

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20054

## 基于最大熵模型的南太平洋长鳍金枪鱼栖息地预测

张嘉容<sup>1</sup>, 杨晓明<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 田思泉<sup>1, 2, 3, 4</sup>

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
4. 上海海洋大学, 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

**摘要:** 长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是一种高度洄游的中上层鱼类, 其分布受环境影响明显, 利用海洋环境的变化对其栖息地分布进行预测有重要的科学意义。本研究采用2015—2017年盛渔期中国(不含港澳台地区)渔船在南太平洋140°E~130°W, 0°~50°S区域长鳍金枪鱼延绳钓渔捞日志数据, 结合同时期海洋环境数据, 使用最大熵模型获得了2015—2016年盛渔期(5—8月)长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线以及各环境因子的贡献率, 并据此计算出2017年盛渔期其潜在栖息地分布, 然后叠加同年真实渔业数据对各模型的预测准确率进行比较。结果表明: (1)由渔获率对各环境因子的反馈曲线发现, 25°S以北区域最适宜长鳍金枪鱼栖息的海表温度为28.4~30.6℃, 300 m水深温度为13.2~17.6℃, 海表面盐度为35.6~36.7, 海表风场南北分量为-1.6~5.8 m/s; 25°S以南区域最适宜长鳍金枪鱼栖息的海表温度为17.8~23.4℃, 300 m水深温度为12.2~16.9℃, 海表面盐度为35.2~36.0, 海表风场南北分量为-0.7~4.9 m/s, 总体相似。(2)25°S以北区域环境因子的重要性排名由高到低依次为海表面温度(因子平均贡献率31.3%)、海表面盐度(30.1%)、300 m水深温度(29.2%)、海表风场南北分量(9.4%); 在25°S以南区域依次为海表面温度(60.7%)、海表面盐度(22.4%)、海表风场南北分量(10.6%)和300 m水深温度(6.3%); 在25°S以南区域, 最重要的环境因子为海表面温度(平均贡献率大于60%), 且显著高于以北区域的31%; 在25°S以北区域, 3个主要环境因子的重要性差异较小, 平均贡献率都在30%左右。(3)模型的综合预测准确率在30%~85%, 具体以中适生区的预测准确率较高, 高、低适生区预测准确率相对较低。

**关键词:** 长鳍金枪鱼; 环境因子; 栖息地预测; 最大熵模型; 南太平洋

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)10-1222-12

长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是当今世界主要的商业金枪鱼种类之一, 2017年南太平洋长鳍金枪鱼捕捞量创历史新高, 达92291 t, 其中延绳钓渔业占89388 t<sup>[1]</sup>。有研究表明长鳍金枪鱼是一种高度洄游的中上层鱼类, 主要在10°S~30°S之间的热带和亚热带水域之间进行季节性迁移<sup>[2-3]</sup>。了解海洋环境的变化对长鳍金枪鱼栖息地分布的影响有助于有效寻找其最适栖息地, 从而降低商业捕捞作业船队对其渔场的搜寻成本, 同时为了

解其资源分布状况有重要科学意义。目前, 不同的模型已经被广泛应用于金枪鱼栖息地预测的研究中, 如神经网络模型<sup>[4]</sup>、栖息地适应性指数模型<sup>[5]</sup>、广义可加模型<sup>[6]</sup>、随机森林<sup>[7]</sup>等。但是这些模型的使用存在一定的局限性, 通常需要多年渔获数据的积累。最大熵模型作为物种分布模型之一, 可以根据该物种分布的不完整信息, 预测其在某一范围内的分布, 并且适用于数据量小、时间跨度短的数据集<sup>[8]</sup>。Duque-Lazo等<sup>[9]</sup>指出使用

收稿日期: 2020-03-04; 修订日期: 2020-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41506151).

作者简介: 张嘉容(1995-), 女, 硕士研究生, 从事长鳍金枪鱼渔场研究. E-mail: jrzhang0922@163.com

通信作者: 杨晓明, 副教授, 研究方向为渔业GIS. E-mail: xmyang@shou.edu.cn

最大熵模型来分析渔获率与环境变化的关系具有较高的准确度, 目前已应用于阿根廷滑柔鱼(*Illlex argentinus*)<sup>[10]</sup>、鲈(*Scomber japonicus*)<sup>[11]</sup>等研究中, 但并未应用该模型对长鳍金枪鱼进行栖息地预测研究并叠加真实数据进行验证。因此, 本研究采用 2015—2017 年 5—8 月中国(不含港澳台地区)所有渔船的长鳍金枪鱼延绳钓渔捞日志数据, 以 2015 年和 2016 年的渔获数据和环境数据建立最大熵模型, 得出长鳍金枪鱼渔获率与环境因子之间的关系, 并将 2017 年的环境数据代入这种关系中得出长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布, 叠加 2017 年的实际渔业数据进行验证, 探讨渔获率与环境因子之间的关系及其潜在栖息地分布的年、月变化, 比较各预测模型之间的差异性和准确度, 为南太平洋长鳍金枪鱼的渔场预报提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

**1.1.1 渔业数据** 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业数据来源于 2015—2017 年中国(不含港澳台地区)所有渔船的长鳍金枪鱼延绳钓渔捞日志(表 1), 包括作业位置、渔获量和投钩数等。中西太平洋渔业委员会对长鳍金枪鱼的资源评估报告<sup>[12]</sup>指出, 南太平洋长鳍金枪鱼主要出现在 140°E~130°W, 0°~50°S 的海域内, 同时纬度上呈现出在 25°S 以

表 1 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业航次信息表

Tab. 1 Fishery trips in the south Pacific longline fishery of *Thunnus alalunga*

年份 year	区域 area	总渔船数 total vessels	累计作业天数/d total fishing days
2015	n	50	8551
	s	3	331
	both	54	9187
2016	n	56	9419
	s	3	202
	both	56	10970
2017	n	73	15072
	s	4	331
	both	59	10889

注: n 表示 0°~25°S 区域; s 表示 25°S~50°S 区域; both 表示 0°~50°S 区域。

Note: n denotes 0°~25°S area; s denotes 25°S~50°S area; both denotes 0°~50°S area.

北和 25°S 以南不同的分布特性。本研究选择盛渔期(5—8 月)此区域内的渔业数据, 并以 25°S 为界分别进行研究。

**1.1.2 环境数据** 海表面温度(sea surface temperature, SST)及不同水深温度、海表面盐度(sea surface salinity, SSS)、混合层深度(mixed layer depth, MLD)来源于中国 Argo 实时资料中心, 时间分辨率均为月, 空间分辨率均为 1°×1°。海表面风场(sea surface wind, SSW)和海表面高度(sea surface height, SSH)分别下载自美国宇航局物理海洋学数据分发存档中心(PO.DAAC)和亚太数据研究中心(APDRC), 时间分辨率均为月, 前者的空间分辨率为 0.25°×0.25°, 后者为 0.5°×0.5°。

### 1.2 数据预处理

(1) 以单位捕捞努力量渔获量(CPUE)表征长鳍金枪鱼资源分布状况, 其公式为:

$$CPUE = \frac{U_{catch}}{f_{hooks}} \quad (1)$$

式中,  $U_{catch}$  表示该作业位置的累计渔获量, 单位为 kg;  $f_{hooks}$  是该作业位置的累计投钩数, 单位为 hooks×1000。

(2) 选取 2015—2016 年 5—8 月长鳍金枪鱼高 CPUE (CPUE 占整体的前 40%)的经纬度数据, 并以 csv 格式输出。使用 Matlab 将 2017 年长鳍金枪鱼渔获数据的空间分辨率插值为 1°, 并计算该空间分辨率下单位渔区内的 CPUE。

(3) 最大熵模型要求环境图层的空间分辨率保持一致, 利用 arcgis 10.2 重采样, 将环境图层的空间分辨率统一为 0.25°×0.25°, 并以 asc 格式输出。

### 1.3 数据分析方法

**1.3.1 最大熵模型** 最大熵模型是基于最大熵演算法的物种分布模式, 是一种基于“当前存在”预测“未知分布”的机器学习方法<sup>[13]</sup>。其原理为熵最大原则, 根据物种分布和环境因子的不完全信息, 探寻最大乱度的随机分配, 预测及估算该物种的潜在栖息地分布<sup>[14]</sup>。在本研究中输入层为长鳍金枪鱼渔获位置的经纬度, 格式为 csv。环境图层为海表面温度及不同水深温度、海表面盐度、海表面风场、海表面高度和混合层深度的 ASCII 栅格数据, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。随机抽取其中

75%数据用于模型建构,其余 25%数据用于验证。

**1.3.2 MaxEnt 模型评价** 使用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)评估最大熵模型的准确度,以 ROC 曲线下面积(area under curve, AUC)的大小作为验证模型预测准确度的指标<sup>[15]</sup>,AUC 值的范围为 0.5~1,AUC 值越大则表明模型预测的准确度越高,通常 AUC 值大于 0.7 时即可当作良好的预测模型<sup>[16]</sup>。

**1.3.3 长鳍金枪鱼潜在栖息地的预测及验证** 利用 2015 年和 2016 年 5—8 月模型得出的渔获率与环境因子之间的关系作为回归拟合函数,将 2017 年 5—8 月的环境数据代入,得出 2017 年 5—8 月长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布。将该结果导入 ArcGIS 10.2,进行南太平洋长鳍金枪鱼潜在栖息地分布图的绘制,并叠加 2017 年 5—8 月长鳍金枪鱼的实际渔获数据用以验证。

为验证最大熵模型的预测能力,将 2017 年各月渔业数据的前 40%划分为高适生区,40%~80%为中适生区,后 20%为低适生区,以 2015 年和 2016 年数据得出 2017 年潜在栖息地分布,把栖息地适应性指数为 0.6~1.0 划分为高适生区,0.2~0.6 为中适生区,0.2 以下为低适生区。计算各模型中预测数据准确对应实际数据的数目,其计算公式为:

$$P_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{(x,y)}}{\sum_{i=1}^n A_{(x,y)}} \quad (2)$$

式中, $P$  表示预测准确率, $A$  表示预测分布中的全部点位数目, $M$  表示预测分布中准确对应实际分布的全部点位数目。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型计算结果及评价

考虑到环境因子之间的自相关和多重共线性问题<sup>[17]</sup>,同时考虑到长鳍金枪鱼主要分布水层深度为 200~300 m<sup>[18]</sup>,且存在昼夜移动情况<sup>[19]</sup>,所以要保留垂直方向上的环境因子,并在建模之前对环境因子进行相关性分析(由于篇幅所限未列出),最终选择了海表温度、300 m 水深温度、海

表盐度、海表风场南北分量这 4 个环境因子参与建模。最大熵模型的 AUC 值显示(表 2),各月 AUC 值均达 0.7 以上,符合当作预测模型的标准,且认为最大熵模型对南太平洋长鳍金枪鱼潜在栖息地分布的预测准确度较高。从年份来看,2016 年 AUC 值整体高于 2015 年;从区域来看,25°S 以南区域的 AUC 值高于 25°S 以北。

表 2 最大熵模型的 AUC 值  
Tab. 2 The AUC value of the maximum entropy model

年份 year	数据类型 data type	区域 area	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
2015	训练数据 training data	n	0.908	0.872	0.892	0.840
		s	0.916	0.923	0.942	0.943
	测试数据 test data	n	0.909	0.903	0.878	0.762
		s	0.862	0.895	0.945	0.936
2016	训练数据 training data	n	0.904	0.908	0.907	0.914
		s	0.927	0.911	0.925	0.958
	测试数据 test data	n	0.924	0.848	0.826	0.879
		s	0.917	0.913	0.937	0.961

注: n 表示 0°~25°S 区域; s 表示 25°S~50°S 区域。

Note: n denotes 0°~25°S area; s denotes 25°S~50°S area.

### 2.2 环境因子的最适范围和贡献率

根据各环境因子的最适值(表 3),25°S 以北区域最适宜长鳍金枪鱼栖息的 SST 为 28.4~30.6 °C,300 m 水深温度( $t_{300}$ )为 13.2~17.6 °C,SSS 为 35.6~36.7,海表风场南北分量( $V_{wnd}$ )为 -1.6~5.8 m/s;25°S 以南区域最适宜长鳍金枪鱼栖息的 SST 为 17.8~23.4 °C, $t_{300}$  为 12.2~16.9 °C,SSS 为 35.2~36.0, $V_{wnd}$  为 -0.7~4.9 m/s。从长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线可以看出(图 1~4),不同月份模型得出的渔获率对各环境因子的反馈曲线主要趋势一致,曲折程度则有所不同。

以 2015 年 25°S 以北各月份拟合的中值曲线显示(图 1),SST 与渔获率在 29 °C 之前呈现出正相关,在 29 °C 之后呈明显的负相关。 $t_{300}$  与渔获率总体呈开口向下的抛物线,其中在 14~16 °C 基本保持平稳。SSS 与渔获率呈正相关,渔获率随盐度的增高而增大。 $V_{wnd}$  与渔获率呈开口向下的抛物线关系,并在 3.5 m/s 达到最高值。同年 25°S 以南各月份拟合的中值曲线中(图 2),SST 与渔获率总体上呈开口向下的抛物线关系,在 18~22 °C

表 3 最大熵模型中各环境因子的最适值  
Tab. 3 The optimum value of the environmental factors in the maximum entropy model

环境因子 environmental factor	年份 year	区域 area	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	环境因子 environmental factor	年份 year	区域 area	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
SST/°C	2015	n	29.6	29.2	28.4	29.5	SSS	2015	n	36.5	36.4	36.7	36.0
		s	17.8	22.3	21.3	s			36.0	35.8	36.0	35.2	
	2016	n	30.6	29.8	29.6	29.2		2016	n	35.6	36.5	36.5	36.4
		s	19.6	21.4	23.4	20.4			s	35.9	35.8	35.9	35.9
$t_{300}/^{\circ}\text{C}$	2015	n	13.9	17.4	17.0	17.6	$V_{\text{wnd}}/(\text{m/s})$	2015	n	0.7	3.1	3.2	5.8
		s	16.5	16.4	16.9	16.6			s	2.5	3.1	-0.7	4.9
	2016	n	13.3	13.2	15.1	15.6		2016	n	-0.5	-1.4	-1.6	-1.3
		s	12.2	16.0	13.8	15.2			s	2.4	2.4	2.7	2.3

注: n 表示 0°–25°S 区域; s 表示 25°S–50°S 区域. SST 表示海表温度;  $t_{300}$  表示 300 m 水深温度; SSS 表示海表盐度;  $V_{\text{wnd}}$  表示海表风场南北分量, 即经向风, 以北为正.

Note: n denotes 0°–25°S area; s denotes 25°S–50°S area. SST denotes sea surface temperature;  $t_{300}$  denotes sea temperature at 300 m depth; SSS denotes sea surface salinity;  $V_{\text{wnd}}$  denotes northward sea surface wind.

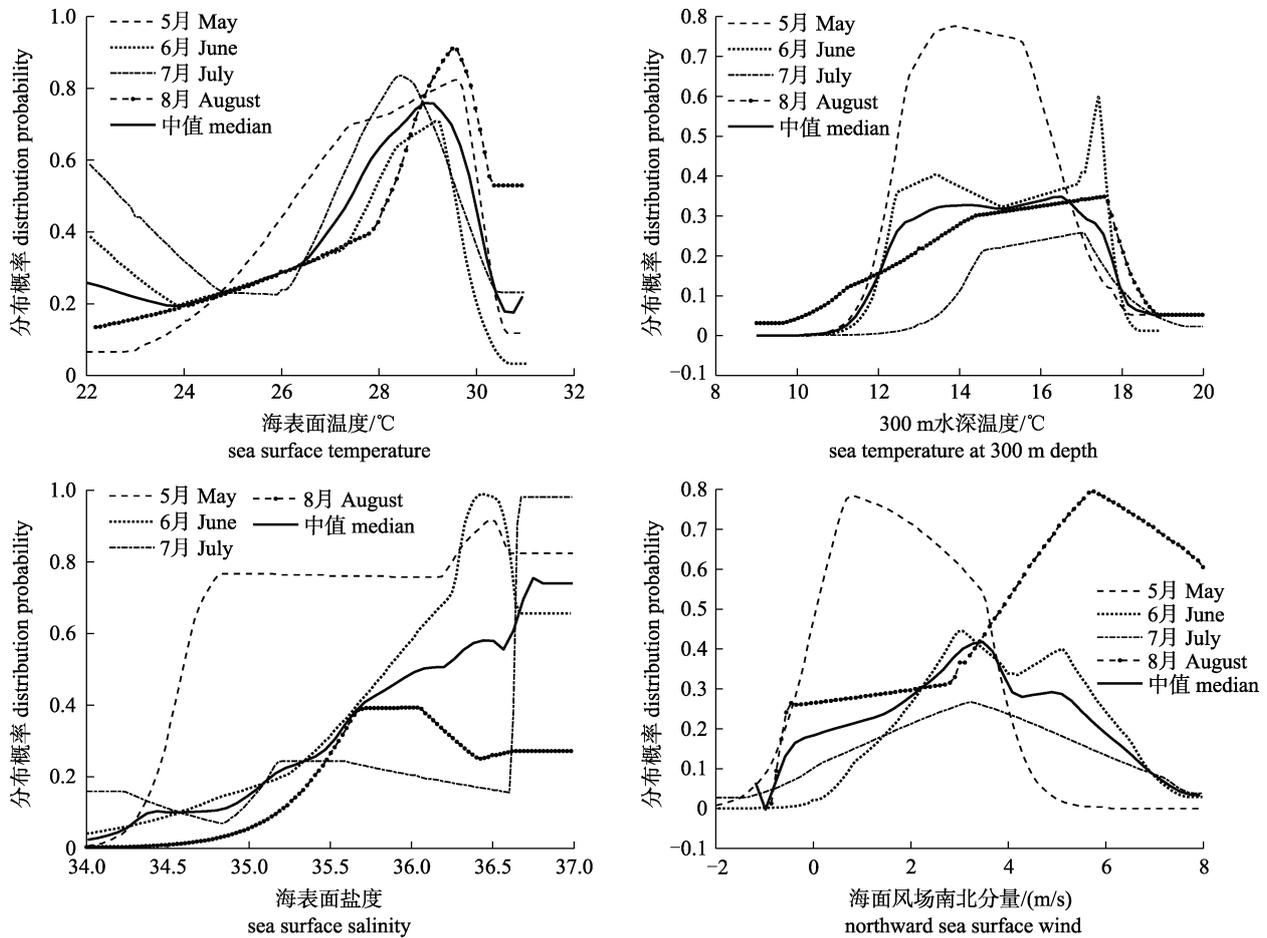


图 1 2015 年 0°–25°S 区域长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线

Fig. 1 Response curves of the environmental factors affecting *Thunnus alalunga* CPUE in 0°–25°S area in 2015

之间又以 20 °C 为中心轻微呈开口向上的抛物线关系。 $t_{300}$  与渔获率在 17 °C 之前呈正相关, 其中

在 12~15 °C 这种正相关关系较轻微, 在 17 °C 之后呈显著的负相关关系。SSS 与渔获率呈现开口向

下的抛物线关系。 $V_{\text{wnd}}$ 与渔获率在 3 m/s 之前呈正相关, 其中在-1~2 m/s 保持轻微的正效应, 在 3 m/s 之后显示负相关。

在以 2016 年 25°S 以北的数据拟合的中值曲线中(图 3), SST 与渔获率在 28 °C 之后呈开口向下的抛物线。 $t_{300}$ 与渔获率则以 14.5 °C 为中心呈现出开口向下的抛物线关系。SSS 与渔获率整体呈正相关关系, 在 35.5~36.0 表现出负相关。各模型得出渔获率对  $V_{\text{wnd}}$  的反馈曲线差异较大, 可能是数据量较小的原因故不予讨论。而同年 25°S 以南各月份拟合的中值曲线(图 4)显示, SST 与渔获率在 20 °C 之前呈正相关关系, 在 20 °C 之后渔获率随温度的升高而降低。 $t_{300}$ 与渔获率总体呈开口向下的抛物线, 其中在 13~16 °C 又呈开口向上的抛物线。SSS 与渔获率基本上呈先缓后急的正相关。 $V_{\text{wnd}}$ 与渔获率总体上显示出正相关, 其中在

0~2 m/s 基本保持平稳。

最大熵模型也可以对各环境因子的贡献率进行比较, 结果显示(表 4)不同年份、不同区域的模型中各环境因子的贡献率存在较大的差异。从年份来看, 2015 年贡献率较高的环境因子为 SST、 $t_{300}$ , 2016 年除 SST、 $t_{300}$  外, SSS 的贡献率也较高。在不同区域的模型中, SST 在 25°S 以南区域的贡献率显著高于 25°S 以北,  $t_{300}$  则与 SST 相反, 在 25°S 以北区域的贡献率比 25°S 以南的区域高, SSS 和  $V_{\text{wnd}}$  的贡献率没有明显的差异。

### 2.3 长鳍金枪鱼潜在栖息地分布的预测结果

通过南太平洋长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布(图 5)可以看出, 长鳍金枪鱼的最适栖息地主要集中在 10°S~40°S, 150°E~130°W 之间。在以不同年份的数据建立的模型中, 长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布还是存在一定年间差异。

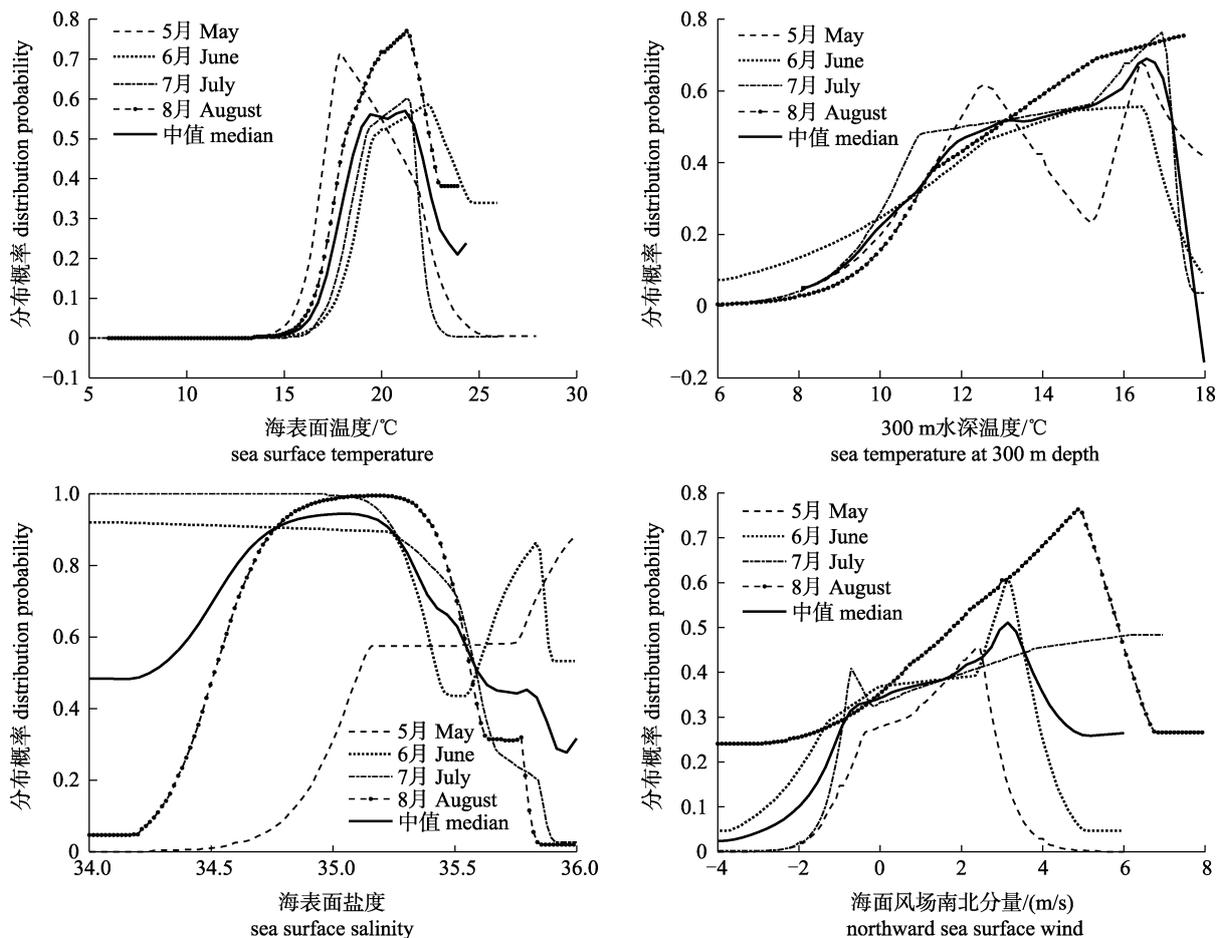


图 2 2015 年 25°S–50°S 区域长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线

Fig. 2 Response curves of the environmental factors affecting *Thunnus alalunga* CPUE in 25°S–50°S area in 2015

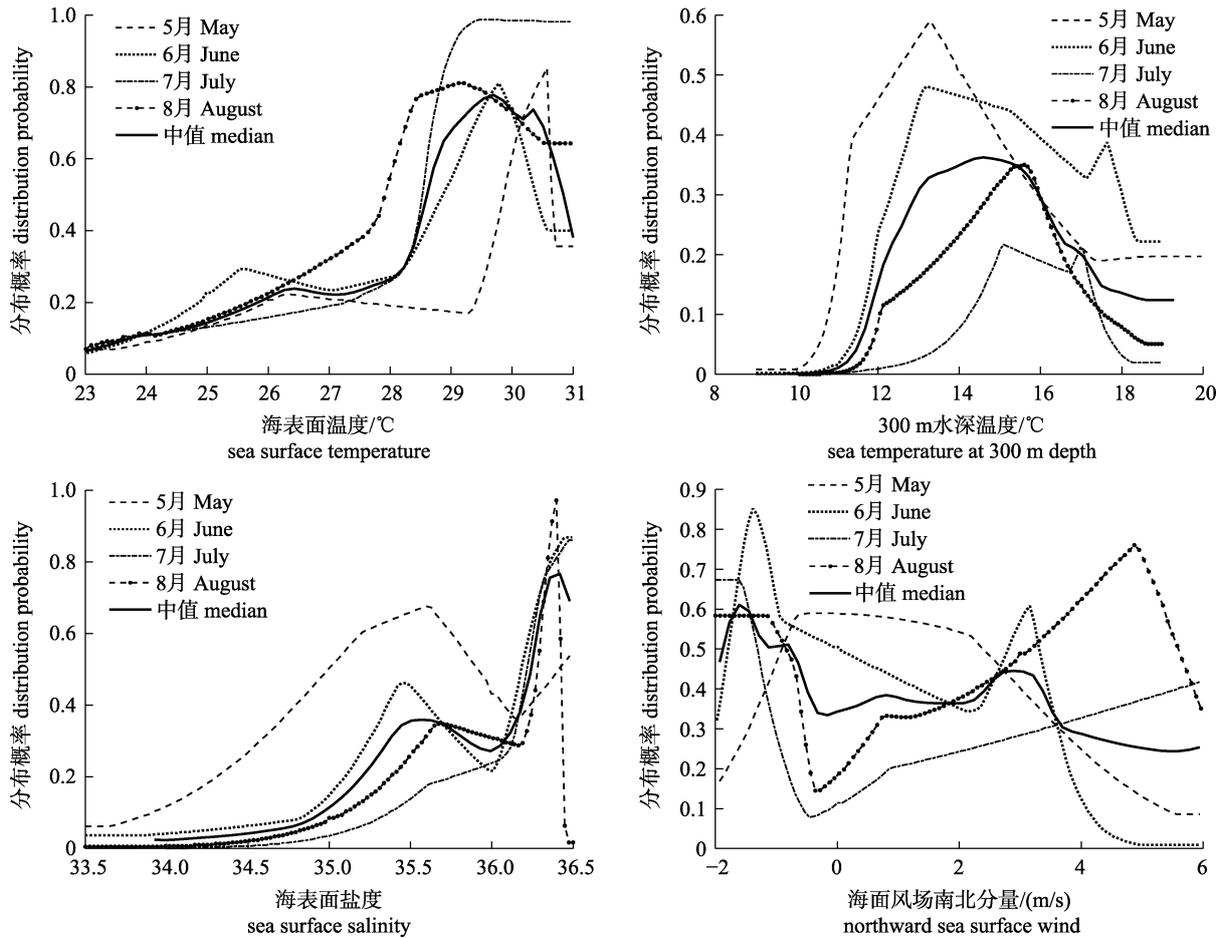


图 3 2016 年 0°-25°S 区域长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线

Fig. 3 Response curves of the environmental factors affecting *Thunnus alalunga* CPUE in 0°-25°S area in 2016

纬度方向上, 在 25°S 以北区域, 长鳍金枪鱼的潜在栖息地基本保持不变, 集中在 10°S~20°S 之间, 而在 25°S 以南区域, 其潜在栖息地随月份的变动逐渐向南推移, 从 5 月集中于 30°S~40°S 之间到 8 月主要出现在 25°S~35°S 之间, 同时在逐渐变窄。经度方向上基本没有变动, 在 25°S 以北区域主要出现在 160°E~130°W 之间, 在 25°S 以南区域在 150°E~130°W 之间均有分布。

同时, 本研究利用 2017 年 5—8 月的长鳍金枪鱼 CPUE 代表对应时期长鳍金枪鱼的实际栖息地分布, 将模型得出的长鳍金枪鱼潜在栖息地分布与之叠加, 比较和验证最大熵模型的预测能力。从最大熵模型的预测准确率可以看出(表 5), 各月份皆以中适生区的预测准确率较高, 平均准确率达到 77.9%, 而预测高、低适生区的能力则相对较低。

### 3 讨论

#### 3.1 最大熵模型的结果及分析

本研究以 2015—2016 年盛渔期 5—8 月南太平洋长鳍金枪鱼的渔业数据建构最大熵模型, 得出环境因子与潜在栖息地分布的关系并作为回归拟合函数, 将 2017 年的环境因子代入后模拟出 2017 年长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布(图 5), 利用 ROC 曲线获得的 AUC 值(表 2)对模型准确度进行了评价。AUC 值越接近 1 则证明模型的准确度越高, 本研究中 AUC 值的均值达到了 0.902, 说明最大熵模型得出的长鳍金枪鱼潜在栖息地分布与其实际分布有较高的拟合度。

#### 3.2 长鳍金枪鱼渔获率与环境因子的关系

本研究利用最大熵模型探讨南太平洋长鳍金枪鱼渔获率与海表面温度及不同水层温度、海表

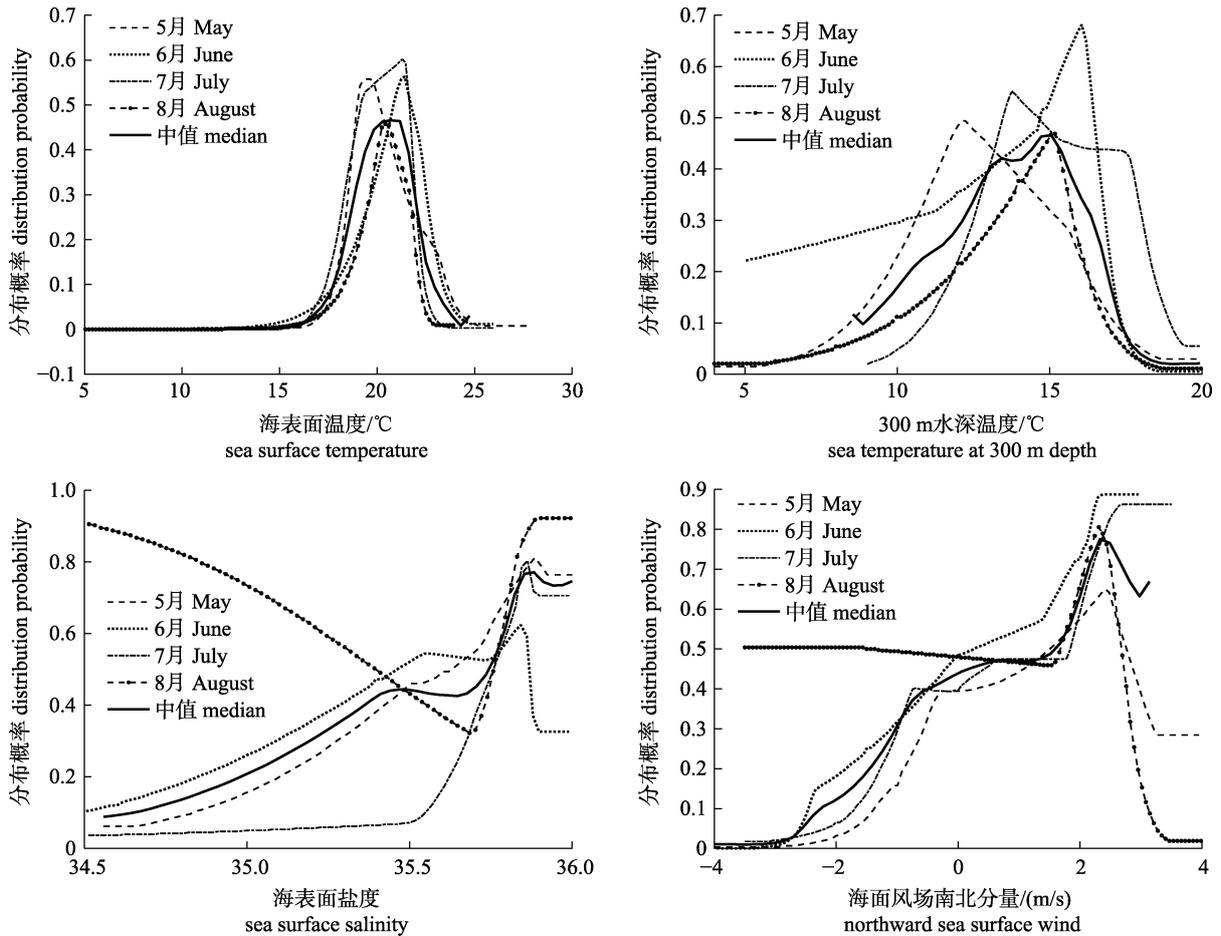


图 4 2016 年 25°S–50°S 区域长鳍金枪鱼渔获率对各环境因子的反馈曲线

Fig. 4 Response curves of the environmental factors affecting *Thunnus alalunga* CPUE in 25°S–50°S area in 2016

表 4 最大熵模型中各环境因子的贡献率

Tab. 4 The contribution rate of the environmental factors in the maximum entropy model

环境因子 environmental factor	年份 year	区域 area	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	环境因子 environmental factor	年份 year	区域 area	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
SST	2015	n	17.1	11.5	28.7	51.3	SSS	2015	n	14.2	28.7	8.7	30.4
		s	64	83.1	71.3	55.8			s	17.5	8.1	10.2	16.5
	2016	n	73.7	33.5	22.7	12.2		2016	n	10.1	40.7	53.7	54
		s	76.9	84.6	13.2	36.7			s	2.9	2.2	76.8	45.1
$t_{300}$	2015	n	48.9	38	54.2	9.9	$V_{wnd}$	2015	n	19.7	21.8	8.4	8.4
		s	12.3	2.3	5.1	3.6			s	6.3	6.5	13.4	24
	2016	n	14.7	19.1	17.6	31		2016	n	1.6	6.7	6	2.8
		s	2	9.1	5.7	10.5			s	18.3	4.1	4.4	7.6

注: n 表示 0°–25°S 区域; s 表示 25°S–50°S 区域. SST 表示海表温度;  $t_{300}$  表示 300 m 水深温度; SSS 表示海表盐度;  $V_{wnd}$  表示海表风场南北分量, 即经向风, 以北为正.

Note: n denotes 0°–25°S area; s denotes 25°S–50°S area. SST denotes sea surface temperature;  $t_{300}$  denotes sea temperature at 300 m depth; SSS denotes sea surface salinity;  $V_{wnd}$  denotes northward sea surface wind.

面盐度、海表面风场等环境因子之间的关系, 结果表明海表面温度、300 m 水深温度为贡献率较

高的环境因子, 海表面盐度、海表风场南北分量的贡献率相对较低。同时在不同区域的模型中环

境因子的贡献率也较大存在差异, 海表温度在 25°S 以南的贡献率显著高于 25°S 以北区域, 300 m 水深温度在 25°S 以南区域的贡献率明显比 25°S 以北区域高。

温度是影响鱼类分布与洄游最重要的环境因子之一<sup>[20-21]</sup>, 而长鳍金枪鱼主要栖息在 200~300 m

水层之间, 与获取其栖息水层的温度相比较, 获取海表面温度较容易, 因此在前人的研究中多采用, 如黄敏茜<sup>[21]</sup>、Goni 等<sup>[22]</sup>、Lan 等<sup>[23]</sup>均选择海表面温度探讨长鳍金枪鱼渔获率与环境因子的关系。本研究结果表明在 25°S 以南区域长鳍金枪鱼的最适海表面温度为 17.8~23.4 °C, 在 25°S 以北区

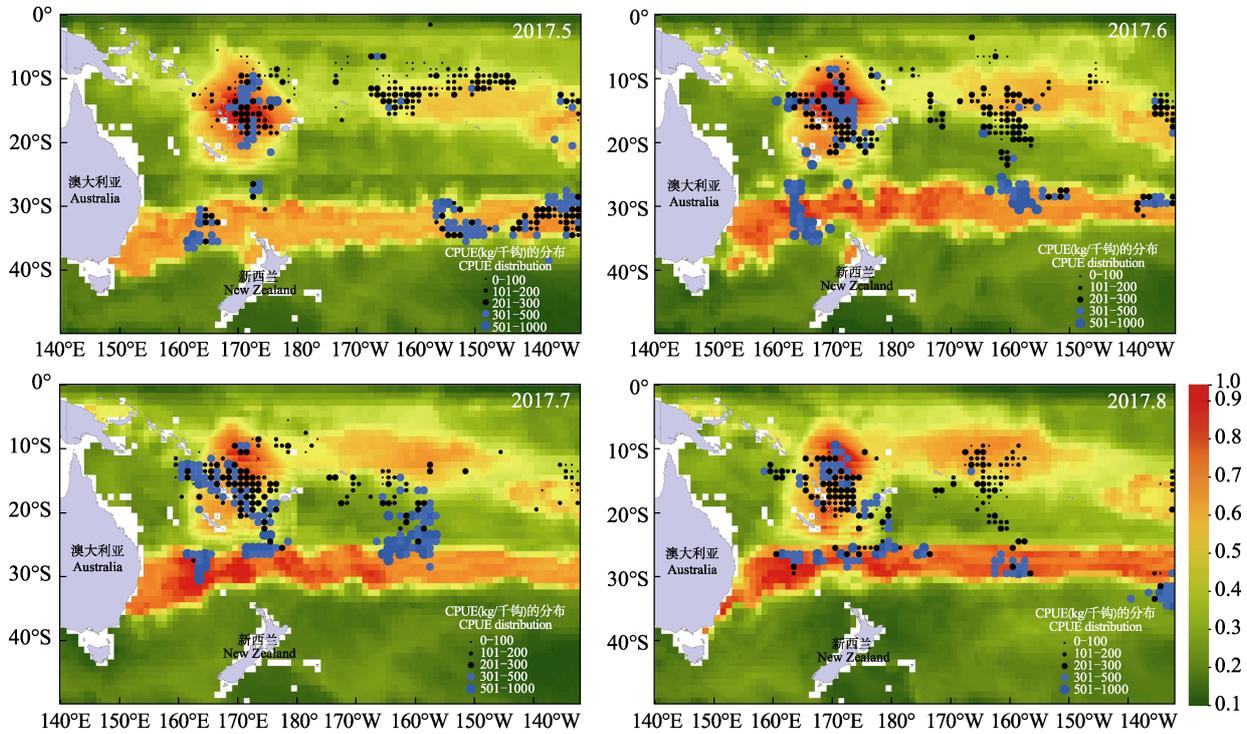


图 5 南太平洋长鳍金枪鱼的潜在栖息地预测

Fig. 5 The potential distribution area of *Thunnus alalunga* in the south Pacific

表 5 最大熵模型的预测准确率

Tab. 5 The predication accuracy of the maximum entropy model

时间 time	真实值程度 real value degree	真实值总数目 total number of real value	预测值 predication value			准确率/% predication accuracy
			高 high	中 medium	低 low	
2017 年 5 月 May 2017	高 high	132	58	74	0	43.94
	中 medium	120	29	86	5	71.67
	低 low	82	5	48	29	35.37
2017 年 6 月 June 2017	高 high	118	42	76	0	35.59
	中 medium	103	12	84	7	81.55
	低 low	73	2	47	24	32.88
2017 年 7 月 July 2017	高 high	100	26	74	0	26.00
	中 medium	86	10	65	11	75.58
	低 low	66	2	46	18	27.27
2017 年 8 月 August 2017	高 high	99	36	63	0	36.36
	中 medium	99	8	82	9	82.83
	低 low	50	2	31	17	34.00

域为 28.4~30.6 °C。这与樊伟等<sup>[24]</sup>指出的长鳍金枪鱼总渔获量分别在 20 °C 和 29 °C 的海域附近呈双峰型分布相符。郭刚刚等<sup>[25]</sup>指出 20 °C 等温线深度又通常用来表示太平洋海域温跃层的深度,长鳍金枪鱼主要以温跃层为界进行昼夜活动。本研究中,在 25°S 以南区域长鳍金枪鱼高渔获率出现在海表面温度为 20 °C 区域附近,故海表温度在 25°S 以南区域的贡献率显著高于 25°S 以北。同时本研究在选择环境因子时加入了不同深度的水温,结果显示在 25°S 以北区域的最大熵模型中,300 m 水深温度有较高的贡献率,主要出现在 13.2~16.7 °C 之间,这也验证了长鳍金枪鱼的主要栖息水层。而 25°S 以南区域中 300 m 水深温度的贡献率低于 25°S 以北区域,这可能是 25°S 以北区域中海表面温度的贡献率很高,因此相对削弱了 300 m 水深温度的贡献率。

以往研究表明海表盐度对于长鳍金枪鱼渔获量的影响较小<sup>[26]</sup>,往往通过水团、海流等间接影响。而在本研究中,海表面盐度对渔获率的影响较大,这可能是在排除了环境因子之间的相关性后揭示了两者的真实关系。总体而言,海表面盐度与渔获率呈现出正相关关系,随盐度的增大而增大。相较于其他 3 个环境因子,各模型得出渔获率对  $V_{\text{wnd}}$  的反馈曲线有一定的差异,可能是在分区域建模后海表面风场的的数据量较小导致拟合结果不佳。海表面风场大致在风速较高时获得较高的长鳍金枪鱼渔获率,可能是由于较大的风速使下层水上升得以补充<sup>[27]</sup>,使海域生产力提高,因此形成了良好的渔场,也有可能是这种混合造成的海域适宜的水温,对长鳍金枪鱼资源有促进作用<sup>[28]</sup>。

### 3.3 长鳍金枪鱼的潜在栖息地分布及验证

本研究选择对 140°E~130°W, 0°~50°S 海域范围内的长鳍金枪鱼渔业数据进行分析,并在纬度方向上以 25°S 为界,分为 0°~25°S 和 25°~50°S 两个区域进行讨论,结果显示(图 5)这种分开分析的方法是合理的。最大熵模型预测了盛渔期内南太平洋长鳍金枪鱼主要集中在 10°S~40°S, 150°E~130°W 区域内,5—8 月间经度方向上保持不变,在 25°S 以北区域长鳍金枪鱼的潜在栖息地

出现在 160°E~130°W 之间,25°S 以南区域在 150°E~130°W 之间均有分布。而在纬度方向上,其在 25°S 以北区域均集中在 10°S~20°S 之间,在 25°S 以南区域其潜在栖息地随时间的推移逐渐向南移动,从 5 月到 8 月整体向南推移了 5°。唐衍力等<sup>[29]</sup>认为 5—8 月长鳍金枪鱼在南太平洋南部的渔场出现在 26°S 附近并稳定持续,这与本研究得出的结论一致。同时本研究结果显示,25°S 以南的长鳍金枪鱼的栖息地分布要优于 25°S 以北,但 2017 年长鳍金枪鱼的渔获数据也显示在 25°S 以北区域的作业频次显著高于 25°S 以南,因此认为可以对 25°S 以南的渔场进行进一步的研究与开发。

目前研究者普遍认为最大熵模型中 AUC 值越高,模型的准确度越高,模型的预测能力越强。Phillips 等<sup>[30]</sup>提出,高 AUC 值下模型的预测能力不一定强,人为因素可能会造成模型预测能力的降低,低 AUC 值下模型的预测能力反而可能更强。本研究将以 2015 年和 2016 年 5—8 月模型预测出的 2017 年 5—8 月长鳍金枪鱼潜在栖息地分布与 2017 年 5—8 月长鳍金枪鱼 CPUE 进行叠加,结果显示,最大熵模型的平均 AUC 值中(表 2),以 5 月 AUC 值最高,6 月最低,而在预测准确率中(表 5),8 月的预测准确率最高,以 7 月为最低,并未与 AUC 值一一对应,这与 Phillips 提出的观点吻合。但本研究仅使用了两年的数据回归拟合,预测结果存在一定的偶然性,未来可使用多年数据研究 AUC 值的高低与预测能力的关系。

本研究在利用最大熵模型对南太平洋长鳍金枪鱼的栖息地进行预测的基础上,以 2017 年真实的渔获数据对长鳍金枪鱼的潜在栖息地进行验证(图 5),宏观上可以发现,渔获分布和预测分布总体较为一致,定量分析结果(表 5)看,预测准确率在 30%~85%之间,其中又以中适生区的预测准确率较高。赖诗涵<sup>[31]</sup>、叶志慧<sup>[32]</sup>在使用最大熵模型进行黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacres*)、中华白海豚(*Sousa chinensis*)的栖息地预测研究时取得了较好的效果。本研究中预测得出的 2017 年长鳍金枪鱼的栖息地分布,在高和低两种适生区拟合效果相对较差。本研究认为原因可能来自:(1)模型自身

的特点。金枪鱼渔场分布具有高度聚集性, 在  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  尺度下真实的高、中、低适应区分布不是连续分布的, 而环境因子具有高度连续分布特征, 因此, 据此计算得出的渔获率分布也是连续的, 导致原本的低适应区和预测的中等适应区重合较多。(2) 建构模型的数据存在一定的限制因素。本建模的数据时空分布都有明显限制, 使用两年的渔获数据, 同时渔船分布受 EEZ 管理限制, 存在部分区域无数据, 获得的环境因子响应曲线也不完整, 不能很好地代表长鳍金枪鱼在南太平洋的真实分布情况, 未来将使用更宏观的数据对长鳍金枪鱼的栖息地预测进行完善。

### 参考文献:

- [1] Brouwer S, Pilling G, Williams P, et al. Trends in the South Pacific albacore longline and troll fisheries (WCPFC-SC14-2018/SA-IP-08)[R]. 14th Regular Session of the Scientific Committee, Busan, Republic of Korea, 8-16 August, 2018.
- [2] Hoyle S, Hampton J, Davies N. Stock assessment of albacore tuna in the South Pacific Ocean (WCPFC-SC8-2012/SA-WP-04-REV1)[R]. 8th Regular Session of the Scientific Committee, Busan, Republic of Korea, 7-15 August, 2012.
- [3] Muhling B A, Lamkin J T, Alemany F, et al. Reproduction and larval biology in tunas, and the importance of restricted area spawning grounds[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2017, 27(4): 697-732.
- [4] Wang J T, Chen X J. Changes and prediction of the fishing ground gravity of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in western-central Pacific[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(8): 44-48. [汪金涛, 陈新军. 中西太平洋鲣鱼渔场的重心变化及其预测模型建立[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(8): 44-48.]
- [5] 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. [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.]
- [6] Song L M, Wu Y P. An integrated habitat index for yellowfin tuna in waters near Gilbert Islands based on GAM[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(8): 1250-1261. [宋利明, 武亚苹. 基于 GAM 的吉尔伯特群岛海域黄鳍金枪鱼栖息地综合指数[J]. *水产学报*, 2013, 37(8): 1250-1261.]
- [7] Chen X Z, Fan W, Cui X S, et al. Fishing ground forecasting of *Thunnus alalunga* in India Ocean based on random forest[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(1): 158-164. [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.]
- [8] Yin X J, Zhou G S, Sui X H, et al. Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 103-109. [殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 103-109.]
- [9] Duque-Lazo J, van Gils H, Groen T A, et al. Transferability of species distribution models: The case of *Phytophthora cinnamomi* in southwest Spain and southwest Australia[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 320: 62-70.
- [10] Chen P, Chen X J. Analysis of habitat distribution of Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic Ocean using maximum entropy model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(6): 893-902. [陈芃, 陈新军. 基于最大熵模型分析西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地分布[J]. *水产学报*, 2016, 40(6): 893-902.]
- [11] Xue J L, Fan W, Tang F H, et al. Analysis of potential habitat distribution of *Scomber japonicus* in northwest Pacific Ocean using maximum entropy model[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(1): 92-98. [薛嘉伦, 樊伟, 唐峰华, 等. 基于最大熵模型预测西北太平洋公海鲈潜在栖息地分布[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(1): 92-98.]
- [12] Tremblay-Boyer L, Hampton J, McKechnie S, et al. Stock assessment of South Pacific albacore tuna (WCPFC-SC14-2018/SA-WP-05)[R]. 14th Regular Session of the Scientific Committee, Busan, Republic of Korea, 8-16 August, 2018.
- [13] Liu S J, Yang J. Modeling spatial patterns of forest fire in Heilongjiang Province using Generalized Linear Model and Maximum Entropy Model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1620-1628. [柳生吉, 杨健. 基于广义线性模型和最大熵模型的黑龙省林火空间分布模拟[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1620-1628.]
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [15] Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.]
- [16] Elith J, Graham C H, Anderson R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [17] Elith J, Graham C H, Anderson R P, et al. Novel methods

- improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [18] Zhu G P, Liu Q, Gao Y B. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species[J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(2): 223-230. [朱耿平, 刘强, 高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布[J]. *生物多样性*, 2014, 22(2): 223-230.]
- [19] Williams A J, Allain V, Nicol S J, et al. Vertical behavior and diet of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) vary with latitude in the South Pacific Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 154-169.
- [20] Schaefer K M, Fuller D W, Aldana G. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in waters surrounding the Revillagigedo Islands Archipelago Biosphere Reserve, Mexico[J]. *Fisheries Oceanography*, 2014, 23(1): 65-82.
- [21] Huang M Q. Albacore (*Thunnus alalunga*) catch rate in relation to oceanographic conditions in the South Pacific Ocean using GAM-based empirical model[D]. Taiwan: Taiwan Ocean University, 2012: 1-75. [黄敏茜. 以泛加成模式分析南太平洋长鳍金枪鱼捕获率与海洋环境之关系[D]. 台湾: 台湾海洋大学, 2012: 1-75.]
- [22] Goni N, Didouan C, Arrizabalaga H, et al. Effect of oceanographic parameters on daily albacore catches in the Northeast Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 73-80.
- [23] Lan K W, Kawamura H, Lee M A, et al. Relationship between albacore (*Thunnus alalunga*) fishing grounds in the Indian Ocean and the thermal environment revealed by cloud-free microwave sea surface temperature[J]. *Fisheries Research*, 2012, 113(1): 1-7.
- [24] Fan W, Zhang J, Zhou W F. The relationship between longline albacore *Thunnus alalunga* and sea surface temperature in the South Pacific Ocean[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2007, 22(5): 366-371. [樊伟, 张晶, 周为峰. 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔场与海水表层温度的关系分析[J]. *大连水产学院学报*, 2007, 22(5): 366-371.]
- [25] 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. [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.]
- [26] Fan Y C, Dai X J, Zhu J F, et al. CPUE standardization of longline fishing *Thunnus alalunga* in South Pacific Ocean[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(1): 122-132. [范永超, 戴小杰, 朱江峰, 等. 南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔业 CPUE 标准化[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(1): 122-132.]
- [27] Bakun A, Black B A, Bograd S J, et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems[J]. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(2): 85-93.
- [28] Chen P, Chen X J, Lei L. Influence of Peruvian upwelling on the anchoveta (*Engraulis ringens*) fishing ground[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1367-1377. [陈芃, 陈新军, 雷林. 秘鲁上升流对秘鲁鳀渔场的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(9): 1367-1377.]
- [29] Tang Y L, Xu Z. The spatio-temporal changes in the long-line fishing grounds of albacore (*Thunnus alalunga*) in Western and Central Pacific Ocean[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(3): 22-29. [唐衍力, 徐湛. 中西太平洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)延绳钓渔场分布的时空变化[J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(3): 22-29.]
- [30] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation[J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [31] Lai S H. Potential habitat distributions and predicated model establishment of yellowfin tuna (*Thunnus albacres*) for longline fishery in the Western and Central Pacific Ocean[D]. Taiwan: Taiwan Ocean University, 2018: 1-65. [赖诗涵. 中西太平洋延绳钓黄鳍金枪鱼潜在栖地分布与预测模式建置之研究[D]. 台湾: 台湾海洋大学, 2018: 1-65.]
- [32] Ye Z H. Distribution prediction and ranging pattern of Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Taiwan[D]. Taiwan: Taiwan University, 2011: 1-112. [叶志慧. 中华白海豚在台湾之分布预测与活动模式[D]. 台湾: 台湾大学, 2011: 1-112.]

## Analysis of albacore (*Thunnus alalunga*) habitat distribution in the south Pacific using maximum entropy model

ZHANG Jiarong<sup>1</sup>, YANG Xiaoming<sup>1,2,3,4</sup>, TIAN Siqian<sup>1,2,3,4</sup>

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Albacore (*Thunnus alalunga*) is a migratory pelagic species, and its spatio-temporal distribution is vulnerable to environmental variation. Thus, a better understanding of the environmental effects on the albacore habitat is of great scientific importance. We used information from the albacore logbooks of mainland China commercial longline vessels and the oceanographic environmental data in the area of 140°E–130°W, 0°–50°S for the South Pacific fishing season (from May to August) from 2015 to 2017 to analyze the response curves of the environmental factors affecting albacore catch per unit effort (CPUE) and the contribution rate of the environmental factors through a maximum entropy model (MaxEnt). We also explored the potential albacore habitat in the main 2017 fishing season and assessed the prediction accuracies compared to the actual catch data. The results showed that: (1) the optimal range of environmental factors were homologous: 28.4–30.6 °C of sea surface temperature, 13.2–17.6 °C of sea temperature at 300 m depth, 35.6–36.7 of sea surface salinity, –1.6–5.8 m/s of northward sea surface wind north of 25°N, and 17.8–23.4 °C of sea surface temperature, 12.2–16.9 °C of sea temperature at 300 m depth, 35.2–36.0 of sea surface salinity, –0.7–4.9 m/s of northward sea surface wind north of 25°S. (2) The environmental factors (sorted by importance) north of 25°S were sea surface temperature (31.3%), sea temperature at 300 m depth (30.1%), sea surface salinity (29.2%), and northward sea surface wind (9.4%); north of 25°S, the environmental factors were sea surface temperature(60.7%), sea surface salinity (22.4%), northward sea surface wind (10.6%), and sea temperature at 300 m depth (6.3%). The most important environmental factor north of 25°S was sea surface temperature (over 60%, on average), which was more significant than the same variable north of 25°S. The importance of the first three environmental factors was similar north of 25°S (approximately 30%, on average). (3) The overall prediction accuracy was 30%–85%; the prediction accuracy of the medium potential habitat was relatively high, while prediction accuracies for the high and low potential habitats were low, as a result of the model and limited data.

**Key words:** *Thunnus alalunga*; environmental factor; potential habitat forecasting; maximum entropy model (MaxEnt); the South Pacific

**Corresponding author:** YANG Xiaoming. E-mail: xmyang@shou.edu.cn