

文章编号: 1674-5566(2024)04-1020-11

DOI: 10.12024/jsou.20240404512

中西太平洋金枪鱼延绳钓钩深度分布及其影响因素

刘志强¹, 郭绍健¹, 王禹程¹, 周成^{1,2,3}, 吴峰^{1,2,3}, 万荣^{1,2,3}

(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: 为掌握中西太平洋金枪鱼延绳钓作业中钓钩深度分布及其影响因素, 根据2021年8—10月随“淞航”号调查船在中西太平洋海域调查时采集的作业参数、钓钩深度和环境数据等信息, 利用支持向量回归模型(Support vector machine, SVR)和广义加性模型(General additive model, GAM)分析不同作业参数和环境因素下钓钩深度的分布情况, 探讨各因素对钓钩深度的影响。结果表明: (1) 钓钩深度的计算值中1号钓钩深度最小, 为(130.03±3.32) m; 8号钓钩深度最大, 为(363.25±36.52) m。实测值中1号钓钩深度最小, 为(130.81±17.94) m; 7号钓钩深度最大, 为(329.91±54.37) m。(2) 1号钓钩的SVR模型整体拟合度最小($R^2=0.38$); 6号钓钩的整体拟合度最大($R^2=0.77$)。SVR模型训练值的均方差中6号钓钩最小, 为0.138; 8号钓钩最大, 为0.309。测试值的均方差中4号钓钩最小, 为0.086; 5号钓钩最大, 为0.282。(3) GAM分析显示0~64 m、128~192 m水层平均流速和投绳速度与各钓钩深度相关性最高, 其次分别为64~128 m、192~256 m、256~320 m水层平均流速和船速。320~384 m水层平均流速和风速与各钓钩深度均无显著相关性。(4) SVR和GAM的钓钩深度预测值与实测值平均差异分别为1.75%和6.38%。SVR预测值与实测值随钓钩位置变化趋势一致, 吻合性较好。研究结果有助于了解作业中金枪鱼延绳钓钩分布规律, 进而为优化钓具性能提供基础参考依据。

关键词: 中西太平洋; 金枪鱼延绳钓; 钓钩深度; 支持向量回归模型; 广义加性模型

中图分类号: S 973.3 **文献标志码:** A

延绳钓作业是一种捕捞金枪鱼的传统渔法, 钓具主体结构包括浮子、干线和支线三部分, 目标鱼种有长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*, ALB)、大西洋蓝鳍金枪鱼(*T. thynnus*, ABFT)、大眼金枪鱼(*T. obesus*, BET)、太平洋蓝鳍金枪鱼(*T. orientalis*, PBFT)、南方蓝鳍金枪鱼(*T. maccoyii*, SBFT)和黄鳍金枪鱼(*T. albacares*, YFB)等, 作业渔船广泛分布于大洋海域^[1-2]。据联合国粮农组织统计, 2021年全球金枪鱼总产量为480万t, 其中延绳钓捕捞量占比9%(约39.5万t), 为保障粮食安全、提供就业机会和创造财政收入贡献了重要作用^[3]。

作为一种典型的被动渔具, 延绳钓钩深度是影响捕捞效率与渔具选择性的关键因素之一^[4]。了解在作业过程中钓钩所能达到的深度及

影响其变化的因素, 对提高目标鱼种的捕捞成功率, 同时降低海龟、鲨鱼、海鸟及海洋哺乳动物的兼捕概率具有十分重要的意义^[5]。目前, 国内外学者对于延绳钓作业形态的研究主要基于海上实测^[6-7]、理论推导^[8-9]及数值模拟^[10-12]等方法。BOGGS^[13]通过海上调查发现延绳钓钩的理论计算深度多高于实测深度, 且海洋表面与温跃层海流产生的剪切力是影响钓钩深度的主要因素。BIGELOW等^[9]研究影响钓钩深度的海洋环境因素时发现风速、流速和流向是造成理论计算深度与实测深度差异的主要原因。在此基础上, 宋利明等^[14]基于多元线性回归模型探究了延绳钓漂移速度、风速、风向和风流合压角等因素对钓钩深度的影响, 并对延绳钓理论深度计算公式进行

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2024-06-12

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401301, 2023YFD2401305); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1003)

作者简介: 刘志强(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为渔具理论与设计。E-mail: lzhiqiang716@126.com

通信作者: 周成, E-mail: c-zhou@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>

了优化。SONG等^[11]基于数值模拟对延绳钓沉降过程进行模拟,结果表明钩钩深度与垂直海流速度呈显著相关。这些研究初步揭示了船速、投绳速度、风速和海流速度等参数对钩钩深度分布的影响。然而,由于数据获取的局限性、对分层海流速度因素考虑的不足以及钓具基本参数的不确定性,导致对影响延绳钓作业形态参数相互关系的理解十分有限。

随着计算机科学技术和人工智能的发展及广泛应用,因其具有计算性能高、分类能力强、泛化能力良好的特点,可为解决渔业领域中大数据和多解释变量的研究提供了新的方法和思路^[15]。为此,本研究基于2021年8月至10月期间开展的中西太平洋金枪鱼延绳钓公海渔业资源综合调查项目数据,利用支持向量回归机和广义加性模型探讨延绳钓作业参数(船速、投绳速度)、环境参数(风速、分层海流速度)与延绳钓钩钩深度分布之间的关系,并对比分析不同模型的准确度。旨在揭示延绳钓钩钩深度分布规律与各参数的影响权重,以期为构建延绳钓钓具形态精准预测模型,合理调整钩钩深度提供基础参考依据。

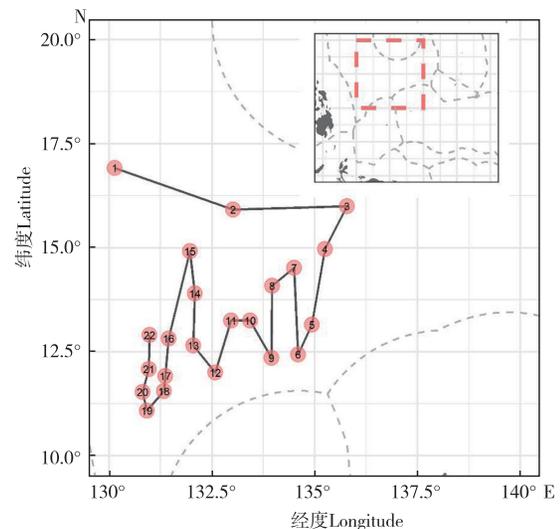
1 材料与方法

1.1 海上调查船与钓具结构

数据来源于2021年8—10月期间开展的中西太平洋金枪鱼延绳钓公海渔业资源综合调查项目(图1)。调查站点位于菲律宾以东的中西太平洋公海海域(10°N~17°N,130°E~136°E),共计22个。调查船为上海海洋大学远洋渔业资源调查船“淞航”号,该船总长85 m、型宽14.96 m、型深8.71 m、总吨位3 166 t、主机功率3 700 kW、最大航速15 kn。

海上调查期间所使用的延绳钓钓具干线为直径5.4 mm的8股聚酰胺编织绳^[16],两浮球间干线长850 m。支线总长45 m,每篮共16枚支绳,每一枚支绳由6部分组成,由上至下依次为:(1)自动挂扣+第1段支绳(直径4 mm,长1.5 m的红色10股聚酯复合捻绳);(2)包铅转环+第2段支绳(长为20 m的250号聚酰胺单丝绳);(3)箱型双转环+第3段支绳(长为14 m的180号聚酰胺单丝);(4)双转环+第4段支线(长为4 m的铅芯绳);(5)11.25 g铅粒+双转环+第5段支线(长为6 m的130号聚酰胺单丝);(6)U型护套+3.8号金枪鱼钩。浮子绳为80股乙烯-醋酸乙烯共聚物

(PES)编织绳,直径5.5 mm,长40 m。浮子材料为丙烯腈-苯乙烯-丁二烯共聚物(ABS)材料,直径500 mm,静浮力64 kg。



数字1~22表示延绳钓资源调查站点顺序;灰色虚线表示专属经济区范围;右上方小图红色虚线框选部分表示该调查区域。
Number 1 to 22 indicates the sequence of locations in resource survey of tuna longline fishing; gray dashed lines represent the exclusive economic zone boundaries; the red dashed box at upper right indicates the surveyed area.

图1 延绳钓资源调查站点设置

Fig. 1 Distribution of locations in resource survey of tuna longline fishing

1.2 延绳钓作业流程与数据采集

海上调查期间共设3种投绳时间,分别为当地时间2:20至4:00,5:30至6:30,以及23:20至次日0:20,持续1.5 h;起钩时间通常为当日7:00至12:00,持续5 h。投绳期间的平均船速为(7.6±0.6) kn,平均投绳速度为(5.8±0.5) m/s,相邻支线间干线长为50 m,单次平均投钩数为(398±38.1)枚,累计投钩8 752枚。

除钓钩数、船速、投绳速度、作业起止时间和作业起始船位等捕捞技术参数外,还记录了支线钩深及作业站点的风速与水层流速数据。其中,支线钩深数据采用自容式微型温度潮位仪(型号:RBRduet3 T.D | tide16,生产厂商:加拿大Richard Brancker公司;测量范围:0~500 m,精度:±0.05%;直径:25 mm,长度:250 mm,质量:334 g;采集频率:10 s⁻¹)测定,投绳前将8枚支线末端的金枪鱼钩替换为RBR,投绳时在中间篮(12篮或13篮)的1~8号钓钩位连续投放RBR;作业站点的风速数据通过船载风速仪获取;水层流速数据采用声学多普勒海流剖面仪(型号:

WHS300-LADCP,生产厂商:劳雷海洋系统有限公司;测量范围:0~800 m;采样频率:38 K)以走航方式获取,采样深度间隔16 m。

1.3 数据分析模型

1.3.1 钓钩深度理论计算

金枪鱼延绳钓钩深度与渔场海流速度、钓钩质量、支线和干线粗度等密切相关,精确计算较为困难,一般采用估算方法。本研究采用YOSHIMURA^[8]基于悬链线理论推导的延绳钓钩深度计算公式:

$$D_j = h_a + h_b + l \left[\sqrt{1 + \cot^2 \theta} - \sqrt{\left(1 - \frac{2j}{n+1}\right)^2 + \cot^2 \theta} \right] \quad (1)$$

$$l = v_1 \times (m+1) \times t/2 \quad (2)$$

$$n = m+1 \quad (3)$$

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \cot \theta \cdot \sinh^{-1}(\tan \theta) \quad (4)$$

式中: D_j 为第 j 号钓钩的深度,m; j 为两浮子间的支线编号序数; h_a 为支线的长度,m; h_b 为浮子绳长,m; l 为两浮子间干线长度; n 为两浮子间干线分段数; m 为两浮子间钓钩数量; v_1 为投绳机出绳速度,m/s; v_2 为船速,m/s; t 为投放相邻两枚钓钩之间的时间间隔,s; θ 为干线支撑点切线与水平面夹角; k 为缩短率。

实际作业中受水流的影响,钓具形状和缩短率会发生改变,钓钩的实际深度与悬链线理论深度出现差异。因此,通常采用上浮率(上浮深度占理论深度的百分比)表示钓钩上浮程度。

1.3.2 支持向量回归模型

支持向量机模型(Support vector machine, SVM)主要分为支持向量分类模型(Support vector class, SVC)和支持向量回归模型(Support vector regression, SVR)。SVC模型多用来处理两类及多类分类问题;SVR则用来处理回归问题^[17]。本文研究金枪鱼延绳钓钩深度分布及其影响因素的关系属于回归问题,因此选用SVR模型进行计算。

SVR是利用一个最优超平面,使得超平面最远的样本点到超平面的距离最短。若数据集为 (x_i, y_i) , x_i 是输入样本, y_i 是输出样本, $\varphi(x_i)$ 为 x_i 映射到最优超平面的特征向量,SVR算法对应

的最优超平面公式为

$$f(x_i) = \omega^T \varphi(x_i) + b \quad (5)$$

式中: ω^T 为 ω 的转置, ω 和 b 均为未确定参数。

SVR模型训练时为寻找最优的 ω 和 b 使得 $f(x_i)$ 与 y_i 更加接近,因此可得出优化函数为

$$\min_{\omega, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (l_\varepsilon[f(x_i) - y_i]) \quad (6)$$

式中: l_ε 为引入的不敏感损失函数; C 为常数; m 为自变量的个数; $f(x_i)$ 为预测值。

在引入松弛变量和拉格朗日乘子后,将其转换为对偶问题,故优化目标和目标函数分别为

$$L(\omega, b, a, \hat{a}, \xi, \hat{\xi}, \mu, \hat{\mu}) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \hat{\xi}_i) - \sum_{i=1}^m \mu_i \xi_i - \sum_{i=1}^m \hat{\mu}_i \hat{\xi}_i + \sum_{i=1}^m a_i [f(x_i) - y_i - \varepsilon - \xi_i] + \sum_{i=1}^m \hat{a}_i [y_i - f(x_i) - \varepsilon - \hat{\xi}_i] \quad (7)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{a}_i - a_i) K(x, x_i) + b \quad (8)$$

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中: $\xi_i, \hat{\xi}_i$ 为松弛变量; $\mu_i, \hat{\mu}_i, a_i, \hat{a}_i$ 为拉格朗日乘子; $K(x, x_i)$ 为核函数,在本文中使用的核函数为高斯径向基函数; σ 为高斯径向基函数的宽带。本研究以不同水层范围内的平均水平流速(0~64/64~128/128~192/192~256/256~320/320~384 m)、风速、船速和投绳速度为输入样本,金枪鱼延绳钓钩深度为输出样本构建SVR训练模型。

1.3.3 广义加性模型

广义加性模型(General additive model, GAM)为广义线性模型的非参数化扩展,具有能直接处理响应变量和多个解释变量之间的非线性关系^[18]。本研究以金枪鱼延绳钓钩深度分布为非独立变量,不同水层范围内的平均水平流速(0~64/64~128/128~192/192~256/256~320/320~384 m)、风速、船速和投绳速度作为解释变量建立GAM模型,表达式为:

$$g(D) = s(D_{64}) + s(D_{128}) + s(D_{192}) + s(D_{256}) + s(D_{320}) + s(D_{384}) + s(w) + s(v_1) + s(v_2) + \varepsilon \quad (10)$$

式中: D 为金枪鱼延绳钓钩深度,m; $D_{64}, D_{128}, D_{192}, D_{256}, D_{320}, D_{384}$ 分别为不同水层范围内的平均流

速, m/s ; w 为风速, m/s ; v_1 为投绳机出绳速度, m/s ; v_2 为船速, kn ; ε 为误差项; s 为自然立方样条平滑。利用 F 检验评估各影响因素的显著性。

1.4 数据处理方法

本研究通过海上实测获得 22 组有效的金枪鱼延绳钓钩钩深度分布数据, 利用公式(1)-(4) 计算得出钓钩的理论深度。基于声学多普勒海流剖面仪采集的不同水层流速, 利用加权平均方法计算得出 0 ~ 384 m, 每隔 64 m 水深范围内的平均水平流速。将获得的不同水层平均水平流速、风速、船速和投绳速度等影响因素和钓钩深度分别输入 SVR 模型和 GAM 进行计算。其中, 计算前将钓钩深度进行归一化处理, 即实测钓钩深度/理论计算深度。因为延绳钓钩钩深度分布具有对称性, 因此在 SVR 和 GAM 计算时只选用一半的钓钩数进行计算, 即选取 1~8 号钓钩。在 SVR 模型计算时, 将数据集进行分割, 80% 的数据进行采样训练, 20% 的数据进行测试验证。本文 SVR 模型计算选用的核函数为高斯径向基函数, 此时 SVR 模型由径向基核函数的系数 g 和模型惩罚因子 C 控制。因此, 基于交叉验证方法对最优参数进行求解, 获得不同钓钩的最优模型参数进行后续计算。下一步将训练数据输入基于最优参数构建的模型中进行采样训练, 随后分别将训练和测试数据输入已训练完成的模型中进行预测, 并对分析预测值与实测值的差异。上述

SVR 和 GAM 分析计算分别利用 R 4.1.1 软件中的 `svm` 和 `mgcv` 包完成。

本研究中对 SVR 和 GAM 模型计算结果误差分析均采用均方差 (Mean squared error, MSE) 形式进行比较:

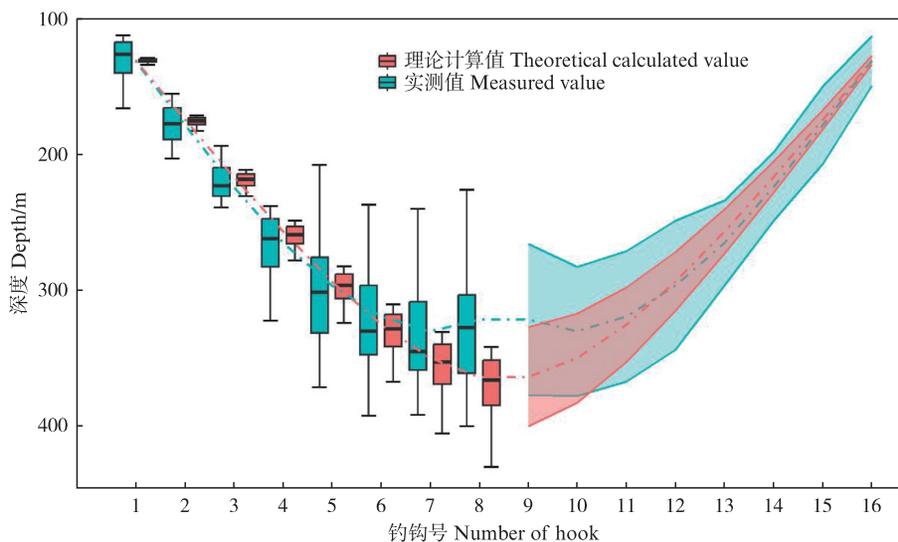
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (11)$$

式中: y_i 和 \hat{y}_i 分别为钓钩深度的实测值和预测值。

2 结果

2.1 钓钩深度分布

金枪鱼延绳钓钩钩深度分布如图 2 所示, 其中红色部分代表理论计算深度, 蓝色部分代表实测值, 钓钩深度分布形态均为悬链线形式, 随着钓钩靠近中间位置其深度逐渐增大。No.1 钓钩的理论计算深度最小, 平均为 (130.03 ± 3.32) m; No.8 钓钩理论计算深度最大, 平均为 (363.25 ± 36.52) m。随着钓钩靠近中间位置, 钓钩深度的波动逐渐增大, 并且钓钩深度越大其波动范围的极值差异越大。钓钩深度实测值中 No.1 钓钩平均深度最小, 为 (130.81 ± 17.94) m; No.7 钓钩平均深度最大, 为 (329.91 ± 54.37) m。实测值的钓钩深度波动范围均大于理论计算值, 且随着深度增大, 钓钩所处水层的波动情况明显增大, 其中 No.8 钓钩深度波动最大; No.1 ~ No.5 钓钩深度的实测平均值略大于理论计算平均值, No.6 钓钩之后的理论深度计算平均值



左侧箱形图分别表示 No. 1~No. 16 钩位的钓钩深度分布; 虚线表示干线形态; 右侧阴影面积表示 95% 置信区间。

The left Box-plots indicate No. 1~No. 16 hook depth distribution; dotted lines indicate the configuration of mainline; right shadow zones denote 95% confidence interval.

图 2 金枪鱼延绳钓钩钩深度分布 (红色: 理论计算值, 蓝色: 实测值)

Fig. 2 Hook depth distribution for tuna longline fishing (red: theoretical calculated value, blue: measured value)

均大于实测平均值,深度差值最大处为No.8钩钩。钩钩整体的上浮率范围为-0.3%~10.3%,其中No.1钩钩上浮率最小,平均为(-0.3±13.7)%;No.8钩钩上浮率最大,平均为(10.3±10.5)%。

2.2 不同钩钩的SVR模型训练和测试结果分析
不同钩钩的SVR模型训练和测试结果如图

3所示,其中No.1钩钩的SVR模型训练和测试值与对应的预测值整体拟合度最小($R^2=0.38$),同时No.1钩钩的SVR模型训练和测试值拟合线($R'^2=0.34$)与参考线差异较大表明其实测值和预测值之间差异也较大。No.6钩钩的SVR模型训练和测试值与对应的预测值整体拟合度最大

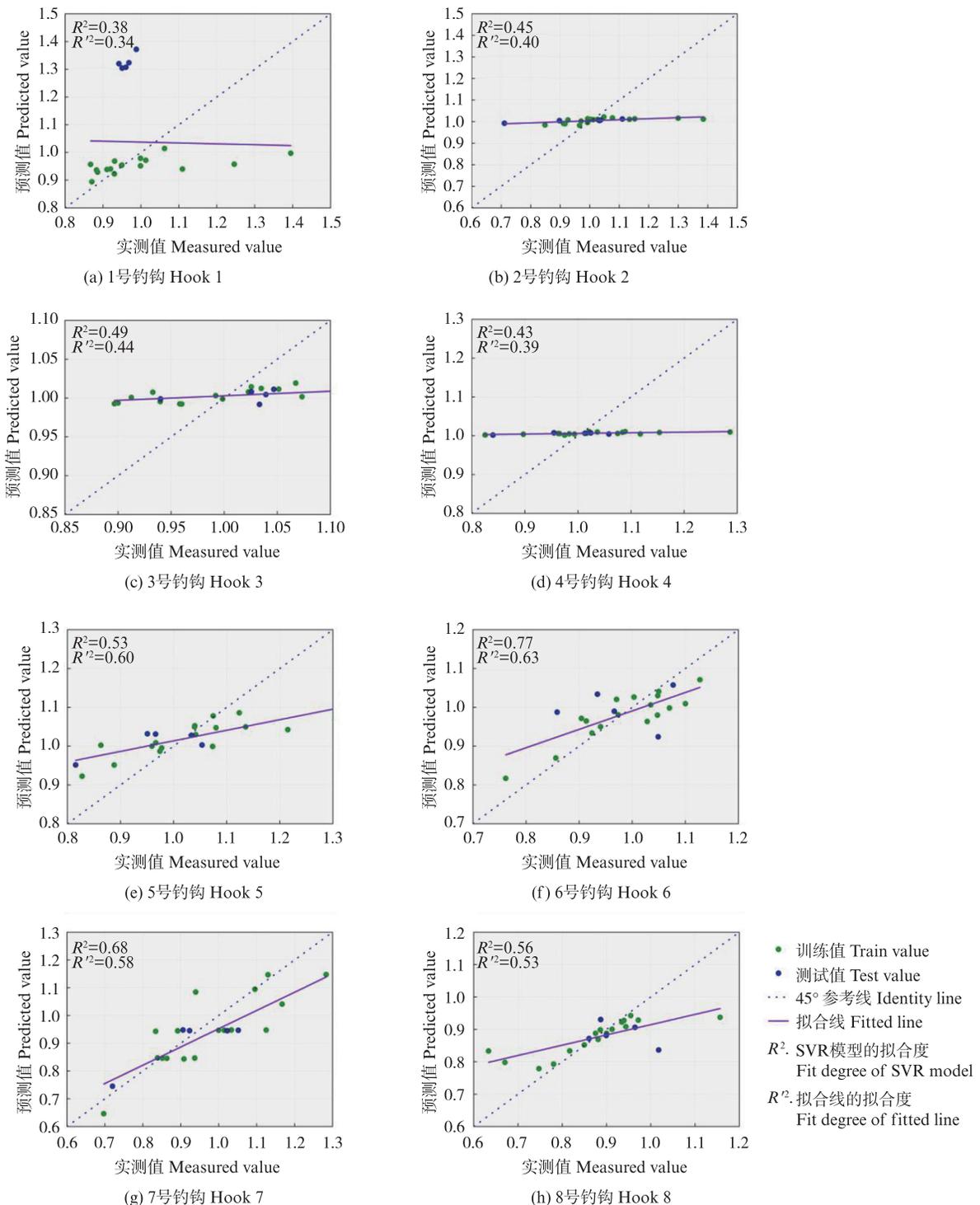


图3 不同钩钩的SVR模型训练值和测试值

Fig. 3 SVR model train values and test values of different hooks

($R^2=0.77$),同时 No.6 钩钩的 SVR 模型训练和测试值拟合线($R'^2=0.63$)与参考线差异最小。No.7 钩钩的 SVR 模型训练和测试值与对应的预测值整体拟合度也相对较高($R^2=0.68$),并且 No.7 钩钩的 SVR 模型训练和测试值拟合线($R'^2=0.58$)与参考线差异也较小。No.5 和 No.8 钩钩的 SVR 模型训练和测试值与对应的预测值整体拟合度接近($R^2=0.53$ 、 $R^2=0.56$),其余钩钩号的 SVR 模型训练和测试值与对应的预测值整体拟合度分别为 0.45 (No.2 钩钩)、0.49 (No.3 钩钩)、0.43 (No.4 钩钩)。综上所述,SVR 模型训练和测试结果中 No.6 钩钩的拟合程度最优,表明其基于 SVR 模型的预测值与实测值间差异较小,预测的准确度较高。No.1 钩钩的 SVR 模型训练和测试结果拟合程度最小,其原因为钩钩深度较浅,深层水流流速对其影响程度较低,使得模型整体拟合度降低。

不同钩钩的 SVR 模型训练和测试值的均方差如图 4 所示,其中在训练值的均方差中 No.6 钩钩最小,为 0.138;No.8 钩钩的均方差最大,为 0.309。在测试值的均方差中 No.4 钩钩最小,为 0.086;No.5 钩钩的均方差最大,为 0.282。

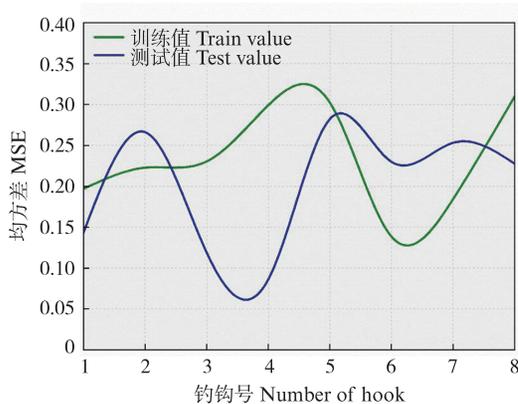


图 4 SVR 模型训练值和测试值的均方差

Fig. 4 Mean squared error of SVR model train values and test values

2.3 不同钩钩的 GAM 结果分析

不同钩钩的 GAM 统计结果如表 1 所示, F 检验表明, No.2 钩钩深度仅与 128~192 m 水层平均流速呈显著相关($P=0.035$)。No.3 钩钩深度仅与投绳速度呈显著相关($P=0.041$)。No.4 钩钩深度分别与 0~64 m、128~192 m 水层平均流速和投

绳速度均呈显著相关($P<0.05$),其中与投绳速度的相关性最高($P=0.009$)。No.5 钩钩深度分别与 0~64 m、64~128 m、128~192 m 水层平均流速和投绳速度均呈显著相关($P<0.05$),其中与投绳速度的相关性最高($P=0.005$)。No.6 钩钩深度分别与 0~64 m、128~192 m、256~320 m 水层平均流速、船速和投绳速度均呈显著相关($P<0.05$),其中与 128~192 m 水层平均流速和投绳速度的相关性相同且最高($P=0.001$)。No.7 钩钩深度仅与投绳速度呈显著相关($P=0.009$)。No.8 钩钩深度分别与 128~192 m、192~256 m 水层平均流速和投绳速度均呈显著相关($P<0.05$),其中与投绳速度的相关性最高($P=0.009$)。同时, No.1 钩钩深度与所有影响因子相关性均不显著。综上所述, 0~64 m、128~192 m 水层平均流速和投绳速度与各钩钩深度相关性最高,其次分别为 64~128 m、192~256 m、256~320 m 水层平均流速和船速。320~384 m 水层平均流速和风速与各钩钩深度均无显著相关性。

不同钩钩的 GAM 分析误差统计如图 5 所示,其中 No.1 钩钩的均方差(MSE)最小,为 0.044; No.6 钩钩的均方差(MSE)最大,为 0.256。No.6 钩钩的残差值最小,为 0.022;No.8 钩钩的残差值最大,为 0.083。

2.4 钩钩深度分布预测

利用上述 SVR 和 GAM 对不同钩钩深度的预测值和实测值如图 6 所示,其中 No.1~No.7 钩钩的实测值深度呈逐渐增大趋势, No.8 钩钩深度略低于 No.7 钩钩深度。实测值中 No.1 钩钩深度最小,为 121.3 m;No.7 钩钩深度最大,为 346.0 m。SVR 预测值中 No.1 钩钩深度最小,为 124.1 m;No.7 钩钩深度最大,为 346.5 m,其与实测值最大钩钩深度位置相同。SVR 预测值与实测值相比 No.2 钩钩深度差异最大,为 5.2%;No.7 钩钩差异最小,为 0.15%;平均钩钩深度差异为 1.75%。GAM 预测值中 No.1 钩钩深度最小,为 143.6 m;No.8 钩钩深度最大,为 350.1 m。GAM 预测值与实测值相比 No.1 钩钩深度差异最大,为 18.3%;No.6 钩钩差异最小,为 1.48%;平均钩钩深度差异为 6.38%。综上所述,SVR 预测值与实测值平均差异小于 GAM 预测值,并且 SVR 预测值与实测值随钩钩位置变化趋势一致,吻合性较好。

表1 不同钓钩的GAM统计结果
Tab. 1 GAM statistical results of different hooks

模型因子 Model factor	F		P		模型因子 Model factor	F		P	
	1~4	5~8	1~4	5~8		1~4	5~8	1~4	5~8
0~64 m 水层平均流速 Flow speed (0-64 m)/(m/s)	0.021	6.046	0.888	0.030*	320~384 m 水层平均流速 Flow speed (320-384 m)/(m/s)	0.579	0.540	0.461	0.477
	0.195	6.088	0.667	0.030*		0.213	0.005	0.652	0.943
	1.117	3.294	0.311	0.095		0.671	0.179	0.429	0.680
	5.956	0.167	0.031*	0.690		0.147	0.499	0.708	0.493
64~128 m 水层平均流速 Flow speed (64-128 m)/(m/s)	1.324	8.950	0.272	0.011*		0.648	1.116	0.436	0.312
	1.576	2.234	0.233	0.161		0.007	0.329	0.936	0.577
	1.587	0.094	0.232	0.764		0.290	0.262	0.600	0.618
	0.736	0.084	0.408	0.777		0.235	0.083	0.637	0.778
128~192 m 水层平均流速 Flow speed (128-192 m)/(m/s)	3.258	7.396	0.096	0.019*		1.894	0.691	0.194	0.422
	5.646	17.267	0.035*	0.001***		3.117	12.278	0.103	0.004**
	3.312	3.549	0.094	0.084		2.190	0.465	0.165	0.508
	8.296	4.764	0.014*	0.050*		3.014	1.302	0.108	0.276
192~256 m 水层平均流速 Flow speed (192-256 m)/(m/s)	2.576	0.046	0.135	0.834		1.151	11.876	0.305	0.005**
	0.483	1.974	0.500	0.185		2.376	55.782	0.149	0.001***
	1.533	1.871	0.239	0.196		5.260	9.569	0.041*	0.009**
	0.236	7.012	0.636	0.021*		9.707	9.564	0.009**	0.009**
256~320 m 水层平均流速 Flow speed (256-320 m)/(m/s)	1.903	0.665	0.193	0.431					
	0.479	7.486	0.502	0.018*					
	0.190	0.631	0.671	0.443					
	0.487	0.793	0.499	0.391					

注:1~4和5~8表示钓钩号;*,**,***分别表示显著性水平 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。

Notes: 1-4 and 5-8 are indicate the number of hooks; *, **, *** are indicate significance level $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively.

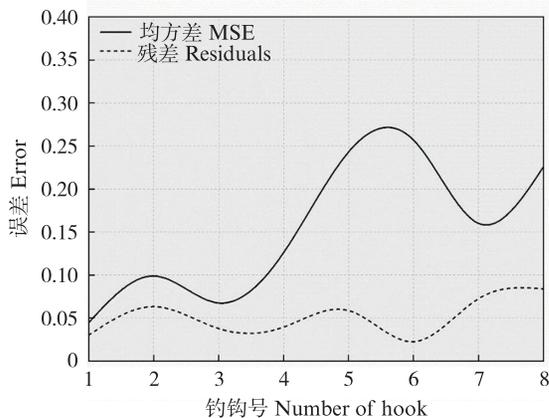


图5 不同钓钩GAM分析的误差统计
Fig. 5 Error statistics for GAM analysis of different hooks

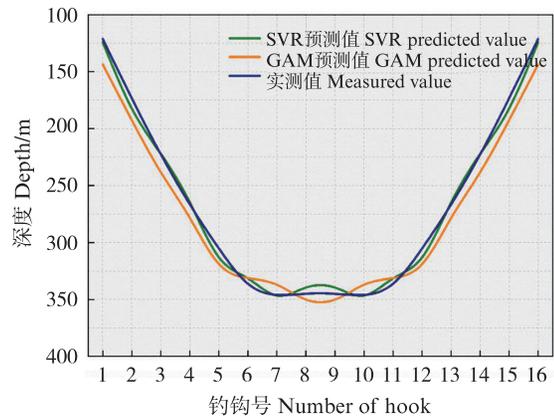


图6 不同钓钩的深度预测值和实测值比较
Fig. 6 Comparison of predicted and measured values of different hooks depth

3 讨论

3.1 钓钩深度分布

海上调查期间钓钩深度的实测值分布在130~330 m水层,作业站点设置于潜在的金枪鱼渔场附近^[19],长鳍金枪鱼、黄鳍金枪鱼、鲣及大眼金枪鱼在此区间均有分布^[20-23]。其中,4种金枪鱼的活动范围分布于近表层至500 m水深范围^[24],因此,调查期间的钓钩深度设置较为合理。实测值中钓钩最大深度在No.7处, No.8次之,而

理论计算深度在No.8处, No.7次之,其原因一方面为实际工况下,支线受浮球浮力、分层海流速度与风速的共同作用下发生形变,导致支线会略微上浮,钓钩深度分布形成了非理想的悬链线形态^[25]。因此,在今后的研究中可补充分析上述因素综合对钓钩深度分布和支线形态的影响。另一方面,在海上调查时1~8号钓钩连续替换为RBR深度仪,其在水中的质量也会影响钓钩深度的变化。

本研究结果中部分钓钩位(No.1~5)的上浮率

为负值,其原因主要为延绳钓投放漂流过程中受风速影响,造成干线上两浮球距离发生变化,当浮球距离减小时支线将进一步加深,导致实测值大于理论值,上浮率出现负值^[26]。然而风速的大小对不同深度钓钩的上浮率影响程度不同,本文中并未分析风速差异对钓钩的上浮率影响情况。因此,在今后的研究中可补充探讨在钓钩投放时不同风速大小对其漂流特征的影响。此外,本研究中钓钩平均上浮率最大值为 $(10.3\pm 10.5)\%$,与张艳波等^[27]在东南太平洋 (13.5%) 和褚宇航等^[28]在南太平洋 (14.16%) 的结果较为接近,而与党莹超等^[29]在北太平洋的钓钩上浮率结果相差较大 $(30\%\sim 45\%)$,其主要原因可能由于北太平洋海流分布的差异导致。

3.2 影响钓钩深度分布因素

本研究 GAM 统计结果表明,在作业参数中,投绳速度对钓钩深度分布的影响权重最大,且呈正相关关系。其原因在于当船速相对固定时,投绳速度越大短缩率越小,即单位时间内浸入水中的干线长度增加,导致两浮球间距减少,进而提高钓钩深度,这一结论与周旺^[30]的延绳钓钩深度数值仿真的结果相一致。本研究中海上调查期间延绳钓作业的投绳速度范围变化较小 (5.8 ± 0.5) m/s,无法充分分析投绳速度差异对钓钩深度分布的影响。因此,在今后的研究中可补充探讨延绳钓作业中投绳速度对钓具形态的影响。在环境参数中,128~192 m 水层平均流速对钓钩深度分布的影响权重最大,且主要影响中下层钓钩深度,0~64 m 水层平均流速次之,且主要影响中层钓钩深度,其余水层流速及风速对钓钩深度分布的影响较小。因此,在实际作业中调整钓钩深度时应更多地关注 0~64 m 和 128~192 m 水层的钓钩。除本研究中选取的影响延绳钓钩深度分布的因素之外,还有风向、航向和流向等因素也对其有一定影响。因此,今后可补充这些因素对钓钩深度分布的影响研究。

3.3 分析方法的可靠性

随着计算机技术的发展,机器学习算法已得到广泛应用。支持向量回归机模型是机器学习算法中的一种适用于分析复杂非线性回归问题的模型。本文利用 SVR 模型可以分析金枪鱼延绳钓钩深度分布与不同影响因素之间的复杂非线性关系,通过将数据映射到高维空间,并找

到一个最优超平面来拟合数据,从而可以处理高度非线性的关系^[9]。SVR 模型具有泛化能力强、灵活性高的优点,然而,其对模型参数敏感度高,计算模型依赖于核函数的选择和参数的调整,因此在使用模型分析前需要进行一定程度的调参工作。同时,因数据集相对较少导致模型整体拟合程度欠佳。本文中 SVR 模型仅选择高斯径向基函数为核函数进行分析,没有探讨分析不同核函数对 SVR 模型结果的影响。因此,今后可补充对比分析不同核函数(如拉普拉斯核函数等)对 SVR 模型的影响,并且使用更多的数据集对模型进行训练分析,提高模型的准确率。

相比而言,GAM 可以用来描述响应变量与各个解释变量之间的非线性关系,直观地体现出各因素对结果的影响程度。GAM 在可解释性上具有明显优势,但对数据的平滑性和模型复杂度的选择较为敏感。因此,在本文中多影响因素下 SVR 模型体现出了更高的整体拟合度,GAM 分析体现出了详细的各因素影响结果。

参考文献:

- [1] 杨军勇,吴峰,杜若谦. 2012—2018 年中西太平洋延绳钓渔业大青鲨兼捕量影响因素分析[J]. 上海海洋大学学报,2022,31(3):691-699.
YANG J Y, WU F, DU R Q. Study on the factors influencing the bycatch of *Prionace glauca* in Western and Central Pacific longline fisheries from 2012 to 2018 [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31 (3) : 691-699.
- [2] 孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
SUN M C. Marine fishery technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [3] FAO. The state of world fisheries and aquaculture [M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.
- [4] 丁博,耿喆,朱江峰. 基于 GLM 模型的印度洋延绳钓渔业大青鲨钩捕死亡率分析[J]. 上海海洋大学学报, 2022,31(3):700-709.
DING B, GENG Z, ZHU J F. Evaluating at-haulback mortality of blue shark (*Prionace glauca*) in the Indian Ocean longline fishery based on GLM model [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(3) : 700-709.
- [5] SANTOS C C, ROSA D, GONÇALVES J M S, et al. A review of reported effects of pelagic longline fishing gear configurations on target, bycatch and vulnerable species [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater

- Ecosystems, 2024, 34(1): e4027.
- [6] MIZUNO K, OKAZAKI M, NAKANO H, et al. Estimation of underwater shape of tuna longline by using micro-BTs[J]. Bulletin of the National Research Institute of Far Seas Fisheries, 1997(34): 1-24.
- [7] MIYAMOTO Y, UCHIDA K, ORII R, et al. Three-dimensional underwater shape measurement of tuna longline using ultrasonic positioning system and ORBCOMM buoy[J]. Fisheries Science, 2006, 72(1): 63-68.
- [8] YOSHIHARA T. Distribution of catches of tuna long line-IV. On the relation between k and φ_0 with a table and diagram[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1954, 19(10): 1012-1014.
- [9] BIGELOW K A, MUSYL M K, POISSON F, et al. Pelagic longline gear depth and shoaling[J]. Fisheries Research, 2006, 77(2): 173-183.
- [10] 刘莉莉, 周成, 虞聪达, 等. 钓钩深度和浸泡时间对东太平洋公海长鳍金枪鱼延绳钓渔获性能的影响研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 40-48.
- LIU L L, ZHOU C, YU C D, et al. Identifying the catch characteristics of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) longline associated with the depth and soaking time of hooks in the high seas of eastern Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 40-48.
- [11] SONG L M, LI J, XU W Y, et al. The dynamic simulation of the pelagic longline deployment [J]. Fisheries Research, 2015, 167: 280-292.
- [12] 宋利明, 周旺. 基于 ANSYS Workbench 力学仿真的金枪鱼延绳钓钩深度[J]. 渔业现代化, 2021, 48(4): 85-94.
- SONG L M, ZHOU W. Hook depth of pelagic longline based on ANSYS Workbench simulation [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(4): 85-94.
- [13] BOGGS C H. Depth, capture time, and hooked longevity of longline-caught pelagic fish: Timing bites of fish with chips[J]. Fishery Bulletin, 1992, 90(4): 642-658.
- [14] 宋利明, 高攀峰. 马尔代夫海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的钓获水层、水温和盐度[J]. 水产学报, 2006, 30(3): 335-340.
- SONG L M, GAO P F. Captured depth, water-temperature and salinity of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) longlining in Maldives waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(3): 335-340.
- [15] 罗智青, 莫汉培, 王汝辉, 等. 基于 Stacking 模型融合的失压故障识别算法[J]. 能源与环保, 2019, 41(2): 41-45.
- LUO Z Q, MO H P, WANG R H, et al. Loss-of-voltage fault identification algorithm based on stacking model fusion [J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(2): 41-45.
- [16] 中华人民共和国农业农村部. SC/T 5001-2014 渔具材料基本术语[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 3.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 5001-2014 The basic terminology of fishing gear materials[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 3.
- [17] 王雪莹. 基于智能计算的溶解氧预测模型研究[D]. 烟台: 山东工商学院, 2021.
- WANG X Y. The research on dissolved oxygen prediction model based on intelligent computing [D]. Yantai: Shandong Technology and Business University, 2021.
- [18] 刘志强, 许柳雄, 唐浩, 等. 拖网作业参数对南极磷虾捕捞效率的影响[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1205-1212.
- LIU Z Q, XU L X, TANG H, et al. Effects of trawling operation parameters on the fishing efficiency of Antarctic krill [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1205-1212.
- [19] 原作辉, 杨东海, 樊伟, 等. 基于卫星 AIS 的中西太平洋金枪鱼延绳钓渔场分布研究[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 649-659.
- YUAN Z H, YANG D H, FAN W, et al. On fishing grounds distribution of tuna longline based on satellite automatic identification system in the Western and Central Pacific[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(6): 649-659.
- [20] 许振琦, 汪金涛, 雷林, 等. 中西太平洋长鳍金枪鱼渔场重心时空分布研究[J]. 水产科学, 2023, 42(4): 604-612.
- XU Z Q, WANG J T, LEI L, et al. Spatial and temporal distribution of the fishing ground gravity of *Thunnus alalunga* in Western and Central Pacific [J]. Fisheries Science, 2023, 42(4): 604-612.
- [21] 张春玲, 蒋逸, 王冰洋, 等. 中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群区域温度垂直结构的构建与初步分析[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 233-241.
- ZHANG C L, JIANG Y, WANG B Y, et al. Construction and analysis of vertical temperature structure for FAD yellowfin tuna in the central and western Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 233-241.
- [22] 杨彩莉, 杨晓明, 朱江峰. 不同类型厄尔尼诺事件中环境因子对中西太平洋金枪鱼围网鳀分布响应[J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 8-18.
- YANG C L, YANG X M, ZHU J F. Response of environmental factors to distribution of skipjack tuna purse seine fishery in Western and Central Pacific Ocean during different El Niña events [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(3): 8-18.
- [23] 杨胜龙, 伍玉梅, 张怵怵, 等. 中西太平洋大眼金枪鱼中心渔场时空分布与温跃层的关系[J]. 应用生态学

- 报, 2017, 28(1): 281-290.
- YANG S L, WU Y M, ZHANG B B, et al. Relationship between fishing grounds temporal-spatial distribution of *Thunnus obesus* and thermocline characteristics in the Western and Central Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 281-290.
- [24] SCHAEFER K M, FULLER D W, BLOCK B A. Vertical movements and habitat utilization of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*), and bigeye (*Thunnus obesus*) tunas in the equatorial eastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data [M]// NIELSEN J L, ARRIZABALAGA H, FRAGOSO N, et al. Tagging and Tracking of Marine Animals with Electronic Devices. Dordrecht: Springer, 2009: 121-144.
- [25] WILLIAMS A J, ALLAIN V, NICOL S J, et al. Vertical behavior and diet of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) vary with latitude in the South Pacific Ocean [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2015, 113: 154-169.
- [26] CAMPBELL R A, YOUNG J W. Monitoring the behaviour of longline gears and the depth and time of fish capture in the Australian Eastern Tuna and Billfish Fishery [J]. Fisheries Research, 2012, 119-120: 48-65.
- [27] 张艳波, 戴小杰, 朱江峰, 等. 东南太平洋金枪鱼延绳钓主要渔获种类垂直分布[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 912-918.
- ZHANG Y B, DAI X J, ZHU J F, et al. Vertical distribution of main species captured by tuna longline fishery in the southeast Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 912-918.
- [28] 储宇航, 戴小杰, 田思泉, 等. 南太平洋延绳钓长鳍金枪鱼生物学组成及其与栖息环境关系[J]. 海洋渔业, 2016, 38(2): 130-139.
- CHU Y H, DAI X J, TIAN S Q, et al. Relationship between biological composition and habitat characteristic of *Thunnus alalunga* of Chinese longline fishery in the South Pacific [J]. Marine Fisheries, 2016, 38(2): 130-139.
- [29] 党莹超, 戴小杰, 吴峰. 北太平洋金枪鱼延绳钓钩垂直分布及浸泡时间对渔获物的影响[J]. 南方水产科学, 2020, 16(3): 86-93.
- DANG Y C, DAI X J, WU F. Effects of vertical distribution and soaking time of tuna longline fishing hooks on catches in North Pacific [J]. South China Fisheries Science, 2020, 16(3): 86-93.
- [30] 周旺. 金枪鱼延绳钓钩深度比较研究——理论计算、海上实测、数值仿真和模型试验[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- ZHOU W. A comparison study on hook depth of pelagic tuna longline based on theoretical calculation, measurement at sea, numerical simulation and model test [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.

Hook depth distribution and influencing factors of tuna longline fishing in Western and Central Pacific Ocean

LIU Zhiqiang¹, GUO Shaojian¹, WANG Yucheng¹, ZHOU Cheng^{1,2,3}, WU Feng^{1,2,3}, WAN Rong^{1,2,3}

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

Abstract: To comprehensively examine the hook depth distribution and influencing factors of tuna longline fishing in Western and Central Pacific Ocean, data collected aboard the vessel "Songhang" from August to October 2021 were analyzed. A combination of Support Vector Regression (SVR) and Generalized Additive Model (GAM) was employed to investigate the distribution of hook depths across different operational parameters and environmental variables. The objective was to elucidate the impact of each factor on hook depth. The results showed that: (1) Among the calculated values of hook depth, Hook No. 1 had the smallest value at (130.03±3.32) m, while Hook No. 8 had the largest value at (363.25±36.52) m. Regarding the measured values, Hook No. 1 had the smallest depth at (130.81±17.94) m, whereas Hook No. 7 exhibited the largest depth at (329.91±54.37) m. (2) The SVR model exhibited varying goodness of fit, with Hook No. 1 displaying the lowest ($R^2=0.38$) and Hook No. 6 demonstrating the highest ($R^2=0.77$) overall fit. The mean squared error (MSE) for training data was smallest for Hook No. 6 (0.138) and largest for Hook No. 8 (0.309), while for testing data, it was smallest for Hook No. 4 (0.086) and largest for Hook No. 5 (0.282). (3) GAM analysis reveals that water layer average velocities at 0-64 m and 128-192 m, as well as the casting speed, exhibit the highest correlations with hook depth across all hooks. Following these, water layer average velocities at 64-128 m, 192-256 m, and 256-320 m, along with vessel speed, show significant correlations. However, water layer average velocity at 320-384 m and wind speed demonstrate no significant correlations with hook depth. (4) The average differences between predicted hook depths by SVR and GAM models and the actual measured values are 1.75% and 6.38%, respectively. The predictions from the SVR model align well with the measured values, showing consistent trends with the variation in hook positions, thus demonstrating good agreement. The results of this study will contribute to understanding the distribution pattern of tuna longline fishing hooks in operation, and provide a basic reference for optimizing the performance of longline.

Key words: Western and Central Pacific Ocean; tuna longline fishing; hook depth; support vector machine; general additive model