

钱梦婷, 贡静雯, 范江涛, 等. 基于光合有效辐射的西北太平洋柔鱼资源丰度和空间分布变动研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 44–53, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.005

Qian Mengting, Gong Jingwen, Fan Jiangtao, et al. Variations in the abundance and spatial distribution of *Ommastrephes bartramii* in the North-west Pacific Ocean based on photosynthetic active radiation[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(12): 44–53, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.005

# 基于光合有效辐射的西北太平洋柔鱼资源 丰度和空间分布变动研究

钱梦婷<sup>1</sup>, 贡静雯<sup>1</sup>, 范江涛<sup>2</sup>, 余为<sup>1,3,4\*</sup>, 陈新军<sup>1,3,4</sup>, 钱卫国<sup>5</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部外海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300; 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. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** 光合有效辐射 (PAR) 对于海洋初级生产力具有显著的调控作用, 会间接影响到头足类的资源丰度和渔场分布。本文根据 2006–2015 年上海海洋大学鱿钓科学技术组提供的柔鱼鱿钓数据和光合有效辐射卫星遥感数据, 研究了光合有效辐射与西北太平洋柔鱼种群的关系, 并评估了异常环境条件下光合有效辐射对柔鱼的影响。结果发现, 柔鱼单位捕捞努力量渔获量 (CPUE)、渔场纬度重心、PAR, 及其空间分布均具有显著的月间变化。7–11 月各月适宜 PAR 范围分别为 36~39 E/(m<sup>2</sup>·d)、33~36 E/(m<sup>2</sup>·d)、24~27 E/(m<sup>2</sup>·d)、18 E/(m<sup>2</sup>·d) 和 12 E/(m<sup>2</sup>·d), 最适宜 PAR 值分别为 36 E/(m<sup>2</sup>·d)、33 E/(m<sup>2</sup>·d)、27 E/(m<sup>2</sup>·d)、18 E/(m<sup>2</sup>·d) 和 12 E/(m<sup>2</sup>·d)。此外, CPUE 与 PAR 有显著正相关关系 ( $p < 0.05$ ), 且 CPUE 与各月适宜 PAR 范围占渔场比例也呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ); 同时渔场纬度重心随各月最适宜 PAR 平均纬度变化而变化。在异常环境条件下, 拉尼娜年份 CPUE 值比厄尔尼诺年份高, 该年份 PAR 值异常增高可能是导致柔鱼资源丰度增加的因素之一。研究表明, 光合有效辐射对于西北太平洋柔鱼资源丰度和空间分布具有显著影响。

**关键词:** 柔鱼; 光合有效辐射; 资源丰度; 空间分布; 异常环境; 西北太平洋

中图分类号: S931.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)12-0044-10

## 1 引言

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 广泛分布于北太平洋 20°~50°N 的海域, 是一种重要的大洋性经济头足类。柔鱼于 20 世纪 90 年代开始被开发<sup>[1]</sup>, 我国从 1993 年开始商业捕捞该物种, 1998–2008 年柔鱼年产量基本在 8 万 t 以上, 最高年产量达 13 万 t, 而 2008 年以后, 产量有较大减幅, 年产量在 5 万 t 左右。柔鱼渔业在我国远洋渔业中占据重要地位, 我国柔鱼产量占

据整个北太平洋柔鱼总产量的 80% 以上<sup>[2]</sup>, 因此柔鱼的可持续开发和利用对远洋渔业事业十分重要。柔鱼是一种短生命周期种类, 一年生, 主要分为 4 个种群: 中部秋生群、东部秋生群、西部冬春生群和中东部冬春生群<sup>[3]</sup>, 其中西部冬春生群体是我国鱿钓的主要捕捞对象。柔鱼有较强的趋光性、集群性, 对水温敏感性强, 且有昼夜垂直移动和随季节南北洄游的习性<sup>[4]</sup>。柔鱼是一种典型的生态机会主义物种, 所以其对气候变化和海洋环境的改变非常敏感<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2019-08-01; 修订日期: 2019-11-07。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2019YFD0901405); 农业农村部外海渔业开发重点实验室开放基金资助 (LOF 2019-01); 国家自然科学基金青年科学基金 (41906073); 上海市自然科学基金 (19ZR1423000); 上海市水产高峰一流学科 (Fisheries A)。

**作者简介:** 钱梦婷 (1999—), 女, 安徽省黄山市人, 研究方向为渔业资源与渔场。E-mail: 121386120@qq.com

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

气候和环境对柔鱼整个生活史阶段都至关重要, 直接影响柔鱼资源丰度和渔场的形成<sup>[6]</sup>。已有研究表明, 海表温度、叶绿素浓度和黑潮亲潮势力强弱等都会影响柔鱼的生长繁殖、丰度与分布, 一些异常气候如厄尔尼诺和拉尼娜现象也会对柔鱼资源产生影响<sup>[7]</sup>。光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)是指太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱成分, 波长在 400~700 nm, 平均约占太阳总辐射的 50%<sup>[8]</sup>。光合有效辐射是植物生命活动、合成有机物的能量来源, 所以其大小会影响海洋浮游植物的数量和分布, 进而会导致海洋初级生产力变动<sup>[9]</sup>, 因此 PAR 可能会间接影响海洋鱼类的丰度和分布。但是目前国内针对光合有效辐射与柔鱼资源关系的研究较少。因此本文利用光合有效辐射卫星遥感数据和 10 年柔鱼鱿钓捕捞数据, 综合分析柔鱼资源变动与光合有效辐射的关系, 为柔鱼资源的可持续利用提供科学基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

柔鱼鱿钓数据来自上海海洋大学鱿钓科学技术组, 数据主要覆盖我国传统的柔鱼作业渔场范围 36°~48°N, 150°~170°E (图 1), 数据时间为 2006~2015 年 7~11 月(7~11 月为我国捕捞柔鱼的主要月份)。捕捞数据包括作业位置(经度和纬度)、作业时间(日和月份)、捕捞努力量(以 d 计)和渔获量(t)。为匹配环境数据, 渔业数据时间分辨率整理以月计, 空间分辨率为 0.5°×0.5°。

环境数据主要来源于卫星遥感数据, PAR 数据来自网站 <http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/thredds/catalog.html>。

### 2.2 分析方法

(1) 计算 2006~2015 年间每年 7~11 月每个月不同渔区内的单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE), 单位为 t/d。定义经纬度 0.5°×0.5°为一个渔区。在本文中, CPUE 表示柔鱼的资源丰度<sup>[10]</sup>, 计算公式为

$$CPUE_{ymi} = \frac{\sum Catch_{ymi}}{\sum Effort_{ymi}}, \quad (1)$$

式中,  $y$  为年份;  $m$  为月份;  $i$  为经度;  $j$  为纬度;  $\sum Catch_{ymi}$  为某一个渔区内的总渔获量;  $\sum Effort_{ymi}$  为一个渔区内的总捕捞努力量。

(2) 计算 2006~2015 年间每年 7~11 月柔鱼渔场纬度重心, 计算公式为<sup>[11]</sup>

$$LATG_m = \frac{\sum (Latitude_{i,m} \times CPUE_{i,m})}{\sum CPUE_{i,m}}, \quad (2)$$

式中,  $i$  为渔区;  $m$  为月份; LATG 为渔场纬度重心; Latitude 为作业纬度。

(3) 计算分析 2006~2015 年 7~11 月各月 CPUE、LATG 和 PAR 值, 并分别绘制 CPUE、LATG、PAR 的月间分布图, 分析上述各变量的月间变化。同时, 绘制北太平洋海区柔鱼 PAR 多年月平均值空间分布图, 分析柔鱼渔场范围内 PAR 的空间分布特征。

(4) 根据频率分布法, 计算柔鱼各月适宜的 PAR 分布范围以及最偏好的 PAR 值(依据前人研究, 超过 4 000 d 捕捞努力量为适宜 PAR 范围<sup>[12]</sup>)。将 2006~2015 年 7~11 月的 PAR 与 CPUE 进行相关分析, 探讨 PAR 与柔鱼资源丰度的相关关系; 以各月适宜 PAR 范围表征适宜的柔鱼栖息地分布, 计算各月适宜栖息地分布的面积占渔场的比例, 并评估其与柔鱼 CPUE 的相关关系; 最后计算各月最适宜的 PAR 平均纬度与柔鱼渔场纬度重心, 分析两者关系。

(5) 分析 2006~2015 年在不同气候条件下柔鱼渔场范围内 PAR 的分布特征。本文主要探索异常气候条件厄尔尼诺和拉尼娜事件对 PAR 空间分布可能产生的影响。厄尔尼诺和拉尼娜事件标准定义来源于

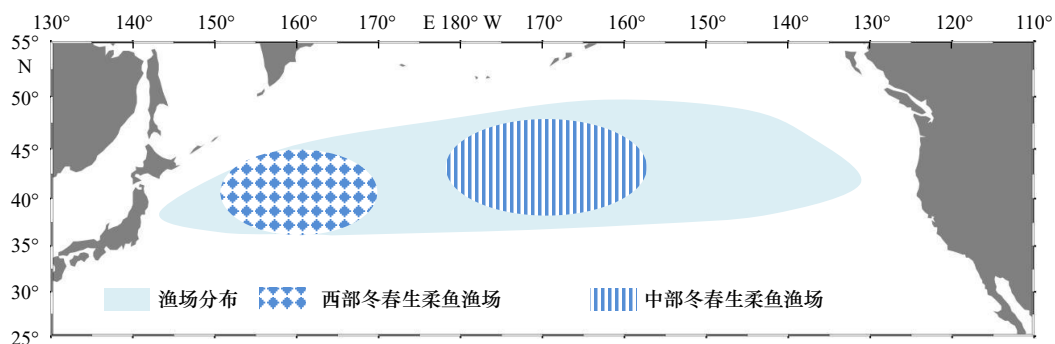


图 1 西北太平洋柔鱼冬春生群体作业渔场的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii*

NOAA 气候预报中心(NCPC)<sup>[19]</sup>: Niño 3.4 区海温异常连续 5 个月滑动平均值高于+0.5°C, 定义为一次厄尔尼诺事件; 连续 5 个月低于-0.5°C, 则认为发生一次拉尼娜事件。将 2011 年(判定为拉尼娜年份)7-11 月份每月空间上各点的 PAR 值减去 2015 年(判定为厄尔尼诺年份)对应月份空间上各点的 PAR 值, 将得到的值绘制为空间分布, 并对其空间分布特征进行对比分析。厄尔尼诺和拉尼娜事件的定义以及分类来源于: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml):

### 3 结果

#### 3.1 柔鱼 CPUE、LATG 以及 PAR 的月间变化

7-11 月 CPUE 月间变化趋势为先增加后降低, 8 月和 9 月 CPUE 较高, 7 月和 11 月 CPUE 较低, 其中 8 月 CPUE 最高, 为 2.60 t/d, 7 月 CPUE 最低, 为 1.43 t/d。渔场纬度重心 7 月位于最南, 为 40.04°N, 7-9 月向北移动, 9-11 月向南移动, 其中 9 月最北, 为 43.22°N。PAR 值 7-11 月逐月递减, 7 月最高, 为 35.18 E/(m<sup>2</sup>·d), 11 月最低, 为 12.22 E/(m<sup>2</sup>·d)(图 2)。

PAR 的空间分布如图 3 所示, 7 月和 8 月空间分布趋势大致相同, 南部 PAR 值较高, 北部 PAR 值偏低, 9 月 PAR 值从北到南逐渐变大, 10 月南北差异较小, 且总体 PAR 值偏低, 11 月 PAR 值也是呈从北到南逐渐增大的趋势, 且总体 PAR 值明显低于前几个月。

#### 3.2 柔鱼 CPUE 和 LATG 与 PAR 值的相关分析

2006-2015 年 7-11 月捕捞努力量的频次分布如图 4 所示。分析得出捕捞努力量的空间分布与 PAR 存在一定关联。而各月 PAR 及其适宜范围(表 1)所示, 7-11 月适宜 PAR 范围和最适宜 PAR 值均逐月降低。

根据上述分析, 把 2006-2015 年 7-11 月 PAR 的月平均值和 CPUE 进行相关性分析可以发现两者的变化趋势基本一致(图 5), 两者呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )。同样 2006-2015 年 7-11 月各月适宜 PAR 范围占渔场比例和 CPUE 变化趋势也基本相同(图 6), 相关性分析结果显示两者呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )。此外, 图 7 显示 2006-2015 年各月最适宜 PAR 平均纬度和纬度重心进行相关性分析可以发现两者变化趋势一致且呈显著正相关( $p < 0.05$ )。

#### 3.3 异常环境条件下柔鱼渔场 CPUE 和 PAR 的差异分析

2011 年是拉尼娜年份, 2015 年是厄尔尼诺年份。2011 年 7-11 月 CPUE 变化范围为 1.33~3.07 t/d,

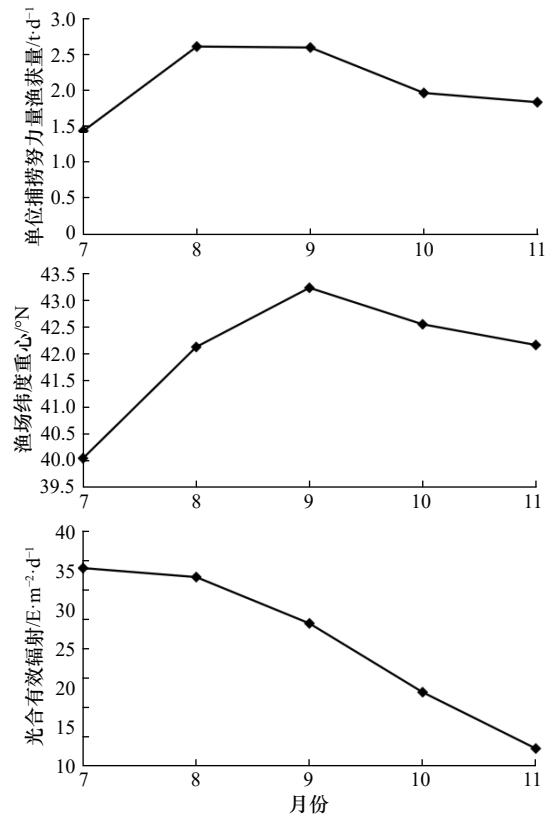


图 2 2006-2015 年 7-11 月西北太平洋柔鱼各月单位捕捞努力量渔获量、渔场纬度重心以及平均光合有效辐射  
Fig. 2 Monthly catch per unit effort, latitudinal gravity center of *Ommastrephes bartramii* and average photosynthetically active radiation in the Northwest Pacific Ocean from July to November over 2006-2015

最大值在 9 月; 2015 年 7-11 月 CPUE 变化范围为 1.06~2.08 t/d, 最大值在 11 月。通过比较发现除了 11 月份, 2011 年拉尼娜年份 CPUE 值显著高于 2015 年厄尔尼诺年份。此外发现, 2011 年 7-11 月各月 PAR 值基本均高于 2015 年对应月份 PAR 值(图 8)。

2011 年 7-11 月与 2015 年 7-11 月各月 PAR 值差值的空间分布图如图 9 所示。2011 年 7-11 月各月渔场大范围内 PAR 值均高于 2015 年。尤其是 8 月和 9 月绝大部分海域 2011 年 PAR 值高于 2015 年且差值较大, 越靠近东南方向, 差异变化越显著。

### 4 讨论与分析

柔鱼是一种短生命周期的生态机会主义物种, 对气候和海洋环境变化极为敏感, 所以柔鱼资源丰度及其渔场分布易受环境变化的影响<sup>[4]</sup>。国内外已有很多关于柔鱼与环境关系的研究, 但是大部分都是针对海表温度、叶绿素浓度以及黑潮亲潮等因子。例如余为等<sup>[15]</sup>利用信息增益技术, 分析了一些环境因子对

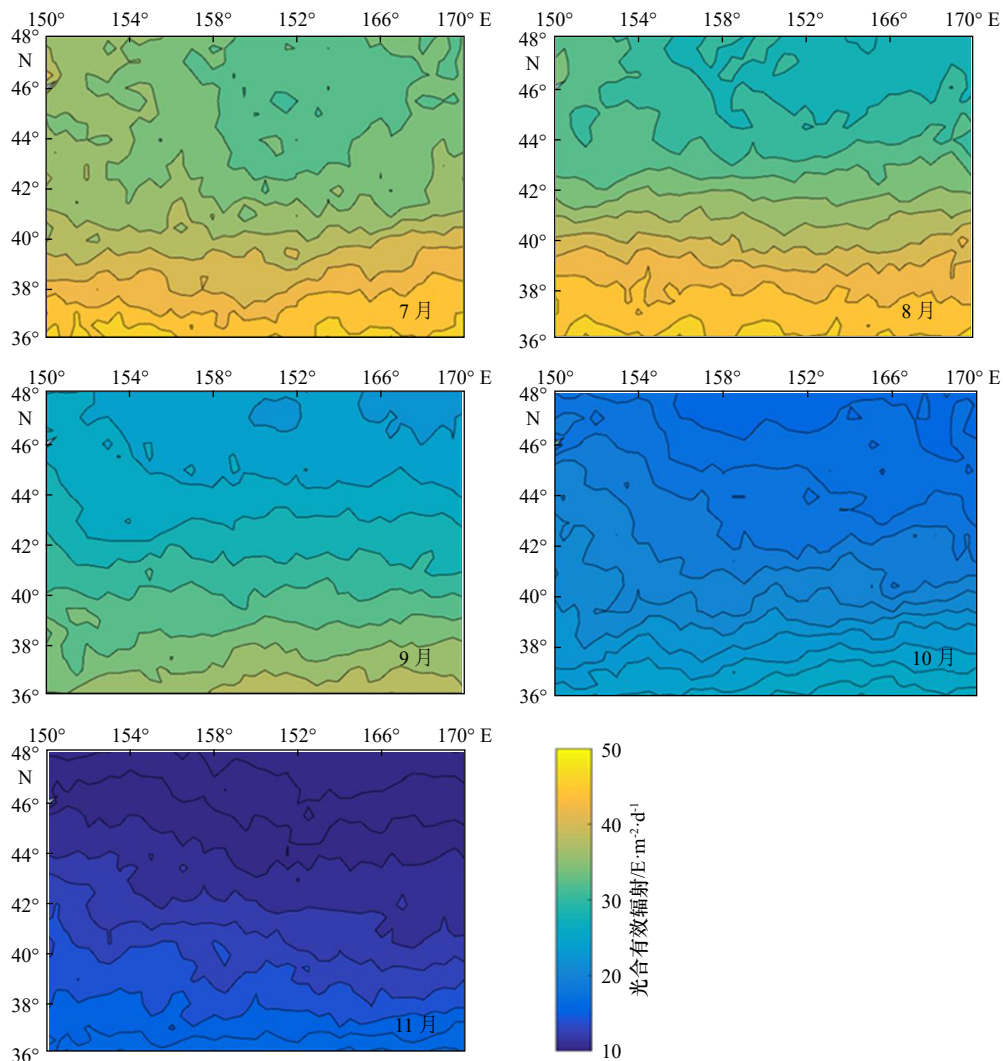


图3 2006–2015年7–11月柔鱼渔场月平均光合有效辐射空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of monthly averaged photosynthetically active radiation on the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* from July to November over 2006–2015

于 CPUE 分布的影响程度,认为西北太平洋柔鱼资源变动最易受水温影响,其次是叶绿素浓度,海表高度和盐度影响较小。陈新军等<sup>[16]</sup>通过分析黑潮年间变化对于西北太平洋柔鱼渔场分布的影响,认为黑潮大弯曲年份,渔场分布广泛但 CPUE 较低,小弯曲年份情况相反。唐峰华等<sup>[17]</sup>研究叶绿素 *a* 分布与渔场的关系,认为反常的叶绿素浓度很有可能导致无法形成正常的大规模渔场。而除了上述几种常见的因子外, PAR 也是一个重要且值得研究的环境因子, PAR 代表了叶绿体进行光合作用的效率,其大小会影响海洋浮游植物的繁殖与分布,进而影响海洋初级生产力的大小,最终可能会造成鱼类资源丰度与分布的变动。所以研究光合有效辐射与柔鱼资源关系可以为柔鱼资源管理提供科学依据。目前已有部分学者针对 PAR 与渔业资源关系进行研究。例如 Sanchez 等<sup>[18]</sup>研究

发现枪乌贼偏向在清澈的水中生长繁殖,不喜在浑浊的水中,因为浑浊的水域对应较低的 PAR 值。余为和陈新军<sup>[12]</sup>分析发现茎柔鱼 CPUE 与 PAR 呈正相关关系,且最适 PAR 纬度影响茎柔鱼渔场分布,该研究表明光合有效辐射对于茎柔鱼资源丰度与分布有显著影响。

本文经研究发现,7–11月西北太平洋柔鱼渔场的 CPUE 随光合有效辐射变化而变化,且变化趋势较为一致,较高强度的 PAR 月份对应的 CPUE 较大,而 PAR 值下降的月份对应的 CPUE 也会下降,2006–2015年 PAR 的月平均值与 CPUE 也有着显著正相关关系,同时当各月适宜光合有效辐射范围占渔场比例大时,CPUE 也会相应增高。从以上的分析结果可以看出柔鱼渔场 PAR 值大小与 CPUE 有着显著关联,即渔场内的光合有效辐射强度显著影响柔鱼的资源

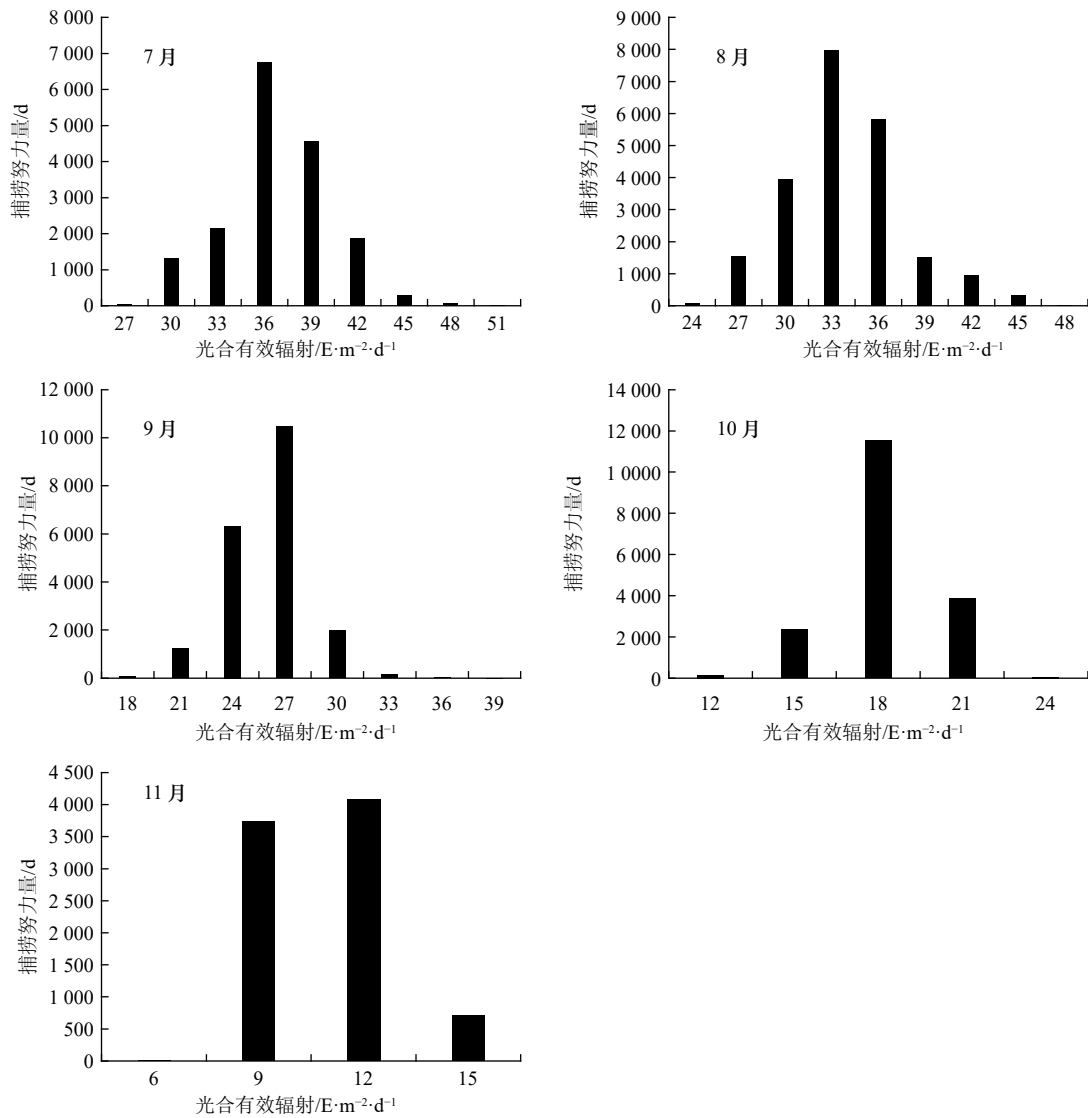


图 4 2006–2015 年 7–11 月捕捞努力量的分布与光合有效辐射的关联

Fig. 4 Fishing effort distributions in relation to photosynthetically active radiation from July to November over 2006–2015

表 1 7–11 月柔鱼各月 PAR 范围, 适宜 PAR 范围和最适宜 PAR 值

Table 1 Monthly PAR, suitable PAR and the most suitable PAR from July to November

月份	PAR范围 /E·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup>	适宜PAR范围 /E·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup>	最适宜PAR值 /E·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup>
7	27~51	36~39	36
8	24~48	33~36	33
9	18~39	24~27	27
10	12~24	18	18
11	6~15	12	12

丰度。根据本文结果推理 PAR 影响柔鱼 CPUE 的机理: 由于 PAR 是指太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱成分, 所以其大小可以反映浮游植物的光合作

用强度, 当 PAR 值升高, 海洋中浮游植物的数量也会相应增多, 进而使得海洋初级生产力增高, 浮游动物等饵料资源丰富, 增加了柔鱼的食物来源, 因此 PAR 的增加有利于柔鱼的生长摄食, 所以柔鱼资源丰度提高, 最终使得柔鱼渔业产量增高; 相反 PAR 低则不利于柔鱼的摄食生长, 其资源丰度则相应降低。需要说明的是并不是高的 PAR 值完全对应高的 CPUE, 存在部分月份光合有效辐射上升而 CPUE 反而下降的情况, 因为柔鱼资源丰度是受海表温度、盐度、海表高度、叶绿素浓度以及 PAR 等环境因子综合作用的结果, 所以可能在某些 PAR 值高的月份, 柔鱼受到了温度不适宜等其他不利环境因素的影响, 造成 CPUE 下降。因此, 在未来的研究中需要结合其他环境因子进行综合分析和考量, 以评估光合有效辐射对柔鱼资源的影响程度。

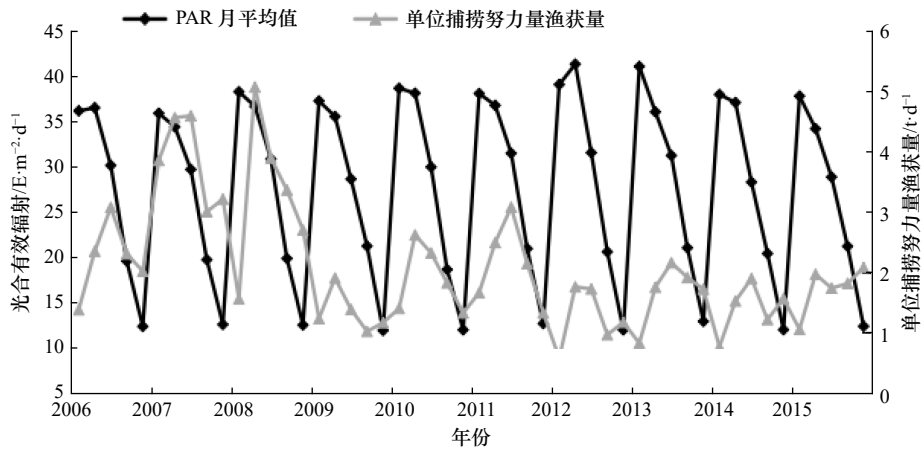


图5 2006–2015年西北太平洋柔鱼7–11月各月光合有效辐射与单位捕捞努力量渔获量关系

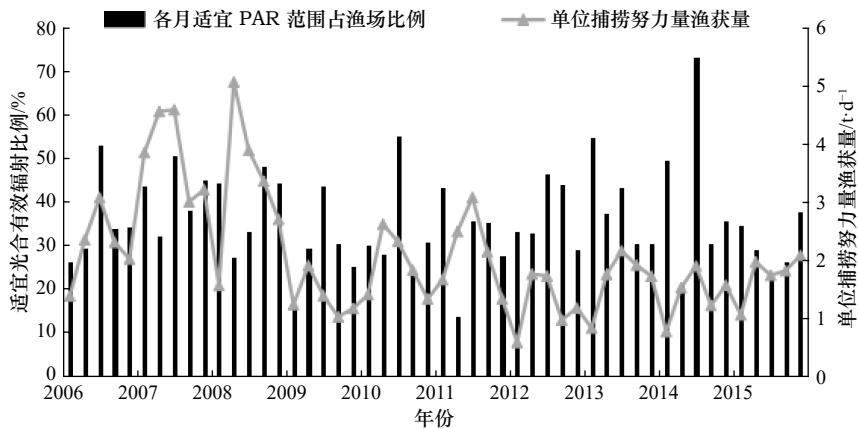
Fig. 5 Monthly averaged photosynthetically active radiation and catch per unit effort on the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean from July to November over 2006–2015

图6 2006–2015年7–11月各月适宜光合有效辐射范围占渔场比例与单位捕捞努力量渔获量的关系

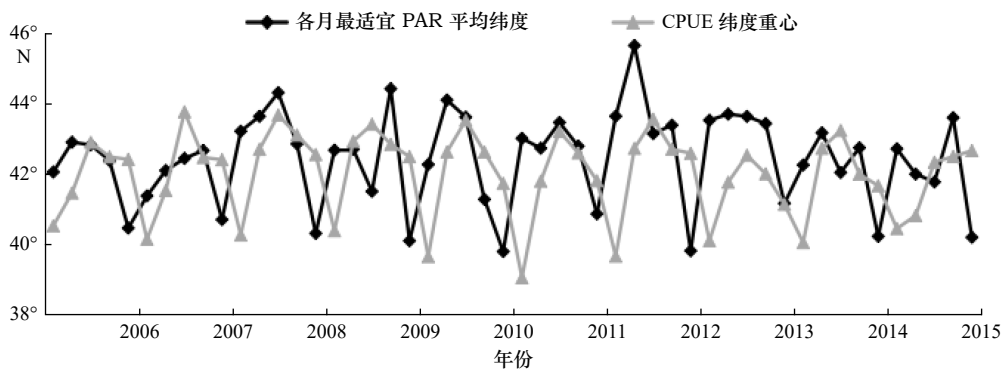
Fig. 6 Relationship between the monthly percentages of suitable photosynthetically active radiation accounting for the fishing ground and the catch per unit effort of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean from July to November over 2006–2015

图7 2006–2015年7–11月各月最适宜光合有效辐射平均纬度与柔鱼渔场纬度重心的关系

Fig. 7 Relationship between the average latitude of the most preferred photosynthetically active radiation and the monthly latitudinal gravity centers of fishing ground of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean from July to November over 2006–2015

由于头足类的空间分布受海洋环境的重要影响,因此当海洋环境发生变化时,其适宜的栖息地在空间上也会发生很大程度上的变动<sup>[19]</sup>。例如王文字等<sup>[20]</sup>认为温度和叶绿素浓度是影响柔鱼空间分布的重要

因素,其研究发现西北太平洋柔鱼的捕获区通常和温度变差 $14^{\circ}\text{C}$ 线所包围的高温差范围相吻合,且中心渔场往往在叶绿素 $a$ 浓度高值区形成。余为等<sup>[21]</sup>认为西北太平洋柔鱼资源空间变动与海洋的净初级生

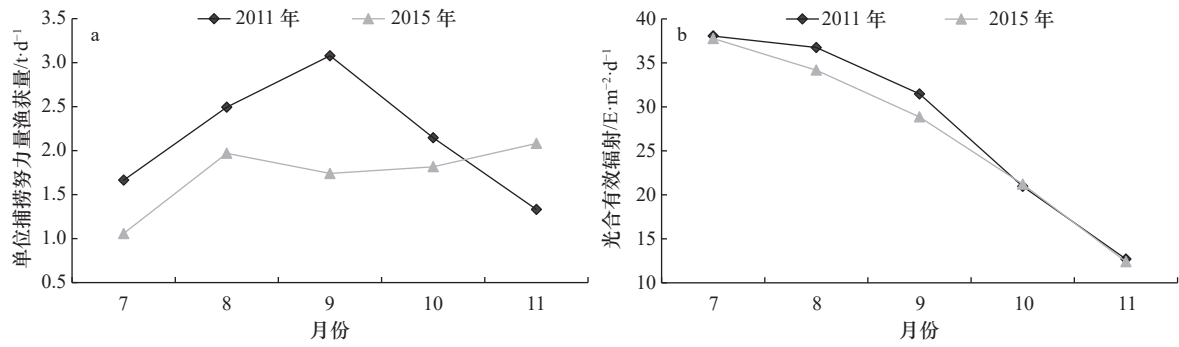


图 8 2011 年 7-11 月与 2015 年 7-11 月西北太平洋柔鱼各月单位捕捞努力量渔获量(a)和平均光合有效辐射(b)  
Fig. 8 Monthly catch per unit effort of *Ommastrephes bartramii* (a) and average photosynthetically active radiation (b) in the Northwest Pacific Ocean during July-November in 2011 and 2015

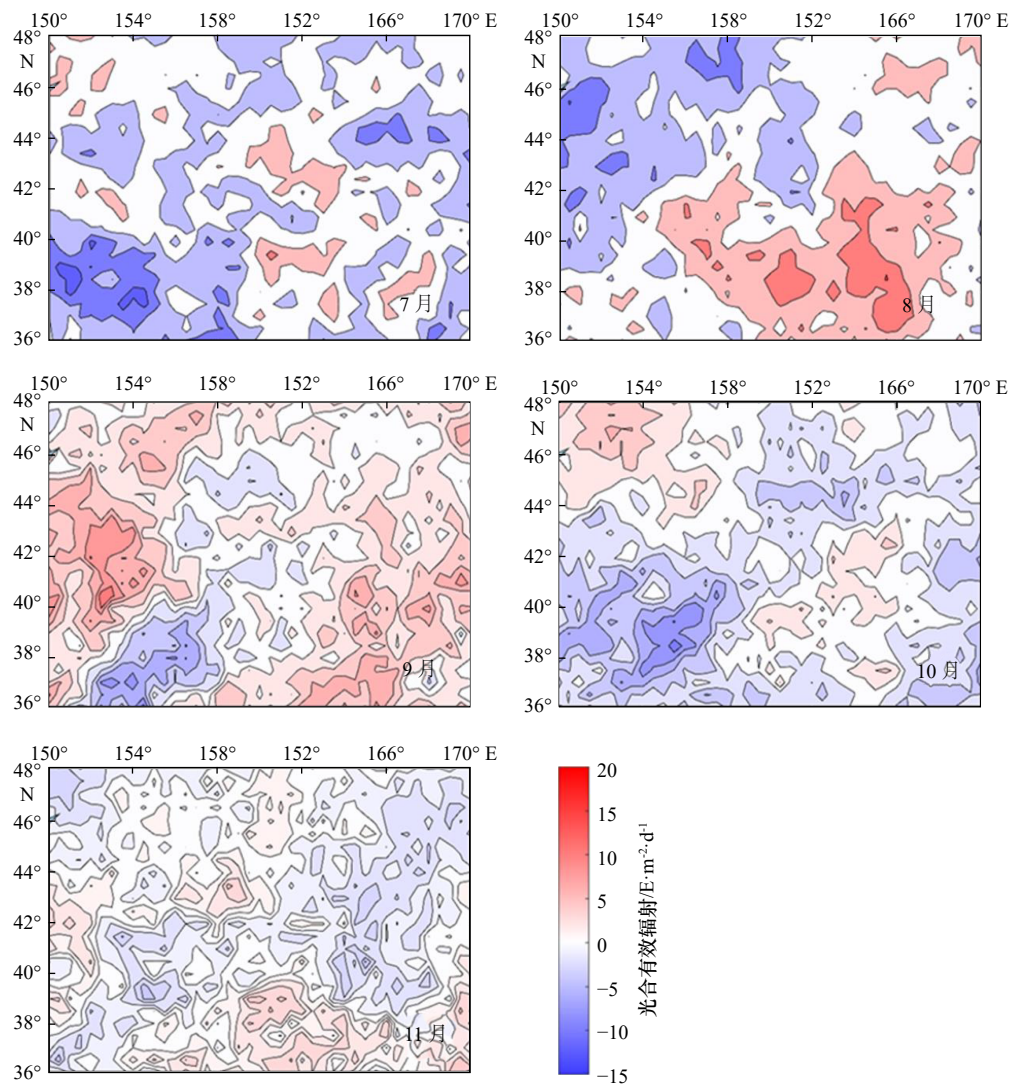


图 9 2011 年与 2015 年 7-11 月柔鱼渔场月平均光合有效辐射差值空间分布  
Fig. 9 Spatial distribution of photosynthetically active radiation difference on the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* from July to November of 2011 and 2015

产力有着密切关系,并推断出柔鱼渔场纬度重心随各年最适初级生产力平均纬度的转移而转移。本文研究发现,柔鱼渔场纬度重心随各月最适宜光合有效辐

射平均纬度变化而变化,说明柔鱼各月最适宜的光合有效辐射位置可能代表着其最适宜的栖息地。究其原因,可能是最适宜的光合有效辐射海域在一定程度

上代表着该海域初级生产力高,对应的浮游动植物密度相应增加,所以柔鱼群体更倾向于游往该海域去摄食,造成该位置柔鱼资源丰度高,故渔场的纬度重心随最偏好的光合有效辐射位置的变化而变化。

异常气候条件下,即厄尔尼诺和拉尼娜事件,会造成柔鱼栖息地环境发生不同的变化,对柔鱼资源丰度与渔场分布也会产生不同的影响。前人研究显示,厄尔尼诺条件下,西北太平洋柔鱼渔场海域海面温度和叶绿素浓度均降低,不利于柔鱼生长,造成柔鱼资源丰度下降;而拉尼娜条件下,柔鱼渔场海面温度升高,叶绿素 $a$ 浓度降低但幅度很小,有利于资源补充,柔鱼产量高<sup>[7]</sup>。还有研究发现秘鲁外海柔鱼中心渔场位置也与厄尔尼诺和拉尼娜事件有关,拉尼娜事件下中心渔场位置通常比厄尔尼诺事件下偏北<sup>[2]</sup>。本文通过对2011年(拉尼娜年份)和2015年(厄尔尼诺年份)柔鱼渔场的PAR与CPUE的比较分析发现,气候变化对柔鱼渔场内的光合有效辐射也存在显著影响,厄尔尼诺年份(2015年)柔鱼渔场光合有效辐射值低于拉尼娜年份(2011年),会降低渔场内浮游植物光合作用效率,进而可能会造成2015

年柔鱼渔场海域初级生产力降低,海区的营养物质减少,不利于柔鱼的摄食,所以厄尔尼诺年份CPUE值也显著低于拉尼娜年份。总结以上可以推断,在大部分异常环境年份下,厄尔尼诺事件会导致西北太平洋柔鱼渔场的PAR值降低,从而可能会造成柔鱼CPUE减小;相反,拉尼娜事件下柔鱼渔场的PAR值上升,可能会导致CPUE上升。

目前,国内对于光合有效辐射与柔鱼资源关系的研究较少,本文从新的角度探讨柔鱼资源与环境因子的关系,通过对2006–2015年7–11月柔鱼渔场光合有效辐射与柔鱼CPUE和渔场纬度重心的相关性分析,得出光合有效辐射对于西北太平洋柔鱼资源丰度和空间分布具有显著影响。但研究的不足之处在于本文只对光合有效辐射单一环境因子进行研究,而在实际的海洋生态系统中,柔鱼的资源受到多种环境因子的影响,所以在今后的研究中,要结合其他环境因子如温度、盐度、叶绿素浓度等进行综合考量和分析,并且可以更加侧重研究光合有效辐射与头足类资源丰度等的关系。

#### 参考文献:

- [1] 樊伟,崔雪森,沈新强. 西北太平洋巴特柔鱼渔场与环境因子关系研究[J]. *高技术通讯*, 2004, 14(10): 84–89.  
Fan Wei, Cui Xuesen, Shen Xinqiang. Study on the relationship between the neon flying squid *Ommastrephes bartramii* and ocean environment in the Northwest Pacific Ocean[J]. *High Technology Letters*, 2004, 14(10): 84–89.
- [2] 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.
- [3] 马金,陈新军,刘必林,等. 北太平洋柔鱼渔业生物学研究进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(4): 563–570.  
Ma Jin, Chen Xinjun, Liu Bilin, et al. Review of fisheries biology of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(4): 563–570.
- [4] 陈峰,陈新军,刘必林,等. 西北太平洋柔鱼渔场与水温垂直结构关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(4): 495–504.  
Chen Feng, Chen Xinjun, Liu Bilin, et al. Relationship between fishing ground of *Ommastrephes bartramii* and vertical temperature structure in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(4): 495–504.
- [5] 曹杰,陈新军,田思泉,等. 基于世代分析法的西北太平洋柔鱼冬春生西部群体资源评估[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(3): 37–42.  
Cao Jie, Chen Xinjun, Tian Siqun, et al. Assessment of western winter-spring stock of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on cohort analysis[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(3): 37–42.
- [6] 程家骅,黄洪亮. 北太平洋柔鱼渔场的环境特征[J]. *中国水产科学*, 2003, 10(6): 507–512.  
Cheng Jiahua, Huang Hongliang. Relationship between environment characters and *Ommastrephes bartramii* fishing ground in the North Pacific[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(6): 507–512.
- [7] 余为,陈新军. 西北太平洋柔鱼栖息地环境因子分析及其对资源丰度的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5032–5039.  
Yu Wei, Chen Xinjun. Analysis of environmental conditions and their influence on the abundance of neon flying squid in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5032–5039.
- [8] Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 121–131.
- [9] 赵进平,王维波, Lee C. 利用北冰洋多光谱数据计算光合有效辐射的研究[J]. *极地研究*, 2010, 22(2): 91–103.  
Zhao Jinping, Wang Weibo, Lee C. Calculation of photosynthetically available radiation using multispectral data in the arctic[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010, 22(2): 91–103.
- [10] Cao Jie, Chen Xinjun, Chen Yong. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter-spring cohort of

- neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the NW Pacific Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 381(12): 119–127.
- [11] Li Gang, Chen Xinjun, Lei Lin, et al. Distribution of hotspots of chub mackerel based on remote-sensing data in coastal waters of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11/12): 4399–4421.
- [12] 余为, 陈新军. 东南太平洋秘鲁海域光合有效辐射对茎柔鱼资源丰度和空间分布的影响研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(11): 97–105.  
Yu Wei, Chen Xinjun. Influences of photosynthetically active radiation on abundance and distribution of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(11): 97–105.
- [13] Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian, et al. Variability of suitable habitat of western winter-spring cohort for neon flying squid in the Northwest Pacific under anomalous environments[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0122997.
- [14] Rodhouse P G. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 3–8.
- [15] 余为, 陈新军, 易倩, 等. 西北太平洋柔鱼传统作业渔场资源丰度年间差异及其影响因子[J]. 海洋渔业, 2013, 35(4): 373–381.  
Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian, et al. Annual difference of abundance index and its influencing factors of *Ommastrephes bartramii* in traditional fishing grounds in the Northwest Pacific[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(4): 373–381.
- [16] 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.
- [17] 唐峰华, 崔雪森, 樊伟, 等. 北太平洋柔鱼渔获量与海洋环境关系的遥感学研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 7–12.  
Tang Fenghua, Cui Xuesen, Fan Wei, et al. Study on relationship of neon flying squid yield in north Pacific Ocean with marine environment by remote sensing[J]. Ocean Technology, 2011, 30(2): 7–12.
- [18] Sanchez P, Demestre M, Recasens L, et al. Combining GIS and GAMs to identify potential habitats of squid *Loligo vulgaris* in the Northwestern Mediterranean[J]. Hydrobiologia, 2008, 612: 91.
- [19] Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian, 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.
- [20] 王文宇, 邵全琴, 薛允传, 等. 西北太平洋柔鱼资源与海洋环境的GIS空间分析[J]. 地球信息科学, 2003, 5(1): 39–44.  
Wang Wenyu, Shao Quanqin, Xue Yunchuan, et al. On the relationship between the resources of *Ommastrephes Bartramii* and marine environment in the northwest Pacific Ocean based on GIS[J]. Geo-Information Science, 2003, 5(1): 39–44.
- [21] 余为, 陈新军, 易倩. 西北太平洋海洋净初级生产力与柔鱼资源量变动关系的研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 64–72.  
Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian. Relationship between spatio-temporal dynamics of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* and net primary production in the northwest Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 64–72.
- [22] 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.  
Xu Bing, Chen Xinjun, Tian Siqun, 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.

## Variations in the abundance and spatial distribution of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean based on photosynthetic active radiation

Qian Mengting<sup>1</sup>, Gong Jingwen<sup>1</sup>, Fan Jiangtao<sup>2</sup>, Yu Wei<sup>1,3,4</sup>, Chen Xinjun<sup>1,3,4</sup>, Qian Weiguo<sup>5</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, 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. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

**Abstract:** The photosynthetic active radiation (PAR) plays a significant role in regulating ocean primary productivity, so it may indirectly affect the abundance and spatial distribution of cephalopods. In this study, we examined the relationship between photosynthetic active radiation and *Ommastrephes bartramii* stocks in the Northwest Pacific Ocean, and evaluated the impacts of the anomalous climatic environments on the squid stocks, based on the fishery data during 2006–2015 obtained from the squid-jigging Science and Technology Group of Shanghai Ocean University and the remotely satellite data of PAR. The results indicated that catch per unit effort (CPUE), latitudinal

gravity center (LATG), PAR and its spatial distribution exhibited significant monthly variation. From July to November, the suitable range of PAR was 36–39 E/(m<sup>2</sup>·d) in July, 33–36 E/(m<sup>2</sup>·d) in August, 24–27 E/(m<sup>2</sup>·d) in September, 18 E/(m<sup>2</sup>·d) in October and 12 E/(m<sup>2</sup>·d) in November. The most favorable PAR was 36 E/(m<sup>2</sup>·d), 33 E/(m<sup>2</sup>·d), 27 E/(m<sup>2</sup>·d), 18 E/(m<sup>2</sup>·d), 12 E/(m<sup>2</sup>·d), respectively, from July to November. The results showed that a significant positive relationship ( $p < 0.05$ ) was found between CPUE and PAR, and further a significantly positive correlation ( $p < 0.05$ ) was found between CPUE and the monthly percentages of suitable PAR accounting for the whole fishing ground. Meanwhile, the LATG varied with the mean latitude of the most preferred PAR in each month. Finally, under the anomalous climatic environments, the CPUE in the La Niña years is higher than that in the El Niño years, which may be caused by the higher PAR in the La Niña years. Our findings indicated that the PAR strongly affected the abundance and spatial distribution of *O. bartramii* in the Northwest Pacific Ocean.

**Key words:** *Ommastrephes bartramii*; photosynthetically active radiation; abundance; spatial distribution; anomalous environments; Northwest Pacific Ocean