

热带印度洋黄鳍金枪鱼水平-垂直分布空间分析*

杨胜龙^{1,2} 化成君¹ 靳少非¹ 范秀梅¹ 张胜茂¹ 伍玉梅¹

(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)

提要 为了解印度洋热带海域黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)延绳钓适宜渔获水温的等温线时空分布,分析黄鳍金枪鱼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印度洋热带海域 16°C 和距海洋表层水温 8°C($\Delta 8^\circ\text{C}$)的月平均等温线场,网格化计算了 16°C 和 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度值和下界深度差,并结合印度洋金枪鱼委员会(IOTC)黄鳍金枪鱼延绳钓渔业数据,绘制了 16°C 和 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与月平均单位捕捞努力量的渔获量(CPUE)的空间叠加图,用于分析热带印度洋黄鳍金枪鱼中心渔场 CPUE 时空分布和高渔获率水温的等温线时空分布关系。结果表明,高值 CPUE 的分布表现出明显的季节性变化。16°C 等温线,在东北季风期间,高值 CPUE 出现的地方深度值大多小于 200m;西南季风期间,在 15°—25°S 深度可到达 250m,在 130—190m 深度全年有高值 CPUE 集中出现,深度值超过 300m 的地方 CPUE 普遍较小。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线,高值 CPUE 出现的地方深度值大多小于 175m,主要在 100—170m;西南季风期间,在 15°S 以南区域,150—300m 深度,也有高值 CPUE 区域出现,全年深度值超过 300m 的地方 CPUE 普遍较小。全年在 15°S 以北纬向区域,高渔获率的垂直分布深度更加集中,在西南季风期间尤其明显。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,16°C 等温线 120—209m; $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线 80—159m;与下界深度差:16°C 等温线 0—59m;海表以下 8°C 等温线 50—119m。文章初步得出热带印度洋黄鳍金枪鱼中心渔场适宜的水平、垂直深度值分布区间,结果可以辅助寻找中心渔场位置,同时指导投钩深度,为热带印度洋黄鳍金枪鱼实际生产作业和资源管理提供理论支持。

关键词 黄鳍金枪鱼;次表层环境;热带印度洋;Argo 浮标

中图分类号 S931.3 doi: 10.11693/hyhz20121027002

了解黄鳍金枪鱼(*Thunnus Obesus*)的个体行为和栖息习性有利于渔业资源分析,帮助寻找中心渔场。早期的研究误认为黄鳍金枪鱼主要在混合层内部活动,偶尔俯冲到温跃层以下(Holland *et al*, 1990; Cayre *et al*, 1993; Block *et al*, 1997)。Dagorn等(2006)通过对热带印度洋成年黄鳍金枪鱼进行档案标志研究,发现成年黄鳍金枪鱼能够下潜到深层冷水区,每天经历的水温变化范围众数为 15—16°C,91.7%的时间所处水温低于表层水温 8°C($\Delta 8^\circ\text{C}$)以上。在非伴游

行为下,黄鳍金枪鱼表现出明显的昼夜垂直迁徙移动。晚上在海表以下 50m 以内,从黎明开始周期性的下潜到海表以下 150m 深的水域捕食深水散射层(DSL),每次停留约 11min,平均深度约 250m。身体周边最低温度众数在 12.3°C,距海表温度(SST)最大温差 8.2°C(Schaefer *et al*, 2007, 2009)。相关的声学遥测研究也表明黄鳍金枪鱼分布在 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 以上水域,认为黄鳍金枪鱼的垂直分布受水温垂直结构的影响(Josse *et al*, 1998; Brill *et al*, 1999)。Mohri等(2000)和

* 国家科技支撑计划项目,2013BAD13B01 号;上海市科技创新行动计划项目,12231203901 号;资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金,2010KF0005SA 号;中国水产科学研究院基本科研业务费资助,2012A1201 号,2013A0201 号;中央级基本科研业务费,2012T07 号。杨胜龙, E-mail: ysl6782195@126.com

通讯作者: 伍玉梅, 副研究员, E-mail: wym_07@163.com

收稿日期: 2012-10-27, 收修改稿日期: 2013-04-16

Song等(2008)采用延绳钓调查数据分析认为印度洋黄鳍金枪鱼垂直分布的高渔获率水温在 16°C左右,在温跃层下界附近觅食。

本文从水温对鱼类活动影响的角度出发,在前人研究结果之上,将鱼类活动规律、高渔获率水温和 Argo 浮标水温要素观测结合起来,通过绘制次表层高渔获率水温深度等值线图 and 空间叠加图,了解关键水温因子的垂直、水平分布,采用数值方法得出黄鳍金枪鱼适宜的水平 and 垂直深度三维空间分布范围,帮助延绳钓渔业寻找中心渔场并指导海上作业投钩的深度,为延绳钓金枪鱼渔业资源研究分析提供一个新的角度。

1 材料和方法

1.1 研究区域

本文选择25°—120°E, 30°S—25°N 为研究区域,采用印度洋金枪鱼委员会(IOTC)1991—2011年黄鳍金枪鱼延绳钓渔业数据,统计计算5°×5°空间精度渔获信息,该区域内黄鳍金枪鱼延绳钓产量占整个印度洋总产量的93%以上。受表层季风影响,该区域表层呈现风海流,在6—10月是西南季风,12月至翌年4月是东北季风,5月和11月是季风转换月份(Rao *et al.*, 1996)。

1.2 研究数据

1.2.1 Argo 剖面浮标数据 本文采用2007—2011年 Argo 数据(数据来自 <http://www.argo.org.cn>)计算次表层环境因子场,包括16°C 和 Δ8°C 等温线、温跃层四个参数(温跃层上界深度、温度和下界深度、温度)等值线网格数据。图1是单元浮标网格分布图,图2是各月有效月平均浮标个数,各月平均个数是977。

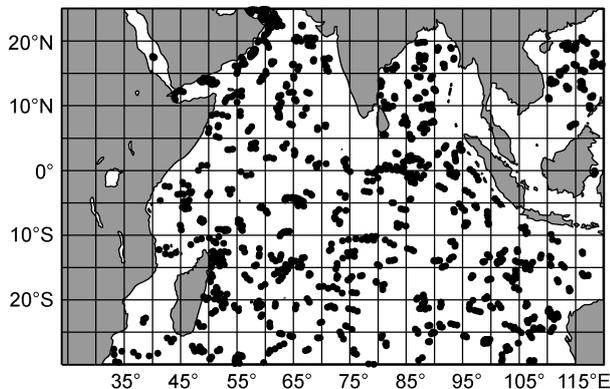


图1 Argo 数据在 3°×3°网格上的分布
Fig.1 Distribution of Argo data in study area

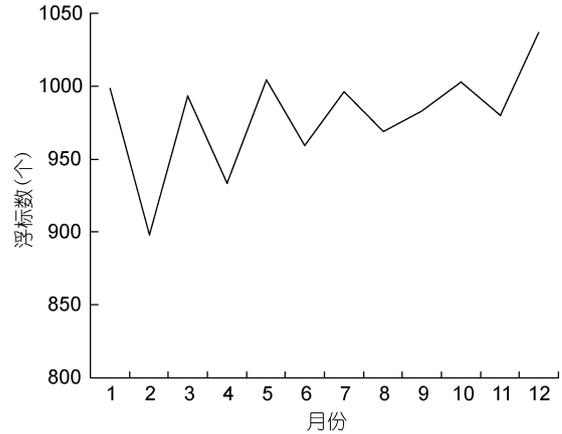


图2 各月浮标数量

Fig.2 The average number of buoys in each month

1.2.2 渔业数据 生产数据采用印度洋金枪鱼委员会(IOTC)1991—2011年黄鳍金枪鱼延绳钓渔业数据。该生产数据属性有放钩数、渔获产量、作业日期、地点(经度、纬度)、渔获尾数。延绳钓生产数据按月采用 5°×5°的空间分辨率进行统计。5°×5°统计方格内单位捕捞努力量渔获量(CPUE, 单位: 尾/千钩)计算公式为:

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

CPUE_(i,j)、N_{fish(i,j)} 和 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。

1.3 分析方法

Δ8°C 是影响印度洋黄鳍金枪鱼垂直分布的水温,16°C 是高渔获率水温(Mohri *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2008), 因此本文绘制了 Δ8°C 和 16°C 等温线深度和月平均 CPUE 空间叠加图,分析黄鳍金枪鱼渔获率的水平和垂直适宜分布深度区间,同时计算 Δ8°C 和 16°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。

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 取大洋温跃层强度(ΔT/Δz)最低标准为 0.05°C/m, 对世界大洋的温度剖面标准层资料进行跃层判断,具体的判别方法和网格化计算参考文献(杨胜龙等, 2012)。

1.3.2 Δ8°C 和 16°C 深度值等值线计算 采用 Akima 插值方法(Akima, 1970)将深度上离散分布的 Argo 温度资料等间隔(2m)拟合。将 2007—2011 年所有数据按月分组,分别提取 Δ8°C 和 16°C 水温处离散

分布的深度值,用 Kriging 方法将其插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格节点上,最后以等值线填色方式显示(杨胜龙等, 2008)。分析时将空间分辨率换成 $5^\circ \times 5^\circ$, 和生产数据匹配。

1.3.3 计算 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 和 16°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($1^\circ \times 1^\circ$)匹配,分别计算 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 和 16°C 深度值与温跃层下界深度值的差值,即温跃层下界深度减去 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 和 16°C 等温线深度值,再将空间分辨率换成 $5^\circ \times 5^\circ$ 。

1.3.4 渔场标准定义 采用文献(杨胜龙等, 2012)分析方法,先计算 1991—2011 年各月网格内月平均 CPUE 值(1495 个)。再计算 1495 个 CPUE 的平均值、均方差和四个四分位数。把大于 Q3 的 CPUE 定义为高值 CPUE,而其所属渔区定为热带印度洋黄鳍金枪鱼中心渔场。

1.3.5 空间分析 把 CPUE 数据按月分组,分别和 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、 16°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 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、 16°C 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 通过频次分析和经验累积分布函数(ECDF, Empirical cumulative distribution function)方法(杨胜龙等, 2012),分别计算黄鳍金枪鱼最适的 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 和 16°C 等温线深度值适宜分布区间,以及 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、 16°C 等温线深度值与温跃层下界深度差值的适宜分布区间。

1.3.7 软件 文中 Akima 拟合和 Kriging 网格化计算基于 Windows 平台的 VC++6.0 软件,采用 Matlab2010(a)软件进行绘图、空间计算和数值计算。

2 结果

2.1 16°C 等温线深度

本文绘制 16°C 等温线深度并和黄鳍金枪鱼 CPUE 进行叠加做空间分析(图 3)。在时间上, 16°C 等温线各月分布不同,但没有像温跃层上界那样明显的季节性变化特征(杨胜龙等, 2012),这可能与 16°C 等温线深度值分布在下界附近区域有关,受表层季风变换影响较小。在水平空间上, 16°C 等温线深度等值线均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纬向区域深度值大,在 10°N — 15°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, 16°C 等温线深度值超过 250m。在 10°N — 15°S 纬向区域和孟加拉湾, 16°C 等温线深度值在 150m 左右。

空间叠加图显示高值 CPUE 出现的地方,东北季风期间, 16°C 等温线深度值大多小于 200m;西南季风期间,在南纬 15° — 25°S 深度可到达 250m。西南季风期间,在 15°S 以南区域,250—300m 深度分布有高值 CPUE 区,在深度超过 300m 的地方,CPUE 全年普遍较小。 16°C 等温线深度与高值 CPUE 离散图(图 4a)表明,高值 CPUE 出现在 110—300m 之间,平均深度值为 186m,在 130—190m 深度处有高值 CPUE 集中出现,只有两个高值 CPUE 落在深度值大于 300m 区域。图 4b 是 15°S 以区域 16°C 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,60%的高值 CPUE 在 130—190m 深度,只有 7 个(12.6%)高值 CPUE 落在深度值大于 250m 区域。

2.2 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度

本文绘制 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度并和黄鳍金枪鱼 CPUE 进行叠加做空间分析(图 5)。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度图表现出明显的季节性变化,在 15°S 以南纬向区域,全年等温线分布较深,超过 200m。在该区域,西南季风期间, $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线分布($>300\text{m}$)要深于东北季风期间深度值等温线分布($<250\text{m}$)。西南季风期间,最深的深度值出现在 25°S 以南,深度可达 400m。东北季风期间,在阿拉伯海北部存在季节性深度值。赤道附近等温线深度值在 100—150m 之间,全年分布较浅。

图 5 表明,高值 CPUE 出现的地方, $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度值大多小于 175m。在西南季风期间, 15°S 以南区域,在 150—300m 深度,有高值 CPUE 区域出现。深度值超过 300m 的地方,CPUE 普遍较小。图 6a 是 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与高值 CPUE 离散图,高值 CPUE 出现在 60—360m,平均深度值为 142m,集中出现在 90—170m(75%),9.1%的高值 CPUE 落在深度值大于 250m 区域。与 16°C 等温线的离散图相比, $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度与高值 CPUE 离散图分布更零散,但 15°S 以北纬向区域分布更集中。83.4%的高值 CPUE 分布在 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度为 90—150m 范围之内。上述结果说明在 15°S 以北纬向区域,中心渔场内黄鳍金枪鱼垂直分布更加集中在某一垂直深度以浅区域。在 15°S 以南纬向区域,中心渔场内金枪鱼垂直分布范围更大。

2.3 适宜垂直分布区间

热带印度洋黄鳍金枪鱼延绳钓高值 CPUE 和 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 、 16°C 等温线深度频数关系图如图 7a 所示。 $\Delta 8^\circ\text{C}$ 等温线深度值在 60—360m 深度都有高值 CPUE

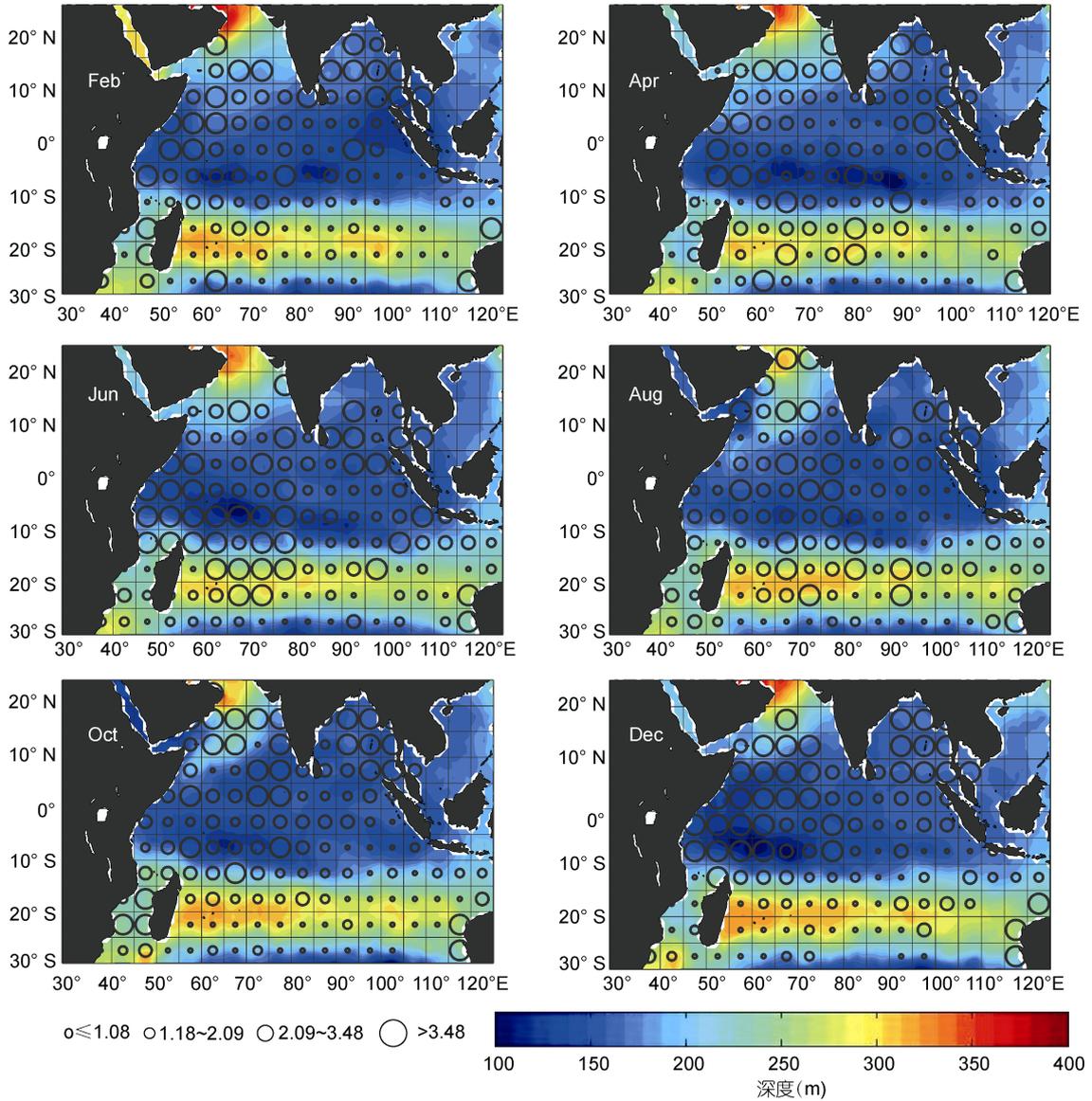


图 3 16°C 等温线深度图和 CPUE 空间叠加图

Fig.3 The overlay map of CPUE and the contour map of estimated 16°C isothermal depth

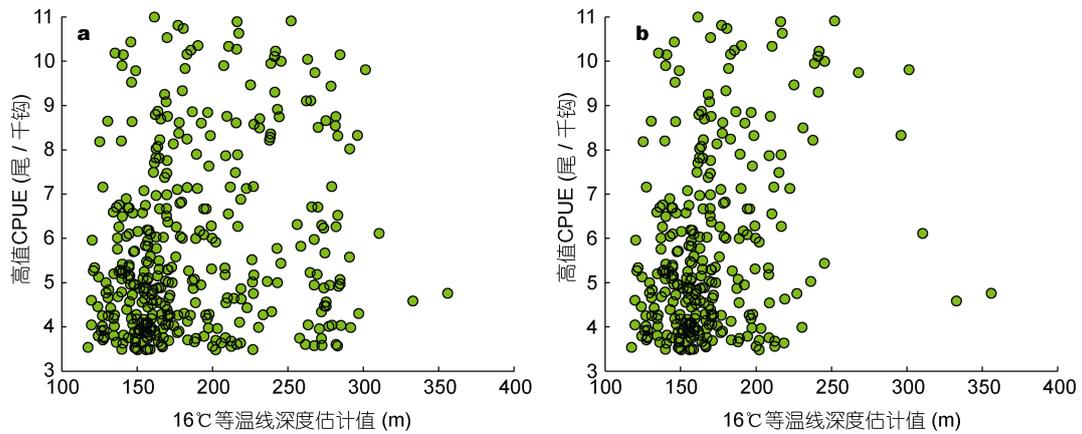


图 4 16°C 等温线深度与高值 CPUE 离散图

Fig.4 Scatter diagram between the 16°C isothermal depth and the CPUE

a: 整个研究区域; b: 15°S 以北区域

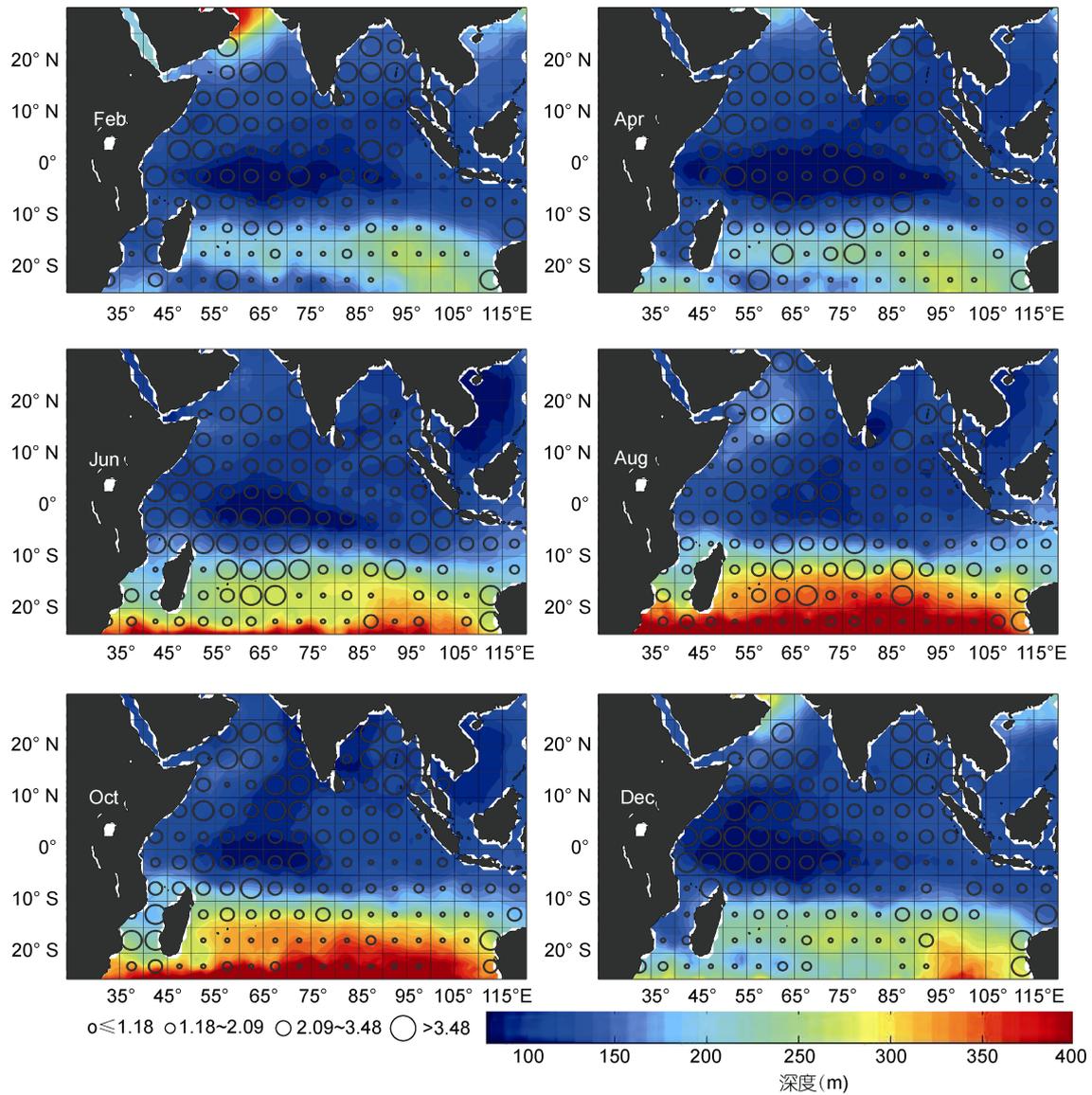


图 5 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度图和 CPUE 空间叠加图

Fig.5 The overlay map of CPUE and the contour map of estimated $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ isothermal depth

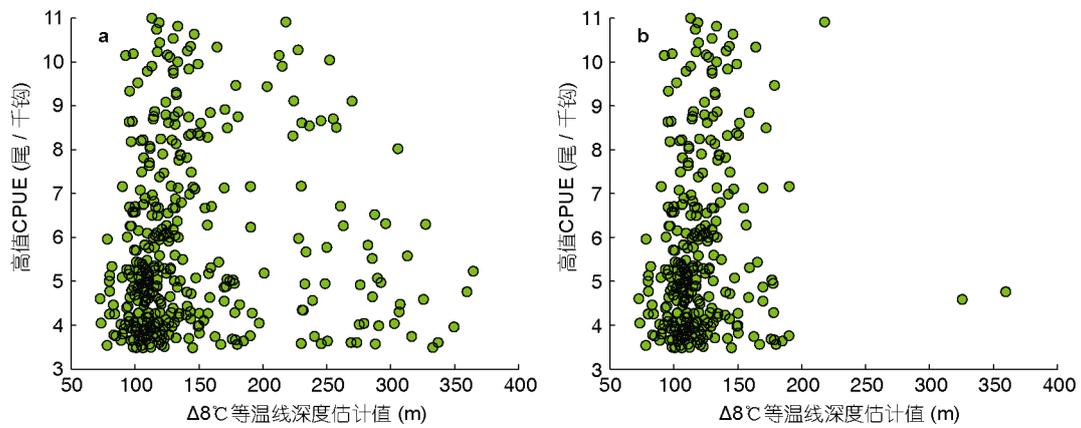


图 6 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度与高值 CPUE 离散图

Fig.6 Scatter diagram between the $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ isothermal depth and the CPUE

a: 整个研究区域; b: 15°S 以北区域

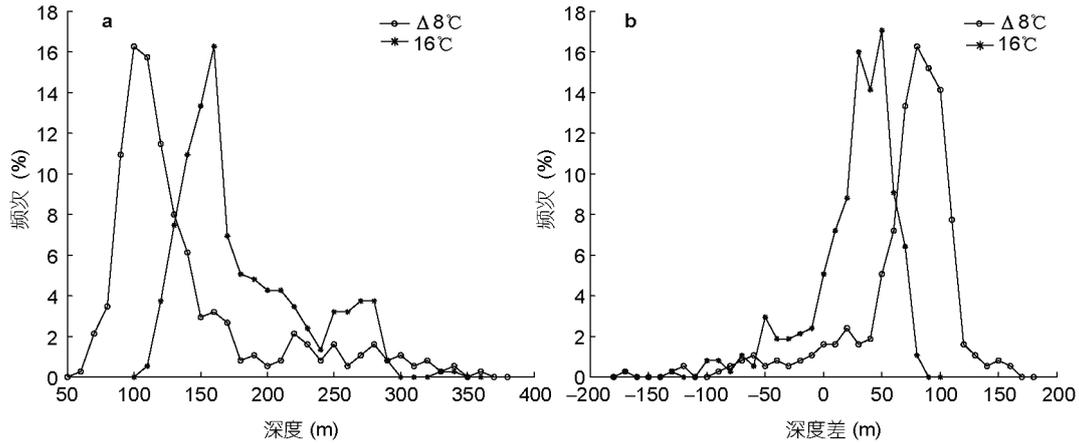


图7 黄鳍金枪鱼高值 CPUE 频数图

Fig.7 Fishing frequency of high yellowfin tuna CPUE

a: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线深度; b: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线深度与温跃层下界深度差值

出现, 适宜区间分布在 80—159m(75%)深度, 在中心渔场高值 CPUE 趋向于集中在 110—119m 深度。 16°C 等温线深度值在 110—340m 之间都有高值 CPUE 出现, 适宜区间分布在 120—219m(77%)深度之间, 中心渔场高值 CPUE 趋向于集中在 160m 深度附近。

热带印度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 $-170—160\text{m}$ 之间, 78.9%的高值 CPUE 区域深度差在 50—119m(图 7b)之间, 在中心渔场, 高值 CPUE 趋向于在 80m 深度差区间内。 16°C 等温线深度与温跃层下界深度差值在 $-170—80\text{m}$ (图 7b)之间, 83.7%的高值 CPUE 区域深度差在 0—79m 之间, 高值 CPUE 趋向于在 30—59m 深度差区间。

图8是 ECDF 分析结果。 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线、以及它们与温跃层下界深度差等4个变量和高值 CPUE 累积分布各不相同。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下 $D_{0.05}=0.07$, $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线对应的 D 值分别是0.035、0.046; $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线与温跃层下界距离对应的 D 值分别是0.036、0.043, 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个变量适宜分布区间分别是: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线 54—174m($115\pm 62\text{m}$, 图 8a); 16°C 等温线 118—212m ($165\pm 47\text{m}$, 图 8b); $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 深度差 34—126m($80\pm 46\text{m}$, 图 8c); 16°C 深度差 $-7—67\text{m}$ ($30\pm 37\text{m}$, 图 8d)。

3 讨论与分析

3.1 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 和 16°C 等温线分布

$\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度呈现出季节性分布特征, 而

16°C 等温线则没有明显的季节性变化。在空间上, $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 在 15°S 以南纬向区域, 全年等温线分布超过 200m, 尤其是西南季风期间, 纬度越高深度越大。 16°C 等温线深在阿拉伯海和马达加斯加纬向区域, 深度值超过 250m。在 $10^{\circ}\text{N}—15^{\circ}\text{S}$ 纬向区域和孟加拉湾 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 深度值低于 150m, 16°C 等温线深度值在 150m 左右。 16°C 等温线深度分布和温跃层下界深度分布十分相似(杨胜龙等, 2012), 据此可以推测, 印度洋高渔获率水温分布深度在温跃层下界附近区域。

3.2 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线深度和温跃层下界深度与黄鳍金枪鱼渔场关系

在三维空间上, 高值 CPUE 的空间分布表现出明显的积极性变化。 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度值大多小于 175m, 集中出现在 100—170m; 在西南季风期间, 15°S 以南区域, 在 150—300m 区域, 也有高值 CPUE 区域出现, 全年深度值超过 300m 的地方, CPUE 普遍较小。 16°C 等温线, 东北季风期间, 高值 CPUE 出现的地方深度值大多小于 200m, 西南季风期间, 在 $15^{\circ}—25^{\circ}\text{S}$ 深度可到达 250m, 但全年高值 CPUE 主要出现在 130—190m 深度, 深度值超过 300m 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(2000)指出, 在热带印度洋, 黄鳍金枪鱼适宜的温度范围是 $13—24^{\circ}\text{C}$, 其中 $15—17^{\circ}\text{C}$ 渔获率最高。Song 等(2008)研究得出在印度洋公海, 黄鳍金枪鱼活动密集的水层为 100—179m, 与渔获率最密切的水层是 120—140m, 水温为 $16—17^{\circ}\text{C}$ 。由此可以认为热带印度洋黄鳍金枪鱼高渔获率分布在 16°C 等温线附近。然而宋利明等(2004)报道, 在热带大西洋

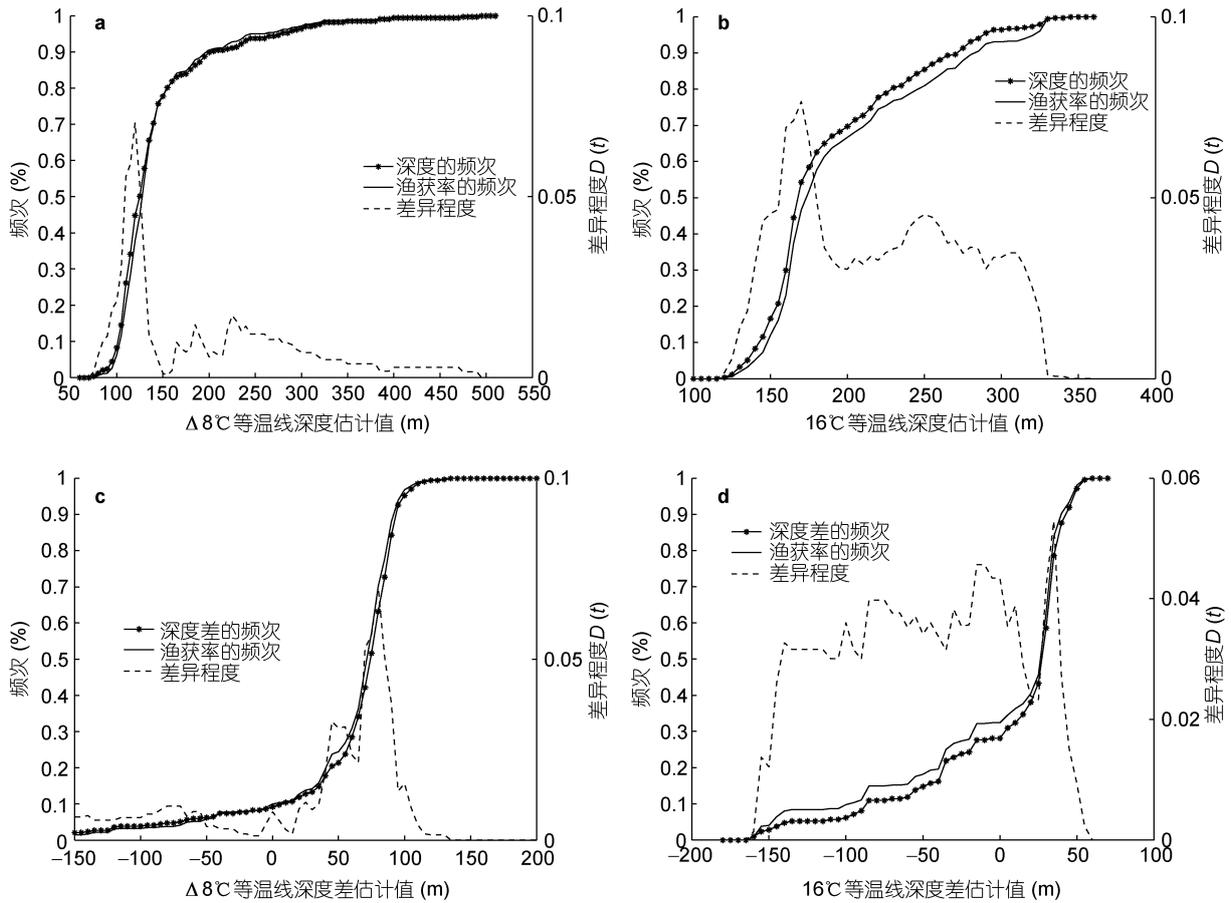


图 8 经验累积分布函数

Fig.8 ECDF for delta 8°C isothermal depth (a), 16°C isothermal depth(b), depth difference of delta 8°C isothermal depth(c), depth difference of 16°C isothermal depth (d) and fishing frequency of high yellowfin tuna CPUE
a: Δ8°C 等温线; b: 16°C 等温线; c: Δ8°C 等温线与温跃层下界距离; d: 16°C 等温线与温跃层下界距离

区域, 黄鳍金枪鱼的最适水层是 150—179m, 最适水温则是 13—14°C。相比热带印度洋区域, 分布于更深层冷水中, 表明黄鳍金枪鱼可以进入更深的冷水去索饵。

本文计算了温跃层下界深度和 Δ8°C、16°C 深度差与高渔获率空间分布关系, 各自的适宜分布深度分别是 39—129m、-9—63m。16°C 等温线深度分布和温跃层下界深度分布十分相似, Song 等(2008)调查期间, 调查点附近的温跃层下界温度为 15°C(杨胜龙等, 2012), 表明印度洋黄鳍高渔获率水温分布的深度在温跃层下界以上区域附近。采用与本文同样的方法, 在宋利明(2004)调查期间, 大西洋调查区域的温跃层下界深度值和温度值(图 9, 10)分别约为 200m 和 13°C。同样表明大西洋黄鳍高渔获率水温分布的深度在温跃层下界以上区域附近。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深度和温度值。热带大西洋和印度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。

3.3 黄鳍金枪鱼适宜分布区域

本文通过频次分析和 ECDF 方法得出热带印度洋黄鳍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: Δ8°C 等温线 100—169m; 16°C 等温线 140—229m; Δ8°C 深度差 50—119m; 16°C 深度差 0—60m。本文分析结果在时间和空间上都做了拓展, 同时可以通过上述分析结果寻找中心渔场位置, 同时确定投钩深度, 本文建议在热带印度洋延绳钓下钩深度在 160m 左右, 不超过 200m; 温跃层下界深度以上 20—30m。

3.4 数据及结论说明

本文采用的 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 22 a)做长时间平均分析, 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。本文的主旨是分析黄鳍金枪鱼历

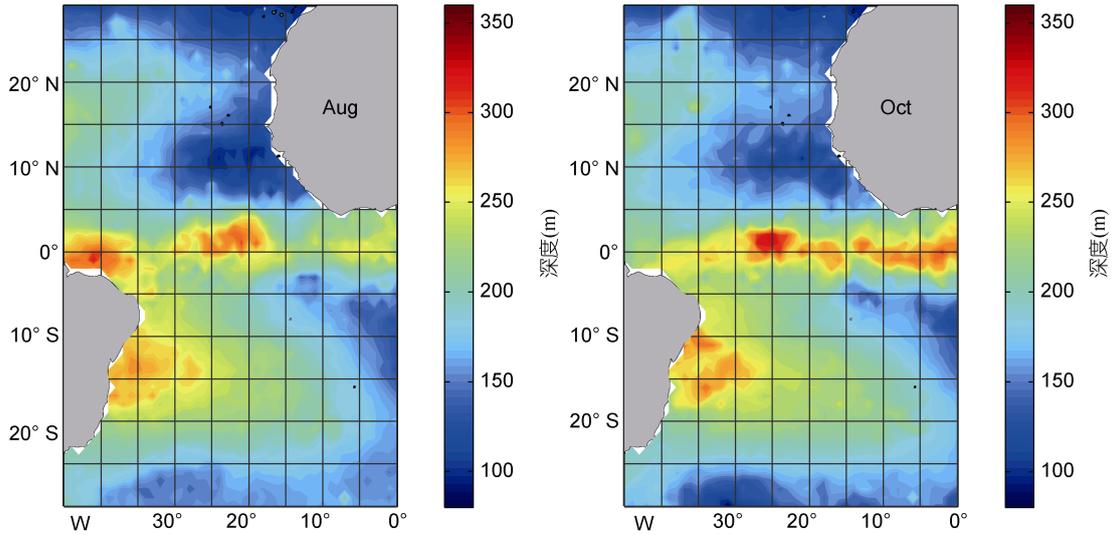


图 9 热带大西洋温跃层下界月平均深度等值线图

Fig.9 The monthly average depth of the lower boundary of thermocline of the tropic Atlantic

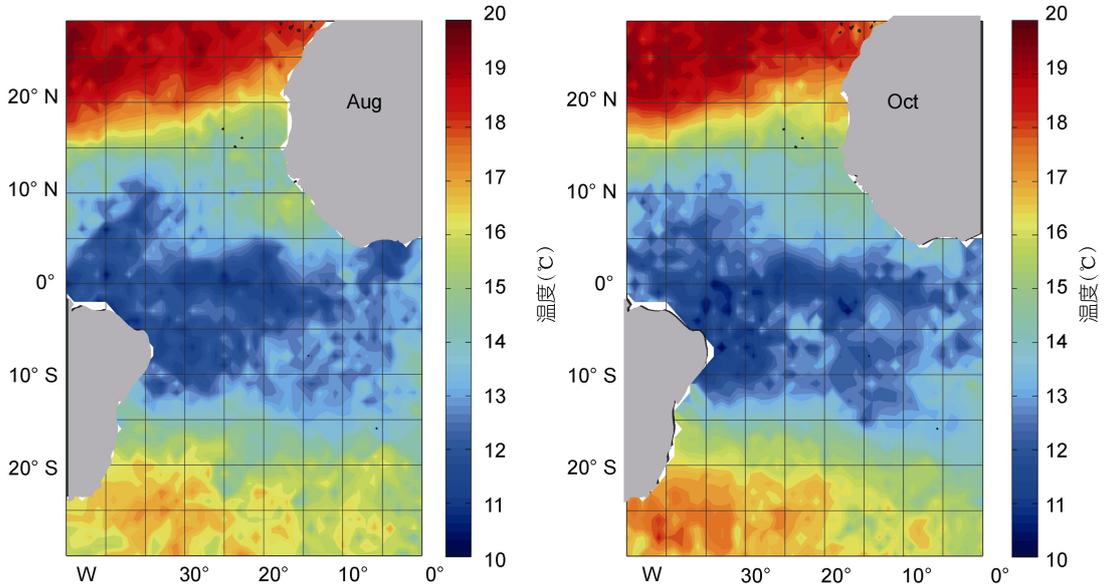


图 10 热带大西洋温跃层下界月平均温度等值线图

Fig.10 The monthly average temperature of the lower boundary of thermocline of the tropic Atlantic

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。采用多年时间序列数据进行平均来统计黄鳍金枪鱼渔场，平滑了资源状况、船队生产状况的影响。结果表明，印度洋次表层等温线深度没有明显季节变化，温跃层深度也没有明显的年际变化(邱东晓等, 2007)，因而其数据可以用于研究工作，生产数据和环境数据时间不同对分析结果产生的影响可以忽略。本文采用 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 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， $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 是国际金枪鱼组织统计的官方精度，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的可靠性，本文采用相同的研究方法，对 2007—2011 年 Argo 数据和同期生产数据进行分析，频次分析结果如图 11 所示。 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度值在 60—500m 之间都有高值 CPUE 出现，74.6% 的高值 CPUE 分布在 90—149m(图 11a)。 16°C 等温线深度值在 120—340m 之间都有高值 CPUE 出现，76.4% 的高值 CPUE 出现在 130—219m 之间(图 11a)。 $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线深度与温跃层下界深度差值在 -150—150m 之间，83.4% 的高值 CPUE 区域深度差在 50—119m(图 11b)之间。 16°C 等温线深度与温跃层下

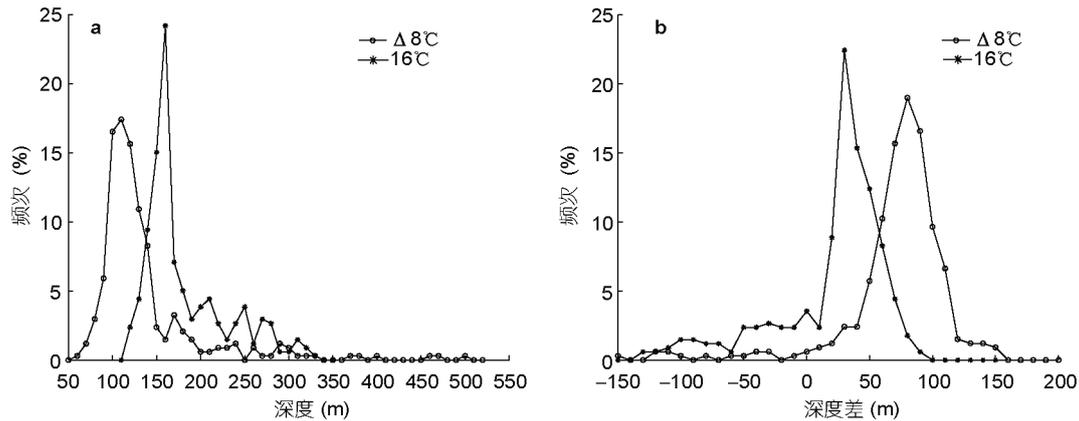


图 11 2007—2011 年黄鳍金枪鱼高值 CPUE 频数图

Fig.11 Fishing frequency of high yellowfin tuna CPUE from 2007 to 2011

a: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线深度; b: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 、 16°C 等温线深度与温跃层下界深度差值

界深度差值在 $-130\text{—}90\text{m}$ (图 11b)之间, 77.6%的高值 CPUE 区域深度差在 $0\text{—}79\text{m}$ 之间。ECDF 分析结果表明, 在显著性水平 $\alpha=0.02$ 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。高值 CPUE 区域 4个变量最适区间分别是: $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 等温线为 $62\text{—}178\text{m}(120\pm 58\text{m})$; 16°C 等温线 $127\text{—}223\text{m}(175\pm 48\text{m})$; $\Delta 8^{\circ}\text{C}$ 深度差 $28\text{—}142\text{m}(85\pm 57\text{m})$; 16°C 深度差 $-7\text{—}79\text{m}(35\pm 44\text{m})$ 。2007—2011 年 Argo 数据和同期生产数据分析结果和文中结果差异不大, 本文研究结果可以用来了解印度洋黄鳍金枪鱼栖息习性, 为生产作业提供理论支持。

参 考 文 献

- 杨胜龙, 马军杰, 伍玉梅等, 2008. 基于 Kriging 方法 Argo 数据重构太平洋温度场研究. 海洋渔业, 30(1): 13—18
- 杨胜龙, 张禹, 张衡等, 2012. 热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层关系. 生态学报, 32(3): 671—679
- 邱东晓, 黄菲, 杨宇星, 2007. 东印度洋-西太平洋暖池的年代际变化特征研究. 中国海洋大学学报, 37(4): 525—532
- 宋利明, 陈新军, 许柳雄, 2004. 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, 35(1): 64—68
- Akima H, 1970. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. J Associ Comput Maeh, 17(4): 589—600
- Block B A, Keen J E, Castillo B *et al*, 1997. Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extent of its range. Mar Bio, 130(1): 119—132
- Brill R W, Block B A, Boggs C H *et al*, 1999. 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. Mar Bio, 133(3): 395—408
- Cayre P, Marsac F, 1993. Modelling the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) vertical distribution using sonic tagging results and local environmental parameters. Aquat Liv Res, 6(1): 1—14
- Dagorn L, Holland K N, Hallier J P *et al*, 2006. Deep diving behavior observed in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). Aquat Liv Res, 19(1): 85—88
- Holland K N, Brill R W, Chang R K C, 1990. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices. Fish Bull, 88: 493—507
- Josse E, Bach P, Dagorn L, 1998. Simultaneous observations of tuna movements and their prey by sonic tracking and acoustic surveys. Hydrobiologia, 371—372: 61—69
- Mohri M, Nishida T, 2000. Consideration on distribution of adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Indian Ocean based on Japanese tuna longline fisheries and survey information. IOTC Proc, 3: 276—282
- Rao R R, Sivakumar R, 1996. Seasonal variability of near-surface isothermal layer and thermocline characteristics of the tropical Indian Ocean. Meteorol Atmos Phys, 61(3—4): 201—212
- Schaefer K M, Fuller D W, Block B A, 2007. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. Mar Biol, 152(3): 503—525
- Schaefer K M, Fuller D W, Block B A, 2009. 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. In: Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N *et al* eds. Reviews: methods and technologies in fish biology and fisheries, vol 9, tagging and tracking of marine animals with electronic devices. Springer, Berlin: 121—144
- Song L M, Zhang Y, Xu L X *et al*, 2008. Environmental preferences of longlining for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the tropical high seas of the Indian Ocean. Fish Oceanogr, 17(4): 239—253

HORIZONTAL AND VERTICAL DISTRIBUTION OF YELLOWFIN TUNA *THUNNUS ALBACARES* IN THE TROPICAL INDIAN OCEAN

YANG Sheng-Long^{1,2}, HUA Cheng-Jun¹, JING Shao-Fei¹, FAN Xiu-Mei¹, ZHANG Sheng-Mao¹, WU Yu-Mei¹

(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 and Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China)

Abstract To investigate the distribution of isothermal depth in subsurface temperature for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) fishing grounds in the tropical Indian Ocean, figures of isothermal depths at 16°C and $\Delta 8^\circ\text{C}$ (temperature difference between 8°C and sea surface temperature, and their spatial overlay maps were plotted. The figures were depicted by monthly temperature profile data from Argo buoys and the monthly CPUE (catch per unit effort) of yellowfin tuna longlines data from IOTC. Meanwhile, depth difference between 16°C and $\Delta 8^\circ\text{C}$ with the lower boundary depth of thermocline was also calculated to find possible relationship between yellowfin tuna vertical distribution and thermocline depth. Result suggests that high CPUE distribution showed obvious seasonal variation. The high CPUE appeared in the ground where the 16°C isothermal depth was shallower than 200 m during northeast monsoon, and reached to 250m in the latitude area between 15°—25°S during the southwest monsoon. In addition, the CPUE concentrated between 130 and 190m, while CPUE became small in depth of over 300 m. The high CPUE appeared in the place where the $\Delta 8^\circ\text{C}$ isothermal depth was shallower than 175m and most distributed between 100—170m; the high CPUE appeared between 150 and 300m in the south of 15°S during southwest monsoon while the value of CPUE was low in the depth of more than 300 m. The vertical distribution of high hook rate concentrated in the area to the north of 15°S, especially during the southwest monsoon. Frequency analysis and the empirical cumulative distribution function were used to compute the optimum range of subsurface factors. The optimum depth range for 16°C isothermal depth was 120—209 m and that for $\Delta 8^\circ\text{C}$ was 80—159 m. The optimum depth difference ranges to the low boundary of thermocline were 0—59m for 16°C isothermal depth and 50—119m for $\Delta 8^\circ\text{C}$. The findings were confirmed with the Kolmogorov-Smirnov test. However, the suitable distribution interval and vertical depth rang in the central fishing ground of yellowfin tuna determined in this study are preliminary, and we hope these results may provide a reference for the longline production operation and management in this marine resource.

Key words *Thunnus albacares*; subsurface environment; the tropic Indian Ocean; Argo