

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.00660

## 热带印度洋大眼金枪鱼垂直分布空间分析

陈雪忠, 杨胜龙, 张禹, 樊伟, 伍玉梅

中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090

**摘要:** 为了解热带印度洋大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)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印度洋 10、12、13 和 16 月平均等温线场, 网格化计算了 12、13 等温线深度值和温跃层下界深度差, 并结合印度洋金枪鱼委员会(IOTC)大眼金枪鱼延绳钓渔业数据, 绘制了 12、13 等温线深度与月平均单位捕捞努力渔获量(CPUE)的空间叠加图, 用于分析热带印度洋大眼金枪鱼中心渔场 CPUE 时空分布和高渔获率水温的等温线时空分布的关系。结果表明, 从垂直分布来看, 热带印度洋中心渔场延绳钓高渔获率区域垂直分布在温跃层下界以下, 在表层以下 150~400 m 深度区间。从水平分布来看, 12 等温线, 高 CPUE 区域大多深度值 <350 m, 众数为 225~350 m; 深度值超过 500 m 的区域 CPUE 普遍较低。13 等温线, 高值 CPUE 出现的地方大多深度值 <300 m, 众数为 190~275 m; 深度值超过 400 m 的区域 CPUE 普遍较低。全年在 15°S 以北区域, 高渔获率的垂直分布深度更加集中。采用频次分析和经验累积分布函数, 计算其最适次表层环境因子分布, 12 等温线 250~340 m; 13 等温线 190~270 m; 12 深度差 30~130 m; 13 深度差 0~70 m。研究初步得出热带印度洋大眼金枪鱼中心渔场适宜的水平、垂直深度值分布区间, 可以辅助寻找中心渔场位置, 同时指导投钩深度, 为热带印度洋金枪鱼实际生产作业和资源管理提供理论支持。

**关键词:** 大眼金枪鱼; 次表层环境; 热带印度洋; Argo

中图分类号: S931.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)03-0660-12

大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)是中国远洋金枪鱼渔业主捕对象之一。它白天潜至 400~500 m 深的水域, 夜间游到 0~100 m 深水域<sup>[1]</sup>。大眼金枪鱼的行为分为 3 种类型: 典型、伴游和其他行为, 且主要呈现为非伴游行为(典型和其他)<sup>[2]</sup>。在非伴游行为下, 中东太平洋大眼金枪鱼在白天有 59.5%~72% 的时间在温跃层(20 )以下水域觅食深水散射层(DSL)生物, 索饵时下潜的深度分布受 12~13 等温线影响<sup>[3]</sup>。不同渔区相关的放流和声学遥测研究得到类似结果<sup>[4-8]</sup>, 大眼金枪鱼索饵时受关键的次表层水温影响, 垂直分布在一定的深度区间。Mohri 等<sup>[9-10]</sup>采用延绳钓调查数据

分析认为, 印度洋大眼金枪鱼垂直分布的适宜水温是 10~16 , 在 12~13 渔获率最高, 并认为大眼金枪鱼的分布受垂直所在的水层是否处于适宜温度区域影响。国内学者采用相同方法得出大眼金枪鱼的高渔获率水温分布在 12~13.9 , 并认为温跃层以下区域大眼金枪鱼渔获率最高<sup>[11-13]</sup>。高渔获率的水温区间与影响大眼金枪鱼垂直分布的次表层水温吻合, 表明大眼金枪鱼垂直分布受关键的次表层水温影响, 进而影响大眼金枪鱼中心渔场的分布和延绳钓作业。以往的研究多采用遥感表层数据分析渔业资源空间分布, 研究区域上跨度小, 时间不连续, 没有大面积计算分析

收稿日期: 2012-08-14; 修订日期: 2012-12-27.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD13B01); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金(2010KF0005SA). 中国水产科学研究院基本科研业务费资助(2012A1201, 2013A0201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(2012T07); 上海科教创新行动计划(12231203901); 南海海外捕捞技术与新资源开发(2013BADBB06).

作者简介: 陈雪忠(1957-), 男, 研究员, 从事捕捞技术和远洋与极地渔业资源管理的研究. E-mail: xuezhong@fishery.ac.cn  
杨胜龙, 并列第一作者, 助研. E-mail: ysl7682195@126.com

大眼金枪鱼高渔获率水温区间等温线分布特征,也未研究其对大眼金枪鱼中心渔场变动的影响;对大眼金枪鱼作业渔场,大眼金枪鱼索饵适宜区域周边水温的等温线深度与温跃层下界深度之间的距离和大眼金枪鱼中心渔场分布关系也没有报道。本研究在前人的基础上,通过 Argo 剖面浮标数据,重构影响大眼金枪鱼垂直分布的等温线场,从中尺度月平均的角度分析热带印度洋大眼金枪鱼高渔获率水温的等温线时空分布特征,得出大眼金枪鱼适宜的三维空间分布范围,为延绳钓捕捞、渔业管理和资源保护提供关键次表层信息。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

本研究确定的研究区域为 25°E~120°E, 30°S~25°N(图 1)。该区域受印度洋季风影响,在夏季,该地区是西南季风(6—10 月),冬季是东北季风(12 至翌年 4 月),5 月和 11 月是季风转换月份<sup>[14]</sup>。

1.2 数据

1.2.1 Argo 数据 采用 2007—2011 年 Argo 浮标剖面数据计算次表层环境因子场,包括等温线、温跃层等网格化数据。Argo 数据来自于中国 Argo

实时数据中心(<http://www.argo.org.cn/>)。这期间研究区域各月有效月平均浮标个数是 977 个,各月浮标个数见图 2;图 1 是 2010 年 12 月份浮标分布图。该区域的浮标个数及其空间分布已基本达到了研究需求。

1.2.2 渔业数据 大眼金枪鱼渔业生产数据来自于印度洋金枪鱼委员会(IOTC)。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。数据统计的空间分辨率是 5°×5°,时间分辨率是月。研究采用 1991—2011 年大眼金枪鱼延绳钓渔业数据,这期间金枪鱼渔业捕捞规模趋于稳定。每 5°×5°统计方格内的单位捕捞努力渔获量(CPUE, 尾/千钩)计算公式为:

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

CPUE<sub>(i,j)</sub>, N<sub>fish(i,j)</sub>, N<sub>hook(i,j)</sub>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。

1.3 数据分析方法

10~16 是印度洋大眼金枪鱼高渔获率分布的水温段<sup>[9-10]</sup>,因此本研究绘制了 10、16 等温线,分析大眼金枪鱼高渔获率垂直分布的上界

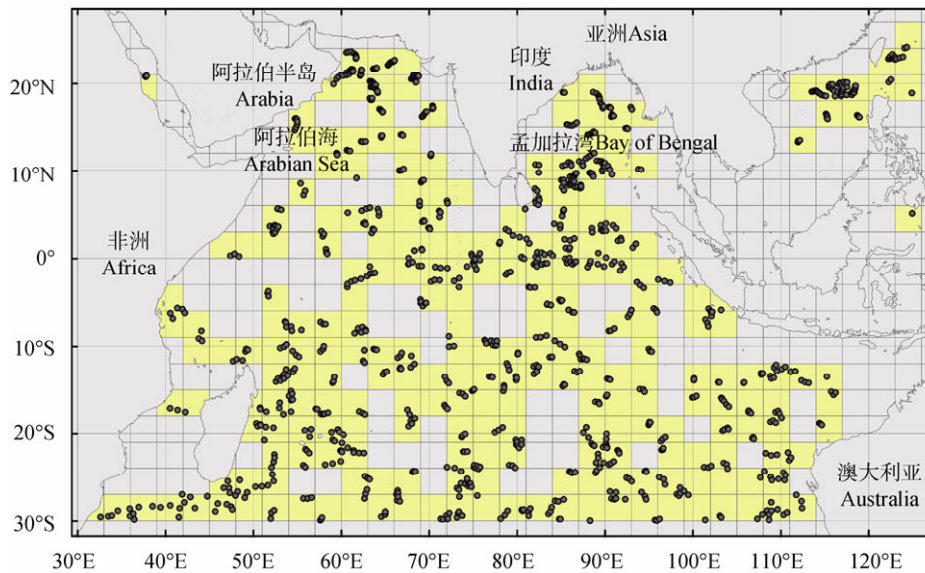


图 1 Argo 数据在 3°×3°网格上的分布  
Fig.1 The distribute of Argo data in 3°×3°grid

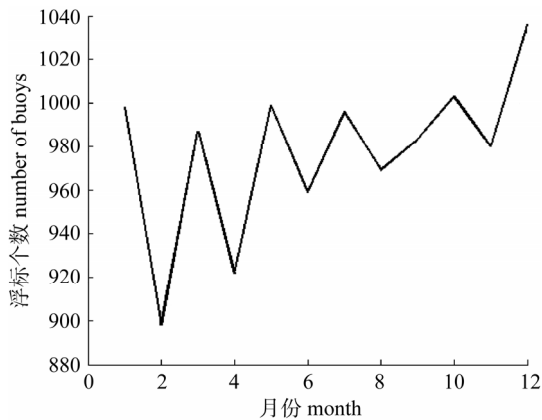


图 2 各月浮标数量

Fig. 2 The number of buoys in each month

和下界深度。大眼金枪鱼的垂直分布受 12~13 等温线影响,同时也是延绳钓高渔获率水温区间,本研究绘制 12、13 等温线深度和月平均 CPUE 空间叠加图,分析大眼金枪鱼高渔获率分布区间,同时计算 12~13 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。

**1.3.1 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** 计算方法和判别方法同文献[15]。

**1.3.2 次表层 10~16 深度值等值线计算** 采用 Akima<sup>[16]</sup>插值方法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 10~16 水温处离散分布的深度值,用地统计方法<sup>[17]</sup>将其插值到网格节点上 ( $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ),再以填色等值线作图方式显示。插网格计算分辨率是  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ,为了和捕捞数据匹配,将深度值转换成  $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的分辨率。

**1.3.3 计算 12~13 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,按照月分组,在空间上匹配对应,分别计算 12~13 等温线深度值与温跃层下界深度之间的差值 ( $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ),再转成  $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的分辨率。

**1.3.4 渔场标准定义** 先按(1)式计算 1991—2011 年各月网格内 CPUE 平均值,共计 1 467 个。计算 1 467 个 CPUE 的平均值、均方差和四分位数(Q1~

Q3)。大于 Q3 的 CPUE 称为高值 CPUE,即认为 CPUE 较高,而其所属渔区定为热带印度洋大眼金枪鱼中心渔场<sup>[15]</sup>。

**1.3.5 空间分析** 绘制 10、16 等温线深度值等值线图,定量分析大眼金枪鱼垂直深度分布的上下界。把 CPUE 数据按月分组,分别和 12、13 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。最后定量分析大眼金枪鱼中心渔场和 12、13 等温线深度值的关系,找出中心渔场金枪鱼适宜垂直分布水平和垂直范围。

**1.3.6 适宜垂直分布区间计算** 大眼金枪鱼最适的 12、13 等温线深度值和 12、13 等温线深度值与温跃层下界深度之间的差值分布区间,分别通过频次分析和经验累积分布函数(ECDF Empirical cumulative distribution function)得到<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 10 和 16 等温线深度

印度洋 10、16 等温线深度等值线分布如图 3 和图 4 所示。由图 3、图 4 可见,在时间上 10、16 等温线各月分布不相同,但没有像温跃层上界那样明显的季节性变化特征,可能与 10、16 等温线深度值分布有关。10 等温线深度值分布在温跃层下界以下,16 等温线深度值分布在下界附近区域,均受表层季风变换影响小。在水平空间上,10、16 等温线深度等值线都呈现纬向和经向分布特征。在纬向上,在阿拉伯海和马达加斯加以南区域深度值大,在  $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{S}$  纬向区域深度值小。在经向上,从东到西深度值由大到小变化。

阿拉伯海和马达加斯加以南区域,10 等温线深度值超过 500 m;16 等温线深度值超过 250 m。在  $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{S}$  纬向区域和孟加拉海,10 等温线深度值在 400~450 m;16 等温线深度值在 150 m 左右。与文献[15]对比分析,16 等温线深度值在东北季风期间略浅于温跃层下界深度,在西南

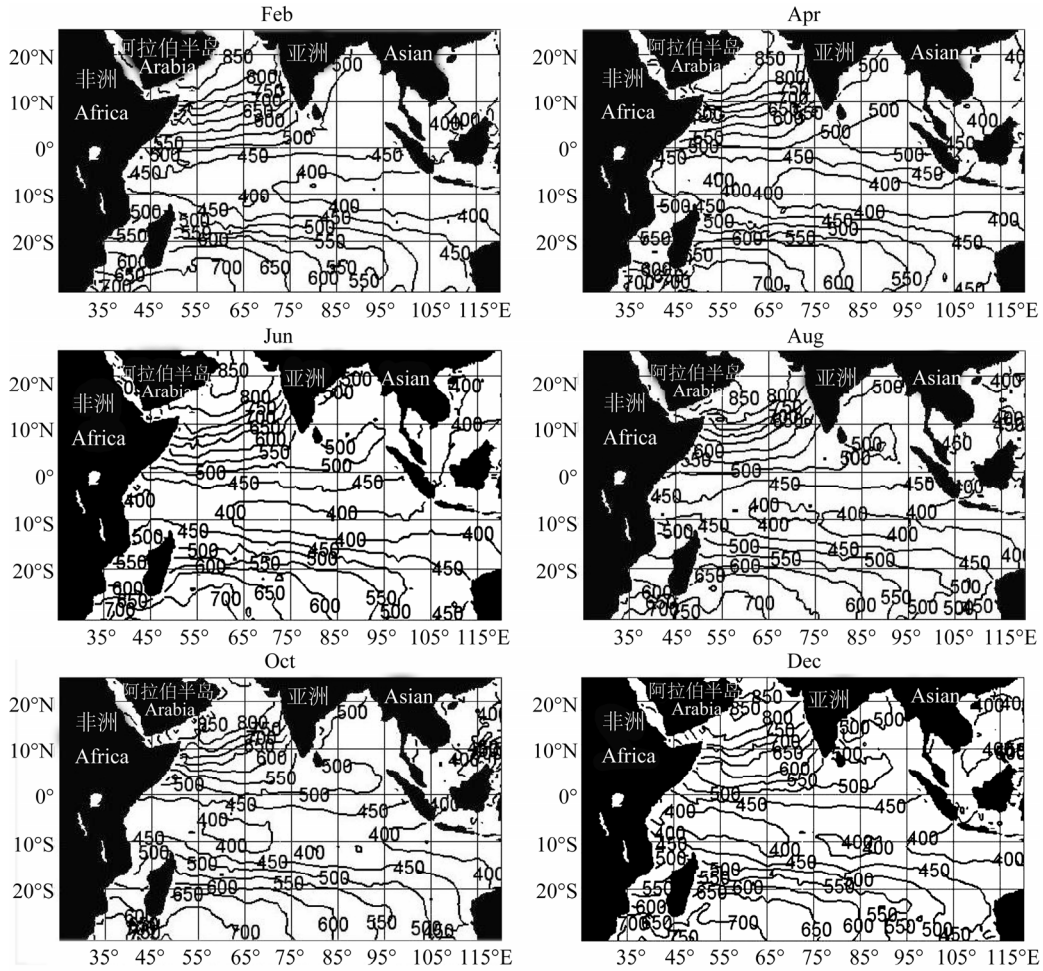


图 3 10 等温线深度等值线图

Fig. 3 Contour map of estimated 10 isothermal depth

季风期间略深于温跃层下界深度。图 5 表明热带印度洋高值 CPUE 区域主要在 10°N~15°S 纬向区域, 由此可推断热带印度洋大眼金枪鱼高渔获率垂直分在 150~400 m 深度之间, 分布在温跃层下界深度附近或以下水深区域。

### 2.2 12 和 13 等温线深度

档案标志放流、声学遥测和延绳钓调查研究结果表明, 12~13 是影响大眼金枪鱼垂直分布的关键水温区间, 也是高渔获率水温分布区间, 因此本研究绘制了 12 和 13 等温线深度, 并和大眼金枪鱼 CPUE 进行叠加做空间分析(图 5,7)。图 5 显示高值 CPUE 出现的地方, 12 等温线深度值大多小于 350 m。在 350~450 m 区域, 分布零散高值 CPUE 区域, 尤其是在东北季风期间。深度值超过 500 m 的地方, CPUE 普遍较小。

12 等温线深度与高值 CPUE 离散图(图 6a)表明, 高值 CPUE 出现在 220~530 m, 平均深度值为 300 m, 众数出现在 225~350 m(87.8%), 有 6.8% 的高值 CPUE 落在深度值大于 400 m 区域。图 6b 是 15°S 以北纬向区域, 12 等温线深度与高值 CPUE 离散图, 相比全年全区域, 高值 CPUE 分布更加集中, 94.7% 的高值 CPUE 在 225~350 m 范围, 只有 9 个(2.7%)高值 CPUE 落在深度值大于 400 m 区域。

高值 CPUE 出现的地方, 13 等温线深度值大多小于 300 m。在 300~400 m 区域, 分布零散高值 CPUE 区域, 尤其是在东北季风期间。深度值超过 400 m 的地方, CPUE 普遍较低。图 8 是 13 等温线深度与高值 CPUE 离散图, 高值 CPUE 出现在 183~430 m, 平均深度值为 248 m, 众数出现

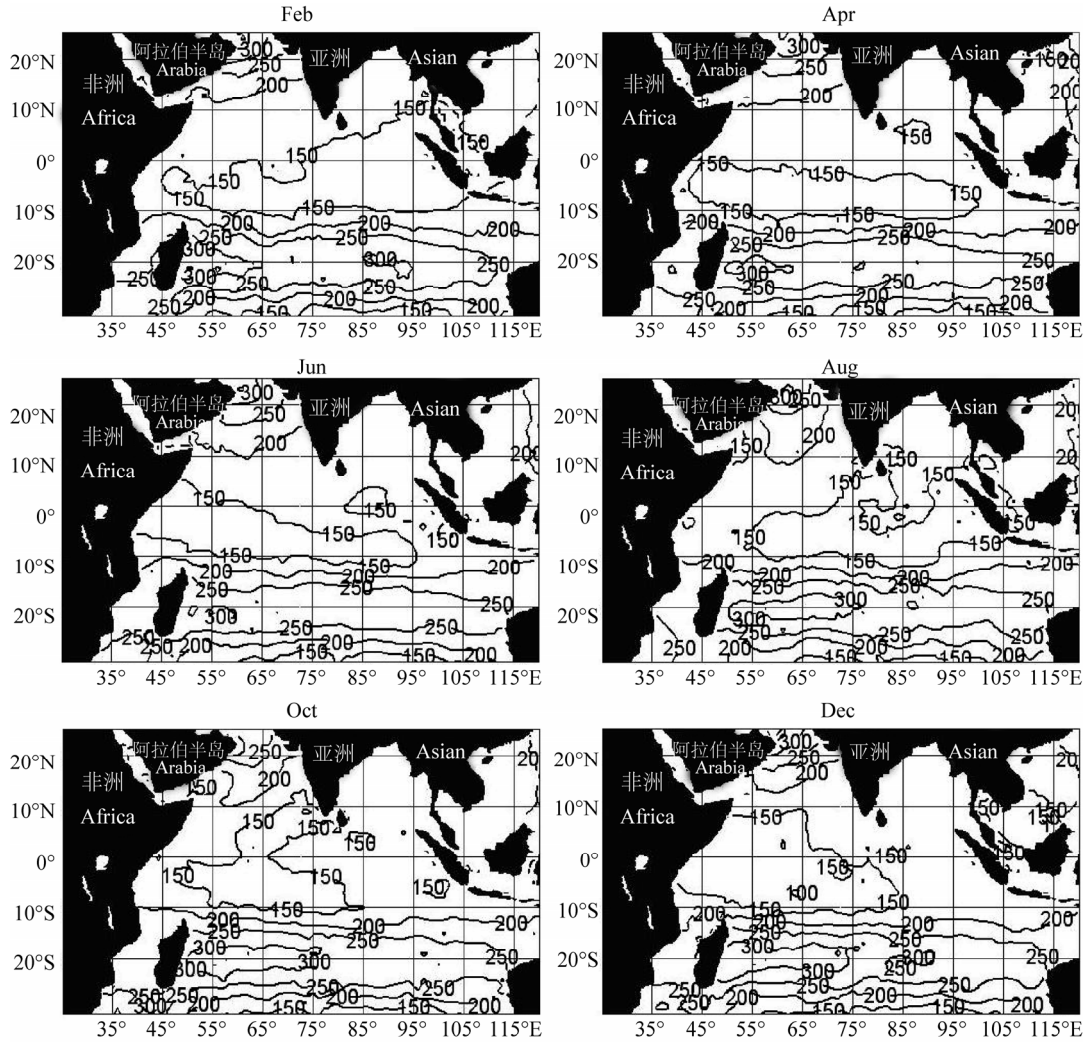


图 4 16 等温线深度等值线图

Fig. 4 Contour map of estimated 16 isothermal depth

在 190~275 m(78%), 5.7%的高值 CPUE 落在深度值大于 350 m 区域。与 12 等温线深度与高值 CPUE 离散图相比, 13 等温线深度与高值 CPUE 离散图分布更零散, 尤其是 15°S 以北纬向区域。相比全年全区域, 15°S 以北纬向区域高值 CPUE 分布深度更加集中, 85%的高值 CPUE 值分布在 190~275 m 范围之内。上述结果说明在 15°S 以北区域, 中心渔场内大眼金枪鱼垂直分布更加集中。在 15°S 以南区域, 中心渔场内大眼金枪鱼垂直分布范围更大。

### 2.3 适宜垂直分布区间

热带印度洋大眼金枪鱼延绳钓高值 CPUE 在 12、13 等温线深度的分布频次图如图 9a 所示。

12 等温线深度值在 230~540 m 都有高值 CPUE 出现, 89.7%的高值 CPUE 分布在 240~340 m, 在中心渔场高值 CPUE 趋向于集中在 260~280 m 深度附近。13 等温线深度值在 180~430 m 都有高值 CPUE 出现, 93.3%的高值 CPUE 出现在 190~300 m, 中心渔场高值 CPUE 趋向于集中在 220 m 深度附近。

大眼金枪鱼延绳钓高值 CPUE 分布频次与 12、13 等温线深度与温跃层下界深度差值的关系如图 9b 所示。12 等温线深度与温跃层下界深度差值在 0~270 m, 89.4%的高值 CPUE 区域分布在深度差 30~130 m(图 9b); 在中心渔场, 高值 CPUE 趋向于在 60 m 深度差区间内。

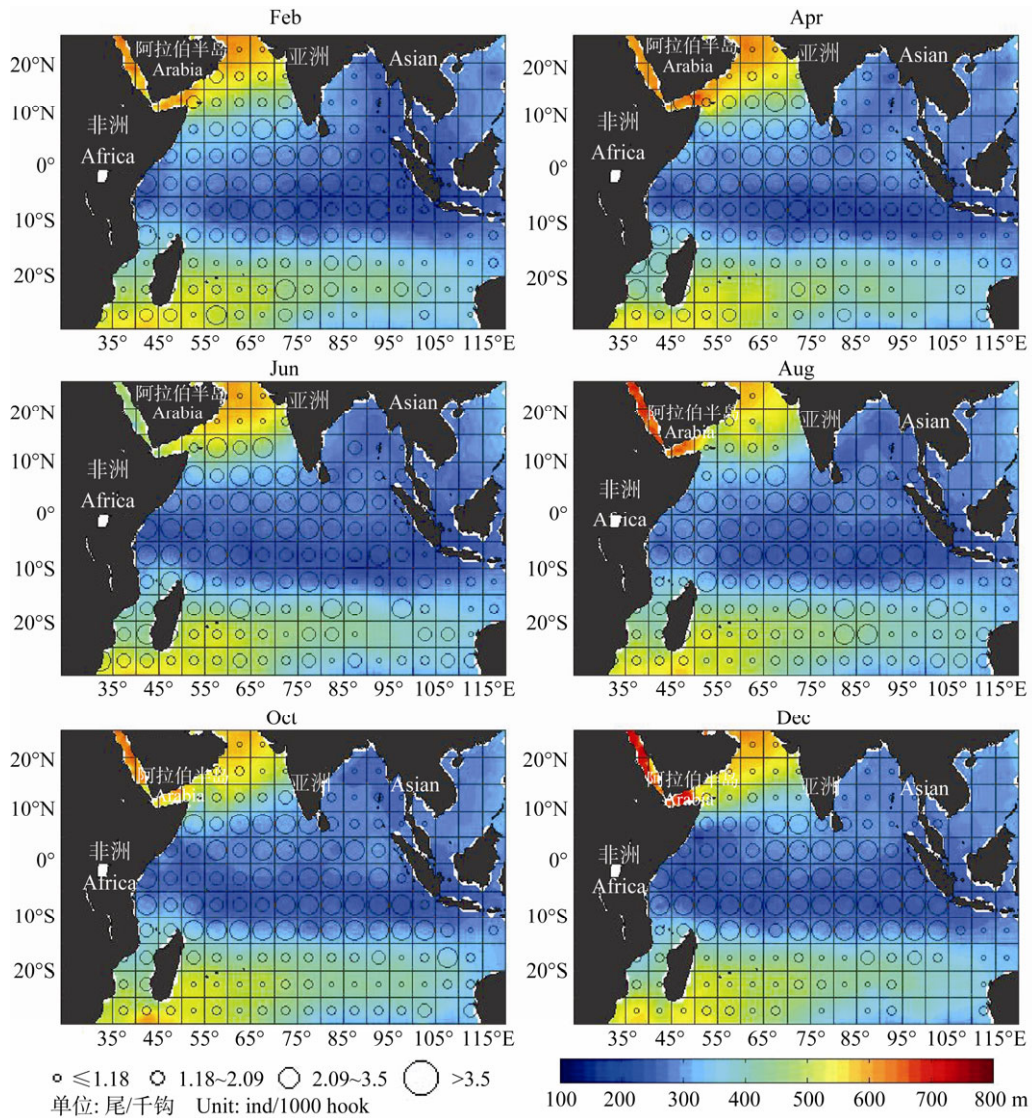


图 5 12 等温线深度和 CPUE 空间叠加图

Fig. 5 The overlay map of CPUE and the contour map of estimated 12 isothermal depth

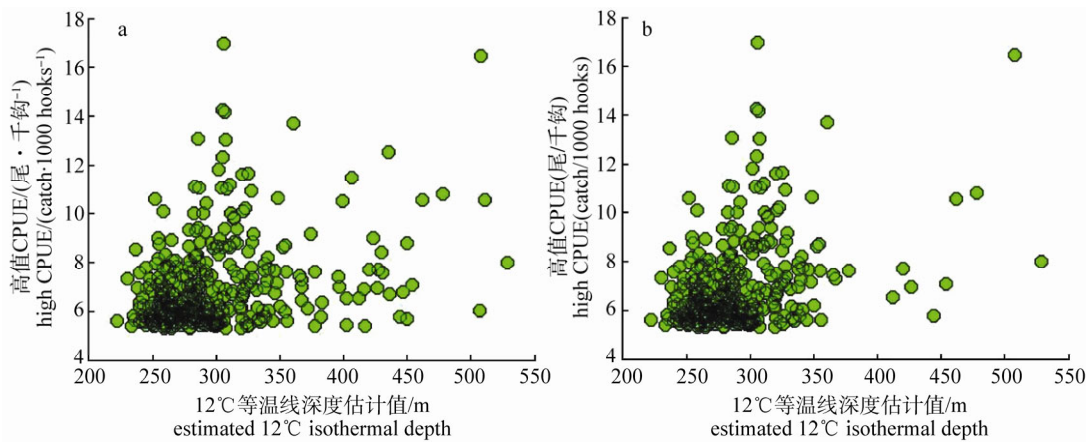


图 6 12 等温线深度与高值 CPUE 离散图

a. 整个研究区域; b. 15°S 以北区域.

Fig. 6 Scatter diagram between the 12 isothermal depth and the high CPUE  
a. entire study area; b. the north of 15°S.

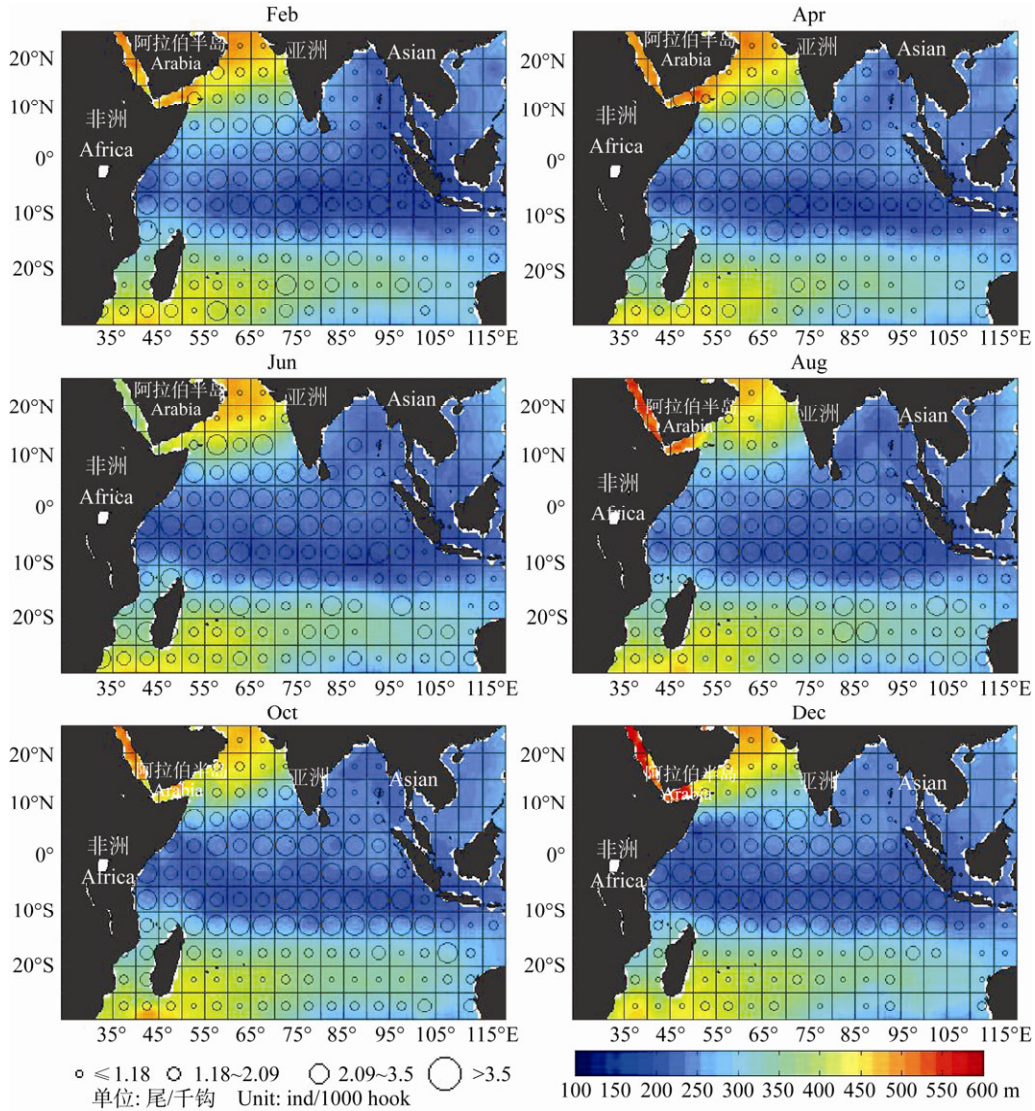


图 7 13 等温线深度和 CPUE 分布区域空间叠加图

Fig. 7 The overlay map of CPUE distribution area and the contour map of estimated 13 isothermal depth

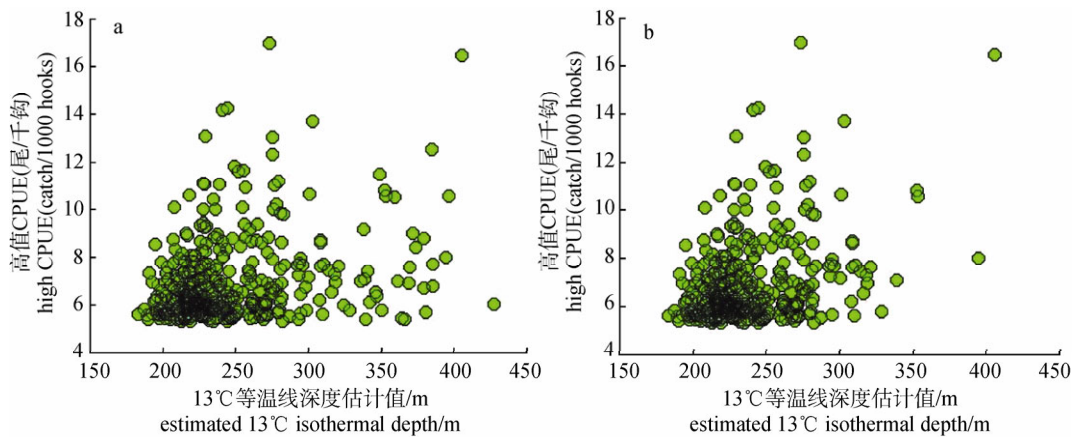


图 8 13 等温线深度与高值 CPUE 离散图

a. 整个研究区域; b. 15°S 以北区域.

Fig. 8 Scatter diagram between the 13 isothermal depth and the CPUE  
a. entire study area; b. area to the north of 15°S.

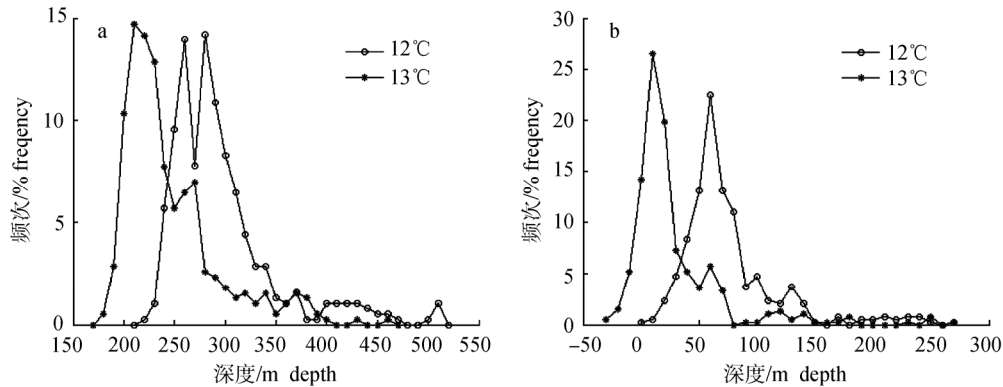


图 9 大眼金枪鱼高值 CPUE 频次分布图

a. 12、13 等温线深度; b. 12、13 等温线深度与温跃层下界深度差值。

Fig. 9 The distribution of fishing frequency of high bigeye tuna CPUE

a. 12 and 13 isothermal depth; b. difference between 12 and 13 isothermal depth and the lower boundary of thermocline.

13 等温线深度与温跃层下界深度差值在-30~270 m(图 9b), 90.86%的高值 CPUE 区域分布在深度差-10~70 m, 高值 CPUE 趋向于在 10 m 深度差区间。

ECDF 分析结果如图 10 所示。4 个变量和高值 CPUE 累积分布各不相同。在显著性水平  $\alpha=0.05$  的水平下  $D_{0.05}=0.069$ , 12、13 等温线对应的  $D$  值分别是 0.043、0.037; 12、13 等温线与温跃层下界距离对应的  $D$  值分别是 0.033、0.031, 所有的  $D$  值都小于  $D_{0.05}$ , 均落在拒绝域之外, 因此接受原假设, 认为高值 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 4 个变量最适区间分别为: 12 等温线 251~359 m [(305±54) m, 图 10a]; 13 等温线 183~277 m [(230±47) m, 图 10b]; 12 深度差 27~137 m [(82±55) m, 图 10c]; 13 深度差-2~82 m [(40±42) m, 图 10d]。

### 3 讨论

#### 3.1 10 和 16 等温线分布

10、16 等温线深度没有明显的季节性变化, 在空间上有类似分布特征。阿拉伯海和马达加斯加以南区域, 10 等温线深度值超过 500 m; 16 等温线深度值超过 250 m。在 10°N~15°S 纬向区域和孟加拉海, 10 等温线深度值在 400~450 m; 16 等温线深度值在 150 m 左右。热带印度洋高值 CPUE 区域、延绳钓高渔获率垂直

分布在 150~400 m 深度之间。高值 CPUE 对应的 12 等温线深度超过 350 m 的区域全年共 44 个(图 5), 深度值落在适宜区间之外。同期这些区域 16 等温线深度和温跃层下界深度差如图 11 所示。图 11 表明, 16 等温线深度在温跃层下界深度附近及以下区域, 深度差平均值在 36 m。说明热带印度洋高值 CPUE 区域、延绳钓高渔获率垂直分在 150~400 m 深度, 同时应该在温跃层下界以下区域。

#### 3.2 12 和 13 等温线深度和大眼金枪鱼渔场关系

在三维空间上, 12 等温线, 高值 CPUE 出现的地方深度值大多小于 350 m, 众数在 225~350 m, 深度值超过 500 m 的地方, CPUE 普遍较低。13 等温线, 高值 CPUE 出现的地方深度值大多小于 300 m, 众数在 190~275 m, 深度值超过 400 m 的地方, CPUE 普遍较小。全年在 15°S 以北纬向区域, 高值 CPUE 区域高渔获率垂直分布深度更加集中。

Mohri 等<sup>[9]</sup>指出, 在热带印度洋, 161~180 m 渔获率是 7.1%, 261~280 m 渔获率是 15.4%。161~280 m 水层渔获尾数占总的 60~280 m 水层的 95%, 241~280 m 水层则是 40%。得出渔获率随深度值增加而变大, 而在中纬度(15°S~25°S)区域渔获率非常低(0~1.4), 和深度的变化无关。作者未能对上述结论加以解释, 通过本研究 and 文献[15]的结

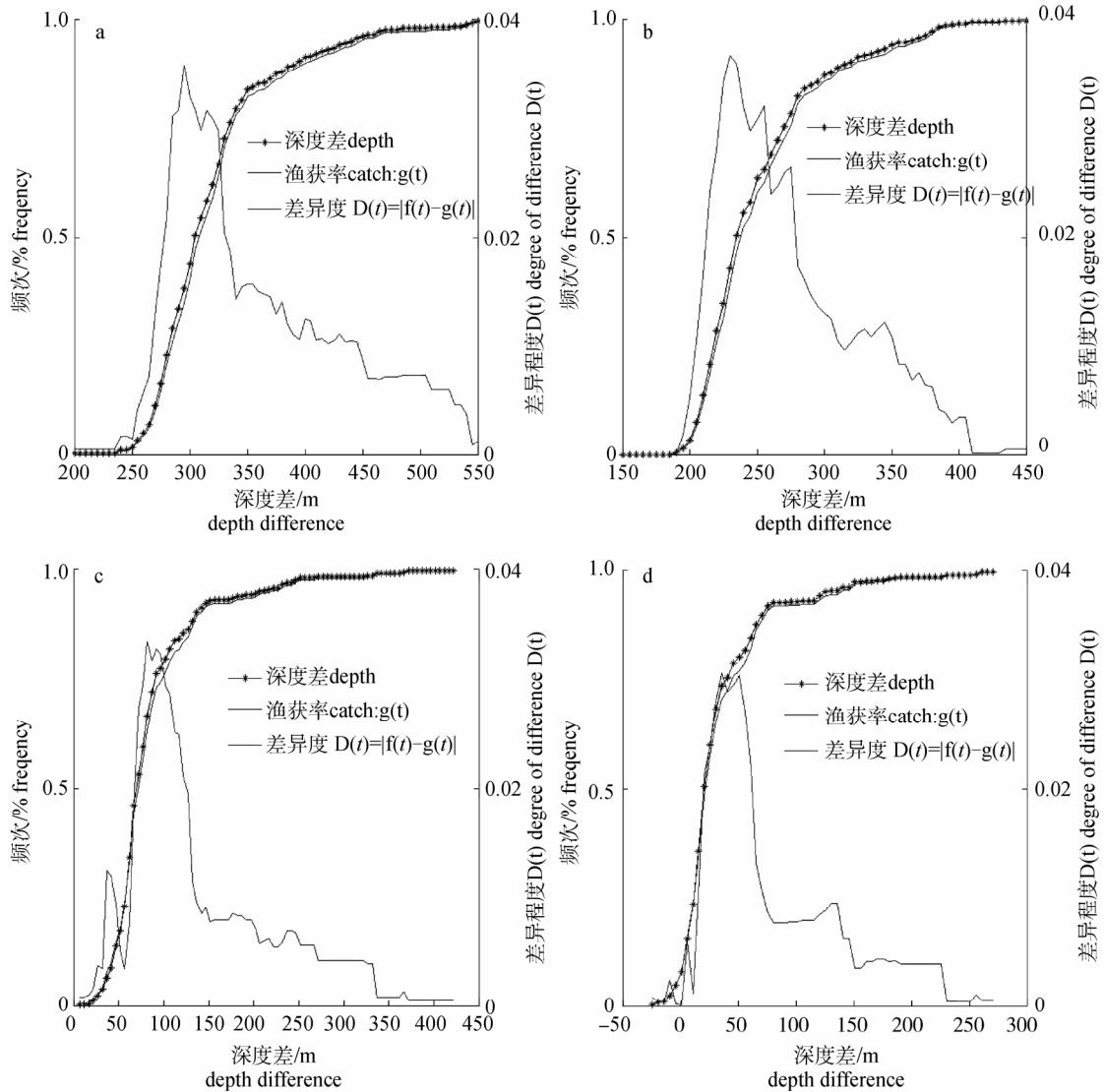


图 10 经验累积分布函数

a.12 等温线, b.13 等温线, c.12 等温线与温跃层下界距离, d. 13 等温线与温跃层下界距离.

Fig. 10 The empirical cumulative distribution function (ECDF) for 12 isothermal depth(a), 13 isothermal depth(b), depth difference of 12 isothermal depth(c) and depth difference of 13 isothermal depth(d) and fishing frequency of high bigeye tuna CPUE

果发现, 在热带印度洋区域, 161~280 m 水层分布在温跃层下界深度附近及以下区域, 在 13 等温线适宜深度分布区间内, 稍浅于 12 等温线适宜深度区间, 这可能是产生文献[9]高渔获率结论的原因, 但投钩越深钓获率越高的结论不准确。在中纬度区域温跃层下界深度超过 280 m, 下界温度高于 17 , 过深的温跃层和过高的温跃层下界温度, 可能不适宜大眼金枪鱼在温跃层下界以下区域觅食, 也可能大眼金枪鱼索饵集聚的水层分布过深, 延绳钓无法捕获而致。在文献[11]研究区

域, 本研究得到的结果与文献[11]相似, 但本研究将区域推广至整个热带印度洋以及全年 12 个月份。

### 3.3 大眼金枪鱼适宜分布区域

本研究通过频次分析和 ECDF 方法得出热带印度洋大眼金枪鱼适宜的分布区间, 取两者交集, 4 个变量参数适宜区间分别是: 12 等温线 250~340 m; 13 等温线 190~270 m; 12 深度差 30~130 m; 13 深度差 0~70 m。建议在热带印度洋延绳钓下钩深度 250 m 左右, 不超过 340 m, 温跃层

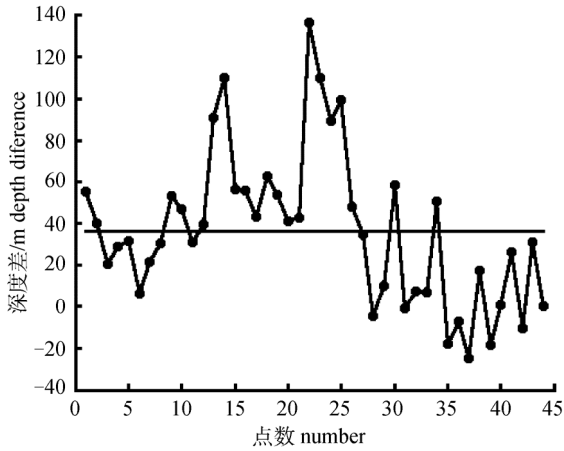


图 11 16 等温线和温跃层下界深度距离

Fig. 11 Depth difference between 16 °C with the lower boundary depth of thermocline

以下 50 m 左右。本研究在时间和空间上都做了拓展, 可以根据上述分析结果寻找中心渔场位置, 同时确定投钩深度。

### 3.4 数据及结论说明

本研究采用的 Argo 数据和捕捞数据不同步。采用 1991—2011 年的数据(时间序列长达 21 年)做长时间分析, 个别年份的数据并不影响整体时间数列数据以及渔场定义。本研究的主旨是分析大眼金枪鱼历史渔场和温跃层关系, 并不是逐年对 CPUE 具体变量值(或渔获量值)和次表层等温线做细致的数值关系分析; 并且采用多年时间序列数据进行平均, 削弱了不同年份资源状况、船队生产状况的影响。结果表明次表层等温线深度

并未因季节而变化, 印度洋温跃层深度没有非常明显的年际变化<sup>[18]</sup>, 由生产数据和环境数据时间不同对分析结果造成的影响可以忽略不计。5°×5° 是国际金枪鱼组织统计的官方精度, 本研究采用 5°×5° 空间精度, 从中尺度月平均角度分析, 可能平滑了一些小范围的特殊海洋环境与 CPUE 的关系。实际上延绳钓作业经常跨度 1~2 个经纬度。

为进一步说明研究结果可靠性, 本研究采用相同的研究办法, 对 2007—2011 年 Argo 数据和同期生产数据进行分析。频次分析结果见图 12, 12 等温线深度值在 230~540 m 都有高值 CPUE 出现, 89.7% 的高值 CPUE 分布在 240~340 m(图 12a)。13 等温线深度值在 180~430 m 都有高值 CPUE 出现, 93.3% 的高值 CPUE 出现在 190~300 m(图 12a)。12 等温线深度与温跃层下界深度差值在 0~290 m, 90.3% 的高值 CPUE 区域深度差在 40~130 m(图 12b)。13 等温线深度与温跃层下界深度差值在 -30~220 m(图 12b)之间, 91.7% 的高值 CPUE 区域深度差在 -10~70 m 之间。ECDF 分析结果因版面原因不再绘图。结果表明, 在显著性水平  $\alpha=0.05$  的水平下 4 个变量高值 CPUE 和 4 个变量关系密切, 样本分布没有显著差异( $P>0.05$ )。高值 CPUE 区域 4 个变量最适区间分别是: 12 等温线 246~344 m [(295±49) m]; 13 等温线, 198~282 m [(240±42) m]; 12 深度差 31~131 m [(81±50)m]; 13 深度差 -6~78 m [(36±42)m]。

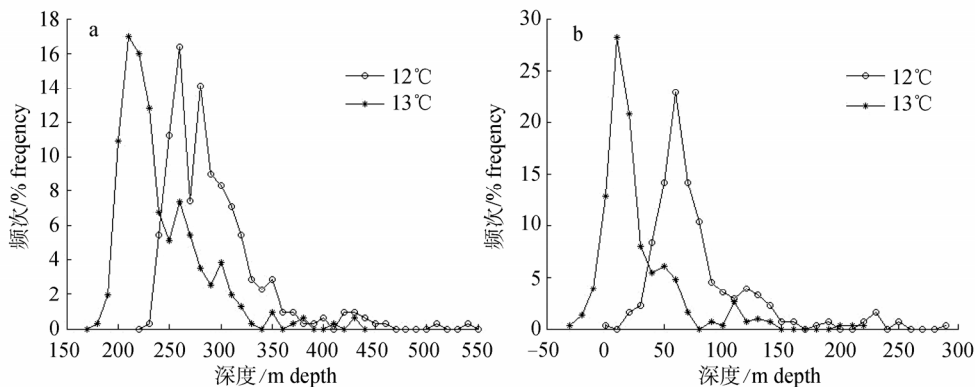


图 12 2007—2011 年大眼金枪鱼高值 CPUE 频数与深度的关系

a. 12、13 等温线深度; b. 12、13 等温线深度与温跃层下界深度差值。

Fig. 12 Relationship between depth and fishing frequency of high bigeye tuna CPUE during 2007—2011

a. 12 and 13 isothermal depth; b. depth difference between 12 and 13 with the lower boundary depth of thermocline.

2007—2011 年 Argo 数据和同期生产数据分析结果和本研究结果非常相似, 本研究结果可以作为确定渔场的参考指标。

#### 参考文献:

- [1] Dagorn L, Bach P, Josse E. Movement patterns of large bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the open ocean, determined using ultrasonic telemetry[J]. Mar Biol, 2000, 136: 361–371.
- [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, as ascertained through archival tag data[M]//Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, et al, ed. 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. 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.
- [4] Evans K, Langley A, Clear N P, et al. Behaviour and habitat preferences of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and their influence on longline fishery catches in the western Coral Sea[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2008, 65: 2427–2443.
- [5] Holland K N, Brill R W, Chang R K C. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices[J]. Fish Bull, 1990, 88: 493–507.
- [6] Musyl M K, Brill R W, Boggs C H, et al. Vertical movements of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) associated with islands, buoys and seamounts near the main Hawaiian Islands from archival tagging data[J]. Fish Oceanogr, 2003, 12: 152–169.
- [7] Masahiko M, YASUAKI T. Vertical distribution and optimum temperature of bigeye tuna in the eastern tropical Indian Ocean based on regular and deep tuna longline catches [J]. J Nat Fish Univ, 1997, 46(1): 13–20.
- [8] Pelagic Fisheries Research Program (PFRP) Newsletter. Oceanography's role in bigeye tuna aggregation and vulnerability[EB/OL].[2011-04-12]http://www.soest.hawaii.edu/PFRP/newsletters/July-Sept 1999.pdf.
- [9] Mohri M, Nishida T. Distribution of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and its relationship to the environmental conditions in the Indian Ocean based on the Japanese longline fisheries information[J]. IOTC Proc, 1999, 2: 221–230.
- [10] Mohri M, Takeda Y. Vertical distribution and optimum temperature of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern tropical Indian Ocean based on regular and deep tuna longline catches[J]. J Natl Fish Univ, 1997, 46(1): 13–20.
- [11] Song L M, Zhou J, Zhou Y Q, et al. Environmental preferences of bigeye tuna, *Thunnus obesus*, in the Indian Ocean: an application to a longline fishery[J]. Environ Biol Fish, 2009, 85: 153–171.
- [12] 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.
- [13] 姜浪波, 许柳雄, 黄金玲. 印度洋大眼金枪鱼垂直分布与水温的关系[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(3): 332–336.
- [14] Rao R R, Sivakumar R. Seasonal variability of near-surface isothermal layer and thermocline characteristics of the tropical Indian Ocean[J]. Meteorol Atmos Phys, 1996, 61: 201–212.
- [15] 杨胜龙, 张禹, 樊伟, 等. 热带印度洋大眼金枪鱼渔场时空分布与温跃层关系[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 679–689.
- [16] Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. JACM, 1970, 17: 589–600.
- [17] 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] 邱东晓, 黄菲, 杨宇星. 东印度洋-西太平洋暖池的年代际变化特征研究[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 525–532.

## Vertical distribution of bigeye tuna *Thunnus obesus* in the tropical Indian Ocean

CHEN Xuezhong, YANG Shenglong, FAN Wei, WU Yumei

East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

**Abstract:** We evaluated the isothermal distribution of subsurface temperatures in the bigeye tuna (*Thunnus obesus*) fishing grounds in the tropical Indian Ocean. We plotted the isothermal depths at 10, 12, 13, and 16°C on a spatial overlay map using data collected on monthly basis from Argo buoys and monthly CPUE (catch per unit effort) from bigeye tuna long-lines. In addition, the differences in depth between the 12 and 13°C isolines at the lower boundary of the thermocline were computed to determine the relationship between bigeye tuna vertical distribution and thermocline depth. Our analysis suggested that the vertical range of optimal temperatures (10 and 16°C) in the area of high CPUE was between 150 and 400 m, and was beneath the lower boundary depth of the thermocline. The overlay maps suggest that CPUE is highest in areas where the 12°C isothermal depth is shallower than 350 m (mode: 225–350 m). Conversely, if the depth is >300 m, the CPUE tends to be low. Similarly, the highest CPUEs were observed in areas where the 13°C isothermal depth was shallower than 300 m (mode: 190–275 m), whereas CPUE was low when the depth exceeded 400 m. The vertical distribution of high hook rates was concentrated in the area to the north of 15°S. We used a frequency analysis and the empirical cumulative distribution function to compute the optimum range of subsurface factors. The optimum ranges for the 12 and 13°C isothermal depths were between 250–340 m and 190–270 m, respectively. The optimum depth difference ranges were 30–130 m for the 12°C isothermal depth and 0–70 m for the 13°C isothermal depth. We documented the distribution interval and vertical depth range for the central fishing ground of bigeye tuna. Our results provide a reference for improving the efficiency of the long-line fleet and aiding in resource management.

**Key words:** *Thunnus obesus*; subsurface environment; the Indian Ocean; Argo

**Corresponding author:** CHEN Xuezhong. E-mail: xuezhong@fishery.ac.cn