

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19245

基于最大熵模型模拟西北太平洋柔鱼潜在栖息地分布

龚彩霞¹, 陈新军^{1, 2, 3, 4, 5}, 高峰^{1, 2, 3, 4}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
3. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 上海海洋大学大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306

摘要: 为模拟西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)潜在栖息地分布, 分析柔鱼渔场时空变化和环境变化规律。利用 2011—2015 年中国鱿钓船在西北太平洋海域获得的柔鱼渔业生产数据, 结合该海域海洋环境遥感数据, 包括海表面温度(sea surface temperature, SST)、叶绿素 a (Chlorophyll-a, Chl a)浓度、净初级生产力(net primary productivity, NPP)、混合层深度(mixed layer depth, MLD)及海平面异常(sea level anomaly, SLA), 采用最大熵模型对柔鱼潜在栖息地进行模拟, 并利用 ArcGIS 软件对栖息地适宜性进行评价。结果显示, 7 月柔鱼最适宜区主要分布在 39°N~43°N, 150°E~163°E。8 月柔鱼最适宜区向东移动, 较适宜区向北扩张至 46°N。9 月柔鱼最适宜区和较适宜区面积向西缩小, 主要集中在 40°N~46°N, 150°E~160°E。10 月最适宜区和较适宜区向南移动, 主要分布在 40°N~45°N, 150°E~165°E。各月影响柔鱼潜在分布的重要环境因子有所差异, 7—8 月为 SST, 9 月为 MLD 和 SST, 10 月为 NPP 和 SST。研究表明西北太平洋柔鱼分布受海洋环境因子的影响, 时空变化明显, 最大熵模型对西北太平洋柔鱼潜在栖息地分布的模拟精度非常高。

关键词: 柔鱼; 最大熵模型; 潜在分布; 海洋环境

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)03-0336-10

海洋生态系统中, 受全球气候变化和局部海洋环境改变的驱动, 海洋物种的时空分布、丰度及资源量等均受到不同程度的影响。寻找海洋物种与海洋环境之间的关系, 并建立有效的物种分布预报模式, 有助于渔业资源开发和可持续利用, 同时, 可为未来气候变化背景下资源变动研究提供理论基础, 从而对渔业资源进行有效管理和后续评估, 提高应对气候变化的能力。

柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是西北太平洋渔业重要的经济种类之一, 主要被中国、日本等国家捕获和利用。1974 年日本鱿钓调查船首先对该资源进行开发和利用, 1993 年中国利用鱿钓船

对西北太平洋柔鱼进行了调查, 并于次年开始了小规模的生产, 之后作业规模不断扩大, 每年的渔获量在 3 万~11 万 t 不等。柔鱼为短生命周期种类, 通常寿命不超过 1 年^[1]。国内外学者研究表明柔鱼资源年间和季节性波动与海洋环境变动息息相关, 如 Chen 等^[2]采用多元线性回归方程建立了柔鱼资源丰度指数与环境变量的关系, 认为拉尼娜事件导致柔鱼资源补充量减少, 同时使渔场北移; 厄尔尼诺事件有利于柔鱼资源补充, 同时使渔场南移。Igarashi 等^[3]通过回归分析方法分析柔鱼丰度变化, 认为柔鱼资源丰度年际变化与太平洋年代际涛动高度相关。Chen 等^[4]采用线性回归

收稿日期: 2019-08-21; 修订日期: 2019-10-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC41876141).

作者简介: 龚彩霞(1986-), 女, 博士研究生, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: cxgong@shou.edu.cn

通信作者: 高峰, 讲师. E-mail: gaofeng@shou.edu.cn

模型分析了柔鱼渔场重心的时空分布与黑潮和海洋环境变动之间的关系,认为黑潮的强度和路径变动导致海表面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)的变化,从而使柔鱼栖息地南北移动。Chen 等^[5]研究认为柔鱼资源丰度与海洋表面温度(sea surface temperature, SST)与海表面盐度(sea surface salinity, SSS)的有关,进一步采用主成分分析方法表明 SST 比 SSS 更能有效预测柔鱼资源丰度的时空变化。Ichii 等^[6]采用多元线性回归分析方法认为柔鱼育肥场的叶绿素锋所在位置能够对柔鱼资源丰度作出较好的预测。以往研究中的渔场渔情分析大多都是基于渔业资源丰度数据(如单位捕捞努力量渔获量或作业船数)进行统计分析并建立预测模式^[7-9],使研究的结果局限在渔场区的时空范围内,而最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型可以从局部的物种实际出现点的经纬度数据和对应的环境变量,结合计算机随机生成的“不出现点”数据,模拟整个研究区域目标物种的生境适宜性^[10]。因此,该研究在以往的研究基础上选取多个影响柔鱼分布的海洋环境因子,并采用 MaxEnt 模型对柔鱼潜在分布进行模拟,并通过模型中输出结果对柔鱼潜在栖息地进行评价,进一步分析影响柔鱼潜在分布的重要环境因子,为柔鱼资源的可持续利用和科学管理提供参考。

1 材料和方法

1.1 渔业数据

柔鱼渔业生产数据来源于上海海洋大学鱿钓技术组,时间为 2011—2015 年 7—10 月,空间分布范围为 35°N~50°N, 150°E~175°E,为西北太平洋传统作业渔场,我国在该海域内每年的柔鱼产量占北太平洋柔鱼总产量的 80%以上。渔业统计数据包括作业船名、作业日期(年、月和日)、作业位置(经度和纬度)、日产量(单位: t)等。该研究利用 2011—2015 年 7—10 月每日渔船作业的经纬度数据,7—10 月渔业样本数量分别为 10155、14082、12825 和 10834,并将该数据按月输入最大熵模型中进行建模。

1.2 海洋环境数据

以往研究表明^[11-12],西北太平洋柔鱼资源时空分布受海洋环境因子的影响,包括 SST、Chl a 浓度、海洋表面高度(sea surface height, SSH)、SSS、净初级生产力(net primary productivity, NPP)、混合层深度(mixed layer depth, MLD)、涡流动能(eddy kinetic energy, EKE)等,因此,该研究基于以往的研究和可获得的数据选取 SST、Chl a 浓度、海平面异常(sea level anomaly, SLA)、MLD 以及 NPP 五个环境因子进行综合分析,其中 SST、Chl a 浓度数据来源与 NOAA CoastWatch ERDDAP 数据库(<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>), SLA 数据来源于法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>), MLD 数据来源于美国夏威夷大学国际太平洋研究中心(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/las/v6/dataset?catitem=0>), NPP 数据来源于美国俄勒冈州立大学网站(<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>)。所有环境数据时间为 2011—2015 年 7—10 月,时间分辨率为月,空间范围为 35°N~50°N, 140°E~180°E,空间分辨率为 0.5°×0.5°。

1.3 MaxEnt 模型应用

MaxEnt 模型在 2004 年开始应用于物种分布模型(species distribution model, SDM),目前已被广泛应用于物种分布研究^[12-15]。模型运算使用最新的软件 MAXENT3.4.1(http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/),该软件输入层(Samples)中的柔鱼分布数据为捕捞当月各渔船每日渔获所在经纬度(即 2011—2015 年 7—10 月各月渔船每日渔获所在经纬度数据,按月以 CSV 格式进行存储,包括物种名、经度、纬度,去除渔获为 0 的数据记录)。环境图层(Environmental layers)为捕捞当月 SST、MLD、NPP、SLA 及 Chl a 浓度数据(即 2011—2015 年 7—10 月各月环境变量取平均值后输入对应捕捞月份的环境图层,且以 ASCII 格式进行存储)。在设置中随机将柔鱼样本中 70%的出现点设置为训练集,剩余的 30%的出现点作为测试集,重复运算设定为 10 次,以消除随机性,并去除重复数,结果以 Logistic 格式输出,其余选项默认模型的自动设置。

利用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)下的面积(area under curve, AUC 值)大小来评价各月模型的精度^[16]。将不同月份的 MaxEnt 模型模拟的柔鱼出现点概率结果分别导入 ArcGIS 中进行可视化分析,将模拟的概率值定义为栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI),并进行人工划分,当 $HSI > 0.6$ 时,该海域被认作柔鱼最适宜区,当 $0.4 < HSI \leq 0.6$,该海域被认作柔鱼较适宜区,当 $0.2 < HSI \leq 0.4$,该海域被认作柔鱼一般适宜区,当 $0 < HSI \leq 0.2$ 时,该海域被认作柔鱼不适宜区。最后采用模

型中的刀切法(Jackknife)模块对影响柔鱼潜在分布的重要环境因子进行分析^[16]。

2 结果与分析

2.1 柔鱼渔场时空分布

7—10 月柔鱼渔场经纬度分布存在季节性差异。渔场经度分布方面,7—8 月柔鱼渔场广泛分布在 $150^{\circ}\text{E} \sim 175^{\circ}\text{E}$ 之间,集中分布在 $150^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 之间,9—10 月柔鱼渔场主要分布在 $150^{\circ}\text{E} \sim 162^{\circ}\text{E}$ 之间, 162°E 以东地区几乎没有渔场作业(图 1)。渔场纬度分布方面,7 月柔鱼渔场

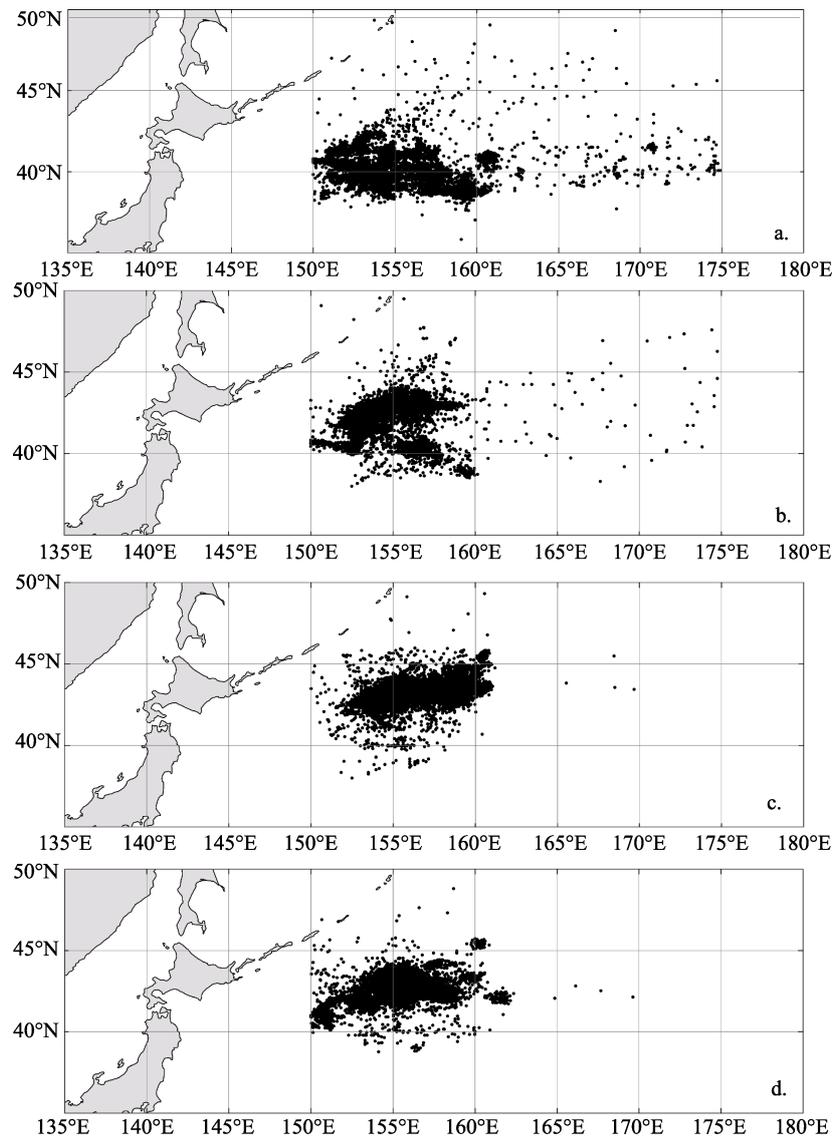


图 1 2011—2015 年 7—10 月中国鱿钓船各月柔鱼渔场作业分布
a. 7 月; b. 8 月; c. 9 月; d. 10 月。

Fig.1 Monthly distribution of squid fishing ground for the Chinese squid-jigging vessels from July to October during 2011-2015
a. July; b. August; c. September; d. October.

主要出现在 37°N~44°N 之间, 8 月柔鱼渔场向北移动, 主要出现在 40°N~44°N 之间, 9 月柔鱼渔场向东北移动, 柔鱼渔场主要出现在 42°N~46°N, 10 月向南移动, 柔鱼渔场主要出现在 40°N~44°N 之间(图 1)。

2.2 柔鱼渔场环境因子变化规律

2011—2015 年西北太平洋柔鱼渔场各环境因子月变化明显(图 2)。7—10 月 Chl a 浓度和 SLA

呈逐月递增趋势。7 月和 8 月捕捞月份早期时 SST 较高, 在随后月份中递减。7—10 月 NPP 呈波动趋势, 7 月和 9 月 NPP 几乎相等, 8 月和 10 月 NPP 几乎相等, 且 7 月和 9 月 NPP 明显高于 8 月和 10 月 NPP。7 月和 8 月捕捞月份早期时 MLD 偏低, 在随后月份中呈上升趋势, 且上升趋势明显, 9 月 MLD 相比于 8 月 MLD 上升了 50%, 10 月 MLD 相比于 8 月 MLD 上升了 160%以上。

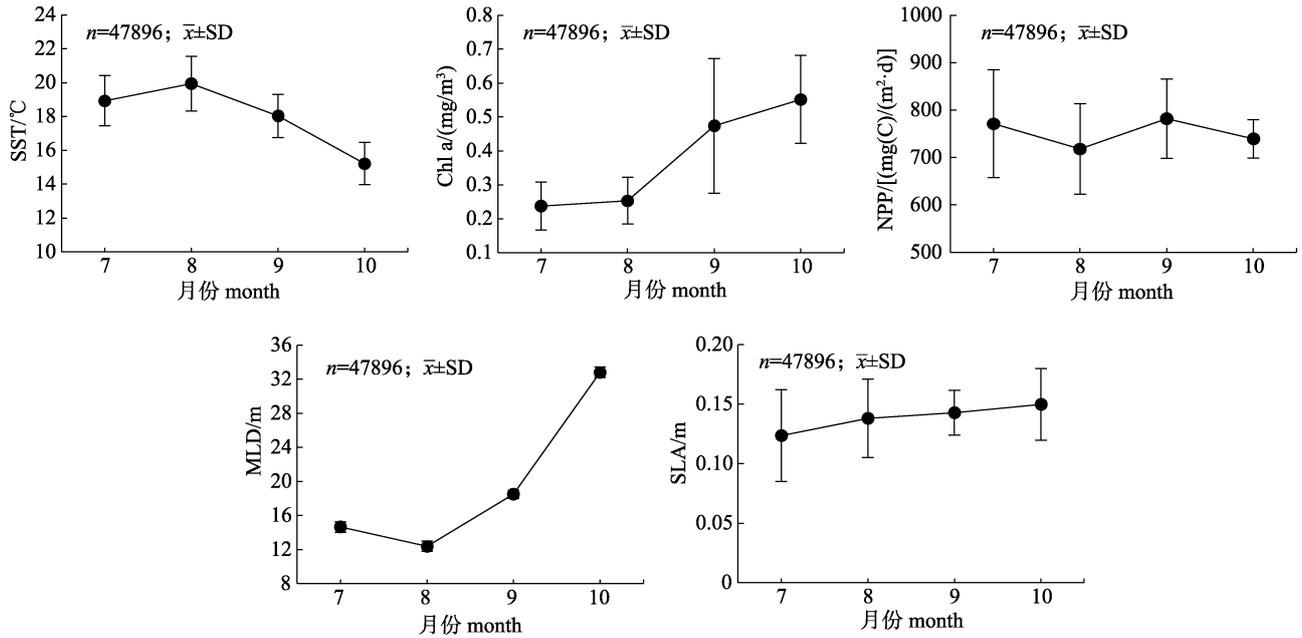


图 2 2011—2015 年 7—10 月柔鱼渔场海洋环境变化(包括海表面温度、叶绿素 a 浓度、净初级生产力、混合层深度及海平面异常)

Fig. 2 Monthly oceanographic environmental changes for squid fishing ground from July to October during 2011-2015, including sea surface temperature (SST), chlorophyll-a (Chl a) concentration, net primary productivity (NPP), mixed layer depth (MLD), and sea level anomaly (SLA)

2.3 最大熵模型结果精度检验

ROC 曲线分析法是通过计算曲线下方面积, 即 AUC 值来判断模型模拟的精度。AUC 值大小范围为 0.5~1, AUC 值数值越大, 表明模拟的精度越高, AUC>0.9 时, 表明模拟精度非常高。2011—2015 年各月柔鱼最大熵模型的测试集 AUC 值均大于 0.9 (表 1), 表明 MaxEnt 模型对西北太平洋柔鱼潜在分布的模拟效果非常好。

2.4 柔鱼潜在栖息地分布特征

利用 MaxEnt 模型对西北太平洋柔鱼各月潜在分布的模拟, 结果显示, 2011—2015 年 7—10 月各月柔鱼潜在栖息地分布变化较大(图 3)。7 月

柔鱼最适宜区主要分布在 39°N~43°N, 150°E~163°E 之间, 最适宜区和较适宜区广泛分布在 38°N~44°N, 150°E~180°E 之间, 呈长条状分布。

表 1 2011—2015 年 7—10 月柔鱼 MaxEnt 模型统计结果
Tab. 1 Summary statistics derived from monthly models for *Ommastrephes bartramii* from July to October during 2011-2015

		n=10; $\bar{x} \pm SD$
月份 month	AUC 值 AUC value	
7 月 July	0.954±0.004	
8 月 August	0.944±0.003	
9 月 September	0.969±0.003	
10 月 October	0.970±0.003	

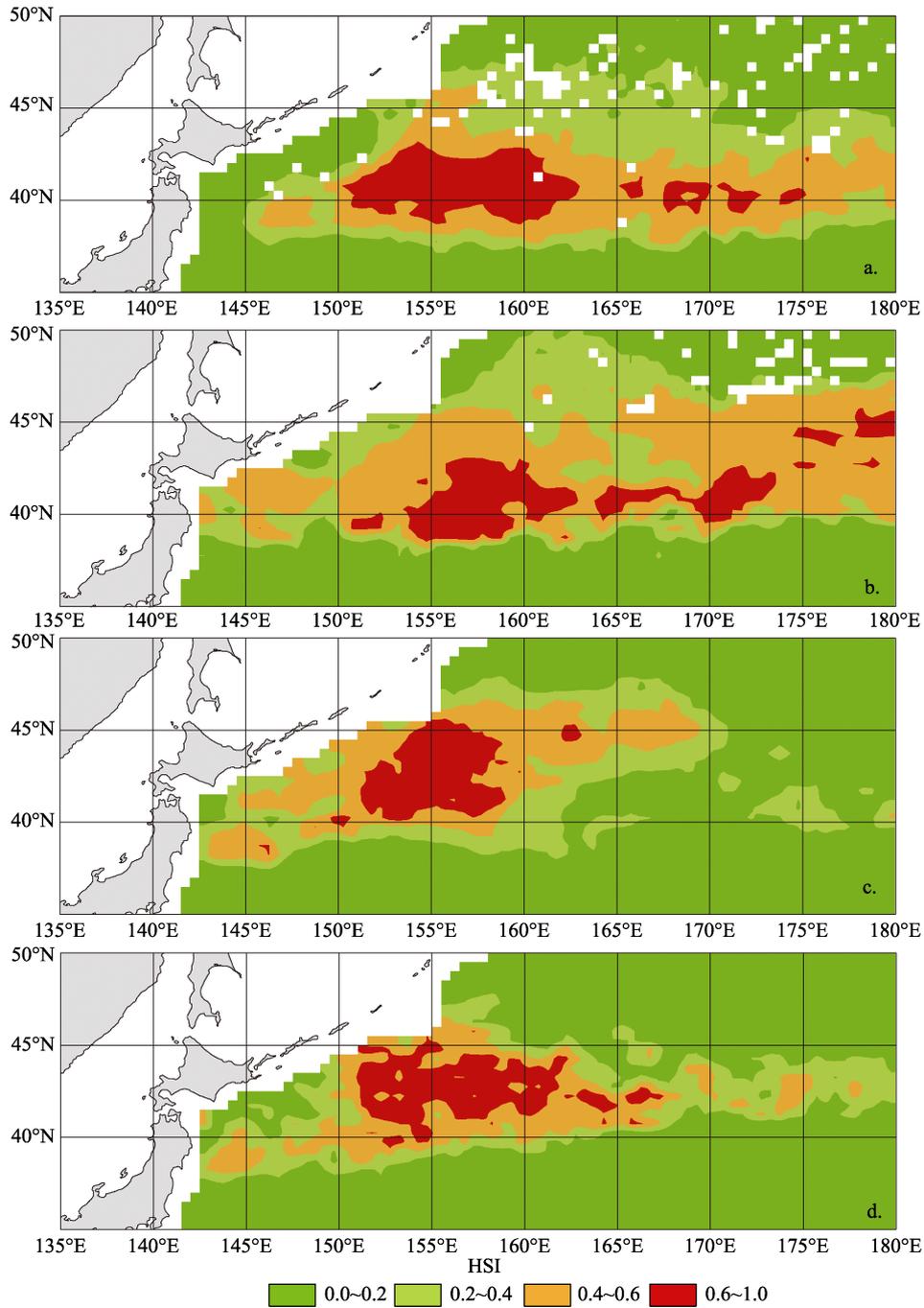


图 3 2011—2015 年 7—10 月柔鱼潜在栖息地适宜性指数分布图
a. 7 月; b. 8 月; c. 9 月; d. 10 月.

Fig. 3 The potential habitat suitability index (HSI) distribution of *Ommastrephes bartramii* from July to October during 2011-2015
a. July; b. August; c. September; d. October.

8 月柔鱼最适宜区向东移动, 较适宜区向北扩张至 46°N。9 月柔鱼最适宜区和较适宜区面积向西急剧缩小, 主要集中在 40°N~46°N, 150°E~160°E 之间。10 月最适宜区和较适宜区向南移动, 主要分布在 40°N~45°N, 150°E~165°E 之间。

2.5 影响柔鱼分布的重要环境因子

2011—2015 年各月柔鱼潜在分布的 MaxEnt 模型中环境变量重要性刀切法结果显示(图 4), 7 月和 8 月, 在仅包含单个因子获得的增益中, 仅包含 SST 时, 模型能获得最大增益, 不含 SST 时, 模型增益

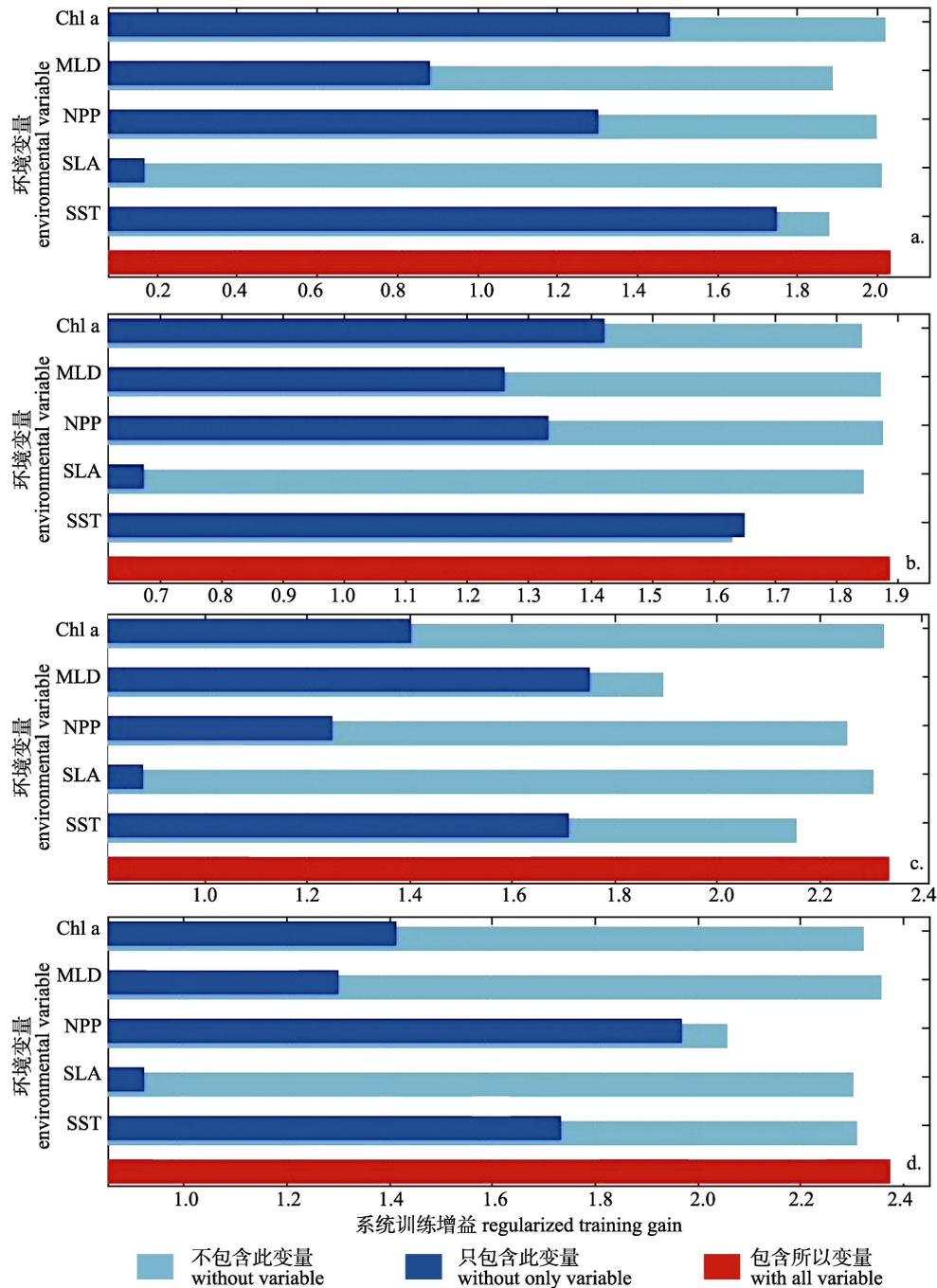


图 4 2011—2015 年 7—10 月柔鱼环境变量重要性刀切法结果
a. 7 月; b. 8 月; c. 9 月; d. 10 月.

Fig. 4 The results of the jackknife test of variable importance for *Ommastrephes bartramii* from July to October during 2011-2015
a. July; b. August; c. September; d. October.

减少最大, 说明 SST 是影响 7 月和 8 月柔鱼潜在分布中的重要环境因子。9 月, 当仅包含 MLD 时模型增益最大, 不包含 MLD 时模型增益减少最多, 其次是 SST, 说明 MLD 和 SST 是影响 9 月柔鱼潜在分布中的重要环境因子。在 10 月, 当仅包含 NPP 时模型

增益最大, 不包含 NPP 时模型增益减少最多, 其次是 SST, 说明 NPP 和 SST 是影响 10 月柔鱼潜在分布中的重要环境因子。在所有的月份中, 相比于其他环境变量, 当仅包含 SLA 时, 模型增益最小, 说明 SLA 在各月模型模拟中对柔鱼潜在分布的影响最小。

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型应用及其优势

采用 MaxEnt 模型模拟西北太平洋柔鱼潜在栖息地分布精度非常高。基于模型模拟或预测精度, MaxEnt 模型通常优于其他方法^[17], 同时 MaxEnt 软件易于使用, 使 MaxEnt 软件包成为物种分布和环境生态位建模最广泛的工具之一。以往的研究中, 渔情分析通常使用基于渔业统计数据^[7-9], 使研究局限于一定的时空范围内, 而 MaxEnt 模型适应于分布数据有限的物种, 只需获取物种出现点的位置信息和环境背景数据, 从而将研究者从判断不出现位点可靠性的困扰中解脱出来^[18]。如该研究中尽管渔业数据采样范围 35°N~50°N, 150°E~175°E, 而当环境背景数据范围有所扩大(35°N~50°N, 140°E~180°E)时, 同样可以模拟渔业采样范围以外的分布概率, 从研究结果可以看出(图 3), 在 140°E~150°E 以及 175°E~180°E 之间, 存在柔鱼最适宜区和较适宜区, 说明柔鱼可能分布于传统作业区域以外的海域, 这也验证了商业性渔业集中作业的特点, 导致在作业海域以外尽管可能有柔鱼存在但并未出现渔船作业的现象。

3.2 影响柔鱼分布的重要环境因子

2011—2015 年 7—10 月 MaxEnt 模型输出的刀切图结果显示(图 4), SST 是各月影响柔鱼潜在分布的重要环境因子, 这与以往的研究结果类似^[5, 19]。SST 通常可作为西北太平洋海域寻找柔鱼渔场的指标^[20], 陈新军等^[21]利用 SST 和海表温水平梯度(the gradient of SST, GSST)建立 HSI 模型能够较好的预测柔鱼中心渔场, 因此 SST 不仅是模拟柔鱼潜在分布的重要环境因子, 同时也是寻找渔场以及预报中心渔场的重要指标。该研究结果同时表明, 各月影响柔鱼潜在分布的重要环境因子有所差异(图 4), 如在 9 月, MLD 是 MaxEnt 模型模拟柔鱼潜在分布的重要环境变量(图 4), 从图 2 可知, 9 月柔鱼渔场平均 MLD 为(18.5±0.5) m, 以往的研究表明, 柔鱼倾向于出现在 MLD 较浅的海域, 最适宜 MLD 范围为 15.5~18.5 m^[22], 因此, 9 月适宜的 MLD 可能为柔鱼营造了适宜的生存环境。在 10 月, NPP 是 MaxEnt 模型模拟柔鱼潜在

分布的重要环境变量(图 4), 从图 2 可知, 10 月柔鱼渔场平均 NPP 为(739.2±40.2) mg(C)/(m²·d), 以往的研究表明, NPP 变化对柔鱼资源的空间分布和丰度大小具有调控作用^[7], 因此, NPP 在 10 月可能成为限制柔鱼分布的关键因子。各月 MaxEnt 模型模拟柔鱼潜在分布中, 当使用单变量构建的 MaxEnt 模型时, 使用 SLA 的模型输出增益明显低于使用其他变量的模型输出增益(图 4), 说明 SLA 对模型的贡献较小; 且在不包含 SLA 的模型输出增益与包含所有变量的模型输出增益基本一致, 说明 SLA 与其他环境因子可能存在交互作用, 因此在建立柔鱼分布模型时可以考虑忽略该因子。

3.3 不足与展望

MaxEnt 模型可以有效处理环境变量间的复杂交互关系^[23], 因此该研究中并未考虑各环境变量的交互作用, 但这会给环境变量重要性评估方面带来困难, 故该研究仅分析了各月对模型影响重要的环境因子, 并未对环境变量的贡献率以及重要性排列进行深度分析。且由于影响物种分布的因子很多, 基于已有的数据构建的模型往往不能反映物种的生态本质, 甚至基础生态位^[9, 24], 因此, 建议在今后的研究中应尽可能地将影响物种的潜在分布的环境因子考虑进来。此外, 针对在海洋环境中的物种建模中常见的数据质量和数量问题, 应尽可能选择适用于目标物种的分布模式, 由于模型的算法以及相对适宜性之间的差异, 有研究认为^[25], 在采用不同的方法或模型进行模拟或预测时, 不建议使用统计数据比较模型和选择“最佳”模型, 建议采用多模式方法, 以减少因数据和模型公示的不确定性造成的偏差。

参考文献:

- [1] Wang Y G, Chen X J. The resource and biology of economic oceanic squid in the world[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005. [王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.]
- [2] Chen X J, Zhao X H, Chen Y. Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwestern Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1152-1160.
- [3] Igarashi H, Ichii T, Sakai M, et al. Possible link between

- interannual variation of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) abundance in the North Pacific and the climate phase shift in 1998/1999[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 150: 20-34.
- [4] Chen X J, Cao J, Chen Y, et al. Effect of the Kuroshio on the spatial distribution of the red flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2012, 88(1): 63-71.
- [5] Chen C S, Chiu T S. Abundance and spatial variation of *Ommastrephes bartramii* (Mollusca: Cephalopoda) in the eastern North Pacific observed from an exploratory survey[J]. *Acta Zoologica Taiwanica*, 1999, 10(2): 135-144.
- [6] Ichii T, Mahapatra K, Sakai M, et al. Changes in abundance of the neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in relation to climate change in the central North Pacific Ocean[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 441: 151-164.
- [7] Yu W, Chen X J, Yi Q, et al. Influence of oceanic climate variability on stock level of western winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(17): 3974-3994.
- [8] Cao J. Stock assessment and risk analysis of management strategies for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2009. [曹杰. 西北太平洋柔鱼资源评估与管理[D]. 上海: 上海海洋大学, 2009.]
- [9] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2009, 95(2-3): 181-188.
- [10] Jiménez-Valverde A, Lobo J M, Hortal J. Not as good as they seem: The importance of concepts in species distribution modelling[J]. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(6): 885-890.
- [11] Yu W. Response mechanism of winter-spring cohort of neon flying squid to the climatic and environmental variability in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [余为. 西北太平洋柔鱼冬春生群对气候与环境变化的相应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [12] Alabia I D, Saitoh S I, Mugo R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. *Fisheries Oceanography*, 2015, 24(2): 190-203.
- [13] Kong W Y, Li X H, Zou H F. Optimizing MaxEnt model in the prediction of species distribution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 2116-2128. [孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2116-2128.]
- [14] Chen P, Chen X J. Analysis of habitat distribution of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic Ocean using maximum entropy model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(6): 893-902. [陈芑, 陈新军. 基于最大熵模型分析西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地分布[J]. *水产学报*, 2016, 40(6): 893-902.]
- [15] Zhang L. Application of MAXENT model in predicting species potential distribution[J]. *Bulletin of Biology*, 2015, 50(11): 9-12. [张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. *生物学通报*, 2015, 50(11): 9-12.]
- [16] Phillips S J. A brief tutorial on Maxent[CP/OL]. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- [17] Merow C, Smith M J, Silander J A Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter[J]. *Ecography*, 2013, 36(10): 1058-1069.
- [18] Li W Q, Xu Z F, Shi M M, et al. Prediction of potential geographical distribution patterns of *Salix tetrasperma* Roxb. in Asia under different climate scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3224-3234. [李文庆, 徐洲锋, 史鸣明, 等. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3224-3234.]
- [19] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: A case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2012, 11(2): 241-248.
- [20] Chen X J. An approach to the relationship between the squid fishing ground and water temperature in the Northwestern Pacific[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1995, 4(3): 181-185. [陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子的关系[J]. *上海水产大学学报*, 1995, 4(3): 181-185.]
- [21] Chen X J, Liu B L, Tian S Q, et al. Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modelling in Northwestern Pacific[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(6): 707-713. [陈新军, 刘必林, 田思泉, 等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔场[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 707-713.]
- [22] Yu W, Chen X J, Yi Q, et al. Spatio-temporal distributions and habitat hotspots of the winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in relation to oceanographic conditions in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2016, 175: 103-115.

- [23] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [24] Wintle B A, McCarthy M A, Parris K M, et al. Precision and bias of methods for estimating point survey detection probabilities[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(3): 703-712.
- [25] Jones M C, Dye S R, Pinnegar J K, et al. Modelling commercial fish distributions: Prediction and assessment using different approaches[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 225: 133-145.

Modeling the potential distribution of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on a MaxEnt model

GONG Caixia¹, CHEN Xinjun^{1, 2, 3, 4, 5}, GAO Feng^{1, 2, 3, 4}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: The neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*), found in the Northwest Pacific Ocean, is a species of great economic importance. It is mainly caught by fishing fleets from and consumed in China (including Taiwan), Japan, and other countries and regions. The winter-spring cohort of *O. bartramii* is a traditional fishing target in China. *O. bartramii* is a short-lived species with a lifespan of about one year. The abundance and distribution of *O. bartramii* are influenced by global climate change and local marine environmental changes, such as El Niño and La Niña events, Pacific interdecadal oscillation, currents, sea surface temperature (SST), chlorophyll-a (Chl a) concentrations, etc. The monthly potential habitat distribution of neon flying squid in the Northwest Pacific Ocean during the peak fishing season (July-October) was explored by using maximum entropy (MaxEnt) models; these models were fitted with squid fishery data obtained from Chinese commercial squid-jigging vessels from 2011 to 2015 and five oceanographic environmental factors derived from remote sensing data (SST; Chl a concentration; net primary productivity, NPP; mixed layer depth, MLD; sea level anomaly, SLA). The accuracy of the monthly MaxEnt models was evaluated by the area under receiver operating characteristic (ROC) curve (AUC). The *O. bartramii* probability of occurrence results, simulated by a different MaxEnt model for each month, were imported into ArcGIS for visual analysis. The values obtained from probabilistic modeling were defined as habitat suitability index (HSI) and divided manually. When $HSI > 0.6$, the sea area was considered as the most suitable area for *O. bartramii*; when $0.4 < HSI \leq 0.6$, the sea area was considered as a suitable area for *O. bartramii*; when $0.2 < HSI \leq 0.4$, the sea area was considered as a generally suitable area for *O. bartramii*; when $0 < HSI \leq 0.2$, the sea area was considered as an unsuitable area for *O. bartramii*. Finally, the Jackknife test in MaxEnt was used to analyze the important environmental factors affecting the potential distribution of *O. bartramii*. The results showed that MaxEnt produced a good simulation of the potential squid distribution in the Northwest Pacific Ocean. The temporal and spatial distribution of *O. bartramii*'s potential habitats varied explicitly from July to October. The most suitable habitat for *O. bartramii* in July was mainly located around 39°N-43°N, 150°E-163°E. In August, the most suitable habitat was located east of these coordinates, while the fairly suitable habitat expanded 46° to the north. The most and fairly suitable habitats shrank westward during September, mainly located around 40°N-46°N and

150°E-160°E, respectively. In October, the potential habitats moved southward, mainly located around 40°N-45°N and 150°E-165°E. The factors that influenced the potential habitats during the study period, varied; these factors were the SST in July and August, the MLD and SST in September, and the NPP and SST in October. In this paper, the potential distribution of squid in the Northwest Pacific Ocean was simulated by a MaxEnt model by using presence-only fishery data combined with several marine environmental factors. This study only analyzed the important environmental factors that affected the monthly MaxEnt models. We did not analyze deeply the contribution rate and importance ranking of environmental variables. There are many factors affecting the distribution of *O. bartramii* and, based on existing data, MaxEnt models often cannot reflect the ecological niche of species. Therefore, the environmental factors affecting the potential distribution of *O. bartramii* should be taken into account as much as possible in future research. Overall, insights into the potential distribution of *O. bartramii* lend important implications on the availability of squid resources to the fishery as well as the sustainable utilization of the squid fishery.

Key words: *Ommastrephes bartramii*; maximum entropy model; potential distribution; oceanographic environmental conditions

Corresponding author: GAO Feng. E-mail: gaofeng@shou.edu.cn