

引用格式: 俞雯靖, 李健, 韩刘伟, 等. 基于生态系统服务供需匹配与拓扑结构耦合的杭州市生态网络优化[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(5): 1104–1115. YU Wenjing, LI Jian, HAN Liuwei, *et al.* Optimization of the ecological network in Hangzhou based on coupling of ecosystem service supply-demand matching and topological structure[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(5): 1104–1115.

基于生态系统服务供需匹配与拓扑结构耦合的 杭州市生态网络优化

俞雯靖¹, 李 健^{1,2}, 韩刘伟^{1,2}, 李佳芯¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 生态文明研究院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】应对人类活动对生态空间的扰动造成的生态系统完整性和连通性下降的问题。【方法】选择 2000 年、2010 年、2020 年, 在计算杭州市生境质量、水源涵养、固碳释氧、水土流失等 4 项生态系统服务供需比的基础上, 构建连接孤立生境斑块的生态网络, 以生态网络功能与拓扑结构相关性为依据优化生态网络, 并借助鲁棒性评价检验生态网络的优化效果。【结果】①较 2000 年, 2020 年水源涵养供需比上升 27%, 固碳释氧、生境质量、水土流失供需比下降明显。②2020 年, 核心源地 132 块, 阻力面由中心城区向外部逐渐递减, 识别到廊道 334 条, 总长 1 027 km。③2010—2020 年, 特征向量中心性在末期提升 34%, 核心节点影响力逐步恢复, 平均度值与聚类系数较低。拓扑结构重要性与生态系统服务供需比呈显著正相关, 与固碳释氧、水源涵养服务供需比相关性最强。④优化方案新增网络踏脚石 31 个, 廊道 56 条。基于鲁棒性验证的网络韧性评估证实了优化的科学性与可行性。【结论】优化框架能够有效识别并修复具有高生态系统服务价值和结构连通性的生态夹点, 形成更具有稳定性的生态网络, 为高度城市化地区生态网络功能与结构的协同优化提供思路。图 8 表 4 参 34

关键词: 生态网络; 生态系统服务; 网络优化; 拓扑结构; 杭州市

中图分类号: X171.4; TU984.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)05-1104-12

Optimization of the ecological network in Hangzhou based on coupling of ecosystem service supply-demand matching and topological structure

YU Wenjing¹, LI Jian^{1,2}, HAN Liuwei^{1,2}, LI Jiaxin¹

(1. College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Institute of Ecological Civilization, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address the decline in ecosystem integrity and connectivity caused by human activities that disturb ecological spaces. [Method] The supply-demand ratios of 4 ecosystem services in Hangzhou in 2000, 2010, and 2020 were calculated, including habitat quality, water conservation, carbon sequestration, and soil erosion. Based on this, an ecological network connecting isolated habitat patches was constructed and optimized based on the correlation between its functions and topological structure. The optimization effect of the ecological network was tested through robustness evaluation. [Result] (1) Compared with 2000, the supply-demand ratio of water conservation increased by 27% in 2020, while those of carbon

收稿日期: 2026-01-20; 修回日期: 2026-05-07

基金项目: 国家社会科学基金项目 (22BGL153); 浙江文化研究工程重点项目 (24WH14-2Z); 浙江省社科规划项目 (23ZK76YB)

作者简介: 俞雯靖 (ORCID: 0009-0005-8563-6538), 从事城乡生态规划研究。E-mail: 2522700565@qq.com。通信作者: 李健 (ORCID: 0000-0001-6327-1383), 教授, 博士, 博士生导师, 从事景观游憩学、国家公园与自然保护地规划与管理研究。E-mail: lijian@zafu.edu.cn

sequestration, habitat quality, and soil erosion declined significantly. (2) In 2020, there were 132 core source areas. The resistance surface decreased gradually from the central urban area to the outside. 334 corridors with a total length of 1 027 km were identified. (3) From 2010 to 2020, eigenvector centrality increased by 34% in the last stage, indicating a gradual recovery in the influence of core nodes, while average degree value and clustering coefficient remained low. The importance of topological structure was significantly positively correlated with the supply-demand ratio of ecosystem services, and had the strongest correlation with the supply and demand ratio of carbon sequestration and water conservation. (4) 31 new network stepping stones and 56 new corridors were added to the optimization plan. Robustness-based resilience evaluation confirmed the scientific validity and feasibility of optimization. [Conclusion] The optimization framework can effectively identify and restore ecological pinch points with high ecosystem service value and structural connectivity, form a more stable ecological network, and provide insights for the synergistic optimization of ecological network functions and structures in highly urbanized areas. [Ch, 8 fig. 4 tab. 34 ref.]

Key words: ecological network; ecosystem services; network optimization; topological structure; Hangzhou City

城市高强度土地利用加剧了生态系统服务功能与生态空间结构的矛盾, 引发景观破碎化与生态功能衰退, 影响生态系统提供的各种福祉, 制约区域的永续发展^[1]。近年来, 中国提出生态系统保护和修复需优化生态网络, 强调“山水林田湖草沙一体化保护和系统治理”, 认为生态网络是协调经济高质量发展与生态高水平保护的前提^[2]。“十五五”规划对美丽中国建设提出了更高的要求, 强调生态网络建设质量与韧性^[3]。当前, 生态网络研究多依托生态系统服务提取生态源地, 开展生态网络空间结构评价, 对两者耦合关系尚未展开充分研究^[4]。城市作为高度耦合的复杂系统, 在尊重自然本底的同时也应该将人类需求纳入考量。

生态网络以景观生态学为理论基础。现有研究多为形态空间格局分析、生态系统服务、生态敏感性识别源地等, 斑块属性与网络结构的关系探索并不充分^[4]。生态网络空间优化能够提高生态系统的健康水平。现有研究常借助连通性指数和可能连通性指数测定斑块, 明确其对景观连接度与生态系统服务的贡献^[5]。为认识生态空间网络的复杂动态关系, 学界引入复杂网络理论量化其拓扑结构, 围绕网络结构与生态功能的关联性开展了大量研究^[6-8]。因此, 在综合生态系统服务能力与生态网络拓扑结构相关性的基础上优化生态网络, 能从单一功能或结构的优化向两者耦合转变。

生态系统服务是维系生命与环境动态平衡的基础, 与人类福祉密切相关^[9-10]。生态系统服务供给以生态空间为载体, 借助生态设施进行传递, 斑块完整性与景观连通度对城市生态功能的持续发挥和效率产生深刻影响^[11]。由此, 对生态系统服务供需匹配进行研究能为生态资源空间优化配置与精准治理提供有效支撑。当前, 生态系统服务供需匹配研究多以城市、城市群等宏观尺度为对象, 研究成果在生态安全格局^[12]、国土空间规划^[13]与居民福祉^[14]等领域广泛应用, 同时在评估体系中, 进一步将生态安全评价与韧性评价^[15]有机关联。但是, 当前研究多局限于时空分异与影响分析, 鲜有生态系统服务供需评估与生态空间优化间的有效衔接和延伸应用。

杭州市空间分异明显, 区域发展不平衡制约了可持续发展, 因此, 有必要在理顺生态系统服务供需匹配与生态网络结构关联性的基础上, 优化生态网络。这对深化生态网络理论实践, 提升网络韧性有积极意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

杭州市地处中国华东地区, 面积为 16 850 km², 地处亚热带季风气候区, 年平均降水量为 1 100.0~1 600.0 mm。地势西高东低, 东部平原为主城区, 西部为山地丘陵, 河湖水系发达, 森林覆盖率高, 是长江三角洲重要的生态屏障(图 1)。近年来, 在杭州湾经济区发展带动下, 杭州成为中国快速城市化进程中典型的高密度城市地区, 生态与发展的矛盾加剧, 生态退化问题显现, 具有较强的研究代表性。

1.2 数据来源与预处理

本研究选取 2000 年、2010 年、2020 年作为时间节点，主要数据来源见表 1，采集的所有空间数据分辨率统一为 100 m，使用 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系。

2 研究方法

在生态网络中，全面识别高价值功能区并纳入生态网络建设，有助于提升生态网络的稳定性与韧性。本研究基于生态系统服务供需情况与生态源地拓扑结构重要性的关联性，整合地理信息系统 (GIS) 与遥感数据构建了协同优化的框架模型 (图 2)。研究步骤如下：首先，量化分析水源涵养、固碳释氧、生境质量、水土流失 4 种代表性生态系统服务供需比。第二，借助电路理论构建生态网络，识别具有高保护价值的生态夹点。第三，结合复杂网络理论评估其拓扑特征稳定性。最后，将生态系统服务供需比与网络拓扑结构的相关性程度以及夹点与障碍点的空间分布相结合找到优先修复区，修复生态网络并评估优化效果。

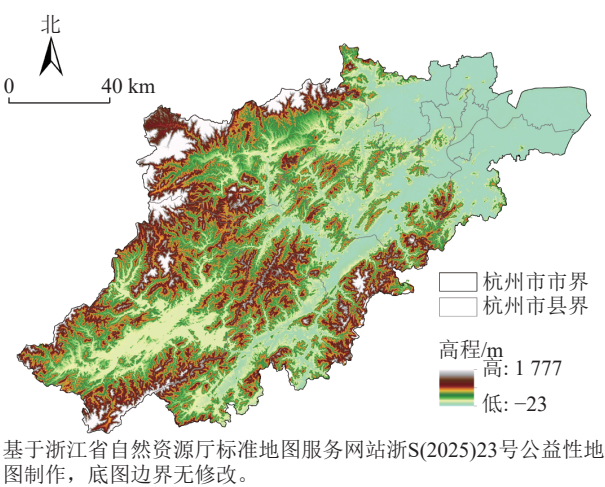


图 1 研究区示意图
Figure 1 Study area of Hangzhou City

表 1 数据来源

Table 1 Data sources		
名称	数据精度	来源
土地覆被	30 m 栅格	中国土地覆盖年度数据集 (CLCD)
土壤属性数据	30 m 栅格	世界土壤数据库 (HWSD)
高程和坡度	30 m 栅格	中国科学院地理空间数据云平台
道路数据	矢量	中国分层级道路数据 (OSM)
河流水系数据	矢量	中国分层级道路数据 (OSM)
归一化植被指数	100 m 栅格	中国无间隙归一化差异植被指数数据集
气象数据	站点数据	国家气象科学数据中心
人口	100 m 栅格	全球人口分布数据集项目
边界	矢量	国家地理信息资源目录服务系统

2.1 生态系统服务供需比

杭州市开发强度高、生态价值突出，《杭州市国土空间规划 (2021—2035 年)》明确了“三江两脉、绿楔融城”的生态格局。杭州市不仅是国家首批碳达峰与碳中和 (“双碳”) 试点城市，还是长江三角洲区域供水保障核心枢纽，缓解水土流失与高效利用水资源是杭州市重要的发展目标。因此，本研究选取生境质量、水源涵养、固碳释氧、水土流失 4 项生态系统服务进行供需平衡研究。供给水平通过 InVEST 模型测算，需求水平则依据人口密度乘以服务的人均需求测算^[7, 12]。生态系统服务供需比计算如下：

$$I_{\text{ESDR}} = \frac{S - D}{(S_{\text{max}} + D_{\text{max}})/2} \quad (1)$$

式 (1) 中： I_{ESDR} 为生态系统服务供需比； S 为供给值； D 为需求值； S_{max} 为最大供给值； D_{max} 为最大需求值。

2.2 生态空间网络构建

2.2.1 源地识别 借助形态空间格局分析法 (MSPA) 对栅格图像进行精确识别与分割，划分不同景观类型与结构。基于 Guidos 2.6，将林地、草地和湿地作为前景，其他类型作为背景，将前景数据分为互不

重叠的核心、孔隙、斑块、边缘、桥接、环道、支线^[16]。在此基础上,采用最小面积阈值法剔除破碎细小的生态斑块,通过 Conefor 软件量化生态源地连通性概率变化指数。该指数用于表征斑块在生态网络中的连通水平,剔除低连通性斑块后,筛选出重要程度较高的斑块作为源地备选^[17]。

2.2.2 阻力面构建 生态阻力面是表征景观斑块间生态流的关键指标^[18]。本研究综合自然、经济因素构建阻力评价体系(表 2)。各指标的分级阈值及对应阻力系数参照文献[19–20]确定,运用层次分析法计算指标权重。

2.2.3 生态廊道及生态夹点提取 生态廊道是连接环境中分散生态单元的通道,是物质、能量流动的最小成本路径^[21]。基于电路理论,使用 Circuitscape 工具中 Linkage Mapper 模拟累积阻力最小成本路径。计算公式如下:

$$N_{ab} = C_a + C_b - L_{ab} \quad (2)$$

式(2)中: N_{ab} 为源地 a 与源地 b 之间累积阻力最小成本路径;搜索窗口至源地 a 与源地 b 的成本加权距离记为 C_a 和 C_b ; L_{ab} 为连接源地 a 和源地 b 的最小成本路径的累积成本加权距离。

表 2 生态阻力因子评价体系

Table 2 Evaluation system of ecological resistance factors

阻力因子	分类方式	阻力值	权重
高程	0~100、100~300、300~500、500~800、≥800 m	10、30、50、80、100	0.05
坡度	0~2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°、≥25°	10、30、50、70、100	0.05
土地利用类型	林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地	1、40、20、60、100、80	0.28
归一化植被指数	≥0.9、0.8~0.9、0.6~0.8、0.4~0.6、<0.4	10、20、50、70、100	0.15
距离交通干线的距离	≥10 000、5 000~10 000、2 000~5 000、1 000~2 000、0~1 000 m	10、20、50、80、100	0.25
夜间灯光	<10、10~20、20~40、40~50、≥50 $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	10、20、40、80、100	0.10
人口密度	<500、500~1 000、1 000~1 500、1 500~3 000、≥3 000 人· km^{-2}	10、20、40、80、100	0.12

说明:分类方式中的数值区间采用上限排除法。

生态夹点作为网络中连接不同生态源地、维持景观连通性的枢纽节点,是生态传输过程中必经的关键瓶颈,需要优先保护^[22]。生态夹点集中高强度生态流,其连通效率对网络整体连通性至关重要,也是维系区域生态系统服务供需平衡的核心支撑。优先修复夹点能以较低的生态修复成本,快速提升整个网络的稳定性与功能效率。本研究通过 Pinchpoint Mapper 工具,在研究区内计算累计电流,用自然断点法将累计电流密度分为 5 个等级,将最高等级区域作为生态夹点区域。

2.3 网络拓扑结构分析

2.3.1 源地节点拓扑特征 根据复杂网络理论,将源地、廊道抽象为节点和边,使用 Gephi 软件,计算度、接近中心性、中介中心性、聚类系数、特征向量中心性和页面排名 6 项指标,量化要素结构特征,进行归一化后用熵权法确定权重,计算节点的综合重要性。

$$I_i = \alpha F_{ci} + \beta E_{ci} + \varphi D_{ci} + \gamma C_{ci} + \lambda B_{ci} + \theta A_{ci} \quad (3)$$

式(3)中: I_i 为第 i 个节点的重要性; F_{ci} 、 E_{ci} 、 D_{ci} 、 C_{ci} 、 B_{ci} 、 A_{ci} 分别为第 i 个节点的度、接近中心性、中介中心性、聚类系数、特征向量中心性和页面排名等 6 个拓扑指标; α 、 β 、 φ 、 γ 、 λ 、 θ 为计算确定的系数。

2.3.2 复杂网络鲁棒性计算 生态网络的鲁棒性反映了其在结构受损时维持功能与结构稳定的能力,节

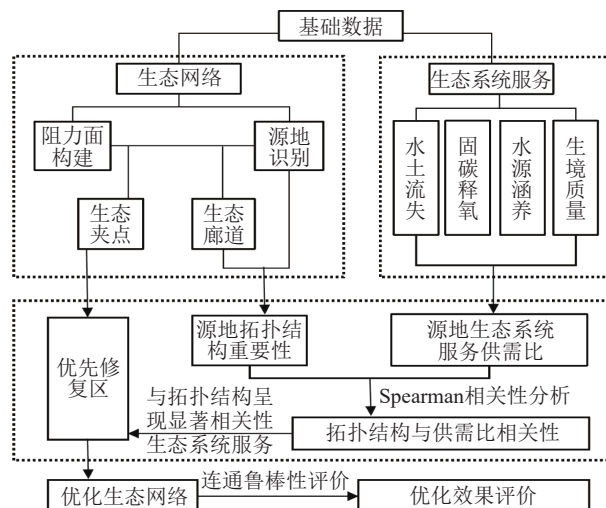


图 2 基于生态系统服务供需与拓扑结构分析的杭州市生态网络优化研究框架

Figure 2 A framework model for coupling ecological network structure and function optimization

点恢复鲁棒性是衡量网络稳定性的关键指标。为表征不同攻击模式下网络鲁棒性的衰减规律,随机攻击采用线性模型拟合,蓄意攻击采用对数模型拟合,以分别刻画线性与非线性的衰减特征。2类衰减规律形态不同,可更精准刻画网络鲁棒性的响应过程。通过 Matlab,设置随机攻击与蓄意攻击2种情景,按总节点数5%的步长移除节点,终止条件为连接鲁棒性(R_C) ≤ 0.1 或节点移除比例达90%,表现不同节点失效对系统连通性的差异化影响^[23-24]。优化效果评估以 $R_C \leq 0.1$ 的节点累计移除比例为核心指标,随机或者按特定顺序移除一定比例节点。当网络在节点移除后曲线下下降缓慢,仍保持较高比例的连通单元时,即表现出良好拓扑稳定性。计算公式如下:

$$R_C = \frac{C_{\max}}{n - n'}; \quad (4)$$

$$D = 1 - \frac{N_r - N_e}{N}. \quad (5)$$

式(4)~(5)中: R_C 为连接鲁棒性; n 为网络节点总数; n' 为被攻击节点数; $C_{\max}$ 为除去部分节点后的网络最大连通子图中的节点数量; D 为节点恢复能力; N 为网络初始总节点数; N_r 为生态网络中实际存在的廊道数量; N_e 为生态网络中理论上可形成的最大廊道数量,其值为节点数 n 的组合数。

2.4 生态网络优化

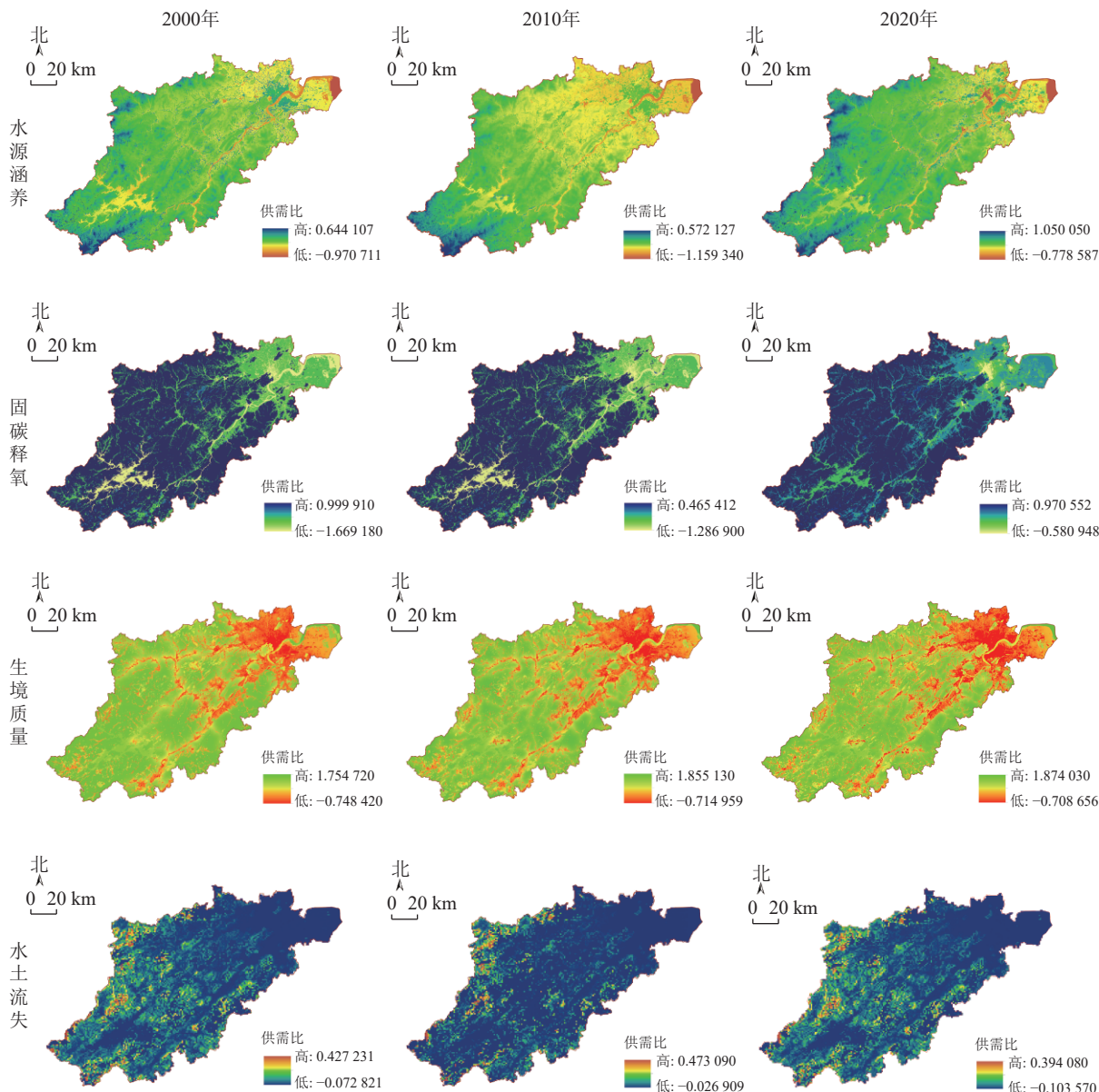
生态系统服务供需比高的源地具有较高生态价值和供给能力,且在拓扑结构中具有强重要性。本研究提取源地4种生态系统服务供需比,结合拓扑结构评估结果进行相关性分析。采用 Spearman 相关系数探究生态网络拓扑结构与生态系统服务供需比的内在关联。在相关性结果的基础上,为对生态源地进行分类优化,本研究依据生态系统服务供需比与拓扑结构综合重要性对生态源地的功能与结构进行分级,以生态系统服务供需比综合指数表征源地服务功能的强弱,数值大于等于0.8为高功能,数值小于0.8为低功能。以拓扑结构综合重要性指数表征节点在生态网络中的结构重要程度,数值大于等于0.4为高结构,数值小于0.4为低结构。在生态夹点优化上,选择备选夹点中与源地拓扑综合重要性指标呈显著正相关的关键节点,进行优先修复,优化生态网络,借助连通鲁棒性评估优化实效。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供需与生态网络的时空格局

3.1.1 生态系统服务供需 2000—2020年,杭州市4项主要生态系统服务供需比呈现时空异质性。从整体来看,各类供需比在西部天目山、清凉峰地区,南部千岛湖地区相对较高,中心城区低值区环状扩展明显(图3)。东部城市中心区与中部耕地丘陵地带是主要低值区域。从时间变化来看,水源涵养供需比均值在2000—2010年下降4.0%,2010—2020年上升27.0%。2020年较2000年呈增长趋势,最高值区域集中于西部边缘山脉。固碳释氧供需比平均值在2000—2010年从0.88降至0.61,在2020年回升至0.83,平衡区域扩大。水土流失供需比从2000年的0.35降至2010年的0.21,2020年提升至0.32,多个山区仍呈现不平衡状态。生境质量供需比平均累计下降幅度为7.4%,中心城区供给压力显著上升。这是由于研究区内密集分布着林地与天然草地,并且在淳安县、建德市、临安区大量积聚。研究期间,保护地建设与流域修复工程有效提升了区域固碳能力,使得这些地区成为供需比高值区。随着矿山复绿、水土保持规划的强力推进和大规模开发活动放缓,需求增长减缓。市区人口大规模迁入与城市东扩、旅游西进发展战略使城市生境破坏日益加剧,但生态供给能力成长并未保持同步发展,局部地区生境供需比日渐紧张。

3.1.2 生态网络 ①生态源地分析。基于形态学空间格局分析(MSPA),将面积大于1 km²的核心区作为备选,剔除生态源地连通性概率变化指数小于0.2地区,结果显示:2000年、2010年、2020年研究区关键生态源地斑块数量分别为135、127、132块,占总面积的比例为49%、37%、39%。从空间格局看,源地形成西密东疏的空间异质性,高度集聚在西部,天目山、清凉峰等构成了大面积、高连通性的核心源地斑块。经济发达的城市东部,呈现大范围源地缺失状态。研究期内,杭州市生态源地的数量、空间范围及核心结构变化趋势与区域内林地、草地等关键自然、半自然生境要素数量消长态势表现出高度的协同性与一致性^[25]。②生态阻力面构建。2000年、2010年、2020年,研究区生态阻力面的阻力值



基于浙江省自然资源厅标准地图服务网站浙S(2025)23号公益性地图制作，底图边界无修改。

图 3 2000—2020 年杭州市主要生态系统服务供需比示意图

Figure 3 Spatial pattern of ecosystem service supply-demand ratio in Hangzhou from 2000 to 2020

最高分别为 92.6、90.5、94.5 (图 4)，呈西部低东部高，由中心城区向外部逐渐递减的态势。东部高强度城市建设与高密度人类活动起主导作用，形成显著的生态障碍效应，阻隔物种的迁移流动。临安区、建德市等广大西部地区植被覆盖度高，阻力值低，物质、能量流动顺畅。年度变化上，高阻力值沿城市边缘向外拓展，受交通建设扩张影响，西部低阻力区域的生态连通优势进一步减弱。③生态网络构建。生态网络识别结果如图 5 所示。2000 年、2010 年、2020 年生态廊道分别为 254、327、334 条，总长度为 1047、877、1027 km，平均长度为 2.64、3.48、3.61 km。廊道空间结构呈蛛网状，沿远离建成区的林地、河流密集分布。西部地区廊道短，联系紧密。中部地区最密集，靠近城区的富阳区、余杭区廊道长，承担联系区域中部南北源地的重要功能，较容易受干扰。东部的市区、钱塘区、萧山区廊道稀少。杭州市区廊道分布密集，但部分源地间廊道连接性较弱，一些重要廊道长度短，有改善空间。

3.2 生态系统服务供需比与网络拓扑结构的关系

3.2.1 生态源地拓扑结构特征 拓扑结构连接越紧密，源地在整个拓扑网络中的重要性越强。利用复杂网络将斑块、廊道抽象为节点和边后，选取与生态功能相关的度、接近中心性、中介中心性、聚类系数、特征向量中心性、页面排名等 6 类指标进行测算 (表 3)。与王戈等^[26]对国内市级尺度复杂网络研究

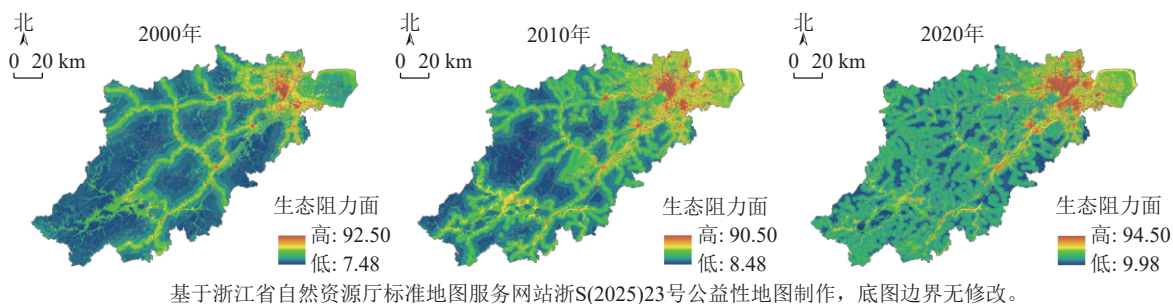


图 4 2000—2020 年杭州市生态阻力面分布示意图

Figure 4 Distribution of ecological resistance surface in Hangzhou City from 2000 to 2020

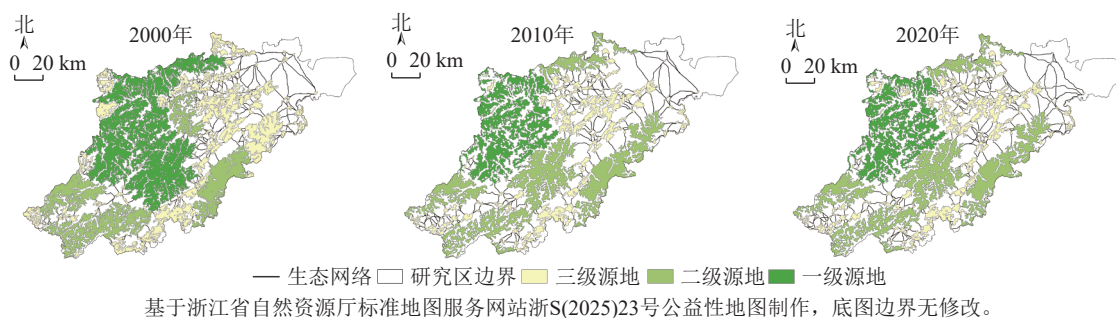


图 5 2000—2020 年杭州市生态网络分布示意图

Figure 5 Spatial distribution of the ecological network in Hangzhou City from 2000 to 2020

结果相比,从数值上看,度较小,表明源地连接廊道平均数量少,网络辐射范围与桥梁作用受到干扰^[27],较小的平均聚类系数则验证了源地聚集水平的不平衡性^[28]。各类指标变化中,2010 年为网络结构低谷期。聚类系数上升展现了局部斑块内部连接增强,2020 年特征向量中心性和页面排名数值显著恢复。接近中心性变化极小,说明网络整体稳定。通过熵权法进行加权得到综合拓扑指数发现:2000—2020 年,在拓扑结构支点显著增加的同时,综合重要性高的生态节点,由原先集中分布于南部高拓扑价值生态源地,逐步转变为北部、东部的关键拓扑节点,数量明显增多。生态核心不断强化,但高重要性节点仍比较分散,东西之间的链接较弱,中部存在生态孤岛。

3.2.2 生态系统服务供需比与拓扑结构的相关性

2000—2020 年生态源地拓扑结构综合重要性与生态系统服务供需比的相关性如表 4。结果表明:4 类生态系统服务供需比都与网络拓扑结构呈现显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 相关。3 个时段内,水

源涵养供需比、固碳释氧供需比与拓扑结构的综合重要性高度相关,表现出明显的网络结构依赖性。生境质量供需比、水土流失供需比的相关性相对较低。2000 年水源涵养供需比相关程度最高,达 0.550 4。这与杭州市天然山水的城市格局密不可分,境内钱塘江流域横贯东西,生态网络与水系高度重叠,决定了水源涵养功能在网络拓扑中的重要地位。随着城市西拓,平原绿地在网络中的连接作用增强,水源涵养供需比相关性出现下降趋势。固碳释氧供需比的相关性不断加强,这源于源地选取过程中西部山区林地、大型湿地作为前景,本身就拥有最高的植被碳储量。近年来,在“双碳”目标的指引下,城市绿色

表 3 拓扑指标平均值

年份	度	接近中心性	中介中心性	聚类系数	特征向量中心性	页面排名
2000	0.203	0.461	0.092	0.571	0.082	0.071
2010	0.191	0.463	0.095	0.582	0.064	0.056
2020	0.203	0.461	0.093	0.570	0.084	0.070

表 4 2000—2020 年杭州市生态源地拓扑结构综合重要性与生态系统服务供需比相关性

Table 4 Relationship between ecological network structure and ecosystem service supply-demand in Hangzhou from 2000 to 2020

生态系统服务	相关系数		
	2000年	2010年	2020年
水源涵养供需比	0.550 4***	0.337 6***	0.377 9***
固碳释氧供需比	0.317 3***	0.310 6***	0.364 8***
生境质量供需比	0.213 0*	0.198 8*	0.242 5**
水土流失供需比	0.213 0*	0.240 9*	0.214 4*

说明: *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。

基础设施建设有效增强了生态网络的连接和枢纽作用，固碳释氧作为更易通过规划塑造的服务，其与网络结构的关系在人工干预下更为紧密持久。

3.2.3 基于结构功能耦合的生态源地区域类型界定 结合相关分析结果，选取拓扑结构综合重要性指数、水源涵养供需比、固碳释氧供需比作为综合加权值，用自然断点法分为 2 级：供需比高功能（生态系统服务供需比大于等于 0.8）、低功能（生态系统服务供需比小于 0.8），拓扑结构综合重要性高结构（拓扑综合重要性指数大于等于 0.4）、低结构（拓扑综合重要性指数小于 0.4），结果如图 6。高供需比高拓扑优质区分布于天目山和千岛湖周边，需严格保护；高供需比低拓扑孤岛区集中于天目山余脉向主城区过渡带，结构连通性为主要短板；低供需比高拓扑脆弱区多分布于中部近郊富阳区、余杭区等廊道密集区，存在功能支撑不足风险；低供需比低拓扑低质区分布在东部钱塘区、萧山区及主城区，需构建低强度生态基底。空间分异与杭州西密东疏、中部断层格局契合，为针对性优化提供了明确的空间指向。

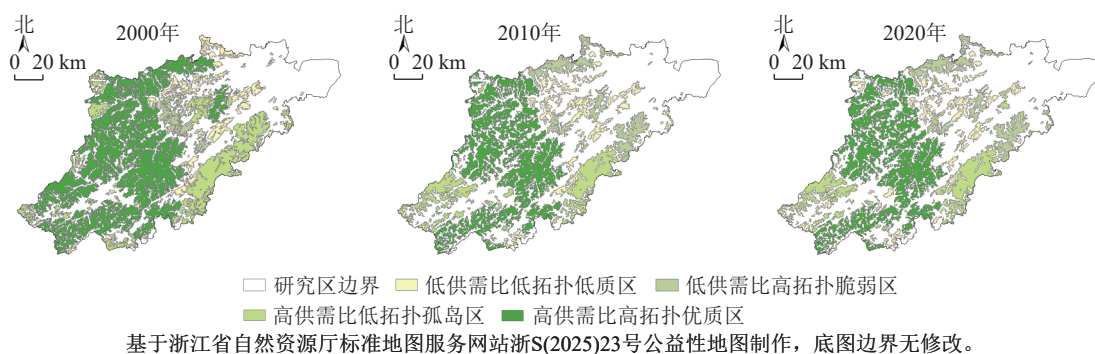
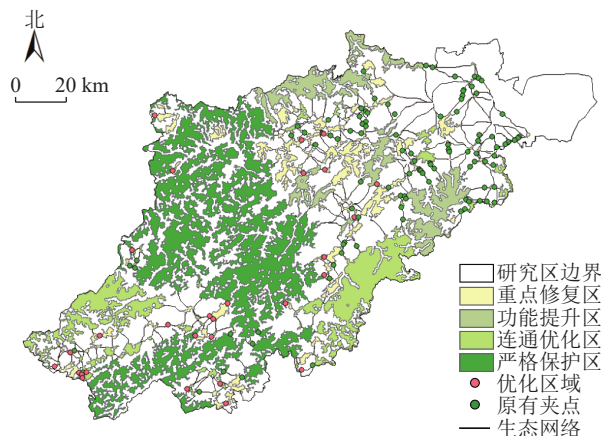


图 6 2000—2020 年杭州市结构功能耦合的生态源地区域类型示意图

Figure 6 Distribution of regional types of ecological source areas based on structure-function coupling in Hangzhou City from 2000 to 2020

3.3 生态网络优化与优化效果

3.3.1 生态网络分区保护与优化 杭州市应当尽量减少土地变化，通过嵌入动态的踏脚石修复生态夹点^[29]。纵观 2000—2020 年，研究区生态网络经历了源地数量锐减、廊道总长波动的动态变化过程，最终整体网络得到显著修复，同时其拓扑结构长期呈现西密东疏的分布格局，且中部节点存在孤岛化特征。本研究将上述动态变化与空间格局特征，作为分区保护与结构优化的核心依据。选取水源涵养、固碳释氧 2 类服务供需比高值区作为关键优化指标，合理性在于其供需比高值在 3 个时期内均与高拓扑重要性节点空间重叠显著，相关性极显著 ($P < 0.001$)，表现出强烈的网络结构依赖性。高值区水系丰富，碳汇功能强，廊道高度密集，相较其他区域更适宜作为功能结构协同优化的核心地带。因此，基于生态系统服务供需水平与网络拓扑特征实施差异化分区分管，将高供需比高拓扑优质区划定为严格管控区，限制人类活动开发；低供需比高拓扑脆弱区划定为连通优化区，优先在水源涵养与固碳潜力较高区域增设夹点与踏脚石，衔接孤立源地；高供需比低拓扑孤岛区设置为功能提升区，通过植被修复提升廊道的固碳释氧与水源涵养能力；重点修复区则要平衡开发与保护，进行功能修复与网络的增补。在夹点优化上，以 2020 年杭州市生态网络的 125 个生态夹点为备选区域，将结构功能双维耦合的孤岛区优化为核心优化区，新增节点 31 个，共增加生态源地 10.26 km²。优化后，生态网络包含 163 个生态源地与 390 条生态廊道，平均廊道长度有所减少。优化区域主要集中在天目山余脉向杭州主城区过渡的丘陵地带，包括余杭径山、富阳银湖、临安青山湖科技城周边等关键区域 (图 7)。



基于浙江省自然资源厅标准地图服务网站浙S(2025)23号公益性地图制作，底图边界无修改。

图 7 生态网络优化方案示意图

Figure 7 Ecological network optimization plan

3.3.2 优化效果评估 对生态网络优化前后的鲁棒性进行评估是确保生态网络稳定性、恢复力的重要环节。本研究通过随机攻击与蓄意攻击 2 种模式验证生态网络抵御风险的能力, 其中蓄意攻击按节点拓扑综合重要性指数从高到低的顺序依次移除节点, 结果如图 8。优化后拓扑网络度从 0.203 上升到 0.216, 平均聚类系数从 0.570 上升至 0.589, 表明添加踏脚石能够削弱单一节点的重要性。在蓄意攻击下, 优化前移除 67% 的节点时, 网络鲁棒性即低于 0.1, 优化后平均需移除 71% 的节点, 网络鲁棒性才降至 0.1 以下。杭州生态网络的鲁棒性临界阈值提升约 6% (随机攻击) 及 7% (蓄意攻击), 这与 XU 等^[6]的研究结果较为一致。随机攻击抵抗力显著加强, 功能衰减速率下降, 表明了优化措施的有效性, 但在优化效果方面存在差异, 可能与研究区的尺度和地理特征差异较大有关。

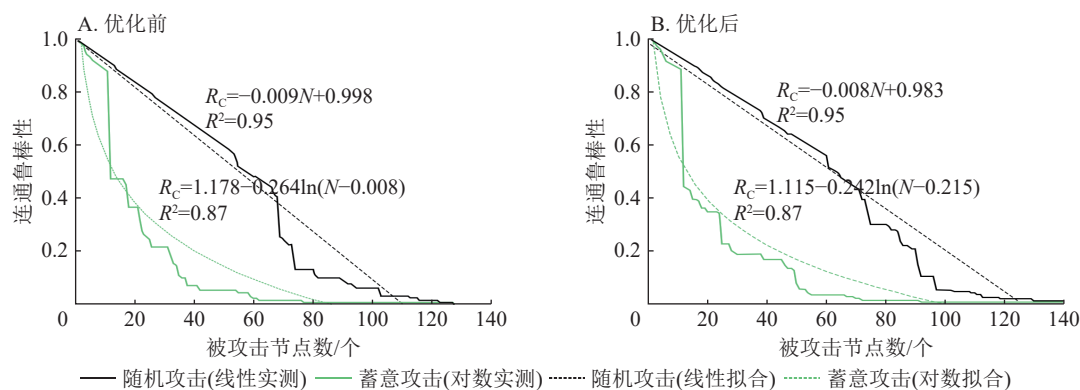


图 8 2020 年生态网络优化效果评价

Figure 8 Evaluation of optimization effects of the ecological network in 2020

4 结论与讨论

4.1 结论

为解决高度城市化地区生态网络优化中以改善源地功能质量为导向造成的局部盲目修复, 选取 2000 年、2010 年、2020 年, 评估 4 项生态系统服务供需比与拓扑结构相关性, 对 2020 年生态网络进行优化, 并验证效果。结论如下: ①2000—2020 年, 杭州市 4 项生态系统服务中除生境质量持续下降外, 其余均在 2000—2010 年下降, 在 2010—2020 年呈现上升的趋势。高值集中于西部山区, 与高密度森林分布一致。②杭州市生态源地以林地、耕地和湿地为主导, 东西部分布不均。中心城区、中部近郊区的生态基础薄弱。在生态空间演变特征上, 源地数量、核心区面积占比上升。2020 年源地为 132 块, 廊道为 334 条。③在生态网络拓扑结构上, 整体稳定性强, 重要拓扑节点分布失衡, 结构上断层明显。拓扑结构的重要性与水源涵养、固碳释氧呈显著正相关关系。④杭州市生态网络新增踏脚石 31 个, 新增廊道 56 条。优化后网络鲁棒性显著提升。优化方案在提升生态网络效率与稳定性的同时, 可对城市精细化修复和管理提供有效参考。

4.2 讨论

4.2.1 研究创新性与主要贡献 城市是一个复杂系统, 其生态网络优化是一个多目标、系统、动态的过程^[30]。以往的生态网络构建和优化研究中, 学者多以景观结构的优良或生境斑块的质量来构建网络^[31], 优化方式停留在单一功能的提升^[8], 不足以全面准确反映生态系统的真实状况。本研究关注到上述研究缺陷, 创新性耦合生态系统服务供需与拓扑结构重要性, 并形成了优化框架模型, 运用于杭州市这一高度城市化地区, 最终制定了能精准高效优化生态网络, 保持其连通性与稳定性的生态网络优化方案。

目前, 探索拓扑特性与生态网络生态系统服务之间相关性的研究较少。江澎等^[32]探究了城市生态拓扑网络与固碳能力的空间关系, 发现固碳能力与聚类系数、特征向量中心度正相关。门丹等^[7]验证流域生态系统服务供需与拓扑网络相关性, 指出食物生产、碳固定有显著相关性。研究表明: 在杭州市山水本底下, 西部关键源地与东部城市汇通过水网形成网络, 使供需水平与网络结构出现极强的相关性。同时, 在“双碳”目标和湿地之城的推动目标下, 强化了水源涵养和固碳释氧服务供需水平与网络结构相关性。说明两者与区域的生境本底相关, 也与人类活动扰动联系。因此, 优化生态网络不仅要立足资

源禀赋,更要结合自然与人类社会系统间的循环和传导过程^[33]。本研究在研究框架中从生态系统服务供需视角,选取与生态网络拓扑综合重要性呈现高相关性的生态系统服务供需比进行优化,以确保生态资源供需平衡。

4.2.2 主要研究局限 由于文化服务数据具有时段波动性,本研究在生态系统服务指标选取上,未能量化长时间序列的文化服务。未来可考虑融入更精细的社会经济数据,如消费水平、空间流动^[34]等,使需求评估更精准。其次,在生态网络构建中,主要参考了模型使用手册、相近研究区的现有文献以及专家意见,缺乏实测数据。在时间尺度上,仅选取了 3 个时间点。若引入更长时间序列的数据,有助于揭示更长期的演变规律。在空间尺度上,本研究主要针对市域尺度展开,较为宏观。今后应该进一步开展多尺度的研究。

5 参考文献

- [1] 朱亚杰,栗云召,刘言智,等.黄河三角洲高效生态经济区生态网络构建与评价[J].*应用生态学报*, 2025, **36**(11): 3457–3466. ZHU Yajie, LI Yunzhao, LIU Yanzhi, *et al.* Construction and evaluation of ecological network in the Yellow River Delta High-efficiency Ecological Eco-nomic Zone[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(11): 3457–3466. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202511.027](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202511.027).
- [2] 易浪,孙颖,尹少华,等.生态安全格局构建:概念、框架与展望[J].*生态环境学报*, 2022, **31**(4): 845–856. YI Lang, SUN Ying, YIN Shaohua, *et al.* Construction of ecological security pattern: concept, framework and prospect[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2022, **31**(4): 845–856. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.04.023](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.04.023).
- [3] 沈满洪.我国“十五五”生态文明建设规划的若干思考——学习党的二十届四中全会精神体会[J].*生态经济*, 2026, **42**(1): 1–6. SHEN Manhong. Reflections on China's 15th Five-Year Plan for ecological civilization construction: insights from studying the spirits of the fourth plenary session of the 20th central committee of the communist party of China[J]. *Ecological Economy*, 2026, **42**(1): 1–6. DOI: [10.3969/j.issn.1671-4407.2026.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4407.2026.01.001).
- [4] MORIN E, RAZAFIMBELO N T, YENGUÉ J L, *et al.* Are human-induced changes good or bad to dynamic landscape connectivity?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, **352**: 120009. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.120009](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120009).
- [5] FOLTÊTE J C. A parcel-based graph to match connectivity analysis with field action in agricultural landscapes: is node removal a reliable method?[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, **178**: 32–42. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2018.05.016](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.016).
- [6] XU Aokang, HU Mengjun, SHI Jing, *et al.* Construction and optimization of ecological network in inland river basin based on circuit theory, complex network and ecological sensitivity: a case study of Gansu section of Heihe River Basin[J]. *Ecological Modelling*, 2024, **488**: 110578. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2023.110578](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110578).
- [7] 门丹,潘竞虎.基于生态系统服务供需与拓扑结构分析的渭河流域生态网络优化[J].*农业工程学报*, 2024, **40**(15): 212–221. MEN Dan, PAN Jinghu. Optimization of the ecological network in the Weihe River Basin using supply and demand of ecosystem service and topological structure analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, **40**(15): 212–221. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.202403175](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202403175).
- [8] MEN Dan, PAN Jinghu. Incorporating network topology and ecosystem services into the optimization of ecological network: a case study of the Yellow River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, **912**: 169004. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.169004](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169004).
- [9] 赵文武,尹彩春,张军泽,等.地理学支撑 SDGs 研究进展与展望——兼议“可持续地理学”理论框架[J].*地理学报*, 2024, **79**(11): 2699–2720. ZHAO Wenwu, YIN Caichun, ZHANG Junze, *et al.* Progress and prospects of geography in promoting the United Nations Sustainable Development Goals: a discussion on the theoretical framework of Sustainable Geography[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, **79**(11): 2699–2720. DOI: [10.11821/dlxb202411001](https://doi.org/10.11821/dlxb202411001).
- [10] 俞佳俐,李健,盛莹,等.城市绿地对居民身心健康福祉满意度影响研究[J].*中国园林*, 2021, **37**(7): 95–100. YU Jiali, LI Jian, SHENG Ying, *et al.* Study on the influence of urban green space on the satisfaction of residents[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2021, **37**(7): 95–100. DOI: [10.19775/j.cla.2021.07.0095](https://doi.org/10.19775/j.cla.2021.07.0095).
- [11] 李玲,王震,王克勤,等.西南高山峡谷区生态系统服务评估及多情景模拟[J].*浙江农林大学学报*, 2025, **42**(4): 813–824. LI Ling, WANG Zhen, WANG Keqin, *et al.* Ecosystem service assessment and multi-scenario simulation in

- southwest alpine canyon region[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 813–824. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20240590.
- [12] 朱月华, 侯宗东, 徐彩仙, 等. 基于生态系统服务供需关系的甘肃白龙江流域生态风险识别与管理[J]. *地理科学*, 2023, 43(3): 423–433. ZHU Yuehua, HOU Zongdong, XU Caixian, *et al.* Ecological risk identification and management based on ecosystem service supply and demand relationship in the Bailongjiang River Watershed of Gansu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3): 423–433. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.03.005.
- [13] 刘雨婷, 覃盟琳, 欧阳慧婷, 等. 基于生态系统服务供需平衡的国土空间资源配置优化[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(6): 1358–1383. LIU Yuting, QIN Menglin, OUYANG Huiting, *et al.* The optimization of territorial spatial resources allocation based on the balance of supply and demand of ecosystem services[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(6): 1358–1383. DOI: 10.31497/zrzyxb.20240607.
- [14] 韩磊, 胡紫洁, 康宏亮, 等. 基于生态系统服务供需的社会-生态安全格局构建——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2026, 46(8): 1–16. HAN Lei, HU Zijie, KANG Hongliang, *et al.* Construction of social-ecological security pattern based on ecosystem service supply and demand: a case study of the Loess Hilly and Gully Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(8): 1–16. DOI: 10.20103/j.stxb.202504080813.
- [15] 田健, 修天峪, 曾穗平. 基于生态系统防洪服务供需评估的沿海雨潮组合风险识别与韧性规划——以闽三角地区为例[J]. *风景园林*, 2025, 32(6): 86–95. TIAN Jian, XIU Tianyu, ZENG Suiping. Coastal storm-surge combination risk identification and resilience planning based on supply and demand assessment of flood regulation ecosystem services: a case study of Fujian Delta[J]. *Landscape Architecture*, 2025, 32(6): 86–95. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20240120.
- [16] VOGT P, RIITTERS K. GuidosToolbox: universal digital image object analysis[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2017, 50(1): 352–361. DOI: 10.1080/22797254.2017.1330650.
- [17] 潘振华, 周媛, 姚婧, 等. 基于形态空间格局分析与最小累积阻力模型的城市热环境生态网络优化研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(5): 1085–1093. PAN Zhenhua, ZHOU Yuan, YAO Jing, *et al.* Research on optimization of urban thermal environment ecological network based on MSPA and minimum cumulative resistance model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(5): 1085–1093. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20230505.
- [18] HUANG Kexin, PENG Li, WANG Xiaohui, *et al.* Incorporating circuit theory, complex networks, and carbon offsets into the multi-objective optimization of ecological networks: a case study on karst regions in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135512.
- [19] 王林艳, 夏敏, 邹伟. 耦合生态服务供需的县域农业空间生态保护修复分区——以宜兴市为例[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(4): 858–877. WANG Linyan, XIA Min, ZOU Wei. Ecological conservation and restoration zoning of county-level agricultural spatial ecology coupled with ecological service supply and demand: a case study of Yixing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(4): 858–877. DOI: 10.31497/zrzyxb.20240407.
- [20] 张可欣, 周颖, 梁鑫雨, 等. 综合结构与功能导向的生态安全格局构建——以河南焦作市为例[J]. *生态学报*, 2025, 45(14): 7134–7149. ZHANG Kexin, ZHOU Ying, LIANG Xinyu, *et al.* Construction of ecological security pattern based on integrated structure and function: a case study of Jiaozuo City, Henan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(14): 7134–7149. DOI: 10.20103/j.stxb.202411302943.
- [21] GU Tong, TONG Yawen, WANG Shiyu, *et al.* Identifying the priority areas for ecological protection considering ecological connectivity and ecosystem integrity: a case study of Xianyang City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112102. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112102.
- [22] 吕佩锦, 刘艳中, 陈勇, 等. “盲区削减”与“功能结构协调”双目标导向下的生态网络协同优化——以武汉市为例[J]. *生态学报*, 2025, 45(1): 420–433. LÜ Peijin, LIU Yanzhong, CHEN Yong, *et al.* Research on synergistic optimization of ecological network under the dual-objective orientation of “blind zone reduction” and “functional structure coordination”: a case study of Wuhan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(1): 420–433. DOI: 10.20103/j.stxb.202402020294.
- [23] HONG Wuyang, GUO Renzhong, LI Xiaoming, *et al.* Measuring urban ecological network resilience: a disturbance scenario simulation method[J]. *Cities*, 2022, 131: 104057. DOI: 10.1016/j.cities.2022.104057.
- [24] LI Jian, DENG Jinyang, PIERSKALLA C. Impact of attendees’ motivation and past experience on their attitudes toward the National Cherry Blossom Festival in Washington, D. C[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 36: 57–67. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.10.008.

- [25] 徐彩瑶, 许文静, 任燕, 等. 瓯江“山水工程”生态系统服务权衡/协同关系的驱动因素及分区管控[J/OL]. 环境科学, 2025-12-01. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202509086>. XU Caiyao, XU Wenjing, REN Yan, *et al.* Driving factors and zonal management of trade-offs/synergies in ecosystem services of the Oujiang River Mountain-River Ecological Restoration Project[J/OL]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025-12-01. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202509086>.
- [26] 王戈, 于强, YANG Di, 等. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 258–266, 312. WANG Ge, YU Qiang, YANG Di, *et al.* Hierarchical ecological network structure based on complex network analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 258–266, 312. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.028.
- [27] ZHU Nanyan, AI Jingwen, ZENG Zhen, *et al.* Exploring the spatial relationship between the ecological topological network and carbon sequestration capacity of coastal urban ecosystems: a case study of Yancheng City, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 4007. DOI: 10.3390/rs15164007.
- [28] WU Yufei, ZHANG Qiao. The confrontation and symbiosis of green and development: coupling coordination analysis between carbon emissions and spatial development in urban agglomerations of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 106: 105391. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105391.
- [29] 李可璇, 张蕾, 李豪, 等. 基于 MSPA 模型和电路理论的晋西北国土空间生态修复关键区域识别[J]. 干旱区研究, 2024, 41(9): 1593–1604. LI Kexuan, ZHANG Lei, LI Hao, *et al.* Identification of the key regions of spatial ecological restoration in the Northwest Shanxi based on the MSPA model and circuit theory[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(9): 1593–1604. DOI: 10.13866/j.azr.2024.09.15.
- [30] 孟令琦, 汤佳, 胡希军, 等. 生态系统服务供需风险簇时空演变特征及影响因素: 以信江流域为例[J]. 生态学杂志, 2025, 44(12): 4211–4224. MENG Lingqi, TANG Jia, HU Xijun, *et al.* Spatiotemporal variations and driving factors of ecosystem service supply and demand risk bundles: a case of Xinjiang Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(12): 4211–4224. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202512.039.
- [31] 林港特, 吴耀炜, 袁海威, 等. 中国东部超大城市群生态安全格局的构建与优化策略[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7344–7357. LIN Gangte, WU Yaowei, YUAN Haiwei, *et al.* Construction and optimization strategies of ecological security pattern in mega urban agglomerations of Eastern China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11): 7344–7357. DOI: 10.13227/j.hjcx.202410273.
- [32] 江澎, 肖湘东, 谭立. 长三角水网型城市生态拓扑网络与固碳能力的空间关系探究——以苏州市为例[J]. 中国园林, 2026, 42(3): 124–131. JIANG Peng, XIAO Xiangdong, TAN Li. Exploring the spatial relationship between ecological topological network and carbon sequestration capacity in water network-type cities of the Yangtze River Delta: a case study of Suzhou City[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2026, 42(3): 124–131. DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0124.
- [33] HAN Nianlong, YU Miao, JIA Peihong, *et al.* Influence of human activity intensity on habitat quality in Hainan tropical rainforest National Park, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2024, 34(3): 519–532. DOI: 10.1007/s11769-024-1423-z.
- [34] LI Jian, ZHONG Yizhou, LI Yanni, *et al.* Past experience, motivation, attitude, and satisfaction: a comparison between locals and tourists for Taihu Lake international cherry blossom festival[J]. *Forests*, 2022, 13(10): 1608. DOI: 10.3390/f13101608.