

DOI: 10.20103/j.stxb.202309051928

沈舟,尹海伟,孔繁花,苏杰,孙辉,李久林.基于生境组团化分析与景观廊道模拟的南京市白鹭生境网络构建与优化.生态学报,2024,44(8):3303-3316.

Shen Z, Yin H W, Kong F H, Su J, Sun H, Li J L. Establishment and optimization of *Egretta garzetta* habitat network in Nanjing based on habitat grouping analysis and LandScape Corridors simulation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3303-3316.

# 基于生境组团化分析与景观廊道模拟的南京市白鹭生境网络构建与优化

沈舟<sup>1</sup>, 尹海伟<sup>1,3,4,\*</sup>, 孔繁花<sup>2</sup>, 苏杰<sup>1</sup>, 孙辉<sup>1</sup>, 李久林<sup>3,4</sup>

1 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

2 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

3 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230022

4 安徽省城镇化建设协同创新中心, 合肥 230022

**摘要:**保持生境连通性是全球生物多样性保护面临的主要挑战之一。生境网络构建与优化是一种积极主动的景观策略,但其成效取决于异质性景观背景下生境分布格局与物种响应。以南京市为例,白鹭为目标物种,开展了基于生境组团化分析与景观廊道(LSCorridors)模拟的生境网络构建与优化研究。通过整合生境适宜性评价、干扰度评价、最大熵(MaxEnt)模型模拟,实现了物种生境源地综合识别;利用景观连通性指标与核密度分析,识别了物种生境分布的组团化格局;在最小成本路径(LCPs)的基础上,定义了优化新增型与提升型两类廊道,并从物种感知与适应性变化出发,应用LSCorridors软件模拟了这两类目标优化廊道的多重随机路径及其空间范围。结果表明,南京市白鹭生境斑块共计428个,总面积达31525.75 hm<sup>2</sup>,主要是林地与水域,具有较为明显的破碎化和局部集聚特征,九大生境组团以南京长江段水域斑块为轴,沿两侧分布,彼此联系比较薄弱;最佳距离阈值4.5 km内,识别LCPs共907条,总长度1548.59 km,平均较短、分布紧凑,主要位于各生境组团内部,但仅少数连接着不同生境组团;确定的8条优化新增型廊道和10条优化提升型廊道,其LSCorridors模拟结果与LCPs存在空间偏差,前者更符合现实进而有益于避免保护低效和促进多类型、差异化的优化措施制定。研究成果能为面向生物多样性保护的南京市生境网络保护以及重点生态廊道的规划实践提供决策参考。

**关键词:**生境网络;最小成本路径;连通性;景观廊道(LSCorridors);生物多样性

## Establishment and optimization of *Egretta garzetta* habitat network in Nanjing based on habitat grouping analysis and LandScape Corridors simulation

SHEN Zhou<sup>1</sup>, YIN Haiwei<sup>1,3,4,\*</sup>, KONG Fanhua<sup>2</sup>, SU Jie<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>, LI Jiulin<sup>3,4</sup>

1 School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China

4 Anhui Collaborative Innovation Center for Urbanization Construction, Hefei 230022, China

**Abstract:** Maintaining habitat connectivity is one of the major challenges facing global biodiversity conservation. The establishment and optimization of habitat networks provide an offensive landscape strategy, but its effectiveness depends on habitat distribution patterns and species response in a heterogeneous landscape. Taking *Egretta garzetta* as the target species in Nanjing, the study established and optimized the habitat network based on grouping analysis and LSCorridors simulation.

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC3802604, 2022YFF1303102);安徽省高校优秀科技创新团队项目(2022AH010021)

**收稿日期:**2023-09-05; **网络出版日期:**2024-01-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzyinhaiwei@163.com

Firstly, by integrating habitat suitability evaluation, disturbance evaluation, and MaxEnt model simulation, the comprehensive identification of species habitat was realized. Then, using the landscape connectivity index and kernel density analysis, the grouping pattern of habitat distribution was analyzed. Finally, two kinds of optimization corridors (i. e., the added corridor and the improved corridor) were defined and identified based on the least-cost paths method, while their multiple random paths and their spatial ranges were thereby simulated by LSCorridor software from the perspective of the variation of species perception and adaptation. The results showed that: there were 428 habitat patches in Nanjing, with a total area of 31525.75 hm<sup>2</sup>, mainly forest and waterbody, with evident fragmentation and local aggregation situation. Nine habitat groups, including landscape patches of the Yangtze River, were concentratedly distributed on both sides of the river, but ecological connections among them were relatively weak. Within an optimal distance threshold of 4.5 km, 907 least-cost paths with a total length of 1548.59 km presented an averagely short and spatially compact status and were mainly located in the interior of each habitat group, while there was a lack of paths connecting the habitat groups. For optimization, eight added corridors and 10 improved corridors were extracted to be further stimulated by LSCorridors, showing the spatial deviations from the least-cost paths. The simulation outputs were considered to be more in line with reality, thus reducing the inefficiency of conservation and promoting the formulation of multi-type and differentiated optimization measures. The study results can provide a decision-making reference for habitat network protection and key ecological corridor planning practices for urban biodiversity conservation.

**Key Words:** habitat network; least-cost paths; connectivity; LandScape Corridors(LSCorridors); biodiversity

从全新世到人类世,快速城市化进程极大提高了人类生活条件与发展水平,但也导致自然生境破碎化、景观连通性降低、以及生物多样性丧失等生态问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。构建与优化生境网络是应对这些生态后果的理想手段之一<sup>[3-6]</sup>。生境网络是指由生态廊道连接的生境系统<sup>[5-6]</sup>,其主要目标包括识别物种栖息的适宜生境及其他具有生境功能的景观,并根据需要建立、恢复和提升生态廊道,以促进物种扩散与相关过程,如重新定居、季节性迁移和基因交流等,以在支离破碎的景观中维持生物多样性<sup>[7-8]</sup>。

自其概念提出以来,国内外学者就如何完善生境网络要素识别与保护方法以促进生境网络连通性提升展开了大量研究<sup>[3-4, 9-15]</sup>,形成了以“生境识别-阻力面构建-廊道模拟”的基本范式<sup>[10, 12, 16]</sup>,为生物多样性保护及生态系统修复提供了重要支持。然而,生境网络的有效性不仅取决于生境斑块之间维系生态过程的廊道存在,还取决于生境适宜性、空间布局、垫脚石、基质渗透性、质量等,以及目标物种对这些因素的响应<sup>[7, 17]</sup>。目前,很少有研究结合生境斑块的空间分布格局和物种在景观基质中的环境感知来深入探讨生境网络的构建与优化问题。

现有的理论与方法中,如生境适宜性评价<sup>[9]</sup>、形态学空间格局(MSPA)分析法<sup>[18]</sup>、最小成本路径(LCPs)法<sup>[19-21]</sup>、电路理论<sup>[22-24]</sup>、图论等<sup>[25-26]</sup>,多关注景观破碎化背景下重要生境斑块的识别与相互连接,但忽略了它们对周围斑块的辐射效应。根据岛屿生物地理学与复合种群理论,大型生境斑块可以容纳更多物种并作为“物种池”在周围岛屿斑块中产生物种联系和形成辐射效应<sup>[26-27]</sup>。由于景观中通常存在多个大型斑块作为“物种池”,辐射效应使得破碎化的生境在空间上形成多个组团/类群。生态组团被定义为由一个及以上大型生境作为核心,与周围斑块具有紧密生态联系的生境集合<sup>[26]</sup>,空间上呈现各组团内部紧密联系、彼此联系松散的格局。然而,当景观中生境斑块仅占总面积的一小部分时,斑块特征(如面积、分布)和隔离程度对生态过程会产生更为显著的影响<sup>[2]</sup>,因此,生境的这种组团化特征在高度城市化地区则表现得更加明显。

建立生态廊道是强化生境组团联系的重要措施,包括识别迁移路径、布设垫脚石斑块或保护促进连通性的线性区域<sup>[17, 28-29]</sup>。通常,生态廊道的划定需要考虑物种在异质性景观中的运动能力。这一般由生成的景观阻力面来表征,而后利用最小成本路径法确定生境斑块之间的最小累积阻力路径<sup>[7, 19-20]</sup>。但此过程存在明显的局限性<sup>[19]</sup>。一方面,根据专家知识与经验数据生成的景观阻力面可能无法准确评估景观对物种运动的潜在影响,如随机行为、能量消耗等<sup>[7, 19]</sup>。另一方面,两个斑块之间的LCPs是唯一且不具备宽度的路径,

而由于物种对环境感知与适应性的变化,实际运动过程中往往会随机选择多种次优廊道及其组合。事实上,生态廊道是一个具有明确定义的地理空间<sup>[17, 30-31]</sup>。因而,面向生物多样性保护的生态网络构建与优化,不能仅依靠理论上的最小成本路径,还需基于物种感知与随机运动,更广泛地考虑异质性景观中多重廊道的组合并落实到空间范围。

本文以南京市为研究区、白鹭为目标物种,提出了基于生境组团化分析与 LSCorridors 模拟的生态网络构建与优化研究思路。首先,通过综合生境适宜性评价、干扰度评价、最大熵(MaxEnt)模型模拟实现了物种生境源地的识别,并基于景观连通性指标与核密度分析,对物种生境分布格局展开了组团化分析;然后,利用 LCPs 构建生态网络的同时,结合不同生境组团之间的联系情况,定义识别了新增型与提升型两类目标优化廊道,形成了总体方案;最后,考虑到 LCPs 的局限性以及物种的环境感知与随机性运动,应用 LSCorridor 软件模拟分析了目标优化廊道的多重可能路径,进而提出了多类型、差异化的廊道保护与修复策略。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

南京位于北纬 31°14'—32°37',东经 118°22'—119°14',总面积 6587 km<sup>2</sup>,属北亚热带季风性湿润气候,四季分明,年平均降雨量为 1106.5 mm,地形以低山缓岗为主(图 1)。辖区内金牛湖、玄武湖、石臼湖、秦淮河等大小湖泊水系众多,林木覆盖率超 30%,为鸟类等提供了良好的生存环境。据统计,境内鸟类数目逾 200 种,涉及鹭科、鸫科、鹎科、鸠鸽科、鸦科等众多类别,而白鹭(*Egretta garzetta*)作为优势种,活动广泛、数量较多,是地区生态环境质量变化的重要指示物种。丰厚的自然资源造就了南京“绿都”的美称,但作为城镇化率达 87.01% 的高度发达城市,南京过去建设用地的快速扩张以及人类活动干扰对生态系统破坏严重,威胁了物种自然生境的完整性与连通性,给生物多样性保护及生态修复造成了巨大压力。

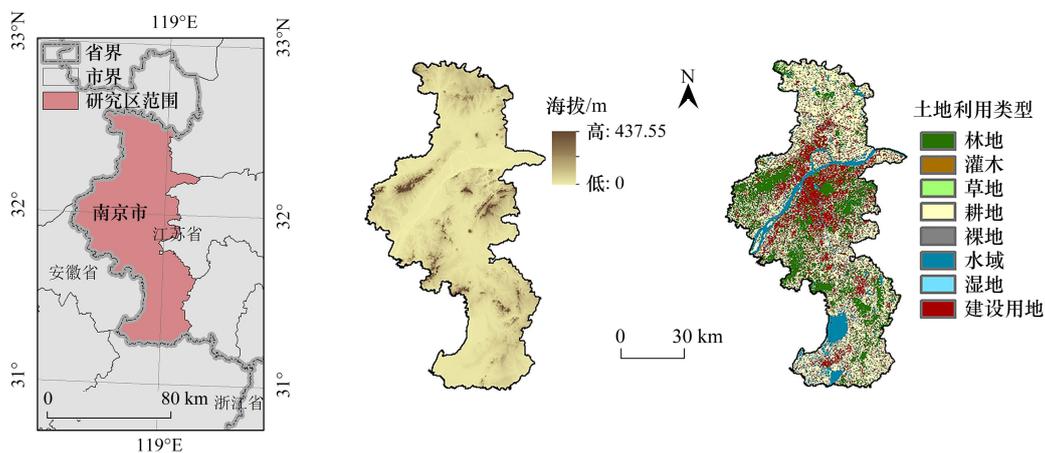


图 1 研究区的范围与土地利用现状及海拔

Fig.1 The range, land use status, and elevation of the study area

### 1.2 数据来源

本文主要数据如表 1 所示。其中土地利用/土地覆被类型划分为:林地、灌木、草地、耕地、建设用地、裸地、水域、湿地 8 类。所有栅格数据处理包括相关分析计算都采用 30 m 分辨率,并在统一的投影与地理坐标系下完成。

## 2 研究方法

### 2.1 目标物种选择与生境斑块识别

选取目标(焦点)物种是探讨生物多样性及栖息地保护网络可行方案的主流工具<sup>[11, 31, 34-35]</sup>。其一般选

取原则包括:物种受威胁程度<sup>[36-37]</sup>、栖息地是否涵盖区域主要生境地类、生物学上的代表性与典型性、是否引起公众关注<sup>[38]</sup>、对环境条件与景观变化的敏感性与指示功能<sup>[39]</sup>、分布特征与生活习性等<sup>[11, 35, 40]</sup>。综合以上,本文选取白鹭(*Egretta garzetta*)作为南京市域生境网络构建与优化的目标物种。白鹭隶属鸟纲、涉禽,常觅食于河流、湖泊水库、湿地(泥滩)、水田,并在繁殖期偏好于乔木林地筑巢,涉及觅食地与筑巢地生境,两者都易受人类活动干扰影响,如建筑物高度与密度、道路、照明、污染、噪音等。它的栖息地海拔一般在 70 m 以下、面积 10 hm<sup>2</sup>以上、所处坡度较小;筑巢地高度通常在 10 m 到 20 m 之间,需较高的植被覆盖度,在离巢近处觅食,警戒距离与惊飞距离大约为 15 m 与 10 m。同时,白鹭作为具有广泛生态位的“广适种”,能够一定程度上“忍受”人为干扰活动与环境变化,在城市地区表现出一定的适应性。结合上述特征及参考已有研究<sup>[9, 15, 40-44]</sup>,本文选取土地利用类型、植被、地形、与觅食地/筑巢地距离,分别构建白鹭筑巢地与觅食地生境适宜性评价指标体系(表 2 和 3);考虑道路、人工光源(基于自然断点法的夜间灯光指数值分类)、建筑物(高度)三个指标构建基于物种感知的干扰度评价指标体系(表 4),其空间计算结果作为生境适宜性修正的一个参数。指标权重由专家打分法确定。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据类型 Data types	数据来源 Data sources	分辨率 Resolution
土地利用/土地覆盖 Land use/ land cover	欧洲航空局 (ESA) 发布的 2020 年 10 m 土地利用/土地覆盖数据集 (WorldCover v100) ( <a href="https://code.earthengine.google.com/">https://code.earthengine.google.com/</a> )	10 m
道路 Roads	OpenStreetMap 网站的道路矢量数据 ( <a href="http://www.openstreetmap.org/">http://www.openstreetmap.org/</a> )	—
植被 Vegetation	国家生态数据中心资源共享平台 2020 年中国 30 m 归一化植被指数 (NDVI) 数据集 ( <a href="http://www.nesdc.org.cn/">http://www.nesdc.org.cn/</a> )	30 m
海拔 Elevation	地理空间数据云数字高程模型 (DEM) 数据 ( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )	30 m
建筑高度 Building height	Zenodo ( <a href="https://zenodo.org/record/7064268#.YxtVAuxBz0p">https://zenodo.org/record/7064268#.YxtVAuxBz0p</a> ) <sup>[32]</sup>	10 m
树冠高度 Canopy height	数字生态系统课题组 (Digital Ecosystem Group) ( <a href="https://3decology.org/2023/06/21/forest-tree-height-map-of-china-2/">https://3decology.org/2023/06/21/forest-tree-height-map-of-china-2/</a> ) <sup>[33]</sup>	30 m
夜间灯光 Nightlight	珞珈一号夜光遥感卫星获取的夜间灯光数据 ( <a href="http://59.175.109.173:8888/index.html">http://59.175.109.173:8888/index.html</a> )	130 m
鸟类发生点 Birds occurrence	中国观鸟记录中心 ( <a href="http://www.birdreport.cn/">http://www.birdreport.cn/</a> )	—

表 2 白鹭筑巢地生境适宜性评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of habitat suitability of *Egretta garzetta* nesting sites

一级指标 The first-grade index	二级指标 The second-grade index	三级指标 The third-grade index	适宜性赋值 Suitability value assignment	权重 Weight	
				一级指标	二级指标
土地利用/土地覆盖 Land use/land cover	林地 耕地、灌木 草地、湿地 裸地 建设用地、水域	—	7	0.33	—
		—	5		
		—	3		
		—	1		
		—	0		
植被 Vegetation	植被覆盖度 (NDVI 值)	>0.6	7	0.28	0.50
		0.4—0.6	5		
		0.2—0.4	3		
		<0.2	1		
	树冠高度	10—20 m	7	0.50	
		5—10 m	5		
		3—5 m	3		
地形 Topography	高程 (DEM)	<3 m, >20 m	1	0.17	0.27
		0—70 m	7		
		70—150 m	5		
		150—300 m	3		
		>300 m	1		

续表

一级指标 The first-grade index	二级指标 The second-grade index	三级指标 The third-grade index	适宜性赋值 Suitability value assignment	权重 Weight		
				一级指标	二级指标	
与可能的觅食地距离 Distance to foraging sites	坡度	<10%	7	0.22	0.40	
		10—25%	5			
		25—50%	3			
		>50%	1			
	起伏度	0—20 m	7		0.33	
		20—50 m	5			
		50—100 m	3			
		>100 m	1			
	与大型水域地 (面积>5 hm <sup>2</sup> ) 距离	<0.5 km	<0.5 km		7	0.55
			0.5—1 km		5	
			1—5 km		3	
			>5 km		1	
与草本湿地 (面积>1 hm <sup>2</sup> ) 距离		<0.5 km	7	0.45		
		0.5—1 km	5			
		1—5 km	3			
		>5 km	1			

表 3 白鹭觅食地生境适宜性评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of habitat suitability of *Egretta garzetta* foraging sites

一级指标 The first-grade index	二级指标 The second-grade index	三级指标 The third-grade index	适宜性赋值 Suitability value assignment	一级指标权重
				Weight of the first-grade index
土地利用/土地覆被 Land use/land cover	水域、湿地 耕地 草地、灌木、林地 裸地 建设用地	—	7	0.47
		—	5	
		—	3	
		—	1	
		—	0	
植被 Vegetation	植被覆盖度 (NDVI 值)	0—0.2	7	0.20
		0.2—0.5	5	
		0.5—0.7	3	
		>0.7	1	
与可能的筑巢地距离 Distance to nesting sites	与大片林地(面积 >10 hm <sup>2</sup> ) 距离	<0.5 km	7	0.33
		0.5—1 km	5	
		1—5 km	3	
		>5 km	1	

表 4 基于物种感知的干扰度评价指标体系

Table 4 Disturbance evaluation index system based on species perception

一级指标 The first-grade index	二级指标 The second-grade index	三级指标 The third-grade index	干扰强度赋值 Disturbance value assignment	权重 Weight	
				一级指标	二级指标
与道路距离 Distance to roads	与主干道距离	0—120 m	7	0.29	0.50
		120—360 m	5		
		360—600 m	3		
		>600 m	1		
	与次干道距离	0—90 m	7		0.20
		90—180 m	5		
		180—540 m	3		
		>540 m	1		

续表

一级指标 The first-grade index	二级指标 The second-grade index	三级指标 The third-grade index	干扰强度赋值 Disturbance value assignment	权重 Weight				
				一级指标	二级指标			
与建筑物距离 Distance to buildings	与铁路距离	0—240 m	7	0.33	0.30			
		240—480 m	5					
		480—900 m	3					
		>900 m	1					
	建筑高度>30 m 的地区	0—300 m	7		0.33	0.50		
		300—1200 m	5					
		1200—3600 m	3					
		>3600 m	1					
		建筑高度 10—30 m 的地区	0—150 m				7	0.30
			150—600 m				5	
			600—2400 m				3	
			>2400 m				1	
建筑高度<10 m 的地区	0—30 m	7	0.20					
	30—120 m	5						
	120—1200 m	3						
	>1200 m	1						
	与人工光源距离 Distance from artificial light sources	夜间灯光指数值高 的地区		0—360 m	7	0.38	0.50	
				360—2400 m	5			
				2400—4800 m	3			
				>4800 m	1			
夜间灯光指数值中 的地区		0—240 m	7	0.30				
		240—1200 m	5					
		1200—2400 m	3					
		>2400 m	1					
夜间灯光指数值低 的地区		0—120 m	7	0.20				
		120—600 m	5					
		600—1200 m	3					
		>1200 m	1					

此外,从物种实际生态位出发,将区内白鹭 347 个观测点导入 MaxEnt 模型,并以筑巢地与觅食地生境适宜性及干扰度评价结果作为环境变量,预测物种在南京市域内的潜在分布区。其中,随机选取 25% 的分布数据用以训练模型,其余 75% 用于测试;选用刀切法评估环境变量重要性并绘制响应曲线;其他参数为默认值;采用受试者工作特征曲线(ROC)下的面积即 AUC 值评估模型性能(其值越接近 1 表明模拟精度越高)<sup>[43, 45]</sup>。本文设置模拟 10 次,得到平均 AUC 值为 0.785,模型表现较优,将最高值 AUC=0.814 的物种分布概率图作为适宜性修正的另一参数。

结合干扰度评价结果与 MaxEnt 模型预测结果对生境适宜性评价进行修正,修正公式如下:

$$H = \begin{cases} H_n = h_n \frac{1 + M}{1 + D} \\ H_f = h_f \frac{1 + M}{1 + D} \end{cases}$$

式中, $H_n$ 与 $H_f$ , $h_n$ 与 $h_f$ 分别表示白鹭筑巢地与觅食地生境适宜性评价修正后、修正前的结果,值越高则适宜性高; $D$ 为通过模糊较大值变换函数实现归一化后的干扰度评价结果, $D \in (0, 1)$ ;  $M$ 为 MaxEnt 输出的物种分布可能性的预测值, $M \in (0, 1)$ ; 1 为给定的常数;采用自然断点法将 $H_n$ 与 $H_f$ 的值划分为五类,从高到底依次为

极高适宜、高度适宜、中度适宜、低度适宜和极低适宜,提取极高适宜作为白鹭生境识别结果,并从中剔除了面积小于  $10 \text{ hm}^2$  的景观斑块。

## 2.2 生境组团化分析与生态网络构建

本文旨在对南京市白鹭生境在空间上的类群即生境组团化特征展开分析。为此,首先选取景观连通性指标:整体连通性(dIIC)、可能连通性(dPC)和面积加权通量(dAWF)实现了单个生境斑块重要性量化<sup>[17, 36]</sup>。考虑到白鹭觅食半径及尺度对指标计算结果的影响,以 500 m 作为距离梯度间隔,依次测试 0.5 km 到 10 km 距离阈值下三个指标的变化情况,发现在 4.5 km 时变化趋于稳定,确定为最佳距离阈值,连通性概率设置为 0.5<sup>[46]</sup>。其次,将三个指标进行归一化等权相加得到衡量斑块重要性程度的综合值,值越高表明生境在景观中越具有“物种池”功能;将这一综合值作为生境节点核密度分析的字段,以 4.5 km 作为搜索半径,从而映射出生境斑块在空间上的组团化特征。景观连通性指标计算由 Conefor 2.6 软件实现,相关公式及含义请参见相关文献<sup>[36, 46-47]</sup>。

基于最小成本路径(LCPs)法确定目标物种生境斑块之间的物种最佳迁移路径,构建了南京市白鹭生境网络。LCPs 能够计算物种从源地到目的地运动迁移过程中的所耗费的累积成本,其中构建景观阻力面是核心步骤<sup>[19, 48]</sup>。由于生境适宜性评价因子同时也是普遍考虑的阻力因子<sup>[19, 30, 49]</sup>,故先将白鹭筑巢地与觅食地生境适宜性评价结果进行等权相加并归一化处理;根据适宜性与阻力值的负相关性,再将该值使用模糊较小值变换函数修正得到了阻力值介于 0—1 的景观阻力面;最后利用 Linkage Mapper Toolkit 在 ArcGIS 10.5 中实现 LCPs 的识别,并依据最佳阈值距离进行了区分界定。

## 2.3 优化廊道识别

考虑到 LCPs 的局限性,本文利用 LSCorridors v1.0 软件对目标优化廊道进行了重复模拟。鉴于许多物种会选择穿过景观中可能不是最具渗透性的区域,该软件应用考虑了物种以不同的方式感知和响应周围的景观异质性,并允许模拟具有不同物种需求的廊道<sup>[7, 31, 49]</sup>。其操作简单,由用户指定一对斑块,一次可以模拟多重廊道,包括四种模拟方法(MP、MLmin、MLavg 和 MLmax)。其中 MP 是最简单的方法,其按单个像素测度,不考虑周围景观影响<sup>[7]</sup>。即在该方法中,为给景观阻力面添加随机变化,每次模拟将生成一个随机值在 0—1 之间均匀分布的栅格图,并将该图乘以一个可变参数( $\geq 0$  的整数,0 表示不具随机性),而后对乘法得到的每个值加 1,得到新的随机图再乘以每个像素阻力值,生成一个新的景观阻力面。实践中,如果可变参数用为  $x$ ,则表示每个像素阻力值乘以区间  $[1, x + 1]$  内的随机值。ML 方法则是根据物种对景观环境感知的强弱考虑影响中心像素的相邻像素,即进一步在 MP 的基础上,MLmin、MLavg、MLmax 分别将景观阻力面的像素使用一个由用户给定的窗口半径内(可被认为是物种空间感知范围)的像素最小值(min)、平均值(avg)和最大值(max)取代<sup>[7]</sup>。基于研究目标及数据可获取性,本文选择 MP 方法,可变参数为默认值 2,模拟次数为 100。

本文生境网络优化包括打通不同生境组团之间的迁移廊道以及提升当前生境组团之间的生态联系。为便于阐述,先将在 4.5 km 最优距离阈值之内的 LCPs 定义为“稳定型迁移廊道”,之外的定义为“优化备选型迁移廊道”;需打通的不同生境组团之间的迁移廊道称为“优化新增型迁移廊道”,需提升的维系着生境组团之间的迁移廊道称为“优化提升型迁移廊道”。优化新增与提升型廊道即两种目标优化廊道类型。结合实际情况与岛屿生物地理学等理论,设定选择原则包括:优先考虑重要性较高生境斑块之间廊道;新增廊道选择依据距离较短原则;提升廊道选择依据距离较远原则;不同生境组团之间仅考虑一条优化新增或提升型廊道;生境组团内部因廊道联系度强而不纳入优化考虑;合理利用生境组团周围连接的岛屿生境;加强生境组团的辐射效应。本文依据这些原则对目标优化廊道进行了 LSCorridors 模拟并与 LCPs 结果进行了对比分析。

## 3 结果分析

### 3.1 生境适宜性与生境斑块

如图 2 所示,为南京市白鹭生境筑巢地与觅食地适宜性评价结果以及生境斑块识别结果。其中,共识别

极高适宜的筑巢地生境 30951.72 hm<sup>2</sup> (4.70%), 高度适宜的 112887.27 hm<sup>2</sup> (17.13%), 中度适宜的 178195.32 hm<sup>2</sup> (27.05%), 低度适宜的 137519.82 hm<sup>2</sup> (20.87%), 极低适宜的 199287.00 hm<sup>2</sup> (30.25%); 得到极高适宜的觅食地生境 22182.39 hm<sup>2</sup> (3.37%), 高度适宜的 136549.71 hm<sup>2</sup> (20.73%), 中度适宜的 152207.64 hm<sup>2</sup> (23.10%), 低度适宜的 225631.89 hm<sup>2</sup> (34.25%), 极低适宜的 122269.50 hm<sup>2</sup> (18.56%)。根据两者的极高适宜类并剔除冗余, 共识别了 332 个筑巢地生境斑块 (总面积为 18839.74 hm<sup>2</sup>) 和 182 个觅食地生境斑块 (总面积为 13004.10 hm<sup>2</sup>); 两类叠加合并后, 得到生境斑块共计 428 个, 总面积达 31525.75 hm<sup>2</sup>。其中, 筑巢地与觅食地生境重合部分面积占 318.09 hm<sup>2</sup>。

就白鹭生境地类组成而言, 主要是林地与水域, 分别为 17794.26 hm<sup>2</sup> 与 11286.99 hm<sup>2</sup>; 但需指出, 有相当一部分数量的耕地兼具了筑巢地生境 (1342.76 hm<sup>2</sup>) 与觅食地生境 (956.11 hm<sup>2</sup>) 的景观功能, 这与白鹭的生活习性相吻合。此外, 有 82.80 hm<sup>2</sup> 湿地被识别为筑巢地生境, 远高于被识别的觅食地生境 3.22 hm<sup>2</sup>, 这可能与南京市湿地普遍具备较高的植被覆盖度且距离水域近的特征有关。空间上, 南京市白鹭生境斑块主要集中在中部长江段, 西部老山国家森林公园地区及狮子岭、大刺山、天井山地区, 东部玄武湖、钟山、汤山、宝华山、栖霞山片区, 以及中南部将军山、方山、牛首山等山林, 南北两端各有斑块散布; 总体上, 主要聚集于山林中低海拔段、沿江沿湖地区, 呈现较为明显的生境破碎化、隔离化和局部集聚的格局特征。

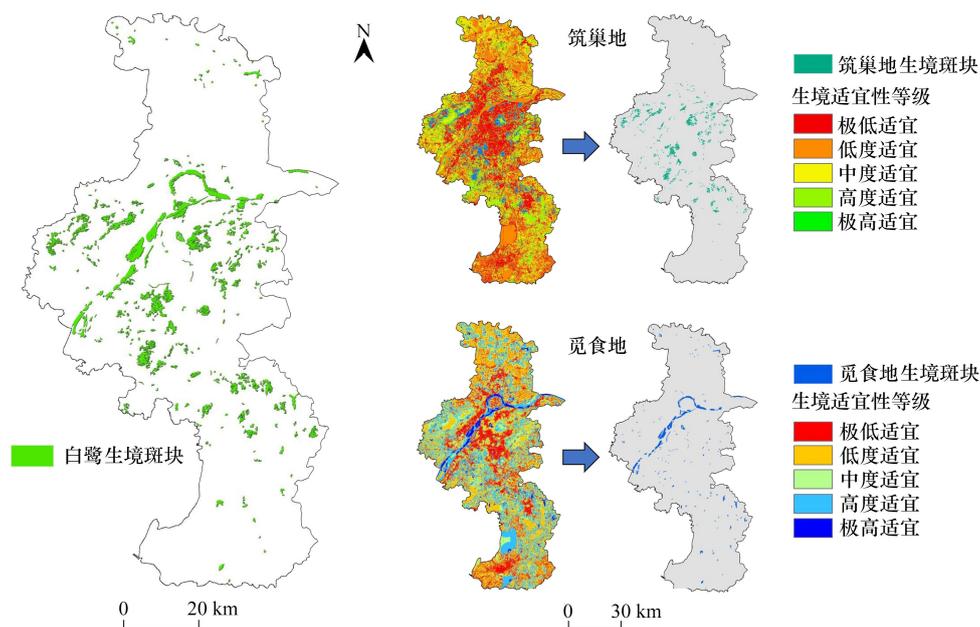


图2 白鹭筑巢地与觅食地生境适宜性评价及斑块识别

Fig.2 Habitat suitability evaluation of *Egretta garzetta* nesting/feeding sites and patch identification

### 3.2 生境组团化与生境网络

南京市白鹭生境斑块重要性的量化以及生境组团化分析结果, 见图 3。根据 dIIC、dPC、dAWF 指标计算以及重要性分级结果可知, 南京长江段水域为白鹭提供了重要 (觅食地) 生境斑块, 这些斑块具有较大的生境面积和生境连通性贡献, 但斑块总数较少, 仅有 5 个; 中等重要程度的生境共计 11 个, 排列分布在长江两侧, 主要是较大型的筑巢地生境, 周围有着较多重要性等级次一级的小型生境; 总体上, 离江越远处则生境斑块相对重要性逐渐降低。核密度分析大致呈现了南京市白鹭九大生境组团 (I—IX), 空间分布格局上, 各组团以南京长江段水域斑块类群为轴, 排列分布, 彼此间联系较为薄弱, 市域南北部几乎无生境组团分布, 多为散布着的小型生境孤岛。

如图 4 所示, 模拟得到南京市白鹭生境迁移廊道 (LCPs) 1140 条, 总长度 3911.48 km, 最长廊道 58.32 km,

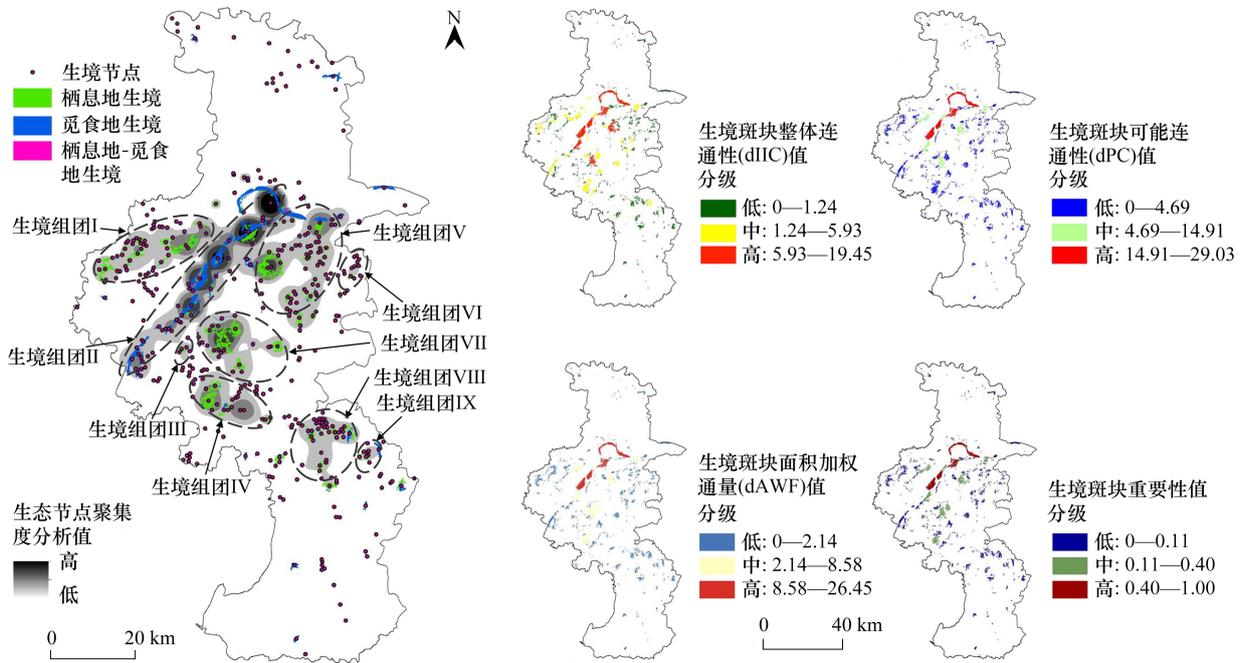


图 3 白鹭生境斑块重要性评价与生境组团化分析

Fig.3 Evaluation of habitat patch importance of *Egretta garzetta* and analysis of habitat grouping

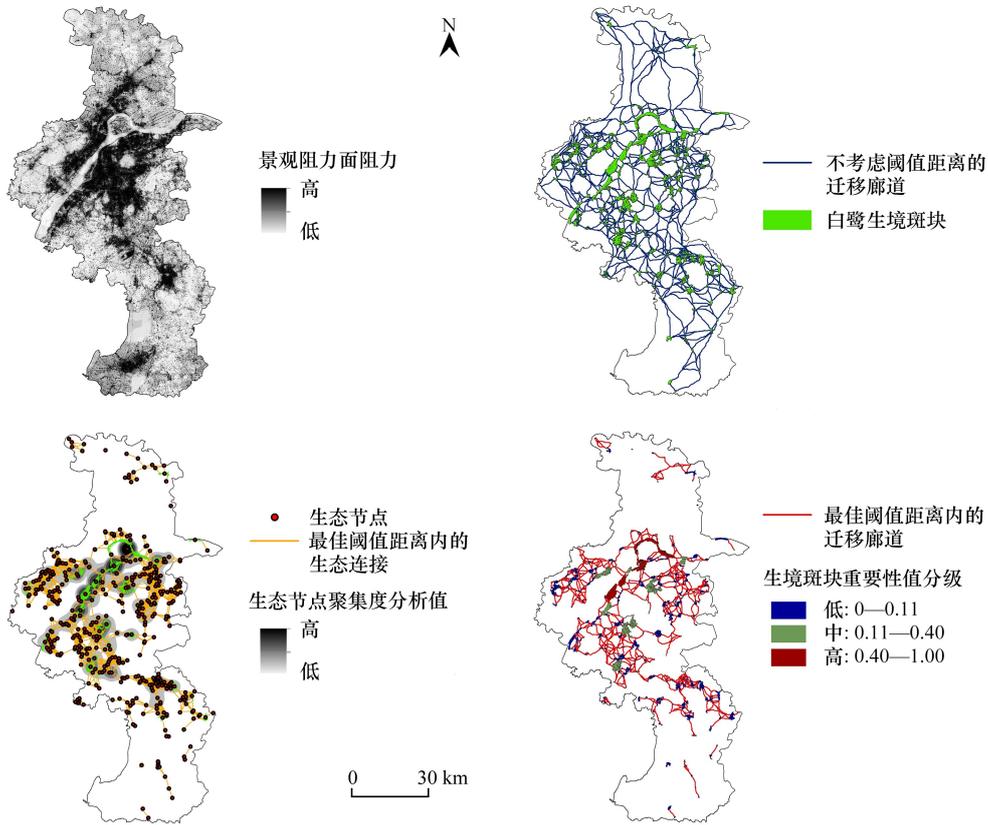


图 4 基于 Linkage Mapper 的白鹭生境网络构建与最佳距离阈值下的廊道提取

Fig.4 Establishment of *Egretta garzetta* habitat network based on Linkage Mapper and corridor extraction under the optimal distance threshold

平均长度 3.43 km;而在最佳距离阈值 4.5 km 之内,907 条迁移廊道能在不同斑块之间保持稳定的生态连接,总长度为 1548.59 km,占全部廊道的 39.59%,最长廊道为 8.82 km,平均廊道长度 1.71 km。这表明存在少数跨度大的迁移廊道在该阈值距离下难以被打通。而这些廊道普遍是各生境组团之间的联系廊道,因而有必要通过创建垫脚石斑块以促进物种迁移。大多数廊道跨度普遍较短,主要位于各生境组团内部,维持着生境网络局部的重要生态过程。但需注意各生境组团之间仅有少数稳定的生态廊道存在,因而其具有极高的生态保育价值。

### 3.3 生态网络优化

如表 5、图 5 所示,分别确定了 8 条优化新增型廊道(LA-01—LA-08)和 10 条优化提升型廊道(LI-01—LI-10),对应 LCPs 总长度分别为 77.13 km 和 53.28 km。其中,最长的 LA-07 为 23.83 km,其平均 LSCorridors 为 25.34 km,连接着生境斑块 N398 与 N410,是生境组团 II 与研究区北部零散孤岛化生境之间的优化新增型廊道;最短的 LI-02 为 3.78 km,其平均 LSCorridors 为 6.07 km,处于生境斑块 N061 与 N088 之间,是生境组团 VIII 与 IX 之间维持物种迁移的优化提升型廊道。LCPs 与 LSCorridors 模拟结果的平均路径长度相比,普遍较短(如廊道 LI-06),这主要是由于 LSCorridors 考虑了物种运动过程中在斑块边缘起止处的随机选择性。但是,廊道 LI-05 和 LI-07 则相反,这类廊道说明存在这样一种情况,即当 LCPs 较长时,尽管对应耗费成本较小,由于物种对环境变化有着一定适应性,导致物种倾向选择克服较大的景观阻力而寻求更短的迁移路径。另外,多数模拟的 LSCorridors 与 LCPs 在空间分布上均存在明显差异(如廊道 LA-06 和 LI-03),虽然在走向趋势上保持相对的吻合(如廊道 LA-07),但从耗费成本的角度,前者有着多种次优的路径方案可供选择,这更符合现实情况。因此,依据 LCPs 的生境网络保护方案在现实中可能是低效的,需要进一步将物种对环境感知的因素纳入廊道模拟与识别中,并针对不同情况制定差异化的优化措施。此外,有两条廊道即 LA-03 和 LA-08,在模拟 100 次过程中仅生成 77 和 59 条路径,这主要是异质性景观中生态夹点或障碍点的阻滞作用所造成的,例如,廊道 LA-08 中有着两处极其狭窄的通道,是所有模拟路径的必经之处。

表 5 两种目标优化廊道类型的特征

Table 5 Characteristics of the two corridor types that proposed to be optimized

廊道优化类型 Corridor optimized types	编号 Number	最小成本路径长度 LCPs length/km	LSCorridors 模拟 LSCorridors simulation		连接的生境斑块 Habitat patches connected
			平均长度/km	生成数量/条	
优化新增型廊道 The added corridor	LA-01	8.65	9.67	100	N209—N259
	LA-02	11.23	12.39	100	N011—N016
	LA-03	5.90	5.98	77	N027—N033
	LA-04	6.36	7.62	100	N057—N087
	LA-05	8.53	9.63	100	N106—N137
	LA-06	5.78	9.78	100	N185—N219
	LA-07	23.83	25.34	100	N398—N410
	LA-08	6.85	7.58	59	N204—N226
优化提升型廊道 The improved corridor	LI-01	5.04	6.73	100	N189—N212
	LI-02	3.78	6.07	100	N061—N088
	LI-03	5.68	6.17	100	N070—N083
	LI-04	4.30	5.14	100	N148—N161
	LI-05	5.59	5.23	100	N128—N142
	LI-06	5.49	6.98	100	N161—N176
	LI-07	8.82	5.14	100	N177—N197
	LI-08	4.77	6.44	100	N205—N215
	LI-09	4.80	6.47	100	N242—N259
	LI-10	5.01	7.78	100	N329—N356

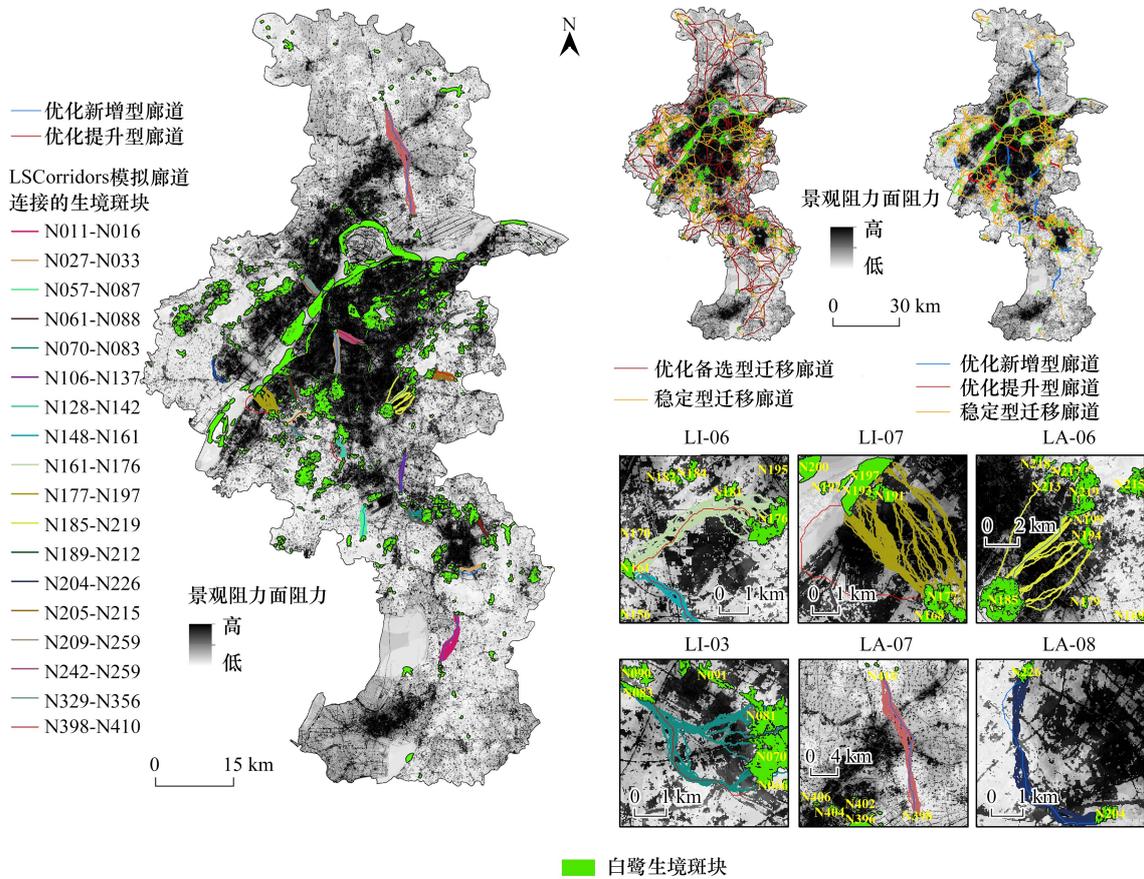


图 5 基于 LSCorridors 的白鹭生境网络优化与迁移廊道可视化

Fig.5 Optimization of *Egretta garzetta* habitat network and visualization of migratory corridor based on LSCorridors

### 4 讨论与结论

#### 4.1 讨论

本文通过创新性地融合生境组团化分析和基于物种感知与随机运动的多重生态廊道模拟,开展了面向生物多样性保护的生境网络构建与优化研究。与以往研究相比,本文形成了基于“适宜性-干扰度-生态位”综合修正的目标物种生境识别方法,提高了物种适宜生境评价的科学性与可靠性。而生境的组团化分析为辨识高度城市化地区物种生境空间分布格局提供了新思路,初步形成了可供实践参考的两类目标优化廊道及识别方法。同时,本研究引入 LSCorridors 这一国际上新型生态廊道模拟技术,与 LCPs 相比,在刻画廊道空间范围上具有显著优势;而与电路理论相比,尽管两者都考虑了物种运动的随机性<sup>[50]</sup>,但 LSCorridors 模拟融入了物种运动过程中对周围环境的感知,因而涵盖了物种可能会穿越不具有渗透性景观的情况<sup>[31, 49]</sup>,这对高密度城市建成区生态廊道的构建与修复更加适用。

根据研究结果,本文强调需要针对不同类型的生态廊道采取差异化的构建与优化措施。总体上,针对优化新增型廊道,建议主要以在廊道范围内实施景观改造与管理手段为主,即系统营建垫脚石斑块并长期维护(如植树造林),为物种迁移提供暂时的“避难所”;针对优化提升型廊道,建议主要考虑降低人为干扰影响,如控制污染和噪音、绿化建筑、适当清除干扰源等。然而,上述措施还需考虑优化廊道的具体跨度并在合适的空间范围内进行。如图 5 中,廊道 LI-06 与 LA-07 的空间范围相对确定,因此前者可以围绕 LCPs 在中段处建设一处垫脚石,而较长的 LA-07 则可设置多处;但对于廊道 LI-07 来说,LCPs 的参考价值不足,应结合

LSCorridors 模拟结果在高频次经过点,即图中阻力值相对较低处,采取多方位建设垫脚石的措施;尽管廊道 LA-06 中存在多处物种迁移潜在通道,但高频次的基本与 LCPs 吻合,可根据现实情况建设多条廊道;相比之下,廊道 LI-03 有着两条明显的分叉路径,则可在分叉处营造半自然生境,并提议建设和维护分叉的两条廊道;廊道 LA-08 是存在明显生态夹点/障碍点的一种类型,需实施夹点的修复与障碍点的清除。综合来看,上述廊道类型大致涵盖了实践中的典型情况,由此提出差异化的优化建议可为生境廊道的规划与建设提供决策参考。

目前,生境廊道构建优化一直是讨论的焦点也是难点,而具体宽度与范围界定依然缺少统一的标准。本研究在提供一种新思路的同时,仍有几个方面需要改进。一方面,研究仅考虑了白鹭(鸟类)这一目标物种,未将其他陆生动物如爬行类、哺乳类等纳入生境识别体系和保护网络,这可能导致对区域生物多样性保护情况的高估。因为,就迁移能力而言,它们较鸟类要弱许多,景观障碍不可逾越的可能性也随之增加,面临更加隔离化的生境(组团)和更少稳定连接的廊道的情境。研究有必要从物种“感知-忍耐-适应”能力的综合维度出发,建立较为全面的物种分类标准及生境适宜性评价体系,当然,此过程中还需警惕多源时空数据融合造成可能的偏差。另一方面,LSCorridors 提供了四种模拟方法和一个可变参数,但研究只使用了默认方法参数,主要是因为缺乏对白鹭运动随机性程度及其对环境感知强度的相关数据,而这须由大量的实验观测作为支撑。此外,本文构建的生境网络主要是面向生物多样性保护单一功能的系统,未来研究可以融合碳、水、热、噪声环境调控等多种功能及生态过程,以期实现高强度、高密度开发地区有限生态空间的高效利用。

## 4.2 结论

本文以南京市为例,开展了基于生境组团化分析与 LSCorridors 模拟的白鹭生境网络构建与优化研究。结果表明:(1)区域白鹭生境斑块共计 428 个,总面积达 31525.75  $\text{hm}^2$ ,主要是林地与水域,分别为 11794.26  $\text{hm}^2$  与 11286.99  $\text{hm}^2$ ,总体呈现较为明显的生境破碎化、隔离化和局部集聚的空间格局特征;(2)以最佳阈值距离 4.5 km 为搜索半径,识别了白鹭九大生境组团,主要排列分布在南京长江段水域斑块群两侧,彼此联系较薄弱,南、北部几乎无生境组团分布,多为小型生境孤岛;(3)存在 907 条稳定连接的廊道,总计 1548.59 km,普遍较短、分布紧凑,主要位于各生境组团内部,而少数维系生境组团之间生态连接的廊道有着极高的保育价值;(4)据此确定的 8 条优化新增型廊道和 10 条优化提升型廊道,其基于 LSCorridors 软件模拟的结果与 LCPs 相比,在空间分布上存在明显差异,前者更符合现实情况,这一定程度上验证了依据 LCPs 的生境网络保护方案在现实中可能是低效的。研究成果能够为面向生物多样性保护的城市高密度地区生境网络的保护以及重点生态廊道的规划实践提供决策参考。

**致谢:**感谢圣保罗州立大学生态学系、空间生态与保护实验室朱莉安娜博士(Juliana Silveira dos Santos)对 LSCorridors 软件包及算法应用提供的帮助。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Chase J M, Blowes S A, Knight T M, Gerstner K, May F. Ecosystem decay exacerbates biodiversity loss with habitat loss. *Nature*, 2020, 584 (7820): 238-243.
- [ 2 ] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, Davies K F, Gonzalez A, Holt R D, Lovejoy T E, Sexton J O, Austin M P, Collins C D, Cook W M, Damschen E I, Ewers R M, Foster B L, Jenkins C N, King A J, Laurance W F, Levey D J, Margules C R, Melbourne B A, Nicholls A O, Orrock J L, Song D X, Townshend J R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 2015, 1 (2): e1500052.
- [ 3 ] von Haaren C, Reich M. The German way to greenways and habitat networks. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/2/3/4): 7-22.
- [ 4 ] Marini L, Bartomeus I, Rader R, Lami F. Species-habitat networks: a tool to improve landscape management for conservation. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(4): 923-928.
- [ 5 ] Opdam P. Assessing the conservation potential of habitat networks. Gutzwiller K J. *Applying Landscape Ecology in Biological Conservation*. New York: Springer, 2002: 381-404.

- [ 6 ] Hobbs R J. Habitat networks and biological conservation. Gutzwiller KJ. *Applying Landscape Ecology in Biological Conservation*. New York: Springer, 2002: 150-170.
- [ 7 ] Ribeiro J W, dos Santos J S, Dodonov P, Martello F, Niebuhr B B, Ribeiro M. LandScape Corridors (lscorridors): a new software package for modelling ecological corridors based on landscape patterns and species requirements. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(11): 1425-1432
- [ 8 ] Shen Z, Wu W, Tian S Q, Wang J. A multi-scale analysis framework of different methods used in establishing ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104579.
- [ 9 ] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. *生态学报*, 2015, 35(14): 4897-4906.
- [ 10 ] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [ 11 ] 胡望舒, 王思思, 李迪华. 基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划. *生态学报*, 2010, 30(16): 4266-4276.
- [ 12 ] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [ 13 ] 吴榛, 王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1976-1985.
- [ 14 ] 张小飞, 王仰麟, 李贵才, 吴健生, 李正国. 流域景观功能网络构建及应用——以台湾乌溪流域为例. *地理学报*, 2005, 60(6): 974-980.
- [ 15 ] 费凡, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 刘佳, 宋小虎. 基于二维与三维信息的南京市主城区生态网络格局对比分析. *生态学报*, 2020, 40(16): 5534-5545.
- [ 16 ] Peng J, Zhao H J, Liu Y X. Urban ecological corridors construction: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 23-30.
- [ 17 ] Shen Z, Wu W, Chen S F, Tian S Q, Wang J, Li L J. A static and dynamic coupling approach for maintaining ecological networks connectivity in rapid urbanization contexts. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369: 133375.
- [ 18 ] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [ 19 ] Sawyer S C, Epps C W, Brashares J S. Placing linkages among fragmented habitats: do least-cost models reflect how animals use landscapes? *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 668-678.
- [ 20 ] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [ 21 ] 张晓琳, 金晓斌, 赵庆利, 任婕, 韩博, 梁鑫源, 周寅康. 基于多目标遗传算法的层级生态节点识别与优化——以常州市金坛区为例. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 174-189.
- [ 22 ] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [ 23 ] Kong F H, Wang D, Yin H W, Dronova I, Fei F, Chen J Y, Pu Y X, Li M C. Coupling urban 3-D information and circuit theory to advance the development of urban ecological networks. *Conservation Biology*, 2021, 35(4): 1140-1150.
- [ 24 ] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. *生态学报*, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [ 25 ] 宋利利, 秦明周, 张鹏岩, 夏艺菲, 马杰, 曹妮. 基于图论的景观图表达、分析及应用. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3579-3588.
- [ 26 ] Luo Y H, Wu J S, Wang X Y, Zhao Y H, Feng Z. Understanding ecological groups under landscape fragmentation based on network theory. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 210: 104066.
- [ 27 ] 赵淑清, 方精云, 雷光春. 物种保护的理论基础——从岛屿生物地理学理论到集合种群理论. *生态学报*, 2001, 21(7): 1171-1179.
- [ 28 ] Saura S, Bodin Ö, Fortin M J. EDITOR'S CHOICE: stepping stones are crucial for species' long-distance dispersal and range expansion through habitat networks. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(1): 171-182.
- [ 29 ] Lynch A J. Creating effective urban greenways and stepping-stones: four critical gaps in habitat connectivity planning research. *Journal of Planning Literature*, 2018, 34(2): 131-155.
- [ 30 ] Shen Z, Wu W, Chen M, Tian S Q, Wang J. Linking greenspace ecological networks optimization into urban expansion planning: insights from China's total built land control policy. *Land*, 2021, 10(10): 1046.
- [ 31 ] Bhakti T, Pena J C, Niebuhr B B, Sampaio J, Goulart F F, de Azevedo C S, Ribeiro M C, Antonini Y. Combining land cover, animal behavior, and master plan regulations to assess landscape permeability for birds. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214: 104171.
- [ 32 ] Wu W B, Ma J, Banzhaf E, Meadows M E, Yu Z W, Guo F X, Sengupta D, Cai X X, Zhao B. A first Chinese building height estimate at 10 m resolution (CNBH-10 m) using multi-source earth observations and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 291: 113578.
- [ 33 ] Liu X Q, Su Y J, Hu T Y, Yang Q L, Liu B B, Deng Y F, Tang H, Tang Z Y, Fang J Y, Guo Q H. Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 269: 112844.
- [ 34 ] Modica G, Praticò S, Laudari L, Ledda A, Di Fazio S, De Montis A. Implementation of multispecies ecological networks at the regional scale: analysis and multi-temporal assessment. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112494.
- [ 35 ] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径. *生物多样性*, 1998, 6(3): 205-212.

- [36] Xun B, Yu D Y, Liu Y P. Habitat connectivity analysis for conservation implications in an urban area. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 44-52.
- [37] Pereira M, Segurado P, Neves N. Using spatial network structure in landscape management and planning: a case study with pond turtles. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(1/2): 67-76.
- [38] Noble M M, Harasti D, Fulton C J, Doran B. Identifying spatial conservation priorities using Traditional and Local Ecological Knowledge of iconic marine species and ecosystem threats. *Biological Conservation*, 2020, 249: 108709.
- [39] Cardador L, De Cáceres M, Giralt D, Bota G, Aquilué N, Arroyo B, Mougeot F, Cantero-Martínez C, Viladomiu L, Rosell J, Casas F, Estrada A, Álvaro-Fuentes J, Brotons L. Tools for exploring habitat suitability for steppe birds under land use change scenarios. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 119-125.
- [40] 吴未, 胡余挺, 范诗薇, 欧名豪. 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. *生态学报*, 2016, 36(15): 4832-4842.
- [41] 严少君, 朱曦, 俞益武, 申亚梅. 城市绿地引鸟设计的探索与实践——浙江省长兴县龙山鹭鸟公园设计方案浅析. *规划师*, 2007, 23(2): 46-49.
- [42] 吝涛, 薛雄志, 卢昌义, 洪华生. 厦门国家级自然保护区白鹭生态安全评价. *生态学报*, 2006, 26(12): 3998-4006.
- [43] 李敏, 李秀明, 徐家慧, 薛琳, 武爱明, 盘凯筠, 闵晓明, 李玉太, 钱法文. 基于 MaxEnt 模型预测白琵鹭在中国东北地区的适宜分布区. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2691-2703.
- [44] 林永红, 徐鹏, 廖星, 王勇军, 栾胜基. 滨海湿地水鸟飞行阻力格局及空间管制策略——以深圳市深圳湾为例. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3182-3190.
- [45] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [46] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [47] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 135-139.
- [48] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [49] Diniz M F, Dallmeier F, Gregory T, Martinez V, Saldivar-Bellassi S, Benitez-Stanley M A, Sánchez-Cuervo A M. Balancing multi-species connectivity and socio-economic factors to connect protected areas in the Paraguayan Atlantic Forest. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 222: 104400.
- [50] Grafius D R, Corstanje R, Siriwardena G M, Plummer K E, Harris J A. A bird's eye view: using circuit theory to study urban landscape connectivity for birds. *Landscape Ecology*, 2017, 32(9): 1771-1787.