北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

PLUS-电路耦合拉萨生态网络多情景模拟与精准修复

段尚 于森 李运远

Coupling PLUS model with circuit theory for multi-scenario simulation and precision restoration of ecological network in Lhasa

Duan Shang, Yu Miao, Li Yunyuan

引用本文:
段尚, 于森, 李运远. PLUS-电路耦合拉萨生态网络多情景模拟与精准修复[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):145-158. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250181
Duan Shang, Yu Miao, Li Yunyuan. Coupling PLUS model with circuit theory for multi-scenario simulation and precision restoration of ecological network in Lhasa[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):145-158. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250181

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250181

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感生态指数和电路理论的生态安全格局构建

Construction of ecological security pattern based on remote sensing urban ecological index and circuit theory: a case study of Guangzhou City, Guangdong Province of southern China

北京林业大学学报, 2023, 45(10): 127-139. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220367

基于MCR模型的围场县小滦河流域生态安全格局识别

Identification of ecological security pattern of Xiaoluanhe River Basin in Weichang County, Hebei Province of northern China based on MCR model

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 26-36. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230026

耦合Graphab-PLUS模型的生态网络动态评估框架

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

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 95-105. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230222

都市圈冷热岛空间网络构建与优化

Construction and optimization of cold and heat island networks for metropolitan area: an integration of interpretable machine learning and circuit theory

北京林业大学学报, 2025, 47(7): 152-166. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250150

多尺度视角下的城市鸟类生境网络构建

Construction of urban bird habitat network from a multi-scale perspective: taking the Cuihu-Shahe area in Beijing as an example

北京林业大学学报, 2025, 47(8): 149-161. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240189

基于土地利用的北京市多情景模拟下生态服务价值影响评估

Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 14–24. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220351

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250181

PLUS-电路耦合拉萨生态网络多情景模拟与精准修复

段 尚 于 淼 李运远
（北京林业大学园林学院，北京 100083）

摘要:【目的】拉萨市作为青藏高原生态屏障的重要组成部分，其生态网络构建对保障区域生态安全与可持续发展具有重要意义。然而，传统单一时空生态网络构建方式难以反映未来土地利用动态变化的影响，导致规划缺乏前瞻性与适应性。本研究旨在通过多情景模拟，系统分析不同土地利用发展路径下生态网络的演变特征，精准识别保护修复重点区域，为提升国土空间综合整治的科学性与精准性提供方法支撑。**【方法】**研究耦合 PLUS 模型、InVEST-MSPA 模型与电路理论，构建“情景模拟—要素识别—网络优化—分级管控”的研究框架。首先，运用 PLUS 模型模拟 2030 年自然发展、耕地保护、生态优先 3 种情景的土地利用格局；继而集成 InVEST-MSPA 模型提取生态源地，基于电路理论构建生态廊道并识别障碍点、夹点等关键节点；最终依据多情景下生态要素的演变差异，分类分级确定生态保护修复的重点区域。该方法的核心在于通过多情景对比揭示土地利用变化对生态网络的差异化影响，并借助电路理论量化连通成本与关键节点，实现生态网络的动态优化与精准调控。**【结果】**(1)生态优先导向的国土空间管控策略能够有效改善生态质量与网络结构。2030 年自然发展与耕地保护情景下建设用地扩张明显，其余用地变化平缓；生态优先情景下，建设用地扩张得到抑制，林地、草地及水域实现小幅度增加，生态源地数量及面积有所增加，破碎化生境得到有效串联，并在生态廊道总长度最小化的前提下实现了最优连通性。(2)明确了维系生态网络结构稳定的核心要素。尽管不同土地利用发展情景下生态网络存在局部变动，但关键生态要素的分布趋势以及空间位置高度稳定，凸显了这些区域在维持生态网络功能中的核心地位，应作为长期保护重点。(3)划分了国土空间保护修复重点区域。研究精准识别重点保护修复源地 204.47 km^2，一级生态廊道 50.46 km，重点保护修复节点 64.8 km^2，这些区域具有高退化风险与高生态价值并存的特征，是当前国土空间保护修复的战略重心。**【结论】**该研究框架优化了生态网络结构，有效识别了各生态要素重点区域，有利于明晰未来国土空间保护修复重点，避免国土空间综合整治过程中出现的对象不明、资源分配不均等问题的产生，研究成果可直接指导拉萨市国土空间综合整治的精准施策，对生态脆弱区的保护修复具有重要示范价值。

关键词：青藏高原；PLUS 模型；电路理论；InVEST-MSPA 模型；生态安全格局；多情景模拟；连通性；生态网络优化；精准识别

中图分类号：X171.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0145−14

引文格式：段尚，于淼，李运远. PLUS-电路耦合拉萨生态网络多情景模拟与精准修复［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：145−158. Duan Shang, Yu Miao, Li Yunyuan. Coupling PLUS model with circuit theory for multi-scenario simulation and precision restoration of ecological network in Lhasa［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 145−158.

Coupling PLUS model with circuit theory for multi-scenario simulation and precision restoration of ecological network in Lhasa

Duan Shang Yu Miao Li Yunyuan
(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］As a key component of the ecological barrier on the Tibetan Plateau, the ecological network of Lhasa is crucial for safeguarding regional ecological security and promoting sustainable

收稿日期: 2025−05−20 **修回日期:** 2025−11−09

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFD2200902)。

第一作者: 段尚，博士生。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email：344539250@qq.com 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: 李运远，教授，博士生导师。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email：liyunyuan@bjfu.edu.cn 地址：同上。

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

development. However, traditional approaches, often based on a static and single-temporal framework, struggle to account for future land-use dynamics, resulting in planning outcomes with limited foresight and adaptability. This study employs multi-scenario simulation to analyze the evolutionary characteristics of the ecological network under various land-use development pathways. It seeks to precisely identify priority areas for conservation and restoration, thereby providing a methodological framework to enhance the scientific rigor and precision of comprehensive territorial space governance. [**Method**] This research integrates the PLUS model, the InVEST-MSPA model, and circuit theory to establish an analytical framework encompassing "scenario simulation, element identification, network optimization, and hierarchical management". We first employ the PLUS model to project land use patterns for 2030 under three distinct scenarios: natural development, farmland protection, and ecological priority. Subsequently, ecological sources are extracted using the InVEST-MSPA model, and circuit theory is applied to delineate ecological corridors and identify critical nodes, including barriers and pinch points. In the final phase, priority areas for ecological conservation and restoration are delineated according to the differential evolution of ecological elements across the various scenarios. The core of this methodology lies in revealing the differential impacts of land-use change on the ecological network through multi-scenario comparison and by quantifying connectivity costs and key nodes via circuit theory, thereby facilitating dynamic optimization and targeted regulation of the network. [**Result**] (1) Territorial spatial control strategies prioritizing ecological conservation effectively enhanced ecological quality and network structure. Under the natural development and farmland protection scenarios for 2030, construction land expanded markedly, with minimal changes in other land types. In contrast, the ecological priority scenario curbed construction land expansion, yielding marginal gains in forest, grassland, and water bodies. This scenario also increased the number and area of ecological sources, effectively integrating fragmented habitats and achieving optimal connectivity with the shortest total ecological corridor length. (2) Core elements underpinning the structural stability of the ecological network were identified. Despite localized variations in the network across different land-use scenarios, the distribution patterns and spatial locations of key ecological elements remained highly stable. This underscores their critical role in maintaining network functionality, warranting their designation as long-term conservation priorities. (3) Priority areas for territorial spatial conservation and restoration were delineated. The study pinpointed 204.47 km^2 of source areas, 50.46 km of primary corridors, and 64.8 km^2 of key nodes for focused intervention. Characterized by coexisting high degradation risk and high ecological value, these areas constitute the strategic priority for current territorial spatial management. [**Conclusion**] This method enhances the ecological network structure and enables the effective identification of key areas for various ecological elements. By clarifying conservation and restoration priorities, it helps prevent common issues in comprehensive territorial spatial remediation, such as ambiguous targets and uneven resource allocation. The findings provide direct guidance for formulating targeted land management strategies in Lhasa and offer a valuable model for protecting and restoring other ecologically fragile regions.

Key words: Tibetan Plateau; PLUS model; circuit theory; InVEST-MSPA model; ecological security pattern; multi-scenario simulation; connectivity; ecological network optimization; targeted identification

随着工业化与城市化进程加快，气候变化、土地退化、生物多样性丧失等生态环境问题频发，严重破坏自然生态系统，威胁区域生态安全[1]。在此背景下，我国将“生态文明建设”列为国家战略，提出“绿水青山就是金山银山”“山水林田湖草生命共同体”等理念，并出台多项生态保护政策，积极推进生态修复工作。生态网络通过线性廊道有机连接开敞空间中的景观斑块[2]，是生态物质与能量流动的重要载体[3]，可在较大程度上协调区域生态安全与经济发展之间的矛盾[4]，已成为城市生态修复的主要手段[5]。科学规划生态网络布局并精准识别各要素重点区域，对于促进生物多样性保护，增强区域生态系统稳定性，推动国土空间综合整治具有重要的现实意义[6−7]。

目前，国内外关于生态网络的研究已形成“生态

源地识别—生态网络构建—重点区域识别”的基本框架。生态源地识别方法主要包括直接识别法、多指标适宜性评价法和综合识别法这 3 类，其中综合识别法常耦合 InVEST 模型[8]、形态空间格局分析（morphological spatial pattern analysis，MSPA）[9−10]、空间优先保护模型（Zonation）[11] 与景观连通度分析等方法。MSPA 与 InVEST 模型相结合的方式兼顾“功能−结构”双重需求，所识别的生态源地兼具高生态服务功能与高空间连通性特征。生态网络构建主要依赖最小累计阻力模型[8]、重力模型[12]和电路理论[9]模拟生态廊道路径。相较而言，电路理论将生态流视为电流运动过程，以电流强度模拟物种扩散阻力，其模拟结果能反映生态流的多路径分布特征，更符合物种随机迁移行为[13]，同时在快速识别生态障碍点与生态夹点方面具有显著优势。总体来看，现有研究多基于历史土地利用数据，采用静态视角构建生态网络，未充分考虑土地利用变化与生态安全的相互作用，忽视了环境、经济与政策因素对生态网络的动态影响，导致研究成果在应对未来复杂变化时存在滞后性。此外，重点区域识别多聚焦于网络连通功能，缺乏对生态要素退化风险与成本效益的综合考量。研究对象集中于经济发达地区，对生态敏感且经济欠发达区域的关注不足。如何通过深入分析生态网络演变过程优化结构，识别亟需保护修复的关键区域，仍是当前生态网络构建与国土空间治理的核心难点。

拉萨市地处青藏高原腹地，是西藏自治区生态文明优先区。近年来，尽管城镇化持续推进，但草地退化、土地沙化、生物多样性下降等问题尚未根本遏制，仍面临整治重点不突出、治理方式不成熟等挑战。鉴于区域治理任务繁重而资源有限的现实困境，如何通过科学布局生态网络，维持区域生态安全格局稳定，并精准识别重点区域以提升国土空间整治效率，成为亟待解决的关键科学问题。为此，本研究以拉萨市为案例，引入斑块级土地利用变化模拟模型（PLUS），结合 MSPA-InVEST 模型与电路理论构建优化生态网络并识别重点区域。PLUS 模型可根据历史土地利用数据与驱动因子预测未来发展趋势[14−15]，相较于其他模拟工具[16−18]，其在转化规则挖掘与景观动态模拟方面更具优势[19−20]；MSPA-InVEST 模型在处理拉萨这类生态空间占比高、功能复杂的区域时，源地识别更为精细准确；电路理论则支持多种模式识别生态节点，有利于实现差异化分类管理。本研究将立足于动态视角，通过多情景评估生态网络演变以优化布局，综合权衡生态要素的功能、演变趋势与成本效益进行分类，以期提升识别结果的可实施性。本研究旨在进一步完善高寒脆弱生态区的生态网络构建体系，为后续国土空间整治的空间落位提供科学参考。

1　研究对象与数据来源

1.1　研究对象

拉萨市位于西藏自治区东南部，东邻林芝市，西接日喀则市，北连那曲市，南与山南市交界，是自治区首府。市域总面积约 2.9 万 km^2，自然资源丰富，森林覆盖率达 19%，草地面积占比 67%，境内拥有国家级自然保护区 4 处，国家级风景名胜区及国家公园 5 处。

1.2　数据来源

本研究所有地理信息数据均投影至 WGS_1984_UTM_Zone_46N 坐标系，栅格像元大小统一设为 30 m，所用数据类型及来源见表 1。

2　研究方法

本研究主要包括 3 个部分：基于 PLUS 模型开展 2030 年土地利用多情景模拟，结合 InVEST-MSPA 模型与电路理论构建各情景下的生态网络，对各情景生态要素进行动态评估与分类分级，进而制定针对性的区域生态安全管控策略。

2.1　基于 PLUS 模型的土地利用发展多情景模拟

2.1.1　历史土地利用发展模拟及验证

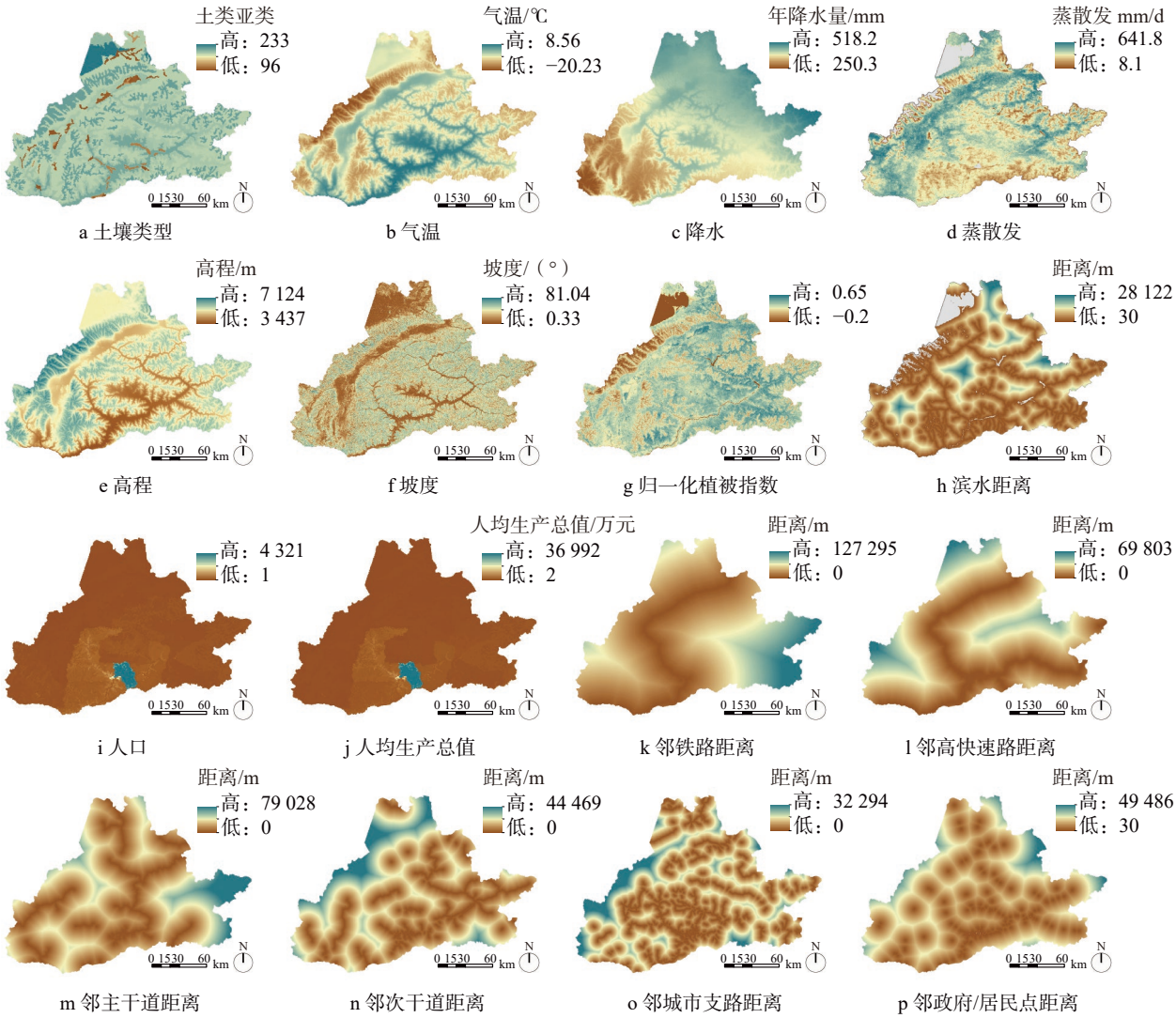
利用 PLUS 模型的 LEAS 模块分析各类土地利用的发展潜力。结合相关文献[21−22] 与研究区实际情况，从自然（土壤类型、气温、降水、蒸散发、高程、坡度、归一化植被指数、邻水域距离）、社会经济（人口、GDP）及交通可达性（邻铁路、高速、主干道、次干道、城市支路、居民点及政府单位距离）3 个维度选取 16 项驱动因子模拟土地发展（图 1）。通过叠加 2010 年与 2015 年土地利用数据获取扩张图谱，采用随机森林回归模型（random forest classification，RFC）分析土地利用变化[23]，并通过比较各地类 RMSE（均方根误差）与 OOB-RMSE（袋外均方根误差）指标（表 2）评估模型泛化能力，最终确定各类土地利用的发展潜力。

基于 CARS 模块模拟 2020 年土地利用变化。设定水域为限制发展区，城镇开发边界为开发区；计算各地类扩张面积占总扩张面积的比例以确定邻域权重[24]；参考已有研究[25]，统计多期历史土地利用转移情况，分析转移趋势，综合考虑自然、经济特征及政策约束，经反复试验确定土地利用类型转换矩阵（表 3）。将模拟结果与 2020 年实际土地利用数据对比，Kappa 系数达 0.94，整体模拟精度良好，可用于

表 1 研究数据类型及来源

Tab. 1 Research data categories and provenance

数据类型	数据名称	年份	来源
土地利用数据	CNLUCC	2010、2015、2020	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
约束数据	自然保护区 城镇开发边界		《拉萨市国土空间总体规划(2021—2035)公众版》
社会经济数据	人口	2020	资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
	GDP	2020	
	POI	2020	高德地图 https://lbs.amap.com
交通数据	道路	2020	Open Street Map www.openstreetmap.org
气候及环境数据	土壤类型		资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
	NDVI	2020	
	年平均气温	2020	
	年降水量	2020	
	蒸散发	2020	NASA https://www.earthdata.nasa.gov/
	DEM	2020	地理空间数据云平台 http://www.gscould.cn/
	坡度		依据2020年DEM数据计算
	水系	2020	Open Street Map www.openstreetmap.org



土类亚类数值源于《1∶100万中华人民共和国土壤图》数字化数据集。

图 1 驱动因子选择

Fig. 1 Selection of driving factors

表 2　各地类 RFC 训练精度情况

Tab. 2　Situation of RFC training accuracy indicators across land types

指标	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
均方根误差(RMSE)	0.039	0.068	0.096	0.051	0.028	0.093
袋外均方根误差(OOB-RMSE)	0.087	0.152	0.215	0.114	0.063	0.208

表 3　土地利用类型转换矩阵

Tab. 3　Land use conversion matrix

用地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	0	1	1
林地	0	1	1	0	1	0
草地	1	1	1	1	1	1
水域	0	0	1	1	1	0
建设用地	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	1	1	1

注: 数值1表示允许转换, 数值0表示不能转换。

后续多情景预测。

2.1.2　未来土地利用发展多情景模拟

综合《拉萨市国土空间总体规划(2021—2035)》《拉萨市国土空间生态修复规划(过程稿)》及《拉萨“十四五”生态环境保护规划》等上位规划, 结合拉萨市发展规划与地理特征, 设定自然发展、耕地保护与生态优先 3 类情景。依托 PLUS 模型 CARS 模块, 采用数量约束法, 通过调整土地利用适应概率矩阵控制各地类需求量, 模拟 2030 年土地利用空间格局。

(1)自然发展情景: 不施加任何发展约束, 仅基于土地发展潜力与 Markov chain 模块预测的 2030 年各类土地需求量设置参数, 获得基准土地利用转移概率矩阵。

(2)耕地保护情景: 严格落实耕地保护政策, 保障粮食安全。将 2010、2015 与 2020 年耕地重合区域设为长期稳定耕地并禁止转换[26], 城镇开发边界设为开发区; 基于自然发展情景的土地利用转移矩阵, 将耕地转换为其他地类的概率在原有基础上下调 50%, 将草地及未利用地 2 种地类转换为耕地的概率在原有基础上上调 50%。

(3)生态优先情景: 优先保障区域生态安全, 强化生态保护力度, 重点保护林地、草地与水域, 防止大规模开发建设侵占生态空间。将自然保护区与 2020 年水域设为限制转换区, 城镇开发边界设为开发区; 基于自然发展情景的土地利用转移矩阵, 将耕地、建设用地及未利用地 3 种地类转换为林地和草地的概率在原有基础上上调 60%, 同时将耕地、林地、草地和水域 4 种地类转换为建设用地的概率在原有基础上下调 60%。

2.2　基于 InVEST-MSPA 模型和电路理论的生态网络构建

2.2.1　生态源地识别

生态源地是指具备重要生态系统服务或辐射功能的生境斑块[27], 本研究采用 InVEST-MSPA 模型综合识别。首先利用 InVEST 生境质量模块识别高生境质量区域, 并参考已有研究[28]设定威胁因子参数及各土地利用类型的生境适宜度与敏感度。MSPA 是一种基于数学形态学原理的空间格局分析方法, 可精确识别多尺度景观结构[29], 其生成的景观要素具有明确生态含义, 其中核心区代表大型自然斑块, 为生物的主要栖息地, 适合作为生态源地[30]。将林地、草地、水域设为前景, 其余地类设为背景进行 MSPA 分析, 提取核心区与高生境质量区域的重叠部分作为初选源地; 为减少破碎化, 使用聚合面工具合并 1 000 m 内相邻斑块[10], 并剔除面积小于 10 km^2 的斑块, 获得最终生态源地。

2.2.2　生态廊道构建

阻力面反映不同区域对物种迁徙的阻碍程度, 阻力越大, 物种通过越困难[31]。选取坡度、高程、滨水距离、邻道路距离、土地利用类型、MSPA 景观类型与生境质量 7 类因子构建综合阻力面, 其中坡度、高程与生境质量按自然断点法划分为 5 个等级, 滨水距离、邻道路距离、土地利用类型与 MSPA 景观类型参照已有研究[10,12−13,27]赋值, 各因子权重由 15 位专家采用层次分析法评分确定(表 4)。利用 Linkage Mapper 插件中的 Build Network and Map Linkages 工具计算源地间最小成本路径, 构建生态

表 4 阻力因子分级及权重

Tab. 4 Resistance factor classification and weighting

阻力值	坡度/(°)	高程/m	滨水距离/m	邻道路距离/m	土地利用类型	MSPA景观类型	生境质量
10	0 ~ 9.30	3 437 ~ 4 135	0 ~ 100	0 ~ 100	林地	核心区	0.85 ~ 1.00
30	9.30 ~ 18.28	4 135 ~ 4 589	100 ~ 500	100 ~ 300	草地	桥接区、环道区	0.71 ~ 0.85
50	18.28 ~ 27.02	4 589 ~ 4 982	500 ~ 1 000	300 ~ 500	水域、耕地	支线、孤岛	0.51 ~ 0.71
70	27.02 ~ 36.19	4 982 ~ 5 379	1 000 ~ 3 000	500 ~ 1 000	未利用地	边缘、孔隙	0.24 ~ 0.51
100	36.19 ~ 81.04	5 379 ~ 7 124	＞ 3 000	＞1 000	建设用地	背景	0 ~ 0.24
权重值	0.101 6	0.077 1	0.164 4	0.087 0	0.297 5	0.044 5	0.227 9

网络。为进一步比较各情景网络结构，计算连通度指数。

$$\alpha = \frac{L - V + 1}{2V - 5}$$

$$\beta = \frac{L}{V}$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)}$$

式中：L 为廊道数，V 为源地个数。α 衡量网络环路程度，值越大表示生态流通越顺畅；β 表示源地对应边数，通常认为 $\beta > 1$ 时网络更复杂；γ 为已有廊道数与最大可能廊道数之比，值越高说明节点连接度越强[32]。

2.2.3 生态节点识别

生态障碍点指物种迁移过程中易受阻区域，对网络连通性影响显著[33]，其修复可提升整体连通性[34]。使用 Barrier Mapper 工具，选择“Maximum”模式识别障碍点。设置最小搜索半径 100 m，最大 500 m、步长 100 m，依据“累计电流恢复值”与“相对 LCD 改进得分”综合判定[35]。前者反映移除障碍后网络电流增长幅度，值越高表明阻碍越大，属“高修复潜力障碍点”；后者表示电流恢复值占生态网络最低成本路径比例，移除后能以较小成本显著提升功能，属“高性价比修复障碍点”。生态夹点指生物扩散中大概率途径且不可替代的区域[36]，其破坏将严重影响连通性，需重点保护。使用 Pinchpoint Mapper 工具，结合“All to one”与“Pairwise”两种模式识别生态夹点。“All to one”模式识别影响核心斑块连通性的“局部夹点”，具有聚集性与高成本效益；“Pairwise”模式评估整体网络连通性的“全局夹点”，数量多，分布广。将各模式结果按自然断点法划分，取电流密度高值区作为生态节点。

2.3 重点区域分类

为最大化国土空间整治效率，遵循风险优先，成本效益优先与全要素协同原则，对源地、廊道与节点的重要程度进行分类，划定保护修复优先序。

2.3.1 生态源地分类

基于各情景源地演变情况，按生境退化风险分类：(1)多情景中发生退化的区域划为重点保护修复源地，退化风险极高，应优先干预；(2)单情景中退化的区域划为一般保护修复源地，风险较低，修复优先级次之；(3)各情景均未退化的为长期稳定源地；(4)生境改善区域划为潜在提升源地，修复潜力大，优先级较低。

2.3.2 生态廊道分类

基于利用率与承载力对廊道分类。使用 Centrality Mapper 工具计算电流中心性，量化其在网络中的中转能力或承载能力，评估其在生态网络连通功能上的重要性[37]。根据电流中心性将廊道分为 3 级：一级廊道为高电流中心性廊道，利用率与承载力最高，建设优先级较高；二、三级廊道功能较弱，建设优先级相对较低。

2.3.3 生态节点分类

基于连通功能与成本效益对节点分类：(1)生态夹点与障碍点重叠区域为重要保护修复节点，属高阻力且不可替代区，优先级最高；(2)“相对 LCD 改进得分”高的“高性价比修复障碍点”为一级修复障碍点，此类障碍点修复成本较低且功能提升显著，宜优先治理；“累计电流恢复值”识别的“高修复潜力障碍点”为二级修复障碍点，可依实际需求灵活修复；(3)将“All to one”与“Pairwise”识别的夹点合并，位于一、二级廊道路径上的为一级保护夹点，位于三级与潜在廊道路径上的为二级保护夹点。

3 结果与分析

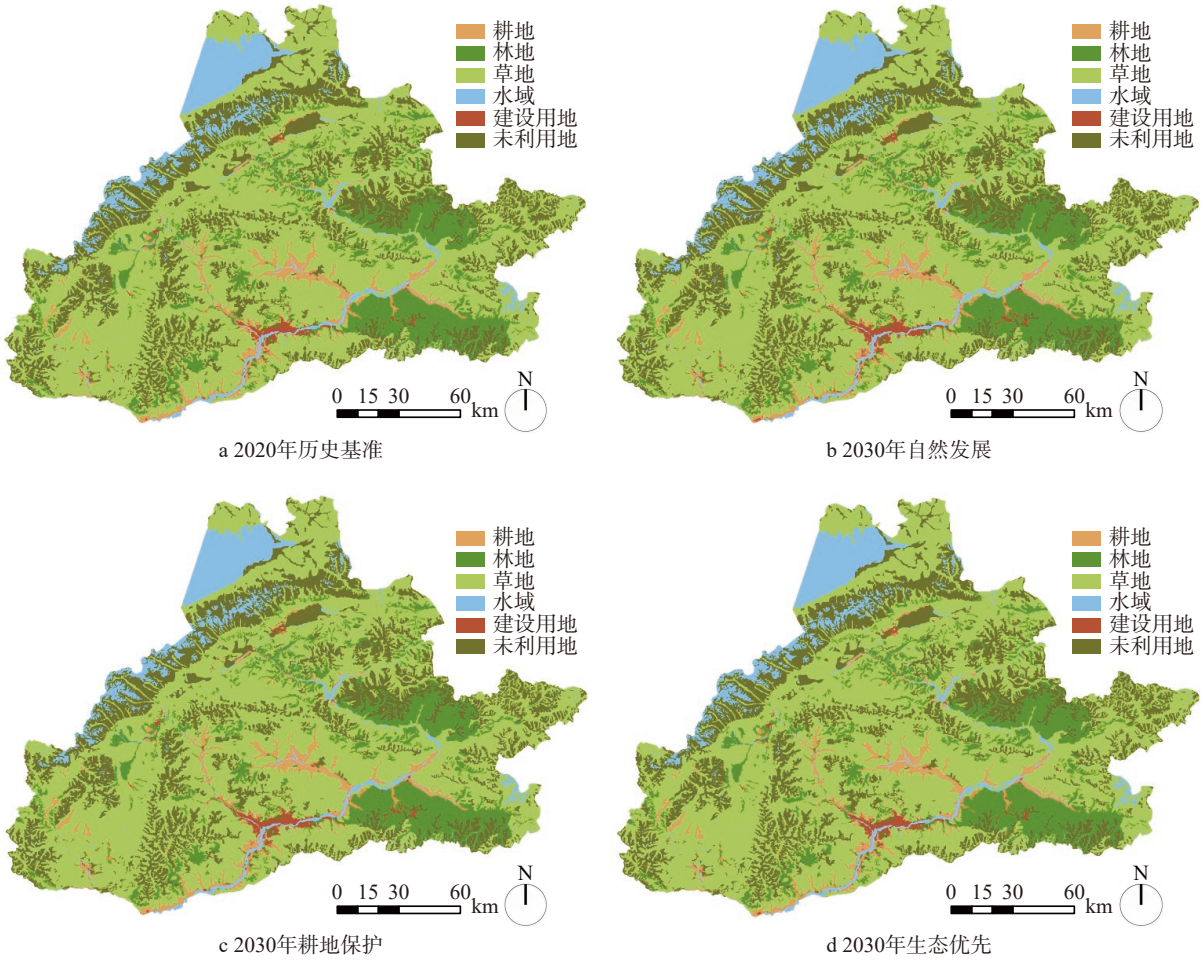
3.1 拉萨市域土地利用发展多情景模拟

以 2020 年土地利用数据为基准，模拟 2030 年自然发展、耕地保护与生态优先 3 种情景的土地利用发展(表 5、图 2)。结果显示：自然发展情景下建设用地较基准年增长超过 62.54%，其他地类面积均有不同程度减少，耕地减少 5.67%，其余减幅低于 1%；耕地保护情景下，用地转换主要集中于建设用

表 5　各情景土地利用类型演变情况

Tab. 5　Dynamics of land use categories across scenarios

情景设置	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	面积/km²	变化比例/%	面积/km²	变化比例/%	面积/km²	变化比例/%	面积/km²	变化比例/%	面积/km²	变化比例/%	面积/km²	变化比例/%
2020年历史基准	996.13		3 504.57		16 322.26		2 030.14		186.59		6 618.73	
2030年自然发展	939.63	−5.67	3 477.99	−0.76	16 290.76	−0.19	2 027.36	−0.14	303.28	62.54	6 612.35	−0.10
2030年耕地保护	964.57	−3.17	3 476.79	−0.79	16 284.05	−0.23	2 039.23	0.45	275.33	47.56	6 611.42	−0.11
2030年生态优先	955.82	−4.05	3 525.99	0.61	16 336.13	0.09	2 050.96	1.03	221.01	18.45	6 561.46	−0.87



a 2020年历史基准　　b 2030年自然发展

c 2030年耕地保护　　d 2030年生态优先

图 2　未来土地利用多情景模拟

Fig. 2　Multi-scenario simulation of future land use

地与耕地，建设用地增长 47.56%，耕地减少 3.17%；生态优先情景下建设用地面积增长 18.45%，耕地减少 4.05%，其他地类基本与 2020 年保持一致。总体而言，2030 年各情景土地利用格局与 2020 年相比变化不大，演变主要集中于建设用地与耕地。

3.2　拉萨市域生态网络多情景模拟

3.2.1　多情景生态源地识别

结合 InVEST-MSPA 模型识别不同情景下的生态源地（图 3）。2020 年共识别源地 40 处，总面积 3 521.9 km²，生态源地空间分布较为均匀，主要为林地与湖泊湿地，大型生态源地集中于当雄县、林周县、尼木县、曲水县及墨竹工卡县，堆龙德庆、城关与达孜三区生态源地相对稀疏，主要因为人类活动频繁，农田与建设用地占比较高，生态功能较弱。以 2020 年为基准，对比 2030 年各情景演变：2030 年自然发展情景下识别源地 42 处，总面积减少 131.6 km²（约 3.73%），各源地面积均有不同程度减少，边缘区域普遍退化，7 号与 22 号源地有破碎化风险，6 号与 30 号退化为一般生态空间；耕地保护情景下识别 45 处，总面积减少 21.6 km²（0.61%），3、7、22、31、36 号源地存在破碎化风险，6 号源地退化为一般生态空间，边缘退化趋势较自然发展情景有一定改善；生态优先

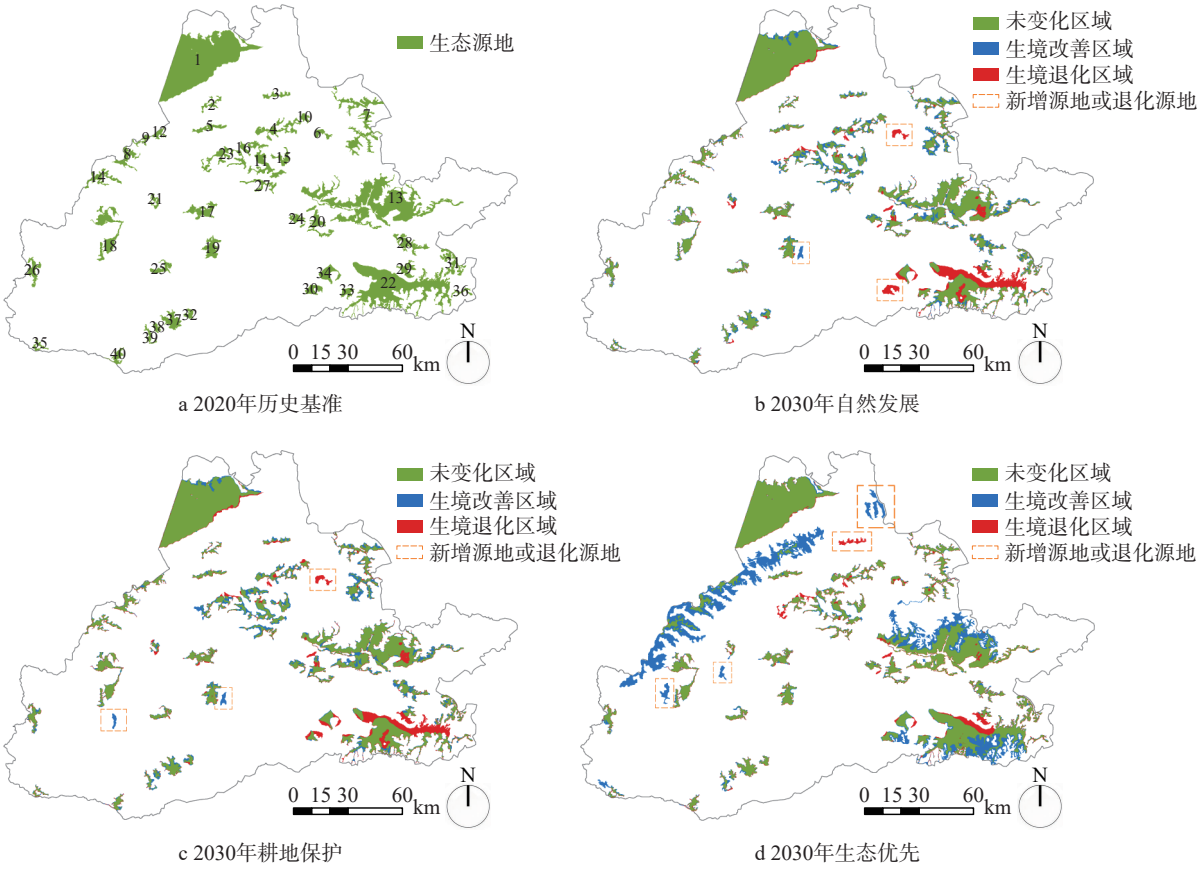


图 3 各情景生态源地演变

Fig. 3 Evolution of ecological source areas across scenarios

情景下识别 40 处，总面积增加 1 238.1 km^2(35.15%)，边缘退化得到有效抑制，仅 3 号源地退化为一般生态空间，8、9、12、14 号源地生态改善并实现整体连通，显示这些源地改善潜力较大，较适宜进行源地修复整合。综合对比，源地退化主要集中在 6、13、22、30、34 号源地，说明这些源地生态环境退化风险较高，需要着重进行监测预警并及时实施生态保护修复措施；13 号源地北侧、22 号源地南侧以及念青唐古拉山源地群周边改善潜力较大，宜通过低强度生态治理转化为高质量生态源地，应作为后续治理的关键区域。

3.2.2 多情景生态廊道模拟及评估

基于阻力因子生成各情景阻力面：2030 年生态优先与耕地保护情景下阻力值与 2020 年相近，自然发展情景下阻力极值与平均值略升；2030 年 3 种情景阻力面格局与 2020 年基本保持一致，高阻力区主要位于城市建设区与山地，低阻力区主要位于地势较为平坦的拉萨河流域河谷平原。基于电路理论构建生态网络(图 4)并计算连通度指数(表 6)。结果显示，因源地与阻力面变化，2030 年部分廊道路径发生调整，但整体格局稳定。自然发展与耕地保护情景下，墨竹工卡县南北源地退化导致连通性减弱，南北向廊道数量与长度增加；生态优先情景下，念青唐古拉山与墨竹朗杰保护区源地群连通，导致廊道数量减少，总长与平均长度下降，其生态网络建设成本与断裂风险降低，生态网络闭合度(α)、线点率(β)及网络连通度(γ)指数提升，表明破碎源地的整合修复对增强网络连通性、复杂性与抗干扰能力具有重要作用。

3.2.3 多情景生态节点识别

已有研究证明生态障碍点的空间位置不受搜索半径阈值的影响[38]，经对比发现搜索半径 300 m 时电流噪点较少，障碍点呈现效果较好。基于“累计电流恢复值”分析(图 5a ~ d)：各情景下障碍点分布较为均匀，多邻近生态源地或位于廊道交汇处，虽然各情景生态廊道路径存在差异，但重叠廊道所识别的障碍点空间分布基本相同，说明生态网络结构演变对障碍点空间位置影响较小；障碍点用地类型以未利用地为主，普遍海拔高、坡度大，生态修复难度较大。基于“相对 LCD 改进得分”分析(图 5e ~ h)：各情景下障碍点空间分布高度一致，集中分布于当雄–林周交界、墨竹工卡县南侧以及曲水县中部生态源地群之间的断裂区域，该情景下识别的障碍点用地类型多为草地与林地，地势平坦，生态修复成本较低。

生态夹点识别结果显示：“All to one”模式识别的夹点(图 6a ~ d)位置与范围基本不变，集中于当雄

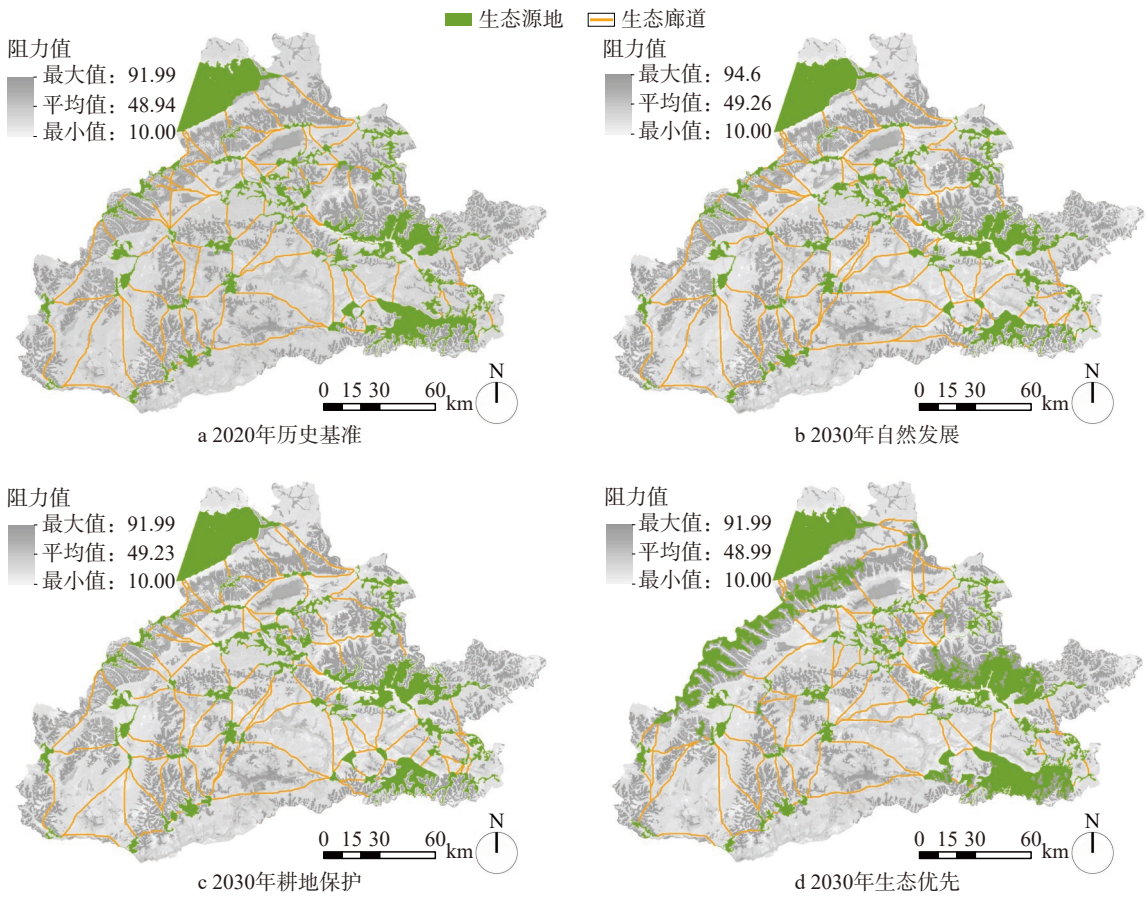


图 4　各情景生态廊道演变

Fig. 4　Evolution of ecological corridors across scenarios

表 6　各情景生态网络连通指数计算

Tab. 6　Calculation of ecological network connectivity indices across scenarios

情景设置	源地数量	廊道数量	廊道总长度/km	廊道平均长度/km	闭合度 α	线点率 β	连通度 γ
2020年历史基准	40	93	1 697.27	18.25	0.720	2.325	0.816
2030年自然发展	42	99	1 943.79	19.63	0.734	2.357	0.825
2030年耕地保护	45	107	1 894.34	17.70	0.741	2.378	0.829
2030年生态优先	40	97	1 592.13	16.41	0.773	2.425	0.851

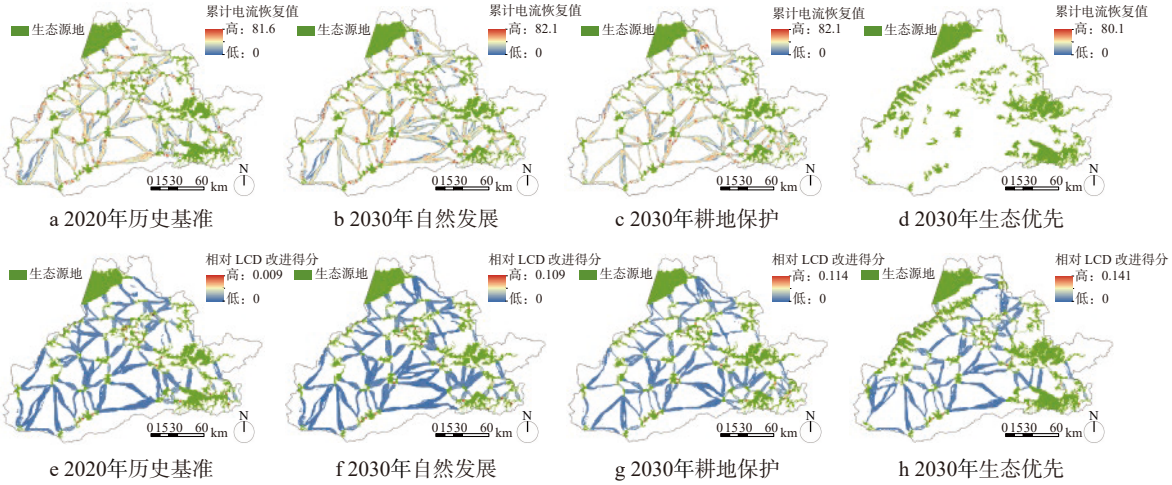


图 5　各情景生态障碍点识别

Fig. 5　Identification of ecological barrier points across scenarios

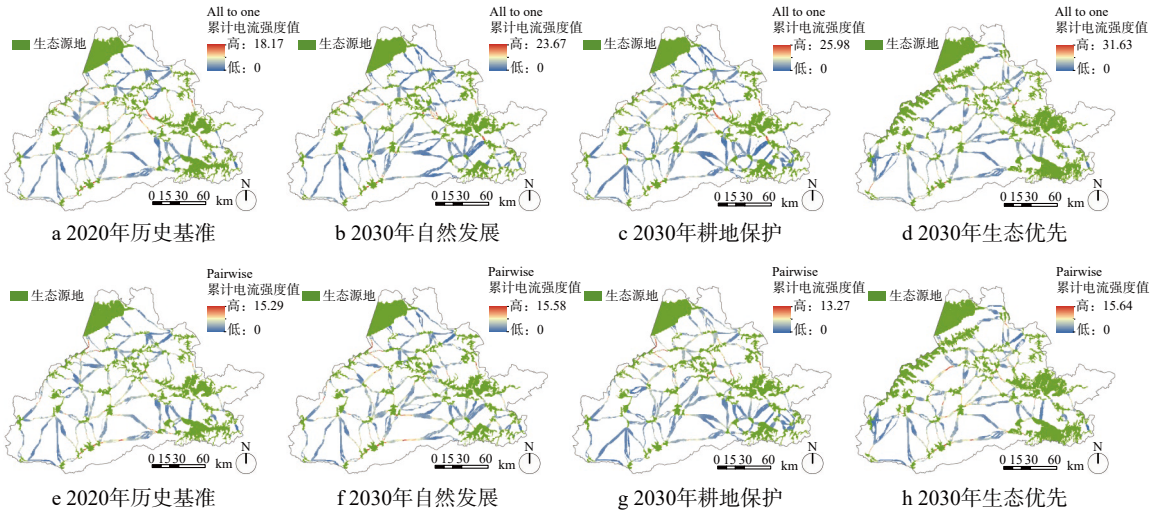


图 6 各情景生态夹点识别

Fig. 6 Pinch point identification across scenarios

县西部、林周县中东部及曲水县中部廊道与源地交汇处；“Pairwise”模式识别的夹点(图 6e～h)分布较散，主要位于当雄县西北部、曲水县中部、堆龙区东北部等廊道枢纽。整体上，2020 年历史基准、2030 年自然发展及耕地保护情景中夹点数量、位置高度一致；2030 年生态优先情景因格局演变，生态夹点数量与面积均呈现不同程度减少，但累计电流强度极值有较大幅度提升，表明夹点区域生态流进一步增强。2 种模式识别出的生态夹点多位于阻力值较低的山谷与河谷平原，说明天然廊道对生态流动具有促进作用。

3.3 基于多情景模拟的生态要素关键区域分类

基于各情景生态要素的时空演变分析，以保障生态网络结构完整、提高整体连通度、高效分配资源投入为目标，从源地、廊道和节点 3 个维度对重点区域进行分类分级(图 7)，差异化进行生态管控策略的制定。

(1)结合 2030 年各情景生态源地演变情况，对生态源地重点区域进行分类。重点保护修复源地共计 204.47 km^2，多位于生态源地与耕地、未利用地的交界区域，威胁源加剧了生境斑块的边缘效应，极易引发生境退化，应通过退耕还林、生态过渡带等措施对高退化风险区域进行高强度人为干预。一般修复区域 310.45 km^2，退化风险较低，多位于各源地边缘区域，这些区域普遍存在水质污染、土地沙化等生态问题，严重削减区域生态韧性，应采取渐进式生态恢复措施提高区域抗干扰能力。长期稳定源地共计 3 006.98 km^2，作为受边缘效应影响较小的源地核心区域，用地类型多为林地及湿地，具备良好的生态基底且较少受人类活动干扰，生境退化风险较低，应以维持原生状态为目标进行动态监测和隔离保护。潜在提升源地 1 783.61 km^2，为各情景生境改善区域，毗邻现有源地和生态廊道节点，人为干扰压力较小，具有较高的生态恢复潜力和修复性价比，更容易通过生态管控转变为高质量生境。

(2)鉴于 2030 年生态优先情景网络连通性指数最高，以该情景的生态廊道布局为基础，并参照其他情景优化整体生态网络结构。基于电流中心性划分建设优先级：一级生态廊道长度共计 50.46 km，主要串联念青唐古拉山脉、当雄–林周交界、曲水县中部以及墨竹工卡县南北两侧源地群，这些廊道普遍具有长度较短、建设性价比较高的特点，应作为生态战

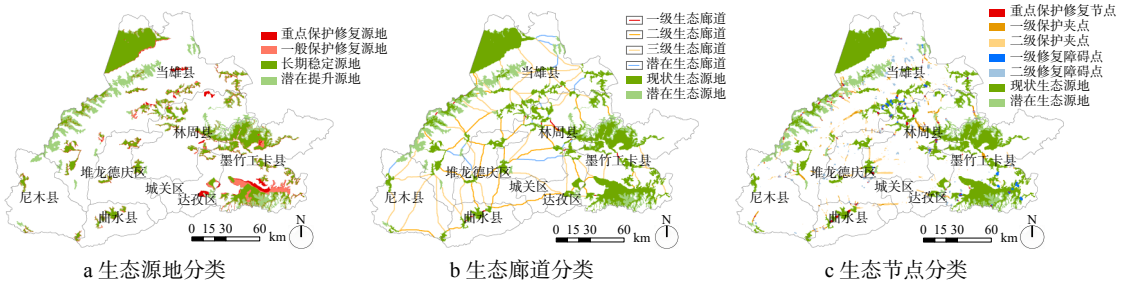


图 7 各生态要素重点区域划分

Fig. 7 Key area delineation for ecological components

略通道进行优先建设并对廊道易断裂区域实施必要的生态修复工程; 二级生态廊道共计 588.5 km, 是维持生态网络结构的重要通道, 负责连接相距较远的源地, 其路径不可代替, 应以维持结构连接为目标进行重点筛查监测, 保障廊道的稳定性与连通性; 三级生态廊道共计 987.91 km, 作为生态网络局部补充性连接, 具有路径动态可调的特点, 应根据一、二级廊道的建设情况以及局部功能需求进行建设规划, 进一步加强区域生态网络的稳定性; 潜在廊道 160.39 km, 是连接潜在源地的补充性廊道, 应根据潜在源地的生态改善情况合理规划建设。

(3)综合各模式识别结果, 综合考量各生态节点功能和成本, 对其保护修复优先级进行分类。重点保护修复节点 64.8 km^2, 集中于念青唐古拉山脉、当雄–林周交界、曲水县中部等地源地群断点区, 应在生态修复的同时进行长时效管控监测, 保证区域连通性及稳定性。一级保护夹点 160.06 km^2, 集中分布于高电流中心性廊道路径, 是影响生态流定向流动和整体网络双向连通的关键区域, 应进行红线管控和长时效监测。二级保护夹点 376.02 km^2, 各节点面积较大, 用地类型复杂且位置较为分散, 可根据生态网络连通功能需求进一步筛选与保护。一级修复障碍点 145.34 km^2, 集中于当雄–林周交界和墨竹工卡县南部源地群的断点区, 应通过针对性修复手段优先修复。二级修复障碍点共计 270.44 km^2, 空间分布较为分散, 对于生态网络连通性其改善潜力最大, 可根据生态廊道分类布局进一步细化优先级。

4 讨　　论

4.1 结果分析与验证

相较于前人研究[39], 本研究采用 MSPA-InVEST 模型避免了直接识别法的主观性, 识别的源地兼顾“功能—结构”, 数量更多, 分布更均; 构建的廊道数量更多, 平均距离更短, 增强了网络稳定性并降低了断裂风险; 同时基于电路理论识别夹点与障碍点, 便于后续国土空间整治工作的推进。为验证结果可靠性, 与《拉萨市国土空间总体规划(2021—2035)》(简称《国空》)和《拉萨市国土空间生态修复规划》(简称《规划》)进行比对。源地识别方面, 研究结果与《国空》划定的生态红线高度重合, 涵盖纳木错自然保护区、纳木错–念青唐古拉山风景名胜区、热振国家森林公园、墨竹朗杰沙棘林保护区等, 空间分布均匀, 契合“一屏多片”的规划格局, 且在林周县东侧与尼木县西侧新识别两处大面积源地, 可作生态管控区域的补充。廊道构建方面, 研究识别的生态廊道与《规划》构建的廊道路径略有不同:《规划》侧重非源地区域节点的可达性, 构建的廊道呈西北密集、东南稀疏的特征, 而本研究构建的生态廊道分布更均质, 尤其是研究区中部、西南部的廊道冗余性更高, 结构更具连通性与稳定性, 可为未来网络结构优化补充提供参考。生态节点识别方面, 本次研究的高优先级节点与《国空》划定的“生态修复重点项目”在扎西岗乡、扎雪乡、尼玛江热乡、阿姆乡、宁中乡、达嘎镇、曲水镇等地高度一致, 识别的其他节点可作为后续国土空间整治重点项目的参考。

4.2 研究框架合理性与优势

本研究融合 PLUS 模型、MSPA-InVEST 模型与电路理论, 构建了“多情景网络构建—网络评估与优化—生态要素分类—重点区域划定”的综合框架。本研究的创新与优势主要体现在:(1)通过多情景模拟对现有生态网络布局进行优化, 相较于其他基于土地发展预测的生态网络研究[21,23,26], 本研究分析了不同土地政策引导下的生态网络响应机制, 统筹生态保护与耕地保护等多重因素, 权衡多种土地利用政策, 避免单一规划方案的不利后果, 实现网络结构的多层次、抗风险优化; (2)建立多维度权衡的生态要素分类体系, 本研究拓展了生态要素的分类体系, 有别于以往研究[27,32]仅依据生态要素连通功能的单一维度划分方式, 通过分析要素特征, 综合考量了要素功能、演变情况和成本效益, 确保有限资源投向优先区域, 弥补了生态网络研究终端环节的不足。

4.3 局限性与深化方向

在生态网络构建方面, 研究主要基于 2020 年数据和 2030 年模拟数据进行网络构建, 未对生态网络的历史演变进行更深入分析, 后续应综合多期历史数据对生态网络演变机制进行深入探究, 从“历史演变—现状基准—未来发展”多角度完善构建体系。同时, 本次研究通过连通性指数量化生态网络功能, 未来应进一步结合复杂网络理论, 通过静态测度和动态模拟综合分析网络拓扑结构与空间鲁棒性[40], 实现对生态网络结构与功能的多角度评估。

5 结论与建议

5.1 结　　论

本研究以拉萨市为对象, 结合城市特征与上位政策设定多情景, 利用 PLUS 模型模拟未来土地利用发展, 基于 InVEST-MSPA 模型与电路理论构建各情景生态网络, 通过演变分析优化网络结构并识别国土空间关键区域, 主要结论如下。

(1)在土地利用演变方面, 2030 年各情景格局与 2020 年相比变化不大, 自然发展与耕地保护情景下各土地类型转变趋势基本相同, 建设用地明显扩

张，其他用地面积不同程度减少，但幅度较小；生态优先情景下建设用地扩张得到较好抑制，林地、草地与水域面积小幅上升。

（2）在生态源地演变方面，相较于 2020 年，2030 年自然发展与耕地保护情景下源地数量与面积均有不同程度减少，当雄县中部、林周县北部、达孜区中部及墨竹工卡县南部受边缘效应影响发生退化；生态优先情景下，各源地生态退化得到较好抑制，源地数量及面积小幅度增加，念青唐古拉山脉及墨竹工卡县南北侧破碎源地群因生境改善实现串联。

（3）在生态廊道演变方面，同 2020 年相比，2030 年各情景因源地与阻力面变化导致小范围生态廊道路径发生部分变动，但关键结构性廊道路径分布趋势基本一致。2030 年生态优先情景下廊道总长与平均长度最短，网络连通性指数最高。

（4）2020 年与 2030 年各情景识别的生态节点空间分布高度一致，位置基本不受网络演变影响，障碍点与夹点部分重合，主要位于当雄–林周交界与曲水县中部源地群断裂区域，其余障碍点及夹点零散分布于生态廊道沿线区域。

5.2 建 议

依据研究结果和拉萨市存在的实际生态问题，对未来国土空间综合整治提出以下建议。

（1）关注预警区域，修复破碎源地。对于当雄县东北部、林周县北部、墨竹工卡县南部、达孜区中部高退化风险源地进行重点监控及评估，进行前瞻式生态治理；念青唐古拉山、当雄–林周交界以及墨竹工卡县北侧、南侧源地群生态改善潜力巨大，应针对破碎源地进行整合修复，加强源地间生态联系，提升生态网络整体连通性。

（2）优先建设骨干廊道，深度发掘踏脚石区域。对林周县中部、曲水县中部、墨竹工卡县中部及念青唐古拉山区域短距离廊道应在短期内进行建设，优先保证局部生态连通；加强发掘生态踏脚石，如连接曲水县至达孜区源地的长距离廊道会增加廊道断裂风险，可结合“南北山绿化”等生态修复工程构建生态踏脚石，进一步增强网络韧性。

（3）精准保护修复节点，优化资源配置。优先治理当雄–林周交界、曲水县中部、念青唐古拉山等夹点与障碍点重合的大面积区域，促进破碎源地融合，以较小投入获取更大生态效益。

本研究基于多情景土地发展模拟指导生态网络结构优化与生态要素差异化分类，构建了适用于拉萨市的生态网络与重点区域识别框架。成果可为拉萨生态可持续发展提供科学支撑，并为后续国土空间综合治理提供参考。

参 考 文 献

[1] Ma L, Bo J, Li X, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 424−438.

[2] 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.
Liu S L, Hou X Y, Yin Y J, et al. Research progress on landscape ecological networks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 3947−3956.

[3] Huang L Y, Wang J, Fang Y, et al. An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102865.

[4] 曲艺, 陆明. 生态网络规划研究进展与发展趋势 [J]. 城市发展研究, 2016, 23(8): 29−36.
Qu Y, Lu M. Research progress and development trend of ecological network planning[J]. Urban Development Studies, 2016, 23(8): 29−36.

[5] 刘秀萍, 李新宇, 李延明, 等. 快速城市化地区生态网络构建与优化：以北京市大兴区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8321−8331.
Liu X, Li X Y, Li Y M, et al. Construction and optimization of ecological network in rapidly urbanized area: a case study of Daxing District, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8321−8331.

[6] Gao J, Gong J, Li Y, et al. Ecological network assessment in dynamic landscapes: multi-scenario simulation and conservation priority analysis[J]. Land Use Policy, 2024, 139: 107059.

[7] Liang C, Zeng J, Zhang R C, et al. Connecting urban area with rural hinterland: a stepwise ecological security network construction approach in the urban-rural fringe[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108794.

[8] 曹加杰, 傅剑玮. 基于 InVEST 模型和最小成本路径的城市绿色空间生境网络构建方法研究——以南京为例 [J]. 中国园林, 2023, 39(1): 53−58.
Cao J J, Fu J W. Research on the construction method of urban green space habitat network based on InVEST model and least-cost path: a case study of Nanjing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(1): 53−58.

[9] 刘瑞雪, 林小龙, 李云. 基于 MSPA-生境质量评估和电路理论的城市绿色基础设施网络优化研究——以深圳市为例 [J]. 中国园林, 2024, 40(10): 68−74.
Liu R X, Lin X L, Li Y. Optimization of urban green infrastructure network based on MSPA-habitat quality assessment and circuit theory: case of Shenzhen[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(10): 68−74.

[10] 陈瑶, 张长春, 胡丰, 等. 基于 MSPA-InVEST 模型分析太行山生态网络演变 [J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6443−6454.
Chen Y, Zhang C C, Hu F, et al. Analysis of ecological network

evolution in Taihang Mountains based on MSPA-InVEST model[J]. Environmental Science, 2025, 46(10): 6443−6454.

[11] 俞金凤, 杜怀玉, 王家亮, 等. 基于 Zonation-MSPA 耦合模型的甘肃沿黄地区生态安全格局构建与评估 [J]. 环境科学, 2025, 46(5): 3085−3097.
Yu J F, Du H Y, Wang J L, et al. Construction and assessment of ecological security pattern in Gansu along the Yellow River based on Zonation-MSPA coupling model[J]. Environmental Science, 2025, 46(5): 3085−3097.

[12] 张乐相, 柴波, 张岩, 等. 基于重力模型与电路理论的生态网络对比研究——以济宁市为例 [J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1684−1696.
Zhang L X, Chai B, Zhang Y, et al. A comparative study on ecological networks based on gravity model and circuit theory: a case study of Jining City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1684−1696.

[13] 许静, 廖星凯, 甘崎旭, 等. 基于 MSPA 与电路理论的黄河流域甘肃段生态安全格局构建 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(4): 805−813.
Xu J, Liao X K, Gan Q X, et al. Construction of ecological security pattern based on MSPA and circuit theory in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(4): 805−813.

[14] 周豹, 赵俊三, 陈国平, 等. 多情景模拟下滇东南喀斯特地区生态系统服务评估与网络优化 [J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4615−4627.
Zhou B, Zhao J S, Chen G P, et al. Ecosystem services assessment and network optimization under multiple scenario simulations in the karst area of southeast Yunnan[J]. Environmental Science, 2025, 46(7): 4615−4627.

[15] Li M Y, Jin G Z, Wang Y F, et al. Optimizing spatial patterns of ecosystem services in the Chang-Ji-Tu Region (China) through Bayesian belief network and multi-scenario land use simulation[J]. Science of the Total Environment, 2024, 917: 170424.

[16] Kamusoko C, Gamba J. Simulating urban growth using a random forest-cellular automata (RF-CA) model[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(2): 447−470.

[17] Tan Z, Guan Q, Lin J, et al. The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106711.

[18] 媛洁, 叶长盛, 黄小兰. 基于 CLUE-S 模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 325−332.
Yuan J, Ye C S, Huang X L. Temporal-spatial evolution and scenario simulation of production-living ecological space in Nanchang based on CLUE-S model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 325−332.

[19] 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.

[20] Lin Z, Peng S. Comparison of multi-model simulations of land use and land cover change considering integrated constraints: a case study of the Fuxian Lake Basin[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109254.

[21] Xu X, Wang S, Rong W. Construction of ecological network in Suzhou based on the PLUS and MSPA models[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110740.

[22] Yang J, Zeng C, Cheng Y J. Spatial influence of ecological networks on land use intensity[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137151.

[23] 史晋, 唐相龙. 基于 PLUS-MSPA 与空间句法的兰州市生态网络多情景模拟与评估 [J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6432−6442.
Shi J, Tang X L. Multi-scenario simulation and evaluation of Lanzhou ecological network based on PLUS-MSPA and spatial syntax[J]. Environmental Science, 2025, 46(10): 6432−6442.

[24] 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.
Wang B S, Liao J F, Zhu W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: a case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284−4298.

[25] Li C, Wu Y, Gao B, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108328.

[26] 管人金, 陈优良, 黄孝斌, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的赣南地区土地利用多情景模拟及生态系统服务响应 [J/OL]. 环境科学, 1−23[2025−04−11]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202411012.
Guan R J, Chen Y L, Huang X B, et al. Multi-scenario simulation of land use and response of ecosystem services in southern Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model[J/OL]. Environmental Science, 1−23[2025−04−11]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202411012.

[27] 赵隆莲, 曹广超, 闫欣, 等. 基于 InVEST 模型和电路理论的生态安全格局识别——以青海省海南藏族自治州为例 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 137−146.
Zhao L L, Chao G C, Yan X, et al. Ecological security pattern identification based on InVEST model and circuit theory: a case study at Hainan Zang Autonomous Prefecture, Qinghai Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 137−146.

[28] 贾天朝, 胡西武, 杨海娟, 等. 生境质量对气候变化与人类活动的空间响应: 以青藏高原为例 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 203−211.
Jia T Z, Hu X W, Yang H J, et al. Spatial response of habitat quality to climate change and human activities: taking the Qinghai-Xizang Plateau as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 203−211.

[29] Vogt P, Ritters K H, Lwanowski M, et al. Mapping landscape corridors[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 481−488.

[30] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's green infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(1−2): 94−110.

[31] 王玉莹, 沈春竹, 金晓斌, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的江苏省生态网络构建与优化 [J]. 生态科学, 2019, 38(2): 138−145.
Wang Y Y, Shen C Z, Jin X B, et al. Developing and optimizing ecological networks based on MSPA and MCR model[J]. Ecological Science, 2019, 38(2): 138−145.

[32] 周燕, 刘梦瑶, 王丽娜, 等. 基于生态网络优化对比的国土空间生态修复策略研究 [J]. 中国园林, 2024, 40(9): 43−49.
Zhou Y, Liu M Y, Wang L N, et al. Research on ecological restoration strategy of territorial space based on ecological network optimization and comparison[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(9): 43−49.

[33] 张海铃, 叶长盛, 胡梦姗. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 393−402.
Zhang H L, Ye C S, Hu M S. Identification and restoration strategy of key areas of ecological restoration in urban agglomeration around Poyang Lake based on ecological security pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 393−402.

[34] Mcrae B H, Dickson B G, Keitt T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. Ecology, 2008, 89(10): 2712−2724.

[35] 祝诗榕, 祝明建, 林丰泽, 等. 基于生态网络构建的国土空间生态修复关键区域识别: 以粤港澳大湾区为例 [J]. 中国园林, 2024, 40(10): 34−40.
Zhu S R, Zhu M J, Lin F Z, et al. Identification of key areas for territorial ecological restoration based on ecological networks: a case study of the Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay area China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(10): 34−40.

[36] 张丽, 王晨旭, 徐建英, 等. 面向连通性提升的旱区城市生态网络优化情景分析: 以巴彦淖尔市及其周边地区为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8675−8689.
Zhang L, Wang C X, Xu J Y, et al. Scenario analysis of urban ecological network optimization for connectivity improvement in arid area: a case study of Bayannur City and its surrounding areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8675−8689.

[37] Wang Y J, Qu Z, Zhong Q C, et al. Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109258.

[38] 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.
Song L L, Qin M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3344−3352.

[39] Su C, Wang Z, Yang S, et al. Decoupling natural and anthropogenic impacts on ecosystem services in the Yarlung Tsangpo River, Lhasa River, and Nianchu River Basin of Xizang[J]. Remote Sensing, 2025, 17(16): 2872.

[40] 黄悦, 李红波, 欧国良. 武汉城市圈生态网络鲁棒性模拟及稳定性分析 [J]. 生态科学, 2024, 43(1): 63−73.
Huang Y, Li H B, Ou G L. Robustness simulation and stability analysis of ecological network in Wuhan metropolitan area[J]. Ecological Science, 2024, 43(1): 63−73.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 冯仲科）