

文章编号: 1674-5566(2020)02-0268-12

DOI:10.12024/jsou.20190202533

## 印度洋长鳍金枪鱼栖息地指数模型的构建与验证

张亚男<sup>1</sup>, 官文江<sup>1,2,3,4</sup>, 李阳东<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 3. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306; 4. 上海市河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:**长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)因其经济价值、分布广泛,成为世界各国海洋渔业的主要捕捞对象之一。对长鳍金枪鱼进行渔场预报研究,可以提高捕捞效率和渔获产量,为渔业生产提供科学依据。选取了2006—2014年印度洋长鳍金枪鱼的生产数据,结合海洋表层的温度、盐度和叶绿素a浓度等3个环境因子,运用一元非线性指数模型按月份建立了各环境因子的印度洋长鳍金枪鱼单因子栖息地适应性指数(suitability index, SI)后,采用算术平均法获得综合栖息地适应性指数模型(habitat suitability index, HSI),并根据2016年印度洋渔业生产数据及相应海洋环境资料,基于地理信息系统(geographic information system, GIS)软件——ArcGIS对栖息地指数模型进行验证。研究表明该模型对渔场预报准确率约为90.56%,各HSI等级下平均预报准确率为87.46%,对于HSI等级4和5( $I_{HSI} > 0.5$ )等较高HSI值渔区所代表的中心渔场,其平均准确率为71.82%,考虑到 $I_{HSI} > 0.5$ 的产量平均比重达69.35%这一事实,说明所建立的HSI模型对印度洋长鳍金枪鱼具有较好的预报效果。

**关键词:** 栖息地指数模型; 渔场预报; 长鳍金枪鱼; 印度洋; 地理信息系统

**中图分类号:** S 934      **文献标志码:** A

长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是主要的经济性金枪鱼鱼种之一<sup>[1]</sup>,在太平洋、大西洋和印度洋均有分布<sup>[2]</sup>。由于长鳍金枪鱼是大洋中上层高度洄游性鱼种,其空间分布与环境因子存在着密切联系,因此结合环境因子对该鱼种进行渔场预报是一种较为可靠的思路<sup>[3-5]</sup>。其中,栖息地指数(habitat suitability index, HSI)基于若干环境因子用来反映生物体对其栖息环境的适应程度,已经广泛地运用到渔场资源预报领域中<sup>[6-9]</sup>。

目前,不少专家学者结合环境因子对太平洋等海域的长鳍金枪鱼渔场进行了研究,栖息地指数模型在东太平洋<sup>[10-12]</sup>和南太平洋<sup>[13-14]</sup>已经得到较好的研究和运用,但由于海洋环境的复杂性,栖息地指数模型在其他海域的研究还很匮乏。印度洋海域是世界上重要的金枪鱼生产海区,长鳍金枪鱼是该海域主要的金枪鱼渔获鱼种之一,主要的捕捞国家和地区包括日本、韩国以

及我国台湾省,我国大陆在该海区的捕捞产量也在逐步上升<sup>[15-16]</sup>。关于印度洋长鳍金枪鱼渔场及资源量的研究,陈雪忠等<sup>[17]</sup>基于随机森林对长鳍金枪鱼渔场进行了预报,官文江等<sup>[2]</sup>对影响印度洋长鳍金枪鱼资源评估的因素进行了分析,然而相较于其他海域,印度洋长鳍金枪鱼资源量分布的相关研究还需要进一步加强。

为研究该海域长鳍金枪鱼渔场的分布情况及其与环境因子之间的关系,选取2006—2014年和2016年的印度洋金枪鱼渔业委员会(Indian Ocean Tuna Commission, IOTC)长鳍金枪鱼渔获数据,结合Argo海表温度(sea surface temperature, SST)、盐度(sea surface salinity, SSS)和卫星遥感叶绿素a浓度(chlorophyll a concentration, *Chl. a*)等因子数据,在地理信息系统(geographic information system, GIS)软件——ArcGIS支持下,建立并验证多环境因子的栖息地

收稿日期: 2019-02-22      修回日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金浙江两化融合联合基金(U1609202); 国家重点研发计划(2016YFC1400903, 2019YFD0901404)

作者简介: 张亚男(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源评估与信息化。E-mail: ynzhangshou@163.com

通信作者: 李阳东, E-mail: ydli@shou.edu.cn

综合指数模型,探索渔场资源分布与环境因子之间的关系,为印度洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域为 20°E ~ 120°E, 20°N ~ 50°S 的印度洋海域。图 1 显示了根据 IOTC 延绳钓产量数据统计得到的印度洋海域 2006—2014 年和 2016 年共 10 年时间的 5° × 5° 渔区累积产量分布。在这 10 年间,作业渔区遍布整个印度洋海域,高产渔区主要分布在西南印度洋,最高的渔区累积产量约为 2.7 万 t。

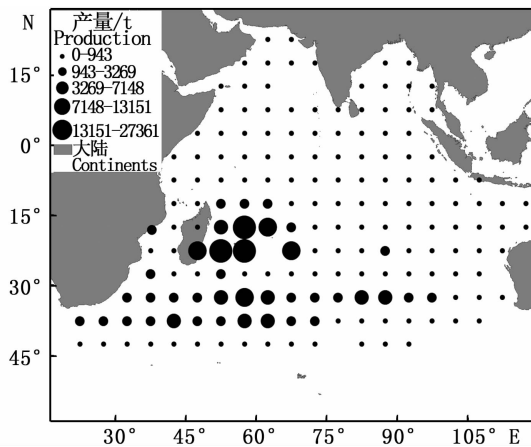


图 1 印度洋长鳍金枪鱼渔场 10 年产量累计分布图

Fig. 1 Cumulative distribution map of Indian Ocean albacore tuna fishing grounds for ten years

### 1.2 数据来源及处理

主要利用了渔业生产数据、SST、SSS 和 *Chl. a* 等数据。其中,选取 2006—2014 年的渔业数据和相关环境因子数据建立 HSI 模型,而 2016 年数据则用于对该模型进行精度验证。渔业生产数据来源于 IOTC (<http://www.iotc.org/>) 的长鳍金枪鱼生产统计数据,这些数据包括经纬度、作业日期、放钩数、渔获尾数与渔获产量等要素,数据的时间尺度为月,水平空间尺度为 1° × 1° 或 5° × 5°。其中,研究所需数据是按年分月统计的产量数据,将该数据集两种空间尺度数据进行质量控制(剔除 0 和 1 低质量代码的数据)之后,按月份统一网格化成 5° × 5° 渔区产量数据。

SST 和 SSS 数据均来源于中国 Argo 实时资料中心 (<http://www.argo.org.cn/>) 的逐年逐月全

球海洋 Argo 网格数据集产品 (BOA-Argo),其水平空间分辨率是 1° × 1°,垂向共 58 层。利用 ArcGIS 10.3 软件的多维工具分别提取温度与盐度数据,并将 2006—2014 年和 2016 年数据按月份通过平均值法重采样到与渔区产量数据一致的 5° × 5° 空间分辨率。

*Chl. a* 数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) OceanWatch 网站 (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/index.html>) 的 Aqua MODIS 卫星的月均产品,其空间分辨率为 0.05° × 0.05°。利用 ArcGIS 10.3 软件将 2006—2014 年和 2016 年数据按月份通过平均值法重采样到与渔区产量数据一致的 5° × 5° 空间分辨率。

### 1.3 栖息地指数模型的构建

利用 2006—2014 年的各月渔获产量数据分别与相应时期的 SST、SSS 和 *Chl. a* 数据构建单一因子的适应性指数 (Suitability Index, SI) 模型。各月单因子 SI 构建方法如下:

将 SST 按 0.5 °C、SSS 按 0.1、*Chl. a* 按 0.02 mg/m<sup>3</sup> 组距进行分类,每个组距间隔统计其对应的长鳍金枪鱼总产量。然后按照公式(1)计算各月单因子栖息地指数  $I_{SI}$  [18]。

$$I_{SI} = C_i / C_{max} \quad (1)$$

式中: $I_{SI}$  为各环境因子的适应性指数; $C_i$  为  $i$  分类间隔的捕捞产量; $C_{max}$  为各分类间隔中的最大捕捞产量。这里假定分类间隔中最高渔获产量  $C_{max}$  为长鳍金枪鱼资源最适宜的因子区间,认定其  $I_{SI}$  为 1;当分类间隔渔获量为 0 时,则认定长鳍金枪鱼资源最不适宜的因子区间,其  $I_{SI}$  为 0 [19]。

使用各月 SST、SSS、*Chl. a* 因子各分类间隔的中间值与各间隔相应  $I_{SI}$  之间的关系构建一元非线性模型,运用 DPS 7.5 软件求解一元非线性回归方程参数。一元非线性模型公式为:

$$I_{SI} = e^{-a(X-b)^2} \quad (2)$$

式中: $I_{SI}$  为各环境因子的适应性指数; $X$  为各环境因子分类间隔所对应中间值; $a$ 、 $b$  为估算参数。

当针对 SST、SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子分别构建单一因子适应性指数模型后,采用算术平均法构建 HSI 模型 [20],  $I_{HSI}$  在 0 ~ 1 即不适宜到最适宜之间变化。计算公式为:

$$I_{HSI} = (I_{SI-SST} + I_{SI-SSS} + I_{SI-Chl.a}) / 3 \quad (3)$$

式中: $I_{HSI}$ 为综合栖息地适应性指数, $I_{SI-SST}$ 、 $I_{SI-SSS}$ 和 $I_{SI-Chl.a}$ 分别代表 SST、SSS 和 *Chl. a* 各环境因子的单因子适应性指数。

#### 1.4 栖息地指数模型的验证

为检验上述 HSI 模型的预报结果空间分布及精度情况,选用 2016 年海洋环境数据对长鳍金枪鱼 HSI 分布进行预报,并利用 IOTC 实际产量数据对预报结果进行验证。首先,利用 2016 年  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  的月平均 SST、SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子,基于 ArcGIS 10.3 软件栅格计算功能,使用公式(2)和公式(3)计算覆盖印度洋海域各渔区的  $I_{HSI}$  值,即得到 2016 年各月的 HSI 预报结果。然后,将 2016 年各月的 HSI 预报结果和实际产量数据按自然断裂法(Natural Break-Jenks)<sup>[21]</sup> 从低到高自然划分为 5 个等级。其中, $I_{HSI}$  值 5 个等级分别为:等级 1( $0 \leq I_{HSI} < 0.1$ )、等级 2( $0.1 \leq I_{HSI} < 0.3$ )、等级 3( $0.3 \leq I_{HSI} < 0.5$ )、等级 4( $0.5 \leq I_{HSI} < 0.7$ )、等级 5( $0.7 \leq I_{HSI} \leq 1$ )。最后,将计算及分类所得的 2016 年各月 HSI 及其实际产量等级叠加可视化,以分析和对比他们的吻合程度。

为进一步定量和定性分析与检验渔场预报结果,根据上述印度洋长鳍金枪鱼预报 HSI 分布及其实际产量分级数据,利用 ArcGIS 10.3 软件提取各渔场分类后的 HSI 等级,并与实际产量等级做差。对于同一个  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  作业渔区,如果预报 HSI 等级与实际产量等级差小于或等于 2,则认为该模型计算的 HSI 能够准确预测渔场的适宜度;如果等级差大于 2,则认为模型不能正确预测该渔场的适宜度<sup>[22]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 SI 模型的建立

图 2 表示了 1—12 月 SST、SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子的适应性指数散点图及其基于一元非线性指数模型(公式 2)建立的适应性指数 SI 拟合曲线。由图 2 中各环境因子散点图和对应的 SI 拟合曲线可知,印度洋长鳍金枪鱼 3 种环境因子的适应性均呈季节性变化。

春季(3—5 月)和夏季(6—8 月)印度洋长鳍金枪鱼最适 SST 范围均为  $17.5 \sim 19^{\circ}\text{C}$ 。秋季(9—11 月)最适范围变化较大:9 月为  $17.5 \sim 18.5^{\circ}\text{C}$ ,10 月为  $23.5 \sim 25^{\circ}\text{C}$ ,11 月为  $25 \sim 27^{\circ}\text{C}$ 。冬季(12—2 月)最适范围在  $25 \sim 28.5^{\circ}\text{C}$ 。春夏

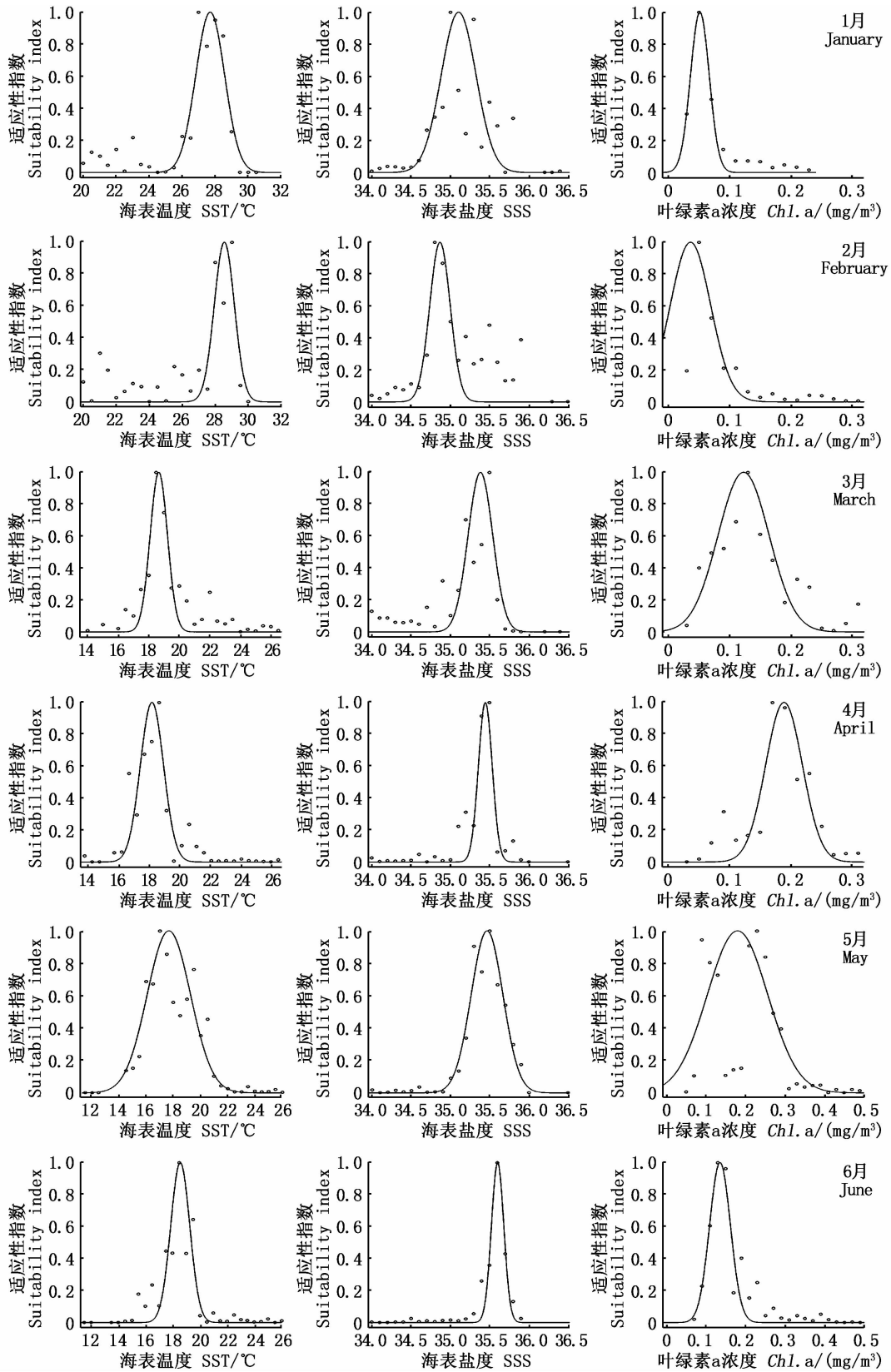
季(3—8 月)的最适 SSS 范围为  $35.3 \sim 35.7$ 。秋季的 9 月最适盐度范围为  $35.5 \sim 35.7$ ,10—11 月以及冬季的 12—2 月的最适范围降低为  $34.8 \sim 35.3$ 。

春季最适 *Chl. a* 范围在  $0.06 \sim 0.22 \text{ mg/m}^3$ ,夏季为  $0.12 \sim 0.16 \text{ mg/m}^3$ 。秋季最适范围总体在  $0.04 \sim 0.2 \text{ mg/m}^3$ :9 月为  $0.08 \sim 0.2 \text{ mg/m}^3$ ,10 月为  $0.05 \sim 0.12 \text{ mg/m}^3$ ,11 月为  $0.04 \sim 0.06 \text{ mg/m}^3$ 。冬季最适范围为  $0.02 \sim 0.07 \text{ mg/m}^3$ 。

表 1-3 为 1—12 月 SST、SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子对应的 SI 模型的估算参数、相关系数  $R^2$ 、及各参数相应的  $P$  值、95% 置信区间。由表 1~表 3 可见,除 3 月和 9 月外,其余月份 SST 对应的 SI 模型  $R^2$  均大于 0.65,拟合系数均通过显著性检验( $P < 0.001$ );除 1—3 月外,SSS 对应的 SI 模型  $R^2$  均大于 0.70,拟合系数均通过显著性检验( $P < 0.001$ );除 8 月外,*Chl. a* 对应的 SI 模型  $R^2$  均大于 0.72,拟合系数均通过显著性检验( $P < 0.001$ )。

### 2.2 HSI 模型渔场预报及其验证

将计算及分类所得的 2016 年各月 HSI 及其实际产量等级叠加可视化,以分析和对比预报结果和实际产量分布的吻合程度,叠加结果如图 3 所示。由图 3 可知,印度洋海域长鳍金枪鱼实际产量等级  $> 3$  的作业渔区主要分布在预报 HSI 等级 4 和 5 ( $I_{HSI} > 0.5$ ) 较高 HSI 值渔区,较高 HSI 分布范围略大于实际高产量分布范围。春季(4—5 月)、夏季(6—8 月)实际高产量等级与预报的高 HSI 等级均往印度洋中南部偏移,主要呈现带状分布在  $50^{\circ}\text{E} \sim 95^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$  附近海域的渔区;秋季(9—11 月)渔场开始转移,9 月的实际高产量等级与预报高 HSI 等级仍然主要分布在  $45^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{E}$ 、 $10^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$  附近海域的渔区,10—11 月的高产量等级与高 HSI 等级已转移至  $45^{\circ}\text{E} \sim 65^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$  附近海域的渔区;冬季(12—2 月)的实际高产量等级与预报高 HSI 等级分布在  $45^{\circ}\text{E} \sim 65^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$  附近海域的渔区。图 3 中,仅 3 月份作为冬、春季过渡月,两种等级分布差异较大:预报较高 HSI 等级分布在印度洋南部  $50^{\circ}\text{E} \sim 95^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$  海区,而实际作业高产量等级在  $45^{\circ}\text{E} \sim 65^{\circ}\text{E}$ 、 $15^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{S}$  与  $50^{\circ}\text{E} \sim 95^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$  带状海域附近均有分布。



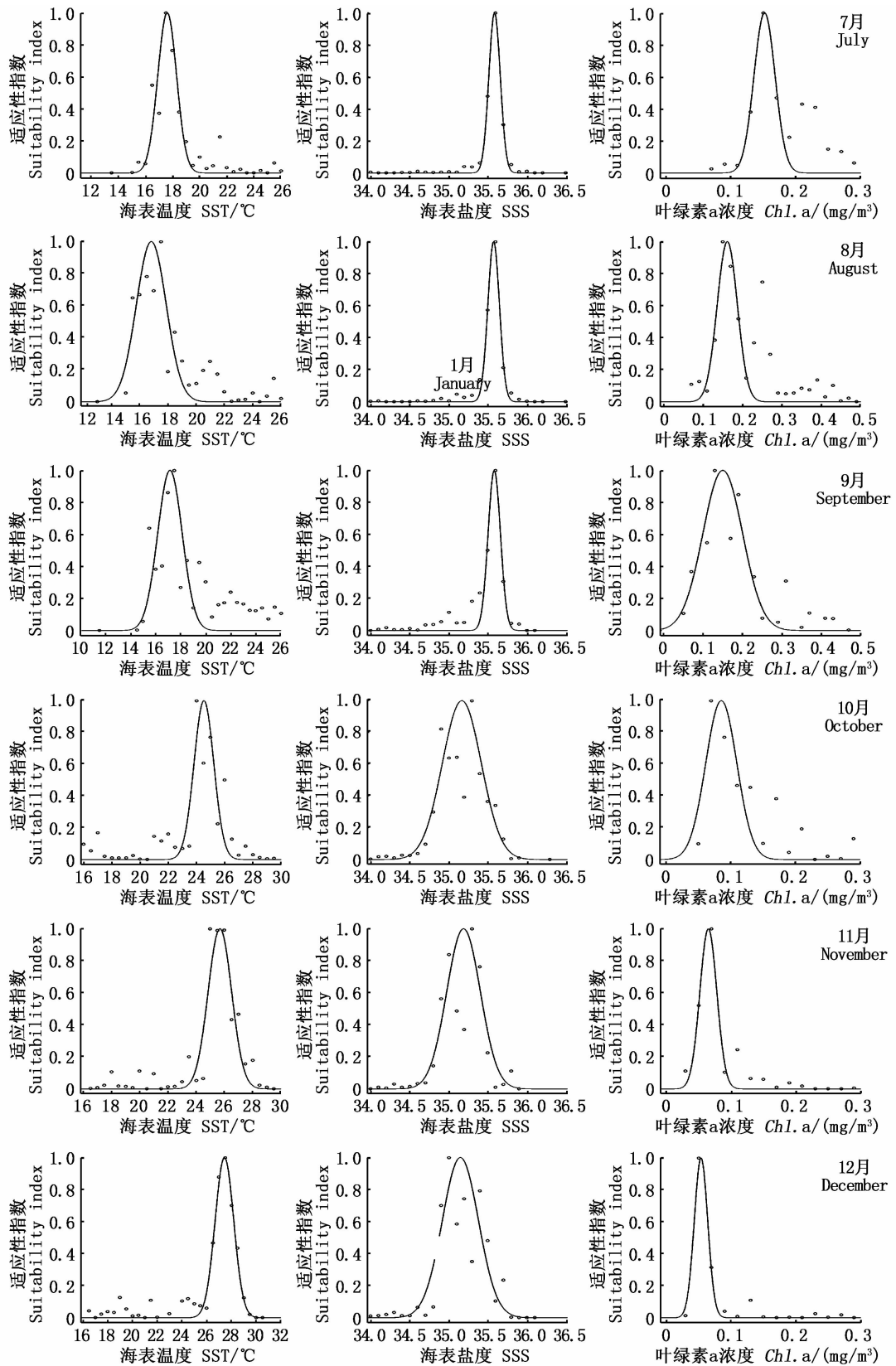


图2 1—12月 SST、SSS 和 Chl. a 因子印度洋长鳍金枪鱼适应性曲线

Fig.2 Monthly suitability index fitting curves of Indian Ocean albacore tuna to SST, SSS and Chl. a

表 1 SST 适应性指数模型统计量  
Tab.1 Statistics of SST suitability index model

月份 Month	拟合数据量 $n$ Fitting quantity	相关系数 $R^2$ Correlation coefficient	参数 $a$ Parameter $a$			参数 $b$ Parameter $b$		
			估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval	估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval
1	38	0.856	0.649	0.0001	[0.468,0.831]	27.702	0.0001	[27.552,27.853]
2	31	0.670	1.347	0.0001	[0.724,1.970]	28.539	0.0001	[28.366,28.711]
3	34	0.448	1.546	0.0017	[0.629,2.463]	18.663	0.0001	[18.456,18.869]
4	36	0.796	0.824	0.0001	[0.567,1.081]	18.020	0.0001	[17.871,18.168]
5	36	0.808	0.197	0.0001	[0.145,0.249]	17.665	0.0001	[17.413,17.917]
6	36	0.747	1.019	0.0001	[0.682,1.356]	18.563	0.0001	[18.421,18.705]
7	31	0.851	1.028	0.0001	[0.736,1.320]	17.611	0.0001	[17.490,17.732]
8	31	0.753	0.445	0.0001	[0.287,0.602]	16.824	0.0001	[16.601,17.047]
9	32	0.413	0.520	0.0002	[0.274,0.766]	17.153	0.0001	[16.869,17.437]
10	28	0.666	1.018	0.0001	[0.584,1.452]	24.530	0.0001	[24.347,24.713]
11	31	0.872	0.721	0.0001	[0.506,0.937]	25.685	0.0001	[25.532,25.837]
12	34	0.959	0.885	0.0001	[0.751,1.019]	27.444	0.0001	[27.375,27.514]

表 2 SSS 适应性指数模型统计量  
Tab.2 Statistics of SSS suitability index model

月份 Month	拟合数据量 $n$ Fitting quantity	相关系数 $R^2$ Correlation coefficient	参数 $a$ Parameter $a$			参数 $b$ Parameter $b$		
			估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval	估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval
1	34	0.495	10.080	0.0001	[5.616,14.543]	35.106	0.0001	[35.046,35.167]
2	28	0.544	29.349	0.0010	[13.030,45.667]	34.868	0.0001	[34.824,34.913]
3	26	0.543	20.167	0.0003	[10.301,30.033]	35.384	0.0001	[35.337,35.431]
4	28	0.875	64.724	0.0001	[41.789,87.659]	35.447	0.0001	[35.428,35.465]
5	29	0.953	12.150	0.0001	[10.140,14.160]	35.465	0.0001	[35.445,35.485]
6	27	0.942	80.395	0.0001	[64.276,96.513]	35.604	0.0001	[35.593,35.614]
7	30	0.995	93.170	0.0001	[87.736,98.604]	35.588	0.0001	[35.585,35.591]
8	27	0.986	90.691	0.0001	[80.642,100.740]	35.576	0.0001	[35.571,35.582]
9	28	0.923	79.861	0.0001	[61.240,98.482]	35.584	0.0001	[35.572,35.596]
10	26	0.720	7.962	0.0001	[5.089,10.835]	35.168	0.0001	[35.113,35.224]
11	34	0.702	10.695	0.0001	[6.839,14.550]	35.190	0.0001	[35.142,35.238]
12	33	0.741	9.252	0.0001	[6.085,12.419]	35.150	0.0001	[35.101,35.199]

表 3  $Chl. a$  适应性指数模型统计量  
Tab.3 Statistics of  $Chl. a$  suitability index model

月份 Month	拟合数据量 $n$ Fitting quantity	相关系数 $R^2$ Correlation coefficient	参数 $a$ Parameter $a$			参数 $b$ Parameter $b$		
			估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval	估计值 Estimated value	$P$	95% 置信区间 95% confidence interval
1	34	0.975	2118.368	0.0001	[1863.274,2373.462]	0.056	0.0001	[0.050,0.053]
2	27	0.966	459.029	0.0001	[272.421,645.637]	0.036	0.0001	[0.028,0.044]
3	24	0.791	287.923	0.0001	[194.465,381.381]	0.127	0.0001	[0.115,0.131]
4	26	0.827	552.082	0.0001	[359.696,744.468]	0.189	0.0001	[0.182,0.195]
5	26	0.852	85.720	0.0001	[60.356,111.084]	0.180	0.0001	[0.167,0.194]
6	26	0.876	715.781	0.0001	[490.090,941.471]	0.136	0.0001	[0.131,0.141]
7	25	0.658	1874.854	0.0007	[878.782,2870.925]	0.152	0.0001	[0.146,0.157]
8	32	0.591	760.471	0.0006	[353.685,1167.257]	0.162	0.0001	[0.153,0.170]
9	21	0.826	196.373	0.0001	[124.801,267.946]	0.150	0.0001	[0.139,0.161]
10	25	0.727	867.075	0.0003	[450.36,1283.789]	0.086	0.0001	[0.079,0.092]
11	27	0.928	2902.970	0.0001	[2130.048,3675.892]	0.065	0.0001	[0.063,0.067]
12	27	0.977	4615.511	0.0001	[3821.968,5409.050]	0.054	0.0001	[0.053,0.055]

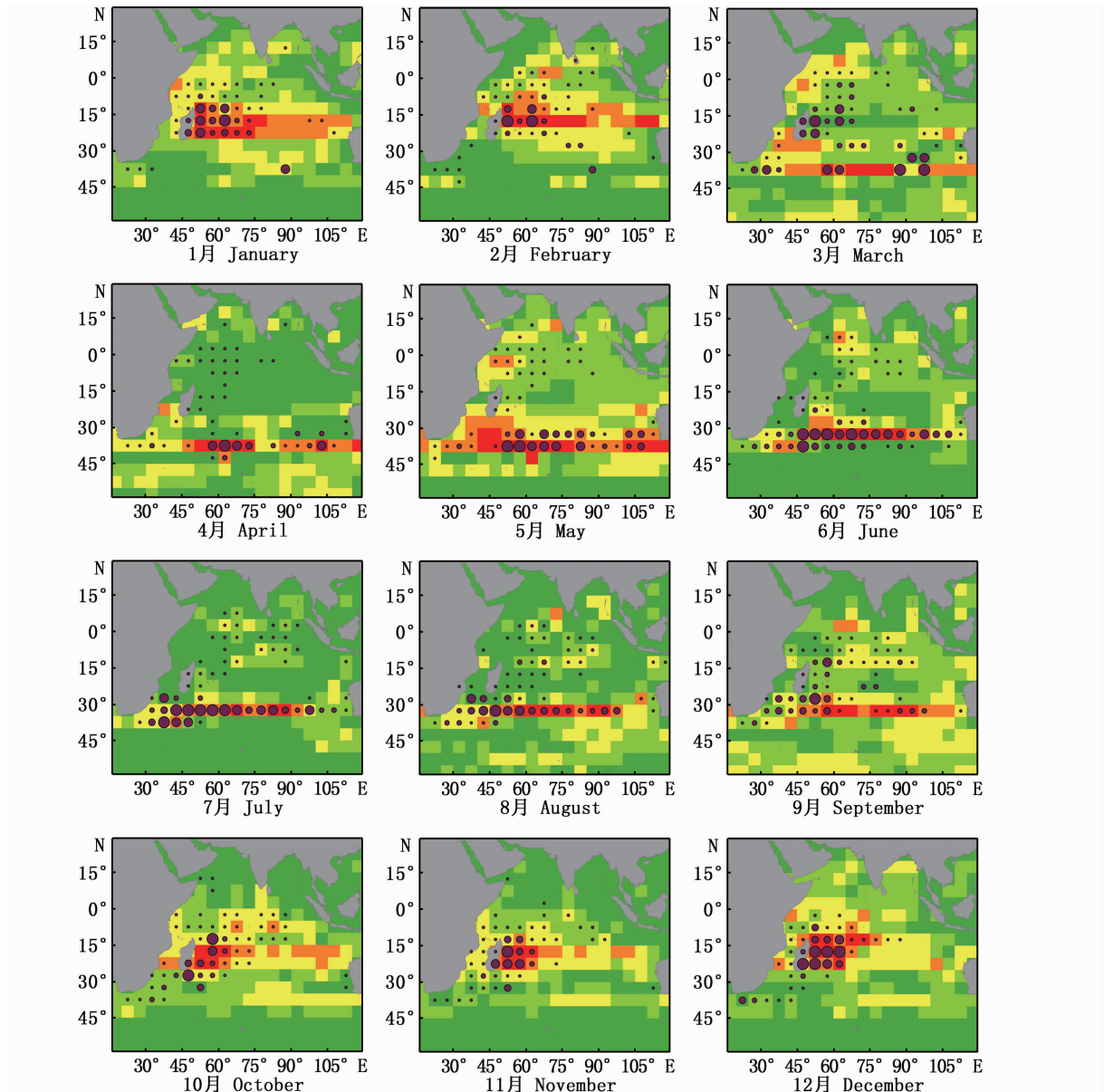


图3 2016年各月印度洋长鳍金枪鱼栖息地指数 HSI 及其实际产量等级分布图

Fig. 3 Distribution of monthly HSI and its actual production grades for Indian Ocean albacore tuna in 2016

表5和表6分别表示渔场总体预报结果和各 HSI 等级下渔场预报准确率。由表5可知,2016年1—12月印度洋长鳍金枪鱼渔场平均准确率达90.56%。由表6可知,低 HSI 等级(等级1~3)准确率普遍较高;高 HSI 等级(等级4~5)通常为中心渔场,其准确率明显低于低 HSI 等级的准确率。表7统计了2016年各月不同 HSI 等级下渔获产量占该月总产量的比重。由表7可知,

低 HSI 等级(等级1~3)下的渔获产量仅占全年总渔获产量的30.65%;高 HSI 等级(等级4、5)下的渔获产量占全年总渔获产量的69.35%。综合表5~表7可知,HSI 等级4和5下的平均预报准确率为71.82%,考虑到预报 HSI 等级4和5的产量占总产量之比为69.35%(29.65%+39.70%),说明 HSI 模型能够较好地预报印度洋长鳍金枪鱼中心渔场的分布。

表 5 2016 年各月渔场预报结果统计  
Tab. 5 Statistics of monthly fishing ground forecast results in 2016

月份 Month	作业渔区数 Number of fishing areas	预报准确 Forecast accuracy		预报不准确 Inaccurate forecast	
		正确渔区数 Number of correct fishing areas	准确率 Accuracy rate/%	不正确渔区数 Number of incorrect fishing areas	不准确率 Inaccuracy rate/%
1	43	37	86.05	6	13.95
2	49	43	87.76	6	12.24
3	52	47	90.38	5	9.62
4	49	45	91.84	4	8.16
5	59	50	84.75	9	15.25
6	64	62	96.88	2	3.12
7	59	58	98.31	1	1.69
8	63	59	93.65	4	6.35
9	59	53	89.83	6	10.17
10	54	47	87.04	7	12.96
11	49	47	95.92	2	4.08
12	41	35	85.37	6	14.63
平均	53	48	90.56	5	9.44

表 6 2016 年各月不同 HSI 等级下渔场预报准确率统计

Tab. 6 Statistics of accuracy for monthly fishing ground forecast according to each HSI grade in 2016 %

HSI 等级 HSI grade	不同月份渔场预报准确率 Forecast accuracy of fishing grounds in different months												平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	100	100	55.56	100	100	100	95.24	95.45	100	100	87.50	100	94.48
2	100	100	100	100	100	94.74	100	100	95.45	100	100	100	99.18
3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4	62.50	28.57	66.67	33.34	52.94	85.71	100	66.67	100	14.28	75.00	55.56	61.77
5	62.50	80.00	100	100	87.50	100	100	85.71	16.67	75.00	100	75.00	81.87
平均 Average	85.00	81.71	84.45	86.67	88.09	96.09	99.05	89.57	82.42	77.86	92.50	86.11	87.46

表 7 2016 年各月不同 HSI 等级下渔获产量比重

Tab. 7 The proportion of monthly catch production according to each HSI grade in 2016 %

HSI 等级 HSI grade	不同月份渔获产量所占比重 The proportion of catches in different months												平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0.00	7.76	34.32	7.32	5.13	5.13	6.24	14.80	3.34	5.83	7.75	2.39	8.33
2	1.22	0.70	15.25	0.15	1.57	14.48	4.72	8.21	13.62	5.07	1.63	2.94	5.80
3	22.58	8.77	19.02	4.35	14.29	9.03	24.21	13.52	24.64	33.15	7.80	16.92	16.52
4	43.76	18.35	28.25	2.95	30.63	25.18	47.06	39.48	33.83	26.71	22.73	36.90	29.65
5	32.44	64.42	3.16	85.23	48.38	46.18	17.77	23.99	24.57	29.24	60.09	40.85	39.70

### 3 分析与讨论

#### 3.1 各环境因子适应性指数分析

由图 2 的模型曲线图和表 1~3 模型拟合精度可知,印度洋长鳍金枪鱼与 SST、SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子存在显著的指数关系 ( $P$  均小于 0.001),表明基于一元非线性指数模型能够较好地反映印度洋长鳍金枪鱼在各环境因子下的适应性变化趋势。

另外,从图 2 的散点图及其拟合的模型曲线可知,印度洋长鳍金枪鱼最适宜温度存在明显的季节性变化,冬季(12—2 月)最适温度分布在 27.5~28.5℃;3 月为冬春过渡月最适温度分布在 18.5~19℃;春、夏季(4—8 月)最适温度分布在 17.5~18.5℃;秋季温度适应性变化较大,9 月的最适宜温度接近夏季,10 月最适温度分布在 23.5~25℃,11 月最适温度分布在 25~27℃,与冬季(1—2 月)温度范围趋近。在已有的一些针



对南太平洋和东太平洋等其他海域 SST 与渔场关系的研究中,长鳍金枪鱼最适温度随季节变化不明显。如范永超等和闫敏等在南太平洋长鳍金枪鱼最适 SST 研究中,范围均在 27 ~ 29 °C<sup>[23-24]</sup>。王震等在东太平洋长鳍金枪鱼研究中作业渔场多分布在 SST 为 24 ~ 29 °C 的海域<sup>[25]</sup>。这些研究中其研究区域一般较小且偏向热带海域,SST 季节性变化相对较小,因而研究得出的最适温度随季节变化不明显。而本研究选取的印度洋海域研究区域较大,纬度范围为 20°N ~ 50°S,横跨温带和热带海洋,温度随季节性变化明显,从而导致印度洋长鳍金枪鱼在各季节存在较为明显的最适宜温度差异。

盐度对大部分的鱼类分布没有直接影响,主要通过海流和水团等间接影响长鳍金枪鱼的分布<sup>[8]</sup>。本研究中印度洋长鳍金枪鱼总体适宜盐度大约为 34.8 ~ 35.7,但也呈现微小的季节性变化,其中秋冬季前后(10—12 月和 1—2 月)偏低一些,范围在 34.8 ~ 35.3;而春夏季前后(3—9 月)偏高一些,范围在 35.3 ~ 35.7,这与其他海域长鳍金枪鱼盐度影响程度类似<sup>[14]</sup>。范永超等在南太平洋长鳍金枪鱼 HSI 模型研究中最适宜盐度为 35.2 ~ 35.4<sup>[23]</sup>,林显鹏等在所罗门群岛海域长鳍金枪鱼的盐度与环境因子的关系研究中,最适盐度范围在 35.6 ~ 35.9<sup>[26]</sup>。

浮游植物作为海洋食物链的初级生产者,对整个生态系统提供物质和能量来源,是维持海洋生物生存和发展的基础。其中,Chl. a 能够反映浮游植物生物量,基于食物链的原理使其为食物的浮游动物的生物量发生变动,进而使以浮游动物为食的海洋性鱼种数量和分布发生改变<sup>[27]</sup>。本研究中,长鳍金枪鱼 Chl. a 最适宜范围同样受季节的影响,总体范围分布在 0.03 ~ 0.22 mg/m<sup>3</sup>,冬季最适宜浓度范围 0.06 ~ 0.16 mg/m<sup>3</sup>;4 ~ 5 月最适宜浓度在 0.13 ~ 0.22 mg/m<sup>3</sup>;11-12 月最适范围在 0.04 ~ 0.06 mg/m<sup>3</sup>。相较于其他海域的长鳍金枪鱼最适宜 Chl. a 范围大体保持了一致。闫敏等在南太平洋长鳍金枪鱼渔场分布与环境因子的研究中最适 Chl. a 浓度为 0.02 ~ 0.08 mg/m<sup>3</sup>,与本研究相比总体略低<sup>[24]</sup>。

### 3.2 栖息地指数 HSI 与渔场分布的关系

使用 2016 年 SST、SSS 和 Chl. a 环境因子数据,基于 ArcGIS 平台对 2016 渔场的 HSI 分布进

行了可视化预报及验证,从其他海域长鳍金枪鱼 HSI 模型仅从统计角度进行验证其精度来看,本文工作更具实际参考意义。印度洋长鳍金枪鱼渔场分布呈季节性变化,模型拟合出的 HSI 可视化预报结果与实际渔场分布基本一致。1—2 月与 10—12 月主要分布在 45°E ~ 70°E、10°S ~ 25°S 海域的热带渔区;4—9 月主要呈现带状分布在 30°S ~ 40°S 附近海域的温带渔区。其中,春夏过渡的 3 月份渔场在温带和热带海域均有分布,结合图 2 与表 1~3 可知,SST、SSS 和 Chl. a 三因子 SI 模型精度以及模型曲线、拟合散点图均未出现双峰即双适宜度范围的情况,但散点图和其适应性曲线表明:3 月份最适宜温度与冬季(1—2 月)相差较大,偏向春夏季最适宜温度;最适宜盐度和叶绿素断层虽总体不明显,但同样偏向春夏季最适宜范围。长鳍金枪鱼为高度洄游性大洋鱼种,特别是季节过渡月,一旦因海流、水团、温跃层等其他未知因子的影响,极易造成中心渔场预报的偏移或不准确<sup>[14]</sup>。

从模型统计精度来看,栖息地模型在印度洋区域各 HSI 等级下月平均准确率为 87.46%,结合空间可视化预报结果可知其整体精度略优于其他海域长鳍金枪鱼整体预报率,能够反映该海域整体渔业资源空间分布;然而,高 HSI 预测准确率上小于低 HSI 预报准确率,且高 HSI 等级下渔获量占全年比重约为 69.35%,这与其他海域长鳍金枪鱼预报准确率基本类似<sup>[8,13-14]</sup>。

## 4 结论

选取 2006—2014 年印度洋长鳍金枪鱼渔获数据,结合 Argo 数据集中的 SST、SSS 和卫星遥感 Chl. a 等环境因子数据,在基于一元指数模型构建单因素适应性模型的基础上建立了多环境因子的栖息地综合指数模型,并在 GIS 软件支持下使用 2016 年实际渔捞产量数据对其进行了验证。研究结果表明:3 种环境因子拟合出的单因素适应性模型均通过显著性检验,能够较好反映印度洋长鳍金枪鱼各月的适应性情况,各环境因子的适应性均呈季节性变化;该栖息地指数模型对渔场预报准确率约为 90.56%,各 HSI 等级下平均预报准确率为 87.46%, $I_{HSI} > 0.5$  所代表的中心渔场平均准确率为 71.82%,同时考虑到  $I_{HSI} > 0.5$  的产量平均比重达 69.35%,说明基于 SST、

SSS 和 *Chl. a* 3 种环境因子的综合栖息地指数模型具有较好的预报效果。

然而,选取 IOTC 的  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  空间分辨率渔业数据属于较大尺度范围的建模,因此,在印度洋局部小区域范围的准确预报存在局限性,还需更加精细的生产数据进行验证。另外,长鳍金枪鱼渔场分布还与其他海洋环境因子关系密切,例如海流、水团、温跃层、海面高度等<sup>[28]</sup>,都是需要探索的方向。金枪鱼为大洋性中上层高度洄游性鱼种,具有垂直分布的现象<sup>[29]</sup>,其他海域已有结合 Argo 剖面数据探索金枪鱼垂向分布情况<sup>[30-32]</sup>,但印度洋海域的长鳍金枪鱼垂直分布情况仍需进一步地探索和研究。因此,在以后的研究中需综合考虑其他环境因子、垂向相关因素以及结合其他的函数模型,以完善长鳍金枪鱼栖息地模型。

#### 参考文献:

- [1] CHEN I C, LEE P F, TZENG W N. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors [J]. *Fisheries Oceanography*, 2010, 14(1): 71-80.
- [2] 官文江, 朱江峰, 高峰. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估的影响因素分析[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(5): 1102-1114.  
GUAN W J, ZHU J F, GAO F. Analysis of influencing factors on stock assessment of the Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 1102-1114.
- [3] 宋利明, 谢凯, 赵海龙, 等. 库克群岛海域海洋环境因子对长鳍金枪鱼渔获率的影响[J]. *海洋通报*, 2017, 36(1): 96-106.  
SONG L M, XIE K, ZHAO H L, et al. Effects of environmental variables on catch rates of *Thunnus alalunga* in waters near Cook Islands [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(1): 96-106.
- [4] YEN K W, LU H J, CHANG Y, et al. Using remote-sensing data to detect habitat suitability for yellowfin tuna in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7507-7522.
- [5] 毛江美, 陈新军, 余景. 基于神经网络的南太平洋长鳍金枪鱼渔场预报[J]. *海洋学报*, 2016, 38(10): 34-43.  
MAO J M, CHEN X J, YU J. Forecasting fishing ground of *Thunnus alalunga* based on BP neural network in the South Pacific Ocean [J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(10): 34-43.
- [6] 陈程, 陈新军, 雷林, 等. 基于栖息地指数模型的毛里塔尼亚头足类底拖网渔场研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(6): 939-945.
- CHEN C, CHEN X J, LEI L, et al. Study on fishing ground of bottom trawl based on the habitat suitability model in Mauritania [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(6): 939-945.
- [7] 王易帆, 陈新军. 中西太平洋鳀栖息地指数预报模型比较研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(5): 743-750.  
WANG Y F, CHEN X J. Comparisons of habitat suitability index models of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(5): 743-750.
- [8] 杨嘉樑, 黄洪亮, 宋利明, 等. 基于分位数回归的库克群岛海域长鳍金枪鱼栖息环境综合指数[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(4): 832-851.  
YANG J L, HUANG H L, SONG L M, et al. An integrated habitat index for albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the waters near the Cook Islands based on the quantile regression method [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(4): 832-851.
- [9] 佟佳琦, 陈锦辉, 高春霞, 等. 基于栖息地适应性指数的长江口刀鲚时空分布特征[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(4): 584-593.  
TONG J Q, CHEN J H, GAO C X, et al. Temporal-spatial distribution of *Coilia nasus* in the Yangtze River Estuary based on habitat suitability index [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(4): 584-593.
- [10] 任中华, 陈新军, 方学燕. 基于栖息地指数的东太平洋长鳍金枪鱼渔场分析[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(5): 385-395.  
REN Z H, CHEN X J, FANG X Y. Forecasting fishing grounds of *Thunnus alalunga* in the eastern Pacific based on habitat suitability index [J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(5): 385-395.
- [11] 沈智宾, 陈新军, 汪金涛. 基于海表温度和海面高度的东太平洋大眼金枪鱼渔场预测[J]. *海洋科学*, 2015, 39(10): 45-51.  
SHEN Z B, CHEN X J, WANG J T. Forecasting of Bigeye tuna fishing ground in the Eastern Pacific Ocean based on sea surface temperature and sea surface height [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(10): 45-51.
- [12] 张艳波. 东南太平洋长鳍金枪鱼垂直分布与栖息地指数研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.  
ZHANG Y B. Vertical distribution and integrated habitat index for albacore (*Thunnus alalunga*) in the southeast Pacific Ocean [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [13] 范江涛, 陈新军, 钱卫国, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼渔场预报模型研究[J]. *广东海洋大学学报*, 2011, 31(6): 61-67.  
FAN J T, CHEN X J, QIAN W G, et al. Models of forecasting fishing ground of *Thunnus alalunga* in the South

- Pacific Ocean[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2011, 31(6): 61-67.
- [14] 郭刚刚, 张胜茂, 樊伟, 等. 基于表层及温跃层环境变量的南太平洋长鳍金枪鱼栖息地适应性指数模型比较[J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 44-51.  
GUO G G, ZHANG S M, FAN W, et al. Comparative research on habitat suitability index models of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) based on surface and thermocline environmental variables in the South Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(10): 44-51.
- [15] 朱江峰, 戴小杰, 官文江. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 1-8.  
ZHU J F, DAI X J, GUAN W J. Stock assessment of albacore *Thunnus alalunga* in the Indian Ocean[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 1-8.
- [16] 马璐璐, 朱江峰, 耿喆, 等. 运用生物量动态模型评估印度洋长鳍金枪鱼资源[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(2): 259-264.  
MA L L, ZHU J F, GENG Z, et al. Stock assessment of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean using biomass dynamics model[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(2): 259-264.
- [17] 陈雪忠, 樊伟, 崔雪森, 等. 基于随机森林的印度洋长鳍金枪鱼渔场预报[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 158-164.  
CHEN X Z, FAN W, CUI X S, et al. Fishing ground forecasting of *Thunnus alalunga* in Indian Ocean based on random forest[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(1): 158-164.
- [18] 官文江, 高峰, 雷林, 等. 多种数据源下栖息地模型及预测结果的比较[J]. 中国水产科学, 2015, 22(1): 149-157.  
GUAN W J, GAO F, LEI L, et al. Comparisons of the habitat suitability index models developed by multi-source data and forecasting [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(1): 149-157.
- [19] SONG L M, ZHOU Y Q. Developing an integrated habitat index for bigeye tuna (*Thunnus sobesius*) in the Indian Ocean based on longline fisheries data [J]. Fisheries Research, 2010, 105(2): 63-74.
- [20] CHEN X J, LI G, FENG B, et al. Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea [J]. Journal of Oceanography, 2009, 65(1): 93-102.
- [21] JENKS G F. Optimal data classification for choropleth maps [M]. Kansas: University of Kansas, Occasional Paper 2, 1977.
- [22] 高峰, 陈新军, 范江涛, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼中心渔场预报的实现及验证[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(5): 754-758.  
GAO F, CHEN X J, FAN J T, et al. Implementation and verification of intelligent fishing ground forecasting of *Merluccius argentinus* in the Southwest Atlantic[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(5): 754-758.
- [23] 范永超, 陈新军, 汪金涛. 基于多因子栖息地指数模型的南太平洋长鳍金枪鱼渔场预报[J]. 海洋湖沼通报, 2015, (2): 36-44.  
FAN Y C, CHEN X J, WANG J T. Forecasting central fishing ground of *Thunnus alalunga* based on multi-factors habitat suitability index in the South Pacific Ocean [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015, (2): 36-44.
- [24] 闫敏, 张衡, 樊伟, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼渔场 CPUE 时空分布及其与关键海洋环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3191-3197.  
YAN M, ZHANG H, FAN W, et al. Spatial-temporal CPUE profiles of the albacore tuna (*Thunnus alalunga*) and their relations to marine environmental factors in the South Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(11): 3191-3197.
- [25] 王震, 陈新军, 雷林. 东太平洋长鳍金枪鱼栖息地指数模型比较[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(1): 58-64.  
WANG Z, CHEN X J, LEI L. Comparison of *Thunnus alalunga* in the Eastern Pacific based on habitat suitability index model [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2017, 37(1): 58-64.
- [26] 林显鹏, 郭爱, 张洪亮, 等. 所罗门群岛海域长鳍金枪鱼的垂直分布与环境因子的关系[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(4): 303-306.  
LIN X P, GUO A, ZHANG H L, et al. Relationship between vertical distribution of albacore tuna *Thunnus alalunga* and the concerned environmental factors in the Solomon Sea [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2011, 30(4): 303-306.
- [27] 于杰, 陈国宝, 张魁, 等. 南海中部海域夏季叶绿素 a 浓度垂向分布特征[J]. 南方水产科学, 2016, 12(4): 1-8.  
YU J, CHEN G B, ZHANG K, et al. Vertical distribution of summer chlorophyll a concentration in the middle South China Sea [J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(4): 1-8.
- [28] 宋婷婷, 樊伟, 伍玉梅. 卫星遥感海面高度数据在渔场分析中的应用综述[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 474-480.  
SONG T T, FAN W, WU Y M. Review on the fishery analysis with satellite remote sensing sea surface height data [J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(4): 474-480.
- [29] HOLLAND K N. Horizontal and vertical movements of Yellowfin and Bigeye tuna associated with fish aggregating devices [J]. Journal of Cell Biology, 1990, 148(5): 957-970.
- [30] 杨胜龙, 张禹, 张衡, 等. 热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 671-679.  
YANG S L, ZHANG Y, ZHANG H, et al. The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and thermocline characteristics in the tropic Indian Ocean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 671-679.

- [31] ASHLEY J W, ALLAIN V, NICOL S J, et al. Vertical behavior and diet of albacore tuna (*Thunnu salalunga*) vary with latitude in the South Pacific Ocean [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2015, 113: 154-169.
- [32] 郭刚刚, 张胜茂, 樊伟, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼垂直活动水层空间分析[J]. 南方水产科学, 2016, 12(5): 123-130.
- GUO G G, ZHANG S M, FAN W, et al. Spatial analysis of vertical active layer of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the South Pacific Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(5): 123-130.

## Construction and verification of a habitat suitability index model for the Indian Ocean albacore tuna

ZHANG Yanan<sup>1</sup>, GUAN Wenjiang<sup>1,2,3,4</sup>, LI Yangdong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Because of its economic value and wide distribution, albacore tuna (*Thunnus alalunga*) has become one of the main fishing targets in the world's marine fisheries. Prediction of albacore tuna can improve fishing efficiency and yield, and provide scientific basis for fishery production. The production data of albacore tuna in the Indian Ocean from 2006 to 2014 and three environmental factors of temperature, salinity and chlorophyll a concentration in the surface layer of the ocean were used in this study. The single-factor Suitability Index (SI) of Indian Ocean albacore tuna with various environmental factors was established monthly by using the single-variable non-linear index model. Then the arithmetic average method was used to obtain the comprehensive Habitat Suitability Index (HSI) model. Using the 2016 Indian ocean albacore tuna production data and the corresponding marine environment data, furthermore, the HSI model was verified based on the ArcGIS platform. The results show that the accuracy of the monthly fishing ground forecast is about 90.56% and the overall forecast accuracy for each HSI grade is 87.46%. Moreover, for the central fishing ground with  $I_{HSI} > 0.5$ , the average accuracy rate is 71.82%. Considering that the average yield ratio of  $I_{HSI} > 0.5$  is 69.35%, it can be concluded that the established HSI model had a promising forecast effect for the Indian Ocean albacore tuna.

**Key words:** habitat suitability index model; fishing ground forecast; albacore tuna (*Thunnus alalunga*); Indian Ocean; geographic information system