

基于流域生态安全格局构建的广州北部生态屏障区关键区域识别与修复策略

Identification and Restoration Strategies of Key Areas in the Northern Guangzhou Ecological Barrier Zone Based on the Construction of Watershed Ecological Security Pattern

童 潇 林 蔚 李 晖*
TONG Xiao LIN Wei LI Hui*

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, China, 510642)

文章编号: 1000-0283(2023)03-0084-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 03. 0084. 011
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-09-28
修回日期: 2022-12-09

摘 要
生态文明建设背景下, 国土空间生态修复已上升为国家战略, 对维护典型区域生态安全与提升生态系统质量和稳定性具有重要意义。以广州北部生态屏障区为研究区, 通过分析生态系统服务功能重要性识别生态源地, 运用电路理论提取生态廊道构建流域生态安全格局, 并通过电流密度判断生态“夹点”和生态障碍点, 以确定生态修复关键区域。结果表明:(1) 共识别出54处生态源地1 973 km², 呈现“东北部多, 西南部少”的特点, 94条生态廊道, 共379.43 km, 其中关键生态廊道25条。(2) 识别待修复关键区域包括16处生态“夹点”、9处主要生态障碍点、34处次要生态障碍点和55处生态断裂点, 主要位于流域下游的城市建设区域和相邻源地之间。根据各关键区域的空间分布关系和土地利用现状提出核心保护类、诊断提升类、重点修复类、调整重塑类和源地贯通区5种修复类型并提出相应策略, 为流域型生态屏障区生态保护修复实践提供参考。

关键词
生态安全格局; 生态修复; 流域; 生态“夹点”; 生态障碍点; 关键区域; 电路理论

Abstract
In the context of ecological civilization construction, ecological restoration of territorial spatial planning has been upgraded to a national strategy, which is important for maintaining the ecological security of typical regions and improving the quality and stability of ecosystems. Taking the northern ecological barrier area of Guangzhou as the study area, we identified ecological source sites by analyzing the importance of ecosystem service functions, extracted ecological corridors by applying circuit theory to build the ecological security pattern of the watershed, and determined ecological “pinch points” and ecological barrier points current density to identify key ecological restoration areas. The results show that: (1) 54 ecological source sites of 1 973 km² were identified, showing the characteristics of “more in the northeast and less in the southwest” and 94 ecological corridors, totaling 379.43 km, including 25 key ecological corridors. (2) The key areas to be restored are identified, including 16 ecological “pinch points”, 9 major ecological barrier points, 34 minor ecological barrier points, and 55 ecological fracture points, which are mainly located downstream of the watershed between the urban construction area and the adjacent source sites. According to the spatial distribution relationship and land use of each key area, five types of restoration are proposed: core protection, diagnostic enhancement, key restoration, adjustment and reshaping, and source land penetration area, and corresponding strategies are proposed to provide a reference for ecological protection and restoration practices in watershed-type ecological barrier areas.

Keywords
ecological security pattern; ecological restoration; watershed; ecological “pinch point”; ecological barrier point; key areas; circuit theory

童 潇
1998年生/男/江西万年人/在读硕士研究生/研究方向为生态修复与景观生态规划

林 蔚
1986年生/男/福建仙游人/博士/讲师/研究方向为生态修复与生态系统服务

李 晖
1967年生/女/重庆人/博士/教授, 博士生导师/研究方向为风景园林遗产保护与景观生态规划设计、景观生态安全格局

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: hui.li.yunnan@foxmail.com

基金项目:
国家自然科学基金项目“粤港澳大湾区水陆交错带权衡/协同关系及韧性景观调控网络机制研究”(编号: 52078222); 广东省教育厅2020年度普通高校重点科研项目“珠江三角洲水网地区乡村空间配置及功能区划‘红线’研究”(编号: 2020ZDZX1033); 广东省教育厅2022年度普通高校特色创新类项目“基于‘三生空间’功能协同的珠三角水网地区传统村落重构策略研究”(编号: 2022WTSCX004)

国土空间生态修复已经上升为国家战略工程，而如何识别国土空间生态修复关键区域，统筹推进山水林田湖草系统治理，构建国土空间生态保护修复格局，实现国土空间优化和生态功能提升，是当前国土空间生态修复的首要事项^[1-3]。生态安全格局对保护和恢复区域生物多样性、维持生态系统结构和过程完整性以及改善区域生态环境具有显著意义^[4]，具有保障区域生态系统整体健康并完善空间配置方案的基础作用^[5-6]，有利于维持景观格局整体性和生态系统功能完整性^[7]，可为国土空间生态修复提供重要决策参考，这已成为国土空间生态修复关键区域识别的重要抓手和主流范式，是风景园林等学科进行生态安全实现的空间落地实施工具^[8]。

生态安全格局构建多采用“源地识别—阻力面构建—廊道提取—战略点识别”的研究范式^[9]。生态源地主要从结构和功能两个方向进行识别^[10]，其中基于结构形态学的空间格局分析(MSPA)方法对阈值的依赖程度较高，导致识别的源地存在较大主观性，而基于综合评价指标体系评估的源地识别方法能够提取对生态系统具有重要作用的空间，又以具体生态系统服务指标应用最为广泛。在构建阻力面的过程中，大多数研究基于土地覆被类型进行赋值，而应用植被覆盖、夜间灯光、地形因素等对阻力面进行修正成为近年来的重要趋势^[11]。廊道提取方法主要包括最小累积阻力模型^[12]、斑块重力模型^[13]和电路理论^[14]等，其中重力模型难以直接识别廊道，最小累积阻力模型能较好模拟不同景观对生物运动的阻碍作用，但容易忽视生物的随机游走性，难以识别廊道中的关键点^[15]；而电路理论的连接度模型基于随机游走特性模拟生物的迁移扩散，充分考虑了生态廊道的冗余度^[16]。战略点的空间布局对生态安全

格局的连通性起到关键作用，常作为生态修复关键区域。有学者以廊道的交点、廊道与山脊线的交点作为关键区域^[17]；也有学者基于电路理论生成的连通性较高的生态“夹点”与阻碍物质能量流动的生态障碍点、断裂点作为关键区域^[18]。近年来，国土空间生态保护和修复逐渐聚焦于生态系统整体性、均衡性保护和修复^[19]，针对生态修复区域的整体识别研究逐渐丰富，实践案例包含省、市、区县等不同区域单元，但多囿于行政单元边界，难以反映并不完全受行政单元边界制约的生态安全问题^[20]，导致所构建的生态安全格局存在不完整和片面性^[21]。因此，构建特定行政区生态安全格局往往需要考虑更大自然地域空间范围内相关因素的影响^[6]，从流域尺度切入，突破行政边界壁垒，通过构建生态安全格局识别国土空间生态修复关键区域，可有效提高区域生态系统整体功能。

广州市北部生态屏障区包括增江、流溪河和西福河三个流域，该区域由多个生态片区

组成，是粤港澳大湾区和超大城市广州的生态核心。然而，生态空间受到城镇空间无序增长和农业空间挤压，导致各生态片区之间及内部斑块连通性降低，亟待通过识别关键区域进行生态修复，提升生态廊道的连通性，从而筑牢区域生态屏障。为此，基于生态系统服务重要性评价识别生态源地，利用电路理论模型提取生态廊道、“夹点”、障碍点等生态安全格局构成要素，针对生态战略点和断裂点提出生态修复策略，以期为流域型生态屏障区修复推进提供决策参考和空间指引。

1 研究区概况和数据获取

1.1 研究区概况

研究区介于113°10′~114°21′E，23°7′~23°57′N之间，面积约6 231.98 km²，涵盖了广州市从化区、增城区、白云区中北部、黄埔区北部、花都区东部以及惠州市龙门县(图1)。研究区域属于亚热带季风气候，气候温和、雨量充沛，年均降雨量大

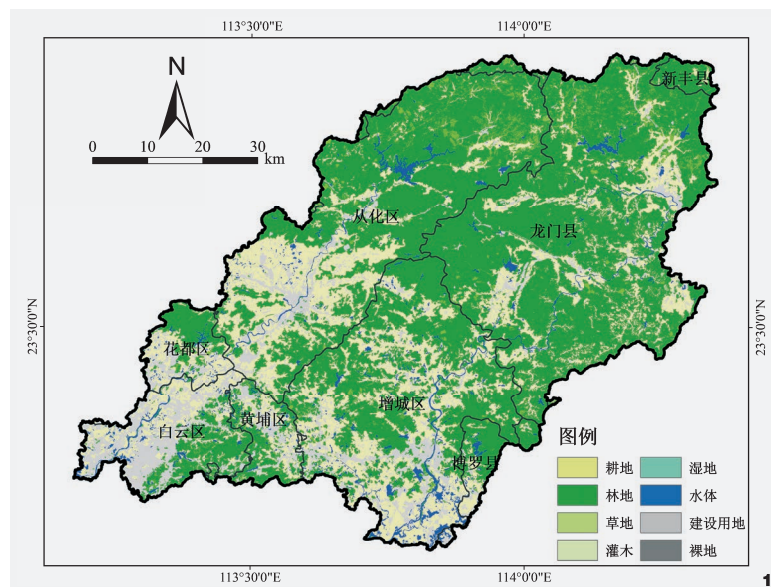


图1 研究区土地利用类型
Fig. 1 Land use types of the study area

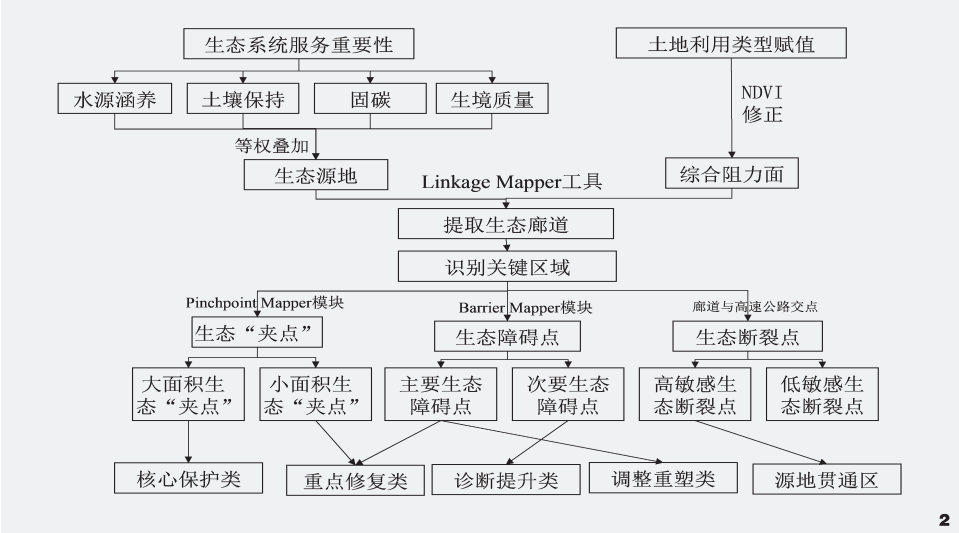


图2 技术路线图
Fig. 2 Technology roadmap

约为1 800 mm，地形东北高西南低，以平原、丘陵为主，平均海拔高度在200 m左右。流域内林地覆盖率约60%，主要分布在流溪河和增江上游，以常绿阔叶林为主，林地内野生动植物种类丰富，生物迁徙活动频繁。随着城市化进程加快，生态空间维护遭受的压力不断增大，由于景观破碎化和森林功能退化导致的水源涵养能力减少、水土流失、生物多样性下降等问题亟待解决。

1.2 数据来源

数据类型及来源详情见表1。

2 研究方法

技术路线如图2所示。首先通过生态系统服务重要性分析识别生态源地，基于土地利用类型、归一化植被指数构建综合阻力面，利用Linkage Mapper工具提取生态廊道，根据电路理论识别生态“夹点”、生态障碍点作为生态修复关键区域，提出针对性修复策略。

4类生态系统服务进行评价，考虑到4类生态系统服务在生态过程中的不可代替性，将各服务归一化操作后等权叠加得到综合生态系统服务重要性图层。参考其他学者对广州市的研究^[22]，考虑到研究区域林地覆盖面积大，选取综合值在前35%的区域，筛选出面积大于1 km²的区域作为生态源地。

2.1.1 水源涵养

以InVEST模型产水量模块进行计算，由于该模块未考虑地表径流，使得林地等生态用地单位面积产水量小于建设用地的不合理结果。因此在计算结果的基础上，扣除地表径流量，作为最终的水源涵养量^[23]，见公式（1）。

$$Y_{xj} = P_x \times \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) - D_{xj} \quad (1)$$

式中， Y_{xj} 表示第j种生态系统类型中单元格x上的年水源涵养量； P_x 表示单元格x上

2.1 基于生态功能重要性提取生态源地

针对流域典型生态环境问题，本研究选取水源涵养、水土保持、生境质量和固碳

表1 数据类型及来源
Tab. 1 Data types and sources

数据类型 Data types	数据来源 Data sources	数据说明 Data description
土地利用数据	国家基础地理信息中心发布GlobeLand30全球地表覆盖数据	空间分辨率为30 m
精细植被类型数据	中国科学院空天信息创新研究院发布的2020年全球30 m地表覆盖精细分类产品	空间分辨率为30 m，包含了30个地表覆盖类型
气象数据	国家气象科学数据中心	包括气温、降水等数据
土壤质地、类型数据	世界土壤数据库中国土壤数据集	空间分辨率为1 km
DEM数据	地理空间数据云	空间分辨率为30 m
归一化植被指数(NDVI)数据	GEE平台计算Sentinel-2A影像数据	空间分辨率为30 m，数值为2020一年中的NDVI的均值
蒸散发数据	美国航天局(NASA)提供的MOD16A2 8d合成产品	空间分辨率500 m，对数据进行拼接、合成，提取总蒸散波段
土壤可蚀性因子	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心广东省30 m分辨率土壤可蚀性因子数据集	空间分辨率为30 m，基于全国第二次土壤普查数据计算
植物净初级生产量(NPP)数据	美国航天局(NASA)提供的MOD17A3HG产品	空间分辨率为500 m，数据为2020一年内总和
水系矢量数据	全国地理信息资源目录服务系统1:25万基础地理数据库	提取其中水系数据，并与影像图比对校正

的年降水量； AET_{xy} 表示栅格单元 x 的年实际蒸散量； D_{xy} 表示地表径流量，由 x 单元格年均降水量与对应生态系统类型的地表径流系数相乘得到。

2.1.2 土壤保持

利用RUSLE模型定量评价土壤保持服务^[24]，见公式(2)。

$$A=R\times K\times LS\times(1-P\times C)\tag{2}$$

式中， A 表示土壤保持量； R 为降雨侵蚀因子； K 为土壤可蚀性因子； LC 为地形因子； C 为覆盖与管理因子； P 为水土保持措施因子。

2.1.3 生境质量

采用InVEST模型Habitat quality模块评价生境质量，通过设定威胁因子后，根据威胁因子的类型、影响强度、各生境类型对威胁因子的敏感程度评估生境质量^[25]。将建设用地和耕地作为威胁因子，并参考论文和研究区情况进行赋值。具体计算见公式(3)。

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^2}\right)\right]\tag{3}$$

式中， Q_{xy} 为 j 地类中栅格 x 的生境质量指数； H_j 为 j 地类的生境适宜度； D_{xy} 为 j 地类中栅格 x 的生境退化度； k 为半饱和常数，取0.5， z 为模型默认参数，取2.5。

2.1.4 固碳

NPP是陆地碳循环的主要组成部分，也是判定生态系统碳源及碳汇和调节生态过程的主要因子。本研究用NPP表征固碳服务^[26]。

2.2 生态阻力面设置

已有研究多基于土地利用类型确定阻力值，但该方法忽略了同个利用类型之间的内部差异。因此，结合前人研究^[11,27]，选取土

地利用类型和NDVI数值作为阻力因子，并确定相对应的阻力值，将两者等权叠加共同构建生态阻力面(表2)。

表2 阻力赋值表^[28]

Tab. 2 Resistance assignment table

土地利用类型 Land use type		NDVI数值 NDVI values	
类型	阻力值	NDVI数值	阻力值
耕地	50	0~0.3	100
林地	1	0.3~0.45	50
草地	20	0.45~0.6	30
灌木	10	0.6~0.7	10
湿地	50	0.7~0.8	1
水体	80		
建设用地	500		
裸地	200		

2.3 生态廊道提取

本研究利用Linkage Mapper工具构建生态廊道，设定最大的成本距离权重为20 km。Linkage Mapper工具是计算生物在源地间移动所克服累积阻力值，筛选出生态源地之间的最小累积成本路径作为生态廊道。

Linkage Mapper工具箱中的Linkage Priority模块够评估生态廊道的优先级，该模块通过评估廊道所连接的源地重要性及廊道的平均阻力值确定生态廊道的优先级。CAV(Core Area Value)表示生态源地的重要性。生态源地的面积越大、面积与周长比值越大、源地平均阻力值越小，则该源地重要性越高^[29]，见公式(4)。

$$CAV_i=k_1\times\frac{A_i-A_{min}}{A_{max}-A_{min}}+k_2\times\frac{S_i-S_{min}}{S_{max}-S_{min}}+k_3\times\frac{R_i-R_{min}}{R_{max}-R_{min}}\tag{4}$$

式中， CAV_i 斑块重要性； A_i 、 S_i 、 R_i 分别为源地 i 的面积、面积周长比值和平均阻力值； A_{max} 、 A_{min} 为所有源地的最大和最小值； S_{max} 、 S_{min} 分别是所有源地面积周长比的最大

和最小值； R_{max} 、 R_{min} 为源地平均阻力的最大和最小值； k_1 、 k_2 、 k_3 为三类因数的权重，总和为1，本研究按默认等权重处理。

CSP(Corridor Specific Priority)表示生态廊道的优先级，生态廊道所连接的源地重要性越高，成本路径越小以及廊道上的平均阻力值越小，其优先级越高^[29]，见公式(5)。

$$CSP_{mn}=k_4\times\frac{CAV_m-CAV_n}{2}+k_5\times\left(1-\frac{L_i-L_{min}}{L_{max}-L_{min}}\right)+k_6\times\left(1-\frac{LCP_R_{mn}-LCP_R_{min}}{LCP_R_{max}-LCP_R_{min}}\right)\tag{5}$$

式中， CSP_{mn} 为源地 m 、 n 之间最小成本路径的重要性值； CAV_m 、 CAV_n 分别为源地 m 、 n 的重要性； L_i 为连接源地 m 、 n 的最小成本路径长度； L_{max} 、 L_{min} 分别为最小成本路径长度的最大和最小值； LCP_R_{mn} 为连接源地 m 、 n 的最小成本路径上的平均阻力值； LCP_R_{max} 、 LCP_R_{min} 分别为最小成本路径上平均阻力的最大和最小值； k_4 、 k_5 、 k_6 分别为前三者的权重，总和为1，本研究按默认等权重处理。将CSP按自然断点法分成4类，选取最高一类作为关键生态廊道，其余为一般生态廊道。

2.4 生态“夹点”与生态障碍点识别

生态“夹点”是利用Linkage Mapper工具箱中的Pinchpoint Mapper模块进行识别，选择“all-to-one”模式计算电流密度，因生态“夹点”的位置不受廊道宽度的影响，以加权成本距离20 km作为廊道宽度。将生成的电流密度数值按自然断点法分为4类，选取最高一类作为生态“夹点”^[30]。

生态障碍点是被利用Linkage Mapper工具箱中Barrier Mapper模块进行识别，分别选取100 m、300 m、500 m分别作为搜索半径迭代运算。该模块有未选定和选定改进得分相对于最小成本距离百分比选项的两种模式，分

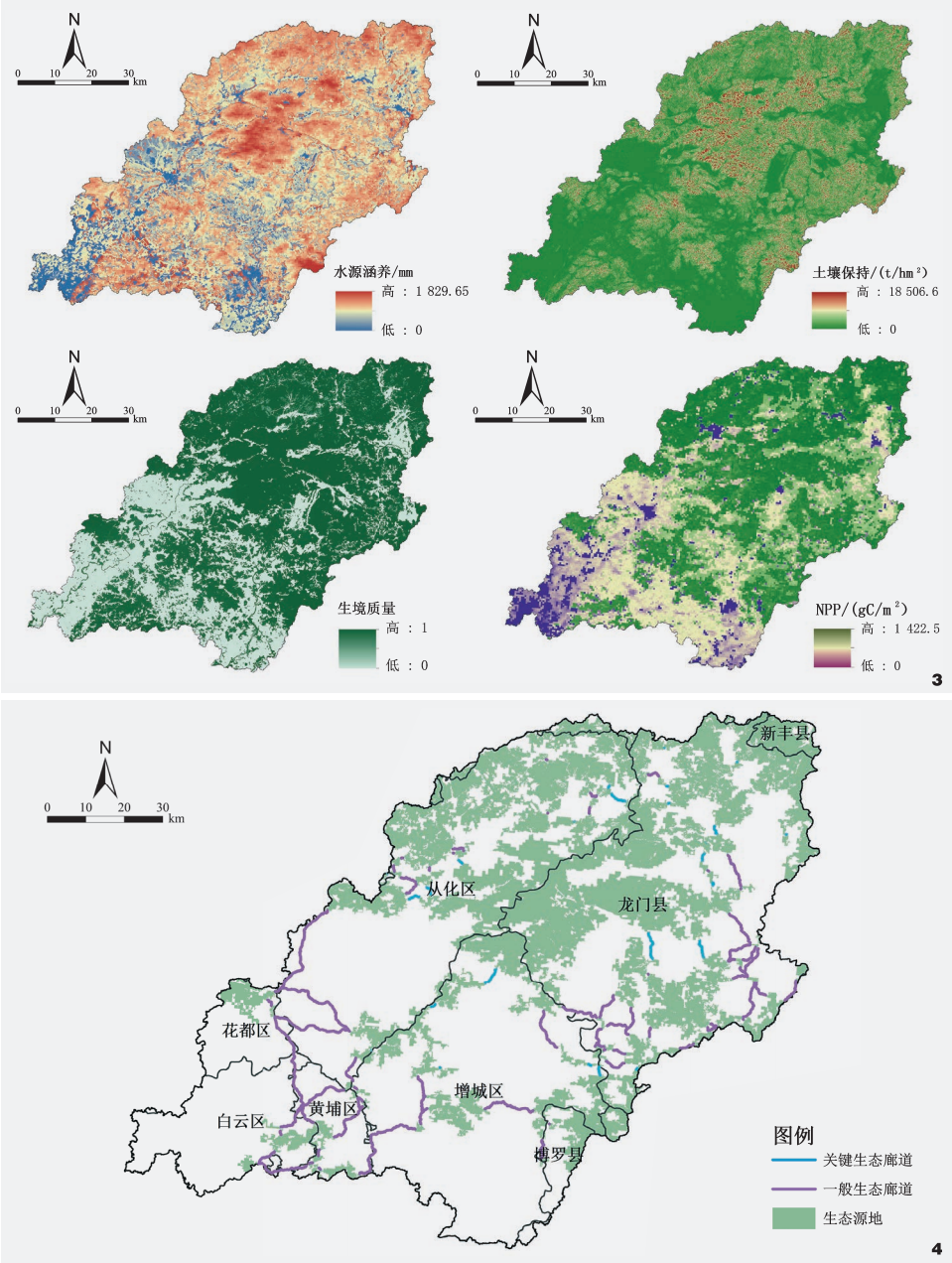


图3 生态系统服务评价
Fig. 3 Ecosystem service evaluation

图4 生态源地与生态廊道
Fig. 4 Ecological source sites and ecological corridors

别表示改进后数值较高的区域和原始连接相对较高的区域^[31]，即完全阻碍区域和具有一定阻碍性区域。将两者分别作为主要生态障碍点和次要生态障碍点。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

从各单项生态系统服务来看，整体呈现东北部价值高、西南价值低的分布特点（图

3），这是研究区北部植被覆盖度较高，西南部城市建成区密集的特点所致。其中从化区与龙门县的交界处，在各项生态系统服务中均具有较高价值，低值大多处于白云区、花都区内的城市建成区域。

叠加筛选后共选出53处生态源地（图4），总面积为1 973 km²，占研究区总面积的31.6%。整体上看，大部分生态源地斑块连续，集中分布在从化区北部、龙门县内，位于流溪河和增江流域上游。面积前三的生态源地分布在广州市与龙门县交汇处、从化区北部、龙门县与新丰县交汇处，分别占生态源地面积的34.8%、19.7%和14.3%，生态环境良好，但边缘破碎化现象严重，且源地内部有较多孔隙，随着城市化进程，源地会有被分割的风险。城镇化发展较好的花都区、白云区、增城区分布了少量生态源地，由于城市建设发展，各源地相距较远较为孤立，与其他源地物质传输困难，容易演变成生态孤岛。

3.2 生态廊道提取

基于Linkage Mapper生成的生态廊道共94条，总长度379.43 km（图4）。整体来看，研究区北部增江和流溪河源头及上游部分，因生态源地面积大，较为完整，因此廊道数量不多，且长度都在1 km左右。增江流域中游，即龙门县麻榨镇和龙华镇由于源地数量多且分散，该区域廊道数量较多。黄埔区、白云区由于源地之间相隔较远，城市用地阻力值高，生态廊道较少且平均长度最长。

根据自然断点法分类得到关键生态廊道25条，CSP值大于0.72。关键生态廊道主要分布在龙门县地派镇、龙华镇和从化区太平镇，大部分与面积前三的生态源地相连，平均长度为1.45 km，且关键廊道的土地利用类

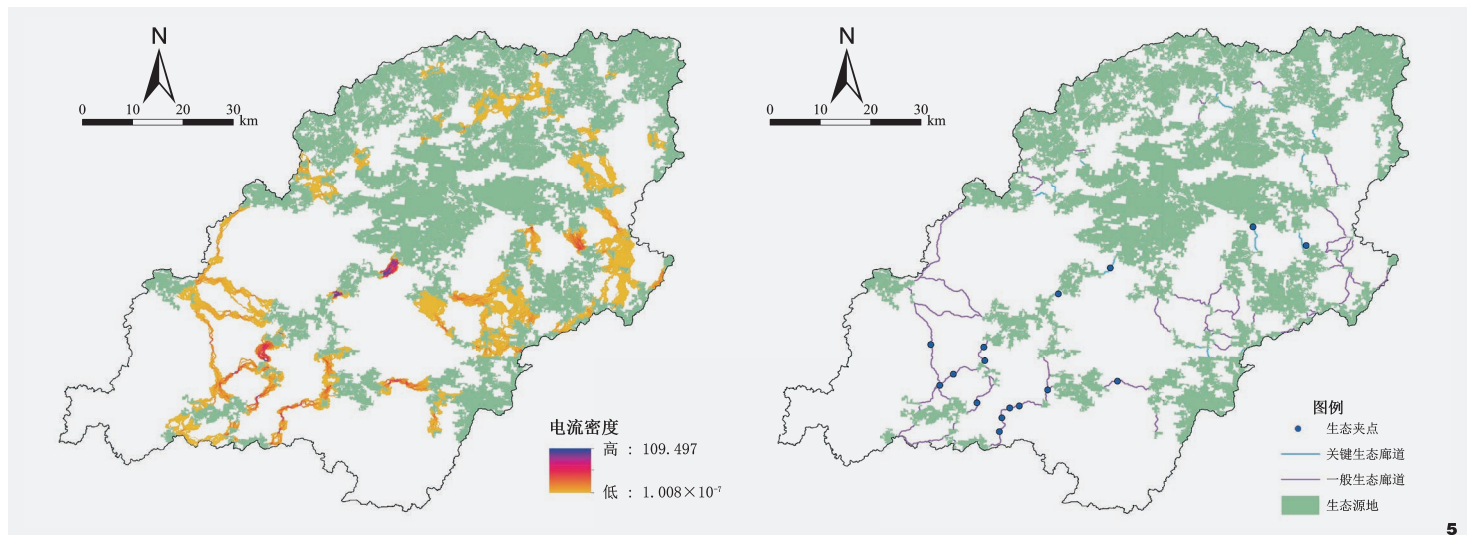


图5 生态“夹点”分布
Fig. 5 Ecological "pinch point" distribution

型大多为林地或草地，平均阻力值较低。一般生态廊道主要分布在研究区东部和西南部。东部区域生态廊道CSP大部分位于0.6到0.7之间，平均阻力值较低。西南部生态廊道平均阻力值较高，土地利用类型主要为耕地，以及少部分小面积林地和建设用地。

3.3 生态修复关键区域识别

3.3.1 生态“夹点”识别

根据Pinchpoint Mapper共识别16处生态“夹点”，面积为9.77 km² (图5)。整体来看，生态“夹点”常生成在高阻力和低阻力的交界处，研究区北部由于整体阻力值较低，并未生成生态夹点。生态“夹点”主要分布在流溪河和西福河的下流流域，面积前三的生态“夹点”位于广州市增城区派潭镇与从化区太平镇，面积分别为4.42 km²、2.06 km²、1.08 km²，占整个生态夹点面积的77.3%，其余生态夹点面积均小于1 km²。土地利用类型为林地，以及部分草地与耕地，其中少数生态“夹点”包含了建设用地。

3.3.2 生态障碍点识别

不同搜索半径下生态障碍点位置相同，结合范围内土地利用类型，300 m搜索半径下能更精确表示出生态障碍点，识别结果如图6所示，改进数值高的区域和原始连接数值高的区域，为9处和34处，将其分为主要生态障碍点和次要生态障碍点，总面积分别为18.87 km²和7.36 km²。从空间布局看，主要生态障碍点分布在黄埔区、白云区、从化区，大多数位于生态廊道经过的高阻力处。次要生态障碍点各行政区均有分布，且常分布在相邻源地之间。从土地利用类型看，主要生态障碍点区域内为建设用地和耕地，次要生态障碍点区域为耕地、草地和疏林地。

3.3.3 生态断裂点识别

本研究主要考虑将大型交通道路对生态廊道的阻隔的交点作为生态断裂点。生态廊道与高速公路相交区域30处，与国省道相交区域为25处。由于高速公路具有封闭

性的特点，会阻断生物迁徙、交流等生态活动，具有较高的生态断裂风险，将其作为高敏感生态断裂点，其中与高速公路交点中有7处位于隧道，不完全阻碍生物迁徙。因此，共得到23处高敏感生态断裂点，32处低敏感生态断裂点 (图7)。

3.4 关键区域生态修复策略

基于生态安全格局，结合各关键区域的空间位置关系和土地利用类型，将修复区域分为了核心保护类、诊断提升类、重点修复类、调整重塑类和源地贯通区 (图8)。

(1) 核心保护类。该类型为面积较大的生态“夹点”，土地利用类型以林地为主，常位于耕地与建设用地之间，如图9-a所示。对于该类型应以生态保护为导向，优化树种结构，遵循多种树种混合种植的原则，提升生态廊道质量。同时，由于位于高阻力值附近，应设置缓冲区，减少硬质边界对物种迁徙的干扰，并划定城镇开发边界。

(2) 诊断提升类。该类型为次要生态障

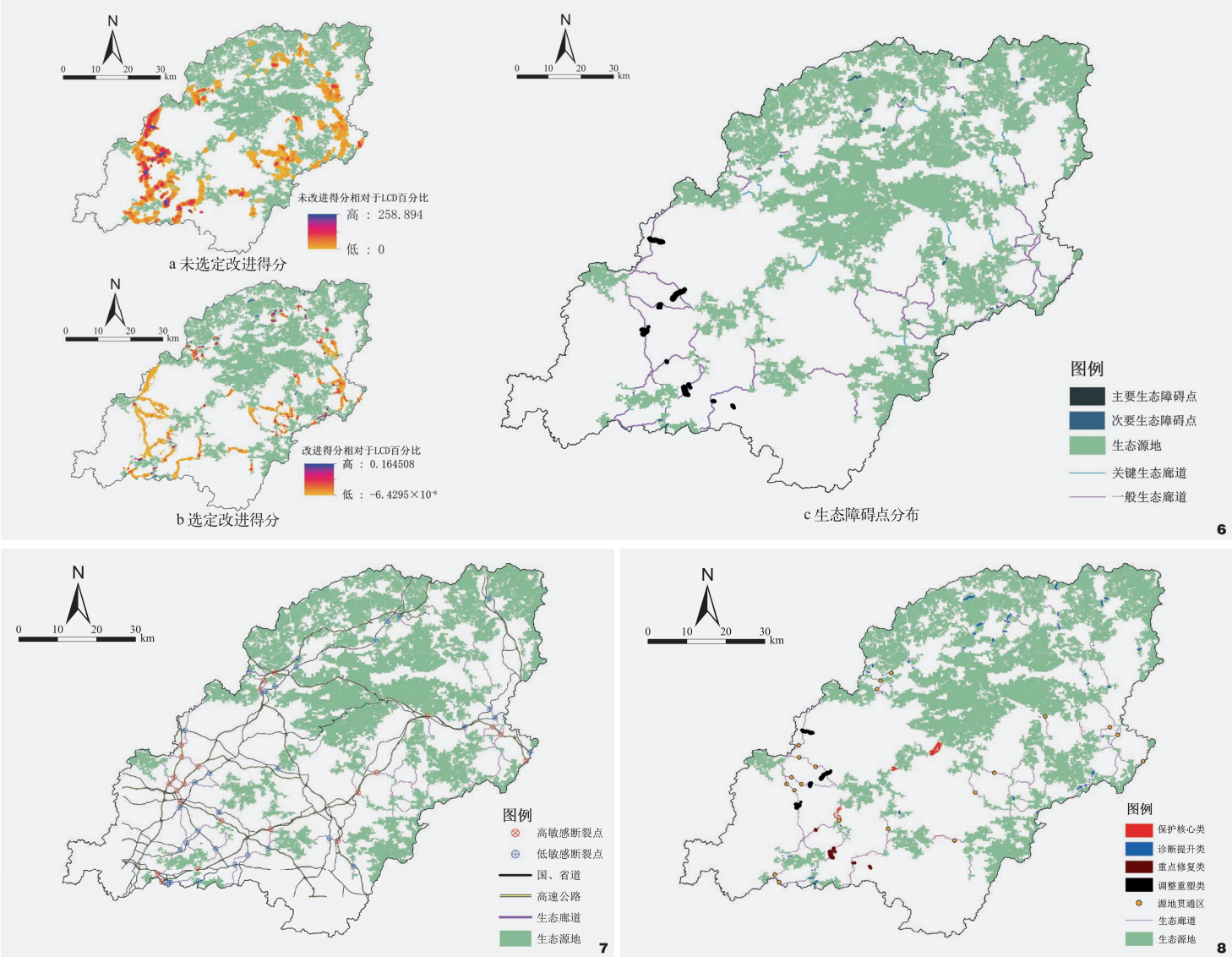


图6 生态障碍点分布
Fig. 6 Distribution of ecological barrier points

图8 生态修复关键区域分类
Fig. 8 Ecological restoration key area zoning

图7 生态断裂点分布
Fig. 7 Distribution of ecological fracture points

碍点区域，以林地和耕地为主，常分布在相邻源地之间，如图9-b所示。该区域原本生态价值与连通性相对较好，以提升生态质量为主。因此修复思路是评估诊断区域内生态质量，将其提升到与相邻的生态源地一致，作为连接区将两个相邻源地合并为一个，降低生态源地破碎化风险。对于林地应确认相

邻源地植被类型，选取同类型植被进行生态修复，更快融入生态源地；对于耕地应首先进行评估，对于低质量耕地开展退耕还林还草，恢复适宜生境，高质量耕地则结合田埂、排水渠等设施构造生物渠道。

(3) 重点修复类。该类型为包含了生态“夹点”的主要生态障碍点区域，以建设用

地、耕地和林地为主，如图9-c所示。区域内林地生态“夹点”位置，因其位于城市建成区，林地容易遭受破坏，是关键区域中重点修复的区域。应优先保护区域内生态“夹点”，可结合生态“夹点”内的植被类型构建缓冲绿地、绿带等城市生态空间，并通过线性空间串联。

(4) 调整重塑类。该类型为主要生态障碍点区域，以建设用地和少量耕地为主，如图9-d所示。主要位于城市密集区，建设用地占比较高，生态修复难度大，修复目标以改善人居环境为主，对于建设用地区域，应实地评估，对于损毁严重的区域，可拆除置换为其他生态用地，若无法拆除，应在周围建设绿色线性空间，为生物迁徙提供辅助。

(5) 源地贯通区。该区域为高敏感生态断裂点区域，为高速公路阻断了生态廊道，修复该区域能够极大提升源地之间的连通性，应根据交通设施具体情况，因地制宜建立地下涵洞、管状涵洞、“过街天桥”等动物通道，同时定期开展动物通道监测（表3）。

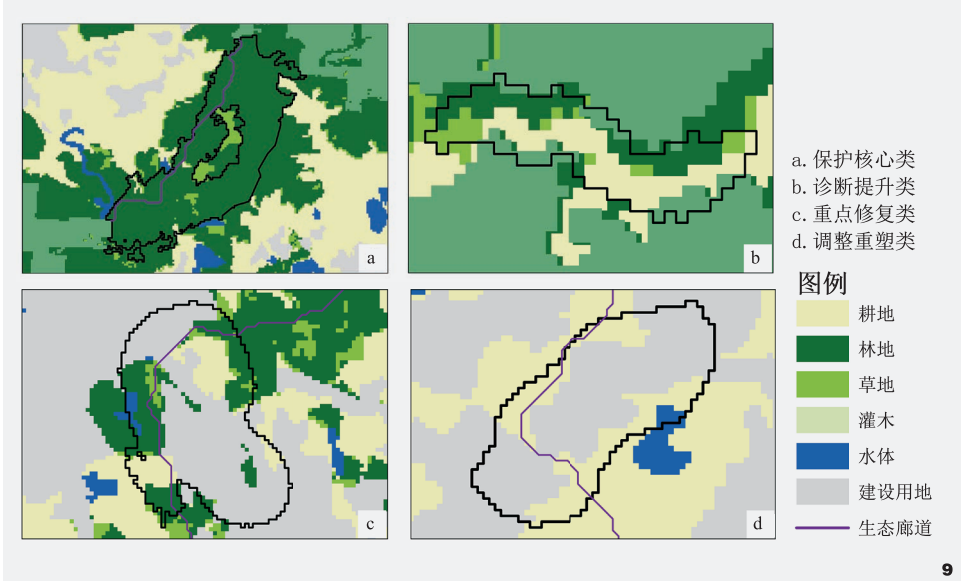


图9 类型示例图
Fig. 9 Example partition map

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 广州北部流域整体生态系统服务功能较高，生态源地共1 973.05 km²，大型源地斑块主要分布在从化区北部、龙门县以及两者行政边界交界处，形状不规则，以林地和灌木为主；生态廊道总长度为379.43 km，主要分布在研究区北部和西南部，关键生态廊

道共25条。
(2) 共识别出16处生态“夹点”、9处主要生态障碍点、34处次要生态障碍点及56处生态断裂点区域。生态“夹点”主要位于高阻力与低阻力交界处，部分生态“夹点”位于生态障碍点附近；主要生态障碍点分布在城市建成区，区域内生态用地较少，生态修复难度大；次要生态障碍点位于相近的源地

之间，区域内主要为低覆盖植物和耕地，生态修复难度低；生态断裂点区域较多，整体上沿着干流分布。

(3) 综合考虑关键区域的空间分布特征和土地利用类型，将关键区域分为5类：核心保护类、诊断提升类、重点修复类、调整重塑类和源地贯通区，并从生态保护和修复两方面提出针对性修复建议和提升方向，为小流域关键区域生态修复提供参考。

4.2 讨论

以流域为研究范围，通过分析主导生态系统服务识别出生态源地，生成的最大生态源地位于行政区交界处，相较于以行政区为单元的研究^[22]，本研究识别的生态源地更具有完整性。有学者指出源地识别时基于生态功能的量化叠加可能会忽视生态系统服务重要性差异或供需效益错位，未来可考虑基于不同生态系统服务的供需或权衡协同关系继续探索^[16,32-33]。基于电路理论分析识别出生态

表3 关键修复区域类型
Tab. 3 Type of critical repair area

类型 Type	关键区域 Key area	土地利用类型 Land use types	修复策略 Restoration strategy
核心保护类	大面积生态“夹点”	林地	封山育林；设置边界缓冲区；划定城镇开发边界
诊断提升类	次要生态障碍点	耕地或林地	林地：提升林分质量，促进相邻源地连接；耕地：评估耕地质量，退耕还林或设置生物渠道
重点修复类	生态“夹点”与主要生态障碍点区域	林地、耕地、建设用地	优先修复生态“夹点”区域，结合绿化带、绿廊、河涌等蓝绿空间优化城市生态空间
调整重塑类	主要生态障碍点区域	建设用地	用地规模置换或协商调整用地性质；在周围修建绿道等线性绿色空间
源地贯通区	高敏感生态断裂点区域	—	建设涵洞、管状通道或动物天桥

廊道，并通过廊道优先级分析工具快速评价生态廊道重要性，改进了源地过多时使用重力模型计算量大的问题。

将电路理论分析生成的生态“夹点”、生态障碍点和生态断裂点作为关键修复区域，结合各类型区域的空间位置关系将关键区域分为5类，提出针对性生态修复策略，但对于修复区域的具体修复工程措施以及修复后生态廊道连通性的提升程度仍需结合实地调查进一步细化验证。此外，在廊道优先级时，对于各因素权重如何确定和关键生态廊道阈值选取尚未进行讨论，还需结合研究区实际情况进一步开展研究。

参考文献

[1] 韩博, 金晓斌, 项晓敏, 等. 基于“要素—景观—系统”框架的江苏省长江沿线生态修复格局分析与对策[J]. 自然资源学报, 2020, 35(01): 141-161.

[2] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343.

[3] 易行, 白彩全, 梁龙武, 等. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J]. 自然资源学报, 2020, 35(01): 37-52.

[4] 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(02): 11-16.

[5] 张美丽, 李智, 张益琛, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(03): 299-307.

[6] 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(03): 407-419.

[7] 樊影, 王宏卫, 杨胜天, 等. 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7614-7626.

[8] 岳邦瑞, 朱宗斌, 潘卫涛. 生态安全概念框架在景观规划中的应用综述[J]. 园林, 2022, 39(03): 87-95.

[9] PENG J, YANG Y, LIU Y, et al. Linking Ecosystem Services and Circuit Theory to Identify Ecological Security Patterns[J]. Science of The Total Environment, 2018, 644: 781-790.

[10] 申佳可, 王云才. 景观生态网络规划: 由空间结构优

先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建[J]. 风景园林, 2020, 27(10): 37-42.

[11] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(03): 471-484.

[12] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 基于MSPA-MCR模型的太湖流域生态安全格局构建与调控[J]. 生态学报, 2022(05): 1-13.

[13] LI Q, ZHOU Y, YI S. An Integrated Approach to Constructing Ecological Security Patterns and Identifying Ecological Restoration and Protection Areas: A Case Study of Jingmen, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108723.

[14] 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.

[15] 潘竞虎, 王云. 基于CVOR和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(07): 2582-2595.

[16] 王敏, 宋昊洋. 耦合功能分区的上海崇明岛生态安全格局构建[J]. 园林, 2022, 39(03): 78-86.

[17] 袁少雄, 宫清华, 陈军, 等. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议[J]. 热带地理, 2021, 41(02): 431-440.

[18] 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(01): 190-203.

[19] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(01): 64-69.

[20] 周璟, 王宏卫, 谈波, 等. 开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别[J]. 生态学报, 2022(24): 1-11.

[21] 潘越, 龚健, 杨建新, 等. 基于生态重要性和MSPA核心区连通性的生态安全格局构建——以桂江流域为例[J]. 中国土地科学, 2022, 36(04): 86-95.

[22] TAN J, LI H, LIN W. Integrating Ecosystems and Socioeconomic Systems to Identify Ecological Security Pattern and Restoration Strategy in a Rapidly Urbanizing Landscape[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10.

[23] 王秀明, 刘诒承, 龙颖贤, 等. 基于改进的InVEST模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2020, 27(05): 381-388.

[24] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 等. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2022, 42(05): 1981-1992.

[25] 李国煌, 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(03): 120-125.

[26] PENG J, ZHAO S, DONG J, et al. Applying Ant Colony Algorithm to Identify Ecological Security

Patterns in Megacities[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 117: 214-222.

[27] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(03): 874-885.

[28] 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.

[29] 李欣鹏, 李锦生, 侯伟. 区域生态网络精细化空间模拟及廊道优化研究——以汾河流域为例[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(05): 14-20.

[30] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35(08): 1986-2001.

[31] LEONARD P B, DUFFY E B, BALDWIN R F, et al. Gflow: Software for Modelling Circuit Theory-Based Connectivity at Any Scale[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8(4): 519-526.

[32] 申佳可, 王云才. 基于多重生态系统服务能力指数的生态空间优先级识别[J]. 中国园林, 2021, 37(06): 99-104.

[33] 杜文武, 任超群, 张志杰, 等. 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建[J]. 园林, 2022, 39(03): 30-38.