



• 研究报告 •

中国南海北部近海蜆资源调查及北部湾潮间带中华蜆幼蜆潜在栖息地评估

鲍虞园^{1#}, 李银康^{2,3#}, 林吴颖⁴, 周志琴⁵, 肖晓波⁶, 颜晓勇^{2,3*}

1. 广东省海洋发展规划研究中心, 广州 510022; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300; 3. 三亚热带水产研究院, 海南三亚 572019; 4. 深圳爱栖自然生态科技有限公司, 广东深圳 518000; 5. 海口雷替湿地研究所, 海口 570000; 6. 广西生物多样性研究和保护协会, 南宁 530012

摘要: 蜆是珍贵的海洋“活化石”生物, 由于过度捕捞、环境污染和栖息地丧失等原因, 中华蜆(*Tachypleus tridentatus*)数量呈现“断崖式”下降, 蜆资源和栖息地保护迫在眉睫。本研究对中国南海北部近海海域成蜆和北部湾沿岸潮间带幼蜆进行调查, 并基于幼蜆调查结果, 运用MaxEnt模型对北部湾沿岸中华蜆幼蜆潜在栖息地进行预测。2018年和2019年调查结果显示南海北部海域成蜆资源分布稀疏, 两次调查的99个站点中, 仅在15个站点累计发现18只成年中华蜆, 且主要集中在北部湾海域; 潮间带幼蜆调查显示, 2019年10个调查点幼蜆丰度为0.01–0.33 ind./100 m², 2020年14个调查点幼蜆丰度为0.01–0.65 ind./100 m², 其中北部湾海南沿岸海域发现蜆育幼场。根据中华蜆幼蜆潜在栖息地评估结果, 最湿季均温(bio 8)和平均海表温度(mean sea surface temperature, sst)是影响其分布的主要因子。北部湾中国沿岸海域潮间带的幼蜆高适宜区占比达18.39%, 主要为北部湾广西沿岸海域、广东遂溪县沿岸海域和海南新英湾, 这些区域值得重点保护。本研究结果可丰富中华蜆种群本底数据, 为今后蜆资源保护和恢复行动的布局提供科学依据和理论支撑。

关键词: 中华蜆; 北部湾; 资源现状; 最大熵模型; 栖息地

鲍虞园, 李银康, 林吴颖, 周志琴, 肖晓波, 颜晓勇 (2023) 中国南海北部近海蜆资源调查及北部湾潮间带中华蜆幼蜆潜在栖息地评估. 生物多样性, 31, 22407. doi: 10.17520/biods.2022407.

Bao YY, Li YK, Lin WY, Zhou ZQ, Xiao XB, Xie XY (2023) The current situation of horseshoe crabs in the offshore waters of northern South China Sea with analysis of the potential habitat distribution of juvenile *Tachypleus tridentatus* in Beibu Gulf. Biodiversity Science, 31, 22407. doi: 10.17520/biods.2022407.

The current situation of horseshoe crabs in the offshore waters of northern South China Sea with analysis of the potential habitat distribution of juvenile *Tachypleus tridentatus* in Beibu Gulf

Yuyuan Bao^{1#}, Yinkang Li^{2,3#}, Wuying Lin⁴, Zhiqin Zhou⁵, Xiaobo Xiao⁶, Xiaoyong Xie^{2,3*}

1 Guangdong Ocean Development Planning Research Center, Guangzhou 510022

2 Key Laboratory of Fishery Ecological Environment of Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300

3 Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya, Hainan 572019

4 Shenzhen Aiqi Nature Ecological Technology Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000

5 Haikou Duotan Wetlands Institute, Haikou 570000

6 Guangxi Biodiversity Research and Conservation Association, Nanning 530012

ABSTRACT

Aims: The horseshoe crab population in the areas surrounding China have declined dramatically due to overfishing, environmental pollution, and habitat loss. In 2019, *Tachypleus tridentatus* was listed in the IUCN Red List as Endangered category. However, the current literature on horseshoe crabs within China is inadequate, adversely affecting

收稿日期: 2022-07-16; 接受日期: 2022-11-10

基金项目: 海南省自然科学基金(322MS154)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0605)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2021SD16; 2021SD18)

共同第一作者 Co-first authors

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn

the conservation of the species. This paper aims to assess the current situation of horseshoe crabs in the offshore waters of the northern South China Sea and determine the potential distribution of the *T. tridentatus* in the Beibu Gulf.

Methods: In 2018 and 2019, trawl sampling was used in the adult horseshoe crab survey in the northern coastal waters of the South China Sea, with a total of 99 sampling sites. For the investigation of juvenile *T. tridentatus* population in the intertidal zones, 10 and 14 investigation points were set up in 2019 and 2020 respectively. Using our survey results, a maximum entropy (MaxEnt) model was used to analyze the potential habitat of juvenile *T. tridentatus* along the Beibu Gulf.

Results: In the survey, 18 horseshoe crabs were found at only 15 of the 99 sites. Among them, 9 horseshoe crabs were found at 7 sites in 2018 and 9 at 8 sites in 2019. The abundance of juvenile *T. tridentatus* in the Beibu Gulf was determined to be 0.01–0.33 ind./100 m² in 2019 and 0.01–0.65 ind./100 m² in 2020. According to the results of the MaxEnt model, 18.39% of the intertidal zone along the Beibu Gulf coast is highly suitable for juvenile horseshoe crabs.

Conclusions: Adult horseshoe crabs in the offshore waters of northern South China Sea are sparsely distributed and mainly concentrated in the Beibu Gulf. Of the areas along the coast of Guangxi in the Beibu Gulf, Suixi County in Guangdong and Xinying Bay in Hainan are the most highly suitable areas for juvenile horseshoe crab. Therefore, we should focus on strengthening the protection of these areas.

Key words: *Tachypleus tridentatus*; Beibu Gulf; current resource status; maximum entropy model; habitat

蜆隶属节肢动物门肢口纲剑尾目, 是地球仅存的肢口纲物种, 其起源可追溯至4.45亿年前, 有海洋“活化石”之称(Rudkin & Young, 2009)。世界上现存4种蜆科生物, 分别为美洲蜆(*Limulus polyphemus*)、中华蜆(*Tachypleus tridentatus*)、圆尾蝎蜆(*Carcinoscorpius rotundicauda*)和巨蜆(*Tachypleus gigas*)。中国沿海地区仅有中华蜆和圆尾蝎蜆分布(Luo et al, 2020)。蜆的生活史跨越不同生境类型, 幼蜆多分布于潮间带, 成蜆则栖息于水深30 m以内沿岸海域(Shuster & Sekiguchi, 2009; Chen et al, 2015)。以中华蜆血液为核心原材料制备的蜆试剂(tachypleus amebocyte lysate, TAL)广泛应用于注射类药物(Novitsky, 2015)和疫苗的内毒素检测(Arnold, 2020; Waycott, 2020)。历史上中华蜆曾广泛分布于中国长江口以南的东海和南海近岸海域, 最北达舟山群岛, 最南分布于北部湾海域(王彝豪, 1984; 梁广耀, 1985; Sekiguchi, 1988)。20世纪80年代以来由于过度捕捞、栖息地严重破坏等原因, 中华蜆资源急剧下降, 在东南沿海许多海域几近消失(翁朝红等, 2012)。2019年IUCN宣布中华蜆为濒危(Endangered, EN)物种(Laurie et al, 2019), 2021年我国将中华蜆和圆尾蝎蜆正式列为国家二级重点保护野生动物。中华蜆种群资源枯竭将直接危及蜆试剂产业, 医药检测行业对蜆血的巨大需求与中华蜆种群“濒危”现状间的矛盾日益凸显。

种群规模、种群动态和分布范围是评估物种或种群状况的重要基础(IUCN, 2012)。北部湾海域被

认为是现今中华蜆资源最为丰富的地区(廖永岩和李晓梅, 2001; Brockmann & Smith, 2009; Sekiguchi & Shuster, 2009; 翁朝红等, 2012), 然而北部湾海域成蜆资源现状仍处于信息空白状态, 幼蜆种群调查多集中于广西海域, 广东和南海海域潮间带鲜有幼蜆分布和种群规模报道, 种群基线信息的缺乏严重阻碍了中国的蜆资源管理和保护行动。

识别适宜分布区域是珍稀濒危动物保护的关键环节之一。人工智能和机器学习方法逐渐成为研究物种与栖息环境适生性的重要手段(Gallagher et al, 2010), 物种分布模型作为模拟和预测物种地理分布的有效工具, 被广泛应用于预测物种适生性分布(Gelviz-Gelvez et al, 2015)。其中最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型具有不依赖物种生物学参数、不需要物种缺失点, 受样本数量偏差影响小等特性, 即使在分布数据较少的情况下也能获得较好的预测精度(Merow et al, 2013; Padalia et al, 2014), 被广泛应用于珍稀濒危动植物分布评估、入侵生物的适生区预测、重要生态系统修复和全球气候变化对物种分布的影响预测等, 在生物地理学、保护生物学和生态学等相关研究中都发挥着重要作用(Mamun et al, 2018; Wei et al, 2018; Li et al, 2019; Yan et al, 2020)。

本研究通过对中国南海北部近海海域成蜆及北部湾潮间带幼蜆资源调查, 探讨了蜆资源分布现状及种群规模, 并利用MaxEnt模型对北部湾中国沿岸中华蜆幼蜆潜在栖息地进行研究, 以期为

鲎栖息地保护和种群资源恢复提供数据支撑和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北部湾位于中国南海西北部, 是典型的半封闭式亚热带海湾, 东临雷州半岛和海南岛, 北依广西壮族自治区, 西临越南, 与琼州海峡和南海相连。北部湾拥有多样的生态系统类型, 为许多重要、濒危的海洋生物提供了关键栖息地, 是中国乃至东南亚重要的海岸带与海洋生物多样性热点区域。

南海北部近海海域成鲎调查共布设99个采样站点, 调查点与南海北部近海渔业资源调查点相同(晏然等, 2018), 其中北部湾海域38个站点, 其余海区61个。北部湾潮间带幼鲎种群调查2019年布设10个调查点, 2020年新增乌坭、草潭、澄迈湾、新盈4个调查点, 调查站位详细信息见表1。

1.2 鲎资源调查方法

1.2.1 近海海域成鲎资源调查

2018年和2019年南海北部近海的鲎渔获数据来源于2018年9–10月和2019年4月南海北部近海渔业资源调查, 采用“北渔60011”单船底拖网进行作业, 船体主机功率441 kW, 网具404目。拖网采样均在白天进行, 每个站的拖网时间为1 h。

鲎资源密度根据传统扫海面积法估算(王腾等, 2020), 公式如下:

$$D = Y / (A \times (1 - E)) \quad (1)$$

式中, D 为资源密度(kg/km^2); Y 为单位时间的渔获率(kg/h); A 为单位时间的扫海面积(km^2/h); E 为逃逸率。

1.2.2 潮间带幼鲎调查

2019年和2020年, 于7–8月白天低潮时进行潮间带幼鲎调查。每个调查站点根据地形特点、潮间带宽度、与红树林的距离和与人为干扰活动距离等因素设置1–4个调查区域, 各调查区域间距大于200 m, 其中新盈设1个调查区域; 螃蟹档、中三墩、西背岭、下村、沙田、榕根山、乌坭、澄迈湾、新英设2个调查区域; 坡尾底设3个调查区域; 渔洲坪、竹林盐场、草潭设4个调查区域。各调查区域由4条垂直于海岸走向的样线组成, 样线长500 m, 宽4 m, 样线间隔125 m (图1)。由2人分别负责每条样线两侧各2 m的范围, 匀速搜索幼鲎踪迹, 现场记录每个区域内中华鲎和圆尾蝎鲎两种幼鲎的数量并逐只测量个体的前体宽度, 测量及记录后将幼鲎原处放回。

1.2.3 中华鲎、圆尾蝎鲎种类区分

根据剑尾截面和表面是否光滑对中华鲎和圆尾蝎鲎的种类进行区分; 中华鲎剑尾截面为三角形, 且尾部上方有3个明显的固定棘, 而圆尾蝎鲎剑尾截面呈圆形, 且表面光滑(Chiu & Morton, 2003)。

表1 北部湾幼鲎调查站位潮位信息表

Table 1 Tide level information of survey stations of juvenile *Tachypleus tridentatus* in Beibu Gulf

编号 Number	站位 Survey station	经度 Longitude	纬度 Latitude	平均高潮位 Mean high tide level (m)	平均低潮位 Mean low tide level (m)	参考潮汐站位 The closest tidal station
1	渔洲坪 Yuzhouping	108°22' E	21°38' N	3.7	1.15	防城港 Fangchenggang
2	螃蟹档 Pangxiedang	108°49' E	21°37' N	3.88	1.37	龙门 Longmen
3	中三墩 Zhongsandun	108°52' E	21°37' N			
4	西背岭 Xibeiling	109°10' E	21°24' N	4.0	1.3	北海 Beihai
5	下村 Xiacun	109°12' E	21°25' N			
6	竹林盐场 Zhulinyanchang	109°16' E	21°25' N			
7	坡尾底 Poweidi	109°33' E	21°31' N	5.05	2.16	铁山港 Tieshangang (石头埠) (Shitoubu)
8	沙田 Shatian	109°39' E	21°30' N			
9	榕根山 Ronggenshan	109°40' E	21°29' N			
10	乌坭 Wuni	109°45' E	21°29' N			
11	草潭 Caotan	109°48' E	21°21' N	4.07	1.51	下泊 Xiabo
12	澄迈湾 Chengmaiwan	109°59' E	19°56' N	2.46	0.92	马村港 Macungang
13	新盈 Xinying (I)	109°31' E	19°54' N	3.15	1.07	新盈 Xinying
14	新英 Xinying (II)	109°16' E	19°43' N	3.07	1.05	洋浦 Yangpu

潮位数据来源: 国家海洋信息中心, 2019

Tide level data source: National Marine Data and Information Service, 2019

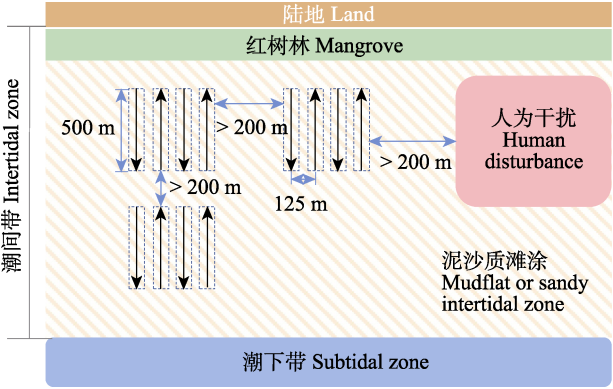


图1 北部湾幼蜆调查样线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of survey line of juvenile *Tachypleus tridentatus* in Beibu Gulf

1.3 幼蜆MaxEnt模型建立

1.3.1 物种分布数据

物种分布数据主要来源于全球生物多样性信息网络(GBIF, <https://www.gbif.org>)、文献记录和野外调查(附录1)。分布数据按照MaxEnt软件格式要求,将物种名和分布点经纬度数据录入Excel以*.CSV格式保存。

1.3.2 环境变量数据

温度、盐度、距岸线距离等环境因素是影响潮间带生物生长分布的重要指标。中华蜆幼蜆主要生长于潮间带区域,分布受到海洋和陆地环境双重影响。本研究基于此将海陆环境变量数据进行融合、标准化处理,以期提高模型准确性。具体操作如下:首先将已下载完成的环境变量数据导入ArcGIS软件,利用“切片栅格”工具按照研究区域的海岸带范围进行数据裁切;之后在海岸带范围内建立缓冲区,利用“扩展”工具提取缓冲区内的数据向海洋或陆地方向进行数据扩展,以实现陆地与海洋数据的融合。本研究选取的13个环境因子主要筛选自Pati等(2021)预测印度东北海岸巨蜆产卵场采用的19种生物气候因子(附录2),以及广东省潮间带红树林适生区预测所用到的海表温度、盐度和地形高程数据(晁碧霄等, 2020)。研究采用的生物气候因子来自世界气候数据库(www.worldclim.org); 海表温度数据来自Remote Sensing Systems (RSS) 公司提供的Microwave Optimally Interpolated SST daily products产品(V5.0版)并进行统计加工; 海表盐度数据来自RSS公司提供的SMAP Salinity V3 Validated Release的Level 3 8-day running averages产品,利用ArcGIS

对获取的海表温度和盐度数据进行预处理,将环境因子的数字图层全部在ArcGIS中统一为WGS1984坐标系,用重采样统一环境因子的空间分辨率,使其与分辨率最低的环境数据集相同,并且统一裁剪范围。地形数据由美国地球物理中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布的ETOP01地形高程和海洋海底地形数据提取,并通过ArcGIS Pro 2.4.3软件空间分析模块计算岸线距离等数据。为避免影响因子间的相互作用对模型结果产生影响,将同类型环境变量数据进行相关性分析(附录3),去除相关性较高($|r| > 0.8$)的因子(Chakraborty et al, 2016; Wei et al, 2018; Jayasinghe & Kumar, 2019),输入MaxEnt模型的环境因子见表2。

1.3.3 模型运行及评估

本研究使用MaxEnt 3.4.1软件进行预测分析。将物种分布数据的75%作为训练数据用于建立模型,剩下25%作为测试数据用于模型检验,模型运行时Settings中“regularization multiplier”为默认值1,重复运行模式为“Subsample”;重复运行10次,并取平均结果为最终实验结果;创建响应曲线、绘制变量

表2 主要环境变量对幼年中华蜆分布的贡献率及重要性
Table 2 Contribution and importance of major environmental variables to the distribution of juvenile *Tachypleus tridentatus*

环境变量 Environmental variables	贡献率 Contribution rate (%)	重要性 Permutation importance (%)
平均海表温度 Mean sea surface temperature (sst)	45.9	10.2
最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter (bio 8)	36	21.3
距海岸线欧氏距离 Euclidean distance to the coastline (coastline)	4.4	44.4
最暖月最高温 Max temperature of the warmest month (bio 5)	3.1	3.9
降水季节性变化 Precipitation seasonality (bio 15)	2.8	0.6
年平均气温 Annual mean temperature (bio 1)	2.4	5.2
海底地形高程 Seabed topographic elevation (etopo 1)	2.3	9.4
年平均降水量 Annual precipitation (bio 12)	0.8	0.2
最干月降水量 Precipitation of the driest month (bio 14)	0.7	0.7
平均海表盐度 Mean sea surface salinity (sss)	0.5	2.2
气温季节性变化 Temperature seasonality (bio 4)	0.4	1
等温性 Isothermality (bio 3)	0.4	0.3
气温日较差 Mean diurnal range (bio 2)	0.2	0.5

重要性刀切图, 使用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)对模型的精度进行评价。ROC曲线(附录4)下方与坐标轴围成的面积为AUC (area under the curve)值, AUC值越高通常表明模型的效果越好, AUC值为0.5–0.6表明模型预测结果失败; 为0.6–0.7表明模型预测结果较差; 为0.7–0.8表明模型预测结果一般; 为0.8–0.9表明模型预测结果较好; 为0.9–1.0表明模型预测结果优秀。MaxEnt模型运算得到各环境变量对模型预测的贡献率和重要性, 环境变量重要性表征单个环境变量对模型结果的影响, 环境变量贡献率考虑不同环境变量间的相互影响。

1.3.4 适生等级划分

MaxEnt软件模拟输出结果值在0–1之间, 越接近1表示物种越可能存在, 利用ArcGIS重分类方法中自然间断点分级法将适宜区间(0–1)由低到高分4个级别: 0–0.1为不适生区、0.1–0.3为低适生区、0.3–0.5为中适生区、大于0.5为高适生区。

2 结果

2.1 中国南海北部近海鲨鱼资源状况

中国南海北部近海海域鲨鱼资源拖网调查结果如图2所示。99个站点2次调查结果显示, 仅在15个站点累计发现18只成年中华鲎, 其中2018年有7个站点共发现9只中华鲎, 出现率仅为7.07% (7/99),

2019年有8个站点共发现9只中华鲎, 出现率为8.08% (8/99)。两次拖网调查均未发现圆尾蝎鲎。这一结果表明鲎当前在中国南海北部海域的分布较为稀疏, 其空间分布区域主要集中于北部湾海域。鲎的资源估算结果表明其数量在本研究区总体较少, 15个调查站点鲎资源密度为5.33–16.00 ind./km², 资源密度最高值位于北部湾南部湾口。

2.2 北部湾沿岸潮间带幼鲎资源现状

本研究潮间带实地调查结果与GBIF中北部湾中国海域中华鲎分布情况基本一致。2019年10个调查点幼鲎丰度为0.01–0.33 ind./100 m², 其中坡尾底、沙田和榕根山幼鲎丰度相对较高(图3a); 2020年14个调查点幼鲎丰度为0.01–0.65 ind./100 m², 其中沙田、榕根山和新盈幼鲎丰度相对较高; 竹林盐场、中三墩、下村幼鲎丰度相对较低, 均低于0.01 ind./100 m² (图3b)。调查发现北部湾海南沿岸海域仍存在鲎育幼场, 草潭、渔洲坪、螃蟹档、西背岭、坡尾底、沙田、榕根山、乌坭是中华鲎和圆尾蝎鲎的共同栖息地, 中三墩、下村、竹林盐场、新盈、新英仅发现中华鲎, 澄迈湾仅发现圆尾蝎鲎。从物种分布来看, 北部湾沿岸潮间带中华鲎幼鲎丰度明显高于圆尾蝎鲎。

2.3 MaxEnt模型模拟结果

2.3.1 预测精度分析

经过变量筛选与模拟实验得出中华鲎幼鲎

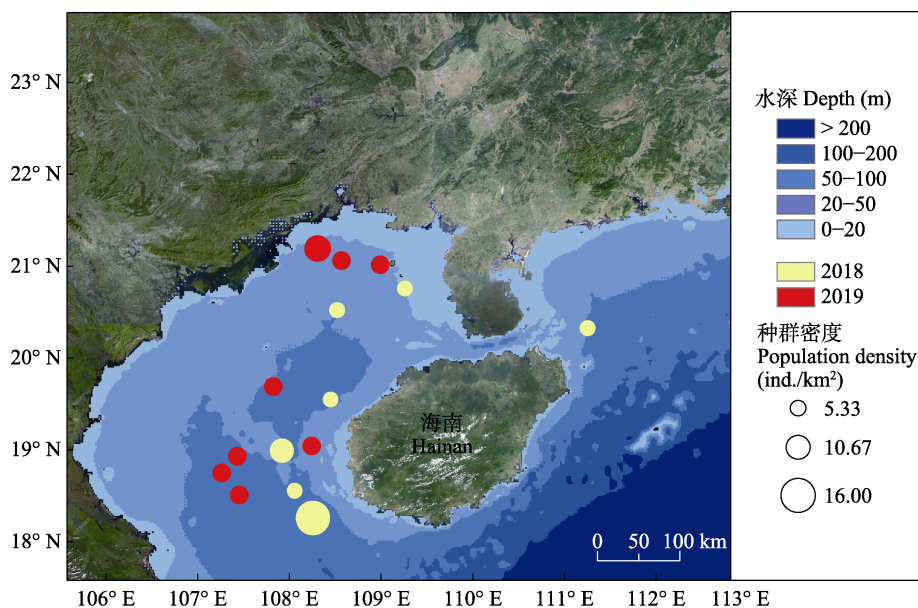


图2 2018年和2019年中国南海北部海域成鲎分布情况

Fig. 2 The distribution of horseshoe crabs in the offshore waters of northern South China Sea in 2018 and 2019

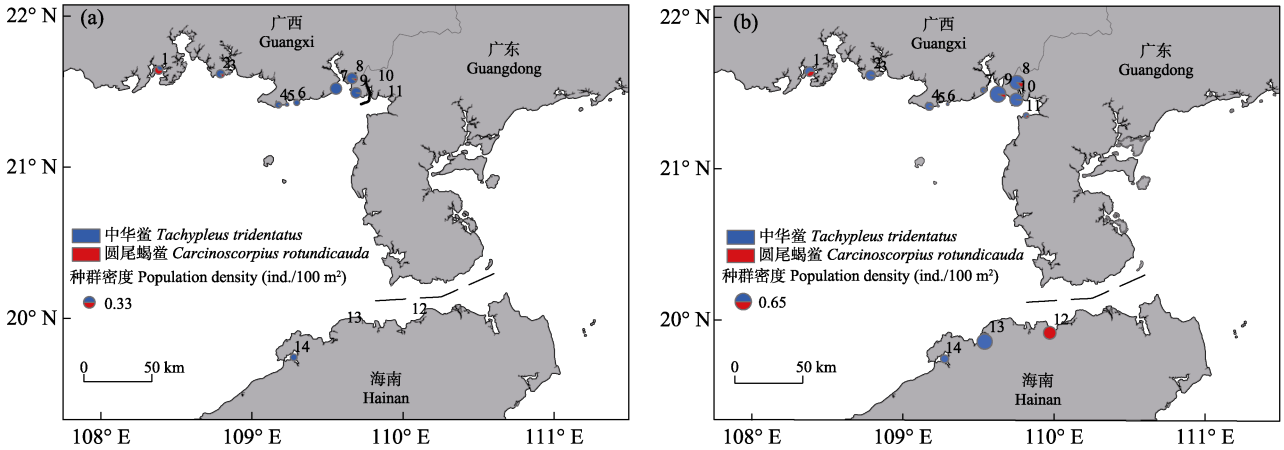


图3 2019年(a)和2020年(b)北部湾潮间带幼鲎分布。1: 渔洲坪; 2: 螃蟹档; 3: 中三墩; 4: 西背岭; 5: 下村; 6: 竹林盐场; 7: 坡尾底; 8: 沙田; 9: 榕根山; 10: 乌坭; 11: 草潭; 12: 澄迈湾; 13: 新盈; 14: 新英。

Fig. 3 Juvenile horseshoe crab distribution in the intertidal zone of Beibu Gulf in 2019 (a) and 2020 (b). 1, Yuzhouping; 2, Pangxiedang; 3, Zhongsandun; 4, Xibeiling; 5, Xiacun; 6, Zhulinyanchang; 7, Poweidi; 8, Shatian; 9, Ronggenshan; 10, Wuni; 11, Caotan; 12, Chengmaiwan; 13, Xinying (I); 14, Xinying (II).

ROC曲线(附录4), 模型训练集AUC值为0.947, 表明本研究MaxEnt模型对中华鲎幼鲎适生区模拟预测结果可信度极高。

2.3.2 各影响因子的重要性

所有环境变量中, 按贡献率从高到低排序依次为平均海表温度(sst, 45.9%)、最湿季均温(bio 8, 36%)、距海岸线欧式距离(coastline, 4.4%)、最暖月最高温(bio 5, 3.1%)、降水季节性变化(bio 15, 2.8%)、年平均气温(bio 1, 2.4%)和海底地形高程(etopo 1, 2.3%) (表2)。

运用MaxEnt模型刀切算法评估各环境变量对物种分布的影响程度, 即环境变量被轮流逐一剔除, 用剩余变量参与运算并以柱状图形式表示各变量对模型的贡献值(图4), 得到最湿季均温(bio 8)、平均海表温度(sst)、年平均气温(bio 1)和降水季节性变化(bio 15) 4个环境变量对中华鲎幼鲎潜在分布预测较为重要, 表明环境变量中包含的信息对于模型结果意义较大。

2.3.3 中华鲎幼鲎适生环境因子范围

主要环境因子与中华鲎幼鲎分布概率的响应曲线如图5所示, 在一定范围内中华鲎幼鲎存在概率随年平均气温和平均海表温度升高而升高, 当年平均气温和平均海表温度分别达到25℃和30℃时中华鲎幼鲎存在概率达到最大。中华鲎幼鲎分布概率与年平均降水量和降水季节性变化分别在0–2,200 mm和0–90%范围内呈正相关。海表盐度在0–34范

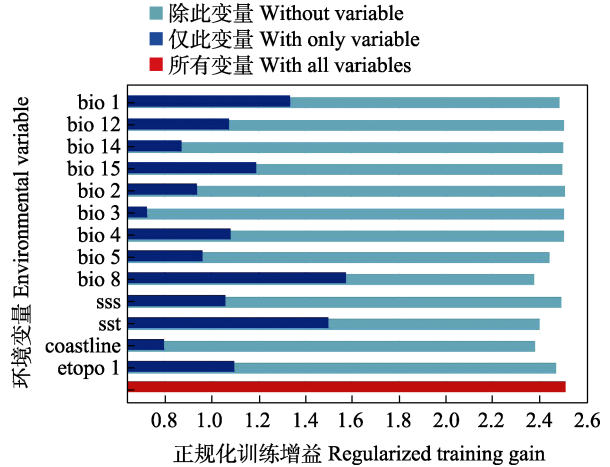


图4 基于刀切法的环境因子重要性分析。环境变量的含义见表2。

Fig. 4 Importance analysis of environmental factors based on Jackknife method. The meanings of the environmental variables are shown in Table 2.

围内, 随着盐度上升中华鲎幼鲎存在概率上升。中华鲎幼鲎分布概率与距海岸线欧式距离呈负相关, 离海岸线较近区域中华鲎幼鲎存在概率较大, 距海岸线越远幼鲎分布概率越低。

2.3.4 幼鲎潜在分布区

基于MaxEnt模型对北部湾潮间带中华鲎幼鲎生境适生性进行预测, 将连续概率分布在ArcGIS中进行重分类, 即高适宜区、中适宜区、低适宜区和不适宜区(图6)。结果表明高适宜区占18.39%, 中适宜区占22.48%, 低适宜区占39.30%, 不适宜区占

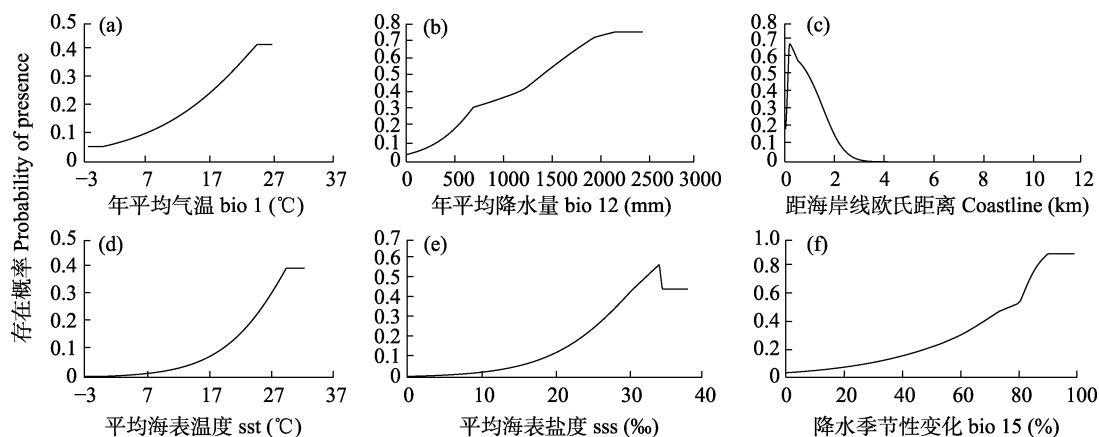


图5 MaxEnt模型中幼年中华蜆对环境变量的响应曲线。环境变量的含义见表2。

Fig. 5 Response curves of juvenile *Tachypleus tridentatus* to environmental variables in MaxEnt models. The meanings of the environmental variables are shown in Table 2.

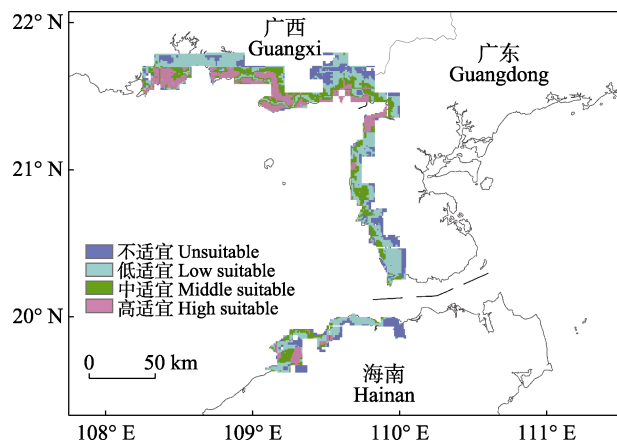


图6 北部湾潮间带中华蜆幼蜆潜在栖息地分布图

Fig. 6 Potential suitable habitats of juvenile *Tachypleus tridentatus* in intertidal zone of the Beibu Gulf of China

19.84%。中华蜆幼蜆高适宜区主要分布于北部湾广西沿岸海域, 北部湾广东、海南沿岸海域各有一处高适宜区, 分别是广东省遂溪县和海南省儋州新英湾。

3 讨论

3.1 北部湾中国地区蜆资源现状

20世纪80年代以来中华蜆资源急剧下降, 各地区科研人员开始对蜆资源分布展开调查。迄今为止, 中国的香港和台湾地区, 以及新加坡已完成幼蜆生境调查, 结果表明适宜幼蜆生长的育幼场数量有限(Cartwright-Taylor et al, 2011; Hsieh & Chen, 2015; Kwan et al, 2016; Lee & Morton, 2016)。北部湾是现今中华蜆资源最丰富的地区(Xie et al, 2020),

2009年Hu等(2015)对西背岭、金海湾和下村3个站点的调查显示, 幼蜆平均丰度为2.16–3.34 ind./100 m²; 2018年Xie等(2020)对广西沿岸海域15个蜆育幼场调查结果表明, 幼蜆丰度为0.06–7.64 ind./100 m², 其中有11个蜆育幼场幼蜆丰度大于1 ind./100 m², 6个蜆育幼场幼蜆丰度大于2 ind./100 m²。本研究于2019–2020年对北部湾沿岸三省潮间带幼蜆开展调查, 结果显示14个调查点幼蜆丰度为0.01–0.65 ind./100 m²。

北部湾广东海域潮间带幼蜆生境调查发现, 雷州半岛西海岸的大部分滨海湿地已极少发现幼蜆, 走访当地渔民得知近些年极少见到上岸产卵的成蜆。儋州新英、临高新盈和澄迈湾潮间带幼蜆调查结果显示, 北部湾海南北部潮间带区域目前仍存在蜆育幼场, 下一步可针对海南岛东岸、南岸等地蜆育幼场信息空白区域开展调查。近岸海域是成蜆的重要栖息地, 本次中国南海北部海域成蜆资源调查仅在北部湾及琼州海峡东侧海域发现少量成蜆。20世纪90年代以前北部湾的蜆年产量可达120–140万只(廖永岩和李晓梅, 2001), 2006年广东省南部海区拖网调查仍可发现少量中华蜆资源(翁朝红等, 2012)。Hu等(2015)、Xie等(2020)、Liao等(2019)以及本研究均是在繁殖季节对北部湾潮间带幼蜆进行调查, 均未能发现成蜆产卵现象, 表明北部湾中国近岸海域成蜆资源量已相当匮乏。随着北部湾地区经济发展, 沿海资源开发利用活动愈加频繁, 给滨海湿地重要物种和栖息地带来巨大压力, 包括围填海工程占据大面积滨海湿地, 野生动物非法贸易

破坏珍稀濒危物种野生种群, 不合理的渔业作业消耗大量自然资源等。北部湾滨海湿地物种和生态面临多种多样且严重程度不一的人类活动威胁, 导致生物多样性减少、外来物种增加、天然栖息地衰退、生态服务功能减弱等状况。本研究成果调查可以确认近年中国南海北部近岸海域蜆资源处于严重衰退状态, 部分海域中华蜆种群自然分布几近消失, 存在区域性灭绝风险, 中华蜆资源科学保护已成为当务之急。

3.2 基于MaxEnt模型预测中华蜆幼蜆适生条件和适生区域




物种与环境之间的关系是物种生态需求和空间分布研究的重要内容。本研究表明对中华蜆幼蜆分布贡献率较高的几个关键因子中, 温度是影响中华蜆分布和生长的重要环境因子, 通过MaxEnt模型对北部湾中国沿岸潜在分布预测响应曲线可知, 中华蜆幼蜆偏向于选择气温和海表温度较高区域作为栖息地, 中华蜆幼蜆生境适宜性随平均气温和平均海表温度上升逐渐增加, 温度在一定程度上决定了蜆的分布区域, 这可能是气候相对较冷的长江口以北地区未见蜆分布记载的原因之一。幼蜆生长发育速度随水温升高而加快, 在水温低于25℃时低龄期幼蜆将停止生长发育(王德祥等, 2001; 洪水根, 2011)。中华蜆幼蜆对盐度的适应范围较广, 盐度在10–35时均可存活, 30–35是幼蜆发育的适宜盐度(王德祥等, 2001), 本研究显示海表盐度为34时分布概率最大。中华蜆幼蜆分布概率还与距海岸线欧氏距离呈负相关, 离海岸线较近区域中华蜆幼蜆分布概率较大, 距海岸线渐远幼蜆分布概率逐渐降低, 这与幼蜆不断生长其栖息地逐步向海洋迁移的生态习性相适应(Seino et al, 2000; Cheng et al, 2015)。降水量对MaxEnt模型预测贡献也较大, 在年平均降水量0–2,200 mm区间, 随着降水量增加幼蜆分布概率逐渐增大, 年均降水量大于2,200 mm时幼蜆分布概率较低。降水量对幼蜆分布影响的机制尚未有相关报道, 潮间带底质类型及其他生物因素(物种自我扩散能力等)可能对幼蜆分布产生影响, 有待进一步深入研究。

本研究幼蜆生境实地调查和预测分析结果与颜明艳等(2019)预测广东企水湾、流沙湾幼蜆分布结果差异较大。本研究潜在栖息地分布预测图AUC

值为0.947, 远高于颜明艳等(2019)的AUC值(0.816), 可能与研究中物种分布基础数据以及环境变量选择有关。本研究通过扩大调查范围, 增加物种分布数据量, 有效提高了预测结果可靠性。颜明艳等(2019)将红树林作为重要的环境变量, 根据唐秋霞和王友绍(2021)对雷州半岛红树林群落分布格局的研究可知, 广东企水湾和流沙湾均有红树林分布, 这与颜明艳等(2019)预测的幼蜆分布结果相吻合。中华蜆倾向于在红树林区域附近高潮带沙滩产卵, 其幼蜆多在靠近红树林的泥滩区域栖息觅食(Li, 2008^①; Kwan et al, 2016)。Xie等(2020)调查发现幼蜆的分布与红树林、海草床分布和沉积物的理化性质有关, 多数幼蜆种群分布于红树林附近泥沙滩和海草床区域, 特别是在叶绿素 a 和有机碳含量普遍较高的潮沟附近。如附录5所示, 我们比较了北部湾中国海域中华蜆幼蜆适宜分布区与红树林分布的关系, 中华蜆幼蜆适宜分布区附近均有红树林分布, 说明红树林等潮间带植被可能对幼蜆分布、生长具有重要作用。

本研究结果显示北部湾中国沿岸海域中华蜆幼蜆高适宜区面积占18.39%, 其中广西沿岸海域中华蜆幼蜆高适宜区分布较多, 预测高适宜区完全覆盖了Xie等(2020)在广西沿岸海域识别的15个蜆育幼场。广东雷州半岛西海岸当前仅有遂溪县一地为高适宜区, 北部湾海南沿岸海域幼蜆高适宜区分布相对集中, 主要分布于新英湾附近, 与野外调查结果一致, 高度吻合说明本研究实地调查区域已基本涵盖了北部湾中国海域三省沿岸的已知幼蜆种群存在点。下一步我们将对模型预测的中适宜区展开调查, 进一步完善北部湾中国海域蜆资源和幼蜆生境分布本底数据。在今后的蜆保护行动中, 对幼蜆高适宜区应进行重点保护, 中适生区加强监测和生境修复, 幼蜆人工放流地点选择时应尽可能避免低适生区特别是不适生区。

ORCID

鲍虞园  <https://orcid.org/0000-0001-9346-1954>
林吴颖  <https://orcid.org/0000-0003-2416-8468>
颜晓勇  <https://orcid.org/0000-0001-8096-7497>

① Li HY (2008) The Conservation of Horseshoe Crabs in Hong Kong. Master dissertation, City University of Hong Kong, Hong Kong.

参考文献

- Arnold C (2020) Horseshoe crab blood is key to making a COVID-19 vaccinated—but the ecosystem may suffer. <https://www.nationalgeographic.com/animals/article/covid-vaccine-needs-horseshoe-crab-blood>. (accessed on 2022-05-20)
- Brockmann HJ, Smith MD (2009) Reproductive competition and sexual selection in horseshoe crabs. In: *Biology and Conservation of Horseshoe Crabs* (eds Tanacredi JT, Botton ML, Smith DR), pp. 199–221. Springer, New York.
- Cartwright-Taylor L, Yap VB, Hsu CC, Lou ST (2011) Distribution and abundance of horseshoe crabs *Tachypleus gigas* and *Carcinoscorpius rotundicauda* around the main island of Singapore. *Aquatic Biology*, 13, 127–136.
- Chakraborty A, Joshi PK, Sachdeva K (2016) Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region. *Ecological Engineering*, 97, 593–609.
- Chao BX, Hu WJ, Chen B, Zhang D, Chen GC, Yu WW, Ma ZY, Lei GC, Wang YY (2020) Potential suitable habitat of mangroves and conservation gap analysis in Guangdong Province with MaxEnt Modeling. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 3785–3794. (in Chinese with English abstract) [晁碧霄, 胡文佳, 陈彬, 张典, 陈光程, 俞炜炜, 马志远, 雷光春, 王玉玉 (2020) 基于MaxEnt模型的广东省红树林潜在适生区和保护空缺分析. *生态学报*, 39, 3785–3794.]
- Chen CP, Yang MC, Fan LF, Qiu G, Liao YY, Hsieh HL (2015) Co-occurrence of juvenile horseshoe crabs *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* in an estuarine bay, southwestern China. *Aquatic Biology*, 24, 117–126.
- Cheng H, Chabot CC, Watson WH (2015) The life history cycle of *Limulus polyphemus* in the Great Bay Estuary, New Hampshire, USA. In: *Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management* (eds Carmichael RH, Botton ML, Shin PKS, Cheung SG), pp. 237–253. Springer, Cham.
- Chiu HMC, Morton B (2003) The morphological differentiation of two horseshoe crab species, *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* (Xiphosura), in Hong Kong with a regional Asian comparison. *Journal of Natural History*, 37, 2369–2382.
- Gallagher RV, Hughes L, Leishman MR, Wilson PD (2010) Predicted impact of exotic vines on an endangered ecological community under future climate change. *Biological Invasions*, 12, 4049–4063.
- Gelviz-Gelvez SM, Pavón NP, Illoldi-Rangel P, Ballesteros-Barrera C (2015) Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico. *Ecological Engineering*, 74, 302–309.
- Hong SG (2011) *Biology of Horseshoe Crabs, Tachypleus tridentatus*. Xiamen University Press, Xiamen. (in Chinese) [洪水根 (2011) 中国蜆生物学研究. 厦门大学出版社, 厦门.]
- Hsieh HL, Chen CP (2015) Current status of *Tachypleus tridentatus* in Taiwan for Red List assessment. In: *Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management* (eds Carmichael RH, Botton ML, Shin PKS, Cheung SG), pp. 383–396. Springer, Cham.
- Hu MH, Kwan BKY, Wong YJ, Cheung SG, Shin PKS (2015) Population structure and growth of juvenile horseshoe crabs *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* (Xiphosura) in Southern China. In: *Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management* (eds Carmichael RH, Botton ML, Shin PKS, Cheung SG), pp. 167–180. Springer, Cham.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2012) IUCN Red List Categories and Criteria (Version 3.1), 2nd edn. <https://portals.iucn.org/library/node/10315>. (accessed on 2022-05-24)
- Jayasinghe SL, Kumar L (2019) Modeling the climate suitability of tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) in Sri Lanka in response to current and future climate change scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 272/273, 102–117.
- Kwan BKY, Hsieh HL, Cheung SG, Shin PKS (2016) 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*, 25, 673–692.
- Laurie K, Chen CP, Cheung SG, Do V, Hsieh HL, John AB, Mohamad F, Seino S, Nishida S, Shin PKS, Yang M (2019) *Tachypleus tridentatus* (errata version published in 2019). <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-1.RLTS.T21309A149768986.en>. (accessed on 2022-05-24)
- Lee CNW, Morton B (2016) Changes in the distributions of juvenile horseshoe crabs (Arthropoda: Chelicerata) (2002–2014) related to environmental perturbations at Pak Nai and Ha Pak Nai, Deep Bay, Hong Kong SAR, China. *Marine Pollution Bulletin*, 108, 134–146.
- Li XJ, Mao FJ, Du HQ, Zhou GM, Xing LQ, Liu TY, Han N, Liu YL, Zhu DE, Zheng JL, Dong LF, Zhang M (2019) Spatiotemporal evolution and impacts of climate change on bamboo distribution in China. *Journal of Environmental Management*, 248, 109265.
- Liang GY (1985) Preliminary investigation on horseshoe crabs resources in Beibu Gulf. *Guangxi Agricultural Science*, (2), 18–20, 16. (in Chinese) [梁广耀 (1985) 北部湾蜆资源的初步调查. *广西农业科学*, (2), 18–20, 16.]
- Liao YY, Li XM (2001) Present situation of horseshoe crab resources in the sea area of China and tactics of preservation. *Resources Science*, 23(2), 53–57. (in Chinese)

- with English abstract) [廖永岩, 李晓梅 (2001) 中国海域蜆资源现状及保护策略. 资源科学, 23(2), 53–57.]
- Liao YY, Hsieh HL, Xu SQ, Zhong QP, Lei J, Liang MZ, Fang HY, Xu LL, Lin WY, Xiao XB, Chen CP, Cheung SG, Kwan BKY (2019) Wisdom of crowds reveals decline of Asian horseshoe crabs in Beibu Gulf, China. *Oryx*, 53, 222–229.
- Luo Z, Miao FZ, Hu MH, Wang YJ (2020) Research development on horseshoe crab: A 30-year bibliometric analysis. *Frontiers in Marine Science*, 7, 41.
- Mamun MD, Kim S, An KG (2018) Distribution pattern prediction of an invasive alien species largemouth bass using a maximum entropy model (MaxEnt) in the Korean Peninsula. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11, 516–524.
- Merow C, Smith MJ, Silander JA (2013) A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069.
- National Marine Data and Information Service (2019) Tide Table 2020 (Vol. 3): From Taiwan Straits to the Beibu Gulf. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [国家海洋信息中心 (2019) 2020年潮汐表(第3册): 台湾海峡至北部湾. 海洋出版社, 北京.]
- Novitsky TJ (2015) Biomedical implications for managing the *Limulus polyphemus* harvest along the northeast coast of the United States. In: *Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management* (eds Carmichael RH, Botton ML, Shin PKS, Cheung SG), pp. 483–500. Springer, Cham.
- Padalia H, Srivastava V, Kushwaha SPS (2014) Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, 22, 36–43.
- Pati S, Shahimi S, Nandi D, Sarkar T, Acharya S, Sheikh H, Acharya DK, Choudhury T, John A, Nelson B, Dash BP, Edinur HA (2021) Predicting *Tachypleus gigas* spawning distribution with climate change in northeast coast of India. *Journal of Ecological Engineering*, 22, 211–220.
- Rudkin DM, Young GA (2009) Horseshoe crabs—An ancient ancestry revealed. In: *Biology and Conservation of Horseshoe Crabs* (eds Tanacredi JT, Botton ML, Smith DR), pp. 25–44. Springer, New York.
- Seino S, Uda T, Maeda K, Yamaji K (2000) Dispersion mechanism of hatchlings of horseshoe crab *Tachypleus tridentatus* at tidal flat off the Yasaka rivermouth in Moriye Bay. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 44, 1209–1214. (in Japanese with English abstract)
- Sekiguchi K (1988) *Biology of Horseshoe Crabs*. Science House Company Limited, Tokyo.
- Sekiguchi K, Shuster CN Jr (2009) Limits on the global distribution of horseshoe crabs (Limulacea): Lessons learned from two lifetimes of observations: Asia and America. In: *Biology and Conservation of Horseshoe Crabs* (eds Tanacredi JT, Botton ML, Smith DR), pp. 5–24. Springer, New York.
- Shuster CN, Sekiguchi K (2009) Basic habitat requirements of the extant species of horseshoe crabs (Limulacea). In: *Biology and Conservation of Horseshoe Crabs* (eds Tanacredi JT, Botton ML, Smith DR), pp. 115–129. Springer, New York.
- Tang QX, Wang YS (2021) Characteristics and distribution pattern of mangrove community in the Leizhou Peninsula. *Ecological Science*, 40(5), 23–32. (in Chinese with English abstract) [唐秋霞, 王友绍 (2021) 雷州半岛红树林群落特征及其分布格局. 生态科学, 40(5), 23–32.]
- Wang DX, Su YQ, Wang J, Liang JR (2001) Influence of environmental factors on development of embryo and larvae in *Tachypleus tridentatus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 8(3), 10–14. (in Chinese with English abstract) [王德祥, 苏永全, 王军, 梁军荣 (2001) 几种因子对中国蜆胚胎和幼体发育的影响. 中国水产科学, 8(3), 10–14.]
- Wang T, Huang HH, Zhang P, Zhang SF, Wu FX, Liu QX, Liao XL, Xie B (2020) Acoustic survey of fisheries resources and spatial distribution in the Guishan wind farm area. *Journal of Fishery Sciences of China*, 27, 1496–1504. (in Chinese with English abstract) [王腾, 黄洪辉, 张鹏, 张书飞, 吴凤霞, 刘庆霞, 廖秀丽, 谢斌 (2020) 珠海桂山风电场水域渔业资源声学评估与空间分布. 中国水产科学, 27, 1496–1504.]
- Wang YH (1984) The northern distribution of *Tachypleus tridentatus* leach in China Seas. *Marine Sciences*, 8(4), 38. (in Chinese with English abstract) [王彝豪 (1984) 中国蜆在我国分布之北界. 海洋科学, 8(4), 38.]
- Waycott B (2020) Can Farming Horseshoe Crabs Help the COVID-19 Cause? <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/can-farming-horseshoe-crabs-help-the-covid-19-cause>. (accessed on 2022-05-20)
- Wei B, Wang R, Hou K, Wang X, Wu W (2018) Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 16, e00477.
- Weng ZH, Xie YJ, Xiao ZQ, Huang LM, Li J, Wang SH, Zhang YZ (2012) Distribution and resource of Chinese horseshoe crab (*Tachypleus tridentatus*) in Fujian and other coast water of China. *Chinese Journal of Zoology*, 47, 40–48. (in Chinese with English abstract) [翁朝红, 谢仰杰, 肖志群, 黄良敏, 李军, 王淑红, 张雅芝 (2012) 福建及中国其他沿岸海域中国蜆资源分布现状调查. 动物学杂志, 47, 40–48.]
- Xie XY, Wu Z, Wang CC, Fu YJ, Wang XP, Xu P, Huang X, Liao YY, Huang SL, Kwan KY (2020) Nursery habitat for Asian horseshoe crabs along the northern Beibu Gulf,

- China: Implications for conservation management under baseline gaps. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 30, 260–272.
- Yan H, Feng L, Zhao Y, Feng L, Zhu C, Qu Y, Wang H (2020) Predicting the potential distribution of an invasive species, *Erigeron canadensis* L., in China with a maximum entropy model. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00822.
- Yan MY, Li QZ, Song J, Wang ZH, Wang YJ, Hu MH (2019) 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*, 39, 3100–3109. (in Chinese with English abstract) [颜明艳, 李琼珍, 宋洁, 王振华, 王有基, 胡梦红 (2019) 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*, 39, 3100–3109.]
- Yan R, Fan JT, Xu SN, Xu YW, Sun MS, Chen ZZ (2018) Distribution characteristics of jack mackerel (*Trachurus japonicus*) habitat in the offshore waters of northern South China Sea. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 2430–2435. (in Chinese with English abstract) [晏然, 范江涛, 徐姗楠, 许友伟, 孙铭帅, 陈作志 (2018) 南海北部近海竹荚鱼栖息地分布特征. *生态学杂志*, 37, 2430–2435.]
- (责任编辑: 李新正 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 本文用于建立模型的中华鲎物种分布数据

Appendix 1 Species distribution data of *Tachypleus tridentatus* for establishing MaxEnt model
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022407-1.pdf>

附录2 世界气候数据库中的19个生物气候因子

Appendix 2 The 19 bioclimatic variables in World Climate Database
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022407-2.pdf>

附录3 MaxEnt模型中19个生物气候因子间的相关性

Appendix 3 Correlation analysis of 19 bioclimatic variables in MaxEnt model
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022407-3.pdf>

附录4 MaxEnt模型ROC曲线验证结果

Appendix 4 Receiver operating characteristic (ROC) curve verification results of MaxEnt model
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022407-4.pdf>

附录5 北部湾中国海域中华鲎幼鲎栖息地红树林分布

Appendix 5 Mangrove distribution in juvenile *Tachypleus tridentatus* habitat in the Beibu Gulf of China
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022407-5.pdf>

鲍虞园, 李银康, 林吴颖, 周志琴, 肖晓波, 颜晓勇 (2023) 中国南海北部近海鲎资源调查及北部湾潮间带中华鲎幼鲎潜在栖息地评估. 生物多样性, 31, 22407. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022407>

附录1 本文用于建立模型的中华鲎物种分布数据
Appendix 1 Species distribution data of *Tachypleus tridentatus* for establishing MaxEnt model

编号 Number	经度 Longitude	纬度 Latitude	数据来源 Data sources
1	108°21' E	21°39' N	全球生物多样性信息网络平台 Global biodiversity information facility (GBIF)
2	108°46' E	21°37' N	
3	109°16' E	19°44' N	
4	109°38' E	19°86' N	
5	110°64' E	19°59' N	
6	108°09' E	21°34' N	Xie et al, 2020
7	108°13' E	21°36' N	
8	108°33' E	21°39' N	
9	108°22' E	21°38' N	
10	108°49' E	21°37' N	
11	108°52' E	21°37' N	现场调查 Field survey
12	109°10' E	21°24' N	
13	109°12' E	21°25' N	
14	109°16' E	21°25' N	
15	109°33' E	21°31' N	
16	109°39' E	21°30' N	
17	109°40' E	21°29' N	
18	109°45' E	21°29' N	
19	109°48' E	21°21' N	
20	109°31' E	19°54' N	
21	109°16' E	19°43' N	

Xie XY, Wu Z, Wang CC, Fu YJ, Wang XP, Xu P, Huang X, Liao YY, Huang SL, Kwan KY (2020) Nursery habitat for Asian horseshoe crabs along the northern Beibu Gulf, China: Implications for conservation management under baseline gaps. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems, 30, 260–272.

鲍虞园, 李银康, 林吴颖, 周志琴, 肖晓波, 颜晓勇 (2023) 中国南海北部近海鲨鱼资源调查及北部湾潮间带中华鲎幼鲎潜在栖息地评估. 生物多样性, 31, 22407. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022407>

附录2 世界气候数据库中的19个生物气候因子
Appendix 2 The 19 bioclimatic variables in World Climate Database

变量 Variables	描述 Description	变量 Variables	描述 Description
bio 1	年平均气温 Annual mean temperature	bio 11	最冷季均温 Mean temperature of the coldest quarter
bio 2	气温日较差 Mean diurnal range	bio 12	年平均降水量 Annual precipitation
bio 3	等温性 Isothermality	bio 13	最湿月降水量 Precipitation of the wettest month
bio 4	气温季节性变化 Temperature seasonality	bio 14	最干月降水量 Precipitation of the driest month
bio 5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month	bio 15	降水季节性变化 Precipitation seasonality
bio 6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month	bio 16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter
Bio 7	气温年较差 Temperature of annual range	bio 17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter
bio 8	最湿季均温 Mean temperature of the wettest quarter	bio 18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio 9	最干季均温 Mean temperature of the driest quarter	bio 19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter
bio 10	最暖季均温 Mean temperature of the warmest quarter		

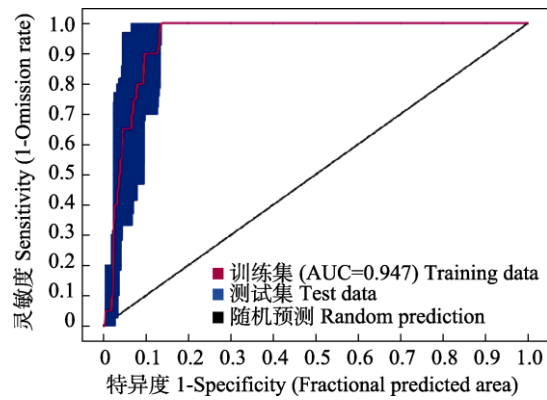
附录3 MaxEnt模型中19个生物气候因子间的相关性。生物气候因子的含义见附录2。

[illegible]

鲍虞园, 李银康, 林吴颖, 周志琴, 肖晓波, 颜晓勇 (2023) 中国南海北部近海鲎资源调查及北部湾潮间带中华鲎幼鲎潜在栖息地评估. 生物多样性, 31, 22407. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022407>

附录4 MaxEnt模型ROC曲线验证结果。AUC (area under the curve)值为ROC曲线下方与坐标轴围成的面积大小,AUC值越接近1, 表明模型的分切效果越好。

Appendix 4 Receiver operating characteristic (ROC) curve verification results of MaxEnt model. The area under the curve (AUC) is the area between the ROC curve and the horizontal axis, and the closer the value of AUC is to 1, the better the segmentation ability of the model.



鲍虞园, 李银康, 林吴颖, 周志琴, 肖晓波, 颜晓勇 (2023) 中国南海北部近海鲨鱼资源调查及北部湾潮间带中华鲎幼鲎潜在栖息地评估. 生物多样性, 31, 22407. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022407>

附录5 北部湾中国海域中华鲎幼鲎栖息地红树林分布
Appendix 5 Mangrove distribution in juvenile *Tachypleus tridentatus* habitat in the Beibu Gulf of China

省/自治区 Provincial / Autonomous region	中华鲎幼鲎适宜分布区 Suitable distribution area of juvenile <i>Tachypleus tridentatus</i>	是否有红 树林分布 Is there a mangrove distribution	参考文献 Reference
广西 Guangxi	防城港西湾 West Bay of Fangchenggang	是 Yes	李春干和代华兵, 2015
	防城港东湾 East Bay of Fangchenggang	是 Yes	
	犀牛脚(大风江) Xiniujiang (Dafengjiang)	是 Yes	李春干和代华兵, 2015
	廉州湾 Lianzhou Bay	是 Yes	廖雨霞等, 2020
	铁山港 Tieshangang	是 Yes	李春干和代华兵, 2015
	沙田(丹兜海) Shatian (Dandou Sea)	是 Yes	
广东 Guangdong	高桥 Gaoqiao	是 Yes	唐秋霞和王友绍, 2021
	遂溪 Suixi	是 Yes	
海南 Hainan	新英湾 Xinying Bay	是 Yes	吴瑞等, 2016

Li CG, Dai HB (2015) Mechanism analysis of temporal dynamics in mangrove spatial distribution in Guangxi, China: 1960–2010. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5992–6006. (in Chinese with English abstract) [李春干, 代华兵 (2015) 1960–2010年广西红树林空间分布演变机制. *生态学报*, 35, 5992–6006.]

Liao YX, Pan LH, Yan B, Shi XF (2020) Analysis of distribution characteristics and species diversity of mangrove communities in Lianzhou Bay, Guangxi. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 36, 361–370. (in Chinese with English abstract) [廖雨霞, 潘良浩, 阎冰, 史小芳 (2020) 广西廉州湾红树林群落分布特征及物种多样性分析. *广西科学院学报*, 36, 361–370.]

Tang QX, Wang YS (2021) Characteristics and distribution pattern of mangrove community in the Leizhou Peninsula. *Ecological Science*, 40(5), 23–32. (in Chinese with English abstract) [唐秋霞, 王友绍 (2021) 雷州半岛红树林群落特征及其分布格局. *生态科学*, 40(5), 23–32.]

Wu R, Chen XH, Chen DD, Tu ZG, Zhang GX, Wang DR (2016) Investigation on current status of mangrove resources in Xinying Bay of Hainan Province. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 36(8), 35–37, 44. (in Chinese with English abstract) [吴瑞, 陈晓慧, 陈丹丹, 涂志刚, 张光星, 王道儒 (2016) 海南省新英湾红树林资源现状调查分析. *热带农业科学*, 36(8), 35–37, 44.]