

基于 Tweedie-GAM 模型的热带大西洋拟锥齿鲨单位捕捞努力量渔获量与环境因子的关系

王浩展¹ 戴小杰^{1,2,3,4*} 官文江^{1,2,3,4} 范永超¹

(¹上海海洋大学海洋科学学院, 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省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; ⁴远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要 拟锥齿鲨是热带大西洋金枪鱼延绳钓渔业中重要的兼捕物种, 对其单位捕捞努力量渔获量(CPUE)与环境关系的研究可为该鱼种的资源保护和管理提供基础资料. 根据我国金枪鱼渔业国家观察员 2009—2015 年在热带大西洋海域(6.38° S—14.92° N, 42.03°—18.53° W)调查时采集的 1085 尾拟锥齿鲨数据及 Tweedie 类分布理论和特点, 建立了 GAM-Tweedie 模型, 对其 CPUE 的时间变化、空间分布及与环境因子的关系进行了分析. 结果表明: 时空因子(年、月、经度、纬度)和环境因子对拟锥齿鲨名义 CPUE 的总偏差解释为 40.2%, 其中时空因子对其的影响均显著, 环境因子中, 海表面高度、叶绿素 a 浓度、作业时天气、海表面盐度、海表面气压对其影响显著, 而海况、农历对其影响不显著; 不同纬度和不同月份下海平面温度与拟锥齿鲨 CPUE 呈显著相关. 2009—2015 年拟锥齿鲨标准化 CPUE 呈现波动, 整体呈上升趋势.

关键词 拟锥齿鲨; 广义可加模型; Tweedie 类分布; 热带大西洋; 金枪鱼延绳钓

Relationship between the environmental factors and the CPUE (catch per unit effort) of *Pseudocarcharias kamoharai* in tropical Atlantic Ocean based on the GAM-Tweedie model.

WANG Hao-zhan¹, DAI Xiao-jie^{1,2,3,4*}, GUAN Wen-jiang^{1,2,3,4}, FAN Yong-chao¹ (¹College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ²National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ³Ministry of Education Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ⁴Collaborative Innovation Center for Distant Water Fisheries, Shanghai 201306, China).

Abstract: Crocodile shark (*Pseudocarcharias kamoharai*) is an important by-catch species of tropical Atlantic tuna longline fishery. The research on the relationship between the CPUE (catch per unit effort) and environmental factors can provide basic data for resource protection and management of this important species. Based on the Tweedie distribution theory, and the data of 1085 crocodile sharks collected by the national observers of longline fishery from 2009 to 2015 in the tropical Atlantic Ocean (6.38° S–14.92° N, 42.03°–18.53° W), the GAM-Tweedie model was established, and the temporal and spatial effects of CPUE as well as the relationship with environmental factors were analyzed. The results showed the explained cumulative deviance of the crocodile shark's CPUE to be 40.2%. The spatio-temporal factors (year, month, longitude, latitude) all had significant effects ($P < 0.05$) on the crocodile shark CPUE. The environmental factors such as sea surface height, chlorophyll a concentration, weather code, sea surface salinity and sea level pressure all had significant effects on CPUE ($P < 0.05$). However, the Beaufort wind force and lunar calendar did not have significant effects on the CPUE ($P > 0.05$). Significant correlation ($P < 0.05$) was observed at different latitudes and in months between the sea surface temperature and CPUE. The standardized CPUE of the crocodile shark in 2009–2015 showed a fluctuating increase trend.

Key words: *Pseudocarcharias kamoharai*; generalized additive model (GAM); Tweedie distribution; the tropical Atlantic Ocean; longline fishery.

拟锥齿鲨 (*Pseudocarcharias kamoharui*) 隶属于鼠鲨目拟锥齿鲨科拟锥齿鲨属, 异名鳄鲨^[1]。拟锥齿鲨是一种广泛分布于世界各大洋热带、亚热带沿岸和公海海域的小型洄游性鱼类^[2], 在热带大西洋金枪鱼延绳钓渔业中是较为常见的兼捕物种。由于其经济价值低, 兼捕后常常被丢弃, 其生物学和渔业信息非常有限^[3]。但它处于海洋食物链的顶端, 对海洋生态系统的稳定和多样性起着非常重要的作用^[4-5]。此外, 其肝脏中富含角鲨烯, 角鲨烯是一种天然有机化合物, 具有提高人体免疫力和抗肿瘤等重要作用, 现主要被用于生产化妆品和保健品^[6-7]。因此该种类具有重要的生态价值和较高的潜在经济价值^[8]。考虑到该物种繁殖力较小等生活史特征^[3], 国际自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 根据 Compagno 等^[2] 的评估, 已经将拟锥齿鲨定为“近危物种”。

在 20 世纪, 拟锥齿鲨被认为是资源非常少和不常见的一种鲨鱼。但是近些年, 在很多延绳钓渔业研究中经常发现被兼捕的拟锥齿鲨^[3]。从 2009 年至今, 观察员数据显示, 拟锥齿鲨在热带大西洋金枪鱼延绳钓渔业中已成为兼捕量最多的两种软骨鱼类之一, 仅次于另一种软骨鱼类——大青鲨 (*Prionace glauca*)^[9]。这些变化可能反映了拟锥齿鲨资源量的增长^[3], 因此不乏国内外学者对其进行研究。对拟锥齿鲨的相关研究主要集中在长度-质量关系、肝质量指数、繁殖生物学等基础生物学研究^[10-13], 而对拟锥齿鲨资源分布、与环境因子的关系, 以及资源评估的研究非常有限。仅 Romanov 等^[3] 根据 1950—2005 年世界范围的远洋延绳钓渔业观察员和研究调查数据, 评估了拟锥齿鲨的丰度和分布, 初步结果显示, 海域、延绳钓目标鱼种、月相、季节、海底深度、渔具深度和投放时间显著影响拟锥齿鲨的兼捕量。

有学者用广义线性模型 (generalized linear mo-

del, GLM) 分析拟锥齿鲨单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 与环境因子的关系^[3], 然而拟锥齿鲨 CPUE 与一些影响因子之间呈非线性关系, 这点无法利用 GLM 模型予以检验。广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 是 GLM 模型的非参数化拓展, 采用平滑函数研究非线性关系, 能够利用原始数据, 更深入地探讨拟锥齿鲨 CPUE 与影响因子间的关系, 以及确定每个因子的重要程度^[14-15], 常被用于研究渔业资源与环境的关系^[15-18]。GAM 是探索、分析数据并发现非线性结构的有效工具^[19]。出于对拟锥齿鲨 CPUE 与环境关系的探索并基于相关研究结果^[20], 本文直接选用 GAM 模型, 根据中国大西洋延绳钓渔业科学观察员 7 年来积累的数据, 用 GAM 模型研究了拟锥齿鲨的分布及其与时空、海洋环境因子等的关系, 旨在为拟锥齿鲨的资源变动研究和开展资源养护工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据 拟锥齿鲨渔业数据来自我国金枪鱼延绳钓渔业观察员 2009—2015 年在热带大西洋海域 (6.33° S—17.43° N, 18.25°—42.03° W) 调查时采集的 989 个钩次的兼捕数据 (表 1)。这些数据包括 (表 2): 作业时的渔获量 (ind)、投钩数 (hooks)、作业位置、天气状况 (weather code, WC)、海表面温度 [sea surface temperature, SST (°C)]、海表面气压 [sea level pressure, SLP (Pa)]、海况 (Beaufort wind force scale, BF) 和农历日 (lunar calendar, LUN); 作业时天气和海况记录方式参照美国夏威夷延绳钓观察员手册^[21], 作业时天气: “00” 代表无记录; “01” 至 “10” 表示从晴朗、无云到下雪等不同的天气, “99” 代表其他天气; 作业时海况记录为: “1” 至 “10”, 分别代表从“海面如镜, 浪高 0 m” 到“非常高

表 1 热带大西洋中国延绳钓渔业中观察员观察航次信息表

Table 1 Observer reports on the tropical Atlantic longline fishery trips

开始日期 Start date	结束日期 End date	经度范围 Longitude range	纬度范围 Latitude range	观察钩次数 Observed numbers of trips	样本数量 Sample size (ind)
2009-11-12	2010-05-17	31.01°—40.93° W	5.92° N—15.03° N	146	27
2010-10-22	2011-03-08	22.00°—39.93° W	6.08° S—13.98° N	166	147
2011-11-38	2012-03-14	27.00°—38.63° W	4.58° N—15.17° N	188	507
2012-11-12	2013-02-06	26.55°—42.03° W	5.00° N—17.43° N	133	132
2013-11-11	2014-04-15	18.57°—38.58° W	6.33° S—13.30° N	226	552
2014-10-29	2014-12-21	21.03°—29.97° W	2.48° S—6.38° S	50	40
2015-09-04	2015-12-18	18.25°—32.88° W	5.98° S—9.42° N	80	156

表 2 热带大西洋拟锥齿鲨兼捕相关环境数据范围

Table 2 Range of environmental data related to tropical Atlantic crocodile shark bycatch

	海平面高度 SSH (m)	海平面叶绿素 a 浓度 CHL ($\times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	海平面盐度 SSS	海平面温度 SST ($^{\circ}\text{C}$)	海平面气压 SLP ($\times 10^3 \text{ Pa}$)	天气 WC	海况 BF	农历 LUN
变化范围 Range	-0.295~0.029	0.1~3.2	34.52~36.48	23.5~29.2	100.8~101.9	1~9	1~8	1~30

SSH: Sea surface height; CHL: Chlorophyll concentration; SSS: Sea surface salinity; SST: Sea surface temperature; SLP: Sea level pressure; WC: Weather code; BF: Beaufort wind force scale; LUN: Lunar calendar. 下同 The same below.

的浪,浪高 8.7 m 左右”等 10 种不同的海况。

1.1.2 水文环境数据 海表面盐度 (sea surface salinity, SSS)、海表面叶绿素 a 浓度 [chlorophyll concentration, CHL ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)]、海面高度 [sea surface height, SSH (m)] 从美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的 ocean watch 网站 (<http://oceanwatch.pif-sc.noaa.gov/>) 下载 (表 2)。

1.2 Tweedie 模型构建

1.2.1 CPUE 的计算及缺失数据的处理 以 CPUE 来代表拟锥齿鲨资源密度的时空分布,其算式为:

$$CPUE = U/f \quad (1)$$

式中: U 为每钩次的渔获量,单位为尾数; f 为每钩次的投钩数,单位为千钩^[22]。此处计算出的 CPUE 未考虑环境因素影响,一般称为名义 CPUE,而经模型处理、在一定程度上去除环境因素影响的 CPUE 称为标准化的 CPUE。计算出 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 单位渔区内的平均产量,并绘制拟锥齿鲨 CPUE 分布图,以直观显示拟锥齿鲨在热带大西洋金枪鱼延绳钓作业区域的分布。

渔业数据受人为和渔船上仪器的运行状态等因素影响常会存在缺失情况;受云层遮挡等因素影响,在 NOAA 下载的环境数据也存在缺失情况。常用处理缺失数据的方法有很多^[23],如删除缺失数据样本、用变量均值或中位数来代替缺失值和采用多重插补法 (multiple imputation, MI)。多重插补是通过变量间关系来预测缺失数据,利用蒙特卡罗方法生成多个完整数据集,再对这些数据集分别进行分析,最后对这些分析结果进行汇总处理^[22]。本文根据数据缺失值随机性的特征和以减少处理缺失值造成偏差的目的,采用多重插补法来处理缺失数据,计算过程通过 R 语言中的 mice 函数包^[24]实现。

1.2.2 Tweedie 类分布的应用和条件 Tweedie 类分布由英国统计学家 Tweedie 在 1984 年首次提出^[18],是指散数分布族分布中一类特殊的概率分布,一般用 $Tw_p(\theta, \varphi)$ 来表示,并由方差函数 $V(\mu) = \mu^p$ 完全确定,其中: θ 为规范参数; φ 为分散参数; $p \in (-\infty, 0)$

$\cup [1, +\infty]$ 。Tweedie 类分布包括了几个常见重要分布: $p=0, 1, 2, 3$ 分别对应于正态分布、泊松分布、伽玛分布和逆高斯分布。在 $1 < p < 2$ 时,相应的 $Tw_p(\theta, \varphi)$ 是一个复合泊松分布^[16, 25]。

由于 CPUE 数据常呈偏态分布 (主要是正偏态分布),其对应的概率密度函数常使用对数正态分布或者伽马分布。由于这些概率密度函数不允许存在零的数据,因此必须对 CPUE 为零的数据进行相应的处理,而 Tweedie 类分布较适合拟合 CPUE 存在较多零值的情况,统一解决包含零值的数据。由于在对镰状真鲨的研究中 Tweedie 分布要优于其他方法^[20],本文研究的拟锥齿鲨 CPUE 与镰状真鲨特征相近,故选用 Tweedie 分布模型。其概率密度方程^[16]为:

$$f(y; \theta, \varphi, p) = a(y; \varphi, p) \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}d(y; \theta, p)\right\} \quad (2)$$

式中: θ 为规范参数; φ 为分散参数; p 为能效参数; $d(y; \theta, p)$ 为单位偏差。

1.2.3 GAM 模型和 GAM-Tweedie 模型的建立 GAM 的一般表达形式^[26]:

$$g(\mu) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon [\mu = E(Y/X)] \quad (3)$$

式中: 函数 $g(\mu)$ 为联系函数 (link function), 本文联系函数为自然对数; β_0 为常数截距项; $f_i(x_i)$ 为用来描述 $g(\mu)$ 与第 i 个解释变量关系的平滑函数,可通过局部加权回归平滑或样条平滑得到,本研究采用样条平滑法; ε 为误差项,假设其服从均值为零的正态分布。

假设拟锥齿鲨 CPUE 数据的分布为 Tweedie 类分布,拟建立的 GAM-Tweedie 模型为^[16]:

$$\begin{cases} CPUE \sim Tw_p(\theta, \varphi) \\ \mu = E(CPUE) \\ \ln(\mu) = X\beta + s(\text{factors}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为 Tweedie 类分布的规范参数; φ 为分散参数; $\mu = E(CPUE)$ 为 CPUE 的期望值; 解释变量中 X 为线性部分的影响因子的指示变量,向量 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_N)$ 为模型截距项和各变量的系数等 N 个待估

参数; s 为自然样条平滑; $factors$ 为因子变量, 包含有 SST、SSS、WC、SLP 和 CHL 等环境因子. 用 R 软件处理数据并得到时空和环境因子对 CPUE 影响的样条曲线, 根据样条曲线的趋势分析与影响因子的关系.

Tweedie 类分布的指标 p 的确定是假定拟锥齿鲨的 CPUE 数据服从 Tweedie 类分布, 首先要确定能效参数 p , 将 p 限定在 1~2 之间, 通过改变式(2) Tweedie 分布密度函数中的 p 值, 得出最大对数似然函数的值, 对应的 p 值即为最适的 p 值^[20,27].

1.2.4 GAM 模型的检验和评价 GAM-Tweedie 模型中使用了准似然(quasi-likelihood)估计, 一般的信息准则例如 AIC(Akaike information criterion) 不适合作为模型评价标准, 因此本文选用了适合准似然估计的 Q-AIC(quasi-AIC) 作为模型选择标准^[20]. 模型变量选择基于模型因子的显著性($P < 0.05$), 将解释变量随机逐个加入 GAM 模型, 得到包含不同个数解释变量的 GAM 模型, 其 Q-AIC 值最小的为最佳模型^[28-29].

1.2.5 对不显著环境因子的研究和某些因子之间关系的讨论 在模型中, 受变量间相关性等因素的影响, 一些对鱼类资源分布影响较大的环境因子(如温度、农历等)有可能对 CPUE 的影响不显著. 基于对拟锥齿鲨 CPUE 和环境因子关系的探索目的, 本文将对不显著变量进行进一步的分析, 对于关系较为密切的因子如 SST、纬度和月份, 单独进行数据分析和讨论. 最后, 通过 GAM-Tweedie 模型用 R 软件计算出标准化的 CPUE, 对拟锥齿鲨资源状态和变动进行初步分析.

数据分析软件为 ArcGIS 10.2、Microsoft Excel 2013、R-3.3.1 和 SPSS 22.0.

2 结果与分析

2.1 拟锥齿鲨 CPUE 分布

中国金枪鱼延绳钓渔业在热带大西洋的作业区域为 6.33° S—17.43° N, 18.25°—42.03° W, 其中 89% 的 2.5°×2.5° 单位渔区内均有拟锥齿鲨的分布, 但拟锥齿鲨主要集中分布在 2.5°—0° S, 22.5°—25° W 和 2.5°—10° N, 25°—30° W 两个区域(图 1).

2.2 分布假设检验

对基于 Tweedie 类分布的 CPUE 的标准化残差值进行分布假设检验, 在 GAM 模型的残差 QQ 图中(图 2), 标准化残差值整体上集中于对角线上并呈线性分布, 而在较大值处向左有一些小的偏差. 这是因为从模型得出的与零值相对应的预测值变为正

值^[21]. 整体来看, GAM 模型的分布假设比较合适.

2.3 模型和显著性因子的选择

根据 Q-AIC 及 p -value 选择最佳的模型, 结果显示, 年、月份、经度、纬度、SSS、SSH、CHL、SLP、WC 均为显著性变量, SST、BF、LUN 为不显著变量. 根据各因子的 p 值进行选择, 去掉不显著的变量之后, Q-AIC 最小的为最佳 GAM 模型(表 3); 最佳模型对 CPUE 的总偏差解释为 40.2%.

通过计算得出 Tweedie 中的最佳 p 值为 1.136.

2.4 各因子对 CPUE 的影响和关系

从名义 CPUE 与时间效应的关系(图 3a、b) 可以看出, 年份在 2009—2010 年段呈正效应关系, 而在 2011—2013 年基本保持平稳, 在 2014—2015 年逐渐上升. 月效应在 1—9 月逐渐降低, 在 9—12 月逐渐升高. 空间效应方面(图 3c、d), 经度在 24°—34° W 与名义 CPUE 呈开口向下的抛物线, 以此抛物线为中心向两边分别延伸到 37.5° W 和 19° W, 与名义 CPUE 呈负效应关系, 而后再往东西方向的趋势由于置信区间较大且数据量较小, 与名义 CPUE 的关

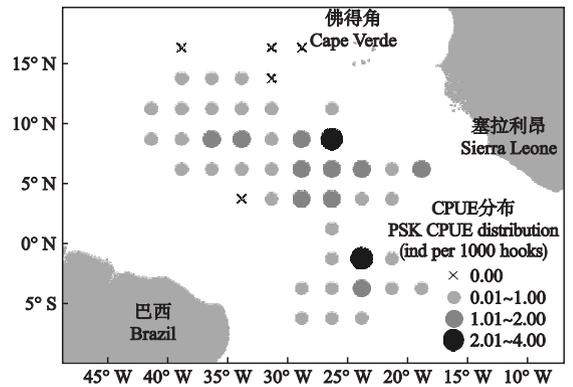


图 1 2009—2015 年热带大西洋延绳钓渔业中拟锥齿鲨 CPUE 的累积分布

Fig.1 2009—2015 CPUE cumulative distribution of the crocodile shark in the longline fishery in the tropical Atlantic Ocean.

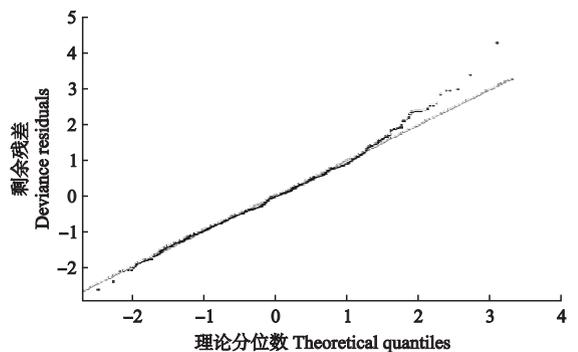


图 2 Tweedie 模型的剩余残差 QQ 图

Fig.2 Quantile-quantile (QQ) plot of the deviance residuals in Tweedie model.

表 3 GAM 模型拟合结果的偏差分析及最佳 GAM 模型

Table 3 Summary analysis of deviance for generalized additive models (GAM) and the optimal GAM model

累加影响因子 Cumulative of influencing factors	p 值 p -value	决定系数 R^2	累计解释偏差 ^[30] Cumulative of deviance explained (%)	可解释偏差 ^[31] Deviance explained (%)	Q-AIC 值 Q-AIC value
+年 (+Year)	$< 2 \times 10^{-16} **$	0.096	15.2	15.2	2677.46
+月 (+Month)	$2.61 \times 10^{-16} **$	0.142	21.0	5.8	2597.86
+经度 (+Lon)	$9.99 \times 10^{-9} **$	0.204	26.4	5.4	2532.30
+纬度 (+Lat)	$2.94 \times 10^{-6} **$	0.204	27.3	0.9	2519.40
+海面高度 (+SSH)	$1.45 \times 10^{-10} **$	0.287	35.2	7.9	2421.29
+海表 Chl a 浓度 (+CHL)	$1.55 \times 10^{-6} **$	0.326	37.2	2.0	2395.89
+天气 (+WC)	$5.09 \times 10^{-7} **$	0.340	38.7	1.5	2370.22
+海表盐度 (+SSS)	0.000264 **	0.366	39.7	1.0	2353.78
+海面大气压 (+SLP)	0.025200 *	0.382	40.2	0.6	2351.15
+农历 (+LUN)	0.175873	0.381	40.8	0.5	2348.44
+海况 (+BF)	0.235581	0.381	41.0	0.2	2349.28
+海面水温 (+SST)	0.450308	0.380	41.2	0.2	2350.77

Lon; Longitude; Lat; Latitude. 下同 The same below. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

系存在不确定性,故不予分析(以下分析中遇到的相似情况同理)^[32];纬度在 11° N 达到最小值,以此

为中心分别往南北方向至 15° N 和 1° S 呈正效应。采用 GAM-Tweedie 模型对拟锥齿鲨 CPUE 与

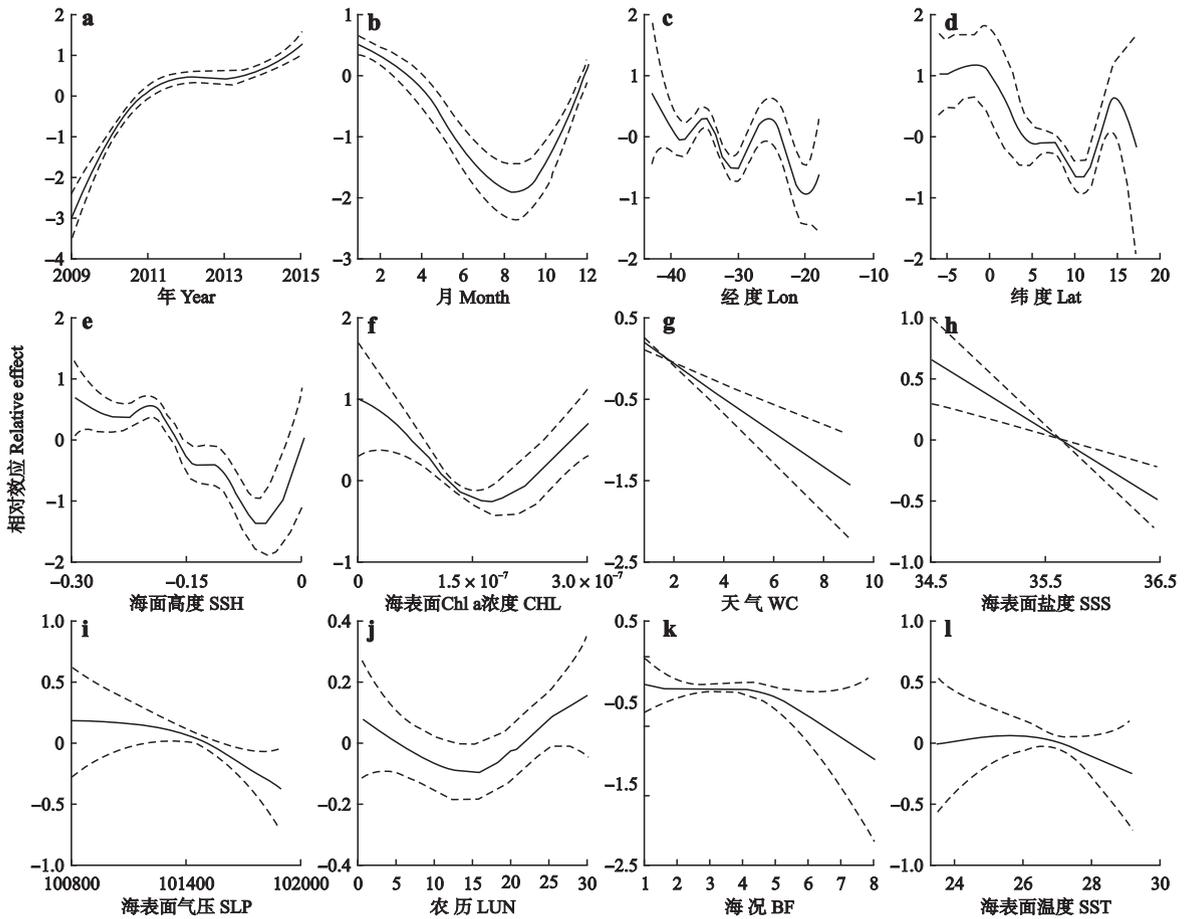


图 3 不同环境因子对热带大西洋延绳钓渔业中拟锥齿鲨 CPUE 的影响

Fig.3 Effects of different environmental factors on *Pseudocarcharias kamoharai* CPUE of longline fishery derived from the GAM analysis in the tropical Atlantic Ocean.

Lon; Longitude; Lat; Latitude; SSH; Sea surface height; CHL; Chlorophyll a concentration; WC; Weather code; SSS; Sea surface salinity; SLP; Sea level pressure; LUN; Lunar calendar; BF; Beaufort wind force scale; SST; Sea surface temperature. 下同 The same below.

环境因子关系分析发现(表 3),对 CPUE 影响比较大的几个环境变量分别是 SSH、CHL、WC、SSS 和 SLP(解释偏差分别为 7.9%、2.0%、1.5%、1.0% 和 0.6%);SSH 与名义 CPUE 在 $-0.23 \sim -0.05$ m 总体上呈现负相关(图 3e),其中在 -0.19 和 -0.12 m 处略微上升,但不显著.CHL 与名义 CPUE 的关系以 $1.528 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为中心向左(叶绿素 a 浓度减小)为负相关,向右为正相关关系(图 3f).WC 与名义 CPUE 的关系呈现较显著的负相关关系(图 3g).SSS 与名义 CPUE 的关系为负相关(图 3h),95% 置信区间最小处的盐度为 35.58,在采样区域,拟锥齿鲨较多地分布在盐度为 35.58 左右的区域.

其他几个环境变量对 CPUE 的影响相对较小(表 3),分别是 LUN(0.5%)、BF(0.2%) 和 SST(0.2%).SLP 与名义 CPUE 的关系也为负相关(图 3i),95% 置信区间最小处的大气压为 101.51×10^3 Pa,在采样区域,拟锥齿鲨多分布在大气压为 101.51×10^3 Pa 左右的区域.LUN 与名义 CPUE 的关系为以农历日 14—16 日降到最低.以此为分界,上半月呈负相关关系,下半月为正相关关系(图 3j).BF 与 CPUE 的关系为海况较好时(小波浪以下)的 CPUE 基本保持平稳,海况较差时(中波浪以上)CPUE 与 BF 表现出明显的负相关(图 3k).SST 与名义 CPUE 的关系为:在 $23.5 \sim 25$ °C 区间内两者呈正相关;在 $25 \sim 26$ °C 区间内 CPUE 达到最大值;在 $26 \sim 28.8$ °C 区间内两者呈负相关关系(图 3l).

2.5 不同纬度和月份下 SST 对 CPUE 的影响

纬度对 CPUE 的影响与 SST 有很大的关系,现对 7 年的数据进行综合分析,研究结果显示,随着纬度的变化,拟锥齿鲨 CPUE 和 SST 的变化趋势较为相似(图 4),经皮尔森相关性检验,同纬度的 CPUE

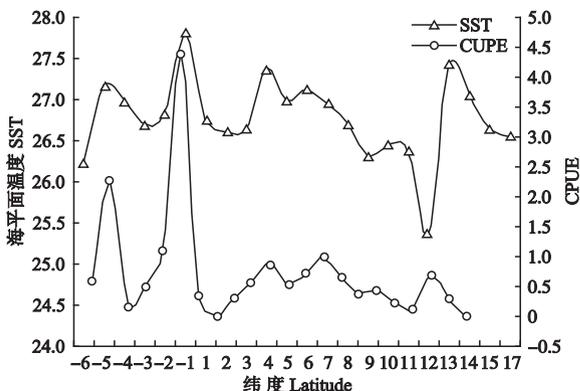


图 4 不同纬度下海表面温度与 CPUE 的变化趋势
Fig.4 Sea surface temperature and CPUE change trend at different latitudes.

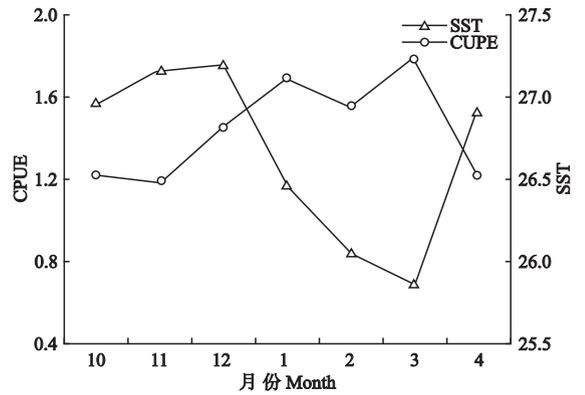


图 5 不同月份海表面温度与 CPUE 的变化趋势
Fig.5 Sea surface temperature and CPUE change trend at different months.

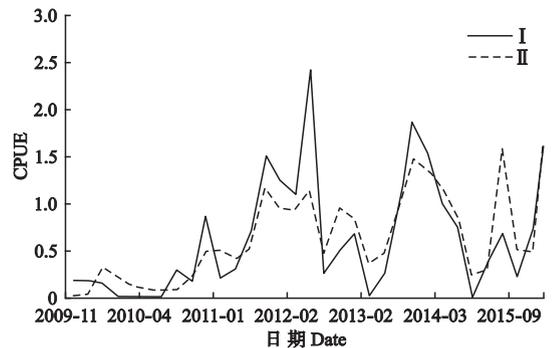


图 6 名义 CPUE (I) 和标准化 CPUE (II) 的变化趋势
Fig.6 Change trend of normal CPUE (I) and standardized CPUE (II).

和 SST 为显著相关($P < 0.05$).

分析了观察期间每月平均 SST 数据和每月平均名义 CPUE 的关系,经皮尔森相关性检验(图 5),结果显示,月平均 SST 对拟锥齿鲨名义 CPUE 有显著影响($r = -0.806, P < 0.05$).1—3 月 SST 相对下降,而拟锥齿鲨的名义 CPUE 相对较高.

2.6 名义 CPUE 和标准化的 CPUE

用 GAM 可以研究渔获产量与环境因子的关系.同时,GAM 又是一种常用的 CPUE 标准化的方法^[19].将 GAM-Tweedie 标准化后的 CPUE 和名义 CPUE 按月平均值进行比较.结果显示,拟锥齿鲨名义 CPUE 和标准化后的 CPUE 没有太大的差异,从 2009 年到 2015 年,拟锥齿鲨标准化的 CPUE 呈现波动,整体呈上升趋势(图 6).

3 讨论

3.1 CPUE 的变化趋势及与时空因子的关系

2009—2011 年 CPUE 呈上升趋势,2011—2013 年 CPUE 捕捞强度趋于平稳,2014—2015 年,CPUE

继续呈上升趋势.可能因为大西洋金枪鱼延绳钓渔业捕捞技术和捕捞经验的提高导致了资源量不断提高的假象;或者是因为各年不同观察员数据质量高低不一;也可能是因为拟锥齿鲨资源量随着其他大型鲨鱼如尖吻鲭鲨(*Isurus oxyrinchus*)等资源量的下降导致的竞争释放作用,从而资源量增加;还可能是因为随着全球环境变化,如 SST 的升高导致海洋热焔的变化,从而导致温跃层深度的改变,进而影响拟锥齿鲨的繁殖力及其幼仔的成活率^[3].遭遇率和 CPUE 的上升趋势可能证明了其资源量的增加,但也存在诸多不确定因素,只能说明热带大西洋金枪鱼延绳钓渔业对拟锥齿鲨的影响在不断增强^[3].

CPUE 的月份变化结果呈现出以 9 月为中心的开口向上的抛物线,11 月至次年 5 月为 CPUE 较高的月份,其原因可能与温度、海流或者饵料物种的迁移有关.另外,由于采样依赖于商业渔船,缺少了 6、7 和 8 月的数据.深入、全面的结果有待于进一步调查和研究.

CPUE 与经度的关系并没有较为清晰的规律,可能与该海域环境因子如温度、海流、盐度或者其锋面的变动有关,或者是在样本量不够大的情况下,经度方向观察到的资源分布不均匀.

3.2 CPUE 与环境因子的关系

海面高度(SSH)能反映海洋锋面、水团等重要的中尺度海洋动力特征,含有海浪、海流和潮汐等海洋动力现象,在渔场分析中具有重要作用^[33].海洋表层水团的大范围运输导致了平均海面高度出现正值和负值情况,相应地,水密度的变化也受海表温度和混合层深度改变的影响^[34].本研究结果显示,海面高度显著影响热带大西洋拟锥齿鲨 CPUE 的分布,海面高度在 $-0.19 \sim -0.05$ m 之间与 CPUE 呈现负相关关系,海面高度在 -0.19 m 处 CPUE 达到最大.这与对其他鱼种与 SSH 关系的研究结果差异较大,如中西太平洋黄鳍金枪鱼、大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)和鲣鱼的 CPUE 均在海平面较高处数值较大^[33,35],原因可能是海面高度为负的海域的海流由于辐散或剪切作用存在不同程度的湍流和锋面,造成该海域营养物质丰富,吸引鱼类在此集群进行索饵等活动,也有可能拟锥齿鲨的摄食习性有关.

海水中的叶绿素 a 含量不仅是浮游植物生物量指标,也可作为以浮游植物为食的浮游动物及海洋鱼类资源丰度的指标.因此,叶绿素 a 反映了该水域的生态环境,叶绿素 a 的浓度可以成为鱼类索饵场优良与否的重要指示剂;叶绿素 a 的含量与海洋多

种环境因子有关,其浓度因区域、季节而异^[33].本研究结果表明,叶绿素 a 对拟锥齿鲨 CPUE 的影响比较显著,但拟锥齿鲨 CPUE 在叶绿素 a 浓度为 $1.528 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时达到最低,在 $1.528 \times 10^{-7} \sim 2.400 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内呈现正相关关系,而在 $0.7 \times 10^{-7} \sim 1.528 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内呈现负相关关系.可能是由于浓度为 $1.528 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右的叶绿素 a 会使水体产生富营养化,不利于海洋生物的生长;叶绿素 a 浓度的梯度分布反映了该海域的锋面和涡流的分布特征.这些特征与中心渔场分布存在相关性^[31].本研究中的 CPUE 分布指向叶绿素 a 浓度高值区和低值区,可能与此处形成的锋面有关^[29],也可能与拟锥齿鲨具有较好的视力和捕食能力有关.

研究结果显示,天气越差 CPUE 越低,可能与阴天、雨天光线较暗影响拟锥齿鲨的觅食活动和捕捞作业本身也受到影响等有关.

海表面盐度(SSS)、水平面气压(SLP)对拟锥齿鲨 CPUE 的可解释偏差较小.戴小杰等^[36]对印度洋大眼金枪鱼的研究显示,SSS 对其 CPUE 的方差贡献率为 0.55%.范永超等^[37]对南太平洋长鳍金枪鱼的研究中 SSS 对 CPUE 的偏差解释仅为 0.2%.虽然盐度轮廓线的界定不像其他参数那样容易定义,认为所有海洋鱼类的盐度变化范围介于 30~40 之间,相对较小的盐度变化幅度对渔场的研究一般不是特别重要,但不同盐度分布能够突出其他参数评估渔场的重要性^[38-39],即盐度对大多数的鱼类直接影响较少,可通过水团、海流等间接影响鱼类的分布^[40].

海平面气压与拟锥齿鲨 CPUE 的关系总体上表现为负相关,并没有得到适合的气压范围,相关的研究也非常少,更为精确的结果需要进一步采集数据进行研究.农历对 CPUE 的影响主要表现为潮汐和月相,虽然本研究结果中农历对 CPUE 的影响并不显著,但可以看到一个微弱的趋势,在月相接近满月时(农历十四至十六),拟锥齿鲨的 CPUE 达到最小,还有待于进一步研究.

3.3 纬度、月份、SST 对 CPUE 的影响

CPUE 与 SST、纬度之间的关系在本研究中不显著,但不同纬度和月份下平均 SST 的变化与 CPUE 的变化呈现显著性相关.如模型结果中 SST 的显著性 p 值为 0.4503,而去除纬度和月份影响后,SST 与 CPUE 的相关显著性分别为 0.012 和 0.028.这主要是因为模型中由于受到关系密切因子之间的互相影响,导致某些环境变量在因子筛选中结果不显著,

所以 SST 与 Lat 和 Month 有着密切的关系, 并且影响着拟锥齿鲨 CPUE 的变化. Ohshima 等^[41]用 GLM 对西北太平洋大青鲨和尖吻鲭鲨的研究结果显示, SST 对大青鲨、尖吻鲭鲨 CPUE 有显著的影响, 而 SST 和 Lat 的相关显著性 p 值为 1.06×10^{-5} . 大青鲨样条曲线的变化趋势在 $12 \sim 27$ °C 范围内为正相关关系; 尖吻鲭鲨在 $8 \sim 18$ °C 范围内为正相关关系, 而在 $18 \sim 27$ °C 范围内为负相关关系. 在其他研究中较为重要的环境因子 SST 在本研究中影响不显著. 首先, 不同鲨鱼受 SST 的影响可能有较大差别; 其次, 由于本研究采样范围依赖于热带大西洋延绳钓渔业, 在纬度上跨度相对较小, 致使 SST 范围也较小; 再者, 模型未考虑因子间的相互影响, 可能也是导致 SST 对 CPUE 影响不显著的原因.

3.4 模型的改进和方法建议

GAM-Tweedie 模型比较适合研究鲨鱼类等 CPUE 零值较多的数据. 本文以已有文章和相关结论为参考构建模型, 并没有和其他模型进行对比, 难免不严谨. 其次, Tweedie 分布类中关于参数 p 的计算方法的理论基础还需要进一步探讨, 环境因子的选择也是基于现有数据, 还有其他环境因子没有考虑到. 基于 Tweedie 类分布的 GAM 模型还需要结合渔业资源数据进行深入研究.

参考文献

[1] Dai X-J (戴小杰), Xu L-X (许柳雄). Primary Color Guide of the World Tuna Fishery Catches Species. Beijing: Ocean Press, 2007: 132 (in Chinese)

[2] Compagno LJV. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Vol. 2. Bullhead, mackerel and carpet sharks (Heterodontiformes, Lamniformes and Orectolobiformes) // Jereb P, Roper CFE, Vecchione M, eds. Fao Species Catalogue for Fishery Purposes, 2001: 548–557

[3] Romanov EV, Ward P, Levesque JC, et al. Preliminary analysis of Crocodile shark (*Pseudocarcharias kamoharai*) distribution and abundance trends in pelagic long-line fisheries. IOTC: Working Party on Ecosystems and Bycatch, Thailand, 2008

[4] Hazin FHV, Couto AA, Kihara K, et al. Distribution and abundance of pelagic sharks in the south-western equatorial Atlantic. *Journal of the Tokyo University of Fisheries*, 1990, **77**: 51–64

[5] Li Y-K (李云凯). Review on the feeding ecology and migration patterns of sharks using stable isotopes. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(9): 2756–2764 (in Chinese)

[6] Smith TJ. Squalene: Potential chemopreventive agent. *Expert Opinion on Investigational Drugs*, 2000, **9**: 1841–1848

[7] Owen RW, Haubner R, Würtele G, et al. Olives and olive oil in cancer prevention. *European Journal of Can-*

cer Prevention, 2004, **13**: 319–326

[8] Castro JI, Woodley CM, Brudek RL. A Preliminary Evaluation of the Status of Shark Species. FAO Fisheries Technical Paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999: 566–568

[9] Ferrette BLDS, Mendonça FF, Rui C, et al. High connectivity of the crocodile shark between the Atlantic and Southwest Indian oceans: Highlights for conservation. *PLoS One*, 2015, **10**(2): e0117549

[10] Dai X-J (戴小杰), Jiang R-L (姜润林), Xu L-X (许柳雄), et al. Study on the fecundity of crocodile shark in the tropical eastern central Atlantic Ocean. *Acta Hydrobiologica Sinica (水生生物学报)*, 2010, **34**(4): 890–892 (in Chinese)

[11] Liu W (刘维), Dai X-J (戴小杰). Reproductive biology characteristics of *Pseudocarcharias kamoharai* in the tropical eastern Pacific Ocean. *South China Fisheries Science (南方水产科学)*, 2008, **4**(2): 21–25 (in Chinese)

[12] Gao C-X (高春霞), Tian S-Q (田思泉), Dai X-J (戴小杰), et al. Preliminary analysis of the biology of the crocodile shark, *Pseudocarcharias kamoharai* in the tropical eastern-central Atlantic Ocean. *Journal of Shanghai Ocean University (上海海洋大学学报)*, 2013, **22**(2): 289–294 (in Chinese)

[13] Fujita K. Oviparous embryos of the pseudocarchariid shark, *Pseudocarcharias kamoharai*, from the Central Pacific. *Journal of Ichthyology*, 1981, **28**: 37–44

[14] Xue Y (薛毅). Statistical Modeling and R software. Beijing: Tsinghua University Press, 2007 (in Chinese)

[15] Zhu G-P (朱国平). Effects of temporal and environmental factors on the fishing ground of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula based on generalized additive model. *Journal of Fisheries of China (水产学报)*, 2012, **36**(12): 1863–1871 (in Chinese)

[16] Sun W-W (孙伟伟). Application of generalized additive model to automobile insurance ratemaking based on tweedie distributions. *Journal of Tianjin University of Commerce (天津商业大学学报)*, 2014, **34**(1): 60–67 (in Chinese)

[17] Niu M-X (牛明香), Li X-S (李显森), Xu Y-C (徐玉成). Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of *Trachurus murphyi* in southeast Pacific Ocean based on generalized additive model. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(4): 1049–1055 (in Chinese)

[18] Tang H (唐浩), Xu L-X (许柳雄), Zhou C (周成), et al. Impact factors of sinking performance for tuna purse seine based on the generalized additive model. *Journal of Fisheries of China (水产学报)*, 2013, **37**(6): 944–950 (in Chinese)

[19] Guan W-J (官文江). R Language Application in Marine Fisheries Beijing: Ocean Press, 2015 (in Chinese)

[20] Shono H. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis. *Fisheries Research*, 2008, **93**: 154–162

[21] National Oceanographic and Atmospheric Administration. Hawaii Longline Observer Program Field Manual [EB/OL]. (2006-01-27) [2016-11-23]. http://www.st.nmfs.noaa.gov/st4/nop/trainingmanuals/HI_Observer_Manual_January06.pdf

[22] Yan M (闫敏), Zhang H (张衡), Fan W (樊

- 伟), *et al.* Spatial-temporal CPUE profiles of the albacore tuna (*Thunnus alalunga*) and their relations to marine environmental factors in the South Pacific Ocean. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2015, **34** (11): 3191–3197 (in Chinese)
- [23] Foy M, Vanbaalen M, Wear M, *et al.* Missing Data and Multiple Imputation: An Unbiased Approach [EB/OL]. (2014-03-08) [2016-11-23]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140003850.pdf>
- [24] Buuren SV, Groothuisoudshoorn K. Mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software*, 2015, **45**: 1–67
- [25] Tweedie MCK. An index which distinguishes between some important exponential families. Proceedings of the Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference. Calcutta, India, 1984: 579–604
- [26] Guisan A, Jr TCE, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene. *Ecological Modelling*, 2002, **157**: 89–100
- [27] Dunn PK. Tweedie: Tweedie Exponential Family Models [EB/OL]. (2016-12-19) [2017-01-10]. <http://cran.stat.upd.edu/ph/web/packages/tweedie/tweedie.pdf>
- [28] Shih C, Chen Y, Hsu C. Modeling the effect of environmental factors on the ricker stock-recruitment relationship for north pacific albacore using generalized additive models. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2014, **25**: 581–590
- [29] Imai C, Sakai H, Katsura K, *et al.* Growth model for the endangered cyprinid fish *Tribolodon nakamurai* based on otolith analyses. *Fisheries Science*, 2002, **68**: 843–848
- [30] Su W (苏巍), Xue Y (薛莹), Ren Y-P (任一平). Temporal and spatial variation in taxonomic diversity of fish in Haizhou Bay: The effect of environmental factors. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2013, **20**(3): 624–634 (in Chinese)
- [31] Zhang Y-J (张燕杰), Cui L-L (崔玲玲), Pang Y-Z (庞有智), *et al.* Classification and ordination of plant communities and the relationship between species richness and environmental factors in Lhasa valley. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2015, **34**(12): 3289–3299 (in Chinese)
- [32] Bigelow KA, Boggs CH, He X. Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery. *Fisheries Oceanography*, 1999, **8**: 178–198
- [33] Wang S-Q (王少琴), Xu L-X (许柳雄), Zhu G-P (朱国平), *et al.* Spatial-temporal profiles of CPUE and relations to environmental factors for yellowfin tuna *Thunnus albacores* from purse-seine fishery in Western and Central Pacific Ocean. *Journal of Dalian Ocean University* (大连海洋大学学报), 2014, **29**(3): 303–308 (in Chinese)
- [34] Chen X-D (陈雪冬), Cui X-S (崔雪森). Application study on relationship between bigeye tuna fishing grounds and environment in the eastern and central pacific ocean by satellite remote sensing. *Remote Sensing Information* (遥感信息), 2006 (1): 25–28 (in Chinese)
- [35] Mao Z-H (毛志华), Zhu Q-K (朱乾坤), Gong F (龚芳). Satellite remote sensing of chlorophyll a concentration in the north Pacific Fishery. *Journal of Fisheries of China* (水产学报), 2005, **29**(2): 270–274 (in Chinese)
- [36] Dai X-J (戴小杰), Ma C (马超), Tian S-Q (田思泉). CPUE standardization of Chinese longline fishery for targeting bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean. *Journal of Shanghai Ocean University* (上海海洋大学学报), 2011, **20**(2): 275–283 (in Chinese)
- [37] Fan Y-C (范永超), Chen X-J (陈新军), Wang J-T (汪金涛). Forecasting central fishing grounds of *Thunnus alalunga* based on multi-factors habitat suitability index in the south Pacific Ocean. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通报), 2015(2): 36–44 (in Chinese)
- [38] Lenoir S, Beaugrand G, Lecuyer É. Modelled spatial distribution of marine fish and projected modifications in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 115–129
- [39] Delcroix T, Hénin C. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1991, **96**: 22135–22150
- [40] Guo A (郭爱), Lin X-P (林显鹏), Zhang H-L (张洪亮), *et al.* Analysis on the long-fin tuna longline fishing techniques and product on high sea in South Pacific. *Journal of Zhejiang Ocean University* (Natural Science) (浙江海洋大学学报:自然科学版), 2010, **29**(3): 246–253 (in Chinese)
- [41] Ohshimo S, Fujinami Y, Shiozaki K, *et al.* Distribution, body length, and abundance of blue shark and shortfin mako offshore of northeastern Japan, as determined from observed pelagic longline data, 2000–2014. *Fisheries Oceanography*, 2016, **25**: 259–276

作者简介 王浩展,男,1991年生,硕士研究生.主要从事鲨鱼生物学和渔业资源研究. E-mail: hoganwang@126.com

责任编辑 肖红

王浩展,戴小杰,官文江,等.基于 Tweedie-GAM 模型的热带大西洋拟锥齿鲨单位捕捞努力量渔获量与环境因子的关系.应用生态学报, 2017, **28**(6): 2024–2032

Wang H-Z, Dai X-J, Guan W-J, *et al.* Relationship between the environmental factors and the CPUE (catch per unit effort) of *Pseudocarcharias kamoharai* in tropical Atlantic Ocean based on the GAM-Tweedie model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28** (6): 2024–2032 (in Chinese)