基于 PLUS-MOP 模型构建韧性城市生态网络*

李雨泽[1,2] 袁静远[1,2] 吴 冰[1,2] 刘晓光[1,2]

1 哈尔滨工业大学建筑学院 哈尔滨 150000

2 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室 哈尔滨 150000

摘要：城市化导致的土地利用变化是城市生态系统退化的主要原因，加强生态网络的韧性有利于提高生态效益。为使生态网络更好地适应未来城市的发展，以哈尔滨为例，基于 PLUS-MOP 模型，从土地利用演进的角度出发，构建 2030 年哈尔滨市生态网络的 3 种模拟情景，并从结构韧性和功能韧性两个维度对其进行韧性评估。结果表明：1）生态网络结构韧性的提升与源地破碎程度、生态廊道长度及网络传递性有关；2）生态网络的功能韧性与重要节点数量和节点删除方式密切相关，比较去除重要节点前后生态网络韧性的变化，有助于精细化识别关键生态节点。最后，针对哈尔滨市生态空间开发和未来发展规划提出相关建议，即保护关键节点的完整性、提升关键节点间的连通性、加强对踏脚石的保护和规划，以期为探索适应长期外部变化的城市生态网络提供新思路。

关键词：土地利用模拟；城市生态网络；网络韧性；PLUS-MOP 模型

DOI：10.12169/zgcsly.2023.01.13.0001

Building a Resilient Urban Ecological Network Based on PLUS-MOP Model

Li Yuze[1,2] Yuan Jingyuan[1,2] Wu Bing[1,2] Liu Xiaoguang[1,2]

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology for Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Land use change out of urbanization is the main cause of urban ecosystem degradation, and strengthening the resilience of ecological networks is conducive to improving ecological benefits. In order to promote better adaptation of the ecological network to future urban development, this paper constructs three simulation scenarios of ecological network in Harbin City in 2030 using PLUS-MOP model from the perspective of land use evolution and assesses their resilience in the two dimensions of structural resilience and functional resilience. The results show that: 1) The enhancement of structural resilience of ecological networks is related to the degree of source fragmentation, ecological corridor length and network transmissibility; 2) The functional resilience of ecological networks is closely related to the number of important nodes and the way to remove. Comparing the changes in ecological network resilience before and after removing important nodes can help further identify key ecological nodes. Suggestions are proposed for ecological space restoration in Harbin, including the conservation of the integrity of key nodes, the improvement of connectivity between key nodes, and more emphasis on the protection and planning of stepping stones, aiming to provide new ideas for exploring the urban ecological networks that can adapt to the long-term external changes.

Keywords: land use simulation; urban ecological network; network resilience; PLUS-MOP model

收稿日期：2023-01-13

第一作者：李雨泽（1997-），女，硕士生，研究方向为韧性城市与可持续发展。E-mail：20s034131@stu.hit.edu.cn

通信作者：刘晓光（1969-），男，博士，副教授，研究方向为景观生态规划。E-mail：lxg126@126.com

联合国（2018 年）预测，到 2050 年，将有 68%的人口居住在城市地区，城市化已经成为 21 世纪的必然趋势。高强度的资源开发和大规模土地利用方式的改变直接影响了区域生态系统的结构和功能。过度建设干扰生态过程导致出现了城市景观碎片化，物种减少等问题，这严重威胁了城市的可持续发展[2]。韧性是在严重压力下抵抗并从中适应或转换的能力[3]。面对未来可能的各种干扰和冲击，构建有效性更长、韧性程度更高的城市生态网络，成为城市化进程中不容忽视的重要问题。

城市生态网络（Urban ecological network，UEN）是一种关键景观要素的空间格局。通过生态廊道将景观中的生态斑块连接起来，减少景观碎片化对物种生存和资源利用的负面影响[4]。UEN 可以整合现有生态要素，在恢复中断的生态过程方面具有显著优势，目前被认为是实现区域生态安全、促进社会可持续发展的重要保障和基本途径。韧性的生态网络不仅有利于生物多样性的发展，也为经济与社会的和谐发展提供了空间布局[5]。“确定生态源地-建立生态阻力面-识别骨干生态廊道”是 UEN 构建的基本范式[6-7]。然而，目前大部分研究都是选取当前时空下生境较好的绿地斑块作为生态源地，提取生态廊道[8-9]。这种静态的视角，忽略了自然和人为因素导致的土地利用演进[10]，无法满足复杂多变的生态系统与空间格局[11]。因此，为了构建未来 10 年或者更长时间内适用的城市生态网络，研究需要考虑是否可以预测土地利用变化的未来方向以探索 UEN 的韧性。

近年来，已有研究开始聚焦于网络格局的模拟预测与综合优化。例如，吴榛等[12]通过 CA-Markov 模型模拟未来城市扩张情景下的土地利用，利用“源地—廊道—网络”理论构建生态网络；林伊琳等[13]通过 FLUS 模型（Future Land-UseSimulation，FLUS）预测滇中城市群 2030 年 3 种情景下的生态安全格局。但是，这些研究都是基于正面视角评价构建后的 UEN 状况，对于网络的危机应对能力与可持续发展问题鲜有提及。韧性是能够有效适应长期外部变化的能力[14]。韧性低的 UEN 在面对外界干扰时可能出现生态斑块破碎甚至消失的问题。本研究从结构韧性和功能韧性两个维度对未来情景下的 UEN 进行分析，进而判断其是如何遭受影响的，以实现衡量韧性的目的。

在土地利用变化预测的研究中，国内外学者采用了如系统动力学[15]、ANN-CA[16]、CLUE-S[17]、FLUS[13]等诸多模型对城市未来土地利用发展进行模拟计算。其中，梁迅等[18]提出的 PLUS 模型相较于以往常用的模型模拟精度更为准确。模型通过耦合自然、社会、经济因素，能够时空动态地模拟多种土地利用类型的斑块级变化。由于每种情景下都有各自发展的子目标，为使各子目标都尽可能地达到最优解，研究耦合多目标优化（Multi-Objective Optimization Problem，MOP）算法与 PLUS 模型，设置多个发展场景，并各自设定了目标函数与约束条件，以实现在各种政策优先导向下未来土地利用变化的模拟预测。

本文通过 MOP-PLUS 模型模拟哈尔滨市 2030 年 3 种政策导向下的土地利用情景；构建基于现状和 3 种情景模拟下的城市生态网络，并对其进行韧性评估；对比分析各种情景下的城市生态网络得出生态网络韧性变化的原因，并为哈尔滨市生态空间开发和未来发展规划提出建议。研究旨在通过动态模拟与博弈分析土地利用变化对生态环境的影响机理，提供利于区域生态稳定的景观途径，为统筹经济发展与生态保护提供参考。

1 研究区概况

哈尔滨市（125° 42′—130° 10′ E，44° 04′—46°40′N）位于中国东北平原东北部，地处东北亚中心区域，面积 53 068 km^2。地形平坦，河流纵横，平原辽阔。哈尔滨市属于大陆性季风气候，冬长夏短，是典型的寒地城市。受漫长的冬季极端气候影响，生态系统内部结构相对不稳定，生态敏感性高，易受外部扰动作用影响。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究采用的哈尔滨市土地覆被类型数据来源于中国国家地理信息中心（http://www.globeland30.org/）的 GlobeLand30 数据集（空间

分辨率为 30 m）；高程数据来自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）；气象数据及社会经济数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/）和国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.cn）；其他相关矢量数据主要来源于国土三调数据。

2.2　研究框架

根据哈尔滨市 2000、2010 和 2020 年的土地利用模拟 2030 年 3 种情景下的土地利用景观格局。据此构建不同时空状态下的潜在生态廊道，并对其进行结构特征和抗毁性分析以衡量不同情景下城市生态网络的韧性程度（图 1）。

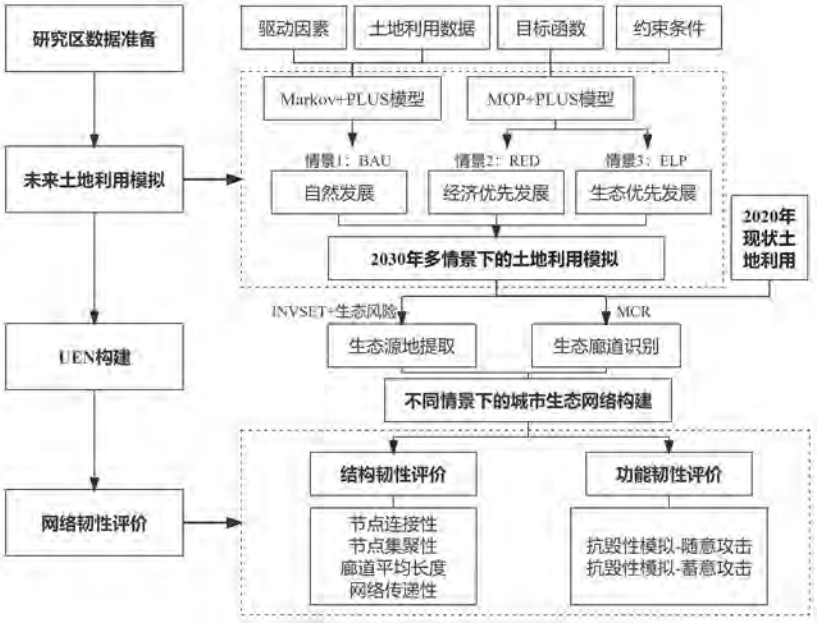


图 1　研究框架

2.3　多情景模拟

2.3.1　PLUS 模型

1）驱动因子设置。根据研究区实际情况，最终选取 13 个驱动因子，分别为人口密度、国内生产总值、夜间灯光数据、到一级道路的距离、到二级道路的距离、到居住区的距离、到高速公路的距离、到铁路的距离、土壤类型、年平均温度、年平均降水量、高程和坡度。并将水域、自然保护区和特殊地区设为禁止转换区。

2）邻域权重设定。邻域权重区间为［0，1］，反映不同土地利用类型的扩张强度[18]。越接近 1 表示扩张能力越强。扩张强度通过斑块类型尺度上面积（TA）的变化规律计算（式 1）[19]，邻域权重设置如表 1。

$$X^* = \frac{x - \min}{max - min} \tag{1}$$

式（1）中：X^* 表示离差标准化值；max 为 TA 最大值；min 为 TA 最小值；x 表示邻域权重。

表 1　邻域权重参数

2010—2020 年	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
TA 变化量	113 823	33 339.25	23 092.50	37 222	64 078.75	1 680.75
邻域权重	0	0.83	0.51	0.85	1	0.65

3）模型验证。通过 2020 年模拟图与 2020 年实际土地利用图对比，进行精度验证，得到 kappa 系数为 0.85，总体精度为 0.91。说明其模拟精度较高，可以用于 2030 年哈尔滨的土地利用模拟。

2.3.2　MOP 算法

为合理协调经济发展和生态保护，研究设计了 3 种场景（BAU，RED，ELP），其中 BAU 情景（自然发展）是根据土地利用变化的历史趋势生成的，没有政策干预的基线状态；RED 情景（经

济优先发展）的目标是最大限度提高经济效益；ELP 情景（生态优先发展）的目标是最大限度提高生态效益。本研究使用 MOP 算法，以经济效益、生态系统服务价值、生态容量为优化目标对 2030 年每种土地利用类型在 RED 和 ELP 两种情景下的面积变化进行预测。

2.4 生态网络构建

2.4.1 生态源地综合识别

本研究从生态功能重要性和景观生态风险两方面进行源地的识别[20-21]，将生境的功能重要性和景观生态风险加权，选取功能重要性高且生态风险低的区域作为生态源地，保留的最小斑块面积为 600 hm^2。

2.4.2 生态廊道构建

本研究构建了指标体系（表 2），以衡量物种迁移过程中的阻力大小。通过连接生态源地之间的最小累计阻力构建潜在生态廊道。

表 2 不同影响因素的阻力值和权重

驱动力	阻力因子						
	自然禀赋		人类开发				环境响应
阻力值	土地类型	坡度/（°）	距离高速的距离/km	距离铁路的距离/km	距离水体的距离/km	人口密度/（人·km^{-2}）	NDVI
1	林地	<3	>3	>3	<0.1	<3	>0.82
2	耕地	3~8	2~3	2~3	0.1~0.4	3~10	0.72~0.82
3	草地和未利用地	8~15	1~2	1~2	0.4~0.7	10~25	0.62~0.72
4	水域	15~25	0.5~1	0.5~1	0.7~1	25~50	0.42~0.62
5	建设用地	>25	<0.5	<0.5	>1	>50	<0.42
权重	0.3	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15

2.5 韧性评价

2.5.1 生态网络的结构特征

1）连接度。平均连接度是网络中每个生态节点的平均度数，是衡量复杂网络节点特征的有效参数之一[22]。平均连接度高，说明生态节点与其他节点连接数目多，生态网络的连接度强。连接度表示如下：

$$C = \sum_i d_i / n \tag{2}$$

式（2）中：C 是网络的平均连接度；d_i 是节点 i 的度数；n 是生态网络的节点总数。

2）集聚度。聚类系数表示连接的节点也与其他节点互连的概率，可以使用平均聚类系数来观察整个网络的聚类程度。集聚度[23]表示如下：

$$A = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{2E_i}{d_i(d_i - 1)} \tag{3}$$

式（3）中：A 是平均聚类系数；E_i 是节点 i 的相邻节点间的实际连接数；d_i 是节点 i 的度数；n 是生态网络的节点总数。

3）平均廊道长度。平均廊道长度是衡量生态廊道基本特征的重要参数，在生态网络中，平均路径越长则生物的流动效率越低。

4）传递性。网络效率是网络传递性的直接体现，该值越小，网络的稳定性越差。研究选择全局效率[23]作为衡量指标，具体表示如下：

$$E = \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{l_{ij}} / n(n - 1) \tag{4}$$

式（4）中：E 是全局效率，取值范围是 [0，1]；l_{ij}表示网络节点 i 和 j 之间的最短路径；n 是生态网络的节点总数。

2.5.2 抗毁性分析

生态网络的功能韧性可以预测生态网络在面对冲击时的运行能力[23]。研究根据图论的方法，不考虑其面积变化，将生态节点抽象为点、生态廊道抽象为线，制作无向生态网络拓扑图，并对网络进行随机攻击和蓄意攻击，每次使一个节点失效，完成对所有生态节点的模拟冲击。随机攻击中，取攻击 20 次的平均值作为结果以避免偶然性；蓄意攻击中，按照节点重要程度排序依次进行攻击。攻击结果通过连通鲁棒性和脆弱鲁棒性两个网络韧性评估的重要指标表征[24]。

3 结果与分析

3.1 未来土地利用模拟

基于 2020 年土地利用数据，模拟得到哈尔滨

市 2030 年的 3 种土地利用变化结果（图 2）。除了 RED 情景外，其他情景下的耕地都明显处于流出状态。由于耕地发展主要受到经济因素的推动，因此在 RED 情景下原有耕地面积基本保持不变。BAU 情景下的耕地主要转化为水体和建设用地。ELP 情景下的耕地主要转化为林地和水体，且林地面积围绕原有林地边缘增加。此外，各情景下的建设用地都沿着哈尔滨主城区持续蔓延，其中 BAU 情景下增长速度最快。总体而言，耕地面积呈现减少趋势，而林地和建设用地呈现上升趋势。

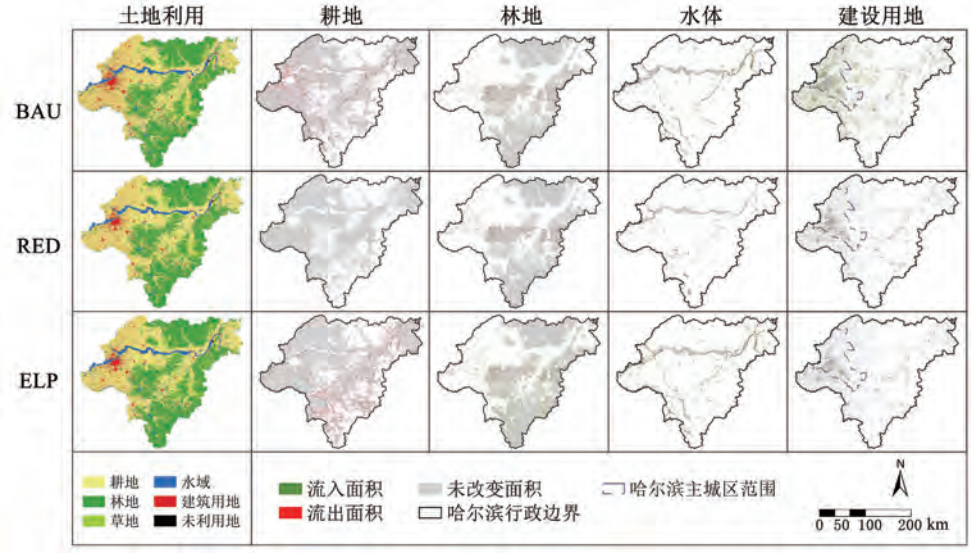


图 2　2030 年 3 种情景下的土地利用格局及变化

3.2　各情景下的城市生态网络

由表 3 和图 3 可知：RED 情景下的生态源地数量最多，但面积占比最小，源地更为破碎；ELP 情景的生态源地面积占比最大，但源地数量最少。此外，区域①②（尚志市周边）的生态源地在不同情景下面积变化明显，说明此处生态系统不够稳定，易受外界干扰，需要在规划中进行重点保护。在空间分布方面，西侧的生态源地整体较少，这可能与哈尔滨主城区位于西侧有关。源地的空间分布影响了生态廊道的连接。BAU、RED 和 2020 年区域①②斑块的破碎程度高，导致生态廊道长度增加，为物种迁徙增加了难度。

表 3　生态源地的特征指标

源地情景	源地数量/个	源地面积/km²	占总面积百分比/%
BAU	27	20 351	38.35
RED	38	19 371	36.5
ELP	20	20 722	39.05
2020 年	34	20 332	38.31

3.3　韧性评价

3.3.1　城市生态网络的结构特征

由表 4 可知：2020 年生态网络节点的连接度和聚集度最高，ELP 情景下最低，说明生态节点与其他节点连接数目较多，节点间互联概率也较大；ELP 情景下生态廊道长度最短，说明生物在廊道中的流动效率最高。此外，RED 情景下生态网络的传递性最差，表明生物或生态事件的结果在整个网络中传播速度最慢，生态网络稳定性最低，ELP 情景则与之相反。因此，生态网络结构韧性的提升与生态廊道长度及网络传递性有关，廊道长度越短，网络传递性越好的生态网络韧性越高。

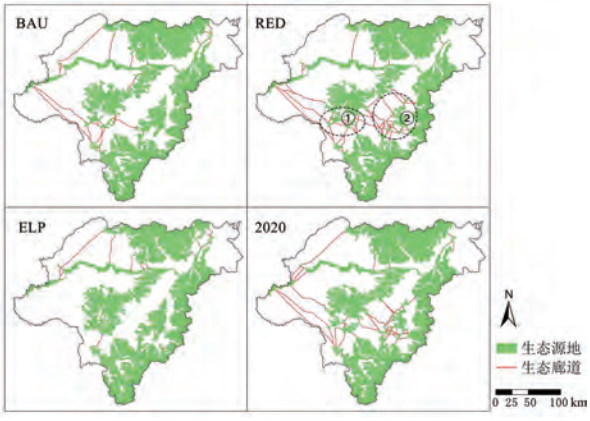


图 3　2030 年 3 种情景和 2020 年现状的城市生态网络

表 4 UEN 的特征指标

网络情景	节点连接度	节点集聚度	廊道平均长度	网络传递性
BAU	3.220 8	0.070 1	14.22	0.254 6
RED	3.367 3	0.104 8	13.9	0.232 5
ELP	2.981 8	0.057 6	9.21	0.270 8
2020 年	3.400 0	0.159 2	12.31	0.253 0

3.3.2 抗毁性分析

判断节点在面对破坏性事件时生态网络的运行能力是衡量网络功能韧性的必要条件。本研究模拟了不同攻击方式下生态网络的连通鲁棒性(图 4)，其初始值均大于 0.95，说明未遭受攻击时生态网络的自身连通能力都比较好。随机攻击下，各情景生态网络崩溃时的节点删除比例相近且下降趋势基本一致，说明网络连通能力相似；蓄意攻击下，BAU 情景的生态网络最先崩溃，ELP 情景连通性最高。此外，在节点删除比例为 15%~20%时，BAU、RED 和 2020 年网络的连通鲁棒性急剧下降。ELP 情景下生态网络的连通鲁棒性无明显拐点，说明网络在重要节点遭受破坏后仍然能保持稳定。

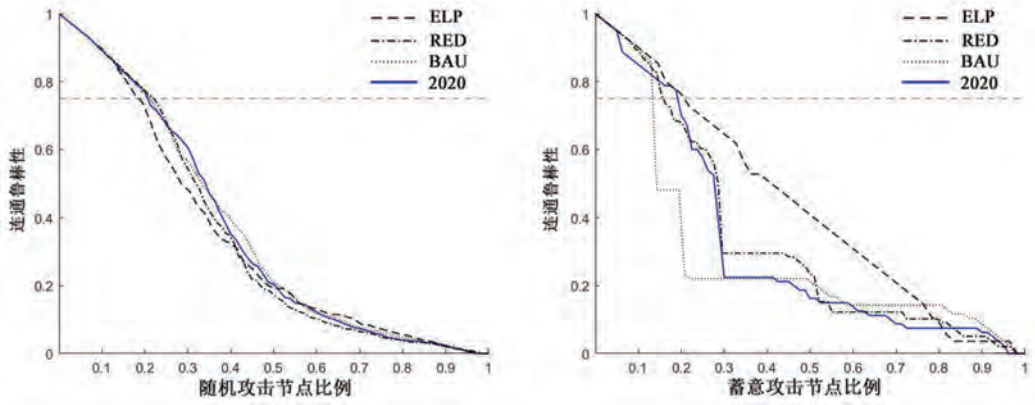


图 4 生态网络在不同攻击方式下的连通鲁棒性

由图 5 可知，脆弱鲁棒性中，ELP 情景下的初始值最大，网络未受攻击时运行效率最好。RED 情景的初始值最低，这可能与追求经济效益最大化，城市化水平最高有关。随着生态节点的删除，脆弱鲁棒性均呈线性下降趋势，且蓄意攻击下的下降速度较随机攻击更快；在随机攻击网络节点的模拟中，节点下降趋势基本一致。当重要程度高的节点遭受攻击后，BAU、RED 和 2020 年的生态网络脆弱鲁棒性急剧下降，ELP 情景依然稳步降低，说明 ELP 情景的生态网络运行效率明显高于其他 3 种情景，这与连通鲁棒性的变化趋势基本一致。

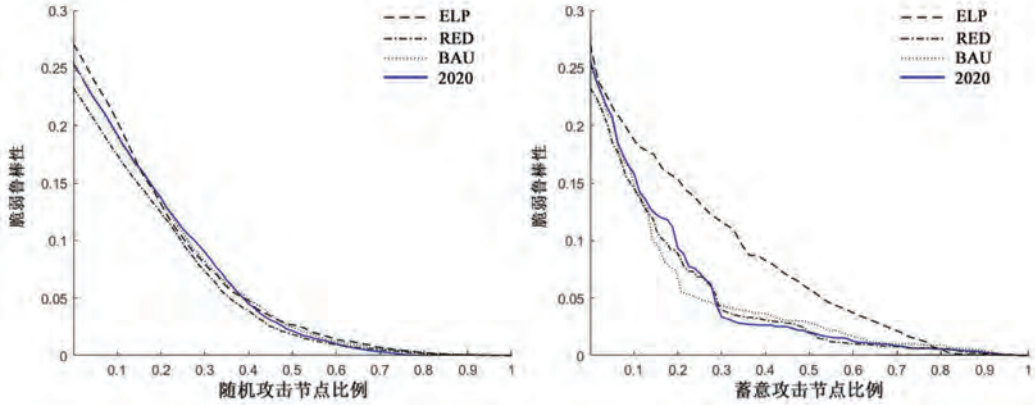


图 5 生态网络在不同攻击方式下的脆弱鲁棒性

总体来看，当重要节点数量减少后，网络韧性均呈现下降趋势。同时，攻击的方式不同，网络的下降速率不同：在随机攻击中，虽然韧性程度下降，但并无明显拐点；在蓄意攻击重要程度高的生态节点减少后，连通鲁棒性和脆弱鲁棒性呈断崖式下降，网络迅速崩溃。

4　讨论

本文识别出了哈尔滨市的主要生态源地，这与陆明和曲艺[25]通过生态系统服务功能评估确定的核心源地位置基本一致，只是面积大小有所不同。源地位置一致主要是由于关键生态要素对生态网络韧性十分重要，一旦消失极易导致网络崩溃，但面积变化说明了不同节点的韧性范围不同。源地大小变化明显说明节点稳定性不足，易受外界因素影响，需要重点保护，为此，提出如下建议：一是保护关键节点的完整性。关键节点遭受人为或自然因素干扰将导致生态网络功能韧性大幅降低，因此建议严格保护关键生态节点的完整性，将周围林地作为生态网络的一部分，增加资源面积，丰富生物物种，提高生境质量。二是提升关键节点间的连通性。节点连通性的提升应根据关键节点的分布特征，实施空间分布的控制和保护措施。例如，通过廊道将重要程度高且较为孤立的节点连接，以提升生态网络的连通性，增强生物的扩散能力。三是加强对踏脚石的保护和规划。踏脚石的合理增加可以提升生态网络的结构韧性，为迁徙物种提供临时的栖息地，特别是迁徙距离长的物种，因此建议结合重要生态走廊的交叉点和节点在生态网络中的重要性程度，选择合适的斑块作为踏脚石，增强哈尔滨的城市生态网络韧性和区域生物多样性。

本文模拟不同情景下的网络韧性结果，不仅为生态保护管理策略提供数据支撑，也为探索适应长期外部变化的城市生态网络提供了新思路，但还存在值得进一步探讨的问题：首先，有必要对生态网络结构韧性和功能韧性之间的相关性进行分析，以便于更加精准的识别哪些节点和走廊是冗余的。其次，模型模拟预测的准确性仍然有提高的空间。最后，在对生态网络进行抽象的过程中，忽略了生态源地实际面积的大小对网络韧性的影响。因此，如何探究源地周边环境和面积大小对网络韧性的具体影响也是实际优化过程中需要考虑的现实问题和未来的研究方向。

5　结论

本文从土地利用变化出发，通过 PLUS-MOP 模型预测了 2030 年土地利用的 3 种演进方向，构建不同情景下的城市生态网络，并将网络特征分析与抗毁性分析相结合，为生态空间开发提出建议。得出结论如下：

1）生态网络结构韧性的提升与源地破碎程度、生态廊道长度及网络传递性有关。源地破碎化程度高、廊道路径长且传递性差的生态网络韧性最低，在受到攻击时最先崩溃。因此，建议减少源地破碎化，并且在较长廊道中寻找合适的斑块作为次要节点，起到垫脚石的作用。通过平衡节点数量、面积和走廊长度以优化生态网络结构。

2）生态网络的功能韧性与重要节点数量和节点删除方式密切相关。生态网络对人为干扰的敏感性高于对非人为干扰的敏感性。节点的度数越高，在生态网络中的重要程度越大，对生态网络功能韧性的影响越大。比较关键节点删除前后生态网络韧性的变化，有助于精细化识别关键生态节点；为实现生态网络的功能最大化，通过抗毁性模拟提前识别和选择供给能力强、对网络稳定影响程度大的生态资源作为主要节点十分必要。

参考文献

[1]周媛,陈明坤,黎贝,等.基于空间连通性动态变化的城市绿地生态网络优化[J].中国城市林业,2023,21(4):23-32.

[2]刘颂,刘蕾.基于生态安全的区域生态空间弹性规划研究:以山东省滕州市为例[J].中国园林,2020,36(2):11-16.

[3]BÜYÜKÖZKAN G,ILICAK Ö,FEYZIOĞLU O.A review of urban resilience literature[J].Sustainable Cities and Society,2022,77:103579.

[4]ZHAO S M,MA Y F,WANG J L,et al.Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,46:126479.

[5]KANG J M,ZHANG X,ZHU X W,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.

[6]叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.

[7]马驰骋,杨东峰,李康康.基于电路理论的高原寒地县域生态网络构建[J].中国城市林业,2023,21(5):95-102.

[8]高梦雯,胡业翠,李向,等.基于生态系统服务重要性和环境敏

感性的喀斯特山区生态安全格局构建:以广西河池为例[J].生态学报,2021,41(7):2596-2608.

[9]周青青,陈仲光,张文兵,等.基于城市蓝网保护的福州市重要生态网络识别[J].中国城市林业,2022,20(5):84-91.

[10]TAHMASEBI T,KARAMI E,KESHAVARZ M.Agricultural land use change under climate variability and change:Drivers and impacts[J].Journal of Arid Environments,2020,180:104202.

[11]易浪,孙颖,尹少华,等.生态安全格局构建:概念、框架与展望[J].生态环境学报,2022,31(4):845-856.

[12]吴榛,张凯云,王浩.城市扩张情景模拟下绿地生态网络构建与优化研究:以南京市部分区域为例[J].中国园林,2022,38(4):56-61.

[13]林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于MCR-FLUS-Markov模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170,207.

[14]陈梦远.国际区域经济韧性研究进展:基于演化论的理论分析框架介绍[J].地理科学进展,2017,36(11):1435-1444.

[15]赵俊三,袁磊,张萌.土地利用变化空间多尺度驱动力耦合模型构建[J].中国土地科学,2015,29(6):57-66.

[16]YANG X,CHEN R,ZHENG X Q.Simulating land use change by integrating ANN-CA model and landscape pattern indices[J].Geomatics,Natural Hazards and Risk,2016,7(3):918-932.

[17]PENG K F,JIANG W G,LING Z Y,et al.Evaluating the potential impacts of land use changes on ecosystem service value under multiple scenarios in support of SDG reporting:a case study of the Wuhan urban agglomeration[J].Journal of Cleaner Production,2021,307:127321.

[18]LIANG X,GUAN Q F,CLARKE K C,et al.Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model:a case study in Wuhan,China[J].Computers,Environment and Urban Systems,2021,85:101569.

[19]王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置:以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

[20]陈妍,乔飞,江磊.基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):553-562.

[21]谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.

[22]HU F N,CHEN L J,CHEN J.Robustness evaluation of complex power grids containing renewable energy[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,132:107187.

[23]KIM Y,CHEN Y S,LINDERMAN K.Supply network disruption and resilience:a network structural perspective[J].Journal of Operations Management,2015,33:43-59.

[24]傅丽华,莫振淳,彭耀辉,等.湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略[J].地理学报,2019,74(7):1409-1419.

[25]陆明,曲艺.基于生态系统服务功能的区域生态网络构建:以哈尔滨为例[J].中国园林,2017,33(10):103-107.