

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230222

# 耦合 Graphab-PLUS 模型的生态网络动态评估框架 ——以北京市中心城区为例

李豪<sup>1</sup> 吴明豪<sup>2</sup> 詹芳芷<sup>1</sup> 李虹烨<sup>1</sup> 张翔<sup>3</sup> 刘志成<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 2. 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518060;

3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

**摘要:**【目的】探索适应城市动态发展和政策引导下的城市生态网络评估框架, 为生态网络的精准化建设提供发展导向和前瞻布局。【方法】以北京市中心城区为研究对象, 基于 2005 年和 2020 年两期土地利用数据, 使用 PLUS 模型对 3 种城市发展情景下 2035 年的土地利用进行模拟, 借助 Graphab 计算不同情景下生态网络的景观连通性指标, 构建生态网络动态评估框架, 厘清问题并探讨中心城区的生态建设方向。【结果】(1)在总体规划发展情景下, 建设用地的扩张强度得到控制, 呈现出分散式发展的趋势, 整体绿色空间发展状态向好; 城市扩张发展情景下建设用地向周边用地强烈扩张。(2)2005—2020 年间, 中心城区的连通概率指数( $P_C$ )下降了 29.1%, 城市生态网络有所退化。总体规划发展情景的生态网络状态改善显著,  $P_C$  涨幅为 62.6%; 而城市扩张情景加重了生态退化的趋势,  $P_C$  降幅为 38.6%。(3)在个体水平上, 连通概率变化指数等级分布呈现西北高, 东南低的格局。总体规划发展情景下, 整体网络结构趋于完整, 较高等级要素数量增加; 城市扩张发展情景下整体网络结构愈发支离破碎, 要素等级退化显著。(4)动态评估框架上, 中心城区倾向低基底特征, 各区网络特征差异显著。【结论】研究通过耦合 Graphab-PLUS 模型, 探索了城市生态网络的评估方法, 构建了“基底-韧性-潜力”的三维度动态评估框架, 为明确区域生态发展导向和支撑国土空间规划提供科学依据。提出了中心城区生态网络的优化建议: 整体上补足区域生态短板, 加强东南片区生态建设; 在分区优化方面, 优先提升海淀区生态网络的整体功能, 着重保护石景山区的生态资源, 并注重东西城区网络要素的系统性建设。

**关键词:** 生态网络; 景观图论; 情景模拟; 景观连通性; 北京市中心城区

**中图分类号:** TU984 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0095-11

**引文格式:** 李豪, 吴明豪, 詹芳芷, 等. 耦合 Graphab-PLUS 模型的生态网络动态评估框架——以北京市中心城区为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 95-105. Li Hao, Wu Minghao, Zhan Fangzhi, et al. A dynamic assessment framework of ecological networks coupled with Graphab-PLUS model: a case study in the central area of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 95-105.

## A dynamic assessment framework of ecological networks coupled with Graphab-PLUS model: a case study in the central area of Beijing

Li Hao<sup>1</sup> Wu Minghao<sup>2</sup> Zhan Fangzhi<sup>1</sup> Li Hongye<sup>1</sup> Zhang Xiang<sup>3</sup> Liu Zhicheng<sup>1</sup>

(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Architecture & Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

3. Beijing Engineering Company Limited, Beijing 100024, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to explore a framework for evaluating urban ecological networks that adapts to the dynamic development of cities and policy guidance, providing development guidance and forward-looking layout for the precise construction of ecological networks. [Method] Taking the central urban area of Beijing as an example, based on land use data from two periods in 2005 and 2020, the PLUS model was used to simulate the land use in 2035 under three urban development scenarios. Graphab was

收稿日期: 2023-09-04 修回日期: 2024-04-06

基金项目: 国家重大科技专项独立课题 (2018ZX07101005), 北京市共建项目专项“城乡生态环境北京实验室”(BLUREE02)。

第一作者: 李豪, 博士生。主要研究方向: 风景园林规划与设计、城市生态网络。Email: lihao\_la@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。

责任作者: 刘志成, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 风景园林规划与设计。Email: Zhicheng\_liu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

used to calculate the landscape connectivity indicators of the ecological network under different scenarios, and a dynamic evaluation framework for the ecological network was constructed to clarify the problems and explore the direction of ecological construction in the central urban area. [Result] (1) Under the overall planning development scenario, the expansion intensity of construction land was controlled, showing a trend of decentralized development, and the overall green space development status was good; under the urban expansion development scenario, construction land expanded strongly to surrounding land. (2) From 2005 to 2020, connectivity probability index ( $P_C$ ) in the central urban area decreased by 29.1%, and the urban ecological network degraded. The ecological network state under the overall planning development scenario improved significantly, with a  $P_C$  increase of 62.6%; while the urban expansion scenario aggravated the trend of ecological degradation, with a  $P_C$  decrease of 38.6%. (3) At individual level, the distribution of connectivity probability change index grades showed a pattern of high in the northwest and low in the southeast. Under the overall planning development scenario, the overall network structure tended to be complete, with an increase in the number of higher-level elements; under the urban expansion development scenario, the overall network structure became increasingly fragmented, and the degradation of element grades was significant. (4) On the dynamic evaluation framework, the central urban area tended to have low-base characteristics, and there were significant differences in network characteristics among districts. [Conclusion] The study explores the evaluation method of urban ecological networks by coupling the Graphab-PLUS model, constructs a three-dimensional dynamic evaluation framework of “basis-resilience-potentiality”, and provides a scientific basis for clarifying regional ecological development orientation and supporting territorial space planning. In addition, the study also proposes optimization suggestions for the ecological network of the central urban area: to make up for the regional ecological shortcomings as a whole and strengthen the ecological construction of the southeast area; in terms of zoning optimization, priority should be given to enhancing the overall function of ecological network in Haidian District, with a focus on protecting the ecological resources of Shijingshan District, and emphasizing the systematic construction of network elements in Dongcheng and Xicheng Districts.

**Key words:** ecological network; landscape graph; scenario simulation; landscape connectivity; central area of Beijing City

过快的城镇化发展和不合理的人类活动导致了景观破碎化,这被认为是城市生物多样性丧失的主要原因<sup>[1]</sup>。生态网络理念由最初的城市景观美化<sup>[2]</sup>,逐步转向修复破碎物种栖息地和提高生态服务功能<sup>[3-4]</sup>。作为整合景观斑块和廊道的有机结构,生态网络能够有效缓解景观破碎化带来的消极影响,并促进生物多样性的保护<sup>[5]</sup>。随着生态文明建设的推进,如何构建完整的生态网络已成为相关学者和规划决策者关注的热点话题<sup>[6-8]</sup>。

景观连通性即“空间内景观促进或阻碍物种(生态过程)在源斑块间运动的程度<sup>[8]</sup>”,是评价和优化生态网络的核心指标<sup>[9-10]</sup>。目前,常用于研究生态网络和量化景观连通性的模型理论包括最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型<sup>[11-12]</sup>、形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)方法<sup>[13-14]</sup>、电路理论<sup>[15]</sup>和复杂网络理论<sup>[16]</sup>等。相较之下,景观图论(landscape graph)具有图示直观,侧重生态过程表达以及模型数据友好的特点<sup>[17-18]</sup>。景观图论以拓扑学为基础,将生态网络的空间结构抽象为一系列点和线的有机组合,其

中斑块被定义为节点,斑块间的廊道用边表示<sup>[19]</sup>。国外有关景观图论研究应用较为广泛,国内相关研究起步较晚,数量尚少,但已在自然森林区<sup>[20]</sup>、动物栖息地<sup>[21]</sup>和城市水岸带<sup>[22]</sup>等区域展开研究,大多以优化现阶段生态网络为目标,缺乏对未来景观动态演变格局的模拟预判与反馈评估。

因此,本文将景观图论与土地利用情景模拟方法相结合,并耦合 Graphab-PLUS 模型,以北京中心城区为例,基于 2005 年与 2020 年两期土地利用数据,模拟不同发展情景下 2035 年的土地利用格局,对比评估生态网络景观连通性的时空演化特征。本研究旨在探索适应对城市动态发展和政策引导下的城市生态网络评估框架,填补该研究领域的部分空白,为生态网络的精准化建设提供发展导向和前瞻布局。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域概况

依据《北京城市总体规划(2016—2035年)》,北京中心城区包括东城区、西城区、海淀区、朝阳区、丰台区和石景山区(图1),总面积 1 378 km<sup>2</sup>,约占北

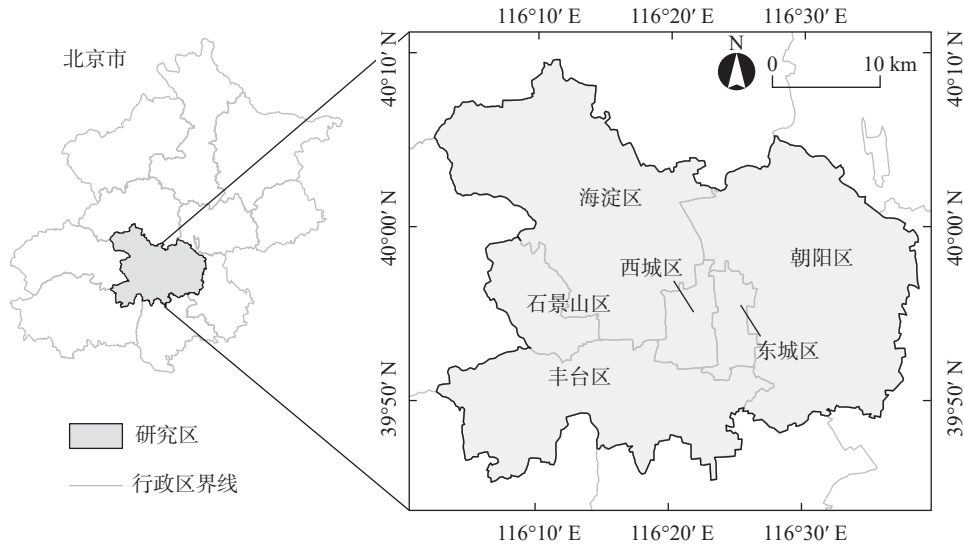


图 1 北京市中心城区

Fig. 1 Central area of Beijing City

京市的 8%, 属暖温带大陆性季风气候。作为国家首都, 北京拥有悠久的建设历史和密集的城市人口, 经历了快速城镇化发展和大规模土地利用转型, 人居环境面临着严峻的生态挑战<sup>[23]</sup>。目前, 城市正处于绿色转型阶段, 由快速增量向优化存量转变。在此背景下, 建立完善的城市生态网络体系是缓解生态发展压力, 推动生态文明建设的重要途径。

## 1.2 数据来源

本研究选取 2005 年和 2020 年作为研究时间节点。土地利用类型根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017) 划分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 类进行解译, 分辨率为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ , 并结合同期高清卫星影像进行目视校正。Landsat 系列遥感影像和高程数据来源地理空间数据云平台 (<http://www.gscould.cn/>), 分辨率为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ; 夜间灯光数据、经济数据和人口数据来源于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ; 现状道路、铁路、交通站点和城镇点等矢量数据来源于 OpenStreetMap 平台 (<https://www.openstreetmap.org/>); 城市规划相关数据及指标来源于《北京城市总体规划(2016—2035 年)》及各行政区发布的规划文件。以上数据经过预处理后, 统一重采样为分辨率  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的栅格数据。

## 2 研究方法

本研究方法包含 3 个主要步骤: 首先, 通过 PLUS (patch-generating land use simulation) 模型进行多情景土地利用模拟; 然后, 利用景观图论软件 Graphab 进行生态网络建模与分析; 最后, 基于情景模拟的生态网络演化结果, 构建“基底-韧性-潜力”的三维度

动态评估框架(图 2)。

### 2.1 土地利用模拟

本研究选择 PLUS 模型进行土地利用情景预测模拟。在 FLUS (future land use simulation) 模型的基础上, 改良 PLUS 模型提出了基于土地扩张分析策略 (land expansion analysis strategy, LEAS) 的规则挖掘框架和多类型随机种子机制 (CA based on multiple random seeds, CARS), 提高了模拟精度, 并增强了对规划政策的适用性<sup>[24]</sup>。

结合研究区现状特征和可量化的数据, 并参考相似研究文献 [25—26], 从自然地理、社会经济和交通区位 3 个层面选取了 10 项驱动力因子输入 LEAS 模块, 其中自然地理因素体现地形和植被覆盖状态, 包括高程、坡度、坡向和归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI); 社会经济因素用于评估人类活动强度, 包括夜间灯光强度、GDP 和人口密度; 交通区位因素用于表征城市发展的可达性强度, 包括路网密度、铁路密度和交通站点密度。

为了验证 PLUS 模型的模拟精度, 研究以 2005 年土地数据为基础, 模拟得到 2020 年的预测数据, 将其与 2020 年的现状土地利用图进行比对, 得到 Kappa 系数为 0.802。表明此次的模拟结果精度良好, 满足研究要求。在此基础上, 本文使用 PLUS 模型, 以 2020 年土地利用为基准, 设置了基准、总体规划和城市扩张 3 种发展情景, 预测 2035 年的土地利用格局。

基准发展情景下, 即根据 2005—2020 年土地利用演变, 通过马尔可夫链 (Markov-chain) 得到 2035 年在自然历史发展趋势下的土地利用需求, 不增加任何转化约束。总体规划发展情景下, 强调平衡生

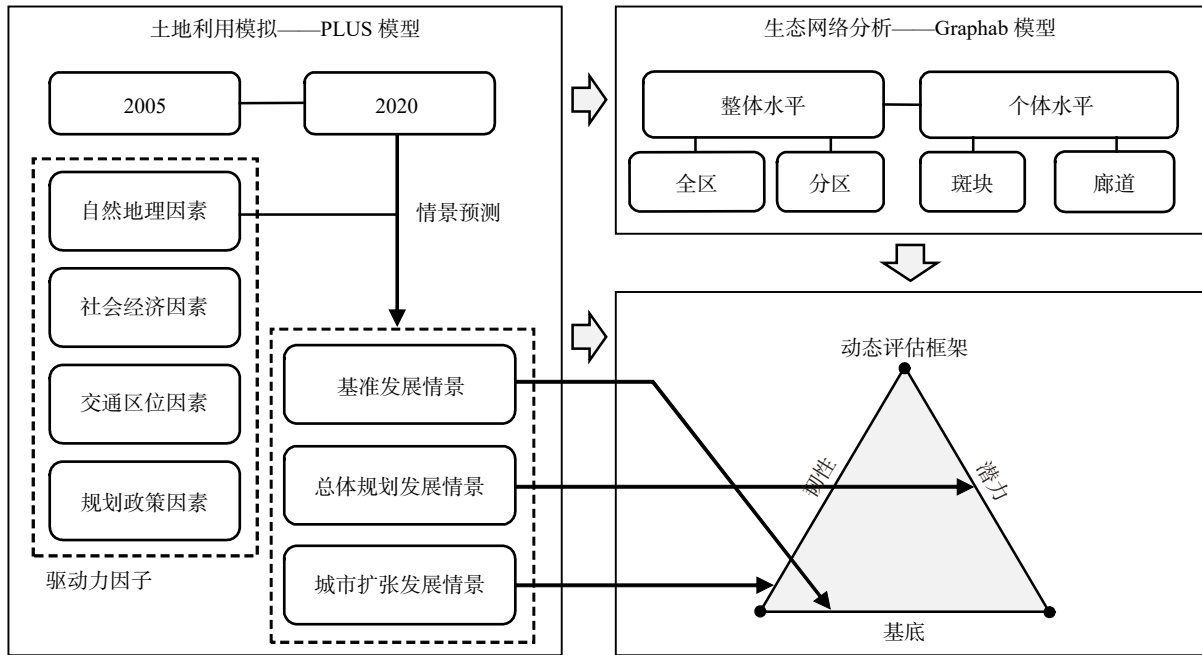


图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

态保护与社会经济发展之间的关系,推动生态建设以达到“生态优先”目标。在此情景下,注重对林地和草地等生态空间的保护,严格控制建设用地规模。土地利用需求根据国土空间总体规划的指标要求进行设置,将生态保护红线和永久基本农田保护红线设置为限制转化区<sup>[26]</sup>,并在转移矩阵(表1)中限制水体向建设用地的转化。城市扩张发展情景下,对2005—2020年的土地利用转移概率进行调整,提高建设用地的扩张强度,将耕地、林地、草地向建设用地的转移概率增加20%,建设用地向耕地外的其他用地类型转移概率降低30%<sup>[27]</sup>。

2.2 生态网络建模

研究使用 Graphab 2.6 模型<sup>[28]</sup>进行生态网络建模和可视化,基于图论原理计算景观连通性指数。选取连通概率指数(probability of connectivity,  $P_C$ )<sup>[29]</sup>和连通概率变化指数(fractions of delta probability of

connectivity,  $P_{DC}$ )<sup>[30]</sup>分别表征整体水平和个体水平上的景观连通性程度。

$P_C$  表示研究区域内随机放置两个点可连接的概率,取值范围在 0~1 之间,其数值越高表明生态网络的整体水平连通性越高。计算公式为

$$P_C = \frac{1}{A^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j e^{-ad_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $A$  为研究区域的总面积,  $a_i$  和  $a_j$  分别为斑块  $i$  和  $j$  的承载容量(通常为表面积),  $e^{-ad_{ij}}$  为斑块  $i$  和  $j$  之间移动的概率。

$P_{DC}$  是通过计算某一要素(斑块或廊道)在移除前后的  $P_C$  变化率而得到的,其数值越大表示这一要素对于整体生态网络的景观连通性贡献越大,保护优先级越高。计算公式为

$$P_{DCi} = \frac{P_{Ci} - P_{Ci}'}{P_{Ci}} \quad (2)$$

表1 PLUS模型的转移矩阵

Tab. 1 Transition matrix for PLUS model

项目	基准发展情景						总体规划发展情景						城市扩张发展情景					
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
林地	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
水体	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
建设用地	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1

式中:  $P_{C_i}$  为移除要素  $i$  之前的整体连通概率,  $P_{C_i}'$  为移除要素  $i$  之后的整体连通概率。

Graphab 模型根据指示物种的栖息地偏好, 将相应的土地利用类型定义为生态源地斑块。水陆两栖爬行动物作为生态系统中重要的指示种群, 能够对环境变化及时预警和反馈<sup>[31]</sup>, 因此研究以水陆两栖类动物中华大蟾蜍 (*Bufo gargarizans*) 为指示物种, 构建区域生态网络。中华大蟾蜍在北京分布广泛,

对生态网络的退化具有高敏感性, 栖息地的破碎化导致其种群数量持续减少。根据中华大蟾蜍的生活习性<sup>[32]</sup>, 参考前人在京津冀地区的相关研究和模型用户手册<sup>[33-34]</sup>, 结合研究区现状特征, 最终确定土地利用类型的阻力值(表 2), 以及最小生态源地面积 ( $3 \text{ hm}^2$ )。距离阈值是生态流的最大可达距离, 用于表征生态源地之间生态流的存在或强弱, 本次研究取值  $1\ 500 \text{ m}$ 。

表 2 土地利用分类及阻力值

Tab. 2 Land use classification and resistance values

栖息地分类	土地利用类型	描述	阻力值
最佳类型	水体	物种栖息地以及迁徙觅食的偏好类型, 增加 30 m 缓冲区范围内的非建设用地, 体现与周边用地的生态联系	1
	耕地		
有利类型	林地	物种的觅食场所, 但在其中的迁徙距离相对有限	10
	草地		
不利类型	建设用地		
	未利用地	物种难以迁徙和生存的土地利用类型	100

### 2.3 动态评估框架

生态韧性或潜力是一个多维的过程, 不是静态的现象<sup>[34]</sup>, 从动态视角出发对生态网络进行评估具有重要的生态建设指导意义<sup>[35]</sup>。为此, 研究结合情景模拟结果构建了“基底-韧性-潜力”的动态评估框架, 用于分析各区域网络及要素的生态属性倾向。

其中, 基底维度代表着生态网络基础的完整性, 通过基准发展情景和现状格局的生态网络状态而确定, 分区的基底维度表征着在整体生态系统中结构主导性与控制力的强弱; 韧性维度代表抵抗生态网络通过主动或被动方式, 最大程度抵抗威胁以减少负面生态影响的能力<sup>[36]</sup>, 并受到自然条件、城市基础设施和经济发展速度等多种因素影响, 通过城市扩张发展情景与现状格局的连通性变化量进行量化; 潜力维度代表着生态网络在未来发展中表现出的积极适应性和可能性<sup>[37]</sup>, 通过总体规划发展情景与现状格局的连通性变化量进行量化。最终对 3 组数据进行 Z-score 标准化处理得到动态评估结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用模拟

以 2020 年现状土地利用为基准数据进行模拟, 得到不同情景下 2035 年土地利用模拟结果(图 3)。在基准发展情景下, 建设用地小幅扩张, 林地和草地有所减少; 在总体规划发展情景下, 建设用地的扩张强度得到控制, 局部区域被腾退疏解, 绿色空间发展良好, 林地面积增加了  $49.82 \text{ km}^2$ ; 在城市扩张发展

情景下, 建设用地扩张趋势增强, 侵占了大量绿色空间, 林地面积缩减了 11.42%。

### 3.2 生态网络分析

#### 3.2.1 整体水平景观连通性

通过 Graphab 计算得到不同时期和情景下中心城区的连通概率指数 ( $P_C$ ) (图 4)。2005—2020 年间, 中心城区的  $P_C$  值下降了 29.1%, 城市生态网络退化显著。在未来 2035 年的模拟中, 基准发展情景延续了生态退化的趋势, 但得益于近期一系列生态文明建设工程的推进, 降幅有所缩减, 为 11.56%。城市扩张发展情景的  $P_C$  值降幅最大, 为 38.6%; 相反, 总体规划发展情景的  $P_C$  值涨幅为 62.6%。结果表明, 总体规划方案的实施能够有效完善中心城区的生态网络, 而城市扩张发展情景则加重了生态退化的趋势。

结合分区  $P_C$  值(图 5)和网络要素雷达图(图 6)可知, 每个分区对不同发展情景的生态反馈程度具有差异性。石景山区和海淀区的景观连通性始终保持在较高水平, 表明西山核心生态源地对中心城区的生态网络发挥着关键作用。在总体规划发展情景下, 海淀区的景观连通性最高, 生态网络要素数量最多, 表明其已有良好的生态网络基础, 且提升潜力巨大。同样, 朝阳区网络要素数量充足, 但连通性水平表现一般, 整体网络存在着结构性问题。东西城区的涨幅也较明显, 但受制于区域网络要素匮乏, 生态网络结构破碎, 其连通性依旧处于低水平。在城市扩张发展情景下, 丰台区退化趋势最为显著, 降幅

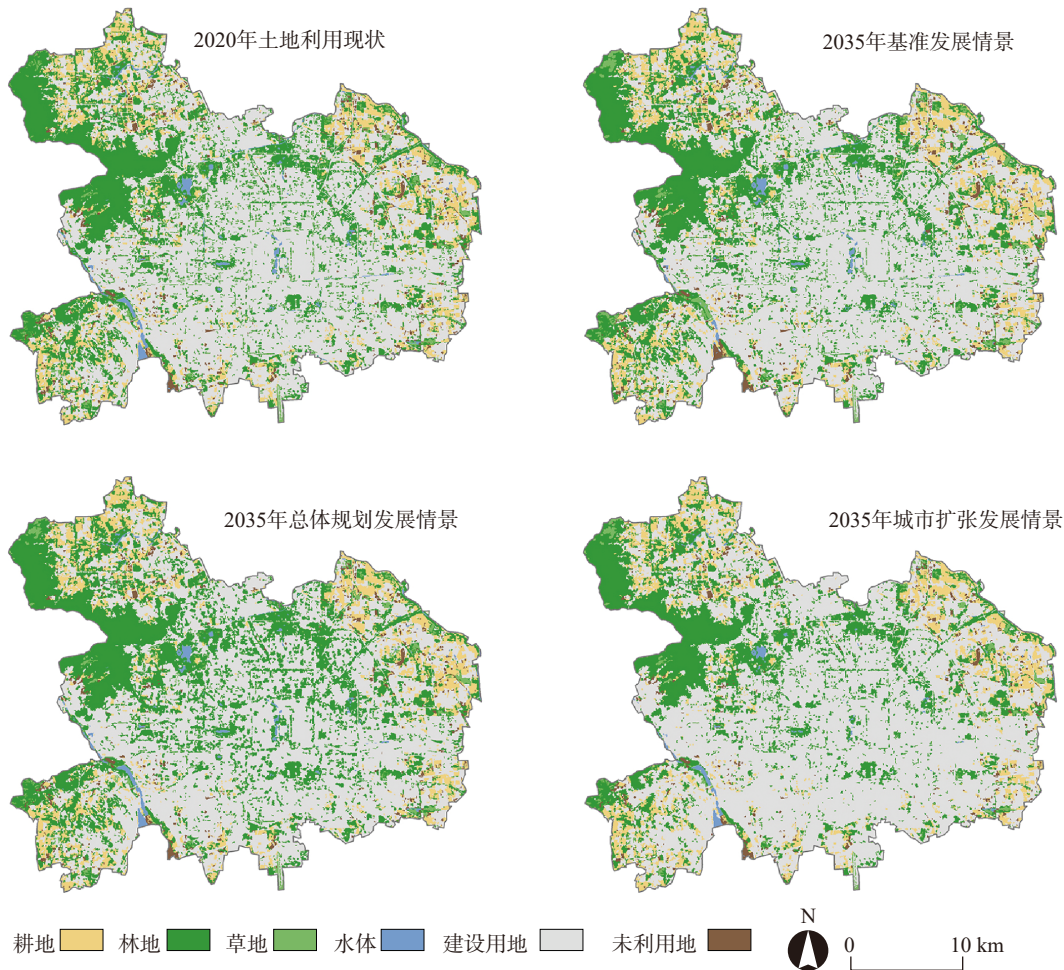


图3 2020年土地利用现状和3种情景下2035年的模拟结果

Fig. 3 Land use status in 2020 and simulation results in 2035 under three scenarios

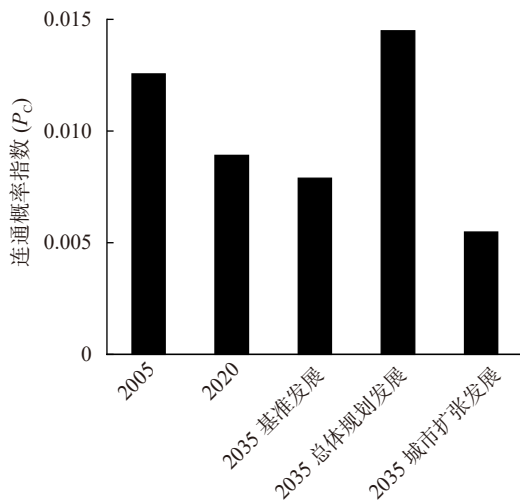


图4 2005—2035年研究区连通概率指数变化

Fig. 4 Changes of connectivity probability index in the study area from 2005 to 2035

为75.06%，石景山区次之。

### 3.2.2 个体水平景观连通性

采用自然断点分级法将斑块和廊道的连通概率变化指数( $P_{DC}$ )划分为高、较高、中、较低和低

5个等级(图7、8)。整体来看,中心城区的生态网络发展不平衡的问题突出,高和较高等级的 $P_{DC}$ 节点及廊道集中分布在西北部的西山及周边区域,而东南部等级水平较低,对区域整体景观连通性的贡献较小。

在基准发展情景下,斑块结构变化并不显著(图7)。在城市扩张发展情景下,整体网络斑块数量骤减,孤岛式斑块增加,导致东南部结构愈发支离破碎,石景山区内较高等级斑块全部退化为中等级。相比之下,在总体规划发展情景中,中部和北部的斑块等级明显提升,东西城区的网络结构迅速发展,核心斑块的辐射联动能力显著增强,生态网络的连通性水平提高。

2020年的现状廊道结构中具有两条清晰的路径——以西山为核心生态源地,向南连接永定河廊道,向东连接三山五园和奥林匹克森林公园(图8)。基准发展情景下基本维持这一态势,而在城市扩张发展情景下廊道等级退化明显,高等级廊道仅存一条,关键廊道结构的完整性和连续性遭到严重破坏。总体规划发展情景下结构延伸和等级提升显

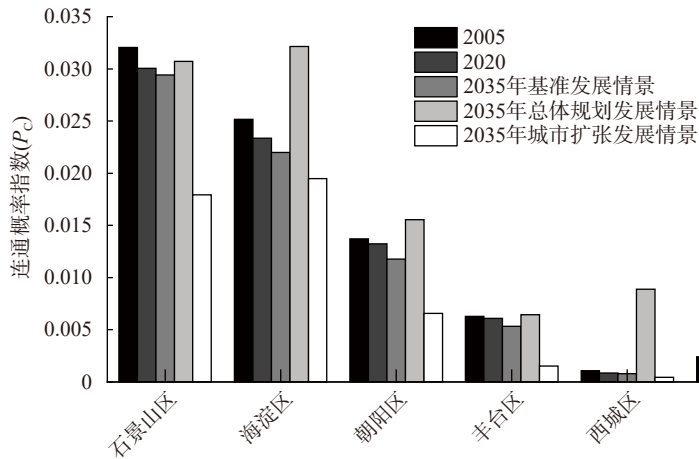


图 5 2005—2035 年分区  $P_C$  指数变化

Fig. 5 Changes of  $P_C$  index in subdivision from 2005 to 2035

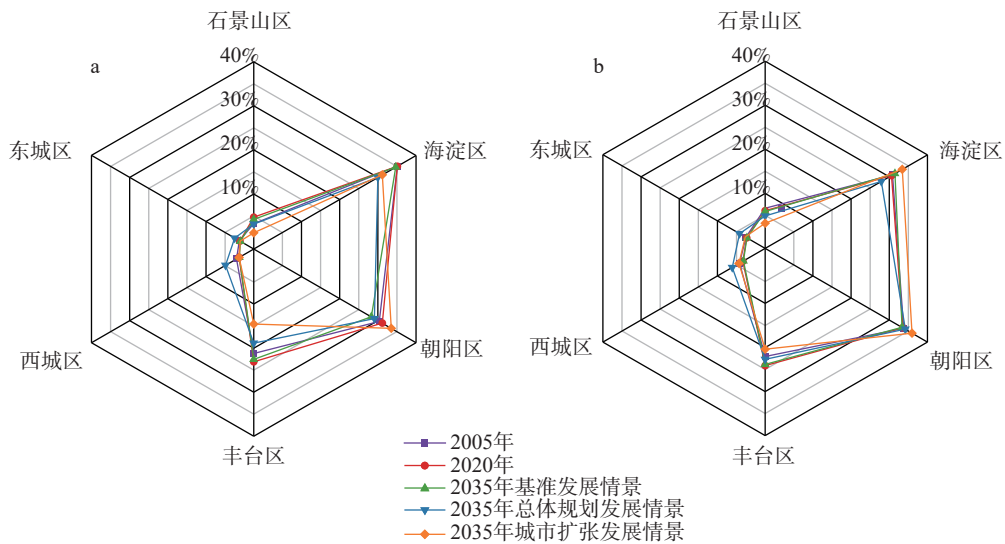


图 6 分区斑块(a)和廊道(b)数量占同期总量百分比雷达图

Fig. 6 Radar plot of the percentage of subdivision patches (a) and corridors (b) in total amount of same period

著,形成了海淀区至西城区、朝阳区至东城区的渗透路径,促使东西城区网络得到发展,区域连通性大幅增长。但东南区域仍未出现较高等级的关键廊道,存在严重的结构问题。

### 3.3 动态评估结果

研究对整体生态网络、斑块和廊道 3 个方面进行量化,得到动态评估结果。由图 9 可知,中心城区生态网络倾向于低基底,整体网络结构并不完整。从各分区来看,石景山区呈现“高基底-低韧性-低潜力”的特征,表明当前网络结构较完善成熟,对中心城区网络具有控制性。但斑块和廊道均为低基底,在要素层面上不足以支撑韧性和潜力的高属性,应注重生态核心区和关键廊道的划定与保护。海淀区是研究区中潜力倾向最大的,具有最高的生态网络提升优先级,以增强区域核心生态的辐射带动能力。朝阳区网络属性倾向均衡。丰台区低潜力特征显著,应优先提升廊道结构的

连通性。东西城区生态网络及要素均处于低基底区间,需要加强基础生态网络要素的建设,提升区域绿色空间总量。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

在土地资源有限、城市化进程加快的背景下,协调城市发展与生态保护需要前瞻性的视角。以北京市中心城区为例,通过比对不同发展情景,研究结果直观验证了总体规划发展的生态效益。诊断当前生态网络存在生态退化趋势显著、区域发展不平衡和极化现象严重的问题。因此,基于研究结果,提出了提升景观连通性和构建网络结构完整性的目标,并提出了中心城区生态网络的优化策略与建议。首先,应补足区域生态短板,着重加强东南片区建设,依托北京第一、第二道绿化隔离地区规划,完善生态网络的整体性。其次,依托动态评估框架,厘清区域

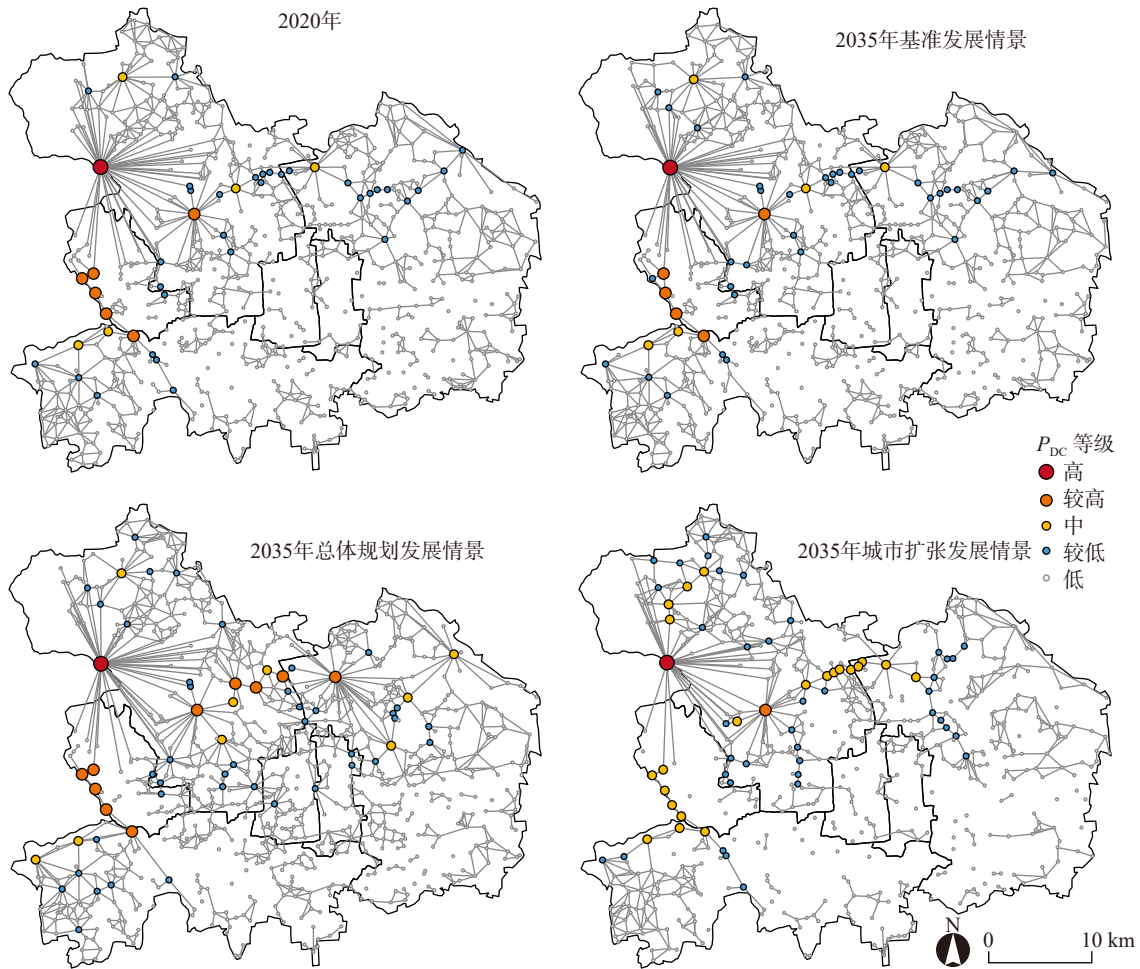


图7 2020年及2035年3种情景下斑块  $P_{DC}$  等级分布

Fig. 7 Distribution of fractions of delta probability of connectivity ( $P_{DC}$ ) levels of patches under three scenarios in 2020 and 2035

网络适应性特征,明确绿地发展导向和管理模式。例如,海淀区当前具有较高的发展潜力,应具有较高的发展优先级;石景山区生态韧性较差,则应具有较高的保护优先级;东西城生态基底资源有限,更应注重建立与周边核心斑块和廊道的联系,逐步提升区域绿量。最后,借助景观图论直观简明的可视化优势,识别核心网络要素,诊断关键结构性问题,实现精细化的国土空间规划。

景观图论模型具有数据获取简单,研究结果可信的优势,但也存在着一定不足。30 m的数据精度会简化城市中复杂的景观特征,导致部分信息缺失。生态网络建模是基于土地利用数据生成的,而同一用地类型的实际生态状况也会存在差异。在未来可结合物种分布模型<sup>[38]</sup>进行栖息地斑块识别,生成更加准确的栖息地适宜性地图,提升研究的科学性。

#### 4.2 结论

本研究通过结合景观图论模型(Graphab)和土地利用情景模拟模型(PLUS),在以往识别关键斑块与廊道的思路之上进行了时空维度的延伸,从城市动态发展视角评估了不同发展情景下的景观连通性

演变特征,构建了“基底-韧性-潜力”的生态网络动态评估框架,能够为分区的生态空间明确发展目标与策略,为支撑国土空间规划和城市生态网络精准化建设提供了研究方法和科学依据。主要研究结论有以下4点。

(1)多情景土地利用模拟结果显示,在总体规划发展情景下,建设用地的扩张强度得到控制,整体绿色空间发展状态向好。相反,城市扩张发展情景下建设用地强烈扩张,比2020年增加了57.14 km<sup>2</sup>,侵占了大量绿色空间。

(2)2005—2020年间,中心城区的连通概率指数下降了29.1%,城市生态网络有所退化。总体规划发展情景的生态网络状态得到显著改善,连通概率指数涨幅为62.6%。城市扩张情景则加重了生态退化的趋势,连通概率指数降幅为38.6%。

(3)研究区生态网络的连通概率变化等级分布呈现西北高,东南低的特征。总体规划发展情景下,整体网络结构趋于完整,较高等级要素数量增加,生态网络的辐射水平提高。城市扩张发展情景下,网络结构愈发支离破碎,要素等级退化显著。

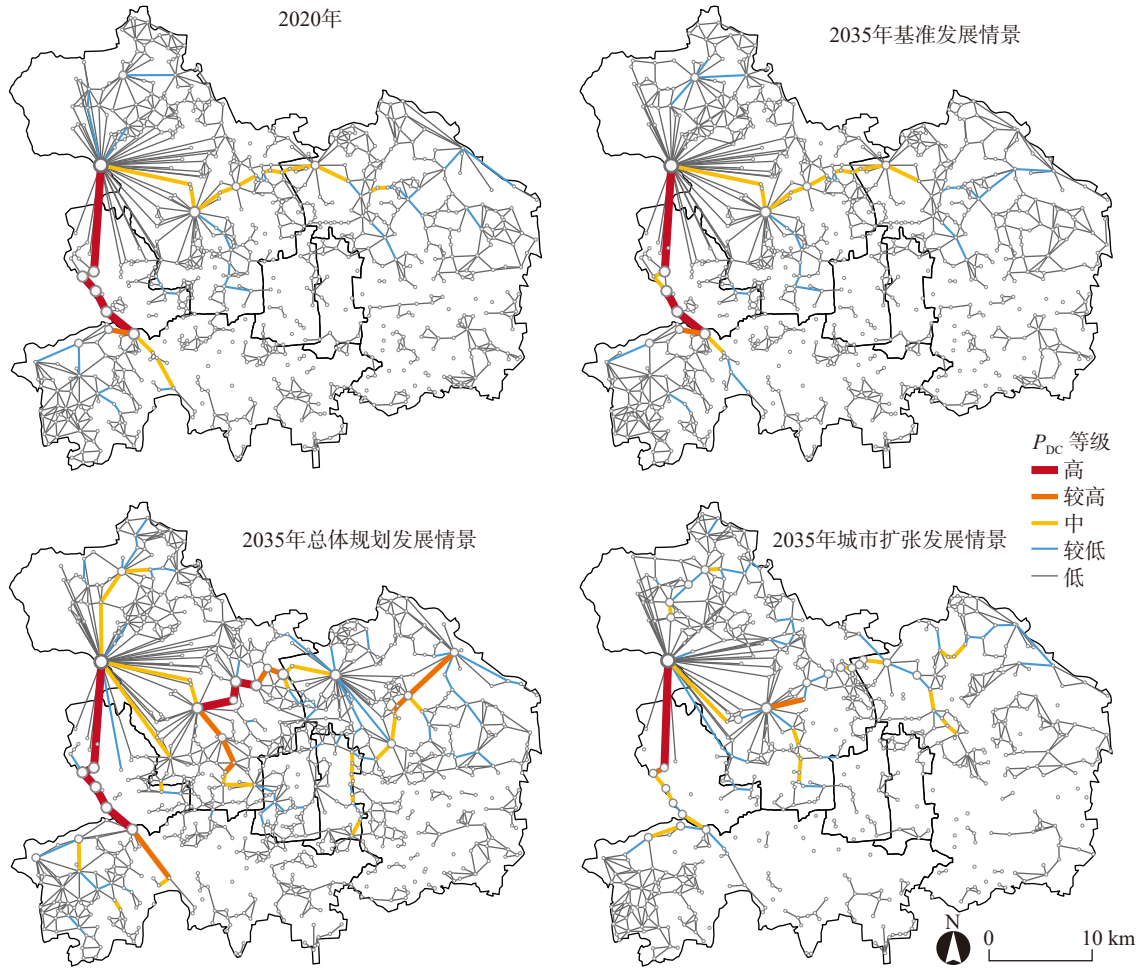


图 8 2020 年及 2035 年 3 种情景下廊道连通概率变化指数( $P_{DC}$ )等级分布

Fig. 8 Distribution of  $P_{DC}$  levels of corridors under three scenarios in 2020 and 2035

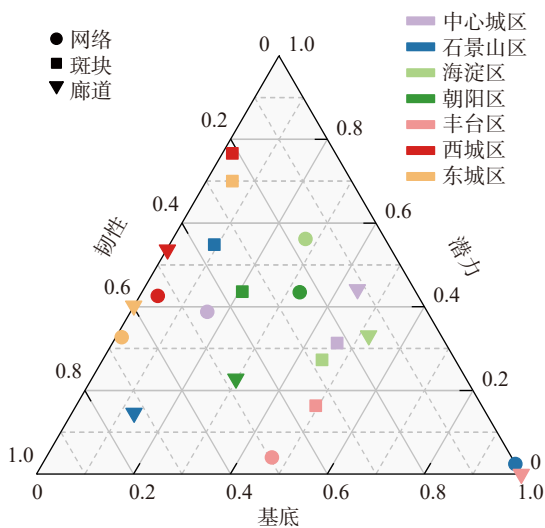


图 9 生态网络动态评估结果

Fig. 9 Dynamic assessment results of ecological networks

(4)动态评估结果表明,中心城区倾向低基底特征,分区生态网络发展不均衡。整体上应补足区域生态短板,着重加强东南片区建设。海淀区的潜力值最大,具有较高的发展优先级;石景山区为高基底特征,具有较高的保护优先级;东西城区生态网络及

要素为低基底特征,应加强与周边核心斑块和廊道的联系,补足基础生态网络要素。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 李晓文, 胡远满, 肖笃宁. 景观生态学与生物多样性保护 [J]. 生态学报, 1999, 19(3): 111-119.  
Li X W, Hu Y M, Xiao D N. Landscape ecology and biodiversity conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 111-119.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 周媛, 唐密, 陈娟, 等. 基于形态学空间格局分析与图谱理论的成都市绿地生态网络优化 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1527-1536.  
Zhou Y, Tang M, Chen J, et al. Optimization of urban green space ecological network in Chengdu based on morphological spatial pattern analysis and graph theory[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1527-1536.

[ 4 ] 高娜, 姜雪, 郑曦. 基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106-118.

- Gao N, Jiang X, Zheng X. Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(3): 106–118.
- [5] Tannier C, Foltête J C, Girardet X. Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1–2): 128–139.
- [6] 李豪, 吴明豪, 李虹焯, 等. 北京市朝阳区城市生态网络演变特征及优化研究[J]. *风景园林*, 2023, 30(增刊 2): 33–38.
- Li H, Wu M H, Li H Y, et al. Evolution characteristics and optimization of urban ecological network in Chaoyang District, Beijing[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(Suppl.2): 33–38.
- [7] 王博娅, 刘志成. 城市更新背景下北京市中心城区生态网络的优化策略[J]. *城市发展研究*, 2022, 29(1): 113–120.
- Wang B Y, Liu Z C. Study on the optimization strategy of ecological network in Beijing central area under the background of urban renewal[J]. *Urban Development Studies*, 2022, 29(1): 113–120.
- [8] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure[J]. *Oikos*, 1993, 68(3): 571–573.
- [9] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 等. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461–1473.
- Li Q Q, Jin X B, Zhang X L, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1461–1473.
- [10] 黄梅, 刘晨曦, 俞晓莹, 等. 城市水生态网络韧性评价与优化策略: 以长沙市为例[J]. *经济地理*, 2022, 42(10): 52–60.
- Huang M, Liu C X, Yu X Y, et al. Resilience evaluation and optimization of urban water ecological network: take Changsha as an example[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(10): 52–60.
- [11] 陈群, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 210–218.
- Chen Q, Liu P H, Zhu C M. Construction of an ecological security structure in Fuzhou City of Jiangxi Province based on an MCR model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 210–218.
- [12] 王敏, 梁爽. 健康城市背景下太原市中心城区绿地生态网络规划[J]. *规划师*, 2021, 37(4): 44–50, 56.
- Wang M, Liang S. Health city oriented green space ecological network planning in central urban area of Taiyuan[J]. *Planners*, 2021, 37(4): 44–50, 56.
- [13] 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.
- [14] 丁成呈, 张敏, 束学超, 等. 多尺度的城市生态网络构建方法: 以合肥市主城区生态网络规划为例[J]. *规划师*, 2021, 37(3): 35–43.
- Ding C C, Zhang M, Shu X C, et al. Establishing multi-scale urban ecological network: Hefei case[J]. *Planners*, 2021, 37(3): 35–43.
- [15] 张文萍, 庄子薛, 谢梦晴, 等. 基于电路理论的多尺度城市热环境网络构建及格局优化: 以成都市中心城区为例[J]. *中国园林*, 2023, 39(4): 103–108.
- Zhang W P, Zhuang Z X, Xie M Q, et al. Construction and pattern optimization of multi-scale urban thermal environment network based on circuit theory: a case study of the central urban area of Chengdu[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023, 39(4): 103–108.
- [16] 杨林哲, 牛腾, 于强, 等. 基于复杂网络理论的生态空间优化: 以松花江流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(9): 91–103.
- Yang L Z, Niu T, Yu Q, et al. Ecological spatial optimization based on complex network theory: a case study of Songhua River Basin of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(9): 91–103.
- [17] 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.
- Shong L L, Qin M Z, Zhang P Y, et al. Representation, analysis and application of landscape graph based on graph theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3579–3588.
- [18] Tarabon S, Calvet C, Delbar V, et al. Integrating a landscape connectivity approach into mitigation hierarchy planning by anticipating urban dynamics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103871.
- [19] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective[J]. *Ecology*, 2001, 82(5): 1205–1218.
- [20] 齐珂, 樊正球. 基于图论的景观连接度量化方法应用研究: 以福建省闽清县自然森林为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7580–7593.
- Qi K, Fan Z Q. Evaluation method for landscape connectivity based on graph theory: a case study of natural forests in Minqing County, Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7580–7593.
- [21] 梅泽文. 基于图论的滇金丝猴栖息地景观连通性动态研究[J]. *林业调查规划*, 2018, 43(1): 52–56.
- Mei Z W. Dynamic study on landscape connectivity of *Rhinopithecus bieti* habitats based on graph theory[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2018, 43(1): 52–56.
- [22] 韩凌云, 徐振, 阮宏华, 等. 基于景观图论和生物能学的景观演变分析方法[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1597–1604.
- Han L Y, Xu Z, Ruan H H, et al. An approach for tracing landscape change based on landscape graph and bioenergetics[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6): 1597–1604.
- [23] 李方正, 韩依纹, 李凤仪, 等. 北京市中心城区土地利用变化及其对生境的影响(1992—2016)[J]. *中国园林*, 2020, 36(3): 76–81.
- Li F Z, Han Y W, Li F Y, et al. Evolution and effects of land use on habitat of Central Beijing (1992–2016)[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2020, 36(3): 76–81.
- [24] Liang X, Guan Q, 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.
- [25] Liang X, Liu X, Li D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32(11): 2294–2316.
- [26] 詹芳芷, 田思月, 刘志成. 基于第二道绿隔规划的北京市平原区绿色空间土地利用多情景模拟与景观格局研究[J]. 城市发展研究, 2023, 30(1): 26–34.
- Zhan F Z, Tian S Y, Liu Z C. Study on land use simulation and landscape pattern of green space in plain area of Beijing based on the second green belt planning[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(1): 26–34.
- [27] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 84–94.
- Li C, Gao B P, Wu Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(1): 84–94.
- [28] Foltête J C, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 38: 316–327.
- [29] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2): 91–103.
- [30] Saura S, Rubio L. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape[J]. Ecography, 2010, 33(3): 523–537.
- [31] 李成, 谢锋, 车静, 等. 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究[J]. 生物多样性, 2017, 25(3): 246–254.
- Li C, Xie F, Che J, et al. Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(3): 246–254.
- [32] 史娜娜, 郭宁宁, 刘高慧, 等. 北京市两栖爬行动物空间分布格局及影响因素研究[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3806–3821.
- Shi N N, Guo N N, Liu G H, et al. Spatial distribution pattern and influencing factors of amphibians and reptiles in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3806–3821.
- [33] 张利, 何玲, 闫丰, 等. 基于图论的两栖类生物栖息地网络规划: 以黑斑侧褶蛙为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1054–1060.
- Zhang L, He L, Yan F, et al. Amphibian habitat network planning based on the graph theory: a case study of *Pelophylax nigromaculata*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1054–1060.
- [34] Grafton R Q, Doyen L, Béné C, et al. Realizing resilience for decision-making[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(10): 907–913.
- [35] Li H, Chen H Y, Wu M H, et al. A dynamic evaluation method of urban ecological networks combining graphab and the FLUS model[J]. Land, 2022, 11(12): 2297.
- [36] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 等. 城市生态韧性水平空间评估及其驱动力: 以北京市通州区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6810–6823.
- Xue F, Zhang N C, Xia C Y, et al. Spatial evaluation of urban ecological resilience and analysis of driving forces: a case study of Tongzhou District, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6810–6823.
- [37] Wang Y X, Yu X H, Zhao B J, et al. Evaluation of ecological carrying capacity in Yangtze River Economic Belt and analysis of its spatial pattern evolution[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109535.
- [38] Dufлот R, Avon C, Roche P, et al. Combining habitat suitability models and spatial graphs for more effective landscape conservation planning: an applied methodological framework and a species case study[J]. Journal for Nature Conservation, 2018, 46: 38–47.

(责任编辑 范娟  
责任编委 李雄)