

文章编号:1009-2722(2012)07-0059-07

# 多波束声参数在海底热液区 底质分类中的应用

## ——以东太平洋海隆“宝石山”热液区为例

张国堙,陶春辉,李怀明,刘为勇,邓显明,陈 升

(国家海洋局第二海洋研究所,杭州 310012;国家海洋局海底科学重点实验室,杭州 310012)

**摘 要:**多波束声纳底质分类可以高效且全覆盖地认识海底底质类型及其分布特征。应用 Simrad EM120 多波束声纳对东太平洋海隆附近的“宝石山”热液区进行底质分类,一方面可以研究多波束声参数在深水热液区进行底质分类的效果,挖掘多波束声纳在海底底质分类方面的应用潜力;另一方面,通过研究热液区的底质取样、摄像以及多波束声纳资料,建立综合分析热液区底质的模式,获得热液区的底质类型及其分布特征。通过提取与底质属性相关的声纳回波反向散射强度数据,形成“宝石山”热液区的声纳图像,并结合该区域的取样与海底摄像资料,综合分析该热液区的底质类型及其分布特征,结果表明,沉积物在该热液区的喷口西侧广泛分布,在喷口周围主要是基岩与砾石的混杂底质。

**关键词:**多波束声纳;海底热液区;底质分类;海底声纳图像

中图分类号: P733.23 文献标识码: A

海底热液活动作为涉及水圈、岩石圈等不同圈层之间相互作用的复杂地质活动,对探索地球深部信息具有重要的科学意义;同时,与海底热液活动伴生的多金属硫化物是一种潜在的矿产资源,具有广阔的开发前景<sup>[1]</sup>。热液区底质类型与分布特征是开展热液成矿科学研究,进行矿区资源评价的重要基础资料,可为寻找新热液区、矿区圈定以及未来海底矿产资源开发提供支撑。目前,对热液区底质类型及分布的认识主要来源于海底直接取样、原位探测以及海底摄像等手段,这些手段只能获得特定站位点或者测线的底质资料,由于作业效率及经济成本限制,尚无法对热液

区底质进行大面积、高效率的探测。多波束声纳系统可以全覆盖扫测海底,提取多波束声纳系统与底质属性相关的水底回波反向散射数据,可反演海底底质类型及其分布状况<sup>[2]</sup>。应用声学遥测的方式,可获得对热液区底质状况的宏观认识。

国外在 20 世纪 90 年代即开始理论研究,结果表明,多波束声纳的回波强度与海底底质属性具有密切关系,可以反演海底底质属性<sup>[3]</sup>。目前,已经出现了不少应用多波束声纳进行底质分类的实用商业软件,如加拿大 Quester Tangent 公司的 QTC VIEW 与 QTC SWATHVIEW 软件,以及挪威 Kongsberg 公司的 Triton 等,这些软件可以区分的水底沉积物类型有岩石、砾石、砂以及泥<sup>[4]</sup>;针对特定海区的多波束声纳底质分类应用研究也较为深入<sup>[5-7]</sup>。国内的研究多数集中在声纳数据的解析、分类原理的探讨以及声纳数据的改正上<sup>[8-10]</sup>,针对具体海区的应用研究工作较少,

收稿日期:2012-02-07

基金项目:国家 863 计划项目“深水多波束测深系统研究”(2007AA090901-04)

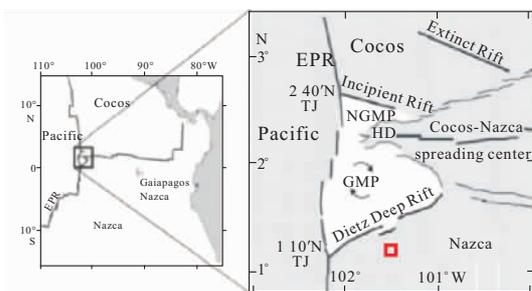
作者简介:张国堙(1984—),硕士,研究实习员,主要从事水声技术应用研究。E-mail:zgysir@126.com

尤其是深水区域。

中国大洋 21 航次第 III 航段在东太平洋海隆附近的“宝石山”热液区进行了深入调查。该热液区面积约 12 km<sup>2</sup>, 地形较为平坦<sup>[11]</sup>, 地形本身对多波束声纳的回波反向散射强度产生的影响较小, 是应用多波束声纳对热液区底质进行研究的理想“实验区”。本文应用“宝石山”热液区的多波束声纳数据, 并结合摄像及取样资料, 综合分析“宝石山”热液区底质特征与分布状况。

## 1 研究区域与数据

“宝石山”热液区位于东太平洋加拉帕格斯微板块的南缘(101.49°W, 1.22°N)。加拉帕格斯扩张中心(The Galapagos Spreading Center, 简称 GSC)位于可可斯板块(Cocos)与纳兹板块(Nazca)之间, 属于中速扩张中脊。可可斯板块与纳兹板块之间的扩张脊在此汇聚形成加拉帕格斯三联点(GTJ), 并形成了加拉帕格斯微板块构造, 被太平洋板块、可可斯板块及纳兹板块包围。加拉帕格斯扩张脊是可可斯板块与纳兹板块间的扩散边界, 从其西端加拉帕格斯三联点开始延伸长约 2 000 km, 其西部边界为赤道断裂带, 东部边界为巴拿马断裂带, 轴向近东西向<sup>[12]</sup>, “宝石山”热液区位置见图 1。



EPR: 东太平洋海隆; GMP: 加拉帕格斯微板块;  
NGMP: 加拉帕格斯微板块北缘; HD: 海斯深渊;  
TJ: 三联点。■为研究区的位置, 左图为三联点区域图,  
右图为沿东太平洋海隆 2°40'N 与 1°10'N 的 2 个三联点

图 1 加拉帕格斯三联点区域地质构造(据文献<sup>[12]</sup>)  
Fig. 1 The diagram of the Galapagos microplate  
(from reference <sup>[12]</sup>)

本文选取大洋 21 航次第 III 航段在该区域调查的 4 条测线(L12、L13、L14 及 L15, 图 2), 此 4

条测线同步采集海底摄像与多波束声纳资料, 多波束声纳数据来源于“大洋一号”船载的挪威 Kongsberg Simrad EM120 深水多波束系统, 工作频率为 12 kHz, 可形成 191 个波束, 系统发射波束最大扇面开角 150°, 形成波束宽度 1°×1°。在“宝石山”热液区作业时, 为获得高分辨率数据, 采用发射扇面开角 60°作业, 即在水深 2 000 m 时, 系统扫描宽度约 2 300 m; 该系统对采集的信号进行时变增益(TVG)处理, 对来自不同方向的声信号进行归一化, 获得在相同背景下的回波反向散射强度。另外, 在该区域进行了 12 个电视抓斗取样, 取得了大量不同类型的底质样品, 包括玄武岩玻璃、不同程度蚀变的玄武岩以及热液沉积物等。

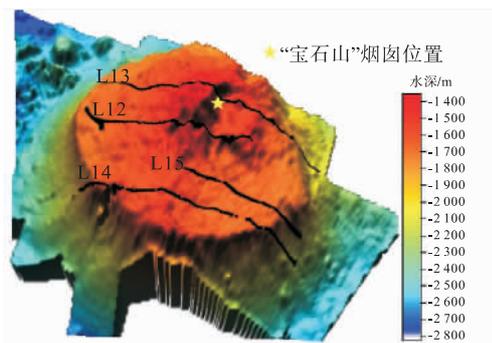


图 2 “宝石山”热液区及测线位置

Fig. 2 The study area of a hydrothermal field

海底摄像拖体在离底 3~5 m 的状态下, 采集了底质的视像信息, 基于视像资料对底质类型进行判读, 几种底质类型的典型视像图像如图 3 所示。

电视抓斗与海底摄像分别采集了“点”与“线”上的底质信息, 多波束声纳则全覆盖采集了整个研究区的底质声纳数据, 综合解译“点”、“线”及“面”的多源底质资料, 建立对热液区底质的全面认识。

## 2 底质分类方法与特征参数提取

### 2.1 多波束声纳底质分类方法

声波在射向介质不均匀的海底时, 会发生散射, 其中, 沿着发射声源方向的回波称为反向散

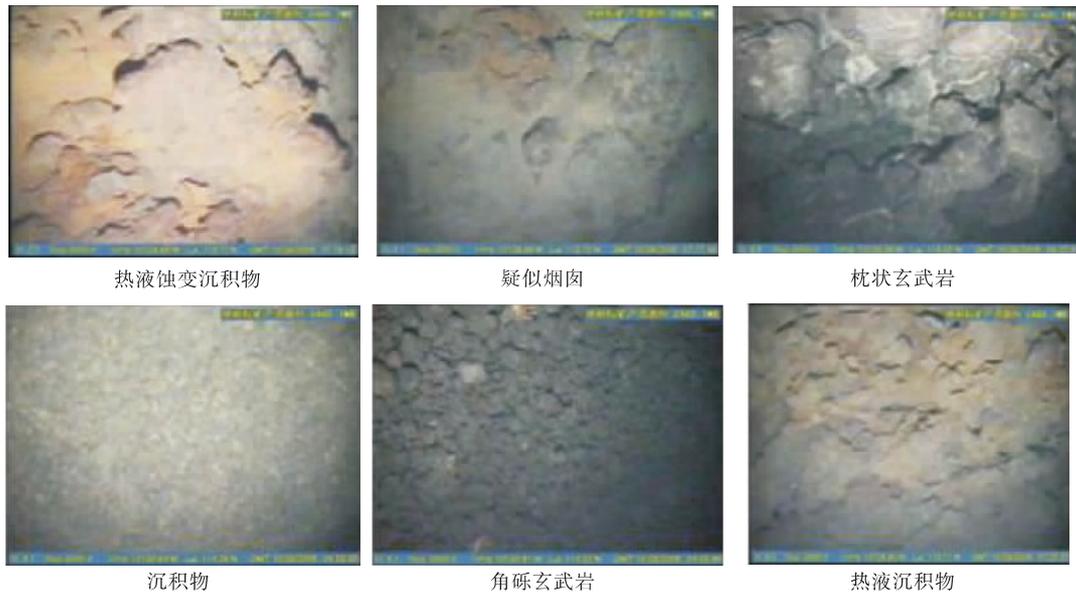


图 3 典型底质类型的视像图像

Fig. 3 The video image of a typical seabed

射<sup>[13]</sup>。多波束声纳水深测量基于反向散射回波的旅行时间,而声学底质分类则基于回波的振幅强度;海底的回波振幅强度取决于海底底质的密度与粗糙度,底质的密度与粗糙度则反映海底底质的类型;这便是应用多波束声纳系统进行海底底质分类的理论依据。

假设声纳系统发射声源级为  $SL$  (Source Level),在传播过程中声能的损失为  $TL$  (Transmission Loss),来自海底目标的反射(散射)为  $BTS$  (Backscatter Target Strength),接收换能器接收到的回波声能级为  $EL$  (Echo Level),海洋的噪声能级为  $NL$  (Noise Level),回波声能级 ( $EL$ ) 必须足够强烈能够压制海洋噪声 ( $NL$ ),使得接收换能器可以获得海底有效回波信号。回波声能级 ( $EL$ ) 与海底目标反向散射强度 ( $BTS$ ) 可以用如下等式表示<sup>[14]</sup>:

$$EL = SL - 2TL + BTS \quad (1)$$

海底目标反向散射强度 ( $BTS$ ) 与海底固有反向散射系数 ( $BS, \text{dB/m}^2$ ) 以及波束脚印面积 ( $A$ ) 相关,其中,  $BS$  取决于海底底质属性与波束入射角<sup>[15]</sup>。

$$BTS = BS + 10\lg A \quad (2)$$

根据声能方程,  $BS$  可表达为:

$$BS = EL - SL + 2TL - 10\lg A \quad (3)$$

只要能够准确获得等式右边的各项,即可提取海底反向散射系数  $BS$ ,依据  $BS$  与底质属性的关系,反演海底不同底质类型,即海底底质分类。

### 2.2 反向散射强度数据处理

依据声纳方程,原始声纳数据中的回波反向散射强度是多种因素共同作用的,包含声线弯曲、传播损失、波束脚印面积、海底地形、波束的海底入射角度以及海底底质的共同影响。进行海底底质分类,须提取仅反映海底底质属性作用的反向散射强度,消除其他影响因素(图 4)。

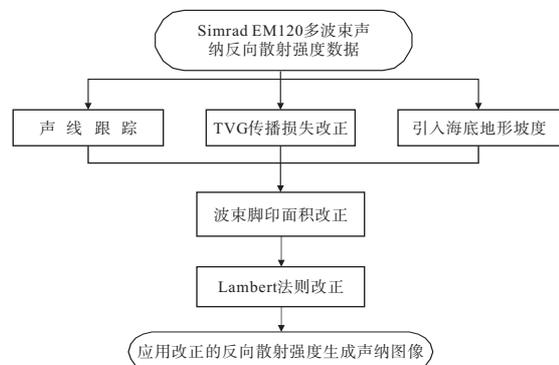


图 4 多波束反向散射强度数据处理流程

Fig. 4 The flowchart of the multibeam sonar data processing

### 2.2.1 反向散射强度数据的改正

#### (1) 声线跟踪

海水是非均匀介质,波束在传播过程中会发生弯曲。对声线跟踪,可获得准确传播路程,是进行传播损失改正的重要基础。依据 Snell 法则,结合声速剖面与波束在海水表层发射时刻的入射角度,可以追踪到波束到达海底的入射角度<sup>[16]</sup>,然后,应用该入射角度进行回波声强的计算。传播损失计算中的传播路径亦通过波束跟踪获得。通常情况,海底都具有一定坡度,为了获得精确的波束海底入射角,须引入地形坡度对其进行改正。

#### (2) 反向散射强度的传播损失改正

声波在传播过程中的损失包括波阵面的扩展损失与传播介质的吸收损失,为了消除传播损失对海底介质散射的影响,需要对衰减引起的信号进行补偿。结合缺失的水体声衰减参数以及声线传播路径,声纳系统本身对传播损失应用时变增益(TVG)函数补偿,信号接收机消除传播损失对回波产生的影响,保证了回波的原有水平<sup>[17]</sup>。在数据的后处理过程中,应用实际测得的声波衰减系数进行数据改正。

#### (3) 海底地形坡度的影响

在原始数据中,实时采集的反向散射强度是在假设海底平坦情况下计算取得的。地形对回波反向散射强度的影响包含 2 个方面:①波束海底入射角;②波束脚印面积<sup>[18]</sup>。通过引入海底地形坡度,结合地形坡度,精确计算波束脚印面积。为了消除波束入射角对反向散射强度的影响,依据声线跟踪,结合地形坡度,计算波束的海底入射角度。

#### (4) 波束脚印面积的改正

海底的固有反向散射系数可以表达为

$$BS = EL - SL + 2TL - 10 \lg A \quad (4)$$

表明  $BS$  与波束脚印面积  $A$  相关,在数据实时采集过程中,该脚印面积的计算是在假设海底平坦的情况下获得的。

在海底平坦时,波束脚印面积  $A$  为<sup>[19]</sup>:

$$A = \theta_T \theta_R R^2 \quad (\text{当波束垂直入射时}) \quad (5)$$

$$A = (c\tau\theta_T R) / (2\sin\theta) \quad (\text{当波束斜入射时}) \quad (6)$$

式中: $\theta_T$  为沿航迹方向发射波束开角, $^\circ$ ;

$\theta_R$  为垂直航迹方向接收波束开角, $^\circ$ ;

$R$  为射程,  $m$ ;

$\theta$  为波束入射角, $^\circ$ ;

$c$  为声速,  $m/s$ ;

$\tau$  为脉冲宽度。

在数据后处理过程中,为了消除海底地形的影响,获得仅仅与海底底质属性相关的反向散射强度,需要考虑海底的坡度(图 5)。当海底坡度角为  $\beta$  时,波束的脚印面积  $A'$  为:

$$A' = \frac{1}{\cos\beta} = (c\tau\theta_T R) / (2\sin\theta\cos\beta) \quad (6)$$

通过引入海底坡度,改正波束脚印面积,消除海底地形对反向散射强度的影响。

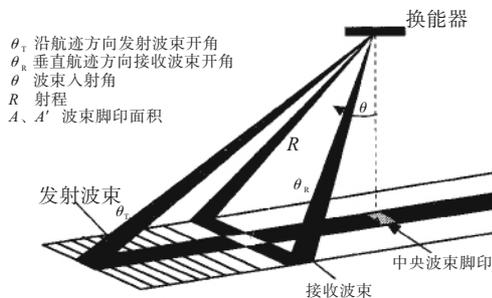


图 5 多波束声纳波束形成示意图(据文献[13])

Fig. 5 The diagram of beamforming(from reference [13])

#### (5) Lambert 法则改正

通过以上数据改正处理,消除了水体与海底地形对回波反向散射强度的影响,获得了与海底底质属性、波束入射角度相关的反向散射强度。为了提取完全反应底质属性的纯量反向散射强度,须消除波束入射角的影响。据前人文献<sup>[20,21]</sup>,当波束入射角  $\theta \approx 0^\circ$  时,  $BS$  近似为一常数;当  $0 < \theta < 25^\circ$  时,  $BS$  随波束入射角线性变化;当  $\theta \geq 25^\circ$  时,  $BS$  随入射角的变化服从 Lambert 法则:

$$\text{当 } \theta \approx 0^\circ \text{ 时, } BS = BS_n \quad (7)$$

当  $0^\circ < \theta < 25^\circ$  时,

$$BS = BS_0 + (BS_n - BS_0) \cdot (25 - \theta) / 25 \quad (8)$$

当  $\theta \geq 25^\circ$  时,

$$BS = BS_0 + 10 \lg \cos^2 \theta \quad (9)$$

式中,  $BS_n$  与  $BS_0$  分别表示波束垂直入射与斜入射时的回波反向散射强度。通过对固有反向散射强度数据进行波束入射角改正,获得了仅与海底

底质属性相关的反向散射强度数据  $BS_n$  与  $BS_o$ , 应用该数据进行底质分类研究。

### 2.2.2 反向散射强度数据的声纳图像

回波反向散射强度数据经过改正后,依据航向与船位置,结合波束中心相对换能器中心的水平位移与深度,计算得到波束中心的地理坐标,这样,就获得了每一个回波反向散射强度采样值的地理位置,在地理框架下,通过拼接测量条带之间的回波数据获得海底声纳图像<sup>[22]</sup>。声纳图像的本质是海底反向散射强度数据的灰度值的数学统计表现,是在对反向散射数据归一化后建立的统一背景的底质声学图像。声纳图像的灰度值是通过回波强度与灰度级对应起来形成的,如果海区底质类型变化复杂,则灰度值分布于整个变化范围。

## 3 底质分类分析与结果

应用“宝石山”热液区经改正处理的反向散射强度数据,形成该区域底质的声纳图像,反向散射强度值的变化通过声纳图像的灰度表现(图 6)。通常,依据海底反向散射强度的强弱划分不同的沉积物类型,如岩石的散射能力比砂强,砂的散射能力又强于淤泥<sup>[23]</sup>,声纳图像的灰度变化即表现底质属性的差异。

对 4 条测线的摄像资料以及电视抓斗的取样

资料进行分析,获得其对应的海底底质特征(表 1)。该区域底质包含玄武质基岩、角砾玄武岩以及热液沉积物等类型。

表 1 依据摄像拖体解译的底质特征  
Table 1 The feature according to the video

测线	底质
L12	底质多为浅薄沉积物覆盖的熔岩基底,少量风化熔岩以及热蚀变沉积物
L13	沉积物、热蚀变沉积物、枕状玄武岩
L14	沉积物和风化基岩底质居多,部分枕状、角砾状玄武岩
L15	主要为灰色—灰白色沉积物底质,喷出熔岩、风化玄武岩底质

通过摄像拖体拖缆补偿进行位置校正,获得对应于同一位置底质的摄像资料与多波束系统中央波束的声纳资料,并分别对该区域的 4 条测线的摄像资料与多波束中央波束区域声纳图像的灰度进行比对研究。

依据测线 L13 的摄像资料,可见底质为枕状玄武岩、角砾玄武岩以及热液沉积物等,这几种类型底质的回波反向散射强度渐次减弱,在声纳图像上的表现是灰度逐渐变小(图 7)。声纳灰度图

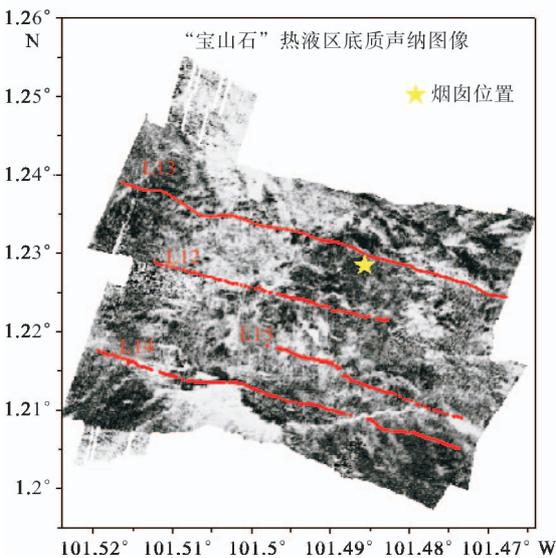


图 6 “宝石山”热液区底质声纳图像

Fig. 6 The sonar backscatter image of the hydrothermal field

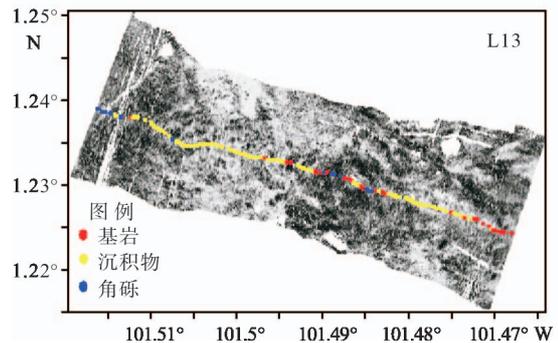


图 7 测线 L13 的多波束声纳图像

Fig. 7 Sonar backscatter image of the L13

与摄像资料所反映的底质类型表现出较好的一致性。应用同样的方法分析测线 L12、L14 及 L15,摄像资料所反映的海底底质与声纳灰度图均表现吻合,由此表明,“宝石山”热液区的声纳图像可有效地表现该区域底质类型及分布状况。综合 TVG 采样资料、摄像资料以及多波束声纳图像,初步得到“宝石山”热液区底质分布(图 8)。

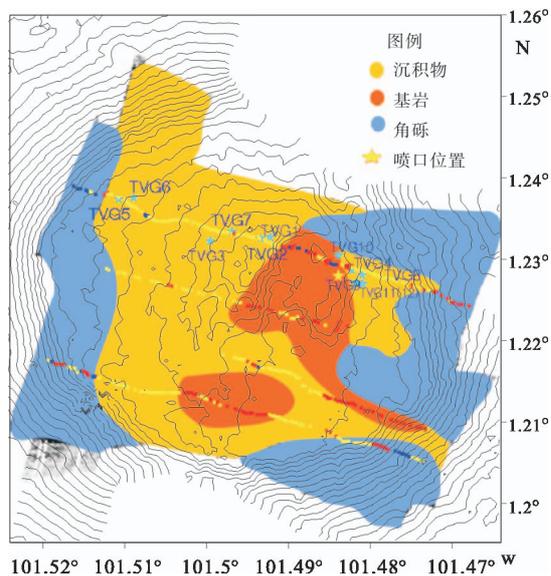


图8 “宝石山”热液区底质分布示意图

Fig. 8 The seabed classification diagram of the hydrothermal field

通过摄像资料与声纳图像的比对研究,验证了“宝石山”热液区声纳图像的有效性;结合摄像资料与 TVG 取样资料,将该区域底质初步分为沉积物、角砾与岩石 3 种类型。

该区域的 ADCP 底流资料显示,热液区底流方向约偏北  $200^\circ$ (图 9),本文认为,这是造成沉积物在热液喷口西南侧广泛分布的重要因素。AD-CP 底流资料从另一角度表明了多波束声纳底质分类结果的合理性及可靠性。

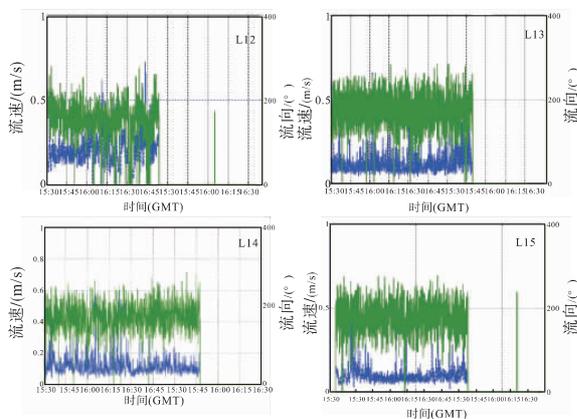


图9 L12、L13、L14 和 L15 测线的 ADCP 底流数据

Fig. 9 The ADCP data of L12、L13、L14 and L15

综合海底摄像资料、TVG 取样资料以及多波束声纳图像,“宝石山”热液区热液喷口所在区域广泛分布岩石;“宝石山”坡脚区域广泛分布砾石;热液喷口西侧广泛分布沉积物。

## 4 结论与展望

(1)在总结国内外多波束声纳反向散射强度数据处理改正方法的基础上,针对中国大洋航次取得的底质数据,应用 TVG 取样资料、摄像资料以及多波束声纳图像,建立了综合“点”、“线”及“面”的热液区底质类型研究模式。

(2)通过应用多波束声纳对“宝石山”热液区进行底质分类研究,获得该热液区底质类型及其分布特征,表明多波束声纳能够应用于海底热液区的底质分类,具有进一步研究与开发价值。

(3)“宝石山”热液区的海底声纳图像显示,沉积物在“宝石山”热液区热液喷口西侧大量分布,在喷口周围主要是基岩与砾石的混杂底质。

海底底质分类研究是一项庞大工程,应用多波束声纳进行底质分类研究,需要进一步深入的工作,表现在以下几个方面:

(1)研究反向散射强度数据处理算法,进一步消除水体以及地形的影响,提取真实反映海底底质属性的数据;

(2)本文以海底摄像资料以及取样资料作为底质类型的先验数据是定性研究。今后需通过测定底质样品的物理及土工参数,建立反向散射强度与底质类型之间的定量关系,更加准确的反演底质类型。

致谢:感谢中国大洋 21 航次第 III 航段全体科考队员的辛勤工作!

参考文献:

- [1] 侯增谦,莫宣学. 现代海底热液成矿作用研究现状及发展方向[J]. 地质学前沿,1996,3(3-4):263-271.
- [2] 杜德文,王宁,周兴华. 声学与海洋沉积物交叉领域的研究[J]. 海洋科学进展,2006,24(3):392-396.
- [3] De Moustier C. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam[J]. J. Acoust. Soc. Am,1986,79(2):316-331.
- [4] Simrad. Instruction Manual of Simrad Triton Seabed Classification [M]. Norway: Kongsberg Simrad Company,

- 1998.
- [5] Le Gonidec Y, Lamarche G, Wright I C. Inhomogeneous substrate analysis using EM300 backscatter imagery[J]. *Marine Geophysical Research*, 2003, 24(3-4): 311-327.
- [6] Ivor Marsh, Colin Brown. Neural network classification of multibeam backscatter and bathymetry[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70(10): 1 269-1 276.
- [7] Gardner J V, Dartnell P, Mayer L A, et al. Geomorphology, acoustic backscatter and processes in Santa Monica Bay from multibeam mapping[J]. *Mar Environ Res*, 2003, 56(1-2): 15-46.
- [8] 陶春辉,金翔龙,许 枫,等.海底声学底质分类技术的研究现状与前景[J]. *东海海洋*, 2004, 22(3): 28-33.
- [9] 陶春辉.多波束系统振幅定位提取与解释处理模块的开发及在多金属结核勘探中的应用[R].杭州:国家海洋局第二海洋研究所,1999.
- [10] 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): 37-42.
- [11] 大洋 21 航次第三航段(DY115-21-III)调查现场报告(硫化物部分)[R].杭州:国家海洋局第二海洋研究所,2009.
- [12] Schouten H, Smith D K, Montési L G J, et al. Cracking of lithosphere north of the Galapagos triple junction[J]. *Geology*, 2008, 5: 339-342.
- [13] 李家彪.多波束勘测原理技术与方法[M].北京:海洋出版社,1999.
- [14] Urick R J. Principles of Underwater Sound[M]. California: Peninsula Pub., 1983.
- [15] Mitchell N C. Processing and Analysis of Simrad Multi-beam Sonar Data[J]. *Marine Geophysical Research*, 1996, 18: 729-739.
- [16] 李家彪,郑玉龙,王小波,等.多波束测深及影响精度的主要因素[J]. *海洋测绘*, 2001(1): 26-32.
- [17] 唐秋华,陈义兰,周兴华,等.多波束海底声像图的形成及应用研究[J]. *海洋测绘*, 2004, 24(5): 9-12.
- [18] 金绍华,翟金生,刘雁春,等. Simrad EM 多波束反向散射强度数据精细处理研究[J]. *测绘科学*, 2010, 35(2): 106-108.
- [19] Hammerstad E. Backscattering and seabed image reflectivity[EB/OL]. [2012-02-04]. Simrad EM Technical Note, 2000. <http://www.km.kongsberg.com/>
- [20] Simrad K. EM Series Multibeam echo sounders Datagram formats[M]. Horten, Norway: Kongsberg Simrad Company, 2010.
- [21] 郭永刚.海底声参数反演研究与应用[D].青岛:中国海洋大学,2004.
- [22] Fernandes W, Chakraborty B. Multibeam backscatter image data processing techniques employed to EM1002 system[C]// Pillai P R S, Supriya M H. Proceeding of the International Symposium on Ocean Electronics (SYMPOL-2009). 2009: 93-99.
- [23] Kloser R. Acoustic Seafloor Classification using the Angular Backscatter Response of a Multibeam Echo Sounder [D]// Hobart, Australia, CSIRO, Marine and Atmospheric Research, 2007.

## SEAFLOOR CLASSIFICATION IN HYDROTHERMAL FIELD USING MULTI-BEAM SONAR

ZHANG Guoyin, TAO Chunhui, LI Huaiming, LIU Weiyong, DENG Xianming, CHEN Sheng

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;  
Key Laboratory of Submarine GeoSciences, SOA, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Multi-beam sonar is an efficient mean for seabed classification. It can provide information on sediment types and their distribution pattern. We studied the seabed classification for a hydrothermal field using Simrad EM120 multi-beam sonar data. The sonar backscatter image shows that soft sediments are mainly distributed in the southwest, and the mixture of rock and gravels to the east of the vent.

**Key words:** multi-beam sonar; submarine hydrothermal; seafloor classification; seabed backscatter image