

# 齐齐哈尔市主城区生态网络构建与优化

谢 婧, 李 文, 贾 佳, 赵 桁 嵩

(东北林业大学 园林学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 齐齐哈尔市主城区为哈大齐工业走廊的重要节点, 近些年因工业化建设导致生态斑块破碎化, 生态效益下降等问题, 构建生态网络是目前修复区域生态环境、整合土地资源的重要手段。基于 ArcGIS 等技术分析研究区域土地利用变化, 得出潜在生态问题, 为后续生态网络构建提供基础。基于景观生态学原理与形态学空间格局分析(MSPA)对研究区域的核心区、桥接区及岛状斑块等进行识别与评价, 根据 dPC 指数提取出重要生态源地, 基于最小累积阻力模型(MCR)得出潜在生态廊道, 通过计算对连通性较弱的区域进行规划补充, 并归纳分析网络体系缓冲区及生态断裂点。结果表明: 齐齐哈尔市共计 16 处核心区为原生态源地, 重要生态廊道 14 条, 一般生态廊道 106 条, 主要分布于研究区域东南部。优化后的生态网络增加了 7 处生态源地、133 条规划生态廊道, 廊道网络结构相关指数有较大提升。根据网络体系缓冲区分析提出生态保护建议, 根据 352 处生态断裂点提出修复连通措施。通过识别生态源地、构建与优化生态廊道形成完善的区域生态网络体系, 旨在为齐齐哈尔市生态网络建设提供选址参考与方法借鉴。

**关键词:** 景观生态学; 生态网络; 形态学空间格局分析(MSPA); 最小累积阻力模型(MCR); 齐齐哈尔市

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2021)06-0308-08

## Construction and Optimization of Ecological Network in the Main Urban Area of Qiqihar City

XIE Jing, LI Wen, JIA Jia, ZHAO Hengsong

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The main urban area of Qiqihar City is an important node of the Harbin-Daqing-Qiqihar Industrial Corridor. In recent years, industrialization has led to the fragmentation of ecological patches and the decline of ecological benefits. Building an ecological network is currently an important technical means to restore the regional ecological environment and integrate land resources. Based on ArcGIS and other technologies, the regional land use changes were analyzed and studied, and potential ecological problems were obtained, which could provide the basis for subsequent ecological network construction. Based on the principles of landscape ecology and morphological spatial pattern analysis, this research identified and evaluated the core areas, bridged areas and island patches of the study area, and extracted important ecological sources according to the dPC index. This research laid out potential ecological corridors based on the minimum cumulative resistance model. Through calculations, areas with weak connectivity were planned and supplemented, and the buffer zone and ecological breakpoints of the network system were summarized and analyzed. A total of 16 core areas in Qiqihar City are the original ecological sources. The study area has 14 important ecological corridors and 106 general ecological corridors which mainly distribute in the southeast of the study area. The optimized ecological network adds 7 ecological sources and 133 planned ecological corridors. The related indexes of corridor network structure have been greatly improved. This research proposes ecological protection suggestions based on the analysis of the buffer zone of the network system, and proposes measures to restore connectivity based on 352 ecological breakpoints. This research forms a complete regional ecological network system by identifying ecological sources, constructing and optimizing ecological corridors, which aims to provide reference and method refer-

收稿日期: 2020-12-15

修回日期: 2020-12-28

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“科技平台持续发展专项, 城市化背景下资源型城市生态格局构建——以大庆市为例”(2572018CP06)

第一作者: 谢婧(1996—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态修复与规划。E-mail: 13039003861@163.com

通信作者: 李文(1971—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事城市生态修复与规划研究。E-mail: liwen@nefu.edu.cn

ence for site selection for the construction of ecological network in Qiqihar City.

**Keywords:** landscape ecology; ecological network; morphological spatial pattern analysis; minimum cumulative resistance model; Qiqihar City

近年来,随着城镇化进程的不断推进,城市生态环境效益逐渐降低<sup>[1]</sup>。构建生态网络是保障生态安全、维持区域生态系统稳定的有力途径,对城乡生态空间的可持续发展具有重要意义。生态网络是基于景观生态学原理,通过识别生态源地、构建生态廊道将研究区域内生态要素如湿地、林地、草地等有机衔接的网络布局模式<sup>[2-5]</sup>。国内外逐渐兴起多学科交叉的模型与方法,现有研究多基于景观生态学理论,从图论<sup>[6]</sup>、拓扑等<sup>[7-8]</sup>角度出发进行生态网络构建。源地识别、阻力面设定与生态廊道选址是构建与优化生态网络的关键步骤。源地识别方面,许峰等<sup>[9]</sup>基于形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)方法,根据研究区巴中西部新城的土地覆被现状,在 Guidos 中识别出对研究区具重要生态意义的核心区作为生态源地。Riitters 等<sup>[10]</sup>基于数学相关理论进行格局分析与源地识别。史芳宁等<sup>[11]</sup>根据研究区广西左右江流域的自然现况,注重大面积自然绿地对区域生态系统的作用,选取物种密集的 25 个自然保护区为生态源地。阻力面设置方面,Lookingbill 等<sup>[12]</sup>考虑物种迁徙规律,通过扩散模型综合评价斑块间的阻力。何建华等<sup>[13]</sup>将武汉市各区人口数据作为人为干扰阻力,纳入阻力面构建中。廊道识别方面,李恒凯等<sup>[14]</sup>基于最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)得出成本路径作为生态廊道选址。Saura 等<sup>[15]</sup>结合景观格局分析与网络相关理论共同确定林地斑块间的连通廊道。杨志广等<sup>[16]</sup>分析了潜在生态廊道的景观结构,得出生态廊道缓冲区的适宜宽度。

齐齐哈尔市作为哈大齐工业走廊城市群的骨干之一,是黑龙江省统筹城乡发展的先导地区,近些年大力发展重工业,工业化快速建设导致了其生态环境的恶化,水土流失与湿地退化严重,亟待生态环境修复与土地资源整合<sup>[17-19]</sup>。本研究以齐齐哈尔主城区为研究范围,通过分析城市建设发展导致的土地利用变化,得出生态环境存在的主要问题,为生态网络构建提供研究基础。在 2017 年土地利用类型解译结果中提取出林地、草地、湿地 3 类生态要素,通过 Guidos 进行基于 MSPA 的景观格局分类,根据 Conefor2.6 得出的斑块可能连通性指数变化量(the delta values for probability index of connectivity, dPC)来确定生态源地,应用 GIS 技术基于最小累积

阻力模型得出潜在生态廊道,计算廊道网络结构分析相关指数,对廊道分布稀疏地区进行科学规划补充,合理优化区域生态网络布局,研究结果旨在为东北老工业城市生态修复与资源整合提供理论与方法借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

齐齐哈尔市是东北地区工业发展的重要枢纽,也是黑龙江省西部经济、政治及文化中心。地处黑龙江省西南部松嫩平原,东经 123°—126°,北纬 45°—48°,总体地势平坦,北部地势较高,东部及南部地势较低;区域内包含嫩江等主要河流廊道,本土植被主要为草甸草原。齐齐哈尔市具有典型东北地区的温带大陆性季风气候,四季分明,春季气候干旱多风,夏秋两季短暂而多雨,冬季漫长而寒冷。近年来,哈大齐工业走廊相关建设和产业发展对城市群起到了极大的经济带动作用,齐齐哈尔市以非金属矿为工业发展特色,快速工业发展使得主城区建设用地急剧扩张<sup>[20]</sup>,侵占城乡生态空间,湿地、林地、草地斑块布局零散,主城区东南部与大庆市接壤的大面积湿地斑块逐渐呈现破碎化,水土流失较为严重,亟待修补与资源整合。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及预处理 本研究采用的数据主要包括《齐齐哈尔市统计年鉴》、齐齐哈尔市矢量路网(源自 Open Street Map)、齐齐哈尔市 Landsat 遥感影像与 DEM 高程数据(源自地理空间数据云, 30 m)、高清 Google 影像等。下载 Landsat5/Landsat8 卫星在相等间隔(2003 年、2010 年、2017 年)的三期影像以及 DEM, 2003 年、2010 年、2017 年三期精度为 30 m 的 Landsat 影像均选自 6—9 月的无云影像,土地利用类型清晰,植被覆盖良好。通过 ENVI 与 ArcGIS 分别对三期影像进行几何校正、辐射校正、大气校正、波段融合,根据本研究需要,将土地利用类型分为湿地、林地、草地、耕地、建设用地和未利用地 6 类。以目视解译法根据 Google Earth 高清历史影像对数据进行纠错,每期随机生成 200 个样点,通过 ENVI 混淆矩阵和精度评价进行验证,得出分类精度分别为 84.5%, 88.0%, 87.5%, 平均精度为 86.67%, 满足后续研究需要。

1.2.2 基于 MSPA 方法的景观识别 形态学空间格局分析法(morphological spatial pattern analysis,

MSPA)在生态源地识别方面应用较多,从生态结构连通性入手,基于数学原理对图像栅格进行空间格局的识别分析<sup>[21]</sup>。本研究基于解译出的 2017 年土地利用类型栅格图(像元大小为 30 m),提取湿地、林地、草地作为 MSPA 的前景要素,因考虑耕地的人为干扰程度较强,将耕地、建设用地、未利用地设为背景,转换成 tiff 格式的二值图,在 Guidostoolbox 中识别出 7 种景观类型,分别为核心区、桥区、岛状斑块、环道区、边缘区、支线、孔隙。

1.2.3 生态源地景观连通性评价 应用 Conefor 2.6 软件,根据斑块连通距离阈值和连通概率可计算出斑块的景观连通性相关指数。景观连通性是衡量区域生态斑块相联系程度的重要指标之一,可能连通性指数(the probability index of connectivity,PC)在现有研究中应用较多,其分析优势在于综合考虑了物种迁移能力和扩散概率,是现阶段较为成熟的评价指标;可能连通性指数变化量(the delta values for probability index of connectivity,dPC)常用来反映斑块重要性<sup>[22]</sup>,公式如下:

$$PC=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^na_ia_jP_{ij}^*}{A_L^2}$$

(1)

$$dPC=\frac{PC-PC_{remove}}{PC}\times100\%$$

(2)

式中: $n$  为研究区域内斑块的总数; $a_i$ 与 $a_j$ 分别为斑块 $i$ 与斑块 $j$ 的面积; $A_L^2$ 为研究区斑块的总体面积; $P_{ij}^*$ 为斑块 $i$ 与斑块 $j$ 之间物种迁徙扩散的最大可能性; $PC_{remove}$ 为将随机斑块 $i$ 剔除后的景观连接度。结合前人研究<sup>[9,11,13,16]</sup>,将斑块连通距离阈值设为 500 m,连通概率为 0.5,应用 Conefor 2.6 进行分析计算,根据结果筛选生态源地。

1.2.4 阻力面的构建 斑块阻力值表示物种扩散的困难程度,对生态网络构建具有重要意义。根据研究区人为干扰与实地调研情况,结合文献<sup>[23-24]</sup>对各土地利用类型进行阻力赋值,赋值范围 1~100。基于 MSPA 方法对生境斑块的识别,生态源地是物种生存的最佳场所,面积较大,具有保护生物多样性的作用,对物种扩散几乎不产生阻力,此类土地的阻力值最小,赋值为 1。其他核心区阻力值相对生态源地稍有增大,但因核心区具有较高的生态价值<sup>[23]</sup>,在整体阻力中仍属于低阻力区。桥区是核心区之间的衔接斑块,起到廊道连通的作用,促进区域信息流动,阻力较小,赋值为 10~20。岛状斑块为区域生态系统中的潜力节点,但与其他斑块连通程度一般,赋值为 30。除 dPC 值较高的核心区、桥区外,其他草地、林地、湿地斑块面积较小、连通性差,此类土地的阻力值相对较大,赋值在 30~50。耕地受到较强的人为干扰,赋值为 80。建设用地为硬质表面,是人为干扰最强的区域,阻力值最大,赋值为 100。

坡度与海拔对物种扩散具一定程度影响<sup>[13]</sup>,阻力赋值范围为 1~100。根据寒地物种栖息地的特征<sup>[25]</sup>,坡度小于 5°时,几乎不影响物种扩散,赋值为 1。迁徙难度随坡度增加而增加,当坡度大于 20°,物种迁徙较困难,此类地形阻力较大,赋值为 80。海拔上,物种扩散难度随高程增加而增大。研究区域景观要素较复杂,土地利用类型在阻力面的构建中占有较大权重,坡度因子次之,因研究区处于东北平原,地形海拔较低,对物种影响较小,其权重也相对较小。综上,基于熵值法<sup>[26]</sup>计算各类指标的离散程度,分析得出土地利用类型、坡度、高程的权重分别为 0.58, 0.25,0.17(表 1)。

表 1 阻力面赋值及权重

阻力因子	指标	阻力赋值	权重	阻力因子	指标	阻力赋值	权重
土地利用类型	生态源地	1	0.58	地形坡度/(°)	<5	1	0.25
	一级核心区	3			5~10	10	
	二级核心区	10			10~15	30	
	三级核心区	15			15~20	50	
	一级桥接区	10			>20	80	
	二级桥接区	15					
	三级桥接区	20				0.17	
	岛状斑块	30	地形高程/m	<100	1		
	人工草地	30		100~250	10		
	人工林地	35		>250	50		
	人工湿地	50					
	未利用地	60					
	耕地	80					
	建设用地	100					



1.2.5 基于 MCR 的生态廊道构建与优化 最小累积阻力模型 (minimum cumulative resistance model, MCR)是现有生态廊道识别的有力途径<sup>[27]</sup>,该模型计算源点到目标点所需克服的最小累积阻力,获得两斑块之间的最小成本路径,即物种扩散最优通道,公式如下:

$$MCR=f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$
 (3)

式中: MCR 为最小成本值;  $D_{ij}$  表示从原点  $j$  到空间单元  $i$  的空间距离;  $R_i$  表示空间单元  $i$  的阻力系数。

重力模型<sup>[28]</sup>能够科学评价生态源点与目标点之间的相互作用程度,相互作用力值越大,两者间的廊道在区域生态系统中具有越重要的地位。经过重力模型计算可得出区域廊道重要性分级,并对廊道稀疏地区进行补充,科学优化生态网络结构。重力模型公式如下:

$$G_{ij}=\frac{L_{\max}^2 \ln(S_i) \ln(S_j)}{L_{ij}^2 P_i P_j}$$
 (4)

式中: $G_{ij}$  代表研究区域内斑块  $i$  与  $j$  之间的相互作用力强度;  $S_i$  为斑块  $i$  的面积;  $S_j$  为斑块  $j$  的面积;  $P_i$  为斑块  $i$  的阻力值;  $P_j$  为斑块  $j$  的阻力值;  $L_{ij}$  为斑块  $i$  与斑块  $j$  之间廊道的累积阻力值;  $L_{\max}$  为研究区域所有廊道的最大累积阻力值。

网络闭合指数( $\alpha$  指数)、网络连接度指数( $\beta$  指数)、网络连通率指数( $\gamma$  指数)反映出区域生态系统中源地与廊道的连通关系以及生态网络结构的复杂程度,指数数值与生态廊道连通性呈正相关<sup>[29-30]</sup>,计算公式如下:

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

$$\beta=\frac{L}{V}$$
 (6)

$$\gamma=\frac{L}{3(V-2)}$$
 (7)

表 2 研究区域 2003—2017 年各类土地利用变化

年份	属性	耕地	林地	草地	湿地	建设用地	未利用地
2003	面积/km <sup>2</sup>	1553.11	602.92	700.09	710.29	354.28	203.48
	所占比例/%	37.66	14.62	16.98	17.22	8.59	4.93
2010	面积/km <sup>2</sup>	1658.78	730.24	648.92	504.20	391.60	190.43
	所占比例/%	40.22	17.71	15.73	12.23	9.49	4.62
2017	面积/km <sup>2</sup>	1984.39	282.42	623.40	664.44	439.98	132.54
	所占比例/%	48.08	6.84	15.10	16.11	10.66	3.21

2.2 基于 MSPA 的景观分析

以 2017 年土地利用类型栅格数据中的湿地、林地、草地作为 MSPA 的前景要素,耕地、建设用地、未利用地作为背景要素,将栅格转化为 tiff 格式的二值图,导入 Guidos 识别出 7 种景观类型,分别为核心区、桥接区、岛状斑块、环道区、边缘区、支线、孔隙,由表 3 看出,核心区面积为 850.43 km<sup>2</sup>,所占比例最

式中:  $L$  为生态廊道数;  $V$  为生态节点数。通过计算对比生态网络优化前与优化后的网络结构指数来量化网络优化结果。

1.2.6 网络缓冲区生态敏感性分析及生态断裂点修复 生态敏感性是指某区域生态系统受人类活动干扰后的环境变化程度,表示该区生态环境被破坏的可能性,高敏感区的生态效益更易因人为干扰而下降<sup>[31-32]</sup>。对优化后的“源地—廊道”生态网络体系构建多级缓冲区,结合文献<sup>[33-34]</sup>将生态网络“源地—廊道”体系 50 m 缓冲区内作为极敏感区,50~200 m 为高敏感区,200~500 m 为中敏感区,500~1 000 m 为低敏感区,其余地区为不敏感区。根据结果提出相应的保护措施,为城市生态规划相关工作提供参考<sup>[35]</sup>。在生态网络建设过程中,生态断裂点的存在不容忽视<sup>[11,36]</sup>。生态网络体系与研究区域内穿行的铁路、高速路、国道相交处为生态断裂点,通过 Open Street Map 网站和 QGIS 软件获取研究区域矢量路网,在 ArcGIS 中与廊道叠加取交点并进行分级评价,根据结果提出相关修复建议。

2 结果与分析

2.1 研究区域土地利用变化

随着城镇化的推进,建设用地不断扩张,研究区生态斑块总面积减少,区域生境呈现破碎化的趋势。根据分析结果(表 2),2003—2017 年,研究区域建设用地面积不断增加,未利用地减少,各生态斑块也处于不断变化中。2003 年耕地面积为 1 553.11 km<sup>2</sup>,所占比重最大,湿地所占的面积比仅次于耕地,建设用地面积为 354.28 km<sup>2</sup>,占总面积的 8.59%;到 2017 年,建设用地占研究区域总面积的 10.66%,林地、草地、湿地面积均减少,区域生态环境亟待保护与修整。

大,为 54.16%,其次为边缘区,占比 15.91%,而岛状斑块、环道区与孔隙所占比例较小,表明齐齐哈尔主城区景观构成以较大型斑块为主,且斑块具有边缘复杂、形态破碎等特征,支线的总面积为 122.19 km<sup>2</sup>,占比为 7.78%,大型斑块的外围分布较多支线,表明斑块较易与外界进行物质能量交流。

表 3 不同景观要素的生态学含义及面积占比

景观类型	生态学含义	面积/km <sup>2</sup>	占前景要素百分/%
核心区	通常为较大面积生境斑块,对生物多样性保护起重要作用	850.43	54.16
桥接区	连接核心区的生态廊道,促进物种迁移与物质信息流动	150.40	9.58
岛状斑块	表现为与其他景观要素分离的小型斑块,生态过程交流较少	116.23	7.40
环道区	表现为同核心区的内部廊道,为物种在斑块内部扩散的媒介	51.31	3.27
边缘区	是核心区外缘、核心区与非生境斑块过渡区域,具边缘效应	249.76	15.91
支线	实现物质能量交流,与桥接区、环道区、边缘区等都可连通	122.19	7.78
孔隙	位于核心区内部,是生境斑块与内部非生境斑块的过渡区域	29.91	1.90
总计		1570.23	100

2.3 景观连通性评价与生态源地提取

结合前人研究<sup>[9,11,23]</sup>,设置斑块连通距离阈值设为 500 m,连通概率为 0.5,通过 Conefor 2.6 计算,根据结果进行景观分级,将核心区分为四级:生态源地  $dPC>0.1$ ,一级核心区  $0.1>dPC>0.05$ ,二级核心区  $0.05>dPC>0.01$ ,三级核心区  $0.01>dPC$ 。提取面积大于 2.5 hm<sup>2</sup>的桥接区并分为 3 个等级:一级桥接区  $dPC>0.8$ ,二级桥接区  $0.8>dPC>0.2$ ,三级桥接区  $0.2>dPC$ 。提取面积大于 2.5 hm<sup>2</sup>的岛状斑块作为潜力节点,综合评价见图 1。为有效区分,核心区 dPC 值取小数点后三位,结合文献<sup>[13,16,23]</sup>选取  $dPC>0.1$  的 16 个斑块作为生态源地(表 4)。

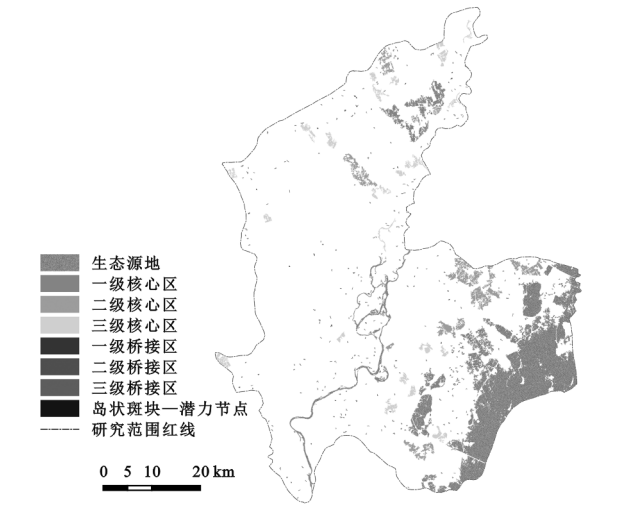


图 1 基于 dPC 指数的核心区、桥接区及岛状斑块分级评价

表 4 核心区(生态源地)景观连通性重要程度排序

编号	dPC	斑块面积/km <sup>2</sup>	编号	dPC	斑块面积/km <sup>2</sup>
1	97.329	307.22	9	0.892	30.26
2	9.956	2.93	10	0.628	1.67
3	9.697	18.30	11	0.321	2.61
4	8.951	22.62	12	0.302	16.06
5	2.507	4.75	13	0.167	8.87
6	2.057	4.10	14	0.109	1.16
7	1.167	1.70	15	0.106	3.07
8	0.929	1.89	16	0.103	1.87

2.4 生态廊道构建

基于最小累积阻力模型(MCR),根据 16 个生态源地与前期分析得出的研究区综合阻力面,在 ArcGIS 中计算每两斑块间的成本路径,16 个生态源地间存在共计 120 条生态廊道。通过重力模型计算 16 个生态源地之间的相互作用矩阵(表 5),参照前人研究<sup>[16,37]</sup>,将相互作用力大于 5 的廊道提取出来,作为重要生态廊道,共计 14 条,其余作为一般廊道,共计 106 条(图 2)。表 5 表明,斑块 10 与斑块 11 间相互作用力最大,为 326.32,说明此两斑块间距离较短,物种迁徙扩散阻力相对较小,斑块关联度较高,在未来规划中应加强斑块 10 与斑块 11 间生态廊道的围合保护。

2.5 生态廊道优化

图 2 表明,生态廊道集中于研究区东南部,东南部生境斑块面积较大,景观连通性较好,而西北部廊道体系连通性较差,结合参考文献<sup>[16]</sup>,在研究区西北部重新选取具有重要生态意义的斑块,构建新廊道来完善研究区生态网络体系。根据前期 MSPA 分析结果,核心区具较高的生态效益,选取研究区西北部除生态源地外,剩余核心区中面积较大且连通性高的斑块作为补充生态源地。对于研究区边界处的核心斑块应重点考虑,因其位于边界,其与内部源地建设生态廊道后,廊道体系将全面覆盖研究区,此生态网络体系更为完善<sup>[16]</sup>。最终选取 7 处补充生态源地(表 6),与原有源地进行补充计算,得出新增 133 条规划廊道(图 3)。

通过廊道网络闭合指数( $\alpha$  指数)、网络连接度指数( $\beta$  指数)、网络连通率指数( $\gamma$  指数)对优化前后的生态网络体系进行对比。结果如下:优化前的生态源地数(网络节点)为 16,廊道总数为 120, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  指数分别为 3.89、7.50、2.86;优化后的生态源地数(网络节点)为 23,廊道总数为 253, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  指数分别为 5.63、11.00、4.02,生态网络连通性有较大提升,表明生态网络结构得到优化,规划的潜在生态廊道提高了区域生态源地连接水平,增强了区域生态系统稳定性。

表 5 基于重力模型构建的生态源地相互作用矩阵

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1		4.77	2.74	2.84	7.06	2.63	1.46	0.81	1.12	1.06	1.26	2.22	0.15	2.14	2.35	0.12
2			0.43	9.88	6.93	0.38	0.29	0.86	0.35	0.22	0.26	0.62	0.07	0.58	0.62	0.06
3				0.42	0.62	8.77	8.80	0.17	0.65	4.92	5.74	2.14	0.07	1.25	0.93	0.06
4					5.01	0.37	0.30	2.31	0.40	0.23	0.27	0.61	0.10	0.55	0.59	0.08
5						0.56	0.41	0.72	0.68	0.32	0.39	1.17	0.11	1.13	1.30	0.09
6							3.09	0.15	0.79	2.60	3.31	3.81	0.07	2.05	1.41	0.05
7								0.13	0.82	105.30	58.09	3.18	0.08	1.76	1.26	0.06
8									0.18	0.10	0.12	0.22	0.06	0.19	0.20	0.05
9										0.72	0.88	4.16	0.20	4.67	3.39	0.17
10											326.32	3.02	0.07	1.64	1.15	0.05
11												3.94	0.08	2.09	1.44	0.06
12													0.14	82.25	20.47	0.11
13														0.11	0.10	17.59
14															61.00	0.10
15																0.09

表 6 补充生态源地生态属性及选择依据

编号	dPC	斑块等级	面积/km <sup>2</sup>	位置	选择理由
1	0.018332	二级核心区	3.62	中部偏北	dPC 值高,景观连通性强,面积大,处于中部枢纽地区
2	0.015459	二级核心区	2.89	北部,近边界处	dPC 值高,景观连通性强,面积较大
3	0.009415	三级核心区	3.47	西部偏南,边界处	dPC 值较高,面积较大,处于西部边界,具备建设必要
4	0.003921	三级核心区	1.53	西北部,近边界处	dPC 值较高,处于西北部近边界处,具备建设必要
5	0.001579	三级核心区	1.42	西部,近边界处	处于缺乏廊道的西部近边界处,具备建设必要
6	0.001291	三级核心区	1.29	西部偏北,边界处	处于缺乏廊道的西部偏北边界,具备建设必要
7	0.001144	三级核心区	1.21	最北部边界处	处于缺乏廊道的研究区最北部边界处,具备建设必要

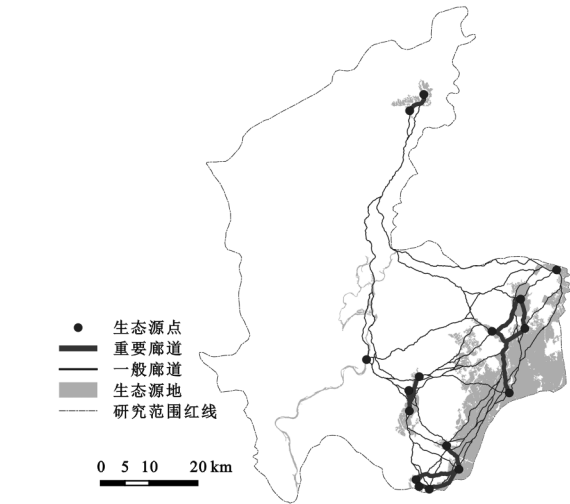


图 2 研究区域生态廊道识别与分级

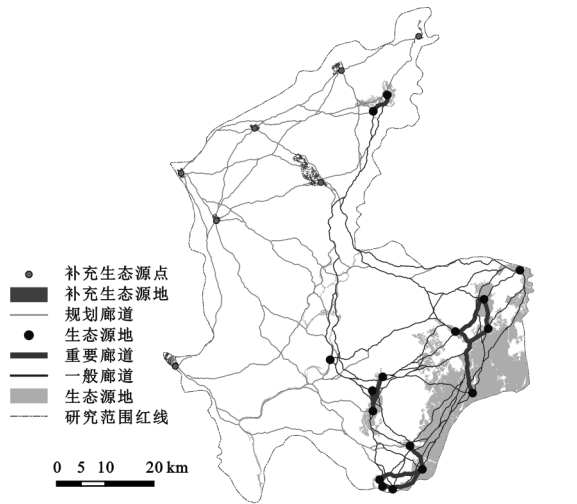


图 3 优化后研究区域生态网络体系

2.6 网络缓冲区生态敏感性分析

将优化后的“源地—廊道”生态网络体系进行分级缓冲区分析,生态网络体系 50 m 缓冲区内为极敏感区,面积为 584.91 km<sup>2</sup>;50~200 m 缓冲带为高敏感区,面积为 455.33 km<sup>2</sup>;200~500 m 缓冲带为中敏感区,面积为 631.60 km<sup>2</sup>;500~1 000 m 缓冲带为低敏感区,面积为 779.61 km<sup>2</sup>;1 000 m 缓冲带外的其他地区面积共 1 652.72 km<sup>2</sup>,为不敏感区(图 4)。极敏感区占研究区域总面积的 14.18%,其比重大于高敏感区的 11.04%,在未

来生态规划中,潜在生态网络较近范围内的缓冲区应格外注重相关法律法规的制定,禁止随意开发建设。在低敏感区与不敏感区可根据实地情况,在避让生境斑块的前提下进行适度的开发建设。

2.7 生态网络断裂点及修复措施

将从 Open Street Map 网站和 QGIS 软件获取的矢量路网在 ArcGIS 中与生态廊道叠加,得出断裂点共计 352 个。其中,一级断裂点为生态廊道与铁路交汇点,共计 116 个;二级断裂点为生态廊道与高速



路交汇点,共计 108 个;三级断裂点为生态廊道与国道交汇点,共计 128 个(图 5)。生态断裂点在平齐铁路沿线上较为集中,在未来生态保护工作中需注重在

相关生态廊道断裂点处修建桥上、桥下通道,为物种扩散提供通道;可结合实地情况建设立体绿道活动空间,调节区域小气候,满足居民日常活动需要。

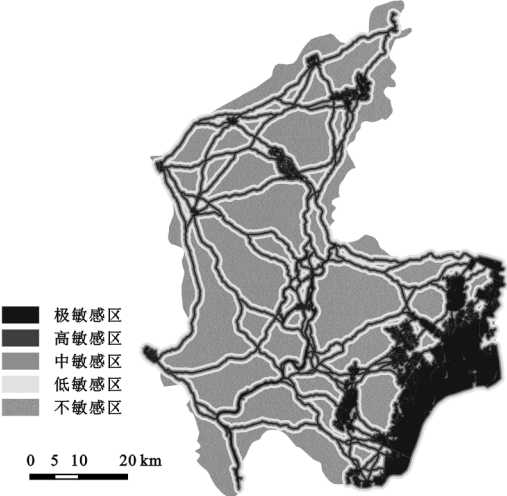


图 4 生态网络体系缓冲区评价

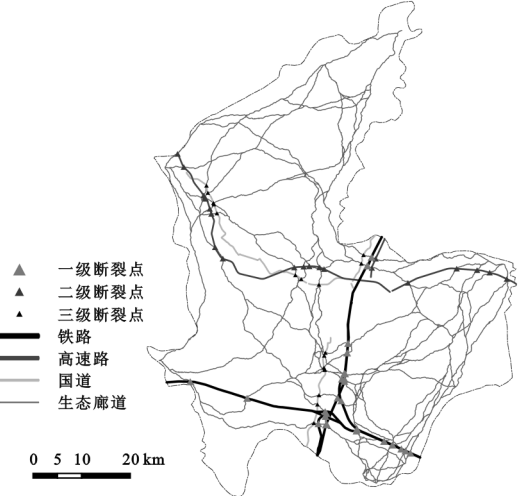


图 5 研究区域重要道路与生态断裂点分布

3 结论与讨论

3.1 结论

构建并优化生态网络能够增强区域生态系统的物质能量流动,缓解工业城市在发展建设中对生态环境产生的破坏,对城乡生态可持续发展具有重要意义。本文通过探究齐齐哈尔市主城区 2003—2017 年的土地利用变化,得出现阶段研究区域存在的生境斑块减少、斑块破碎化等生态问题,为生态网络的构建与优化提供建设方向,在东北重工业城市因地制宜的生态规划策略方面进行了一定的创新。基于形态学空间格局分析(MSPA)方法与景观连通性识别出生态源地,并结合区域景观类型与地形要素构建阻力面,基于最小累积阻力模型(MCR)识别潜在生态廊道。通过重力模型计算对廊道进行重要性分级,通过相关网络指数科学评价生态网络体系优化结果,并构建生态网络体系缓冲区作为研究区域生态敏感性分区,为后续相关部门的生态规划工作提供建设参考。研究表明:齐齐哈尔市主城区在城镇化进程中,生态斑块逐渐破碎化,生境面积减小,边缘趋于规则。核心区生态源地集中于研究区东南部的自然湿地以及穿过主城区的嫩江支流,原提取出生态源地共 16 处。重要生态廊道共计 14 条,一般生态廊道共计 106 条,主要集中于研究区东南部,在东北部亦有少量分布,而西北部的生态廊道存在连通水平不均、缺乏闭合环路等问题,生态网络体系有待完善。通过计算补充了 7 个生态源地与 133 条规划生态廊道,根据网络指数计算得出,优化后的生态网络结构连通性有了较大提升。优化后的生态网络体系共计 23 处生态

源地、253 条生态廊道,旨在为区域生态保护区划定与防护林廊道建设提供参考。根据网络体系缓冲区的生态敏感性分区得出未来规划中的重点保护区域与适度开发区域,根据 352 个生态断裂点布局得出立体绿道拟修建位置,为齐齐哈尔市相关生态规划设计策略的制定提供选址与方法借鉴。

3.2 讨论

结合前期分析,研究区域西北部耕地斑块面积较大,作为人为活动较强的区域,可能对斑块内小型林草地产生干扰破坏,应加大对此类小型斑块的保护力度,通过科学补植修复破碎林草地生境,提高区域生态系统的物质能量流动与生物多样性。本研究对东北老工业城市的生态网络构建与优化仍处于尝试探索阶段,整体研究过程中存在以下不足:首先,源地选择没有综合考虑到研究区内不同物种的生存规律差异,源地的扩充还需进一步斟酌;其次,阻力面的构建缺乏对城市人口迁移等影响因子的考虑。希望在未来研究中能够不断完善,为齐齐哈尔等工业城市的绿色建设提供更为科学的生态网络构建与优化策略。

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] De Montis A, Ganciu A, Cabras M, et al. Comparative ecological network analysis :an application to Italy[J]. Land Use Policy, 2019,81:714-724.  
[3] Foltête J C. How ecological networks could benefit from landscape graphs: a response to the paper by Spartaco Gippoliti and Corrado Battisti[J]. Land Use Policy, 2019,80:391-394.

- [4] 刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等.景观生态网络研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3947-3956.
- [5] 杜世勋,荣月静.山西省生态安全格局空间识别研究[J].水土保持研究,2017,24(6):147-153,2.
- [6] 穆博,李华威, AUDREY L M,等.基于遥感和图论的绿地空间演变和连通性研究:以郑州为例[J].生态学报,2017,37(14):4883-4895.
- [7] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010,94(3/4):186-195.
- [8] 宋利利,秦明周,张鹏岩,等.基于图论的景观图表达、分析及应用[J].应用生态学报,2020,31(10):3579-3588.
- [9] 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.
- [10] Riitters K H, Vogt P, Soille P, et al. Neutral model analysis of landscape patterns from mathematical morphology [J]. *Landscape Ecology*, 2007,22(7):1033-1043.
- [11] 史芳宁,刘世梁,安毅,等.基于生态网络的山水林田湖草生物多样性保护研究:以广西左右江为例[J].生态学报,2019,39(23):8930-8938.
- [12] Lookingbill T R, Gardner R H, Ferrari J R, et al. Combining a dispersal model with network theory to assess habitat connectivity [J]. *Ecological Applications*, 2010,20(2):427-441.
- [13] 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.
- [14] 李恒凯,刘玉婷,李芹,等.基于 MCR 模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J].地理科学,2020,40(6):989-998.
- [15] Saura S, Vogt P, Velázquez J, et al. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011,262(2):150-160.
- [16] 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.
- [17] 崔佳,臧淑英.哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应[J].地理研究,2013,32(5):848-856.
- [18] 陈晓红,周宏浩,王秀.基于生态文明的县域环境—经济—社会耦合脆弱性与协调性研究:以黑龙江省齐齐哈尔市为例[J].人文地理,2018,33(1):94-101.
- [19] 蔡天雨,徐磊,陈亚恒,等.基于生态安全的青龙满族自治县土地利用冲突识别[J].水土保持研究,2020,27(5):273-280,2.
- [20] 杨凤海,赵烨荣,宋佳佳,等.齐齐哈尔市土地生态系统服务价值时空变化研究[J].中国农业大学学报,2018,23(2):105-114.
- [21] 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.
- [22] Meng J J, Wang Y, Wang X D, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtza Basin*, 2016,25(7):1052-1061.
- [23] 高宇,木皓可,张云路,等.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[J].生态学报,2019,39(20):7547-7556.
- [24] 曹珍秀,孙月,谢跟踪,等.海口市海岸带生态网络演变趋势[J].生态学报,2020,40(3):1044-1054.
- [25] 胡远东.大庆城市异质景观形成对湖泊湿地环境与生物多样性的影响[D].上海:华东师范大学,2015.
- [26] 蒋思敏,张青年,陶华超.广州市绿地生态网络的构建与评价[J].中山大学学报:自然科学版,2016,55(4):162-170.
- [27] Graves T, Chandler R B, Royle J A, et al. Estimating landscape resistance to dispersal[J]. *Landscape Ecology*, 2014,29(7):1201-1211.
- [28] 张慧莹.基于多目标优化的泰山区域山水林田湖草生命共同体生态网络构建研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [29] 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.
- [30] 路晓,王金满,李新风,等.基于最小费用距离的土地整治生态网络构建[J].水土保持通报,2017,37(4):143-149,346.
- [31] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.干旱区城市生态安全格局优化研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J].水土保持研究,2020,27(4):336-341.
- [32] Thomas M F. Landscape sensitivity to rapid environmental change: a Quaternary perspective with examples from tropical areas[J]. *Catena*, 2004,55(2):107-124.
- [33] 朱东国,谢炳庚,陈永林.基于生态敏感性评价的山地旅游城市旅游用地策略:以张家界市为例[J].经济地理,2015,35(6):184-189.
- [34] 杨远琴,任平,洪步庭.基于生态安全格局的三峡库区腹地低丘缓坡土地开发利用[J].水土保持研究,2019,26(3):305-310,317.
- [35] 尹海伟,孔繁花,罗震东,等.基于潜力—约束模型的冀中南区域建设用地适宜性评价[J].应用生态学报,2013,24(8):2274-2280.
- [36] 官紫玲,陈顺和,赵天予.基于景观生态安全格局的县域建设用地开发策略研究:以福建省永泰县乡村振兴实践为例[J].水土保持通报,2019,39(6):199-204,322.
- [37] 陈德超,施祝凯,王祖静,等.苏州环太湖地区生态网络构建与空间冲突识别[J].生态与农村环境学报,2020,36(6):778-787.