

DOI: 10.5846/stxb201805161079

颜明艳, 李琼珍, 宋洁, 王振华, 王有基, 胡梦红. 基于 MAXENT 模型评估北部湾潮间带中国鲎和圆尾鲎稚鲎的潜在地理分布及种群保育对策. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Yan M Y, Li Q Z, Song J, Wang Z H, Wang Y J, Hu M H. Prediction of potential distribution areas of Chinese horseshoe crab and mangrove horseshoe crab in the Beibu Gulf of Guangxi based on MAXENT model and their population conservation strategies. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

基于 MAXENT 模型评估北部湾潮间带中国鲎和圆尾鲎稚鲎的潜在地理分布及种群保育对策

颜明艳^{1,2,3}, 李琼珍⁴, 宋洁⁵, 王振华⁶, 王有基^{1,2,7}, 胡梦红^{1,2,3,*}

1 水产科学国家级实验教学示范中心(上海海洋大学) 上海 201306

2 海洋生物科学国际联合研究中心(上海海洋大学), 中国科学技术部, 上海 201306

3 上海水产养殖工程技术研究中心(上海海洋大学), 上海 201306

4 广西壮族自治区水产科学研究院, 南宁 530021

5 天津市一瑞生物工程有限公司, 天津 300457

6 上海海洋大学信息学院, 上海 201306

7 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室(上海海洋大学)

摘要: 鲎具有极高的经济价值和科研意义。近年来由于过度捕捞和栖息地受损等原因, 亚洲鲎种群数量正急剧下降。鲎漫长的生命周期使得鲎资源的保护和增殖迫在眉睫。生态位模型已经广泛应用于物种的潜在地理分布预测。基于实地调研数据和公开发表的北部湾中国海域中国鲎和圆尾鲎地理分布数据, 运用 MAXENT 模型得到中国鲎和圆尾鲎在广西北部湾(中国部分)的栖息地适宜度指数(Habitat suitability index, HSI), 确定了这两种稚鲎在北部湾中国海域潜在适生区。模型分析结果表明, 潮间带坡度和地形指数是影响中国鲎分布的主要环境因子, 而潮间带底质的有机物含量和植被指数是影响圆尾鲎分布的主要环境因子, 根据研究结果建议在两种稚鲎适生区建立保护区, 进行人工放流稚鲎, 加强对海草和红树林的生态建设, 进而促进鲎资源种群恢复和发展。

关键词: 中国鲎; 圆尾鲎; 最大熵模型; 生境适宜性; 保护

Prediction of potential distribution areas of Chinese horseshoe crab and mangrove horseshoe crab in the Beibu Gulf of Guangxi based on MAXENT model and their population conservation strategies

YAN Mingyan^{1,2,3}, LI Qiongzhen⁴, SONG Jie⁵, WANG Zhenhua⁶, WANG Youji^{1,2,7}, HU Menghong^{1,2,3,*}

1 National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2 International Research Center for Marine Biosciences at Shanghai Ocean University, Ministry of Science and Technology, Shanghai 201306, China

3 Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai 201306, China

4 Guangxi Institute of Fisheries, Nanning 530021, China

5 Tianjin Era Biology Technology Co., Ltd. 300457

6 College of Information Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

7 Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Horseshoe crab has high economic and scientific values. In recent years, because of overfishing and habitat

基金项目: 香港海洋公园保育基金(OT03. 1617); 2017 北海市“十三五”海洋经济创新发展示范项目“鲎试剂及中华鲎生态利用产业链协同创新项目”(Bhsfs006)

收稿日期: 2018-05-16; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mhhu@shou.edu.cn

degradation, the population of horseshoe crabs in China is decreasing rapidly. However, their long life cycle makes it extremely urgent to protect horseshoe crabs. Ecological niche models have been widely applied to predict the potential geographic distribution of species. The habitat suitability index of the Chinese horseshoe crab *Tachypleus tridentatus* and mangrove horseshoe crab *Carcinoscorpius rotundicauda* in the Beibu Gulf (Chinese part) was determined by using the maximum entropy model and the distribution of habitat suitability of the two types of juvenile horseshoe crab in the Beibu Gulf was determined based on field survey data and published data on the geographical distribution of two horseshoe crab species in the Beibu Gulf. The model analysis results showed that the slope of the intertidal zone and topographic index were the main environmental factors affecting the distribution of the Chinese horseshoe crab, while the organic content and vegetation index of intertidal sediment were the main environmental factors affecting the distribution of the mangrove horseshoe crab. According to the results, to promote the recovery and development of horseshoe crab resources, protected areas should be established, artificial release of juvenile horseshoe crabs in habitat suitability areas of horseshoe crab should be conducted, and the ecological construction of seagrasses and mangroves in these areas should be strengthened.

Key Words: chinese horseshoe crab; mangrove horseshoe crab; MAXENT; habitat suitability; conservation

鲎(Horseshoe crab), 又称“马蹄蟹”, 隶属于节肢动物门(Arthropoda)、肢口纲(Merostomata)、剑尾目(Xiphosura), 是地球上最古老的生物之一, 有“活化石”之称。鲎是肢口纲仅存的物种, 目前全世界仅存 3 属 4 种, 分别为圆尾鲎(*Carcinoscorpius rotundicauda*)、中国鲎(*Tachypleus tridentatus*)、南方鲎(*Tachypleus gigas*)和美洲鲎(*Limulus polyphemus*)。中国鲎和圆尾鲎为我国仅有的两种鲎。

鲎在医学^[1](鲎试剂)、药理学^[2](鲎素)和仿生学^[3]等领域均具有很高的科研和经济价值。生物资源的开发利用必然建立在较大生物资源量的基础上, 然而, 近年来由于过度捕捞和栖息地受损等原因^[4], 我国鲎种群数量正急剧下降。鲎生命周期很长, 从卵细胞受精至性成熟需要超过十年的时间^[5], 漫长的生长周期使得鲎资源的恢复十分困难, 开展鲎的人工繁育、野外放流、栖息地保护等工作刻不容缓。人工增殖放流是一条恢复鲎种群有效可行的措施。但对于中国鲎和圆尾鲎生境选择偏好和生态位分化领域的研究却几近空白。北部湾作为我国为数不多的鲎适宜栖息地, 因其特殊的环境和地理条件, 存在中国鲎和圆尾鲎幼鲎同地共栖的现象^[6-7]。基于此, 构建两种稚鲎在大尺度潮间带环境空间分布和大跨度范围内的栖息地适应性模型对于鲎增殖放流和鲎资源的恢复具有重要参考价值。

栖息地亦称生境(habitat), 指生物的生存环境, 即生物个体、种群或群落能在其中进行全部生命过程的生存空间中的生态环境因子总和^[8]。评价与分析生物对某种或者某些环境因子的变化的适应范围即生境适宜性评价。生态位模型是一种通过物种在野生环境出现的相关分布区域、环境指示物种的丰富度等信息对物种分布情况进行预测的科学方法, 可为物种的栖息地选择、地理分布区预测等提供重要的量化分析工具^[9]。生态位模型(MAXENT、GARP、ENFA 和 BIOCLIM 等)已经广泛应用于物种的潜在地理分布预测。本研究聚焦于中国鲎和圆尾鲎生境选择特征, 确定环境变量(如微生境环境因子、潮间带地形等), 利用 ENVI(The Environment for Visualizing Images)遥感影像处理软件, 对广西北部湾鲎分布区域潮间带的 Landsat 主题成像仪(TM)影像进行分析, 结合中国数字气象数据、地球系统科学数据共享网提供的相关数据和数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM), 以 ArcGIS 为平台, 开展两种稚鲎的生态位建模及分析研究。基于实地调研数据和公开发表的北部湾中国海域环境数据和中国鲎和圆尾鲎地理分布数据, 用 MAXENT 模型得到中国鲎和圆尾鲎在广西北部湾(中国部分)的栖息地适宜度指数(Habitat suitability index, HSI), 从宏观角度上确定两者在北部湾(中国部分)潮间带的适宜生存环境, 旨在为中国鲎和圆尾鲎栖息地的保护和鲎种群资源恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

北部湾(The Beibu Gulf),位于中国南海的西北部,是一个半封闭的海湾。东临中国的海南岛和雷州半岛,西临越南,北临广西壮族自治区,与琼州海峡和中国南海相连,为中国海南岛和中越两国陆地所环抱。研究区域为北部湾中国沿海区域。以 2013 年发射的分辨率为 30 m 的 landsat 8 卫星遥感影像图为基础,筛选云覆盖度小同时图像数据没有损失的遥感图像绘制了北部湾(中国部分)的镶嵌图(图 1),具体展示研究区域。

本研究实地调研区域选择了北部湾(中国部分)潮间带有海鲎出现的三个典型潮间带(各潮间带海岸线长度不少于 1000 m),分别为西场(XC)、金海湾(JHW)和西背岭(XBL)。三个潮间带均位于广西省北海(108°50'45"E—109°47'28"E,21°29'N—21°55'34"N)。图 2 为研究区域,其中 a 和 b 代表实地调研区域。

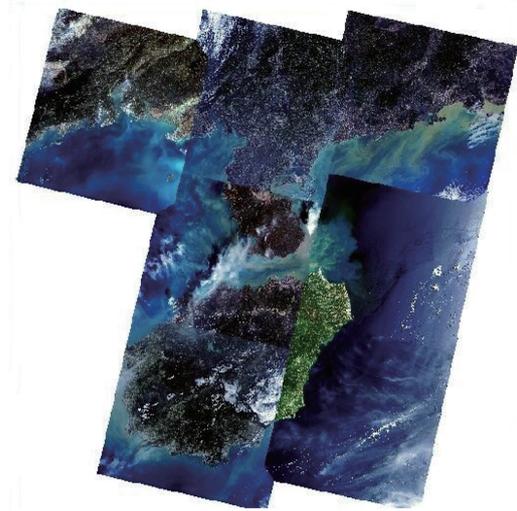


图 1 数字化北部湾(中国部分)镶嵌图
Fig.1 The digital mosaic picture of Beibu Gulf (Chinese part)

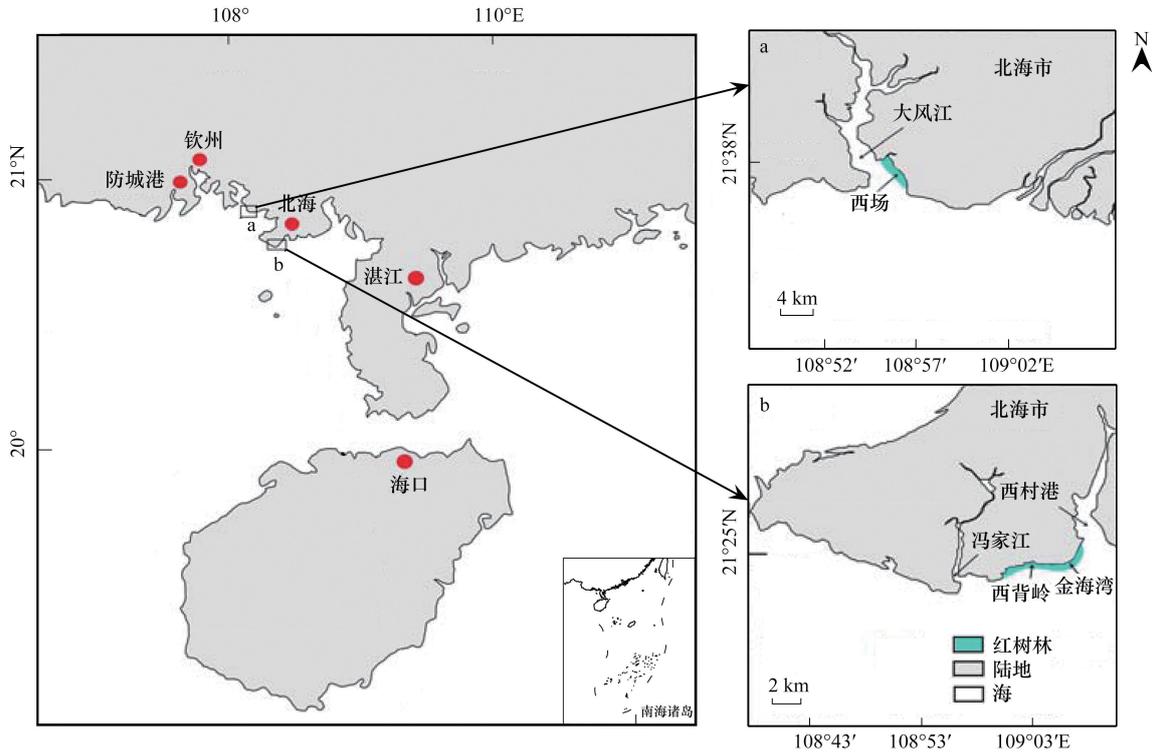


图 2 研究区域和实地调研站点位置图
Fig.2 The location of research areas and field research sites

1.2 模型介绍及运行

生态位模型(GARP、MAXENT、ENFA 和 BIOCLIM 等)已经广泛应用于物种的潜在地理分布预测,但不同模型预测的结果存在较大差异。最大熵理论最早在 1957 年由 Jaynes 提出^[10],MAXENT 理论可用于预测物种栖息地的适宜性。如果对预测区域生态条件或物种相关信息一无所知,则该地区适宜或不适宜物种的概率均为 0.5。如果已知一些物种存在或者其适宜生态条件的数据则会降低预测的不确定性。获得的信息越多,预

测的不确定性就越低。MAXENT 模型是基于最大熵理论的预测模型,根据不完全的物种分布及相应的环境信息,用物种“存在”点分布数据作为限制条件,得出此条件下的最大熵分布,预测物种在研究地区的潜在栖息地分布区域^[11-12]。该软件自 2004 年被 Phillips 等^[13]人研发出,被广泛应用于物种潜在栖息地分布的预测和评价。在“不存在点”数据难以准确的情况下,相比较其他模型,MAXENT 模型预测准确性最高^[14-16],且对于区域较大和环境数据较多的研究更为实用^[17]。对最大熵模型(MAXENT)预测结果进行的 ROC 曲线下面积值(Areas under curve, AUC)分析显示,其预测结果优于同类预测模型,即便物种分布数据不全,MAXENT 模型依旧能得到较为满意的结果^[18]。因此,本文选择了用 Maxent 模型对预测两种稚鲨在北部湾的潜在分布。

物种生态适宜性评价因子的选择是评价的关键^[19]。环境变量之间有一定的关联,对环境变量进行相关性分析后用于生态位模型计算^[20]。采用 SPSS 软件对获得的溶氧、盐度、温度等生态因子进行筛选,筛选后得到的生态因子用于 MAXENT 模型计算。将两种稚鲨的分布点数据和环境变量数据集导入到 MAXENT 软件中,进行建模运算。利用 ArcGIS 软件对 MAXENT 模型计算结果进行叠加分析和地图制作,得出基于筛选后生态因子的中国鲨和圆尾鲨两种稚鲨的生态适宜性分布图。

1.3 数据获取

按照 MAXENT 模型软件的要求,分别获取了广西北部湾区域和两种稚鲨“存在点”的空间地理数据和环境数据。

1.3.1 实地调研

本研究实地调研区域选择了北部湾(中国部分)潮间带有海鲨出现的三个典型潮间带(各潮间带海岸线长度不少于 1000 m),分别为西场(XC)、金海湾(JHW)和西背岭(XBL)。根据各个潮间带的海岸线长度,分别于海图基准面上 0.6 m 到 1.6 m 设立平行于海岸线的六条样带,每条样带宽 4 m。现场记录每个潮间带中中国鲨和圆尾鲨两种稚鲨的数量并逐只测量个体的前体宽度,测量及计数后将稚鲨放回原地。开展种群调查工作的同时,进行微生境环境因子监测工作。每个样带隔 100 m 放置一个 10 m×10 m 的样方。现场测定各个样方内盐度、水温、溶氧等指标。于各 10 m×10 m 样方的四角和中心位置放置 5 个 20 cm×20 cm 的小样方。将 20 cm×20 cm 小样方表层 5 cm 的底质放入采样瓶带回实验室测定底质含水量和粒径分布、以及有机物含量。将 5 个小样方内的微生境特征值进行平均,即为整个 10 m×10 m 大样方内微生境特征值。

1.3.2 遥感数据

通过地理空间数据云 LANDSAT 系列数据中的 Landsat 8 卫星数字产品获得分辨率为 30 m 的一系列影像图。Landsat-8 卫星参数如表 1, Landsat-8 上携带有两个主要载荷:陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)和热红外传感器(Thermal Infrared Sensor, TIRS)。OLI 陆地成像仪包括可见光波段、近红外波段等 9 个波段(表 2),空间分辨率为 30 m。

表 1 Landsat 8 卫星参数

Table 1 Landsat 8 Satellite parameters

所属国家 Country	美国 America	所属国家 Country	美国 America
发射时间 Launch date	2013-2-11	降交点地方时 Equatorial crossing time	10:00
轨道类型 Orbit type	近极地太阳同步轨道	轨道重复周期 Orbit repetition period/d	16
轨道高度 Orbit height/km	705	传感器数量 Number of sensors	1
轨道倾角 Orbit inclination/(°)	98.2	下行速率 Downlink rate/Mbps	330
运行周期 Period/min	98.9		

目前 Landsat OLI 数据是 Landsat 系列最新多光谱遥感数据。Landsat OLI 波段参数见表 2。与 Landsat-7 相比,Landsat-8 OLI/TIRS 在辐射分辨率、波段数、光谱范围方面都有很大的改进,包含了一个分辨率为 15 m,成像宽幅为 185×185 km 的全色波段。OLI 对波段 5 的调整排除了 0.825 μm 处水汽的吸收,可有效避免大气

的稀有特征。新增了海岸带检测和卷云识别波段, TIRS 传感器单独设置的两个热红外波段对生态环境监控更具有使用价值。Landsat-8 OLI 相对 MODIS 数据具有较好的空间分辨率, 较 SPOT 和 THOESD 具有较好的时间分辨率, 对比 QuickBird(16.5 km×16.5 km) 和 GeoEye(15 km×15 km) 具有较好的观察幅宽。

表 2 OLI 传感器波段基本数据

Table 2 OLI sensor band Basic data

波段 Band	波长范围 Wavelength/ μm	分辨率 Resolution/m
1 海岸波段 Band 1-Coastal	0.43—0.45	30
2 蓝波段 Band 2-Blue	0.45—0.51	30
3 绿波段 Band 3-Green	0.53—0.59	30
4 红波段 Band 4-Red	0.64—0.67	30
5 近红外波段 Band 5-Near Infrared	0.85—0.88	30
6 短波红外 1 Band 7-Short Wavelength Infrared 1	1.57—1.65	30
7 短波红外 2 Band 7-Short Wavelength Infrared 2	2.11—2.29	30
8 全色波段 Band 8-Panchromatic	0.50—0.68	15
9 卷云波段 Band 9-Cirrus	1.360—1.390	30

环境变量数据包括:①气候环境相关数据由中国数字气象数据、地球系统科学数据共享网提供;②地形因子数据,包括地形指数、坡度等,由中国科学院数据库 30 m 分辨率的数字高程图(DEM)计算得到;③植被因子数据,利用 Envi 遥感影像处理软件对北部湾 TM 影像进行归一化植被指数等方法处理得到;④红树林、蟹分布点数据等参数通过实地调研及文献等收集^[21-26]。

2 结果与分析

2.1 两种稚蟹在潮间带的密度分布图

利用遥感(Remote Sensing, RS)与地理信息系统(Geographical Information System, GIS)技术对三个调研潮间带进行了分析。基于已获实地调研数据,利用 ArcGIS 软件得出在西背岭、金海湾和西场 3 个潮间带中国蟹和圆尾蟹的密度分布情况。

本研究用不同颜色表示稚蟹分布密度的不同。西背岭仅有中国蟹稚蟹分布,无圆尾蟹稚蟹分布,且样带 4 中国蟹稚蟹分布最多(图 3);金海湾中国蟹密度相较于圆尾蟹密度高(图 4);而西场两种稚蟹密度则与金海湾分布相反,圆尾蟹密度比中国蟹密度高(图 5)。

2.2 研究区域地形地貌特征和植被相关参数

利用 ENVI(The Environment for Visualizing Images)

遥感影像处理软件,对整个研究区域潮间带的 Landsat

主题成像仪(TM)影像进行分析,结合中国数字气象数据、地球系统科学数据共享网提供的相关数据和数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM),以 ArcGIS 为平台,分别建立各环境变量的栅格文件。利用 ArcGIS 及数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)提取反映研究区域潮间带地貌形态特征的坡度和地形指数。广西北海地势从北向南倾斜,东北、西北为丘陵,南部沿海为台地和平原。平均海拔 10—15 米。

中国蟹倾向于在高潮线位置的红树林区域产卵,其稚蟹偏好在靠近红树林的泥滩区域栖息并觅食。圆尾蟹稚蟹则偏好在有机质含量丰富,有淡水溪流经的区域分布^[27-30]。研究区域的植被指数将可能成为决定两种稚蟹差异化分布的关键因子之一。因此,我们利用 ENVI 对 Landsat8 的 OLI 陆地成像仪的 5、6、2(NIR、

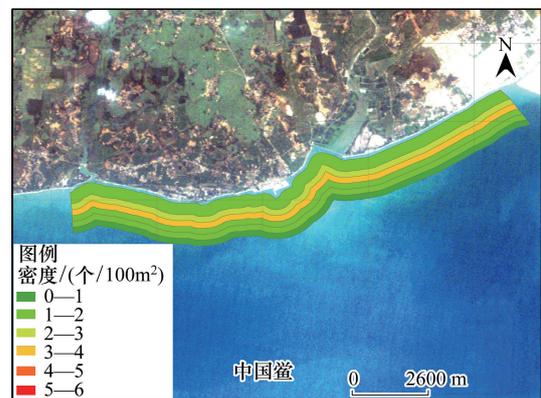


图 3 西背岭潮间带中国蟹稚蟹密度分布图

Fig. 3 Distribution of juvenile Chinese horseshoe crab in Xi Bei Ling

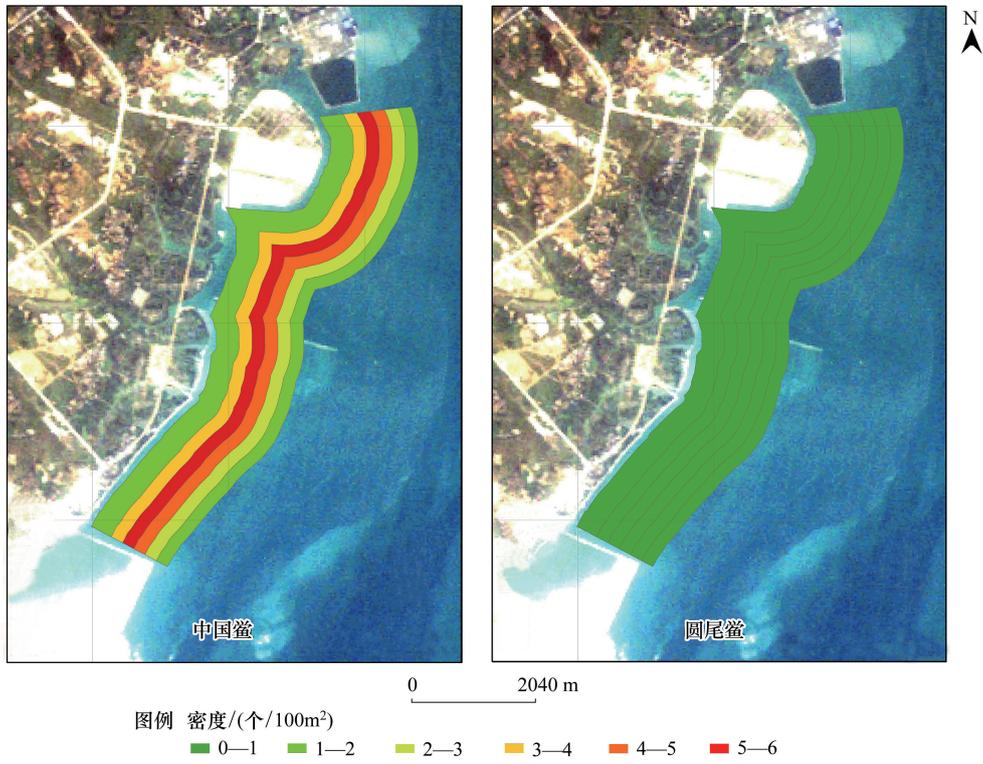


图 4 金海湾潮间带稚蟹密度分布图

Fig.4 Distribution of juvenile horseshoe crab in Jin Hai Wan



图 5 西场潮间带稚蟹密度分布图

Fig.5 Distribution of juvenile horseshoe crab in Xi Chang

SWIR1、Blue) 波段进行了组合便于在全色图像上区分植被特征,在此基础上,我们计算了研究区域潮间带的植被指数和覆盖率。

2.3 两种稚鲎在北部湾(中国部分)的潜在适生图

本研究基于前期实地调研结果和公开发表的北部湾中国海域中国鲎和圆尾鲎地理分布数据,充分利用有限的物种分布数据和环境数据,模拟中国鲎和圆尾鲎稚鲎的生态位需求,探索两者已知“存在点”分布区的环境特征与研究区域的环境特征之间的非随机关系,从而模拟出两者在北部湾(中国部分)的潜在适生性分布图。构建了这两种稚鲎在大尺度潮间带环境空间和大跨度范围内的栖息地适应性模型,根据其适宜性指数将其划分成 3 个等级: <10%、10%—60%、>60%,其中以 >10% 的区域为每种稚鲎在北部湾(中国部分)的生态适宜区(图 6 和图 7)。

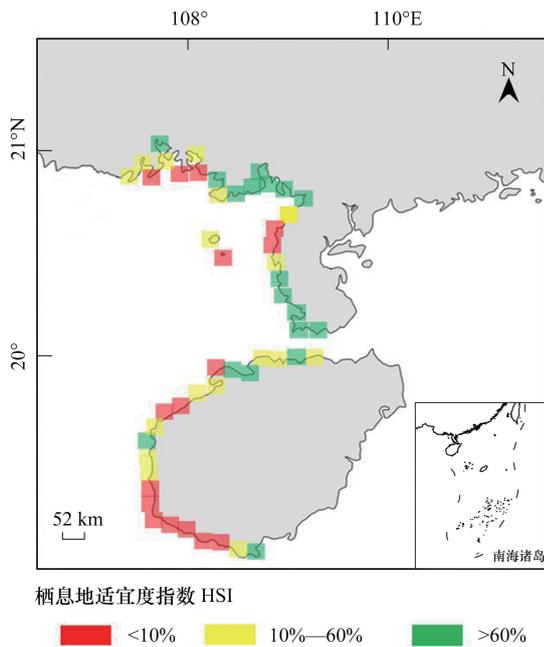


图 6 北部湾(中国部分)中国鲎生境适宜性分布

Fig.6 The distribution of habitat suitability of Chinese horseshoe crab in Beibu Gulf (Chinese part)

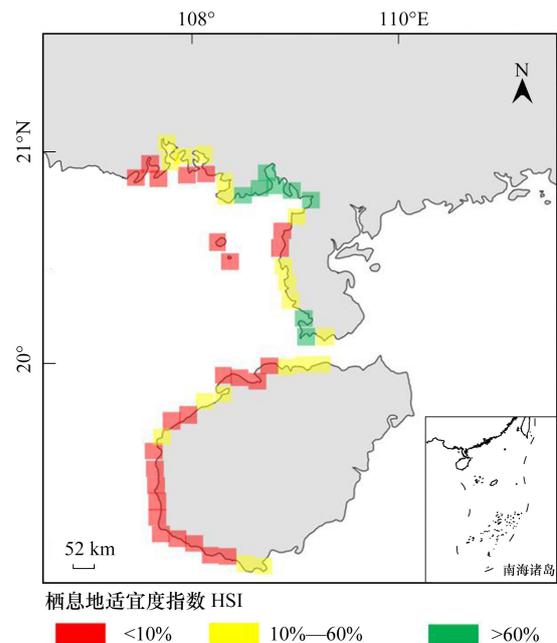


图 7 北部湾(中国部分)圆尾鲎生境适宜性分布

Fig.7 The distribution of habitat suitability of Mangrove horseshoe crab in Beibu Gulf (Chinese part)

2.3.1 MAXENT 模型预测结果检测

本研究中,中国鲎和圆尾鲎分布预测图(图 6 和图 7)的 AUC 值分别为 0.816、0.728。

2.3.2 两种稚鲎分布及其与环境的关系

中国鲎和圆尾鲎在广西北部湾(中国部分)潜在分布预测区域如图 6 和图 7 所示。根据图 6,可得出中国鲎稚鲎的潜在适宜生境分布于广西犀牛角、广西北暮盐场、广东乞水湾、广东流沙湾、海南东方等地潮间带。由图 7 可知,适合圆尾鲎分布的生境明显少于中国鲎,其在北部湾主要在广西北暮盐场、广东流沙湾、海南东方等地潮间带。

3 讨论

机理模型、回归模型和生态位模型是目前生境评价模型的 3 个类型。机理模型根据生境因子对物种分布的影响模拟得到物种的适宜性生境,但未考虑生境的可达性,且对因子等级划分及确定重要性上存在主观性,因此,机理模型具有一定局限性。与回归模型相比,生态位模型仅需生物“出现点”的数据,不需要其“未出现点”的数据。

生态位模型(GARP、MaxEnt、ENFA和BIOCLIM等)已经广泛应用于物种的潜在地理分布预测。曹向锋等^[31]对黄顶菊分布进行预测时,用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC曲线)对Maxent、GARP、ENFA、Bioclim和Domain 5种模型的预测结果进行了比较,发现ROC曲线下面积值(Area Under Curve, AUC)平均值最高的是MAXENT模型。罗翀等^[32]用MAXENT和ENFA模型预测秦岭山系林麝的生境分布,结果显示Maxent模型预测效果更佳。张琴等^[33]用3个生态位模型(BIOCLIM、DOMAIN和MAXENT)预测药用植物天麻的全球潜在适生区,用Kappa统计量和受试者工作特征曲线ROC比较不同模型的预测效果后发现,MAXENT模型的精度较高。崔相艳等^[34]用最大熵(MAXENT)模型和规则集遗传算法(GARP)模型预测了野生油茶的潜在分布区,结果表明,MAXENT模型的预测结果更精确。Elith等^[35]用16种生态位模型(包括MAXENT和GARP模型等)对物种进行比较后发现,无论准确度还是方便性,MAXENT模型相较于其他模型都更优秀。因此,本文选择了用MAXENT模型对预测两种稚鲨在北部湾的潜在分布。

本研究用MAXENT模型得到中国鲨和圆尾鲨在广西北部湾(中国部分)的栖息地适宜度指数(Habitat suitability index, HSI),确定了这两种稚鲨在北部湾中国海域潜在适生区。目前,受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC曲线)被公认为诊断试验的最佳评价指标^[36]。本结果通过ROC曲线下面积值(AUC)判断模型的准确度。ROC曲线通过改变诊断阈值,获得多对真(假)阳性率值之间的对应关系,以假阳性率(特异度)为横坐标、真阳性率(灵敏度)为纵坐标绘制得到,ROC曲线与横坐标围成的面积值即为AUC值。AUC值的变化范围为0—1,当AUC<0.6时,预测结果失败,>0.8时,预测价值较高,等于1时为理想分布,表示模型预测的潜在分布区与实际分布完全一致^[37]。中国鲨和圆尾鲨分布预测图(图6和图7)的AUC值分别达到0.816、0.728,证实本研究中的MAXENT模型预测结果的准确性可信度较高。

潮间带实地调研结果与模型分析结果得到的适宜性指数基本一致。实地调研结果显示,西背岭仅有中国鲨分布无圆尾鲨,金海湾中国鲨分布多于圆尾鲨,西场则与金海湾相反,圆尾鲨分布多于中国鲨;而最大熵模型生境适宜性分析结果表明西背岭圆尾鲨适宜度指数<10%,中国鲨适宜度指数为10%—60%,金海湾、西场潮间带两种稚鲨的适宜度指数均为10%—60%,两者结果高度拟合。模型分析结果表明,广西北暮盐场、广东流沙湾、海南东方等是两种稚鲨共生的潜在分布区域,温度、湿度等气候因子,以及海水盐度、溶氧值等海水水文学因子在北部湾区域各潮间带的变化幅度较小,对于两种稚鲨的分布影响较小,潮间带坡度和地形指数是影响中国鲨分布的主要环境因子,而潮间带底质的有机物含量和植被指数是影响圆尾鲨分布的主要环境因子,这与两者的繁育和生物学习性相一致,可为后续的生境保护和人工放流工作提供参考依据。鲨数量急剧减少,通过人工育苗和稚鲨放流等方法促进鲨种群数量恢复有效可行。王骏博^[38]研究发现,在适宜的滩涂地区人工养殖或放流幼鲨,幼鲨完全可以在自然区域生长发育。结合模型研究结果,中国鲨在潮间带坡度和地形指数适宜的区域,圆尾鲨在潮间带底质有机物含量丰富和植被指数适宜的区域放流小鲨将大大提高鲨的生存率,有效恢复鲨种群数量。

北部湾海洋生物资源丰富,是众多海洋生物的栖息地和繁殖地。近年来,随着北部湾区域经济的加速发展,以石油化工业、造纸业、冶金业、海洋产业和能源等工业为重心,一批相关产业正落户于此,而环境保护基础设施建设并不是很完善,使得北部湾面临着巨大的环境压力。潮间带作为海洋与陆地的连接枢纽,受人为活动影响显著,陆地工农业生产、海洋产业开发等排放的废水多在此汇集。潮间带是中国鲨和圆尾鲨的繁殖地和稚鲨的栖息地,潮间带的地形地貌特点和环境因子决定了其种群的分布和规模。我们认为底质的沙质比例会影响中国鲨和圆尾鲨的分布,潮间带的地形地貌特征会影响稚鲨不同生长阶段在滩涂的分布,而不容忽视的是潮间带的植被(海草床/红树林)也是决定两者分布的关键因素。FAN等^[39]研究两种稚鲨生活史各阶段摄食时发现,鲨食物中的碳源近60%是来自矮大叶草海草衍生的碎屑。谢蕙莲等^[40]发现两种稚鲨共栖于珍珠湾红树林围绕的潮间带泥滩地上。从卫星遥感影像中只能得到植被覆盖率和植被指数,缺乏海草床和红树林的高分辨率分布图,而海草床的数据仅能从相关文献资料中获取,数据不够精准。如果能将这些数据考虑进来,预测的结果将会更加准确。

由于过度捕捞,水污染,围海造地、滩涂养殖等造成的栖息地破坏^[41-42],鲎数量急剧下降,面临濒危。除此以外,成鲎还被作为食物^[43]、因采血而被过度开发利用等^[44],加剧了鲎资源的枯竭。目前,北部湾沿岸,是中国鲎在地球上唯一种群密度较高的“净土”,连同雷州湾及海南附近海域,约占全球种群资源总量的 90%,且存在中国鲎和圆尾鲎幼鲎同地共栖的现象。北部湾作为我国鲎资源的最大片状栖息地,急需保护鲎的有力举措。为更好保护鲎资源,提出以下几点建议:

(1)加强已有保护区的保护力度,建立新的海洋特别保护区,特别是广西北暮盐场、广东流沙湾、海南东方等两种稚鲎的潜在分布区域。在稚鲎潜在适宜分布区域建立保护区,加强建设与管理,保护鲎及其生存环境,尤其是作为稚鲎觅食场所的海草及红树林分布的有机质丰富的潮间带,让鲎有适宜的环境繁衍生息对于鲎资源的保护至关重要。

(2)加强执法力度,制止非法捕捞。由于鲎试剂是目前检测内毒素最简便且最有效的试剂,对作为原材料的鲎采血无法避免,近年来鲎试剂厂对于鲎的需求更是有增无减。受鲎试剂厂采购鲎的利益驱使,加上广西、广东等地素有食鲎的习惯,捕捞、食用、买卖鲎等非法行为屡禁不止,政府部门应加强鲎的保护,规范和监督鲎试剂公司对于鲎的采血及释放过程,对于违反规定的公司或者非法捕捞、贩卖鲎的行为予以打击和严惩,从而促使大众自觉抵制非法买卖鲎等行为。同时,有关部门应加强科普宣传、公众教育,引导广大民众意识到鲎的宝贵,了解到鲎资源濒临灭绝的现状,积极参与到保护鲎的行动中,避免人类活动对鲎产卵地和孵育地造成干预,减少对鲎的捕捞和买卖。

(3)人工放流稚鲎,促进种群恢复和发展。MAXENT 模型分析结果表明,潮间带坡度和地形指数是影响中国鲎分布的主要环境因子,而潮间带底质的有机物含量和植被指数是影响圆尾鲎分布的主要环境因子,该结果为人工放流工作提供了参考依据,在广西北暮盐场、广东流沙湾、海南东方等是两种稚鲎共生的潜在适宜分布区域人工放流稚鲎提高存活率,进而促进鲎资源种群恢复和发展。

参考文献 (References):

- [1] Solano G, Gómez A, León G. Assessing endotoxins in equine-derived snake antivenoms: Comparison of the USP pyrogen test and the Limulus Amoebocyte Lysate assay (LAL). *Toxicol*, 2015, 105: 13-18.
- [2] 史娟, 江涛, 于日磊. 二硫键对鲎素结构与活性影响的研究. *中国海洋药物*, 2018, 37(1): 91-95.
- [3] Evert C F. Bionics—a new approach to engineering research. *IEE-IERE Proceedings-India*, 1969, 7(3): 97-97.
- [4] Nelson B R, Satyanarayana B, Moh J H Z, Ikhwanuddin M, Chatterji A, Shaharom F. The final spawning ground of *Tachypleus gigas* (Müller, 1785) on the east Peninsular Malaysia is at risk; a call for action. *PeerJ*, 2016, 4: e2232.
- [5] 翁朝红, 肖志群, 谢仰杰, 洪水根. 创设厦门海域中国鲎自然保护区. *集美大学学报: 自然科学版*, 2008, 13(1): 40-44.
- [6] Hu M H. Aspects of Ecology and Biology of Two Sympatric Horseshoe Crab Species (*Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda*) [D]. Hong Kong, China: City University of Hong Kong, 2011.
- [7] 刘伟茹. 广西北部湾地区圆尾鲎与中国鲎生物学研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [8] 杨维康, 钟文勤, 高行宜. 鸟类栖息地选择研究进展. *干旱区研究*, 2000, 17(3): 71-78.
- [9] 蔡静芸, 张明明, 粟海军, 张海波. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究. *经济动物学报*, 2014, 18(1): 47-52, 58-58.
- [10] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 1957, 106(4): 620-630.
- [11] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. *生物学通报*, 2015, 50(11): 9-12.
- [12] 薛嘉伦, 樊伟, 唐峰华, 郭刚刚, 汤伟, 张胜茂. 基于最大熵模型预测西北太平洋公海鲎潜在栖息地分布. *南方水产科学*, 2018, 14(1): 92-98.
- [13] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning. Banff, Alberta, Canada: ACM, 2004.
- [14] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [15] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudik M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [16] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria.

- Ecological Applications, 2011, 21(2): 335-342.
- [17] Farashi A, Kaboli M, Karami M. Predicting range expansion of invasive Raccoons in Northern Iran using ENFA Model at two different scales. Ecological Informatics, 2013, 15: 96-102.
- [18] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [19] Sillero N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. Ecological Modelling, 2011, 222(8): 1343-1346.
- [20] Lu C Y, Gu W, Dai A H, Wei H Y. Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: a case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. in Qinling Mountains, China. Ecological Modelling, 2012, 242: 105-115.
- [21] 熊文朋. 北部湾潮间带重金属污染评价及其水环境容量[D]. 南宁: 广西师范学院, 2016.
- [22] 许道全. 北部湾潮间带蟹体重金属的组织分布及与主要环境因子的相关性[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [23] 付文超, 孟范平, 王志峰, 王群, 李永富, 周游, 程凤莲. 北部湾潮间带沉积物和双壳类动物中的重金属: 污染特征与生物积累. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1401-1409.
- [24] 程凤莲. 基于系列生物标志物的北部湾潮间带底栖环境质量评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [25] 邱广龙, 范航清, 周浩郎, 李森, 曾聪, 李蕾鲜. 基于 SeagrassNet 的广西北部湾海草床生态监测. 湿地科学与管理, 2013, 9(1): 60-64.
- [26] 范航清, 彭胜, 石雅君, 郑杏雯. 广西北部湾沿海海草资源与研究状况. 广西科学, 2007, 14(3): 289-295.
- [27] Kwan B K Y, Hsieh H L, Cheung S G, Shin P K S. Present population and habitat status of potentially threatened Asian horseshoe crabs *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* in Hong Kong: a proposal for marine protected areas. Biodiversity and Conservation, 2016, 25(4): 673-692.
- [28] Li H Y. The Conservation of Horseshoe Crabs in Hong Kong[D]. Hong Kong, China: City University of Hong Kong, 2008.
- [29] Chen C P, Yang M C, Fan L F, Qiu G L, Liao Y Y, Hsieh H L. Co-occurrence of juvenile horseshoe crabs *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* in an estuarine bay, southwestern China. Aquatic Biology, 2015, 24(2): 117-126.
- [30] Jawahir A R N, Samsur M, Shabdin M L, Adha A R K. Distribution of two species of Asian horseshoe crabs at west coast of Sarawak's Waters, East Malaysia. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2017, 43(2): 135-140.
- [31] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 刘凤权. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3069.
- [32] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 2011, 31(5): 1221-1229.
- [33] 张琴, 张东方, 吴明丽, 郭杰, 孙成忠, 谢彩香. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区. 植物生态学报, 2017, 41(7): 770-778.
- [34] 崔相艳, 王文娟, 杨小强, 李述, 秦声远, 戎俊. 基于生态位模型预测野生油茶潜在分布. 生物多样性, 2016, 24(10): 1117-1128.
- [35] Elith J, Kearney M, Phillips S. The art of modelling range-shifting species. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(4): 330-342.
- [36] Buckman-Sewald Jessica J, Whorton C R, Root K V. Developing macrohabitat models for bats in parks using maxent and testing them with data collected by citizen scientists. International Journal of Biodiversity and Conservation, 2014, 6(2): 171-183.
- [37] Hughes G, Madden L V. Evaluating predictive models with application in regulatory policy for invasive weeds. Agricultural Systems, 2003, 76(2): 755-774.
- [38] 王骏博. 底质对东方鲀幼体存活的影响. 福建农业科技, 2008, (2): 77-78.
- [39] Fan L F, Chen C P, Yang M C, Qiu G L, Liao Y Y, Hsieh H L. Ontogenetic changes in dietary carbon sources and trophic position of two co-occurring horseshoe crab species in Southwestern China. Aquatic Biology, 2017, 26: 15-26.
- [40] 谢惠莲, 范航清, 廖永岩, 关杰耀, 邱广龙, 林吴颖, 陈瑞芳, 陈章波. 蟹保育的三赢策略. 广西科学, 2017, 24(5): 509-515.
- [41] Cartwright-Taylor L, Lee J, Hsu C C. Population structure and breeding pattern of the mangrove horseshoe crab *Carcinoscorpius rotundicauda* in Singapore. Aquatic Biology, 2009, 8(1): 61-69.
- [42] Chen C P, Yeh H Y, Lin P F. Conservation of the horseshoe crab at Kinmen, Taiwan: strategies and practices. Biodiversity & Conservation, 2004, 13(10): 1889-1904.
- [43] Botton M L. The conservation of horseshoe crabs: what can we learn from the Japanese experience? //Tanacredi J T, ed. *Limulus in the Limelight*. Boston: Springer, 2002: 41-51.
- [44] Gauvry G. Current horseshoe crab harvesting practices cannot support global demand for TAL/LAL: the pharmaceutical and medical device industries' role in the sustainability of horseshoe crabs//Carmichael R H, Botton M L, Shin P K S, Cheung S G, eds. *Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management*. Cham: Springer, 2015.