

刘瑜, 郑全安, 李晓峰. 西北太平洋柔鱼渔场分布与涡动能变化的相关关系[J]. 海洋学报, 2020, 42(2): 44–51, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.02.005

Liu Yu, Zheng Quanan, Li Xiaofeng. Relationship between neon flying squid *Ommastrephes bartramii* fishery distribution patterns and eddy kinetic energy in Northwest Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(2): 44–51, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.02.005

# 西北太平洋柔鱼渔场分布与涡动能变化的相关关系

刘瑜<sup>1</sup>, 郑全安<sup>2</sup>, 李晓峰<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 马里兰大学 大气海洋科学系, 马里兰州 科利吉帕科 20742)

**摘要:** 本研究利用卫星高度计数据计算海洋涡动能 (Eddy Kinetic Energy, EKE), 根据 2010–2016 年中国远洋渔业协会鱿钓组提供的西北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 渔业生产数据, 分析柔鱼渔场的 EKE 分布特征以及黑潮延伸体 EKE 的时空变化对柔鱼渔场分布的影响。结果显示, 柔鱼渔场的 EKE 与单位捕捞努力量渔获量 (Catch Per Unit Effort, CPUE) 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), EKE 对 CPUE 的有效影响范围为  $0 \sim 1\,500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , 最适宜 EKE 范围为  $25 \sim 150 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。黑潮延伸体 EKE 强度由西向东递减, 与 CPUE 年平均呈负相关, 相关系数为  $0.81 (P < 0.05)$ 。按黑潮延伸体经度范围分为 4 个子区域, CPUE 月平均纬度重心响应该月 EKE 强度最高的子区域。盛渔期 8–10 月渔场距离黑潮延伸体在  $800 \sim 1\,000 \text{ km}$  范围内时, CPUE 随距离增加而增大, 其中最适宜的距离范围为  $850 \sim 950 \text{ km}$ 。研究表明, 当黑潮延伸体路径弯曲多变时, EKE 增大, 而柔鱼 CPUE 变低, 渔场位置越偏北。

**关键词:** 涡动能; 柔鱼; 柔鱼渔场; CPUE; 黑潮延伸体; 西北太平洋

中图分类号: P745

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)02-0044-08

## 1 引言

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 为我国西北太平洋公海重要经济鱼类之一, 通常随着黑潮进行南北索饵、繁殖洄游, 并在黑潮与亲潮交汇区形成渔场<sup>[1]</sup>。在交汇区冷暖水汇流, 海水垂直运动加强, 营养盐富集并伴有浮游植物大量繁殖, 从而成为高生产力区, 吸引浮游动物和鱼类来此索饵与繁衍<sup>[2]</sup>。黑潮延伸体是北太平洋中尺度涡动能 (Eddy Kinetic Energy, EKE) 最大的海域。研究表明黑潮延伸体大弯曲以及高生产力区域均与涡旋活动有相互联系<sup>[3-4]</sup>。涡旋运动过程会影响环流、海温及叶绿素的垂直和水平分布, 从而影响资源丰度和渔场分布。以往研究多为黑潮形态或者黑潮流量对柔鱼渔场分布的影响<sup>[5-6]</sup>, 或者将涡动能作为海洋环境要素之一, 与其他环境因子如海

表温度、叶绿素、海面高度等建立模型预测渔业资源丰度与渔场分布<sup>[7-8]</sup>, 而黑潮延伸体涡动能对于柔鱼渔场分布的影响研究阙如。因此, 本文根据中国鱿钓船在西北太平洋海域的柔鱼生产数据和卫星高度计遥感数据, 分析柔鱼渔场的涡动能与柔鱼的单位捕捞努力量渔获量 (Catch Per Unit Effort, CPUE) 的相关关系, 同时计算黑潮延伸体涡动能的时空变化及其对柔鱼渔场分布的影响, 以期寻找柔鱼渔场适宜的涡动能范围, 探索西北太平洋柔鱼渔场分布对黑潮延伸体涡动能变化的响应, 为该渔业资源的评估与科学开发管理提供依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源和预处理

柔鱼生产数据取自中国远洋渔业协会上海海洋

收稿日期: 2019-01-06; 修订日期: 2019-05-10。

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“大洋性渔业捕捞技术与新资源开发”(2013BAD13B05)。

作者简介: 刘瑜 (1985—), 女, 山东省烟台人, 工程师, 主要研究方向为渔业遥感。E-mail: liuy@shou.edu.cn

\* 通信作者: 李晓峰, 教授, 主要从事海洋遥感和人工智能海洋研究。E-mail: xfli@shou.edu.cn

大学鱿钓技术组,数据内容包括作业日期、经度、纬度、日产量(t)和作业船数等,数据时间为2010–2016年的7–11月,渔船作业范围主要分布在38°~46°N, 147°~170°E。CPUE定义为每艘船每天的捕捞产量,单位为t/d,作为渔业资源丰度的指标。采用渔场分布重心作为资源量的空间分布和变化指标<sup>[9]</sup>,计算公式为

$$X = \frac{\sum_i^n (C_i \times X_i)}{\sum_i^n C_i}, \quad Y = \frac{\sum_i^n (C_i \times Y_i)}{\sum_i^n C_i}, \quad (1)$$

式中, $X$ 、 $Y$ 分别为渔场作业重心的经度和纬度; $C_i$ 为作业点 $i$ 的CPUE; $X_i$ 和 $Y_i$ 分别为作业点 $i$ 的纬度和经度; $n$ 为作业总次数。

环境数据为卫星高度计测得的海表面高度异常(Maps Sea Level Anomaly, MSLA)数据,取自法国空间局AVISO网站(<http://www.aviso.oceanobs.com>),其中包括海面高度数据和地转流数据。该数据采用墨卡托投影方式插值,空间分辨率 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ ,时间分辨率为天。涡动能的计算公式为<sup>[10]</sup>:

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

式中, $EKE$ 为涡动能,单位为 $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ;  $u' = u - \bar{u}$ ,  $v' = v - \bar{v}$ ,  $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 分别是纬向速度 $u$ 和经向速度 $v$ 的年平均值。

## 2.2 研究方法

如图1所示,西北太平洋柔鱼渔场主要分布在黑潮延伸体以北位置。本文以A区(32°~38°N, 138°~168°E)代表黑潮延伸体区域,B区(31°~34°N, 138°~142°E)代表黑潮大弯曲发生的主要区域,再按经度范围(142°~166°E)等分为C区(142°~150°E)、D区(150°~158°E)和E区(158°~166°E)3个子区域。参

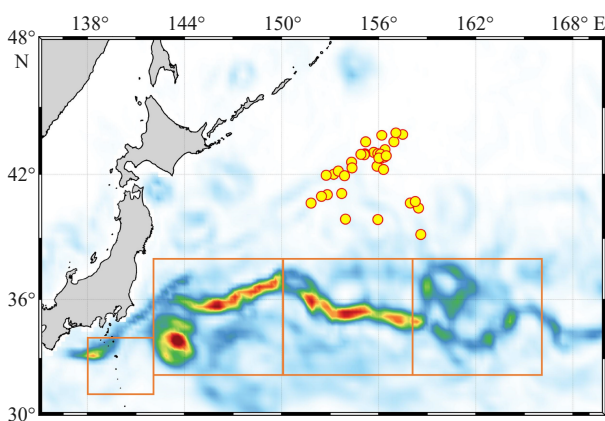


图1 研究区域和渔场重心位置(黄色圆圈)

Fig. 1 Study area and the locations of fishing ground centroids (yellow circles)

考冯劭华等<sup>[11]</sup>提出的面积指数,本文定义黑潮延伸体各区域内 $EKE$ 大于 $3000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 所有点的加权和作为 $EKE$ 的强度(仍记作 $EKE$ );然后对不同子区域 $EKE$ 大于 $3000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 的数据点进行线性回归拟合,求出一条直线代表该区域的位置,并计算作业点到该直线的垂直距离,记作 $DIST$ 。

广义可加模型(Generalized Additive Models, GAM)能够直接处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系,也可以独立得出解释变量对响应变量的影响效应<sup>[12]</sup>。本文计算每个渔捞作业点的 $EKE$ ,按月平均匹配组成样本集,利用频率分析法和GAM模型,估算适宜的 $EKE$ 范围;然后将CPUE和黑潮延伸体各区域的 $EKE$ 强度、渔场重心到 $EKE$ 位置的距离,按天和月平均数据组成样本集,采用回归分析法和相关性分析法,分析黑潮延伸体 $EKE$ 的强度变化及其对渔场空间分布和资源丰度的影响。

## 3 结果

### 3.1 柔鱼CPUE与作业渔场EKE的关系分析

图2示出2010–2016年7–11月的西北太平洋柔鱼的月均CPUE和 $EKE$ 的变化,得出7年月平均CPUE和 $EKE$ 呈负相关,相关系数为0.78( $P < 0.01$ )。每年的月均CPUE均呈先增加后递减趋势,7月为1.16 t/d,而2012年7月最低为0.68 t/d;8月和9月增高,分别为2.40 t/d和2.63 t/d,2016年9月最高为4.48 t/d;10月和11月降低,分别为2 t/d和1.82 t/d。月均 $EKE$ 与CPUE的季节变化呈相反趋势,7–11月的平均 $EKE$ 分别为 $264 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $206 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $100 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $145 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 和 $173 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,其中除了2015年7月、8月和2016年7月之外,月平均 $EKE$ 低于 $300 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,最低在2011年9月为 $30 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,而该月平均CPUE为3.09 t/d,为月平均CPUE第二高月份。

图3示出2010–2016年7–11月CPUE在各 $EKE$ 区间内的累积频率分布,得出CPUE主要分布在 $EKE$ 范围为 $0 \sim 100 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,该范围的累积频率分别为32%、58%、71%、62%和46%,而在 $0 \sim 200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 范围内累积频率分别为53%、82%、89%、78%和69%。作业位置主要集中在 $EKE$ 较低的区域。结合 $EKE$ 与CPUE关系的GAM分析图(图4),在95%置信度下,CPUE受到 $EKE$ 的影响显著( $P < 0.01$ ), $EKE$ 对CPUE的有效影响范围为 $0 \sim 1500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。在 $0 \sim 500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 范围内,CPUE随着 $EKE$ 增加而减少,尤其在 $0 \sim 200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 呈显著线性负相关趋势。在 $500 \sim 1200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 范围内,随 $EKE$ 升高CPUE增大,呈

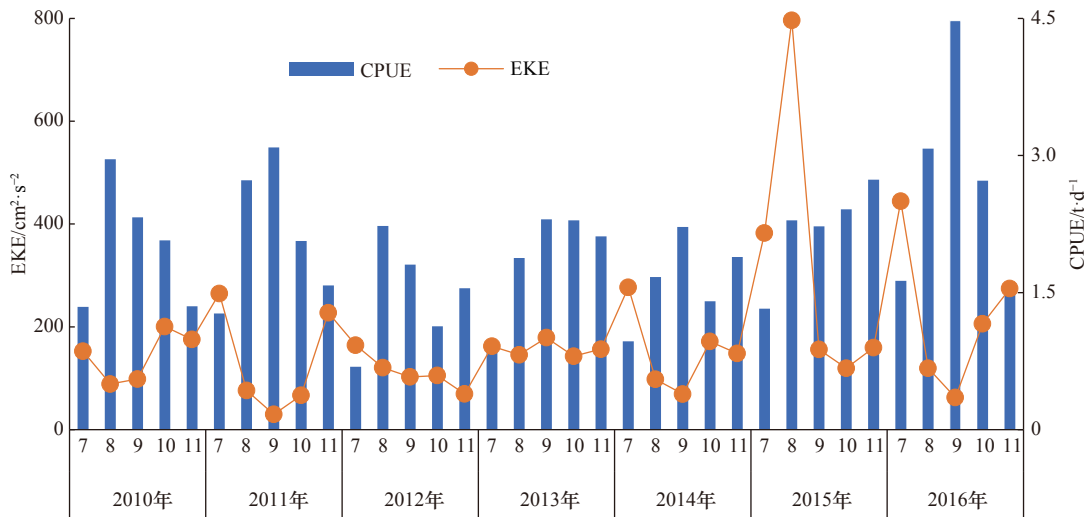


图2 2010–2016年7–11月柔鱼的月平均CPUE和EKE变化

Fig. 2 Variations of the monthly average CPUE and EKE from July to November during 2010–2016

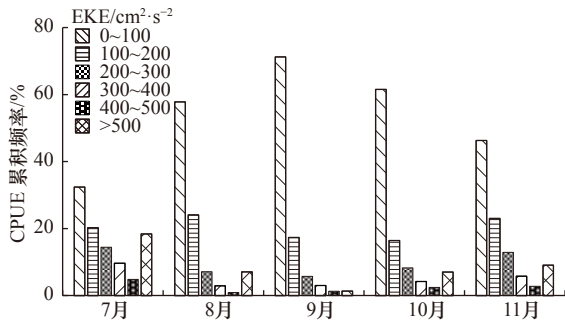


图3 2010–2016年7–11月CPUE在各EKE区间内的累积频率分布

Fig. 3 Distribution of CPUE frequencies in relation to EKE from July to November during 2010–2016

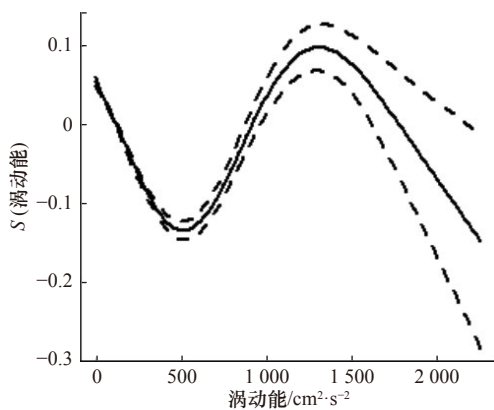


图4 EKE与CPUE关系的GAM分析图

Fig. 4 GAM analysis of the relationship between EKE and CPUE

$S$  为光滑样条函数的拟合值, 表示其对 CPUE 的影响。虚线表示 95% 的置信区间, 实线表示拟合后平均值  
 $S$  is the fitted value of smoothing spline functions, which represent their impacts on CPUE. Dashed lines indicate 95% confidence intervals, solid line indicates the mean of fitted data

非线性相关。GAM 分析结果显示, 柔鱼渔场的最佳 EKE 范围为  $25 \sim 150 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。

### 3.2 柔鱼 CPUE 与黑潮延伸体 EKE 的关系分析

图 5 示出 2010–2016 年 7–11 月的黑潮延伸体 EKE\_A 与 CPUE 的相关分析, 可见年平均 EKE\_A 与 CPUE 呈负相关, 二者的相关系数为  $0.81 (P < 0.05)$ , 这意味着黑潮延伸体中尺度 EKE 越活跃的年份, 柔鱼的 CPUE 越低。7 年整体月平均 EKE\_A 与 CPUE 呈负相关, 相关系数为  $0.35 (P < 0.05)$ 。图 5 还显示, 不同年份的月平均变化趋势有所不同。经计算, 2010–2011 年, 月平均 EKE\_A 与 CPUE 为正相关, 相关系数为  $0.80 (P < 0.05)$ ; 2012–2016 年, 二者为负相关, 相关系数为  $0.51 (P < 0.05)$ ; 2015–2016 年负相关系数达  $0.78 (P < 0.05)$ , 其中 2016 年 9 月的 EKE\_A 最低为  $108 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , 而该月 CPUE 高达  $4.47 \text{ t/d}$ , 为研究期间最高值。对于 2010 年和 2011 年, 尽管二者月平均为正相关, 但年平均 EKE\_A 均不高, 并且月平均 EKE\_A 的变化幅度较低。这可能与大尺度气候年际变化有关, 同时也受到渔场的作业位置的影响。

本研究进一步计算黑潮延伸体各子区域 EKE 与 CPUE 的相关关系, 为发现不同区域的 EKE 变化情况, 本研究计算了黑潮延伸体 B、C、D 和 E 子区域 2010–2016 年 7–11 月逐天 EKE 变化, 图 6 结果显示, 黑潮延伸体 35 个月 EKE 总和, E 区为  $244 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , 远低于 C 区的  $652 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  和 D 区的  $648 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , 可见黑潮延伸体 EKE 强度的年际变化为由西向东逐渐递减。其中, C 区和 D 区不同年份的变化规律略有不同, 2013 年、2014 年、2016 年为 C 区 EKE 高于 D 区, 其他年份相反。对于不同区域, EKE\_B 以斜率为  $0.0032$

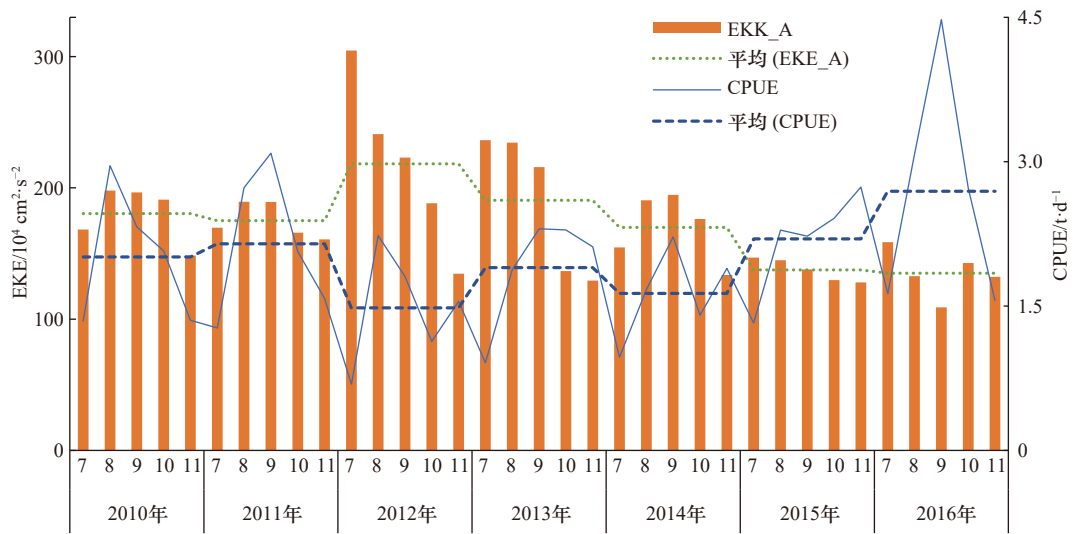


图5 2010-2016年7-11月CPUE与黑潮延伸体EKE\_A相关变化图

Fig. 5 Variations of the monthly average CPUE and EKE\_A of the Kuroshio Extension from July to November during 2010-2016

虚线表示每年的平均值,实线表示拟合后平均值

Dashed lines indicate the average of each year, solid line indicates the mean of fitted data

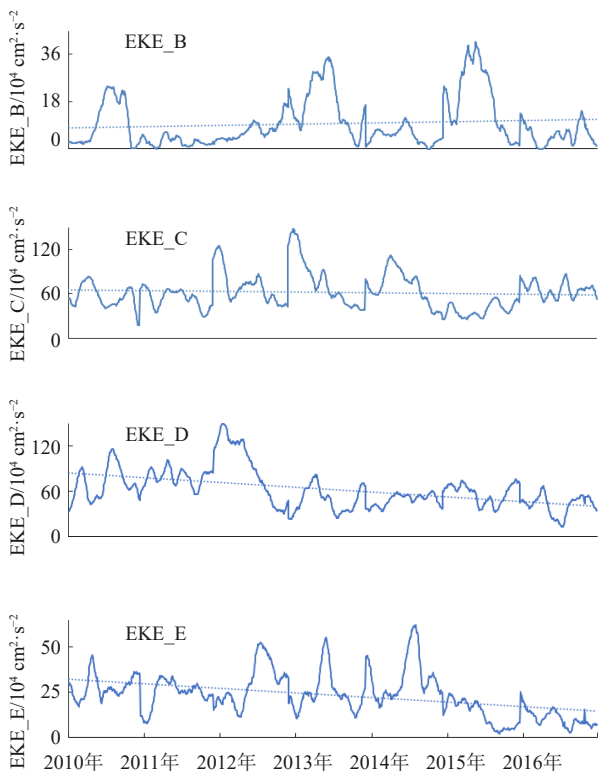


图6 2010-2016年7-11月黑潮延伸体各子区域的EKE变化

Fig. 6 Variations of the EKE in sub-areas of the Kuroshio Extension from July to November during 2010-2016

( $R^2=0.01$ )递增,在2010年、2013年和2015年9月出现3个峰值,分别为 $24 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $35 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 和 $40 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ;EKE\_C、EKE\_D、EKE\_E呈递减趋势,斜率分别为 $-0.0058$ ( $R^2=0.01$ )、 $-0.0425$ ( $R^2=0.24$ )和

$-0.0169$ ( $R^2=0.18$ )。EKE\_C峰值在2012年、2013年7月和2014年8月,分别为 $125 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $148 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 和 $113 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,EKE\_D在2012年7月峰值为 $150 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ;EKE\_E峰值在2012年、2014年10月和2013年9月,分别为 $53 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 、 $62 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 和 $55 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。研究发现,C、D、E3个区域出现峰值的月份对应的CPUE则较低,7-10月CPUE最低的年份依次为2012年、2014年、2013年和2012年,而当某区域出现峰值的年份,该区域的EKE总强度也要高于其他年份。以上分析显示,柔鱼的月平均CPUE变化响应黑潮延伸体的不同子区域的EKE强度变化,这与该月渔场位置距离动力活跃区域的远近有关,因此有必要进一步分析不同区域EKE强度与渔场位置的相关性。

图7显示2010-2016年7-11月柔鱼CPUE渔场分布重心主要范围为 $39^\circ \sim 44^\circ \text{N}$ 、 $151^\circ \sim 160^\circ \text{E}$ 。经计算,月平均CPUE与纬度重心呈正相关,相关系数为 $0.65$ ( $P < 0.01$ )。而月平均CPUE与经度重心无显著相关,故采用CPUE纬度重心来反映渔场位置。由于柔鱼渔场的变动,纬度重心分别受不同子区域的影响,表1为2010-2016年柔鱼CPUE纬度重心与黑潮延伸体EKE的相关性分析,相关系数取该月相关最高的区域。结果显示,7月CPUE纬度重心对EKE\_D有明显响应,而2011年、2014年和2015年7月经度分布重心变化幅度大且较长时间位于高经度区域,因此,对EKE\_E响应明显;8月,除2014年响应EKE\_C,其余年份均响应EKE\_B,且相关系数均超过 $0.70$ ( $P <$

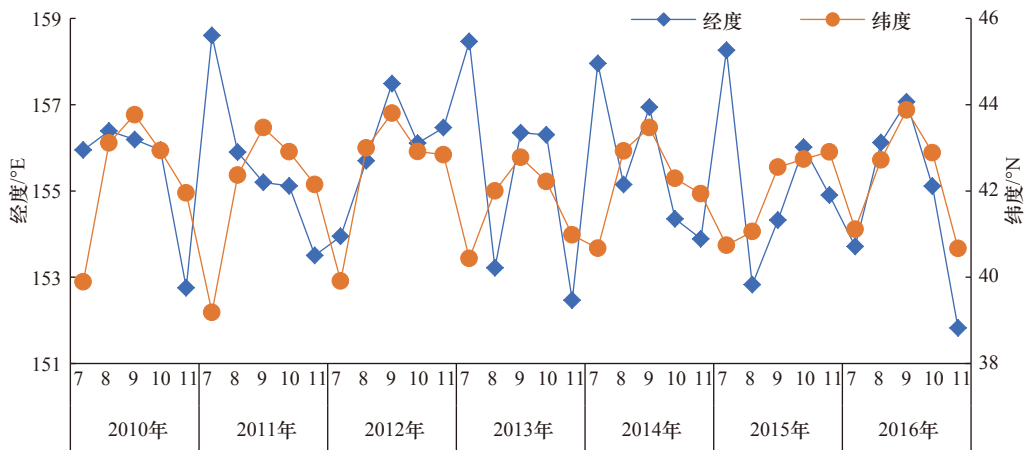


图 7 2010–2016 年 7–11 月 CPUE 渔场分布重心变化

Fig. 7 Fishing ground centroids from July to November, 2010–2016

表 1 CPUE 纬度重心与黑潮延伸体 EKE 的相关关系

Table 1 Correlations of the latitudinal centroids of CPUE to EKE of the Kuroshio Extension

年/份	7月	8月	9月	10月	11月
2010	0.77_D	0.79_B	$P>0.05$	0.69_D	$P>0.05$
2011	0.55_E	0.91_B	$P>0.05$	0.85_C	$P>0.05$
2012	0.81_D	0.71_B	0.91_E	0.82_C	$P>0.05$
2013	0.86_D	0.96_B	$P>0.05$	0.70_C	$P>0.05$
2014	0.51_E	0.87_C	0.86_C	0.83_C	$P>0.05$
2015	0.84_E	0.73_B	0.36_C	$P>0.05$	$P>0.05$
2016	0.74_D	0.82_B	0.60_C	$P>0.05$	$P>0.05$

注: 表中有系数值时均为  $P < 0.01$ ; \_B、\_C、\_D、\_E 表示子区域。

0.01); 9月, 2014–2016年响应 EKE\_C, 2012年响应 EKE\_E, 其他年份与 EKE 相关不显著, 其中, 2012年9月的经度重心为7年里最高月份; 10月, 2010年响应 EKE\_D, 2011–2014年响应 EKE\_C, 而2015年和2016年无显著相关; 11月, 为渔船返程期, 均与 EKE 无显著相关。由此可见, 黑潮延伸体 EKE 越活跃, 柔鱼的纬度分布重心越偏北。研究发现, 除了与对应的区域 EKE 活跃相关外, 也与渔场作业位置与活跃区的距离有关。

由于7月和11月渔场分布经度变化幅度大, 故取盛渔期8–10月 CPUE 与各区 DIST 进行 GAM 分析, 结果如图8所示。在95%置信度下, GAM 模型显示 A、B、D、E 区域的 DIST 对 CPUE 影响极为显著 ( $P < 0.01$ ), C 区影响不显著 ( $P > 0.05$ ), D 区变化与 A 区的变化趋势最接近。A 区和 D 区, 在 DIST 为 800~1 000 km 范围内, CPUE 与 DIST 呈正相关, 小于 800 km 和大于 1 000 km 置信度较低, 二者没有显著相关性;

B 区由于距离作业渔区较远, CPUE 与 DIST 在 600~800 km 和 1 300~1 600 km 范围内呈负相关, 在 800~1 000 km 范围内呈正相关。C 区 DIST 主要分布在 700 km 左右范围内, 与 CPUE 没有显著相关性。总的来说, 渔场与黑潮延伸体的距离过近 ( $< 600$  km) 或者过远 ( $> 1 000$  km), 则 DIST 对 CPUE 没有影响, 而 DIST 在 800~1 000 km 范围内, CPUE 随 DIST 增加而增大, 其中最适宜的 DIST 范围为 850~950 km。

#### 4 讨论与分析

柔鱼为短生命周期鱼类, 对海洋环境变化较为敏感, 并且具有昼夜垂直洄游的习性<sup>[7]</sup>。EKE 活跃的区域, 海面高度变化大, 海水常发生强烈的垂直运动, 并引起温度梯度急剧变化, 超过柔鱼适应范围, 而温跃层成了鱼类垂直运动时难以逾越的障碍, 并且海流流速大时不利于鱼群集聚。研究发现, 柔鱼渔场的 EKE 与 CPUE 季节变化呈显著负相关, 相关系数为 0.78 ( $P < 0.01$ ), 其中9月柔鱼 CPUE 最高, 而对应的最低 EKE。根据 CPUE 的累积频率分布, 渔场 EKE 范围主要分布在 0~200  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  内, 其中9月70%以上 EKE 范围为 0~100  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , CPUE 在各 EKE 区间范围内累积频率为逐渐递减趋势。GAM 分析显示 CPUE 受到 EKE 的影响显著, 有效影响范围为 0~1 500  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , 最适宜 EKE 范围为 25~150  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , 本研究得出的以上适宜范围与以往研究结果基本一致<sup>[7]</sup>。尽管柔鱼喜好 EKE 较低的海域, 但柔鱼并不集聚在 EKE 小于 20  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  的水域, 这可能是因为海流和温度梯度变化若在鱼类的适应范围内, 鱼群也需要由涡旋引起的海水垂直运动带来的饵料。

北太平洋柔鱼通常进行季节性南北洄游, 在长距离的洄游过程中, 黑潮和亲潮势力的此消彼长以及黑

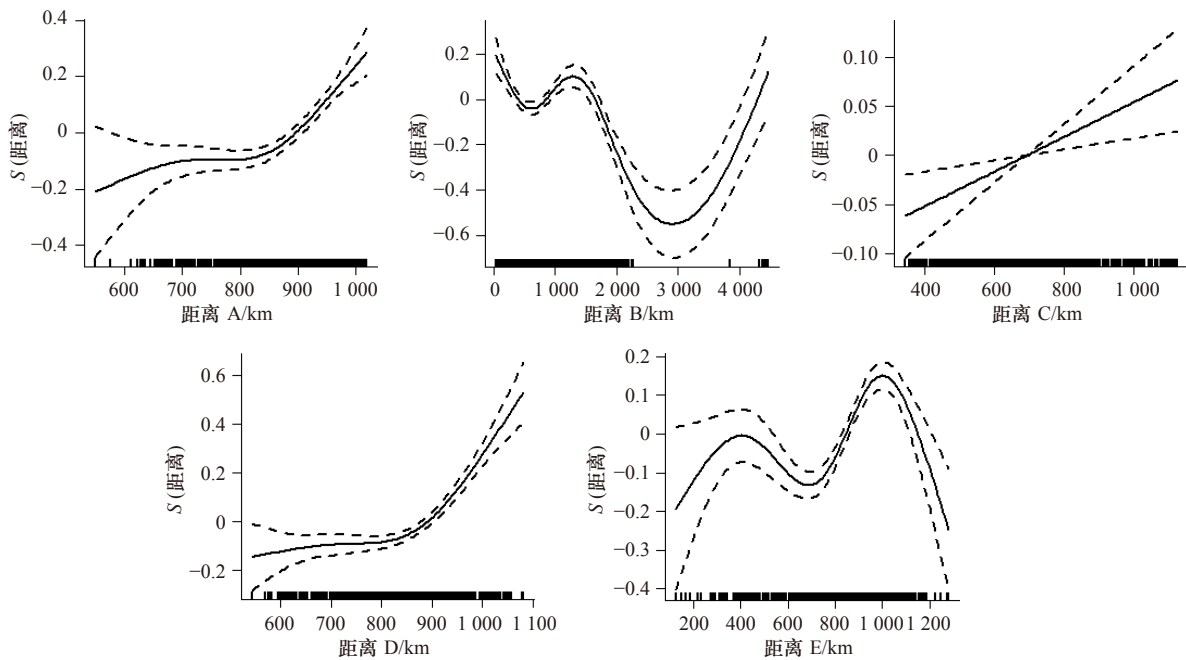


图8 不同区域DIST与CPUE关系的GAM分析

Fig. 8 GAM analysis of the relationship between DIST of sub-areas and CPUE

潮延伸体的环境条件对柔鱼的丰度与分布、死亡率以及补充量等产生很大影响<sup>[13-14]</sup>。总结前人关于黑潮延伸体形态对柔鱼的影响主要为黑潮延伸体发生大弯曲,呈大的蛇形摆动时,柔鱼渔场的水温会降低,资源丰度降低,渔场分布重心向北偏移<sup>[4-6,12]</sup>。通常在黑潮大弯曲发生的年份,黑潮延伸体路径复杂多变不稳定,常伴有涡旋产生并从黑潮延伸体主轴脱落<sup>[3]</sup>,从而导致EKE增加。本研究发现,黑潮延伸体EKE\_A与CPUE年平均呈显著负相关关系,EKE越活跃的年份,柔鱼的CPUE越低,与黑潮延伸体大弯曲产生的结果相一致。但在年际月均变化中,2010年和2011年两年为正相关,其余年份为负相关,其中2015年和2016年呈显著负相关,这可能是由于黑潮延伸体大弯曲主要位于B区,而由于涡旋和周围海水相互作用产生的湍流耗散,黑潮延伸体EKE表现为由西向东递减的变化趋势,每年递减的时间有所区别,因此,月平均CPUE变化响应黑潮延伸体的不同区域EKE强度的变化。黑潮延伸体EKE强度在春、夏季较大,这种季节变化机制有多种可能的解释,如风场的季节性变化引起海洋正压响应等<sup>[15]</sup>。

本研究发现这种变化更多影响着渔场的分布,由于涡旋在运动过程中能量不断耗散<sup>[16]</sup>,因此其影响具有一定的范围,这导致响应区域与渔场的距离远近相关,研究结果显示,8-10月盛渔期DIST在800~1000 km范围内,CPUE随DIST增加而增大,其中最适宜的

DIST范围为850~950 km。前文计算给出的CPUE 2013年、2014年和2015年连续3年对黑潮延伸体的响应特征却各不相同,本文将这3年盛渔期月份的渔场重心与月均EKE分布图叠加,以更好的说明响应区域的特征。从图9中可以看出,2013年黑潮延伸体路径变化复杂,黑潮延伸体主轴南北侧涡旋较多,这意味着8月B区EKE增强,9月B区和C区EKE均较强,因此,2013年8月和9月渔场位置分别响应B区和C区的EKE强度。在2014年,黑潮延伸体路径总体平顺,涡旋较少,仅C区在黑潮延伸体南侧出现一个明显的涡旋,该涡旋持续发展到了10月,因此,2014年渔场位置盛渔期期间一直响应C区的EKE强度变化。而2015年黑潮路径虽然总体弯曲较多,但涡旋数量不多,在B区的一个环状的涡旋持续到10月稍减弱,因此2015年渔场位置盛渔期在8月份响应B区的EKE强度变化。而渔场与黑潮延伸体的距离的响应表现为,2014年的经纬度均较高,2015年的经纬度均为7年中最低的年份,而CPUE最高月份为10月,与其他年份的盛渔期时间相反。结合表1,研究结果显示,CPUE的纬度重心响应该月EKE强度最高的子区域,并与其响应子区域的EKE呈正相关,因此当EKE强度增大,渔场位置越偏北。

由此可见,黑潮及黑潮延伸体的EKE变化不仅影响柔鱼渔场分布,而且影响着渔场与黑潮延伸体的距离,从而影响柔鱼的洄游路线和渔场变动,而且大

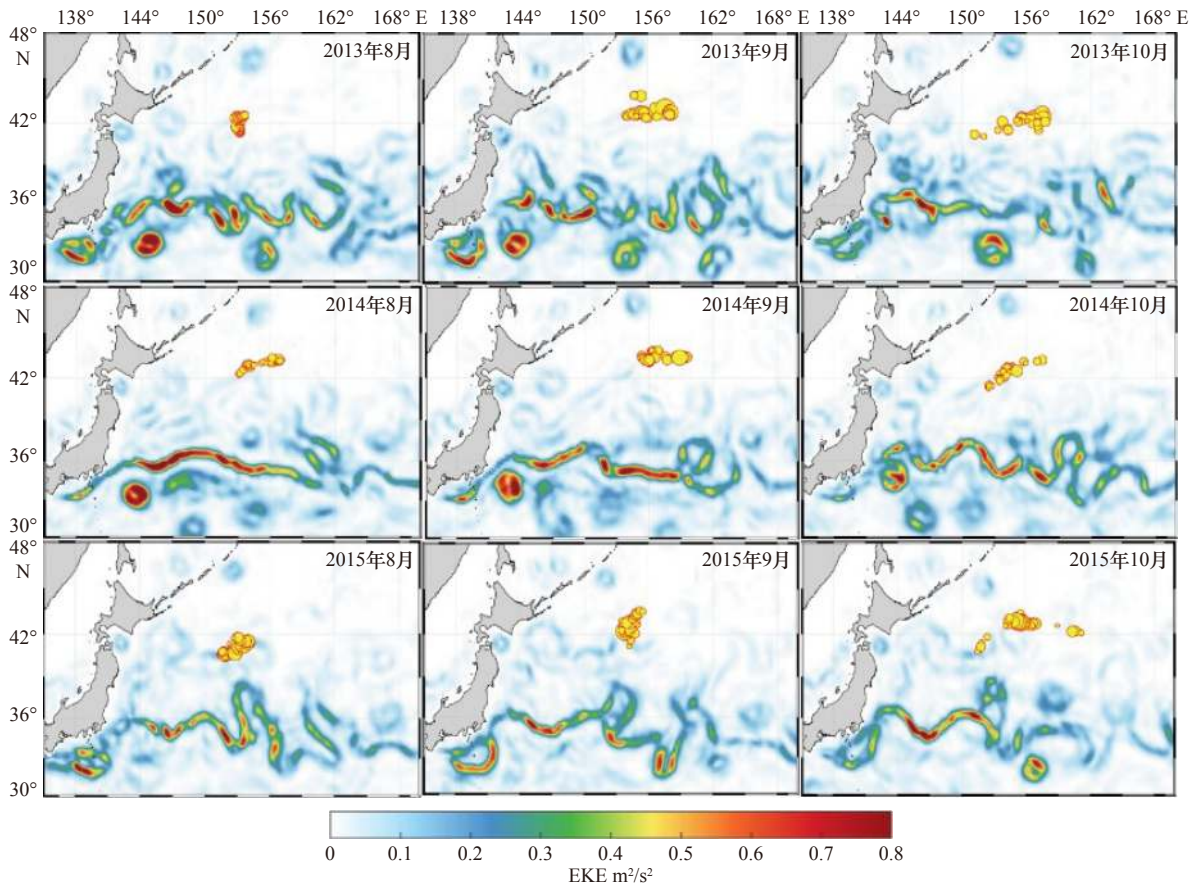


图 9 2013–2015 年 8–10 月渔场重心与月平均 EKE 分布图(黄色圆圈表示渔场重心)

Fig. 9 Maps of fishing ground centroids (yellow circles) with backgrounds of monthly average EKE from August to October, 2013–2015

尺度气候变化也影响着渔场的变动<sup>[17]</sup>, 今后需要进一步开展黑潮及黑潮延伸体与其他环境因子如温度、

海表面高度和叶绿素等对柔鱼资源丰度和渔场分布变动影响的综合分析研究。

#### 参考文献:

- [1] 王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.  
Wang Yaogeng, Chen Xinjun. Commercial Oeanic Ommastrephid Squid of the World and its Fishery[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [2] Watanabe Y. Recruitment variability of small pelagic fish populations in the Kuroshio-Oyashio transition region of the western North Pacific[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 2009, 41: 197–204.
- [3] Qiu B, Chen S M. Concurrent decadal mesoscale eddy modulations in the Western North Pacific subtropical gyre[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(2): 344–358.
- [4] 郑聪聪, 杨宇星, 王法明. 北太平洋中尺度涡时空特征分析[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 105–112.  
Zheng Congcong, Yang Yuxing, Wang Faming. Spatial-temporal features of eddies in the North Pacific[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 105–112.
- [5] 范江涛, 陈新军, 曹杰, 等. 西北太平洋柔鱼渔场变化与黑潮的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(3): 378–384.  
Fan Jiangtao, Chen Xinjun, Cao Jie, et al. The variation of fishing ground of *Ommastrephes Bartramii* in the Northwest Pacific concerning with Kuroshio current[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(3): 378–384.
- [6] 崔雪森, 伍玉梅, 唐峰华, 等. 日本以南黑潮流量对西北太平洋柔鱼渔场重心影响的滞后性分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(1): 99–104.  
Cui Xuesen, Wu Yumei, Tang Fenghua, et al. effect of Kuroshio transport off southern japan on fishing ground gravity of neon flying squid *Ommastrephes Bartramii* in Northwest Pacific Ocean based on time lag analysis[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(1): 99–104.
- [7] 余为. 西北太平洋柔鱼冬春生群对气候与环境变化的响应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.  
Yu Wei. Response mechanism of winter-spring cohort of neon flying squid to the climatic and environmental variability in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.

- [8] Syah A F, Saitoh S I, Alabia I D, et al. Predicting potential fishing zones for Pacific saury (*Cololabis saira*) with maximum entropy models and remotely sensed data[J]. *Fishery Bulletin*, 2016, 114(3): 330–342.
- [9] Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, et al. El Niño southern oscillation and tuna in the western Pacific[J]. *Nature*, 1997, 389(6652): 715–718.
- [10] 张苑伦, 刘志亮, 王世红. 南黄海涡动能及其谱特征的季节性变化[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 130–137.  
Zhang Wanlun, Liu Zhiliang, Wang Shihong. Seasonal variations of eddy kinetic energy and its spectral characteristics in the southern Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 130–137.
- [11] 冯劭华, 罗德海, 钟霖浩. 黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系[J]. *大气科学*, 2015, 39(5): 861–874.  
Feng Shaohua, Luo Dehai, Zhong Linhao. The relationship between mesoscale eddies in the Kuroshio Extension region and storm tracks in the North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(5): 861–874.
- [12] 田思泉, 陈新军, 冯波, 等. 西北太平洋柔鱼资源丰度与栖息环境的关系及其时空分布[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, 18(5): 586–592.  
Tian Siqun, Chen Xinjun, Feng Bo, et al. Spatio-temporal distribution of abundance index for *Ommastrephes Bartramii* and its relationship with habitat environment in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2009, 18(5): 586–592.
- [13] Chen X J, Cao J, Chen Y, et al. Effect of the Kuroshio on the spatial distribution of the red flying squid *Ommastrephes Bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2012, 88(1): 63–71.
- [14] 陈新军, 曹杰, 田思泉, 等. 表温和黑潮年间变化对西北太平洋柔鱼渔场分布的影响[J]. *大连水产学院学报*, 2010, 25(2): 119–126.  
Chen Xinjun, Cao Jie, Tian Siqun, et al. Effect of inter-annual change in sea surface water temperature and Kuroshio on fishing ground of squid *Ommastrephes Bartramii* in the Northwest Pacific[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2010, 25(2): 119–126.
- [15] 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 Dong, Chen Xi, Zhao Yanling, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the two western boundary current extension regions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(6): 15–28.
- [16] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 131–158.  
Zheng Quanan, Xie Lingling, Zheng Zhiwen, et al. Progress in research of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 131–158.
- [17] 余为, 陈新军. 西北太平洋柔鱼冬春生群体栖息地的变化研究[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 86–94.  
Yu Wei, Chen Xinjun. Variability in the potential habitat of winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes Bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 86–94.

## Relationship between neon flying squid *Ommastrephes bartramii* fishery distribution patterns and eddy kinetic energy in Northwest Pacific Ocean

Liu Yu<sup>1</sup>, Zheng Quanan<sup>2</sup>, Li Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park 20742, USA)

**Abstract:** In this study, the eddy kinetic energy (EKE) derived from satellite altimeter data and the fishery data during 2010–2016 obtained from the Chinese Squid-jigging Science and Technology Group, are used to analyze the spatial and temporal relationship between the Kuroshio Extension EKE and fishing ground distribution. The results show that the catch per unit effort (CPUE) is negatively related to the EKE of fishing ground in the range of 0–1 500 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, the most suitable EKE is between 25–150 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Furthermore, the Kuroshio Extension EKE decreasing from west to east, is correlated with CPUE with the high correlation coefficient of 0.81. According to the longitudinal range, the Kuroshio Extension is divided into four sub-areas, and the monthly average latitudes of fishing ground centroids respond to the sub-areas with the highest EKE in the same month. When the distance (DIST) from fishing grounds to the Kuroshio Extension in the range of 800–1 000 km, CPUE increases with the DIST, and the most suitable DIST from August to October is between 850–950 km. When the Kuroshio Extension path has complicated meanders, EKE is high, while the CPUE is reduced and the fishing grounds move northward.

**Key words:** eddy kinetic energy; *Ommastrephes bartramii*; fishing ground; CPUE; Kuroshio Extension; Northwest Pacific Ocean