

基于 MSPA 和 MCR 模型的株洲市生态网络构建与优化

邵润钰^{1,2,3}, 罗紫薇^{1,2,3}, 胡希军^{1,2,3*}, 王烨梓^{1,2,3}, 张九月⁴

(1. 中南林业科技大学 风景园林学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学 城乡景观生态研究所, 湖南 长沙 410004;
3. 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004; 4. 湖南城市学院 设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:为解决快速城镇化导致的生态空间布局破碎等问题,构建起湖南省东部重要生态屏障,以湖南省株洲市为对象,通过形态学空间格局分析和景观连接度水平评价,筛选出景观连通性较高的生态源地斑块,基于最小累积阻力模型和重力模型,提取生态廊道并对生态廊道重要性进行评价构建株洲市生态网络,根据株洲市历史文化景观资源对生态网络进行优化。结果表明,1)初步构建的生态网络包括 25 个生态源地和 300 条生态廊道,共判别 97 个生态节点和 92 个生态障碍点,其中,市辖区及醴陵市西部、攸县北部的生态源地破碎化程度较高,生态廊道在东北部市辖区、西北部和攸县东部分布较少,重要生态节点主要分布在株洲北部,生态障碍点总体上呈现北多南少。2)增加了 12 个踏脚石斑块,其中 4 个作为补充生态源地,同时也新增 106 条生态廊道,以实现生态网络的优化。3)优化后的生态网络连通性增强,网络闭合指数、网络连接度指数和网络连通率指数分别增加了 0.96、2.06。研究结果可为市域生态网络体系构建和国土空间规划与生态修复等研究提供参考和理论依据。

关键词:形态学空间格局分析(MSPA);最小累积阻力模型(MCR);景观格局;生态网络;株洲市
中图分类号:TU982.29 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2024)02-0217-11

Construction of Zhuzhou Ecological Network Based on MSPA and MCR Models

SHAO Run-yu^{1,2,3}, LUO Zi-wei^{1,2,3}, HU Xi-jun^{1,2,3*}, WANG Ye-zi^{1,2,3}, ZHANG Jiu-yue⁴

(1. College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Changsha 410004, Hunan, China; 4. Hunan City University Design and Research Institute Company, Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: Taking Zhuzhou City in Hunan Province as the research object, morphological spatial pattern analysis and landscape connectivity index were used to extract ecological source patches with high landscape connectivity. Based on minimum cumulative resistance model and the gravity model, the ecological corridors were extracted and the importance of the ecological corridors was evaluated to construct the ecological network of Zhuzhou City. The historical and cultural landscape resources of Zhuzhou City were used to optimize the ecological network. The research results showed that 1) the preliminarily constructed ecological network included 25 ecological sources and 300 ecological corridors, and a total of 97 ecological nodes and 92 ecological obstacle points were identified. The degree of fragmentation was relatively high. Ecological corridors were less distributed in the northeastern municipal area, northwest and eastern You District. Important ecological nodes were mainly distributed in the northern part of Zhuzhou. Ecological obstacle points were generally more in the north than in the south. 2) Therefore, 12 stepping stone patches were added, 4

收稿日期:2022-12-28 修回日期:2023-02-21

基金项目:国家林业和草原局重点学科(林人发[2016]21号);湖南省“双一流”培育学科(湘教通[2018]469号);湖南省研究生科研创新项目(CX20220739);中南林业科技大学研究生科技创新基金(CX202101023)。

第一作者:邵润钰。研究方向:大地景观规划与生态修复。E-mail:1519981591@qq.com

* 通信作者:胡希军,博士,教授,博士生导师。研究方向:景观生态规划与生态修复。E-mail:120795043@qq.com

of which were used as supplementary ecological sources, and 106 new ecological corridors were also added to optimize the ecological network. 3) After optimization, the connectivity of the optimized ecological network was enhanced, and the network closure index, network connectivity index and network connectivity rate index increased by 0.96, 2 and 0.66, respectively. The research results can provide reference and theoretical for the urban ecological network construction of ecological security pattern and also can provide scientific basis for the research on land space planning and ecological restoration.

Key words: morphological spatial pattern analysis (MSPA); minimum cumulative resistance (MCR); landscape pattern; ecological network; Zhuzhou City

城市的扩张、快速化的城市化发展, 为广大人民提供了更好的生活条件和美好生活, 但同时导致大规模的生态斑块被侵蚀, 景观破碎性程度加剧, 生态斑块之间的联系逐渐减弱^[1], 给人类和动植物带来了极大的威胁, 在一定程度上造成了生物多样性的降低和物种的灭绝^[2-3]。在此背景下, 诸多学者提出了生态网络的概念, 作为恢复和维持生态连通性的保护工具^[4]。生态网络通过生态廊道连接破碎的生境斑块, 促进斑块间物质能量交流和物种迁移^[5]。尤其是在森林公园和自然保护区等物种丰富度较高的区域, 生态网络的构建可以促进区域物种的迁徙和交流, 确保栖息地的连续性和完整性^[6], 同时也对控制城市扩张, 保护动植物多样性, 节约化利用城市土地具有重要意义^[7]。

从 20 世纪 90 年代起, 国内外学者在宏观上围绕生态网络做出许多方法与模型构建上的尝试^[8-9], 大量研究为构建生态网络提供了较为成熟的研究范式^[10]。目前构建生态廊道大多采用最小累积阻力模型与电路理论模型, 电路理论模型借助电流在阻力面内随机游走模拟物种交流与迁徙代替成本距离, 衡量异质性景观中的功能连通性^[11], 该方法减少了繁杂的廊道冗杂, 但其对于研究地的土地覆被类型精度要求较高, 大量的精确数据不易获取, 所以在数据不详的地方实现困难。最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)是基于生态阻力面在 ArcGIS 中计算源与目标之间的最小阻力值来判断物种迁徙和扩散的最小迁移路径, 从而构建生态网络^[12]。MCR 模型通常与形态学安全格局、景观连接度指数法与重力模型相结合, 依据其简单的数据结构、快速的运算方法达到直观的结果表达, 可全面考虑研究各个阻力因子的影响。如今, 最小累积阻力模型作为一种高效的方式被众多学者广泛应用^[13], 对青岛市^[14]、哈尔滨市^[15]等区域开展了一系列生态网络构建研究并得到了一定成果, 但这些学者尝试以研究区生境特点或基于生态系统服务重要性作为对生境斑块识别, 缺乏一定的客观性。形态学空间格局分析法(morphological spatial pat-

tern analysis, MSPA)是基于图形学原理, 以栅格方式运算对土地覆被类型进行分类, 识别研究区域内对景观连通性起重要作用的关键生态栖息地^[16], 提高了最小累积阻力模型在构建生态网络方面的合理性。在构建阻力面划分阻力因子时, 我国的大部分学者大多采用层次分析法(AHP)^[17-18], 层次分析法是常见的阻力赋值法, 采用 AHP 法得到的指标权重结果更多地取决于研究者的主观判断, 具有一定的臆断和随机性^[19]。本研究引入熵权法, 它是一种常用的客观赋值法, 其权重结果取决于评价方案数据之间的相互关系, 熵权法会对 AHP 法的赋权结果进行修正, 得到最终的综合权重, 从而提高综合阻力面的客观性与准确性。

湖南省株洲市森林资源丰富, 作为我国曾经的八大工业基地之一, 历史积累形成的生态环境问题目前仍在治理。本研究以湖南省株洲市为例, 运用形态学空间格局分析法(MSPA)和最小累积阻力模型(MCR), 识别连通性较好的生境斑块, 提取潜在生态廊道并借助重力模型构建各生态源地之间的相互作用矩阵, 结合研究区实际情况和生态源地之间的相互作用强度划分重要生态廊道和一般生态廊道, 最后通过构建踏脚石完善并优化生态网络, 为株洲市的生态修复规划和生态文旅体系发展提供理论依据, 同时也可为市域生态安全格局、国土空间规划和生态修复等提供研究方法和思路。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

株洲市位于湖南省东部, 湘江下游(112.6°—114.7°E, 26.3°—28.1°N)(图 1), 总面积 11 272 km²。境内东南高、西北低, 位于罗霄山脉西麓, 南岭山脉至江汉平原的倾斜地段上, 西北侧主城区内湘江两岸较为平坦, 境内水系密布。株洲属亚热带季风气候, 光热充足, 雨量充沛, 植物资源丰富, 植被类型为亚热带常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林, 森林覆盖率 61.95%, 活立木蓄积量为 2 534.53×10⁴ m³。

1.2 数据来源及预处理

株洲市土地覆被数据通过国家基础地理信息中

心发布的 2020 年 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com>)矢量裁剪得到(图 2);ASTER GDEM 分辨率为 30 m 的高程数据(条带号 112、113、114,行编号 26、27、28)、道路以及水系分布数据均来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);2020 年株洲市归一化植被指数

(NDVI)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),获取后对数据进行归一化处理;人文类风景资源通过株洲市文物、林业以及旅游等相关部门的政府官网获取,资源点的空间位置通过对照高德坐标拾取系统以及 91 卫星地图进行拾取。

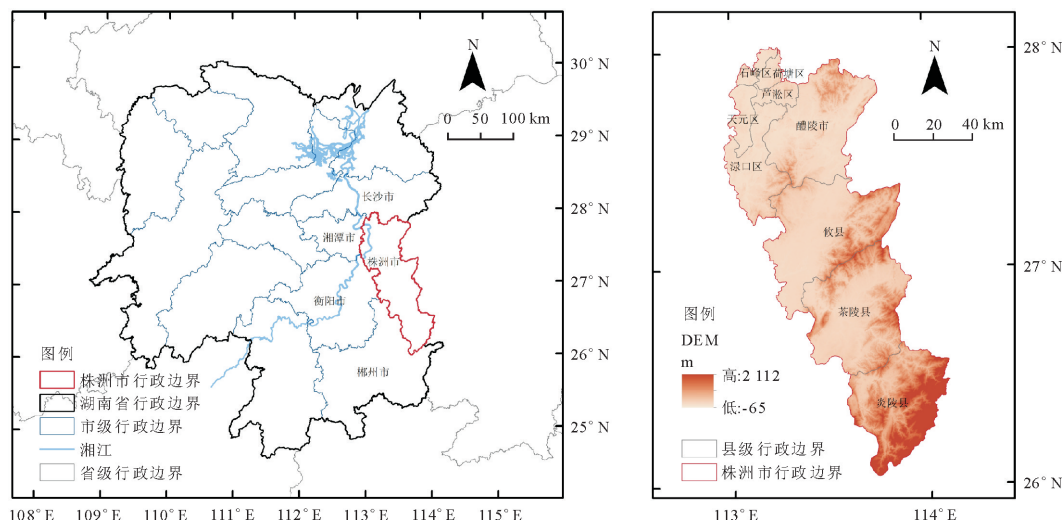


图 1 株洲市区位

Fig. 1 Location of Zhuzhou City

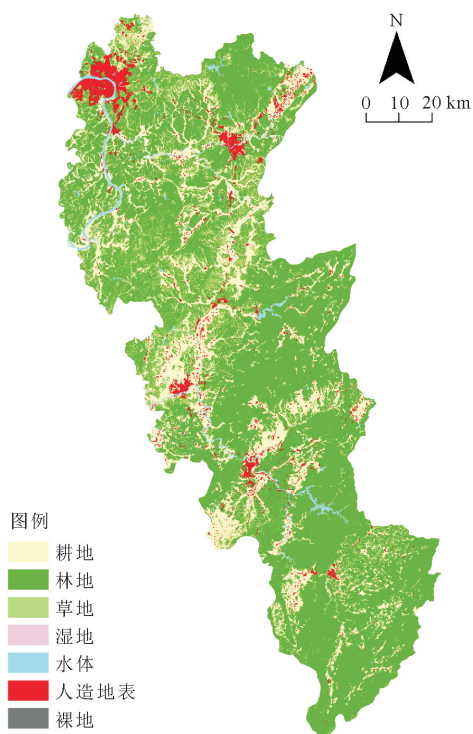


图 2 株洲市土地覆被

Fig. 2 Land cover of Zhuzhou

2 研究方法

2.1 基于 MSPA 模型和景观连接度评价的生态源地提取

2.1.1 基于 MSPA 模型的景观格局分析 MSPA

是通过数学形态学原理对栅格图像进行处理,利用土地覆被数据对原始图形进行重分类描述其形态特征,从而生成像元层面的景观生态斑块。参考前人研究方法^[7],以土地覆被数据为基础,在 ArcGIS 10.6 中提取林地、草地、湿地、水体 4 种景观类型分析前景数据并赋值为 2,其余类型作为背景数据赋值为 1,通过 Guidos Toolbox 软件进行 MSPA 分析,得到 7 类景观要素数据,分别为核心区、岛状斑块、孔隙、边缘区、桥接区、环道区、支线。其中,核心区是前景像元中面积较大的生境斑块,核心区的一些元素对区域内生态系统的稳定性和生物多样性的保护有重要意义,常被作为生态网络中的生态源地^[3]。并根据核心区斑块面积大小筛选提取重要核心区做景观连通性分析。

2.2.2 基于景观连接度评价的生态源地提取 景观连接度指数可定量表征某种景观类型在生态源地之间物质迁移和能量传递的难易程度,维持良好的连通性对生态系统的稳定和生物多样性的保护有重要意义^[3]。参考相关文献与以往研究^[5,20],常用的景观连接度指数包括整体连接度指数(dIIC)、可能连接度指数(PC)、斑块重要性指数(dPC)等,上述指数是能够充分反映景观的连通性。本研究选取可能连接度指数(PC)和斑块重要性指数(dPC)对核心区进行重要生态源地识别。公式如下^[7]

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}}{A_L^2} \quad (1)$$

$$d_{PC} = \frac{P_c - P_{c\text{remove}}}{P_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_c 表示斑块间可能连接度指数 ($0 < P_c < 1$); d_{PC} 表示斑块重要性指数; n 表示斑块总数; a_i 、 a_j 表示斑块 i 、 j 的面积; A_L 表示所含景观的总面积; P_{ij} 表示物种在斑块 i 、 j 间扩散的最大距离; $P_{c\text{remove}}$ 表示剔除某斑块后景观的连接度指数值。

面积大的核心区往往生境质量较高,景观连通性也更强,适宜动植物的生存与扩散。因此本研究依据 MSPA 结果,根据核心区面积大小降序排列,筛选出前 30 个面积较大的斑块作为初步的生态源地数据。考虑到斑块连通性存在不确定性,将生态源地数据导入 Conefor 2.6 软件。参考前人研究^[21-22],选取 2.5 km 作为景观连接度评价的距离阈值,连通概率设置为 0.5,选取核心区 $d_{PC} > 0.1$ 的 25 个斑块作为生态源地,并在 ArcGIS 10.6 中将生态源地转为生态源点。

2.2 基于最小累积阻力模型和重力模型的生态廊道建立

2.2.1 阻力面因子选取

生态物质在区域内流动需克服场地阻力,土地覆被类型和地形是影响阻力的重要因素^[17]。距离道路、建筑越近,人为干扰越强,所以对人造地表、道路景观阻力赋值较大;以及水域距离对生物迁徙的阻隔也考虑在阻力因子内。参考前人研究成果^[19],确定了景观格局、坡度、地形起伏度、距水域距离、土地覆被类型、NDVI、距道路距离共 7 个影响因子,并对其进行分级赋值(表 1、图 3)。

2.2.2 阻力值确定及综合阻力面构建

采用熵权法与层次分析法相结合的方法对各阻力因子赋予权重值。结合前人研究^[5,7],通过 21 位专业领域的专家对 7 种指标因子根据重要程度进行打分,运用层次分析法,依据各个指标集合构建阶梯型的指标层次结构,采用两两比较法并进行一致性检验,确定指标主观权重 w_i ;再对专家打分的元数据进行归一化处理,根据熵值计算公式构建各个指标因子的熵值矩阵,得到各个因子的客观权重 w_j 。熵权法作为一种较为复杂的客观赋权方法,具有避免各个因子之间由于信息交叉与重复带来误差的优势;层次分析法所

需数据信息量少、计算简单,但较为主观,所以本研究通过熵权法对层次分析法的结果进行修正,得到各个因子的综合权重 w_{ij} (表 2),最后利用栅格计算器将 7 个阻力因子按权重叠加得到综合阻力面(图 4)。修正公式如下^[23]

$$w_{ij} = \frac{(\omega_i \omega_j)^{0.5}}{\sum_{ij=1}^m (\omega_i, \omega_j)^{0.5}} (ij=1, 2, 3, \dots, m) \quad (3)$$

表 1 生态阻力因子分类

Table 1 Classification of ecological resistance factors

阻力因子	分级标准	阻力值
土地覆被类型	森林	1
	水体、湿地	2
	草地	3
	耕地、裸地	4
	人造地表	5
坡度/(°)	3	1
	3~8	2
	8~15	3
	15~25	4
	>25	5
NDVI	0~0.15	5
	0.15~0.30	4
	0.30~0.45	3
	0.45~0.60	2
	0.60~1.00	1
景观格局	核心区	1
	桥接区	2
	支线、环道区	3
	边缘区、岛状斑块	4
	孔隙、背景	5
地形起伏度/m	0~9	1
	9~21	2
	21~34	3
	34~50	4
	50~143	5
距道路距离/m	<300	5
	300~600	4
	600~900	3
	900~1 500	2
	>1 500	1
距水域距离/m	<300	5
	300~600	4
	600~900	3
	900~1 500	2
	>1 500	1

表 2 阻力因子权重

Table 2 Weight of resistance factors

阻力因子	景观格局	坡度	地形起伏度	距水域距离	土地覆被类型	NDVI	距道路距离
权重	0.21	0.09	0.11	0.13	0.23	0.11	0.12

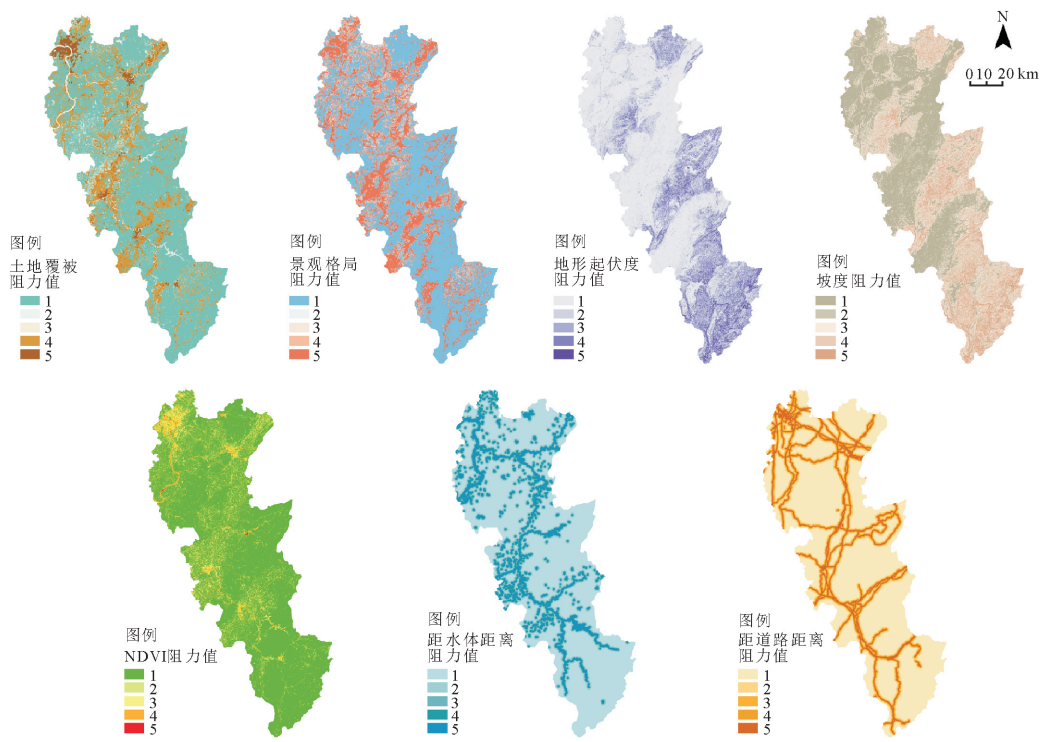


图 3 株洲市生态阻力基面

Fig. 3 Ecological resistance base surface in Zhuzhou

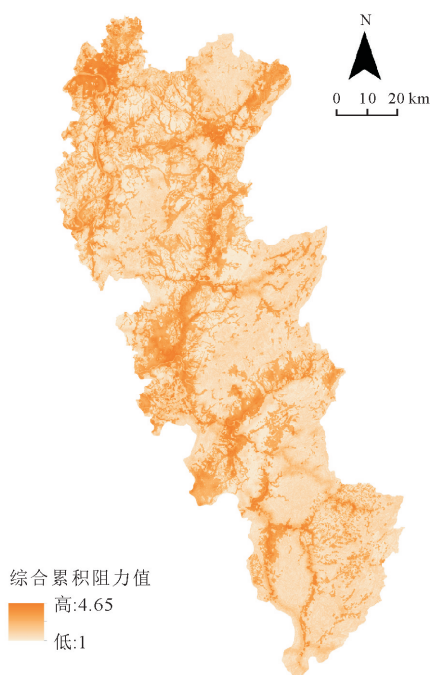


图 4 综合阻力

Fig. 4 Comprehensive resistance base surface

2.2.3 基于 MCR 的生态廊道提取 最小累积阻力模型(MCR,式中记为 M_{CR})是基于生态阻力面计算源地与目标地之间目标阻力值,并连续模拟构建最短路径,即理论最佳路径。公式如下^[24]

$$M_{CR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (4)$$

式中: f 表示 M_{CR} 与变量 D_{ij} 和 R_j 之间正比关系

的函数; D_{ij} 表示能量或物质从 j 至 i 的空间距离; R_j 表示景观表面 i 的阻力值。

基于综合阻力面,计算各生态源地间最小累积阻力值,利用 MCR 模型生成研究区潜在生态廊道,并筛选剔除重复廊道,得到研究区生态网络最优布局。最后利用重力模型定量评价生态源地间的相互作用强度,通过作用力(F)大小判定潜在廊道对区域生态安全的相对重要性(表 3),公式^[21]如下

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

式中: G_{ij} 表示斑块 i, j 间生态引力; N_i, N_j 表示斑块 i, j 的权重值; P_i, P_j 表示斑块 i, j 的阻力值; L_{ij} 表示斑块 i 到 j 之间的累积阻力值; L_{\max} 表示潜在廊道的最大阻力值。综合重力值(F)结果,将源地 $F \geq 300$ 的廊道划分为重要廊道,其余划为一般廊道。本研究将重要廊道宽度设定为 100 m,一般廊道宽度设定为 60 m。

2.2.4 生态廊道网络连接度分析 网络连接度能够计算生态廊道与所有廊道连接点之间连接程度,可以定量反映生态网络的连接程度^[25]。本研究利用网络分析法计算研究区生态网络优化前后的网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)、网络连通率指数(γ 指数),通过生态网络优化前和优化后网络结构指数,对比分析可定量验证生态网络是否得到优化^[26-27],计算公式^[26-27]如下

表 3 基于重力模型的生态源地相互作用矩阵

Table 3 Interaction matrix of ecological sources based on Gravity Model

源地 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	616.96																							
3	331.65	2 947.30																						
4	102.09	182.96	229.14																					
5	24.97	33.78	32.13	57.45																				
6	140.23	669.32	516.96	429.22	41.24																			
7	33.05	50.92	55.20	327.23	112.79	57.92																		
8	71.79	141.90	129.73	601.07	428.21	959.58	36.43																	
9	50.80	95.58	86.30	338.40	252.29	1 729.92	39.94	5 180.95																
10	32.69	78.04	49.91	46.14	137.01	36.43	7.78	61.06	43.60															
11	21.02	34.76	30.31	67.11	67.78	183.94	29.22	227.67	304.40	20.71														
12	22.85	47.97	36.70	38.98	107.36	40.04	7.65	81.18	53.34	168.97	31.51													
13	33.81	68.08	54.65	78.65	157.93	94.33	14.84	212.48	150.55	109.42	94.70	514.77												
14	24.44	47.24	38.64	64.03	106.03	93.12	13.64	215.04	157.76	55.12	124.18	148.80	1 408.83											
15	22.39	36.37	30.98	60.02	71.23	127.57	21.81	187.75	195.42	38.94	410.96	72.19	302.18	724.53										
16	14.08	21.97	18.18	30.63	38.22	56.65	19.34	72.23	73.19	23.55	168.76	34.70	104.11	372.82	160.56									
17	18.28	31.01	25.16	35.10	55.28	59.77	17.49	82.44	76.21	37.83	102.77	64.68	201.37	354.21	301.57	906.42								
18	14.30	24.62	19.04	23.61	41.09	26.25	6.46	42.93	33.09	67.29	24.94	89.67	132.82	49.00	93.89	47.42	105.01							
19	12.46	21.41	16.80	20.82	35.89	24.79	6.47	40.48	31.66	43.84	26.02	78.69	133.55	53.78	98.16	54.97	133.44	1 627.57						
20	9.43	14.62	11.83	14.88	22.75	23.04	8.90	28.87	26.59	19.58	32.48	25.55	51.80	53.37	53.07	100.74	197.17	67.64	87.69					
21	2.61	3.83	3.19	3.82	5.55	5.54	3.39	6.67	6.18	4.74	6.74	5.65	9.47	9.58	9.73	14.35	22.23	11.16	66.28	15.54				
22	1.35	1.88	1.57	1.87	2.56	2.62	1.80	2.96	2.76	2.08	2.87	2.27	3.55	3.37	3.54	4.49	6.18	3.60	8.68	25.56	2.63			
23	1.59	2.13	1.71	1.93	2.73	2.57	1.43	2.94	2.61	2.31	2.38	1.91	3.21	2.78	3.04	3.38	4.58	3.25	4.61	8.60	1.61	7.00		
24	1.33	1.78	1.43	1.62	2.29	2.16	1.20	2.47	2.19	1.94	2.01	1.61	2.71	2.35	2.56	2.85	3.87	2.74	3.91	7.35	1.35	6.06	240.67	
25	0.47	0.62	0.52	0.56	0.78	0.73	0.51	0.83	0.75	0.67	0.69	0.64	0.91	0.81	0.87	0.94	1.24	0.92	1.32	2.14	0.66	1.95	6.30	8.30

$$\alpha = \frac{L - V + 1}{2V - 5} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{L}{V} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)} \quad (8)$$

式中: L 为生态廊道数; V 为生态节点数。

3 结果与分析

3.1 景观格局分析

根据株洲市土地覆被分类并进行 MSPA 分析得到结果见图 5, 7 种景观类型的总面积占研究区总面积的 75.19%, 共 8 467.97 km²。其中核心区面积为 6 851.8 km², 占生态空间面积的 80.91%, 占比最大, 主要分布在株洲东部罗霄山脉中段西侧, 茶陵县、炎陵县和攸县的核心区斑块较大, 稳定性较强; 而北部市辖区、醴陵市部分区域斑块数量较为破碎和稀少, 连通性较差。桥接区面积为 232.07 km², 占生态空间面积的 2.74%, 主要密集地分布在株洲市北部, 这表明北部原始通道较少, 部分源地承担着连通的功能。边缘区占比 8.57%, 在所有景观类型中占比第 2, 证明株洲存在斑块破碎化严重的问题, 需要增加核心区斑块之间的景观连通性, 促进物质交换与流动。岛状斑块占比 0.66%, 零散分布在研究区内部, 未来可作为生态要素流动的临时栖息地。其余景观类型环道区占比 1.89%, 孔隙占比 3.17%, 支线占比 2.05%。

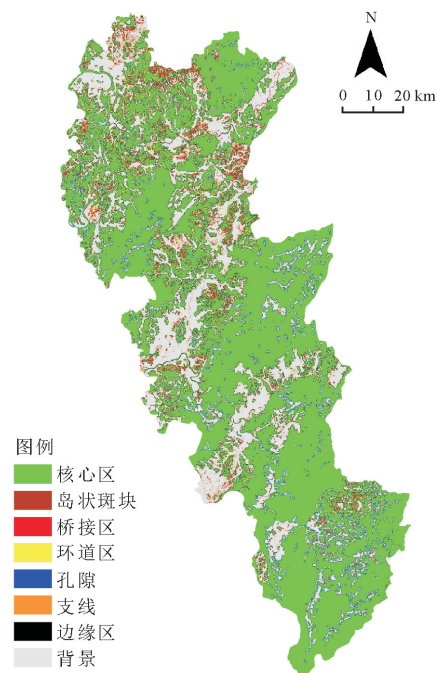


图 5 2020 年株洲市 MSPA 景观格局

Fig. 5 MSPA landscape pattern of Zhuzhou in 2020

3.2 生态网络构建

3.2.1 生态源地 生态源地斑块最终形成 25 个, 总面积 6 057.27 km²。根据斑块重要性指数 (d_{PC}) 将生态源地分为极重要生态源地 ($d_{PC} > 6$)、重要生态源地 ($1 < d_{PC} < 6$)、一般生态源地 ($0.1 < d_{PC} < 1$) (图 6)。由图 6 可知, 极重要生态源地共有 7 个, 主要分布在株洲中部和南部, 此区域生态系统服务功能显著, 受人类干扰程度较弱, 以大面积的林地为

主,分布着自然保护区、森林公园等具有重要生态意义的区域。斑块 22 的 d_{PC} 最大,为 70.85,面积为 1 599.36 km²,位于中部攸县、茶陵县交界处,罗霄山脉中段西侧,包含湖南攸州国家森林公园、云阳山、攸县酒埠江、仙人桥、白龙洞等众多生物适宜栖息地。斑块 25 次之, d_{PC} 为 66.11,面积为 2 469.15 km²,是 25 个生态源地中最大的一个,位于株洲市东南部,罗霄山脉中段、南岭山脉北麓,内有湖南省神农谷国家森林公园、东阳湖国家湿地公园、炎帝陵风景名胜等区等众多国家保护地。斑块 21 的 d_{PC} 为 46.63,主要位于湘江风光带及周围山体。斑块 19 位于株洲市中部攸县,区域内包含金背山、庵头岭等保护地;斑块 12 位于渌口区,内有大王山及其周边山脉保护地;斑块 6 位于醴陵市,内有金鸡山等保护地;斑块 7 位于醴陵市北部,斑块内包括官庄湖国家湿地公园等国家保护地。重要生态源地共有 4 个,主要分布在北部主城区和醴陵市,面积较小。一般生态源地共 14 个, d_{PC} 均小于 1,大多分布在株洲市北部市辖区内,对株洲市整体连通性没有太大贡献。

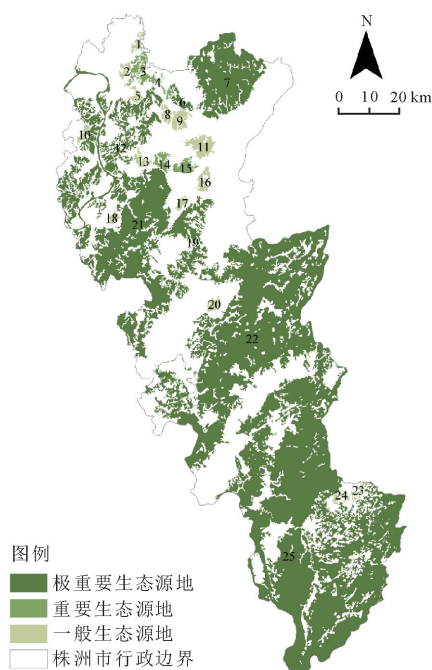


图 6 株洲市生态源地空间分布

Fig. 6 Spatial ecological source area of Zhuzhou

3.2.2 生态廊道 研究区潜在生态廊道共计 300 条,其中重要廊道 21 条,一般廊道 279 条,总长度为 3 106.52 km(图 7)。源地 8 和源地 9 之间的相互作用强度为 5 180.95,相互作用强度最大,表明源地之间的生态引力较大,并且源地之间的距离较近,流通过程阻力较小,在后期建设中应重点保护建设此类距离近且相互作用力强的生态廊道。源地 1 与源地 25 之间的相互作用强度为 0.47,相互作用强

度最小,因为源地 1 与源地 25 位于株洲市的南北两端,源地距离较远、阻力较大,生态廊道之间的物质交换较为困难,在未来规划中,应在景观阻力较大的源地之间,增补生态源地或补充踏脚石,增加斑块的景观连通性。根据廊道分布,廊道较为密集地分布在株洲市的北部,因为株洲北部比南部斑块破碎化程度较大。源地 12、13、14 和源地 15 之间的重要廊道呈线状相连,源地 6、8、9 之间的廊道呈环状分布,并于源地 7、10 之间构成一个线状穿越株洲市北部的重要生态屏障,以此来减弱株洲市北部生态栖息地破碎化程度较大对动植物栖息迁徙产生的影响,在未来的城市发展中应重视株洲北部的生态保护,提高区域的景观连通性。由图 7 可以看出,在株洲市北部市区、攸县东部和西北部醴陵市部分区域缺少生态源地,导致不存在生态廊道,进而导致研究区内生态网络不完整,不能够实现研究区内部生态循环和流动。所以在北部和东部需要增补生态踏脚石来完善整体网络,如构建生态缓冲带,或拆除建筑设施改建绿地、增设公园等,加强研究区内部生态联系,促进生态循环,缓解城市发展与环境保护之间的矛盾。

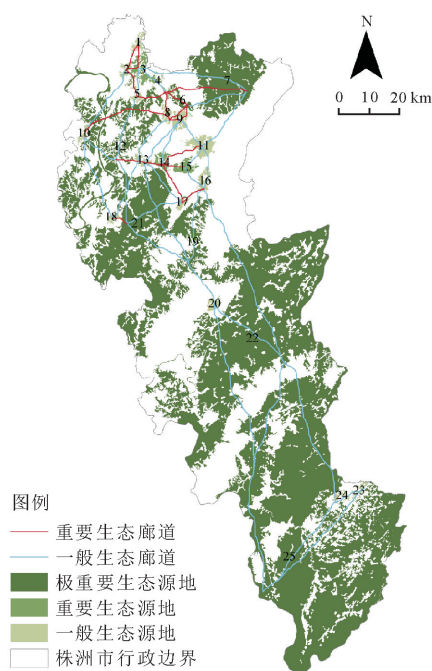


图 7 株洲市生态廊道空间分布

Fig. 7 Spatial corridor distribution of Zhuzhou

3.2.3 生态节点 生态网络中的生态节点作为生物的跳板和转折点,能够给迁移距离较远的物种提供良好的歇息地^[28]。根据初步构建的区域生态网络,并结合研究区实际状况,将重要生态廊道的重要转折点和重要生态廊道与重要、一般生态廊道的交点划分为重要生态节点,将一般生态廊道的重要转折点和一般生态廊道的交汇处划分为一般生态节点,

共判别出研究区生态节点 97 个(图 8),其中重要生态节点 42 个,一般生态节点 55 个。重要生态节点大部分分布在株洲市北部,未来应重点关注株洲北部生态安全,提升区域生态系统多样性、稳定性。

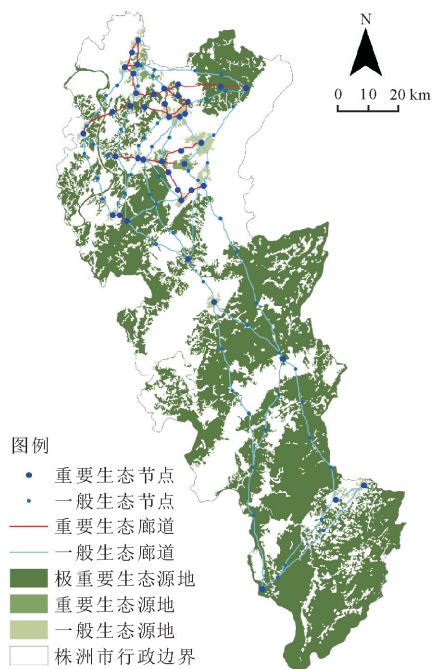


图 8 株洲市生态节点空间分布

Fig. 8 Spatial ecological nodes of Zhuzhou

在区域生态网络建设中,在铁路、公路等人类活动较为频繁的区域应提供生物迁徙的路径,如建设高架天桥、地下通道等立体绿道为物种扩散创建通道。本研究结合株洲铁路、高速公路、重要道路和建设用地分布图,识别研究区生态网络中存在的障碍点(图 9),共识别了区域 92 个生态障碍点。障碍点主要分布在株洲北部市辖区及醴陵市,其中位于铁路的 24 个,高速公路的 21 个,其余分布在其他重要道路上。

3.3 生态网络优化

在株洲市生态网络初步构建分析中,通过斑块重要性指数和 MCR 模型共提取出 25 个重要生态源地和 300 条生态廊道,根据文化遗迹调查结果(图 10),研究区共提取株洲市历史遗迹及遗址、乡村聚落和建筑等具有特殊历史文化的景观资源共 113 处,将资源点与 MSPA 分析后的核心区进行叠加,根据一般生态源地重要性程度和位置分布情况^[12],选取 12 处核心区斑块作为踏脚石斑块,其中 4 块为补充生态源地,结合生态廊道布局等建立分支廊道的方式进行连接,新增 106 条生态廊道,经过筛选剔除重复廊道,构建完善研究区生态网络体系(图 11)。优化后株洲共存在 29 个重要生态源地和 406 条生态廊道,代入公式计算得到株洲市生态网络优

化后 α 、 β 、 γ 指数分别为 7.09、14、5.01,较优化前生态网络连通性有较大提升,实现了株洲生态网络体系的优化。

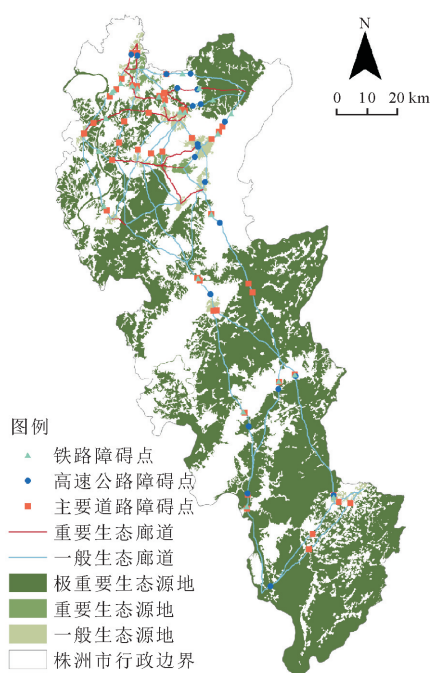


图 9 株洲市生态障碍点空间分布

Fig. 9 Spatial ecological barrier points of Zhuzhou

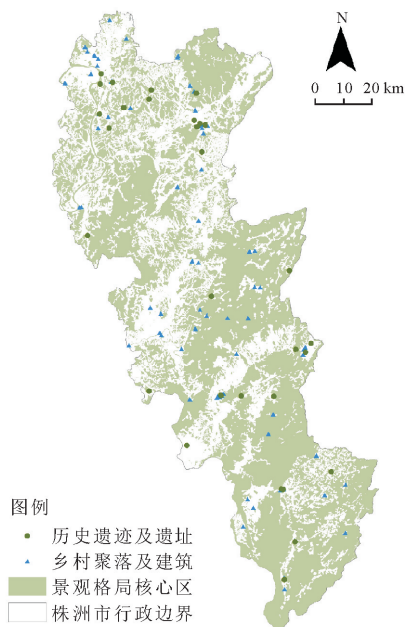


图 10 文化遗址景观调查分布

Fig. 10 Cultural relics and landscape survey distribution

4 讨论

研究结果为株洲生态网络体系构建、国土空间规划与生态修复等研究提供参考和理论依据,也为未来构建具有多元价值的株洲生态风景道提供一定的科学依据。本研究对生态踏脚石的提取,通过文

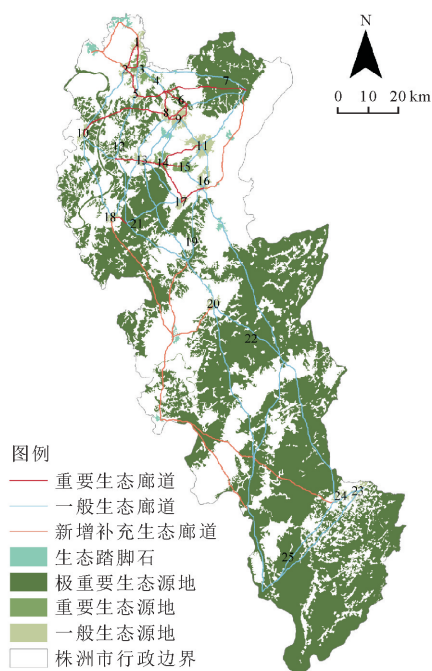


图 11 优化后株洲市生态网络体系

Fig. 11 Optimization of ecological network construction

化资源点叠加景观格局核心区进行筛选提取踏脚石,目的是为更好地将人文景观资源与生态廊道串联起来,建设生态文旅体系,在未来可使用水文分析原理形成“集水盆地”确定生态节点,二者相结合,更加科学合理;目前研究对生态廊道宽度阈值指标的选取方法和选择标准并无定论^[30],多数学者将生态廊道宽度设置为 60~100 m^[5,26],本研究基于株洲市域范围,研究区域较小,动物类型多以小型动物为主,为满足生物迁徙需要,选择 100 m 作为重要廊道宽度,60 m 为一般廊道宽度,后续研究中应考虑对廊道功能性识别从而进行更细致的分类研究。

生态网络的构建是恢复和维护生态连通性的重要策略,也是维护生态安全和生物多样性的方法。本研究基于对株洲市国土空间生态安全格局提出保护建议。

初步构建了株洲市的生态网络体系并对生态网络提供了优化措施,依据源地的生态要素及廊道走向,在未来可基于株洲市域空间分布情况和生态状况,从生态保护视角出发,加强区域生态系统、生物多样性、生态环境质量的管控和治理,构建生态重要屏障、生态廊道,协调区域内各生态组团共同发展。

构建绿水青山修复环、长株潭绿心体验环与“三横三纵”的 6 条重要生态屏障。其中,绿水青山修复带以斑块破碎化程度较大的株洲市辖区和醴陵市为中心,是生态系统修复与生物多样性保护重点区域。长株潭绿心体验环将云峰湖、秋瑾故居等文旅景点和株洲北部的生态源地联系,以文旅景点为重要节

点,以生态廊道和道路绿廊为导线,构建长株潭生态文旅体系。

保育修复湘江生态带,提高株洲市内各河流廊道生态流量;打造主次生态廊道有机连接起生态源地斑块,全面构建株洲市生态安全网络;推进水体、农田、林地多片区保护和修复,确定流域综合治理、土地综合整治、森林质量提升重点区域,改善生态质量功能;加强湖南攸州国家森林公园、神农谷国家森林公园等自然保护区生态保护,筑牢林地保护修复屏障,提升生态源地功能。

5 结论

市域生态空间网络的建设是提高城市生态环境可持续发展与城市化进程协同发展的基本途径,是城市生态安全的基础^[29]。生态网络的建设能够实现城市发展与环境保护同时进行。依据 2020 年株洲市土地覆被类型,综合考虑高程、坡度、NDVI 等多因素建立评价指标体系构建阻力面,通过 MCR 模型识别株洲市潜在生态廊道,并基于重力模型定量分析廊道重要性程度,提取历史景观资源增设踏脚石对生态网络进行优化。研究结论如下。

基于 MSPA 分析得到株洲市景观类型总面积 8 467.97 km²,其中核心区面积为 6 851.8 km²,占株洲总面积的 60.79%。在东部和南部呈聚集状态,稳定性较强。通过景观格局指数提取 25 块重要生态源地,以林地、湿地为主,主要分布在研究区东部和南部。市辖区及醴陵市西部、攸县北部的生态源地分布零散,破碎化程度高,缺少重要生态源地,致使研究区生态网络体系不完整,生态廊道分布不均衡。

基于 MCR 模型共构建 300 条潜在生态廊道,并根据重力模型提取重要生态廊道 21 条。株洲市北部及东部区域大多是阻力值较大的建成区,西部及南部阻力较小。株洲市生态廊道重要生态廊道呈线状、环状相连,潜在生态廊道呈网状分布全域。北部的重要生态廊道由西向东将生态源地联系起来,构成多层次线状的重要生态屏障。重要生态廊道主要分布在北部,北部生态源地破碎化程度大,迫切需要建设重要生态廊道,提供动物迁徙的路径,维系区域生态安全。

共判别重要生态节点 42 个,一般生态节点 55 个。重要生态节点在空间上分布相对均匀,在东北、西北和中部较为密集,与生态源地分布较一致,为株洲生态保护和修复提供了方向。这也表明在生态源地较为密集的区域,为疏通生态网络需要增强生态节点的规划建设,提高景观连通性,促进区域之间物

质流动。研究识别生态障碍点 92 个,总体上北多南少,在主城区和醴陵市应积极考虑生物迁徙通道,强化生态建设。

通过构建踏脚石实现研究区生态网络的优化,共增加 12 个踏脚石斑块,其中 4 个为补充生态源地,共生成 106 条生态廊道。优化后生态网络连通性提高, α 、 β 、 γ 指数分别增加了 0.96、2、0.66,数值越大网络结构越流畅。通过生态网络结构优化增强了株洲生态网络体系的完整性,提升了研究区的生物多样性和生态系统服务价值。

参考文献:

- [1] MIAO Z H, PAN L, WANG Q Z, *et al.* Research on urban ecological network under the threat of road networks—A case study of Wuhan[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(8): 342-358.
- [2] DAVID P, LISETTE P, PETER L, *et al.* Variation in genetic diversity across the range of North American brown bears[J]. Conservation Biology, 1998, 12(2): 418-429.
- [3] 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(9): 6425-6434. (in Chinese)
- [4] CHIARA F, VINCENZO A, GEORGIOS F, *et al.* The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption[J]. Transportation Research Part D, 2019, 67: 275-290.
- [5] 徐伟振,黄思颖,耿建伟,等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
XU W Z, HUANG S Y, GENG J W, *et al.* Construction of ecological space network in Xiamen City based on MCR and gravity model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 264-272. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] JONGMAN ROB H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks[J]. Landscape and Urban Planning, 1995, 32(3): 169-183.
- [9] JONGMAN ROB H G, MART K. European ecological networks and greenways[J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2): 305-319.
- [10] CAO Y, YANG R, CARVER S. Linking wilderness mapping and connectivity modelling: a methodological framework for wildland network planning[J]. Biological Conservation, 2020, 251: 108679.
- [11] 宋利利,秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
SONG L L, QIN M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3344-3352. (in Chinese)
- [12] 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.
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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3367-3376. (in Chinese)
- [13] 贾振毅,陈春娣,童笑笑,等. 三峡沿库城镇生态网络构建与优化——以重庆开州新城为例[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 782-791.
JIA Z Y, CHEN C D, TONG X X, *et al.* Developing and optimizing ecological networks for the towns along the Three Gorges Reservoir: a case of Kaizhou new town, Chongqing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 782-791. (in Chinese)
- [14] 傅强,宋军,毛锋,等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3670-3680.
FU Q, SONG J, MAO F, *et al.* Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3670-3680. (in Chinese)
- [15] 徐嘉,许大为,曲琛. 基于生态系统服务重要性的国土空间生态安全格局研究——以哈尔滨市域为例[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 304-312.
XU J, XU D W, QU C. Spatial ecological security pattern construction based on ecosystem service function evaluation—take Harbin city as an example[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(4): 304-312. (in Chinese)
- [16] 姚朋,孙一豪,奚秋蕙,等. 耦合多元价值的生态风景道规划研究——以乌兰察布四横交通带风景道为例[J]. 中国园林, 2019, 35(4): 101-106.
YAO P, SUN Y H, XI Q H, *et al.* Research on ecological scenic byways planning coupled with multiple values—taking ulanqab four horizontal traffic belt as an example[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(4): 101-106. (in Chinese)
- [17] 姜虹,张子墨,徐子涵,等. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1981-1992.
JIANG H, ZHANG Z M, XU Z H, *et al.* Construction of eco-

- logical security pattern integrating multiple ecological protection objectives in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1981-1992. (in Chinese)
- [18] 张玥, 许端阳, 李霞, 等. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别[J]. *生态学报*, 2020, 40(6):1933-1943.
ZHANG Y, XU D Y, LI X, *et al.* Construction of ecological corridors and identification of key nodes in the core area of China-Laos transportation corridors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6):1933-1943. (in Chinese)
- [19] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于"HY-LM"的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(7):2995-3009.
WEI B J, SU J, HU X J, *et al.* Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and linkage mapper[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7):2995-3009. (in Chinese)
- [20] 陈瑾, 赵超超, 赵青, 等. 基于 MSPA 分析的福建省生态网络构建[J]. *生态学报*, 2023, 43(2):1-12.
CHEN J, ZHAO C C, ZHAO Q, *et al.* Construction of ecological network in Fujian Province based on morphological spatial pattern analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2):1-12. (in Chinese)
- [21] 郑群明, 扈嘉辉, 申明智. 基于 MSPA 和 MCR 模型的湖南省生态网络构建[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(5):1-10.
ZHENG Q M, HU J H, SHEN M Z. Construction of ecological network in Hunan Province based on MSPA and MCR models[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2021, 44(5):1-10. (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] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9):2700-2708.
LI S, WEI H, NI X L, *et al.* Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9):2700-2708. (in Chinese)
- [24] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型[J]. *生态学报*, 2022, 42(5):1968-1980.
WANG X R, WAN R R, PAN P P. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR model in Taihu Lake basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1968-1980. (in Chinese)
- [25] 黄雪飞, 吴次芳, 游和远, 等. 基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10):243-251.
HUANG X F, WU C F, YOU H Y, *et al.* Construction of rural landscape ecological corridor in water network plain area based on MCR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10):243-251. (in Chinese)
- [26] 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.
KONG Y, WANG S Y. Construction of urban and rural ecological network in Yanqing District of Beijing based on MSPA model[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(7):113-121. (in Chinese)
- [27] 秦子博, 玄锦, 黄柳菁, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的海岛型城市生态网络构建——以福建省平潭岛为例[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2):303-311.
QIN Z B, XUAN J, HUANG L J, *et al.* Ecological network construction of sea-island city based on MSPA and MCR model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):303-311. (in Chinese)
- [28] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5):1611-1618.
CHEN X P, CHEN W B. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake eco-economic zone, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5):1611-1618. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. *生态学报*, 2005, 25(9):2406-2412.
ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9):2406-2412. (in Chinese)