

DOI: 10.12264/JFSC2021-0563

厄尔尼诺和拉尼娜发生期太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度的响应研究

陈丙见^{1, 5}, 冯志萍², 余为^{2, 3, 4}

1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
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. 国家海洋卫星山东数据应用中心, 山东 烟台 264006

摘要: 太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)是短生命周期的重要经济头足类, 其资源丰度易受气候和海洋环境变量的影响。本研究利用 1977—2015 年日本与韩国的太平洋褶柔鱼秋生群渔业统计数据, 结合海表面温度(sea surface temperature, SST)、50 m 水层温度(Temp_50 m)和 100 m 水层温度(Temp_100 m)等海洋环境数据, 探究太平洋褶柔鱼资源丰度[以 CPUE (单位捕捞努力量渔获量)为指标]和补充量在不同厄尔尼诺和南方涛动 ENSO (El Niño-Southern oscillation)事件下的变动差异。结果表明, 相较于厄尔尼诺事件, 拉尼娜事件下太平洋褶柔鱼渔场内 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 升高, 其在空间上呈由西北向东南、由北向南递增的变化趋势, 且大于 20 °C 的海温分布面积增加, 三者距平值均值及正值在空间上的分布面积均大于其在厄尔尼诺事件期间的。厄尔尼诺事件下的太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度及其补充量小于其在拉尼娜事件期间的, 且资源丰度与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间呈正相关。研究认为, 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼渔场海温环境存在明显差异, 其资源丰度及补充量与气候影响下的海温变动有关。

关键词: 太平洋褶柔鱼; 厄尔尼诺事件; 拉尼娜事件; ENSO; CPUE; 海温; 时空变化

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)11-1636-11

太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)是典型的短生命周期暖温性浅水种, 是日本、韩国、中国等国家重要的捕捞目标鱼种^[1-2]。因产卵盛期和洄游模式的变化, 太平洋褶柔鱼被划定为夏生群、秋生群和冬生群 3 个群体, 且以秋生群和冬生群的资源量最为丰富^[3]。20 世纪 80 年代后, 韩国以开发太平洋褶柔鱼秋生群为主, 而日本在 70 年代后期开始对褶柔鱼不同群体的渔获进行统计^[4]。目前, 褶柔鱼秋生群的主要捕捞区域在日本海, 渔获量占总捕捞量较大比例, 其产卵场从东海北部延伸到九州西岸及日本海西陆沿岸, 渔获量以

日本和韩国居高, 且具有显著的年际波动现象^[5-6]。因此, 探究太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度及补充量与气候-海洋环境变量间的关联性可为其资源的可持续利用提供科学依据。

短生命周期的头足类, 其资源丰度与分布对不同时间尺度气候和海洋环境条件的变化较为敏感, 且其资源量多数由其补充量决定, 如余为等^[7]利用经验正交函数分析不同太平洋年代际振荡 PDO (pacific decadal oscillation, PDO)位相下西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔场环境特征及其资源丰度指标单位捕捞努力量渔获量

收稿日期: 2021-11-26; **修订日期:** 2021-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41906073); 自然资源卫星遥感技术体系建设与应用示范项目(202101003).

作者简介: 陈丙见(1987-), 男, 助理研究员, 研究方向为海洋生物资源评估与开发. E-mail: 75541875@qq.com

通信作者: 余为, 副研究员, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: wyu@shou.edu.cn

(catch per unit effort, CPUE)的变化, 认为 PDO 暖位相时柔鱼 CPUE 高, 冷位相时其 CPUE 较低。Yu 等^[8]基于不同权重的算术平均模型 AMM (arithmetic mean model, AMM)分析西北太平洋柔鱼 CPUE 在厄尔尼诺和拉尼娜事件下的变动, 结果发现柔鱼 CPUE 与海表面温度呈负相关, 且拉尼娜事件可能会增强其栖息地的适宜性。唐峰华等^[9]认为冷暖流交汇流隔的暖流区易形成太平洋褶柔鱼渔场, 且产卵场的海表温多数情况下影响着太平洋褶柔鱼秋生群的资源补充量。由此看出, 不同的栖息环境影响了鱼类资源分布与丰度。对比以往太平洋褶柔鱼资源分布与丰度对海洋环境与气候变化响应的研究发现, 多数研究选取海表面环境变量, 且仅考虑了其资源丰度的变化^[10-11]。因此, 本研究基于长时间序列的渔业数据和海洋环境数据, 并结合气候指数探究太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度及其资源补充量在不同 ENSO 事件下的变动差异, 为褶柔鱼资源预测及管理提供科学帮助。

1 材料与方法

1.1 数据选取

本研究选取的太平洋褶柔鱼渔业捕捞数据来自日本渔业机构提供的 2015 年太平洋褶柔鱼秋生群资源评估报告(<http://abchan.fra.go.jp/digests27/index.html>), 时间为 1977—2015 年, 作业区域主要集中在日本北陆沿岸、对马海峡附近及东海附近的 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内。渔业数据主要包括作业年份、捕捞国家渔获量(包括韩国、日本, 单位: t)、捕捞努力量和单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)等。其中, 表征太平洋褶柔鱼资源丰度的指标 CPUE (单位: t/d)是根据报告中总捕捞量(catch)/总捕捞努力量(effort)计算得出的。

1977—2015 年海表面温度(sea surface temperature, SST)、50 m 水层温度(Temp_50 m)和 100 m 水层温度(Temp_100 m)等环境数据来自亚太数据研究中心(http://apdrc.soest.hawaii.edu/las_ofes/v6/dataset?catitem=71)。数据的空间范围为 125°E~137°E, 30°N~37°N, 空间分辨率为 0.5°×0.5°, 时间分辨率

为年。影响太平洋褶柔鱼资源丰度变动的厄尔尼诺和拉尼娜事件则由海洋尼诺指数(oceanic Niño index, ONI)的大小定义, 而 ONI 则是通过 Niño 3.4 区(120°W~170°W, 5°N~5°S)海表面温度距平值(sea surface temperature anomaly, SSTA)的连续 3 个月的滑动平均值表征的, 其数据来源于美国 NOAA 气候预报中心(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)。

1.2 分析方法

1.2.1 异常气候事件的归类 本研究依据 NOAA 对不同 ENSO (EI Niño-Southern oscillation)事件的划定标准[即海洋尼诺指数 ONI 连续 5 个月超过 0.5 °C (或低于 -0.5 °C)], 则认为发生一次厄尔尼诺(或拉尼娜)事件[对 1977—2015 年发生厄尔尼诺和拉尼娜气候事件的年份进行归类。

1.2.2 不同 ENSO 事件下海洋环境条件变化 计算 1977—2015 年 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 均值及三者在不同 ENSO 事件下的均值, 并绘制三者在不同 ENSO 事件下的平均态分布图以探究 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 等海洋环境变量的年际变化及三者在不同异常气候事件下的时空变化; 计算 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 海温距平值并分析三者距平值在不同 ENSO 事件下的时空变化; 绘制 Niño 3.4 指数与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 的时空相关性分布图以探究气候和环境变量间的关联性。

1.2.3 不同 ENSO 事件下各海温层中适宜温度范围的变化 基于 19.5~23 °C 的海温变化范围是太平洋褶柔鱼最适宜的孵化温度范围^[12], 本研究通过计算不同 ENSO 事件下 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 中 19.5~23 °C 所占比例及此海温变化范围在太平洋褶柔鱼产卵场(125°E~131°E)中的空间分布, 以分析不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼产卵场最适温度环境条件的变化差异。

1.2.4 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼资源丰度变化及其与环境变量的相关性 对比太平洋褶柔鱼资源丰度(CPUE)和资源量(resources)在不同 ENSO 事件下的变化差异, 利用 matlab 中交相关法(crosscorr 函数)分析太平洋褶柔鱼 CPUE 与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间的时空相关性

并绘制相关性分布图。

2 结果与分析

2.1 异常气候事件年份的归类

依据上述划定标准,本研究对厄尔尼诺、拉尼娜和正常气候事件年份的归类结果如表 1 所示。

表 1 根据不同 ENSO 事件划分标准归类的 1977—2015 年发生厄尔尼诺和拉尼娜事件的年份
Tab. 1 The years with different ENSO events during 1950—2017 according to the definition of the El Niño-Southern oscillation events

事件 climate condition	年份 year
厄尔尼诺事件 El Niño event	1982、1987、1991、1997、2002、2004、 2009、2015
正常气候 normal event	1977、1978、1979、1980、1981、1983、 1984、1985、1986、1989、1990、1992、 1993、1994、1996、2001、2003、2005、 2006、2008、2012、2013、2014
拉尼娜事件 La Niña event	1988、1995、1998、1999、2000、2007、 2010、2011

2.2 不同 ENSO 事件下海洋环境条件的变化差异

1977—2015 年 SST 整体呈波动式上升的年际变化趋势,其于 1999 和 2007 年有明显的升温变化,Temp_50 m 和 Temp_100 m 的年际变化趋整体与 SST 相似,两者在 2007 年也均有明显升温的变化现象(图 1)。异常气候事件下,SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 呈现由西北向东南、由北向南递增的空间变化,且大于 20 °C 的海温在拉尼娜事件下的分布面积大于在厄尔尼诺事件期间的;此外,高于 24 °C 的 SST 空间集中分布在 128°E~134°E, 30°N~32°N 区域内,高于 20 °C 的 Temp_50 m 和 Temp_100 m 的 SST 空间集中分布在 128°E~137°E, 30°N~32°N 范围内(图 1)。SSTA、50 m 水层温度距平均值(Temp_50 mA)和 100 m 水层温度距平均值(Temp_100 mA)在不同 ENSO 事件下的变化差异与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 相似,即三者拉尼娜事件下的均值及正值在空间上的分布面积均显著大于其在厄尔尼诺事件期间的(图 2)。

Niño 3.4 指数与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m

间的交相关函数结果表明(图 3),SST、Temp_50 m、Temp_100 m 与 Niño 3.4 指数在时间上呈负相关,相关性均在 lag=-1 时最大,相关系数分别为 -0.4211, -0.4168 和 -0.3789;空间上,太平洋褶柔鱼产卵场区域内(125°E~131°E) SST、Temp_50 m、Temp_100 m 与 Niño 3.4 指数均呈负相关($P<0.05$)。

2.3 不同 ENSO 事件下各海温层中 19.5~23 °C 适宜范围的变化

不同 ENSO 事件下,SST 中 19.5~23 °C 所占比例变化差异较小,而 Temp_50 m 和 Temp_100 m 中 19.5~23 °C 所占比例变化均为拉尼娜事件期间的大于厄尔尼诺事件期间的(图 4)。空间上,在太平洋褶柔鱼产卵场区域(125°E~131°E)内,拉尼娜事件下 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 中 19.5~23 °C 的空间分布面积略大于其在厄尔尼诺事件期间的(图 5)。

2.4 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼 CPUE 变化及其与环境变量的相关性

不同 ENSO 事件下,太平洋褶柔鱼秋生群 CPUE 整体在 2~2.5 t/D 范围内变化,且厄尔尼诺事件下的 CPUE 略高于拉尼娜事件期间的;资源量整体在 34.5~45 亿尾范围内变化,厄尔尼诺事件期间太平洋褶柔鱼资源量小于拉尼娜事件期间的,资源量差异约为 5 亿尾(图 6)。太平洋褶柔鱼 CPUE 与各环境变量的交相关函数结果表明(图 7),褶柔鱼 CPUE 与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 时间上呈正相关,相关性均在 lag=-2 时最大,相关系数分别为 0.5589, 0.5451, 0.4748;在太平洋褶柔鱼产卵场的空间海域内,CPUE 与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 呈正相关($P<0.05$)。

3 讨论与分析

3.1 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼产卵场环境特征分析

较多海洋渔业资源、渔场与海洋学关系的研究表明,温度是影响海洋物种资源量补充效率、渔场探测等较为重要的海洋环境变量,其对海洋鱼类和头足类既有孵化率、成活率、性腺成熟度、索饵等内在机理变化的影响,也存在垂直移动、洄游模式、栖息等外部条件变化的影响^[13-14]。

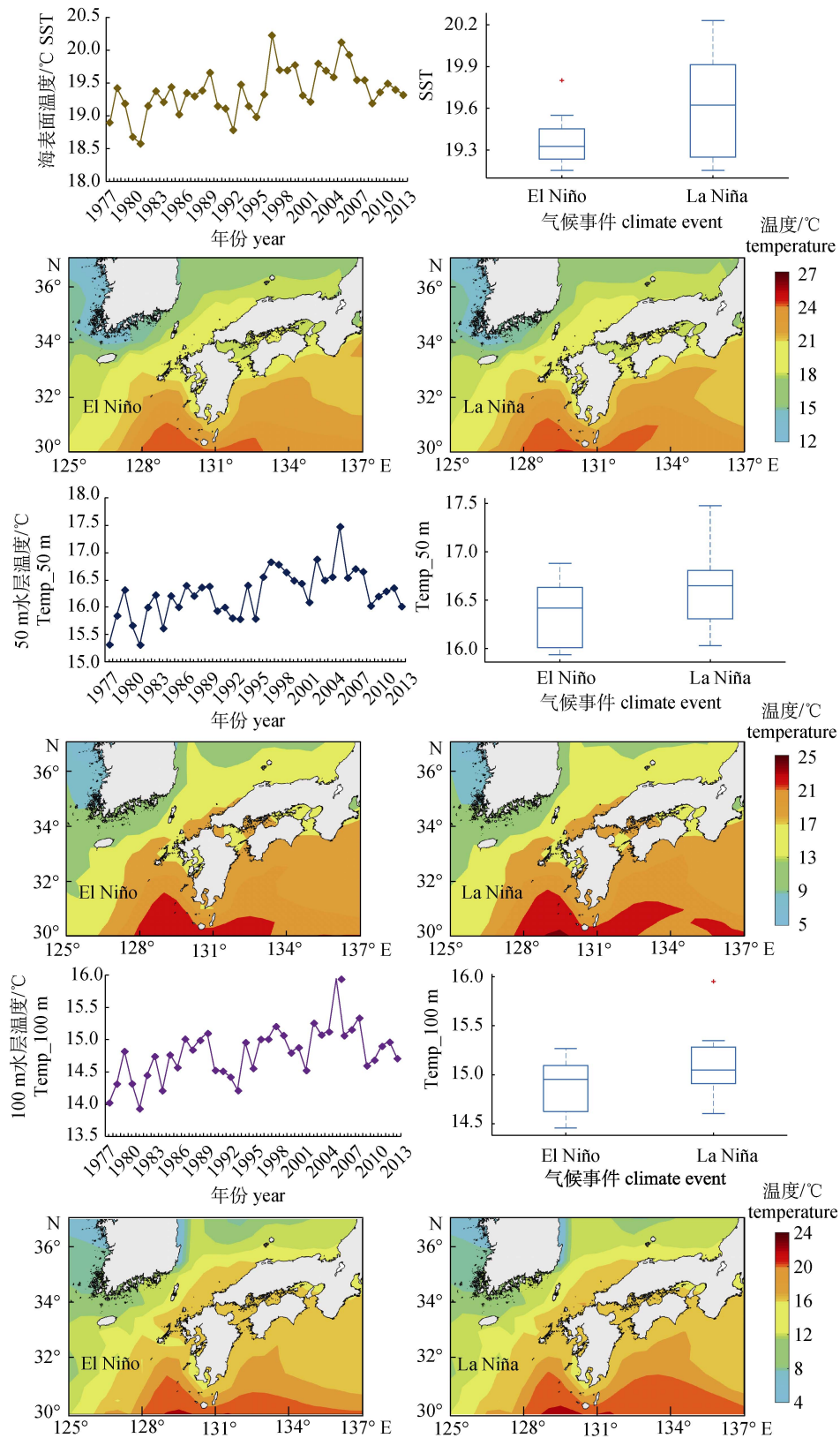


图 1 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内 1977~2015 年 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 的
年际变化趋势及三者在不同 ENSO 事件下的时空分布
Fig. 1 Interannual variation trend of SST, Temp_50 m and Temp_100 m from 1977 to 2015 and their spatial-temporal
distribution under different ENSO events in the sea area of 125°E~137°E, 30°N~37°N

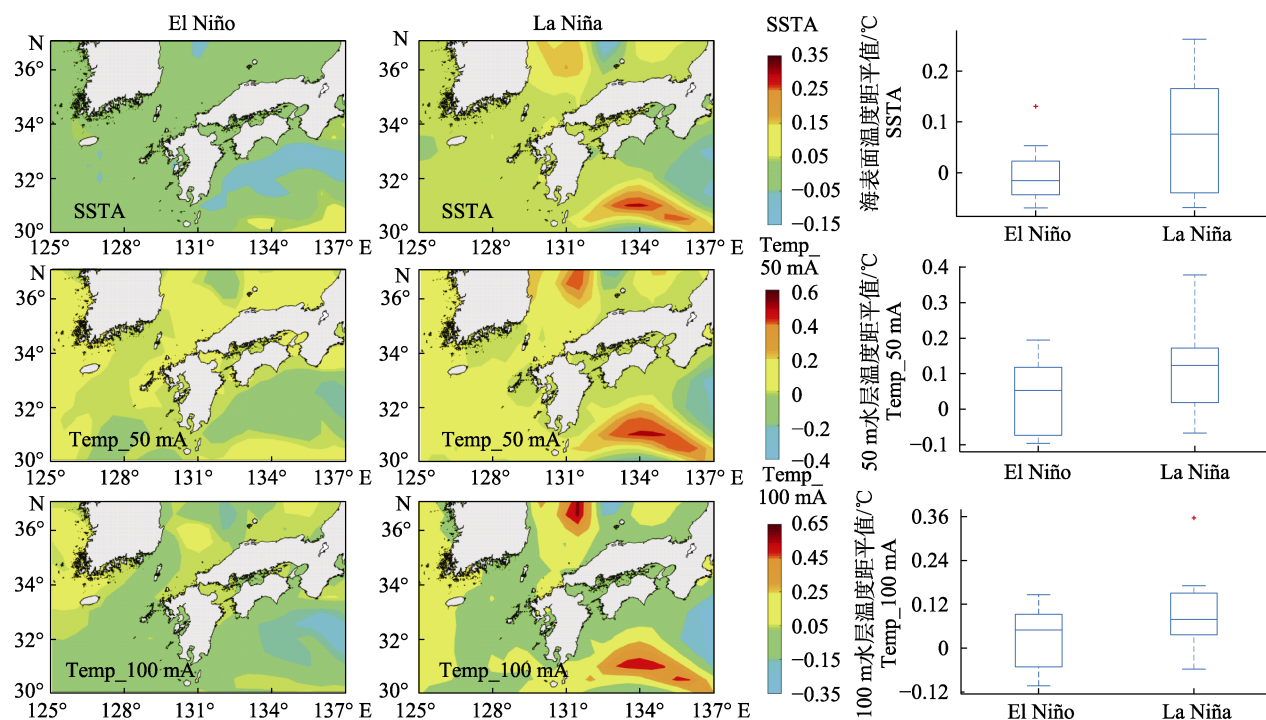


图 2 不同 ENSO 事件下 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内 SSTA、Temp_50 mA、Temp_100 mA 的时空分布图
Fig. 2 Spatio-temporal distribution of SSTA, Temp_50 mA and Temp_100 mA under different ENSO events in the sea area of 125°E~137°E, 30°N~37°N

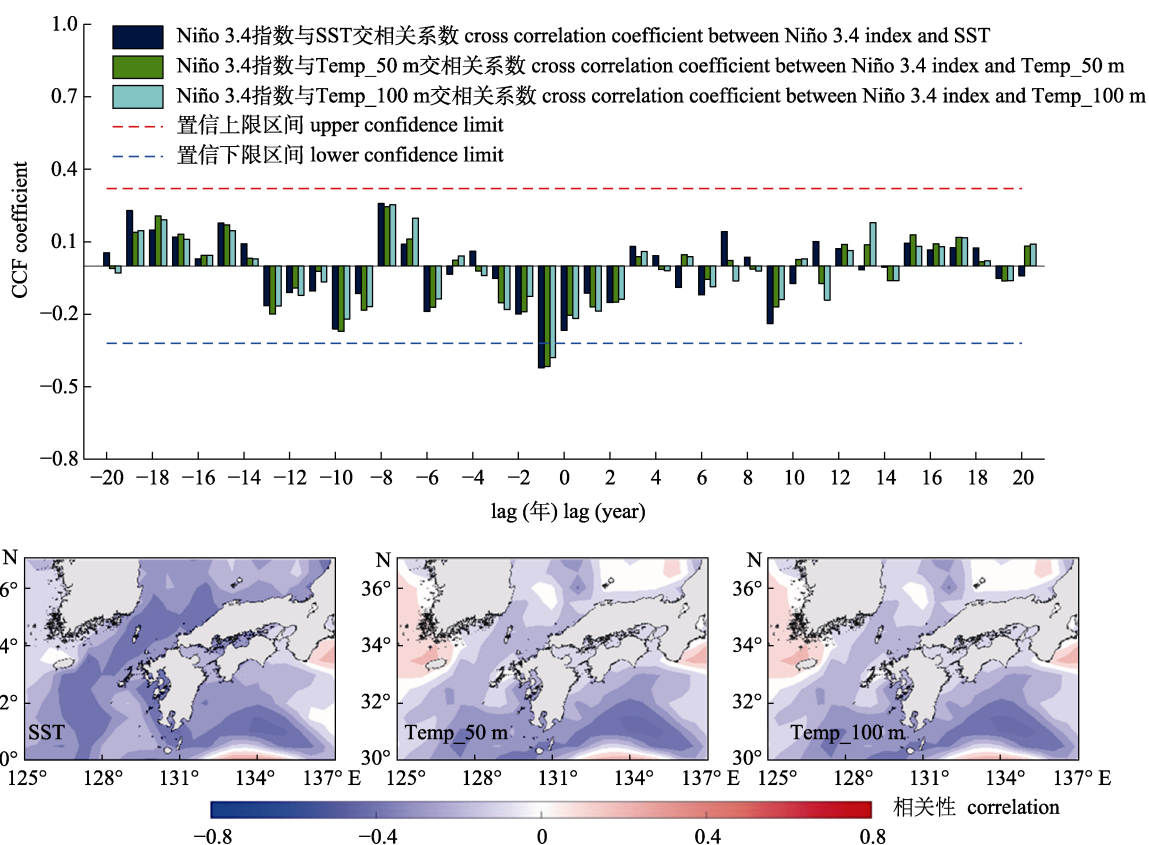


图 3 Niño 3.4 指数与 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间的时空交相关性
Fig. 3 Spatial-temporal cross correlation between Niño 3.4 index and SST, Temp_50 m and Temp_100 m in the sea area of 125°E~137°E, 30°N~37°N

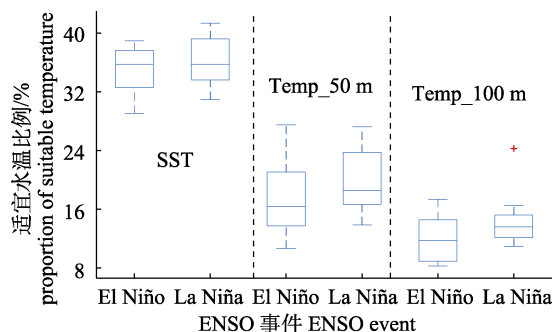


图 4 不同 ENSO 事件下 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 中水温 19.5–23 °C 所占比例变化

Fig. 4 Variations of the proportion of temperature 19.5–23 °C in SST, Temp_50 m and Temp_100 m under different ENSO events

冯志萍等^[15]基于最大熵模型探究东南太平洋智利竹筴鱼(*Trachurus murphyi*)潜在分布变动, 研究认为水温是影响智利竹筴鱼渔场时空分布较为重要的环境因子。周为峰等^[13]利用全球海洋 Argo 网格数据集(BOA_Argo)结合渔业捕捞数据分析厄尔尼诺和拉尼娜事件下温跃层对中西太平洋黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacores*)渔场分布的影响, 研究表明黄鳍金枪鱼 CPUE 在厄尔尼诺事件下的东移和其在拉尼娜事件下的西移与其渔场所在温跃层的上界温度有关。太平洋褶柔鱼是暖温性鱼种, 其生长繁殖和栖息需要一定的海温, 刚孵化个体集中分布在 0~25 m 水层处, 幼体多数分布在 75 m 水层上, 总体不存在较大范围的昼夜垂直移动^[16]。因此, 本研究除选取 SST 作为分析褶柔鱼资源丰

度和资源量在不同 ENSO 事件下变动差异的研究变量外, 还嵌合其生物学特性加入 Temp_50 m 和 Temp_100 m 等海洋环境变量。不同 ENSO 事件下各环境因子的时空变化结果表明(图 1), 厄尔尼诺事件下 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 均值及三者距平值均值(SSTA, Temp_50 mA 和 Temp_100 mA)均小于拉尼娜事件期间的, 这可能是由于沃克环流减弱, 中、东太平洋气压随海温升高而降低, 西太平洋表层暖水区东移, 下层冷水上翻以补给表层海水, 致使表层和次表层海水温度降低。武胜男等^[17]研究发现, 太平洋褶柔鱼秋生群产卵场环境变化受 PDO 影响, PDO 暖位相时的褶柔鱼产卵场温度低于冷位相, 这与本研究结果较为一致。空间上, 太平洋褶柔鱼秋生群沿日本海东西两侧由南向北索饵, 其后沿日本海中部南下产卵, 在索饵路径区域内的海温变化范围为 15~20 °C, 其产卵路径区域内的海温变化范围为 18~21 °C, 与其适宜栖息温度 17~23 °C 基本吻合^[18-19]。

3.2 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼 CPUE 和资源量的变化

气候变化被认为是引起小型中上层远洋鱼类和头足类资源丰度和潜在分布变动最为主要的驱动因素之一, 如 Gong 等^[20]基于最大熵模型预测西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)在未来

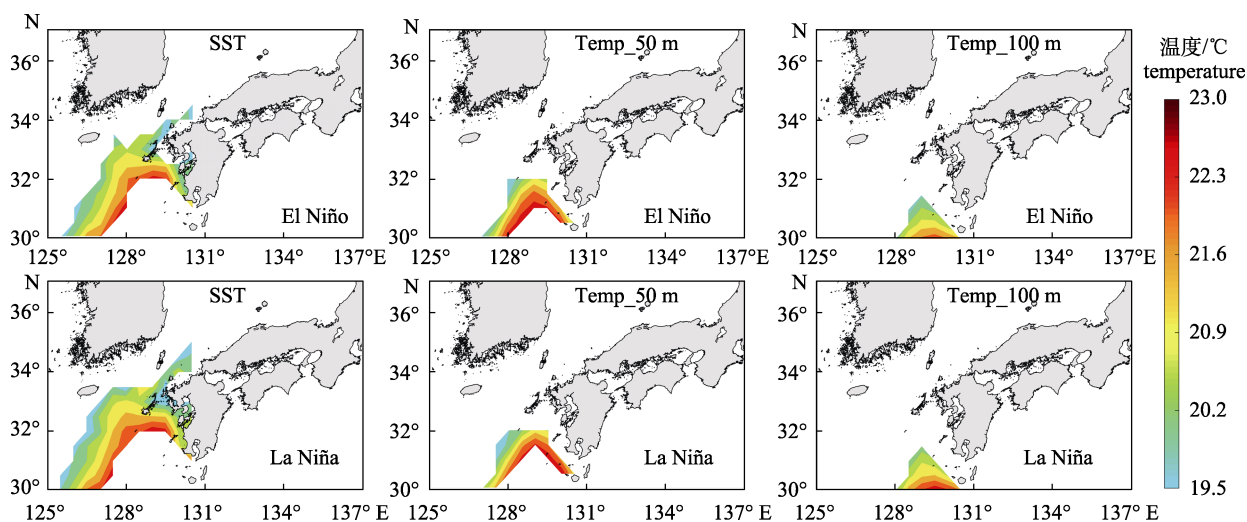


图 5 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼产卵场 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 中 19.5–23 °C 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of 19.5–23 °C in SST, Temp_50 m and Temp_100 m of *Todarodes pacificus* spawning ground under different ENSO events in the sea area of 125°E~137°E, 30°N~37°N

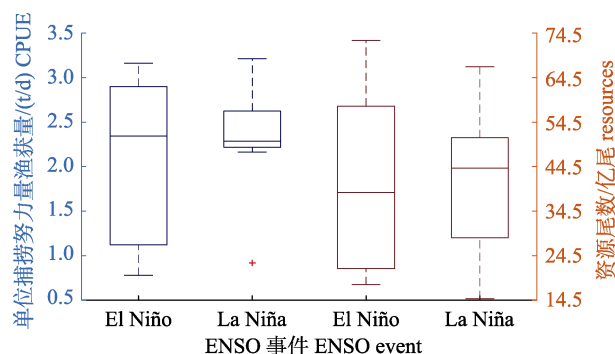


图 6 不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼 CPUE 和资源量的变化差异

Fig. 6 Variation of CPUE and resources of *Todarodes pacificus* under different ENSO events

不同气候变化情景下的适应性分布, 研究表明, 全球气候变化影响下西北太平洋柔鱼适宜栖息地向北迁移, 到 21 世纪末其适宜栖息地面积将减少, 鱼汛可能会推迟, 渔船的作业时间也将会缩短。ENSO 是热带太平洋的大气-海洋耦合变化, 由于地球自转的“刹车效应”使赤道带和大气具有向东的惯性, 赤道洋流和信风减弱, 东太平洋冷水上涌强度削弱, 使得东太平洋暖水堆积而引发海水温度升高、海面抬升的厄尔尼诺现象, 相反的现象出现时则发生拉尼娜现象, 此现象维持 3 个月即为异常气候事件^[21-22]。ENSO 是影响海洋渔业资源波动最常见的气候事件之一, Liu 等^[23]使用机器学习和统计模型探索日本鳀 (*Engraulis japonicas*) CPUE 与气候和海洋环境条件变化的联系, 研究发现受 ENSO 气候事件驱动和海洋环境条件(如 SST 和盐度锋等)改变的影响, 日本鳀的资源丰度可能会发生重大转变, 其渔场 SST、CPUE 和 ENSO 气候指数均呈显著负相关。本研究通过对比不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼秋生群 CPUE 和资源量(resources)的变化差异(图 6), 发现厄尔尼诺事件下, 太平洋褶柔鱼 CPUE 与拉尼娜事件期间相比差异较小, 表现为拉尼娜事件下的资源量显著高于厄尔尼诺事件期间的, 这可能与 ENSO 事件所引起的海温变化有关。Sakurai 等^[24]提出了有关太平洋褶柔鱼繁殖策略假说, 认为孵化后的褶柔鱼个体在北上索饵的过程中主要集群于温差相对较小的暖水区域。不同 ENSO 事件下, 太平洋褶柔鱼产卵场海域内 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 水温层中 19.5~23 °C 最适宜孵化

海温范围的空间分布差异甚微, 在其个体迁移至索饵场的路径内海温空间分布差异也较小, 由此可能导致不同异常气候事件下褶柔鱼 CPUE 的分布差异较小(图 1, 图 5)。太平洋褶柔鱼主要沿日本沿岸水域和日本海中部产卵洄游, 该海域纬度空间上的温差在不同 ENSO 事件下变化较大, 对其资源补充量的影响也较大(图 6)。此外, 随拉尼娜事件的发生, 西北太平洋热带气旋增多, 褶柔鱼个体北上索饵路径区域内海温的升高促进了其生长发育, 增加了其资源补充量发展的可能性, 且在褶柔鱼北上索饵和南下洄游路径区域内的海表温变化范围为 15~24 °C, 对褶柔鱼个体而言整体较为适宜。

3.3 太平洋褶柔鱼 CPUE 与海洋环境变量的关系

头足类资源量因个体寿命较短和气候-环境变化而更新速度较快, 其与海温变动关联性较大, 因此, 了解头足类种群和海洋环境变量间的相互作用是探究物种对其栖息环境的响应机制及高效、精准预测其渔场分布和资源变动的重要前提。Tosunolu 等^[25]基于 GAM 模型分析了与海表面温度、叶绿素浓度相关的东地中海欧洲沙丁鱼 CPUE 的季节性变化, 研究认为海表面温度是影响其 CPUE 变动最重要的参数。Xu 等^[26]在季节和年际尺度上探究了东北太平洋长鳍金枪鱼 CPUE 分布与亚热带锋的关联性, 结果发现较高的长鳍金枪鱼 CPUE 多数分布在海温梯度较高的区域内。本研究中太平洋褶柔鱼 CPUE 与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间的交相关结果表明其与 3 个海洋变量时空上呈正相关(图 7)。西北太平洋 20 世纪 70 年代后期到 80 年代中期的海表温下降幅度较为明显, 且同时段内太平洋褶柔鱼资源量也呈下降变化, 而 80 年代后期褶柔鱼资源量又随海温的升高表现出同步性的增加现象, 此研究结果体现了海温与太平洋褶柔鱼资源量间的正相关关系, 间接表明了本研究太平洋褶柔鱼 CPUE 与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间相关性结果的可靠性^[19,27]。此外, Niño 3.4 指数与 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间的时间相关性以及太平洋褶柔鱼 CPUE 与 3 个环境变量间的时间相关性均具有超前现象, 这可能是由气候变化下影响太平洋褶柔鱼资源量变动的海流的变化引起的

(图 3)。北赤道暖流(north equatorial current, NEC)是热带西北太平洋海流系统的主要组成部分, 其在风力和浮力通量驱动下自西向东流动, 菲律宾沿岸附近的北向支流-北太平洋副热带流环(即黑潮)在海洋物种对气候变化的响应过程中起着重要的作用^[28-29]。胡松等^[30]研究认为黑潮延伸体南部区域的小部分气旋涡可以形成长时间的高叶绿素斑块且多数向西传播, 有助于支撑一个食物链并可能起到生物传输带的作用。太平洋褶柔鱼的早期生长情况及其幼体的分布与黑潮走向有较大关联, 同时黑潮也是形成褶柔鱼渔场的主要海流

之一^[19]。吴国丽等^[31]利用 HYCOM (hybrid coordinate ocean model)再分析数据对 NEC、黑潮在 2015—2016 年超强厄尔尼诺事件期间的变化特征进行了研究, 结果认为厄尔尼诺事件期间, 北赤道暖流的西向流异常促进了北赤道暖流运输的增强, 使其输运异常序列超前 Niño 3.4 指数约 5 个月且具有较强的相关性, 黑潮输运虽无增强现象, 但其与 Niño 3.4 指数同样具有较强的相关性。随 NEC 向西输运到达菲律宾沿岸后分叉形成黑潮的过程中, 因厄尔尼诺事件的持续性可能会延长其对 Niño 3.4 的超前时间。

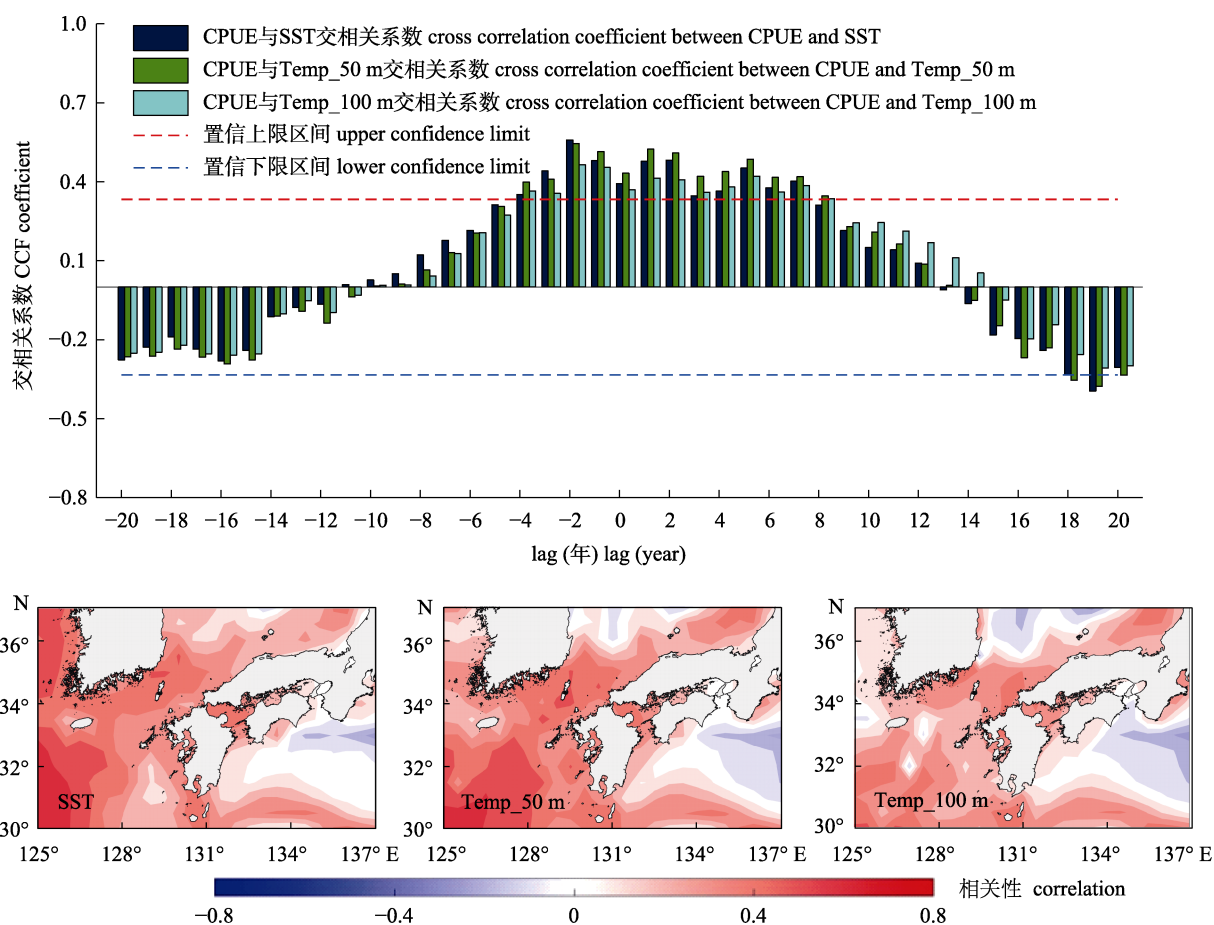


图 7 太平洋褶柔鱼 CPUE 与 125°E~137°E, 30°N~37°N 海域内 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 间的时空交相关性
Fig. 7 Spatial-temporal cross correlation between CPUE of *Todarodes pacificus* and SST, Temp_50 m and Temp_100 m in the sea area of 125°E~137°E, 30°N~37°N

3.4 研究展望

本研究基于太平洋褶柔鱼秋生群渔获数据和 SST、Temp_50 m 和 Temp_100 m 等海洋环境数据, 探究了不同 ENSO 事件下太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度变化, 结果表明拉尼娜事件下太平洋褶柔

鱼秋生群产卵场中海温升高, 各水温层中褶柔鱼适宜海温范围 19.5~23 °C 所占比例较大, 资源量更丰富。本研究存在部分局限性: 海温代表海洋热量条件, 但在太平洋褶柔鱼秋生群的生长繁殖和洄游过程中不仅单一依靠热量支撑, 其生存区

域内食物丰富度、海洋物理特性等均会对其资源丰度产生一定程度的影响。此外,不同 ENSO 事件强度对太平洋褶柔鱼资源丰度和分布的影响也是不同的,如 Yu 等^[2]研究认为弱厄尔尼诺事件可能会使褶柔鱼冬生群 CPUE 增加,而中等强度的厄尔尼诺则会使其 CPUE 减少。因此,在以后的研究中应全面考虑气候、环境条件对褶柔鱼资源丰度的影响,可考虑在合理条件下加入更多影响褶柔鱼繁殖发育的条件指标,同时从气候事件不同强度或多气候事件叠合角度嵌入研究点,以全面评估太平洋褶柔鱼群体对不同气候事件的响应变动。

参考文献:

- [1] Bower J R, Nakamura Y, Mori K, et al. Distribution of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) paralarvae near the Kuroshio off southern Kyushu, Japan[J]. Marine Biology, 1999, 135(1): 99-106.
- [2] Yu W, Zhang Y, Chen X J, et al. Response of winter cohort abundance of Japanese common squid *Todarodes pacificus* to the ENSO events[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(6): 61-71.
- [3] Sakurai Y, Kiyofuji H, Saitoh S, et al. Changes in inferred spawning areas of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) due to changing environmental conditions[J]. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57(1): 24-30.
- [4] Arkhipkin A I, Rodhouse P G K, Pierce G J, et al. World squid fisheries[J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 2015, 23(2): 92-252.
- [5] Zhang L, Chen X J, Wang J T, et al. Catastrophe prediction of abundance of autumn cohort of pleated squid *Todarodes pacificus* in Japan Sea and East China Sea based on gray system theory[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(4): 607-611. [张磊, 陈新军, 汪金涛, 等. 基于灰色系统的太平洋褶柔鱼秋生群资源丰度灾变预测[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 607-611.]
- [6] Shimura T, Sakura Y, Ujir, et al. Distribution of egg-mass and paralarva of the common squid *Todarodes pacificus* near the Oki Islands[R]. Tottori Prefectural Fisheries Experimental Station and Hokkaido University Faculty of Fisheries, 2010, 38: 17-44.
- [7] Yu W, Chen X J, Yi Q. Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwestern Pacific Ocean under different climate modes[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 525-534. [余为, 陈新军, 易倩. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525-534.]
- [8] Yu W, Chen X J, Zhang Y, et al. Habitat suitability modelling revealing environmental-driven abundance variability and geographical distribution shift of winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2019, 76(6): 1722-1735.
- [9] Tang F H, Shi Y R, Zhu J X, et al. Influence of marine environment factors on temporal and spatial distribution of Japanese common squid fishing grounds in the Sea of Japan[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 1036-1043. [唐峰华, 史赞荣, 朱金鑫, 等. 海洋环境因子对日本海太平洋褶柔鱼渔场时空分布的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 1036-1043.]
- [10] Xie E G, Chen X J, Wang J T, et al. Study on residual yield model of winter fishes of *Todarodes pacificus* based on water temperature factors[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 71-77. [谢恩阁, 陈新军, 汪金涛, 等. 基于水温因子的太平洋褶柔鱼冬生群剩余产量模型研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 71-77.]
- [11] Zhang S, Li L, Chen X J. A comparative study on forecasting model of the stock abundance index for the winter-spawning cohort of *Todarodes pacificus* in the Pacific Ocean based on the factor of SST[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 704-710. [张硕, 李莉, 陈新军. 基于海表温因子的太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度预测模型比较[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 704-710.]
- [12] Yamamoto J, Miyanaga S, Fukui S, et al. Effect of temperature on swimming behavior of paralarvae of the Japanese common squid *Todarodes pacificus*[J]. Bulletin of Japanese Society of Fishery Oceanography, 2012, 76: 18-23.
- [13] Zhou W F, Chen L L, Cui X S, et al. Effects of thermocline and space-time factors on yellowfin tuna fishing ground distribution in the central and western Pacific in abnormal climate[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 192-201. [周为峰, 陈亮亮, 崔雪森, 等. 异常气候下温跃层及时空因子对中西太平洋黄鳍金枪鱼渔场分布的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 192-201.]
- [14] Wang L M, Ma S Y, Liu Y, et al. Fluctuations in the abundance of chub mackerel in relation to climatic/oceanic regime shifts in the northwest Pacific Ocean since the 1970s[J]. Journal of Marine Systems, 2021, 218: 103541.
- [15] Feng Z P, Yu W, Chen X J, et al. Distribution of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) habitats off Chile based on a maximum entropy model[J]. Journal of Fishery Sciences

- of China, 2021, 28(4): 431-441. [冯志萍, 余为, 陈新军, 等. 基于最大熵模型的智利外海竹筴鱼栖息地研究[J]. 中国水产科学, 2021, 28(4): 431-441.]
- [16] Yamamoto J, Shimura T, Uji R, et al. Vertical distribution of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) paralarvae near the Oki Islands, southwestern Sea of Japan[J]. Marine Biology, 2007, 153(1): 7-13.
- [17] Wu S N, Yu W, Chen X J. Variations in environmental conditions on the spawning grounds of autumn cohort of *Todarodes pacificus* and their impacts on squid abundance[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(2): 129-138. [武胜男, 余为, 陈新军. 太平洋褶柔鱼秋生群产卵场环境变化及对资源丰度的影响[J]. 海洋渔业, 2018, 40(2): 129-138.]
- [18] Alabia I, Dehara M, Saitoh S I, et al. Seasonal habitat patterns of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) inferred from satellite-based species distribution models[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11): 921.
- [19] Fang Z, Chen X J. Review on fishery of Japanese flying squid *Todarodes pacificus*[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(1): 102-116. [方舟, 陈新军. 太平洋褶柔鱼渔业资源及渔场学研究进展[J]. 海洋渔业, 2018, 40(1): 102-116.]
- [20] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. The change characteristics of potential habitat and fishing season for Neon flying squid in the northwest Pacific Ocean under future climate change scenarios[J]. Marine and Coastal Fisheries Dynamics Management and Ecosystem Science, 2021, 13(5): 450-462.
- [21] Kirov B, Georgieva K. Long-term variations and interrelations of ENSO, NAO and solar activity[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(6-8): 441-448.
- [22] Yan H, Liu C C, Zhang W C, et al. ENSO variability around 2000 years ago recorded by *Tridacna gigas* $\delta^{18}\text{O}$ from the South China Sea[J]. Quaternary International, 2017, 452: 148-154.
- [23] Liu S H, Liu Y, Alabia I D, et al. Impact of climate change on wintering ground of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using marine geospatial statistics[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 604
- [24] Sakurai Y. How climate change might impact squid populations and ecosystems: A case study of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus*[J]. Global Ocean Ecosystem Dynamics, 2006, 24: 33-34.
- [25] Tosunoglu Z, Ceyhan T, Gulec O, et al. Effects of lunar phases and other variables on CPUE of European pilchard, *Sardina pilchardus*, caught by purse seine in the eastern Mediterranean[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2021, 21(6): 283-290.
- [26] Xu Y, Nieto K, Teo S L H, et al. Influence of fronts on the spatial distribution of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the Northeast Pacific over the past 30 years (1982-2011)[J]. Progress in Oceanography, 2017, 150: 72-78.
- [27] Sakurai Y, Kidokoro H, Yamashita N, et al. Advances in squid biology, ecology and fisheries. Part II-Oegopsid squid[M]//Rosa P G, O'dor R. *Todarodes pacificus*, Japanese Flying Squid. New York: Nova Science Publishers, 2013: 262.
- [28] Zhai F G, Hu D X. Interannual variability of transport and bifurcation of the North Equatorial Current in the tropical North Pacific Ocean[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(1): 177-185.
- [29] Wu G L, Zhai F G, Hu D X. Interannual variations of North Equatorial Current transport in the Pacific Ocean during two types of El Niño[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(3): 585-596.
- [30] Hu S, Li M H, Liu B L, et al. Seasonal characteristics of chlorophyll a concentration in kuroshio extension and influences of mesoscale eddies[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(6): 1370-1378. [胡松, 李敏华, 刘必林, 等. 黑潮延伸体区域叶绿素季节变化以及中尺度涡对其影响机制研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(6): 1370-1378.]
- [31] Wu G L, Li S H, Liu Z Z, et al. Variations in the tropical Western Pacific gyre during the 2015/2016 super El Niño event[J]. Marine Sciences, 2020, 44(1): 8-18. [吴国丽, 李思航, 刘子洲, 等. 2015/2016 年超强厄尔尼诺期间热带西太平洋海洋环流变化特征[J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 8-18.]

Response of autumn cohort abundance of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) during El Niño and La Niña events

CHEN Bingjian^{1,5}, FENG Zhiping², YU Wei^{2,3,4}

1. Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, 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. National Ocean Satellite Shandong Data Application Center, Yantai 264006, China

Abstract: The Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, is an economically important cephalopod with a short life cycle. Its abundance and replenishment of resources are significantly influenced by climatic and marine environmental variables. According to the fishery data obtained from the Japanese fisheries institutions of the autumn cohort of *T. pacificus* from 1977 to 2015, as well as environmental data and the climate index, variations in the sea surface temperature (SST) and water temperature at different depths (50 m and 100 m) on the fishing ground of *T. pacificus* were examined under different El Niño-Southern oscillation (ENSO) events. Their influences on the abundance (defined by catch per unit effort, CPUE) and replenishment of resources were further assessed. The results showed that Niño 3.4 index was negatively correlated with SST, Temp_50 m (temperature under 50 m), and Temp_100 m (temperature under 100 m), and variations were found in SST, Temp_50 m, and Temp_100 m and their anomaly value on the fishing ground of *T. pacificus* under different ENSO events. Compared with El Niño events, La Niña events were associated with higher SST, Temp_50 m, and Temp_100 m, and a spatially increasing trend from northwest to southeast and from north to south. At the same time, the distribution area of sea temperature above 20 °C and the mean of the anomaly value of SST, Temp_50 m, and Temp_100 m increased, as well as the positive anomaly value of sea temperature changed similarly. Correlation analysis suggested that the annual CPUE of *T. pacificus* was positively correlated with SST, Temp_50 m, and Temp_100 m, which reflected that the CPUE of *T. pacificus* was higher during the La Niña events rather than during El Niño events. The replenishment resources of *T. pacificus* varied similarly to the CPUE under different ENSO events. Our finding suggested that there are obvious differences in the sea temperature conditions of the fishing ground of *T. pacificus* under different ENSO events and the change of the abundance and replenishment resources of *T. pacificus* may be related to the sea temperature.

Key words: *Todarodes pacificus*; El Niño; La Niña; ENSO; CPUE; sea temperature; spatial-temporal variations

Corresponding author: YU Wei. E-mail: wyu@shou.edu.cn