

集成深拖与 AUV 对洋中脊热液喷口的联合探测*

周建平^{1,2,3}, 陶春辉^{2,3}, 金翔龙^{2,3}, 李怀明^{2,3}, 邓显明^{2,3}, 顾春华^{2,3}, 何拥华^{2,3}

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国家海洋局 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012;

3. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

摘要: 热液喷口探测是目前国际上的热点, 探测技术方法也多种多样。阐述了集成深拖与自治水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 探测技术, 重点介绍了集成深拖的组合特性。针对热液喷口的探测需求, 根据集成深拖与 AUV 两种方法的优点, 提出两种技术方法的联合探测。以一个实际探测的区块为例, 讨论了两种方法联合探测的实效性。指出该技术方法可更快速地探测热液的异常范围, 同时可降低 AUV 下潜的盲目性, 也可以减少 AUV 的下潜次数, 节约了海上调查时间, 提高探测效率。最后指出了现场探测与数据分析需进行深拖位置校正和关注底流及地形对热液羽状流空间分布的影响两个重要问题, 为未来的热液探测提供了指导作用。

关键词: 深拖; 自治水下机器人(AUV); 洋中脊; 热液喷口探测

中图分类号: P716 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)05-0081-07

Joint exploration by Deep Tow and AUV for hydrothermal vent on ocean ridge

ZHOU Jian-ping^{1,2,3}, TAO Chun-hui^{2,3}, JIN Xiang-long^{2,3}, LI Huai-ming^{2,3}, DENG Xian-ming^{2,3}, GU Chun-hua^{2,3}, HE Yong-hua^{2,3}

1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. The Key Lab of Submarine Science, Hangzhou 310012, China;

3. The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

Abstract: Detection of hydrothermal vents is an international hot spot. There are various detection technology and methods for the detection. Deep Tow and Automatic Underwater Vehicle (AUV) are important and popular technology, which is described in this paper with a focus on the combination characteristics of integration Deep Tow. According to the demand of exploration on hydrothermal vents and the advantages of both methods, a new method is presented, which is a joint exploration by both techniques. The effectiveness of the new method is discussed using an example of an actual exploration on East Pacific Rise. This new method can reduce the blindness of dive of AUV, by using the survey result of Deep Tow instead of the first phase of normal AUV survey, so the exploration time will be shortened. Two important factors, correcting the actual site of Deep Tow and the effect of current and topography on deployment to the hydrothermal vent, have been identified on the spot detection and data analysis. This study provides an important guidance for future exploration on hydrothermal vents.

Key words: Deep Tow; Autonomous Underwater Vehicle; ocean ridge; hydrothermal vent exploration

自 1977 年在加拉帕戈斯岛附近发现海底热泉和 1979 年在东太平洋海隆(East Pacific Ridge, EPR; 21°N)发现海底黑烟囱以来^[1-3], 科学家们就没有停止过对海底热液活动的探测与研究。海底热液活

动是海洋中存在的一种自然现象, 截止 2004 年, 全世界发现 280 多处热液喷口, 其主要分布在洋中脊和弧后盆地, 也有部分位于火山弧和板内火山等^[4-5]。从目前发现的热液区或异常区来看, 海底热液的分

收稿日期: 2010-08-12; 修订日期: 2010-09-29。卢冰编辑

基金项目: 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT0802); 海洋公益性行业科研专项 (200805005); 国家高技术研究发展计划项目(2007AA091901)

作者简介: 周建平(1974—), 男, 安徽省宣城市人, 副研究员, 中国地质大学(武汉)资源学院在职博士, 主要从事海洋调查技术、热液硫化物和海底沉积物性研究。E-mail: zhoujp@sio.org.cn

*感谢大洋一号全体调查队员和船员为本文数据获取付出的辛苦工作, 特别感谢集成深拖和 ABE 组的成员提供的各项图片, 感谢王洪法研究员提供的照片。

布极不均匀,其中太平洋分布最多,大西洋次之,北冰洋和印度洋较少^[6]。热液活动形成的多金属硫化物富含铅、锌、铜、金、银等有用金属元素且富集程度高,是新型潜在矿产资源,具有重要的经济意义,而且对水圈和生物圈产生重大影响,也是研究生物基因新领地^[7-8]。

洋中脊是地壳生长的地方,在地球固体物质循环中起着重要作用,是地质、生物和化学的作用交汇区,是科学家研究海洋岩石圈、地壳形成、生命起源等自然科学的天然试验场地^[9-10]。洋中脊是目前发现热液喷口最多的区域,同时,公海内洋中脊也是我国探测研究热液硫化物的首选区域。目前我国在东太平洋海隆、印度洋中脊和大西洋中脊都进行了初步的探测研究,并在东太平洋海隆赤道以南区域、西南印度洋中脊和南大西洋发现了若干的热液喷口区,并且是在超慢速西南印度洋中脊发现喷口的首个国家^[11]。

地球物理方法和水文方法在海底热液探测中已比较成熟,能对几千米范围的热液异常进行探测^[12]。深拖在千米级范围异常探测和近海底的观测都起到关键的作用^[3, 7, 13-14]。AUV在百米级范围内的热液探测,以及海底微地形地貌和生物群落的发现中也起到至关重要的作用^[7, 14-15]。但在洋中脊复杂的地形下,如何实现即较大范围内快速有效探测到热液喷口异常,又能精确地发现热液喷口位置呢?我们在2007年和2008年的大洋航次的热液探测发现的过程中,实现集成深拖和AUV的联合应用,形成了一套有效的探测方法,为我国的热液喷口探测发现提供了重要技术支撑。

1 设备简介

1.1 集成深拖

深拖系统是一种有效的海底探测手段,在多金属结核、天然气水合物等海底矿藏探测都已起到了重要作用^[16]。世界上第一个热液喷口正是通过深拖系统探测发现的^[3]。目前在海洋探测中的深拖系统主要分为光学深拖和声学深拖两种。光学深拖主要以近底的摄像与照相为工作手段,探测几米级别的海底微地貌。声学深拖则以配置为多波束、浅剖或侧扫等声学探测设备为特征,探测几百米级别的海底地形地貌。目前深拖系统大多实现了实时的信号传输,在实验室可直接监测到地形地貌的数据或图像。针对于热液硫化物探测需求,深拖系统上集成了化学、水文或物理等传感器,形成一种有效的集

成深拖,用于探测水体中几千米级别上的热液喷口羽状流的化学或物理异常。

我们目前有多套深拖系统在使用,声学深拖系统有Benthos声学深拖和研制的DTA-4000浅剖侧扫深拖。光学深拖系统有挪威引进的Simrad6000、研制的6000m光拖和大洋深海摄像系统。

集成拖体最基本的设备为深拖本体上的摄像与照相设备,具有6000m水深的耐压能力,可拍摄近海底的微地形地貌,视像通过通讯铠装缆实时地传输到实验室,方便于调查人员实时判断海底情况。在通讯拖缆上挂载了海水热液自动探测仪(Miniature Autonomous Plume Recorder, MAPR)和甲烷传感器(METHane Sensor, METs),用于测量水体中的温度、浊度和CH₄异常。在深拖本体上加载了声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、温盐剖面仪(Conductivity, Temperature, Depth Sensors, CTD)、近底磁力仪和原位化学分析等探测设备,可以完成水体的流速和流向、温度、盐度和化学元素、近底磁场等参数测量。加载超短基线应答器可以进行水下定位,但目前还没有很好地利用。图1和表1分别为在引进的Simrad6000光学深拖的基础上改造升级的集成深拖系统的照片和主要配置与技术参数。

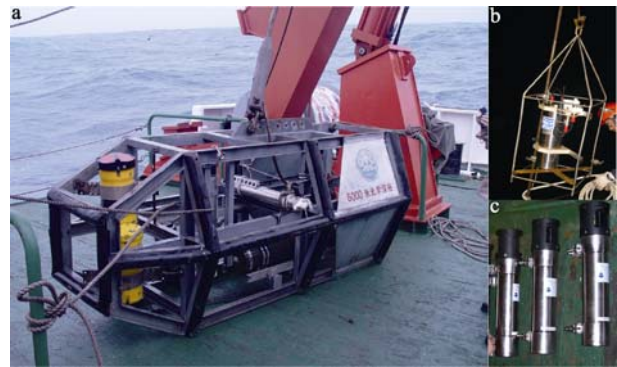


图1 集成深拖系统

a.光学深拖本体,其内安装了摄像、照相、ADCP(2套,分别向上和向下测量)和CTD等探测设备;b. METs;c. 3台MAPR

Fig. 1 Main body of Deep Tow, including video, camera, ADCP (2 sets, upward and downward) and CTD (a), METs (b) and MAPR (c)

1.2 AUV

AUV是自治水下机器人(autonomous underwater vehicle)的简称,是能实现在水下等深或等高地完全自治探测的设备。为实现探测功能,其上搭载有针对不同探测目的的相关传感器,包括声学、化学、水文或地球物理等传感器。AUV能实现1km

级别的异常探测、几十米级别的地形地貌和近底的几米微地貌探测^[14-15,17]。

表 1 综合拖体主要配置与参数表

Tab. 1 Configuration and parameter of integration Deep Tow

项目名	参数描述
摄像	连续拍摄、模拟视频信号输出
照相	35mm 胶片, 装载容量 800 幅, 实验室可控拍摄
高度计	量程 1—100m, 精度 10cm
MAPR	可测量温度、压力和浊度, 自容数据保存。温度误差 0.001, 浊度量程 0—5000mV, 测量灵敏度 0.01mV
METS	探测 CH ₄ , 能校正的 CH ₄ 浓度范围为 10 nmol·L ⁻¹ —10 mol·L ⁻¹
ADCP	自容式 300kHz ADCP, 测量流速精度 ±0.5cm·s ⁻¹
CTD	测量海水的温度分辨率为 0.005°C, 电导率分辨率为 0.0005S·m ⁻¹ , 深度精度为 0.1%
超短基线	最大作用距离 7000m, 斜距 4300m, 半开角 15°条件下的定位精度为 0.44%

我们使用的 AUV 是租用美国 WHOI 的自治深海探测器(ABE, Autonomous Benthic Explorer)。最大工作深度为 4500m, 能实现在水下全自治探测和水面的人工操控, 水下测量数据完全自容保存, 利用长基线和多普勒导航定位, 具有 3 个尾部和 2 个中间垂直的推进器, 可实现在复杂地形条件下的自治测量。ABE 上装备有姿态传感器和用于探测的声学、光学、水文和化学等传感器, 表 2 为我们采用的 ABE 技术配置与参数。

表 2 ABE 的主要配置与参数表^[14]

Tab. 2 Main configuration and parameters of ABE

项目名	参数描述
姿态传感器	压力、纵摇、横摇、艏摇
图像	1024 × 1024 像素, 12 位数字相机
多波束	SIMRAD SM2000, 主频 200 kHz
高度计	量程 1—50m, 精度 10cm
水文传感器	电导率、温度传感器、光反向散射传感器(浊度)
特别传感器	Eh 电极(氧化还原传感器)
ADCP	自容式 300kHz ADCP, 测量流速精度 ±0.5cm·s ⁻¹

2 探测方法

2.1 热液异常分布特征

洋中脊是热液活动最为丰富的区域, 但相对于深拖和 AUV 来说, 在洋中脊上寻找喷口依然是一项大海捞针式的探索过程。为了达到最佳的探测效果, 必须根据热液喷口及其产生的羽状流的特点, 建立合理的探测方法体系。研究探测洋中脊海域的

地形图是必备的资料, 可以根据事先收集的地形资料, 在地形资料缺少或精度不足的海域, 利用船载多波束进行地形测量, 获得调查区洋中脊及附近海域详细地形图。洋中脊的一系列的特征构造更为有利于为流体提供通道。根据研究表明, 热液喷口产生的位置与洋中脊的地形特征有一定的关联性, 如中脊裂谷中的高地、裂谷侧壁、转换断层、三联点等特征构造位置^[8,18-19]。通过中脊的各类裂隙等流体通道, 下渗的冷海水与上升的高温流体形成对流循环, 与海底表层的围岩发生沉淀、物理和化学等作用, 形成热液区的微地形地貌、物理、化学和矿化异常特征^[18]。

热液喷口产生的高温喷射流体, 进入 2 左右的冷海水后, 迅速向上和向四周扩散, 浓度逐渐稀释, 上升的高度和水平的扩散方向与热液流体喷射的流量和速度、海底的地形、底流的方向与强度等因素影响。根据前人的探索与研究, 一般在海底以上 100—400m 的范围均可以探测到不同强度的热液异常, 而横向扩散的范围则可以几千米以上^[14], 图 2 为示意图。

存在热液喷口的海底, 其微地形地貌、岩石和生物等具有与周围海底不相同的异常特征, 最直接的表现就是高耸的喷口体或相对高于海底面的丘体、矿化或蚀变的岩石和大量的热液生物分布。

2.2 集成深拖方法

根据热液可能分布的洋中脊地形地貌特征, 沿中脊或垂直于中脊的特征位置, 布设深拖测线, 以最快且最大程度上探测热液喷口的异常。根据水体中热液羽状流的空间特征, 集成深拖挂载的探测传感器安装在离海底 500m 高度以内, 在 100m 以内挂载 2 只 MAPR, 在 100m 至 300m 之间挂载 3 只 MAPR 和 1 台 METs, 在 300m 以上挂载 1 只 MAPR。如图 2 中所示意, 挂载的传感器贯穿水体中热液羽状流分布空间, 这样能在最大范围、最大可能地探测到热液羽状流的 CH₄、温度、浊度等异常。

集成深拖上的摄像和照相在离海底 3—5m 的高度可以清晰地拍到海底微地貌, 直接发现微地形地貌、岩石和生物等异常, 识别出热液喷口的地质、生物特征, 进而显示这些喷口的存在, 但这一过程是非常的困难。

2.3 AUV 方法

根据热液喷口及其在水体中产生的热液羽状流异常特征, AUV 的探测分 3 个阶段: 第 1 个阶段是在离海底 300m 左右, 等深地进行大间距(约 300m)

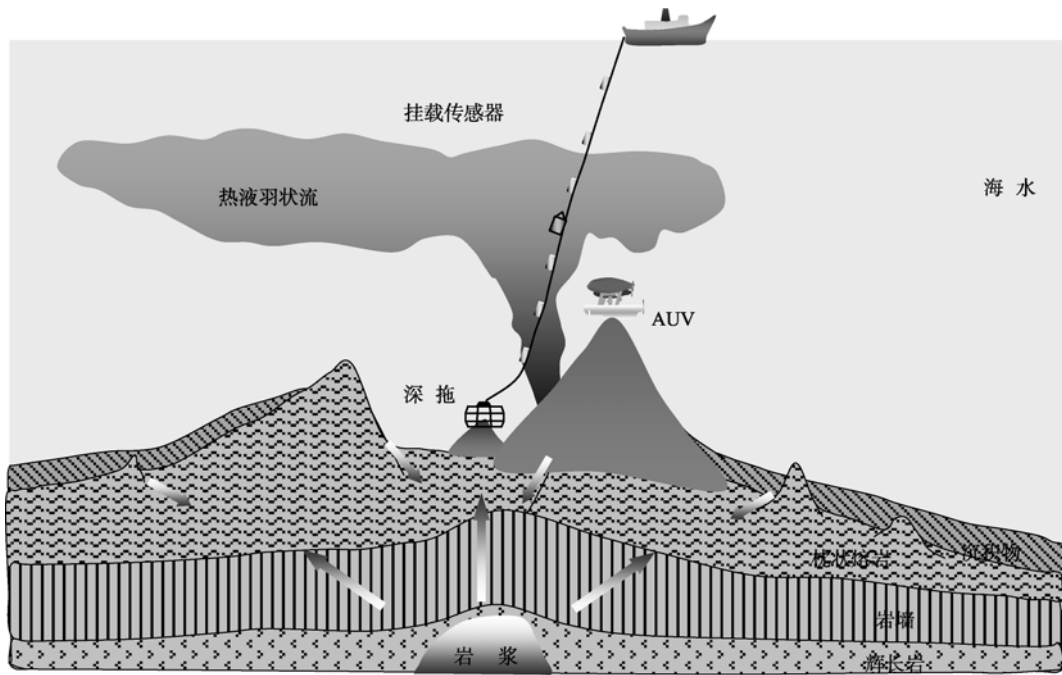


图2 集成深拖与AUV的作业方式示意图

Fig. 2 Sketch of deployment of Deep Tow and AUV

的测线面积测量,主要探测的目标是水体中的温度、浊度、Eh等热液羽状流异常;第2阶段是在第1阶段的异常区内,离海底50m等高的进行中等间距(约50m)测线的布设测量,主要探测目标是测异常区的高精度声学地形地貌,图2中给出第2阶段的工作方式示意图,对一些几米高的喷口,可以从本阶段的地形图上初步识别;第3阶段是在第2阶段的异常区进行近底(5m左右)拍照,获得高清晰的微地形地貌与生物照片。对AUV的探测方法更为详细的描述请见文献[14-15]。

2.4 联合探测

集成深拖和AUV都是热液区探测的高效技术方法之一,各有优点,也各有缺点。集成深拖的优点是海底视像实时传输到实验室,通过海底视像使得科学家们可对探测的区域进行初步的实时分析,以便确定下一步的探测目标,并可能直接发现探测目标。甲板供电技术使得深拖本体可以较长时间连续水下工作,加载设备的自给供电能力对作业时间有一定限制,这也是下一步需要解决的技术问题。挂载的热液羽状流异常探测传感器分布在离海底500m以下的几个层位,覆盖了热液羽状流垂向的分布空间,使得更容易探测到其异常值。集成深拖的缺点是水下定位精度差,受船舶运动和海流影响大,不可能进行一定面积海底的全覆盖探测。

AUV的优点是能实现完全的自治探测,在1km

尺度范围内对海底进行全覆盖探测,并利用长基线等定位手段实现高精度的海底定位。缺点是不能获得实时的数据;探测的时间受电池的能力限制,不能进行大面积测量;不能同时对多个深度层位进行探测;每个阶段的耗时约12h,并不能同时进行其他方法的作业。更为重要的是洋中脊的地形非常复杂,AUV水下工作有丢失的危险,每多下水一次,就多一份危险,ABE目前已在一次工作中遗失海底了。

为提高探测的效率,减少AUV的下水次数,联合使用2种探测手段,在测量数据上进行优势互补。具体的作法就是利用集成深拖进行初步的异常探测,利用深拖探测的浊度、温度、视像、海流等异常或基础数据对可能的热液区和海底环境进行判断,为AUV的探测选择目标海域,替代AUV的第1阶段的异常探测。AUV的探测从第2个阶段开始,这样减少的AUV的下水次数和作业时间,也可以使第2阶段一次下水增加探测范围。

3 实例

在东太平洋海隆赤道以南的海域,我们使用了这两种探测方法,联合进行中脊热液区的探测,测区的水深在2600—3600m之间。图3是探测海域的地形图及布设的测线图。深拖测线布设通过沿中脊的一系列特征点,由于底流的原因,深拖的测线沿中脊的探测比较难控制方向,所以设计的测线较短,

且多垂直或斜交于中脊。在图中左侧海底有一异常高地, 也布设了一条横穿的测线, 也探测到了异常, 但由于时间原因, 并没有进行详细的探测研究。下文将利用一个测区的资料来阐述集成深拖与 AUV 联合探测的成果。

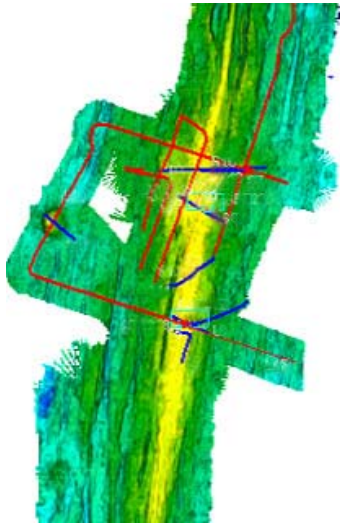


图 3 调查区的海底地形与测线布设图

深蓝色线为集成深拖测线, 红色线为地球物理测线, 浅蓝色方框为 AUV 测区

Fig. 3 Topography and survey line of research area. Blue line is Deep Tow, red line is geophysics, and light blue box is AUV

该测区在位于离深拖本体约 20m 的 MAPR 记录到了明显的浊度异常, 异常值达 30—50mV。图 4 为浊度和温度随时间变化及对应的水深变化值。

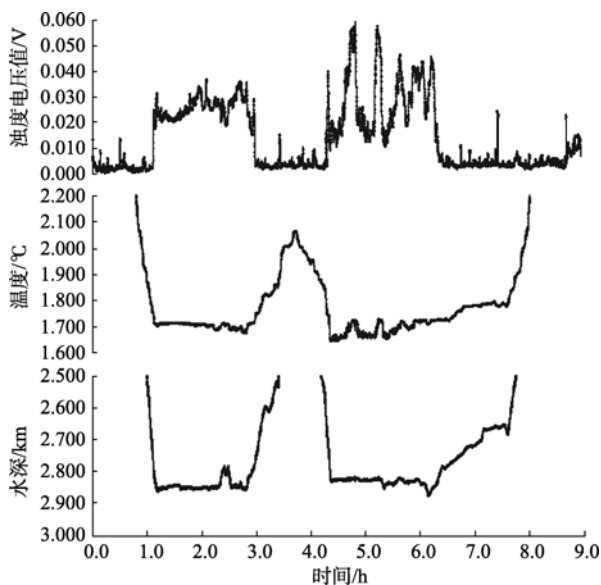


图 4 离深拖本体约 20m 的 MAPR 探测的浊度, 温度随时间的变化情况

Fig. 4 Turbid and temperature change with time of MAPR at 20m from Deep Tow

异常出现的水深值约 2750—2850m, 该测区水深为 2900—3000m, 表明热液羽流的上升高度在 150—250m。与第 2 个浊度异常出现在相同的范围内存在温度异常, 最大可达 0.07°C 。3—4h 内的浊度突然变高, 这与深拖的水深突然变浅相对应。图 5 为深拖下放和回收过程的 MAPR 浊度变化曲线, 从图中可以看出两个过程的浊度变化基本一致, 在 2800m 水深左右有较大的浊度异常, 并与图 4 中一致, 在 2400m 水深左右有较弱的浊度异常。这表明在整个测线的范围可能都存在浊度异常, 但测线并不完全沿热液羽状流异常扩散方向, 因为图 4 中有部分时间段没有异常出现。

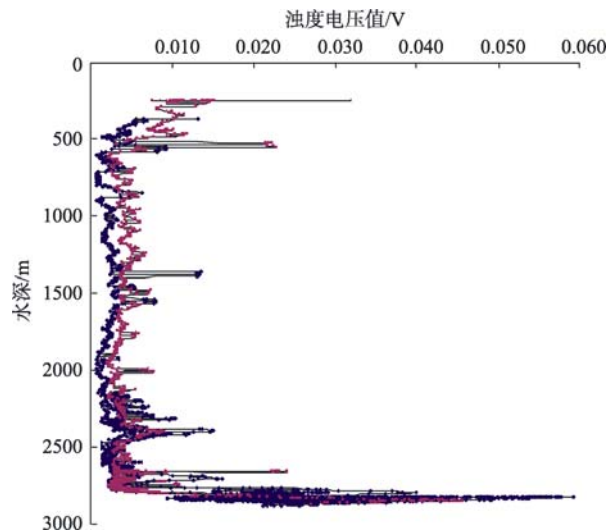


图 5 离深拖本体 20m 的 MAPR 所测得的浊度随深度的变化图

蓝线表示下放过程, 红线表示回收过程

Fig. 5 Turbid of MAPR change with depth at 20m from Deep Tow. Blue line is downward, and red line is upward

集成深拖挂载的 METs 传感器上也存在较小的 CH_4 异常, 搭载的 CTD 也探测到温度、浊度异常。这两者的异常与 MAPR 的异常位置相差不大, 稍微的位置差异可能是由于设备在水体中的高度不一致导致。

根据集成深拖探测的异常范围, 选定 AUV 下潜的工作区, 取消正常的 AUV 作业的第 1 阶段, 直接进行第 2 阶段, 进行离底 50m 定高的地形和异常探测, 同时搭载 MAPR 和 Eh 传感器。将水下的工作范围从一个区块扩展成两个相邻的区块, 这两个区块的选择也是根据集成深拖的异常数据来定。图 6 为选定的两个区块的地形图, 地形上表现出高低条带状分割, 高差不到 100m。图中右边测区中两个标注为 Eh 梯度异常点, 并存在 MAPR 的浊度异常值。

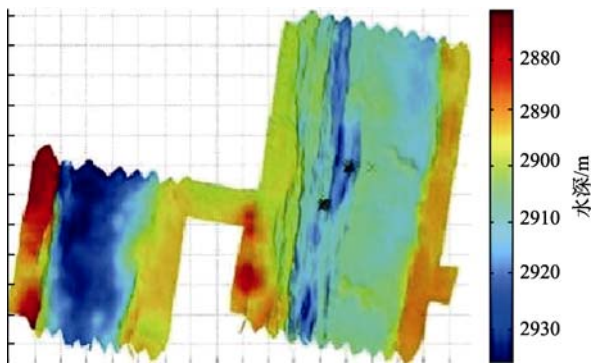


图 6 离底 50m 高的海底地形图

图形网格 2m, 黑色*号标注为 Eh 梯度异常最大值点

Fig. 6 Topography of 50 m above the seafloor. Grid is 2 m, and the black star represents the maximum gradient anomaly of Eh

根据第 2 阶段的地形、Eh 梯度和浊度异常, 选择第 3 阶段的 AUV 下潜区块。离底 5m 定高进行拍照。5s 拍 1 张, 前后照片有一定的重叠, 保证连续全覆盖地获得探测区块的海底照片。图 7 为获得的海底照片, 可以明显看到较多的生物体, 是存在热液喷口的生物异常特征, 同时可以看到海底存在一



图 7 离海底 5m 的照片(海葵和蟹类等生物)

Fig. 7 Photograph taken ~5m above the seafloor, showing anemones and crabs

条深切的沟槽。

4 小结

集成深拖和 AUV 均可以单独进行热液喷口的调查, 都是行之有效的探测方法。前者最大优点是实时快速, 能进行长距离的视像和不同层位水体异常测量, 后者最大优点是全自治高精度地获得水体异常和图像资料。两者联合探测, 实现优势互补, 最大程度上利用各种探测资料, 联合判断和识别。尤其是利用集成深拖的异常来确定 AUV 的探测区块, 进而降低 AUV 下潜的盲目性, 同时可以省去 AUV 的第 1 个探测阶段, 减少一个探测周期内的下潜次数, 节约海上的作业时间, 提高探测效率。

另外, 在海上调查和对资料进行判断时, 有两个问题必须加以注意:

1) 深拖位置的校正。因为探测区域的水深为 3000m 左右, 在船速 2 节左右时, 拖曳缆长度近 4000m, 集成拖体位于船尾部后下方(见图 2 中所示意), 所以深拖本体的坐标位置与船体的坐标位置有一定的差距。这一差距与船的航行速度、拖曳缆的长度、风向、流向和流速等外界环境因素都相关。解决这一差距的方法有两种: 一是实时记录上述的各项影响参数, 并进行深拖位置的校正, 武光海等人进行过初步的研究^[20], 但这种方法也不是太精确。二是利用超短基线实时对拖体的水下位置进行定位, 目前这种方法正趋于成熟利用^[21]。

2) 底流和地形的影响。喷口中喷射出的流体进入环境水体后, 其扩散的范围受底流和地形影响。所以要结合多波束地形、深拖上的测流对异常点的位置进行综合判断, 识别异常的来源和扩散方向, 初步确定热液喷口区的位置, 为下一次的深拖或 AUV 作业进行更为准确的选区。

参考文献

- [1] BALLARD R D, GRASSLE J F. Return to oases of the deep (strange world without sun)[J]. National Geography, 1979, 156(5): 680-703.
- [2] CORLISS J B, BALLARD R D. Oases of life in the cold abyss[J]. National Geography, 1977, 152: 441-453.
- [3] LONSDALE P. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers[J]. Deep Sea Research, 1977, 24(9): 857-863.
- [4] BAKER E T, GERMAN C R. On the global distribution of hydrothermal vent fields [EB/OL]. [2010-08-12]. <http://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/bake2544/introduction.shtml>.
- [5] 杜同军, 翟世奎, 任建国. 海底热液活动与海洋科学研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2002, 32(4): 597-602.
- [6] 夏建新, 李畅, 马彦芳. 深海底热液活动研究热点[J]. 地质力学学报, 2007, 13(2): 179-191.
- [7] 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]. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 263-273.
- [8] FOUQUET Y. Where are the large hydrothermal sulphide

- deposits in the oceans? [J]. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1997, 355: 427-441.
- [9] GERMAN C R, LIN JIAN. The thermal structure of the oceanic crust, ridge spreading, and hydrothermal circulation: how well do we understand their inter-connections? [M]// GERMAN C R., LIN JIAN, PARSON L M. *Mid-ocean ridges: Hydrothermal interactions between the lithosphere and oceans*. Geophysical Monograph, 2004, 148: 1-18.
- [10] VAN DOVER C L, GERMAN C R, SPEER K G, et al. Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates[J]. *Science*, 2002, 295: 1253-1257.
- [11] TAO CHUNHUI, LIN JIAN, GUO SIQING, et al. First discovery and investigation of a high-temperature hydrothermal vent field on the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge[C/OL]//American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract, 2007. [2010-08-12]. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AGUFM.T52B.07T>.
- [12] CAVE R R, GERMAN C R. Hydrothermal plume detection in the deep ocean—a combination of technologies[J]. *Journal of the Society for Underwater Technology*, 1998, 23: 71-75.
- [13] MACDONALD K C, LUYENDYK B P. Deep-tow studies of the structure of the Mid-Atlantic Ridge crest near lat 37 ° N[J]. *Geological society of America bulletin*, 1977, 88(16): 621-636.
- [14] GERMAN C R, DANA R Y, MICHAEL J, et al. Hydrothermal exploration with the Autonomous Benthic Explorer[J]. *Deep-Sea Research I*, 2008, 55: 203-219.
- [15] DANA R Y, ALBERT M B, MARIE-HELLENE C, et al. High resolution mapping of a fast spreading mid ocean ridge with the Autonomous Benthic Explorer[C]//Proceedings of the 11th international symposium on unmanned untethered submersible technology, Durham, NH, Aug, 1999: 1-14.
- [16] 包更生, 王洪法, 申屠海港, 等. 中国开辟区多金属结核覆盖率分布特征[J]. *海洋学报*, 2002, 24(4): 68-75.
- [17] MELCHERT B, DEVEY C W, GERMAN C R, et al. First evidence for high-temperature off-axis venting of deep crustal/mantle heat: The Nibelungen hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(1-2): 61-69.
- [18] TIVERY M K. Generation of seafloor hydrothermal vent fluids and associated[J]. *Oceanography*, 2007, 20(1): 50-65.
- [19] 季敏, 翟世奎. 现代海底典型热液活动区地形环境特征分析[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 46-55.
- [20] 武光海, 程永寿, 刘捷红, 等. 拖网及深海摄像站位位置与水深的初步校正[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(3): 90-97.
- [21] 吴学文, 包更生, 张恺. 热液硫化物现场调查中超短基线异常定位数据的快速剔除[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 165-169.