

引用格式: 朱颖, 马奥, 冯育青, 等. 苏州市受胁水鸟生境适宜性分析与生境网络构建[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 802–812. ZHU Ying, MA Ao, FENG Yuqing, et al. Habitat suitability analysis and habitat network construction of threatened waterbirds in Suzhou[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 802–812.

苏州市受胁水鸟生境适宜性分析与生境网络构建

朱 颖^{1,2}, 马 奥¹, 冯育青^{2,3}, 李 欣^{2,3}, 吴燕飞^{2,3}

(1. 苏州科技大学建筑与城市规划学院, 江苏苏州 215011; 2. 江苏太湖湿地生态系统国家定位观测站, 江苏苏州 215000; 3. 苏州市湿地保护管理站, 江苏苏州 215100)

摘要: 【目的】受胁水鸟是湿地生境质量的关键指示物种。构建受胁水鸟生境网络, 有助于保护区域水鸟多样性, 提升湿地生态系统功能。【方法】以苏州市域为研究区, 选取 2022 年受胁水鸟分布点及相关环境变量数据, 运用 MaxEnt 模型评价受胁水鸟生境适宜性, 在此基础上结合斑块重要性指数识别生境源地, 利用电路理论确定廊道并判定生境夹点和生境障碍点, 构建苏州市受胁水鸟生境网络。【结果】①2022 年苏州市受胁水鸟生境适宜性良好, 其中高适宜生境呈显著破碎化。②受胁水鸟生境源地 31 处, 总面积为 196.55 km², 空间分布呈现组团特征, 分别聚集在长江、阳澄湖、澄湖和太湖沿岸。③受胁水鸟生境廊道 62 条, 总长为 705.55 km, 其中高阻力廊道 9 条, 低阻力廊道 53 条, 廊道适宜宽度为 600 m。④50 处生境夹点和 28 处生境障碍点对受胁水鸟的迁移扩散产生重要影响。【结论】研究期间苏州市受胁水鸟生境适宜性良好。探索了生境网络定量构建方法, 提出了生境网络优化建议, 为地区生物多样性保护及应对地区生境变化提供科学参考。图 6 表 5 参 38

关键词: 受胁水鸟; 生境网络; MaxEnt 模型; 生境适宜性分析; 苏州市

中图分类号: Q958 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)04-0802-11

Habitat suitability analysis and habitat network construction of threatened waterbirds in Suzhou

ZHU Ying^{1,2}, MA Ao¹, FENG Yuqing^{2,3}, LI Xin^{2,3}, WU Yanfei^{2,3}

(1. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China; 2. National Positioning Observation and Research Station of Taihu Wetland Ecosystem, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 3. Suzhou Wetland Conservation and Management Station, Suzhou 215100, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Threatened waterbirds are key indicator species of wetland habitat quality. Constructing a habitat network of threatened waterbirds is conducive to protecting regional waterbird diversity and enhancing the function of wetland ecosystem. [Method] Taking Suzhou municipal area as the study area, the distribution points and related environmental variable data of threatened waterbirds in 2022 were selected, and habitat suitability of threatened waterbirds was evaluated by MaxEnt model. On this basis, combined with the patch importance index, habitat source areas were identified and corridors were determined by using circuit theory, and habitat pinch points and barrier points were identified to construct a habitat network of threatened waterbirds in Suzhou. [Result] (1) The habitat suitability of threatened waterbirds in Suzhou in 2022 was good, and the highly suitable habitats were significantly fragmented. (2) There were 31 habitat source areas,

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2025-03-19

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(23YJAZH231); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23_1757); 苏州科技大学风景园林学学科建设项目; 江苏省企业研究生工作站项目和江苏太湖湿地生态系统国家定位观测研究站资助项目

作者简介: 朱颖(Orcid: 0000-0002-2861-7577), 教授, 博士, 从事风景园林规划设计理论与实践、区域景观规划与生态修复研究。E-mail: zhuying@mail.usts.edu.cn。通信作者: 冯育青(Orcid: 0000-0002-2414-790X), 研究员级高级工程师, 博士, 从事苏州市湿地保护与修复实践。E-mail: wetland_sz@163.com

with a total area of 196.55 km², and their spatial distribution presented a cluster feature, gathering along the Yangtze River, Yangcheng Lake, Cheng Lake and Taihu Lake, respectively. (3) There were 62 habitat corridors with a total length of 705.55 km, including 9 high-resistance corridors and 53 low-resistance corridors. The appropriate width of the corridors was 600 m. (4) 50 habitat pinch points and 28 habitat barrier points were found to have significant impacts on the migration and dispersal of threatened waterbirds in the region. [Conclusion] During the study period, the habitat suitability of threatened waterbirds in Suzhou is good. The quantitative construction method of habitat network is explored, and suggestions for the optimization of habitat network are put forward. This study provides scientific reference for regional biodiversity conservation and response to regional habitat changes. [Ch, 6 fig. 5 tab. 38 ref.]

Key words: threatened waterbirds; habitat network; MaxEnt model; habitat suitability analysis; Suzhou

生境网络是提高生物多样性的重要空间途径^[1]，能够将破碎的生境源地和具有连接作用的廊道交织串联，形成面向物种保护的网状景观系统^[2]。科学地构建生境网络不仅对生物多样性保护产生正面影响，也能够有效地应对生境破碎化^[3-4]，因此，生境网络的构建也成为生物多样性保护与空间规划协调的重要方法^[5-6]。

鉴于生境网络的重要性，相关学者从不同空间尺度在构建方法^[7]、质量评价^[8]、优化途径^[9]等方面已开展诸多研究，并形成“识别生境源地—构建阻力面—提取廊道”的基本构建范式^[7-9]，其核心在于考虑物种迁移扩散的生态过程^[6]，进而实现生物多样性的系统性保护。生境源地的准确识别是构建生境网络的基础。相关研究发现：以生态敏感性^[10]、生境适宜性^[11]等方法判别源地时，存在指标权重赋值差异较大，导致生境源地识别的客观性不足等问题；运用 MSPA^[4]、InVEST^[6]模型方法识别源地，则由于使用单一用地类型数据存在难以准确反映物种对生境需求等问题。对于上述问题，生态位模型中的最大熵模型（MaxEnt）能依据物种较少的分布点及多种环境变量，在不同空间尺度下准确可靠地识别出物种的适宜生境^[12]，同时还能够关注到物种对生境的需求。提取廊道主要使用图论模型^[1]、MCR 模型^[7]和电路理论^[13]。电路理论能够模拟物种个体在异质景观中随机迁移扩散的过程，可以探索出多条符合物种行为特征的路径作为廊道^[13]，更好地体现物种生态过程的流通性。在提取廊道时，需要注意的是廊道宽度直接影响着物种迁移扩散、物质能量流动的质量与效率^[14]，关系着生境网络功能发挥的可靠性。此外，景观生态学强调任何生态过程都有其尺度阈，超出尺度阈的研究结果也将失去可靠性^[4, 15]。

水鸟是湿地生物多样性的重点保护目标^[16]，也是表征湿地生态系统健康状态的关键生物指标^[17]。受胁水鸟，即列入世界自然保护联盟（IUCN）《濒危物种红色名录》或《中国生物多样性红色名录》中处于易危（VU）及以上保护等级的水鸟^[18-19]，对湿地环境变化极为敏感，所面临的挑战更为严峻。随着受胁水鸟生境破碎化或规模化消失^[20-21]，地区水鸟物种多样性显著下降。构建生境网络，可保障水鸟安全迁移扩散，进行基因交流，有助于缓解生境破碎化影响，实现水鸟多样性保护。

苏州市地处长江三角洲经济发展中心区域，同时作为典型的水网城市，其丰富的湿地资源已成为东亚—澳大利西亚候鸟迁徙线上的重要中转站^[22]。随着社会经济的高速发展，受胁水鸟生境地承受了众多干扰，导致地区生物多样性及生态可持续性面临严峻的挑战，因此，如何在经济快速发展地区开展受胁水鸟生境保护，提升地区生物多样性，是当地生态保护需着力解决的问题。本研究针对苏州市域尺度，运用 MaxEnt 模型评价苏州市受胁水鸟的生境适宜性，在此基础上结合斑块重要性指数识别生境源地，利用电路理论提取廊道并判别生境夹点和障碍点，即通过“源地识别—廊道提取—适宜廊道宽度确定—生境夹点和障碍点定位”模式定量构建生境网络，旨在为苏州市水鸟多样性保护提供决策支持，也为市域尺度生物多样性保护提供借鉴。

1 研究区概况及数据来源

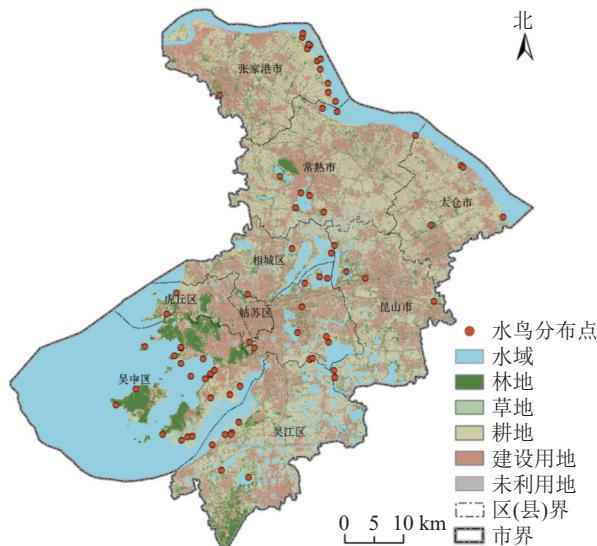
1.1 研究区概况

苏州市地处长江、太湖两大流域的下游交汇处，是长江三角洲的地理中心，地理坐标为 30°47'~

32°02'N, 119°55'~121°20'E, 总面积为 8 657.32 km² (图 1)。全市属亚热带季风气候, 域内河道纵横、河湖众多, 形成“一江、百湖、万河”的独特水网水系格局, 其中, 水域面积占全市国土总面积的 34.6%, 众多水鸟栖息于此。《2022 苏州市湿地保护年报》显示: 苏州市已有 15 处湿地达到国际重要湿地标准。截至 2022 年 12 月, 苏州市共记录到鸟类 330 种, 其中属于国家一级重点保护野生动物的水鸟有 9 种, 属于国家二级重点保护野生动物的水鸟有 18 种, 列入世界自然保护联盟《濒危物种红色名录》的水鸟有 21 种, 合计 35 种重要水鸟。

1.2 目标水鸟及其分布点信息

本研究在苏州市水鸟资源的基础上, 以世界自然保护联盟《濒危物种红色名录》和《中国生物多样性红色名录》中所收录的受胁水鸟为参考^[18-19], 考虑到处于近危等级的水鸟对于中国水鸟物种保护也具有重要意义^[23], 因此将处于近危等级的水鸟也纳入受胁水鸟。在此基础上结合《江苏省生态环境质量指示物种清单(第 1 批)》《江苏省生物多样性红色名录(第 1 批)》, 筛选出能够表征苏州市生态环境质量且覆盖多种湿地生境类型的 15 种受胁水鸟作为目标水鸟(表 1)。



基于江苏省自然资源厅标准地图服务网站苏S(2024)14号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图 1 研究区及水鸟空间分布点示意图

Figure 1 Study area and spatial distribution points of waterbirds

表 1 目标水鸟名录

Table 1 List of target waterbirds

序号	名称	学名	保护等级	居留型	生态习性及栖息需求
1	青头潜鸭	<i>Aythya baeri</i>	极危/极危	冬候鸟	
2	中华秋沙鸭	<i>Mergus squamatus</i>	濒危/濒危	冬候鸟	
3	罗纹鸭	<i>Mareca falcata</i>	近危/近危	冬候鸟	
4	鸳鸯	<i>Aix galericulata</i>	无危/近危	冬候鸟	
5	小天鹅	<i>Cygnus columbianus</i>	无危/近危	冬候鸟	
6	黑颈鹤	<i>Podiceps nigricollis</i>	无危/近危	冬候鸟	
7	卷羽鹈鹕	<i>Pelecanus crispus</i>	近危/濒危	冬候鸟	
8	黑嘴鸥	<i>Chroicocephalus saundersi</i>	易危/易危	冬候鸟	
9	半蹼鹬	<i>Limnodromus semipalmatus</i>	近危/近危	旅鸟	
10	大杓鹬	<i>Numenius madagascariensis</i>	濒危/易危	旅鸟	
11	大滨鹬	<i>Calidris tenuirostris</i>	濒危/濒危	旅鸟	
12	黑脸琵鹭	<i>Platalea minor</i>	濒危/濒危	冬候鸟	
13	白琵鹭	<i>Platalea leucorodia</i>	无危/近危	冬候鸟	
14	东方白鹳	<i>Ciconia boyciana</i>	濒危/濒危	冬候鸟	
15	白头鹤	<i>Grus monacha</i>	易危/濒危	旅鸟	

说明: 保护等级的左边表示该水鸟在《濒危物种红色名录》^[18]中的受保护状态, 右边表示该水鸟在《中国生物多样性红色名录》^[19]中的受保护状态。居留型参考《中国鸟类分类与分布名录(第 4 版)》划分。

基于目标水鸟名录及研究区范围, 分别在中国观鸟记录中心 (<http://www.birdreport.cn/>)、全球生物多样性信息网 (<http://www.gbif.org/>) 以及中国生物网 (<http://map.especies.cn/>) 上检索 2022 年目标水鸟在研究区分布的观测数据, 共筛选有明确经纬度信息的分布记录 238 条; 又以《2022 苏州市湿地保护年报》中的相关资料和专业团队的实地调查进行补充得到 17 条分布记录, 合计 255 条。本研究旨在分析受胁水

鸟的综合生境适宜性, 故将所有分布记录进行合并。为确保模型精度并减少空间偏差, 在每个 30 m×30 m 网格中仅保留 1 个分布点, 以减少空间自相关效应^[26], 最终确定 75 个有效分布点用于本研究(图 1)。

1.3 环境变量数据

依据 15 种受胁水鸟的生态习性及栖息需求特征^[22, 24–27], 从气候、栖息生境和人为干扰 3 个方面筛选出 10 个环境变量(表 2), 以此构建 MaxEnt 模型并进行生境适宜性评价。

表 2 环境变量来源及处理

Table 2 Environment variable sources and processing

类型	环境因子	来源及处理
气候变量	年平均气温/℃	
	年平均降水/mm	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
	相对湿度/%	
	距水域距离/m	水域主要包括河流、湖泊、坑塘、沟渠和水库等水域空间。基于苏州市湿地资源矢量数据, 在 ArcGIS 10.8 中计算欧氏距离得到
	土地利用类型	以 2022 年 Landsat-8 遥感卫星数据(http://www.gscloud.cn/) 为数据源, 通过 ENVI 5.3 平台用监督分类法进行解译, 依据国家标准 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》, 结合研究区特征, 将数据修正为水域、林地、草地、耕地、建设用地和未利用地 6 个类型
	归一化植被指数	以 2022 年 Landsat-8 遥感卫星影像为数据源, 在 ArcGIS 10.8 中处理得到
生境变量	高程/m	在中国科学院地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/) 获取 GDTM 30 m 分辨率数据集
	坡度/(°)	在 ArcGIS 10.8 中计算坡度
	距道路距离/m	在 Open Street Map(https://www.openstreetmap.org/) 上获取苏州市道路数据, 在 ArcGIS 10.8 中计算欧氏距离得到
	夜间灯光指数	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
干扰变量		

2 研究方法

2.1 基于 MaxEnt 模型的生境源地识别

生境源地是区域内物种交流和迁移扩散的核心区域, 对个体或群落的生存至关重要^[7]。生境源地的识别需要统筹斑块供给物种高适宜生境方面的功能属性及结构连通性方面的空间属性^[11]。首先, 以 MaxEnt 模型评价苏州市受胁水鸟生境适宜性。将目标水鸟分布点和环境变量输入 MaxEnt 3.4.4, 随机选取 75% 的点位作为训练数据进行分布预测, 剩余的 25% 用于模型验证, 模型重复运行 10 次^[12]。采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC) 下的面积(area under curve, AUC) 值对结果精度评价。其中, ROC 曲线的横坐标为 1-特异性(1-specificity) 即假阳性率, 表示实际不存在物种分布但预测为存在的概率; 纵坐标为灵敏度(sensitivity) 即真阳性率, 表示实际存在物种分布且预测为存在的概率。AUC 值范围为 0~1, 越接近 1 表明结果精度越高^[28]。根据模型输出的平均生境适宜性指数(habitat suitability index, HSI) 对受胁水鸟生境适宜性进行评价。

其次, 运用 ArcGIS 10.8 筛选出高适宜生境内 HSI 值大于 0.9^[13] 且面积大于 50 hm²^[24–25] 的斑块。在此基础上, 用斑块重要性指标量化斑块在维持水鸟迁移扩散时的相对重要程度, 以整体连通性指数(IIC) 和可能连通性指数(PC) 均分权重得到斑块重要性指数(dI), 选取 dI>1 为生境源地^[9]。考虑到目标水鸟在越冬地的日常活动具有一定空间尺度, 因此依据水鸟的日常觅食等行为特征^[29], 以目标水鸟平均觅食活动范围 13 km^[30–31] 作为斑块连通距离阈值, 并将连通概率设定为 0.5^[6], 在 Conefor 2.6 软件中计算 IIC 和 PC。计算公式详见文献[6]。

2.2 阻力面构建与廊道提取

生境适宜性通常与区域内生物多样性呈正相关^[32]。在水鸟的日常活动中, 食物和水源分布不均、人为干扰强度差异等因素将会支持或限制其在地区内的迁移扩散^[29]。MaxEnt 模型通过综合考虑影响目标水鸟活动的共性变量测度生境适宜性, 反映水鸟对生存条件的响应, 一定程度上量化其在迁移扩散时的受阻程度, 因此可通过生境适宜性值的倒数表征水鸟迁移扩散所遇阻力^[32]。本研究利用 ArcGIS 10.8 中

栅格计算器计算目标水鸟生境适宜性值倒数，即逆值构建阻力面。

廊道是物种在源地间迁移扩散的低阻力通道，连通着生境网络内各要素流动^[33]。本研究利用电路理论的Linkage Mapper工具中“Build Network and Map Linkages”模块，并在ArcGIS 10.8中载人生境源地和阻力面数据生成最小成本路径(least cost paths, LCP)作为廊道^[4]。结合前人研究及水网特征^[33]，分别设置100、200、600、1 200和2 000 m的廊道宽度，计算各廊道内水鸟分布点和土地利用类型面积占比变化，根据变化拐点确定廊道适宜宽度。

2.3 生境夹点和生境障碍点判定

生境夹点和生境障碍点是生境网络中生态保护和修复的关键区^[13]，其中，生境夹点是物种沿着廊道迁移扩散必经的重要区域，承担“踏脚石”功能。该区域的丧失极可能阻断物种在源地间迁移扩散。借助Pinchpoint Mapper工具，选择“all to one”模式迭代计算获取电流密度图，运用自然断点法取高电流密度区域作为夹点^[4]。

生境障碍点是指严重阻碍物种在源地间迁移扩散的断裂区域。这些区域生态功能的修复能够在较大程度上提升网络的连通性。借助Barrier Mapper工具，设置50~200 m探测半径和50 m步长，采用移动窗口法判定障碍点^[34]。

3 结果与分析

3.1 生境源地识别

3.1.1 生境适宜性分析 通过MaxEnt模型运算，目标水鸟训练数据和测试数据的AUC值分别为0.879和0.820，表明适宜生境识别与实际分布高拟合度(图2)，适合开展水鸟生境适宜性评价研究。以自然断点法对目标水鸟生境适宜性进行等级划分，得到高适宜区、中适宜区、低适宜区及不适宜区(图3)。

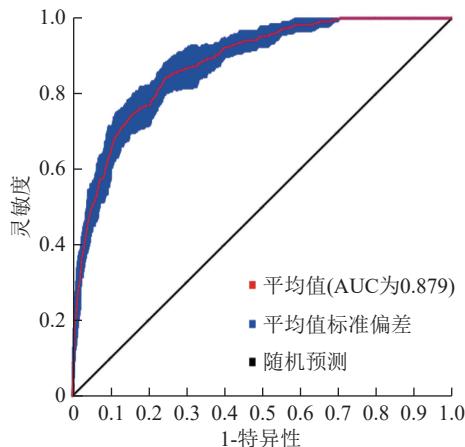
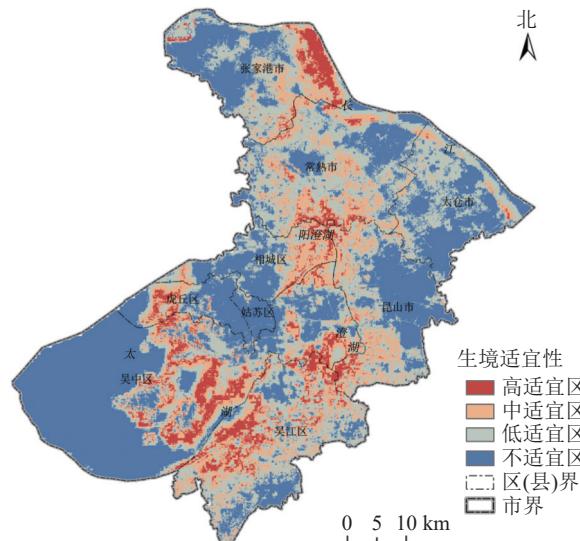


图2 MaxEnt模型的受试者工作特征曲线(ROC)

Figure 2 Receiver operating characteristic curve (ROC) of the MaxEnt model



基于江苏省自然资源厅标准地图服务网站苏S(2024)14号的标准地图制作，底图边界无修改。

图3 目标水鸟生境适宜性分布示意图

Figure 3 Distribution of target waterbird habitat suitability

空间格局上，研究区内目标水鸟生境适宜区分布呈现“南北高，中间低”的特点。其中，高适宜区面积为606.44 km²，占研究区面积的7.00%，集中在长江、阳澄湖、澄湖和太湖沿岸等湿地资源丰富、生态本底良好的区域；中适宜区面积为1 595.90 km²，占研究区面积的18.43%，主要沿高适宜区呈连续面状围合式分布，在高适宜生境和城市空间之间起到重要的缓冲作用；低适宜区面积为2 720.47 km²，占研究区面积的31.42%，主要分布在城镇化建设程度相对较低的区域；不适宜区范围最大，面积为3 734.51 km²，占研究区面积的43.14%，集中分布在各区(县)高度城镇化建设区域。综合来看，苏州市受胁水鸟高适宜生境破碎化程度较高，散点状分布在北太湖、阳澄湖以及澄湖周围，仅在东太湖和张家

港沿江处集中分布少量高完整度且连续的斑块。

3.1.2 生境源地空间分布 基于对研究区生境适宜性分析,识别出生境源地31处,总面积为196.55 km²,主要包括张家港常阴沙生态农业旅游区、常熟铁黄沙湿地、太湖消夏湾湿地、太湖绿洲湿地公园、同里国家湿地公园等片区(图4)。

生境源地空间分布不均,呈组团式聚集在太湖、澄湖、长江及阳澄湖片区,源地之间被高密度建设用地分隔,缺乏衔接区域。太湖沿岸的生境源地相对密集,连通性较好,整体生境适宜性较高,支持着青头潜鸭、小天鹅等众多受胁水鸟的栖息活动;澄湖片区的生境源地处于独特的湖荡环境,聚集性较强,仅次于太湖沿岸;长江沿岸的生境源地则相对隔离,但其面积大且完整性高;阳澄湖沿岸的生境源地面积最小且相对孤立,但具有衔接研究区南北生境源地的功能。总体上,生境源地局部聚集特征明显,源地间跨度较大,对水鸟的安全迁移扩散造成一定的影响(表3)。

表3 生境源地空间位置及用地类型

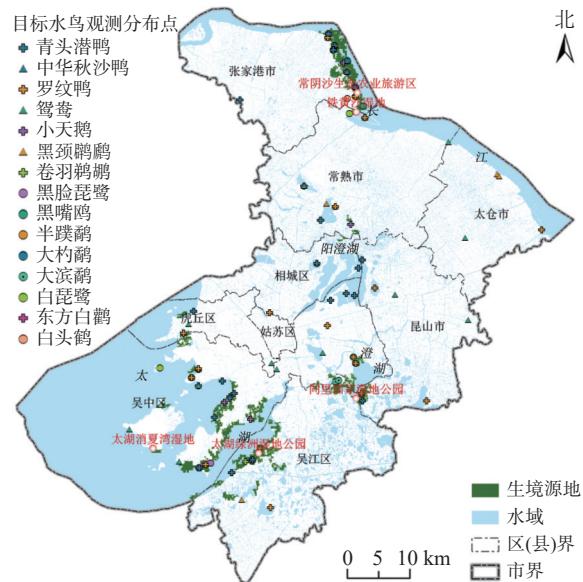
Table 3 Spatial location and land use type of habitat source

空间位置	数量/个	面积/km ²	主要用地类型	主要活动水鸟
太湖沿岸	21	109.83	水域、耕地	青头潜鸭、小天鹅、黑脸琵鹭、黑嘴鸥、卷羽鹈鹕
澄湖沿岸	6	26.94	耕地、水域	青头潜鸭、鸳鸯
长江沿岸	1	56.79	耕地、水域	白琵鹭、半蹼鹬、中华秋沙鸭
阳澄湖沿岸	3	2.99	耕地、水域	小天鹅、罗纹鸭

3.2 廊道空间分布及宽度

目标水鸟生境适宜性逆值构建的阻力面显示:低阻力区域主要分布在长江、阳澄湖、澄湖和太湖周围,即生境源地分布区域。低阻力区域之间被高密度建设用地隔断,阻碍水鸟在源地间迁移扩散。

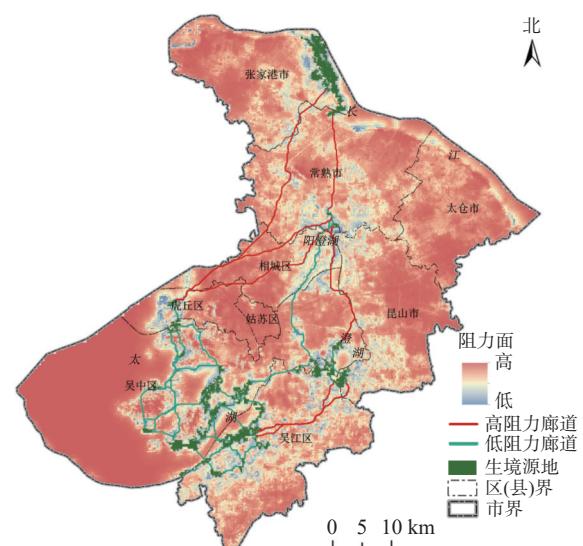
以电路理论模型提取廊道62条,总长度为705.55 km,平均长度为11.38 km。廊道空间分布呈北疏南密的勺状形态。北部生境源地规模大但数量较少,因此连接生境源地之间的廊道较稀疏;南部生境源地较为分散,导致廊道结构相对密集复杂(图5)。电路理论得出的加权成本距离(CWD)与最小成本路径长度(LCPL)的比值能够反映廊道间相对阻力^[8],依据自然断点法分为高阻力廊道和低阻力廊道。其中,高阻力廊道虽承担着串联研究区南北生境源地的连接廊道,但因平均距离过长,超过目标水鸟日常13 km觅食范围^[30-31],且需跨越高密度建设用地,对水鸟迁移扩散影响较大。低阻力廊道则集中在生态本底较好的太湖和澄湖沿岸,这些廊道干扰较少且跨度短,适合水鸟日常活动需求(表4)。



基于江苏省自然资源厅标准地图服务网站苏S(2024)14号的标准地图制作,底图边界无修改。

图4 生境源地空间分布示意图

Figure 4 Spatial distribution of habitat source



基于江苏省自然资源厅标准地图服务网站苏S(2024)14号的标准地图制作,底图边界无修改。

图5 廊道空间分布及阻力大小示意图

Figure 5 Spatial distribution and resistance of corridor

表4 不同阻力廊道的长度及占廊道总长度的百分比

Table 4 Length of different resistance corridors and their percentage in the total length of corridors

廊道	CWD/ LCPL	数量/条	总长度/km	平均长度/km	占比/%
高阻力廊道	5.21~9.79	9	373.51	41.50	52.94
低阻力廊道	1.29~5.20	53	332.04	6.26	47.06

说明: CWD. 加权成本距离; LCPL. 最小成本路径长度。

廊道宽度是水鸟安全迁移扩散的关键影响因素。相关研究认为: 水鸟迁徙的廊道宽度为1000 m^[33], 通过不同宽度廊道内用地类型面积变化拐点来确定。本研究中水域和耕地面积占比随廊道宽度增加先缓慢下降后快速下降, 建设用地先缓慢增加后快速增加, 而水鸟分布点占比持续增加后逐渐趋缓, 因此变化拐点为600 m(表5)。综合考虑廊道用地类型和水鸟分布点占比情况, 最终设定廊道适宜宽度为600 m。

表5 不同廊道宽度内用地类型面积及分布点占比

Table 5 Proportion of land use type area and distribution points in different corridor widths

宽度/m	水域/%	耕地/%	林地/%	草地/%	建设用地/%	未利用地/%	分布点/%
100	35.2	32.5	14.7	1.1	10.3	6.2	54.7
200	35.1	31.9	14.3	1.3	11.0	6.4	61.3
600	34.5	31.8	13.4	1.1	12.5	6.7	72.0
1200	32.3	29.7	13.0	1.1	16.1	7.8	72.0
2000	30.8	28.4	12.5	1.2	19.8	7.3	77.3

3.3 生境夹点和生境障碍点空间分布

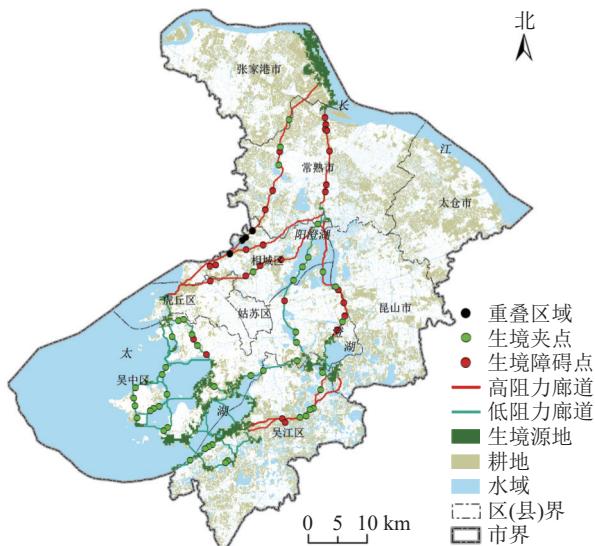
通过电路理论判定出研究区内生境夹点50处, 总面积为11.49 km², 用地类型为水域和耕地。这些夹点集中在阳澄湖、澄湖和太湖沿岸源地边缘及其之间廊道交汇处, 水鸟通过这些区域概率较高, 对维持水鸟迁移扩散至关重要。通过叠加阻力面发现: 这些夹点受周边高阻力建设用地挤压, 极易发生退化。

研究区内生境障碍点28处, 总面积为49.64 km²。障碍点主要沿高阻力廊道呈组团式分布, 集中在常熟市海虞镇、吴中区以及虎丘区和相城区交界处。这些区域以建设用地为主, 人类活动干扰较大, 对水鸟的迁移扩散有较大的影响。此外, 有4处生境夹点和生境障碍点重叠(面积为0.43 km²), 主要位于相城区的漕湖湿地公园周围, 水鸟沿廊道迁移扩散通过这4处重叠区域的概率极高但阻力较大, 亟需采取措施修复(图6)。

3.4 生境网络构建与特征分析

基于苏州2022年受胁水鸟分布点及生态资源现状, 构建了包括31处生境源地、62条廊道以及50处生境夹点和28处生境障碍点的生境网络, 承载15种受胁水鸟的栖息(图6)。

生境网络总体上形成清晰的闭环形态和复杂的网络结构, 但呈现出明显的空间连通性差异。网络的连通性受益于苏州市南北部生态本底较佳的长江、阳澄湖、澄湖以及太湖周围低阻力廊道, 为水鸟日常迁移扩散提供较好的支持, 且周围散布着“踏脚石”功能的生境夹点, 有效增强了生境网络的连通性。连接廊道单一且需跨过高密度建设用地, 网络中部连通性较弱, 极易受到外界干扰导致断裂, 削弱网络整体连通性。未来应重点加强其生态建设, 可结合城市中湖泊、河流和湿地公园等进行生境夹点增护、生境障碍点修复等方式来疏通廊道阻力, 提升网络整体功能及连通性。



基于江苏省自然资源厅标准地图服务网站苏S(2024)14号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图6 苏州市受胁水鸟生境网络示意图

Figure 6 Threatened waterbird habitat network of Suzhou

4 讨论

4.1 市域尺度上生境网络构建的可靠性

本研究探索能反映市域尺度下水鸟迁移扩散这一生态过程的生境网络构建方法，并综合多种方法形成“源地识别—廊道提取—适宜廊道宽度确定—生境夹点和障碍点定位”的生境网络定量构建模式，深化了生境网络构建研究。

MaxEnt 模型为生境源地识别提供有效支撑。虽然所研究的受胁水鸟分布的观测记录较少，但 MaxEnt 模型判别出的适宜生境较为理想，与实际分布高度拟合。在此基础上结合斑块重要性指数识别生境源地，与 XU 等^[35]基于 MSPA 识别的苏州市生态源地较为一致，但数量较少且破碎化严重。可能的原因是受胁水鸟对湿地环境高度敏感^[25]，仅在生态较佳的江河湖泊沿岸零散分布，同时也客观反映出受胁水鸟对生境需求的响应。

本研究结果能够有效地表征水鸟在地区迁移扩散的特点。从受胁水鸟的行为特征出发，运用生境适宜性倒数构建阻力面，以电路理论模型模拟受胁水鸟的迁移扩散路径，明确了多条符合水鸟实际行为特征的廊道，与 XU 等^[35]利用 MCR 模型识别的苏州市生态廊道接近，但北部沿江廊道较稀疏。可能的原因是太仓市沿江港口众多，人为活动干扰水鸟栖息，导致该区域无廊道连接。这一结果充分反映人类活动对受胁水鸟的潜在阻碍影响，也在一定程度上反映所构建的阻力面能够有效表征受胁水鸟对生存条件的实际响应。此外还确定了生境夹点和生境障碍点的位置。这些结果符合研究区实际情况，验证了生境网络构建的可靠性。

4.2 适宜的廊道宽度可保障功能发挥

廊道需满足一定宽度才能发挥生态功能^[14]。池源等^[36]认为：过窄的廊道会降低敏感物种的生态连接效果，并增加边缘效应，但过宽也可能增加物种迁移扩散干扰风险。当廊道宽度达到阈值时，所支持的鸟类边缘种数量会趋于稳定。本研究发现：当廊道宽度增加至 600 m 时，廊道内受胁水鸟分布点占总分布点的比值增至 72%，并趋于稳定。可能的原因是苏州优良的生态本底为水鸟提供了多种觅食替代区，因此廊道内受胁水鸟分布点没有随着廊道宽度的增加而增加。部分水鸟分布点远离廊道，表明 600 m 宽度的廊道可较大程度保障研究区内受胁水鸟数量稳定。廊道内以水域和耕地为主，符合陈心桐等^[37]研究指出的水域和耕地是保障水鸟栖息和觅食的关键用地类型。综上所述，廊道宽度为 600 m 时最为适宜，这也符合 YANG 等^[38]提出的宽度为 500~1 000 m 的廊道能够保障水鸟安全迁移扩散的结论。

4.3 生境网络优化建议

本研究识别的生境源地与《江苏省生态空间管控区域规划》的苏州市生态空间管控区域高度重叠，受人为影响较小。生境夹点和生境障碍点作为生境网络中生态保护和修复的关键区^[13]，是对苏州市水鸟多样性保护策略的重要补充和完善，应优先关注生境夹点和生境障碍点的保护与修复。①精准定位夹点，精细施策提升质量。优先将生境源地相邻的夹点纳入保护范围，促进生境质量提升，增强生态系统的稳定性。其次，应加强对挤压在建设用地夹点周围环境的监测和管理，控制建设强度、降低建设干扰。同时加强耕地附近夹点与周边湖荡坑塘的衔接，形成夹点组团，扩大斑块面积，缩短廊道长度，为水鸟提供栖息和迁移缓冲。②构建缓冲屏障，消减障碍点影响。北部(常熟)障碍点集中，主要受当地规模农业生产影响。在综合考虑水鸟迁徙规律的基础上，采取相关措施降低农业生产的干扰强度，将生产空间作为自然保护地的补充类型。中部如虎丘区和相城区交界处的连续带状障碍点，可结合沿线河流及其绿带构建缓冲屏障，为水鸟迁移提供连续性空间。此外，尤其要注意修复生境夹点和生境障碍点重叠区，修复后可极大地降低水鸟迁移扩散的阻断影响。

5 结论

本研究在市域尺度上，通过 MaxEnt 模型和电路理论探索苏州市受胁水鸟生境网络构建方式，以“源地识别—廊道提取—适宜廊道宽度确定—生境夹点和障碍点定位”模式定量构建了包括 31 处生境源地、62 条廊道以及 50 处生境夹点和 28 处生境障碍点的生境网络。构建的生境网络能够较可靠地反映水鸟迁移扩散需求，并提出相应的生境网络优化建议。研究结果可为苏州市水鸟多样性保护提供决策支

持，也为市域尺度生物多样性保护提供借鉴。

需要说明的是，本研究所构建的生境网络仅反映现有受胁水鸟监测数据的覆盖程度。后续研究可以整合受胁水鸟的生态习性参数(如觅食半径、飞行高度阈值)与高精度分布点数据，重点量化区域尺度下生境源斑块面积阈值、生态廊道拓扑结构及夹点空间分布对水鸟迁徙路径选择的交互影响机制。

6 参考文献

- [1] 吴未, 张敏, 许丽萍, 等. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4897–4906.
WU Wei, ZHANG Min, XU Liping, et al. The impact of land use change on habitat network: a case study of *Egretta garzetta* in Su-Xi-Chang Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4897–4906.
- [2] OPDAM P, STEINGRÖVER E, von ROOIJ S. Ecological networks: a spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 75(3/4): 322–332.
- [3] FAHRIG L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2003, 34: 487–515.
- [4] 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.
LI Bo, HE Meng, PENG Lin, et al. Research on the construction of ecological network in the high-density urban area of Chongqing based on the migration and diffusion of forest birds[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023, 39(7): 35–39.
- [5] CONNERY K. Biodiversity and urban design: seeking an integrated solution[J]. *Journal of Green Building*, 2009, 4(2): 23–38.
- [6] 曹朔, 陈宇, 许博文, 等. 西安市街区尺度生境网络构建的案例与思考[J]. 中国园林, 2024, 40(5): 104–110.
CAO Shuo, CHEN Yu, XU Bowen, et al. Case and corollaries on the construction of block-scale habitat network in Xi'an[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2024, 40(5): 104–110.
- [7] 曹加杰, 傅剑玮. 基于 InVEST 模型和最小成本路径的城市绿色空间生境网络构建方法研究——以南京为例[J]. 中国园林, 2023, 39(1): 53–58.
CAO Jiajie, FU Jianwei. Research on the construction method of urban green space habitat network based on InVEST Model and least-cost path: a case study of Nanjing[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023, 39(1): 53–58.
- [8] FENG Huamei, LI Yuehui, LI Yueyuan, et al. Identifying and evaluating the ecological network of Siberian roe deer (*Capreolus pygargus*) in Tieli Forestry Bureau, northeast China[J/OL]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01477[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.gecco.2021.e01477](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01477).
- [9] 周燕, 刘梦瑶, 禹佳宁, 等. 基于生境网络构建优化的生物多样性保护规划途径研究[J]. 中国园林, 2024, 40(5): 111–117.
ZHOU Yan, LIU Mengyao, YU Jianning, et al. Biodiversity conservation planning based on habitat network optimization[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2024, 40(5): 111–117.
- [10] 陈群, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 210–218.
CHEN Qun, LIU Pinghui, ZHU Chuanmin. Construction of an ecological security structure in Fuzhou City of Jiangxi Province based on an MCR Model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 210–218.
- [11] 汪洁琼, 李心蕊, 王敏, 等. 基于水鸟栖息地保育的城市滨水生境网络构建与优化策略: 以昆山市为例[J]. 风景园林, 2021, 28(6): 76–81.
WANG Jieqiong, LI Xinrui, WANG Min, et al. Establishing and optimization strategy of urban waterfront habitat network based on waterfowl habitat conservation: a case study of Kunshan City[J]. *Landscape Architecture*, 2021, 28(6): 76–81.
- [12] 陈思明. 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 潜在分布格局的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 6058–6068.
CHEN Siming. Spatial scale effect of potential distribution pattern of *Spartina alterniflora*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(14): 6058–6068.
- [13] 刘俊男, 陈航, 高凯. 基于城市生物多样性保护的环滇池鸟类生境识别与网络构建[J]. 中国园林, 2022, 38(10): 32–37.
LIU Junnan, CHEN Hang, GAO Kai. Identification and network construction of bird habitats around Dianchi Lake based on urban biodiversity conservation[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, 38(10): 32–37.
- [14] 周媛, 黎贝, 李朋瑶, 等. 基于“生态-气候适应性-游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化[J]. 生态学报,

- 2024, **44**(13): 5854–5866.
- ZHOU Yuan, LI Bei, LI Pengyao, et al. Optimization of complex green space ecological network pattern based on the multi-functional coupling of ecology-climate adaption-recreation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(13): 5854–5866.
- [15] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 186–192.
- WU Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 186–192.
- [16] 刘金, 阚品甲, 张正旺. 中国水鸟的物种多样性及其国家重点保护等级调整的建议[J]. 湿地科学, 2019, **17**(2): 123–136.
- LIU Jin, QUE Pinjia, ZHANG Zhengwang. species diversity and suggestions for adjustment of the national protection level of waterbirds in China[J]. *Wetland Science*, 2019, **17**(2): 123–136.
- [17] 白雪红, 王文杰, 蒋卫国, 等. 气候变化背景下京津冀地区濒危水鸟潜在适宜区模拟及保护空缺分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(6): 1001–1011.
- BAI Xuehong, WANG Wenjie, JIANG Weiguo, et al. Simulation of potential suitable distribution of endangered waterfowl and its gap analysis of national nature reserves in Beijing-Tianjin-Hebei Region under climate change scenarios[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 1001–1011.
- [18] International Union for Conservation of Nature. *The IUCN Red List of Threatened Species*[EB/OL]. 2023-01-01[2024-08-26]. <http://www.iucnredlist.org/.html>.
- [19] 张雁云, 郑光美. 中国生物多样性红色名录——脊椎动物: 第2卷 鸟类[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- ZHANG Yanyun, ZHENG Guangmei. *China's Red List of Biodiversity: Vertebrates Volume II, Birds*[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [20] YANG Hongyan, CHEN Bing, BARTE M, et al. Impacts of tidal land reclamation in Bohai Bay, China: ongoing losses of critical Yellow Sea waterbird staging and wintering sites[J]. *Bird Conservation International*, 2011, **21**(3): 241–259.
- [21] 张强, 马克明, 李金亚, 等. 不同尺度下停歇点湿地对迁徙水鸟的影响研究综述[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2520–2529.
- ZHANG Qiang, MA Keming, LI Jinya, et al. The effect of stopover wetlands on migratory waterbirds at different scales: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2520–2529.
- [22] 姜琳琳, 张怡, 杨羽佳, 等. 苏州湿地鸟类多样性热点时空分布变化及其影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2024, **40**(3): 386–397.
- JIANG Linlin, ZHANG Yi, YANG Yujia, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of bird diversity hotspots in Suzhou wetland based[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, **40**(3): 386–397.
- [23] 李丁男. 中国受胁雁鸭类的地理分布及保护状况研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- LI Dingnan. *Geographical Distribution and Protection Status of Threatened Species of Anatidae in China*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [24] WHITE C L. *Habitat Value of Created Wetlands to Waterbirds in Golf Course Landscapes*[D]. Gainesville: University of Florida, 2003.
- [25] WANG Cheng, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al. Study on habitat suitability and environmental variable thresholds of rare waterbirds[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2021, **785**: 147316[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147316](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147316).
- [26] 李晖, 刘彦, 黄伊琳, 等. 基于Maxent模型的深圳湾鸟类热点生境判别及修复研究[J]. 中国园林, 2022, **38**(12): 14–19.
- LI Hui, LIU Yan, HUANG Yilin, et al. Study on the identification and restoration of bird hotspot habitats in Shenzhen Bay based on Maxent Model[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, **38**(12): 14–19.
- [27] ZHANG Ping, HU Yueran, QUAN Youming, et al. Identifying ecological corridors for wetland waterbirds in Northeast China[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2022, **145**: 109620[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109620](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109620).
- [28] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究[D]. 湖南: 湖南农业大学, 2007.
- WANG Yunsheng. *Application of Niche Models in the Risk Assessment of Invasive Alien Species*[D]. Hunan: Hunan Agricultural University, 2007.
- [29] WANG Cheng, ZHOU Yong, ZHANG Huabing, et al. Study on the rare waterbird habitat networks of a new UNESCO World Natural Heritage site based on scenario simulation[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2022, **843**: 157058[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.157058](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157058).
- [30] SUTHERLAND G D, HARESTAD A S, PRICE K, et al. Scaling of natal dispersal distances in terrestrial birds and

- mammals[J/OL]. *Conservation and Ecology*, 2000, 4(1)[2024-08-26]. DOI: [10.5751/ES-00184-040116](https://doi.org/10.5751/ES-00184-040116).
- [31] 孙喆, 陆诗韵. 北京市郊铁路对乡村地区鸟类栖息地连通性的影响及优化[J]. *风景园林*, 2023, 30(4): 50–57.
- SUN Zhe, LU Shiyun. Influence of Beijing suburban railway on bird habitat connectivity in rural areas and optimization thereof[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(4): 50–57.
- [32] QIAN Minyan, HUANG Yuting, CAO Yarong, et al. Ecological network construction and optimization in Guangzhou from the perspective of biodiversity conservation[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117692[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.117692](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117692).
- [33] SUN Xiaoping, SHEN Jiamin, XIAO Yang, et al. Habitat suitability and potential biological corridors for waterbirds in Yancheng coastal wetland of China[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110090[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2023.110090](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110090).
- [34] 李婷, 李朝奎, 从政, 等. 基于遥感生态指数的大冶矿区生态网络格局构建及优化[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 601–610.
- LI Ting, LI Chaokui, CONG Zheng, et al. Construction and optimization of ecological network pattern in Daye mining area based on remote sensing ecological index [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 601–610.
- [35] XU Xinlei, WANG Siyuan, RONG Wenzhuo. Construction of ecological network in Suzhou based on the PLUS and MSPA models[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110740[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.ecolind.2023.110740](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110740).
- [36] 池源, 石洪华, 丰爱平. 典型海岛景观生态网络构建——以崇明岛为例[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 433–440.
- CHI Yuan, SHI Honghua, FENG Aiping. Typical island landscape ecological network establishment: a case study of Chongming Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(3): 433–440.
- [37] 陈心桐, 何彬方, 霍彦峰, 等. 升金湖湿地水鸟越冬期季节性景观格局变化及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(8): 1653–1663.
- CHEN Xintong, HE Binfang, HUO Yanfeng, et al. Seasonal landscape pattern changes of Shengjin Lake and its influencing factors during the wintering period of waterbirds[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(8): 1653–1663.
- [38] YANG Xitao, LIU Wei, LI Shuangshuang, et al. Restoration of urban waterbird diversity: a case study of the construction of a waterbird ecological corridor in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, southern China[J/OL]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 39: e02277[2024-08-26]. DOI: [10.1016/j.gecco.2022.e02277](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02277).