

吉尔伯特群岛海域大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*) 栖息环境综合指数*

宋利明^{1, 2, 3} 杨嘉樑³ 武亚苹³ 惠明明³ 吕凯凯³

(1. 国家远洋渔业工程技术研究中心 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室 上海 201306;
3. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306)

提要 根据 2010 年 10 月—2011 年 1 月在吉尔伯特群岛海域利用金枪鱼延绳钓调查所取得的 32 个站点的大眼金枪鱼渔获数据, 以及测得的温度、盐度、叶绿素、溶解氧浓度、水平海流及垂直海流数据, 采用分位数回归的方法研究了各水层(80—240m, 每 40m 为一层)中各环境因子与大眼金枪鱼渔获率的关系, 建立“栖息环境综合指数(integrated habitat index, *IHI*)模型”, 并利用另外 8 个站点的数据验证研究结果。结果表明, (1) *IHI* 模型的预测能力较好; (2) 不同的水层影响大眼金枪鱼分布的环境因子不同, 在较浅的水层(80—200m), 大眼金枪鱼的渔获率与溶解氧浓度和海流相关, 而在较深水层(>200m)则仅与温度相关; (3) 大眼金枪鱼较适宜的栖息水层为 120—160m; (4) 大眼金枪鱼 *IHI* 指数分布较高的两个海域分别为 2—3°S, 169—175°E 与 1—3°S, 178—180°E, 建议在上述两个海域作业时, 尽可能使钓具沉降到 120—160m 的水层, 以达到减少兼捕渔获物, 同时提高生产效率。

关键词 大眼金枪鱼, 栖息环境综合指数, 分位数回归, 吉尔伯特群岛

中图分类号 Q958

大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)是延绳钓捕捞的总价值最高的热带金枪鱼鱼种, 大眼金枪鱼延绳钓渔业已成为世界上重要的商业性渔业(Song *et al.*, 2010)。国内外对各海域的大眼金枪鱼资源分布(Maunders *et al.*, 2006)及其与海洋环境的关系(Dagorn *et al.*, 2000; Biglow *et al.*, 2002; 宋利明等, 2004, 2006, 2008, 2009, 2010)进行了广泛的研究。宋利明等(2007)和 Song 等(2010)利用分位数回归(Koenker *et al.*, 1978)的方法分别对大西洋中部和印度洋中部大眼金枪鱼栖息环境综合指数进行了研究。目前, 我国远洋渔业企业计划在基里巴斯共和国吉尔伯特群岛海域发展大眼金枪鱼延绳钓渔业, 为了掌握该海域大眼金枪鱼的栖息环境、采用高效生态友好型捕捞技术并遵守中西太平洋渔业委员会的管理规定, 有必要对吉尔伯特群岛

海域大眼金枪鱼栖息环境综合指数进行研究, 从而达到在可持续利用该渔业资源的前提下提高该鱼种的渔获率并减少其它物种的兼捕。本文通过 2010 年 9 月—2011 年 1 月在吉尔伯特群岛海域海上调查得到的大眼金枪鱼渔获数据、温度、盐度、溶解氧浓度、叶绿素浓度及三维海流等多种环境数据, 采用分位数回归的方法(宋利明等, 2007, 2011a; Song *et al.*, 2010)研究吉尔伯特群岛海域大眼金枪鱼在多种环境因子共同作用下的栖息环境选择, 建立栖息环境综合指数(*IHI*)模型、确定影响该海域大眼金枪鱼空间分布的关键因子, 并利用同一水域的实测数据对模型的有效性进行验证。研究结果可为提高吉尔伯特群岛海域大眼金枪鱼的渔获率、预报大眼金枪鱼渔情和研究其它鱼类的栖息环境选择提供参考。

* 国家高技术研究发展计划(863)资助, 2012AA092302 号; 上海市教育委员会科研创新项目, 12ZZ168 号; 高等学校博士学科点专项科研基金联合资助, 20113104110004 号; 2009 年度农业部远洋渔业探捕项目资助, D8006090066 号。宋利明, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: lmsong@shou.edu.cn

收稿日期: 2011-06-12, 收修改稿日期: 2011-09-20

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 调查船 执行本次海上调查任务的渔船为延绳钓渔船“深联成 901”, 主要的船舶参数如下: 总长 26.8m、型宽 5.20m、型深 2.20m、总吨 102.00t、净吨 30.00t, 主机功率 400kW。

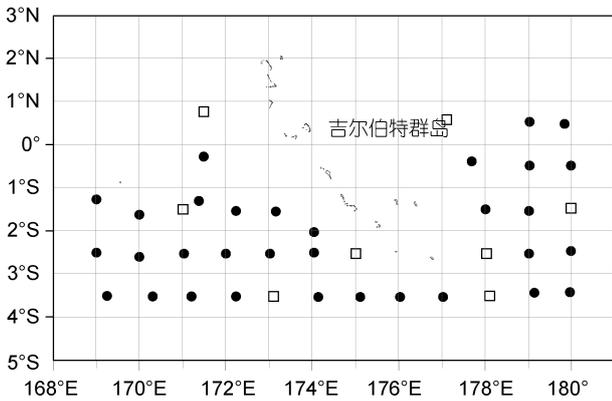


图 1 调查站点

Fig.1 Survey sites

注: 表示建模站点, □表示模型验证站点

1.1.2 调查时间与调查海区 调查时间为 2010 年 9 月 24 日—2011 年 1 月 26 日。有效调查站点共计 40 个, 调查海域为 0°48' N—3°34' S, 169°00' E—179°59' E, 其中 32 个站点的数据用来建立大眼金枪鱼栖息环境综合指数模型, 其余 8 个站点的数据用来验证该模型(图 1)。

1.1.3 调查渔具与渔法 本次调查船上原来所用的钓具(简称为传统钓具)结构为: 浮子直径 360mm, 浮子绳直径 5.0mm、长 25m, 干线直径 4.0mm, 支绳第一段为直径 3.5mm 的硬质聚丙烯、长 1.5m 左右, 支绳第二段为直径 1.8mm 的单丝、长 18m, 支绳第三段为直径 1.2mm 的钢丝、长 0.5m、全长 20m。钓具分为传统钓具、试验钓具和防止海龟误捕的钓具, 试验钓具的结构见文献(宋利明等, 2010)。传统钓具、试验钓具示意图见图 2。其中防止海龟误捕的钓具仅用圆型钓钩(图 3a)替代环型钓钩(图 3b)(宋利明等, 2010, 2011a)。以下分析过程中, 因防止海龟误捕钓具与传统钓具大眼金枪鱼的渔获率无显著性差异, 把防止海龟误捕钓具的钓钩数和钓获

的大眼金枪鱼尾数计入传统钓具中(宋利明等, 2010, 2011b)。

调查期间, 一般情况下, 06:00—09:00 投绳, 持续时间为 3h 左右; 15:30—21:00 起绳, 持续时间为 5.5h 左右; 船长根据探捕调查计划决定当天投绳的位置, 受条件所限实际的投绳位置和计划位置会有一些的偏差。

船速一般为 7.5 节、出绳速度一般为 10.5 节、传统钓具两浮子间的钓钩数为 25 枚、两钓钩间的时间间隔为 8s。每天投放传统钓具 750 枚左右。投放试验钓具时, 靠近浮子的第 1 枚钓钩空缺、第 2 枚钓钩换成 4 种不同重量的重锤、两浮子间的钓钩数为 21 枚, 其它参数不变, 试验钓具每种 42 枚, 共 16 组, 每天投放 8 组(1—8 组、9—16 组)。另外, 每天投放 100 枚防海龟误捕的圆型钩。

1.1.4 调查方法与内容 本次调查记录每天的作业参数(投绳位置、投绳的开始时间、投绳结束时间、投钩数、投绳时船速和出绳速度、两枚钓钩间的时间间隔和两浮子间的钓钩数)、大眼金枪鱼钓获尾数、钓获大眼金枪鱼的钓钩编号, 用加拿大 RBR 公司的 XR-620 多功能水质仪测定各站点 0—450m 的温度、

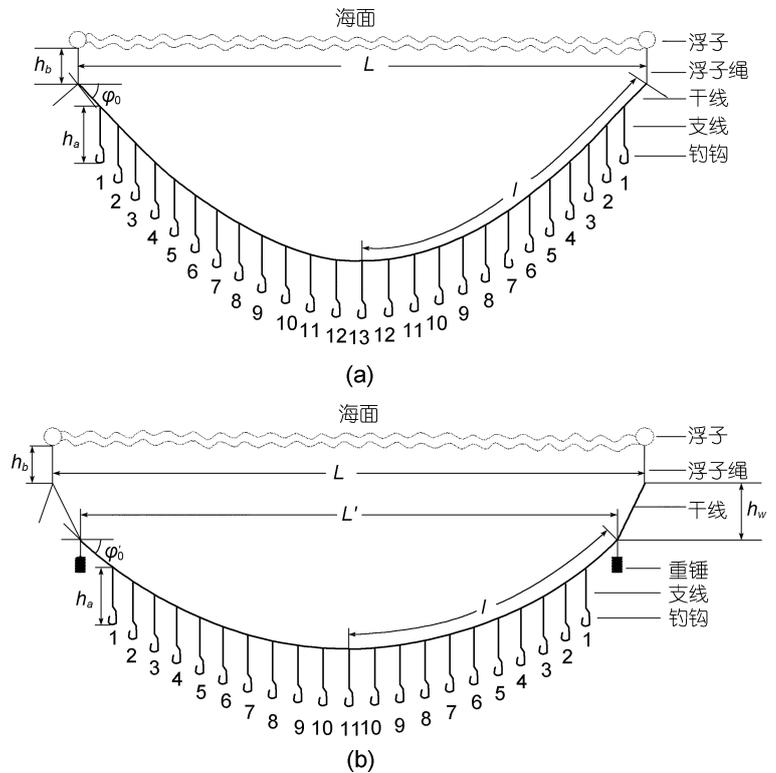


图 2 两种渔具结构

Fig.2 The configuration of two fishing gears a. 传统钓具; b. 试验钓具

盐度、叶绿素和溶解氧浓度,用 TDR 2050 测定了部分钓钩在海水中的实际深度及其变化,用挪威 NORTEK 公司的 3 维海流计测定了各站点 0—450m 的海流数据。

1.2 数据处理方法

1.2.1 钓钩深度计算方法

本文采用文献(Cao *et al.*, 2011)计算钓钩深度的方法,传统钓具的理论深度按照日本吉原有吉的理论钓钩深度计算公式(斋藤昭二, 1992),得出各钓钩编号的理论深度,即:

$$D_t = h_a + h_b + l \left[\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \phi_0} - \sqrt{\left(1 - \frac{2\xi}{n}\right)^2 + \text{ctg}^2 \phi_0} \right] \quad (1)$$

$$L = V_2 \times n \times t \quad (2)$$

$$l = \frac{V_1 \times n \times t}{2} \quad (3)$$

$$k = \frac{L}{2l} = \frac{V_2}{V_1} = \text{ctg} \phi_0 \text{sh}^{-1}(\text{tg} \phi_0) \quad (4)$$

式(1)—(4)中, D_t 为传统钓具理论深度(m); h_a 为支线长(m); h_b 为浮子绳长(m); l 为干线弧长的一半; ϕ_0 为干线与浮子绳连接点上切线与水平面的交角,与 k 有关,在实际作业中很难测得 ϕ_0 ; ξ 为 2 浮子间的钓钩编号, n 为 2 浮子间干线的分段数; L 为 2 浮子间海面上的距离; V_2 为船速(m/s); t 为投绳时前后 2 枚支线间的时间间隔(m); V_1 为投绳机出绳速度(m/s)。

试验钓具的理论深度则需要做相应的修正,得出理论深度计算公式,即:

$$D'_t = h_a + h_b + h_w + l \left[\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \phi'_0} - \sqrt{\left(1 - \frac{2\xi}{m}\right)^2 + \text{ctg}^2 \phi'_0} \right] \quad (5)$$

$$L' = V_2(m + 4)t - 2 \sqrt{(2V_1 t)^2 - h_w^2} \quad (6)$$

$$l = \frac{V_1 \times m \times t}{2} \quad (7)$$

$$k = \frac{L'}{2l} = \text{ctg} \phi'_0 \text{sh}^{-1}(\text{tg} \phi'_0) \quad (8)$$

式(5)—(8)中, D'_t 为试验钓具理论深度(m); h_w 为挂重锤处干线的垂度(m); L' 为重锤间的水平距离(m); m 为 2 重锤间干线的分段数; ϕ'_0 为挂重锤处干线与浮子绳连接点上切线与水平面的交角;其它则同式(1)—(4)。

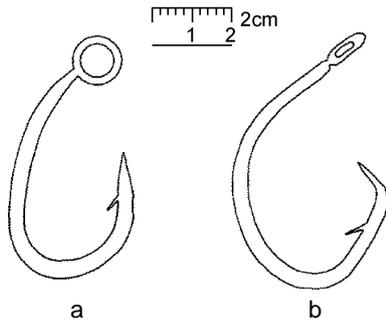


图3 两种钓钩钩型

Fig.3 Two hook types

a. 环型钩; b. 圆型钩

应用 SPSS13.0 软件,采用多元回归分析方法建立 TDR 测得的深度、理论钓钩深度和海洋环境因子的关系模型,从而得出拟合钓钩深度计算公式(Cao *et al.*, 2011):

$$D_f = D_t \cdot 10^{-0.098 - 0.24 \lg(\xi) - 0.083 \lg(V_g) - 0.016 \lg(\sin \gamma)} \quad (9)$$

$$D'_f = D'_t \cdot 10^{0.081 - 0.386 \lg(\xi) - 0.064(V_g)} \quad (10)$$

式(9)—(10)中, D_f 和 D'_f 分别为传统钓具和试验钓具钓钩的预测深度(m); V_g 为钓具漂流速度(m/s); $\sin \gamma$ 为风流合压角的正弦值;其它同式(1)—(8)。

1.2.2 每个站点各水层大眼金枪鱼的渔获率 $CPUE_{ij}$ 本次调查渔具的作业深度范围为 40—240m,每一水层为 40m,共分成 5 层,即 40—80、80—120、120—160、160—200 和 200—240 m。其中每个站点各水层的渔获率 $CPUE_{ij}$ 计算方法如下(Song *et al.*, 2008, 2009, 2011; 宋利明等, 2011a):

$$CPUE_{ij} = \frac{N_{ij}}{H_{ij}} \times 1000 \quad (11)$$

式(11)中, N_{ij} 为第 i 站点、 j 水层钓获的大眼金枪鱼的尾数, H_{ij} 为第 i 站点、 j 水层内所投放的钓钩数。其中, $i = 1, 2, 3, \dots, 40$, 在钓获的 220 尾大眼金枪鱼中,记录钩号(即钓钩深度)的为 216 尾(取样覆盖率为 98.18%)。

1.2.3 每个站点大眼金枪鱼的渔获率 $CPUE_i$ 每个站点大眼金枪鱼的渔获率 $CPUE_i$ 定义如下(Song *et al.*, 2008, 2009, 2011; 宋利明等, 2011a):

$$CPUE_i = \frac{N_i}{f_i} \times 1000 \quad (12)$$

式(12)中, N_i 为第 i 站点钓获的大眼金枪鱼尾数, f_i 为第 i 站点所投放的钓钩数。其中, $i = 1, 2, 3, \dots, 40$ 。

1.2.4 不同水层大眼金枪鱼的渔获率 $CPUE_j$ 不同水层大眼金枪鱼的渔获率定义为(Song *et al.*, 2008, 2009, 2011; 宋利明等, 2011a):

$$CPUE_j = \frac{N_j}{f_j} \times 1000 \quad (13)$$

式(13)中, N_j 为第 j 水层钓获大眼金枪鱼的尾数, f_j 为第 j 水层内所投放的钓钩数。

1.2.5 计算基于各水层渔获率为权重的环境因子 本文中,环境因子包括温度、盐度、溶解氧浓度、叶绿素、水平海流和垂直海流。基于各水层渔获率为权重的环境因子值的计算公式为(Song *et al.*, 2010; 宋利明等, 2011a):

$$F_i = (CPUE_{ij} F_{ij}) / (CPUE_j) \quad (14)$$

式(14)中, F_i 为第 i 站位的加权环境因子(T_i 、 S_i 、 DO_i 、 FIC_i 、 HC_i 和 VC_i)值, $CPUE_j$ 表示第 j 水层大眼金枪鱼的渔获率, F_{ij} 表示第 i 站点、 j 水层的环境因子值(其中 T_{ij} 、 S_{ij} 、 DO_{ij} 和 FIC_{ij} 为 XR-620 测得的该水层内温度、盐度、溶解氧浓度和叶绿素浓度的算术平均值, HC_{ij} 和 VC_{ij} 为三维海流计测得的该水层内水平海流和垂直海流速度的算术平均值)。

1.2.6 建立分位数回归模型 分位数回归模型最早由 Koenker 等(1978), 模型建立的具体方法参见文献(宋利明等, 2007, 2011a; Song *et al*, 2010)。本文采用美国地理调查局中陆生态科学研究中心(Midcontinent Ecological Science Center, U.S. Geological Survey)开发的 Blossom 统计学软件进行分位数回归(Cade *et al*, 2001)。

1.2.7 不同水层大眼金枪鱼栖息环境综合指数(IHI_{ij}) 根据不同站点、不同水层的渔获率 $CPUE_{ij}$ 与该水层内温度 T_{ij} 、盐度 S_{ij} 、溶解氧浓度 DO_{ij} 、叶绿素 FIC_{ij} 、水平海流 HC_{ij} 和垂直海流 VC_{ij} 的最适模型方程, 即 $CP\hat{U}E_{ij}$, 利用该模型计算 IHI_{ij} 指数。

应用分位数回归得出不同站点、不同水层渔获率($CPUE_{ij}$)与该水层温度 T_{ij} 、盐度 S_{ij} 、溶解氧浓度 DO_{ij} 、叶绿素 FIC_{ij} 、水平海流 HC_{ij} 和垂直海流 VC_{ij} 之间回归方程的一般形式为:

$$CP\hat{U}E_{ij} = C_{ij} + a_{ij}T_{ij} + b_{ij}S_{ij} + c_{ij}FIC_{ij} + d_{ij}DO_{ij} + e_{ij}HC_{ij} + f_{ij}VC_{ij} + g_{ij}TS_{ij} + h_{ij}TFIC_{ij} + k_{ij}TDO_{ij} + l_{ij}THC_{ij} + m_{ij}TVC_{ij} + o_{ij}SFIC_{ij} + p_{ij}SDO_{ij} + q_{ij}SHC_{ij} + r_{ij}SVC_{ij} + s_{ij}FICDO_{ij} + t_{ij}FICHC_{ij} + u_{ij}FICVC_{ij} + v_{ij}DOHC_{ij} + w_{ij}DOVC_{ij} + x_{ij}HCVC_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (15)$$

式(15)中, C_{ij} 为常数项, 参数 TS_{ij} 、 $TFIC_{ij}$ 、 TDO_{ij} 、 THC_{ij} 、 TVC_{ij} 、 $SFIC_{ij}$ 、 SDO_{ij} 、 SHC_{ij} 、 SVC_{ij} 、 $FICDO_{ij}$ 、 $FICHC_{ij}$ 、 $FICVC_{ij}$ 、 $DOHC_{ij}$ 、 $DOVC_{ij}$ 和 $HCVC_{ij}$ 分别表示温度和盐度、温度和叶绿素、温度和溶解氧浓度、温度和水平海流、温度和垂直海流、盐度和叶绿素、盐度和溶解氧浓度、盐度和水平海流、盐度和垂直海流、叶绿素和溶解氧浓度、叶绿素和水平海流、叶绿素和垂直海流、溶解氧浓度和水平海流、溶解氧浓度和垂直海流及水平海流和垂直海流之间的交互作用项, ε_{ij} 为误差项。

$$IHI_{ij} = \frac{CP\hat{U}E_{ij}}{CP\hat{U}E_{ij}^{\max}} \quad (16)$$

式(16)中, $CP\hat{U}E_{ij}^{\max}$ 指各个水层中 $CP\hat{U}E_{ij}$ 的最大值。

1.2.8 整个水体栖息环境综合指数 \overline{IHI}_i 大眼金枪鱼整个水体的渔获率($CPUE_i$)与对应站点的加权平

均温度 T_i 、盐度 S_i 、溶解氧浓度 DO_i 、叶绿素 FIC_i 、水平海流 HC_i 和垂直海流 VC_i 及交互项 TS_i 、 $TFIC_i$ 、 TDO_i 、 THC_i 、 TVC_i 、 $SFIC_i$ 、 SDO_i 、 SHC_i 、 SVC_i 、 $FICDO_i$ 、 $FICHC_i$ 、 $FICVC_i$ 、 $DOHC_i$ 、 $DOVC_i$ 和 $HCVC_i$, 共 21 个变量, 建立模型, 最后用 $CP\hat{U}E_i$ 计算 \overline{IHI}_i 指数。分位数回归的一般形式为:

$$CP\hat{U}E_i = C_i + a_iT_i + b_iS_i + c_iFIC_i + d_iDO_i + e_iHC_i + f_iVC_i + g_iTS_i + h_iTFIC_i + k_iTDO_i + l_iTHC_i + m_iTVC_i + o_iSFIC_i + p_iSDO_i + q_iSHC_i + r_iSVC_i + s_iFICDO_i + t_iFICHC_i + u_iFICVC_i + v_iDOHC_i + w_iDOVC_i + x_iHCVC_i + \varepsilon_i \quad (17)$$

式(17)中, C_i 为常数项, a_i 、 b_i 、...、 x_i 为各项系数, ε_i 为误差项。

\overline{IHI}_i 指数计算的公式如下:

$$\overline{IHI}_i = \frac{CP\hat{U}E_i}{CP\hat{U}E_i^{\max}} \quad (18)$$

式(18)中, $CP\hat{U}E_i^{\max}$ 指整个水体的 $CP\hat{U}E_i$ 中的最大值。

1.2.9 绘制 IHI 分布图 根据上文中 IHI 的估计值, 使用日本环境模拟实验有限公司开发的 Marine explore 4.0 软件绘制出 IHI 等值线分布图。

1.2.10 IHI 模型的预测能力及验证 将用于建模的 32 个站点相应环境变量代入模型, 得出各个水层以及整个水体的 IHI 预测值并分别计算其预测值与实测大眼金枪鱼 $CPUE$ 间的泊松相关系数, 判断模型的预测能力(Song *et al*, 2010; 宋利明等, 2011a)。不同水层预测 IHI 的算术平均值 IHI_j 与对应的各水层实测大眼金枪鱼 $CPUE_j$ 进行比较, 并计算其泊松相关系数来判断模型的预测能力(Song *et al*, 2010; 宋利明等, 2011a)。应用成对双样本均值分析 t -检验的方法分别计算用于模型验证的 8 个站点的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ (包括各个水层的 $CPUE_{ij}$ 与整个水体的 $CPUE_i$) 的泊松相关系数并进行差异显著性检验来判断 IHI 模型的可靠性(Song *et al*, 2010; 宋利明等, 2011a)。

2 结果

2.1 不同水层 IHI_{ij} 指数及其分布

应用分位数回归最后得到不同水层的渔获率回归方程, 具体每个水层的各个参数见表 1。对于 40—80m 水层, 由于每个变量的 P 值均大于 0.05, 故不能得出渔获率与环境变量之间关系的回归模型。

从表 1 得, 影响不同水层大眼金枪鱼渔获率的关键环境因子不同。4 个水层内的大眼金枪鱼 IHI_{ij} 指数分布分别如图 4 所示。不同水层 IHI_{ij} 指数分布存在

表 1 最佳模拟方程的参数估计
Tab.1 Estimation parameters of optimal simulation equation

水层	80—120m		120—160m		160—200m		200—240m	
	0.80		0.99		0.85		0.90	
分位数	估计值	P	估计值	P	估计值	P	估计值	P
C_{ij} (constant)	512.26		-1400.48		-90.16		27.64	
a_{ij} (T_{ij})	0		0		0		-1.31	0.011
b_{ij} (S_{ij})	0		30.34	0.002	0		0	
c_{ij} (FIC_{ij})	0		0		0		0	
d_{ij} (DO_{ij})	-114.15	0.033	90.72	0.002	38.02	0.025	0	
e_{ij} (HC_{ij})	-766.85	0.050	0		171.46	0.029	0	
f_{ij} (VC_{ij})	-39.61	0.006	0		-55.03	0.010	0	
g_{ij} (TS_{ij})	0		0		0		0	
h_{ij} ($TFIC_{ij}$)	0		0		0		0	
k_{ij} (TDO_{ij})	0		0		0		0	
l_{ij} (THC_{ij})	0		0		0		0	
m_{ij} (TVC_{ij})	0		0		0		0	
o_{ij} ($SFIC_{ij}$)	0		0		0		0	
p_{ij} (SDO_{ij})	0		0		0		0	
q_{ij} (SHC_{ij})	0		0		0		0	
r_{ij} (SVC_{ij})	0		0		0		0	
s_{ij} ($FICDO_{ij}$)	0		0		0		0	
t_{ij} ($FICHC_{ij}$)	0		0		0		0	
u_{ij} ($FICVC_{ij}$)	0		0		0		0	
v_{ij} ($DOHC_{ij}$)	173.69	0.022	0		-68.76	0.020	0	
w_{ij} ($DOVC_{ij}$)	0		0		0		0	
x_{ij} ($HCVC_{ij}$)	0		0		0		0	

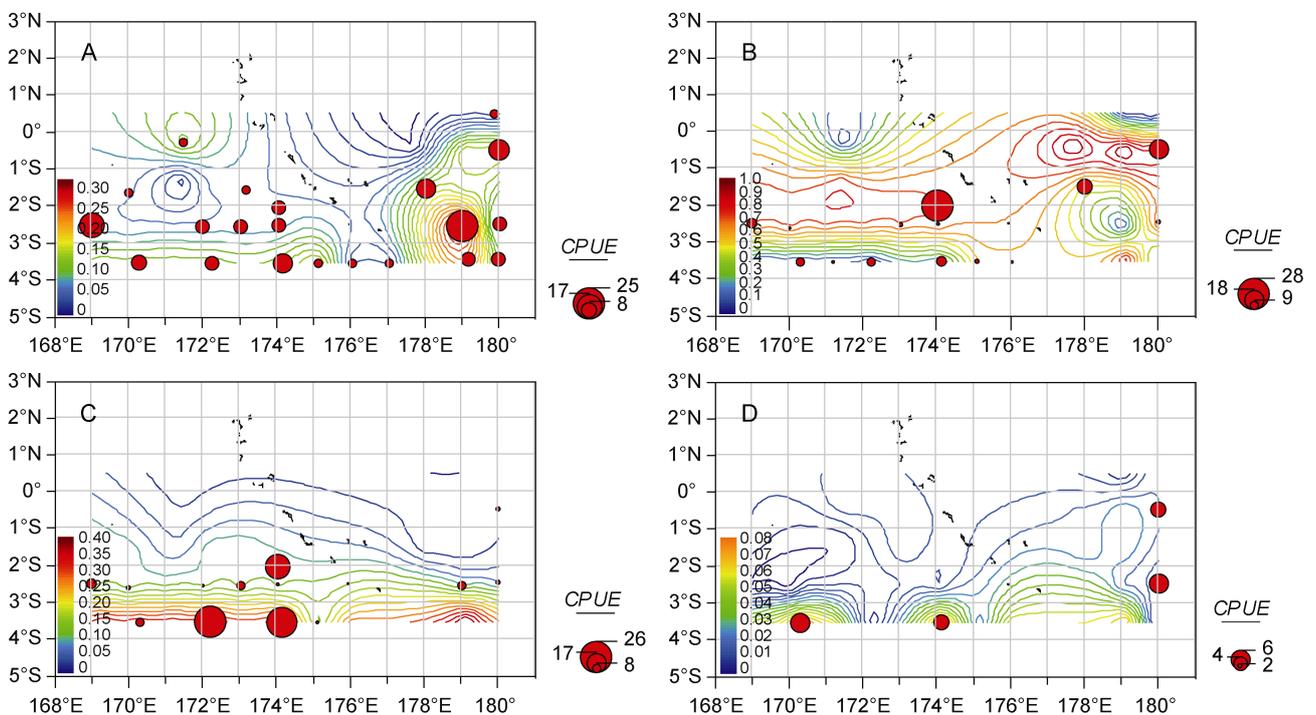


图 4 吉尔伯特群岛海域各水层中大眼金枪鱼 IHI_{ij} 分布

Fig.4 The bigeye tuna IHI_{ij} distribution of various water layers in waters near Gilbert Islands

注: A. 80—120m; B. 120—160m; C. 160—200m; D. 200—240m。图中不同颜色深度的图例表示 IHI_{ij} 的取值大小(无量纲); CPUE 数据单位为尾/千钩

差异(0.02—0.89), 其中指数较高的区域见表 2, 从表 2 得, 120—160m 水层大眼金枪鱼的 IHI_{ij} 指数最高(0.24—0.89), 而 200—240m 水层大眼金枪鱼的 IHI_{ij} 指数最低(0.02—0.08)。

2.2 整个水体的 \overline{IHI}_i 指数及其分布

应用分位数回归方法, 得出整个水体的最佳分位数回归方程如下:

$$CP\hat{U}E_i = -457.34 + 8.243T_i + 7.52S_i + 1024.15FIC_i -$$

$$50.76TFIC_i \quad (\theta=0.8) \quad (19)$$

由式(19)得, 模型中包含温度、盐度、叶绿素及温度与叶绿素的交互项这 4 个变量, 它们的 P 值依次为 0.03、0.049、0.02 及 0.03。

从吉尔伯特群岛海域大眼金枪鱼 \overline{IHI}_i 空间分布(图 5)中得出, \overline{IHI}_i 指数较高的海域共有两个(表 2), 分别位于吉尔伯特群岛海域的东南部和西南部。其 \overline{IHI}_i 指数范围分别为(0.64—0.88)和(0.51—0.94)。

表 2 相对较高的 IHI_{ij} 、 \overline{IHI}_i 的海区范围及其对应的 IHI 值
Tab.2 The area boundary with the relatively greater IHI_{ij} , \overline{IHI}_i and their IHI values

栖息环境综合指数	水层(m)	相对较高的 IHI 海区范围	IHI 值
IHI_{ij}	80—120	2—3°S, 178—180°E	0.24—0.32
	120—160	0—1°S, 176—180°E	0.24—0.89
		1—3°S, 169—174°E	0.73—0.77
	160—200	3—4°S, 169—180°E	0.14—0.40
	200—240	3—4°S, 169—180°E	0.02—0.08
\overline{IHI}_i	—	2—3°S, 169—175°E	0.64—0.88
	—	1—3°S, 178—180°E	0.51—0.94

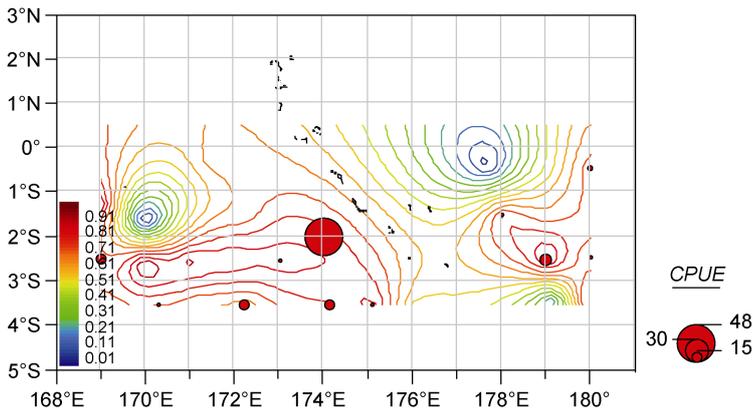


图 5 吉尔伯特群岛海域整个水体中大眼金枪鱼 \overline{IHI}_i 分布
Fig.5 The bigeye tuna \overline{IHI}_i distribution of whole water column in waters near Gilbert Islands

注: 图中不同颜色深度的图例表示 \overline{IHI}_i 的取值大小(无量纲); CPUE 数据单位为尾/千钩

2.3 IHI 模型的预测能力

将用于建模的 32 个站点相应的环境变量代入模型, 得出各个水层以及整个水体的 IHI 预测值并分别计算其与实测大眼金枪鱼 $CPUE$ 的泊松相关系数, 一般认为泊松相关系数在小于 0.400、0.400—0.499、0.500—0.699 和大于 0.700 时, 相应的模型预测能力分别为差、中、良和优(Song *et al*, 2010; 宋利明等, 2011a), 各水层以及整个水体的 IHI 预测指数与实测 $CPUE$ 间的泊松相关系数以及预测能力分别见表 3,

在各水层中, 预测能力最佳的为 120—160m 水层, 预测能力达到优。不同水层预测 IHI_{ij} 的算术平均值与对应各水层实测大眼金枪鱼 $CPUE_j$ 的比较见图 6, 它们之间的泊松相关系数达到 0.98。

2.4 IHI 模型的验证

应用成对双样本均值分析 t -检验的方法(唐启义等, 2002)分别计算用于模型验证的 8 个站点的各个水层与整个水体的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ 的 P 值, 分析其有无显著性差异, 结果见表 4, 所有水层和整个水体的预测 $CPUE$ 与实测 $CPUE$ 无显著性差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 部分水层无预测模型或模型预测能力较差的原因

对于 40—80m 水层, 无法得出预测模型。对于 160—200m 及 200—240m 水层, 模型的预测能力为中等(表 3), 相对较低。原因可能有以下 3 个方面: (1) 本文只考虑温度、盐度、叶绿素、溶解氧和三维海流这些环境因子对大眼金枪鱼渔获率的影响, 在这三个水层可能有其它本文未考虑到的因素制约着大眼金枪鱼的分布, 从而影响该水层模型的预测能力; (2) 此次调查期间由于海流较大, 致使大部分钓具未能沉

表 3 各水层预测的 *IHI* 指数与实测 *CPUE* 间的泊松相关系数及预测能力

Tab.3 The Poisson correlation coefficients between predicting *IHI* and the observed *CPUE* in corresponding depth stratum and their predictive power

水层(m)	泊松相关系数	预测能力
80—120	0.50	良
120—160	0.75	优
160—200	0.64	中
200—240	0.45	中
整个水体	0.70	优

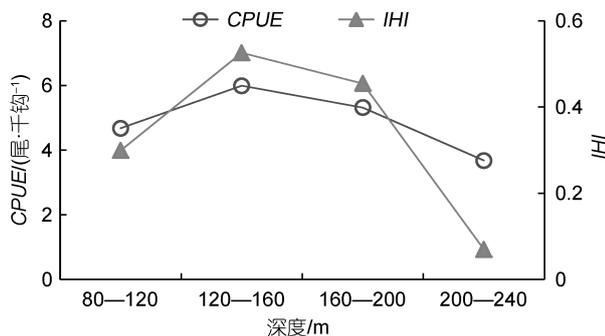


图 6 各水层预测的 *IHI* 均值与对应各水层实测大眼金枪鱼 *CPUE* 间的比较

Fig.6 The comparison of the arithmetic average predicting *IHI* with the observed *CPUE* of bigeye tuna in corresponding depth stratum

表 4 各水层预测 *CPUE* 与实测 *CPUE* 间成对双样本均值分析 *t*-检验结果

Tab.4 The results of paired two samples *t*-tests for *CPUE*s between the model prediction and observation in corresponding depth stratum

水层(m)	<i>P</i> 值
80—120	0.2956
120—160	0.3724
160—200	0.1245
200—240	0.0935
整个水体	0.2313

降到设计深度,从而在这三个水层的钓钩数量分布较少,导致了该水层内大眼金枪鱼渔获物较少,因此可能存在渔获物的取样误差;(3)由于调查时间的限制,用于建模的站点偏少。

3.2 *IHI* 模型预测大眼金枪鱼渔获率能力的评价

IHI 模型预测大眼金枪鱼渔获率的能力总体上属于良好。由图 6 可得,各水层预测 *IHI* 指数的算术平均值与其对应的各水层大眼金枪鱼 *CPUE* 的算术平

均值的泊松相关系数达到了 0.98,并且从图 6 中可看出,两者在各水层中的变化趋势大致相同。在 120—160m 水层的实测 *CPUE* 的算术平均值、*IHI* 预测指数最高,这就表明该海域大眼金枪鱼较为适宜的栖息水层为 120—160m。通过 XR-620 实测,调查期间该海域,该水层所对应的温度范围为 27.0—28.0℃,宋利明等(2006)对马尔代夫海域大眼金枪鱼的研究表明,大眼金枪鱼渔获率最高温度范围为 27.0—27.9℃,研究结果与本文 *IHI* 模型的预测结果相近,说明了 *IHI* 模型的预测能力良好。由表 3 得出,该海域除未能建模的 40—80m、200—240m 水层外,其它各水层预测 *IHI* 指数与实测 *CPUE* 间的泊松相关系数均大于 0.50,故预测能力均为良好;对于吉尔伯特群岛海域整个水体,预测 *IHI* 指数与实测 *CPUE* 间的泊松相关系数则达到 0.70,为优。由图 4(B)与图 5 可得,120—160m 水层所反映的 *IHI* 指数[图 4(B)]较高的海区(1°—3°S, 169°—176°E; 0°—1°S, 176°—180°E)与整个水体反映的 *IHI* 指数(图 5)较高的海区(2°—3°S, 169°—176°E; 1°20′—3°S, 177°—180°E)基本一致,因此今后可以用 120—160m 水层的 *IHI* 指数来表达整个水体的 *IHI* 指数。这一结果与 Hanamoto(1987)在研究太平洋水域的大眼金枪鱼时,得出其主要分布于 100.0—250.0m 的结果基本一致。但是,宋利明等(2010)通过实测 *CPUE* 得出大眼金枪鱼偏好的深度为 200.0—240.0m,这一结果与本文差异较大,原因可能是此次调查期间由于海流较大,致使大部分钓具未能沉降到设计深度,从而使得较深水层的钓钩数量分布较少,导致了较深水层内大眼金枪鱼渔获物较少,而在较浅水层的渔获物较多,即可能存在渔获物的取样误差。

3.3 *IHI* 模型的有效性

可以用 *IHI* 模型来预测相应水层的大眼金枪鱼的渔获率。将用于验证模型的 8 个站点对应的环境变量代入相对应的回归模型,可得出各个水层和整个水体的大眼金枪鱼的预测 *CPUE*,从表 4 中发现,所有水层大眼金枪鱼的预测 *CPUE* 与实测 *CPUE* 之间均无显著性差异($P > 0.05$),但是 160—200m 和 200—240m 水层的 *P* 值偏小,这可能与 *IHI* 模型的预测能力为中等有关。而对于整个水体的大眼金枪鱼预测 *CPUE* 与实测 *CPUE* 而言,它们之间也无显著性差异($P = 0.2313$),其泊松相关系数达到 0.70(表 3)。预测 *CPUE* 与实测 *CPUE* 比较接近。综上所述,*IHI* 模型基本上可用于预测该海域不同水层(尤其是 80—240m 的各个水层)和整个水体的大眼金枪鱼的渔获率和 *IHI*

指数。

3.4 限制大眼金枪鱼空间分布的环境因子分析

从本文结果(表 1 和式 19)可知, 每个水层决定大眼金枪鱼分布的环境因子各不相同。比如 Song 等(2009)认为鱼类被捕获的深度是所有环境变量综合作用下的结果, 从结果可以看出在较浅的水层, 大眼金枪鱼的渔获率与溶解氧浓度和海流等环境因子相关, 而在较深水层则仅与温度相关。这可能与大眼金枪鱼的特定的生物学特性以及当地特定的海洋环境有关, 大眼金枪鱼作为一种高度洄游性的鱼类, 其在运动时, 肌肉中的蛋白质在转换时需要消耗大量的氧气(Costello *et al*, 1996)。因此, 在海洋的中上层, 溶解氧浓度的含量制约着大眼金枪鱼的运动。此次调查期间, 吉尔伯特群岛海域附近的海流尤其是水平海流的强度相对较强, 大眼金枪鱼对海流的变化也比较敏感。所以本文认为在较浅的水层, 大眼金枪鱼的分布受到溶解氧浓度和海流(尤其是水平海流)的制约。在较深的水层, 温度与水深的关系呈负相关, 而大眼金枪鱼作为暖水性鱼类(Garey *et al*, 1971), 在低温海域较少出现。因此, 本文认为在较深水层, 大眼金枪鱼的分布受到温度的限制, 因此体温是促使大眼金枪鱼垂直移动的关键因子(Holland *et al*, 1992)。比如 Fry(1971)研究得出温度不但影响鱼类的新陈代谢, 还影响其反应速度, 是鱼类分布的重要影响因子。因此, 在整个水体中, 温度与大眼金枪鱼的分布密切相关。

3.5 减少兼捕并提高生产效率的建议

对于吉尔伯特群岛海域, 大眼金枪鱼 *IHI* 指数较高的两个海域为 2° — 3° S, 169° — 175° E 与 1° — 3° S, 178° — 180° E, 建议在符合可持续利用的前提下, 在上述两个海域, 尽可能使渔具沉降到 120—160m 的水层, 在减少兼捕的同时, 提高该海域大眼金枪鱼延绳钓作业的生产效率。

3.6 结语

本文用到吉尔伯特群岛海域 32 个站点的温度、盐度、叶绿素、溶解氧浓度、水平海流和垂直海流 6 个变量及其 15 个交互项来建立不同水层和整个水体的大眼金枪鱼栖息环境综合指数模型。由于调查条件的限制, 其它一些变量(如浮游生物量和大眼金枪鱼捕食种类分布数据)未能收集, 因此, 这些变量也未纳入本研究, 对本研究结果可能会造成一定的影响, 在今后的研究中应增加这些变量。

致谢 本研究得到了基里巴斯共和国政府的许可,

并得到深圳市联成远洋渔业有限公司董事长周新东、总经理陈清白、基地经理朱永利、船队经理许上进、“深联成 901”号船长及全体船员等大力支持, 谨致谢。

参 考 文 献

- 宋利明, 陈新军, 许柳雄, 2004. 大西洋中部大眼金枪鱼垂直分布与温度、盐度的关系. 中国水产科学, 11(6): 561—566
- 宋利明, 高攀峰, 2006. 马尔代夫海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的钓获水层、水温和盐度. 水产学报, 30(3): 335—340
- 宋利明, 高攀峰, 周应祺等, 2007. 基于分位数回归的大西洋中部公海大眼金枪鱼栖息环境综合指数. 水产学报, 31(6): 798—804
- 宋利明, 张禹, 周应祺, 2008. 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. 水产学报, 32(3): 369—378
- 宋利明, 李玉伟, 高攀峰, 2009. 帕劳群岛附近海域延绳钓渔场大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)的环境偏好. 海洋与湖沼, 40(6): 768—776
- 宋利明, 吕凯凯, 胡振新等, 2010. 吉尔伯特群岛海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的环境偏好. 海洋渔业, 32(4): 374—384
- 宋利明, 胡振新, 2011a. 马绍尔群岛海域大青鲨栖息地综合指数. 水产学报, 35(8): 1208—1216
- 宋利明, 杨嘉樑, 胡振新等, 2011b. 两种延绳钓钓具大眼金枪鱼捕捞效率的比较. 上海海洋大学学报, 20(3): 424—430
- 唐启义, 冯明光, 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社: 333—339
- 斋藤昭二, 1992. マグロの游泳层と延绳渔法. 东京: 成山堂书屋: 9—10
- Biglow K A, Hampton J, Miyabe N, 2002. Application of a habitat-based model to estimate effective longline fishing effort and relative abundance of Pacific bigeye tuna (*Thunnus obesus*). Fisheries Oceanography, 11(3): 143—155
- Cade B S, Richards J D, 2001. User manual for BLOSSOM statistical software. Colorado: Midcontinent Ecological Science Center US Geological Survey: 1—106
- Cao D M, Song L M, Zhang Y *et al*, 2011. Environmental preferences of *Alopias superciliosus*, and *Alpias vulpinus* in waters near Marshall Islands. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 45(1): 103—119
- Costello O M, Brill R W, Hochachka P W, 1996. Structural basis for oxygen delivery: Muscle capillaries and manifolds in tuna red muscle. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 113(1): 25—31
- Dagorn L, Bach P, Josse E, 2000. Movement patterns of large bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the open ocean, determined using ultrasonic telemetry. Marine Biology, 136(2): 361—371
- Fry F E J, 1971. The Effect of Environmental Factors on the Physiology of Fish. In: Hoar W S, Randall D J ed. Fish Physiology. New York: Academic Press: 1—98
- Garey F G, Teal J M, Kanwisher J W *et al*, 1971. Warm-bodied fish. Oxford Journals, 11(2): 137—143

- Hanamoto E, 1987. Effect of oceanographic environment on bigeye tuna distribution. *Bull Jap Soc Fisheries Oceanography*, 51(3): 203—216
- Holland K N, Brill R W, Chang R K C *et al*, 1992. Physiological and behavioral thermoregulation in bigeye tuna (*Thunnus obesus*). *Nature*, 358: 410—212
- Koenker R, Bassett G, 1978. Regression quantiles. *Econometrica*, 46(1): 43—61
- Maunder M, Hoyle S, 2006. Status of bigeye tuna in the eastern Pacific Ocean in 2004 and outlook for 2005. *Inter-Amer, Trop Tuna Comm, Stock Assess Rep*, 6: 103—206
- Song L M, Wu Y P, 2011. Standardizing *CPUE* of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) longline fishery in the tropical waters of the northwestern Indian Ocean using a deterministic habitat-based model. *Journal of Oceanography*, 67: 541—550
- 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. *Fisheries Oceanography*, 17(4): 239—253
- Song L M, Zhou J, Zhou Y Q *et al*, 2009. Environmental preferences of bigeye tuna, *Thunnus obesus*, in the Indian Ocean: an application to a longline fishery. *Environmental Biology of Fishes*, 85(2): 153—171
- Song L M, Zhou Y Q, 2010. Developing an integrated habitat index for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean based on longline fisheries data. *Fisheries Research*, 105(2): 63—74

AN INTEGRATED HABITAT INDEX OF BIGEYE TUNA *THUNNUS OBESUS* IN WATERS NEAR GILBERT ISLANDS

SONG Li-Ming^{1,2,3}, YANG Jia-Liang³, WU Ya-Ping³, HUI Ming-Ming³, LÜ Kai-Kai³

(1. *National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai*, 201306; 2. *Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai*, 201306; 3. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai*, 201306)

Abstract On the basis of the survey data at 32 sampling stations in waters near Gilbert Islands from Oct., 2010 through Jan., 2011, the vertical profile data of temperature, salinity, chlorophyll-*a*, dissolved oxygen concentration, horizontal current, vertical current and the catch per unit effort (*CPUE*) data of bigeye tuna were applied to develop the “Integrated Habitat Index (*IHI*)” models by the quantile regression method. Models were developed for six water strata from 40m to 280m (40m per stratum) and the entire water column to understand the relationship between the bigeye tuna *CPUE* and the environmental variables. The measured environmental variables at the other eight sampling stations were used to validate the models’ predictive power. The results showed: (1) the models’ predictive power was good; (2) the key environmental parameters in the *IHI* models differed among the depth strata. In the shallow water (80—200m), there was closely relationship among the *CPUE* of the bigeye tuna and the dissolved oxygen and the sea current; In the deep water (>200m), there was closely relationship between the *CPUE* of bigeye tuna and the temperature; (3) the optimal depth that bigeye tuna inhabit was in the range of 120—160m; (4) the bigeye tuna’s *IHIs* in the areas of 2—3°S, 169—175°E and 1—3°S, 178—180°E were relatively high. Our study suggested that to deploy the fishing gears in the water depth of 120—160m should improve fishing efficiency and reduce the bycatch.

Key words Bigeye tuna *Thunnus obesus*, Integrated habitat index, Quantile regression, Gilbert Islands