzhou. Master Thesis. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese)

作者简介 杨志广,男,1996年生.主要从事地理科学研究.
E-mail: zg_yang@m.scnu.edu.cn

责任编辑 杨 弘

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.应用生态学报,2018,29(10): 3367-3376

Yang Z-G, Jiang Z-Y, Guo C-X, *et al.* Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3367-3376 (in Chinese)