

环境因子对 3 种不同作业类型鲣 CPUE 的影响研究

马有成¹, 朱国平², 张健^{1,3}, 王啸⁴, 张鸿霖¹, 石建高⁵

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

2. 宏东渔业股份有限公司, 福建福州 350015

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心/大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室/农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306

4. 上海开创远洋渔业有限公司, 上海 200082

5. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090

摘要: 鲣 (*Katsuwonus pelamis*) 广泛分布于各大洋热带和亚热带海域, 在世界金枪鱼渔业中占有重要地位, 其资源丰度受多种海洋环境因子的影响。为探明降水对不同鲣群体资源分布及变动的影响机制, 利用 2017—2019 年毛里塔尼亚海域双拖渔业数据、2018—2020 年中西太平洋围网渔业数据和 2010—2020 年美洲热带金枪鱼委员会网站记录的延绳钓渔业数据, 结合降水、海表面盐度 (Sea surface salinity, SSS) 和海表面温度 (Sea surface temperature, SST) 等环境数据, 通过广义加性模型 (Generalized additive model, GAM) 分析鲣的 3 种不同作业方式的单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 时空分布及其与降水等环境因子之间的关系。结果表明: 月份对双拖和延绳钓作业方式鲣 CPUE 的影响显著 ($P<0.05$); 纬度对 3 种鲣作业方式的 CPUE 均存在显著性影响 ($P<0.05$); 降水对双拖和围网作业方式鲣 CPUE 分别存在极其显著性 ($P<0.001$) 和显著性 ($P<0.05$) 影响, 且影响趋势较为一致, 即这 2 种作业方式中高 CPUE 出现在较为适宜的降水范围内, 然而降水对鲣的延绳钓 CPUE 的影响并不显著; SSS 和 SST 对鲣的 3 种作业方式 CPUE 影响显著 ($P<0.05$)。因此, 在今后分析环境因子对渔业 CPUE 的影响效果时, 建议将降水放入常规海洋环境因子中。

关键词: 鲣; 双拖; 围网; 延绳钓; 降水; 环境因子

中图分类号: S 931

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Influence of environmental factors on CPUE of three different fishing methods in skipjack tuna fisheries

MA Youcheng¹, ZHU Guoping², ZHANG Jian^{1,3}, WANG Xiao⁴, ZHANG Honglin¹, SHI Jianga⁵

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. Hongdong Fishery Co., Ltd., Fuzhou 350015, China

3. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries/Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education/Key Laboratory of Ocean Fisheries Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

4. Shanghai Kai Chuang Deep Sea Fisheries Co. Ltd., Shanghai 200082, China

5. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) is widely distributed in tropical and subtropical waters around the world and is a key target species in global tuna fishery. The abundance of its resources is influenced by various marine environmental factors.

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-07-03

基金项目: 农业农村部全球重要鱼种资源监测评估专项; 国家重点研发计划项目 (2020YFD0900803)

作者简介: 马有成 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源。E-mail: mayc2021shou@163.com

通信作者: 张健 (1979—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为渔具选择性。E-mail: j-zhang@shou.edu.cn

In order to explore the mechanisms by which precipitation affects the distribution and variation of resources in different *K. pelamis* stocks, based on the data from the pair trawl fishery in Mauritanian waters during 2017–2019, data from the purse seine fishery from the Western and Central Pacific Ocean during 2018–2020, and data from the longline fishery recorded on the IATTC website during 2010–2020, combining with environmental data such as precipitation, sea surface salinity (SSS) and sea surface temperature (SST), we analyzed the spatiotemporal distribution of catch per unit effort (CPUE) for three different fishing methods of skipjack tuna and its relationship with environmental factors such as precipitation by Generalized Additive Model (GAM). The findings indicate that month significantly influenced the CPUE of skipjack tuna for pair trawl and longline fishing methods ($P < 0.05$). Latitude also had a significant effect on all the three fishing methods ($P < 0.05$). Precipitation exhibited an extremely significant effect ($P < 0.001$) on the CPUE of skipjack tuna for pair trawl fishing method and a significant effect ($P < 0.05$) for purse seine fishing method. The trend of this effect was relatively consistent, with higher CPUE occurring within a more suitable range of precipitation. However, the effect of precipitation on the CPUE of skipjack tuna for longline fishing method was not significant. Sea surface salinity and sea surface temperature also had significant effects on the CPUE of skipjack tuna for all the three fishing methods ($P < 0.05$). Hence, when analyzing the effects of environmental factors on fishery CPUE in the future, it is recommended to include precipitation in conventional marine environmental factors.

Keywords: *Katsuwonus pelamis*; Pair trawl; Purse seine; Longline; Precipitation; Environmental factors

鲣 (*Katsuwonus pelamis*) 是广泛分布于世界各大洋热带和亚热带海域的中上层鱼类, 具有高度洄游性、渔业作业类型多、管理区域复杂等特点, 是金枪鱼渔业的主要目标种类之一^[1]。鲣种群分布模式不是随机变化的, 而是受到海洋环境因子和气候因素变化的影响。海洋环境因子, 如海表面温度 (Sea surface temperature, SST)^[2-3]、海表面盐度 (Sea surface salinity, SSS)^[4] 和叶绿素 *a* 浓度 (Chlorophyll *a* concentration, Chl-*a*)^[5] 不仅是鲣种群分布的限制性因素, 甚至影响其生存。而气候现象, 如厄尔尼诺和拉尼娜现象, 也会对其产生消极或积极的影响^[6-8]。因此, 掌握鲣资源丰度的变化规律, 对准确预测其种群分布、评估资源量、合理开发和持续利用资源具有重大意义^[9]。

由于气候和海洋环境变化, Putri 和 Zainuddin^[10] 预计鲣的丰度将出现小幅度下降, 因此, 全球对鲣渔业资源的关注进一步提升。在太平洋^[11-12]、印度洋^[13-14] 和大西洋^[15] 各海域, 围绕多种作业方式, 各国学者均开展了气候变化和海洋环境变动对鲣资源丰度的影响相关研究, 然而鲜有文献提及或关注到降水等因素对于鲣等大洋性高度洄游物种种群分布的影响。大洋中降水量的变化是对厄尔尼诺和拉尼娜现象影响的直观表现, 异常的温度变化会改变极端降水事件的发生频率、强度和持续时间^[16-18], 而降水对不同海洋生物的繁殖^[19-20]、生活史变化^[21]、迁徙行为^[22-23] 等均具有不同程度的影响, 因此忽视降水对此类生物资源丰度的影响, 可能无法全面、真实

地反映渔业资源量及其与多种海洋环境因子的关系。

为了解和掌握降水对不同海域鲣群体分布的影响, 本文使用毛里塔尼亚海域双拖渔业数据、中西太平洋围网和延绳钓渔业数据, 结合降水、SSS、SST 等主要环境因子, 分析不同作业方式下鲣单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 的时空分布特征, 以及降水等海洋环境因子对不同作业方式下鲣 CPUE 的影响, 以期初步探明降水对不同鲣群体资源分布及变动的的影响机制, 为今后进一步开展鲣渔业资源评估和养护, 实现渔业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 渔业数据

双拖鲣数据来源于宏东国际 (毛塔) 渔业发展有限公司双拖网中上层作业船队统计的 2017—2019 年的生产渔捞日志, 涉及生产渔船共 11 艘, 渔船作业范围为 20°W—10°W, 16°N—21°N, 渔捞日志数据包含渔船作业时间、作业位置、放网数量、鲣渔获量等。围网鲣数据来源于上海开创远洋渔业有限公司围网渔船统计的 2018—2020 年的生产渔捞日志, 涉及生产渔船共 7 艘, 渔船作业范围为 155°E—180°E、180°W—165°W, 10°S—6°N, 渔捞日志数据包含渔船放网时间、收网时间、作业位置、鲣渔获量等。延绳钓鲣数据来源于美洲热带金枪鱼委员会网站 <http://www.iattc.org>, 时间为 2010—2020 年, 生产渔船为日本延绳钓渔船, 作

业范围为 77°W—148°W, 37.5°S—32.5°N; 空间分辨率为 5°×5°, 时间分辨率为月; 数据内容包括作

业时间、作业位置、钩数、鲣渔获量。3种鲣捕捞方式作业范围如图1所示。

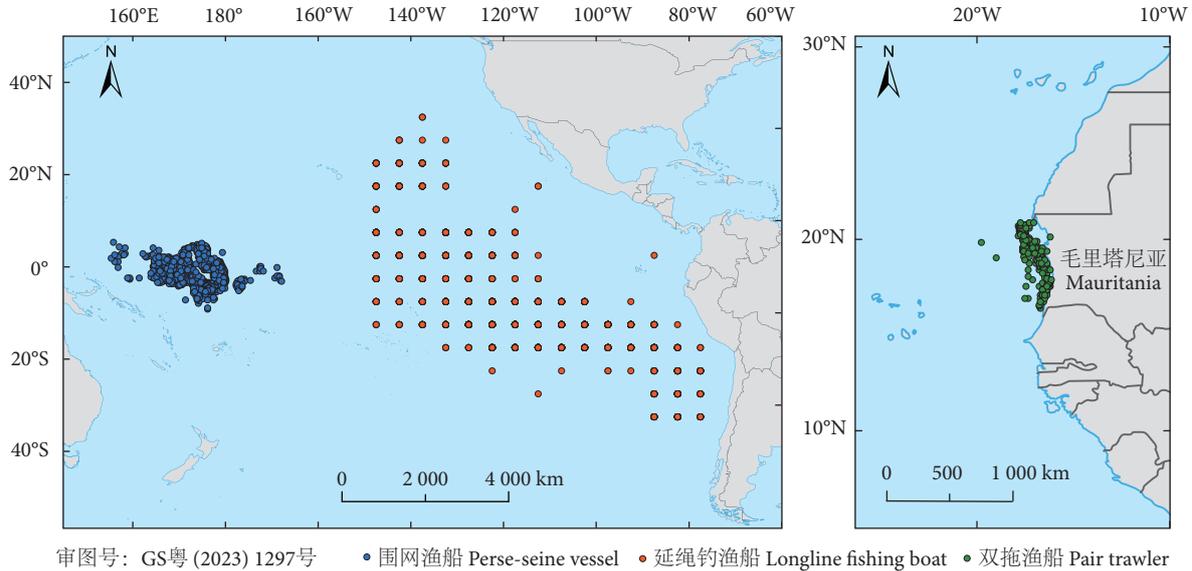


图1 鲣渔业作业范围

Fig. 1 Scope of operation of skipjack tuna fishery

1.2 环境数据

海洋环境因子中海表面温度、海表面盐度数据来自哥白尼数据中心网站 <https://data.marine.copernicus.eu/>, 空间范围为 180°W—180°E, 33°S—33°N, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为月; 降水数据来自 NCEP/NCAR (美国国家环境预测中心/国家大气研究中心) 的再分析数据集网站 <https://psl.noaa.gov/>, 空间范围为 180°W—180°E, 90°S—90°N, 空间分辨率为 2.5°×2.5°, 时间分辨率为月; 利用克里金空间插值法^[24]对降水数据进行了不同空间分辨率重采样, 根据已知的大尺度数据点赋权重预测小尺度未知点的值。

1.3 数据处理

1.3.1 CPUE 标准化

使用 CPUE 作为指示鲣丰度指标^[11]。对于 3 种捕捞方式鲣数据计算月平均 CPUE 以指示资源相对丰度, 同时为了匹配环境数据, 使用一个渔区单元 (0.25°×0.25°、0.25°×0.25°、5°×5°) 内月度总渔获量除以捕捞努力量来分别计算双拖、围网和延绳钓鲣 CPUE, 即:

$$Y_{y,m,i} = \frac{\sum C_{y,m,i}}{\sum E_{y,m,i}} \quad (1)$$

式中: $Y_{y,m,i}$ 表示单元渔区内的月度鲣 CPUE; $\sum C_{y,m,i}$ 表示单元渔区内的月度总渔获量; $\sum E_{y,m,i}$ 表示单元渔区内月度总捕捞努力量; y 为年份; m

为月份; i 为渔区单元。

1.3.2 统计方法

广义加性模型 (Generalized Additive Model, GAM) 是一种非参数化的广义多元线性回归方法, 可以直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系, 有效地提升研究精度^[25]。利用广义加性模型分析 3 种捕捞作业方式鲣 CPUE 与降水等环境因子的关系, 即以鲣 CPUE 作为响应变量, 以年度 (y) 和月份 (m) 作为时间因子解释变量, 以渔区经度 (L_{lon}) 和纬度 (L_{lat}) 作为空间因子解释变量, 降水量 (P_{prec} , $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、海表面温度 (T_{SS} , $^{\circ}\text{C}$)、海表面盐度 (S_{SS} , ‰) 作为环境因子解释变量, 建立模型如下:

$$\ln(Y_{\text{CPUE}} + 1) = \text{factor}(y) + S(m) + S(L_{lon}) + S(L_{lat}) + S(P_{\text{prec}}) + S(T_{SS}) + S(S_{SS}) + \varepsilon \quad (2)$$

式中: 为防止零值的情况, 采用 Y_{CPUE} 加上 1 再进行对数化处理, S 表示自然立方样条平滑; ε 表示模型误差。

利用方差膨胀因子 (Variance inflation factor, VIF) 对时空和环境因子进行多重共线性检验, 且 VIF 阈值小于 10 时认为影响因子间不存在多重共线^[26]。采用逐步加入解释变量的方法, 结合解释变量拟合的显著性水平和赤池准则信息 (Akaike information criterion, AIC) 对 GAM 完整模型进行解

释变量筛选；AIC 值越小，模型拟合效果越好，以此获得最优模型^[27]。

以上模型的构建在 R 4.1.3 软件中实现，通过 R 语言 mgcv 包中的 gam 函数实现模型拟合和 car 软件包的 VIF 函数判断因子的多重共线性。

2 结果

2.1 时空和环境因子的共线性

时空和环境因子的共线性分析结果如表 1 所示，所选取的时空和环境因子 VIF 值均小于 10，

表明各因子之间不存在共线性问题，均可作为解释变量用于 GAM 模型分析。

2.2 最优 GAM 模型

将解释变量逐步加入模型，分别构建得到关于 3 种作业方式鲤 CPUE 与各解释变量的 GAM 模型，获得 GAM 模型统计参数如表 2 所示。双拖作业方式最优模型保留所有变量；围网作业方式最优模型首先剔除不显著解释因子月份，再进行模型构建；延绳钓作业方式首先剔除不显著解释因子经度和降水，再进行模型构建。

表1 影响因子之间的共线性分析
Table 1 Collinearity analysis among influencing factors

作业方式 Fishing method	年份 Year	月份 Month	经度 Longitude	纬度 Latitude	降水 Precipitation	海表面盐度 SSS	海表面温度 SST
双拖 Pair trawler	1.38	1.93	2.20	3.96	1.59	2.89	2.60
围网 Purse-seine	1.06	1.52	1.09	1.51	1.79	1.41	2.10
延绳钓 Longline	1.03	1.20	4.15	2.96	1.26	1.619	3.08

表2 GAM 模型拟合及最优模型筛选
Table 2 GAM model fitting and optimal model screening

作业方式 Fishing method	公式 Formula	赤池信息准则 AIC
双拖 Pair trawler	$\ln(Y_{CPUE}+1)=NULL$	17 521
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)$	17 517
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)$	17 265
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lon})$	17 180
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lon})+S(L_{lat})$	17 098
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)$	17 077
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)+S(S_{SS})$	17 020
围网 Purse-seine	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)+S(S_{SS})+S(T_{SS})$	16 933
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=NULL$	11 161
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)$	10 481
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(L_{lon})$	10 473
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(L_{lon})+S(L_{lat})$	10 469
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)$	10 430
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)+S(S_{SS})$	10 390
延绳钓 Longline	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(L_{lon})+S(L_{lat})+S(prec)+S(S_{SS})+S(T_{SS})$	10 352
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=NULL$	-1 150
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)$	-1 200
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)$	-1 284
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lat})$	-1 462
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lat})+S(S_{SS})$	-1 483
	$\ln(Y_{CPUE}+1)=factor(y)+S(m)+S(L_{lat})+S(S_{SS})+S(T_{SS})$	-1 501

2.3 双拖捕捞作业鲣 CPUE 与各因子关系

2.3.1 双拖鲣 CPUE 分布时空特征

双拖捕捞作业方式捕捞到鲣的 GAM 模型结果如表 3 和图 2 所示。由表 3 可见, 时空因子(月份、经度和纬度)均与鲣 CPUE 呈极显著关系 ($P < 0.001$)。由图 2 可见, 鲣 CPUE 在 10 月到翌年 3 月增长速度较快, 在 3 月达到最高值, 之后开始下降至

5 月, 而后 5—10 月出现先上升再下降的趋势; 在经度上, 鲣 CPUE 在 17.5°W—17.0°W 上, 自西向东呈递减的趋势; 而后出现上升趋势, 在 16.5°W 时达到最大, 随后出现自西向东递减趋势; 纬度与鲣 CPUE 存在显著正相关关系, 即其 CPUE 自南向北逐渐上升。

表3 各影响因子对 3 种作业方式鲣 CPUE 的影响
Table 3 Effects of environmental factors on CPUE of three fishing methods for skipjack

作业方式 Fishing method	自由度 DF	月份 Month	经度 Longitude	纬度 Latitude	降水 Precipitation	海表面盐度 SSS	海表面温度 SST
双拖 Pair trawler	自由度 DF	8.93	7.9	2.11	7.05	7.88	8.44
	F	10.59	7.13	12.22	4.44	8.62	8.9
	P	$<2 \times 10^{-16}$ ***	$<2 \times 10^{-16}$ ***	6.61×10^{-5} ***	1.85×10^{-5} ***	$<2 \times 10^{-16}$ ***	$<2 \times 10^{-16}$ ***
围网 Purse-seine	自由度 DF	—	6.27	5.7	5.07	6.93	7.63
	F	—	3.02	2.72	2.78	6.63	1.86
	P	—	0.003 50**	0.007 86**	0.014 03*	$<2 \times 10^{-16}$ ***	0.039 41*
延绳钓 Longline	自由度 DF	6.04	5.57	7.83	4.6	6.01	4.66
	F	3.85	2.75	17.56	2.11	2.36	2.26
	P	$<2 \times 10^{-16}$ ***	—	$<2 \times 10^{-16}$ ***	—	0.000 698***	0.000 389***

注: ***. $P < 0.001$; **. $P < 0.01$; *. $P < 0.05$ 。

Note: ***. $P < 0.001$; **. $P < 0.01$; *. $P < 0.05$ 。

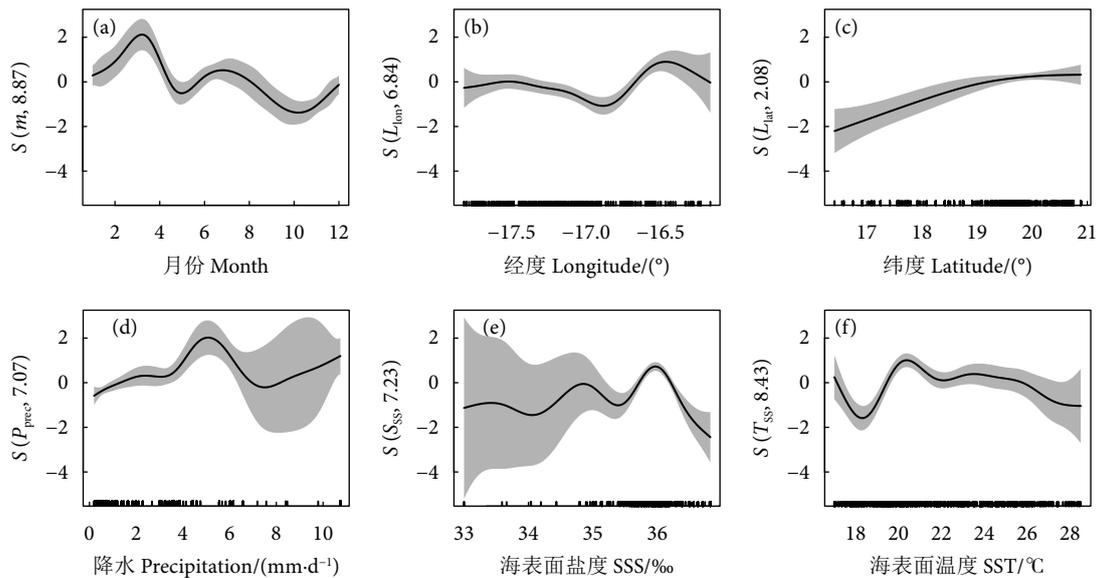


图2 双拖鲣 CPUE 与各因子关系

Fig. 2 Relationship between CPUE and various factors for skipjack of pair trawl

2.3.2 双拖鲣 CPUE 与环境因子关系

环境因子(降水、SSS 和 SST)均与鲣 CPUE 呈极显著性相关 ($P < 0.001$)。鲣渔场降水范围主要介于 0~10 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 降水为 0~5 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 鲣 CPUE

与其呈正相关; 介于 5~7 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 降水与 CPUE 呈负相关; 而后随着降水的增加鲣 CPUE 升高(图 2-d)。鲣渔场 SSS 范围主要介于 35‰~37‰, 鲣 CPUE 随着 SSS 的增加而上升, SSS 为 36‰ 时

CPUE 最高, 其后开始下降(图 2-e); SST 在 17~18 °C 范围内, 鲣 CPUE 随着温度的升高而降低, 在 18~20 °C 范围内, 鲣 CPUE 与 SST 呈正相关关系, 而超出此范围时, 鲣 CPUE 随着 SST 的增加而稍微下降。

2.4 围网捕捞作业鲣 CPUE 与各因子关系

2.4.1 围网鲣 CPUE 分布时空特征

用围网捕捞的鲣的 GAM 模型结果如表 3 和

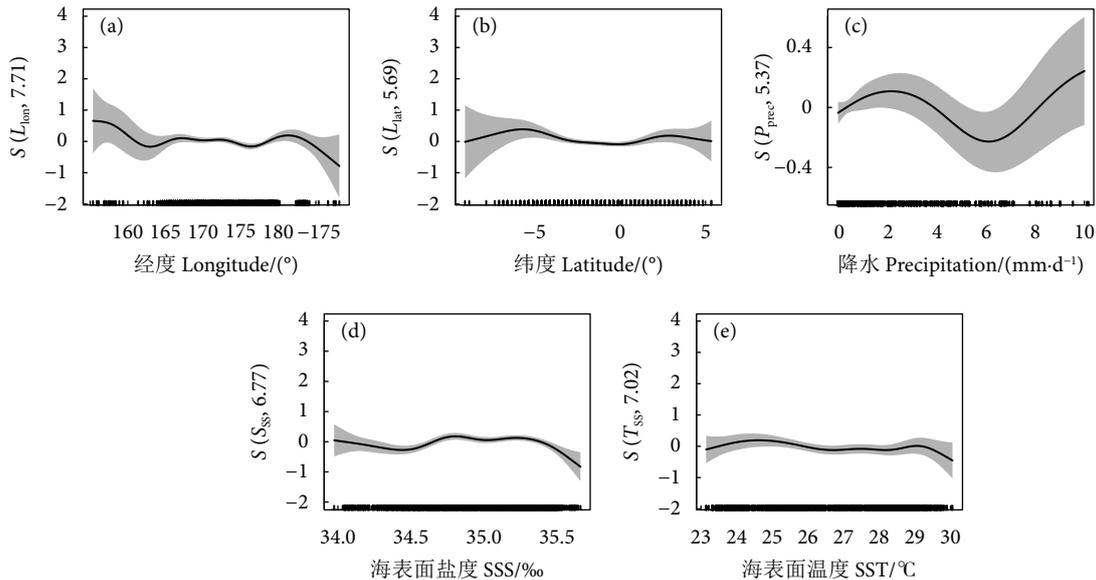


图3 围网鲣 CPUE 与各因子的关系

Fig. 3 Relationship between CPUE and various factors for skipjack of seine

2.4.2 围网鲣 CPUE 与环境因子关系

降水和 SST 对鲣 CPUE 的影响显著 ($P < 0.05$), SSS 对鲣 CPUE 的影响极其显著 ($P < 0.001$, 表 3)。渔场主要降水范围为 0~15 mm·d⁻¹, 介于 0~3 mm·d⁻¹ 时, 鲣 CPUE 与降水呈正相关; 介于 3~6 mm·d⁻¹ 时, 鲣 CPUE 与降水呈负相关; 超出此范围, 则鲣 CPUE 与降水呈正相关(图 3-c)。SSS 介于 34‰~34.5‰ 时鲣 CPUE 较为稳定, 超过此范围后, 鲣 CPUE 随着 SSS 的增加而升高, 而后在 34.5‰~35.3‰ 时达到最高值, 之后逐渐降低(图 3-d)。SST 与鲣 CPUE 呈负相关关系, 鲣 CPUE 较高的 SST 范围介于 23.5~24.5 °C(图 3-e)。

2.5 延绳钓捕捞作业鲣 CPUE 与各因子关系

2.5.1 延绳钓鲣 CPUE 分布时空特征

用延绳钓捕捞的鲣的 GAM 模型结果如表 3 和图 4 所示。月份与鲣 CPUE 呈极显著相关关系(表 3), 在 1 月鲣 CPUE 最高, 随之开始下降, 5—7 月稍有回升而后又继续下降, 10—12 月有上升的趋势(图 4-a); 空间因子纬度对鲣 CPUE 有显著性影响(表 3), 整体上由低纬至高纬, 鲣 CPUE 逐渐升高

图 3 所示。时间因子(月份)对鲣 CPUE 无影响, 空间因子(经纬度)对鲣 CPUE 有显著性影响 ($P < 0.05$)。在经度梯度上, 鲣 CPUE 呈现出自西向东逐渐降低的趋势(图 3-a); 在纬度梯度上, 鲣 CPUE 自南向北先升高再小幅度下降并趋于平缓, 再小幅度增加, 最后小幅度降低(图 3-b)。

(图 4-b)。

2.5.2 延绳钓鲣 CPUE 与环境因子关系

降水对鲣 CPUE 无显著性影响 ($P > 0.05$), SSS 和 SST 对鲣 CPUE 有显著性影响(表 3)。鲣渔场 SSS 范围主要为 34‰~36‰, 鲣 CPUE 与 SSS 呈正相关关系(图 4-e); 鲣渔场 SST 范围主要为 15~29 °C, 鲣 CPUE 先随着温度升高而增加, 当超过 22 °C 时鲣 CPUE 有下降趋势(图 4-d)。

3 讨论

3.1 SSS 与 SST 对 3 种作业方式鲣 CPUE 的影响

鱼类通常对较小范围的盐度变化反应剧烈, 盐度通过影响鱼体的渗透压调节来改变其分布^[28]。作为一种暖水性鱼类, 金枪鱼的分布和丰度表现出与盐度变化显著的相关关系^[29], 鲣属于狭盐性鱼类, 喜生活于高盐海域, 其种群分布与 SSS 之间存在很强的相关性^[30]。杨胜龙等^[31]研究指出鲣生活的盐度范围为 34.0‰~35.5‰, 本研究结果与其相似, 从 GAM 模型图可以看出, 鲣喜好的盐度较高, 渔场分布集中在 SSS 为 34‰~36‰ 范围内,

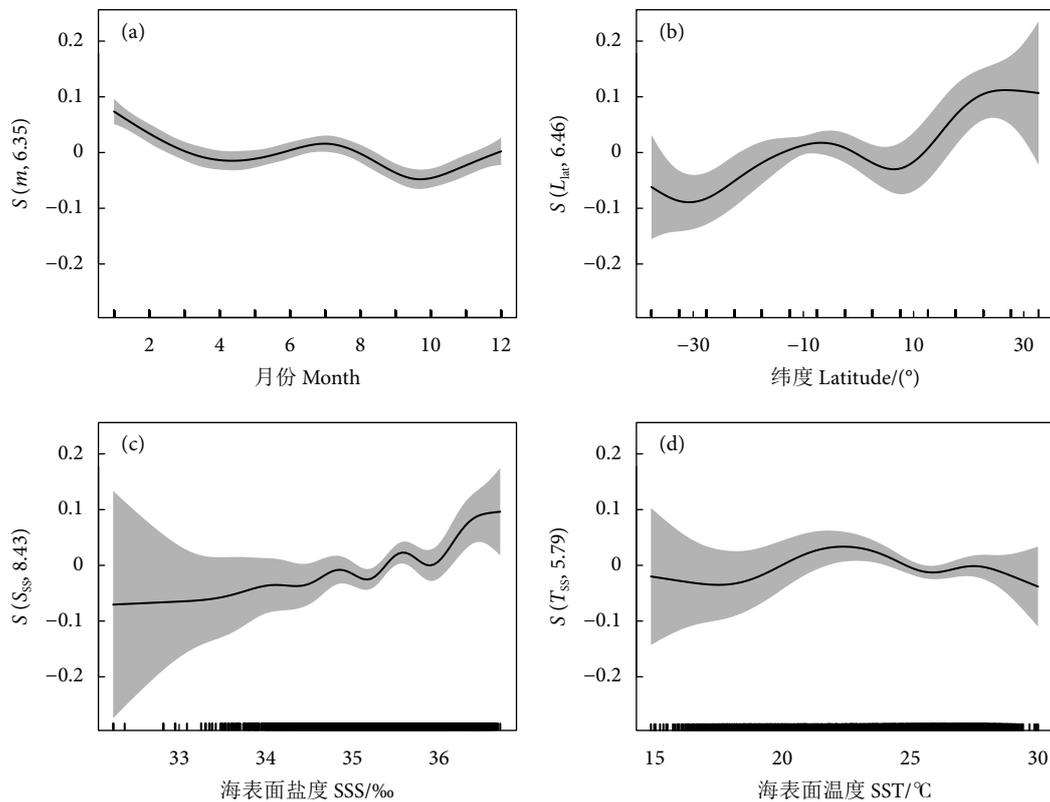


图4 延绳钓鲣 CPUE 与各因子关系

Fig. 4 Relationship between CPUE and various factors for skipjack of longline

双拖作业鲣 CPUE 较高时的 SSS 约为 36‰，这可能与其生存区域的海洋环境有关，毛里塔尼亚沿岸有加那利寒流自北向南海岸走向流动，带来北部的冷水，与由南向北流动的几内亚暖水在布兰科海峡区域混合，形成显著的涌升流^[32]，故此区域内的 SSS 高于其他海域。

鱼类的生理活动有其最佳的 SST 范围，SST 是影响鱼类繁殖、生长及游泳能力等的一个重要因素^[29]。已有研究证明，金枪鱼物种的垂直和水平分布由 SST 变化所引起^[33]，且因生理差异，金枪鱼在不同生命阶段对 SST 的敏感程度也不同，幼鱼随着年龄的增长对 SST 会更加敏感。本研究发现，SST 对 3 种作业方式鲣的影响极为显著 ($P < 0.001$)，且鲣 CPUE 较高时的 SST 不同，双拖作业鲣 CPUE 在 SST 为 20 °C 时最高，围网作业鲣 CPUE 在 SST 为 24 °C 时最高，延绳钓作业鲣 CPUE 在 SST 为 22 °C 时最高；3 种作业方式鲣 CPUE 有着不同的 SST 适宜范围，但当 SST 超过最适区间后其 CPUE 均随着 SST 的升高而降低。说明 SST 的变化对不同海域的鲣资源有着正面和负面的影响，当赤道区温度升至 33~34 °C 时，将超过鲣的耐受范围（其耐受范围介于 20~32 °C）^[14]，此时

SST 对鲣的生存和分布产生了负面影响。

3.2 降水对 3 种作业方式鲣 CPUE 的影响

鲣全年可以进行产卵，繁殖潜力大，每批产卵约 100 万枚^[34]，其繁殖所需的能量主要来自食物摄入^[35]，因此鲣的特点是生长快速和与环境密切相关的产卵行为。鲣迁移距离大，水平迁移距离平均超过 1 000 n mile^[36]，与其他金枪鱼物种相比，鲣的垂直运动有限，仅限于中上层水层，因为其对低溶解氧和低温耐受性有限^[37]；其体温调节能力也较有限，仅适合栖息于相对温暖、含氧量高的水层，因此温跃层深度变化会对鲣的捕捞产生影响；海洋环流的变化可能会影响海洋中饵料，从而影响鲣的小规模分布^[38]。鲣对海洋环境条件变化十分敏感^[6]，种群分布极易受其影响，降水可以通过影响海洋初级生产中的有机物，导致养分输送和初级生产者物种组成产生变化^[39-40]，通过改变淡水输送的幅度和时间，影响有机物的输送和海域处理有机物的停留时间和环境条件（光照、分层、微生物群落等）^[41-42]，还可能通过改变沉积物、营养物质和有机物的输送以及改变分层和溶解氧浓度等影响海洋的物理和生物地球化学环境^[43]，从而影响鲣的繁殖、迁徙和摄食来影响其资源的分布。

本研究发现降水对 3 种作业方式鲣 CPUE 的影响不同。降水对双拖和围网作业鲣 CPUE 的影响显著, 且对鲣 CPUE 的影响较为一致, 这 2 种作业方式的鲣均存在适宜生存的降水范围; 而降水对延绳钓作业鲣 CPUE 的影响不显著(表 3), 这可能是由于降水对不同作业方式区域内鲣的栖息地、行为和海洋环境等影响不同所致。本研究中, 双拖作业方式捕捞的鲣在毛里塔尼亚沿岸海域, 存在着几内亚暖流和加那利寒流相交汇的情况, 通常寒暖流的交汇会使得该区域各种渔业资源较为丰富^[44], 这些环境条件有利于幼鱼存活。降雨的变化会影响沿海地区的盐度、水浑浊度和杀虫剂等污染物的浓度, 进而影响生物的繁殖行为, 其对高繁殖力和高生长速度的鲣有显著性影响^[45]。本研究结果显示, 中西太平洋围网鲣 CPUE 与降水存在显著相关关系, 而东太平洋延绳钓鲣 CPUE 与降水无显著相关关系, 这可能由鲣的生物学特性所致, 因鲣在洄游过程中会受到海洋环境变化的性影响^[7], 对于中西太平洋热带海域, 因 SST 常年在 28 °C 以上, 形成了西太平洋暖池, 其提供了太平洋最大比例的金枪鱼捕捞量, 是鲣理想的索饵场^[46], 且在生物生产力方面显示出显著的动态变化; 而对于东太平洋海域, 除了最强厄尔尼诺事件期间外, 初级生产力和“下游”金枪鱼饵料丰度在空间和时间上都很高且稳定。与东太平洋相比, 中西太平洋暖池的次级生产力较低但充足, 可补偿温度、氧气和水透明度等环境条件的不足^[47], 造成降水对两个海域鲣 CPUE 的影响有差异。

降水对 3 种作业方式鲣 CPUE 影响的差异, 还有可能受作业方式的影响, 如捕捞效率差异、捕捞鲣生长发育阶段差异、渔业空间分辨率差异以及捕捞海域饵料差异等。双拖和围网渔具捕捞鲣效率高, 以鲣作为主捕目标, 在空间和时间分布上较为有限^[48]; 延绳钓渔具捕捞鲣效率较低, 鲣作为兼捕物种, 其 CPUE 值较低, 因此数据的稳定性不高, 可能对本研究中降水与鲣 CPUE 的相关性产生了影响。本文采用延绳钓渔业数据, 由于不同作业方式的模型处理和 CPUE 计算方法一致, 且延绳钓渔业可提供大空间尺度和时间尺度相对一致的数据^[49], 因此仍是优良的数据来源; 日本延绳钓船队主要捕捞对象为各个鱼种中体型较大的个体, 因此本文使用的是鲣生长发育成熟阶段的数据, 预测的资源分布也应被视为成熟鲣的分布变化, 此阶段

鲣的游泳和觅食能力较强。有研究发现有叉长大于 45 cm 的鲣才可以在黑潮充分觅食后, 迁移到黑潮最北端^[50], 围网和双拖作业方式捕捞的鲣集群性较高, 且捕捞的幼鱼对降水影响的响应较高, 这可能导致降水对延绳钓作业方式鲣 CPUE 的影响不显著; 本文使用的双拖和围网作业鲣数据均为海上实测渔业数据, 空间分辨率较小(0.25°), 而延绳钓作业鲣数据为美洲热带金枪鱼委员会网站记录的组织数据, 空间分辨率较大(5°), 随着空间尺度的增大, 各个小渔区所包括的海域面积增加, 渔区内所包含的环境信息也增多^[51], 可能会影响降水与鲣 CPUE 的相关性; 在延绳钓渔业作业过程中, 用钓线结缚装饵料的钓钩来引诱金枪鱼吞食^[52], 会造成捕捞海域的鲣饵料较多, 从而导致鲣 CPUE 受降水的影响不显著。

4 小结

本研究使用 GAM 模型对降水、SSS、SST 海洋环境因子与鲣 CPUE 关系进行分析, 结果表明降水与常规海洋环境因子一样会对鲣资源变动产生影响。建议在今后分析环境因子对渔业 CPUE 的影响效果时, 将降水纳入常规海洋环境因子中。后续研究需要探讨更多的环境因子, 如叶绿素 *a* 浓度、海表面高度等, 以及大尺度气候变化对渔业资源的影响, 从而更全面地解释物种资源丰度变动与环境因子间的关系。

参考文献:

- [1] COLLETE B B. FAO species catalogue, Vol 2. Scombrids of the world: an annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date[J]. FAO Fish Synop, 1983, 125: 1-137.
- [2] ZAINUDDIN M. Skipjack tuna in relation to sea surface temperature and chlorophyll-*a* concentration of Bone Bay using remotely sensed satellite data[J]. J Ilmu Teknol Kelaut, 2011, 3(1): 82-90.
- [3] 陈洋洋, 陈新军, 郭立新, 等. 基于捕捞努力量的中西太平洋鲣鱼围网渔业入渔预测分析 [J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 32-45.
- [4] KIM J, NA H, PARK Y G, et al. Potential predictability of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) catches in the Western Central Pacific[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 3193-3199.
- [5] DRUON J, CHASSOT E, MURUA H, et al. Preferred feeding habitat of skipjack tuna in the eastern central Atlantic and western Indian Oceans: relations with carrying capacity and vulnerability to purse seine fishing[C]. Seychelles: IOTC Proceedings, 2016: 18-31.
- [6] YEN K W, LU H J, HSIEH C H. Using remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for skipjacks in the western central

- Pacific Ocean[J]. 台湾水产学会刊, 2012, 39(4): 235-246.
- [7] 朱若雅, 许子安, 汪金涛, 等. 基于捕捞努力量的中西太平洋鲹鱼栖息地适宜性指数模型优化 [J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(6): 81-87.
- [8] HSU T Y, CHANG Y, LEE M A, et al. Predicting skipjack tuna fishing grounds in the Western and Central Pacific Ocean based on high-spatial-temporal-resolution satellite data[J]. Remote Sens, 2021, 13(5): 861-877.
- [9] 方舟, 陈洋洋, 陈新军, 等. 基于不同环境因子的中西太平洋鲹鱼资源丰度灰色预测模型构建 [J]. 海洋学研究, 2018, 36(4): 60-67.
- [10] PUTRI A, ZAINUDDIN M. Impact of climate changes on skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) catch during May–July in the Makassar Strait[J]. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 2019, 253(1): 1-8.
- [11] 冯虎年, 陆化杰, 汪金涛. 中西太平洋围网鲹鱼 CPUE 时空分布与环境因子关系 [J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(1): 33-40.
- [12] LEHODEY P, SENINA I, CALMETTES B, et al. Modelling the impact of climate change on Pacific skipjack tuna population and fisheries[J]. Climatic Change, 2013, 119: 95-109.
- [13] 李亚楠, 陈新军. 印度洋鲹鱼围网资源渔场时空变化及其与 ENSO 的关系 [J]. 海洋学报, 2017, 39(4): 72-78.
- [14] DUERI S, BOPP L, MAURY O. Projecting the impacts of climate change on skipjack tuna abundance and spatial distribution[J]. Global Change Biol, 2014, 20(3): 742-753.
- [15] DRUON J N, CHASSOT E, MURUA H, et al. Skipjack tuna availability for purse seine fisheries is driven by suitable feeding habitat dynamics in the Atlantic and Indian Oceans[J]. Front Mar Sci, 2017, 4: 315-332.
- [16] ADLER R F, GU G, SAPIANO M, et al. Global precipitation: means, variations and trends during the satellite era (1979–2014) [J]. Surv Geophys, 2017, 38: 679-699.
- [17] TRENBERTH K E, SHEA D J. Relationships between precipitation and surface temperature[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32(14): 1-4.
- [18] LONG S M, XIE S P, ZHENG X T, et al. Fast and slow responses to global warming: sea surface temperature and precipitation patterns[J]. J Climate, 2014, 27(1): 285-299.
- [19] MEYNECKE J O, LEE S Y, DUKE N C, et al. Effect of rainfall as a component of climate change on estuarine fish production in Queensland, Australia[J]. Estuar Coast Shelf S, 2006, 69(3/4): 491-504.
- [20] SOBRINO I, SILVA L, BELLIDO J, et al. Rainfall, river discharges and sea temperature as factors affecting abundance of two coastal benthic cephalopod species in the Gulf of Cadiz (SW Spain)[J]. B Mar Sci, 2002, 71(2): 851-865.
- [21] MINTA S O. An assessment of the vulnerability of Ghana's coastal artisanal fishery to climate change[D]. Troms: Universitetet i Tromsø, 2003: 56.
- [22] le PAPE O, CHAUVET F, DÉSAUNAY Y, et al. Relationship between interannual variations of the river plume and the extent of nursery grounds for the common sole (*Solea solea*, L.) in Vilaine Bay. Effects on recruitment variability[J]. J Sea Res, 2003, 50(2/3): 177-185.
- [23] GILLSON J, SCANDOL J, SUTHERS I. Estuarine gillnet fishery catch rates decline during drought in eastern Australia[J]. Fish Res, 2009, 99(1): 26-37.
- [24] 罗丽, 戴长雷, 李梦玲, 等. 基于 GIS 的黑龙江省多年平均降水量空间插值分析比较 [J]. 吉林水利, 2021(10): 9-16.
- [25] 方舟, 陈洋洋, 陈新军, 等. 基于不同模型研究环境因子对中西太平洋鲹资源丰度的影响 [J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1123-1130.
- [26] RODRIGUES M, de la RIVA J, FOTHERINGHAM S. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression[J]. Appl Geogr, 2014, 48: 52-63.
- [27] 谢笑艳, 汪金涛, 陈新军, 等. 南印度洋长鳍金枪鱼渔获率与水深温度关系研究 [J]. 南方水产科学, 2021, 17(5): 86-92.
- [28] 孙健勋. 结合环境因子的基里巴斯鲹鱼围网渔场兼捕现状及对策分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 4.
- [29] MAHADURAGE I G R. Environmental effect on the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) fishery in the Sri Lankan waters[D]. Busan: Pukyong National University, 2016: 19.
- [30] ROUGERIE F, CHABANNE J. Relationship between tuna and salinity in Tahitian coastal waters[J]. TO-AN, 1983, 17: 12-13.
- [31] 杨胜龙, 周魁芳, 周为峰, 等. 基于 Argo 数据的中西太平洋鲹渔获量与水温、表层盐度关系的初步研究 [J]. 大连水产学院学报, 2010, 25(1): 34-40.
- [32] 韩保平, 方海, 阮雯. 毛里塔尼亚海洋渔业概况 [J]. 现代渔业信息, 2011, 26(4): 20-23.
- [33] NEILL W H, CHANG R K, DIZON A E. Magnitude and ecological implications of thermal inertia in skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis* (Linnaeus)[J]. Environ Biol Fish, 1976, 1: 61-80.
- [34] GRANDE M, MURUA H, ZUDAIRE I, et al. Reproductive timing and reproductive capacity of the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the western Indian Ocean[J]. Fish Res, 2014, 156: 14-22.
- [35] MCBRIDE R S, SOMARAKIS S, FITZHUGH G R, et al. Energy acquisition and allocation to egg production in relation to fish reproductive strategies[J]. Fish Fish, 2015, 16(1): 23-57.
- [36] FONTENEAU A, HALLIER J P. Fifty years of dart tag recoveries for tropical tuna: a global comparison of results for the western Pacific, eastern Pacific, Atlantic, and Indian Oceans[J]. Fish Res, 2015, 163: 7-22.
- [37] GRAHAM J B, DICKSON K A. Tuna comparative physiology[J]. J Exp Biol, 2004, 207(23): 4015-4024.
- [38] LOUKOS H, MONFRAY P, BOPP L, et al. Potential changes in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat from a global warming scenario: modelling approach and preliminary results[J]. Fish Oceanogr, 2003, 12(4/5): 474-482.
- [39] DONEY S C. The growing human footprint on coastal and open-

- ocean biogeochemistry[J]. *Sci*, 2010, 328(5985): 1512-1516.
- [40] NAJJAR R G, PYKE C R, ADAMS M B, et al. Potential climate-change impacts on the Chesapeake Bay[J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2010, 86(1): 1-20.
- [41] RABALAIS N N, TURNER R E, DÍAZ R J, et al. Global change and eutrophication of coastal waters[J]. *ICES J Mar Sci*, 2009, 66(7): 1528-1537.
- [42] WHITEHEAD P G, WILBY R L, BATTARBEE R W, et al. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality[J]. *Hydrolog Sci J*, 2009, 54(1): 101-123.
- [43] DONEY S C, RUCKELSHAUS M, EMMETT DUFFY J, et al. Climate change impacts on marine ecosystems[J]. *Annu Rev Mar Sci*, 2012, 4: 11-37.
- [44] 吴越, 沈建林, 黄洪亮, 等. 毛里塔尼亚头足类资源及渔业现状[J]. *渔业信息与战略*, 2017, 32(3): 217-224.
- [45] BLABER S, BLABER T. Factors affecting the distribution of juvenile estuarine and inshore fish[J]. *J Fish Biol*, 1980, 17(2): 143-162.
- [46] 胡奎伟, 朱国平, 王学昉, 等. 中西太平洋鲹鱼丰度的时空分布及其与表温的关系[J]. *海洋渔业*, 2011, 33(4): 417-422.
- [47] LEHODEY P. The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO[J]. *Prog Oceanogr*, 2001, 49(1/2/3/4): 439-468.
- [48] ERAUSKIN-EXTRAMIANA M, ARRIZABALAGA H, HOBDDAY A J, et al. Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean[J]. *Global Change Biol*, 2019, 25(6): 2043-2060.
- [49] ARRIZABALAGA H, DUFOUR F, KELL L, et al. Global habitat preferences of commercially valuable tuna[J]. *Deep-Sea Res II*, 2015, 113: 102-112.
- [50] NIHIRA A. Studies on the behavioral ecology and physiology of migratory fish schools of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the oceanic frontal area [Japan][J]. *Bulletin of Tohoku National Fisheries Research Institute (Japan)*, 1996, 58: 137-233.
- [51] 魏广恩, 陈新军. 不同环境模式下空间分辨率对北太平洋柔鱼 CPUE 标准化的影响[J]. *海洋科学*, 2021, 45(4): 147-158.
- [52] 宋利明, 许回. 金枪鱼延绳钓渔获性能研究进展[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(7): 925-937.