

文章编号: 1674-5566(2025)02-0413-09

DOI: 10.12024/jsou.20241104679

## 海洋中尺度涡对南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔获量的影响

郑淳文<sup>1</sup>, 刘力文<sup>1</sup>, 郭绍健<sup>1</sup>, 孟晓宇<sup>1</sup>, 周成<sup>1,2,3,4</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可持续利用重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 为了探索南太平洋中尺度涡对长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)渔获量的影响模式, 揭示不同类型涡旋与南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔获量的相关关系, 基于涡特征环境数据利用EddyNet深度学习模型自动检测识别南太平洋中尺度涡, 结合渔业探捕数据, 分析捕捞站点到涡边缘及涡中心的相对距离对长鳍金枪鱼单位捕捞努力量渔获量(Catch per unit effort, CPUE)的影响。结果显示, 南太平洋反气旋涡数量通常多于气旋涡, 同时半径大于气旋涡。气旋涡和反气旋涡均显示, 随着捕捞站点到最近涡边缘外侧的相对距离的增加, 长鳍金枪鱼CPUE均呈下降趋势。在涡扰动区域内, 反气旋涡的CPUE高于气旋涡, 且随着捕捞站点到涡中心相对距离的增加, CPUE逐渐减小。研究表明, 中尺度涡相较于背景场对渔获物产量具有积极的调控作用, 且反气旋涡和气旋涡对于长鳍金枪鱼空间分布具有不同的影响机制。本研究进一步加深了对海洋中尺度涡与长鳍金枪鱼空间分布之间复杂关系的理解, 为渔业捕捞效率的优化和可持续管理提供了科学依据。

**关键词:** 长鳍金枪鱼; 中尺度涡; EddyNet深度学习模型; 单位捕捞努力量渔获量; 南太平洋

**中图分类号:** S 932.4 **文献标志码:** A

长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)是南太平洋延绳钓金枪鱼渔业的重要目标种类, 也是中国延绳钓渔船的主要捕捞对象之一<sup>[1]</sup>。长鳍金枪鱼广泛分布于亚热带和温带海域, 具有高度的洄游特性, 是海洋生态系统中顶级捕食者之一<sup>[2-4]</sup>。南太平洋复杂的气候变化、海洋环境和海洋动力学过程为长鳍金枪鱼提供了适宜的栖息环境。以往的研究表明, 长鳍金枪鱼的栖息地环境特征主要包括叶绿素a质量浓度、水温、溶解氧等<sup>[5-7]</sup>, 许多研究发现海洋中尺度涡对海洋生物栖息地生态有着重要影响<sup>[8-10]</sup>。中尺度涡的时间尺度通常为数天至数月, 空间尺度则为数十至数百千米<sup>[11]</sup>。根据其特性, 中尺度涡可分为气旋涡和反气旋涡, 分别导致“冷异常”或“暖异常”, 因此又被称为冷涡和暖涡<sup>[8]</sup>。

海洋中尺度涡通过自下而上的气旋涡和反气

旋涡过程, 不断混合上层海水并输送营养物质, 进而促进了初级生产力的提高和浮游植物的生长, 高营养级生物向浮游生物密集区域汇集, 形成复杂的捕食-被捕食生态互动<sup>[12]</sup>。广泛研究表明, 中尺度涡对赤蠵龟(*Caretta caretta*)<sup>[13-15]</sup>、黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)和大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)<sup>[16]</sup>、王企鹅(*Aptenodytes patagonicus*)<sup>[17]</sup>、大青鲨(*Prionace glauca*)和噬人鲨(*Carcharodon carcharias*)<sup>[18-19]</sup>、瓜头鲸(*Peponocephala electra*)<sup>[20]</sup>和南象海豹(*Miounga leonine*)<sup>[21-24]</sup>等物种的捕食行为、迁移路径选择以及漂流规律等方面产生影响<sup>[25]</sup>。尽管有研究发现中尺度涡会影响长鳍金枪鱼的分布和渔获量, 但相关的量化分析仍然较为罕见。

本研究以南太平洋法属波利尼西亚南部公海与皮特凯恩岛东北部公海为研究区域, 基于涡旋

收稿日期: 2024-11-01 修回日期: 2025-02-11

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401301, 2023YFD2401305)

作者简介: 郑淳文(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: 787827015@qq.com

通信作者: 周成, E-mail: c-zhou@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>

特征环境数据,采用EddyNet深度学习模型对中尺度涡进行识别分析并统计其时空分布特征,分析涡旋类型及捕捞站点与涡旋空间距离等特征与南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔获量的相关关系。研究结果将进一步加深对海洋中尺度涡与长鳍金枪鱼空间分布之间复杂关系的理解,并为渔业捕捞效率的优化和可持续管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 渔业数据

长鳍金枪鱼捕捞数据来源于浙江省远洋渔业集团股份有限公司所属“新世纪71号”超低温金枪鱼延绳钓渔船海上探捕调查。调查数据包括作业位置、作业日期、捕捞量和钓钩数量等信息。探捕区域为法属波利尼西亚南部公海(2013年11月—2014年2月)和皮特凯恩岛东北部公海(2015年11月—12月),空间范围为 $10^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$ ,  $160^{\circ}\text{W}\sim 115^{\circ}\text{W}$ (图1)。

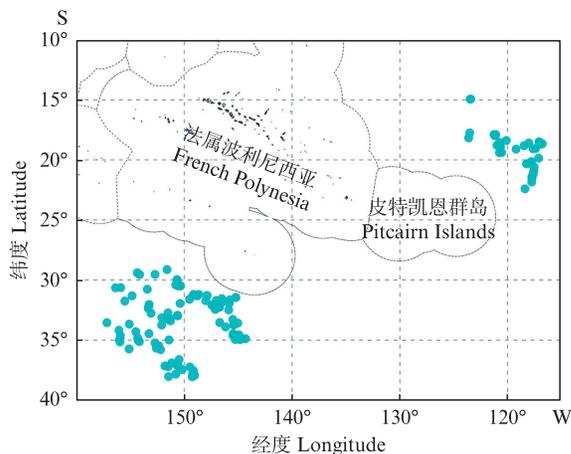


图1 捕捞站点图

Fig. 1 Exploratory fishing survey stations

### 1.2 涡特征环境数据

本研究中采用的中尺度涡识别检测的特征环境为海面高度异常值(Sea level anomaly, SLA),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/>)提供的全球海洋网格化L4海面高度和衍生变量产品,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为d。

<http://www.shhydxxb.com>

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 涡旋识别方法及涡特征范围定义

本研究采用LGUENSAT等<sup>[26]</sup>提出的EddyNet模型深度学习的方法,该模型基于涡特征环境数据对涡旋进行自动识别与检测。EddyNet由卷积编码器-解码器和像素分类层组成,输出的像素分类层能生成与输入大小相同的图形,分类为非涡旋、反气旋涡和气旋涡等3个类别。模型从包含3个阶段的编码(下采样)路径开始,在每个阶段中,首先配置有2个 $3\times 3$ 的卷积层,随后采用缩放指数线性单元(Scaled exponential linear unit, SELU)激活函数<sup>[27]</sup>,或者采用线性整流函数(Rectified linear unit, ReLU)结合批量归一化,随后通过1个 $2\times 2$ 的最大池化层,将输入的分辨率减半。解码(上采样)路径则使用转置卷积(即反卷积)<sup>[28]</sup>以返回到原始分辨率。EddyNet<sup>[29-31]</sup>从收缩路径直接传递信息到扩展路径,以保留早期阶段的信息。为了防止过度拟合,模型采用了32位过滤器架构,并加入了随机失活层。与现在被广泛使用的结构相比,EddyNet具有更少的参数,能够降低内存消耗,摆脱了传统方法对人工阈值的依赖,在复杂的海洋环境中展现出更强的泛化能力和识别精度。如图2所示,对2015年12月17日研究区域进行中尺度涡识别,其中红色多边形为反气旋涡,蓝色多边形为气旋涡。

基于涡旋的归一化半径识别和分类不同大小涡旋。通过提取涡旋最边缘的轮廓线,并转换为地图文件(shp格式)计算其面积 $S$ 。涡旋的归一化半径基于面积进行计算,公式如下:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1)$$

式中: $r$ 为涡旋的归一化半径, $m$ ;  $S$ 为涡旋面积,  $\text{m}^2$ 。

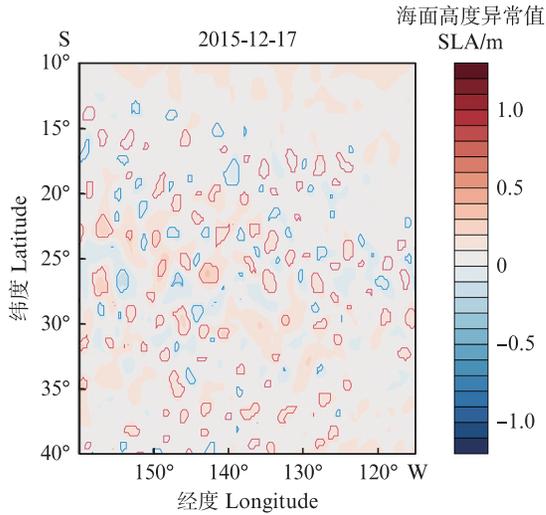
中尺度涡旋的特征范围按归一化半径分为涡中心、涡内部、涡扰动和涡边缘等4个部分(图3),其中 $0\sim 0.5r$ 为涡中心、 $0\sim r$ 为涡内部、 $0\sim 1.5r$ 为涡扰动、 $1.5r\sim 2.5r$ 为涡边缘。

#### 1.3.2 CPUE计算

采用单位捕捞努力量渔获量(Catch per unit effort, CPUE)作为估计长鳍金枪鱼相对丰度的指标,计算公式:

$$C_{\text{CPUE}} = \frac{C_n}{E_n} \quad (2)$$

式中:  $C_{CPUE}$  为长鳍金枪鱼单位捕捞努力量渔获量,尾/千钩;  $C_n$  为第  $n$  个作业钩次的长鳍金枪鱼渔获量,尾;  $E_n$  为第  $n$  个作业钩次投放的钩钩数量,千钩。



红色多边形为反气旋涡;蓝色多边形为气旋涡。  
Red and blue polygons represent anticyclonic eddies and cyclonic eddies, respectively.

图2 基于 EddyNet 模型的中尺度涡识别(以 2015 年 12 月 17 日为例)  
Fig. 2 Mesoscale eddy recognition based on EddyNet model(December 17, 2015)

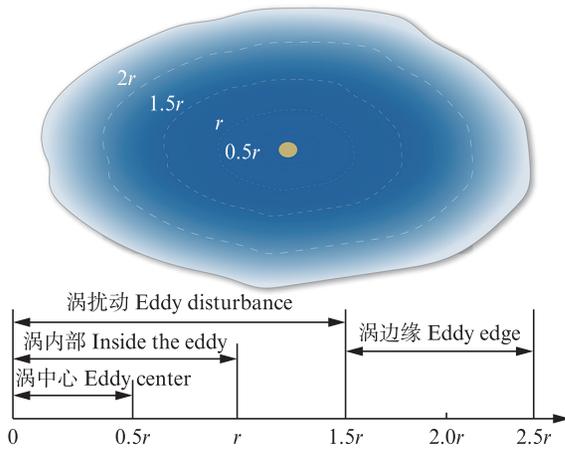


图3 归一化半径对涡特征范围定义  
Fig. 3 Definition of the range of normalized radius pair eddy features

### 1.3.3 广义加性模型

本研究采用广义加性模型 (Generalized additive model, GAM) 拟合长鳍金枪鱼 CPUE 与涡旋特征之间的非线性关系<sup>[32]</sup>。基于显著性检

验进行不同变量的筛选,并结合模型  $R^2$  评估其性能,以确保筛选变量的统计显著性和模型的预测效果。模型中,响应变量为长鳍金枪鱼 CPUE,解释变量包括捕捞站点到最近涡边缘 ( $2r$ ) 的相对距离(实际距离与半径  $r$  的比值)、经度和纬度。由于 CPUE 服从伽马分布,连接函数选择对数函数。同时本研究数据中不存在零值 CPUE,因此无需进行零值处理。GAM 模型表达式如下:

$$\lg C_{CPUE} \sim s(X_{dist}) + s(X_{lat}) + s(X_{lon}) + \varepsilon \quad (3)$$

式中:  $s$  为平滑样条函数;其中  $s(X_{dist})$  为探捕调查站点到涡边缘的相对距离项;  $s(X_{lat})$  为纬度项;  $s(X_{lon})$  为经度项;  $\varepsilon$  为误差项。

## 2 结果与分析

### 2.1 南太平洋中尺度涡的特征变化

2013 年 11 月—2014 年 2 月期间,法属波利尼西亚南部公海识别的气旋涡数量为 177~252 个,反气旋涡数量为 224~295 个;气旋涡半径为 23.53~90 467.33 m,反气旋涡半径为 23.92~94 791.93 m。2015 年 11 月—12 月期间,皮特凯恩岛东北部公海识别的气旋涡数量为 179~208 个,反气旋涡数量为 236~265 个;气旋涡半径为 725.85~54 598.95 m,反气旋涡半径为 22.70~80 372.55 m。研究表明,反气旋涡数量通常多于气旋涡数量,其半径也大于气旋涡的半径。气旋涡的面积主要为  $5 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ,反气旋涡的面积主要为  $1 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 。在探捕期间,研究区域的涡旋数量随时间呈波动下降的趋势(图 4)。

### 2.2 捕捞站点到最近涡边缘的相对距离对 CPUE 的影响

基于 GAM 模型对长鳍金枪鱼 CPUE 与捕捞站点到最近涡边缘的相对距离、经度及纬度之间的关系进行分析,结果如表 1 所示,捕捞站点到最近涡边缘(气旋涡、反气旋涡)的相对距离对长鳍金枪鱼的 CPUE 均影响显著 ( $P < 0.05$ ),整体呈现下降趋势。

如图 5 所示,在反气旋涡环境中,随捕捞站点到最近反气旋涡边缘的相对距离增大,长鳍金枪鱼 CPUE 呈波动下降趋势。经度变化对长鳍金枪鱼 CPUE 的影响基本不变,而随着纬度的增加,北部区域长鳍金枪鱼 CPUE 低于南部区域。

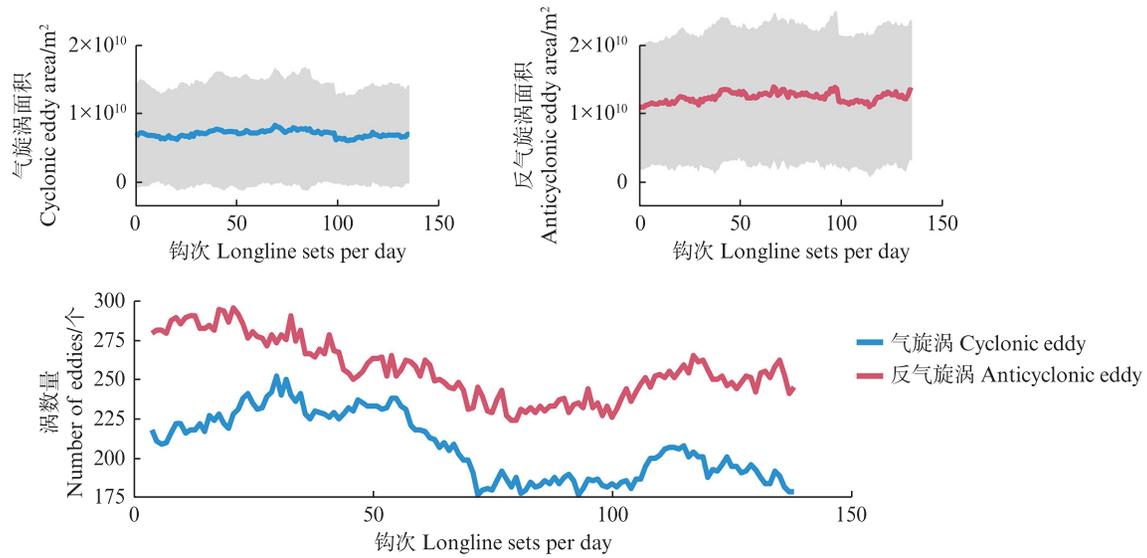


图4 中尺度涡气旋(蓝色)、反气旋(红色)的面积及涡数量变化趋势

Fig. 4 Trends in the area of mesoscale eddy cyclones (blue) and anticyclones (red) and the number of eddies

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

GAM变量 GAM variables	有效自由度 edf	P	校正决定系数 R <sup>2</sup> adj	偏差解释率 Deviance explained/%
反气旋涡 Anticyclonic eddy			0.534	60.8
捕捞站点到反气旋涡的相对距离 Relative distance	8.032	<0.05		
经度 Longitude	4.508	<0.05		
纬度 Latitude	7.577	<0.05		
气旋涡 Cyclonic eddy			0.526	57.7
捕捞站点到气旋涡的相对距离 Relative distance	1.000	<0.05		
经度 Longitude	3.906	<0.05		
纬度 Latitude	6.562	<0.05		

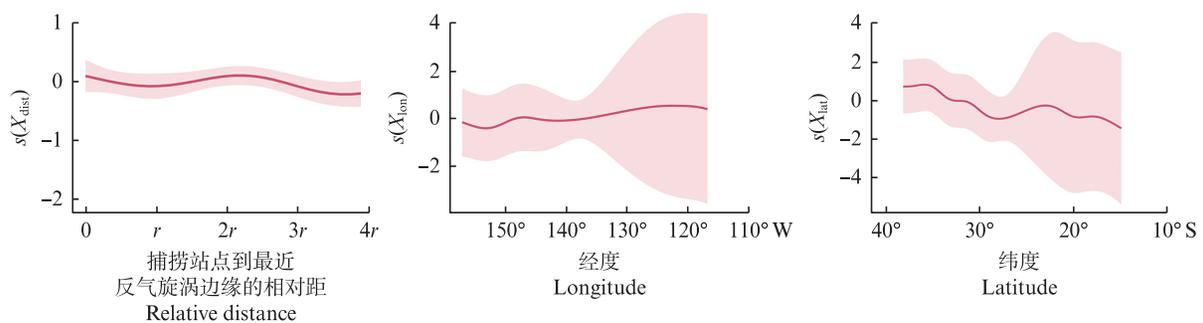


图5 反气旋涡环境下长鳍金枪鱼CPUE变化趋势

Fig. 5 Variation trends of *Thunnus alalunga* CPUE in an anticyclonic eddy environment

在气旋涡环境中,与反气旋涡环境的波动下降趋势不同,捕捞站点到最近气旋涡边缘的相对距离对长鳍金枪鱼CPUE表现为显著的线性关系(edf=1),随着相对距离的增大,长

鳍金枪鱼CPUE呈线性下降趋势。经度对长鳍金枪鱼CPUE的影响整体呈上升趋势,而纬度的降低导致长鳍金枪鱼CPUE波动下降(图6)。

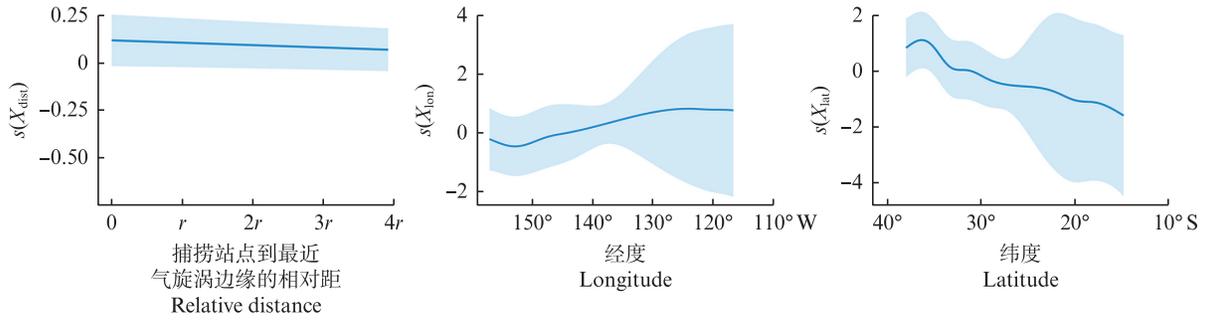
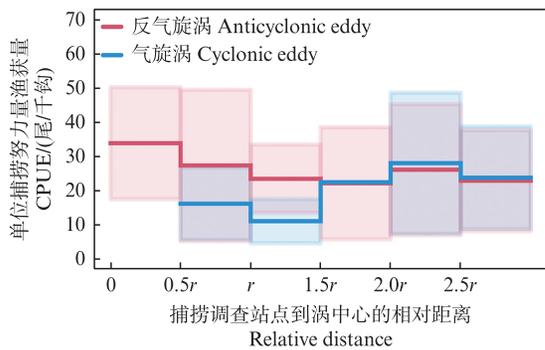


图6 气旋涡环境下长鳍金枪鱼 CPUE 变化趋势

Fig. 6 Variation trends of *Thunnus alalunga* CPUE in a cyclonic eddy environment

### 2.3 捕捞站点到涡中心的相对距离对 CPUE 的影响

图7展示了捕捞站点到涡中心的相对距离对长鳍金枪鱼 CPUE 的影响。随着捕捞站点到涡中心的相对距离的增加,气旋涡和反气旋涡内长鳍金枪鱼的 CPUE 呈现出不同的变化趋势。在反气旋涡环境中,长鳍金枪鱼 CPUE 的最大值位于距离涡中心较近的位置(0~ $r$ )较高,其值为(33.82±16.29)尾/千钩,但随着距离的增加,CPUE 逐渐降低。在气旋涡环境中,随着捕捞站点到涡中心相对距离的增加,长鳍金枪鱼 CPUE 逐渐增加,在涡边缘(2.0 $r$ ~2.5 $r$ )处,CPUE 达到峰值(27.99±20.51)尾/千钩,此后随着相对距离的进一步增加,CPUE 逐渐降低。在涡扰动的核心区域(0~1.5 $r$ ),反气旋涡中长鳍金枪鱼 CPUE 远高于气旋涡,然而在涡的边缘区域(>1.5 $r$ ),气旋涡和反气旋涡对 CPUE 大小的影响并无明显差异。



横线和箱体分别代表长鳍金枪鱼单位捕捞努力量渔获量均值和标准差范围。  
The horizontal lines and boxes represent the mean and standard deviation range of CPUE for albacore tuna, respectively.

图7 长鳍金枪鱼 CPUE 随捕捞站点到涡中心的相对距离变化趋势

Fig. 7 Variation trend of *Thunnus alalunga* CPUE with the relative distance from the survey station to the eddy center

### 3 讨论

本研究结合长鳍金枪鱼的渔业探捕数据,分析了捕捞站点到最近涡边缘的相对距离以及到涡中心的相对距离对南太平洋长鳍金枪鱼 CPUE 的影响。结果显示,长鳍金枪鱼的 CPUE 与捕捞站点到最近涡边缘的相对距离(气旋涡、反气旋涡)呈显著相关。随着捕捞站点到反气旋涡边缘的相对距离的增加,长鳍金枪鱼 CPUE 整体呈波动下降趋势。这一现象可能与反气旋涡内部复杂的流场结构及其水温、盐度等环境因素的综合作用密切相关。反气旋涡(暖涡)其内部通常表现为显著的下降流,其流动和旋转运动显著影响了海水的垂直混合特性,导致海水温度上升。这种温暖的环境降低了长鳍金枪鱼在该环境中进行温度调节所需的能量,为长鳍金枪鱼提供了适宜的生活环境,有利于其在涡旋边缘区域的聚集和觅食等行为<sup>[19,33]</sup>。

随着捕捞站点到最近气旋涡边缘的相对距离的增加,长鳍金枪鱼 CPUE 逐渐下降。在气旋涡的影响范围内,气旋涡(冷涡)促使富含营养盐的深层海水上升,影响了海水中的营养盐浓度以及浮游动植物的分布范围,促进初级生产力的提高,为长鳍金枪鱼等中上层捕食者提供了丰富且多样的食物资源。而随着捕捞站点到最近气旋涡边缘相对距离的增大,这种影响逐渐减弱,进而对长鳍金枪鱼 CPUE 的影响逐渐下降。例如,南印度洋水域的南象海豹、东北太平洋水域的北象海豹(*Mirounga angustirostris*)等在气旋涡环境中表现出更频繁的潜水行为和更长的水下停留时间,觅食活动显著增多且觅食行为变得集中且高效<sup>[23, 34-36]</sup>。

在涡扰动范围内(0~1.5r),反气旋涡内长鳍金枪鱼 CPUE 明显高于气旋涡,且其最大值位于距离涡心较近的位置。相较于气旋涡扰动范围,长鳍金枪鱼在气旋涡边缘部分捕获率更高,在 2.0r~2.5r 达到峰值。在 >2.5r 时,气旋涡与反气旋涡对 CPUE 大小的影响未展现出显著的差异,这表明涡旋的边缘效应较弱,同时可能受到其他环境因素的干扰,需要在之后的研究中添加环境数据进一步探索。不同涡旋类型对鱼类和海洋生物的聚集效应存在显著差异。在西北大西洋海域中,HSU 等<sup>[16]</sup>认为反气旋涡中聚集了北方蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)的猎物,如大西洋鲱鱼(*Clupea harengus*)、大西洋鲭鱼(*Scomber scombrus*)、乌贼和甲壳类动物等,所以在反气旋涡中北方蓝鳍金枪鱼的捕获量更高。相比之下,由于气旋涡增强了墨西哥湾以南水域的营养物质供应,提高了初级生产力并增加了觅食机会,因此黄鳍金枪鱼在气旋涡中的捕获量更高<sup>[37]</sup>。初级生产力往往与气旋涡紧密相关,而高密度饵料鱼群则更倾向于在反气旋涡中聚集<sup>[16]</sup>,两者复杂的耦合作用导致了物种间不同的捕获量。此外,涡旋对海龟等其他海洋生物的分布和迁移行为也有重要影响。根据 CHAMBAULT 等<sup>[14]</sup>的研究,在北大西洋区域,幼年赤蠵龟通常较少停留在气旋涡中。KOBAYASHI 等<sup>[13]</sup>的研究表明,在中国东海区域,赤蠵龟倾向于以强烈的气旋涡边缘作为它们的活动目标。一项在南大西洋开展的研究<sup>[38]</sup>表明,幼年赤蠵龟对反气旋涡流的核心区域具有较强的趋向性。在本研究中,不同类型的中尺度涡以及中尺度涡的内部与外部,长鳍金枪鱼的分布和数量呈现出显著的差异,揭示了长鳍金枪鱼等中上层捕食者的聚集、觅食和迁徙等行为与中尺度涡的类型、距离最近中尺度涡边缘的远近以及距离中尺度涡中心的距离密切相关,为渔业生产捕捞和海上渔业管理提供科学支撑。

本研究采用由 LGUENSAT 等<sup>[26]</sup>提出的 EddyNet 模型,基于涡特征环境数据对法属波利尼西亚南部公海与皮特凯恩岛东北部公海的中尺度涡旋进行识别分析,但由于对输入数据的质量和分辨率要求较高、对于边界模糊或强度较低的涡旋识别效果有限以及在涡旋密集或重叠区域的识别准确性较低等原因,存在涡旋未能成功

识别或误识别的情况<sup>[29]</sup>。此外,本研究主要聚焦于中尺度涡旋的数量与半径特征,未深入分析旋转速度、生命周期等其他关键涡旋特征,可能限制了对涡旋动态行为的深入理解。同时,在评估涡旋对南太平洋长鳍金枪鱼渔获量影响时,未将海温、盐度、溶解氧浓度、海流流速、叶绿素 a 质量浓度等关键环境因子纳入考量,可能影响对渔获量分布的综合解释。未来研究应通过优化数据质量、改进模型性能、构建涡旋特性与环境因子的综合模型,提升涡旋识别的准确性及对海洋渔业影响的全面理解。

作者声明本文无利益冲突。

#### 参考文献:

- [1] 郭刚刚,张胜茂,樊伟,等.南太平洋长鳍金枪鱼垂直活动水层空间分析[J].南方水产科学,2016,12(5):123-130.  
GUO G G, ZHANG S M, FAN W, et al. Spatial analysis of vertical active layer of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the South Pacific Ocean [J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(5): 123-130.
- [2] CONSOLI P, ROMEO T, BATTAGLIA P, et al. Feeding habits of the albacore tuna *Thunnus alalunga* (Perciformes, Scombridae) from central Mediterranean Sea [J]. Marine Biology, 2008, 155(1): 113-120.
- [3] DUFOUR F, ARRIZABALAGA H, IRIGOIEN X, et al. Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution [J]. Progress in Oceanography, 2010, 86(1/2): 283-290.
- [4] ZHOU C, HE P G, XU L X, et al. The effects of mesoscale oceanographic structures and ambient conditions on the catch of albacore tuna in the South Pacific longline fishery [J]. Fisheries Oceanography, 2020, 29(3): 238-251.
- [5] 张国良.基于海洋环境因子的所罗门群岛长鳍金枪鱼延绳钓渔场研究[D].上海:上海海洋大学,2023.  
ZHANG G L. Longline fishery ground for albacore tuna in Solomon Islands based on marine environmental factors [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [6] 程懿麒.基于机器学习的中西太平洋长鳍金枪鱼栖息地时空分布模型的构建和评价[D].上海:上海海洋大学,2022.  
CHENG Y Q. Construction and evaluation of model for the spatial and temporal distribution of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) habitats in the western and central Pacific Ocean based on machine learning [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [7] 谢笑艳,汪金涛,陈新军,等.南印度洋长鳍金枪鱼渔

- 获率与水深温度关系研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(5): 86-92.
- XIE X Y, WANG J T, CHEN X J, et al. Study on relationship between albacore catch rate and water depth and temperature in South Indian Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(5): 86-92.
- [8] 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.
- [9] SCALES K L, MILLER P I, EMBLING C B, et al. Mesoscale fronts as foraging habitats: composite front mapping reveals oceanographic drivers of habitat use for a pelagic seabird [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(100): 20140679.
- [10] TEW KAI E, MARSAC F. Influence of mesoscale eddies on spatial structuring of top predators' communities in the Mozambique Channel [J]. Progress in Oceanography, 2010, 86(1/2): 214-223.
- [11] 杨亮, 修义瑞, 张雷, 等. 亚丁湾附近海域海洋中尺度涡的时空特征分析[J]. 海洋测绘, 2023, 43(2): 46-49.
- YANG L, XIU Y R, ZHANG L, et al. Temporal and spatial characteristics of mesoscale eddies in the sea area near the Gulf of Aden [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2023, 43(2): 46-49.
- [12] FLIERL G, MCGILLICUDDYD J. Mesoscale and submesoscale physical-biological interactions [J]. The Sea, 2002, 12: 113-186.
- [13] KOBAYASHI D R, CHENG I J, PARKER D M, et al. Loggerhead turtle (*Caretta caretta*) movement off the coast of Taiwan: characterization of a hotspot in the East China Sea and investigation of mesoscale eddies [J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(4): 707-718.
- [14] CHAMBAULT P, BAUDENA A, BJORN DAL K A, et al. Swirling in the ocean: immature loggerhead turtles seasonally target old anticyclonic eddies at the fringe of the North Atlantic gyre [J]. Progress in Oceanography, 2019, 175: 345-358.
- [15] POLOVINA J, UCHIDA I, BALAZS G, et al. The Kuroshio Extension Bifurcation Region: a pelagic hotspot for juvenile loggerhead sea turtles [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, 53(3/4): 326-339.
- [16] 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.
- [17] COTTÉ C, PARK YH, GUINET C, et al. Movements of foraging king penguins through marine mesoscale eddies [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 274(1624): 2385-2391.
- [18] BRAUN C D, GAUBE P, SINCLAIR-TAYLOR T H, et al. Mesoscale eddies release pelagic sharks from thermal constraints to foraging in the ocean twilight zone [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(35): 17187-17192.
- [19] GAUBE P, BRAUN C D, LAWSON G L, et al. Mesoscale eddies influence the movements of mature female white sharks in the Gulf Stream and Sargasso Sea [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7363.
- [20] WOODWORTH P A, SCHORR G S, BAIRD R W, et al. Eddies as offshore foraging grounds for melon-headed whales (*Peponocephala electra*) [J]. Marine Mammal Science, 2012, 28(3): 638-647.
- [21] BAILLEUL F, COTTÉ C, GUINET C. Mesoscale eddies as foraging area of a deep-diving predator, the southern elephant seal [J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 408: 251-264.
- [22] CAMPAGNA C, ROSA PIOLA A, MARIN M R, et al. Southern elephant seal trajectories, fronts and eddies in the Brazil/Malvinas Confluence [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(12): 1907-1924.
- [23] KEATES T R, HAZEN E L, HOLSER R R, et al. Foraging behavior of a mesopelagic predator, the northern elephant seal, in northeastern Pacific eddies [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2022, 189: 103866.
- [24] MASSIE P P, MCINTYRE T, RYAN P G, et al. The role of eddies in the diving behaviour of female southern elephant seals [J]. Polar Biology, 2016, 39(2): 297-307.
- [25] KEITH JOHNSON W, MILLER L A, SUTHERLAND N E, et al. Iron transport by mesoscale Haida eddies in the Gulf of Alaska [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2005, 52(7/8): 933-953.
- [26] LGUENSAT R, SUN M, FABLET R, et al. EddyNet: a deep neural network for pixel-wise classification of oceanic eddies [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE, 2018: 1764-1767.
- [27] KLAMBAUER G, UNTERTHINER T, MAYR A, et al. Self-normalizing neural networks [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach, CA, USA: Curran Associates Inc., 2017: 971-980.
- [28] ZEILER M D, KRISHNAN D, TAYLOR G W, et al. Deconvolutional networks [C]//Proceedings of 2010 IEEE

- Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010:2528-2535.
- [29] LGUENSAT R, RJIBA S, MASON E, et al. Convolutional neural networks for the segmentation of oceanic eddies from altimetric maps[J]. *Remote Sensing*, 2018, 1(1): 1-16.
- [30] SAIDA S J, SAHOO S P, ARI S. Deep convolution neural network based semantic segmentation for ocean eddy detection [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 219: 119646.
- [31] 刘启明. 基于深度学习的海洋涡旋识别方法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- LIU Q M. Research on ocean eddies identification method based on deep learning [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.
- [32] FRANÇA 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 and Shelf Science*, 2012, 107: 22-31.
- [33] FENNELL S, ROSE G. Oceanographic influences on deep scattering layers across the North Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 2015, 105: 132-141.
- [34] DRAGON AC, MONESTIEZ P, BAR-HEN A, et al. Linking foraging behaviour to physical oceanographic structures: southern elephant seals and mesoscale eddies east of Kerguelen Islands[J]. *Progress in Oceanography*, 2010, 87(1/4): 61-71.
- [35] JONSEN I D, MCMAHON C R, PATTERSON T A, et al. Movement responses to environment: fast inference of variation among southern elephant seals with a mixed effects model[M]. *Ecology*, 2019, 100(1): e02566.
- [36] ROBINSON P W, SIMMONS S E, CROCKER D E, et al. Measurements of foraging success in a highly pelagic marine predator, the northern elephant seal[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2010, 79(6): 1146-1156.
- [37] TEO S L H, BLOCK B A. Comparative influence of ocean conditions on yellowfin and Atlantic bluefin tuna catch from longlines in the Gulf of Mexico [J]. *PLoS One*, 2010, 5(5): e10756.
- [38] GAUBE P, BARCELÓ C, MCGILLICUDDY JR D J, 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.

## Effects of oceanic mesoscale eddies on longline catches of *Thunnus alalunga* in the South Pacific Ocean

ZHENG Chunwen<sup>1</sup>, LIU Liwen<sup>1</sup>, GUO Shaojian<sup>1</sup>, MENG Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHOU Cheng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, 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 Sustainable Utilization of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to explore the modeling of the impact of mesoscale eddies on albacore tuna (*Thunnus alalunga*) catches in the South Pacific Ocean, and to reveal the correlation between different types of eddies and longline catches of albacore tuna in the South Pacific Ocean, in this study, the EddyNet deep learning model was used to automatically identify and detect mesoscale eddies in the South Pacific Ocean based on eddy feature environmental data, and combined with fishery sounding data to analyze the effects of the relative distances from the fishing stations to the eddy edges and eddy centers on the catch per unit effort (CPUE) of albacore tuna. The results show that anticyclonic eddies in the South Pacific Ocean are usually more numerous than cyclonic eddies and have a larger radius than cyclonic eddies. From beyond the eddy edge, both cyclonic and anticyclonic eddies showed a decreasing trend in CPUE for albacore tuna as the relative distance from the fishing site to the nearest eddy edge increased. Within the eddy disturbance region, the CPUE of the anticyclonic eddy was higher than that of the cyclonic eddy, and gradually decreased as the relative distance from the fishing site to the center of the eddy increased. The study suggests that the mesoscale has a positive regulatory effect on catch yield compared to the background field, and that the anticyclonic and cyclonic eddies have different influence mechanisms on the spatial distribution of albacore tuna. This study further deepens the understanding of the complex relationship between oceanic mesoscale eddies and the spatial distribution of albacore tuna, and provides a scientific basis for the optimization of fishing efficiency and sustainable management of fisheries.

**Key words:** *Thunnus alalunga*; mesoscale eddy; EddyNet deep learning model; CPUE; South Pacific Ocean