# 基于 LCA 与电路理论的北京市门头沟区景观安全格局构建*

钟子兰 吴其江 郑 璐 蒋家星 孙 喆

北京建筑大学建筑与城市规划学院 北京 100044

**摘要**：【目的】探索门头沟区景观安全格局构建方法，为相似地区乡村景观研究与保护提供参考。【方法】运用“LCA-MSPA-电路理论-复杂网络理论”对门头沟区开展景观资源评估、源地识别、阻力面构建、生态网络要素提取、拓扑指标优化，构建多层级景观空间网络。【结果】1）共分出 17 种景观类型，289 个特征区域，景观类型丰富；2）生成景观源地 13 处，共识别 21 条景观廊道、18 处夹点、24 处障碍点；3）现状格局呈“西多东少”的格局分布，整体连通性较强，稳定性还需加强。【结论】形成“区-源地-廊道-节点”景观空间网络，从全区层面建设景观保护区，并从源地、廊道、夹点和障碍点 4 方面提出具体修复措施，以提升景观网络的结构与连通性，为复杂山区乡村景观提供新的方法范式，实现生态保护与修复。

**关键词**：景观安全格局；景观特征；电路理论；复杂网络模型；门头沟区

DOI：10.12169/zgcsly.2024.11.01.0002

# Construction of Landscape Security Pattern in Mentougou District of Beijing Based on LCA and Circuit Theory

Zhong Zilan Wu QiJiang Zheng Lu Jiang Jiaxing Sun Zhe

(School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract**: 【Objective】 Explore the construction method of landscape security pattern in Mentougou District, and provide reference for rural landscape research and protection in similar areas. 【Method】 Using “LCA-MSPA- Circuit Theory-Complex Network Theory”, the landscape resources assessment, source identification, resistance surface construction, ecological network elements extraction and topological index optimization were carried out in Mentougou District, and a multi-level landscape spatial network was constructed. 【Result】 1) there are 17 landscape types and 289 characteristic areas, which are rich in landscape types; 2) 13 landscape sources were generated, and 21 landscape corridors, 18 pinch points and 24 obstacle points were identified; 3) The current situation is distributed in a pattern of “more in the west and less in the east”, with strong overall connectivity and stability that needs to be strengthened. 【Conclusion】 Form a “area-source-corridor-node” landscape space network, and put forward specific repair measures from four aspects: source, corridor, pinch point and obstacle point. This study provides a new method paradigm for rural landscape in complex mountainous areas, which is helpful to improve the stability of landscape system and realize ecological protection and restoration.

**Keywords**: landscape safety pattern; landscape features; circuit theory; complex network models; mentougou district

收稿日期：2024-11-01

* 基金项目：北京市属高校教师队伍建设支持计划优秀青年人才培育计划项目（BPHR202203082）；国家自然科学基金青年项目（52108036）；北京建筑大学教学改革项目（01080824013）；北京建筑大学研究生创新项目资助（PG2024023）

第一作者：钟子兰（2000- ），女，硕士生，研究方向为城乡开放空间规划设计。E-mail：zhongzilan0606@163.com

景观特征评估（Landscape Character Assessment，LCA）是一种通过对景观特征进行分类，以评估特定地区景观的方法，是连接空间和景观的重要途径，在欧洲广泛应用于景观策略、城市规划、休闲旅游等领域[1]。国内学者将 LCA 方法应用于跨尺度、多类型研究对象中，如香港大都市、北京长城文化带、湖北碧山村乡村景观等[2-4]。

电路理论（Circuit Theory）于 2006 年首次由 McRea 应用于景观生态学领域[5]，并在近年形成“源地识别-阻力面构建-廊道选取”的生态网络构建方法[6-7]。其在计算生态夹点与生态障碍点等连通性质方面更加精准。目前电路理论多应用于绿色基础格局优化、生态网络构建、城市热环境格局优化中[8-9]，在景观安全格局研究中较少。

北京市门头沟区是首都生态涵养区和京西重要生态屏障。而“23·7”暴雨导致灾后生态景观环境严重破坏，需全面提升全区生态安全韧性，亟待对全区景观安全格局开展整体性研究。传统的景观安全格局构建方法多注重栅格数据的空间运算，缺乏对景观系统的整体性分析，而 LCA 与电路理论的结合可有效支撑整体景观分类并基于景观连通性计算构建景观格局。综上，本研究探索门头沟区景观安全格局构建方法，并对安全格局开展复杂网络拓扑分析，研究网络中结构与功能之间的关系，开展门头沟区景观格局分区，构建多层级景观空间网络，提出相应的景观恢复措施，为相似地区乡村景观研究与保护提供参考。

## 1 研究区概况

门头沟区（115°25′00″—116°10′07″E，39°48′34″—40°10′37″N）位于北京市城区正西偏南，该区东西长约 62 km，南北宽约 34 km，总面积 1 447.85 km$^2$[10]。海拔为 50～2 303 m，山地面积占 98.5%，平原面积仅占 1.5%，整体高差明显，地势呈西北高、东南低的走势。门头沟区拥有丰富的景观资源，分布着多个自然保护区、风景名胜区、森林公园及其他景区（图 1）。

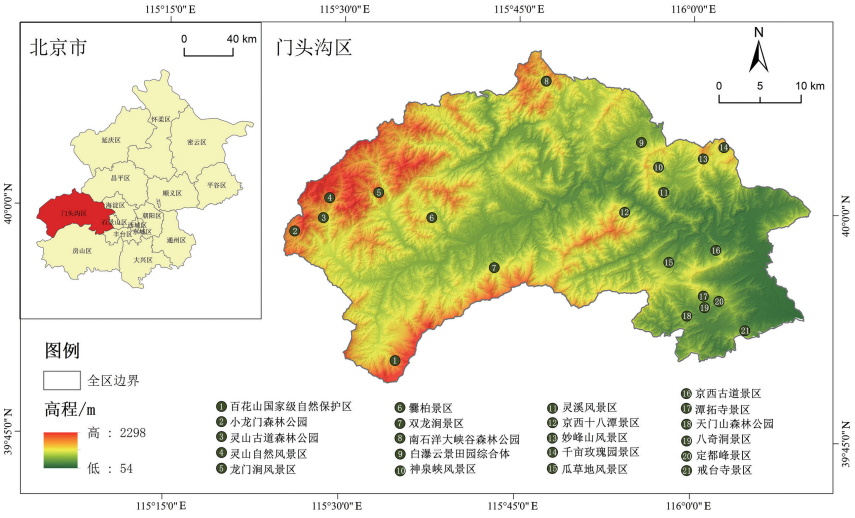



图 1 门头沟区区位、高程与重要景观资源分布

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

以 2020 年为研究年限，主要数据来源：1）植被类型数据来源中国科学院植物数据中心（https://www.plantplus.cn/cn）。2）DEM、坡度数据源自地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn），分辨率为 30 m。3）NDVI、土地利用类型数据源自中科院资源环境科学与数据中心，分辨率为 30 m（https://www.resdc.cn/）。4）道路数据源自 openstreetmap 地图数据社区（https://www.openstreetmap.org）。5）其他社科资料来自门头沟区政府官网。将以上数据投影处理，并为统一坐标系 WGS 1984 UTM Zone 50N。

### 2.2 基于 LCA 的门头沟区景观资源评估

水文、地形、植被类型和土地利用按照景观属性进行分类，地形按照相对高度进行分类（表 1）[11]。在 ArcGIS 中按照 100 m×100 m 将

研究区划分为 146 083 个景观空间单元，以基本景观单元为基础进行特征识别，定义每个单元的景观特征为其边界内面积占比最大的景观类型。

**表 1　景观特征要素**

| 要素名称 | 变量及代码 |
|---|---|
| 水文 | R41=河流、R43=水库 43、R46=滩涂 |
| 地形 | 平原：D1<20 m、丘陵：20 m<D2<200 m、山地：D3>200 m |
| 植被类型 | E1=针叶林、E4=灌丛、E8=草甸、E11=栽培植被、E3=阔叶林 |
| 土地利用 | L1=耕地、L2=林地、L3=草地、L4=水域、L5=建设用地 |

对不同景观类型进行实地调研，评估景观特征类型的准确性并进行修正，通过人工校绘制最终的景观特征地图，建立景观特征类型价值评估体系[2,12]（图 2），通过专家打分与模糊层次分析法将景观价值分为高、较高、中、较低、低 5 类。

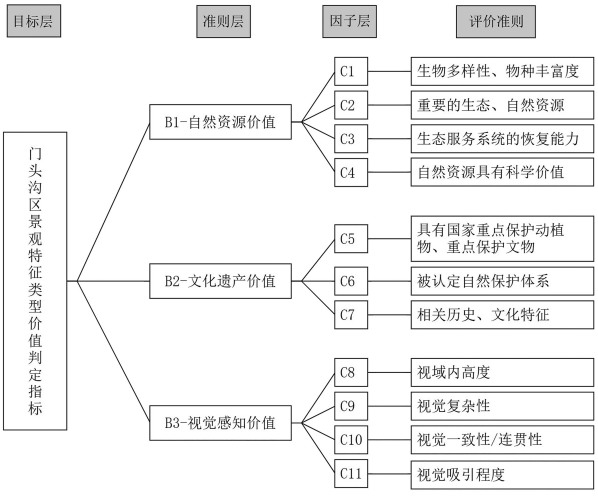



**图 2　景观价值评估体系**

## 2.3　基于 MSPA 与生态网络分析的景观源地识别

依据景观价值判断的结果，选取景观价值结果为高的区域作为前景数据，其他类型的数据作为背景数据，利用 Guidos Toolbox 软件的 MSPA 工具将景观划分为核心区、孤岛、连接桥、环岛、支线、边缘区、孔隙 7 种类型。提取面积大于 3 $km^2$ 的核心区作为初始源地。

在 Confor 软件中进行景观连通性计算，通过多次实验，设置阈值宽度 2 000 m 为最佳稳定状态，连通概率设为 0.5。计算可能连通性指数（*PC*）和斑块重要性指数（*dPC*），根据重要性分析结果最终选取 *dPC*>0.1 的斑块作为景观源地。

## 2.4　基于 AHP 法的景观阻力面构建

从自然和人文两方面选取 6 个阻力因子，并对每个因子分 5 级赋值[12-15]（表 2）。除景观价值和土地利用类型，其余 4 个因子均采用自然断点法确定。结合专家打分与 AHP 层次分析法，确立单因子权重，利用 ArcGIS 软件栅格加权叠加构建综合阻力面。

**表 2　阻力因子赋值及权重**

| 阻力因子 | 指标分级 | 阻力值 | 权重 | 阻力因子 | 指标分级 | 阻力值 | 权重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 景观价值 | 优 | 1 | 0.29 | 坡度/(°) | 0~10.31 | 1 | 0.12 |
| | 较优 | 2 | | | 10.31~19.78 | 2 | |
| | 中等 | 3 | | | 19.78~28.97 | 3 | |
| | 较差 | 4 | | | 28.97~39.00 | 4 | |
| | 差 | 5 | | | 39.00~71.05 | 5 | |
| 土地类型 | 林地/未利用地 | 1 | 0.21 | 距道路距离/m | >800 | 1 | 0.09 |
| | 草地 | 2 | | | 600~800 | 2 | |
| | 水域 | 3 | | | 400~600 | 3 | |
| | 耕地 | 4 | | | 200~400 | 4 | |
| | 建设用地 | 5 | | | <200 | 5 | |
| NDVI | >0.77 | 1 | 0.18 | 距居民点距离/m | >800 | 1 | 0.11 |
| | 0.68~0.77 | 2 | | | 600~800 | 2 | |
| | 0.56~0.68 | 3 | | | 400~600 | 3 | |
| | 0.38~0.56 | 4 | | | 200~400 | 4 | |
| | 0~0.38 | 5 | | | <200 | 5 | |

## 2.5　基于电路理论模型的景观网络要素提取

通过 Arcgis 平台中的 Linkage Mapper 工具把综合累计阻力面和景观源地同步整合导入，模拟物种或能量迁移扩散的最小成本路径，识别生态廊道。

使用 Pinchpoint Mapper 工具提取夹点，电流

密度廊道宽度设置为 500 m，将 0 排除，利用自然断点法分为 5 级，选择电流密度最高数值的区域确定为夹点区域。

使用 Barrier Mapper 工具识别景观网络障碍点，并计算累计电流恢复值。采用“Maximum”模式进行迭代运算，设置最小搜索半径为 50 m，最大搜索半径为 200 m，步长为 50 m。

### 2.6 基于复杂网络的拓扑指标优化

运用复杂网络理论，视景观空间网络中源地为节点，廊道为边[16]，通过各项指标反应网络中的结构与功能特性，将景观廊道 id1 和 id2 导入复杂网络可视化软件 Gephi，选取 7 个度量指标，并进行归一化处理。其中度、平均路径长度和和模块性用于描述景观网络的基本特征[17]，聚类系数、紧密度中心性、介数中心性和特征向量中心性为重要指标[18]，反映每个节点的相对重要性。

## 3 结果与分析

### 3.1 景观特征评估

以“土地利用类型+植被类型+地形”3 类属性命名，最终将门头沟区划分为 17 个景观类型，289 个特征区域，其中山地阔叶类型是面积占比最大的景观类型（图 3）。景观价值量高的景观类型有河流景观、山地阔叶林景观、山地针叶林景观、丘陵阔叶林景观，主要分布在中西部山区和河流一带。

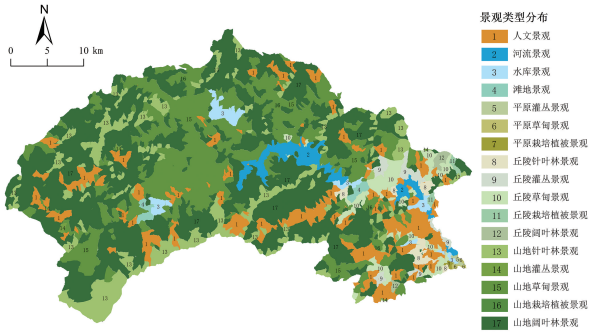



图 3 景观类型分布

### 3.2 景观安全格局构建

#### 3.2.1 景观源地识别

识别出 13 个景观源地，主要为自然保护区、自然风景区与森林公园（图 4、表 3）。西部山区和南部较多以组团式分布，面积较大，如灵山自然风景区等；北部、东部分布较少且分散，如南石洋大峡谷森林公园等。

源地总面积为 421.86 $km^2$，编号 13 的源地面积最大，面积为 185.96 $km^2$，dPC 为 70.82；其次是编号 9，面积为 112.92 $km^2$，dPC 为 53.99。这两个源地面积总和占总景观源地 70.85%，说明其他源地面积较小，尤其东部地区源地分散较破碎，生境质量较差，这与东部多为建设用地实际情况相符。

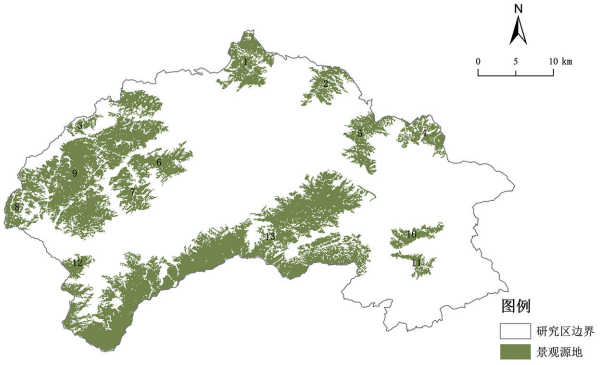



图 4 景观源地分布

表 3 景观源地编号及连通性

| 编号 | 面积/$km^2$ | dPC | 编号 | 面积/$km^2$ | dPC |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 21.81 | 0.49 | 8 | 7.94 | 3.97 |
| 2 | 12.14 | 0.15 | 9 | 112.72 | 53.99 |
| 3 | 3.74 | 1.79 | 10 | 8.08 | 0.15 |
| 4 | 11.68 | 3.13 | 11 | 5.15 | 0.11 |
| 5 | 17.59 | 8.46 | 12 | 5.53 | 33.51 |
| 6 | 16.65 | 7.94 | 13 | 185.96 | 73.82 |
| 7 | 12.87 | 5.91 | | | |

#### 3.2.2 阻力面识别

由图 5~6 可知，综合阻力值整体呈现东部高、西部低的特点。高阻力值地区靠近建成区，靠近铁路、高速等快速道路，植被覆盖度低，多为草甸景观；低阻力值地区以西部山区、南部风景区为主，植被覆盖度高，多为阔叶林、针叶林景观。研究区大部分地区以低阻力值为主，说明门头沟地区物种或能量在迁移或推进过程中受到的阻碍较小。

#### 3.2.3 景观廊道、夹点与障碍点构建

连接 13 个景观源地的景观廊道共有 21 条（图 7A），共计 74.46 km。最长的廊道为 13.39 km，最短为 0.11 km。空间分布上总体呈现“西多东少”的格局，由于东部与北部源地分布较远，廊道较为狭长，连接东部和北部的源地。西部的源地分布较多，连接的廊道数量多、分布密集、长度较短，整体表现的空间连通性强。中部地区存在廊道空缺的情况，景观格局极为脆弱，不利于整体生态格局的构建。

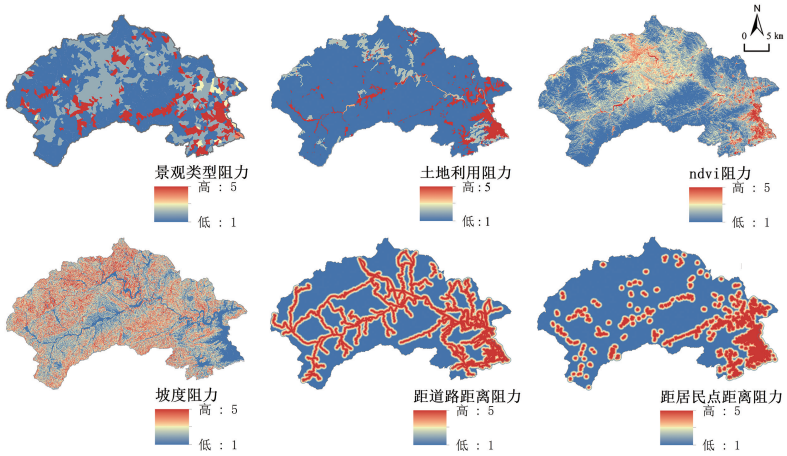



图 5　单因子阻力面

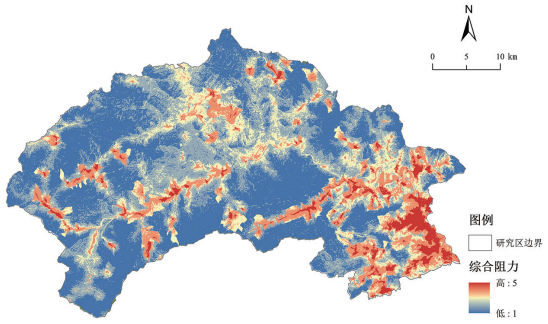



图 6　综合阻力面

共识别出 18 个夹点，主要位于研究区东部和西部，其中面积最大为 0.33 $km^2$（图 7B）。重要夹点分布在西部的源地附近，该地区廊道密集、夹点分布密集，生境较好；一般夹点主要位于东北部的灵溪风景区、神泉峡风景区、妙峰山风景区等，夹点分布较少，且面积较小。夹点较多分布在山地阔叶林景观、河流景观、山地草甸景观；夹点所在位置的阻力值较低，表明物种在该低阻力区域更容易流动，有助于维持景观的稳定性。

共识别 24 个障碍点，面积共 1.62 $km^2$，其中最大障碍点面积为 0.90 $km^2$（图 7C）。景观障碍点所在位置廊道单一细长，源地与源地之间距离较远，能量流通阻力较大，容易发生断裂。叠加景观类型与综合阻力面识别发现，面积大的障碍点处于建设用地附近，人类活动干扰复杂，周边生态阻力大，对景观连通性存在破坏行为。

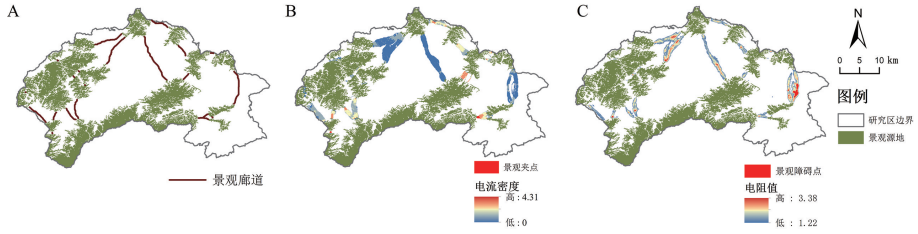



图 7　景观廊道、夹点、障碍点分布

综上，研究区内部分景观廊道单一且较长，容易发生断裂，急需提高连通性。景观夹点主要沿廊道两端分布，靠近景观源地，重要夹点较为稀疏，且与障碍点存在部分重叠地方，需要重点进行修复。

### 3.3　景观网络的拓扑指标分析

从图 8A 中可见，9 号和 13 号节点位于网络的中心位置，起着重要的连接作用。其余节点呈分散状态分布，相互连接并传输信息。根据模块大小可以分为 4 个模块（图 8B），基于模块化的定义，每个模块内的节点都具有很强的连通性，如节点 10、11、13 在同一模块，在地理位置方面也彼此相邻，景观连通性强。模块度值最低为 0，为节点 2、4、5，位于研究区的东北部，表明稳定性较差，容易遭到破坏。

从度（图 9A）分析，节点 9 和 13 度值为 7，证明这些节点在网络中的重要作用。度的最小值为 1，说明网络中每个节点至少有一个节点相连，

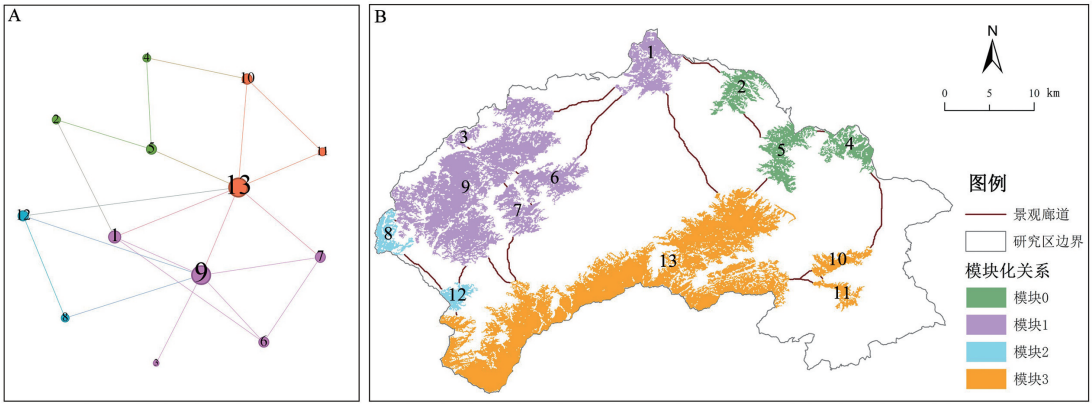



图 8 景观网络结构、模块关系与地理位置

不存在孤立的节点。门头沟区景观网络的平均路径长度为 2.051，说明研究区网络能量流动性高，景观要素之间的相互作用较强、传递效率较高。网络中有 5 个节点的聚类系数（图 9B）大于 0.5，其中节点 8 和 11 的聚类系数达到 1，表明与连接它们的节点有很强的相似性，而 4 个节点的聚类系数为 0，表明与连接它们的节点间有较大的异质性。

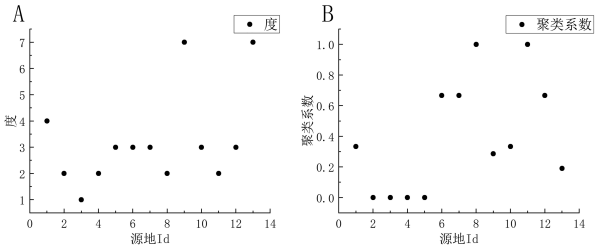



图 9 景观空间网络基本拓扑指标

门头沟区景观网络的接近中心性差异较大，6 个节点的值大于 0.5，其中节点 13 接近中心性最大，为 0.71，说明该节点位于网络的正中心；值低于 0.5 的节点接近中心性变化不明显。节点 9 与节点 13 的介数中心性明显大于其他节点，表明这些节点有助于能量传递和生物流动；相反，节点 3、8 和 11 的介数中心性为 0，表明这些节点不利于生物流动（图 10）。

综上，节点 9 和 13 是网络中最重要的节点，节点 2、3 和 4 的各项指标值非常低，可以通过增加它们的拓扑指标值来增强景观网络的拓扑性质。

### 3.4 门头沟区景观格局发展策略

#### 3.4.1 建设多层级景观空间网络

以不同尺度建设廊道系统，建立“区-源地-廊道-节点”景观空间网络。在规划层面，通过

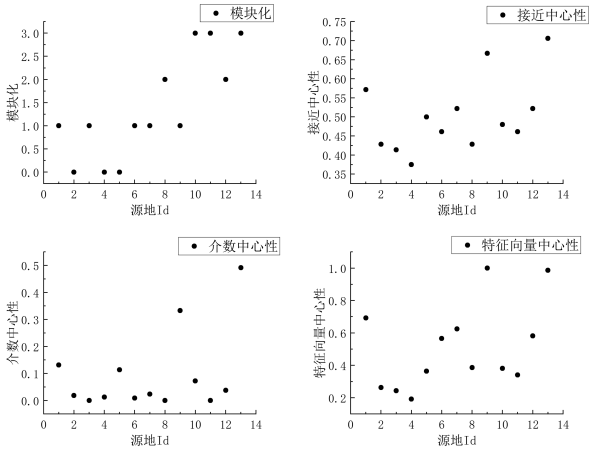



图 10 景观空间网络重要拓扑指标

景观网络建设，确保对每一层级进行有序的保护与管理。建设高品质景观点，促进经济旅游与景观资源保护协同发展。建立以区为统筹，景观源地为核心，廊道为连接，节点为支撑的多层级景观安全格局，全区范围内的辐射，利于统筹管理，实现景观生态经济平衡发展。

#### 3.4.2 全域层面建设景观保护区

以清水河、永定河流域建设景观保护轴线，依据拓扑指标结果的景观源地模块化特征分析进行组团，将门头沟区划分为 4 个景观保护区（图 11），即生态恢复区、山地保护区、景观优化区、景观缓冲区。

生态恢复区位于门头沟区东北部，地处雁翅镇与妙峰山镇，具有妙峰山风景区、神泉峡风景区等景观资源，主要景观类型有山地针叶林与丘陵各类景观。该区景观资源多，但与其他源地连通性较差，需促进生态系统的恢复和生物多样性的提升。

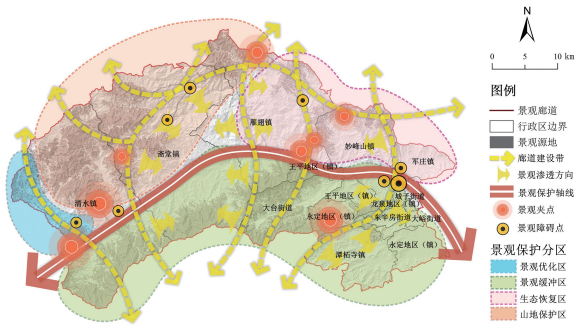



图 11　景观格局与分区规划

山地保护区分布于门头沟区西北部，地处清水镇、斋堂镇与雁翅镇，具有爨柏景区与灵山自然风景区等景观资源，主要景观类型有人文景观与山地各类景观。该区景观资源分布集中，且均位于门头沟地势较高的山地地区，森林面积占比大，应注意保护山地自然景观和野生动植物的栖息地，同时在进行资源开发的时候应注意限制人类的活动，确保生态系统的完整性和稳定性。

景观优化区位于门头沟区的西部清水镇内，占地面积较小，距离偏远，具有小龙门森林公园景观资源，主要景观类型有山地针叶林、山地草甸、山地阔叶林景观。该区景观环境良好，需进一步提高景观要素服务功能，提高景观价值。

景观缓冲区位于门头沟区南部狭长地区，横跨面积大、地形变化复杂，经过门头沟城区街道与永定镇、潭拓寺镇等 7 镇，具有永定河、百花山国家自然保护区、天门山森林公园等景观资源，主要景观类型复杂多变。地理位置上靠近建设区域。该区景观资源可进行适当开发，进行更新利用，为人类提供一定的景观服务价值。同时，由于中部景观源地空缺，景观空间网络脆弱，山地保护区与景观缓冲区承载了维持整体景观空间网络韧性的功能。

### 3.4.3　景观恢复措施

保护景观源地。要加强源地的保护和管理，对于门头沟中心地区的源地空缺问题，挖掘景观资源，增设小型斑块源地。对于受损的源地，实施生态恢复项目，如增加乡土植物种植、水土保持等；耕地方面采用的退耕还林、退耕还湿等生态修复方式[19]。

加固景观廊道。门头沟地区南北向源地距离较远、景观廊道距离长，容易破裂，需在易断裂处提高景观廊道连通性，如建设植被带、防护林带[20]，永定河流域建设生态沟渠。

设置景观夹点。门头沟现状夹点数量少且面积较小，物种流通性较差，应在关键位置建设夹点，例如增设建立自然保护区、加大植被种植、增加林地与河岸自然化等措施，扩大夹点数量与面积。

修复障碍点，减少阻力面的影响。由于障碍点多在建设用地边缘附近，距居民点距离与距道路距离对阻力面影响较大，在道路上建立生态桥梁等；在建筑上采取生态化设计，如绿色屋顶、生态墙面；合理规划建设用地数量，去除或修复障碍点。同时，需限制人类活动对景观源地的干扰，分步分层级进行景观开发。

## 4　讨论

研究发现，门头沟区西部与南部虽受到建设用地的影响，但由于源地数量多、面积大，景观连通性仍然较强，这与前人研究结果基本一致[21]。本研究发现，全区廊道总体呈现“西多东少”的景观格局，北部与东部廊道脆弱，与景观资源分布稀散和建设用地影响有关，这与前人研究存在差异，主要是因为以往研究纳入的景观要素较少，而本研究综合考虑多种景观要素的影响，同时，门头沟地区的土地利用类型等环境发生了变化[22]。

本研究在现有的“源地-廊道-节点”的生态安全格局构建的理论基础上，引入 LCA 进行景观特征的分类和价值判定，比以往源地筛选直接采用土地利用类型数据更具创新性[9,15]，加强了对人为因素的影响。将电路理论应用在景观格局建设中并验证其可行性，并加入复杂网络模型，通过计算门头沟区节点和网络的拓扑性质，定量化研究分析源地与廊道间的关系。提出景观格局与分区规划，构建多层级的景观空间网络，并提出相应的发展策略，为区域景观保护与利用提供科学依据。

本研究还存在不足之处：研究基于静态数据，对于景观格局的动态变化和长期效应的评估不足；虽然提出了相应景观恢复措施，但对于措施的实施效果和可持续性缺乏长期的跟踪研究；研究主

要集中在北京市门头沟区，对于其他地区的适用性和普适性需要进一步验证。

## 5 结论

本研究提出的“LCA-MSPA-电路理论-复杂网络理论”适用于多尺度的景观系统。筛选的景观源地主要分布在西部和南部自然保护区和风景区，个别分布在东部丘陵地带，中部地区缺少景观源地。源地稀疏廊道容易断裂，障碍点集中分布于建设用地边缘。构建“区-源地-廊道-节点”景观空间网络，从全区层面建设景观保护区，提升景观网络的结构与连通性。研究结果为未来山地型地区景观破碎化治理提供依据，有效增强景观与生态系统稳定性。

**参考文献**


[1]张慧,张媛.景观特征评估(LCA)的应用价值[J].中国城市林业,2018,16(2):74-79.

[2]鲍梓婷,周剑云.香港景观特征评估(LCA)的实践与经验[J].中国园林,2015,31(9):100-104.

[3]孙昕悦,张婧雅.基于参与式制图的乡村景观特征识别方法:以湖北省碧山村为例[J].城市建筑,2024,21(11):19-24.

[4]孙喆,刘亚洁,张杰,等.基于 LCA 的文化遗产地景观保护与利用规划研究:以北京长城文化带古北口镇为例[J].城市发展研究,2022,29(10):107-115,2,41.

[5]MCRAE B H.Isolation by resistance[J].Evolution,2006,60(8):1551.

[6]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.

[7]丁金华,褚涵,孙琦.基于 MSPA 与电路理论的水网地区生态网络构建[J].中国城市林业,2024,22(5):122-129.

[8]刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J].生态学报,2018,38(12):4363-4372.

[9]高滢,苏毅.基于 MSPA 和电路理论的县域生态网络构建[J].中国城市林业,2025,23(2):115-122.

[10]北京市门头沟区人民政府.地理概况[EB/OL].(2025-01-27)[2024-11-01].https://www.bjmtg.gov.cn/bjmtg/zjmtg/dlgk/201811/1000849.shtml.

[11]王耕,李素娟,张兴国.基于 DEM 的淮河源地貌形态类型划分[J].水土保持通报,2018,38(2):292-296.

[12]龚苑红,叶宗达,吴静,等.游憩导向下喀斯特景观特征评估及空间格局构建[J].中国园林,2023,39(8):102-107.

[13]宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.

[14]邬志龙,杨济瑜,谢花林.南方丘陵山区生态安全格局构建与优化修复:以瑞金市为例[J].生态学报,2022,42(10):3998-4010.

[15]吴楠,王甜,程鹏,等.基于电路理论的扬子鳄保护区块间生态廊道和节点识别研究[J].长江流域资源与环境,2024,33(6):1228-1238.

[16]SU K,YU Q,YUE D P,et al.Simulation of a forest-grass ecological network in a typical desert oasis based on multiple scenes[J].Ecological Modelling,2019,413:108834.

[17]ZHANG M X,LI J X,WANG L N,et al.The impact of connectivity in natural protected areas on the resilience of urban ecological networks:a research framework based on hierarchical disturbance scenario simulation[J].Ecological Indicators,2024,164:112144.

[18]QIU S,YU Q,NIU T,et al.Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon Sinks: the case of Xuzhou, China [J]. Ecological Indicators,2022,143:109313.

[19]余慈衔,王柳柱,赵晟,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的舟山岛生态安全格局构建及优化[J].海洋通报,2023,42(1):102-111.

[20]薛强,路路,牛韧,等.基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复:以济南市为例[J].生态学报,2021,41(22):9050-9063.

[21]俞孔坚,王思思,李迪华,等.北京市生态安全格局及城市增长预景[J].生态学报,2009,29(3):1189-1204.

[22]张玉虎,李义禄,贾海峰.永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J].干旱区地理,2013,36(6):1049-1057.