

李敏稚, 田晓雨. “城市-湿地复合体”生态网络韧性的多情景测度与响应: 以广州市海珠区为例[J]. 风景园林, 2026, 33 (3): 42-50.

“城市-湿地复合体”生态网络韧性的多情景测度与响应——以广州市海珠区为例

李敏稚 田晓雨

摘要:【目的】在城市时空动态演变中,对广州市海珠区未来发展的不同情景进行模拟,探索城市动态发展和区域协同引导下城市生态网络韧性测度方法与设计响应,在中观尺度下讨论城市可持续发展的导向及规划策略。【方法】以广州市海珠区为例,提出“城市-湿地复合体”概念并总结其特征,运用斑块级土地利用变化模拟(patch-generating land use simulation, PLUS)模型,模拟2030年自然发展、城市扩张和生态优先3种情景下的土地利用格局,结合形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)与图论方法,构建动态演进的生态网络并量化其韧性特征。通过介数中心性分析和节点删除算法,评估生态网络结构韧性与功能韧性,揭示“城市-湿地复合体”的韧性响应机制。【结果】海珠区生态源地的分布与珠江河网、湿地公园(如海珠湿地)及城市绿地系统高度重合。自然发展情景下生态网络连通性、抗干扰能力和连接效率最高,结构韧性强;城市扩张情景下生态网络对关键节点依赖性增强,功能韧性较弱;生态优先情景下生态网络韧性阈值最高,韧性水平高。【结论】生态网络是保障城市生态韧性的关键载体。“城市-湿地复合体”生态网络韧性测度,可以为中观尺度下城市生态敏感区的生态韧性强化及设计响应提供新思路。

关键词: 风景园林; 韧性城市; 生态网络; 可持续; 城市演进; 城市-湿地复合体; 斑块级土地利用变化模拟模型

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于多元博弈和共同创新的城市设计形态导控研究”(编号51978267); 2026年度广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目“适应气候变迁的高密度城市街区精细化设计和空间治理研究”; 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室自主研究课题“陆海统筹视角下粤港澳大湾区绿色城市设计评估方法和转型策略研究”(编号2024ZB13)

中图分类号: TU986 **文章编号:** 1673-1530(2026)03-0042-09 **收稿日期:** 2025-11-15
文献标识码: A **DOI:** 10.3724/j.fjyl.LA20250709 **修回日期:** 2026-01-29

城乡建设空间的快速扩张影响着地表自然特征,人类经济社会发展可能加剧环境恶化的风险^[1]。自1978年改革开放以来,在经济快速发展背景下,粤港澳大湾区经历了显著的城市化转型^[2],2023年末常住人口超8 600万人,是中国经济最发达、人口密度最高的城市群之一^[3]。Wu等^[4]通过生态系统健康指数计算得出,粤港澳大湾区城市化和生态系统健康回归系数整体呈负值,表明城市化率的提高增大了生态环境压力,极大干扰了生态系统健康,而生态系统健康负效应尤其集中在大湾区中部片区。

生态网络是城市的基础构成系统之一,是保护、恢复和发展景观生态连通性的关键载体。福尔曼(Richard T. T. Forman)等^[5]提

出了“斑块—廊道—基质”理论,奠定生态网络研究的基础结构。构建生态网络的常用方法模型包括形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)^[6]、最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型^[7]、景观图论(landscape graph theory)^[8]、电路理论(circuit theory)^[9]、生态系统服务与权衡的综合评估(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)模型^[10]等,为生态网络研究提供了理论支撑与技术支持。

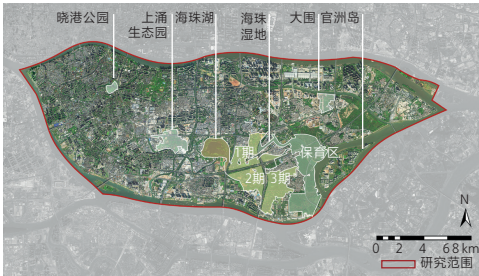
加拿大生态学家霍林(C.S. Holling)首次将韧性的思想应用到生态学领域,后续学者对韧性的研究逐渐从自然生态学向人类生态学延展^[11]。随着各类韧性理论与网络分析方

文章亮点:

- 1、提出“城市-湿地复合体”的新概念,并建立“网络—韧性—潜力”的整体分析逻辑,为中高密度城市生态协同规划提供新视角和新方法。
- 2、综合运用PLUS模型、MSPA等方法,模拟3种发展情景下生态网络的动态演变,并通过量化分析揭示了生态网络的结构性规律,包括自然发展情景下网络连通性最高,以及生态优先情景下韧性阈值最大等特征。
- 3、耦合国土空间规划目标,讨论海珠区“新中轴”规划与高韧性廊道的空间契合性,为粤港澳大湾区城市的生态修复与精细化治理提供可操作的设计响应与节点分级保护策略。

法的深度融合,复杂网络分析已成为韧性研究的关键路径。生态网络作为由核心区、斑块与廊道构成的空间系统,其结构要素与复杂网络中的节点、边及整体拓扑结构具有显著的对对应关系^[12]。生态网络通过强化节点间的连接与相互作用,能系统提升生态系统的整体韧性^[13]。现有研究多侧重于生态网络结构导向的度量。早期研究常采用网络效率、网络最大连接性等指标来分析网络受到干扰后的结构保持能力^[14],近年来研究的评估方式日渐丰富,增加了可恢复性、鲁棒性等指标。然而上述度量与评估对于干扰状态下生态网络维持系统生态能力的关注略显不足^[15]。

城市生态系统变化的区域影响、产生机理及应对方式等逐渐受到城市生态系统可持



1 研究范围
Research area

续发展研究与管理领域的重视^[16]，城市生态韧性概念及研究应运而生^[17]。随着城市发展，工业和居住活动对空间资源的需求急剧增加，进一步加剧了城区三生空间分布不均等问题^[18]。当前急需找到解决经济发展和生态保护冲突的有效方案，在此背景下诸多学者转向城市发展与生态耦合的多情景模拟研究。在流域空间方面，Yu 等^[19]通过采用元胞自动机-马尔可夫（cellular automata-Markov, CA-Markov）模型和未来土地利用模拟（future land use simulation, FLUS）模型，在自然、经济和社会驱动因素下研究淮河流域城市演化模式和空间分布，战略性提出土地利用管理、耕地系统保护方案；Zhang 等^[20]在斑块级土地利用变化模拟（patch-generating land use simulation, PLUS）模型中整合预测三角洲地区景观生态风险。在中心城区方面，李豪等^[21]运用 FLUS 模型模拟北京市中心城区不同发展情景下 2035 年的土地利用格局，对比评估生态网络景观连通性的时空演化特征；丁金华等^[22]基于 CA-Markov 模型模拟城市扩张情景下苏南水网区域土地利用格局，预测其景观生态风险空间分布，构建动态演变下的生态安全格局；Wu 等^[23]分析了土地利用类型变化与碳储量变化的关系。Liang 等^[24]提出精度更高的 PLUS 模型，通过耦合自然、社会、经济因素，模拟多种土地利用类型的斑块级变化。同时，有学者认为小规模土地利用变化研究和预测有助于规划设计者更细致地理解当地特征和需求，可用于分析和提高规划设计精度^[25]，与 PLUS 模型的应用路径不谋而合。

表1 数据来源
Tab. 1 Data sources

数据类型	空间分辨率	数据来源
土地覆被类型	30 m	中国国家地理信息中心GlobeLand30数据集（www.globeland30.org）
高程模型	30 m	地理空间数据云平台（www.gscloud.cn）
人口密度	30 m	LandScan平台（landscan.ornl.gov）
行政边界		国家基础地理信息数据库（www.resdc.cn）
人类活动强度		高德地图兴趣点（point of interest, POI）数据
交通网络		OpenStreetMap（www.openstreetmap.org）

注：表格中空项为对应数据为矢量数据，没有对应的空间分辨率。

城市湿地是城市人地系统中的重要组成部分，在城市发展中具有非常重要的生态、社会、文化价值^[26]，城市与湿地之间存在极其复杂的关系和相互影响。已有研究主要集中在湿地景观格局变化^[27]、生态风险评估^[28]、各类湿地空间要素间关系^[29]等领域，在研究逻辑和方法上未能将城市和湿地系统视为整体，难以实现国土空间规划的高效统筹与协同效益最大化。而本研究拟选取的广州市海珠区在漫长发展进程中清晰体现并稳定延续了极强的城市与湿地高度复合的空间格局特征：湿地规模较大，占海珠区绿地面积的 68%，有生态主导性；湿地水文系统受潮汐河网的影响，与城市排水系统、交通廊道等高度叠合；城市建成区与湿地空间具有复杂的嵌套关系，生态节点与城市功能节点存在显著竞争。基于此，本研究提出“城市-湿地复合体”概念，并以海珠区作为典型研究对象：它融合了大规模自然湿地与高密度建成区，具有显著的空间整合性、生态多样性及社会服务功能复合性。通过科学规划与持续管理，“城市-湿地复合体”有转化为连通、安全、具有韧性的生态基础设施的潜力，从而支撑城市高质量建设与可持续发展，成为践行“绿水青山就是金山银山”理念的关键空间载体。

为提高生态韧性评估精度，本研究提出城市发展与区域生态网络动态耦合的构建方法，以广州市海珠区为例，引入 PLUS 模型、MSPA 等方法来综合优化生态网络识别技术。在城市的时空动态演变中，对未来发展情景进行模拟，预见性探索城市动态发展和区域协同引导下城市生态网络韧性测度方法与设

计策略，在中观尺度上为城市可持续发展提供规划策略与空间指引。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

广州市海珠区地处珠江三角洲腹地，是广州市中心城区唯一四面环水的江心岛区。区域范围内绿地生态资源丰富（图 1），总面积约 90.42 km²^[30]，兼具历史文脉传承与现代城市发展特征。海珠区以珠江潮汐河道为骨架，拥有华南地区最大的国家级“城央”湿地——海珠湿地。受珠江水系自然分割的影响，区域生态空间呈现“南北梯度分异”的特点。海珠区呈现出独特的“江-涌-湿地-城”复合格局，其生态基底受珠江潮汐水文系统与城市高强度开发的双重影响，形成显著的“生态-建设”空间博弈特征。同时，作为广州市“老城市新活力”的核心实践区，海珠区兼具生态敏感性和城市核心功能，其生态网络优化对城市可持续发展具有重要意义和范式价值。

1.2 数据来源

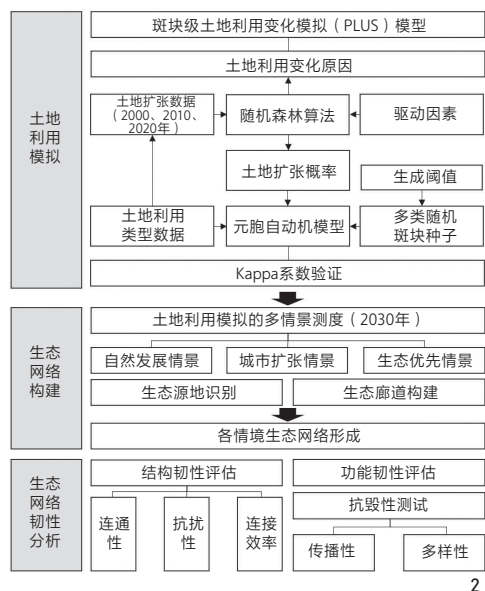
本研究选取 2000、2010、2020 年为时间节点，共采集土地覆被类型、高程模型、行政边界、人类活动强度、人口密度、交通网络 6 类数据（表 1）。此外，本研究在模拟过程中充分考虑了《广州市生态廊道体系规划（2020—2035 年）》与《广州市国土空间总体规划（2021—2035 年）》的指导要求，将管控要素融入情景设置中，以提升模拟精度并增强结果的现实解释力，为生态网络的规划实施与评估提供了更可靠的依据。

表2 邻域权重参数
Tab. 2 Neighborhood weight parameters

土地利用类型	邻域权重
耕地	0.840
林地	0.062
草地	0.020
水域	0.020
建设用地	0.960

表3 PLUS 模型转移矩阵
Tab. 3 Transfer matrix of PLUS model

用地类型	自然发展情景					城市扩张情景					生态优先情景				
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地
耕地	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
林地	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
草地	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
水域	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
建设用地	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1



2 研究框架图
Research framework diagram

2 研究方法

通过 PLUS 模型进行土地利用情况模拟, 预测 2030 年海珠区在自然发展、城市扩张、生态优先 3 种情景下的土地利用情况, 构建 2020 年和多情景模拟下的 2030 年城市生态网络; 最后, 进行生态网络韧性分析, 对研究区域生态网络结构韧性和功能韧性进行动态评估, 提出对应策略 (图 2)。

2.1 土地利用模拟

2.1.1 模拟步骤

PLUS 模型是一种基于机器学习与空间斑块生成的土地利用变化模拟模型, 其核心优势在于结合了随机森林算法, 可分析用地扩张驱动机制, 并通过多类随机斑块种子的元胞自动机模型 (cellular automata model based on multi-type random patch seeds, CARS) 生

成更真实的土地利用斑块结构, 用于模拟城市扩张、生态保护等复杂情景^[20]。Kappa 系数是 PLUS 模型验证的核心指标, 能够客观反映模拟结果的科学性与可靠性, 当 Kappa>0.75 时, 表示模拟结果与实际情况之间的一致性较高^[31]。

根据研究区域实际情况及相关研究基础^[32], 本研究将大型水域、生态保护区, 以及生物岛、琶洲人工智能与数字经济试验区等政策重点区域划定为用地转换限制区, 以约束城市无序扩张。同时, 选取高程、坡度、距建筑距离、距道路距离、人口密度 5 项作为空间驱动因子, 输入土地扩张分析策略 (land expansion analysis strategy, LEAS) 模块。为提升中小尺度模拟的差异性, 构建“自然—社会”综合评价体系, 引入 POI 核密度作为表征人类活动强度的发展因子, 以增强模型预测的准确性。

基于 2000、2010 年 2 期土地利用数据及上述共 6 个空间驱动因子, 通过随机森林算法解析各因子对土地利用扩张的贡献度, 并运用 CARS 进行 2020 年土地利用情况模拟。模型中设定了邻域权重, 权重越高表示该类用地越不易向其他地类转换^[24]。基于研究区域土地利用实际情况及相关文献研究^[32], 经 PLUS 模型软件测试与验证, 得到模拟精度较高时的邻域权重值 (表 2)。

2.1.2 多情景模拟

通过 2020 年模拟图与当年实际土地利用图的精度验证, 得出 Kappa 系数为 0.77, 总体精度为 0.88, 说明模拟精度较高, 可以用于 2030 年海珠区的土地利用模拟。以 2020 年土地利用为基准, 设置了 3 种发展情景。

1) 自然发展情景: 基于 2010—2020 年

土地利用变化状况及自然、社会经济驱动因素, 不考虑政策法规、土地利用规划、城市发展规划等因素的限制。模拟海珠区的土地利用空间格局仅按照其历史演化轨迹线性发展, 是一种理想意义上的发展场景。

2) 城市扩张情景: 海珠区的主体功能被定义为国家级城市化地区, 同时将继续加强与粤港澳大湾区城市群的协同发展, 提升区域辐射力和影响力。设置该情景有助于科学把握海珠区在区域协同城市化背景下保持快速增长模式时的土地利用变化状况。

3) 生态优先情景: 生态优先发展情景的目标是最大限度地提高生态效益。《广州市海珠区国土空间总体规划 (2021—2035 年)》 (简称《规划》) 中提到, 到 2035 年, 海珠区全域范围内不再划定耕地保有量及永久基本农田; 生态保护红线划定面积不低于 8.69 km²。根据以上规划文件调整模型中土地利用需求的数据。

本研究明确了 5 类土地利用方式间的转换规则: 转换规则影响土地利用类型变化, 允许转化时, 对应的矩阵值为 1, 反之为 0 (表 3)。

2.2 生态网络构建

2.2.1 生态源地识别

采用 MSPA 法将土地利用数据处理为包括自然生态要素 (前景) 与其他土地利用类型 (背景) 的二值化栅格图像, 利用 Guidos Toolbox 软件基于八邻域原则进行分析, 将前景景观分为互不重叠的 7 类 (核心区、岛状斑块、桥接区、环岛区、支线、孔隙和边缘区), 其中核心区为生态网络中的生态源地, 岛状斑块为彼此不相连的孤立小斑块, 承担踏脚石的作用。选取功能重要性高且生态风险低的区域作为生态源地, 保留的最小斑块

面积为 0.05 km²。

2.2.2 生态廊道构建

生态阻力面描述了物种在不同栖息地斑块间移动的难度，反映了生态过程的水平阻力，能够表征景观异质性对生态流动的影响^[33]。本研究结合自然因素和人为因素，构建海珠区综合阻力面（图 3）。将坡度、土地利用类型、距道路距离、距水体距离、POI 核密度和归一化植被指数 6 个因子的阻力系数分为 5 个不同等级^[34]，利用自然断点法和等分法进行重分类，运用熵权法构建阻力面因子权重（表 4）。基于该阻力面，通过 Linkage Mapper 工具计算生态源地间的最小累积阻力路径，识别不同情景下的生态廊道，构建生态安全格局。

2.3 生态网络韧性分析

2.3.1 结构韧性评价

在景观生态学与景观图论中，拓扑指数是揭示网络结构韧性的重要量化工具，其中 γ 、 α 、 β 指数作为核心连通性指标，分别从不同维度揭示生态网络的拓扑性质，用于分析生态网络的韧性能力。结构越复杂、连接越紧密、环路越丰富，网络在应对干扰时维持功能稳定的潜力越大，生态耦合途径也越具冗余性与恢复力^[35]。本研究选择基于景观图论的网络分析法反映生态网络的拓扑结构。

γ 指数反映生态网络的整体连通性，衡量实际连接边数与理论最大可能连接边数的比例。计算式为

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

式中， L 代表实际存在的连接边数； $L_{\max}$ 指理论上可能的最大连接边数； V 代表生态斑块数量。

α 指数表征生态网络的闭合度（冗余性），即实际环路数与理论最大环路数的比值。高 α 值表示网络环路多，抗干扰能力强。 β 指数表示单位节点的平均连接数，反映网络连接效率。 $\beta=1$ 表示树状结构（无环路）， $\beta>1$ 表示复杂连接。计算式为

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

式中， L 代表实际存在的连接边数， V 代表节点总数。

2.3.2 功能韧性评价

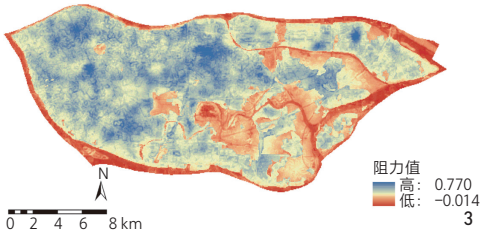
功能韧性评价是评估生态系统、城市系统或工程系统在面临干扰（如自然灾害、人为活动、气候变化）时，维持核心功能、适应变化并恢复的能力。其核心在于量化系统在压力下的稳定性、适应性与恢复力，可以为风险管理与规划提供科学依据。判断节点在面对破坏性事件时生态网络的运行能力，是评价网络功能韧性的必要条件^[36]。本研究通过随机概率攻击和确定性攻击 2 种攻击场景来模拟生态网络的功能变化：在随机概率攻击中，综合考虑节点失效的各种排列组合可能性，通过多次重复攻击并取结果平均值，以全面反映随机干扰下的网络响应；确定性攻击则用于探究特定节点失效对系统的影响，从而识别在维持韧性方面具有关键作用的节点^[14]。遭受单次攻击后，节点立即失效，意为节点因干扰而完全失去功能，其所有直接相连的廊道也将随之被移除，网络结构因此发生动态重构，剩余节点重新连接形成新的拓扑，生态网络韧性水平随之变化。为准确衡量这种韧性水平，本研究选取用于系统评估的 4 项指标：聚集度、连接度、传播效率与功能多样性。各指标分别从结构整合、连通维持、流量可达及功能冗余等维度，共同刻画网络受攻击后维持核心功能的能力^[37]。

1) 聚集度可以用局部聚类系数和平均聚类系数来表示^[38]。局部聚类系数描述了网络中特定节点与其邻近节点之间连接的聚集情况，而平均聚类系数则代表了整个网络的聚集水平。计算式为

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}，$$
$$A = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}。$$

式中， C_i 代表节点 i 的局部聚类系数， E_i 表示节点 i 邻近节点之间的实际边数， k_i 表示节点 i 的度数， A 表示聚集度指数， n 表示网络中总节点数。

2) 连通性反映节点的连接水平。网络平均连通度为所有节点度的均值，是刻画网络整体连接特征的关键拓扑指标^[39]。更高的平均



3 海珠区综合阻力面
Comprehensive resistance surface for Haizhu District

表4 因子综合权重与阻力值
Tab. 4 Factor weightings and resistance values

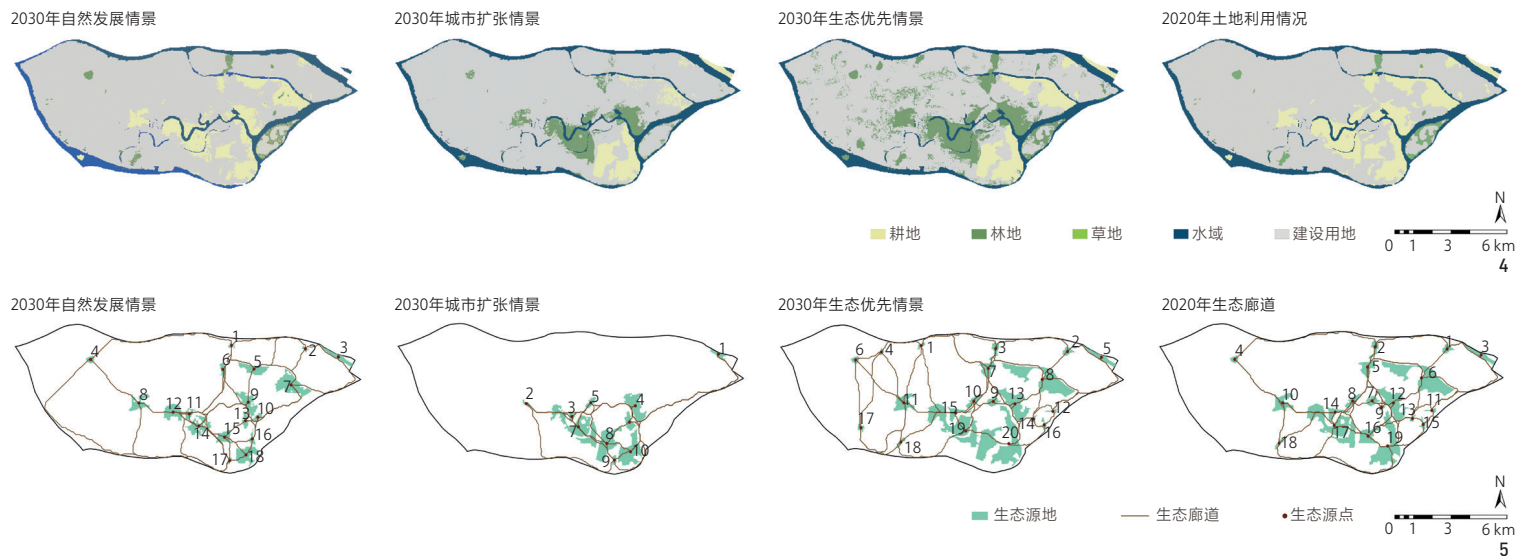
指标层	综合权重	等级	阻力值
坡度	0.21	<3°	1
		3°~<7°	3
		7°~<12°	5
		12°~19°	7
		>19°	9
土地利用类型	0.18	林地	1
		耕地	3
		草地	5
		水域	7
		建设用地	9
距道路距离	0.05	>800 m	1
		600~800 m	3
		400~<600 m	5
		200~<400 m	7
		<200 m	9
距水体距离	0.20	<200 m	1
		200~<400 m	3
		400~<600 m	5
		600~800 m	7
		>800 m	9
POI核密度	0.34	<150	1
		150~<350	3
		350~<600	5
		600~900	7
		>900	9
归一化植被指数	0.18	>0.8	1
		0.6~0.8	3
		0.4~<0.6	5
		0.2~<0.4	7
		<0.2	9

连通度意味着更强的网络连通性。计算式为

$$K = \sum \frac{k_i}{n}。$$

式中， K 代表网络的平均连通度， k_i 表示节点 i 的度数， n 代表网络中的总节点数。

3) 传播性是生态网络中物质、能量与信



4 土地利用多情景模拟
Multi-scenario simulation of land use

5 生态网络多情景模拟结果
Multi-scenario simulation results of ecological networks

息流动能力的表征，反映系统在结构约束下实现功能流转的效率与潜力。本研究采用网络效率作为其量化指标^[14]，通过计算所有节点对之间最短路径效率的平均值评估网络整体传输性能，计算式为

$$E = \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij} (n-1)}$$

式中， E 表示网络效率， $0 \leq E \leq 1$ ； d_{ij} 表示网络中节点 i 和节点 j 之间的最短距离； n 代表网络中的总节点数； G 表示研究范围的网络拓扑图。

4) 多样性是生态网络在遭受局部干扰时，通过功能或结构的可替代性来维持整体性能的能力。本研究借鉴交通网络韧性研究，采用独立路径的平均值作为量化网络多样性的指标^[40]。独立路径是指 2 个节点间所有相互关联且不重合的路径。当 2 个节点间的 1 条独立路径受到干扰，其他的独立路径能够保证 2 个节点之间的正常运行。计算式为

$$V = \sum_{i \neq j \in G} \frac{n_{ij}}{n(n-1)}$$

式中， V 表示独立路径的平均值， n_{ij} 表示网络中节点 i 和节点 j 之间的独立路径数量， n 表示网络中的总节点数， G 表示研究范围的网络拓扑图。

通过对指标标准化操作和权重计算可得

出在攻击情况下的功能韧性 (F)^[41]。计算式为

$$F = \frac{(N_e + N_v)}{2}$$

式中， N_e 表示传播性指标， N_v 表示多样性指标。

3 结果与分析

3.1 多情景模拟结果

以 2020 年现状土地利用为基准数据进行模拟，得到不同情景下 2030 年土地利用模拟结果。2030 年在自然发展情景下，研究区内建设用地小幅扩张，林地草地有所减少；在城市扩张发展情景下，建设用地扩张趋势增强，侵占大量绿色空间，原有绿地边缘破碎化程度加剧；在生态优先发展情景下，建设用地的扩张强度得到控制，在研究区域中部和西北部出现小型绿地斑块（图 4）。

3.2 生态网络分析

模拟情景显示，生态廊道多倾向于连接城市绿地等生态阻力较低的区域，但在密集开发的影响下，生态系统往往呈现破碎化状态，从而制约了网络内部的整体连通性。3 种发展情景下生态廊道总体呈现两段式分布格局，即西北-东南的布局模式。自然发展情境下，构建 36 条廊道，共 62.089 km，主要集中在东南部，中北部区域缺乏纵向贯穿的廊道；城市扩张情境下，构建 18 条廊道，共

表 5 3 种发展情景下结构韧性指标测算结果
Tab. 5 The results of structural resilience indicators under three development scenarios

发展情景	γ 指数	α 指数	β 指数
自然发展	0.77	0.65	2.06
城市扩张	0.75	0.60	1.80
生态优先	0.76	0.63	2.05

37.259 km，廊道数量在各个区域都显著减少，只集中于生态红线划定的保护区域；而在生态优先情境下，构建 41 条廊道，共 63.490 km，西部有数条南北走向的廊道，廊道网络更加密集，中心城区有穿过性廊道（图 5）。

3.3 韧性测度与设计响应

3.3.1 结构韧性分析

通过 ArcGIS 的基础分析及计算式计算可得到 3 种情景模拟下 γ 指数、 α 指数、 β 指数的测算结果（表 5）。总体而言，3 种情境均呈现出“高 γ 低 α ”的结果，表明生态网络连通性较好，但结构性冗余不足，即网络中可供替代连接的环路数量较少，易因单点失效而崩溃。自然发展和生态优先情景下， β 指数数值适中，生态网络复杂度处于正常水平，构成层次较丰富。虽然在生态优先情景下，研究区域内的生态源地和廊道数量有所增加，但其连通性和抗干扰力并没有显著优势，这可能是由于增加的生态源地位于高密

度城区，生态源地间连接阻力较大，阻碍了物种扩散。

3.3.2 功能韧性分析

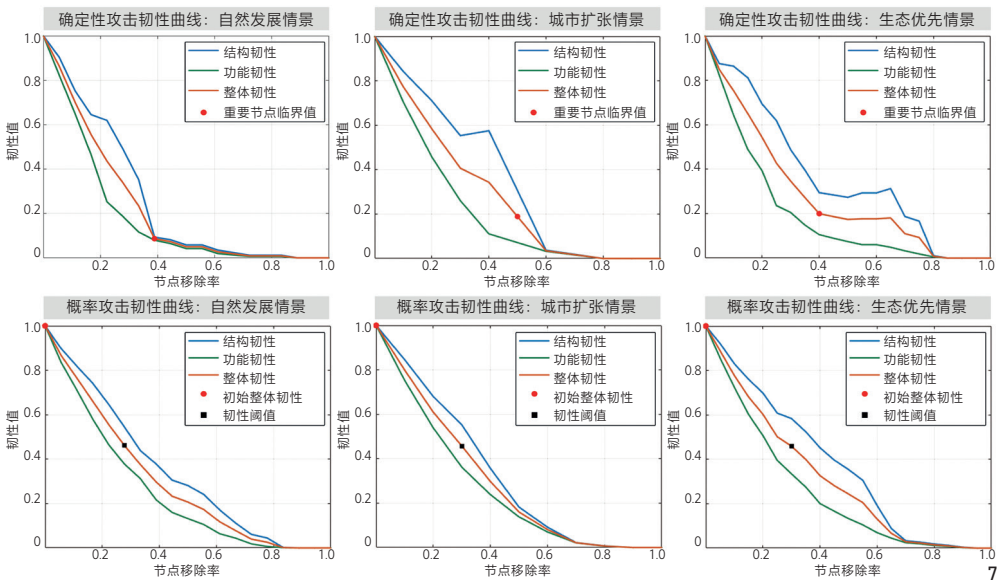
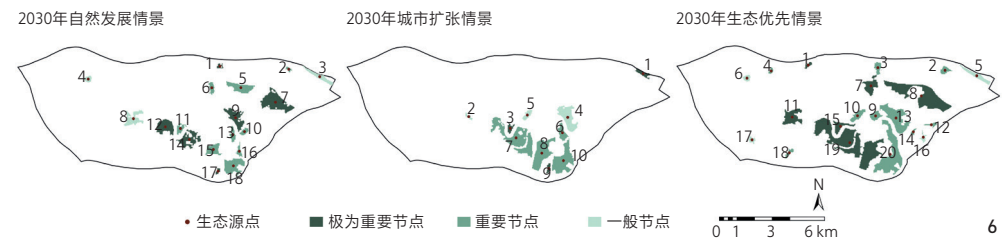
根据节点受攻击后对网络功能韧性的影响程度，本研究将节点按照重要性划分为3个等级：极为重要、重要与一般（表6）。其中，极为重要节点也称关键韧性节点，代表对维持网络功能具有核心作用的节点集合。

在确定性攻击下，3种情景的生态网络功能韧性均呈现下降趋势，在城市扩张情景中下降尤为显著，表明节点重要性越高，对网络韧性的维持作用越大。当极为重要和重要节点失效时，网络韧性下降幅度尤其明显。从关键韧性节点的占比来看：自然发展情景中占比最低，城市扩张情景中占比最高。在自然发展情景下，网络存在较少的关键韧性节点即可维持功能，系统在关键韧性节点失效后更早进入低水平稳定状态，需重点保护的目标更为集中；而在城市扩张情景下，因关键韧性节点分布广泛且结构脆弱，网络整体韧性表现较差。

在概率攻击下，3种情景的网络功能韧性变化趋势基本一致：节点去除率在0%~30%时，功能韧性快速下降；去除率在30%~70%时，下降趋缓；去除率超过70%后，功能韧性逐渐趋近于零。本研究将韧性阈值定义为整体韧性下降至初始值一半时所对应的节点移除率。各情景的韧性阈值较为接近且下降曲线相似，表明在随机干扰下，不同情景的网络鲁棒性与崩溃路径相近（图7）。

综上，确定性攻击可用于识别关键韧性节点及其重要性分级，概率攻击则反映了网络应对随机干扰的整体稳健性。二者结合表明，生态网络在面临针对性攻击时更显脆弱，尤其在城市扩张情景下，关键韧性节点多、结构冗余低，导致其功能韧性显著下降。

在空间布局上，关键韧性节点的空间分布格局基本一致。其中海珠湿地公园核心区（一期、二期）部分区域的重要性较高，且三期南侧区域在3种情境下均呈现出极高的重要性。在自然发展和生态优先情景下，关键韧性节点向北侧延伸，大围地块现存绿地构成点状重点地区。



6 节点重要性分析
Node importance analysis

7 2种攻击下整体韧性变化
Overall resilience changes under two types of attacks

表6 韧性阈值与节点分级信息
Tab. 6 Resilience thresholds and node classification information

发展情景	韧性阈值	极为重要节点临界点坐标	重要节点临界点坐标	重要节点占比/%
自然发展	0.27	(0.33, 0.23)	(0.83, 0.01)	3.3
城市扩张	0.27	(0.50, 0.19)	(0.60, 0.04)	5.0
生态优先	0.30	(0.40, 0.12)	(0.80, 0.01)	4.0

4 结论

4.1 结果讨论

海珠区生态源地高度集中于河网、湿地公园与城市绿地系统。然而，不同情景下生态源地面积与破碎化程度差异显著：城市扩张情景下，高强度开发导致生态源地面积减少，海珠湿地周边斑块碎片化加剧；生态优先情景下，通过生态修复与廊道连通，核心湿地斑块面积扩大，破碎化程度降低。这表明生态源地的稳定性与人为干预强度直接相关，需优先保护珠江沿岸湿地与城市绿心等关键区域，防止其功能退化。

海珠区结构韧性在自然发展情景下表现

最优，廊道平均长度缩短显著，网络传递效率较高，这与廊道的缩短提升了物种迁移效率有关。海珠区功能韧性分析显示：自然发展情景下重要节点向北延伸至官洲街道果园农田，形成“湿地—农田”带状结构，但该结构连接稀疏、易受开发切割；城市扩张情景下各类节点高度集中于海珠湿地南侧，呈现生态孤岛化格局，空间冗余度最低；生态优先情景下构建“核心湿地—多级支点”网络，生态空间分布更均衡，但廊道路径较长，易受城市建设与人为活动干扰。

《规划》提出构建连接北中轴、贯穿全区南北的“新中轴”，以强化珠江前后航道

滨水空间与海珠湿地核心区的生态联系,构建“多中心—多走向—多层次”的绿色生态骨架。从韧性视角分析,本研究的多情景模拟结果与规划导向呈现出高度耦合性。新中轴的空间走向与自然发展情景下生态网络的高连通性廊道基本吻合,《规划》提出的生态主轴契合了区域生态流动方向及自然格局演化规律;在城市扩张情景中,新中轴所覆盖区域恰处于高阻力带,该轴和空间留白对削弱阻断效应、增强系统抗干扰能力具有显著作用;在生态优先情景下,新中轴强化了湿地与滨江绿带之间的生态联系,使生态流动从“点—线”联系向“面—网”扩展,实现了“结构稳定—功能冗余—生态恢复”的系统性提升。

未来可基于本研究模拟结果进一步量化规划实施强度对生态连通性及韧性阈值的边际效应研究,推动从“规划预测”到“规划评估”的科学转型,为国土空间规划提供可量化、可验证的生态依据。

4.2 优化策略

本研究提出以“保护关键节点+提升廊道连通性+加强踏脚石规划”为结构框架的生态韧性优化策略。复合体内部生态节点的稳定性高度依赖于人为干预强度,尤其在城市扩张情景下,湿地边缘破碎化趋势明显,提示未来规划需在生态控制边界、用地混合机制与空间治理制度层面进一步完善,以保障长期韧性与功能完整性。

1) 保护关键节点的完整性:海珠区关键韧性节点高度集中于海珠湿地公园核心区(一期、二期)及三期南侧,这些关键韧性节点在确定性攻击下会失效,导致生态网络功能韧性下降50%以上,规划应避免使生态源地边缘破碎化;湿地南部“集中生态源地”区域应加强廊道冗余布设与边缘建设管控,以避免城市扩张导致生态源地结构破碎。

2) 提升关键节点间的连通性:北部农田与河网区应作为生态路径扩展轴线,构建绿轴与节点跳跃体系,以强化湿地中心区生态功能支撑;可构建多级生态廊道,沿珠江前航道和后航道建设宽度 ≥ 100 m的滨江绿带作为主干廊道,串联海珠湿地与黄埔古港绿廊;

利用现状河涌(如赤沙涌、石榴岗河等)打造生态水廊,连接孤立的社区绿地以构建次级廊道;在开发密集区(如琶洲人工智能与数字经济试验区)实施“立体绿化+生态天桥”的增绿措施,通过屋顶花园和跨路廊道衔接碎片化绿地,突破建成区之间的阻隔。

3) 加强踏脚石的保护与规划:识别踏脚石潜力区,选取生态走廊交叉点(如海珠湖—广州塔轴线)和孤立的社区绿地(如晓港公园),划定50~100个面积 ≥ 0.5 hm²的小微斑块作为踏脚石候选区。优化踏脚石功能,在长距离廊道(如跨越珠江的生态轴)中增设人工浮岛、浅滩湿地等,为迁徙的候鸟提供临时栖息地。通过林荫步道连接相邻踏脚石(间距 ≤ 500 m),形成“斑块—廊道—踏脚石”的三级生态网络,打造物种扩散的跳板系统。

韧性模拟结果也进一步揭示了节点保护等级的必要性。基于此,本研究建议构建节点分级保护体系,将生态网络优化从总体布局推进到精细化要素调控:一级节点(极其重要节点)实施刚性保护,避免因局地开发导致系统性和连通性崩溃;二级节点(重要节点)通过增强冗余路径,提高生态空间恢复潜力;三级节点(一般节点)则承担网络补链与生态渗透职能。海珠区生态网络可由单一的生态缓冲结构转化为具有空间连续性、功能复合性的城市生态韧性支撑系统,从而在规划实施层面有力验证多情景模拟的科学有效性。

4.3 未来研究展望

PLUS模型为海珠区生态网络动态模拟提供了有效工具,但仍存在一定局限性:对高密度建成区内小型绿地斑块的模拟精度不足,可能在一定程度上低估潜在的生态节点及其连接功能;难以预测气候变化对网络韧性的长期效应。未来研究可结合高分辨率遥感数据细化生态阻力面参数,并尝试对经济强度、人口密度等城市化因素进行空间量化,以揭示生态网络韧性对城市化空间响应的深层机制。

随着未来《规划》的实施,模拟结果与未来实际绿地格局可能存在差异。但通过多情景模拟所揭示的土地利用转型规律与生态

约束条件,仍可为理解城市生态空间演变机制提供科学依据;本研究所构建的生态网络及韧性评估框架,可作为评估规划实施效果、优化绿地中轴建设、提升区域生态稳定性的重要参考。

参考文献(References):

- [1] HU H, YAN K G, SHI Y, et al. Decrypting Resilience: The Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Ecological Resilience in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 106: 107540.
- [2] YANG C, LI Q Q, HU Z W, et al. Spatiotemporal Evolution of Urban Agglomerations in Four Major Bay Areas of US, China and Japan from 1987 to 2017: Evidence from Remote Sensing Images[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 232-247.
- [3] 庄宝怡, 孙传璋, 植接弟, 等. 基于居民生态福祉提升目标的区域生态网络构建: 以粤港澳大湾区为例[J]. 生态学报, 2025, 45 (24): 12453-12469.
- [4] ZHUANG B Y, SUN C Z, ZHI J D, LI J G. Regional Ecological Network Construction for Ecological Well-Being: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (24): 12453-12469.
- [5] WU Y, WU Y M, LI C, et al. Spatial Relationships and Impact Effects Between Urbanization and Ecosystem Health in Urban Agglomerations Along the Belt and Road: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (23): 16053.
- [6] FORMAN R T T, GODRON M. Patches and Structural Components for a Landscape Ecology[J]. BioScience, 1981, 31 (10): 733-740.
- [7] VOGT P, RIITTERS K H, IWANOWSKI M, et al. Mapping Landscape Corridors[J]. Ecological Indicators, 2007, 7 (2): 481-488.
- [8] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 8-15.
- [9] YU K J. Landscape Ecological Security Patterns in Biological Conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (1): 8-15.
- [10] HASHEMI R, DARABI H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014-2021[J]. International Journal of Environmental Research, 2022, 16 (2): 24.
- [11] DICKSON B G, ALBANO C M, ANANTHARAMAN R, et al. Circuit-Theory Applications to Connectivity Science and Conservation[J]. Conservation Biology, 2019, 33 (2): 239-249.
- [12] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 等. InVEST模型原理及其应用研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34 (3): 204-208.
- [13] TANG Y, ZHU W P, ZHANG H, et al. A Review on Principle and Application of the InVEST Model[J]. Ecological Science, 2015, 34 (3): 204-208.
- [14] HOLLING C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4 (1973): 1-23.
- [15] WANG T, LI H B, HUANG Y. The Complex Ecological Network's Resilience of the Wuhan Metropolitan Area[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108101.

- [13] PENG J, YANG Y, LIU Y X, et al. Linking Ecosystem Services and Circuit Theory to Identify Ecological Security Patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [14] HONG W Y, GUO R Z, LI X M, et al. Measuring Urban Ecological Network Resilience: A Disturbance Scenario Simulation Method[J]. *Cities*, 2022, 131: 104057.
- [15] WANG S, WU M Q, HU M M, et al. Promoting Landscape Connectivity of Highly Urbanized Area: An Ecological Network Approach[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107487.
- [16] GRAZIANO P, RIZZI P. Vulnerability and Resilience in the Local Systems: The Case of Italian Provinces[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 211-222.
- [17] BOTEQUILHA-LEITÃO A, DÍAZ-VARELA E R. Performance Based Planning of Complex Urban Social-Ecological Systems: The Quest for Sustainability Through the Promotion of Resilience[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56: 102089.
- [18] XU H T, SONG Y C, TIAN Y. Simulation of Land-Use Pattern Evolution in Hilly Mountainous Areas of North China: A Case Study in Jincheng[J]. *Land Use Policy*, 2022, 112 (C): 105826.
- [19] YU T H, JIA S S, ZHANG Y, et al. How Can Urban Expansion and Ecological Preservation Be Balanced A Simulation of the Spatial Dynamics of Production-Living-Ecological Spaces in the Huaihe River Eco-economic Belt[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171: 113192.
- [20] ZHANG S H, ZHONG Q L, CHENG D L, et al. Landscape Ecological Risk Projection Based on the PLUS Model Under the Localized Shared Socioeconomic Pathways in the Fujian Delta Region[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108642.
- [21] 李豪, 吴明豪, 詹芳芷, 等.耦合 Graphab-PLUS 模型的生态网络动态评估框架: 以北京市中心城区为例[J].*北京林业大学学报*, 2025, 47 (1): 95-105.
- LI H, WU M H, ZHAN F Z, et al. A Dynamic Assessment Framework of Ecological Networks Coupled with Graphab-PLUS Model: A Case Study in the Central Area of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47 (1): 95-105.
- [22] 丁金华, 汪大庆, 钱晶.城市扩张情景下苏南水网景观生态风险评价与生态安全格局构建: 以苏州白蚬湖片区为例[J].*长江流域资源与环境*, 2024, 33 (9): 2059-2070.
- DING J H, WANG D Q, QIAN J. Landscape Ecological Risk Assessment and Ecological Security Pattern Construction in the Southern Jiangsu Water Network Area Under the Urban Expansion Scenario Simulation: A Case Study of the Baixian Lake Area in Suzhou[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33 (9): 2059-2070.
- [23] WU Q, WANG L, WANG T Y, et al. Spatial-Temporal Evolution Analysis of Multi-Scenario Land Use and Carbon Storage Based on PLUS-InVEST Model: A Case Study in Dalian, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112448.
- [24] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [25] MEDEIROS A, FERNANDES C, GONÇALVES J F, et al. A Diagnostic Framework for Assessing Land-Use Change Impacts on Landscape Pattern and Character: A Case-Study from the Douro Region, Portugal[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104580.
- [26] JIANG W G, WANG W J, CHEN Y H, et al. Quantifying Driving Forces of Urban Wetlands Change in Beijing City[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22 (2): 301-314.
- [27] 陶洁, 李莎拉, 张李婷, 等.黄河三角洲湿地生态环境质量评价与景观格局分析[J].*华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2025, 46 (6): 1-9.
- TAO J, LI S L, ZHANG L T, et al. Ecological Evaluation and Landscape Pattern Analysis of Yellow River Delta Wetlands[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2025, 46 (6): 1-9.
- [28] 陈丽华, 马源.佛山市湿地景观生态安全格局构建及修复研究[J].*环境科学与技术*, 2023, 46 (6): 174-186.
- CHEN L H, MA Y. Study on Wetland Landscape Ecological Security Pattern Construction and Wetland Landscape Restoration in Foshan City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46 (6): 174-186.
- [29] 朱颖, 周昕宇, 冯育青, 等.水网城市湿地生态网络韧性评价: 以苏州中心城区为例[J].*林业科学*, 2025, 61 (2): 62-73.
- ZHU Y, ZHOU X Y, FENG Y Q, et al. Resilience Evaluation of Wetland Ecological Network in Water Network City: A Case Study of Suzhou Central Urban Area[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, 61 (2): 62-73.
- [30] 海珠年鉴编纂委员会.海珠年鉴 2021[M]. 广州: 广州出版社, 2021.
- Haizhu Yearbook Compilation Committee. *Haizhu Yearbook 2021*[M]. Guangzhou: Guangzhou Publishing House, 2021.
- [31] MUTALE B, QIANG F. Modeling Future Land Use and Land Cover Under Different Scenarios Using Patch-Generating Land Use Simulation Model. A Case Study of Ndola District[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1362666.
- [32] 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 City Ecological Network Based on PLUS-MSPA and Spatial Syntax[J]. *Environmental Science*, 2025, 46 (10): 6432-6442.
- [33] SPEAR S F, BALKENHOL N, FORTIN M J, et al. Use of Resistance Surfaces for Landscape Genetic Studies: Considerations for Parameterization and Analysis[J]. *Molecular Ecology*, 2010, 19 (17): 3576-3591.
- [34] NIE W B, XU B, YANG F, et al. Simulating Future Land Use by Coupling Ecological Security Patterns and Multiple Scenarios[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859(Pt 1): 160262.
- [35] LI F, LIU X S, ZHANG X L, et al. Urban Ecological Infrastructure: An Integrated Network for Ecosystem Services and Sustainable Urban Systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S12-S18.
- [36] 赵健宇, 张露露, 裘希, 等.基于节点失灵的相依网络韧性测度及稳定策略研究[J].*系统工程理论与实践*, 2025, 45 (4): 1309-1327.
- ZHAO J Y, ZHANG L L, XI X, et al. Research on the Resilience Measurement of Interdependent Networks and Corresponding Stability Strategies Based on the Failure of Nodes[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2025, 45 (4): 1309-1327.
- [37] 李嘉欣.城市绿色空间生态网络韧性时空演变及其优化研究[D].杭州: 浙江农林大学, 2024.
- LI J X. Spatial-Temporal Evolution and Optimization of Resilience of Urban Green Space Ecological Network[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2024.
- [38] HU F N, CHEN L J, CHEN J. Robustness Evaluation of Complex Power Grids Containing Renewable Energy[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 132: 107187.
- [39] HEITGER M H, GOBLE D J, DHOLLANDER T, et al. Bimanual Motor Coordination in Older Adults Is Associated with Increased Functional Brain Connectivity: A Graph-Theoretical Analysis[J]. *PLoS One*, 2013, 8 (4): e62133.
- [40] IP W H, WANG D W. Resilience and Friability of Transportation Networks: Evaluation, Analysis and Optimization[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5 (2): 189-198.
- [41] LI J X, NIE W B, ZHANG M X, et al. Assessment and Optimization of Urban Ecological Network Resilience Based on Disturbance Scenario Simulations: A Case Study of Nanjing City[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 438: 140812.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

图 1~7 由作者绘制, 其中图 1 底图来自高德卫星影像 (2024 年)。表 1~6 由作者绘制。

(编辑 / 刘昱霏)

作者简介:

李敏稚 / 男 / 博士 / 华南理工大学本科生态院副院长, 建筑学院风景园林系副系主任、副教授、博士生导师 / 华南理工大学亚热带建筑与城市科学全国重点实验室成员 / 广州市景观建筑重点实验室成员 / 研究方向为城市设计形态导控方法和技术、气候适应性城市设计、绿色城市设计、城市韧性演进、精明营建、社区营造和公众参与
arlimz@scut.edu.cn

田晓雨 / 女 / 华南理工大学建筑学院在读硕士研究生 / 研究方向为城市生态韧性、城市设计

LI M Z, TIAN X Y. Multi-scenario Measurement and Response of Ecological Network Resilience in Urban-Wetland Complexes: Case Studies of Haizhu District, Guangzhou[J]. Landscape Architecture, 2026, 33(3): 42-50. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20250709.

Multi-scenario Measurement and Response of Ecological Network Resilience in Urban-Wetland Complexes: Case Studies of Haizhu District, Guangzhou

LI Minzhi, TIAN Xiaoyu

Abstract:

[Objective] Urbanization has fragmented ecological habitats, threatening urban ecosystem sustainability. Ecological networks are crucial for maintaining resilience, with dynamic interactions between network systems and urban development. Amid the green transformation of cities, refining the framework for optimizing urban ecological networks is essential. However, current research mainly focuses on static optimization, neglecting the dynamic evolution between nature and urbanization, and overlooks land use/cover changes in mid-to-small-scale areas, weakening the social functions of ecological networks. This study aims to address the limitations of current static approaches to urban ecological network optimization by investigating the dynamic interplay between urbanization and ecological network resilience. Specifically, focusing on Haizhu District, Guangzhou, this research will discuss the following issues. 1) Simulate future urban development scenarios and potential disturbances, considering spatio-temporal dynamics and land use/cover changes at a mesoscale; 2) Develop and apply a framework for proactively measuring the resilience of urban ecological networks under these dynamic scenarios; 3) Propose targeted design responses and optimization strategies to enhance ecological network resilience, incorporating principles of regional coordination; 4) Ultimately, inform sustainable urban development orientations and operational strategies for Haizhu District, contributing to a more resilient and ecologically sound urban environment.

[Methods] This study develops a theoretical framework to analyze the dynamic coupling between urban development and ecological networks, and proposes a new concept of "Urban-Wetland Complex" and summarizes it along with its characteristics. The framework is applied to Haizhu District, Guangzhou (90.42 km²), a representative wetland urban area in the Pearl River Delta, serving as a case study. Multi-source data, including land use and land cover change (LUCC) data, remote sensing imagery, and socio-economic statistics, are integrated to parameterize the patch-generating land use simulation (PLUS) model. This model is then used to simulate three future development scenarios: 1) natural evolution (baseline scenario without policy intervention), 2) ecological priority (scenario that maximizes ecological benefits), and 3) economic priority (scenario that maximizes economic efficiency). Based on multi-temporal land-use classification maps derived from these simulations, ecological networks are constructed under each scenario. A dual-dimensional resilience assessment model, encompassing both structural and functional aspects, is proposed to quantify the resilience of the network. Structural resilience is evaluated using Graph Theory metrics, specifically connectivity probability and network closure. Functional resilience is assessed through betweenness centrality analysis and node-deletion experiments, focusing on key node identification rate and overall network robustness.

[Results] 1) Structural and functional resilience mechanisms: Structural resilience was primarily influenced by the degree of source fragmentation, the average length of ecological corridors, and network transmissibility. Functional resilience, in contrast, depended on the number of critical nodes and their sensitivity to node removal processes. The comparison of network resilience before and after node removal effectively identified key ecological nodes within the network. 2) Spatial patterns of ecological sources: Ecological sources in

Haizhu District were largely consistent with the Pearl River network, wetland parks (e.g., Haizhu Wetland) and existing urban green space systems, reflecting the dominance of wetland-river interactions in shaping the ecological structure. 3) Scenario-based resilience performance: Under the natural development scenario, network connectivity, disturbance resistance, and connection efficiency were the highest, indicating superior structural resilience. The shortened average corridor length enhanced species migration efficiency, leading to improved overall network performance. Under the urban expansion scenario, the ecological network displayed a strong dependence on a limited number of critical nodes, resulting in weakened functional resilience and reduced spatial redundancy. Nodes were highly concentrated south of the wetlands, aligning with the phenomenon of ecological islanding induced by intensive development. Under the ecological priority scenario, the network exhibited the highest resilience threshold and overall stability. Secondary nodes such as Dawei Park and the riverside green belts formed a "core wetland-multi-tiered pivot" structure, enhancing spatial equilibrium and redundancy. However, the longer corridor paths in this scenario were more frequently interrupted by urban infrastructure and human disturbance.

[Conclusion] This study advances on previous research on the identification of key ecological patches and corridors by incorporating a spatiotemporal perspective into the analysis of urban ecological networks. By assessing the evolution of landscape connectivity under multiple development scenarios, this study reveals the dynamic interactions between urban expansion and ecological resilience. The study further refines the methodological framework for evaluating urban ecological networks, establishing a three-dimensional analytical system integrating "network-resilience-potential". This framework not only provides scientific guidance for determining regional ecological development directions and optimizing land-use planning but also serves as a theoretical reference for understanding the dynamic coupling between nature and city in high-density urban environments. Ultimately, the findings contribute to bridging the gap between ecological modeling and spatial design, supporting the construction of adaptive, resilient, and sustainable urban ecological systems.

Keywords: landscape architecture; resilient city; ecological network; sustainability; urban evolution; urban-wetland complex; PLUS model

Authors:

LI Minzhi, Ph.D., is an associate professor, doctoral supervisor, deputy dean of the Undergraduate College, deputy director of the Department of Landscape Architecture, the School of Architecture, South China University of Technology, a member of State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, South China University of Technology, a member of Guangzhou Key Laboratory of Landscape Architecture. His research focuses on urban design form control methodologies and techniques, climate-adaptive urban design, green urban design, urban resilience evolution, smart building practices, community development, and public participation.
arlimz@scut.edu.cn

TIAN Xiaoyu is a Master student in the School of Architecture, South China University of Technology. Her research focuses on urban ecological resilience and urban design.