

DOI: 10.12264/JFSC2021-0521

海表面温度及叶绿素 a 浓度对西北印度洋鳶乌贼时空分布的影响

魏裙倚^{1,3}, 崔国辰⁴, 玄文丹^{1,3}, 陶迎新^{1,3}, 苏施^{1,3}, 朱文斌^{1,2}

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;
2. 浙江省海洋水产研究所, 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021;
3. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316021;
4. 海安市水产技术推广站, 江苏 南通 226600

摘要: 西北印度洋鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)资源具有一定的开发潜力, 可作为商业性捕捞对象。本研究基于西北印度洋 2017 年 1—3 月, 8—12 月鳶乌贼的渔捞日志数据, 结合同期海表面温度(sea surface temperature, SST)及叶绿素 a 浓度(chlorophyll-a, Chl-a)数据, 运用渔场重心分析、地统计插值、GAM (generalized additive model)模型分析, 探究西北印度洋鳶乌贼渔场时空变动及其与海洋环境因子的关系。研究表明, 2017 年 1—3 月, 8—12 月鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)渔场重心大多分布于海洋锋带附近, 分布范围集中于 13.6°N~17.2°N、58.3°E~62.2°E 海域, 1—3 月渔场重心向西南迁移, 8—11 月渔场重心往东北移动, 12 月向西南折回。GAM 模型分析结果显示, 西北印度洋鳶乌贼渔场最适 SST 范围是 25.5~27.0 °C, 最适 Chl-a 浓度范围是 0.2~0.4 mg/m³, 月份是影响鳶乌贼单位捕捞努力渔获量(catch per unit effort, CPUE)的主要因子。研究结果对于了解该海域鳶乌贼资源变动规律、指导鳶乌贼资源科学生产具有重要意义。

关键词: 西北印度洋; 鳶乌贼; CPUE 时空分布; 环境因子; GAM 模型

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0388-10

鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)隶属头足纲(Cephalopoda)、枪形目(Teuthoidea)、柔鱼科(Ommastrephidae)、鳶乌贼属, 广泛分布于印度洋、太平洋的热带和亚热带海域^[1], 是一种暖水大洋性头足类, 具有生长周期短、资源储量大等特点^[2-4]。印度洋鳶乌贼产量年间波动较大, 可承载较高的捕捞压力, 其渔场受海洋环境影响较大。

前苏联和日本等国家曾对印度洋西北公海海域鳶乌贼资源进行调查, 认为该海域鳶乌贼资源具有一定的开发潜力, 可作为商业性捕捞的对象^[5]。王尧耕等^[6]和周金官等^[7]曾对印度洋西北海域鳶乌贼资源进行预测, 其潜在资源量为 1000 万 t。余为等^[5]和陈新军等^[8]在 2003 年 9—11 月利用鱿

钓船对印度洋鳶乌贼中心渔场形成机制进行了初步研究, 结果表明各海域的作业渔场其最适表温不同。余为等^[5]曾利用 2003 年和 2004 年 9—10 月探捕数据结合表温、盐度、海表面高度和叶绿素 a (chlorophyll-a, Chl-a)浓度 4 个环境因子, 分别用算术平均法和几何平均法在西北印度洋鳶乌贼渔场构建了 HIS (habitat suitability index)模型, 实证研究结果显示这 4 个环境因子均能较好地反映西北印度洋鳶乌贼中心渔场的分布情况。鳶乌贼在我国南海海域也有分布, 郭有俊等^[9]对南海春季鳶乌贼渔场变动进行研究, 推测海水温度、海平面高度异常(sea surface height anomaly, SSHA)以及涡流等环境因子对鳶乌贼资源有重要

收稿日期: 2021-10-31; 修订日期: 2022-02-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901505); 浙江省重点研发计划项目(2018C02026).

作者简介: 魏裙倚(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为渔业资源. E-mail: 973391958@qq.com

通信作者: 朱文斌(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事渔业资源与管理研究. E-mail: foolse@126.com

影响。截至目前,国内外学者对鳶乌贼的研究主要侧重于资源量^[10-11]、种群结构、日龄与生长等生物学研究,对印度洋鳶乌贼时空分布、渔场变动以及与环境因子关系的研究主要集中在 2003 年和 2004 年的 9—11 月,积累的生产数据资料较少。

海洋环境因子对柔鱼类栖息地以及产卵、索饵场的形成具有重要的作用,而海表温度 SST、Chl-a 浓度作为引起柔鱼资源变动的主要环境因子具有易获取、监测范围广、时间连续性强等特点,常被用于大洋性渔场监测。本研究利用 2017 年 1—3 月和 8—12 月西北印度洋鳶乌贼生产调查数据,结合同期 SST 及 Chl-a 浓度数据,采用渔场重心分析、地统计插值、GAM 模型分析等方法研

究西北印度洋鳶乌贼渔场变动特性,以期有效指导该海域鳶乌贼渔业生产。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究渔业数据来源于舟山远洋鱿钓渔船“兴旺 111”号、“兴旺 222”号的 2017 年 1—3、8—12 月渔捞日志,数据量共 414 条,月均 26 条,渔捞日志记录内容包含作业时间、日捕捞产量(t)、作业渔船、作业位置(经度、纬度),作业区域为 12°N~20°N、56°E~65°E (图 1)。“兴旺 111”号、“兴旺 222”号长 65.4 m、宽 8.11 m,主机功率 1787 kW,吨位 1643 t;两船尺度相同,将两船渔业数据合并处理。

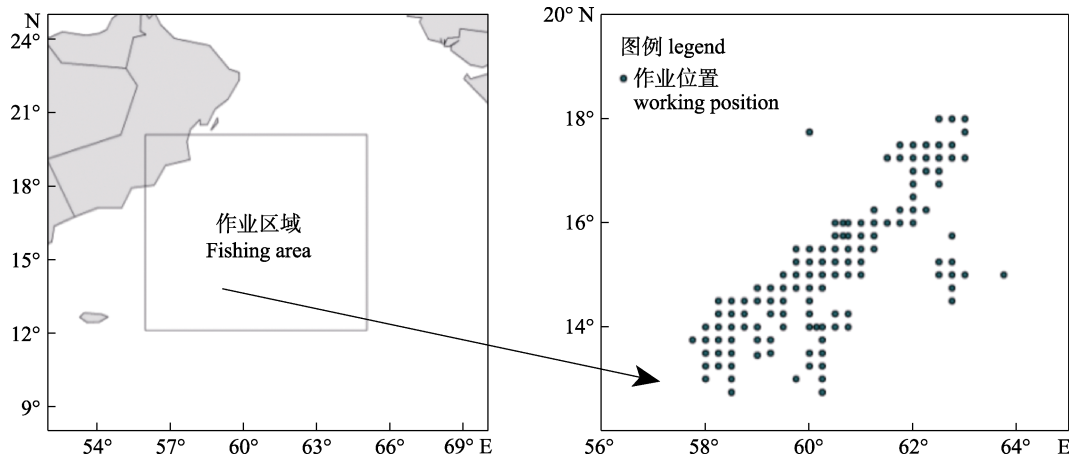


图 1 西北印度洋鳶乌贼作业渔场

Fig. 1 Fishing ground of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean

海洋环境数据 SST 及 Chl-a 均来源于美国 Ocean Data 网站中的 MODIS-卫星(<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>),时间分辨率为月,选取月平均合成数据,空间分辨率为 9 km。为使渔业、环境数据匹配,将 SST、Chl-a、渔业捕捞产量数据按照 0.5°×0.5°单元格划分。本研究使用环境数据为经过处理后的三级产品,2017 年 8 月单位捕捞努力量渔获量(CPUE)分布海域无对应 Chl-a 浓度,故本研究 GAM 模型未拟合 2017 年 8 月 SST、Chl-a 数据。

1.2 研究方法

1.2.1 CPUE 与环境的关系分析 利用名义 CPUE (t/d)表征渔获量高低^[12]。其计算公式为:

$$CPUE = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}$$

式中, C_i 为第 i 天的西北印度洋鳶乌贼渔获量, n 为总天数。以四分位数(分别为 <2.2, 2.2~3.3, 3.3~5, >5)为节点将 CPUE 从低到高归类为 I、II、III、IV 4 个等级,将 CPUE 与 SST、Chl-a 分别叠加。

1.2.2 产量重心计算 将各作业点经纬度乘以捕捞产量并累加求和,再除以总渔获量,得到产量重心经纬度。其公式为^[13]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^j (C_i * X_i)}{\sum_{i=1}^j C_i}, Y = \frac{\sum_{i=1}^j (C_i * Y_i)}{\sum_{i=1}^j C_i}$$

其中, X 、 Y 分别是某一月份的产量重心经度和纬

度; C_i 为第 i 次作业的产量; X_i 为某一月中第 i 次作业时的经度; Y_i 为某一月中第 i 次作业时的纬度; j 为某一月作业总次数。

1.2.3 GAM 模型分析 在建立模型之前, 先利用相关性分析对影响因子进行筛选, 具有显著相关性的两个因子保留一个, 月份作为分类变量, 不做相关分析^[14]。GAM 模型一般表达式如下:

$$g(u) = \beta + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon$$

式中, $g(u)$ 代表鳶乌贼 CPUE (t/d), 即每天的捕捞产量; β 代表截距, x_i 表示解释变量, $f_i(x_i)$ 代表经过样条平滑函数处理的任意单变量函数, ε 代表误差。利用 P 值以及 F 值检验影响因子重要性, F 值越大, 因子越重要; P 值越小, 结果越显著^[15]。将 GAM 模型中上下 95% 的置信区间虚实线最接近的部分定义为渔场最适环境范围^[16]。

本研究采用 Excel 2016 软件计算 CPUE 四分位数, AutoCAD 2007 软件绘制产量重心分布图, Arcgis 10.0 软件绘制研究区及环境因素图, Hdfview 3.0 软件计算单元格 SST、Chl-a 值, R 语言分析 GAM 模型。

2 结果与分析

2.1 渔获量及 CPUE 变化

2017 年西北印度洋鳶乌贼渔获量及 CPUE 波动明显(图 2)。11 月渔获量最高, 为 321.23 t, 占全部渔获量的 19.03%; 10 月次之, 为 311.80 t, 占全部渔获量的 18.47%; 8 月渔获量最低, 为 103.00 t, 占全部渔获量的 6.1%。CPUE 曲线整体呈先上升后下降趋势, 高 CPUE (>5 t/d) 分布于 8、10、11 月, 8 月 CPUE 最高, 为 6.06 t/d, 2 月最低, 为 2.34 t/d。

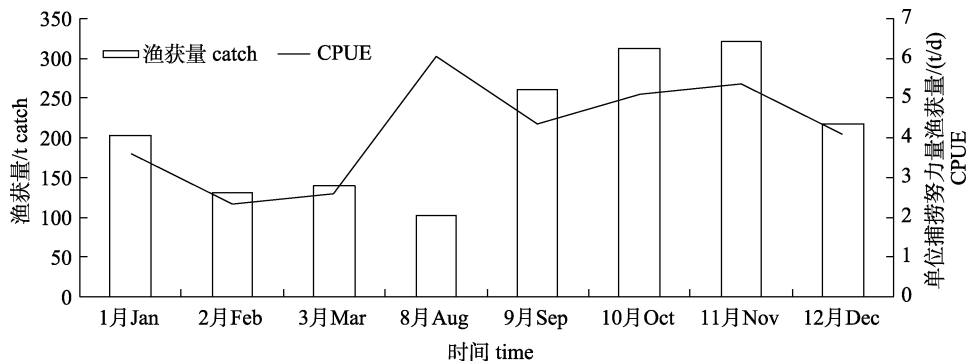


图 2 2017 年西北印度洋鳶乌贼渔获量及 CPUE 月变化

Fig. 2 Monthly variation of *Sthenoteuthis oualaniensis* catch and CPUE in the Northwest Indian Ocean in 2017

2.2 产量重心变化

1—3 月, 8—12 月西北印度洋鳶乌贼产量重心经度方向分布范围为 58.3°E~62.2°E, 纬度方向分布范围为 13.6°N~17.2°N; 1—3 月产量重心呈现往西南移动的趋势, 8—11 月产量重心呈现往东北移动的趋势, 与 1—3 月相反; 12 月则再呈往西南折回的移动趋势(图 3)。

2.3 CPUE、SST 及 Chl-a 空间分布变化

在调查海域, SST、Chl-a 与 CPUE 的关系见表 1。调查海域的 SST 范围为 21.0~29.1 °C, 其中高产量海域出现在 25.3~28.4 °C (平均日产量在 3.3 t 以上)。作业渔场的 SST, 1—3 月呈先下降后上升趋势, 8—12 月呈先上升后下降趋势。

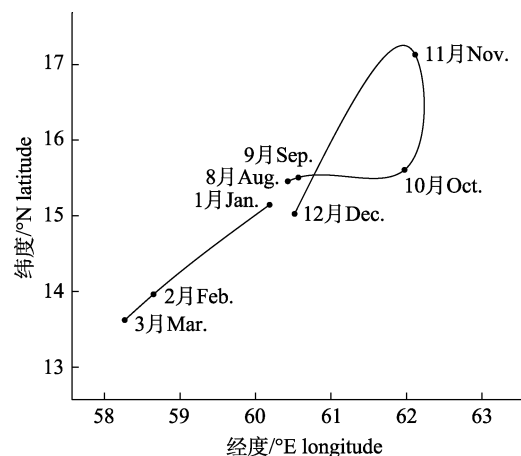


图 3 各月份西北印度洋鳶乌贼产量重心分布图

Fig. 3 Distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* gravity center in the Northwest Indian Ocean for each month

由 CPUE、SST 和 Chl-a 的空间分布月变化发现(图 4, 图 5), 渔场重心大多分布于海洋锋带附

近; 1、2、3 月产量重心在 14°N 附近, 8、9、10、12 月在 15°N 附近, 11 月在 17°N 附近。印度洋海

表 1 2017 年西北印度洋鳶乌贼单位捕捞努力渔获量(CPUE)、海表面温度(SST)、叶绿素 a 浓度(Chl-a)月变化
Tab. 1 Monthly variations of catch per unit effort (CPUE), sea surface temperature (SST), and chlorophyll-a concentration (Chl-a) of Northwest Indian Ocean *Sthenoteuthis oualaniensis* in 2017

时间 time	作业天数/d catch day	CPUE/(t/d)	环境因子 environmental factor			
			SST 范围/°C SST range	Chl-a 浓度范围/(mg/m ³) Chl-a range	SST 均值/°C mean SST	Chl-a 均值/(mg/m ³) mean Chl-a
1 月 Jan.	28	3.62	24.33–27.12	0.20–17.32	26.13	0.29
2 月 Feb.	28	2.34	23.41–27.10	0.19–26.87	25.85	0.45
3 月 Mar.	27	2.60	25.30–27.80	0.13–28.44	26.73	0.62
8 月 Aug.	17	6.06	21.44–27.77	0.05–17.23	25.33	–
9 月 Sep.	30	4.35	21.93–28.51	0.13–33.46	26.81	0.70
10 月 Oct.	31	5.11	24.40–29.01	0.14–33.18	28.36	0.24
11 月 Nov.	30	5.35	26.73–28.41	0.12–18.00	27.47	0.32
12 月 Dec.	27	4.09	23.08–27.30	0.20–8.45	26.00	0.35

注: CPUE 表示单位捕捞努力量渔获量; SST 表示海表面温度; Chl-a 表示叶绿素 a 浓度。

Note: CPUE denotes catch per unit effort; SST denotes sea surface temperature; Chl-a denotes chlorophyll-a concentration.

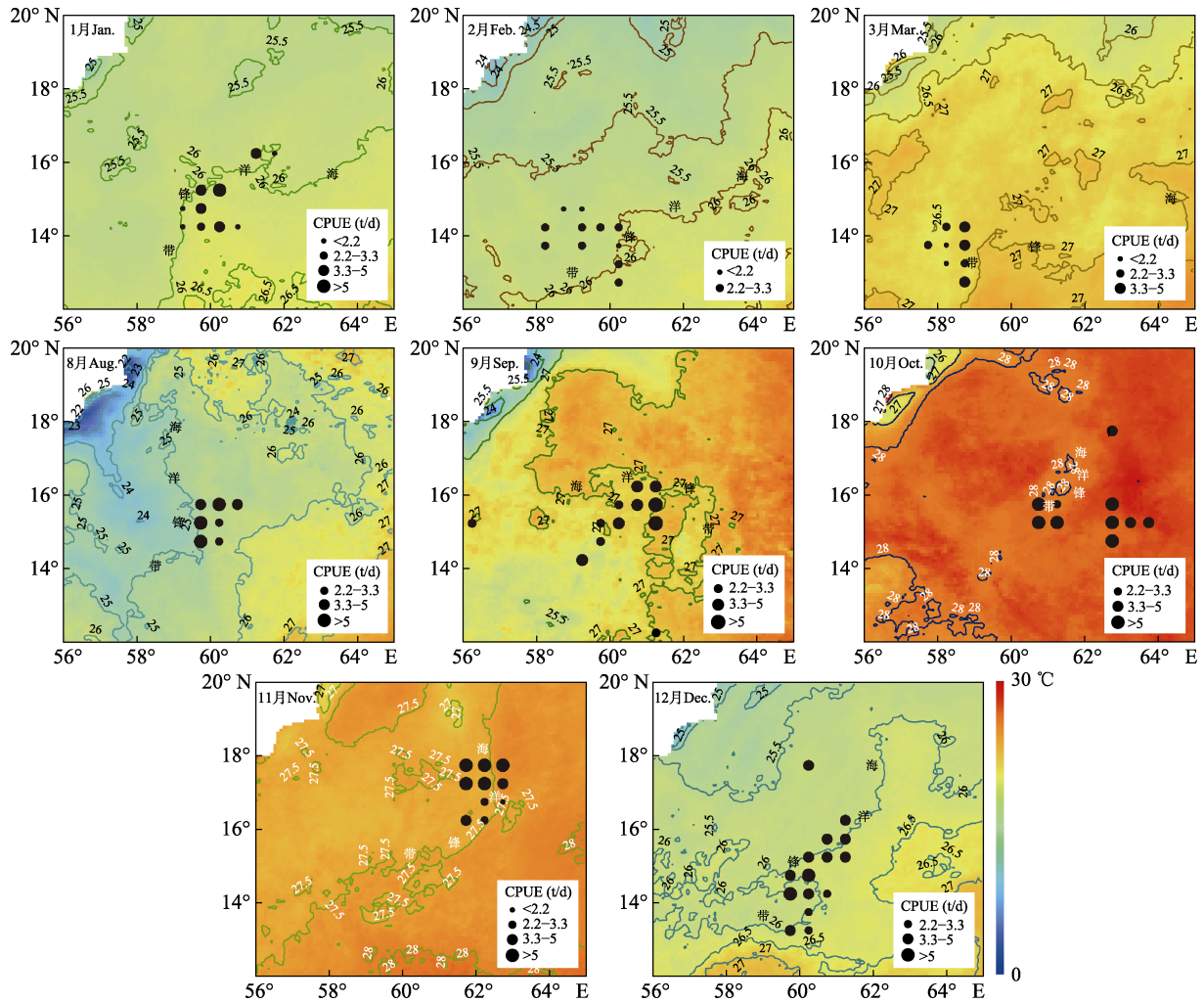


图 4 西北印度洋海域海表面温度(SST)和鳶乌贼单位捕捞努力渔获量(CPUE)空间分布月变化
Fig. 4 Monthly spatial distribution change of sea surface temperature (SST) and catch per unit effort (CPUE) of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean

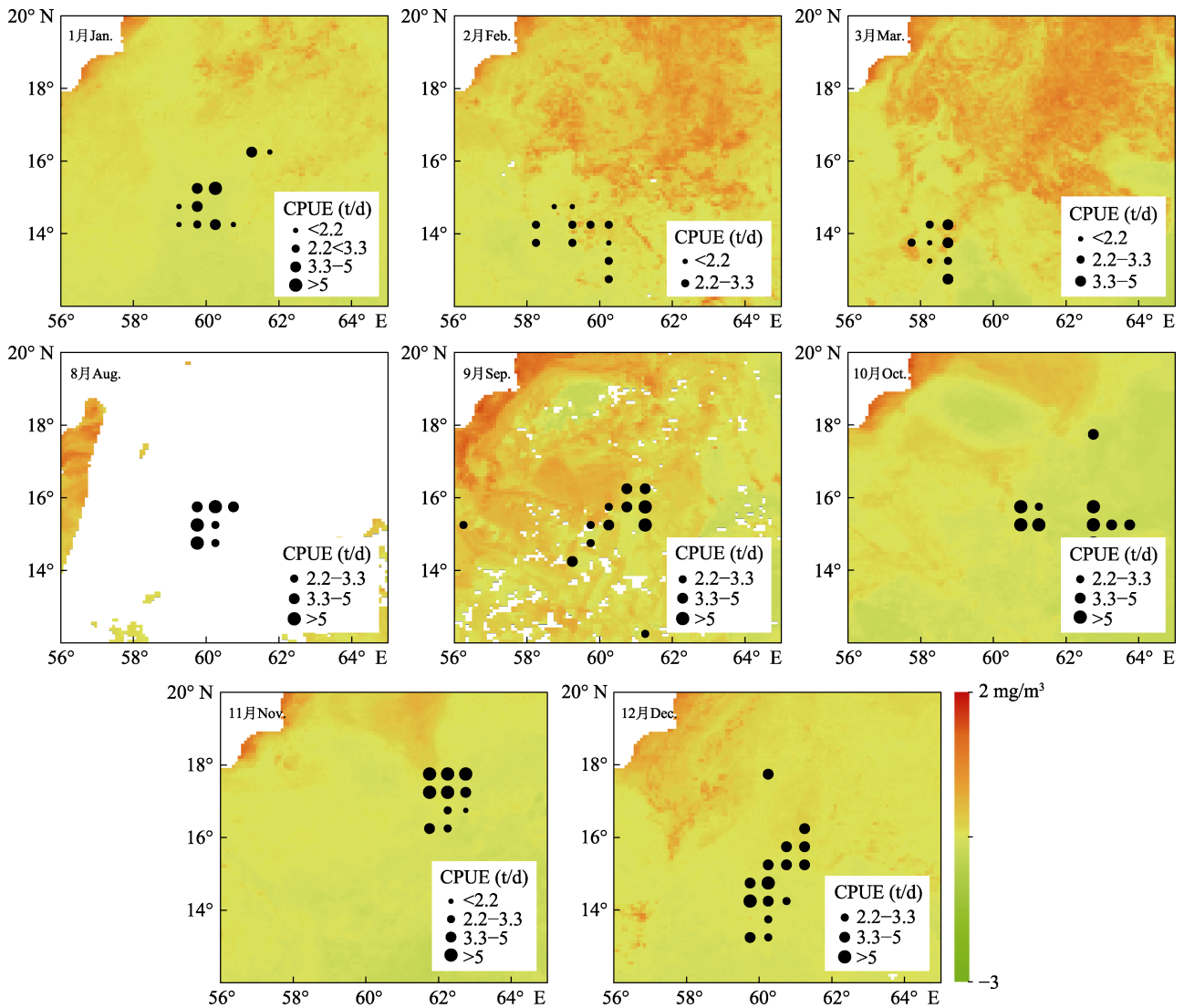


图 5 西北印度洋海域 \log_{10} 叶绿素 a 浓度 (\log_{10} Chl-a) 和鸢乌贼单位捕捞努力渔获量 (CPUE) 空间分布月变化

Fig. 5 The monthly spatial distribution variations of \log_{10} Chl-a concentration and CPUE of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean

域各月 SST 空间分布存在差异, 时间上作业区域的 SST 呈先上升再下降趋势, 10 月 SST 最高; 空间上 SST 存在纬度差异, 低纬度海域 SST 高于高纬度。Chl-a 纬度分布变化趋势与 SST 相反, 高纬度海域 Chl-a 浓度高于低纬度海域。

2.4 GAM 模型分析

GAM 模型分析结果如图 6、图 7 所示。海表温效应图显示, CPUE 随海表温上升不断增加, 2017 年 1—3 月和 8—12 月西北印度洋鸢乌贼渔场最适 SST 范围为 25.5~27.0 °C; 最适 Chl-a 范围为 0.2~0.4 mg/m^3 。经度效应图显示, 鸢乌贼渔场重心集中分布于 60°E~62°E。从月份效应图看,

CPUE 的月份变化较大, 12 月显著高于其他月份, 10 月最低, 1—3 月整体变化不大。

SST、Chl-a、经度、月份与 CPUE 的 GAM 模型检验结果显示(表 2), 月份与 CPUE 关系极显著 ($P < 0.001$), SST 与 CPUE 关系显著 ($P < 0.01$), 其他因子在 CPUE 上的回归均不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 西北印度洋鸢乌贼产量和 CPUE 的变化

西北印度洋鸢乌贼各月份渔获量及 CPUE 存在差异, 这与其生活习性有关。鸢乌贼不同渔场资源量存在季节差异, 例如, 南海鸢乌贼资源量

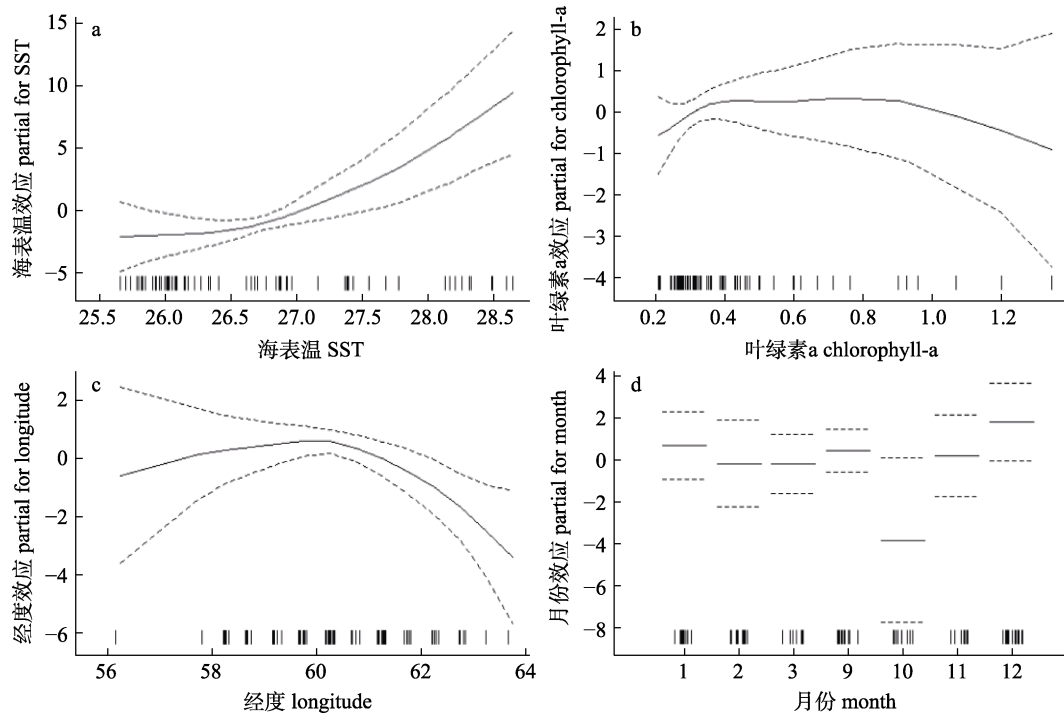


图 6 西北印度洋鳶乌贼单位捕捞努力渔获量(CPUE)与(a)海表面温度(SST)、(b)叶绿素 a 浓度(Chl-a)、(c)经度、(d)月份的 GAM 模拟结果
虚线表示拟合可加函数的逐点标准差, 即 95% 置信区间的上、下限。

Fig. 6 GAM simulation results between catch per unit effort (CPUE) of *Sthenoteuthis oualaniensis* and (a) sea surface temperature (SST), (b) chlorophyll-a (Chl-a) concentration, (c) longitude, and (d) month
Dashed curves are 95% confidential intervals.

表 2 西北印度洋鳶乌贼渔场 CPUE 与影响因子的模拟检验表

Tab. 2 Simulated checklist of CPUE and impact factors of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean fishing grounds

影响因子 environmental factor	F 值 F value	P 值 P value
月份 month	14.6453	4.271×10 ⁻¹⁰ ***
经度 longitude	0.5080	0.478854
叶绿素 a Chl-a	0.0370	0.848098
海表面温度 SST	8.1882	0.005855**

注: ***表示 0.001 水平上显著相关(P<0.001), **表示 0.01 水平上显著相关(P<0.01).

Note: *** indicates significant correlation at the 0.001 level, ** indicates significant correlation at the 0.01 level.

由大至小依次为春季、夏秋季、冬季^[17]; 温利红等^[18]得出结论印度洋鳶乌贼资源量上半年低于下半年。本研究认为西北印度洋鳶乌贼资源量秋冬季大于春夏季, 与前人研究结果一致。由于受到索马里海流的影响, 研究海域形成了上升流, 带

来了深海较多的营养盐进入上层和大陆架海域, 进一步提高了研究海域的初级生产力, 这是该海域形成良好渔场的优越条件。秋冬季, 索马里暖流势力较强, 该海域形成的上升流也较多、较强, 因此, 带来的深海营养盐也较丰富, 使得秋冬季成为该海域的渔汛旺季; 反之, 春夏季, 索马里寒流势力相对较弱, 研究海域形成的上升流也相对较少、较弱, 因此, 带来的深海营养盐也相对较少, 使得春夏季成为该海域的渔汛淡季。这也解释了本研究 8—12 月(秋冬季)产量明显高于其他月份的现象(图 2)。西北印度洋鳶乌贼 9—12 月产量增加的原因, 一方面是作业天数增加, 9—11 月平均作业天数分别为 30 d、30.5 d、30 d; 另一方面与研究区域 SST 升高有关。余为等^[5]通过研究 2003 年和 2004 年 9—10 月西北印度洋鳶乌贼资源变动, 发现其资源丰度与 SST 显著相关, 在一定范围内鳶乌贼 CPUE 随 SST 升高而增加。本研究得出, 8—10 月鳶乌贼分布海域 SST 升高, 8 月

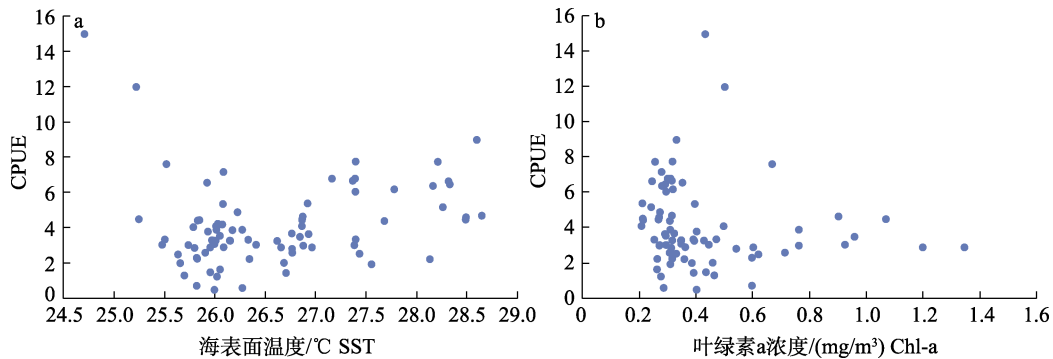


图 7 西北印度洋鸢乌贼单位捕捞努力渔获量(CPUE)与(a)海表面温度(SST)、(b)叶绿素 a 浓度(Chl-a)散点分布图
Fig. 7 Scatter plot of catch per unit effort (CPUE) of *Sthenoteuthis oualaniensis* as a function of (a) sea surface temperature (SST), and (b) chlorophyll-a (Chl-a) concentration in the Northwest Indian Ocean

产量最低但 CPUE 最高, 表明 8 月研究海域鸢乌贼资源丰富。刘必林等^[19]研究发现, 西北印度洋鸢乌贼可分为春季和秋季两个产卵群体, 胴长分别为 273~476 mm 和 142~433 mm。结合国内外调查情况和海洋气象条件^[20-24], 本研究认为除季风期外, 印度洋西北部公海海域的鸢乌贼资源可供全年开发, 生产渔汛为 9 月至翌年 4 月。西南大西洋阿根廷滑柔鱼渔场的汛期主要为 1—5 月, 因此 8—11 月的印度洋西北部公海鸢乌贼渔场可作为西南大西洋的后备渔场。

本研究数据仅限于 2017 年, 虽然还不能准确判断产量和 CPUE 的分布规律, 但在一定程度上揭示了其变化。在以后的研究中, 应依据长期渔业数据对其进行分析, 系统性的资源调查是揭示其资源变动规律的关键。

3.2 西北印度洋鸢乌贼产量重心分布变化

西北印度洋鸢乌贼产量重心呈 1—3 月往西南迁移, 8—11 月往东北移动的趋势; 12 月则往西南折回移动。范江涛等^[25]认为南海鸢乌贼并不存在水平洄游现象, 周艳波等^[26]认为鸢乌贼对温度敏感, 洄游路径与海水温度紧密相关。本研究认为西北印度洋鸢乌贼的产量重心变化与捕捞船作业路线、SST 变化有关。冷暖流交汇形成流场锋面, 会携带大量的营养物质, 为鸢乌贼提供丰富的食物, 有利于渔场的形成^[27]。因此渔场重心常分布于冷暖流交汇处。4—7 月由于印度洋盛行季风等原因没有进行生产^[7,28], 因此最适海域与实际作业海区不可避免存在偏差^[5]。本研究未分析

海流数据, 无法判断海流状况对于鸢乌贼产量重心变化造成的影响, 今后需对海流数据与鸢乌贼产量的关系进行分析。

3.3 海表面温度对西北印度洋鸢乌贼渔场的影响

西北印度洋鸢乌贼的分布与 SST 密切相关, 其 CPUE 随 SST 上升逐渐增加。除季风期外, 该海域鸢乌贼全年生产最适海表面温度为 25.5~27.0 °C。前人研究表明, SST 对鱼类生长至关重要^[25,29], 鸢乌贼生存环境与温度有密切关联^[3,20]。余为等^[5]对西北印度洋鸢乌贼渔场的研究表明, 2003、2004 年 9—10 月其最适 SST 范围为 27~29 °C。本研究中, 9—10 月最适 SST 范围为 27.04~28.31 °C, 相同月份本研究结果与前人研究结果基本相似; 10 月、11 月, 渔场重心分布在 15°N~17°N、62°E 附近海域, 平均日产 5 t 以上, 其海表温均值基本在 27~29 °C 之间, 这一结论与前人研究结果基本相同^[5,9,30]。

3.4 叶绿素 a 浓度对西北印度洋鸢乌贼渔场的影响

Chl-a 浓度对西北印度洋鸢乌贼渔场分布存在影响^[30], 但并不是渔场形成的最主要原因(表 2)。相比于 Chl-a 浓度对南海鸢乌贼的影响^[31], Chl-a 浓度对西北印度洋鸢乌贼影响较小。有研究表明, 西北印度洋鸢乌贼的渔场分布与桡足类、糠虾类等生物量存在显著相关性^[32], 而 Chl-a 浓度是表征浮游植物丰富程度的一个重要参数。本研究通过 GAM 模型结果显示西北印度洋鸢乌贼 CPUE 与 Chl-a 浓度相关性较小, 原因可能是大洋尺度大, 浮游动物空间分布较广^[32], 导致 Chl-a

浓度分布不均, 且研究海域气候条件复杂, 常年受到季风、上升流等气候环境影响^[20-23,33]。另外, 前人仅分析了 2004 年 10—11 月秋季表层浮游生物组成和分布与中心渔场的关系^[32], 未对全年情况进行更深入的研究, 故本研究与前人研究结果略有差异。

通过分析各月份 SST、Chl-a 浓度的适宜范围, 可以在一定程度上表征鳶乌贼资源密度和渔场分布。在未来渔情预报研究中, 可综合应用 SST、Chl-a 浓度及洋流等海洋环境因子, 预测鳶乌贼中心渔场位置, 指导渔业生产。

4 结论

(1) 2017 年鳶乌贼渔场重心集中分布于 12°N~16°N、58°E~63°E 海域, 渔场重心 1—3 月向西南迁移, 8—11 月往东北移动, 12 月向西南折回。

(2) 西北印度洋鳶乌贼渔场最适海表面温度范围是 25.5~27.0 °C, 最适叶绿素 a 浓度范围是 0.2~0.4 mg/m³。月份是影响该海域鳶乌贼 CPUE 的主要因子, CPUE 与 Chl-a 无显著相关性。

(3) 西北印度洋鳶乌贼 CPUE 的分布变动与其渔船捕捞路线及海洋环境变化有关。单一影响因子和 CPUE 相关性不显著。

致谢: 诚挚感谢浙江兴旺远洋渔业有限公司的数据支持。

参考文献:

[1] Dong Z Z. Biology of the Economic Species of Cephalopods In the World Oceans[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1991. [董正之. 世界大洋经济头足类生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.]

[2] Yu J, Hu Q W, Li C H, et al. Relationship between the *Symplectoteuthis oualaniensis* resource and environmental factors in the Xisha-Zhongsha waters in spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(6): 62-73. [余景, 胡启伟, 李纯厚, 等. 西沙-中沙海域春季鳶乌贼资源与海洋环境的关系[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 62-73.]

[3] Xu H Y. Analysis on distribution of habitant and key environmental factors for the purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) in the open South China Sea[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [徐红云. 南海外海鳶乌贼栖息地分布与关键环境因子分析[D]. 上海:

上海海洋大学, 2017.]

[4] Fan J T, Zhang J, Feng X, et al. Fishery forecast research of purpleback flying squid in Nansha area based on Habitat model[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(5): 20-26. [范江涛, 张俊, 冯雪, 等. 基于栖息地模型的南沙海域鳶乌贼渔情预报研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(5): 20-26.]

[5] Yu W, Chen X J. Analysis on habitat suitability index of *Sthenoteuthis oualaniensis* in northwestern Indian Ocean from September to October[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2012, 32(6): 74-80. [余为, 陈新军. 印度洋西北海域鳶乌贼 9-10 月栖息地适宜指数研究[J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(6): 74-80.]

[6] Wang Y G, Chen X J. The fishery and resources of ocean economic squid in the world[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. [王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.]

[7] Zhou J G, Chen X J, Liu B L. Notes on the present status of exploitation and potential of cephalopod resources on the world[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(3): 268-275. [周金官, 陈新军, 刘必林. 世界头足类资源开发利用现状及其潜力[J]. 海洋渔业, 2008, 30(3): 268-275.]

[8] Chen X J, Ye X C. Preliminary study on the relationship between fishing ground of *Symplectoteuthis oualaniensis* and environmental factors in northwestern Indian Ocean[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(1): 55-60. [陈新军, 叶旭昌. 印度洋西北部海域鳶乌贼渔场与海洋环境因子关系的初步分析[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 55-60.]

[9] Guo Y J, Wu W X, Ling W Q, et al. Relationship between CPUE of *Sthenoteuthis oualaniensis* and environmental factors in the southeastern coast of Hainan in spring[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(6): 63-70. [郭有俊, 吴文秀, 凌炜琪, 等. 海南东南部海域春季鳶乌贼 CPUE 与海洋环境关系[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 63-70.]

[10] Zuyev G, Nigmatullin C, Chesalin M, et al. Main results of long-term worldwide studies on tropical nektonic oceanic squid genus *Sthenoteuthis*: An overview of the Soviet investigations[J]. Bulletin of Marine Science -Miami-, 2002, 71(2): 1019-1060.

[11] Chesalin M V, Zuyev G V. Pelagic cephalopods of the Arabian Sea with an emphasis on *Sthenoteuthis oualaniensis*[J]. Bulletin of Marine Science, 2002, 71(1): 209-221.

[12] Yang X S, Zou X R, Xu X X, et al. Effects of ENSO on abundance index and spatial-temporal change of Chilean jack mackerel in the Southeast Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(2): 290-297. [杨香帅, 邹晓荣, 徐香香, 等. ENSO 现象对东南太平洋智利竹筴

- 鱼资源丰度及其渔场变动的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(2): 290-297.]
- [13] Chen X J, Qian W G, Xu L X, et al. Comparison among annual positions of fishing grounds for *ommatrephes bartrami* from 150°E to 165°E in the north Pacific[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2003, 23(3): 26-32. [陈新军, 钱卫国, 许柳雄, 等. 北太平洋 150°E-165°E 海域柔鱼重心渔场的年间变动[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(3): 26-32.]
- [14] Li Y D, Zhang C L, Ji Y P, et al. Spatio-temporal distribution of *Larimichthys polyactis* in southern waters off the Shandong Peninsula and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(4): 442-450. [李迎冬, 张崇良, 纪毓鹏, 等. 山东半岛南部海域小黄鱼时空分布及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2021, 28(4): 442-450.]
- [15] Nan Y, Zhang Q Q, Zhang B H. Influencing factors of long-term variations on gridded PM2.5 of typical regions in China based on GAM model[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 499-509. [南洋, 张倩倩, 张碧辉. 基于 GAM 模型分析中国典型区域网格化 PM2.5 长期变化影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 499-509.]
- [16] Dai S W, Tang F H, Fan W, et al. Distribution of resource and environment characteristics of fishing ground of *Scomber japonicas* in the North Pacific high seas[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(4): 372-382. [戴澍蔚, 唐峰华, 樊伟, 等. 北太平洋公海日本鲭资源分布及其渔场环境特征[J]. 海洋渔业, 2017, 39(4): 372-382.]
- [17] Zou J W, Chen L F, Lin J J, et al. Analysis on variation & distribution of center fishing ground for light falling-net in offshore of the South China Sea: Based on statistics of fishery surveillance to Guangxi fishing vessels[J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(4): 78-84. [邹建伟, 陈立峰, 林蒋进, 等. 南海外海灯光罩网主要渔场分布及变动研究——基于广西渔船的生产监测统计[J]. 南方水产科学, 2014, 10(4): 78-84.]
- [18] Wen L H, Zhang H, Fang Z, et al. Spatial and temporal distribution of fishing ground of *Sthenoteuthis oualaniensis* in northern Indian Ocean with different fishing methods[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(6): 1079-1089. [温利红, 张衡, 方舟, 等. 不同捕捞方式下印度洋北部鳶乌贼渔场时空分布差异[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 1079-1089.]
- [19] Liu B L, Chen X J, Zhong J S. Age, growth and population structure of squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in northwest Indian Ocean by statolith microstructure[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(3): 206-212. [刘必林, 陈新军, 钟俊生. 采用耳石研究印度洋西北海域鳶乌贼的年龄、生长和种群结构[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(3): 206-212.]
- [20] Lin D M, Chen X J. Fishing ground distribution of *Symplectoteuthis oulaniensis* and its relations to SST in the northwestern Indian Ocean[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 546-551. [林东明, 陈新军. 印度洋西北部海域鳶乌贼渔场分布及其与海面温度的关系[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 546-551.]
- [21] Huang X L. Interannual salinity variations over equatorial Indian Ocean in relation to Indian monsoon[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021. [黄贤良. 赤道印度洋盐度的年际变化及其与印度季风的关系[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.]
- [22] Du Y, Zhang L Y, Zhang Y H. Review of the tropical gyre in the Indian Ocean with its impact on heat and salt transport and regional climate modes[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 243-254. [杜岩, 张涟漪, 张玉红. 印度洋热带环流圈热盐输运及其对区域气候模态的影响[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 243-254.]
- [23] Yu W D, Fang Y, Liu L, et al. Introduction of the second international Indian Ocean expedition(IIOE-2)[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(1): 1-7. [于卫东, 方越, 刘琳, 等. 第二次国际印度洋科学考察计划(IIOE-2)介绍[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 1-7.]
- [24] 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, 2005, 14(1): 71-80.
- [25] Fan J T, Feng X, Qiu Y S, et al. Review on the biology of purpleback flying squid in South China Sea[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(23): 122-128. [范江涛, 冯雪, 邱永松, 等. 南海鳶乌贼生物学研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(23): 122-128.]
- [26] Zhou Y B, Xie E G, Wu Q E, et al. The relationship between the resources of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the open South China Sea and the marine environment[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(2): 38-48. [周艳波, 谢恩阁, 吴洽儿, 等. 南海外海鳶乌贼渔场范围与海洋环境的关系[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 38-48.]
- [27] Ji S J, Zhou W F, Cheng T F, et al. On the forecast and analysis of fishing grounds in the open South China Sea[J]. Fishery Information and Strategy, 2015, 30(2): 98-105. [纪世建, 周为峰, 程田飞, 等. 南海外海渔场渔情分析预报的探讨[J]. 渔业信息与战略, 2015, 30(2): 98-105.]
- [28] Zhang J Y, Sun W F, Ma Y, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of temperature front in the East Indian Ocean monsoon zone from 2000 to 2017[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(1): 100-108. [张精英, 孙伟富, 马毅, 等. 2000—2017 年东印度洋季风带海域温度锋时空特征变化分析[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(1):

- 100-108.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Liu K K, Chao S Y, Shaw P T, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: Observations and a numerical study[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2002, 49(8): 1387-1412.
- [31] Yan L, Li J, Zhang P, et al. Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the South China Sea based on the Generalized Additive Model[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(2): 217-223. [晏磊, 李杰, 张鹏, 等. 基于 GAM 模型的南海鳶乌贼 CPUE 时空分布及其与环境因子的关系[J]. 海洋通报, 2021, 40(2): 217-223.]
- [32] Qian W G, Chen X J, Liu B L, et al. The relationship between fishing ground distribution of *Symlectoteuthis oualaniensis* and zooplankton in the northwestern Indian Ocean in autumn[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(4): 265-271. [钱卫国, 陈新军, 刘必林, 等. 印度洋西北海域秋季鳶乌贼渔场分布与浮游动物的关系[J]. 海洋渔业, 2006, 28(4): 265-271.]
- [33] Yang X M, Chen X J, Zhou Y Q, et al. A marine remote sensing-based preliminary analysis on the fishing ground of purple flying squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the northwest Indian Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(5): 669-675. [杨晓明, 陈新军, 周应祺, 等. 基于海洋遥感的西北印度洋鳶乌贼渔场形成机制的初步分析[J]. 水产学报, 2006, 30(5): 669-675.]

Effects of SST and Chl-a on the spatiotemporal distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* fishing ground in the Northwest Indian Ocean

WEI Qunyi^{1,3}, CUI Guochen⁴, XUAN Wendan^{1,3}, TAO Yingxin^{1,3}, SU Shi^{1,3}, ZHU Wenbin^{1,2}

1. Marine and Fisheries Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;
2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute; Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;
3. Fishery College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;
4. Hai'an Aquatic Product Technology Promotion Department, Nantong 226600, China

Abstract: *Sthenoteuthis oualaniensis* has significant economic potential as a catchable species in the Northwest Indian Ocean. To study the spatial and temporal distribution of *S. oualaniensis* and its relationship with relevant environmental factors, we conducted fishing ground analyses, geostatistical interpolation, and generalized additive model analyses using sea surface temperature (SST), chlorophyll-a (Chl-a) concentration, and logbook data from January to March and August to December in 2017. Our results indicate that: (1) *S. oualaniensis* fishing grounds are mainly distributed around the oceanic front; (2) the centers of gravity of *S. oualaniensis* fishing grounds range from 13.6°N to 17.2°N and from 58.3°E to 62.2°E, with migration occurring towards the southwest from January to March, then towards the northeast from August to November, and then towards the southwest in December; (3) *S. oualaniensis* prefers SST between 25.5–27.0 °C and Chl-a concentration 0.2–0.4 mg/m; (4) the catch per unit effort (CPUE) of *S. oualaniensis* varies significantly during the year. Our study contributes to understanding *S. oualaniensis* stock distribution and can be further applied for sustainable management in the Northwest Indian Ocean.

Key words: Northwest Indian Ocean; *Sthenoteuthis oualaniensis*; spatio-temporal distribution of CPUE; environmental factors; generalized additive model

Corresponding author: ZHU Wenbin. E-mail: foolse@126.com