

基于 Linkage Mapper 与复杂网络的成都市生态网络构建与优化

田硕娟^{1,2,3}, 张文君^{1,2,3*}, 何 灵^{1,2,3}, 缪骏懿^{1,2,3}, 訾应昆^{1,2,3}

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 国家遥感中心 绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科大四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299)

摘 要:城市化速度加快,城镇内部生态斑块破碎,生态廊道隔断,区域可持续发展受到阻碍。构建生态网络可以连接破碎斑块,保护生物多样性与地域特色。以成都市为例,基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)方法并结合景观连通度指数确定生态源地,从地形、景观结构、人类活动三方面确定阻力因子来构建综合阻力面,基于 ArcGIS 水文分析原理和 linkageMapper 识别生态廊道和生态节点,利用复杂网络增边优化理论,对研究区处于高阻力值且介中心性低的点进行模拟增边,最后对比增边前后的稳定性,验证增边效果。结果表明:1)成都市生态源地主要分布在西部林区,东部和中部较为稀疏。2)成都市阻力值呈现由中部向外部降低趋势,中心都市圈阻力值最高。3)基于 GIS 共提取 111 条生态廊道、209 条辐射道、101 个生态节点。4)识别出增边优化节点 8 个,成功模拟增加 11 条生态廊道,模拟增边优化后网络稳定性明显提升,网络连通性增强,网络结构整体更为稳定。

关键词:生态廊道;生态节点;生态网络;linkage Mapper(LM);复杂网络;稳定性

中图分类号:S731.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0176-09

Construction and Optimization of Chengdu Ecological Network Based on Linkage Mapper and Complex Network

TIAN Shuo-juan^{1,2,3}, ZHANG Wen-jun^{1,2,3*}, HE Ling^{1,2,3}, MIAO Jun-yi^{1,2,3}, ZI Ying-kun^{1,2,3}

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;
2. Mianyang Science and Technology City Branch of National Remote Sensing Center, Mianyang 621010, Sichuan, China;
3. Tianfu Institute of Research and Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, Sichuan, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the ecological plaques inside cities and towns are fragmented, the ecological corridors are cut off, and the sustainable development of the region is hindered. Building an ecological network can connect broken patches and protect biodiversity and regional characteristics. Taking Chengdu as an example, this study used the morphological spatial pattern analysis (MSPA) method to determine the ecological source area combined with the landscape connectivity index. Resistance factors that were determined from morphology, landscape structure and human activities were used to construct resistance surface. Ecological corridors and nodes were identified based on the hydrological analysis principle of ArcGIS and linkage Mapper. The edge-adding of the points with high resistance value and low betweenness in the study area was simulated by using the complex network edge-adding optimization theory. The stabilities before and after the edge were compared to verify the effect of increasing the edge. The research results were as follows. 1) The ecological sources of Chengdu were mainly distributed in the western

收稿日期:2022-09-09 修回日期:2022-11-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC150540202);国家自然科学基金(41871174);四川省测绘地理信息学会科技开放基金(CCX202205)。

第一作者:田硕娟。研究方向:地理信息系统应用。E-mail:973907228@qq.com

* 通信作者:张文君,教授,研究生导师。研究方向:遥感信息技术。E-mail:113999066@qq.com

forest area, and the eastern and central areas were relatively sparse. 2) The resistance value of Chengdu showed a downward trend from the middle to the outside, and the resistance value of the central metropolitan area was the highest. 3) Based on GIS, a total of 111 ecological corridors, 209 radial corridors and 101 ecological nodes were extracted. 4) Eight edge-added optimization nodes were identified, and 11 ecological corridors were successfully simulated. After the simulated edge-added optimization, the network stability was significantly improved, the network connectivity was enhanced, and the overall network structure was more stable.

Key words: ecological corridor; ecological node; ecological network; linkage Mapper (LM); complex network; robustness

生态安全是 21 世纪人类面临的新挑战,随着经济快速发展,建设用地不断扩张,区域景观生态空间分布格局变化剧烈^[1]。大型生境斑块被侵占和蚕食,生物交流的廊道被隔断,景观破碎化严重,城市发展与生态保护矛盾愈加激烈^[2-4]。生态网络能够从景观格局、生态价值、生态安全等方面提升城市生境质量,其以生态廊道为基质,连接破碎斑块,传递物质能量,整合生态资源,提高景观连接度,实现生态空间网络从结构连通到功能连通^[5]。

20 世纪 90 年代开始,国内外学者开始研究生态网络构建方法,着重于生态源地选取与生态廊道模拟^[6-7]。形态学空间格局分析(MSPA)^[8]从景观格局出发,能够客观识别生态栖息斑块。生态廊道是物质交流的重要通道,目前学者们多运用最小累积阻力模型提取最小耗费路径^[9-10];少量学者利用 linkagemapper(LM)工具提取最小成本加权距离,即生态廊道^[11]。生态节点是生态廊道内的关键地段,具有战略节点价值^[12]。目前生态节点研究主要集中在生态源地与最小耗费距离的交点或水文分析下等阻力线的切点,随着 LM 工具箱的使用,电路理论也逐渐运用于生态节点识别中^[13]。生态网络本身属于复杂系统的一部分,基于复杂系统理论分析生态网络是该领域前沿方向之一,大部分学者集中于网络评价结构指标优化,极少涉及复杂网络^[14]。

成都是“一带一路”和长江经济带战略的重要节点城市,也是我国主要的水源涵养区和生物多样性富集区。为了响应成都市“五绿润城”行动,更好地推动成都市生态文明建设,本研究通过 MSPA 选择生态源地,构建生态阻力面,利用 LM 工具和水文分析原理模拟生态廊道,提取生态节点,基于复杂理论对网络进行增边优化,最终形成完整的生态网络。研究结果有利于重建成都市景观生态网络格局,为城市生态可持续发展提供可行性依据。

1 研究区概况

成都市(102°54′—104°53′E, 30°05′—31°26′N)位于四川盆地西部、青藏高原东部,全市面积为

14 335 km²,地处亚热带季风气候区,热量充足,雨量丰富,四季分明,森林物种丰富,植被良好,覆盖率达 40.2%。同时拥有十分丰富的生物资源,包括 6 种国家Ⅰ级保护野生植物、15 种国家Ⅰ级保护动物以及 100 余种国家Ⅱ级保护动植物。近年来随着成都城市化进程加快、土地利用强度逐年扩大,生态系统服务功能遭受损害,景观破碎化严重,生态系统受到威胁。因此,构建成都市生态网络体系尤为关键。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

使用数据见表 1。将源数据经过 ArcGIS 等软件处理,得到对应的栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 生态网络识别 形态学空间格局分析(MSPA)是基于腐蚀、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^[15-16]。它根据土地利用数据,将林地、水域、湿地等生态服务价值高的地方划为前景数据,其余为背景数据。基于 Guidos 2.6 软件,采用八邻域分析方法,获得核心区、孤岛、边缘、孔隙、桥接区、环道区和支线 7 种景观^[17]。

景观连接度能够有效衡量区域中的景观类型是否有利于生态源地内物种迁移和能量转化,可以反映斑块对促进景观连通的重要性,通常包括整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC)、可能连通性指数(probability of connectivity, PC)^[18],计算公式及参数意义见表 2。

结合前人经验,综合考虑研究区斑块面积以及景观连通度,利用 Confer 软件,对成都市核心区斑块进行连通性评价,筛选连通性指数较高的生态斑块作为生态源地。

2.2.2 阻力面构建 生态区物种移动和能量传递都需要克服相关阻碍才能促进交流。本研究结合相关数据以及成都市生态现状,从地形、景观结构、人类活动 3 个方面选取 DEM、坡度、NDVI、土地利用类型、路网密度、河网密度、居民点密度作为阻力因子。结

合研究区范围,并参考相关学者研究^[19-20],将地表覆盖类型依据文献^[21]进行分类,其余阻力因子利用自然断点法进行分级。然后咨询专家意见,采用层次分析法确定权重^[22],构建综合阻力面(表 3)。

表 1 数据来源与处理

Table 1 Data sources and processing

数据类型	数据来源	数据处理
土地利用数据	GlobeLand30 全球地表覆盖数据: http://www.global-landcover.com/	通过 ArcGIS 裁减、拼接等提取研究区耕地、草地等 8 类数据
高程数据	地理空间数据云: https://www.gscloud.cn/	2020 年 DEM 数据
归一化植被指数	地理空间数据云: https://www.gscloud.cn/	利用 ENVI 遥感影像波段计算进行 NDVI 提取
路网数据	OpenStreetMap: https://www.openhistoricalmap.org/	提取道路矢量要素

表 2 景观连接度指数计算公式及意义

Table 2 Landscape connectivity index calculation formula and relative significance

景观连接度指数	计算公式	参数意义
整体连通性指数(IIC)	$I_{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_i^2} \quad (1)$	式中: a_i, a_j 分别为斑块 i, j 的面积; nl_{ij} 表示斑块 i 到 j 的连接数。 $0 \leq I_{IC} \leq 1$ 时,斑块之间没有连接, $I_{IC} = 1$ 时,整体为生境斑块。
可能连通性指数(PC)	$P_C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_i^2} \quad (2)$	式中: p_{ij}^* 表示斑块 ij 之间的最大可能连通率。 $0 < P_C < 1$, P_C 值越大,景观连接可能性越高。
斑块重要性(dPC)	$d_{PC} = \frac{P_C - P_{C_{remove}}}{P_C} \times 100\% \quad (3)$	式中: d_{PC} 通过 P_C 的变化衡量各个斑块对维持景观连通性的重要程度。

表 3 生态阻力因子分类及阻力值

Table 3 Ecological resistance factor classification and resistance value

阻力指标	阻力因子	权重	阻力值				
			1	2	3	4	5
地形	高程	0.089	<700	700~1 200	1 200~2 000	2 000~2 916	>2 916
	NDVI	0.113	>0.5	0.3~0.5	0.1~0.3	-0.2~0.1	<-0.1
	坡度	0.076	<7	7~15	15~25	25~38	>38
景观结构	土地利用类型	0.194	林地	水体、湿地	草地	硬化地表	建设用地
人类活动	水网密度	0.153	>5	2.5~5	1~2.5	0.3~1	<0.3
	路网密度	0.201	<1	1~2.8	2.8~5.5	5.5~10	>10
	居民点密度	0.054	<0.6	0.6~2.5	2.5~5.5	5.5~10	>10
	河道密度	0.113	>0.8	0.5~0.8	0.3~0.5	0.1~0.3	<0.1

2.2.3 构建生态网络

2.2.3.1 提取生态廊道 利用 LM 工具将生态源地和综合阻力面导入 ArcGIS 中,识别最小成本路径(Least-cost path method, LCP),获得最小成本距离通道。借助水文分析原理,利用 Hydrology 工具进行洼地填充,计算水流方向,之后进行汇流累积量计算,反复设置阈值最终提取以廊道和源地为中心向四周发散的最小通道即辐射道。

2.2.3.2 识别生态节点 利用 Pinchpoint Mapper 模块调用 Circuitscape(电路理论)将电流限制到最佳走廊,混合了最小耗费距离和电路理论方法,显示生态节点,同时用“夹点”电流值来衡量生态廊道和节点对于维持整个网络连接的重要性。

2.2.4 生态网络优化

2.2.4.1 节点介数中心性计算 节点介数为复杂网络中所有通过该节点的最短路径占网络中所有最

短路径的比例,能显示该节点的重要性,这些重要节点有助于整个生态网络结构的稳定性^[21],节点介数(A_i)计算公式为:

$$A_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (4)$$

式中: n_{st}^i 表示经过节点 i 且最短路径的路径数量; g_{st} 表示连接 s 和 t 的最短路径的数量。

2.2.4.2 复杂网络稳定性计算 稳定性是指系统在不确定性的扰动下,具有保持某种性能不变的能力,通过分析鲁棒性来验证网络增边前后的稳定性。复杂网络稳定性的计算公式为

$$R = \frac{c}{N - N_r} \quad (5)$$

式中: R 为网络稳定性; c 为去除部分节点后网络最大连通子图节点个数; N_r 为被移除节点个数。

3 结果与分析

3.1 基于 MSPA 与景观连通性的生态源地分析

3.1.1 基于 MSPA 的景观格局分析 由图 1 可知,整个研究区除背景之外,以核心区为主,核心区面积占 7 类景观的 80.3%,集中分布在西部林地和东部水域,中部地区较为分散,景观连通性整体较

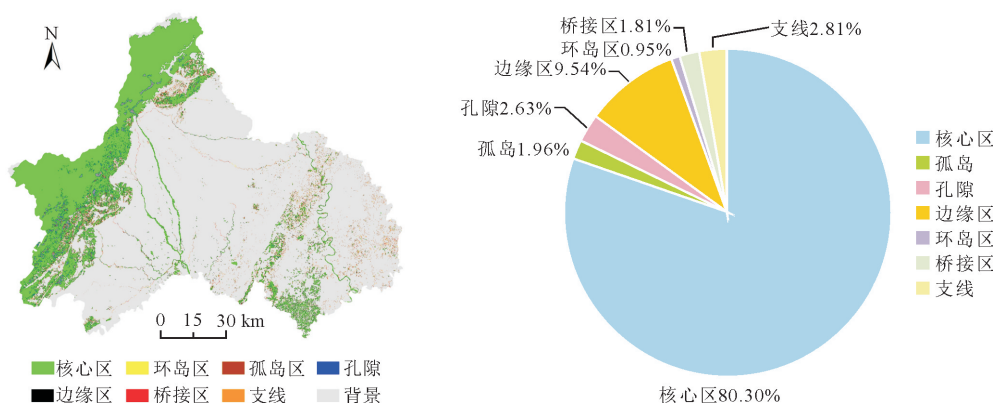


图 1 基于 MSPA 的景观类型分布

Fig. 1 MSPA-based landscape type distribution map

由图 2 可以看出,生态源地主要分布在西部都江堰、大邑县的林地聚集区以及岷江、东部三叉水库和沱江周边,中部分布较为稀疏。由表 4 可知 43 号生态源地景观连通度最好、面积最大,是整个成都市生态流通的核心。西部大块生态源地连通性强,有利于物种迁移和流通。中部和东部生态源地面积较小,空间上较为分散,景观连通性较差。为促进研究区整体生态协调,应在中部、东部适当建立中小型生态节点,推动区域生态系统的平衡。

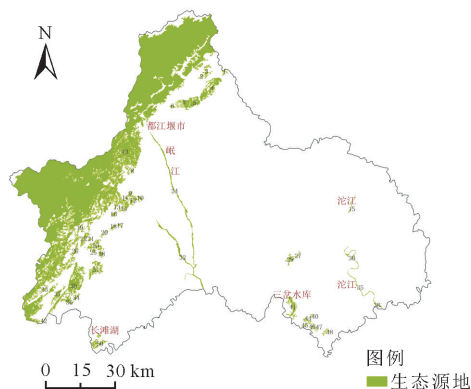


图 2 生态源地空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological sources

3.2 生态阻力面构建

利用 ArcGIS 重分类工具将 8 个阻力因子进行分类(图 3),采用层次分析法确定各阻力权重,构建综合阻力面。成都市阻力值呈现由中部向外降低趋势,中部武侯区、成华区和金牛区等位于成都市区三环以

差,阻碍了东西部生态核心区物种交流与迁移。其他 6 类景观均零星分布,景观破碎化较为严重。

3.1.2 生态源地选择 根据 MSPA 的计算结果,选取面积大于 100 hm² 的核心区作为备选生态源地,利用 Confer 软件,计算研究区景观连通性指数,将 IIC、PC、DPC 指数排在前 50 名,即景观连通性较强的核心区斑块作为生态源地。

内,受到人口、道路、交通的干扰,生态遭到极大程度的破坏,导致局部区域阻力高;西部大邑县、邛崃市、都江堰市等位于成都平原向川西北高原过渡地带,林地密集,人类活动较少,生态阻力值低(图 4)。

3.3 生态网络构建

3.3.1 生态廊道提取

3.3.1.1 基于 Linkage Mapper 提取生态廊道 利用 LM 的 Linkage Pathways 工具来识别和绘制核心区之间的最低成本路线(图 5),生态流通道映射出 111 条生态廊道,连接了整个研究区域。区域内生态廊道总长度为 1 077.329 km,最大欧式距离为 77.05 km,平均欧式距离为 8.91 km,研究区生态流通道整体不和谐,极值现象明显。

3.3.1.2 综合生态廊道 将基于 LM 提取的生态廊道与水文分析的辐射道结合,共提取出 310 条生态廊道(图 6)。

3.3.1.3 基于水文分析原理识别潜在生态廊道 基于水文分析原理提取最大累积阻力面,经过反复设置阈值,将汇流累积量阈值设为 1 500,提取出研究区连接性较强且具有整体性的“山谷线”,共识别出 209 条辐射道(图 7),生态廊道从生态源地向四周发射形成“支流”,促进生态源地与周边的信息物质交流,有利于推动生态网络的建设。

3.3.2 生态节点提取

3.3.2.1 基于电路理论提取生态节点 利用 Circuitscape 理论识别最小成本路线中的夹点,分为

all-to-one(多对一)模式和 Pairwise(成对)模式。Pairwise 即成对模式,计算每 2 个生态源地之间的电流密度;all-to-one 即多对一模式,计算其他源地到另一个源地之间的电流密度。电流密度高的则代

表该区域是生物流运动的关键位置,鉴于廊道宽度对于夹点的影响并不大,结合研究区实际情况,将 6 000 m 加权成本距离设置为廊道宽度(图 8),提取电流最高值作为生态夹点。

表 4 景观连通度指数及面积统计

Table 4 Landscape connectivity index and area statistics

生态源地	整体连通性(IIC)	斑块重要性(DPC)	面积/hm ²	生态源地	整体连通性(IIC)	斑块重要性(DPC)	面积/hm ²	生态源地	整体连通性(IIC)	斑块重要性(DPC)	面积/hm ²
1	0.054	0.049	238.68	18	0.062	0.096	218.7	35	0.017	0.016	465.66
2	0.047	0.108	158.04	19	0.170	0.308	388.89	36	0.043	0.102	143.37
3	1.840	1.105	675.9	20	0.105	0.176	192.87	37	0.364	0.595	827.46
4	1.537	1.344	3 094.8	21	0.031	0.071	106.65	38	0.009	0.008	177.21
5	0.578	0.514	1 322.6	22	0.900	1.122	748.71	39	3.424	5.406	6 408.63
6	0.025	0.049	164.43	23	0.549	0.941	1 155.8	40	0.003	0.003	103.23
7	0.283	0.450	1 406.7	24	0.017	0.023	2 199.2	41	0.016	0.018	1 383.12
8	0.137	0.262	314.64	25	0.038	0.084	168.3	42	0.054	0.078	121.86
9	0.099	0.160	227.88	26	0.215	0.411	493.74	43	99.777	99.705	223 963
10	0.063	0.141	215.91	27	0.004	0.003	113.4	44	0.008	0.009	206.28
11	0.061	0.108	140.04	28	0.067	0.150	301.05	45	0.006	0.007	221.04
12	0.359	0.568	678.15	29	0.007	0.008	473.22	46	0.013	0.011	209.34
13	0.048	0.081	111.33	30	0.016	0.013	495.09	47	0.006	0.007	112.59
14	0.073	0.145	167.4	31	0.505	0.734	1 678.4	48	0.004	0.005	260.55
15	0.003	0.002	199.08	32	0.016	0.022	2 014.3	49	0.005	0.005	164.34
16	0.096	0.140	219.69	33	0.081	0.144	185.49	50	0.018	0.016	964.8
17	0.023	0.034	151.74	34	0.079	0.182	262.53				

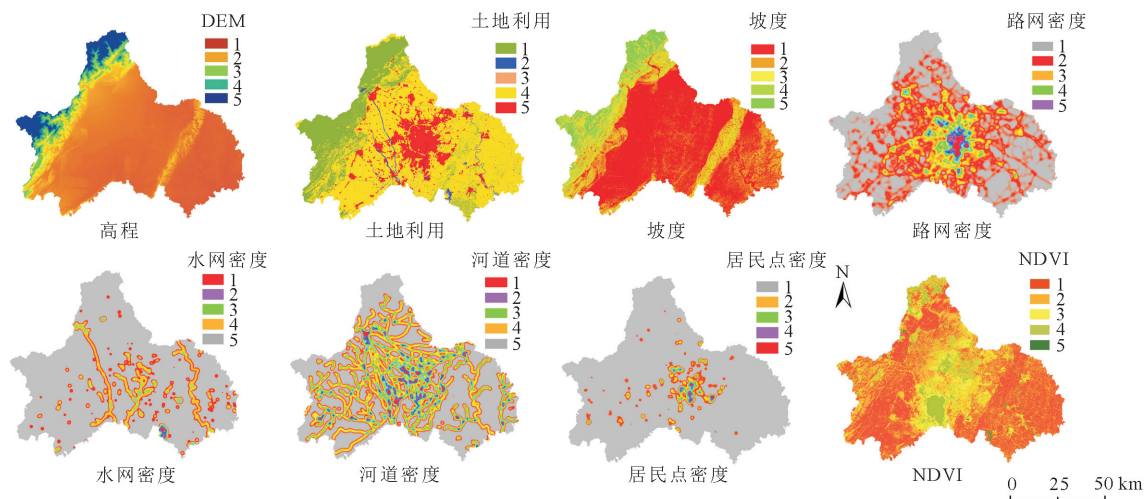


图 3 累积阻力面阻力因子

Fig. 3 Resistance factors of cumulative resistance surface

2 种模式下电流密度高区域在空间分布上有所差别,多对一模式下电流密度最高为 46.37,成对模式下电流密度最高为 21.59,结合 2 种模式选取高电流区域作为生态节点,共提取生态节点 59 个,由图 9 可知,生态节点集中分布在景区、公园和生态旅游区附近,具有极高的保护价值,对成都市的整体连通性起着关键作用。

3.3.2.2 基于水文分析提取生态节点 通过水文

分析提取最大累积阻力路径,选取生态重要区与生态脆弱区的交点作为生态节点,共提取节点 54 个,多集中在辐射道密集区,进一步加强点、线、面相互交织的复合型生态网络空间结构构成,推动了成都市景观生态结构的连续性(图 10)。

3.3.2.3 综合生态节点 将水文分析得到的生态节点与电路理论提取的生态节点进行合并叠加,删除重合节点,得到 101 个综合生态节点(图 11)。

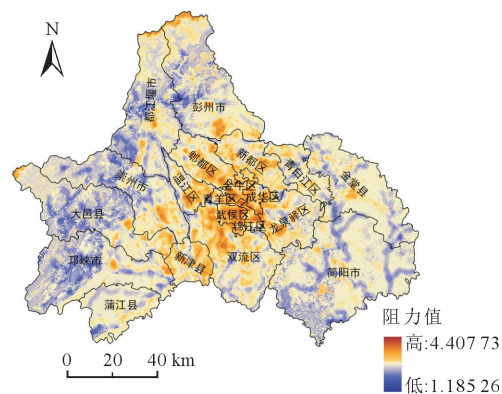


图 4 综合阻力面

Fig. 4 Comprehensive resistance surface

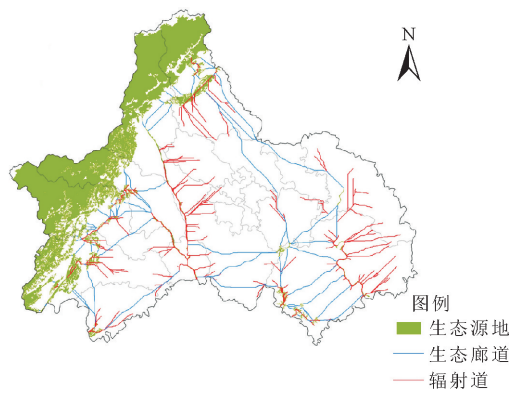


图 6 研究区综合生态廊道

Fig. 6 Distribution of comprehensive ecological corridor of the study area

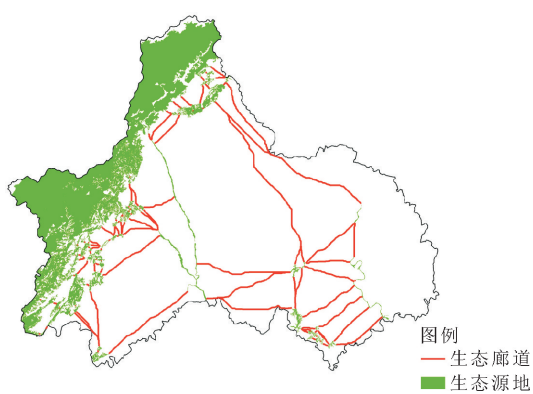


图 5 Linkage Mapper 识别生态廊道分布

Fig. 5 Linkage Mapper identifies ecological corridor distribution

3.4 生态网络优化

3.4.1 生态网络增边优化

3.4.1.1 生态网络节点重要性分析 复杂网络中节点介数越大表明该节点在生态网络中最对整体资源控制起关键作用^[23]。通过 MATLAB 软件模拟网络邻接矩阵,利用 Gephi 软件计算所有节点的介数中心性(图 12)。

由图 13 可知,该生态网络大部分节点的介数中心性都较低,介数值为 0 的有 38 个,其余节点介数呈离散型分布,低于 50 的有 14 个,整体生态节点的重要性较低,网络异质性较强,有多个节点位于生

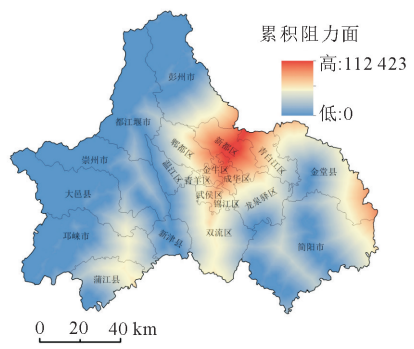


图 7 水文分析识别生态辐射道

Fig. 7 Hydrological analysis to identify ecological radiation paths

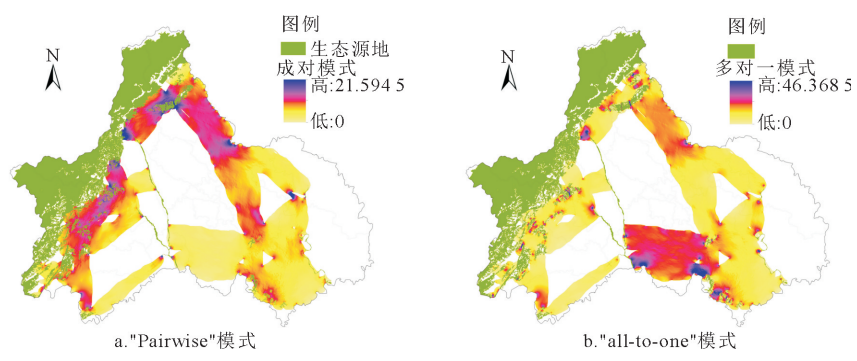


图 8 基于 Pinchpoint Mapper 电流密度分析

Fig. 8 Analysis of current density based on Pinchpoint Mapper

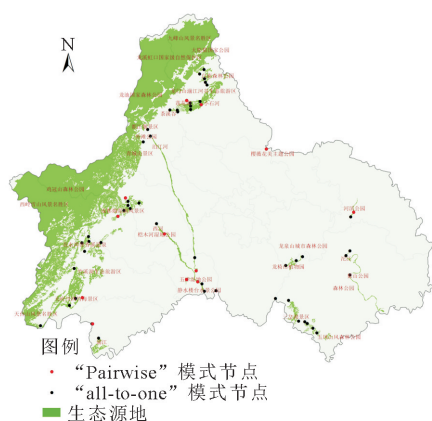


图 9 基于 Pinchpoint Mapper 生态节点分析

Fig. 9 Analysis of ecological nodes based on Pinchpoint Mapper

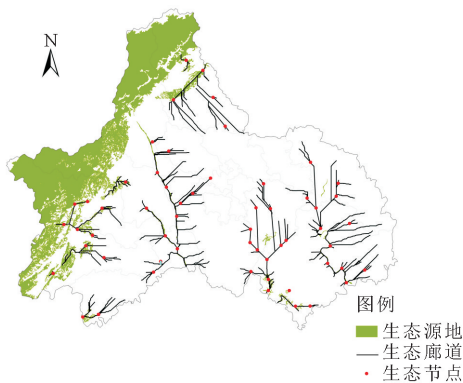


图 10 基于水文分析生态节点分布

Fig. 10 Analysis of ecological node distribution based on hydrology

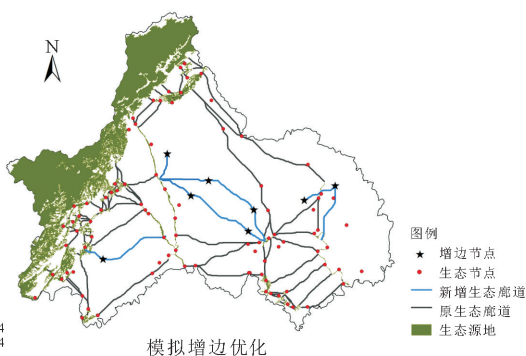
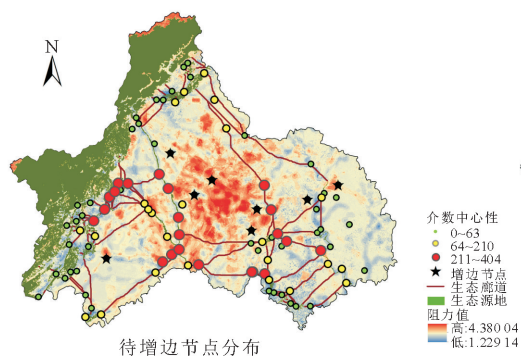


图 12 生态网络增边优化

Fig. 12 Ecological network edge enhancement optimization

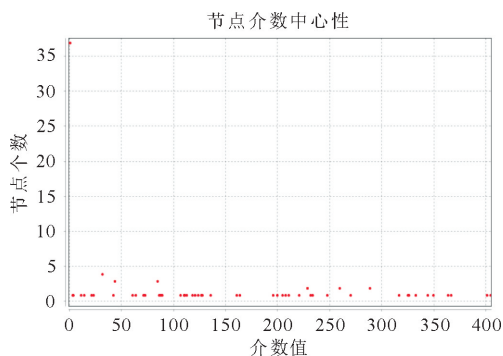


图 13 生态节点的介数分布

Fig. 13 Betweenness distribution of ecological nodes

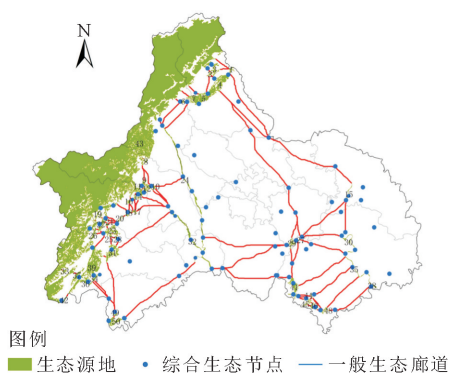


图 11 综合生态节点分布

Fig. 11 Comprehensive ecological node distribution

态阻力值高区域,这些节点可作为优化的重点对象。

3.4.1.2 生态网络增边优化策略 结合成都市生态网络图,筛选位于高阻力值的节点,在此基础上二次识别介数中心性低的节点(图 13),增边节点主要位于成都市中心都市圈以及东部生态源地稀疏区,综合考虑增边节点的拓扑结构,利用 ArcGIS 的成本路径模型为待优化的节点进行增边模拟(图 14),尽可能使其与周边节点和生态源地形成新的生态廊道。增边模拟后为 8 个节点增加了 11 条生态廊道,进一步加强了中部与东西部地区的交流。

3.4.1.3 稳定性分析 基于 python 软件对生态网络增边优化前后进行随机攻击和蓄意攻击模拟,以此分析网络的稳定性变化。结果表明,优化前网络

的稳定性仅为 0.57,网络连通性较差,不利于生态源地、生态节点之间的交流。蓄意攻击模式下稳定性下降速度较为明显,当节点攻击数达到 80 后整个网络已经崩溃,移除全部节点之后网络稳定性降为 0;在随机攻击模式下,网络稳定性的下降速度较为平缓,整体波动性比较大,最终稳定性在 0.2 以上,表明最小连通子图下,网络节点之间还存在小范围连接。

增边优化后网络稳定性增加为 1,网络连通性增强,网络结构整体更为稳定。蓄意攻击模式下,去除

21个节点后网络稳定性急速下降,此时网络结构已被破坏,当节点去除83个之后网络已然完全崩溃;随机模式下网络稳定性下降速度较为平缓,网络稳定性整体保持在0.2以上,网络优化效果较为明显。

整体看来,对于指定节点增加生态廊道,能够大幅度提升网络的连接稳定性,加强网络结构的稳定性,推动生态源地、生态节点之间的物种、信息和能量交流,增强成都市生态系统功能。

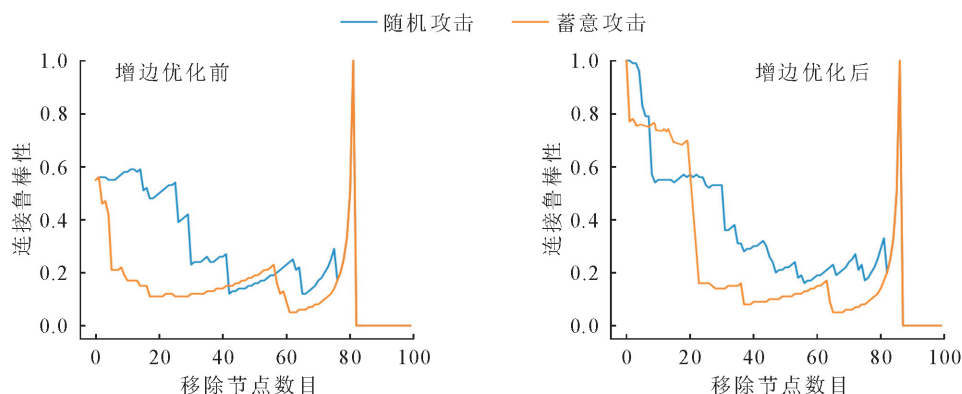


图 14 增边优化前后稳定性变化

Fig. 14 Robustness changes before and after edge addition optimization

4 结论与讨论

4.1 结论

根据生态学原理构建区域生态网络有利于整合破碎化斑块,保护生物多样性,并针对其网络存在的缺陷进行优化重构。

基于 MSPA 结果,成都市以核心区为主,其他 6 类景观均零星分布,景观破碎化较为严重。生态源地主要分布在西部林地密集区以及东部水域附近,中部分布较为稀疏,整体生态协调性较差。

通过构建成都市综合阻力面表明,成都市都市圈内阻力值较高,呈现中部现象向外部降低的趋势。

基于 LM 提取的生态廊道多集中在西部优质生态斑块,生态节点多集中在景区、公园和生态旅游区附近;水文分析提取的生态辐射道由生态源地向四周形成“支流”,生态节点集中在辐射道附近,保护现有生态节点是未来加强东西部生态交流合作的关键。

基于复杂网络对需要增边的 8 个节点进行优化,模拟出 11 生态廊道,并计算增边前后的稳定性,增边后稳定性有明显提升,表明增边优化有利于研究区生态质量改善、景观连通性增强,可为区域或较大尺度生态修复提供参考。

4.2 讨论

为提高生态网络建设的合理性,本研究还可以从以下几个方面进行深入探讨。

MSPA 由于边缘效应与物种保护和生态过程息息相关,故研究区域和保护种类不同,边缘宽度也应不同。本研究中边缘宽度为 30 m,该阈值并不适应某种特定的群体,因此在设定边缘宽度时需要综

合考虑具体的研究对象、研究区域、景观适应性等因素。

生态网络的关键是景观阻力值的设定,然而现在国内外对于阻力值的研究并没有规定的标准值。本研究综合考虑研究区地形、景观结构、人类活动具有一定科学性。但由于研究区详细生物资料缺乏,在对景观阻力值赋值时并没有综合考虑各类物种的生活特性,忽略了距离阈值的影响,也可能遗漏某些重要因子,今后应结合特定物种,完善阻力因子选取,研究不同距离阈值对景观阻力的影响,以此来提高研究的科学性。

由于现在复杂生态网络分析仍处于定性分析阶段,没有完善的定量研究,故对于成都市生态修复策略还需要更进一步的研究,这也是未来区域生态修复具体探究的深层次内容。

参考文献:

- [1] 尹海伟,孔繁花,祈毅,等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [2] 仇江啸,王效科,逯非,等. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [3] 马欢,岳德鹏,于强,等. 生态脆弱区防护网络构建及分区研究——以磴口县为例[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 193-202.
- MA H, YUE D P, YU Q, et al. Construction of ecological network and protection partition of ecological fragile area: a case study of Dengkou County [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 193-202. (in Chinese)
- [4] XIA H, ZHANG W, WANG H, et al. Spatial-temporal patterns and characteristics of ecological function between 2009 and 2015 in China [J]. Ecological Indicators, 2020, 116:

- 106478.
- [5] ADRIAENSEN F, CHARDON J P, BLUST G D, *et al.* The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(4): 1-247.
- [6] 张美丽, 齐跃普, 张利, 等. 基于 Linkage Mapper 与粒度反推法的太行山中北段生态节点识别与分析: 以河北省阜平县为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(12): 1569-1578.
- ZHANG M L, QI Y P, ZHANG L, *et al.* Identification and analysis of ecological nodes based on Linkage Mapper and granular inversion method in the middle and northern section of Taihang Mountains: a case study of Fuping County, Hebei Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(12): 1569-1578. (in Chinese)
- [7] 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.
- 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)
- [8] 何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3590-3601.
- HE J H, PAN Y, LIU D F. Analysis of the wetlands ecological pattern in Wuhan City from the perspective of ecological network[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3590-3601. (in Chinese)
- [9] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 290-301.
- [10] 戴璐, 刘耀彬, 黄开忠. 基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2459-2474.
- DAI L, LIU Y B, HUANG K Z. Construction of an ecological security network for waterfront cities based on MCR model and DO index: a case study of Jiujiang city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2459-2474. (in Chinese)
- [11] WANG C, YU C, CHEN T, *et al.* Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? an example of Nanchang, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [12] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [13] 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)
- [14] 于强, 岳德鹏, Yang Di, 等. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 330-336, 329.
- [15] 陈明, 戴菲. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施空间格局对 PM_{2.5} 的影响[J]. *中国园林*, 2020, 36(10): 63-68.
- [16] 孟宇彤, 赵康军, 赵伟. 针对森林背景的去雾图像优化[J]. *森林工程*, 2022, 38(4): 106-112.
- [17] 莫惠萍, 林美玲, 胡欣雨, 等. 基于 MSPA 和 MCR 的土地生态适宜性评价——以韶关市始兴县为例[J]. *黑龙江生态工程职业学院学报*, 2021, 34(4): 20-25, 29.
- [18] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山山水田湖草生态保护与修复[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- WANG X Y, FENG Z, WU K N, *et al.* Ecological conservation and restoration of life community theory based on the construction of ecological security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8725-8732. (in Chinese)
- [19] 裴燕如, 孙炎浩, 于强, 等. 黄河流域典型矿区生态空间网络优化——以鄂榆地区为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1541-1554.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 139-147.
- [23] 王灿, 吴雪, 罗小娟. 基于介数中心性的无线传感器网络抗毁性评价方法[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(5): 19-21, 25.
- WANG C, WU X, LUO X J. Method for invulnerability evaluation of WSNs based on betweenness centrality[J]. *Sensors and Microsystems*, 2015, 34(5): 19-21, 25. (in Chinese)