

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16277

基于 GAM 模型分析水温垂直结构对热带大西洋大眼金枪鱼渔获率的影响

杨胜龙^{1,2}, 张怵怵¹, 唐宝军¹, 化成君¹, 张胜茂¹, 范秀梅¹, 戴阳¹, 冯春雷¹

1. 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090;
2. 中国水产科学研究院 渔业资源与遥感信息技术重点开放实验室, 上海 200090

摘要: 通过模型分析环境变量对延绳钓大眼金枪鱼渔获率的影响, 评估适宜垂直活动空间对大西洋大眼金枪鱼延绳钓渔获率的作用。首先采用回归分析检验环境变量对延绳钓渔获率(由单位捕捞努力渔获量(catch per unit fishing effort, CPUE)表示)的影响显著性, 结合时空变量, 采用 GAM (generalized additive model)模型分析各变量对大眼金枪鱼 CPUE 非线性作用。模型结果表明, 环境因子和时空变量对热带大西洋延绳钓大眼金枪鱼渔获率空间分布影响明显。大西洋大眼金枪鱼延绳钓的高渔获率月份出现在夏季和冬季, 空间上在赤道以北和 30°~50°W。12℃等温线深度对大眼金枪鱼延绳钓渔获率的影响表现为抛物线形状, 高渔获率出现在深度较浅的 250 m 水层, 随着 12℃等温线深度的增加, 大眼金枪鱼延绳钓渔获率降低。温跃层下界深度和深度差对大眼金枪鱼延绳钓渔获率的影响都是穹顶状。随着温跃层下界深度值和深度差由小变大至 200 m, 延绳钓渔获率递增; 温跃层下界深度和深度差超过 200 m 后, 延绳钓渔获率变小。温跃层下界深度和深度差对大眼金枪鱼延绳钓渔获率影响显著的水层分别是 200 m 和 50 m。研究结果显示, 12℃等温线深度和温跃层对热带大西洋延绳钓大眼金枪鱼渔获率影响是交叉的, 在大眼金枪鱼适宜垂直活动水层受限制和延绳钓作业深度相同时, 延绳钓渔获率最高; 在适宜垂直活动空间过深或者过浅时, 延绳钓渔获率都变小, 但可以通过改变作业方式提高渔获率。采用延绳钓 CPUE 进行渔场和资源评估要考虑金枪鱼适宜垂直活动空间。

关键词: 大眼金枪鱼; GAM 模型; Argo; 水温垂直结构; 渔获率; 热带大西洋; CPUE

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)04-0875-09

金枪鱼的垂直分布同时受海洋环境和饵料分布的影响^[1-2], 其垂直水层分布的不同会影响渔船作业和捕捞效率^[3-4], 因此有大量金枪鱼适宜生境和生理极限的文献^[5-9]。同时观测金枪鱼垂直分布、饵料分布和海洋环境条件 3 个对象非常困难^[2], 因此大量研究聚焦海洋环境对金枪鱼适宜生境和生理极限的影响^[4]。但采用海洋环境变量评估金枪鱼适宜生境对延绳钓捕捞效率的影响文献不多^[2, 10]。海洋环境同时影响金枪鱼及其饵料生物的适宜垂直栖息空间选择。在适宜垂直栖息

空间被压缩区域, 有利于表层渔场捕捞, 渔获率高; 反之渔获率低^[11-12]。大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)具有高速游动能力, 水温和溶解氧是影响其适宜垂直分布的主要海洋因素。Bertrand 等^[2]基于水温和溶解氧定义了一个综合指标, 指出太平洋大眼金枪鱼适宜生境空间随纬度变化并影响延绳钓金枪鱼的作业和渔获率。Deary 等^[13]采用相似的方法, 定义了大眼金枪鱼适宜生境水温(12℃)和极限生境水温(8℃), 了解太平洋大眼金枪鱼垂直活动空间。杨胜龙等^[14]分析了 12℃等温

收稿日期: 2016-09-18; 修订日期: 2016-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41606138); 上海市自然科学基金项目(14ZR1449900); 国家科技支撑计划项目(2013BAD13B01); 上海市科技创新行动计划(15DZ1202201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015M07).

作者简介: 杨胜龙(1982-), 男, 助理研究员, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: ysl6782195@126.com. 张怵怵, 并列第一作者, 副研究员, 从事渔业信息化研究. E-mail: zhangbianbian@hotmail.com

通信作者: 冯春雷, 副研究员, 研究方向为渔业资源和捕捞学. E-mail: fengmaster@126.com

线深度和温跃层对大西洋延绳钓大眼金枪鱼中心渔场水平空间分布的影响,并统计了适宜的分布区间。上述研究没有评估大眼金枪鱼适宜生境空间对延绳钓渔获率是如何影响。在相同的资源量下,大眼金枪鱼适宜生境空间的不同,CPUE 和资源量的相关程度不同^[12];在渔获率相对低的海域通过改变投钩深度有可能提高渔获率,因而统计出不同的商业 CPUE 值^[2]。因此仅了解环境变量对 CPUE 的空间分布是不够的,尤其是在资源评估中会导致偏差^[12]。大西洋大眼金枪鱼适宜生境空间对延绳钓渔获率影响文献较少,因此本文在前人的研究基础上以环境变量为大眼金枪鱼适宜生境范围指标,通过模型分析适宜生境空间对热带大西洋大眼金枪鱼延绳钓渔获率的影响,为延绳钓金枪鱼捕捞作业和资源养护提供理论支持。

1 方法与材料

1.1 数据和处理方法

本文以研究区域为 25°S~20°N、60°W~20°E,渔业数据采用大西洋养护金枪鱼国际委员会 (ICCAT)2007—2013 年 5°×5°的延绳钓生产统计数据,渔获率采用单位捕捞努力渔获量(CPUE,尾/千钩),按下式计算:

$$CPUE_{(i,j)} = \frac{N_{fish(i,j)} \times 1000}{N_{hook(i,j)}} \quad (1)$$

式中, $CPUE_{(i,j)}$ 、 $N_{fish(i,j)}$ 、 $N_{hook(i,j)}$ 分别是第 i 个经度、第 j 个纬度处方格的月平均值、月钓获总尾数和月总投钩数。

Bertrand 等^[2]和 Deary 等^[13]综合大量文献,以 12°C 为太平洋适宜栖息水温下限指标。温跃层被认为是影响金枪鱼适宜垂直空间的关键环境因子,同时考虑到 12°C 和温跃层对延绳钓渔获率的影响有可能是交叉的,因此本文环境变量选择 12°C 等温线深度和温跃层下界参数,以及 12°C 等温线深度与温跃层下界深度的差值,分析大西洋大眼金枪鱼适宜生境空间对渔获率的影响。12°C 等温线深度和温跃层采用 Argo 浮标数据(<http://www.argo.org.cn/>)计算获得。首先采用 Akima^[15]插值方法将深度上分布不均匀的单个 Argo 浮标剖面温度资料,等距插值到规则深度层上,垂直等距间

隔为 2 m。在此基础上,采用判别法逐步提取 12°C 深度值;采用周燕遐等^[16]的温跃层判别方法,逐层判断提取大洋温跃层参数值。之后用地统计方法^[17]将按年、月提取的 12°C 深度和温跃层下界深度值,插值到 1°×1°网格节点上。按照年、月分组,在空间上匹配对应,计算 12°C 等温线深度值与温跃层下界深度之间的差值。最后对所有的环境数据,按月平均,即计算 2007—2013 年月平均数据。同时为与大眼金枪鱼延绳钓捕捞数据匹配,将所有 1°×1°网格环境参数值平均化转换成 5°×5°的空间分辨率。

1.2 模型方法

Hartoko 等^[18-19]采用 ECDF(empirical cumulative distribution function)方法计算 $D(t)$,并建立其对每个环境变量的单变量多项式回归方程检验变量对 CPUE 的影响。本文借鉴上述方法,分别建立 $D(t)$ 对 12°C 等温线深度和 12°C 等温线深度值与温跃层下界深度差的单变量多项式回归模型,以拟合优良度(决定系数)检验 12°C 等温线深度和 12°C 等温线深度值与温跃层下界深度差对渔获率的影响重要性。累积分布曲线方程式(ECDF)如下:

$$f(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l(x_i) \quad (2)$$

式中,分段函数 $l(x_i)$ 表达式为:

$$l(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq t \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\bar{y}} l(x_i) \quad (4)$$

$$D(t) = |f(t) - g(t)| \quad (5)$$

$$D = \max |f(t) - g(t)| \quad (6)$$

式中, $f(t)$ 是温跃层特征参数经验累计频率分布函数; $l(x_i)$ 是分段函数; $g(t)$ 是中心渔场 CPUE 权重经验累计分布函数。 n 为资料个数; t 为分组环境因子值; x_i 为第 i 月温跃层特征参数值; y_i 为第 i 月月平均 CPUE; \bar{y} 月平均 CPUE 的平均值。根据给定的显著水平 α ,采用 $K-S$ 检验统计量。

在此基础上分别建立 $D(t)$ 对 4 个环境变量多项式回归模型:

$$D(t) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3 \quad (7)$$

式中, d 是 12℃ 等温线深度或者 12℃ 等温线深度值与温跃层下界深度差; a 是多项式回归系数。

GAM 模型可以模拟环境变量对 CPUE 的非线性作用^[20-23], 本研究采用 GAM 模型分析各时空变量和环境变量对 CPUE 的非线性影响。时间变量有月, 空间变量有经度和纬度; 环境变量有 12℃ 等深线, 温跃层下界深度、温度, 以及 12℃ 与温跃层下界深度差。所有变量自由度为 4, 采用 R 软件包的 mgcv 函数库构建 GAM 模型和计算, 模型选择采用 AIC 值。(1)式计算的 CPUE 值有 16% 的 0 值, 一般对 CPUE 加上一个常数, 本文参考文献[20-23], 对所有 CPUE 加上常数 1 后取对数变换, 构建的 GAM 模型方程如下:

$$\ln(\text{CPUE}+1) = s(\text{month}) + s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + s(\text{environmental variable}) \quad (8)$$

式中, month 表示月份; lon 表示经度; lat 表示纬度, environmental variable 表示环境变量。

2 结果与分析

2.1 相关性分析

ECDF 分析结果表明, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的水平下, 所有变量的 D 值都大于 $D_{0.05}=0.04$, 表明 CPUE 累积分布曲线与 12℃ 等温线深度、温跃层下界深度和温度, 以及 12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差的累积分布曲线有明显区别^[24]。依据参考文献[24], CPUE 与 12℃ 等温线深度、温跃层下界深度和温度, 以及 12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差分布有密切关系。

多项式回归结果的决定系数表明 12℃ 等温线深度、温跃层下界深度, 以及 12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差对 $D(t)$ 回归拟合良好, 而温跃层下界温度对 $D(t)$ 回归拟合较差(图 1)。结果表明, 12℃ 等温线深度、温跃层下界深度, 以及 12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差对渔获率影响明显,

而温跃层下界温度对渔获率影响不明显。12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差对 $D(t)$ 回归决定系数最高, 表明相比, 12℃ 等温线深度和温跃层下界深度; 12℃ 等温线深度与温跃层下界深度差对渔获率的影响更明显。

2.2 GAM 模型分析结果

由于回归分析表明温跃层下界温度对 CPUE 值的影响不显著, GAM 建模的环境变量不包含下界温度。经度、纬度和月份被认为是对延绳钓渔获率有显著影响的, 作为时空因子放入 GAM 模型的自变量中。建立的 GAM 模型回归公式与模型见表 2、表 3, 最终的 GAM 模型保留了所有输入变量, 此时模型 AIC 值最小, 方差解释最高。最终的 GAM 模型在 0.05 的显著性水下, 6 个变量对 CPUE 值存在显著性影响。所有变量对 CPUE 方差解释率为 49.3%, 模型拟合的决定系数为 0.48。P 值表明, 月变量虽然对 CPUE 影响通过 0.05 的显著检验, 但 P 值较大说明时间变量对 CPUE 分布有影响但不明显。表 1 还表明, 12℃ 等温线深度对 CPUE 的解释方差贡献最大, 在增加温跃层下界深度和深度差后, 方差变大, AIC 值变小, 但这种变化较小。

图 2 表明所有时空变量和环境变量对 CPUE 影响作用都是非线性的。CPUE 从 1 月份下降至 3 月份, 随后增长至 7 月份, 达到全年最高, 之后几个月呈现波动。赤道以南的 CPUE 偏低, 赤道以北 CPUE 快速升高。图 4c 显示, 在 50°W 区域 CPUE 值最大, 但 95% 置信区间非常大, 置信度低。与 CPUE 密切的经向空间在 30°W~40°W, 自 30°W 以东区域 CPUE 值逐渐减小。12℃ 等温线深度对 CPUE 影响曲线呈现凹抛物线形状, 从 200 m 到 450 m 随着 12℃ 等温线深度变大, CPUE 值逐渐降低。在深度超过 450 m 后 CPUE 有所变大, 但是置信区间误差很大。对 CPUE 影响密切的深度值在 200~300 m。温跃层下界深度对 CPUE 影响

表 1 K-S 检验结果
Tab. 1 Results of K-S test

环境因子 environment factor	D	环境因子 environment factor	D
深度 depth	0.20	下界深度 the low boundary depth	0.08
深度差 relative depth	0.14	下界温度 the low boundary temperature	0.21

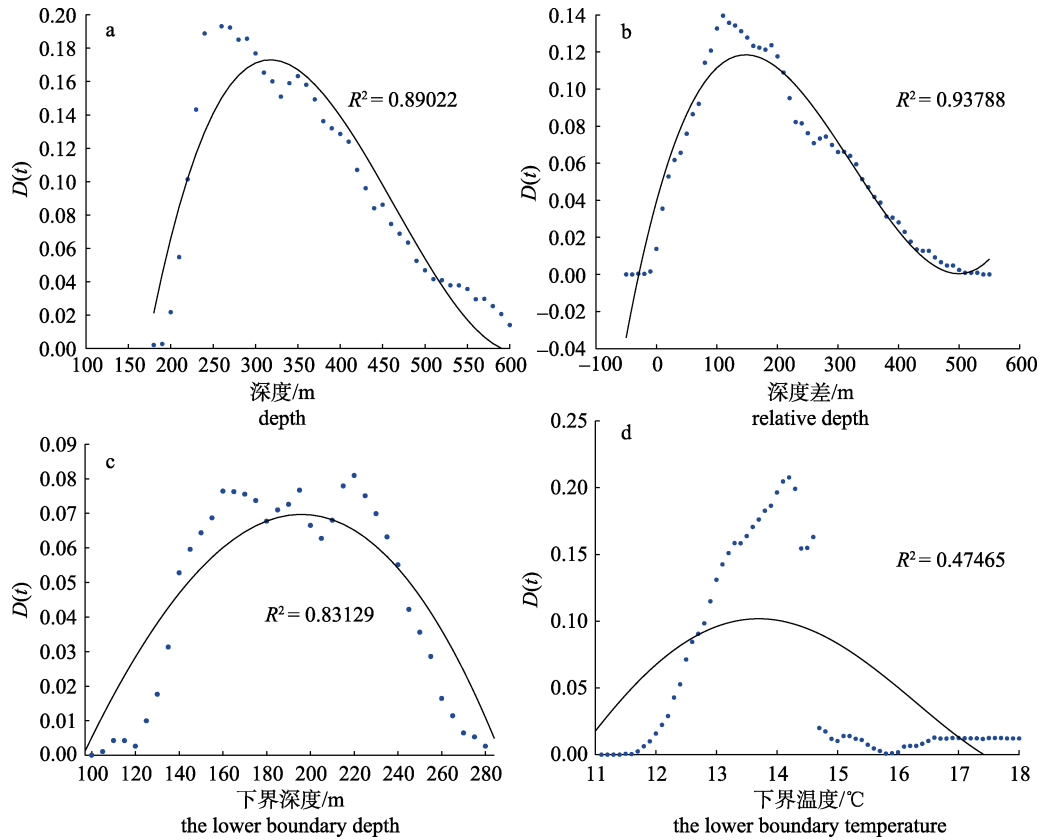


图 1 大眼金枪鱼 CPUE 空间分布图

a. 12°C 等温线深度; b. 12°C 等温线深度与温跃层下界深度差值; c. 温跃层下界深度; d. 温跃层下界温度.

Fig. 1 Spatial distribution analysis of bigeye tuna around

a. 12°C isothermal depth; b. depth difference between 12°C with the lower boundary depth of thermocline; c. the lower boundary depth of thermocline; d. the lower boundary temperature of thermocline.

表 2 GAM 模型统计参数

Tab. 2 Statistical characteristics of the model

公式 formulae	AIC	方差解释/% deviance explained	决定系数 R^2_{adj}	方差 deviance
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})$	2079.96	21.8	0.21	428
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})+s(D_{12})$	1715.73	44.9	0.44	301
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})+s(D_{\text{thermo}})$	1930.62	32.6	0.32	368
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})+s(RD_{12})$	1945.1	31.7	0.31	373
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})+s(D_{12})+s(D_{\text{thermo}})$	1633.68	47.8	0.47	286
$\ln(\text{CPUE}+1)=s(\text{month})+s(\text{lon})+s(\text{lat})+s(D_{12})+s(D_{\text{thermo}})+s(RD_{12})$	1635.34	49.3	0.48	277

表 3 GAM 模型检验值

Tab. 3 F-test for significance of non-parametric effects

变量 variable	自由度 df	F	P
$s(\text{month})$	6	2.5	0.023
$s(\text{lat})$	3	31.26	0
$s(\text{lon})$	3	13.62	0
$s(D_{12})$	2.6	29.61	0
$s(D_{\text{thermo}})$	2.8	22.15	0
$s(RD_{12})$	2.5	17	0

曲线呈现穹顶状, 随着温跃层下界深度值的增加, CPUE 逐渐增加, 在 200 m 附近达到最大, 此时下界深度对 CPUE 影响也是最密切的; 之后随着下界深度的变大, CPUE 值缓慢降低。12°C 等深线深度与温跃层下界深度差对 CPUE 影响曲线同样呈现穹顶状。在 0~200 m 区间, 随着深度差的变大 CPUE 值快速变大, 在 200 m 后, 随着深度差的变大又快速降低。在深度差 30~50 m 区域, 置信区

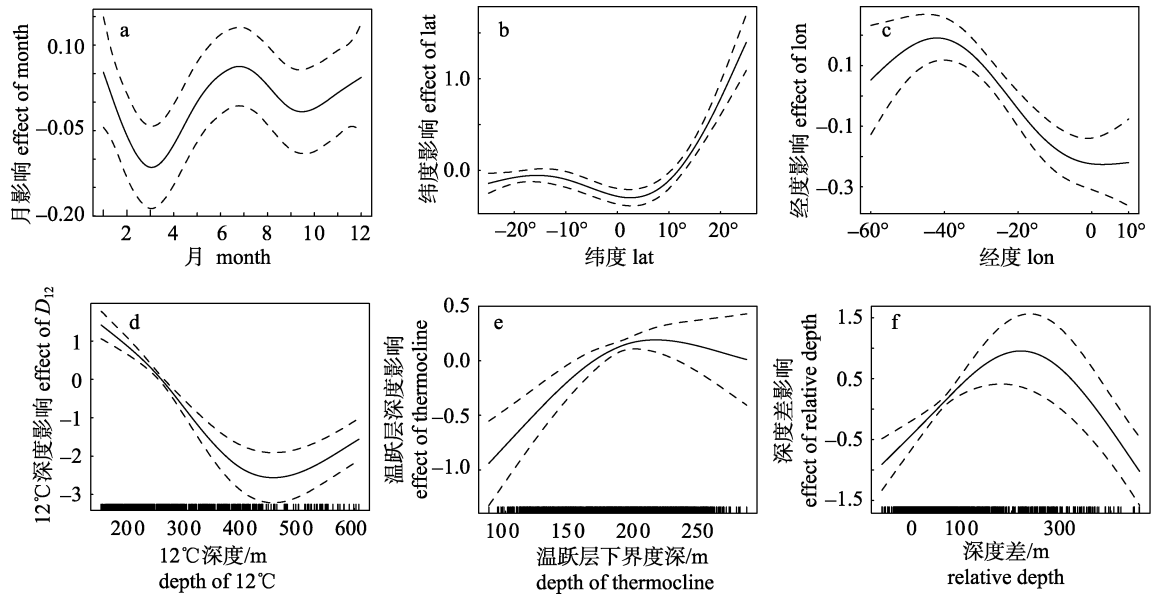


图2 GAM模型获得的6个变量对CPUE的影响

Fig. 2 GMA-derived effects of six predictors on CPUE

间小,表明深度差对CPUE影响最密切的值在30~50 m。图4a表明,全年各月对CPUE的影响是波动的,但95%置信区间始终较大,这同样揭示这种非线性影响不是很显著。相比经度,纬度的95%置信区间表明,在空间上纬度的影响要重于经度,CPUE值受纬度影响大。

3 讨论

3.1 环境因子对渔获率影响显著性分析

海洋生态系统的改变会影响金枪鱼的水平-垂直分布、洄游、幼鱼存活率和补充强度,从而在不同的空间尺度上影响渔业捕捞和渔获率^[21]。延绳钓金枪鱼的捕捞效率主要依赖于投钩深度和金枪鱼游动水层是否吻合^[6]。金枪鱼的垂直分布主要受海洋环境和饵料生物影响,海洋环境主要包括水温、温跃层和溶解氧^[2]。本文基于前人工作选取4个环境变量,ECDF分析表明CPUE累积分布曲线与4个环境变量的累积分布曲线有明显区别,依据参考文献^[24],表明渔获率和4个环境因子有很强的相关性。但本文回归分析表明12°C等温线深度、温跃层下界深度,以及12°C等温线深度和温跃层下界深度差值对热带大西洋大眼金枪鱼延绳钓渔获率的影响明显,而温跃层下界温度影响不明显。研究认为当温跃层变浅时,金枪

鱼垂直分布更集中,有利于延绳钓渔船捕捞,渔获率高;反之渔获率低^[25]。这种描述是从温跃层垂直深度分布,而不是水温,这可能是本文分析结果的原因。相比12°C等温线深度,其与温跃层的深度差对渔获率有更大的影响,揭示12°C等温线深度和温跃层对中西太平洋延绳钓大眼金枪鱼渔获率的影响是交叉的,而不是独立的。GAM模型分析证实环境变量对渔获率的影响是非线性的。需要指出的是影响延绳钓大眼金枪鱼渔获率的还有溶解氧等其他环境因子,本文计算结果证实12°C等温线深度及其与温跃层下界深度差对渔获率空间分布有明显的影响,不同环境因子对渔获率的影响差异需进一步分析。

3.2 水温垂直结构对大眼金枪鱼延绳钓渔获率影响

CPUE经常作为资源丰度指标分析中心渔场分布。但在不同的水温垂直结构水域,CPUE对资源量的回归直线斜率是不同的^[11-12],因此名义CPUE值并不能很好的反映真实的资源情况^[4]。如果标准化CPUE没有考虑金枪鱼生境习性,也会产生估计偏差^[26-27],从而无法准确评估渔场和资源评估。杨胜龙等^[14]分析了大西洋延绳钓大眼金枪鱼中心渔场与12°C等温线深度和温跃层空间分布关系,统计中心渔场区的环境区间,主要是水

平空间的分析,对于指导渔船寻找中心渔场和投钩作业有科学指导意义,但没有进一步研究金枪鱼适宜垂直活动空间对渔获率的影响,但无助于改进作业和进一步提高资源管理能力。

12℃等温线被认为是大眼金枪鱼适宜生境水温^[13]。GAM模型分析表明12℃等温线深度对渔获率的影响是非线性的,在12℃等温线深度较浅的区域CPUE较高,对CPUE影响密切的深度值在250m。这是因为热带大西洋很多延绳钓投钩深度在200~250m水层,从而在12℃等温线深度为250m左右的区域有最高的渔获率^[2]。如在法属波利尼亚马克萨斯群岛海域,调查发现大眼金枪鱼资源量虽然低于塞舌尔群岛海域,但调查的CPUE值要高于后者。因为在马克萨斯群岛海域大眼金枪鱼垂直活动水层在250m以浅,和调查投钩深度吻合,因此大量的商业延绳钓渔船在此作业^[2],符合通常定义的中心渔场标准。随着12℃等温线深度的增加,CPUE降低,这与相关调查文献不符合。文献指出,随着延绳钓投钩的深度增加,延绳钓大眼金枪鱼渔获率变大^[3, 5, 28-29]。在大西洋,深水延绳钓(400m)表明超过300m的水层,延绳钓大眼金枪鱼CPUE依然很高^[30]。日本学者调查的结果表明,大西洋大眼金枪鱼延绳钓CPUE最高值在300m水层以下^[29]。因此可能是在深于12℃等温线深度的地方,大眼金枪鱼白天栖息于此,由于水层深,大部分渔船投钩作业深度不够,产生较低的渔获率而转移生产区域。如在塞舌尔群岛海域白天大眼金枪鱼最深活动水层在500m,超过了一般商业延绳钓作业深度^[2],CPUE偏低。在CPUE值适中,以及12℃等温线深度较大的海域,可以通过提高延绳钓作业深度进行探捕,调查实际的大眼金枪鱼资源量。因此在不考虑大眼金枪鱼适宜生境空间的情况下,CPUE作为指标分析中心渔场需要谨慎考虑。

温跃层是影响金枪鱼垂直活动的关键环境因子。相关文献表明,温跃层变浅,大眼金枪鱼会更密集分布在较浅水层,有利于渔船捕捞,从而渔获率变高^[11-12, 25]。本文模型结果表明,温跃层下界深度对CPUE值影响是非线性的穹顶状,并不是单调递减的。CPUE在温跃层下界深度为200m

时达到最大,并且对渔获率的影响最密切。研究表明大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓CPUE随着温跃层变深而变大^[23, 31]。文献中温跃层深度在200m以浅,结果和本文相似。温跃层深度变浅,渔获率反而变低的原因可能如下:第一,过浅的温跃层极大的压缩了大眼金枪鱼及其饵料生物的栖息空间,一部分海洋生物难以忍受而游到附近的适宜栖息海域,导致资源量减少。第二,大眼金枪鱼适宜栖息的垂直生境空间被限制在较浅水域,在延绳钓作业方式不变的情况下,白天大部分钩子分布水层超过了大眼金枪鱼适宜栖息的下界深度。在CPUE适中的海域,依据温跃层和12℃等温线深度,通过改变作业方式,将延绳钓投钩深度和大眼金枪鱼适宜栖息的水层匹配,可改变渔获率。本文结果还显示温跃层超过200m后延绳钓大眼金枪鱼CPUE开始降低。结论与温跃层变深金枪鱼资源分布不集中、延绳钓渔获率变低的观点吻合。

回归模型和GAM模型表明,12℃等温线深度与温跃层下界深度对渔获率有明显影响,深度差对CPUE的影响类似温跃层,密切的区间在30~50m。结果揭示12℃等温线深度与温跃层下界深度对渔获率的影响不是独立的,而是互相交叉的。大眼金枪鱼觅食的深水散射层生物为了躲避被猎食,白天会迅速潜入温跃层以下的低氧冷水区域^[32-33]。大眼金枪鱼是所有金枪鱼中对水温容忍最高的鱼种,觅食对象为深水散射层的底层生物,索饵水层在温跃层下界及以下水域^[34]。大眼金枪鱼索饵水层要满足在温跃层下界以下,同时又要在适宜栖息的下界深度以上,因此其适宜生境空间同时受适宜水温下界和温跃层影响。在深度差为200m时的渔获率最大,但95%的置信区间过大,结果并不可信。

4 不足和展望

统计模型能够了解中心渔场的分布,GAM模型的结果能更好地揭示各个变量对渔获率的影响。本文以12℃为大眼金枪鱼适宜栖息水层下界指标,同时结合温跃层分析金枪鱼适宜生境空间对热带中大西洋延绳钓渔获率的影响。水温是影响大眼金枪鱼水平和垂直分布的关键环境因子,

但其他环境因子如溶解氧也会影响大眼金枪鱼垂直分布。由于没有足够的溶解氧数据, 本文未做相关分析。虽然文献指出大西洋溶解氧不影响金枪鱼的分布, 但未来需要结合包括溶解氧在内更多的环境因子进行分析。大眼金枪鱼延绳钓渔获率不仅受适宜生境空间影响, 饵料生物也有重要作用。这需要未来做更多的调查, 获取更多的数据, 多角度结合研究。

参考文献:

- [1] Lehodey P, Alheit J, Bertignac M. Climate variability, fish and fisheries[J]. *J Climate*, 2006, (19): 5009–5030.
- [2] Bertrand A, Josse E, Bach P, et al. Hydrological and trophic characteristics of tuna habitat: consequences on tuna distribution and longline catchability[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2002, (59): 1002–1013.
- [3] Boggs C H. Depth, capture time, and hooked longevity of longline caught pelagic fish of fish with chips[J]. *Fish B-NOAA*, 1992, (9): 642–658.
- [4] Bigelow K A, Maunder M N. Does habitat depth influence catch rates pelagic species[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2007, (64): 1581–1594.
- [5] Brill R W. A review of temperature and oxygen tolerance studies of tunas pertinent to fisheries oceanography, movement models and stock assessments[J]. *Fish Oceanogr*, 1994, (3): 204–216.
- [6] Matsumoto T, Saito H, Miyabe N. Swimming behavior of adult bigeye tuna using pop-up tags in the central Atlantic[J]. *Collect Vol Sci Pap ICCAT*, 2004, 57(1): 151–170.
- [7] Evans K, Langley A, Clear NP, et al. Behaviour and habitat preferences of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and their influence on longline fishery catches in the western Coral Sea[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, 65: 2427–2443.
- [8] 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, as ascertained through archival tag data[C]// Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, et al. Reviews: methods and technologies in fish biology and fisheries, vol 9, tagging and tracking of marine animals with electronic devices. Berlin: Springer, 2009: 121–144.
- [9] Schaefer K M, Fuller D W. Vertical movements, behavior, and habitat of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the equatorial eastern Pacific Ocean, ascertained from archival tag data[J]. *Mar Biol*, 2010, 157: 2625–2642.
- [10] Bigelow K A, Hampton J, Miyabe N. Application of a habitat-based model to estimate effective longline fishing effort and relative abundance of Pacific bigeye tuna (*Thunnus obesus*)[J]. *Fish Oceanogr*, 2002, 3(11): 143–155.
- [11] Prince E D, Goodyear C P. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes[J]. *Fish Oceanogr*, 2006(15): 451–464.
- [12] Prince E D, Luo J, Goodyear C P, et al. Ocean scale hypoxia-based habitat compression of Atlantic istiophorid billfishes[J]. *Fish Oceanogr*, 2010(19): 448–462.
- [13] Deary A L, Moret-Ferguson S, Engels M, et al. Influence of Central Pacific Oceanographic Conditions on the Potential Vertical Habitat of Four Tropical Tuna Species[J]. *Pac Sci*, 2015, 69(4): 461–475.
- [14] Yang S L, Jin S F, Hua C J, et al. Spatial-temporal distribution of bigeye tuna *Thunnus obesus* in the tropical Atlantic Ocean based on Argo data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 601–608. [杨胜龙, 靳少非, 化成君, 等. 基于 Argo 数据的热带大西洋大眼金枪鱼时空分布[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 601–608.]
- [15] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. *J ACM*, 1970(17): 589–60.
- [16] Zhou Y X, Li B L, Zhang Y J, et al. World oceanic thermocline characteristics in winter and summer[J]. *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(1): 16–22. [周燕遐, 李炳兰, 张义钧, 等. 世界大洋冬夏季温度跃层特征[J]. *海洋通报*, 2002, 21(1): 16–22.]
- [17] Yang S L, Ma J J, Wu Y M, et al. Study on the reconstruction of Pacific temperature area with Argo data based on the Kriging methods[J]. *Mar Fish*, 2008, 30(1): 13–18. [杨胜龙, 马军杰, 伍玉梅, 等. 基于 Kriging 方法 Argo 数据重构太平洋温度场研究[J]. *海洋渔业*, 2008, 30(1): 13–18.]
- [18] Hartoko A. Spatial distribution of *Thunnus* sp., vertical and horizontal sub-surface multilayer temperature profiles of in-situ Argo float data in Indian ocean[J]. *J Coast Devel*, 2010, 14(1): 61–74.
- [19] Sukresnoa B, Hartoko A, Sulistyoc B, et al. Empirical cumulative distribution function (ECDF) analysis of *Thunnus* sp. Using ARGO float sub-surface multilayer temperature data in Indian Ocean south of Java[J]. *Proced Environm Sci*, 2015, 23: 358–367.
- [20] Mainuddin M, Saiton K, Saiton S I. Albacore fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data[J]. *Fish Oceanogr*, 2008, 17(2): 61–73.

- [21] Briand K, Molony B, Lehodey P. A study on the variability of albacore (*Thunnus alalunga*) longline catch rates in the southwest Pacific Ocean[J]. Fish Oceanogr, 2011, 20(6): 517–529.
- [22] Zagaglia C R, Lorenzetti J A, Stech J L. Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic[J]. Remote Sens Environ, 2004(93): 267–281.
- [23] Maury O, Gascuel D, Marsac F, et al. Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environment in the Atlantic[J]. Can J Fish Aqu Sci, 2001(58): 458–469.
- [24] Perry R I, Smith S J. Identifying habitat associations of the marine fishes using survey data: an application to the north-west Atlantic[J]. Can J Fish Aqu Sci, 1994(51): 589 – 602.
- [25] Pelagic Fisheries Research Program(PFRP) Newsletter. Oceanography's Role in Bigeye Tuna Aggregation and Vulnerability[Z]. 1999, 4(3). <http://www.soest.hawaii.edu/PFRP/newsletters/July-Sept1999.pdf>.
- [26] Kell L, Palma C, Prince E. Standardization of blue marlin CPUE taking into account habitat compression[J]. Collect Vol Sci Pap ICCAT, 2011, 66(4): 1738–1759.
- [27] Vanderlaan A S M, Hanke A R, Chasse J, et al. Environmental influences on Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) catch per unit effort in the southern Gulf of St. Lawrence[J]. Fish Oceanogr, 2014, 23(1): 83–100.
- [28] Hanamoto E. Effect of oceanographic environment on bigeye tuna distribution[J]. Bull Jpn Soc Fish Oceanogr, 1987(51): 203–216.
- [29] Yokawa K, Saito H, Kanaiwa M, et al. Vertical distribution pattern of CPUE of Atlantic Billfishes and associated species estimated using longline research data[J]. Bull Mar Sci, 2006(79): 623–634.
- [30] Song L M, Xu L X, Chen X J. Relationship between bigeye tuna vertical distribution and the temperature, salinity in the Central Atlantic Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(6): 561–566. [宋利明, 许柳雄, 陈新军. 大西洋中部大眼金枪鱼垂直分布与温度, 盐度的关系[J]. 中国水产科学, 2004, 11(6): 561–566.]
- [31] Lan K W, Lee M A, Lu H J, et al. Ocean variations associated with fishing conditions for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic Ocean[J]. J Mar Sci, 2011, 68(6): 1063–1071.
- [32] Brill R W, Bigelow K A, Musyl M K, et al. Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) behavior and physiology and their relevance to stock assessments and fishery biology[J]. Collect Vol Sci Pap ICCAT, 2005(57): 142–161.
- [33] Josse E, Bach P, Dagorn L. Simultaneous observations of tuna movements and their prey by sonic tracking and acoustic surveys[J]. Hydrobiologia, 1998(371/372): 61–69.
- [34] Song L M, Zhang Y, Zhou Y Q. The relationships between the thermocline and the catch rate of *Thunnus albacares* and *Thunnus obesus* in the high seas of the Indian Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(3): 369–378. [宋利明, 张禹, 周应祺. 印度洋公海温跃层与黄鳍金枪鱼和大眼金枪鱼渔获率的关系[J]. 水产学报, 2008, 32(3): 369–378.]

Influence of vertical structure of the water temperature on bigeye tuna longline catch rates in the tropical Atlantic Ocean

YANG Shenglong^{1,2}, ZHANG Bianbian¹, TANG Baojun¹, HUA Chengjun¹, ZHANG Shengmao¹, FAN Xiumei¹, DAI Yang¹, FENG Chunlei¹

1. Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China;
2. Key and Open Laboratory of Remote Sensing Information Technology in Fishing Resource, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: The vertical habitat of tuna has significant effects on the longline catch rates, which are primarily influenced by oceanographic features. In order to support longline operations and fishery management, several key environmental factors were used to evaluate the influence of vertical habitat on longline catch rates in the tropical Atlantic Ocean. Regression model was used to determine the relationship between environment and longline catch rates, expressed as catch per unit fishing effort (CPUE), while generalized additive model (GAM) was used to evaluate the significance of environmental factors on CPUE. The results revealed that the environment and spatio-temporal factors had significant effects on catch rates, and the relationships were nonlinear. High catch rates were achieved in the summer and winter to the north of the equator, between 30°–50°W. The shape of the 12°C isolines (open para curves) showed influences on longline catch rates. High catch rates were observed where the depth was lower than 250 m. The hooking rates declined as the depth of 12°C isolines increased to 400 m. The nonlinear effects of the low depths of thermoclines and relative depths were both like a dome. The longline catch rates increased as the thermocline depth and relative depth increased to 200 m, while at depths greater than 200 m, the catch rates decreased. There were strong relationships between longline catch rates and the thermocline depth and relative depth, which were 200 m and 50 m, respectively. These results suggest that the influences of 12°C isolines and thermoclines were cross. The catch rates reached maximum levels when the vertical habitat was compressed consistent with hooking depth and decreased when the vertical habitat depth was too large or too small, but could change by adjusting the depth of hooks. The vertical habitat of tuna should be taken into account in fisheries stock assessments and fishing grounds analyses.

Key words: *Thunnus obesus*; GAM model; Argo; vertical structure of the water temperature; catch rates; the tropical Atlantic Ocean; CPUE

Corresponding author: FENG Chunlei. E-mail: fengmaster@126.com