

杨胜龙, 范秀梅, 吴祖立, 等. 基于 GAM 模型研究水温垂直结构对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼渔获率的影响[J]. 海洋学报, 2021, 43(4): 46–54, doi:10.12284/hyxb2021040

Yang Shenglong, Fan Xiumei, Wu Zuli, et al. Analysis of the influence of the vertical structure of water temperature on the catch rate of yellowfin tuna in the tropical central and western Pacific based on the GAM model[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(4): 46–54, doi:10.12284/hyxb2021040

基于 GAM 模型研究水温垂直结构对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼渔获率的影响

杨胜龙^{1,2}, 范秀梅¹, 吴祖立¹, 伍玉梅¹, 戴阳^{1*}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室, 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: 黄鳍金枪鱼索饵水层影响延绳钓捕捞效率, 而黄鳍金枪鱼索饵水层分布受水温垂直结构的影响, 因此本文采用 GAM 模型分析次表层环境变量对延绳钓黄鳍金枪鱼渔获率的影响, 评估黄鳍金枪鱼垂直水层分布对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓单位捕捞努力量渔获量 (Catch Per Unite Effort, CPUE) 的作用。模型结果表明, 环境因子对热带中西太平洋延绳钓黄鳍金枪鱼渔获率空间分布影响明显。黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 在 2012 年之后快速增多, 高渔获率月份出现在北半球夏季, 空间上在 10°S, 140°E 附近区域。温跃层上界温度和深度、温跃层下界深度、18°C 等温线深度、 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度及其和温跃层下界深度的深度差对延绳钓渔获率影响较大, 是影响热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率的关键环境因子。随着温跃层上界温度和深度值变大, 延绳钓 CPUE 逐渐递增, 对延绳钓 CPUE 影响密切的温度和深度分别为 27~28°C 和 70~90 m。温跃层下界深度对延绳钓 CPUE 影响在 250~280 m 时最大; 之后随着下界深度的变大, CPUE 快速下降。18°C 等温线深度对延绳钓 CPUE 影响呈现先震荡后递增的趋势, 影响密切的区域在 230 m 深度上下。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度的差值对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 影响呈现先快速递减后缓慢增加的趋势, 在深度差为 70 m 上下时影响最密切。研究结果揭示, 在黄鳍金枪鱼活动水层受限或栖息水层和延绳钓作业深度相吻合时, 延绳钓渔获率最高。依据黄鳍金枪鱼垂直活动水层调整延绳钓投钩, 可以提高渔获率。因此, 采用延绳钓 CPUE 进行渔场和资源评估时要考虑金枪鱼适宜垂直活动空间。

关键词: 黄鳍金枪鱼; 次表层环境; 水温垂直结构; 单位捕捞努力量渔获量

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)04-0046-09

1 引言

黄鳍金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 是远洋渔业重要经济鱼种, 其索饵水层分布受海洋环境和饵料分布的共同影响^[1], 进而影响渔船捕捞效率^[2-3], 因此有大量关于黄鳍金枪鱼垂直游动水层的研究^[4-7]。海洋环境还会影响金

枪鱼及其饵料生物的适宜垂直栖息空间选择, 故大量研究从海洋环境对金枪鱼适宜生境的影响角度进行分析^[7-9]。Deary 等^[7]研究了黄鳍金枪鱼在最适宜水温 (17.5°C)、溶解氧 (107.4 mol/kg) 和极限水温 (12°C)、溶解氧 (43.6 mol/kg) 条件下, 其垂直活动空间分布特征, 结果表明, 太平洋黄鳍金枪鱼垂直活动水层存在明显的

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-09-04。

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901405); 国家自然科学基金 (41606138); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (2019T09)。

作者简介: 杨胜龙 (1982—), 男, 江西省九江市人, 主要从事渔场次表层环境和金枪鱼渔场变动研究。E-mail: ysl6782195@126.com

* 通信作者: 戴阳, 副研究员。E-mail: daiyangbox@163.com

空间分布特征。而在溶解氧不受限制的海域,黄鳍金枪鱼垂直游动主要受水温垂直结构的影响^[10],其大部分时间分布在低于海表温度 8℃ 以内的海域(距海表水温 8℃, 定义为 $\Delta 8^\circ\text{C}$)^[11]。目前,相关文献多侧重于黄鳍金枪鱼水层分布及环境影响的研究,且有关环境对延绳钓渔获率影响分析多采用表层遥感数据^[12],次表层环境数据对延绳钓渔获率影响研究报道较少^[13]。

在相同的渔业资源量条件下,金枪鱼栖息的生境不同会导致金枪鱼分布密度不同。在金枪鱼适宜栖息的垂直空间被压缩区域,鱼群分布相对密集,有利于表层渔船捕捞,渔获率高;反之渔获率低^[8-9]。因此,金枪鱼栖息生境对单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unite Effort, CPUE)与资源量的回归曲线有重要影响^[8-9]。依据鱼群活动水层改变作业深度有可能提高渔获率,金枪鱼游动水层对商业 CPUE 值亦有影响^[1]。因此,仅了解表层环境变量对 CPUE 的水平空间影响是不够的,还应该考虑金枪鱼适宜栖息水层^[9]。研究中西太平洋黄鳍金枪鱼适宜生境空间对延绳钓渔获率影响的文献较少,因此本文在前人研究基础上,以次表层环境变量作为黄鳍金枪鱼适宜生境范围指标,用模型分析垂直水温结构对热带中西太平洋黄鳍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。

2 方法与材料

2.1 数据和处理方法

本文的研究区域为 25°S~25°N, 130°E~130°W (图 1), 渔业数据采用中西太平洋渔业委员会(Western and Central Pacific Fishery Commission, WCPFC)

2007–2017 年的延绳钓生产统计数据(分辨率: 5°×5°), 渔获率采用 CPUE(单位: 尾/千钩)来表示,按下列式计算:

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

式中, $\text{CPUE}_{(i,j)}$ 、 $N_{\text{fish}(i,j)}$ 、 $N_{\text{hook}(i,j)}$ 分别为第 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。

Deary 等^[7]综合大量文献,认为 10.5℃ 为太平洋黄鳍金枪鱼生理容忍水温下限值,17.5℃ 为黄鳍金枪鱼适宜水温值。标志放流结果表明,东太平洋黄鳍金枪鱼白天频繁进入 12℃ 等温线觅食。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 被认为是限制黄鳍金枪鱼垂直分布的关键因子^[10]。温跃层是影响金枪鱼适宜垂直游动和索饵的关键环境因子^[1]。因此,本文选择次表层水温(12~18℃)、垂直温差($\Delta 8^\circ\text{C}$)和温跃层作为影响黄鳍金枪鱼渔获率的备选环境变量。同时,考虑到水温和温跃层对延绳钓渔获率的影响有可能是交叉的,因此,本文环境变量选择了 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度的差值(sdc)以及 17℃ 和 18℃ 等温线深度和温跃层下界深度的差值($sdc1$ 、 $sdc2$),综合分析了中西太平洋黄鳍金枪鱼适宜生境空间对渔获率的影响。

采用 Argo 浮标数据(来源于 <http://www.argo.org.cn/>)计算次表层水温、垂直温差和温跃层月平均产品数据(分辨率: 1°×1°),计算方法参考文献[13]。对所有的环境产品数据,按月平均,即计算 2007–2017 多年月平均数据。同时为与黄鳍金枪鱼延绳钓捕捞数据匹配,将所有分辨率为 1°×1° 的网格环境参数值转换成 5°×5° 的空间分辨率。

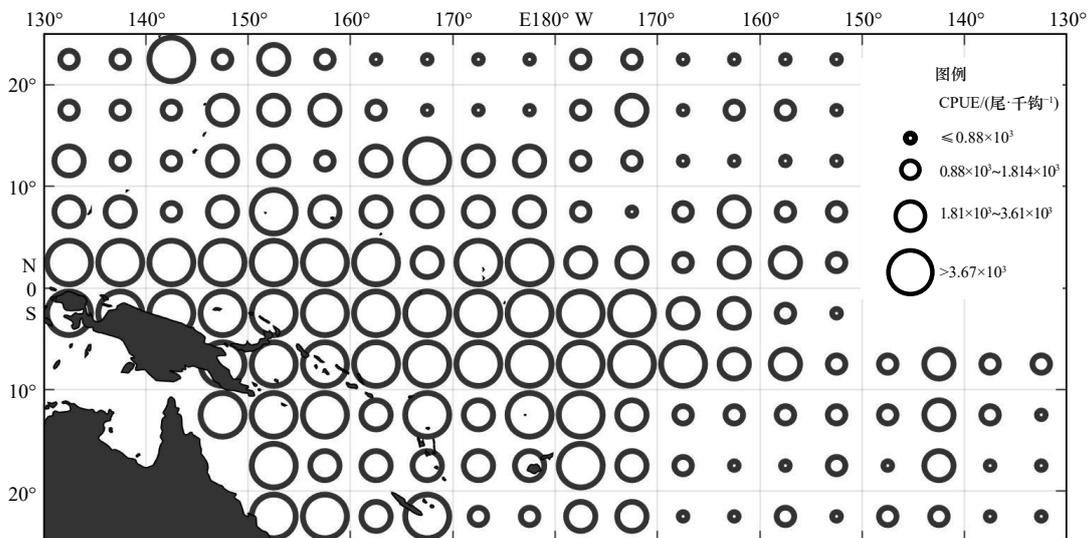


图 1 2007–2017 年中西太平洋延绳钓黄鳍金枪鱼 CPUE 分布

Fig. 1 CPUE distribution of longline yellowfin tuna in western and central Pacific from 2007 to 2017

2.2 模型方法

GAM 模型可以模拟分析输入因子对 CPUE 的非线性影响作用^[12]。CPUE 的变化可能是变量的交叉影响结果,包括随时空变化的环境变量和资源量。本文构建时空 GAM 模型和环境 GAM 模型,分别讨论 CPUE 时空分布特征和环境变量对 CPUE 的影响。时间变量有年和月,空间变量有经度和纬度。次表层环境变量有次表层水温(12~18℃)、垂直温差(Δ8℃)和温跃层以及 Δ8℃ 和 17℃ 与温跃层下界深度差,共计 17 个输入变量。所有变量自由度为 4,采用 R 软件包的 mgcv 函数库构建 GAM 模型进行计算。采用逐步添加变量的方法构建模型,以 0.05 显著性水平选择影响变量,最优模型选择采用 AIC(Akaike Information Criterion)值。公式(1)计算的 CPUE 值有部分为 0,一般给 CPUE 加上 1 个常数。本文对所有 CPUE 加上常数 1 后取对数变换,构建的 GAM 模型方程为

$$\ln(\text{CPUE} + 1) = a + s(\text{year}) + s(\text{month}) + s(\text{lon}) + s(\text{lat}) + e, \quad (2)$$

$$\ln(\text{CPUE} + 1) = a + s(\text{subsurface environmental variables}) + e, \quad (3)$$

式中, e 为模型设差; a 为常数。

采用特征根判定法对输入变量多重共线性进行检验。依据首次构建的环境 GAM 模型解释方差,剔除解释方差较小的变量,直到 kappa 系数小于 1 000,最后构建最终的环境 GAM 模型。

3 结果

3.1 GAM 模型结果

时空变量 GAM 模型结果见表 1 和表 2,模型 AIC 值为 19 965.13; 偏差解释率为 45.3%(表 2)。从方差和 F 值看,经度(lon)和纬度(lat)对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率影响很大,年(year)和月(month)对延绳钓渔获率影响相比很小(表 1)。

环境变量剔除了 13~17℃ 等温线深度、Δ8℃ 等温线深度、温跃层下界与 17℃ 深度差($sdc1$)和温跃层下界与 18℃ 深度差($sdc2$)等变量,保留了温跃层上界深度($upsd$)、温跃层上界温度($upwd$)、温跃层下界深度($downsd$)、温跃层下界温度($downwd$)、温跃层厚度(hd)、温跃层强度(qd)等 6 个温跃层参数以及 12℃ 深度(D12)、18℃ 深度(D18)和 Δ8℃ 等温线深度与温跃层下界深度差(sdc)。此时 kappa 系数是 236,不存在严重的多重共线性。

基于保留的变量构建的环境 GAM 模型结果见表 3 和表 4。在 $p=0.05$ 的显著检验水平下,所有环境变量通过显著性检验,此时模型 AIC 值最小,为

表 1 中西太平洋黄鳍金枪鱼时空变量 GAM 模型 F -检验值

Table 1 F -test value of the spatio-temporal GAM model of yellowfin tuna in western and central Pacific

变量	自由度	F	p
年	2.79	191.09	$<2 \times 10^{-16}$
月	2.89	47.13	$<2 \times 10^{-16}$
纬度	3	2 613.34	$<2 \times 10^{-16}$
经度	3	1 606.35	$<2 \times 10^{-16}$

表 2 中西太平洋黄鳍金枪鱼时空变量 GAM 模型统计参数

Table 2 Statistical characteristics of the spatio-temporal GAM model of yellowfin tuna in western and central Pacific

公式	AIC 值	偏差解释率/%	决定系数
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{year})$	28 039.2	2	0.02
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{year}) + s(\text{month})$	27 879.19	3.16	0.031
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{year}) + s(\text{month}) + s(\text{lon})$	24 090.88	26.3	0.263
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{year}) + s(\text{month}) + s(\text{lon}) + s(\text{lat})$	19 965.13	45.3	0.452

表 3 次表层环境变量 GAM 模型统计参数

Table 3 Statistical characteristics of the spatio-temporal GAM model for subsurface environmental variables

变量	自由度	F	p
上界温度	1.55	458.19	$<10^{-6}$
上界深度	2.33	80.83	$<10^{-6}$
下界温度	2.97	39.95	$<10^{-6}$
下界深度	3	199.81	$<10^{-6}$
厚度	2.9	23.47	$<10^{-6}$
强度	2.86	10.55	$<10^{-6}$
12℃ 深度	2.97	29.69	$<10^{-6}$
18℃ 深度	2.96	95.09	$<10^{-6}$
深度差	2.98	106.09	$<10^{-6}$

23 784.19。次表层环境变量对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率存在非线性影响。所有次表层环境变量对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 偏差解释率为 28.1%,模型拟合的决定系数为 0.279。从方差和 F 值看,温跃层上界温度和深度、温跃层下界深度、18℃ 等温线深度、Δ8℃ 等温线深度及其和温跃层下界深度差对延绳钓渔获率影响较大。温跃层厚度、强度、温跃层下界温度和 12℃ 等温线深度对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率影响较低。

表 4 次表层环境变量 GAM 模型检验值

Table 4 GAM model test value of subsurface environmental variables

公式	AIC值	偏差解释率/%	决定系数
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd})$	25 918.51	15.9	0.159
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd})$	25 508.2	18.4	0.183
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{downwd})$	25 266.73	19.8	0.197
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd})$	24 769.75	22.6	0.226
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{hd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd})$	24 666.62	23.2	0.232
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{hd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd}) + s(\text{intensity})$	24 622.31	23.5	0.234
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{hd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd}) + s(\text{intensity}) + s(\text{D12})$	24 409.33	24.7	0.246
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{hd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd}) + s(\text{intensity}) + s(\text{D12}) + s(\text{D18})$	24 066.41	26.6	0.265
$\ln(\text{CPUE} + 1) = s(\text{upwd}) + s(\text{upsd}) + s(\text{hd}) + s(\text{downsd}) + s(\text{downwd}) + s(\text{intensity}) + s(\text{D12}) + s(\text{D18}) + s(\text{sd})$	23 784.19	28.1	0.279

3.2 CPUE 时空分布特征

图 2 表明, 热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 影响在 2012 年之前维持在较低的水平, 2012 年之后 CPUE 开始上升。不同月份热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 呈现穹顶状分布。CPUE 从 1 月一

直增长至 6 月, 达到全年最高, 之后逐渐下降。热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 在赤道以南的值要高于赤道以北的值, 高值 CPUE 集中出现在 10°S。随着纬度向北, 黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 值逐渐递减。图 2d 显示, 热带中西太平洋西部区域黄鳍

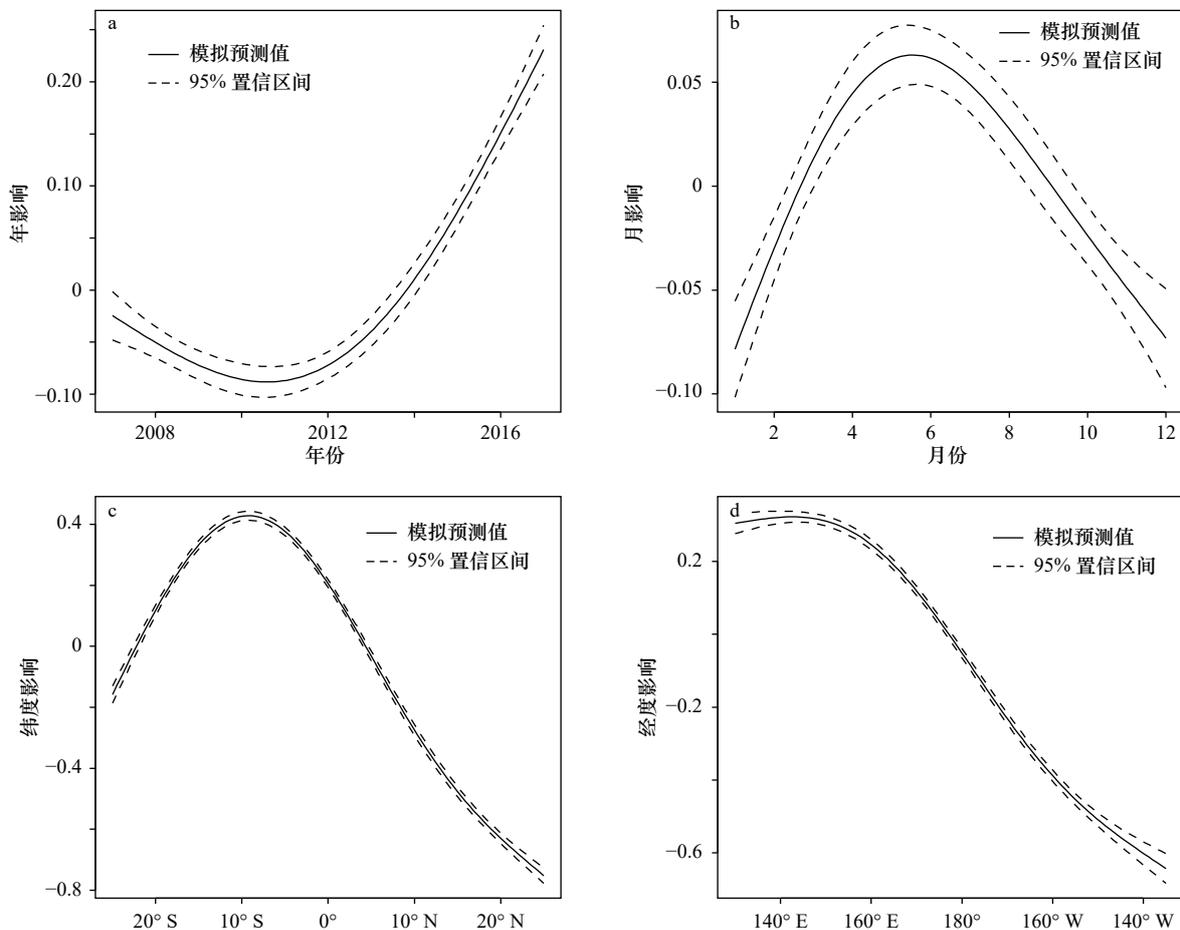


图 2 时空变量对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 的影响
Fig. 2 The effects of spatial-temporal predictors on CPUE of western and central Pacific

金枪鱼延绳钓 CPUE 要大于东部区域。CPUE 最大出现在 140°E 区域,随着经度由西向东,CPUE 值逐渐变小。对 CPUE 影响密切的空间区域在 10°S, 140°E 附近。

3.3 次表层环境因子对 CPUE 影响

在 p 等于 0.05 的显著检验水平下,温跃层对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 存在显著影响(图 3)。温跃层上界深度和温度对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 影响呈现递增趋势,随着温跃层上界温度和深度值变大,延绳钓 CPUE 逐渐递增,对延绳钓 CPUE 影响密切的温度和深度范围分别为 27~28°C 和 70~90 m(图 3a, 图 3b)。温跃层下界深度在 250 m 以浅时,对延绳钓 CPUE 影响是微弱震荡,在 250 m 时达到最大,此时下界深度对延绳钓 CPUE 影响也是最密切的;之后随着下界深度的变大,延绳钓 CPUE 值快速降低(图 3c)。温跃层下界温度对延绳钓 CPUE 影响呈现非线性递减趋势。随着温跃层下界温度变大,延绳钓 CPUE 值逐渐变低。温跃层下界温度对延绳钓 CPUE 影响密切的温度范围为 13~16°C。温跃层厚度对延绳钓 CPUE 影响呈现先震荡递减再增加的趋势。温跃层厚度对延绳钓 CPUE 影响密切的深度范围为 40~70 m(图 3e)。温跃层强度对延绳钓 CPUE 影响呈现震荡递减趋势,温跃层强度在 0.1°C/m 时对延绳钓 CPUE 影响密切,之后随着温跃层强度变大,延绳钓 CPUE 逐渐变小(图 3f)。

12°C 和 18°C 等温线深度对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 影响相似,对延绳钓 CPUE 影响呈现先震荡后递增趋势(图 3g, 图 3h)。12°C 等温线深度对延绳钓 CPUE 影响密切的深度在 340 m 深度左右;18°C 等温线深度影响密切的深度在 230 m 深度左右。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度的差值对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 影响呈现先快速递减后缓慢增加,在深度差为 70 m 左右影响最密切但影响最低(图 3i)。

4 讨论

4.1 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^[4]。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^[1]。海洋环境和饵料生物呈现时空变化特征,因此金枪鱼渔船捕捞作业和渔获率也都呈现时空变化的规律,年、月和经纬度是 CPUE 时空变化的反映。金枪鱼的垂直分布水层

是否和延绳钓投钩深度水层吻合,直接影响延绳钓金枪鱼捕捞效率^[2-3]。因此,本文从次表层环境影响黄鳍金枪鱼垂直游动,进而影响延绳钓渔获率的角度,构建了次表层环境变量对 CPUE 的非线性响应模型,讨论了水温垂直结构对延绳钓黄鳍金枪鱼 CPUE 的影响。

CPUE 变量可能是许多相互交叉的因子的函数,包括环境变量的时空变化、捕捞能力和资源量。渔业资源空间分布实际受环境变量影响,环境变量的空间分布驱动渔业资源时空变动。构建 2 个模型,分别探讨了中西太平洋延绳钓黄鳍金枪鱼 CPUE 时空分布特征和环境变量对 CPUE 的影响。第一个 GAM 模型只包含时空变量,不包括环境变量,模型结果揭示了 CPUE 时空分布特征。第二个模型只包含环境变量,揭示了环境变量本身分布对 CPUE 的影响。Briand 等^[4]采用相似方法分析了南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔获率变化。时空模型方差和 F 值显示(表 1, 表 2),CPUE 呈现明显的空间分布特征,CPUE 高值主要出现在西南区域。CPUE 随时间变化并不明显,表明各年和各月 CPUE 差异不大。

环境模型结果表明,温跃层上界温度和深度、温跃层下界深度、18°C 等温线深度、 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度及其和温跃层下界深度差对延绳钓黄鳍金枪鱼渔获率有影响。温跃层是水温垂直结构中一个关键的环境因素,它不仅影响着金枪鱼的垂直水层分布,也影响着金枪鱼的饵料生物垂直水层分布^[1]。晚上黄鳍金枪鱼栖息在温跃层以上暖水层,白天黄鳍金枪鱼下游到温跃层内部靠近下界区域觅食深水散射层(Deep Scattering layer, DSL)上层海洋生物^[5]。温跃层上界深度和温度以及温跃层下界深度对渔获率影响较大。黄鳍金枪鱼有能力突破温跃层进入深水层,但这种行为很少^[4-5]。这可能是本文模型温跃层强度、厚度和温跃层下界温度相比影响较小原因。次表层温度对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 也有影响。Deary 等^[7]以 17.5°C 为黄鳍金枪鱼适宜栖息水温,分析了其适宜分布的垂直深度,同时以 10.5°C 为太平洋黄鳍金枪鱼容忍水温的下限值,绘制了其最大垂直下游深度空间分布。18°C 接近太平洋黄鳍金枪鱼适宜栖息水温是其影响相对较大原因。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 被认为是限制黄鳍金枪鱼垂直下游的温差^[10],因此 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度的差对渔获率影响显著。

4.2 关键次表层环境对黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率的影响

延绳钓黄鳍金枪鱼捕获深水觅食的散射层生物,其捕捞效率不仅与渔业资源空间分布有关,还与投钩深度是否与黄鳍金枪鱼索饵活动水层吻合及饵料生物分布密度有关^[2]。延绳钓渔船投钩深度一般保持不

变,因此深水觅食的黄鳍金枪鱼索饵水层分布对表层渔船捕捞效率有重要影响。

影响黄鳍金枪鱼索饵水层分布的2个关键因子是饵料生物深度^[15]和环境因子^[16-17]。黄鳍金枪鱼水平空间和垂直水层分布均受饵料生物影响。延绳钓黄鳍金枪鱼渔获率与饵料生物密度在水平空间呈正相关关系^[1]。在饵料生物分布区域,其水层分布对黄鳍金枪鱼索饵水层和表层渔船作业有重要影响。研究表明,白天黄鳍金枪鱼会频繁下游到深层冷水区域觅食 DSL 上层的海洋生物^[15],索饵水层多在温跃层内部靠近下界区域^[18],因此 DSL 的水层分布直接影响黄鳍金枪鱼索饵水层分布。在太平洋,季节性 DSL 昼夜垂直分布和温跃层有关,DSL 上层的海洋生物白天分布在温跃层以下区域,晚上分布在温跃层以上水域^[19]。太平洋 DSL 分布在 200~500 m 水层,其水层深度与温跃层深度呈正相关。当温跃层变浅时,DSL 垂直分布也变浅,黄鳍金枪鱼索饵水层变浅;反之,温跃层变深时,DSL 分布水层也变深^[9],黄鳍金枪鱼索饵水层变深。温跃层通过影响 DSL 水层对黄鳍金枪鱼索饵水层有直接和间接影响。因此,不同的海域因温跃层分布不同,黄鳍金枪鱼白天索饵水层会有空间差异,对延绳钓渔获率有重要影响。此外,局部过于密集的生物分布并不利于延绳钓渔船捕捞。金枪鱼类都依靠视觉进行捕食,在饵料生物过于密集的水层,延绳钓投钩的诱饵并不占优势,黄鳍金枪鱼会更优先捕食饵料生物,导致渔获率低^[1]。

黄鳍金枪鱼觅食时,下游的水层深度不但受限于自身生理功能,还受外界环境因子影响。黄鳍金枪鱼下游最大深度受其生理承受的最低水温和溶解氧限制。实验表明,在周边水温急剧下降超过 10℃ 时,黄鳍金枪鱼不能有效提升自身肌体温度,因此 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 被认为是限制黄鳍金枪鱼垂直分布的关键因子^[10]。本研究结果表明, $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度的差对渔获率影响更显著,表明 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度对 CPUE 的作用和温跃层下界深度的作用是交叉的。

本文模型结果表明,温跃层上界温度和深度、温跃层下界深度、 18°C 等温线深度、 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度及其和温跃层下界深度差对延绳钓渔获率影响较大,是影响热带中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓渔获率的关键环境因子。温跃层下界深度通过影响饵料生物水层分布,进而影响黄鳍金枪鱼索饵水层。图 3 表明,在温跃层下界深度逐渐变大到 250 m 时,CPUE 都比较大,这与中西太平洋延绳钓投钩深度主要覆盖 70~300 m^[20] 有关。在温跃层下界深度为 250 m 上下

时,黄鳍金枪鱼在该水层附近觅食饵料生物,索饵水层和延绳钓多数钓钩深度吻合。因此在 250 m 深度区域,延绳钓黄鳍金枪鱼渔获率最大。下界深度超过 300 m 时,黄鳍金枪鱼垂直活动空间大、分布不集中和索饵水层深都不利于表层渔船捕捞,渔获率低。 18°C 等温线多分布在温跃层内部,揭示黄鳍金枪鱼适宜栖息的水温深度在投钩的主要深度区间,栖息深度和投钩深度吻合时有较好的渔获率。温跃层上界温度不影响黄鳍金枪鱼垂直水层分布,但黄鳍金枪鱼是暖水性鱼类,栖息和产卵需要在一定的水温之上才可进行。厄尔尼诺和拉尼娜事件影响着太平洋的温跃层变化,太平洋金枪鱼空间分布发生改变^[7]。中西太平洋黄鳍金枪鱼围网产量在 29°C 最高^[21]。Lan 等^[12] 采用海洋表层环境变量分析了中西太平洋黄鳍金枪鱼 CPUE 变化并进行预测。延绳钓 CPUE 随着海表温度升高而变大,影响密切区域的温度为 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 。本文模型结果揭示,温跃层上界温度对 CPUE 影响密切的温度为 $27\sim 28^\circ\text{C}$,与黄鳍金枪鱼喜好栖息在表层 28°C 有关。温跃层上界深度为 70~90 m。在中西太平洋,黄鳍金枪鱼幼鱼夜间分布都浅于 100 m,但比东太平洋黄鳍金枪鱼垂直分布深,全年多数月份都在温跃层之上水域,少数时间游到温跃层以下^[22]。

4.3 次表层环境对黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 标准化的启示

CPUE 经常作为资源丰度指标用于渔业资源分析,CPUE 的商业生产数据受各种因素影响(如时间、空间、渔船参数和环境变量等)^[23]。因此,名义 CPUE 值并不能很好地反映真实的资源情况^[9],一般会对 CPUE 进行标准化^[24]。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^[8-9]。当标准化 CPUE 没有考虑金枪鱼生活习性时,也会产生估计偏差^[25],从而无法准确对渔场和资源进行评估。如在法属波利尼亚马克萨斯群岛海域,调查发现,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 250 m 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^[1],符合通常定义的中心渔场标准。因此,分析次表层环境对延绳钓渔获率影响是非常有意义的。

Hinton 和 Nakano^[26] 考虑到渔船的作业效率与金枪鱼在水团中分布的交叉作用对捕捞作业有影响,将海洋环境对黄鳍金枪鱼的行为限制加入到 CPUE 标准化中,提出了基于生境空间的 CPUE 标准化方法,其中 1 个关键的变量就是黄鳍金枪鱼在每个温度差

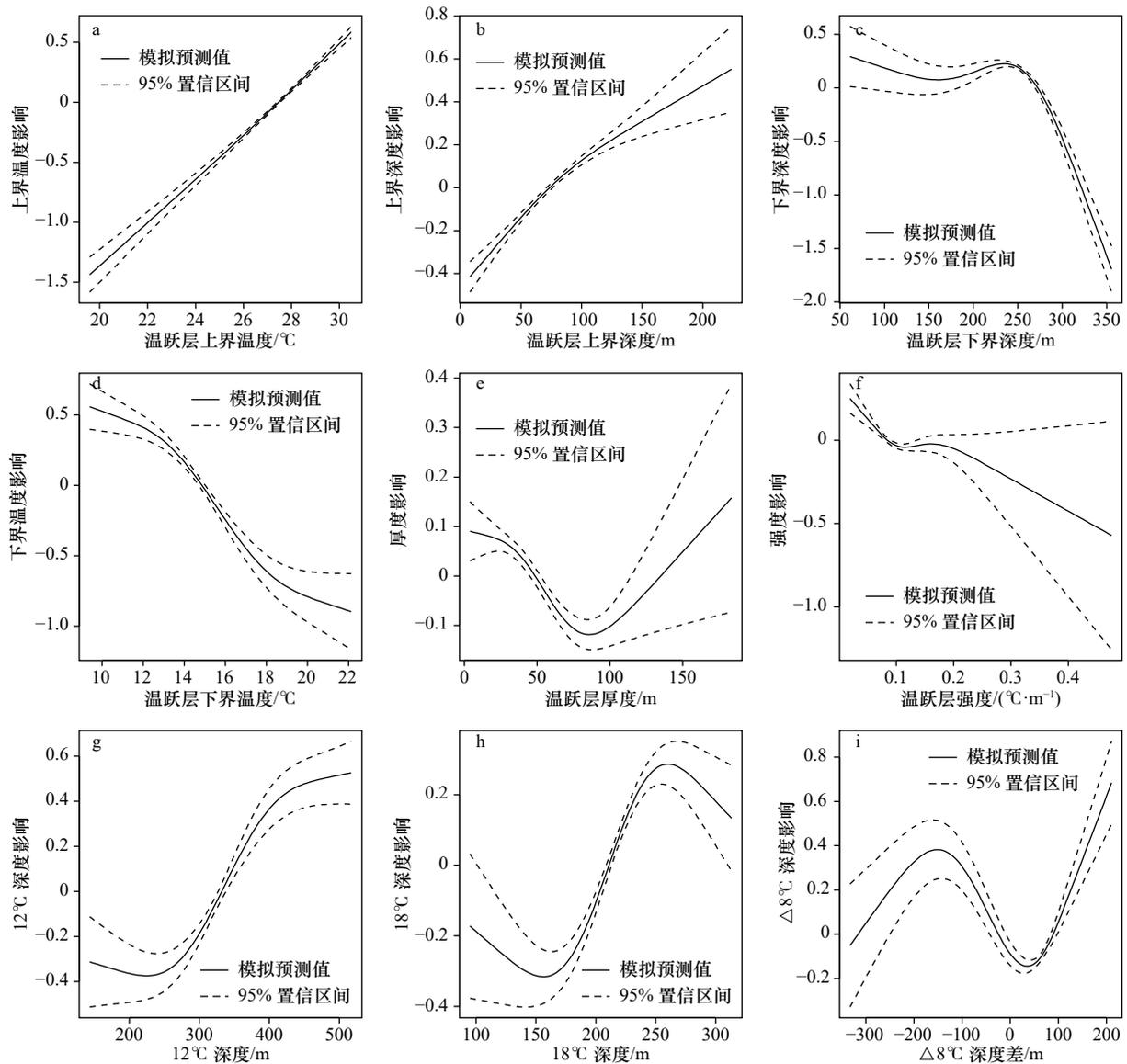


图3 次表层环境变量对中西太平洋黄鳍金枪鱼延绳钓CPUE的影响

Fig. 3 The effects of subsurface environmental variables on CPUE of yellow tuna in the western and central Pacific

内分布的时间。研究证实,结合金枪鱼垂直习性选择和金枪鱼上钩深度,能有效地降低相对丰度估计时的不确定性^[26]。

GAM模型常被用于CPUE标准化^[24]。Lan等^[12]采用海洋表层环境变量构建了GAM模型,模型偏差解释率为33.8%。本文采用GAM模型构建了次表层环境变量对CPUE的非线性关系,模型偏差解释率为28.1%。模型结果表明,次表层环境变量对CPUE有显著影响,也证实了在渔业CPUE标准化中,应该考虑和纳入影响金枪鱼垂直分布的次表层环境变量,使标准化CPUE更加合理。

参考文献:

- [1] Bertrand A, Josse E, Bach P, et al. Hydrological and trophic characteristics of tuna habitat: consequences on tuna distribution and

5 不足和展望

GAM模型的结果揭示了各个变量对渔获率的影响。水温是影响黄鳍金枪鱼水平和垂直分布的关键环境因子,但其他环境因子也有重要影响,如溶解氧也会影响黄鳍金枪鱼垂直分布,叶绿素会影响饵料生物分布,从而影响黄鳍金枪鱼的空间分布。由于没有足够的溶解氧数据,本文没有对其做相关分析。饵料生物分布对黄鳍金枪鱼垂直分布的影响也有重要作用,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。

- longline catchability[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59(6): 1002–1013.
- [2] 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.
- [3] Bigelow K A, Maunder M N. Does habitat or depth influence catch rates of pelagic species?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(11): 1581–1594.
- [4] Schaefer K M, Fuller D W, Block B A. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the north-eastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data[J]. Marine Biology, 2007, 152(3): 503–525.
- [5] Schaefer K M, Fuller D W, Block B A. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Pacific Ocean off Baja California, Mexico, determined from archival tag data analyses, including unscented Kalman filtering[J]. Fisheries Research, 2011, 112(1/2): 22–37.
- [6] Block B A, Keen B, Castillo B, et al. Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extent of its range[J]. Marine Biology, 1997, 130: 119–132.
- [7] 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]. Pacific Science, 2015, 69(4): 461–475.
- [8] Prince E D, Goodyear C P. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes[J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15(6): 451–464.
- [9] Prince E D, Luo J G, Goodyear C P, et al. Ocean scale hypoxia-based habitat compression of Atlantic istiophorid billfishes[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 19(6): 448–462.
- [10] Brill R W, Block B A, Boggs C H, et al. Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: implications for the physiological ecology of pelagic fishes[J]. Marine Biology, 1999, 133(3): 395–408.
- [11] 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]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2005, 57(2): 142–161.
- [12] Lan K W, Shimada T, Lee M A, et al. Using remote-sensing environmental and fishery data to map potential yellowfin tuna habitats in the tropical pacific ocean[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 444.
- [13] 杨胜龙, 张忬忬, 靳少非, 等. 中西太平洋延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层关系[J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 78–87.
Yang Shenglong, Zhang Bianbian, Jin Shaofei, et al. Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Western and Central Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(6): 78–87.
- [14] Briand K, Molony B, Lehodey P. A study on the variability of albacore (*Thunnus alalunga*) longline catch rates in the southwest Pacific Ocean[J]. Fisheries Oceanography, 2011, 20(6): 517–529.
- [15] 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.
- [16] 宋利明, 陈新军, 许柳雄. 大西洋中部黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)的垂直分布与有关环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 64–68.
Song Liming, Chen Xinjun, Xu Liuxiong. Relationship between vertical distribution of yellowfin tunas' (*Thunnus albacares*) and the concerned environmental factors in the Central Atlantic Ocean[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(1): 64–68.
- [17] Mohri M, Nishida T. Consideration on distribution of adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Indian Ocean based on Japanese tuna longline fisheries and survey information[J]. IOTC Proceeding, 2000(3): 276–282.
- [18] Hazen E L, Johnston D W. Meridional patterns in the deep scattering layers and top predator distribution in the central equatorial Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 19(6): 427–433.
- [19] 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.
Song Liming, Zhang Yu, Zhou Yingqi. 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.
- [20] 栾松鹤, 戴小杰, 田思泉, 等. 中西太平洋金枪鱼延绳钓主要渔获物垂直结构的初步研究[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 501–509.
Luan Songhe, Dai Xiaojie, Tian Siqian, et al. Vertical distribution of main species captured by tuna longline fishery in the western and central Pacific[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(6): 501–509.
- [21] 王少琴, 许柳雄, 朱国平, 等. 中西太平洋金枪鱼围网的黄鳍金枪鱼CPUE时空分布及其与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(3): 303–308.
Wang Shaoqin, Xu Liuxiong, Zhu Guoping, et al. Spatial-temporal profiles of CPUE and relations to environmental factors for yellowfin tuna *Thunnus albacares* from purse-seine fishery in western and central Pacific Ocean[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014, 29(3): 303–308.
- [22] Leroy B, Itano D G, Usu T. Vertical Behavior and the Observation of FAD Effects on Tropical Tuna in the Warm-Pool of the Western Pacific Ocean[C]//Western and Central Pacific Fisheries Commission Scientific Committee, Six Regular Session. Nuku'alofa, Tonga, 2010.

- [23] Harley S J, Myers R A, Dunn A. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance?[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(9): 1760–1772.
- [24] Maunder M N, Langley A D. Integrating the standardization of catch-per-unit-of-effort into stock assessment models: testing a population dynamics model and using multiple data types[J]. *Fisheries Research*, 2004, 70(2/3): 389–395.
- [25] Kell L, Palma C, Prince E. Standardization of blue marlin CPUE taking into account habitat compression[J]. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 2011, 66(4): 1738–1759.
- [26] Hinton M G, Nakano H. Standardizing catch and effort statistics using physiology, ecology, or behavioral constraints and environmental data, with an application to Blue Marlin (*Makaira nigricans*) catch and effort data from Japanese longline fisheries in the Pacific[J]. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 1996, 21: 171–200.

Analysis of the influence of the vertical structure of water temperature on the catch rate of yellowfin tuna in the tropical central and western Pacific based on the GAM model

Yang Shenglong^{1,2}, Fan Xiumei¹, Wu Zuli¹, Wu Yumei¹, Dai Yang¹

(1. Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, 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 foraging depth of yellowfin tuna (*Thunnus obesus*), which is primarily influenced by the vertical structure of the water temperature, has a significant effect on longline catch rates. Therefore, the generalized additive model (GAM) was applied to analyse the influence of subsurface environmental variables on the longline catch per unit of effort (CPUE) in the central and western Pacific. The results show that subsurface environmental factors have significant impacts on the spatial distribution of yellowfin tuna catches in longline fisheries. The longline CPUE for the yellowfin tuna in the tropical central and western Pacific rise rapidly after 2012. A high catch rate appears in the northern hemisphere during summer in the region near 10°S, 140°E. The upper boundary temperature and depth of the thermocline, the lower depth of the thermocline, the depth of the isotherm at 18°C, and the relative depth between $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ and the lower depth of thermocline greatly influence the longline fishing rate. These key environmental factors affect the tropical central and western Pacific yellowfin tuna longline catch. The CPUE increases as the temperature and the depth of the upper boundary of the thermocline increased. The strongly associated relationships between the upper boundary temperature and depth with CPUE were 27–28°C and 70–90 m, respectively. High catch rates are observed when the lower boundary depth of the thermocline is from 250 m to 280 m. Then, as the lower boundary depth increased, the CPUE value quickly decreased. The effect of the 18°C isotherm depth on the CPUE of longline fishing initially fluctuated and then increased. The nonlinear effects of the relative depth between $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ and the lower depth of the thermocline first decreased and then increased slowly. The strong associations between CPUE and the 18°C isotherm depths and relative depth are at 230 m and 70 m, respectively. The catch rates reaches a maximum when the vertical habitat is compressed, making it consistent with hooking depth. The catch rates could be changed by adjusting the depth of hooks. The vertical habitat of tuna should be taken into account in fisheries stock assessments and fishing grounds analysis.

Key words: *Thunnus obesus*; subsurface environmental; vertical structure of the water temperature; CPUE