

文章编号:1000-0615(2007)06-0805-08

应用栖息地指数对印度洋大眼金枪鱼分布模式的研究

冯 波^{1,2}, 陈新军¹, 许柳雄¹

(1. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090;
2. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524006)

摘要:运用分位数回归方法对温度、温差、氧差与印度洋大眼金枪鱼延绳钓钩获率进行二次回归分析,找出最佳上界方程,以最佳上界方程拟合的数值来建立栖息地指数(HSI)模型,从而揭示印度洋大眼金枪鱼栖息地的分布模式。研究表明,温度、温差、氧差与印度洋大眼金枪鱼延绳钓钩获率的最佳上界分位数回归方程分别为 $HR_{T_{0.9}} = -44.803 + 7.685T_{0.9} - 0.255T_{0.9}^2$, $HR_{dT_{0.9}} = 6.234 + 0.953dT_{0.9} - 0.026dT_{0.9}^2$ 和 $HR_{dO_{0.88}} = 7.422 + 4.25dO_{0.88} - 0.727dO_{0.88}^2$ 。10°N ~ 10°S 间印度洋海域大眼金枪鱼 HSI 指数达到 0.9 以上;10°N 以北的波斯湾及 10°S ~ 15°S 海域的 HSI 指数为 0.8 ~ 0.9;15°S ~ 40°S 之间海域 HSI 指数介于 0.7 ~ 0.8,其中 50°E ~ 90°E、15°S ~ 25°S 间存在一片季节性 HSI 指数 < 0.7 的区域;40°S 以南的海域 HSI 指数 < 0.6。

关键词:大眼金枪鱼;分位数回归;栖息地指数;印度洋

中图分类号:S 931.2

文献标识码:A

Study on distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean based on habitat suitability index

FENG Bo^{1,2}, CHEN Xin-jun¹, XU Liu-xiong¹

(1. College of Marine Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;
2. Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524006, China)

Abstract: Bigeye tuna *Thunnus obesus* is one of key species caught by Chinese tuna longline fleets. Its spatial distribution in relation to environmental factors is highlighted by international organizations and researchers. The aim of this study is to present the analysis of correlation between hooking rates of bigeye tuna longline and environmental factors in the Indian Ocean. Three environmental variables including temperature, temperature difference and dissolved oxygen difference are used to fit habitat suitability model in order to explain the distribution pattern of bigeye tuna in the Indian Ocean. Function expressions of hooking rates and environmental factors are estimated by quantile regression. Data predicted by optimum upper boundary quantile curves are fitted to the habitat suitability model to display quarterly distribution of bigeye tuna via visualization of Surfer 8.0. The optimum upper boundary quantile curves for temperature (T)-hooking rate (HR), temperature difference (dT)- HR and dissolved oxygen difference (dO_2)- HR are in the following $HR_{T_{0.9}} = -44.803 + 7.685T_{0.9} - 0.255T_{0.9}^2$, $HR_{dT_{0.9}} = 6.234 + 0.953dT_{0.9} - 0.026dT_{0.9}^2$ and $HR_{dO_{0.88}} = 7.422 + 4.25dO_{0.88} - 0.727dO_{0.88}^2$, respectively. Habitat suitability index is above 0.9 within 10°

收稿日期:2006-12-06

资助项目:国家科技支撑计划(2006BAD09A05);教育部新世纪优秀人才计划(NCET-06-0437);上海市重点学科(T1101)

作者简介:冯 波(1977-),男,江苏宜兴人,讲师,博士研究生,从事海洋渔业资源研究。Tel:021-65711985

通讯作者:陈新军,E-mail:xjchen@shfu.edu.cn

$N - 10^{\circ}S$, 0.8–0.9 in the north of $10^{\circ}N$ and within $10^{\circ}S - 15^{\circ}S$, 0.7–0.8 within $15^{\circ}S - 40^{\circ}S$, and below 0.6 in the south of $40^{\circ}S$. However, a mass of waters occurs seasonally within $50^{\circ}E - 90^{\circ}E$, $15^{\circ}S - 25^{\circ}S$ where habitat suitability index is less than 0.7. The habitat suitability model indicates the reliable results and could be improved by integrating more interactive variables. It is proved in this study that quantile regression is a useful way to investigate correlation between organism and limiting ecological factors.

Key words: *Thunnus obesus*; quantile regression; habitat suitability index (HSI); Indian Ocean

印度洋大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 是我国远洋金枪鱼延绳钓船队主捕鱼种之一, 2004 年产量在 8 321.2 t, 约占其总产量的 62.45%。大眼金枪鱼的空间分布及其与环境关系得到世界渔业管理组织和学者的重视^[1-3]。在研究鱼类栖息地分布领域, 上世纪 80 年代初期由美国鱼类和野生生物署 (US Fish and Wildlife Service) 提出的栖息地指数 (habitat suitability index, HSI) 模型。该模型广泛地被应用于预测和显示海洋经济鱼类的栖息地分布, 为政府决策层提供管理依据^[4]。然而我国在这方面的应用研究还刚刚起步^[5], 国外也没有学者对印度洋大眼金枪鱼的栖息地指数进行相关研究。本文以温度、温差、氧差等 3 个因素, 利用栖息地指数模型重新诠释了印度洋大眼金枪鱼栖息地的分布模式, 以期揭示大眼金枪鱼分布与相关环境因素的内在联系。

1 材料与方法

1.1 商业性金枪鱼延绳钓渔业数据

商业性金枪鱼延绳钓渔业数据来源于上海水产大学金枪鱼工作组的渔业数据库。文中使用了 1975 年到 1997 年印度洋大眼金枪鱼深水延绳钓数据, 主要包含生产的地点、月份、渔获量、捕捞努力量等信息。

1.2 环境数据

海洋环境数据来自美国国家海洋数据中心的 World Ocean Atlas 98 (WOA98) 光盘, 为印度洋 7 个水层 (75、100、125、150、200、250 和 300 m) 的温度和溶解氧浓度。

1.3 数据处理

钓获率 (hooking rate, HR) 按时间 (两个月) 初步计算出 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 方格内渔获尾数和钩数的平均值, 然后计算出 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 方格内的钓获率平均值, 计算公式为:

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

式中, $HR_{(i,j)}$ 为经度 i , 纬度 j 处的钓获率平均值; $N_{fish(i,j)}$ 为该经纬度上的渔获尾数平均值; $N_{hook(i,j)}$ 为该处的下钩数平均值。

水温 T 按标准水层 (75, 100, 125, 150, 200, 250 和 300 m) $\sum d_i t_i / \sum d_i$ 加权平均按计算, d_i 表示第 i 个深度层距离, t_i 表示水温在第 i 个深度层的双月平均值^[6]。

温差 (dT) 和氧差 (dO) 由 50 m、150 m 水层的相应参数相减取得的双月平均值。

1.4 分位数回归

分位数回归是根据 x 估计 y 的分位数 (quantile) 的一种方法^[7]。其模型为: $\hat{y}_Q = a_Q + b_Q x$, 与一般直线回归不同的是, 这里 y_Q 表示给定 x 的条件下, y 的 Q 分位数的估计值。 $0 < Q < 1$ 。参数估计一般用加权最小一乘 (weighted least absolute, WLA) 准则, 即使 $\sum | \hat{y}_Q - a_Q - b_Q x_i | h_{iQ}$ 达到最小。这里,

$$h_{iQ} = \begin{cases} 2Q & \text{若 } y_i Q > a_Q + b_Q x_i \\ 2(1-Q) & \text{若 } y_i Q \leq a_Q + b_Q x_i \end{cases}$$

即在回归线上方的点 (残差为正), 权重为 $2Q$, 在回归线下方的点 (残差为负), 权重为 $2(1-Q)$ 。通常可通过线性规划迭代求解, 其初值用加权最小二乘估计值。

1.5 基于分位数回归的单因素 HSI 模型

HSI 模型可用简单数值模拟生物体对其周围栖息环境要素反应。构建 HSI 模型的过程中, 最重要的一个步骤是如何把鱼类对栖息水域中各环境要素的反应用一个合适的适应性指数 (index of suitability, SI) 来表示。其次计算出生物对各环境要素的 SI , 然后通过一定的数学方法把各种的 SI 关联在一起形成最后的 HSI 模型。最常见的关联算法有: 几何平均值算法和算术平均值算法。此外, 为保证 HS 模型的可靠性, 还要求进行关联的各 SI 数值具有相对的一致性。基于分位数回归的 HSI 模型的建立过程如图 1。

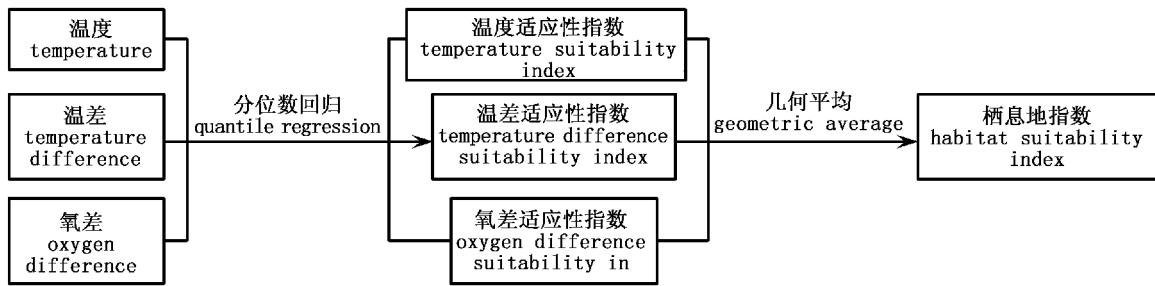


图1 建模流程

Fig. 1 Modelling process

首先,利用分位数回归分别对温度、温差、氧差与钓获率之间的关系进行了二次回归分析, Q 从 0 到 1 进行全程搜索,用秩得分检验(rank-score test)来计算 P 值的大小,根据 P 值的大小来检验各参数项是否等于零,当参数检验值 $P < 0.05$ 时,表明该参数拒绝为零假设,即该参数项有效;而当参数检验值 $P > 0.05$ 时,表明该参数接受为零假设,即剔除该参数项。采用上界点分析的原则,挑选具有最大响应的最佳上界分位数回归方程。最佳上界分位数回归方程的 Q 最大取值依据温度这一主导因素。文中以 a 、 b 、 c 分别表示二次回归方程中的二次项系数、一次项系数、常数项。分位数回归使用 Blossom 软件^①。

其次,根据最佳上界分位数回归方程,以温度、温差和氧差等自变量来修正 Q 分位数下应变量钓获率的数值,这个数值是被认为是潜在的钓获率叫做 HR_Q 。同时为了保证同一时间地点不同环境变量拟合数值的一致性,对最佳上界分位数回归方程拟合的钓获率数据进行了配对样本 t 检验。然后利用 HR_Q 来计算各自变量的 SI 指数,公式为:

$$SI = \frac{HR_Q}{HR_{Q_{\max}}} \quad (2)$$

式中: $HR_{Q_{\max}}$ 为 HR_Q 的最大值;

利用几何平均计算 HSI ,其公式为:

$$HSI = \sqrt[3]{SI_1 \times SI_2 \times SI_3} \quad (3)$$

式中: SI_1 为温度适应性指数; SI_2 为温差适应性指数; SI_3 为氧差适应性指数。

最后,运用 Surfer 8.0 来创建大眼金枪鱼 HSI

栖息地空间分布地图。

2 结果

根据不同分位数下二次回归的秩得分检验结果,二次项系数 a 、一次项系数 b 、常数项 c 均显著地大于零($P < 0.05$)。各分位数下的回归方程均能较好地解释自变量与应变量的关系。

2.1 水温与钓获率的分位数关系

不同分位数下,温度与钓获率二次回归曲线的各项系数变化趋势如下(图 2)。当 $0 \leq Q < 0.68$ 时, a 和 c 随 Q 增加逐渐减小, b 逐渐增大;当 $0.68 \leq Q < 0.76$ 时, a 和 c 随 Q 增加骤增, b 骤降;当 $0.76 \leq Q < 0.91$ 时 a 、 b 、 c 均保持相对稳定;当 Q 趋近 1 时, a 、 b 、 c 均出现急剧波动。因此当水温作为单一环境限制因素时,这里取 $Q = 0.9$ ^[5], 钓获率取得最大稳定响应的上边界方程如下:

$$HR_{T_{0.9}} = -44.803 + 7.685T_{0.9} - 0.255T_{0.9}^2$$

2.2 温差与钓获率的分位数关系

在不同分位数下,温差—钓获率二次回归曲线的各项系数变化趋势如下(图 3):当 $Q < 0.94$ 时, a 逐渐减小, b 、 c 逐渐增大;而当 Q 趋近 1 时, a 、 b 、 c 均出现急剧波动。故当 $Q < 0.94$ 时,其上界回归方程较为可靠。为了保持与温度—钓获率回归方程的一致性,这里取 $Q = 0.90$,其方程如下:

$$HR_{dT_{0.9}} = 6.234 + 0.953dT_{0.9} - 0.026dT_{0.9}^2$$

2.3 氧差与钓获率的分位数关系

不同分位数下,氧差—钓获率二次回归曲线的各项系数变化趋势如下(图 4)。当 $Q < 0.92$ 时,

① <http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/>

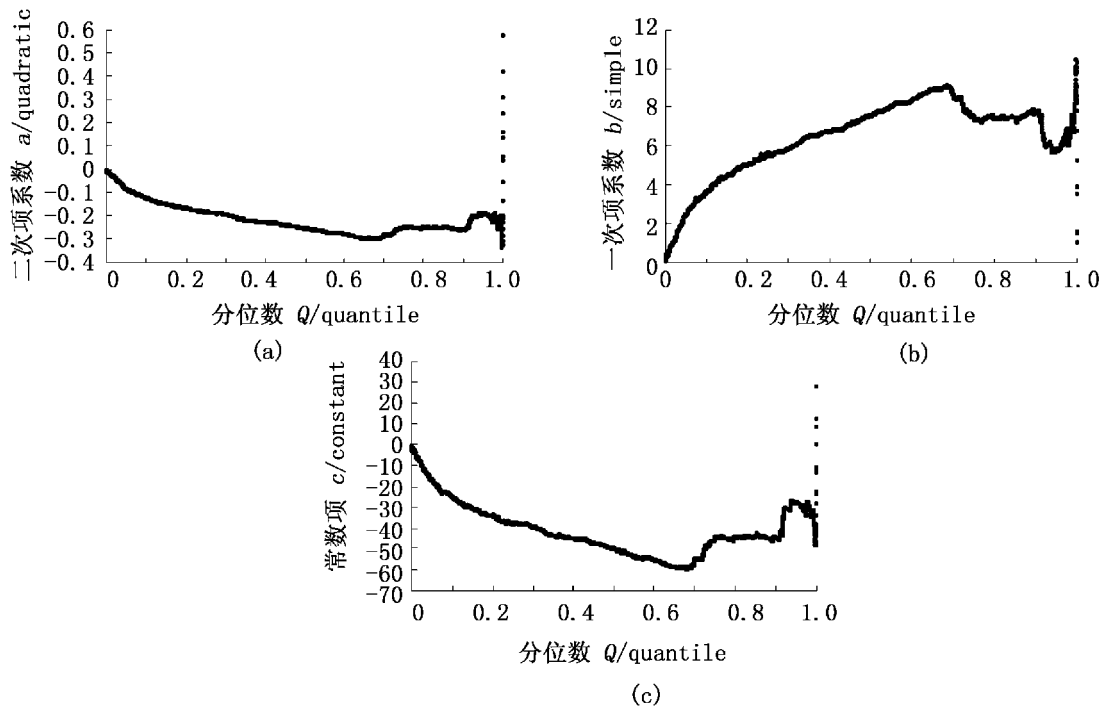


图2 不同分位数下温度—钩获率二次回归曲线的各项系数变化趋势

Fig.2 Quadratic terms of temperature and hooking rate curves by different quantiles

(a):分位数与二次项系数 a 的关系; (b): 分位数与一次项系数 b 的关系; (c):分位数与常数项 c 的关系
(a): quantile and quadratic a ; (b): quantile and simple b ; (c): quantile and constant c

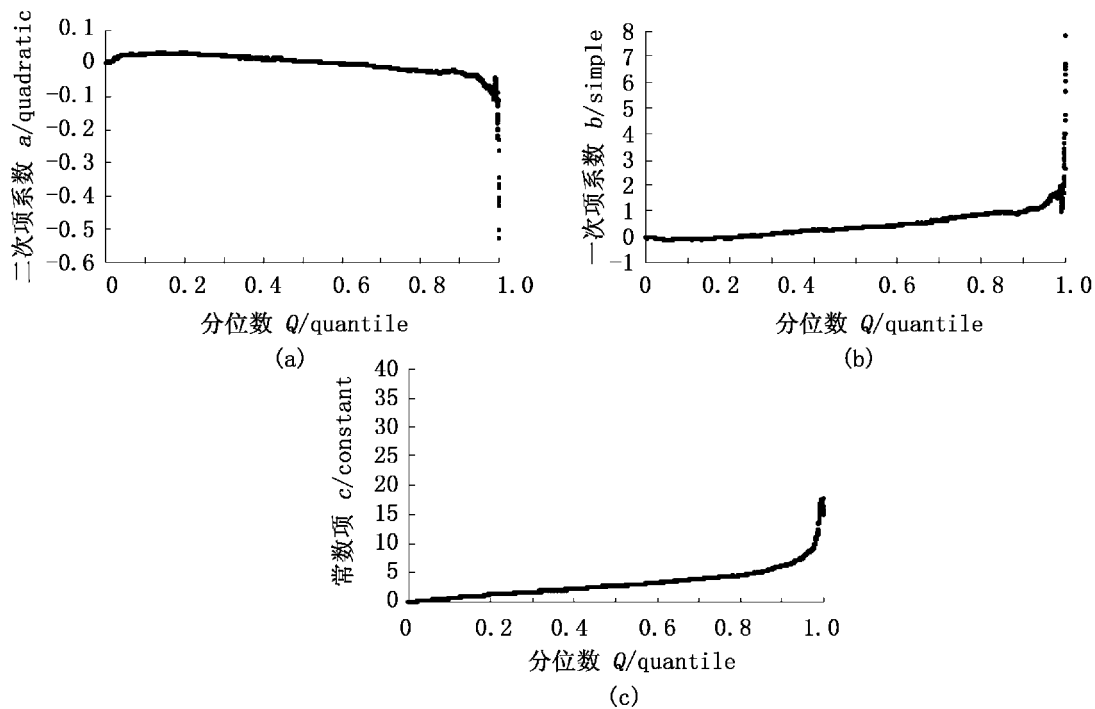


图3 在不同分位数下温差—钩获率二次回归曲线的各项系数变化趋势

Fig.3 Quadratic terms of temperature difference and hooking rate curves by different quantiles

(a):分位数与二次项系数 a 的关系; (b): 分位数与一次项系数 b 的关系; (c):分位数与常数项 c 的关系
(a): quantile and quadratic a ; (b): quantile and simple b ; (c): quantile and constant c

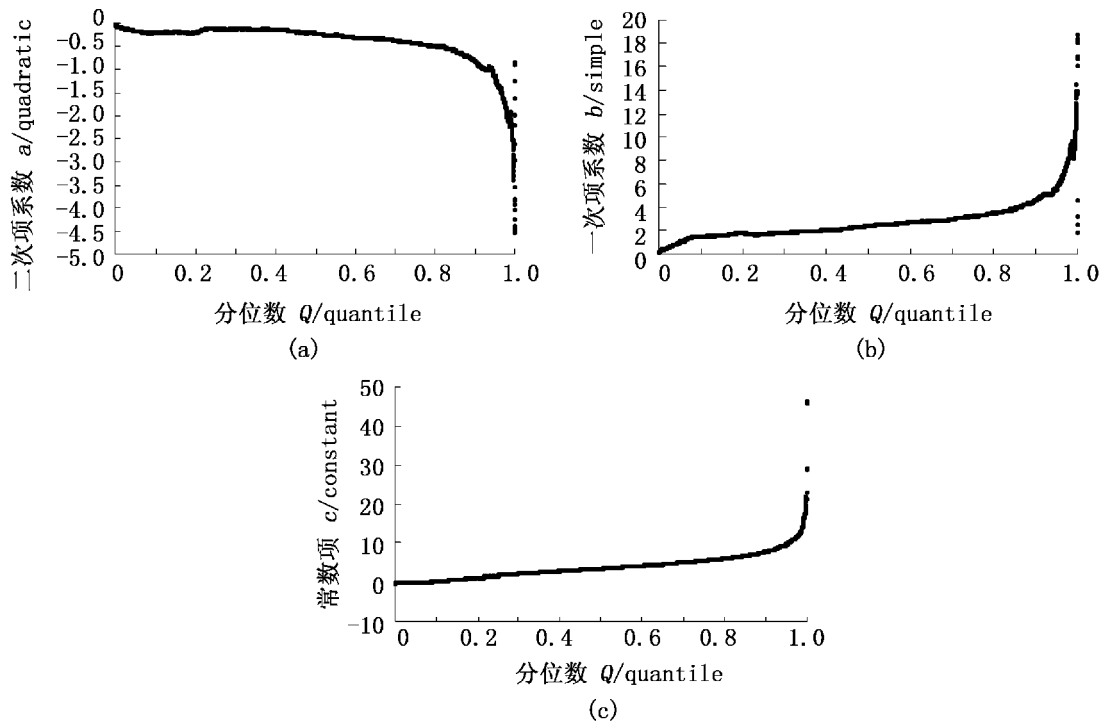


图 4 不同分位数下氧差—钓获率二次回归曲线的各项系数变化趋势

Fig. 4 Quadratic terms of dissolved oxygen difference and hooking rate curves by different quantiles

(a):分位数与二次项系数 a 的关系; (b): 分位数与一次项系数 b 的关系; (c): 分位数与常数项 c 的关系
 (a): quantile and quadratic a ; (b): quantile and simple b ; (c): quantile and constant c

a 逐渐减小, b 、 c 逐渐增大; 而当 Q 趋近 1 时, a 、 b 、 c 均出现急剧波动。故当 $0.6 < Q < 0.92$ 时, 其上界回归方程较为可靠。为了保持 3 个环境变量拟合钓获率数值的一致性, 这里取 $Q = 0.88$, 其方程如下:

$$HR_{dO_{0.88}} = 7.422 + 4.25dO_{0.88} - 0.727dO_{0.88}^2$$

2.4 拟合数据配对 t 检验

对最佳上界分位数回归方程拟合的钓获率数据进行配对样本 t 检验(表 1), 不同因素拟合的钓获率数据不存在显著的差异 ($P > 0.05$), 达到了模型对数据的要求。

表 1 配对样本 t 检验

Tab. 1 Paired samples t -test

配对 pair	均值 mean	标准偏差 std. deviation	标准均差 std. error mean	t 检验 t -test	自由度 df	P 值 sig.
$HR_T - HR_{dT}$	0.005161	3.242529	0.016966	0.304176	36527	0.760995
$HR_T - HR_{dO}$	0.004984	3.715093	0.019438	0.256397	36527	0.797645
$HR_{dT} - HR_{dO}$	-0.00018	1.443806	0.007554	-0.02338	36527	0.981345

2.5 大眼金枪鱼 HSI 空间分布

不同月份下, 印度洋大眼金枪鱼 HSI 空间分布规律如下: 1-2 月, $10^{\circ}N \sim 10^{\circ}S$ 间的广大海域 HSI 达到 0.9 以上, $10^{\circ}N$ 以北的波斯湾及 $10^{\circ}S \sim 15^{\circ}S$ 海域的 HSI 为 0.8~0.9, $15^{\circ}S \sim 40^{\circ}S$ 间海域 HSI 介于 0.7~0.8, 其中 $50^{\circ}E \sim 90^{\circ}E$ 、 $15^{\circ}S \sim 25^{\circ}S$ 间存在一块 $HSI < 0.7$ 的区域(以下简称 A

区), $40^{\circ}S$ 以南的海域 HSI 均 < 0.6 (图 5-a); 3-4 月, $HSI > 0.8$ 以上分布区域基本不变, A 区较前两个月向北略有收缩, 南部高纬度 HSI 为 0.7 等值线东段向北发展(图 5-b); 5-6 月, 西印度洋 HSI 为 0.9 等值线西段向北收缩, A 区向东延伸至 $95^{\circ}E$, 南部高纬度 HSI 为 0.7 等值线西段亦向北发展(图 5-c); 7-8 月, 南部高纬度 HSI 为 0.7

等值线整体向北发展与 A 区融合,在 20°S 附近形成新的 HSI 为 0.7 等值线,并马达加斯加附近向东呈 S 形折回,沿 30°S 向西延伸(图 5-d);9-10 月,西印度洋 HSI 为 0.9 等值线西段向南推进,恢复到 1-2 月的状态。20°S 以南海域,出现

四处 $HSI < 0.6$ 的小块区域,30°S 处 HSI 为 0.7 等值线向西收缩(图 5-e);11-12 月,20°S 以南海域出现一大片 $HSI < 0.6$ 区域,30°S 处 HSI 为 0.7 等值线又向东发展(图 5-f)。

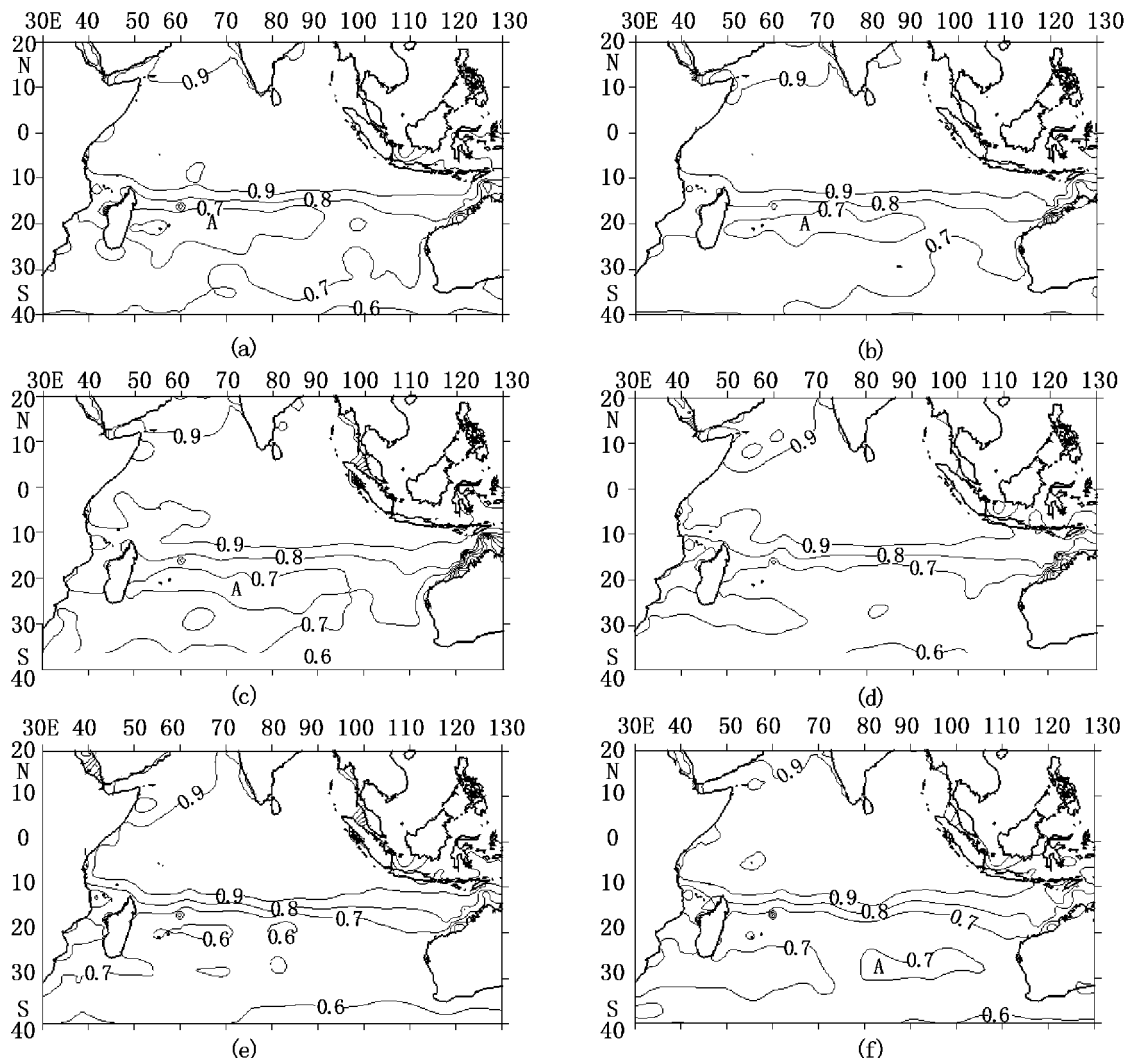


图 5 印度洋大眼金枪鱼 HSI 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of bigeye tuna HSI in the Indian Ocean

(a):1-2 月; (b):3-4 月; (c):5-6 月; (d):7-8 月; (e):9-10 月; (f):11-12 月

(a):Jan-Feb; (b):Mar-Apr; (c):May-Jun; (d):Jul-Aug; (e):Sep-Oct; (f):Nov-Dec

3 讨论

3.1 大眼金枪鱼分布与环境因素的关系

水温是影响大眼金枪鱼分布的最主要参数之一。毛利雅彦等^[8]认为,大眼金枪鱼渔获水温为 10~30℃,85% 的渔获集中在水温为 10~20℃ 的海域,其中高渔获率出现在水温 15~17℃ 海域。冯波和许柳雄^[9]用数值分析的方法,得出大

眼金枪鱼渔获适温为 14~17℃。本文以 $Q = 0.90$ 分位数、高钓获率(钓获率 ≥ 8.35 尾/千钩)时回归得出的水温为 11℃~19℃,比王家樵^[5]的研究结论(12℃~16℃)范围稍大。

垂直水温梯度变化(温跃层)可对大眼金枪鱼分布产生影响,但生产船难以现场测量温跃层的深度。冯波和许柳雄^[10]曾提出利用 50 m 与 150 m 水层的温差来代替寻找温跃层,同时还发

现:它们之间的温差 $> 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钓获率显著地升高,这表明 50 m 与 150 m 间温跃层对大眼金枪鱼分布影响密切。据认为,大眼金枪鱼喜好在温跃层顶部或其下面摄食^[11]。然而, $Q = 0.90$ 分位数、钓获率 ≥ 8.35 时回归得出:温差 $> 2.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时即对钓获率产生了潜在影响。这是否提示了温差的最低限制?冯波和许柳雄^[10]的结论虽也有相应表现,但不甚明显。垂直水温梯度变化是引发大眼金枪鱼行为还是海洋生态过程的变化等得进一步验证。

溶解氧梯度变化对大眼金枪鱼的聚集产生了重要作用。冯波^[3]研究认为,当 50 m 和 150 m 两个水层的氧差在 $1.4 \sim 3.8\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,高钓获率占到 83.18%。然而, $Q = 0.88$ 分位数、钓获率 ≥ 8.35 时回归得出:氧差 $> 0.23\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 时即对钓获率产生了潜在影响。这是否也暗示了氧差发生作用的初始限制?大眼金枪鱼对环境溶解氧浓度承受极限是 $1.0\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$,它最大可下潜至水下 600 m^[11-12]。从这个意义上推测,溶氧跃层可能本身对大眼金枪鱼分布的影响力较弱,而是溶氧跃层制约了饵料生物的分布水层,间接地影响了大眼金枪鱼的分布空间。

3.2 大眼金枪鱼的空间分布

从 *HSI* 分布的月变化可看出(图 5),适合大眼金枪鱼栖息的水域主要分布在 10°S 以北的印度洋海域,这与王家樵^[5]研究结果基本相近。*HSI* 等值线分布模式与冯波和许柳雄^[9]的水温等值线分布模式极为相似,各月变化也呈现类似的趋势,其中 *HSI* 为 0.9 等值线对应于该处的 17°C 等温线,A 区对应 19°C 等温线形成的封闭区域。A 区的 *HSI* 较低,它的发生、发展、融合与印度洋赤道辐合带(ITCZ)的地理位置南北迁移有密切的关系^[13]。冬季(1月)ITCZ 在印度洋位于 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{S}$,此时 $50^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$ 之间存在大片的 $HSI < 0.7$ 的区域;随着冬至夏的季节转换,ITCZ 整体向北偏移,A 区逐渐收缩消融,夏季(7月)ITCZ 在印度洋移至 20°N 以北,A 区消失。

3.3 *HSI* 模型

HSI 模型在我国的研究还刚刚起步,而在国外已经被广泛地应用,如美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署早在上世纪 80 年代初提出了多达 157 个 *HSI* 评价模型。然而 *HSI* 模型对环境变量的选择没有主次之分,决定变量

权重系数更多地依赖于专家的经验判断^[14]。王家樵^[5]曾利用单因素 *HS* 模型(温度、盐度、溶解氧、温跃层深度等)对印度洋大眼金枪鱼的栖息地分布进行了探讨,然而印度洋盐度的全年时空变化不很明显,盐度对大眼金枪鱼分布整体影响较小;大眼金枪鱼通常分布在最小溶解氧水平在 $1.0\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的海域,印度洋广大海域都满足此要求,因此溶解氧在平面分布上对大眼金枪鱼水平活动范围的制约力有限^[6],而 50 m 与 150 m 水层氧差可对钓获率产生较大影响^[3]。因此,本文采用温度、温差、氧差 3 个环境因素进行研究,取得了较为理想的结果。在今后的研究中还须考虑变量的交互作用,改善模型的预测效果。

3.4 *RQ* 模型

分位数回归方法目前在很多领域有广泛的应用,特别是在医学、计量经济学等领域。而分位数回归模型在鱼类生态学研究领域应用的还不是很多。Thomson 等^[15]指出传统的相关和回归分析方法并不适合应用于生态学领域的相关因素关系研究。生态学上对限制因素概念通常是更关注被测量因素对生物体产生最大响应的变化率^[16]。因此,Cade 等^[17]鼓励生物学家使用分位数上界分析的方法对生物活动与周围环境变化的关系进行研究。传统的直线回归用最小二乘法的原理得到回归方程,它要求数据独立、方差齐性及因变量正态分布。它们只能概括数据集合的平均信息,特别是不能对分布在数据集合中不同区域数据进行针对性逼近。分位数回归的优点是当误差分布是非正态分布时,能提供许多不同分位数的估计结果,因而能更清楚阐释因变量的整个分配,甚至可以处理数据异质性问题^[18]。对于本文的数据集合分布特征,分位数回归是一种良好的选择。但 Q 接近 0 和 1 时,分位数回归模型越易受到极端值的影响,越是不稳定(图 2-a,图 3-a,图 4-a),因此在取用上界分位数回归方程时宜考虑 $Q = 0.5 \sim 0.95$ 。

本文得到集美大学水产学院王家樵老师大力帮助,特此致谢。

参考文献:

- [1] Masahiko M. Seasonal change in bigeye tuna fishing areas in relation to the oceanographic parameters in

- the Indian Ocean [J]. Journal of National Fisheries University, 1999, 47(2): 43-54.
- [2] Lee P F, Chen I C, Tzeng W N. Spatial and temporal distribution patterns of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean [J]. Zoological Studies, 2005, 44(2): 260-270.
- [3] 冯波. 印度洋大眼金枪鱼延绳钓获率与环境因素的初步研究 [D]. 上海水产大学硕士学位论文, 2003: 1-63.
- [4] Bain K B, Bain J L. Habitat suitability index models: coastal stocks of striped bass [Z]. U. S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, Washington, D. C. 1982. FWS/OBS-82/10. 1. 29.
- [5] 王家樵. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数模型研究 [D]. 上海水产大学硕士学位论文, 2006: 1-40.
- [6] November A R. Factors affecting distribution of adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and its reproductive ecology in the Indian Ocean based on Japanese tuna longline fisheries and survey information [D]. Vrije Univerisiteit Brussel, Belgium, 2000.
- [7] 季莘, 陈锋. 百分位回归及其应用 [J]. 中国卫生统计, 1998, 15(6): 9-11.
- [8] 毛利雅岩, 花本荣二, 竹内正一. まぐろ延縄の漁獲からみたのインド洋メバチの適水温 [J]. 日本水产学会志, 1996, (5): 761-764.
- [9] 冯波, 许柳雄. 基于 GIS 的印度洋大眼金枪鱼延绳钓获率与水温关系的研究 [J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(6): 18-23.
- [10] 冯波, 许柳雄. 印度洋大眼金枪鱼延绳钓获率与 50 m、150 m 水层温差间关系的初步研究 [J]. 上海水产大学学报, 2004, 13(4): 359-362.
- [11] Kim N H, John R S. Physiological thermoregulation in bigeye tuna, *Thunnus obesus* [J]. Environmental Biology of Fisheries, 1994, 40: 319-327.
- [12] Masahiko M. Distribution of bigeye tuna in the Indian Ocean based on the Japanese tuna longline fisheries and survey information [D]. National Fisheries University, Japan, 1998.
- [13] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 54-60.
- [14] Eastwood P D, Mladen G J. Introducing greater ecological realism to fish habitat models [J]. GIS/Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, 2003, 2: 181-198.
- [15] Thomson J D, Weiblen G, Thomson B A, et al. Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers and rocks [J]. Ecology, 1996, 77: 1698-1715.
- [16] Brian S C, Barry R N. A gentle introduction to quantile regression for ecologists [J]. Front Ecol Environ, 2003, 1(8): 412-420.
- [17] Cade B S, Terrell J W, Schroeder R L. Estimating effects of limiting factors with regression quantiles [J]. Ecology, 1999, 80: 311-323.
- [18] 吴建南, 马伟. 分位数回归与显著加权分析技术的比较研究 [J]. 统计与决策, 2006, 4: 4-7.