

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

江澎 肖湘东* 谭立

摘 要: 长三角城市作为中国现代化发展的一大缩影, 其具备较为典型且值得剖析的城市扩张与生态环境间的矛盾冲突。生态网络的构建及优化作为维护区域生态安全的重要途径, 其提升城市生态系统的固碳能力也已被证实是实现全球碳中和目标的有效手段。以苏州市为研究对象, 基于形态空间格局分析、最小累积阻力模型、电路理论等构建生态网络, 结合复杂网络理论对其拓扑结构进行评价, 并探究网络各项拓扑指标与固碳能力的相关关系, 根据研究结果对生态网络提出优化策略并进行韧性验证。结果表明, 苏州市生态网络的固碳能力与生态源地的度、聚类系数、特征向量中心性等呈正相关, 且不同类型源地的相关关系存在较大差异。新增了11个生态踏脚石及15条生态廊道, 基于鲁棒性验证的网络韧性评估也证实了优化策略的科学性与可行性。对苏州市生态拓扑网络与固碳能力的空间关系进行了探究, 提出了以增强固碳能力、提升生态系统韧性为导向的生态网络优化策略, 为全球碳中和战略目标的实现提供了理论指导及实践参考。

关 键 词: 风景园林; 生态网络; 复杂网络理论; 拓扑结构; 固碳能力

文章编号: 1000-6664(2026)03-0124-08

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0124

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-04-11

修回日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52178046)

1 背景

近年来, 学者在全球、国家、区域等不同尺度生态系统的大量研究中指出, 城市生态空间是城市内部唯一的直接碳汇资源, 大尺度的碳汇能力与城市生态空间、自然环境因素和土地利用类型密切相关^[1], 而城市发展在过程中引发的生境破碎化和土地利用转变等因素则可被认定为区域生态系统碳汇能力下降的最重要因素^[2]。越来越多的研究者开始将生态网络构建与生态系统固碳能力提升结合起来^[3]。生态网络又称生态空间网络, 其基于斑块-廊道-基质理论, 将重要景观要素视为生态节点, 将连接生态节点的线性通道视为生态廊道, 将景观结构、生态过程、生态系统功能相耦合, 多用于区域景观生态格局与生态系统优化等方面的研究^[4]。当前已经初步形成“生态源地-生态阻力面-生态廊道”的主流研究范式^[5], 利用各种遥感数据、卫星影像等, 结合形态空间格局分析(MSPA)、生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)、最小累积阻力模型(MCR)、电阻理论等进行网络构建。

目前, 生态系统的碳源碳汇研究主要集中在森林、土壤、生物等层面的碳汇动态, 对城市生态系

统固碳能力的空间分异关注较少, 这可能与地理空间位置与生态网络特征难以量化有关。生态网络本质上是景观斑块空间拓扑结构的抽象与简化, 杨林哲等在松花江流域生态空间网络的研究中引入了复杂网络理论, 提出了优化生态空间的增边策略^[6]; 方敏哲等探究了黄河流域植被生态空间网络拓扑指标与固碳能力之间的相关性, 阐明了生态网络结构特征与生态系统服务之间的内在关系^[7]。区域生态系统固碳能力当前主要通过净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)测算及碳汇系数估算2种方法进行获取, 前者多用于植被与耕地, 后者则可以较好地估算城市生态网络中林地、草地、水体等各种地类的固碳量^[8], 但如何计算获取并选择使用合理的碳汇系数十分重要。

研究以典型水网型城市苏州市为案例, 利用MSPA、MCR、电阻理论等构建苏州市生态网络, 结合复杂网络理论分析生态网络的拓扑指标及固碳能力, 并探究两者间的相关关系。从生态系统功能优化和固碳能力提升的角度优化生态网络, 并对优化前后的网络进行分析评估以验证优化结果。城市空间发展与生态系统稳定间的平衡是苏州乃至全世界城市发展过程中的关键问题, 研究对于全球

水网型城市生态网络优化、固碳能力提升、生态系统保护等方面具有重要的参考意义。

2 研究区域及数据来源

2.1 研究区概况

水网型城市是指淡水河湖纵横交错、湖荡星罗棋布的一类城市, 其往往自然资源丰富、经济较为发达^[9]。苏州市位于长江三角洲中心地带, 河港交错、湖荡密布, 拥有各级河道2万多条, 大小湖泊300多个, 是典型的平原水网型城市。作为我国第二批低碳建设试点城市之一, 苏州市坚持生态优先、绿色发展, 目前设立风景名胜區、森林公园、湿地公园等自然保护地20个, 在江苏省内生态地位突出。

2.2 数据来源

研究使用的数据如表1所示。人口密度能够反映大规模生产生活活动的聚集程度, 是碳排放研究的重要指标, 路网与水网数据则是对人类活动可达性及其对生态系统干扰范围的补充。归一化植被指数能够直观地展现植物在生态系统中的固碳作用, 而高程和坡度往往会给低海拔地区植被的NEP积累带来负面影响, 导致陆地碳汇

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: ericx88@suda.edu.cn

表1 研究数据介绍及来源

数据名称	数据来源
遥感影像	百度地图(https://map.baidu.com)
人口密度(POP)	WorldPop数据集(https://www.worldpop.org)
土地利用及覆被(LULC)	欧空局ESA World Cover 10 m v100数据集(https://esa-worldcover.org)
水网、路网	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
高程(DEM)	ALOS卫星相控阵型L波段合成孔径雷达采集的数据(https://search.asf.alaska.edu/#/)
坡度(SLOPE)	基于ArcGIS的坡度工具对DEM数据计算分析获得
归一化植被指数(NDVI)	基于Google Earth Engine平台, 使用Landsat 8数据集获得(https://earthengine.google.com)

表2 基于MSPA的生态网络空间形态类型及其生态学含义

空间形态类型	生态学含义
核心	大型的自然或半自然斑块, 是生态网络中源地的主要来源
孤岛	相对孤立、碎片化的小型自然或半自然斑块, 可视为生态网络中的“踏脚石”
孔隙	核心区内部边界内自然或半自然斑块, 是与核心区内部建设用地的过渡地带, 可视为生态缓冲带
边缘	核心区外部边界内自然或半自然斑块, 是与核心区外部建设用地的过渡地带, 可视为生态缓冲带
环路	连接同一核心区内部的自然或半自然廊道, 有利于加强斑块内部物种迁移与能量流动等生态过程
桥接	连接相邻2个不同核心区的自然或半自然廊道, 有利于促进核心区之间的物种迁移与能量流动
支线	连接核心区及外围非自然型斑块的或半自然廊道, 是两者间发生物种迁移、能量交流的通道

量受损, 应被纳入碳汇研究考虑范畴。土地利用及覆被变化作为陆地生态系统碳储量变化的重要影响因素, 也是“双碳”研究不可忽视的一环。

3 方法

3.1 生态网络构建

3.1.1 基于形态空间格局分析和景观连通性的生态源地识别

形态空间格局分析是一种基于形态学算法识别研究区域内重要生态斑块的方法。将研究区土地利用数据中的林地、草地、湿地等碳汇用地设为前景, 其他用地为背景, 输出为二值数据。基于Guidos Toolbox 3.2软件, 采用八邻域法分析, 识别MSPA景观类型空间分布^[10](表2)。景观连通度作为景观促进或阻碍某种生态过程在生境斑块间运动的程度, 可以衡量斑块功能特征及网络整体结构。研究将利用Conefor 2.6软件计算斑块重要性指数dPC, 结合斑块面积筛选重要生态源地。

3.1.2 基于修正后的最小累积阻力模型的生态阻力面构建

依据生态安全格局理论, 生态阻力面的构建对生态廊道的识别极为重要。既有研究多基于最小累积阻力模型(MCR模型)构建生态阻力面, 然而, 传统的MCR模型往往会忽略不同生境条件、土地利用类型、人类干扰强度间的差异、交叉关系等^[11]。对传统MCR模型进行修正, 选取

LULC、DEM、SLOPE、NDVI、MSPA数据为生态阻力因子, 选取人口密度、距水域距离、距主要道路距离为人为干扰因子, 基于层次分析法确定各因子的权重及阻力系数, 构建综合生态阻力面指标评价体系(表3)。

3.1.3 基于电路理论和重力模型的生态廊道提取

生态廊道对于生态资源的整合和生态流动的继续必不可少。基于综合生态阻力面及重要生态源地, 根据电路理论利用Linkage Mapper工具识别最小成本路径以获取潜在生态廊道, 并使用重力模型提取核心生态廊道。重力模型可以量化生态源地间的相互作用, 相互作用力越大, 源地间的廊道越重要, 建设优先级越高。将根据重力模型矩阵确定相互作用强度G的阈值, 分级提取重要、次重要及一般廊道。计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_i} \times \ln(S_i) \right] \left[\frac{1}{P_j} \times \ln(S_j) \right]}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_i \ln S_j}{L_{ij}^2 P_i P_j}$$

式中: G_{ij} 为生态源地*i*和*j*间的相互作用强度; N_i 和 N_j 为源地*i*和*j*的对应权重值; D_{ij} 为源地间潜在廊道的标准阻力值; P_i 和 P_j 为源地*i*和*j*的平均阻力值; S_i 和 S_j 为源地*i*和*j*的面积; L_{ij} 为源地*i*和*j*间的廊道阻力值; $L_{\max}$ 为研究区域廊道的最大阻力。

3.2 基于复杂网络理论的生态网络拓扑结构分析

利用复杂网络理论, 生态源地被抽象为网络的节点, 生态廊道被抽象为网络的边, 景观空间被抽象为一个无向网络。生态拓扑网络简化量化

表3 综合生态阻力面评价指标体系

指标类别	指标因子	权重	赋值	分级
生态阻力因子	DEM/m	0.12	1	0~4
			20	4~8
			60	8~12
			80	12~19
			100	19~91
	Slope/°	0.07	1	0~1.11
			20	1.11~2.30
			60	2.30~3.97
			80	3.97~7.67
			100	7.67~68.66
	NDVI	0.11	1	0.8~1.0
			20	0.6~0.8
			60	0.4~0.6
			80	0.2~0.4
			100	0~0.2
	LULC	0.21	1	森林、水体、湿地
			20	灌木、草地
			60	耕地
			80	建设用地
			100	裸地
	MSPA	0.18	5	核心
			10	桥接
			30	环路
			40	支线
			50	孤岛
			60	边缘
			70	孔隙
			100	背景
人为干扰因子	人口密度/(人/km ²)	0.12	1	0~667
			20	667~2 892
			60	2 892~7 786
			80	7 786~15 572
			100	15 572~27 057
	距主要道路距离/m	0.10	1	< 500
			20	500~1 000
			60	1 000~1 500
			80	1 500~2 000
			100	≥ 2 000
	距水域距离/m	0.09	1	≥ 1 500
			20	1 000~1 500
			60	500~1 000
			80	100~500
			100	< 100

了景观的空间结构, 各种拓扑指标可用于表征生态网络, 使得网络研究更易进行。利用复杂网络可视化软件Gephi 0.10.1将生态网络构建生态拓扑网络并探究其拓扑特征。最终选取9项拓扑指标对网络进行评价^[12](表4)。

3.3 固碳能力评估

固碳能力的研究在全世界范围内受到广泛关

注, 各国学者对不同土地利用类型的固碳量做了大量研究, 研究结果指出, 针对不同地类可采取相应的碳汇系数来估算固碳量^[13]。由于在当前研究中不能完全剔除耕地在生产过程中产生的温室气体, 最终仅将森林、草地、湿地等地类纳入碳汇计算的范畴。各地类固碳量计算公式如下:

$$C_i = \sum_{i=1}^n A_i S_i$$

式中: C_i为固碳总量; i为土地利用类型; S_i为土地利用类型i的土地面积; A_i为土地利用类型i的碳汇系数^[12](表5)。

3.4 生态网络的韧性评估

韧性的概念被广泛用于评估系统的性能, 其已成为展现网络系统在外部冲击来临时适应能力和抵抗能力的重要指标^[14]。在网络模型的韧性研究中, 鲁棒性分析因其仅受网络拓扑特性影响, 可最大限度排除设计条件微小变化影响, 可充分体现复杂网络的特征而被广泛使用。研究将基于鲁棒性验证评估优化前后生态网络的韧性。

3.4.1 生态网络的鲁棒性

鲁棒性可理解为维持生存状态保持稳定状态的能力。在网络系统研究中, 当网络受到攻击或发生故障时, 可视作其被移除了一些节点或边, 若移除后网络仍能保持连接, 则说明网络的连接性对这些节点或边的移除具有鲁棒性。网络的鲁棒性可分为连接鲁棒性和恢复鲁棒性2类, 前者是指网络保持节点连接和能量流通的能力, 后者则是节点或边受损后, 网络恢复到原始状态的特性。研究使用的鲁棒性指标如表6所示。

3.4.2 生态网络的冲击模拟

建立网络冲击模拟对于预测网络抵抗风险能力的动态过程至关重要。通过随机和恶意攻击移除生态网络的节点和边, 模拟灾害对生态系统中源地和廊道的破坏^[15]。基于3项鲁棒性指标在攻击下的变化趋势, 分析优化前后网络的韧性特征。假设模拟下主节点受到一次冲击将立即失效, 且连接该节点的所有边都会被移除, 以此评估去除节点后网络韧性的动态变化。

4 结果与分析

4.1 生态网络构建与分析

4.1.1 生态源地的识别

基于MSPA核心区初步筛选生态斑块, 使用Conefor 2.6软件识别出面积大于5 km²、dPC

表4 拓扑指标含义及其生态学意义

指标类型	指标名称	指标含义	在生态网络中的生态学意义
网络总体结构评估	平均度	网络所有节点的平均程度	网络中所有节点的平均连接性
	平均聚类系数	网络中所有节点聚类系数的平均值	表明网络中节点的分布是集中还是分散
	模块度	网络中每个节点被分配给不同的社区	评估网络社区划分的效果
网络节点评估	度	节点拥有的道路数	生态节点拥有的生态廊道数量
	介数中心性	网络中通过节点的所有最短路径比例的归一化指数	生态节点在网络中任意2个节点最短路径上的比例
	接近中心性	从一个节点到所有其他节点的最短距离之和乘以其他节点数量的倒数	生态节点通过最短路径与其他节点之间的距离, 量化节点在几何中心的位置
	聚类系数	节点的相邻节点之间实际存在的廊道数量与可能存在的最大廊道数量之比	相邻节点之间的连接比例
	特征向量中心度	为每个节点分配一个相对分数, 与得分高的节点相连接将获得更大的权重	连接到节点A的节点越重要, 则节点A就越重要; 用于评估节点的重要性
	PageRank	节点的重要性	生态节点重要性排序

表5 不同土地利用类型的碳汇系数

土地利用类型		森林	草地	灌木	湿地	水体
碳汇系数/(Mg C/hm ²)	植被	159.0	11.5	43.1	15.3	—
	土壤	124.9	132.4	131.4	347.5	67.1
	总计	283.9	143.9	174.5	362.8	67.1

表6 鲁棒性指标的含义及其生态学意义

指标名称	指标意义	在生态网络中的生态学意义
平均度	网络中所有生态节点的平均程度	评估网络中所有源地和节点的平均连接性
效率	网络中任意2个节点之间的最短路径	表示网络节点之间能量流的效率
连接鲁棒性	攻击下网络碎片化过程中最大连通子图的相对大小	直接反映网络损坏的程度

值大于0.26的重要生态源地共15块(图1)。根据生态功能和优势斑块的土地利用类型, 源地可分为水体源地和森林源地两大类, 主要包括太湖、阳澄湖、澄湖、昆承湖、金鸡湖、独墅湖、旺山景区、天池山景区、上方山国家森林公园、长江流域周边等。苏州市生态源地的地类属性充分展现了水网型城市生态空间格局的特征, 同时, 源地的空间分布也体现出生态资源分布的不平衡性, 其多集中在西南部的太湖周边、中部的阳澄湖周边、北部紧邻长江的地区。

4.1.2 生态阻力面的构建

对各因子阻力面(图2)加权叠加获得综合生态阻力面(图3-1)。结果表明, 苏州市整体生态风险抵御能力较低。低与较低阻力区分别占总面积的15.28%和18.57%, 较高、高阻力区占56.75%。低与较低阻力区与重要生态源地重合度较高, 地势平坦, 主要集中在长江流域、太湖、阳澄湖等大型水体沿岸及苏州南部的湖荡周边; 较高及高阻力区多分布于人口密度、开发程度较高的城市建设用地; 中阻力区多分布于植物覆被较好、地势较高的山体及地势平坦的农田周

边, 其与部分较高阻力区具备生态缓冲功能, 存在发掘潜力。

4.1.3 生态廊道的分析

采用重力模型对潜在生态廊道进行分级分析, 根据交互矩阵确定相互作用强度G的阈值为1.48和5.00, 提取G值大于5的重要生态廊道6条, G值介于1.48~5.00的次重要生态廊道16条, 共识别核心生态廊道22条(图3-2)。苏州市核心生态廊道集中分布于城市河道, 且在水系支流沿线多有分布, 如廊道7、10、11、12、15等。苏州市生态基础较好, 生态廊道分布较为密集, 但部分源地间廊道的连接性较弱, 且一些重要廊道长度较短, 存在改善空间。

4.2 生态网络拓扑结构分析

4.2.1 拓扑网络整体结构评估

从网络整体结构来看, 网络的平均度和平均聚类系数分别为1.467和0.285, 相较于宋宏利^[16]等国内市级尺度的复杂网络研究, 本研究较低的平均度表明生态源地连接的生态廊道平均数量较少, 较小的平均聚类系数则表明生态源地并不呈现均衡的聚集水平, 城市总体生态空间异质性较

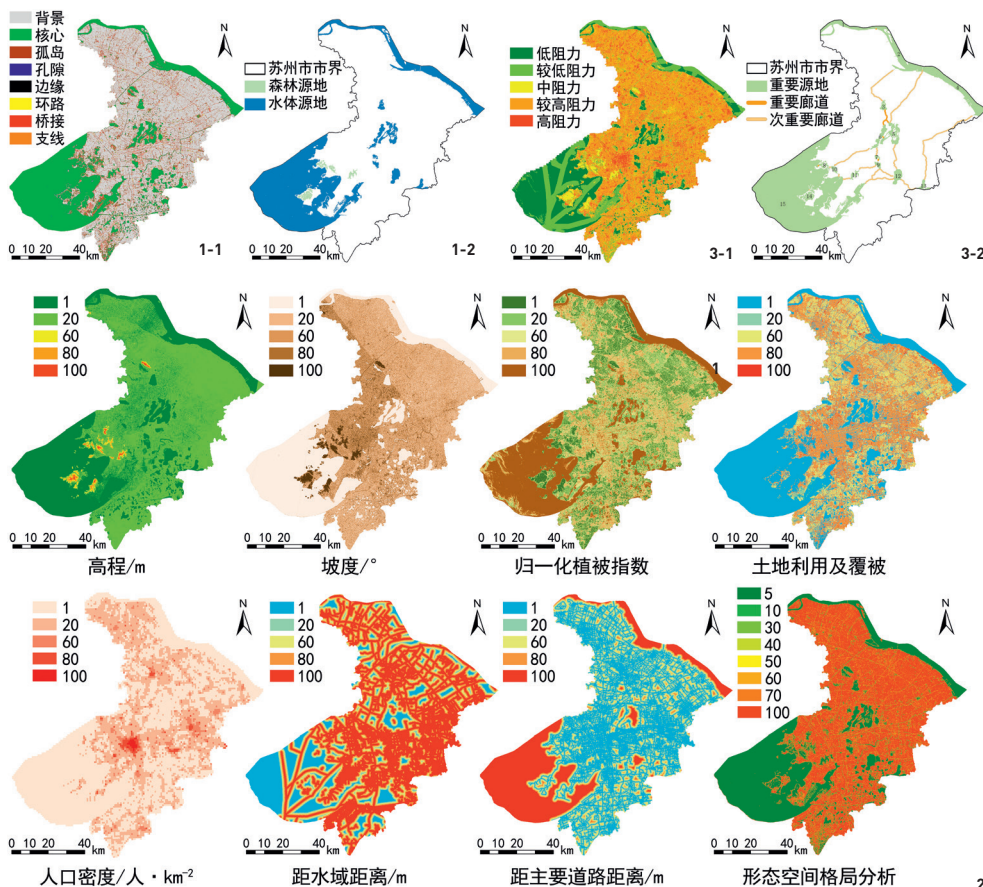


图1 苏州市MSPA景观类型(1-1)及重要生态源地分布(1-2)

图2 苏州市各因子阻力面分级图

图3 苏州市综合生态阻力面(3-1)及核心生态廊道(3-2)

高。拓扑网络的模块度为0.348,可分为4个社区,其中社区4的聚类系数较高,表明其源地和廊道具有较好的聚集水平和稳定性。社区1的模块度值最低,表明社区内的源地和廊道稳定性较差,更容易因外界干扰而发生塌陷(图4)。

4.2.2 拓扑节点评估

评估拓扑节点的指标可分为3类。首先,度和介数中心性是指节点的“桥梁”作用。节点15具有最高的度值,节点5、6、9、12具有较高的度值和介数中心性,表明这些处于网络中心的节点具有重要的连接作用,若其丢失,许多节点可能会失去与其他节点间的“桥梁”。其次,接近中心性和聚类系数反映了生态节点的连通性。节点1、4、13的接近中心性、聚类系数值较低,说明节点与邻近节点之间的廊道数量较少,需加强节点与邻近节点间的廊道建设。最后,特征向量中心性和PageRank是使用不同权重评估节点重要性的指标。节点6、7、9、10、12、13、15的特征向量中心性和PageRank较高,表明这些节点在苏州市生态网络中发挥着关键作用。

4.3 固碳能力估算及其与拓扑结构的相关性分析

4.3.1 固碳能力估算结果

根据生态源地面积比例最高的主导土地利用类型,生态源地可分为水体和森林两大类,研究使用碳汇系数估算了苏州市15个生态源地的固碳量(表7)。其中,水体生态源地的固碳量占总量的89.21%,面积占比仅2.78%的森林生态源地固碳量占总量的10.79%。从源地类型的面积占比可以看出,苏州市森林源地比重较低,未能发挥出高碳汇系数的森林地类的碳汇能力,将导致城市生态系统的固碳能力处于较低水平。显然,增加森林等新的植被源地的数量、优化植被质量等对于提高苏州整体固碳能力具有重要意义。

4.3.2 拓扑指标与固碳能力的相关性分析

进一步分析了生态源地的固碳能力与各种拓扑指标之间的相关性(图5),发现固碳能力与度的相关性为显著($r=0.612$),与特征向量中心度、PageRank相关性极显著($r=0.791$, 0.879)。研究表明,森林源地的固碳能力与度、介数中心性、聚类系数、PageRank呈负相关;

水体源地的固碳能力与度、聚类系数、特征向量中心度、PageRank呈正相关,与其他2个指标呈负相关。针对不同类型生态源地固碳能力的提升,注意点有所不同。水体节点固碳量提升可增加其他类型的节点以降低其介数中心性、接近中心性,植被节点则需要慎重考虑以何种方式添加同类型节点以减少各项拓扑指标。总之,选择添加水体或植被节点时需权衡多方面利弊。

4.4 生态网络优化及韧性验证

4.4.1 优化前生态网络的空间特征

苏州市的生态网络具有典型的水网型城市特征,水体和森林是重要生态源地的主导土地利用类型,核心生态廊道多沿流域支流分布。苏州市重要生态源地集中分布在西南部的太湖周边、中部的阳澄湖周边及北部紧邻长江的地区,生态廊道则多分布在城市中部和东北侧,连接太湖、阳澄湖、澄湖、金鸡湖、独墅湖等湖泊水体及天池山、大阳山、旺山、上方山、天平山等森林资源。根据研究结果,苏州市中心城区、东部、北部、南部地区的生态网络待完善空间较多,发展潜力巨大。

4.4.2 生态网络优化策略

1) 识别生态踏脚石。

生态网络中可优化节点的识别对于维护网络的稳定性和完整性尤为重要。踏脚石可以为物种迁徙、能量流动提供短暂的驻足地,有助于物种、能量的迁移流动及生物的生存发展。通常来说,踏脚石多选择生态廊道之间的交叉点,或在较长生态廊道中选择一些小型绿地改造为踏脚石,缩短生态廊道的长度以降低物种、能量迁徙过程的风险^[17]。选取生态廊道交叉口附近及较长廊道部分节段的11个生境条件较好的斑块为生态踏脚石(图6),优化后的拓扑网络的整体结构和社区划分发生了较大变化(图7)。平均度从1.467下降到1.269,平均聚类系数从0.285下降到0.115,表明生态踏脚石的增加削弱了各节点的重要性,增强了生态网络的稳定性。新生态踏脚石中c、e、h、k的PageRank值最高,表明其对优化网络具有重要作用,是开发建设的重要区域。

2) 优化生态廊道。

在以往研究中,如何科学地改善和增加生态廊道缺乏参考和标准^[18]。仇实等提出增加生态廊道或增加生态踏脚石的优化策略,以缩短生态功能较弱或固碳量较低的节点之间的最短路径^[8]。

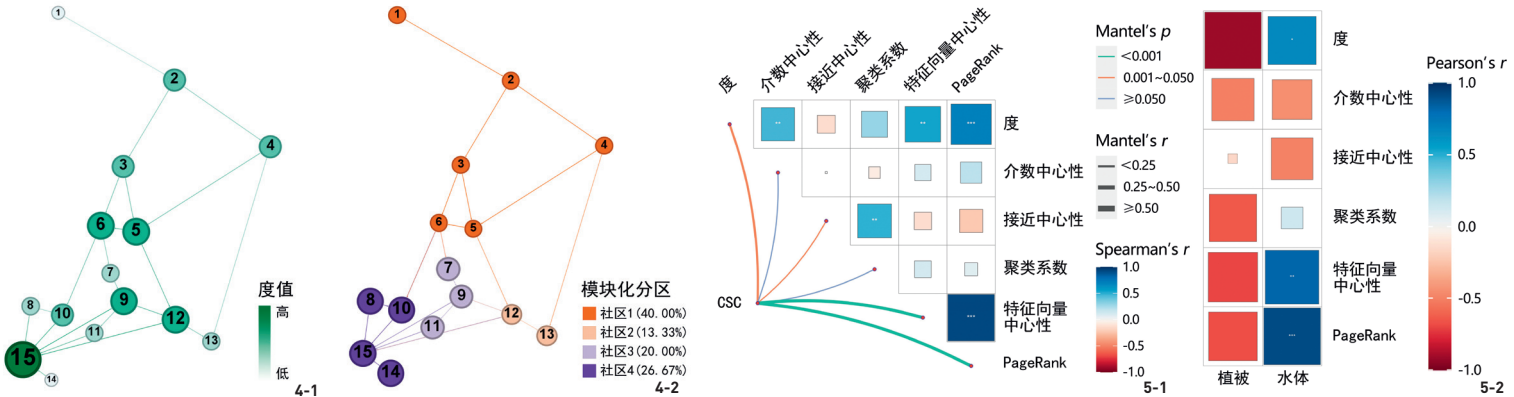


图4 生态网络的拓扑网络及模块化划分(4-1中节点大小表示度; 4-2中节点大小表示模块度指数)
图5 生态源地固碳能力与各种拓扑指标间的相关性(5-1)及2类生态源地的拓扑指标与固碳能力间的相关系数矩阵(5-2)[不同类别间的生态源地存在异质性, 其固碳能力与各项拓扑指标呈单调关系, 故选择Spearman相关性分析(5-1); 各类生态源地的固碳能力分别与网络拓扑指标呈线性关系, 故选择Pearson相关性分析(5-2)]
图6 苏州市生态踏脚石的识别放置

本研究分析发现: 通过增加踏脚石的数量提高度值、聚类系数等, 从而实现对固碳能力的提升具备可行性。水体踏脚石建设需要依托特殊的水土环境, 在城市发展较为成熟的苏州市内开辟新的大型水体节点并不具备太高的可实施性, 苏州市生态廊道的优化仍要将重任寄托于放置较多数量的小节点或植被踏脚石等。选择聚类系数较低的生态源地(1~4、7、11、13、14)和生态踏脚石(a、b、d~g、i~k)为主要优化对象, 在其及周边区域之间新增15条生态廊道, 构建出优化后的生态拓扑网络(图8)。新增廊道后的网络平均度上升至1.846, 网络各节点间的平均连接性有所提升; 平均聚类系数上升至0.373, 网络各节点分布更加集中; 平均路径长度下降到3.111, 网络中生态廊道长度有所减少, 生态源地间的物质能量迁移成本得到降低; 网络社区的结构发生了变化, 更契合城市形态和生态服务的需要。整体上, 生态网络的稳定性得到了增强。

3)增强固碳能力。

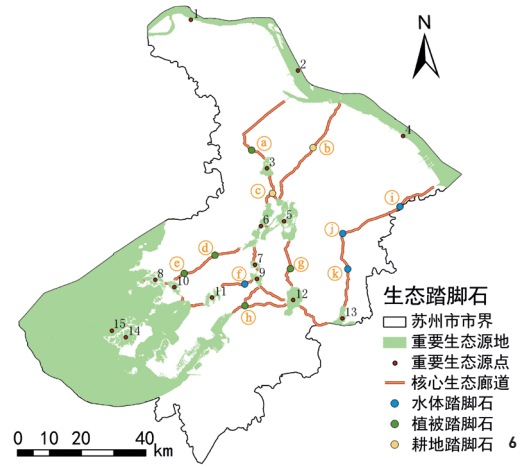
增强空间景观结构和提高城市生态质量被认为是提高城市生态系统可持续性的有效途径^[19]。从宏观角度来看, 通过优化生态拓扑网络, 可以促进生态节点之间的物质交换能力, 降低循环风险, 增强城市生态系统的固碳能力。不同土地利用类型生态源地的固碳能力存在差异, 森林是世界各地陆地固碳的主体。而在本研究中, 水体源地的固碳量总占比为89.21%, 是苏州这类水网型城市的重要生态基础, 但伴随着城市的发展, 水体资源数量的减少已呈趋势, 苏州市生态系统的固碳能力提升不能仅依靠水体, 需深入挖掘其他类型生态源地的潜力。因此, 研究提出2种优化策略: 一是通过增加植被等类型生态踏脚石, 这或对源地的固碳量产生直接影响; 二是通过增加生态廊道数量和聚类系数来提高生态节点的固碳能力。生态踏脚石和生态廊道的增加将对生态系统固碳能力的提升直接产生影响。绿地面积越大, 总固碳量越多, 绿地间的聚集系数越大, 单位面积固碳量越高, 这对城市生态网络优化和固碳能力提升具有重要作用^[20]。

4.4.3 生态网络韧性验证

除了探究生态拓扑网络与固碳能力的空间关系, 构建并优化生态网络以提高生态系统的稳定性和恢复力是本研究的另一重要目的。生态网络抵御冲击的能力可以通过模拟网络矩阵对随机和蓄意攻击的鲁棒性来体现。

表7 2类生态源地的固碳量估算

源地编号	源地类型	面积/km ²	面积占比/%	固碳量/Mg C	固碳量占比/%
1~7、9、12、13、15	水体	2 220.68	97.22	149 007.60	89.21
8、10、11、14	森林	63.45	2.78	18 014.43	10.79
总计		2 284.13	100.00	167 022.00	100.00



计算了优化前后网络在随机攻击和蓄意攻击下的度、效率和最大连通子图相对大小的变化趋势(图9)。整体上, 优化后的网络稳定性强于未优化的网络。随着被攻击节点比例的增加, 网络稳定性开始下降。在蓄意攻击下, 优化后网络的崩溃时间出现了较为显著的推迟。在介数攻击下, 优化后网络的效率和最大连通子图相对大小的陡降从20%推迟至40%; 未优化网络在受攻击节点比例达到60%时3项指标均趋于崩溃, 而优化后网络则在攻击比率接近80%甚至更迟时才趋于崩溃。显然, 优化后网络的稳定性和抗攻击能力得到了显著提升, 优化策略的科学性与合理性得以验证。

5 讨论

5.1 固碳能力与拓扑指标的相关性

苏州市生态网络的固碳能力与网络拓扑指标的相关性整体上较为显著, 其与城市中部、西部大片的湖泊水体、密集的河网水系及集中分布的

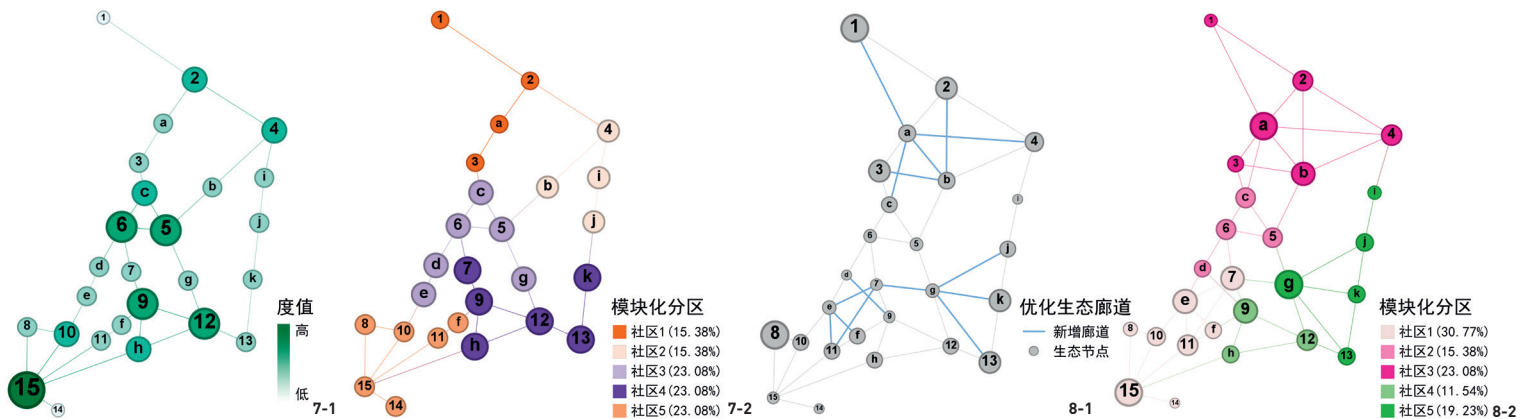


图7 优化生态踏脚石后的拓扑网络(7-1)及其模块化划分(7-2)(7-1中节点大小表示度; 7-2中节点大小表示模块度指数)

图8 优化新增的生态廊道(8-1)及优化后的拓扑网络及其模块化划分(8-2)(8-1中节点大小表示聚类系数; 8-2中节点大小表示PageRank)

图9 未优化(9-1)和优化后(9-2)生态网络鲁棒性的变化

森林、绿地资源可能存在着密切关系,这对河道交错纵横的水网型城市及森林植被等较为丰富的资源型城市生态拓扑网络的固碳能力研究具有一定的参考性与预见性。湖泊水体、森林植被等不同类型源地与网络拓扑指标或存在不同甚至相反的相关性,如本研究中水体源地与度、聚类系数、PageRank呈正相关,而森林源地与其则呈负相关。各类生态源地固碳能力的提升不仅需要其本身单方面的优化,更需考虑区域规划与场地现状,综合自身变动对其他类型源地的多重影响而选择策略,采取针对性的优化措施。

5.2 生态网络的优化

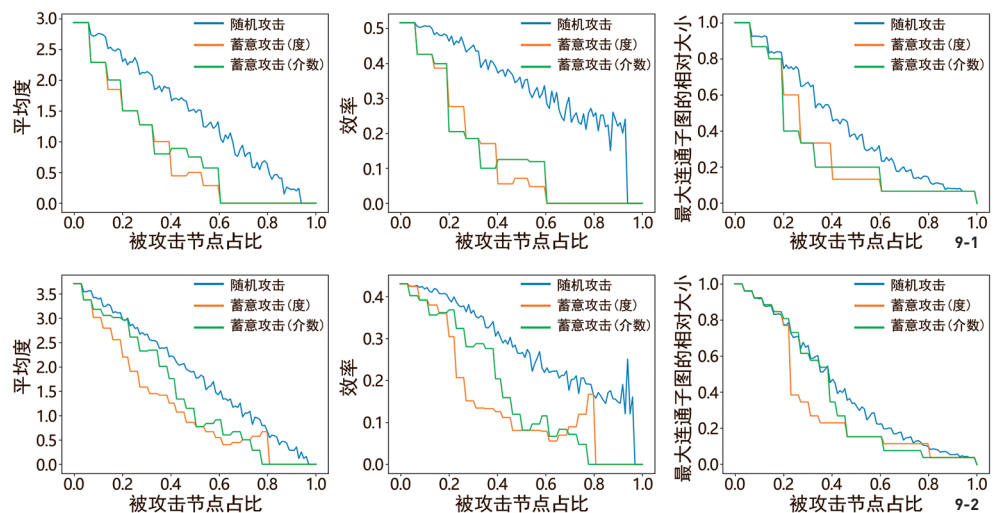
5.2.1 固碳增汇导向下的生态网络优化

基于生态网络拓扑指标之间、拓扑指标与固碳能力间的相关性分析,发现放置生态踏脚石、新增生态廊道以提高度、聚类系数,从而提升固碳能力这一思路的可行性。结合苏州市生态网络特征及生态资源分布,新增了植被、水体、耕地踏脚石,在聚类系数较低的源地和生态踏脚石间添加生态廊道,优化拓扑网络的整体结构和社区划分,实现了生态网络的韧性及固碳能力提升。

由于场地特征及自然资源分布不同、各类型源地的固碳能力差异等,需慎重选择以何类斑块为优化重心、何类廊道为连接通道,探究各优化地块间的相关性及改造优先级,协调区域内各类资源与固碳能力等生态功能的关系,为多层次协同优化的实现提供途径。

5.2.2 韧性验证

基于鲁棒性验证的生态网络韧性评估是确保以提高生态系统稳定性、恢复力和固碳能力为目标的生态网络优化可行性与科学性的重要一环。



以模拟网络矩阵对随机和蓄意攻击的鲁棒性来验证生态网络抵御冲击的能力,计算了随机和蓄意攻击下网络的度、效率和最大连通子图相对大小。研究表明,优化后的网络较未优化前稳定性更强。在蓄意攻击下,网络的崩溃时间出现了较为显著的推迟。优化后的网络在受攻击节点比例达到80%时3项指标才趋于崩溃,高于未优化网络的60%,证实了优化策略的可行性与科学性。

网络优化(如生态网络、社会网络等)的相关研究,在着眼于优化策略的深入挖掘、开拓创新之余,应积极开展优化前后网络的稳定性及主题导向的分析评价。如使用鲁棒性等验证网络的韧性、使用InVEST等验证网络的生境质量等,确保网络优化的科学价值与实际效益,使得研究能够落入实处、发挥其应有价值及意义。

5.2.3 不足与展望

生态网络构建过程中仍存在一些待优化空

间。首先,选择生态源地时可使用更为科学、精细的地类划分数据,以提高所识别源地属性与其现实情况的契合度。其次,探讨生态网络的固碳能力时可以将生态廊道也纳入分析范畴。本研究是以生态源地的固碳能力为主要分析对象,并未对地类属性较为复杂的生态廊道进行探讨,后续可对此深入研究以弥补相关空缺。在全球碳中和目标背景下,世界各地尤其是现代化程度、生态地位较高的一类城市(如长三角水网型城市)亟须寻得能够协调城市发展与生态效益的前进道路,期待未来能有更多以此为主题的研究得到开展。

6 结论

基于“生态源地-生态阻力面-生态廊道”的主流生态网络构建方法,使用MSPA、MCR、电路理论、重力模型等构建了苏州市生态网络,识别了15个重要生态源地、22条核心生态廊道。之

后引入复杂网络理论构建生态拓扑网络, 分析了其拓扑特征与固碳能力的相关关系并提出优化策略; 新增了11个生态踏脚石和15条生态廊道, 结合鲁棒性评估对优化前后网络的韧性进行分析, 发现优化后网络的稳定性、抗攻击能力显著提升, 验证了优化策略的科学性与可行性; 探究了以韧性及固碳能力提升为目标的生态网络优化策略, 对水网型城市碳汇功能提升研究具有一定的理论和实践意义。研究主要得出以下结论。

1) 苏州市具有典型的水网型城市生态空间格局特征, 生态源地的主要地类为湖泊水体、森林绿地, 生态廊道集中分布于城市河道、水体支流沿线。苏州市的生态资源空间分布具有不平衡性, 中心城区、城市东部、北部、南部的生态基础薄弱, 生态网络仍待完善。

2) 苏州市生态源地的固碳能力与度、聚类系数、特征向量中心度呈显著正相关关系。通过放置踏脚石、新增廊道等手段提升度、聚类系数等对于苏州市生态网络固碳能力的提升具有一定效用。

3) 新增了11块生态踏脚石及15条生态廊道, 为苏州市生态网络韧性和固碳能力的提升作出了贡献。

注: 文中图片均由作者绘制。

参考文献:

[1] 谢高地. 论我国生态系统碳汇能力及其提升途径[J]. 环境保护, 2023, 51(3): 12-16.
XIE G D. Ecosystem Carbon Sink Capacity in China and Its Improvement Approach[J]. Environmental Protection, 2023, 51(3): 12-16.

[2] 耿瑜爽, 李巍, 乐荣武. 呼包鄂榆城市群耦合空间碳排放生态网络构建[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4086-4097.
GENG Y S, LI W, YUE R W. Ecological network construction of coupling spatial carbon emissions in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4086-4097.

[3] 吴榛, 张凯云, 王浩. 城市扩张情景模拟下绿地生态网络构建与优化研究: 以南京市部分区域为例[J]. 中国园林, 2022, 38(4): 56-61.
WU Z, ZHANG K Y, WANG H. Construction and Optimization of Green Space Ecological Network under Urban Expansion Scenario Simulation: A Case Study in Some Areas of Nanjing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(4): 56-61.

[4] ZHANG R, ZHANG L, ZHONG Q, et al. An optimized evaluation method of an urban ecological network: The case of the Minhang District of Shanghai[J]. Urban Forestry & Urban Greening,

2021, 62: 127158.

[5] 李权奎, 金晓斌, 张晓琳, 等. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1461-1473.
LI Q Q, JIN X B, ZHANG X L, et al. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1461-1473.

[6] 杨林哲, 牛腾, 于强, 等. 基于复杂网络理论的生态空间优化: 以松花江流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(9): 91-103.
YANG L Z, NIU T, YU Q, et al. Ecological spatial optimization based on complex network theory: a case study of Songhua River Basin of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(9): 91-103.

[7] FANG M, SI G, YU Q, et al. Study on the relationship between topological characteristics of vegetation ecospatial network and carbon sequestration capacity in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4926.

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

[9] 陆小波, 杨俊宴. 中型平原水网城市空间形态特征研究[J]. 城市规划, 2018, 42(12): 109-115.
LU X B, YANG J Y. A study on spatial form and characteristics of medium-sized river plain cities[J]. Urban Morphology and Design, 2018, 42(12): 109-115.

[10] 苏王新, 张刘宽, 常青. 基于MSPA的街区蓝绿基础设施格局及其热缓解特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1173-1181.
SU W X, ZHANG L K, CHANG Q. Characteristics of blue-green infrastructure and its relationship with thermal environment in blocks based on morphological spatial pattern analysis (MSPA)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(6): 1173-1181.

[11] 曹秀凤, 刘兆顺, 李淑杰, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别: 以吉林省松原市为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2779-2787.
CAO X F, LIU Z S, LI S J, et al. Identification of key areas of ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security: A case of Songyuan City, Jilin province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2779-2787.

[12] ZHU N, AI J, ZENG Z, 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.

[13] 李曼, 张艳芳, 刘焕才, 等. 基于碳源和碳汇情景预测的山西省碳中和实现路径研究[J]. 生态经济, 2023, 39(10): 24-32.
LI M, WANG Y F, LIU H C, et al. Research on the Realization Path of Carbon Neutrality in Shanxi Province Based on Carbon Source and Carbon Sink Scenario Prediction[J]. Ecological Economy, 2023, 39(10): 24-32.

[14] 黄梅, 刘晨曦, 俞晓莹, 等. 城市水生态网络韧性评价与

优化策略: 以长沙市为例[J]. 经济地理, 2022, 42(10): 52-60.
HUANG M, LIU C X, YU X Y, et al. Resilience Evaluation and Optimization of Urban Water Ecological Network: Taking Changsha as an Example[J]. Economic Geography, 2022, 42(10): 52-60.

[15] 邓楚雄, 刘唱唱, 李志武. 生态修复背景下流域国土空间韧性研究思路[J]. 中国土地科学, 2022, 36(5): 11-20.
DENG C X, LIU C C, LI Z W. Research Path on the Resilience of Watershed Territorial Space under the Background of Ecological Restoration[J]. China Land Science, 2022, 36(5): 11-20.

[16] 宋宏利, 王悦悦, 张启斌, 等. 邯郸西部生态空间网络结构时空演变及其与固碳功能相关性研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 226-237.
SONG H L, WANG Y Y, ZHANG Q B, et al. Spatialtemporal Evolution of Ecological Spatial Network Structure in Western Handan Region and Its Correlation with Carbon Sequestration Function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 226-237.

[17] QIU S, FANG M, YU Q, et al. Study of spatialtemporal changes in Chinese forest eco-space and optimization strategies for enhancing carbon sequestration capacity through ecological spatial network theory[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160035.

[18] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 等. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.
YANG K, CAO Y G, FENG Z, et al. Research Progress of Ecological Security Pattern Construction Based on Minimum Cumulative Resistance Model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 555-565.

[19] YU G, CHEN Z, PIAO S, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(13): 4910-4915.

[20] YANG L, NIU T, YU Q, et al. Relationship between Topological Structure and Ecosystem Services of Forest Grass Ecospatial Network in China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4700.

(编辑/金花)

作者简介:

江 澎
2001年生/男/江苏盐城人/苏州大学金螳螂建筑学院在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计(苏州 215123)

肖湘东
1976年生/男/湖南常德人/博士/苏州大学金螳螂建筑学院风景园林系主任, 教授, 博士生导师/研究方向为风景园林规划与设计、风景园林建筑设计(苏州 215123)

谭 立
1992年生/男/湖北建始人/博士/苏州大学金螳螂建筑学院副教授, 硕士生导师/研究方向为城乡绿地网络、乡土景观(苏州 215123)

Exploring the Spatial Relationship between the Ecological Topological Network and Carbon Sequestration Capacity of the Yangtze River Delta Water Network Cities: A Case Study of Suzhou

JIANG Peng, XIAO Xiangdong*, TAN Li

Abstract: Under the global aspiration for carbon neutrality, enhancing urban carbon sink capacity has become an increasingly critical focus for nations worldwide. As urbanization continues at an unprecedented pace globally, the rapid expansion of cities has led to notable changes in land use patterns and increased habitat fragmentation, thereby exerting profound impacts on regional carbon balances. The development and optimization of ecological networks have emerged as vital strategies for safeguarding ecological security and promoting sustainable development. In recent years, an expanding body of research has demonstrated that ecological network construction is closely linked to the enhancement of urban ecosystems' carbon sequestration capacities, confirming that it is an effective approach to achieving the overarching goal of global carbon neutrality. The cities within the Yangtze River Delta (YRD), a prominent emblem of China's modernization, exemplify typical conflicts between urban expansion and ecological preservation. These conflicts highlight the urgency of adopting integrated ecological planning to reconcile urban growth with ecological integrity. In this context, the present study selects Suzhou, a key city in the YRD, as a case to investigate ecological network construction and optimization. Employing the mainstream "ecological source areas-ecological resistance surface-ecological corridors" framework, the research identifies critical ecological sources through morphological spatial pattern analysis and landscape connectivity indices. 8 factors - including dem, slope, NDVI, population density, land use, land cover, and so on - are incorporated to comprehensively evaluate landscape resistance. Using a least-cost path model, a combined ecological resistance surface is developed to quantify landscape resistance. Building upon this, core ecological corridors are extracted utilizing circuit theory and gravity models, enabling the identification of key pathways for ecological flow and connectivity. These corridors form the backbone of Suzhou's ecological network system, designed to enhance habitat connectivity and ecological stability. Subsequently, complex network theory is introduced to model the ecological topological network of Suzhou, facilitating an analysis of its structural features and their relationship with carbon sequestration capacity. Metrics such as degree centrality, clustering coefficient, and eigenvector centrality are employed to examine the network's topological roles and their influence on ecological function. The analysis reveals that Suzhou's ecological network exhibits typical water-network spatial

characteristics, with primary source habitats mainly comprising lakes and forests. Ecological corridors are predominantly aligned along urban rivers and tributaries, yet the spatial distribution of ecological resources displays a notable imbalance. Correlation analyses demonstrate that the carbon sequestration capacity of ecological sources is significantly positively related to network characteristics such as degree, clustering coefficient, and eigenvector centrality. Improving these metrics - by adding ecological "stepping stones" and expanding corridors - proves effective in enhancing the network's overall carbon sequestration function. Based on the above findings, the study proposes a series of ecological network optimization strategies aimed at ecological function restoration and carbon sequestration capacity enhancement. Notably, 11 ecological stepping stones and 15 new corridors are incorporated into the network. Robustness assessments - evaluating the network's resilience and attack tolerance - show that the optimized network demonstrates higher stability and resistance against disturbances, confirming the scientific validity and practical feasibility of the optimization approach. These results validate that targeted ecological network modifications can enhance its resilience and carbon sequestration capacity. The study's outcome highlights that Suzhou's ecological network embodies a water-centric spatial pattern, with key ecological sources mainly being lakes and forests, and corridors predominantly along rivers. Although the spatial distribution of ecological resources remains uneven, targeted interventions through adding stepping stones and corridors can significantly enhance the network's carbon sequestration ability. The research aims to deepen understanding of the spatial relationship between ecological topological structures and carbon sequestration capacity, providing a scientific foundation for ecological network optimization centered on ecological function recovery and carbon storage enhancement. Overall, this study offers valuable insights for optimizing urban ecological networks in water-rich cities, with significant implications for regional ecological resilience, biodiversity conservation, and carbon sink functions. The findings hold important theoretical and practical significance for advancing urban ecological planning and contributing to the broader goals of ecological security and climate change mitigation.

Keywords: landscape architecture; ecological network; complex network theory; topological structure; carbon sequestration capacity

Biography

JIANG Peng, male, born in 2001 in Yancheng, Jiangsu Province, Master's student in Golden Mantis School of Architecture, Soochow University, research area: landscape planning and design (Suzhou 215123)

XIAO Xiangdong, male, born in 1976 in Changde, Hunan Province, Ph.D., Professor, Doctoral Supervisor, and Head of Department of Landscape Architecture, Golden Mantis School of Architecture, Soochow University, research area: landscape planning and design, landscape architecture design (Suzhou 215123)

TAN Li, male, born in 1992 in Jianshi, Hubei Province, Ph.D., Associate Professor and Master's Supervisor at Golden Mantis School of Architecture, Soochow University, research areas: urban-rural green space networks, local landscape (Suzhou 215123)