

文章编号: 1674-5566(2019)03-0456-08

DOI:10.12024/jsou.20181102442

## 基于海表温度和光合有效辐射的西北太平洋柔鱼冬春生群体栖息地热点预测

温 健<sup>1</sup>, 陆鑫一<sup>1</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4</sup>, 余 为<sup>1,2,3,4</sup>

(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省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

**摘 要:** 柔鱼是大洋洄游性头足类种类, 具有重要的生态地位和经济价值, 目前是日本、韩国和中国等国家在西北太平洋捕捞的主要对象。柔鱼属于短生命周期生物, 其栖息地适宜性受气候和海洋环境变化的显著影响。本文根据中国远洋渔业数据中心提供的 2006—2015 年 9—11 月中国鱿钓捕捞数据和海表面温度 (SST) 以及光合有效辐射 (PAR) 两个关键环境因子, 构建基于捕捞努力和算术平均算法的柔鱼综合栖息地热点预测模型, 并对分析柔鱼栖息地适宜性在超强厄尔尼诺和强拉尼娜条件下的变动规律及其成因。结果表明: 基于 SST 和 PAR 的栖息地模型能够有效地预测西北太平洋柔鱼栖息地热点海域; 9—11 月柔鱼各月适宜的 SST 和 PAR 范围具有显著月间变化且逐渐减小; 柔鱼产量、捕捞努力和单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 随栖息地指数值的增加呈现线性增加趋势。对比 2007 年强拉尼娜年份和 2015 年超强厄尔尼诺年份, 研究发现, 2007 年柔鱼 CPUE 和栖息地适宜性显著高于 2015 年, 其主要原因可能是 2007 年强拉尼娜现象导致柔鱼渔场内适宜的 SST 和 PAR 面积显著增加, 而 2015 年超强厄尔尼诺现象导致两者适宜面积急剧下降, 从而导致柔鱼栖息地适宜性变差, 柔鱼 CPUE 降低。

**关键词:** 柔鱼; 海表面温度; 光合有效辐射; 栖息地热点; 厄尔尼诺; 拉尼娜; 西北太平洋

**中图分类号:** S 932.8      **文献标志码:** A

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 属大洋洄游性头足类种类, 柔鱼科 (Ommastrephid)。柔鱼按照繁殖时间主要划分为冬春生和秋生两个群体, 两者均广泛分布在太平洋海域, 具有重要的生态地位, 在食物链中起到承上启下的作用, 且其经济价值较高, 因此被众多环太平洋远洋渔业国家所捕捞, 包括日本、俄罗斯、韩国和中国等<sup>[1-2]</sup>。我国于 1993 年对柔鱼冬春生群体西部种群进行首次探捕并获得成功, 随后开始小规模捕捞, 2004 年后开始形成一定规模, 到目前为止我国柔鱼年产量占据西北太平洋头足类产量的 80% 以上, 每年产量 8 万 ~ 10 万 t, 柔鱼渔业已成为我国远洋渔业主要的组成部分<sup>[3]</sup>。柔鱼只有 1 年生命周期, 其短生命周期的生活史特征导致渔场的空间分布和资源丰度大小对气候和环境变化极其敏

感, 已有研究<sup>[4-5]</sup> 表明柔鱼栖息地受大尺度气候变化如厄尔尼诺/拉尼娜现象以及局部海域环境因子如海表面温度 (sea surface temperature, SST) 影响显著。因此, 精确探测柔鱼的栖息地热点海域对于渔场开发和资源有效利用具有重要意义。

栖息地模型始于 20 世纪 80 年代, 主要用来描述野生动物生境质量, 随后被广泛应用于鱼类渔场的预测和开发<sup>[6]</sup>。就柔鱼而言, 过去针对其栖息地模型的研究主要是利用 SST、海面高度和盐度等环境因子<sup>[7-8]</sup>。光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是影响浮游植物密度和分布的重要影响因子, 是海洋初级生产力的驱动因素<sup>[9-10]</sup>。因此, PAR 可能会影响海洋渔业的潜在产量。已有研究<sup>[11-12]</sup> 表明, PAR 对头足类资源丰度和空间分布具有显著影

收稿日期: 2018-11-21      修回日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金 (41876141); 上海市水产高峰一流学科 (Fisheries A)

作者简介: 温 健 (1998—), 男, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: 932804913@qq.com

通信作者: 余 为, E-mail: wyu@shou.edu.cn

响。目前尚无文献研究光合有效辐射对西北太平洋柔鱼栖息地的影响,因此本文首次建立了基于 SST 和 PAR 的柔鱼栖息地热点预测模型,初步探索了 PAR 对柔鱼栖息地适宜性及其热点海域分布的影响。本文的研究目的是建立基于 SST 和 PAR 的柔鱼渔场预测模型,同时评估极端环境对柔鱼栖息地的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

(1)西北太平洋柔鱼的生产数据来自上海海洋大学中国远洋渔业数据中心,数据包括捕捞日期(年和月)、捕捞范围(经度和纬度)、每日产量(单位:t)和捕捞努力量(单位:d)等,空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,时间范围为 2006—2015 年 9—11 月。图 1 显示了 2006—2015 年秋季我国鱿钓渔船在西北太平洋海域内的作业位置分布图,主要捕捞对象是柔鱼冬春生西部群体。

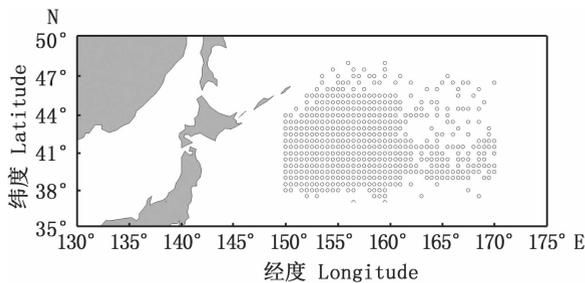


图 1 2006—2015 年 9—11 月我国鱿钓渔船作业位置分布图

Fig.1 Spatial distribution of fishing location of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* squid-jigging fisheries in the northwest Pacific Ocean from September to November from 2006 to 2015

(2)环境数据选取 SST 和 PAR。SST 数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)环境数据库(ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2.highres/),该数据为卫星遥感、观测数据等不同来源的数据通过最优插值法进行融合,其空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ;PAR 是指波长在 400~700 nm 的辐射能,能够被植物叶绿体利用,用来进行光合作用。本文中 PAR 数据来源于卫星遥感数据,从 Oceanwatch 数据库下载,网址为 http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/thredds/catalog.html,其空间分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。环境数据时间覆盖 2006—2015 年 1—12 月,数据范

围覆盖整个柔鱼作业渔场海域,在数据分析前,需将环境数据空间分辨率均转化为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  并与渔业数据相匹配。

### 1.2 分析方 法

(1)计算单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)。定义经纬度  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  为一个渔区,计算捕捞月份 9—11 月每个渔区内的 CPUE,单位为 t/d,其计算公式<sup>[13]</sup>为

$$Y_{\text{CPUE-ymij}} = \frac{\sum C_{\text{ymij}}}{\sum E_{\text{ymij}}} \quad (1)$$

式中: $\sum C_{\text{ymij}}$ 为一个渔区内某年某月累计渔获量,t; $\sum E_{\text{ymij}}$ 为一个渔区内某年某月累计捕捞努力量,d;y 为年份;m 为月份;i 为经度;j 为纬度。

(2)构建栖息地指数(HSI)模型。第一步,依据频率分布法,利用捕捞努力量与柔鱼渔场内两个环境因子(SST 和 PAR)的统计关系计算适宜性指数值 SI,即分析捕捞努力量在各环境因子不同区间内的频率分布,计算各环境变量不同范围内柔鱼出现的概率。9—11 月各环境变量 SI 值计算公式<sup>[14]</sup>为

$$I_{\text{SI}} = \frac{E_i}{E_{i,\text{max}}} \quad (2)$$

式中: $E_i$ 为环境变量第 i 区间内总捕捞努力量; $E_{i,\text{max}}$ 为环境变量第 i 区间内最大总捕捞努力量。 $I_{\text{SI}} = 0$  时代表该海域的栖息地质量最差,即最不利于柔鱼栖息;而  $I_{\text{SI}} = 1$  时则代表该海域内的环境条件最适宜柔鱼生长,即最适合的柔鱼栖息地<sup>[15]</sup>。

第二步,利用估算的 SI 值和两个环境变量分段区间值拟合 SI 曲线。SI 与环境因子的关系可通过正态分布或偏正太分布进行估算,其拟合函数<sup>[15]</sup>分别为

$$I_{\text{IS-SST}} = \exp[a \times (X_{\text{SST}} - b)^2] \quad (3)$$

$$I_{\text{IS-PAR}} = \exp[a \times (X_{\text{PAR}} - b)^2] \quad (4)$$

式中:a 和 b 为模型中待估算的参数。利用算术平均法(arithmetic mean model, AMM)计算柔鱼的综合栖息地适宜性指数值,数值范围为 0~1,本文认定  $\text{HSI} \geq 0.6$  的海域为柔鱼适宜的栖息地,即为栖息地热点海域<sup>[15-16]</sup>。

第三步,对模型进行交叉验证。利用 2006—2014 年 9—11 月的柔鱼渔业数据和环境数据(SST 和 PAR)构建综合 HSI 模型。将 2015 年环境数据作为 AMM 模型输入条件分别预测该年 9—11

月的柔鱼渔场 HSI 值,对 HSI 预测模型进行测试和交叉验证。同时将 2015 年 CPUE 数据与预测 HSI 值分布图进行空间叠加,观察渔业数据与预测适宜栖息地热点位置是否在空间上匹配吻合。同时我们进一步分析在不同 HSI 区间内的柔鱼产量、捕捞努力量以及 CPUE 的变化,以验证模型结果是否合理。

(3)对比极端气候条件下柔鱼栖息地适宜性变化。依据 NOAA 对厄尔尼诺/拉尼娜事件及其强度的定义<sup>[17]</sup>,2007 年 9—11 月发生了强拉尼娜事件,2015 年 9—11 月发生了超强厄尔尼诺事件(<http://ggweather.com/enso/oni.htm>)。基于方法(2)构建的综合栖息地指数模型预测 2007 和 2015 年 9—11 月西北太平洋柔鱼栖息地适宜性,将两个年份的 CPUE 和平均栖息地指数值进行对比,进一步探讨在异常气候条件下柔鱼的资

源丰度和适宜环境范围的差异。

## 2 结果

### 2.1 HSI 模型构建与验证

利用正态和偏正态函数拟合柔鱼捕捞努力量与 SST 和 PAR 的 SI 曲线,求解的 SI 模型参数及曲线见图 2。经统计检验,9—11 月所有的 SI 模型各参数变量均通过显著性检验且具有较高的相关系数值( $P < 0.001$ ),说明模型拟合效果较好。同时,基于 SST 和 PAR 的 SI 模型,利用 AMM 算法计算了 2015 年 9—11 月西北太平洋柔鱼渔场内的 HSI 值,并与各月 CPUE 进行空间叠加验证模型,结果发现各月捕捞作业位置大部分分布在  $HSI \geq 0.6$  的海域范围内(图 3),即渔船分布在柔鱼的栖息地热点海域,CPUE 随 HSI 值的增加呈现增加趋势。

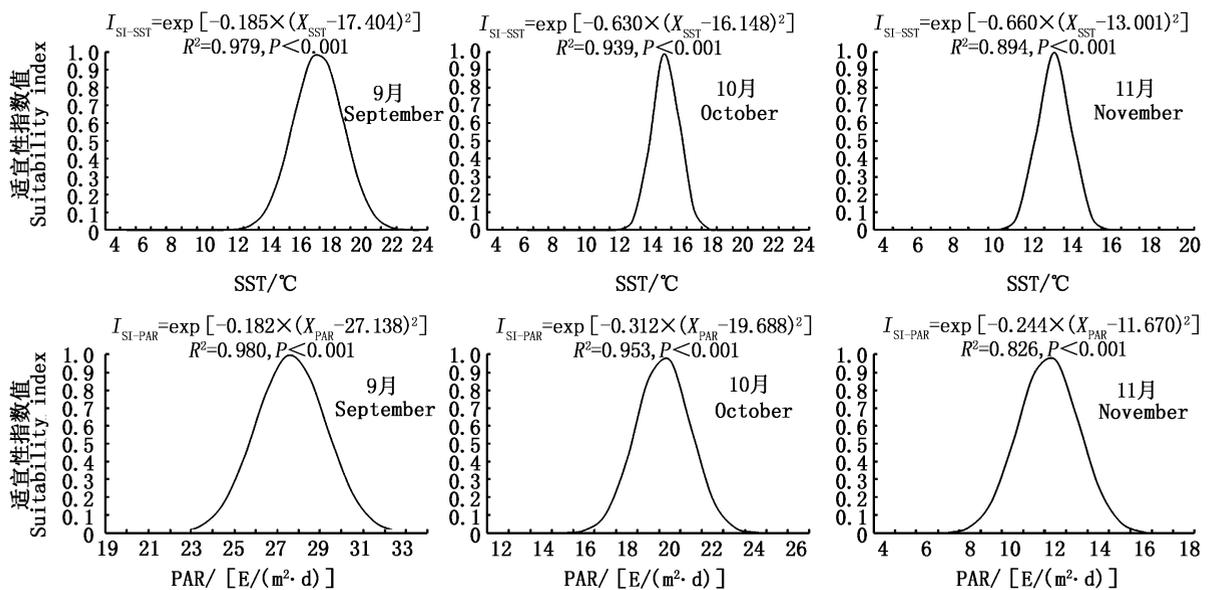


图 2 柔鱼 9—11 月 SST 和 PAR 两个环境变量拟合的适宜性指数模型

Fig. 2 Monthly fitted suitability index curve of each environmental variable (SST and PAR) for neon flying squid *Ommastrephes bartramii* from September to November

### 2.2 柔鱼产量、捕捞努力量和 CPUE 与 HSI 的关系

图 4 显示不同 HSI 区间内柔鱼产量、捕捞努力量以及 CPUE 分布及大小变化。结果发现,柔鱼产量、捕捞努力量以及 CPUE 随着 HSI 区间值

的增加呈现线性增加趋势,以上 3 个变量与 HSI 之间均存在显著的相关关系。以上结果说明基于 SST 和 PAR 的栖息地模型能够有效预测西北太平洋柔鱼的栖息地热点海域。

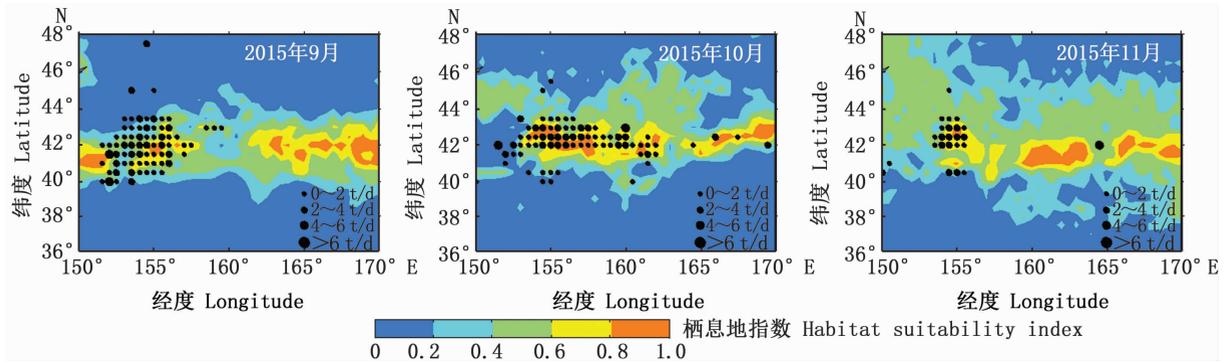


图3 2015年9—11月柔鱼CPUE与预测的HSI叠加图

Fig.3 The predicted habitat suitability index overlaid with catch per unit effort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* from September to November in 2015

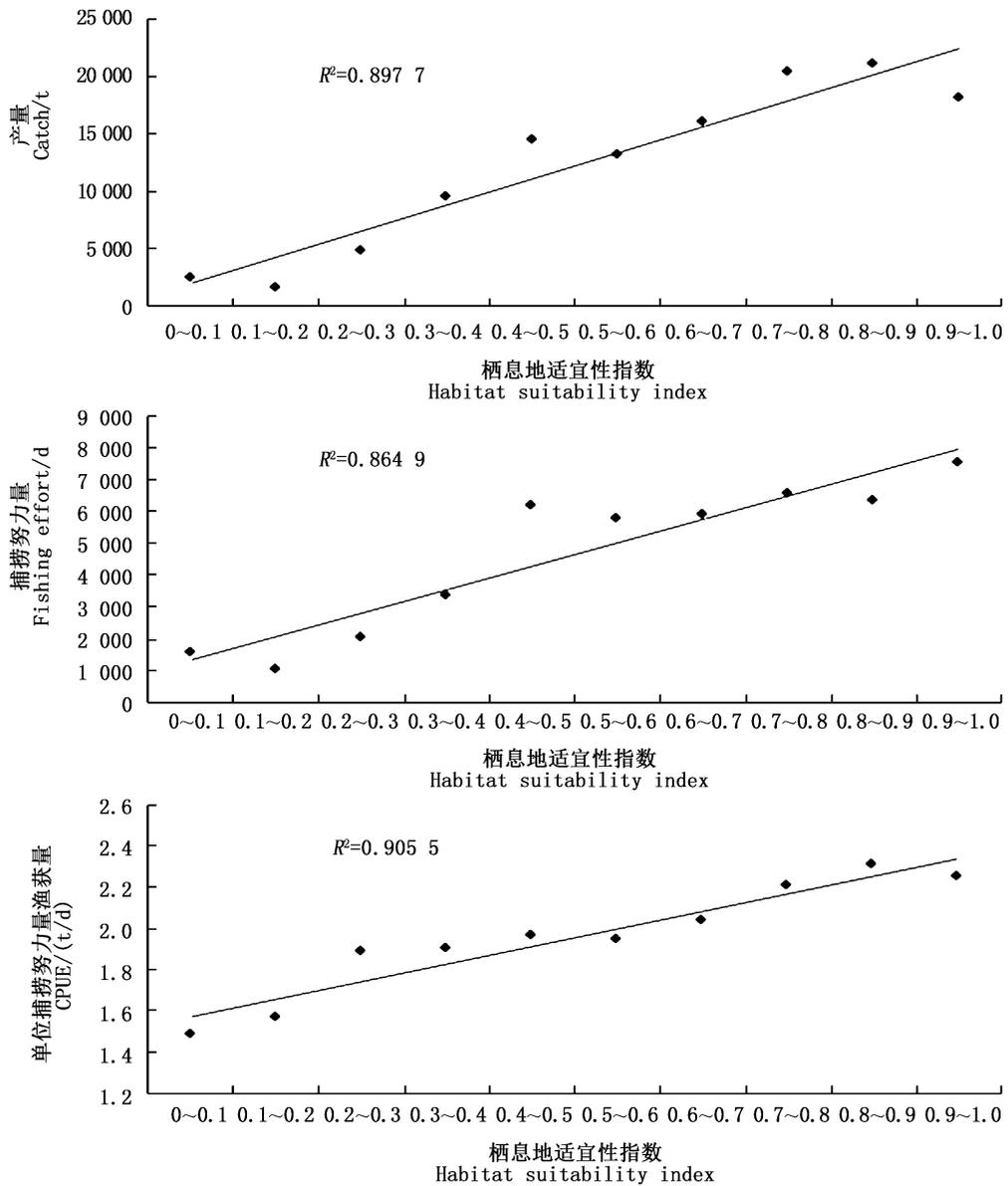


图4 2006—2015年9—11月柔鱼产量、捕捞努力量以及CPUE与HSI值的关系

Fig.4 Correlations between the habitat suitability index and catch, fishing effort and catch per unit effort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* from September to November from 2006 to 2015

### 2.3 极端环境下柔鱼栖息地适宜性的比较

在相同的作业渔场内,2007年和2015年由于发生了不同的极端环境事件,柔鱼栖息地适宜性和资源丰度发生显著的变化。由表1可以看出,2007年9—11月发生了强拉尼娜事件,该年各月CPUE要显著高于2015年对应月份,其中2007年9月CPUE最高为4.58 t/d,其余月份CPUE均超过3 t/d。而2015年发生超强厄尔尼诺事件,各月CPUE相对较低,在1.7~2.0 t/d浮动。同样,对比两个年份柔鱼栖息地适宜性发

现,2007年各月平均栖息地指数值均高于2015年。由图5可以看出,除了10月份外,2007年9—11月各月适宜的SST和PAR范围均高于2015年各月,说明2007年各月柔鱼渔场的SST和PAR明显更适宜其生长和生存,而2015年柔鱼渔场内的这些环境条件不利于其栖息,特别是适宜的PAR面积要明显少于2007年。此外,2007年柔鱼产量高达11万t,而2015年的柔鱼产量急剧下降仅有3万t左右。

表1 2007和2015年柔鱼平均CPUE和适宜栖息地平均值

Tab.1 Comparison of the averaged catch per unit effort (CPUE) and the averaged habitat suitability between 2007 and 2015 for *O. bartramii* fisheries

月份 Month	单位捕捞努力量渔获量 CPUE/(t/d)		栖息地平均值 The averaged habitat suitability	
	2007	2015	2007	2015
9月	4.58	1.74	0.28	0.19
10月	3.00	1.82	0.25	0.19
11月	3.21	2.08	0.31	0.29

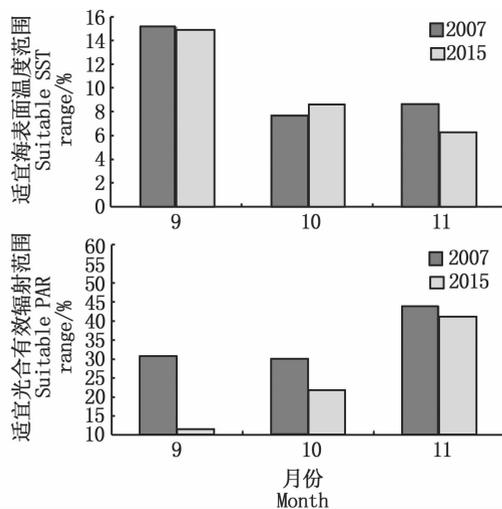


图5 2007和2015年9—11月柔鱼渔场内适宜的SST和PAR范围比较

Fig.5 Comparison of suitable SST and PAR ranges from September to November between 2007 and 2015 on the fishing ground of neon flying squid *Ommastrephes bartramii*

### 3 讨论与分析

西北太平洋海域由于黑潮暖流和亲潮寒流交汇形成了世界上最为重要的渔场,在该海域内,许多经济鱼种被太平洋各国捕捞,例如金枪

鱼<sup>[18]</sup>、秋刀鱼<sup>[19]</sup>、鲱鱼<sup>[20]</sup>以及头足类种类如柔鱼<sup>[21]</sup>。在黑潮和亲潮交汇海域内,有利的生物和非生物环境为柔鱼提供了良好的生长环境<sup>[21]</sup>。柔鱼作为短生命周期物种,其整个生活史阶段受到气候和海洋环境变化影响显著。例如:在早期生活史阶段,柔鱼生殖行动和产卵位置极大依赖于产卵场温度,产卵场内初级生产力水平影响柔鱼仔幼鱼的摄食和存活率;在柔鱼幼鱼阶段,其洄游行为受到黑潮势力强弱变化调控;在成鱼阶段,柔鱼栖息地显著受渔场内温度和饵料丰度影响<sup>[5,22]</sup>。近十几年来,各国柔鱼产量年间变化明显,其中一个重要原因是气候和环境变动对柔鱼栖息地适宜性产生影响,进而影响其资源丰度和空间分布<sup>[23]</sup>。因此,越来越多科学家关注柔鱼栖息地的分布和变动规律。然而以往研究主要针对SST、海面高度等环境因子对柔鱼栖息地影响,实际上柔鱼对渔场温度和饵料丰度更为敏感<sup>[24]</sup>。PAR作为海洋初级生产力水平重要的驱动因子<sup>[9]</sup>,对海洋浮游动植物密度影响显著,因此研究基于SST和PAR的柔鱼栖息地模型对精确探测柔鱼栖息地热点具有重要意义,同时也进一步加深了解柔鱼资源对不同环境因子变化的响应过程。

研究发现,柔鱼9—11月各月对应的适宜的

SST 范围分别为 16 ~ 19 °C、14 ~ 16 °C 和 12 ~ 14 °C,这与前人的研究结果<sup>[25]</sup>基本一致,而 9—11 月对应的适宜 PAR 范围分别为 25 ~ 29 E/(m<sup>2</sup> · d)、18 ~ 21 E/(m<sup>2</sup> · d) 和 10 ~ 13 E/(m<sup>2</sup> · d)。可以看出,柔鱼 9—11 月适宜的 SST 和 PAR 范围随着月份逐渐降低。研究结果显示,基于 SST 和 PAR 的栖息地模型能够有效预测西北太平洋柔鱼栖息地热点海域。针对栖息地模型做以下几点说明:(1)以捕捞努力量代替 CPUE 计算柔鱼的适宜性指数值。TIAN 等<sup>[26]</sup>曾针对柔鱼构建了基于 CPUE 和捕捞努力量的栖息地模型进行对比,其结果发现基于 CPUE 的 HSI 模型会高估柔鱼的栖息地适宜范围,因此本文选用捕捞努力量代替 CPUE。(2)选用算术平均法计算综合栖息地指数值。在栖息地模型中,有最大/小值法、几何平均法等多种算法来估算最终的 HSI 值,但是这些算法相对算术平均法缺陷较大,例如几何平均法会低估鱼类的栖息地水平,最大值法会高估等。算术平均法会均衡考虑各因子的影响程度,因此其结果更为准确<sup>[6]</sup>。但是实际上各种环境因子对柔鱼栖息地影响水平具有差异,应该在模型中针对不同因子赋予其不同权重<sup>[27]</sup>,在以后的研究中需予以考虑;(3)模型交叉验证结果更为可靠。对栖息地模型结果进行有效验证是模型研究的重要一环。首先,利用 2006—2014 年的渔业和环境数据进行构建模型,用 2015 年数据对模型结果进行交叉验证,结果发现 2015 年柔鱼栖息地与实际渔业捕捞数据基本匹配,说明本文基于 SST 和 PAR 的栖息地模型能够有效预测柔鱼的栖息地热点海域。其次,估算不同 HSI 区间内柔鱼的产量、捕捞努力量和 CPUE 值,发现两者之间存在显著的线性关系,验证了该模型的结果合理正确。当然,构建栖息地模型时应该随机选取 80% 数据进行建模,然后用剩下的数据进行验证,模型结果可能更为可靠准确。

厄尔尼诺和拉尼娜现象对太平洋海域内渔业资源具有显著影响<sup>[28]</sup>。例如:在东南太平洋秘鲁外海海域,当拉尼娜事件发生时,秘鲁海域上升流增强,渔场生产力水平上升,因此茎柔鱼栖息地适宜面积增加,其资源丰度增加;相反,厄尔尼诺事件发生时,秘鲁海域上升流减弱,生产力水平降低,导致茎柔鱼适宜栖息地缩减,因此其资源丰度减小<sup>[15]</sup>。在西北太平洋海域,已有大量

研究<sup>[29-30]</sup>认为厄尔尼诺和拉尼娜事件对金枪鱼、秋刀鱼等鱼类栖息地适宜性具有调控作用。针对柔鱼种群,对比了 2007 年强拉尼娜年份和 2015 年超强厄尔尼诺年份,两个年份作业海域相同,但是产量却发生巨大转变。研究发现,2007 年柔鱼 CPUE、产量和栖息地适宜性显著高于 2015 年,其主要原因可能是 2007 年强拉尼娜事件导致柔鱼渔场内适宜的海表面温度和光合有效辐射面积显著增加,而 2015 年超强厄尔尼诺事件导致两者适宜面积急剧下降,从而导致柔鱼栖息地适宜性变差,柔鱼 CPUE 降低,产量减少。当然,本文只选择了 2 个年份作为对比案例,在以后的研究中需要增加更多时间序列数据来佐证本文研究结果。

#### 参考文献:

- [1] BOWER J R, ICHII T. The red flying squid (*Ommastrephes bartramii*): a review of recent research and the fishery in Japan [J]. Fisheries Research, 2005, 76(1): 39-55.
- [2] 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,2005:152-153.  
WANG Y G, CHEN X J. Economy soft fish resources and fishing in the world ocean [M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 152-153.
- [3] CHEN X J, LIU B L, CHEN Y. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries [J]. Fisheries Research, 2008, 89(3): 211-221.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 龚彩霞,陈新军,高峰,等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.  
GONG C X, CHEN X J, GAO F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(2): 260-269.
- [7] YU W, CHEN X J, YI Q, 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.
- [8] 陈新军,刘必林,田思泉,等. 利用基于表温因子的栖息

- 地模型预测西北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 渔场[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(6): 707-713.
- CHEN X J, LIU B L, TIAN S Q, et al. Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modelling in northwestern Pacific [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(6): 707-713.
- [9] 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.
- [10] 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 J P, WANG W B, LEE C. Calculation of photosynthetically available radiation using multispectral data in the Arctic[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(2): 91-103.
- [11] 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(1): 91-98.
- [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 W, CHEN X J. 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] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. 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: 119-127.
- [14] CHEN X J, TIAN S Q, LIU B L, et al. Modeling a habitat suitability index for the eastern fall cohort of *Ommastrephes bartramii* in the central north Pacific Ocean[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(3): 493-504.
- [15] YU W, YI Q, CHEN X J, et al. Modelling the effects of climate variability on habitat suitability of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*, in the southeast Pacific Ocean off Peru[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(2): 239-249.
- [16] ALABIA I D, SAITOH S I, HIRAWAKE T, et al. Elucidating the potential squid habitat responses in the central north Pacific to the recent ENSO flavors[J]. Hydrobiologia, 2016, 772(1): 215-227.
- [17] 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 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.
- [18] ZAINUDDIN M, KIYOFUJI H, SAITOH K, et al. Using multi-sensor satellite remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for albacore (*Thunnus alalunga*) in the northwestern North Pacific[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, 53(3/4): 419-431.
- [19] TAKASUKA A, NISHIKAWA K, KURODA H, et al. Growth variability of Pacific saury *Cololabis saira* larvae under contrasting environments across the Kuroshio axis: survival potential of minority versus majority [J]. Fisheries Oceanography, 2016, 25(4): 390-406.
- [20] YATSU A, WATANABE T, ISHIDA M, et al. Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendations for management [J]. Fisheries Oceanography, 2005, 14(4): 263-278.
- [21] YU W, CHEN X J, YI Q, et al. Spatio-temporal distributions and habitat hotspots of the winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in relation to oceanographic conditions in the northwest Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2016, 175: 103-115.
- [22] 余为, 陈新军, 易倩, 等. 北太平洋柔鱼早期生活史研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(5): 755-762.
- YU W, CHEN X J, YI Q, et al. Review on the early life history of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the north Pacific [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(5): 755-762.
- [23] ALABIA I D, SAITOH S I, MUGO R, et al. Identifying pelagic habitat hotspots of neon flying squid in the temperate waters of the central north Pacific[J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0142885.
- [24] 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 W, CHEN X J, YI Q. 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.
- [25] CHEN X J, LIU B L. The catch distribution of *Ommastrephes bartramii* in squid jigging fishery and the relationship between fishing ground and SST in the north Pacific Ocean in 2004 [J]. Marine Science Bulletin, 2006, 8(2): 83-91.
- [26] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2009, 95(2/3): 181-188.
- [27] GONG C X, CHEN X J, GAO F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: a case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(2): 241-248.

- [28] ANDERSON C I H, RODHOUSE P G. Life cycles, oceanography and variability: ommastrephid squid in variable oceanographic environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 133-143.
- [29] ZAINUDDIN M, SAITOH K, SAITOH S I. Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western north Pacific Ocean using remotely sensed satellite data[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 17(2): 61-73.
- [30] TIAN Y, AKAMINE T, SUDA M. Variations in the abundance of Pacific saury (*Cololabis saira*) from the northwestern Pacific in relation to oceanic-climate changes[J]. Fisheries Research, 2003, 60(2/3): 439-454.

## Predicting the habitat hot spots of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean based on the sea surface temperature and photosynthetically active radiation

WEN Jian<sup>1</sup>, LU Xinyi<sup>1</sup>, CHEN Xinjun<sup>1,2,3,4</sup>, YU Wei<sup>1,2,3,4</sup>

(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 Ocean Fisheries Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The neon flying squid *Ommastrephes bartramii* from is a migratory ommastrephidae squid species with ecological importance and economic values. At present, *O. bartramii* is mainly targeted by the squid-jigging fishing vessels from Japan, ROK and China and so on. *O. bartramii* has only 1 – year life span, therefore, its habitat suitability is largely affected by climate variability and environmental conditions. In this study, an integrated habitat suitability index (HSI) model was developed based on the fishing effort and the arithmetic mean method by using the fisheries data from September to November during 2006 – 2015 obtained from the data centers of Chinese squid-jigging fishery combined with two key environmental variables including sea surface temperature (SST) and photosynthetically active radiation (PAR). This study further evaluated and compared the impacts of very strong El Niño and strong La Niña on habitat suitability of *O. bartramii*. Results showed that habitat modeling method based on SST and PAR could effectively predict the habitat hot spots of *O. bartramii* in the Norwest Pacific Ocean. It was clearly found that the suitable ranges of SST and PAR varied monthly, and the ranges decreased from September to November. The catch, fishing effort and catch per unit effort (CPUE) tended to linearly increase with the habitat suitability index. Comparing the 2007 year with strong La Niña and the 2015 year with very strong El Niño, it showed that the CPUE and habitat suitability in 2007 were higher than those in 2015. The difference might be attributed to the high enlargement of suitable area of SST and PAR in 2007 due to the strong La Niña, while the very strong El Niño in 2015 led to the sharp decrease of suitable area for both SST and PAR. All of these resulted in the low CPUE.

**Key words:** *Ommastrephes bartramii*; sea surface temperature; photosynthetically active radiation; El Niño; La Niña; the northwest Pacific Ocean