

印度洋大眼金枪鱼栖息地指数研究及其比较

陈新军¹, 冯波^{1,2}, 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 524088)

摘要: 根据商业性大眼金枪鱼延绳钓渔业数据、环境数据结合专家知识绘制了印度洋大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 对温度、盐度、溶解氧和温跃层深度的适应性指数曲线, 运用 4 种关联建模方法计算综合栖息地指数。用 AIC 值检验不同建模方法的拟合度, 并对不同建模方法的输出结果进行空间分析。最后用实证研究的方法探索其在渔场选择上的可行性。结果表明, 最小值法在 4 个模型方法中拟合度最好, 给出了较为严格的栖息地适宜度估计, 算术平均法则给出了较为粗略的栖息地适宜度估计。不同方法计算得出的栖息地指数 (HSI) 在空间分布上存在明显的差异。连乘法指示的 HSI>0.9 的区域局限于赤道附近 55°E~68°E 间; 最小值法指示的 HSI>0.9 的区域分布于赤道附近 50°E~75°E 小块水域; 算术平均法和几何平均法指示的 HSI>0.9 区域终年分布在 50°E~85°E、5°N~5°S 间的广大热带印度洋海域。最小值法和算术平均法指示的 HSI 等值线分布具有一定的相似性, 两者相比较发现, 最小值法指示的 HSI=0.4 等值线相当于算术平均法指示的 HSI=0.7 等值线; 最小值法指示的 HSI=0.6 等值线相当于算术平均法指示的 HSI=0.8 等值线; 最小值法指示的 HSI=0.7 等值线相当于算术平均法指示的 HSI=0.9 等值线。实证研究发现, 算术平均法和几何平均法指示的 HSI 值对大眼金枪鱼的渔获地点和渔获频次有较好的估计, 平均渔获频次比重分别达到 96.10% 和 85.51%。研究认为发展实时的栖息地动态预测模型有助于渔场的探索。[中国水产科学, 2008, 15 (2): 269-278]

关键词: 大眼金枪鱼; 栖息地指数; 印度洋; 实证研究

中图分类号: S97

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2008)02-0269-10

印度洋大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 是中国远洋金枪鱼延绳钓船队主捕鱼种之一, 2004 年产量为 8 321.2 t, 约占中国远洋捕捞金枪鱼总产量的 62.45%^[1]。其渔场分布及其与环境之间的关系备受生产国与印度洋金枪鱼管理委员会 (Indian Ocean Tuna Commission, IOTC) 的关注。栖息地指数 (Habitat suitability index, HSI) 模型最早由美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署于 20 世纪 80 年代初提出, 被用来描述野生动物的栖息地质量。该署还对 157 种野生鸟类和鱼类建立了 HSI 评价模型。随后 HSI 模型被广泛地被应用于物种管理、环境影响评价和生态恢复研究^[1-3]。目前中国对栖息地研究更多地关注于栖息地的选择, 而对栖息地环境质量评价尚处于起步阶段^[4]。关于利用栖息地模型评价大洋鱼类栖息地质量的报道仍然较

少。Nishida 等^[5] 提出开发基于印度洋鱼类栖息地的海洋生态模型, 研究各种海洋要素对鱼类分布的综合影响。Lee 等^[6] 利用 GIS 方法研究印度洋大眼金枪鱼的时空分布与表温的关系, 但未能给出受水温影响的栖息地模式。王家樵^[7] 采用标准化后的 CPUE 的相对比值作为示栖息地适度指数建立了栖息地模型。本研究则尝试用标准的栖息地建模方法对印度洋大眼金枪鱼栖息地特征进行评价, 比较不同建模法对栖息地适宜度的评价差异, 探索其应用于渔业资源养护与渔场预报的可行性, 借以推进中国在栖息地建模与应用管理研究水平。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 商业性金枪鱼延绳钓渔业数据 来源于上

收稿日期: 2007-03-09; 修订日期: 2007-09-12.

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

作者简介: 陈新军 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事渔业资源与渔场学、远洋鱿钓渔业等方向的研究. E-mail: xjchen@shfu.edu.cn

1) http://www.fao.org/figis/servlet/TabStock?tb_ds=TunaLandings&tb_mode=TABLE&tb_act=SELECT&tb_grp=STOCK

海水产大学金枪鱼技术组渔业数据库。本研究使用了 IOTC 1975~1997 年印度洋大眼金枪鱼延绳钓的生产数据以及 2004 年中国远洋延绳钓船队在印度洋的大眼金枪鱼生产数据。包括作业地点、月份、渔获量、捕捞努力量等信息。

1.1.2 环境数据 取自美国国家海洋数据中心制作的 World Ocean Atlas 98 (WOA98) 海洋环境数据光盘。提取了印度洋 7 个水层 (75 m、100 m、125 m、150 m、200 m、250 m 和 300 m) 温度、盐度、溶解氧环境数据。

1.2 数据处理

钓获率 (Hooking rate, HR) 的计算方法为首先计算出 2 个月内 $1^\circ \times 1^\circ$ 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:

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

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

相对资源指数 (Relative abundance index, RAI) 由某一时间地点的 HR 值除以所有 HR 值中的最大的值得到。计算公式为:

$$RAI = \frac{HR}{HR_{\max}}$$

RAI 可以看作反映栖息地质量的指标, 等价于实际的 HSI^[8]。

水温、盐度、溶解氧按标准水层 (75 m, 100 m, 125 m, 150 m, 200 m, 250 m 和 300 m) 以 $\sum d_i v_i / \sum d_i$ 加权平均计算, d_i 表示第 i 个深度层距离, v_i 表示水温、盐度、溶解氧在第 i 个深度层的数值。

温跃层深度通过特定标准深度水层上的温度数据估算, 也作为一个环境因素考虑。由于 20°C 等温线位于温跃层上部, 因此以 20°C 水温的水层的深度作为对温跃层深度的估计值^[9]。

1.3 建模方法

该模型是一种模拟生物体对其周围栖息环境变量反应的离散数值模型^[10-11], 建模流程如图 1 所示。

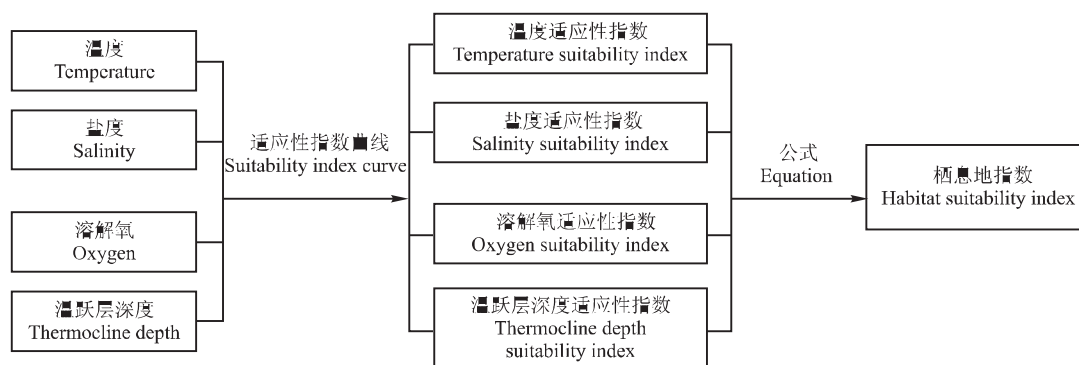


图 1 建模流程

Fig.1 Flow chart of modeling

首先, 将鱼类对栖息水域中的各环境变量的反应应用一个合适的适应性指数 (Suitability index, SI) 来表示。计算和比较各月份不同环境变量值对应的作业频率, 发现大眼金枪鱼出现的环境变量喜好区间, 并结合专家知识, 绘制印度洋大眼金枪鱼对温度、盐度、溶解氧和温跃层深度的适应性指数曲线; 其次, 根据各环境的适应性指数曲线, 计算大眼金枪鱼对各环境要素的单因素 SI 值; 最后, 通过利用数学方法把各种 SI 值关联起来得出综合 HSI。HSI 值在

0 (不适宜) 到 1 (最适宜) 之间变化。本研究引用了 4 种关联方法, 即连乘法 (Continued product, CP)、最小值法 (Minimum, Min)、算术平均法 (Arithmetic mean, AM) 和几何平均法 (Geometric mean, GM):

$$HSI = \prod_{i=1}^4 SI_i \quad (\text{CP})^{[12]}$$

$$HSI = \min(SI_1, SI_2, SI_3, SI_4) \quad (\text{Min})^{[13]}$$

$$GSI = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 SI_i \quad (\text{AM})^{[14]}$$

$$HSI = \sqrt{\prod_{i=1}^4 SI_i} \quad (GM) \quad [15]$$

式中: i 表示环境因子; 1、2、3、4 分别表示温度、盐度、溶解氧和温跃层深度四个环境因子。

1.4 模型方法比较

模型方法拟合度比较的依据选用了赤井信息准则 (Akaike information criterion, AIC)。模型参数采用最大似然法进行估计^[16]。最大似然法的基本思想是找到观测数据的最适的参数估计值。这里 RAI 为观测数据, HSI 为预测拟合数据。根据上述 4 种模型方法, 任一相同时间地点下的 HSI 与 RAI 的似然函数可表示为:

$$L(data/\theta) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(HSI_i - RAI_i)^2}{2\sigma^2}\right]$$

其中, $L(data/\theta)$ 是数据组 $data$ 的似然值, θ 代表模型参数, HSI_i 和 RAI_i 是具有相同时间地点的第 i 对的 HSI 与 RAI 值。用 MS-Excel 的规划求解得到参数的最大似然估计值 L , 根据 AIC 值选择出最适的栖息地模型方法: $AIC = -2L + 2m$

其中, m 是模型参数个数。获得最小 AIC 值的建模方法被认为是最适建模方法。研究中模型的取样数 $n = 3\ 667$, 模型参数个数 $m = 4$ 。

1.5 空间展布

对不同模型方法计算出的 HSI 进行空间展布, 1975~1997 年每 2 个月比较大眼金枪鱼栖息地分布

模式的差异。研究区域为中国印度洋延绳钓船主要作业海域 (40°E~95°E, 15°N~10°S)。

1.6 实证分析

为拓展栖息地模型的应用范围, 依据 2004 年中国印度洋延绳钓生产数据, 假设高 HSI 水平下出现较高的渔获频次百分比或渔获率, 检验不同模型预测中心渔场的可行性。

2 结果与分析

2.1 环境变量适应性指数曲线

渔获频次统计发现, 各月份的渔获主要出现在水温 13~18 °C 的区域, 其中以 15~16 °C 水域出现最多, 渔获频次百分比平均达到 75.01%; 渔获主要出现在盐度 34.7~35.6 水域, 其中盐度 35.1~35.2 的水域中出现最多, 频次百分比平均达到 57.15%; 渔获主要出现在溶解氧为 1.0~4.0 mL/L 的水域, 其中溶解氧 2.5 mL/L 的水域出现最多, 平均达到 40.83%; 渔获温跃层深度主要出现在水深 75~155 m 的范围内, 其中 115 m 处出现最多, 频次百分比平均达到 25.11%。结合王家樵^[7]、Mohri^[17-18]、冯波等^[19-20] 的研究结果, 将渔获频次最高的环境变量区间所对应的栖息地指数规定为 1, 此环境变量区间即最适宜区域; 将分布区间以外的栖息地指数规定为 0, 即不适合区域。水温、盐度、溶解氧、温跃层深度的适应性指数曲线见图 2。

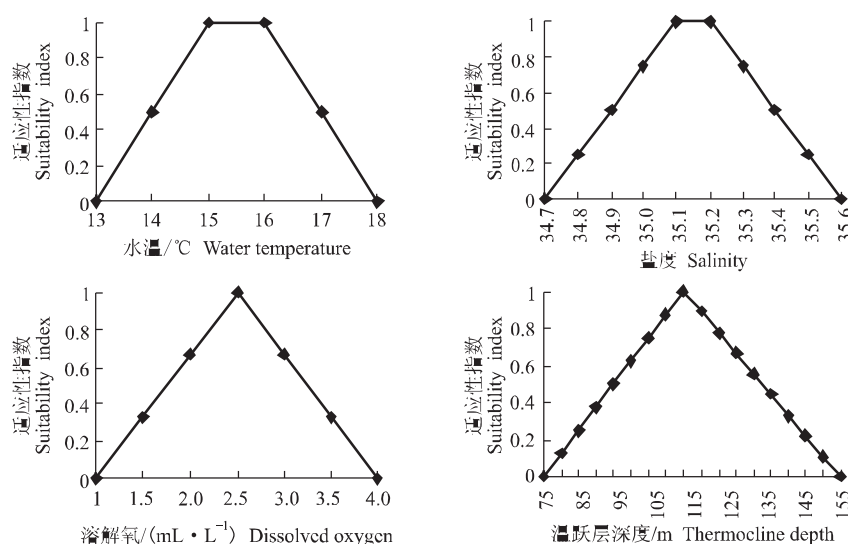


图 2 水温、盐度、溶解氧、温跃层深度的适应性指数曲线图

Fig.2 Suitability index curve of water temperature, salinity, dissolved oxygen and thermocline depth

2.2 HSI模型拟合度比较

对不同方法计算出的 HSI 值相对 RAI 值拟合度进行比较发现,最小值法得出的 AIC 值最小,为 3 035.73; 算术平均法得出的 AIC 值最大为

3 966.48。这表明在 4 个模型方法中最小值法最为适合,它给出了较为严格的栖息地适宜度估计; 而算术平均法则给出了较为粗略的估计,如表 1 所示。

表 1 不同模型方法的拟合度比较
Tab.1 Goodness of fit test by different modeling equation

项 目 Item	相对资源指数 RAI	模型 Modeling equation			
		连乘法 Continued product, CP	最小值法 Minimum, Min	算术平均法 Arithmetic mean, AM	几何平均法 Geometric mean, GM
变量数 Variable number		4	4	4	4
样本数 Sample size	3 667	3 667	3 667	3 667	3 667
平均 Mean	0.442	0.334	0.485	0.737	0.679
标准偏差 STD	0.239	0.266	0.255	0.160	0.233
偏斜度 Skewness	0.436	0.551	-0.165	-0.666	-1.222
最小值 Minimum	0.003	0	0	0.108	0
最大值 Maximum	1	0.997	0.997	0.999	0.999
置信度 (95.0%) Confidence interval	0.007	0.009	0.008	0.005	0.008
AIC 值 AIC value		3 486.13	3 035.73	3 966.68	3 870.95

2.3 HSI空间分布比较

不同模型方法计算出的 HSI 空间分布如图 3~6 所示。连乘法指示的 HSI 分布适宜空间相对狭小 (图 3), HSI>0.9 的区域局限于赤道附近 55°E~68°E 间,以 9~10 月分布空间最大。5°N 以北和 5°S 以南即属于不适宜区域。最小值法指示的 HSI>0.9 的区域分布于赤道附近 50°E~75°E 小块水域,且随季节变化从 11 月至翌年 10 月分布呈现逐渐扩大趋势 (图 4)。算术平均法指示的 HSI>0.9 终年分布在 50°E~85°E、5°N~5°S 间的广大热带印度洋海域。唯在 11~12 月,分布范围最小 (图 5)。几何平均法指示的 HSI>0.9 空间分布与算术平均法一致,而 HSI<0.1 的不适宜区域空间分布与最小值法基本一致 (图 6)。

据 AIC 值得知,最小值法给出的是较为严格的估计,算术平均法给出的是较为粗略的估计,因此在预测的适宜栖息地的空间分布上也显示出极大

的差异。最小值法指示的 HSI>0.9 的空间分布范围远远小于算术平均法,它对 HSI>0.9 以外范围的 HSI 值较算术平均法明显地低估。但最小二乘法 (图 4) 与算术平均法 (图 5) 得出的 HSI 等值线分布模式具有一定的相似性,最小值法和算术平均法分别得出不同 HSI 水平值所占研究区域的平均百分比 (表 2)。两者相比较发现,最小二乘法 (图 4) 得出的 HSI=0.4 等值线相当于算术平均法 (图 5) 得出的 HSI=0.7 等值线, HSI>0.4 和 HSI>0.7 影响的水域范围分别平均占到研究区域的 48.50% 和 50.60%; 图 4 中的 HSI=0.6 等值线相当于图 5 中的 HSI=0.8 等值线, HSI>0.6 和 HSI>0.8 影响的水域范围平均分别占到研究区域的 29.13% 和 32.69%; 图 4 中的 HSI=0.7 等值线相当于图 5 中的 HSI=0.9 等值线, HSI>0.7 和 HSI>0.9 影响的水域范围分别平均占到研究区域的 19.48% 和 14.82%。

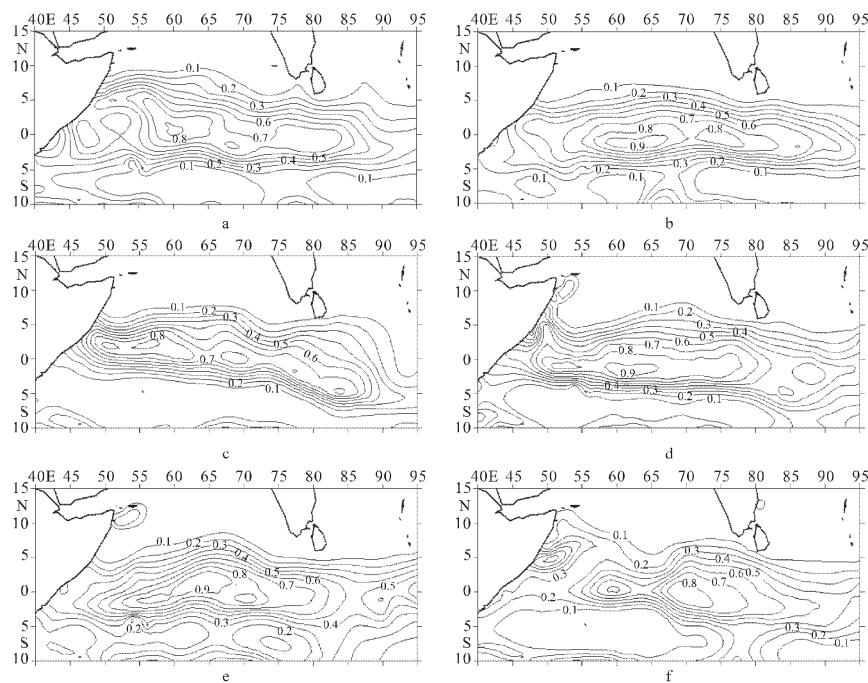


图3 连乘法计算出的 1975~1997 年不同月份下印度洋大眼金枪鱼 HSI 值的空间分布

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

Fig.3 HSI distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean calculated by equation CP during 1975~1997

a: January-February; b: March-April; c: May-June; d: July-August; e: September-October; f: November-December.

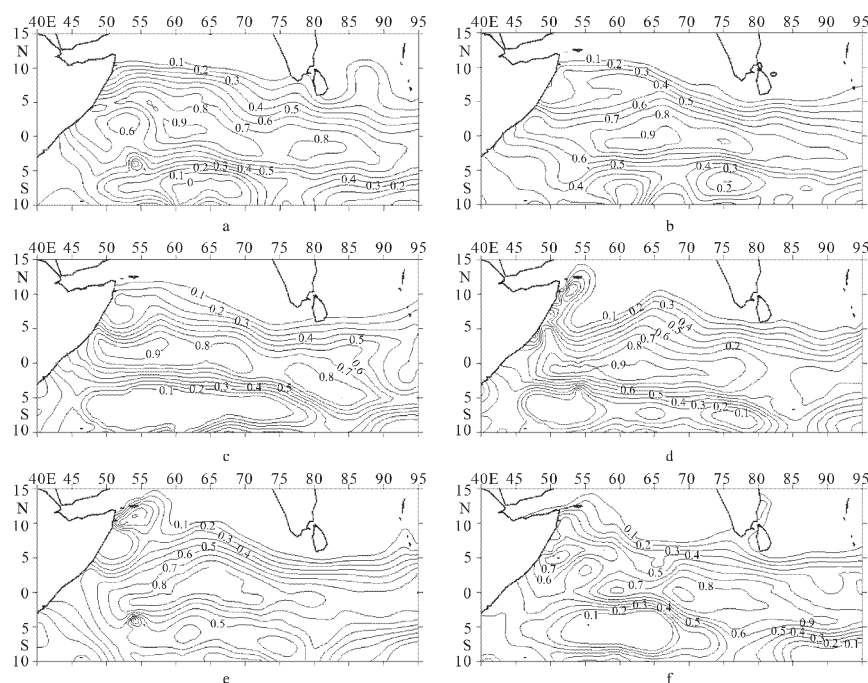


图4 最小值法计算出的 1975~1997 年不同月份下印度洋大眼金枪鱼 HSI 值的空间分布

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

Fig.4 HSI distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean calculated by equation Min during 1975~1997

a: January-February; b: March-April; c: May-June; d: July-August; e: September-October; f: November-December.

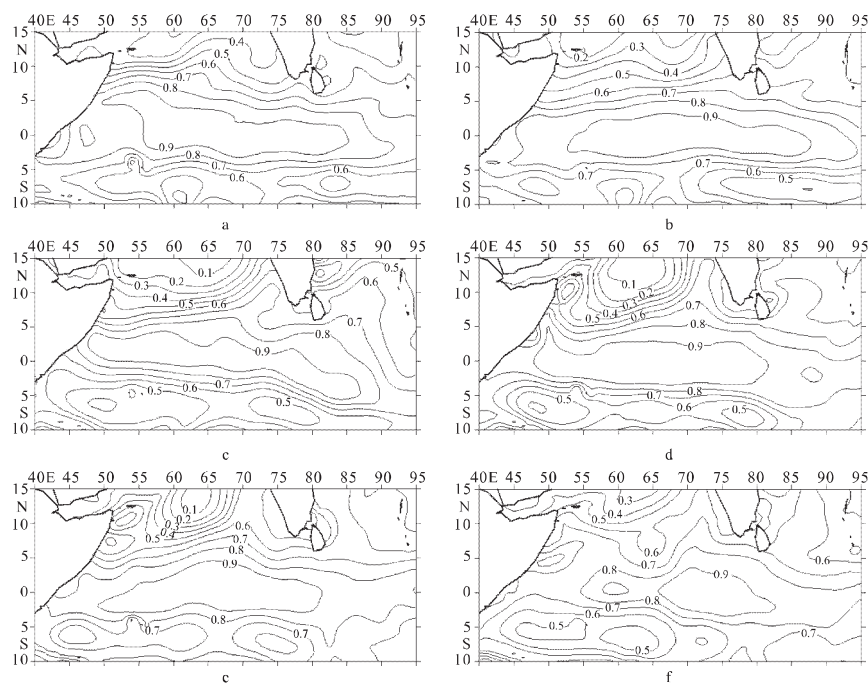


图5 算术平均法计算出的1975~1997年不同月份下印度洋大眼金枪鱼HSI值的空间分布
a: 1~2月; b: 3~4月; c: 5~6月; d: 7~8月; e: 9~10月; f: 11~12月。

Fig.5 HSI distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean calculated by equation AM during 1975~1997
a: January-February; b: March-April; c: May-June; d: July-August; e: September-October; f: November-December.

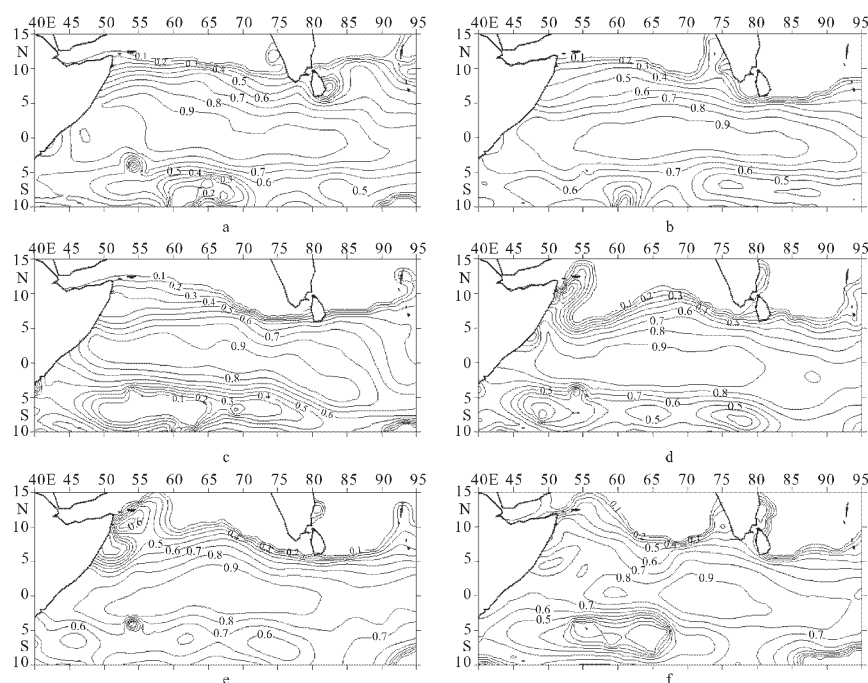


图6 几何平均法计算出的1975~1997年不同月份下印度洋大眼金枪鱼HSI值的空间分布
a: 1~2月; b: 3~4月; c: 5~6月; d: 7~8月; e: 9~10月; f: 11~12月。

Fig.6 HSI distribution of *Thunnus obesus* in the Indian Ocean calculated by equation GM during 1975~1997
a: January-February; b: March-April; c: May-June; d: July-August; e: September-October; f: November-December.

表 2 由最小值法和算术平均法计算出的不同 HSI 值所占区域平均百分比

Tab.2 Average covering percentage of area under different HSI levels calculated by Min and AM equations

HSI	最小值法 Min			算术平均法 AM		
	均值 Mean	标准差 Std	百分比 /% Percentage	均值 Mean	标准差 Std	百分比 /% Percentage
0-0.1	0.012	0.026	24.550	0.068	0.022	0.570
0.1-0.2	0.145	0.029	6.493	0.149	0.028	1.665
0.2-0.3	0.250	0.030	9.808	0.252	0.030	2.430
0.3-0.4	0.345	0.029	10.647	0.355	0.030	3.389
0.4-0.5	0.444	0.029	10.738	0.456	0.028	7.618
0.5-0.6	0.545	0.029	8.623	0.554	0.028	15.852
0.6-0.7	0.651	0.029	9.658	0.649	0.029	18.416
0.7-0.8	0.745	0.028	10.048	0.750	0.029	17.367
0.8-0.9	0.843	0.029	6.779	0.850	0.029	17.876
0.9-1.0	0.931	0.025	2.654	0.939	0.024	14.817

2.4 实证研究

4 种计算方法得不同 HSI 水平下 2004 年中国印度洋大眼金枪鱼延绳钓渔获情况 (表 3)。当 HSI<0.5 时, 4 种方法对应的平均渔获频次比重分别为 77.92%、50.65%、3.90%、14.28%; 当 HSI ≥ 0.5 时, 4 种方法对应的平均渔获频次比重分别为 22.08%、

49.35%、96.10%、85.51%。对于最小值法, 当 HSI ≥ 0.3 时, 渔获频次比重为 77.92%。但渔获率在不同 HSI 水平下却无显著的差别。对于几何平均法, 将 HSI 计算结果与 2004 年渔获进行叠加, 发现其渔获地点时空分布极不均匀 (图 7), 但大部分渔获地点出现 HSI ≥ 0.5 的范围内。

表 3 2004 年不同 HSI 水平下中国延绳钓渔船在印度洋的大眼金枪鱼渔获状况

Tab.3 Longline fishery capture of *Thunnus obesus* under different HSI levels in the Indian Ocean in 2004

HSI	连乘法 CP			最小值法 Min		
	渔获频次 Fishing frequency	渔获频次比重 /% Percentage of fishing time	平均钓获率 / (尾 • 1 000 钩 ⁻¹) Average hooking rate (No.per 1 000 hooks)	渔获频次 Fishing frequency	渔获频次比重 /% Percentage of fishing time	平均钓获率 / (尾 • 1 000 钩 ⁻¹) Average hooking rate (No.per 1 000 hooks)
0-0.1	16	20.78	10.87	3	3.90	11.30
0.1-0.2	10	12.99	11.59	8	10.39	10.83
0.2-0.3	15	19.48	11.03	6	7.79	11.18
0.3-0.4	12	15.58	10.63	9	11.69	11.08
0.4-0.5	7	9.09	9.33	13	16.88	12.10
0.5-0.6	3	3.90	6.94	10	12.99	10.12
0.6-0.7	3	3.90	9.16	12	15.58	8.95
0.7-0.8	5	6.49	8.53	6	7.79	8.01
0.8-0.9	5	6.49	10.48	8	10.39	10.09
0.9-1.0	1	1.30	12.61	2	2.60	11.00

HSI	算术平均法 AM			几何平均法 GM		
	渔获频次 Fishing frequency	渔获频次比重 /% Frequency percentage	平均钓获率 / (尾 • 1 000 钩 ⁻¹) Average hooking rate (No.per 1 000 hooks)	渔获频次 Fishing frequency	渔获频次比重 /% Frequency percentage	平均钓获率 / (尾 • 1 000 钩 ⁻¹) Average hooking rate (No.per 1 000 hooks)
0-0.1	—	—	—	—	—	—
0.1-0.2	—	—	—	—	—	—
0.2-0.3	—	—	—	1	1.30	17.02
0.3-0.4	1	1.30	17.02	3	3.90	11.33
0.4-0.5	2	2.60	12.64	7	9.09	10.78
0.5-0.6	9	11.69	9.33	6	7.79	9.04
0.6-0.7	13	16.88	11.38	19	24.68	11.42
0.7-0.8	25	32.47	11.16	18	23.38	10.60
0.8-0.9	14	18.18	8.80	10	12.99	8.79
0.9-1.0	13	16.88	9.82	13	16.88	9.82

注: “—”表示在匹配统计时, 未发现有数值出现。

Note: “—”representing no data in the statistic analysis.

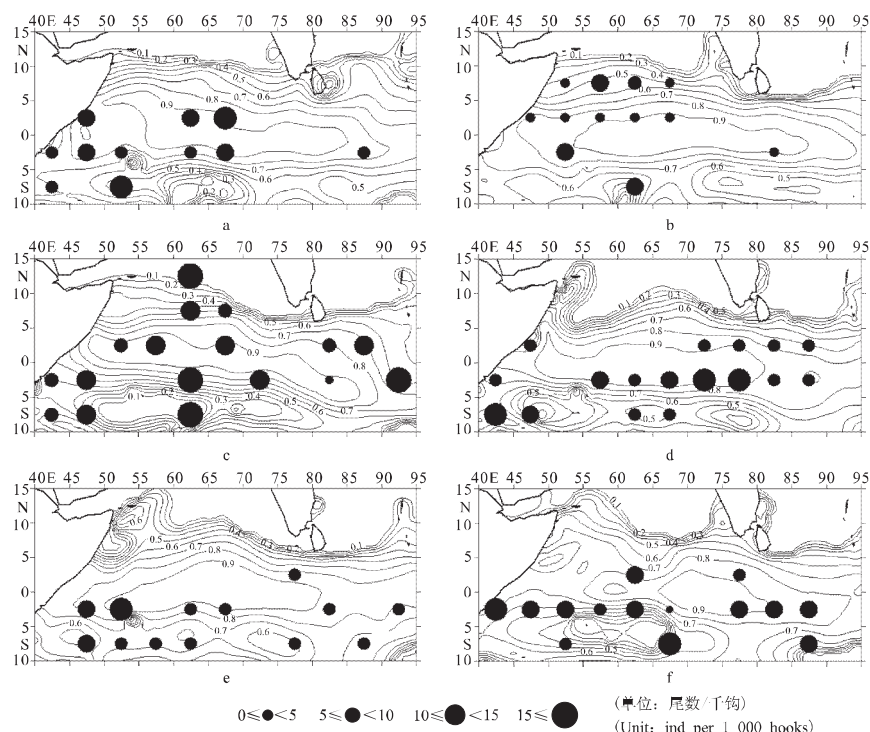


图7 2004年中国印度洋大眼金枪鱼延绳钓不同钓获率水平对图6的叠加图

Fig.7 Overlays of longline fishery hooking rate of *Thunnus obesus* against HSI distribution estimated by GM in 2004

3 讨论

3.1 大眼金枪鱼栖息地空间分布

从 HSI 分布的月变化可看出,大眼金枪鱼栖息地的适宜度由 5°N~5°S 间的赤道海域向南北两侧减小。这与王家樵^[7]得出的大眼金枪鱼温度 HSI 空间分布相近。HSI 等值线分布模式与冯波等^[20]的水温等值线分布模式存在相似之处,各月变化也呈现类似的趋势。其中 5°S~10°S 间的低 HSI 等值线分布形式对应于 14℃ 等温线形成的封闭区域,而该处 12 月至翌年 7 月为辐合下沉流海域,高钓获率分布相对较少。它的发生发展受到附近印度洋赤道辐合带 (Inter-tropic convergence zone, ITCZ) 密切影响^[21]。

不同方法指示的 HSI 分布存在明显的差异,其中连乘法指示的大眼金枪鱼分布适宜区域最为狭小,最小值法略为增大,算术平均法和几何平均法基本一致。这种差异源于计算方法的不同。利用 AIC 检验和空间分析可以帮助判断大眼金枪鱼的适宜栖息地。

3.2 HSI建模

不同模型方法计算得到的栖息地适度值与实际资源分布的拟合度,取决于建模者的目标以及模型的结构误差,不同的模型方法输出的结果存在明显的差异 (表 1)。只有准确的预测模型才能得出可靠的评价结果,栖息地模型在应用时需要慎重选择,特别是对于珍稀物种的管理和养护。评价一个栖息地模型的好坏,通常是将模型的输出值与实际资源相比较,但这并不等同于检验栖息地模型在预测某一物种栖息地质量时的准确度^[22]。因此在栖息地质量评价中,栖息地特征、物种对栖息地的选择与喜好等都是被考虑的重要因素。

3.3 不确定性问题

造成模型预测结果的不确定性主要分为三方面:一是模型曲线的可靠性,HSI 模型的曲线描述了栖息地变量与某一物种的适应性关系,这个关系取决于历史研究资料、野外经验和专家判断;二是输入数据的代表性,用于建模的数据通常采集于有限个站点,样本必须能够反映总体数据的分布特性,依赖有限个变量和输入值,不确定性就表

现为多维变化性,可以通过模型的检验和改进、扩大采集数据的典型性来降低 HSI 曲线和输入数据的不确定性^[13];三是模型的结构,针对同一数据,用不同模型评价得到结果可能有显著的差异。在解决前述两个问题后,引入模型的选择标准,常用的选择标准如 AIC 或 BIC 可有效地评价模型的优劣。

3.4 渔场预测的可行性

利用栖息地模型来选择渔场需要非常谨慎,因为不同的模型方法计算结果差异很大。依据连乘法来判断渔场显然不可靠,因为它在低 HSI 水平时出现了极高的渔获频次,偏离本题的假设。最小值法考虑了 HSI 的最低限度,预测结果较为保守,不利于对渔场动态的估计,它指示的区域可能为相对稳定的大眼金枪鱼产卵场所,但需要进行现场调查进一步证实^[23]。算术平均法和几何平均法具有较大的灵活性,可以用来帮助选择渔场。几何平均法虽然总体估计效果低于算术平均法,但在计算时考虑了单因素 SI 值偏小和偏大的极端影响,输出的结果也较为折中,所以是栖息地建模时最常用的方法^[10-11,15,22],其空间展布的图形介于最小值法和算术平均法之间,这里建议对几何平均法展开更多的检验与研究。值得注意的是 HSI 不能指示资源丰度(渔获率),原因是它所反映的渔场的环境指标尚不充分,而且为多年平均值,仅体现了印度洋大眼金枪鱼渔场的总体状况。同时也注意到高的渔获频率并不一定取得高的渔获率,因此在适宜鱼类栖息地进行更多的生产,可能是很好的策略。未来开发实时的动态多因素栖息地模型将有助于解决这一问题。

参考文献:

- [1] Duel H, Pedrolì B, Laane W E M. The habitat evaluation procedure in the policy analysis of inland waters in the Netherlands: towards ecological rehabilitation[C]//Leclerc M, Carpa H, Valentin S, Boureault A, Cote Y. Ecohydraulics 2000. 2nd International Symposium on habitat Hydraulics, Quebec, 1996: 619-630.
- [2] Gore J A, Hamilton S W. Comparison of flow-related habitat evaluations downstreams Regulated Rivers[J]. Res Manag, 1996, 12: 459-469.
- [3] Maddock I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. Freshw Biol, 1999, 41: 373-391.
- [4] Li X H, Li D M, Li Y M, et al. Habitat evaluation for crested ibis: A GIS-based approach[J]. Ecol Res, 2002, 17 (5): 565-573.
- [5] Nishida T, Bigelow K, Mohri M, et al. Comparative study on Japanese tuna longline CPUE standardization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Indian ocean based on two methods: general linear model (GLM) and habitat-based model(HBM)/GLM combined[C]. IOTC Proceedings, 2003, 6: 48-69.
- [6] Lee P F, Chen I C, Tzeng W N. Spatial and temporal distribution patterns of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean[J]. Zool Stuy, 2005, 44 (2): 260-270.
- [7] 王家樵. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数模型研究 [D]. 上海: 上海水产大学, 2006: 1-40.
- [8] Bayer M, Porter W F. Porter evaluation of a guild approach to habitat assessment for forest-dwelling birds[J]. Environ Manag, 1988, 12 (6): 797-801.
- [9] 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]. Belgium: Vrije Universiteit Brussel, 2000.
- [10] US Fish and Wildlife Service. Habitat evaluation procedures (HEP) [M]//Ecological Service Manual 102. Washington D.C. 1980.
- [11] US Fish and Wildlife Service. Standards for the development of habitat suitability index models[M]//Ecological Service Manual 103. Washington D.C. 1980.
- [12] Grebenkov A, Lukashovich A, Linkov I, et al. A habitat suitability evaluation technique and its application to environmental risk assessment. Detection and Disposal of Improvised Explosives[M]. Springer Netherlands, 2006: 191-201.
- [13] Van der Lee G E M, Van der Molen D T, Van den Boogaard H F P, et al. Uncertainty analysis of a spatial habitat suitability model and implications for ecological management of water bodies[J]. Landsc Ecol, 2006, 21 (7): 1 019-1 032.
- [14] Hess G R, Bay J M. A regional assessment of windbreak habitat suitability[J]. Environ Monitor Assess, 2000, 6 (12): 239-256.
- [15] Lauver C L, Busby W H, Whistler J L. Testing a GIS model of habitat suitability for a declining grassland bird[J]. Environ Manag, 2002, 30 (1): 88-97.
- [16] 王艳君, 刘群, 任一平. AIC 与 BIC 在亲体一补充量模型选

- 择中的应用及比较 [J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35 (3): 397-403.
- [17] Mohri M. Seasonal change in bigeye tuna fishing areas in relation to the oceanographic parameters in the Indian Ocean[J]. J Nat Fish Univ, 1999, 47 (2): 43-54.
- [18] Mohri M. Distribution of bigeye tuna in the Indian Ocean based on the Japanese tuna longline fisheries and survey information[D]. Japan: National Fisheries University, 1998: 1-187.
- [19] 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: 上海水产大学 2003: 1-63.
- [20] 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.
- [21] 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: 104-106.
- [22] Wakeley J S. A method to create simplified versions of existing habitat suitability index (HSI) models[J]. Environ Manag, 1988, (1): 79-83.
- [23] Mohri M, Nishida T. Distribution of bigeye tuna and its relationship to the environmental conditions in the Indian Ocean based on the Japanese longline fisheries information[C]. Proceedings of the IOTC/WPTT/99/11. 1999: 221-230.

A comparative study on habitat suitability index of bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean

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

(1.Ocean College, Shanghai Fisheries Univeristy, Shanghai 200090, China; 2.Fisheries College, Guangdong Ocean Univeristy, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Suitability index curves about water temperature, salinity, dissolved oxygen and thermocline depth for bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean were drawn based on the commercial tuna longline fishery data and environmental data as well as expertise knowledge. Integrated habitat suitability index was computed using four conjunction equations, i.e. continued product model (CP), minimum model (Min), arithmetic mean model (AM) and geometric mean model (GM). Goodness of fit of the four modeling methods was tested by Akaike Information Criterion (AIC) and the results of different modeling methods were compared using spatial analysis. The best goodness of fit was given by minimum model which gave rigorous estimation whereas the worst was given by arithmetic mean model which gave coarse estimation. Area distribution of habitat suitability index (HSI) are greatly differently indicated by various methods. Contour of HSI>0.9 concentrated at equatorial waters of 55°E~68°E which come from the continued product model. Contour of HSI>0.9 concentrated at equatorial waters of 50°E~75°E which resulted from the minimum model. Contour of HSI>0.9 distributed in the range of 50°E~85°E and 5°N~5°S throughout the year which was indicated by the arithmetic mean model and the geometric mean model. Contour of HSI=0.4 indicated by the minimum model was equivalent to that of HSI=0.7 by the arithmetic mean model. Contour of HSI=0.6 indicated by the minimum model was equivalent to that of HSI=0.8 by the arithmetic mean model. Contour of HSI=0.7 indicated by the minimum model was equivalent to that of HSI=0.9 by the arithmetic mean model. An empirical study confirmed that the arithmetic mean model and the geometric mean model could give a reliable estimation for fishing area and fishing frequency with the fishing frequency percentages reaching 96.10% and 85.51%, respectively. It is helpful to develop a real-time habitat dynamic model for detection of fishing ground in the future. [Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15 (2): 269-278]

Key words: *Thunnus Obesus*; habitat suitability index; Indian Ocean; empirical study