

基于GLM模型的印度洋延绳钓渔业大青鲨钩捕死亡率分析

丁博, 耿喆, 朱江峰

Evaluating at-haulback mortality of blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian Ocean longline fishery based on GLM model

DING Bo, GENG Zhe, ZHU Jiangfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20220103699>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

印度洋西南部海域大青鲨生物学特性初步研究

Preliminary analysis of biology for the blue shark, *Prionace glauca*, in the southwest Indian Ocean

上海海洋大学学报. 2017, 26(2): 271 <https://doi.org/10.12024/jsou.20160301683>

热带大西洋拟锥齿鲨资源动态和空间分布研究

Preliminary analysis of crocodile shark (*Pseudocarcharias kamoharai*) resources information and spatial distribution in the tropical Atlantic Ocean

上海海洋大学学报. 2017, 26(4): 570 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161101910>

热带大西洋金枪鱼延绳钓渔业中海龟的兼捕与保护

Bycatch and conservation of sea turtles by pelagic tuna longline fishery in tropical Atlantic Ocean

上海海洋大学学报. 2021, 30(4): 726 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200102909>

印度洋长鳍金枪鱼栖息地指数模型的构建与验证

Construction and verification of a habitat suitability index model for the Indian Ocean albacore tuna

上海海洋大学学报. 2020, 29(2): 268 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190202533>

环型钩拉伸实验与ANSYS模拟的对比研究

A comparison mechanical property of ring hook between tensile test and ANSYS simulation

上海海洋大学学报. 2017, 26(2): 278 <https://doi.org/10.12024/jsou.20160501767>

文章编号: 1674-5566(2022)03-0700-10

DOI:10.12024/jsou.20220103699

基于 GLM 模型的印度洋延绳钓渔业大青鲨钩捕死亡率分析

丁博^{1,2}, 耿喆^{1,2,3,4}, 朱江峰^{1,2,3,4}

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

摘要: 大青鲨(*Prionace glauca*)是金枪鱼延绳钓渔业的主要兼捕鲨鱼种类。根据 2012—2019 年中国金枪鱼延绳钓观察员在印度洋记录的 1 272 次作业的 778 尾大青鲨数据,运用广义线性模型(generalized linear model, GLM)分析大青鲨的钩捕死亡率(即钩捕上船时死亡个体的比率)和潜在的影响因素。结果表明:大青鲨的总体钩捕死亡率为 13.4%,雄性的钩捕死亡率高于雌性;潜在影响因素中,钓钩类型、钓钩大小、个体长度、捕获深度和捕获纬度对钩获时的存活状态具有显著影响,其中钓钩类型和捕获纬度的影响最大;钩型与纬度的交互项、性别与个体长度的交互项对死亡率也有显著影响。使用鹰嘴钩时,纬度越北,死亡率越小;其他 3 种钩型,纬度越北,死亡率越高。雌性大青鲨的个体越大,死亡率减小;但雄性大青鲨的死亡率与个体大小无明显规律。本研究可为降低大青鲨的钩捕死亡率,促进该海域的资源可持续利用提供科学参考。

关键词: 大青鲨; 金枪鱼延绳钓; 死亡率; 广义线性模型; 印度洋

中图分类号: S 931.2 **文献标志码:** A

由于繁殖力和种群恢复潜力较低,鲨鱼容易受到渔业的过度捕捞^[1]。大青鲨(*Prionace glauca*)是金枪鱼延绳钓渔业最常见的兼捕鱼种^[2],有时兼捕量超过总渔获量的 50%,占兼捕鲨鱼量的 85%~90%^[3-4]。为了评估鲨鱼被钩捕后的死亡率,有关研究采用钩捕死亡率(Athaulback mortality)来定量分析被延绳钓捕获后拖曳到甲板时的死亡尾数占比^[5]。

目前已开展的大青鲨钩捕死亡率研究主要集中在印度洋以外海域^[6-10]。有评估性别、个体长度等生物学特征,以及钓钩类型与钓钩大小等渔具属性对目标鱼种钩捕死亡率的影响。但针对印度洋大青鲨钩捕死亡率的研究缺乏,鉴于此,基于中国远洋渔业观察员记录的渔获数据,分析印度洋金枪鱼延绳钓渔业兼捕大青鲨的钩捕死亡率,并使用广义线性模型(generalized linear model, GLM)评估生物学因素、时空因素、渔具特征因素对于钩捕死亡率的影响。研究大青鲨钩捕死亡率,并通过模型分析生物学、时空变量和渔业操作变量的影响,可深入了解影响钩

捕死亡率的潜在因素,改进渔获量统计和捕捞死亡率估算,从而提高资源评估的准确性,有助于为改进渔具和捕捞策略、减少大青鲨捕获提供实用信息^[11]。

1 材料与方法

1.1 数据来源

所用渔获数据来自中国远洋渔业科学观察员项目,由印度洋金枪鱼延绳钓渔业科学观察员随船记录。观察员按照 IOTC 数据收集的要求接受培训,记录数据包括作业信息(作业位置、钓钩类型、天气状况和饵料状况等)、渔获个体信息(鱼种名称、大小、质量、性别、成熟度、存活状态等),其中存活状态指渔获被捕获拖曳上甲板时的状态,包括存活且健康(A1)、受轻伤(A2)、受重伤接近死亡(A3)、死亡(D)和未知(U)状态。

观察员航次时间跨度为 2012—2019 年,共计 11 个航次,累计观察 1 272 次作业,除未知(U)状态的个体,其余有状态记录的兼捕大青鲨 778 尾,记录的兼捕位置分布见图 1,作业区域范围为

收稿日期: 2022-01-26

修回日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(41676120); 农业农村部全球渔业资源调查监测专项(2021 年度)

作者简介: 丁博(1993—),男,硕士研究生,研究方向为渔业资源。E-mail:806841954@qq.com

通信作者: 朱江峰, E-mail:jfzhu@shou.edu.cn

17°N~11°S,40°E~90°E。观察员航次的渔船为超低温延绳钓渔船,长度 44.4~56.9 m,目标鱼种为大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)。钓具的主绳由尼龙编绳或玻璃丝单丝组成,投放的主绳长度 80 370~249 570 m,浮绳长度 25~40 m,支绳长度 18~50 m,支绳间距 23.2~56.6 m,使用的钓钩以日式金枪鱼钩为主,也包括部分圆形钩、韩式钩和鹰嘴钩。

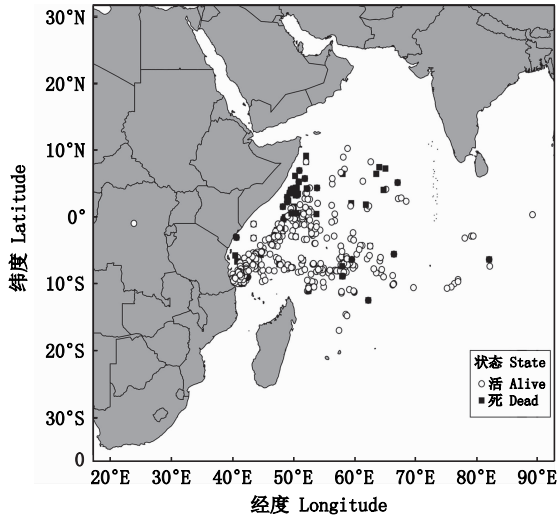


图 1 2012—2019 年印度洋延绳钓观察员航次记录的兼捕大青鲨位置

Fig.1 Locations of blue sharks caught by longline observer trips in the Indian Ocean (2012–2019)

1.2 数据分析

以上述大青鲨为研究对象,分析其钩捕死亡率及其影响因素。剔除未知(U)状态的个体,将剩余 778 尾大青鲨个体状态划分为存活(Alive,包含 A1、A2、A3 三种状态)和死亡(Dead,包含 D 的状态)类别变量,并作为 GLM 模型的响应变量,解释变量包括钩获深度、钩获位置、个体大小、钩型和钓钩大小。

由于钩获深度未能实际观测,因此参考以往的研究,延绳钓钓钩的深度采用几何方法估算。假设无海流影响,两浮球之间延绳钓呈悬链线状态,则捕获鲨鱼的理论钓钩深度可根据两浮子间主绳长(m)、浮绳长(m)、支绳长(m)、支绳间距(m)、投绳速度(m/s)、投绳时船速(kn)计算得出。本研究采用 YOSHIHARA^[12]提出的延绳钓钩深度计算方法,计算公式如下:

$$D_j = F + B +$$

$$\frac{L}{2} \left[\sqrt{1 - \cot^2 \theta} - \sqrt{\left(2 \cdot \frac{j}{N+1}\right)^2 + \cot^2 \theta} \right] \quad (1)$$

$$H_j = \frac{L}{2 \tan \theta} \cdot \sinh^{-1} \left(\tan \theta \cdot \frac{2j - N - 1}{N + 1} \right) + \frac{H}{2} \quad (2)$$

式中: D_j 为钓钩理论深度,m; H_j 为钓钩与最近浮球之间的水平距离; F 为浮子绳长度,m; B 为支线长度,m; L 为两浮子间主绳长度,m; N 为单篮(basket)支线数; θ 为延绳钓主绳在浮子绳末端接合点处切线与水平方向的夹角,(°),与缩短率 k (两个连续浮球间的水平距离与主绳长度的比值)具有以下关系:

$$k = \frac{H}{L} = \cot \theta \cdot \sinh^{-1}(\tan \theta) = \cot \theta \cdot \ln(\tan \theta + \sec \theta) \quad (3)$$

$$L = (N + 1) \cdot S \quad (4)$$

$$H = \frac{S}{V_s} \cdot (N + 1) \cdot V_b \quad (5)$$

式中: H 为两相邻浮子之间的水平距离,m; S 为两相邻支线间的主绳长度,m; V_s 和 V_b 分别为投绳速度和船速,m/s。上述计算得出的大青鲨钩获深度范围为 202.1~297.2 m。

运用卡方检验,对不同性别组、不同捕获时间、不同钓钩类型与个体大小的钩捕死亡率差异进行检验。为排除可能解释变量间存在的多重共线性的问题,通过方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)和 Spearman 相关系数对连续变量的相互独立性进行检验,当 VIF<10 时,认为变量之间无严重多重共线性^[13]。响应变量属于 0~1 响应的二项分布,因此对大青鲨钩捕个体状态与影响因素之间的关系采用连接函数为对数函数的广义线性模型表达^[14]。GLM 模型表达式为

$$\text{Logit}(S) = \ln\left(\frac{S}{1-S}\right) = \beta_0 + \beta_1 S_{\text{sex}} + \beta_2 F_L + \beta_3 Y + \beta_4 M + \beta_5 X_{\text{Lon}} + \beta_6 X_{\text{Lat}} + \beta_7 D + \beta_8 H + \beta_9 X_{\text{size}} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: S 为鲨鱼钩捕到甲板时的状态(Alive=0, Dead=1); β_0 为模型的截距; β_i ($i=1,2,3,\dots,9$)为最大似然法估计的系数; S_{sex} 为性别; F_L 为叉长; Y 和 M 分别为捕获时的年、月; X_{Lon} 和 X_{Lat} 分别为捕获时的经度和纬度; D 为捕获时的理论钓钩深度; H

为捕获时的钩钩类型; X_{size} 为捕获时的钩钩大小; ε_i 为该模型的误差项。

GLM 模型选用的潜在解释变量的名称、类型和取值范围如表 1 所示。使用上述所有变量建立模型, 基于赤池信息准则 (AIC) 向后逐步回归法, 选取 AIC 值最小的模型作为初步最佳模型进行分析^[15]。要求初始模型所有潜在解释因子均显著 ($P < 0.05$), 显著性由似然比检验确定, 之后加入交互项, 使用上述相同步骤进行筛选, 确定最终模型。

表 1 GLM 模型潜在解释变量的名称类型与取值

Tab.1 Explanatory variables, types and values in the GLM model

| 变量 Variable | 类型 Type | 取值 Value |
|-------------------|------------|--|
| 性别 Sex | 类别变量 | 雄性/雌性 |
| 叉长 Fork length/cm | 连续变量 | 100~341 |
| 时间 Time/year | 类别变量 | 2012—2019 |
| 经度 Longitude | 连续变量 | 40°E~90°E |
| 纬度 Latitude | 连续变量 | 17°N~11°S |
| 钩钩深度 Hook depth/m | 连续变量 | 202.1~297.2 |
| 钩钩类型 Hook type | 类别变量 | 日式金枪鱼钩/ 圆形钩钩/ 韩式钩/鹰嘴钩 |
| 钩钩大小 Hook size | 类别变量 | No.3.8/No.4.0/No.4.2/ No.4.5/No.4.8 |

1.3 模型诊断与拟合优度

Hosmer 和 Lemeshow 测试检验通常用于二元逻辑回归模型的拟合优度检验^[16]。 k 折交叉验证下模型受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 下的面积 (area under curve, AUC) 是衡量二分类模型优劣的一种评价指标^[17]。通过 k 折交叉验证, 以估计模型对钩捕死亡率的拟合水平。由于本研究的模型属于二元类型, 因此采用交叉验证法估计分类错误率, 交叉验证法将原始样本随机分成 k 个子样本, 然后保留 1 个子样本作为验证数据集, 并使用剩余的 $k-1$ 个子样本作为训练数据集来构建模型。交叉验证过程被重复 k 次, 每 k 个子样本都使用 1 次作为验证数据集, 本研究 $k = 10$ 。最后计算 ROC 曲线下的面积以及模型的 95% 置信区间, AUC 的取值范围应在 0.5 和 1 之间, 当 AUC 越接近 1.0 时, 模型预测能力越高; 等于 0.5 时, 则预测能力最低, 认为无应用价值^[18]。

统计分析与画图均通过 R 程序语言 (4.1.1 版) 实现。其中, 用软件包 “usdm” 进行连续变量 VIF 筛选^[19]; 用软件包 “cvAUC” 进行交叉验证^[20]; 用软件包 “visreg” 对建立的 GLM 模型中解释变量与响应变量之间的关系作图^[21]; 用软件包 “car” 和 “Resource Selection” 对模型进行残差诊断^[22]; 其他涉及到的地图及数据分布图均使用软件包 “mapdata” 和 “mapproj” 等完成^[23-24]。

2 结果

2.1 钩捕死亡率

此次分析的 778 尾大青鲨中, 总钩捕死亡率为 13.4%。其中, 56% 为雌性个体, 雌性的钩捕死亡率为 12.8%; 44% 为雄性个体, 雄性的钩捕死亡率为 14%。雌性样本平均叉长为 208 cm (SD = 29), 雄性样本平均叉长为 213.6 cm (SD = 30.7)。卡方检验显示雌、雄样本的钩捕死亡率不存在显著差异 (chi-square = 0.23, df = 1, $P = 0.63$)。但考虑到鲨鱼的性别对生活习性可能有影响, 性别仍作为解释变量用于建立 GLM 的初步模型。

2.2 钩捕死亡率的影响因素

VIF 检验表明, 影响因素的 VIF 值均小于 10。建立初步模型, 根据 AIC 向后逐步回归, 筛选出各影响因素均显著 ($P < 0.05$) 的最佳模型, 影响因素对模型的偏差解释见表 2。不考虑交互项的简单 GLM 模型中, 大青鲨的叉长、捕获深度、捕获纬度、钩钩类型及钩钩大小都对大青鲨的钩捕死亡率有显著影响。其中, 影响最大的变量是钩钩类型, 其次是叉长、钩钩大小和捕获纬度, 捕获深度虽然在整个模型中解释了最小的偏差, 但仍然是显著的变量。卡方检验结果与似然比检验结果相近。将性别与叉长、钩钩类型与纬度、捕获深度与纬度交互加入模型, 各潜在影响因素仍是显著水平。虽然纬度变量没有达到显著, 但是它与钩钩类型的交互作用显著 (表 3)。

2.3 模型诊断与拟合优度结果

经过残差分析并使用库克距离确定了一些数据点, 即显著离群值, 经检验这些点对最终的模型参数估计没有影响, 因此没有从最终的模型中删除。加入交互项前后模型均未出现过拟合或者散布的情况, Hosmer 和 Lemeshow 测试检验拟合优度, 简单模型的 χ^2 为 18.569 ($P = 0.017$), 加入交

互项后模型拟合的更好, χ^2 为 2.841 ($P = 0.944$)。而且,通过加入交互项,模型的辨别能力也得到提升,简单模型的平均 AUC 为 0.738,95% 置信区间

为(0.602,0.856);加入交互项后模型的平均 AUC 为 0.791,置信区间为(0.680,0.894),AUC 越大,模型正确率越高,显然加入交互项的模型更好。

表 2 简单 GLM 模型分析大青鲨钩捕死亡率的偏差表

Tab.2 Deviation table of the simple GLM model to analyze the hooking mortality of blue shark

| 参数 Parameter | 自由度 df | 偏差 Deviance | 剩余自由度 Resid.df | 剩余偏差 Resid. Dev | 似然比检验 LRT | 显著性 P |
|-----------------|-----------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|----------|
| Null | | | 777 | 612.00 | | |
| 钩型 Hook type | 3 | 84.743 | 774 | 527.26 | 84.743 | <0.05 |
| 叉长 Fork length | 1 | 5.675 | 771 | 520.42 | 10.794 | <0.05 |
| 钓钩大小 Hook size | 4 | 1.162 | 772 | 526.09 | 13.743 | <0.05 |
| 捕获深度 Depth | 1 | 11.592 | 770 | 508.83 | 10.483 | <0.05 |
| 纬度 Latitude | 1 | 23.028 | 769 | 485.80 | 65.090 | <0.05 |

表 3 GLM 模型加入交互项后各影响因素的参数估计和显著性

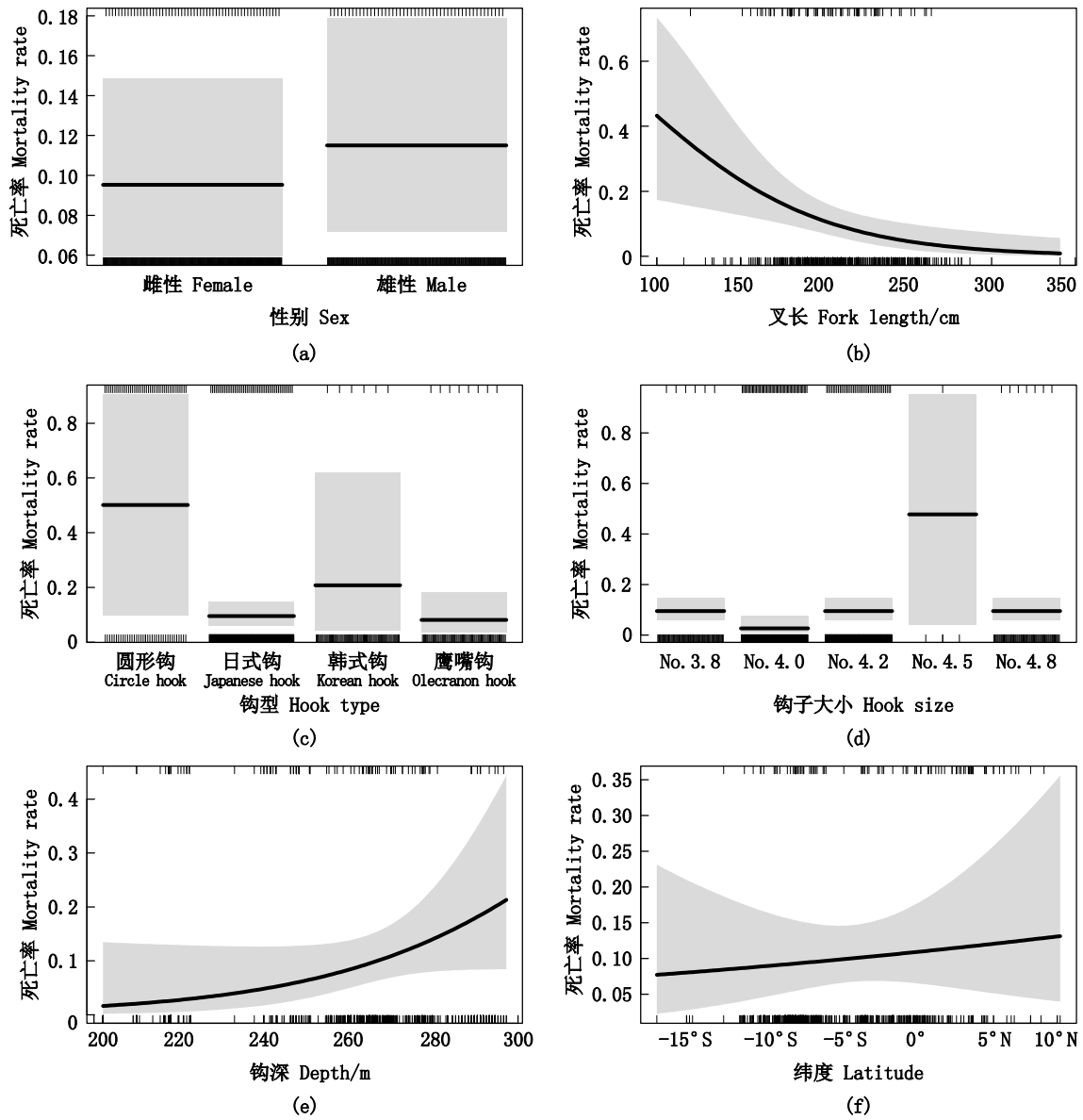
Tab.3 Parameter estimation and significance of each influencing factor after adding the interaction term to the GLM model

| 变量 Variable | 斜率 Estimate | 标准误差 Std. Error | Z 检验 Z value | 显著性 P |
|---|----------------|--------------------|-----------------|----------|
| 截距 Intercept | -6.162 | 3.479 | -1.771 | 0.077 |
| 雄性 Male | -3.679 | 1.830 | -2.011 | <0.05 |
| 日式金枪鱼钩 Japanese tuna hook | -4.458 | 0.856 | -5.211 | <0.01 |
| 韩式钩 Korean type hook | -1.902 | 0.945 | -2.012 | <0.05 |
| 鹰嘴钩 Olecranon type hook | -5.486 | 1.134 | -4.838 | <0.01 |
| 叉长 Fork length | -0.018 | 0.006 | -2.888 | <0.01 |
| 钓钩大小 No.4.0 | -1.337 | 0.540 | -2.477 | <0.05 |
| 钓钩大小 No.4.5 | 2.163 | 1.550 | 1.395 | 0.163 |
| 捕获深度 Depth | 0.047 | 0.015 | 3.117 | <0.01 |
| 捕获纬度 Latitude | -0.343 | 0.589 | -0.583 | 0.560 |
| 雄性:叉长 Male:Fork length | 0.019 | 0.009 | 2.107 | <0.05 |
| 日式金枪鱼钩:捕获纬度 Japanese tuna hook:Latitude | -0.341 | 0.134 | -2.545 | <0.05 |
| 韩式钩:捕获纬度 Korean type hook:Latitude | -0.086 | 0.129 | -0.671 | 0.502 |
| 鹰嘴钩:捕获纬度 Olecranon type hook:Latitude | -0.474 | 0.159 | -2.974 | <0.01 |
| 捕获深度:捕获纬度 Depth:Latitude | 0.003 | 0.003 | 1.034 | 0.301 |

2.4 预测钩捕死亡率

预测的钩捕死亡率见图 2~4。使用加入交互项的模型进行预测,雄性的钩捕死亡率(11.5%)略高于雌性(9.5%),见图 2a;钩捕死亡率随叉长增大而减小,见图 2b。钓钩类型仍然是对大青鲨钩捕死亡率影响最大的因素。使用日式金枪鱼钩和鹰嘴钩捕获的钩捕死亡率预测值为 9.5%和 8.2%,使用圆形钩和韩式钩捕获的钩捕死亡率预测值达 50.2%和 20.8%(图 2c)。钓钩大小方面,使用 No.4.5 钓钩的钩捕死亡率预测值达 47.8%,No.3.8、No.4.2 和 No.4.8 钓钩的钩捕死亡率预测值为 9.5%,No.4.0 钓钩的钩捕死亡率预测值仅为 2.7%(图 2d)。捕获深度方面,不同捕获深度的死亡率处于 1.40%~12.86%(图 2e)。纬度

方面,预测结果显示当捕获位置越往北时,钩捕死亡率越大(图 2f),为 7.7%~13.1%。个体大小方面,钩捕死亡率随叉长增大而减小,但在性别与叉长的交互作用项显示(图 3)。雄性个体死亡率与叉长大小呈现随叉长增大,死亡率先减小再升高的趋势,死亡率趋势平稳维持在 11.5%左右;雌性个体的钩捕死亡率随叉长增大而减小,均为 1.1%~43.3%。钩型与纬度的交互作用项显示,纬度对钩捕死亡率的影响会因为钓钩类型的差异而不同(图 4)。使用鹰嘴钩时,在南半球的钩捕死亡率高,捕获位置越北,钩捕死亡率越小,与其他 3 种钩型与纬度的交互作用项的钩捕死亡率变化趋势相反,日式钩对钩捕死亡率具有更低的影响水平,捕获位置变化,但钩捕死亡率变化范围不大。

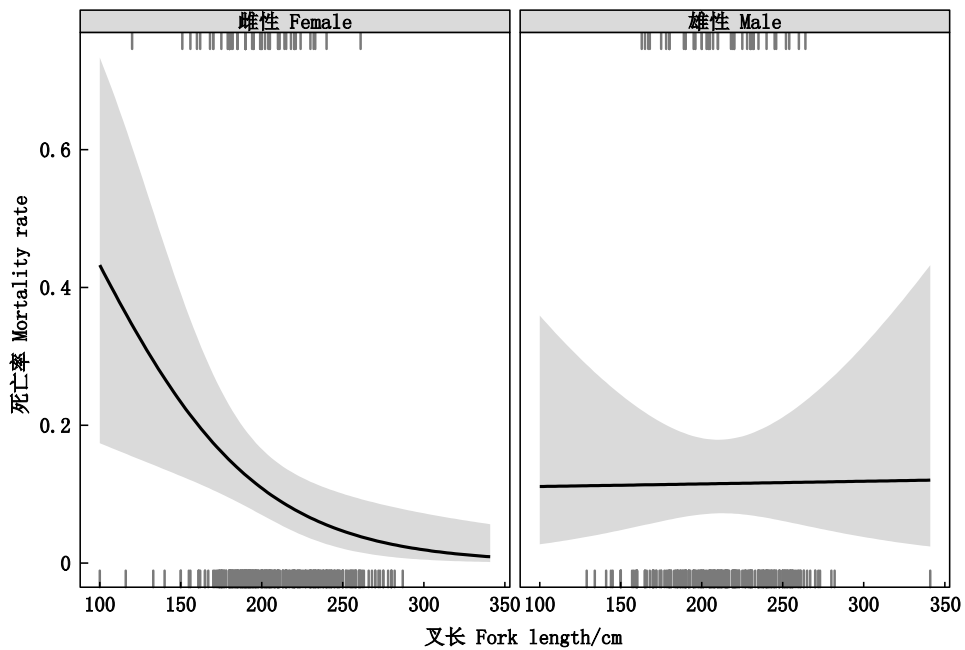


图中实线表示预测的死亡率变化,灰色阴影部分表示该影响因素 95%的置信区间,顶部和底部的短线分别表示死亡和存活的大青鲨样本数量。

The solid black line indicates the predicted change in mortality, the gray shaded area indicates the 95% confidence interval of this effect factor, and the short bars at the top and bottom indicate the number of Dead and Alive blue shark samples respectively.

图 2 各影响变量对大青鲨钩捕死亡率的影响预测

Fig.2 Predicted effects of various influencing factors on the mortality rate of blue sharks

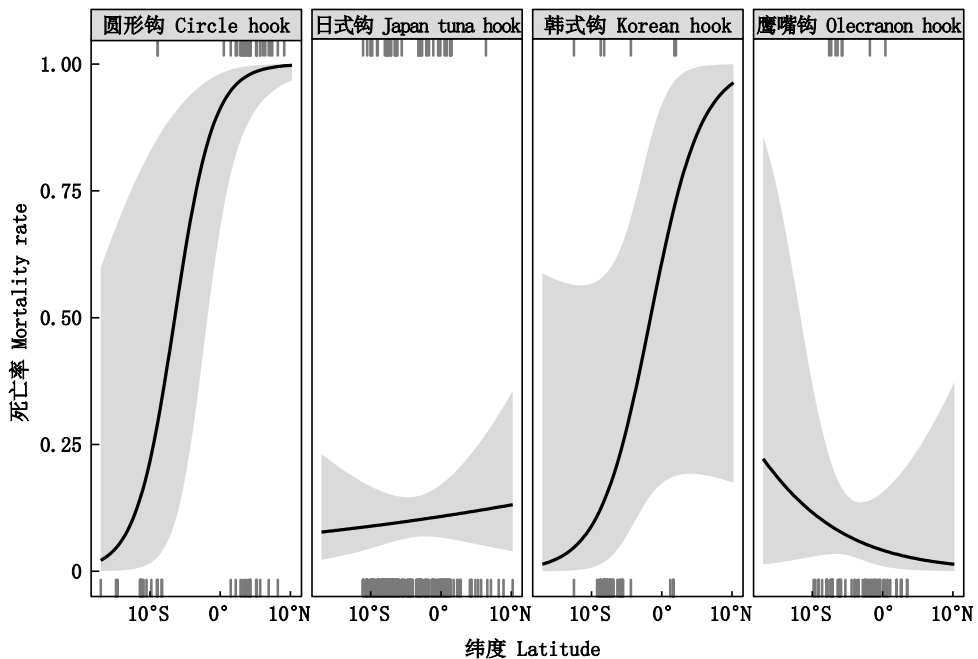


图中实线表示预测的死亡率变化,灰色阴影部分表示该影响因素 95%的置信区间,顶部和底部的短线分别表示死亡和存活的大青鲨样本数量。

The solid black line indicates the predicted change in mortality, the gray shaded area indicates the 95% confidence interval of this effect factor, and the short bars at the top and bottom indicate the number of Dead and Alive blue shark samples respectively.

图 3 性别与叉长的交互项对大青鲨钩捕死亡率的预测影响

Fig.3 Predictive effects of the interaction term between sex and fork length on At-haulback mortality of blue sharks



图中实线表示预测的死亡率变化,灰色阴影部分表示该影响因素 95%的置信区间,顶部和底部的短线分别表示死亡和存活的大青鲨样本数量。

The solid black line indicates the predicted change in mortality, the gray shaded area indicates the 95% confidence interval of this effect factor, and the short bars at the top and bottom indicate the number of Dead and Alive blue shark samples respectively.

图 4 钩型与纬度的交互项对大青鲨钩捕死亡率的预测影响

Fig.4 Predictive effects of the interaction term between hook type and latitude on At-haulback mortality of blue sharks

3 讨论

延绳钓渔业兼捕鲨鱼的钩捕死亡率研究一直是相关学者关注的重点。本研究针对的是以大眼金枪鱼为主捕对象的印度洋延绳钓渔业,兼捕的大青鲨总体钩捕死亡率为13.4%。大青鲨钩捕死亡率范围很广,CAMPANA等^[25]研究发现,大西洋西北部加拿大延绳钓渔业的大青鲨钩捕死亡率为12%~13%,加拿大中大上层延绳钓渔业中大青鲨钩捕平均死亡率^[26]约为14.7%,这与本文估计的相近。美国延绳钓渔业^[27]大青鲨的钩捕死亡率为18%~22%,部分渔业可达31%。而在太平洋夏威夷延绳钓渔业中,大青鲨钩捕死亡率为4%~8.5%,8.5%反映的是较浅水域剑鱼捕捞的钩捕死亡率。钩捕死亡率差异可能与钩钩类型不同有关,也有可能和不同海域的大青鲨栖息地环境存在差异、游路线不同有关。

需要指出的是,本研究分析的大青鲨钩捕死亡率是短时钩捕死亡率(short-term hooking mortality),未考虑释放后的死亡率。部分存活但受伤的个体,释放后仍会因为捕捞过程造成的创伤而死亡。基于弹出式卫星标记(pop-up satellite archival tags)的研究表明,鲨鱼释放后实际死亡率^[25-26](post-release mortality)可能接近或大于20%。MUSYL等^[28]也利用卫星标记发现,大青鲨受伤后释放2 d内死亡率高达83%,且释放后死亡率与捕上甲板时的状态显著相关,所以可以通过改善鲨鱼回拉条件提高鲨鱼存活率。

3.1 影响大青鲨钩捕死亡率因素的讨论

在延绳钓渔业中,减少兼捕渔获物的常见策略包括调整渔具,如改变钩钩类型,但不同研究得出的效果有所不同。本研究以大眼金枪鱼为目标渔获物,钩型是造成大青鲨兼捕死亡的最显著的影响因素,其中圆形钩钩下死亡率最高。而WATSON等^[29]研究认为,圆形钩钩可有效降低渔获物的钩捕死亡率,但也有研究认为钩钩类型对目标物种的钩捕死亡率无显著影响^[30-31]。有研究^[32]表明,与其他类型钩钩相比,使用圆形钩钩时,通常有较高的中上层鲨鱼和金枪鱼捕获量,同时较低剑鱼和海龟兼捕量。圆形钩钩的渔获物组成中,大眼金枪鱼的占比也显著高于其他物种,但金枪鱼及兼捕鲨鱼死亡率却不高^[33]。原因可能是圆形钩钩更多的钩在下颌,而不进入

肠道,不会造成更大的伤害^[34]。卫星标记放流结果显示,对于释放后死亡率,钩钩钩位位置比钩钩类型更为重要^[27]。本文研究涉及4种钩型,5个尺寸,鹰嘴钩有No.4.5和No.4.8两种规格,且No.4.5的钩捕死亡率最高。但No.4.5规格兼捕大青鲨样本数极少,结果误差可能很大。除No.4.5外,其他钩钩规格中No.4.0是造成大青鲨钩捕死亡率最低的,结合钩钩类型,日式No.4.0金枪鱼钩钩或许是对大青鲨最友好的钩型。

除钩钩钩型外,纬度是第二显著的影响因素,北半球钩捕死亡率略大于南半球钩捕死亡率,COELHO等^[35]对印度洋鲨鱼研究结果表明,这一变化是受到捕获位置和物种的影响,大青鲨大个体常出现在赤道附近,小个体更易出现在更高纬度及大陆架沿岸区域,因此大青鲨在赤道附近兼捕死亡率低,越往高纬度地区兼捕死亡率越高。本研究结果显示,北半球高纬度靠近大陆架沿岸区域的大青鲨预测死亡率比赤道附近的高。上钩死亡率因船队作业方式与作业区域的不同而有差异,配备圆形钩钩的渔船主要在北半球作业及南半球高纬度地区作业,而配备鹰嘴钩的渔船主要在南半球及赤道附近作业,北半球数据较少。因而在纬度与钩型的交互影响上,鹰嘴钩在北半球钩捕死亡率小于南半球。

个体大小是另一个重要的影响因素,大青鲨钩捕死亡率与个体大小呈负相关,与之前研究结果一致^[28]。本研究中,小个体鲨鱼钩捕数少但死亡率高,成熟鲨鱼会随着个体增大而死亡率下降并趋于稳定。COELHO等^[14]将鲨鱼叉长分段研究也得到了类似的结论。原因可能是小个体在捕获过程中更容易受到伤害导致死亡,而大个体鲨鱼有时可以咬断绳子逃脱,生存能力更强。性别与叉长的交互结果也显示雌性大青鲨的个体越大,死亡率减小,与其他研究结果一致;但雄性大青鲨的死亡率与个体大小无明显规律,产生差异的原因或许是针对目标鱼种作业渔场的不同或者渔具选择不同。

研究表明,上钩位置深度越深,大青鲨预测钩捕死亡率越大。BRACCINI等^[36]利用阔口真鲨(*Carcharhinus plumbeus*)的数据分析也得到相似结论。当鲨鱼被钩捕后,钩捕深度越深,随钓线被拖曳至水面时间更长,鲨鱼的反抗时间也越长,而生理应激会加大二次创伤与加速代谢性酸

中毒。GILMAN 等^[30]通过检测被捕捞的鲨鱼血液中的乳酸、二氧化碳含量以及 pH,验证鲨鱼在被捕捞后的生存及释放后状态与生理应激反应之间的关系,在生理应激下,鲨鱼个体大小和应激时间与体内乳酸含量呈正相关,pH 减小,鲨鱼因为代谢性酸中毒降低了血红蛋白的氧亲和力,从而缺氧死亡。过往研究也表明,鲨鱼上钩位置越深,温度与氧气含量变化越大,捕获的鲨鱼个体也越大,在水下的浸泡时间越长,死亡率会明显增。以上研究结果均与本研究结论一致。

3.2 不足与展望

不同的船队作业方式不同,如中国延绳钓与日本延绳钓作业方式不同,本研究结果不一定能推广到其他船队。本文在数据处理阶段将严重受伤状态的大青鲨归为“存活”(Alive),若归为“死亡”(Dead),结果则会不同。尽管模型的预测结果似乎是合理的,但仍有一些潜在的影响因素没有考虑,如上钩后的浸泡时间,过往研究也表明,鲨鱼上钩后在水下的浸泡时间越长,死亡率增加^[37]。除此之外,不同船只的规格,人员操作方法及延绳钓渔具的一些组成部分,如支绳材料对死亡率的影响也是显著的^[14]。因此尽管目前数据有限,有些潜在解释变量可能在今后的研究中需要考虑。

此外,本研究分析的是依赖于渔业(fishery-dependent)的观测数据。在空间与时间上并没有覆盖印度洋的整个延绳钓作业区。本研究区域集中在印度洋西部低纬度地区,东部与高纬度地区未有观测记录,而鲨鱼的分布具有空间异质性,中低纬度大陆架水域物种丰富度最高^[38]。建议未来研究能补充印度洋其他地区数据,完善研究。

本研究提出了关于印度洋西部低纬度地区大青鲨钩捕死亡率的重要影响因素,可用来预测延绳钓渔业对大青鲨钩捕死亡率的影响,确定大青鲨资源管理与养护技术的效率,也可为降低大青鲨的钩捕死亡率,促进该海域的资源可持续利用提供科学参考。

参考文献:

- [1] STEVENS J D, BONFIL R, DULVY N K, et al. The effects of fishing on sharks, rays, and chimaeras (chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(3): 476-494.
- [2] SIMPFENDORFER C A, HUETER R E, BERGMAN U, et al. Results of a fishery-independent survey for pelagic sharks in the western North Atlantic, 1977 - 1994 [J]. *Fisheries Research*, 2002, 55(1/3): 175-192.
- [3] IOTCWPEB. Report of the sixth session of the iotc working party on ecosystems and bycatch [R]. Victoria, Seychelles: Working Party on Ecosystems and Bycatch(WPEB), 2010.
- [4] COELHO R, SANTOS M N, AMORIM S. Effects of hook and bait on targeted and bycatch fishes in an equatorial Atlantic pelagic longline fishery [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2012, 88(3): 449-467.
- [5] MUONEKE M I, CHILDRESS W M. Hooking mortality: a review for recreational fisheries [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 1994, 2(2): 123-156.
- [6] COELHO R, FERNANDEZ-CARVALHO J, LINO P G, et al. An overview of the hooking mortality of elasmobranchs caught in a swordfish pelagic longline fishery in the Atlantic Ocean [J]. *Aquatic Living Resources*, 2012, 25(4): 311-319.
- [7] CAMPANA S E, JOYCE W, FRANCIS M P, et al. Comparability of blue shark mortality estimates for the Atlantic and Pacific longline fisheries [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 396: 161-164.
- [8] AFONSO A S, SANTIAGO R, HAZIN H, et al. Shark bycatch and mortality and hook bite-offs in pelagic longlines: interactions between hook types and leader materials [J]. *Fisheries Research*, 2012, 131-133: 9-14.
- [9] BUTCHER P A, PEDDEMORS V M, MANDELMAN J W, et al. At-vessel mortality and blood biochemical status of elasmobranchs caught in an Australian commercial longline fishery [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 878-889.
- [10] REINHARDT J F, WEAVER J, LATHAM P J, et al. Catch rate and at-vessel mortality of circle hooks versus J-hooks in pelagic longline fisheries: a global meta-analysis [J]. *Fish and Fisheries*, 2018, 19(3): 413-430.
- [11] SERAFY J E, ORBESEN E S, SNODGRASS D J, et al. Hooking survival of fishes captured by the United States Atlantic pelagic longline fishery: impact of the 2004 circle hook rule [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2012, 88(3): 605-621.
- [12] YOSHIHARA T. Distribution of fishes caught by the long line II. vertical distribution [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1951, 16(8): 370-374.
- [13] BUI D T, LOFMAN O, REVHAUG I, et al. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(3): 1413-1444.
- [14] COELHO R, INFANTE P, SANTOS M N. Application of generalized linear models and generalized estimation equations to model at-haulback mortality of blue sharks captured in a pelagic longline fishery in the Atlantic Ocean [J]. *Fisheries*

- Research, 2013, 145: 66-75.
- [15] AKAIKE H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle[M]//PARZEN E, TANABE K, KITAGAWA G. Selected Papers of Hirotugu Akaike. New York:Springer, 1998:199-213.
- [16] HOSMER JR D W, LEMESHOW S, STURDIVANT R X. Applied logistic regression[M]. 3rd ed. Hoboken:John Wiley & Sons, 2013.
- [17] FUSHIKI T. Estimation of prediction error by using *K*-fold cross-validation[J]. Statistics and Computing, 2011, 21(2): 137-146.
- [18] BRADLEY A P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms[J]. Pattern Recognition, 1997, 30(7): 1145-1159.
- [19] NAIMIB. Package ‘usdm’: uncertainty analysis for species distribution models[R]. Package Version 1.1-18, 2017: 1-15.
- [20] LEDELL E, PETERSEN M, VAN DER LAAN M. Package ‘cvAUC’[R]. Package Version 1.1.4, 2022.
- [21] BREHENY P, BURCHETT W. Package ‘visreg’: visualization of regression models[R]. Version 2.7.0,2020.
- [22] FOX J, WEISBERG S. An R companion to applied regression[M].2nd ed. Thousand Oaks; SAGE Publications, 2011.
- [23] Richard A. Becker and Allan R. Wilks. R version by Ray Brownrigg. (2018). mapdata;Extra Map Databases. R package version 2.3.0.<https://CRAN.R-project.org/package=mapdata>
- [24] Roger Bivand and Nicholas Lewin-Koh (2021). maptools; Tools for Handling Spatial Objects. R package version 1.1-2. <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>
- [25] CAMPANA S E, JOYCE W, MANNING M J. Bycatch and discard mortality in commercially caught blue sharks *Prionace glauca* assessed using archival satellite pop-up tags[J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 387: 241-253.
- [26] CAMPANA S E, JOYCE W, FOWLER M, et al. Discards, hooking, and post-release mortality of porbeagle (*Lamna nasus*), shortfin mako (*Isurus oxyrinchus*), and blue shark (*Prionace glauca*) in the Canadian pelagic longline fishery[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(2): 520-528.
- [27] DIAZ G A, SERAFY J E. Longline-caught blue shark (*Prionace glauca*): factors affecting the numbers available for live release[J]. Fishery Bulletin-National Oceanic and Atmospheric Administration,2005, 103(4): 720-724.
- [28] MUSYL M K, GILMAN E L. Post-release fishing mortality of blue (*Prionace glauca*) and silky shark (*Carcharhinus falciformes*) from a Palauan-based commercial longline fishery[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2018, 28(3): 567-586.
- [29] WATSON J W, EPPERLY S P, SHAH A K, et al. Fishing methods to reduce sea turtle mortality associated with pelagic longlines[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, 62(5): 965-981.
- [30] GILMAN E, HUANG H W. Review of effects of pelagic longline hook and bait type on sea turtle catch rate, anatomical hooking position and at-vessel mortality rate[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2017, 27(1): 43-52.
- [31] YOKOTA K, KIYOTA M, MINAMI H. Shark catch in a pelagic longline fishery: comparison of circle and tuna hooks[J]. Fisheries Research, 2006, 81(2/3): 337-341.
- [32] SALES G, GIFFONI B B, FIEDLER F N, et al. Circle hook effectiveness for the mitigation of sea turtle bycatch and capture of target species in a Brazilian pelagic longline fishery[J]. Aquatic Conservation; Marine and Freshwater Ecosystems, 2010, 20(4): 428-436.
- [33] PACHECO J C, KERSTETTER D W, HAZIN F H, et al. A comparison of circle hook and J hook performance in a western equatorial Atlantic Ocean pelagic longline fishery[J]. Fisheries Research, 2011, 107(1/3): 39-45.
- [34] COOKE S J, SUSKI C D. Are circle hooks an effective tool for conserving marine and freshwater recreational catch-and-release fisheries? [J]. Aquatic Conservation; Marine and Freshwater Ecosystems, 2004, 14(3): 299-326.
- [35] COELHO R, MEJUTO J, DOMINGO A, et al. Distribution patterns and population structure of the blue shark (*Prionace glauca*) in the Atlantic and Indian Oceans[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(1): 90-106.
- [36] BRACCINI J M, WALTRICK D. Species-specific at-vessel mortality of sharks and rays captured by demersal longlines[J]. Marine Policy, 2019, 99: 94-98.
- [37] MORGAN A, CARLSON J K. Capture time, size and hooking mortality of bottom longline-caught sharks[J]. Fisheries Research, 2010, 101(1/2): 32-37.
- [38] LUCIFORA L O, GARCÍA V B, WORM B. Global diversity hotspots and conservation priorities for sharks[J]. PLoS One, 2011, 6(5): e19356.

Evaluating at-haulback mortality of blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian Ocean longline fishery based on GLM model

DING Bo^{1,2}, GENG Zhe^{1,2,3,4}, ZHU Jiangfeng^{1,2,3,4}

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

Abstract: The blue shark (*Prionace glauca*) is a main bycatch shark species in the tuna longline fishery. Based on the data of 778 blue sharks from 1 272 fishing sets recorded by Chinese tuna longline observers in the Indian Ocean from 2012 to 2019, a generalized linear model (GLM) was applied to analyze the at-haulback mortality (i.e., the mortality rate when fish was captured and hauled back to the deck) and potential influencing factors of blue shark. The results were shown as follows: The overall at-haulback mortality of blue shark was 13.4%, and the at-haulback mortality of males was higher than that of females. Among the potential influencing variables, hook type, hook size, individual size, capture depth and capture latitude had significant influences on the survival status of blue sharks, and the impacts of hook type and capture latitude were the greatest. The interaction between hook type and latitude, as well as between gender and fork length also greatly contributed to at-haulback mortality. When using olecranon hooks, the more northerly being caught, the lower mortality rate was observed; for the other three hook types, the more northerly being caught, the higher mortality rate was observed. The larger the female blue shark was, the lower the mortality rate was observed; however, there was no clear pattern between the mortality rate of male blue shark and their individual size. This study can provide scientific information for reducing the estimated fishing mortality of blue shark and promoting the sustainable use of resources in this fishery.

Key words: blue shark; tuna longline; mortality; GLM; Indian Ocean