

基于 MSPA 和 MCR 模型的曲靖中心城市生态网络优化研究

代继平¹, 朱 坤², 周天宇³, 龙 飞⁴, 黄 丽⁴, 彭建松^{1*}

(1. 西南林业大学 森林城市研究院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650224;
3. 国家林业和草原局 调查规划设计院, 北京 100714; 4. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224)

摘 要:随着城市化进程的加快, 生境破碎化问题日益突出, 大型生境被行政区划等人为因素分割, 而生态网络格局的构建是协调城市区域发展与自然资源保护的有效手段, 因此构建符合区域实际情况的生态安全格局具有重要意义。以曲靖功能核心城市麒麟区、沾益区、马龙区为研究对象, 基于 MSPA 和 MCR 模型对研究区生态网络进行构建和优化。结果表明, 1) 核心区景观“麒沾马”三区分布相对均匀, 核心区景观面积 185 525.19 hm², 占整体生态景观总面积的 74.06%; 2) 景观连通性选取的 20 个重要生态源地, 面积共 95 049.63 hm², 沾益区分布最多, 麒麟区次之, 马龙区分布最少。斑块连接性重要程度(dPC 值)与其面积相关性不显著; 3) 重力模型构建 20 个重要生态源地间的相互作用矩阵, 提取相互作用力最大的 16 条重要廊道。其中斑块 18~19 的相互作用最强, 斑块 8~10 的相互作用较弱; 4) 通过对生态廊道的提取, 构建“一区、三核、七片、六廊、多点”的生态网络空间结构, 以期构筑山湖相拥、林水相依的高原山地城市的生态网络格局。研究结果可为类似区域空间尺度的生态空间网络规划和生态修复及保护提供科学指导。

关键词:城市化; 曲靖中心城市; 景观生态学; 生态网络优化

中图分类号: TU986 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2022)06-0250-08

Optimization Study of Qujing Central City Ecological Network Based on MSPA and MCR Models

DAI Ji-ping¹, ZHU Kun², ZHOU Tian-yu³, LONG Fei⁴, HUANG Li⁴, PENG Jian-song^{1*}

(1. Forest City Research Institute, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. College of Landscape and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
3. Survey Planning and Design Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;
4. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: With the speeding up of urbanization, the problem of habitat fragmentation has become increasingly prominent. Large habitat patches are divided by administrative barriers and other human factors. Construction of ecological pattern of network is an efficient way to coordinate the development of urban areas and the protection of natural resources. Therefore, the building in conformity with the practical situation of regional ecological security pattern is of great significance. In this study, the functional core cities of Qujing-Qilin District, Zhanyi District and Malong District (referred as Qi-Zhan-Ma areas) were taken as the research objects. Based on MSPA and MCR model, the ecological network in the study area was constructed and optimized. The results showed that 1) the three areas of Qi-Zhan-Ma in the core area were relatively evenly distributed. The landscape area of the core area was 185 525.19 hm², accounting for 74.06% of the total ecological landscape area. 2) Twenty important ecological sources areas were selected based on land-

收稿日期: 2021-10-13 修回日期: 2021-12-13

基金项目: 云南省森林城市发展规划(2020—2035)(1863112)。

第一作者: 代继平, 硕士, 工程师/讲师。研究方向: 森林城市。E-mail: 597174261@qq.com

* 通信作者: 彭建松, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 城市森林。E-mail: 1006489155@qq.com

scape connectivity, with a total area of 95 049.63 hm², of which the Zhanyi District had the largest share, followed by Qilin and Malong District. There was no significant correlation between importance of patch connectivity (dPC value) and patch area. 3) Based on gravity model 16 important corridors with the largest interaction forces were extracted from an interaction matrix of 20 important ecological sources. The interaction between patch 18—19 was the strongest, while the interaction between patch 8—10 was weak. 4) Through the extraction of ecological corridors, the ecological network spatial structure of "one area, three cores, seven pieces, six corridors and multiple points" was constructed, in order to build the ecological network pattern of plateau mountain city with "mountains and lakes embracing, forest and water interdependent". The results can provide scientific guidance for ecological spatial network planning and ecological restoration and protection at similar regional spatial scale.

Key words: urbanization; central city of Qujing; landscape ecology; ecological network optimization

在城市化进程的背景下,城市问题积重难返,生态系统面临着前所未有的压力^[1-2]。为了解决这一问题,生态网络格局成为一种被动适应的、具有高效优势的重要规划策略,这一概念的提出迅速成为不同领域学者关注的热点^[3-4]。

多数生态学和生物学者认为,斑块破碎化是影响生物多样性的一个重要驱动因素,不仅导致物种种群孤立,阻碍物种交流,而且严重影响区域自然环境基底,威胁生态系统的服务功能和可持续性,构建与优化生态网络可有效增加斑块间的相互联系^[5-6]。目前区域生态网络构建主要通过线性或带状生态廊道,将破碎、分散、孤立的生态斑块有效连接起来,形成连通、高效、自然、完整的生态系统,为区域物种的迁移扩散、信息交流提供安全通道,以减少景观破碎化对生物多样性造成的影响^[7-8]。针对城市生态网络构建与优化,国内外学者经过不断的探索研究^[9-13],验证了 MSPA 和 MCR 模型等方法耦合运用已逐步成为生态网络格局分析的主要技术手段;构建景观阻力面,探索成本因素,有利于最大限度地发挥城市生态网络的功能,降低经济成本,对未来生态网络营建具有深远意义^[14]。

2018 年以来,曲靖市全面开启了麒麟区、沾益区、马龙区(以下简称“麒沾马”)一体化发展建设,打破行政区划壁垒,实施抱团融合发展。本研究以曲靖功能核心城市“麒沾马”为研究对象,研究区拥有突出的地位和作用、特殊的气候条件、得天独厚的自然资源,为各种生物的繁衍提供了良好的自然条件,对区域生物多样性维持具有重要作用。为保护建设好“麒沾马”之间森林山体生态带,推进建设好大城市生态圈,优化和完善区域生态网络显得尤为重要。

1 研究区概况

曲靖地处低纬高原,为亚热带高原季风气候,多年平均气温 14.5℃。市域森林覆盖率 50.01%,是

典型的高原山地城市。位于我国第三大河流珠江的源头和金沙江中上游,承担着珠江和长江流域以及西部高原三大生态安全屏障的建设任务,素有“滇黔锁钥”“云南咽喉”“珠江源头第一城”之称,在国家生态环境保护 and 建设中具有极其重要的地位和作用。2019 年 11 月成功获评国家森林城市。“麒沾马”是珠江源头第一城“一主两副”的中心城市(图 1a),国土面积共 6 213.84 km²,截至 2020 年,建有自然保护与生物栖息地 9 处。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

行政区划(来源于 BIGEMAP 地图下载器),基于 ArcGIS10.7 进行合并、融合等处理。以 2020 年 5 月曲靖市 Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像为基础数据(来源于 <http://www.gscloud.cn/search>, 30 m 空间分辨率, cloudcover 为 0.12),采用 ENVI5.3 对其进行裁剪、辐射定标和大气校正等配准处理,采用软件监督分类和人眼目测相结合的解译方法,提取研究区土地利用数据,并参照 BIGEMAP 高清影像和实地调研情况,对解译数据进行多次修正和校对,最终基于 ArcGIS10.7 生成研究区土地利用类型图(图 1b)。以“麒沾马”DEM 数字高程数据为基础(来源于 <http://www.gscloud.cn/search>, 30m 空间分辨率),基于 ArcGIS10.7 进行镶嵌、掩膜提取、投影,并利用 3D Analyst 工具栅格表面等处理得到坡度数据。“麒沾马”路网数据(来源于 BIGEMAP 地图下载器),基于 ArcGIS10.7 提取研究区主要道路进行合并、裁剪和投影等处理。

2.2 景观格局分析

MSPA 是对景观连通性分析的新方法,能精确地得出像元层面上的景观生态类型与结构性要素^[15]。GuidosToolbox 是 MSPA 的重要工具,该软件采用八邻域图像细化分析法对二值栅格 8 位 Tiff

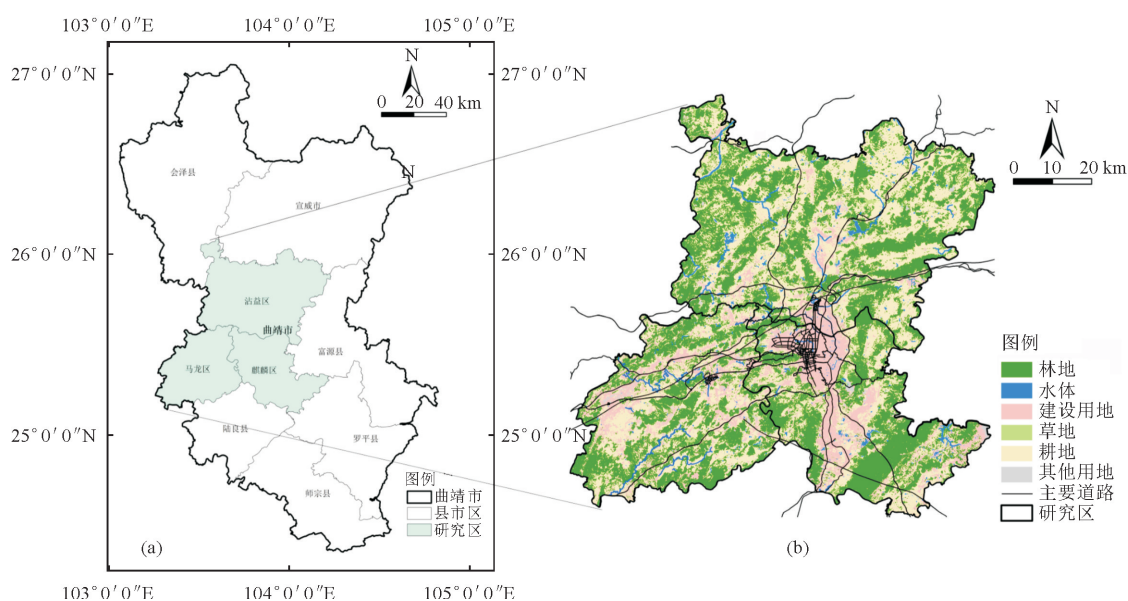


图1 研究区概况(a)和土地利用类型(b)

Fig. 1 Overview of the study area(a) and land use types(b)

数据进行分析,得到核心区、孤岛等7种互不重叠的景观要素^[16],使得核心区面积、廊道数量等结构性要素在结果中直接显现^[17]。

提取林地作为前景数据(赋值2),水体、建设用地、草地、耕地和其他用地作为背景数据(赋值1)。通过MSPA多尺度对比,得出像元大小(Pixel Size)与边缘宽度(EdgeWidth)参数值设置的不同会导致结果不同,景观类型的数量和面积也会随之发生变化。经过反复测试,最终将MSPA的参数值设置为:像元大小30 m×30 m、边缘宽度1(对应的实际距离为30 m)。

2.3 生态源地选取

生态源地作为大型生境斑块,具有重要的生态功能和高连通性,在空间分布上具有一定的聚集性^[18]。在景观水平上,生境斑块面积的大小和连接性对保护区域生物多样性具有重要的生态意义^[19]。基于Conefor2.6计算景观的整体连通性(integral index of connectivity, IIC, 公式中用 I_{IC} 表示)和可能连通性(probability index of connectivity, PC, 公式中用 P_C 表示)2种指数,即可反映景观斑块的连接度,又可计算斑块对景观连接的重要性(importance, dPC, 公式中用 d_{PC} 表示)^[20-21]。公式如下:

$$I_{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_i \cdot a_j}{1 + n_{ij}} \right)}{A^2} \quad (1)$$

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A^2} \quad (2)$$

$$d_{PC} = \frac{P_C - P_{C_{remove}}}{P_C} \times 100\% \quad (3)$$

式中: n —斑块总数量, a_i —斑块 i 的面积, n_{ij} —斑

块 i 到 j 的连接数, P_{ij}^* —物种在斑块 i 和 j 之间直接迁徙扩散的最大概率, A —景观总面积, $P_{C_{remove}}$ —将随机斑块 i 剔除后的景观连接度。

选取核心区中斑块面积最大的30个源地进行连通性分析,把斑块连通距离阈值(distance threshold)分别设置为500、1 000、1 500、2 000、2 500 m;为了与IIC结果具有可比性,将可能性概率(corresponds to probability)设置为0.5,通过对比得出,距离阈值设置过大,会导致某些大型斑块被分割、小型斑块会消失等情况。随着阈值变化,dIIC和dPC值也随之变化。在一定范围内,dIIC和dPC所反映的斑块重要性排序相对一致。最终将距离阈值设置为500 m,选择dPC值>1的20个斑块作为重要生态源地。

2.4 景观阻力面确定

生态网络格局的构建需要综合考虑生态基底对整个过程的作用。不同类型斑块在物种交流、能量流动时会有一定的阻碍^[22]。不同源地间跨越景观的难易程度和景观类型不同的差异也会导致景观阻力的不同^[23-24]。考虑不同景观类型、地形和人为干扰等因素的影响,对不同要素类型和各级阻力因子进行赋值(表1)^[25]。最后通过栅格计算器得到景观综合阻力面,作为MCR模型的成本数据。

2.5 生态廊道提取

在景观综合阻力面构建的基础上进行生态廊道提取,基于最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)识别出最小成本路径,并将其作为斑块之间连接和物种交流的通道,进而提升生态网络整体连通性。MCR模型可以通过计算从

“源”与目标的最小消耗路径,得到物种运动的最佳路径(M_{CR})^[26-27]。公式如下

$$M_{CR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$

(4)

式中: f —未知的单调递增函数, m —景观单元 i 的数量, n —生态源地 j 的数量, D_{ij} — j 到 i 的空间距离, R_i — i 对某物种运动过程的综合阻力系数。

表 1 景观阻力因子分级、赋值与权重

Table 1 Classification, valuation and weight of landscape resistance factors

阻力值	因子分级			
	土地利用类型	DEM 高程(h)	坡度(i)	距道路距离(s)/m
1	林地	$\leq 1\,900$	≤ 5	$> 9\,000$
2	草地、耕地	(1 900, 2 050]	(5, 20]	(7 000, 9 000]
3	其他用地	(2 050, 2 200]	(20, 35]	(5 000, 7 000]
4	水体	(2 200, 2 350]	(35, 45]	(2 000, 5 000]
5	建设用地	$> 2\,350$	> 45	$\leq 2\,000$
权重	0.46	0.18	0.25	0.11

重力模型能够以量化的方式评价斑块之间的相互作用强度,相互作用力值越大,表征两者间潜在廊道在区域生态系统中的位置越重要^[28]。公式如下:

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

(5)

式中: G_{ij} —斑块 i 和 j 的相互作用力, L_{\max} —廊道阻力的最大值, S_i —斑块 i 的面积, L_{ij} — i 到 j 的廊道阻力值, P_i —斑块 i 的阻力值。

在以上分析的基础上,运用 MCR 模型计算生态源地到其他景观单元的累积距离,通过 Spatial Analysis 工具下的成本距离,得到最小累积阻力面。使用成本路径,计算源斑块到目标斑块的最小路径,得到 190 条潜在生态廊道。基于重力模型构建 20 个重要生态源地间的相互作用矩阵,将相互作用力最大的 16 条廊道提取出来作为重要廊道,删除冗余廊道,得到研究区重要生态廊道图。

2.6 生态网络构建

基于“源地-阻力面-廊道”识别出的 20 个生态节点,提取出的 16 条重要潜在生态廊道,结合景观生态学、环境科学、景观规划设计等多学科领域,以主要生境斑块的有效连接为原则,充分考虑生态节点和廊道的有机结合,通过“斑块-廊道-基质”不同空间层次的分析(图 2),科学构建研究区的生态网络框架,优化生态网络格局^[29]。

3 结果与分析

3.1 景观格局分析

由表 2 和图 3 可见,研究区内对生态保护具有重要作用的核心区景观面积共 185 525.19 hm^2 。

其中麒麟区 57 512.81 hm^2 ,占核心区景观面积的 31%;沾益区 77 920.58 hm^2 ,占核心区景观面积的 42%;马龙区 50 091.80 hm^2 ,占核心区景观面积的 27%。“麒沾马”分布相对均匀,沾益区居多,斑块间的景观连通性较强。空间异质性较小,景观系统核心区斑块面积占整体生态景观总面积的 74.06%。孤岛斑块面积较小。孔隙和边缘区是核心区的内、外部边缘,两者面积仅次于核心区,表明景观斑块具有较好的边缘效应。环线和桥接区面积较小,表明斑块间和斑块内部的连通性较低。支线占景观总面积的 3.04%,表明核心区与外部景观具有一定的连通作用。

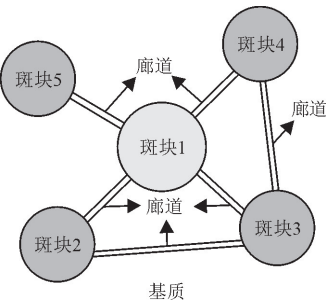


图 2 斑块-廊道-基质结构

Fig. 2 Schematic diagram of "patch-corridor-matrix" structure

表 2 基于 MSPA 的景观分析结果统计

Table 2 Statistics of landscape analysis results based on MSPA

类型	面积/ hm^2	占生态景观总面积(%)	占总面积(%)
核心区	185 525.19	74.06	29.86
孤岛	3 615.03	1.44	0.58
孔隙	8 184.60	3.27	1.32
边缘区	41 361.75	16.51	6.66
环线	1 779.84	0.71	0.29
桥接区	2 408.31	0.96	0.39
支线	7 621.29	3.04	1.23
合计	250 496.01	100.00	40.31

3.2 生态源地选取分析

由表 3 和图 4 可见,选取的重要生态源地斑块面积从 1 452.87 hm^2 到 18 206.10 hm^2 不等,共 95 049.63 hm^2 。其中麒麟区 32 355.51 hm^2 ,占总面积的 34.04%;沾益区 37 801.40 hm^2 ,占总面积的 39.77%;马龙区 24 892.72 hm^2 ,占总面积的 26.19%。沾益区分布最多,麒麟区次之,马龙区分布最少。在四周呈现聚集状态,面积较大,中心区域斑块较小,且分散程度较大。选取的重要斑块均为城市森林的核心区域,可作为生物赖以生存的生境和栖息地。此外,斑块连接性重要程度(dPC 值)与其面积大小对比可知,二者相关性不显著,如斑块 9、7、12 虽面积相对较小,但 dPC 值相对较高。因

此,基于 MSPA 方法与连通重要性指数识别源地,可有效避免忽略小面积斑块的连通性作用,有助于保障景观斑块间的连通性水平。

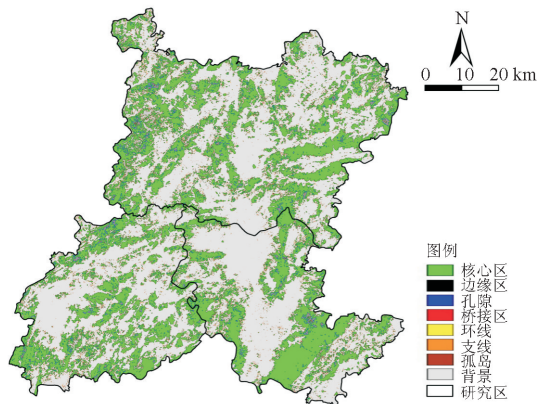


图3 MSPA 分析景观类型

Fig. 3 MSPA analysis of landscape types

表3 基于景观连通性的核心区(生态源地)重要程度统计

Table 3 Statistics of the importance degree of core area (ecological source area) based on landscape connectivity

排序	斑块编号	斑块面积 /hm ²	占核心区 (%)	dIIC	dPC
1	20	18 206.10	9.81	35.57	32.39
2	9	5 745.06	3.10	13.31	14.69
3	7	3 928.86	2.12	12.02	12.58
4	2	6 389.64	3.44	9.93	12.04
5	5	6 733.71	3.63	11.79	11.59
6	6	5 042.97	2.72	6.91	8.42
7	12	3 635.01	1.96	5.99	7.61
8	11	4 741.02	2.56	4.48	5.25
9	8	4 059.90	2.19	3.83	4.67
10	17	4 680.00	2.52	3.53	4.19
11	1	1 998.45	1.08	2.52	3.75
12	15	2 340.45	1.26	1.76	2.59
13	16	5 100.93	2.75	2.79	2.54
14	3	3 737.43	2.01	2.30	2.40
15	13	4 679.73	2.52	2.35	2.14
16	19	3 477.42	1.87	1.84	2.05
17	14	4 039.56	2.18	1.75	1.59
18	4	1 998.72	1.08	1.23	1.43
19	10	3 061.80	1.65	1.48	1.35
20	18	1 452.87	0.78	0.77	1.08
合计		95 049.63	51.23	—	—

3.3 生态廊道提取分析

由表4和图4可见,不同生态斑块间的相互作用强度存在显著差异,作用力最大的16条廊道中斑块18—19的相互作用最强,表明斑块间生态廊道的景观阻力较小,连通程度较高,生境适应性较强,廊道在生态网络中具有突出地位,对物种之间交流和区域生物多样性等起着至关重要作用,因此在今后的规划中应加强控制和保护;斑块8—10的相互作

用较弱,表明斑块间生态廊道的景观阻力较大,连通程度较弱,不能有效满足生物物种的迁移和扩散,影响生物物种丰富度和生物多样性,因此在今后的规划中应加以优化和完善,提高这一廊道的连通性和生境适宜性。

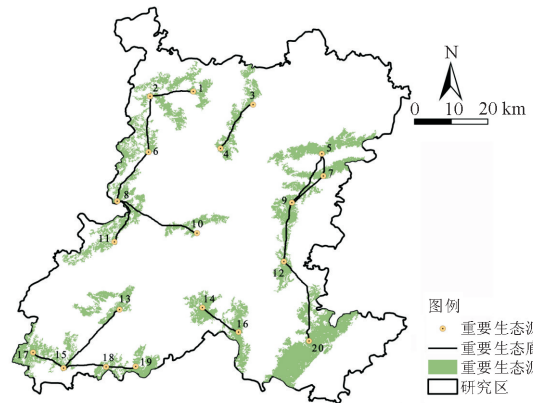


图4 重要生态廊道

Fig. 4 Important ecological corridor map

3.4 生态网络结构优化分析

依托“麒沾马”研究区域内自然山体、森林以及生态要素等现状布局,构建“一区、三核、七片、六廊、多点”的生态网络结构(图5),形成“绿环护城、绿核嵌城、绿片映城、绿廊穿城、绿点镶城”的生态空间布局,充分发挥城市生态效能。

“一区”:指“麒沾马”一体化融合成“一区”。打破行政区划限制,根据生物物种扩散的需求和生态建设的可能性,建议规划加强斑块1—3、3—5、16—20、14—19、11—17生物通道的建设,增加斑块之间的有效连接,从而形成连通的、闭合的、完整的环状生态屏障,为区域内生物物种的迁移和扩散提供保障。

“三核”:指“麒沾马”建成区组成的3个生态绿核。随着“沾麒马”一体化发展,建成区将会是“一区”发展的动力核心,建议加强建成区的绿地建设,形成“三核驱动”的发展模式。

“七片”:指区域内建设的自然保护区、森林公园、湿地公园以及自然山体等。建议在保护优先的前提下,依托其独具特色的、丰富的自然景观资源,进行合理利用。并尽量将其与周边生态林地、山体等进行整体性统筹考虑,增大斑块面积,形成连片的生境斑块,从而增强生态功能和适宜性,提高生物多样性。

“六廊”:指区域内7个片区间的线性或带状连接。在考虑生态源地间相互作用力和距离因素上,建议规划加强斑块10—4、10—9、10—20、10—14、10—13生物廊道的建设,充分发挥廊道作为线型生

境的功能,打通区域由内向外的有效连接。

“多点”:指区域内的 20 个重要生态节点,是确定生物多样性持久性的重要地点,是主要生物多样性区(key biodiversity areas,KBA)。具有更好的面积效应,为区域内生物物种提供更大的生境。建议加强现状重要生态节点的保护,提升自身质量,并整合节点周边的生态要素,保护内部生态环境和生物多样性,同时加大辐射功能,有效拓展区域网络。

表 4 基于重力模型的 20 个重要生态源地间相互作用矩阵

Table 4 Interaction matrix of 20 important ecological sources based on gravity model																					
斑块号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	0	31 097	23 250	15 029	577	4 362	1 527	1 511	1 063	1 492	663	554	312	320	201	335	164	216	155	360	
2		0	6 281	11 293	373	5 074	1 033	1 088	2 863	871	1 564	857	474	316	307	194	311	162	197	142	302
3			0	10 097	109	1 097	1 655	3 733	1 199	2 269	2 057	627	813	340	357	210	386	162	226	165	452
4				0	11 654	2 355	7 755	2 264	5 225	6 415	1 174	1 910	587	665	331	710	252	365	271	827	
5					0	591	3 606	213	652	32 188	3 185	502	2 054	316	376	185	471	142	214	157	687
6						0	647	464	384	603	2 321	4 597	359	604	354	314	341	260	304	206	242
7							0	830	4 153	367	3 877	622	4 024	406	494	247	703	190	285	209	1 303
8								0	884	25 860	1 051	347	573	2 627	1 172	850	904	670	810	572	444
9									0	5 472	610	22 704	989	408	1 008	237	1 593	182	322	257	3 419
10										0	12 205	3 363	3 762	4 198	982	3 204	677	1 039	791	1 199	
11											0	461	5 685	1 150	2 409	745	2 645	1 376	856	384	
12												0	557	3 671	332	9 171	224	488	424	47 093	
13													0	3 294	28 313	1 425	6 987	16 564	7 683	498	
14														0	1 072	713 569	469	2 173	3 469	1 673	
15															0	786	81 074	58 305	4 219	326	
16																0	498	1 491	1 673	4 771	
17																	0	12 574	2 078	313	
18																		0	42 168	510	613
19																			0	652	
20																				0	

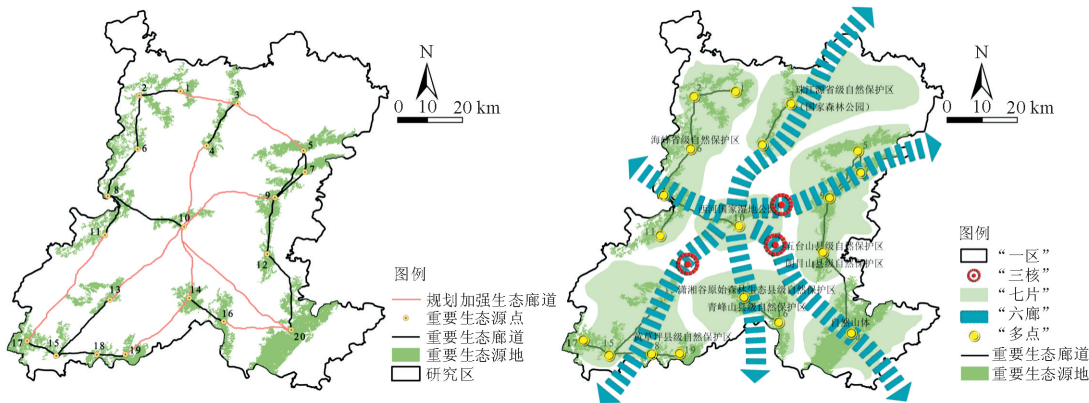


图 5 生态网络空间结构优化

Fig. 5 Spatial structure optimization map of ecological network

4 结论与讨论

4.1 结论

从景观格局分析,研究区内核心区景观面积共 185 525.19 hm²。空间异质性较小,景观系统核心区斑块面积占整体生态景观总面积的 74.06%。从生态源地和生态廊道选取来看,共选取 20 个重要生态源地,斑块面积共 95 049.63 hm²,在四周呈现聚集状态,面积较大,中心区域斑块较小,且分散程度较大。不同生态斑块间的相互作用强度存在显著差异。斑块连接性重要程度(dPC 值)与其面积相关性不显著。提取相互作用力最大的 16 条重要廊道。构建“一区、三核、七片、六廊、多点”的生态网络空间

结构。

构建区域生态网络是景观生态规划的重要方法,是解决城市化带来的景观破碎化、生态系统服务功能削弱等诸多生态问题的重要措施,是解决区域性生态问题整体途径的尝试。虽然目前曲靖市中心城市自然本底条件优越,但随着城市建设,仍然存在破坏生态廊道的现象,在生态网络构建中生态节点起着至关重要的作用,因此应加强生态节点和生态廊道的建设,保护当地生态安全格局。以生态文明建设为引领,运用全面生态建设的理念,突破传统以显性交通体系、河流水系等要素为规划骨架的观念,以自然条件为依据,寻求区域环境与其他构成要素的关系以及人与自然在空间上的认知同构关系,使

得自然环境与人工环境有机融合,从而构建多样化的、多功能的曲靖大城市生态景观格局。

4.2 讨论

遥感影像已经成为快速获取土地类型数据的基本工具。但不同时期数据的解译会直接导致不同的解译结果,且解译处理和格式转换本身就存在不确定性,这种差异会直接反映在景观格局分析上。本研究在遥感影像处理方面,采用监督分类+人工目测解译修正的复合方法,通过高清影像比对和外业调查验证等方法增加数据解译结果的真实性,但精度仍有待提高。

斑块连接的重要性程度与斑块面积的大小二者相关性不显著,大的生态斑块可以构成区域物种的生态源地,保护更多的生物物种,而小的生态斑块可以增加城市景观异质性,为物种提供运动交流的暂歇地,创造丰富的生态节点和生境资源,提高区域生物多样性。本研究基于 MSPA 与连通重要性指数识别生态源地,并通过多尺度对比论证,有效避免忽略小面积斑块的连通性作用,有助于保障景观斑块间的连通性水平。

景观阻力赋值类型的选取与赋值的区间均会对廊道的形成、生态网络的结果产生重要影响,因此需要科学地确定景观阻力参数。本研究基于数据资料的可获得性,仅选取了土地利用类型、高程、坡度和距道路距离等 4 种类型。并未考虑同一土地利用类型在不同开发建设强度下对景观阻力值的影响,缺少所选因子与区域内物种迁移较为准确的数据关系等,主要根据前人相关研究,具有一定的局限性和较大的主观性,需结合更全面的数据进行深入分析。基于 MCR,通过重力模型对生态网络的结构进行定量分析,提取重要生态廊道和一般廊道,为生态网络保护的优先度提供了一定的科学依据。

基于以上分析,打破行政区划限制,构建“斑块—廊道—基质”多层次、多要素(点、线、面、网)相结合的曲靖市中心城市生态网络系统,能够有效保护“麒沾马”大城市生态系统、物种栖息地和重要景观,对城市生态圈保护与修复方向具有指导意义。

参考文献:

- [1] MAHMOOD A,JIANG P,ABDUL M,*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.
- [2] 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.
- [3] CHEN Y Y,LUO Z J,QI S,*et al.* Ecological security pattern construction of Nanchang city based on ecological sensitivity and ecological network [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 342-349. (in Chinese)
- [3] SILVIA P,PERE S,LUCA S. 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.
- [4] CUNHA N S,MAGALHAES 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.
- [5] 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.
- [5] 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(7): 2119-2127. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] LIANG Y Y,ZHAO Y D. Construction and optimization of ecological network in Xi'an based on landscape analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3767-3776. (in Chinese)
- [7] 苏凯,于强,YANG Di,等. 基于多场景模型的沙漠-绿洲交错带林草生态网络模拟[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 243-253.
- [7] SU K,YU Q,YANG D,*et al.* Simulation of forest-grass ecological network based on multi-scene model in typical desert-oasis ecotone [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 243-253. (in Chinese)
- [8] 吴健生,岳新欣,秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 429-440.
- [9] 韩婧,李冲,李颖怡. 基于 GIS 的珠海市西区绿地生态网络构建[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 243-251.
- [9] HAN J,LI C,LI Y Y. Construction of green space ecological network based on GIS of Western ecological new district in Zhuhai [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 243-251. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 马志宇. 基于景观生态学原理的城市生态网络构建研究——以常州市为例[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2007.
- [12] 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.
- [12] WANG Y Y,SHEN C Z,JIN X B,*et al.* Developing and optimizing ecological networks based on MSPA and MCR model [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2): 138-145. (in Chinese)
- [13] ELIZABETH C,RAFAEL M S,JUAN M T R,*et al.* National assessment of the fragmentation levels and fragmentation-class transitions of the forests in Mexico for 2002, 2008 and 2013[J]. *Forests*, 2016, 29(3): 48.
- [14] HUANG X X,WANG H J,SHAN L Y,*et al.* Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity [J]. *Eco-*

- logical Indicators, 2021, 132, 108319.
- [15] 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.
- QI S, LUO Z J, CHEN Y Y, *et al.* Construction and optimization of ecological network in Yuanzhou district based on MSPA and the least-cost path method[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(2): 351-360. (in Chinese)
- [16] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [17] 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.
- GAO Y L, HUANG H, LI Z H, *et al.* Construction of the ecological network of Pingtan Island based on MSPA [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2019, 48(5): 640-648. (in Chinese)
- [18] 张启舜, 李飞雪, 王帝文, 等. 基于生态网络的江苏省生态空间连通性变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3007-3020.
- ZHANG Q S, LI F X, WANG D W, *et al.* Analysis on changes of ecological spatial connectivity in Jiangsu Province based on ecological network [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3007-3020. (in Chinese)
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性[J]. 生态学报, 2008, (5): 2237-2244.
- XIONG C N, WEI H, LAN M J. Analysis of connectivity on greenland landscape in metropolitan region of Chongqing City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, (5): 2237-2244. (in Chinese)
- [21] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 1-9.
- ZHANG L C, ZHANG Y F, DONG L B. Spatial pattern and correlation of forest landscape in daxing'an mountains based on landsat TM data[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 1-9. (in Chinese)
- [22] 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.
- CHEN N N, KANG S Z, ZHAO Y H, *et al.* Construction of ecological network in Qinling Mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1545-1553. (in Chinese)
- [23] 邱婧. 城镇建设用地弹性规划区研究——以重庆市秀山县县城土地利用规划为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [24] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
- MAO L, JIA J M. Study on the change characteristics of landscape pattern of agricultural and forestry land at county area in Heilongjiang[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 44-53. (in Chinese)
- [25] 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.
- GUO J X, HU Z Q, LI H X, *et al.* Construction of municipal ecological space network based on MCR model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 275-284. (in Chinese)
- [26] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 61-67.
- HAN R Y, ZHAO Z P, XIAO N W. The eco-network construction and optimization in biodiversity conservation priority area——a case study of the Taihang Mountain area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 61-67. (in Chinese)
- [27] 汪金梅, 雷军成, 王莎, 等. 东江源区陆域生态网络构建与评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3092-3098.
- WANG J M, LEI J C, WANG S, *et al.* Construction and evaluation of terrestrial ecological networks in headwaters region of the Dongjiang River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3092-3098. (in Chinese)
- [28] 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.
- ZHANG Y L, YIN W T, HU X J, *et al.* The construction of resource-saving ecological network based on MSPA and MCR model——a case study of Dongshan island in Fujian Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 254-261. (in Chinese)
- [29] 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.