

DOI: 10.12264/JFSC2023-0079

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

金鹏超¹, 余为^{1, 2, 3, 4, 5}, 武孝慈¹, 张聿琛¹

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

摘要: 茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是短生命周期的头足类种类, 对环境变化极其敏感, 秘鲁外海是茎柔鱼重要的作业渔场, 该海域广泛分布的中尺度涡对其有何影响尚不清晰。本研究基于角动量涡旋检测与追踪算法(angular momentum eddy detection and tracking algorithm, AMEDA)获得的涡旋追踪数据分析了秘鲁外海涡旋的时空分布, 并进一步采用茎柔鱼渔业数据、涡旋追踪数据和环境数据评估中尺度涡及其引起的环境变化对秘鲁外海茎柔鱼资源丰度和分布的影响。结果表明, 秘鲁外海的涡旋主要分布在沿岸海域和 15°S 以南的海域, 存在一定的月间变化, 年际变化不明显。反气旋涡和气旋涡的影响范围划分为内部(0-R)和边缘(R-2R)区域, 反气旋涡中的茎柔鱼丰度优于气旋涡, 涡旋边缘的茎柔鱼丰度高于涡旋内部; 反气旋涡中的适宜环境占比高于气旋涡, 涡旋边缘的适宜环境占比高于涡旋内部。此外, 反气旋涡中相对较低的海表面温度(sea surface temperature, SST)和 50 m 水层温度($T_{50\text{ m}}$)产生了更多的适宜栖息地, 导致反气旋涡中茎柔鱼丰度更高。研究表明, 不同类型涡旋内部和边缘中适宜环境变化存在差异, 进而影响茎柔鱼资源丰度以及空间分布。

关键词: 中尺度涡; 环境变化; 茎柔鱼; 资源丰度; 秘鲁

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)06-0753-12

茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是秘鲁外海重要的经济头足类, 根据 FAO 数据显示, 近 5 年中国捕捞量在 30 万 t 左右, 是我国远洋鱿钓渔业中的重要目标物种。茎柔鱼捕捞量存在明显的年际波动, 主要原因是茎柔鱼作为短生命周期的物种, 海洋环境对其生活史和资源状况存在强烈影响^[1]。当前多数研究主要围绕海水温度等局部的海洋环境要素^[2-3]及大尺度的气候事件^[4]与茎柔鱼资源的关系展开, 缺乏针对海洋动力过程对茎柔鱼的影响的解析。

中尺度涡广泛存在于秘鲁海域^[5], 受其垂直

结构和旋转的影响^[6], 涡旋能够引起上升流或下降流, 导致其内部及其周围海域的垂直水温^[6]和叶绿素^[7]等环境要素发生改变, 进而直接或间接地引起渔场环境的改变。通常, 在科氏力作用下, 气旋涡在中心产生上升流, 造成中心海水温度降低, 也称冷涡; 反气旋涡在边缘产生上升流, 而在中心产生下降流, 造成中心海水温度升高, 也称暖涡。近期的研究表明中纬度海域的长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)、赤道海域茎柔鱼、西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)等物种的资源丰度和空间分布均受到中尺度涡的作用^[8-10]。以往

收稿日期: 2023-04-02; 修订日期: 2023-05-08.

基金项目: 上海市自然科学基金项目(23ZR1427100); 上海市人才发展资金项目(2021078); 上海海洋大学学科创新先导专项; 国家自然科学基金青年基金项目(41906073).

作者简介: 金鹏超(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: 1119853097@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

的研究主要关注海表面高度^[11]、涡旋动能^[3]等海洋中尺度变量与茎柔鱼之间的关系,但这些中尺度变量仅能代表涡旋的存在或者衡量能量大小,不能充分表征不同类型的涡旋,无法探明涡旋对茎柔鱼资源丰度和空间分布的具体影响。

目前对于中尺度涡如何影响秘鲁外海茎柔鱼渔场,仍然缺乏详细的研究。本研究利用基于角动量涡旋检测与追踪算法(angular momentum eddy detection and tracking algorithm, AMEDA)得到的涡旋数据、渔业数据和环境数据,对秘鲁外海涡旋的时空变化规律和基本特征进行统计分析,利用归一化方法,评估了中尺度涡及其引起的海洋环境变化对秘鲁外海茎柔鱼资源丰度和分布的影响,重点关注气旋涡和反气旋涡对茎柔鱼渔场影响的差异及其机制,为可持续的渔业捕捞和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 渔业数据

本研究中茎柔鱼捕捞数据来自上海海洋大学鱿钓技术组,数据范围为 2015—2019 年 9—12 月的,空间范围覆盖了 75°W~95°W、8°S~20°S 主要作业渔场(图 1)。数据内容包括作业位置(经纬度)、作业日期(年、月、日)、捕捞量(单位: t)和捕捞努力量(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^[12]。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°,时间分辨率为 1 d,时间范围为 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日,空间范围为 75°W~95°W、8°S~20°S(图 1)。

已知,水温垂直结构和叶绿素 a 浓度(chlorophyll-a, Chl-a)是影响茎柔鱼生存生长的重要环境因子^[3,13],本研究使用的海表面温度(sea surface temperature, SST)和 50 m 水层温度数据($T_{50\text{ m}}$)来自 CMEMS 的全球海洋集合再分析产品(https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_031/description),空间分辨率为 1/4°,时间分辨率为 1 d。海表面叶绿素浓度数据来自 CMEMS 的全球海洋卫星观测产品(https://data.marine.copernicus.eu/product/OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L3_MY_009_1_07/description),空间分辨率为 4 km,时间分辨率为 1 d。海水温度数据与叶绿素浓度数据被插值为统一的空间分辨率 1/4°。

1.3 研究方法

1.3.1 涡旋的研究方法 本研究采用了 AMEDM 方法^[12]进行涡旋的检测和追踪,该方法可以有效提取涡旋(图 2),可应用于不同空间分辨率的不同速度场,几乎无须对可调参数进行调整,基本使用默认值,能够量化涡旋的动态特征,跟踪到涡旋的移动轨迹并识别出涡旋与涡旋间的合并和分裂事件,已经成功应用于大西洋、地中海等世界多个海域^[14-15]。

本研究利用涡旋生命周期、涡旋半径、涡旋

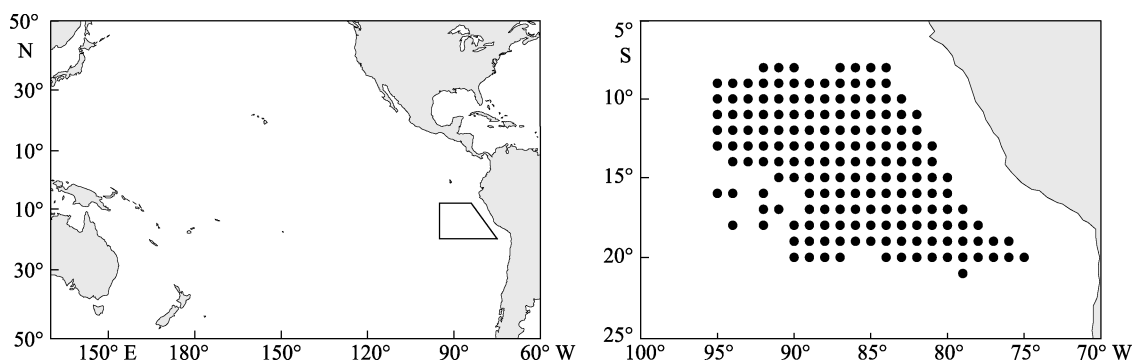


图 1 中国茎柔鱼鱿钓渔船秘鲁海区作业地理位置

Fig. 1 Geographical distribution of Chinese squid-jigging fishery for *Dosidicus gigas* off Peru

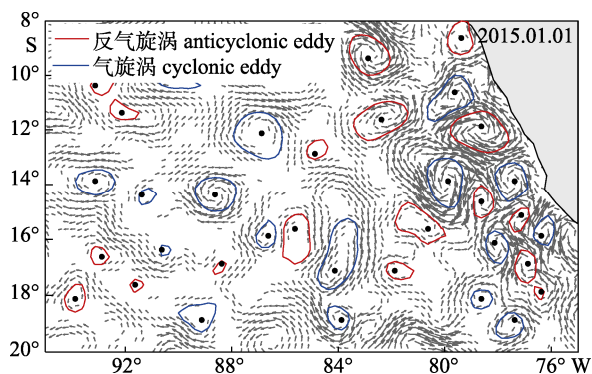


图 2 涡旋检测展示案例

Fig. 2 Demonstrate case of the automatic eddy detection algorithm

旋转速度和涡旋强度等参数来描述涡旋的基本特征量。具体定义及公式如下:

(1) 涡旋生命周期: 涡旋的生命周期定义为涡旋从生成到消亡所持续的时间, 通过涡旋最后被检测到的日期减去涡旋首次被检测到的日期。

(2) 涡旋半径:

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

式中, S 为涡旋覆盖的面积; R 为涡旋半径, 被定义为覆盖相同表面面积的圆的半径, 单位为 km。

(3) 涡旋旋转速度:

涡旋旋转速度定义为涡旋最外层边界的平均海流速度, 单位为 m/s。

1.3.2 涡旋与茎柔鱼资源丰度的关联性分析 作业渔船的产量和资源丰度指示因子 CPUE (单位捕捞努力渔获量, catch per unit effort) 在一定程度上可用来表征海洋经济物种的分布和资源量的变化情况, 将涡旋数量与茎柔鱼丰度指数进行比较, 分析茎柔鱼资源丰度与涡旋的潜在关系。为进一步分析茎柔鱼渔场作业点和不同类型涡旋之间的地理空间关系, 依据渔业数据和涡旋追踪数据, 判定了每个捕捞作业点在作业当天距离最近的反气旋涡和气旋涡, 并计算其与涡心的距离。由于涡旋尺度不一, 本研究引入了归一化相对距离^[10], 并基于该涡旋的半径计算捕捞位置到涡心的归一化相对距离。

距涡心距离的计算公式如下:

$$D = \frac{Z}{R}$$

式中, Z 为捕捞位置到最近的反气旋涡或气旋涡中心的距离, R 为该涡旋半径, D 为作业点与涡旋的归一化相对距离。研究认为涡旋对区域海洋生态的影响范围大致为其 2 倍半径范围^[16], 因此在分析中选取了涡旋 2 倍半径范围内的渔业作业数据。将归一化相对距离按照 0.1 倍半径间隔划分为 20 个区间, 计算每个区间内茎柔鱼的总捕捞量、总捕捞努力量。

纬向和经向的计算公式如下:

$$D_x = \frac{Z_x}{R}$$

$$D_y = \frac{Z_y}{R}$$

式中, Z_x 和 Z_y 为捕捞位置到最近的反气旋涡或气旋涡中心的纬向和经向距离, R 为该涡旋半径, D_x 和 D_y 分别为归一化的纬向和经向相对距离。

本研究中分别对多个反气旋涡和气旋涡内的总捕捞量和总捕捞努力量进行平均, 求得单位涡旋捕捞量和单位涡旋捕捞努力量, 采用单位涡旋捕捞量和单位涡旋捕捞努力量来表征茎柔鱼资源丰度, 分析不同类型涡旋内茎柔鱼资源的空间分布和茎柔鱼捕捞与距涡心距离的变化情况。

1.3.3 涡旋内茎柔鱼适宜环境的变化分析 依据频率分布法, 将各环境因子划分为不同区间, 统计不同区间内捕捞努力量的大小, 据此计算茎柔鱼适宜的环境分布范围(捕捞努力量分布较多的环境), 将捕捞努力量大于 10000 d 作为适宜的环境范围。渔业数据与环境数据通过插值法进行匹配。

为揭示渔场内涡旋引起的海洋环境变化, 本研究建立一个基于涡旋半径的归一化涡心径向距离网格, 代表两倍涡旋半径($\pm 2R$)的范围, 涡旋的半径由覆盖相同面积的圆的半径定义; 对于每个涡旋, 其被检测到的每一天都可由该网格代表; 之后将海洋因子变量插值到每个涡旋的网格中, 再将网格对多个涡旋进行平均^[17]。本研究仅统计了涡旋内有捕捞作业当天的涡旋状态, 以更好地代表影响茎柔鱼渔业的涡旋。

根据频率分布法得到的茎柔鱼适宜环境分布范围, 计算得到每个气旋和反气旋涡内部和边缘的适宜环境占比, 与方法 1.3.2 中类似, 分别对多

个气旋涡和反气旋涡内的适宜环境占比进行平均,求得单位涡旋适宜环境占比,以单位涡旋适宜环境占比来表征不同类型涡旋内的适宜环境的分布情况,分析涡旋内适宜环境分布的差异对于渔业分布可能造成的影响。

2 研究结果

2.1 秘鲁外海涡旋的时空分布

基于涡旋自动检测方法识别并追踪了 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日秘鲁外海茎柔鱼渔场内($8^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$, $75^{\circ}\text{W}\sim 95^{\circ}\text{W}$)的中尺度涡旋。目前有两种常用的定义涡旋数量的方法:拉格朗日法和欧拉法;前者将涡旋的整个生命周期视为一个涡旋,后者则统计每个时刻区域内出现的所有涡旋。在 2015—2019 年间,基于拉格朗日法共追踪到 2143 个中尺度涡,其中气旋涡共 1028 个,反气旋涡共 1115 个,两者数量相差不大。基于欧拉法逐日检测,共统计到 64849 个涡旋,其中气旋涡 33816 个,反气旋涡 31033 个,逐日的气旋涡数量高于反气旋涡。

为探究涡旋活动的潜在年际及季节性变化,按照拉格朗日法统计了各月和各年出现的涡旋数量(图 3)。涡旋数量存在一定的月间差异,1—4 月涡旋数量小幅波动,5—9 月呈上升趋势,9—10 月大幅下降后,10—12 月又在小幅上升;涡旋总数

量的年间变化较小,气旋涡与反气旋涡的数量具有相同的变化趋势。

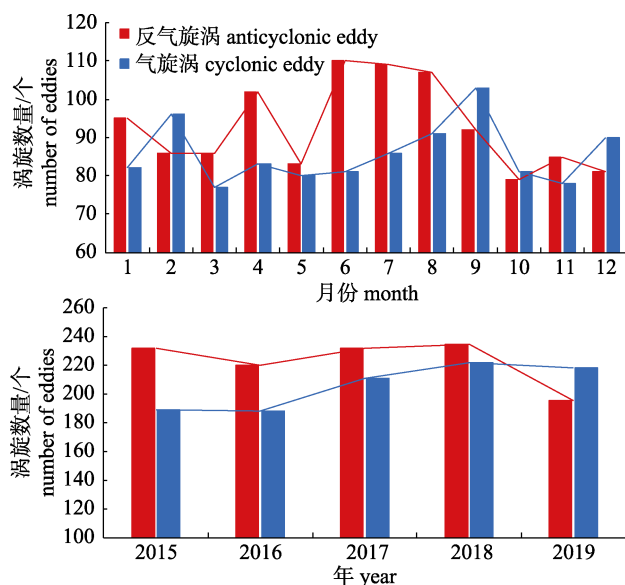


图 3 涡旋数量的月变化和年际变化

Fig. 3 The monthly and interannual variation of eddy numbers

为更清楚了解两种不同性质涡旋的分布情况,将研究区域划分为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的格点,显示了气旋涡与反气旋涡的空间分布(图 4)。两种涡旋的分布相近,涡旋主要分布在秘鲁沿岸海域,在研究区域的北部($8^{\circ}\text{S}\sim 12^{\circ}\text{S}$)分布较少,但也存在一定差异,除沿岸海域外,反气旋涡在 $16^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 范围集中出现,气旋涡则在 $13^{\circ}\text{S}\sim 16^{\circ}\text{S}$ 更低纬度集中出现。

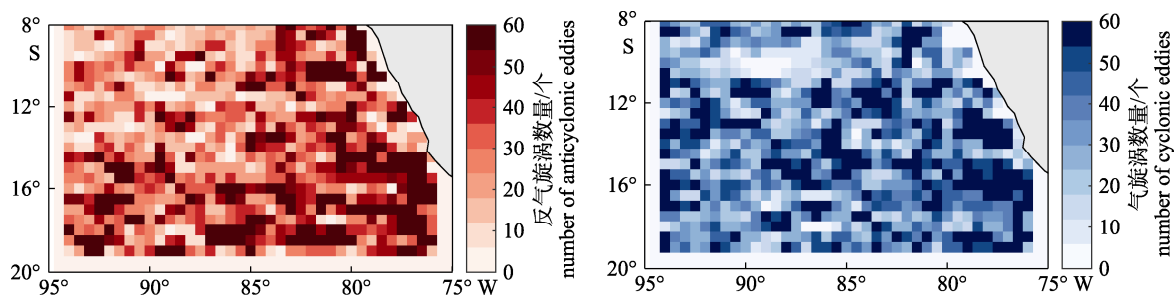


图 4 涡旋数量在 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average eddy number over $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ bins

图 5a 显示,随着生命周期的增加,涡旋数量急剧减小,绝大多数涡旋的生命周期短于 100 d。其中气旋涡平均生命周期为 35.28 d,反气旋涡平均生命周期为 30.37 d。生命周期短于 100 d 的涡旋中反气旋涡占比略高(图 5d),而生命周期大于

100 d 的生命周期涡旋中气旋涡的占比更高。涡旋半径的频率分布基本一致(图 5b),其峰值位于约 50 km 处。气旋涡和反气旋涡的平均半径分别为 58.82 km 和 61.57 km。在半径小于 50 km 的涡旋中,反气旋涡占多数,而在半径大于 50 km 的涡

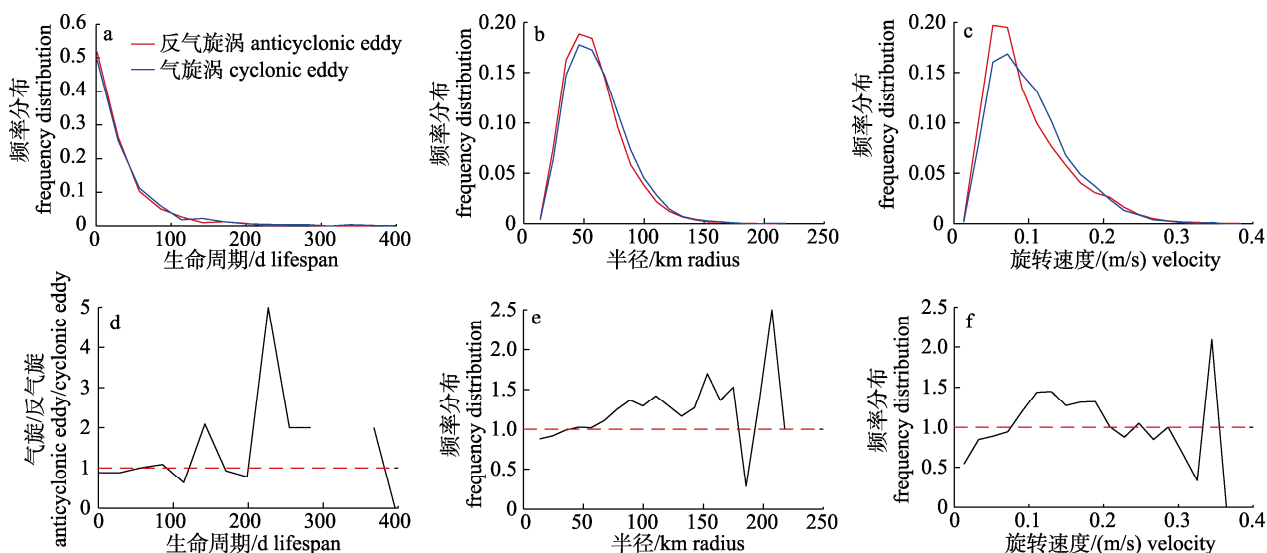


图 5 不同生命周期、半径和旋转速度的气旋涡和反气旋涡的频率分布及数量比值

a-c: 气旋涡与反气旋涡的概率密度分布; d-f: 气旋涡与反气旋涡的数量比值。

Fig. 5 Frequency distribution and the number ratio of cyclonic eddies and anticyclonic eddies with different lifespan, radius and rotation speeds

a-c: probability density distribution of cyclonic and anticyclonic eddies; d-f: ratio of the number of cyclonic eddies to the number of anticyclonic eddies.

旋中, 气旋涡占优势。气旋涡与反气旋的速度频率分布呈偏态分布, 气旋涡的旋转速度稍高于反气旋涡, 气旋涡为 0.1026 m/s, 反气旋涡则为 0.0974 m/s, 对于旋转速度大于 0.1 m/s 的涡旋, 气旋涡数量占优势。

2.2 茎柔鱼资源丰度与涡旋的关系

结果显示, CPUE 有明显的年间变化, 月间变化不明显(图 6)。CPUE 在 2015—2018 年呈逐渐降低的趋势, 到 2018 年达到最低的 2.86 t/d, 在 2019 年又上升, 而 9—12 月的月间变化基本呈上升趋势。涡旋数量具有明显的年间变化, 月间变

化不明显。2015—2019 年涡旋数量呈波动分布, 2015 年涡旋数量最高, 达到了 158 个, 2016 年涡旋数量最低为 116 个。涡旋数量在月间变化上表现为 9—10 月明显下降, 10—12 月逐月上升。

研究表明, 涡旋数量与 CPUE 的年间变化呈正相关, 月间变化呈负相关(图 6)。其中 CPUE 与涡旋数量年间变化的相关系数为 0.47, 月间变化的相关系数为-0.37, 相关性均不显著。

反气旋涡和气旋涡 2 倍半径内茎柔鱼单位涡旋捕捞量和单位涡旋捕捞努力量见图 7。比较涡旋的内部和边缘区域发现, 反气旋涡 1.5 倍半径

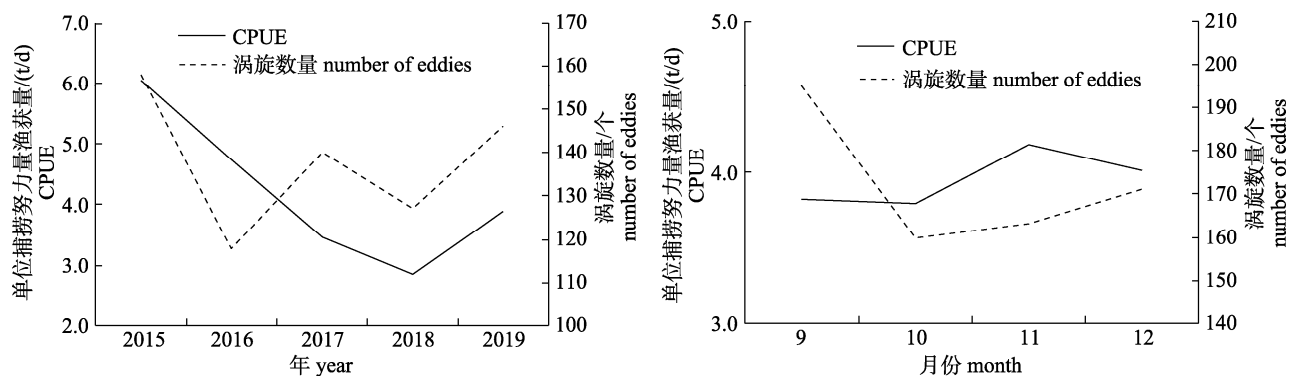


图 6 涡旋数量与 CPUE 的年间变化、月间变化对比

Fig. 6 Comparison of annual and monthly variations in eddy number and CPUE

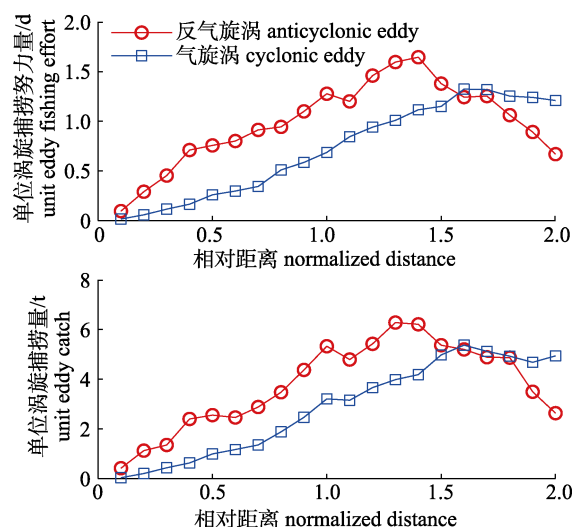


图 7 茎柔鱼资源丰度与距涡心距离的关系

Fig. 7 The relationship between abundance of jumbo flying squid and the distance from fishing position to the anticyclonic (cyclonic) eddy center

内的单位涡旋捕捞努力量和单位涡旋捕捞量均随着距涡心距离的增加而增大,随后呈缓慢下降趋势,气旋涡边缘($R \sim 2R$)的茎柔鱼资源丰度高于内部($0 \sim R$);气旋涡 2 倍半径内的单位涡旋捕捞努力量和单位涡旋捕捞量均随着距涡心距离的增加而增大,气旋涡边缘的茎柔鱼资源丰度明显高于内部。另外,发现在 $0 \sim 1.5 R$ 内,反气旋涡内部及边缘的茎柔鱼单位涡旋捕捞量和单位涡旋捕捞努力量明显高于气旋涡; $1.5 \sim 2 R$ 内,气旋涡边缘的单位涡旋捕捞量和单位涡旋捕捞努力量稍高于反气旋涡边缘。

为进一步验证茎柔鱼与不同类型涡旋的关系,本研究分析了茎柔鱼在空间上的分布情况。图 8 左列显示了反涡旋 2 倍半径范围内的茎柔鱼分布情况。 $0 \sim R$ 范围内,茎柔鱼分布较为均匀,反气旋涡内的单位涡旋捕捞努力量集中在 $0.02 \sim 0.06 d$ 之间,单位涡旋捕捞量集中在 $0.1 \sim 0.25 t$ 之间; $R \sim 2R$ 范围内,茎柔鱼分布相对集中,高丰度的区域主要出现在涡心的东南方向,最高的单位涡旋捕捞努力量和单位涡旋捕捞量数值也出现在该方向上,而其他方向上的分布则较为稀疏,甚至在涡心的西北方向存在零值。图 8 右列显示了气旋涡 2 倍半径范围内的茎柔鱼分布情况。 $0 \sim R$ 范围内,茎柔鱼资源丰度相对较低,该范围内的单位涡旋捕捞努力量基本都小于 $0.02 d$,单位涡旋捕捞量集

中在 $0 \sim 0.1 t$ 之间; $R \sim 2R$ 范围内,茎柔鱼分布相对分散,集中出现在涡心的西部,单位涡旋捕捞量也呈现类似的分布,气旋涡边缘的资源丰度明显高于气旋涡内部。

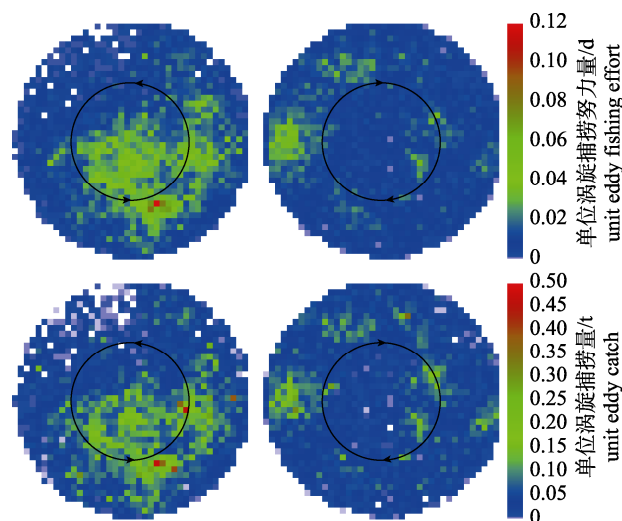


图 8 单位涡旋捕捞努力量和单位涡旋捕捞量空间分布
左列为反气旋涡,右列为气旋涡,涡旋内部($0 \sim R$)和边缘($R \sim 2R$)被黑色实线分开。

Fig. 8 Spatial distribution of unit eddy fishing effort and unit eddy catch

Left column is anticyclonic eddies. Right column is cyclonic eddies. The eddy core ($0 \sim R$) and periphery ($R \sim 2R$) are separated by the solid black line.

比较不同类型涡旋中的茎柔鱼资源丰度空间分布发现, $0 \sim R$ 范围内,反气旋涡中的茎柔鱼资源丰度显著高于气旋涡内部; $R \sim 2R$ 内,反气旋涡和气旋涡内的资源丰度空间分布不同,反气旋涡内集中,气旋涡内相对分散。

为更直接地比较不同类型涡旋内部和边缘的茎柔鱼丰度差异,研究统计了内部和边缘内茎柔鱼的分布情况(表 1)。结果显示,在涡旋内部,反气旋涡中的单位涡旋捕捞努力量和单位捕捞量是气旋涡内的两倍,反气旋涡内部的茎柔鱼资源丰度显著高于气旋涡内;而在涡旋边缘范围内,反气旋涡和气旋涡中茎柔鱼丰度差异相对较小,反气旋涡中的茎柔鱼丰度稍微高于气旋涡,单位涡旋捕捞努力量和单位捕捞量均高出 8% 左右。总体来说,比较茎柔鱼丰度在不同类型涡旋 2 倍半径范围内的一维和二维空间分布,发现反气旋涡中的茎柔鱼资源丰度均优于气旋涡。

表 1 涡旋内外茎柔鱼丰度情况统计

Tab. 1 Statistics on the abundance of jumbo flying squid in the core and periphery of eddies				
涡旋类型 eddy type	0-R		R-2R	
	单位涡旋捕捞努力量/d unit eddy fishing effort	单位涡旋捕捞量/t unit eddy catch	单位涡旋捕捞努力量/d unit eddy fishing effort	单位涡旋捕捞量/t unit eddy catch
反气旋涡 anticyclonic eddy	7.34	26.35	12.4	49.15
气旋涡 cyclonic eddy	3.04	12.36	11.4	45.00

2.3 不同类型涡旋内外适宜环境差异

图 9 为不同环境因子区间内捕捞努力量的频率分布。SST 中, 捕捞努力量主要集中在 16~21 ℃ 的范围内, 适宜范围为 17~19 ℃; $T_{50\text{ m}}$ 中, 捕捞努力量主要集中在 16~20 ℃ 的范围内, 适宜范围为

17~18 ℃; Chl-a 中, 捕捞努力量主要集中在 0.1~0.8 mg/m^3 的范围内, 适宜范围为 0.2~0.4 mg/m^3 。

图 10 显示了涡旋内部和边缘 SST、 $T_{50\text{ m}}$ 和 Chl-a 的平均态分布模式。反气旋涡内部和边缘的 SST 和 $T_{50\text{ m}}$ 差异较小, 边缘温度略高于内部, 气旋涡中的 SST 和 $T_{50\text{ m}}$ 也呈现相似分布模式。另外, 反气旋内部和边缘的 SST 和 $T_{50\text{ m}}$ 均小于气旋涡, 均低于气旋涡 0.5 ℃ 左右。Chl-a 在涡旋内部或边缘的分布情况基本一致, 涡旋边缘的 Chl-a 浓度略大于内部的浓度, 反气旋涡内部和边缘的 Chl-a 浓度略大于气旋涡。

直方图显示了涡旋内部和边缘环境的总体分布情况, 红色柱体表示适宜环境的分布(图 10), 并据此计算了单位涡旋适宜环境占比(表 2)。结果显示涡旋中单位涡旋适宜 SST 占比最大, 单位涡旋适宜 $T_{50\text{ m}}$ 占比最小。比较不同类型涡旋内部和边缘的单位涡旋环境适宜占比, 发现反气旋涡旋内部和边缘的单位涡旋 SST 占比和单位涡旋 $T_{50\text{ m}}$ 占比均显著大于气旋涡中的情况, 反气旋涡和气旋涡中单位涡旋适宜 Chl-a 占比基本一致, 两者相差不到 1%。综合以上 3 个环境因子的单位涡旋适宜环境占比来看, 反气旋涡中具有更加优越的生境, 这可能是造成茎柔鱼更容易聚集在反气旋中的主要原因。另外, 涡旋边缘有更大的单位涡旋适宜环境占比, 涡旋边缘的适宜环境面积大于涡旋内部, 可以吸引和容纳更多的生物聚集。

3 讨论

本研究利用 AMEDA 涡旋自动追踪算法, 对秘鲁外海内的海洋中尺度涡的分布及物理特征进行了统计分析。2015—2019 年间在秘鲁外海共计追踪到 2143 个涡旋, 其中气旋涡 1082 个, 反气旋

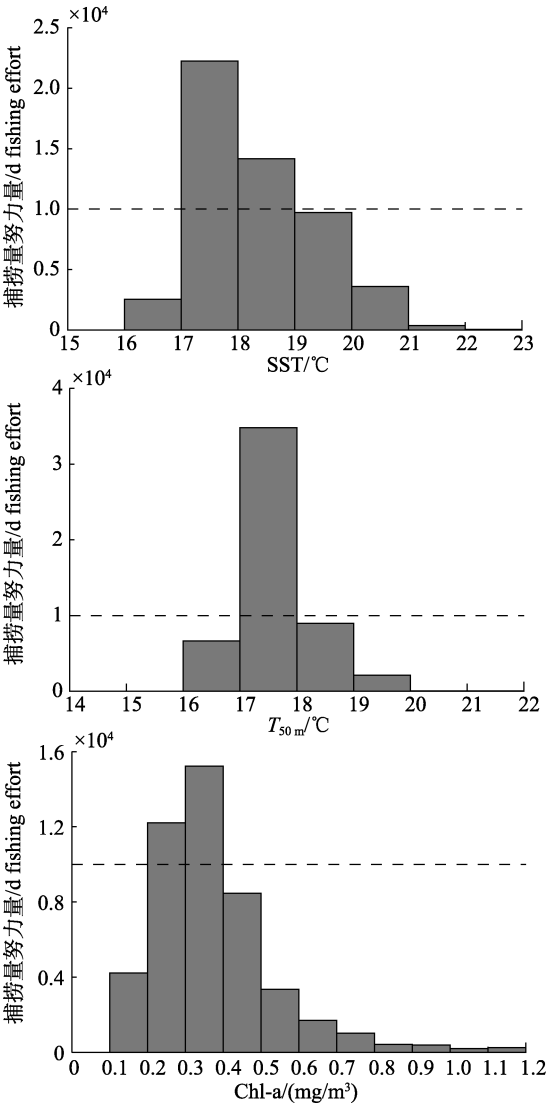


图 9 捕捞努力量的分布与不同环境因子的关系
Fig. 9 Fishing effort distributions in relation to different environment variables

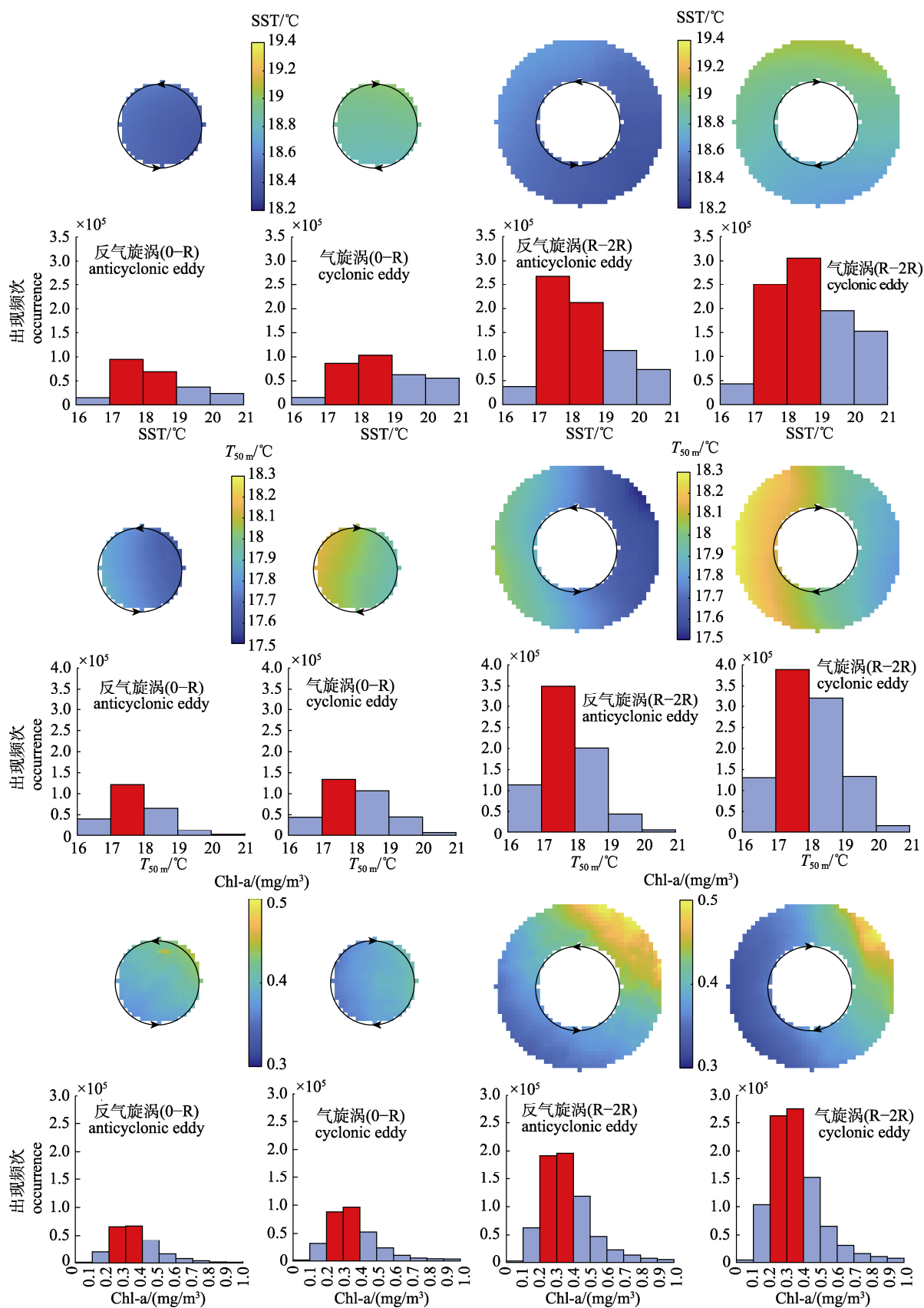


图 10 与渔业相关的涡旋中环境因子的平均态分布和直方图分布

Fig. 10 Averaged state distributions and histogram distributions of environmental factors in fisheries-related eddies

表 2 涡旋内外单位涡旋适宜环境占比情况统计
Tab. 2 Statistics of unit eddy suitable environment percentage in the core and periphery of eddies

环境变量 environmental variable	0-R		R-2R	
	反气旋涡/% anticyclonic eddy	气旋涡/% cyclonic eddy	反气旋涡/% anticyclonic eddy	气旋涡/% cyclonic eddy
SST	16.38	13.97	48.10	40.87
T _{50 m}	12.20	9.84	35.01	28.57
Chl-a	13.31	13.60	38.82	39.50

涡 1115 个。研究区域内追踪到的气旋涡和反气旋涡的数量相差不大,逐日的涡旋数量中反气旋涡多于气旋涡,该数量规律与前人的观测结果基本一致^[5,18],但由于没有对追踪到的涡旋数据进行条件过滤,因此涡旋数量较其他研究偏大。以往的研究提出由于秘鲁-赤道洋流系统与海岸线的相互作用以及较强的上升流影响^[19],秘鲁海域的涡旋多在沿海海岸产生,并逐渐向西进行移动,在 15°S 以南的位置出现频率更高^[5,20-21],本研究也证实了这一结果。整体来看,探测到的涡旋集中分布在沿海海岸和 15°S 以南的海域(图 4),气旋涡和反气旋涡都符合这一分布特征,生活在这一海域内的茎柔鱼更容易受到涡旋的影响。

气旋涡与反气旋涡的统计特征也存在一定的差异。涡旋的平均生命周期为 32.5 d,气旋涡和反气旋涡的平均生命周期分别为 35.28 d 和 30.37 d,气旋涡平均存在时间更长一点,这一结果也与以往研究结果大体一致^[5,22]。气旋涡的平均半径略小于反气旋涡的平均半径,但气旋涡的旋转速度高于气旋涡,在长周期、大尺度的涡旋中气旋涡占比高,旋转速度一般能够衡量涡旋的强度,意味着气旋涡的强度更高,作用时间与范围更广。总体来看,不同类型涡旋的半径和速度等特征变量存在一定差异,可能对茎柔鱼资源丰度和分布造成不同影响。

本研究发现涡旋数量的年间和月间分布与茎柔鱼资源丰度的相关性均不显著。从年间来看,2015—2016 年和 2017—2019 年间,涡旋数量变化与 CPUE 存在相似的变化趋势,但 2016—2017 年间呈相反的变化趋势;从月间来看,10—12 月涡旋数量呈上升趋势,CPUE 也有相似的上升趋势,9—10 月涡旋数量变化呈现下降趋势,同时

CPUE 变化较小,涡旋数量变化和 CPUE 变化关系不明显。涡旋数量的多少可以一定程度上反映涡旋的活跃程度^[5],但无法完全解释涡旋对于海洋环境及生物的影响。有研究发现气旋涡和反气旋涡可以通过自身的旋转和水平移动对周围环境造成影响,引起生物栖息地环境的改变,进而对生物资源丰度产生不同的影响^[8],不同类型涡旋影响的差异可能是造成涡旋数量与茎柔鱼资源丰度变化趋势不一致的原因之一。此外,处于不同生命周期阶段内的涡旋对于生物的影响也存在差异^[9]。除了涡旋数量,其他涡旋分布特征与茎柔鱼资源丰度的关系有待进一步探究,如不同类型涡旋的数量、涡旋半径、涡旋生命周期等。

通常认为,气旋涡为高初级生产力的区域,而反气旋涡则是贫瘠的“海洋沙漠”^[23],但越来越多的研究表明,由于反气旋引起的局部环境条件和摄食条件的变化,反气旋涡比气旋涡更利于形成高丰度渔区。Xing 等^[8]将全球捕捞活动大数据与卫星观测的中尺度涡数据结合起来,发现中纬度海域捕捞活动更加频繁地聚集在反气旋涡核心而远离气旋涡核心;Zhang 等^[10]利用栖息地适宜性指数(HSI)模型,分析了 2009—2018 年西北太平洋中尺度涡引起的柔鱼渔场的环境变化及其对柔鱼丰度的影响,发现柔鱼集中分布在近表层温度较高的反气旋暖核及附近。本研究的分析结果也得到相同结论。通过分析茎柔鱼捕捞与距涡心距离的变化情况(图 7)和涡旋内茎柔鱼资源的空间分布关系(图 8),发现反气旋涡和气旋涡周围茎柔鱼的单位涡旋捕捞努力量和单位涡旋捕捞量表现出明显差异。首先,反气旋涡内部的作业次数、产量均高于气旋涡内;其次,反气旋涡边缘的茎柔鱼资源分布集中在涡心的东南部方向,气旋涡边缘的茎柔鱼资源分布相对分散,反气旋涡边缘整体的资源丰度高于气旋涡边缘的丰度。最近,在一项关于北太平洋副热带环流区域中上层鱼类与涡旋关系的研究中,发现随着作业点到涡心距离的增加,反气旋涡中旗鱼的出现几率呈先增加后缓慢下降趋势,在气旋涡中的出现几率呈上升趋势,0~1.5 R 范围内反气旋涡中的出现概率始终高于气旋涡^[24]。本研究的结果显示茎柔鱼在涡旋

中存在相同的分布规律。

与以往发现的涡旋分布模式不同^[6], 本研究结果显示与秘鲁外海茎柔鱼渔场相关的反气旋涡中的表层和近表层水温低于气旋涡。本研究将不同尺度的涡旋进行归一化处理并基于涡旋存在当天的环境数据进行插值处理, 得到归一化后的涡旋环境分布, 该方法被广泛运用在涡旋的环境研究中^[16-17]。涡旋的时空分布决定了涡旋当天的环境分布, 秘鲁外海的水温整体上呈现北高南低、西高东低的分布模式^[20], 与渔场相关的反气旋涡比气旋涡更靠近沿海海域, 出现的纬度更高, 这意味着反气旋涡所处的海域水温相对较低。另外, 与其他海域不同, 秘鲁外海的反气旋涡核心之上存在近表层的冷水团, 造成反气旋涡涡心表层和近表层水温相对冷的情况出现, 仅用表层或者近表层温度难以识别反气旋涡^[6,25]。同时有研究表明, 由于反气旋涡引起的障碍层加厚, 最终在反气旋涡和气旋涡内均发现了海表温距平值小于 0 的情况^[26], 因此在反气旋中的平均 SST 和 $T_{50\text{ m}}$ 低于气旋涡是合理的。

表 2 显示, 反气旋涡的内部和边缘的适宜环境占比均优于气旋涡, 反映了反气旋涡中的生境是优于气旋涡的, 更有利于茎柔鱼的生存, 这一结果也从环境上解释了茎柔鱼在反气旋涡中丰度更高和分布更聚集的原因。适宜叶绿素占比的分布在不同涡旋中的差异不大, 因此推断反气旋涡中相对较低的表层和近表层温度产生了更多的适宜栖息地是反气旋涡中茎柔鱼丰度高的主要原因。茎柔鱼作为昼夜垂直迁移的生物, 茎柔鱼一般生活在 0~200 m 水深范围内, 白天栖息在较深的水域中, 在夜晚则上浮到近表层进行摄食活动^[27], 水温能够直接影响茎柔鱼的资源分布^[28], 同时也会通过影响其猎物的分布间接影响其分布情况^[29-30], 以往的研究也表明近表层的水温对茎柔鱼的资源分布起到关键作用^[13,31]。

本研究通过单位涡旋适宜环境占比初步探明了反气旋涡引起的近表层水温变化更有利于茎柔鱼的聚集, 形成高丰度的茎柔鱼渔区, 但仍不能全面地解释茎柔鱼在不同类型涡旋内部和边缘分

布的现象, 未来可以利用 HSI 模型、广义加性模型等物种分布模型来进一步验证这一分布现象。另外, 仅有表层和近表层的水温不足以显示涡旋的垂直结构变化, 以后可以加入更深水层的水温和溶解氧等环境因子, 并通过涡旋的三维空间分布更好地比较不同类型涡旋内的环境分布差异。

参考文献:

- [1] Nigmatullin C M, Nesis K N, Arkhipkin A I. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae)[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 9-19.
- [2] Yu W, Chen X J, Zhang Y. Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters[J]. Journal of Marine Systems, 2019, 194: 41-51.
- [3] Fang X N, He Y, Yu W, et al. Spatio-temporal distribution of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru and differences in the effects of environmental conditions[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(5): 658-672. [方星楠, 何妍, 余为, 等. 秘鲁外海茎柔鱼栖息地时空分布及对环境因子的响应差异[J]. 中国水产科学, 2021, 28(5): 658-672.]
- [4] Yu W, Yi Q, Chen X J, et al. Climate-driven latitudinal shift in fishing ground of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(12): 3531-3550.
- [5] Chaigneau A, Gizolme A, Grados C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 106-119.
- [6] Chaigneau A, Le Texier M, Eldin G, et al. Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(11025): 1-16.
- [7] Dufois F, Hardman-Mountford N J, Greenwood J, et al. Anticyclonic eddies are more productive than cyclonic eddies in subtropical gyres because of winter mixing[J]. Science Advances, 2016, 2(5): e1600282.
- [8] Xing Q, Yu H, Wang H, et al. Mesoscale eddies modulate the dynamics of human fishing activities in the global mid-latitude ocean[J]. Fish and Fisheries, 2023, 24(4): 1-17.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] Wen J, Gong J W, Li T, et al. Spatio-temporal variations in the habitat of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru under anomalous climate conditions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(10): 92-99. [温健, 贡静雯, 李婷, 等. 异常气候条件下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的时空变动[J]. *海洋学报*, 2020, 42(10): 92-99.]
- [12] 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.
- [13] Yi Q, Chen X J, Yu W, et al. A comparison of habitats of *Dosidicus gigas* in the fishing ground off Chile and Peru based on information gain technique[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(2): 272-278. [易倩, 陈新军, 余为, 等. 基于信息增益技术比较分析智利和秘鲁外海茎柔鱼渔场环境[J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(2): 272-278.]
- [14] Aroucha L C, Veleza D, Lopes F S, et al. Intra-and inter-annual variability of North Brazil current rings using angular momentum eddy detection and tracking algorithm: observations from 1993 to 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(12): e2019JC015921.
- [15] Garreau P, Dumas F, Louazel S, et al. High-resolution observations and tracking of a dual-core anticyclonic eddy in the Algerian Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(12): 9320-9339.
- [16] 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.
- [17] Gaube P, Barceló C, McGillicuddy D J Jr, et al. The use of mesoscale eddies by juvenile loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the southwestern Atlantic[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(3): e0172839.
- [18] Chaigneau A. Mean surface circulation and mesoscale turbulent flow characteristics in the eastern South Pacific from satellite tracked drifters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C5): C05014.
- [19] Pizarro O. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile Undercurrent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): 1581.
- [20] Penven P. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C10): C10021.
- [21] Chaigneau A. Eddy characteristics in the eastern South Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C6): C06005.
- [22] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [23] 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.
- [24] Arostegui M C, Gaube P, Woodworth-Jefcoats P A, et al. Anticyclonic eddies aggregate pelagic predators in a subtropical gyre[J]. *Nature*, 2022, 609(7927): 535-540.
- [25] Colas F, McWilliams J C, Capet X, et al. Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(1): 509-529.
- [26] He Q, Zhan H, Cai S. Anticyclonic eddies enhance the winter barrier layer and surface cooling in the Bay of Bengal[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(10): e2020JC016524.
- [27] Sakai M, Tsuchiya K, Mariategui L, et al. Vertical migratory behavior of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off Peru: Records of acoustic and pop-up tags[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2017, 51(2): 171-179.
- [28] Yu W, Chen X J. Ocean warming-induced range-shifting of potential habitat for jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. *Fisheries Research*, 2018, 204: 137-146.
- [29] Cao L L, Li Q Y, Liu B L. Preliminary analysis on the composition of fish and cephalopod in diet of *Dosidicus gigas* in the high sea of Eastern Pacific Ocean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4515-4522. [操亮亮, 力清影, 刘必林. 东太平洋公海茎柔鱼饵料中鱼类和头足类组成初步分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4515-4522.]
- [30] Stewart J S, Hazen E L, Bograd S J, et al. Combined climate- and prey-mediated range expansion of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*), a large marine predator in the California Current System[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 1832-1843.
- [31] Xu B, Chen X J, Tian S Q, et al. Effects of El Niño/La Niña on distribution of fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(5): 696-707. [徐冰, 陈新军, 田思泉, 等. 厄尔尼诺和拉尼娜事件对秘鲁外海茎柔鱼渔场分布的影响[J]. *水产学报*, 2012, 36(5): 696-707.]

Analysis of the spatial and temporal distribution of eddies off Peru and their relationship with the abundance of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*

JIN Pengchao¹, YU Wei^{1, 2, 3, 4, 5}, WU Xiaoci¹, ZHANG Yuchen¹

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

Abstract: *Dosidicus gigas*, a short-lived cephalopod species, is extremely sensitive to environmental changes. The waters off Peru are an important fishing ground for *D. gigas*; nonetheless, mesoscale eddies are ubiquitous throughout this region. However, the impacts of eddies off Peru on *D. gigas* remain unclear. In this study, we first analyzed the spatial and temporal distribution of eddies off Peru using an angular momentum eddy detection and tracking algorithm (AMEDA) based on an eddy tracking dataset; we then used fishery data, an eddy tracking dataset, and environmental data to evaluate the impacts of mesoscale eddies and eddy-induced changes in the environmental conditions on the abundance and distribution of *D. gigas* off Peru. It was found that eddies off Peru were primarily distributed in the coastal waters and south of 15°S, with some inter-monthly variability; nonetheless, interannual variability was not significant. The influence range of the anticyclonic and cyclonic eddies was divided into internal (0–R) and marginal (R–2R) regions. The corresponding analysis showed that the abundance of *D. gigas* in the anticyclonic eddy regions was higher than that in the cyclonic eddy regions; further, the abundance of *D. gigas* at the edge of the eddies was higher than that in the center of the eddies. Correspondingly, the percentage of suitable environments in the anticyclonic eddies was higher than that in the cyclonic eddies, and the percentage of suitable environments at the edges of the eddies was higher than that in the center. In addition, the relatively lower sea surface temperature (SST) and 50 m water temperature ($T_{50\text{ m}}$) in the anticyclonic eddies yielded more suitable habitats, leading to a high abundance of *D. gigas* at anticyclonic eddy sites. Our results suggested that the variation of suitable environments in the interior and edges of different types of eddies affects the abundance and spatial distribution of *D. gigas*.

Key words: mesoscale eddy; environmental variations; *Dosidicus gigas*; abundance; Peru

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