

DOI: 10.12264/JFSC2024-0250

印度洋长鳍金枪鱼不同生活史阶段栖息地时空分布

徐胜, 官文江

上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306

摘要: 长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是印度洋金枪鱼渔业的重要目标鱼种。作为中上层洄游性鱼类, 其分布受到海洋环境的影响。为探究海洋环境变动对长鳍金枪鱼栖息地时空分布的影响, 本研究利用 2001—2016 年印度洋海洋环境数据, 构建了印度洋长鳍金枪鱼不同生活史阶段的栖息地模型, 通过对比模型预测的适宜栖息地位置与实际渔获量分布的关系对模型准确性进行了验证, 使用受试者工作特征曲线下的面积(area under curve, AUC)对模型进行了评价, 并在此基础上分析了不同生活史阶段长鳍金枪鱼适宜栖息地的年际变动。研究结果表明: (1) 渔获量大值区与模型预测的适宜栖息地基本重合, 性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼栖息地模型月平均 AUC 值分别为 0.79 和 0.73, 预测准确率较高; (2) 模型预测的性未成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地在 1—6 月位于 25°S~40°S 海域, 7—12 月位于 20°S~40°S 海域; 性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地在产卵期位于 10°S~25°S 马达加斯加岛以东海域, 非产卵期位于 25°S~45°S 海域; (3) 性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地都呈逐年南移趋势。以上结果对理解长鳍金枪鱼种群动态、促进其资源可持续利用具有重要科学意义。

关键词: 印度洋; 长鳍金枪鱼; 栖息地指数; 年际变动

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)02-0214-14

长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是金枪鱼渔业的重要目标鱼种, 广泛分布于各大洋温带、亚热带海域, 具有高度季节性洄游特征^[1]。在印度洋, 不同生活史阶段的长鳍金枪鱼在空间分布上存在差异, 即性未成熟个体主要分布于 30°S~45°S 海域, 而大部分性成熟个体则在 10°S~45°S 海域均有分布, 并且产卵期主要集中于 10°S~25°S 海域^[2]。印度洋长鳍金枪鱼渔业始于 20 世纪 50 年代, 在 2001 年渔获量达到最高值 4.5 万 t, 当前平均年渔获量约为 4 万 t, 占全球长鳍金枪鱼总渔获量的 15%^[3]。印度洋金枪鱼委员会(Indian Ocean tuna commission, IOTC)温带金枪鱼工作组(working party on temperate tunas, WPTmT)的评估结果表明长鳍金枪鱼暂未被过度捕捞, 但由于长鳍金枪鱼种群结构及其空间动态不明确, 其资源评估结

果存在较大的不确定性^[4]。因此, 预测印度洋长鳍金枪鱼的时空分布及其变化趋势, 对长鳍金枪鱼资源的合理开发与管理利用具有重要科学意义。

目前, 已有多种模型应用于印度洋长鳍金枪鱼栖息地的研究, 包括广义线性模型^[5]、神经网络模型^[6]、栖息地模型^[7]、广义加性模型^[8]等。然而上述模型没有体现长鳍金枪鱼在不同生活史阶段对环境需求存在差异的特点, 热带、亚热带温暖海域有利于长鳍金枪鱼鱼卵和仔鱼存活, 而温带充足的饵料能满足幼鱼快速生长的食物需求^[1]。

本研究利用 2001—2016 年印度洋海洋环境数据, 构建了印度洋长鳍金枪鱼不同生活史阶段的栖息地模型。通过对比模型预测的适宜栖息地位置与实际渔获量(渔获尾数)分布的关系对模型准确性进行了验证, 利用受试者工作特性曲线下的

收稿日期: 2024-07-24; 修订日期: 2024-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072981).

作者简介: 徐胜(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估与管理. E-mail: xusheng00417@163.com

通信作者: 官文江, 副教授, 研究方向为渔业资源评估. E-mail: wjguan@shou.edu.cn

面积大小(area under curve, AUC)^[9]对模型进行了评价,并在此基础上分析了不同生活史阶段长鳍金枪鱼栖息地的年际变动,为印度洋长鳍金枪鱼的种群动态与资源可持续利用提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

海洋环境数据包括水温(℃)、溶解氧浓度(mL/L)、海洋净初级生产力(mg/m²·day)、真光层深度(m)、弱游泳生物量(g/m²)等,这些数据来源于哥白尼海洋环境监测服务中心(Copernicus-Marine Environment Monitoring Service, CMEMS, <https://data.marine.copernicus.eu/products>)。数据的时间分辨率均为天,水温、海洋净初级生产力、真光层深度和弱游泳生物量的空间分辨率为0.083°×0.083°,溶解氧浓度的空间分辨率为0.25°×0.25°,水温在垂直方向共 50 层,溶解氧浓度在垂直方向共 75 层,数据时间范围为 2001 年 1 月至 2016 年 12 月。

印度洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业生产统计数据来源于 IOTC,时间范围为 2001 年 1 月至 2016 年 12 月,渔业数据包括作业时间、作业地点、渔获种类、重量、尾数及放钩数等,数据的时间分辨率为月,空间分辨率为 5°×5°。

1.2 数据处理

在水平方向上使用分辨率为 0.05°×0.05°的网格,利用双线性插值处理,将不同分辨率的海洋环境数据插值到相同分辨率网格内。

在垂直方向上根据真光层深度(Z_{eu})将海洋分为 3 个深度层,分别为表层(0~0.5 Z_{eu})、中层(0.5 Z_{eu} ~3.5 Z_{eu})、深层(3.5 Z_{eu} ~7.5 Z_{eu})^[10-11],设深度层为 Z ,水温 T_Z 和溶解氧浓度 O_Z 由式(1)与式(2)计算:

$$T_Z = \frac{\sum_{h=h_{Zmin}}^{h_{Zmax}-1} T_h (\kappa_{h+1} - \kappa_h)}{\sum_{h=h_{Zmin}}^{h_{Zmax}-1} (\kappa_{h+1} - \kappa_h)} \quad (1)$$

$$O_Z = \frac{\sum_{h=h_{Zmin}}^{h_{Zmax}-1} O_h (\kappa_{h+1} - \kappa_h)}{\sum_{h=h_{Zmin}}^{h_{Zmax}-1} (\kappa_{h+1} - \kappa_h)} \quad (2)$$

式中, κ_h 为第 h 层水深在整个水深范围中所占比重, T_h 和 O_h 分别为第 h 层水温和溶解氧浓度, h_{Zmax} 与 h_{Zmin} 为深度层 Z 水深最大值和最小值对应的垂直层次。

根据弱游泳生物在 3 个深度层内昼夜垂直洄游特征,将弱游泳生物分为 6 类(表 1),其中 m 类的生物量用 F_m 表示。

表 1 各类弱游泳生物白天夜晚所在深度层
Tab. 1 Depth layer where various types of micronekton are located during the day and night

类别 m category	白天所在深度层 depth layer during the day	夜晚所在深度层 depth layer during the night
1	表层 surface	表层 surface
2	中层 middle	中层 middle
3	中层 middle	表层 surface
4	深层 deep	深层 deep
5	深层 deep	中层 middle
6	深层 deep	表层 surface

统计网格的长鳍金枪鱼是否性成熟由其平均体重[总渔获重量除以总渔获尾数,并且去除超过本研究中长鳍金枪鱼渐近体重 43.81 kg 的异常值,渐近体重由下文渐近体长及式(17)计算得到]进行判断,即当平均体重大于 14 kg^[2]时,长鳍金枪鱼为性成熟,否则为性未成熟。平均体重分布如图 1 所示,以 14 kg 为界,性未成熟长鳍金枪鱼渔业数据的平均体重分布范围为 1.57~14 kg,加权平均体重[由式(3)计算得到]为 11.54 kg,性成熟长鳍金枪鱼渔业数据的平均体重分布范围为 14~43.57 kg,加权平均体重为 19.09 kg。

$$\bar{w} = \sum_{j=1}^{k_2} (w_j \cdot C_j / C_s) \quad (3)$$

式中, w_j 为渔区 j 中平均体重, C_j 渔区 j 中渔获量, k_2 为渔区总数, C_s 为总渔获量。

1.3 模型构建

本研究通过构建长鳍金枪鱼栖息地指数 I 以对不同生活史阶段长鳍金枪鱼栖息地进行评价, I 取值范围为 0~1, 1 表示最适宜栖息地, 0 表示最不适宜栖息地, I 大于 0.5 海域定义为适宜栖息地。根据长鳍金枪鱼生活史阶段,将栖息地指数分为产卵栖息地指数(I_s , 即鱼卵、仔鱼及正在产卵成

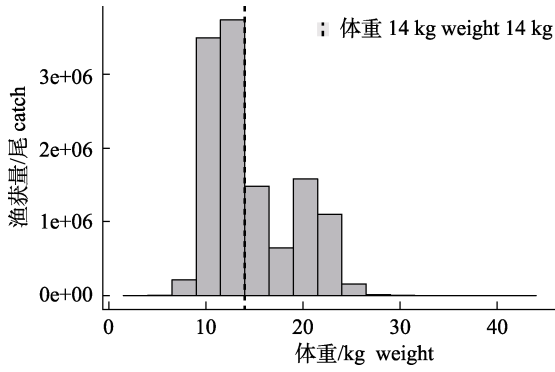


图 1 印度洋长鳍金枪鱼体重分布图

Fig. 1 Weight distribution of albacore tuna in the Indian Ocean

鱼的栖息地指数)与索饵栖息地指数(I_i , 即除鱼卵、仔鱼之外性未成熟鱼与未产卵成鱼的栖息地指数)。长鳍金枪鱼各生活史阶段栖息地指数由式(4)计算^[12]:

$$I = \begin{cases} I_s, 0 \leq l < l_i \\ I_i, l_i \leq l \leq l_k \\ \frac{I_0}{1 + e^{\chi(d-G)}} + \frac{I_i}{1 + e^{\chi(G-d)}}, l_i < l \leq l_k \end{cases} \quad (4)$$

式中, l 为长鳍金枪鱼体长, l_s 和 l_i 为划分长鳍金枪鱼不同生活史阶段栖息地指数的体长阈值, 本研究分别设为 15 cm^[13]和 87.1 cm [14 kg 对应体长, 由下文式(17)计算得到], l_k 为长鳍金枪鱼渐近体长, 本研究设为 125.94 cm, 由文献[14-16]中渐近体长求平均计算得到, I_0 为正在产卵成鱼的栖息地指数(即 $l=0$ 时的 I_s), G 为昼夜时长之比, 参数 d 与 χ 表征索饵与产卵转换的时间点与快慢程度。

由于表层水温、饵料丰度以及被捕食风险是影响长鳍金枪鱼鱼卵和仔鱼存活的重要因素^[12], 因此产卵栖息地指数 I_s 由式(5)至式(9)计算:

$$I_s = \Phi_1(P) \cdot \Phi_2(T_0) \cdot \Phi_3(F_0) / I_{s\max} \quad (5)$$

$$\Phi_1(P) = e^{-\frac{(P-P_s)^2}{\sigma_P^2}} \quad (6)$$

$$\Phi_2(T) = \begin{cases} e^{-\frac{(T-T^{\text{low}})^2}{2\sigma^2}}, T < T_{\text{low}} \\ 1, T^{\text{low}} \leq T \leq T_{\text{up}} \\ e^{-\frac{(T-T^{\text{up}})^2}{2\sigma^2}}, T \geq T_{\text{up}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Phi_3(F_0) = \frac{1}{F_0 e^{0.5\beta_F^2 - \alpha_F}} e^{-\frac{(\log F_0 - \alpha_F)^2}{2\beta_F^2}} \quad (8)$$

$$F_0 = tF_1 + (1-t)(F_1 + F_3 + F_6) \quad (9)$$

式中, $I_{s\max}$ 为产卵栖息地指数最大值, 用于将 I_s 归一化到 0~1 范围内, P 为净初级生产力, 参数 P_s 与 σ_P 为适宜长鳍金枪鱼产卵的最优净初级生产力及适宜区间宽度, T_0 为表层水温, F_0 为表层总弱游泳生物量, T_{low} 和 T_{up} 为长鳍金枪鱼最适宜温度的下限和上限, σ 为长鳍金枪鱼温度适宜区间宽度, 参数 α_F 、 β_F 为长鳍金枪鱼产卵时最优表层弱游泳生物密度及适宜区间宽度, t 为一天中白天时间所占比例。

长鳍金枪鱼索饵行为受水温、溶解氧浓度及饵料影响^[17], 索饵栖息地指数 I_i 计算如下:

$$I_i = \left(\sum_{m=1}^6 \sqrt{\Phi_{2,m}(T) \cdot \Phi_{4,m}(O) \cdot F_m} \right) / I_{i\max} \quad (10)$$

$$\Phi_{2,m}(T) = t \cdot \Phi_2(T_d) + (1-t) \cdot \Phi_2(T_n) \quad (11)$$

$$\Phi_{4,m}(O) = t \cdot \Phi_4(O_d) + (1-t) \cdot \Phi_4(O_n) \quad (12)$$

$$\Phi_4(O) = \frac{1}{1 + \gamma^{O-\hat{O}}} \quad (13)$$

式中, $I_{i\max}$ 为索饵栖息地指数最大值, 用于将 I_i 归一化到 0~1 范围内, T_d 、 T_n 、 O_d 、 O_n 分别为第 m 类弱游泳生物白天(d)与夜晚(n)所在深度层对应的温度和溶解氧浓度, 参数 $\hat{O}$ 为长鳍金枪鱼生存所需最低溶解氧浓度, 参数 γ 为溶解氧浓度函数的曲率系数^[18]。

长鳍金枪鱼随体长增加将寻找更冷的栖息地, 以平衡随体长增加而升高的体温, 同时适宜温度范围扩大^[19], 基于上述理论, 不同生活史阶段长鳍金枪鱼最适宜温度上下限及适宜区间宽度根据体长或体重进行线性内插得到, 计算如下:

$$T_{\text{low}} = T_{0\text{low}} + (T_{k\text{low}} - T_{0\text{low}}) \frac{l}{l_k} \quad (14)$$

$$T_{\text{up}} = T_{0\text{up}} + (T_{k\text{up}} - T_{0\text{up}}) \frac{l}{l_k} \quad (15)$$

$$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_k - \sigma_0) \frac{w}{w_k} \quad (16)$$

其中, w 为长鳍金枪鱼的体重, w_k 为长鳍金枪鱼渐近体重, 参数 $T_{0\text{low}}$ 和 $T_{0\text{up}}$ 为性成熟长鳍金枪鱼最

适产卵温度的下限和上限, 参数 σ_0 为性成熟长鳍金枪鱼最适产卵温度区间宽度, 参数 T_{low} 和 T_{kup} 为长鳍金枪鱼体长达到渐近体长时最适温度的下限和上限, 参数 σ_k 为对应温度适宜区间宽度。

体重(kg)与体长(cm)^[20]的关系如下:

$$w = 0.00001372 \times l^{3.097}$$

(17)

1.4 模型参数设置及估计

本研究所有参数见表 2, 除部分参数来自文献外(表 2), 其他参数利用产卵期(11 月至翌年 2 月)性成熟长鳍金枪鱼渔获量数据及环境数据构造目标函数、并通过最小化目标函数进行估计, 目标函数定义如下:

$$C'_{ymj} = \frac{\log_{10} C_{ymj}}{\log_{10} C_{\max}}$$

(18)

$$\text{MSE} = \sum_{j=1}^{k_1} (C'_{ymj} - I_{0,ymj})^2$$

(19)

式中, C_{ymj} 为 y 年 m 月渔区 j (即 $5^\circ \times 5^\circ$ 统计网格^[21]) 中性成熟长鳍金枪鱼渔获量, $C_{\max}$ 为性成熟长鳍金枪鱼最大渔获量, C'_{ymj} 为归一化后的渔获量数据, 其取值范围在 0~1 之间, $I_{0,ymj}$ 为对应渔区内正在产卵成鱼的栖息地指数均值, k_1 为渔区总数。本研究利用 R4.2.3^[22] 的 nls 函数最小化目标函数, 获得参数估计。通过 50 次迭代以及 0.9 倍和 1.1

倍初始值扰动验证参数估计的准确性; 绘制 $I_{0,ymj}$ 与对应 C'_{ymj} 的关系图, 验证参数估计的合理性。

1.5 模型验证与评价

1.5.1 模型验证 根据性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼加权平均体重, 利用式(17)得到对应体长分别为 82 cm (即体重 11.54 kg 对应体长)和 97 cm (即体重 19.09 kg 对应体长); 据此, 分别计算 2001—2016 年各月所有网格点上性未成熟(体长为 82 cm)与性成熟(体长为 97 cm)长鳍金枪鱼平均栖息地指数, 绘制各月平均栖息地指数空间分布图, 并叠加对应实际渔获量数据以验证模型的准确性。

1.5.2 模型评价 本研究利用 AUC 值对模型预测效果进行评价^[23]。由于计算 AUC 值时需将各月渔区($5^\circ \times 5^\circ$)划分为渔场与非渔场, 为此, 本研究以各月渔获量数据中第二四分位数为阈值划分, 即当渔区渔获量大于该值时, 该渔区为高产渔区, 即渔场(逻辑值为 1), 反之则为低产渔区, 即非渔场(逻辑值为 0)^[24]。AUC 值取值范围为 0.5~1, 将其分为[0.5~0.6)、[0.6~0.7)、[0.7~0.8)、[0.8~0.9)、[0.9~1) 5 个区间, 分别表示模型预测精度较差、一般、较准确、很准确和极准确^[25-26]。本研究以渔区范围内栖息地指数均值表示该渔区栖息地指数, 通过对比性未成熟(体长 82 cm)与性成熟(体长 97 cm)长鳍金枪鱼栖息地模型平均 AUC 值以及不同月份平均 AUC 值, 分析模型对不同生活史阶段长鳍金枪鱼栖息地的预测效果。

1.5.3 栖息地年际变化分析 本研究根据模型预测的结果, 采用一元线性回归分析方法, 计算 2001—2016 年各月所有网格点上性未成熟(体长为 82 cm)与性成熟(体长为 97 cm)长鳍金枪鱼栖息地指数年际变化趋势, 并绘制年际变化显著海域的变化趋势分布图, 变化趋势为正表示该海域栖息地指数逐年增加, 反之则逐年降低, 线性趋势分析的显著性水平设为 0.05。

采用同样的回归分析方法计算长鳍金枪鱼适宜栖息地(栖息地指数大于 0.5 海域)加权平均经纬度的年际变化趋势, 变化趋势为正表示适宜栖息地逐年向东或向北移动, 反之则向西或向南移动。加权平均经纬度的计算方法如下:

表 2 栖息地模型参数来源及值

Tab. 2 Source and value of habitat model parameters

参数 parameters	单位 unit	参数值 value	来源 reference
d	—	1.11	[19]
χ	—	10	本研究假设 assumption
P_s	mg/m ² ·d		本研究估计 estimated
σ_P	—		本研究估计 estimated
σ_0	—		本研究估计 estimated
T_0^{low}	℃		本研究估计 estimated
T_0^{up}	℃		本研究估计 estimated
α_F	g/m ²		本研究估计 estimated
β_F	—		本研究估计 estimated
σ_k	—	5.2	[19]
T_k^{low}	℃	15	[2]
T_k^{up}	℃	21	[2]
$\hat{O}$	mL/L	3.43	[19]
γ	—	10 ⁻⁵	[19]

$$X_{ym} = \frac{\sum_{j=1}^{k_{ym}} \text{lon}_{ymj} \cdot I_{ymj}}{\sum_{j=1}^{k_{ym}} I_{ymj}} \tag{20}$$

$$Y_{ym} = \frac{\sum_{j=1}^{k_{ym}} \text{lat}_{ymj} \cdot I_{ymj}}{\sum_{j=1}^{k_{ym}} I_{ymj}} \tag{21}$$

式中 X_{ym} 、 Y_{ym} 分别为第 y 年、 m 月适宜栖息地加权平均经度、纬度, lon_{ymj} 、 lat_{ymj} 、 I_{ymj} 为对应年月
中栖息地指数大于 0.5 的网格点 j 的经度、纬度、
栖息地指数, k_{ym} 为对应年月
中栖息地指数大于 0.5 的网格点总数。

2 结果与分析

2.1 参数估计

经迭代以及对初始值进行扰动, 参数 σ_P 与 T_{0up} 无法收敛到相同值, 因此本研究分别将其设为 231.34 和 27, 而其他参数经迭代和扰动后均能收敛到相同值, 参数估计较准确(表 3)。

$I_{0,ymj}$ 与对应 C'_{ymj} 呈显著的正相关关系($P<0.05$) (图 2), 表明参数估计结果相对合理。

表 3 栖息地模型参数估计结果
Tab. 3 Estimation results of habitat model parameters

参数 parameter	初始值 initial value	估计值 estimated value
P_s	150	202.09
σ_P	160	231.34
σ_0	3.2	2.67
T_0^{low}	24	23.88
T_0^{up}	26	27
α_F	2.9	3.46
β_F	2.2	1.98

2.2 栖息地空间分布

模型预测的各月性未成熟长鳍金枪鱼月平均栖息地指数空间分布表明(图 3), 3—5 月适宜栖息地主要分布在 25°S~40°S 海域, 6 月适宜栖息地北边界开始逐渐向北移动, 最北到 20°S, 12 月北

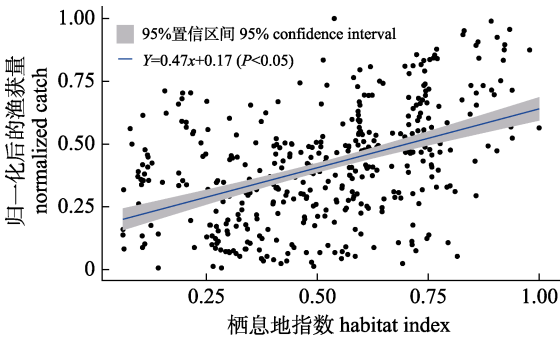


图 2 归一化渔获量值与对应渔区栖息地指数相关关系
Fig. 2 Correlation between the normalized catch and the habitat index of the corresponding fishing area

边界开始南移, 适宜栖息地回到 25°S~40°S 海域, 性未成熟长鳍金枪鱼渔获量大值区与模型预测的适宜栖息地基本重合(图 3)。

模型预测的各月性成熟长鳍金枪鱼月平均栖息地指数空间分布表明(图 4), 4—8 月适宜栖息地主要位于 25°S~45°S 海域, 9 月开始适宜栖息地范围逐渐向北扩大, 10 月至翌年 2 月适宜栖息地分布在 10°S~25°S 马达加斯加岛以东海域, 3 月适宜栖息地开始南移, 逐渐回到 25°S~45°S 海域, 渔获量大值区域与预测的适宜栖息地基本重合(图 4)。

2.3 模型精度

性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼栖息地预测模型月平均 AUC 值分别为 0.79 和 0.73 (表 4), 预测准确率较高。从各月 AUC 值来看(表 4), 在预测性成熟长鳍金枪鱼栖息地分布中第一、四季度比第二、三季度更准确, 而预测性未成熟长鳍金枪鱼栖息地分布时第二、三季度更准确。

2.4 栖息地年际变化

性未成熟长鳍金枪鱼栖息地指数年际变化以 30°S 为界, 10°S~30°S 大部分海域栖息地指数逐年呈减小趋势, 30°S~45°S 大部分海域栖息地指数逐年呈增大趋势(图 5)。

性成熟长鳍金枪鱼栖息地指数年际变化在 3 月至 9 月以 35°S 为界, 10°S~35°S 海域栖息地指数逐年呈减小趋势, 35°S~45°S 海域呈增大趋势; 在 10 月至翌年 2 月, 圣诞岛西南部、澳大利亚西北部海域栖息地指数逐年呈增大趋势, 马达加斯

加岛东北部海域呈减小趋势(图 6)。

经向上性未成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地呈东移趋势, 但仅 8 月通过显著性检验, 纬向上呈显著南移趋势, 平均每年至少南移 0.08° (表 5)。

性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地变化趋势与性未成熟长鳍金枪鱼基本一致, 经向上东移趋势不显著, 而纬向上平均每年南移 0.08° , 但部分月份(如 3、10、11 月)趋势不显著(表 6)。

3 讨论

3.1 模型参数合理性及不确定性分析

研究表明长鳍金枪鱼鱼卵、仔鱼仅在表层水温 24°C 以上的海域被发现, 高水温有利于鱼卵和仔鱼的生长和发育^[1]。在印度洋海域的相关研究中, Chen 等^[2]研究发现产卵期长鳍金枪鱼成鱼主要出现在 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$ 海域, 张亚男等^[26]认为产卵期长鳍金枪鱼最适宜温度为 $23.5\sim 28.5^{\circ}\text{C}$ 。由于长

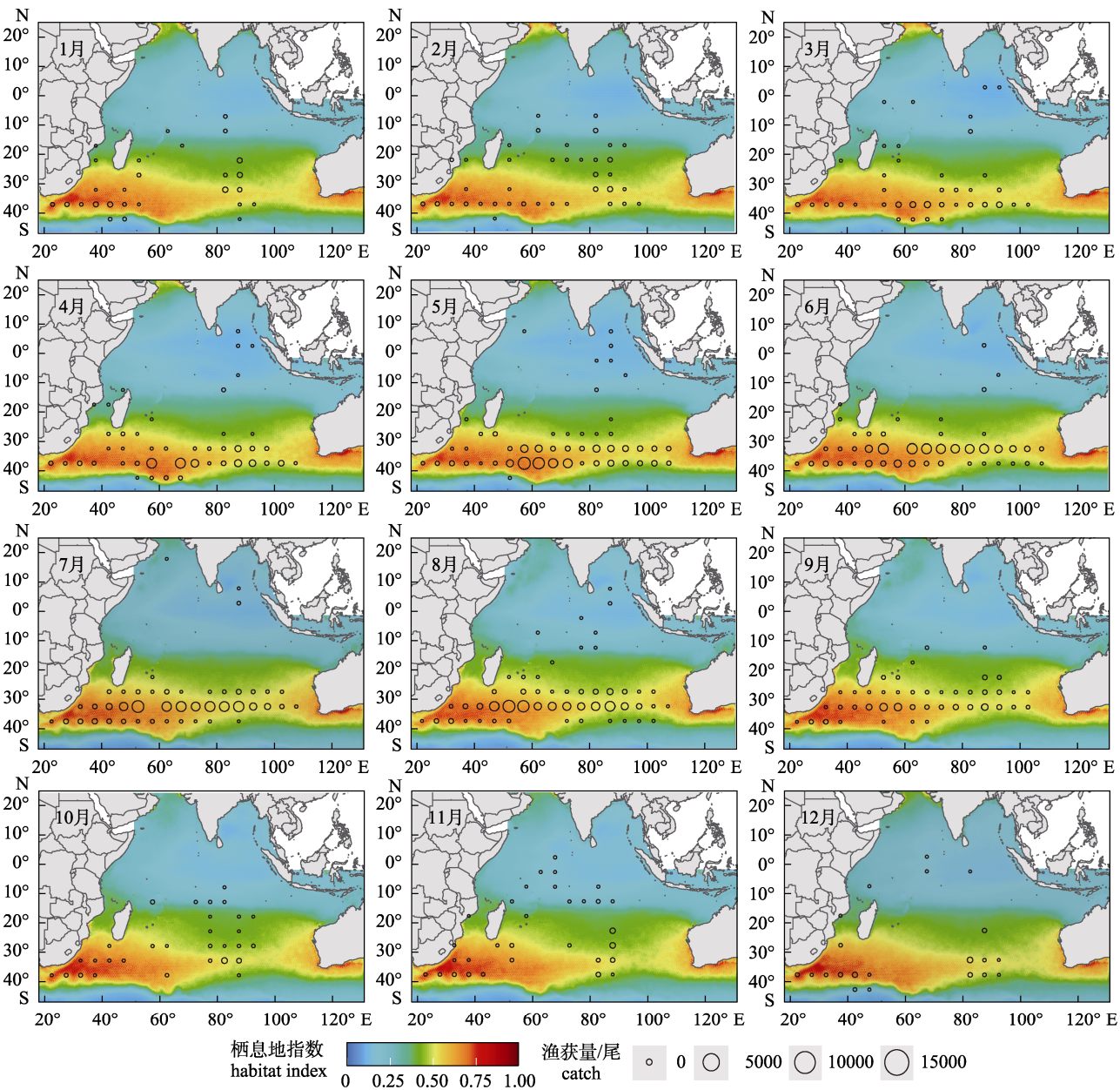


图 3 各月性未成熟长鳍金枪鱼平均栖息地指数与实际渔获量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean habitat index and actual catch of sexually immature albacore tuna by month

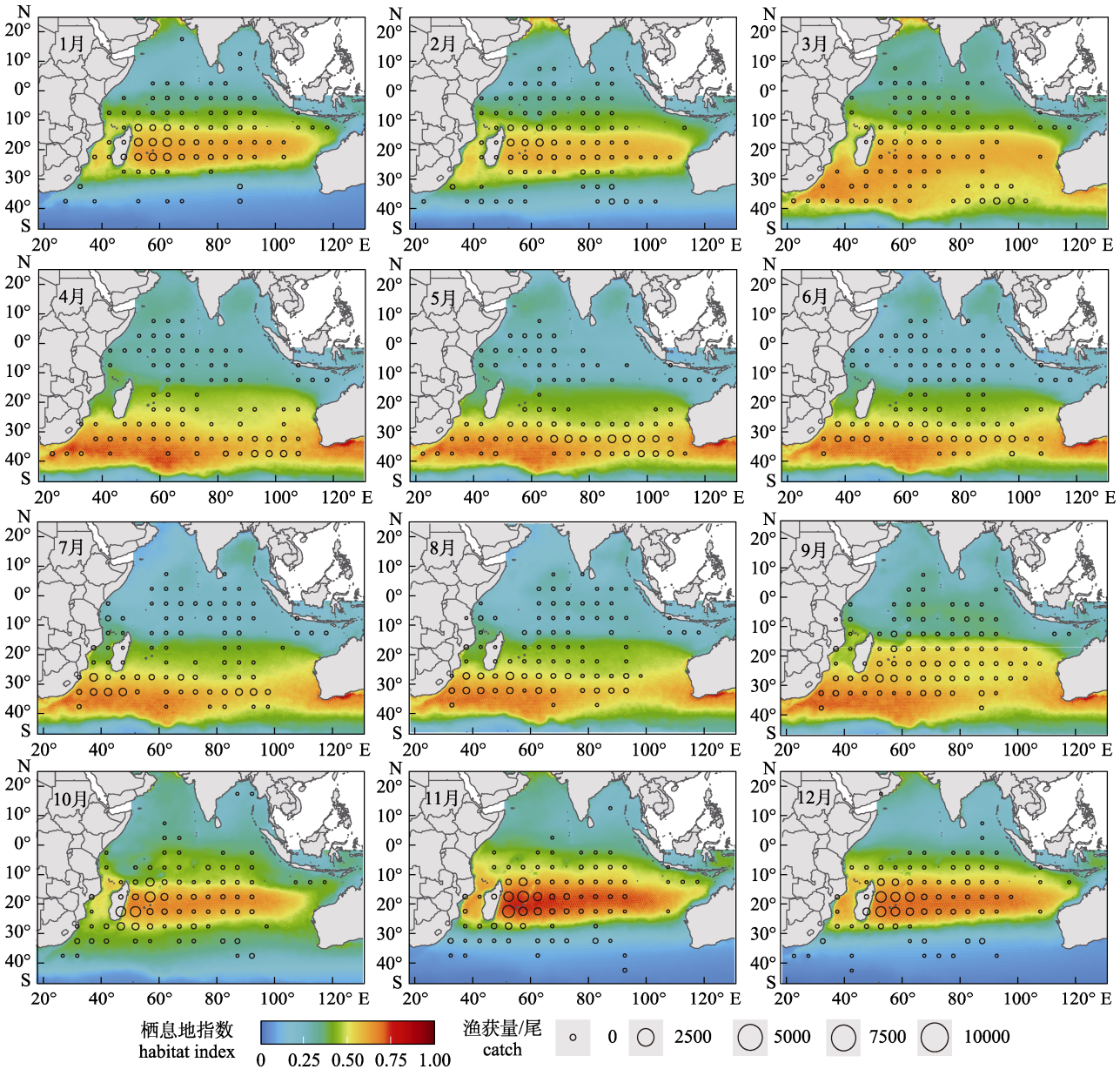


图 4 各月性成熟长鳍金枪鱼平均栖息地指数与实际渔获量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean habitat index and actual catch of sexually mature albacore tuna by month

表 4 不同月份性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼栖息地预测模型的 AUC 值

Tab. 4 AUC of habitat prediction models for sexually immature albacore tuna and sexually mature albacore tuna in different months

月份 month	性未成熟长鳍金枪鱼 sexually immature albacore tuna	性成熟长鳍金枪鱼 sexually mature albacore tuna	月份 month	性未成熟长鳍金枪鱼 sexually immature albacore tuna	性成熟长鳍金枪鱼 sexually mature albacore tuna
1 月	0.70	0.83	8 月	0.87	0.65
2 月	0.76	0.75	9 月	0.87	0.72
3 月	0.77	0.73	10 月	0.74	0.86
4 月	0.84	0.66	11 月	0.65	0.78
5 月	0.85	0.73	12 月	0.63	0.80
6 月	0.91	0.63	均值 average	0.79	0.73
7 月	0.93	0.60			

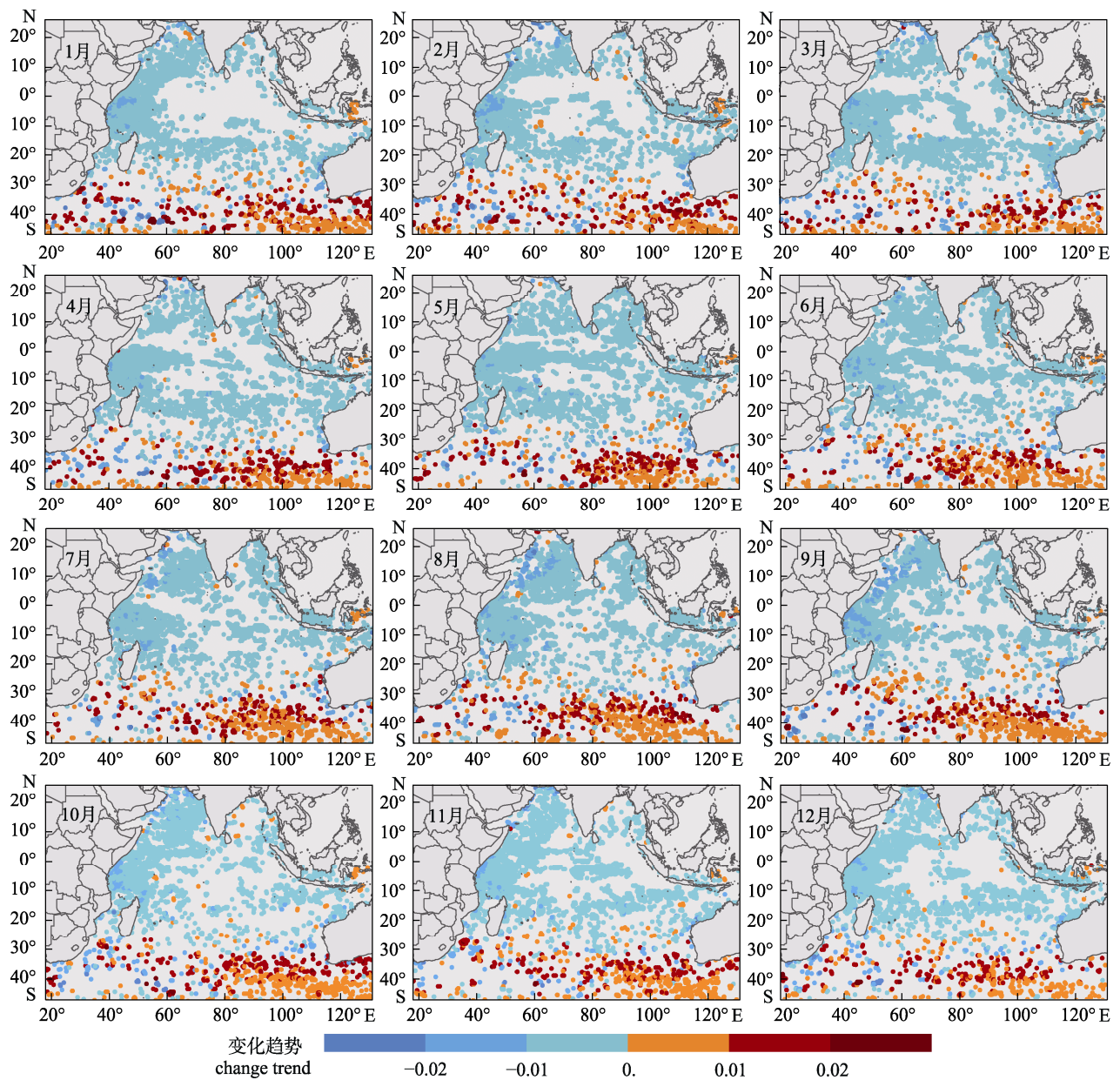


图 5 各月性未成熟长鳍金枪鱼栖息地指数年际变化显著(通过 95%的显著性检验)区域
(白色区域趋势变化不显著)变化趋势分布

Fig. 5 Distribution of trends in areas with significant (passed 95% significance test) inter-annual changes in habitat index for sexually mature albacore tuna by month (not significant trend change in white areas)

鳍金枪鱼产卵最适温度上限估计不收敛, 本研究采用了相关文献^[1-2]的结果即 27 °C; 本研究估计的长鳍金枪鱼产卵最适温度下限为 23.88 °C; 对比上述研究结果, 本研究长鳍金枪鱼产卵最适温度范围的设置具有合理性。

产卵期, 印度洋长鳍金枪鱼主要产卵场^[2]净初级生产力范围在 128~277 mg/(m²·d), 本研究估计的最适净初级生产力相对合理(表 3), 但在估计

参数 σ_P 时结果不收敛, 因此本研究根据主要产卵场净初级生产力范围, 设置参数 σ_P , 使得在该范围内 $\Phi_1(P)$ 大于 0.9, 未来需要收集分辨率更高的渔业统计数据以估计该参数、提高模型可信度。

当前, 长鳍金枪鱼的产卵期尚不明确, Nikolic 等^[1]研究认为, 11—12 月为印度洋长鳍金枪鱼产卵高峰期; Koto^[27]研究表明长鳍金枪鱼成鱼在 12 月至翌年 2 月进行产卵, 因此, 本研究假设 11 月

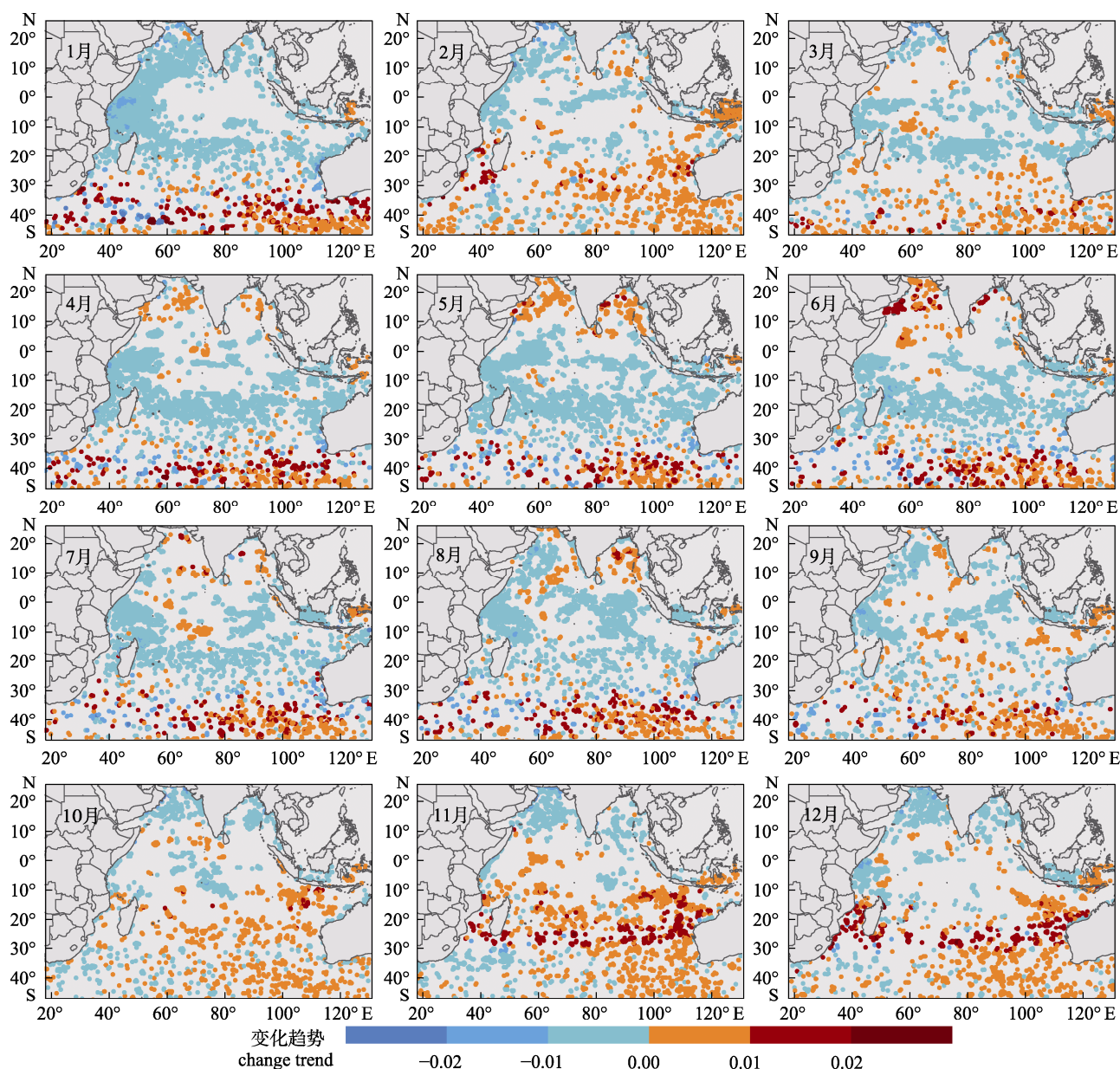


图 6 各月性成熟长鳍金枪鱼栖息地指数年际变化显著(通过 95% 的显著性检验)区域
(白色区域趋势变化不显著)的变化趋势分布

Fig. 6 Distribution of trends in areas with significant (by 95% test of significance) inter-annual variation in habitat indices for sexually mature albacore tuna by month (not significant trend change in white areas)

至翌年 2 月为印度洋长鳍金枪鱼产卵期。为使模型较好预测性成熟长鳍金枪鱼栖息地指数,需要对参数 χ 进行合理设置,由于当前缺乏精确描述性成熟长鳍金枪鱼移动的渔业数据^[18],该参数难以估计,当其值取 1000 时^[12],9 月 25°S 以北栖息地指数较高,25°S 以南栖息地指数较低,栖息地指数大值区与实际渔获量大值区重合度较低,而

将其设为 10 时具有较高的重合度,低于该值则会导致 11 月产卵场栖息地指数较低,预测效果不佳。

由于渔业统计数据缺少准确的体长组成,部分参数无法估计,因此采用相关文献中的参数值,造成本研究中参数设置存在较大的不确定性。尽管如此,本研究结果表明, $I_{0,ymj}$ 与 C'_{ymj} 具有显著的线性相关性(图 2),参数估计或设置仍相对合理。

表 5 各月性未成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地
加权平均经纬度年际变化趋势
Tab. 5 Inter-annual trends in weighted mean latitude
and longitude of suitable habitat for sexually
immature albacore tuna by month

月份 month	经度 longitude		纬度 latitude	
	变化趋势 change trend	<i>P</i>	变化趋势 change trend	<i>P</i>
1 月	0.05	0.22	-0.14	<0.05
2 月	0.06	0.10	-0.12	<0.05
3 月	0.04	0.44	-0.09	<0.05
4 月	0.01	0.74	-0.08	<0.05
5 月	0.05	0.17	-0.08	<0.05
6 月	0.05	0.23	-0.09	<0.05
7 月	0.06	0.32	-0.12	<0.05
8 月	0.09	<0.05	-0.13	<0.05
9 月	0.06	0.33	-0.14	<0.05
10 月	0.09	0.19	-0.12	<0.05
11 月	0.06	0.34	-0.11	<0.05
12 月	0.04	0.47	-0.12	<0.05

表 6 各月性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地
加权平均经纬度年际变化趋势
Tab. 6 Inter-annual trends in weighted mean latitude
and longitude of suitable habitat for sexually
mature albacore tuna by month

月份 month	经度 longitude		纬度 latitude	
	变化趋势 change trend	<i>P</i>	变化趋势 change trend	<i>P</i>
1 月	0.06	0.25	-0.09	<0.05
2 月	0.05	0.53	-0.11	<0.05
3 月	0.04	0.59	-0.13	0.26
4 月	0.01	0.97	-0.10	<0.05
5 月	0.04	0.29	-0.08	<0.05
6 月	0.04	0.28	-0.06	<0.05
7 月	0.03	0.57	-0.08	<0.05
8 月	0.02	0.5	-0.09	<0.05
9 月	0.02	0.82	-0.08	<0.05
10 月	0.03	0.86	-0.07	0.06
11 月	0.18	0.12	-0.03	0.14
12 月	0.11	0.08	-0.06	<0.05

3.2 栖息地分布

研究表明, 印度洋长鳍金枪鱼主要产卵场位于马达加斯加以东 10°S~25°S 海域^[2], 除了马达加斯加以东海域外, 西印度洋赤道附近、圣诞岛西南海域及澳大利亚西北海域均可能是产卵场^[28]。

本研究预测的产卵场与实际产卵场基本吻合^[29], 但也有少部分区域未能重叠, 如澳大利亚西北海域, 低栖息地指数的预测与该海域具有较高净初级生产力有关, 较高净初级生产力增加了鱼卵和仔鱼被捕食的风险, 不利于其存活, 实际渔获量分布表明, 该海域渔获量也较低, 因此, 即使该海域是产卵场, 其重要性也较低, 低栖息地指数的预测具有一定的合理性。

非产卵期, 性成熟长鳍金枪鱼主要分布在 25°S~45°S 海域, 该结果与陈雪忠等^[30]利用基于随机森林模型以及张亚男等^[26]利用栖息地指数模型得到的结果基本一致, 该海域也是长鳍金枪鱼主要索饵场^[31]; 但与 Chen 等^[2]利用中国台湾延绳钓渔业数据分析得到的性成熟长鳍金枪鱼主要分布于 10°S~25°S 存在差异, 原因可能为 Chen 等结论通过 1979—1985 年渔业数据统计得到, 与本研究时间范围相距较久, 渔业数据因船队捕捞位置、放钩数量、目标鱼种的改变而存在差异^[32], 进而影响了研究结果; 此外, 从其研究的印度洋长鳍金枪鱼单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)分布也可发现, 在非产卵期性成熟长鳍金枪鱼 CPUE 高值区主要集中于 25°S~40°S, 与本研究相一致。实际捕捞中^[33]发现在 32°S~35°S 范围内长鳍金枪鱼平均体重随着纬度增加而增加, 并且平均体重超过 14 kg, 表明在 32°S 以南同样会存在较多的性成熟长鳍金枪鱼个体。根据渔业数据统计, 性成熟长鳍金枪鱼第一季度与第四季度主要分布于 10°S~25°S 海域, 而第二季度与第三季度分布于 25°S~40°S 海域^[34], 表明性成熟长鳍金枪鱼会随着季节南北洄游, 而非一直停留于 10°S~25°S 海域, 与这本研究基本一致。

在性未成熟长鳍金枪鱼栖息地分布预测中, 10 月至翌年 2 月部分海域渔获量大值区未能与栖息地指数大值区重合, 原因为在该时间段内渔船目标鱼种为 10°S~25°S 海域性成熟长鳍金枪鱼^[35], 25°S~40°S 海域性未成熟长鳍金枪鱼渔获量较少, 影响了结果验证。

此外, 性未成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地因受海水温度的影响, 也存在南北季节性变动, 但相

对于性成熟长鳍金枪鱼,其变动范围较小,该结果与 Chen 等^[2]研究基本一致。

由于当前渔业统计数据缺乏体长、体重及年龄组成,本研究仅能通过渔获重量与渔获尾数得到平均体重,从而无法对长鳍金枪鱼所有生活史阶段栖息地指数分布进行验证。为简化,本研究没有具体验证每一体重(或体长)栖息地指数分布的合理性;同时,若体重(或体长)划分过细,则会减少渔业数据量,降低模型验证的可信度,因此本研究仅选取了两个具有代表性的体重(或体长),即 11.54 kg (体长 82 cm)、19.09 kg (体长 97 cm),以验证模型的准确性。根据现有渔业数据平均体重分布特点,11.54 kg (体长 82 cm)与 19.09 kg (体长 97 cm)分别为性未成熟与性成熟渔业数据的平均体重,以分别代表渔获物中所有性未成熟与性成熟部分的渔业数据。未来若有包含体长、体重及年龄组成的渔业统计数据,将能进一步体现不同体长长鳍金枪鱼渔获量数据与对应栖息地指数之间的关系,提升模型验证的可信度。

3.3 栖息地年际变化

在非产卵期,30°S 以北大部分海域性成熟长鳍金枪鱼栖息地指数呈逐年减小趋势,而 30°S 以南呈逐年增大趋势,该结果表明长鳍金枪鱼在热带、亚热带海域索饵的可能性不断降低,而 30°S~45°S 主要索饵海域栖息地质量逐年提高,该结果与 Erasquin-Extramiana 等^[36]发现一致。

在产卵期,圣诞岛西南部、澳大利亚西北部海域性成熟长鳍金枪鱼栖息地质量有所提升,该现象与气候变化有关, Jones 等^[37]研究表明随着气候变暖、海水增温,海洋初级生产力将降低,进而对海洋生物分布造成影响;经计算发现该海域净初级生产力呈逐年降低趋势,净初级生产力的减小降低了长鳍金枪鱼卵和仔鱼被捕食的风险,将吸引更多性成熟长鳍金枪鱼前往该区域产卵, Mondal 等^[38]利用气候模式同样预测出该海域在未来将成为重要产卵场。

性未成熟长鳍金枪鱼与性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地都呈南移趋势,这一发现与 Mondal 等^[38]模拟预测的趋势一致,在南太平洋^[39]和北太平洋^[40]长鳍金枪鱼相关研究中,长鳍金枪鱼适宜栖

息地同样呈现向高纬度转移的趋势。全球变暖导致水温上升^[41],等温线向高纬度移动,使得长鳍金枪鱼适宜栖息地随之向高纬度转移。

3.4 渔场划分

由于本研究使用的渔业统计数据包含了主捕和兼捕长鳍金枪鱼的渔获量,将含有渔获量数据的渔区都假设为长鳍金枪鱼渔场时,易将非渔场错分为渔场,影响模型结果验证,因此本研究根据渔获量大小,以四分位数中的第二四分位数为阈值,将渔区划为渔场与非渔场,以降低兼捕数据对划分长鳍金枪鱼渔场的影响。在相关研究中,曹睿星等^[23]根据捕捞努力量大小采用第二四分位数划分高产渔区与低产渔区,而陈雪忠等^[30]根据捕捞努力量渔获量大小采用第二三分位数划分,本研究设置阈值与上述研究相同或相近。渔业数据来源、质量、分辨率等不同都会影响渔场划分,今后若能确定印度洋长鳍金枪鱼渔场的精确位置,将能进一步提高模型验证的可信度。

4 结论

本研究利用环境数据,构建基于长鳍金枪鱼不同生活史阶段及其对环境需求的栖息地模型,预测了印度洋性未成熟与性成熟长鳍金枪鱼适宜栖息地分布,并通过印度洋金枪鱼渔业委员会提供的印度洋长鳍金枪鱼渔获量数据对模型的准确性进行了验证,利用受试者工作特征曲线下的面积对模型的准确性进行了评价,最后分析了不同生活史阶段长鳍金枪鱼适宜栖息地位置的年际变动。结果表明,适宜栖息地与实际渔获量高值区基本重合,模型预测的准确性较高,并发现在预测时间范围内适宜栖息地有南移趋势。适宜栖息地较大概率为长鳍金枪鱼潜在渔场,但不能完全代表长鳍金枪鱼实际活动区域。未来将栖息地模型与种群动态模型进行耦合,对长鳍金枪鱼时空分布和种群动态进行模拟,或能进一步提升预测结果的可靠性。

参考文献:

- [1] Nikolic N, Morandau G, Hoarau L, et al. Review of albacore tuna, *Thunnus alalunga*, biology, fisheries and man-

- agement[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2017, 27(4): 775-810.
- [2] Chen I C, Lee P F, Tzeng W N. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors[J]. Fisheries Oceanography, 2005, 14(1): 71-80.
- [3] IOTC. Overview of Indian Ocean albacore fisheries[R]. IOTC Secretariat, Document 2022, IOTC-2022-WPTmT08(AS)-04.
- [4] IOTC. Report of the sixth session of the IOTC working party on temperature Tunas[R]. IOTC Secretariat, Document 2016, IOTC-2016-WPTmT06-R.
- [5] Mondal S, Wang Y C, Lee M A, et al. Ensemble three-dimensional habitat modeling of Indian Ocean immature albacore tuna (*Thunnus alalunga*) using remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5278.
- [6] Cheng Y Q, Zhang J B, Wang J T, et al. Study on the relationship between temporal-spatial distribution of Indian Ocean albacore (*Thunnus alalunga*) and marine environment based on neural network[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2021, 52(4): 960-970, 1-6. [程懿麒, 张俊波, 汪金涛, 等. 基于神经网络的印度洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*) 时空分布与海洋环境关系研究[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(4): 960-970, 1-6.]
- [7] Zhu G P, Li F Y, Chen J T, et al. Spawn habitat suitability for albacore (*Thunnus alalunga*) in South-central Indian Ocean[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(5): 697-700, 707. [朱国平, 李凤莹, 陈锦淘, 等. 印度洋中南部长鳍金枪鱼繁殖栖息的适应性[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(5): 697-700, 707.]
- [8] Nugroho S C, Setiawan R Y, Setiawati M D, et al. Estimation of albacore tuna potential fishing grounds in the southeastern Indian Ocean[J]. IEEE Access, 2022, 11: 1141-1147.
- [9] Fawcett T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.
- [10] Lehodey P, Murtugudde R, Senina I. Bridging the gap from ocean models to population dynamics of large marine predators: A model of mid-trophic functional groups[J]. Progress in Oceanography, 2010, 84(1-2): 69-84.
- [11] Lehodey P, Conchon A, Senina I, et al. Optimization of a micronekton model with acoustic data[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(5): 1399-1412.
- [12] Senina I, Sibert J, Lehodey P. Parameter estimation for basin-scale ecosystem-linked population models of large pelagic predators: Application to skipjack tuna[J]. Progress in Oceanography, 2008, 78(4): 319-335.
- [13] IOTC. Stock assessment of albacore tuna in the Indian Ocean for 2014 using Stock Synthesis[R]. Hoyle S D, Sharma R, Herrera M. Document 2014, IOTC-2014-WPTmT05-24.
- [14] IOTC. Age and growth of albacore Tuna (*Thunnus alalunga*) in the southern and central Indian Ocean based on Chinese observer data[R]. Zhou C, Li F, Tang H, et al. Document 2012, IOTC-2012-WPTmT04-16.
- [15] Huang C S, Wu C L, Kuo C L, et al. Age and growth of the Indian Ocean albacore, *Thunnus alalunga*, by scales[R]. FAO/IPTP/TWS/90/53, 1990: 111-112.
- [16] Hsu C C. Parameters estimation of generalized von Bertalanffy growth equation[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1991, 26: 66-77.
- [17] Senina I, Lehodey P, Sibert J, et al. Integrating tagging and fisheries data into a spatial population dynamics model to improve its predictive skills[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2020, 77(3): 576-593.
- [18] Senina I N, Lehodey P, Hampton J, et al. Quantitative modelling of the spatial dynamics of South Pacific and Atlantic albacore tuna populations[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2020, 175: 104667.
- [19] Lehodey P, Senina I, Murtugudde R. A spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM)—Modeling of tuna and tuna-like populations[J]. Progress in Oceanography, 2008, 78(4): 304-318.
- [20] Penney A J. Morphometric relationships, annual catches and catch-at-size for south African caught south Atlantic albacore (*Thunnus alalunga*)[J]. Collective Volume of Scientific Papers, ICCAT, 1994, 42(1): 371-382.
- [21] Chen Y Y, Chen X J, Guo L X, et al. Comparison of fishing ground of skipjack based on BP neural network in the western and central Pacific Ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2017, 37(6): 65-73. [陈洋洋, 陈新军, 郭立新, 等. 基于 BP 神经网络的中西太平洋鲣鱼渔场预报模型构建与比较[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(6): 65-73.]
- [22] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing[M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.
- [23] Cao R X, Guan W J, Gao F, et al. Prediction of chub mackerel fishing ground distribution in the East China Sea and Yellow Sea based on maximum entropy model and habitat suitability index model[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 72-81. [曹睿星, 官文江, 高峰, 等. 基于最大熵和栖息地指数模型预测东、黄海日本鲭渔场分布[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 72-81.]
- [24] Metz C E. Basic principles of ROC analysis[J]. Seminars in Nuclear Medicine, 1978, 8(4): 283-298.
- [25] Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC

- curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.]
- [26] Zhang Y N, Guan W J, Li Y D. Construction and verification of a habitat suitability index model for the Indian Ocean albacore tuna[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, 29(2): 268-279. [张亚男, 官文江, 李阳东. 印度洋长鳍金枪鱼栖息地指数模型的构建与验证[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(2): 268-279.]
- [27] Koto T. Distribution and movement of the albacore in the Indian and the Atlantic Oceans based on the catch statistics of Japanese tuna longline fishery[J]. *Bulletin of the Far Seas Fisheries Research Laboratory*, 1969, 1: 115-129.
- [28] Guan W J, Zhu J F, Gao F. Analysis of influencing factors on stock assessment of the Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 1102-1114. [官文江, 朱江峰, 高峰. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估的影响因素分析[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 1102-1114.]
- [29] IOTC. Short review on biology, structure, and migration of *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean[R]. Nikolic N, Fonteneau A, Hoarau L, et al., Document 2014, IOTC-2014-WPTmT05-13_Rev 2.
- [30] Chen X Z, Fan W, Cui X S, et al. Fishing ground forecasting of *Thunnus alalunga* in Indian Ocean based on random forest[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(1): 158-164. [陈雪忠, 樊伟, 崔雪森, 等. 基于随机森林的印度洋长鳍金枪鱼渔场预报[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 158-164.]
- [31] Chen X J. Distant-water fishery: Resources and fishing grounds[M]. Beijing: Science Press, 2018. [陈新军. 远洋渔业概论——资源与渔场[M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [32] Nieto K, Xu Y, Teo S L H, et al. How important are coastal fronts to albacore tuna (*Thunnus alalunga*) habitat in the Northeast Pacific Ocean?[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 150: 62-71.
- [33] Wang X Q, Lin Y, Wu J R. Initial analysis on exploring fishing ground for albacore longline in the Southeast Indian Ocean[J]. *Fishery Information and Strategy*, 2020, 35(3): 198-207. [王晓晴, 林宇, 吴锦仁. 东南印度洋长鳍金枪鱼延绳钓渔场探捕浅析[J]. 渔业信息与战略, 2020, 35(3): 198-207.]
- [34] IOTC. Indian Ocean albacore stock: review of its fishery, biological data and results of its 2014 stock assessment[R]. Fonteneau A, Document 2016, IOTC-2016-WPTmT06-09.
- [35] IOTC. Descriptive analyses of the Taiwanese Indian Ocean longline fishery, focusing on tropical areas[R]. Hoyle S D, Yeh Y M, Chang S T, et al. Document 2015, IOTC-2015-WPTT17-INF09.
- [36] Erauskin-Extramiana M, Arrizabalaga H, Hobday A J, et al. Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2043-2060.
- [37] Jones M C, Cheung W W L. Using fuzzy logic to determine the vulnerability of marine species to climate change[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): e719-e731.
- [38] Mondal S, Ray A, Lee M A, et al. Projected changes in spawning ground distribution of mature albacore tuna in the Indian Ocean under various global climate change scenarios [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(8): 1565.
- [39] Chang Y J, Hsu J, Lai P K, et al. Evaluation of the impacts of climate change on albacore distribution in the South Pacific Ocean by using ensemble forecast[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 731950.
- [40] Christian J R, Holmes J. Changes in albacore tuna habitat in the Northeast Pacific Ocean under anthropogenic warming[J]. *Fisheries Oceanography*, 2016, 25(5): 544-554.
- [41] Oschlies A. Ocean deoxygenation from climate change[M]// Laffoley D, Baxter J M. *Ocean Deoxygenation: Everyone's Problem: Causes, Impacts, Consequences and Solutions*. Gland: IUCNtzerland, 2019: 105-116.

The spatial-temporal distribution of habitat of Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*) at different life history stages

XU Sheng, GUAN Wenjiang

College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Albacore tuna (*Thunnus alalunga*) is an economically important fish in tuna fishery in the Indian Ocean. As a pelagic migratory fish, its distribution is significantly influenced by the marine environment. In this study, we used environmental data from the Indian Ocean spanning from 2001 to 2016 to construct a habitat model for different life history stages of albacore tuna and their corresponding environmental requirements. We validated the accuracy of the model by comparing the predicted suitable habitat locations with the actual distribution of catch quantities. We evaluated the model using the area under the receiver operating characteristic curve (area under curve, AUC) and analyzed the inter-annual variations of suitable habitat at different life history stages of albacore tuna to examine the impact of marine environmental changes on spatial-temporal habitat distribution. The results indicated that: (1) The high catch areas largely overlap with the model-predicted suitable habitat, with monthly average AUC values of 0.79 for immature and 0.73 for mature albacore tuna habitat models, showing high prediction accuracy. (2) The model predicted that suitable habitat for immature albacore tuna was located between 25°S and 40°S in the Indian Ocean from January to June and between 20°S and 40°S from July to December. For mature albacore tuna, the suitable habitat during the spawning period is located east of Madagascar Island between 10°S and 25°S, whereas during the non-spawning period, it is between 25°S and 45°S. (3) Both the suitable habitats for immature and mature albacore tuna showed a year-on-year trend of southward migration. The above results have significant scientific importance for understanding the population dynamics of albacore tuna and promoting sustainable resource utilization.

Key words: Indian Ocean; *Thunnus alalunga*; habitat suitability index; inter-annual variability

Corresponding author: GUAN Wenjiang. E-mail: wjguan@shou.edu.cn