

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20019

多类型厄尔尼诺和拉尼娜事件下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的变动

温健¹, 钱梦婷¹, 余为^{1, 2, 3, 4}, 陈新军^{1, 2, 3, 4}, 刘必林^{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. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306

摘要: 茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)为短生命周期头足类, 其栖息地易受气候及海洋环境的影响。本研究利用 1950—2015 年海表温度(SST)和海面高度距平(SSHA)数据, 计算秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性指数, 分析不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间茎柔鱼栖息地适宜性的变动规律。结果表明, 相较于弱厄尔尼诺和中强度厄尔尼诺事件, 强厄尔尼诺事件期间, 茎柔鱼渔场水温偏暖, 海面高度偏高, 适宜的 SST 和 SSHA 范围减小, 适宜的栖息地面积减小, 弱拉尼娜事件期间, 水温偏暖, 海面高度偏高; 中强度拉尼娜和强拉尼娜事件期间, 水温偏冷, 海面高度偏低。相较之下, 强拉尼娜事件期间较为适宜的栖息地面积明显多于中强度拉尼娜和弱拉尼娜事件。此外, 随着厄尔尼诺强度的增加, 适宜的栖息地纬度重心向南偏移; 随着拉尼娜强度的增加, 适宜的栖息地纬度重心向北偏移。结论认为, 不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间茎柔鱼渔场环境存在明显差异, 适宜的栖息地范围及空间分布不同。

关键词: 茎柔鱼; ENSO 强度; 厄尔尼诺; 拉尼娜; 栖息地适宜性指数; 秘鲁外海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2020)09–1095–09

茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是体型最大的头足类之一^[1], 广泛分布于太平洋东部加利福尼亚(37°N)至智利(47°S)沿岸到 125°W 的海域^[2]。目前, 在东太平洋公海捕捞茎柔鱼的国家主要有日本、俄罗斯、韩国和中国等, 此外, 秘鲁、智利和厄瓜多尔等当地沿海国家也在其专属经济区内进行捕捞^[3–4]。中国于 2001 年在秘鲁专属经济区外进行茎柔鱼资源勘测, 之后开始大型的商业捕捞。据中国远洋捕捞数据统计, 2001 年的产量为 1.78×10^4 t, 到 2015 年产量达到 32.4×10^4 t^[5]。由于茎柔鱼的生命周期仅为 1~2 年^[6], 其生活史过程对气候和海洋环境变化较为敏感^[7–8]。当气候和海洋环境不利时, 茎柔鱼种群会及时响应, 转移到相对适宜的栖息地^[9–10], 相关研究结果显示, 秘鲁外海茎柔

鱼的栖息地空间分布受气候和环境条件的显著影响^[11]。

厄尔尼诺(El Niño)和拉尼娜(La Niña)事件是太平洋表温异常变动的主导因素, 其具有年际变动周期^[12]。秘鲁外海的海洋环境受到大尺度气候的显著控制, 因此, 厄尔尼诺和拉尼娜事件对该区域鱼类的空间分布产生明显的影响^[13]。前人研究表明, 厄尔尼诺事件致使茎柔鱼栖息地适宜性降低, 适宜栖息地面积减少, 产量降低; 而拉尼娜事件使茎柔鱼适宜栖息地面积增加, 产量提高^[14]。此外由于各年厄尔尼诺和拉尼娜事件强度不同, 对鱼类栖息地的影响也有所不同, 前人发现柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)、鲐(*Scomber japonicas*)等鱼种在不同气候条件下, 栖息地适宜性变化存

收稿日期: 2020-02-01; 修订日期: 2020-02-25。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901405); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41906073); 上海市自然科学基金项目(19ZR1423000); 上海市高校特聘教授东方学者岗位计划项目(0810000243)。

作者简介: 温健(1998–), 男, 硕士研究生, 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

在差异^[15-16]。以往对于茎柔鱼栖息地在不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件下的变动研究甚少,且研究时间序列较短。因此本研究分析长时间尺度下,不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间秘鲁外海茎柔鱼渔场环境的变化,以及不同强度事件期间茎柔鱼栖息地适宜性和纬度重心的变化,为茎柔鱼资源的开发利用提供重要渔场信息。

1 材料与方法

1.1 材料

环境数据包括海表温度(sea surface temperature, SST)和海面高度(sea surface height, SSH),数据时间范围为 1950—2015 年 1—12 月,时间分辨率为月。数据覆盖秘鲁外海茎柔鱼渔场海域,其空间分布范围为 8°S~20°S、95°W~75°W,数据空间分辨率均由 0.1°×0.1°通过插值转化为 0.5°×0.5°。环境数据均来源于夏威夷大学网站(<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)。厄尔尼诺和拉尼娜事件利用海洋尼诺指数(ocean Niño index, ONI)来表征,尼诺指数依据 Niño 3.4 区(170°W~120°W, 5°S~5°N)海表温距平值(sea surface temperature anomaly, SSTA)来获取,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)。

1.2 分析方法

1.2.1 厄尔尼诺和拉尼娜事件强度划分 依据 NOAA 对厄尔尼诺和拉尼娜事件的定义, Niño 3.4 区 SSTA 连续 5 个月滑动平均值超过+0.5 °C,则认为发生一次厄尔尼诺事件;若连续 5 个月低于-0.5 °C,则认为发生一次拉尼娜事件。依据尼诺指数的大小,将厄尔尼诺的强度划分为: $0.5 \leq \text{ONI} \leq 0.9$, 为弱厄尔尼诺事件; $1.0 \leq \text{ONI} \leq 1.4$, 为中强度厄尔尼诺事件; $1.5 \leq \text{ONI} \leq 1.9$, 为强厄尔尼诺事件; $\text{ONI} \leq 2.0$, 为超强厄尔尼诺事件, 本文将强厄尔尼诺事件和超强厄尔尼诺事件合并归为强厄尔尼诺事件。将拉尼娜事件的强度划分为: $-0.9 \leq \text{ONI} \leq -0.5$, 为弱拉尼娜事件; $-1.4 \leq \text{ONI} \leq -1.0$, 为中强度拉尼娜事件; $-1.9 \leq \text{ONI} \leq -1.5$, 为强拉尼娜事件; $\text{ONI} \leq -2.0$, 为超强拉尼娜事件。当 ONI 处于以上各临界值区间内连续超过 3 个月,则认为发生该类强度的异常气候(<http://ggweather.com/enso/oni.htm>)。依据上述定义,本研究将 1950—2015 年发生的厄尔尼诺和拉尼娜事件按照强度进行归类(表 1)。

表 1 1950—2015 年厄尔尼诺和拉尼娜事件强度划分
Tab. 1 The classification of the El Niño and La Niña event intensity from 1950 to 2015

异常气候事件 anomalous climate conditions	强度 intensity	年份 year
厄尔尼诺事件 El Niño event	弱强度 weak	1953, 1969, 1976, 1977, 2004, 2006
	中强度 moderate	1951, 1963, 1986, 1994, 2002, 2009
	高强度 strong	1957, 1965, 1972, 1982, 1987, 1991, 1997, 2015
拉尼娜事件 La Niña event	弱强度 weak	1954, 1964, 1971, 1983, 2000
	中强度 moderate	1955, 1970, 1995, 2011
	高强度 strong	1973, 1975, 1988, 1998, 1999, 2007, 2010

1.2.2 分析不同强度气候条件下适宜的环境变化

依据定义的不同强度的厄尔尼诺和拉尼娜事件(表 1),分别计算弱强度、中强度和高强度的厄尔尼诺及拉尼娜事件下的 SSTA 和 SSHA 空间平均值,绘制不同强度下的空间分布图,分析其空间分布特征。依据 Yu 等^[14]建立的适应性指数(suitability index, SI)模型,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 3 种强度的厄尔尼诺和拉尼娜事件下的变动规律。

1.2.3 建立栖息地指数模型 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),将 $\text{HSI} \geq 0.6$ 定义为适宜的栖息地^[17]。依据 9—12 月茎柔鱼渔场海域 HSI 数据,计算 3 种强度厄尔尼诺和

拉尼娜事件 HSI 的空间平均值, 绘制空间分布图并分析不同强度气候条件下栖息地适宜性的空间变化。此外, 通过对厄尔尼诺和拉尼娜事件的强度划分, 计算不同强度对应年份 HSI 的平均值, 并分析其变动规律。

1.2.4 分析不同强度气候条件下纬度重心变化

依据强度划分结果, 计算茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心, 分析厄尔尼诺和拉尼娜事件在不同强度期间纬度重心的变化。其中, HSI 纬度重心计算方法为^[17]:

$$LAGT_{HSI} = \frac{\sum (\text{latitude}_{(i,m)} \times HSI_{(i,m)})}{\sum HSI_{(i,m)}}$$

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

2 结果与分析

2.1 不同强度气候条件下 SSTa、SSHA 的空间变化

由图 1 可以看出, 秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTa 的空间变化与不同强度的厄尔尼诺和拉尼娜事件之间有显著的相关性。弱厄尔尼诺事件及中强度厄尔尼诺事件期间, SSTa 较低, 表明茎柔鱼渔场的海表水温偏低, 相比较之下, 强厄尔尼诺事件下茎柔鱼渔场的海表水温偏高; 中强度拉尼娜及强拉尼娜事件期间, 茎柔鱼渔场的海表水温明显比弱拉尼娜事件的海表水温偏低。秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSHA 在不同强度气候条件下的空间变化与 SSTa 大致相同(图 2)。强厄尔尼诺事件期间海

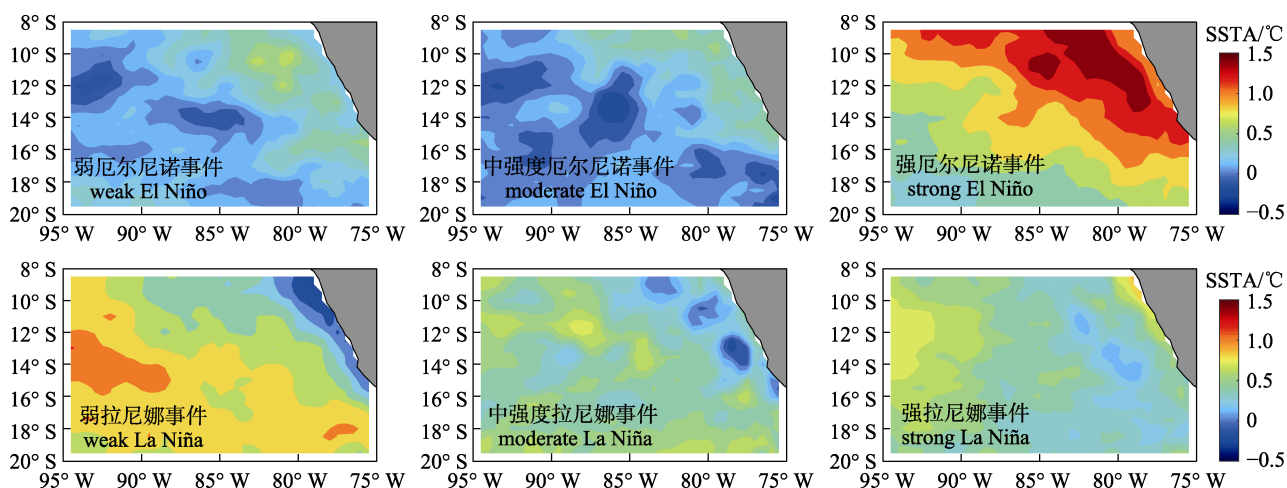


图 1 不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间海表温距平值(SSTa)的空间分布

Fig. 1 The spatial distributions of sea surface temperature anomaly (SSTa) in El Niño and La Niña events with different intensity

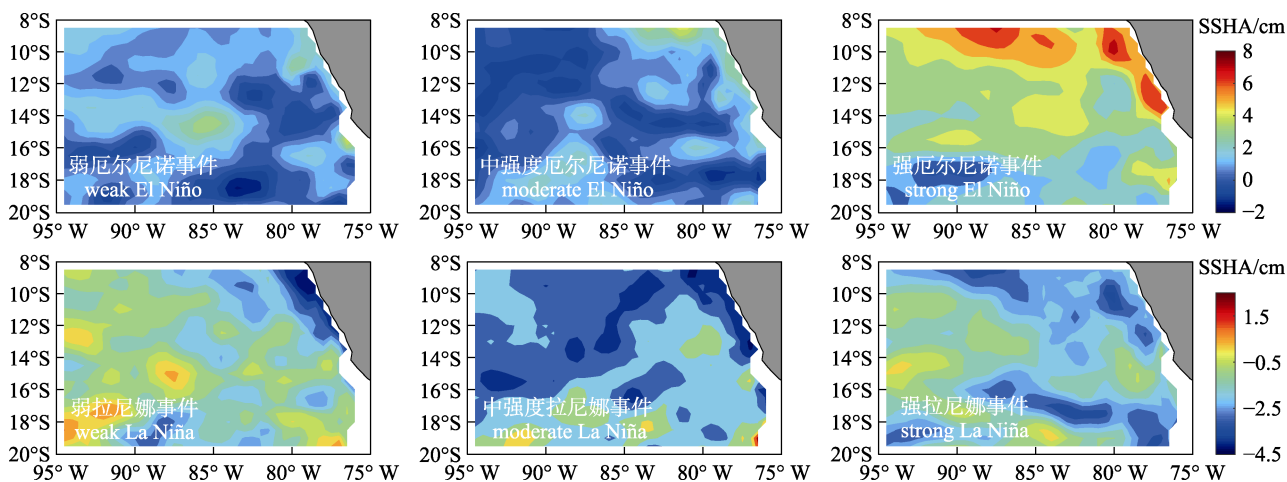


图 2 不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间海表高度距平值(SSHA)的空间分布

Fig. 2 The spatial distributions of sea surface height anomaly (SSHA) in El Niño and La Niña events with different intensity

面高度偏高,弱厄尔尼诺事件及中强度厄尔尼诺事件期间海面高度偏低;弱拉尼娜事件期间海面高度偏高,中强度拉尼娜及强拉尼娜事件期间海面高度偏低。

2.2 不同强度气候条件下 SSTA、SSHA 的适宜性变化

秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 及 SSHA 在不同

强度气候条件下有显著的变化(图 3)。弱厄尔尼诺事件及中强度厄尔尼诺事件期间,秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 较低;强厄尔尼诺事件期间,茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 较高;弱拉尼娜事件期间茎柔鱼渔场 SSTA 较高,中强度拉尼娜及强拉尼娜事件期间茎柔鱼渔场 SSTA 较低,茎柔鱼渔场 SSHA 在 3 种强度的拉尼娜事件期间均偏低。

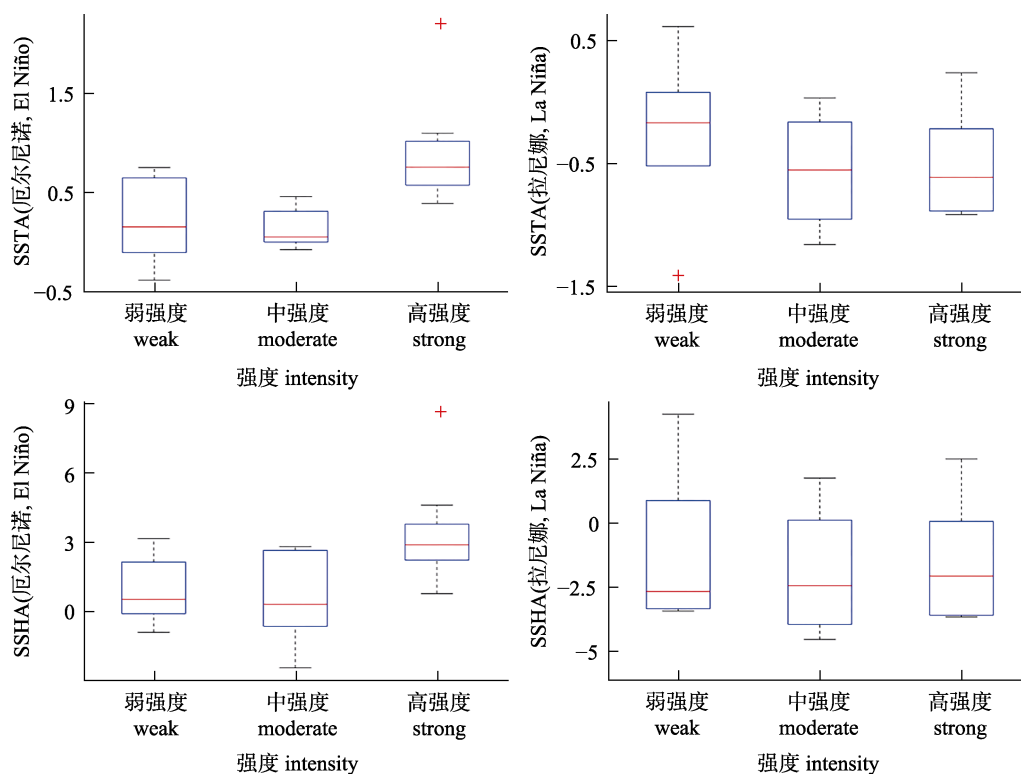


图 3 海表温度距平值(SSTA)和海表高度距平值(SSHA)在不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间的年际变化

“+”为异常值。

Fig. 3 Interannual variability of sea surface temperature anomaly (SSTA) and sea surface height anomaly (SSHA) in El Niño and La Niña events with different intensity

“+” represents abnormal value.

弱厄尔尼诺事件及中强度厄尔尼诺事件期间,秘鲁外海茎柔鱼渔场适宜的 SST 及 SSHA 明显高于强厄尔尼诺事件。在 3 种不同强度的拉尼娜事件期间,茎柔鱼渔场适宜的 SST 及 SSHA 均较高,平均值均在 0.6 左右,表明茎柔鱼渔场 SST 及 SSHA 较为适宜(图 4)。

2.3 不同强度气候条件下茎柔鱼栖息地的适宜性变化

从图 5 可见,秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性在不同强度的气候条件下差异较为显著。厄尔尼

诺事件的强度越弱,茎柔鱼栖息地的适宜性越高,较为适宜的栖息地面积越多;拉尼娜事件的强度越强,茎柔鱼栖息地的适宜性越高,较为适宜的栖息地面积越多。此外,拉尼娜事件期间,茎柔鱼栖息地的适宜性明显比厄尔尼诺事件下的适宜性高。其中,强厄尔尼诺事件与强拉尼娜事件呈现鲜明对比。强厄尔尼诺事件期间,茎柔鱼渔场 HSI 均低于 0.6;强拉尼娜事件期间,茎柔鱼渔场 HSI 均高于 0.6,表明强拉尼娜事件期间茎柔鱼的栖息地较为适宜。

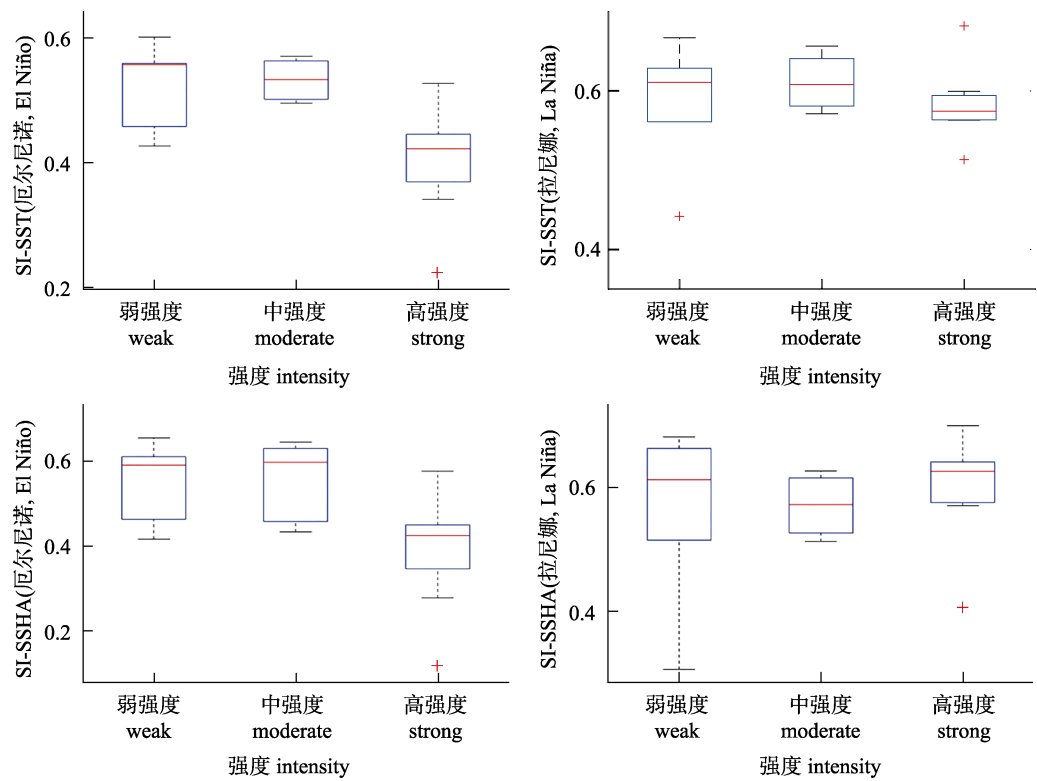


图 4 适宜的海表温度(SST)和适宜的海表高度距平值(SSHA)在不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间的年际变化
“+”为异常值。
Fig. 4 Interannual variability in suitable sea surface temperature (SST) and sea surface height anomaly (SSHA) in El Niño and La Niña events with different intensity
“+” represents abnormal value.

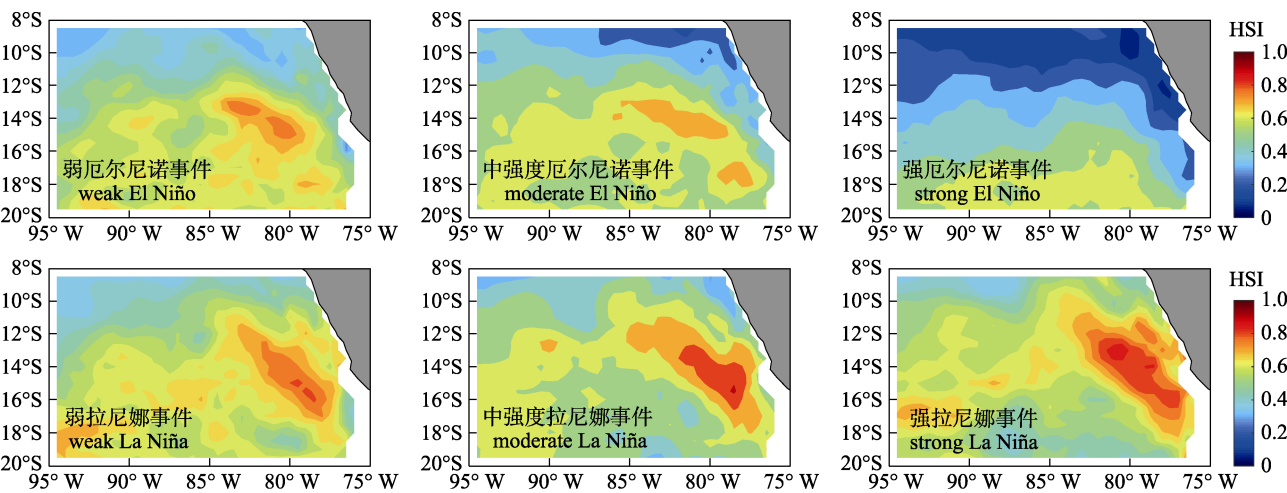


图 5 不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间栖息地适宜性指数(HSI)的空间分布
Fig. 5 The spatial distributions of habitat suitability index (HSI) in El Niño and La Niña events with different intensity

根据不同强度气候条件的年份得到 HSI 的平均值(图 6), 可以看出在弱厄尔尼诺事件及中强度厄尔尼诺事件期间茎柔鱼栖息地的适宜性明显高于强厄尔尼诺事件; 在 3 种强度的拉尼娜事件期间, 茎柔鱼栖息地的适宜性均较为适宜。此外, 在厄尔尼诺事件期间, 随着强度的增加, 茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心逐渐向南偏移; 然而在拉尼娜事件期间, 随着强度的增加, 茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心逐渐向北偏移。整体来看, 拉尼娜事件期间茎柔鱼渔场 HSI 的纬度重心明显比厄尔尼诺事件偏北(图 7)。

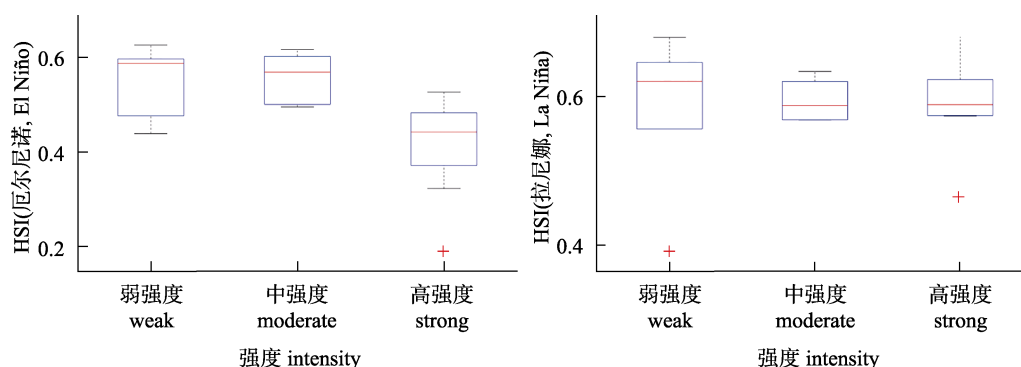


图 6 栖息地适宜性指数(HSI)在不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间的变化
“+”为异常值。

Fig. 6 Variability in the habitat suitability index (HSI) in El Niño and La Niña events with different intensity
“+” represents abnormal value.

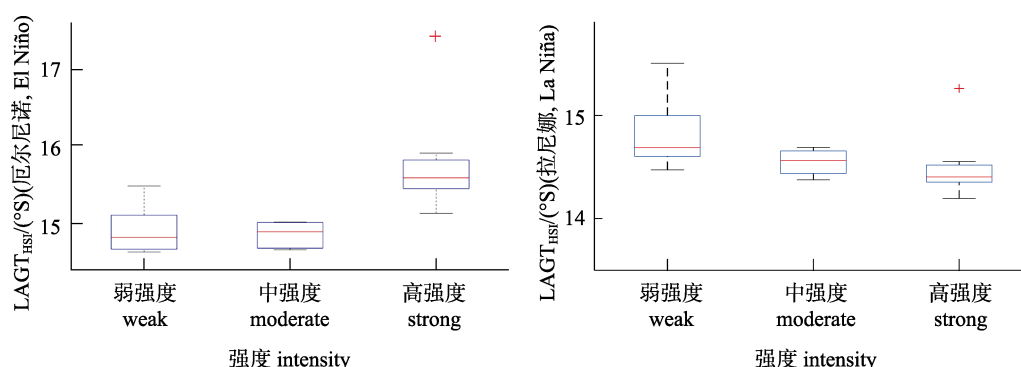


图 7 渔场重心在不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件期间的纬向变化
“+”为异常值。

Fig. 7 Latitudinal changes in gravity centers of HSI in El Niño and La Niña events with different intensity
“+” represents abnormal value.

3 讨论

厄尔尼诺和拉尼娜事件对太平洋渔业有深远的影响^[18], 大尺度的气候变化对鱼类生存的海洋环境有显著影响, 进而使柔鱼种群做出迅速反应, 迁移到适宜的栖息地^[19]。厄尔尼诺事件发生时, 太平洋东部和中部海洋表面异常偏暖; 拉尼娜事件发生时, 太平洋东部和中部海洋表面异常偏冷^[12]。对于茎柔鱼, Robinson 等^[9]认为 1999 年拉尼娜事件期间形成了水温偏冷的适宜栖息地, 此外, 由于海表温度偏冷、叶绿素 a 浓度较高和较强的上升流等因素增加了茎柔鱼的产量。Robinson 等^[20]认为 2009—2010 年厄尔尼诺事件期间, 茎柔鱼捕捞量保持低水平与异常的冬春季风和较低浓度的叶绿素 a 有关。Yu 等^[14]利用 SST、SSHA 和叶绿素 a(Chl a) 3 个关键环境因子构建栖息地指数模型,

研究了东南太平洋茎柔鱼栖息地不同气候条件下的变动, 表明厄尔尼诺事件期间海域环境不适宜茎柔鱼生长, 适宜栖息地面积减小, 产量降低; 而拉尼娜事件期间茎柔鱼适宜栖息地面积扩张, 产量提高。前人仅对厄尔尼诺和拉尼娜事件期间茎柔鱼栖息地的变动进行了研究, 然而不同年份的厄尔尼诺和拉尼娜事件强度不同, 因此需要考虑不同强度异常事件情况下栖息地的变动, 本研究分析了较长时间序列的不同强度异常事件对茎柔鱼栖息地的影响, 从而补充了茎柔鱼群体响应气候变化的相关研究。

本研究基于 Yu 等^[14]的方法, 利用 SST 和 SSHA 两个关键环境因子构建了栖息地指数模型。SST 对茎柔鱼渔场形成有较为显著的影响^[21], SSHA 也作为影响栖息地的重要因素之一, 通过 Yu

等^[14]的预测和验证,证明模型是可靠准确的。但茎柔鱼栖息地的环境变化较为复杂,今后的研究中应加入其他环境因子,使模型预测更加精确。Yu 等^[14]通过对 2006—2012 年厄尔尼诺和拉尼娜事件的分析,对比分析了两种异常气候条件下栖息地的变动规律。本研究依据 1950—2015 年长时间序列的数据,通过将厄尔尼诺和拉尼娜事件分别划分为弱强度、中等强度和高强度,研究发现在强厄尔尼诺事件期间,栖息地海表水温偏暖,海面高度偏高,适宜栖息地面积较少;中强度拉尼娜和强拉尼娜事件期间,栖息地海表水温偏冷,海面高度偏低,适宜栖息地面积较多。Yu 等^[17]研究认为 2015 年强厄尔尼诺事件期间,环境条件不利于茎柔鱼的生存,2011 年拉尼娜事件期间,各环境因子的适宜面积均有所增大,进而使适宜栖息地面积增加。这与本研究结果一致。Waluda 等^[22]认为,在拉尼娜事件强度较高的年份,上升流势力强劲,茎柔鱼的资源丰度和渔获量更高。本研究发现,强拉尼娜事件期间,适宜的栖息地面积最大(图 5)。

目前已有相关研究分析不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件对海洋鱼类栖息地的影响,如余为等^[15]研究发现西北太平洋柔鱼各月适宜温度范围受厄尔尼诺和拉尼娜事件调控,其面积随气候事件的强弱发生变化。郭爱等^[16]研究认为中国近海鲈栖息地适宜性与厄尔尼诺和拉尼娜事件显著相关,且随着异常气候事件强度的不同而发生变化。本研究表明,不同强度厄尔尼诺和拉尼娜事件会对秘鲁外海茎柔鱼渔场的海表温度和海面高度产生不同的影响,进而使得茎柔鱼渔场适宜的 SST 和 SSHA 面积发生变化,导致不同强度气候条件下茎柔鱼适宜的栖息地面积不同。本研究推测茎柔鱼栖息地响应气候变化的过程可能为:相对于弱厄尔尼诺和中强度厄尔尼诺事件,强厄尔尼诺事件期间茎柔鱼渔场水温偏高,海面高度偏高,适宜的 SST 和 SSHA 面积缩小,进而使茎柔鱼适宜栖息地面积减少;相较于弱拉尼娜事件,中强度拉尼娜和强拉尼娜事件期间茎柔鱼渔场水温偏低,海面高度偏低。不同强度拉尼娜事件下适宜的 SST 和 SSHA 均偏高,但强拉尼娜事件期间茎柔

鱼适宜栖息地面积明显大于弱拉尼娜和中强度拉尼娜事件。此外,随着强度的增加,厄尔尼诺事件期间茎柔鱼栖息地的纬度重心逐渐偏南,拉尼娜事件期间茎柔鱼栖息地纬度重心逐渐偏北。本研究充分表明,秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性在不同强度异常气候事件期间发生显著变化,因此,本研究结果能为大洋性头足类渔业资源响应大尺度气候变化研究提供补充和借鉴,并为茎柔鱼资源的可持续管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] Nesis K N. *Dosidicus gigas*[M]. London: Academic Press, 1983: 216-231.
- [2] Waluda C M, Yamashiro C, Elvidge C D, et al. Quantifying light-fishing for *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific using satellite remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 129-133.
- [3] Morales-Bojórquez E, Pacheco-Bedoya J L. Jumbo squid *Dosidicus gigas*: A new fishery in Ecuador[J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 2016, 24(1): 98-110.
- [4] Wei Y R, Chen X J, Lin D M, et al. Energy accumulated in the somatic tissues of the jumbo squid, *Dosidicus gigas*, off Peru[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 444-454. [魏嫣然, 陈新军, 林东明, 等. 秘鲁外海茎柔鱼肌肉组织的能量积累[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 444-454.]
- [5] FAO. Fishery statistical collections: Global aquaculture production[EB/OL]. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/en>.
- [6] Liu B L, Chen X J, Yi Q. A comparison of fishery biology of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas* outside three Exclusive Economic Zones in the Eastern Pacific Ocean[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(3): 523-533.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Litz M N C, Phillips A J, Brodeur R D, et al. Seasonal occurrences of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) in the northern California Current System[J]. CalCOFI Report, 2011, 52: 97-108.
- [11] Yu W, Chen X J. Ocean warming-induced range-shifting of potential habitat for jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. Fisheries Research, 2018, 204: 137-146.
- [12] Sheinbaum J. Current theories on El Niño-Southern Oscillation: A review[J]. Geofísica Internacional, 2003, 42(3): 291-305.
- [13] Swartzman G, Bertrand A, Gutiérrez M, et al. The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983 to 2005[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 228-237.
- [14] 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.
- [15] Yu W, Chen X J. 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. [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.]
- [16] Guo A, Zhang Y, Yu W, et al. Influence of El Niño and La Niña with different intensity on habitat variation of chub mackerel *Scomber japonicas* in the coastal waters of China[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(12): 58-67. [郭爱, 张杨, 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.]
- [17] Yu W, Chen X J, Zhang Y. Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters[J]. Journal of Marine Systems, 2019, 194: 41-51.
- [18] Bell J D, Ganachaud A, Gerkhe P C, et al. Mixed responses of tropical Pacific fisheries and aquaculture to climate change[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 591-599.
- [19] Rodhouse P G K. Role of squid in the Southern Ocean pelagic ecosystem and the possible consequences of climate change[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2013, 95: 129-138.
- [20] Robinson C J, Gómez-Gutiérrez J, Markaida U, et al. Prolonged decline of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) landings in the Gulf of California is associated with chronically low wind stress and decreased chlorophyll *a* after El Niño 2009–2010[J]. Fisheries Research, 2016, 173(Part 2): 128-138.
- [21] 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. [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.]
- [22] 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.

Habitat variations of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru under El Niño and La Niña events with different intensities

WEN Jian¹, QIAN Mengting¹, YU Wei^{1, 2, 3, 4}, CHEN Xinjun^{1, 2, 3, 4}, LIU Bilin^{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 Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: The jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) is a short-lived cephalopod species widely distributing in the eastern Pacific Ocean. Presently, international squid-jigging fishing vessels from China, Japan, Peru, and Chile target this species. China mainland started to exploit *D. gigas* in 2001 and now has the largest squid fishery in the world. The oceanic waters off Peru are abundant and important fishing grounds. China has hundreds of fishing vessels operating in these waters, outside of the exclusive economic zones of Peru. The *D. gigas* habitat is strongly affected by climatic and environmental variability at different spatial and temporal scales. In this study, two critical environmental variables [the sea surface temperature (SST) and sea surface height anomaly (SSHA) from 1950 to 2015] that affect the abundance and distribution of *D. gigas* were used to calculate the habitat suitability index in the waters off Peru. We also evaluated the effects of El Niño and La Niña events on habitat suitability. The integrated HSI values were calculated by the Arithmetic Mean Method. The El Niño and La Niña years from 1950 to 2015 were defined by the 5-month running mean of the SST anomalies in the Niño 3.4 region (5°N–5°S, 120°–170°W) and measured by SSTs above or below a threshold of +0.5 °C/–0.5 °C for 5 consecutive months. The intensity of each anomalous event was identified from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The results suggest that strong El Niño events, compared to weak and moderate El Niño events, are associated with warmer SST and higher sea surface height (SSH). These changes led to smaller suitable areas of SST and SSHA, thereby decreasing the suitable habitat range. During weak La Niña events, SST was warmer and SSH was higher, but during moderate and strong La Niña events, SST was colder and SSH was lower. The range of suitable habitats during strong La Niña events was significantly wider than that during moderate and weak La Niña events. Moreover, as the intensity of El Niño increased, the latitudinal gravity centers of the suitable habitat shifted southward, and as the intensity of La Niña increased, the latitudinal gravity centers of the suitable habitat shifted northward. Our findings suggest that there are significant differences in the environmental conditions of the squid fishing ground during El Niño and La Niña events. These differences directly affect the range of suitable habitats and spatial distribution of *D. gigas*.

Key words: *Dosidicus gigas*; ENSO intensity; El Niño; La Niña; habitat suitability index; off Peru

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