



## 基于高精度声学图像的海洋牧场海床类型识别

徐晓甫<sup>1,2,3,4</sup>, 向先全<sup>1</sup>, 曾祥茜<sup>1,2,3,4</sup>, 张博伦<sup>2,4</sup>,  
孙苗<sup>1</sup>, 房恩军<sup>2,4</sup>, 刘克奉<sup>2,4\*</sup>

(1. 自然资源部海洋信息技术创新中心, 国家海洋信息中心, 天津 300171;

2. 天津市水产研究所, 天津 300457;

3. 清华大学, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

4. 天津市海洋牧场工程技术中心, 天津 300457)

**摘要:** 人工鱼礁作为海洋牧场建设的基础生态工程, 在海洋生态环境修复和渔业资源增殖方面起着重要作用。随着人工鱼礁的大量投放, 海洋牧场海床逐步转变为高度异质性的底栖生境, 底栖生态变化会直接到底栖及底层生物的栖息与繁衍。针对传统调查方法在海洋牧场中的局限性, 聚焦天津海洋牧场, 基于侧扫声纳后散射数据和多波束测深数据, 从侧扫图像亮度、图像纹理及地形起伏度等 3 个维度, 探索了天津海洋牧场海床类型识别、分类和面积量化的新方法。结果显示, 天津海洋牧场共发现人工鱼礁、牡蛎类、淤泥类、蛤仔泥混类、牡蛎泥混类及碎贝泥混类等 6 种海床类型, 基于声学图像特征的海床类型识别方法准确率达 90%, 可满足海洋牧场底栖生态研究的需求; 通过对比分析, 天津海洋牧场本底淤泥类海床消退为 58.19%, 贝类海床增至 7.96%, 贝类资源增殖效果明显; 人工鱼礁周边新生牡蛎礁 0.246 km<sup>2</sup>, 并伴有 0.303 km<sup>2</sup> 的牡蛎泥混海床待发育为牡蛎礁, 海洋牧场建设对牡蛎礁具有重要的修复作用。研究表明, 声学技术对传统底栖调查方法的补充与完善作用, 海洋牧场对牡蛎礁的修复作用, 成果可有效应用于近岸海域生境修复、贝类资源量精准评估及牡蛎礁演化机理等领域的研究。

**关键词:** 牡蛎礁; 底栖生境; 海床声学分类; 侧扫声纳; 多波束测深仪; 海洋牧场; 天津  
**中图分类号:** S 931 **文献标志码:** A

海洋牧场作为中国传统渔业转型新动力, 在解决海洋生境退化和渔业资源衰退等突出问题方面起着重大作用<sup>[1]</sup>, 近年来发展势头迅猛。人工鱼礁是海洋牧场建设的基础生态工程<sup>[2]</sup>, 是海洋牧场生境构建和修复的重要内容<sup>[3]</sup>。人工鱼礁的投放, 形成了新的流场, 为水产生物提供了良好的生息繁育场所<sup>[3]</sup>, 从而提高了渔业资源的产量和质量, 增加了生物多样性, 修复了海域生态环

境。然而, 随着人工鱼礁的大量投放, 海洋牧场的海床转变为高度异质性底栖生境, 使得传统的定点采样、局部拖网等调查方法在海洋牧场中受到限制。如何对海床生境进行精准识别成为海洋牧场底栖生态研究面临的重要问题, 而海床分类是解决该问题的首要步骤。

随着现代声呐和计算机技术的快速发展, 高精度声学设备为海床类型的遥测和识别提供了先

收稿日期: 2020-10-20 修回日期: 2021-02-11

资助项目: 天津市科技重大专项与工程 (18ZXRHSF00270); 自然资源部海洋信息技术创新中心开放基金 (B201801028); 国家重点研发计划 (2019YFD0902104); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金 (sklhse-2020-B-05); 国家自然科学基金 (41806205)

第一作者: 徐晓甫 (照片), 从事海洋牧场、渔业资源、GIS 和声学调查研究, E-mail: xuxiaofu\_tj@126.com

通信作者: 刘克奉, 从海洋牧场、渔业资源方面研究, E-mail: liukefeng@sina.com



进的技术手段, Anderson 等<sup>[4]</sup>和 Brown 等<sup>[5]</sup>对声学技术在海床分类中的应用进行了回顾和展望,认为声学技术是监测和识别海床最有效的遥测方法,已成为揭示底栖生态复杂性的必经途径。目前,声学海床分类技术已成功应用于多个海域的生态研究,2019年 Haggarty 等<sup>[6]</sup>使用多波束测深仪对加拿大不列颠哥伦比亚省的海床进行了识别和分类,计算了平鲷 (*Sebastes* spp.) 的栖息地面积,有效支持了该海域的空间设计与规划;2018年 Egerton 等<sup>[7]</sup>利用声学回波数据对卡塔尔海域的海床进行了识别,首次发现了牡蛎海床与鱼类分布之间的强正相关关系;2017年 Gutperlet 等<sup>[8]</sup>利用侧扫声纳探索了德国翡翠湾高度异质、人类干扰强烈的海洋环境中底栖群落结构与海床类型之间的关系,明确了群落空间结构的主要驱动因子;Gavazzi 等<sup>[9]</sup>利用多波束测深仪在意大利威尼斯泻湖潮汐通道中识别了5种海床类型,绘制了底栖生境空间分布地图。

然而,国际上基于声学数据的海洋牧场底栖生态研究较少,目前处于前期探索阶段。Lima 等<sup>[10]</sup>总结了1962—2018年全世界620项人工鱼礁领域的研究,结果显示,人工鱼礁底栖生态研究多数使用抓斗和箱式采泥器等常规设备,声学技术仅限于鱼类群落探测与追踪研究。国内海洋牧场底栖生态的研究以定点采样为主流调查方法,取得了良好的研究成果<sup>[11-13]</sup>;基于声学技术的海洋牧场研究多集中于鱼群资源量<sup>[14-15]</sup>和礁体空间分布<sup>[16-17]</sup>方面,海床分类研究仅有 Li 等<sup>[18]</sup>利用多波束测深仪对牟平海域人工鱼礁区的沉积物分类

进行了初步探索。

本实验聚焦天津市大神堂海域国家级海洋牧场示范区(天津海洋牧场),针对定点采样、局部拖网等传统调查方法在高度异质性底栖生境中的局限性,基于侧扫声纳和多波束测深仪的联合调查,探索海洋牧场海床类型识别、分类和定位的新方法,以为海洋牧场海床类型识别、底栖生境修复、贝类资源评估和天然牡蛎礁演化等研究提供基础数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

天津海洋牧场是首批国家级海洋牧场示范区,位于渤海湾西北部区域,与天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区相邻,面积13 km<sup>2</sup>(图1),本底海床以粉砂质砂和砂质粉砂为主<sup>[19]</sup>。该海洋牧场人工鱼礁项目自2009年开始建设,截至2018年底,已投放钢筋混凝土人工鱼礁29348块,空方体积共1.088×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>。经过多年的发展,礁区群落结构明显改善<sup>[20]</sup>,物种数量和生产效益有所增加<sup>[21]</sup>,取得了良好的经济效益和生态效益。

### 1.2 数据采集与分析

**侧扫声纳调查** 2018年9—10月,利用瑞典 Deep Vision<sup>®</sup>公司生产的 DE340 型侧扫声纳对天津海洋牧场海床进行了整体声学探测。设备频率为340 kHz,分辨率为10 cm,满足海床类型识别的需求。鉴于海洋牧场区域水深较浅,现场作业采用前拖的方式,扫宽设置为双侧各25 m,以

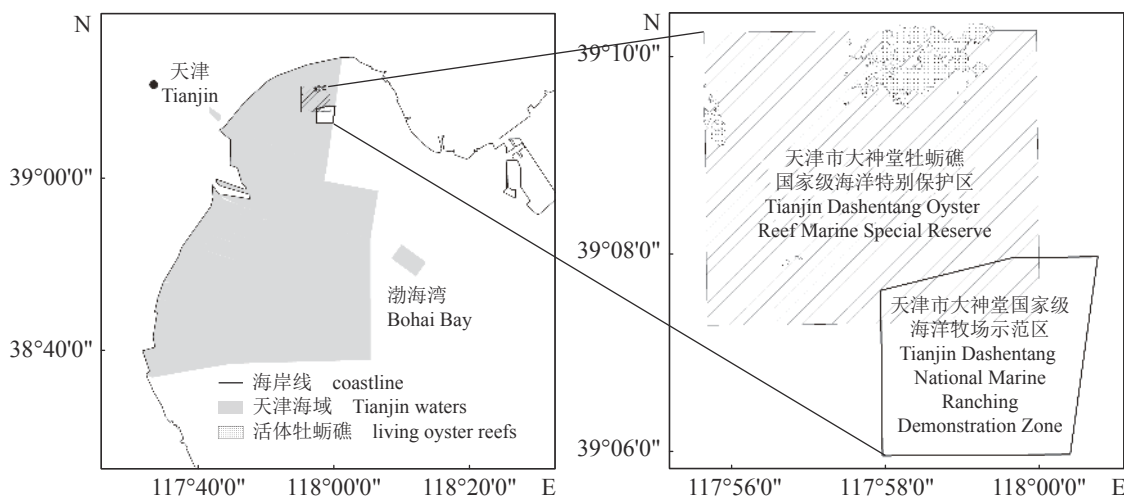


图1 天津海洋牧场区域位置

Fig. 1 Location of Tianjin marine ranching zone

最大限度地减少船舶尾流的干扰<sup>[22]</sup>。空间定位信息来源于亚米级差分 GPS。侧扫声纳数据处理采用 DeepView FV 3.0 软件, 将反向散射回波强度数据转化为侧扫声纳图像亮度信息, 图像亮度高低指代海床硬度大小。最后, 利用 ArcGIS 10.3 软件对侧扫声纳数据进行整体拼接和镶嵌, 形成天津海洋牧场侧扫声纳声学图像。

**多波束调查** 2019 年 2—3 月, 在侧扫声纳精确定位人工鱼礁的基础上, 利用美国 R2 Sonic 公司 2024 型号多波束测深仪对天津海洋牧场中投礁区域进行了针对性全覆盖式声学探测。该多波束测深仪一次性发射声波 256 束, 可获取航线两侧一定范围的精确水深, 分辨率达到 10 cm。作业过程中, 结合外围传感器, 将横摇、纵摇、艏摇、声速、潮位和吃水等误差进行标定和校准, 获取精准的海域牧场地形起伏数据, 生成栅格文件, 导入 ArcGIS 10.3 软件进行拼接和镶嵌, 形成天津海洋牧场多波束声学图像。

**海床类型识别** 高精度声学图像能够客观反映海床软硬度 and 起伏度, 不同海床类型展现的声学图像特征有差异。通过对声学图像典型特征区域进行海床原位采样, 建立海床类型与图像特征的映射关系, 并重新随机采集海床样品对该映射关系进行验证和评估, 即可基于已验证的映射关系对声学图像进行整体反演, 实现海洋牧场海床类型的识别和分类。

本研究中, 经专家人工判别声学图像特征, 规划采样站位 70 个, 其中, 位于鱼礁礁群内部的站位 6 个, 距礁群 50 m 以内的站位 18 个, 其余站位布设于图像特征较为典型区域内部及交界区域, 以保证海床数据的代表性和全面性<sup>[9, 23]</sup>。采样设备为 0.05 m<sup>2</sup> 箱式采泥器, 每个样品取表层 10 cm, 分析各样品的组成比例, 判别其海床类型。综合分析海床原位样品与相应位置声学图像特征的对应关系, 明确关键性声学图像特征, 构建海床类型与声学图像特征映射关系表, 并针对每种海床类型随机选择 5 个站位重新采集海床样品, 用以对该映射关系表的验证和评估。人工鱼礁声学特征较为明显和独特, 且无法使用箱式采泥器直接采样, 其识别和定位采用专家知识判断法, 后期采用原位吊礁的方法验证判断结果。

海床声学分类效果验证和评估的通用方法是混淆矩阵<sup>[9]</sup>, 该矩阵通过对海床类型识别结果和采样结果的交叉制表, 计算整体准确率、精确率、

灵敏度及特异度等指标 (表 1), 从而对分类效果进行评估。综合考虑相关研究的成果<sup>[9, 24-25]</sup> 及天津海洋牧场海床类型的复杂程度, 确定将整体准确率 ≥ 85% 作为判断映射关系表是否满足底栖生态系统研究需求的标准。

表 1 混淆矩阵及其评价指标的计算方法

Tab. 1 Confusion matrix and its evaluation index calculation method

识别值 prediction	采样值 sampling	
	是 true	非 false
是 true	TP	FP
非 false	FN	TN
精确率 positive predictive value	TP/(TP+FP)	
灵敏度 true positive rate	TP/(TP+FN)	
特异度 true negative rate	TN/(TN+FP)	
整体准确率 classification accuracy	(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)	

## 2 结果

### 2.1 天津海洋牧场声学图像

通过侧扫声纳和多波束测深仪的出海作业及相关软件的校正镶嵌, 本研究获得了天津海洋牧场的侧扫声纳和多波束声学图像 (图 2)。从侧扫声纳声学图像中可以看出, 海床硬度差异性显著, 人工鱼礁清晰可见。多波束声学图像表明: ①天津海洋牧场水深从西北到东南逐步变大, 最浅处 2.68 m, 最深处 7.67 m; ②人工鱼礁与周边海床水深差异显著, 可利用水深数据准确辨识人工鱼礁; ③人工鱼礁周边的地形有区域性差异。

### 2.2 声学图像特征与海床对应样品

现场采样结果显示, 海床样品之间形态及组成差异较大, 对应的声学图像特征之间有明显区别 (图版)。参考以往研究成果<sup>[9, 22-26]</sup>, 依据礁体、淤泥、贝类生物及破碎贝壳等组成成分的差异, 天津海洋牧场中共发现 6 种类型的海床: ①人工鱼礁, 即人工投放的钢筋混凝土构筑物; ②淤泥类, 海床样品组成以淤泥为主, 非淤泥组分总比重小于 10%; ③牡蛎类, 海床样品组成以牡蛎为主, 非牡蛎组分总比重小于 10%; ④牡蛎泥混类, 海床样品组成以牡蛎和淤泥为主, 二者比重均小于 90%, 且牡蛎大于蛤仔与碎贝的比重; ⑤蛤仔

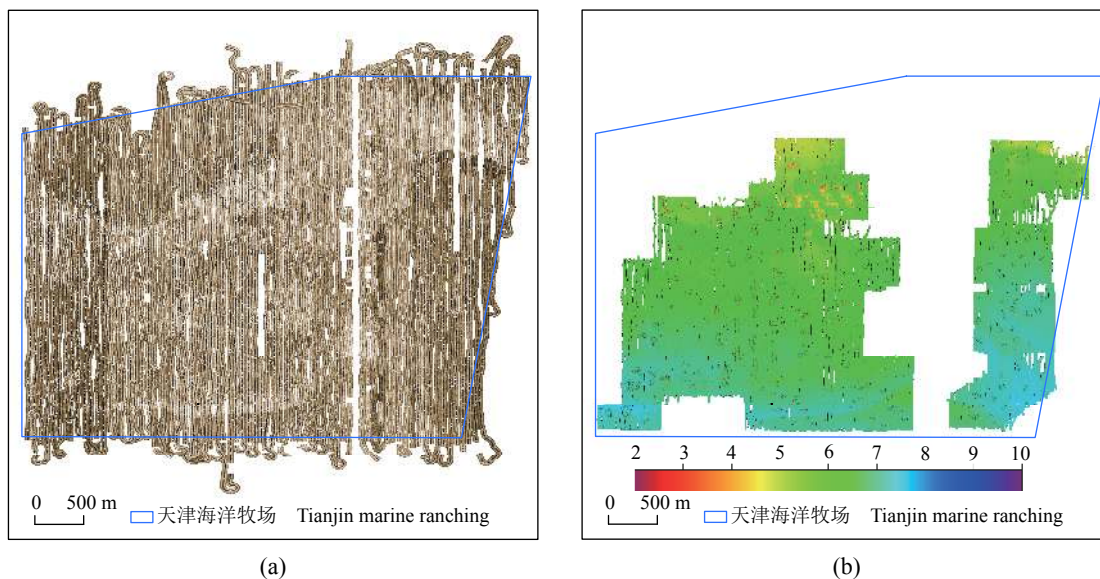


图 2 天津海洋牧场声学图像

(a)(b) 分别为天津海洋牧场侧扫声纳声学图像和多波束声学图像

Fig. 2 Acoustic image of Tianjin marine ranching

(a)(b) are the side scan sonar acoustic image and multi-beam acoustic image of Tianjin marine ranching, respectively

泥混类，海床样品组成以蛤仔和淤泥为主，淤泥比重小于 90%，蛤仔的比重大于牡蛎与碎贝；⑥碎贝泥混类，海床样品组成以不成型碎贝和淤泥为主，淤泥比重小于 90%，碎贝的比重大于牡蛎与蛤仔。各海床类型的描述及对应的声学图像特征见表 2，经过综合对比与分析，可以得出：① 每个典型区域内采样站位之间的距离均在百米以内，各站位海床类型的差异验证了天津海洋牧场底栖生境的高度异质性；② 海床类型的声学图像特征区分度高，边界较为明显，保证了声学识别方法的高效和准确；③ 海床类型识别需综合考虑侧扫亮度、侧扫纹理及多波束地形等 3 个声学图像特征，对于地形变化剧烈的人工鱼礁周边区域尤为重要。

### 2.3 海床识别验证

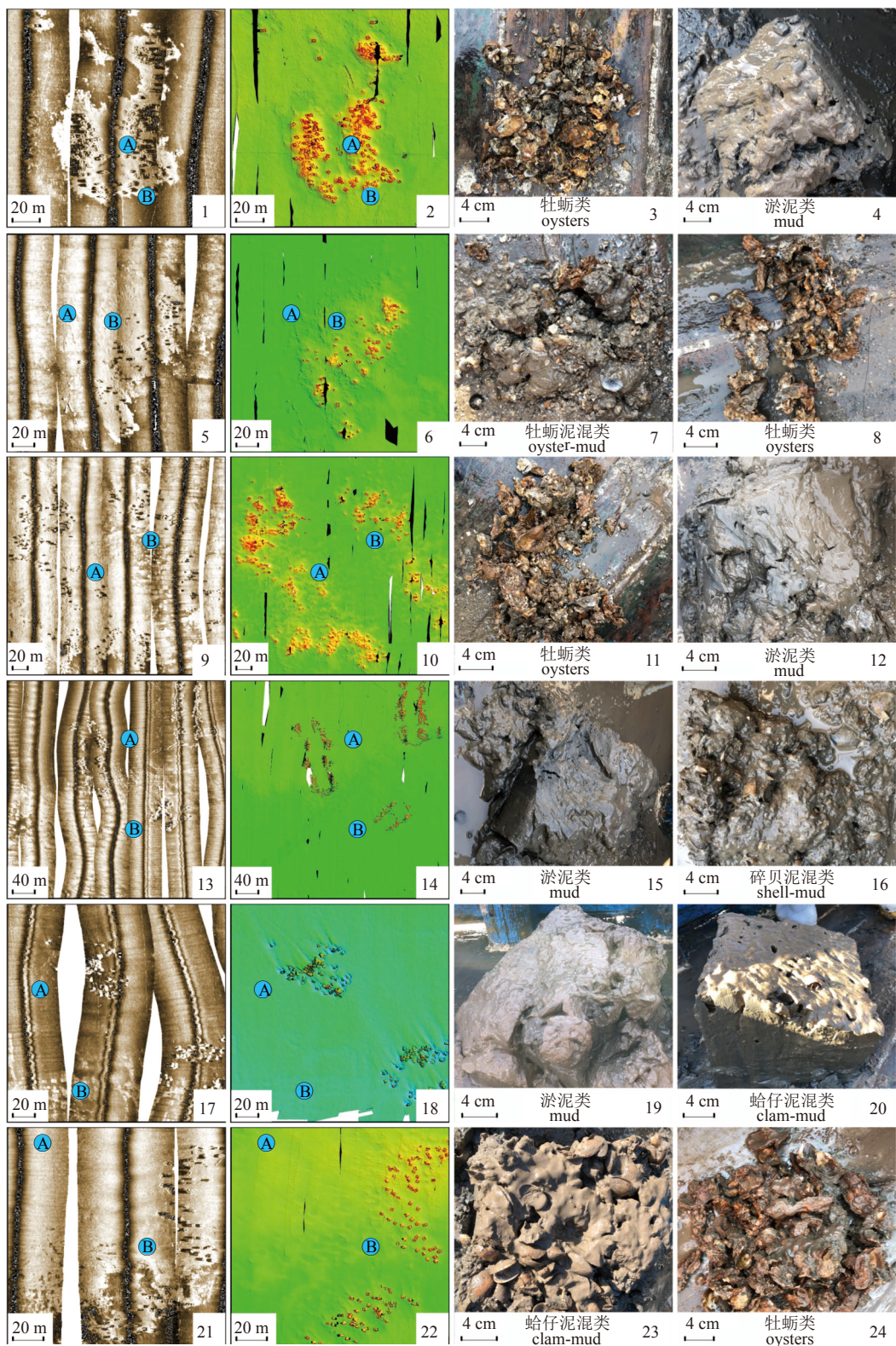
混淆矩阵中前 6 行中的数字分别代表海床样品实际类型和识别类型的对应数量，后 4 行中的数字代表各海床类型识别效果的评价指标 (表 3)。结果显示，本分类方法的总体准确率为 90%，可满足天津海洋牧场底栖生境的研究需求；人工鱼礁、牡蛎和蛤仔泥 3 个类型识别效果最为良好，各项评价指标均为 100%；淤泥类型次之，精确率和特异度为 100%，灵敏度为 83.33%，表明预测为淤泥的区域均与实际相符，个别零散淤泥区域未能有效识别；碎贝泥混区和牡蛎泥混区的效果

有待提高。

### 2.4 海洋牧场海床类型空间分布

基于已验证的海床类型声学图像特征，本研究反演了天津海洋牧场的海床类型及其空间分布 (图 3)，并计算了各海床类型的面积 (表 4)。其中，侧扫声纳和多波束声学图像同步覆盖的区域，综合考虑两种声学图像的特征进行反演；在多波束声学图像未覆盖的区域，单独使用侧扫声纳声学图像来反演海床类型，由于多波束未覆盖的区域均为未投礁区域，地形变化及异质性程度较低，不会对海床类型的识别效果产生过多影响。

天津海洋牧场中共发现人工鱼礁 27698 块，海床面积 0.062 km<sup>2</sup>，分布较密集，多数礁体呈现竖置状态，保存现状较好；淤泥质海床是天津大神堂海域的本底海床<sup>[19]</sup>，在海洋牧场中占比最高，主要分布于海洋牧场的边缘区域，随着人工鱼礁的投放，呈现逐步消退的趋势；贝类生物是海洋牧场重要的增殖对象，天津海洋牧场中的贝类海床分为牡蛎类、牡蛎泥混类和蛤仔泥混类，识别面积总计 1.082 km<sup>2</sup>，占海洋牧场区域总面积 7.96%，呈现持续增长的态势，其中，牡蛎海床和牡蛎泥混海床分布于人工鱼礁周边区域，验证了人工鱼礁对牡蛎的增殖作用，而蛤仔多分布于海洋牧场南部和东部边缘区域，与淤泥质海床相邻，展现了其对泥质及低人类扰动的需求；碎贝泥混海床



图版 典型声学图像与现场海床样品的对应关系

每行图片代表一个典型的声学图像纹理区域, 每列从左至右依次代表典型区域的侧扫声纳图像、多波束图像、A 点样品照片及 B 点样品照片

#### Plate Corresponding relationship between typical acoustic images and seabed samples

Each row of pictures represents a typical acoustic image texture area, and each column, from left to right, represents the side scan sonar image, multi-beam image, sample photo of point A, and sample photo of point B in this typical area

表 2 海床类型定义与声学特征

Tab. 2 The definition and acoustic characteristics of seabed types

海床类型 seabed type	样品个数 number of samples	侧扫亮度 brightness of SSS image	侧扫纹理 texture of SSS image	多波束地形 topography derived from MBES image
人工鱼礁 artificial reefs	/	高	块状分布	落差显著
淤泥 mud	30	低	均匀连续	平坦
牡蛎 oysters	6	高	均匀连续	明显起伏
牡蛎泥 oyster-mud	5	高	均匀连续	轻微起伏
蛤仔泥 clam-mud	3	中	明暗相间	波浪起伏
碎贝泥 shell-mud	3	高	均匀连续	平坦
碎贝泥 shell-mud	23	中	均匀连续	平坦

表 3 天津海洋牧场海床分类混淆矩阵

Tab. 3 Confusion matrix for seabed classification of Tianjin marine ranching

识别值 prediction	采样值 sampling					
	人工鱼礁 artificial reef	淤泥 mud	牡蛎 oysters	碎贝泥 shell-mud	蛤仔泥 clam-mud	牡蛎泥 oyster-mud
人工鱼礁 artificial reef	5	0	0	0	0	0
淤泥 mud	0	5	0	0	0	0
牡蛎 oysters	0	0	5	0	0	0
碎贝泥 shell-mud	0	1	0	4	0	0
蛤仔泥 clam-mud	0	0	0	0	5	0
牡蛎泥 oyster-mud	0	0	0	2	0	3
精确率/% positive predictive value	100	100	100	80	100	60
灵敏度/% true positive rate	100.00	83.33	100.00	66.67	100.00	100.00
特异度/% true negative rate	100.00	100.00	100.00	94.74	100.00	90.91
整体准确率/% classification accuracy	90					

为不成型的贝壳与淤泥的混合物，面积仅次于淤泥区，多分布于海洋牧场的中部区域。

### 3 讨论

#### 3.1 适宜于海洋牧场的海床声学分类方法

海洋牧场中人工鱼礁的大量投放，使部分区域转变为礁岩性质的海床，海床形态与组成发生了改变，同时人工鱼礁为附着性贝类生物提供了良好的栖息环境，贝类生物的增殖也在一定程度上影响了海床的形态和组成。由此，与天然海床不同，海洋牧场海床具有较高的异质性，全覆盖式调查对其识别和分类研究有重要意义。研究表明，声学技术是大面积海床分类的有效途径<sup>[8]</sup>，但声学设备和识别方法尚未标准化<sup>[4]</sup>，最优方案未达成广泛共识<sup>[5]</sup>。

声学反向散射数据在海床分类和制图中使用

最为广泛，海床声学分类研究多数以此为基础，采集该数据最佳设备是侧扫声纳<sup>[4]</sup>。人工鱼礁的投放和贝类资源的增殖，特别是牡蛎叠置向上生长的特性<sup>[27]</sup>，影响了海洋牧场海床的地形起伏<sup>[23]</sup>，使得地形变化成为海床类型识别的重要依据，然而侧扫声纳无法直接采集地形变化信息。多波束测深仪可通过记录回波速度，大范围准确计算海床的起伏度，但反向散射回波数据的质量弱于侧扫声纳<sup>[4]</sup>。以往研究多采用单一设备<sup>[5-9, 22-26]</sup>，多种设备联合使用仅限于优劣对比<sup>[28]</sup>，融合多设备优势的研究还不多见。本研究针对海洋牧场礁体密布、贝类增殖及高度异质等特点，综合考虑不同声学设备的性能特点<sup>[5]</sup>，分别通过侧扫声纳和多波束测深仪采集了反向散射强度和测深数据，以声学图像亮度和颜色来表征底质的硬度和地形的起伏，并从中提取纹理等海床形态特征<sup>[5]</sup>，以探索海洋牧场中海床类型与声学图像特征之间的

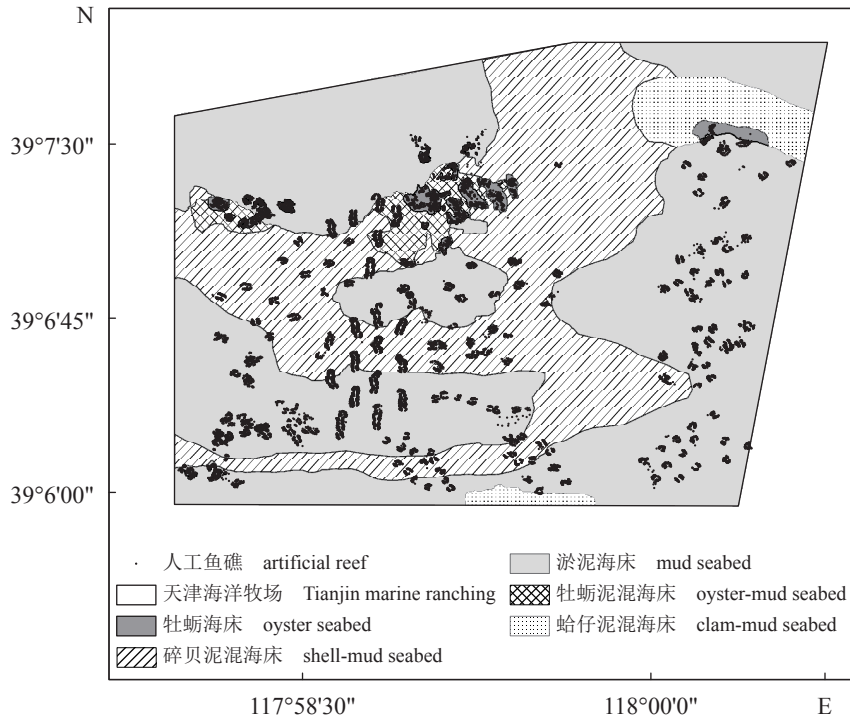


图 3 天津海洋牧场海床类型空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of seabed types in Tianjin marine ranching

表 4 天津海洋牧场海床类型分布面积

Tab. 4 Distribution area of seabed types in Tianjin marine ranching

海床类型 seabed type	面积/km <sup>2</sup> area	占比/% percentage
牡蛎海床 oyster seabed	0.246	1.81
牡蛎泥混海床 oyster-mud seabed	0.303	2.23
蛤仔泥混海床 clam-mud seabed	0.533	3.92
碎贝泥混海床 shell-mud seabed	4.545	33.40
淤泥海床 mud seabed	7.918	58.19
人工鱼礁 artificial reefs	0.062	0.46

映射关系。

声学图像特征的识别有专家经验判断和自动化算法两种方式, 其中, 自动化算法虽然消除了专家经验判断的主观性, 但是处理淤泥与生物混合海床仍然存在较大问题, 分类效果不佳<sup>[8]</sup>, 而专家经验判断方式更为通用和灵活<sup>[4, 22, 29]</sup>, 本研究选择专家经验判断法作为海洋牧场海床识别和分类的第一方案。结合原位海床样品, 经综合对比与分析, 确定天津海洋牧场中存在 6 种类型的海床: 人工鱼礁、淤泥类、牡蛎类、牡蛎泥混类、蛤仔泥混类及碎贝泥混类, 并以侧扫亮度、侧扫纹理及多波束地形做为海洋牧场海床分类的声学图像特征, 与同类研究相比<sup>[18, 30]</sup>, 分类数量增至

6 种, 整体准确率提高为 90%。

### 3.2 声学技术对传统底栖调查方法的补充与完善作用

海洋牧场海床作为高度异质性底栖生境, 物理特性和生物群落非均匀分布, 生态系统演变跨多个时空尺度, 传统底栖调查方法仅提供抽样局部信息, 虽然可以通过增加样本数量和减少站位间距的方式来提高信息的丰富度<sup>[5, 8]</sup>, 但是无法满足海洋牧场高度异质性底栖生境调查的需要。声学技术可以在多种空间尺度上描述海洋底栖生境的特征, 是常规调查方法的重要补充<sup>[4-5]</sup>。

**避免了常规调查的抽样误差** 基于声学技术的海洋牧场海床分类方法可以提供海床的形态、组成、分布及微地形地貌等生境信息, 调查人员可根据实际需求在特定区域采集样品, 避免了在高度异质性底栖生境中局部取样带来的误差, 提升了海洋牧场底栖生境调查的效率和精度。

**减少了底栖生态的人为扰动** 海洋牧场海床声学分类方法, 属于非接触性调查方式<sup>[10]</sup>, 一方面解决了传统的拖网调查方法在礁体密布的海洋牧场中无法作业的难题, 另一方面减少了传统接触性调查方法对底栖生境的人为扰动和破坏, 有利于保持底栖生态系统的原生态和完整性。

实现了贝类生物的精确定位。贝类生物是海洋牧场重要的增殖对象,在海洋牧场中呈现块状聚集分布,传统的定点和拖网调查分别以点和线的方式开展,无法精确定位贝类生物的空间分布和范围。海洋牧场海床声学遥测方法将底栖生态调查技术从点、线发展到面,实现了贝类生物空间分布的整体探测,为海洋牧场中贝类资源的定量评估和演化变迁研究提供了基础数据。

### 3.3 海洋牧场海床类型与声学图像的紧密联系

天津海洋牧场人工鱼礁的主体由钢筋混凝土制成,呈立方单体结构,竖立于海床上,其硬度与海底底质有明显区别,在声学图像上表现为侧扫亮度高<sup>[30]</sup>,侧扫纹理块状分布,多波束地形落差明显<sup>[18]</sup>,声学特征明显,易于识别。

淤泥质海床与其他海床类型相比,硬度小,平滑度较高,其在侧扫声纳图像上呈现的亮度低<sup>[23-26, 28-29]</sup>,纹理均匀连续<sup>[8, 31]</sup>,在多波束图像上起伏变化较小<sup>[18]</sup>,声学特征明显,与其他海床类型界线较为清晰,可基于声学图像特征对其精准识别与定位。

碎贝泥混区为不成型的贝壳与淤泥的混合物,侧扫亮度高于淤泥区,低于牡蛎区<sup>[9, 22-23, 25-26, 31]</sup>,纹理均匀连续,多波束图像上较为平坦,易与牡蛎泥混淆<sup>[25]</sup>,后期可考虑更多声学特征,提高识别准确度<sup>[26]</sup>。

贝类生物是海洋牧场重要的增殖对象,其壳体硬度介于淤泥和人工鱼礁之间,聚集生长特性引发海床的形态变化。天津海洋牧场中的贝类海床分为牡蛎类、牡蛎泥混类和蛤仔泥混类。牡蛎类海床紧密环绕于人工鱼礁周边,侧扫声纳图像亮度高<sup>[22, 25-26]</sup>,多波束地形起伏明显,声学特性非常典型,这是由于牡蛎为固着性生物,人工鱼礁为其提供了良好的附着环境,其垂直向上叠置生长的生活方式<sup>[27]</sup>,造成海床地形的高低起伏变化;牡蛎泥混类海床位于牡蛎海床周边,生物量未达到叠置状态,侧扫声纳图像亮度与牡蛎区差别不大,但多波束地形起伏较为轻微;与牡蛎不同,菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)具有很强的潜沙行为<sup>[32]</sup>,多栖息于底泥表层15 cm以内,其声学特性与蛤仔密度高度相关,高密度区域的声学特性与牡蛎相近,仅在地形起伏度上有所差异;低密度区域具有明暗相间的侧扫纹理和波浪形起伏。

### 3.4 海洋牧场对牡蛎礁的修复作用

牡蛎礁是一种生物礁系统,具有净化水体、

维持生物多样性、防止岸线侵蚀等多种重要生态功能<sup>[33]</sup>。天津海洋牧场紧邻天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区,该保护区拥有我国北方纬度最高的现代活体牡蛎礁群,受潮汐流场的影响,96%以上的牡蛎幼虫在繁殖期将脱离初始礁体,随海流迁移至周边海域<sup>[34]</sup>。人工鱼礁是良好的牡蛎幼虫附着基<sup>[35]</sup>,可为牡蛎的生长发育提供适宜生境。基于声学技术,本研究的结果表明,天津海洋牧场中共有0.549 km<sup>2</sup>淤泥质海床转变为牡蛎海床或牡蛎泥混海床,形成全新的牡蛎礁系统。据此,本研究首次以实际调查数据验证了海洋牧场对牡蛎礁的修复作用。

## 4 结论

现代化海洋牧场的建设是一个系统工程,涉及到海洋生态学、动物行为学、海洋工程、信息技术学等多学科的交叉应用<sup>[1]</sup>。本研究探索了声学技术在海洋牧场底栖生态研究中的重要作用,取得了初步的成果,在此基础上,可在以下领域开展进一步深入研究。

### 4.1 近岸海域生境修复的量化研究

人工鱼礁是海洋牧场建设中的重要组成部分,也是近岸海域生境修复的重要设施和关键技术,但其修复效果还缺乏长期系统的量化研究<sup>[33]</sup>。基于声学技术,本研究对天津海洋牧场的海床进行了遥测和分类,发现人工鱼礁、牡蛎类、淤泥类、碎贝泥混类、蛤仔泥混类及牡蛎泥混类等6种海床类型,经实测验证,总体准确度达到了90%,并绘制了天津海洋牧场海床类型的空间分布专题图,为海洋牧场生境研究提供可靠基础数据。在未来的研究中,结合地形、流场和营养盐等相关海洋学数据,可进一步明确特定生物或群落适宜生境的分布和面积,从而量化研究人工鱼礁对近岸海域生境的修复效果。

### 4.2 海洋牧场贝类资源量的精准评估

贝类生物是海洋牧场增殖目标之一,其资源量的科学计算对于海洋牧场效果评估有重要意义。本研究采用的海床遥测与识别方法,实现了贝类生物分布范围的定位,识别面积总计1.082 km<sup>2</sup>,为海洋牧场贝类生物资源量估算提供了有效依据。在未来的研究中,可针对不同贝类生物的生长特性,进一步探索海洋牧场贝类生物资源量的精准



估算方法, 为海洋牧场增殖效果评估提供科学手段。

### 4.3 牡蛎礁的演化机理研究

本研究的结果表明, 天津海洋牧场中已形成 0.246 km<sup>2</sup> 牡蛎海床及牡蛎礁待发育海床 0.303 km<sup>2</sup>, 但牡蛎海床在天津海洋牧场中分布并不均衡, 多出现于人工鱼礁周边区域, 且呈现近岸多、远海少的趋势, 其形成机理尚不明确。在未来的研究中, 立足于牡蛎礁保护区与海洋牧场之间的交互, 通过耦合三维高分辨率水动力模型、随机粒子迁移模型和牡蛎幼虫游泳行为特征, 探索牡蛎幼虫迁移与牡蛎礁演化机理, 从礁体构型和投礁选址两个关键维度来实现牡蛎礁的修复与再生。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] 梁振林, 郭战胜, 姜昭阳, 等. “鱼类全生活史”型海洋牧场构建理念与技术[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1211-1222.  
Liang Z L, Guo Z S, Jiang Z Y, *et al.* Construction concept and technology of the marine ranching mode of the whole life history of fishes[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1211-1222 (in Chinese).
- [2] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发中国水生生物资源养护行动纲要的通知 [EB/OL]. (2006-02-14). [http://www.gov.cn/zwqk/2006-02/27/content\\_212335.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2006-02/27/content_212335.htm).  
The State Council of the People's Republic of China. Circular of the state council on the issuance of China's action outline for the conservation of aquatic biological resources[EB/OL]. (2006-02-14). [http://www.gov.cn/zwqk/2006-02/27/content\\_212335.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2006-02/27/content_212335.htm) (in Chinese).
- [3] 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1851-1869.  
Chen P M, Shu L M, Yuan H R, *et al.* Review on development, definition and classification of marine ranching in domestic and overseas[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1851-1869 (in Chinese).
- [4] Anderson J T, Van H D, Kloser R, *et al.* Acoustic seabed classification: current practice and future directions[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(6): 1004-1011.
- [5] Brown C J, Smith S J, Lawton P, *et al.* Benthic habitat mapping: a review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 92(3): 502-520.
- [6] Haggarty D, Yamanaka L. Evaluating rockfish conservation areas in southern British Columbia, Canada using a Random Forest model of rocky reef habitat[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 208: 191-204.
- [7] Egerton J P, Al-Ansi M, Abdallah M, *et al.* Hydroacoustics to examine fish association with shallow offshore habitats in the Arabian Gulf[J]. *Fisheries Research*, 2018, 199: 127-136.
- [8] Gutperlet R, Capperucci R M, Bartholomä A, *et al.* Relationships between spatial patterns of macrofauna communities, sediments and hydroacoustic backscatter data in a highly heterogeneous and anthropogenic altered environment[J]. *Journal of Sea Research*, 2017, 121: 33-46.
- [9] Gavazzi G M, Madricardo F, Janowski L, *et al.* Evaluation of seabed mapping methods for fine-scale classification of extremely shallow benthic habitats—application to the Venice Lagoon, Italy[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 170: 45-60.
- [10] Lima J S, Zalmon I R, Love M. Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 145: 81-96.
- [11] Yang X Y, Lin C G, Song X Y, *et al.* Effects of artificial reefs on the meiofaunal community and benthic environment—A case study in Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 140: 179-187.
- [12] Chen Q, Yuan H R, Chen P M. Integrated response in taxonomic diversity and eco-exergy of macrobenthic faunal community to artificial reef construction in Daya Bay, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 512-521.
- [13] Chen Q, Yuan H R, Chen P M. Short-term effects of artificial reef construction on the taxonomic diversity and eco-exergy of the macrobenthic faunal community in the Pearl River Estuary, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 772-782.
- [14] 张俊, 陈丕茂, 房立晨, 等. 南海柘林湾—南澳岛海洋牧场渔业资源本底声学评估[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1187-1198.  
Zhang J, Chen P M, Fang L C, *et al.* Background acoustic estimation of fisheries resources in marine ranching

- area of Zhelin Bay-Nan'ao Island in the south China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1187-1198 (in Chinese).
- [15] 王欢欢, 毕福洋, 曹敏, 等. 獐子岛海洋牧场秋季渔业资源声学调查与评估[J]. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(06): 802-807.  
Wang H H, Bi F Y, Cao M, *et al.* Survey and acoustic assessment of fishery resources in marine ranching area surrounding Zhangzi Island in autumn[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(06): 802-807 (in Chinese).
- [16] 沈蔚, 章守宇, 李勇攀, 等. C3D测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(3): 404-409.  
Shen W, Zhang S Y, Li Y P, *et al.* The application of C3D bathymetry side scan sonar system in artificial reef construction[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(3): 404-409 (in Chinese).
- [17] 赵刚, 李妍, 许祝华, 等. 侧扫声呐在人工鱼礁跟踪监测中的应用[J]. *地质学刊*, 2020, 44(3): 307-311.  
Zhao G, Li Y, Xu Z H, *et al.* Application of side-scan sonar in artificial reef tracking and monitoring[J]. *Journal of Geology*, 2020, 44(3): 307-311 (in Chinese).
- [18] Li D, Tang C, Xia C L, *et al.* Acoustic mapping and classification of benthic habitat using unsupervised learning in artificial reef water[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 185: 11-21.
- [19] 王凯, 吴建政, 安永宁, 等. 渤海湾北部表层沉积物的物理力学性质[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(01): 14-18.  
Wang K, Wu J Z, An Y N, *et al.* Physico-mechanic properties of surface sediments in the north of bohai bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(01): 14-18 (in Chinese).
- [20] 王宇, 侯纯强, 汪笑宇, 等. 天津近岸海域人工鱼礁区渔业资源增殖效果初步评估[J]. *海洋湖沼通报*, 2018, 1(2): 137-145.  
Wang Y, Hou C Q, Wang X Y, *et al.* Preliminary evaluation on proliferation effects of artificial reefs in live oyster reef area, Tianjin, China[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018, 1(2): 137-145 (in Chinese).
- [21] 于洁, 王宇, 房恩军, 等. 天津大神堂人工鱼礁区生态养护效果的初步评估[J]. *河北渔业*, 2016(6): 24-28,41.  
Yu J, Wang Y, Fang E J, *et al.* Preliminary evaluation on the ecological conservation effects of artificial reefs area in Dashentang, Tianjin[J]. *Hebei Fisheries*, 2016(6): 24-28,41 (in Chinese).
- [22] Allen Y C, Wilson C A, Roberts H H, *et al.* High resolution mapping and classification of oyster habitats in nearshore Louisiana using sidescan sonar[J]. *Estuaries*, 2005, 28(3): 435-446.
- [23] Isachenko A, Gubanova Y, Tzetlin A, *et al.* High-resolution habitat mapping on mud fields: new approach to quantitative mapping of Ocean quahog[J]. *Marine environmental research*, 2014, 102: 36-42.
- [24] Richter J T, Sloss B L, Isermann D A. Validation of a Side-Scan Sonar Method for quantifying walleye spawning habitat availability in the littoral zone of northern Wisconsin Lakes[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2016, 36: 942-950.
- [25] Legare B, Mace C. Mapping and classifying eastern oyster (*Crassostrea virginica*) habitat in Copano Bay, Texas, by coupling acoustic technologies[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 33(2): 286-294.
- [26] Smith G, Bruce D, Roach E. Remote acoustic habitat assessment techniques used to characterize the quality and extent of oyster bottom in the Chesapeake Bay[J]. *Marine Geodesy*, 2001, 24(3): 171-189.
- [27] 岳军, 张宝华, 韩芳, 等. 渤海湾西北岸的几道牡蛎礁[J]. *地质学报*, 2012, 86(8): 1175-1187.  
Yue J, Zhang B H, Han F, *et al.* Several oyster Barrier reefs in the northwest coast of Bohai Bay[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(8): 1175-1187 (in Chinese).
- [28] Holler P, Markert E, Bartholomä A, *et al.* Tools to evaluate seafloor integrity: comparison of multi-device acoustic seafloor classifications for benthic macrofauna-driven patterns in the German Bight, southern North Sea[J]. *Geo-Marine Letters*, 2017, 37(2): 93-109.
- [29] Georgiadis M, Papatheodorou G, Tzanatos E, *et al.* Coralligène formations in the eastern Mediterranean Sea: morphology, distribution, mapping and relation to fisheries in the southern Aegean Sea (Greece) based on high-resolution acoustics[J]. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 2009, 368(1): 44-58.
- [30] 沈蔚, 马建国, 张进, 等. 基于侧扫声纳的人工鱼礁自动识别方法研究[J]. *海洋测绘*, 2019, 39(6): 34-37,42.  
Shen Y, Ma J G, Zhang J, *et al.* Research on automatic identification method of artificial reef based on side scan sonar[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2019, 39(6): 34-37,42 (in Chinese).
- [31] Ungureanu G, Lazăr A, Lazăr R, *et al.* Habitat mapping of Romanian Natura 2000 Sites. A case study, "underwa-

- ter sulfurous seeps, Mangalia”[J]. *Italian Journal of Geosciences*, 2015, 134(1): 69-73.
- [32] 杨凤, 曾超, 王华, 等. 环境因子及规格对菲律宾蛤仔幼贝潜沙行为的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 795-802.
- Yang F, Zeng C, Wang H, *et al.* Effects of environmental factors and clam size on the burrowing behavior of Manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 795-802(in Chinese).
- [33] 杨红生, 许帅, 林承刚, 等. 典型海域生境修复与生物资源养护研究进展与展望 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 809-820.
- Yang H S, XU S, LIN C G, *et al.* Research progress and prospects of restoration and resource conservation in typical sea areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 809-820 (in Chinese).
- [34] North E W, Schlag Z, Hood R R, *et al.* Vertical swimming behavior influences the dispersal of simulated oyster larvae in a coupled particle-tracking and hydrodynamic model of Chesapeake Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 359: 99-115.
- [35] Xu M, Yang X Y, Song X J, *et al.* Seasonal analysis of artificial oyster reef ecosystems: implications for sustainable fisheries management[J]. *Aquaculture International*, 2020, 29: 167-192.

## Research on seabed classification of marine ranching based on high-precision acoustic images

XU Xiaofu<sup>1,2,3,4</sup>, XIANG Xianquan<sup>1</sup>, ZENG Xiangxi<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Bolun<sup>2,4</sup>,  
SUN Miao<sup>1</sup>, FANG Enjun<sup>2,4</sup>, LIU Kefeng<sup>2,4\*</sup>

(1. *Marine Information Technology Innovation Center of Ministry of Natural Resources, National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China;*

2. *Tianjin Fisheries Research Institute, Tianjin 300457, China;*

3. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

4. *Tianjin Marine Ranching Engineering Technology Center, Tianjin 300457, China*)

**Abstract:** As the foundation for ecological engineering of marine ranching, artificial reefs play an important role in the restoration of marine ecological environment and the proliferation of fishery resources. With a large number of artificial reefs, the seabed of marine ranching has gradually transformed into highly heterogeneous benthic habitats, which directly affects the development and reproduction of bottom organisms. How to accurately identify seabed habitats has become an important issue in the benthic ecological research of marine ranching, and remote sensing of the seabed using acoustic technique combined or individually are providing solutions to this problem. Currently, the acoustic seabed classification technique has been applied to ecological research in many sea areas successfully, but it is rarely used in marine ranching. Also, the science of acoustic seabed classification is at its nascence, and there is still no widely accepted agreement about the standardization of instruments and methods. Focusing on the application of acoustic technique in seabed classification of marine ranching, we developed a new method of seabed telemetry and identification based on side scan sonar (SSS) and multi-beam echo sounder (MBES), and applied it in Tianjin Marine Ranching. The SSS and MBES acoustic images objectively reflect the hardness and topography of seabed respectively, which closely relates to seabed type. But most seabed types are not directly measurable using remote survey techniques. It is always necessary to measure the seabed types using in situ ground truthing methods, which can be linked in some way to the characteristics of acoustic images, and then the seabed types can be identified and classified by using acoustic images. In our research, 70 seabed in-situ samples were analyzed and connected with the corresponding acoustic images, and the results show that key image features to identify the seabed type were brightness and texture of SSS image and topography derived from MBES

image. Based on the believable relationship between seabed type and acoustic image characteristic, the seabed type of Tianjin Marine Ranching was identified, classified and quantified. The results show that ① six seabed types were found in Tianjin Marine Ranching, including artificial reefs, oysters, mud, clam-mud, oyster-mud and shell-mud, and the accuracy of seabed classification method based on acoustic characteristics is 90%, which can meet the needs of benthic ecological research in marine ranching; ② the mud seabed has subsided to 58.13%, and the shellfish seabed has increased to 7.96%, which demonstrates that the shellfish proliferated in Tianjin Marine Ranching; ③ 0.266 km<sup>2</sup> of new oyster reef are closely surrounding artificial reefs, and 0.313 km<sup>2</sup> of oyster-mud seabed will be developed into oyster reef, which verifies the restoration effect of Tianjin Marine Ranching on living oyster reef. Compared with conventional benthic survey methods, our method of acoustic seabed classification based on high-precision acoustic images can avoid sampling errors, reduce human disturbance, discover accurate position of shellfish and improve the accuracy of seabed classification. This study explored the acoustic classification method suitable for the seabed of marine ranching, discussed the complement and perfection of acoustic technique to traditional benthic survey methods, clarified the close relationship between marine ranching seabed types and acoustic image characteristics, and verified the restoration effect marine ranching on oyster reefs. Our research results can be effectively applied to coastal habitat restoration, accurate assessment of shellfish resources, and the evolution mechanism of oyster reefs.

**Key words:** oyster reef; benthic habitat; seabed acoustic classification; side scan sonar (SSS); multi-beam echo sounder (MBES); marine ranching; Tianjin

**Corresponding author:** LIU Kefeng. E-mail: liukefeng@sina.com

**Funding projects:** Tianjin Science and Technology Major Programs and Projects (18ZXRHSHF00270); Open Fund of the Marine Information Technology Innovation Center of the Ministry of Natural Resources (B201801028); National Key R & D Program of China (2019YFD0902104); Open Fund of State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering (sklhse-2020-B-05); National Natural Science Foundation of China (41806205)