



## 海洋牧场人工鱼礁群探测及空方量测算方法

杨 龙<sup>1,2</sup>, 高 珊<sup>1,2</sup>, 冯义楷<sup>1,2</sup>, 刘森波<sup>1,2</sup>, 江丰标<sup>1</sup>, 丁继胜<sup>1,2\*</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 为了得到人工鱼礁位置及体积, 以海洋牧场测量项目为例, 综合利用高分辨率声学测量及高精度定位设备, 实现对水下人工鱼礁位置、形态及周边海底地形的精密测量; 以获取的地理空间数据为依据, 对鱼礁进行精确定位, 构建人工鱼礁地形模型。分析了多种堆积物体积计算方法, 选用最优方法测算鱼礁体空方量并与实际投放空方量进行比较。结果显示, 研究方法在人工鱼礁投放区域位置探测方面与实际投放位置非常符合; 体积计算方面, 在投放多年的鱼礁区域存在 25.76% 误差, 而在新投放的鱼礁区, 误差仅为 2.22%。研究表明, 综合采用高精度定位设备及水下测深、侧扫声呐探测手段, 可以准确确定鱼礁投放位置及实际存在形态, 对于新投放的人工鱼礁, 也可以比较精确地测算其真实投放空方量, 但是对于投放时间比较长的人工鱼礁区, 由于冲刷、沉陷等多种因素的影响, 测算结果与实际投放数量存在一定的差异。研究结果证实了综合利用声呐探测及高精度定位设备在客观公正评价海洋牧场建设过程中的科学性和有效性, 可为我国的海洋牧场建设提供有效的监测及评价技术支撑, 为海洋牧场建设过程中人工鱼礁的投放效果及后续运行及管理提供科学依据。

**关键词:** 海洋牧场; 人工鱼礁; 空方量测算; 声呐探测

**中图分类号:** S 953.1

**文献标志码:** A

近年来, 社会的迅速发展加剧了对资源的需求; 另一方面, 受环境污染、生境退化、过度捕捞和全球气候变化等因素的影响, 全球海洋渔业资源衰退明显<sup>[1]</sup>, 也凸显了海洋资源的日渐匮乏。为了增加海洋资源供给, 众多沿海国家开始重视海洋牧场建设, 以改善海域生态环境<sup>[2]</sup>, 同时也可以缓解近海渔业资源的衰退所带来的资源匮乏, 保障海洋资源可持续发展。国外开始建造与渔业有关的人工礁体始于 20 世纪 60 年代, 材料包括岩石、轮胎、木材、混凝土和金属, 甚至是石油、天然气平台<sup>[3]</sup>。我国从 20 世纪 80 年代开始改革开

放, 经济发展迅速, 与需求相矛盾的是我国近海渔业资源衰退严重, 海洋捕捞从捕捞过度走向了竭泽而渔的严重状态<sup>[4]</sup>。针对资源的需求迫切性, 人工鱼礁的建设提上日程并逐步展开。进入 21 世纪之后, 海洋牧场建设在一些沿海省市如火如荼展开, 主要分布在辽宁、河北、山东、江苏、浙江、广东、广西等地区<sup>[5]</sup>。海洋牧场建设达到了一定规模, 对其管理水平也需要相应发展提升, 我国早期海洋牧场建设及运行过程中, 由于技术限制与管理粗放, 海洋牧场的建设和验收管理体系不够规范化。最近几年, 随着我国“坚持陆海统

收稿日期: 2023-05-29 修回日期: 2023-09-01

资助项目: 自然资源部海洋测绘重点实验室开放基金 (2021B04)

第一作者: 杨龙 (照片), 从事海洋测绘相关技术研究, E-mail: yanglong@fio.org.cn

通信作者: 丁继胜, 从事海洋测绘相关技术研究, E-mail: dingjisheng@fio.org.cn



筹, 加快建设海洋强国”战略的提出及各行业集约化管理理念的重视, 我国也加强了海洋牧场建设的规范化管理, 也符合海洋牧场 6 大核心工作之一即“系统管理”的要求<sup>[6]</sup>。

在海洋牧场建设的选址、人工鱼礁布放、后续维护等重要环节中, 人工鱼礁投放后的效果检测, 以及运行过程中对人工鱼礁存在状态的监测至关重要, 关系到海洋牧场建设质量及安全有效运行。人工鱼礁是人们根据实际需求放置在海底的、可以影响海底生物生存和其他物理过程的人工建造的结构体<sup>[7]</sup>。人工鱼礁的布放位置及效果, 代表了海洋牧场所布放鱼礁的空间位置及体积是否符合技术设计, 因此在海洋牧场建设过程中, 应极为重视人工鱼礁布放的选址调查、布放效果检测、生产运行过程监测等。通过对人工鱼礁进行科学合理地探测, 不但可以精确界定其边界和权属, 还可以快速测算布放人工鱼礁的空方量并获取周边海区地形冲刷情况, 为海洋牧场管理及安全运行提供科学依据。

技术发展早期, 人工鱼礁的探测多依靠人工潜水观察、视频录像等方式完成, 不仅效率较低, 而且准确性差。随着技术发展, 人工鱼礁的探测手段也升级到了综合利用声学、光学及电磁学等多种技术手段来完成。对人工鱼礁的探测, 不仅局限于人工鱼礁施工过程中的施工监测或者施工之后的竣工验收, 还包括了施工之前的海洋牧场选址测量和海洋牧场运行过程中的日常安全监测。2006 年邓显明等<sup>[8]</sup>采用侧扫声呐和浅地层剖面仪对人工鱼礁布放区域进行了选址调查, 满足了该海区人工鱼礁建设综合指标需求。张进等<sup>[9]</sup>和沈蔚等<sup>[10]</sup>利用 C3D 测深侧扫声呐系统对人工鱼礁投放区进行了投放前本底调查和投放后的效果检测, 证实了该手段在人工鱼礁布放前后检测的可行性和高效性。2018 年逯金明<sup>[11]</sup>联合使用多波束测深系统和侧扫声呐系统分别对人工鱼礁投放区域进行了地形地貌扫测, 获取了详细的海底地形、地貌和底质等信息。赵晓龙等<sup>[12]</sup>利用无人船搭载多波束测深系统、侧扫声呐系统和卫星定位系统完成了对人工鱼礁的投放效果检测及实际投放空方量的估算。人工鱼礁空方量的计算, 多基于传统的土石方量计算方法即通过测量被计算对象的特征来实现, 该方法由于原始数据均以研究区域特征离散点为基础, 最终计算精度取决于特征点位原始数据的精度和点位的密度<sup>[13]</sup>。为实现对人工

鱼礁实际投放空方量的准确测算, 首先应有准确的原始数据作为基础, 其次还应采用合适的研究方法, 最终通过建立合适的理论计算模型完成测算。本研究同步综合利用先进的多波束测深声呐、地貌扫测声呐、惯性定位定姿系统, 对所投放人工鱼礁区实现高精度、高分辨率的地形地貌原始数据采集, 处理之后生成高精度数字高程模型 (digital elevation model, DEM), 采用了多种空间物体体积计算方法, 对投放鱼礁进行空方量测算, 与实际投放体积比较, 得出最优测算方法。

## 1 材料与方法

为了保障探测数据及最终人工鱼礁投放量测算的准确性, 综合利用高精度、高分辨率的空间位置信息及影像信息同步集采方法, 并辅以高精度空间定位信息搭建研究平台, 制定合理的技术实施方案, 最大限度降低采集数据的外部误差来源, 以获取检测对象高分辨率的空间位置数据及声呐影像数据; 分析研究目前常用的堆体体积计算方法, 实现人工鱼礁实际投放空方量的最佳测算。

### 1.1 地形及影像数据采集

地形及影像数据采集使用的设备为 Subsea 公司生产的 Norbit iWBMS 一体化水下地形地貌数据采集系统, 其每 Ping 波束数可达 1 024 个, 波束角为  $0.5^{\circ} \times 0.9^{\circ}$ , 对海底目标具有极高的地形及地貌分辨率, 可实现对海底目标的精准空间定位及影像重现, 为人工鱼礁检测及方量计算提供空间位置信息及目标影像信息。

### 1.2 高精度定位定姿

声呐设备要实现目标物准确的空间绝对位置定位, 必须使用辅助定位定姿系统来实现。研究数据采集过程中, 使用的定位定姿系统为 POS MV WaveMaster 系统, 其最高定位精度可以达到厘米级, 姿态测量精度达到  $0.015^{\circ}$ , 不仅可以提高目标物单次空间定位的准确度, 也可以极大地提高同一目标物多次测量位置重合准确度, 从而提高人工礁体的位置定位精度和方量计算准确度。

### 1.3 研究区域

研究数据来源于我国渤海湾内某海洋牧场 (图 1 深蓝色虚线方框位置) 勘测数据, 整个研究区域长 3 500 m, 宽 1 300 m, 区域内水深为 5 m~12 m, 海底主要为沙、石底质。该海区投放有圆

台礁、M型礁、沉箱、碎石堆积礁等多种类型礁石, 形成人工鱼礁群, 为海洋生物创造良好的生存栖息环境。考虑到整个探测区域面积较大, 人工鱼礁类型较多, 本研究仅以该区域内沉箱类型礁石区(图1中橙色方框区域, 长900 m, 宽600 m)声呐探测数据为对象, 对人工鱼礁的检测及方量估算方法进行研究。

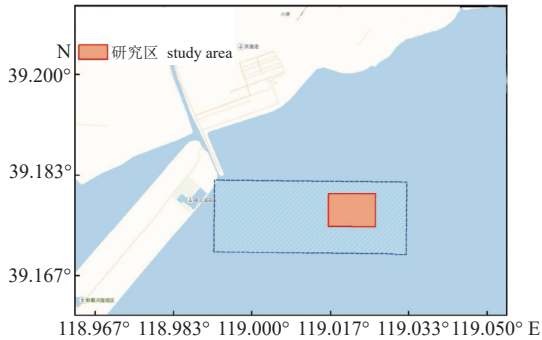


图1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the study area

### 1.4 技术集成

常规情况下, 进行海底地形地貌测量的声呐设备和辅助定位定姿设备属于不同原理和测量目

的的独立设备, 设备操作人员完成设备组合安装并系统校准后才能开展测量工作, 但在安装校准过程中, 因硬件安装和外部环境影响, 难免产生多种误差造成最终测量准确度降低。本研究所使用的数据采集平台采用了先进的系统技术集成, 将定位定姿系统集成于声呐换能器内部, 实现了与声呐换能器的之间相对位置的固定, 避免了安装校准误差, 极大提高了系统整体测量准确度, 对提高人工礁体的定位和空方量测算精度非常重要。

### 1.5 研究数据获取

人工鱼礁的探测数据质量, 不仅取决于所用设备技术指标, 还与实施方案制定及操作人员技术水平息息相关。数据获取前应根据检测内容和技术要求, 选用合适的探测设备, 依照技术要求制定合理的实施方案。利用多波束声呐系统测量时, 根据不同的水深, 选择合适的测量模式、波束扇面覆盖角、测量频率、脉冲长度等参数<sup>[14]</sup>; 结合被探测海区的实际水深条件和声呐设备采用的扇面覆盖角所对应的条带覆盖宽度, 选择合适的测线间距, 获取最佳的探测数据。数据获取流程如图2。

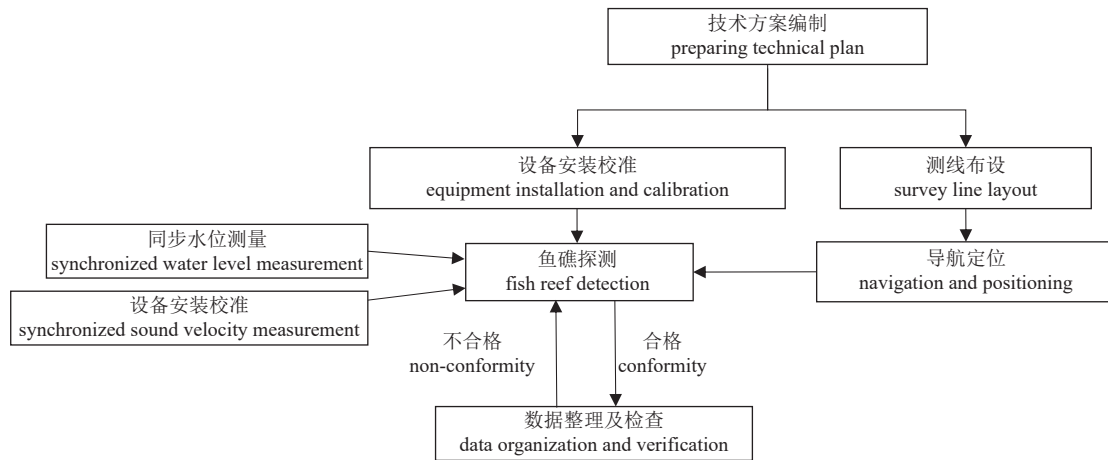


图2 数据获取流程图

Fig. 2 The flowchart of data collection

本研究数据获取过程中, 采取了不大于130°的波束扇面覆盖角、最大的波束发射 Ping 率(50次/s), 在保障回波信号良好的情况下, 尽可能减小发射脉冲长度, 提高了采集数据精度, 从而提高对目标物的空间分辨率, 有助于地形数据精度的提高及对目标物边界的识别, 提高人工鱼礁的定位及空方量估算的准确度, 获取了研究区域质量最佳

的声呐探测数据及对应的定位定姿数据。

### 1.6 数据分析

姿态及定位数据分析 人工鱼礁探测的最终效果, 不仅与外业数据采集手段与方法有关, 数据处理方法的选择同样至关重要。构建 DEM 计算堆体体积方法中, 影响最终计算结果的直接

因素是 DEM 的分辨率<sup>[15]</sup>, DEM 分辨率越高, 计算准确度越高。因此, 为有效评估人工鱼礁投放效果及实际运行情况, 应对采集的原始数据进行精细处理, 获取鱼礁在三维空间的准确位置及其自身影像图。利用统计分析方法对水深数据及定位定姿数据进行精度分析。数据处理主要包括姿态数据、定位数据和声呐数据处理等几项内容。

为了获得探测目标最佳的定位结果, 利用同步采集的 GNSS 参考站静态数据, 对实时采集的姿态及定位数据重新计算, 处理后的姿态数据和定位数据获得进一步精度提升。为评价定位定姿数据处理结果, 对成果数据进行了统计评价分析, 图 3 为姿态数据处理前后精度比对, 图 4 为定位数据处理前后精度比对。处理之后, 姿态数据标准差范围由 1.7~2.0 cm 提高到 1.1~1.3 cm; 定位数据标准差由 40 cm 左右提高到大部分优于 10 cm, 数据整体精度都得到了较大的提高, 这对于保障人工鱼礁最终位置识别及空方量计算的精度具有重要意义。

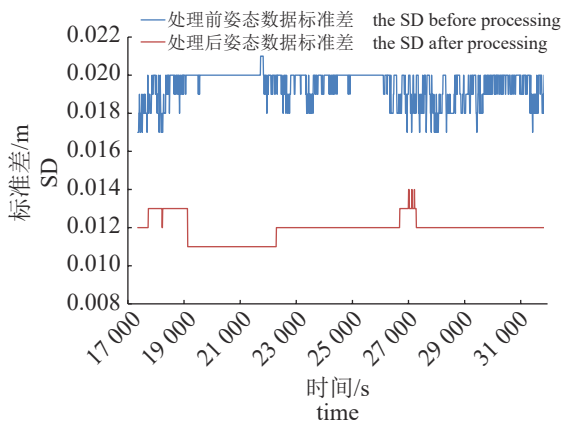


图 3 姿态数据处理精度结果

Fig. 3 Attitude data processing accuracy results

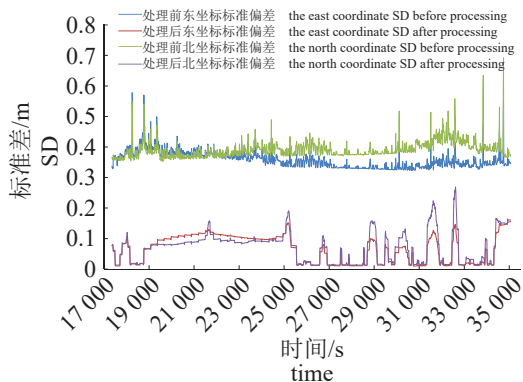


图 4 定位数据处理精度结果

Fig. 4 Positioning data processing precision results

**声呐数据处理** 声呐数据处理包括空间位置数据处理及影像数据处理, 对于本研究涉及的案例, 声呐数据处理主要包括多波束水深地形数据和侧扫影像数据两部分。测深数据和图像数据经过处理后可以反映海底地形的起伏变化情况及地貌特征<sup>[16]</sup>。多波束成果资料质量不仅取决于换能器的测量精度, 还取决于姿态、定位、潮汐、声速以及换能器吃水等各种辅助参数的测量精度<sup>[17]</sup>, 多波束测深数据处理主要是对这些组成数据单元进行处理改正, 并剔除其他因为噪声因素引起的错误测深点。多波束影像数据在测量过程中受噪声及其他外部因素影响, 声强测量值不能直接反映真实的海底地质特征<sup>[18]</sup>, 为了测量图像能最大限度接近被测对象真实面目, 在数据处理中, 除了常规的声传播损失、声线改正及 Lambert 法则改正等处理之外, 还应考虑海底地形起伏、中央波束区反射信号对反向散射强度产生的影响<sup>[19]</sup> 并加以处理。

基于以上处理要求, 研究数据处理时综合采用了 PDS 及 FMGT 软件, 并根据多波束测量规范要求, 抽取部分主测线和检查线重合测点数据 (2 195 个重合点), 进行了精度统计比对分析。发现本次声呐数据主测线和检查线重合点水深限差均不大于 20 cm, 所有重合点限差中误差 8 cm (表 1)。根据处理数据生成研究区域人工鱼礁的空间位置图 (图 5-a) 及对应影像图 (图 5-b), 发现空间位置图可以获取探测目标人工鱼礁的平面位置及对应高程, 但人工鱼礁的自身形态及数量反映并不是很清晰。相反, 影像图可以很清晰地反映人工鱼礁的形态及数量, 但是目标物人工鱼礁的高度信息却无法直接获取。

表 1 测深主/检测线比对统计表

Tab. 1 Comparison statistics table for depth measurement of main/check line

统计项 statistical items	≤20 cm 为合格 ≤20 cm qualified	>20 cm 为超限 >20 cm unqualified	总数 total
	点数/个 no. of points	2 195	
百分比/% percentage	100	0	0
平均中误差/cm average RMSE	8		

### 1.7 人工礁体空方量计算

海洋牧场人工鱼礁空方量测算时, 应首先准确识别人工鱼礁与海底交界线, 之后按边界线形成独立的鱼礁目标区, 最后按照土方量计算方法

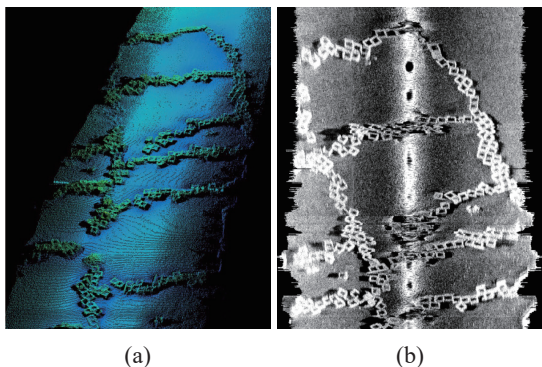


图 5 鱼礁区地形数据 (a) 及影像数据 (b) 处理结果示例  
 Fig. 5 Example of processing results of terrain data (a) and image data (b) of fishing reef area

实现鱼礁目标区的体积计算。

**鱼礁边界线识别** 本研究人工鱼礁边界识别提取时使用 ArcGIS Python 工具开发的半自动形态学工具 Python 3+, 基于等高度线原理根据多波束水深数据自动识别提取。Python 3+ 主要采用基于地形位置指数 (TPI) 的方法从水深数据中绘制地势高出周边的特征区域。即使用地形位置指数 (TPI) 和当地莫兰指数 (LMI) 方法的组合, 根据测深数据绘制地形高度特征。正 TPI 通常表示水深较高的位置。正 LMI 通常表示正局部自相关的空间模式, 即高于平均值的区域与周围区域具有相似的属性值。边界识别步骤见图 6。

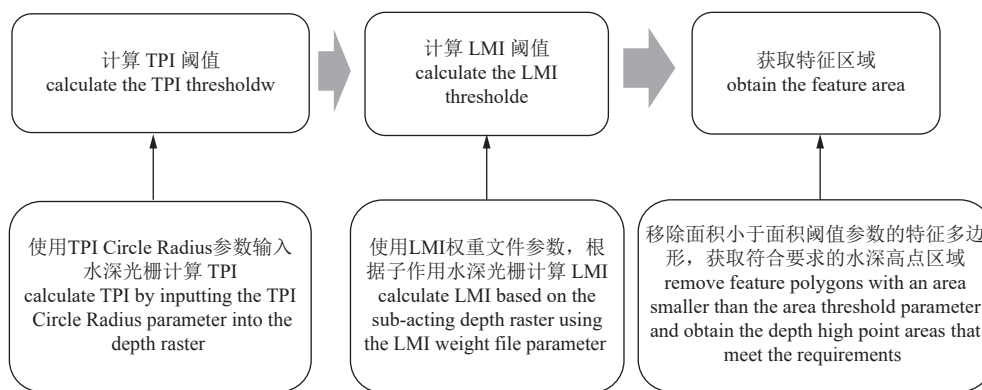


图 6 边界线识别算法流程

Fig. 6 The flowchart of boundary line recognition algorithm

根据以上方法自动识别划定的鱼礁区域, 由于部分特殊地形区域或者个别测量粗差点等因素影响, 存在一些不合理的选定区域, 需人工干预进行删除、修改, 甚至是重新选择, 最大可能使圈出的鱼礁区域符合实际情况。通过自动识别结合人工识别修正, 得到人工鱼礁的底部轮廓, 并形成独立的边界文件, 用于鱼礁体积计算的目标提取边界。

**人工鱼礁空方量测算** 土石方工程中, 方量计算方法主要有方格网法、等高线法、断面法、DTM法等, 其中以源数据为结点的三角网 DTM 法, 理论上为最精确的计算方法<sup>[20]</sup>, 基于不规则三角网 (triangulated irregular network, TIN) 的数字地面模型在堆体土方量计算, 理论上该方法适用于任何地形, 计算精度最高<sup>[21]</sup>。由于实景三维模型上每个点位都有真实坐标及高程, 可以真实反映地形连续的起伏变化, 较采用断面抽样的方法更接近真实地形。并且计算方量的过程中, 每个顶点坐标都会参与进来, 计算的结果自然会

更准确, 也是本研究中重点使用的方法。侧扫声呐图像可较为准确高效地识别人工鱼礁, 便于人工鱼礁识别与提取<sup>[22]</sup>, 并可用于人工鱼礁的投放位置分布情况评估, 但是由于声呐影像数据不具有实测高程信息, 需要根据礁体阴影长度估算其高度, 之后建立礁体的截面高度曲线, 利用积分法估算礁体体积<sup>[23]</sup>, 这种方法高程信息非实测, 依靠后期图像解译量取, 准确度不高, 而且工作量较大, 效率低。而多波束水深地形数据可以实时获取被测目标的精确三维位置信息, 且采样点密度大, 特征点信息较丰富, 适合使用三角网法计算人工礁体体积。根据测量区域的高程点和地形特征构建不规则三角网, 将其中的每一个三角形顶点竖直与底面构建成直三棱柱 (图 7), 然后按照三棱柱的体积公式测算该区域的空方量, 累加所有的三棱柱体积作为整个测算区域的总方量 (式 1)。三角网法体积  $V$  计算公式:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n (Z_1 + Z_2 + Z_3) S_i \quad (1)$$

式中,  $Z_1$ 、 $Z_2$  和  $Z_3$  分别为不规则三角网中的第  $i$  个  $\triangle ABC$  各顶点到设计底面的高程,  $S_i$  为  $\triangle ABC$  在设计底面的投影面积 (图 7)。

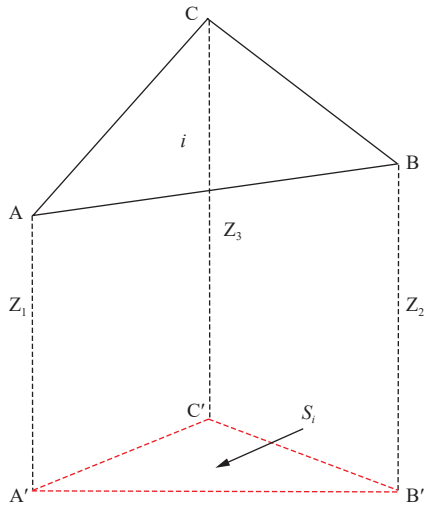


图 7 不规则三角网中某个三角形构成的直三棱柱

A, B, C 分别代表三角形的三个顶点,  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  是  $\triangle ABC$  在参考面上的投影点, 红色虚线三角形为  $\triangle ABC$  在参考面的投影,  $Z_1$  为 A 点到  $A'$  点的垂向距离,  $Z_2$  为 B 点到  $B'$  点的垂向距离,  $Z_3$  为 C 点到  $C'$  点的垂向距离。

Fig. 7 Straight triangular prism formed by a triangle in the triangular irregular network

A, B and C represent the three vertices of the triangle,  $A'$ ,  $B'$  and  $C'$  are the projection points of  $\triangle ABC$  on the reference plane, the red dashed triangle represents the projection of the triangle on the reference plane,  $Z_1$  is the vertical distance from point A to point  $A'$ ,  $Z_2$  is the vertical distance from point B to point  $B'$ , and  $Z_3$  is the vertical distance from point C to point  $C'$ .

在 Global Mapper 中通过构建不规则三角网将处理后的多波束水深地形数据生成 TIN 模型, 将前文所输出的边界文件按照实际位置与 TIN 模型进行叠加, 确定鱼礁区的体积计算范围 (图 8, 仅限于位于宗海区域范围以内), 利用 Calculate cut-and-fill Volume 功能 (其计算原理见式 1), 测算该区域内所投放人工鱼礁的方量。由此得到礁体空方总量为  $1\,693.29\text{ m}^3$ 。

## 2 结果

为了评估所采用的方量测算方法的精度, 将实际投放礁体体积与测量结果二者数值符合程度作为评价指标。如图 8 所示的测量区域, 根据测量数据计算得到海域内礁体空方总量为  $1\,693.29\text{ m}^3$ ; 从声呐图像中, 可以识别出该区域小沉箱个数为 440 个, 每个沉箱设计为  $1.8\text{ m}\times 1.8\text{ m}\times 1.6\text{ m}$ ,

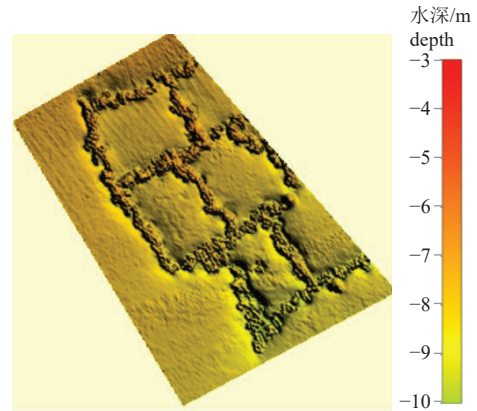


图 8 研究区域人工鱼礁空间点云数据构建的 TIN 模型

Fig. 8 TIN model based on spatial point cloud data of the measured artificial reef

直接计算得到所识别出的人工鱼礁礁体空方总量为  $2\,280.96\text{ m}^3$ 。本海洋牧场完成建设时间与本次探测时间相隔近 10 年, 而且部分区域存在较严重的冲淤现象, 造成实际测量计算结果与按礁体数量计算的空方量相差  $587.67\text{ m}^3$ , 差异在 25.76%。由于该海洋牧场人工礁体原始投放量数据遗失, 故缺乏精确的比对基准依据。

为了更客观地评估本研究空方量测算方法的精度, 选用了另外一组完成投放后及时进行声呐探测的人工鱼礁测量数据, 该组数据从采集到数据后处理, 完全采用了和文中相同的技术手段, 数据处理后生成的 TIN 模型如图 9 所示。

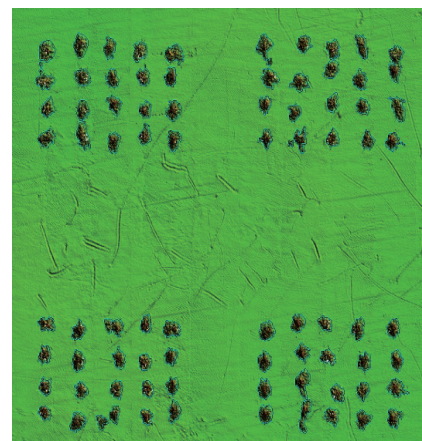


图 9 用于案例空间点云数据精度评估的 TIN 模型

Fig. 9 TIN model of the case space point cloud data for precision evaluation

TIN 模型图显示, 礁体投放比较规整, 均匀分布在 4 个正方形海区, 每个海区为 20 个人工礁体堆积体 (其中有一个区域的一个礁体略微分散, 可以按照 2 个堆体来计算), 各堆体间排列也较为

均匀(图9)。本次所使用的精度评估验证数据具有以下特点:原始数据密度较大,相邻数据点之间的距离不大于10 cm;数据时效性强(完成人工礁体布放后及时进行有效空方量检测)、礁体布放规则(有利于提高检测准确性);礁体布放区海底底质条件较好(基本无冲刷及沉陷区)。以上特点保证了最终测算结果最大限度接近实际投放量,使得空方量算法验证更为客观、准确。

利用不规则三角网(TIN)的数字地面模型法对所有的堆体进行了体积计算,最终结果为31 289.45 m<sup>3</sup>。而根据委托方提供的原始资料,本海洋牧场人工礁体实际投放量为32 000.00 m<sup>3</sup>,误差率为2.22%,证实该计算方法用于海底堆体的体积计算准确率较高,方法切实有效。

### 3 讨论

我国人工鱼礁建设初期缺乏科学统一的规范化和技术层面的体系化,使得在人工鱼礁管理方面还有很多的不足<sup>[24]</sup>。目前所开展的研究,多使用单一的测深声呐或者侧扫声呐进行探测,鲜有完全同步使用测深和侧扫声呐同步测量。本研究采用多波束测深系统及侧扫声呐图像扫测系统完全同步对人工鱼礁进行扫测,利用精细处理后多波束测深数据生成高精度的DEM,之后采用不规则TIN的数字地面模型法测算海洋牧场区域内人工鱼礁的空方量,经与海洋牧场人工礁体实际投放原始资料比对,人工礁体空方量测算误差率仅为2.22%,满足人工鱼礁建设竣工验收的需求,证实了研究方法准确有效,为人工鱼礁投放、后期监测提供有效的技术支持,为人工鱼礁建设的规范化运维管理提供了科学依据。

通过本研究,可为该领域从业人员提供以下参考建议。

数据获取时可从以下方面来保证人工鱼礁探测及空方量测算的准确性和高效性:尽可能同步使用测深、侧扫声呐系统,取长补短;配备可数据后处理的高精度定位定姿测量系统,提供更高精度的空间位置信息;采集过程中使用设备所能提供的最大波束数,尽可能减小多波束发射扇面覆盖角,增大波束发射Ping率,使用辅助的高精度定位定姿系统,对系统进行精确地安装校准,从源头保证采集数据的准确性。

在空方量测算方面,基于等高线全自动海底鱼礁边界线识别与提取,在人工鱼礁比较散乱及

自然地形比较复杂的区域,自动提取的边界线会比较杂乱,有时候甚至会偏离较大,要对这些边界线进行人工交互的二次识别与调整。

本研究采用了自动边界线识别提取结合传统人工数字化的方式,虽然提高了最终的识别与计算精度,但工作效率还不够高效。后续研究工作将重点结合目前快速发展的声呐自动目标识别技术,实现人工鱼礁全自动识别、礁体边缘线全自动提取,实现人工鱼礁群的快速准确自识别监测及空方量自动化统计分析,更好地服务于我国的海洋牧场建设和管理。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献(References):

- [1] 李东,侯西勇,唐诚,等.人工鱼礁研究现状及未来展望[J].*海洋科学*,2019,43(4):81-87.  
Li D, Hou X Y, Tang C, *et al.* A review on the progress of artificial reef research[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(4): 81-87 (in Chinese).
- [2] 李想,吉志伟.适合我国南海的人工鱼礁现状及发展综述[J].*科技风*,2020(7):155.  
Li X, Ji Z W. A review of the current status and development of artificial reefs suitable for the South China Sea in China[J]. *Technology Wind*, 2020(7): 155 (in Chinese).
- [3] 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.
- [4] 李忠义,林群,李娇,等.中国海洋牧场研究现状与发展[J].*水产学报*,2019,43(9):1870-1880.  
Li Z Y, Lin Q, Li J, *et al.* Present situation and future development of marine ranching construction in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1870-1880 (in Chinese).
- [5] 章守宇,许敏,汪振华.我国人工鱼礁建设与资源增殖[J].*渔业现代化*,2010,37(3):55-58.  
Zhang S Y, Xu M, Wang Z H. Review of artificial reef and stock enhancement[J]. *Fishery Modernization*, 2010, 37(3): 55-58 (in Chinese).
- [6] 杨红生.我国海洋牧场建设回顾与展望[J].*水产学报*,2016,40(7):1133-1140.  
Yang H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*,

- 2016, 40(7): 1133-1140 (in Chinese).
- [7] Jiang Y Z, Lin N, Yuan X W, *et al.* Effects of an artificial reef system on demersal nekton assemblages in Xiangshan Bay, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(1): 59-68.
- [8] 邓显明, 陶春辉, 孙春岩, 等. 侧扫声呐和浅地层剖面仪在人工鱼礁选址和监测中的应用 [C]//中国地震局地球物理研究所. 中国地球物理学会第 22 届年会论文集. 成都: 中国地球物理学会, 2006: 425.
- Deng X M, Tao C H, Sun C Y, *et al.* Application of side-scan sonar and shallow stratigraphic profilers in the siting and monitoring of artificial reefs[C]//Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Chengdu: Science and Technology Press, 2006: 425 (in Chinese).
- [9] 张进, 沈蔚, 韩军, 等. 成像声呐在人工鱼礁建设中的应用 [J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(8): 370-372.
- Zhang J, Shen W, Han J, *et al.* The application of imaging sonar in artificial reef construction[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(8): 370-372 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 逯金明. 基于多波束和侧扫声呐的人工鱼礁区对比分析 [J]. *山东工业技术*, 2018(5): 183.
- Lu J M. Multi-beam and side-scan sonar-based comparison analysis of artificial reef areas[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2018(5): 183 (in Chinese).
- [12] 赵晓龙, 夏涛, 张秋艳. 基于无人测量船的人工鱼礁投放空方量测量与评估 [J]. *海岸工程*, 2020, 39(3): 196-203.
- Zhao X L, Xia T, Zhang Q Y. Surveying and evaluation of earthwork volume of artificial reefs using unmanned surface vehicle[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 39(3): 196-203 (in Chinese).
- [13] 冯晓刚, 刘明星, 撒利伟, 等. 三维激光扫描在土石方量精计算中的应用 [J]. *地理空间信息*, 2015, 13(4): 49-51.
- Feng X G, Liu M X, Sa L W, *et al.* Application of 3D laser scanning in the accurate calculation of soil and rock volumes[J]. *Geospatial Information*, 2015, 13(4): 49-51 (in Chinese).
- [14] 丁继胜, 董立峰, 唐秋华, 等. 高分辨率多波束声呐系统海底目标物检测技术 [J]. *海洋测绘*, 2014, 34(5): 62-64,71.
- Ding J S, Dong L F, Tang Q H, *et al.* Detection technology of underwater target based on high-resolution multi-beam sonar system[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(5): 62-64,71 (in Chinese).
- [15] 阮琼瑶, 李文达, 张尚弘, 等. 基于无人机和 SfM 的天津港堆场散料体积测量 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(6): 198-205.
- Ruan Q Y, Li W D, Zhang S H, *et al.* UAV and SfM-based volume measurement of bulk materials in storage yard of Tianjin port[J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2021, 52(6): 198-205 (in Chinese).
- [16] 程秀丽. 多波束测量数据处理关键技术研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- Cheng X L. Research on the key technology of multi-beams measured data processing[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2014 (in Chinese).
- [17] 王启, 刘胜旋, 关永贤. 浅水多波束测深资料处理关键技术探讨 [J]. *海洋测绘*, 2021, 41(2): 29-33.
- Wang Q, Liu S X, Guan Y X. The discussion on shallow multibeam echosounding data processing method[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2021, 41(2): 29-33 (in Chinese).
- [18] 赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 18-34.
- Zhao J H, Liu J N. Multi-beam bathymetry and image data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 18-34 (in Chinese).
- [19] 唐秋华, 周兴华, 丁继胜, 等. 多波束反向散射强度数据处理研究 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(2): 51-55.
- Tang Q H, Zhou X H, Ding J S, *et al.* Study on processing of multibeam backscatter data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 51-55 (in Chinese).
- [20] 程会超, 张永珍. DTM 土方计算与误差分析 [J]. *城市勘测*, 2011(3): 150-151,154.
- Cheng H C, Zhang Y Z. DTM earthwork calculation and error analysis method[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011(3): 150-151,154 (in Chinese).
- [21] 陈爱梅, 吴昊, 吴北平, 等. 四种土方量计算方法的对比研究与应用 [J]. *北京测绘*, 2015(1): 104-108.
- Chen A M, Wu H, Wu B P, *et al.* Comparative study and application of four kinds of earthwork calculation methods[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2015(1): 104-



- 108 (in Chinese).
- [22] 马建国. 人工鱼礁的声学探测与评估 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- Ma J G. Acoustic detection and evaluation of artificial fish reefs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese).
- [23] 刘永虎, 刘敏, 田涛, 等. 侧扫声呐系统在石料人工鱼礁堆体积估算中的应用 [J]. 水产学报, 2017, 41(7): 1158-1167.
- Liu Y H, Liu M, Tian T, *et al.* The application of Side Scan Sonar system in volume estimation of stone artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(7): 1158-1167 (in Chinese).
- [24] 王强, 鄢慧丽, 徐帆. 人工鱼礁建设概述 [J]. 农技服务, 2017, 34(3): 149-151.
- Wang Q, Yan H L, Xu F. Overview of artificial reef construction[J]. *Agricultural Technology Service*, 2017, 34(3): 149-151 (in Chinese).

## Detection and empty volume measurement and calculation method of artificial reef groups in marine pastures

YANG Long<sup>1,2</sup>, GAO Shan<sup>1,2</sup>, FENG Yikai<sup>1,2</sup>, LIU Senbo<sup>1,2</sup>, JIANG Fengbiao<sup>1</sup>, DING Jisheng<sup>1,2\*</sup>

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of social economy and a sharp increase in resource demand have spurred rapid growth in the construction of marine ranching. The deployment of artificial fishing reefs during marine ranch construction and their subsequent status monitoring are crucial. Monitoring encompasses not only the distribution range and condition of artificial fishing reefs and the scouring of the surrounding seabed but also the verification of the effective spatial volume of the deployed artificial fishing reefs to compliance with technical indicators during marine ranch construction. This paper exemplifies the detection and empty volume calculation of artificial reefs to ascertain their location and volume. Initially, a high-resolution Multibeam Echo sounder sonar system (integrated with high-precision attitude measurement system) and a high-precision Global Navigation Satellite System are employed to accurately capture the underwater location, shape, and seabed topography of artificial reefs. Subsequently, various volume calculation methods are analyzed based on the geospatial data obtained from precise measurements. An optimal method is then selected to calculate the volume of the artificial reefs and compared with the actual volume. The results indicate a high consistency between the method used in this study and the actual location of the artificial reef. For empty volume calculation, the error was 25.76% for a long-standing reef, while it was only 2.22% for a newly placed one. This study demonstrates that the method can accurately determine the location and morphology of artificial reefs and accurately calculate the empty volume for new artificial reefs. However, due to factors such as scouring and subsidence, discrepancies are observed in the calculations for long-standing artificial reefs. The findings also confirm that the integrated use of sonar and high-precision positioning equipment is effective for an objective and equitable evaluation of marine pastures construction.

**Key words:** marine ranching; artificial reef; empty volume measurement and calculation; sonar detection

**Corresponding author:** DING Jisheng. E-mail: [dingjisheng@fio.org.cn](mailto:dingjisheng@fio.org.cn)

**Funding projects:** Open Fund Project of the Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources (2021B04)