

DOI: 10.12264/JFSC2020-0258

基于最大熵模型的智利外海竹筴鱼栖息地研究

冯志萍^{1, 2, 3, 4, 5}, 余为^{1, 2, 3, 4, 5}, 陈新军^{1, 2, 3, 4, 5}, 邹晓荣^{1, 2, 3, 4}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306

摘要: 竹筴鱼(*Trachurus murphyi*)是一种大洋性鱼类, 其资源丰度及分布受海洋环境变化的显著影响, 分析其栖息地环境差异对研究其渔场变动具有重要的科学意义。本研究利用 2013—2017 年每年 3—8 月智利外海竹筴鱼渔业捕捞数据, 结合混合层深度(mixed layer depth, MLD)、海表面高度(sea surface height, SSH)、海表面盐度(sea surface salinity, SSS)及不同水层水温(包括 0_m、25_m、50_m、100_m、150_m、200_m、300_m、400_m、500_m)构建最大熵模型, 分析竹筴鱼潜在栖息地月间变化, 依据各月环境变量贡献率大小选取该月排位前 3 的关键环境因子, 通过竹筴鱼对关键环境因子的响应曲线, 获取各月关键环境因子适宜范围以分析栖息地环境的月间差异, 最终模拟竹筴鱼的月间栖息地分布。结果表明: 竹筴鱼潜在栖息地变动与实际作业位置基本一致, 随月份增加逐渐向北移动, 3 月分布于 42°S~47°S 之间, 8 月延伸到 30°S 以北区域。各月环境变量贡献率表明关键环境因子具有月间差异性, 3 月关键环境因子为 Temp_400 m、Temp_500 m、SST; 4 月为 Temp_400 m、Temp_500 m、MLD; 5 月为 Temp_500 m、SST、Temp_400 m; 6 月为 SST、Temp_500 m、Temp_50 m; 7 月为 SST、Temp_300 m、SSH; 8 月为 SSH、Temp_300 m、Temp_100 m, 各月关键环境因子适宜范围不同。此外, 水温是影响竹筴鱼渔场时空分布的重要因子, 不同月份竹筴鱼适宜水温层与其垂直移动特性具有一致性; 随竹筴鱼栖息地的北移, SSH 的贡献率逐渐增加, 这可能与智利南北部分布的海流有一定的关系。

关键词: 智利竹筴鱼; 最大熵模型; 栖息地时空变动; 海洋环境; 东南太平洋

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)04-0431-11

竹筴鱼(*Trachurus murphyi*)是智利海域重要的经济鱼类, 广泛分布于 35°S~50°S 的智利至新西兰之间的“竹筴鱼带”及南太平洋的秘鲁、厄瓜多尔等专属经济区, 其渔获量居东南太平洋前列, 尤以智利海域居多, 是远洋渔业国家重要的捕捞对象^[1-2]。国内外学者研究表明, 竹筴鱼是具有高度垂直洄游特性的生态种, 其资源丰度及分布的年际和月间变动与海洋环境变化关联度较大, 如 Bertrand 等^[3]利用 GAM 模型分析竹筴鱼栖息地变

动, 认为竹筴鱼栖息地在 2—9 月逐渐向北迁移, 后又向南洄游。Li 等^[4]通过对比算术平均模型和几何平均模型对竹筴鱼潜在栖息地预测结果后发现, AMM 模型的预测效果更好。汪金涛等^[5]采用基于主成分分析的 BP 神经网络模型较好的预报了竹筴鱼中心渔场。李媛洁等^[6]运用灰色关联评价等数量方法分析了竹筴鱼渔场的季节变化, 认为秋季竹筴鱼栖息地位于智利最南端, 冬季逐渐北移, 春季较秋冬两季分布位置最北。在以往的

收稿日期: 2020-08-20; 修订日期: 2020-09-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901405); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41906073); 上海市自然科学基金项目(19ZR1423000).

作者简介: 冯志萍(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: 1098899451@qq.com

通信作者: 余为, 副研究员, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: wyu@shou.edu.cn

研究中, 研究结果往往依赖于多年渔获数据的积累, 且未考虑影响竹筴鱼栖息地分布的环境变量存在月间差异。最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)是一种可以从物种实际有限的经纬度分布信息无偏推断其未知分布的物种分布模型, 环境变量对模型的增益效果可作为衡量其重要性的指标^[7-8]。因此, 本研究选用 2013—2017 年每年 3—8 月竹筴鱼生产统计数据, 利用 MaxEnt 模型模拟各月竹筴鱼栖息地分布变化, 进一步筛选和分析各月影响竹筴鱼分布的关键环境因子, 为竹筴鱼渔场的探测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 渔业数据

2013—2017 年每年 3—8 月竹筴鱼捕捞数据由上海海洋大学中国远洋渔业数据中心提供, 数据包括作业位置(经度和纬度)、作业日期(年、月、

日)、作业网次、及日捕捞量(单位: t), 空间覆盖范围为 20°S~47°S, 70°W~97°W (图 1)。各年间变化均以时间分辨率为月, 空间分辨率为 0.5°×0.5°为单位进行建模分析。

1.2 环境数据

研究表明, 竹筴鱼资源丰度及渔场时空分布随 SST、SSH、SSS 等海洋环境因子的变化具有明显的年际和月间变化^[3-5,9]。基于竹筴鱼昼沉夜浮及高度洄游的生物学特性, 本研究选取海表面高度(sea surface height, SSH)、海表面盐度(sea surface salinity, SSS)、混合层深度(mixed layer depth, MLD)以及不同水层水温(包括 0_m、25_m、50_m、100_m、150_m、200_m、300_m、400_m、500_m)等 12 个环境因子进行分析。所有数据均来自亚太数据研究中心(http://apdrc.soest.hawaii.edu/las_ofes/v6/dataset?catitem=71), 时间为 2013—2017 年 3—8 月, 空间分布范围为 20°S~47°S, 70°W~97°W, 时间分辨率为月, 空间分辨率为 0.5°×0.5°。

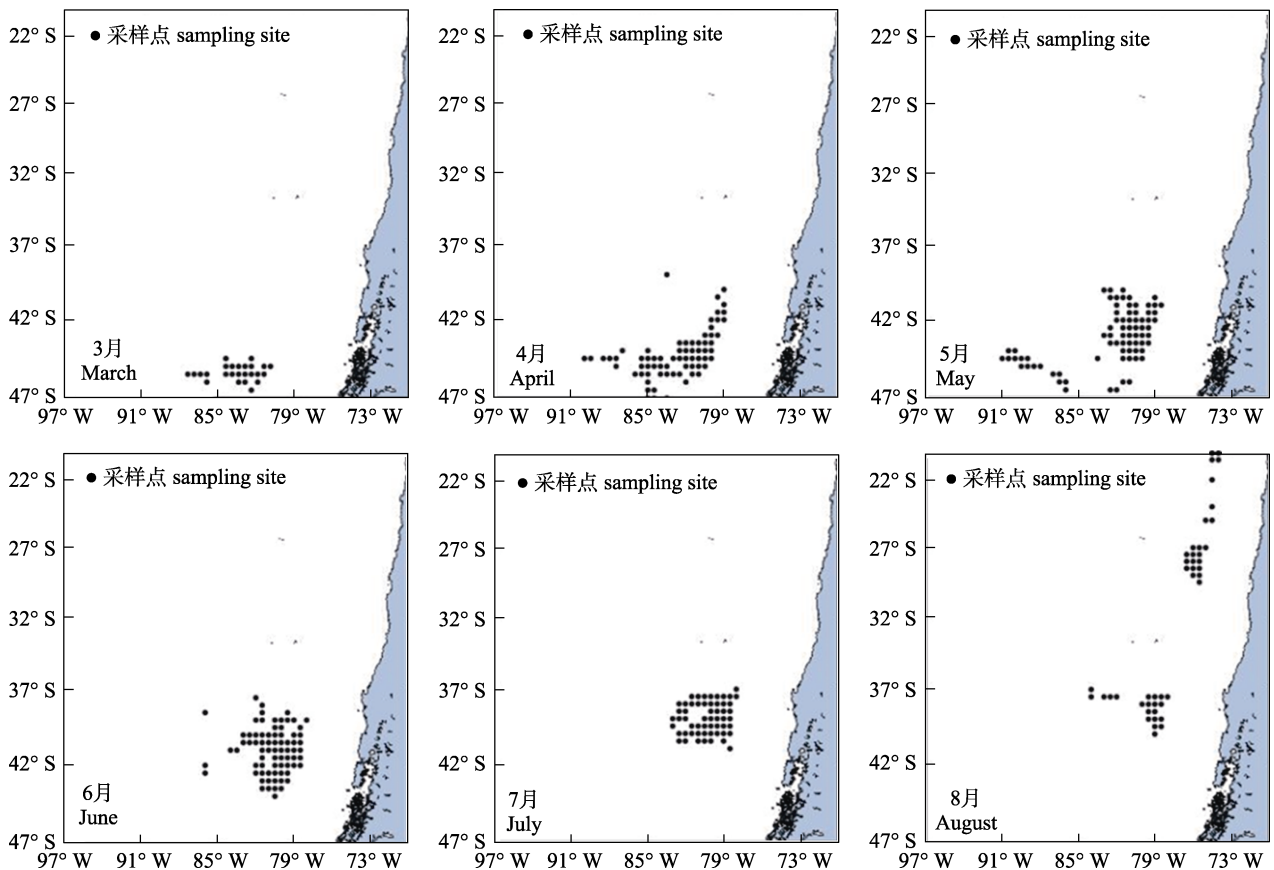


图 1 2013—2017 年 3—8 月中国拖网船队在智利公海作业区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of operation area of Chinese trawl fleets in the open ocean off Chile from March to August in 2013-2017

1.3 分析方法

1.3.1 MaxEnt 模型 MaxEnt 模型是基于物种存在数据及其分布的区域环境数据, 在符合限制条件中选择物种存在概率最大的分布为其最优潜在分布, 即熵最大原则, 是一种基于“当前存在”预测“未知分布”的机器学习方法^[10-11]。模型运算使用软件 MAXENT 3.4.1 (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)^[12], 输入层中的竹筴鱼分布数据为捕捞当月各渔船每日作业位置的渔获数据(去除渔获为 0 的数据), 以物种名、经度、纬度的形式输入, 并以 CSV 格式存储。环境图层是由 ArcGis 10.2 输出的 ASCII 格式的 2013—2017 年 3—8 月的 MLD、SSH、SSS 及不同水层水温(0_m、25_m、50_m、100_m、150_m、200_m、300_m、400_m、500_m)月均数据。在运算过程中竹筴鱼分布数据的 75% 作为构建模型的训练数据, 其余 25% 为模型精度验证的测试数据, 重复运算设定为 10 次以消除重复数和随机性。

依据受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)评价模型精度, 该曲线以模型对预测结果阈值的判断为依据, 以假阳性率(即物种不存在被错误预测为存在的比率)为横坐标, 以真阳性率(即物种存在被正确预测的概率)为纵坐标绘制而成, 将曲线下面积(area under curve, AUC)的大小作为衡量模型精度的指标, AUC 值越接近于 1, 表明模型预测精度越高^[12-13]。根据模型自动生成的 ROC 曲线下面积值 AUC 的大小判断各月模型精度, 将 AUC 大小划分为 $0.5 \leq AUC < 0.6$ 、 $0.6 \leq AUC < 0.7$ 、 $0.7 \leq AUC < 0.8$ 、 $0.8 \leq AUC < 0.9$ 、 $0.9 \leq AUC < 1.0$ 等 5 个等级, 预测效果分别表示为失败、较差、一般、好、极好^[14]。

1.3.2 潜在栖息地分布图绘制 利用 ArcGis 10.2 对模型输出的每个栅格点上竹筴鱼分布存在概率的 ASCII 格式数据进行可视化处理, 将其分布存在概率定义为栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI), 范围为 0~1, 依据适宜程度将其划分为 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0 等 5 个等级, 并认为 $HSI \geq 0.6$ 的区域为竹筴鱼最适宜栖息地^[15], 利用 MATLAB 绘制各月竹筴鱼潜在栖息地分布图。

1.3.3 渔场经纬度重心及最适 HSI 重心分析 单位捕捞努力量渔获量(catch per unit of effort, CPUE)可以表征鱼类资源密度^[16], 渔场经纬度重心分布则体现了作业位置的时空变动, 而最适 HSI (即 $HSI \geq 0.6$)重心则体现了竹筴鱼最适潜在栖息地的变动, 对比分析竹筴鱼实际与预测分布变化。其中 CPUE、渔场经纬度重心及最适 HSI 重心计算公式分别为:

$$CPUE_{mij} = \frac{\sum Catch_{mij}}{\sum Effort_{mij}} \quad (1)$$

$$LONG = \frac{\sum (Lon_{mij} \times CPUE_{mij})}{\sum CPUE_{mij}} \quad (2)$$

$$LATG = \frac{\sum (Lat_{mij} \times CPUE_{mij})}{\sum CPUE_{mij}} \quad (3)$$

$$LONG_{HSI} = \frac{\sum (Lon_{mij} \times HSI_{mij})}{\sum HSI_{mij}} \quad (4)$$

$$LATG_{HSI} = \frac{\sum (Lat_{mij} \times HSI_{mij})}{\sum HSI_{mij}} \quad (5)$$

式中, Catch 代表作业位置的捕捞量; Effort 代表作业位置的捕捞努力量; LONG、LATG、 $LONG_{HSI}$ 、 $LATG_{HSI}$ 分别为渔场经度、纬度重心、最适 HSI 经度、最适纬度重心; m 代表月份、 i 代表经度、 j 代表纬度。

1.3.4 关键环境因子选取及其分析 依据模型运算结果中各环境因子贡献率大小选取各月关键环境因子, 其原理为模型运算过程中通过改变单一环境变量特征系数获得模型增益, 将此增益转化为百分比后视为该变量对物种分布的贡献率^[17], 按照从大小的顺序选取各月环境变量贡献率排名前三的因子为该月关键环境因子。最后结合竹筴鱼对关键环境因子响应曲线来分析其各月关键环境因子适宜范围的变动规律。

2 结果与分析

2.1 模型计算结果及评价

从 MaxEnt 模型运算结果可以看出, 竹筴鱼潜在栖息地分布变化与实际作业位置变化趋势基

本一致: 在月间变化中, 随月份增加, 竹筴鱼潜在栖息地向北迁移。在季度变化中, 冬季(6—8月)整体较秋季(3—5月)最适宜栖息地面积位置偏北。秋季, 竹筴鱼 3 月主要分布在 42°S~47°S 之间, 且最适宜栖息地面积最小, 3 月之后栖息地面积向

北移动, 但变化趋势不明显, 最适宜栖息地面积增加; 冬季, 竹筴鱼最适宜栖息地向北移动变化较为明显, 5 月栖息地面积最小, 8 月竹筴鱼最适宜栖息地延伸到智利 30°S 以北的区域, 且栖息地面积最大(图 1, 图 2)。

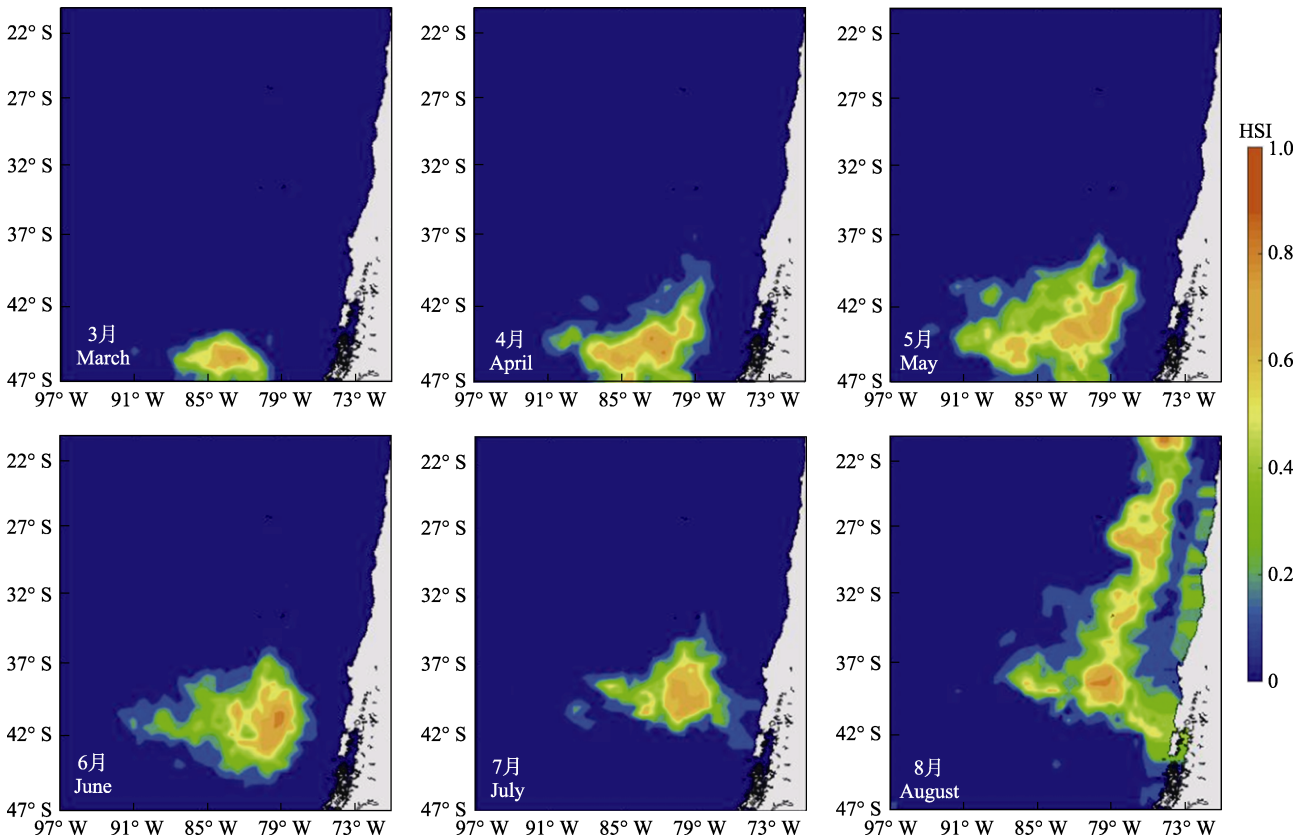


图 2 2013—2017 年 3—8 月东南太平洋智利竹筴鱼潜在栖息地分布图

Fig. 2 Spatial distribution of potential habitat of *Trachurus murphyi* in the Southeast Pacific Ocean from March to August in 2013-2017

由 2013—2017 年 3—8 月各月模拟精度结果可知, AUC 值均大于 0.9, 表明各月模型模拟竹筴鱼潜在分布与其实际分布吻合度很高, 分析结果可靠(表 1)。

2.2 渔场经纬度重心及最适 HSI 重心变动分析

从整体变化来看, 渔场经纬度重心和最适 HSI 重心变化趋势基本一致(图 3)。经度方向上, 渔场重心和最适 HSI 重心随月份增加, 呈现东移的趋势。两者经度重心在 3—7 月内分布在 80°W 以西的海域内, 8 月东移到 77°W~78°W 区域内。两者经度重心于 3 月、4 月、和 7 月基本重合, 而 HSI 经度重心在 5 月和 6 月较渔场经度重心分别

表 1 2013—2017 年 3—8 月竹筴鱼 MaxEnt 模型统计结果

Tab. 1 Statistical analysis of MaxEnt model of *Trachurus murphyi* from March to August in 2013-2017

模型 maxEnt model	样本量 sample size	精度 AUC	标准偏差 standard deviation
3 月 March	25	0.989	0.005
4 月 April	69	0.970	0.014
5 月 May	75	0.958	0.014
6 月 June	74	0.973	0.009
7 月 July	56	0.980	0.005
8 月 August	44	0.939	0.031

东移 0.9°和 0.6°。纬度方向上, 渔场重心和最适 HSI 重心随月份增加, 呈现北移的趋势。两者重心在 3—7 月基本重合, 均分布在 30°S~46°S 区域之间,

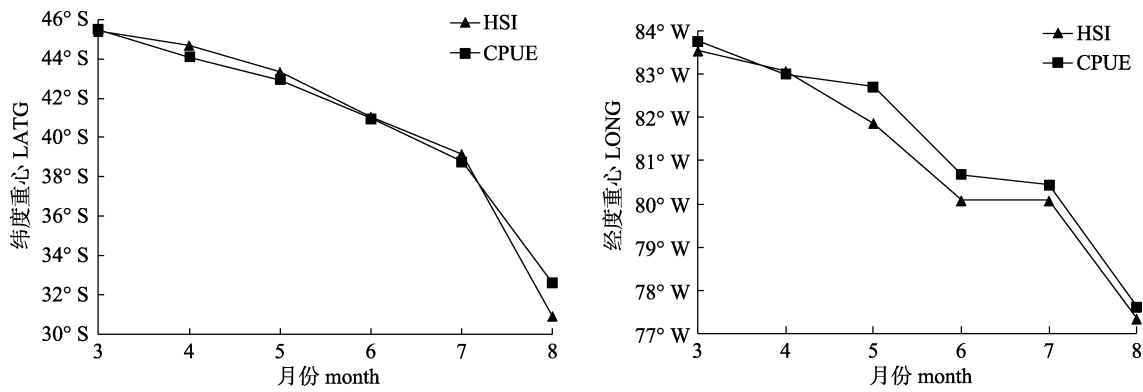


图 3 2013—2017 年 3—8 月东南太平洋智利竹筴鱼渔场经纬度重心及最适 HSI 重心分布
Fig. 3 Distribution of longitude and latitude center of gravity and optimal HSI center of gravity of the fishing ground of *Trachurus murphyi* in the Southeast Pacific Ocean from March to August in 2013-2017

8 月北移趋势最为明显, 渔场重心和最适 HSI 重心均分布于 30°S 以北的区域, 且最适 HSI 重心较渔场重心北移 1.7°。

2.3 各月关键环境因子及其适宜范围

根据各月各环境变量贡献率大小(表 2)选取各月关键环境因子, 通过竹筴鱼存在概率对各月关键环境因子的响应状况, 分析各月关键环境因子的适宜范围(图 4)。研究表明, 3 月关键环境因子为 Temp_400 m、Temp_500 m、SST, 各因子适宜范围分别为 5.9~6.1 °C、5.8~6.0 °C、12~13.5 °C。4 月关键环境因子为 Temp_400 m、Temp_500 m、MLD, 各因子适宜范围分别为 5.9~6.2 °C、5.9~6.1 °C、47~60 m。5 月关键环境因子为 Temp_500 m、SST、Temp_400 m, 各因子适宜范围分别为 5.9~

6.2 °C、11~15 °C、6~6.5 °C。6 月关键环境因子为 SST、Temp_500 m、Temp_50 m, 各因子适宜范围分别为 11.5~14 °C、6~6.3 °C、11.5~14.5 °C。7 月关键环境因子为 SST、Temp_300 m、SSH, 各因子适宜范围分别为 12~14 °C、7.2~8.2 °C、4~10 cm。8 月关键环境因子为 SSH、Temp_300 m、Temp_100 m, 各因子适宜范围分别为 2~8 cm、7.5~9 °C、11~14 °C。3—8 月各月关键环境因子累计贡献率依次为 77.1%、80.8%、84.2%、69.1%、89.2%、80.8%, 均大于 60%, 表明其对竹筴鱼渔场时空分布起着主要作用。此外, 各月关键环境因子月均变化结果表明, 随月份增加, SST 呈现逐渐下降的趋势, 其余水温层基本于 8 月呈下降趋势(表 3)。

表 2 2013—2017 年 3—8 月东南太平洋智利竹筴鱼渔场各环境因子贡献率
Tab. 2 Contribution rates of environmental factors of the fishing ground of *Trachurus murphyi* in the Southeast Pacific Ocean from March to August in 2013-2017

环境变量 environment variable	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
混合层深度 MLD	1.4	10.3	3.1	8.9	5.1	6.9
海表面高度 SSH	2.3	0.7	0.6	7.5	16	33.1
海表面盐度 SSS	2.1	0.9	6.4	3.3	4.1	5.4
海表面温度 SST	7.3	8.9	35.6	49.6	48.1	0.6
25_m 水层温度 Temp_25 m	6.1	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0
50_m 水层温度 Temp_50 m	2.1	1.8	0.3	9.2	0.1	1.6
100_m 水层温度 Temp_100 m	3.3	2.4	0.1	5.3	0.2	20.8
150_m 水层温度 Temp_150 m	0.1	0.2	0.4	0.0	0.0	2.9
200_m 水层温度 Temp_200 m	2.3	1.5	0.5	0.0	0.0	0.0
300_m 水层温度 Temp_300 m	3.3	2.0	4.3	5.2	25.1	26.9
400_m 水层温度 Temp_400 m	63.4	46.4	10.2	0.7	0.6	0.1
500_m 水层温度 Temp_500 m	6.4	24.1	38.4	10.3	0.4	1.7

注: 加粗环境变量为各月筛选出的关键环境因子。

Note: The environmental variables in bold are the key environmental factors in each month.

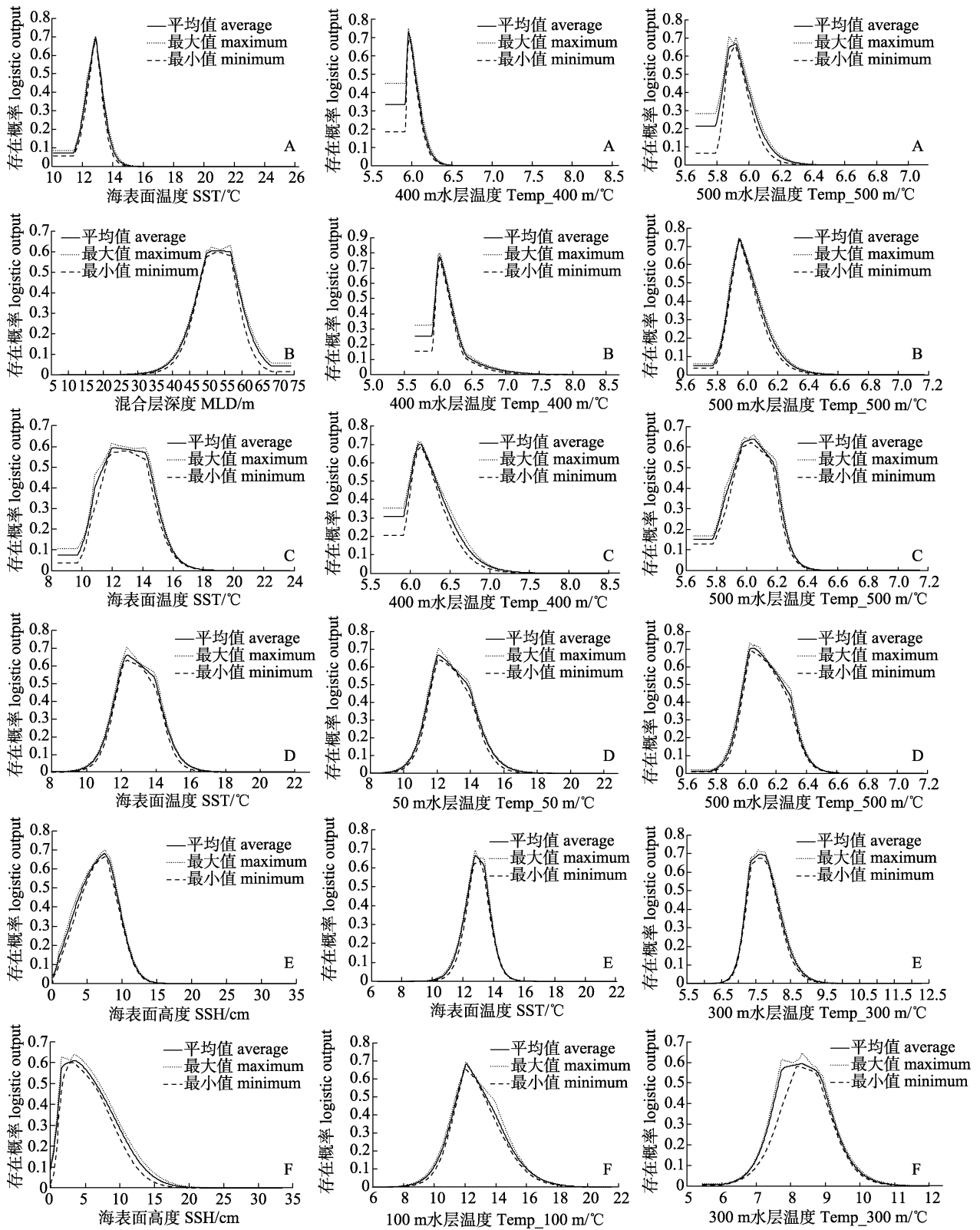


图 4 2013—2017 年 3—8 月东南太平洋智利渔场竹筴鱼对关键环境因子的反应曲线图

A. 3 月; B. 4 月; C. 5 月; D. 6 月; E. 7 月; F. 8 月.

Fig. 4 Response curves of *Trachurus murphyi* to key environmental factors in Chilean fishing ground of Southeast Pacific Ocean from March to August in 2013-2017

A. March; B. April; C. May; D. June; E. July; F. August.

表3 2013—2017年3—8月东南太平洋智利竹筴鱼渔场关键环境因子月均变化
 Tab. 3 Monthly averaged values of the key environmental factors on the fishing ground of *Trachurus murphyi* in the Southeast Pacific Ocean from March to August in 2013-2017

月份 month	混合层深度/m MLD	海表面高度/cm SSH	海表面温度/°C SST	50 m 水温/°C Temp_50 m
3月 March	31.5	12.5	18.7	15.6
4月 April	42.8	12.5	17.9	16.2
5月 May	52.0	12.2	17.0	16.3
6月 June	66.7	11.8	15.8	15.5
7月 July	81.6	10.9	14.8	14.6
8月 August	90.8	10.5	14.2	14.0

月份 month	100 m 水温/°C Temp_100 m	300 m 水温/°C Temp_300 m	400 m 水温/°C Temp_400 m	500 m 水温/°C Temp_500 m
3月 March	13.3	8.56	7.15	6.48
4月 April	13.3	8.55	7.15	6.48
5月 May	13.4	8.57	7.17	6.49
6月 June	13.5	8.59	7.19	6.50
7月 July	13.7	8.63	7.20	6.50
8月 August	13.5	8.64	7.19	6.50

3 讨论

3.1 最大熵模型结果及其优势分析

本研究利用最大熵模型模拟了2013—2017年3—8月智利竹筴鱼潜在栖息地分布,模型输出结果对比发现(图1,图2,图3),竹筴鱼潜在分布与实际作业位置变化趋势基本一致;AUC检测各月模型精度均大于0.9(表1),表明模型结果具有可靠性。与以往研究竹筴鱼分布的栖息地模型^[4]、神经网络模型^[5]、广义可加模型^[3]等相比,最大熵模型仅基于物种有限个分布点的位置数据和环境背景数据,避免渔业统计数据在时间和空间上的局限性,目前已应用于柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)^[15,18]、阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)^[11]、西北太平洋公海鲈(*Scomber japonicus*)^[19]、黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacres*)^[20]等,表明此模型研究结果具有较强的可靠性。实际上,不同月份内环境因子对竹筴鱼的影响程度不同,即存在影响程度较高的关键环境因子和影响程度较低的非关键环境因子。在当前智利竹筴鱼渔场与环境关联的研究中,众多结果忽略了环境的月间差异,这些研究所选取的环境因子大多剔除了相关性较高的因子,且人为设定因素影响较大。最大熵模型在竹筴鱼生物学特性基础上,有效考虑环境变量间的相关关系,利用各环境变量对模型增益效果计算

其贡献率大小,从而表征各环境变量的重要性程度,由各环境因子贡献率大小筛选出各月影响竹筴鱼渔场分布的关键环境因子进行分析研究,忽略影响甚微的因素,增强了预测智利竹筴鱼渔场时选取环境变量的科学性,提高预报的可靠性。

3.2 关键环境因子变化

3.2.1 关键环境因子共性 2013—2017年3—8月各月环境因子贡献率结果显示各月关键环境因子虽具有一定差异性(表2),但各月所有关键环境因子具有共性,即海温占据比较重要的位置,这与以往的研究结果较为一致^[3-6]。竹筴鱼渔场分布于东南太平洋南部西风漂流冷水区与北部逆赤道暖水流的交汇处^[21],海温通常是探测竹筴鱼渔场变动的重要指标,Li等^[4]利用栖息地模型预测表明智利海域竹筴鱼潜在适宜栖息地纬度重心与其渔场重心变化趋势一致,认为适宜栖息地和渔场纬度重心的季节性变化可能取决于副热带锋面带或副热带水团,且在此变化过程中海温起了重要的作用。陈春光等^[22]采用最短距离对竹筴鱼中心渔场聚类分析以研究其月间变动规律,认为适宜的海温是形成竹筴鱼中心渔场的重要条件。此研究结果同时表明,3—8月SST呈现逐渐下降的趋势(表3),竹筴鱼适宜栖息地由南向北移动,这可能是由影响竹筴鱼渔场形成的海流季节性变化所致。秋季,西风漂流的冷水势力弱于北部赤道暖

水势力, 两海流混合区向南移动, 因而竹筴鱼渔场位于智利南部区域, 且此时海温较高; 冬季则相反^[21]。徐红云等^[23]通过栖息地模型分析各月竹筴鱼适宜海温变化, 认为智利海域竹筴鱼栖息地随 SST 的升高有明显的南移趋势, 随 SST 的下降有明显的北移趋势, 这与本文研究的在 SST 变化下竹筴鱼栖息地变动结果较为一致。

3.2.2 关键环境因子中水温垂直结构的变化 具有昼夜垂直洄游习性的头足类和鱼类潜在栖息地和渔场的形成不仅受到 SST、SSS、海流等海洋环境要素的影响, 同时还受到水温垂直结构的影响。Tian 等^[24]在研究中虽未涉及水温层对西北太平洋柔鱼渔场的影响, 但已将该影响因素考虑在内, 而陈新军等^[25]则利用不同水温层数据结合栖息地模型较好的预测了西北太平洋柔鱼中心渔场及潜在渔场。钱卫国等^[26]研究发现智利南部区域(37°S~41°S, 78°W~84°W)的茎柔鱼主要受深层水温(300~325 m)和浅层(25~75 m)水温影响, 北部(28°S~30°S, 76°W~78°W)主要受深层水温(150~250 m)影响。Song 等^[27]同样采用不同水层水温数据建立栖息地模型分析印度洋大眼金枪鱼的渔场分布。竹筴鱼具有昼夜垂直洄游特性, 故本文除考虑 SST、SSH、SSS、MLD 外, 同时还加入了 25_m、50_m、100_m、150_m、200_m、300_m、400_m、500_m 水层水温研究其潜在栖息地分布。研究结果表明(表 2), 秋季各月关键水温层因子均包括 Temp_400 m、Temp_500 m, 栖息的水层相对稳定; 冬季关键水温梯度变化大, 且栖息的水层较秋季浅, 这可能与竹筴鱼昼夜垂直洄游活动的季节性变化有关。秋季分布于智利南部的竹筴鱼白天集群于 40~450 m 水层深处, 夜晚密集分布于 20~40 m 水层, 捕捞量少于冬季, 昼夜活动浮动差较小, 栖息的水层较稳定, 冬季竹筴鱼主群则出现于水温梯度大的地方^[28]。阮行健^[29]认为冬季作为探捕旺季, 竹筴鱼鱼群多出现在表层至 300 m 水层间, 偶尔分布于 100 m 以上的水层中, 夜晚上浮于表层至 100 m 水层之间, 昼夜活动浮动较大, 栖息的水温梯度变化大。本文加入不同水温层影响因素后发现, 各月影响竹筴鱼潜在栖息地分布的关键环境因子与竹筴鱼垂直洄游特性

具有一致性, 因此, 在以后的竹筴鱼渔场预报研究选取环境变量时, 因考虑多贴合其生物学特性, 除考虑海表面因素影响外, 深层水温也不容忽略。

3.2.3 SSH 对竹筴鱼栖息地的影响 各环境因子贡献率结果表明(表 2), 除海温影响外, 竹筴鱼栖息地分布还受到 SSH 的影响, 其贡献率随竹筴鱼栖息地北移逐渐增加, 当竹筴鱼栖息地北移延伸到 30°S 以北的区域时, SSH 为该月贡献率最高的环境因子, 这可能与智利南北部受到的海流影响程度不同有关, 同时表明 SSH 也是探测竹筴鱼渔场变动的重要指标。蒋瑞等^[30]认为 SSH 对竹筴鱼渔场分布的影响存在季节差异, Li 等^[4]同样认为 SSH 是影响竹筴鱼适宜栖息地的重要环境变量, 且影响程度存在月间差异。智利竹筴鱼渔场形成主要受西风漂流和秘鲁寒流的影响, 稳定的洋流体系是其渔场形成的最根本原因, 而 SSH 是海水动力学的表征, 代表了海水的辐合和涌升^[21,31]。以往研究表明, 位于 43°S 附近的西风漂流的南向支流其流速和流向于秋季变化不明显, 而智利南部 36°S 海域附近除受到秘鲁寒流的影响外, 同时受到信风及副高交替控制, 有明显的上升补偿流存在, 海流影响程度整体高于仅受西风漂流影响的南部区域^[32-33]。本研究表明, 秋季竹筴鱼主要分布于 41°S 附近, SSH 月均变化不明显, 幅度差在 0~0.5 cm 以内(表 3), 表明海流变化幅度不大; 冬季, 竹筴鱼适宜栖息地由南向北移动, 部分群体分布于 30°S 以北的区域, SSH 变化较秋季明显, 表明其分布受海流影响程度增强, 故 SSH 的贡献率逐渐增大。

3.3 不足与展望

本研究利用最大熵模型对 2013—2017 年 3—8 月竹筴鱼潜在栖息地变动及其渔场环境差异进行分析, 根据环境因子贡献率大小选取各月关键环境因子, 虽增强了研究选取环境因子的科学性, 但仍存在一定的局限性: 最大熵模型是基于统计学的基础上, 在背景环境限制条件下, 根据物种存在位置数据推测其潜在分布, 若研究目标具有高度洄游特性时, 样本数据选择的偏差会造成环境数据的偏差, 使得模型预测精度降低, 如 Alabina 等^[18]基于 2001 年构建的最大熵模型基础

上预测 2002—2004 年柔鱼潜在栖息地分布, 预测结果显示 2002—2004 年冬季预测效果优于夏季, 这可能是由于夏季柔鱼洄游活动性较强, 致使样本数据的采样范围偏差较大造成的。因此, 在以后的研究中可以规避采样限制以提高 MaxEnt 模型在渔业应用中的实用性。此外, Bertrand 等^[34]认为竹筴鱼栖息地分布受溶解氧的限制, 主要分布于溶解氧浓度较高的智利中南部海域; Acros 等^[35]认为 ENSO 事件对竹筴鱼种群的影响存在滞后效应, 且在厄尔尼诺事件期间, 竹筴鱼生物量呈现增加的趋势, 因此在以后的研究中, 可将这些影响因素量化结合到模型中分析竹筴鱼的时空分布变化。

参考文献:

- [1] Gerlotto F, Dioses T. Bibliographical synopsis on the main traits of life of *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean[C]/Proceedings of the First Meeting of the Scientific Committee of SPRFMO, California, 2013.
- [2] Cubillos L A, Paramo J, Ruiz P, et al. The spatial structure of the oceanic spawning of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off central Chile (1998–2001)[J]. Fisheries Research, 2008, 90(1-3): 261-270.
- [3] Bertrand A, Dragon a C, Habasque J, et al. Hydrography biogeochemistry and Chilean jack mackerel stock structure interactions[C]/Proceedings of the Second Meeting of the Scientific Committee of SPRFMO, California, 2014.
- [4] Li G, Cao J, Zou X R, et al. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the South East Pacific[J]. Fisheries Research, 2016, 178: 47-60.
- [5] Wang J T, Gao F, Lei L, et al. Application of BP neural network based on principal component analysis in fishing grounds of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the southeast Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2014, 36(8): 65-71. [汪金涛, 高峰, 雷林, 等. 基于主成分和 BP 神经网络的智利竹筴鱼渔场预报模型研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(8): 65-71.]
- [6] Li Y J, Chen X J, Wang J T, et al. Spatio-temporal distribution of mackerel in Southeast Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(4): 616-625. [李媛洁, 陈新军, 汪金涛, 等. 东南太平洋智利竹筴鱼资源渔场时空分布[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(4): 616-625.]
- [7] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [8] Zhang J R, Yang X M, Tian S Q. Analysis of albacore (*Thunnus alalunga*) habitat distribution in the south Pacific using maximum entropy model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(10): 1222-1233. [张嘉容, 杨晓明, 田思泉. 基于最大熵模型的南太平洋长鳍金枪鱼栖息地预测[J]. 中国水产科学, 2020, 27(10): 1222-1233.]
- [9] Jin W H. The relationship between change mechanism of fishing ground for jack mackerel and ocean temperature, salinity in the Southeast Pacific Ocean based on PLS[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [晋伟红. 基于偏最小二乘法的东南太平洋智利竹筴鱼渔场与海洋温度、盐度关系研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [10] Alabia I D, Saitoh S I, Mugo R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(2): 190-203.
- [11] 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.]
- [12] Phillips S J. A brief tutorial on Maxent[CP/OL]. http://bio-diversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- [13] 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.]
- [14] Wang L H, Yang J X, Xu X N. Analysis of suitable bioclimatic characteristics of *Pseudolarix amabilis* by using Max-Ent model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 127-131. [王雷宏, 杨俊仙, 徐小牛. 基于 MaxEnt 分析金钱松适生的生物气候特征[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 127-131.]
- [15] Gong C X, Chen X J, Gao F. Modeling the potential distribution of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on a Max Ent model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(3): 336-345. [龚彩霞, 陈新军, 高峰. 基于最大熵模型模拟西北太平洋柔鱼潜在栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(3): 336-345.]
- [16] Fang X Y, Chen X J, Ding Q. Optimization fishing ground prediction models of *Dosidicus gigas* in the high sea off Chile based on habitat suitability index[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34(4): 67-73. [方学燕, 陈新军, 丁琪. 基于栖息地指数的智利外海茎柔鱼渔场预报模型优化[J]. 广东海洋大学学报, 2014, 34(4): 67-73.]
- [17] Urbani F, D'Alessandro P, Frasca R, et al. Maximum en-

- tropy modeling of geographic distributions of the flea beetle species endemic in Italy (Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini)[J]. *Zoologischer Anzeiger - A Journal of Comparative Zoology*, 2015, 258: 99-109.
- [18] Alabía I D, Saitoh S I, Mugo R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. *Fisheries Oceanography*, 2015, 24(2): 190-203.
- [19] 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.]
- [20] 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]. Keelung: Taiwan Ocean University, 2018: 1-65. [赖诗涵. 中西太平洋鮪延绳钓黄鳍鲔潜在栖地分布与预测模式建置之研究[D]. 基隆: 台湾海洋大学, 2018: 1-65.]
- [21] Niu M X, Li X S, Xu Y C. Preliminary study on spatio-temporal change of central fishing ground of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the offshore waters of Chile[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(11): 105-109. [牛明香, 李显森, 徐玉成. 智利外海竹筴鱼中心渔场时空变动的初步研究[J]. *海洋科学*, 2009, 33(11): 105-109.]
- [22] Chen C G, Zhang M, Zou X R, et al. Investigation on monthly variation in central fishing ground for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the Southeast Pacific Ocean[J]. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(5): 60-67. [陈春光, 张敏, 邹晓荣, 等. 东南太平洋智利竹筴鱼中心渔场的月间变动研究[J]. *南方水产科学*, 2014, 10(5): 60-67.]
- [23] Xu H Y, Wang J T, Chen X J, et al. Influence of sea surface temperature changes on Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) habitat in the Southeast Pacific[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(4): 337-347. [徐红云, 汪金涛, 陈新军, 等. 海表水温变化对东南太平洋智利竹筴鱼栖息地分布的影响[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(4): 337-347.]
- [24] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Fisheries Research*, 2009, 95(2-3): 181-188.]
- [25] Chen X J, Chen F, Gao F, et al. Modeling of habitat suitability of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) based on vertical temperature structure in the Northwestern Pacific Ocean[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(6): 52-60. [陈新军, 陈峰, 高峰, 等. 基于水温垂直结构的西北太平洋柔鱼栖息地模型构建[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(6): 52-60.]
- [26] Qian W G, Chen X J, Zheng B, et al. Study on the resource density distribution of *Dosidicus gigas* and marine environment in the high sea waters off Chile[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(1): 98-103. [钱卫国, 陈新军, 郑波, 等. 智利外海茎柔鱼资源密度分布与渔场环境的关系[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(1): 98-103.]
- [27] Song L M, Zhou Y Q. Developing an integrated habitat index for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean based on longline fisheries data[J]. *Fisheries Research*, 2010, 105(2): 63-74.
- [28] Zhang M, Xu L X. Analysis and discussion on the exploitation and utilization of the resources of *Trachurus murphyi* in the Southeast Pacific Ocean[J]. *Marine Fisheries*, 2000, 22(3): 137-140. [张敏, 许柳雄. 开发利用东南太平洋竹筴鱼资源的分析探讨[J]. *海洋渔业*, 2000, 22(3): 137-140.]
- [29] Ruan X J. Study on reproductive biology of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the Southeast Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [阮行建. 东南太平洋智利竹筴鱼生殖生物学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.]
- [30] Jiang R, Chen X J, Lei L, et al. A comparative study on habitat suitability index of *Trachurus murphyi* during autumn and winter[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(2): 240-249. [蒋瑞, 陈新军, 雷林, 等. 秋冬季智利竹筴鱼栖息地指数模型比较[J]. *水产学报*, 2017, 41(2): 240-249.]
- [31] Zhang W, Zhang J. A discussion about relationship between the distribution of production of *Illex argentinus* and marine environmental factors in the Southwest Atlantic Ocean[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(4): 471-475. [张炜, 张健. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场与主要海洋环境因子关系探讨[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(4): 471-475.]
- [32] Lin L R, Hu J Y. Seasonal and interannual variations of sea surface geostrophic current in the Southeast Pacific[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(6): 51-58. [林丽茹, 胡建宇. 太平洋东南海域表层地转流场的季节及年际变化特征[J]. *海洋科学*, 2006, 30(6): 51-58.]
- [33] Chen F. An analysis of the causes of the cold current in Peru based on the principle of integrity[J]. *Geography Teaching*, 2016(15): 31-32, 39. [陈锋. 基于整体性原理的秘鲁寒流成因剖析[J]. *地理教学*, 2016(15): 31-32, 39.]
- [34] Bertrand A, Habasque J, Hattab T, et al. 3-D habitat suitability of jack mackerel *Trachurus murphyi* in the Southeastern Pacific, a comprehensive study[J]. *Progress in Oceanography*, 2016, 146:199-211.
- [35] Arcos D F, Cubillos L A, Núñez S P. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1-4): 597-617.

Distribution of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) habitats off Chile based on a maximum entropy model

FENG Zhiping¹, YU Wei^{1,2,3,4,5}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4,5}, ZOU Xiaorong^{1,2,3,4}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;
3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: *Trachurus murphyi* is a pelagic fish species, the resource abundance and distribution of which are significantly affected by variations in the marine environment. Accordingly, analyses of the influence of key environmental variables on the fishing grounds of *T. murphyi* are of particular importance in gaining an understanding of how fishing grounds are altered in response to changes in environment. In this study, we collected fishery data for Chilean *T. murphyi* from March to August, obtained during the period between 2013 and 2017, from the National distant-water fisheries data center of Shanghai Ocean University, along with data relating to the following 12 environmental factors: mixed layer depth (MLD), sea surface height (SSH), sea surface salinity (SSS), and water temperature at different depths (0, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, and 500 m). Using these data, we examined monthly variations in the potential habitat of *Trachurus murphyi* based on a maximum entropy model. The key environmental factors in each month were selected according to the proportional contribution of each environmental variable, and the suitable range of key environmental factors was determined on the basis of the response curves of these factors. We also examined monthly variations in the key environmental variables. The results revealed that the spatial changes in potential habitat were essentially consistent with the actual fishing locations, and that habitat hotspots gradually shifted northward during the months from March to August. In March, the potential habitat hotspots were distributed in the waters between 42°S and 47°S, and extended to regions north of 30°S in August. The contribution of environmental variables in each month indicated monthly differences in the key environmental factors, as well as in the suitable environmental ranges. The key environmental factors were identified as Temp 400 m, Temp 500 m, and SST in March; Temp 400 m, Temp 500 m, and MLD in April; Temp 500 m, SST, and Temp 400 m in May; SST, Temp 500 m, and Temp 50 m in June; SST, Temp 300 m, and SSH in July; and SSH, Temp 300 m, and Temp 100 m in August. In addition, water temperature was identified as an important factor affecting the spatio-temporal distribution of the fishing grounds, and the suitable water temperature layer in different months was found to be consistent with the migration characteristics of *T. murphyi*. With the northward movement of the habitat, the contribution rate of SSH gradually increased, which may be related to the distribution of currents off the Chilean coast.

Key words: Chilean *Trachurus murphyi*; maximum entropy model; spatio-temporal variation of potential habitat; marine environment; southeast Pacific Ocean

Corresponding author: YU Wei. E-mail: wyu@shou.edu.cn