

DOI: 10.11964/jfc.20220613575

海表温度时空分布模式对西北太平洋柔鱼生物学特征的影响

张天蛟¹, 张闪闪¹, 袁红春^{1*}, 余 为²

1. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

第一作者: 张天蛟, 从事智慧渔业研究, E-mail: tjzhang@shou.edu.cn

通信作者: 袁红春, 从事智慧渔业研究, E-mail: hcyuan@shou.edu.cn

摘要:

【目的】旨在提出基于深度学习挖掘海表时空分布模式, 并分析对不同月份雌、雄柔鱼生长发育变化的影响。

【方法】实验基于2016年7—10月西北太平洋柔鱼的生物学测定数据, 分析其胴长、体重和性腺成熟度的组成, 并采用幂指数方程分月拟合雌、雄柔鱼胴长和体重的关系; 采用深度卷积嵌入式聚类(DCEC)模型, 基于MODIS-Aqua和MODIS-Terra海表面温度三级反演图像数据提取海表温度(sea surface temperature, SST)的分布模式, 用于反映各月调查站点对应的SST时空分布特征与规律; 在此基础上, 分析不同月份SST时空分布模式对雌、雄柔鱼生长发育的影响。

【结果】①2016年7—10月, 西北太平洋雌、雄柔鱼的生长与发育不完全同步, 雌性生长速率较快, 雄性性腺发育速率较快。②基于DCEC模型提取得到了4类SST图像特征, 能够较好地反映各月调查站点对应的SST时空分布模式, 体现了厄尔尼诺现象、黑潮和亲潮等对海表温度的影响。③7—8月, 柔鱼平均体重、胴长和性腺成熟度偏低, 雌、雄个体差别不大, 与SST时空分布模式的关系不显著。④9—10月, 在SST变化较均匀但整体温度较低时, 柔鱼平均体重、胴长和性腺成熟度均偏低; 在SST变化较均匀但整体温度升高时, 柔鱼的平均体重、胴长和性成熟个体数量明显上升, 雌鱼生长速率较雄鱼快, 但雄性成熟速率较雌性更快; 冷暖水相遇形成比较明显的界限时, 雌、雄柔鱼的胴长和体重达到最大值, 但性腺发育有所延缓。

【结论】本研究基于深度学习DCEC模型挖掘了SST时空分布模式对不同月份雌、雄柔鱼生长发育变化的影响, 为进一步了解西北太平洋柔鱼生物学特征提供参考。

关键词: 柔鱼; 海表温度(SST)分布模式; 深度卷积嵌入式聚类(DCEC)模型; 生物学特征; 西北太平洋



资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901405); 上海海洋大学科技发展专项(A2-2006-22-200204)

收稿日期: 2022-06-22

修回日期: 2022-11-25

文章编号:

1000-0615(2025)03-039305-15

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是西北太平洋渔业的重要经济种类之一^[1], 为1年生的短生命周期头足类, 具有产卵完即死亡的特点, 其个体生长变化极易受海水温度变化的影响。水温上升会加快柔鱼的生长^[2-3]、代谢, 进而影响体型的大小^[4-5]; 反之, 水温下降会阻碍柔鱼



的生长, 导致柔鱼产卵地点的改变^[6-7], 影响胚胎发育^[8]等。关于柔鱼与海表温度 (sea surface temperature, SST) 之间的关系^[9-11] 已有不少研究。如韩飞等^[12]、Velázquez 等^[13] 研究发现 SST 对性腺发育有重要影响; 陈新军等^[14-16] 指出厄尔尼诺和拉尼娜事件导致 SST 变化, 过高或过低的 SST 均不利于柔鱼的生长, 产区的渔业资源丰度也会受到影响; 魏广恩等^[17] 指出 SST 对柔鱼生活史的各个阶段都有影响; 陈新军等^[18-19] 指出柔鱼生活环境 SST 不同, 会导致后期柔鱼个体特征的差异性。远洋海域的 SST 具有较强的时空动态性与复杂性, 与海域气候条件、季风状况和水文特征等相互耦合。以往研究均采用了海域 SST 均值或距平数据, 缺乏对影响柔鱼生长特征的 SST 动态分布模式的解析。

目前已有研究采用人工智能模型从高时空分辨率遥感图像中提取海洋环境的动态特征, 如 Ducournau 等^[20] 基于深度学习的图像超分辨率模型与复杂的卷积神经网络方法, 采用 SST 数据进行高分辨海洋表面温度场重建。Zeng 等^[21] 采用人工神经网络和经验正交函数相结合的方法对海表面高度数据进行分析, 实现了对墨西哥湾套流变化和涡旋脱落过程的模拟与预测。张天蛟等^[22] 基于深度卷积嵌入式聚类模型 (deep convolutional embedded clustering, DCEC) 提取了 SST 动态特征, 并证明了该方法能够较好地反映西南印度洋海表环境的时空动态特征与规律, 能够显著提高渔场预测模型的预测精度。

本实验拟继续采用 DCEC 模型提取西北太平洋 SST 时空分布模式的动态特征, 并结合 2016 年 7—10 月西北太平洋柔鱼的生物学测定数据, 在分析柔鱼胴长、体重和性腺成熟度等生长特征的基础上, 进一步挖掘海表环境动态特征对不同月份雌、雄柔鱼生长发育变化的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

柔鱼样本来自 2016 年 7—10 月在西北太平洋公海 (40°32'~45°58'N, 152°53'~158°54'E) 的捕捞调查 (图 1, 黑点代表调查站位)。共采样 1 956 尾西北太平洋柔鱼, 样本数据的基本信息如表 1 所示。

SST 数据来源于 NASA GSFC 水色数据网 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 的全球 MODIS-Aqua 和 MODIS-Terra 传感器海表面温度三级反演产品图像, 初始空间分辨率为 0.041 6°×0.041 6°, 时间为 2016 年 7—10 月, 以日为单位, 共 246 张初始图像。

本研究获得了上海海洋大学实验动物管理和使用伦理委员会批准 (SHOU-DW-2016-001), 实验过程中操作人员严格遵守上海海洋大学动物伦理规范, 并按照上海海洋大学动物伦理委员会制定的规章制度执行。

1.2 实验方法

西北太平洋柔鱼生物学测定 对西北太平洋柔鱼样本进行测定, 包括胴长、体重、性别及性腺成熟度等。胴长测量使用皮尺, 精确至 1 mm; 重量用电子弹簧秤测定, 精确至 1 g;

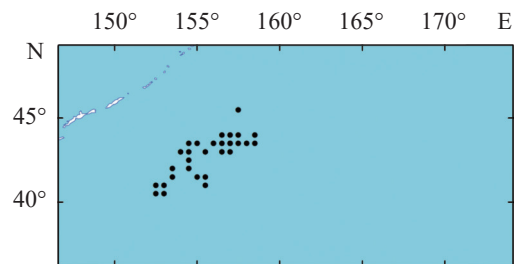


图 1 2016 年 7—10 月西北太平洋柔鱼调查站位分布
Fig. 1 Distribution map of the survey stations in the Northwest Pacific Ocean from July to October 2016

表 1 2016 年 7—10 月西北太平洋柔鱼调查样本信息

Tab. 1 Sample information of *O. bartramii* in the Northwest Pacific from July to October 2016

月份 month	经度 longitude	纬度 latitude	样本数/只 number of samples	胴长范围/mm mantle length range	体重范围/g body weight range
7	152°53'~158°54'	40°32'~43°06'	347	173~338	125~804
8	156°11'~157°11'	43°18'~43°57'	360	192~360	208~1 205
9	156°38'~158°54'	43°34'~45°58'	848	236~4 566	124~548
10	154°30'~157°24'	41°30'~44°28'	401	205~498	233~3 813

性成熟度的划分参照文献^[23], 将性腺的特征变化划分为 I、II、III、IV、V 共 5 期, 其中 I 和 II 为未成熟, III~V 期为成熟个体。

西北太平洋 SST 时空分布模式特征提取

西北太平洋 SST 时空分布模式为能够反映海域 SST 时空分布规律的遥感图像特征。实验按照 2016 年 7—10 月柔鱼调查站位, 裁剪对应的 SST 三级反演图像日数据, 采用 DCEC 模型进行无监督学习, 提取图像的聚类特征, 以体现研究期间各月的西北太平洋 SST 时空动态分布模式。本实验将各月图像的聚类特征划分若干类簇, 每个类别对应一种 SST 时空分布模式。

第一, 采用 MATLAB 软件对 2016 年 7—10 月 MODIS-Aqua 和 MODIS-Terra 的 SST 三级反演图像进行数据预处理: ①图像裁剪, 从每幅图像中裁剪出调查站位所对应的每日 SST 子图, 每幅子图的范围为 0.5°×0.5°, 共得到子图 10086 幅。②对子图进行筛选及融合, 保留能够完整覆盖调查站位的单张 MODIS-Aqua 子图; 单张 MODIS-Aqua 子图不完整时, 将 MODIS-Aqua 和 MODIS-Terra 两张子图进行融合。③将无效像素占比大于 50% 的子图剔除。④针对图像中云覆盖的区域, 采用 Telea 等^[24]提出的快速行进方法对子图进行修复, 即从待修复区域边缘开始, 基于插值方法将未知像素点周围像素值加权求和, 逐渐向内部填充, 直至完成所有区域的修复。

第二, 基于深度卷积嵌入聚类算法对预处理后的子图进行非监督学习。DCEC 模型结构如图 2 所示, 该模型通过深度自编码器, 提取 SST 图像特征进行预训练, 将原始数据非线性映射到 10 维特征空间, 再将其输入到聚类层进行聚类。为了避免对嵌入空间的扭曲, 该算法

使用重构损失和聚类损失的加权和整体网络进行微调, 直至满足收敛性判定标准则停止。图 2 中 x 表示输入图像; x' 表示经过自编码器的重构图像; q 表示生成的聚类结果, 每幅图得到唯一的特征值。

第三, 采用 Davies-Bouldin (DBI)^[25] 指数评估 DCEC 模型的聚类效果, 通过不断迭代, 输出最佳聚类个数, 进而得到聚类特征 q , 流程图如图 3 所示。

将初始聚类数设置为 2, 对输入图像 x 按照 k -means 聚类方法得到初始化聚类中心, 基于损失函数进行迭代至收敛, 计算 DBI 指数, 计算公式:

$$DBI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max_{j \neq i} \left(\frac{\bar{S}_i + \bar{S}_j}{\|w_i - w_j\|_2} \right), \tag{1}$$

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} x_k}{n_i}, \tag{2}$$

式中, N 表示聚类个数; \bar{S}_i 和 \bar{S}_j 表示第 i 个和第 j 个聚类中样本点与同一聚类簇中所有样本 $x_k (1 \leq k \leq n_i)$ 平均值的标准误差; n_i 表示第 i 个聚类中样本点的个数。 $\|w_i - w_j\|_2$ 表示 w_i 和 w_j 之间的距离。DBI 值越小, 样本集的内相似度和类间差异性越高, 聚类效果越好。

第四, 将全部 SST 图像按照最佳聚类个数 q 进行标注, 得到每幅图像的聚类特征值, 将聚类特征值按月分组, 针对每一个调查点提取每组图集的特征值众数, 从而得到各月各站点的 SST 特征类别, 用以反映 SST 时空分布模式。

以上特征提取过程基于 Python 3.7 软件实现。**柔鱼生态学特征与 SST 特征的相关性分析** 采用频度分析法, 分析柔鱼胴长、体重和性腺成熟度的组成。

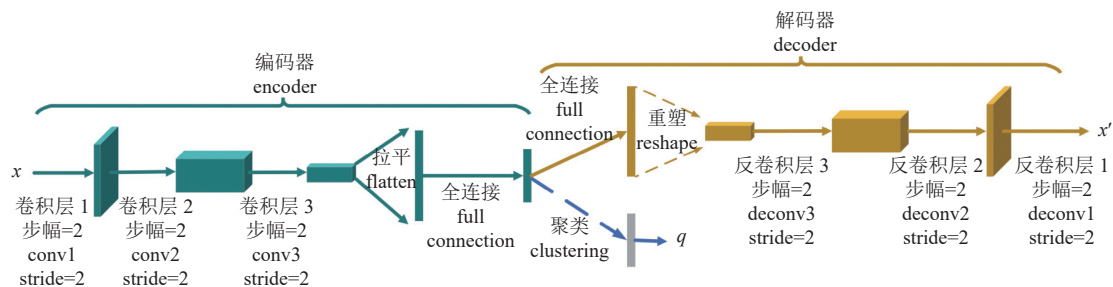


图 2 深度卷积嵌入聚类 (DCEC) 模型

Fig. 2 Deep Convolutional Embedded Clustering (DCEC) model structure

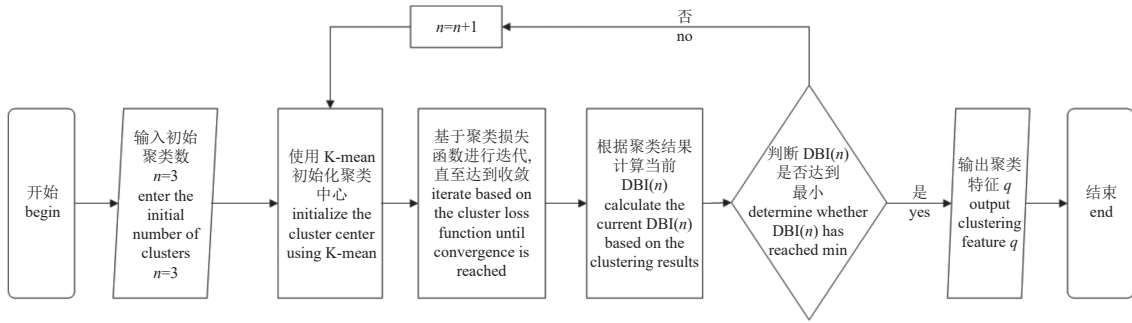


图 3 聚类流程图

Fig. 3 Process of clustering

分别计算雌、雄柔鱼胴长和体重的 Pearson 相关系数, 判断相关性; 在此基础上, 采用幂指数方程, 分月拟合雌、雄柔鱼胴长和体重的关系, 公式:

$$W = aL^b \quad (3)$$

式中, W 为柔鱼体重(g); L 为柔鱼胴长(mm); a 和 b 为参数。 a 为生长的条件因子, b 是生长参数。 a 反映了生物体的肥满度; b 体现了柔鱼的生长速率。当 $b=3$ 时为等速生长; 当 $b>3$ 时为正异速增长, 随胴长的增加, 肥满度升高, 体重也增加; 当 $b<3$ 时为负异速生长, 随胴长的增加, 肥满度降低, 身体朝细长的方向发展。

对于每个月份的所有站点, 按照其 SST 时空分布模式进行归类, 计算相同 SST 分布模式下各站点的柔鱼胴长、体重分布与性腺成熟度等生物学特征平均值, 从而对比分析各月 SST 时空分布模式对柔鱼各生物学特征的影响。具体地, 采用方差分析方法, 分析各月 SST 时空分布模式对柔鱼胴长和体重的差异性; 通过卡方检验, 分析各月 SST 时空分布模式下柔鱼性腺成熟度的差异性; 通过绘制箱型图, 对比分析各月 SST 时空分布模式下雌、雄柔鱼胴长和体重的分布; 利用频度分析法, 对比分析各月 SST 时空分布模式下雌、雄柔鱼性腺成熟度情况。

以上统计分析均采用 Microsoft Excel 和 SPSS statistics 24 软件进行, 图表采用 Origin 2019b 和 Microsoft Excel 软件绘制。

2 结果

2.1 胴长、体重和性腺成熟度组成

通过性别目测柔鱼样本, 最终确定雌性样

本 1 063 尾, 雄性 893 尾。在雌性个体中, 胴长范围为 124~548 mm, 优势胴长组为 200~360 mm, 占总样本数的 93.6%; 在雄性个体中, 胴长范围为 166~348 mm, 优势胴长组为 200~320 mm, 占整体样本比 93.06% (图 4)。

雌性个体体重范围为 142~4 566 g, 雄性个体体重范围为 125~1 236 g。雌性个体优势体重组为 200~1 400 g, 占总样本数的 95.77%; 雄性个体优势体重组为 200~1 000 g, 占总样本数的 95.63% (图 5)。

对于雌性个体, 柔鱼性腺成熟度以 I 期和 II 期为主, III 期样本所占比例较小, 未发现 IV 期和 V 期柔鱼个体。在雄性个体中, 仍以 I 期和 II 期为主, III 期样本所占比例较小, 发现少量 IV 期柔鱼, 未发现 V 期柔鱼个体 (图 6)。

在雌性群体中, 在胴长小于 240 mm 时, I 期个体占比最大; 在胴长为 240~320 mm 时, 以 II 期柔鱼个体为主; 胴长为 320~360 mm 时, 首次出现柔鱼成熟个体; 在胴长大于 400 mm

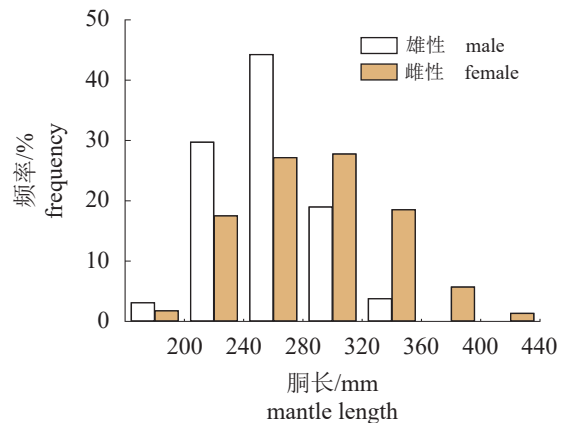


图 4 雌性和雄性柔鱼胴长组成

Fig. 4 Composition of mantle length of *O. bartramii*

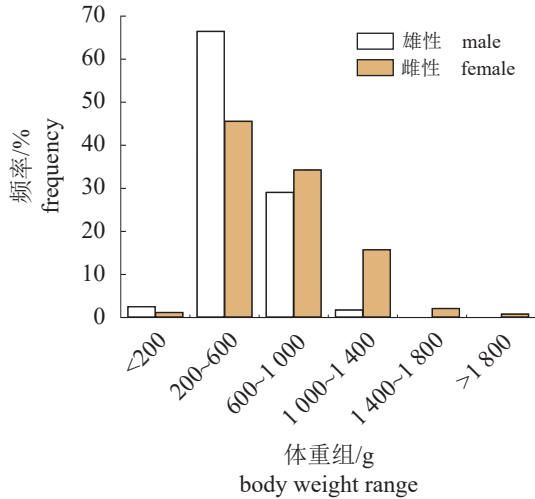


图 5 雌性和雄性柔鱼体重组成

Fig. 5 Composition of body weight of *O. bartramii*

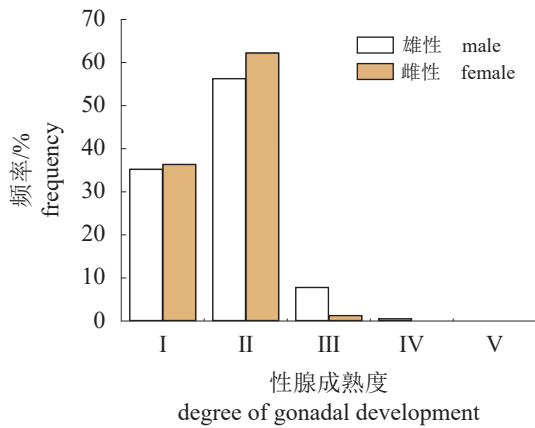


图 6 雌性和雄性柔鱼性腺发育程度 (I~V 期) 组成

Fig. 6 Composition of the degree of gonadal development (stage I-V) of *O. bartramii*

时, 柔鱼雌性成熟个体和未成熟柔鱼个体的比例约等于 1:1 (图 7)。

在雄性群体中, 在胴长组为 240~280 mm 时, 首次出现成熟柔鱼个体, 与雌性柔鱼个体相比, 性腺发育程度较雌性早。在胴长组为 320~360 mm 时, 雄性成熟柔鱼个体占比大于未成熟柔鱼个体。

2.2 胴长与体重的关系

通过计算 Pearson 相关系数发现, 柔鱼个体胴长和体重具有显著相关性 ($r=0.928$, $P<0.05$); 基于幂指数方程分月拟合雌雄柔鱼胴长和体重关系, 结果显示, 7—10 月, 雌、雄柔鱼的体重随胴长的增长呈指数增长趋势, 且增长趋势相近, 在一定程度上反映了个体的生长

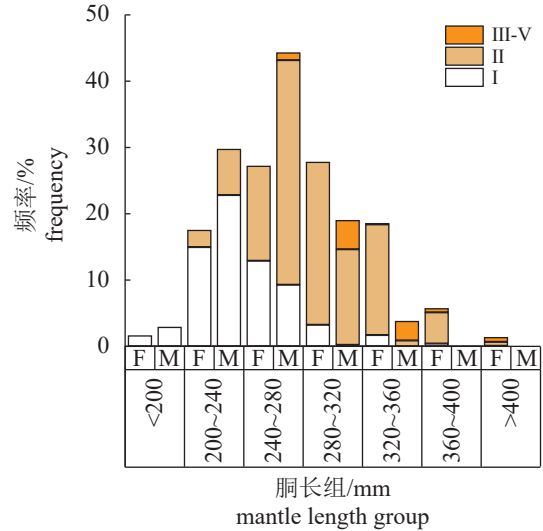


图 7 不同性腺发育程度雌性和雄性柔鱼 (I 期, II 期, III~V 期) 的胴长频率分布

F. 雌性, M. 雄性, 下同。

Fig. 7 Mantle length distribution by different gonadal maturation (stage I, II, III-V) of *O. bartramii*

F. female, M. male, the same below.

状况 (图 8)。

7 月, 雄性 a 值大于雌性 a 值, 雄性个体的肥满度较雌性高; 8 月, 雌性 a 值较大, 说明此时雌性个体具有较好的肥满度, 仍处于生长发育阶段, 而雄鱼 b 值较大, 并出现了部分雄性成熟个体, 说明雄性生长速率较雌性快; 9 月, 雌性 a 值较大, 雌性生长速率大于雄性; 10 月, 雄鱼 b 值较大, 说明雄性生长速率较雌性快。

2.3 SST 时空分布模式与胴长、体重和性腺成熟度的关系

基于 DCEC 模型的 SST 分布特征提取结果

基于聚类损失函数进行迭代, 确定 DCEC 模型的最佳聚类个数 n 为 7, 进而得到对应的聚类特征图。将聚类特征图按月分组, 针对每一个调查点提取每组图集的特征值众数, 得到共 4 类温度分布模式, 对应编码 0、1、2 和 3, 在每一类中随机选取 10 张聚类特征图 (图 9)。

图 9 中, 4 类分布模式具有明显区别, 每一类均具有明显的内部规律。例如, SST 时空分布模式 0 和 SST 时空分布模式 1 的温度空间分布较为均匀, 但模式 1 的平均温度比模式 0

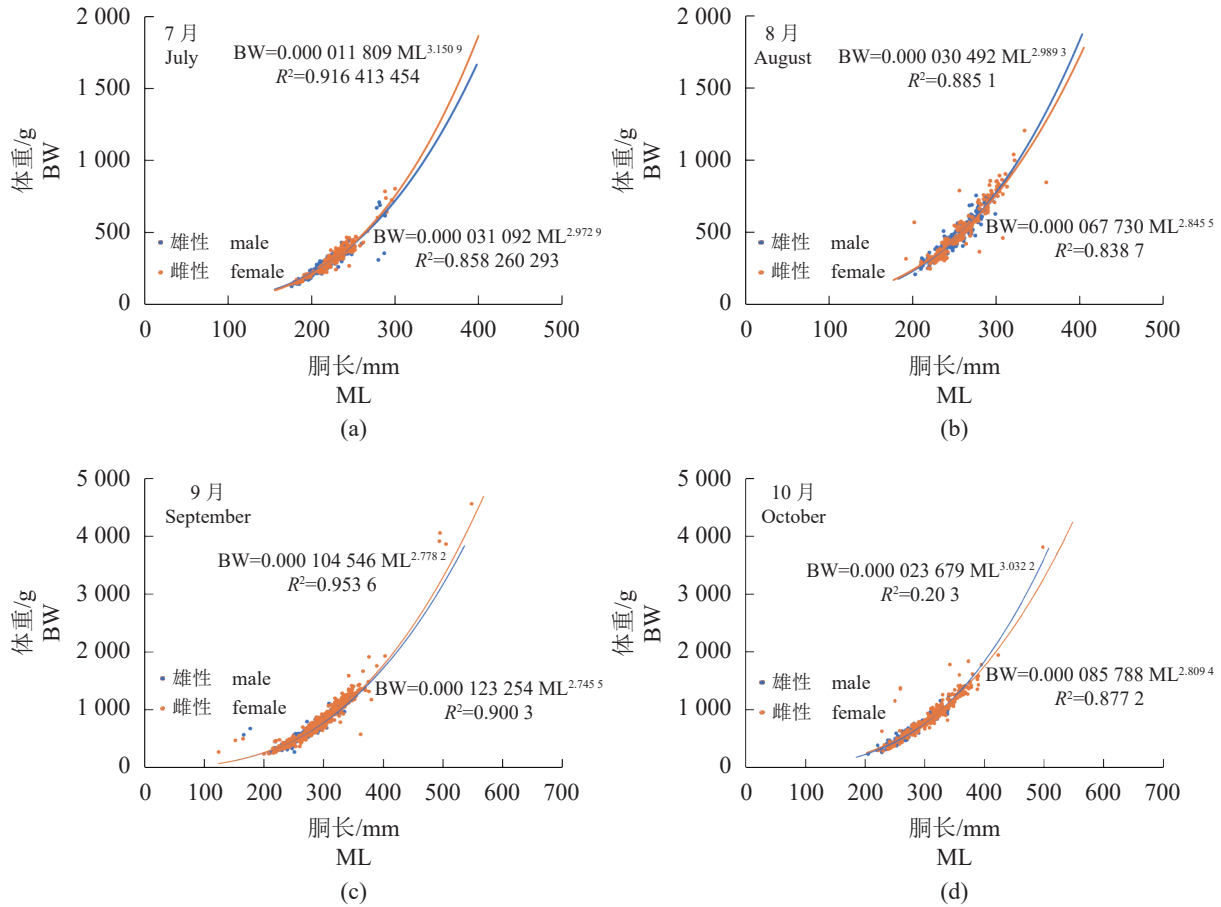


图 8 西北太平洋雌雄柔鱼胴长和体重的关系

BW.体重, ML.胴长, 下同。

Fig. 8 Relationship between mantle length and body weight of *O. bartramii*

BW. body weight, ML. mantle length, the same below.

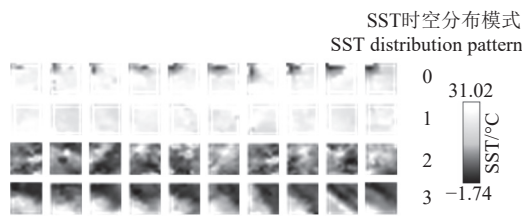


图 9 基于 DCEC 模型提取的 4 类 SST 时空分布模式图集

每一类随机选取 10 张图片。

Fig. 9 The four types of SST distribution pattern extracted from DCEC model

10 images are randomly selected from each category.

的平均温度更高, 模式 0 西北处有一处冷水流; SST 时空分布模式 2 体现了更加复杂的暖冷流相互交汇与包围的模式, 冷水流范围较大; SST 时空分布模式 3 体现了暖流从西南方向与冷流交汇, 暖水流不断向东北方向延伸。

7—10 月各调查站点对应的 SST 时空分布模式分布结果显示, 不同站点的每日 SST 时空分布特征, 由于受到厄尔尼诺现象、黑潮和亲潮等影响而有所差异, 导致在机器学习聚类后, 提取的遥感图像特征有所不同, 因此形成了每个月不同站点不同类别的温度分布模式 (图 10)。具体体现: 7 月偏南的调查点位主要以 SST 时空分布模式 1 为主, 随着位置向东北偏移, 逐渐出现了模式 0、2 和 3, SST 时空分布模式由均匀分布过渡到冷暖流交汇、融合的复杂分布; 8 月调查点位分布较为集中, SST 时空分布模式均匀单一, 均为模式 1; 9 月调查点集中在中部海域, 以均匀分布的模式 0 和模式 1 为主, 在调查点位聚集中心, 有一处呈现了暖流与冷流交汇的 SST 时空分布模式 3; 10 月调查点位分布呈“S”型, 整体海域温度模式分布均匀, 仅有一处呈现了暖流与冷流交汇模式 3。

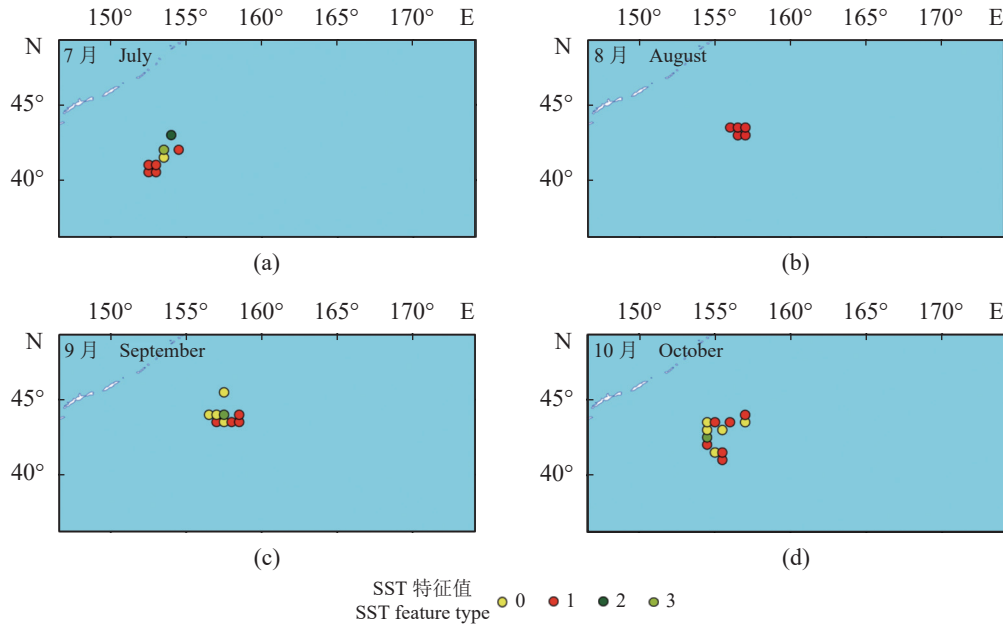


图 10 2016 年 7—10 月各月调查站点对应的月 SST 时空分布模式

Fig. 10 SST distribution pattern corresponding to the survey stations in the Northwest Pacific Ocean from July to October 2016

SST 时空分布模式与柔鱼胴长、体重及性腺成熟度的关系 通过方差分析发现, 柔鱼体重在不同 SST 时空分布模式下存在显著差异 ($P < 0.05$), 胴长在不同 SST 时空分布模式下存在显著差异 ($P < 0.05$); 通过 SST 时空分布模式卡方检验发现, 柔鱼的性腺成熟度在不同 SST 时空分布模式下存在显著差异 ($\chi^2 = 161.541$, $P < 0.05$)。各月 SST 时空分布模式下的柔鱼平均体重、平均胴长, 以及性腺成熟度 III 级以上所占百分比, 如图 11 所示。

7—8 月, 柔鱼体重、胴长以及性腺成熟度与 SST 时空分布模式的关系不显著; 9 月, 柔鱼平均体重、平均胴长及成熟个体数量百分比在 SST 分布模式 1 下达到最大值; 10 月, 柔鱼体重与胴长受模式 3 影响明显, 成熟个体数量百分比在模式 1 下达到最大值。

图 12 为各月 SST 时空分布模式与雌、雄柔鱼体重分布箱型图的对应关系。7 月, 4 种 SST 时空分布模式对应的雌、雄个体体重均较轻, 受温度影响不大; 8 月 SST 时空分布仅有模式 1, 柔鱼雌、雄个体体重平均值接近, 但雄性柔鱼个体体重分布较雌性柔鱼个体体重分布集中; 9 月, SST 时空分布模式为 1 时, 雌性体重明显增大; 10 月, SST 时空分布模式为 1 时, 雌性体重普遍高于柔鱼雄性体重; 模式为 3 时, 柔鱼雌、雄个体均达到最大值。

图 13 为各月 SST 时空分布模式与雌、雄柔鱼胴长的对应关系。在相同的 SST 时空分布模式下, 雌性胴长普遍高于雄性胴长。7 月, 雌性和雄性的平均胴长为 200~250 mm, 差距不大。8 月, 在 SST 时空分布模式相同的情况下, 雌性和雄性的胴长接近; 9 月, SST 时空分布模式为 1 时, 雌性胴长明显较大。10 月, SST 时空分布模式为 1 时, 雌性胴长普遍大于雄性。分布模式为 3 时, 雌、雄个体的平均胴长均达到最大值, 雌、雄个体之间胴长差距缩小。

图 14 为各月 SST 时空分布模式与雌、雄柔鱼性腺成熟度频率分布的对应关系。7 月, 雌、雄个体的性腺成熟度以 I 级为主; 8 月, 雌雄性腺成熟度逐渐过渡为 II 级; 9 月, 雌雄个体的性腺成熟度逐渐向 III 级过渡, 在 SST 时空分布模式为 0 和 1 时, 雌雄 III 级成熟个体出现, 且分布模式 1 下的雄性成熟比例较大; 10 月, III~V 级成熟个体出现在 SST 时空分布模式为 0 和 1 时, 且分布模式 1 下的雄性成熟比例较大。

3 讨论

3.1 西北太平洋柔鱼的胴长、体重与性成熟度分析

对 2016 年 7—10 月西北太平洋雌雄柔鱼的胴长、体重与性成熟度组成的分析结果表明,

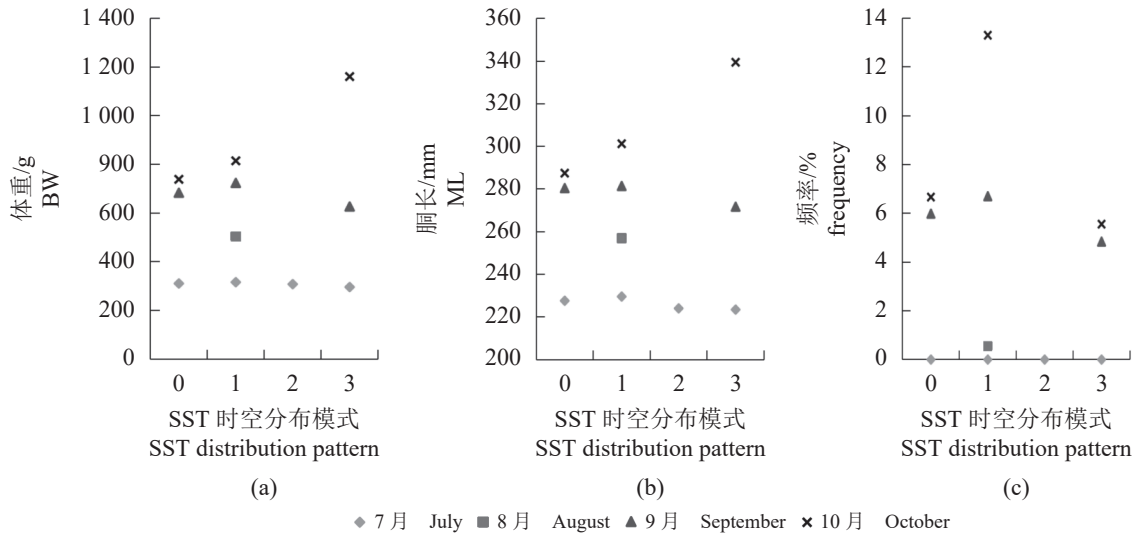


图 11 2016 年 7—10 月 SST 时空分布模式下的柔鱼平均体重 (a)、平均胴长 (b), 以及性腺成熟度 III 级以上所占百分比 (c)

Fig. 11 Average body weight (a), mean mantle length (b), and percentage of gonadal maturity level III or above (c) in the SST distribution pattern from July to October 2016

总样本中雌性数量约为雄性数量的 1.20 倍, 总体上雌性的平均胴长和体重均比雄性偏大; 在相同的胴长情况下, 雄性成熟个体数量大于雌性。通过以上可以判断, 柔鱼雌雄个体的生长、发育不完全同步, 雌性生长速率较快, 雄性发育速率较快。这与唐峰华等^[26]的研究结果相似, 该研究指出雌雄个体生长速率存在差异性, 由于雄性繁殖的时间长, 所以较早进入性成熟阶段。

7 月, 样本中未发现成熟个体, 8、9、10 月样本中均存在一定数量的成熟个体, 且数量所占的比例逐渐增加, 测定月份越大, 其体重越大, 胴长越长, 性腺成熟度越高。8 月, 首次发现雄性成熟个体, 9 月, 首次发现雌性个体, 柔鱼成熟 (性成熟度达到 III) 时, 雄性柔鱼胴长大小约为 32~34 cm, 雌性柔鱼胴长大小为 36~40 cm, 最大可达 54 cm, 这与余为等^[27]和黄洪亮等^[28]的研究结果相似。

各月胴长和体重关系的幂指数方程显示, 7 月, 雄性个体的肥满度较雌性高, 但对应的胴长和体重相比其他月份均最低, 可判断出 7 月之前处于西北太平洋柔鱼雌雄群体的产卵和繁殖期, 这与唐峰华等^[26]研究结果一致。8 月, 雌性 a 值较大, 说明此时雌性个体具有较好的肥满度, 仍处于生长发育阶段, 而雄鱼 b 值较大, 并出现了部分雄性成熟个体, 说明雄性生

长速率较雌性快。9 月, 雌性生长速率大于雄性, 这可能由于西北太平洋柔鱼雌性群体生殖投入大, 在生长发育过程中, 将所补给的能量和转化肌肉组织能量供给性腺发育^[29], 导致雌性快速生长。此时, 部分雌性个体已达到成熟阶段。10 月, 雌、雄柔鱼个体逐渐成熟, 体重值和胴长值逐渐上升, 为盛渔期。已有研究表明, 柔鱼的个体生长和性腺成熟度同步发育, 性腺发育成熟后的个体不再摄食。9—10 月柔鱼成熟个体居多且不再摄食, 幼体摄食的竞争对手减少, 摄食量充足, 体重和胴长不断增加^[30]。对 7—10 月的研究结果可以看出, 秋季对于西北太平洋柔鱼而言是一个主要的生长季节, 这与董正之^[31]的研究结果相吻合。

3.2 SST 时空分布模式对胴长、体重和性腺成熟度的影响

本研究表明, 基于 DCEC 模型提取的 4 类 SST 图像特征, 能够较好地代表 7—10 月各调查站点对应的海表温度特征与规律。例如, 7 月, 南部调查点位温度分布均匀且偏高, 东北调查点位温度逐渐降低, 并呈现了更加复杂的冷暖流交汇现象。2015/2016 厄尔尼诺现象在初夏 (6—7 月) 迅速衰减, 使得西北太平洋南侧存在着较强的反气旋环流, 出现了强烈的暖海温异常现象, 随着南侧东风异常的不断发

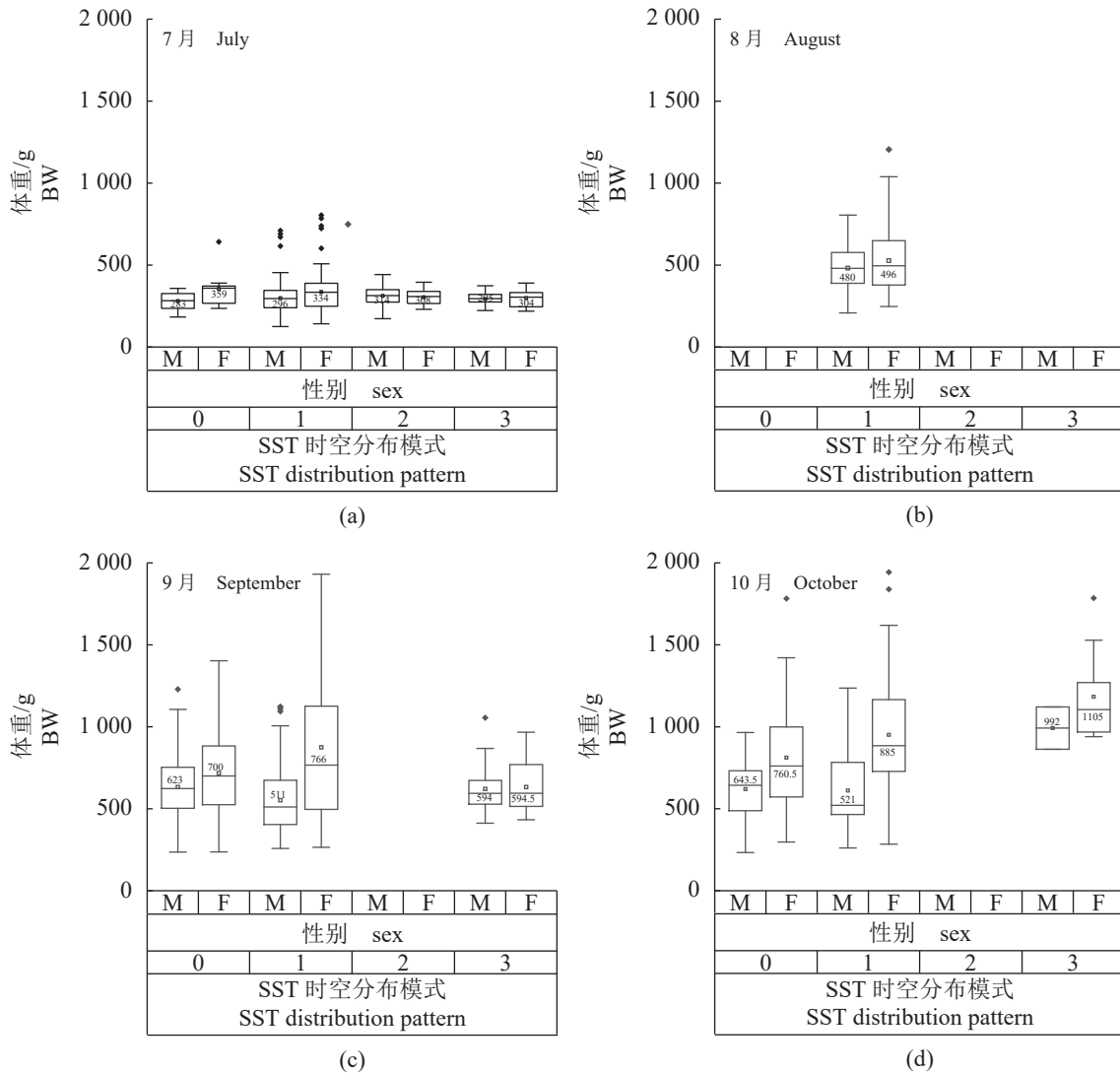


图 12 2016 年 7—10 月海表温度时空分布模式与雌雄柔鱼体重的对应关系
 Fig. 12 Correspondence between SST distribution pattern and body weight of male and female *O. bartramii* from July to October 2016

东北部冷暖流交汇融合^[32-33]。8—10月,反气旋环流减弱至消退,调查点位温度分布以模式0和模式1均匀分布为主,但温度高低不同,在零星点位呈现了暖流与冷流交汇模式。由于柔鱼的传统作业渔场一般位于黑潮和亲潮的交汇处,作业位置呈现的温度高低变化,这与黑潮和亲潮相对强弱有关^[34]。

结果显示,柔鱼体重、胴长和性腺成熟度在不同 SST 时空分布模式下存在显著差异;不同月份柔鱼的体重、胴长和性腺成熟度与 SST 时空分布模式的关系也不同。例如,7、8月,由于在渔汛初期,不同 SST 时空分布模式下柔鱼个体生长发育的差异性不大;9、10月,柔

鱼处于快速生长发育阶段,体重、胴长和性腺成熟度在不同 SST 时空分布模式下存在显著差异。SST 时空分布模式为 0 时,温度分布均匀但温度较低,柔鱼体重、胴长和性成熟个体数量均偏低;在 SST 时空分布模式为 1 时,温度分布均匀但温度升高,柔鱼体重、胴长和性成熟个体数量上升明显,且分布范围更广。这也证明了水温是影响头足类生长发育的重要环境因子,决定着个体的生长速率进而影响体型大小^[35]。Staff 等^[36]和连晋新等^[37]的研究表明,在适宜的水温条件下,柔鱼的生长速率随水温的升高而加快,从而促进柔鱼个体的生长发育,柔鱼个体较早进入成熟期。Arkhipkin 等^[38]研

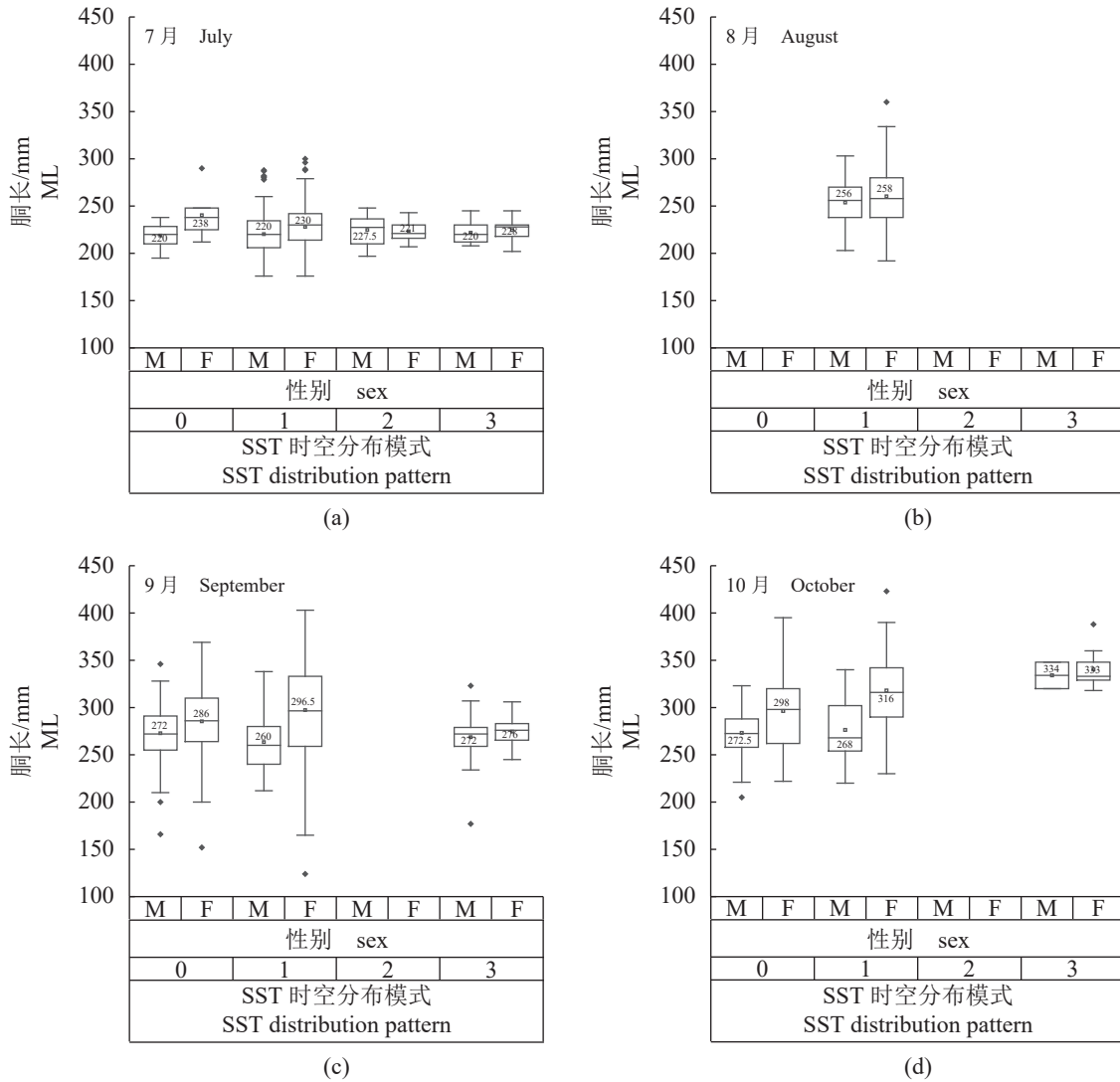


图 13 2016 年 7—10 月海表温度分布模式与雌雄柔鱼胴长的对应关系

Fig. 13 Correspondence between SST distribution pattern and mantle length of *O. bartramii* from July to October 2016

究表明, SST 与柔鱼生命周期呈负相关。温度越高, 发育速度越快, 柔鱼个体较早进入成熟期。

7 月, 最北部的调查点位呈现了 SST 时空分布模式为 2 的情况, 冷暖水相遇后交汇融合, 整体温度偏低, 对应的柔鱼体重、胴长值相比其他 SST 时空分布模式偏低。这与陈新军等^[34]的研究结论类似, 该研究指出柔鱼向北或东北洄游时, 进入黑潮与亲潮交汇区, 海面高度变化大, 海水发生强烈的垂直运动, 引起温度梯度急剧变化, 黑潮和亲潮交汇对柔鱼的生长以及补充产生巨大的影响, 会使渔场水温降低, 不利于柔鱼的生长发育。10 月, 调查点位中部

呈现了一处 SST 时空分布模式为 3 的情况, 冷暖水相遇后形成了比较明显的界限, 此时柔鱼胴长和体重达到最大值。主要原因是调查点位处在亲潮前锋区域, 亲潮丰富的养分使得其经过的水域成为富裕的渔场^[19], 为柔鱼的生长提供了有利条件, 柔鱼快速生长发育^[39]。

本研究表明, 在 9—10 月不同的 SST 时空分布模式下, 雌、雄柔鱼的生长发育特征差异明显。9—10 月, SST 时空分布模式 1 对应的温度分布均匀且温度较高, 对应调查点位的雌鱼生长速度明显较雄鱼快, 体重和胴长明显增大, 但雄性成熟速率较雌性更快。进一步证明了在均匀适宜的温度范围下, 雌性柔鱼生长较

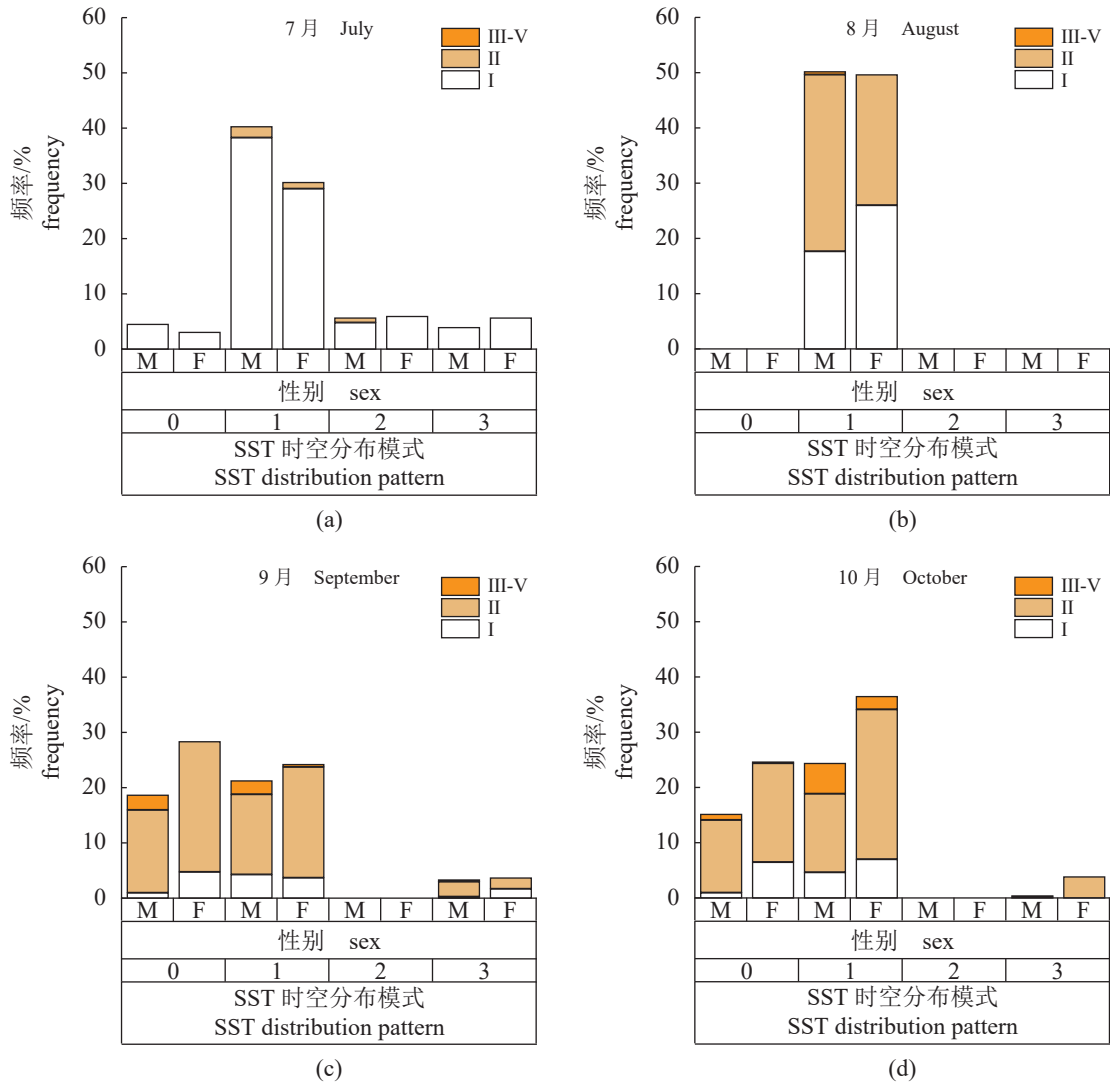


图 14 2016 年 7—10 月海表温度分布模式对应的柔鱼雌雄性群体性腺发育度的频率分布
 Fig. 14 Distribution pattern of SST distribution pattern and the frequency distribution of gonadal development *O. bartramii* from July to October 2016

雄性快, 而雄性柔鱼在较小胴长时达到性成熟。已有研究发现^[35], 高温环境会使同科的雄性茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 出现性早熟的现象, 雄性柔鱼在较小胴长时达到性成熟, 是为完成与不同时期性成熟雌性柔鱼生殖交配这一繁殖策略。10 月, 模式 3 对应的温度分布模式为冷暖交汇情况时, 柔鱼雌、雄体重与胴长均达到最大值, 且雌性普遍高于雄性, 说明冷暖流交汇时更能促进雌性个体的快速生长。冷暖流交汇时会把下层饵料带到上层, 从而为雌性快速成长提供更多营养物质。但 SST 时空分布模式 3 对应的雌雄样本中并没有成熟个体, 说明柔鱼的性腺发育对环境适宜性要求较高, 冷暖流交汇可能

会同时延缓雌、雄柔鱼的性腺发育。

4 结论

本研究基于 2016 年 7—10 月西北太平洋柔鱼的生物学测定数据, 在分析柔鱼胴长、体重和性腺成熟度等生长特征的基础上, 采用 DCEC 模型提取了西北太平洋 SST 时空分布模式, 进而分析了不同月份 SST 时空分布模式对雌、雄柔鱼生长发育变化的影响。研究表明: ① 2016 年 7—10 月, 西北太平洋雌、雄柔鱼的生长与发育不完全同步, 雌性生长速率较快, 雄性性腺发育速率较快。② 基于 DCEC 模型提取得到了 4 类 SST 图像特征, 能够较好地反映

各月调查站点对应的海表温度特征与规律, 体现了厄尔尼诺现象、黑潮和亲潮等对海表温度的影响。③ 7—8月, 柔鱼平均体重、胴长和性腺成熟度偏低, 雌、雄个体差别不大, 与 SST 时空分布模式的关系不显著。④ 9—10月, 在 SST 变化较均匀但整体温度较低时, 柔鱼平均体重、胴长和性腺成熟度均偏低; 在 SST 变化较均匀但整体温度升高时, 柔鱼的平均体重、胴长和性成熟个体数量明显上升, 雌鱼生长速率较雄鱼快, 但雄性成熟速率较雌性更快; 冷暖水相遇后形成了比较明显的界限, 此时雌、雄柔鱼的胴长和体重达到最大值, 但性腺发育有所延缓。

参考文献 (References):

- [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.
Wang Y G, Chen X J. The resource and biology of economic oceanic squid in the world[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005(in Chinese).
- [2] Forsythe J W. Accounting for the effect of temperature on squid growth in nature: from hypothesis to practice[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2004, 55(4): 331-339.
- [3] Chen X J, Zhao X H, Chen Y. 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
- [4] Bazzino G, Quiñones R A, Norbis W. Environmental associations of shortfin squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Northern Patagonian Shelf[J]. *Fisheries Research*, 2005, 76(3): 401-416.
- [5] 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.
- [6] Chen C S, Haung W B, Chiu T S. Different spatiotemporal distribution of Argentine short-finned squid (*Illex argentinus*) in the Southwest Atlantic during high-abundance year and its relationship to sea water temperature changes[J]. *Zoological Studies*, 2007, 46(3): 362-374.
- [7] Waluda C, Rodhouse P, Podestá G, et al. Surface oceanography of the inferred hatching grounds of *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) and influences on recruitment variability[J]. *Marine Biology*, 2001, 139(4): 671-679.
- [8] Márquez L, Larson M, Almansa E. Effects of temperature on the rate of embryonic development of cephalopods in the light of thermal time applied to aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 706-718.
- [9] Alabia I D, Saitoh S I, Mugo R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific[J]. *Fisheries Oceanography*, 2015, 24(2): 190-203.
- [10] Xu J, Chen X J, Chen Y, et al. The effect of sea surface temperature increase on the potential habitat of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(2): 109-116.
- [11] 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(3): 108-116.
- [12] 韩飞, 陈新军, 林东明. 东太平洋赤道海域茎柔鱼组织能量积累及其与海表面环境因子的关系 [J]. *中国水产科学*, 2020, 27(4): 427-437.
Han F, Chen X J, Lin D M. Energy accumulation and its relation to sea surface environments in *Dosidicus gigas* from the equatorial water of the Eastern Pacific[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(4): 427-437 (in Chinese).
- [13] Velázquez C Q, Herrera A H, Velázquez-Abunader I, et al. Maturation, age, and growth estimation of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the central region of the Gulf of California[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2013, 32(2): 351-359.
- [14] 隋芯, 汪金涛, 陈新军等. 厄尔尼诺事件对西北太平洋柔鱼种群动态的影响 [J]. *水产学报*, 2022, 46(8): 1345-1356.
Sui X, Wang J T, Chen X J. Impacts of the El Niño event on the population dynamics of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(8): 1345-1356(in Chinese).
- [15] 王岩, 陈新军, 方舟. 海洋环境变化对北太平洋柔鱼耳石形态的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(2): 301-310.
Wang Y, Chen X J, Fang Z. Effects of marine environment variation on the statolith morphology of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the north Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(2): 301-310 (in Chinese).
- [16] Yu W, Chen X J, Chen C S, et al. Impacts of oceanographic

- factors on interannual variability of the winter-spring cohort of neon flying squid abundance in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(10): 48-59.
- [17] 魏广恩, 陈新军. 北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 资源渔场研究进展 [J]. *广东海洋大学学报*, 2016, 36(6): 114-122.
- Wei G E, Chen X J. Review on neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) resources and fishing ground in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2016, 36(6): 114-122 (in Chinese).
- [18] 陈新军, 田思泉, 许柳雄. 西北太平洋海域柔鱼产卵场和作业渔场的水温年间比较及其与资源丰度的关系 [J]. *上海水产大学学报*, 2005, 14(2): 168-175.
- Chen X J, Tian S Q, Xu L X. Analysis on changes of surface water temperature in the spawning and feeding ground of *Ommastrephes bartrami* and its relationship with abundance index in the Northwestern Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2005, 14(2): 168-175 (in Chinese).
- [19] 陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子的关系 [J]. *上海水产大学学报*, 1995, 4(3): 181-185.
- Chen X J. An approach to the relationship between the squid fishing ground and water temperature in the Northwestern Pacific[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1995, 4(3): 181-185 (in Chinese).
- [20] Ducournau A, Fablet R. Deep learning for ocean remote sensing: An application of convolutional neural networks for super-resolution on satellite-derived SST data[C]//IEEE. Proceedings of 2016 9th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS). Cancun: IEEE, 2016: 1-6.
- [21] Zeng X M, Li Y Z, He R Y. Predictability of the loop current variation and eddy shedding process in the Gulf of Mexico using an artificial neural network approach[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(5): 1098-1111.
- [22] 张天蛟, 廖章泽, 宋博, 等. 基于深度卷积嵌入式聚类 (DCEC) 的海洋环境特征提取对渔情预报模型的改进研究——以西南印度洋大眼金枪鱼为例 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(8): 105-117.
- Zhang T J, Liao Z Z, Song B, et al. Improvement of marine environment feature extraction based on deep convolution embedded clustering (DCEC) for fishery forecast model—a case study of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Southwest Indian Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(8): 105-117 (in Chinese).
- [23] Lipiński M R, Underhill L G. Sexual maturation in squid: quantum or continuum?[J]. *South African Journal of Marine Science*, 1995, 15(1): 207-223.
- [24] Telea A. An image inpainting technique based on the fast marching method[J]. *Journal of Graphics Tools*, 2004, 9(1): 23-34.
- [25] Arbelaitz O, Gurrutxaga I, Muguerza J, et al. An extensive comparative study of cluster validity indices[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(1): 243-256.
- [26] 唐峰华, 伍玉梅, 樊伟. 北太平洋柔鱼生殖群体结构特征及繁殖生物学 [J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(7-8): 72-78.
- Tang F H, Wu Y M, Fan W. Population structure and reproductive biology of mature neon flying squid in the North Pacific Ocean[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(7-8): 72-78 (in Chinese).
- [27] 余为, 陈新军, 易倩, 等. 北太平洋柔鱼早期生活史研究进展 [J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(5): 755-762.
- Yu W, Chen X J, Yi Q, et al. Review on the early life history of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the North Pacific[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(5): 755-762 (in Chinese).
- [28] 黄洪亮, 郑元甲, 程家骅. 北太平洋海区柔鱼生物学特征研究 [J]. *海洋渔业*, 2003, 25(3): 126-129,135.
- Huang H L, Zheng Y J, Cheng J H. Study on the biological characteristics of *Ommastrephes bartrami* in the North Pacific[J]. *Marine Fisheries*, 2003, 25(3): 126-129,135 (in Chinese).
- [29] Lin D M, Chen X J, Chen Y, et al. Sex-specific reproductive investment of summer spawners of *Illex argentinus* in the southwest Atlantic[J]. *Invertebrate Biology*, 2015, 134(3): 203-213.
- [30] Arkhipkin A. Age, growth, stock structure and migratory rate of pre-spawning short-finned squid *Illex argentinus* based on statolith ageing investigations[J]. *Fisheries Research*, 1993, 16(4): 313-338.
- [31] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 82-90.
- Dong Z Z. Biology of the economic species of Cephalopods in the world oceans[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1991: 82-90 (in Chinese).
- [32] 陈卫, 陆日宇. 2015/2016 厄尔尼诺事件的衰减位相及其对应的西北太平洋环流异常 [J]. *大气科学学报*, 2016, 39(6): 766-777.
- Chen W, Lu R Y. Decaying phase of the 2015/2016 El Niño event and its associated western North Pacific atmospheric cir-

- culation anomaly[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2016, 39(6): 766-777 (in Chinese).
- [33] 殷明, 肖子牛, 李崇银, 等. 2015年西北太平洋热带气旋活动特征及强 El Niño 现象对其影响的初步分析 [J]. 气象, 2016, 42(9): 1069-1078.
- Yin M, Xiao Z N, Li C Y, et al. Analysis on features of tropical cyclone activities over the western North Pacific in 2015 and their variations associated with strong El Niño[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(9): 1069-1078 (in Chinese).
- [34] 陈新军, 曹杰, 田思泉, 等. 表温和黑潮年间变化对西北太平洋柔鱼渔场分布的影响 [J]. 大连水产学院学报, 2010, 25(2): 119-126.
- Chen X J, Cao J, Tian S Q, et al. Effect of inter-annual change in sea surface water temperature and Kuroshio on fishing ground of squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2010, 25(2): 119-126 (in Chinese).
- [35] 王岩, 陈新军, 方舟. 海洋环境变化对北太平洋柔鱼个体生长的影响 [J]. 水产学报, 2022, 46(4): 569-582.
- Wang Y, Chen X J, Fang Z. Effects of marine environment variation on the growth of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the north Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 569-582 (in Chinese).
- [36] Staaf D J, Zeidberg L D, Gilly W F. Effects of temperature on embryonic development of the Humboldt squid *Dosidicus gigas*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2011, 441: 165-175.
- [37] 连晋欣, 臧娜, 林东明, 等. 东太平洋赤道海域茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 的体型月间变化及环境效应 [J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(4): 1007-1018.
- Lian J X, Zang N, Lin D M, et al. Monthly variation in body size of *Dosidicus gigas* and environmental responses in the equatorial waters of eastern pacific ocean[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(4): 1007-1018 (in Chinese).
- [38] 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.
- [39] 唐峰华, 张胜茂, 杨胜龙, 等. 海洋环境要素对北太平洋柔鱼中心渔场时空分布的影响效应 [C]//中国水产学会. 2011年中国水产学会学术年会论文摘要集. 厦门: 中国水产学会, 2011.
- Tang F H, Zhang S M, Yang S L, et al. Effect of marine environmental elements on spatiotemporal distribution of neon flying squid in the north Pacific fishing ground[C]//China Society of Fisheries. Abstract Collection of Academic Conference Papers. Xiamen: China Society of Fisheries, 2011 (in Chinese).

Effects of sea surface temperature distribution patterns on the biological characteristics of neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the Northwest Pacific

ZHANG Tianjiao¹, ZHANG Shanshan¹, YUAN Hongchun^{1*}, YU Wei²

1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) is an economically important cephalopod with a short life cycle, and its biological characteristics are highly susceptible to changes in sea surface temperature (SST). This study aims to investigate the influence of SST distribution patterns in the Northwest Pacific on the growth and development of neon flying squid, using deep learning methods to analyze temporal and spatial variations. Data on mantle length, body weight and gonad maturity of *O. bartrami* from July to October 2016 were analyzed, and the relationship between mantle length and body weight was modeled using a power index equation. The Deep Convolutional Embedded Clustering (DCEC) model was employed to extract SST distribution patterns from MODIS-Aqua and MODIS-Terra three-level inversion image data. The results showed that: ① During July to October 2016, the growth and development of female and male *O. bartrami* in the Northwest Pacific were not completely synchronized; females exhibited a faster growth rate, while males had a faster gonad development rate. ② Four types of SST image features extracted using DCEC model reflected the monthly SST characteristics of survey sites, corresponding to the effects of *El Niño*, Kuroshio Current, and Oyashio Current. ③ From July to August, squid exhibited low average body weight, mantle length, and gonad maturity, with minimal differences between sexes and no significant relationship with SST distribution pattern. ④ From September to October, when SST changed uniformly but overall temperatures were low, squid had low average weight, mantle length, and gonad maturity. However, when SST changed uniformly with an overall temperature, average body weight, mantle length, and the number of sexually mature individuals significantly increased. Females grew faster than males, but male maturity rates exceeded those of females. When cold and warm waters met, forming a clear boundary, squid mantle length and weight reached their maximum, but gonad development was delayed. This study, based on the deep learning DCEC model, provides insights into the effects of SST distribution patterns on the growth and development of neon flying squid and offers a reference for further understanding the biological characteristics of *O. bartrami* in the Northwest Pacific.

Key words: *Ommastrephes bartrami*; sea surface temperature (SST) distribution model; deep convolution embedded clustering (DCEC) model; biological characteristics; the Northwest Pacific

Corresponding author: YUAN Hongchun. E-mail: hcyuan@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2019YFD0901405); Shanghai Ocean University Science and Technology Development Special Fund (A2-2006-22-200204)