

DOI: 10.5846/stxb202109232670

何思璇, 张典, 吴福星, 王先艳, 胡文佳, 梁姗姗, 杜建国, 俞炜炜, 陈彬. 厦门湾中华白海豚潜在生态廊道识别及人类活动干扰评估. 生态学报, 2022, 42(21): 8555-8567.

He S X, Zhang D, Wu F X, Wang X Y, Hu W J, Liang S S, Du J G, Yu W W, Chen B. Identification of potential ecological corridors for *Sousa chinensis* in Xiamen Bay and assessment of anthropogenic disturbance. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8555-8567.

# 厦门湾中华白海豚潜在生态廊道识别及人类活动干扰评估

何思璇<sup>1</sup>, 张典<sup>1,4</sup>, 吴福星<sup>1,2,3</sup>, 王先艳<sup>1,2,3</sup>, 胡文佳<sup>1,2,3,\*</sup>, 梁姗姗<sup>1,5</sup>, 杜建国<sup>1,2,3</sup>, 俞炜炜<sup>1,2,3</sup>, 陈彬<sup>1,2,3</sup>

1 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005

2 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

3 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

4 厦门大学, 厦门 361005

5 汕头大学, 汕头 515063

**摘要:**生态廊道具有维持或恢复生态连通性的功能,对于连接生物栖息地、保护物种多样性具有重要意义。现有的生态廊道研究主要集中于陆地,而海洋生态系统具有水体广泛连通、缺乏直观的景观斑块等特点,导致海洋生态廊道的研究成为长期以来的科学难题。以栖息地位于厦门湾的国家一级保护动物中华白海豚(*Sousa chinensis*)为对象,尝试基于物种分布模型和最小成本路径分析法建立海洋生态廊道的识别方法。研究采用物种分布模型识别厦门湾内中华白海豚的适宜生境分布区和节点,并利用模型产出的生境适宜性结果生成海洋中的阻力表面,模拟计算节点与节点间在阻力表面上的最小成本路径,从而生成物种扩散网络。研究结果显示,厦门湾中华白海豚的分布主要受到航道距离、到岸线距离和叶绿素浓度三项因素的影响,主要适宜生境位于西海域至九龙江口和大嶼海域。潜在的核心生态廊道面积 93.19km<sup>2</sup>,次级生态廊道面积 170.41km<sup>2</sup>,九龙江口-鼓浪屿南侧-黄厝-大小嶼岛沿线可能是厦门湾中华白海豚的主要迁移路线。在此基础上,从用海空间重叠和桥梁影响两方面开展了人类活动对廊道的干扰评估。评估结果显示旅游活动和航运活动可能是中华白海豚生态廊道的主要影响来源,其中核心廊道受旅游活动影响更大,次级廊道受航运活动的影响更大。此外,厦门岛北部的桥梁亦可能会影响中华白海豚生态廊道的连通性。研究创新性地提出了海洋生态廊道的空间定量化识别方法并成功应用于厦门湾中华白海豚研究,研究结果可为我国海洋生物多样性保护、海洋保护区的空间规划等领域提供新的科学工具。

**关键词:**海洋生态连通性;海洋生态廊道;中华白海豚;物种分布模型;厦门湾

## Identification of potential ecological corridors for *Sousa chinensis* in Xiamen Bay and assessment of anthropogenic disturbance

HE Sixuan<sup>1</sup>, ZHANG Dian<sup>1,4</sup>, WU Fuxing<sup>1,2,3</sup>, WANG Xianyan<sup>1,2,3</sup>, HU Wenjia<sup>1,2,3,\*</sup>, LIANG Shanshan<sup>1,5</sup>, DU Jianguo<sup>1,2,3</sup>, YU Weiwei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Bin<sup>1,2,3</sup>

1 Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

2 Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

3 Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China

4 Xiamen University, Xiamen 361005, China

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2019YFE0124700);国家自然科学基金项目(41906127);自然资源部海洋生态预警监测项目“海洋生态廊道划定研究与试点”;福建省自然科学基金项目(2021J06031)

**收稿日期:**2021-09-23; **网络出版日期:**2022-06-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huwenjia@tio.org.cn

5 Shantou University, Shantou 515063, China

**Abstract:** Ecological corridors have the function of maintaining or restoring ecological connectivity, and are important for connecting the biological habitats and protecting species diversity. Existing studies on ecological corridors have mainly focused on land, while marine ecosystems are characterised by extensive water connectivity and lack of visual landscape patches, making the study of marine ecological corridors a long-standing scientific challenge. In this study, the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*), a national level protected species in Xiamen Bay, was used as the target, and a method for identifying marine ecological corridors was developed based on the species distribution model and the least-cost path analysis. The study used a species distribution model to identify suitable habitat areas and nodes for Indo-Pacific humpback dolphins in the Xiamen Bay, and used the habitat suitability results of the model to generate a resistance surface in the ocean and simulate the least-cost path between nodes and nodes on the resistance surface, so as to generate a species dispersal network. The results showed that the distribution of Indo-Pacific humpback dolphins in Xiamen Bay was mainly influenced by three factors: channel distance, distance to shoreline, and chlorophyll concentration, while the main suitable habitats were located in the western waters to the mouth of Jiulong River and Dadeng waters. The potential core ecological corridor covered an area of 93.19 km<sup>2</sup> and the secondary ecological corridor covered an area of 170.41 km<sup>2</sup>. The route along Jiulong River Estuary-south of Gulangyu Islet-Huangcuo-Dadeng Island and Xiaodeng Island may be the main migration route of Indo-Pacific humpback dolphins in Xiamen Bay. On this basis, the assessment of the disturbance of human activities on the corridor was carried out in terms of the overlapping of sea-use space and the impact of bridges. The assessment results indicate that tourism and shipping activities are likely to be the main sources of impacts on the Indo-Pacific humpback dolphin ecological corridor, with the core corridor being more influenced by tourism activities and the secondary corridor being more influenced by shipping activities. In addition, the bridges in the northern part of Xiamen Island may also affect the connectivity of the Indo-Pacific humpback dolphin ecological corridor. This study innovatively proposes a spatially quantified identification method for marine ecological corridors and successfully applies it to the study of the Indo-Pacific humpback dolphin in Xiamen Bay. The results of this study can provide new scientific tools for the conservation of marine biodiversity and the spatial planning of marine protected areas in China.

**Key Words:** marine ecological connectivity; marine ecological corridor; Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*); species distribution model; Xiamen Bay

近年来,人类对自然生态系统的需求正在加速,全球范围内人类活动已对生物多样性造成了严重威胁,物种损失、种群规模减小和活动范围收缩已变为常态<sup>[1]</sup>,与此同时栖息地的丧失和破碎化加剧了这一进程<sup>[2]</sup>。对物种的保护除了就地保护外,还应建立物种栖息地内部和栖息地之间的生态连通性,而生态廊道是保证连接的方法之一<sup>[3-4]</sup>。生态廊道一般指能够维持或恢复有效生态连通性的地理空间,可连接破碎化生境并适宜生物生存、移动或扩散,识别并划定生态廊道有助于保护生态系统的连通性和生物多样性<sup>[5]</sup>。通常生态廊道在空间上可能是连接栖息地的连续路径或通道,而在某些情况下,生态廊道可以是不连贯的栖息地斑块(“垫脚石”)<sup>[6]</sup>。

尽管目前已有多种空间分析方法可用于生态廊道的识别,但大多数都基于以下的共同假设:动物穿越不同地面覆盖类型时具有克服空间阻力的特性,根据动物趋利避害的本能,往往会自发选择阻抗最小的路径迁徙,因此可用成本距离、最小累积阻力等加以度量和识别<sup>[7]</sup>。常用的廊道规划方法包括最小成本路径分析<sup>[8]</sup>、电路分析<sup>[9]</sup>、图论<sup>[10]</sup>、专家意见模型<sup>[11]</sup>等。不同的方法具有不同的优势,其中最小成本路径分析是最经典、应用场景最广的<sup>[12]</sup>;电路分析可突出动植物移动的可行性和通行密度,但路径模拟仍依赖于成本路径方法且过程较复杂<sup>[13]</sup>;图论<sup>[14]</sup>和专家意见模型<sup>[15]</sup>在一定程度上依赖经验判断,随机性较低,同时这两种方法往往适用于分布较为稳定的物种,如植物和固定小范围内活动物种。

现有的生态廊道识别方法多用于陆地案例的研究,而与陆地生态系统比较,海洋生态系统中由于海水的覆盖和流动往往缺乏边界明确的景观斑块,具有广泛连通的特征。相比陆地上可以直观展示的土地覆被格局、地形和障碍物,海洋中有着更多影响生物迁徙但却难以直接观察到的因素,这导致了海洋生态廊道的识别具有较高难度,缺乏公认的研究方法或案例<sup>[16-17]</sup>。陆地生态廊道往往呈线状<sup>[18]</sup>或者面状<sup>[19]</sup>分布,而与陆地生态廊道相比,海洋生态廊道更为开放,生物的扩散运动也更为活跃,具有更高的不确定性,呈现方式也更多样<sup>[20-21]</sup>。如何识别海洋生物的核心生境及其节点分布,构建海洋生物迁移的阻力表面并模拟其廊道的空间结构,这是海洋生态廊道研究中尚需解决的关键问题。基于生境适宜性构建阻力表面是廊道分析中的常用方法<sup>[22]</sup>,而物种分布模型可用于评估物种的生境适宜性并模拟生物的潜在分布区域<sup>[23]</sup>,近年来物种分布模型中的 MaxEnt 模型在鲸豚类等海洋生物的生境适宜性研究中得到了有效应用<sup>[24-26]</sup>。因此,本研究拟将物种分布模型引入至海洋生态廊道研究,探索从生境分布区识别到廊道模拟的整体构建过程。

中华白海豚(*Sousa chinensis*)是国家一级重点保护水生哺乳动物,在 2018 年世界自然保护联盟濒危物种红色物种名录上属“易危”物种<sup>[27]</sup>。厦门湾是中国境内中华白海豚重要的栖息地之一<sup>[28]</sup>,湾内已建立有厦门海洋珍稀物种自然保护区对中华白海豚实施保护<sup>[29]</sup>,但白海豚种群的数量仍在逐年下降<sup>[30]</sup>。现有研究虽已初步摸清白海豚数量和主要活动地点,但白海豚生态廊道和洄游路线的空间分布尚不明确<sup>[31]</sup>,这阻碍了对白海豚种群的有效保护与管理。因此,本研究拟以厦门湾中华白海豚为目标物种,基于 MaxEnt 物种分布模型和最小成本路径分析法探索海洋生态廊道的识别方法,明确白海豚潜在海洋生态廊道的空间分布格局,并分析评估人类活动对廊道的干扰状况。本研究在国内首次提出了海洋生态廊道空间化、量化的构建过程和研究案例,能够为海洋空间规划和海洋保护地规划提供新方法和新工具,同时亦可为厦门湾中华白海豚的保护管理提供理论指导与科学依据。

## 1 研究区概况

厦门湾(117°48'55.18"—118°34'46.77"E,24°14'33.23"—24°42'23.70"N)西起九龙江河口,东至晋江市围头角至龙海市镇海角连线,属典型亚热带季风型海洋性气候,总面积约为 1081km<sup>2</sup>(图 1)。中国境内已知的中华白海豚的数量不足 6000 头<sup>[32]</sup>;2007—2010 年的调查显示,厦门湾中华白海豚的数量近 70 头<sup>[33]</sup>。然而厦门湾是多功能港口,集商业、客运、军事、养殖渔业、旅游为一体,周边区域人口密集,海洋开发利用强度较大<sup>[34]</sup>。即使设立了专门的中华白海豚保护区,白海豚依然受到人类活动的较大影响,保护成效仍待提升。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及处理

#### 2.1.1 中华白海豚分布数据及预处理

2010 年 8 月至 2016 年 12 月,采用船基样线法对厦门湾中华白海豚的分布情况进行调查,调查频次为每月一个航次,每个航次调查均覆盖整个厦门湾;具体的野外调查和数据收集方法详见 Wang 等<sup>[35-36]</sup>。野外调查共发现中华白海豚 196 群,其分布位点如图 1 所示。将 196 个白海豚分布点的经纬度录入至 Excel 中,另存为 csv 格式,制备成 MaxEnt 模型可用的分布数据。

#### 2.1.2 环境变量数据及预处理

MaxEnt 模型基于最大熵原理建立物种出现记录与多元环境条件之间的关系,从而对物种分布进行预测或生境适宜性评估<sup>[37-38]</sup>,因此除物种分布数据外,还需输入相应的适生环境变量。在采用物种分布模型研究海豚活动模式的案例中,通常选取的环境变量包括水深、水质、水温、到航道的距离、到岸线的距离等<sup>[39-40]</sup>。本研究结合前人研究和经验,兼顾厦门湾的研究尺度、环境特征以及中华白海豚的生境偏好<sup>[41]</sup>,筛选出 11 个用于模型建立的环境变量,其中包括 6 个水质数据,3 个水文数据和 2 个地形数据(表 1)。环境变量数据获取方式包括环境公报、现场调查、文献查阅、遥感影像解释等多种来源,在 ArcGIS 10.2 软件中采用多种空间插值

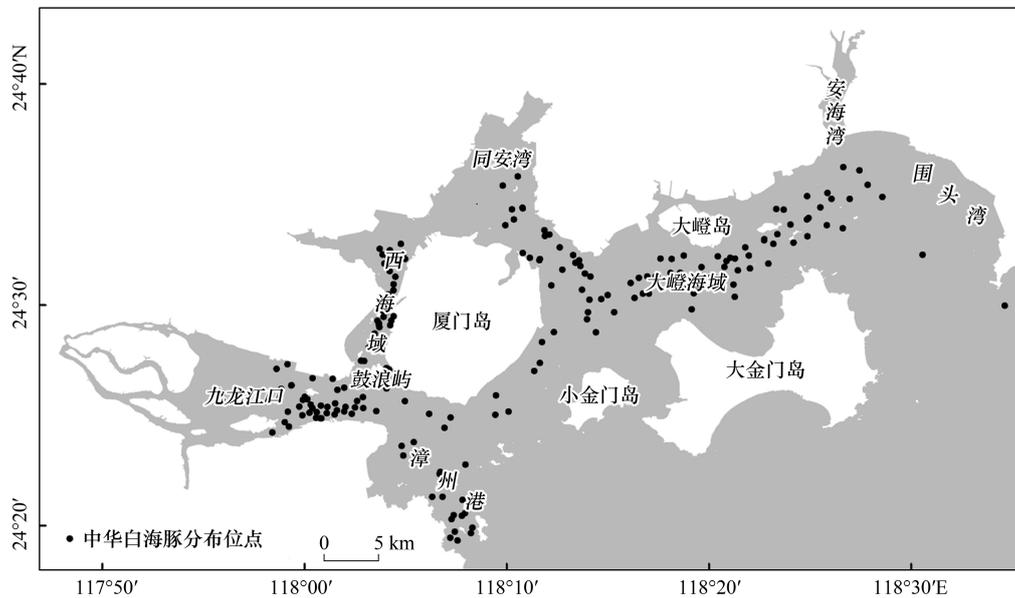


图 1 研究区和中华白海豚分布点

Fig.1 Study area and distribution sites of Indo-Pacific humpback dolphin

和地理距离计算方法将不同来源的环境数据同化处理至厦门湾研究范围,形成 250m×250m 分辨率的栅格数据集,并转换为 ASCII 格式,以备 MaxEnt 模型运算。

表 1 环境变量数据来源及处理方式

Table 1 Sources and treatment of environmental variable data

类型 Types	变量及描述 Variables and descriptions	单位 Unites	来源 Sources	空间处理方式 Treatment
水质数据 Water quality data	盐度	‰	环境影响评价报告 <sup>[42-44]</sup>	克里金插值法
	溶解氧浓度	mg/L		
	叶绿素 a 浓度	μg/L		
	无机氮浓度	mg/L		
	活性磷酸盐浓度	mg/L		
水文数据 Hydrological data	石油类	μg/L		
	水温	℃		克里金插值法
地形数据 Topographic data	潮流流速	m/s	文献数据 <sup>[45]</sup>	面转栅格
	到航道距离	m	福建省海洋功能区划(2011—2020)	欧氏距离
	水深	m	2018 年中国近岸电子海图	
2009 年国家海洋局第三海洋研究所调查数据	自然邻域法			
	到岸线距离	m	2018 年中国近岸电子海图	欧氏距离

### 2.1.3 人类用海活动数据来源

人类用海活动数据来源于《福建省海洋功能区划(2011—2020)》、《厦门市全域旅游专项规划(2017—2035)》、厦门珍稀海洋物种国家级自然保护区总体规划、2015—2020 年 500m 分辨率全球船舶密度数据<sup>[46]</sup>和 2021 年 30m 分辨率谷歌卫星遥感影像。其中,工业与城镇用海区、已批围填海和港口区 3 种用海区域数据来自《福建省海洋功能区划(2011—2020)》;旅游活动区域数据来自《厦门市全域旅游专项规划(2017—2035)》中的临海旅游区,结合中华白海豚听觉阈值和海上游览项目噪音,根据噪声损失公式进行潜在影响范围估算,

将临海旅游区及其周边 1600m 缓冲区作为旅游活动影响区域<sup>[47-49]</sup>;航运活动区域数据提取自 AIS 记录的全球船舶密度栅格数据<sup>[46]</sup>,将栅格数据按值重分类后取密度高值区作为航运活动频繁的区域;保护区边界数据提取自保护区的拐点坐标。考虑到中华白海豚的迁移特性,跨海桥梁建筑也作为潜在影响来源被纳入人类活动的分析范畴,桥梁的长度、位置等信息采用遥感影像目视解译方式结合文献资料查阅获得。

## 2.2 MaxEnt 模型设置

将厦门湾白海豚分布数据和环境变量数据集导入 MaxEnt 模型,用 75% 的数据进行训练,其余数据作为测试数据。采用 Bootstrap 法进行重采样,取模型重复运行 10 次的平均值结果。MaxEnt 模型输出结果为栅格数据,像元取值范围在 0—1,代表物种分布概率或生境适宜性程度。根据栅格像元值大小,将中华白海豚适生区进一步划分为 3 组,分别是最优适生区(>0.5)、中等适生区(0.5—0.2)和非适生区(<0.2),从而生成厦门湾中华白海豚生境适宜性等级的空间分布图。MaxEnt 模型的准确性通常采用 AUC(Area Under Curve) 值进行评估,一般认为 AUC 值在 0.9—1.0 时模型预测结果优秀;在 0.8—0.9 时预测结果较好;低于 0.5 则结果劣于随机分布<sup>[50]</sup>。

## 2.3 潜在生态廊道识别方法

采用最小成本路径分析法构建厦门湾中华白海豚海洋生态廊道,廊道构建的运算过程利用 SDMtoolbox 工具包在 ArcGIS 10.2 软件中进行<sup>[51]</sup>,该工具可基于已知的生境节点和给定的阻力表面,通过反复计算节点与节点间在阻力表面上连接的趋势和概率,最终得到节点之间成本最低的最佳路径并根据路径选择频次生成物种扩散网络。

本研究基于生境适宜性的分析结果开展廊道分析。首先,将中华白海豚的最优适生区提取为核心生境分布区,移除面积小于 0.5km<sup>2</sup> 的区块以降低图斑噪点,再参照图斑平均大小将部分面积过大的连续分布图斑进行均匀化。其次,从核心生境分布区构建生境节点,识别生境分布图斑的几何质心,从而生成生境节点图层。随后,从生境适宜性图层构建阻力表面,阻力表面由一组表征物种穿过该区域所需消耗的能量或困难程度或穿越风险的数值组成,一般来说生境适宜性越高,物种穿过阻力越小<sup>[52]</sup>,本研究中采用 SDMtoolbox 工具包中“invert SDM/ENM”模块将厦门湾中华白海豚生境适宜性评估结果反转为阻力表面<sup>[51]</sup>。最后,将生境节点和阻力表面分别导入 SDMs 工具中的“Landscape Connectivity”模块进行计算,可输出生境节点之间的最优路径及生态廊道分布。

## 2.4 廊道干扰评估方法

中华白海豚栖息于近岸的河口海湾,容易受到渔业活动、沿海工业化、船只伤害、港口建设等人为活动的威胁<sup>[53]</sup>。不同性质的用海活动对白海豚栖息地造成不同程度的影响,例如被流刺网缠绕至窒息而亡<sup>[54]</sup>、高速船舶的碰撞<sup>[41]</sup>、围填海活动挤压或影响生境范围<sup>[53]</sup>等。此外,有迹象表明,在桥梁附近中华白海豚的数量和出现频次降低甚至完全消失<sup>[33]</sup>,已有相关文献指出桥梁可能会影响长江江豚的洄游路线<sup>[55]</sup>,在实际调查中也发现部分桥梁对白海豚活动具有较大影响。因此,根据各类用海活动的特点,本研究将从两个方面开展廊道干扰度分析,第一是廊道与用海活动的空间重叠分析,第二是桥梁等穿越性跨海工程造成的廊道影响分析。前者通过计算各类用海活动区域与廊道区域的空间重叠面积和重叠率,定量分析不同类型空间用海对中华白海豚活动廊道的影响;后者识别并统计桥梁的数量、密度等数据,尝试定性分析桥梁对廊道的可能影响状况。

## 3 结果与分析

### 3.1 MaxEnt 模型评估结果

MaxEnt 模型的平均训练 AUC 值为 0.945,标准偏差 0.005,表明 MaxEnt 模型的预测结果准确性较高,并且模型性能稳定。对环境因子的重要性分析结果表明(表 2),对中华白海豚潜在适生区分布影响较高的环境因子分别为到航道距离、叶绿素浓度、溶解氧浓度和到岸线距离。刀切法分析结果显示(图 2),盐度、叶绿素

浓度等变量在独立作用时对模型的增益作用较大,而到岸线距离和到航道距离等变量从模型内剔除时对模型造成的减益作用更大。综合重要性和刀切图的分析结果,到航道距离、到岸线距离、叶绿素浓度这 3 项环境变量可能对厦门湾内中华白海豚的分布起着最重要的驱动作用。

表 2 环境因子重要性分析

Table 2 Importance analysis of environmental factors

环境变量 Environmental variables	排列重要性 Permutation importance	环境变量 Environmental variables	排列重要性 Permutation importance
到航道距离 Distance to the waterways	43.6	石油类 Petroleum	5.0
叶绿素 a 浓度 Chlorophyll-a concentration	9.6	活性磷酸盐浓度 Active phosphate concentration	3.5
溶解氧浓度 Dissolved oxygen concentration	9.0	盐度 Salinity	3.3
到岸线距离 Distance to the coast	8.5	潮流流速 Velocity of flow	3.0
无机氮浓度 Inorganic nitrogen concentration	6.7	水深 Depth	2.3
水温 Water temperature	5.5		

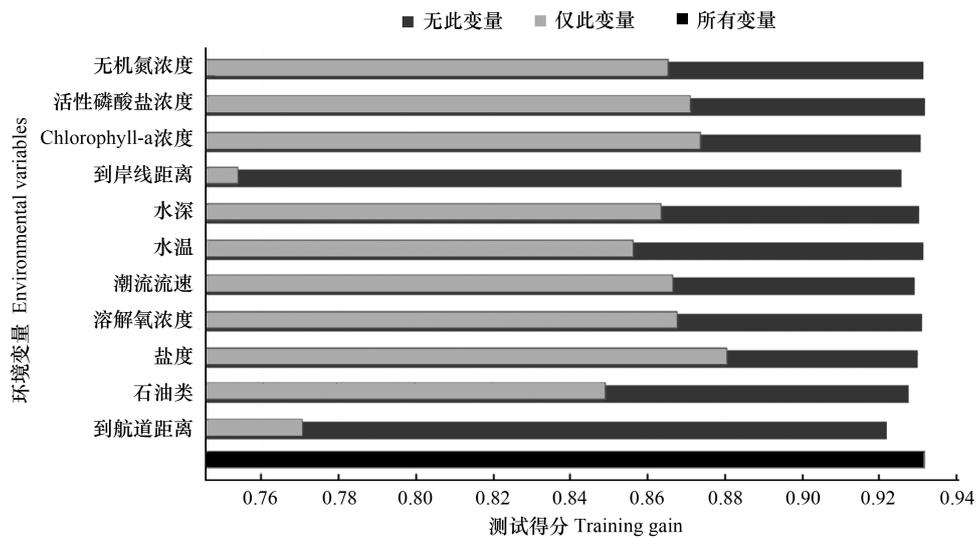


图 2 环境变量刀切法分析结果

Fig.2 Jackknife analysis result for the environmental variables

将生境适宜性评估结果分为最优适生区、中等适生区和非适生区,结果显示最优适生区共 178.69km<sup>2</sup>,中度适生区共 493.19km<sup>2</sup>。最优适生区主要集中分布于厦门湾的西海域、九龙江口和同安湾-大嶝海域,在龙海沿岸、厦门岛东南的黄厝沿岸也有零散分布,而中等适生区基本涵盖除沿岸浅水滩涂区以外的厦门湾大部分海域(图 3)。

### 3.2 中华白海豚潜在海洋生态廊道

根据厦门湾中华白海豚的最优适生区结果提取得到核心生境分布区,共计 38 个,平均面积 31.04km<sup>2</sup>,其中最大的核心生境位于西海域至九龙江口。与白海豚调查数据相对照,共有 60% 的白海豚出现位点落在核心生境内,表明识别出的生境分布区较准确。将核心生境图斑转换为生境节点,在厦门湾内共生成 38 个白海豚生境节点。廊道模拟结果显示,共有 703 条潜在路径连接各生境节点,总长为 17420km,平均路径长度为 24.78km。最长的路径可连接九龙江口至围头湾,跨越 22 个生境节点,长度达到 76.01km(图 4)。

由于海洋生态系统具有广泛连通的特点,因此难以参照经典的陆地廊道研究过程对廊道宽度进行定量统计。本研究采用自然断点法根据路径选择频次将模拟得到的白海豚扩散网络图层划分为核心廊道和次级廊

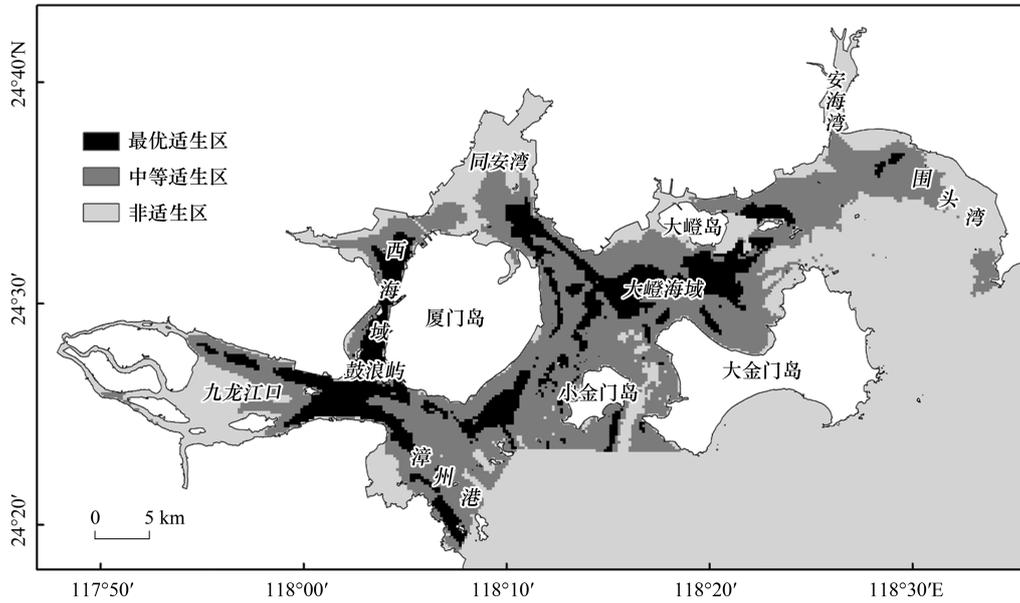


图 3 基于 MaxEnt 模型的适生区分布

Fig.3 Suitable habitat distribution based on the MaxEnt model

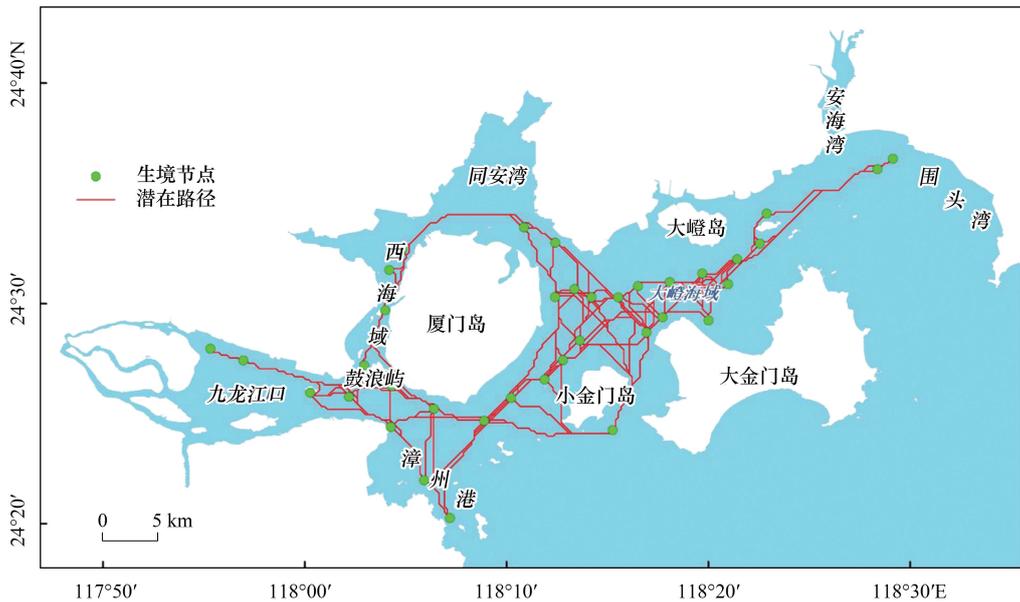


图 4 生境节点和路径分布

Fig.4 Habitat nodes and routes distribution

道并统计区域面积(图 5),其中核心廊道共 93.19km<sup>2</sup>,次级廊道共 170.41km<sup>2</sup>。整体来看,沿九龙江口-鼓浪屿南侧-黄厝-大小嶼岛有一条明显的核心廊道,提示该路线可能是中华白海豚在厦门湾内的主要迁移通道。

### 3.3 人类活动对白海豚生态廊道干扰评估

廊道重叠分析结果显示(图 6),廊道与保护区的重叠率仅为 9.75%,与旅游活动区的重叠率达 22.79%,与已批围填海的重叠率为 0.72%,与工业与城镇用海区的重叠率为 1.4%,与航运活动区的重叠率达 29.79%,与港口区的重叠率达 7.70%,上述结果提示航运活动和旅游活动可能是对白海豚生态廊道造成最大干扰的空



图5 中华白海豚生态廊道空间识别结果

Fig.5 Spatial identification results of the Indo-Pacific humpback dolphin ecological corridor

间用海活动。其中 27% 的核心廊道和 32.59% 的次级廊道受到航运活动的干扰, 29.91% 的核心廊道和 16.40% 的次级廊道受到旅游活动的干扰(表 3), 提示核心廊道受旅游活动影响可能更大, 而次级廊道受航运活动的影响更大。

桥梁影响分析结果显示, 厦门湾内共有 5 处桥梁可能会对廊道产生影响, 包括九龙江口 1 处(厦漳大桥), 西海域 2 处(海沧大桥、杏林大桥), 同安湾 2 处(厦门大桥、集美大桥), 桥梁平均长度 4.72km。尤其是在厦门岛北部, 密集的三处桥梁平均间隔仅为 1.87km, 这可能会影响白海豚生态廊道的连通性。

表 3 生态廊道与用海活动区重叠面积

Table 3 Overlapping areas of ecological corridors and sea usages

用海活动区域 Usage of seas	核心廊道/km <sup>2</sup> Core ecological corridor	次级廊道/km <sup>2</sup> secondary ecological corridor
旅游活动区 Tourism activity area	29.38	32.75
航运活动区 Shipping activity area	27.77	53.44
保护区 Protected area	10.23	16.34
港口区 Port area	5.40	15.59
已批围填海 Approved reclamation	0.22	1.75
工业与城镇用海区 Industrial and urban sea areas	—	3.81

## 4. 讨论

### 4.1 中华白海豚生境适宜性的主要驱动因子

物种分布模型采用各种环境因子模拟得到的生境适宜性及由此生成的阻力面是生态廊道识别的重要依据, 已有的研究表明中华白海豚的生境适宜性受到不同环境因子影响。例如, 到岸线距离、鱼类丰度和盐度这 3 项环境变量对雷州湾的中华白海豚分布有着重要影响<sup>[41]</sup>, 而水深和叶绿素 a 浓度这 2 项环境变量可能对广西三娘湾的中华白海豚分布有着重要的驱动作用<sup>[39]</sup>。Chen 等采用 MaxEnt 模型对福建省白海豚的分布进行了模拟, 认为到岸线距离、叶绿素 a 浓度和水深这 3 项环境变量可能是重要性最高的环境变量<sup>[40]</sup>。本研究通

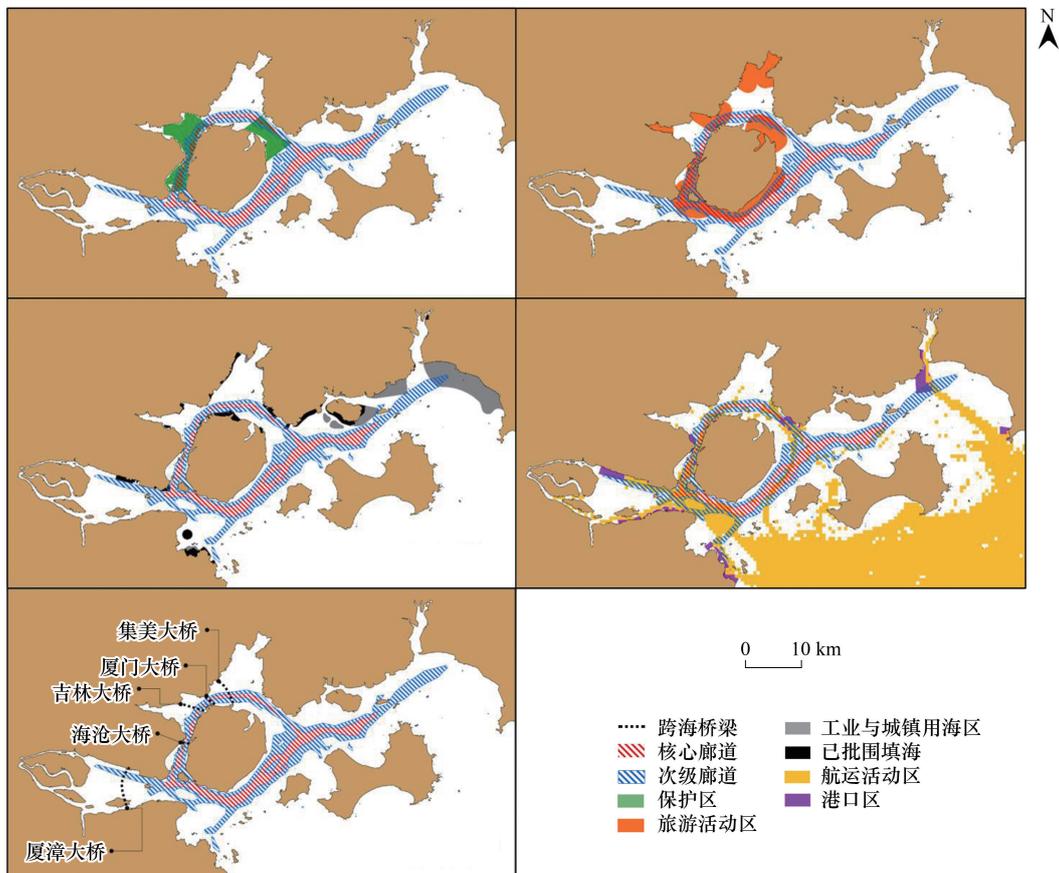


图 6 生态廊道与用海活动叠加分析

Fig.6 Overlay analysis between ecological corridors and sea-usage activities

过模型识别得到航道距离、到岸线距离和叶绿素 a 浓度这 3 项环境变量可能对厦门湾中华白海豚的生境适宜性有着重要的驱动作用。上述研究发现的影响白海豚生境分布的主导环境变量具有一定程度的相似性,认为这可能与白海豚的生活习性有关。中华白海豚喜好在河口附近区域活动,到岸线距离、盐度和水深等环境变量可直接或间接地表征与河口的距离<sup>[56]</sup>。此外,鱼类丰富的区域是中华白海豚首选的觅食地点,因此鱼类丰富度和叶绿素 a 浓度可能直接或间接地表征了白海豚食物的丰富程度<sup>[56-57]</sup>,从而影响到白海豚的分布。

而在更大的尺度上,温度等具有纬度梯度变化的环境变量可能对白海豚的分布驱动作用更加明显,有研究表明中华白海豚更偏好亚热带海区<sup>[58]</sup>。国外学者记录到水温和岸线对位于南非阿尔戈阿湾的白海豚分布有着重要的驱动作用,该区域由于毗邻南极,仅在夏季才能够观测到白海豚<sup>[59]</sup>。因此,当开展不同尺度的研究时,可能需要谨慎选择重点关注的环境影响因素。

#### 4.2 中华白海豚生态廊道的影响来源和保护建议

本研究发现厦门湾内人类活动对中华白海豚生态廊道的干扰主要来自旅游休闲活动和港口航运活动。过于频繁的旅游休闲活动会迫使白海豚迁离原本的栖息地<sup>[60]</sup>,而近些年来兴起的生态旅游,如潜水近距离接触海洋动物,也会对海洋动物造成压力<sup>[61-62]</sup>。港口航运活动会带来噪声污染或船只直接撞击伤害<sup>[63-64]</sup>,由于噪音的累积效应,长期暴露于噪声环境会使中华白海豚上浮频率增加,累积出水时间增多,寿命缩减<sup>[65]</sup>。因此,可针对不同的干扰源提出相应的保护管理措施。针对旅游休闲活动带来的问题,可以考虑在开展旅游规划和游览项目设置时,在白海豚廊道周边尽量不设计产生大量噪声、占用廊道空间的游览活动,替换为带有科普宣传意义的生态友好型游览项目,提升公众对于白海豚保护的认知。此外,在白海豚繁育期间可减少或限制在核心生境和生态廊道内的旅游活动,设置临时性的禁航区。针对港口航运活动带来的问题,可以考虑

对船舶采取减噪措施或在规定的区域内限速,避免过度噪音和冲撞。在开展厦门港总体规划、设计航道布局的过程中,充分考虑生态廊道的空间分布,减少航线规划与廊道的重叠,避免挤压白海豚生存空间。海洋物种的保护往往需要多个社会组织参与,共同努力。建议有关主管部门出台更为完善的管理体制及监管制度,包括通过生态补偿等手段实现利益相关方的平衡,鼓励开展人与中华白海豚和谐共存的探索性研究和实践。

桥梁的分布,尤其是桥墩间距,对海豚等海洋哺乳动物的迁徙可能具有影响。虽然目前尚未有定量研究揭示这一现象,但对淡水鲸豚类的研究已显示铁路桥的建造对鄱阳湖长江江豚的活动和迁徙产生了影响<sup>[55,66]</sup>。该桥梁的桥墩间距为 37m<sup>[67]</sup>,对比桥梁建设前后的江豚活动记录,桥梁建成后江豚在该桥附近出现了停滞徘徊现象,仅有少部分活跃个体敢穿过桥洞<sup>[66]</sup>。厦门岛周边桥梁的跨海桥墩间距从大到小分别是海沧大桥<sup>[68]</sup>、厦漳大桥<sup>[69]</sup>、杏林大桥<sup>[70]</sup>、厦门大桥<sup>[71]</sup>和集美大桥<sup>[72]</sup>,其中集美大桥跨海桥墩间距最短,仅 20m,海沧大桥跨海桥墩间距最长,有 648m。在实际调查观测中也发现白海豚难以通过厦门岛北部海域,而在海沧大桥附近则通行无阻。同时本研究结果亦显示集美大桥附近的适生区域和潜在廊道面积均较低,因此推测集美大桥及其相邻的两座大桥可能对厦门湾中华白海豚生态廊道具有一定影响。这一现象提示在未来的海洋工程设计中,应在建设施工前对重要物种的生态廊道空间分布开展科学评估,尤其是大型海洋生物,需根据物种的生态特征和迁移行为特点适度扩大桥墩间距,有必要的情况下可改进施工方案(例如以隧道代替桥梁),从而促进物种栖息地及生态廊道的连通。

#### 4.3 海洋生态廊道识别存在的问题与展望

在海洋中,生物的迁移方式可分为被动扩散和主动运动,两者差别在于能否自主跨越阻力表面。被动扩散生物依赖水流推动,例如浮游生物、珊瑚或底栖生物的幼体等<sup>[73]</sup>。而能进行主动扩散的生物主要为游泳动物,由于其具有更高的活动性会主动规避胁迫,选择干扰小、成本低的迁徙路径<sup>[7,74]</sup>。相比主动扩散,被动扩散的海洋生物往往与洋流活动挂钩,可以不用考虑构建阻力面,可采取的廊道识别方式也较多,比如基于假定规则模拟个体运动的模型(Individual-based modelling)和图论等。Kobayashi 等通过拉格朗日法,使用高分辨率洋流数据,对约翰斯顿环礁和夏威夷群岛之间的珊瑚虫的迁移进行分析,找出两条生态廊道<sup>[75]</sup>。Trembl 等在拉格朗日个体法的基础上添加了图论法,使得廊道更为清晰,找到更多的垫脚石廊道,进一步揭示了珊瑚虫被动扩散的途径<sup>[76]</sup>。

目前为止,主动运动的海洋生物一般运用追踪的方式研究其生态廊道,但这种方式成本较高,往往只能跟踪少量个体,鲜少能够空间定量化识别目标生物种群的生态廊道。Williamson 等将栖息于珊瑚礁的两种鱼类绑定追踪器进行追踪,运用同位素标记法和遗传信息分析法分析判明其分布密度和种群大小,用空间分析推测扩散距离和分布方向,从而推测廊道分布区域<sup>[77]</sup>。Briscoe 等跟踪北太平洋红海龟寻找其生态廊道位置,发现温度是影响海龟迁移的主要因素,探寻出一条适用于红海龟的间歇性暖水廊道<sup>[78]</sup>。本研究联合应用生境适宜性模型和最小成本路径模型,有效地将观测记录与空间分析模型相结合,实现了对生态廊道的空间识别,得到的主要核心生境位于九龙江口-西海域和大嶼岛,主要廊道从九龙江口至围头湾沿厦门岛南部分布,这与以往的调查研究结果高度一致<sup>[56,79-80]</sup>,具有一定的创新性和实用性。但目前主动运动生物的生态廊道研究仍处于探索阶段,公认的范例和固定模式较少。本研究目前仅在厦门湾尺度以中华白海豚为目标物种开展尝试,未来如有条件或可进一步扩展研究范围和研究对象,继续探索具有普适性的海洋生态廊道识别与构建方法。

#### 参考文献(References):

- [1] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Beher J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7: 12558.
- [2] Ceballos G, Ehrlich P R, Dirzo R. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(30): E6089-E6096.

- [ 3 ] Trombulak S C, Baldwin R F. Landscape-scale Conservation Planning. Netherlands: Springer, 2010: 1-17.
- [ 4 ] Resasco J. Meta-analysis on a decade of testing corridor efficacy: what new have we learned? Current Landscape Ecology Reports, 2019, 4(3): 61-69.
- [ 5 ] International Union for Conservation of Nature. Guidelines for Conserving Connectivity Through Ecological Networks and Corridors. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature, 2020.
- [ 6 ] Klaassen M. Metabolic constraints on long-distance migration in birds. Journal of Experimental Biology, 1996, 199(1): 57-64.
- [ 7 ] Rudnick D A, Ryan S J, Beier P, Cushman S A, Dieffenbach F, Epps C W, Gerber L R, Hartter J, Jenness J S, Kintsch J, Merenlender A M, Perkl R M, Preziosi D V, Trombulak S C. The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities. Ecological Society of America, 2012, 16: 1-20.
- [ 8 ] 青菁, 胥池, 杨彪, 杨志松, 齐敦武, 杨旭煜, 古晓东, 戴强. 小相岭山系大熊猫廊道规划. 生态学报, 2016, 36(4): 1125-1133.
- [ 9 ] Pacheco A D, Delgado-Macuil R J, Díaz-Pacheco Á, Larralde-Corona C P, Dinorín-Téllez-Girón J, López-Y-López V E. Use of equivalent circuit analysis and Cole-Cole model in evaluation of bioreactor operating conditions for biomass monitoring by impedance spectroscopy. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2021, 44(9): 1923-1934.
- [ 10 ] Hofman M P G, Hayward M W, Kelly M J, Balkenhol N. Enhancing conservation network design with graph-theory and a measure of protected area effectiveness: refining wildlife corridors in Belize, Central America. Landscape and Urban Planning, 2018, 178: 51-59.
- [ 11 ] Ferreira-Rodríguez N, Pavel A B, Cogălniceanu D. Integrating expert opinion and traditional ecological knowledge in invasive alien species management: *Corbicula* in Eastern Europe as a model. Biological Invasions, 2021, 23(4): 1087-1099.
- [ 12 ] 宋波, 倪婷玉, 王瑾. 基于迁移意愿的动物迁移廊道修正——以德化县云豹为例. 生态学报, 2010, 30(17): 4571-4577.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Galpern P, Manseau M, Fall A. Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation. Biological Conservation, 2010, 144(1): 44-55.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Balbar A C, Metaxas A. The current application of ecological connectivity in the design of marine protected areas. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00569.
- [ 17 ] 单楠, 周可新, 潘扬, 唐夫凯. 生物多样性保护廊道构建方法研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 411-420.
- [ 18 ] Plissock P, Simonetti J A, Grez A A, Vergara P M, Barahona-Segovia R M. Defining corridors for movement of multiple species in a forest-plantation landscape. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01108.
- [ 19 ] 孙珊, 齐增湘, 周敏, 白瑾瑾, 吕婧玮, 刘鑫. 野生哺乳动物生态廊道构建——以云豹为例. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 81-84, 96-96.
- [ 20 ] Oswald K J, Beery S, Rossiter K, Wang Y, Kibbey M R. Species distribution models for a native imperiled minnow and a nonnative sport fish in a Western Ohio River. North American Journal of Fisheries Management, 2020, 40(5): 1225-1238.
- [ 21 ] Pendoley K L, Schofield G, Whittock P A, Ierodiaconou D, Hays G C. Protected species use of a coastal marine migratory corridor connecting marine protected areas. Marine Biology, 2014, 161(6): 1455-1466.
- [ 22 ] Spear S F, Balkenhol N, Fortin M J, Mcrae B H, Scribner K. Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: considerations for parameterization and analysis. Molecular Ecology, 2010, 19(17): 3576-3591.
- [ 23 ] Engler J O, Rödder D, Stiels D, Förstler M I. Suitable, reachable but not colonised: seasonal niche duality in an endemic mountainous songbird. Journal of Ornithology, 2014, 155(3): 657-669.
- [ 24 ] Sahri A, Putra M I H, Mustika P L K, Kreb D, Murk A J. Cetacean habitat modelling to inform conservation management, marine spatial planning, and as a basis for anthropogenic threat mitigation in Indonesia. Ocean & Coastal Management, 2021, 205: 105555.
- [ 25 ] Breen P, Brown S, Reid D, Rogan E. Modelling cetacean distribution and mapping overlap with fisheries in the northeast Atlantic. Ocean & Coastal Management, 2016, 134: 140-149.
- [ 26 ] Moura A E, Sillero N, Rodrigues A. Common dolphin (*Delphinus delphis*) habitat preferences using data from two platforms of opportunity. Acta Oecologica, 2012, 38: 24-32.
- [ 27 ] Jefferson T A, Smith B D, Brulik G T, Perrin W. *Sousa chinensis* (Errata Version Published in 2018). The IUCN Red List of Threatened Species, 2017.
- [ 28 ] 王先艳, 妙星, 吴福星, 闫晨曦, 刘文华, 祝茜. 厦门至珠江口间沿岸海域中华白海豚分布的调查研究. 台湾海峡, 2012, 31(2): 225-230.
- [ 29 ] 闫晨曦. 厦门市珍稀海洋物种国家级自然保护区中华白海豚(*Sousa chinensis*)保护和管理的分析与评价[D]. 济南: 山东大学, 2012.

- [30] 王先艳, 钟铭鼎, 吴福星, 戴宇飞, 林莉. 厦门湾中华白海豚: 面临的威胁与保护对策. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 154-162.
- [31] 吴福星. 福建沿海中华白海豚的分布与种群数量调查[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [32] 王丕烈, 韩家波. 中国水域中华白海豚种群分布现状与保护. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 484-487.
- [33] Chen B Y, Gao H L, Jefferson T A, Lu Y, Wang L, Li S S, Wang H, Xu X R, Yang G. Survival rate and population size of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Xiamen Bay, China. Marine Mammal Science, 2018, 34(4): 1018-1033.
- [34] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志-第八分册-. 北京: 海洋出版社, 1994: 165-235.
- [35] Wang X Y, Wu F X, Turvey S T, Rosso M, Zhu Q. Seasonal group characteristics and occurrence patterns of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Xiamen Bay, Fujian Province, China. Journal of Mammalogy, 2016, 97(4): 1026-1032.
- [36] Wang X Y, Wu F X, Turvey S T, Rosso M, Tao C H, Ding X H, Zhu Q. Social organization and distribution patterns inform conservation management of a threatened Indo-Pacific humpback dolphin population. Journal of Mammalogy, 2015, 96(5): 964-971.
- [37] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [38] 郑诚, 温仲明, 郭倩, 樊勇明, 杨玉婷, 高飞. 基于 MaxEnt 模型的延河流域草本植物适生分布与功能性状分析. 生态学报, 2021, 41(17): 6825-6835.
- [39] Wu H P, Jefferson T A, Peng C W, Liao Y Y, Huang H, Lin M L, Cheng Z L, Liu M M, Zhang J X, Li S H, Wang D, Xu Y H, Huang S L. Distribution and habitat characteristics of the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) in the Northern Beibu Gulf, China. Aquatic Mammals, 2017, 43(2): 219-228.
- [40] Chen B Y, Hong Z, Hao X Q, Gao H L. Environmental models for predicting habitat of the Indo-Pacific humpback dolphins in Fujian, China. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2020, 30(4): 787-793.
- [41] Lin M L, Liu M M, Lek S, Dong L J, Zhang P J, Gzolan R E, Li S H. Modelling habitat suitability of the Indo-Pacific humpback dolphin using artificial neural network: the influence of shipping. Ecological Informatics, 2021, 62: 101274.
- [42] 国家海洋局. 晋江围头湾区域建设用海环评专章. 2009.
- [43] 厦门市海洋与渔业局. 厦门市近岸海域海洋环境质量趋势性监测报告. 2016.
- [44] 厦门市海洋发展局. 关于筲箕湖第二排涝泵站及西堤闸工程海洋环境影响报告表的公示. (2019-03-07). [http://hyj.xm.gov.cn/xxgk/tzgg/201903/t20190308\\_2230694.htm](http://hyj.xm.gov.cn/xxgk/tzgg/201903/t20190308_2230694.htm).
- [45] 徐啸, 沈莹, 毛宁, 张磊. 沙泥混合型岸滩及沙泥分界点初探——厦门湾岸滩类型调查. 河海大学学报: 自然科学版, 2018, 46(2): 183-188.
- [46] Cerdeiro D A, Komaromi A, Liu Y, Saeed M. World Seaborne Trade in Real Time: A Proof of Concept for Building AIS-based Nowcasts from Scratch. IMF Working Papers, 2020.
- [47] 苏冠龙. 水下打桩噪声对我国珍稀海洋哺乳动物(中华白海豚与斑海豹)的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [48] 张国胜, 顾晓晓, 邢彬彬, 韩家波. 海洋环境噪声的分类及其对海洋动物的影响. 大连海洋大学学报, 2012, 27(1): 89-94.
- [49] Vasconcelos R O, Amorim M C P, Ladich F. Effects of ship noise on the detectability of communication signals in the Lusitanian toadfish. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(Pt 12): 2104-2112.
- [50] Wu B C, Zhou L J, Qi S, Jin M L, Hu J, Lu J S. Effect of habitat factors on the understory plant diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas based on MaxEnt model. Ecological Indicators, 2021, 129: 107917.
- [51] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [52] 龚明昊, 欧阳志云, 徐卫华, 宋延龄, 戴波. 道路影响下野生动物廊道的选址——以大熊猫保护廊道为例. 生态学报, 2015, 35(10): 3447-3453.
- [53] Jaroensutasinee K, Jutapruet S, Jaroensutasinee M. Population size of indo-pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) at Khanom, Thailand. Walailak Journal of Science & Technology, 2010, 7(2): 115-126.
- [54] 张荔锋. 中华白海豚环境压力分析和保护对策研究——以厦门中华白海豚为例[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2008.
- [55] Kimura S, Akamatsu T, Li S H, Dong L J, Wang K X, Wang D, Arai N. Seasonal changes in the local distribution of Yangtze finless porpoises related to fish presence. Marine Mammal Science, 2012, 28(2): 308-324.
- [56] 王先艳. 中华白海豚对厦门西港的选择利用研究. 中国科技成果, 2016, 17(13): 33-34.
- [57] Pan C W, Chen M H, Chou L S, Lin H J. The trophic significance of the Indo-Pacific humpback dolphin, *Sousa chinensis*, in Western Taiwan. PLoS One, 2016, 11(10): e0165283.
- [58] 肖尤盛. 中华白海豚现存数量与生存现状. 海洋与渔业, 2020, (2): 20-21.
- [59] Karczmarski L. Group dynamics of humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in the Algoa Bay region, South Africa. Journal of Zoology, 2000, 249

- (3): 283-293.
- [60] Wu H P, Peng C W, Huang H, Jefferson T A, Huang S L, Chen M, Zeng Q H, Yu X Y, Wang X Y, Xu Y H. Dolphin-watching tourism and Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Sanniang Bay, China: impacts and solutions. *European Journal of Wildlife Research*, 2020, 66(1): 17.
- [61] Lusseau D, Slooten L, Currey R J C. Unsustainable dolphin-watching tourism in Fiordland, New Zealand. *Tourism in Marine Environments*, 2006, 3(2): 173-178.
- [62] Montero-Quintana A N, Vázquez-Haikin J A, Merklings T, Blanchard P, Osorio-Beristain M. Ecotourism impacts on the behaviour of whale sharks: an experimental approach. *Oryx*, 2020, 54(2): 270-275.
- [63] Jefferson T A, Hung S K, Robertson K M, Archer F I. Life history of the Indo-Pacific humpback dolphin in the Pearl River Estuary, southern China. *Marine Mammal Science*, 2012, 28(1): 84-104.
- [64] Ng S L, Leung S. Behavioral response of Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*) to vessel traffic. *Marine Environmental Research*, 2003, 56(5): 555-567.
- [65] 牛富强. 水下噪声对海豚行为的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [66] 董首悦. 采用声学方法研究湖口水域长江江豚的分布及其活动规律[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [67] 沈娜, 谢峻. 鄱阳湖特大桥承台施工方案探讨. *交通世界*, 2021(3): 51-52.
- [68] 宁新财. 浅谈厦门海沧大桥钢桥面铺装翻修工程施工及质量管理. *科技与企业*, 2014(08): 209+211.
- [69] 赵鹏鹏, 陈山亭. 厦漳跨海大桥北汊主桥钢箱梁施工技术//中国水运建设行业协会工程施工专业委员会2013年会论文集. 北京: 中国水运建设行业协会工程施工专业委员会, 2013.
- [70] 许黎明, 张强, 苏扬. 厦门市北部的重要出口-杏林公路大桥设计. *桥梁建设*, 2007(3): 44-47, 67-67.
- [71] 林杯钊. 浅谈厦门大桥主桥扩建加固方案. *福建建材*, 2020, (3): 73-75.
- [72] 张学峰. 跨海大桥主墩基础损伤分析及检测评价技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [73] 王淑红, 洪文霆, 陈纪新, 陈芸, 王艺磊, 张子平, 翁朝红, 谢仰杰. 珊瑚人工繁育技术研究进展. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2903-2912.
- [74] Allen C H, Parrott L, Kyle C. An individual-based modelling approach to estimate landscape connectivity for bighorn sheep (*Ovis canadensis*). *PeerJ*, 2016, 4(5): e2001.
- [75] Kobayashi D R. Colonization of the Hawaiian Archipelago via Johnston Atoll: a characterization of oceanographic transport corridors for pelagic larvae using computer simulation. *Coral Reefs*, 2006, 25(3): 407-417.
- [76] Trembl E A, Halpin P N, Urban D L, Pratson L F. Modeling population connectivity by ocean currents, a graph-theoretic approach for marine conservation. *Landscape Ecology*, 2008, 23(1): 19-36.
- [77] Williamson D H, Harrison H B, Almany G R, Berumen M L, Bode M, Bonin M C, Choukroun S, Doherty P J, Frisch A J, Saenz-Agudelo P, Jones G P. Large-scale, multidirectional larval connectivity among coral reef fish populations in the Great Barrier Reef Marine Park. *Molecular Ecology*, 2016, 25(24): 6039-6054.
- [78] Briscoe D K, Tomaszewicz C N T, Seminoff J A, Parker D M, Balazs G H, Polovina J J, Kurita M, Okamoto H, Saito T, Rice M R, Crowder L B. Dynamic thermal corridor may connect endangered loggerhead sea turtles across the Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 630590.
- [79] 陈炳耀. 厦门中华白海豚种群生物学与保护研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007.
- [80] 吴福星, 王先艳, 丁晓辉, 戴宇飞, 赵丽媛, 祝茜. 厦门水域中华白海豚出现于围头湾. *兽类学报*, 2019, 39(6): 608-613.