DOI: 10.12264/JFSC2024-0083

# 巴塔哥尼亚海域中尺度涡的特征及其与阿根廷滑柔鱼时空分布的 关系分析

张立川<sup>1</sup>,朱文斌<sup>2</sup>,朱凯<sup>2</sup>,金鹏超<sup>1</sup>,余为<sup>1,3,4,5,6</sup>

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306;

2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021;

- 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
- 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
- 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
- 6. 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:**阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)属短生命周期头足类,其资源丰度和分布易受海域环境变动的影响。中尺度 涡是该海域重要的动力过程,驱动了海域环境的变动,为获知巴塔哥尼亚海域的涡旋特征以及阿根廷滑柔鱼与其 栖息海域中尺度动力过程的关系,本研究通过角动量涡旋检测与追踪算法(angular momentum eddy detection and tracking algorithm, AMEDA)统计了 2013—2019 年巴塔哥尼亚海域的中尺度涡旋,分析了该区域涡旋的时空特征,结合阿根廷滑柔鱼渔业数据,探讨了涡旋内外阿根廷滑柔鱼适宜环境的变化特征,揭示了中尺度涡与阿根廷滑柔 鱼资源的关系。结果显示,2013—2019 年共有 2262 个完整生命周期的涡旋,气旋涡与反气旋涡数量相当,主要集 中分布在福克兰寒流流域及其右侧海域。气旋涡的生命周期、半径和移动速度等特征均高于反气旋涡。涡旋边缘 区域的阿根廷滑柔鱼资源丰度高于涡旋内部,高值多出现于气旋涡的西侧和反气旋涡的西北及东南侧海域。此外,气旋涡中的阿根廷滑柔鱼资源丰度显著高于反气旋涡。海表面温度、200 m 水温和叶绿素 a 浓度在气旋涡和反气 旋涡内外的分布模态与阿根廷滑柔鱼资源丰度的分布格局相一致。适宜环境的出现频次在气旋涡中更高,且主要 分布在涡旋边缘。研究结果为理解涡旋在海洋生态系统中的作用及其对渔业资源的影响提供了重要科学依据。

**关键词:** 中尺度涡; 环境变化; 阿根廷滑柔鱼; 资源丰度; 巴塔哥尼亚海域 中图分类号: \$931 \_\_\_\_\_ 文献标志码: A \_\_\_\_\_\_ 文章编号: 1005-8737-(2024)07-0854-13

阿根廷滑柔鱼(*Illex argentinus*)是大洋浅海性 头足类种类<sup>[1]</sup>,广泛分布在巴塔哥尼亚海域 35°S~52°S 的大陆架和大陆坡海域(图 1),属于长 距离洄游物种<sup>[2]</sup>。主要捕食甲壳类、软体动物等, 同时也被海狮等海洋哺乳动物、海鸟和中上层鱼 类所捕食,在西南大西洋海洋生态系统中扮演着 承上启下的重要角色<sup>[3-4]</sup>。作为重要的经济型头足 类,阿根廷滑柔鱼是中国、阿根廷和韩国等国家 的主要商业捕捞对象,平均年产量约为34.64万t, 最高产量为115.33万t<sup>[5]</sup>,各年间产量变化较大。 阿根廷滑柔鱼作为一年生生物,种群变动与海洋 环境变化密切相关<sup>[6-9]</sup>,海洋环境对阿根廷滑柔 鱼的生命活动起到调控性作用。

巴塔哥尼亚海域位于南美洲的东南沿海,拥 有复杂的海洋环流系统<sup>[10-11]</sup>。在此处巴西暖流与 福克兰寒流交汇<sup>[12]</sup>,促使巴塔哥尼亚海域成为世

作者简介:张立川(1998-),女,硕士研究生,研究方向为渔业海洋学.E-mail: 1938328498@qq.com

收稿日期: 2024-03-30; 修订日期: 2024-05-21.

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

通信作者:余为,副研究员,主要从事渔业海洋学研究. E-mail: wyu@shou.edu.cn

界上中尺度涡活动最为频繁的海域之一。中尺度 涡主要包括气旋涡(cyclonic eddy, CE)和反气旋涡 (anticyclonic eddy, AE)两种类型,二者由于垂向 和水平旋转方向的不同而导致不同的生态效应和 环境变化。总体来说,涡旋通过局部海域的垂向 搅拌和水平扰动作用,裹挟海水运动,输送热量 和营养物质,吸引浮游动物和捕食者的聚集<sup>[13-14]</sup>, 从而对西南大西洋生态系统产生重要影响。阿根 廷滑柔鱼作为该海域的重要渔业资源,其空间分 布和资源丰度与中尺度涡的活动变化密切相关。 因此,深入了解中尺度涡的时空特征及其对阿根 廷滑柔鱼时空分布的影响,对于渔业资源的开发 和利用具有重要意义。

随着卫星遥感技术和海洋观测手段的发展, 中尺度涡的研究逐渐成为渔业海洋学领域的热 点。特别是海洋中尺度动力过程与渔业资源的关 系,更是受到广泛关注。前人已对秘鲁<sup>[15]</sup>、东太 平洋[16]、西北太平洋[17]等海域的中尺度涡进行了 研究,这些研究结果揭示了中尺度涡的生成、传 播和消亡过程,以及它们对海洋环境和生态系统 的影响。然而,中尺度涡与阿根廷滑柔鱼资源时 空分布的关系尚不清晰,有待系统和深入研究。 本研究旨在通过角动量涡旋检测与追踪算法 (angular momentum eddy detection and tracking algorithm, AMEDA), 对 2013-2019 年之间巴塔 哥尼亚海域的中尺度涡进行统计分析,揭示该期 间涡旋的时空特征。同时,结合阿根廷滑柔鱼渔 业数据,探讨中尺度涡与阿根廷滑柔鱼资源的关 系,为阿根廷滑柔鱼的渔业管理与开发提供科学 依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 渔业数据

本研究中阿根廷滑柔鱼渔业数据来自上海海 洋大学远洋渔业中心,研究数据包括作业日期、 经度、纬度、渔获量、作业天数。渔业数据的时 间范围为 2013—2019 年 1—4 月,空间范围为 -35°W~-55°W,-70°S~-50°S,分辨率为0.5°×0.5°。 渔业数据范围覆盖了阿根廷专属经济区及其外侧 的公海海域,其空间分布见图1。



图 1 2013-2019 年 1-4 月阿根廷滑柔鱼渔获量分布 Fig. 1 Catch distribution of *Illex argentinus* from January to April during 2013 to 2019

#### 1.2 涡旋数据

为了研究巴塔哥尼亚海域的中尺度活动,使 用绝对动力地形(absolute dynamic topographies, ADT)和地转流流速(纬向流速 *U*; 经向流速 *V*)数 据来追踪涡旋,数据下载自哥白尼海洋环境监测 服务中心(CMEMS, http://marine.copernicus.eu)。 为了保证涡旋识别的完整性,调整涡旋数据下载 时间为 2012 年 1 月至 2019 年 12 月,空间范围为 -35°W~-55°W, -70°S~-50°S。时间分辨率为天, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。

#### 1.3 环境数据

已知温度和叶绿素 a 是影响阿根廷滑柔鱼栖 息地变动的主要生态因子,且由于阿根廷滑柔鱼 的昼夜迁移特性,使其对 200 m 水深处的水温反 应尤为敏感,本研究选择海表面温度(sea surface temperature, SST)、200 m 水温(*T*<sub>200m</sub>)和叶绿素 a (chlorophyll-a, Chla) 3 类环境因子,以探究中尺 度涡与环境的关系。研究中所采用的环境数据均 源自 CMEMS,时间范围为 2013 年 1 月至 2019 年 12 月,空间范围为 70°W~50°W、55°S~35°S。 时间分辨率为天,空间分辨率为 0.25°×0.25°。

1.4 研究方法

**1.4.1 涡旋识别** AMEDA<sup>[18]</sup>是一种综合性的涡 旋自动化识别算法,该方法基于水平流场的物理 参数和几何特性,利用海流的几何特征识别涡旋 边缘,还使用局部归一化角动量计算法和特征共 享轮廓计算法得到涡旋的中心位置、区分涡旋的 合并/分裂事件<sup>[16,19]</sup>。该算法不仅可以量化涡旋的 动力学过程,还能跟踪涡旋的动态演化过程。其 具体的检测和追踪结果见图 2。

**1.4.2 涡旋参数计算** 巴塔哥尼亚海域涡旋的基本特征量包括涡旋位置、涡旋个数、涡旋生命周

期、涡动能、移动速度等参数,这些特征量的获 取在识别跟踪涡旋时利用特征提取算法可以直接 得到。具体定义及公式如下:

(1) 涡旋数量:常用的统计涡旋数量的方法 主要有拉格朗日法和欧拉法,拉格朗日涡旋计数 法将拥有完整生命周期的涡视为一个涡旋<sup>[20]</sup>,欧 拉法则按照时间间隔对出现的所有涡旋计数<sup>[21]</sup>。 本研究使用拉格朗日涡旋计数法,将研究区域划 分为0.5°×0.5°的网格区域,计算2013—2019年间 的涡旋总数和落在每个网格区域的气旋涡和反气 旋涡的个数。

(2) 涡旋生命周期:涡旋生命周期代表了从涡 旋生成至涡旋消亡经历的所有时间,通过涡旋消亡 的日期减去涡旋生成的日期计算得出,单位为天(d)。



Fig. 2 Automatic eddy detection cases based on angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA)

(3) 涡旋半径:涡旋半径代表了涡心到海流 闭合轮廓线的平均距离。计算公式为:

$$R = \sqrt{S / \pi}$$

式中, *S* 为涡旋覆盖的面积; *R* 为涡旋半径, 单位 为 km。

(4) 涡旋旋转速度:涡旋旋转速度代表了涡 旋最外层海流闭合轮廓线的平均海流速度,单位 为 m/s。

(5) 涡旋绝对传播距离:涡旋绝对传播距离 表征了涡旋的移动特征,通过涡旋消亡的位置与 涡旋生成的位置计算得出,单位为°。

(6) 涡旋离岸距离:涡旋的离岸距离定义为 渔业相关涡旋的涡心位置与海岸线之间的最小距 离,可以通过 R 中的 sf 包计算得到。sf 包具备矢 量空间数据标准化处理的能力<sup>[22]</sup>,自带离散海岸 线数据,可以将渔业相关涡旋的空间位置进行可 视化处理。

**1.4.3 涡旋与阿根廷滑柔鱼资源丰度的关联性分** 析 本研究采用渔获比例和出现概率两个指标表 征阿根廷滑柔鱼资源的丰度,渔获比例基于渔获 量计算,出现概率基于捕捞努力量确定。按照时 间序列和空间位置利用插值法对渔业数据和涡旋 追踪数据进行匹配,生成渔业涡旋追踪数据集。 在此基础上,利用归一化处理方法<sup>[23]</sup>,对不同类 型涡旋内每个网格点的总渔获量和总捕捞努力量 进行处理,分析气涡旋和反气旋涡对阿根廷滑柔 鱼资源量空间分布的影响。渔获比例和出现概率 的具体计算公式如下:

## 渔获比例(%)=catch/catch<sub>max</sub>

## 出现概率(%)=effort/effortmax

式中, catch 为涡旋内每个网格点的累计渔获量, effort 为涡旋内每个网格点的累计作业天数, catch<sub>max</sub> 为所有网格点中的累计渔获量最大值, effort<sub>max</sub> 为 所有网格点中的累计捕捞努力量最大值。

为分析阿根廷滑柔鱼资源量与距涡心距离的 关系,依据渔业相关涡旋的追踪数据,判定距离 每日捕捞作业点最近的反气旋涡和气旋涡,并计 算该作业点到涡心的归一化相对距离。同时,以 0.1倍半径为间隔,统计2倍涡旋半径内每个区间 的阿根廷滑柔鱼的总渔获量和总捕捞努力量<sup>[15]</sup>。 距涡心距离的计算公式如下:

#### D=Z/R

式中, *D* 为归一化后的作业点到涡旋中心的最短距离, *Z* 为作业点到最近的反气旋涡或气旋涡心的距离, *R* 为该涡旋半径。

1.4.4 阿根廷滑柔鱼渔场的适宜环境范围 将所 有环境数据的空间分辨率处理为 0.5°×0.5°,按照 插值法匹配所有渔业点对应的环境。依据频率分 布法,将 SST 以 2 ℃为间隔、T<sub>200 m</sub> 以 0.5 ℃为 间隔、Chla 以 0.1 mg/m<sup>3</sup> 为间隔划分,统计不同环 境区间内的捕捞努力量大小。将捕捞努力量大于 10000 d 的环境区间定义为适宜环境范围,将捕 捞努力量最大值对应的环境区间定义为最适宜环 境范围。

1.4.5 涡旋 2 倍半径内阿根廷滑柔鱼适宜环境的 变化分析 为揭示渔场内涡旋引起的海洋环境变 化导致的阿根廷滑柔鱼资源丰度变动,分析了 SST、T<sub>200</sub>m和 Chla 在涡旋内外的分布情况以及对 应环境间隔的总渔获量大小。该部分建立了一个 基于涡旋半径的归一化涡心径向距离网格, 按天 匹配所有涡旋2倍半径区域内每个网格点的环境 值,并对所有涡旋中对应的每个网格点的环境值 进行时间的平均化处理,得到涡旋内平均环境变 量的空间分布模态<sup>[15]</sup>。根据 1.4.4 得到的适宜环 境分布范围, 计算每个气旋涡和反气旋涡 2 倍半 径内的各个环境间隔的出现频次,分析涡旋内外 适宜环境分布的差异。此外,该部分使用欧拉法 对涡旋计数,对涡旋计数时会使得出现在相邻日 期内的同一涡旋进行累加计数, 故该部分涡旋计 数数量大于拉格朗日法计算的 2013—2019 年的 涡旋总数。

#### 2 结果与分析

## 2.1 巴塔哥尼亚海域中尺度涡的时空特征

采用拉格朗日法对 2013—2019 年巴塔哥尼 亚海域中完整生命周期的涡旋进行统计,共计观 察到涡旋数量 2262 个,其中气旋涡为 1119 个,反 气旋涡为 1143 个。气旋涡与反气旋涡的空间分布 格局见图 3a,整体上旋涡多分布于福克兰寒流流 域及其右侧海域,气旋涡和反旋涡两种涡旋分布 紧密且重叠,反气旋涡的数量略多于气旋涡。其 中气旋涡分布位置与福克兰寒流的流向相同;而 反气旋涡密集分布于福克兰寒流右侧,分布区域 靠近巴西暖流北部海域且更加集中。在福克兰寒 流左侧的近岸海域,涡旋分布较少且分散,多靠 近沿岸海域,该处反气旋涡的数量多于气旋涡。

气旋涡与反气旋由生成位置为原点向各方向 传播,图 3b 分别展示了两类涡旋的传播轨迹。反 气旋涡在各个方向的传播距离相对均衡,在东、 西方向最远移动 6.92°、4.83°, 在南、北方向最远 移动 7.25°、5.5°, 平均向东传播 0.197°, 向北传播 0.21°, 少量反气旋涡在南侧和东北侧有较弱的偏 向性。气旋涡在东、西方向最远移动 4.67°/7.67°、 在南、北方向最远移动 4.83°/10.83°, 平均向西传 播 0.15°, 向北传播 0.51°。比较发现气旋涡沿西北 方向的扩散程度更高,较反气旋涡有更明显的传 播特征和更远的传播距离。在传播距离较短时, 反气旋涡出现的频率更高。随着传播距离的增加, 气旋涡比反气旋涡更显著,移动的距离更远。图4 显示了 2013-2019 年 1-4 月间与阿根廷滑柔鱼 渔业相关涡旋的空间分布与离岸距离,由图可见, 大部分涡旋处于离岸距离 200~500 km 区域。气旋 涡的分布较反气旋涡更加集中, 而反气旋涡的南 北扩散程度较气旋涡更高。此外, 在更靠近外海 区域气旋涡的数量高于反气旋涡。

绝大多数涡旋的生命周期均小于 200 d, 且随 着生命周期的增加,涡旋的数量会急剧减少(图 3c-1)。其中,气旋涡平均生命周期为 43.30 d,反 气旋涡平均生命周期为 42.39 d。当生命周期 <43.40 d 或在 196.39 d~231.20 d之间时,气旋涡 的数量占比明显更高(图 3c-4)。两类涡旋的半径 频率分布基本一致,半径峰值位于约 33.52 km处, 气旋涡和反气旋涡的平均半径分别为 41.08 km 和 39.15 km。当涡旋半径在 32.08~101.89 km 时,反 气旋涡数量占比较高;反之在半径大于 50 km 或 小于 39.15 km 的涡旋中,气旋涡数量较高(图 3c-2、图 3c-5)。气旋涡与反气旋的速度频率分布 呈偏态分布,速度峰值均为 0.11 m/s。总体上气旋涡 的移动速度稍高于反气旋涡,气旋涡平均移动速 度为 0.22 m/s, 反气旋涡平均移动速度为 0.21 m/s, 对于旋转速度为 0.13~0.58 m/s 的涡旋来说, 反气旋涡数量占优势(图 3c-3、图 3c-6)。

## 2.2 中尺度涡与阿根廷滑柔鱼资源丰度和分布 的关系

通过引入归一化涡旋中心坐标系,比较了阿 根廷滑柔鱼在气旋涡和反气旋涡中的渔获量量占 比及出现概率的空间分布模态(图 5a)。可以看出 阿根廷滑柔鱼更加集中分布于涡旋边缘,2 倍涡 旋半径区域内的资源丰度值远超于1 倍涡半径区 域内。此外,气旋涡中的资源丰度远远高于反气 旋涡,阿根廷滑柔鱼高丰度值主要集中在气旋涡 的西侧和反气旋涡的西北侧及东南侧海域。

图 5b 展示了在 2 倍涡旋半径范围内,阿根廷 滑柔鱼的渔获量及捕捞努力量及其与距涡心距离 的关系。在气旋涡的 0~2 倍半径区域内,单位涡 旋渔获量平均值达到 420.96 t,而单位涡旋捕捞 努力量的平均值为 625.29 d。相比之下,反气旋涡 的平均单位涡旋渔获量和平均单位涡旋捕捞努力 量显著较低,分别为 40.45 t和 36.70 d。具体来看, 在涡旋中心 0~0.5 倍半径的范围内,反气旋涡与 气旋涡的单位涡旋渔获量相差不大,但气旋涡的 单位涡旋捕捞努力量略高于气旋涡。在 0.5~1 倍半 径的区域内,气旋涡的单位涡旋渔获量和单位涡 旋捕捞努力量均显著高于反气旋涡,两项指标均 随距涡心距离的增加而迅速上升;在 1~1.5 倍半径 范围内,它们随距涡心距离的增加而呈现波动特 征;而在 1.5~2 倍半径范围内,则呈现下降趋势。

## 2.3 不同类型涡旋内外适宜环境差异

通过捕捞努力量在不同环境区间内的频次分 布(图 6a),发现阿根廷滑柔鱼适宜的 SST 范围为 10~13 ℃,最适宜范围 12~13 ℃; $T_{200 \text{ m}}$ 的适宜范 围为 3~5.5 ℃,最适宜范围为 4~4.5 ℃; Chla 的 适宜范围为 0.1~0.5 mg/m<sup>3</sup>,最适宜范围为 0.2~ 0.4 mg/m<sup>3</sup>。通过分析 SST、 $T_{200 \text{ m}}$ 和 Chla 在涡旋 内外部的平均态分布模态(图 6b),发现各环境因 子的分布模式在涡旋内外部差异较大,其中在气 旋涡中,适宜 SST 处于涡旋左侧 1 倍半径边缘至 2 倍半径边缘区域,适宜  $T_{200 \text{ m}}$ 处于涡旋右侧 1



图 3 巴塔哥尼亚海域中尺度涡涡旋数量的空间分布(a)、绝对传播距离(b)以及特征参数的频率分布和数量比值(c) c1-c3: 气旋涡与反气旋涡的生命周期、涡旋半径和移动速度的频率分布; c4-c6: 气旋涡与反气旋涡的数量比值. Fig. 3 Spatial distribution of average eddy number over 0.5°×0.5° bins of cyclonic eddies and anticyclonic eddies (a); relative propagation trajectories of cyclonic eddies and anticyclonic eddies (b); frequency distribution and the number ratio of cyclonic eddies and anticyclonic eddies with different lifespan, radius and rotation velocity (c) in Patagonia sea c1-c3 shows the frequency distribution of the lifespan, radius and rotation speed of cyclonic eddies and anticyclonic eddies; c4-c6 shows the ratio of the number of cyclonic eddies to the number of anticyclonic eddies.









a和c的涡旋内部区域(0-R)和涡旋边缘区域(R-2R)被黑色实线分开.

Fig. 5 Occurrence probability (a) and catch ratio (c) of *Illex argentinus* within the areas of twofold eddy radius and the relationship of fishing effort (b) and catch (d) of *Illex argentinus* between the distance from fishing position to the eddy center The eddy core (0-R) and eddy periphery (R-2R) regions are separated by the solid black line in fig. a and c.

倍半径周围,适宜 Chla 位于气旋涡西南侧;而在 反气旋涡中,适宜 SST 处于涡旋东南侧 2 倍半径 周围,适宜 *T*<sub>200 m</sub>处于涡旋左侧,适宜 Chla 位于 反气旋涡东北侧及西南侧的 2 倍半径范围中。

图 6c 显示涡旋内部和边缘各环境区间出现频 次的总体分布情况,其中红色柱体突出显示了最 适宜环境的累计出现频次。结果显示, SST、T<sub>200 m</sub>、 Chla 的最适宜环境出现频次均为气旋涡中更多, 反气旋涡内出现频次更少。各环境因子相比, Chla 的最适宜范围在涡旋中的出现频次最高,其次是 T<sub>200 m</sub>和 SST。比较不同类型涡旋内部和边缘的单 位涡旋适宜环境的出现频次,涡旋边缘(*R*~2*R*)各 适宜环境因区间的出现频次均高于涡旋内部 (0~R)。

涡旋内外适宜环境的分布模式与阿根廷滑柔 鱼的资源空间分布模式大致相同(图7),其中Chla 与反气旋中资源分布情况最为相近,*T*200 m与气旋 涡的分布模式最为相近。所有渔业相关的适宜环 境点或最适宜环境点均分布在气旋涡和反气旋涡 的左侧海域, 气旋涡中适宜环境出现频次最高区 域均在1倍半径边缘, 反气旋涡中则分布在2倍 涡旋半径边缘区域。





Fig. 6 Fishing effort distributions in relation to different environment variables (a), spatial distribution of averaged environmental variables in the area of twofold radius ( $\pm 2R$ ) of eddies in *Illex argentinus* fishing ground (b) and histogram distribution of environmental variables in different ranges in relation to the anticyclonic and cyclonic eddies (c)



图 7 巴塔哥尼亚海域涡旋内外渔业相关点的适宜环境(a)和最适宜环境分布(b) Fig. 7 Suitable environment distribution (a) and optimal environment distribution (b) in the area of twofold radius (±2*R*) of the anticyclonic and cyclonic eddies on the fishing ground

#### 3 讨论

本研究利用 AMEDA 涡旋自动追踪算法, 分 析了 2013—2019 年巴塔哥尼亚海域中尺度涡的 时空分布特征;利用以时间序列和空间位置为基 准的插值法匹配涡旋与渔业数据, 探讨了涡旋与 阿根廷滑柔鱼资源时空分布的关系。从涡旋的生 命周期和半径来看, 2013-2019 年该海域气旋涡 和反气旋涡的平均生命周期分别为 43.30 d 和 42.39 d, 平均半径分别为 41.08 km 和 39.15 km, 平均移动速度分别为0.22 m/s和0.21 m/s,并且在 长生命周期的涡旋中, 气旋涡的数量也明显高于 反气旋涡。总体来看, 气旋涡的所有涡旋特征参 数均高于反气旋涡。这意味着气旋涡的强度更高, 作用时间与范围更广,可能对海洋环境造成的影响 范围更广。但不同海域中尺度涡的演变可能存在 差异,例如在秘鲁海域,气旋涡除涡旋半径外其 余涡旋特征参数均大于反气旋涡, 但在西北太平洋 等海域,涡旋参数均为反气旋涡大于气旋涡[15,17]。

从涡旋的空间分布来看, 气旋涡和反气旋涡

在巴塔哥尼亚海域均广泛存在, 但它们的分布特 征和传播路径呈现出明显的差异。具体来说,气 旋涡与福克兰寒流的流径分布较为一致, 而反气 旋涡则更多地分布在海域的右侧以及北侧靠近巴 西暖流的海域。这种分布格局很可能与海流的动 力学特性以及环境因素的差异密切相关。由于科 氏力的作用,巴塔哥尼亚海域的涡旋通常局限于 西部边界洋流(福克兰寒流)和其他高度不稳定的 洋流中<sup>[24]</sup>,这一观点与本研究的发现相一致。该 海域存在复杂的海岸线、岛屿、大陆坡以及高能 量的福克兰寒流与低能的巴西暖流。当寒流与暖 流对冲交汇后,巴西暖流向东流动,而福克兰寒 流在短暂回流后也向东流入大西洋,这些高度不 稳定的活动主要发生在海域的右侧。同时,由于 强流的阻挡作用, 右侧的涡旋活动难以跨越到左 侧海域。而左侧海域观察到的少量中尺度涡活动 主要是由于洋流与海岸线的相互作用以及上升 流、锋面的影响而产生,并多沿海岸线分布。这 类沿岸涡旋的驱动过程将上升流产生的生物量输

送到近海区域,减少了上升流区本身的生物量, 但增加了近海区域的营养物质,这也是左侧渔场 形成的重要原因之一。类似的涡旋分布格局可以 在黑潮-亲潮洋流系统中观察到<sup>[17]</sup>,黑潮沿日本 群岛向东与亲潮汇合形成黑潮-亲潮延伸体,以亲 潮为界限,气旋涡集中分布于亲潮南侧,反气旋 涡集中分布于亲潮北侧,西北太平洋柔鱼渔场在 黑潮-亲潮延伸体中受反气旋涡的吸引中形成。

涡旋特征的季节性变化对阿根廷滑柔鱼渔业 资源的分布可能产生间接影响。这种影响机制主 要是通过涡旋引起的局部海域环境因子变化,进 而对阿根廷滑柔鱼的种群资源产生作用。在热带 大西洋和巴西北部的涡流场中,赤道潜流和北巴 西暖流的正压不稳定性使得对应涡流场的相对涡 度、生命周期和振幅表现出强烈的季节循环。在 赤道潜流中,气旋涡与反气旋涡的半径在12—2月 最大,在但在北巴西暖流的涡流场中,气旋涡的 振幅、半径、涡度等在各季节没有表现出显著的 变化,反气旋涡的特征参数最小值在早春达到<sup>[25]</sup>。 虽然涡旋特征的季节性变化与海流的季节变化紧 密相连,但涡旋特征变化与渔业资源之间的具体 关系仍不明确。针对巴塔哥尼亚海域涡旋的季节 性变化及其影响要开展更深入的研究。

研究发现阿根廷滑柔鱼资源的空间分布与中 尺度涡密切相关。阿根廷滑柔鱼在气旋涡中的资源 丰度远高于反气旋涡,这可能与气旋涡衍生的有 利环境条件促进阿根廷滑柔鱼的生长和繁殖有关。 通常认为, 气旋涡提升温跃层, 增加营养物质浓 度;反气旋降低温跃层,抑制浮游植物生长<sup>[26-27]</sup>。 这与阿根廷滑柔鱼的分布规律相同。除此之外, 从空间分布上来看渔业资源更集中于涡旋边缘, 尤其是2倍涡旋半径区域内。这一发现与涡旋内 SST、T<sub>200 m</sub>、Chla的适宜值分布以及涡旋内渔业 相关适宜环境点的分布模态相同,均为涡旋边缘 的适宜环境面积大于涡旋内部的适宜环境面积。 以往研究表明,边缘生物富集是中尺度涡的特性, 在涡旋边缘由于湍流的摩擦耦合产生丰富的上升 流<sup>[28-30]</sup>,使得运动能力较弱的游泳生物在涡旋边 缘被动聚集,从而在涡旋边缘处形成生物富集。

Schmid 等<sup>[29]</sup>在对佛罗里达海峡中尺度涡衰变的 影响研究时发现, 当气旋涡的生命周期到达衰老 阶段时, 涡旋内部将由上升流转变为下降流, 下 层水体则向外流动到涡旋边缘形成上升流,导致 浮游生物滞留在较深的下沉水体并被带到涡旋边 缘。而反气旋涡的生成特性,是在涡心产生下降 流,在边缘产生上升流,形成生物富集现象。值得 注意的是, 在反气旋涡的西北侧和东南侧也发现 了阿根廷滑柔鱼资源的富集现象,除了边缘富集的 原因外,这种局部特异性可能与特定的环境条件 变化有关。阿根廷滑柔鱼属于冷水性头足类[31-32]、 而与渔业相关的反涡旋涡内外的环境平均态分布 图显示反气旋涡内 SST 为东北侧高, 西北至东南侧 的 2 倍半径边缘温度低, T<sub>200m</sub>为左高右低(图 6b), 涡旋内温度的分布特征符合阿根廷滑柔鱼的生活 特性。同时,反气旋涡中 Chla 分布也显示为西北 侧和东南侧高(图 6b), 与反气旋涡中阿根廷滑柔 鱼的资源分布模式相符。此外,结合与渔业相关 涡旋的离岸距离分布图(图 4)及阿根廷滑柔鱼渔获 量分布图(图1)来看, 福克兰岛处的阿根廷滑柔鱼 渔场可能受反气旋涡的影响更大。福克兰岛周围 海域是重要的阿根廷滑柔鱼渔区之一<sup>[33]</sup>,而此处 的资源主要分布在福克兰岛左侧海域(图1)。根据 图 4 显示, 福克兰岛左侧海域以反气旋涡的显著 分布为主, 西北侧以气旋涡的分布为主。同时, 根 据前人研究发现, 福克兰岛左侧海域恰好为巴塔 哥尼亚海域的大陆架断裂锋面(shelf break front, SBF)所处区域<sup>[34-35]</sup>,该处阿根廷滑柔鱼渔场的变 动是否还受到锋面的影响需要进一步研究确定。

通过比较不同类型涡旋内外适宜环境的差异, 发现各环境因子在涡旋内外的分布模式和出现频 次存在显著差异。这些差异可能与涡旋的动力学 特性、海流的影响以及海洋环境的空间异质性有 关。研究期间追踪到的 2262 个完整生命周期的涡 旋中,气旋涡数量略少于反气旋涡数量。但从阿 根廷滑柔鱼的资源分布来看,气旋涡中出现适宜 环境和最适宜环境的次数以及气旋涡中的资源丰 度都远高于反气旋涡,这进一步证实了气旋涡对 阿根廷滑柔鱼渔业资源的重要性。同时也注意到, 无论是气旋涡还是反气旋涡,均为适宜 Chla 出现 频次最高, *T*<sub>200 m</sub>次之, SST 出现频次最低,可以认 为 Chla 和 *T*<sub>200 m</sub>与阿根廷滑柔鱼渔业的相关性较 高。在前人的研究中,认为温度是影响阿根廷滑 柔鱼种群变动的主要因素,刘赫威等<sup>[33]</sup>也曾利用 不同水层的温度作为指标建立栖息地模型,证明 200 m 水温的确是影响阿根廷滑柔鱼渔场分布的 最重要原因之—<sup>[32]</sup>。

本研究揭示了巴塔哥尼亚海域中尺度涡的时 空特征与阿根廷滑柔鱼渔场之间的密切关系,评 估了中尺度海洋涡对阿根廷滑柔鱼资源时空分布 的影响,但仍不能全面地解释阿根廷滑柔鱼的资 源变动的原因。在后续的研究中,建议进一步探 究涡旋特征的季节性变化和涡旋不同生命阶段的 变化对阿根廷滑柔鱼渔业的影响,利用 HSI 模型 进一步探究廷滑柔鱼栖息地对不同环境因子的响 应过程。另外,仅用中尺度涡不能全面表征中尺 度海洋过程,可以加入锋面的研究以更好地解释 中尺度海洋过程对阿根廷滑柔鱼渔业资源的影响 原因。

#### 参考文献:

- Liu B L, Chen X J, Tian S Q, et al. Sex maturity of *Illex argentinus* in the high sea waters of Southwest Atlantic[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2008, 17(6): 721-725.
  [刘必林,陈新军,田思泉,等.西南大西洋公海阿根廷滑 柔鱼性成熟的初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 2008, 17(6): 721-725.]
- [2] de la Chesnais T, Fulton E A, Tracey S R, et al. The ecological role of cephalopods and their representation in ecosystem models[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2019, 29(2): 313-334.
- [3] Rosas-Luis R, Navarro J, Sánchez P, et al. Assessing the trophic ecology of three sympatric squid in the marine ecosystem off the Patagonian Shelf by combining stomach content and stable isotopic analyses[J]. Marine Biology Research, 2016, 12(4): 402-411.
- [4] Queirós J P, Phillips R A, Baeta A, et al. Habitat, trophic levels and migration patterns of the short-finned squid *Illex argentinus* from stable isotope analysis of beak regions[J]. Polar Biology, 2019, 42(12): 2299-2304.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability

in action[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 2020.

- [6] Chemshirova I, Hoving H J, Arkhipkin A. Temperature effects on size, maturity, and abundance of the squid *Illex argentinus* (Cephalopoda, Ommastrephidae) on the Patagonian Shelf[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 255: 107343.
- Bazzino G, Quiñones R A, Norbis W. Environmental associations of shortfin squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Northern Patagonian Shelf[J]. Fisheries Research, 2005, 76(3): 401-416.
- [8] Park J, Oh I S, Kim H C, et al. Variability of SeaWiFs chlorophyll-a in the southwest Atlantic sector of the Southern Ocean: strong topographic effects and weak seasonality[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2010, 57(4): 604-620.
- [9] Rodhouse P G K, Pierce G J, Nichols O C, et al. Environmental effects on cephalopod population dynamics: implications for management of fisheries[J]. Advances in Marine Biology, 2014, 67: 99-233.
- [10] Fan X M, Fan W, Tang F H, et al. Research on the variability of Brazil-Malvinas Confluence and its cause[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 86-93. [范秀梅, 樊伟, 唐峰华,等. 巴西暖流和马尔维纳斯寒流交汇点的变动及其影响机制 的探讨[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 86-93.]
- [11] Torres Alberto M L, Bodnariuk N, Ivanovic M, et al. Dynamics of the Confluence of Malvinas and Brazil Currents, and a southern Patagonian spawning ground, explain recruitment fluctuations of the main stock of *Illex argentinus*[J]. Fisheries Oceanography, 2021, 30(2): 127-141.
- [12] Strub P T, James C, Combes V, et al. Altimeter-derived seasonal circulation on the southwest Atlantic shelf: 27°-43°S[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(5): 3391-3418.
- [13] Qi Q H. Oceanic mesoscale processes and regional marine environment and climate security[J]. Ocean Development and Management, 2020, 37(10): 12-20. [齐庆华. 海洋中尺 度过程与区域海洋环境和气候安全[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(10): 12-20.]
- [14] Perelman J N, Ladroit Y, Escobar-Flores P, et al. Eddies and fronts influence pelagic communities across the Eastern Pacific Ocean[J]. Progress in Oceanography, 2023, 211: 102967.
- [15] 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.]

- [16] 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.
- [17] Zhang Y C. The effects of mesoscale eddies on the abundance and distribution of *Neon* flying squid in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023. [张聿琛. 西北太平洋柔鱼渔场对中尺度 涡的响应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.]
- [18] 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.
- [19] Hou J. Extraction of ocean eddy and its relationship with the distribution of *Ommastrephes bartrami* in the Northwest Pacific[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. [侯 杰.西北太平洋涡旋提取及其与柔鱼渔场分布的关系研 究[D]. 上海:上海海洋大学, 2020.]
- [20] Xia Q, Dong C M, He Y J, et al. Lagrangian study of several long-lived Agulhas rings[J]. Journal of Physical Oceanography, 2022, 52(6): 1049-1072.
- [21] Haller G, Hadjighasem A, Farazmand M, et al. Defining coherent vortices objectively from the vorticity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 795: 136-173.
- [22] Pebesma E J. Simple features for R: standardized support for spatial vector data[J]. The R Journal, 2018, 10(1): 439-446.
- [23] 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.
- [24] Mason E, Pascual A, Gaube P, et al. Subregional characterization of mesoscale eddies across the Brazil-Malvinas Confluence[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(4): 3329-3357.
- [25] Aguedjou H M A, Dadou I, Chaigneau A, et al. Eddies in the tropical Atlantic Ocean and their seasonal variability[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(21): 12156-12164.
- [26] McGillicuddy Jr D J. Mechanisms of physical-biologicalbiogeochemical interaction at the oceanic mesoscale[J]. Annual Review of Marine Science, 2016, 8: 125-159.
- [27] 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.

- [28] Tranter D J, Leech G S, Airey D. Edge enrichment in an ocean eddy[J]. Marine and Freshwater Research, 1983, 34(4): 665-680.
- [29] Schmid M S, Cowen R K, Robinson K, et al. Prey and predator overlap at the edge of a mesoscale eddy: Fine-scale, *in situ* distributions to inform our understanding of oceanographic processes[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): article No.921.
- [30] Zhang X, Jing Z Y, Zheng R X, et al. Submesoscale characteristics of a typical anticyclonic mesoscale eddy in Kuroshio Extension[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(6): 31-40. [张旭, 经志友, 郑瑞玺, 等. 黑潮延伸 体海域典型涡旋的次中尺度特征分析[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(6): 31-40.]
- [31] Wang Y, Wang J T, Chen X J, et al. Interannual change of *Illex argentines* abundance and its relationship with sea surface temperature in Falkland Waters[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(5): 109-114. [王越, 汪金涛,陈新军,等. 福克兰海域阿根廷滑柔鱼资源丰度 年间变化与其栖息地海表温度的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(5): 109-114.]
- [32] Liu H W, Yu W, Chen X J, et al. Construction of habitat suitability index model for Argentine shorfin squid *Illex argentinus* based on vertical water temperature at different depths[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(6): 1035-1043. [刘赫威, 余为, 陈新军, 等. 基于不同水层海水温度的阿根廷滑柔鱼栖息地模型构建[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(6): 1035-1043.]
- [33] Shi H M, Fan W, Zhang H, et al. Spatial analysis of fishing intensity for *Illex argentinus* based on fishing vessel tracks[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(6): 1-11. [史慧敏, 樊伟, 张涵, 等. 基于渔船轨迹的阿根廷滑柔鱼捕捞强度 空间分析[J]. 南方水产科学, 2021, 17(6): 1-11.]
- [34] Alemany D, Acha E M, Iribarne O O. Distribution and intensity of bottom trawl fisheries in the Patagonian Shelf Large Marine Ecosystem and its relationship with marine fronts[J]. Fisheries Oceanography, 2016, 25(2): 183-192.
- [35] Artana C, Lellouche J M, Park Y H, et al. Fronts of the Malvinas Current System: surface and subsurface expressions revealed by satellite altimetry, Argo floats, and Mercator operational model outputs[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(8): 5261-5285.

## Analysis of the characteristic statistics of eddies in Patagonia sea and their relationship with the spatial and temporal distribution of Argentine shortfin squid, *Illex argentinus*

ZHANG Lichuan<sup>1</sup>, ZHU Wenbin<sup>2</sup>, ZHU Kai<sup>2</sup>, JIN Pengchao<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1, 3, 4, 5, 6</sup>

- 1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
- 2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Zhoushan 316021, China;
- 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China;
- 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
- 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
- 6. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: Illex argentinus is a short-lived cephalopods species, and its resource abundance were sensitive to environment variation. Mesoscale eddies are the main dynamics in its habitat sea area, which cause the variation of environment. In order to investigate the characteristics of eddies in Patagonia sea area and the relationship between I. argentinus resources and mesoscale eddies in the sea area, The angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA) was utilized to identify mesoscale eddies in Patagonia from 2013 to 2019, and analyze the temporal and spatial characteristics of the eddies in this region. Based on the fishery data of Argentine shortfin squid Illex argentinus and eddy data, the characteristics of the suitable environment within a twofold radius  $(\pm 2R)$  of the anticyclonic and cyclonic eddies were determined, and the relationship between mesoscale eddies and fishery resources was revealed. During the study period, there were 2262 eddies with a complete life cycle, and they were mainly distributed in the Falkland current basin and its vicinity. The number of cyclonic eddies was slightly less than the number of anticyclonic eddies, but the lifespan, radius, velocity, and abundance of fishery resources were higher for cyclonic eddies than for anticyclonic eddies. The abundance of fishery resources was higher at the edge of the twofold radius of the eddies than in the inner area of the eddies, and the high abundance values significantly appeared on the west side of the cyclonic eddies and the northwest and southeast sides of the anticyclonic eddies. The distribution patterns of sea surface temperature, seawater temperature at a depth of 200 m, and chlorophyll-a concentration were consistent with the fishery resource abundance in the area of the twofold radius of the anticyclonic and cyclonic eddies in the fishing ground. Suitable environmental conditions occurred more frequently within gas vortices predominantly along the edges of the cyclonic eddy. These results provide crucial scientific insights into the role of marine mesoscale eddies in ecosystems, while elucidating their impact on fishery resources.

**Key words:** mesoscale eddy; environmental variations; *Illex argentinus*; abundance; Patagonia **Corresponding author:** YU Wei. E-mail: wyu@shou.edu.cn