基于生境网络的苏州水鸟类群关键保护区划定*

马 奥[1] 朱 颖[1,2] 钱 达[1] 李 欣[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定位观测研究站 江苏苏州 215000
3 苏州市湿地保护管理站 江苏苏州 215000

摘要：【目的】构建水鸟类群生境网络并划定关键保护区，为维持水鸟种群多样性和种群持续安全提供科学依据。【方法】以苏州为研究区，选取不同类群水鸟分布点及相关环境因子数据，结合 MaxEnt 模型和斑块重要性指数识别生境源地，利用电路理论模型确定廊道，构建水鸟类群生境网络，在此基础上判定生境夹点和障碍点并划定关键保护区。【结果】识别生境源地 141 处，面积 1 794.47 km^2，呈组团式聚集在阳澄湖、澄湖、太湖以及长江沿岸；提取廊道 269 条，总长度 1 777.93 km，其中低阻力廊道 110 条，高阻力廊道 159 条；雁鸭类、鹳鹮类和鸻鹬类廊道适宜宽度 100 m，秧鸡类廊道适宜宽度 60 m，鸻鹬类和鹭类廊道适宜宽度 200 m，鸥类廊道适宜宽度 600 m；判定生境夹点 178 处和障碍点 250 处。在此基础上划定 6 处关键保护区。【结论】划定的关键保护区呈现“一核、两带、多节点”的空间格局，拥有良好的生态本底，但需进一步加强对其保护提升。研究结果可以反映不同水鸟类群的需求差异，为苏州水鸟种群多样性保护提供决策支持。

关键词：水鸟类群；生境网络；关键保护区；MaxEnt 模型；苏州
DOI：10.12169/zgcsly.2025.05.12.0001

Identification of Key Protected Areas for Waterbird Guilds in Suzhou Based on Habitat Networks

Ma Ao[1] Zhu Ying[1,2] Qian Da[1] Li Xin[2,3]

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

Abstract: 【Objective】 A habitat network for waterbird guilds and designate key protected areas is constructed so as to provide scientific evidence for maintaining the diversity and long-term safety of waterbird population. 【Method】 Taking Suzhou as the study area, we collect data on distribution points of waterbird guilds and related environmental factors and recognize habitat sources using the MaxEnt model and patch importance index. Corridors are determined using a circuit theory model, and a waterbird habitat network is constructed. Based on this, habitat pinch points and barrier points are identified, and key protected areas are delineated. 【Result】 A total of 141 habitat sources are recognized covering an area of

收稿日期：2025-05-12
* 基金项目：教育部人文社会科学研究项目（23YJAZH231）；中央财政林业科技推广示范资金项目（苏［2024］TG10）；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定位观测研究站项目
第一作者：马奥（1998-），男，硕士生，研究方向为地域景观生态规划与生态修复。E-mail：XyMarioMo@163.com
通信作者：钱达（1975-），男，硕士，讲师，研究方向为风景园林规划设计与理论。E-mail：172953135@qq.com

1 794.47 km^2, which aggregate in a clustered way around Yangcheng Lake, Cheng Lake, Tai Lake, and along the Yangtze River; 269 corridors are extracted with a total length of 1 777.93 km, including 110 low-resistance corridors and 159 high-resistance corridors; the suitable corridor width is 100 m for geese and ducks, grebes, and cormorants, 60 m for rails, 200 m for plovers, sandpipers, and egrets, and 600 m for gulls; 178 habitat pinch points and 250 barrier points are identified, based on which 6 key protected areas are delineated.【Conclusion】The delineated key protected areas present a spatial pattern of "one core, two belts and multiple points", which indicates a good ecological foundation, but more efforts should be taken to upgrade their protection. The findings can reliably reflect the differences in the needs of various waterbird guilds, providing decision-making support for the conservation of waterbird diversity in Suzhou.
Keywords: waterbird guild; habitat network; key protected area; MaxEnt model; Suzhou

水鸟作为湿地生态系统的重要指示物种，其种群多样性能有效表征湿地健康状况[1]。随着水鸟生境破碎化或规模化消失，其种群数量锐减及多样性持续下降[2-3]。生境网络作为将生境斑块和廊道组织链接成面向物种保护的空间网络[4]，是应对生境破碎化、维护水鸟种群多样性和种群持续安全的重要途径[5]。

生境网络的构建主要遵循"生境源地识别-阻力面构建-廊道提取"范式[6]，在此基础上划定关键保护区并进行修复，能够实现在最小面积约束下达成生态恢复的全局最优解[7]。当前，针对水鸟生境网络的研究多聚焦于单一或少数同类群水鸟保护[4-5]，对不同类群水鸟需求差异构建生境网络的研究文献尚不多见。水鸟生境网络构建的核心在于考虑物种迁移扩散的生态过程，不同类群的需求差异会影响生境网络分布和关键保护区划定的科学性[8]。因此，构建满足水鸟类群需求差异的生境网络并划定最有价值的保护区域，采取针对性保护提升保护效率[7]，对维持水鸟最低种群数量和水鸟种群多样性具有积极作用。

生境源地的识别和廊道提取是生境网络构建的关键要素。MaxEnt 模型具有依据物种分布点及环境因子模拟物种适宜生境的优势[9]，克服了 MSPA[10]、InVEST[11]模型方法难以准确反映物种对生境需求的局限性，是当前应用于生境源地识别的重要方法。针对廊道的提取，电路理论模型能够模拟物种随机迁移扩散过程并探索出多条符合物种行为特征的路径（即廊道[5]）；同时，根据电流密度的高低还能有效判定影响生境源地间生态流通性的关键点，即生境夹点，以及阻碍物种在生境源地间迁移扩散的断裂区域，即障碍点，这二者常被视为关键保护区，对二者的修复可显著提升网络连通性[6-7,9]。

苏州地处典型水网地区，是东部地区重要的中心城市及东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上的重要中转站[12]。本研究以苏州为研究区，基于"MaxEnt-Conefor-电路理论"模型构建生境网络，判定生境夹点和障碍点，并据此划定融合不同水鸟类群需求属性的关键保护区，以期为苏州水鸟种群多样性保护提供决策支持。

1 研究区概况

苏州地处太湖和长江下游交汇处，总面积 8 657.32 km^2。域内水网交错、河湖众多。苏州湿地面积 33.20 万 hm^2，占全市国土总面积的 34.6%，其中湖泊水面、河流水面为主要湿地类型。2023 年苏州记录到水鸟 322 种，其中国家一级、二级保护动物 64 种，苏州已成为区域水鸟多样性保护的热点地区。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究在确定适用于研究的水鸟类群名录基础上，结合环境因子间相关性分析以及各环境因子对 MaxEnt 模型贡献率，确定各水鸟用于建模的环境因子。

2.1.1 水鸟分布数据及类群划分

1）数据来源。网络数据源自中国观鸟记录中心（http://www.birdreport.cn/）和全球生物多样性信息数据中心（http://www.gbif.ory/）的苏州市水鸟观测记录；实地调查数据源自 2023 年专业团队对苏州太湖、长江等重要湿地开展的鸟类调

查数据，见《2023 苏州市湿地保护年报》。

2）数据处理。为提高搜集到的 10 436 个分布点数据的质量和可用性，运用 SDMtoolbox 中“Spatially Rarely Occurrence Data for SDMs”工具消除数据空间自相关带来的模型偏差，即在每 30 m×30 m 网格中对同种水鸟仅存留一个分布点，保留具有 15 个以上分布点的水鸟[12]，最终得到 2 721 个有效分布点。

3）水鸟类群划分。参考相关研究[13]，将 2 721 个有效分布点中所包含的 40 种水鸟划分为 7 种类群：雁鸭类、鹳鹮类、鸬鹚类、秧鸡类、鸻鹬类、鸥类和鹭类（表 1）。

表 1　水鸟类群组成名录

水鸟类群	编号	水鸟名称	生态习性及栖息需求
雁鸭类	A1	小天鹅 *Cygnus columbianus*	游禽，常在距栖息地 10 km 范围内觅食；偏好在 20 hm^2 以上的湖泊、坑塘等水域栖息[14]
	A2	鸳鸯 *Aix galericulata*	
	A3	赤膀鸭 *Mareca strepera*	
	A4	罗纹鸭 *Mareca falcata*	
	A5	绿头鸭 *Anas platyrhynchos*	
	A6	斑嘴鸭 *Anas zonorhyncha*	
	A7	针尾鸭 *Anas acuta*	
	A8	绿翅鸭 *Anas crecca*	
	A9	琵嘴鸭 *Spatula clypeata*	
	A10	红头潜鸭 *Aythya ferina*	
	A11	青头潜鸭 *Aythya baeri*	
	A12	白眼潜鸭 *Aythya nyroca*	
	A13	凤头潜鸭 *Aythya fuligula*	
鹳鹮类	B1	小鹳鹮 *Tachybaptus ruficollis*	游禽，觅食范围通常 3 km 左右；偏好栖息在湖泊等开敞水域[15]
	B2	凤头鹀鹮 *Podiceps cristatus*	
鸬鹚类	C1	普通鸬鹚 *Phalacrocorax carbo*	游禽，觅食范围为 20 km 左右；常在开阔水域栖息[16]
秧鸡类	D1	白胸苦恶鸟 *Amaurornis phoenicurus*	涉禽，常在距营巢地 2 km 范围内觅食；栖息在植被丰富水域[17]
	D2	黑水鸡 *Gallinula chloropus*	
	D3	白骨顶 *Fulica atra*	
鸻鹬类	E1	黑翅长脚鹬 *Himantopus himantopus*	涉禽，多栖息在浅滩、沼泽等环境；觅食范围因体型有所差异，但整体平均在 15 km 左右[18]
	E2	凤头麦鸡 *Vanellus vanellus*	
	E3	灰头麦鸡 *Vanellus cinereus*	
	E4	金眶鸻 *Charadrius dubius*	
	E5	水雉 *Hydrophasianus chirurgus*	
	E6	扇尾沙锥 *Gallinago gallinago*	
	E7	鹤鹬 *Tringa erythropus*	
	E8	青脚鹬 *Tringa nebularia*	
	E9	林鹬 *Tringa glareola*	
	E10	矶鹬 *Actitis hypoleucos*	
鸥类	F1	红嘴鸥 *Chroicocephalus ridibundus*	涉禽，常在以栖息或筑巢地为圆心 20 km 半径范围内觅食；常栖息在湖泊和沿江沼泽地带[18]
	F2	须浮鸥 *Chlidonias hybrida*	
鹭类	G1	黄斑苇鳽 *Ixobrychus sinensis*	涉禽，日常觅食范围在 10 km 左右；多栖息滩涂沼泽、湖泊水库及稻田地[19]
	G2	夜鹭 *Nycticorax nycticorax*	
	G3	绿鹭 *Butorides striata*	
	G4	池鹭 *Ardeola bacchus*	
	G5	牛背鹭 *Bubulcus coromandus*	
	G6	苍鹭 *Ardea cinerea*	
	G7	大白鹭 *Ardea alba*	
	G8	中白鹭 *Ardea intermedia*	
	G9	白鹭 *Egretta garzetta*	

2.1.2　环境因子数据

1）环境因子筛选与预处理。结合水鸟的生态习性及栖息需求特征[12,17,20-21]，从气候、生境和干扰这 3 方面筛选出 27 个环境因子（表 2）。①气候因子数据：19 个气候因子来自全球气候数据中心（https://www.worldclim.org）。②生境因子数据：土地利用类型数据以 2023 年 Landsat-8 遥感卫星数据（http://www.gscloud.cn/）为基础，在 ENVI5.3 平台进行监督分类法解译，依据《土地利用现状分类》（GB/T21010-2017），并结合研究区特征将其修正为水域、林地、草地、耕地、建设用地和未利用地 6 个类型。NDVI 以 2023 年

Landsat-8 遥感卫星数据为基础，运用 ArcGIS10.8 软件处理。距水域距离是通过苏州市湿地保护管理部门所提供的湿地水域基础数据，并在 ArcGIS 10.8 软件中计算欧式距离得出。海拔取自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）的 GDTM 30 m分辨率数据集，并在 ArcGIS 10.8 中计算坡度和坡向。③干扰因子数据：距道路距离通过 Open Street Map（https://www.openstreetmap.org/）获取，在 ArcGIS10.8 软件中计算欧式距离。夜间灯光指数取自资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/）数据集。在此基础上将 27 个环境因子按研究区范围裁剪并重采样为 30 m×30 m 分辨率栅格数据，投影坐标统一为 WGS_1984_UTM_Zone_50N，保存为 ASCII 格式。

2）环境因子间相关性分析及各环境因子贡献率确定。不同环境因子对各水鸟生境选择的影响及贡献具有差异性。为避免环境因子产生多重共线性而导致 MaxEnt 模型过度拟合，利用 ArcGIS10.8 中波段集统计算得到各个环境因子相关系数矩阵，并将所有环境因子输入 MaxEnt 模型预试验得到各环境因子对不同水鸟生境选择的初步贡献率。

3）各水鸟建模因子确定。对于相关性系数 $|r|>0.8$ 的环境因子，优先保留对 MaxEnt 模型贡献率高的，剔除贡献率<1%的环境因子[21]，最终确定各水鸟用于建模的环境因子（表 2）。

表 2 用于 MaxEnt 模型的环境因子

类型	环境因子	用该因子建模的水鸟编号(表 1)
气候因子	年均气温	A2、A3、A4、A5、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B2、E1、E5、E7、G1、G3、G6
	气温日均差	A3、A9、E3、E4、E10
	等温性	A11、A12、E1、E2、E5、E7、F1、F2、G4、G7、
	气温季节性变化系数	A10、A11、A12、G1
	最热月份最高气温	A1、A2、A4、A5、A6、A7、A8、A9、C1、D3、E4、E5、E8、F2、G1、G2、G3、G4、G6、G9
	最冷月份最低气温	A2、A4、A5、A6、A8、A10、A13、B1、B2、C1、D2、D3、E6、E9、G1、G2、G3、G5、G6、G8、G9
	气温年均差	A1、A7、D1、E8
	最湿季节平均气温	A6、A8、A9、A10、A13、B2、C1、E10、G1、G2、G5、G6、G7、G9
	最干季节平均气温	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	最暖季节平均气温	A3、G5
	最冷季节平均气温	A1、A6、B1、C1、D1、D2、D3、E3、E6、E9、F1、G2、G4、G5、G7、G8、G9
	年降雨量	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	最湿月份降雨量	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E2、E3、E5、F2、G1、G2、G3、G4、G6、G7、G8、G9
	最干月份降雨量	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	降雨季节性变化系数	A2、A4、A5、A6、A8、A10、A12、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、F2、G2、G4、G6、G7、G8、G9
	最湿季节降雨量	A1、A2、A3、A4、A7、A9、B2、E2、F1、F2、G1、G9
	最干季节降雨量	A5、A6、A7、A8、A10、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E4、E5、E6、E10、F1、F2、G1、G2、G4、G5、G7、G8、G9
	最暖季节降雨量	B1、C1、D3、E3、E5、G4、G6、G7
	最冷季节降雨量	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A11、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E3、E4、E6、E8、E9、E10、F1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
生境因子	距水域距离	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	土地利用类型	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	归一化植被指数	A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G6、G7、G8、G9
	海拔	A5、D1、D2、G5
	坡向	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、G1、G2、G3、G4、G5、G8、G9
	坡度	A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A12、B1、B2、C1、D1、D3、E1、E2、E3、E5、E7、E10、F1、F2、G2、G3、G4、G6、G8、G9
干扰因子	距道路距离	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9
	夜间灯光指数	A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10、A11、A12、A13、B1、B2、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8、E9、E10、F1、F2、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9

2.2　水鸟类群生境网络构建

2.2.1　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[11]。研究基于“MaxEnt-Conefor”模型综合识别生境源地，以此统筹生境源地功能和空间属性。

首先，将各水鸟分布点和环境因子数据输入 MaxEnt3.4.4，随机选取 75% 的分布点为训练数据，剩余的 25% 为测试数据。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，AUC 值范围为 0~1，越接近 1 表明结果精度越高。选择模型模拟 10 次的平均生境适宜性指数（habitat suitability index，HSI），并将其导入 ArcGIS 10.8 软件，叠加得到不同水鸟类群适宜生境[9]。

其次，运用 ArcGIS10.8 软件分别筛选各水鸟类群中 HSI 值大于 0.9[9] 且面积大于 30 hm^2[11] 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，通过将整体连通性指数（IIC）和可能连通性指数（PC）均分权重，计算得到斑块重要性指数（dI），选取 dI>1 的斑块为生境源地[19]。利用 Conefor2.6 软件计算 IIC 和 PC。考虑水鸟迁移扩散的生态过程与日常觅食活动有显著关系[22]，将斑块连通阈值设置为各水鸟类群的日常觅食范围（表 1），设定连通概率为 0.5[19]。

2.2.2　阻力面构建

阻力面反映物种在生境源地间迁移的难度。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直接或间接地支持或限制其在地区内的迁移扩散[5]。生境适宜性与区域内生物多样性通常呈正相关[23]。据表 2，MaxEnt 模型通过综合考虑影响水鸟活动的共性环境因子而测度生境适宜性，一定程度上量化水鸟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来表征其迁移扩散所遇阻力。本研究利用 ArcGIS10.8 软件计算水鸟类群生境适宜性值倒数构建阻力面。

2.2.3　廊道提取与宽度确定

本研究利用电路理论模型的 Linkage Mapper 工具中的“Bulid Network and Map Linkages”模块，在 ArcGIS10.8 软件中分别加载各水鸟类群的生境源地和阻力面数据生成最小成本路径（least cost paths，LCP），并提取作为廊道。在此基础上结合廊道的 CWD：LCPL（成本加权距离：最小成本路径长度）的比值判定其阻力，并以自然断点法分为高、低阻力廊道[24]。此外，结合前人研究及水网特征[5, 25]，分别设置 12、30、60、100、200、600 和 1 200 m 的廊道宽度，计算各廊道内用地类型面积占比变化，并根据廊道内用地类型面积占比出现变化拐点的廊道宽度确定廊道适宜宽度。

2.3　水鸟类群关键保护区划定

2.3.1　生境夹点与障碍点判定

运用 Pinchpoint Mapper 工具，选择“all to one”模式迭代计算获取电流密度图；参考相关研究，运用 ArcGIS10.8 中自然断点法将电流密度划分为 5 级并取最高级为生境夹点[9]。借助 Barrier Mapper 工具，设置 30~150 m 探测半径和 30 m 步长，采用移动窗口法识别障碍点；参考相关研究，运用 ArcGIS10.8 中自然断点法将最大改进障碍得分值划为 5 级，最高分值级为生境障碍点[9]。

2.3.2　关键保护区划定

参考相关研究[6-8]，首先运用 ArcGIS10.8 栅格计算器叠加各水鸟类群生境适宜性结果，得到综合生境适宜性；然后叠加各水鸟类群的生境夹点和障碍点，利用 ArcGIS10.8 核密度工具计算其综合核密度；最后以自然断点法划分生境夹点和障碍点的综合核密度，将最高生境适宜性以及最高综合核密度所覆盖范围内的生境夹点和障碍点区域划定为关键保护区。

3　结果与分析

3.1　水鸟类群生境网络构建

3.1.1　生境源地空间分布

通过 MaxEnt 模型计算，目标水鸟（40 种）训练数据和测试数据的平均 AUC 值分别为 0.954±0.019 和 0.889±0.030，表明生境识别结果与实际分布拟合度较高，适宜生境识别结果适用研究。

研究区共识别生境源地 141 处，面积 1 794.47 km^2，以水域和耕地为主（表 3）。各水

鸟类群生境源地空间分布较为相近，均呈组团式聚集于阳澄湖、澄湖、太湖及长江沿岸。

水鸟类群中，雁鸭类、鹬鹬类及秧鸡类生境源地分布相近，呈线面结合式，连通性较好；鸻鹬类生境源地分布广但离散，是长江沿岸唯一有生境源地分布的类群，连通性较差；鸻鹬类生境源地面积最小且相对孤立；鸥类与鹭类生境源地分布相近且聚集显著，集中在澄湖、阳澄湖及东太湖等水域（图 1）。总体上，生境源地呈局部聚集，空间距离较大，对水鸟迁移扩散有一定影响。

表 3 不同水鸟类群生境源地面积及其用地类型占比

水鸟类群	生境源地数量/个	面积/km^2	用地类型面积占比/%					
			水域	林地	草地	耕地	建设用地	未利用地
雁鸭类	19	335.51	47.11	9.08	3.11	29.42	4.38	6.90
鹬鹬类	19	317.45	32.71	15.40	3.63	35.18	4.96	8.12
鸻鹬类	24	258.98	25.88	9.97	3.62	42.84	8.61	9.09
秧鸡类	20	305.68	23.23	13.67	3.31	40.65	9.32	9.82
鸻鹬类	11	102.57	3.74	8.22	4.02	71.95	3.28	8.80
鸥类	23	196.04	11.01	14.05	4.80	54.53	6.66	8.95
鹭类	25	278.24	25.72	13.88	3.81	40.64	6.23	9.73

3.1.2 廊道空间分布

不同水鸟类群的低阻力区均分布在长江、阳澄湖、澄湖和太湖周围，与生境源地分布耦合，但其被中部高密度建设用地割裂，水鸟在生境源地间迁移扩散受阻（图 1）。

在研究区提取廊道 269 条，总长度 1 777.93 km。其中，低阻力廊道 110 条，跨度短且干扰少；高阻力廊道 159 条，跨度长且干扰大。

水鸟类群中，雁鸭类和鹬鹬类廊道围合在中部城区；鸻鹬类廊道依托其广布的生境源地形成横跨南北空间分布；秧鸡类与鸻鹬类相近，即中南部较密集、北部较稀疏；鸥类廊道呈交织网状分布在中南部；鸻鹬类呈月牙状分布在东南部（图 1）。总体上，廊道分布不均，呈团簇状环绕在生境源地周围。

3.1.3 廊道适宜宽度

由图 2 可知，雁鸭类、鹬鹬类、鸻鹬类、鸻鹬类和鹭类的廊道内部土地利用变化呈现共性规律，其中水域和建设用地先快速增加后趋缓，耕地先增加后下降，前三者出现变化拐点的廊道宽度为 100 m，而后二者拐点则为 200 m。秧鸡类廊道中，水域、耕地、林地及建设用地持续增加后趋缓，出现变化拐点的廊道宽度为 60 m。鸥类廊道中，水域和耕地先缓慢增加后下降，建设用地则先持续增加后趋缓，出现变化拐点的廊道宽度为 600 m。综上，建议雁鸭类、鹬鹬类和鸻鹬类廊道适宜宽度为 100 m；鸻鹬类和鹭类适宜廊道

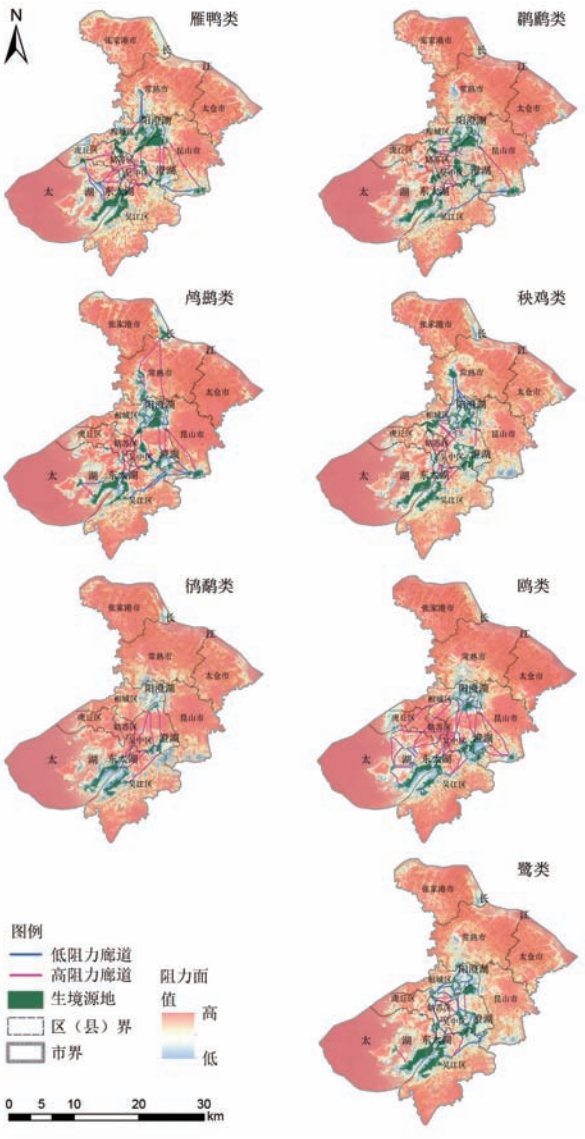


图 1 不同水鸟类群阻力面及廊道

宽度为 200 m；秧鸡类廊道适宜宽度为 60 m；鸥类廊道适宜宽度为 600 m。

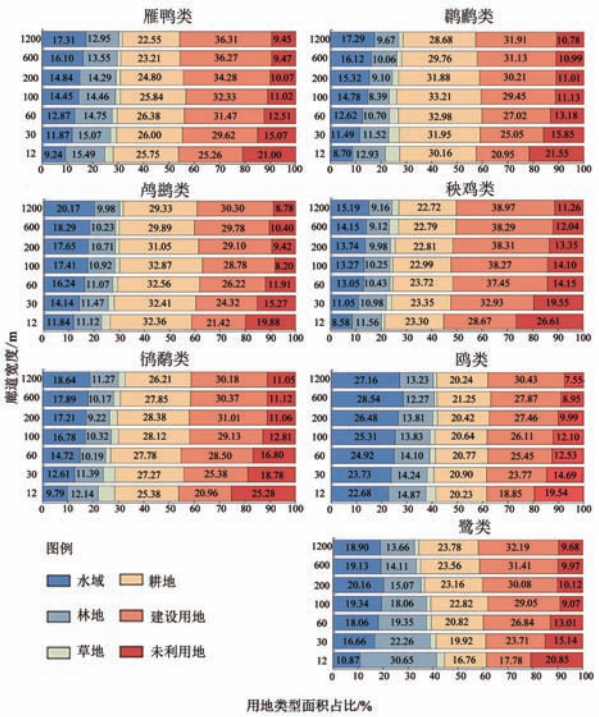


图 2　不同水鸟类群廊道不同宽度内用地类型面积占比

3.2　水鸟类群关键保护区划定

3.2.1　生境夹点空间分布

研究区识别出生境夹点 178 处，总面积 72.53 km^2，以水域和耕地为主，集中分布在长江、阳澄湖、澄湖和太湖沿岸的生境源地周围。

水鸟类群中，雁鸭类、鹈鹕类和秧鸡类的生境夹点分布较一致，聚集在阳澄湖周围并向东太湖延伸；鸻鹬类生境夹点分布较广，由北部沿江至澄湖逐渐密集；鸻鹬类生境夹点零星分散在阳澄湖、澄湖及东太湖沿岸；鸥类生境夹点分布最为密集，聚集在阳澄湖、澄湖及太湖沿岸；鹭类同鸥类较相近，但在太湖沿岸无分布（图 3）。总体上，生境夹点被周边建设用地挤压在狭窄瓶颈地带，面临退化或断裂风险。

3.2.2　生境障碍点空间分布

研究区共判定生境障碍点 250 处，总面积 964.73 km^2，以建设用地为主，主要沿高阻力廊道呈组团分布，受人类活动干扰较大。

水鸟类群中，鹈鹕类、秧鸡类和鹭类生境障碍点分布相近，集中在姑苏区、相城区及吴中区交界处；鸻鹬类生境障碍点在常熟市和昆山市分

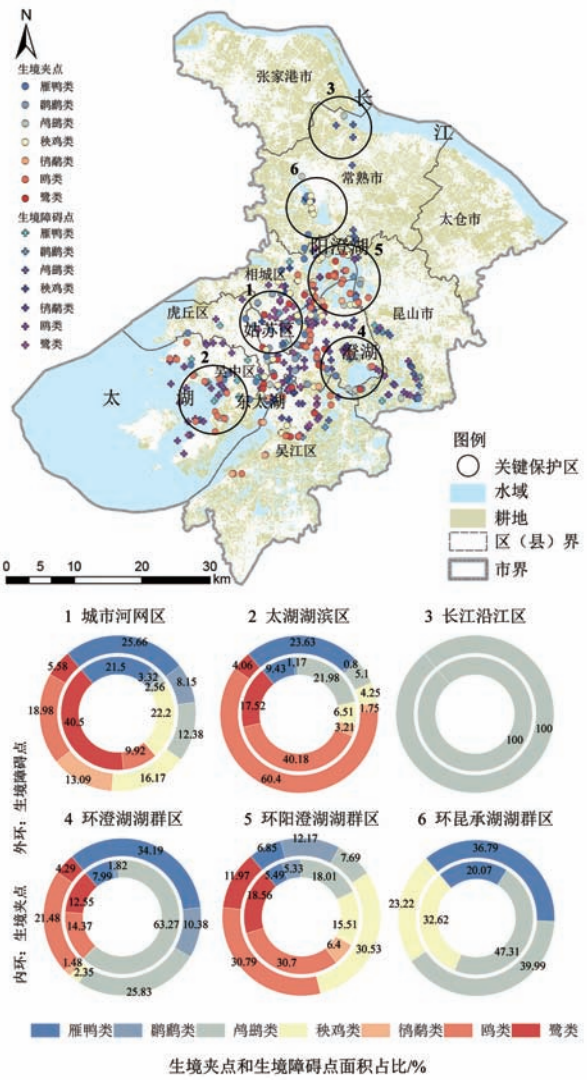


图 3　水鸟类群关键保护区分布及各关键保护区各水鸟类群生境夹点和障碍点面积占比

别存在一处显著聚集；雁鸭类和鸥类生境障碍点分布相近，环绕阳澄湖、澄湖和太湖围合式分布，但鸥类更为密集；鸻鹬类生境障碍点主要在阳澄湖至澄湖、太湖的高阻力廊道上（图 3）。总体上，生境障碍点阻力较大，亟需采取措施修复。

3.2.3　关键保护区划定

研究区共划定关键保护区 6 处（图 3），高度聚集于各水鸟类群的生境夹点和障碍点，并融合各水鸟类群的需求属性。

空间分布上，呈现“一核、两带、多节点”格局。其中，“一核”为中心城区核心湿地群（区域 1），其河网密布，是生境夹点和障碍点最为密集区域。“两带”为环太湖湿地保护修复带（区域 2）、长江沿江湿地保护发展带（区域 3），

分别依托太湖和长江丰厚湿地资源，提供水鸟较佳的栖息和觅食条件。“多节点”为环澄湖群（区域 4）、环阳澄湖群（区域 5）和环昆承湖群（区域 6），其水域、耕地、林地资源丰富。总体上，这些区域拥有良好的生态本底，需进一步优化提升。

4 讨论

Lack[26]指出鸟类能根据环境特征主动选择生境。孙喆和陆诗韵[22]研究进一步表明水鸟迁移扩散与日常觅食活动有显著关系。本研究利用能够反映水鸟主动选择生境偏好的分布点驱动 MaxEnt 模型识别适宜生境，在此基础上将各水鸟类群的日常觅食范围设置为斑块连通阈值，借助 Conefor 模型计算斑块重要性指数以识别生境源地。MaxEnt 模型与 Conefor 模型相结合突破了 MSPA[10]、InVEST[11]等模型的局限性，既能体现水鸟类群对生境的偏好，也可揭示不同水鸟类群的需求差异。

廊道需满足一定宽度才能发挥生态功能[25]，本研究根据水鸟所偏好的用地类型面积占比出现拐点时的廊道宽度确定廊道适宜宽度。陈心桐等[27]揭示水域和耕地为水鸟栖息和觅食提供关键生境支持。本研究设定雁鸭类、鹬鹬类和鸻鹬类廊道适宜宽度为 100 m，秧鸡类为 60 m，鸻鹬类和鹭类为 200 m，鸥类为 600 m。这与 Yang 等[28]提出的水鸟安全迁移扩散的廊道范围（30 ~ 1 000 m）是一致的。

受限于数据可获取性，研究仅基于 2023 年全年的水鸟分布数据构建水鸟类群生境网络并划定关键保护区。后续研究可进一步明确保护优先级，并根据水鸟类群需求差异开展针对性修复策略研究。

5 结论

本研究遵循“生境源地识别-阻力面构建-廊道提取”范式，利用“MaxEnt-Conefor-电路理论”模型构建了 7 种水鸟类群生境网络，在此基础上判定生境夹点和障碍点，并以此划定水鸟类群关键保护区 7 处。这些关键保护区呈现“一核、两带、多节点”的空间格局，需进一步加强对其保护提升。研究结果能反映不同水鸟类群的需求差异，为苏州水鸟种群多样性保护提供决策支持。

参考文献

[1]刘金，阙品甲，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.

[2]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.

[3]王成，刘红玉，李玉凤，等.盐城滨海湿地水鸟类群生境适宜性及生态阈值研究：对栖息地景观结构恢复的启示[J].生态与农村环境学报，2022，38(7)：897-908.

[4]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.

[5]SUN X P，SHEN J M，XIAO Y，et al. Habitat suitability and potential biological corridors for waterbirds in Yancheng coastal wetland of China[J].Ecological Indicators，2023，148：110090.

[6]李佳杰，顾媛媛，邢忠.武汉城市圈“生物迁移-区域降温”复合功能生态网络构建[J].风景园林，2025，32(1)：96-104.

[7]祝诗榕，祝明建，林丰泽，等.基于生态网络构建的国土空间生态修复关键区域识别：以粤港澳大湾区为例[J].中国园林，2024，40(10)：34-40.

[8]LI X X，OU X Y，SUN X Y，et al.Urban biodiversity conservation：a framework for ecological network construction and priority areas identification considering habit differences withinspecies [J]. Journal of Environmental Management，2024，365：121512.

[9]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.

[10]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.

[11]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.

[12]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.

[13]王瑶.澄碧河自然保护区冬季水鸟多样性及其栖息地动态变化研究[D].南宁：广西大学，2021.

[14]BILAL S，RAIS M，ANWAR M，et al.Habitat association of Little Grebe (*Tachybaptus ruficollis*) at kallar kahar lake，Pakistan[J]. Journal of King Saud University：Science，2013，25(3)：267-270.

[15]马嘉慧.普通鸿鹄于野放后从香港越冬地向北迁徙的监测[C]//第十二届全国鸟类学术研讨会暨第十届海峡两岸鸟类学术研讨会论文摘要集.2013.

[16]刘海龙.基于过程视角的城市地区生物保护规划：以浙江台州为例[J].生态学杂志，2010，29(1)：8-15.

[17]WHITE C L.Habitat value of created wetlands to waterbirds in golf course landscapes[D].Florida：University of Florida，2003.

[18]JIANG H X，HOU Y Q，CHU G Z，et al.Breeding population dynamics and habitat transition of Saunders's Gull *Larus saundersi* in Yancheng National Nature Reserve，China[J].Bird Conservation International，2010，20(1)：13-24.

[19]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.
[20]杨云峰.城市湿地公园中鸟类栖息地的营建[J].林业科技开发，2013，27(6)：89-94.
[21]刘晶晶，张舟，张权，等.基于参数优化 MaxEnt 模型的气候变化下青头潜鸭(*Aythya baeri*)在长江流域的潜在适生区预测[J].生态与农村环境学报，2025，41(3)：295-307.
[22]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.
[23]QIAN M Y，HUANG Y T，CAO Y R，et al.Ecological network construction and optimization in Guangzhou from the perspective of biodiversity conservation [J]. Journal of Environmental Management，2023，336：117692.
[24]黄俊达，黄金玲，陈超劲.以自然保护地为主体的广州市域生态网络构建[J].应用生态学报，2024，35(1)：247-254.
[25]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.
[26]LACK D.Habitat selection in birds with special reference to the effects of afforestation on the breckland avifauna[J].The Journal of Animal Ecology，1933，2(2)：239.
[27]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.
[28]YANG X T，LIU W，LI S S，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].Global Ecology and Conservation，2022，39：e02277.

(上接第 70 页)

[25]ANDERSON K，HANCOCK S，CASALEGNO S，et al.Visualising the urban green volume：exploring LiDAR voxels with tangible technologies and virtual models [J]. Landscape and Urban Planning，2018，178：248-260.
[26]BILJECKI F，LEDOUX H，STOTER J. An improved LOD specification for 3D building models [J]. Computers，Environment and Urban Systems，2016，59：25-37.
[27]GONG H Y，SUN Q，FANG C R，et al.TreeDetector：using deep learning for the localization and reconstruction of urban trees from high-resolution remote sensing images[J].Remote Sensing，2024，16(3)：524.
[28]WEINSTEIN B G，MARCONI S，BOHLMAN S，et al.Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks [J]. Remote Sensing，2019，11(11)：1309.
[29]BARBER C B，DOBKIN D P，HUHDANPA A H.The quickhull algorithm for convex hulls [J]. ACM Transactions on Mathematical Software，1996，22(4)：469-483.
[30]CHAN T M.Optimal output-sensitive convex hull algorithms in two and three dimensions [J]. Discrete & Computational Geometry，1996，16(4)：361-368.
[31]李文博.基于高密度 UAV-LiDAR 点云的人工针叶林单木分割应用[D].哈尔滨：东北林业大学，2023.
[32]张炜，郝佳雪.基于 L-system 算法的植物信息模型构建和三维绿量分析[J].风景园林，2023，30(3)：96-104.
[33]LEITNER D，KLEPSCH S，BODNER G，et al.A dynamic root system growth model based on L-Systems[J].Plant and Soil，2010，332(1)：177-192.
[34]郭湧，陈鲁.基于点云数据的树木关键生态指数提取方法[J].景观设计，2024(1)：4-8.
[35]ZHANG W，LI W J.Construction of environment-sensitive digital twin plant model for ecological indicators analysis[J].Journal of Digital Landscape Architecture，2024，9：18-28.
[36]ERIKSSON H，SUN J，TARANDI V，et al. Comparison of versioning methods to improve the information flow in the planning and building processes[J].Transactions in GIS，2021，25(1)：134-163.
[37]ROOSE T，FOWLER A C，DARRAH P R.A mathematical model of plant nutrient uptake[J].Journal of Mathematical Biology，2001，42(4)：347-360.
[38]YANG J M，ZHANG M F，ZHANG J，et al.Allometric growth of common urban tree species in Qingdao City of Eastern China[J].Forests，2023，14(3)：472.
[39]刘建峰，倪健.我国主要树种类型通用生物量相对生长方程的建模比较[J].第四纪研究，2021，41(4)：1169-1180.
[40]贺丽，严俊霞，段兰兰，等.山西高原主要林型生物量异速生长模型[J].中国水土保持科学，2023，21(6)：102-110.
[41]YAZDI H，SHU Q G，CHEN X，et al.GroTree-A Novel Toolbox for Simulating and Managing Urban Tree Canopy Growth[J].Journal of Digital Landscape Architecture，2024，9：815-825.
[42]LEE J J，LI B S，BENES B.Latent L-systems：transformer-based tree generator[J].ACM Transactions on Graphics，2024，43(1)：1-16.
[43]郭湧，魏云琦，欧阳翠玉.基于 LIM 的城市园林树木碳储量基线情景模拟研究：以北京市某高校绿地为例[J].北京林业大学学报，2022，44(12)：111-120.
[44]LEE S，LEE S，LEE J，et al.Estimating aboveground volume of diverse urban tree species：Developing allometric equations for higher taxonomic levels[J].Urban Forestry & Urban Greening，2024，94：128256.
[45]LEDOUX H，ARROYO OHORI K，KUMAR K，et al.CityJSON：a compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model[J].Open Geospatial Data，Software and Standards，2019，4(1)：4.