

东亚江豚全球适宜栖息地分布预测

陈炳耀, 杨丛汶

(南京师范大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 东亚江豚是国家二级重点保护野生动物, IUCN 红色名录濒危 EN 物种, 主要分布于中国、日本和韩国水域, 目前的关注度较少, 科学家还未对其栖息地进行过相关系统的评价。本研究基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 平台以及物种分布位点和 6 种环境变量数据, 构建了适宜栖息地的模型, 模型的训练集和测试集的 AUC 分别为 0.973 和 0.965, 表明模型的预测能力良好。模型预测适合度大于 0.5 的中高度适宜栖息地约 213 110.2 km², 主要分布在台湾海峡以北的中国沿岸海域(159 865.4 km²)、朝鲜半岛西南部海域(37 863.3 km²) 和日本的东南部海域(4 615 km²); 适合度大于 0.7 的高适宜区主要分布于浙江北部至江苏南通, 盐城到连云港附近, 山东威海以北的渤海海域, 韩国的江华湾及周边海域。通过分析因子贡献率、排列重要性和刀切法检验, 水深、盐度以及海表温度在东亚江豚栖息地选择中起到比较重要的作用。基于本研究结果, 建议对长江口及渤海湾增加现有保护区的面积或建立新的保护区, 管控区内的人类活动, 促进东亚江豚的生存和发展。

[关键词] 东亚江豚, 环境变量, 栖息地预测, 水深, 最大熵模型

[中图分类号] Q958.2 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2024)02-0076-08

The Prediction of Global Suitable Habitat Distribution for East Asian Finless Porpoise

Chen Bingyao, Yang Congwen

(School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The East Asian Finless Porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*), as a national second-class protected animal in China and an endangered species in IUCN red list, is distributed in China, Japan and Korea coastal waters. This species attracted little attention, its habitat has not been systematically evaluated so far. In this study, the distribution model was constructed based on distribution data of east Asian Finless Porpoise and downloaded environmental factors data on MaxEnt and ArcGIS platform. The $AUC_{\text{training}} = 0.973$, $AUC_{\text{test}} = 0.965$ indicated good precision of the model and reliable result. The habitat area with suitability greater than 0.5 was about 213 110.2 km², mainly distributed in coastal waters north of Taiwan strait, China (159 865.4 km²), the western and southern waters of the Korean peninsula (37 863.3 km²), and the southeastern waters of Japan (4 615 km²). The areas of high suitability (habitat suitability > 0.7) are distributed from north Zhejiang province to Nantong, from Yancheng to the vicinity of Lianyungang, Bohai Sea north Weihai, China and Ganghwa Bay and its surrounding waters in South Korea. By analyzing the contribution rate, the leading importance of factor, and the jackknife test, the bathymetry, salinity, and sea surface temperatures are important in the prediction MaxEnt model. Based on our results in habitat suitability prediction, the study suggested to increase the area or number of the natural marine protected areas appropriately, control anthropogenic activities, and improve the survival and development of east Asian Finless Porpoises.

Key words: the Narrow-ridged Finless Porpoise, habitat prediction, MaxEnt, bathymetry, environmental factors

东亚江豚(*Neophocaena asiaeorientalis sunameri*)属于鲸偶蹄目(Cetartiodactyla)、鼠海豚科(Phocoenidae)、江豚属(*Neophocaena*)。目前东亚江豚的分类地位有一定争议, 2011 年 Jefferson 等^[1]认为东亚江豚与长江江豚(*N. a. asiaeorientalis*)同属窄脊江豚(*N. asiaeorientalis*)的不同亚种, 2018 年 Zhou 等^[2]认为东亚江豚和长江江豚均为独立物种。本文参照世界自然保护联盟(IUCN)、濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)和国际捕鲸委员会(IWC)当前的相关文件, 还将东亚江豚列为一个亚种。在中国海域, 东亚江豚

主要分布于台湾海峡以北的近岸海域,国外分布于朝鲜半岛西部、南部沿海^[3]以及日本东部及南部海域^[4]。目前,东亚江豚被列为国家二级重点保护野生动物和 IUCN 濒危(EN)物种。

与长江江豚受到高度关注不同,东亚江豚很少被关注,因此对种群动态的了解比较有限。近几年,国内科学家开始应用船只调查和被动声学对黄渤海的长岛^[5]、庙岛^[6]、黄河口^[7]、东海江苏沿岸(内部资料)等水域开展了东亚江豚野外分布及密度的监测,识别了一些关键栖息地,如黄河口北部及莱州湾中部、长江口南通近岸、砵矶岛至南北隍城岛一线以西水域、砵矶岛-大钦岛西北侧和东南侧水域等,掌握了基本的种群基线信息。然而截止目前,在更大尺度上如全国或全球,均没有东亚江豚适宜栖息地分布的相关研究或者预测。

栖息地的变化是全球野生动物尤其鲸豚类濒危的主要影响因素之一^[8]。江豚近岸分布,近年来中国沿海渔业、岸线开发均有较大的发展,沿岸的水生生态环境不可避免的受到了影响与改变^[9-10],因此其栖息地与食物资源都在遭受人类活动的影响。了解东亚江豚栖息地的选择与环境因子之间的关系,预测适宜栖息地分布,将为东亚江豚的保护管理和沿海海岸建设与规划提供十分重要的参考。

物种分布模型(species distribution models, SDMs),基于提供的物种地理数据与环境变量数据,建立数学模型,计算得到物种的生境偏好,再投影到特定的时空条件中,将对大范围尺度下的生境偏好以概率形式反应出来,一般而言,即是适宜的栖息地分布^[11-13]。目前使用中的物种分布模型有距离模型(DOMAIN)、生态位因素分析模型(ENFA)、规则集遗传算法模型(GARP)、生物气候分析方法模型(BIOCLIM)、最大熵模型(MaxEnt)^[14]等。

MaxEnt(maximum entropy)模型是 SDMs 发展过程中出现的一种基于热力学第二定律的分布模型,其将物种与其生境视为一个系统,计算系统在具有最大熵时的状态参数确定物种和环境之间的稳定关系,并以此估计物种的分布^[15]。由于 MaxEnt 模型在低样本量时也有可观的预测精度^[16],且预测效果较其他模型有更好的优点^[17],自 2006 年以来,MaxEnt 模型已被广泛应用于动物栖息地的研究中^[18],如西黑冠长臂猿^[19]、九华山的黑熊^[20]、伊斯帕尼奥拉岛翼手目动物^[21]、印太江豚^[22]、中华白海豚等^[23]。

本研究将采用 MaxEnt 模型对全球范围内东亚江豚的栖息地进行预测,了解栖息地的选择与环境变量的相关性,识别核心分布区并划分不同等级优先保护的栖息地,促进东亚江豚的保护。

1 研究方法

1.1 数据来源及预处理

从文献[2-4,24-28]、以往船只调查和全球生物多样性信息网(Global biodiversity information facility, <https://www.gbif.org/>)中共收集到 191 个位点数据。由于位点数据来自不同时间、方式,获取的数据有重合、错误、密度分布不均一,甚至有空间相关性的情况,这将会导致模型运算出现偏差^[29],因此需要将位点数据筛选后才能用于后续模型。将所有位点整合并导入 ArcGIS 10.6 中,先去除重复、错误的位点,再通过 SDMtoolbox 工具中的 Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMs 工具,设置 0.5°的稀释精度以去除多余位点,减小位点数据的空间自相关,经过筛选得到 66 个可用位点(图 1)。

环境数据使用了叶绿素 a 浓度、海表温度、水深、溶解氧、盐度、初级生产力、浮游植物密度、硝酸盐浓度 8 个环境变量。其中水深数据下载自 GEBCO(General bathymetric chart of the oceans, 网址:https://www.gebco.net/data_and_product-s/gridded_bathymetry_data/)。海表温度下载自 NASA Earthdata(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)。其他数据均下载自 Bio-ORACLE(Marine data layers for ecological modelling, <https://www.bio-oracle.org/>)。将所有环境数据导入 ArcGIS 10.6 中,地理坐标系统一为 GCS-WGS-1984,将所有图层的空间分辨率转换为 0.1°×0.1°,并裁剪成统一经纬度,保存为 ASCII 格式用于后续研究。

1.2 MaxEnt 模型构建

本文应用 MaxEnt 对东亚江豚的位点数据与筛选后的环境变量来预测东亚江豚栖息地的分布,并由此来分析各环境变量对其栖息地选择的影响。

为了避免环境变量之间的相关性导致的模型过度拟合,首先需要对环境变量进行相关性分析,并筛选变量。将 8 个环境变量导入 ArcGIS 10.6 中,使用 ArcToolbox 中 Band collection statistics 工具的波段集统计对环境变量进行相关性分析,确定各变量之间的相关系数(表 1),对 Pearson 相关系数的绝对值>0.85 的

强相关变量进行筛选,去除了溶解氧和浮游植物密度,得到 6 个环境变量,即叶绿素 a 浓度、海表温度、水深、盐度、硝酸盐浓度、初级生产力.

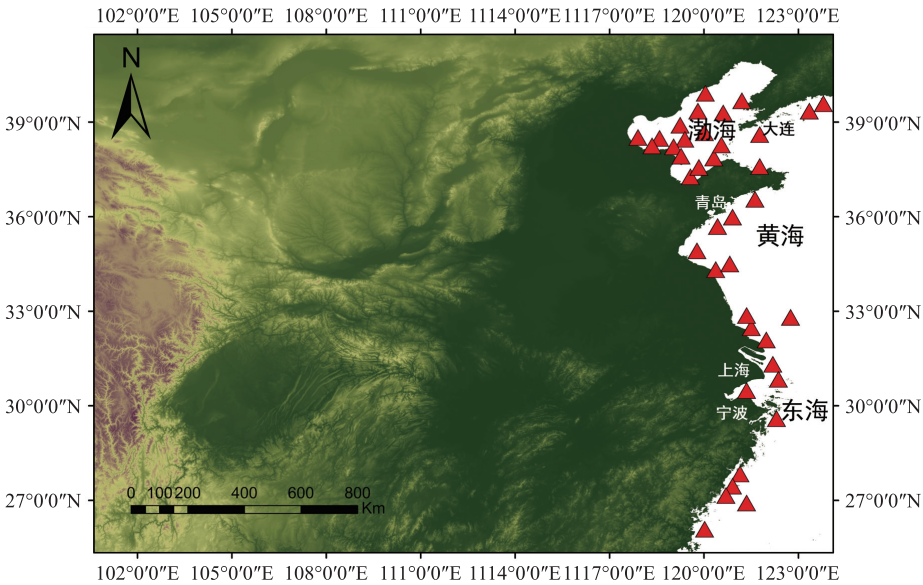


图 1 在中国北方沿岸筛选后的东亚江豚位点分布

Fig. 1 The filtered location of East Asian Finless Porpoise in coastal area of north China

表 1 8 个环境变量之间的相关系数

Table 1 The correlated coefficients between eight environmental variables

环境变量	海表温度	溶解氧	叶绿素 a 浓度	盐度	水深	浮游植物密度	初级生产力	硝酸盐浓度
海表温度	1.000							
溶解氧	-0.933 *	1.000						
叶绿素 a 浓度	-0.600	0.603	1.000					
盐度	0.508	-0.578	-0.568	1.000				
水深	-0.423	0.433	0.477	-0.531	1.000			
浮游植物密度	-0.589	0.639	0.934 *	-0.651	0.466	1.000		
初级生产力	-0.268	0.287	0.824	-0.531	0.356	0.870 *	1.000	
硝酸盐浓度	-0.544	0.632	0.510	-0.630	0.274	0.570	0.493	1.000

* :表示相关系数>0.85,强相关.

Maxent 模型有两个可修改参数对模型的构建十分重要,即 RM(regularization multiplier)与 FC(feature classes),FC 对应于模型中不同协变量的数学变换,并以此对变量间的复杂关系建模,在 MaxEnt 模型中,包括线性(Linear-L)、二次型(Quadratic-Q)、片段化(Hinge-H)、乘积型(Product-P)和阈值性(Threshold-T)这 5 种可以相互组合的特征,而 RM 则是对模型添加一个新的阈值,通过控制选择好的 FC 条件的强度来避免模型的过度拟合^[30]. 本文通过 Rstudio(4.1.3 version)中的 ENMeval 软件包来获得最佳的 RM 值与 FC 设置,加载 6 个筛选后的环境变量与东亚江豚位点数据,选择最小 AICc 赤池信息准则(akaikie information criterion)值的组合^[31-33],值越小表明拟合优度越高、所选参数组合最优.

将筛选后的东亚江豚位点数据与 6 个环境变量数据载入到 MaxEnt 模型中,绘制 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)并计算 AUC 值(area under roc curve). 通常计算一个 ROC 曲线的 AUC 值来判断一个模型的准确性,当正确预测比例即敏感性= 1,而错误预测比例即特异性= 0 时,这个理想的 ROC 曲线的 AUC 值= 1,表示这个模型完全正确. 而当敏感性:特异性= 1:1,即 AUC 值= 0.5 时,表明对于模型的评估完全基于偶然概率. 因此,一般将 AUC 值 0.5~1 划分开来,AUC<0.6 表明预测失败,0.6~0.7 较差,0.7~0.8 一般,0.8~0.9 良好,0.9~1 优秀^[34].

2 结果与讨论

2.1 模型精度评价

选择 AICc 值最小时的 FC 与 RM 值,FC 组合为 LQH,RM=1. 运行 MaxEnt 模型,得到预测模型的 AUC

值,训练集的 AUC=0.973,测试集 AUC=0.965(图2),这表明预测模型的精度较高,结果可靠。

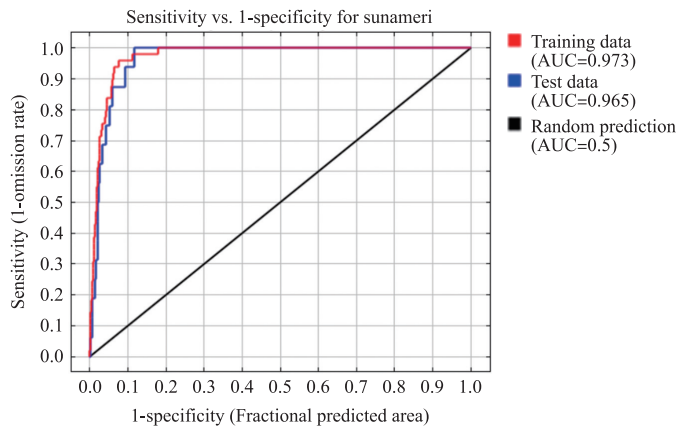


图2 MaxEnt 模型 ROC 曲线与 AUC 值

Fig. 2 The ROC curve and AVC value of MaxEnt model

2.2 MaxEnt 模型预测栖息地

东亚江豚的栖息地预测结果如图3所示,使用自然间断法将栖息地划分为高适宜区(适宜度 ≥ 0.7)、中适宜区($0.5 \leq \text{适宜度} < 0.7$)、低适宜区($0.4 \leq \text{适宜度} < 0.5$)和非适宜区(适宜度 < 0.4)。适合度大于0.7的高适宜区主要分布于浙江北部至江苏南通、江苏盐城到连云港附近、山东威海以内的渤海海域,韩国的江华湾及周边海域。适合度大于0.5的高适宜区和中适宜区面积约202 343.7 km²。在中国,主要分布于黄东海沿岸和渤海大部分海域(约159 865.4 km²)。在朝鲜半岛,高中适宜区分布于朝鲜西部海域、韩国西部、南部海域(约37 863.3 km²),而半岛东部也显示出小范围的低适宜区。在日本,江豚的高、中适宜栖息地主要在其东部海域(约4 615.0 km²),如东京沿岸、名古屋沿岸、大阪至广岛沿岸以及长崎周围的岛屿海域,北部沿岸也有部分低适宜潜在栖息地。

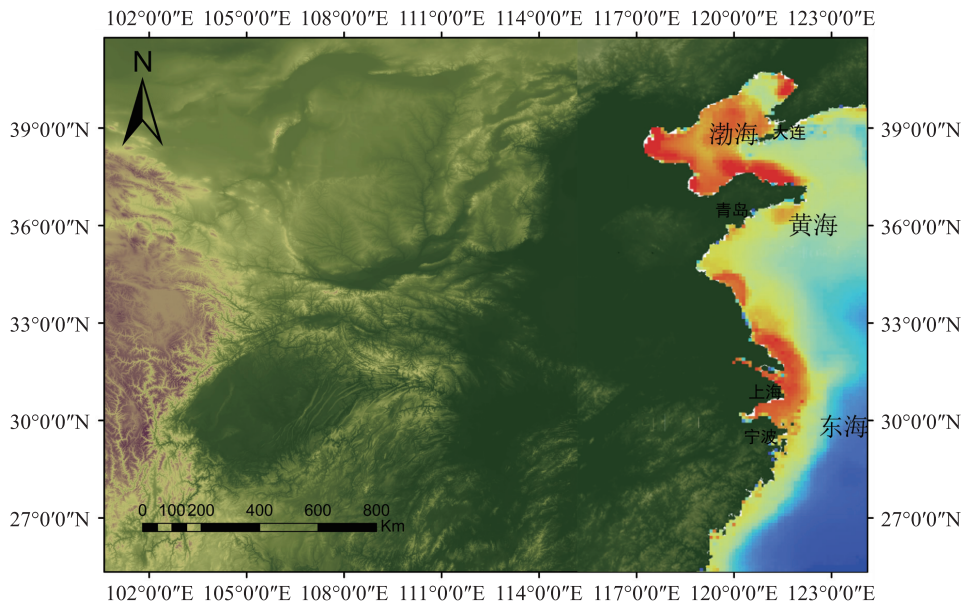


图3 MaxEnt 预测的东亚江豚在中国北方沿岸的适宜栖息地分布(红色适宜度 > 0.5)

Fig. 3 The suitable habitat distribution of East Asian Finless Porpoise in coastal area of north China predicted by MaxEnt(red ,suitability > 0.5)

2.3 环境变量贡献率与重要性

6个环境变量对东亚江豚的栖息地预测模型的构建有不同程度的贡献,从大到小为:盐度、海表温度、水深、硝酸盐浓度、初级生产力、叶绿素a浓度。前三者贡献率值较高,表明模型的建立主要参考的是江豚位点数据与附近盐度、海表温度和水深之间的关系。

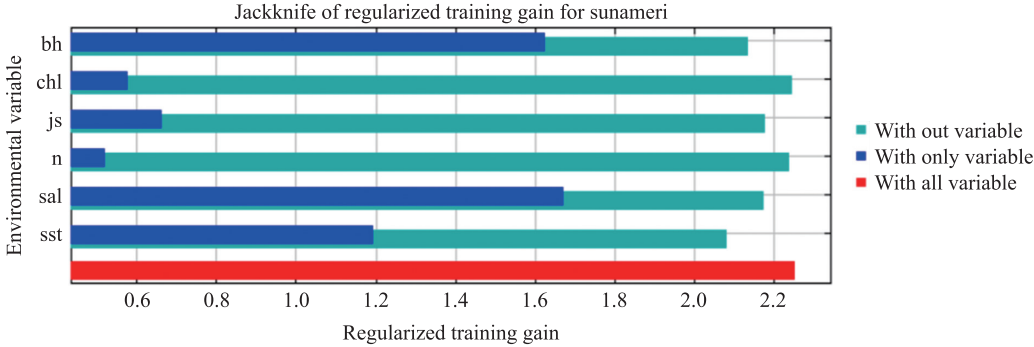
6 个环境变量对预测结果的重要性排列从大到小为:水深、海表温度、初级生产力、盐度、叶绿素 a 浓度、硝酸盐浓度(表 2)。水深的重要性 80.5%,远远超过其他变量,说明水深是对江豚栖息地适宜度影响最大的变量,但同时,其因子贡献率不高又说明了模型的构建参考水深没有盐度、海表温度多,由此可以反应出适宜水深对江豚而言是一个基本生存条件,只有在一定范围(近岸较浅),才有较好的适宜度。其他因子如硝酸盐浓度、叶绿素 a 浓度、初级生产力的重要性百分比远远低于水深,实际的贡献比较有限。

表 2 筛选后环境变量因子贡献率与排列重要性

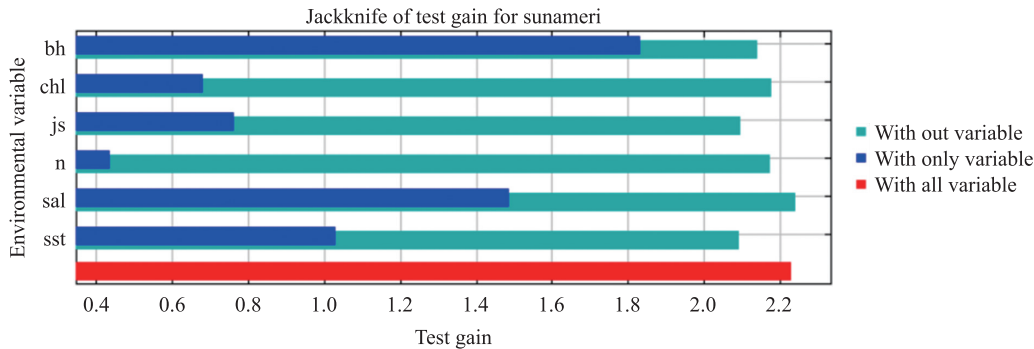
Fig. 2 The contribution rate and importance of filtered environmental variables

环境变量	对模型贡献率/%	对结果重要性/%	环境变量	对模型贡献率/%	对结果重要性/%
盐度(sal)	67.8	4.5	硝酸盐浓度(n)	5.6	1.0
海表温度(sst)	13.2	6.9	初级生产力(js)	3.7	5.8
水深(bh)	9.4	80.5	叶绿素 a 浓度(chl)	0.3	1.3

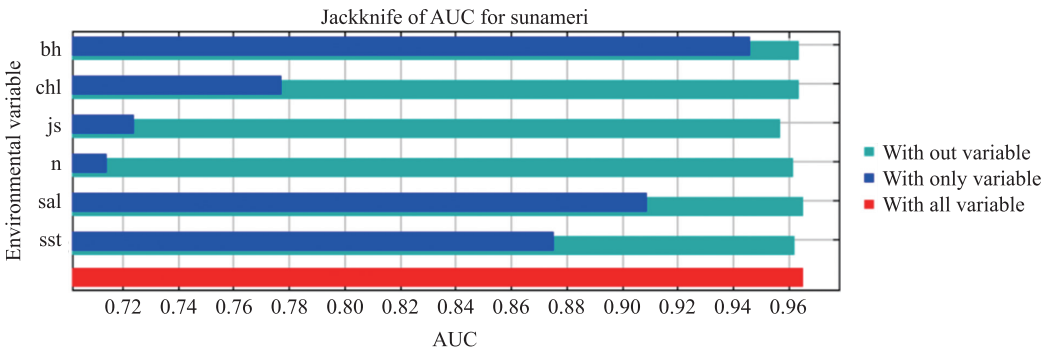
通过刀切法得到的环境变量重要性排列(图 4 a-c),即各个环境变量与东亚江豚栖息地分布的关系。从训练集的结果来看,仅此变量(With only variable)水深与盐度得分较高,表明对东亚江豚的栖息地选择有重要影响,叶绿素 a 浓度、初级生产力与硝酸盐浓度得分较低,表明这 3 个变量对东亚江豚栖息地的选择影响很小。海表温度变量的除此变量(Without variable)得分最低,意味着在去掉该变量后,模型的



(a) 训练集刀切法检验结果(X轴表明从中获得的栖息地适宜度增益)



(b) 测试集刀切法检验结果



(c) AUC值刀切法检验结果

图 4 训练集、测试集和 AUC 的刀切法检验结果

Fig. 4 The Jackknife gain of training data set, test data set and AUC

训练增益最低,所以海表温度也是东亚江豚栖息地选择的主要考虑因素。同理,测试集、训练集和 AUC 的刀切法结果在“仅此变量”的总体趋势上相同,在“除此变量”中,海表温度、基础生产力、水深的训练增益较低。同时,DGPW 发现在 AUC 值的刀切法检验中,“仅此变量”硝酸盐浓度得分最低,水深得分最高,反应出硝酸盐浓度对江豚栖息地的选择影响不大,而所有变量的“除此变量”得分都大于 0.9,表明由此构建的模型是可靠的,也侧面反应出东亚江豚的栖息地选择是基于多个环境变量的相互作用。

综合对模型贡献率、适宜栖息地预测结果的重要性的刀切法检验的结果,水深、海表温度和盐度是影响江豚栖息地选择的主导因子。

2.4 讨论

2.4.1 东亚江豚适宜栖息地分布

对于 MaxEnt 模型的预测结果,发现在贡献率、重要性、刀切法检验中,水深、海表温度、盐度这 3 个环境变量都表现出对江豚栖息地选择的重要影响,证明这 3 个因子就是其栖息地选择的主导因子。江豚近岸分布的特点与水深相关,江豚主要生活在近岸水域,这可能与江豚的食性有关,江豚体型较小,以中上层鱼类为食,水深较浅有利于其捕食。盐度也是影响江豚栖息地选择的一个重要因子,东亚江豚在长江口和渤海莱州湾,是长江和黄河与大海交汇处,这两处水域的盐度稍低,与远岸海洋水域的盐度有一定差异,而远岸很少有分布,这在响应曲线中得到印证,其盐度越高,适宜度越低,因此推测盐度是东亚江豚的近岸分布的一部分因素。海表温度的影响可能体现在不同季节的差异上,海表温度在不同季节相应变化,在因子分析中知道东亚江豚对温度变化比较敏感,其是否会随着温度的季节性变化而改变活动区域还有待更深的研究。

栖息地预测结果,绝大多数区域与现生的东亚江豚分布范围相吻合。但是,未见东亚江豚出现的报道的朝鲜半岛东部和北部沿岸却显示出小范围的低适宜区,这将有待于实地考察。

预测表明高适宜栖息地呈块状分布,浙江北部至江苏南通,江苏盐城到连云港附近,山东威海以内的渤海海域,韩国的江华湾及周边海域,它们之间有一定的间隔。长期的间隔是否会导致不同地理种群的分化?通过韩国、日本、中国水域的东亚江豚线粒体控制区的基因序列对比^[35],发现不同地区的东亚江豚的之间有明显的遗传分化。在日本的 5 个水域,Yoshida 等^[36]通过分子生物学方法对比分析了日本 5 个水域的江豚线粒体 DNA 序列,证明了这 5 个地区并非同一个种群。在我国,通过对东亚江豚渤海种群、长江口种群、长江种群(长江江豚亚种或独立种)、南海北部种群、台湾种群及珠江口种群(印太江豚 *Neophocaena phocaenoides*)的线粒体部分控制区序列分析^[37]发现,6 个地理种群间的 F_{ST} 值范围为 $-0.020\ 32 \sim 0.702\ 77$ 。AMOVA 分析结果表明,长江口种群、长江种群较近,南海北部种群、台湾种群关系较近,而与渤海种群和珠江口种群较远, F_{CT} 值最大(0.423 59),说明地理位置相应体现出我国水域江豚种群的亲缘关系远近和遗传格局。

2.4.2 人类生产活动的影响与建议

东亚江豚的高适宜分布地区紧邻上海、天津以及首尔等大型城市,沿海海岸的工商业的开发程度必然会对东亚江豚的栖息地产生破坏,特别是长江口,是长江联通大海的主要通道,渔业、运输业极其发达,同样的情况在江华湾与渤海湾也会不同程度出现。此外,自台湾海峡以北的中国沿海海岸都显示为适宜栖息地,这里有舟山渔场和黄渤海湾渔场,渔业捕捞发达,与东亚江豚产生食物竞争,降低栖息地质量,偶尔误捕,这些极大地影响了东亚江豚的栖息地空间。

目前在东亚江豚的高适宜区内,长江口有中华鲟自然保护区^[38],渤海湾有天津古海岸与湿地自然保护区^[39],但这二者都不是专为东亚江豚设立,特别是渤海湾的天津古海岸与湿地自然保护区,其位于碧海湾西岸,主要为保护贝壳堤与牡蛎礁古海岸遗址和湿地生态系统及各种动植物,包含东亚江豚的栖息地面积较小。国内还没有东亚江豚的自然保护区,因此,建议以这两个高适宜水域的密集分布区为中心,建立新的保护区或扩大已有各类保护面积,增加东亚江豚为保护对象,尽可能地维持原始生态。

目前公众对东亚江豚的了解严重不足,需要加强对东亚江豚的宣传,提高公众的保护意识,同时建立健全的巡查制度,建立在保护区外的保护制度,如在东亚江豚经常活动水域范围内禁渔、调整货轮航道等。建立健全监督检查的制度与方式,严防对东亚江豚的非法捕杀活动。

3 结论

本研究揭示了盐度、水深、海表温度为 MaxEnt 模型构建的主导因子,且水深、海表温度、盐度的微小变化对栖息地适宜度的影响波动较大。中、高适宜区面积约为 213 110.2 km²,中国海域适宜栖息地占比 73%,主要分布在台湾海峡以北的中国沿海、韩国的西部及南部沿海、日本的东南部沿海。目前中国尚未建立东亚江豚自然保护区,沿岸高适生区分布着许多港口与渔场,对东亚江豚的栖息地造成较大影响,建议建立东亚江豚的栖息地自然保护区,完善区内区外保护方法,合理规划沿岸的水域发展利用,以利于物种的保护。

[参考文献]

- [1] JEFFERSON T A, WANG J Y. Revision of the taxonomy of Finless Porpoises (genus *Neophocaena*): The existence of two species[J]. *Journal of marine animals and their ecology*, 2011, 4(1): 3-16.
- [2] ZHOU X M, GUANG X M, SUN D. Population genomics of Finless Porpoises reveal an incipient cetacean species adapted to freshwater[J]. *Nature communications*, 2018(9): 1276.
- [3] YOUNG R L, YONG R A, KYUM J P, et al. Age and reproduction of the Finless Porpoises, *Neophocaena asiaeorientalis*, in the Yellow Sea, Korea[J]. *Animal cells and systems*, 2013, 17(5): 366-373.
- [4] SHIRAKIHARA K, NAKAHARA F, SHINOHARA M, et al. Abundance decline in the narrow-ridged Finless Porpoise population off the Pacific Coast of Eastern Japan[J]. *Population ecology*, 2019, 61(03): 325-332.
- [5] 李永涛, 于国旭, 程兆龙, 等. 长岛海域东亚江豚种群密度和分布的初步研究[J]. *动物学杂志*, 2023, 58(5): 658-668.
- [6] 程兆龙, 于国旭, 李永涛, 等. 庙岛群岛海域夏季东亚江豚分布与集群特征[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(4): 583-588.
- [7] 程兆龙, 于国旭, 李永涛, 等. 黄河口及其邻近水域春季东亚江豚分布规律[J]. *海洋与湖沼*, 2022(2): 53.
- [8] CHEN C W, JEFFERSON T A, CHEN B Y, et al. Geographic range size, water temperature, and extrinsic threats predict the extinction risk in global cetaceans[J]. *Global change biology*, 2022, 28: 6541-6555.
- [9] 杨莹, 王秋莲, 夏妍梦, 等. 我国海洋生态环境状况及保护对策研究[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集(三). 天津: 中国环境科学学会, 2021.
- [10] 崔野. 加快治理跨境海洋环境问题[J]. *环境教育*, 2022(1): 33-35.
- [11] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [12] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [13] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [14] 应佳莉. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化对中国特有茛苕潜在分布的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学, 2021.
- [15] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- [16] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J]. *林业科学*, 2012, 48(1): 53-59.
- [17] 杨启杰. 基于 MaxEnt 模型的孑遗植物桫欏在不同时期的潜在适生区研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [18] 李响, 张成福, 贺帅, 等. MaxEnt 模型综合应用研究进展分析[J]. *绿色科技*, 2020(14): 14-17.
- [19] 张琳婧. 西黑冠长臂猿栖息地多场景空间模拟预测与保护规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [20] 郑伟成, 陈智强, 郑子洪, 等. 浙江九龙山国家级自然保护区黑熊活动监测及其华东地区潜在分布区预测[J]. *动物学杂志*, 2021, 56(4): 509-521.
- [21] MIGUEL S, RICARDO T, ARMANDO R D, et al. Spatial distribution of bat species on hispaniola island, the greater antilles[J]. *Acta chiropterologica*, 2022, 23(2): 443-454.
- [22] 孟祥垚, 汪华志, 周煜, 等. 北部湾印太江豚密度估算及适宜栖息地预测[J]. *兽类学报*, 2022, 42(4): 362-369.
- [23] CHEN B Y, HONG Z, HAO X, et al. Environmental models for predicting habitat of the Indo-Pacific humpback dolphins in Fujian, China[J]. *Aquatic conservation marine and freshwater ecosystems*, 2020, 30: 787-793.
- [24] 田甲申, 鹿志创, 王震, 等. 辽宁海域东亚江豚的年龄鉴定与生长规律[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2471-2476.
- [25] PARK, KYUM J, SOHN H, et al. A new abundance estimate for the Finless Porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* on the West Coast of Korea: An indication of population decline[J]. *Fisheries and aquatic sciences*, 2015, 18(4): 411-416.
- [26] 张枫, 张保卫, 唐文乔, 等. 长江口江豚的遗传多样性现状及种群动态[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(5): 656-665.

- [27] 左涛,孙坚强,时永强,等. 渤海江豚种群现状初探[J]. 兽类学报,2018,38(6):551-561.
- [28] 中国科学院动物所. 中国动物志[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [29] PHILLIPS S J, DUDIK M, ELITH J, et al. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data[J]. Ecological applications, 2009, 19(1):181-197.
- [30] MORALES N S, FERNÁNDEZ I C, BACA-GONZÁLEZ V. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review[J]. Peer journal, 2017, 5:e3093.
- [31] 张子双. 基于特征选择的肝癌生物标志物筛选方法[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [32] 柴龙凯. 基于数据(序列模式)挖掘的医院物资使用量预测模型研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2018.
- [33] 张艳. 基于信息准则的模型选择方法的研究及应用[D]. 济南:山东理工大学, 2017.
- [34] NAHM F S. Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians [J]. Korean journal of anesthesiol, 2022, 75(1):25-36.
- [35] LEE S M, PARK K J, KIM B Y, et al. Genetic diversity and population demography of narrow-ridged Finless Porpoises from South Korea on the basis of mitochondrial DNA variation: Implications for its conservation in East Asia[J]. Marine mammal science, 2019, 35(2):574-594.
- [36] YOSHIDA H, YOSHIOKA M, SHIRAKIHARA M, et al. Population structure of Finless Porpoises (*Neophocaena phocaenoides*) in coastal waters of Japan based on mitochondrial DNA sequences[J]. Journal of mammalogy, 2001, 82(1):123-130.
- [37] 程亚欣. 基于线粒体控制区和细胞色素 B 基因的江豚种群遗传多样性和遗传结构分析[D]. 上海:上海海洋大学, 2016.
- [38] 潘邵媛,王学昉,田思泉,等. 长江口中华鲟保护区海洋环境监测浮标站点的优化设计[J]. 海洋学报, 2021, 43(4):55-64.
- [39] 蔡为民,张磊,刘沁萍,等. 天津古海岸与湿地国家级自然保护区生态补偿标准及关键技术研究[J]. 湿地科学, 2016, 14(2):137-144.

[责任编辑:黄 敏]