

DOI: 10.5846/stxb202108122227

范冰冰, 李杨帆, 张雪婷, 李艺. 海岸带区域陆海统筹生态安全研究. 生态学报, 2023, 43(3): 962-972.

Fan B X, Li Y F, Zhang X T, Li Y. "One map" of coastal ecological security by integrating land-sea ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 962-972.

海岸带区域陆海统筹生态安全研究

范冰冰, 李杨帆*, 张雪婷, 李 艺

滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102

摘要: 海岸带既是区域经济发展的黄金地带, 亦是陆海系统交互胁迫的敏感区域, 快速城镇化与工业化导致海岸带关键生态系统服务受损、生态网络格局紊乱、珍稀物种安全保障空间萎缩等重大生态安全问题。以闽三角海岸带珍稀物种-栖息地系统为研究对象, 从“多物种-多生境-多尺度”视角出发, 基于陆海统筹理念系统评估了闽三角海岸带珍稀物种-栖息地系统的脆弱性, 建立了基于物种水平的海岸带生态保护与修复网络, 构建了海岸带陆海统筹生态安全“一张图”。研究结果表明: (1) 高强度围填海驱动下, 闽三角红树林与水鸟栖息地脆弱性显著增加, 高脆弱区域主要集中于九龙江河口、厦门同安湾和泉州湾; (2) 闽三角生态安全网络由 12 条水鸟迁徙廊道和 11 个生态节点组成, 其中影响陆海统筹生态安全的生态节点 4 个, 预警生态节点 3 个; (3) 闽三角海岸带未来安全韧性生境(水鸟栖息地与文昌鱼、中国鲎低脆弱生境较密集的区域) 分布于云霄红树林保护区、东山岛近岸、九龙江河口、厦门大嶝海域、围头湾、深沪湾。本研究能够为设计规划未来韧性海岸带“受损海水-滨海湿地-珍稀物种”一体化修复与保护的生态安全格局, 保障陆海统筹生态安全提供理论支撑和一体化解决方案。

关键词: 生态安全格局; 脆弱性; 生态网络; 陆海统筹; 海岸带

“One map” of coastal ecological security by integrating land-sea ecosystems

FAN Bingxiong, LI Yangfan*, ZHANG Xueting, LI Yi

Key Laboratory of Coastal and Wetland Ecosystems (Ministry of Education), College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract: Coastal zone is the critical zone of economic development and also the sensitive area affected by land-sea interaction stresses. Rapid urbanization and industrialization have led to various coastal ecological security issues, such as the degradation of key ecosystem services, the disorder of ecological network pattern, and the shrinking of natural habitats for rare species. Based on the theory of land-sea integration, we evaluated the ecological vulnerability from the perspective of "multiple species habitats scales", established the ecological protection and restoration network on the species level, and developed "one map" of coastal ecological security by integrating land-sea ecosystems in the coastal zone of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou megalopolis. Our results are followed: (1) the vulnerability of mangrove and waterfowl habitat had significantly increased due to the highly intensive reclamation, and the high vulnerable areas were mainly concentrated in Jiulong River Estuary, Tong'an Bay and Quanzhou Bay; (2) The ecological security network was consisted of 12 waterfowl migration corridors and 11 ecological nodes, including 4 ecological nodes affecting ecological security of land-sea integration and 3 early warning ecological nodes; (3) The resilient habitats in coastal zone (areas with densely low fragile habitat of waterfowl, *amphioxus* and *Chinese horseshoe crabs*) were distributed in Yunxiao mangrove reserve, the nearshore of Dongshan Island, Jiulongjiang Estuary, Dadeng sea area of Xiamen, Weitou Bay, and Shenhu Bay. Our study can provide theoretical supports and integrated solution for designing a resilient coastal zone with the vulnerable coastal ecosystem and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701205); 国家重点研发计划(2016YFC0502900)

收稿日期: 2021-08-12; 网络出版日期: 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangf@xmu.edu.cn

rare species, protecting the ecological security of land-sea integration.

Key Words: ecological security pattern; vulnerability; ecological network; land-sea integration; coastal zone

生态安全是国家经济繁荣和社会安定的重要保障,其本质包含两个方面,一是防止生态环境退化对国家经济基础构成冲击,二是防止生态环境问题影响社会安定^[1]。目前,全球经济发展重心主要集中在海岸带地区,随着科技水平的不断提高,陆地与海洋开发活动已向复杂化与多元化演变,陆海资源和空间的压力与日俱增,陆海空间生态安全问题也逐渐凸显^[2-3]。因此,海岸带地区社会经济的健康可持续发展需要处理好人类福祉与陆海资源保护的相互关系,在摸清陆地与海洋的生态联接的前提下,统筹权衡不同发展目标情景,着力解决陆海空间生态安全问题,实现陆海协调、安全发展^[2,4]。陆海统筹生态安全成为海岸带可持续发展中重点关注和着力解决的重大科技难题和迫切管理需求。

对海岸带区域人类活动强度和产生的生态后果进行科学评估,进而构建安全的生态空间格局,是保障陆海统筹生态安全的重要途径和手段^[5-6]。针对陆域生态安全评估,国内外学者已在多种尺度上开展了大量的实证研究,包括区域尺度的生态安全综合评估^[7-10],候鸟^[11]、狼群^[12]、熊猫^[13]等物种及其栖息地尺度的安全研究。就海岸带地区而言,围填海作为该区域强度最大且最典型的人类活动,其对水鸟^[14-15]、鱼类^[16]、滨海植物^[17]等物种及其栖息地的影响受到了广泛关注,目前已有研究针对水鸟栖息地构建生态保护网络开展生态影响评估^[18-19]。然而,受制于海岸带地区多界面和多维度交互的特征,大多数研究侧重于单一物种与栖息地保护研究,缺乏多物种-多生境-多尺度的综合考量,尚缺乏基于物种-栖息地的陆海统筹生态保护网络研究,无法实现对海岸带珍稀物种-复杂栖息地系统的有效保护与管理。如何建立“多物种-多生境-多尺度”的陆海统筹生态安全评估体系?探索海岸带陆海统筹生态安全“一张图”,实现陆海统筹生态系统的综合管理成为亟待深入研究的科学问题。

本研究以福建省闽三角城市群海岸带珍稀物种-复杂栖息地系统为对象,提出陆海统筹生态空间脆弱性评估方法,并构建陆海统筹生态保护与修复网络,建立海岸带陆海统筹生态安全“一张图”,以期为我国陆海统筹生态系统的综合管理提供理论指导和方法支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区与数据

1.1.1 研究区域概况

闽三角城市群位于福建省东南沿海,地处海上丝绸之路起点、国家生态文明先行示范区和海峡西岸经济区,包括厦门、漳州、泉州三市,陆域面积约为 2.6 万 km²,海域面积约 3.0 万 km²,与台湾隔海相望。闽三角城市群境内有泉州湾、厦门湾、东山湾等海湾,具有滨海红树林湿地、滩涂、沙滩等众多典型海岸带生态系统(图 1),共设有国家级自然保护区 5 个,省级自然保护区 4 个,市县级保护区 12 个。随着闽三角城市群的城镇化与社会经济快速发展,海岸带生态问题愈发突出,如关键生态系统服务受损、生态网络格局紊乱、珍稀物种安全保障空间萎缩等,闽三角城市群的海岸带生态安全受到了一定程度的威胁。

1.1.2 数据来源与预处理

本研究所用数据包括闽三角地区围填海区域与类型数据、红树林湿地和滨海沙滩空间分布数据、土地利用类型数据、建筑物高度、人口密度数据、水鸟栖息地数据、DEM 数据、文昌鱼和中国鲎分布与相关气候环境数据,所有数据类型和来源详见表 1。本研究通过人机交互解译 Landsat 系列卫星影像获取闽三角地区围填海区域、红树林湿地、滨海沙滩的空间地理信息数据。在了解文昌鱼和中国鲎行为、习性和适宜栖息地环境的基础上,利用年均海表温度、海水深度和叶绿素 a 浓度数据以及闽三角文昌鱼与中国鲎点位数据,基于 Maxent 模型模拟出文昌鱼和中国鲎的最大适宜生境。

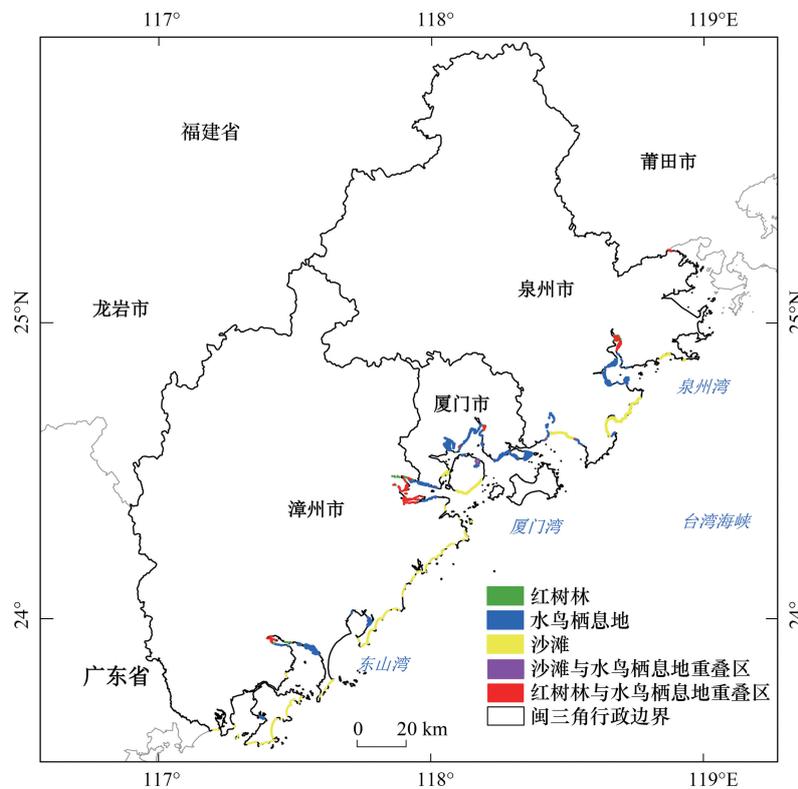


图 1 研究区位图

Fig.1 Location of study area

表 1 本研究相关数据简介与来源

Table 1 Introduction and source of relevant data in this study

数据名称 Data	数据类型 Types	空间分辨率 Spatial resolution	来源 Sources
围填海范围与类型 Extent and types of coastal reclamation	矢量	—	由人机交互解译获得
红树林、沙滩分布 Distribution of mangrove and beach	矢量	—	由人机交互解译获得
土地利用类型 Land use types	栅格	1km	清华大学地球系统科学研究中心 (http://data.ess.tsinghua.edu.cn/)
建筑物高度 Buildings height	栅格	1km	文献[20]
人口密度 Population density	栅格	1km	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
2017 年闽三角越冬水鸟调查数据 Survey data of waterfowl in South Fujian Golden Delta	矢量	—	厦门大学环境与生态学院陈小麟课题组野外调查
水鸟观测数据 Waterfowl observation data	报告	—	中国观鸟记录中心 (http://www.birdreport.cn/)
数字高程 Digital elevation	栅格	90m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
文昌鱼、中国鲎分布 Distribution of <i>amphioxus</i> and <i>Chinese horseshoe crabs</i>	矢量	—	文献[21]
海表温度 Sea surface temperature	栅格	1km	亚马逊云平台开放数据集 (https://registry.opendata.aws/mur/)
海水深度 Ocean depth	栅格	1km	英国海洋数据中心 (https://www.bodc.ac.uk/)
叶绿素 a 浓度 Chlorophyll-a concentration	栅格	1km	美国国家航空航天局 (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/13/)

1.2 研究方法

生态安全的科学内涵包括生态风险和生态脆弱性,其科学本质是通过脆弱性分析与评价,运用各种手段和方法不断改善生态脆弱性,降低生态风险^[22-23]。陆海统筹生态安全的科学本质即是基于陆海统筹生态过程,进行生态空间脆弱性分析与评价,运用各种手段(如构建生态廊道、设立自然保护区、生态修复规划等)改善陆海生态空间脆弱性,进而降低陆海生态风险。因此,本研究通过收集野外调查与文献数据,利用遥感与GIS手段,提取海岸带重要生境和生境胁迫因子,构建海岸带陆海统筹生态空间脆弱性评估体系,识别海岸带关键脆弱区;选取水鸟作为陆海统筹生态安全的关键物种,将海岸带关键脆弱区作为重要生态源地,通过最小累积阻力模型构建水鸟迁徙的生态网络,进而构建闽三角海岸带陆海统筹生态安全格局;通过集成陆海统筹生态空间脆弱性与生态安全格局,建立闽三角海岸带陆海统筹生态安全“一张图”(图2)。

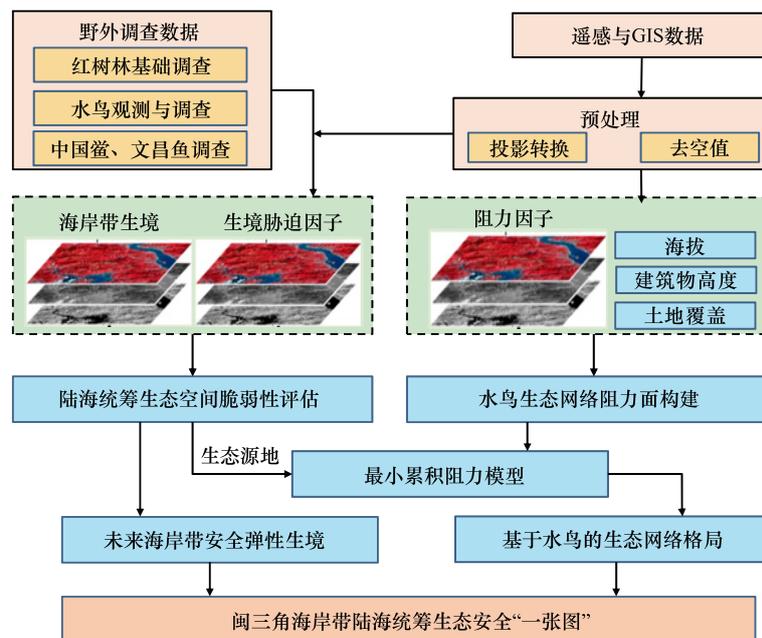


图2 海岸带陆海统筹生态安全“一张图”技术路线

Fig.2 Research procedure of “one map” of coastal ecological security integrated land-sea

1.2.1 海岸带陆海统筹生态脆弱性系统评估

Turner 等(2003)指出脆弱性不仅仅体现在对危险(扰动和压力)的暴露上,还体现在系统遇到这种危险时的敏感性和恢复力上,进而提出至今最为完善且适用于多学科的脆弱性评价框架与方法^[24]。该方法将脆弱性定义为系统在某种风险胁迫下可能受到伤害的程度,包括系统所承受的压力(暴露度)、系统对压力的敏感度(敏感性)、系统面对压力的调节能力(恢复力)三个维度。该框架与方法也被应用于空间脆弱性评价研究中,指导区域空间规划^[25-26]。因此,基于脆弱性理论与空间脆弱性评价方法(InVEST模型)^[27]进行闽三角海陆联接带生态空间系统评估,能够有效识别出海陆联接带哪些生态空间以及哪些物种最容易受到人类活动与环境变化的损害,进而有针对性地指导海陆联接带生态空间修复工作。

本研究综合考虑海岸带高强度人类活动特别是围填海干扰下物种-生境-尺度的复合效应,提出基于多物种(红树林、水鸟、文昌鱼、中国鲎)-多生境(红树林湿地、水鸟栖息地、沙滩、文昌鱼和中国鲎潜在生境)和生境胁迫因子(围填海、海洋功能区划、海水养殖和潮汐),从暴露度、敏感性和恢复力三个维度分别构建海岸带重要生态空间脆弱性评估指标体系,运用InVEST模型的生境风险评估模块,根据各生境在压力因子胁迫下的暴露、敏感和恢复程度,将各指标由大到小依次赋值为3、2、1,并通过欧几里得距离法得到陆海统筹生态

空间脆弱性评估结果(图3)。

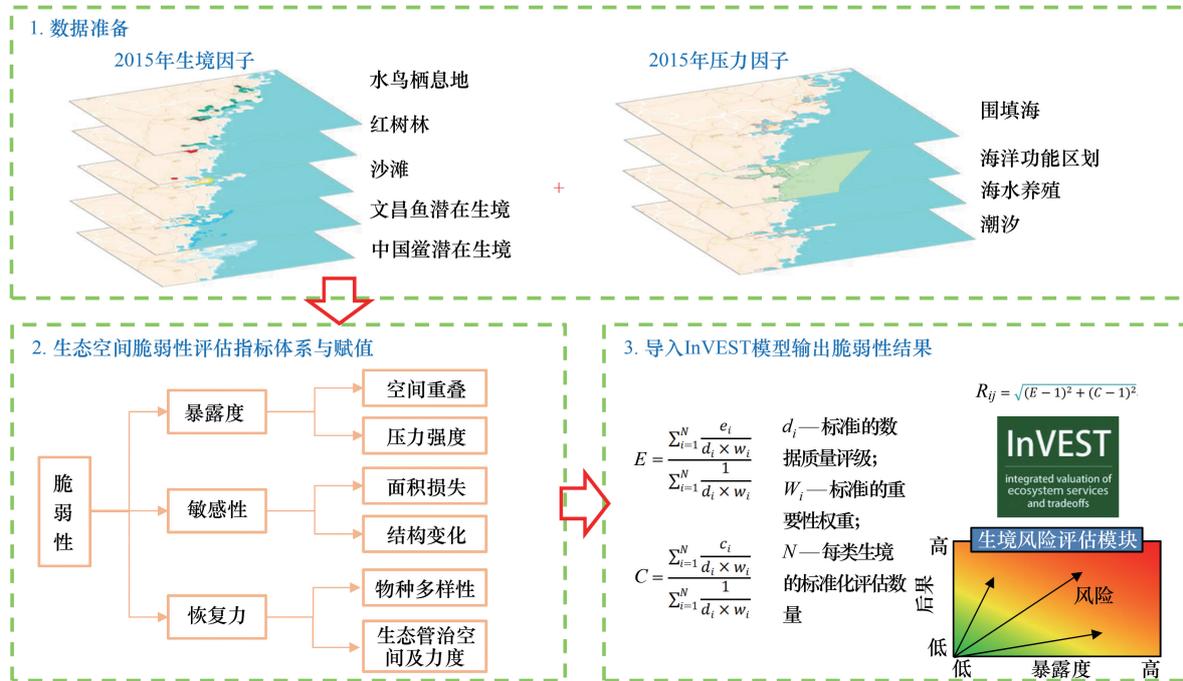


图3 海岸带陆海统筹生态空间脆弱性系统评估

Fig.3 Systematically assessment of coastal ecological zone vulnerability from land-sea integration

1.2.2 基于水鸟(鹭类)迁徙生态网络的海岸带生态安全格局构建

生态网络是生态系统中生物相互作用的一种表现,其中物种(节点)通过两两相互作用(链接)连接起来^[19,28]。生态网络理论的提出与应用,对景观生态学在生物多样性保护与生物资源管理方面的应用有重要意义^[29-30]。生态安全格局是指针对区域生态环境问题,在排除干扰的基础上,能够保护和恢复生物多样性、维持生态系统结构和过程的完整性,实现对区域生态环境问题有效控制和持续改善的区域性空间格局^[31]。建立生态网络的目的是增强各景观要素之间的相互连接度,保护和恢复生物多样性、维持生态系统结构和过程的完整性,在不同生境之间建立合理的廊道,设计与规划合理的景观生态安全优化格局^[32]。

(1)生态源地识别 本研究基于“源地-廊道-节点”构建水鸟迁徙的生态网络。基于闽三角海岸带生态空间脆弱性系统评估结果,分别提取出红树林、沙地和水鸟栖息地脆弱性较高的区域(中、高脆弱性)。虽然一些水鸟栖息地属于低脆弱性,但这些区域可能与红树林、沙滩的高脆弱区存在重叠与交叉,这些区域同样存在较高的脆弱性,也应纳入水鸟生态保护网络中进行重点保护与修复。因此,在 ArcGIS 中利用空间分析工具对三者进行叠置分析,分别取水鸟栖息地低脆弱性与红树林、沙滩中、高脆弱性的交集区域,并与水鸟栖息地中、高脆弱区进行合并,构成生态源地。

(2)生态廊道模拟 生态廊道是连接不同生境、物种迁移扩散的潜在路径,是生态网络中的重要组成部分,最小费用路径法(Least-cost path, LCP)是生态廊道构建的常用方法^[33],可以确定源和目标之间的最小消耗路径及物种迁移扩散的最佳路径。基于最小费用路径法构建生态廊道的原理是最小累积阻力模型,俞孔坚等将常用于地理信息系统中的费用距离融入该模型^[34],修改后的公式如下:

$$MCR = f_{min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_j) \tag{1}$$

式中, MCR 为最小累积阻力值; f 是正函数,代表地理空间中任一点的最小阻力与其到所有源的距离和不同景观类型间的正相关关系; D_{ij} 为物种从源到某景观单元 i 的空间距离; R_j 为某景观单元 i 阻碍某物种运动的

阻力系数。

通过了解水鸟习性、栖息地环境和干扰特征,选取人口密度、建筑物高度和土地利用/覆盖作为水鸟飞行的主要阻力因子,借鉴已有研究的阻力赋值^[18,35-36],对每个阻力因子进行赋值(表2)。由于水鸟飞行能力较强,且水鸟具有亲水习性,常栖息和活动于平原和低山丘陵地区的溪流、水塘、江河、沼泽和水田地上,因此在一般物种的阻力赋值基础上,对不同阻力因子赋值进行修正:1)对于人口密度、建筑物高度和建成区用地,将所有阻力因子赋值等比例调低至1—100^[18,34];2)对于有利于水鸟迁徙的河渠、滩涂、滩地阻力值调整至最小(即赋值为1),将水鸟可能栖息的水田、湖泊、水库坑塘阻力赋值调整为3(表2)。针对土地覆盖中的城乡、工矿、居民用地,本研究综合考虑其三维属性,将其与建筑物高度进行等权叠加^[37],得到城乡、工矿、居民用地的三维阻力赋值。然后,通过将每个阻力因子进行标准化叠置分析,构建闽三角海岸带水鸟迁徙的阻力面,基于ArcGIS 软件空间分析耗费距离、耗费路径工具,将构建的阻力面作为阻力图层,根据最小累积阻力模型原理,模拟海岸带生态源地间的最小累积阻力路径,并将该路径作为生态网络的潜在廊道(图4)。

表2 不同阻力因子及其赋值

Table 2 Different resistance factors and values

阻力因子 Resistance factors		修正前阻力值 Pre-revised resistance value	修正后阻力值 Post-revised resistance value	阻力因子 Resistance factors		修正前阻力值 Pre-revised resistance value	修正后阻力值 Post-revised resistance value
人口密度 Population density/ (人/km ²)	<88	200	40	林地 Forest	灌木林	3	3
	88—403	300	60		有林地	5	5
	403—803	400	80		疏林地	9	9
	>803	500	100		其他林地	5	5
建筑物高度 Buildings height	<20m	200	40	草地 Grassland	高覆盖度草地	20	10
	20—40m	300	60		中覆盖度草地	30	15
	40—60m	400	80		低覆盖度草地	40	20
	>60m	500	100	耕地 Cropland	水田	45	3
未利用地 Unused land	裸地	100	40		旱地	55	20
	裸岩石砾地	200	60	水域 Water	滩涂	3	1
城乡、工矿、居民用地 Urban and rural areas, industrial and mining, residential land	农村居民点	300	70		滩地	3	1
	城镇用地	500	80		湖泊	100	3
	其他建设用地	500	100		河渠	100	1
					水库坑塘	100	3

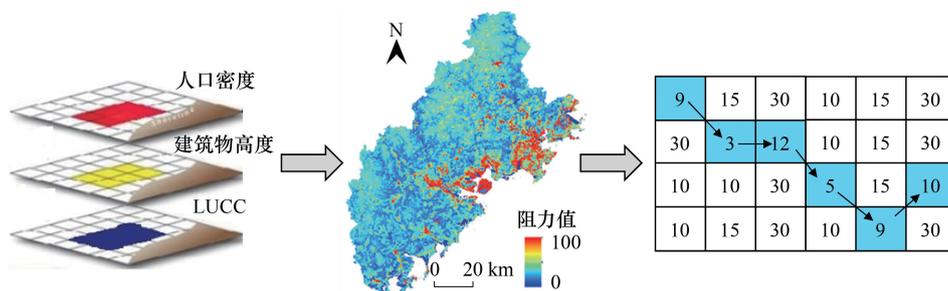


图4 最小累积阻力算法

Fig.4 Minimum cumulative resistance algorithm

(3)生态节点识别 生态廊道的主要相交点和重要转折点作为生态节点,其中人类影响指数随着时间逐渐升高且变化速率为正的生态节点为预警生态节点^[38],位于河口且生态脆弱性高的生态节点为陆海统筹生

态节点。2017 年闽三角越冬水鸟调查数据源自泉州洛阳桥、泉州围头湾、厦门东坑湾、厦门五缘湾、漳州九龙江口、漳州漳江口等 24 个鸟区开展的野外观测。基于专家经验和文献依据^[39],对水鸟样点进行分类,识别闽三角海陆联结带主要的水鸟夜栖、觅食和繁殖点位。

2 研究结果

2.1 闽三角海岸带陆海统筹生态脆弱性系统评估结果

根据闽三角海陆联接带生态脆弱性系统评估结果(图 5),区域内生态系统关键脆弱区主要集中在九龙江口、厦门湾和泉州湾。其中,红树林湿地中的水鸟栖息地关键脆弱区主要分布于漳江口、九龙江河口、厦门湾下潭尾、泉州湾北部河口地区,由于设有福建漳江口红树林国家级自然保护区、福建九龙江口省级自然保护区、福建泉州湾河口湿地省级自然保护区(洛阳江口),脆弱区面积相对较小,但仍受到一定程度的人类活动干扰。闽三角滨海沙滩脆弱区集中于厦门岛、晋江市和石狮市近海岸,主要是由于这些区域人类活动较强、排污口密度较大,且多以人工岸线为主。水鸟是滨海生态系统健康的主要指示生物类群,闽三角滨海水鸟栖息地脆弱区主要分布于云霄漳江口、九龙江口、厦门湾、围头湾、泉州湾沿岸的红树林湿地、滩涂等区域。中国鲎与文昌鱼生境脆弱区分散分布于漳州漳浦县近海岸、厦门湾海域、泉州围头湾,泉州市湄洲湾至石狮市近海海域是中国鲎与文昌鱼的生境脆弱区的密集分布区域。

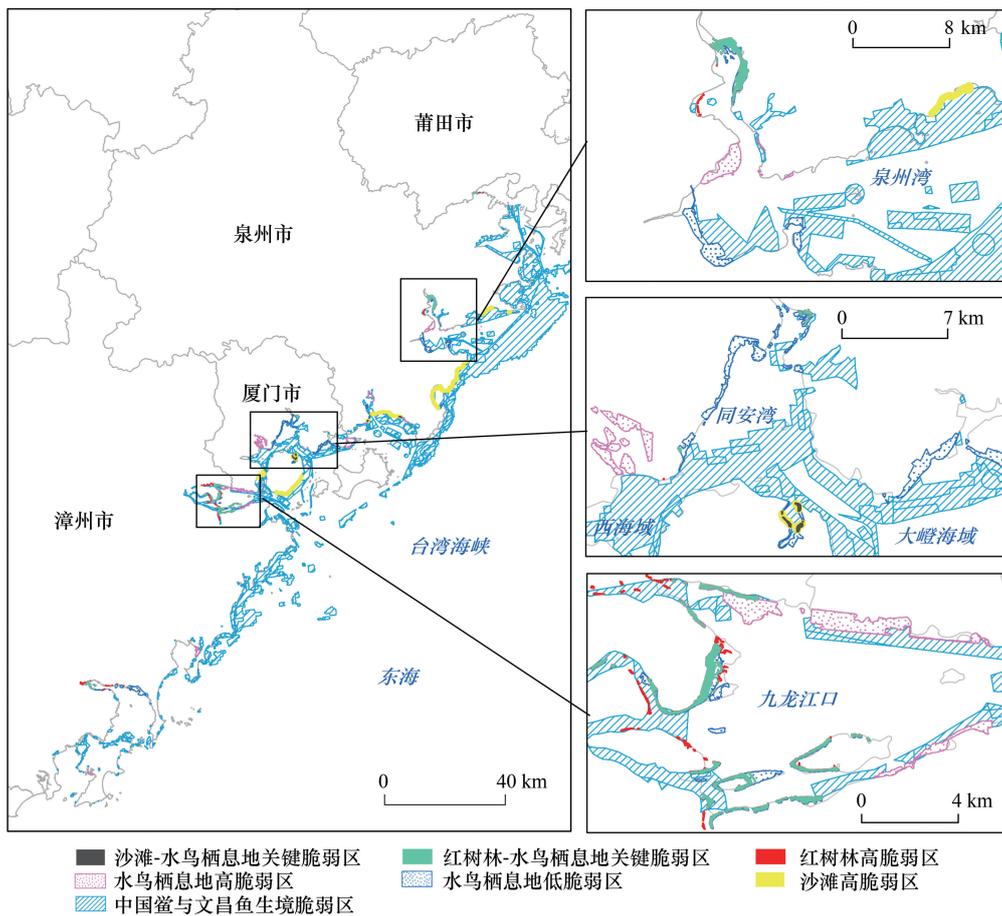


图 5 闽三角海陆联接带生态系统脆弱区分布

Fig.5 The distribution of ecosystem vulnerability in land-sea ecotone of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou megalopolis

2.2 闽三角海岸带生态网络空间格局

基于“源地-廊道-节点”通过最小累积阻力模型构建闽三角海陆联接带生态网络,如图 6 所示。其中,水

鸟迁徙廊道 12 条,总长度为 350.24 km,主要沿河渠、水库坑塘、沿海滩涂等分布,海岸带城市建成区域对于水鸟迁徙的耗费阻力较大,生态廊道呈现数量少且较为单一的特点。该生态网络中识别出水鸟迁徙关键生态节点 11 个,其中影响陆海统筹生态安全的生态节点有 4 个,分别位于九龙江河口、厦门同安湾、泉州围头湾、泉州湾沿岸;水鸟迁徙的预警生态节点有 3 个,分别位于漳州龙海市汤溪上游、厦门同安汀溪水库和晋江市与南安市交界处。最后,利用 2017 年闽三角区域越冬水鸟调查数据和中国观鸟记录中心获取的数据进行生态网络验证,验证结果表明观测到的水鸟分布有超过 70% 处于生态源地或生态廊道上(图 6)。

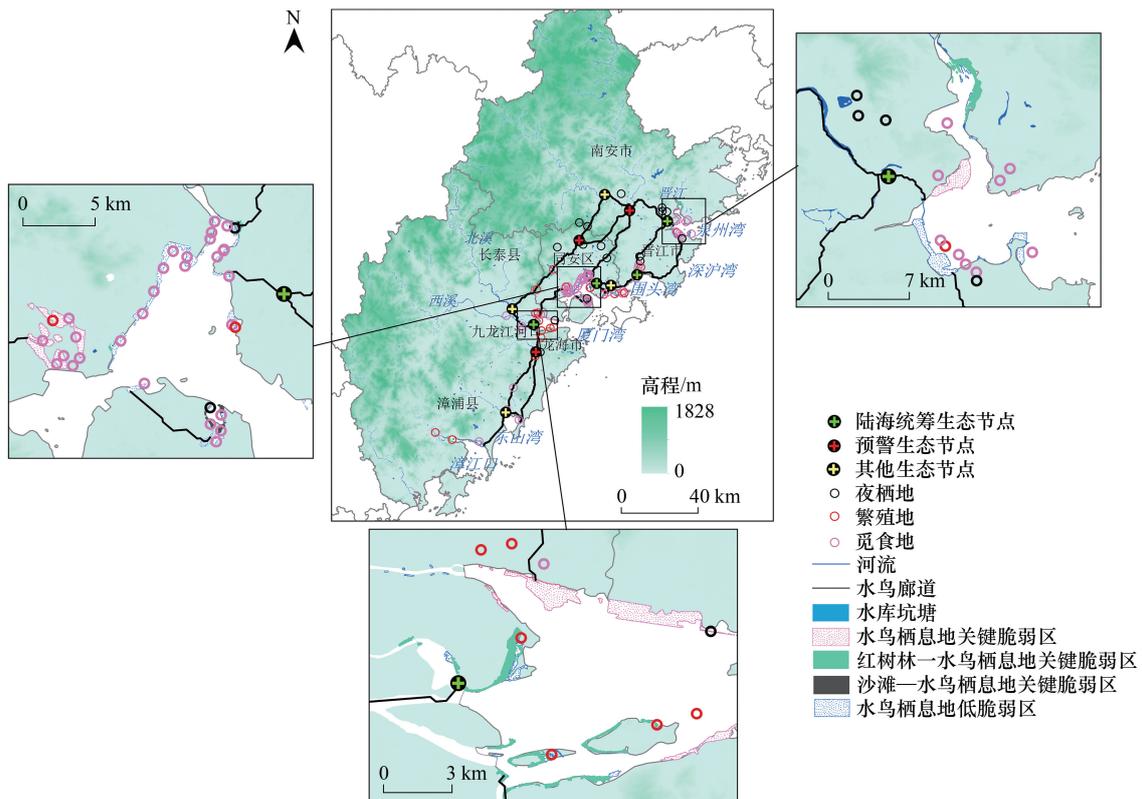


图 6 闽三角海陆联接带水鸟迁徙生态网络格局

Fig.6 The pattern of waterfowl migration ecological network in land-sea ecotone of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou megalopolis

2.3 闽三角海岸带陆海统筹生态安全“一张图”

基于闽三角海陆联接带水鸟迁徙生态网络与文昌鱼、中国鲎的未来潜在生境识别结果,规划设计闽三角海陆联接带景观生态安全“一张图”(图 7)。基于“一张图”可识别出闽三角未来潜在韧性安全生境,包括云霄红树林保护区、泉州湾南部等水鸟栖息地低脆弱区与文昌鱼、中国鲎潜在安全生境比较密集的区域。通过将水鸟生态网络、红树林和沙滩以及中国鲎/文昌鱼生态安全空间统筹为“一张图”,能够辨别出陆海关键物种/生境的生态安全共性问题,有效识别闽三角海岸带关键物种/生境生态安全之间的权衡与协同空间。由于各类物种的生态安全空间是相互连通的,它们之间存在复杂的物质、能量和信息流通,如红树林和水鸟栖息地能够为文昌鱼和中国鲎生活空间提供营养盐和食物。因此,需要重点关注陆海统筹生态节点及其邻近的各类物种生态安全空间之间的交互作用。对于红树林生境和水鸟栖息地高脆弱性和中国鲎/文昌鱼低脆弱性共存区域(如九龙江口、泉州湾西北部),需要重点保护与修复红树林生境和水鸟栖息地,以提升其为中国鲎/文昌鱼提供营养盐和食物的功能。对于红树林生境和水鸟栖息地高脆弱性和中国鲎/文昌鱼高脆弱性共存区域(如厦门西海域、厦门同安湾、泉州围头湾),需要协同保护与修复红树林生境、水鸟栖息地和中国鲎/文昌鱼生境。闽三角陆海统筹生态安全“一张图”对于明确未来生态保护与修复的重点区域,进一步引导海岸带城

市开发建设和生态保护,加强闽三角陆海生态景观结构和功能联系,维护闽三角陆海生态系统安全格局具有重要的意义。

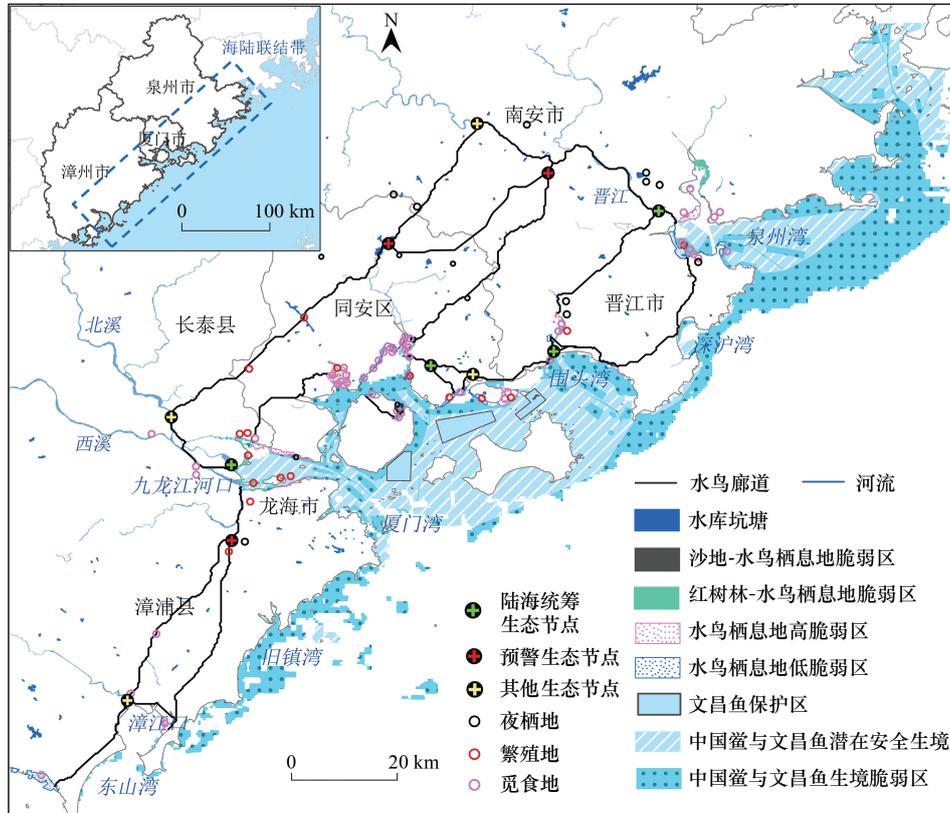


图 7 闽三角海陆联接带景观生态安全格局“一张图”

Fig.7 “one map” of landscape ecological security pattern in land-sea ecotone of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou megalopolis

3 讨论

3.1 “多物种-多生境-多尺度”的海岸带陆海统筹生态安全“一张图”

已有研究侧重于单一物种与栖息地保护研究,缺乏多物种-多生境-多尺度的综合考量的问题,本研究建立了“多物种-多生境-多尺度”的海岸带陆海统筹生态安全“一张图”,能够有效指导海岸带珍稀物种-复杂栖息地系统的统筹保护、修复与管理。过往研究更多注重陆域的生态安全评估^[7-8],海岸带城市也是如此^[10],并且在生态安全格局构建方面,生态源地的选择普遍以广义的重要生态功能区、敏感区为主^[4,6,27],本研究针对海岸带关键的生态系统,选取围填海、海洋功能区划、海水养殖和潮汐为主要胁迫因子,对关键生境进行生态空间脆弱性评估,并选取中、高脆弱区为主要生态源地,更贴合海岸带区位条件和生境特性,亦更加真实且有针对性地反映海岸带生境的脆弱与敏感属性。基于多物种(水鸟、文昌鱼、中国鲎)、多生境(红树林、水鸟栖息地、文昌鱼和中国鲎潜在生境)、多尺度(物种、生态系统、陆海全域)的复合生态环境效应,综合选取单一和共同影响因子,建立海岸带陆海统筹生态空间脆弱性系统评估体系,评估结果能够为陆海统筹生态空间综合修复与管理提供科学支撑。

3.2 基于水鸟飞行约束条件下的生态网络构建

水鸟飞行与栖息受海拔、风力、温度、人类活动强度(建筑高度、光源、声源等)等地形、环境和人类因素的多重影响。Dokter 等人利用可操作天气雷达,通过测量鸟类密度、飞行速度和方向,建立鸟类飞行高度函数,并进行了大致估算,验证了海拔对鸟类飞行的影响^[35];Visser 等人发现气候变化(冬季变暖)会缩短鸟类迁徙

的距离^[40]; Hüppop 等人发现风力大小会影响候鸟迁徙的时间和距离,同时海上风电场的建设会增加鸟类迁徙的风险^[41]。而国内关于鸟类飞行廊道与影响的研究大部分集中于候鸟迁徙的观测手段、栖息地选择、生理生态学、土地利用变化影响等二维平面的研究^[18,34,42],缺乏对鸟类迁徙高度与人工构造物阻碍的考虑。本研究通过了解水鸟习性、栖息地环境和干扰特征,基于可操作性和数据可获取性原则,重点考虑人工构造物、人群密集程度和地形要素等陆源因素的影响,选取了人口密度、建筑物高度和土地覆盖作为水鸟飞行的主要阻力因子,对于建设用地不再简单进行阻力赋值,而是通过叠加建筑物高度进行加权赋值,最终模拟了闽三角海岸带水鸟飞行廊道和水鸟保护生态网络,能够为研究区水鸟保护与栖息地修复提供更加精准和可操作的科学支撑。为了提供更为精确的研究成果服务于管理需求,下一步将完善水鸟迁徙廊道的影响因素选取,考虑将光、声污染纳入水鸟飞行的约束因子中,同时进一步收集水鸟生物多样性数据,完善水鸟生态网络的验证。

4 结论与展望

本研究提出针对海岸带重要生态系统的陆海统筹生态空间脆弱性评估方法,并构建陆海统筹生态保护与修复网络,建立海岸带陆海统筹生态安全“一张图”,以期为我国陆海统筹生态系统的综合管理提供理论指导和方法支撑。研究以福建省闽三角城市群海岸带珍稀物种-复杂栖息地系统为案例,得到以下结论:

(1) 围填海、海水养殖污染等陆海胁迫因子统筹驱动下,闽三角九龙江口、厦门湾西海域和泉州湾西北部沿岸生态系统脆弱性较高,生态安全胁迫较大,需要重点进行保护与修复。

(2) 水鸟生态网络是统筹闽三角陆海多物种(水鸟、文昌鱼、中国鲎)、多生境(红树林、水鸟栖息地、文昌鱼/中国鲎潜在生境)、多尺度(物种、生态系统、陆海全域)生态安全评价和管理的关键要素。

(3) 将水鸟生态网络、红树林和沙滩以及中国鲎/文昌鱼生态安全空间统筹为“一张图”,能够辨别出陆海关键物种/生境的生态安全共性问题,并有效识别闽三角海岸带关键物种/生境生态安全之间的权衡与协同空间。

(4) 近年来闽三角生态修复力度加大,海岸带未来潜在的陆海统筹韧性安全生境将主要位于云霄红树林保护区、九龙江河口和泉州湾南部(生态修复示范区)。

海岸带陆海统筹生态安全“一张图”中各类物种的生态安全空间是相互连通的,它们之间存在复杂的物质、能量和信息流通,如红树林、沙滩和水鸟栖息地能够为文昌鱼和中国鲎生活空间提供营养盐和食物,反之水鸟和潮间带大型动物也能以文昌鱼和中国鲎幼体为食等。这些关键物种/生境间的交互作用机制将是进一步完善海岸带陆海统筹生态安全“一张图”的工作重点。

致谢: 厦门大学王文卿教授对本研究给予帮助,陈小麟教授和黄智君博士提供鸟区观测数据,并在水鸟生态网络构建方法上提出建议,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 何大明,柳江,胡金明,冯彦,甘淑. 纵向峡谷区的跨境生态安全与调控体系. 科学通报, 2007, 52(S2): 1-9.
- [2] 韩增林,狄乾斌,周乐萍. 陆海统筹的内涵与目标解析. 海洋经济, 2012, 1: 10-15.
- [3] 刘纪化,张飞,焦念志. 陆海统筹研发碳汇. 科学通报, 2015, 60(35): 3399-3405.
- [4] 殷炳超,何书言,李艺,李杨帆. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4373-4382.
- [5] 刘红,王慧,张兴卫. 生态安全评价研究述评. 生态学杂志, 2006, 25(1): 74-78.
- [6] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬. 区域生态安全格局:概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [7] 刘勇,刘友兆,徐萍. 区域土地资源生态安全评价——以浙江嘉兴市为例. 资源科学, 2004, 3: 69-75.
- [8] 杜巧玲,许学工,刘文政. 黑河中下游绿洲生态安全评价. 生态学报, 2004, 24(9): 1916-1923.
- [9] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,肖笃宁,赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [10] 李杨帆,林静玉,孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用. 地理研究, 2017, 36(3): 485-494.
- [11] Stjernman M, Green M, Lindström Å. Habitat-specific bird trends and their effect on the Farmland Bird Index. Ecological Indicators, 2013, 24: 382-391.
- [12] Behr D M, Ozgul A, Cozzi G. Combining human acceptance and habitat suitability in a unified socio-ecological suitability model: a case study of

- the wolf in Switzerland. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(6): 1919-1929.
- [13] 秦青, 刘晶茹, 于强, 马奔, 谭宏利, 解林红, 温亚利. 四川省大熊猫保护地生态安全及其时空演变. *生态学报*, 2020, 40(20): 7255-7266.
- [14] Li N, Wang Z, Xia L, Yan F, Xu L Q, Qiao Y J, Li X H, An S Q, Fang S B. Effects of long-term coastal reclamation on suitable habitat and wintering population size of the endangered red-crowned Crane, *Grus japonensis*. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 21-29.
- [15] Ma T T, Li X W, Bai J H, Cui B S. Habitat modification in relation to coastal reclamation and its impacts on waterbirds along China's coast. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 17: e00585.
- [16] Greenstreet S P R, Rogers S I. Indicators of the health of the North Sea fish community: identifying reference levels for an ecosystem approach to management. *ICES Journal of Marine Science*, 2006, 63(4): 573-593.
- [17] Ilman M, Dargusch P, Dart P. A historical analysis of the drivers of loss and degradation of Indonesia's mangroves. *Land Use Policy*, 2016, 54: 448-459.
- [18] 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.
- [19] Delmas E, Besson M, Brice M H, Burkle L A, Dalla Riva G V, Fortin M J, Gravel D, Guimarões P R, Hembry D H, Newman E A, Olesen J M, Pires M M, Yeakel J D, Poisot T. Analysing ecological networks of species interactions. *Biological Reviews*, 2019, 94(1): 16-36.
- [20] Li M M, Koks E, Taubenböck H, Van Vliet J. Continental-scale mapping and analysis of 3D building structure. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111859.
- [21] 翁朝红, 谢仰杰, 肖志群, 黄良敏, 李军, 王淑红, 张雅芝. 福建及中国其他沿岸海域中国鲎资源分布现状调查. *动物学杂志*, 2012, 47(3): 40-48.
- [22] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 薛雄志. 生态安全研究进展. *生态学报*, 2005, 25(4): 861-868.
- [23] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展. *农村生态环境*, 2003, 19(1): 56-59.
- [24] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [25] Li Y F, Zhang X X, Zhao X X, Ma S Q, Cao H H, Cao J K. Assessing spatial vulnerability from rapid urbanization to inform coastal urban regional planning. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 123: 53-65.
- [26] Harik G, Alameddine I, Maroun R, Rachid G, Bruschi D, Garcia D A, El-Fadel M. Implications of adopting a biodiversity-based vulnerability index versus a shoreline environmental sensitivity index on management and policy planning along coastal areas. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 187-200.
- [27] Arkema K K, Verutes G M, Wood S A, Clarke-Samuels C, Rosado S, Canto M, Rosenthal A, Ruckelshaus M, Guannel G, Toft J, Faries J, Silver J M, Griffin R, Guerry A D. Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7390-7395.
- [28] 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.
- [29] Opdam P, Steingröver E, Van Rooij S. Ecological networks: a spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 322-332.
- [30] Bixler R P, Johnson S, Emerson K, Nabatchi T, Reuling M, Curtin C, Romolini M, Grove J M. Networks and landscapes: a framework for setting goals and evaluating performance at the large landscape scale. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(3): 145-153.
- [31] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [32] 傅强, 顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1021-1029.
- [33] LaRue M A, Nielsen C K. Modelling potential dispersal corridors for cougars in Midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 2008, 212(3/4): 372-381.
- [34] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长前景. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [35] 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.
- [36] Dokter A M, Liechti F, Stark H, Delobbe L, Tabary P, Holleman I. Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 8(54): 30-43.
- [37] 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. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2043-2057.
- [38] Li Y, Yin B C, Li Y F. Early warning signals for landscape connectivity and resilient conservation solutions. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(1): 73-83.
- [39] 王博, 陈小麟, 林清贤, 周晓平, 朱开建, 上官榆劲. 厦门鹭类集群营巢地分布及其生境特性的研究. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(5): 734-737.
- [40] Visser M E, Perdeck A C, Van Balen J H, Both C. Climate change leads to decreasing bird migration distances. *Global Change Biology*, 2009, 15(8): 1859-1865.
- [41] Hüppop O, Dierschke J, Exo K M, Fredrich E, Hill R. Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *IBIS*, 2006, 148(S1): 90-109.
- [42] 马志军, 王勇, 陈家宽. 迁徙鸟类中途停歇期的生理生态学研究. *生态学报*, 2005, 25(11): 3067-3075.