

DOI: 10.5846/stxb201708051407

吴未, 冯佳凝, 欧名豪. 基于景观功能性连接度的生境网络优化研究——以(中国)苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Wu W, Feng J N, Ou M H. Habitat network optimization using landscape functional connectivity: A case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

基于景观功能性连接度的生境网络优化研究 ——以(中国)苏锡常地区白鹭为例

吴 未^{1,2,*}, 冯佳凝¹, 欧名豪^{1,2}

1 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

2 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

摘要: 景观功能性连接在生境网络优化方面具有重要意义。以快速城市化苏锡常地区为研究区、白鹭为目标物种, 采用 2 种景观功能性连接度测度方法相结合的方法, 通过构建遴选阈值和恢复阈值、筛选功能性显著迁移廊道, 识别新增生境节点及对应迁移廊道, 构建出优化生境网络和优化生境干网。结果表明: 1) 优化生境网络的片区聚集程度及觅食地对筑巢地的依附性得到增强, 优化生境干网与白鹭长距离迁移生境网络具有较高拟合度; 2) 优化生境网络和优化生境干网的 α 、 β 、 γ 3 个网络结构指数值都有较大幅度增加。优化生境干网与优化生境网络相比, 在生境节点和迁移廊道总数较少的情况下, 具有网络结构指数值变化不明显的特性, 为推荐方案。优化生境干网的提出, 尤其为快速城市化地区物种多样性保护提供了一种新思路, 即优化生境网络的保护底线方案, 同时拓展了网络优化研究方法、强化了物种多样性保护在土地资源管理工作中的可操作性。

关键词: 景观功能性连接; 生境网络优化; 生境干网; 快速城市化地区; 土地资源管理; 白鹭

Habitat network optimization using landscape functional connectivity: A case study of the little egret (*Egretta garzetta*) in the Su-Xi-Chang area, China

WU Wei^{1,2,*}, FENG Jianing¹, OU Minghao^{1,2}

1 College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 National & Local Joint Engineering Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation, Nanjing 210095, China

Abstract: Habitat networks have a vital function in inhibiting habitat fragmentation and in enhancing biodiversity conservation due to connectivity among habitat patches. However, in previous studies, habitat network optimization has focused mainly on landscape structural connectivity rather than on functional connectivity, but the latter has more ecological significance. Therefore, the objectives of this study were to optimize habitat networks by combining the graphic and the probability of moving between patches theoretical methods for landscape functional connectivity and to attempt to answer the following research questions: (1) What characteristics are exhibited by habitat networks that are optimized through functional connectivity? (2) What advantages do the optimized networks have in reserve plan and land-use plan implementation? Using this approach, an ideal threshold and an acceptable threshold were calculated and applied to classify current corridors, respectively, as well as newly added patches and corresponding corridors, which have significant landscape functional connectivity. The Su-Xi-Chang area, at the center of the Yangtze River Delta region of China and representing rapid urbanization, was selected for the study. The little egret (*Egretta garzetta*) was chosen as a regionally representative species, which is commonly recommended by animal ecologists. The results showed (1) that the optimized

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571176); 国家大学生创新性实验计划项目(201610307068)

收稿日期: 2017-08-05; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ww@njau.edu.cn

habitat networks possess a higher density and clearer aggregation centers, whereas the optimized arterial networks have a high fitness with the long-distance migration direction of the little egret, which has already been proved and is commonly accepted, and (2) that optimized habitat and arterial networks comprising patches and corridors with significant features of landscape functional connectivity were both ideal results of the current habitat network optimization. This conclusion was verified by the network connectivity indices alpha (α), beta (β), and gamma (γ). Optimized arterial networks were recommended due to similar values of network connectivity indices and fewer habitat nodes and migration corridors than those of optimized habitat networks. Optimized arterial networks can be adopted as the minimum boundary of optimized habitat networks of the study area, especially in rapidly urbanizing areas, which provides a new idea suitable for regional biodiversity conservation. Furthermore, both current and newly added habitats and corridors were identified based on the land-use type classification issued by the Ministry of Land Resource Management of China, which can be easily adopted into local land-use planning and highly operatively implemented by land resource management. The developed approach of this study highlights habitat network rebuilding and development research, integrates a biodiversity conservation plan into local land-use planning, and increases the efficiency of both biodiversity conservation and land resource management.

Key Words: landscape functional connectivity; habitat network optimization; arterial networks; rapid urbanization; land resource management; little egret (*Egretta garzetta*)

生境网络在遏制生境破碎化^[1]、保护物种多样性^[2]等方面具有重要作用。这种作用与斑块间的连接度^[3]或景观连接度^[4]密不可分。提高连接度可有效减缓生境网络质量下降,达到生境网络优化的目的^[1,5-6]。

景观连接度用于反映景观要素在生物体生态过程中的单向关联关系^[7]。已有成果多侧重结构性连接^[7-9],对功能性连接的研究较少^[10]。事实上,结构性连接多系人为框定,不能较好地反映出功能性连接情况,描述的物种相关性较低^[11]。功能性连接与物种习性 & 感知关系密切,已成为探索物种群体之间、物种与景观要素之间有机联系紧密程度的重要指标^[12],广泛应用于量化分析^[13]物种行为学规律^[14]及景观与生境运动规律^[15],但应用于生境网络的研究较少。景观功能性连接从测度方法看,包括图论、斑块间移动概率、基质渗透及观察物种扩散率等^[7,16]。其中,图论法简单高效、性价比较高^[17],可采用 IIC、dIIC 等指数^[18-19]测算功能性连接度,但以上指数同样可测度结构性连接度^[20],很难将两者区别开来;此外图论法还存在难以衡量物种个体在研究斑块、廊道中真实连续性^[21]的问题。斑块间移动概率测度法相关性强、可信度高,但人力耗费较大、不适宜大规模调查^[21]。两种方法互补性较强且便易操作,将其结合起来有益于景观功能性连接度的研究。

景观功能性连接度测度的准确性与生境网络构建质量息息相关,直接关系到网络优化结果。已有网络优化成果主要侧重于加强同质斑块间的联系,如重构无差别化的生境节点或优选迁移廊道^[22-23],或对网络进行优化^[24]或评价^[25-26]。事实上,生境斑块具有异质性特征,会因土地利用类型的不同而表现出不同的功能,进而对物种发挥出不同的支撑作用^[27]。对生境斑块及对应迁移廊道进行异质化分析,能够最大程度的反映出生境网络的各种功能和主要特征以及物种行为习性与网络间的吻合程度。

以苏锡常地区白鹭现状生境网络为基础,从景观功能性连接度出发,采用图论与斑块间移动概率相结合的方法,对生境网络进行优化。尝试回答“基于景观功能性连接度构建的生境网络特征是什么?优点是什么?”等问题,以丰富生境网络构建优化理论研究并将生境网络保护融入土地利用规划之中。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

苏锡常地区(119°08'—121°15'E,30°46'—32°04'N)位于江苏省南部太湖之滨,是长江三角洲腹心地带,属于长江冲积平原,区内地势平坦,河湖众多,属北亚热带季风气候,年均降水 1092.4 mm,年均气温 15.3℃,

总面积 1.75 万 km²。境内物种丰富,有鸟类、兽类、两栖爬行类 200 多种,鸟类 170 余种。其中白鹭(*Egretta garzetta*)被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》名单和太湖地区环境污染指示生物物种^[28]。研究表明,2000—2010 年区内白鹭适宜地类斑块总面积虽有所增加,但生境斑块总面积减少了,生境网络质量不断下降,生境环境持续恶化^[27]。

1.2 数据来源及处理

采用中国科学院国际科学数据服务平台 2010 年 Landsat TM 影像数据、1:5 万数字高程 DEM 数据(30 m×30 m)、2010 年中国县级行政区划矢量数据以及中国观鸟记录中心(China Bird Report)2003—2010 年观测数据。数据在 ENVI 遥感软件支持下完成几何校正、图像配准等,并经地区 2010 年土地利用现状图校对,ArcGIS 10.3 软件完成了预处理。综合考虑目标物种生境特点、数据精度及土地利用规划管理工作实际,将研究区划为水田、旱地、园地、乔木林地、灌木林地、草地、城乡建设用地、交通用地、滩涂沼泽、湖泊水库、河流、运河和其他未利用地 13 类^[27]。

1.3 研究思路与方法

以白鹭 2010 年现状生境网络为基础,采用图论和平均移动概率相结合的方法测度距离优化阈值,并以之为依据,筛选出功能性连接特征显著的结构性迁移廊道、识别出新增生境节点及对应功能性连接特征明显的新增迁移廊道,实现优化生境网络的目的。

1.3.1 生境网络现状识别与构建

生境网络与生境斑块关系密切,后者具有典型异质性特征,如白鹭生境斑块可以有觅食地和筑巢地之分,有必要对生境斑块/生境节点进行分类研究生境网络。依据中国观鸟记录中心数据,研究区有白鹭观测点 77 处,分别采用白鹭筑巢地和觅食地生境约束条件模型^[27]与 TM 影像图逐一对照相结合的方法,识别出符合约束条件模型要求的筑巢地和觅食地生境。采用几何中心法将上述生境斑块转化为生境节点;采用不受半径约束的直线连接法识别出筑巢地迁移廊道,参照白鹭大范围迁移方向^[29-30]识别出觅食地迁移廊道,构建出白鹭现状生境网络。以上计算通过 ArcGIS 10.3 软件完成。

1.3.2 优化阈值测度

斑块间平均移动概率法强调物种在研究斑块间迁徙的可能性,可采用概率指数测度法遴选出对功能性连接度影响明显的移动距离阈值^[20](设为阈值 A)。计算表达式为:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} p_{ij}^p}{n_p(n_p - 1)} \quad (1)$$

$$p_{ij}^p = e^{-kd_{ij}} \quad (2)$$

式(1)中, n_p 为景观斑块数; p_{ij}^p 为从斑块 i 到斑块 j 的移动概率。式(2)中, d_{ij} 为从斑块 i 边缘到斑块 j 边缘的距离(以最近边缘点为测算依据); k 为反映目标物种扩散行为的物种-特殊常数,通常取值 $k=0.0462$ ^[31]。

图论法可用于生境网络整体连接度和斑块优选性排序问题,可采用斑块重要性指数(dIIC)计算距离阈值^[31-34](设为阈值 B)。计算表达式为:

$$dIIC = \frac{IIC - IIC_{\text{remove}}}{IIC} \quad (3)$$

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (4)$$

式(3)中, IIC 为景观连接度指数值; IIC_{remove} 为去除某斑块后的景观连接度指数值。式(4)中, n 为生境斑块数; a_i 和 a_j 分别为第 i 和第 j 块斑块面积; nl_{ij} 为斑块 i j 间的路径总数; A_L 为区域面积。

在阈值 A 和 B 中,设定数值大者为遴选阈值、数值小者为恢复阈值。遴选阈值用于筛选现状生境网络中

的功能性迁移廊道;恢复阈值用于识别新增生境节点与对应迁移廊道,形成相应优化方案。考虑到白鹭觅食地和筑巢地分布规律不同,营巢半径更大^[35-37],所以要分别测算不同距离阈值对景观功能性连接度的影响。测度觅食地距离阈值时,设定白鹭适宜觅食半径为 10 km^[37]、任意 2 个觅食地间距离小于 10 km 是连通的,反之不连通。为简化研究,测算 1.0—10.0 km 每间隔 0.5 km 的 19 种阈值变化情景。测度筑巢地距离阈值时,以现状生境网络中 2 个相邻筑巢地间最大直线距离 L km(取整十数)为上限,设定任意 2 个筑巢地间距离小于 L km 是连通的,反之不连通。为简化研究,测算 5—L km 每间隔 5 km 的阈值变化情景。以上计算通过 Conefor Sensinode 2.2 软件完成。

1.3.3 迁移廊道筛选

依据恢复阈值和遴选阈值,对现状生境网络中筑巢地-筑巢地(筑巢地迁移廊道)、筑巢地/觅食地-觅食地(觅食地迁移廊道)2 类迁移廊道进行比照。迁移廊道距离,当小于恢复阈值时设为功能性显著;当介于恢复阈值和遴选阈值之间时为功能性不显著;当大于遴选阈值时为结构性显著。将功能性显著迁移廊道及相连生境节点构建的生境网络称为生境干网、功能性不显著迁移廊道及相连生境节点构建的生境网络称为生境支网、其余为结构性显著生境网络。以上计算通过 ArcGIS 10.3 软件完成。

1.3.4 生境网络优化及结果评价

优化的生境网络主要包括新增生境节点和对应迁移廊道。其中,新增生境节点包括筑巢地和觅食地 2 类。以现状筑巢地节点为中心、筑巢地恢复阈值为半径,根据已有研究^[27],采用与生境约束条件模型相结合的方法,识别出踏脚石斑块并转换为新增筑巢地节点。同理,以现状和新增筑巢地节点为中心、觅食地恢复阈值为半径,识别出新增觅食地节点。新增对应迁移廊道包括筑巢地-筑巢地和筑巢地/觅食地-觅食地 2 类。分别以新增(筑巢地/觅食地)节点为中心,采用最大半径不超过觅食地和筑巢地恢复阈值的直线连接法,识别出新增筑巢地迁移廊道和觅食地迁移廊道。与现状生境干网相结合,形成优化生境网络和优化生境干网。以上计算通过 ArcGIS 10.3 软件完成。选取 α 、 β 、 γ 3 个网络结构指数对优化结果进行评价^[38-39]。

2 结果与分析

2.1 生境网络现状识别构建结果

图 1 为 2010 年白鹭现状生境网络。其中筑巢地节点 12 个、筑巢地迁移廊道 16 条;觅食地节点 65 个、觅食地迁移廊道 102 条。

2.2 优化阈值结果

由图 1 测得 1.3.2 节中 L 值为 50 km。图 2 和图 3 分别为觅食地和筑巢地平均移动概率指数随距离阈值增加的变化曲线。对觅食地而言,距离阈值在 (9.5, 10.0 km) 时,变化曲线出现明显下降,故设定觅食地阈值 A 为 (0, 9.5 km)。对筑巢地而言,距离阈值在 30 km 时,曲线出现较明显拐点,故设定筑巢地阈值 A 为 (0, 30 km)。

表 1 为不同距离阈值处于斑块重要性指数最大值 ($dIIC_{max}$) 时无重要性斑块数目及其面积情况。对觅食地而言,距离阈值在 (0, 9.0 km) 时,斑块重要性指数最大值均大于 99.99;在 9.0 km 时,最大值出现“0”值,说明距离阈值在 (0, 9.0 km) 内的生境斑块对白鹭景观功能性连接度具有贡献,觅食地阈值 B 可为 (0, 9.0 km)。同理由表 2 得筑巢地阈值 B 可为 (0, 40.0 km)。

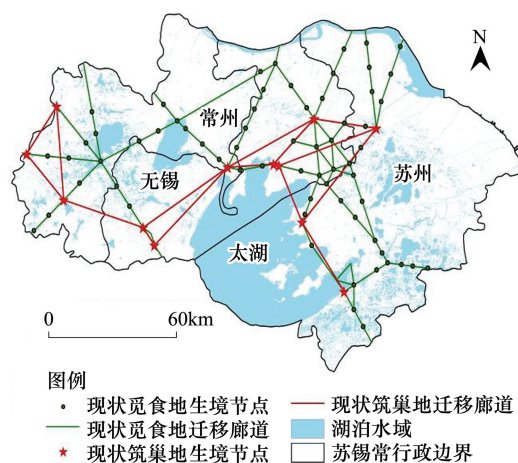


图 1 白鹭现状生境网络

Fig.1 Current habitat networks of the little egret in study area for the year 2010

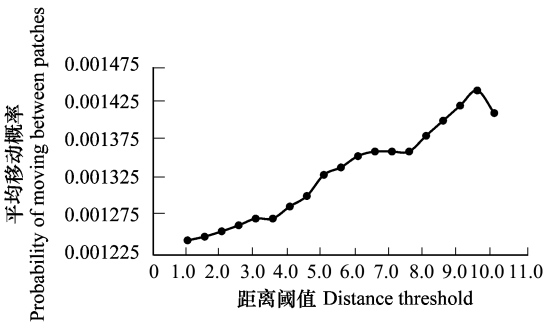


图 2 觅食地平均移动概率指数与距离阈值的关系
Fig.2 Relationship between probability of moving between patches and distance threshold for hunting habitats

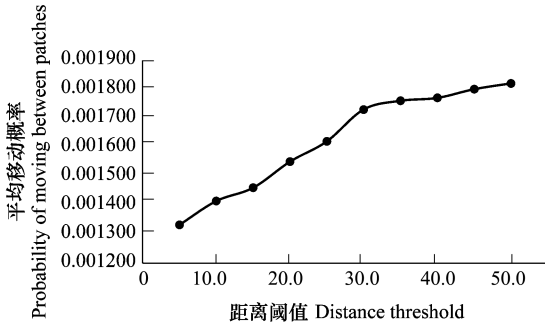


图 3 筑巢地平均移动概率指数与距离阈值的关系
Fig.3 Relationships between probability of moving between patches and distance threshold for nesting habitats

表 1 觅食地不同距离阈值处于斑块重要性指数最大值($dIIC_{max}$)时无重要性斑块数目及其面积情况

Table 1 Amount and proportion of no significance patches at the maximum value of patch index ($dIIC_{max}$) of hunting habitats							
距离阈值/km Distance threshold	斑块重要性 指数最大值 $dIIC_{max}$ index	无重要性斑块 No significance patches		距离阈值/km Distance threshold	斑块重要性 指数最大值 $dIIC_{max}$ index	无重要性斑块 No significance patches	
		数目/个 Amount	总面积/ hm^2 Total area			数目/个 Amount	总面积/ hm^2 Total area
1.0	99.99	21	363.7326	6.0	99.99	15	230.5024
1.5	99.99	21	454.3070	6.5	99.99	5	64.1756
2.0	99.99	24	553.4850	7.0	99.99	8	107.0078
2.5	99.99	27	674.6443	7.5	99.99	12	162.7637
3.0	99.99	29	98.0379	8.0	99.99	14	210.6791
3.5	99.99	26	546.9043	8.5	99.99	14	210.6791
4.0	99.99	22	461.5533	9.0	99.99	0	0
4.5	99.99	2	22.2221	9.5	99.98	15	301.1143
5.0	99.99	15	230.5024	10.0	99.99	21	363.7326
5.5	99.99	15	230.5024				

表 2 筑巢地不同距离阈值处于斑块重要性指数最大值($dIIC_{max}$)时无重要性斑块数目及其面积情况

Table 2 Amount and proportion of no significance patches at the maximum value of patch index ($dIIC_{max}$) of nesting habitats							
距离阈值/km Distance threshold	斑块重要性 指数最大值 $dIIC_{max}$ index	无重要性斑块 No significance patches		距离阈值/km Distance threshold	斑块重要性 指数最大值 $dIIC_{max}$ index	无重要性斑块 No significance patches	
		数目/个 Amount	总面积/ hm^2 Total area			数目/个 Amount	总面积/ hm^2 Total area
5.0	99.99	15	230.5024	30.0	99.98	8	171.4178
10.0	99.99	21	363.7326	35.0	99.98	5	75.1543
15.0	99.98	12	341.0823	40.0	99.98	4	57.0697
20.0	99.98	8	171.4178	45.0	99.97	10	251.9202
25.0	99.98	6	115.8257	50.0	99.97	10	277.8452

综上,觅食地恢复阈值和遴选阈值分别为(0,9.0 km)和(0,9.5 km)、筑巢地恢复阈值和遴选阈值分别为(0,30 km)和(0,40 km)。

2.3 迁移廊道筛选结果

图 4 为白鹭现状迁移廊道筛选结果。生境干网为红色、生境支网为绿色、结构性显著生境网络为蓝色;生境干网多分布在筑巢地节点周边。

2.4 新增生境节点及对应迁移廊道识别结果

图 5 为新增生境节点及对应迁移廊道识别结果。其中新增筑巢地节点 9 个、对应迁移廊道 19 条;新增觅食地节点 51 个、对应迁移廊道 146 条;新增节点和迁移廊道主要集中在生境干网周边,明显提升了 3 个片区生境干网的连通性。

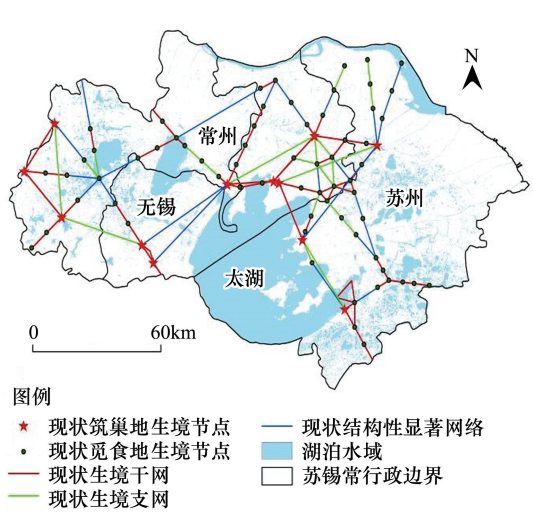


图 4 白鹭现状迁移廊道筛选结果

Fig.4 Classified results of current habitat networks of the little egret in study area for the year 2010

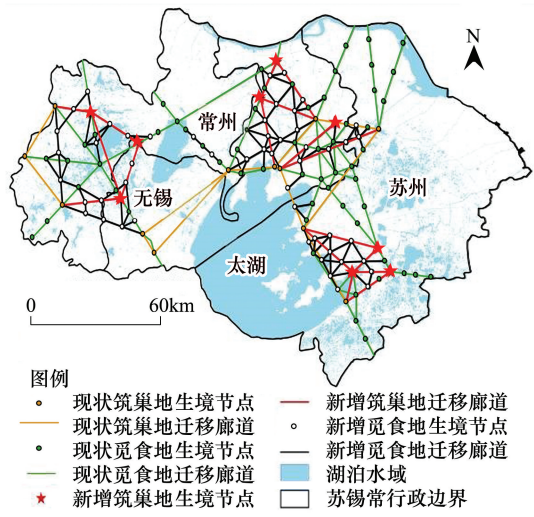


图 5 新增生境节点及对应迁移廊道识别结果

Fig.5 Newly added habitat nodes and corresponding and corresponding corridors of the little egret in study area

图 6 为现状生境网络优化结果。其中生境节点 137 个(筑巢地节点 21 个、觅食地节点 116 个)、功能性显著迁移廊道 282 条(筑巢地迁移廊道 35 条、觅食地迁移廊道 247 条)。网络优化后,以筑巢地为中心的网络集聚特征更加明显。

图 7 为优化后的生境干网。其中筑巢地生境节点 21 个、筑巢地迁移廊道 28 条,觅食地生境节点 94 个、觅食地迁移廊道 199 条。与现状生境网络(图 1、图 4)相比,觅食地迁移廊道对筑巢地及其迁移廊道具有较强依附性;通过新增筑巢地节点,白鹭迁移距离明显变短,功能性显著的觅食地迁移廊道数量及密度得到较大幅度增加。

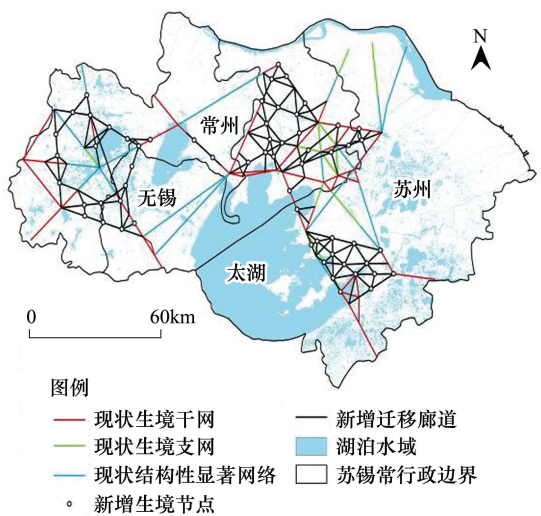


图 6 生境网络优化结果

Fig.6 Optimized habitat networks with newly added habitats corridors nodes of the little egret in study area

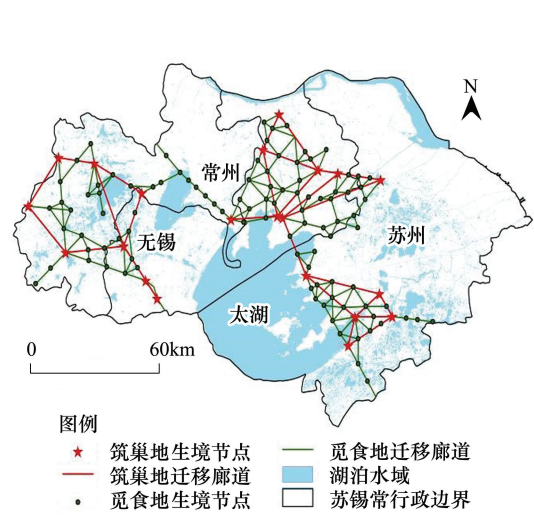


图 7 研究区优化生境干网

Fig.7 Optimized arterial networks of the little egret in study area for the year 2010

2.5 网络优化结果评价

表 3 为 3 种生境网络的结构指数情况。与现状生境网络相比,优化生境网络及干网的 3 个网络结构指数值均得到明显增加,说明生境网络和干网均达到优化目的。优化生境干网与优化生境网络相比,节点数和廊道数在减少较多情况下保持了网络结构指数值的基本不变,说明优化生境干网成效更佳,宜为推荐方案。此外,将新增生境节点与 TM 影像图逐一对照,对应面积均在 10—100 hm²,地类以乔木林地、湖泊水库、滩涂沼泽及水田等地类为主,属于生境适宜地类,说明优化方案具有较强的可操作性。

表 3 不同生境网络结构指数变化情况

Table 3 Results of structural characteristics of different habitat networks

生境网络 Habitat networks	节点数 Nodes	廊道数 Corridors	闭合度 Alpha (α) index	线点率 Beta (β) index	网络结构指数 Gamma (γ) index
现状生境网络 Current habitat networks	77	117	0.28	1.52	0.52
优化生境网络 Optimized habitat networks	137	282	0.54	2.06	0.70
优化生境干网 Optimized arterial networks	115	232	0.52	2.02	0.68

3 结论与讨论

从景观功能性连接度出发,通过采用 2 种测度方法相结合的方法,增补出筑巢地和觅食地节点及对应迁移廊道,筛选出功能性显著的生境干网等步骤,实现了生境网络优化目的。结果表明,基于景观功能性连接的生境网络具有以下特征和优点:1)生境网络优化后密度更大、片区聚集效应更加明显,觅食地对筑巢地的依附性得到加强;生境干网与白鹭长距离迁移生境网络^[30]拟合度较高;2)通过功能性连接筛选得到的优化生境干网,提供了一种生境网络优化的新方法,尤其适用于快速城市化地区,即提供了一定意义上生境网络优化的底线方案;3)通过不同阈值将物种生活习性、分布规律等差异性紧密结合;同时借助基于土地利用分类形成的异质化生境节点和迁移廊道,重构出具有一定生物特征的生境网络,有利于将物种生境网络保护规划甚至保护区规划融入土地利用规划之中。如稻田(基本农田)作为白鹭觅食地生境之一,属于土地利用规划中严格保护的对象,其用途不得随意变更,但却不在保护区规划范围。事实上,对基本农田(稻田)的保护无论在法律效力或现实执行中,都明显严格于对保护区的保护。所以将两种规划相结合,物种保护的力度将更加强化。因此,将物种多样性保护融入土地资源管理工作的实践之中具有重要现实意义。

鉴于景观功能性连接在生境网络优化应用中的研究较少,以及囿于动物行为学或鸟类生态学相关研究成果的限制,本研究还可以在以下方面不断深入:1)作为夏候鸟的白鹭是一种集群营巢的水鸟,苏锡常地区为其繁殖分布区^[35,40]。白鹭主要行为或生境网络连通性应从繁殖期及繁殖后期(游荡期)两个时间段来考虑;同时筑巢地特别是在同一繁殖期内是一个相对稳定的概念,筑巢地迁移廊道概念也宜从不同年份繁殖地分布地点转换率的视角考虑。但是从生物多样性保护实施特别是土地利用规划或土地资源管理视角看,生境网络保护应兼顾所有情景,不能仅考虑单一时期情景。繁殖和繁殖后期的白鹭生境网络可以不同,但都需要得到保护。这种没有分时间段方法构建的生境网络是否与分而后合之方法构建的生境网络在空间上是否一致,很值得探讨。2)生境网络优化中,对筑巢地和觅食地节点及对应迁移廊道的考察,是从景观功能性连接中距离阈值单一维度出发的,应用到土地资源管理工作实践中具有简单易行的特征和优点;从生物行为学出发,研究偏于简单,对连接测度的“功能性”挖掘不够深入,需要加强生态过程多维度综合视角的研究。3)文中距离阈值设定参照前人研究成果,但显著性评判上仍存在部分主观性,如表 1 中觅食地距离阈值在 3.0、4.5、6.5 km 和 9.0 km 处均出现较明显变化,但最终选择变化最明显的 9.0 km 为阈值标准,缺乏动物行为学的解释。此外,功能性连接测度方法较多,如基于扩散成功概率、搜索时间概率、迁徙个体再次被发现概率、迁入率观察等^[16,21]。本文选取了其中互补性较强的 2 种方法。如果采用其他方法进行组合,测度结果是否会相同?如果结果不同,又将如何界定阈值?等问题有待回答。4)论文从功能性连接出发对生境网络进行优化,并采用

三个网络结构指数分别评价优化网络的闭合度、线点率和连接度,是对网络优化方案的综合性评价。但是网络结构指数在测度网络的结构性能之外,是否能够测度网络的功能性能? 是否需要构建测度网络的功能性能的新方法或相关指数? 以及如何构建? 构建指数是否可以用于不同功能网络之间的对比等一系列问题,也值得关注。

景观结构性连接强调通过优化景观要素在生境空间的连续性以增强连接度^[41],而景观功能性连接强调通过提高与物种生态学过程拟合程度以增强生境间的连接程度。虽然本文从功能性连接出发,不以强调网络结构特征^[23]的结构性连接为切入点,但方法上仍以模型模拟为主,缺少实地同步观测的海量数据^[42]支撑。随着全球对地观测技术水平的发展^[43],上述问题有望得到根本性解决,需得到高度重视。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Jongman R H G, Bouwma I M, Griffioen A, Jones-Walters L, Van Doorn A M. The pan European ecological network: PEEN. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3): 311-326.
- [3] Leibold M A, Holyoak M, Mouquet N, Amarasekare P, Chase J M, Hoopes M F, Holt R D, Shurin J B, Law R, Tilman D, Loreau M, Gonzalez A. The metacommunity concept: A framework for multi-scale community ecology. *Ecology Letters*, 2004, 7(7): 601-613.
- [4] Marulli J, Mallarach J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2/4): 243-262.
- [5] Neel M C. Patch connectivity and genetic diversity conservation in the federally endangered and narrowly endemic plant species *Astragalus albens* (Fabaceae). *Biological Conservation*, 2008, 141(4): 938-955.
- [6] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 童笑笑, 周文佐, 陈若漪, 张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. *生态学报*, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [7] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君. 景观连接度的概念、度量及其应用. *生态学报*, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [8] O'Brien D, Manseau M, Fall A, Fortin M J. Testing the importance of spatial configuration of winter habitat for woodland caribou: an application of graph theory. *Biological Conservation*, 2006, 130(1): 70-83.
- [9] Freeman R C, Bell K P. Conservation versus cluster subdivisions and implications for habitat connectivity. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(1): 30-42.
- [10] Fall A, Fortin M J, Manseau M J, O'Brien D. Spatial graphs: principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, 2007, 10(3): 448-461.
- [11] Jonsen I D, Taylor P D. Fine-scale movement behaviors of calopterygid damselflies are influenced by landscape structure: an experimental manipulation. *Oikos*, 2000, 88(3): 553-562.
- [12] Pino J, Marull J. Ecological networks: are they enough for connectivity conservation? A case study in the Barcelona Metropolitan Region (NE Spain). *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 684-690.
- [13] Bélisle M. Measuring landscape connectivity: The challenge of behavioral landscape ecology. *Ecology*, 2005, 86(8): 1988-1995.
- [14] 邓文洪. 栖息地破碎化与鸟类生存. *生态学报*, 2009, 29(6): 3181-3187.
- [15] 马志军. 追踪鸟类的迁徙. *科学*, 2013, 65(1): 19-22.
- [16] Kindlmann P, Burel F. Connectivity measures: a review. *Landscape Ecology*, 2008, 23(8): 879-890.
- [17] Galpern P, Manseau M, Fall A. Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 44-55.
- [18] Ayram C A C, Mendoza M E, Salicrup D R P, Granados E L. Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity. *Journal for Nature Conservation*, 2014, 22(5): 424-435.
- [19] Bunn A G, Urban D L, Keitt T H. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(4): 265-278.
- [20] Rayfield B, Fortin M J, Fall A. Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. *Ecology*, 2011, 92(4): 847-858.
- [21] Calabrese J M, Fagan W F. A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(10): 529-536.
- [22] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional

- embodied energy accounting in China. *Energy Policy*, 2015, 86: 651-663.
- [23] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [24] Pino J, Rodà F, Ribas J, Pons X. Landscape structure and bird species richness: implications for conservation in rural areas between natural parks. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 49(1/2): 35-48.
- [25] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [26] DiLeo M F, Rico Y, Boehmer H J, Wagner H H. An ecological connectivity network maintains genetic diversity of a flagship wildflower, *Pulsatilla vulgaris*. *Biological Conservation*, 2017, 212: 12-21.
- [27] 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.
- [28] 阮禄章, 张迎梅, 赵东芹, 董元华, Mauro F. 白鹭作为无锡太湖地区环境污染指示生物的研究. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 263-268.
- [29] 张孚允, 杨若莉. 中国鸟类迁徙研究. 北京: 中国林业出版社, 1997: 133-152.
- [30] 吴未, 范诗薇, 欧名豪. 基于网络效能分析的生境网络构建与优化——以苏锡常地区白鹭为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3872-3880.
- [31] Gil-Tena A, Brotons L, Fortin M, Burel F, Saura S. Assessing the role of landscape connectivity in recent woodpecker range expansion in Mediterranean Europe: Forest management implications. *European Journal of Forest Research*, 2013, 132(1): 181-194.
- [32] 陈杰, 梁国付, 丁圣彦. 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3773-3781.
- [33] 姜磊, 岳德鹏, 曹睿, 任慧君. 北京市朝阳区景观连接度距离阈值研究. *林业调查规划*, 2012, 37(2): 18-22, 32-32.
- [34] 陈春娣, Colin M D, Maria I E, Glenn S H, 吴胜军. 城市生态网络功能性连接辨识方法. *生态学报*, 2015, 35(19): 6414-6424.
- [35] 胡慧娟, 陈剑溶, 孙雷, 吴广齐, 卢昌义, 宋晓军. 厦门大屿岛三种鹭的种群动态和营巢. *生物多样性*, 1999, 7(2): 123-126.
- [36] 朱曦, 章立新, 梁峻, 宣志灿. 鹭科鸟类群落的空间生态和种间关系. *动物学研究*, 1998, 19(1): 45-51.
- [37] 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.
- [38] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 144-152.
- [39] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 179-193.
- [40] 王辉, 董元华, 李涛, 张迎梅, 阮禄章, 赵东芹, Mauro F. 无锡鼋头渚 4 种鹭类繁殖期的生态学特征研究. *农村生态环境*, 2001, 17(4): 17-21, 38-38.
- [41] Tischendorf L, Fahrig L. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 2000, 90(1): 7-19.
- [42] Yu H, Wang X, Cao L, Zhang L, Jia Q, Lee H, Xu Z G, Liu G H, Xu W B, Hu B H, Fox A D. Are declining populations of wild geese in China 'prisoners' of their natural habitats? *Current Biology*, 2017, 27(10): R376-R377.
- [43] Rose R A, Byler D, Eastman J R, Fleishman E, Geller G, Goetz S, Guild L, Hamilton H, Hansen M, Headley R, Hewson J, Horning N, Kaplin B A, Laporte N, Leidner A, Leimgruber P, Morissette J, Musinsky J, Pintea L, Prados A, Radeloff V C, Rowen M, Saatchi S, Schill S, Tabor K, Turner W, Vodacek A, Vogelmann J, Wegmann M, Wilkie D, Wilson C. Ten ways remote sensing can contribute to conservation. *Conservation Biology*, 2015, 29(2): 350-359.