

大亚湾西南海域尖笔帽螺 2020 年 7 月 暴发期内的分布特征*

刘岱¹ 应轲臻² 蔡中华¹ 黄洪辉³ 毕洪生⁴

(1. 清华大学深圳国际研究生院 深圳 518055; 2. 深圳市绿洲光生物技术有限公司 深圳 518057;
3. 中国水产科学研究院南海水产研究所 广州 510300; 4. 马里兰大学环境中心 美国马里兰州 20688)

摘要 尖笔帽螺是一种分布广泛的翼足类生物,在食物网与生物地球化学循环中起着重要作用。2020 年 7 月,大亚湾出现高密度尖笔帽螺,给当地生态安全带来潜在风险。文章利用浮游生物成像仪(PlanktonScope),以定点的方式对大亚湾西南海域的环境因子与尖笔帽螺密度进行采样,并对大亚湾高密度尖笔帽螺的分布特征进行研究。结果显示:在水平方向上,尖笔帽螺主要分布于西部湾口及长湾附近海域,其他海域分布相对较少;在垂向上,尖笔帽螺多分布于高温低盐的表层,低温高盐的下层水体分布较少;体长分布方面,湾口西部及其北侧海域尖笔帽螺体长较长,小辣甲西侧、北侧海域尖笔帽螺体长偏短,湾口中部海域体长远小于其他区域。通过分析结果发现,此次大亚湾湾内高密度尖笔帽螺存在随外海海流输入的可能;温盐分布结果表明,尖笔帽螺多出现在海水表层,其垂直分布可能也受海水分层及海流的影响。通过对尖笔帽螺分布特征的归纳与讨论,可以为后续该种生物的进一步溯源提供参考。

关键词 大亚湾;尖笔帽螺;分布特征;浮游生物成像仪;水下成像系统;近海生物暴发

中图分类号 Q959.2 **doi:** 10.11693/hyhz20210400086

翼足类是腹足纲的一个单系分支,在海洋食物网、生物地球化学循环与海洋酸化中扮演着重要角色(Howes *et al.*, 2014; Manno *et al.*, 2019; Kohnert *et al.*, 2020)。翼足类常随海流漂移的特性,使它对不同水团有重要的指示作用(Chen *et al.*, 1970)。尖笔帽螺(*Creseis acicula*)是一种分布广泛的翼足类生物,南北纬 50 度范围内均有分布(Burrige *et al.*, 2017),在我国东海与南海的各个季节也有观测到较多种群(戴燕玉, 1995; 徐兆礼, 2005)。尖笔帽螺广泛的水平分布可能与其水平运动能力弱、随海流移动且温盐适应范围广的特性有关(Sakthivel *et al.*, 1974; 齐钟彦等, 1986; Xu *et al.*, 2006)。在垂直分布方面,尖笔帽螺倾向于生活在海水表层,总丰度往往与表层水温和海流有关(齐钟彦等, 1986; Xu *et al.*, 2006),这种垂直分布特征

可能与其捕食活动有关,尖笔帽螺在近岸的大规模出现经常与浮游植物的暴发(Sakthivel *et al.*, 1974)和浮游动物的高生物量期吻合(Peter *et al.*, 1978),意味着尖笔帽螺可能更倾向于生活在浮游植物较为密集的上层水体。在种群丰度方面,尖笔帽螺由于个体的繁殖可以发生在生命周期的早期,不需要成长为成熟的雌性个体(Lalli *et al.*, 1989),其繁殖周期可能较短,能够在适宜条件下实现快速地繁殖,具备大规模暴发的条件。

目前,尖笔帽螺的暴发日渐频繁。自 20 世纪 60 年代起,尖笔帽螺在世界范围内的观测记录开始增多,并在 2010 年后出现大幅度增长(GBIF, 2020)。2020 年 7 月,在南海北部大亚湾地区发现尖笔帽螺成群聚集,暴发成“潮”,给当地生态安全带来潜在风险

* 国家重点研发计划项目, 2017YFC1403601 号, 2020ZLHY0403 号, 2018YFC1407501 号; 山东省重大科技创新工程项目, 2019JZZY020708 号; 中国水产科学研究院基本科研业务费项目, 2020TD15 号。刘岱, 硕士研究生, E-mail: 785426610@qq.com

通信作者: 毕洪生, 博士, E-mail: hbi@umces.edu

收稿日期: 2021-04-11, 收修改稿日期: 2021-07-06

(Hunt *et al.*, 2008)。为研究大亚湾湾内尖笔帽螺的来源, 需要通过采样得到尖笔帽螺的分布状况。然而传统的浮游生物网与声呐探测等采样手段, 都面临诸多缺点与挑战。浮游生物网对于斑块状分布的生物采样效率低下, 在拖网采样中也难以获得物种精确地水平分布信息; 对于浅海生物, 浮游生物网难以获得样本精确地垂直分布信息, 且在采样过程中容易出现挂网、漏网等问题, 给数据的准确度带来影响 (Remsen *et al.*, 2004; Howes *et al.*, 2014)。而声呐探测则不具备分辨生物个体的能力, 甚至同种生物的不同个体都需要不同频率才能准确分辨, 同时易受外界干扰, 如近表层的声波反射 (Robison, 2004)。因此我们需要一种新的采样方式来克服传统采样方式的缺点。

浮游生物成像仪 (PlanktonScope) 是基于浮游生物可视化成像系统 (ZOOplankton VISualization, ZOOVIS) 而发展的远心背影水下成像系统 (Bi *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2020), 该系统能在浊度较高的复杂水体环境中对微小生物形成有效成像, 具有宽视野、大纵深、高分辨率等特点, 已在白令海、中国南海、东海、黄海、深圳湾、大亚湾等多个海域成功应用 (Bi, 2017; Song *et al.*, 2020)。浮游生物成像仪能够通过原位成像的方式准确获得尖笔帽螺的垂直分布情况以及在海洋中的活动状况, 并可以通过人工智能系统智能分辨所拍图片中浮游生物的种类与数量, 有效克服了传统采样方式所面临的困境。

本研究通过浮游生物成像仪在大亚湾海域的定点垂直投放, 获得尖笔帽螺在采样站点的密度和垂直分布情况, 并通过插值法预测尖笔帽螺在大亚湾西北部海域的分布, 追溯尖笔帽螺的可能来源, 为后续应对尖笔帽螺的暴发提供参考。

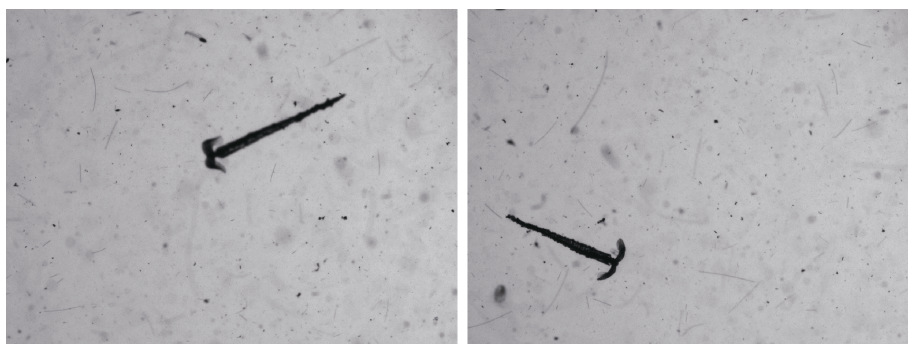


图 2 浮游生物成像仪原位采样图片

Fig.2 Examples of *in situ* images collected by plankton imager PlanktonScope

1 材料与方法

1.1 研究海域与采样方法

本次研究的采样时间为 2020 年 7 月 4 日, 范围为 大亚湾 22.56°—22.68°N, 114.50°—114.70°E 范围内海域 (图 1)。采样方法为利用装有 EXO (EXO1 Multiparameter Sonde) 的浮游生物成像仪 (PlanktonScope) 在研究海域内的 10 个点位 (S1—S10) 进行定点垂直投放, 投放深度为 0—12 m。投放时, 先将装有 EXO 的成像仪缓慢投放至近底部, 停留数分钟后再缓慢拉起进行回收, 过程中浮游生物成像仪以 10 Hz 的频率进行图像采样, 采样原位图如图 2 所示; EXO 则以 1 Hz 的频率实时测定海水的温度、盐度、深度和叶绿素浓度等指标, 得到海水的理化特征数据。

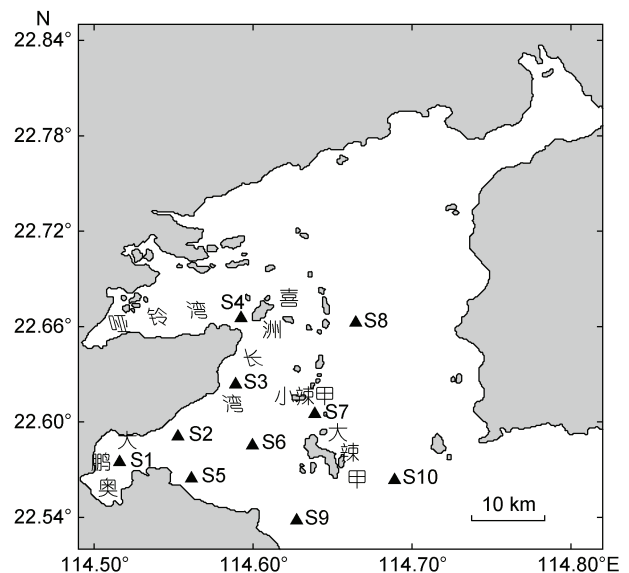


图 1 大亚湾采样站点图

Fig.1 Map of study area and sampling sites in the Daya Bay

利用 EXO 采集到的温度与盐度数据, 结合海水热力学方程(TEOS-10)(Feistel *et al*, 2010; Wright *et al*, 2010), 计算出各个水层的海水密度, 并对 1 m 水深间隔的温度与盐度进行聚类分析。

将 EXO 采集到的温度、盐度、叶绿素浓度数据以 1 m 为间隔, 计算出不同水深的温度、盐度和叶绿素浓度; 将不同深度的环境因子求平均值, 作为当前采样站点对应的环境因子的数值; 最后使用 Matlab (R2020b, Mathworks Inc.) 工具箱 Design and Analysis of Computer Experiments (DACE) 中的克里金插值法 (Kriging) (Lophaven *et al*, 2002), 对采样海域温度、盐度和叶绿素浓度的空间分布情况进行插值计算。其中回归模型选用 0 阶多项式, 即假设采样区域满足二阶平稳性假设:

$$f_1(x) = 1, \quad (1)$$

式中, $f_1(x)$ 是位置的函数, $f_1(x) = 1$ 表示估计值仅与距离相关。

相关模型选用球状模型(Spherical):

$$R(\theta, w, x) = \prod_{j=1}^n R(\theta, w_j - x_j),$$

$$R(\theta, w_j - x_j) = 1 - 1.5\xi_j + 0.5\xi_j^3, \quad (2)$$

$$\xi_j = \min\{1, \theta|w_j - x_j|\},$$

式中, $R(\theta, w, x)$ 表示与随机过程总协方差有关的函数, $R(\theta, w_j - x_j)$ 表示其在第 j 个点上的分量; w, x 表示已知点与未知点的位置函数, w_j, x_j 为其在第 j 个点上的分量, $w_j - x_j$ 反映已知点与未知点之间的距离, θ 反映计算值随距离衰减的速率, 上限值设为 1.5, 下限值设为 0.1, 初始猜测值设为 0.5。

1.2 图像获取与生物提取

浮游生物成像仪每小时能够采集约 36 000 张图片, 图像处理包括三部分: 第一步是利用动态下采样 (Cheng *et al*, 2020) 和自适应阈值法对潜在目标物进行提取及增强 (Bi *et al*, 2015; Cheng *et al*, 2019); 第二步是基于卷积神经网络 (CNN) 的特征提取和描述; 第三步是多分类 SVM 模型进行分类 (Cheng *et al*, 2019)。

首先利用自适应 ROI 提取 (adaptive ROI extraction) 获得图片中的潜在目标物。该方法将最大稳定极值区域 (maximally stable extremal regions, MSER) 和 Sauvola 局部二值化法相结合, 首先计算图像的平均信噪比 (mean signal-to-noise ratio, MSNR), 计算公式如下:

$$M = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n},$$

$$\text{MSNR} = \max(M - x_i)^2, \quad (3)$$

式中, n 代表像素数, x_i 代表第 i 个像素的像素值。如果 $\text{MSNR} > 0.1$, 图片有较高的对比度, 则利用 MSER 方法对图片进行二值化处理; 如果 $\text{MSER} \leq 0.1$, 说明图片对比度较低, 则利用 Sauvola 局部二值化法对图片进行二值化处理, 以 1 像素的步长, 1%—3% 图片尺寸的大小对图片进行分割, 根据公式 (4), 通过对 $T(x, y)/m(x, y)$ 与设定阈值的大小进行比较, 来确定所有像素的二值化 (Cheng *et al*, 2019)。

$$T(x, y) = m(x, y) \left[1 + k \left(\frac{\delta(x, y)}{R} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

式中, $T(x, y)$ 为每个矩形框的阈值大小, $m(x, y)$ 为矩形框内的平均像素值, R 为整个图片所有像素的最大标准差, 对灰度图像来说, 这个值为 128, $\delta(x, y)$ 为矩形框内所有像素的标准差, k 为固定值 0.34。

然后利用 ROI 增强实现目标物特征的进一步增强。该步骤在提取 ROI 的基础上, 采用基于断点链接的降噪算法来实现目标特征增强。对自适应 ROI 提取步骤中所划分的矩形框, 设矩形框内的像素数为 N , 如果以某像素为中心的矩形框内, 0.75N 数量的像素点都为目标物, 那么该像素也会被认定为目标物的一部分 (Cheng *et al*, 2019)。

在取得目标区域 (ROI) 后, 将目标区域以外的像素值保存在数组 P_{back} 中, 目标区域的数值设为 0。对其中的所有非 0 像素值按以下公式进行增强, 对背景进行锐化:

$$T_b = p_{\min} + \frac{p_{\max} - p_{\min}}{\delta}, \delta \in [3, 4], \quad (5)$$

$$p' = p + 5(p - T_b)(\delta - 3),$$

式中, T_b 表示目标物背景强度, p_{\min} 为区域内最低像素值, p_{\max} 为区域内最大像素值, δ 为 3 到 4 之间的常数, p 为原非 0 像素值, p' 为增强后的像素值 (Cheng *et al*, 2019)。

其次是利用卷积神经网络 (CNN) 中的卷积层和全连接层对上述步骤得到的 ROI 进行特征学习, 并利用训练集中的样本调整 CNN, 最后将全连接层的输出作为多分类 SVM 模型训练与分类的输入 (Cheng *et al*, 2019)。

最后利用具有较高容错性的多分类 SVM 模型, 使用一个简单的线性分类器 $\varphi(X) = W^T X + b$ 将每个

ROI 映射到不同的类别, 其中 $\varphi(X)$ 为映射函数, W 为权重, X 为特征向量, b 为变差。再通过 CNN 中提取的特征对目标对象进行分类(Cheng *et al*, 2019)。本次分类采用的分类器以南海浮游动物种类为主, 包括桡足类、箭虫、柱囊虫、虾类、水母类、棘皮动物幼虫等南海海域常见浮游生物类别以及非浮游生物类别。提取的目标物通过自动分类程序, 会被归入相对应的生物类别或者非生物中, 最后经过人工校验, 将分类错误的生物手工移到正确类别组中, 并重新进行自动计数。本次分析中, 由于缺乏尖笔帽螺的图库, 先通过将图像处理程序将尖笔帽螺从原图裁剪, 然后手工校对, 将笔帽螺移到相对应的类别, 进行自动计数和测量体长。

1.3 尖笔帽螺密度统计方法

浮游生物成像仪采用平行光背影成像技术, 根据成像区间(8 cm×9 cm)和景深(5 cm), 可以估算清晰成像的水层体积为 0.36 L。每张图片中清晰成像的尖笔帽螺数量即为 0.36 L 海水中尖笔帽螺的数量, 反映的尖笔帽螺密度为:

$$C = \frac{I}{0.36} \times 1000, \quad (6)$$

其中 C 为尖笔帽螺密度, 单位为 ind./m³; I 为图片中清晰成像的尖笔帽螺数量。

对于尖笔帽螺在垂直方向上的分布, 选用 1 m 的深度间隔, 根据 EXO 所采集的深度数据, 收集 1 m 深度间隔范围内所有的图片, 统计图片数量 J_{dep} 、所有图片中尖笔帽螺总数量 I_{dep} , 得到该 1 m 水层内尖笔帽螺的密度 C_{dep} 为:

$$C_{\text{dep}} = \frac{I_{\text{dep}}}{0.36 \times J_{\text{dep}}} \times 1000. \quad (7)$$

以 1 m 为间隔, 对于所有采样站点不同深度的尖笔帽螺密度求平均值, 得到该采样站点尖笔帽螺的平均密度 C_{ave} 为:

$$C_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{\text{dep}=1}^n C_{\text{dep}}. \quad (8)$$

并根据每个采样站点的平均密度, 使用 DACE 工具箱对尖笔帽螺在采样海域的水平分布情况进行预测(Lophaven *et al*, 2002), 其中回归模型选用 0 阶多项式, 即假设采样区域满足二阶平稳性假设:

$$f_1(x) = 1. \quad (9)$$

式中, $f_1(x)$ 是位置的函数, $f_1(x)=1$ 表示估计值仅与距离相关。

相关模型选用高斯模型(Guass):

$$R(\theta, w, x) = \prod_{j=1}^n R(\theta, w_j - x_j),$$

$$R(\theta, w_j - x_j) = \exp\left(-\theta(w_j - x_j)^2\right), \quad (10)$$

式中, $R(\theta, w, x)$ 表示与随机过程总协方差有关的函数, $R(\theta, w_j - x_j)$ 表示其在第 j 个点上的分量; w, x 为表示已知点与未知点的位置函数, w_j, x_j 为其在第 j 个点上的分量, $w_j - x_j$ 反映已知点与未知点之间的距离, θ 反映计算值随距离衰减的速率, 上限值设为 1.5, 下限值设为 0.1, 初始猜测值设为 0.5。

1.4 尖笔帽螺体长统计方法

1.4.1 尖笔帽螺体长测量样本选取 对于所有采样站点通过 ROI 提取与神经网络分类后的单个尖笔帽螺图像, 按照图像清晰、体长完整、避免重复与覆盖的原则进行挑选(表 1)。尖笔帽螺总数量小于 10 000 的站点, 挑选所有符合要求的单个尖笔帽螺图像; 尖笔帽螺数量大于 10 000 的站点, 利用随机数法按照上述原则进行挑选, 直至数量达到 500 张。由于 S1、S4 站点尖笔帽螺数量过少, S8 站点无数据, 因而不进行挑选。

1.4.2 模型建立与体长计算 从已挑出的尖笔帽螺图片中, 随机挑选约 300 张图片, 用于建立公式模型(表 1)。每个站点二次挑选的图片数量依据各个站点一次挑选出的图片数量占总挑出图片数的比例来决定, 每个采样站点二次挑选的图片数量 num 为:

$$\text{num} = \left\lfloor \frac{A_1}{A_t} \times 300 \right\rfloor, \quad (11)$$

其中, A_1 为特定站点一次挑选挑出的单个尖笔帽螺图片数量, A_t 为一次挑选挑出的单个尖笔帽螺图片总数量。二次挑选占总挑出图片数量的 18%—20%, 用于代表整体的体长状况。二次挑选同样通过随机数法来完成。

对二次挑选得到的单个尖笔帽螺图片进行二值化处理, 选出其中的最大连通区域, 并生成矩形框。成像仪采集到的图像每像素长度为 31 μm , 据此可以得到矩形框的长边长度。尖笔帽螺与体长可由以下公式估算测量:

$$L = \frac{L_1 \times 0.031}{\cos \theta}, \quad (12)$$

其中, L 为尖笔帽螺体长的估算测量值, L_1 为矩形框长边长度。 θ 为与最大连通区域具有相同标准二阶中心矩的椭圆的长轴与矩形框长边的夹角, 用于反映图

表 1 各个采样位点一次挑选、二次挑选图片挑选情况
Tab.1 Number of images selected in the first and second round at different sampling sites

站点	尖笔帽螺数量	图片数量	尖笔帽螺出现的图片数量	一次挑选图片数量	二次挑选图片数量
S2	5 204	20 792	4 544	207	37
S3	816	2 162	680	215	38
S5	615	8 188	615	38	6
S6	1 064	11 343	977	127	22
S7	9 367	34 255	7 462	498	90
S9	202 969	59 271	45 998	500	90
S10	152	2 979	147	72	13
总和	220 187	138 990	60 423	1 657	296

像上尖笔帽螺主躯干的朝向。同时手动在每张图片上选取尖笔帽螺头尾两点,计算出两点间距离 L_r , 作为图像中尖笔帽螺的实际体长。对体长的估算值 L 与体长的实际值 L_r 进行一元线性回归, 得到体长估算修正公式:

$$L_r = L \times 0.8049 + 20.964, R^2 = 0.8865. \quad (13)$$

F 检验 $P < 0.01$, 证明两者线性关系显著。利用该模型, 可测量出一次挑选中所有尖笔帽螺的体长, 并对不同站点体长分布进行聚类分析, 将体长与温度、盐度、叶绿素浓度进行多元线性回归。

2 结果

2.1 环境因子

对于温度分布, 在水平方向上, S3 站点平均温度最高, S1、S2、S4、S5、S7 站点次之, S6、S9、S10 站点平均温度相对较低(图 3a)。在垂直方向上, S1—S5、S7 站点随深度增加, 温度降低较为平缓; S6、S9、S10 站点在水深 5—6 m 的水层内温度急剧下降(图 4a)。

对于盐度分布, 在水平方向上, S6 站点平均盐度最高, S7、S9 站点相对较高, S2、S5、S10 次之, S1、S3 站点盐度相对较低, S4 站点盐度最低(图 3b)。在垂直方向上, S2、S3、S5、S7 站点盐度随深度变化较小; S1、S4、S6 站点盐度随水深增加而增加, S6 站点在 6 m 水深处盐度变化较大, 而 S1、S4 站点盐度随深度变化较为缓慢; S9、S10 站点在水深 5 m 处盐度变化较大, 5 m 水深以上的水层与 5 m 水深以下的水层, 盐度变化较为平缓(图 4b)。

对于叶绿素浓度分布, S1、S4 站点叶绿素浓度最高, 且随深度增加而增大, 在 3 m 水深处达到稳定; S6、S9 站点叶绿素浓度相对较高, 约为 S1、S4 站点

的一半, 且随深度增加而增大, 在 7 m 水深处达到稳定; S3、S5、S10 站点叶绿素相对较低, 约为 S6、S9 站点的一半, S3、S5 站点叶绿素浓度随深度增加而增大, S10 则是各个水层叶绿素浓度相对均匀, 变化较小。S2、S7 站点叶绿素浓度偏低, S7 站点几乎为 0 (图 3c, 4c)。

2.2 尖笔帽螺水平分布状况

各采样站点的尖笔帽螺平均密度存在较大差异。其中 S9 站点尖笔帽螺密度最高, 超过 3 000 ind./m³; S3 站点相对较高, 约为 1 000 ind./m³; S2、S4、S6、S7、S10 站点尖笔帽螺密度介于 200—500 ind./m³ 之间。S5 站点尖笔帽螺密度较小, 不足 100 ind./m³; S1 站点未发现尖笔帽螺。根据克里金插值法, 对尖笔帽螺在采样区域的分布进行预测, 结果如图 3d 所示, 可以看出湾口西部海域尖笔帽螺密度最高, 长湾附近密度相对较高, 大鹏澳海域内未发现尖笔帽螺。

2.3 尖笔帽螺垂直分布状况

在不同采样站点中, 尖笔帽螺密度垂直分布的差异较为显著。其中 S1 点未发现尖笔帽螺; S2、S5、S6 三个站点尖笔帽螺在采样水层的底部分布较多, 而 S4、S7、S9、S10 四个站点则在采样水层的上部分布较多, S3 站点尖笔帽螺在整个水层内均匀分布。在深度超过 5 m 的站点中, S7、S9、S10 站点尖笔帽螺主要分布在 5 m 以上水层, S6 站点则主要分布在 5 m 以下水层(图 4d)。

根据不同水层温度、盐度与尖笔帽螺密度, 以及利用海水热力学方程(TEOS-10)得到的海水密度(Feistel *et al.*, 2010; Wright *et al.*, 2010), 可以得到尖笔帽螺主要分布的温度区间为 27.50—32.50 °C, 盐度区间为 32.50—34.50, 密度区间为 1 019.50—1 021.50 kg/m³(图 5)。

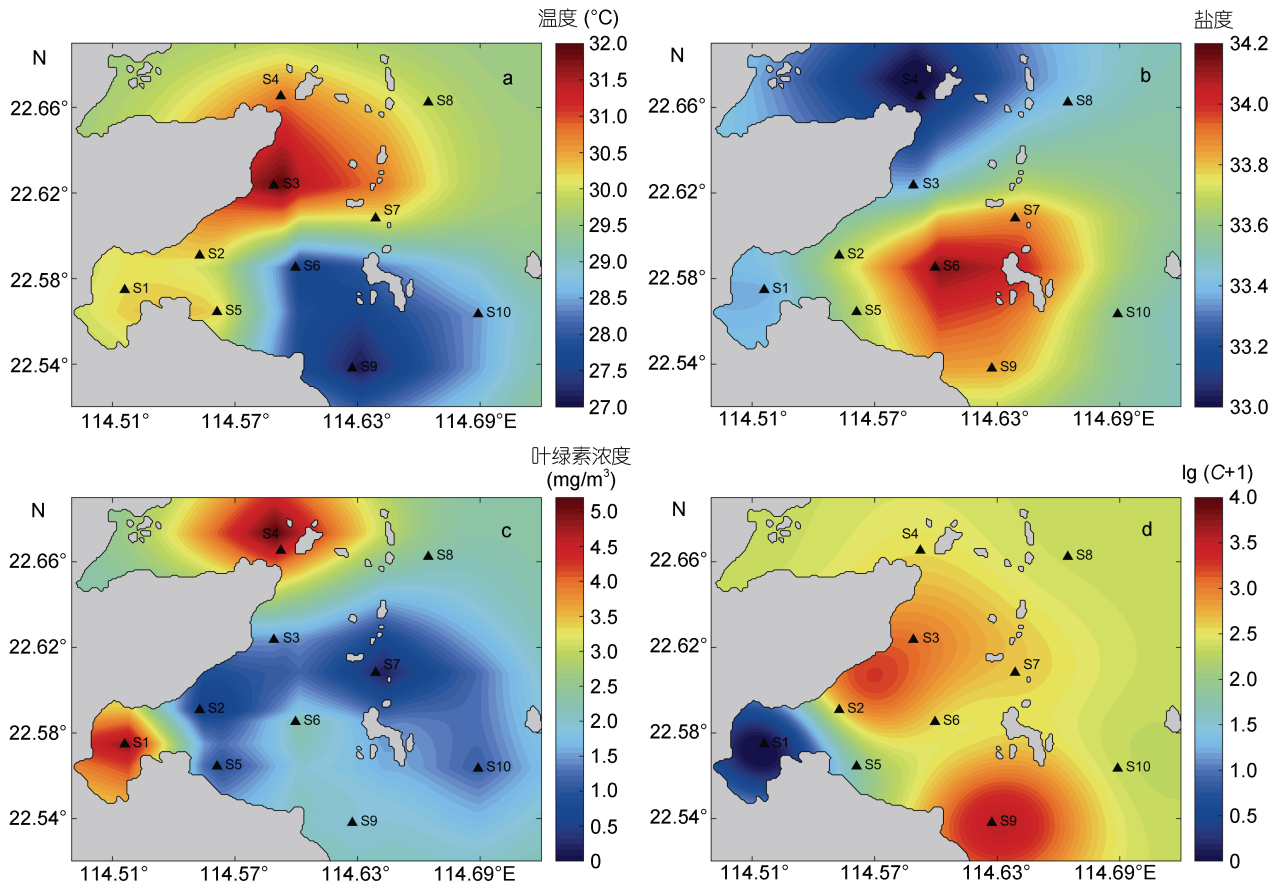


图 3 采样海域温度(a)、盐度(b)、叶绿素浓度(c)、尖笔帽螺密度(d)水平分布图

Fig.3 Horizontal distribution of temperature (a), salinity (b), chlorophyll (c) and *Creseis acicula* density (d) in sampling area
注: C 为尖笔帽螺密度, 单位为 ind./m³

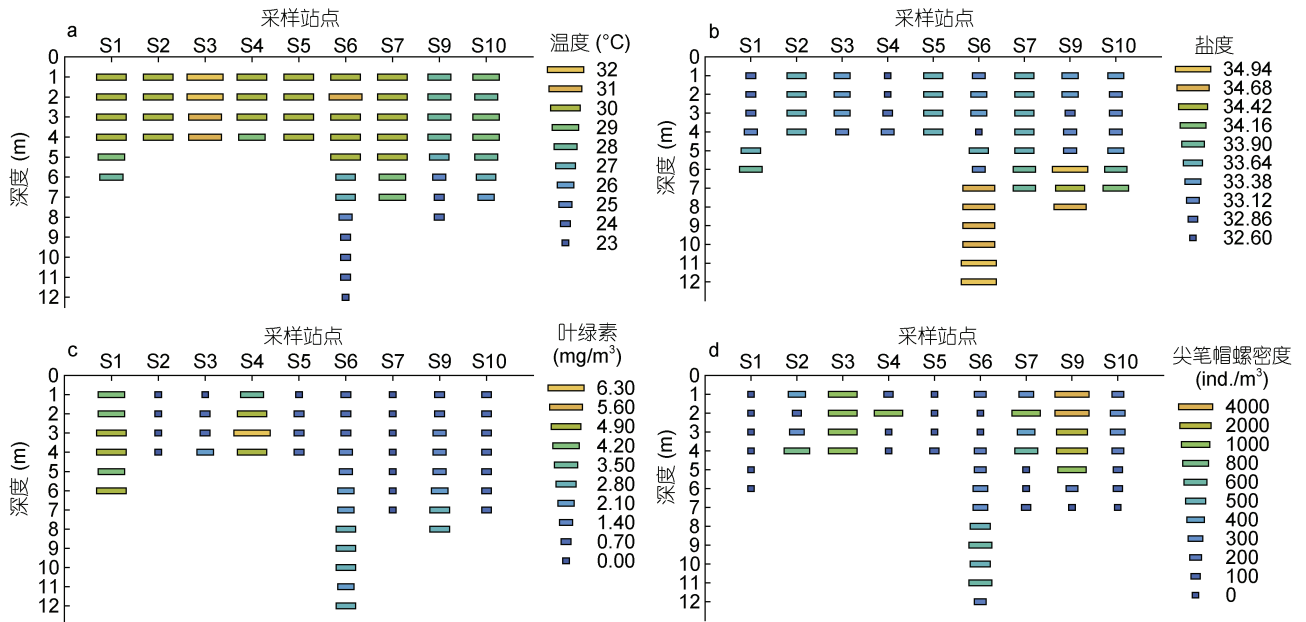


图 4 采样位点温度(a)、盐度(b)、叶绿素浓度(c)、尖笔帽螺密度(d)垂直分布图

Fig.4 Vertical distribution of Temperature (a), salinity (b), chlorophyll (c) and *Creseis acicula* density (d) in sampling sites

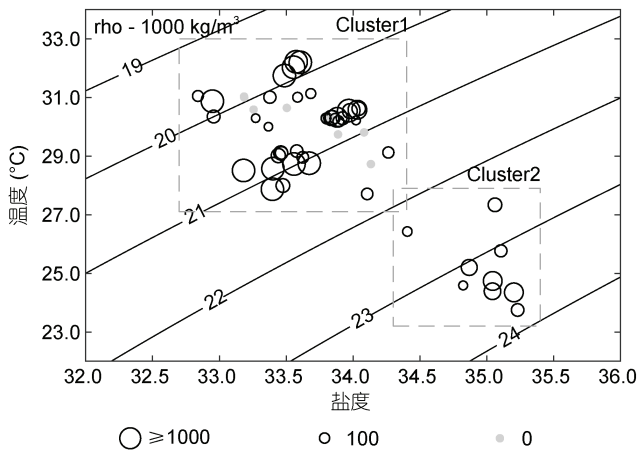


图 5 尖笔帽螺密度温盐变化图

Fig.5 *Creseis acicula* density in TS-diagram
注: rho 为海水密度, 圆圈大小表示尖笔帽螺密度, 单位为 ind./m³

2.4 尖笔帽螺体长分布状况

尖笔帽螺在不同站点体长的分布情况既存在相似性, 也存在一定差异。S2、S3、S5、S6、S7、S9 站点体长在 9—12 mm 范围内的个体最多, 平均体长

相近。其中 S2 站点体长长于 12 mm 的个体偏多; S3、S7 两个站点体长短于 9 mm 的个体偏多。S10 站点体长在 6—9 mm 范围内的个体最多, 平均体长偏短(图 6, 7)。

利用图 6 中各个站点的体长分布占比进行聚类分析, 可以发现 S3 与 S7 站点的体长分布最为接近; S5、S6、S9 站点的体长分布相差相对较小; S2、S10 站点与其他站点相比, 体长分布相差较大(图 8)。将体长与温度、盐度、叶绿素浓度进行多元线性回归, 分析结果 $R^2 < 0.4$, F 检验 P 值 > 0.1 , 体长与环境因子的线性相关性并不明显。

3 讨论

3.1 湾口海域尖笔帽螺分布与来源

尖笔帽螺本身水平运动能力较弱, 其分布受海流影响较大(Sakthivel *et al*, 1974; 齐钟彦等, 1986), 且从图 3 可以看出, 尖笔帽螺水平分布与环境因子的关系并不明显, 因而湾口海域不同地点尖笔帽螺密度的差异, 可能主要受海流影响。武文等(2017)的研

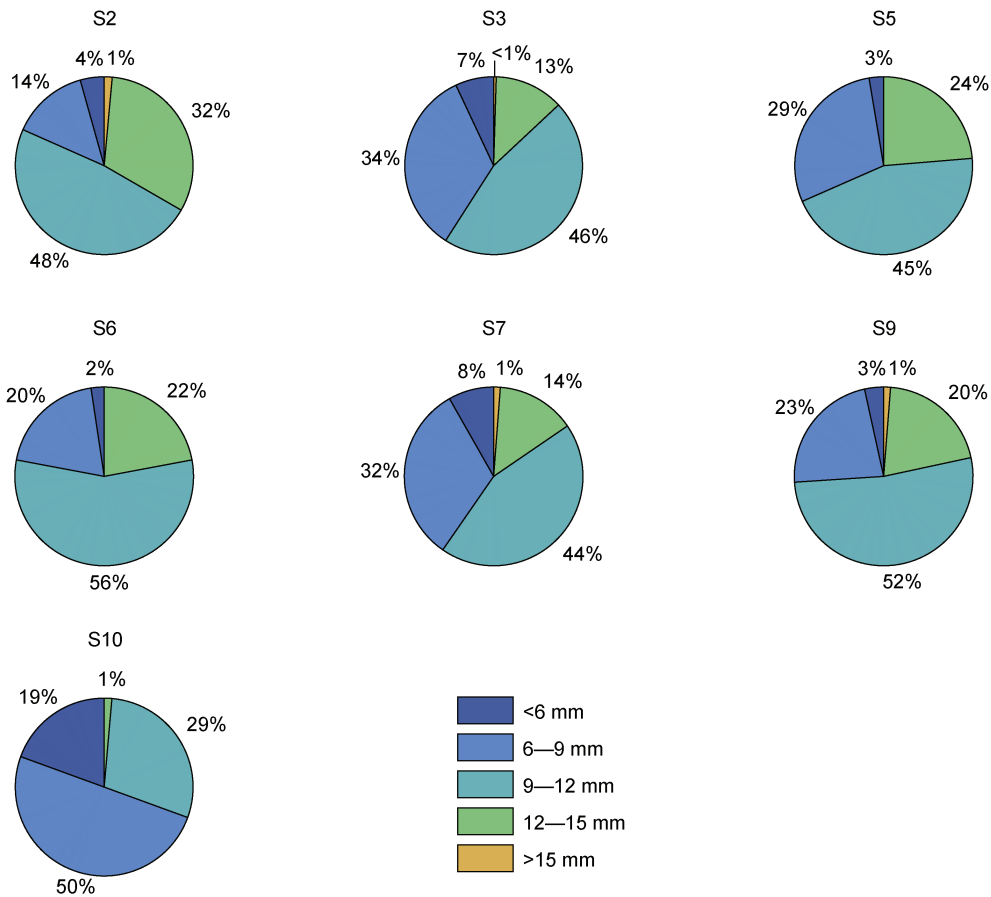


图 6 尖笔帽螺体长分布图

Fig.6 Body length distribution of *Creseis acicula*

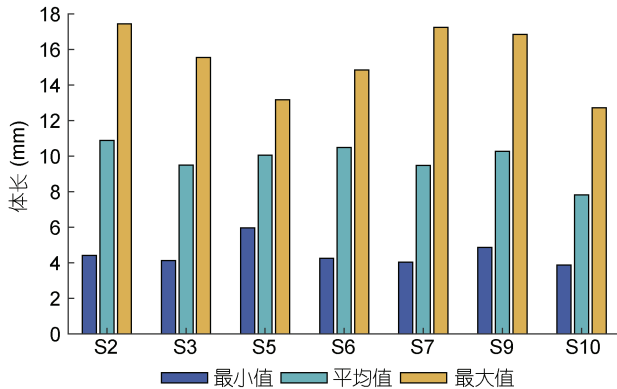


图 7 各站点尖笔帽螺体长最小值、平均值与最大值

Fig.7 Minimum, average and maximum body length of *Creseis acicula* in sampling sites

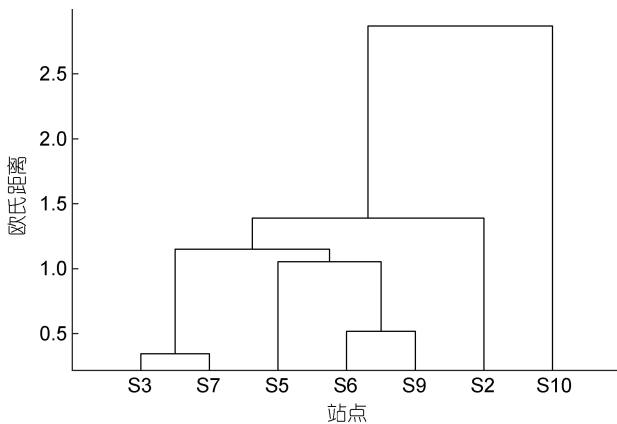


图 8 采样位点尖笔帽螺体长聚类分析

Fig.8 Cluster analysis of body length in sampling sites

究表明, 湾口西部大辣甲西南侧海域(S9)往复流较弱, 余流较强流向湾内。从温度与盐度分布(图 3a, 3b)也可看出, 该片海域表现出低温高盐的特征, 受外来海水入侵的特征明显(韩舞鹰等, 1991), 因而湾外的尖笔帽螺可能更易随海流进入, 并在此处滞留, 形成高密度区域(图 3d)。

湾口中部海域(S10)往复流较强, 余流较弱斜向湾外东南方向(武文等, 2017)。此处相比湾口西部温度相对较高, 盐度相对较低, 可能是由于往复流较强受湾内与湾外海水影响均较大。受往复流影响, 尖笔帽螺可能更难在此处滞留, 密度较小(图 3d)。

3.2 湾内西南侧海域尖笔帽螺分布与来源

对于湾内西南侧海域, 尖笔帽螺在长湾附近分布较多, 大鹏澳内部分布较少, 其余海区平均密度相近(图 3d)。通过尖笔帽螺温盐分布(图 5)可以发现, 尖笔帽螺更偏向于出现在高温低盐的水体, 长湾附近受核电站温排水影响, 水体温度较高, 同时距湾口相

对较远, 盐度偏低, 尖笔帽螺可能更倾向于在此处聚集。同时该片海域流速较大, 余流较强, 尖笔帽螺可能更易在此处淤积(吴仁豪等, 2007; 武文等, 2017)。大辣甲北部 S7 附近海域尖笔帽螺密度低于长湾海域, 但体长分布与长湾相近(图 6, 7, 8), 且流经长湾的海流与流经大辣甲北部的海流均源于西部湾口(武文等, 2017; Zhang *et al*, 2019), 两片海域尖笔帽螺来源可能存在一定联系。

大辣甲西部 S5、S6 站点附近海域尖笔帽螺密度相对较低, 且体长分布与湾口西部(S9)相似, 平均体长相当(图 7, 8)。体长回归分析表明, 尖笔帽螺体长与温度、盐度和叶绿素浓度等环境因子无明显线性相关性, 这意味着尖笔帽螺体长分布可能受海流影响较大。湾口西部海域存在较强的指向湾内的余流, 因而该片海域的尖笔帽螺可能随海流进入湾内, 滞留于大辣甲西部。

3.3 影响尖笔帽螺垂直分布因素

尖笔帽螺垂直分布受诸多因素影响, Karakas 等(2020)发现尖笔帽螺具备垂直运动能力, 且受捕食活动和环境变化等因素驱动, 可能会对尖笔帽螺的垂直分布产生较大影响。在捕食活动方面, 尖笔帽螺以浮游植物为食(Howes *et al*, 2014), 从图 4c、4d 中可以看出, S6 站点尖笔帽螺密度与与叶绿素浓度变化趋势相近, 但在尖笔帽螺密度较高的 S9 站点, 变化趋势则相反, 浮游藻类分布与尖笔帽螺密度分布相关性并不明显, 表明尖笔帽螺垂直分布在不同的环境条件下可能对食物的响应不同。在环境方面, 从图 5 可以看出尖笔帽螺主要分布于温度偏高, 盐度偏低的水域, 该类型的水域主要出现在海水表层, 这与 Xu 等(2006)的研究一致。同时温盐的变化受海流影响较大, 多项研究表明, 粤东地区夏季存在上升流, 低温高盐的海水易入侵大亚湾, 导致湾内海水分层(韩舞鹰等, 1988; 曾刚等, 1992; Zhang *et al*, 2019); Zhang 等(2019)则发现大亚湾西南部海域夏季表层海流与深度平均海流方向并不一致。从图 4a、4b 图中可以看出, 西部湾口及附近海域水深 5—6 m 处存在温盐变化较大的水层, 可能存在海水分层的现象。不同水层海流流向的差别, 可能是大辣甲西部海域尖笔帽螺在采样水层的下层分布较多的原因之一; 同时海流流速与垂直混合强度, 也可能对尖笔帽螺的垂直分布带来影响。

4 结论

本文通过利用浮游生物成像仪与 EXO 等设备对

大亚湾西南海域进行图片及环境因子采样, 获得温度、盐度、叶绿素浓度等环境因子和尖笔帽螺在该片海域的分布情况, 得到以下结论:

(1) 利用浮游生物成像仪, 能够获得尖笔帽螺精细的水平、垂直分布特征。在水平方向上, 尖笔帽螺主要分布于西部湾口及长湾附近海域, 存在外源输入的可能。在垂直方向上, 尖笔帽螺多分布于表层, 但在大辣甲西侧海域, 尖笔帽螺在下层水体分布相对较多, 可能受温盐与海水分层影响。

(2) 在大亚湾海域内, 尖笔帽螺高丰度多出现于温度较高、盐度较低水层, 且该类温盐特征多出现于海水表层; 在低温高盐水域, 尖笔帽螺分布较少, 丰度较低。

(3) 尖笔帽螺在不同海域体长分布不同。大鹏澳东侧海域长个体偏多, 西部湾口体长适中, 靠近内侧的小辣甲西部、南部海域体长偏短, 湾口中部海域体长远小于其他区域。体长大小的分布与温度、盐度和叶绿素浓度相关性并不明显, 可能与海流存在一定关系。

参 考 文 献

- 齐钟彦, 林光宇, 张福绥等, 1986. 中国动物图谱: 软体动物第三册. 北京: 科学出版社
- 吴仁豪, 蔡树群, 王盛安等, 2007. 大亚湾海域潮流和余流的三维数值模拟. 热带海洋学报, 26(3): 18—23
- 武文, 严聿晗, 宋德海, 2017. 大亚湾的潮汐动力学研究——I. 潮汐系统的观测分析与数值模拟. 热带海洋学报, 36(3): 34—45
- 徐兆礼, 2005. 东海浮游翼足类(Pteropods)种类组成和多样性研究. 生物多样性, 13(2): 168—173
- 韩舞鹰, 马克美, 1988. 粤东沿岸上升流的研究. 海洋学报, 10(1): 52—59
- 韩舞鹰, 马克美, 1991. 大亚湾海水混合交换特征. 海洋科学, (2): 64—67
- 曾刚, 李立, 许金殿等, 1992. 大亚湾西部和北部浅水区夏半年的温、盐度分析. 台湾海峡, 11(1): 28—34
- 戴燕玉, 1995. 南海中部翼足类和异足类生态的初步研究. 海洋学报, 17(6): 111—116
- Bi H, 2017. Hongsheng Bi. 2014. Framework for mobile deployment of the ZOOplankton Visualization and Imaging System (ZOOVIS) and Dual-frequency IDentification SONar system (DIDSON) in the Bering Sea, July-August 2017. Research Workspace. 10.24431/rw1k57s, version: 10.24431_rw1k57s_20210316T191058Z
- Bi H S, Cook S, Yu H *et al*, 2013. Deployment of an imaging system to investigate fine-scale spatial distribution of early life stages of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in Chesapeake Bay. Journal of Plankton Research, 35(2): 270—280
- Bi H S, Guo Z H, Benfield M C *et al*, 2015. A semi-automated image analysis procedure for *in situ* plankton imaging systems. PLoS One, 10(5): e0127121
- Burrige A K, Goetze E, Wall-Palmer D *et al*, 2017. Diversity and abundance of pteropods and heteropods along a latitudinal gradient across the Atlantic Ocean. Progress in Oceanography, 158: 213—223
- Chen C, Hillman N S, 1970. Shell-bearing pteropods as indicators of water masses off cape hatteras, north carolina. Bulletin of Marine Science, 20(2): 350—367
- Cheng X M, Cheng K C, Bi H S, 2020. Dynamic downscaling segmentation for noisy, low-contrast *in situ* underwater plankton images. IEEE Access, 8: 111012—111026
- Cheng K C, Cheng X M, Wang Y Q *et al*, 2019. Enhanced convolutional neural network for plankton identification and enumeration. PLoS One, 14(7): 0219570
- Feistel R, Wright D G, Jackett D R *et al*, 2010. Numerical implementation and oceanographic application of the thermodynamic potentials of liquid water, water vapour, ice, seawater and humid air – Part 1: background and equations. Ocean Science, 6(3): 633—677
- GBIF, 2020. GBIF.org (17 July 2020) GBIF occurrence download. <https://doi.org/10.15468/dl.rfkdyz>
- Howes E L, Bednaršek N, Büdenbender J *et al*, 2014. Sink and swim: a status review of thecosome pteropod culture techniques. Journal of Plankton Research, 36(2): 299—315
- Hunt B P V, Pakhomov E A, Hosie G W *et al*, 2008. Pteropods in Southern Ocean ecosystems. Progress in Oceanography, 78(3): 193—221
- Karakas F, Wingate J, Blanco-Bercial L *et al*, 2020. Swimming and sinking behavior of warm water pelagic snails. Frontiers in Marine Science, 7: 556239
- Kohnert P C, Cerwenka A F, Brandt A *et al*, 2020. Pteropods from the kuril-kamchatka trench and the sea of okhotsk (Euopisthobranchia; Gastropoda). Progress in Oceanography, 181: 102259
- Lalli C M, Gilmer R W, 1989. Pelagic Snails: the Biology of Holoplanktonic Gastropod Mollusks. Stanford: Stanford University Press
- Lophaven S N, Nielsen H B, Søndergaard J, 2002. Aspects of the matlab toolbox DACE. Technical University of Denmark
- Manno C, Rumolo P, Barra M *et al*, 2019. Condition of pteropod shells near a volcanic CO₂ vent region. Marine Environmental Research, 143: 39—48
- Peter K, Paulinose V, 1978. Swarming of creseis acicula rang (Pteropoda) in the Bay of Bengal. Indian Journal of Marine Sciences, 7(2): 126—127
- Remsen A, Hopkins T L, Samson S, 2004. What you see is not what you catch: a comparison of concurrently collected net, Optical Plankton Counter, and Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder data from the northeast Gulf of Mexico. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51(1): 129—151
- Robison B H, 2004. Deep pelagic biology. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 300(1—2): 253—272

- Sakthivel M, Harida P, 1974. Synchronization in the occurrence of *Trichodesmium* bloom and swarming of *Creseis acicula* Rang (Pteropoda) and *Penilia avirostris* Dana (Cladocera) in the area off Cochin. *Mahasagar*, 7: 61—67
- Song J T, Bi H S, Cai Z H *et al*, 2020. Early warning of *Noctiluca scintillans* blooms using *in-situ* plankton imaging system: an example from Dapeng Bay, P.R. China. *Ecological Indicators*, 112: 106123
- Wright D G, Feistel R, Reissmann J H *et al*, 2010. Numerical implementation and oceanographic application of the thermodynamic potentials of liquid water, water vapour, ice, seawater and humid air – Part 2: The library routines. *Ocean Science*, 6(3): 695—718
- Xu Z L, Li C J, 2006. Study on abundance variation of pteropods in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(1): 100—107
- Zhang H, Cheng W C, Chen Y R *et al*, 2019. Importance of large-scale coastal circulation on bay-shelf exchange and residence time in a subtropical embayment, the northern South China Sea. *Ocean & Coastal Management*, 168: 72—89

OUTBURST OF *CRESEIS ACICULA* IN SOUTHWEST DAYA BAY IN JULY 2020

LIU Dai¹, YING Ke-Zhen², CAI Zhong-Hua¹, HUANG Hong-Hui³, BI Hong-Sheng⁴

(1. *Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China*; 2. *Oasis Photobio Tech LTD., Shenzhen 518057, China*; 3. *South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China*; 4. *University of Maryland Center for Environmental Science, Maryland 20688, USA*)

Abstract *Creseis acicula* is a widely distributed pteropod and an important link of food web in biogeochemical cycle. In July 2020, high-density *C. acicula* occurred in the Daya Bay, Hainan, South China Sea, which likely had considerable impact on local food web structure. In this study, an *in-situ* optical underwater plankton imaging systems, the PlanktonScope was deployed to determine *C. acicula* density and environmental parameters in the bay. Spatial distribution of *C. acicula* was investigated. Results show that *C. acicula* was distributed in greater density mainly in the west bay mouth and Changwan than in other areas. In vertical direction, *C. acicula* was distributed mainly in the surface layer with higher temperature and lower salinity than those in deeper water columns. The body length of *C. acicula* was greater in the west bay mouth than those in the north and west area of Xiaolajia, and that in the middle of bay mouth was much shorter than other areas'. Therefore, the high-density *C. acicula* outburst in Daya Bay might come from an outside source through current. The T-S diagram shows that *C. acicula* was more likely to appear in the surface water and affected by the stratification of seawater and current. This study provided a reference for further tracing of the species.

Key words Daya Bay; *Creseis acicula*; distribution feature; PlanktonScope; underwater imaging system; coastal organism outburst