

DOI: 10.5846/stxb202012213241

范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. 生态学报, 2022, 42(16): 6620-6632.

Fan C M, Wang Z T, Tang N, Deng G P. Construction of ecological network in downtown of Guiyang city based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6620-6632.

基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建

范春苗¹, 王志泰^{1,2,*}, 汤娜¹, 邓国平¹

1 贵州大学 林学院, 贵阳 550025

2 贵州大学 风景园林规划设计研究中心, 贵阳 550025

摘要:喀斯特多山地区, 城市扩展过程中大量自然山体镶嵌入城, 形成具有多种生态系统服务功能的城市遗存自然山体。但在城市内部致密化发展过程中, 这些城市遗存山体常被城市建设用地孤立和包围, 形成人工干扰场中的生态孤岛。生态网络的构建既有利于城市遗存自然山体自然资源保护, 又有助于丰富城市绿色基础设施生态系统服务功能。以喀斯特地区典型的多山城市——贵阳市行政区为研究对象, 综合利用形态学空间格局分析法和景观连通性识别中心城区生态源地, 基于主成分分析确定研究区综合阻力面, 通过最小累积阻力模型、重力模型和水文分析等方法, 识别并优化关键衔接廊道及节点, 在中心城区行政区和建成区两个尺度构建研究区生态网络。结果表明: (1) 行政区生态源地分布整体呈现“南北相望”的格局, 建成区生态源地集中在中部; (2) 研究区综合生态阻力高值主要集中在研究区中部, 呈放射状向外扩散, 综合生态阻力低值主要分布在研究区周边, 以大型林地斑块为主; (3) 行政区极重要、重要、一般廊道数分别为 15、21、69, 极重要廊道集中分布在北部, 建成区极重要、重要、一般廊道数分别为 37、113、227 条, 极重要廊道主要分布在建成区中部; (4) 行政区和建成区一类生态节点分别为 29、25 个, 二类生态节点 33、17 个。最终通过叠加行政区和建成区生态网络要素, 形成贵阳市中心城区生态网络, 研究结果能为贵阳市中心城区在未来用地空间上协调生态保护与城市发展提供科学合理的参考。

关键词:形态学空间格局; 最小累积阻力模型; 空间主成分分析; 生态网络构建; 贵阳市

Construction of ecological network in downtown of Guiyang city based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis

FAN Chunmiao¹, WANG Zhitai^{1,2,*}, TANG Na¹, DENG Guoping¹

1 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Landscape Architecture Planning and Design Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: In the karst mountainous area, with the urban expansion, a large number of natural mountains have been embedded into the urban built-up area, forming the urban remnant natural mountains which have various ecosystem service functions. However, in the process of dense development within the urban area, these urban remnant mountains were often isolated and surrounded by the urban construction land, forming the ecological islands in the artificial interference field of urban built-up area. Construction of ecological network of the mountainous urban could be not only conducive to the protection of natural resources of urban remnant natural mountains, but also beneficial to enrich the service functions of urban green infrastructure ecosystem. Taking the downtown of Guiyang, a typical mountainous city in karst area, as research area, we comprehensively used morphologically spatial pattern analysis (MSPA) and landscape connectivity to identify

基金项目:国家自然科学基金项目(32060367); 贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z011); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]一般 458)

收稿日期: 2020-12-21; 网络出版日期: 2022-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ztwang@gzu.edu.cn

ecological sources and determined the comprehensive resistance area based on the principal component analysis. We also identified and optimized the key connection corridors and nodes through the minimum cumulative resistance model (MCR), and constructed the ecological network at two scales of the administrative area and the built-up area of the research area. The results showed that: 1) the overall distribution of ecological sources in the administrative region presented a pattern of “north and south facing each other”, and the ecological sources in the built-up area were concentrated in the central part; 2) The high values of comprehensive ecological resistance were mainly concentrated in the middle of the study area and radially spread outwards, while the low values were mostly distributed in the periphery of the study area with large forest patches; 3) The number of essential, important and general corridors in the administrative region were 15, 21 and 69 respectively. The essential corridors were concentrated in the north of the study area, meanwhile, the number of essential, important and general corridors in the built-up area were 37, 113 and 227 respectively, and the essential corridors were mainly distributed in the middle of the built-up area; 4) There were 29 and 25 ecological nodes in the administrative and built-up areas, and 33 and 17 second-class ecological nodes, respectively. Finally, by superposition the ecological network elements of administrative region and built-up areas, the ecological network of the downtown of Guiyang City was constructed. This study could provide scientific and reasonable reference for coordinating ecological conservation and urban development in the central urban area of Guiyang city.

Key Words: morphological spatial pattern analysis; minimum cumulative resistance model; spatial principal component analysis; ecological network construction; Guiyang City

快速城市化进程伴随着高强度土地开发与利用,严重影响了区域景观生态安全与可持续发展,使原本脆弱的城市生态环境更趋于恶化^[1]。针对当前面临的各类生态环境问题,各级政府持续推动了各个层面的国土空间治理,强调“自然资源整体保护”与“科学布局生产空间、生活空间、生态空间”的指导思想^[2]。贵阳市作为西南岩溶地区中心城市之一,是典型的喀斯特多山城市,可建设用地少,人口压力大,发展更加集中。近年来贵阳市中心城区城市化加剧,生态系统服务功能受损、土地利用结构失衡,生态安全以及可持续发展受到极大威胁^[3]。而中心城区内的山地环境具有高度异质化的生境、相对较低的人类干扰强度,是生物多样性保护的重点区域^[4]。针对这类岩溶地区多山城市的城-山镶嵌体景观特征,为缓解喀斯特山地城市生态保护与经济发展之间的矛盾,探索喀斯特多山城市生态网络构建模式具有重要意义,研究结果将对喀斯特山地城市绿地生态系统空间格局优化和绿地系统规划提供依据和参考。

生态网络以景观生态学为理论基础,融合岛屿生物地理学、干扰生态学等其他相关理论,以连接景观空间中破碎化的景观斑块为目的,依托线性生态廊道的连接而构建的生态网络体系,具有维持景观空间内的生物多样性、生态系统稳定性等功能^[5-7],是提升自然资源整体保护与区域生态安全的有效途径。生态网络起源于20世纪80年代的欧洲,最开始是由生态节点、廊道、缓冲区以及自然保护区等组成的网络状景观^[1]。发展至今,生态网络结构已趋于成熟,学术界对生态网络构建的研究已形成基本模式:生态源地识别、综合生态阻力面构建与潜在生态廊道提取。对生态源地识别,现有研究多以生态系统服务^[8]、生态安全^[9]、景观连通性^[10]、生态功能重要性^[11]等因素作为评价依据,或直接根据斑块面积与属性选取适宜生态斑块^[12]。综合阻力面多基于阻力赋值^[5]或构建相关评价体系^[13]获得,近年来有学者利用夜间灯光数据^[14]、地形位指数^[15]、地质灾害敏感性^[16]来修正综合阻力面,使评价结果更具客观性。提取潜在生态廊道的方法广泛地使用最小累积阻力模型(MCR)^[17-19]和电路理论^[20],并基于重力模型^[9]研判相对重要生态廊道。喀斯特地区作为生态研究热点区域,但喀斯特多山城市生态网络构建研究目前少见报道,同时喀斯特地区城市建成环境中遗存了大量生态用地,在城市中具有重要的生态系统服务价值,传统方法仅用单一行政区域尺度识别生态网络,无法发挥建成环境内生态斑块的生态系统服务价值,因此,根据不同空间尺度上生态问题的差异性,针对性构建多尺度生态网络并叠置识别重要衔接空间,在满足较大尺度上生态网络结构基础上,考虑小尺度环境中遗存

生境的生态系统服务价值,是目前喀斯特多山城市生态网络规划亟待优化的方法路径。

综上所述,本研究以贵阳市中心城区为研究区域,基于主成分分析确定研究区综合阻力面,利用形态学空间格局分析法(MSPA)和景观连通性识别中心城区生态源地,通过综合评价识别建成区生态源地,基于MCR模型、重力模型、水文分析等方法构建并叠置中心城区行政区和建成区生态网络识别关键衔接廊道及节点,最后对研究区生态网络进行优化。旨在为贵阳市中心城区在国土空间规划和城市开发建设中协调生态保护与城市发展提供科学合理的参考。

1 研究区概况

贵阳市作为我国西南地区重要中心城市之一,位于贵州省中部($106^{\circ}07'—107^{\circ}17'E$, $26^{\circ}11'—26^{\circ}55'$),是贵州省政治、经济、文化、科教、交通中心和西南地区重要交通、通信枢纽,工业基地及商贸旅游服务中心。其地处黔中山原中部典型喀斯特地貌区,地跨长江水系乌江支流与珠江水系红水河支流分水岭。近年来贵阳市城市化加剧,生态系统服务功能受损、土地利用结构失衡,生态安全以及可持续发展受到极大威胁。建设生态网络保证区域生态安全可对其生物多样性保护起到直接的促进作用。本研究分中心城区行政区和建成区两个尺度,中心城区行政区包括南明区、云岩区、花溪区、乌当区、观山湖区、白云区(市辖区),总面积为2529.38 km²,中心城区建成区为以上6个市辖区范围内实际建成或正在建成的、相对集中分布的地区,至2018年,面积为368.24 km²,建成区内有527座城市山体遗存^[21],本研究在叠置两尺度生态网络的基础上构建并优化贵阳市中心城区生态网络。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究采用的数据包括贵阳市中心城区2018年5月Pleiades高分辨率历史遥感影像图(0.5 m空间分辨率)、Landsat 8遥感影像数据、DEM高程数据,来源地理数据空间云(<http://www.gscloud.cn>),行政区划、主要公路分布、铁路分布等其他基础地理数据来源于全国地理信息资源目录服务系统;自然保护区、山体公园分布等数据来源于贵阳市相关规划资料;土壤类型数据来源于中科院环境科学数据库。城市山体植物多样性数据来源于野外调研及文献查阅。本研究基于中科院土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类,遥感影像进行目视解译后将用地分为林地、草地、水域、建设用地、耕地、未利用地6类(图1)。

2.2 研究方法

2.2.1 基于空间主成分分析的生态阻力综合评价

(1) 生态阻力约束因子

参考前人研究^[22-23],结合研究区实际情况,从自然属性和人类活动干扰两方面选取坡度、高程、归一化植被指数等10个指标作为表征研究区综合生态阻力的约束因子(图2)。其中归一化植被指数利用ENVI的Band Math计算得出,生境质量和相对生境退化度通过InVEST模型计算得^[14],土地利用类型根据研究区土地利用数据分类提取,建设用地密度由ArcGIS 10.2的核密度分析得出,距道路距离、距水体距离利用研究区道

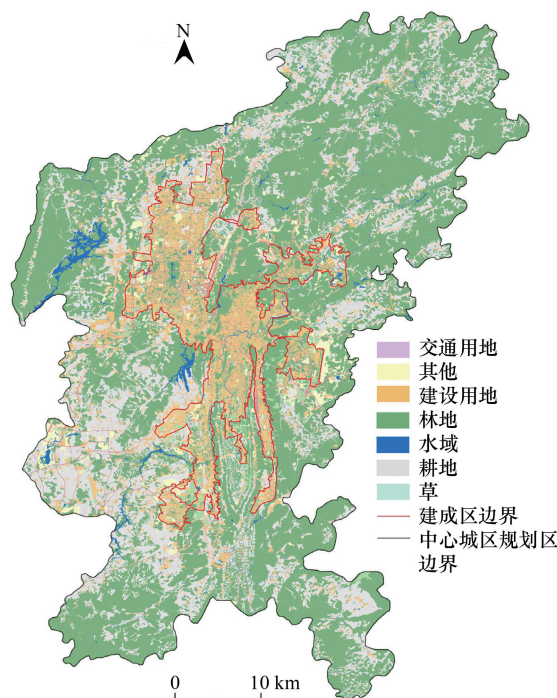


图1 研究区土地利用分类

Fig.1 Land use classification in the study area

路与水体数据建立多环缓冲区。利用 ArcGIS 10.2 软件,将各单因子评价结果通过自然断点法重分类为 5 级。最后将全部数据导出为 30 m×30 m 栅格。单因子生态阻力评价结果见图 3。

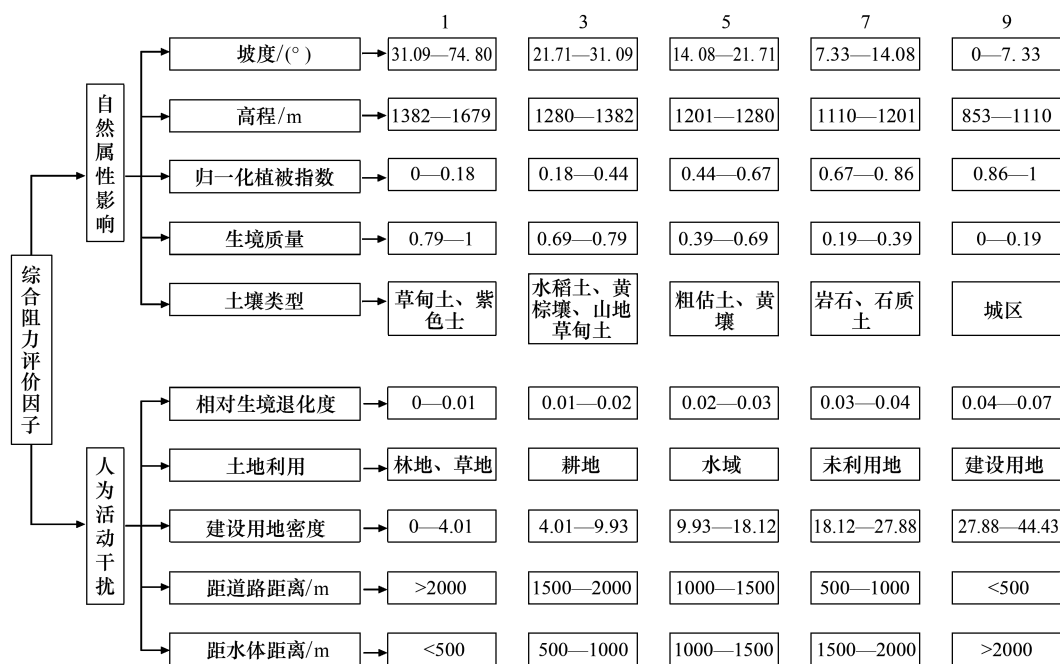


图 2 综合阻力评价指标体系

Fig.2 Comprehensive resistance evaluation index system

(2) 空间主成分分析

空间主成分分析 (SPCA) 则是在 ArcGIS 空间分析功能支持下,以栅格数据为基本操作单元,通过 PCA 将相关的空间变量对因变量的影响程度分配到相应的主成分因子上^[24]。本文运用 ArcGIS 10.2 的 Principal Components 工具,将生态阻力综合评价指标栅格依次输入进行空间主成分分析,得到每个主成分所对应的空间载荷图和各主成分的累积贡献率,通过数理统计方法得到各评价因子权重,将各个评价因子进行加权求和,得到研究区综合生态阻力空间分布。具体公式如下:

$$E = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \cdots + a_nx_n \quad (1)$$

式中, E 为生态阻力综合结果, a_n 为主成分分析的权重, x_n 为研究区单因子阻力面。

2.2.2 生态源地识别

(1) 行政区生态源地识别

MSPA 方法强调结构性连接,能从像元层面更加精确地分辨出景观的类型与结构^[25],将研究用地按形态输出为互不重叠的七类(核心区、桥接区、边缘区、孔隙、孤岛、环道区、支线)。为保证景观要素完整性并结合研究区范围大小,本文选择 30 m×30 m 栅格作为研究单元,选取林地、水域、草地作为 MSPA 分析的前景数据^[26],其他土地利用类型为背景数据,利用 ArcGIS 10.2 软件将数据进行重分类,前景值设置为 2,背景值设置为 1,缺失数据设置为 0,导入 MSPA 分析软件后输出 TIF 图并对结果进行统计。通过计算整体连通性指数 (ICC) 和可能连通性指数 (PC) 来表征研究区生态斑块的景观连通性水平,在斑块重要性指数 (dPC) 的基础上识别研究区生态源地^[27],各指数计算公式如下:

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

$$PC = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}^* a_i a_j \right) / A_L^2 \quad (3)$$

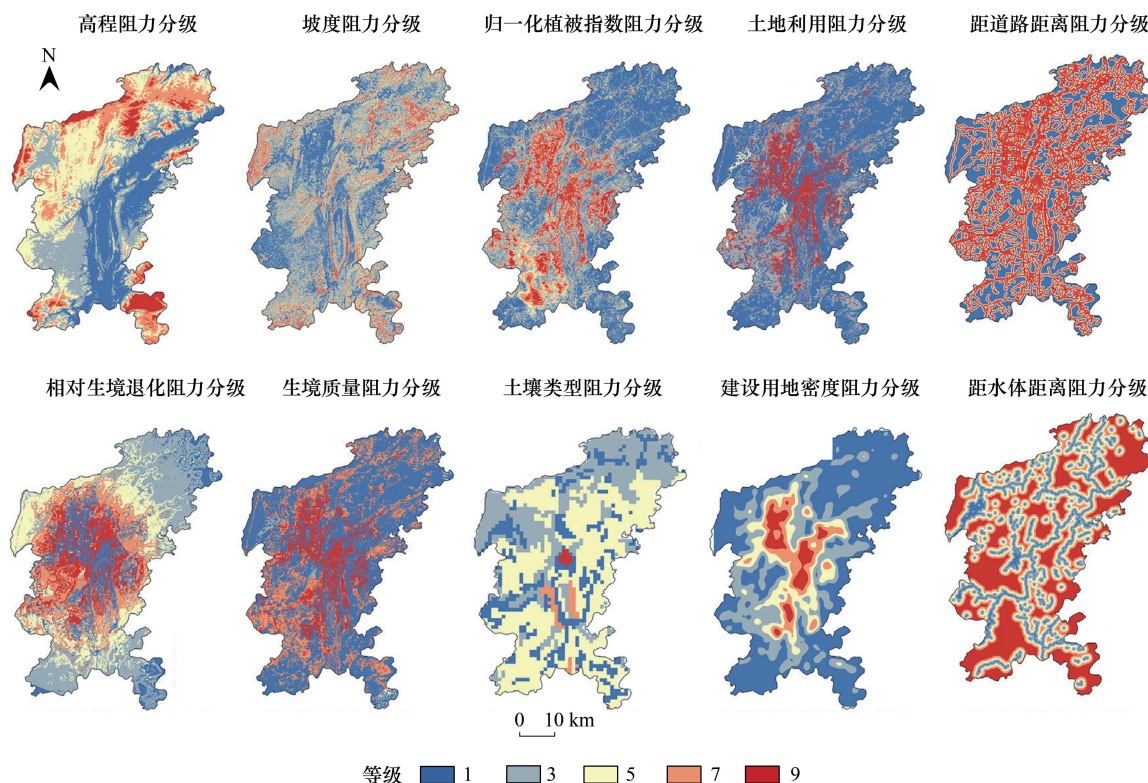


图3 研究区单因子阻力面

Fig.3 Single factor resistance surface in the study area

$$dPC = (PC - PC_{\text{remove}}) / PC \times 100\% \quad (4)$$

式中, $i \neq j$, n 表示提取生态源斑块总数, a_i 为斑块 i 的面积, a_j 为斑块 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, P_{ij}^* 为斑块 i 和斑块 j 之间所有路径最大乘积概率, PC_{remove} 为去除某斑块后剩余斑块整体指数值。

结合研究区情况,提取面积大小前 30 的核心区斑块进行景观连通性分析,借助景观连通性分析软件 Conefor 26,设置连通概率为 0.5,计算斑块连通性指数(dPC),选择 $dPC > 4.0$ 的核心区斑块作为生态源地。

(2) 建成区生态源地识别

贵阳市具有典型喀斯特生态环境,形成特殊的“城中有山,城山镶嵌”格局,城市中自然山体具有重要生态学意义。本文对贵阳市建成区内 527 座城市遗存山体进行斑块重要性指数、斑块形状指数、生物多样性指数综合评价,以此为依据进行建成区生态源地识别。首先利用 ArcGIS 10.2 中 Coverage 工具,设置距离 500 m,对 527 座山体斑块进行聚合。利用 Conefor 26 软件计算景观连通性指数(dPC),表征生境斑块对潜在生态网络结构的相对重要性;测算各山体斑块形状指数,表征建成区内自然山体的形状复杂程度;通过实地调研计算得到建成区分区植物多样性均值。最后将斑块连通性指数、斑块形状指数、植物多样性指数三者等权叠加,通过自然断点法将建成区自然山体按重要程度分为 5 类,提取极重要和重要斑块作为建成区内生态源地。

2.2.3 生态网络构建

MCR 模型通过计算物种在景观阻力面上从源点到目标所需克服的最小累积阻力,获取二者间的最低成本路径,该路径可视为物种在两地间迁移扩散的最优路径^[14]。将生态阻力综合评价结果作为 MCR 分析的成本数据,利用 ArcGIS 10.2 软件的成本路径工具,依次计算每个源点到其他源点的最小耗费路径,生成潜在生态廊道。基于重力模型计算生态源地间的相互作用矩阵^[28],依据评价结果将潜在生态廊道分为极重要廊道、

重要廊道和一般廊道。

$$G_{ab} = \frac{N_a \times N_b}{D_{ab}^2} = \frac{\frac{1}{P_a} \times \ln S_a \times \frac{1}{P_b} \times \ln S_b}{(L_{ab}/L_{\max})^2} = \frac{L_{\max}^2 \times \ln(S_a \times S_b)}{L_{ab}^2 \times P_a \times P_b} \quad (5)$$

式中, G_{ab} 表示源地 a 、 b 间的相互作用强度; N_a 、 N_b 分别为源地 a 和源地 b 的权重系数; D_{ab} 为源地 a 、 b 间潜在生态廊道标准化值; P_a 和 P_b 分别为源地 a 和 b 的整体阻力值; S_a 和 S_b 分别为源地 a 和源地 b 的面积; L_{ab} 表示源地 a 和源地 b 之间的生态廊道累积阻力值; $L_{\max}$ 为研究区所有生态廊道的最大阻力值。

将研究区生态廊道与阻力脊线的交点作为一类生态节点, 生态廊道与生态廊道的交点作为二类生态节点。叠加生态源地、生态廊道及生态节点构成研究区生态网络。

3 结果与分析

3.1 中心城区行政区生态阻力评价

中心城区行政区生态阻力指数经过主成分变换后的结果如下(表1), 前9个主成分特征值大于1, 前6个主成分的方差贡献率累积超过了总方差的85%, 提取前6个主成分可以合理地反映贵阳市行政区生态阻力格局组成。分析各主成分在原始指标上的载荷(表2)显示: 生境质量、植被覆盖、土地利用在第一个主成分上的载荷较大, 这些指标可以概括为自然生境影响因子; 生境退化、建筑密度、距道路距离在第二个主成分上载荷较大, 这些因子反映人类活动影响; 距道路距离在第三个主成分中载荷较大, 说明第三个主成分与人类活动相关程度高; 植被覆盖、距水体距离在第四个主成分中载荷较大, 为自然影响因子; 坡度指标在第五个主成分载荷较大; 坡度、高程、植被覆盖度在第六个主成分中载荷较大。第六第五主成分相关程度高的指标为地形因子。因此, 可将研究区生态阻力评价指标概括为3类影响因子: 自然生境影响因子、人类活动影响因子、地形影响因子。因研究区属于典型喀斯特地貌区, 形成了独特的“城中有山、城山镶嵌”格局, 自然生境是影响其综合生态阻力的重要因子, 城市化发展带来植被的破坏, 导致生态斑块破碎化, 对研究区资源环境和整体生态安全造成重要影响; 人类活动也是影响研究区生态阻力格局的重要因子, 近年来贵阳市城市化加剧, 建设用地密度增大, 城市外部和内部的生态斑块均受到不同程度的侵蚀, 在城市发展的同时对生态环境带来了极大破坏; 另一个重要的影响因子为地形因子, 特殊的喀斯特地貌一定程度上影响了研究区的土地利用结构, 进而影响生态阻力综合布局。

表1 主成分的特征值及其累积贡献率

Table 1 Eigenvalues of principal components and their cumulative contribution rates

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution Rates/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%	主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution Rates/%	累积贡献率 Accumulative contribution rate/%
1	14.7616	40.66	40.66	6	2.0093	5.53	86.42
2	5.0446	13.90	54.55	7	1.6305	4.49	90.91
3	3.9890	10.99	65.54	8	1.3346	3.68	94.59
4	3.2061	8.83	74.37	9	1.1428	3.15	97.74
5	2.3669	6.52	80.89	10	0.8220	2.26	100

由研究区生态阻力等级空间分布图(图4)可知, 高阻力区主要集中在研究区中部, 呈放射状向外扩散, 这是由于该区为老城区, 城市化水平高, 交通体系发达, 建设用地密集, 植被覆盖率较低且生态斑块破碎。低阻力区主要分布在研究区周边, 以大型林地斑块为主, 人为干扰程度低, 生态环境质量较高。这种中部高、周边低的阻力空间格局, 影响了城市内部与外部生境斑块之间的物质流动和物种迁移, 对研究区进行生态网络构建可以增强生境斑块间的景观连通性。

表 2 主成分载荷矩阵
Table 2 Principal component load matrix

约束因子 Restraint factor	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
坡度 Slop	-0.06	-0.035	0.009	-0.099	0.459	0.266	0.334	-0.173	0.2	-0.035
高程 Altitude	-0.041	-0.149	0.157	0.089	-0.336	0.407	0.209	0.177	0.14	-0.059
土地利用 Land use	0.124	-0.084	-0.069	0.008	0.044	0.176	-0.005	-0.009	-0.063	0.887
归一化植被指数 NDVI	0.101	0.076	-0.149	0.209	0.055	0.305	-0.288	-0.11	0.317	-0.401
相对生境退化度 habitat degradation	-0.06	0.248	-0.065	0.206	-0.139	-0.098	0.285	-0.148	0.357	0.367
建筑密度 Building density	0.065	0.108	-0.099	0.142	0.032	0.089	0.396	0.184	-0.598	-0.242
生境质量 Habitat quality	0.144	-0.131	-0.001	-0.071	-0.08	-0.269	0.366	-0.119	0.35	-0.257
距水体距离 distancefrom water area	-0.026	-0.191	0.111	0.426	0.179	-0.196	-0.034	-0.092	-0.076	0.041
距道路距离 distancefrom the road	0.087	0.188	0.414	-0.001	0.094	0.028	-0.042	0.001	0.006	0.019
土壤类型 Soil type	0.004	0.015	-0.033	0.033	0.162	-0.093	-0.002	0.773	0.312	0.065

PC: 为主成分 Principal component;NDVI: 归一化植被指数 Dormalized difference vegetation index

分区域统计研究区阻力均值,得到研究区分区阻力等级划分图(图5),根据阻力大小分为高阻力区(4.78—5.63)、较高阻力区(4.03—4.77)、一般阻力区(3.48—4.02),其中云岩区为高阻力区,较高阻力区为南明区和白云区,花溪区、乌当区、观山湖区阻力相对较低。分析表明,云岩区阻力最高是由于其为贵阳老城主体部分,发展定位以现代生产性服务业为主,区内主要生态斑块为小规模城市山体公园,人为干扰严重,同为老城区的南明区虽地处城市交通枢纽地带,交通体系发达,但其中部尚存大型生态斑块,且东部地区城市化水平较低,因此其生态阻力低于云岩区;花溪区、乌当区、观山湖区处于城市化扩张阶段,区内现存大量未经人为干扰的山体生态斑块,自然条件良好,生态阻力低;白云区为全国最大的铝工业基地之一,工业发展一定程度影响了该区的生态斑块,因此该区生态阻力较高。

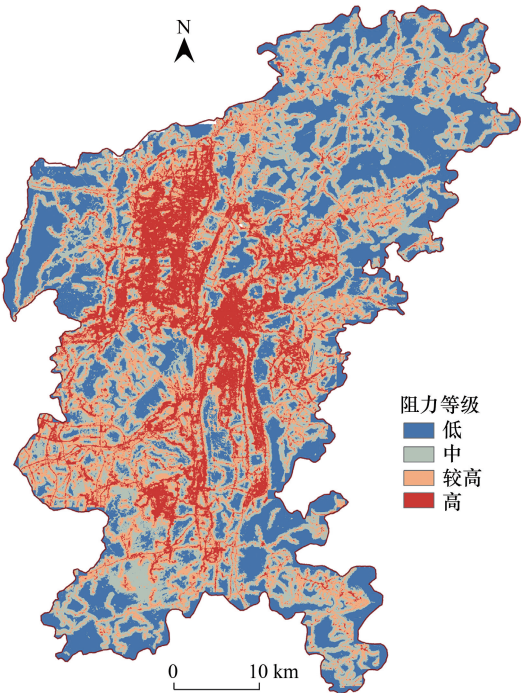


图 4 研究区综合阻力面
Fig.4 Comprehensive resistance surface in the study area

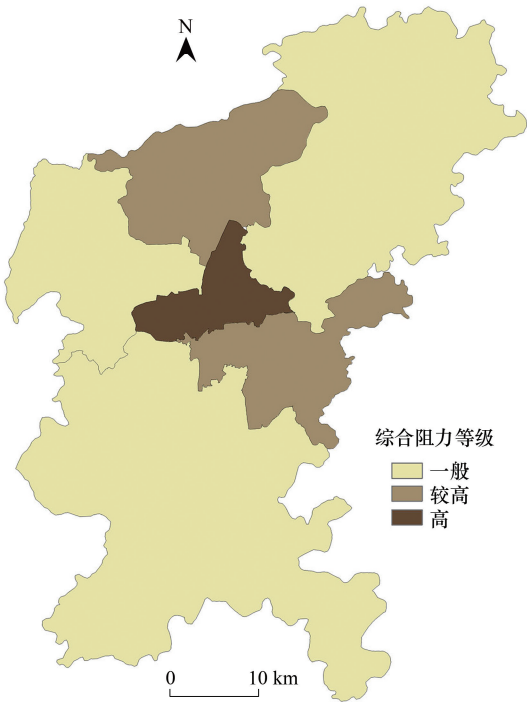


图 5 研究区区域阻力等级划分
Fig.5 Division of regional resistance level

3.2 中心城区生态网络要素识别与提取

3.2.1 生态源地选取

(1)中心城区行政区生态源地选取

通过提取研究区生态用地进行 MSPA 分析,识别出 7 类景观结构(图 6),由 MSPA 分类统计(表 3)可知,行政区生态用地共 1533.43 km²,占研究区的 60.03%。其中核心区面积 1160.23 km²,占生态用地面积的 75.66%,在七类景观结构类型中占比最大,其次为边缘区。整体来看,生态用地核心区主要分布在东北部和南部,中部核心区斑块面积小且分散,破碎化程度较高。筛选 $dPC \geq 4$ 共计 15 个核心区斑块作为生态源地(表 4、图 8),可以看出其分布呈“南北相望”格局,南部生态源地面积较小,北部面积大而集中,中部地区景观连通性低,不利于物种迁移和物质流动,需要加强对原有生态斑块的保护并增加生态源地。

(2)建成区生态源地提取

通过对建成区 527 座遗存自然山体斑块的重要性指数、斑块形状指数、生物多样性进行等权叠加,通过自然断点法将结果分为 5 级,得到建成区自然山体斑块综合评价(图 7)。选取极重要、重要斑块共 28 个作为建成区生态源地,主要分布在云岩区、南明区、观山湖区,包含了建成区内 10 座综合公园,其中,黔灵山公园、阿哈湖国家湿地公园、花果园湿地公园所在斑块综合价值最高,应加强生态保护。

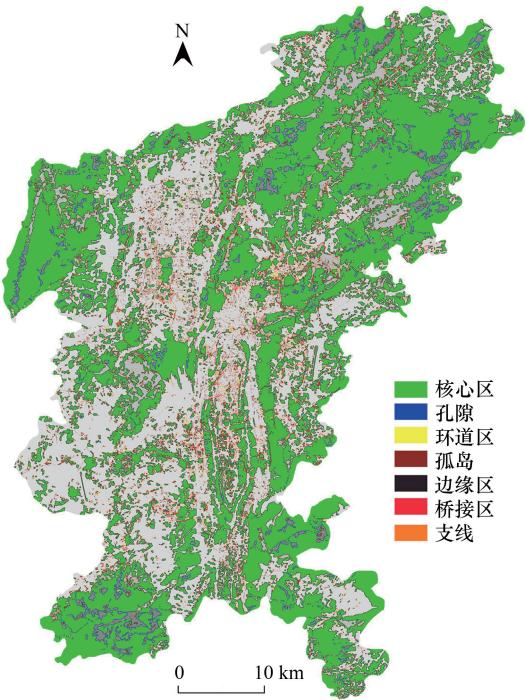


图 6 研究区形态学空间格局

Fig.6 Morphologically spatial pattern of the study area

表 3 形态学空间格局分类统计			
Table 3 Classification statistics of morphologically spatial pattern			
景观类型 Landscape types	面积 Area/km ²	占生态用地面积比例 Proportion of ecological land area/%	占总面积比例 Proportion of total area/%
核心区 Core	1160.23	75.66	45.42
桥接区 Bridge	30.38	1.98	1.19
边缘区 Edge	219.81	14.33	8.61
孔隙 Perforation	34.28	2.24	1.34
孤岛 Islet	23.1	1.51	0.9
环道区 Loop	17.61	1.15	0.69
支线 Branch	48.03	3.13	1.88
总计 Total	1533.43	100.00	60.03

表 4 核心区斑块重要性指数排序					
Table 4 Ranking of the importance index of core area					
编号 Number	源地编号 Source number	斑块重要性指数(dPC) Patch importance index	编号 Number	源地编号 Source number	斑块重要性指数(dPC) Patch importance index
1	15	58.79	9	28	6.65
2	7	45.99	10	0	6.23
3	5	19.79	11	9	6.02
4	4	18.46	12	27	4.4
5	2	17.65	13	26	4.26
6	13	15.58	14	6	4.22
7	29	10.93	15	10	4.09
8	11	7.29			

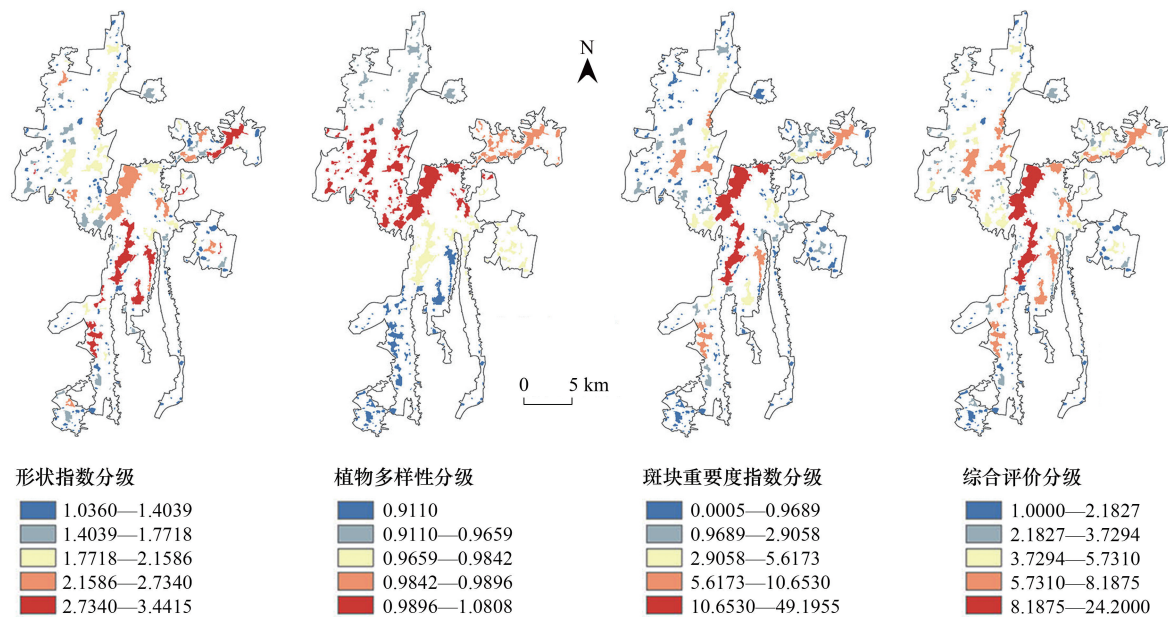


图 7 建成区遗存自然山体综合评价

Fig.7 Comprehensive evaluation of remnant natural mountain in built-up area

3.2.2 生态廊道提取

基于 MCR 模型,总计得到 105 条行政区生态廊道和 378 条建成区生态廊道,面积分别为 18.93 km²和 5.98 km²。从生态廊道景观构成类型表可以看出(表 5),两个尺度的生态廊道中占比最多的景观类型均为林地,分别占比 84.06%和 65.83%,说明林地是联系各生态斑块并保证生态迁移的关键景观类型。行政区生态廊道景观类型中,耕地占比第二,建成区生态廊道中建设用地占比第二,主要是因为行政区尺度上,耕地占研究区面积 21.89%且阻力较小,而在建成区,建设用地为主要景观类型。因此,针对不同尺度上的生态廊道建设其侧重点应有不同。

表 5 生态廊道景观构成类型表

Table 5 Landscape composition types of ecological corridor

景观类型 Land use type	面积 Total area/km ²	占研究区百分比 Percentage of the study area/%	占廊道面积 Area in ecological network as corridors/km ²	占廊道面积比 In the ecological network as corridors/%
林地 Forest	1450.51	56.72	15.91/3.94	84.06/65.83
耕地 Arable land	559.89	21.89	1.73/0.16	9.12/2.73
草地 Grass	47.98	1.88	0.26/0.19	1.39/3.13
水域 Water	35.87	1.40	0.21/0.08	1.10/1.31
未利用地 Unused land	77.51	3.03	0.15/0.21	0.78/3.48
建设用地 Construction area	385.51	15.07	0.67/1.41	3.56/23.51
总计 Total	2557.28	100.00	18.93/5.98	100.00/100.00

通过重力模型计算识别到行政区极重要、重要、一般廊道数分别为 15、21、69。其中极重要廊道集中分布在研究区北部,这些廊道连接的源地间相互作用强度较高且斑块分布密集,为物种迁移提供了良好的环境。连接行政区南北部生态源地的廊道较长,部分穿过建成区内部,这些廊道易受到外界干扰而发生断裂,在后期的规划中应采取相应措施以提升廊道稳定性。连接行政区西北和东北的生态廊道长度较短,且主要位于核心区内部,稳定性高,应注意对周边林地的保护。

识别到建成区极重要、重要、一般廊道数分别为 37、113、227 条。极重要廊道主要分布在建成区中部,南部和北部少见分布,南部源地斑块与其他斑块间形成了明显隔离,未形成连通廊道,后期规划应着重加强与其他斑块间的联系,保护现有南北连通廊道的同时利用周边生态源地形成廊道网络,以提升建成区生态网络整体连通性。

3.2.3 生态节点

识别到行政区一类生态节点 29 个,主要分布在花溪区、乌当区、观山湖区,其中林地 19 个,占一类生态节点的 65.52%,耕地 6 个,占 20.69%。识别到二类生态节点 33 个,各区均见分布,二类生态节点中,林地 20 个,占 60.1%,耕地 9 个,占 27.27%。识别到建成区一类生态节点 25 个,主要分布在生态源地斑块密集的观山湖区和云岩区,一类生态节点林地占 18 个,占一类生态节点的 72%,其次为建设用地 3 个,占 12%。建成区二类生态节点 17 个,主要分布在建成区周边,其中林地占 14 个,占生态节点总数的 82.35%。两类生态节点都是生态功能薄弱的关键点,要加强保护。

3.3 生态网络构建

分别将行政区与建成区两个尺度上识别到的生态源地、生态廊道和生态节点进行叠加,初步得到贵阳市中心城区行政区和建成区的生态网络(图 8、图 9)。

叠加行政区与建成区的生态网络,两个尺度生态网络间重合生态廊道 10 条,重合长度 2.52 km,面积 2.27 km²,占行政区潜在生态廊道的 11.98%,占建成区潜在生态廊道 37.82%,两尺度生态节点共重合 5 个,其中 2 个位于建成区内部。因行政区生态源地主要分布在南北两侧而中部建成区景观连通性较差,结合行政区中部斑块空间分布和斑块连通性指数,将斑块连通性值较大的两个核心区斑块作为新增的生态源地,并模拟 4 条生态廊道与其它生态源地连通。踏脚石斑块能作为距离较远的生态源地间生物暂栖地,对提升生态网络稳定性具有重要作用,较长生态廊道中部及生态节点集中区域需要设置踏脚石斑块以保证生态网络功能的发挥^[10]。研究区南北部分生态源地距离较远,连通性差,中部区域综合阻力值高,生态廊道易断裂,故在建成区中部位于生态廊道附件的 4 个二类生态节点作为踏脚石斑块以提升生态网络稳定性。最终形成贵阳市中心城区生态网络如图 10 所示。

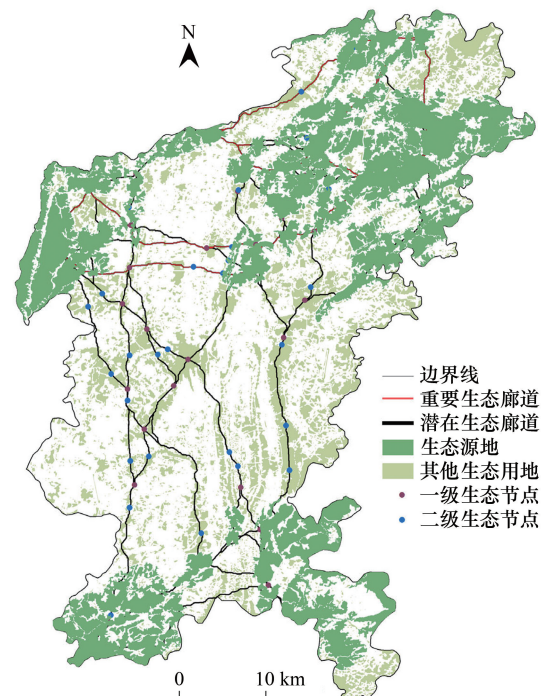


图 8 行政区生态网络

Fig.8 Ecological network of the administrative area

4 讨论

4.1 喀斯特山地城市生态网络的构建方法

贵阳市作为典型的喀斯特地貌多山城市,是我国第一批森林城市之一,其建成环境内遗存有大量自然山体,是非常重要的生态斑块资源^[29]。现有研究多从市域、省域、城市群等单一尺度进行生态网络构建^[1],喀斯特多山城市环境下的遗存生境对整体生态网络功能效益的发挥与衔接作用往往被忽略。本文针对性构建行政区-建成区生态网络,在满足较大尺度上生态网络结构基础上,考虑喀斯特城市建成环境中遗存生境,能有效推动喀斯特多山城市生态网络的合理构建与优化。基于主成分分析构建研究区的阻力面,能有效减少数据冗余、客观性更强^[30],通过本文研究发现,影响贵阳市行政区综合阻力的因子主要为自然影响因子、人类活

动影响因子、地形影响因子,这一结果符合喀斯特区域空间特征^[31],同时分区统计阻力发现各区阻力等级呈中心高周围低的态势,与肖杨等对贵阳市生态安全格局研究结果基本一致^[32],说明基于主成分分析构建的阻力面可以有效表征研究区生态安全水平,实现了定性与定量结合的深入研究。

4.2 喀斯特山地城市生态网络空间保护与修复建议

(1) 生态网络空间分类管控

国家十四五规划提出构建国土空间保护新格局,再次从战略目标层面对国土空间开发保护提出新要求^[33],对生态功能空间的保护与利用是高质量发展国土空间开发保护的重要途径^[2],生态网络构建结果区分出生态源地、生态廊道、生态节点,根据其空间分布特征,实施空间分类管控,能有效指导生态空间优化。从行政区空间尺度来看,生态源地是生态保护的核心区域,是保障自然生态系统服务的最小生态用地底线^[34],研究筛选出 15 个斑块作为行政区生态源地,涵盖了青岩油杉自然保护区、香纸沟风景名胜区、相思河风景名胜区、百花湖风景名胜区等典型生境,是保证生态安全的重要战略点,这类生态源地基本与贵阳市二环林带在空间上叠加,应编制控制性的详细规划,加强环城林带的保护与管理;从建成区空间尺度来看,研究筛选出 28 个斑块作为建成区生态源地,涵盖了黔灵山公园、阿哈湖国家湿地公园、花果园湿地公园等城区公园绿地及部分未公园化利用的遗存山体生境,其中公园绿地具较高生态系统服务价值的同时兼具美学价值,在提供游憩等服务功能的同时要考虑环境承载力,对森林植被、水资源等的保护,应当提出相应的规定以便实施统一管理,建成环境内未公园化利用的遗存山体生境处于建设用地包围之中,岛屿化严重,建议结合缓冲区设置保证其景观连通性。

(2) 生态网络关键衔接空间生态功能完善及拓展

生态廊道是生态网络体系中具有重要连通作用的带状区域^[35],叠置行政区-建成区生态网络识别到的衔接生态廊道还具有重要的结构与功能双重衔接作用。本研究识别到衔接廊道主要位于建成区北部,结构上连通贵阳市一环林带和二环林带,应作为优先保护与修复区域,可与城市公共空间建设协同发展,依托二环林带自然绿地屏障及一环林带上的黔灵山生境斑块,并将沿线的其他具有生态潜力的用地转换为生态用地。衔接节点应以提升生态质量为目标^[28],研究识别到衔接节点 5 个,2 个位于建成区内部,被建设用地包围,应划定开发

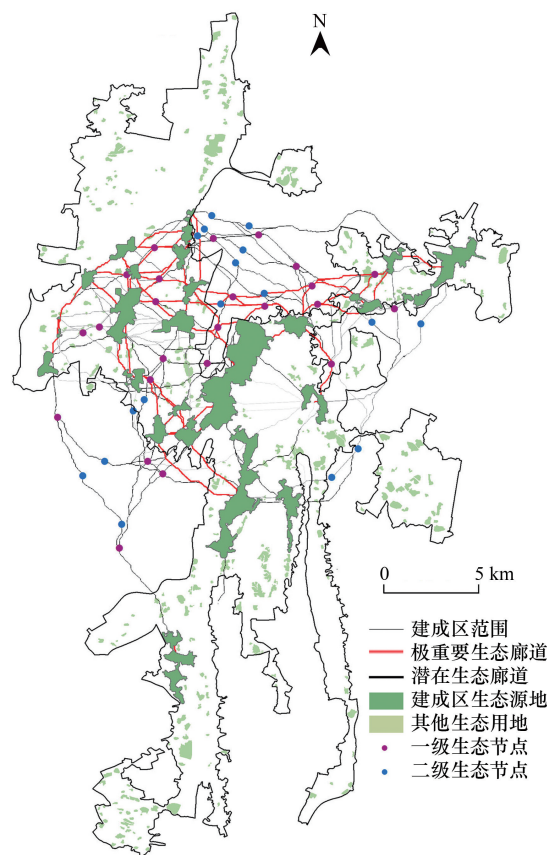


图9 建成区生态网络

Fig.9 Ecological network of the built-up area

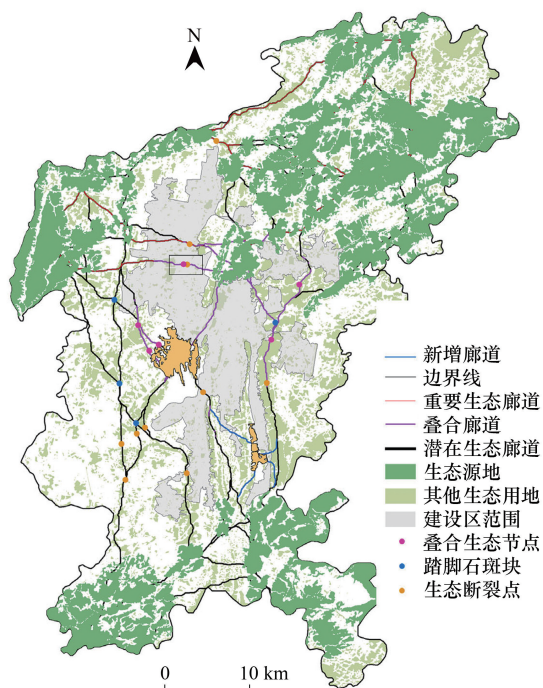


图10 贵阳市中心城区生态网络

Fig.10 Ecological network of the central urban of Guiyang city

控制线,扩大缓冲区范围,避免城市活动对其的破坏。建成区外部的衔接节点位于阿哈湖水库水源保护区,用地情况主要为林地和湿地,应以保护与修复为主,改善水质和连通性。本文研究发现还存在以下不足:在对建成区生态斑块的综合评价上仅选择了形状指数、植物多样性、斑块连通性三个方面,受到模型、数据等不确定因素的限制,相关生态系统服务的需求并未纳入指标体系,同时缺乏相关社会经济数据的支撑,因此提取的生态源地在一定程度上具有局限性,其次本文仅从识别衔接廊道及节点入手考虑两个空间尺度生态网络的综合生态效益发挥,未来需要进一步考虑两个空间尺度生态网络的有效衔接。

5 结论

多山城市建成区内遗存的大量自然山体,是城市生态环境建设的珍贵资源,但由于城市建设用地紧张,这些城市遗存山体以及其它城市绿地斑块的连通性很低。本研究基于景观生态学原理,运用形态学空间格局和景观连通性在研究区识别生态源地 43 块,城市遗存山体是主要的生态源地贡献者;综合运用最小累积阻力模型、重力模型和水文分析等方法,识别行政区极重要、重要、一般廊道数分别为 15、21、69,建成区极重要、重要、一般廊道数分别为 37、113、227 条;识别行政区和建成区一类生态节点分别为 29、25 个,二类生态节点 33、17 个;通过两个尺度生态网络要素叠加,最终构建了贵阳市中心城区生态网络。研究结果可为贵阳市中心城区在未来用地空间上协调生态保护与城市发展提供科学合理的参考。

参考文献 (References):

- [1] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [2] 吴健生, 王仰麟, 张小飞, 彭建, 刘焱序. 景观生态学在国土空间治理中的应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 14-25.
- [3] 李雪冬, 杨广斌, 周越, 李冰, 张旭亚. 基于 3S 技术的岩溶地区城市景观生态安全评价——以贵阳市为例. 中国岩溶, 2016, 35(3): 340-348.
- [4] 王根绪, 刘国华, 沈泽昊, 王文志. 山地景观生态学研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 3967-3981.
- [5] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [6] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [7] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [8] Wang Y, Pan J H. Building ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: a case study in Ganzhou District, NW China. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118337.
- [9] 刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 张森. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟. 生态学报, 2020, 40(21): 7873-7885.
- [10] 齐松, 罗志军, 陈瑶瑶, 赵杰, 林晓霞. 基于 MSPA 与最小路径方法的袁州区生态网络构建与优化. 农业现代化研究, 2020, 41(2): 351-360.
- [11] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. Habitat International, 2018, 71: 110-124.
- [12] Fu Y J, Shi X Y, He J, Yuan Y, Qu L L. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China. Ecological Indicators, 2020, 112: 106030.
- [13] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301.
- [14] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [15] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [16] 苏冲, 董建权, 马志刚, 乔娜, 彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [17] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型 (MCR) 和空间主成分分析法 (SPCA) 的沛县北部生态安全格局构建研究. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [18] 李政, 丁忆, 王亚林, 陈静, 吴凤敏. 基于最小累积阻力模型的山地石漠化地区生态安全格局构建: 以重庆市南川区为例. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1046-1054.
- [19] 谭华清, 张金亭, 周希胜. 基于最小累积阻力模型的南京市生态安全格局构建. 水土保持通报, 2020, 40(3): 282-288, 296-296.

- [20] Huang J M, Hu Y C, Zheng F Y. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: a case study of Jinan City. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(11): 12414-12427.
- [21] 邢龙. 岩溶地区城市山体自然遗存特征及其生态服务功能综合绩效评价——以贵阳市为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [22] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [23] 王琦, 付梦娣, 魏来, 韩煜, 史娜娜, 李俊生, 全占军. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4546-4554.
- [24] 潘竞虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [25] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [26] 陈德超, 施祝凯, 王祖静, 余成. 苏州环太湖地区生态网络构建与空间冲突识别. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(6): 778-787.
- [27] 高宇, 木皓可, 张云路, 田野, 汤大为, 李雄. 基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究——以招远市为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7547-7556.
- [28] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- [29] 向杏信. 城市遗存自然山体植物群落特征研究——以贵阳市为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [30] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1288-1300.
- [31] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [32] 肖杨, 周旭, 蒋啸, 张继, 李洪广. 基于生态系统服务功能评价的贵阳市生态安全格局维护研究. *生态科学*, 2020, 39(4): 244-251.
- [33] 杨伟民. 构建国土空间开发保护新格局. *中国经济评论*, 2020, (S1): 32-35.
- [34] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [35] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.