DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804172

一种顾及辐射畸变的多波束与侧扫声呐通用海底底质分类方法

严 俊[1],赵建虎[2,3],孟俊霞[4],张红梅[5]

(1. 安徽大学 资源与环境工程学院,合肥 230601;2. 武汉大学 测绘学院,武汉 430079;
3. 武汉大学 海洋研究院,武汉 430079;4. 安徽建筑大学 土木工程学院,合肥 230601;
5. 武汉大学 动力与机械学院,武汉 430072)

摘 要: 声学海底底质分类对于海底环境和生态系统的研究具有重要意义,而多波束与侧扫声呐是目前最常用于探测海底底质的声呐设备.然而,多波束与侧扫声呐都严重地受到辐射畸变的影响,导致声呐图像噪声较大且难以消除,进而造成对海底底质的误判,并且多波束与侧扫声呐通用底质分类方法目前仍然较为缺乏.为此,本文提出了一种顾及辐射畸变的多波束和侧扫声呐的通用海底底质分类方法.该方法包括了对声呐图像中辐射畸变的改正、针对两种声呐数据特点的不同角度数据归一化、分类数自适应的非监督底质分类以及形态学去除底质图像噪声的步骤,并给出了完整的多波束与侧扫声呐通用海底底质分类流程.将本文方法应用于福建沿海同水域下实测的多波束与侧扫声呐数据得到了该水域的底质分类图像.实验结果表明了同区域下的多波束与侧扫声呐数据通过本文方法得到的底质分类结果具有较高的一致性,证明了通用底质分类方法的有效性,同时通过相互验证也提高了底质分类结果的可靠性.

关键词: 多波束声呐;侧扫声呐;非监督底质分类;辐射畸变;角度响应

中图分类号: P229 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)05-0178-07

A universal seabed classification method of multibeam and sidescan sonar images in consideration of radiometric distortion

YAN Jun[1], ZHAO Jianhu[2,3], MENG Junxia[4], ZHANG Hongmei[5]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Institute of Marine Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 4. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
5. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Acoustic seabed classification is significant for the study of the seabed environment and the ecosystem, in which multibeam and sidescan sonars are the most common sonar equipment. However, multibeam and sidescan sonars are both largely affected by radiometric distortion, which makes the noise of the sonar image too big to be eliminated and the seabed sediment misinterpreted. Moreover, the universal seabed classification methods for multibeam and sidescan sonars are still deficient. Therefore, this paper proposes a universal seabed classification method of multibeam and sidescan sonars in consideration of radiation distortion. Steps of the method include correction of radiometric distortion, normalization of both mulitbeam and sidescan sonars data, adaptive unsupervised seabed classification, and morphological image denoising. A complete universal seafloor classification procedure was also presented. The proposed method was applied to the same water area in Fujian Coast, where multibeam and sidescan sonars data were both measured and the seabed classification results of the water area were obtained. Experimental results show that the seabed classification results processed from multibeam and sidescan data in the same water area were in high consistency, which verifies the validity of the universal seabed classification method and improves the reliability of the classification results through mutual verification.

Keywords: multibeam echo sonar; sidescan sonar; unsupervised seabed classification; radiometric distortion; angular response

收稿日期: 2017-04-23
基金项目: 国家自然科学基金(41576107、41376109、51804001);安徽大学博士科研启动经费(J01003270);安徽省自然科学基金(1808085QE147);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A038)
作者简介: 严 俊(1989—),男,工学博士,讲师;
赵建虎(1970—),男,教授,博士生导师
通信作者: 严 俊,juny.yan@foxmail.com

声学海底底质分类对海洋环境的科学研究和生态系统管理具有重大意义,已经成为海洋科学一个研究热点[1].相比于传统的实地采样方法,声学法是目前最有效的大区域海底底质分类的遥感方式.声学海底底质分类可以通过对多波束声呐

(Multibeam echo sounder, MBES)[2-3]、侧扫声呐(side scan sonar, SSS)[4-5]、单波束/分裂波束声呐(Single-beam/Split-beam echo sonar, SBES)[6]等常见声呐设备的后向散射回波强度数据进行分析获得. 虽然 SBES 有着成本低、便携性强、易安装等优势,但是采样点密度较低、大面积测量效率低,于是很多时候被 MBES 和 SSS 替代. 然而 MBES 与 SSS 的回波强度数据都受到辐射畸变的严重影响,图像质量较低,因而在进行海底底质分类时必须顾及辐射畸变的影响. 一些研究中利用辐射畸变导致的回波强度的角度响应[7]特点进行海底底质分类[8],并与实际海底情况对比,证明了利用角度响应数据分类的可行性[9]. 另一些研究则首先削弱辐射畸变的影响[10],然后对处理后的 MBES 和 SSS 回波强度数据及图像使用 BP 神经网络[11-12]、支持向量机[13]、卷积神经网络[14]进行分类并取得了合理的分类结果. 另外,由于 SSS 图像分辨率较高、纹理特征较丰富,还可利用灰度共生矩阵特征对 SSS 图像进行海底底质分类[15]. 然而这些方法都需要较为复杂的前期预处理或者原始图像质量较好,否则辐射畸变对分类的结果会造成巨大的影响. 同时,由于 MBES 和 SSS 都是通过换能器发射声波并记录后向散射回波强度数据的方式来形成海底声学图像,且海底底质的变化会直接导致后向散射回波强度的变化,因此 MBES 和 SSS 回波强度图像在反映海底底质变化上具有极强的相似性[16]. 虽然单独的 MBES 与 SSS 底质分类方法研究较多,但两种声呐数据的通用海底底质分类方法研究较少. 因此,本文提出了一种顾及辐射畸变的多波束与侧扫声呐通用海底底质分类方法.

1　辐射畸变的影响

MBES 与 SSS 通过发射声波并记录来自海底的后向散射回波强度来获取海底图像以及实现海底底质分类,然而受到换能器波束模式、传播损失、海底散射模式[17]等因素影响后向散射回波强度数据存在严重的辐射畸变,见图 1. 受到辐射畸变影响严重的区域,辐射畸变对回波强度变化的影响会十分严重,甚至会超过底质变化对回波强度变化的影响,造成底质变化的判断失误. 因此底质分类中必须对辐射畸变进行改正.

受到波束主瓣与旁瓣的影响,MBES 与 SSS 的波束模式会导致回波强度随着角度的变化而变化,而 SSS 的单宽波束模式相对于 MBES 多波束模式导致回波强度的角度响应更为明显. 声波在水中传播时,由于受到球形扩散产生的传播损失和水体的吸收两部分影响,声波能量不断地衰减,在垂航方向上会导致回波强度的斜距响应,进而可以转换为角度响应. 声波受到海底散射模式的影响,波束的后向散射回波强度随着波束入射角变化而变化,即为散射模式导致的回波强度角度响应. 综上所述,辐射畸变的主要因素都会对垂航方向上的回波强度造成角度响应,因而在海底底质分类的过程中需要处理声呐回波强度的角度响应.

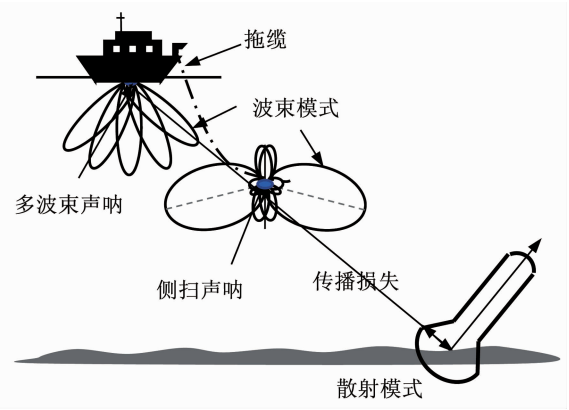


图 1　多波束与侧扫声呐的辐射畸变影响

Fig. 1　Effect of radiometric distortion on multibeam and sidescan sonars

由于 SSS 声呐高度是不断变化的且无法准确实时获得,因此在沿航方向上也存在由传播损失导致的辐射畸变,通常可以通过后期计算 SSS 高度的变化[18]来消除[19]. 而 MBES 由于安装在船体上,可以有效地改正传播损失,因而可以忽略沿航方向辐射畸变的影响.

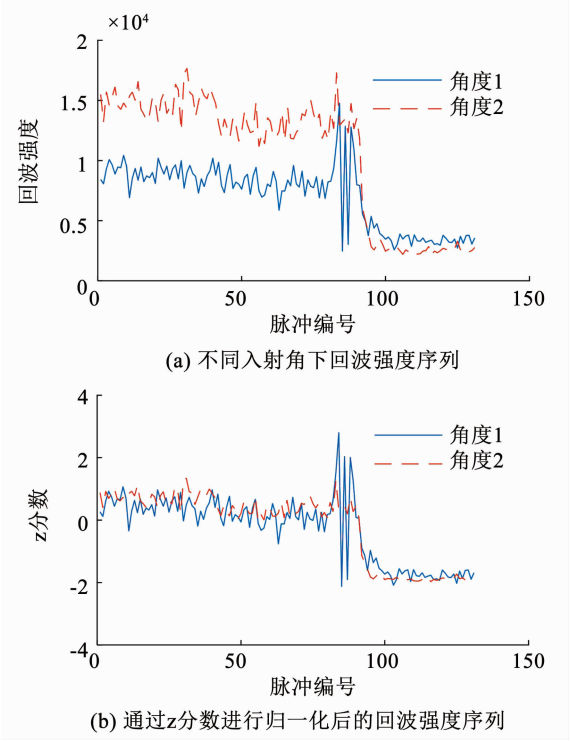
2　顾及辐射畸变的海底底质分类方法

声呐波束模式、传播损失和海底散射模式综合导致了垂航方向上 MBES 和 SSS 回波强度的角度响应. 基于在同一角度下受到的辐射畸变影响相同这一特征,首先对不同角度下的数据进行归一化;然后,根据归一化后的数据变化趋势与源数据一致的特点,对归一化后的图像进行非监督分类,并通过自适应的迭代方法来确定分类个数;最后利用形态学方法去除分类图像中的噪声.

2.1　利用 z 分数进行角度数据归一化

消除了沿航方向的辐射畸变影响后,垂航方向上的 MBES 与 SSS 的回波强度数据在相同波束入射角度下受到的角度响应影响是一样的,因此在这种情况下可认为底质变化影响是影响强度变化的唯一因素. 这就意味着,可以利用同一角度的强度变化直接反映底质的变化. 但是,由于辐射畸变导致的回波

强度角度响应,MBES 与 SSS 不同角度下的后向散射回波强度明显处于不同强度范围,见图 2(a). 通过 z 分数实现角度数据归一化,保证了不同角度下数据变化的一致性,从而消除了辐射畸变在垂航方向上的影响. 反之,如果不进行归一化,回波强度的角度性差异会直接影响分类结果. 因而需要首先对不同角度下数据进行归一化.



(a) 不同入射角下回波强度序列

(b) 通过z分数进行归一化后的回波强度序列

图 2 沿航方向下不同入射角下回波强度序列的归一化

Fig. 2 The z-score normalization of along-track backscatter strength sequence under different incident angles

z 分数是将多个不同变化区间的参数归算到一个共同变化区间的常用数学统计手段[20]. 对于任意同角度下的强度序列 $\boldsymbol{B}$(均值为 μ,标准差为 σ),则 $\boldsymbol{B}$ 中任一强度值 b 的 z 分数为

$$z = \frac{(b-\mu)}{\sigma}.$$

不同入射角下的回波强度数据通过 z 分数归一化后,原来不同强度区间的数据被统一到共同的变化区间中,尤其是同一个底质类型下的回波强度值基本接近,见图 2(b). 由于不同底质产生的强度变化趋势仍反映在归一化后的 z 分数序列中,且保持在同一区间内变化,从而实现了不同角度下底质变化的统一,消除了辐射畸变的影响,进而可以实现全图的海底底质分类.

2.2 利用 *k*-means ++ 对归一化后的图像进行分类

在没有先验数据的情况下,可利用非监督分类方法对归一化后的回波强度数据进行分类. 相比于其他非监督方法,k-means 作为非监督分类的经典方法,具有简单、快速、适用于大数据挖掘等优点,并且顾及到声呐回波强度数据量较大但是数据结构简单,故本文选择 k-means 算法用于海底底质分类. 但 k-means 同时存在两个基本缺陷,即初始中心变化会导致结果的不唯一性和分类数 k 的无法确定性. 第一个问题可以通过 k-means ++ 算法有效地解决[21];对第二个问题,本文根据海底底质类型的特点给出了自适应的 k 值迭代确定方法.

2.2.1 *k*-means ++ 非监督分类

使用 k-means ++ 算法对归一化后的 z 分数图像进行非监督底质分类,具体的步骤如下:

1)将 z 分数图像 $\boldsymbol{I}_z$ 展成向量 $\boldsymbol{V}$;

2)使用 k-means ++ 算法对向量 $\boldsymbol{V}$ 进行 k 个聚类中心初始化;

3)计算 $\boldsymbol{V}$ 中每个值到每个聚类中心的距离,并将每个值分配到最近中心;

4)计算每个聚类的平均参数来建立 k 个新的聚类中心位置;

5)重复步骤 3 ~ 4 直到所有的分配不再变化,得到 $\boldsymbol{V}$ 每个值对应的分布 $\boldsymbol{D}$;

6)将 $\boldsymbol{D}$ 还原为二维分类图像 $\boldsymbol{I}_D$.

2.2.2 分类数 *k* 的迭代确定算法

由于 k-means 分类是将不同的回波强度值分配到不同聚类的中心范围中,每个聚类中心代表该类型底质的中心强度,而每个聚类范围内的回波个数所占比例则代表这种底质在该水域所占比例. 在初始 k 值较大情况下,对占有比例极少(< 5%)的分类,往往是噪声或粗差的影响,应删除对应分类. 对于中心强度极为接近(底质简单情况,中心距离 < 整体回波强度变化范围的 10%;底质复杂情况,中心距离 < 整体回波强度变化范围的 5%)的两种分类,可以认为是同一种底质,应合并相近分类. 综上考虑,在无外部数据下的分类数 k 的自适应确定方法步骤如下:

1)k 默认选择较大的数值(比如 k = 7);

2)按照指定的 k 值对 z 分数图像进行 k-means ++ 非监督分类;

3)计算每种聚类类型的中心强度和占有比例;

4)删除占有比例小的分类,合并相距中心较近的分类,从而得到新的 k 值;

5)重复步骤 2 ~ 4,直至 k 值不再变化.

2.3 利用形态学方法图像去噪

声呐图像中噪声在底质分类后同样会给底质图

像带来影响，可以通过形态学的开闭运算来消除噪声并且连接相同底质[22]. 在图像形态学中，图像 A 开运算指的是利用图像元 B 对图像 A 进行先腐蚀后膨胀的过程，主要用于将相近较小片的对象连接在一起；而图像 A 的闭运算指的是利用图像元 B 对图像 A 进行先膨胀后腐蚀的过程，主要用于去除由图像噪声带来的小斑点，通过合理顺序使用这两种运算可以达到需要的目的. 由于 SSS 图像信噪比较高，对 SSS 底质图像进行先开后闭运算，可以有效地连接图像中的相同底质. 而由于 MBES 图像信噪比较低，对 MBES 底质图像进行先闭后开的运算，可以有效地去除噪声斑点.

2.4　顾及辐射畸变的 MBES 与 SSS 通用海底底质分类流程

综上所述，顾及辐射畸变的 MBES 与 SSS 通用海底底质分类方法包括：首先将 MBES 和 SSS 数据转换为入射角-回波强度数据，接着利用 z 分数实现数据归一化，然后通过迭代方法自适应确定分类数 k 值后利用 k-means ++ 实现海底底质分类，最后通过形态学的方法提高底质图像质量，见图 3.

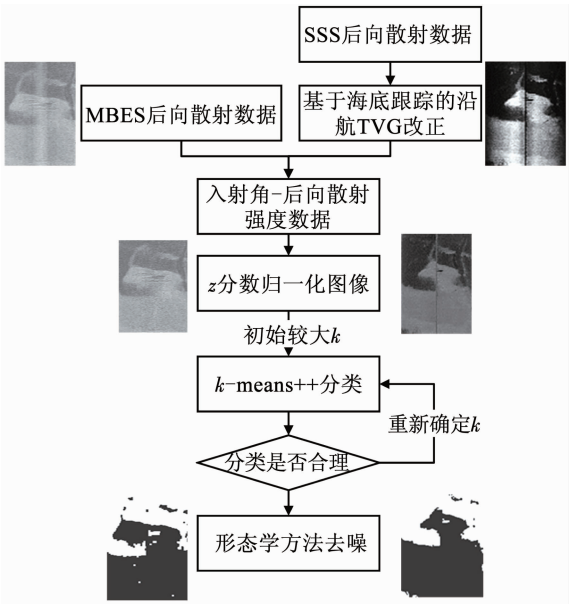


图 3　海底底质分类流程图

Fig. 3　Flowchart of seabed classification

3　实验与分析

为了验证本文方法的有效性，选取 2012 年在福建近岸相同水域实测的 MBES 及 SSS 数据进行实验. MBES 数据由 EM3002 型多波束测深仪（工作频率 300 kHz，单头最大开角 130°，工作时最大采样点数 131，测深分辨率为 1 cm，声强振幅分辨率 0.5 dB）实测获得. SSS 数据则由 Edgetech 4100P 型拖鱼声呐（工作频率为 500 kHz 单频测量，记录最大斜率为 112 m，俯角 20°，水平波束角为 0.5°，垂直波束角为 50°）实测获得. 整个实验水域由 7 条 MBES 测线和 4 条 SSS 测线组成，对记录的 MBES（ *. all）数据、SSS（ *. xtf）数据进行解码分别得到原始数据，并且进行常规预处理. 其中 MBES 回波强度为 dB 值，而 SSS 回波强度为采集软件归化后的 0 ~ 255^2 值.

3.1　非监督分类数 k 的确定

选取实测水域内具有特点的几处区域进行分析，利用文中非监督分类数 k 迭代确定方法来确定该区域的合理分类数. 实验首先验证了其中一个区域海底底质分类数 k 的迭代确定过程，以及多次迭代中不同 k 值对应的海底底质分类结果，见图 4.

将图 4 中每次分类结果对应海底类型的占有比例和中心位置进行统计记录，见表 1. 针对该段声呐图像，首先将初始分类数 k 设为较大值 7，k-means ++ 分类后统计每种类型的占有比例得到表 1 中数据第一行. 通过剔除占有比例小于 5% 的分类将 k 缩减为 4，重新分类后得到表 1 中第二行. 同样剔除小比例分类得到 k 为 3，分类后得到每个类型的比例以及其中心位置（对应灰度声呐图像 0 ~ 255 的值）；由于此时底质情况简单，合并中心距离较近（小于 255 × 10%）的分类得到 k = 2. 最后在 k = 2 进行分类后最终可以获得一个稳定合理的分类结果，见图 4（d）和表 1.

表 1　分类数对应的每种类型所占的比例以及中心位置

Tab. 1　Proportion and central location of each sediment type with different classification numbers k

分类数 k	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4	类型 5	类型 6	类型 7
k = 7	0.1%	0.7%	4.2%	14%	32%	18%	32%
k = 4	4%	30%	33%	33%			
k = 3	21%	46%	33%				
中心	125	101	61				
k = 2	66%	34%					
中心	111	62					

注：k = 7 中类型 1、2、3 和 k = 4 中类型 1 所占比例过小应剔除，而 k = 3 中类型 1 和 2 中心距离近应该合并

利用实际区域表层沉积物采样得知该区域主要的海底底质为淤泥和砾石，与本文自适应方法最终获得的结果一致，从而证明了自适应分类数确定方法的合理性.

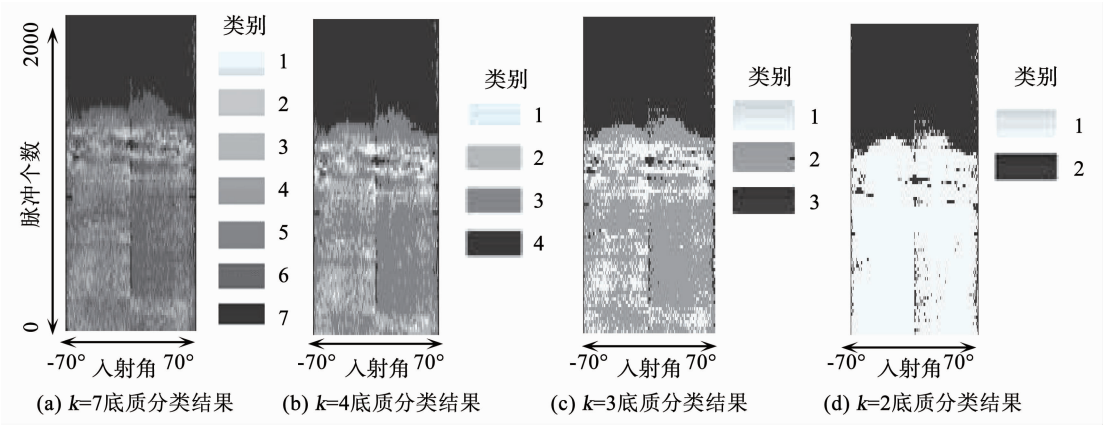


图 4 实测水域分类数 k 值确定的迭代算法

Fig. 4 The iterative determining algorithm of the classification number k in the measured water

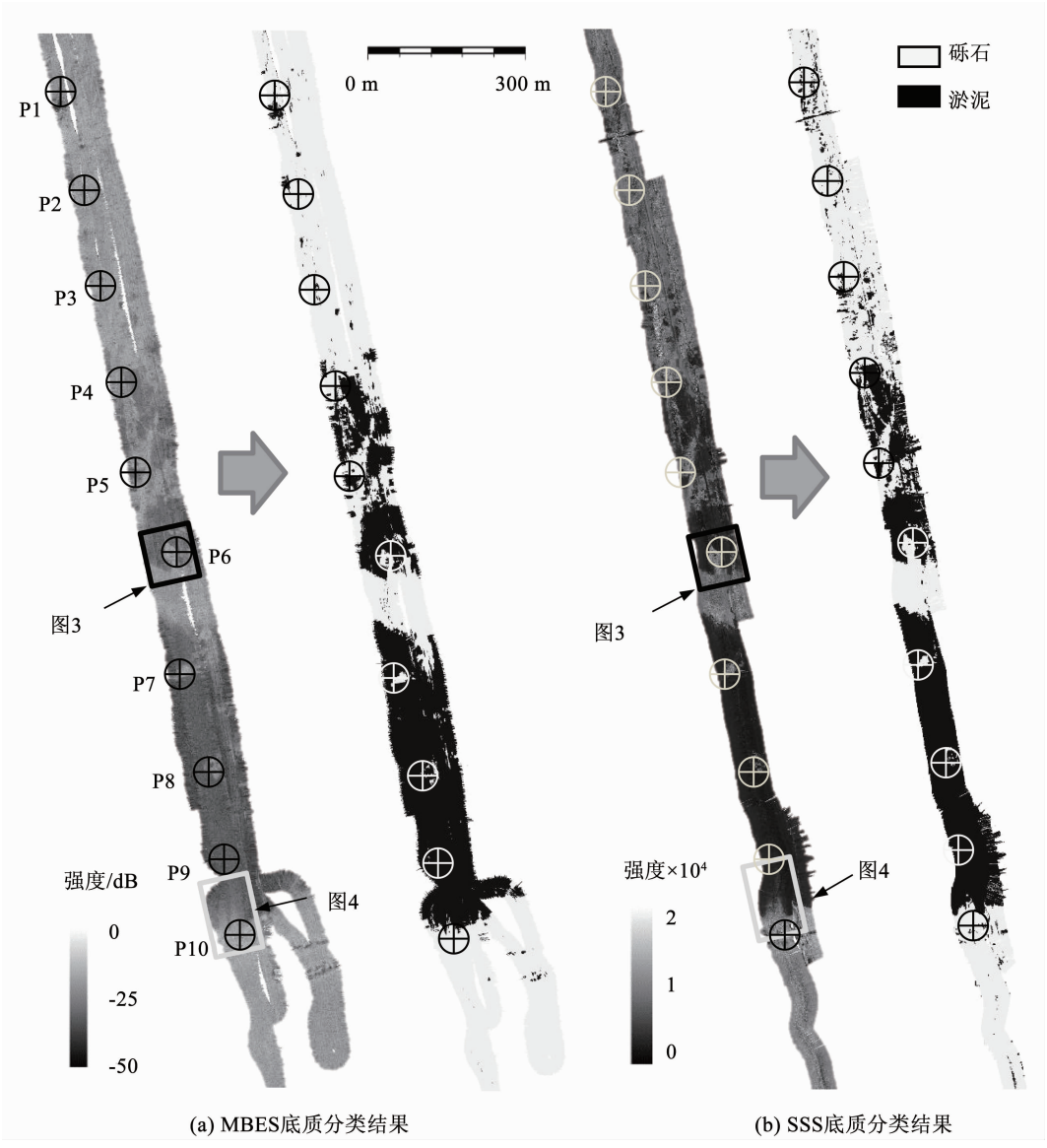


图 5 福建水域同区域下 MBES(a)与 SSS(b)海底底质分类结果

Fig. 5 Seabed classification results of MBES (a) and SSS (b) in the same Fujian water area

3.2 福建水域海底底质分类

利用本文提出的 MBES 和 SSS 海底底质分类流程处理测区内 MBES 和 SSS 中每条测线,并按照回波强度采样点的实际位置生成地理编码的底质图像. 然后,根据每条测线的位置关系将所有测线拼接得到整个区域的海底底质分类图像. MBES 测线与

SSS 测线的区域声呐图像和对应海底底质分类结果，见图 5.

通过对比图 5(a)和(b)可以看到在实验区域中，MBES 与 SSS 的原始图像在回波强度上差距明显，SSS 图像在灰暗变化上要比 MBES 更加明显；但是两者的底质分类的结果整体基本一致，SSS 由于自身位置精度不高与 MBES 底质分类图像在位置和形状上有细微差异.

对比两种声呐数据的底质分类结果，在整个测区中均匀地选择了 10 个采样点(P1 ~ P10)进行分析，见图 5. 对图 5 中标定的 10 个点依次统计其在 MBES 和 SSS 声呐图像中的回波强度值以及对应位置的底质分类结果，见表 2，两组强度数据的变化关系统计结果，见图 6.

表 2　选取图 5 中点对应位置的 MBES 与 SSS 回波强度以及对应分类结果

Tab. 2　Backscatter strengths and classification results of MBES and SSS in the selected points in Fig. 5

点名	MBES 强度/dB	分类结果	SSS 强度 $\times 10^4$	分类结果
P1	-23.7	砾石	0.98	砾石
P2	-19.2	砾石	1.12	砾石
P3	-18.4	砾石	1	砾石
P4	-19.4	砾石	1.21	砾石
P5	-33.1	淤泥	0.32	淤泥
P6	-30.4	淤泥	0.38	淤泥
P7	-16.7	砾石	1.02	砾石
P8	-31.6	淤泥	0.22	淤泥
P9	-31.8	淤泥	0.29	淤泥
P10	-17.6	砾石	1.22	砾石

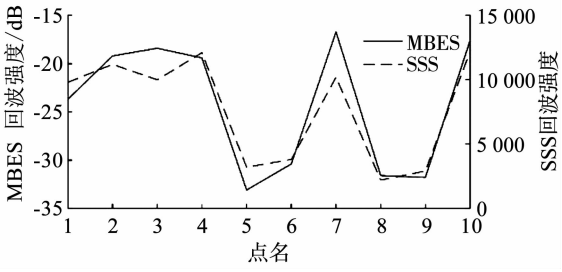


图 6　选取点对应的 MBES 与 SSS 回波强度对应变化关系

Fig. 6　Corresponding variation relationship between backscatter strengths of MBES and SSS in the selected points

从表 2 和图 6 可以看出同名点下 MBES 和 SSS 的回波强度的变化关系基本吻合，符合理论规律；细微的差异则由两种声呐系统的测量方式差异导致. 通过表 2 中所有同名点的分类结果完全一致可以得知 MBES 和 SSS 的分类结果具有很好的一致性，从而验证了本文方法对于 MBES 和 SSS 数据海底底质分类的可行性与通用性.

4　结　论

本文提出了一种顾及辐射畸变的 MBES 与 SSS 通用海底底质分类方法，有效地消除了辐射畸变对于海底底质分类中的严重影响，通过数据归一化、非监督分类以及图像去噪等步骤建立了完整的海底底质分类流程. 将方法应用于福建水域同区域下实测的 MBES 与 SSS 声呐数据，通过合理地判定海底底质类型，实现了从测线到全区域的底质分类图像构建，并通过对比 MBES 与 SSS 的海底底质分类结果证明了本文方法在 MBES 和 SSS 声呐数据海底底质分类中的可行性和一致性.

参考文献

[1] ANDERSON J T, VAN HOLLIDAY D, KLOSER R, et al. Acoustic seabed classification: Current practice and future directions [J]. ICES Journal of Marine Science, 2008, 65(6): 1004. DOI:10.1093/icesjms/fsn061

[2] PRESTON J. Automated acoustic seabed classification of multibeam images of Stanton Banks [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(10): 1277. DOI:10.1016/j.apacoust.2008.07.011

[3] INNANGI S, BARRA M, DI MARTINO G, et al. Reson SeaBat 8125 backscatter data as a tool for seabed characterization (Central Mediterranean, Southern Italy): Results from different processing approaches[J]. Applied Acoustics, 2015(87): 109. DOI:10.1016/j.apacoust.2014.06.014

[4] BUSCOMBE D, GRAMS P E, SMITH S M C. Automated riverbed sediment classification using low-cost sidescan sonar[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(2): 06015019. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001079

[5] PERGENT G, MONNIER B, CLABAUT P, et al. Innovative method for optimizing side-scan sonar mapping: The blind band unveiled [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 194: 77. DOI:10.1016/j.ecss.2017.05.016

[6] VENTERIS E R, MAY C J. Cost-effective mapping of benthic habitats in inland reservoirs through split-beam sonar, indicator Kriging, and historical geologic data[J]. PLOS ONE, 2014, 9(4): e95940. DOI:10.1371/journal.pone.0095940

[7] 严俊，张红梅，赵建虎，等. 多波束声呐后向散射数据角度响应模型的改进算法 [J]. 测绘学报，2016，11：1301. DOI:10.11947/j.AGCS.2016.20160169
YAN Jun, ZHANG Hongmei, ZHAO Jianhu, et al. Study on improvement of multibeam backscatter angular response model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(11): 1301. DOI:10.11947/j.AGCS.2016.20160169

[8] ZHAO J, YAN J, ZHANG H, et al. Two self-adaptive methods of improving multibeam backscatter image quality by removing angular response effect [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 22(2): 288. DOI:10.1007/s00773-016-0410-1

[9] FONSECA L, BROWN C, CALDER B, et al. Angular range

analysis of acoustic themes from Stanton Banks Ireland: A link between visual interpretation and multibeam echosounder angular signatures[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(10): 1298. DOI:10.1016/j.apacoust.2008.09.008

[10] TANG Q, LEI N, LI J, et al. Seabed mixed sediment classification with multi-beam echo sounder backscatter data in Jiaozhou Bay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(1): 1. DOI:10.1080/1064119X.2013.764557

[11] MARSH I, BROWN C. Neural network classification of multibeam backscatter and bathymetry data from Stanton Bank (Area IV)[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(10): 1269. DOI: 10.1016/j.apacoust.2008.07.012

[12] 何林帮. 基于多波束和浅剖的海底浅表层沉积物分类关键问题研究[J]. 测绘学报, 2016, 45(12): 1498. DOI:10.11947/j.AGCS.2016.20160466
HE Linbang. Research on key issues of sediment classification for seabed and sub-bottom based on multi-beam and sub-bottom profile echo intensity[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(12): 1498. DOI:10.11947/j.AGCS.2016.20160466

[13] 唐秋华, 周兴华, 丁继胜, 等. 学习向量量化神经网络在多波束底质分类中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(3): 229
TANG Qiuhua, ZHOU Xinghua, DING Jisheng, et al. Seafloor classification from multibeam backscatter data using learning vector quantization neural network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(3): 229

[14] BERTHOLD T, LEICHTER A, ROSENHAHN B, et al. Seabed sediment classification of side-scan sonar data using convolutional neural networks [C]//2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Honolulu, HI, USA. IEEE, 2017: 1. DOI:10.1109/SSCI.2017.8285220

[15] 郭军, 马金凤, 王爱学. 基于 SVM 算法和 GLCM 的侧扫声纳影像分类研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(3): 60
GUO Jun, MA Jinfeng, WANG Aixue. Study of side scan sonar image classification based on SVM and gray level co-occurrence matrix[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(3): 60

[16] LE BAS T P, HUVENNE V A I. Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping-Comparison of multibeam and sidescan systems[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(10): 1248. DOI:10.1016/j.apacoust.2008.07.010

[17] WAITE A D. Sonar for practising engineers, 3rd Edition[M]. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2002: 20

[18] ZHAO J, WANG X, ZHANG H, et al. A comprehensive bottom-tracking method for sidescan sonar image influenced by complicated measuring environment[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(3): 619. DOI:10.1109/JOE.2016.2602642

[19] CAPUS C, RUIZ I T, PETILLOT Y. Compensation for changing beam pattern and residual TVG effects with sonar altitude variation for sidescan mosaicing and classification[C]//7th. Eur. Conf. Underwater Acoustics, Delft, The Netherlands. 2004: 1

[20] FONSECA L, CALDER B. Clustering acoustic backscatter in the angular response space[C]//Proceedings of the US hydrographic conference. Norfolk, VA, 2007: 1

[21] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-means ++: the advantages of careful seeding[C]//Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New Orleans, Louisiana: Society for Industrial and Applied Mathematics. 2007: 1027

[22] ZHAO J, MENG J, ZHANG H, et al. Comprehensive detection of gas plumes from multibeam water column images with minimisation of noise interferences[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2755. DOI: 10.3390/s17122755

(编辑 苗秀芝)