

# 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

徐 嘉,许大为\*,曲 琛

(东北林业大学 园林学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**构建生态安全格局是保证国土空间生态安全与城市可持续发展的重要途径,对城市生态环境改善至关重要。以哈尔滨规划区为研究对象,在生物多样性、水源供给、土壤保持、碳储量服务功能评估的基础上提取生态源地,设定阻力面并通过最小累计阻力模型识别生态廊道,定量衡量与定性分析相结合构建生态安全格局。结果表明,哈尔滨市域生态系统服务呈现显著空间异质特征,东南方向高、城区中心低的分布格局;识别生态源点 17 个,提取重要生态廊道 11 条,一般廊道 40 条。划分出高、较高、中、低安全区并判别重要生态战略点 38 个,一般生态战略点 18 个;根据 78 处生态断裂点提出修复连通措施;在构建生态安全格局基础上,提出了“一轴、一带、四区”生态安全格局优化策略。综合考虑生态系统服务重要性、生态要素流动稳定性、生态结构完整性,实现从被动修复到主动适应的城市安全格局构建,为哈尔滨市域国土空间生态安全保护与城市生态可持续发展提供科学支持。

**关键词:**国土空间;生态系统服务;最小累积阻力模型;生态安全格局;哈尔滨市

**中图分类号:**X171.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)04-0304-09

Spatial Ecological Security Pattern Construction Based on Ecosystem Service Function Evaluation  
——A Case Study of Harbin

XU Jia,XU Da-wei\*,QU Chen

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

**Abstract:**Constructing the ecological security pattern is an important way to ensure the ecological security and sustainable development of the national land space,and it is crucial for the improvement of urban ecological environment. Taking the Harbin planning area as the research object,based on the evaluation of biodiversity,water supply,soil conservation,and carbon storage service functions,ecological sources were extracted,and ecological corridors were identified after calculating the resistance surface by using the minimum cumulative resistance model. Quantitative measurement and qualitative analysis were combined to construct an ecological security pattern. The results showed that Harbin's urban ecosystem services presented significant spatial heterogeneity,with a distribution pattern of high in the southeast and low in the urban center. Seventeen ecological source points were identified,11 important and 40 general ecological corridors were extracted. The study area was divided into high,relatively high,medium and low safety areas. Thirty eight important and 18 general ecology strategic points were identified. According to 78 ecological break points,restoring and connecting measures were proposed. On the basis of constructing the ecological security pattern,the optimization strategy of the "one axis,one belt,four districts" ecological security pat-

收稿日期:2022-05-25 修回日期:2022-06-16

基金项目:国家自然科学基金(42171246);黑龙江省重点研发项目(GZ20210193)。

第一作者:徐 嘉。研究方向:生态导向城市设计。E-mail:742582968@qq.com

\*通信作者:许大为,博士,教授,博士生导师。研究方向:生态导向城市设计。E-mail:xdw\_ysm@126.com

tern was proposed. The study comprehensively takes the ecology related aspects into consideration, including the importance of ecosystem services, the flow stability of ecological elements, and the integrity of ecological structure, to realize the construction of an urban security pattern from passive restoration to active adaptation, which provides a reference for the ecological security protection of Harbin's urban territorial space and regional sustainable development.

**Key words:** territorial space; ecosystem service; minimum cumulative resistance model; ecological security pattern; Harbin City

随着城镇化进程推进,人类需求与环境生态间的矛盾逐渐凸显,由此导致了水土流失、生物多样性锐减、水生态平衡失调等生态环境问题不利于城市的可持续发展<sup>[1]</sup>。生态安全格局作为实现区域生态安全的基本途径和重要保障,是国土空间优化与生态保护修复的关键层级<sup>[2]</sup>。生态安全格局构建能够针对空间尺度范围内存在的结构紊乱、功能受损或城市快速化建设进程下的区域性生态系统矛盾,通过国土要素的空间结构调整优化和生态脆弱区修复的方式,提升生态系统服务能力、促进资源合理配置、保障国土空间区域安全。

生态安全格局通过识别并保护潜在生态关键要素实现对生态过程的有效调控,从而达到优化区域内生态系统健康、生物多样性、生态系统服务持续供给的目的<sup>[3]</sup>。应用最小累积阻力模型提取生态源地、划定阻力面并判别廊道已成为生态安全格局研究的主流范式。早期的相关研究基于对空间的定性规划与定量格局分析<sup>[4-5]</sup>,近年来研究逐步进入到空间演进<sup>[6]</sup>、静态格局优化<sup>[7]</sup>、动态格局模拟<sup>[8]</sup>和状态趋势分析<sup>[9]</sup>。其中生态源地识别通常考虑生境质量<sup>[10]</sup>、形态空间格局分析<sup>[11]</sup>、生态系统服务价值评估<sup>[12]</sup>等方式提取;阻力面构建方面有根据物种迁徙规律,通过扩散模型分析<sup>[13]</sup>或者叠加城市兴趣点<sup>[14]</sup>纳入阻力面构建等方式。生态廊道的构建研究包括最小阻力模型(MCR)、模拟电路理论<sup>[15]</sup>等。各尺度研究区生态网络构建的研究不断积累、日渐成熟,已有研究为国土空间生态安全格局提供了参考思路和常用方法借鉴。但在国土空间范围中从全局角度构筑生态保护格局,优化生态空间安全格局体系仍然面临着挑战。

哈尔滨市作为中国东北地区中心城市,城区建设的无序蔓延蚕食着城市空间的生态资源,产生生态系统服务功能下降、生态脆弱性升高等问题。本研究基于生态安全格局的构建,针对哈尔滨市规划区生态环境本底特征,分别对生物多样性、水源供给、土壤保持、碳储量4种生态系统服务重要性进行评估,根据结果提取生态源地;综合考虑自然环境因素与人为干扰因素构建阻力面,运用最小阻力模型

判别重要廊道与潜在廊道;识别生态战略点和断裂点后重点保护和修复。为生态系统服务功能的正常发挥和城市可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省南部,是东北地区工业发展重要枢纽和重要粮食生产基地、是东北城镇化进程较快和资源环境变化的典型区域、也是“东北振兴”和“一带一路”倡议的重要地区。根据《哈尔滨市城市总体规划(2011—2020)》,以哈尔滨市规划区作为研究范围进行框定,哈尔滨市规划区126°—128°E,45°—47°N,其土地资源丰富,土壤类型丰富,耕地面积比重较大。哈大齐工业走廊的建设和相关产业发展对城市经济起到了带动作用<sup>[16]</sup>,快速的经济的发展使得国土空间建设用地扩张,亟须资源整合与生态安全格局优化。

### 1.2 数据来源

本研究数据来源主要包括:2020年哈尔滨规划区土地覆盖数据来自Globalland30(<http://www.globallandcover.com>),分辨率为30m;DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)30m分辨率数字高程产品;土壤数据来自于国家冰川冻土沙漠科学数据中心1:100万世界土壤数据集(<http://www.ncdc.ac.cn>);气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),年降雨量与年潜在蒸散量数据通过克里金插值法获得。NVDI数据来自美国航天局NASA的MODIS13Q1数据,分辨率为250m,经过预处理及像元统计得到2020年NDVI。夜间灯光数据来源于美国国家海洋和大气管理局官网,选取2020年月平均灯光辐射数据。行政区划以及交通数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务功能重要性评价

本研究结合哈尔滨地区的生态环境现状,从生物多样性、水源供给、土壤保持、碳储量4个主导服

务功能角度对哈尔滨市域生态系统服务进行功能量评价。采用基于生态系统服务的形成机理和作用过程的 InVEST 模型进行评估。

2.1.1 生物多样性功能评价 基于 InVEST3.10 模型中的生境质量模型计算哈尔滨规划区生境质量指数表达生物多样性,通过参考模型使用说明的基础上,最终选取水田、旱地、城镇用地、农村居民点和其他建设用地作为威胁源,根据地区实际情况参考相关研究确定 LULC 二级分类对威胁源的相对敏感性<sup>[17]</sup>。计算公式如下

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj+k}^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $Q_{xj}$  表示在  $j$  种生境类型中对应  $x$  栅格的生境质量; $H_j$  为  $j$  生境类型的生境适宜度; $D_{xj}$  为栅格  $x$  的栖息地退化度; $z$  为尺度常数; $k$  为半饱和常数。

2.1.2 水源供给功能评价 基于 InVEST3.10 模型评估水源供给服务。该模型基于 Budyko 水热耦合平衡假设计算水源供给<sup>[18]</sup>。计算公式如下

$$Y_{xj} = \left( 1 - \frac{A_{ETxj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (2)$$

$$\frac{A_{ETxj}}{c} = 1 + \frac{P_{ETxj}}{P_x} - \left[ 1 + \left( \frac{P_{ETxj}}{P_x} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (3)$$

式中: $Y_{xj}$  表示年降水量; $A_{ETxj}$  为土地利用类型  $j$  上对应  $x$  栅格的实际年平均蒸散发量; $P_x$  为栅格  $x$  的年均降雨量; $P_{ETxj}$  为栅格  $i$  上的潜在蒸散量; $\omega$  表示植被可利用含水量。

2.1.3 土壤保持功能评价 基于 InVEST3.10 的土壤保持模型,通过潜在侵蚀量和实际侵蚀量之差表示生态系统通过其结构与过程变化对生物沉积物的保留量。计算公式如下

$$S_{Di} = R_{KLSi} - U_{SLEi} \quad (4)$$

$$R_{KLSi} = R_i \times k_i \times L_{Si} \quad (5)$$

$$U_{SLEi} = R_i \times k_i \times L_{Si} \times C_i \times P_i \quad (6)$$

式中: $S_{Di}$  表示土壤保持量; $R_{KLSi}$  为潜在侵蚀量; $U_{SLEi}$  为实际侵蚀量; $R_i$  为降雨侵蚀力因子; $k_i$  为土壤可侵蚀因子; $L_{Si}$  为斜率长度梯度因子; $C_i$  为植物覆盖管理因子; $P_i$  为水土保持措施因子。

2.1.4 碳储量功能评价 基于 InVEST3.10 的土壤保持模型,通过土地利用数据结合研究区实际情况和相关研究参考建立碳池,来计算区域含碳量。计算公式如下

$$C_{total} = C_{soil} + C_{above} + C_{below} + C_{dead} \quad (7)$$

式中: $C_{total}$  为区域碳储量; $C_{soil}$  为土壤碳储量; $C_{above}$  为地上碳储量; $C_{below}$  为地下碳储量; $C_{dead}$  为死亡有机物碳储量。

## 2.2 生态源地识别

生态源地能够保持区域生态系统稳定、维持区域生态系统服务功能,是具有辐射功能的特殊生态斑块,对区域生态安全有重要意义。本研究综合生态系统服务评价重要区域作为生态源地,对生态系统服务各项指标结果进行极差标准化处理消除量纲影响。权重设置综合考虑各指标之间的相关性,将极差标准化后的生物多样性、水源供给、土壤保持、碳储量指标结果利用 ArcGIS 划分  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的 582 个网格,取 4 个指标每个网格内的平均值,利用 SPSS27.0 软件的主成分因子分析法计算主成分并确定权重。测算结果 KMO 值为 0.648,表明各生态系统服务间相关性较强,满足主成分因子分析前提条件<sup>[19]</sup>。确定权重分别为 0.34、0.25、0.27、0.14,叠加分析采用自然断点法进行分类划分为极重要、非常重要、重要、比较重要和一般重要。生态源地需要达到一定规模才能发挥作用结合研究区的区域特征,参考相关研究选取生态系统服务非常重要备选地  $>3 \text{ km}^2$  的斑块作为生态源地<sup>[20]</sup>。

## 2.3 构建阻力面

生态阻力面表示生态物质在生态源地间流动需要克服的阻力值<sup>[21]</sup>,能够反映景观生态功能和生态空间过程的趋势与可能。根据哈尔滨市域生态用地分布特点选取土地利用类型、高程、坡度和归一化植被指数(NDVI)4 个阻力因子。参考相关研究<sup>[22-24]</sup>,综合考虑寒地物种栖息地的特征结合土地类型、地形地貌和植被覆盖情况导致的生境适宜性差异、距离衰减性原理等对各阻力因子赋值。通过层次分析法确定权重,构建阻力因子判别矩阵进行一致性检验,获得权重(表 1),利用 ArcGIS10.8 软件对各阻力面加权叠加得到综合阻力面。夜间灯光数据能够综合表征人类干扰程度,因此本研究采用可表征人类活动干扰程度的夜间灯光指数修正生态阻力系数,以提升廊道准确性和合理性。

## 2.4 生态廊道提取

生态廊道是区域内能量和物质流动的载体,是保持生态过程、生态功能在区域内连通的关键生态组分<sup>[25]</sup>研究采用 MCR 模型生成阻力面并且构建生态安全网络。基于修正后的最小累计阻力面,利用成本距离分析的方法,计算源地之间的路径提取潜在廊道,廊道之间分布紧密存在重合或相似的廊道可以相互取代,通过重力模型判定潜在廊道的相对重要性。计算公式如下

$$M_{CR} = f \times \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (8)$$

式中: $M_{CR}$  表示生态源点到其他给点的最小累计阻力值; $f$  为最小累计阻力值迁移过程的正函数; $D_{ij}$



表 1 阻力因子及其权重值  
Table 1 Resistance factors and their weights

阻力因子	权重(%)	指标	阻力系数
土地利用	0.38	林地	10
		草地	30
		湿地	50
		耕地	100
		水体	200
		未利用地	700
		建设用地	1 000
高程	0.22	2~120	10
		120~230	70
		230~350	200
		350~500	500
		500~827	800
坡度	0.21	0°~7°	10
		7°~14°	100
		14°~23°	200
		23°~34°	500
		>40°	1 000
归一化植被指数	0.19	0.82~0.99	10
		0.68~0.82	30
		0.49~0.68	50
		0.21~0.49	200
		<0.21	800

为源地  $j$  到其他景观单元  $i$  的距离,  $R_i$  为经夜间灯光数据修正的综合阻力系数。

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\left[ \frac{1}{P_i} \times \ln(S_i) \right] \left[ \frac{1}{P_j} \times \ln(S_j) \right]}{\left( \frac{L_{ij}}{L_{\max}} \right)^2} \quad (9)$$

式中:  $G_{ij}$  表示源点  $ab$  之间的相互引力指数;  $N_i$  和  $N_j$  为源点  $i$  和  $j$  的权重;  $D_{ij}$  为源地  $i$  与  $j$  间标准化的引力值;  $P_i$  和  $P_j$  为源点的引力值;  $S_i$  和  $S_j$  为源地的面积;  $L_{ij}$  为源地的累计阻力值;  $L_{\max}$  为所有廊道的最大阻力值。

2.5 生态安全格局构建

由生态源地、生态廊道、不同水平生态安全区叠加组成共同构成生态安全格局。生态安全区是为了保护生态源地安全划定的区域,区域越靠近生态源地物种丰富度越高生物流遭受的阻力小,对生态源地的促进作用越明显。以最小累计阻力面为基础,参考前人研究<sup>[26]</sup>利用自然间断法进行分级,将哈尔滨市域生态安全格局分为高水平生态安全区、较高水平生态安全区、中水平生态安全区和低水平生态安全区。

生态战略点为不同生态要素之间相互流动的关键点,对提高阻力相对较大区域的生态连通性有较大作用<sup>[27]</sup>。利用 ArcGIS10.8 中提取最小累计阻力

面的山脊线、山谷线与所提取生态廊道相交提取出一级生态战略点,提取廊道间的焦点识别二级生态战略点。

生态安全格局构建过程中,生态断裂点存在不容忽视,本研究将生态廊道体系与哈尔滨市域的铁路、高速路、国道相交处为生态将矢量路网与生态廊道进行叠加得到生态断裂点,主要考虑纵横交叉的道路对生物流动产生的阻碍,并提出修复建议。

3 结果与分析

3.1 基于生态系统服务重要性的源地识别

通过 InVEST 模型对四类生态系统服务功能物质质量核算得出哈尔滨规划区生物多样性、水源供给、土壤保持、碳储量空间分布情况(图 1)。结果表明:生物多样性空间分异特征明显,关键区域主要分布在以林地为主的阿城区松峰山镇、小岭镇周围和以湿地为主的松花江流域道外区段、呼兰区段。这些地区植被覆盖面积广、物种丰富、人为干扰较小、生态环境质量高。是国家重点保护动植物的迁徙路径和栖息的关键区域。水源供给服务总量为  $4.647\ 8 \times 10^6\ \text{m}^3$  呈现以阿城区平坊镇为中心向周围辐射递减的趋势、城市中心建成区和松北区西北地区水源供给较小。哈尔滨规划区土壤保持量为  $3.232\ 7 \times 10^7\ \text{t/a}$  主要集中在阿城区,香坊区东南部分和道外区南侧。哈尔滨规划区生态系统碳储量功能为  $116.517\ 1\ \text{TgC/a}$ ,地均固碳量为  $0.804\ 1\ \text{kgC/m}^2 \cdot \text{a}$  高值区分布于阿城区,松北区南侧以及道里区北侧。将生境质量、产水量、土壤保持和碳储量结果依权重叠加,得到生态系统服务重要性评价结果(图 2)并划分 5 个等级为重要、较重要、一般重要、较不重要、不重要(表 2)。

表 2 生态系统服务功能重要性等级面积与比例

Table 2 Area and proportion of ecosystem service function importance level

评价等级	面积/ $\text{km}^2$	比例(%)
重要	915.42	12.9
较重要	748.69	10.6
一般重要	3 936.03	55.7
较不重要	896.27	7.9
不重要	557.91	12.9

生态系统服务重要区面积  $915.42\ \text{km}^2$ ,占比 12.9%;生态系统较重要值面积  $748.69\ \text{km}^2$ ,占比 10.6%;生态系统服务重要区和较重要区以林地和湿地为主,主要分布于阿城区南侧,以及松花江两侧,具有重要的水源供给和生物多样性功能为城市营养物质保持提供了有力保障。生态系统一般重要

区面积 3 936.03 km<sup>2</sup>, 占比 55.7%, 以耕地为主, 主要分布于各区县, 为国土空间生态系统服务功能效益发挥提供保障。生态系统服务较不重要区面积 896.27 km<sup>2</sup>, 占比 7.9%, 其在呼兰河两侧、道里区南岗区存在相对聚集, 其他地区零星散布于建设用地外围边缘。生态系统服务不重要区面积 557.90 km<sup>2</sup>, 占比 12.9%, 主要集中于人口分布密集的道里区、道外区、南岗区、香坊区以及松北区南侧的城市

建设区和碳储量及生物多样性较低的呼兰区南部, 其生态系统服务有待提高。

研究通过生态服务评价和面积合理化配置选取生态系统服务重要区, 备选地 > 3 km<sup>2</sup> 的斑块确定 17 个生态源地, 总面积为 873.54 km<sup>2</sup>。从生态源地用地类型来看以林地为主, 湿地次之其面积分别占 83.4% 和 10.1%, 这与哈尔滨市林地资源丰富、松花江沿岸湿地较多的地域特征有关。

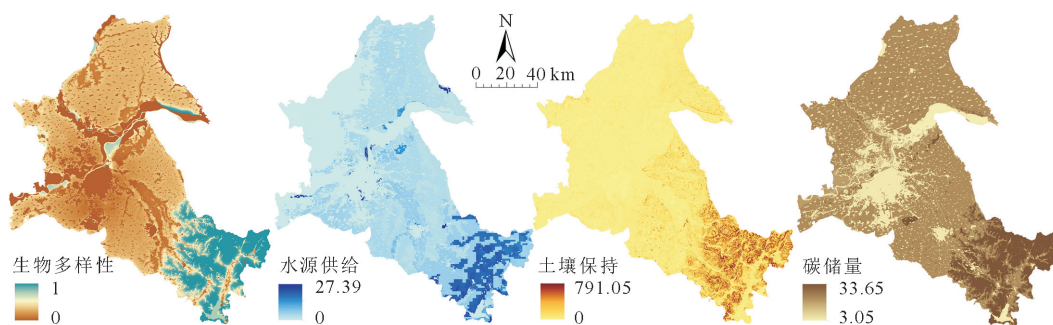


图 1 生态系统服务评价

Fig. 1 Evaluation of ecosystem services

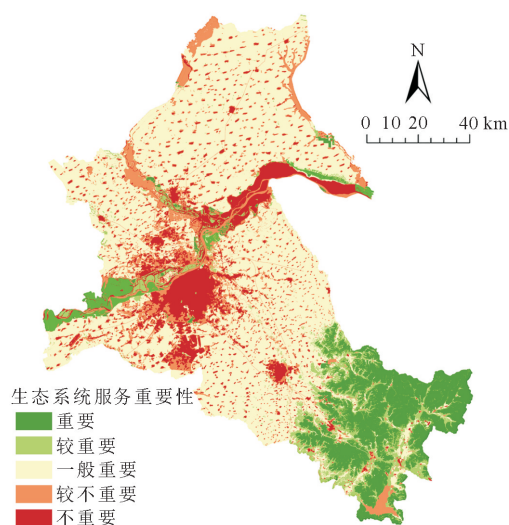


图 2 生态系统服务重要性评价结果

Fig. 2 Evaluation results of the importance of ecosystem services

### 3.2 阻力面构建

按照阻力因子得到基础阻力面, 并通过夜间灯光修正形成生态阻力面, 其空间异质性显著, 最小累积阻力值能表达空间上的阻力数值, 也反映了源地对生境的选择性和景观对物种的干扰程度。根据生态源地与综合阻力面计算耗费距离, 获得最小累积阻力面 (图 3)。阻力高值区域具有市中心且向周围区县扩散的趋势、同时具有东南处聚集, 其余地区分散的特征。阻力极高值主要以建设用地和农村居民点为主, 受城镇建设用地和人类活动频繁的影响。东南部受地形和坡度的影响阻力高值也较为聚集。且松花江流域周边阻力值极高不利于生态扩张, 因此针

对建设生态网络过程中应重点关注松花江流域。

### 3.3 生态廊道提取

采用 MCR 模型通过计算生态服务从源地至其他源地的累计阻力找到耗费最小的成本路径提取生态廊道。提取潜在廊道 136 条, 建立重力模型矩阵进行评价后剔除重复率高且引力 < 0.2 的廊道筛选出一般生态廊道共 51 条 (图 4) 总长度 1 609.69 km。其中重要廊道 11 条, 总长度 443.59 km。主要分布于阿城区、平房区和香坊区。其中位于兴隆村的核心源地通过 4 条重要廊道与呼兰河流域湿地、太阳岛湿地保护区、道里区北部、阿城区北部的重要生态景观连接。位于阿城区的核心源地通过四条廊道连接黑龙江华安自然保护区、松峰山自然保护区等重要生态保护区。参考《哈尔滨市国土空间总体规划 (2020—2035 年)》发现重要廊道分布与城市总体空间格局规划轴线相符。一般廊道在市域各

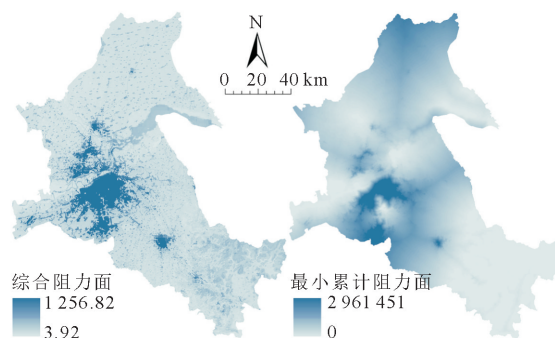


图 3 阻力面构建

Fig. 3 Construction of the resistance surface

区县均有分布,廊道沿东南向西北延伸,主要沿林地和河流水系分布,经过自然保护区和湿地。一般廊道能够保障格局的完整性和连通性,由于人为活动的影响和威胁受到的阻力影响略高于核心廊道,为保障国土空间生态安全格局的整体性和连通性,需要对一般廊道加以保护修复。

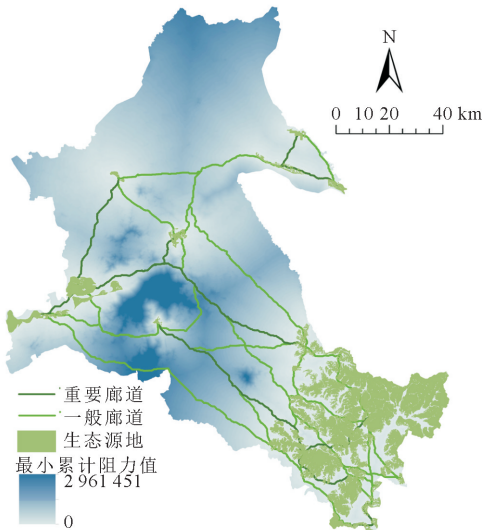


图 4 生态源地及廊道

Fig. 4 Ecological sources and corridors

3.4 生态安全格局构建

将生态源地、生态廊道、生态安全区与生态战略点叠加构建哈尔滨规划区生态安全格局(图 5)。哈尔滨市规划区生态安全格局分为高水平生态安全区、较高水平生态安全区、中水平生态安全区和低水平生态安全区(表 3)。高水平生态安全区面积 1 978.20 km<sup>2</sup>,占比 28.04%,是保护生态源地的防御区域,应以重点保护为主限制城市建设扩张,以林地和湿地水源为主应恢复和保护天然湿地、森林等资源,做好水源、水源涵养林的保护工作。较高水平生态安全区面积 2 505.50 km<sup>2</sup>,占比 35.52%,应对区域生态系统实行保护与修复并重的策略,耕地范围较大,应加大力度植树造林,对现有的耕地和其他用地布局进行优化。中、低水平生态安全区面积 1 759.80 km<sup>2</sup> 和 810.81 km<sup>2</sup> 分别占比 24.95%和 11.49%,区域生态系统服务功能较低,应在城市发展的同时兼顾生态保护。

表 3 生态安全区面积与比例

Table 3 Area and proportion of ecological safety zone		
评价等级	面积/km <sup>2</sup>	比例(%)
高水平安全区	1 978.20	28.04
较高水平安全区	2 505.50	35.52
中水平安全区	1 759.80	24.95
低水平安全区	810.81	11.49

生态战略点作为物种的跳板和转折点,最大路径与廊道的相交处影响物种的流动,但同时人为干扰严重,生态阻力较大,需要重点修复,本研究提取重要生态战略点 38 个,一般生态战略点 18 个。其中阿城区北部分布比较集中,统计发现其中 12 个生态战略点在自然保护区内,证明生态战略点是维持廊道连通性的重要区域。应以保护生态环境、提高生态环境稳定性为主进行战略性保护。

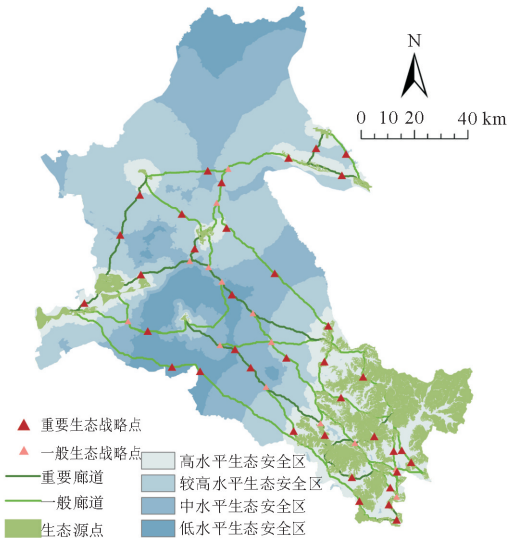


图 5 哈尔滨规划区生态安全格局

Fig. 5 Ecological security pattern in Harbin planning area

研究识别 150 个生态断裂点,集中分布于研究区中部和南部,其中位于铁路上 16 个,高速公路上 79 个,其余分布于国道上(图 6)。需在断裂点处建设生态环境空间,提升绿地面积,减少人类活动干扰,建设可供生物通行的桥上、地下通道等,可结合情况建设立体绿道空间,调节区域小气候、为物种扩散提供通道。

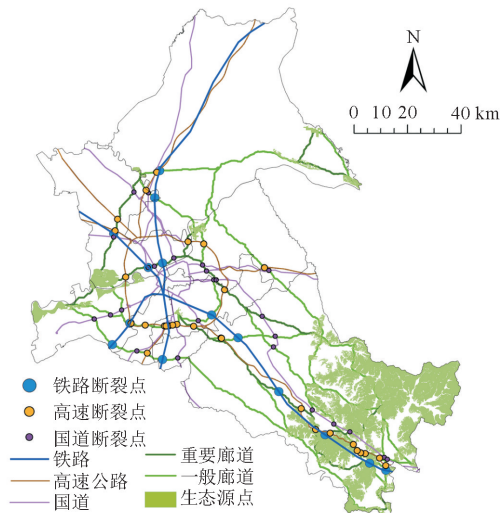


图 6 研究区重要道路与生态断裂点分布

Fig. 6 Distribution of important roads and ecological breakpoints in the study area



### 3.5 生态安全格局优化策略

生态安全格局为“被动修复”向“主动适应”的国土空间修复提供了重要的空间优化途径<sup>[28]</sup>。基于哈尔滨市域空间分布情况以及各地区生态状况,从生态保护视角出发,通过生态源地为基底,以自然廊道连通各生态功能分区,协调生态组团共同发展,进一步在生态安全格局基础上提出立足于国土安全尺度的优化策略,构筑起“一轴、一带、四区”的国土空间生态空间布局优化模式,打造协同化、复合型、多层次的生态网络空间结构(图7)。



图7 哈尔滨规划区生态安全格局优化

Fig. 7 Optimization of ecological security pattern in Harbin planning area

一轴指松花江生态廊道轴,其东西向贯穿哈尔滨规划区,实现了生态源地间信息流、能量流、物质流的有效传递。主城区生态源地分布在一轴两侧,一轴的生态安全格局构建有利于提高生态系统服务同时增加河流廊道的连通性。一带指从呼兰区贯穿至阿城区的重要生态廊道带,在南北生态斑块间构建起生态联系。4区是基于生态安全格局的保护分区,为生态农业改善区、重要水源涵养区、城市生态发展区、重要生态保育区。基于各个分区提出了优化策略,生态农业改善区位于呼兰区和松北区北部,该区域是基本农田重点建设地区,大面积耕地致使生态系统服务功能较低,生态源地面积小,考虑发展生态农业,考虑建立防护林带保护农田增加廊道连通性。重要水源涵养区位于松花江流域哈尔滨段,该区域水系发达湿地范围较为集中,也是候鸟迁徙的重要途径,道外区北侧生态系统功能较低,生态阻力较大,应构筑滨水生态缓冲带,促进南北向的源地连通,加强水环境治理与生态修复、推进湿地恢复和水生植被保护为核心的水生态修复工程。城市生态

发展区位于道里区、南岗区、平房区、香坊区、道外区城市密集建设区,该区域建设用地面积较大、生态断裂点分布相对集中,对生态廊道的修复有较大的阻碍作用,是生态保护的矛盾区,影响生态源地功能的发挥。应加强对生态环境的重点管控,多点位规划小规模生态工程,如建立道路绿化改善周边环境。重要生态保育区位于阿城区南部,该区域生态源地分布集中、生境质量高、生态阻力相对较低,区域内生态战略点分布较多,需要加强保护修复,应禁止人为因素干扰,重点保护林地资源。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

1) 哈尔滨规划区生态系统服务总体呈现主城区较低向各区县逐渐递减的趋势,其中生态系统服务高值区域重要生态功能区面积 915.42 km<sup>2</sup>,主要分布于阿城区、松北区,分布相对集中,土地利用类型以大面积的林地、湿地为主。研究通过生态服务评价和面积合理化配置利用最小累积阻力模型,识别生态源地 17 个,面积共计 873.54 km<sup>2</sup>,占生态用地的 12.97%。

2) 构建哈尔滨规划区生态安全格局,其中基于 MCR 模型构建出生态安全最小累计阻力面,具有高值区呈市中心向外扩散的趋势,呈现东南部聚焦、其余地区分散的特征。识别核心生态廊道 11 条、一般生态廊道 40 条,主要分布于河流廊道、林地丰富和地势平坦地区。识别哈尔滨规划区高水平生态安全区、较高水平生态安全区、中水平生态安全区和低水平生态安全区,不同的生态安全区应采取不同的措施共同保障国土空间生态安全。识别出重要生态战略点 38 个,一般生态战略点 18 个,为生态安全格局保护及修复提供了方向。识别生态断裂点 78 个,构建立体廊道等修复断裂点为物种扩散提供通道,促进物质流动。

3) 基于生态安全格局,提出“一轴、一带、四区”的国土空间生态安全格局优化模式。强化生态廊道与生态绿心建设,维护生态要素流动稳定,优化生态网络体系,共筑生境退化防线。为国土空间生态安全格局构建提供优化建议,对提高区域生态资源持续供给和生态系统服务能力具有积极实践意义。

### 4.2 讨论

4.2.1 生态系统服务评价及生态源地分布 本研究针对哈尔滨市域水土流失严重、生境质量退化等生态环境选取生态系统服务指标进行物质量评价划分功能等级后对源地进行提取<sup>[3,10,12]</sup>。哈尔滨市规划区虽然土地利用类型丰富,但中心城区生态系统

服务重要性较差,间接反映了人类活动对生态系统服务的负面影响,特别是北部与中部由于城市化快速发展带来的生态源地面积骤减的问题,可通过适度建设生态工程,增加生态源地的分布从而降低城市化发展造成的影响。

4.2.2 生态阻力分析及生态廊道建设 综合考虑自然环境因素和人为干扰因素对环境带来的干扰,参考相关研究<sup>[21,23]</sup>中利用夜间灯光数据对综合阻力面进行修正,结果显示,未利用地和建设用地受人为干预强度大,高阻力区分布于中心城区与城镇居民聚居区并向外逐步降低的趋势。廊道的提取对生态安全格局构建具有重要的意义,本研究利用最小阻力模型计算廊道之间的阻力形成重力模型矩阵能够判断廊道的重要性,但是没有针对研究区物种的生活特性进行针对性的重要性评价,同时缺乏对廊道宽度的规划,后续研究中应考虑对廊道系统的功能性识别与定量化评定进行精细化研究。

4.2.3 国土空间生态安全格局保护建议 生态安全格局构建顺应新时代多规合一融合的趋势、能够推进国土空间高效管理与生态文明建设。推进市域国土空间开发和保护的进程<sup>[2,28]</sup>。本研究以重点保护生态战略点,持续修复生态断裂点为基础,提出“一轴、一带、四区”的生态安全布局优化模式,为哈尔滨市域生态用地规划和建设用地布局提供一定参考。但存在对其具体建设方案、应发挥功能未进行分类设计和详细探讨的问题。在以后的研究中,生态安全格局建设应与国土空间开发利用、规划与管控进一步结合,同时还需考虑源地与廊道的脆弱区识别与保护修复措施等核心问题,进一步提高国土空间安全格局的合理性和前瞻性。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
YU C L, LIU D, FENG R, *et al.* Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 290-301. (in Chinese)
- [2] 方莹,王静,黄隆杨,等.基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例[J].自然资源学报,2020,35(1):190-203.  
FANG Y, WANG J, HUANG L Y, *et al.* Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: a case study of Yantai city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 190-203. (in Chinese)
- [3] 杜悦悦,胡熠娜,杨旻,等.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例[J].生态学报,2017,37(24):8241-8253.  
DU Y Y, HU Y N, YANG Y, *et al.* Building ecological security patterns in southwestern mountainous areas based on ecological importance and ecological sensitivity: a case study of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8241-8253. (in Chinese)
- [4] MACMILLAN R A, MOON D E, COUPE R A. Automated predictive ecological mapping in a forest region of BC, Canada, 2001-2005[J]. *Geoderma*, Amsterdam: Elsevier, 2007, 140(4): 353-373.
- [5] HUCK M, JEDRZEJEWSKI W, BOROWIK T, *et al.* Analyses of least cost paths for determining effects of habitat types on landscape permeability: wolves in Poland[J]. *Acta Theriologica*, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011, 56(1): 91-101.
- [6] RAO Y, DAI J, DAI D, *et al.* Effect of compactness of urban growth on regional landscape ecological security[J]. *Land*, Basel: Mdp, 2021, 10(8): 848.
- [7] 冯琰玮,甄江红.黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J/OL].中国农业资源与区划:1-10[2022-05-25].
- [8] 陈田田,彭立,王强.基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策[J].中国环境科学,2021,41(8):3956-3968.  
CHEN T T, PENG L, WANG Q. Scenario decision of ecological security based on the trade-off among ecosystem services[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3956-3968. (in Chinese)
- [9] KANG J, ZHANG X, ZHU X, *et al.* Ecological security pattern: a new idea for balancing regional development and ecological protection. a case study of the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01472.
- [10] 李怡,赵小敏,郭熙,等.基于InVEST和MCR模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化[J].自然资源学报,2021,36(11):2980-2994.  
LI Y, ZHAO X M, GUO X, *et al.* Optimization of ecological red line in the hilly region of Southern China based on InVEST and MCR model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11): 2980-2994. (in Chinese)
- [11] 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, ZHANG 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)
- [12] 王正伟,王宏卫,杨胜天,等.基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例[J].生态学报,2022,42(1):91-104.  
WANG Z W, WANG H W, YANG S T, *et al.* Identification and optimization strategy of ecological security pattern of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: taking Baicheng county as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 91-104.
- [13] 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*, Hoboken: Wiley, 2010, 20(2): 427-441. (in Chinese)
- [14] 李国煜,林丽群,伍世代,等.生态源地识别与生态安全格局构



- 建研究——以福建省福清市为例[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(3):120-125.
- LI G Y, LIN L Q, WU S D, *et al.* Recognition of ecological source and ecological security pattern construction: a case study of Fuqing city[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(3):120-125. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 谢婧, 李文, 贾佳, 等. 齐齐哈尔市主城区生态网络构建与优化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6):308-315.
- XIE J, LI W, JIA J, *et al.* Construction and optimization of ecological network in the main urban area of Qiqihar city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6):308-315. (in Chinese)
- [17] 李倩, 吴雅华, 李佳芯, 等. 基于生态系统服务供需关系的福州绿地生态网络构建分区[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2):238-247.
- LI Q, WU Y H, LI J X, *et al.* Construction zoning of urban green space ecological network based on ecosystem service supply and demand in Fuzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2):238-247.
- [18] XIE Z, GAO Y, LI C, *et al.* Spatial Heterogeneity of typical ecosystem services and their relationships in different ecological-functional zones in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Sustainability, Basel: Mdp, 2018, 10(1):6. (in Chinese)
- [19] 韦钧培, 杨云川, 谢鑫昌, 等. 基于服务簇的南宁市生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1):21-31.
- WEI J P, YANG Y C, XIE X C, *et al.* Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in Nanning city based on ecosystem service bundles[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(1):21-31. (in Chinese)
- [20] 周小丹, 胡秀艳, 王君楠, 等. 江苏省土地生态网络规划中源地的选取研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8):1746-1756.
- ZHOU X D, HU X Y, WANG J Y, *et al.* Study on the selection of source sites in the land ecological network planning of Jiangsu Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8):1746-1756. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 王海云, 匡耀求, 文薪荐, 等. 粤港澳大湾区生态网络构建及廊道优化研究[J]. 中国环境科学, 2022(5):1-16.
- WANG H Y, KUANG Y Q, WEN X J, *et al.* Study on ecological network construction and corridor optimization in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. China Environmental Science, 2022(5):1-16. (in Chinese)
- [23] 张慧, 邱凯玉, 王宇瑶, 等. 农业主产区土地生态安全格局构建——以克东县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6):274-282.
- ZHANG H, QIU K Y, WANG Y Y, *et al.* Construction of land ecological security pattern in main agricultural production areas——taking Kedong county as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6):274-282. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 张豆, 渠丽萍, 张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7525-7537.
- ZHANG D, QU L P, ZHANG J J. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: a case study of Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7525-7537. (in Chinese)
- [26] 朱陇强, 郭泽呈, 肖敏, 等. 半干旱区县域生态安全格局构建研究——以临洮县为例[J/OL]. 生态学报, 2022(14):1-13 [2022-05-25].
- [27] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 等. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究[J]. 生态学报, 2020, 40(23):8417-8429.
- WU J S, LUO K Y, MA H K, *et al.* Ecological security and restoration pattern of Pearl River Delta, based on ecosystem service and gravity model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23):8417-8429. (in Chinese)
- [28] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1):3-13.
- PENG J, LV D N, DONG J Q, *et al.* Processes coupling and spatial integration: characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1):3-13. (in Chinese)