

DOI: 10.5846/stxb201401060036

杨胜龙, 马军杰, 吴晓芬, 王晓璇, 范秀梅, 樊伟. 热带大西洋黄鳍金枪鱼垂直分布空间分析. 生态学报, 2015, 35(15): 5040-5049.

Yang S L, Ma J J, Wu X F, Wang X X, Fan X M, Fan W. Spatial analysis of the horizontal and vertical distribution of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the tropical Atlantic Ocean. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5040-5049.

## 热带大西洋黄鳍金枪鱼垂直分布空间分析

杨胜龙<sup>1,2</sup>, 马军杰<sup>3</sup>, 吴晓芬<sup>4</sup>, 王晓璇<sup>1</sup>, 范秀梅<sup>1</sup>, 樊伟<sup>1,\*</sup>

1 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

2 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090

3 同济大学法学院, 知识产权学院, 上海 200092

4 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012

**摘要:** 为了解热带大西洋黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 延绳钓适宜渔获水温的等温线时空分布, 分析黄鳍适宜的垂直和水平空间分布范围, 采用 Argo 浮标剖面温度数据重构热带大西洋 13 °C 和距海洋表层水温 8 °C ( $\Delta 8$  °C) 的月平均等温线场, 网格化计算了 13 °C 和  $\Delta 8$  °C 等温线深度值和温跃层下界深度差, 并结合大西洋金枪鱼会委员 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas ICCAT) 的黄鳍金枪鱼延绳钓渔业数据, 绘制了 13 °C 和  $\Delta 8$  °C 等温线深度与月平均 CPUE 的空间叠加图, 用于分析热带大西洋黄鳍金枪鱼中心渔场单位捕捞努力渔获量 (Catch per unit effort CPUE) 时空分布和次表层环境季节性变化关系。结果表明, 13 °C 等温线, 在高值 CPUE 出现的海域深度值大多小于 250 m, 主要在 170—249 m, 深度值超过 250 m 的海域 CPUE 普遍较小。5° S—9° N 区域,  $\Delta 8$  °C 等温线高值 CPUE 出现的海域深度值大多小于 150 m, 主要在 50—139 m; 7—10 月份在南半球的非洲西海岸, 在  $\Delta 8$  °C 等温线深度值为 150—350 m 的海域也会出现中心渔场。全年在低纬度区域, 高渔获率的垂直分布深度更加集中。13 °C 等温线影响热带大西洋黄鳍金枪鱼的空间分布, 温跃层下界温度影响黄鳍金枪鱼的垂直分布。采用频次分析和经验累积分布函数计算其适宜次表层环境因子分布, 13 °C 等温线 180—240 m;  $\Delta 8$  °C 等温线 50—139 m; 与下界深度差: 13 °C 等温线—70—29 m; 海表以下 8 °C 等温线 30—149 m。文章初步得出热带大西洋黄鳍金枪鱼适宜的水平、垂直深度分布区间。结果可以辅助渔情预报, 为热带大西洋黄鳍金枪鱼实际生产作业和资源管理提供参考依据。

**关键词:** 黄鳍金枪鱼; 次表层环境; 热带大西洋; Argo 浮标

## Spatial analysis of the horizontal and vertical distribution of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the tropical Atlantic Ocean

YANG Shenglong<sup>1,2</sup>, MA Junjie<sup>3</sup>, WU Xiaofen<sup>4</sup>, WANG Xiaoxuan<sup>1</sup>, FAN Xiumei<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1,\*</sup>

1 Key and Open Laboratory of Remote Sensing Information Technology in Fishing Resource, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

2 Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, P.R.China, Shanghai 200090, China

3 School of Law & School of Intellectual Property, Tongji University, Shanghai 200092, China

4 State Key Lab of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** In order to investigate the distribution of the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the fishing grounds in the tropical Atlantic Ocean, the isothermal distribution of subsurface temperatures in the yellowfin tuna fishing grounds was evaluated. The depths of 13 °C and 8 °C isotherm from the sea surface temperature (SST) ( $\Delta 8$  °C), were plotted on spatial overlay maps using data collected on a monthly basis from Argo buoys and monthly CPUE data (catch per unit effort) from *Thunnus albacares* long-lines supplied by the International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas

**基金项目:** 上海市自然科学基金 (14ZR1449900); 科技支撑计划项目 (2013BAD13B01); 上海市科技创新行动计划 (12231203901)

**收稿日期:** 2014-01-06; **网络出版日期:** 2014-09-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanwei@126.com

(ICCAT). In addition, the differences in depth between the 13°C and delta 8°C isolines at the lower boundary of the thermocline were computed to determine the relationship between *Thunnus albacares* vertical distribution and thermocline depth. The overlay maps suggest that the delta 8°C isothermal depth distribution showed obvious seasonal variation, roughly in the zonal striped distribution on the annual mode. The spatial distribution of the delta 8°C isothermal depth is deep in winter and shallow in summer. The delta 8°C isothermal depth is shallow, lying at 150 m in the low latitude area throughout the year. The topography of the 13°C isothermal depth showed little seasonal variation. The 13°C isothermal depth was greater than 250 m to the north of the slope, which started 15°N of West Africa and ended 10°N of South America, and to the south of the slope, which started from 10°S of South America and ended 30°S of West Africa. In the triangular area between these two slopes, the 13°C isothermal depth distribution ranged from 150 m to 200 m. The CPUE is highest in areas where the 13°C isothermal depth was shallower than 250 m (mode: 170—249 m). Conversely, if the depth is greater than 250 m, the CPUE tends to be low. Similarly, the highest CPUEs were observed in areas where the delta 8°C isothermal depth was shallower than 150 m (mode: 50—139 m) in the latitude area between 5°S and 10°N throughout the year, whereas the delta 8°C isothermal depth reached 150—350 m offshore of the west coast of Africa in the southern hemisphere from July to October. The vertical distribution of high hook rates was concentrated in the area between 5°S and 10°N. The horizontal distribution of *Thunnus albacares* in the tropical Atlantic Ocean was affected by the 13°C isothermal depth, and the vertical distribution of *Thunnus albacares* was affected by the low boundary temperature and depth of the thermocline. Frequency analysis and the empirical cumulative distribution function were used to compute the optimum range of subsurface factors. The optimum ranges for 13°C and delta 8°C isothermal depths were 180—240 m and 50—139 m, respectively. The optimum depth difference ranges were 70—29 m for 13°C isothermal depths and 30—149 m for delta 8°C isothermal depths. The results were confirmed by using the Kolmogorov-Smirnov test. The distribution interval and vertical depth range for the central fishing ground of *Thunnus albacares* was documented, and the results provide a reference for improving the efficiency of long-line fleet and resource management.

**Key Words:** *Thunnus albacares*; subsurface environment; the Tropic Atlantic Ocean; Argo

了解黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)的个体行为和环境栖息习性,有利于渔业资源管理,指导渔船生产,对渔业资源进行适度利用。标志放流结果表明,金枪鱼是具有高速和深水游动能力的生物,垂直移动距离覆盖非常广<sup>[1-4]</sup>。在非伴游行为下,黄鳍金枪鱼表现出明显的昼夜垂直移动特征,晚上栖息在海表 50 m 以内暖水区域,从黎明开始周期性的下潜到低氧冷水区域进行觅食深水散射层(Deep Scatter Layer DSL),但绝大部分时间活动在距海洋表层水温 8 °C 以内水域<sup>[1-5]</sup>。黄鳍金枪鱼这种高速移动,尤其是垂直方向的远涉,会减少黄鳍金枪鱼捕捞和海表环境因子关系,Yokawa<sup>[6]</sup>指出大西洋黄鳍金枪鱼渔获主要在距海洋表层水温 7—9 °C 以内水域获得。Zagaglia 等<sup>[7]</sup>研究认为海表温度(SST),叶绿素 a 浓度(Chl-a)和海面高度异常(SSHA)等表层环境因子对热带大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓单位捕捞努力渔获量(CPUE)有统计意义,但不是主要影响因素。Lan 等<sup>[8]</sup>研究表明相比海表温度,大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 和次表层的水温关系更密切,并推断较高的次表层水温会导致温跃层垂直分布更深,从而产生较高的黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE。Maury 等<sup>[9]</sup>研究认为温跃层深度越深,黄鳍金枪鱼延绳钓 CPUE 值越大,而围网 CPUE 与温跃层深度分布成反比,与温跃层强度分布成正比,CPUE 和 150 m 水温具有明显的统计意义。延绳钓调查表明,大西洋黄鳍金枪鱼垂直分布的高渔获率水温在 13 °C 左右<sup>[10]</sup>。

以往的研究多采用遥感表层数据分析黄鳍金枪鱼生态、栖息环境。分析黄鳍金枪鱼对三维环境尤其是深度的生物环境适应性可更好地了解其水平-垂直分布,有利于掌握中心渔场分布规律。本文在前人研究结果之上,从水温对鱼类活动影响的角度出发,结合鱼类活动规律、高渔获率水温和 Argo 浮标水温要素观测,通过绘制次表层水温深度等值线图 and 空间叠加图,采用数值方法得出黄鳍金枪鱼适宜的水平 and 垂直深度空间分布

范围,了解黄鳍金枪鱼环境栖息和索饵活动习性,为延绳钓金枪鱼渔业实际生产作业和渔业资源管理提供帮助。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

黄鳍金枪鱼是暖水性鱼类,延绳钓作业主要在热带区域,因此本文确定(60° W—20° E, 25° S—25° N)作为研究区域(图 1)。采用中国 Argo 实时数据中心(<http://www.argo.org.cn>)的 2007—2011 年 Argo 浮标剖面水温 and 深度数据进行温跃层特征分析,研究区域各月有效月平均浮标个数是 644 个。研究采用自于大西洋金枪鱼委员会 (ICCAT) 的 2007—2011 年黄鳍金枪鱼延绳钓渔业数据,渔业数据包括作业日期、地点(经度、纬度)、放钩数、渔获产量、渔获尾数。

### 1.2 研究方法

距 SST 温差 8 °C (记  $\Delta 8$  °C) 是影响大西洋黄鳍金枪鱼垂直分布的水温,13 °C 是高渔获率水温<sup>[6,10]</sup>,由于研究海域海流年变化不大<sup>[11]</sup>,同时黄鳍金枪鱼的垂直分布受温度而不是深度影响<sup>[12]</sup>,因此本文绘制  $\Delta 8$  °C 和 13 °C 等温线深度和月平均 CPUE 空间叠加图,以分析黄鳍金枪鱼渔获率分布水平和垂直适宜分布深度区间,同时计算  $\Delta 8$  °C 和 13 °C 等温线深度值与温跃层下界深度之间的差值,分析高值 CPUE 垂直分布和温跃层关系。该方法已经被国外文献用来从中尺度月平均角度研究金枪鱼环境习性<sup>[7-8,13]</sup>。空间分析、数值计算和图件绘制均采用 Matlab2010(a) 软件及相关工具包。

#### 1.2.1 数据处理

生产数据统计的空间分辨率是 5°×5°,时间分辨率是月。统计每 5°×5°方格内的 CPUE (单位:尾/千钩) 计算公式为:

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

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 CPUE,月总渔获尾数和月总投钩数。公式 (1) 可以消除投影后低纬度和高纬度网格大小不同带来的影响<sup>[11]</sup>。

#### 1.2.2 剖面温度梯度计算、温跃层判定标准和温跃层特征网格计算

渔场区温跃层判别方法和具体的网格化计算参考文献<sup>[14-15]</sup>。按照 Levitus<sup>[16]</sup> 的季节划分,将北半球的季节划分如下:1—3 月为冬季,4—6 月为春季,7—9 月为夏季,10—12 月为秋季。

#### 1.2.3 $\Delta 8$ °C 和 13 °C 深度值等值线计算

采用 Akima 插值方法<sup>[17]</sup>将深度上分布不均匀的 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。将 2007—2011 年所有数据按月分组,分别提取  $\Delta 8$  °C 和 16 °C 水温处离散分布的深度值,用地统计方法<sup>[18]</sup>将其插值到网格节点上(1°×1°),再以填色等值线作图方式显示。插值网格计算分辨率是 1°×1°,为和捕捞数据匹配,将深度值转换成 5°×5°的分辨率。

#### 1.2.4 计算 $\Delta 8$ °C 和 13 °C 深度值与温跃层下界深度值之间差值

在上述计算结果之上,按月分组,在空间上匹配对应,分别计算三维深度差值,即温跃层下界深度减去  $\Delta 8$  °C 和 13 °C 等温线深度值(1°×1°),再转成 5°×5°的分辨率。

#### 1.2.5 渔场标准定义

按 (1) 式计算 2007—2011 年各月网格内 CPUE 月平均值,共 1080 个。计算 1080 个 CPUE 的平均值、均方差和四分位数(Q1—Q4)。大于 Q3 的 CPUE 称为中心渔场 CPUE,即认为 CPUE 较高,而其所属渔区定义为黄鳍金枪鱼中心渔场。

#### 1.2.6 空间分析

把 CPUE 数据按月分组,分别和  $\Delta 8$  °C、13 °C 等温线深度值进行时空匹配,在空间上进行数据叠加,绘制

时空分布图,并分析 CPUE 与各参数的时空分布特征。最后定量分析黄鳍金枪鱼中心渔场和  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值的关系,找出中心渔场黄鳍金枪鱼适宜水平和垂直范围。

### 1.2.7 适宜垂直分布区间计算

通过频次分析和经验累积分布函数(Empirical cumulative distribution function, ECDF)方法,分别计算黄鳍金枪鱼最适的  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  和  $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值适宜分布区间,以及  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值与温跃层下界深度差值的适宜分布区间。采用非参数统计 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验方法进行显著性检验,检验方法为分别计算温跃层 4 个特征变量和中心渔场 CPUE 累积频度曲线,求出 K-S 检验的统计量  $D$ ,并作显著性检验。累积分布曲线方程式(ECDF)和统计量计算公式如下:

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

其中分段函数  $l(x_i)$  表达式为

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

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

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

式中, $f(t)$  是温跃层特征参数经验累积频率分布函数, $l(x_i)$  是分段函数, $g(t)$  是中心渔场 CPUE 权重经验累积分布函数。 $n$  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  $\alpha$ ,采用 K-S 检验统计量。

## 2 结果

### 2.1 $13^{\circ}\text{C}$ 等温线深度和 CPUE 关系

$13^{\circ}\text{C}$  等温线深度和 CPUE 空间叠加图可见,各月  $13^{\circ}\text{C}$  等温线分布不相同(图 1),并未出现像温跃层上界深度和温度那样明显的季节性变化特征<sup>[14]</sup>,揭示  $13^{\circ}\text{C}$  等温线受表层气候变化影响小。在水平空间上, $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度等值线都呈现纬向分布特征。从非洲西海岸  $15^{\circ}\text{N}$  到南美洲东海岸  $10^{\circ}\text{N}$  以北区域和南美洲  $10^{\circ}\text{S}$  以南向外斜向区域, $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值超过 250 m。从巴西外海向非洲西海岸  $30^{\circ}$  角斜向区域和非洲纳米比亚外海向南美洲  $135^{\circ}$  斜向区域, $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值在 150—200 m 之间。从秋季到春季,几内亚湾  $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值在 230—250 m 左右,其他月份低于 230 m。空间叠加图显示热带大西洋黄鳍金枪鱼中心渔场大多出现在  $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值的小于 280 m 区域,在  $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值大于 280 m 的区域,黄鳍金枪鱼 CPUE 值普遍偏低。

$13^{\circ}\text{C}$  等温线深度与高值 CPUE 离散图(图 2)表明,高值 CPUE 出现在 120—300 m 之间,平均深度值为 213.6 m,标准方差为 33.4 m,77.1% 出现在 181—247 m ( $(214 \pm 33)$  m),有 7% 的高值 CPUE 落在深度值大于 250 m 区域。76% 的高值 CPUE 出现在  $5^{\circ}\text{S}$ — $10^{\circ}\text{N}$  区域(图 2),说明大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓中心渔场主要分布在赤道低纬度区域,在该纬向区域内,平均深度值为 214.7 m,标准方差为 23.3 m,68.8% 出现在 191—237 m ( $(214 \pm 23)$  m),说明在区域内,高值 CPUE 的  $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度值分布更加集中。

### 2.2 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度

由  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度和黄鳍金枪鱼 CPUE 空间叠加图可知, $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度图呈现出明显的冬深夏浅的季节性分布特征(图 3)。1—6 月份的  $15^{\circ}\text{N}$  以北区域和 7—12 月份的  $15^{\circ}\text{S}$  以南区域等值线深度都超过 200 m。 $10^{\circ}\text{S}$ — $10^{\circ}\text{N}$  之间纬向区域,分布在形状不一的等值线低值区域。图 3 表明,1—6 月份中心渔场出现的地方, $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度值大多小于 150 m;7—10 月份在南半球的非洲西海岸, $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度值为 150—350 m 的地方也会出现中心渔场,之后中心渔场向低纬度迁移,分布的深度值降低。

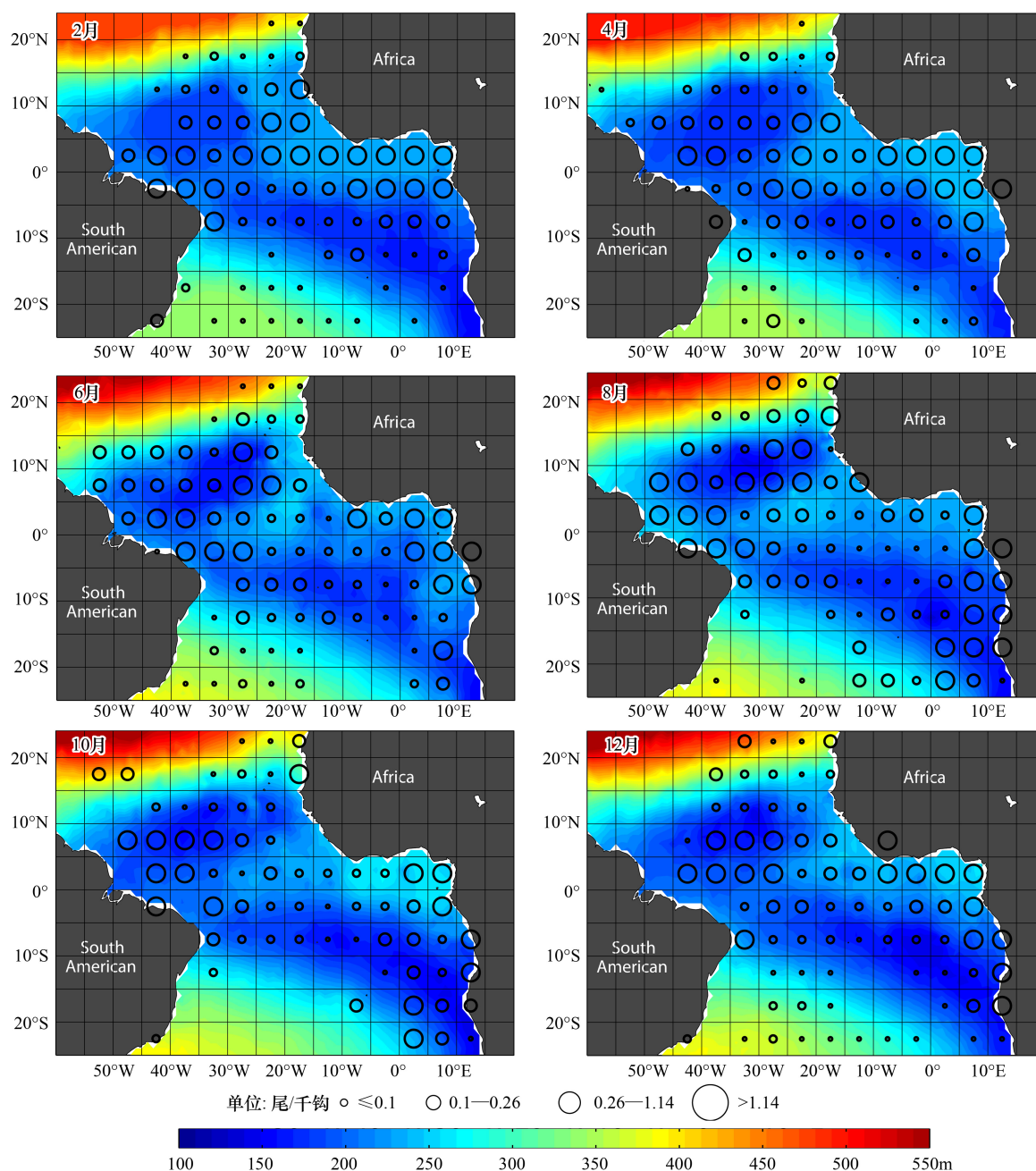


图 1 13℃等温线深度和 CPUE 空间叠加图

Fig.1 Overlay map of CPUE and contour map of the estimated 13°C isothermal depths

CPUE: 位捕捞努力渔获量 (Catch per unit effort)

$\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度与高值 CPUE 离散图 (图 4), 高值 CPUE 出现在 50—370 m, 平均深度值为 112 m, 标准方差为 62.9 m, 90% 出现在 49—175 m ( $(112 \pm 63)$  m), 6% 的高值 CPUE 落在深度值大于 200 m 区域。对于  $5^{\circ}\text{S}$ — $10^{\circ}\text{N}$  区域  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度与高值 CPUE 离散图, 相比整个研究区域, 高值 CPUE 分布更加集中, 平均深度值为 91.4 m, 标准方差为 30.2 m, 88.4% 出现在 61—121 m ( $(91 \pm 30)$  m)。该区域内, 高值 CPUE 的  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度值, 不仅分布更集中, 平均分布深度也变低 (图 4)。

### 2.3 适宜垂直分布区间

热带大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓高值 CPUE 和  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$  等温线深度频数关系如图 5 所示。 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线深度值在 50—360 m 都有中心渔场出现, 适宜分布区间在 50—139 m (81.1%), 在中心渔场高值 CPUE 趋向于

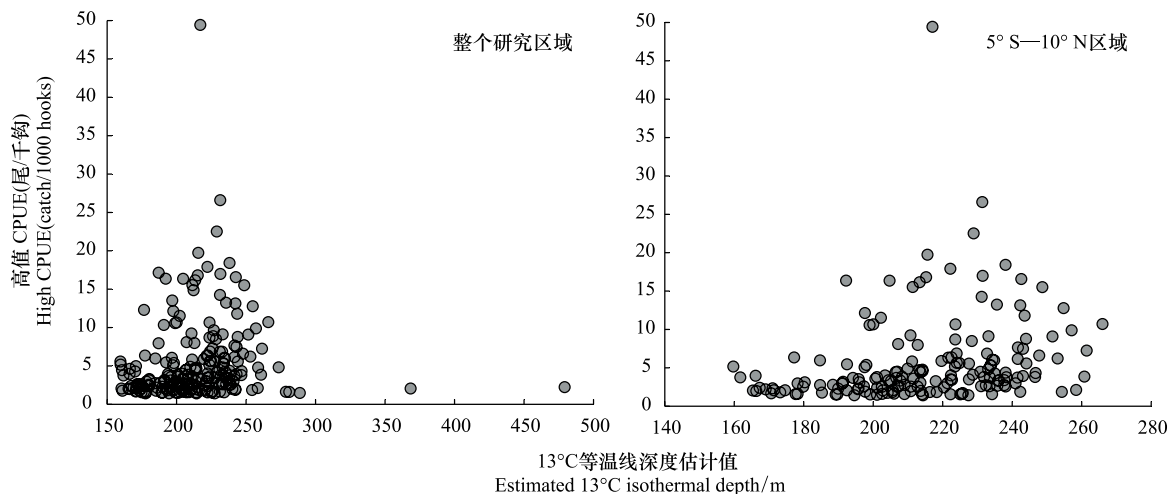


图2 13℃等温线深度与高值 CPUE 离散图

Fig.2 Scatter diagram between the 13℃ isothermal depth and the Catch per unit effort (CPUE)

集中在  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等值线深度 50—59 m, 低于 50 m 区域没有中心渔场出现。13℃ 等温线深度值在 140—470 m 之间都有高值 CPUE 出现, 适宜区间分布在 170—249 m (87.7%) 之间, 高值 CPUE 趋向于集中在 200—229 m。

热带大西洋黄鳍金枪鱼延绳钓高值 CPUE 分布区域,  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等温线深度与温跃层下界深度差值在 -220—190 m 之间, 73.9% 的高值 CPUE 区域深度差在 20—149 m (图 5) 之间, 在中心渔场, 高值 CPUE 趋向于在 80 m 深度差区间内。13℃ 等温线深度与温跃层下界深度差值在 -290—50 m (图 5) 之间, 78.5% 的高值 CPUE 区域深度差在 -70—39 m 之间, 高值 CPUE 趋向于在 0 m 深度差区间。

ECDF 分析结果见图 6, 4 个变量和高值 CPUE 累积分布各不相同。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、16℃ 等温线对应的  $D(t)$  值分别是 0.11, 0.12;  $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、16℃ 等温线与温跃层下界距离对应的  $D(t)$  值分别是 0.044, 0.057, K-S 检验高度显著 ( $P < 0.01$ ), 高值 CPUE 和 4 个变量关系密切, 样本分布没有显著差异。高值 CPUE 区域与 4 个变量密切联系的区间分别是,  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等温线 52—178 m ( $(115 \pm 63)$  m, 图 6a); 13℃ 等温线 177—243 m ( $(210 \pm 33)$  m);  $\Delta 8^\circ\text{C}$  深度差 27—203 m ( $(115 \pm 88)$  m); 13℃ 深度差 -79—29 m ( $(-30 \pm 49)$  m)。

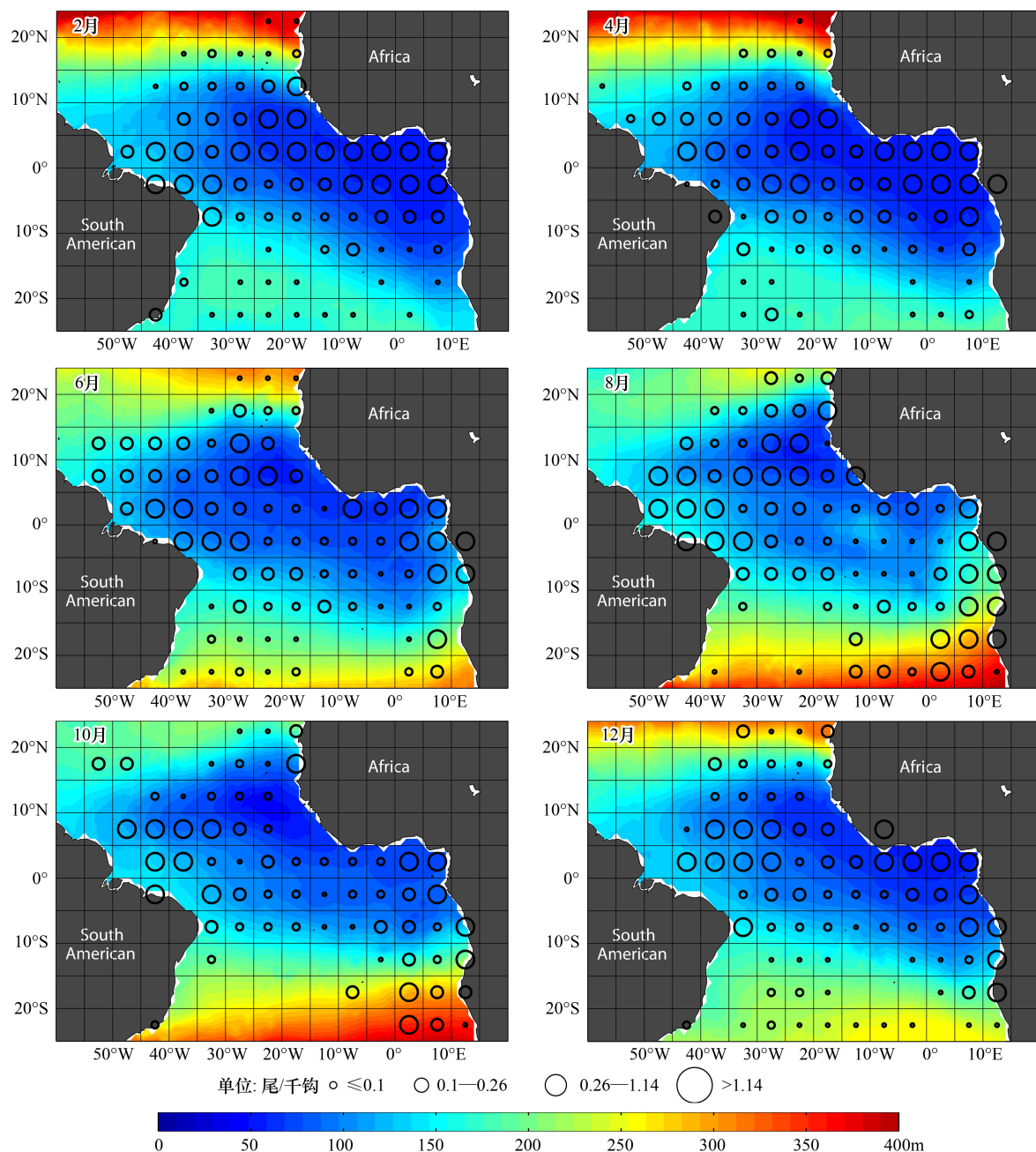
通过频次分析和 ECDF 方法得出热带大西洋黄鳍金枪鱼适宜的分布区间, 取两者交集取整, 本文取 4 个变量参数适宜区间分别是,  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等温线 50—139 m; 13℃ 等温线 180—240 m;  $\Delta 8^\circ\text{C}$  深度差 30—149 m; 13℃ 深度差 -70—29 m。

### 3 讨论与分析

#### 3.1 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 和 13℃ 等深线分布与黄鳍金枪鱼三维空间分布关系

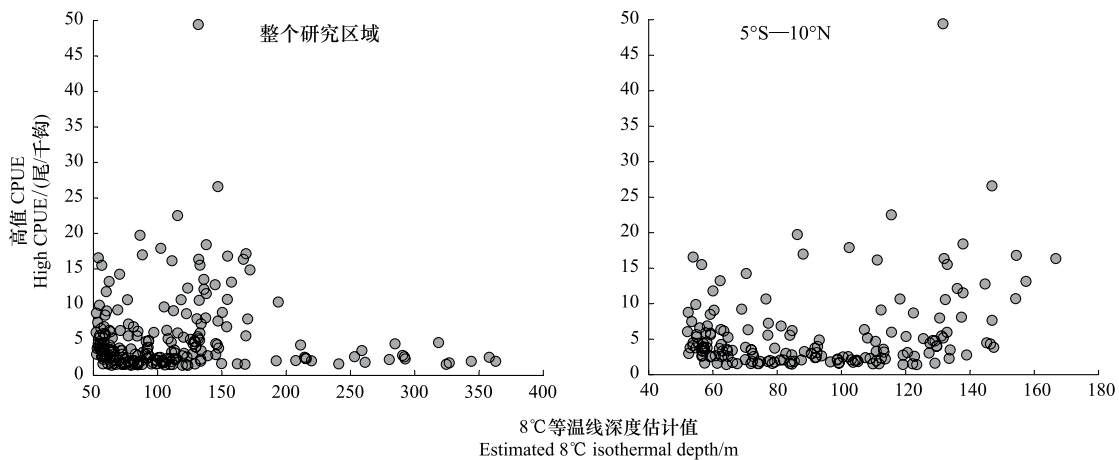
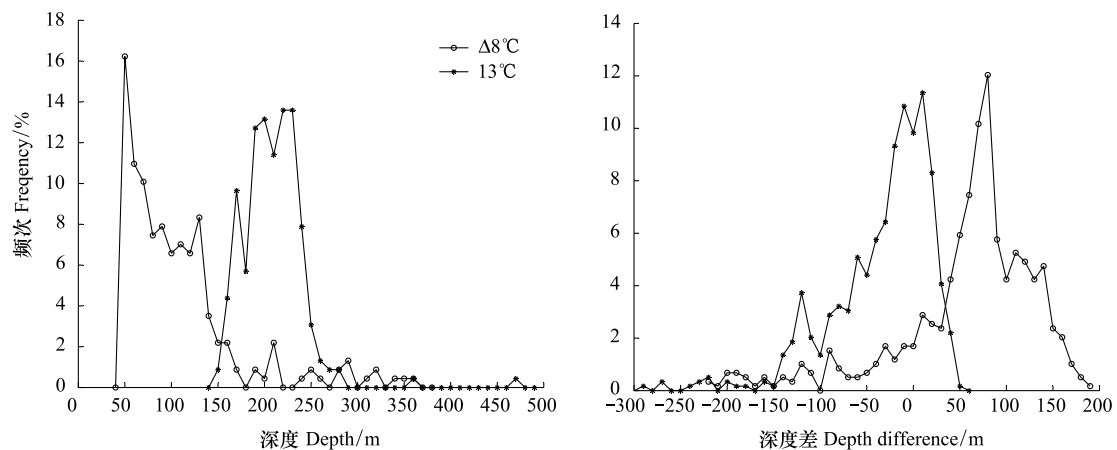
$\Delta 8^\circ\text{C}$  等温线深度呈现出明显的冬深夏浅的季节性分布特征, 而 13℃ 季节性变化特征不是很明显。1—6 月份中心渔场出现的地方,  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等值线深度值大多小于 150 m。7—10 月份在纳米比亚外海, 在  $\Delta 8^\circ\text{C}$  等值线深度值为 150—350 m 的地方也会出现中心渔场。但是同期在纳米比亚外海温跃层下界深度不超过 150 m<sup>[14, 18]</sup>, 根据本文后面分析, 该海域黄鳍金枪鱼的垂直深度分布应该浅于 150 m。相比所有研究区域, 5° S—10° N 区域的高值 CPUE 分布更加集中。热带大西洋黄鳍金枪鱼中心渔场 1—3 月份分布在赤道中东地区, 从东向西延伸, 3—5 月份中心渔场开始向西迁徙, 7—9 月份迁移到 15° W 以西的巴西外海, 同时在纳米比亚外海也形成中心渔场, 之后赤道地区和纳米比亚外海中心渔场渐渐又向几内亚湾和临近区域迁徙<sup>[14]</sup>。在 5° S—10° N 区域全年  $\Delta 8^\circ\text{C}$  和 13℃ 等值线分布相比较浅, 压缩了黄鳍金枪鱼的垂直分布空间, 金枪鱼分布比较集中, 使得黄鳍金枪鱼易于被表层渔船捕捞<sup>[19]</sup>。

全年热带大西洋中心渔场大多出现在 13℃ 等值线深度值的小于 250 m 区域, 13℃ 等值线深度值大于

图3  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度和CPUE空间叠加图Fig.3 The overlay map of CPUE and the contour map of estimated  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  isothermal depth

250 m 的区域,黄鳍金枪鱼 CPUE 普遍偏低。空间叠加图表明热带大西洋黄鳍金枪鱼的中心渔场空间分布与  $13^{\circ}\text{C}$  小于 250 m 区域吻合,揭示热带大西洋黄鳍金枪鱼空间分布受  $13^{\circ}\text{C}$  等值线分布影响。在  $13^{\circ}\text{C}$  等值线超过 250 m 区域,温跃层下界深度较高<sup>[18]</sup>,同时由于大西洋溶解氧不受限制<sup>[19]</sup>,黄鳍金枪鱼可以下潜到更深水域索饵,但是黄鳍金枪鱼追捕的 DSL 也会下潜到更深的冷水区域寻求庇护,使得黄鳍金枪鱼的觅食变得困难。同时,金枪鱼类是视觉和机会捕食者,在上述区域  $13^{\circ}\text{C}$  等值线甚至超过 500 m,使得光线很弱,这大大降低了黄鳍金枪鱼的捕食能力,使得该区域不适合黄鳍金枪鱼生存。即使该区域存在一些黄鳍金枪鱼群体,但是由于分布水层较深,超过了一般延绳钓捕捞作业深度,不容易被捕捞。

$13^{\circ}\text{C}$  是大西洋黄鳍金枪鱼高渔获率水温,可以认为  $13^{\circ}\text{C}$  水层是大西洋黄鳍金枪鱼的索饵水层,因此也是大西洋黄鳍金枪鱼白天觅食活动的水层。本文统计表明 77.1% 的高值 CPUE 出现在 181—247 m,据此可以

图4  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度与高值 CPUE 离散图Fig.4 Scatter diagram between the  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  isothermal depth and the CPUE图5 黄鳍金枪鱼高值 CPUE 频数图  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$ 等温线深度和  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度差值Fig.5 Relationship between  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  and  $13^{\circ}\text{C}$  isothermal depth, depth difference between  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  and  $13^{\circ}\text{C}$  with the lower boundary depth of thermocline and fishing frequency of high yellowfin tuna CPUE

推断,热带大西洋黄鳍金枪鱼白天觅食时,垂直分布的水层深度区间在 181—247 m。标志放流表明,黄鳍金枪鱼有超过 90%的时间(包括晚上)在低于表层温度  $8^{\circ}\text{C}$  以上水层,在低纬度  $5^{\circ}\text{S}$ — $10^{\circ}\text{N}$  纬向区域,黄鳍金枪鱼都分布在 180 m 以内,说明在大西洋低纬度,黄鳍金枪鱼索饵活动的水层和生活水层不相同,这从黄鳍金枪鱼索饵时典型的“W”垂直运动也可看出<sup>[1-3]</sup>。

### 3.2 黄鳍金枪鱼垂直分布和温跃层下界关系

宋利明等<sup>[10]</sup>报道,在热带大西洋区域,黄鳍金枪鱼的最适水层是 150—179 m,最适水温则是  $13$ — $13.99^{\circ}\text{C}$ ,其次是  $12$ — $12.99^{\circ}\text{C}$ 。但是在热带印度洋,Mohri 等<sup>[20]</sup>指出,黄鳍金枪鱼适宜的温度范围是  $13$ — $24^{\circ}\text{C}$ , $15$ — $17^{\circ}\text{C}$  渔获率最高,低于  $13^{\circ}\text{C}$ ,渔获率急剧下降;Song<sup>[21]</sup>认为黄鳍金枪鱼活动密集的水层为 100—179 m,与渔获率最密切的水层是 120—140 m,水温为  $16$ — $17^{\circ}\text{C}$ 。可以认为热带印度洋黄鳍金枪鱼高渔获率分布在  $16^{\circ}\text{C}$  等温线附近。相比热带印度洋区域,热带大西洋高渔获率水层分布更深层的冷水中( $13^{\circ}\text{C}$  等温线附近),表明大西洋黄鳍金枪鱼进入更深的冷水去索饵。在同一纬度区域,同一鱼种在不同大洋垂直分布差异较大,显然是受不同大洋海洋环境影响而产生的结果。

本文采用频次分析方法计算了温跃层下界深度与  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  和  $13^{\circ}\text{C}$  深度差与高值 CPUE 分布关系,各自的适宜分布深度分别是 30—149 m;  $-70$ —29 m。表明热带大西洋黄鳍金枪鱼每天绝大部分时间活动在温跃层下

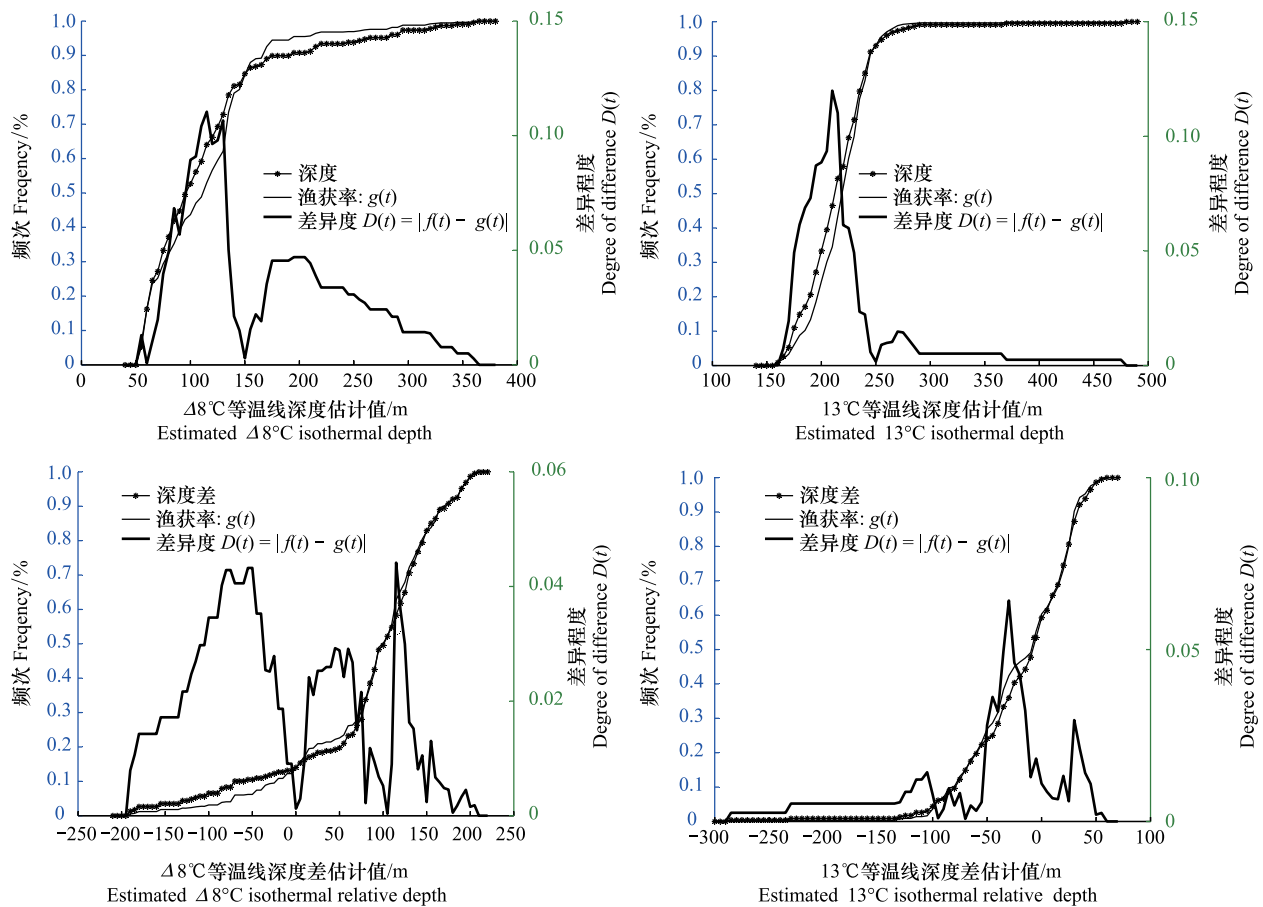


图6 a  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线,  $13^{\circ}\text{C}$ 等温线,  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线与温跃层下界距离,  $13^{\circ}\text{C}$ 等温线与温跃层下界距离

Fig.6 ECDF for delta  $8^{\circ}\text{C}$  isothermal depth,  $13^{\circ}\text{C}$  isothermal depth, depth difference of delta  $8^{\circ}\text{C}$  isothermal depth, depth difference of  $13^{\circ}\text{C}$  isothermal depth and fishing frequency of high yellowfin tuna CPUE

界以上水域,同时热带大西洋黄鳍金枪鱼高渔获率水温分布的深度在温跃层下界深度附近。在印度洋,宋利明<sup>[21]</sup>调查认为在温跃层下界深度附近黄鳍金枪鱼渔获率较高。杨胜龙等<sup>[22]</sup>人分析了印度洋黄鳍金枪鱼和温跃层关系,认为印度洋黄鳍金枪鱼适宜的温跃层下界温度是  $13\text{—}16^{\circ}\text{C}$ , 低于  $13^{\circ}\text{C}$ , 统计显示渔获率很低, 这和 Mohri 等<sup>[20]</sup>人的研究结果一致。此外通过对比发现, 宋利明调查的月份地点, 温跃层下界温度和高渔获率一致。而在大西洋和印度洋, 在温跃层下界深度附近黄鳍金枪鱼渔获率都较高, 据此可推断, 影响黄鳍金枪鱼索饵时垂直分布的环境因子是温跃层下界温度值。热带印度洋和大西洋不同的温跃层下界深度值和温度值产生了两大洋黄鳍金枪鱼不同的高渔获率水层和水温, 使得两大洋的黄鳍金枪鱼垂直深度分布不同。

### 3.3 黄鳍金枪鱼适宜分布区域

本文计算的  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  和  $13^{\circ}\text{C}$  等温线适宜区间分别是  $50\text{—}139\text{ m}$  和  $180\text{—}240\text{ m}$ 。揭示黄鳍金枪鱼白天索饵水层在  $170\text{—}249\text{ m}$ 。在赤道东太平洋以及加利福尼亚海湾, 标志放流证实黄鳍金枪鱼白天频繁进入  $150\text{—}250\text{ m}$  水层索饵 DSL<sup>[1,3]</sup>。杨胜龙<sup>[14]</sup>等得出热带大西洋黄鳍金枪鱼的适宜温跃层下界深度在  $150\text{—}249\text{ m}$ ; 热带印度洋黄鳍金枪鱼  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  温线适宜区间是  $80\text{—}159\text{ m}$ <sup>[23]</sup>。上述结果都和本文分析结果基本吻合。Yokawa<sup>[6]</sup>调查指出大西洋黄鳍金枪鱼高渔获率水层在  $25\text{—}175\text{ m}$ , 宋利明等人<sup>[10]</sup>得出的结果是  $150\text{—}179.9\text{ m}$ , 另外在  $120\text{—}149.9\text{ m}$  和  $180\text{—}209.9\text{ m}$  水层, 钓获率也较高。Yokawa 的调查结果低于本文  $13^{\circ}\text{C}$  等温线适宜区间值, 但和  $\Delta 8^{\circ}\text{C}$  等温线适宜区间值吻合。宋利明的调查结果在本文结果之内, 但略低于本文结果。上述结论不同可能与延绳钓调查时间段, 空间小有关。本文绘制的空间分布表明, 在不同月份不同海域, 次表层海洋环境空间分布不一样, 这会导致黄鳍金枪鱼的垂直分布在不同海洋有差异。

延绳钓黄鳍金枪鱼的捕捞效率不仅与渔场鱼情预报有关,还与科学投钩作业有关。本文分析结果可以辅助寻找中心渔场位置,同时确定投钩深度提高捕捞效率和减少兼捕,本文建议在热带大西洋延绳钓下钩深度在 200—229 m 左右,不超过 250 m,温跃层下界深度附近。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Schaefer K M, Fuller D W, Block B A. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Marine Biology*, 2007, 152(3): 503-525.
- [ 2 ] 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//Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, Hobday A, Lutcevage M, Sibert J. 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.
- [ 3 ] 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. *Fisheries Research*, 2011, 122(1/2): 22-37.
- [ 4 ] Brill R W, Block B A, Boggs C H, Bigelow K A, Freund E V, Marcinek D J. 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. *Marine Biology*, 1999, 133(3): 395-408.
- [ 5 ] Josse E, Bach P, Dagorn L. Simultaneous observations of tuna movements and their prey by sonic tracking and acoustic surveys. *Hydrobiologia*, 1998, 371-372: 61-69.
- [ 6 ] Yokawa K, Saito H, Kanaiwa M, Takeuchi Y. Vertical distribution pattern of CPUE of atlantic billfishes and associated species estimated using longline research data. *Bulletin of Marine Science*, 2006, 79(3): 623-634.
- [ 7 ] Zagaglia C R, Lorenzetti J A, Stech J L. Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 267-281.
- [ 8 ] Lan K W, Lee M A, Lu H J, Shieh W J, Lin W K, Kao S C. Ocean variations associated with fishing conditions for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic Ocean. *Journal of Marine Science*, 2011, 68(6): 1063-1071.
- [ 9 ] Maury O, Gascuel D, Marsac F, Fonteneau A, De Rosa A. Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environment in the Atlantic Ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(3): 458-469.
- [ 10 ] 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. *海洋与湖沼*, 2004, 35(1): 64-68.
- [ 11 ] 邱云, 胡建宇. 热带大西洋中部表层环流及其月变化特征的分析. *海洋学报*, 2004, 26(6): 1-12.
- [ 12 ] Weng K C, Stokesbury M J, Boustany A M, Seitz A C, Teo S L, Miller S K, Block B A. Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags. *Journal of Fish Biology*, 2009, 74(7): 1434-1449.
- [ 13 ] Lee P F, Chen I C, Tzeng W N. Spatial and temporal distribution patterns of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean. *Zoological Studies*, 2005, 44(2): 260-270.
- [ 14 ] 杨胜龙, 马军杰, 张禹, 化成君, 戴阳. 大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系. *生态学报*, 2013, 33(19): 6345-6353.
- [ 15 ] 周燕遐, 李炳兰, 张义钧, 巴兰春. 世界大洋冬夏季温度跃层特征. *海洋通报*, 2002, 21(1): 16-22.
- [ 16 ] Levitus S. Climatological Atlas of the World Ocean. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1983, 64(49): 962-963.
- [ 17 ] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM*, 1970, 17(4): 589-602.
- [ 18 ] 杨胜龙, 张胜茂, 蒋兴伟, 邹斌, 化成君, 周为峰. 热带大西洋大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼渔场温跃层的时空变化特征. *应用海洋学学报*, 2013, 32(3): 349-357.
- [ 19 ] Prince E D, Goodyear C P. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes. *Fisheries Oceanography*, 2006, 15(6): 451-464.
- [ 20 ] 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. *Indian Ocean Tuna Commission*, 2000, 3: 276-282.
- [ 21 ] Song L M, Zhang Y, Xu L X, Jiang W X, Wang J Q. Environmental preferences of longlining for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the tropical high seas of the Indian Ocean. *Fisheries Oceanography*, 2008, 17(4): 239-253.
- [ 22 ] 杨胜龙, 张禹, 张衡, 王栋, 马军杰, 张晶, 崔雪森. 热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 671-679.
- [ 23 ] 杨胜龙, 化成君, 靳少非, 范秀梅, 张胜茂, 伍玉梅. 热带印度洋黄鳍金枪鱼垂直分布空间分析. *海洋与湖沼*, 2014, 45(2): 281-290.