基于水鸟飞行阻碍的粤港澳大湾区生态廊道的构建与复合*

曹瀚文 祝明建 祝诗榕 马 滢

华南理工大学设计学院 广州 510000

摘要：【目的】构建与复合粤港澳大湾区 3 个焦点物种（凤头鹀鹛、黑脸琵鹭、小青脚鹬）的生态廊道，旨在构建出最优的潜在迁飞廊道以维护大湾区生物多样性。【方法】基于 3 个焦点物种的分布与习性数据，运用 MaxEnt 最大熵模型模拟水鸟分布，叠加生境适宜性评价获得生态源地，利用 Linkage mapper 辅以 MCR 对廊道进行识别，通过比较生态系统服务价值的方法实现廊道间的复合。【结果】大湾区生态源地主要由水体、林地和草地构成，总面积为 9 865.31 km^2，空间分布呈“南密北疏、主城区空心”的格局，滨海滩涂及近水林地为主要分布区，而东北部源地缺失导致生态网络断裂；识别出 88 条潜在生态廊道，总长度 4 155.77 km，其中东北部因建筑密集和地形阻力无廊道分布，严重削弱了区域连通性。【结论】研究区生态源地与廊道分布受自然地形和人为干扰共同影响。建议：1）在东北部无源地及廊道区域增设连接通道，整合破碎化生境；2）沿海经济带（深圳、珠海等）需限制建筑高度并推广鸟类友好设计；3）肇庆、惠州等断裂风险区应加强廊道保护与修复。研究结果为高密度城市化区域的生态网络优化提供了科学参考。

关键词：适生区分布；生态廊道；水鸟；三维阻力面

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.05.0002

Construction and Integration of Ecological Corridors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Obstacles to Waterbird Flight

Cao Hanwen Zhu Mingjian Zhu Shirong Ma Ying

(School of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: 【Objective】 This study is to construct and integrate ecological corridors for three key species (Crested Grebe, Black-faced Spoonbill, and Little Greenshank) in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, aiming to construct the optimal potential flyway corridors to maintain biodiversity in the Area. 【Method】 Based on the data on the distribution and the habit of the three key species, the MaxEnt maximum entropy model is used to simulate the distribution of waterbirds, and the ecological source is obtained by superimposing the habitat suitability evaluation. The corridors are identified by Linkage mapper supplemented by MCR, and the integration between the corridors is realized by comparing the ecosystem service value. 【Result】 The ecological source area in the Greater Bay Area is mainly composed of water, forestland and grassland, with a total area of 9 865.31 km^2, and the spatial distribution pattern is characterized by “dense in the south and sparse in the north, and hollow in the urban core area”. The coastal mudflats and the near-water forest land are the main distribution areas, while the shortage of

收稿日期：2024-06-05

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（32271735）；广东省哲学社会科学规划 2024 年度一般项目（GD24CYS34）

第一作者：曹瀚文（1999-），女，硕士生，研究方向为生态景观规划设计。E-mail：www.caohanwen520@qq.com

通信作者：祝明建（1982-），男，副教授，硕士生导师，研究方向为生态景观规划设计。E-mail：zhumj@scut.edu.cn

northeastern sources results in the fracture of the ecological network. A total of 88 potential ecological corridors with a total length of 4 155.77 km is identified, among which the regional connectivity in the northeast is severely weakened due to the dense construction and topographic resistance.【Conclusion】The distribution of ecological sources and corridors in the study area is affected jointly by natural topography and anthropogenic disturbances. It is suggested: 1) To add the connecting corridors should in the passive land and corridor areas in Northeast China for integrating fragmented habitats; 2) Coastal economic belts (Shenzhen, Zhuhai, etc.) need to limit the height of buildings and promote bird-friendly design; and 3) Corridor protection and restoration should be strengthened in Zhaoqing, Huizhou and other risk areas. The results of this study provide a scientific reference for the optimization of ecological network in high-density urbanized regions.

Keywords: distribution of suitable habitat; ecological corridor; waterbird; three-dimensional resistance surface

随着城市化的快速发展，城市生境碎片化日益严重，导致栖息地丧失、生物多样性降低和物种分布转移等问题[1]，对城市生态系统的健康构成严重威胁[2]。生境碎片化不仅威胁着鸟类的生存，还削弱了鸟类对于基因流和物种交流的作用，进而损害了生态系统的连通性和完整性。此外，城市化还加剧了气候变化对生物多样性的冲击，特别是对于濒危物种，更易受到栖息地退化的不利影响[3-4]。鸟类作为城市生态系统中的重要指示物种，对环境变化较为敏感，其多样性能反映城市生态系统的健康状况[5-6]。这要求我国在城市化发展中，采取有效措施保护鸟类多样性，维护生态平衡。

生态廊道作为构建城市整体性生态格局的重要因素，能有效连接孤立的生态斑块，增强生态连通性并缓解生境破碎化[7]，也是保育水鸟多样性的重要措施。当前对廊道的研究多聚焦于大型哺乳动物生态廊道的构建，如 Shanu 等[8]以老虎（*Panthera tigris*）为焦点物种，使用博弈论和图论方法识别印度中部的生态廊道，再利用 Kruskal 的算法构建可行的廊道网络；Dehaghi 等[4]运用 MaxEnt 模型绘制东方盘羊（*Ovis orientalis*）的栖息地适宜图，利用 MSPA 方法和电路理论构建廊道；杨楠等[9]国内学者使用 MaxEnt 模型分析评价了蓝马鸡（*Crossoptilon auritum*）栖息地适宜性；魏雯和唐安琪[10]提出基于 InVEST-图论复合模型识别并优化生境网络的方法，运用 Graphab 软件识别亚洲象（*Elephas maximus*）的潜在生境网络。鸟类生态廊道研究稀缺，在廊道复合方面尚处于停留在理论探索与创新阶段[11]。

粤港澳大湾区作为世界第四大湾区，是我国建设世界级城市群和参与全球竞争的重要空间载体[12]，同时也是水鸟重要的栖息地和迁徙中转地。本研究基于凤头䴙䴘（*Podiceps cristatus*）、黑脸琵鹭（*Platalea minor*）、小青脚鹬（*Tringa guttifer*）这 3 个焦点物种的分布与习性数据，运用 MaxEnt 模型识别生态源地并构建三维阻力面，并通过 Linkage mapper 模型对大湾区水鸟生态廊道进行模拟并复合，旨在构建出最优的潜在迁飞廊道以维护大湾区生物多样性。

1　研究区概况

粤港澳大湾区（111° 12′—115° 35′ E，21°25′—24°30′N）位于中国南方地区，由广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 市和香港、澳门两个特别行政区构成，土地总面积约 5.6 万 km^2。地区内河网密布，地形上西北高而东南低，山地集中在北部，而平原则主要分布在中部和沿海地区。从 2000—2020 年，粤港澳大湾区的建设用地比例显著上升，从 7.47%增加至 16.12%，土地开发与生态保护之间的矛盾日益尖锐，生态安全形势严峻。

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

本研究的数据来源如表 1 所示。使用 ArcGIS10.5 软件对所有数据进行坐标定义，地理坐标统一设置为：CCS_WCS_1984；投影坐标统一设置为：WGS_1984_UTM_Zone_50N。

表 1 研究数据来源

数据分类	数据名称	数据来源
物种分布数据	鸟类分布数据	GBIF 全球生物多样性数据库(www.Gbif.org) 中国观鸟记录中心(www.Bird talker.net)
环境数据	土地利用/覆被数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn),空间分辨率 30 m×30 m
	高程数据	中国科学院地理空间数据云(www.gscloud.cn),空间分辨率 30 m×30 m
	归一化植被指数	资源环境科学与数据平台 (www.resdc.cn),空间分辨率 30 m×30 m
	气候因子	WorldClim2.1 数据库(www.world clim.org)
	广东省湿地资源分布数据	国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn),空间分辨率 30 m×30 m
	建筑轮廓数据	OSM(open map tiles.org)

2.2 焦点物种选择

本研究基于以下原则选取焦点物种：1）具有重要的生态学意义或价值；2）具有生物学上的代表性与典型性；3）相关资料可获取性与可参考性。

根据焦点物种选择模型，选取得分高且物种数据较易获取的滨鸟、水禽与涉禽作为焦点物种(表 2)[13-14]。

表 2 焦点物种的生物特征

项目	凤头鹲鹛	黑脸琵鹭	小青脚鹬
生态类群	小型水禽 (体长<500 mm)	大型涉禽 (体长≥500 mm)	小型滨鸟 (体长<500 mm)
居留类型	冬候鸟	冬候鸟	旅鸟
栖息地特征	低山和平原地带的江河、湖泊、池塘等水域，包括人工水体、沼泽、海湾和泻湖，岸边和水中需有植被。	内陆湖泊、水塘、河口、水稻田以及沿海岛屿和海滨沼泽地带等湿地环境。	海边沙滩、开阔而平坦的泥地、河口沙洲和沿海沼泽地带。
生活习性	不善于陆上步行，起飞较吃力，潜水能力强。	性沉着机警，人难于接近。	稍有惊动即刻起飞，飞翔力强。常于海滨觅食，寻找淤泥或沙滩中的小型无脊椎物为食。
保护级别	三有名录物种	ICBP 世界濒危鸟类红皮书、国家Ⅱ级重点保护物种	国家Ⅱ级重点保护物种、CITES 附录Ⅰ物种

2.3 生态源地选取方法

2.3.1 水鸟栖息地适宜性评价

基于水鸟对生态环境的特定需求和已有研究结果，挑选出影响水鸟栖息地适宜性的关键因子并赋予相应权重[15-19]（表 3）。利用 ArcToolbox 中的加权总和工具，对每个重新分类的生境变量进行叠加，并将水鸟生境分为 5 个等级：适宜生境(HSI≥80)、较适宜生境（60≤HSI<80)、一般适宜生境（40≤HSI<60)、较不适宜生境（20≤HSI<40)、不适宜生境（HSI<20)。水鸟栖息地适宜性指数的计算公式如下所示[20]：

$$HSI = \sum_{i=1}^{n} w_i f_i \quad (1)$$

式（1）中：HSI 粤港澳大湾区水鸟栖息地的适宜性指数；n 为指标因子的个数；W_i为指标权重；f_i为指标因子计算值。

2.3.2 叠加物种分布模型

针对焦点物种，选取 80%的记录点作为训练数据进行分布预测，剩下 20%的记录点用于模型预测效果的检验。为避免过度拟合[21]，使用 SPSS20 对环境变量进行相关性分析，选择 9～14 个较为显著的环境变量用于 MaxEnt 建模，保证两个变量的相关系数>0.8[22]。

最后将一般适宜生境及以上的区域和适宜生境模型与主要生态源叠加，提取>10 km^2 的生境斑块为一级生态源地[23]。

2.4 阻力面构建方法

选取土地覆盖类型和高程作为自然阻力因子，建筑高度和道路等级作为人类阻力因子。土地覆被类型中选择湖泊、草地、林地、沼泽、耕地、岩石、果园和其他土地类型这 8 种绿量差异较大的样地进行对比并进行阻力值设定，以区分不同生境条件下水鸟生存行为的变化。为因子设定阻力值（表 4)，通过均值叠加运算获得三维景观阻力面[24-28]。

表 3　水鸟栖息地适宜性评价指标及权重

目标层	系统层	权重	状态层	权重	指标层	分值
水鸟栖息地适宜性	水供应	0.25	距河流距离/m	0.5	100	2
					100~200	4
					200~500	6
					500~1 000	8
					>1 000	10
			距湖泊距离	0.5	100	2
					100~200	4
					200~500	6
					500~1 000	8
					>1 000	10
	高程适宜度	0.1	DEM/m	1	>250	2
					201~250	4
					151~200	6
					101~150	8
					<100	10
	食物丰富度	0.25	食物供给能力	0.65	城乡、工矿、居民用地、未利用土地	2
					林地	4
					草地、耕地	6
					林地	8
					水域、海洋	10
			NDVI	0.35	<0	2
					0~0.2	4
					0.2~0.4	6
					0.4~0.6	8
					>0.6	10
	遮蔽条件	0.2	土地利用	1	城乡、住宅用地	2
					未利用土地	4
					草地	6
					林地	8
					水域	10
	人为干扰度	0.2	距道路距离/m	0.45	100	2
					100~200	4
					200~500	6
					500~1 000	8
					>1 000	10
					>1 000 人·km^{-2}	2
			人口密度/人·km^{-2}	0.55	500~1 000·km^{-2}	4
					200~500	6
					100~200	8
					100	10

表 4　基于景观类型和三维建筑高度的水鸟飞行阻力参数

阻力因子	分级特征	阻力值	解释
景观类型	湖泊	1	最佳生境类型
	草地	1	
	林地	2	核心生境类型
	沼泽	2	
	耕地	5	
	岩石	5	
	果园	5	
	其他类型	50	生态资源匮乏、人为干扰严重
道路等级	自行车绿道、社区道路	50	道路干扰分级
	中级道路	150	
	主要道路、高速公路和快速路	250	
高程 DEM/m	≤300	1	小型水鸟飞行高度
	300<DEM<1 000	5	候鸟飞行高度
	≥1000	40	鸟类不能飞越
建筑高度/m	≤20	20	鸟类可以飞越
	20<h≤50	200	鸟类可能会受到影响
	50<h≤100	500	鸟类会远离
	100<h≤200	1 000	鸟类会远离玻璃幕墙
	h>200	2 000	鸟类不能飞越

2.5 生境网络构建方法

2.5.1 基于 Linkage mapper 的生态廊道提取

将生态源地作为节点，非生态源地的生态阻力视为电阻，对最小成本路径进行识别。将获取的路径作为廊道进一步筛选[29]：阻力低（前10%）的廊道作为优先保护的低阻力廊道，阻力高（后10%）的廊道为需修复的高阻力廊道，其余廊道则归类为非重要生态廊道。

2.5.2 生境网络复合

采用评价生态系统服务价值的方法进行廊道间的复合，并设定鸟类迁移廊道宽度为200 m[30-31]。在复合情境中，若两源地间存在多水鸟廊道，在保证飞行的前提下，将生态系统服务价值转换为阻力值模拟新廊道（表5~6），将更新后的廊道与生境斑块进行叠加，构建出复合生境网络。

生态系统服务价值计算公式：

$$E_a = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (2)$$

式（2）中：E_a为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值（元·hm^{-2}）；i为农作物种类；p_i为i种农作物某年的全国平均价格（元·t^{-1}）；q_i为i种农作物单位面积产量（$t \cdot hm^{-2}$）；m_i为i种农作物种植面积（hm^2）；M为所有农作物的种植面积（hm^2）。

3 结果与分析

3.1 水鸟栖息地适宜性

评估粤港澳大湾区水禽栖息地适宜性的因素主要包括供水状况、高程适宜性、食物丰富度、隐蔽状况和人类干扰程度。

供水状况是影响水鸟栖息地选择的基本条件，从图1C中能看出，珠江流域的江河湖泊为水鸟提供丰富的水源，且在枯水期沉积物丰富，加之大湾区夏季降雨充沛而冬季稀少，促进营养物质累积及滩涂裸露，满足水鸟觅食需求[16]。因此水鸟在水源附近适宜水鸟栖息。

高程适宜性是影响水鸟栖息地分布的关键条件。不同的海拔高度影响着栖息地的遮蔽条件、植被分布、湿地生物多样性等。从图1A可看出，将高程作为评价指标，有助于将不宜水鸟生存的山地等区域排除在适宜栖息地外，如肇庆、广惠交界等多山地带。

食物丰富度是影响水鸟栖息地分布的主要条件。其丰富度随土地利用类型变化而呈现差异，总体上水源>草地>林地>其他。此外，归一化植被指数反映植被生长密度，以及潜在的丰富底栖生物群落，对水鸟进行觅食补充[32]。隐蔽状况是水鸟栖息地分布的重要条件，能有效降低被捕食风险、减少人为干扰，提高繁殖成功率。土地利用现状直接关系到水鸟保护效果，尽管水域和滩涂是理想觅食场所，但开阔区域更易受人类活动影响，这说明优质觅食地并不完全等同于适宜栖息地。

人类干扰程度是影响水鸟适宜栖息地分布的反向条件。人为干扰往往会改变水鸟的栖息地选择条件[33]。道路建设和人口密集区域，显著降低水鸟栖息地质量。根据图1E的结果，大湾区水鸟栖息地适宜区域往往位于远离交通要道和人口密集的区域。

总体上，良好的（适宜、较适宜、一般适宜）适宜生境分布在湿地资源丰富、遮荫条件好、人为干预少的地区，而不适宜生境多分布在城市建成区、林地和山地。（图1F）

3.2 焦点物种的适生区分布

MaxEnt模型预测结果检验显示AUC值均超过0.9，表明用该模型预测凤头鹱鹳、黑脸琵鹭和小青脚鹬于粤港澳大湾区的适生区分布（图2）准确性高。

模型揭示凤头鹱鹳和黑脸琵鹭生态位狭窄，需针对性保护，特别是凤头鹱鹳分布零散更易受生境退化影响。小青脚鹬生态位较宽，适生区成体块且边界线明确，应着重确保其关键生境的质量和连续性，避免生境破碎化。

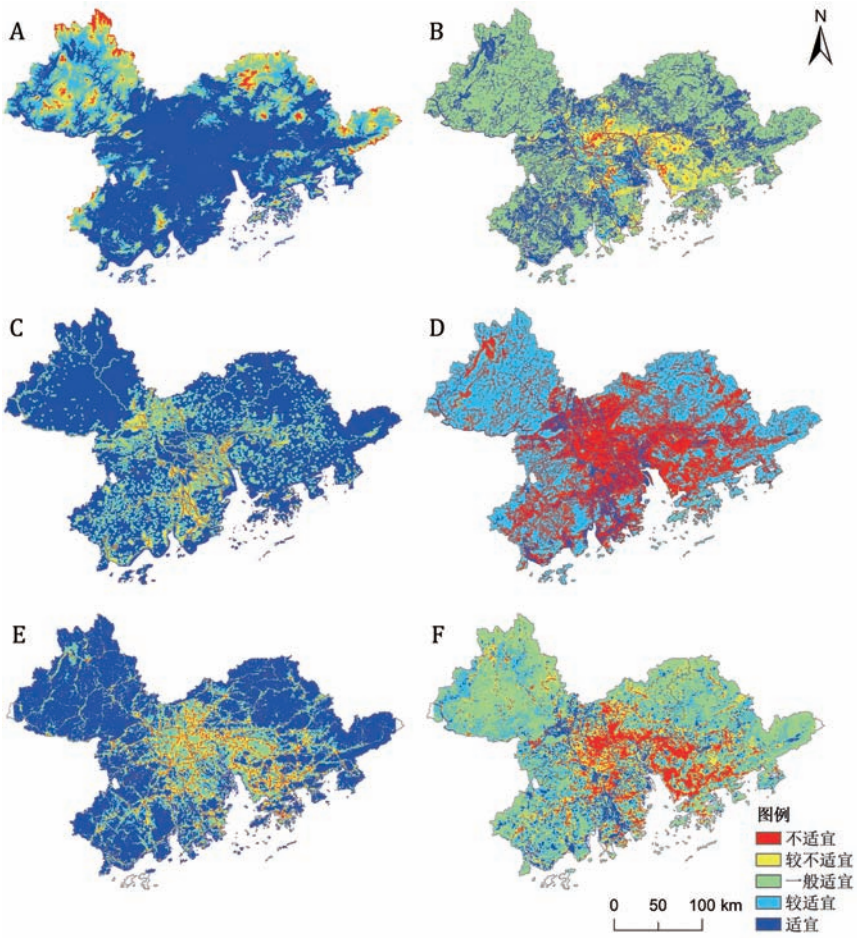
总体来看大湾区南部沿海地区（江门、珠海、港澳等）的适生分布区远大于北部（肇庆、佛山等），归因于沿海地区水系和湿地资源丰富，且有大面积林草地带提供隐蔽和觅食场所。相比之下，北部虽靠近南岭，生态资源丰富，但林区面广、线长、缺少水系，不利于水鸟生存。

表 5　粤港澳大湾区生态系统服务功能经济价值　　元·hm^{-2}

项目	耕地		林地			草地			水域			湿地			工矿、城乡居民用地	未利用土地			总计
	水田	旱地	有林地	灌木林	疏林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	河渠	湖泊	水库坑塘	滩涂	滩地	沼泽地		沙地	裸土地	裸岩石质地	
供给服务　食物生产	8 096.9	5 060.6	1 309.8	1 131.2	1 047.8	2 262.4	1 809.9	1 357.4	4 762.9	4 762.9	4 762.9	3 036.4	3 036.4	3 036.4	0.0	59.5	0.0	0.0	265 341.5
原料生产	535.8	2 381.5	3 095.9	2 560.1	2 476.7	3 334.0	2 667.2	2 000.4	1 369.3	1 369.3	1 369.3	2 976.8	2 976.8	2 976.8	0.0	178.6	0.0	0.0	
水资源供给	−15 658.1	119.1	1 607.5	1 309.8	1 286.0	1 845.6	1 476.5	1 107.4	49 355.6	49 355.6	49 355.6	15 419.9	15 419.9	15 419.9	0.0	119.1	0.0	0.0	
调节服务　气体调节	6 608.5	3 988.9	10 121.2	8 394.6	8 096.9	11 728.7	9 382.9	7 037.2	4 584.3	4 584.3	4 584.3	11 311.9	11 311.9	11 311.9	0.0	654.9	119.1	119.1	2 984 068.2
气候调节	3 393.6	2 143.3	30 184.9	25 183.9	24 147.9	31 018.4	24 814.7	18 611.1	13 633.8	13 633.8	13 633.8	21 433.1	21 433.1	21 433.1	0.0	595.4	0.0	0.0	
净化环境	1 012.1	595.4	8 870.9	7 620.7	7 096.7	10 240.2	8 192.2	6 144.1	33 042.7	33 042.7	33 042.7	21 433.1	21 433.1	21 433.1	0.0	1 845.6	595.4	595.4	
水文调节	16 193.9	1 607.5	19 885.1	19 944.7	15 908.1	22 742.9	18 194.3	13 645.7	608 699.5	608 699.5	608 699.5	144 256.5	144 256.5	144 256.5	0.0	1 250.3	178.6	178.6	
支持服务　土壤保持	59.5	6 132.2	12 264.5	10 240.2	9 811.6	14 288.7	11 431.0	8 573.2	5 536.9	5 536.9	5 536.9	13 752.9	13 752.9	13 752.9	0.0	774.0	119.1	119.1	392 844.5
维持养分循环	1 131.2	714.4	952.6	774.0	762.1	1 071.7	857.3	643.0	416.8	416.8	416.8	1 071.7	1 071.7	1 071.7	0.0	59.5	0.0	0.0	
生物多样性	1 250.3	774.0	11 192.8	9 347.2	8 954.3	12 978.9	10 383.1	7 787.4	15 181.8	15 181.8	15 181.8	46 855.1	46 855.1	46 855.1	0.0	714.4	119.1	119.1	
文化服务　美学景观	535.8	357.2	4 882.0	4 108.0	3 905.6	5 715.5	4 572.4	3 429.3	11 252.4	11 252.4	11 252.4	28 160.7	28 160.7	28 160.7	0.0	297.7	59.5	59.5	146 161.7
总计	23 159.6	23 874.1	104 367.2	90 614.3	83 493.8	117 227.0	93 781.6	70 336.2	747 835.9	747 835.9	747 835.9	309 708.0	309 708.0	309 708.0	0.0	6 549.0	1 190.7	1 190.7	3 788 415.9

表 6 粤港澳大湾区不同土地利用类型对水鸟迁移的阻力值

土地利用类型	综合阻力值	土地利用类型	综合阻力值	土地利用类型	综合阻力值
水田	75	河渠	1	其他建设用地	100
旱地	75	湖泊	1	沙地	85
有林地	15	水库坑塘	1	裸土地	95
灌木林	20	滩涂	10	裸岩石质地	95
疏林地	20	滩地	10		
高覆盖度草地	15	沼泽地	10		
中覆盖度草地	20	城镇用地	100		
低覆盖度草地	20	农村居民点	100		



A：基于高程适宜度；B：基于食物供给度；C：基于水供应；D：基于遮蔽条件；E：基于人为干扰程度；F：水鸟栖息地适宜性分布图

图 1 基于不同因素的粤港澳大湾区水鸟栖息地适宜性评估

3.3 基于 Linkage mapper 模型的生态廊道识别

3.3.1 生态源地与阻力面

模型识别出水鸟适宜源地面积共 9 865.31 km^2，主要由水体和林地构成，空间上南部沿海区域源地密集连通，北部源地稀疏且面积小，东北部源地缺失导致生态网络不完整，整体分布呈现南密北疏、主城区空心化，且建筑密集区源地破碎化严重。

景观阻力面构建如图 3 所示，总体上，高楼层建筑构成了焦点物种在研究区内迁移扩散的主要障碍。因此，在城市建筑规划与设计中，应采用鸟类友好型设计，减少鸟类与建筑物的碰撞。

3.3.2 潜在生态廊道分布

3 个焦点物种的潜在生态廊道分布如图 4，共识别出 88 条生境廊道，总长度 4 155.77 km。空间分布上，位于江门和佛山高明区的廊道阻力较小，深圳、惠州北部以及佛山东部城区廊道阻力较大。

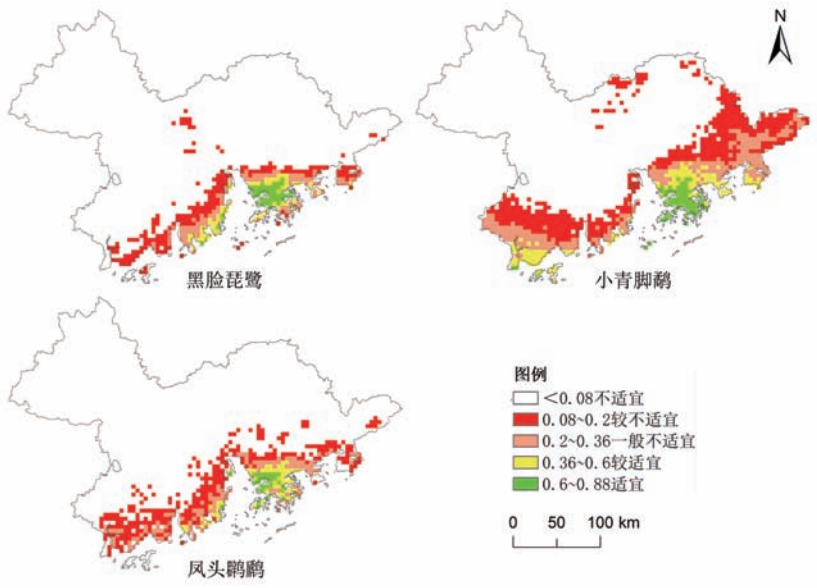


图 2　MaxEnt 适生区分布预测

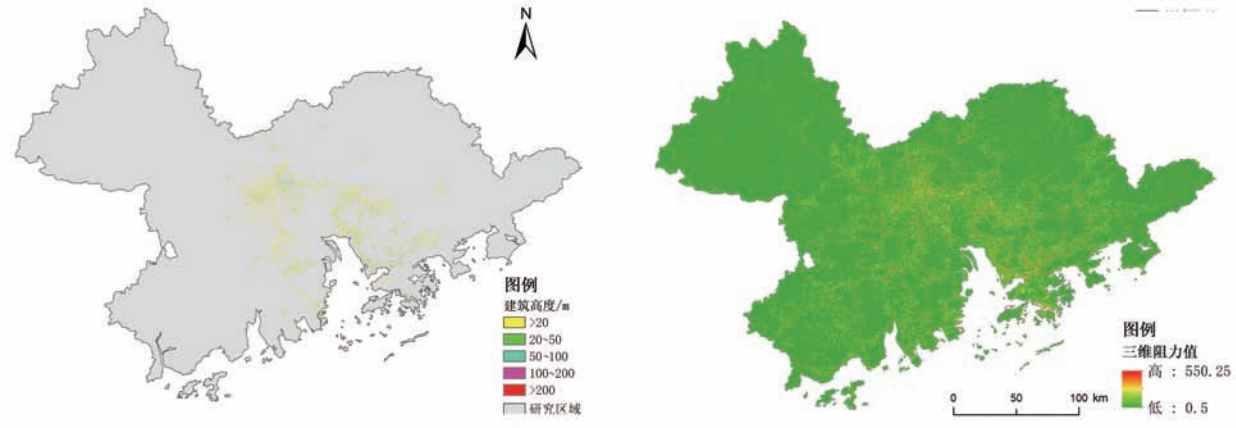


图 3　三维阻力面构建结果

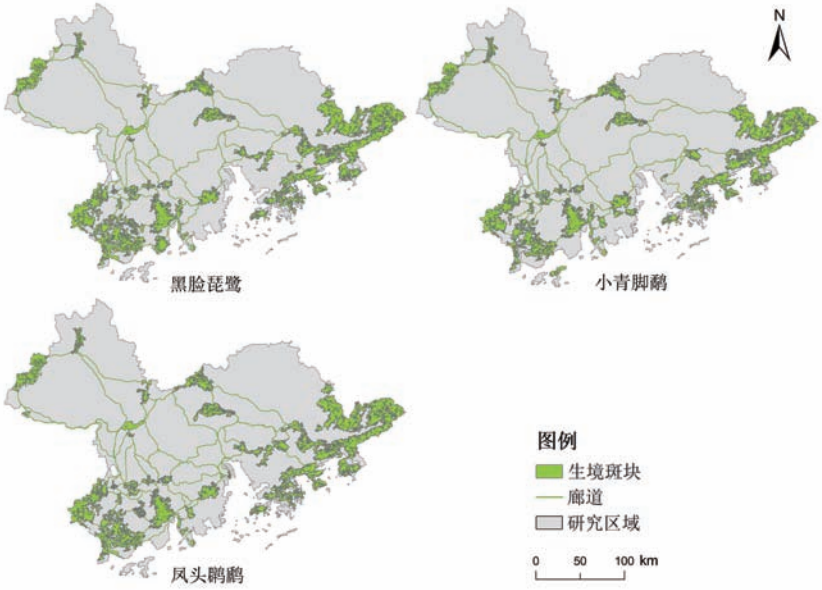


图 4　潜在生态廊道分布情况

水鸟廊道整体呈现西南、东南部分布密集，且基本与河流、坑塘相重合；东北、西北、中部廊道因建筑与海拔阻力大，故廊道稀少；东北部无廊道分布，不利于区域整体的生态安全。建议在东北部无源地区域构建连接通道，连接周边源地与廊道，形成完整生态网络，提高区域生态网络完整性和连通性。

3.4 生境网络的复合

图 5 分别为 3 种水鸟生境网络的复合结果，生境斑块叠加后总面积为 9 865.31 km^2，生态廊道共 88 条，总长度为 4 155.77 km。筛选出低阻力廊道 9 条，多位于城市边缘，建筑开发较弱受人为干扰影响小的源地之间，高阻力廊道 9 条，集中位于沿海城市密集区。

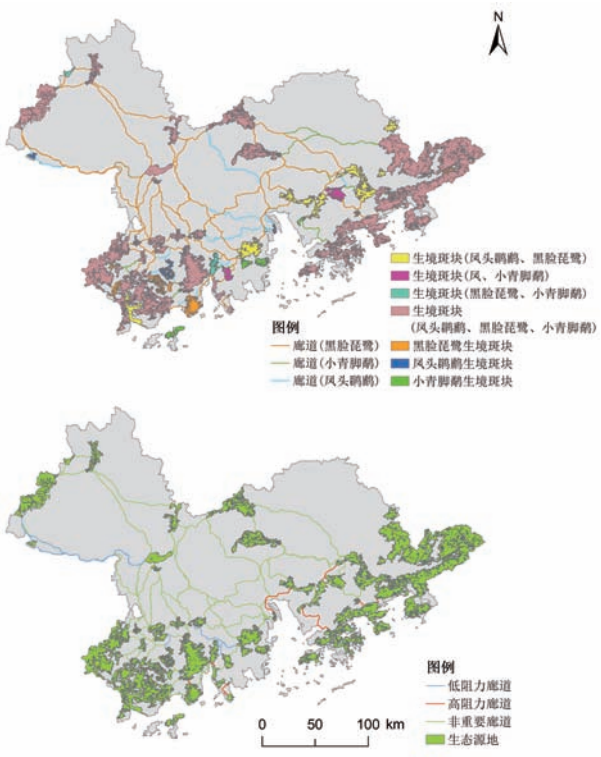


图 5 生境网络的复合结果

高阻力廊道主要分布在高干扰度与高适宜区重合区，如珠海、深圳、东莞以及江门沿海地区，应在持续开展廊道监测和研究工作的基础上，加强宣传教育，共同营造良好的生态环境。低阻力廊道主要分布在生态环境相对适宜，人为干扰程度小的区域，如江门、珠海的内陆地区以及肇庆，应加强保护和管理，减少人为干扰，为水鸟提供更好的栖息迁徙环境。

4 讨论

在生态源地的识别上，本研究相较于以往生态源地识别方法提高了源地筛选准确性、减少了主观性的干扰[34-37]，识别结果更具客观性和合理性。相较 Yang 等[38]的研究成果，在栖息地适宜性评价上缺少海洋部分适宜性评价，但整体适宜性分布走向一致，个别区域例如珠海滨海、惠州-白盆珠水库周边存在差异，可能由于所选物种和评价指标不同导致。

阻力面构建综合考虑了水鸟的生态学和行为学特性，与 Liu 等[27]仅根据鸟类飞行能力为高程和建筑物高度赋值构建三维阻力面，以及 Ersoy 等[39]依据土地覆盖数据预估物种迁移难度的方法不同。本研究在考虑鸟类飞行高度的基础上增添道路与景观类型的阻力参数，增强三维阻力面的合理性，对廊道区域建筑高度以及外饰面管控具有实操性。

依托生态系统服务进行优化调控，是实现区域生态与经济双重优化的有效手段[40]，本研究通过引入生态系统服务价值辅助廊道复合，对“格局-过程-服务-福祉-可持续”研究范式进行尝试[41]，通过替换低价值廊道，增强网络整体生态服务功能价值，协调环境保护与经济增长的关系，具有重要意义。

本研究对粤港澳大湾区的生态廊道构建与复合处于尝试探索阶段，仍存在一定局限性：1）受限于研究使用的 30 m 空间分辨率数据，可能未能捕捉城区内小型林水结合用地，此类用地对水鸟的栖息地价值可能被低估；2）本研究的焦点物种含有长距离迁徙物种，生境网络的构建优化需考虑跨区域衔接，以实现多尺度的协调发展[42]；3）研究用到的电路理论和最小累计阻力模型均依赖于阻力面的准确赋值，探索结合区域规划，实现科学合理的景观阻力赋值将是未来研究的方向[43]；4）缺乏生态廊道建设长度和廊道内用地合规性的研究，未来将重点收集粤港澳大湾区生物物种和政策资料，深化县域尺度下的廊道建设研究，以期为我国湿地城市高密度城区的生态网络优化策略提供参考。

5　结论

研究区生态源地与廊道分布受自然地形和人为干扰共同影响。源地分布呈现南部滨海密集，东北、西北、中部缺少的情况，这与大湾区西北高东南低的地形、滨海地区的冲积平原以及沿海到陆地覆被类型的变化密不可分；水源的可获得性虽是水鸟栖息地分布的基本条件，但考虑到遮蔽条件、人类干扰程度等因素，导致适宜生境并不完全与水资源重合；除去自然因素，高层建筑是鸟类迁移的主要障碍，限制高度或采用鸟类友好设计有助于提升源地间可达性。在粤港澳大湾区内共识别出 88 条水鸟潜在生态廊道，总长度 4 155.77 km，其中肇庆与惠州地区廊道间隔较远、易发生断裂，需综合考虑自然和人为因素，保护和优化水鸟生境及廊道。

参考文献

[1]张琼悦，邓卓迪，胡学斌，等.粤港澳大湾区城市化进程对区域内鸟类分布及栖息地连通性的影响[J].生物多样性，2023，31(3)：72-84.

[2]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.

[3]BAETEN L，VERSTRAETEN G，DEFRENNE P，et al. Former land use affects the nitrogen and phosphorus concentrations and biomass of forest herbs[J].Plant Ecology，2011，212(5)：901-909.

[4]DEHAGHI IM，SOFFIANIAN A，HEMAMI MR，et al. Exploring structural and functional corridors for wild sheep (*Ovis orientalis*) in a semi-arid area[J].Journal of Arid Environments，2018，156：27-33.

[5]徐诗，王成，韩丹，等.北京综合性社区鸟类群落构成及其季节变化：以中国林业科学研究院社区为例[J].中国城市林业，2021，19(1)：25-30.

[6]BRYCE S A，HUGHES R M，KAUFMANN P R.Development of a bird integrity index：using bird assemblages as indicators of riparian condition[J].Environmental Management，2002，30(2)：294-310.

[7]郑好，高吉喜，谢高地，等.生态廊道[J].生态与农村环境学报，2019，35(2)：137-144.

[8]SHANU S，IDICULLA J，QURESHI Q，et al. A graph-theoretic approach for modelling tiger corridor network in Central India-Eastern Ghats landscape complex，India [J]. Ecological Informatics，2019，50(3)：76-85.

[9]杨楠，马东源，钟雪，等.基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价[J].生态学报，2020，40(19)：7064-7072.

[10]魏雯，唐安琪.基于 InVEST-图论模型的西双版纳州亚洲象生境网络评价[J].生态学报，2024，44(12)：5206-5218.

[11]陈剑阳，尹海伟，孔繁花，等.环太湖复合型生态网络构建[J].生态学报，2015，35(9)：3113-3123.

[12]赵玉灵.粤港澳大湾区自然资源遥感调查与保护建议.国土资源遥感，2018，30(4)：139-147.

[13]杨锡涛.粤港澳大湾区水鸟生态廊道识别与生态廊道滨海区域营建模式研究[D].哈尔滨：东北林业大学，2022.

[14]车铭哲，于劲翔.“以鸟为本”理念下的滨海湿地生态修复规划：以北戴河七里海潟湖湿地生态修复项目为例[J].规划师，2019，35(7)：55-59.

[15]罗绮琪，胡慧建，徐正春，等.基于 Maxent 模型的粤港澳大湾区水鸟多样性热点研究[J].生态学报，2021，41(19)：7589-7598.

[16]苟芳珍.苏干湖国家重要湿地鸟类栖息地适宜性评估[D].兰州：西北师范大学，2020.

[17]BI M C，XIE G D，YAO C Y.Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area，China[J].Ecological Indicators，2020，16：106432.

[18]LANGE C J，COLLINS D P，METZGER K L，et al.Predicting impacts of sea level rise on wintering redhead ducks along the lower Texas Coast[J].Global Ecology and Conservation，2018，16：e00481.

[19]ZHAO H M，WANG Y Q，XU B，et al.Exploring an efficient habitat index for predicting population and abundance of migratory birds in Poyang Lake Wetland，South China[J].Acta Ecologica Sinica，2018，38(6)：381-390.

[20]MALEKI S，SOFFIANIAN A R，KOUPAEI S S，et al.Habitat mapping as a tool for water birds conservation planning in an arid zone wetland：the case study hamun wetland [J]. Ecological Engineering，2016，95：594-603.

[21]LI R Q，XU M，WONG M H G，et al.Climate change threatens giant panda protection in the 21st century [J]. Biological Conservation，2015，182：93-101.

[22]杜超群，吴昊，袁慧，等.湖北主要造林树种生态区划研究[J].西南林业大学学报(自然科学)，2023，43(6)：1-7.

[23]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.

[24]FIJN R C，KRIJGSVELD K L，POOT M J M，et al.Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a D utch offshore wind farm[J].The International Journal of Avian Science，2015，157(3)：558-566.

[25]HAGER S B，COSENTINO B J，MCKAY K J，et al.Window area

and development drive spatial variation in bird-window collisions in an urban landscape[J].PLoS ONE,2013,8(1):e53371.

[26]丁金华,褚涵,孙琦.基于MSPA与电路理论的水网地区生态网络构建[J].中国城市林业,2024,22(5):122-129.

[27]LIU Z H, HUANG Q D, TANG G P. Identification of urban flight corridors for migratory birds in the coastal regions of Shenzhen City based on three-dimensional landscapes [J]. Landscape Ecology,2021,36(7):2043-2057.

[28]TREMBLAY M A,CLAIR S C C.Factors affecting the permeability of transportation and riparian corridors to the movements of songbirds in an urban landscape[J].Journal of Applied Ecology, 2009,46(6):1314-1322.

[29]屠越.上海市生态源地识别体系构建与生态保护修复关键区识别[D].上海:华东师范大学,2021.

[30]吴未,胡余挺,范诗薇,等.不同鸟类生境网络复合与优化:以苏锡常地区白鹭、鸳鸯、雉鸡为例[J].生态学报,2016,36(15):4832-4842.

[31]谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003(2):189-196.

[32]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.

[33]MA Z J, CAI Y T, LI B, et al. Managing wetland habitats for waterbirds: an international perspective [J]. Wetlands: The Journal of the Society of Wetland Scientists,2010,30:15-27.

[34]屠越,刘敏,高婵婵,等.大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断[J].生态学报,2022,42(17):7056-7067.

[35]吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].生态学报,2013,33(13):4125-4133.

[36]许峰,尹海伟,孔繁花,等.基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J].生态学报,2015,35(19):6425-6434.

[37]李绒,角媛梅,刘歆,等.基于MaxEnt模型的绿孔雀适宜生境评价及廊道设计[J].生态学杂志,2019,38(3):919-926.

[38]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.

[39]ERSOY E,JORGENSEN A,WAEEEN P H.Identifying multispecies connectivity corridors and the spatial pattern of the landscape[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2019,40:308-322.

[40]戴培超,张绍良,公云龙,等.生态系统服务视角下的工矿废弃地再开发模式及策略[J].生态学杂志,2020,39(6):2106-2114.

[41]赵文武, 刘月,冯强,等.人地系统耦合框架下的生态系统服务[J].地理科学进展,2018,37(1):139-151.

[42]尹海伟,孔繁花,祈毅,等.湖南省城市群生态网络构建与优化[J].生态学报,2011,31(10):2863-2874.

[43]单楠,周可新,潘扬,等.生物多样性保护廊道构建方法研究进展[J].生态学报,2019,39(2):411-420.