

温健, 陆鑫一, 余为, 等. 秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性年代际变动[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 36–43, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.005

Wen Jian, Lu Xinyi, Yu Wei, et al. Decadal variations in habitat suitability of *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 36–43, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.005

## 秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性年代际变动

温健<sup>1</sup>, 陆鑫一<sup>1</sup>, 余为<sup>1,2,3,4\*</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4</sup>, 刘必林<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:** 茎柔鱼广泛分布于东南太平洋海域, 是我国重要的远洋捕捞对象之一, 其种群易受气候和栖息地环境的影响。利用海表面温度 (SST) 和海表面高度距平 (SSHA) 两个关键环境因子, 计算 1950–2015 年 1–12 月秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性指数 (HSI), 对比分析太平洋年代际涛动 (PDO) 位于冷暖位相下茎柔鱼渔场环境以及栖息地质量的变动。结果显示, 1950–2015 年 PDO 呈现冷、暖、冷 3 个位相变化, 其中 PDO 冷位相内的 SST 距平 (SSTA) 和 SSHA 明显低于 PDO 暖位相。交相关分析结果表明, PDO 指数与 SSTA 和 SSHA 均呈显著正相关, 而 HSI 与 PDO 指数、SSTA 和 SSHA 均呈显著负相关。PDO 位于冷位相时, 茎柔鱼渔场内水温变冷, 海面高度下降, 适宜的 SST 和 SSHA 范围增加, 因此茎柔鱼有利的栖息地面积增大; 而 PDO 位于暖位相时, 水温增暖, 海面高度上升, 适宜的 SST 和 SSHA 范围缩减, 导致茎柔鱼适宜的栖息地面积缩小。研究认为, 太平洋年代际涛动调控了茎柔鱼渔场内的环境变化, 进而对茎柔鱼栖息地质量及适宜栖息地范围产生显著影响。

**关键词:** 茎柔鱼; 栖息地适宜性; 太平洋年代际涛动; 时空分布; 秘鲁

中图分类号: P714<sup>+</sup>.5; S917.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)06-0036-08

### 1 引言

茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 为大洋头足类种类, 广泛分布于东太平洋海域<sup>[1]</sup>, 分布在 140°W 以东的加利福尼亚半岛 40°N 至智利 47°S 的海域<sup>[2]</sup>。茎柔鱼渔业始于 1974 年, 但大规模开发利用始于 20 世纪 90 年代中期。我国于 2001 年开发了秘鲁外海茎柔鱼渔场, 2006 年首次进入智利外海茎柔鱼渔场, 目前茎柔鱼渔获产量稳定在 20×10<sup>4</sup> t/a, 茎柔鱼已经成为我国鱿钓船的重要捕捞对象<sup>[3-4]</sup>。一般认为, 茎柔鱼存在大、中、小 3 个群体<sup>[5-6]</sup>, 茎柔鱼的生命周期为 1~2 a<sup>[7]</sup>, 其群体对于气候以及栖息地环境的变化极为敏感, 其生

存环境受到大尺度气候条件的影响<sup>[8]</sup>。已有研究表明, 茎柔鱼渔场变动与海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)<sup>[9]</sup>、水温垂直结构<sup>[9]</sup>、海表盐度 (Sea Surface Salinity, SSS)<sup>[10]</sup> 以及光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR)<sup>[11]</sup> 等环境因子有密切关系。

作为短生命周期种类, 茎柔鱼资源量变动对局部海域环境条件以及全球气候变化极为敏感, 其资源和渔场随之发生波动。太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 是一种以 10 a 周期尺度变化的太平洋气候变化现象。在 PDO 暖期 (暖位相) 时, 北太平洋西北部和中部海域异常变冷, 而东太平洋海域和北美沿岸海域异常变暖; 而在 PDO 冷期 (冷位

收稿日期: 2019-02-16; 修订日期: 2019-04-23。

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2019YFD0901405, 2019YFD0901404); 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); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位计划项目 (0810000243); 上海市“浦江人才”计划项目 (18PJ1404100)。

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

相), 北太平洋西北部和中部海域异常变暖, 东太平洋海域和北美沿岸海域异常变冷<sup>[12]</sup>。前人研究表明, PDO对西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)<sup>[13]</sup>和太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)<sup>[14]</sup>等头足类的渔场环境产生显著影响。本研究分析在太平洋年代际涛动位于冷暖位相两种气候条件下, 对比秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 与 SSHA 的时空变化特征, 以及两种气候条件下茎柔鱼栖息地质量的变化, 并探索茎柔鱼适宜栖息地对 PDO 的响应过程, 整体把握大尺度气候变化对茎柔鱼栖息地的影响, 从而丰富秘鲁外海茎柔鱼渔场环境动态的认识, 为茎柔鱼资源的可持续开发和管理提供科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

环境数据包括 SST 和海表面高度 (Sea Surface Height, SSH), 时间为 1950–2015 年 1–12 月, 共计 792 个月, 数据覆盖了秘鲁海区茎柔鱼渔场海域, 其空间分布范围为 8°~20°S, 75°~95°W, 数据空间分辨率均转化为 0.5°×0.5°。环境数据均来自于夏威夷大学网站 (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>)。PDO 指数来源于美国华盛顿大学大气与海洋研究联合研究所网站 (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>)。

### 2.2 分析方法

计算海表温度距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 和海表面高度距平值 (Sea Surface Height Anomaly, SSHA), 并对 1950–2015 年 PDO 指数、秘鲁外海茎柔鱼渔场海域 SSTA 和 SSHA 进行逐年平均, 分析其年际变化。根据 PDO 指数的年际变化, 确定 PDO 冷暖位相的具体时间范围。

利用交相关函数分析 PDO 指数与 SSTA 和 SSHA 的相关性, 分别绘制 PDO 在冷暖位相时茎柔鱼渔场内的 SSTA 和 SSHA 空间分布图, 对比分析茎柔鱼渔场范围内 SSTA 和 SSHA 在不同 PDO 位相时的空间分布特征。

依据 Yu 等<sup>[15]</sup>建立的适宜性指数 (Suitability Index, SI) 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), 其计算公式如下:

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

式中,  $SI_{SST}$  和  $SI_{SSHA}$  为 SST 和 SSHA 的适宜性指数。综合栖息地适宜性指数值范围在 0~1 之间, 认定

$HSI \geq 0.6$  的海域为茎柔鱼适宜的栖息地<sup>[16]</sup>。依据 SI 模型计算茎柔鱼各月适宜 SST 和适宜 SSHA 范围, 并分别对其逐年平均, 对比 PDO 位于冷暖位相时茎柔鱼对各环境因子适宜范围的变动规律。此外, 对 1950–2015 年各年 HSI 进行逐年平均, 分析其年际变化, 绘制 PDO 位于不同位相时茎柔鱼 HSI 空间分布图, 利用交相关函数分析 HSI 与 PDO 指数、SSTA 和 SSHA 的相关性, 最终推理秘鲁外海茎柔鱼栖息地质量对 PDO 年代际变化的响应过程。

## 3 研究结果

### 3.1 SSTA 和 SSHA 变化及与 PDO 指数交相关分析

由图 1 可以看出, 1950–2015 年 PDO 经历两个冷位相和一个暖位相, 其中 1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 位于冷位相, 1977–1998 年 PDO 位于暖位相。1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 指数平均值分别为 -0.63 和 -0.15; 而 1977–1998 年 PDO 指数平均值为 0.60。秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 的变化范围为 -1.32~1.35°C, 其中 1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, SSTA 平均值分别为 -0.25°C 和 -0.08°C, 明显低于 1977–1998 年 PDO 暖位相, 其对应的 SSTA 平均值为 0.36°C。SSTA 波动范围为 -4.43~5.85 cm, 其中 1950–1976 年和 1999–2015 年平均 SSHA 分别为 -1.59 cm 和 -0.58 cm, 明显低于 1977–1998 年平均 SSHA 值 2.39 cm。

1950–2015 年茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 的变化趋势与 PDO 指数的变动基本保持一致 (图 1)。交相关分析表明, 秘鲁外海茎柔鱼渔场 SSTA 与 PDO 指数呈显著正相关, 在提前 1 个月时相关性最大, 相关系数数值为 0.496 2 ( $p < 0.05$ ); 此外, 渔场 SSHA 与 PDO 指数呈显著正相关, 在提前 1 个月时相关性最大, 相关系数为 0.588 6 ( $p < 0.05$ ) (图 2)。

### 3.2 PDO 冷暖位相内的 SSTA 和 SSHA 空间分布差异

从图 3 可看出, 1950–1976 年 PDO 位于冷位相时, 绝大多数海域内的 SSTA 均为负值, 仅在 17°~20°S, 75°~77°W 海域内出现少数正值, 空间上 SSTA 由南向北呈现递减的趋势; 1977–1998 年 PDO 位于暖位相时, 秘鲁外海茎柔鱼渔场内的 SSTA 全部为正值, 东北海域的 SSTA 相较其他海域比较集中并且偏高, 西南部分海域的 SSTA 也较高; 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, 在空间上 SSTA 呈由南向北递增的趋势, 大部分海域 SSTA 为负值, 北部部分海域 SSTA 为正值。

1950–1976 年 PDO 位于冷位相时, SSHA 大多为

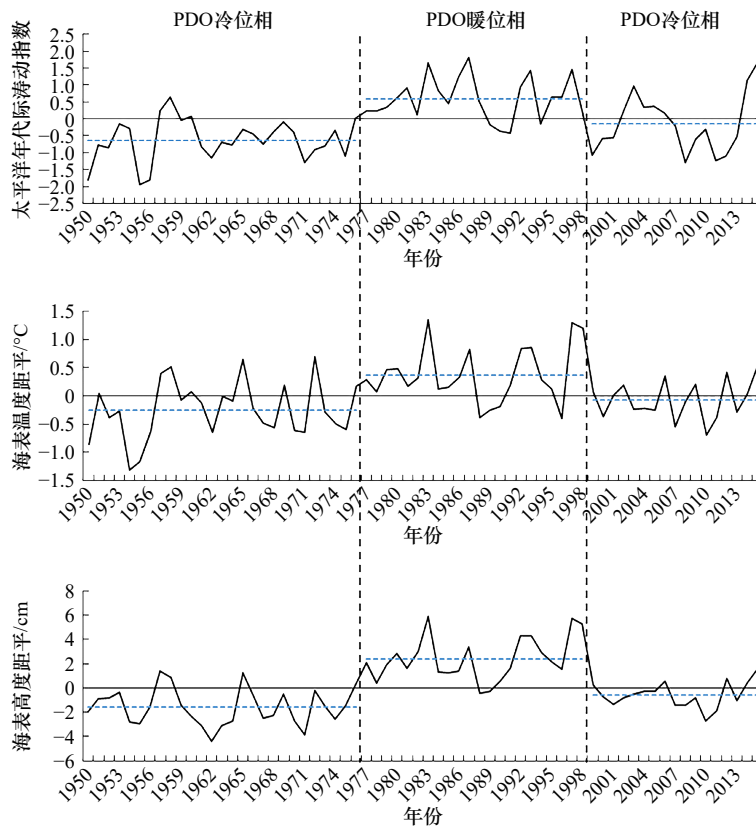


图 1 1950–2015 年 PDO 指数以及东南太平洋海域秘鲁茎柔鱼渔场 SSTA 和 SSHA 的际年变化

Fig. 1 Interannual variability in the PDO index, SSTA, SSHA on the fishing ground of *D. gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru during 1950–2015

负值, 在  $13^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$ ,  $75^{\circ}\sim 77^{\circ}\text{W}$  海域内出现少数正值; 1977–1998 年 PDO 位于暖位相时, 渔场内 SSHA 全部为正,  $14^{\circ}\sim 16^{\circ}\text{S}$ ,  $85^{\circ}\sim 88^{\circ}\text{W}$  海域以及  $9^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ,  $82^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{W}$  海域内, SSHA 偏高; 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, 在空间上 SSHA 呈西南高东北低的趋势, 大部分海域 SSHA 为负值, 仅有西南部分海域的 SSHA 为正。因此可以看出, PDO 位于冷位相时, 茎柔鱼渔场内水温变冷, 海面高度下降; 相反, PDO 位于暖位相时, 茎柔鱼渔场水温增暖, 而海面高度上升 (图 3)。

### 3.3 秘鲁外海茎柔鱼渔场在 PDO 冷暖位相内栖息地变化

由图 4 可知, 茎柔鱼适宜的 SST 面积比例在 21.3%~47.8% 之间波动。1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, 适宜的 SSHA 面积比例平均值分别为 38.3% 和 36.8%, 明显高于 1977–1998 年 PDO 位于暖位相内适宜的 SSHA 面积比例 35.0%。此外, 茎柔鱼适宜的 SSHA 面积变化范围为 9.3%~42.3%。1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, 适宜的 SSHA 面积比例平均值分别为 36.1% 和 36.0%, 明显

高于 1977–1998 年 PDO 位于暖位相内适宜的 SSHA 面积比例 26.4%。

从图 5 可看出, 1950–2015 年 HSI 的变化趋势与 PDO 指数 (图 1) 呈相反趋势, HSI 变化范围为 0.25~0.58。1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 位于冷位相时, HSI 平均值分别为 0.52 和 0.51, 明显高于 1977–1998 年 PDO 暖期的 HSI 平均值 0.44。从 HSI 的空间分布可以看出, 在 1950–1976 年和 1999–2015 年 PDO 冷位相时, 较为适宜的栖息地面积 ( $\text{HSI} \geq 0.6$ ) 明显大于 1977–1998 年 PDO 暖位相, 并且较为适宜的栖息地集中分布于  $12^{\circ}\sim 16^{\circ}\text{S}$ ,  $75^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{W}$  海域 (图 5)。

进一步分析 1950–2015 年各月 HSI 与 PDO 指数、SSTA 和 SSHA 交相关性 (图 6)。结果显示, HSI 和 PDO 指数呈显著负相关关系, 且滞后 2 个月产生最大负影响, 对应交相关系数为  $-0.290\ 5$  ( $p < 0.05$ ); HSI 和 SSTA 呈显著负相关关系, 且在滞后 1 个月时产生最大负影响, 对应交相关系数为  $-0.377\ 3$  ( $p < 0.05$ ); 同样 HSI 和 SSHA 呈显著负相关关系, 并在 0 月产生最大负影响, 对应交相关系数为  $-0.440\ 5$  ( $p < 0.05$ )。

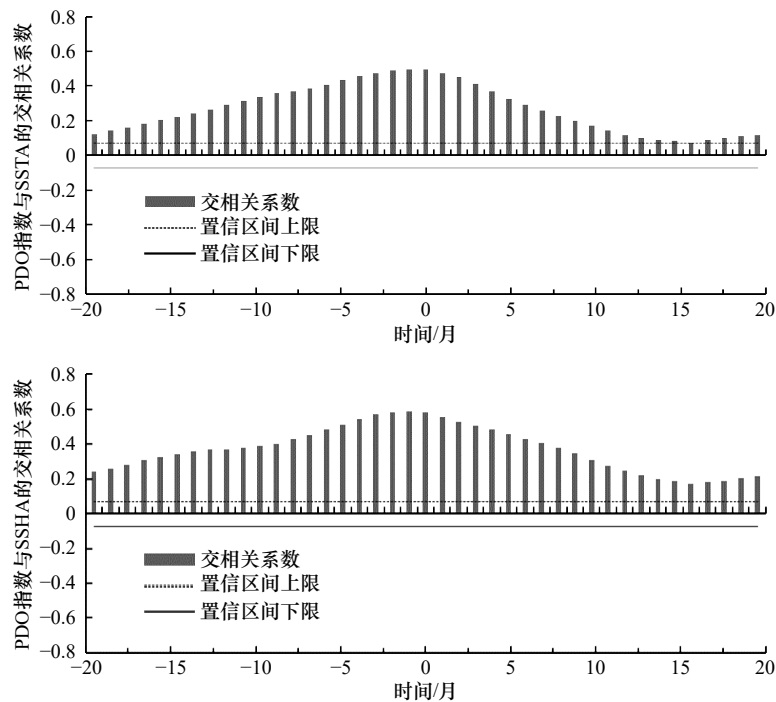


图2 PDO指数与SSTA、SSHA的交相关系数

Fig. 2 Cross correlation coefficients between the PDO index and SSTA, and between PDO index and SSHA

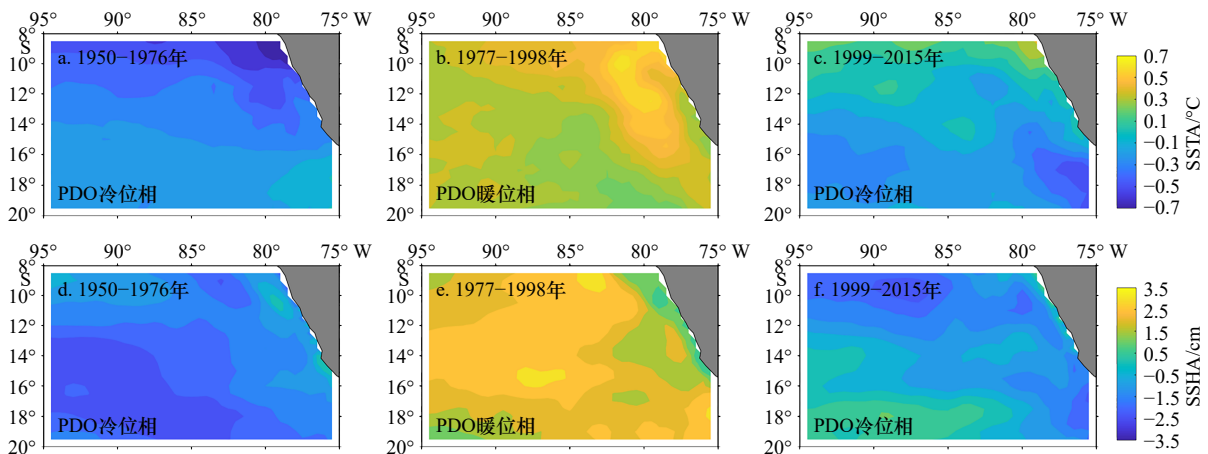


图3 1950–2015年PDO位于冷暖位相时SSTA、SSHA的空间分布

Fig. 3 The spatial distributions of SSTA and SSHA during the cold PDO and warm PDO over 1950–2015

## 4 讨论

太平洋年代际涛动是一种年代际时间尺度上的气候变率强信号,是叠加在长期气候趋势变化下的扰动,可直接造成太平洋及其周边地区的年代际变化<sup>[17]</sup>。不同尺度气候变化之间也存在着交互作用,例如PDO位于暖位相时,厄尔尼诺事件发生频率高且强度较强;PDO位于冷位相时,拉尼娜事件发生频率高且强度较强<sup>[18]</sup>。从本文研究结果来看,根据PDO指数、SSTA和SSHA的时间序列(图1)可以观察到,PDO指数以及环境因子的波动除了年代际的变化,在年际

时间尺度上也存在着显著的波动。例如,1997年适宜的SST和适宜的SSHA面积比例为1950–2015年的最低值(图4),1997年HSI值也达到最低水平(图5),栖息地质量下降,适宜栖息地面积减小。已有研究表明<sup>[13]</sup>,1997–1998年厄尔尼诺现象的发生,使得茎柔鱼资源量下降,从而导致秘鲁外海茎柔鱼产量剧减。由此可知,若在PDO暖位相时期发生厄尔尼诺现象,两种气候效应的叠加,可能会使茎柔鱼资源下降程度变大。

PDO冷暖位相的交替能够影响海洋鱼类种群。Zwolinski和Demer<sup>[19]</sup>研究认为太平洋沙丁鱼种群的

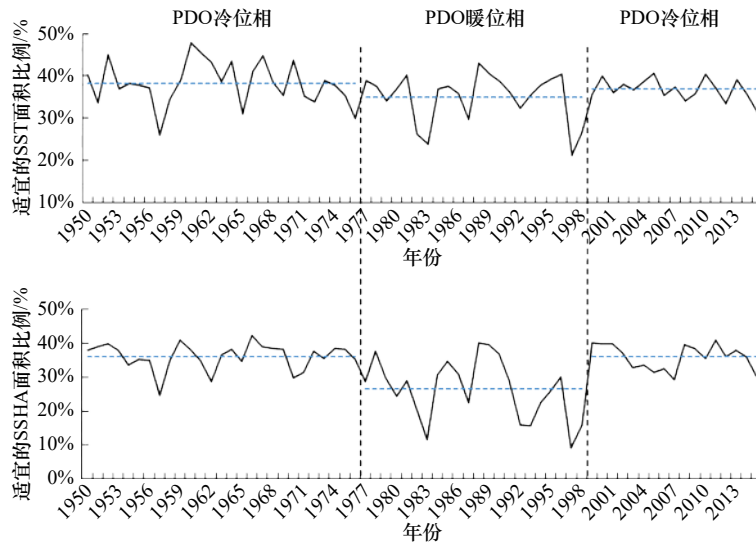


图 4 1950–2015 年 PDO 暖期和冷期适宜的 SST 面积比例和适宜的 SSHA 面积比例的年际变化  
 Fig. 4 Interannual variability in suitable SST area proportion and SSHA area proportion during the cold and warm PDO over 1950–2015

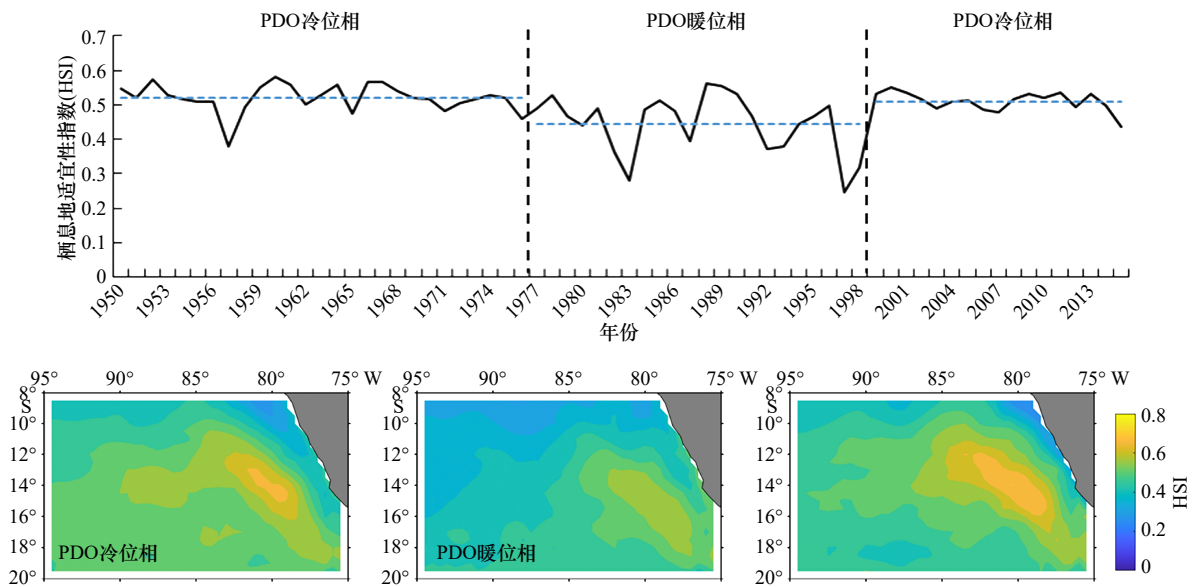


图 5 1950–2015 年 PDO 暖期和冷期 HSI 的年际变化和空间分布  
 Fig. 5 Interannual variability in the HSI on the cold PDO and warm PDO during 1950–2015. The spatial distributions of HSI on the cold PDO and warm PDO

补充量与 PDO 直接相关, PDO 位于暖位相时, 沙丁鱼种群增加, 位于冷位相时减少。张衡等<sup>[20]</sup>对 1952–2001 年太平洋长鳍金枪鱼延绳钓生产数据和 PDO 进行交叉相关分析, 结果表明长鳍金枪鱼 CPUE 同太平洋年际振荡指数具有相关性。Phillips 等<sup>[21]</sup>根据 1961–2008 年北太平洋长鳍金枪鱼幼鱼的空间分布与海表温度以及 PDO 指数和多元 ENSO 指数的关联, 得出 PDO 指数对长鳍金枪鱼资源有负影响。PDO 变化对太平洋地区海洋生态系统以及渔业的影响, 对于短生命周期的头足类鱼类研究甚少<sup>[22]</sup>。余为等<sup>[13]</sup>研

究认为, PDO 暖期时产生了有利于柔鱼生长和繁殖的气候条件, 导致资源量上升; 相反, PDO 冷期则产生了不利于柔鱼的环境条件导致柔鱼资源丰度下降, 从而产量锐减。武胜男等<sup>[14]</sup>研究发现, PDO 变化在一定程度上影响太平洋褶柔鱼秋生群资源量和产卵场环境。PDO 位于正位相年份, 太平洋褶柔鱼秋生群产卵场 SST 明显低于 PDO 负位相年份。由于我国鱿钓渔业发展历程短, 缺乏长时间的捕捞数据, 目前对于柔鱼科的研究都仅限于短时间序列内, 并局限于探讨 PDO 的年际变化。本文根据 1950–2015 年 PDO

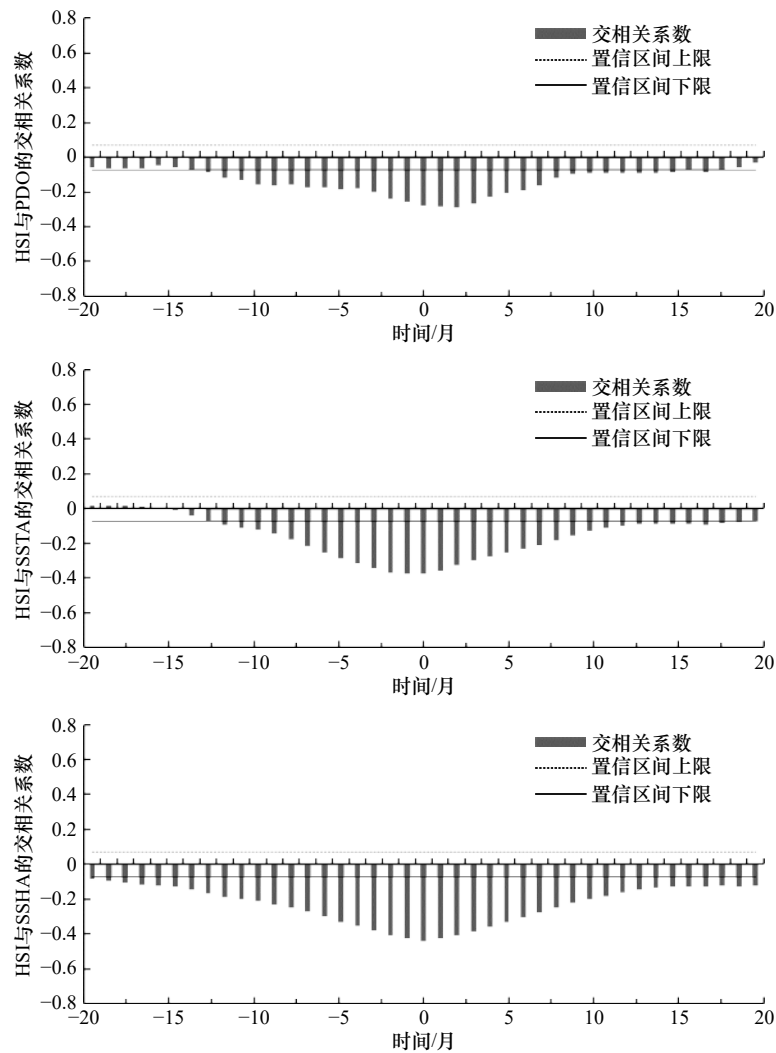


图6 HSI与PDO、SSTA和SSHA的交相关系数

Fig. 6 Cross correlation coefficients between the HSI and PDO, HSI and SSTA, HSI and SSHA

指数变化,将PDO分为3个时期,分别为1950–1976年冷位相、1977–1998年暖位相和1999–2015年冷位相,该PDO时期的划分与前人的研究基本相同<sup>[12, 18, 23]</sup>。并且探讨了不同位相时期内秘鲁外海茎柔鱼渔场环境变化,研究认为PDO指数与SSTA和SSHA呈显著正相关关系,说明PDO位于冷位相时,SSTA和SSHA偏低,PDO位于暖位相时则相反。

许多研究显示,SST对茎柔鱼渔场的分布影响显著,是影响茎柔鱼生命史及空间分布的关键因子<sup>[3, 9]</sup>。SST作为最基本的输入变量,通常被用于HSI建模<sup>[10, 15]</sup>。在Yu等<sup>[15]</sup>研究中指出,SSHA是栖息地形成的重要因素之一,将SSHA考虑在栖息地模型建立中能够更加准确地鉴定和探索最适宜栖息地。并且研究发现,利用AMM建立的综合栖息地适宜性指数模型,高HSI值与大量捕捞努力量和高渔获量之间存在很强的一致性<sup>[15]</sup>,能够为气候变化下的栖息地适宜性提供

强有力的依据。另外,Yu等<sup>[15]</sup>已利用实际生产数据对栖息地指数模型进行了验证,故本文未对模型进行重复验证。

依据Yu等<sup>[15]</sup>建立的SI模型,确定适宜的SST和适宜的SSHA,其年际变化与PDO指数的波动有一定的相关性,并且PDO位于冷位相时,适宜的SST和SSHA面积增加;PDO位于暖位相时,适宜的SST和SSHA面积减少。通过AMM建立综合栖息地适宜性指数模型,分析发现PDO位于冷位相时,栖息地的质量上升,适宜的栖息地面积较多;PDO位于暖位相时,栖息地的质量下降,适宜的栖息地面积较少。由于茎柔鱼易受到气候以及海洋环境的影响,本研究利用长达66年的环境数据,通过在PDO年代际尺度气候变化背景下,分析SSTA和SSHA等环境因子的变化,同时构建HSI模型,分析适宜栖息地的面积分布。结果显示,环境因子的变动与PDO大尺度气候

变化有显著的相关性,并且栖息地的质量以及适宜范围很好地响应了 PDO 的变化。结合上述分析,我们推理出秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性对 PDO 的可能响应过程为: PDO 位于冷位相时,东太平洋偏冷,茎柔鱼渔场水温变冷,海面高度下降,适宜的温度和海面高度范围增加,进而栖息地质量上升,适宜的栖息地面积较多; PDO 位于暖位相时,东太平洋偏暖,茎柔鱼渔场水温变暖,海面高度上升,适宜的温度和海面高度范围减小,进而栖息地质量下降,适宜的栖息地面积较小。

本研究仅选用了 SST 和 SSHA 两个环境因子构建 HSI 模型,HSI 模型不可避免地会有一些的偏差,我们需要考虑每个环境因子的作用,在下一步的研究中我们可以考虑加入叶绿素、海表面盐度等因子。此外,由于我国秘鲁外海茎柔鱼渔场的生产数据没有达到长时间尺度的条件,所以缺少了与环境数据的对比,今后我们应该通过国际合作收集更多的渔业数据,能够更好地对海洋环境以及气候对于渔场的影响进行大尺度的分析。

#### 参考文献:

- [1] 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,2005:240-264.  
Wang Yaogeng, Chen Xinjun. The Resource and Fishery of World Oceanic Economic Squid[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 240-264.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 钱卫国,陈新军,郑波,等.智利外海茎柔鱼资源密度分布与渔场环境的关系[J].上海水产大学学报,2008,17(1):98-103.  
Qian Weiguo, Chen Xinjun, Zheng Bo, et al. Study on the resource density distribution of *Dosidicus gigas* and marine environment in the high sea waters off Chile[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(1): 98-103.
- [5] 叶旭昌,陈新军.秘鲁外海茎柔鱼胴长组成及性成熟初步研究[J].上海水产大学学报,2007,16(4):347-350.  
Ye Xuchang, Chen Xinjun. Study of mantle length composition and sex maturity of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) in fishing ground off Peru[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, 16(4): 347-350.
- [6] 刘必林,陈新军,钱卫国.智利外海茎柔鱼生物学特性的初步研究[J].广东海洋大学学报,2009,29(1):1-5.  
Liu Bilin, Chen Xinjun, Qian Weiguo. Biological characteristic of *Dosidicus gigas* off Chile waters[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2009, 29(1): 1-5.
- [7] Markaidea U, Quiñónez-Velázquez C, Sosa-Nishizaki O. Age, growth and maturation of jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) from the Gulf of California, Mexico[J]. *Fisheries Research*, 2004, 66(1): 31-47.
- [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] 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.
- [10] 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 Yingqi, et al. Forecasting fishing ground of *Dosidicus gigas* based on habitat suitability index off Peru[J]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(5): 67-75.
- [11] 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.
- [12] Miller A J, Chai F, Chiba S, et al. Decadal-scale climate and ecosystem interactions in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(1): 163-188.
- [13] 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.  
Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian. 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.
- [14] 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.  
Wu Shengnan, Yu Wei, Chen Xinjun. 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.
- [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] Tian S Q, Chen X J, Chen Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommatrephe bratramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2009, 95(2/3): 181–188.
- [17] 何鹏程, 江静. PDO对西北太平洋热带气旋活动与大尺度环流关系的影响[J]. *气象科学*, 2011, 31(3): 266–273.  
He Pengcheng, Jiang Jing. Effect of PDO on the relationships between large scale circulation and tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(3): 266–273.
- [18] 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 太平洋年代际振荡冷、暖背景下ENSO循环的特征[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(2): 238–249.  
Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. The characteristics of ENSO cycle in different phases of Pacific Decadal Oscillation[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(2): 238–249.
- [19] Zwolinski J P, Demer D A. Environmental and parental control of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) recruitment[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2013, 71(8): 2198–2207.
- [20] 张衡, 樊伟, 崔雪森. 北太平洋长鳍金枪鱼延绳钓渔场分布及其与海水表层温度的关系[J]. *渔业科学进展*, 2011, 32(6): 1–6.  
Zhang Heng, Fan Wei, Cui Xuesen. Relationship of distribution of albacore *Thunnus alalunga* longline fishery grounds and sea surface temperature in the North Pacific Ocean[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(6): 1–6.
- [21] Phillips A J, Ciannelli L, Brodeur R D, et al. Spatio-temporal associations of albacore CPUEs in the Northeastern Pacific with regional SST and climate environmental variables[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(7): 1717–1727.
- [22] Mantua N J, Hare S R. The Pacific Decadal Oscillation[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 35–44.
- [23] Mosek H G, Charter R L, Watson W, et al. Abundance and distribution of rockfish (*Sebastes*) larvae in the Southern California Bight in relation to environmental conditions and fishery exploitation[R]. The California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report, 2000, 41: 132–147.

## Decadal variations in habitat suitability of *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru

Wen Jian<sup>1</sup>, Lu Xinyi<sup>1</sup>, Yu Wei<sup>1,2,3,4</sup>, Chen Xinjun<sup>1,2,3,4</sup>, Liu Bilin<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. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** *Dosidicus gigas* is an important fishing target by Chinese squid-jigging fisheries, which is widely distributed in the Southeast Pacific Ocean. Its population is largely affected by climatic and environmental conditions on the fishing ground. In this study, we calculated the habitat suitability index (HSI) on the fishing ground of *D. gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru from January to December during 1950 to 2015 based on sea surface temperature (SST) and the anomalies of sea surface height (SSHA), and variability in the environmental variables and habitat quality were further analyzed under the warm and cold phases of the Pacific Decadal Oscillation (PDO). The results suggested that PDO showed cold, warm and cold phases from 1950 to 2015. The anomalies of SST (SSTA) and SSHA during the cold PDO were significantly lower than those during the warm PDO. The cross correlation analysis suggested that both the SSTA and the SSHA were significantly positively correlated with the PDO index. However, and the HSI values on the fishing ground of *D. gigas* were significantly negatively correlated with the PDO index, SSTA and SSHA. During the cold PDO, the water temperature became cold, and the SSH decreased, these changes led to enlarged areas of suitable SST and SSHA for *D. gigas*, therefore, the favorable habitats largely increased. However, during the warm PDO, the water temperature became warm, the SSH elevated, whereas the ranges of suitable SST and SSHA contracted, all these changes resulted in the decrease of the suitable habitat of *D. gigas*. Our findings suggested that PDO regulated the environmental conditions on the fishing ground of *D. gigas* off Peru, and further significantly affected the habitat quality and suitable ranges of the habitat.

**Key words:** *Dosidicus gigas*; habitat suitability; Pacific Decadal Oscillation; spatio-temporal distribution; Peru