

基于复杂网络与机器学习的深圳市鸟类栖息生态网络构建

Construction of Bird Habitat Ecological Network in Shenzhen Based on Complex Networks and Machine Learning

王昭熙 唐海达 况达 李相逸*

WANG Zhaoxi, TANG Haida, KUANG Da, LI Xiangyi*

基金项目: 2024年度广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金项目面上项目“建成环境对鸟类多样性影响机制下的粤港澳大湾区生态修复研究”(编号: 2024A1515011422); 广东省哲学社会科学规划2024年度青年项目“基于鸟类多样性提升的红树林湿地保护与城市生态发展研究”(编号: GD24YYS21); 广东省自然科学基金面上项目“泛洪区乡村家庭承洪韧性评估及提升路径研究——以广东北江中游为例”(编号: 2025A1515010973); 深圳市自然科学基金面上项目“基于鸟类分布的高密度城市三维生态网络未来多情景模式预测与干预修复”(编号: JCYJ20250604182411016)

摘要

城市是生物多样性保护的热点地区, 基于物种视角构建并保护城市生态网络对于减少城市内物种生存威胁, 提高物种多样性, 实现城市的可持续发展目标具有重要意义。以鸟类为指示物种, 耦合复杂网络与随机森林模型, 构建深圳市鸟类栖息地网络, 并解析其空间格局与建成环境阈值。深圳市鸟类栖息地网络由135个节点、7 427条加权连边组成, 具有小世界特性和高连接密度特征。随机森林模型显示, 人为干扰贡献率达40.3%, 其中与城镇的距离和夜间灯光指数影响显著; 生境因子中, 距水体960.53 m为关键阈值, 自然草场占比为7.08%时多样性支持效能最高。基于研究结果, 提出“片区差异化-节点优先化”管理框架并构建“一核三廊”生态网络, 为在高密度城市实现生物多样性保护与可持续发展提供定量范式。

Abstract

Urban areas serve as critical hotspots for biodiversity conservation. Constructing and preserving urban ecological networks from a species-centric perspective is of significant importance for mitigating threats to species survival within cities, enhancing species diversity, and achieving urban sustainable development goals. This study employs birds as indicator species, integrating complex network theory with random forest modeling to establish a bird habitat network in Shenzhen and to analyze its spatial patterns in relation to built-environment thresholds. The network comprises 135 nodes and 7 427 weighted edges, exhibiting small-world properties and high connectivity density. Random forest analysis reveals that anthropogenic disturbances contribute 40.3%, with urban proximity and nighttime light intensity showing significant effects. Among habitat factors, a distance of 960.53 m from water bodies serves as a key threshold, while a proportion of 7.08% natural grassland yields the highest efficiency in supporting diversity. Based on the findings, a management framework of 'area differentiation - node prioritization' is proposed, along with an ecological network structured as 'one core and three corridors', offering a quantitative paradigm for advancing biodiversity conservation and sustainable development in high-density urban settings.

文章亮点

1) 融合复杂网络与机器学习方法, 从鸟类物种共现视角构建城市栖息地生态网络, 更真实刻画高密度城市中鸟类栖息地的空间连通结构。2) 引入随机森林与部分依赖图, 定量揭示建成环境因子对关键栖息地节点的重要性及其非线性阈值效应, 为精细化生态管控提供依据。3) 基于网络结构与环境阈值结果, 提出“片区差异化-节点优先化”管理框架与“一核三廊”生态网络, 为超大城市生物多样性保护提供可操作的定量范式。

关键词

生态网络; 生物多样性; 生态修复;
复杂网络; 随机森林

Keywords

Ecological network; Biodiversity;
Ecological restoration; Complex
network; Random forest

收稿日期: 2025-07-19

修回日期: 2025-11-03

快速城市化进程引起景观格局发生变化, 国土空间资源与环境承载着巨大的压力, 这一过程加剧了栖息地的丧失与破碎化, 生物多样性随之降低, 生态系统受到严重破坏^[1-3], 对城市的可持续发展构成了严重威胁^[4]。在此背景下, 构建生态网络成为国际公认的维护区域生态安全和保护城市生物多样性的关键策略^[5]。

生态网络的价值在于其服务多种生物群体的能力, 学界普遍认为支持多种物种的生态网络更具生态效益^[6]。因此, 选取具有代表性的指示物种是构建生态网络的关键所在。鸟类对环境变化高度敏感, 其物种分布、种群消长与生态环境密切相关^[7]。因此, 从鸟类视角出发构建生态网络, 对于城市生态规划和生态修复具有重要的指导意义。

生态网络构建的核心范式通常聚焦于识别关键生态源地, 并通过生态廊道将其连接, 形成支撑物种迁移与生态过程的空间结构^[8-9]。然而, 传统方法在生态源地识别上往往依赖物种多样性指数或宏观环境质量评估, 在生态廊道判别上则主要依据土地利用类型。该方法虽然可以刻画栖息地斑块间的潜在连接, 但未能充分考虑目标物种的生态需求与空间行为特征^[6], 难以直接反映基于物种真实空间共现的生态交互强度, 可能导致构建的网络与实际物种的利用模式存在偏差, 从而影响了其生态效能。为了强调物种层面的迁徙特征, 复杂网络理论被引入生态网络研究^[10], 该方法将栖息地斑块视为“节点”, 物种潜在迁移路径视为“连边”, 通过计算网络连接度指标来识别关键栖息地和廊道^[11-12]。例如, Lorenzo Marini 等构建了“栖息地-物种”二分网络, 将多个物种与栖息地资源相联系, 用于评估特定物种或特定栖息地不同景观中的重要性^[13]。相较于传统方法, 复杂网络方法显著增强了模型对物种迁徙特征的刻画能力, 特别是对于鸟类等具有较强移动能力的物种, 廊道直线连接更符合鸟类的飞行习性。尽管如此, 现有研究多集中于对生态网络构建结果的描述、网络评价^[14-15]与优化策略等^[16],

缺乏从生态网络关键节点视角出发, 系统量化周边建成环境因子对物种生态需求影响的研究, 尤其缺乏对关键环境因子影响阈值的研究, 而这对制定精细化、具有可操作性的生态空间管控措施至关重要。

针对上述研究缺口, 本研究选择高强度开发与丰富生物多样性并存、生态保护需求迫切的典型超大城市——深圳市作为研究区域, 融合复杂网络分析与机器学习方法, 深入探究城市鸟类栖息地的生态网络格局及其与建成环境因子的复杂相互作用机制。具体目标包括: 1) 结合公众观鸟数据, 构建反映实际鸟类活动与空间联系的栖息地复杂网络; 2) 解析网络结构, 划分社团, 揭示栖息地的空间聚集模式与格局; 3) 识别网络中具有高度连接性的关键栖息地节点, 构建随机森林回归模型, 量化关键节点连接强度与多维度建成环境因子间的复杂非线性关系; 4) 采用部分依赖图 (Partial Dependence Plot, PDP), 识别影响节点连接强度的主导环境因子及其关键影响阈值。研究旨在为城市栖息地保护、生态修复与空间管控策略提供科学依据。

1 研究区域概况

深圳市地处广东省南部、珠江三角洲东岸, 毗邻香港, 是粤港澳大湾区中心城市之一, 面积约 1 997.47 km², 其中建设用地约占 46.42%, 常住人口约 1 799 万人^①, 人均用地面积约 111 m², 属典型的高密度城市。深圳市下辖 10 个行政区 (图 1), 包括福田区、南山区、宝安区、龙岗区、龙华区、罗湖区、光明区、坪山区、盐田区和大鹏新区。深圳属于亚热带季风气候, 降水量充沛, 生态系统多样, 分布有河湖、湿地、滩涂等多种生态空间, 为众多生物提供栖息地。根据《深圳鸟类名录 (2024 版)》^[17], 该市有 431 种鸟类, 包括陆禽、涉禽、鸣禽、游禽等多种类型, 占全国鸟类种类的 30% 左右。在持续推进城市发展的过程中, 协调开发与生态保护的关系, 是深圳需要重点关注的问题。

2 研究数据与方法

2.1 数据收集与预处理

2.1.1 鸟类数据

本研究采用的鸟类数据源自美国 eBird 网站 (www.ebird.org)。

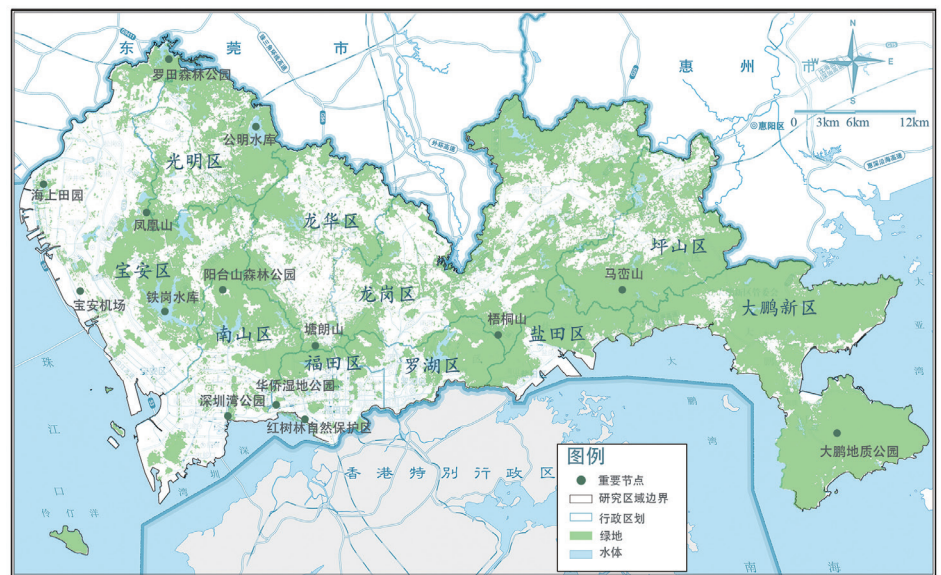


图 1 深圳市行政区划图

Fig.1 Administrative division map of Shenzhen City

① 数据来源于《深圳市 2024 年国民经济和社会发展统计公报》https://tjj.sz.gov.cn/zwgk/zfxgkml/tjsj/tjgb/content/post_12190509.html。

为减少公众科学数据中可能存在的偏差^[18-19]，本研究选取2015—2020年共6年的观测记录以扩大样本量，并剔除了总观测次数低于50次的鸟类物种，从而降低因偶然观测或迷鸟记录所引入的噪声干扰。基于此，为缓解空间自相关性，本研究运用空间聚类与随机子采样方法，把研究区域划分为30 m分辨率的格网，并在每个格网内随机保留1个具有代表性的点位。按深圳市范围掩膜提取后，最终获得11 412条有效观测记录，共涉及371种鸟类。参考既有研究^[20]，采用1 km×1 km的格网作为栖息地节点单元，对整个研究区域进行划分，并在每个节点内统计出现的所有鸟类物种。

2.1.2 环境变量数据

研究表明，城市鸟类生存主要受气候、地形、生境和人为活动的影响：1) 年均温度与年降水量等气候条件直接影响鸟类种群数量与栖息地选择^[21-22]。2) 地形通过改变水热条件和植被的空间分异，间接影响鸟类分布；海拔在一定程度上可反映生境多样性，进而影响鸟类栖息^[23]。3) 植被覆盖度与鸟类群落密度和多样性呈正相关^[24]；绿地、水体及农林用地则作为主要觅食生境满足鸟类食源需求^[25]。4) 城市化导致生境破碎化与景观复杂化^[26]。人口密度、交通及噪声等人为干扰显著影响鸟类分布^[27]；而在城市化水平较低的区域，如小微湿地，鸟类物种丰富度较高^[28]。

本研究选择气候、地形、生境和人为4类环境因子进行

分析（表1）。其中气候因子选取年平均温度与年降水量，使用克里金插值法进行预处理以获取同空间分辨率的数据；地形因子中的坡度与坡向均由高程数据计算得到；与水体、海岸线以及城镇的距离均为像元到最近目标要素的欧式距离。为了保证影响因子与鸟类栖息地尺度一致，本研究使用分区统计计算1 km×1 km格网内各个环境因子的平均值。

2.2 研究方法

2.2.1 复杂网络理论

研究首先进行网络建模。基于公众观鸟数据，以存在鸟类活动的格网为节点，若2个格网中出现相同鸟种，则在节点间建立连接，由此构建深圳市鸟类栖息地网络。该网络为无向加权图，边权重表示连接强度。计算公式如下：

$$G = (V, E, W) \tag{1}$$

$$W = \frac{N_{ij}}{D_{ij}} \tag{2}$$

式中， G 表示深圳市鸟类栖息地网络， V 表示鸟类出现的格网节点集合， E 表示网络连边集合， W 表示连边权重， N_{ij} 表示节点*i*和节点*j*相同鸟类的数量， D_{ij} 表示节点*i*和节点*j*之间的欧氏距离。

然后计算“小世界”系数（Small World），其是复杂网络理论中的核心概念，描述了一种兼具高度局部聚集性和全局短路径连通性的网络结构特征^[29]，在生态学中可表示物种、能量或信息能在网络中高效传递。计算公式如下：

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)} \tag{3}$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \tag{4}$$

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i \neq j}^n d_{ij} \tag{5}$$

$$\sigma = \frac{C/C_{\text{random}}}{L/L_{\text{random}}} \tag{6}$$

式（3）中， C_i 为节点*i*的网络聚类系数， e_i 表示节点*i*的邻居节点之间存在的实际连边数， k_i 表示节点*i*的邻居数量。式（4）中， C 为观察网络的聚类系数， n 为节点数量。式（5）中， L 为观察网络的平均路径长度， d_{ij} 为节点*i*与其他节点*j*之间的最短路径长度。式（6）中， σ 为小世界系数， C_{random} 与 L_{random} 分别为与观察网络具有相同节点数和边数的随机网络的对应指标。当 $\sigma > 1$ 时，说明网络具有小世界特征。

接着计算度中心性，以解释网络中节点的连接权重关系^[30]。度中心性指该节点拥有的相邻节点的数量，数值越大，重要性越高。在栖息地网络中度中心性可以作为衡量栖息地生态价值的关键指标，其高低反映了栖息地在生态网络中的重要性。度中心性较高的节点通常意味着该栖息地被更多鸟类群落共同利用，在物种扩散、能量流动和信息传递中发挥着枢纽作用。计算公式如下：

$$K_i = \sum_{i \neq j}^n v_{ij} \tag{7}$$

表1 鸟类影响因子选取与来源

Tab.1 Selection and sources of bird predictor variables

类别	影响因子	数据来源
气候因子	年均温度 /℃	ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/
	年降水量 /mm	pub/data/noaa/isd-lite/
地形因子	高程 /m	
	坡度 /°	地理空间数据云
	坡向	
	归一化植被指数 (NDVI)	国家科技基础条件平台 - 国家生态科学数据中心
生境因子	与水体的距离 /m	MCD12Q1 土地类型产品
	与海岸线距离 /m	MCD12Q1 土地类型产品
	人工草场占比	
	自然草场占比	https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/26a0f6c95ee4c29b5c650b129aab788
	常绿阔叶林占比	
	常绿阔叶灌木占比	
人为因子	水体占比	
	人口密度 / (人 /km ²)	LandScan 全球人口密度数据
	与城镇距离 /m	MCD12Q1 土地类型产品
	夜间灯光指数	EANTLI 夜间灯光数据集
	与道路距离 /m	OSM 网站的历史道路数据

式中, K_i 为节点 i 的度中心性, v_{ij} 为网络中的节点 i 与其他节点 j 的连接边数, n 为网络的节点数。

最后进行社团结构挖掘。社区检测方法能识别生态网络中的栖息地功能群体, 为理解物种共存和生物多样性模式提供数据支持^[31]。本文采用 Louvain 算法进行社团发现。该算法通过迭代优化模块度并结合层次聚类, 形成层次化的聚类结构, 是当前高效且应用广泛的算法之一^[32]。

2.2.2 随机森林模型

本研究采用随机森林 (Random Forest) 算法构建环境因子与栖息地网络节点度中心性的非线性映射关系。随机森林是美国科学家 Leo Breiman 结合 Bagging 集成学习理论、随机子空间方法提出的机器学习算法^[33]。该方法首先通过自助采样随机抽取训练样本子集; 其次, 在决策树的每个节点分裂时, 随机选取部分特征进行最优划分。这一机制使得集成形成的“森林”中的每棵树都学习到数据的不同方面, 不仅能够有效拟合复杂的非线性关系, 更能显著减少数据不平衡和局部噪声对整体模型的影响, 增强泛化能力。

2.2.3 部分依赖图

由于机器学习模型的“黑箱”特性, 输入的环境因子特征与栖息地节点中心性之间的量化关联难以直观呈现。部分依赖图 (PDP) 是用于解释机器学习模型中特征与预测结果之间关系的工具。它通过计算某个特征在不同取值水平下对模型预测结果的平均影响, 来展示该特征与模型输出之间的关系^[34]。计算公式如下:

$$PDP_{x_s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_s, x_{\setminus s}^{(i)}) \quad (8)$$

式中, n 是训练数据集中的样本数量, $x_{\setminus s}^{(i)}$ 是第 i 个样本中除以 x_s 外的其他特征的值, $f(\cdot)$ 是训练好的机器学习模型的预测函数, $f(x_s, x_{\setminus s}^{(i)})$ 是在固定 $x_s=x_s$ 的情况下, 模型对第 i 个样本的预测值。

3 结果与分析

3.1 鸟类栖息地网络分析

3.1.1 网络建模结果

本研究构建的鸟类栖息地网络包含 135 个节点和 7 427 条连边 (图 2), 网络密度为 0.821, 表明深圳市各栖息地节点存在极其广泛的连接。网络的实际聚类系数为 0.939, 随机网络聚类系数为 0.833, 实际平均路径步长为 1.167, 随机平均路径步长为 1.166;

小世界系数为 1.12, 大于 1, 说明鸟类栖息地网络具有小世界的特征——鸟类栖息地在空间上形成多个内部连接紧密的局部集群, 同时这些集群之间又能通过较短的路径实现相对高效的连通, 这有利于鸟类在破碎化城市景观中的扩散和信息传递。连边的权重反映栖息地中鸟类组成相似性和空间接近性。深圳鸟类栖息地网络连边的权重分布呈现高度右偏 (图 3), 大部

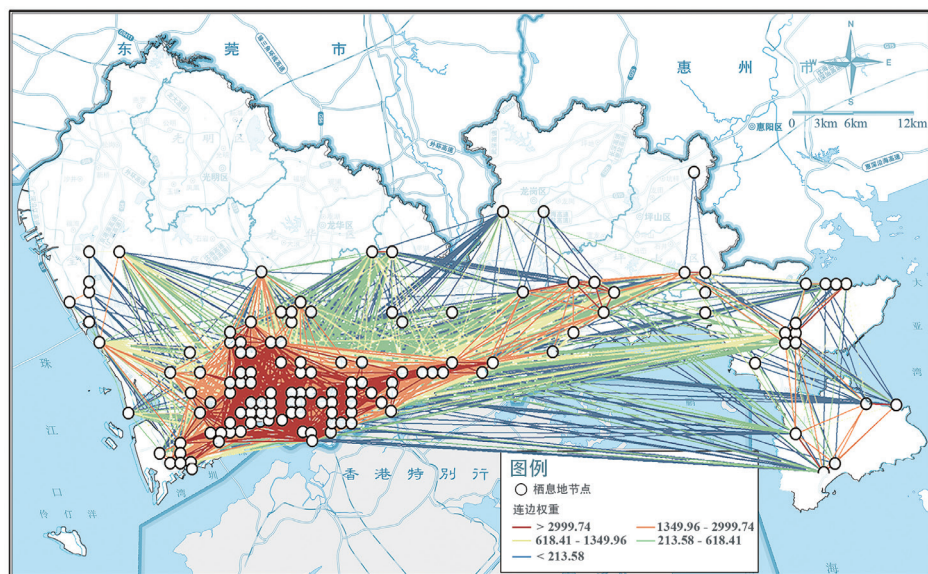


图 2 栖息地网络构建结果

Fig.2 Results of the habitat network construction

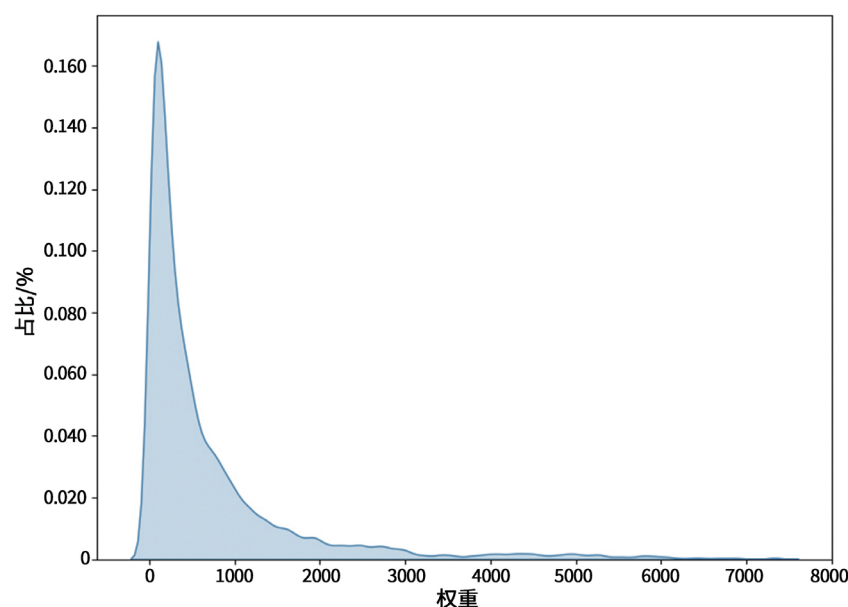


图 3 权重密度分布图

Fig.3 Edge-weight density distribution

分连边权重较低,高权重连边主要分布于深圳湾沿岸、南山-福田核心绿地群内部及其连接通道,构成了网络中生态流传输的骨干通道。

3.1.2 鸟类栖息地社团结构

基于 Louvain 算法的模块化检测将网络划分为 5 个内部连接紧密的栖息地社团(图 4)。每个社团代表相对独立的生态功能单元,内部栖息地间鸟类交流频繁。其中,社团 1 主要分布于福田区与南山区的交界地带;社团 2 高度集中于南山区南部与福田区西南部,空间范围覆盖深圳湾公园、福田红树林自然保护区及华侨城湿地公园等核心生态节点;社团 3 几乎占据整个大鹏新区,形成了连续完整的生态板块;社团 4 分布最为广泛,主要位于福田区、罗湖区、龙岗区、盐田区和坪山区;社团 5 分布于宝安区、龙华区与南山区,呈现出整体分散、局部聚集的特征。社团内部的栖息地应被视为一个整体管理单元,重点维护和提升其内部的连通性。

3.1.3 关键栖息地识别

将度中心性计算结果按照自然断点法分为 5 类(图 5)。度中心性最高的节点高度集中于社团 2 和社团 4 当中,包括南山区南部和罗湖区南部,这些节点依托于深圳湾、梧桐山等大型生态空间,生境质量较高。受到社团 2 区域的生态辐射作用,位于福田区与南山区交界处的社团 1 中栖息地节点的度中心性也相对较高,说明其在整个网络中承担着重要的中介和过渡功能。相比之下,社团 5 中宝安机场周边的栖息地节点度中心性普遍较低。其余度中心性较低的区域多分布于各行政区建成区内部(图 5)。

3.2 鸟类栖息地环境因子分析

3.2.1 环境因子重要性分析

随机森林模型精确地揭示了各种环境因素对结果的影响程度(图 6)。人为因子占据主导地位,其贡献率高达 40.3%,其次是生境因子,占比 31.9%,而气候与地形因子的贡献相对较少,分别为 14.4% 和 13.3%。具体而言,人为干扰因素中,与城镇的距离是影响栖息地变化最为显著的因素。此外,夜间灯光指数、与道路的距离

等因子的影响也较为明显。

在生境因子中,水源对鸟类栖息地选择具有重要影响。城市河流为野生动物提供栖息地,能连接城市绿地,促进生物多样性。在研究区域内,涉禽和游禽的种类多达 120 种,水源的接近性为鸟类提供了适宜的栖息地。草地、滨海空间等是鸟类栖息的重要场所,在城市化进程中,其内部的生态稳定性可能遭到破坏,对鸟类栖息

的支持功能亦可能减弱。

3.2.2 关键环境因子阈值分析

本研究选取对鸟类栖息地影响最显著的 2 个人为因子和 2 个生境因子进行部分依赖图分析(图 7)。其中,随着与城镇距离增大,栖息地的度中心性迅速升高,达到峰值后趋于稳定(图 7-a)。当夜间灯光指数为 0~312.70 时,鸟类栖息地度中心性随夜间灯光指数增加而缓慢下降;此后急剧下降至较

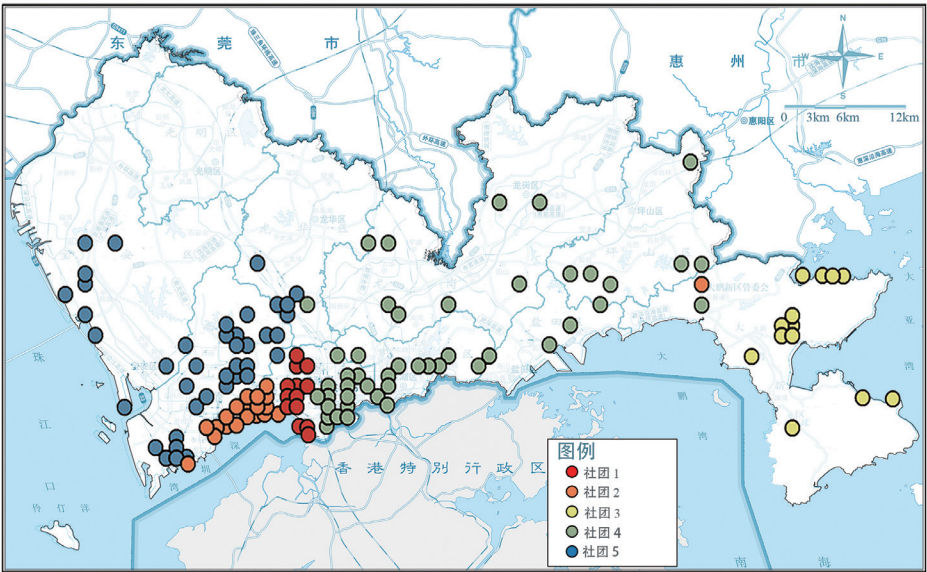


图 4 栖息地网络社团空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of habitat network communities

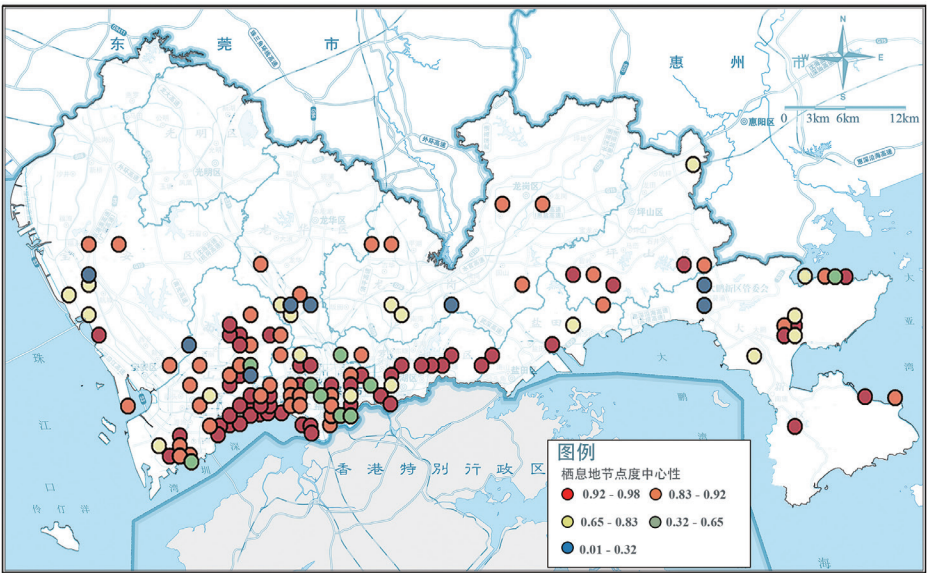


图 5 栖息地网络度中心性分布

Fig.5 The degree centrality distribution of the habitat network

低值，旋即回升至接近初始水平（图 7-b）；当指数超过 361.64 后，下降速率再次加快。该结果强调了需要针对不同城市化阶段制定差异化的光污染管控策略。

生境因子中，在距离水体 0~960.53 m 范围内，鸟类栖息地重要性基本保持稳定；超出此范围后重要性快速下降，距离为 1 206.32 m 处度中心性降至最低值，随后迅速回升至某

一稳定水平并维持（图 7-c）。这表明远水区域可能通过人为食源补充形成了替代性觅食中心，一定程度上补偿了自然水体的生态服务功能缺失，体现了鸟类对城市化环境中资源替代策略的适应。鸟类栖息地度中心性随自然草场占比增大而呈现先升后降的趋势，在 7.08% 达到峰值（图 7-d）。在一定范围内，草场面积占比增大可为鸟类提供更大范围的生态支持；然而，当占比超过一定阈值时，该区域植物配置趋于单一化，所能支持的鸟类多样性随之受限。

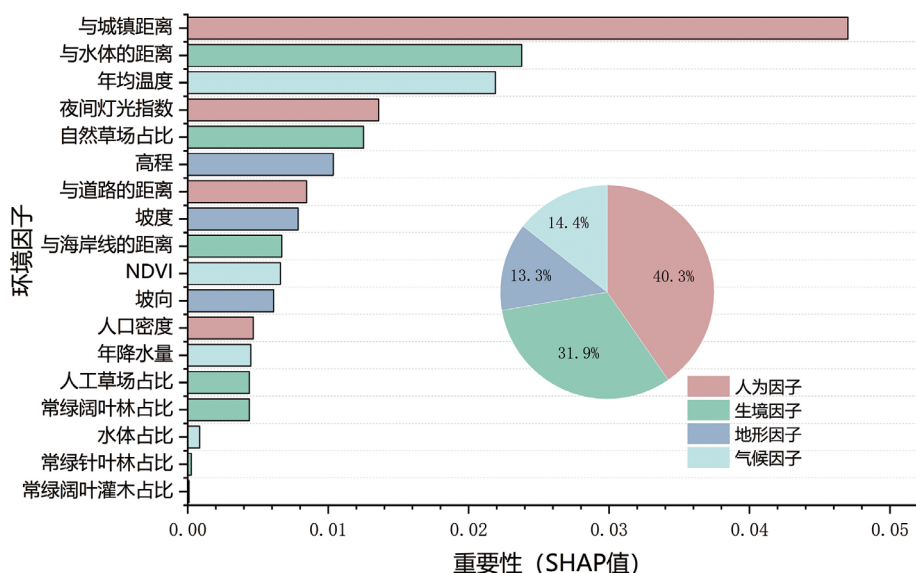


图 6 影响因子重要性排序

Fig.6 Ranking of impact factor importance

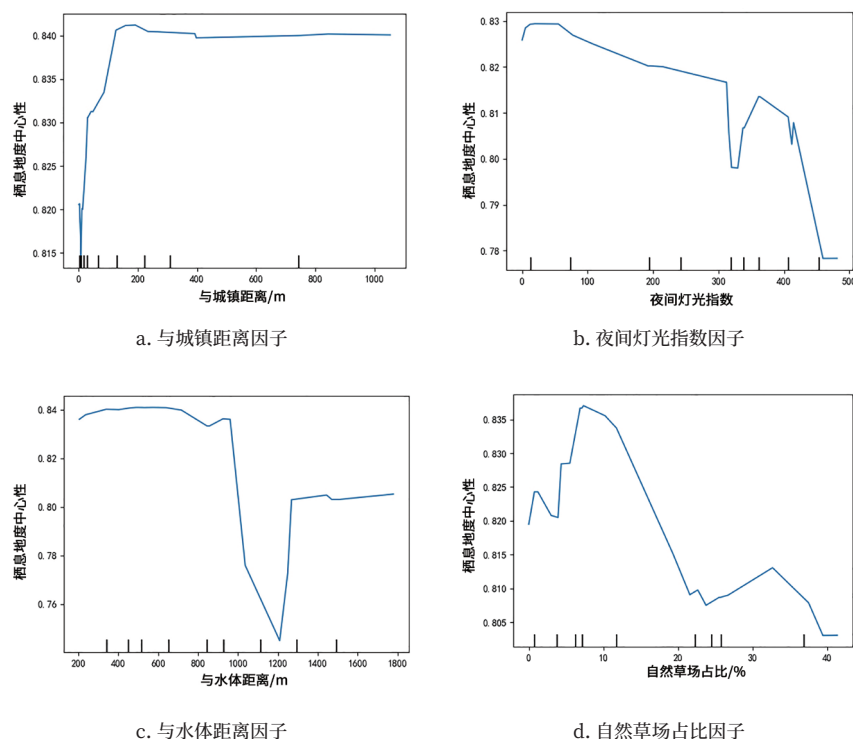


图 7 关键因子部分依赖图

Fig.7 Key factor partial dependency graph

4 讨论

4.1 高密度城市生态连通性的“双面性”

本研究构建的鸟类栖息地网络具有高连接密度特征与显著的小世界特性，表明尽管城市化程度高，深圳残留的栖息地斑块之间仍维持较高的功能连通性。高度局部聚类与较短平均路径长度说明，鸟类在局部绿地内活跃聚集，并可借助关键节点与廊道实现跨集群高效流动。该结构体现了鸟类对破碎化生境的适应既依托南部连续生态板块，也受益于建成区内作为踏脚石的小微栖息地^[35]。与 Joscha Beninde 等^[36]“生物多样性需要宏观连续、大面积生境”的结论不同，研究揭示了高密度城市的复杂生态现实：宏观尺度生境破碎化，微观尺度通过空间优化维持生态功能并存。

4.2 关键环境因子对栖息地非线性阈值

随机森林模型结果表明，人为干扰因子的贡献率最高，明确指示城市化是深圳市鸟类栖息地格局演变的核心驱动因素。城镇区域的发展通常带来环境污染的加剧，包括空气污染、水污染和土壤污染，这些对鸟类的健康和栖息环境构成了严重威胁^[37]；夜间灯光指数会直接或间接影响鸟类的觅食和栖息行为^[38]；道路建设破坏了原有栖息地之间的连通性^[39]，其空气污染和噪声污染也对鸟类的生存构成了威胁。部分依赖图（PDP）进一步揭示了关键环境变量与栖息地功能间

存在显著非线性关系及生态阈值。例如,当自然草场覆盖率达 7.08% 时,鸟类多样性支持效能达到峰值,一旦超出该阈值,生境均质化加剧,效能反而下降,这证明生境异质性与绿地规模同样重要^[40]。此外,与水体距离在 1 206.32 m 以外的区域,栖息地重要性出现回升并趋于稳定,这说明城市鸟类栖息地功能同时受自然水体生态辐射与城市化衍生资源分布的双重影响^[35],强调生态保护规划需兼顾自然核心区的严格缓冲与建成区异质化生境的系统性优化。

4.3 生态管理策略

基于复杂网络社团结构特征及环境因子驱动机制的分析结果,本研究提出“片区差异化-节点优先化”的生态管理框架,并以关键环境因子阈值为导向制定系统性规划策略。首先,划分三大管控分区,将度中心性高的栖息地确立为首要保护节点,在南山区南部片区通过巩固滨海生态修复、布设连续生态廊道,缝合碎片化绿地,缓解城市隔离效应,进而带动宝安区生态质量整体跃升;罗湖-盐田片区在严守大型生态空间完整性的前提下,适度嵌入生态旅游,实现保护、教育与收益的协同增效;大鹏片区则推行海陆统筹修复,重点削弱工业园与聚居区对物种扩散的阻隔作用。其次,构建基于环境阈值的精细化调控体系。在城镇周边建立生态缓冲区,通过核心区禁用 LED 广告屏、郊区保留暗天空廊道等措施限制高强度广谱光源,以梯度化管控光污染;严格守护距水体 960.53 m 范围的生态缓冲带,保障水源依赖性鸟类的觅食空间;实施草场“镶嵌式管理”,将单块草场占比控制在 10% 以下,以维系植被异质性。最后,构建“一核三廊”生态网络,以“深圳湾-福田湿地群”为核心,修复大鹏地质公园至马峦山、梧桐山至华侨城湿地 2 条生态廊道,并在高度破碎化区域布设屋顶绿化、小微湿地等人工生态踏脚石,破解跳跃型社团的生存困局,全面提升超大城市生物多样性的韧性。

5 结论

本研究耦合复杂网络分析与随机森林模型,系统解析了深圳市鸟类栖息地空间结构、连接特性及环境驱动机制,并提出相应生态管理策略。研究遵循“格局-机制-管控”的逻辑主线。在格局上,构建包含 135 个节点和 7 427 条加权边的栖息地网络,其具有显著小世界特性,呈现局部集群与全局高效连通并存的结构。在机制上,随机森林模型表明人为干扰因子的贡献率最高,其中距城镇的距离和夜间灯光指数是主导因素;生境因子中,距水体 960.53 m 内的范围对鸟类生存至关重要,自然草地覆盖率为 7.08% 时多样性达峰值。基于此,提出“片区差异化-节点优先化”管理框架,划分三大管控分区,并通过“一核三廊”空间网络、水体缓冲带、草地镶嵌式管理和光污染调控等阈值措施,提升生态网络完整性与韧性。

本研究通过构建鸟类物种共现网络表征栖息地之间的潜在生态联系,更真实地模拟鸟类的直线飞行迁移特征;并通过引入随机森林模型与部分依赖图,有效量化了多维度环境

因子对栖息地节点功能的影响机制,克服了传统方法偏重于静态结构描述的限制,为实现高密度城市生态空间的精准管控提供了定量依据。

但研究仍存在一定局限性。公众观鸟数据在时空分布上不均匀,难以完整反映鸟类迁徙与活动规律,可能导致网络节点与连接强度的失真。观测记录高度集中于城市公园、绿道等易到达的休闲区域,而偏远林地、军事管制区或难以进入的陡峭山地则可能成为数据“盲区”,这可能导致本研究构建的网络高估了高人气绿地节点的连接中心性,同时低估了那些人迹罕至但生态功能重要的栖息地在网络中的实际作用。受环境数据可获性限制,所用观测数据截至 2020 年,未能包含近期变化。网络构建仅基于物种共现与欧氏距离,未考虑种间关系、栖息地结构等功能参数,简化了真实生态过程。此外,本研究以鸟类为单一研究对象,旨在提供一套可迁移的分析框架,但所构建的生态网络在服务其他类群方面的适用性仍有局限。未来研究可纳入更多类型的物种,融合“大范围物种分布数据”与“高精度实地调查数据”,提升数据的全面性与可靠性;同时结合卫星追踪与声学监测等多源数据,构建物种移动轨迹数据库,建立长时序数据平台,并引入功能性状与发展多层网络模型,以深化对群落构建和生态系统稳定性的机制理解。

注:图 1、2、4、5 的底图来源于深圳市地理信息公共服务平台,审图号为粤 S (2018) 02-65 号,其余图片均为作者自绘。

参考文献:

- [1]BANKS-LEITE C, EWERS R M, FOLKARD-TAPP H, et al. Countering the effects of habitat loss, fragmentation, and degradation through habitat restoration[J]. One Earth, 2020, 3 (6): 672-676.
- [2]伍斌,王志杰,潘远珍.基于 GIS 的安顺市景观格局空间梯度分析[J].西北林学院学报,2019,34(6):214-223.
- [3]CAO Y, YANG R, CARVER S. Linking wilderness mapping and connectivity modelling:A methodological framework for wildland network planning[J]. Biological Conservation, 2020, 251: 108679.
- [4]TORRES A, JAEGER J A G, ALONSO J C. Multi-scale mismatches between urban sprawl and landscape fragmentation create windows of opportunity for conservation development[J]. Landscape Ecology, 2016, 31 (10): 2291-2305.
- [5]陈静,左翔,彭建松,等.基于 MSPA 与景观连通性分析的城市生态网络构建——以保山市隆阳区为例[J].西部林业科学,2020,49(4):118-123,141.
- [6]李波,贺萌,彭琳,等.基于林鸟迁移扩散的重庆市高密度城区生态网络构建研究[J].中国园林,2023,39(7):35-39.
- [7]STROHBACH M W, HAASE D, KABISCH N. Birds and the city: urban biodiversity, land use, and socioeconomics[J]. Ecology and Society, 2009, 14 (2): 31.
- [8]刘庆豪.山东省会经济圈景观格局时空演变及全要素生态网络构建与分析[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [9]PENG J, PAN Y, LIU Y, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. Habitat International, 2018, 71: 110-124.

- [10] 田北辰, 李沛权, 黄千杜. 基于鸟类视角的城市生态廊道构建方法研究综述[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (8) : 3010-3022.
- [11] MINOR E S, URBAN D L. A Graph-Theory Framework for Evaluating Landscape Connectivity and Conservation Planning[J]. Conservation Biology the Journal of the Society for Conservation Biology, 2010, 22 (2) : 297-307.
- [12] URBAN D, KEITT T. Landscape connectivity: a graph - theoretic perspective[J]. Ecology, 2001, 82 (5) : 1205-1218.
- [13] MARINI L, BARTOMEUS I, RADER R, et al. Species-habitat networks: A tool to improve landscape management for conservation[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56 (4) : 923-928.
- [14] 陈文漪, 刘敏, 潘悦, 等. 基于电路理论的高原山地县域生态网络构建——以云南省镇沅县为例[J]. 广东园林, 2024, 46 (6) : 51-59.
- [15] 牛腾, 岳德鹏, 张启斌, 等. 潜在生态网络空间结构与特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50 (8) : 166-175.
- [16] LIU W, LI X, LIU T, et al. Approximating betweenness centrality to identify key nodes in a weighted urban complex transportation network[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 1: 1-8.
- [17] 深圳市观鸟协会记录委员会. 深圳鸟类名录 (2024 版) [R]. 深圳: 深圳市观鸟协会, 2024.
- [18] CALLAGHAN C T, WATSON J E M, LYONS M B, et al. Conservation birding: A quantitative conceptual framework for prioritizing citizen science observations[J]. Biological Conservation, 2020, 253 (12) : 108912.
- [19] DUAN H, XIA S, YU X, et al. Using citizen science data to inform the relative sensitivity of waterbirds to natural versus human-dominated landscapes in China[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10 (14) : 7233-7241.
- [20] 游巍斌, 蔡新瑜, 王英姿, 等. 基于不同网格尺度福州主城区鸟类多样性与景观特征的关系研究[J]. 生态学报, 2023, 43 (18) : 7670-7681.
- [21] LI X, WANG Z, CHEN Y, et al. Exploring the impact of land use on bird diversity in high-density urban areas using explainable machine learning models[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 374: 124080.
- [22] DUDNEY J, WILLING C E, DAS A J, et al. Nonlinear shifts in infectious rust disease due to climate change[J]. Nature communications, 2021, 12 (1) : 5102.
- [23] ANTONELLI A, KISSLING W D, FLANTUA S G A, et al. Geological and climatic influences on mountain biodiversity[J]. Nature geoscience, 2018, 11 (10) : 718-725.
- [24] MORELLI F, BENEDETTI Y, SU T, et al. Taxonomic diversity, functional diversity and evolutionary uniqueness in bird communities of Beijing's urban parks: effects of land use and vegetation structure[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 23: 84-92.
- [25] 刘奕彤, 齐增湘, 刘慧. 基于鸟类栖息地的江口洲湿地适宜性评价[J]. 安徽农学通报, 2019, 25 (4) : 83-88.
- [26] HAIGHT J D, HALL S J, FIDINO M, et al. Urbanization, climate and species traits shape mammal communities from local to continental scales[J]. Nature ecology & evolution, 2023, 7 (10): 1654-1666.
- [27] 孙丰硕. 不同城市化水平鸟类群落特征及城区鸟类对生境因子的选择[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [28] 汪婷, 周立志. 合肥市小微湿地鸟类多样性的时空格局及其影响因素[J]. 生物多样性, 2022, 30 (7) : 146-158.
- [29] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [30] BARRAT A, BARTHELEMY M, PASTOR-SATORRAS R, et al. The architecture of complex weighted networks[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2004, 101 (11) : 3747-3752.
- [31] GAO CHAO, MA Z, ZHANG A Y, et al. Achieving optimal misclassification proportion in stochastic block models[J]. Journal of Machine Learning Research, 2017, 18 (60) : 1-45.
- [32] NEWMAN M E J. Networks: An Introduction[M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [33] BREIMAN L. Random forest[J]. Machine Learning, 2001, 45: 5-32.
- [34] FRIEDMAN J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine[J]. Annals of statistics, 2001, 29 (5) : 1189-1232.
- [35] KEELER B L, HAMEL P, MCPHEARSON T, et al. Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 29-38.
- [36] BENINDE J, VEITH M, HOCHKIRCH A. Biodiversity in cities needs space: a meta - analysis of factors determining intra - urban biodiversity variation[J]. Ecology letters, 2015, 18 (6) : 581-592.
- [37] CHASTEL O, FORT J, ACKERMAN J T, et al. Mercury contamination and potential health risks to Arctic seabirds and shorebirds[J]. Science of the Total Environment, 2022, 844: 156944.
- [38] CIACH M, FRÖHLICH A. Ungulates in the city: light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment[J]. Urban Ecosystems, 2019, 22: 513-523.
- [39] ZHAI Z, LIU S, LI Z, et al. The spatiotemporal distribution patterns and impact factors of bird species richness: A case study of urban built-up areas in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 169: 112847.
- [40] STEIN A, GERSTNER K, KREFT H. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales[J]. Ecology letters, 2014, 17 (7) : 866-880.

作者简介:

王昭熙 / 2000 年生 / 女 / 山西长治人 / 天津大学建筑学院 (天津 300072) / 在读博士研究生 / 专业方向为生物多样性与生态修复

唐海达 / 1990 年生 / 男 / 江苏无锡人 / 博士 / 深圳大学建筑学院 (深圳 518060) / 研究员, 副教授 / 研究方向为可持续建筑、医院环境营造、健康建筑与城市

况达 / 1991 年生 / 男 / 重庆人 / 博士 / 深圳大学建筑学院 (深圳 518060) / 助理教授 / 研究方向为承洪韧性、灾害韧性、雨洪管理

李相逸 (* 通信作者) / 1990 年生 / 女 / 甘肃陇南人 / 博士 / 深圳大学建筑学院 (深圳 518060) / 副教授 / 研究方向为景观生态修复、景观规划设计 / E-mail: lixiangyi@szu.edu.cn