

DOI: 10.12264/JFSC2023-0279

基于垂直水温因子的春夏季秘鲁外海茎柔鱼栖息地年代际变化分析

余为^{1, 2, 3, 4, 5}, 金鹏超¹, 朱桂忠⁶

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, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306;
6. 上海市崇明区农业质量安全中心, 上海 202150

摘要: 茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是短生命周期的头足类, 对气候事件引起的海洋环境变化十分敏感, 在不同气候和环境条件下其栖息地的时空分布会产生变化。本研究结合太平洋年代际涛动(PDO)指数, 利用 0、50、100 和 150 m 4 个水层关键水温因子, 计算 1950—2015 年秘鲁外海基于垂直水温的适宜性指数(SI)以及茎柔鱼栖息地适宜性指数(HSI), 分析长时间序列下茎柔鱼渔场垂直水温环境以及适宜栖息地在不同 PDO 时期的变动规律。结果发现, PDO 暖期内秘鲁渔场内 4 个水层水温明显高于冷期。茎柔鱼栖息地适宜性与 PDO 指数呈现显著的负相关关系, PDO 冷期内秘鲁海域的垂向水温变冷, 秘鲁外海形成质量较高的茎柔鱼栖息地, 导致栖息地适宜性上升, 适宜的水温向西北方向移动, 适宜栖息地面积扩张且向西北方向迁移; PDO 暖期时垂向水温升高, 秘鲁外海形成质量较差的茎柔鱼栖息地, 栖息地适宜性较低, 且适宜栖息地向东南方向缩减。此外, 茎柔鱼适宜栖息地有着明显的季节性变化, 相对春季, 夏季的栖息地适宜性指数高, 且适宜栖息地向东北海域扩张。研究认为, 茎柔鱼栖息地的时空分布与 PDO 位相转变驱动的不同水层海水温度变化密切相关, 并且具有明显的季节性差异。

关键词: 茎柔鱼; 垂直水温; 栖息地分布; 太平洋年代际涛动; 季节变化; 秘鲁外海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)11-1374-13

茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)主要分布于东太平洋海域 125°W 以东, 加利福尼亚半岛北部(40°N)至智利南部(47°S)的海域, 具有较高的经济价值, 其资源被大规模开发, 其中沿海捕捞国家包括秘鲁、智利、厄瓜多尔等, 非沿海国包括中国、日本、韩国等^[1-2]。我国自 2001 年对秘鲁海域茎柔鱼资源开始探捕^[3], 其后产量不断上升, 并相继开辟了智利、赤道茎柔鱼渔场, 2018—2021 年我国茎柔鱼产量在 35 万 t 左右波动。茎柔鱼是一种短生命周期的头足类, 生长阶段易受到环境变化的影响^[4-5], 较温暖的水温会导致更快的生长速

度, 形成较小的个体, 而较冷的水温环境下, 茎柔鱼生长相对较慢, 有利于形成胴长更大的个体^[6]; 成熟后又会主动寻找适宜的栖息地, 渔场也会随之产生移动^[7-8]。

东太平洋海域受多种气候因子的影响, 海洋环境复杂多变^[9]。茎柔鱼的资源丰度和栖息地的分布有着明显的年际差异, 这可能与发生在东太平洋海域的气候事件相关^[10]。太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)是反映太平洋地区年际到年代际中长期时间尺度的气候环境变化的一种强信号, 通常以太平洋海表温异常(sea

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2023-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41906073); 上海市人才发展资金项目(2021078); 上海市自然科学基金项目(23ZR1427100).

作者简介: 余为(1989-), 副研究员, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: wyu@shou.edu.cn

通信作者: 朱桂忠, 工程师, 研究方向为渔业海洋学. E-mail: 1119853097@qq.com

surface temperature anomaly, SSTA)来定义 PDO 的不同时期, 即 PDO 冷期和 PDO 暖期^[11]。不同 PDO 时期内, 太平洋海域的水温表现出显著的地理性差异: 在 PDO 冷期(暖期)内, 北太平洋海域的 SSTA 呈正异常(负异常), 水温偏高(低), 而东太平洋海域的 SSTA 会呈现负异常(正异常), 水温偏低(高)^[12]。PDO 冷暖期转换时, 海域环境因子变化显著, 尤以水温的变化较为明显。以往研究表明, 茎柔鱼的资源丰度和分布与垂向水温结构关系密切^[13-14], 但是垂向水温结构对于茎柔鱼栖息地影响的研究甚少, 栖息分布模型中可能未考虑垂向水温条件, 同时这些研究时间序列较短, 年代际气候事件驱动垂向水温的变动, 这对茎柔鱼栖息地分布具有潜在影响, 茎柔鱼的栖息地在年代际时间尺度下对于秘鲁海域不同水层水温变化的响应有待进一步研究。因此, 本研究基于 1950—2015 年的垂直水温数据和太平洋年代际涛动(PDO)指数, 分析了在 PDO 冷期和 PDO 暖期模式下秘鲁外海茎柔鱼渔场不同水层水温及茎柔鱼栖息地的春夏季变化, 以期对秘鲁外海茎柔鱼的可持续利用提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

环境数据选取秘鲁海域 0 m、50 m、100 m 和 150 m 4 个不同水层的温度作为环境变量。数据覆盖的空间范围为 75°W~95°W, 8°S~20°S; 时间范围为 1950—2015 年 1—12 月, 时间分辨率为月, 空间分辨率为 0.5°×0.5°。基于以上环境数据, 本研究利用经验公式计算得到茎柔鱼栖息地适宜性指数, 计算方法详见分析方法部分。水温数据来自于夏威夷大学亚太数据研究中心(http://apdrc.soest.hawaii.edu/las_ofes/v6/dataset?catitem=71)。太平洋年代际涛动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)(<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>)。

1.2 分析方法

(1) 构建栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型。基于最大熵模型、叠加法和信息增益等方法评估的水温垂直结构与茎柔鱼时空

分布相关性的结果显示, 秘鲁外海茎柔鱼渔场和适宜栖息地的形成与海域中上层水温因子(0, 50 m, 100, 150 m)的关系密切^[13-15], 因此本研究选择 0 m、50 m、100 m、150 m 作为垂直水温结构的代表水温因子。利用余为等^[15]等建立的单因子适宜性指数(suitability index, SI)模型分别计算 0 m、50 m、100 m、150 m 4 个水层水温的 SI 值, 该单因子模型利用最小二乘法拟合观测到的单因子 SI 值和不同水层水温变量的区间值, 得到了水温-适宜性关系的经验公式。在此基础上, 利用算术平均法(arithmetic mean model, AMM)计算茎柔鱼的综合栖息地适宜性指数, 计算公式如下:

$$HSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SI_{Temp_0\text{ m}} + SI_{Temp_50\text{ m}} + SI_{Temp_100\text{ m}} + SI_{Temp_150\text{ m}})$$

式中, $SI_{Temp_0\text{ m}}$ 、 $SI_{Temp_50\text{ m}}$ 、 $SI_{Temp_100\text{ m}}$ 和 $SI_{Temp_150\text{ m}}$ 分别表示 0 m、50 m、100 m 和 150 m 水层温度的适宜性指数, n 代表环境因子个数。综合栖息地适宜性指数的数值范围为 0~1, 根据数值的大小可以将适宜性划分为 5 个等级, 即 0.0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0, 认定 $HSI \geq 0.6$ 的区域为茎柔鱼适宜的栖息地^[16-17]。根据分析结果, 绘制出秘鲁海域茎柔鱼春夏两个季节的栖息地分布图, 分析其时空分布特征。

(2) 根据 PDO 指数的分布, 将 1950—2015 年划分为 1950—1976 年 PDO 冷期, 1977—1998 年 PDO 暖期以及 1999—2015 年 PDO 冷期^[18-19]。计算 1950—2015 年秘鲁渔场 0 m、50 m、100 m、150 m 4 个水层的水温距平值(HSIA)。绘制出在不同 PDO 时期春夏季秘鲁海域水层温度时空分布以及茎柔鱼的栖息地适宜性指数分布图, 分析 3 个时期茎柔鱼渔场垂向水温和 HSI 的时空分布变化。利用交相关性分析, 分析出 PDO 事件与 HSIA 之间的相关性。

(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。绘制出在不同 PDO 时期春夏季 4 个环境变量 $SI=0.6$ 的空间分布图, 分析在不同 PDO 背景下茎柔鱼适宜环境条件季节性分布情况。

(4) 计算在不同 PDO 时期春夏季节茎柔鱼适

宜栖息地($HSI \geq 0.6$)的经纬度出现频次,用于分析茎柔鱼适宜栖息地不同季节的空间变动。

2 结果与分析

2.1 不同水层水温的时空变化

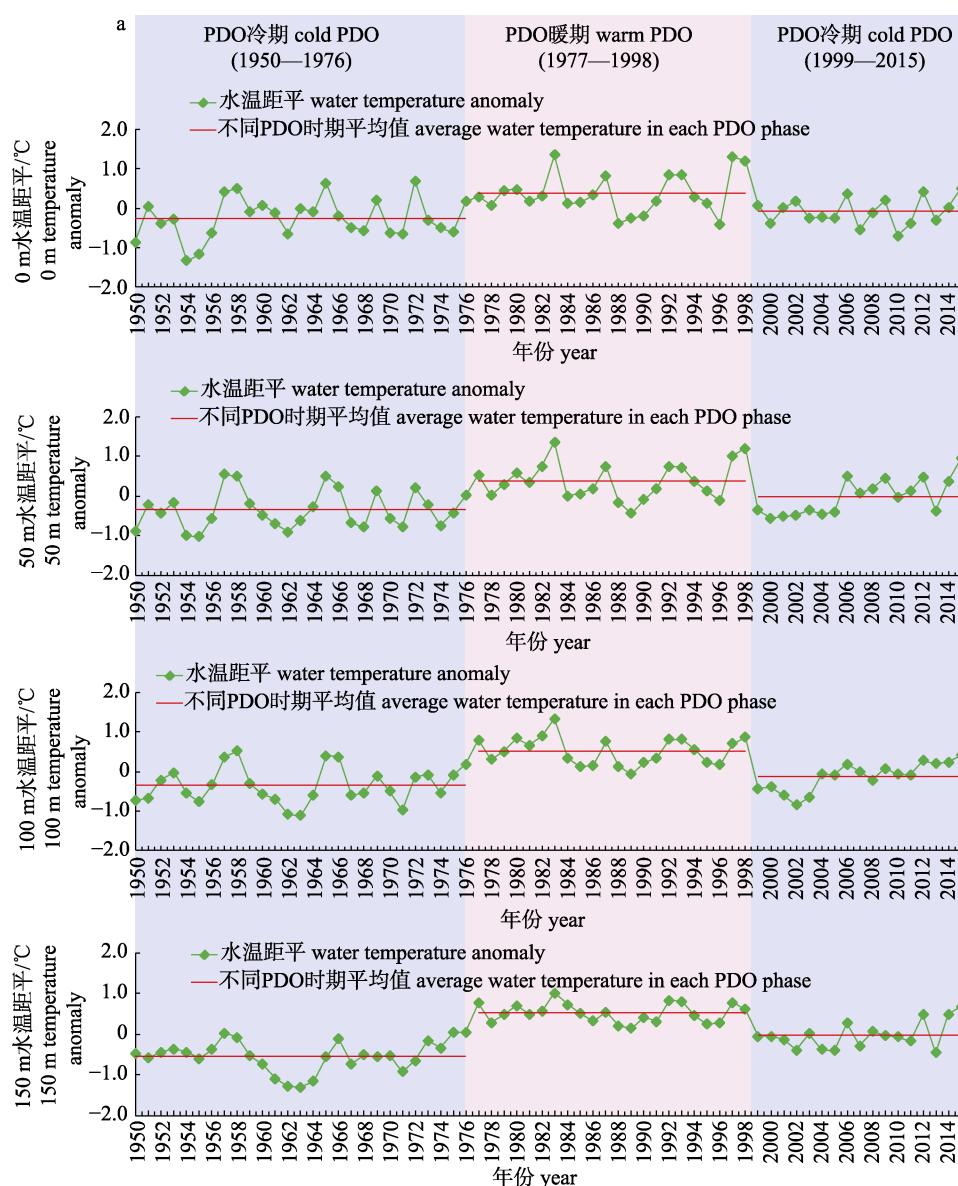
图1折线图和箱型图显示,秘鲁海域茎柔鱼渔场内0 m、50 m、100 m和150 m 4个水温因子存在显著的年代际变化,在两个PDO冷期内4个水层温度的数值以及其距平值明显低于PDO暖期。由图1b可以看出不同水层温度呈现出季节性变化,春季不同水层温度的变化范围均小于夏季,夏季0~100 m水层水温明显高于春季,150 m水温

春夏季变化相对不明显。

从空间分布上来看,不同PDO时期秘鲁外海茎柔鱼渔场的温度变化均表现出从海域东部(近海)向西部(远海)由冷变暖的趋势(图2)。PDO冷期与暖期相比,秘鲁近海海域内冷水分布面积较大,整片海域内温度较低。对比春夏两季的水温空间分布,春季渔场的温度显著低于夏季,冷水分布的面积也明显高于夏季,在1997—1998年PDO暖期夏季时达到最小。

2.2 PDO与HSI之间的关系

1950—2015年HSIA指数与PDO指数呈现出相反的变化趋势,1950—1976年和1999—2015年



(待续 to be continued)

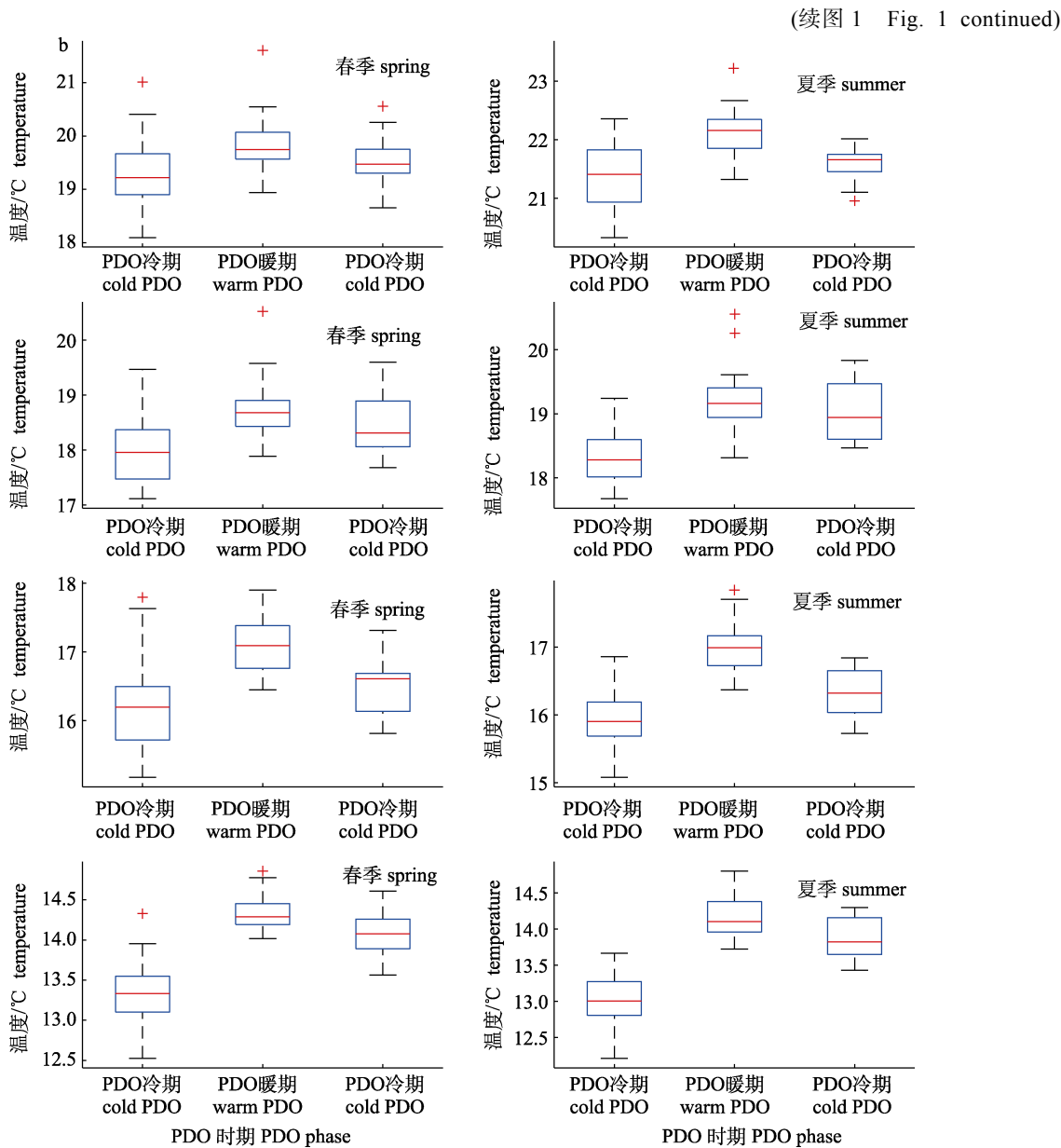


图 1 不同 PDO 时期秘鲁外海茎柔鱼渔场 0 m、50 m、100 m、150 m 水层温度变化
a. 1950—2015 年不同水层温度的年代际变化; b. 不同 PDO 时期春夏季不同水层温度的变化。+表示异常值。
Fig. 1 Variation of water temperature at depths of 0 m, 50 m, 100 m and 150 m on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru during different PDO phases
a. Decadal variation of water temperature at different depth during 1950 to 2015; b. Variation of water temperature at different depth during different PDO phases in spring and summer. + indicates anomalous value.

两个 PDO 冷期内 HSIA 指数大多数为正值, 而在 1977—1998 年 PDO 暖期时情况则相反(图 3)。交相关分析结果显示, 1950—2015 年 HSI 与 PDO 之间具有显著的负相关关系, 且在滞后 1 个月时呈现出最大负影响, 与之对应的交相关系数为 -0.3483 ($P<0.05$)。这说明 PDO 冷期内秘鲁海域茎柔鱼栖息地适宜性更高, 而 PDO 暖期则更多产生生境质

量较低的栖息地。
2.3 不同 PDO 时期适宜栖息地面积和空间位置的季节性差异

1950—2015 年秘鲁外海茎柔鱼渔场春季和夏季平均 HSI 值的分布如图 4 所示, 结果发现两个季节的适宜栖息地分布存在相同之处, 均分布在 85°W 以东, 呈西北向东南的条状分布, 但夏季的

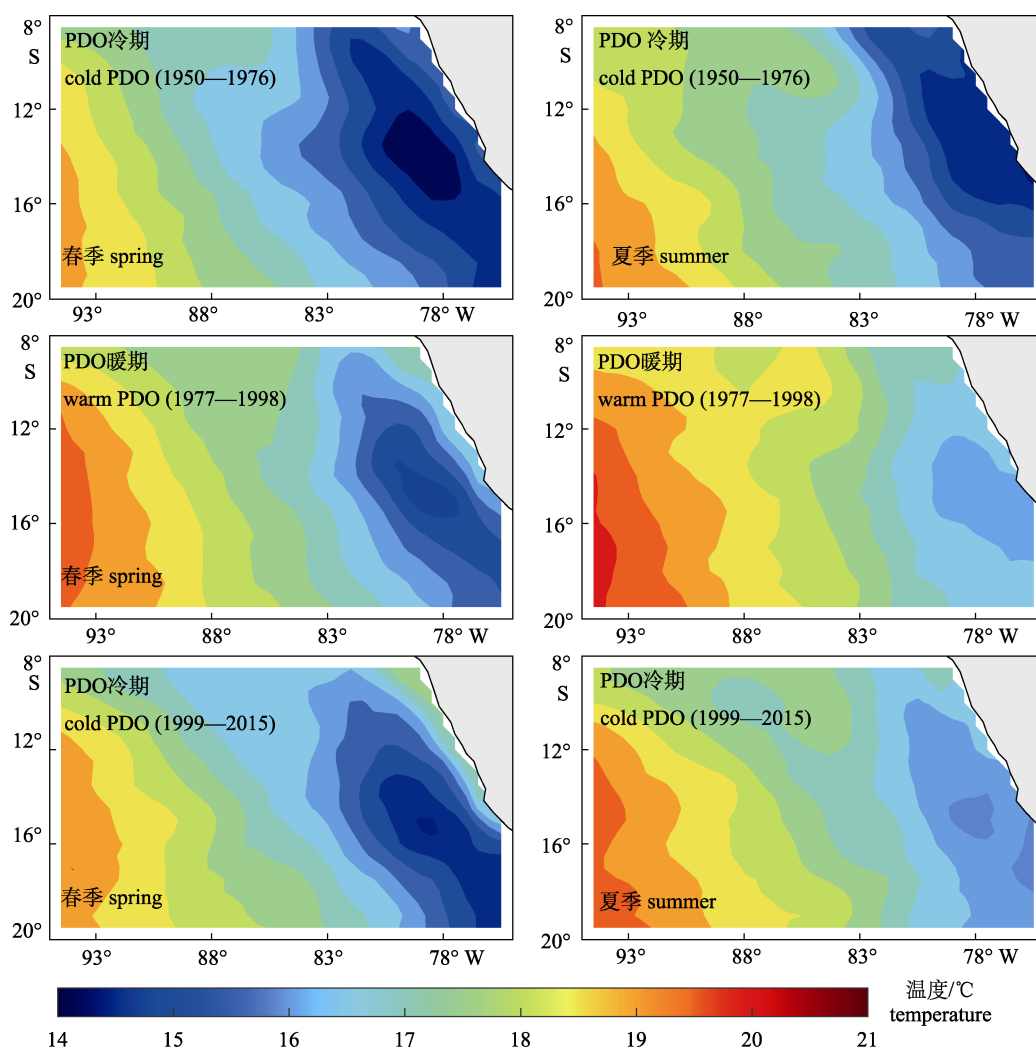


图 2 不同 PDO 时期秘鲁外海茎柔鱼渔场春夏季温度空间分布变化

Fig. 2 Spatial distribution of water temperature on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru in spring and summer during different PDO phases

适宜栖息地面积要大于春季。从经度分布来看,春季和夏季差别不大,二者都在 $75^{\circ}\text{W}\sim 86^{\circ}\text{W}$ 之间,但夏季的分布更为偏西;从纬度分布来看,夏季的适宜栖息地分布比春季更为广泛,春季适宜栖息地集中在 $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 之间,夏季适宜栖息地在海域内从南至北均有分布。

不同 PDO 时期下春季和夏季茎柔鱼栖息地分布存在明显的差异(图 5)。在 1950—1976 和 1999—2015 年两个 PDO 冷期内,春季和夏季的适宜栖息地面积均明显高于 1977—1998 年的 PDO 暖期。总体上看,不同 PDO 时期内,茎柔鱼适宜栖息地的分布主要集中在秘鲁海域的中部。从春夏季对比来看,不同 PDO 时期内,春季适宜

栖息地的面积均小于夏季。从经纬度分布来看,不同 PDO 时期内均表现为春季适宜栖息地经度分布较为广泛,夏季适宜栖息地在纬度分布上更为广泛。结合不同 PDO 时期春夏季茎柔鱼适宜栖息地($\text{HSI} \geq 0.6$)面积变化图(图 6)来看,在 1950—2015 年间随着 PDO 经历冷、暖、冷 3 个时期的交替变换,茎柔鱼适宜栖息地的面积在春季和夏季两个季节也出现由扩张到缩减再到扩张的变化过程。春季茎柔鱼适宜栖息地面积较夏季相比占渔场总面积较少,但是变化幅度较小,适宜栖息地面积分布最小值出现在 1977—1998 的 PDO 暖期内。1950—1976 和 1999—2015 年两个 PDO 冷期茎柔鱼适宜栖息地面积的变化幅度从总体上看

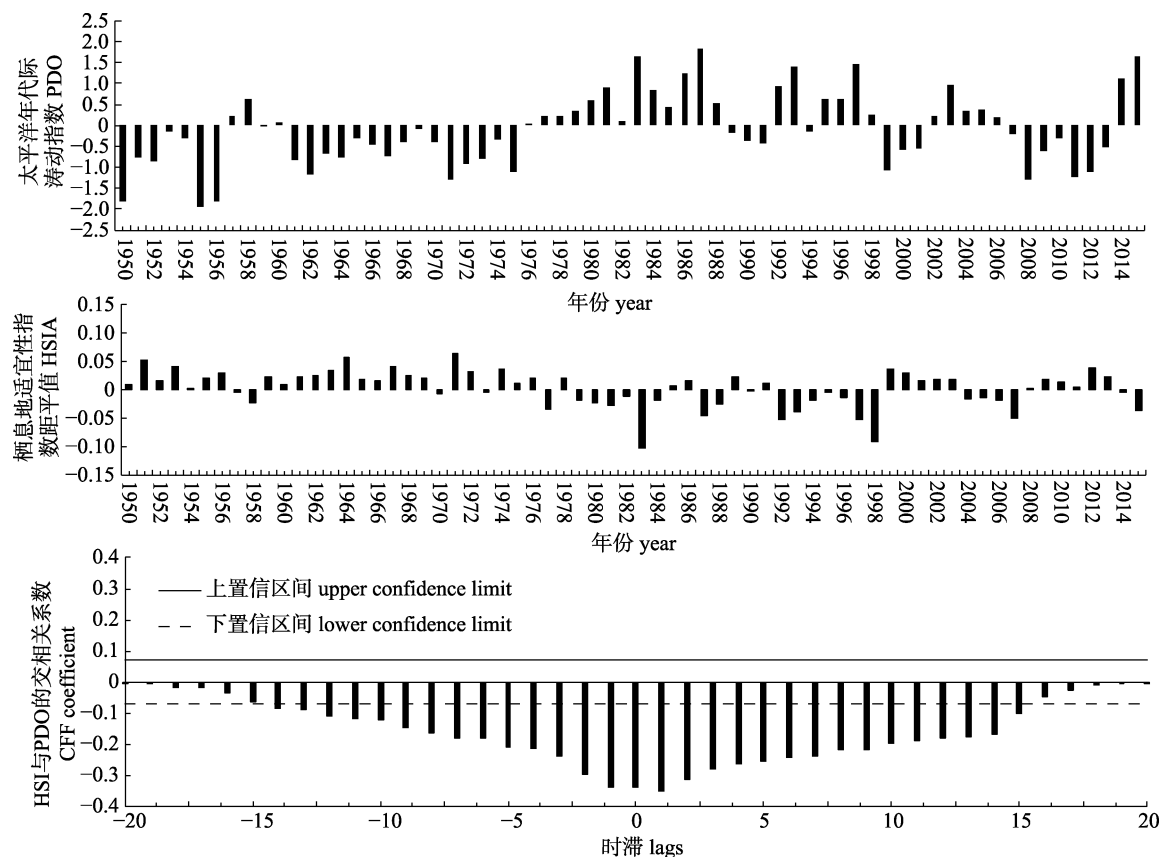


图 3 1950—2015 年秘鲁外海茎柔鱼渔场 PDO 指数与 HSIA 指数的年际变化以及 HSI 与 PDO 的交相关系数

Fig. 3 Inter annual changes of PDO index and HSIA index and cross correlation coefficient of HSI and PDO on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru from 1950 to 2015

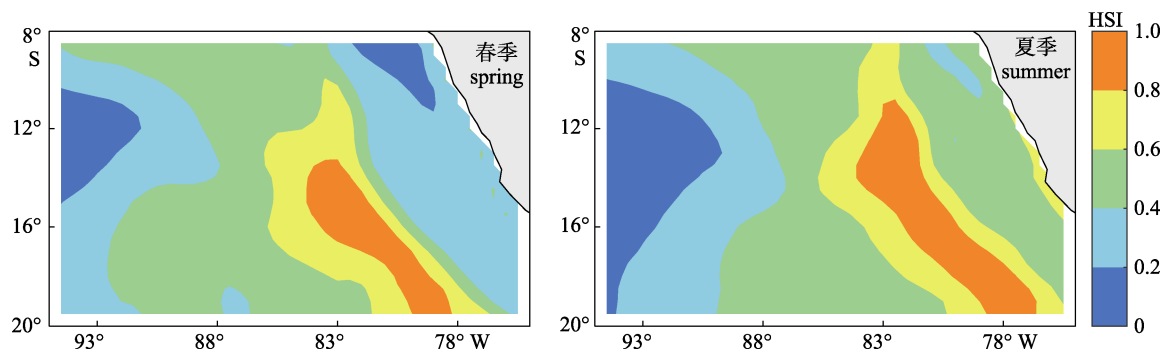


图 4 1950—2015 年秘鲁外海茎柔鱼适宜栖息地指数分布

Fig. 4 Distribution of habitat suitability index (HSI) of *Dosidicus gigas* off Peru from 1950 to 2015

大于 1977—1998 年的 PDO 暖期。这表明 PDO 冷期秘鲁海域茎柔鱼栖息地适宜性指数升高, 而 PDO 暖期栖息地适宜性指数则降低。

图 7 显示了不同 PDO 时期秘鲁海域春季和夏季茎柔鱼适宜栖息地($HSI \geq 0.6$)的经纬度重心分布。结果表明, 从经度分布来看, PDO 冷期茎柔鱼春季和夏季适宜栖息地经度重心主要出现在 81.3°W 以西; PDO 暖期主要经度重心分布在

81.3°W 以东, 与 PDO 冷期相比, PDO 暖期内的适宜栖息地经度重心在经度上明显东移。从纬度分布来看, PDO 冷期内适宜栖息地纬度重心主要集中在 $14.7^{\circ}\text{S} \sim 15.2^{\circ}\text{S}$ 之间; PDO 暖期主要集中在 15.5°S 以南的位置, 与冷期相比有明显的南移趋势。因此, PDO 暖期对应的秘鲁海域茎柔鱼适宜栖息地存在向东南方向偏移的趋势, 与图 5 的栖息地空间分布较为一致。此外, 从季节来看,

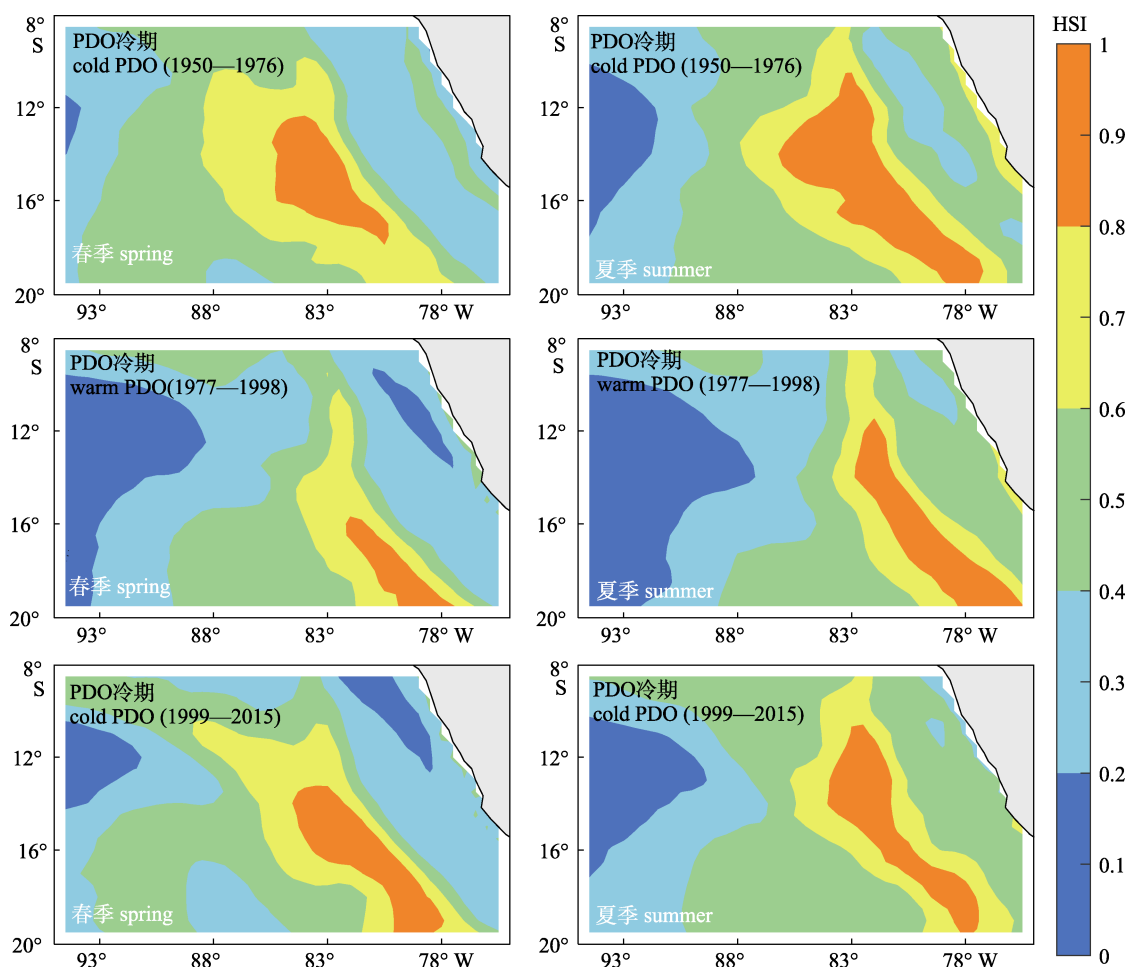


图 5 不同 PDO 时期春季和夏季秘鲁外海茎柔鱼栖息地空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of *Dosidicus gigas* habitat off Peru under different PDO phases in spring and summer

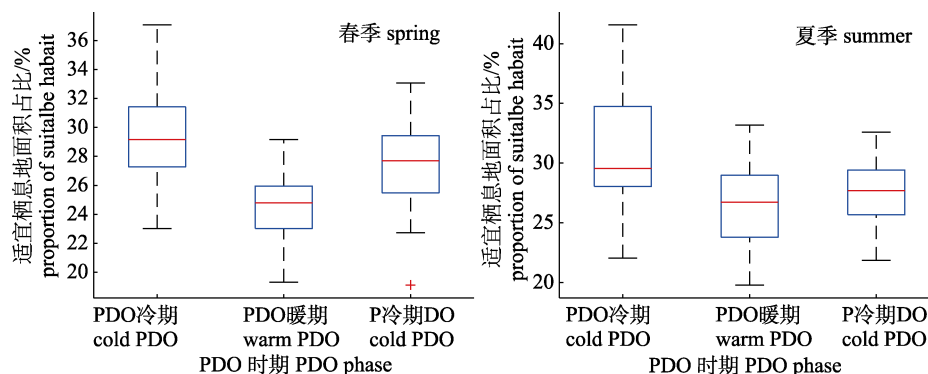


图 6 不同 PDO 时期春季和夏季秘鲁外海茎柔鱼适宜栖息地(HSI ≥ 0.6)的变化

+表示异常值。

Fig. 6 Percentage of suitable habitat (HSI ≥ 0.6) on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru during different PDO phase
+ indicates anomalous value.

夏季的 HSI 经度重心比起春季有东移的趋势, HSI 纬度重心比春季偏南分布。

2.4 不同 PDO 时期适宜水温空间位置的季节性差异

图 8 显示, 在 1950—1976 年和 1999—2015

年两个 PDO 冷期内, 4 个水温因子 SI=0.6 和 SI=0.8 等值线的分布范围比 1977—1998 年 PDO 暖期更加广泛。春夏季节对比发现, 夏季海域内 4 个水温因子 SI=0.6 和 SI=0.8 等值线的分布范围较春

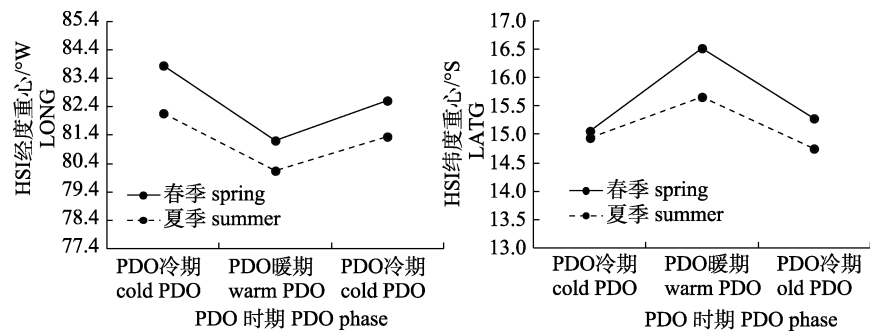


图 7 不同 PDO 时期春夏季秘鲁海域茎柔鱼适宜栖息地($HSI \geq 0.6$)的经纬度重心分布

Fig. 7 The longitudinal and latitudinal gravity centers of suitable habitats ($HSI \geq 0.6$) of *Dosidicus gigas* off Peru under different PDO phase in spring and summer

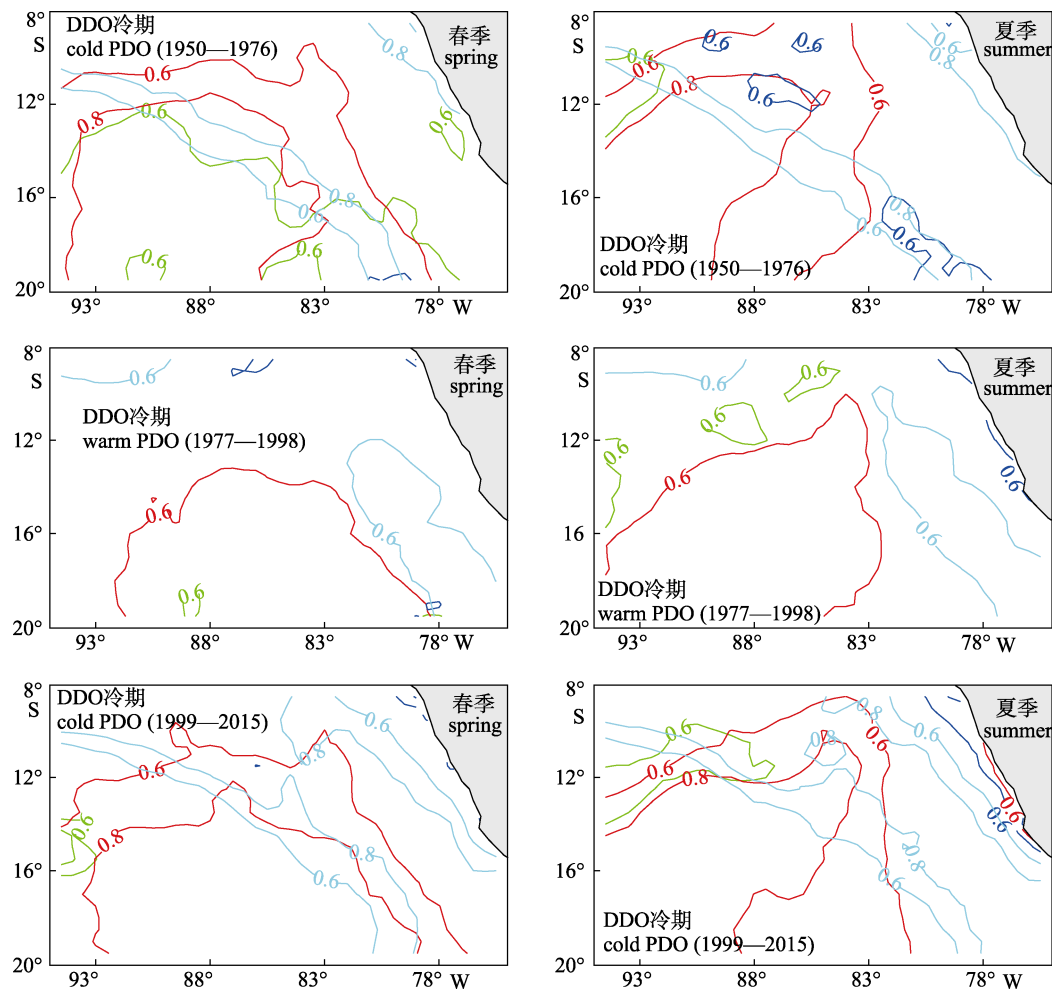


图 8 不同 PDO 时期春季和夏季秘鲁外海茎柔鱼渔场 0 m (红线)、50 m (浅蓝线)、100 m (深蓝线)和 150 m (绿线) 水层温度因子 $SI=0.6$ 和 $SI=0.8$ 等值线空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of $SI=0.6$ and $SI=0.8$ isoline at 0 m (red line), 50 m (light blue line), 100 m (dark blue line) and 150 m (green line) in spring and summer on the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru during different PDO phase

季相比也更为广泛。在 PDO 冷期内 4 个水温因子 $SI=0.6$ 和 $SI=0.8$ 等值线主要分布在海域北部, PDO 暖期主要分布在海域南部, 与适宜栖息地在

经纬度上的分布规律较为一致。此外对比发现, PDO 冷期内 4 个水温因子 $SI=0.6$ 和 $SI=0.8$ 等值线的重叠部分较多, PDO 暖期时则几乎无重叠部

分, 且不存在 $SI=0.8$ 的部分。春季和夏季对比发现, 夏季环境因子 $SI=0.6$ 和 $SI=0.8$ 等值线的重叠部分较春季多。以上结果表明, PDO 冷期适宜 0 m、50 m、100 m 和 150 m 水温在分布范围和重叠区域上要大于 PDO 暖期, 春季适宜不同水层水温分布范围要少于夏季。

此外, 本研究比较了茎柔鱼适宜栖息地分布(图 5)与适宜不同水层水温等值线分布(图 8), 发现适宜栖息地与适宜 50 m 水层温度分布存在较多的重叠区域, 与适宜 0 m 水层温度分布有部分重合, 与适宜 100 m 和 150 m 水层温度分布几乎不重叠, 说明秘鲁外海茎柔鱼适宜栖息地的分布与海域内近表层(0~50 m)水层温度的空间分布具有显著相关性。

3 讨论

东太平洋海域受到多种气候事件的影响, 使得该海域的水温条件变化复杂, 水温变化对茎柔鱼渔场和栖息地的时空分布有着重要的影响^[20], 水温上升时, 茎柔鱼适宜栖息地面积明显收缩, 同时栖息地重心向东南方向转移^[21]。气候变化引起的海域水温变化与茎柔鱼渔场和栖息地分布密切相关^[19,22], 有研究发现厄尔尼诺-南方涛动(El Niño southern oscillation, ENSO)事件处于正相位时, 秘鲁海域水温异常增高使得茎柔鱼资源量出现下降, 产量剧减^[23]。Yu 等^[24]利用茎柔鱼适宜栖息地模型, 比较了 2011 年拉尼娜事件和 2015 年厄尔尼诺事件条件下茎柔鱼栖息地的差异。结果表明, 拉尼娜事件期间适宜的海表面温度(SST)和海表面高度距平(SSHA)显著增高, 导致了高质量的栖息地; 厄尔尼诺事件期间适宜的环境条件减少, 不利于形成适宜栖息地。ENSO 事件具有 2~7 年周期, 其正反相位对应的厄尔尼诺和拉尼娜事件发生频率较高, 但是 PDO 作为年代际变动的气候事件, 其发生周期要长于 ENSO 事件。本研究发现在 PDO 冷期时秘鲁外海水温下降, 茎柔鱼春夏季节适宜栖息地面积和分布范围增大, 栖息地质量升高(图 6), 不同气候背景下驱动的水温变化导致栖息地的变动具有一致性。

PDO 事件是反映太平洋地区年代际时间尺度

的气候环境变化的一种强信号, PDO 冷期和暖期模态的转换对海水温度具有显著的影响^[25]。我国茎柔鱼渔业起步较晚, 没有长时间序列下的生产数据, 因此本研究主要分析了 PDO 模态转换对于渔场不同水层水温以及茎柔鱼栖息地分布的影响。研究发现, PDO 冷期的各水层水温均小于 PDO 暖期, 茎柔鱼栖息地与 PDO 之间具有显著的负相关关系, 说明 PDO 冷期时 HSI 值偏高, 茎柔鱼栖息地质量较高, PDO 暖期则相反。汪金涛等^[26]建立了基于神经网络方法的茎柔鱼预报模型, 发现 SST 是影响茎柔鱼丰度最重要的环境因子, 其资源丰度随着 SST 的增大而随之降低, 说明相对低的水温更适合茎柔鱼的生存。本研究中 PDO 暖期的秘鲁外海渔场水温显著提高, 可能会降低茎柔鱼的产量。Yu 等^[27]发现在气候事件影响下, 茎柔鱼的产量与适宜栖息地面积变化存在一致性, 当适宜栖息地面积较大时, 产量更高, 因此相较于 PDO 暖期, PDO 冷期产生了更多适宜的栖息地, 各个适宜水温因子也更加适合茎柔鱼生存(图 8), 可能会形成更高产的渔场。此外, 在 PDO 暖期时茎柔鱼适宜栖息地更偏东南分布, 这与水温的空间分布有关, 茎柔鱼偏好冷水, PDO 暖期时海域水温升高, 适宜的水温主要分布在海域东南部(图 7), 在暖期时茎柔鱼主动寻找适宜水温, 因此栖息地向东南偏移。仅通过分析茎柔鱼栖息地的变动, 无法完全代表茎柔鱼资源的变动, 因此未来需要做好我国的渔业数据收集工作, 同时加强与秘鲁外海沿岸国家合作, 收集更多的生产数据, 利用广义加性模型等物种分布模型开展不同 PDO 事件下长时间序列的茎柔鱼生产数据和环境关系的分析。

茎柔鱼有着明显的昼夜垂直洄游特征, 常生活在 0~200 m 的水层之间^[28], 易受到栖息海域环境变化的影响。以往研究在分析茎柔鱼生境适宜性的过程中, 往往使用海表面温度、海表面高度等海面表层环境变量^[19-20], 而未考虑到垂直水温结构。垂直方向上的水温变化已经成为研究头足类栖息地的重要影响因素之一^[29], 有研究发现加入不同水层水温因子的栖息地模型模拟结果更加准确^[30], 因此本研究依据茎柔鱼栖息的水层范围^[28]

和以往学者的研究结果^[13-15]选取 0 m、50 m、100 m、150 m 不同水层水温作为关键环境因子,并基于余为等^[15]构建的单因子 SI 模型探究基于垂向水温的茎柔鱼生境的年代际变化特征及其与 PDO 的关联。目前,算术平均法已经成功应用并较好地模拟了气候事件影响下东南太平洋茎柔鱼、东海鲈(*Scomber japonicus*)、中西太平洋鲷(*Katsuwonus pelamis*)等大洋性物种栖息地变动^[22,31-32],该方法可以平均地反映出各个环境因子对茎柔鱼栖息地的影响,因此本研究选择利用算术平均法计算不同 PDO 时期的综合 HSI 值,但这一方法仍然存在一些偏差。本研究发现茎柔鱼适宜栖息地的分布与适宜 0 m、50 m 水层水温分布重叠区域较多,而与适宜 100 m、150 m 水层水温重叠区域较少;易倩等^[14]利用信息增益技术发现 SST、55 m 水层水温和 0~55 m 水层的水温梯度对茎柔鱼中心渔场分布有决定性作用;金鹏超等^[33]通过计算适宜环境占比发现,反气旋涡内产生了更多适宜的近表层水温,使得茎柔鱼聚集出现在反气旋涡中。以上研究的结果和本研究结果均表明不同水层水温对茎柔鱼生境的影响程度存在一定差异,因此,在未来的研究中可以进一步引入不同权重的栖息地模型,赋予垂直水层温度不同的权重,进一步提高栖息地模型的模拟性能。

此外,本研究发现茎柔鱼在春、夏季节适宜栖息地分布有着显著的季节差异,夏季与春季相比茎柔鱼适宜栖息地面积增大,分布范围更广,栖息地质量更高(图 5),根据不同适宜水温的分布范围和重叠程度(图 8),推测夏季时秘鲁海域的水温变化更加适合形成茎柔鱼适宜栖息地,适宜水温分布更多且覆盖范围更大。徐冰等^[34]分析秘鲁外海茎柔鱼渔场的季节分布,发现茎柔鱼渔场在春夏季节有着明显的变化,夏季的渔场分布与春季相比范围更大,且产量更高^[34],这与本研究的结果基本一致。夏季与春季相比在经度分布上向东偏移,在纬度分布上向南偏移,茎柔鱼适宜栖息地的分布夏季比春季更加偏东南方向,这是由于夏季海域水温升高,茎柔鱼主动寻找适宜水温的结果。因此茎柔鱼适宜栖息地的分布与海域的水温空间分布密切相关。有研究通过分析 SST、

叶绿素浓度(Chl-a)、海表面高度(SSH)等 3 个环境因子以及相关气候条件,发现秘鲁外海茎柔鱼渔场纬度重心呈现出明显的月际变化:在 9 月—翌年 2 月主要从北部海域向南部海域变动^[35],以上与本研究的结果一致。此外,仅利用水温数据并不能完全指示茎柔鱼的栖息地分布,茎柔鱼的季节性移动可能与渔场的摄食环境有一定的关系^[36],因此未来需要考虑净初级生产力、叶绿素浓度等可以作为食物可利用性指标的环境因素加入到栖息地模型中,更好地模拟茎柔鱼栖息地在年代际时间尺度上的变化。

参考文献:

- [1] Chen X J, Liu B L, Wang Y G. Cephalopods of the world[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009: 355-360. [陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 355-360.]
- [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] Zhang X J, Yang J Y, Lian D J. *Dosidicus gigas* off Peruvian high sea and its resources exploration[J]. Shandong Fisheries, 2005, 22(3): 44-45. [张新军, 杨军勇, 连大军. 秘鲁外海茎柔鱼资源及渔业开发[J]. 齐鲁渔业, 2005, 22(3): 44-45.]
- [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] 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.
- [6] Arkhipkin A, Argüelles J, Shcherbich Z, et al. Ambient temperature influences adult size and life span in jumbo squid (*Dosidicus gigas*)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 72(3): 400-409.
- [7] Alegre A, Ménard F, Tafur R, et al. Comprehensive model of jumbo squid *Dosidicus gigas* trophic ecology in the Northern Humboldt Current system[J]. PLoS ONE, 2014, 9(1): e85919.
- [8] 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.]

- [9] Heppell S S, Chesney T A, Montero J T, et al. Interannual variability of Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) off Oregon and Southern Washington[J]. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report, 2013, 54: 180-191.
- [10] Anderson C I H, Rodhouse P G. Life cycles, oceanography and variability: Ommastrephid squid in variable oceanographic environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 133-143.
- [11] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [12] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58(1): 35-44.
- [13] 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 sea water 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.]
- [14] Yi Q, Chen X J, Yu W, et al. A comparison of habitats of *Dosidicus gigas* in the fishing ground off Chile and Peru based on information gain technique[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(2): 272-278. [易倩, 陈新军, 余为, 等. 基于信息增益技术比较分析智利和秘鲁外海茎柔鱼渔场环境[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(2): 272-278.]
- [15] Yu W, Jin P C, Zhu G Z. Temporal and spatial distribution of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* habitat off Peru based on vertical water temperature[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(10): 1246-1258. [余为, 金鹏超, 朱桂忠. 基于垂直水温因子的秘鲁外海茎柔鱼春、夏季栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2023, 30(10): 1246-1258.]
- [16] 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.
- [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): 1-15.
- [18] 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.
- [19] Wen J, Yu W, Chen X J. Seasonal habitat variation of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru under different climate conditions[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1464-1476. [温健, 余为, 陈新军. 不同气候模态下秘鲁外海茎柔鱼栖息地的季节性分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1464-1476.]
- [20] Feng Z P, Yu W, Chen X J, et al. Analysis of fishing ground of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the southeast Pacific Ocean off Peru based on weighting-based habitat suitability index model[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(6): 878-888. [冯志萍, 余为, 陈新军, 等. 基于不同权重栖息地模型的秘鲁外海茎柔鱼渔场分析[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 878-888.]
- [21] 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.
- [22] Wen J, Gong J W, Li T, 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. [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.]
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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茎柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525-534.]
- [26] Wang J T, Gao F, Lei L, et al. Modeling of fishing grounds for *Dosidicus gigas* based on BP neural network in southeast Pacific[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(2): 131-137. [汪金涛, 高峰, 雷林, 等. 基于神经网络的东南太平洋茎柔鱼渔场预报模型的建立及解释[J]. 海洋渔业, 2014, 36(2): 131-137.]
- [27] 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.
- [28] Sakai M, Tsuchiya K, Mariátegui L, et al. Vertical migratory behavior of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off Peru: Records of acoustic and pop-up tags[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2017, 51(2): 171-179.

- [29] Chen X J, Chen F, Gao F, et al. Modeling of habitat suitability of Neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) based on vertical temperature structure in the northwestern Pacific Ocean[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(6): 52-60. [陈新军, 陈峰, 高峰, 等. 基于水温垂直结构的西北太平洋柔鱼栖息地模型构建[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 52-60.]
- [30] Liu H W, Yu W, Chen X J, et al. Construction of habitat suitability index model for Argentine shorfin squid *Illex argentinus* based on vertical water temperature at different depths[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(6): 1035-1043. [刘赫威, 余为, 陈新军, 等. 基于不同水层海水温度的阿根廷滑柔鱼栖息地模型构建[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(6): 1035-1043.]
- [31] 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.]
- [32] Yen K W, Wang G H, 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.
- [33] Jin P C, Yu W, Wu X C, et al. Analysis of the spatial and temporal distribution of eddies off Peru and their relationship with the abundance of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(6): 753-764. [金鹏超, 余为, 武孝慈, 等. 秘鲁外海涡旋的时空分布及其与茎柔鱼资源丰度的关系分析[J]. 中国水产科学, 2023, 30(6): 753-764.]
- [34] Xu B, Chen X J, Qian W G, et al. Spatial and temporal distribution of fishing ground for *Dosidicus gigas* in the offshore waters of Peru[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(11): 43-47. [徐冰, 陈新军, 钱卫国, 等. 秘鲁外海茎柔鱼渔场时空分布分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(11): 43-47.]
- [35] Yu W, Yi Q, Chen X J, et al. Climate-driven latitudinal shift in fishing ground of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(12): 3531-3550.
- [36] Alegre A, Ménard F, Tafur R, et al. Comprehensive model of jumbo squid *Dosidicus gigas* trophic ecology in the Northern Humboldt Current system[J]. PLoS ONE, 2014, 9(1): e85919.

Decadal variations in habitat suitability of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru during spring and summer based on vertical water temperature

YU Wei^{1, 2, 3, 4, 5}, JIN Pengchao¹, ZHU Guizhong⁶

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. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
6. Center for Quality and Safety of Agriculture, Chongming District, Shanghai, 202150, China

Abstract: The jumbo flying squid *Dosidicus gigas*, which is widely distributed in the eastern Pacific Ocean, has been regarded as an important fishing target for Chinese distant-water fisheries. Previous studies have linked the fluctuations in squid catch to varying local environmental conditions and climate shifts, such as sea surface temperature, chlorophyll-a, and El Niño-Southern Oscillation. As a short-lived cephalopod, *D. gigas* is sensitive to environmental changes caused by climatic events, leading to changes in both the spatial and temporal distribution of its habitats. The Pacific Decadal Oscillation (PDO) is a strong indicator reflecting climate and environmental changes occurring across interdecadal time scales within the Pacific region. Though the oscillation between the warm and cold phases of the PDO can affect the marine ecosystem and fishery industry in the Pacific Ocean, limited research has been conducted on its effect on short-lived cephalopod species, particularly *D. gigas*. In addition, *D. gigas* has a diurnal vertical migration pattern, which is influenced by water temperature. Studies have demonstrated that employing a habitat model that incorporates vertical water temperature factors leads to improved simulation and prediction of the distribution of *D. gigas* habitats. In this study, we aimed to analyze the long-term changes in the vertical water temperature and suitable habitat of *D. gigas* in different PDO periods. We calculated the suitability index (SI) of vertical water temperature and the habitat suitability index (HSI) of *D. gigas* from 1950 to 2015 off Peru using four key water temperature factors at 0, 50, 100, and 150 m. The water temperatures at all four depths in the Peruvian waters were significantly higher during the warm phase of the PDO than those during the cold PDO phase. The HSI observed on the fishing ground displayed a significant negative correlation with the PDO index. In the cold phase of the PDO, the vertical water temperature off Peru experienced cooling, leading to higher quality habitat for *D. gigas*. This shift caused the favorable water temperature range to move northwestward, inducing an increase in the habitat suitability. The suitable habitat expanded and shifted northwestward. However, during the warm phase of PDO, vertical water temperatures increased, which was unfavorable to the growth of *D. gigas*. Moreover, the suitable water temperatures range decreased, resulting in lower HSI and a southeastward shift of suitable habitat. In addition, there were significant seasonal variations in the suitable habitat of *D. gigas*. In contrast to spring, HSI exhibited higher levels during summer, which coincided with expansion of suitable habitat towards northeast. Our findings suggested that spatio-temporal distribution of *D. gigas* habitat is closely related to the changes in seawater temperature at different water layers driven by the PDO phase shift. Moreover, there are clear seasonal variations in the distribution of this habitat.

Key words: *Dosidicus gigas*; vertical water temperature; habitat distribution; Pacific decadal oscillation; seasonal variation; off Peru

Corresponding author: ZHU Guizhong. E-mail: 1119853097@qq.com