

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20162

## 不同气候模态下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的季节性分布

温健<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 余为<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 陈新军<sup>1, 2, 3, 4</sup>

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学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省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 上海海洋大学远洋渔业协同创新中心, 上海 201306

**摘要:** 茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)为环境敏感型头足类, 气候的多元变化促使茎柔鱼栖息地发生变动。本研究利用海表温度(SST)和海表面高度(SSHA)两个关键环境因子构建栖息地适宜性指数(HSI)模型, 结合太平洋年代际涛动(PDO)指数, 分析 1950—2015 年不同气候模态下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的季节性分布规律。结果发现, PDO 冷期茎柔鱼栖息地适宜性较高; 而 PDO 暖期栖息地适宜性较低。相较于 PDO 冷期, PDO 暖期下茎柔鱼适宜栖息地分布向东南移动。适宜栖息地的分布位置与适宜的 SST 和 SSHA 的重叠区域重合, 表明两个关键环境因子与栖息地分布显著相关。此外, 适宜栖息地指数距平均值与 PDO 指数的年际变化呈显著负相关关系。春季茎柔鱼渔场栖息地适宜性高于冬季, 且冬季适宜栖息地的分布相较春季偏东南方向。茎柔鱼渔场 6—11 月适宜的 SST 和最适宜的 SST 在经度和纬度上的分布存在显著差异, 春季(9—11 月)最适宜的 SST 分布逐月向西北方向移动; 冬季(6—8 月)最适宜的 SST 分布逐月向东南方向移动。推测不同气候模态下茎柔鱼栖息地季节性分布差异, 可能是由于最适宜的 SST 显著的月间分布差异所致。研究表明, 不同 PDO 时期下茎柔鱼栖息地适宜性具有显著季节性差异, 其差异可由环境因子的月间变动来解释。

**关键词:** 茎柔鱼; 栖息地适宜性; 气候; 太平洋年代际涛动; 季节变化

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)12-1464-13

东太平洋具有复杂多变的海洋环境, 北美洲和南美洲沿岸由两个低速洋流系统, 加利福尼亚洋流和洪堡洋流组成, 在赤道海域由北赤道流、南赤道流及赤道逆流组成<sup>[1]</sup>。茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)作为大洋性经济头足类, 广泛分布于东太平洋<sup>[2]</sup>。据 FAO 统计, 2018 年茎柔鱼总产量为 89.2 万 t, 茎柔鱼渔业作为我国远洋渔业的重要组成部分, 2018 年产量达 34.6 万 t。茎柔鱼生命周期短、生长速度快, 其生活史具有高度可塑性<sup>[3]</sup>。由于茎柔鱼寿命短的特性, 其易受气候和局部海洋环境变化的影响<sup>[4]</sup>。已有研究表明, 气候及海洋环境变

化对茎柔鱼种群结构<sup>[5]</sup>、年龄与生长<sup>[6-7]</sup>、繁殖<sup>[3]</sup>、营养级<sup>[8]</sup>等生物学习性产生重要影响。

茎柔鱼资源丰度具有显著的年间差异, 这可能与东太平洋多尺度的气候变化相关<sup>[9]</sup>。ENSO (El Niño-Southern oscillation)现象具有年际变动, 特别是在厄尔尼诺和拉尼娜事件发生时, 茎柔鱼渔场环境发生显著变化, 进而使得茎柔鱼产量变动<sup>[10-11]</sup>。太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)相较 ENSO 现象变化频率较低, 是太平洋长期气候变化信号<sup>[12]</sup>。以海表温度(sea surface temperature, SST)异常定义不同 PDO 时期,

收稿日期: 2020-05-22; 修订日期: 2020-06-09.

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).

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, 博士, 讲师, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: wyu@shou.edu.cn

PDO 冷期时, 北太平洋西北部和中部海域异常变暖, 而东太平洋海域和北美沿岸海域异常变冷; PDO 暖期时与 PDO 冷期相反<sup>[12-13]</sup>。不同气候模态下海洋环境差异显著, 气候模态的转变对头足类资源丰度变化具有重要影响, 以往研究表明枪乌贼(*Loligo bleekeri*)<sup>[14]</sup>和西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)<sup>[15]</sup>等头足类资源分布与气候模态转变相关。目前对于 PDO 现象影响茎柔鱼渔场环境的研究甚少, 本研究基于长时间序列数据, 探讨不同 PDO 时期下秘鲁外海茎柔鱼渔场环境的季节性变化, 并通过分析关键环境因子的月间变化, 探索茎柔鱼渔场季节性变化的可能原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

环境数据包括海表温度(SST)和海表面高度(sea surface height, SSH), 数据时间范围为 1950—2015 年 1—12 月, 时间分辨率为月。数据的空间分布范围为 8°S~20°S、95°W~75°W, 空间分辨率均通过插值转化为 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>)。太平洋年代际涛动(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(JISAO)网站(<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>)。

### 1.2 分析方法

(1)计算海表面高度距平值(SSHA), 依据 Yu 等<sup>[16]</sup>建立的适宜性指数(suitability index, SI)模型, 计算茎柔鱼渔场海域适宜的海表温度(SI-SST)和适宜的海表面高度距平值(SI-SSHA)。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  $SI_{SSHA}$  分别为 SST 和 SSHA 的适宜性指数。定义  $HSI \geq 0.6$  的海域为茎柔鱼适宜的栖息地<sup>[17-18]</sup>。将茎柔鱼渔场 HSI 值按照季节分别平均, 绘制春季和冬季茎柔鱼栖息地气候态分布图, 分析其空间分布特征。

(2) 1950—2015 年 PDO 经历冷、暖、冷 3 个时期, 其中 1950—1976 年为 PDO 冷期, 1977—1998 年为 PDO 暖期, 1999—2015 年为 PDO 冷期<sup>[13]</sup>。分别对 3 个时期茎柔鱼渔场 HSI 值进行平均并计算与(1)中气候态值的差值, 分析不同气候模态下, 春季和冬季茎柔鱼渔场 HSI 的空间分布规律及与气候态差异的变化情况。

(3)定义各环境因子的适宜性指数  $SI \geq 0.6$  为茎柔鱼渔场适宜的环境条件<sup>[19]</sup>, 绘制不同气候模态下适宜的 SST 和 SSHA 的空间分布, 分析两种适宜环境条件及重叠海域的分布范围。基于(1)中 1950—2015 年的 HSI 值, 计算栖息地适宜性指数距平值(HSIA), 将各年的 HSIA 值与 PDO 指数按照季节进行平均, 对比分析其变化趋势。

(4)计算不同气候模态下, 春季和冬季茎柔鱼渔场适宜的栖息地( $HSI \geq 0.6$ )在经度和纬度的出现频次, 分析不同气候模态及不同季节栖息地在空间上的变动。分别计算春季和冬季各月(即 6—11 月)不同气候模态下, 茎柔鱼渔场  $SI-SST \geq 0.6$  及最适宜的 SST 在经度和纬度上的分布情况, 对比分析各月及不同气候模态下适宜环境条件的变化。分别绘制不同气候模态下茎柔鱼渔场 6—11 月各月最适宜 SST 等值线空间分布图, 分析最适宜 SST 的分布特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 春季和冬季气候态栖息地分布

图 1 为茎柔鱼渔场春季和冬季气候态栖息地分布, 对比发现春季适宜的栖息地面积显著高于冬季, 且春季适宜栖息地的分布范围较广, 经度在 94°W~77°W 范围内均有分布, 纬度相对偏南分布, 整体呈现由北向南栖息地适宜性逐渐增强的趋势。冬季适宜栖息地面积相对较小, 集中分布在 88°W~77°W, 13°S~20°S 的海域, 栖息地适宜性整体呈现偏向东南增强的趋势。

### 2.2 不同气候模态下春季和冬季栖息地分布差异分析

1950—2015 年经历 3 个 PDO 时期, 不同时期下春季和冬季茎柔鱼渔场存在显著差异(图 2)。1950—1976 年和 1999—2015 年 PDO 冷期下, 春

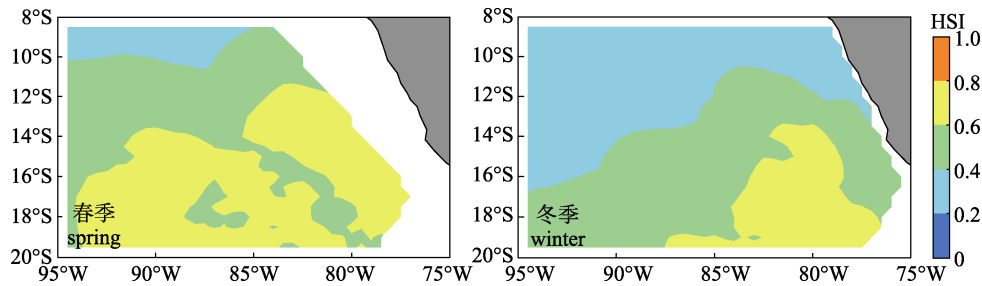


图 1 春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼 HSI 气候态分布

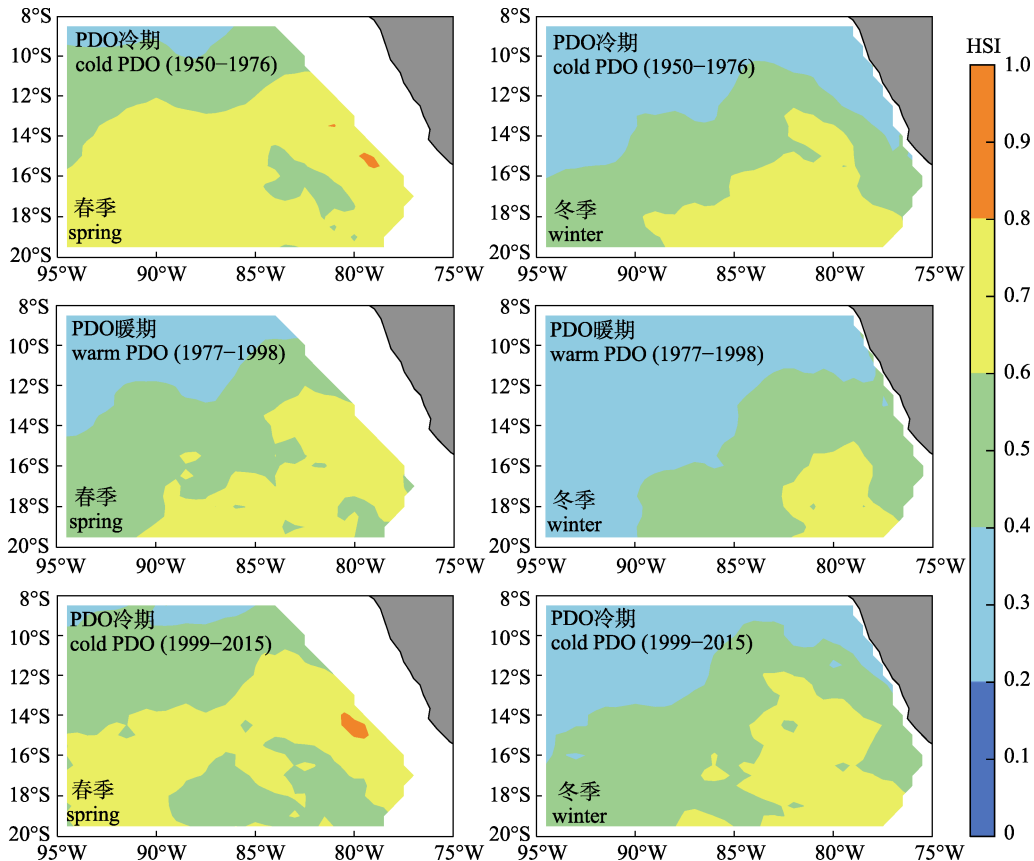
Fig. 1 Climatological distribution of HSI of *Dosidicus gigas* off Peru in spring and winter

图 2 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼栖息地分布

Fig. 2 Spatial distribution of habitat of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter

春季和冬季茎柔鱼渔场的适宜栖息地面积均显著高于 1977—1998 年 PDO 暖期。可以看出在 PDO 冷期下, 春季茎柔鱼渔场 HSI 值出现少许  $HSI \geq 0.8$  的海域, 且春季和冬季栖息地整体适宜性增加。结合不同时期 HSI 值与气候态值的差异图(图 3)发现, PDO 冷期下春季和冬季渔场 HSI 值相较气候态值偏高; PDO 暖期下 HSI 值相较气候态值偏低。进一步表明 PDO 冷期春季和冬季茎柔鱼渔场的栖息地适宜性升高; 而 PDO 暖期栖息地适宜性降低。

茎柔鱼渔场两个关键环境因子的适宜环境条件空间分布如图 4 所示, 对比发现茎柔鱼渔场春季适宜的 SST 和 SSHA 分布范围均比冬季广泛。PDO 冷期下春季和冬季茎柔鱼渔场适宜的 SST 和 SSHA 分布相较 PDO 暖期也更广泛, 且重叠区域也相对更多。PDO 冷期下, 春季茎柔鱼栖息地适宜的 SST 和 SSHA 的重叠区域主要分布于  $85^{\circ}W \sim 77^{\circ}W$ 、 $12^{\circ}S \sim 18^{\circ}S$  和  $95^{\circ}W \sim 85^{\circ}W$ 、 $12^{\circ}S \sim 16^{\circ}S$  两个海域。PDO 暖期下, 重叠区域仅分布于  $83^{\circ}W \sim$

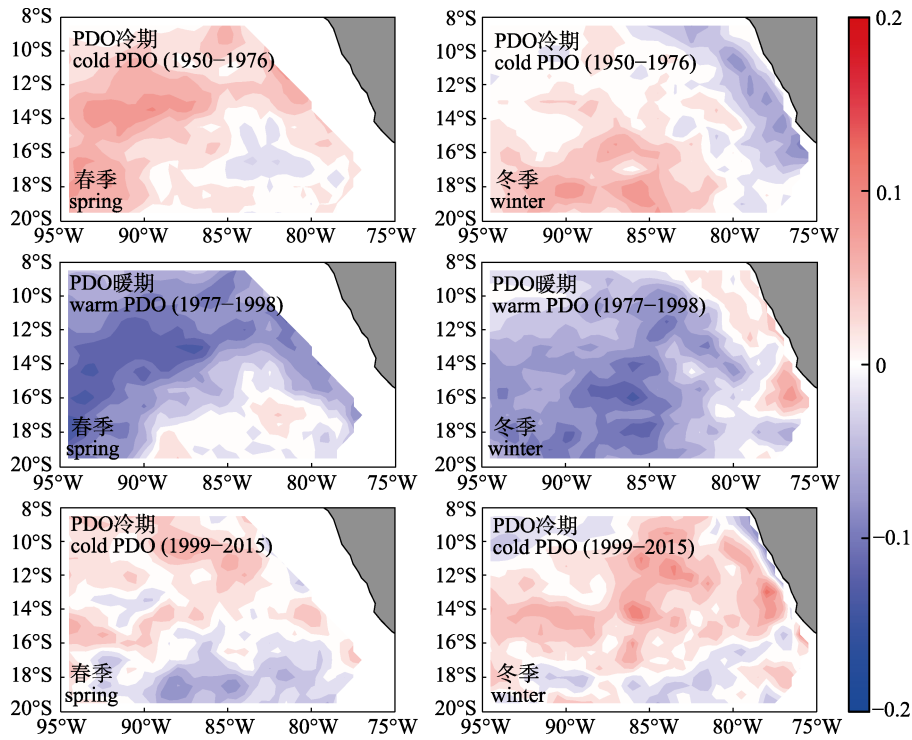


图 3 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼 HSI 与气候态值的差异

Fig. 3 Difference between HSI of *Dosidicus gigas* off Peru and its climatological value under different PDO periods in spring and winter

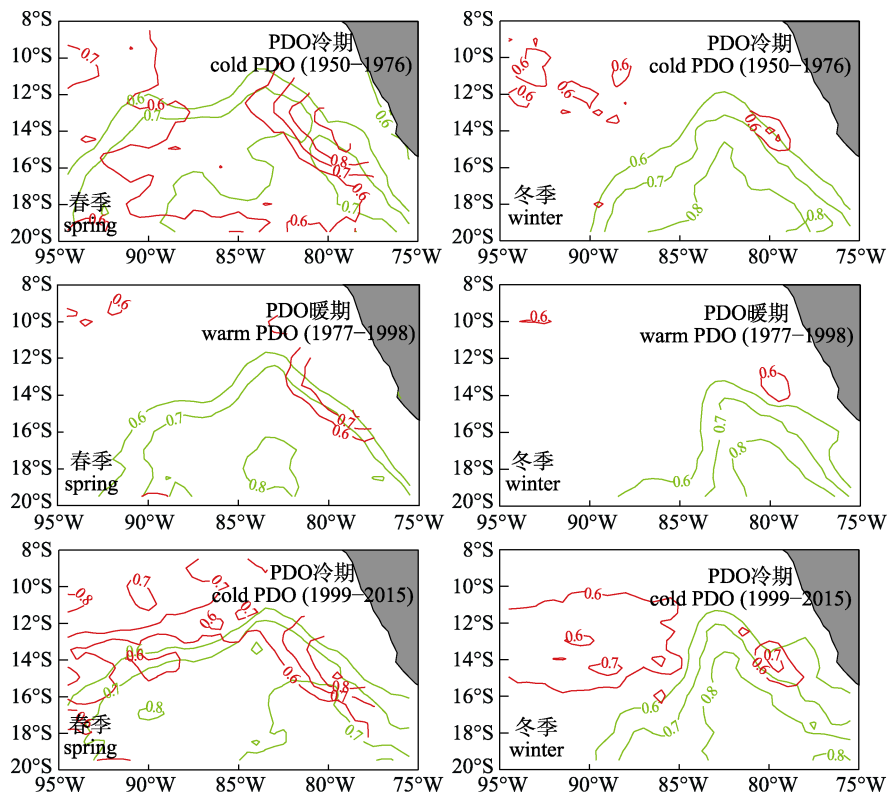


图 4 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼渔场基于 SST(绿线)和 SSHA(红线)的适宜 SI (SI ≥ 0.6)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the areas of suitable index (SI ≥ 0.6) based on SST (green line), and SSHA (red line) on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter

77°W、12°S~16°S 的海域。冬季茎柔鱼栖息地适宜的 SST 和 SSHA 的重叠区域少, PDO 冷期仅分布于 81°W~79°W、13°S~15°S 的海域, PDO 暖期没有重叠区域。与图 2 对比发现, 重叠区域与适宜栖息地的分布位置大部分重合, 表明栖息地与

SST 和 SSHA 的空间分布显著相关。1950—2015 年茎柔鱼渔场 HSIA 和 PDO 指数的年际变化趋势呈现负相关关系(图 5), 表明 PDO 冷期时茎柔鱼渔场栖息地较为适宜, PDO 暖期时茎柔鱼渔场栖息地较为不利。

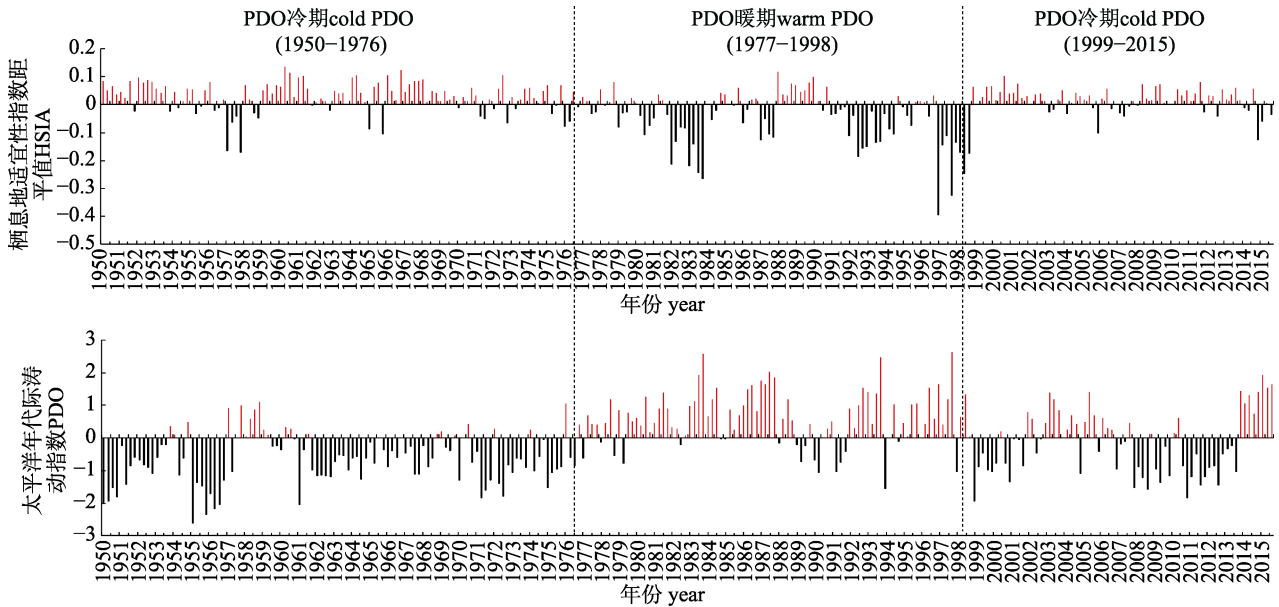


图 5 1950—2015 年 PDO 指数以及秘鲁茎柔鱼渔场 HSIA 的年际变化

Fig. 5 Interannual variability in the PDO index, HSIA on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru during 1950-2015

### 2.3 不同气候模态下春季和冬季栖息地空间位置分析及其成因

图 6 为不同 PDO 时期春季和冬季茎柔鱼适宜栖息地在经度和纬度的空间分布。PDO 冷期下, 春季茎柔鱼适宜栖息地在经度上的分布较为平均, 纬度上 1950—1976 年相比 1999—2015 年更为平均, 秋季适宜栖息地在经度和纬度上分布明显少于春季, 且分别向东和南移动; PDO 暖期下, 春季适宜栖息地相较于 PDO 冷期在经度上分布相对偏少, 且明显向东移动, 在纬度上分布也偏少, 具有向南移动的趋势, 秋季适宜栖息地在经度和纬度上分布较少, 明显向东和向南移动。

分析 6—11 月各月适宜的 SST 在经度和纬度的分布情况(图 7), 春季(9—11 月)适宜 SST 分布较为平均, 仅有 10 月分布在经度上偏东, 在纬度上偏南。而冬季(6—8 月)适宜的 SST 分布在经度上明显向东移动, 在纬度上明显向南移动。相较于 PDO 冷期, PDO 暖期下春季(9—11 月)和冬季(6—8

月)均在经度上向东移动, 在纬度上向南移动。

分析 6—11 月各月最适宜的 SST 在经度和纬度的分布情况(图 8), 明显看出春季(9—11 月)最适宜的 SST 的分布较冬季(6—8 月)更广泛, 且冬季在经度上偏东, 在纬度上偏南。相较于 PDO 冷期, PDO 暖期最适宜的 SST 分布较少, 在 7—9 月最显著。春季(9—11 月)最适宜 SST 等值线分布逐月向西北方向移动, 冬季(6—8 月)最适宜的 SST 等值线分布逐月向东南方向移动。相较于 PDO 冷期, PDO 暖期 6—11 月各月最适宜的 SST 等值线均明显向东南方向移动(图 9)。

### 3 讨论

栖息地适宜性指数(HSI)模型能够评估大洋性鱼类栖息地质量, 近年来在渔业科学中被广泛应用<sup>[20]</sup>。本研究依据 Yu 等<sup>[16]</sup>建立的 SI 模型, 选取 SST 和 SSHA 两个关键环境因子作为 HSI 模型的输入参数, SST 通常作为研究茎柔鱼栖息地变

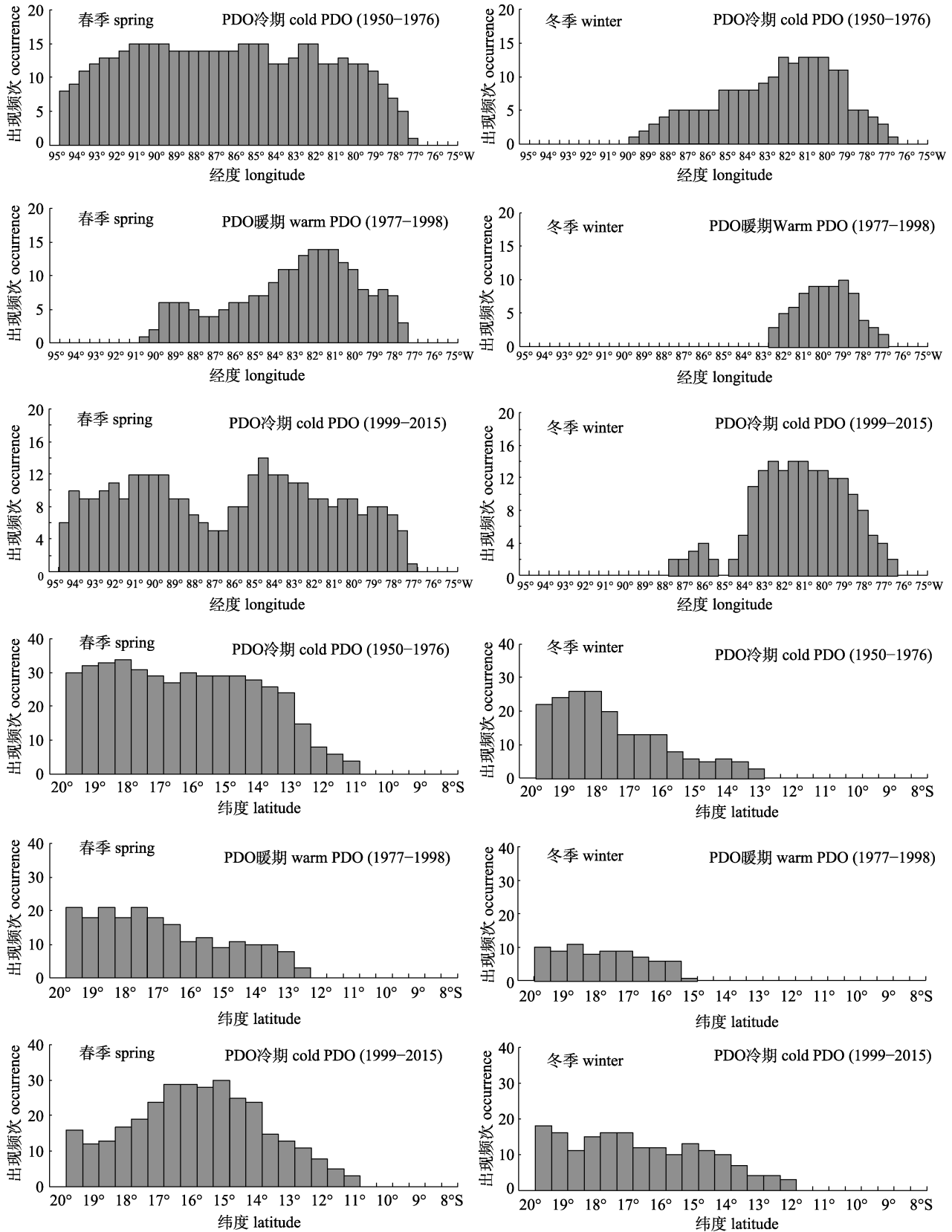
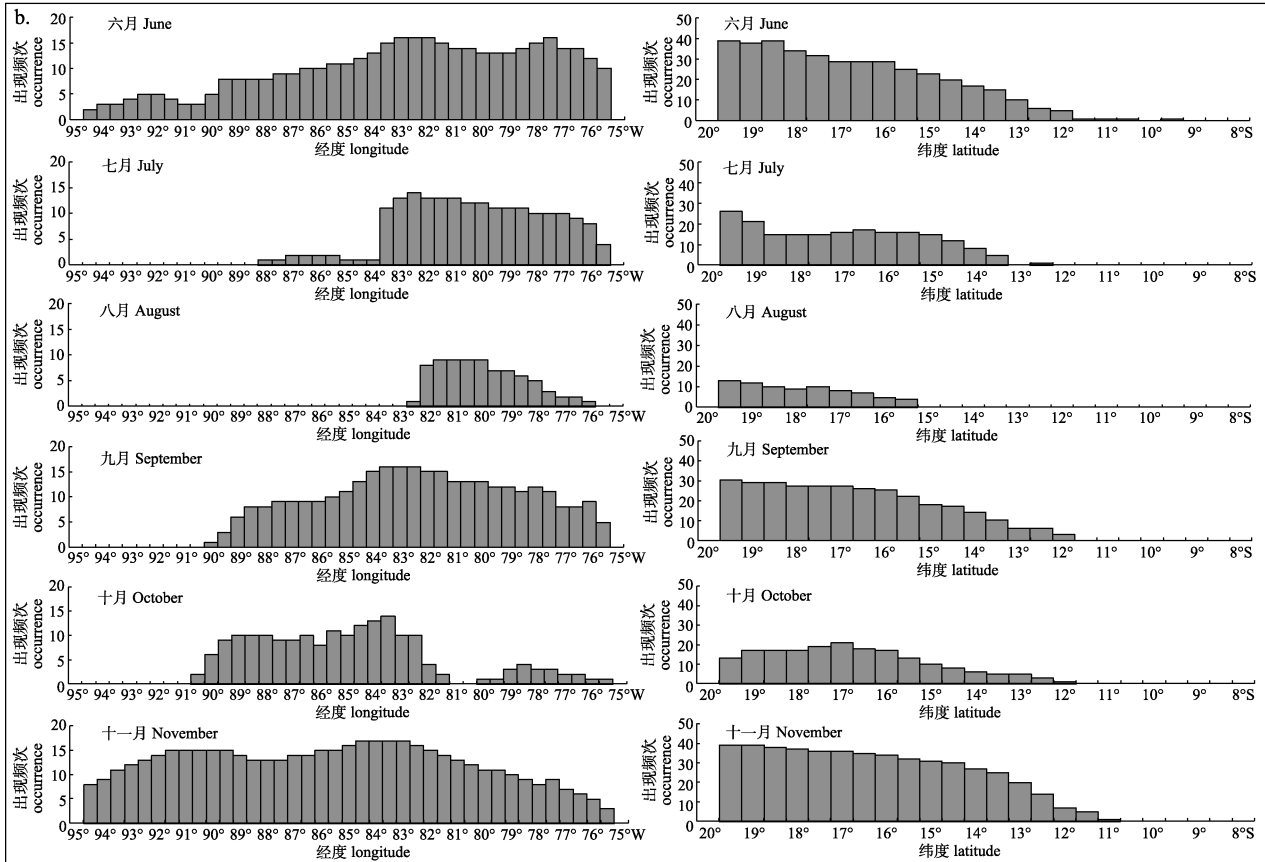
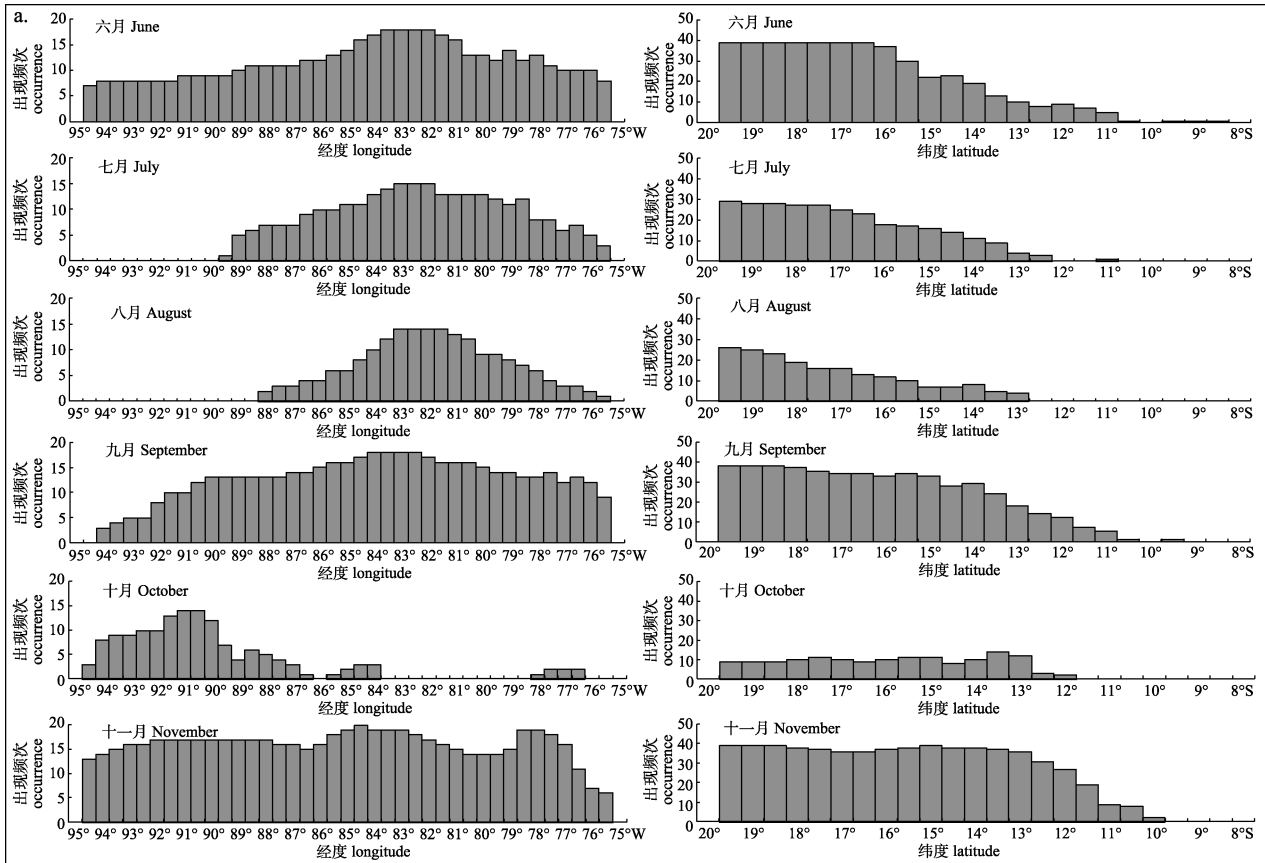


图 6 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海荃柔鱼适宜栖息地(HSI ≥ 0.6)在经度和纬度上的分布频次

Fig. 6 The occurrence of suitable habitats (HSI ≥ 0.6) of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter in relation to the longitude and latitude



(待续 to be continued)

(续图 continued)

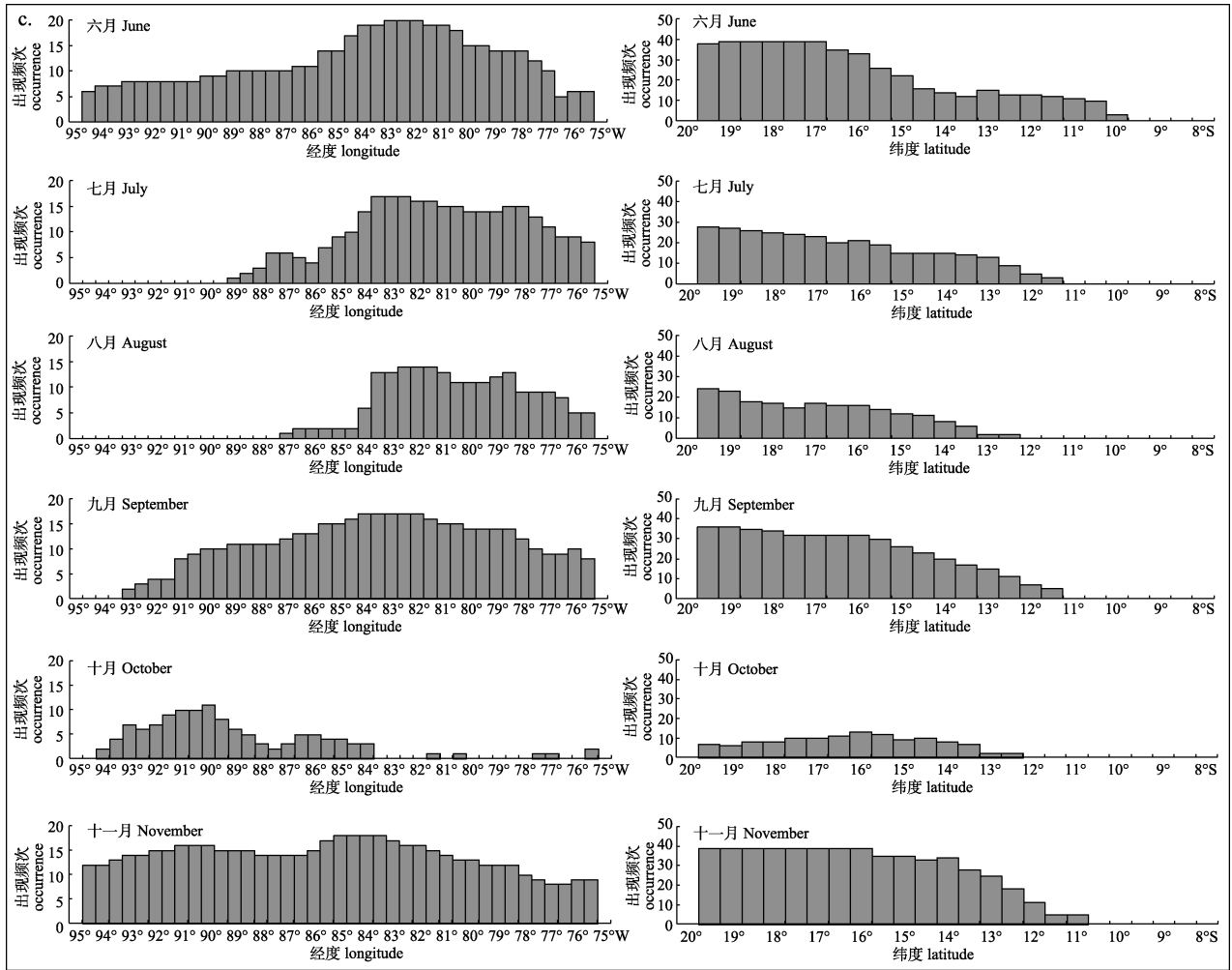


图 7 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼适宜的 SST 在经度和纬度上的分布频次  
a. PDO 冷期(1950–1976); b. PDO 暖期(1977–1998); c. PDO 冷期(1999–2015).

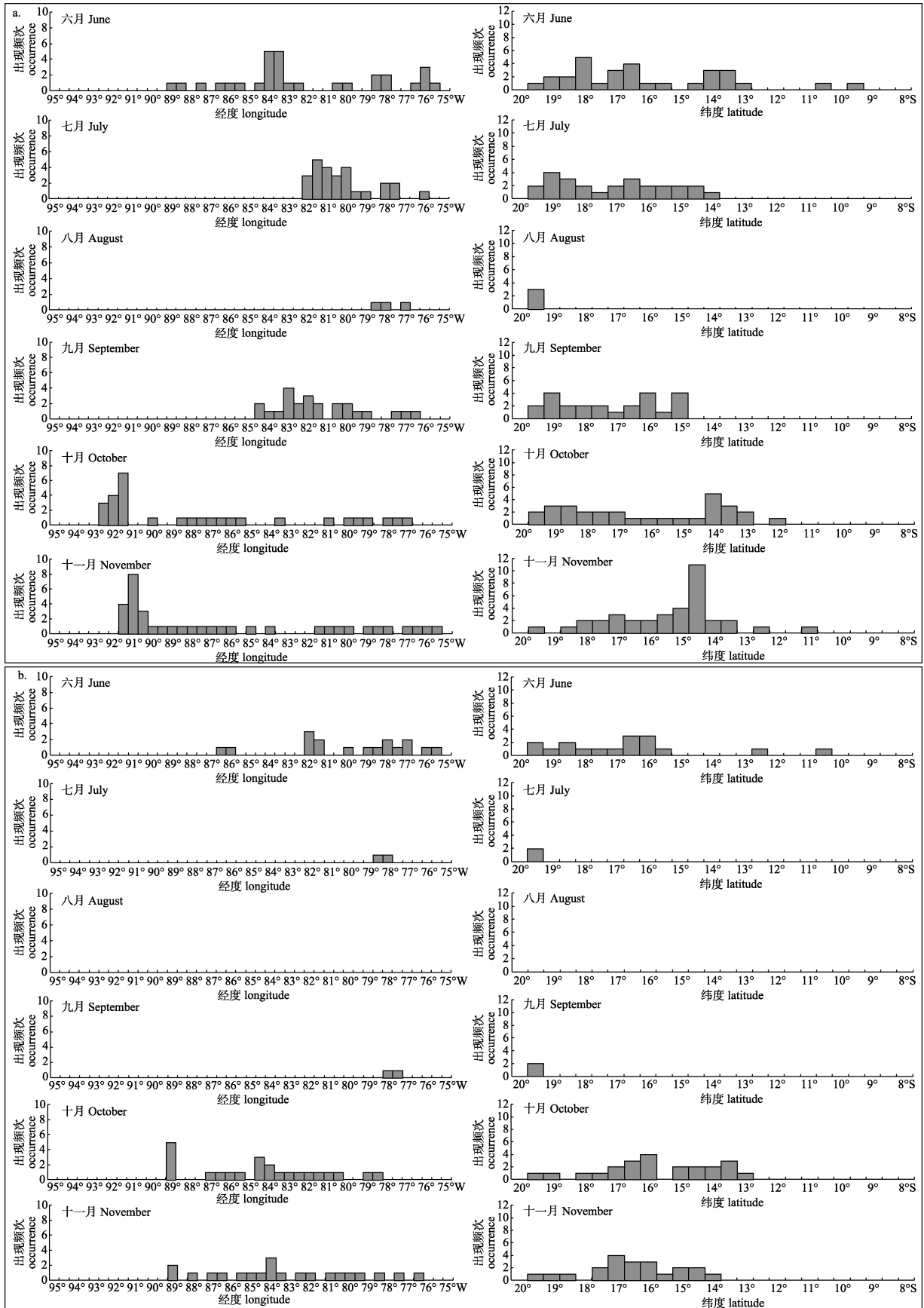
Fig. 7 The occurrence of suitable SST (SI-SST ≥ 0.6) of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter in relation to the longitude and latitude  
a. the cold PDO (1950–1976); b. the warm PDO (1977–1998); c. the cold PDO (1999–2015).

动最基本的环境因子, 由于其对茎柔鱼资源分布的显著影响<sup>[21]</sup>。海表面高度也作为影响茎柔鱼栖息地关键要素之一, 涡流活动促进水团垂直混合, 可能改变海洋表面营养盐浓度及初级生产力水平, 进而影响茎柔鱼的资源丰度<sup>[15]</sup>。本研究基于算术平均法构建 HSI 模型, 主要由于其较为平均地反映各环境因子的影响程度, 且近年来在较多鱼类适宜栖息地预测中得到成功应用, 预测结果较为准确<sup>[22-23]</sup>。本研究利用 HSI 模型分析秘鲁外海茎柔鱼渔场春季和冬季适宜栖息地的空间分布, 研究发现春季适宜的栖息地面积显著高于冬季且分布范围较广。Yu 等<sup>[19]</sup>利用 2006—2015 年 SST、

SSHA 和净初级生产力(NPP)构建 HSI 模型, 研究发现茎柔鱼栖息地适宜性具有显著季节性变化, 春秋季节期间适宜栖息地面积增加, 而冬季适宜栖息地面积减少, 这与本文研究结果一致。

茎柔鱼对栖息地环境条件变化较敏感<sup>[24]</sup>。已有较多研究表明, 厄尔尼诺和拉尼娜事件的交替变化对茎柔鱼的资源分布有显著影响<sup>[1,25]</sup>。Yu 等<sup>[16]</sup>分析不同气候条件下环境变化对茎柔鱼栖息地适宜性的影响, 研究发现厄尔尼诺事件期间上升流势力减弱, 渔场水温变暖, 适宜的环境范围缩小, 致使适宜栖息地面积减小; 拉尼娜事件期间上升流势力增强, 渔场水温变冷, 适宜的环境范围增





(待续 to be continued)

(续图 continued)

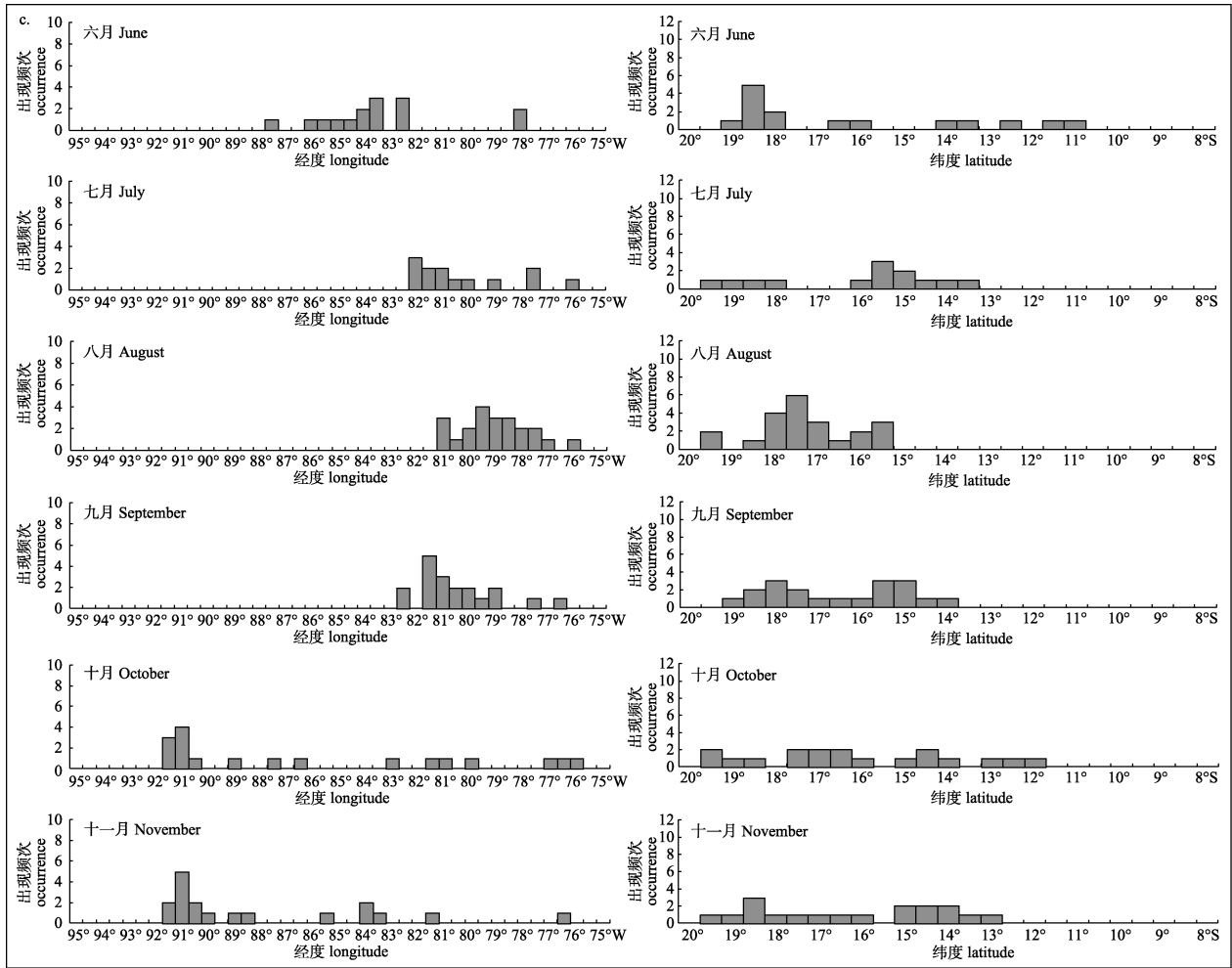


图 8 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼最适宜的 SST 在经度和纬度上的分布频次  
 a. PDO 冷期(1950-1976); b. PDO 暖期(1977-1998); c. PDO 冷期(1999-2015).

Fig. 8 The occurrence of the most suitable SST of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter in relation to the longitude and latitude  
 a. the cold PDO (1950-1976); b. the warm PDO (1977-1998); c. the cold PDO (1999-2015).

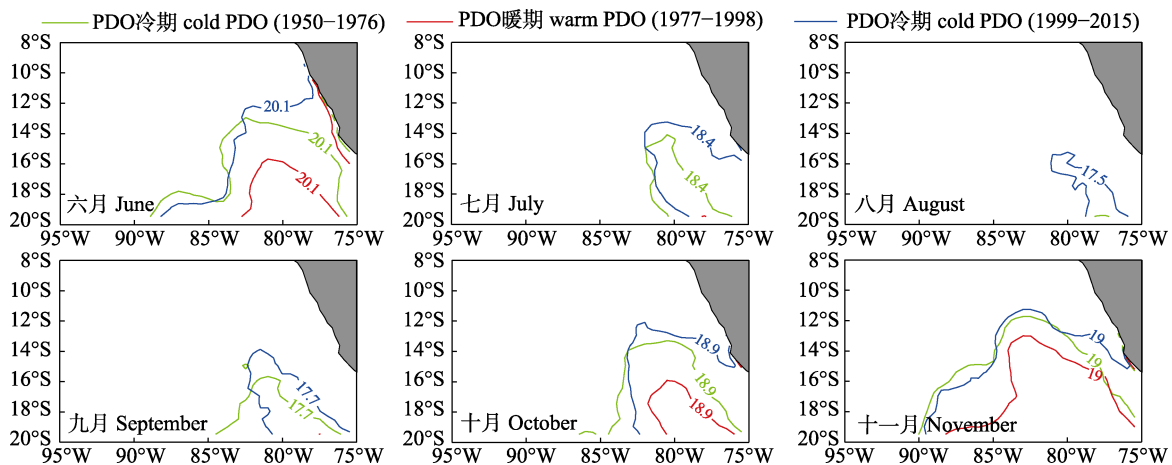


图 9 不同 PDO 时期春季和冬季秘鲁外海茎柔鱼最适宜的 SST 等值线分布

Fig. 9 Spatial distribution of the isoline of the most suitable SST of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO periods in spring and winter

加, 适宜栖息地面积增加。PDO 冷期与 PDO 暖期太平洋环境条件具有显著差异, 北太平洋西北部和中部海域在 PDO 冷期异常变暖, PDO 暖期异常变冷<sup>[13]</sup>。Yu 等<sup>[26]</sup>结合 1995—2011 年西北太平洋柔鱼的生产数据, 分析 PDO 对其栖息地环境的影响, 研究发现 PDO 与柔鱼渔场 SST、SSH 及 CPUE 的纬度重心之间具有显著相关性, PDO 暖期下柔鱼渔场水温变冷, 海表面高度降低, CPUE 纬度重心向南移动; PDO 冷期下柔鱼渔场水温变暖, 海表面高度升高, CPUE 纬度重心向北移动。东太平洋在不同 PDO 时期下环境变化也显著, PDO 冷期下东太平洋海域和北美沿岸海域异常变冷; PDO 暖期下东太平洋海域和北美沿岸海域异常变暖<sup>[13]</sup>。而目前 PDO 对茎柔鱼渔场环境的研究甚少, Litz 等<sup>[27]</sup>研究表明, 北加利福尼亚洋流海域的茎柔鱼季节性分布与 PDO 现象相关, 茎柔鱼分布密度与 SST 和 PDO 趋势相同。本研究发现, PDO 冷期茎柔鱼渔场适宜的环境范围增加, 栖息地适宜性升高; 而 PDO 暖期适宜的环境范围减少, 栖息地适宜性降低, 适宜栖息地的分布偏东南方向。

此外, 研究发现茎柔鱼渔场春季和冬季栖息地适宜性有显著差异, 推测原因可能为茎柔鱼渔场适宜的环境范围缩减, 冬季茎柔鱼渔场适宜的 SSHA 范围明显较春季减少, 且适宜的 SST 和 SSHA 的重叠范围明显减少。春季茎柔鱼适宜栖息地在经度上分布相较冬季更为平均, 冬季适宜栖息地明显向东移动, 在纬度上明显向南移动。适宜的栖息地空间分布主要受环境条件变化的调控, 以往的研究发现, 太平洋头足类栖息地季节性空间分布差异与适宜的环境分布位置有较强的相关性, 环境条件的月间差异也促使栖息地适宜性差异显著<sup>[19,28]</sup>。唐峰华等<sup>[29]</sup>研究发现柔鱼渔场重心与月间 SST 差异有显著关系, 且具有明显的季节性变化。本研究分析 6—11 月适宜的 SST 的空间分布发现, 春季(9—11 月)适宜 SST 分布相对较为平均, 而冬季(6—8 月)适宜 SST 分布逐渐向东南方向移动。通过进一步分析最适宜的 SST 空间分布发现, 春季(9—11 月)最适宜的 SST 分布逐渐向西北方向移动, 而冬季(6—8 月)最适宜的 SST 分布逐渐向东南方向移动。推测春季和冬季

茎柔鱼适宜栖息地的空间分布差异可能是由于适宜的 SST 的月间分布差异所致。研究表明, 不同气候模态(PDO 冷期和暖期)下秘鲁外海茎柔鱼栖息地适宜性发生显著的季节性变化。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Medellín-Ortiz A, Cadena-Cárdenas L, Santana-Morales O. Environmental effects on the jumbo squid fishery along Baja California's west coast[J]. Fisheries Science, 2016, 82(6): 851-861.
- [3] Ramos J E, Ramos-Rodriguez A, Bazzino Ferreri G, et al. Characterization of the northernmost spawning habitat of *Dosidicus gigas* with implications for its northwards range extension[J]. Marine ecology progress series, 2017, 572: 179-192.
- [4] Ibáñez C M, Argüelles J, Yamashiro C, et al. Population dynamics of the squids *Dosidicus gigas* (Oegopsida: Ommastrephidae) and *Doryteuthis gahi* (Myopsida: Loliginidae) in northern Peru[J]. Fisheries Research, 2015, 173(2): 151-158.
- [5] Markaida U. Population structure and reproductive biology of jumbo squid *Dosidicus gigas* from the Gulf of California after the 1997-1998 El Niño event[J]. Fisheries Research, 2006, 79(1): 28-37.
- [6] Hu G, Yu W, Li B, et al. Impacts of El Niño on the somatic condition of Humboldt squid based on the beak morphology[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37: 1440-1448.
- [7] Keyl F, Argüelles J, Tafur R. Interannual variability in size structure, age, and growth of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) assessed by modal progression analysis[J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(3): 507-518.
- [8] Portner E J, Markaida U, Robinson J C, et al. Trophic ecology of Humboldt squid, *Dosidicus gigas*, in conjunction with body size and climatic variability in the Gulf of California, Mexico[J]. Limnology and Oceanography, 2020, 65: 732-748.
- [9] Heppell S S, Chesney T A, Montero J, et al. Interannual variability of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) off Oregon and Southern Washington[J]. Cal-COFI Reports, 2013, 54: 180-191.
- [10] 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.
- [11] Wen J, Qian M T, Yu W, et al. Habitat variations of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru under the El Niño and La Niña events with different intensity[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(9): 1095-1103. [温健, 钱梦婷, 余为, 等. 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[J]. 中国水产科学, 2020, 27(9): 1095-1103.]
- [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] Wu C R. Interannual modulation of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2013, 110: 49-58.
- [14] Tian Y J, Nashida K, Sakaji H. Synchrony in the abundance trend of spear squid *Loligo bleekeri* in the Japan sea and the Pacific Ocean with special reference to the latitudinal differences in response to the climate regime shift[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 968-979.
- [15] 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.]
- [16] 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.
- [17] Chen X J, Tian S Q, Chen Y, et al. A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. Fishery Bulletin. 2010, 108: 1-15.
- [18] Chang Y J, Sun C L, Chen Y, et al. Modelling the impacts of environmental variation on the habitat suitability of swordfish, *Xiphias gladius*, in the equatorial Atlantic Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(5): 1000-1012.
- [19] 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.
- [20] Hua C X, Li F, Zhu Q C, et al. Habitat suitability of Pacific saury (*Cololabis saira*) based on a yield-density model and weighted analysis[J]. Fisheries Research, 2020, 221: 105-408.
- [21] Hu Z M, Chen X J, Zhou Y Q. Distribution of fishing ground of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) and its relationship with structure of seawater temperature in the waters off Peru[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(5): 770-777. [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.]
- [22] Yen K W, Wang G, 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.
- [23] Li G, Chen X J, Lei L, et al. Distribution of hotspots of chub mackerel based on remote-sensing data in coastal waters of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12): 4399-4421.
- [24] 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(2): 122-127.
- [25] 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.
- [26] Yu W, Chen X J, Yi Q, et al. Impacts of climatic and marine environmental variations on the spatial distribution of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35: 108-116.
- [27] Litz M N, Phillips A J, Brodeur R D, et al. Seasonal occurrences of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) in the northern California Current System[J]. CalCOFI Rep, 2011, 52: 97-108.
- [28] Yu W, Wen J, Zhong Z, et al. Spatio-temporal variations in the potential habitat of a pelagic commercial squid[J]. Journal of Marine Systems, 2020, 103339.
- [29] Tang F H, Fan W, Wu Y M, et al. Seasonal Changes of Relationship Between Marine Environment and Squid Fishing Resources in North Pacific Ocean[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(3): 242-249. [唐峰华, 樊伟, 伍玉梅, 等. 北太平洋柔鱼渔场资源与海洋环境关系的季节性变化[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 242-249.]

## Seasonal habitat variation of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru under different climate conditions

WEN Jian<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Xinjun<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 Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** The jumbo flying squid *Dosidicus gigas* is an environmentally sensitive cephalopod. The habitat variation of *D. gigas* is greatly affected by multi-scale climate variability. In this study, we constructed a habitat suitability index (HSI) model based on two critical environmental variables (sea surface temperature (SST) and sea surface height (SSHA) from 1950 to 2015), and analyzed seasonal habitat distribution for *D. gigas* off Peru under different climate conditions. The results suggested that habitat suitability during the cold Pacific Decadal Oscillation (PDO) was higher than that during the warm PDO. Compared with the cold PDO, suitable *D. gigas* habitat during the warm PDO shifted southeastward. The spatial distribution of suitable habitat was consistent with the overlapping areas of both the suitable SST and SSHA ranges, indicating that the two critical environmental variables were significantly related to the spatial distribution of suitable habitats. Moreover, the HSI anomalies on the *D. gigas* fishing ground were significantly negatively correlated with the PDO index. The habitat suitability on the *D. gigas* fishing ground in spring was higher than that in winter, and the spatial distribution of suitable habitat in winter was further Southeast than that in spring. The longitudinal and latitudinal distribution of suitable SST and the most suitable SST on the fishing ground of *D. gigas* showed significant variability between June and November. The distribution of the most suitable SST in spring (September to November) shifted northwestward; however, the distribution of the most suitable SST in winter (June to August) shifted southeastward. The difference in seasonal habitat distribution for *D. gigas* under different climate conditions may be owing to the monthly difference in distribution of the most suitable SST. Our findings indicated that there were significant differences in the habitat suitability on *D. gigas* fishing grounds under different PDO periods, and the difference in seasonal distribution could be explained by monthly differences in environmental variables.

**Key words:** *Dosidicus gigas*; habitat suitability; climate; Pacific Decadal oscillation; seasonal distribution

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