

DOI: 10.12264/JFSC2024-0039

## 西北印度洋中尺度涡对鳶乌贼时空分布的影响

付迎悦<sup>1</sup>, 武孝慈<sup>1</sup>, 金鹏超<sup>1</sup>, 余为<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 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:** 鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)是具有重要经济价值的头足类之一, 在西北印度洋海域蕴藏有丰富的资源量, 该海域受季风的影响中尺度涡分布广泛, 但对栖息于该海域鳶乌贼的影响尚不清晰。本研究基于角动量涡旋检测与追踪算法获得的涡旋追踪数据集匹配渔业数据, 统计了西北印度洋中尺度涡的时空分布, 分析了不同类型涡旋和鳶乌贼资源丰度和分布的关系, 并结合广义加性模型解析了中尺度涡基本特征量与鳶乌贼资源分布之间的关联。结果表明, 西北印度洋中尺度涡发生的高频海域在北部区域, 且存在明显的月间和年际变化。振幅、相对涡度大的中尺度涡内更容易聚集高的鳶乌贼资源丰度。气旋涡内部区域和外围区域的鳶乌贼资源丰度均优于反气旋涡, 且这种差异于涡旋内部区域更加明显。研究表明, 西北印度洋中尺度涡会影响鳶乌贼的资源分布, 需要进一步结合环境因子探究其影响机制。

**关键词:** 中尺度涡; 鳶乌贼; 资源丰度和分布; 西北印度洋

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)04-0454-11

鳶乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)属枪形目 (Teuthoidea), 开眼亚目 (Oegopsida), 柔鱼科 (Ommastrephidae), 鳶乌贼属 (*Sthenoteuthis*), 广泛分布在印度洋、太平洋的赤道和亚热带等海域<sup>[1]</sup>。鳶乌贼是一种大洋性洄游头足类种类, 进行深海区到浅海区的生殖洄游和浅海区到深海区的越冬洄游。该种类主要生活在海表温度 26~28 °C 的水域中, 喜高盐, 适盐范围在 35.5~36.5 之间<sup>[2]</sup>, 具有生长速度快, 生命周期短, 产量高, 经济效益高等特点<sup>[3]</sup>。鳶乌贼以海洋中上层幼小鱼类、甲壳类、其他头足类为食, 有同类相食的习性, 又是海洋大型鱼类、海鸟等捕食者的摄食对象, 在海洋食物网中位于承上启下的关键位置<sup>[4]</sup>。鳶乌贼

具有很大的生态和经济价值, 是重要的渔业资源之一, 据评估西北印度洋海域鳶乌贼资源极丰富, 是我国远洋鱿钓渔业在该海域的主要捕捞对象。

印度洋三面被陆地环绕, 形成了半封闭海域, 受大陆季风的影响, 具有独特的大洋环流系统, 海洋环境复杂。在印度洋西北部海域, 中尺度涡现象十分丰富。中尺度涡是大洋中常见的海洋中尺度动力过程, 与一般的洋流运动不同, 中尺度涡自身旋转的过程中进行水平方向上的移动, 具有很大的动能, 在海洋生态系统水体交换、能量交换方面具有很大的作用<sup>[5]</sup>。中尺度涡可以引起海水辐散, 分为气旋涡和反气旋涡, 气旋涡在涡旋内部产生上升流; 反气旋涡与气旋涡不同, 在

收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-02-23.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401303); 上海市人才发展资金项目(2021078); 上海市自然科学基金项目(23ZR1427100).

作者简介: 付迎悦(1999-), 硕士研究生, 女, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: 1352370956@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

涡旋边缘产生上升流<sup>[6]</sup>。上升流引起底层富营养海水上涌,带来了丰富营养物质,使得藻类以及海表的浮游生物繁殖旺盛,叶绿素浓度增加<sup>[7]</sup>,叶绿素浓度在一定程度上表征海表初级生产力。鳶乌贼对环境变化十分敏感,其资源变动受环境因子影响显著,会向着营养物质丰富、海水温度适宜的海域迁移。中尺度涡旋带来的局部海洋环境变化可能会驱动鳶乌贼资源分布格局的变化。国内外学者针对西北印度洋环境因子(包括温度、盐度、叶绿素浓度等)与鳶乌贼渔场的时空分布关联已开展了较多的分析<sup>[8-9]</sup>,然而目前海洋中尺度过程特别是涡旋对鳶乌贼资源分布的影响尚不清晰。

因此,为探究西北印度洋中尺度涡的时空演变规律及其对该海域鳶乌贼资源的影响,本研究主要分析西北印度洋中尺度涡旋的时空分布规律,厘清了鳶乌贼资源在气旋和反气旋涡内外的分布差异,分析涡旋不同特征参数与鳶乌贼资源分布的关系,据此厘清西北印度洋中尺度涡旋对鳶乌贼时空分布的影响,为印度洋鳶乌贼更精准的渔场和渔汛预报提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 渔业数据

本研究所使用的鳶乌贼渔业数据来自上海海洋大学中国远洋渔业数据中心,数据时间范围为2017—2019年1—12月,时间分辨率为日,空间范围为 $50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 、 $5^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ (图1),共包含8592个数据记录,采样数据点的位置均匀分布于研究区域内。数据内容包括作业经纬度、作业时间、作业次数、渔获量(catch,单位:t)和捕捞努力量(fishing effort,单位:d)。

### 1.2 环境数据

随着海洋遥感技术的发展,多卫星合并的高度计资料被广泛应用于提取并追踪中尺度涡。本研究选取由哥白尼海洋服务中心(CMEMS)提供的多卫星高度计融合数据(<https://marine.copernicus.eu/>),数据包含绝对动态地形(absolute dynamic topographies, ADT)和海表面流速数据,其空间分辨率为 $1/4^{\circ}$ ,时间分辨率为1d,时间范围为2017

年1月1日至2019年12月31日,空间范围为 $50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 、 $5^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ (图1)。

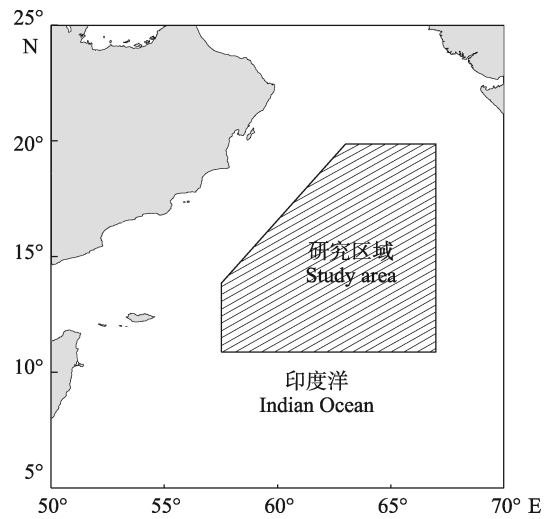


图1 研究区域的空间分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the spatial distribution of the study area

## 1.3 研究方法

**1.3.1 涡旋的识别与追踪** 本研究采用AMEDM (angular momentum eddy detection and tracking algorithm)方法进行西北印度洋涡旋的识别与追踪。AEDMA方法是基于Mkhini等<sup>[10]</sup>提出的一种混合方法改进而来的,准确度较高,且已在全球多个海域得到广泛应用<sup>[11]</sup>。相较于其他方法,该方法具有以下几个优点:(1)可以从空间分辨率较粗的环境数据集中分析出中尺度涡的主要动力学特征而不受到影响;(2)能够完整地探测出涡旋在其整个生命周期内的演变情况;(3)可以精确地识别出涡旋形成、分裂与合并的主要区域;(4)参数的调整较少。基于该方法,可得到一个完整的涡旋数据集,包括涡旋的半径、振幅、生命周期和相对涡度等基本特征量。

**1.3.2 涡旋与鳶乌贼资源丰度和分布的关系** 为探究涡旋数量与鳶乌贼渔获量的关系,本研究对2017—2019年每月西北印度洋气旋涡和反气旋涡数量分布情况进行统计,同时计算各月份的鳶乌贼的总渔获量。由于涡旋可以对其两倍半径范围内的海洋生态环境进行调控<sup>[12]</sup>,故本研究将涡旋影响范围分为涡旋内部(eddy interior, EI)(0-R)和涡旋外围(eddy periphery, EP)(R-2R)。为理清两类

涡旋影响范围内鸢乌贼资源的分布情况,本研究根据每日鸢乌贼作业点经纬度数据和涡旋形态特征数据,判断每个作业点是否在当天涡旋影响范围内。当一个作业点当天在多个涡旋影响范围内时,计算该作业点和每个涡旋涡心的距离,判断其受距涡心距离最近的涡旋影响。因为涡旋每天的形状特征都不同,故本研究使用归一化相对距离来表征涡旋和在其影响范围内的鸢乌贼作业点之间的地理空间关系<sup>[13]</sup>。然后为每个涡旋都建立一个半径为其两倍半径,圆心为涡心的归一化网格<sup>[14]</sup>,再根据归一化相对距离,判断涡旋内鸢乌贼资源丰度的空间分布情况。此外,为分析鸢乌贼丰度与距涡心距离的变化情况,本研究按照 0.1 倍半径的间隔,将归一化相对距离分为 20 个区间,计算每个区间内鸢乌贼的渔获量、捕捞努力和单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)。

**1.3.3 广义加性模型** 广义加性模型(generalized additive model, GAM)能较好反映响应变量与多个因子变量之间的非线性关系<sup>[15]</sup>。利用 GAM 模型分析鸢乌贼资源丰度与反气旋涡(AE)和气旋涡(CE)特征参数的统计关系,以鸢乌贼资源丰度作为响应变量,涡旋半径、振幅和相对涡度作为因变量。变量间的多重共线性通过检查方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)排除。以自然对数作为 GAM 连接函数,对资源丰度值加上常数 1

以防止 0 值出现。由于每日作业点的日渔获量对应 1 次捕捞努力量,因此该作业点的渔获量即可认为是资源丰度值。因此,本研究 GAM 模型表达式为:

$$\ln(\text{catch}+1)=\text{as.factor}(\text{year})+\text{as.factor}(\text{month})+s(\text{radius})+s(\text{deta})+s(\text{vort})+\varepsilon$$

式中, catch 为鸢乌贼单船单日渔获量, year 和 month 为年和月, as. factor 用于处理年、月等因子变量, s 为平滑样条函数, radius、deta、vort 分别为涡旋的半径、振幅、相对涡度,  $\varepsilon$  为误差项。

## 2 结果与分析

### 2.1 西北印度洋中尺度涡的特征变化

根据涡旋自动检测方法对西北印度洋海域(50°E~70°E、5°N~25°N)的中尺度涡进行识别与追踪,时间范围为 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日。在 2017 至 2019 年间,基于欧拉法共探测到中尺度涡 35068 个,其中反气旋涡 16468 个,气旋涡 18600,气旋涡数量略多于反气旋涡数量。为统计反气旋涡与气旋涡的空间分布状况,将研究区域划分为 0.5°×0.5°的格网,对研究区域的中尺度涡数量进行量化处理,通过比较反气旋涡与气旋涡的空间分布(图 2),发现该研究区域内反气旋涡与气旋涡出现的高频海域比较一致,多出现于西北印度洋北部海域(15°N~25°N),其中沿岸海域更为密集。

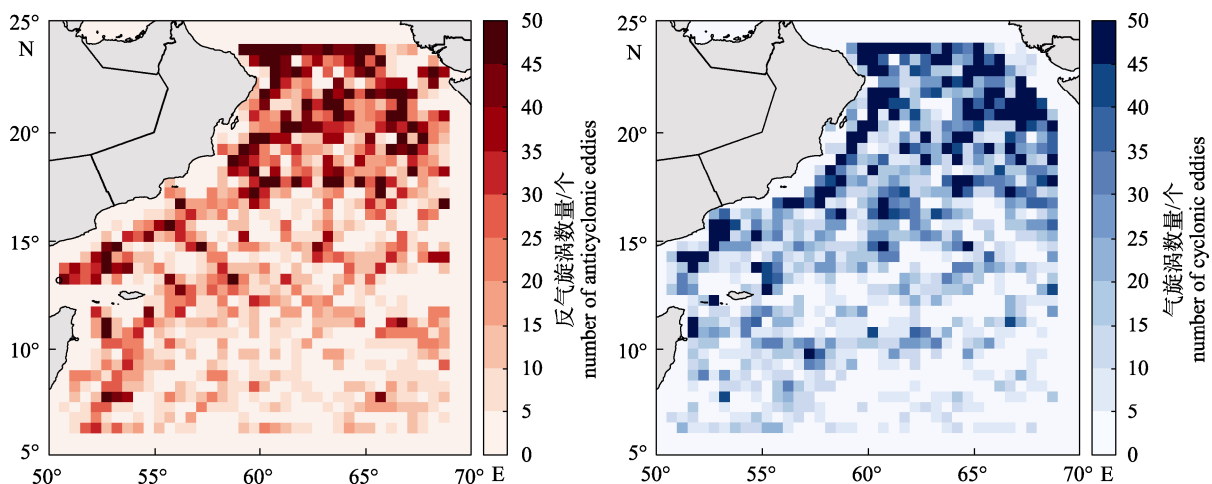


图 2 涡旋数量在 0.5°×0.5°网格内的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average eddy number over 0.5°×0.5° bins

在以往的研究中, 往往以中尺度涡的生命周期、半径、旋转速度、旋转强度等参数表征涡旋的基本特征, 图 3 对研究区域反气旋涡与气旋涡的参数进行分析比较, 其中反气旋涡 197 个, 气旋涡 217 个。图 3a 表明该区域中尺度涡的数量随着生命周期的增加而急剧下降, 反气旋涡与气旋涡的数量变化趋势相似, 该研究区域内的中尺度涡生命周期区间范围为 1~458 d, 绝大多数中尺度涡的生命周期短于 100 d, 短于 100 d 的反气旋涡占比 72.6%, 气旋涡占比 71.4%。反气旋涡最长生命周期为 458 d, 平均生命周期 78.8 d; 气旋涡最长生命周期 425 d, 平均生命周期 80.0 d。研究

区域内中尺度涡的数量随着半径的增加呈现先上升后下降的趋势(图 3b), 反气旋涡与气旋涡随半径变化的趋势大致相同。反气旋涡的平均半径约为 97.86 km, 气旋涡约为 81.78 km, 反气旋涡与气旋涡在半径约为 50 km 处出现频率分布的极值, 气旋涡在半径为 1~100 km 范围内气旋涡的数量大于反气旋涡, 半径大于 100 km 则是反气旋涡数量大于气旋涡。由图 3c 可明显发现反气旋涡与气旋涡的频率分布几乎重合, 呈偏态分布。研究区域的中尺度涡平均转速为 0.26 m/s, 反气旋涡与气旋涡都在约 0.15 m/s 处出现频率分布的极值。

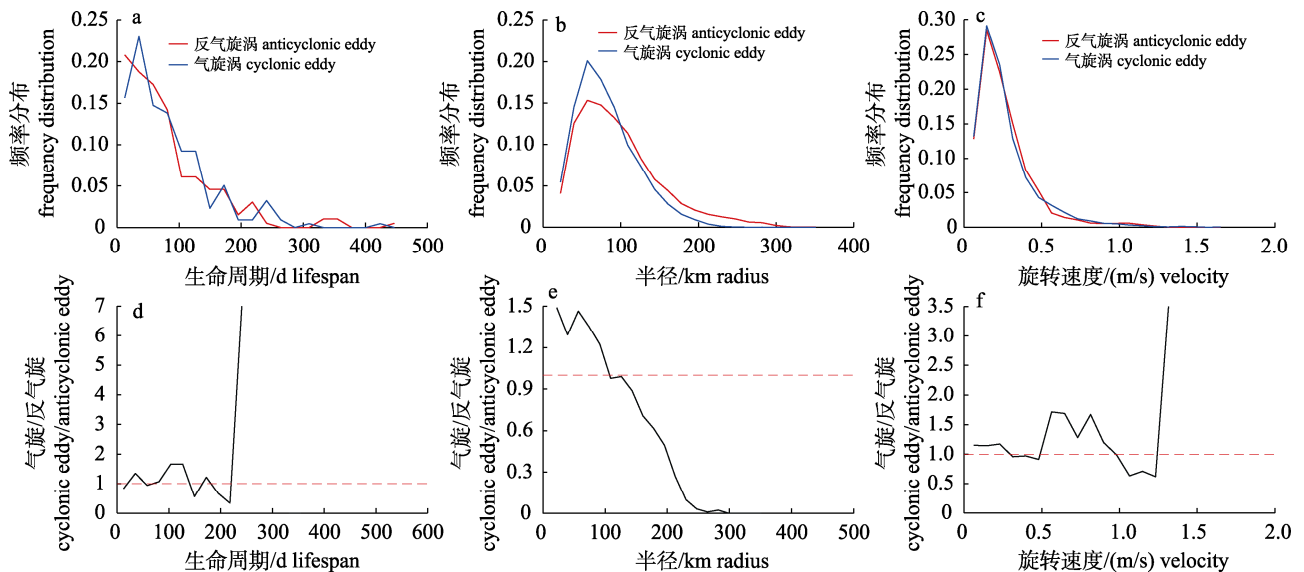


图 3 气旋涡与反气旋涡生命周期、半径和旋转速度的概率密度分布(a-c)以及气旋涡与反气旋涡的数量比值(d-f) 红色虚线表示气旋涡与反气旋涡的数量比值为 1。

Fig. 3 Frequency distribution of cyclonic and anticyclonic eddies lifespan, radius, and rotation speeds (a-c) and the number ratio of cyclonic eddies to anticyclonic eddies (d-f)

The dashed red line indicates that the ratio of the number of cyclonic eddies to the number of anticyclonic eddies is one.

对中尺度涡的轨迹采取归一化处理, 将涡旋生成点的位置定义为原点, 横轴、纵轴为相对经、纬度, 统计其在各个方向上移动的相对距离绘制下图(涡心在整个生命周期的移动, 不考虑移动速度), 图 4 直观地展示了反气旋涡与气旋涡向各个方向的传播轨迹, 向西移动明显, 南北向移动范围较小。对于反气旋涡, 经度方向上向东移动的最大度数为 3.05, 向西移动的最大度数为 14.3。纬度方向上向北移动的最大度数为 5.54, 向南移动的最

大度数为 5.83。对于气旋涡, 经度方向上向东移动的最大度数为 5.05, 向西移动的最大度数为 11.96。纬度方向上向北移动的最大度数为 4.05, 向南移动的最大度数为 6.00。反气旋涡最大移动距离  $1.602 \times 10^3$  km, 气旋涡最大移动距离  $1.375 \times 10^3$  km。图 5 显示了涡旋绝对传播距离的统计分布, 涡旋的数量随着绝对传播距离的增加而下降, 东向绝对距离传播中, 反气旋涡在传播距离较短时数量较多, 北向绝对传播距离中, 两类涡旋没有明显差异。

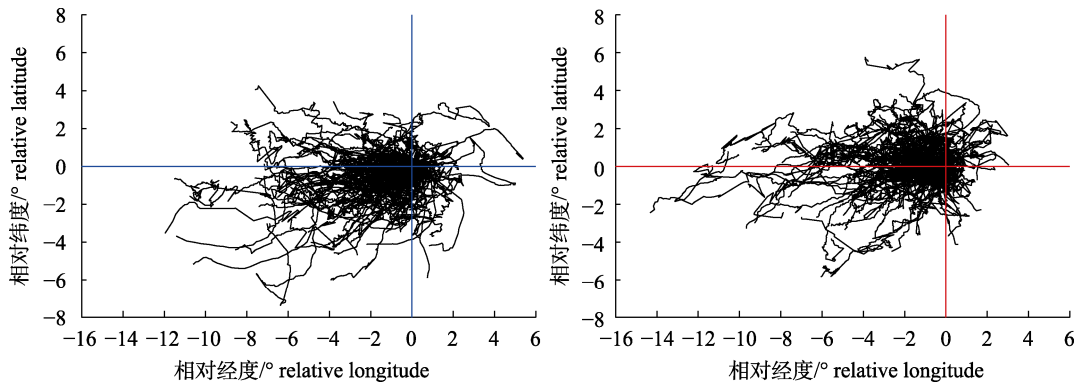


图 4 气旋涡与反气旋涡的相对传播轨迹

横轴、纵轴分别表示相对经、纬度 蓝色: 气旋涡; 红色: 反气旋涡.

Fig. 4 Relative propagation trajectories of cyclonic and anticyclonic eddies  
Relative latitude and longitude are represented on the horizontal and vertical axes, respectively.  
Blue: cyclonic eddy; red: anticyclonic eddy.

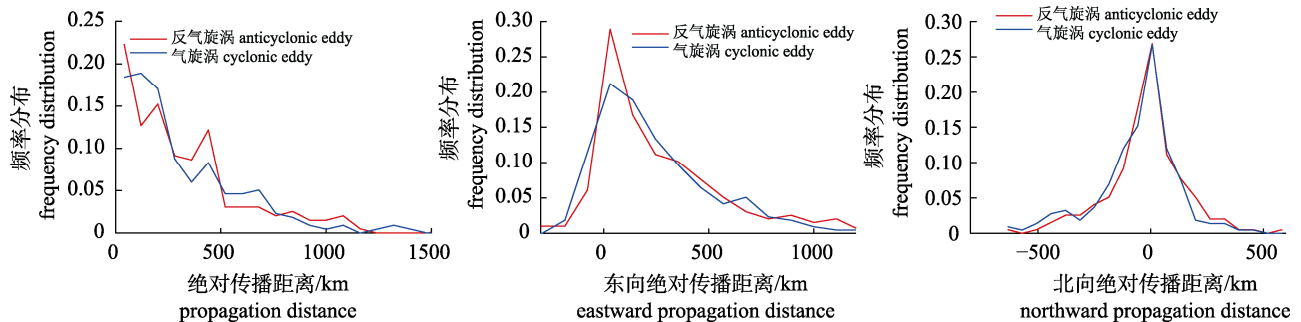


图 5 气旋涡与反气旋涡的绝对传播距离以及东向和北向传播距离

Fig. 5 The absolute propagation distances of cyclonic and anticyclonic eddies, as well as the eastward and northward propagation distances

## 2.2 西北印度洋鸢乌贼资源和中尺度涡分布的关联

2017—2019 年统计西北印度洋海域的渔获量分别为 7972 t、6485 t、40174 t, 其中 2018 年鸢乌贼渔获量最低。月间变化上每年 6—8 月鸢乌贼的渔获量最低, 9—12 月鸢乌贼的渔获量最高, 其中 2019 年 11 月的渔获量最大, 达到 9083 t, 占 2019 年总渔获量的 22.6%。基于拉格朗日法统计到 414 个涡旋, 其中反气旋涡共 197 个, 气旋涡共 217 个。气旋涡数量多于反气旋涡。从整体看, 前十个月涡旋数量在 10 个上下波动, 11、12 月呈增加趋势, 12 月份达到最大, 有 54 个, 其中反气旋涡 31 个, 气旋涡 23 个, 2019 年的涡旋数量增加明显。图 6 可以明显看出鸢乌贼的渔获量与中尺度涡的数量存在正相关性。

为验证西北印度洋鸢乌贼资源丰度与涡旋之

间的关联, 确定了鸢乌贼渔场作业点与反气旋涡、气旋涡之间的相对位置关联。图 7 左显示, 鸢乌贼 CPUE 高值主要出现在反气旋涡一倍半径边缘区域和气旋涡内部区域, 气旋涡内外部的鸢乌贼资源丰度比反气旋涡略高; 就捕捞努力和渔获量来说, 鸢乌贼渔业船舶和高值渔获量主要集中在涡旋内部及靠近涡旋边缘区域, 在距气旋涡中心东侧有鸢乌贼高捕获量区域, 最高为 220.7 t, 而在反气旋涡东南边缘有高鸢乌贼捕获量区域, 最高为 164.5 t。

反气旋涡和气旋涡 2 倍半径内鸢乌贼 CPUE、捕捞努力和渔获量与涡心距离的关系见图 7 右。就 CPUE 来说, 随着距涡心距离的增加, 反气旋涡与气旋涡的鸢乌贼 CPUE 整体呈波动上升的趋势, 气旋涡内最大值在其 1 倍半径处, 反气旋涡最大值在其 1.9 倍半径处。鸢乌贼 CPUE 在反



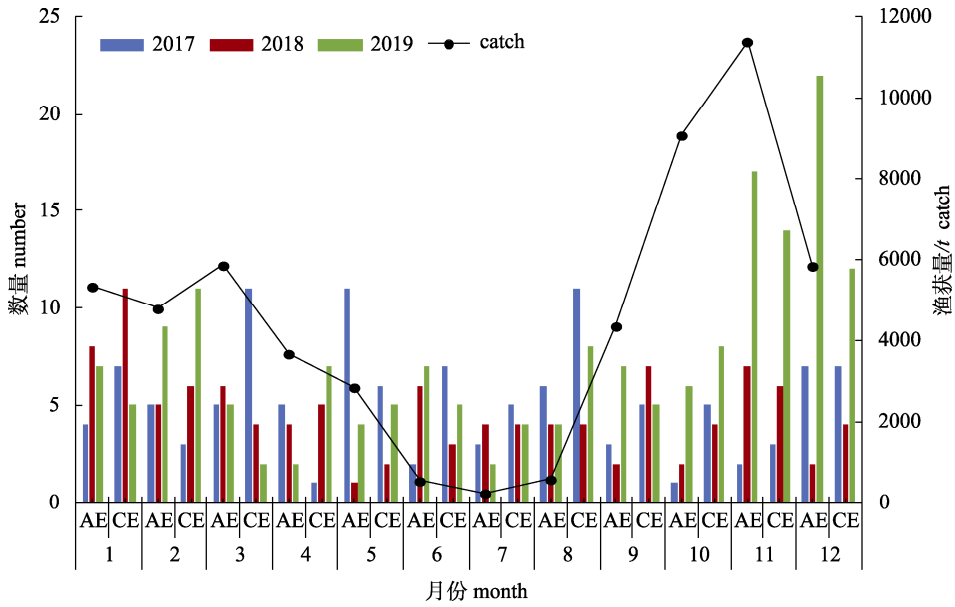


图 6 2017–2019 年 1–12 月气旋涡与反气旋涡数量以及鳶乌贼渔获量的变化

Fig. 6 Interannual and monthly numbers of cyclonic and anticyclonic eddies and catches of *Sthenoteuthis oualaniensis* from January to December during 2017–2019

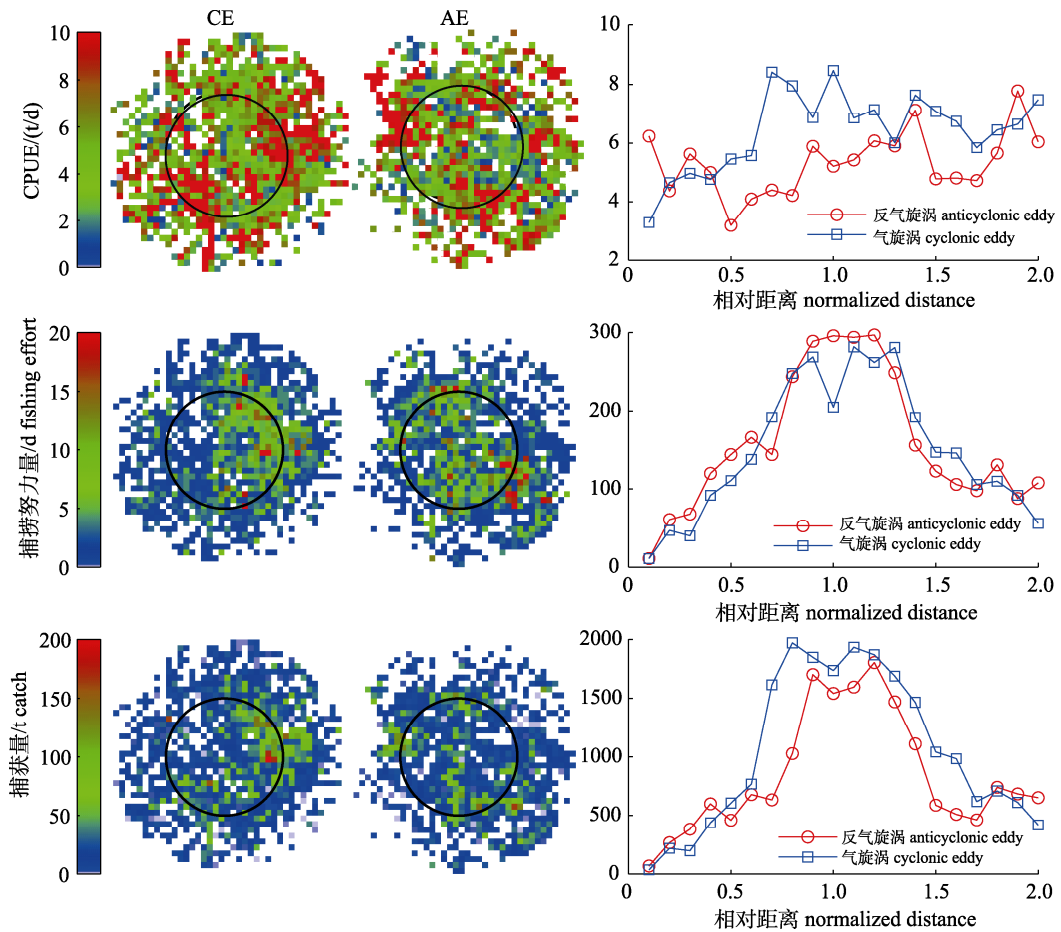


图 7 气旋涡与反气旋涡资源丰度、捕捞努力量以及渔获量的空间分布(左图)及其与距涡心距离的关系(右图)

Fig. 7 Spatial distribution of CPUE, fishing effort, and catch in cyclonic and anticyclonic eddies (left panel) and its distance to the center of the eddies (right panel)

气旋涡内的平均值为 5.32 t/d, 在气旋涡内为 6.41 t/d。随着距涡心距离的增加, 鸕乌贼的渔获量和捕捞努力量在两类涡旋内呈现相同的变化趋势, 均整体呈先增加后减少的变化趋势, 其中, 鸕乌贼捕捞努力量在距反气旋涡(气旋涡)涡心 1.2 (1.1)倍半径处最大, 为 297 d (282 d), 鸕乌贼渔获量在距反气旋涡(气旋涡)涡心 1.2 (0.8)倍半径处最大, 为  $1.80 \times 10^3$  t ( $1.97 \times 10^3$  t)。总的来说, 气旋涡内部区域和外围区域的鸕乌贼资源丰度均优于反气旋涡, 且这种差异于涡旋内部区域更加明显。

利用 GAM 模型分析了鸕乌贼渔获量与年、月、中尺度涡的半径、振幅与相对涡度的关系(表 1)。模型显著性检验结果表明, 所有因子均为极显著。涡旋的半径对鸕乌贼的资源丰度有明显的影响(图 8), 反气旋涡与气旋涡呈现相反的趋势, 对于反气旋涡, 资源丰度与涡旋半径总体呈现正相关, 涡旋半径大于 150 km 的部分置信区间较大, 可信度较低; 对于气旋涡, 资源丰度与涡旋半径呈现负相关, 随着涡旋半径的增大资源丰度表现下降的趋势。中尺度涡的振幅是指涡旋中心与涡旋特征轮廓边界之间的高度差, 振幅的大小可以

表征涡旋引起的海面高度变化的剧烈程度。本研究表明, 涡旋的振幅对其涡旋影响范围内的鸕乌贼渔获量也有明显的影响。对于反气旋涡, 鸕乌贼的渔获量随着振幅的增加逐渐缓慢增加; 对于气旋涡, 鸕乌贼的渔获量随着振幅的增加呈现波动上升的趋势, 增加的幅度要比反气旋涡大。相对涡度(vorticity)定义为速度的旋度, 表示中尺度涡的旋转程度。其中, 气旋涡的涡度为正值, 反气旋涡的涡度为负值, 为方便分析, 本研究将反气

表 1 GAM 模型统计结果  
Tab. 1 Statistical results of the GAM model

GAM 变量	edf	Chi-sq	P-value	R <sup>2</sup> -adj	偏差解释率
AE				0.285	35.8%
year			<0.001***		
month			<0.001***		
radius	8.791	401.8	<0.001***		
deta	8.715	203.8	<0.001***		
vorticity	8.468	276.3	<0.001***		
CE				0.255	31.3%
year			<0.001***		
month			<0.001***		
radius	8.291	331.1	<0.001***		
deta	8.901	286.5	<0.001***		
vorticity	8.576	550.2	<0.001***		

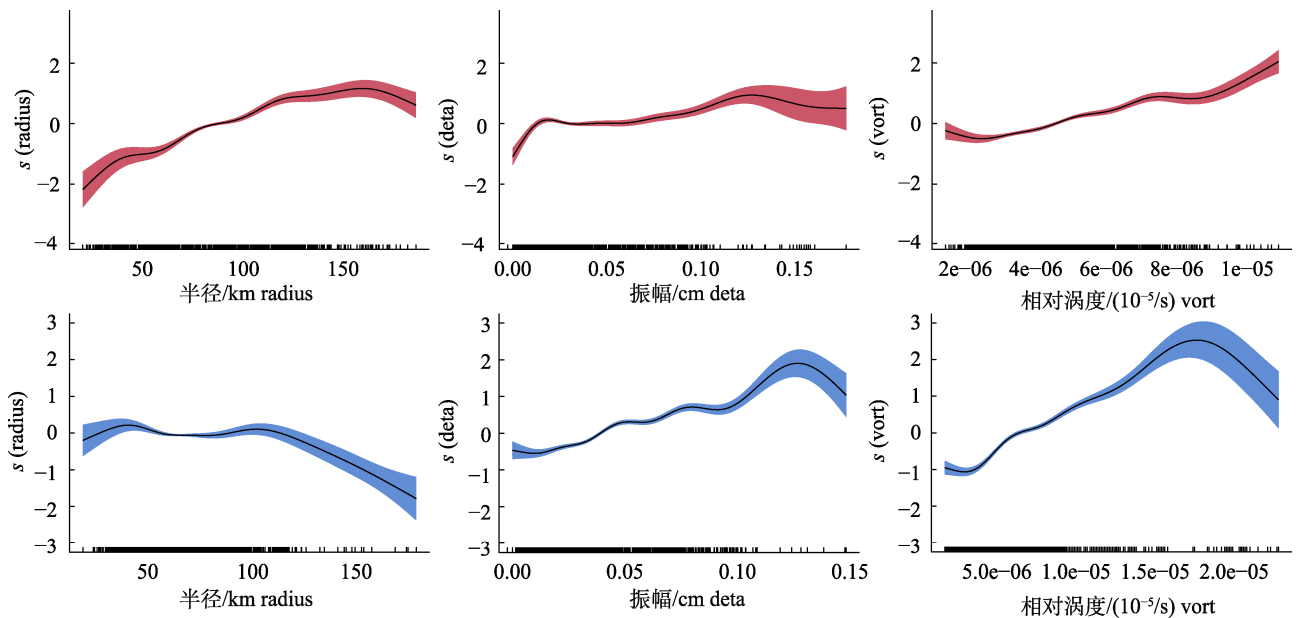


图 8 气旋涡和反气旋涡周围鸕乌贼 Catch 与涡旋基本特征量的拟合曲线  
红色: 反气旋涡; 蓝色: 气旋涡。

Fig. 8 Fitting curves of the *Sthenoteuthis oualaniensis* catch and the basic characteristics of the eddies around the cyclonic and anticyclonic  
Red: anticyclonic eddies; blue: cyclonic eddies.

旋涡的相对涡度取绝对值, 单位为  $10^{-5}/s$ 。反气旋涡与气旋涡的相对涡度与鳶乌贼的渔获量均呈正相关, 随着涡旋相对涡度的变大逐渐增加。

### 3 讨论

西北印度洋为半封闭的海域, 是全球典型的季风区之一, 受大陆季风影响显著<sup>[16-17]</sup>。在季风的驱动以及其他环境因子的影响下, 西北印度洋海域中尺度涡现象活跃, 本研究基于 AMEDA 涡旋自动追踪算法, 对西北印度洋海域内中尺度涡的时空分布进行统计分析。2017—2019 年间基于欧拉法探测中尺度涡数量, 发现反气旋涡与气旋涡在数量统计上差别不大, 气旋涡的数量略高于反气旋涡, 这一结果与前人的研究不同<sup>[18]</sup>, 可能是由于本研究选取的年份过少, 还可能是由于本研究的涡旋没有经过筛选。与前人的研究结果类似<sup>[19]</sup>, 大部分的反气旋涡与气旋涡都分布在研究区域的北部, 主要原因是沿岸辐射的 Rossby 波以及赤道 Kelvin 波的北支沿岸边缘逆时针传播, 容易引起斜压不稳定, 有利于涡旋的产生<sup>[20-21]</sup>。反气旋涡与气旋涡的基本特征参数基本相似, 涡旋的平均生命周期为 79.5 d, 反气旋涡与气旋涡相差并不大; 反气旋涡的平均半径略高于气旋涡, 半径较大的涡旋中反气旋涡的数量更多; 反气旋涡与气旋涡的旋转速度差别不大。在涡旋的生命周期、强度基本相同的情况下, 半径越大, 其影响范围也就随之扩大, 由此可以得出该研究区域反气旋涡的影响范围较气旋涡更大。通过对中尺度涡的相对移动轨迹进行分析, 反气旋涡与气旋涡东西向移动明显, 南北向移动不明显, 导致这一现象的原因可能主要是受研究海域内向西传播的 Rossby 波影响<sup>[22-24]</sup>, 其次可能是受印度洋西部边界流不稳定性的影响<sup>[25-26]</sup>。这一结果符合全球多个海域西向传播明显的特征<sup>[27-28]</sup>。

涡旋的数量存在年际和月间变化。2019 年的涡旋数量明显高于前两年, 这可能与印度洋偶极子事件(IOD)的发生有关<sup>[29]</sup>。根据近几年的 IOD 指数可以发现 2019 年下半年 IOD 处于极高的正相位, 有研究表明 IOD 与季风关系密切, 正 IOD 的发展有利于加强季风<sup>[30-31]</sup>, 同时季风的加强又

会促进中尺度涡的产生。涡旋的数量与鳶乌贼资源丰度存在关联性, 中尺度涡的生成会提高该海域鳶乌贼的渔获量。经统计分析, 研究区域范围内 4—7 月涡旋数量较其他月份少, 6—8 月西北印度洋鳶乌贼的渔获量过低, 造成这一现象的原因可能是印度洋鳶乌贼对中尺度气候现象的滞后响应, 涡旋数量减少后海洋环境随之变化, 进而导致鳶乌贼渔获量的降低。中尺度涡对调控海洋初级生产力有重要意义, 其艾克曼抽吸作用可以在垂直结构上进行营养盐的输运, 与此同时, 涡旋在移动过程中会携带其内部营养物质一起移动, 为海表浮游植物的生长供给营养物质, 提高海表初级生产力<sup>[32-33]</sup>。

以往的研究大多集中于分析环境因子与鳶乌贼渔获量之间的关系, 本研究基于 GAM 模型分析了涡旋参数与印度洋鳶乌贼的关联, 经梳理, 涡旋的半径、振幅、相对涡度与鳶乌贼渔获量具有显著相关性。鳶乌贼的资源丰度与气旋涡的半径总体上呈现负相关的关系, 反气旋涡相反。导致这一结果的原因可能是由于气旋涡在中心产生上升流, 造成中心海水温度降低<sup>[34]</sup>, 随着半径的增大, 海表面温度降低的幅度以及范围也会随之扩大, 温度过低不适宜鳶乌贼的生长, 未来可结合环境数据做进一步分析。研究区域鳶乌贼的渔获量随着反气旋涡与气旋涡的振幅和相对涡度的增加而增加, 这表明在一定范围内涡旋活跃能促进鳶乌贼资源丰度的提高。早期研究表明气旋涡影响范围内的初级生产力较高<sup>[35]</sup>, 但高生产力的气旋涡往往伴随着不利的温度条件, 近期研究证明反气旋涡带来的环境效应有利于头足类渔业资源的渔场丰度提高<sup>[36]</sup>, 如西北太平洋柔鱼<sup>[14]</sup>、秘鲁和赤道海域茎柔鱼<sup>[13,37]</sup>等均被证明在反气旋涡影响范围内的资源丰度更高。与上述研究相反, 西北印度洋海域鳶乌贼在气旋涡内外外的鳶乌贼捕捞努力量比反气旋涡略低, 但鳶乌贼 CPUE、渔获量却明显比反气旋涡高, 造成这种区别的原因可能是由于印度洋偶极子是印度洋海气相互作用形成年际气候变化的主要模式<sup>[38]</sup>。2017—2019 年印度洋偶极子正相位强度较大。当偶极子处于正相位时, 西部印度洋海域温度降低, 营养物质分



布不稳定,使得反气旋涡中原本温暖的海水变得寒冷,而鸢乌贼在面临海洋环境变化时十分灵活,此时气旋涡内丰富的营养物质可能更加适宜鸢乌贼生存。未来需要进一步结合不同涡旋内外的环境因子来解析涡旋的影响机制,从而阐明鸢乌贼在不同涡旋内外的分布特征。

### 参考文献:

- [1] Chen X J, Han B P, Liu B L, et al. World cephalopod resources and their fisheries[M]. Beijing: Science Press, 2013: 139-140. [陈新军, 韩保平, 刘必林, 等. 世界头足类资源及其渔业[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 139-140.]
- [2] Wang H H, He T, Lu H J, et al. Effects of sexual maturity and body size on statolith shape of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(8): 1350-1360. [王洪浩, 何涛, 陆化杰, 等. 性成熟和个体大小对西北印度洋鸢乌贼耳石形态的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(8): 1350-1360.]
- [3] Lu H J, He J R, Wang H H, et al. Comparison of fisheries biological characteristics of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the northwest Indian Ocean in different climatic years[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(5): 827-835. [陆化杰, 何静茹, 王洪浩, 等. 不同气候年间西北印度洋鸢乌贼渔业生物学比较[J]. 水生生物学报, 2023, 47(5): 827-835.]
- [4] Xie J Y, Zhang L Z, Wu W X, et al. Feeding habit and trophic niche of purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) in the Nansha Islands area, South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(12): 1993-2002. [谢嘉仪, 张丽姿, 吴文秀, 等. 南沙群岛海域鸢乌贼摄食习性与营养生态位[J]. 水产学报, 2021, 45(12): 1993-2002.]
- [5] Phillips H E, Rintoul S R. Eddy variability and energetics from direct current measurements in the Antarctic circumpolar current south of Australia[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30(12): 3050-3076.
- [6] Godø O R, Samuelson A, MacAulay G J, et al. Mesoscale eddies are oases for higher trophic marine life[J]. PLoS One, 2012, 7(1): e30161.
- [7] McGillicuddy Jr D J. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale[J]. Annual Review of Marine Science, 2016, 8(1): 125-159.
- [8] Tian S Q, Chen X J, Yang X M. Study on the fishing ground distribution of *Symlectoteuthis oualaniensis* and its relationship with the environmental factors in the high sea of the northern Arabian Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006(1): 51-57. [田思泉, 陈新军, 杨晓明. 阿拉伯北部公海海域鸢乌贼渔场分布及其与海洋环境因子关系[J]. 海洋湖沼通报, 2006(1): 51-57.]
- [9] Wei Q Y, Cui G C, Xuan W D, et al. Effects of SST and Chl-a on the spatiotemporal distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* fishing ground in the Northwest Indian Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(3): 388-397. [魏裙倚, 崔国辰, 玄文丹, 等. 海表面温度及叶绿素 a 浓度对西北印度洋鸢乌贼时空分布的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(3): 388-397.]
- [10] Mkhini N, Coimbra A L S, Stegner A, et al. Long-lived mesoscale eddies in the eastern Mediterranean Sea: Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(12): 8603-8626.
- [11] Le Vu B, Stegner A, Arsouze T. Angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2018, 35(4): 739-762.
- [12] Zhou K B, Benitez-Nelson C R, Huang J E, et al. Cyclonic eddies modulate temporal and spatial decoupling of particulate carbon, nitrogen, and biogenic silica export in the North Pacific Subtropical Gyre[J]. Limnology and Oceanography, 2021, 66(9): 3508-3522.
- [13] Jin P C, Yu W, Wu X C, et al. Analysis of the spatial and temporal distribution of eddies off Peru and their relationship with the abundance of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(6): 753-764. [金鹏超, 余为, 武孝慈, 等. 秘鲁外海涡旋的时空分布及其与茎柔鱼资源丰度的关系分析[J]. 中国水产科学, 2023, 30(6): 753-764.]
- [14] Zhang Y C, Yu W, Chen X J, et al. Evaluating the impacts of mesoscale eddies on abundance and distribution of neon flying squid in the Northwest Pacific Ocean[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 862273.
- [15] Franca S, Vasconcelos R P, Fonseca V F, et al. Predicting fish community properties within estuaries: Influence of habitat type and other environmental features[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2012, 107(2): 22-31.
- [16] Xing H B, Chen S, Xu K, et al. Interannual variability of meridional heat transport and its mechanism in the Indian Ocean during monsoon transitions[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 26-37. [邢会斌, 陈昇, 徐康, 等. 季风转换期印度洋经向热运输的年内变异及其机理[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 26-37.]
- [17] Goes J I, Tian H Z, do Rosario Gomes H, et al. Ecosystem state change in the Arabian Sea fuelled by the recent loss of snow over the Himalayan-Tibetan Plateau region[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): Article No.7422.
- [18] Sun C J, Wang X D, Zhang A M, et al. Statistical characteri-

- stics and mechanisms of mesoscale eddies in the North Indian Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(5): 27-40.
- [19] Trott C B, Subrahmanyam B, Chaigneau A, et al. Eddy tracking in the northwestern Indian Ocean during southwest monsoon regimes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(13): 6594-6603.
- [20] Rao R R, Kumar M S G, Ravichandran M, et al. Interannual variability of Kelvin wave propagation in the wave guides of the equatorial Indian Ocean, the coastal Bay of Bengal and the southeastern Arabian Sea during 1993–2006[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(1): 1-13.
- [21] Han W Q, Lawrence D M, Webster P J. Dynamical response of equatorial Indian Ocean to intraseasonal winds: Zonal Flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4215-4218.
- [22] Nethery D, Shankar D. Vertical propagation of baroclinic Kelvin waves along the west coast of India[J]. *Journal of Earth System Science*, 2007, 116(4): 331-339.
- [23] Shankar D, Shetye S R. On the dynamics of the Lakshadweep high and low in the southeastern Arabian Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C6): 12551-12562.
- [24] Shankar D, Vinayachandran P N, Unnikrishnan A S. The monsoon currents in the North Indian Ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 52(1): 63-120.
- [25] Al Saafani M A, Shenoi S S C, Shankar D, et al. Westward movement of eddies into the Gulf of Aden from the Arabian Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C11): C11004.
- [26] Kurian J, Vinayachandran P N. Mechanisms of formation of the Arabian Sea mini warm pool in a high-resolution Ocean General Circulation Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C5): C05009.
- [27] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [28] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(15): L15606.
- [29] Jiang J L, Liu Y M, Li J P, et al. Indian Ocean dipole: A review and perspective[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(6): 579-591. [姜继兰, 刘屹岷, 李建平, 等. 印度洋偶极子研究进展回顾[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(6): 579-591.]
- [30] Li T, Wang B, Chang C P, et al. A theory for the Indian Ocean dipole-zonal mode[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(17): 2119-2135.
- [31] Loschnigg J, Meehl G A, Webster P J, et al. The Asian monsoon, the tropospheric biennial oscillation, and the Indian Ocean zonal mode in the NCAR CSM[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(11): 1617-1642.
- [32] Gaube P, McGillicuddy Jr D J, Chelton D B, et al. Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(12): 8195-8220.
- [33] Dong C M, Mavor T, Nencioli F, et al. An oceanic cyclonic eddy on the lee side of Lanai Island, Hawai'i[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C10): C10008.
- [34] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [35] Chelton D B, Gaube P, Schlax M G, et al. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 328-332.
- [36] Xing Q W, Yu H Q, Wang H, et al. Mesoscale eddies modulate the dynamics of human fishing activities in the global midlatitude ocean[J]. *Fish and Fisheries*, 2023, 24(4): 527-543.
- [37] Fang X N, Yu W, Chen X J, et al. Response of abundance and distribution of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) to short-lived eddies in the eastern equatorial Pacific Ocean from April to June 2017[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 721291.
- [38] Lumban-Gaol J, Siswanto E, Mahapatra K, et al. Impact of the strong downwelling (upwelling) on small pelagic fish production during the 2016 (2019) negative (positive) Indian Ocean dipole events in the eastern Indian Ocean off Java[J]. *Climate*, 2021, 9(2): Article No.29.

## Impacts of mesoscale eddies on the spatial and temporal distribution of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Northwest Indian Ocean

FU Yingyue<sup>1</sup>, WU Xiaoci<sup>1</sup>, JIN Pengchao<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shang 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:** *Sthenoteuthis oualaniensis*, a cephalopod species with significant economic value, is widely distributed and abundant in the Northwestern Indian Ocean. This region is characterized by rich and active mesoscale eddies influenced by various factors such as monsoons. Currently, the impacts of mesoscale eddies on *S. oualaniensis* in the Northwestern Indian Ocean are still unknown. Therefore, this study utilized data derived from the angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA) for eddy detection and tracking and matched the eddies with fisheries data. The spatiotemporal distribution of mesoscale eddies in the Northwestern Indian Ocean was examined, and the relationships between different types of eddies and the abundance and distribution of *S. oualaniensis* were evaluated. Moreover, this study applied the generalized additive model (GAM) to assess the association between the fundamental characteristics of mesoscale eddies and the abundance and distribution of *S. oualaniensis*. The results revealed that high-frequency occurrences of mesoscale eddies were observed in the northern regions of the Northwestern Indian Ocean, exhibiting monthly and interannual variations. Mesoscale eddies with larger amplitudes and higher relative vorticity tended to enhance the abundance of *S. oualaniensis*. The abundance of *S. oualaniensis* resources within the inner and peripheral regions of the cyclonic eddies was higher than that in the anticyclonic eddies, with this distinction being more pronounced within the internal zones of the eddies. Our findings suggested that mesoscale eddies had significant impacts on the distribution of *S. oualaniensis*, and the underlying mechanism could be further elucidated in the future by analyzing the environmental conditions.

**Key words:** mesoscale eddy; *Sthenoteuthis oualaniensis*; abundance and distribution; Northwest Indian Ocean

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