

黑潮-亲潮交汇区中上层渔获量变动对涡旋的响应

苏日昇¹, 魏永亮^{1,2}, 唐泽艳³, 庞邓连¹, 张春玲¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 自然资源部东海发展研究院, 上海 201306)

摘要: 海洋中尺度过程对渔场空间变动的影响是渔业资源评估的重要内容。为了阐明黑潮-亲潮交汇区(145°E~165°E和35°N~45°N)渔场资源丰度对中尺度涡的响应关系, 利用上海海洋大学“淞航”号远洋综合调查船2021—2023年6—8月西北太平洋调查航次中上层拖网渔获产量和卫星高度计数据, 研究了渔获密度与环境因子和涡旋的关系。结果显示, 海水温度和叶绿素a质量浓度与渔场渔获密度分布在空间上显著相关, 二者主导中上层渔场资源丰度, 40°N以北海域平均渔获产量较高, 40°N以南渔获产量偏低。气旋涡1~2倍半径内叶绿素a质量浓度正异常显著, 反气旋涡叶绿素a质量浓度东北部正异常, 其余方向均减少; 涡旋2倍半径范围内, 鱼群更偏向于气旋涡南部和反气旋北部聚集。气旋涡虽然是营养性涡旋, 但其伴随的上升流导致水温过低, 不利于鱼群聚集。黑潮-亲潮交汇区海洋生物倾向于在气旋涡南部和反气旋北部聚集。本研究可为西北太平洋短期的渔情预报和渔场重心预测提供科学依据, 而黑潮流轴的年际动态差异引起的渔场变动仍需进一步研究。

关键词: 中尺度涡; 渔场; 资源丰度; 环境变化; 黑潮-亲潮交汇区

中图分类号: S 932

文献标志码: A

中尺度涡主要由非线性涡旋组成^[1-2]。涡旋区易诱发上升流和下降流, 将流体中的盐、二氧化碳、溶解氧和营养物质等进行水平垂直运输^[3], 它们是跨尺度动力海洋学的重要组成部分, 在与海气相互作用方面也有重要的意义^[4]。

西北太平洋受高温高盐的黑潮暖流与低温低盐的亲潮寒流的共同作用, 在大洋中形成巨大的锋面和中尺度涡, 温盐梯度变化迅速, 形成海洋生物饵料丰富、渔业资源产量高的渔场^[5]。特殊的海洋环境也对西北太平洋渔业资源产生了影响, 气候变化导致海水温度、黑潮流场和海洋生态系统的变化, 并且海洋生物对环境的变化极为敏感, 这对渔业资源的生存和繁殖条件造成了一定程度的影响。因此, 开展西北太平洋渔业资源动态监测及海水环境要素变动的研究对渔场分布尤为重要。

中尺度涡活动强烈影响海水理化要素, 进而

影响渔业资源分布。气旋涡内叶绿素a质量浓度通常表现出正异常, 而反气旋涡被认为是“低营养”涡旋^[6]。有研究^[7]发现, 黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)和大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)在海面高度和温度均较低的气旋涡处有更高的渔获产量; 也有研究^[8-11]表明, 西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)、茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)、剑鱼(*Xiphias gladius*)和长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)等更趋向于反气旋涡内的温暖水体。涡旋活动与渔场分布关系密切, 但不同的物种受涡旋的影响各不相同, 因此在探究涡旋生态效应时, 将物种结合研究, 能更好地分析出鱼群大体趋向。

虽然诸多研究是关于西北太平洋渔业资源与环境因子和中尺度涡的关系, 但往往是基于单一物种, 并且目前关于西北太平洋海域的涡旋及其三维特征对渔业资源丰度空间分布的影响机

收稿日期: 2024-04-26

修回日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(41976174, 41606196); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)专项(D-8025-23-1002)

作者简介: 苏日昇(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中尺度涡旋生态效应。E-mail: susheng202202@163.com

通信作者: 魏永亮, E-mail: yl-wei@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

制仍不清楚。为此,利用2021—2023年6—8月上海海洋大学“淞航”号西北太平洋中上层拖网数据,探明海水环境要素及中尺度涡对黑潮-亲潮交汇区渔业资源密度和空间分布的影响,以期为短期的渔情预报和渔场重心预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 渔业数据及渔场区域

本研究所用渔业数据来源于上海海洋大学“淞航”号远洋综合调查船西北太平洋调查航次中上层拖网数据,时间范围为2021—2023年6—8月,作业区域为145°E~165°E和35°N~45°N(图1),拖网作业深度为20~50 m。数据主要包括作业站位、作业日期、捕捞量和渔获密度。渔获密度即拖网捕捞1 km²海域所捕获的样品质量,计算公式^[12]:

$$d = \frac{c}{a} \quad (1)$$

式中: d 为渔获密度,kg/km²; c 为渔获率,kg/h; a 为每小时的扫海面积,km²/h。

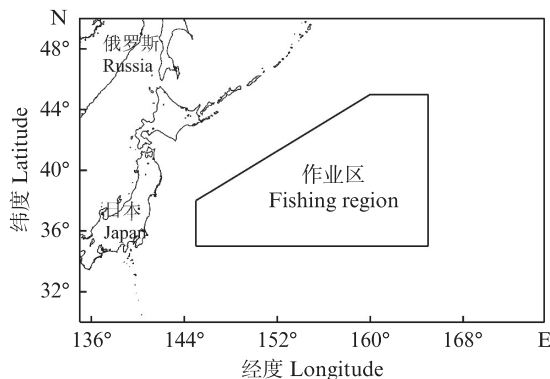


图1 上海海洋大学“淞航”号拖网作业区域
Fig. 1 Trawling fishing region of "Songhang" of Shanghai Ocean University

1.1.2 环境数据

本研究选取海表面温度(Sea surface temperature, SST)、叶绿素a质量浓度(Chlorophyll-a mass concentration, *Chl.a*)和混合层深度(Mixed layer depth, MLD)数据用于渔场环境分析研究,海面高度异常(Sea level anomaly, SLA)和表层流场数据进行中尺度涡探测与追踪研究,风场数据用于分析海水垂向速率。

海表面 *Chl.a* 数据来源于哥白尼海洋环境观

测服务中心(The Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)官方网站(<https://marine.copernicus.eu/>)的卫星数据最优插值产品(OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L4_NRT_009_102),时间分辨率为1 d,空间分辨率为4 km×4 km。SST数据来源于全球海洋集合再分析产品(GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024),时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.083°×0.083°,在后续表层 *Chl.a* 和 SST 结合分析中将空间分辨率插值设为4 km×4 km。海水深层温度、*Chl.a* 和 MLD 数据均来源于CMEMS的全球海洋集合再分析产品,时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.25°×0.25°,垂向0.5~5 902 m,分为不等间隔的75层。

风场数据来自欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)提供的ERA5再分析数据,采用数据为海表面10 m处的经向和纬向分量,时间范围为2021年1月1日至2023年12月31日,时间和空间分辨率分别为6 h和0.25°×0.25°。

SLA和表层流场数据来源于法国国家空间研究中心(Centre national d'Études spatiales, CNES)。采用的时间范围为2020年12月1日至2023年11月1日,空间分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1 d。

1.2 研究方法

1.2.1 中尺度涡探测与追踪

采用基于NENCIOLI等^[13]和董昌明等^[14]提出的基于流场几何特征定义的中尺度涡方法,必须满足4个约束条件才能定义为涡旋中心点:(1)涡旋中心南北速度分量 v 在涡旋中心邻近符号相反,且数值大小与涡旋中心距离的增加而线性增加;(2)涡旋中心东西速度分量 u 在涡旋中心邻近符号相反,数值大小与涡旋中心距离的增加而线性增加;(3)区域内速度最小的点近似为涡旋中心;(4)涡旋中心邻近的速度矢量的旋转方向必须一致。中尺度涡的边界定义为涡旋中心周围的流函数最外层的闭合环线。确定好涡旋中心点后,比较下一时刻的中尺度涡中心位置来确定涡旋移动轨迹。

1.2.2 涡旋特征参数

涡旋特征参数能反映涡旋对海水作用情况,因此选用涡旋振幅、非线性度、半径和涡动能

(Eddy kinetic energy, EKE)分析渔场动态特征。涡旋振幅定义为涡旋中心 SLA 与涡旋边界 SLA 之差的绝对值;涡旋非线性度(U/c)为中尺度涡边界的旋转速度即中尺度涡最大旋转速度(U)与中尺度涡的移动速度(c)的比值,当 $U/c > 1$ 时,可认为该中尺度涡具有非线性,可以有效地运输水体。EKE 基于地转流速异常 u' 、 v' 计算^[15]:

$$E_{\text{EKE}} = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad (2)$$

式中: u' 和 v' 分别为地转流速异常的东西分量和南北分量。

研究认为涡旋的2倍半径是影响鱼群活动的有效距离^[16],本研究将渔获密度作为渔场资源丰度的指数,分析渔获密度与涡旋的空间分布特征关系,将捕获站位的经纬度和捕获时间与涡旋中心的相对距离为2倍半径范围内的同一时间涡旋相匹配,并将涡旋半径归一化处理。

1.2.3 埃克曼抽吸

埃克曼抽吸速率(Ekman pumping velocity, EPV)是由于海面风场的不均匀性导致海水水平运输的差异,势必引起区域海水辐聚或辐散,是海水垂向速度产生的重要原因,计算公式^[17-18]:

$$\tau = (\tau_x, \tau_y) = \rho_{\text{air}} C_D U_{10}(u, v) \quad (3)$$

$$V_{\text{EPV}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_y}{\rho f} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_x}{\rho f} \right) \quad (4)$$

式中: u 和 v 分别为海表面10 m高度风速的速度分量; τ_x 和 τ_y 分别为风应力的经度和纬度分量; ρ_{air} 和 ρ 分别为海表面空气密度(1.29 kg/m^3)和海

水密度($1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); f 为科氏参数; U_{10} 为风速矢量的模 $U_{10} = \sqrt{u^2 + v^2}$; C_D 为拖曳系数。

2 结果

2.1 渔场资源丰度与环境因子的关系

为探讨西北太平洋鱼群适宜环境区间,将2021—2023年6—8月拖网工作共计114个站位空间分辨率处理成 $1^\circ \times 1^\circ$,并与同一时间尺度的 SST 和表层 *Chl.a* 相结合(图2)。从工作区域来看,各点平均渔获密度为 176.8 kg/km^2 ,渔获密度随着纬度的增加而增加,纬向分布变化趋势并不明显。从纬度分布上来看, 40°N 以北平均渔获密度为 834.1 kg/km^2 ,在 43°N 平均渔获密度最大有 $1\,133.0 \text{ kg/km}^2$; 40°N 以南平均渔获密度为 176.8 kg/km^2 ,在 37°N 平均渔获密度最低达 35.2 kg/km^2 。从经度分布上来看, 161°E 平均渔获密度最高为 $1\,808.2 \text{ kg/km}^2$,其次为 158°E 的 $1\,339.5 \text{ kg/km}^2$ 。在 *Chl.a* 和 SST 与渔获密度的关系(图3), SST 为 $14\sim 17^\circ\text{C}$ 、*Chl.a* 为 $0.1\sim 0.8 \text{ mg/m}^3$ 时渔获密度相对较高。黑潮-亲潮的交汇在西北太平洋6—8月的 SST 梯度在 $34^\circ\text{N}\sim 46^\circ\text{N}$ 变化迅速, *Chl.a* 也与 SST 有着相同的变化趋势,但变化梯度较小。 35°N 以南为副热带逆流区,该海域的流场速度慢,且初级生产力低,被誉为“海洋沙漠”。随着纬度的上升,海水温度下降及亲潮高营养水体的补充, *Chl.a* 在高纬度及邻近陆地区域有较高值,即这些区域初级生产力强,饵料丰富,这可能是在高纬度地区有着更高的渔获密度的原因。

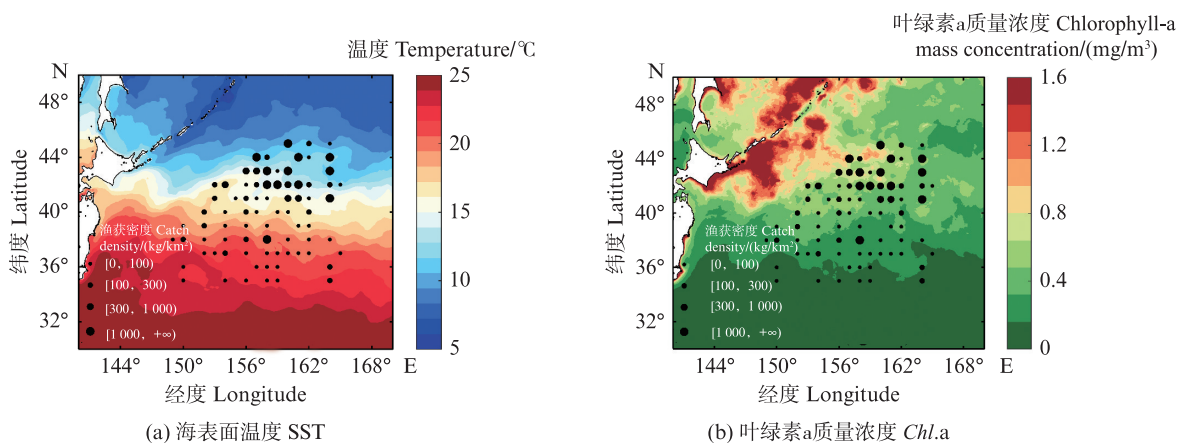


图2 2021—2023年6—8月渔场环境因子与渔获密度平均空间分布

Fig. 2 Average spatial distribution of environmental factors and catch density in fisheries from June to August of 2021–2023

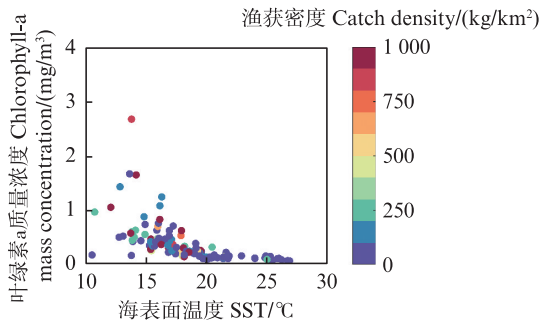


图3 渔获密度与环境因子相互关系

Fig. 3 Relationship between catch density and environmental factors

为探明渔场资源丰度不同的成因,将渔获密度划分为4个区间,即渔获密度 $<100 \text{ kg/km}^2$ 为低产量, $100 \leq \text{渔获密度} < 300 \text{ kg/km}^2$ 为中低产量; $300 \leq \text{渔获密度} < 1000 \text{ kg/km}^2$ 为中高产量;渔获密

度 $\geq 1000 \text{ kg/km}^2$ 为高产量。不同产量区间的站位经纬度与SST、50 m深度水温和表层Chl.a相结合,并考虑Chl.a对渔业资源的时效性,还需将所有捕获站点设定为7月1日,得到其前6个月环境因子变化的时间序列(图4)。可以得知:Chl.a随海水温度变化而显著变化,在1—2月的Chl.a表现出较低值,并且变化幅度不大,3—6月变化幅度剧烈,这与海水温度的变化相关,低温环境下的海洋生物活动不活跃,初级生产力低,Chl.a因此偏低。在3—6月春季的温暖水体有利于浮游植物生长,吸引鱼群索饵,渔获密度很可能在此增大,但在6月中下旬高温海水使表层Chl.a均呈现下降趋势。其次,分析各区间的Chl.a的极大值可知,低产量区间Chl.a极大值处于4月初;中低和中高产量均处于5月中旬,高产量处于6月初。

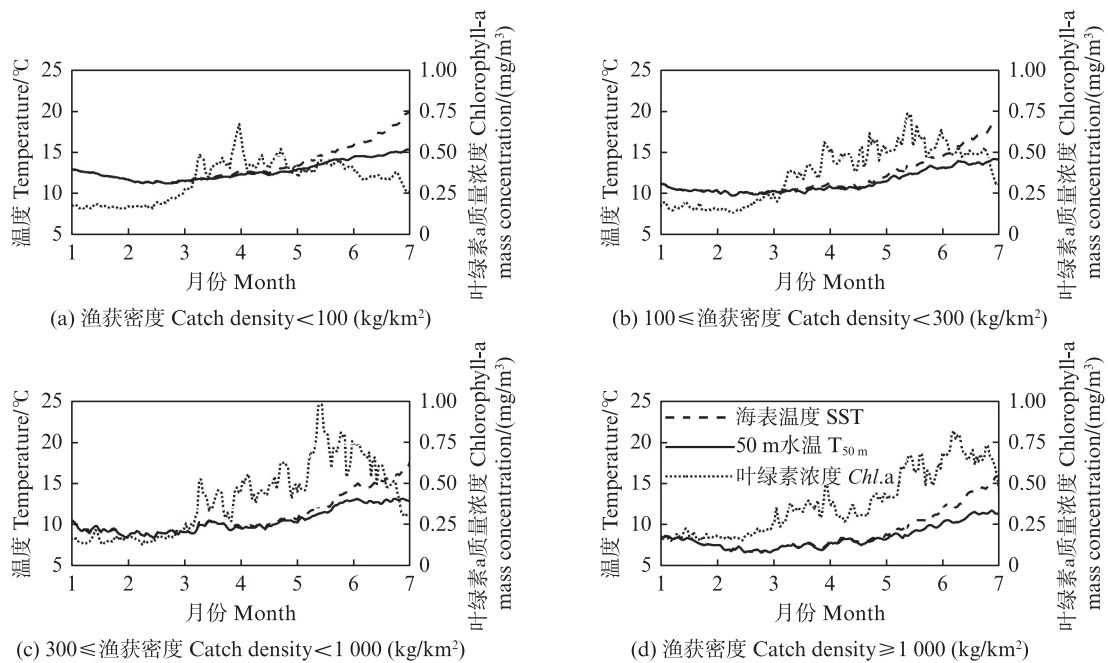


图4 渔获密度各站位前6个月环境因子时间变化序列

Fig. 4 Time change sequence of environmental factors in the first 6 months of each catch density station

2.2 渔场资源丰度与涡旋的潜在关系

本研究基于流场特征识别并追踪了2021—2023年拖网工作区内的涡旋,并以 40°N 为界,统计分析了2021—2023年渔获密度和1—6月的涡旋要素特征(表1和表2)。结果可知, 40°N 以北平均渔获密度在2021年最大为 1513 kg/km^2 ,其次为2023年 850.6 kg/km^2 ,2022年渔获密度最低为 419.8 kg/km^2 ; 40°N 以南平均渔获密度在2022

年最大为 443.1 kg/km^2 ,其次为2021年 95.2 kg/km^2 ,2023年渔获密度最低为 50.2 kg/km^2 。除2022年 40°N 以北海域,北部海域渔获密度均大于南部海域,很可能是由于黑潮流域的年际波动引起的差异。2021年气旋涡数量、半径和周期最大,2022年反气旋涡数量最少。反气旋涡的涡旋要素特征,半径、振幅和非线性度等均高于气旋涡,南北差异显著。

表1 拖网工作区域内2021—2023年渔获密度信息
Tab. 1 Catch density information in the trawl fishing region from 2021 to 2023

项目 Item	2021		2022		2023	
站点纬度 Station latitude	>40°N	≤40°N	>40°N	≤40°N	>40°N	≤40°N
渔获密度 Catch density/(kg/km ²)	1 517.3	95.2	419.8	443.1	850.6	50.2

表2 拖网工作区域内2021—2023年1—6月涡旋要素信息
Tab. 2 Eddy parameters in the trawl fishing region from January to June of 2021—2023

要素 Element	气旋涡 Cyclonic eddy						反气旋涡 Anticyclonic eddy					
	>40°N			≤40°N			>40°N			≤40°N		
年份 Year	2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
数量 Number/个	141	125	135	295	308	309	128	136	105	273	225	250
周期 Life cycle/d	6.5	3.7	6.0	6.7	4.6	3.8	6.1	5.6	6.6	8.0	7.5	7.4
半径 Radius/km	40.7	35.9	38.4	45.2	45.1	45.4	37.2	37.9	40.9	49.9	56.0	46.8
振幅 Amplitude/cm	1.8	1.4	2.1	5.4	4.9	4.4	1.9	2.3	2.4	5.3	6.4	5.0
非线性度 U/c	3.0	2.7	3.7	5.6	4.3	4.4	5.0	5.0	4.3	4.5	4.6	4.0

渔获密度空间分布与环境因子空间变化特征是渔业资源评估的重点。将涡旋中心与渔获站位分布划分为4个象限(图5),气旋涡4个象限的平均渔获密度分别为272.3、239.3、816.7和244.0 kg/km²,气旋涡的第三象限即西南方向渔获密度最高,其余象限的渔获密度差距不大;反气旋涡4个象限的平均渔获密度分别为289.6、821.7、645.4和747.6 kg/km²,西北方向的平均渔获密度最高,东北方向相对较低。

气旋涡内外海水温差即气旋涡的1倍半径与1~2倍半径范围内的海水温度差异,在表层、20、40、60、80和100 m深度的温差分布情况分别为-0.70、-1.49、-1.84、-1.91、-1.93和-1.94 °C, *Chl.a* 气旋涡内外差异为0.010、0.001、-0.015、0.010、0.010和0.010 mg/m³。气旋涡海水温度各水深纬向分布趋势一致,水温在涡旋2倍半径的西南方向偏高,西北方向水温最低。气旋涡 *Chl.a* 高值从表层东北方向,随水层下降向顺时针向西南方向偏移。拖网作业深度为20~50 m,该水层内的西南向的温暖水体和高 *Chl.a* 与气旋涡在西南方向有更高的渔获密度相对应。由此可知气旋涡在抽吸作用下引起的垂向流速将深层海水带至上层,并且由于涡旋的剪切形变和拉伸形变,海水温度和 *Chl.a* 分布不均匀,在黑潮-亲潮交汇的气旋涡区,鱼群更倾向于温暖和高营养的水体,即气旋涡的西南方向。在0~100 m的深度范围,随着深度的增加,环境因子在涡旋影响范围内的空间差异更明显,直至离开涡旋作用的最大深度。

反气旋涡内外海水温差即反气旋涡的1倍半径与1~2倍半径范围内的海水温度差异,在表层、20、40、60、80和100 m深度的温差分布情况分别为0.12、0.13、0.36、0.63、0.71和0.80 °C, *Chl.a* 反气旋涡内外差异为-0.016、-0.010、-0.006、0.002、-0.001和-0.010 mg/m³。反气旋涡内各层海水温度随纬度的升高而降低,并且垂直空间分布特征基本一致,东南方向为高温水体。随着水层的下降,反气旋涡的暖涡特征逐渐明显,涡旋1倍半径范围的海水温度高于1~2倍半径范围,温差也随深度增加而增加。反气旋涡表层 *Chl.a* 等值线密集,0~40 m西北方向上 *Chl.a* 普遍高值,60~100 m *Chl.a* 高值自西北方向逆时针旋转至南侧,随水深增加 *Chl.a* 逐渐趋向于均匀。反气旋涡影响范围内西北方向的高渔获密度与0~40 m水层的 *Chl.a* 对应关系显著,其次,由于反气旋涡上层 *Chl.a* 较高,拖网作业在反气旋涡中均有较高的渔获密度。

结合涡旋的生成位置,以黑潮主轴为界,南北两侧分别由气旋涡和反气旋涡占主导^[19],即气旋涡更易出现在拖网工作区域南侧或更北侧,这就解释了为何图5c中气旋涡上层平均温度较高而深层温度低于反气旋涡。同理,气旋涡 *Chl.a* 较低,很可能是表层过高的水温和稳定的水层使得海水向上的垂向流速较小,涡旋表层和20 m水层表现出低 *Chl.a* 的分布特征,在次表层40 m左右海水温度更适宜海洋生物活动,该水层 *Chl.a* 达到最大值。

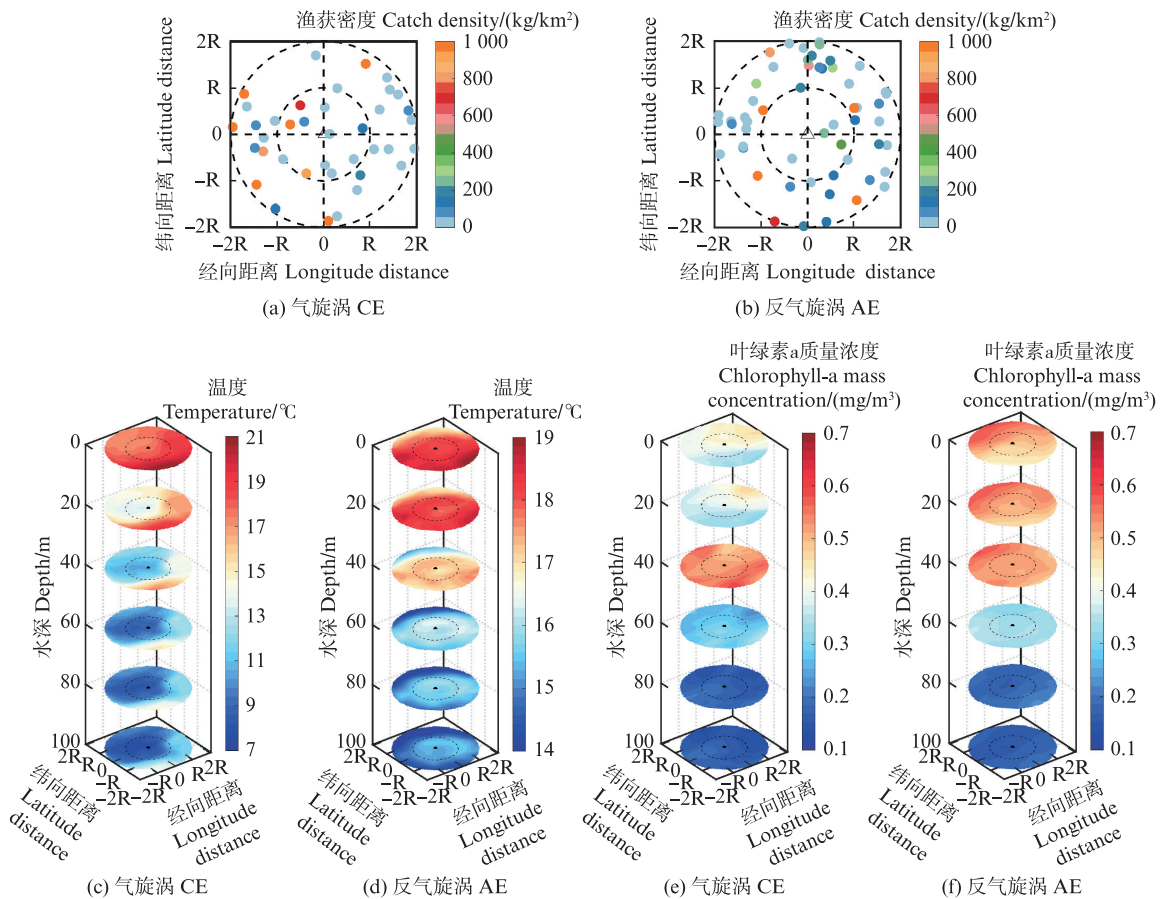


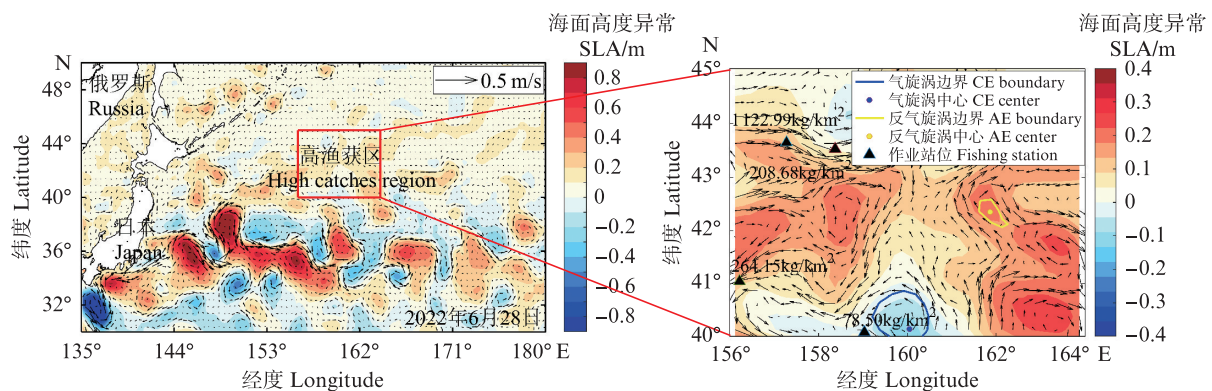
图5 渔获密度与温度、叶绿素a质量浓度在涡旋内的三维空间分布特征

Fig. 5 Three-dimensional spatial distribution characteristics of catch density, temperature and chlorophyll-a mass concentration in the eddy

2.3 高渔获渔场内涡旋的生态效应

中尺度涡可以增强海水初级生产力和捕获海水,创造适宜海洋上层微藻群落生存的环境。此外,涡旋内部滞留的寒冷或温暖的海水可能引起短期内外不同海洋生物种群分布,造成局部生

态不均匀效应。为探讨高渔获区内的涡旋生态效应,减少纬向和经向空间差异,并结合渔获产量,本文选择了40°N~45°N,156°E~164°E的空间范围作为高渔获产区渔场(图6),区域内海水低温和高营养为主要特征。



作业站位为背景流场前后两天的拖网位置。

Fishing station is the trawl position of two days before and after the background flow field.

图6 高产量渔获区位置及涡旋分布特征图

Fig. 6 Location and eddy distribution of high yield fishing region

将高产量渔获区 2021—2023 年所有涡旋 2 倍半径范围内的温度、*Chl.a*、异常温度和异常 *Chl.a* 叠加至 0~100 m 分层分析(图 7),其中异常温度和异常叶绿素 a 质量浓度是海水温度和 *Chl.a* 减去当月平均温度和平均 *Chl.a* 所得。涡旋垂直分布特征显著,气旋涡温度东部高于西部,西北方向水温最低,0~100 m 水层分布特征一致,南部等温线密集,在 40 m 水层涡旋 1 倍半径与 1~2 倍半径的温差最大为 1.07 °C。在气旋涡异常温度中,0~40 m 水层在 1~2 倍半径范围均有不同程度的正值,并且随着深度的增加,南部水温负异常加剧,在 60 m 水层中负异常温度最高达 -0.29 °C,东侧涡旋 2 倍半径边缘各水层均为正值。气旋涡 *Chl.a* 各水层内分布均匀,0~20 m 水层涡旋中心内 *Chl.a* 略有降低,40~100 m 气旋涡 1 倍半径内部 *Chl.a* 均高于 1~2 倍半径,在 60 m 水层达最大值 0.10 mg/m³。1~2 倍半径各水层均有不同程度的增加,气旋涡异常 *Chl.a* 在 40 m 水层最高达 0.13 mg/m³,涡旋 1 倍半径内通常为负值,这很可能是深层气旋涡内部低温所致。

反气旋涡高温海水自涡旋中心向西南部扩散,等温线大体呈“Ω”形。0~60 m 涡旋内外温差随水层增加而增加,60 m 水层达最大值 1.15 °C,80~100 m 水层稳定,涡旋内外温差减小。反气旋异常温度空间分布差异显著,北部为正值,南部为负值,并且各水层空间分布趋势一致,在 20 m 水层有极小值 -0.23 °C,40 m 水层有极大值 0.17 °C。造成这种水温异常分布的原因很可能是由于反气旋涡在北半球是顺时针旋转,涡旋的旋转流速在 1~2 倍半径最大,反气旋将南部高温水体顺时针旋转扩散至北部,北部低温水体也同时旋转扩散至南部,冷暖海水的交汇使得北部出现大面积的水温正异常值,南部出现负异常值。反气旋涡 *Chl.a* 在 1 倍半径内低于外侧,但内外差异较小。*Chl.a* 异常在反气旋涡 1~2 倍半径的北方及东北方向为正值,0~20 m 涡旋中心负异常极值偏西,在 40 m 水层中 *Chl.a* 南部呈现大范围负异常,负异常极值可达 -0.01 mg/m³,60~100 m 水层正负异常值减小,但大体呈负异常趋势。海洋生物对生存水体理化环境要素的变化十分敏感,涡旋的旋转效应在 2 倍半径范围内引起的水温和叶绿素 a 质量浓度三维空间上的变动,势必会使海水生物生存范围受限。

由图 8 可知,高产量渔获区长期受涡旋的影响,平均每天存在气旋涡和反气旋涡 1.78 和 2.13 个。SLA 在冬季最强,与 EKE 表现出同期的变化趋势,相关系数为 0.71 ($P < 0.01$)。MLD 在春季深度最深,并且 SLA 在同一时间最小。随后在 MLD 抬升期间即 4—6 月,深度上下波动剧烈,叶绿素 a 总量(是指在高产量渔获区,从表层至 100 m 水深,水体中所含叶绿素 a 的总质量)达到极大值,在捕捞期间回归正常水平。由表 1 可知 2022 年高产渔获密度最低,海水叶绿素 a 总量也在 2022 年较少,二者密切相关。埃克曼抽吸速度是海水垂向速度的指标,区域内总体表现为负抽吸速度,即海水下沉占主导,这与反气旋涡数量正相关。海水下沉会使海水营养程度降低,但亲潮高营养水体的输送,补充了区域内海洋生物所需的营养物质,海洋生物资源并不会因此匮乏。

3 讨论

根据 2021—2023 年 6—8 月西北太平洋渔获产量与海水温度和 *Chl.a* 以及中尺度涡空间分布特征的分析,可以得出以下结论:(1)40°N 以北海域,SST 和 *Chl.a* 为 14~17 °C 和 0.1~0.8 mg/m³ 时平均渔获产量较高,40°N 以南渔获产量偏低;(2)捕捞时间与 *Chl.a* 高值时间越接近,渔获产量偏高;(3)高产量渔获区内反气旋涡占主导,海面高度异常为正异常;(4)气旋涡 1~2 倍半径内 *Chl.a* 正异常显著,反气旋涡 *Chl.a* 东北部正异常,其余方向均减少;(5)涡旋 2 倍半径范围内,鱼群更偏向于气旋涡南部和反气旋涡北部聚集。根据以上结论,可以进一步讨论渔场与环境因子和中尺度涡的内在关系。

3.1 渔场与环境因子关系

研究发现 2021—2023 年 6—8 月拖网作业站位的渔获密度与纬度密切相关,温暖且营养贫乏的黑潮与寒冷且高生产力的亲潮交汇使西北太平洋夏季纬向温度梯度较大,大多数中上层鱼类属于狭温性鱼类^[20],渔场分布不均匀。黑潮流轴年际振荡引起的水温变动与鱼群洄游及渔获产量密切相关,区域内冷暖水团势力都较为强大,锋面区等温线密集,在锋面附近也容易形成中心渔场。TAKASUKA 等^[21]提出的“最佳生长温度”假说表明远东拟沙丁鱼(*Sardinops melanostictus*)

的生长速率在海水温度为 16.2 °C 时最佳。渔场生境变迁和适应性对渔获丰度和鱼群生长的影响至关重要,研究发现,6—8 月拖网捕捞工作区

域内以 40°N 为界,以北海域有更高的渔获产量,以南则相对较低,这与头足类渔场区域基本一致^[22]。

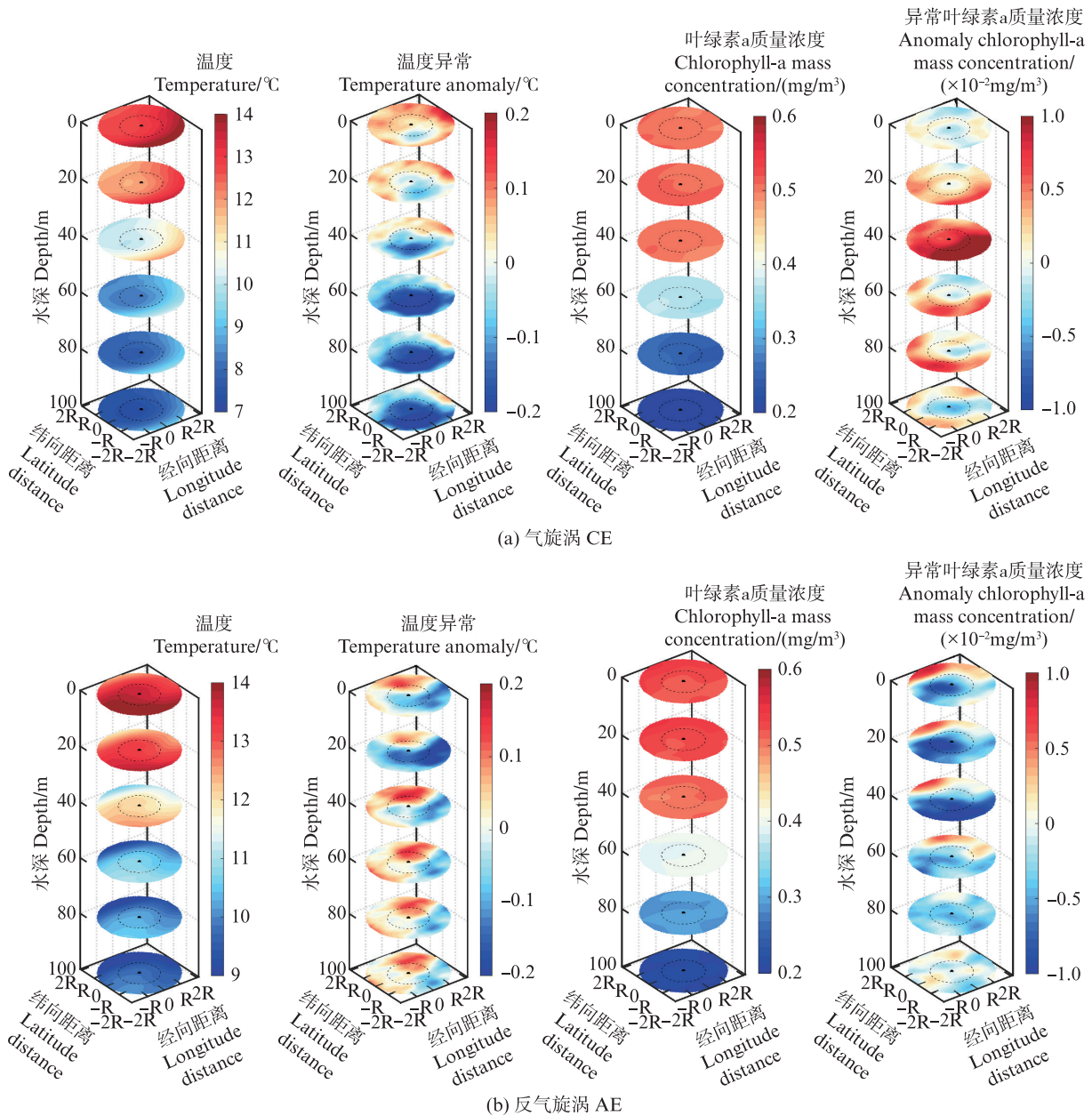
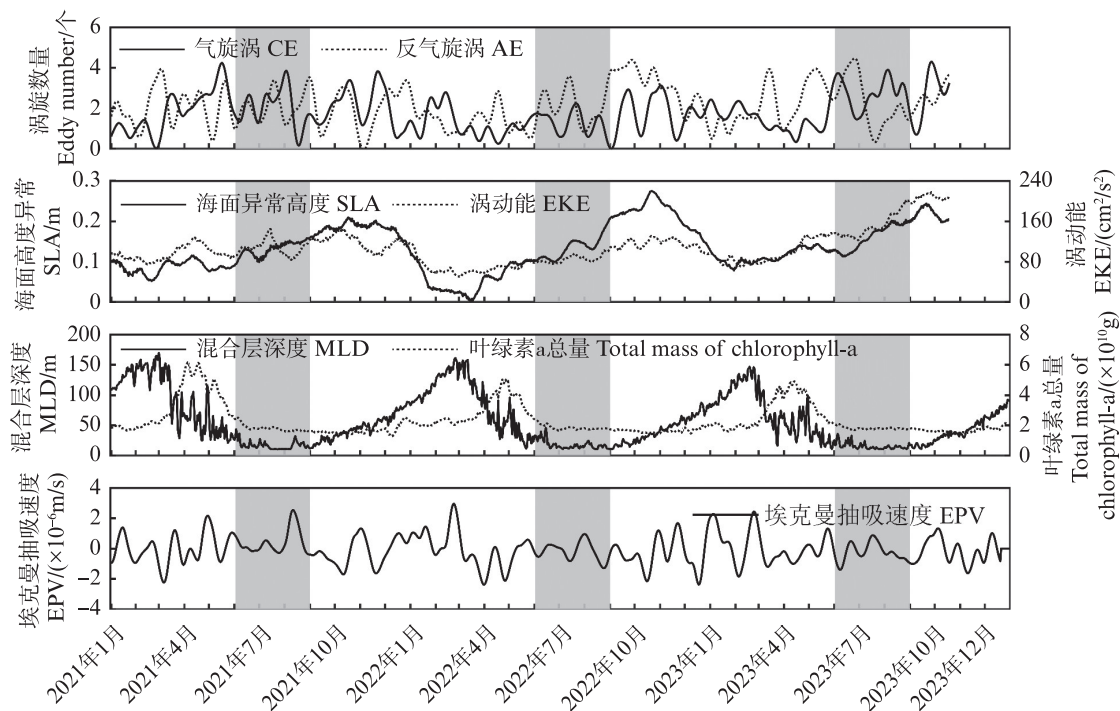


图7 2021—2023年涡旋温度、叶绿素a质量浓度及其异常值三维复合平均特征

Fig. 7 Three-dimensional composite average characteristics of eddy temperature, chlorophyll-a mass concentration and their outliers from 2021 to 2023



黑色阴影区为6—8月拖网作业时间;埃克曼抽吸速度通过一个月低通滤波。

Black shaded area indicates the trawl fishing time from June to August; Ekman pumping speed through a month of low-pass filter.

图8 2021—2023年高产量渔获区内海水动力因素及0~100 m水层的叶绿素总量的时间序列

Fig. 8 Time series of seawater dynamic factors and total mass of chlorophyll-a in 0–100 m water layer in high yield fishing area from 2021 to 2023

*Chl.a*能反映浮游生物及生物饵料的丰度大小,是追踪渔情和渔场重心变迁的重要指标。西北太平洋6—8月 $Chl.a$ 纬向分布特征显著,黑潮-亲潮交汇区以南流域强度小且稳定,北太平洋大尺度环流体系在此处使得区域内海水辐聚下沉,初级生产力弱且海水营养匮乏, $Chl.a$ 低;以北流域则相反, $Chl.a$ 高且海水温度低。拖网捕捞的主要渔获有南美拟沙丁鱼(*Sardinops sagax*)和日本鲭(*Scomber japonicus*)等,产卵洄游性鱼类在产卵期和育肥期要求的海水生境不同,前者对水温的要求较高,常常需要迁徙至南部高温海域,后者则需要高营养、饵料丰富的海域。因此产卵场和育肥场在西北太平洋的不同海域,即产卵场在水温高但 $Chl.a$ 低的南部海域,育肥场在水温低但 $Chl.a$ 高的北部海域^[23]。 $Chl.a$ 与捕捞的渔获产量在西北太平洋6—8月应有滞后效应,也就是说初形成的饵料场吸引鱼群聚集需要时间, $Chl.a$ 在捕捞前一段时间较高,该捕捞区域内鱼群可利用的饵料资源就越丰富,渔获密度很可能因此偏高。但是,捕捞时间距叶绿素a极值出现时间较远,该区域内的营养物质提前消耗殆尽,鱼群则会另寻其他高营养海域,渔获密度因此降低。

3.2 渔场与涡旋关系

黑潮-亲潮交汇区是一个天然高渔获产量区。同时,区域内涡旋活动频繁,海水空间结构变化,影响局地生态结构,是引起渔场环境分布不均匀的重要原因。生态效应对涡旋的响应可归因于:涡旋周边浮游植物的水平平流、涡旋核心内生态系统的滞留、上升流和下降流、涡旋引起的分层变化和涡旋生物“搅动”效应^[24]。涡旋热量及叶绿素a运输在涡旋生成、稳定和衰退期均有不同特征,稳定期的涡旋水平和垂直输运达到最强^[25]。涡旋1倍半径水体加速混合,湍急的边缘水体使上表层水体形成内外锋面,在2倍半径范围内的物化要素变动最强。涡旋的非线性不稳定或涡旋之间的相互作用产生的亚中尺度锋面和埃克曼输运可以产生强大的垂向速度,是海水上下水层物质交换的重要机制,同时涡旋中心的浮游植物群落结构会因此变化^[26]。黑潮-亲潮交汇区6—8月的反气旋涡2倍半径范围内的渔获密度高于气旋涡,暖性涡旋更能吸引鱼群聚集。反气旋涡多为低营养结构涡旋,但反气旋涡在北半球的顺时针旋转效应使得2倍半径的暖涡北部水温和 $Chl.a$ 均呈现正异常,暖涡北部渔获产量明

显增加。气旋涡引起内海水温度负异常,并且冷涡上升流输送高营养水体,涡旋内外营养化增强,南部水温和 *Chl.a* 变动显著,同时对比渔获产量结果也能发现冷涡南部产量偏高。因此,可初步猜测黑潮-亲潮交汇区 6—8 月海水生物偏向于气旋涡 2 倍半径范围南部和反气旋涡北部。拖网作业受天气影响较小,能较好地反映某一水层的渔场资源丰度,但是对于其他海域涡旋影响有效范围内和其他季节的渔场分布是否具有共性仍需后续的研究加以证实。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies [J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [2] XIU P, CHAI F, SHI L, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993-2007 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115 (C3): C03012.
- [3] ZHANG Z G, WANG W, QIU B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies [J]. *Science*, 2014, 345 (6194): 322-324.
- [4] FRENGER I, GRUBER N, KNUTTI R, et al. Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 608-612.
- [5] 傅利福, 胡婉盈, 张春玲, 等. 黑潮-亲潮交汇区柔鱼渔场温盐垂直结构反演实验 [J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(4): 960-973.
FU L F, HU W Y, ZHANG C L, et al. Reconstruction experiment of temperature and salinity vertical structure of *Ommastrephes bartramii* fishing ground in Kuroshio-Oyashio confluence region [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(4): 960-973.
- [6] HE Q Y, ZHAN H G, CAI S Q, et al. Eddy effects on surface chlorophyll in the northern South China Sea: mechanism investigation and temporal variability analysis [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 112: 25-36.
- [7] HSU A C, BOUSTANY A M, ROBERTS J J, et al. Tuna and swordfish catch in the U. S. northwest Atlantic longline fishery in relation to mesoscale eddies [J]. *Fisheries Oceanography*, 2015, 24(6): 508-520.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
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.
- [10] DURÁN GÓMEZ G S, NAGAI T, YOKAWAK. Mesoscale warm-core eddies drive interannual modulations of swordfish catch in the Kuroshio Extension System [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 680.
- [11] 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.
- [12] 王跃中, 袁蔚文. 南海北部底拖网渔业资源数量变动 [J]. *南方水产*, 2008, 4(2): 26-33.
WANG Y Z, YUAN W W. Changes of demersal trawl fishery resources in northern South China Sea as revealed by demersal trawling [J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(2): 26-33.
- [13] NENCIOLI F, DONG C M, DICKEY T, et al. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(3): 564-579.
- [14] 董昌明, 蒋星亮, 徐广珺, 等. 海洋涡旋自动探测几何方法、涡旋数据库及其应用 [J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(4): 439-453.
DONG C M, JIANG X L, XU G J, et al. Automated eddy detection using geometric approach, eddy datasets and their application [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(4): 439-453.
- [15] 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.
- [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] 缪启龙, 周家翔, 董亚非. 南海海面风应力特征分析 [J]. *热带海洋*, 1993, 12(1): 64-68.
MIAO Q L, ZHOU J X, DONG Y F. An analysis on sea wind stress features of South China Sea [J]. *Tropic Oceanology*, 1993, 12(1): 64-68.
- [18] 刘超洋. DINEOF 重构南海遥感叶绿素 a 数据质量及应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.

- LIU C Y. Study on quality and applications of reconstructed remote sensing chlorophyll a data using DINEOF in the South China Sea[D]. Shanghai:Shanghai Ocean University, 2023.
- [19] 胡冬, 陈希, 赵艳玲, 等. 两个西边界流延伸体区域中尺度涡统计特征分析[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 15-28.
- HU D, CHEN X, ZHAO Y L, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the two western boundary current extension regions[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 15-28.
- [20] 王雅萌, 陈新军, 陈芃, 等. 黑潮和亲潮生态系统中上层渔获量变动趋势及影响因素分析[J]. 海洋渔业, 2022, 44(2): 164-177.
- WANG Y M, CHEN X J, CHEN P, et al. Variation trend and influencing factors of catch in mid-pelagic species of Kuroshio and Oyashio ecosystems[J]. Marine Fisheries, 2022, 44(2): 164-177.
- [21] TAKASUKA A, OOZEKI Y, AOKI I. Optimal growth temperature hypothesis: why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(5): 768-776.
- [22] YU W, CHEN X J, YI Q, et al. A review of interaction between neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) and oceanographic variability in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(4): 739-748.
- [23] CHEN X J, ZHAO X H, CHEN Y. Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwestern Pacific Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1152-1160.
- [24] GAUBE P, MCGILLICUDDY 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.
- [25] 卢宇辉, 程灵巧, 张俊, 等. 基于船舶观测的黑潮延伸体典型涡对的三维结构分析[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(4): 1005-1019.
- LU Y H, CHENG L Q, ZHANG J, et al. Analysis of the three dimensional structure of a typical dipole in the Kuroshio extension based on shipboard observation [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(4): 1005-1019.
- [26] MARTIN A P, RICHARDS K J. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy [J]. DeepSea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(4/5): 757-773.

Effects of eddies on catch in mid-pelagic species in the Kuroshio-Oyashio confluence region

SU Risheng¹, WEI Yongliang^{1,2}, TANG Zeyan³, PANG Denglian¹, ZHANG Chunling¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center on Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai Municipal Ocean Bureau, Shanghai 201306, China; 3. East China Sea Institute for Development Research, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201306, China)

Abstract: The effect of marine mesoscale processes on spatial variation of fisheries is an important part of fishery resources assessment. In order to clarify the response relationship between fishery resource abundance in the Kuroshio-Oyashio confluence region (145° E–165° E, 35° N–45° N) and mesoscale eddies, this study utilized data from mid-pelagic trawl catches and satellite altimetry collected during research cruises in the Northwest Pacific from June to August 2021–2023 by the "Songhang" of Shanghai Ocean University research vessel. The study investigated the relationship between catch density and environmental factors as well as eddies. The results indicate a significant spatial correlation between sea surface temperature, chlorophyll-a mass concentration, and the distribution of fishing density in the fishing grounds. These factors predominantly influence the resource abundance of middle and pelagic fishery. The average fish catch yield is higher in the sea area north of 40°N compared to those south of it. Within 1–2 times the radius of cyclonic eddies, there is a notably positive abnormality in chlorophyll-a mass concentration. Conversely, in anticyclonic eddies, there is a positive abnormality in chlorophyll-a mass concentration in the northeastern part and reduced mass concentrations elsewhere. Within a radius of two times the eddy, fish aggregation was favored to the south of the cyclonic eddy and to the north of the anticyclone. Although the cyclonic eddies are nutrient eddies, their accompanying upwelling leads to low water temperatures, which are not favorable for fish aggregation. Marine organisms in the Kuroshio-Oyashio confluence region tend to aggregate in the southern part of the cyclonic eddy and the northern part of the anticyclonic eddy. This study can provide a scientific basis for short-term fishery forecasting and prediction of the center of gravity of the fishery in the Northwest Pacific Ocean, while the fishery changes caused by the inter-annual dynamic difference of the Kuroshio Current axis still need to be further investigated.

Key words: mesoscale eddy; fishing grounds; resource abundance; environmental change; Kuroshio-Oyashio confluence region