

DOI: 10.12264/JFSC2021-0497

西南大西洋鱿鱼钓渔船作业空间分布及其与环境的关系

杨胜龙^{1,2}, 史慧敏^{1,2,3}, 樊伟^{1,2}, 张衡^{1,2}, 费英杰⁴, 张涵⁴

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部渔业遥感重点实验室, 上海 200090;
2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 渔业资源与遥感信息技术重点开放实验室, 上海 200090;
3. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306;
4. 上海理工大学理学院, 上海 200093

摘要: 为了解西南大西洋鱿鱼钓渔船捕捞作业空间分布特征及其与海洋环境的关系, 本研究基于 2018—2019 年 1—5 月的西南大西洋鱿鱼钓渔船船位数据挖掘渔船捕捞努力量信息, 统计分析了渔船作业重心变化; 结合同期的海表温度(sea surface temperature, SST)、海面高度(sea surface height, SSH)、底层温度(bottom temperature, BT)和叶绿素 a 浓度(chlorophyll-a, CHL-a) 4 种环境数据, 绘制环境因子和捕捞努力量的空间分布叠加图, 定性分析了捕捞努力量空间分布与环境因子的关系。采用广义加性模型(generalized additive model, GAM)构建捕捞努力量对海洋环境非线性表达方式, 分析海洋环境变动对西南大西洋鱿鱼钓渔船捕捞的影响。结果表明: 1—5 月研究区域渔船捕捞努力量呈现先增后减趋势, 其中 2 月捕捞努力量最高; 渔船作业重心具有明显的纬向月变化特征, 1—5 月渔船作业重心整体呈现由北向南转移。鱿鱼钓渔船主要在 SST 8~15 °C, SSH -0.14~0.16 m, BT 5~8 °C 和 CHL-a 浓度 0.2~0.6 mg/m³ 范围内作业。GAM 模型表明空间因子和环境因子对西南大西洋鱿鱼钓分布有显著影响。经度和纬度的协同作用对捕捞努力量的解释方差贡献最大, SST、SSH、CHL-a 浓度和 BT 4 个环境因子对捕捞努力量均有重要影响。所有变量对捕捞努力量的影响作用都是非线性的, 其中 SST 影响最密切范围在 14~15 °C, SSH 影响最密切范围是 -0.1~0.02 m, BT 影响最密切的范围是 5~6 °C, CHL-a 浓度影响最密切范围是 0.2~0.4 mg/m³。

关键词: 西南大西洋; 鱿鱼钓; 船舶自动识别系统; 捕捞努力量; 空间分布特征; 海洋环境; 广义加性模型

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0365-12

西南大西洋鱿鱼钓渔船主要捕捞阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)和巴塔哥尼亚枪乌贼(*Patagonian longfin squid*)等鱿鱼, 其广泛分布在西南大西洋大陆架及其大陆坡海域, 在海洋生态系统中起着重要的作用。它们生长速度快, 生命周期短, 资源变动与海洋环境变化密切相关。国内外对其资源变动和海洋环境变化的关系开展了大量研究^[1-6]。研究表明海表温度(SST)、海面高度(SSH)和叶绿素 a 浓度(CHL-a)是影响西南大西洋鱿鱼资源变动的重要环境因子。现有文献大都基于商业渔船

捕捞日志数据, 此类数据存在记录不规范和时间滞后等问题。在该区域作业的国家 and 区域渔船较多, 现有文献中渔业数据多基于本国商业捕捞日志数据, 样本代表性不全面, 限制了区域性的渔业评估和短期渔业管理。

基于渔船轨迹挖掘的捕捞努力量信息可被应用于分析和了解渔船捕捞空间行为特征^[7-8], 了解人类捕捞活动对海洋生态的影响, 为渔业分析提供时空高精度和更全面的信息。海上作业时船长依据海洋环境变化和以往的捕捞经验寻找渔

收稿日期: 2021-10-13; 修订日期: 2021-12-17.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901404, 2019YFD0901405); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2019T09); 中国水产科学研究院东海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2021M06); 上海市科技创新行动计划项目(19DZ1207504); 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室开放基金项目(fjmfre2019003); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2020TD82).

作者简介: 杨胜龙(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为海洋生态学. E-mail: ysl6782195@126.com

场, 渔船聚集捕捞区域揭示资源量丰度分布情况。在一定时间内捕捞努力量与渔获量是成正比关系的^[9], 捕捞努力量可替代用于分析和了解资源空间分布^[8,10]。

渔业资源分布随着海洋环境变化而变化, 而渔船捕捞活动随着渔业资源空间变动而变动, 从而导致人类捕捞活动受环境变动影响。研究表明近海和远洋渔船捕捞投入的捕捞努力量时空分布均受海洋环境变化影响^[10-12]。基于海洋环境和捕捞努力量构建的物种分布模型, 可以预测时空高精度的渔船捕捞强度信息^[12-13], 并用于渔情预报。Hsu 等^[14]依据中国台湾围网金枪鱼渔船捕捞努力量信息, 构建了每天的中西太平洋鳀空间高精度渔情预报模型, 结果表明, 基于渔船轨迹数据的验证精度要优于渔业数据。

西南大西洋鱿鱼钓捕捞对象生命周期短, 了解其中短期资源变动情况, 对于合理开发利用该资源非常重要。本研究采用西南大西洋鱿鱼钓渔船轨迹数据, 统计挖掘渔船捕捞努力量信息, 分析渔船作业空间分布特征及其与海洋环境的关系, 以期西南大西洋鱿鱼钓渔船管理和短期渔业资源分析提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源和处理

1.1.1 AIS 数据 AIS 数据来自 exactView 卫星星座。研究表明阿根廷滑柔鱼和巴塔哥尼亚枪乌贼的捕捞作业主要在 1—5 月^[4,15-17], 故提取 2018—2019 年 1—5 月的西南大西洋鱿鱼钓的船位数据。船位点数据信息包括船号 MMSI、时间、经度、纬度、航向和航速等。西南大西洋鱿鱼钓渔船 MMSI 号信息来自 <http://www.globalfishingwatch.org> 网站。本研究依据 AIS 数据和搜集的鱿鱼钓渔船 MMSI 号挑选鱿鱼钓渔船 AIS 数据, 从拥有的全部数据中共提取 173 条鱿鱼钓渔船信息。其中中国大陆地区 112 条, 中国台湾地区 25 条, 韩国 23 条, 阿根廷 9 条, 其他国家和地区 4 条。本研究选定 38°S~55°S、56°W~66°W 为研究区域。

1.1.2 环境数据 SST、SSH 和次表层水温^[18]是影响其资源变动重要环境因子。研究区域包括专

属经济区, 专属经济区是大陆架, 海底深度从几十米到几百米不等, 因此本研究采用 BT 作为一个环境因子进行研究。本研究选取海表温度(sea surface temperature, SST)、海面高度(sea surface height, SSH)、底层温度(bottom temperature, BT)和叶绿素 a 浓度(chlorophyll-a, CHL-a) 4 种环境数据分析渔船空间行为特征。SST、SSH 和 BT 数据下载自 CMEMS (global-reanalysis-phy-001-030), 时间分辨率均为月, 空间分辨率均为 0.083°×0.083°。CHL-a 数据下载自 CMEMS (global-reanalysis-bio-001-029), 时间分辨率均为月, 空间分辨率均为 0.25°×0.25°。研究过程中将环境变量和捕捞努力量的空间精度统一到 0.25°×0.25°。

1.2 研究方法

1.2.1 单位捕捞努力量 鱿鱼钓渔船只在夜间将渔船保持漂流状态进行捕捞作业^[15]。捕捞努力量定义为鱿钓渔船晚上投入捕捞作业的时间, 即鱿钓渔船捕捞作业状态下投入的努力量。捕捞状态根据速度阈值和太阳辐照度因素共同确定。太阳辐照度的计算利用了 solaR 程序包中的 calcSol 函数。将捕捞状态记为 1, 非捕捞状态记为 0。捕捞状态计算公式如下:

$$P = \begin{cases} 1, & S = 0 \text{ 且 } v_1 < v < v_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S 为太阳辐照度, v 为渔船速度, v_1, v_2 分别代表渔船速度阈值上下界。

Taconet 等^[15]认为鱿鱼钓渔船捕捞作业持续时间不低于 4 h, 故在判断为作业状态的轨迹数据中, 将单条渔船单次连续作业持续时间不大于 4 h 的轨迹点数据剔除。针对单条渔船的 AIS 数据, 依次计算每个渔船轨迹点与相邻的前一个轨迹点之间的时间差, 作为渔船在该轨迹点的停留时间, 即为该点的捕捞努力量, 公式为

$$T_k = \sum_{k=1}^n (UT_{k+1} - UT_k) \quad (2)$$

式中 UT_k 为提取的渔船轨迹点序列中第 k 个轨迹点的更新时间, 单位为小时。

将研究区域网格化成 0.25°×0.25°的网格, 按月计算每个网格内的捕捞努力量累加量, 作为该网格内的捕捞努力量, 即捕捞强度。时间精度为

月, 空间精度为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 公式为:

$$EF_{lon,lat} = \sum T_{lon,lat} \quad (3)$$

式中, lon 为栅格化后网格坐标经度, lat 为栅格化后网格坐标纬度, $T_{lon,lat}$ 为网格内轨迹点渔船捕捞努力量, 单位为小时。

1.2.2 渔船捕捞作业重心 将两年对应月份对应网格的捕捞努力量求平均值作为该网格的捕捞努力量, 并计算各月平均捕捞努力量在空间上的重心。渔船捕捞重心的计算公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times X_i)}{\sum_{i=1}^n C_i}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (4)$$

式中, X、Y 分别为渔船捕捞作业重心的经、纬度坐标; X_i 为第 i 个捕捞努力量不为 0 的网格的纬度, Y_i 为第 i 个捕捞努力量不为 0 的网格的经度; C_i 为第 i 个捕捞努力量不为 0 的网格的捕捞努力量。

1.2.3 捕捞努力量和环境变量的关系 西南大西洋鱿鱼钓渔船捕捞活动受鱿鱼分布的影响, 鱿鱼生存及分布受到环境因素的影响, 故环境因素间接影响鱿鱼钓渔船分布。为研究环境因素对鱿鱼钓渔船捕捞努力量的影响, 用处理后的数据, 分别绘制捕捞努力量和 SST、SSH、BT 及 CHL-a 这 4 个环境变量分布叠加图, 可直观地表现出捕捞努力量分布最适宜的环境变量范围。用数理统计方法统计 2018—2019 年 1—5 月累计下的捕捞努力量在 4 个环境变量各区间分布情况, 分析捕捞努力量分布的适宜区间。

1.2.4 GAM 模型 GAM 模型可用来模拟响应变量对预测变量的非线性作用, 本研究基于 GAM 模型建立西南大西洋鱿鱼钓捕捞努力量对空间变量和环境变量的非线性相关关系, 分析各变量对捕捞努力量的非线性影响。空间变量包括经度和纬度; 环境变量包括 SST、SSH、BT 和 CHL-a。参考文献[19-20]对所有捕捞努力量取对数变换, 构建的 GAM 模型方程如下:

$$\ln(EF) = s(lon,lat) + s(SST) + s(SSH) + s(BT) + s(CHL-a) \quad (5)$$

式中, s 为自然样条平滑函数, lon 表示经度, lat 表

示纬度, SST 表示海表温度($^{\circ}C$), SSH 表示海面高度(m), BT 表示底层温度($^{\circ}C$), CHL-a 表示叶绿素-a 浓度(mg/m^3)。 $s(lon,lat)$ 表示空间因子对渔船作业分布的影响是经度和纬度相互作用的结果。采用 mgcv 函数库构建 GAM 模型, 模型用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)和决策系数 R^2_{adj} 检验逐步加入因子后模型的拟合程度。联系函数采用高斯分布函数。平滑函数采用基于 P 样条的自适应平滑器函数, 平滑函数自由度不设定, 由模型自动模拟选择最优函数阶数, 绘图采用 R 语言。

2 结果与分析

2.1 捕捞努力量分析

图 1 表明西南大西洋鱿鱼钓渔船在 1—2 月投入的捕捞努力量呈上升趋势, 2—4 月捕捞努力量基本持平, 约为 3.2×10^4 h; 5 月捕捞努力量有所下降, 约为 2.3×10^4 h。月平均捕捞努力量最低的是 1 月, 约 2×10^4 h。

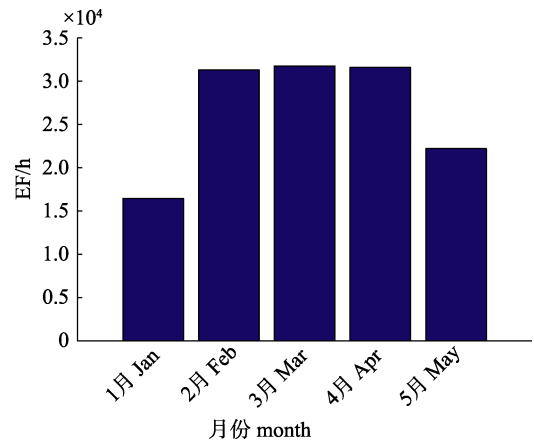


图 1 2018—2019 年 1—5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量

Fig. 1 Average monthly fishing effort of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018—2019

2.2 渔船捕捞作业重心变化

2018—2019 年西南大西洋鱿鱼钓作业重心呈现明显空间变化(图 2)。1 月捕捞作业重心在 $60^{\circ}38'W$, $45^{\circ}11'S$, 2 月向西南移动到 $60^{\circ}76'W$, $46^{\circ}84'S$, 3 月向东南移动分布在 $60^{\circ}28'W$, $48^{\circ}26'S$ 附近, 4 月捕捞作业重心向西南移动到 $60^{\circ}55'W$, $48^{\circ}81'S$, 5 月重心向东北移动到 $60^{\circ}32'W$, $48^{\circ}33'S$ 。1—5 月, 在纬向上, 西南大西洋鱿鱼钓渔船作业

重心呈现由北向南转移。

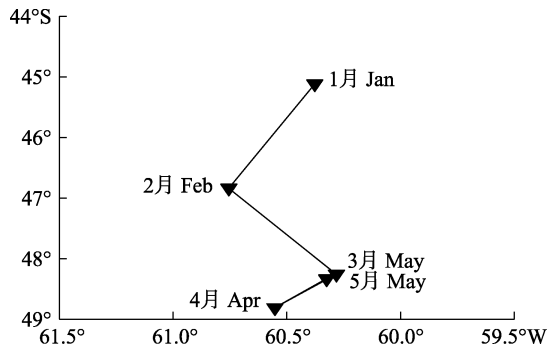


图 2 2018—2019 年 1—5 月西南大西洋鱿鱼钓重心月变化图

Fig. 2 Monthly variation of gravity center of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018—2019

2.3 捕捞努力量与 SST 关系

2018—2019 年 1—5 月平均 SST 有明显季节差异(图 3)。时间上, 1—3 月是南半球夏季, 研究区域北部 SST 较大, 在 17~23 °C 之间, 覆盖面积

大, 覆盖范围内几乎没有高值捕捞努力量。4—5 月北部高值 SST 区域覆盖面积缩小, 反之, 南部 SST 低值区域覆盖面积变大。空间上, 一条低温冷舌由南向北延伸。在 1—2 月该冷舌区北部 SST 在 14 °C 左右, 后逐渐降低到 10 °C。

1 月高值捕捞努力量主要分布在该冷舌区域附近, SST 在 13~15 °C 左右。2—3 月高值捕捞努力量沿冷舌区域左侧向南分布, 在福克兰群岛北部海域逐渐有渔船开始作业。渔船作业区域 SST 在 11~15 °C 左右。此外 1—3 月在冷舌区左侧专属经济区内也有部分渔船作业, SST 在 15 °C 左右。4 月整个冷舌区域及左侧附近海域都有较多的高值捕捞努力量分布, 但在福克兰群岛北部海域渔船作业更多。5 月高值努力量主要分布在福克兰群岛北部海域, 冷舌区域有少部分捕捞努力量分布。4—5 月捕捞努力量多分布于福克兰群岛周边海域, SST 较低, 在 9~14 °C 左右。全年在北部 SST 高值区域没有渔船捕捞作业。

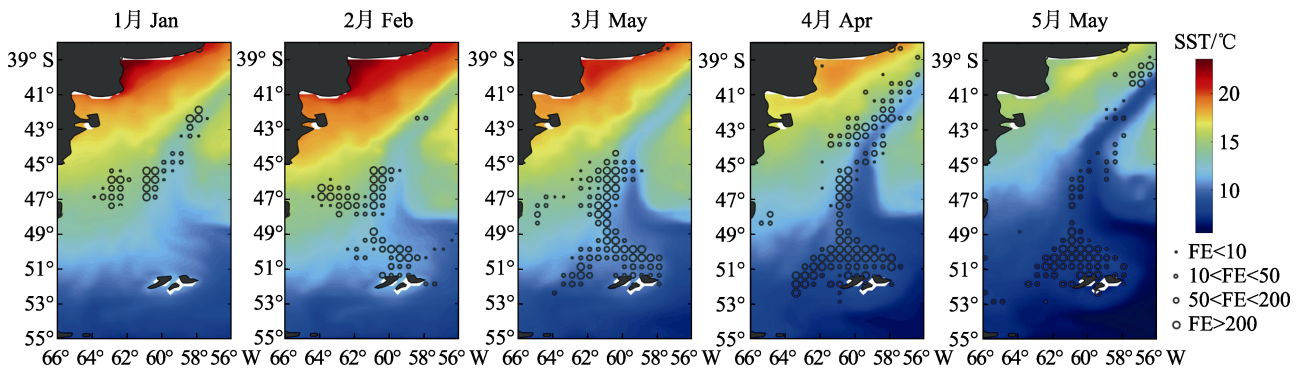


图 3 2018—2019 年 1—5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量(FE)和海表温度(SST)空间叠加图

Fig. 3 Spatial superposition of monthly average fishing effort (FE) and sea surface temperature (SST) of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018—2019

2.4 捕捞努力量与 SSH 关系

2018—2019 年 1—5 月 SSH 几乎没有差异(图 4)。整体上, 靠近南美洲大陆和福克兰群岛的区域 SSH 较高, SSH 值高于-0.1 m。紧接着东部 SSH 范围-0.4~-0.1 m 的区域呈“S”形条状分布。剩余的福克兰群岛东北部有一块区域 SSH 范围-0.7~-0.4 m。捕捞努力量主要分布在 SSH -0.2~0.1 m 的区域。

1—3 月高值捕捞努力量主要分布在 SSH 高值和低值交界区域, SSH 在-0.2~0.1 m; 西北部 SSH 值高于 0.1 m 的区域和东部 SSH 值小于-0.1 m 的区域虽然存在捕捞活动, 但捕捞努力量却不高。4—5 月捕捞努力量主要分布在福克兰群岛北部, SSH 主要在-0.2~0.1 m。西北部 SSH 值高于 0.1 m 的区域、东部和福克兰群岛南部 SSH 值小于-0.2 m 的区域虽然存在捕捞活动, 但捕捞努力量却不高。

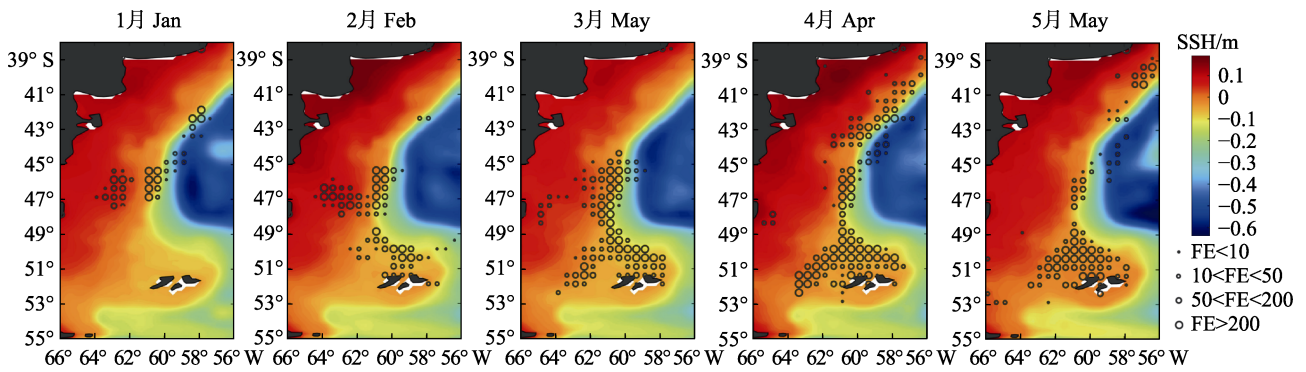


图 4 2018—2019 年 1—5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量(FE)和海面高度(SSH)空间叠加图

Fig. 4 Spatial superposition of monthly average fishing effort (FE) and sea surface height (SSH) of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018–2019

2.5 捕捞努力量与 BT 关系

2018—2019 年 1—5 月平均 BT 无明显差异(图 5)。研究区域北部靠近南美洲大陆的区域和南部福克兰群岛周围区域海底深度较浅, BT 较高。在 1—3 月西北部沿海 BT 最大, 超过 20 °C, 3 月开始, 最大 BT 下界到 17 °C。随着月份的增加, 西北部沿海区域 BT 稍微变低, 但覆盖面积变化不大。专属经济区外区域 BT 较低, 随时间无明显变化。

1—3 月高值捕捞努力量主要分布在 BT 高值和低值交界区域, BT 在 5~8 °C; 西北部 BT 值高于 8 °C 的区域和东部 BT 值小于 5 °C 的区域基本不存在捕捞活动。4—5 月捕捞努力量主要分布在福克兰群岛北部, BT 主要在 5~7 °C。西北部 BT 值高于 8 °C 的区域、东部 BT 值小于 5 °C 和福克兰群岛南部 BT 值小于 5 °C 的区域虽然存在捕捞活动, 但捕捞努力量却不高。

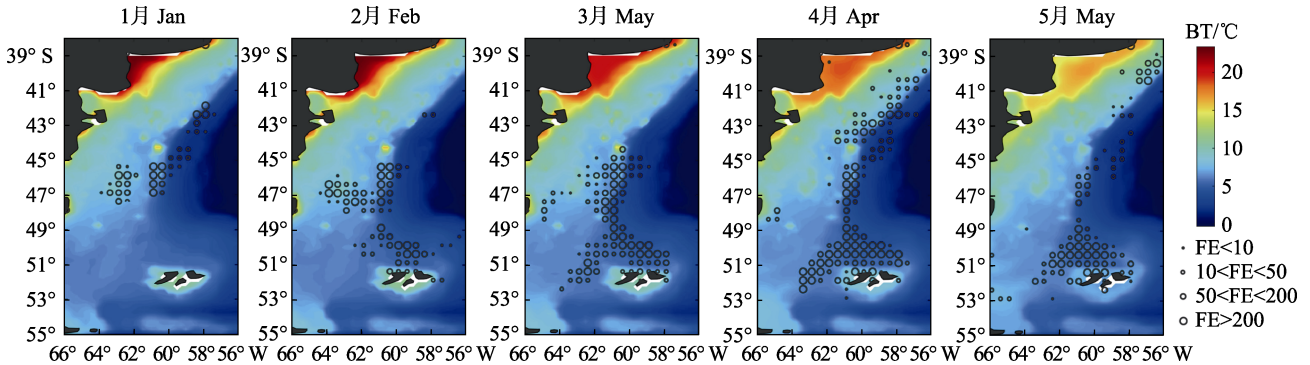


图 5 2018—2019 年 1—5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量(FE)和底层温度(BT)空间叠加图

Fig. 5 Spatial superposition of monthly average fishing effort (FE) and bottom temperature (BT) of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018–2019

2.6 捕捞努力量与 CHL-a 浓度关系

2018—2019 年 1—5 月平均 CHL-a 浓度整体上差异不大(图 6)。研究区域北部靠近南美洲大陆的区域 CHL-a 浓度略低, 南部福克兰群岛周围区域 CHL-a 浓度较高, 其余区域 CHL-a 浓度基本相同。1—5 月南部福克兰群岛周围区域 CHL-a 浓度呈逐月下降趋势, 北部靠近南美洲大陆的区域低 CHL-a 浓度的区域范围逐月缩小。整体上, 高值

捕捞努力量主要分布在 CHL-a 浓度为 0.5 mg/m³ 的附近区域。

2.7 捕捞努力量在各环境变量上的比重分布

捕捞努力量在 SST 上的比重分布图(图 7a)表明, 捕捞努力量出现在 SST 5.6~23.5 °C 之间, 平均 SST 为 14.55 °C, 高值捕捞努力量集中分布在 8~15 °C (92.1%)。捕捞努力量在 SSH 上的比重分布图(图 7b)表明, 捕捞努力量出现在 SSH

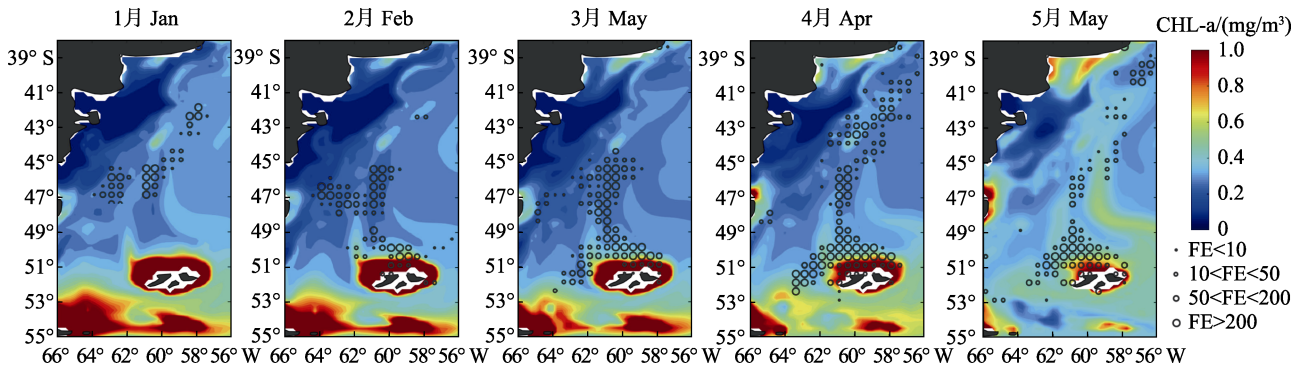


图 6 2018–2019 年 1–5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量(FE)和叶绿素 a 浓度(CHL-a)空间叠加图

Fig. 6 Spatial superposition of monthly average fishing effort (FE) and chlorophyll-a concentration (CHL-a) of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018–2019

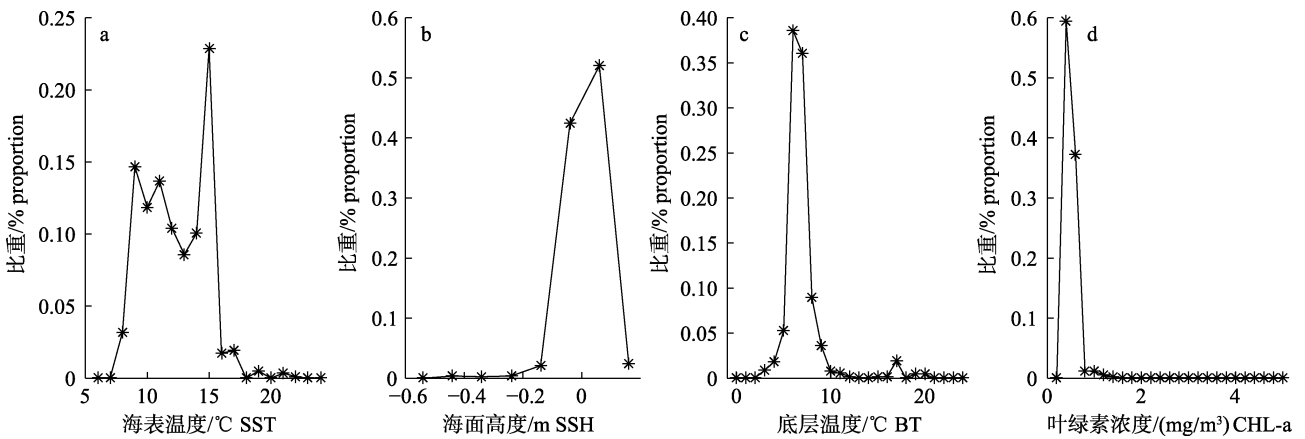


图 7 2018–2019 年 1–5 月西南大西洋鱿鱼钓月平均捕捞努力量在 4 种环境变量上的比重分布

Fig. 7 Proportion distribution of monthly average fishing effort in four environmental variables of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean from January to May in 2018–2019

-0.64~0.19 m 之间, 平均 SSH 为 -0.22 m。高值捕捞努力量集中出现在 -0.14~0.16 m (94.5%)。BT 与高值捕捞努力量比重分布图(图 7c)表明, 捕捞努力量分布在 0~24 °C 之间, 平均 BT 为 11.38 °C, 高值捕捞努力量集中出现在 5~8 °C (83.5%) 之间。捕捞努力量在 CHL-a 浓度上的比重分布图(图 7d)表明, 捕捞努力量出现在 CHL-a 浓度 0.1~4.1 mg/m³ 之间, 平均 CHL-a 浓度为 2.0 mg/m³, 高值捕捞努力量集中分布在 0.2~0.6 mg/m³ (93.6%)。

2.8 GAM 模型结果

F 检验表明, 在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下, 采用 AIC 准则逐步得到的最终 GAM 模型保留了经纬度、SST、SSH、BT 和 CHL-a (表 1, 表 2)。最终的 GAM 模型在 0.05 的显著性水平下, 所有变量对捕捞努力量方差解释率为 56.8%, 模型拟合的决定系数为 0.52 (表 1)。经度和纬度的协同影响对捕捞努力量的解释方差贡献最大(表 1), 对应的 *F* 值也最大(表 2)。SST、SSH、CHL-a 和 BT

表 1 GAM 模型统计参数
Tab. 1 Statistical parameters of GAM model

公式 formula	模型用赤池信息准则 AIC	方差解释/% deviance explained	决定系数 R_{adj}^2	方差 deviance
$\ln(EF)=s(lon,lat)$	6748.68	49.0	0.45	8700.44
$\ln(EF)=s(lon,lat)+s(SST)$	6687.53	52.3	0.48	8125.37
$\ln(EF)=s(lon,lat)+s(SST)+s(SSH)$	6658.13	54.0	0.49	7841.13
$\ln(EF)=s(lon,lat)+s(SST)+s(SSH)+s(BT)$	6642.38	55.1	0.50	7655.82
$\ln(EF)=s(lon,lat)+s(SST)+s(SSH)+s(BT)+s(CHL-a)$	6425.01	56.8	0.52	7220.39

表 2 GAM 模型检验结果
Tab. 2 GAM model verification results

变量 variable	自由度 df	F	P
lon,lat	122.446	6.209	<2e-16
SST	18.878	3.954	<2e-16
SSH	11.431	3.784	2.14e-05
BT	8.000	2.891	0.000352
CHL-a	2.907	3.508	0.017665

对捕捞努力量也有影响。

2.9 不同因子对捕捞努力量的影响

图 8a 中黑色实线表明渔场分布区域, 主要区域显示为一条封闭曲线和一条不封闭曲线。封闭曲线分布于研究区域南部, 范围在 48°S~55°S,

57°W~64°W; 不封闭曲线分布于研究区域东部, 范围在 40°S~50°S, 56°W~62°W。红色虚线(1 个正的标准差)和绿色虚线(1 个负的标准差)代表渔场区域的置信区间, 很靠近黑线, 表明渔场分布范围紧贴黑线分布。北部有两处弧形分布的黑色曲线, 分布范围在 38°S~42°S, 57°W~64°W; 西部有多条弧形分布的黑色曲线, 分布范围在 42°S~55°S, 63°W~66°W, 其两侧均有红色虚线和绿色虚线标注的置信区间。经度和纬度对西南大西洋鱿鱼钓捕捞努力量相应效应的三维图(图 8b)显示, 在研究区域低经度有一处捕捞努力量值高波动较大的区域, 分布在 45°S~55°S, 64°W~66°W, 其余部分有多处较平缓的突起和凹陷部分。

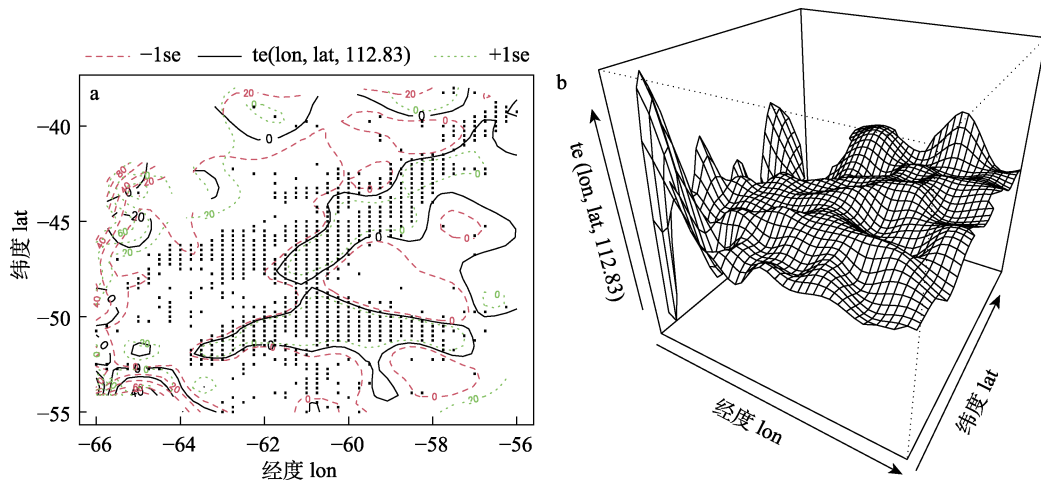


图 8 经度和纬度对西南大西洋鱿鱼钓捕捞努力量影响效应的二维(a)和三维(b)空间图
Fig. 8 Two-dimensional (a) and three-dimensional (b) spatial maps of the effect of longitude and latitude on fishing effort of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean

图 9a 显示, 当温度低于 8 °C 时, 随着 SST 升高, SST 对捕捞努力量的影响呈递减趋势。8~9 °C, SST 对捕捞努力量的影响呈递增趋势。9~10 °C, SST 对捕捞努力量的影响基本持平。10~11 °C 区间, SST 对捕捞努力量的影响曲线呈“V”型分布。11~13 °C, SST 对捕捞努力量的影响呈递减趋势。13~14 °C, SST 对捕捞努力量的影响呈递增趋势。14 °C 时, SST 对捕捞努力量的影响最大。14~17 °C, SST 对捕捞努力量的影响呈递减趋势。温度高于 17 °C 时, 随着 SST 升高, SST 对捕捞努力量影响呈现平稳的负影响。SST 对鱿鱼钓渔船影响密切的置信区间为 14~15 °C。图 9b 显示, SSH 低于 -0.2 m, SSH 对捕捞努力量影响基本保持稳定,

SSH 在 -0.2~-0.13 m 内, SSH 对捕捞努力量影响呈现骤减趋势。SSH 在 -0.13~-0.02 m 内, SSH 对捕捞努力量影响呈现增强趋势。SSH 高于 -0.12 m, SSH 对捕捞努力量影响呈骤减趋势。对鱿鱼钓渔船影响密切的置信区间为 -0.1~-0.02 m。图 9c 显示, BT 低于 5 °C 时, BT 对捕捞努力量影响呈递增趋势; 5 °C 时, BT 对捕捞努力量影响程度达到最高。5~7 °C, BT 对捕捞努力量影响呈骤减趋势; 7~10 °C, BT 对捕捞努力量影响呈递增趋势; 当温度高于 10 °C 时, BT 对捕捞努力量影响呈递减趋势。BT 对鱿鱼钓渔船影响密切的置信区间为 5~6 °C。图 9d 显示, CHL-a 浓度低于 1.5 mg/m³ 时, CHL-a 浓度对捕捞努力量影响呈下降趋势。当

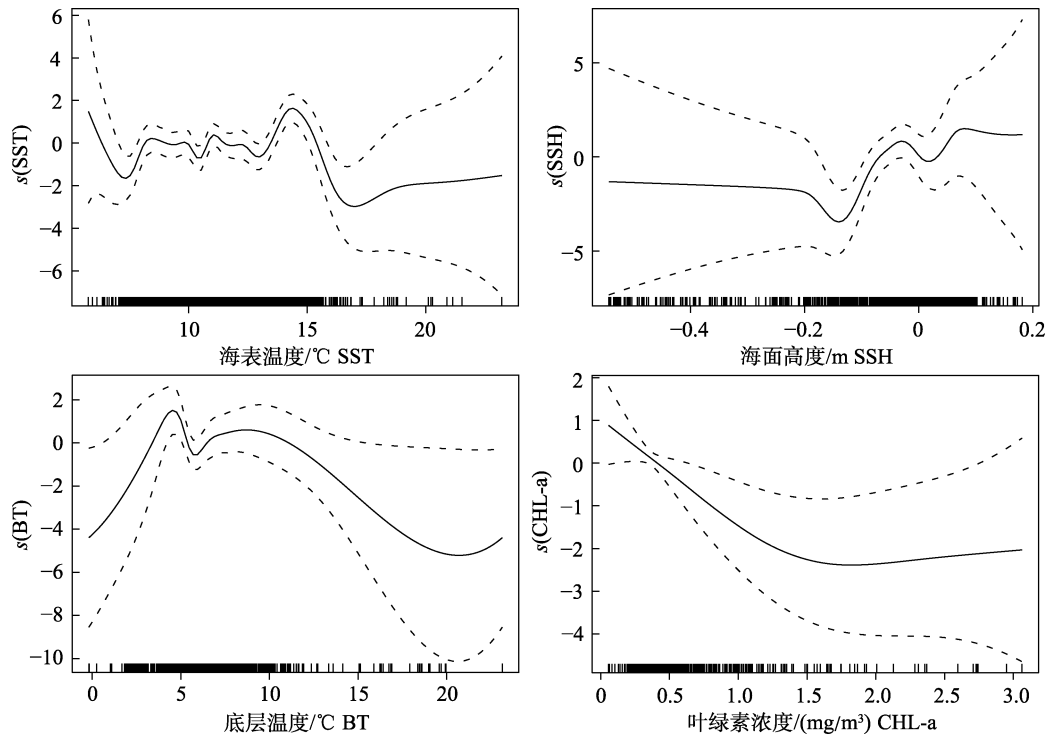


图 9 GAM 模型获得的 4 个变量对西南大西洋鱿鱼钓捕捞努力量的影响

Fig. 9 Effects of four variables obtained by GAM model on fishing effort of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean

CHL-a 浓度高于 1.5 mg/m^3 时, CHL-a 浓度对捕捞努力量影响程度不再发生变化。CHL-a 浓度对鱿鱼钓渔船影响密切的置信区间为 $0.2\sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ 。

3 讨论

3.1 捕捞努力量月份分布和空间分布

各月捕捞努力量统计图(图 1)显示, 1—4 月捕捞努力量都很高, 5 月发生骤减。伍玉梅等^[21]研究 2006 年西南大西洋鱿鱼钓渔场特征发现, 主要生产时间集中在 1—4 月, 5 月开始下滑, 这与本研究结果吻合。渔船在渔汛期开始时奔赴鱿鱼聚集区进行捕捞作业, 在渔汛期结束时, 结束捕捞作业。

GAM 表明, 经度和纬度对捕捞努力量影响最大, 鱿鱼钓渔船作业空间分布主要呈两条延伸范围较广的曲线, 说明捕捞对象的洄游对渔船作业有极大影响。渔船捕捞努力量空间变动主要由索饵和产卵洄游行为引起。重心变化图(图 2)显示 1—5 月捕捞努力量中心由北向南移动, 呈纬向变化, 主要与其聚集索饵行为有关。这与本研究中 3—5 月的捕捞作业重心相对于 1—2 月向南移动的研究结果一致。唐峰华等^[22]用 2002—2014 年

的数据进行研究, 西南大西洋柔鱼渔场重心在 $58^\circ\text{W}\sim 61^\circ\text{W}$ 、 $41^\circ\text{S}\sim 45^\circ\text{S}$ 的范围内。侯庆联等^[1]用 2012—2017 年数据进行研究, 西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场重心在经度上主要分布于 $58^\circ\text{W}\sim 63^\circ\text{W}$ 海域, 纬度主要集中在 $41^\circ\text{S}\sim 44^\circ\text{S}$ 、 $47^\circ\text{S}\sim 48^\circ\text{S}$ 两个区域。图 2 表明西南大西洋鱿鱼钓渔船重心范围在 $60^\circ\text{W}\sim 61^\circ\text{W}$ 、 $45^\circ\text{S}\sim 49^\circ\text{S}$, 相比于唐峰华等^[22]和侯庆联等^[1]研究结果中西南大西洋渔场重心范围偏南。原因在于研究所用的数据时间范围不同, 与本研究采用数据空间覆盖范围不同也有关。且侯庆联等^[1]提出的重心范围相对于唐峰华等^[22]提出的结果偏南, 说明重心分布范围随着年份推移有逐渐南移的趋势, 而本研究所用数据比其他学者的数据年限靠后, 所以本研究的重心结果偏南是有一定合理性的。

捕捞努力量空间分布(图 3)随月份有南移迹象。已有研究^[18]表明, 西南大西洋鱿鱼 44°S 附近的夏季产卵群体(summer spawning stock, SSS)产卵期在 12 月至翌年 2 月, 位于 $42^\circ\text{S}\sim 47^\circ\text{S}$ 的南部巴塔哥尼亚群体(South Patagonic stock, SPS)产卵期在 4—8 月。唐议^[23]对 2000 年的数据进行研究

表明,1—2月公海西南大西洋鱿鱼钓的主要捕捞对象是SSS种群,2—6月西南大西洋鱿鱼向南洄游过程中索饵,3月后SPS种群进入产卵期,则捕捞对象以SPS种群为主。图3显示1月渔船作业范围 $41^{\circ}\text{S}\sim 47^{\circ}\text{S}$,在SSS种群产卵中心周围;2—5月捕捞作业范围南移,范围在 $42^{\circ}\text{S}\sim 51^{\circ}\text{S}$,正是SPS种群产卵区域附近。这与已有研究相一致。

3.2 渔船作业分布和海洋环境变量关系

渔场的变动是海洋环境变化的间接反映,而渔船捕捞作业在一定程度上受海洋环境分布的影响。西南大西洋鱿鱼是西南大西洋一种短生命周期生物,其资源分布及其丰度受时间、空间、海洋环境等因素的影响,捕捞努力量受到鱼群资源分布、船队空间分布和海洋环境因子分布的影响^[6]。SST与捕捞努力量叠加图(图3~5)显示捕捞努力量多分布于巴西暖流和福克兰寒流交汇处,这是由于暖流和寒流交汇处更易形成渔场,而渔船分布受渔场分布的影响。西南大西洋鱿鱼钓渔场位于巴西暖流和福克兰寒流交汇处,该海域因其含有丰富的营养盐,成为西南大西洋鱿鱼的重要饵料场,也是西南大西洋鱿鱼洄游的动力^[24]。鱼群分布随时空变化而变化,其分布及资源丰度受海洋环境因素影响。陈新军^[25]提出SST与海流的边界和锋面有关,故SST的空间分布是影响西南大西洋鱿鱼钓渔场分布的一个重要环境因子^[26]。SSH的变化会造成西南大西洋鱿鱼生长所需的营养物质流动,从而影响鱼群分布,故SSH可作为研究西南大西洋鱿鱼钓渔船作业分布的一个重要影响因子。虽然西南大西洋鱿鱼钓分布和资源丰度分布受到SST、SSH、CHL-a浓度、盐度、海流等环境因子的影响,但在研究中^[4-6,27-31]使用较多的环境因子主要有SST、SSH、CHL-a浓度等。本研究提取SST、SSH、BT和CHL-a浓度4个环境变量,研究其对于捕捞努力量分布的影响。随着时间推移,各月渔船作业最适宜环境因素也有所变化。

SSH与捕捞努力量叠加图(图3)表明渔船作业区域各月SST变化较大,1月捕捞努力量多分布于温度 $13\sim 15^{\circ}\text{C}$,2—3月捕捞努力量多分布于温度 $11\sim 15^{\circ}\text{C}$,4—5月捕捞努力量多分布于温度

$9\sim 14^{\circ}\text{C}$ 。图6a表明西南大西洋的鱿鱼钓渔船捕捞努力量适宜SST为 $9\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。唐峰华等^[22]认为,西南大西洋的阿根廷滑柔鱼渔场最适海表温度为 $9\sim 14^{\circ}\text{C}$,李德伟等^[32]认为,阿根廷滑柔鱼渔场适宜表温为 $8\sim 14^{\circ}\text{C}$,最适表温为 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$ 。伍玉梅等^[21]认为,阿根廷滑柔鱼渔场的适宜海洋表层温度在 $7\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。这些研究结果与本研究结果基本一致。

SSH与捕捞努力量叠加图(图4)显示捕捞努力量主要分布在SSH为 $-0.2\sim 0.1\text{m}$ 的区域。图6b表明捕捞努力量各月多分布于SSH为 $-0.14\sim 0.16\text{m}$ 处,陆化杰等^[33]研究表明,高CPUE相对稳定出现的SSH范围为 $-0.20\sim 0.20\text{m}$ 。张炜等^[17]研究得到,阿根廷滑柔鱼适宜SSH范围是 $-0.26\sim 0.04\text{m}$,产量较高海域所对应的SSH范围为 $-0.18\sim -0.08\text{m}$ 。这也基本上验证了本研究的结果。图5和图6c均显示各月捕捞努力量多分布在BT范围为 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。李德伟等^[32]研究发现西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场的适宜水深分别是 $100\sim 120\text{m}$ 和 $250\sim 500\text{m}$ 。而本研究研究区域包括专属经济区的大陆架,海底深度从几十米到几百米不等,因此本研究采用BT对鱿鱼钓渔船捕捞作业分布进行研究。

渔船作业区域各月SST变化较大,但海洋BT和SSH在月维度上变化不大。在福克兰群岛附近,4—5月SST较低,但SSH和BT变化不大,适宜鱿鱼钓渔船捕捞对象栖息。适宜的SSH和BT是鱿鱼钓捕捞对象洄游索饵到福克兰群岛周边重要原因,这揭示渔船作业对SSH和BT更有偏好。SST对西南大西洋鱿鱼资源变动有重要影响^[5,27-28]。GAM结果表明,经纬度是最大程度影响西南大西洋鱿鱼钓渔船捕捞作业分布的因子;此外,SST、SSH、CHL-a和BT对鱿鱼钓渔船捕捞作业也是重要影响因素。构建的GAM模型空间经纬度和4个环境变量的共同作用对捕捞努力量的影响解释度达56.8%,依次加入影响因子的过程中, R_{adj}^2 增大,AIC减小,说明加入新的影响因子使得模型结果变好^[34]。

本研究结果和渔业分析结果吻合,证实基于渔船轨迹数据挖掘的信息可以用于渔业资源变动分析,也为未来更高的时间和空间精度可行分析

提供支撑。此外本研究挖掘的渔船轨迹数据空间分布更全面,能更全面表示人类捕捞活动对西南大西洋渔业资源在空间上生态压力。

3.3 不足与展望

本研究针对 2018—2019 年 1—5 月的 AIS 数据采用数理统计方法和 GAM 模型方法研究鱼群分布状况及捕捞努力量和环境变量之间的关系。受限于获取数据种类限制,本研究只用了 AIS 数据进行研究。由于鱿钓渔船功率不同,单位时间做工大小不同,在掌握渔船功率数据的条件下,将进一步以累计捕捞时间与功率的乘积(kW·h)作为捕捞努力量进行研究。在有条件获取商业渔船的渔获数据的情况下,可增加渔获数据进行验证和辅助研究。未来要结合 AIS 数据和渔获数据研究海洋环境因子对渔船捕捞作业分布的影响,为渔业资源利用和管理提供理论支持。空间尺度问题是地学和环境科学研究中的热点问题之一,其对评估生态结构和生物多样性等科学问题均有较大的理论与实用价值。未来应考虑不同的时间和空间尺度下,环境变化如何影响渔场捕捞强度的空间格局,明确最适的时空尺度下渔船捕捞活动时空变动的环境影响原理。

参考文献:

- [1] Hou Q L, Chen X J, Wang J T. Study on spatio-temporal distribution of *Illex argentinus* in southwest Atlantic Ocean[J]. Marine Sciences, 2019, 43(5): 103-109. [侯庆联, 陈新军, 汪金涛. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源时空分布研究[J]. 海洋科学, 2019, 43(5): 103-109.]
- [2] Chen C S, Haung W B, Chiu T S. Different spatiotemporal distribution of Argentine short-finned squid (*Illex argentinus*) in the southwest Atlantic during high-abundance year and its relationship to sea water temperature changes[J]. Zoological Studies, 2007, 46(3): 362-374.
- [3] Haimovici M, Santos R A D, Bainy M C R S, et al. Abundance, distribution and population dynamics of the short fin squid *Illex argentinus* in Southeastern and Southern Brazil[J]. Fisheries Research, 2014, 152: 1-12.
- [4] Lu H J, Chen X J, Cao J. CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5375-5384. [陆化杰, 陈新军, 曹杰. 基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5375-5384.]
- [5] Fang Z, Chen X J, Li J H, et al. Distribution of fishing ground of *Illex argentinus* and its relationship with sea surface temperature in the waters of Exclusive Economic Zone of Argentina[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(1): 134-140. [方舟, 陈新军, 李建华, 等. 阿根廷专属经济区内鱿钓渔场分布及其与表温关系[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 134-140.]
- [6] Li N, Chen X J, Wang R. Incorporating spatial autocorrelation into CPUE standardization with an application to the *Illex argentinus*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(2): 61-68. [李娜, 陈新军, 王冉. 基于空间自相关的阿根廷滑柔鱼 CPUE 标准化研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(2): 61-68.]
- [7] Natale F, Gibin M, Alessandrini A, et al. Mapping fishing effort through AIS data[J]. PLoS ONE, 2015, 10(6): e0130746.
- [8] Le Guyader D, Ray C, Gourmelon F, et al. Defining high-resolution dredge fishing grounds with Automatic Identification System (AIS) data[J]. Aquatic Living Resources, 2017, 30: 39.
- [9] Lee J, South A B, Jennings S. Developing reliable, repeatable, and accessible methods to provide high-resolution estimates of fishing-effort distributions from vessel monitoring system (VMS) data[J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(6): 1260-1271.
- [10] Wiafe G. An assessment of the potential for mapping fishing zones off the coast of Ghana using ocean forecast data and vessel movement[J]. West African Journal of Applied Ecology, 2019, 26(2): 26.
- [11] Wang Y B, Wang Y. Estimating catches with Automatic Identification System (AIS) data: a case study of single otter trawl in Zhoushan fishing ground, China[J]. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 2016, 15(1): 75-90.
- [12] Crespo G O, Dunn D C, Reygondeau G, et al. The environmental niche of the global high seas pelagic longline fleet[J]. Science Advances, 2018, 4(8): eaat3681.
- [13] Cimino M A, Anderson M, Schramek T, et al. Towards a fishing pressure prediction system for a Western Pacific EEZ[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 461.
- [14] Hsu T Y, Chang Y, Lee M A, et al. Predicting skipjack tuna fishing grounds in the western and central Pacific Ocean based on high-spatial-temporal-resolution satellite data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 861.
- [15] Taconet M, Kroodsma D, Fernandes J A. Global Atlas of AIS-Based Fishing Activity-Challenges and Opportunities[M]. Rome: FAO, 2019: 13-31.
- [16] Wu Y M, Zheng L L, Cui X S, et al. *Illex argentinus* resource abundance and its relations to the main ecological

- factors in Southwest Atlantic Ocean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(6): 1137-1141. [伍玉梅, 郑丽丽, 崔雪森, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼的资源丰度及其与主要生态因子的关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1137-1141.]
- [17] 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.]
- [18] Liu H W, Yu W, Chen X J, et al. Influence of Antarctic Sea ice variation on abundance and spatial distribution of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* in the southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(2): 187-199. [刘赫威, 余为, 陈新军, 等. 南极海冰变动对西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源丰度及空间分布的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(2): 187-199.]
- [19] Zainuddin M, Saitoh K, Saitoh S I. Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data[J]. Fisheries Oceanography, 2008, 17(2): 61-73.
- [20] Briand K, Molony B, Lehodey P. A study on the variability of albacore (*Thunnus alalunga*) longline catch rates in the southwest Pacific Ocean[J]. Fisheries Oceanography, 2011, 20(6): 517-529.
- [21] Wu Y M, Yang S L, Shen J H, et al. Fishing grounds characteristics of *Illex argentinus* in southwest Atlantic[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1445-1451. [伍玉梅, 杨胜龙, 沈建华, 等. 西南大西洋阿根廷滑柔鱼作业渔场特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1445-1451.]
- [22] Tang F H, Cui X S, Fan W, et al. Study on relationship between resources abundance of squids and marine environment in high seas fishing grounds[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(4): 153-162. [唐峰华, 崔雪森, 樊伟, 等. 公海柔鱼类资源丰度与海洋环境关系的研究[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(4): 153-162.]
- [23] Tang Y. Analysis on biological characteristics of the catch of squid jigging in the southwest Atlantic[J]. Marine Fisheries, 2002, 24(1): 14-19. [唐议. 西南大西洋鱿钓作业渔获物——阿根廷滑柔鱼生物学分析[J]. 海洋渔业, 2002, 24(1): 14-19.]
- [24] O'Dor R K. Big squid in big currents[J]. South African Journal of Marine Science, 1992, 12(1): 225-235.
- [25] Chen X J. Fishery Resources and Fishery Science[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 16-215. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 16-215.]
- [26] Wang J T, Gao F, Lei L, et al. Study on forecasting model of recruitment for *Illex argentinus* by using the environmental factors in the spawning ground[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(12): 119-124. [汪金涛, 高峰, 雷林, 等. 基于产卵场环境因子的阿根廷滑柔鱼资源补充量预报模型研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 119-124.]
- [27] Wang Y F, Chen X J, Chen P, et al. Prediction of abundance index of Argentine shortfin squid in the Southwest Atlantic Ocean based on grey system model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(4): 64-73. [王言丰, 陈新军, 陈芑, 等. 基于灰色系统西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源丰度预测模型的构建[J]. 海洋学报, 2019, 41(4): 64-73.]
- [28] Wang Y F, Chen X J, Guo L X. Research on the abundance prediction model of *Illex argentinus* based on sea surface temperature of spawning ground[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 42(6): 29-35. [王易帆, 陈新军, 郭立新. 基于产卵场海表温度的阿根廷滑柔鱼资源丰度预测模型研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 29-35.]
- [29] Wang J T, Gao F, Lei L, et al. Impacts of temporal and spatial scale as well as environmental data on fishery forecasting models for *Illex argentinus* in the southwest Atlantic[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 1007-1014. [汪金涛, 高峰, 雷林, 等. 阿根廷滑柔鱼渔场预报模型最适时空尺度和环境因子分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 1007-1014.]
- [30] Hu G Y, Chen X J, Wang J T. Forecasting fishing ground of *Illex argentinus* based on different weight habitat suitability index in the southwestern Atlantic[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(8): 88-95. [胡贯宇, 陈新军, 汪金涛. 基于不同权重的栖息地指数模型预报阿根廷滑柔鱼中心渔场[J]. 海洋学报, 2015, 37(8): 88-95.]
- [31] Ding Q, Chen X J, Wang J T. Comparison habitat suitability index model of *Illex argentinus* and its application into fishing ground forecasting[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 8-13. [丁琪, 陈新军, 汪金涛. 阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 适宜栖息地模型比较及其在渔场预报中的应用[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 8-13.]
- [32] Li D W, Zhang L, Wang Y, et al. Study on the relationship between *Illex argentinus* CPUE and environmental factors based on GAM[J]. Fishery Modernization, 2015, 42(4): 56-61. [李德伟, 张龙, 王洋, 等. 基于 GAM 的阿根廷滑柔鱼 CPUE 与环境因子关系分析[J]. 渔业现代化, 2015, 42(4): 56-61.]
- [33] Lu H J, Chen X J, Cao J, et al. CPUE standardization of *Illex argentinus* for Chinese mainland squid-jigging fishery in the southwest Atlantic Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 951-960. [陆化杰, 陈新军, 曹杰, 等. 中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化[J]. 水产学报,

2013, 37(6): 951-960.]

- [34] Deng J M, Qin B Q, Wang B W. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in blue-green algal bloom forecasting[J]. Chinese Journal of

Ecology, 2015, 34(3): 835-842. [邓建明, 秦伯强, 王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 835-842.]

Spatial distribution of squid fishing vessel operations in the southwest Atlantic Ocean and its relationship with environmental factors

YANG Shenglong^{1,2}, SHI Huimin^{1,2,3}, FAN Wei^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, FEI Yingjie⁴, ZHANG Han⁴

1. Key Laboratory of Fisheries Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Key and Open Laboratory of Remote Sensing Information Technology in Fishing Resource, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
3. College of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Understanding the spatial pattern of human fishing activities is very important for fishery resource supervision and spatial management. In order to understand the spatial distribution characteristics of squid fishing vessels in the southwest Atlantic Ocean and its relationship with the marine environment, fishing effort information was calculated based on the squid fishing vessels trajectory data in the southwest Atlantic Ocean from January to May during 2018–2019 and analyzed for variation in the center of activity. The overlay maps of the spatial distribution of environmental factors and fishing effort were plotted together with three environmental data sets of the same period: sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), bottom temperature (BT) and chlorophyll-a (CHL-a), to investigate the relationship between the spatial distribution of fishing effort and environmental factors. The Generalized Additive Model (GAM) was used to construct a non-linear expression of fishing effort on the marine environment, and to analyze the impact of changes in the marine environment on squid fishing vessel activity in the southwest Atlantic Ocean. The results showed that the fishing effort of the boats in the study area at first increased and then decreased from January to May, and the fishing effort was the highest in February. The center of gravity of fishing boats has obvious zonal monthly changes. From January to May, the center of gravity of fishing boats shifted from north to south as a whole. The operations of squid fishing boats are mainly distributed in areas with sea surface temperature of 8–15 °C, sea surface height of 0.14–0.16 m, bottom temperature of 5–8 °C and CHL-a concentration of 0.2–0.6 mg/m³. The GAM model shows that spatial factors and environmental factors have a significant impact on the distribution of squid fishing in the southwest Atlantic Ocean. The synergy of longitude and latitude contributed the most to the explanatory variance of fishing effort. Four environmental factors, SST, SSH, CHL-a, and BT, all have important effects on fishing effort. The effects of all variables on fishing effort are non-linear. The most closely affected range of SST is 14–15 °C, the most closely affected range of SSH is –0.1–0.02 m, the most closely affected range of BT is 5–6 °C, and the most closely affected range of CHL-a concentration is 0.2–0.4 mg/m³.

Key words: southwest Atlantic Ocean; squid fishing; automatic ship identification system; fishing effort; spatial distribution characteristics; marine environment; generalized additive model

Corresponding author: YANG Shenglong. E-mail: ysl6782195@126.com