

文章编号: 1674-5566(2024)04-0974-11

DOI: 10.12024/jsou.20240404503

基于声学指数的2021年夏季西北太平洋鲈鱼栖息地建模

薛铭华¹, 童剑锋^{1,2,3}, 朱振宏¹, 吕硕¹

(1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 西北太平洋的鲈鱼具有重要经济价值, 为了更好地管理其资源, 必须了解其适宜栖息地分布。本研究将2021年夏季西北太平洋公海渔业资源调查采集的声学走航数据转化为可用于栖息地建模的声学指数即海里面积散射系数, 结合海表面温度(Sea surface temperature, SST)、海表面盐度(Sea surface salinity, SSS)、海表面高度(Sea surface height, SSH)和叶绿素a质量浓度(Chlorophyll a mass concentration, *Chl. a*)的卫星遥感数据分析鲈鱼适宜栖息地与主要海洋环境要素之间的关系。分析了鲈鱼适宜栖息地对应的各环境要素范围。分别使用算术平均法和几何平均法建立鲈鱼的栖息地适宜性指数模型, 并通过500次交叉验证比较了两种模型的性能, 绘制鲈鱼适宜栖息地的空间分布图。研究表明, 鲈鱼的适宜SST、SSS、SSH和*Chl. a*分别为22.51~25.09 °C、34.09~34.65、0.48~1.14 m和0.13~0.23 mg/m³。使用算术平均法建立的模型在回归斜率、R²和AIC方面均优于几何平均法, 更适合鲈鱼的适宜栖息地建模。夏季西北太平洋鲈鱼适宜性较高的栖息地主要集中在38°N以南海域, 靠近黑潮一侧。本研究可为这一重要渔业资源的可持续开发提供依据, 有助于进一步使用声学指数探究海洋条件对鱼类适宜栖息地分布的影响。

关键词: 鲈鱼; 栖息地适宜性指数模型; 渔业声学; 环境因子; 西北太平洋

中图分类号: S 932.4 **文献标志码:** A

西北太平洋渔业资源丰富, 长期以来作为世界上海洋渔业产量最高的海域, 大量远洋渔船在此生产作业, 捕捞鲈鱼(*Scomber japonicus*)、秋刀鱼(*Cololabis saira*)、沙丁鱼(*Sardinops sagax*)、鲹鱼(*Engraulis japonicus*)和多种头足类。作为这些渔船主捕目标之一的鲈鱼属暖水性中上层洄游鱼类^[1], 有鳔且为闭鳔, 分布水深通常在300 m以浅^[2]。其饵料生物种类丰富, 包括浮游动物、甲壳类、头足类、小型鱼类及仔稚鱼等^[3], 并在不同海域有所不同。其捕食者则主要是各种鲨鱼、剑鱼等大型鱼类。作为西北太平洋主要的经济鱼类之一, 鲈鱼在中国、韩国和日本等国家的海洋渔业中占据重要地位, 并被北太平洋渔业委员会(North Pacific fisheries commission, NPFC)列为优先管理物种之一^[4]。多年来, 随着资源持续开发, 捕捞压力急剧增大, 鲈鱼产量已大不如前。当前

国内学者对鲈鱼的研究主要集中于资源评估模型^[5-6]、渔场学^[7-8]和基础生物学^[9]方面。此外, 在环境因素影响栖息地分布方面也有一些研究^[10-11]。但是, 现有研究大都基于渔获数据, 使用声学数据开展鲈鱼栖息地的研究极为少见。

渔业声学技术不仅可以获取整条航线上的连续数据, 还可以实时捕捉一定水深内鱼类的分布情况, 为海洋渔业资源研究提供了成倍于渔获数据的信息。此外, 与捕捞数据仅局限在下网作业的若干个不同, 完整的声学走航数据覆盖了更大空间范围的线和面, 这些大空间尺度且高时空分辨率的声学数据, 在海洋生物的行为监测^[12]和资源评估^[13-14]中均可发挥重要作用。因此, 由声学数据转换而来的体积后向散射强度(Volume backscattering strength, 单位dB)、海里面积散射系数(Nautical area scattering coefficient, NASC),

收稿日期: 2024-04-18 修回日期: 2024-05-23

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401302, 2019YFD0901401)

作者简介: 薛铭华(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为渔业声学。E-mail: yc_beiming@163.com

通信作者: 童剑锋, E-mail: jftong@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

单位 m^2/nmi^2) 以及其他与渔业资源有关的声学指数可为鱼类栖息地建模中所需的响应变量提供新的选择。MURASE 等^[15]使用声学数据建立广义加性模型 (Generalized additive model, GAM) 分析了日本近海中上层鱼类和太平洋磷虾 (*Euphausia pacifica*) 分布与环境因素之间的关系。HANINTYO^[16]将声学调查数据用于最大熵 (Maximum entropy) 建模,研究了巴厘岛周边海域小型中上层鱼类的栖息地分布特征。

鉴于鲈鱼具有较高的经济价值及其渔获量的显著下降,必须采取管理措施确保其资源可持续利用。基于生态系统的渔业管理要求理解鱼类资源分布与栖息地环境之间的关系。栖息地适宜性指数模型 (Habitat suitability index, HSI) 是探究鱼类栖息地与环境要素之间关系及描述栖息地偏好程度的有效工具^[17]。武智等^[18]基于渔业声学调查数据结合地形因子建立 HSI 模型,评价了珠江东塔产卵场鱼类的适宜栖息地状况,表明了声学数据在江河水域鱼类 HSI 建模中的可行性。因此,如果能够借助声学数据和 HSI 模型开

展栖息地适宜性评价,则将为更好地管理鲈鱼资源发挥重要作用。本研究将 2021 年夏季西北太平洋公海渔业资源调查采集的声学走航数据转化为可用于栖息地建模的声学指数 NASC,结合卫星遥感数据建立鲈鱼的 HSI 模型,了解鲈鱼适宜栖息地的空间分布特征及与主要海洋环境要素之间的关系。本研究可为这一重要渔业资源的可持续开发提供依据,有助于进一步使用声学指数探究海洋条件对鱼类适宜栖息地分布的影响,并为基于生态系统的渔业管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 声学数据

本次调查中数据采集平台为上海海洋大学“淞航”号渔业资源调查船。该船于 2021 年 6 月 18 日至 8 月 7 日在西北太平洋海域 $147^{\circ}\text{E}\sim 165^{\circ}\text{E}$, $33^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 进行了声学走航调查(图 1)。调查水域主要集中于 0~250 m 水层。

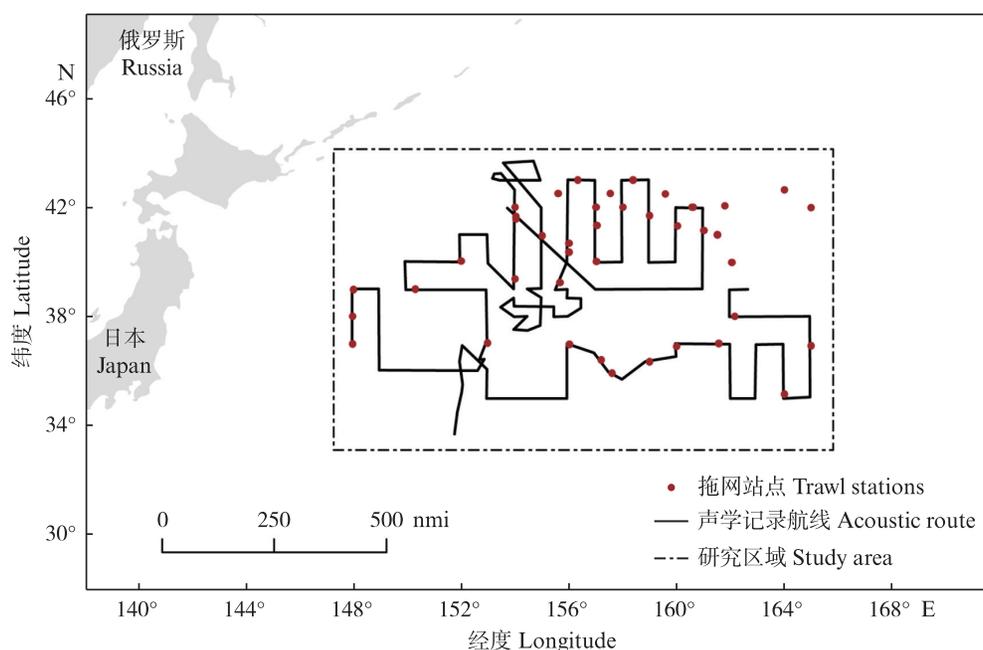


图 1 研究区域、声学记录航线及拖网采样站点
Fig. 1 Study area, acoustic route and trawl stations

声学数据由船载 Simrad EK80 科学鱼探仪采集并记录。该鱼探仪包括 18、38、70、120、200 和 333 kHz 等 6 个频率的换能器,本研究数据在 38 kHz 下采集。为保证原始数据的准确

性,调查结束后在海况较好时采用国际通用的标准球法^[19]对鱼探仪进行了校正。38 kHz 换能器主要参数设置和校准结果如表 1 所示。

表1 Simrad EK80主要参数和校准信息
Tab. 1 Main parameter settings and calibration information of Simrad EK80

参数 Parameters	参数设置 Parameter settings
换能器型号 Transducer type	ES38-7
发射功率 Transmit power/W	2 000
脉冲长度 Pulse duration/ms	1.024
波束角 Beam angle/(°)	7
吸收系数 Absorption coefficient/(dB/km)	5.498
声速 Sound speed/(m/s)	1 547.83
双向波束角 Two-way beam angle/dB	-20.70
换能器增益 Transducer gain/dB	26.55
Sa修正系数 Sa correction factor/dB	0.02

1.1.2 生物学数据

调查区域内共设置42个站点进行拖网采样(图1),以辅助声学数据计算。采样网具为调查船上的四片式中层拖网,主尺度434 m×97.1 m,网口直径40 mm,单囊结构。通过网位仪监测拖网深度和网口大小,拖网最大深度平均为67.78 m。每次拖网持续时间约为1.5 h,平均拖速4.6 kn。由于时间有限,每次起网后随机选取各鱼种约30尾,现场测量体长、体质量信息。

1.1.3 环境数据

本研究使用的海洋环境变量,包括海表面温度(Sea surface temperature, SST)、海表面盐度(Sea surface salinity, SSS)、海表面高度(Sea surface height, SSH)和叶绿素a质量浓度(Chlorophyll a mass concentration, Chl.a)。所有环境数据均下载自哥白尼海洋环境管理服务中心(<https://data.marine.copernicus.eu/products>),时间分辨率为1 d。

1.2 数据预处理

声学数据使用专业的声学数据后处理软件Echoview 12.0进行分析。使用Echoview内置的3种算法来消除背景噪声、传输噪声和脉冲噪声的影响^[20-22]。在此基础上通过3×3侵蚀滤波、7×7膨胀滤波和7×7中值滤波对数据实施进一步的噪声去除和信号强度修正。设置基本积分航程单元为水平方向上1 nmi,垂直方向上250 m。以-75 dB为积分阈值下限,-30 dB为积分阈值上限,对5~250 m的回声数据进行积分。并根据拖网渔获中鲈鱼所占数量比例对积分值进行分配,获得鲈鱼对应的NASC值,计算公式:

$$N = q \times N_T \quad (1)$$

式中: N 代表鲈鱼的NASC值; q 为鲈鱼数量比例; N_T 为每一积分单元中所有物种的NASC值。

在Matlab R2020a中将鲈鱼NASC和环境数据重采样为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的空间分辨率并网格化。完成重采样的各网格NASC和环境变量数值由该网格内所有原始数据求均值得到。根据每个NASC网格对应的日期和经纬度提取相应的环境数据并精准匹配。

1.3 SI模型

SI模型是HSI模型的基本组成部分,它量化了响应变量与各个环境变量之间的关系。本研究利用声学指数NASC计算了各环境变量的SI。SI的取值为0~1,当NASC最大时,环境变量的SI为1,表示该海域最适宜鲈鱼栖息;当NASC最小时,环境变量的SI为0,表示该海域最不宜鲈鱼栖息^[23]。SI计算方式:

$$S_{i,k} = \frac{N_{i,k} - N_{i,\min}}{N_{i,\max} - N_{i,\min}} \quad (2)$$

式中: $S_{i,k}$ 为环境变量*i*第*k*类的SI; $N_{i,k}$ 为环境变量*i*第*k*类的鲈鱼平均NASC; $N_{i,\min}$ 和 $N_{i,\max}$ 分别为环境变量*i*对应的鲈鱼平均NASC的最小值和最大值。构建高斯函数并利用最小二乘法求解参数,建立SI和各环境因子之间的关系如下:

$$S_i = e^{-a(X-b)^2} \quad (3)$$

式中: S_i 为环境变量*i*的SI; a 和 b 为待估计参数; X 为环境变量值。

1.4 HSI建模

将每个环境变量的SI值组合起来建立HSI经验模型。本研究使用了两种被广泛应用的模型,算术平均模型(Arithmetic mean model, AMM)和几何平均模型(Geometric mean model, GMM):

$$H_{\text{AMM}} = \frac{1}{4} \times \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

$$H_{\text{GMM}} = \left(\prod_{i=1}^n S_i \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中: H_{AMM} 和 H_{GMM} 分别是基于AMM和GMM方法计算得到的HSI,其取值为0~1。

1.5 模型验证

采用交叉验证的方法比较AMM模型和GMM模型的性能。随机选取80%的数据作为训练集用于构建模型,另外20%的数据作为测试集用来评估HSI模型的预测性能^[24]。每种HSI模型的交

又验证过程重复 500 次。每次交叉验证,将基于训练集计算得到的 HSI 预测值与基于测试集的 HSI 观测值进行线性回归分析,通过构建线性关系来描述二者的近似程度。使用回归截距、斜率、 R^2 和赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 来评价基于 AMM 和 GMM 建立的两个 HSI 模型的性能。

1.6 绘制 HSI 分布图

最优模型被用于计算离散 HSI 值。使用半方差模型和普通克里金方法对 HSI 离散值进行空间插值,其中半方差模型选择高斯模型进行拟合。当 $HSI > 0.7$ 时,表示该区域是高质量栖息地^[25]。在 ArcGIS 10.4 中绘制鲈鱼 HSI 的空间分布图,实现模型输出的可视化并与实际观测值鲈鱼 NASC 的分布进行比较。

2 结果

2.1 鲈鱼数量比例及 NASC

本次调查共获拖网渔获物 4 442.83 kg, 主要包括鲈鱼、沙丁鱼、鳀鱼和灯笼鱼 (Myctophidae) 等。其中鲈鱼 1 796.38 kg, 沙丁鱼 2 259.5 kg, 鳀鱼 346.95 kg, 灯笼鱼 40 kg。

在海上调查期间共计取 1 329 尾鲈鱼样本、1 010 尾沙丁鱼样本、446 尾鳀鱼样本和 1 221 尾灯笼鱼样本记录体长、体质量数据。鲈鱼体长为 1.20~38.70 cm, 平均体长为 16.15 cm, 体质量为 7.02~590.45 g, 平均体质量为 37.08 g; 沙丁鱼体长为 1.20~26.70 cm, 平均体长为 14.42 cm, 体质量为 4.94~213.26 g, 平均体质量为 22.71 g; 鳀鱼体长为 7.60~17.00 cm, 平均体长为 11.82 cm, 体质量为 1.56~24.77 g, 平均体质量为 9.44 g; 灯笼鱼体长为 1.50~15.50 cm, 平均体长为 7.61 cm, 体质量为 0.35~22.63 g, 平均体质量为 4.04 g。根据各物种的平均体质量计算可知, 鲈鱼渔获数量为 48 446 尾, 占有渔获的数量比例为 24.90%。

调查海域内所有种类的 NASC 为 0~11 575.24 m^2/nmi^2 , 平均 NASC 为 358.56 m^2/nmi^2 , 其频率分布和空间分布分别如图 2~3 所示。根据鲈鱼数量比例分配所得鲈鱼的 NASC 范围为 0~2 881.77 m^2/nmi^2 , 平均 NASC 为 89.27 m^2/nmi^2 。

2.2 环境变量的 SI

对基于 SST、SSS、SSH 和 *Chl. a* 4 个环境变量和鲈鱼 NASC 计算得到的 SI 值进行高斯拟合, 分别得到不同环境变量的 SI 曲线 (图 4)。每个环境变量 SI 模型的参数 a 和 b 的值见表 2, 拟合效果均较好。

与鲈鱼 NASC 发生水域对应的 SST 为 14.48~25.57 $^{\circ}\text{C}$, 其中 22.51~25.09 $^{\circ}\text{C}$ 是鲈鱼的适宜 SST ($SI > 0.7$), 对应的 NASC 值为 0.01~1 165.41 m^2/nmi^2 ; 鲈鱼 NASC 发生水域的 SSS 为 32.84~34.64, 其中 34.09~34.65 是鲈鱼的适宜 SSS, 对应的 NASC 值为 0.01~1 165.41 m^2/nmi^2 ; 鲈鱼 NASC 发生水域的 SSH 为 -0.31~1.20 m, 其中 0.48~1.14 m 是鲈鱼的适宜 SSH, 对应 NASC 值为 0.01~939.31 m^2/nmi^2 ; 鲈鱼 NASC 发生水域的 *Chl. a* 为 0.11~0.73 mg/m^3 , 其中 0.13~0.23 mg/m^3 是鲈鱼的适宜 *Chl. a*, 对应 NASC 值为 0.03~939.31 m^2/nmi^2 。

2.3 AMM 模型和 GMM 模型结果比较

对 AMM 模型和 GMM 模型分别进行 500 次交叉验证。两种模型每次交叉验证中 HSI 预测值与观测值的线性回归结果存在差异 (表 3)。无论在平均值还是中值方面, 尽管基于几何平均方法建立的模型截距更接近于 0, 但基于算术平均方法建立的模型斜率更接近于 1、 R^2 更接近于 1 且 AIC 更低。因此, 算数平均模型更适合估算基于声学指数 NASC 建立的西北太平洋鲈鱼的栖息地适宜性。

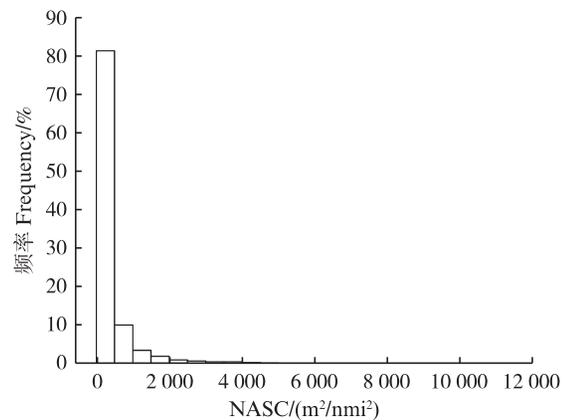


图 2 调查海域内所有种类 NASC 的频率分布直方图
Fig. 2 NASC frequency distribution histogram of all species in the survey area

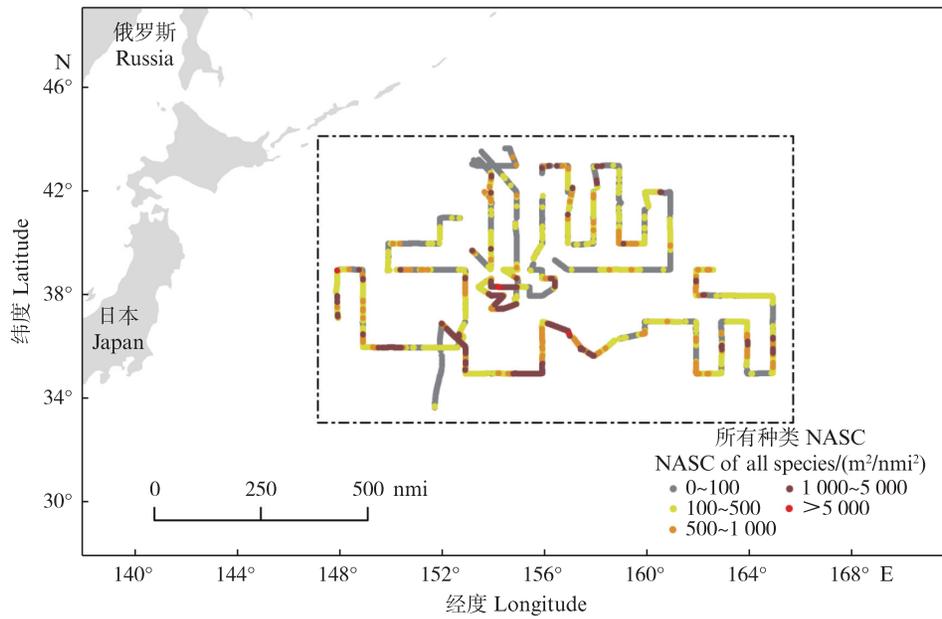
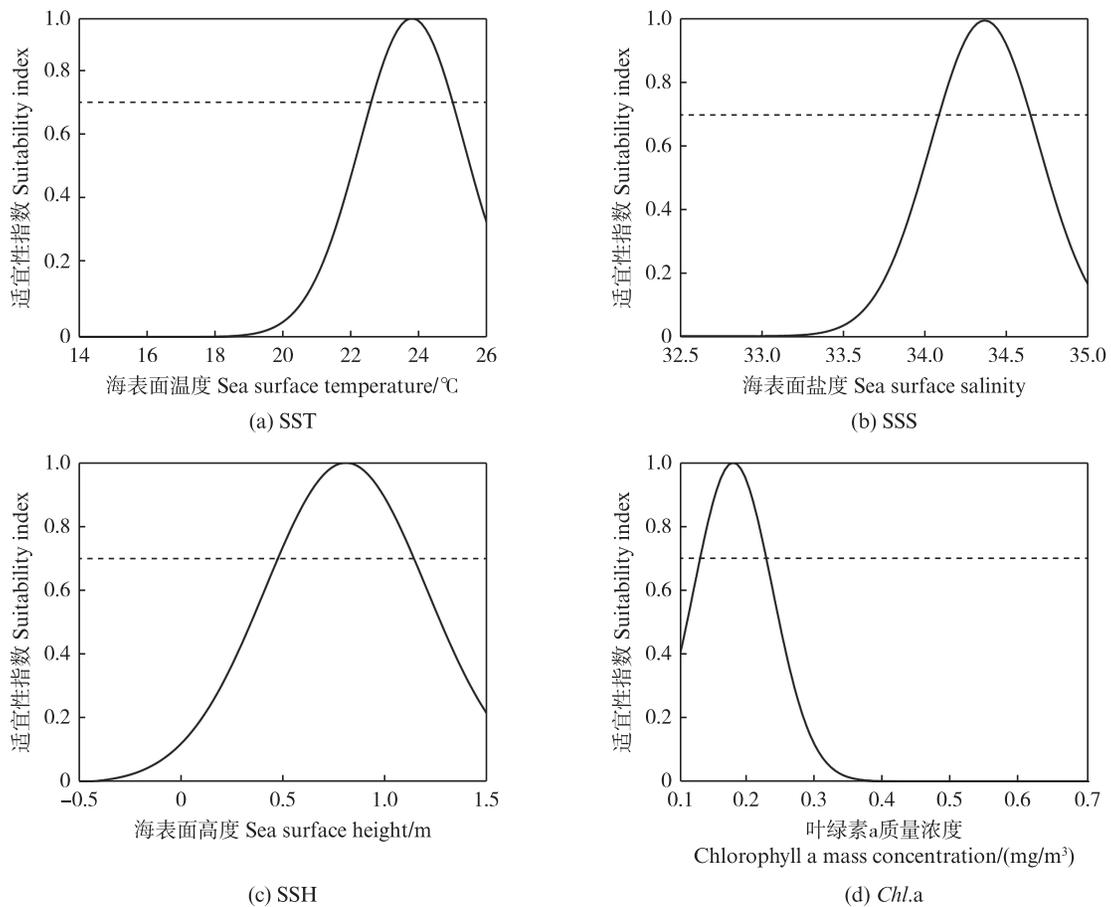


图3 2021年夏季西北太平洋所有种类NASC的空间分布

Fig. 3 Distribution of NASC of all species in Northwest Pacific Ocean in the summer of 2021



虚线表示SI=0.7的水平线。
Dashed lines represent SI=0.7.

图4 基于SST, SSS, SSH和Chl. a拟合得到的SI曲线

Fig. 4 SI curves based on SST, SSS, SSH and Chl. a

表2 基于高斯函数拟合的SI模型参数
Tab. 2 Parameters of SI models based on Gaussian function

环境变量 Environmental variables	SI模型参数 Parameters of SI model		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>P</i>
SST	0.21	23.80	$<2 \times 10^{-16}$
SSS	4.52	34.37	$<2 \times 10^{-16}$
SSH	3.20	0.81	$<2 \times 10^{-16}$
<i>Chl.a</i>	151.08	0.18	$<2 \times 10^{-16}$

表3 基于AMM和GMM方法构建的HSI模型截距、斜率、 R^2 和AIC
Tab. 3 The intercept, slope, R^2 and AIC of HSI models developed by AMM and GMM

模型 Model	截距 Intercept		斜率 Slope		R^2		AIC	
	平均值 Mean	中值 Median	平均值 Mean	中值 Median	平均值 Mean	中值 Median	平均值 Mean	中值 Median
	AMM	0.06	0.06	0.98	0.98	0.74	0.77	-136.89
GMM	0.05	0.05	0.97	0.97	0.65	0.67	-58.25	-53.59

2.4 西北太平洋鲈鱼适宜栖息地分布

以AMM模型为最优模型绘制西北太平洋鲈鱼的栖息地适宜性指数空间分布图(图5),并与实际NASC的分布情况进行比较。本次调查中,研究区域南部靠近黑潮延伸流的鲈鱼NASC整体高于北部。在 36.5°N 、 152.5°E 附近, 38.2°N 、 154°E 附近以及 36.6°N 、 156.6°E 附近存在3个鲈鱼高NASC值

聚集区,NASC均达到 $500\text{ m}^2/\text{nmi}^2$ 以上。鲈鱼NASC最大值出现在 38.25°N 、 154.25°E 处,为 $1\ 165.41\text{ m}^2/\text{nmi}^2$ 。在适宜栖息地方面,夏季西北太平洋鲈鱼适宜性较高的栖息地集中在 38°N 以南的黑潮延伸流一侧,与NASC分布趋势一致。其中,在 34.3°N 、 148.6°E 附近, 36.6°N 、 156.6°E 附近以及 36°N 以南、 158°E 以东的位置存在3个HSI高值区。

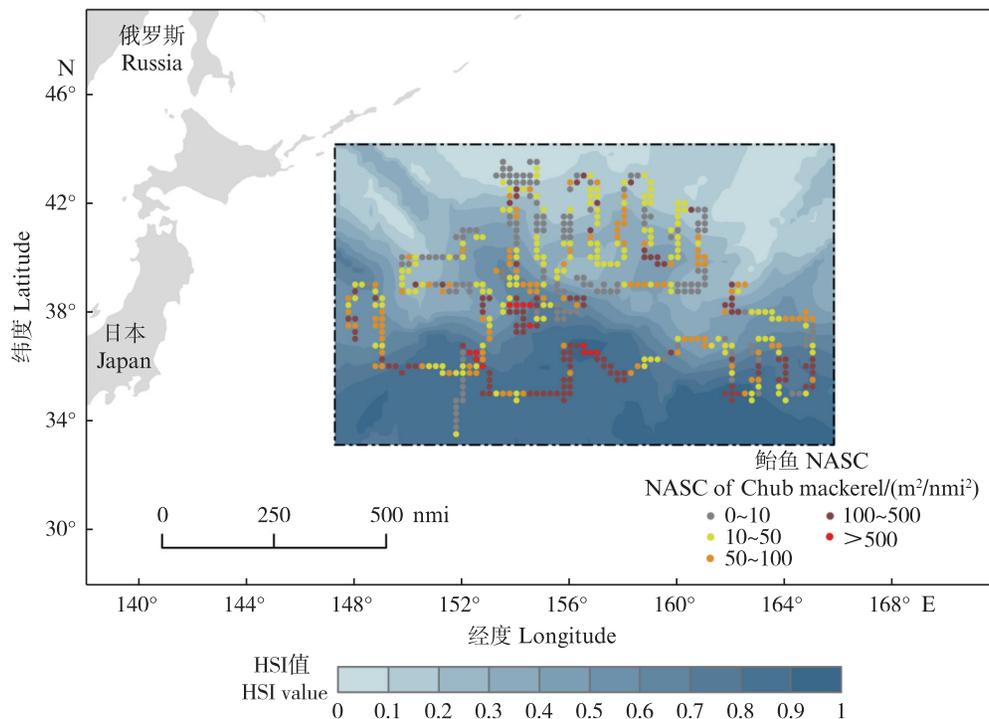


图5 2021年夏季西北太平洋鲈鱼HSI值和NASC的空间分布

Fig. 5 Distribution of HSI values and NASC of *S. japonicus* in Northwest Pacific Ocean in the summer of 2021

3 讨论

3.1 海洋环境要素对鲈鱼栖息地的影响

海洋鱼类的适宜栖息地分布受到 SST、SSS、SSH 和 *Chl.a* 等环境条件的影响^[17,26-27]。因此,根据目标物种的栖息地偏好与海洋环境之间的关系来捕捉其栖息地特征,对于准确评价栖息地质量非常重要^[28]。SST 是影响小型远洋鱼类栖息地的关键环境因素^[29-30],它与鱼类的生长、摄食、产卵和洄游密切相关^[31]。而鲈鱼作为一种短生命周期的大洋性鱼类,其资源状况和栖息地对 SST 的变化极其敏感^[32],SST 是影响其栖息地分布的首要因子^[33]。本研究发现,西北太平洋鲈鱼在夏季的适宜 SST 为 22.51~25.09 °C,这与 CHEUNG 等^[34]发现的鲈鱼最适栖息水温为 25 °C 左右相一致。然而,与范秀梅等^[35]得到的西北太平洋鲈鱼 8 月的最适 SST 区间 [(18.83±3.94) °C] 结果相比略高。这是由于我们的研究区域所处纬度更低,水温整体较高。与东、黄海近岸水域相比,西北太平洋鲈鱼的适宜 SST 具有一定差异。陈爽等^[36]的研究发现,中国近海鲈鱼夏季的最适 SST 在 27.2~28.6 °C;郭爱^[32]对东、黄海鲈鱼的研究发现其 7—8 月的适宜 SST 为 29~30 °C。这种差异表明不同海域的鲈鱼种群对温度的适应范围不同。

盐度是影响鱼类洄游、集群和栖息地分布的另一因素^[37-38],对鱼类各生长阶段的行为特征存在较大影响^[17,39]。本研究发现西北太平洋鲈鱼在夏季的适宜 SSS 为 34.09~34.65,这与郑波等^[40]和武胜男等^[41]对鲈鱼适宜 SSS 的研究结果 33.3~34.3 和 34.72~34.74 较为接近。

SSH 与涡流、锋面和辐合等海洋要素密切相关^[42-43],也是影响鲈鱼资源的重要因子^[41]。此外,SSH 也揭示了海水大规模运动和营养盐流动的模式,在一定程度上反映了饵料丰度的变化情况^[44]。本研究发现西北太平洋鲈鱼在夏季的适宜 SSH 范围为 0.48~1.14 m。郭爱^[32]的研究认为鲈鱼 7—8 月的适宜 SSH 在 0.65~0.75 m,在本研究的适宜范围之内。夏季鲈鱼正处于索饵洄游期间,其分布受到获取最佳食物资源的需求驱动。研究海域内的涡旋可能会困住饵料生物,从而为鲈鱼创造良好的进食条件^[26]。

叶绿素 a 质量浓度作为反映生物量和生产力状况的指标与鱼类的生长和补充有关。鲈鱼作

为中小型鱼类在食物链中处于中间位置。因此,它虽然不直接捕食浮游植物,但依然会受到叶绿素分布情况的影响^[35]。本研究发现西北太平洋鲈鱼在夏季的适宜 *Chl.a* 为 0.13~0.23 mg/m³,与李纲等^[45]的研究结果 (0.10~0.30 mg/m³) 相近,但存在一定差异。这些差异一定程度上是研究区域不同造成的,他们的研究区域位于日本南部海域。

鱼类的最适栖息环境因其所处季节、海域和不同生命阶段而异。根据拖网采样所获鲈鱼样本的体重信息可知,本航次的鲈鱼渔获物多为幼鱼。同时,由于本研究调查时间持续较长、调查范围较广,时间跨度和调查区域与鲈鱼的主要索饵洄游路线可能不一致。这两方面原因也在一定程度上导致本研究最终获得的夏季鲈鱼栖息地最适环境要素范围与其他研究的结果有所差异。因此,今后应在西北太平洋开展更多调查,累积不同季节的、更多的航次数据进行综合分析,以提升研究结果的准确性和科学性。

3.2 鲈鱼适宜栖息地的分布特征

本研究中调查海域位于高温高盐的黑潮与低温低盐的亲潮相交汇海域,带来了冷、暖水团的混合与流动,产生了复杂的洋流系统。亲潮中的高营养盐与黑潮暖水相结合,促进了浮游生物的大量繁殖^[30,46],为鱼类带来了丰富的食物来源和适宜的生活环境。本研究表明夏季西北太平洋鲈鱼适宜性较高的栖息地集中在 38°N 以南海域,靠近黑潮一侧。这可能是因为黑潮水温适宜鲈鱼栖息,且浮游生物聚集较多,是鲈鱼良好的索饵场所^[47]。另一方面,李纲等^[45]发现鲈鱼的中心渔场通常出现在 SSH 极大值和极小值交汇处,并靠近极大值一侧水域,即出现在冷水团和暖水团交汇区且靠近暖水团一侧。在本研究调查期间,黑潮一侧暖水团较多,亲潮一侧则以冷水团为主。因此,黑潮和亲潮与鲈鱼资源分布密切相关。此外,2021 年 7 月至 8 月在 38°N 以北海域靠近亲潮一侧发生了强烈的海洋热浪事件^[48]。这一事件会对海洋生态系统中的低营养级生物产生影响,从而影响以它们为食的鱼类分布、洄游和种群动态,对渔业资源生物造成不利影响^[49]。

3.3 鲈鱼 HSI 模型的构建

在适宜栖息地建模中,选择不同的方法将多个 SI 组合起来构建最优的 HSI 模型非常关键^[50]。

组合方法不同会产生不同的 HSI 结果。本研究分别采用 AMM 和 GMM 方法来建立 HSI 模型,两者分别基于不同的假设^[51]。本研究通过 500 次交叉验证比较了这两种方法在西北太平洋鲈鱼栖息地建模中的效果。根据 HSI 预测值与观测值的线性回归截距、斜率、 R^2 和 AIC 结果,尽管 GMM 的截距更小,但在其余 3 个参数方面 AMM 的表现优于 GMM。

在以往的鱼类栖息地研究中,往往使用渔业捕捞数据中的捕捞努力量和单位捕捞努力量渔获量作为相对资源丰度指数来建立 HSI 模型。本研究将声学数据转化得到的 NASC 值作为声学指数构建西北太平洋鲈鱼栖息地适宜性指数模型,对于拓展大洋性渔业资源渔场预测方法,提高渔场预测精度有一定意义。但是,尽管已对数据进行了去噪处理且对积分阈值进行了限定,调查海域中存在的大量灯笼鱼、头足类和目标生物的同科目物种回声信号仍不可避免地对结果产生影响。其中灯笼鱼种类繁多,部分种类具有鱼鳔,目标强度较高,其产生的回声信号不易通过噪声去除和设置阈值的方式消除。并且,灯笼鱼具有昼夜垂直迁移行为,白天生活在较深水层,夜晚则在海表大量聚集,对夜间采集的声学数据做出重要贡献。然而,由于本研究中拖网采样并非都在夜间进行,渔获中灯笼鱼占比较低,可能无法代表夜间的真实情况,从而容易导致最终得到的声学指数 NASC 高估鲈鱼的相对资源丰度。因此,未来的研究应将消除上述非目标生物回声信号的干扰并减弱同科目物种回声信号占比作为重点,提高声学指数的准确度。这不仅要求我们累积足够的拖网调查样本,还要加强对不同物种生物学特征和生态学习性的研究。针对灯笼鱼等具有昼夜垂直迁移行为的生物,后续可尝试将昼夜数据分开研究,并在详细了解各物种声学散射特征的基础上借助频差法单独提取鲈鱼回声信号。此外,环境数据的来源可能对鱼类栖息地模型结果产生较大影响,本研究使用卫星遥感数据虽然覆盖范围较广、分辨率较高,但其准确性仍有待探讨。未来应尽可能使用调查站位现场采集的环境数据进行建模。此外,不同环境要素对鲈鱼栖息地的影响存在强弱之分,今后应该借助专家知识或提升回归树等方法确定不同环境变量的权重,提升栖息地建模的精确度。

参考文献:

- [1] 张玮. 环境影响下东海两种主要上层经济渔业生物渔获量波动特征[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
ZHANG W. Fluctuation characteristics of biological catches of two main upper economic fisheries in the East China Sea under environmental impacts [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [2] HERNÁNDEZ J J C, ORTEGA A T S. Synopsis of biological data on the chub mackerel (*Scomber japonicus* Houttuyn, 1782) [M]. Roman: Food and Agriculture Organization, 2000.
- [3] 李曰嵩, 邢宇娜, 潘灵芝, 等. 鲈鱼生活史及模型应用研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(4): 694-705.
LI Y S, XING Y N, PAN L Z, et al. Research progress on life history and model application of chub mackerel *Scomber japonicus*: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(4): 694-705.
- [4] NPFC. About NPFC [EB/OL]. https://www.npfc.int/about_npfc.
- [5] 李纲, 郑晓琼, 朱国平, 等. 基于水温因子的东、黄海鲈鱼剩余产量模型建立[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(1): 108-113.
LI G, ZHENG X Q, ZHU G P, et al. Establishment of surplus production model for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea and Yellow Sea based on the sea surface temperature [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(1): 108-113.
- [6] 田志盼, 麻秋云, 张云飞, 等. 鲈鱼的资源评估探讨及其不确定性分析[J]. 水产科学, 2022, 41(6): 915-926.
TIAN Z P, MA Q Y, ZHANG Y F, et al. Uncertainties of parameters associated with stock assessment for Chub mackerel *Pneumatophorus japonicus* based on JABBA [J]. Fisheries Science, 2022, 41(6): 915-926.
- [7] 高峰. 基于提升回归树的东、黄海鲈鱼渔场预报模型研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
GAO F. Fishing ground forecasting of chub mackerel in the East China Sea and Yellow Sea using boosted regression trees [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [8] 杨胜龙, 范秀梅, 伍玉梅, 等. 基于 GAM 模型的阿拉伯海鲈鱼渔场分布与环境关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2466-2470.
YANG S L, FAN X M, WU Y M, et al. The relationship between the fishing ground of mackerel (*Scomber australasicus*) in Arabian Sea and the environment based on GAM model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2466-2470.
- [9] 庄之栋, 马超, 刘勇, 等. 北太平洋公海秋季鲈鱼生物学特性的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 40(6): 125-131.
ZHUANG Z D, MA C, LIU Y, et al. A preliminary study

- on biological characteristics of *Scomber japonicus* in the North Pacific Ocean in autumn [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018, 40(6): 125-131.
- [10] 易炜, 郭爱, 陈新军. 不同环境因子权重对东海鲈鱼栖息地模型的影响研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(12): 90-97.
- YI W, GUO A, CHEN X J. A study on influence of different environmental factors weights on the habitat model for *Scomber japonicus* [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(12): 90-97.
- [11] 武孝慈, 冯志萍, 余为. 未来气候情境下中国东海鲈鱼栖息地的时空分布[J]. 南方水产科学, 2023, 19(1): 12-21.
- WU X C, FENG Z P, YU W. Spatio-temporal distribution of habitat patterns of *Scomber japonicus* in East China Sea under future climatic conditions[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(1): 12-21.
- [12] MUÑOZ L, ASPILLAGA E, PALMER M, et al. Acoustic telemetry: a tool to monitor fish swimming behavior in sea-cage aquaculture [J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 645.
- [13] STIERHOFF K L, ZWOLINSKI J P, DEMER D A. Distribution, biomass, and demography of coastal pelagic fishes in the California current ecosystem during summer 2019 based on acoustic-trawl sampling [R]. Boulder: NOAA, 2020.
- [14] ESCOBAR-FLORES P C, O' DRISCOLL R L, MONTGOMERY J C, et al. Estimates of density of mesopelagic fish in the Southern Ocean derived from bulk acoustic data collected by ships of opportunity [J]. Polar Biology, 2020, 43(1): 43-61.
- [15] MURASE H, NAGASHIMA H, YONEZAKI S, et al. Application of a generalized additive model (GAM) to reveal relationships between environmental factors and distributions of pelagic fish and krill: a case study in Sendai Bay, Japan [J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1417-1424.
- [16] HANINTYO R. Spatio-temporal habitat suitability detection for small pelagic fish using earth observation data on Nusa Penida Coast - Bali, Indonesia [D]. Enschede: University of Twente, 2019.
- [17] 柳晓雪, 高春霞, 田思泉, 等. 基于栖息地适宜指数的浙江南部近海黄鲫最适栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1485-1495.
- LIU X X, GAO C X, TIAN S Q, et al. Distribution of *Setipinna taty* optimal habitats in the South inshore area of Zhejiang Province based on the habitat suitability index [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1485-1495.
- [18] 武智, 李跃飞, 朱书礼, 等. 基于渔业声学调查的珠江东塔产卵场鱼类栖息地适宜性研究[J]. 南方水产科学, 2023, 19(3): 11-18.
- WU Z, LI Y F, ZHU S L, et al. Fish habitat suitability analysis of Dongta spawning ground of Pearl River based on fisheries acoustic survey [J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(3): 11-18.
- [19] DEMER D A, BERGER L, BERNASCONI M, et al. Calibration of acoustic instruments [M]. Denmark: International Council for the Exploration of the Sea, 2015.
- [20] BOSWELL K M, WILSON M P, WILSON C A. Hydroacoustics as a tool for assessing fish biomass and size distribution associated with discrete shallow water estuarine habitats in Louisiana [J]. Estuaries and Coasts, 2007, 30(4): 607-617.
- [21] DE ROBERTIS A, HIGGINBOTTOM I. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise [J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1282-1291.
- [22] RYAN T E, DOWNIE R A, KLOSER R J, et al. Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data [J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(8): 2482-2493.
- [23] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommatrephes bratramii* in the northwestern Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2009, 95(2/3): 181-188.
- [24] TANAKA K, CHEN Y. Modeling spatiotemporal variability of the bioclimate envelope of *Homarus americanus* in the coastal waters of Maine and New Hampshire [J]. Fisheries Research, 2016, 177: 137-152.
- [25] 龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.
- GONG C X, CHEN X J, GAO F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 260-269.
- [26] HUA C X, LI F, ZHU Q C, et al. Habitat suitability of Pacific saury (*Cololabis saira*) based on a yield-density model and weighted analysis [J]. Fisheries Research, 2020, 221: 105408.
- [27] GAO T J, TONG J F, XUE M H, et al. Characterizing the sound-scattering layer and its environmental drivers in the North Equatorial Current of the Central and Western Pacific Ocean [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1477.
- [28] CHANG Y J, SUN C L, CHEN Y, et al. Modelling the impacts of environmental variation on the habitat suitability of swordfish, *Xiphias gladius*, in the equatorial Atlantic Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 1000-1012.
- [29] TSENG C T, SUN C L, BELKIN I M, et al. Sea surface temperature fronts affect distribution of Pacific saury

- (*Cololabis saira*) in the Northwestern Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2014, 107: 15-21.
- [30] ZHU Z H, TONG J F, XUE M H, et al. Assessing the influence of abiotic factors on small pelagic fish distribution across diverse water layers in the Northwest Pacific Ocean through acoustic methods [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111563.
- [31] MELO-MERINO S M, REYES-BONILLA H, LIRA-NORIEGA A. Ecological niche models and species distribution models in marine environments: a literature review and spatial analysis of evidence [J]. Ecological Modelling, 2020, 415: 108837.
- [32] 郭爱. 气候与海洋环境变化对东黄海鲈鱼栖息地时空变动的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- GUO A. Impacts of the climatic and environmental variations on the spatio-temporal distribution of potential habitat of chub mackerel *Scomber japonicus* in the East China Sea and Yellow Sea[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [33] 薛嘉伦, 樊伟, 唐峰华, 等. 基于最大熵模型预测西北太平洋公海鲈潜在栖息地分布[J]. 南方水产科学, 2018, 14(1): 92-98.
- XUE J L, FAN W, TANG F H, et al. Analysis of potential habitat distribution of *Scomber japonicus* in northwest Pacific Ocean using maximum entropy model [J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(1): 92-98.
- [34] CHEUNG W W L, WATSON R, PAULY D. Signature of ocean warming in global fisheries catch[J]. Nature, 2013, 497(7449): 365-368.
- [35] 范秀梅, 唐峰华, 崔雪森, 等. 基于栖息地指数的西北太平洋日本鲭渔情预报模型构建[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 34-43.
- FAN X M, TANG F H, CUI X S, et al. Habitat suitability index for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(12): 34-43.
- [36] 陈爽, 郭爱, 陈新军. 海表温度变化时近海日本鲭栖息地时空分布预测[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 593-604.
- CHEN S, GUO A, CHEN X J. Distribution forecasting of habitat of chub mackerel (*Scomber japonicus*) during the climate change in the coastal waters [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(3): 593-604.
- [37] 王云峰, 朱鑫华. 盐度对鱼类生态生理学特征的影响[J]. 海洋科学集刊, 2002(44): 151-158.
- WANG Y F, ZHU X H. A review on impact of salinity on patterns of fish ecophysiology [J]. Studia Marina Sinica, 2002(44): 151-158.
- [38] 武胜男, 陈新军. 西北太平洋日本鲭渔业生物学和渔业海洋学研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(2): 91-100.
- WU S N, CHEN X J. Review on fishery biology and fishery oceanography of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(2): 91-100.
- [39] 张云雷, 薛莹, 于华明, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 83-91.
- ZHANG Y L, XUE Y, YU H M, et al. Study on the habitat suitability of *Johnius belangerii* during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 83-91.
- [40] 郑波, 陈新军, 李纲. GLM和GAM模型研究东黄海鲈资源渔场与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2008, 32(3): 379-386.
- ZHENG B, CHEN X J, LI G. Relationship between the resource and fishing ground of mackerel and environmental factors based on GAM and GLM models in the East China Sea and Yellow Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(3): 379-386.
- [41] 武胜男, 陈新军, 刘祝楠. 基于GAM的西北太平洋日本鲭资源丰度预测模型建立[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 36-42.
- WU S N, CHEN X J, LIU Z N. Establishment of forecasting model of the abundance index for chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the northwest Pacific Ocean based on GAM [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 36-42.
- [42] ALVES J O S, HAINES K, ANDERSON D L T. Sea level assimilation experiments in the tropical Pacific[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(2): 305-323.
- [43] KURODA H, YOKOUCHI K. Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan [J]. Fisheries Oceanography, 2017, 26(4): 439-454.
- [44] AYERS J M, LOZIER M S. Physical controls on the seasonal migration of the North Pacific transition zone chlorophyll front [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C5): C05001.
- [45] 李纲, 陈新军. 夏季东海渔场鲈鱼产量与海洋环境因子的关系[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 1-8.
- LI G, CHEN X J. Study on the relationship between catch of mackerel and environmental factors in the East China Sea in summer[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 1-8.
- [46] XUE M H, TONG J F, TIAN S Q, et al. Broadband characteristics of zooplankton sound scattering layer in the Kuroshio - Oyashio confluence region of the Northwest Pacific Ocean in summer of 2019 [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(9): 938.
- [47] 王良明, 李渊, 张然, 等. 西北太平洋日本鲭资源丰度分布与表温和水温垂直结构的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(11): 29-38.

- WANG L M, LI Y, ZHANG R, et al. Relationship between the resource distribution of *Scomber japonicus* and seawater temperature vertical structure of Northwestern Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(11): 29-38.
- [48] KURODA H, SETOU T. Extensive marine heatwaves at the sea surface in the northwestern Pacific Ocean in summer 2021[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3989.
- [49] DU Y Z, FENG M, XU Z H, et al. Summer marine heatwaves in the Kuroshio-Oyashio extension region [J]. Remote Sensing, 2022, 14(13): 2980.
- [50] XUE Y, GUAN L S, TANAKA K, et al. Evaluating effects of rescaling and weighting data on habitat suitability modeling[J]. Fisheries Research, 2017, 188: 84-94.
- [51] YU W, YI Q, CHEN X J, et al. Modelling the effects of climate variability on habitat suitability of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*, in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(2): 239-249.

Modelling of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) habitat in the summer of 2021 in Northwest Pacific Ocean using Acoustic Index Analysis

XUE Minghua¹, TONG Jianfeng^{1,2,3}, ZHU Zhenhong¹, LYU Shuo¹

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: The Chub mackerel (*Scomber japonicus*) in Northwest Pacific Ocean holds significant economic value. It is important to better manage its resources by understanding its suitable habitat distribution. This study transformed acoustic data collected from the high seas fishery survey during the summer of 2021 into acoustic index suitable for habitat modeling. By integrating satellite remote sensing data on sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), sea surface height (SSH), and chlorophyll a mass concentration (*Chl. a*), this study analyzed the relationship between suitable habitat and marine environmental factors. The ranges of environmental factors corresponding to suitable habitat were analyzed. Habitat suitability index models were established using both arithmetic mean method and geometric mean method. Their performance was compared through 500 iterations of cross-validation, and the suitable habitat distribution map was developed. The results indicated that the suitable ranges for SST, SSS, SSH, and *Chl. a* were respectively 22.51–25.09 °C, 34.09–34.65, 0.48–1.14 m, and 0.13–0.23 mg/m³. The model developed using the arithmetic mean method performed superiorly in terms of regression slope, R^2 and AIC, proving more appropriate for modeling suitable habitat for Chub mackerel. Suitable habitat was primarily concentrated south of 38°N, near the Kuroshio current.

Key words: Chub mackerel (*Scomber japonicus*); habitat suitability index model; fishery acoustic; environmental factors; Northwest Pacific Ocean