

温健, 贡静雯, 李婷, 等. 异常气候条件下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的时空变动[J]. 海洋学报, 2020, 42(10): 92–99, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.009

Wen Jian, Gong Jingwen, Li Ting, et al. Spatio-temporal variations in the habitat of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru under anomalous climate conditions[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(10): 92–99, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.10.009

异常气候条件下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的时空变动

温健¹, 贡静雯¹, 李婷¹, 赵嵩玲¹, 田园园¹, 陈新军^{1,2,3,4}, 余为^{1,2,3,4*}

(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发展教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 茎柔鱼主要分布于东太平洋, 是我国鱿钓渔船的主要捕捞对象, 气候变化对其栖息地有较大影响。本研究依据 1950–2015 年海表温度 (SST)、海表高度距平 (SSHA) 以及尼诺指数 (Niño3.4 指数), 计算秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性指数 (HSI), 分析在厄尔尼诺 (El Niño)、正常气候和拉尼娜 (La Niña) 条件下适宜栖息地的时空变动。分析表明, 海表温度距平 (SSTA) 和 SSHA 与 Niño3.4 指数的变化趋势基本相同, Niño3.4 指数与 SSTA 和 SSHA 均呈显著正相关, 但与 HSI 值呈显著负相关。依据气候事件的定义, 将研究年份划分为 El Niño 年, 正常年和 La Niña 年。研究发现, 在 El Niño 年, 茎柔鱼渔场水温变暖, 海面高度上升, 适宜的 SST 和 SSHA 范围缩小, 导致适宜的栖息地面积范围缩减; 而在正常气候和 La Niña 年份, 茎柔鱼渔场水温变冷, 海面高度下降, 适宜的 SST 和 SSHA 范围增大, 因此适宜的栖息地面积范围增加。此外, Niño3.4 指数和茎柔鱼渔场 HSI 纬度重心呈显著正相关, 在 El Niño 事件下适宜的栖息地纬度重心向南偏移。研究认为, 不同 ENSO 事件下茎柔鱼渔场环境变化显著, 进而影响茎柔鱼适宜的栖息地范围及其空间分布。

关键词: 茎柔鱼; 栖息地; 时空分布; 异常气候条件; 秘鲁

中图分类号: P714⁺.5; S917.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)10-0092-08

1 引言

茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 属于大洋中上层头足类, 在东太平洋分布广泛, 主要分布于加利福尼亚半岛 (37°N) 到智利南部 (47°S), 从北美洲和南美洲海岸到 125°W 的海域^[1]。1974 年茎柔鱼渔业开始发展, 到 1980 年产量达到 1.9 万 t, 但 1982 年出现短暂资源枯竭, 到 20 世纪 90 年代, 茎柔鱼资源增长并被大规模开发^[2]。根据联合国粮农组织统计, 中国鱿钓船队于 2001 年开始捕捞茎柔鱼, 2001–2015 年茎柔鱼总产量从 1.78 万 t 上升至 32.4 万 t^[3]。茎柔鱼生命周期短, 仅

有 1~2 a^[4], 因此其种群对栖息地环境及不同尺度气候变化极为敏感^[5-6]。研究已表明, 海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 和海表高度 (Sea Surface Height, SSH) 对茎柔鱼栖息地变动的影响相比其他环境因子更为显著^[7]。此外, 光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR)^[8] 及净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP)^[9] 等环境因子与茎柔鱼渔场也有密切联系。

厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是海洋与大气连续但不规则的循环变化现象, 它影响全球气候异常变化^[10]。厄尔尼诺 (El Niño) 事

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-07-22。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD0901405); 上海市自然科学基金 (19ZR1423000); 国家自然科学基金 (NSFC41876141); 大洋渔业资源可持续发展重点实验室开放基金 (A1-0203-00-2009-5); 上海市水产高峰一流学科 (Fisheries A)。

作者简介: 温健 (1998—), 男, 山西省汾阳市人, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: jwen0913@163.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

件发生时,太平洋中部和东部海域表温异常变暖;而拉尼娜(La Niña)事件发生时,太平洋中部和东部海域表温则异常变冷,ENSO现象具有年际变动^[11]。以往研究表明,鲈鱼(*Scomber japonicus*)、黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)、柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)、褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)等鱼种的空间分布及资源丰度均受ENSO的调控^[12-15]。对于茎柔鱼,以往研究主要关注ENSO事件对其渔场环境状况的影响,并探索其资源空间分布的变化^[16]。对于ENSO影响茎柔鱼栖息地的研究也仅限于分析特殊年份,且时间序列短^[9]。因此,本研究分析长时间尺度下,在不同ENSO事件期间秘鲁外海茎柔鱼渔场环境的变化,以及不同事件期间茎柔鱼栖息地适宜性及栖息地纬度重心的变化,探索适宜栖息地时空分布对不同ENSO事件的响应过程,以掌握年际气候变化对茎柔鱼栖息地的影响,为可持续开发和利用茎柔鱼资源提供依据。

2 材料与方法

2.1 材料

环境数据包括SST和SSH,来源于夏威夷大学网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)。数据时间范围为1950–2015年1–12月,空间范围覆盖秘鲁外海茎柔鱼渔场,其中渔场范围为8°~20°S,95°~75°W(图1),SST和SSH时间分辨率为月,空间分辨率原为0.1°×0.1°,均通过插值转化为0.5°×0.5°。ENSO事件利用Niño3.4区海表温距平值(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)来表示,其数据来自美国NOAA气候预报中心(https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)。

2.2 分析方法

依据NOAA对El Niño和La Niña事件的定义,Niño3.4区(5°N~5°S,170°~120°W)SSTA连续5个月滑动平均值超过+0.5℃,则认为发生一次El Niño事件;若连续5个月低于-0.5℃,则认为发生一次La Niña事件,其余为正常气候。本研究据此定义1950–2015年发生的异常环境事件(表1)。

计算SSTA和海表高度距平值(Sea Surface Height Anomaly, SSHA),并且依据1950–2015年9–12月的Niño3.4区SSTA,结合对应月份的SSTA及SSHA数据,对1950–2015年东南太平洋秘鲁茎柔鱼渔场进行年际变化分析,分析SSTA、SSHA、Niño3.4指数的变化趋势。此外,利用交相关函数分析Niño3.4指数与SSTA和SSHA的滞后相关性。

依据定义的El Niño和La Niña事件,将1950–2015

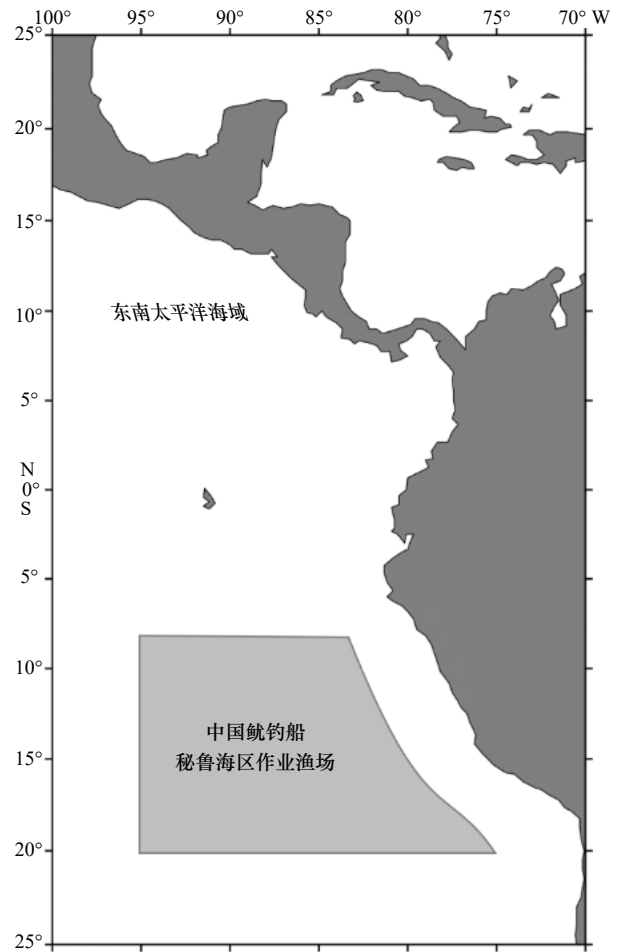


图1 我国茎柔鱼鱿钓渔船秘鲁海区作业地理位置

Fig. 1 Geographical distribution of Chinese squid-jigging fishery for *Dosidicus gigas* off Peru

年9–12月的SSTA和SSHA数据分为3种ENSO年份,计算空间平均值,绘制不同类型下的空间分布图,分析其空间分布特征。依据Yu等^[17]建立的适应性指数(Suitability Index, SI)模型,建立SI-SST和SI-SSHA时的响应变量是捕捞努力量,推算茎柔鱼渔场海域9–12月适宜的海表温度(SI-SST)和适宜的海表高度距平(SI-SSHA),分析SSTA、SSHA、SI-SST和SI-SSHA在不同ENSO事件期间的变动规律。

利用算术平均法(Arithmetic Mean Model, AMM)计算综合栖息地适宜性指数(Habitat Suitability Index, HSI),其计算公式如下:

$$HSI = \frac{1}{2} (SI_{SST} + SI_{SSHA}), \quad (1)$$

式中, SI_{SST} 和 SI_{SSHA} 分别为SST和SSHA的适宜性指数。HSI的范围为0~1,将 $HSI \leq 0.2$ 、 $0.2 < HSI < 0.6$ 及 $HSI \geq 0.6$ 分别定义为不适宜的、正常的及适宜的栖息地^[9]。利用交相关函数分析Niño3.4指数和HSI的滞后相关性。此外,在不同ENSO事件下分析HSI的

表 1 1950–2015 年 El Niño 和 La Niña 事件的确定

Table 1 Definition of the El Niño and La Niña events for years 1950–2015

ENSO 种类	年份
El Niño	1951、1953、1957、1963、1965、1969、1972、1976、1977、1982、1986、1987、1991、1994、1997、2002、2004、2006、2009、2015
正常气候	1950、1952、1956、1958、1959、1960、1961、1962、1966、1967、1968、1974、1978、1979、1980、1981、1984、1985、1989、1990、1992、1993、1996、2001、2003、2005、2008、2012、2013、2014
La Niña	1954、1955、1964、1970、1971、1973、1975、1983、1988、1995、1998、1999、2000、2007、2010、2011

变化,并且依据 1950–2015 年 9–12 月茎柔鱼渔场海域 HSI 数据,计算空间平均值并绘制空间分布图,分析适宜性栖息地面积在不同 ENSO 事件下的空间变化特征。

计算各月茎柔鱼 HSI 的纬度重心,并利用交相关函数分析 Niño3.4 指数与茎柔鱼 HSI 的纬度重心的滞后相关性。此外,将 1950–2015 年 9–12 月茎柔鱼平均 HSI 的纬度重心进行归类,分析不同 ENSO 事件期间纬度重心的变化。其中,HSI 纬度重心计算方法为^[9]

$$LAGT_{HSI} = \frac{\sum [\text{Latitude}_{(i,m)} \times HSI_{(i,m)}]}{\sum HSI_{(i,m)}}, \quad (2)$$

式中,LAGT_{HSI} 为 HSI 的纬度重心;Latitude 为纬度值;*i* 为渔区;*m* 为月份。

3 研究结果

3.1 不同 ENSO 事件期间 SSTA、SSHA 的时间变化

由图 2 可以看出, Niño3.4 指数、秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 及 SSHA 呈显著年际变化。从三者的波动情况可以看出,当 Niño3.4 指数上升时,相应地 SSTA 和 SSHA 均增长;当 Niño3.4 指数下降时, SSTA 和 SSHA 也随之降低。

交相关分析表明, Niño3.4 指数与茎柔鱼渔场 SSTA 呈显著正相关,在 SSTA 滞后 0 月时相关性最大,相关系数值为 0.594 2 ($p < 0.05$),表明在 Niño3.4 区 SSTA 发生变化时,秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 随之迅速变化;同样, Niño3.4 指数与茎柔鱼渔场 SSHA 也呈显著正相关,在 SSHA 滞后 1 个月时相关性最大,相关系数值为 0.564 7 ($p < 0.05$) (图 3)。

3.2 不同 ENSO 事件下各环境因子的适宜性变化

秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 与 ENSO 事件有显著的相关性。由图 4 可以看出,当 El Niño 事件发生时,渔场 SSTA 均为正值,表明茎柔鱼渔场的海表水温偏高;在正常气候条件下,茎柔鱼渔场的海表水温相较于 El Niño 事件明显降低;而在 La Niña 事件下, SSTA 均为负值,相较于前两种气候条件,茎柔

鱼渔场的海表水温最低。茎柔鱼渔场 SSHA 与 ENSO 的相关性与 SSTA 大致相同,在 El Niño、正常气候和 La Niña 条件下,茎柔鱼渔场海面高度依次降低。

秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA、SSHA、适宜的 SST 和 SSHA 在不同的 ENSO 事件下呈显著的变化(图 5)。茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 在 El Niño 事件下较高,在正常气候事件和 La Niña 事件下较低。相应地,正常气候事件和 La Niña 事件下适宜的 SST 和 SSHA 显著高于 El Niño 事件。

3.3 不同 ENSO 事件下茎柔鱼栖息地适宜性时空变化

交相关分析表明, Niño3.4 指数与 HSI 呈显著负相关,在 HSI 滞后 1 个月产生最大负影响,相关系数值为 -0.265 6 ($p < 0.05$),表明在 Niño3.4 指数较高时,适宜的栖息地面积较少(图 6)。进一步分析在不同 ENSO 事件下茎柔鱼渔场 HSI 的时空变化(图 7)。结果显示,1950–2015 年在正常气候和 La Niña 事件下,茎柔鱼的 HSI 值显著高于 El Niño 事件。此外,茎柔鱼适宜栖息地面积比例也显著高于 El Niño 事件。此外,从空间分布图看,正常气候和 La Niña 事件下, HSI ≥ 0.6 的面积比例较大;El Niño 事件下的 HSI 值大部分小于 0.6,表明栖息地质量较低。

Niño3.4 指数与茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心的交相关分析表明,两者呈显著正相关。并在 HSI 的纬度重心滞后 0 月时具最大相关性,相关系数值为 0.356 2 ($p < 0.05$),表明 Niño3.4 指数较高时,茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心偏南。在 El Niño 事件下,茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心明显较正常气候事件和 La Niña 事件下的纬度重心向南移动(图 8)。

4 讨论

ENSO 能使热带太平洋生态系统出现较强的年际变化,对诸多经济鱼种的资源丰度及空间分布产生影响^[18]。茎柔鱼因其生命周期短,对于环境因子的变化极为敏感,异常气候现象对其资源波动也有较大影响,特别是 El Niño 和 La Niña 事件^[19]。Robinson 等^[20]

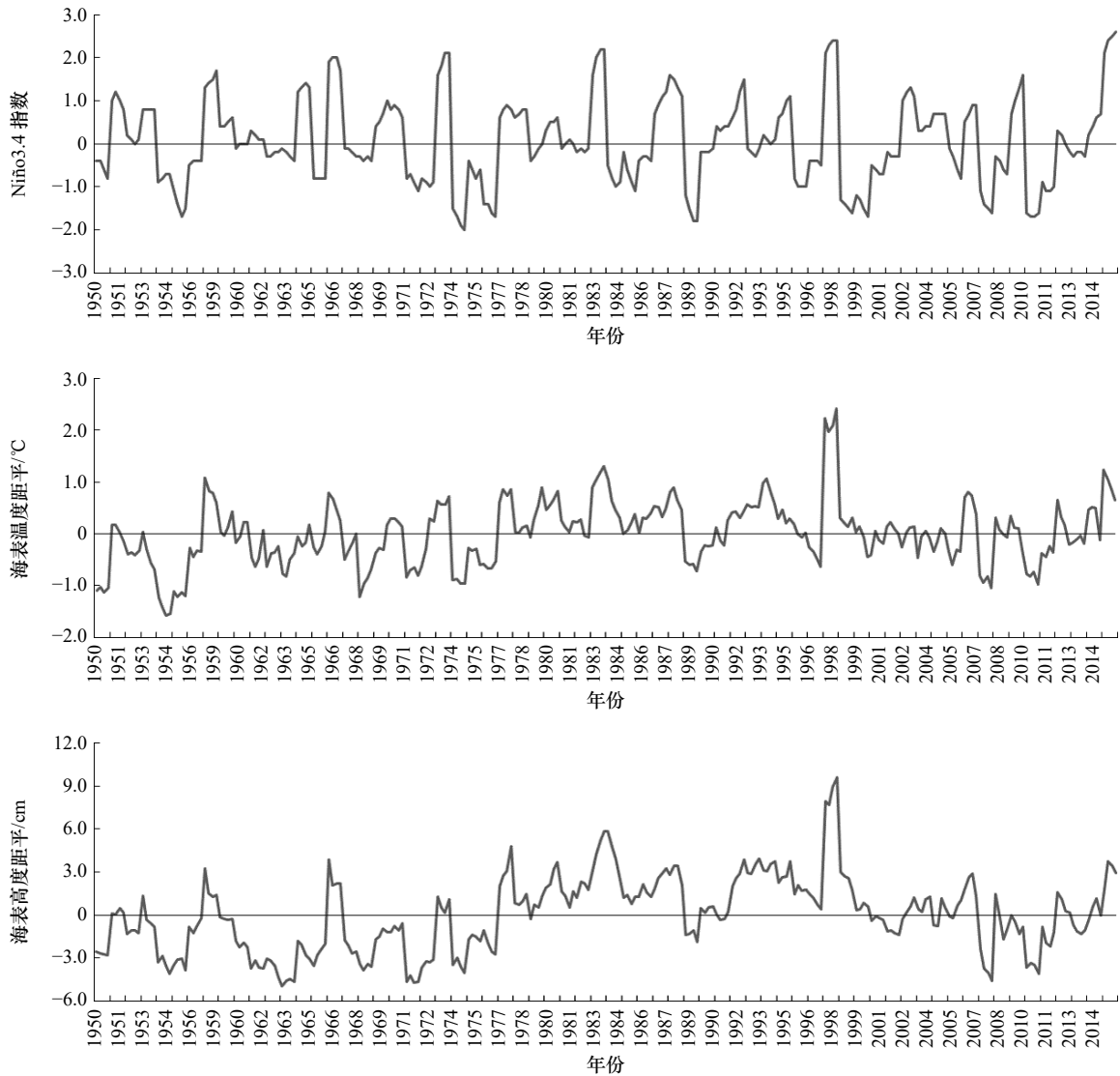


图2 1950–2015年9–12月东南太平洋秘鲁茎柔鱼渔场 Niño3.4 指数、SSTA、SSHA 的 annual 变化
 Fig. 2 Interannual variability of the Niño3.4 index, SSTA, SSHA on the fishing ground of *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru from September to December, 1950–2015

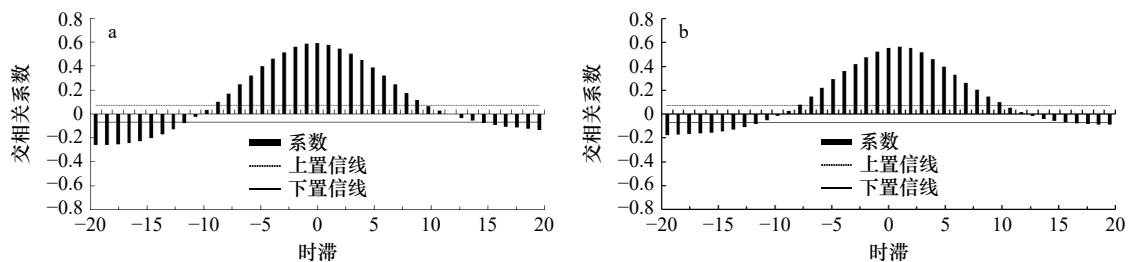


图3 Niño3.4 指数与 SSTA(a)、SSHA(b) 的交相关系数
 Fig. 3 Cross correlation coefficients between the Niño3.4 index and SSTA (a), and between the Niño3.4 index and SSHA (b)

研究发现, La Niña 事件引起海表温度较长时间变冷的现象,使得茎柔鱼的渔获量较高;从 2005 年 1 月到 2012 年 3 月,渔获量逐步下降,发现此与栖息地水温逐渐变暖有关。Waluda 和 Rodhouse^[21] 认为, 1998-1999 年强 El Niño 事件期间,上升流势力较弱,导致茎

柔鱼资源丰度和渔获量较低。本研究发现, Niño3.4 指数与秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 呈显著正相关, Niño3.4 指数越高,渔场的海表温度及海面高度越高。此外,本研究通过分析茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 的空间分布特征,同样发现在 El Niño 事件下,

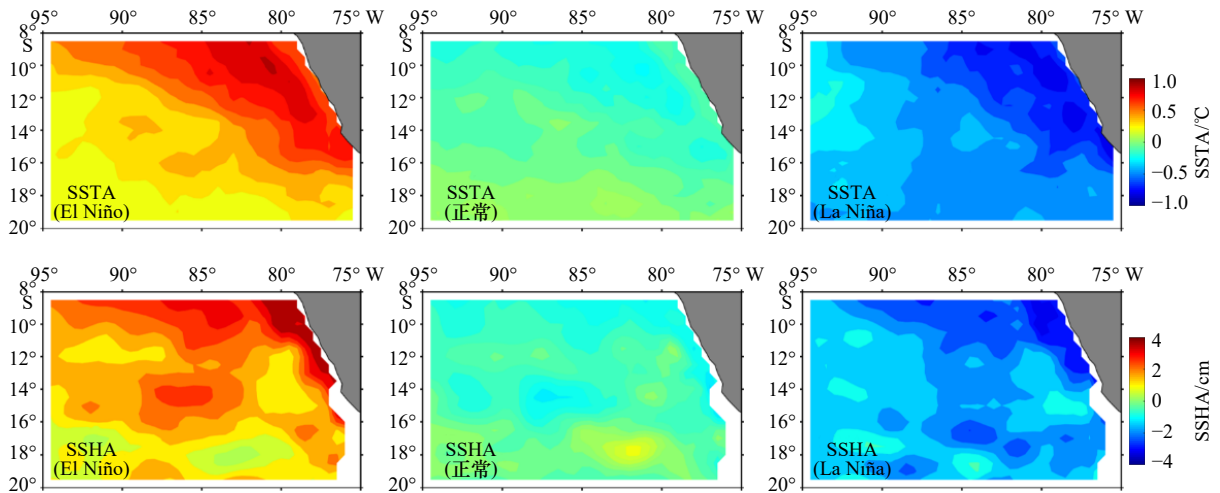


图 4 1950–2015 年不同气候模式下 SSTA、SSHA 的空间分布

Fig. 4 The spatial distributions of SSTA and SSHA under different climate patterns over 1950–2015

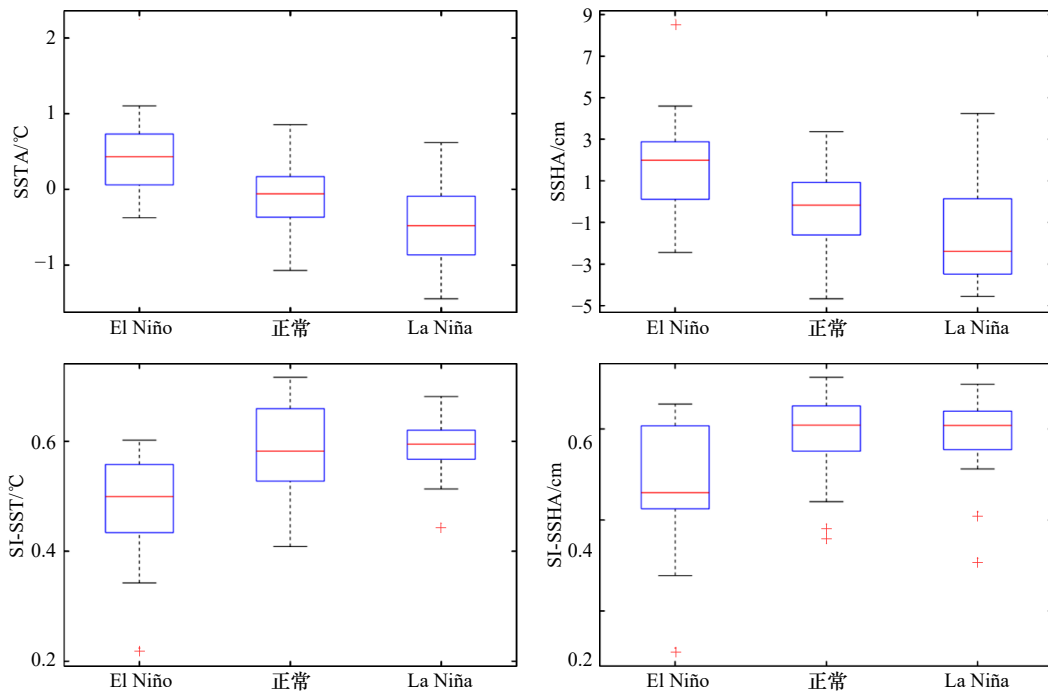


图 5 1950–2015 年 SSTA、SSHA、适宜(SI)的 SST 和 SSHA 在不同气候模式下的变化(“+”为异常值)

Fig. 5 Interannual variability in SSTA, SSHA, suitable (SI) SST and SSHA under different climate patterns over 1950–2015 (“+” represents abnormal value)

渔场的水温偏暖,海面高度升高;在正常气候及 La Niña 事件下,渔场的水温偏冷,海面高度降低。Yu 等^[9]研究认为,与 2015 年的强 El Niño 事件相比,2011 年的 La Niña 事件产生了适宜的环境条件,有利于茎柔鱼的生长和生存。在 2011 年的每个季节,各环境因子的适宜面积都有所增大,从而使适宜栖息地面积增加。这与本研究结果一致。本研究通过对不同 EN-SO 事件下 SI-SST 和 SI-SSHA 变化进行分析,发现在正常气候及 La Niña 事件下,适宜的 SST 和 SSHA 相

比于 El Niño 事件下的比例有显著的增加。

基于 Yu 等^[17]研究结果,本研究将 SST 和 SSHA 作为关键环境因子,构建了栖息地指数模型。已有较多研究证实 SST 对茎柔鱼渔场形成有重要影响,并常用于 HSI 建模^[15-16, 22-23]。SSHA 作为影响栖息地的重要因素之一,将其用于 HSI 建模能更加准确地探索适宜栖息地的分布范围。Yu 等^[9]研究表明 SSHA 是造成栖息地质量差异的主导因素。通过算术平均模型 (Arithmetic mean model, AMM) 方法计算 HSI,可以在

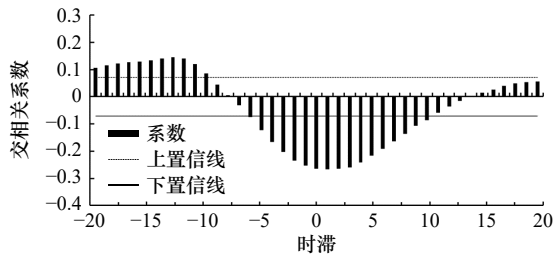


图6 Niño3.4指数与HSI的交相关系数

Fig. 6 Cross correlation coefficients between the Niño3.4 index and HSI

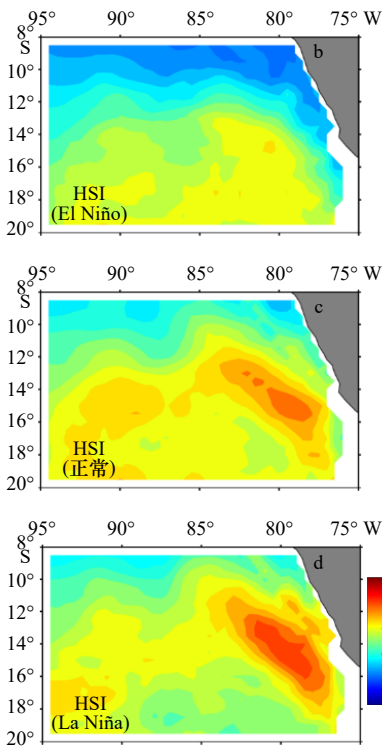
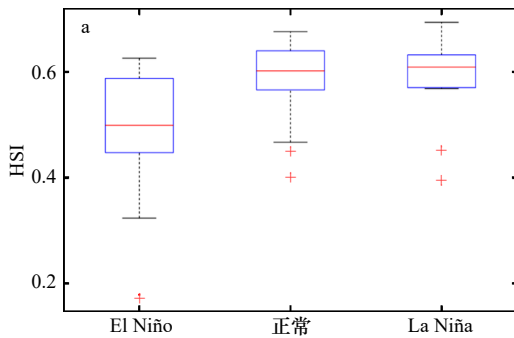


图7 1950–2015年HSI在不同气候模式下的变化(a, “+”为异常值)及HSI的空间分布(b, c, d)

Fig. 7 Variability in the HSI (a, “+” represents abnormal value) and spatial distributions of HSI (b, c, d) under different climate patterns during 1950–2015

结果中反应每个环境因子的变化。目前, 大多数研究选择 AMM 方法并成功预测鱼种的栖息地适宜性, 例如 鲭鱼 (*Katsuwonus pelamis*)^[24]、鲈鱼 (*Scomber ja-*

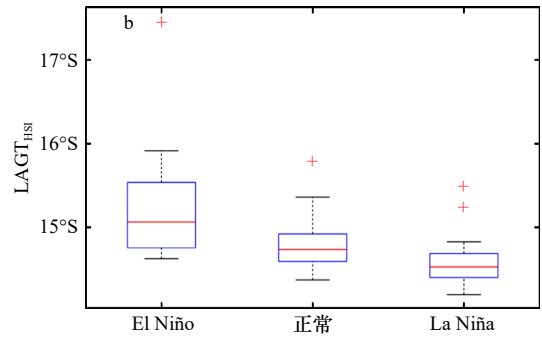
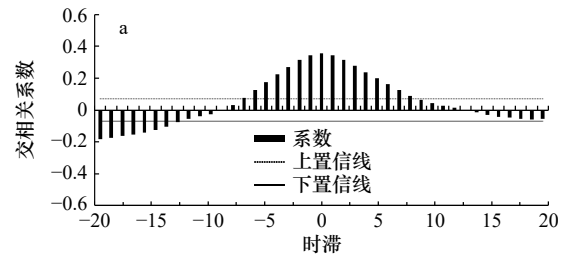


图8 1950–2015年Niño3.4指数与渔场重心纬度(LAGT_{HSI})的交相关系数(a)及渔场重心在不同气候模式下的纬向变化(b, “+”为异常值)

Fig. 8 Cross correlation coefficients between the Niño3.4 index and latitudinal gravity centers of HSI (a) and latitudinal changes in gravity centers of HSI under different climate patterns during 1950–2015(b, “+” represents abnormal value)

ponicus)^[12]、柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*)^[25]。本文利用 1950–2015 年的 Niño3.4 指数与 HSI 值进行交相关分析, 发现两者呈显著负相关, 滞后 1 个月的相关性最强, 表明茎柔鱼栖息地能够迅速响应 ENSO 事件。Yu 等^[17]利用 2006–2013 年的数据对 HSI 与 Niño3.4 指数进行分析, 发现滞后时间为 -1~ -3 个月, 呈显著负相关, 与本研究结果一致。此外, 本研究分析了适宜栖息地纬度重心与 Niño3.4 指数的交相关性, 发现两者呈显著正相关。进一步分析在不同 ENSO 事件下适宜栖息地纬度重心的变化, 发现在 El Niño 事件下, 适宜栖息地纬度重心偏南; 在正常气候及 La Niña 事件下, 适宜栖息地纬度重心偏北。Paulino 等^[26]研究表明, 渔捞作业船队的年度分布与 El Niño 海温异常相关, 在 2008 年和 2009 年船队集中在北部, 在 La Niña 事件年份呈分散空间分布, 但总体集中在 SST 范围为 18.4~22°C 的海域内。这可能是由于商业渔船的特性, El Niño 事件下茎柔鱼资源丰度较低, 船队仅在资源较为集中的地区进行作业。徐冰等^[16]根据我国 2005–2009 年鱿钓船生产数据, 结合表温等资料, 发现 2007 年受 La Niña 事件影响, 相较 2006 年和 2009 年 10–12 月 El Niño 事件, 中心作业渔场向北偏移了 1°~2°。这与本文研究结果一致。

本研究推测秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性对不

同 ENSO 事件的可能响应过程为: 在 El Niño 事件下, 茎柔鱼渔场海表温度升高, 海面高度上升, 适宜的海表温度和海面高度面积减少, 栖息地质量下降, 适宜栖息地面积减少, 适宜栖息地纬度重心偏南; 在正常气候及 La Niña 事件下, 茎柔鱼渔场海表温度降低, 海面高度下降, 适宜的海表温度和海面高度面积增加, 栖息地质量上升, 适宜栖息地面积增加, 适宜栖息地

纬度重心偏北。由于 HSI 模型存在偏差, 仅利用 SST 和 SSA 两个参数不能完全描述茎柔鱼栖息地的环境变化, 今后的研究中我们应加入其他环境因子并且考虑各环境因子的权重分配, 使模型预测更加精确。此外, 由于生产数据的缺失, 我们较难对长时间尺度的环境数据进行对比, 因此今后应加强国际渔业合作收集更多的数据。

参考文献:

- [1] Taípe A, Yamashiro C, Mariategui L, et al. Distribution and concentrations of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian coast between 1991 and 1999[J]. *Fisheries Research*, 2001, 54(1): 21–32.
- [2] Argüelles J, Rodhouse P G, Villegas P, et al. Age, growth and population structure of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in Peruvian waters[J]. *Fisheries Research*, 2001, 54(1): 51–61.
- [3] FAO. Fishery statistical collections: global aquaculture production[EB/OL]. (2015-01-03) [2018-10-24]. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/en>.
- [4] Nigmatullin C M, Nesis K N, Arkhipkin A I. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae)[J]. *Fisheries Research*, 2001, 54(1): 9–19.
- [5] Waluda C M, Yamashiro C, Rodhouse P G. Influence of the ENSO cycle on the light-fishery for *Dosidicus gigas* in the Peru Current: An analysis of remotely sensed data[J]. *Fisheries Research*, 2006, 79(1/2): 56–63.
- [6] Stewart J S, Field J C, Markaida U, et al. Behavioral ecology of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in relation to oxygen minimum zones[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 95: 197–208.
- [7] 胡振明, 陈新军, 周应祺, 等. 利用栖息地适宜指数分析秘鲁外海茎柔鱼渔场分布[J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 67–75.
Hu Zhenming, Chen Xinjun, Zhou Yinqi, et al. Forecasting fishing ground of *Dosidicus gigas* based on habitat suitability index off Peru[J]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(5): 67–75.
- [8] 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.
- [9] Yu Wei, Chen Xinjun, Zhang Yang. Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters[J]. *Journal of Marine Systems*, 2019, 194: 41–51.
- [10] 王彦磊, 黄兵, 郑红莲, 等. ENSO循环及相关研究进展[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2009, 3(4): 1–8.
Wang Yanlei, Huang Bing, Zheng Honglian, et al. The summary of ENSO cycle and related research[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2009, 3(4): 1–8.
- [11] Sheinbaum J. Current theories on El Niño-Southern Oscillation: a review[J]. *Geofísica Internacional*, 2003, 42(3): 291–305.
- [12] 郭爱, 张扬, 余为, 等. 两类强度厄尔尼诺和拉尼娜事件对中国近海鲈鱼栖息地的影响[J]. *海洋学报*, 2018, 40(12): 58–67.
Guo Ai, Zhang Yang, Yu Wei, et al. Influence of El Niño and La Niña with different intensity on habitat variation of chub mackerel *Scomber japonicus* in the coastal waters of China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(12): 58–67.
- [13] Lu H J, Lee K T, Lin H L, et al. Spatio-temporal distribution of yellowfin tuna *Thunnus albacares* and bigeye tuna *Thunnus obesus* in the Tropical Pacific Ocean in relation to large-scale temperature fluctuation during ENSO episodes[J]. *Fisheries Science*, 2001, 67(6): 1046–1052.
- [14] Chen Xinjun, Zhao Xiaohu, Chen Yong. 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.
- [15] Yu Wei, Zhang Yang, Chen Xinjun, 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.
- [16] 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.
- [17] Yu Wei, Yi Qian, Chen Xinjun, 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.
- [18] Harrison D E, Chiodi A M. Multi-decadal variability and trends in the El Niño-Southern Oscillation and tropical Pacific fisheries implications[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 9–21.
- [19] Yamagata T, Shibao Y, Umatani S I. Interannual variability of the Kuroshio Extension and its relation to the Southern Oscillation/El Niño[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1985, 41(4): 274–281.
- [20] Robinson C J, Gómez-Gutiérrez J, de León D A S. Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) landings in the Gulf of California related to remotely sensed SST and concentrations of chlorophyll *a* (1998–2012)[J]. *Fisheries Research*, 2013, 137: 97–103.

- [21] Waluda C M, Rodhouse P G. Remotely sensed mesoscale oceanography of the Central Eastern Pacific and recruitment variability in *Dosidicus gigas*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 310: 25–32.
- [22] 陈新军, 赵小虎. 秘鲁外海茎柔鱼产量分布及其与表温关系的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15(1): 65–70.
Chen Xinjun, Zhao Xiaohu. Preliminary study on the catch distribution of *Dosidicus gigas* and its relationship with sea surface temperature in the offshore waters of Peru[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(1): 65–70.
- [23] 胡振明, 陈新军, 周应祺. 秘鲁外海茎柔鱼渔场分布和水温结构的关系[J]. 水产学报, 2009, 33(5): 770–777.
Hu Zhenming, Chen Xinjun, Zhou Yingqi. Distribution of fishing ground of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) and its relationship with structure of sea water temperature in the waters off Peru[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(5): 770–777.
- [24] Yen K W, Wang Guihua, Lu H J. Evaluating habitat suitability and relative abundance of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the western and central Pacific during various El Niño events[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 139: 153–160.
- [25] 温健, 陆鑫一, 陈新军, 等. 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[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 456–463.
Wen Jian, Lu Xinyi, Chen Xinjun, et al. Predicting the habitat hot spots of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the north-west Pacific Ocean based on the sea surface temperature and photosynthetically active radiation[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(3): 456–463.
- [26] Paulino C, Segura M, Chacón G. Spatial variability of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) fishery related to remotely sensed SST and chlorophyll-*a* concentration (2004–2012)[J]. *Fisheries Research*, 2016, 173: 122–127.

Spatio-temporal variations in the habitat of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru under anomalous climate conditions

Wen Jian¹, Gong Jingwen¹, Li Ting¹, Zhao Songling¹, Tian Yuanyuan¹, Chen Xinjun^{1,2,3,4}, Yu Wei^{1,2,3,4}

(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. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Jumbo squid *Dosidicus gigas* is the main fishing target by Chinese squid-jigging fisheries, which mainly distributes in the eastern Pacific Ocean. Its habitat can be greatly affected by climatic changes. In this study, we calculated the habitat suitability index (HSI) on the squid fishing ground in the Southeast Pacific Ocean off Peru based on data of sea surface temperature (SST), the anomalies of sea surface height (SSHA) and Niño3.4 index during 1950 to 2015. Spatio-temporal variations in the squid habitat were further examined under the El Niño, the normal and the La Niña conditions. The results showed that variations in SST anomalies (SSTA) and SSHA in the fishing ground were consistent with those of the Niño3.4 index. Cross correlation analysis indicated that both SSTA and SSHA were significantly positively correlated with the Niño3.4 index. However, the HSI values were significantly negatively correlated with the Niño3.4 index. We divided the years between 1950 and 2015 into three types, the El Niño years, the normal years and the La Niña years. During the El Niño years, water temperature became warm, and the SSH increased; these changes led to contracted areas of suitable SST and SSHA, therefore, the range of suitable habitats largely decreased. However, during the normal and the La Niña years, water temperature was cold, the SSH decreased, and ranges of suitable SST and SSHA enlarged; these changes resulted in the increases in suitable habitat for the squid. Furthermore, the latitudinal gravity centers of suitable HSI on the squid fishing ground were significantly positively correlated with the Niño3.4 index. The latitudinal gravity centers of suitable HSI shifted southward in the El Niño years. Our findings suggested that ENSO events significantly affected environmental conditions on the squid fishing ground, and thus affected ranges and latitudinal distribution of suitable habitat for the squid in the Southeast Pacific Ocean off Peru.

Key words: *Dosidicus gigas*; habitat; spatio-temporal distribution; anomalous climate conditions; Peru