

王赛超, 赵子群, 薛万来, 等. 北京市生态系统服务评估与生态安全格局构建[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.001

WANG Saichao, ZHAO Ziqun, XUE Wanlai, et al. Evaluation of ecosystem services and development of ecological security pattern in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.001

北京市生态系统服务评估与生态安全格局构建

王赛超^{1,2,3}, 赵子群⁴, 薛万来^{2,3}, 吴 卿¹, 李文忠^{2,3}, 支翔宇⁴,
李 龙⁴, 于艺培⁴

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 3. 流域水环境与生态技术北京市重点实验室, 北京 100048; 4. 北京市密云水库管理处库区管理所, 北京 101512)

摘要:【目的】构建生态安全格局有利于保障区域生态安全、物种生存和信息交流, 为自然、社会和经济可持续发展提供强有力的支持。【方法】使用 InVEST 模型对北京市多种生态系统服务进行模拟, 对模拟结果进行量化分析, 并结合 MSPA 分析、MCR 模型和电路理论, 构建北京市生态安全格局, 为相关政策的制定提供依据。【结果】结果表明: 水源涵养、土壤保持、碳储存、水质净化和生境质量高价值斑块面积分别为 1 984.59 km²、617.61 km²、8 041.22 km²、8 638.69 km² 和 930.70 km², 分别占研究区总面积的 12.09%、3.76%、49.00%、52.64% 和 5.67%, 生态系统服务高价值斑块整体位于研究区西部和北部的山区。北京市生态安全格局由 21 个生态源地、46 条生态廊道和 1 个生态夹点组成。北京市生态源地总面积为 1 220.83 km², 占北京市总面积的 7.45%, 生态廊道总长度为 1 003.78 km。【结论】北京市生态源地主要分布在西部和北部山区, 未来继续开展相关生态保护工作, 从而提升生态源地面积, 提高生境质量。

关键词: 生态系统服务; 生态安全格局; InVEST 模型; MSPA 分析; MCR 模型; 数值模拟



DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0001-14

Evaluation of ecosystem services and development of ecological security pattern in Beijing

WANG Saichao^{1,2,3}, ZHAO Ziqun⁴, XUE Wanlai^{2,3}, WU Qing¹, LI Wenzhong^{2,3},
ZHI Xiangyu⁴, LI Long⁴, YU Yipei⁴

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. Beijing Key Laboratory of Watershed Water Environment and Ecological Technology, Beijing 100048, China; 4. The Reservoir Management Office of Miyun Reservoir Management Authority of Beijing, Beijing 101512, China)

Abstract: [Objective] Developing an ecological security pattern plays a crucial role in ensuring regional ecological security,

收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-09-04; 录用日期: 2024-09-10; 网络出版日期: 2024-12-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07101005-03); 北京市科技计划课题(Z221100005222013)

作者简介: 王赛超(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态环境方面的研究。E-mail: 1933323467@qq.com

通信作者: 薛万来(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水生态环境评估研究。E-mail: xuewanlai@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

species survival, and information exchange, thereby providing strong support for sustainable development across natural, social, and economic dimensions. [Methods] The InVEST model was employed to simulate various ecosystem services in Beijing, and the simulation result were quantitatively analyzed. Additionally, Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) analysis, the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model, and circuit theory were integrated to develop an ecological security pattern for Beijing, providing a scientific basis for policy making. [Results] The result showed that high-value patches for water conservation, soil retention, carbon storage, water purification, and habitat quality covered areas of 1 984.59 km², 617.61 km², 8 041.22 km², 8 638.69 km², and 930.70 km², respectively, accounting for 12.09%, 3.76%, 49.00%, 52.64%, and 5.67% of the study area. These high-value patches were primarily located in the mountainous areas of western and northern Beijing. The ecological security pattern of Beijing was composed of 21 ecological sources, 46 ecological corridors, and 1 ecological pinch point. The total area of ecological sources covered 1 220.83 km², accounting for 7.45% of Beijing's total area, while the total length of ecological corridors extended to 1 003.78 km. [Conclusion] The ecological sources in Beijing are mainly distributed in the western and northern mountainous areas. Future efforts of ecological conservation are essential to further expand the area of ecological sources and enhance habitat quality.

Keywords: ecosystem services; ecological security pattern; InVEST model; MSPA analysis; MCR model; numerical simulation

0 引言

随着城市化进程的日益加速,高强度的土地开发活动不断影响着生态系统的服务功能^[1],在这一进程中,景观连通性受到削弱,生境斑块出现破碎化等生态问题逐渐显露出来,将严重威胁区域乃至国家的生态安全,对经济社会的可持续发展造成阻碍^[2-3]。与此同时,人口的高度聚集和生态用地被侵占等城市化带来的问题,也削弱了城市应对生态风险的能力^[4]。因此,构建生态安全格局成为刻不容缓的任务,通过这一举措,能精准识别城市生态保护的关键节点,为城市的空间规划提供坚实的依据,而且,合理的城市空间布局还将有力推动城市的高质量发展^[5-6]。当前,构建生态安全格局已成为社会各界广泛关注的焦点,是亟待共同解决的重要问题。

近年来,国内外众多学者结合生态景观学、地理学等视角围绕生态安全格局的构建开展研究。国外对生态安全的关注较早,1993年RAPPORT^[7]曾对生态健康(Ecological Health)的定义进行讨论,2000年生态安全(Ecological Security)概念首次被美国政府提及^[8],城市生态安全(Urban Ecological Security, UEC)^[9]、城市增长边界(Urban Growth Boundaries, UGB)^[10]等相似或相关的研究也逐渐受到学者们重视,ELADAWY^[11]构建了南非德班市的生态安全格局,结果显示德班市生态源地主要分布在中部和西北部山区,生态廊道呈“一环三带”放射状分布,为德班市生态环境保护供了一定参考。国内有关生态安全格局的研究起步较晚但研究方法已逐渐成熟,俞孔坚^[12]首次引入了生态安全格局的概念和“源的确—建立阻力面—判别安全格局”的景观安全格局

识别步骤,经过不断的发展,“源地-阻力-廊道”的模式被确定为构建生态安全格局的基本模式^[13-14]。这种模式显著提升了源地和廊道的识别精度,使生态安全格局的构建结果更具系统性和科学性^[15]。源地又称生态源地,是维系生态过程、保持生态系统完整性和提供服务的核心区域^[16],源地的识别方法多样,依据生态安全格局的目标不同,主要通过自然保护区、生态系统服务评估以及形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)^[17]等方法进行识别。阻力面表示物种迁徙与信息交流过程中所遭遇的阻力值大小,阻力面的构建依赖阻力因子的选择,土地利用类型、高程和坡度因子与生物活动息息相关,因此也是学者们颇为关注的阻力因子^[18],除此之外,学者们也会结合研究区的具体特征,利用距道路距离^[19]、夜间灯光^[20]等数据对阻力面进行调整。生态廊道是指具有多种生态服务功能的廊道类型,作为源地斑块间物种迁徙和信息交流的桥梁,是生态安全格局不可或缺的组成部分^[21]。生态廊道主要依靠最小阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR)^[22]、斑块重力模型^[23]、综合评价指标体系^[24]等方法识别^[25]。MCR模型能计算物种从“源”扩散到某点的最小累积成本距离,模拟最小成本路径^[26]。随着研究的深入,生态节点^[27]、生态夹点^[28]等新要素逐步融入生态安全格局中,生态安全格局研究愈发成熟。

北京市是中国的首都,北京市的生态环境问题受到世界的重点关注。依据《北京市生态环境状况公报》,北京市持续深入推进多项生态保护和修复工程,取得了显著效果。2023年,北京市生态环境

稳定在良好水平。但当前北京市对生态保护关键区域的识别较为模糊, 仅针对密云水库等重要水源地及河湖公园等城市绿地开展相关措施, 缺少对其他重要生态斑块的针对性施措。而生态系统服务以其精准识别区域重要生态斑块的优势, 近年来逐渐进入大众的视野。在生态系统服务研究中, InVEST模型的操作最为简便且模拟精度高, 学者们利用 InVEST模型在华北地区^[29]、黄河流域^[30]等区域广泛开展生态系统服务评估研究。刘华妍等^[31]对北京市的碳储量、土壤保持能力以及产水量这三种关键的生态系统服务进行了深入分析。研究结果显示, 碳储量和土壤保持功能的空间分布呈现出高度的相似性, 具有明显的协同关系, 生态重要区域主要对应于林地分布密集的地区。将生态系统服务评估引入生态安全格局构建中能够使结果更为科学和精准, 同时, 生态安全格局也为生态系统服务的研究提供了更为长远的应用前景。基于

此, 本研究借助 InVEST模型, 针对北京市五种关键生态系统服务进行量化评估, 并进一步耦合形态学空间格局分析(MSPA)、最小累积阻力模型(MCR)及电路理论等方法构建北京市的生态安全格局。本研究旨在为北京市生态环境可持续发展、生态补偿机制及生态保护政策等的制定和实施提供坚实的数据支撑与科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京市位于中国北部, 与河北省和天津市相邻, 位于 115°20'E—117°30'E, 39°28'N—41°05'N 之间, 总面积 16 410.54 km², 包含 16 个市辖区(见图 1)。北京市位于华北平原北部、西部和北部为山区, 西部山区属于太行山脉, 北部山区属于燕山山脉, 平原地区平均海拔 30~50 m, 山区平均海拔 1 000~1 300 m, 植被类型以落叶阔叶林为主, 并相间温性针叶林, 境

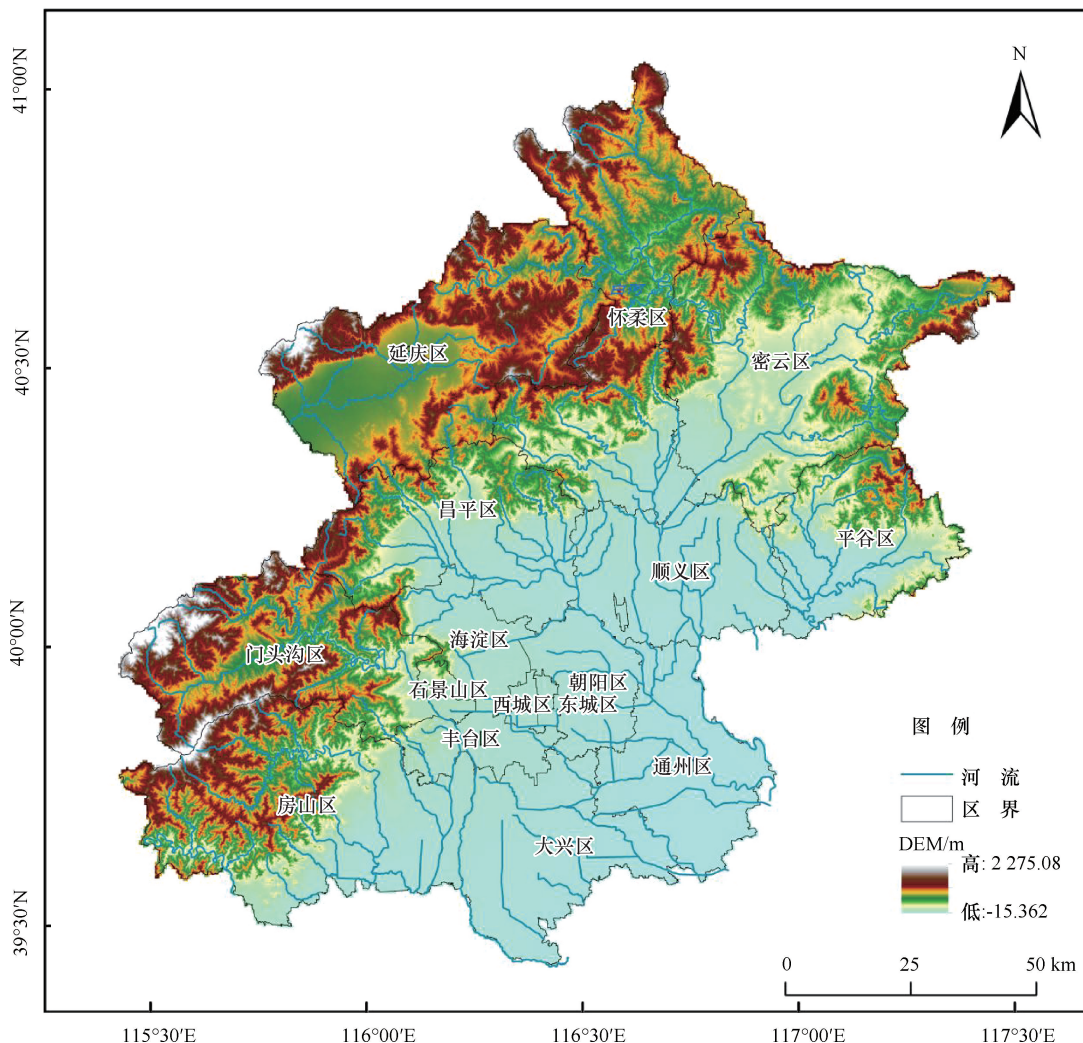


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

内主要有永定河水系、拒马河水系、潮白河水系、北运河水系和蓟运河水系五大水系。北京市属于暖温带半湿润半干旱季风气候区, 年平均气温, 平原地区为 11~13 ℃, 海拔 800 m 以下的山区为 9~11 ℃, 高寒山区在 3~5 ℃, 降雨主要集中在夏季, 占全年降雨的 3/4, 年降水量约 500~700 mm。2023 年, 北京市地区生产总值达 43 760.7 亿元, 常住人口 2 185.8 万人。

1.2 数据来源及预处理

部分数据来源如表 1 所列, 其中降雨数据和潜在蒸散发数据空间分辨率均为 1 km, 利用 ArcGIS 10.8 软件进行投影、裁剪、栅格计算器等操作处理得到研究区月降雨量和潜在蒸散发量数据, 研究区年降雨量和潜在蒸散发数据由当年 12 个月份经过像元统计操作处理得到; 土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕发布的 1990—2022 年中国年度土地利用数据, 空间分辨率为 30 m, 通过投影、裁剪、重分类等操作处理得到研究区土地利用数据, 本研究将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、未利用土地和建设用地 6 类; 根系限制层数据来源于 YAN 等^[32]空间分辨率为 1 km 的中国深度至基岩地图, 利用 ArcGIS 10.8 软件通过投影、裁剪、栅格计算器等操作处理得到研究区根系限制层深度; 数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据空间分辨率为 30 m, 使用 ArcGIS10.8 软件进行填注并计算坡度; 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 数据空间分辨率为 30 m, 反演得出研究区植被覆盖度 (Fractional Vegetation Cover, FVC) 数据。根据模型操作要求, 将所有数据投影统一为 WGS84_UTM_Zone_50N, 将所有栅格数据重采样至 30 m×30 m 分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

生态系统服务评估主要模拟水源涵养、生境质量、水质净化、土壤保持和碳储存五项服务。本研究采用 InVEST 模型产水量模块量化评估研究区水源涵

养服务。InVEST 模型产水量模块的工作原理是水量平衡, 即用某一栅格的年降雨总量和年蒸散发总量的差值代表该栅格年产水量。计算公式为

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (1)$$

式中, $Y(x)$ 为年产水量 (mm); $AET(x)$ 为年实际蒸散发量 (mm); $P(x)$ 为年降雨量 (mm)。

生境质量服务采用 InVEST 模型生境质量模块进行评估。它通过对栅格内的生境或植被类型的范围及退化程度来评估该栅格的生境质量, 评估结果为 0~1 之间的无量纲数值, 数值越接近 1, 其生境质量越高。计算公式为

$$Q(x_j) = H(j) [1 - D_{x_j}^z / (D_{x_j}^z + K^z)] \quad (2)$$

式中, $Q(x_j)$ 为某栅格的生境质量; $H(j)$ 为该栅格的生境适宜度; $D_{x_j}^z$ 为该栅格的生境退化程度; K^z 为半饱和常数, 由用户设定。

水质净化服务采用 InVEST 模型养分输送比模块进行评估。该模型使用了简单的质量平衡方法, 通过经验关系表示养分物质的长期稳态流动, 即

$$ALV = HSS \times pol \quad (3)$$

式中, ALV 为营养物质输出量; HSS 为水文敏感性得分; pol 为输出系数。

土壤保持服务采用 InVEST 模型泥沙输移比模块进行评估。以某栅格的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差表示该栅格的土壤保持量。计算公式为

$$SD = rkl_s - usle \quad (4)$$

式中, SD 为某栅格的土壤保持量 (t); rkl_s 为该栅格未采取植被措施和水土保持措施的潜在土壤侵蚀量 (t); $usle$ 为采取植被措施和水土保持措施后该栅格的实际土壤侵蚀量 (t)。

碳储存服务采用 InVEST 模型的碳储存和封存模块进行评估。区域内碳储量主要取决于区域内的四大碳库: 地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库, 模型根据土地利用类型分类汇总这些碳库内的碳储量。计算公式为

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据名称	数据来源	数据类型
逐月降雨量数据	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn)	栅格数据
逐月潜在蒸散发数据	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn)	栅格数据
土壤数据	世界土壤数据集 V1.1	栅格数据
河流水系数据	北京市第一次水务普查结果	矢量数据
数字高程模型 DEM	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)	栅格数据
道路数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)	矢量数据
归一化植被指数 NDVI	美国国家航天局 NASA 官网 (http://www.nasa.gov)	栅格数据

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

式中, C_{total} 为某栅格的总碳储量(t); C_{above} 为该栅格的地上碳储量(t); C_{below} 为该栅格的地下碳储量(t); C_{soil} 为该栅格的土壤碳储量(t); C_{dead} 为该栅格的死亡有机物碳储量(t)。

1.3.2 生态源地识别

生态源地是对生态系统具有重要作用,可以提供高价值生态系统服务的生态斑块。本研究采用自然间断点分类法将北京市生态系统服务评估结果从低到高依次划分为低、较低、中等、较高和高价值五种类别,将其等权叠加后选取综合价值较高的斑块作为生态源地备选斑块。MSPA 又称形态学空间格局分析,它可以识别不同要素之间的空间拓扑关系,被学者广泛应用于景观分析中。对生态源地备选斑块使用 GidocsToolbox 软件进行 MSPA 分析,提取分析结果中的核心区,并选取面积不小于 30 km² 的斑块作为最终的生态源地。

1.3.3 生态阻力面构建

生态阻力面反映了生态源地之间物种迁徙和信息交流等流动过程所受的阻力大小,这些活动会优先选取阻力最小的路径。阻力面构建的关键是阻力因子的选择,综合考虑研究区的特点并结合数据的可获得性,最终将高程、坡度、植被覆盖度、土地利用类型、距道路距离和距河流距离 6 项因子作为构建生态阻力面的阻力因子(见表 2)。因不同因子的量化单位不统一,故将各因子进行归一化处理,使用变异系数法计算各因子权重,按权重叠加获得研究区综合阻力面。

表 2 生态阻力因子
Table 2 Ecological resistance factors

阻力因子	正负向	权重
高程	+	0.19
坡度	+	0.25
土地利用类型	+	0.26
植被覆盖度	-	0.23
距河流距离	-	0.04
距道路距离	-	0.03

1.3.4 生态廊道及生态夹点识别

生态廊道是生态源地之间物种迁徙所受阻力最小的通道,对提升区域连通性具有重要作用。Linkage Mapper 工具箱的 Build Network and Map Linkages 工具是模拟最小成本路径的常用工具,使用此工具提取生态廊道,并结合 Centrality Mapper 工具依据廊道的电流中心性(Current Flow Centrality)将提取到的生态廊道分为三级,等级越高表明廊道的连通性及重要程度

越高。电流中心性^[33]是指各生态源地组成的网络节点中,计算所有节点对之间的电流流动情况,以此来判断各个廊道的连通性等级。

生态夹点是基于电路理论,模拟电流在廊道中流通电流密度最大的区域,表明该区域信息交流频繁,在物种迁徙过程中充当“踏脚石”。使用 Linkage Mapper 工具箱的 Pinchpoint Mapper 工具,使用 ArcGIS 10.8 的重分类工具将电流密度按自然间断点法由低到高分分为 5 类,取最高的一类作为生态夹点。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务评估结果

使用 InVEST 模型泥沙输移比模块计算得到研究区土壤保持结果,如图 2(a)所示。北京市土壤保持高价值区域较少,面积仅为 616.40 km²,占北京市面积的 3.76%。研究区内土壤保持价值类别呈聚集性分布,高价值区域主要集中于研究区山区部分,该部分地区高程较高,区域内植被覆盖度高,有利于水土保持;低价值区域则集中分布于平原部分,受人类活动影响强烈,水土保持功能有所降低。值得注意的是,土壤保持的状况与土地利用类型之间存在着紧密的关联,研究结果显示,耕地和建设用地的土壤保持价值量明显不及其他土地利用类型。因此,我们亟需针对耕地实施一系列有效的生态保护措施,以降低水土流失的风险,从而维护土壤的健康与价值。

使用 InVEST 模型碳储存和封存模块计算得到研究区碳储量结果,如图 2(b)所示。北京市碳储量高价值区面积为 8 041.16 km²,占研究区面积的 49.00%。碳储量服务价值高低与植被有密切关系,碳储量高价值斑块主要分布于研究区西部和北部山区,土地利用类型以林地和草地为主,植被覆盖度高,在吸收温室气体固碳释氧方面具有重要作用。研究区内碳储量功能低价值区土地利用类型主要是水域。

使用 InVEST 模型养分输送比模块计算得到研究区水质净化结果,如图 2(c)(d)所示。水质净化服务价值的高低与氮和磷的输出呈负相关,即氮和磷的输出越少,表明该区域水质净化服务价值越高。水质净化功能高价值区域主要分布在北京市西部和北部山区的各大行政区,土地利用类型以林地为主。其中,对氮和磷的净化功能在空间上基本保持一致,但净化磷功能的低价值区域更为集中。水质净化功能低价值区域主要分布在北京市中心城区,植被覆盖度低,缺少对水质的净化能力,这与植被覆盖度高的山区呈

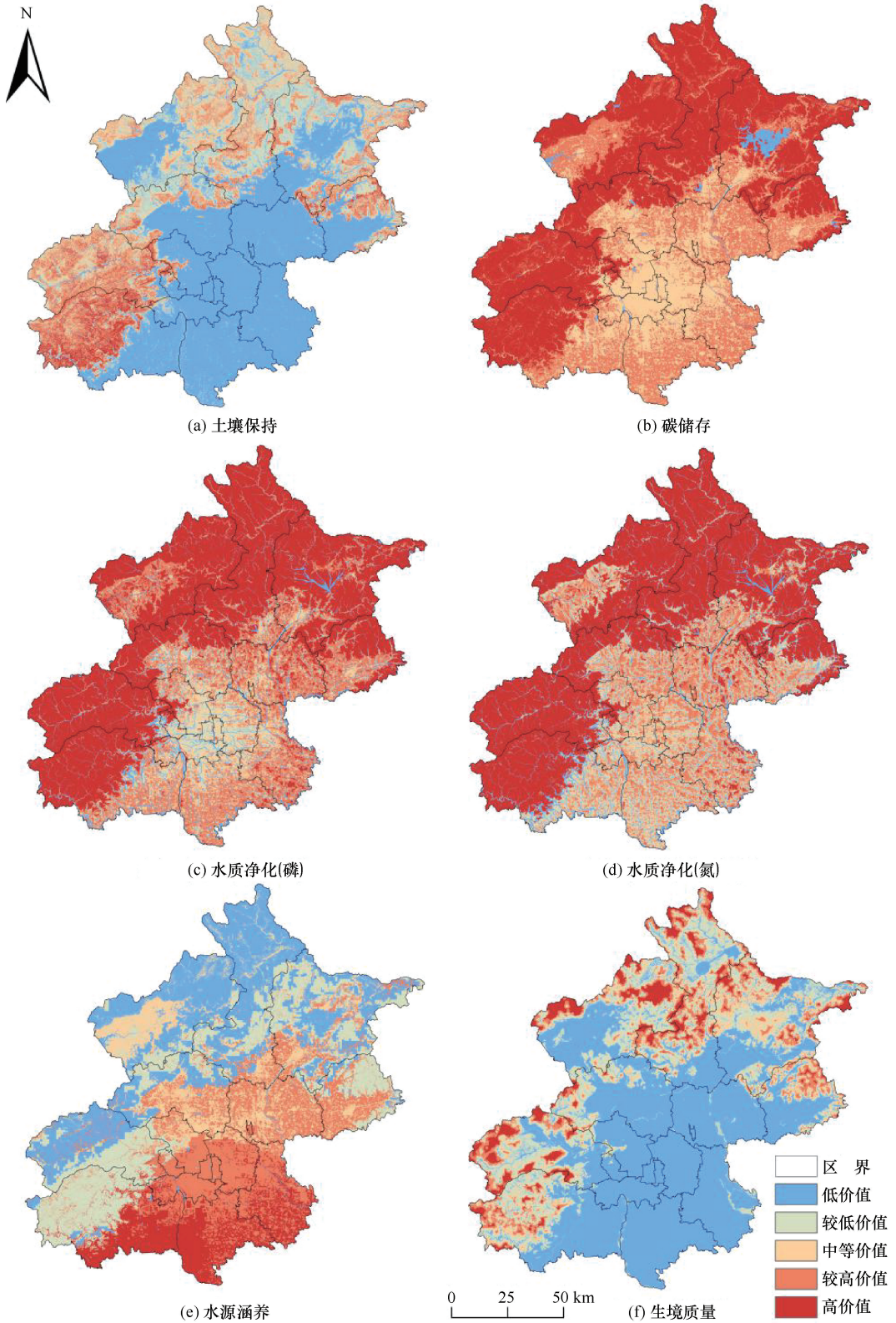


图2 生态系统服务价值评估结果

Fig. 2 Evaluation results of ecosystem service values

现明显的对比关系。

使用 InVEST 模型年产水量模块计算得到研究区水源涵养评价结果, 如图 2(e) 所示。北京市水源涵

养服务价值由南向北逐渐降低, 存在明显的层次递进关系, 北京市常年蒸散发量大于降雨量, 山脉对夏季季风的阻碍, 导致处于迎风坡的平原地区降雨量高于

7.45%, 分布于延庆区、怀柔区、密云区、平谷区、门头沟区和房山区。其中, 最大斑块的面积是 120.54 km², 位于延庆区, 最小斑块的面积是 30.30 km², 位于门头沟区。生态源地斑块空间上主要集中分布于研究区的西南部和北部, 东部仅存在两处生态源地, 研究区的中部和东南部因为大部分是建设用地和耕地, 不具备较多的较高价值生态系统服务, 故而没有生态源地。生态源地与生境质量服务高价值斑块的空间分布呈现一定的相似性, 表明生境质量服务价值高的斑块, 其他生态系统服务也处于优良水平。

2.3 生态阻力面及生态廊道构建

依据前文提出的方法构建研究区生态阻力面, 将土地利用、距道路距离、距河流距离、坡度、植被覆盖度和高程阻力面进行标准化, 并根据权重进行叠加得到研究区综合生态阻力面, 结果如图 4 所示。生态阻力面整体呈高低错落式分布, 高值主要

集中在研究区中部的平原地区, 位于北京市的中心城区和延庆区城区, 人类活动强度大, 土地利用类型以建设用地和耕地为主, 交通道路纵横交错, 植被覆盖率低, 导致该区域阻力值远高于其他地区, 不利于物种迁徙等生态活动; 低值则环绕分布于高值周围, 位于房山区、门头沟区、延庆区、怀柔区和密云区等区的山区, 该区域高程较高, 坡度较陡, 但植被覆盖度高, 存在大量的森林和草地, 属于北京市生态保护红线范围, 受人类活动干扰程度低, 政府高度注重对区域内自然环境的保护, 因此生态阻力小, 适合物种迁移交流。

基于生态源地和生态阻力面, 采用 Linkage Mapper 工具箱进行生态廊道识别, 结果如图 5 所示, 共识别出 46 条生态廊道, 总长度 1 003.78 km, 最短的廊道 0.42 km, 最长的廊道 150.52 km。研究区北部及西南部生态源地较为集中, 且生态阻力值小, 因

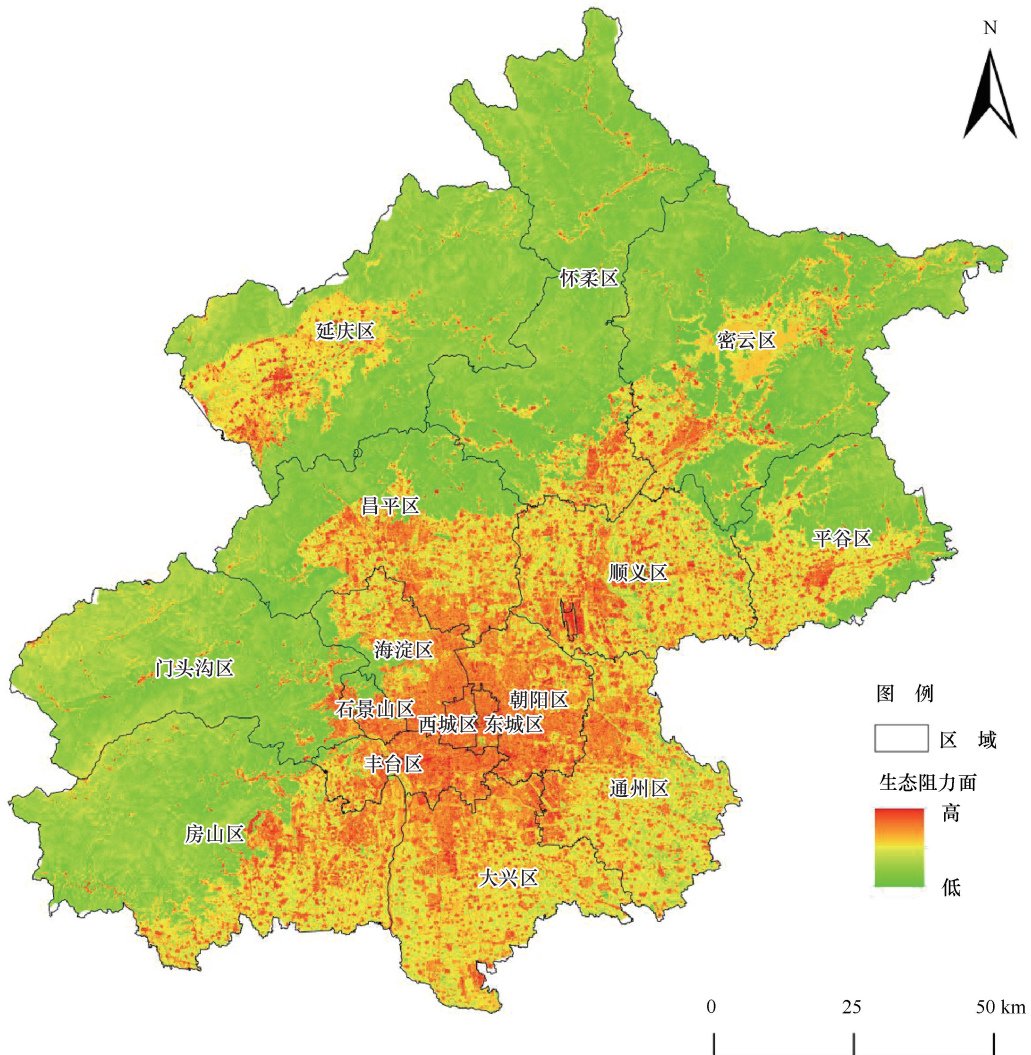


图 4 生态阻力面

Fig. 4 Ecological resistance surface

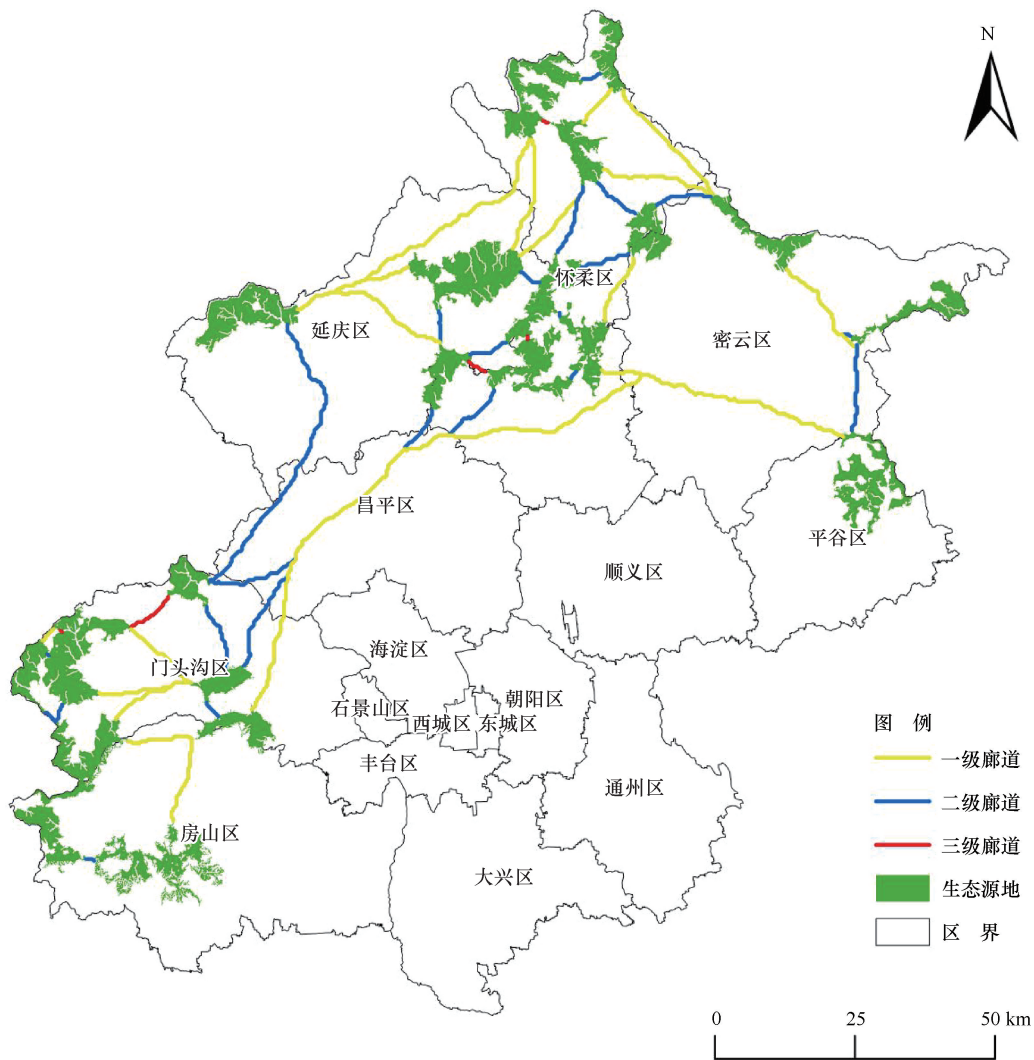


图5 生态廊道提取结果

Fig. 5 Extraction results of ecological corridors

此廊道较为集中, 不同源地之间的信息交流成本较低, 西南部与北部源地的交流主要依靠平谷区的两条廊道实现。阻力值较高的地区, 仅有延庆区内有一条廊道穿过, 中心城区没有任何一条廊道穿过, 东部源地与西部源地的交流不得不绕行经过北部源地才能到达西南部源地, 这也是研究区内最长的一条廊道。使用 Centrality Mapper 工具依据廊道的电流中心性将提取到的生态廊道分为三类, 18 条一级廊道, 23 条二级廊道和 5 条三级廊道。一级廊道主要分布在相距较远的源地之间, 这些廊道通常是距离较远的源地之间阻力最小的交流通道, 是信息交流的关键通道, 例如最长的一条一级廊道是东部源地到西部源地的唯一路径, 对于一级廊道应加强生态保护, 防止廊道被破坏从而阻断物种迁徙和信息交流。二级廊道主要分布在各个源地的边缘地带, 物种在西部、北部和东部源地之间交流时会优先沿着二级廊道运动到各部分源地边

缘, 然后沿着一级廊道在各部源地之间迁徙交流。三级廊道则主要分布在西部和北部源地内部, 源地之间距离较近。

2.4 生态安全格局构建

生态源地是具有高生态价值和生态系统服务功能完善的生态斑块, 为物种生存提供保障, 是物种迁徙、信息交流的起点和终点; 生态廊道是各生态源地之间物种迁徙和信息交流耗费成本最低的生态通道, 对生态廊道的阻断会严重影响生态环境; 生态夹点是物种迁徙和信息交流在生态廊道中的踏脚石, 采用电路理论将电流密度高的区域设为生态夹点, 生态夹点的修复和保护对物种迁徙、信息交流及生态环境的连通性具有重要作用。将生态源地、生态廊道和生态夹点三者结合, 构建源地—廊道—夹点一体的生态安全格局, 为研究区生态保护政策的制定提供依据。

北京市生态安全格局如图 6 所示, 由 21 个生态

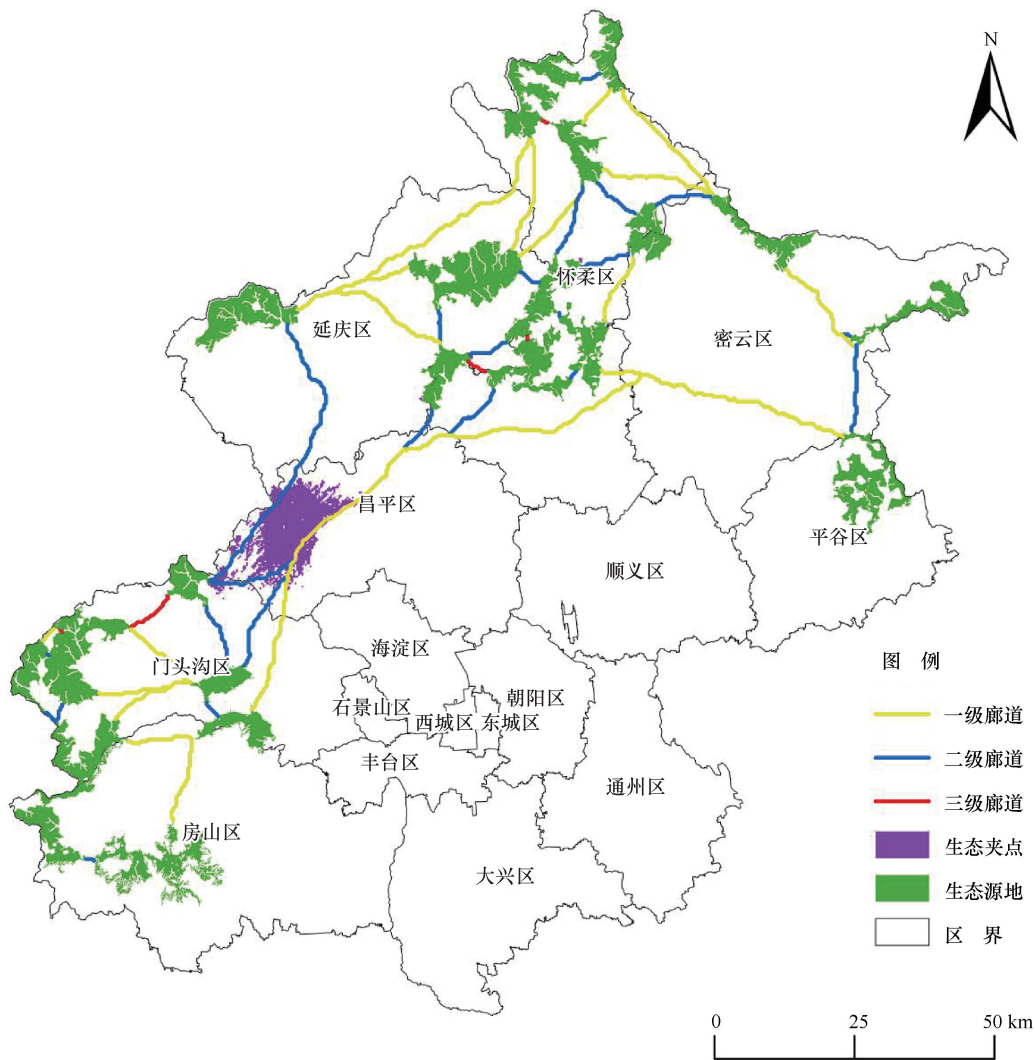


图6 生态安全格局

Fig. 6 Ecological security pattern

源地、46条生态廊道和1个生态夹点组成。生态源地面积为1 220.83 km², 有明显的聚集特征, 主要分布在研究区北部、西部和东部。生态廊道的长度为1 003.78 km, 与生态源地交错形成网状结构, 极大地提升了各源地之间的生态连通性, 因此要加强对生态廊道的保护优化, 促进生态源地之间物种迁徙和信息交流。基于 Pinchpoint Mapper 工具识别1个生态夹点斑块, 生态夹点在电路理论中是电流密度最高的区域。北京市生态夹点位于昌平区, 处于西部源地和北部源地的连接地带, 有4条廊道经过, 生态夹点在防止生态空间退化等方面具有重要作用。

依据研究结果提出“一块三区多带”的生态环境保护修复策略(见图7)。“一块”是指生态保护斑块, 该区域是生物交流的重要连接斑块, 位于昌平区生态控制区, 应持续开展相关生态保护工作, 减少人

类活动的干扰, 确保生态夹点不被破坏, 生态安全水平不降低。“三区”是指西部、北部和东部生态提升区。这些区域植被覆盖度高, 应该保持生物多样性, 禁止一切乱砍滥伐现象, 持续开展水土流失保护工作, 提升生境质量, 进一步提升生态源地的面积, 切实保障首都生态安全。“多带”则是生态维护带, 依靠各级生态廊道串联“三区”, 加强各生态源地之间的内外连通, 提升各生态区域的连通性, 维持生态安全格局的完整性, 形成健全的生态网络体系。

3 结果讨论

3.1 生态系统服务

城市生态系统服务已逐渐引起学者们的广泛关注, 深入探索其空间分布格局对城市的长远发展和科学规划具有举足轻重的意义^[34]。杨婉清等^[35]对北

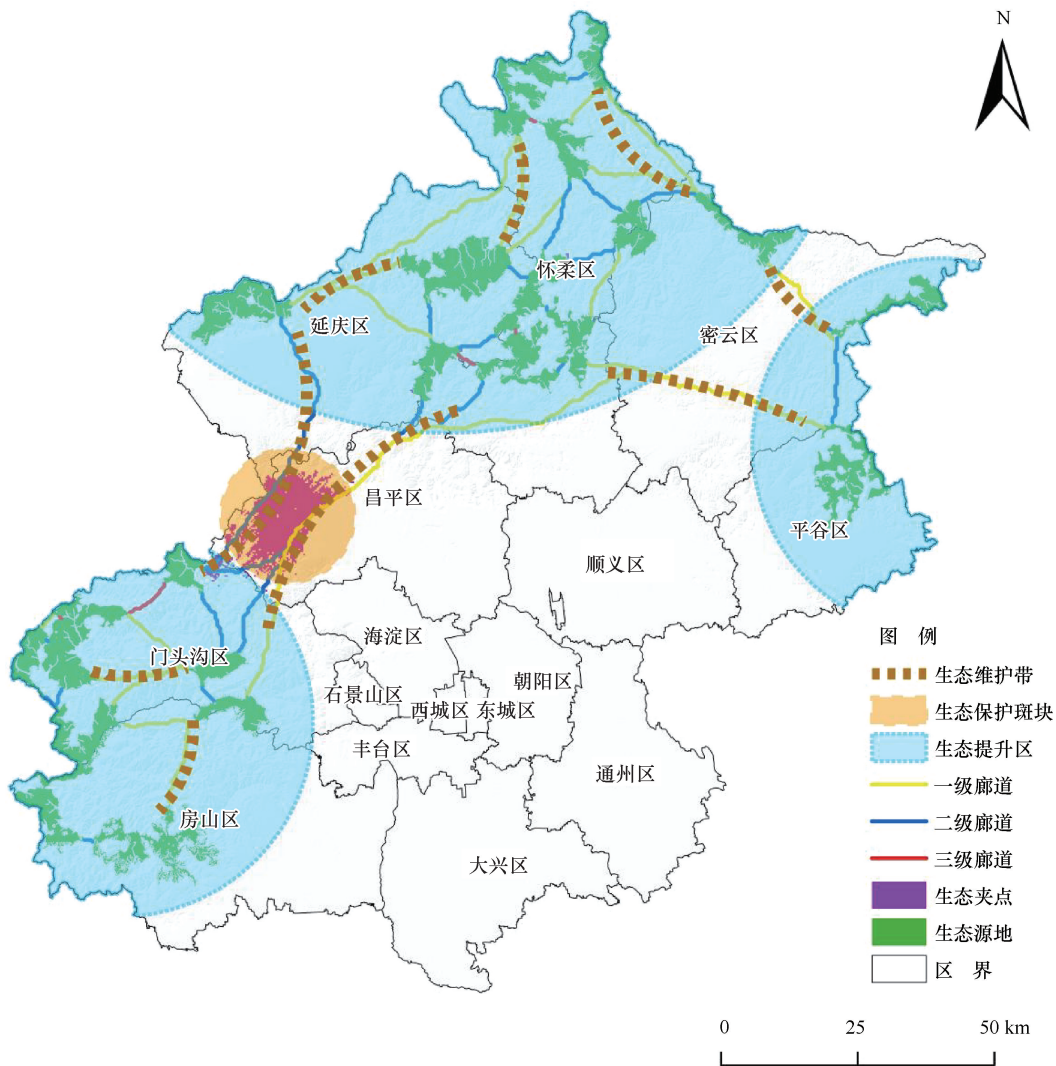


图7 生态修复策略

Fig. 7 Ecological restoration strategies

京市景观格局和生态系统服务交互作用进行分析,景观破碎化程度对生态系统服务具有负面影响,而景观多样性则具有正面作用。薛万来等^[36]模拟分析北京市内永定河流域碳储量时空变化,空间上山区碳储量服务显著高于平原区域,土地利用类型是碳储量变化的主导因素,时间上,碳储量与年降雨量拟合度高,两者存在显著正相关。YANG等^[37]对华南地区的产水服务评估发现,降雨量也是影响产水服务时间变化的主要因素,10 a内降雨量增加46%,产水量增加138%。此外,本研究对北京市水质净化服务和生境质量服务进行模拟,山区在水质净化服务和生境质量服务展现出比平原地区更强的服务价值。前人的研究结果表明^[38-39],植被能够有效去除水体中氮、磷等营养物质,减少水体富营养化程度,对水质净化具有重要作用,植被的光合

作用以及植被根系的固土作用,可以有效减少水土流失,改善生态环境,高度的植被覆盖率是山区生态系统服务价值高的主要原因。

3.2 生态安全格局

生态安全格局在城市生态建设中扮演着举足轻重的角色。它是生态学理论为基石,以景观生态学格局与过程关系为依据的生态规划模式。在生态源地的选择上,部分学者基于土地利用类型选择自然保护区、林地等斑块作为生态源地,这一结果较为直观,但忽略了生态源地与生态环境的交互作用。因此近年来学者们开始将眼光放在生态系统服务上,崔嵩等^[40]侧重于生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)作为主要评估标准,而孙梓渊等^[41]则聚焦于固碳释氧、土壤保持和水源涵养这三大生态系统服务。本研究在生态源地识别的基础上,额外选取了

生境质量和水质净化两类生态系统服务的评估结果作为识别依据,选取五类生态系统服务价值较高的区域,并结合 MSPA 分析来精确识别生态源地,结论的可靠性进一步提高。生态阻力面反映了区域内各种交流活动所受的阻力值大小,本研究参考前人选取结果以及数据的可获得性,选取高程、坡度和土地利用类型等 6 种阻力因子,同时采用变异系数法确定各阻力因子的权重,减少个人主观因素对构建阻力面的干扰与影响,使生态廊道和生态夹点的识别更具准确性。探索生态安全格局的构建是当前学者和有关部门的关注重点,俞孔坚等^[41]将北京生态安全格局概括为以西、北地区山地森林和大型湿地为重要生态源,以水系、林带等线性要素为廊道;汉瑞英等^[42]以防风固沙和生物多样性等生态功能为基础,结合现有自然保护区构建北京生态安全格局,结果表明,生态源地多分布在北京市西北区域,中部区域的生态源地主要是城市公园、绿地和水域,生态格局破碎化现象明显;《北京市生态安全格局专项规划(2021年—2035年)》(以下简称《规划》)中以生物多样性为基础构建了生物多样性生态格局,通过对比,本研究与《规划》所构建的生态安全格局在山区范围内基本一致,但因为《规划》使用的数据更为翔实,考虑了水土保持、历史文化遗产和市民休憩空间等因素,相较本研究在平原区域识别的更为精确。未来北京市生态安全格局应采取“提上限、保下限”的分区优化策略,山区是北京市高生态价值区,要持续开展生态保护工作,从而提升生态环境质量,提升生态源地面积和生态廊道数量,提升生态安全上限;平原是北京市的主要建设区,人口密度高,在进行建设活动时,要保证不破坏现有城市公园、绿地和水域等自然景观,生态环境质量不降低。

3.3 不足与局限性

本研究构建了北京市生态安全格局,但研究中因为数据获取的局限性等原因,研究结果仍有部分不足之处有待改进。本研究仅选取 5 类生态系统服务进行评估和识别生态源地,事实上,物种选择生态源地生存繁衍涉及的因素更多,未来需要更细致地选择识别生态源地的指标。InVEST 模型的数据多是来源于全国尺度的低分辨率数据,缺少高精度数据,且生物物理表等参数的选择主要参考以往研究,缺少实地调查,主观性较强,未来应注重数据的本地化获取,加强实地调查,确保数据的准确,从而提高模型模拟结果的精度。

4 结论

本研究以北京市为研究区,使用 InVEST 模型对水源涵养、碳储存、土壤保持、生境质量和水质净化五种生态系统服务进行模拟评估,并结合 MSPA 分析识别生态源地,基于最小阻力模型和电路理论提取生态廊道和生态夹点,构建北京市生态安全格局,主要得出以下结论。

(1)依据模型模拟结果,北京市生态系统服务空间分布差异较大;生境质量和土壤保持高价值斑块较少,分别仅占研究区总面积的 5.67%和 3.76%;水源涵养分布受到降雨量和土地利用类型的影响,整体呈现东部和南部高西部和北部低的空间格局;水质净化和碳储存功能空间分布保持一致,山区的价值量明显高于平原地区。降雨量和土地利用类型分别是影响各生态系统服务时空分布变化的主导因素。整体上,北京市生态系统高价值斑块位于西部和北部山区中,土地利用类型主要以林地和草地为主,生物多样性丰富,该地区属于北京市生态红线保护范围,后续应持续开展相关工作。

(2)北京市生态安全格局主要包括 21 个生态源地、46 条生态廊道和 1 个生态节点。生态源地总面积为 1 220.83 km²,占北京市总面积的 7.45%,主要分布于西部和北部山区。生态廊道总长度 1 003.78 km,共有 18 条一级廊道、23 条二级廊道和 5 条三级廊道,生态廊道的分布主要依附于水系和林带等线性要素。生态夹点共有一个,位于西部源地和北部源地的连接处。北京市未来生态环境保护要区分山区和平原地区分区精准施策,从而打造更为稳定的生态安全格局。

参考文献 (References):

- [1] WANG D C, CHEN J H, ZHANG L H, et al. Establishing an ecological security pattern for urban agglomeration, taking ecosystem services and human interference factors into consideration[J]. PeerJ, 2019, 7: e7306.
- [2] QIAN W Q, ZHAO Y, LI X Y. Construction of ecological security pattern in coastal urban areas: A case study in Qingdao, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110754.
- [3] DUAN J Q, CAO Y, LIU B, et al. Construction of an ecological security pattern in Yangtze River Delta based on circuit theory[J]. Sustainability, 2023, 15(16): 12374.
- [4] 孙梓渊,王赛超,陈彬.基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2024,44(11):4650-4661.

- SUN Z Y, WANG S G, CHEN B. Construction of ecological security pattern and assessment of ecological resilience based on ecosystem services: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4650-4661.
- [5] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 等. 区域生态安全格局: 设计原则与方法[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 1055-1062.
- LI X Y, MA K M, FU B J, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): Designing principles and method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [6] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- MA K M, FU B J, LI X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 761-768.
- [7] RAPPORT D J. Ecosystems not optimized: a reply[J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, 2(1): 57.
- [8] SU Y X, CHEN X Z, LIAO J S, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 35-46.
- [9] HODSON M, MARVIN S. "Urban ecological security": A new urban paradigm? [J]. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(1): 193-215.
- [10] CHO S H, POU DYAL N, LAMBERT D M. Estimating spatially varying effects of urban growth boundaries on land development and land value[J]. *Land Use Policy*, 2008, 25(3): 320-329.
- [11] LIN Q X, ELADAWY A, SHA J M, et al. Remotely sensed ecological protection redline and security pattern construction: A comparative analysis of Pingtan (China) and Durban (south Africa) [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 2865.
- [12] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999(1): 10-17.
- YU Kongjian. The security pattern of landscape ecology for biodiversity protection [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(1): 10-17.
- [13] 王晓峰, 朱梦娜, 张欣蓉, 等. 基于“源地-阻力-廊道”的三江源区生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4609-4623.
- WANG X F, ZHU M N, ZHANG X R, et al. Ecological security pattern construction of the three-river source region based on source-resistance-corridor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4609-4623.
- [14] 朱发昇, 李长春, 侯爱冰. 国家重大战略和水资源演变背景下河西走廊水安全保障的思考[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(6): 20-25.
- ZHU Fasheng, LI Changehun, HOU Yuanbing. Thought on water security guarantees in the Hexi Corridor under the background of major national strategies and water resource evolution[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(6): 20-25.
- [15] WANG Y, ZHANG L, SONG Y H. Study on the construction of the ecological security pattern of the Lancang River Basin (Yunnan section) based on InVEST-MSPA-circuit theory [J]. *Sustainability*, 2023, 15(1): 477.
- [16] 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.
- YE X, ZOU C X, LIU G H, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [17] 李倩瑜, 唐立娜, 邱全毅, 等. 基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建: 以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(6): 2284-2294.
- LI Q Y, TANG L N, QIU Q Y, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model: a case study of Xiamen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6): 2284-2294.
- [18] 吕静, 李明阳. 基于生态系统服务价值评价的松花江流域吉林段生态安全格局构建[J]. *河南科学*, 2024, 42(3): 384-392.
- LYU Jing, LI Mingyang. Construction of ecological security pattern in jilin section of songhua river basin based on ecosystem service value evaluation [J]. *Henan Science*, 2024, 42(3): 384-392.
- [19] 张平江, 党国锋. 基于MCR模型与蚁群算法的洮河流域生态安全格局构建[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(3): 481-491.
- ZHANG Pingjiang, DANG Guofeng. Construction of ecological security pattern in taohe river basin based on mcr model and ant colony algorithm [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(3): 481-491.
- [20] 孙宝娣, 钟城豪, 崔东旭, 等. 区域协同视角下黄河流域生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4624-4636.
- SUN B D, ZHONG C H, CUI D X, et al. Constructing ecological security patterns through regional cooperation in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4624-4636.
- [21] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [22] 向爱盟, 赵筱青, 黄佩, 等. 高原湖泊流域国土空间生态修复优先区诊断及修复研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(15): 6143-6153.
- XIANG A M, ZHAO X Q, HUANG P, et al. Diagnosis and restoration of priority area of territorial ecological restoration in Plateau Lake Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6143-6153.
- [23] KONG F H, YIN H W, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [24] 张小飞, 李正国, 王如松, 等. 基于功能网络评价的城市生态安全格局研究: 以常州市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(4): 728-736.
- ZHANG X F, LI Z G, WANG R S, et al. Research on urban ecological security pattern based on functional network evaluation: A

- case study of Changzhou City [J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2009, 45(4): 728-736.
- [25] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.
- [26] 刘瑞宽, 杨林朋, 李同昇, 等. 基于 ERA 和 MCR 模型的生态安全格局构建: 以陕西沿黄地区为例[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 1053-1063.
LIU R K, YANG L P, LI T S, et al. Establishment of ecological security pattern along the Yellow River in Shaanxi Province based on ERA and MCR models[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(2): 1053-1063.
- [27] 姚材仪, 何艳梅, 程建兄, 等. 岷江流域生态安全格局评价与优化: 基于最小累积阻力模型和重力模型[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 7083-7096.
YAO C Y, HE Y M, CHENG J X, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Minjiang River Basin based on MCR model and gravity model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17): 7083-7096.
- [28] 包玉斌, 王耀宗, 路锋, 等. 六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(7): 1172-1183.
BAO Yubin, WANG Yaozong, LU Feng, et al. Construction and zoning optimization of territorial spatial ecological security pattern in Liupan Mountains Area [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(7): 1172-1183.
- [29] YANG X, CHEN R S, MEADOWS M E, et al. Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China [J]. *Water Supply*, 2020, 20(3): 1035-1045.
- [30] 丁菊, 柳西波, 何凯. 宁夏黄河流域生态系统服务权衡协同及其与人类活动强度的关联性研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 171-182.
DING J, LIU X B, HE K. Trade off and synergy of ecosystem services and their correlation with human activity intensity in the Yellow River Basin of Ningxia[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(7): 171-182.
- [31] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 等. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 209-219.
LIU H Y, XIAO W F, LI Q, et al. Spatiotemporal variations and trade-offs of ecosystem services in Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1): 209-219.
- [32] YAN F P, SHANGGUAN W, ZHANG J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 2.
- [33] CARROLL C, MCRAE B H, BROOKES A. Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of gray wolf populations in western North America [J]. *Conservation Biology*, 2012, 26(1): 78-87.
- [34] 王子尧, 孟露, 李惊, 等. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3571-3581.
WANG Z Y, MENG L, LI L, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3571-3581.
- [35] 杨婉清, 杨鹏, 孙晓, 等. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6487-6498.
YANG W Q, YANG P, SUN X, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6487-6498.
- [36] 薛万来, 朱莎莎, 朱梦洵, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的永定河流域碳储量功能变化分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9): 13-25.
XUE W L, ZHU S S, ZHU M X, et al. Carbon storage function in Yongding River Basin based on the FLUS-InVEST model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9): 13-25.
- [37] YANG D, LIU W, TANG L Y, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133-143.
- [38] 吴尧. 河岸植被缓冲带植被类型与宽度对水质净化效益的影响[J]. *现代园艺*, 2021, 44(13): 49-51.
WU Yao. Impact of vegetation type and width of riparian vegetation buffer zone on water purification benefits [J]. *Modern Horticulture*, 2021, 44(13): 49-51.
- [39] 李平. 青海高寒区典型植被的固土净水功能与机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
LI Ping. Soil Stabilization and Water Purification Functions and Mechanisms of Typical Vegetation in Alpine Regions of Qinghai [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [40] 崔嵩, 杜显磊, 贾朝阳, 等. 黑龙江省生态系统服务价值估算及其生态安全格局构建[J]. *环境科学*, 2024, 45(11): 6489-6500.
CUI Song, DU Xianlei, JIA Zhaoyang, et al. Estimation of ecosystem service value and construction of ecological security pattern in Heilongjiang Province [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11): 6489-6500.
- [41] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.
YU K J, WANG S S, LI D H, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [42] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文, 等. 基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 95-102.
HAN R Y, ZHAO Z P, XIAO N W, et al. Construction of ecological security pattern in Beijing City based on minimum resistance model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 95-102.

(责任编辑 王璐)