

台湾岛西南海域福尔摩沙海脊冷泉区地形地貌特征分析

王冰^{1,2}, 栾振东^{1,3,4}, 张鑫^{1,3,4}, 席世川^{1,2}, 李连福^{1,2}, 连超³,
阎军¹, 陈长安¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海洋研究所, 深海极端环境与生命过程研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 利用水深数据和 ROV 近海底影像资料, 对福尔摩沙海脊冷泉区的海底地形地貌和冷泉系统的海底表征进行了描述和分析, 并讨论了二者之间的响应关系。结果表明, 相对于船载多波束数据而言, 近海底多波束测深系统所获得的数据能更高精度地反映冷泉区海底地形地貌特征, 是研究冷泉系统不可或缺的基础资料。基于 ROV 近海底观测影像资料, 福尔摩沙海脊冷泉系统整体表现为局部被化能自养生物群落覆盖并有流体喷口零星分布的巨大自生碳酸盐岩岩丘, 海底表征主要包括形态各异的自生碳酸盐岩结壳或岩体、化能自养生物群落、流体喷口、还原性沉积物等几种形式。研究表明, 福尔摩沙海脊冷泉区的地形地貌特征与冷泉系统海底表征具有良好的响应关系, 并且该区的地形地貌特征主要受控于出露于海底的自生碳酸盐岩的形态特征及规模。首次揭示了福尔摩沙海脊冷泉区地形地貌特征与其海底表征之间的响应关系, 以为后续的冷泉研究提供必要的背景资料支持。

关键词: 冷泉; 福尔摩沙海脊; 海底地形地貌; 海底表征

中图分类号: P737.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)02-0051-09

DOI: 10.11759/hyxx20171120003

海底冷泉主要是指富含 CH_4 、 H_2S 等组分的流体持续或间歇性溢出或喷出海底所形成的流体系统^[1-3]。冷泉流体温度稍高于周围海水或与之相近, 之所以称之为冷泉, 是因为与热液系统相比, 冷泉流体温度要低得多。冷泉系统的发育表明了相应海区经历了复杂的沉积和构造过程, 包括沉积物压实脱水、富 CH_4 流体聚集、断层和断裂形成等。迄今为止, 所发现的海底冷泉主要集中在大陆边缘, 特别是油气资源丰富的被动大陆边缘^[4-7]和处于挤压构造背景条件下的主动大陆边缘^[8-10]。海底冷泉系统是海底流体体系的重要组成部分, 是海底物质与能量交换的重要通道, 尤其对地球浅部圈层碳的释放和固定具有重要意义。发育成熟的冷泉系统可以分为海底表征, 富 CH_4 流体来源以及连接两部分的流体通道系统等三个部分^[11]。其中冷泉系统的水底表征主要包括最为典型的化能自养生物群落, 自生碳酸盐岩丘或结壳, 流体喷口, 还原性沉积物, 以及近海底 CH_4 含量的高异常等。海底冷泉系统的水底表征是冷泉发育的最直接证据, 忠实地反映了冷泉系统的发育阶段, 记录了冷泉系统的演化过程, 全面研究冷泉系统的水底表征对

于识别和综合研究冷泉系统具有重要的科学意义。

南海北部也发育有多个冷泉系统^[12-16], 并且包括两个流体活动异常活跃的冷泉系统, 即位于台西南的福尔摩沙海脊冷泉系统和位于琼东南盆地西部海域的“海马”冷泉系统。冷泉的较集中分布得益于该区更为有利的地质条件, 如巨厚的沉积物和丰富的断裂可以为冷泉系统发育提供充足的流体来源和良好的输运通道, 另一方面则是得益于该区丰富的海上调查资料。在当时已知的冷泉系统中, 位于南海北部被动大陆边缘福尔摩沙海脊上的冷泉系统, 由于其依然处于活动阶段, 发育有典型的冷泉系统海底表征, 且地理位置易于开展海上科考调查等优势, 在 2014 年将其定为“发现”ROV 海试区域之一, 并

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2017-12-27

基金项目: 中国科学院先导专项项目(XDA11030301, XDA11040301, XDA11040305)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA11030301, No.XDA11040301, No.DA1104 0305]

作者简介: 王冰(1987-), 女, 山东滨州人, 博士研究生, 海洋地质专业, 电话: 0532-82898530, E-mail: includeint@126.com; 栾振东(1976-), 通信作者, 正高级工程师, 海洋地质, 电话: 0532-82898536, E-mail: luan@qdio.ac.cn

基于在海试过程中获得的丰富数据和样品,我们将该冷泉区作为重点调查区在后续相关航次中开展了连续的海上调查工作。本文主要根据在该区获得的水深数据(包括大范围的船载多波束水深数据和重点调查区的近海底多波束水深数据)和 ROV 采集的近海底高清影像资料,对冷泉区的海底地形地貌和冷泉系统的海底表征进行了描述和分析,并讨论了两者的响应关系。

1 调查区地质背景介绍

NW-SE 向的福尔摩沙海脊位于中国南海北部陆坡,是海底主要经重力流侵蚀后所形成的残余正地形,构造上属于被动大陆边缘和台湾岛西南变形带前缘^[17-18]。海脊顶部水深约为 1 120 m,纵向(平行海脊)约 30 km,横向(垂直海脊最宽)约 5 km,海脊两翼较陡,坡度最大处超过 30°^[17-18]。海底峡谷从 E、W、N 三侧环绕海脊并控制其形成和演化,海脊脊顶与谷底的最大高差约为 700 m。福尔摩沙海脊发育有南北两个脊顶,本文所调查的海底冷泉系统位于其南侧脊顶。冷泉系统的海底表征主要包括繁茂的化能

自养生物群落,广泛发育的自生碳酸盐岩丘和结壳以及流体喷口等形式^[1, 19]。

福尔摩沙海脊下伏地层中似海底反射层(BSR)广泛发育^[18]。SWW-NEE 向横切海脊的地震剖面显示,海底以下 180~460 m 深度范围内,存在近于连续的 BSR。该 BSR 仅在对应脊顶冷泉位置的剖面处发生间断,并且该间断处与脊顶冷泉系统之间有近于垂直的信号异常带相连^[18],两侧的 BSR 大致以该信号异常带为中心轴沿两翼近于对称分布。对该冷泉区的自生碳酸盐岩进行地球化学分析表明,天然气水合物分解所形成的流体是本冷泉系统海底流体的重要组成部分^[1]。

基于对福尔摩沙海脊的地震和热流数据分析,有研究者提出了该冷泉系统的流体循环模式。该模式认为福尔摩沙海脊冷泉系统的海底流体在浮力和生物消耗所形成的“生物泵”作用下,沿近于垂直的流体通道向上运移,海脊两翼的底层海水则沿地层渗入流体系统,补充由于 CH_4 厌氧氧化所消耗的 SO_4^{2-} ,进而保证富 CH_4 和 H_2S 的海底流体运移到海底维持化能自养生物群落^[18, 20]。

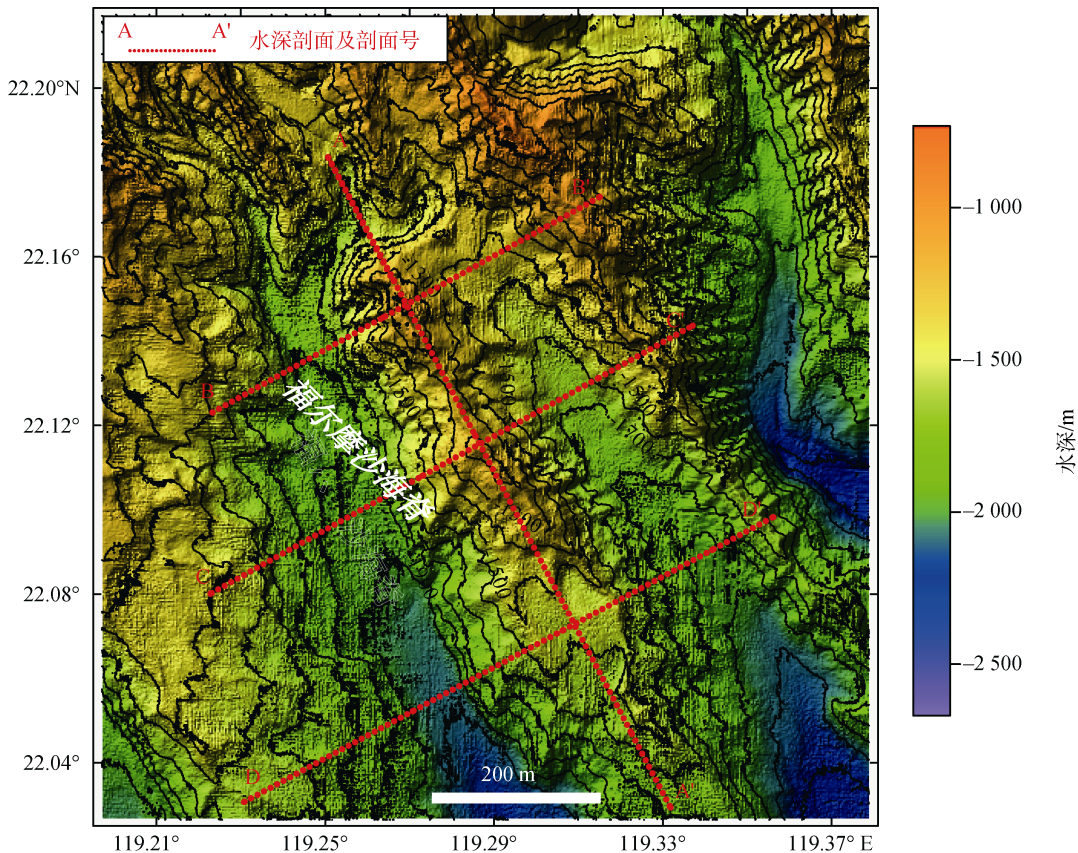


图1 福尔摩沙海脊船载多波束水深数据海底地形地貌图

Fig. 1 Seabed relief map of the Formosa Ridge created with bathymetric data collected using R/V mounted multibeam echo sounder system

2 研究方法

2014年执行“WPOS”海洋专项项目三的海上调查航次过程中,利用“科学”科考船船载的SB-3012深水多波束测深系统采集了以福尔摩沙海脊为中心的 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 大范围水深数据资料。在该工区内,共布测线10条,单条测线间距 $3\ 000\text{ m}$,船速约为 6 kn ,以保证实现水深数据的全覆盖。数据采集结束后,利用Caris软件对原始数据进行参数校正和计算,剔除噪声和干扰数据,最终获得研究区 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的全覆盖水深数据。经Surfer软件成图,用以揭示福尔摩沙海脊的地形地貌特征。

2015年,在执行同一项目支持的海上调查航次中,使用搭载于“发现”ROV的R2-Sonic 2024多波束测深系统对2014年观测的海底冷泉区($2\text{ km} \times 2\text{ km}$)进行了高精度水深测量。在数据采集过程中,“发现”ROV以 0.8 kn 的速度进行定高飞行,据海底高度约为 15 m 。ROV的水下定位采用长基线声学定位系统,有效精度可达亚米级别。原始数据经处理后,最终获得以冷泉区为中心约 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 范围的高精度水深数据并用Surfer软件成图,以揭示福尔摩沙海脊冷泉系统的海底地形地貌特征。

在执行2014年、2015年和2016年“WPOS”海洋专项项目三海上调查航次过程中,“发现”ROV在冷泉区进行了多次下潜并获得了丰富的原位数据和影像资料。选取其中以走航观测为主的ROV下潜视频资料,识别和统计所观测到的自生碳酸盐岩、生物群落、底质类型、气泡流等海底信息,以分析该冷泉系统的海底表征的形式和特点。

3 结果

3.1 福尔摩沙海脊地形地貌特征

根据利用船载多波束水深数据所成的海底地形图和近于平行海脊的地形剖面可以看出(图1,图2 AA'剖面),整体而言,福尔摩沙海脊在N、W、E三侧由海底峡谷环绕,使之呈现为近于独立的正地形。福尔摩沙海脊发育北、南两个脊顶,间隔约 2 km ,北、南脊顶水深分别约为 $1\ 100\text{ m}$ 和 $1\ 125\text{ m}$,海底地形整体由N向S倾斜。在近于垂直脊线的地形剖面上(图1,图2),海脊和峡谷大致沿NNW-SSE平行相间排列,组合呈现出“W”状地形特征。海脊脊顶和周围峡谷谷底之间高差在 $300\sim 850\text{ m}$,由NW向SE,高差有先增大后减小的趋势。在垂直脊线的同一

剖面上,SW侧高差大于NE侧高差,最大高差出现于南侧脊顶与其SW侧峡谷谷底之间,约为 850 m 。海脊宽度在南侧脊顶以北基本保持一致,约为 5 km ,而在其南侧则呈现逐渐变大再变小的趋势,最宽处约为 7 km (图2 DD'剖面)。海脊两翼坡度相近并较陡,总体而言两翼坡角均大于 10° ,并且西南翼坡度大于东北翼坡度。沿海脊由NW向SE,两翼坡度逐渐变大,在DD'剖面上,西南翼坡度可达 34° 。海脊两翼有次级峡谷零星发育,主要集中于北侧脊顶西侧以及南侧脊顶东侧。次级峡谷分别在两翼坡脚汇入海底峡谷,在谷口未见明显海底扇堆积,推测这些次级峡谷运输的沉积物由流经主要海底峡谷的浊流或底流携带走。

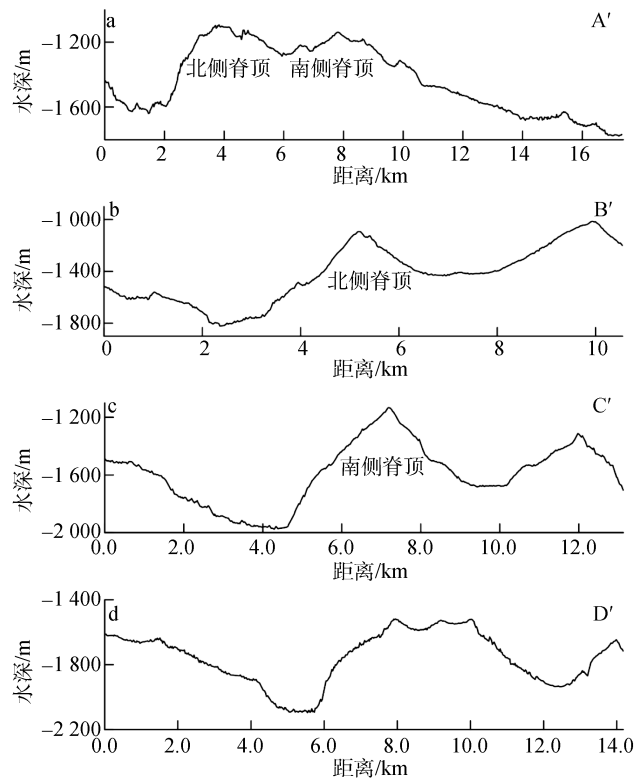


图2 船载多波束水深数据剖面图

Fig. 2 Topographic profiles of the Formosa Ridge created with the data collected using an R/V mounted multi-beam echo sounder system

福尔摩沙海脊冷泉系统发育于海脊南侧脊顶处,根据ROV近海底水深数据所成重点调查区海底地形图(图3a, b)可以看出,福尔摩沙海脊南侧脊顶最高处水深约为 $1\ 125\text{ m}$,在水深 $1\ 140\text{ m}$ 以上区域等高线近于圆形闭合,直径约为 80 m ,表现为发育在海脊上高度为 25 m 的丘状正地形,坡降约为 $0.2\sim 0.5$,坡度较

陡。根据脊顶三维地形图(图3b)、地貌晕渲图(图3c)和典型剖面图(图3d)可以看出,福尔摩沙海脊南侧脊顶处存在地形异常区,区内离散分布有多个规模较小、高度可达4 m的丘状或脊状正地形。该地形异常区NS约95 m,WE约85 m,呈现为不规则长圆形(图3b和c中红色虚线圈定范围)。根据所处位置和水深范围,可将其分为脊顶地形异常区和北侧斜坡地形异常区

两部分,前者大致为1 140 m等深线所圈定区域,后者则呈舌状向坡下延伸,水深范围约在1 140~1 165 m。在脊顶地形异常区内,其中心丘状地形直径约为22 m,高度约为4 m,W,S,E三侧由高度较小正地形围绕。在脊顶北侧斜坡处异常地形区内,最显著丘状地形直径约为12 m,高度约为3.5 m。整体而言,脊顶异常区地形更复杂,微地形更发育。

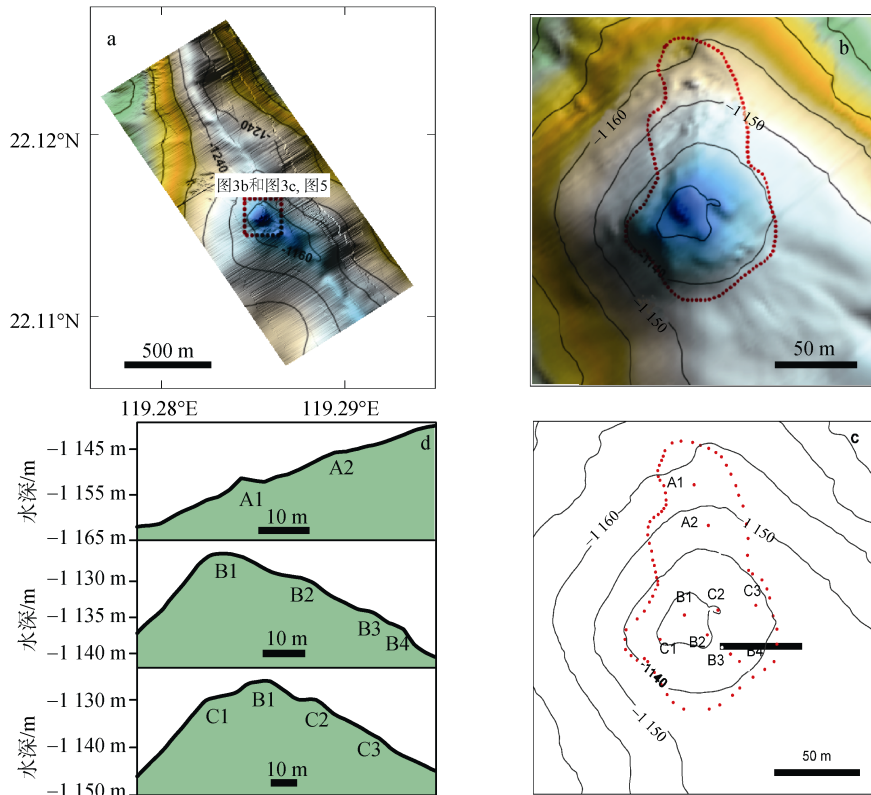


图3 ROV搭载水下近海底多波束数据海底地形地貌图

Fig. 3 Seabed relief map and bathymetric profiles created with bathymetric data collected using an ROV-mounted multibeam echo sounder system

3.2 福尔摩沙海脊冷泉区ROV影像资料分析

基于对冷泉区海底地形地貌数据和ROV近海底高清影像资料的分析与统计,福尔摩沙海脊冷泉区NS向长约95 m,WE向长约85 m,呈现为不规则长圆形(图3b,c)。区内全部有自生碳酸盐岩出露,该冷泉系统整体表现为局部被化能自养生物群落覆盖并有流体喷口零星分布的巨大自生碳酸盐岩岩丘,其海底表征主要包括形态各异的自生碳酸盐岩,典型的化能自养生物群落,冷泉喷口和还原性沉积物等几种形式。

自生碳酸盐岩:该冷泉系统广泛发育了多种形态的自生碳酸盐岩,主要包括自生碳酸盐岩硬底,自生碳酸盐岩混杂堆积以及可观察到流体通道的枝杈状自生碳酸盐岩等几种类型。自生碳酸盐岩硬底

是指在出露于海底或者被薄层沉积物覆盖的上表面平坦的自生碳酸盐岩结壳,在垂直于海底的剖面上常发育有层状结构(图4a,b)。这些硬底状自生碳酸盐岩常被裂隙或者断裂切割,断裂间距和切割深度可达数米,进而形成巨大的自生碳酸盐块体(图4b),并且常见生物群落沿裂隙或断裂发育。自生碳酸盐岩混杂堆积主要表现为外形不规则的原位出露或滚落的自生碳酸盐岩岩块在海底杂乱分布,其上常有海绵等虑食性底栖生物发育(图4c)。具有流体通道的自生碳酸盐岩常发育在较大自生碳酸盐体顶部,规模较小,单个或呈树枝状自由生长在水体中(图4d)。在对本冷泉系统边缘沉积物进行插管取样操作时发现有下伏沉积物中仍有硬底结构的发育。

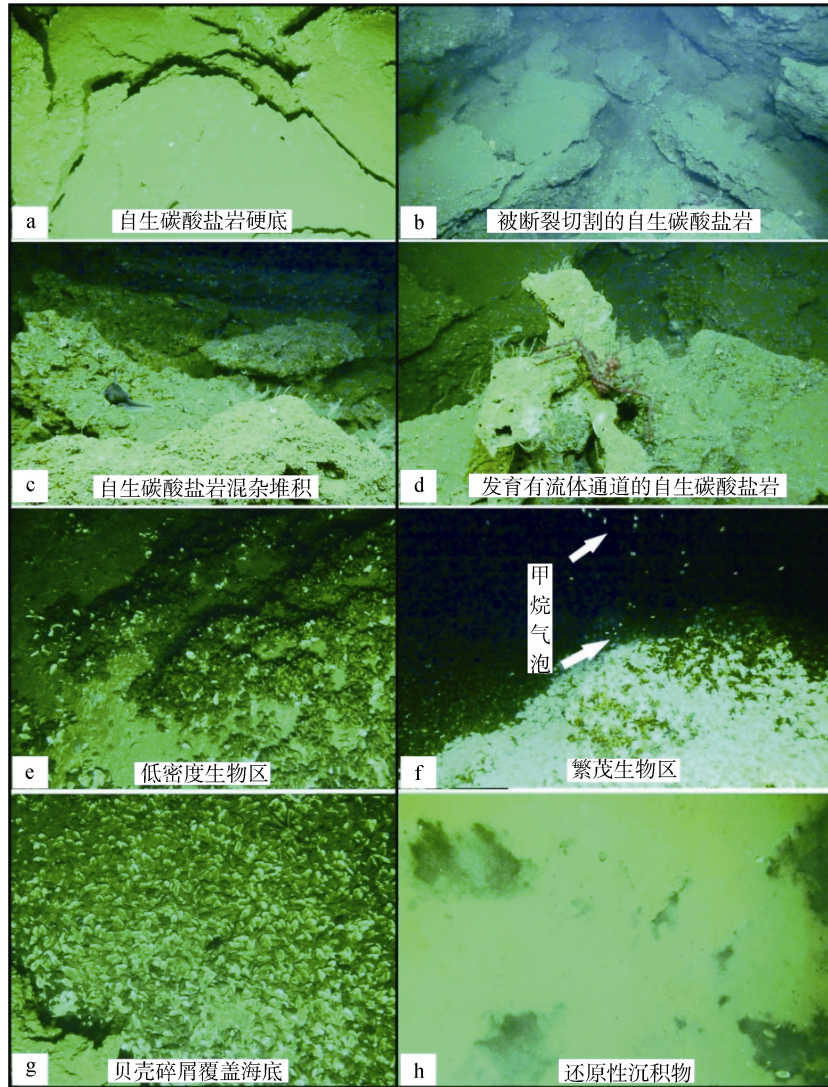


图 4 福尔摩沙海脊冷泉系统主要海底表征

Fig. 4 Surficial expressions of the cold seep system located on the south summit of the Formosa Ridge

化能自养生物群落: 该冷泉系统生物群落以大型底栖类生物白色柯氏潜铠虾和深棕色贻贝为主, 并包括阿尔文虾、帽贝、海绵、珊瑚、海葵、多毛类多种等生物类型。根据单位面积内贻贝个体密度, 可以将贻贝群落分为离散型和密集型两类。前者是指贻贝或由少数贻贝组成的贻贝群零星分散于自生碳酸盐岩表面, 单位面积内贻贝密度较小的区域(图 4e)。后者是指贻贝密集分布, 个体间几乎不存在间距甚至成层分布, 即单位面积内贻贝密度大的区域(图 4f)。柯氏潜铠虾主要呈现密集分布, 即个体众多的潜铠虾聚集在一起, 形成不同规模的集群, 独立或成片叠加分布在贻贝密集分布区(图 4f)。除了依然活跃的生物群落之外, 部分区域被大量保存完整的

贝壳或贝壳碎屑覆盖(图 4g)。值得注意的是, 与其他冷泉系统相比, 在福尔摩沙海脊冷泉系统的生物群落中并未发现管状蠕虫的广泛发育。

冷泉喷口, 即冷泉流体中的 CH_4 以气泡形式大量逸出海底的位置, 逸出的气泡可形成易观测的气泡流(图 4f)。经过 2014—2016 年 3 年的连续观测, 在该冷泉区观测到多次气泡流现象, 并标定了多个冷泉喷口。同时还发现, 气泡流并不是长期存在的, 换言之冷泉喷口具有周期性或者间歇性的活动特征。

还原性沉积物, 由于沉积物中含有 H_2S 等还原性产物, 还原性沉积物颜色一般呈现为黑色(图 4h)并且含有强烈的 H_2S 气味。在本流体系统中, 还原性沉积物发育于系统边缘地区。

4 讨论

4.1 冷泉区近海底高精度多波束测量的必要性分析

对比图 5 中两图可以发现, 由于船载多波束水深数据有效数据点过少而使其成图所展示的地形地貌特征过于粗略, 远不能满足对冷泉区海底地形地貌特征研究的需求。而近海底多波束水深系统所获得的大量有效数据, 则可以细节性地展示冷泉区的海底地形地貌特征, 能为冷泉系统海底表征的研究

提供重要的背景资料, 满足了科研和后续近海底原位调查的需求。因此, 对深海冷泉研究而言, 利用近海底多波束水深系统对冷泉区进行高精度水深测量是必不可少的基础调查。需要指出的是, 近海底多波束系统需搭载于 ROV 或 AUV 等深潜器上, 要保证其安全高效作业, 合理布设测线和设置相关参数, 则需以船载多波束系统获得的大范围水深数据为参考。因此, 在深海区域, 只有将两种多波束水深探测系统有效结合起来, 才能满足海上大面和重点调查工作的要求。

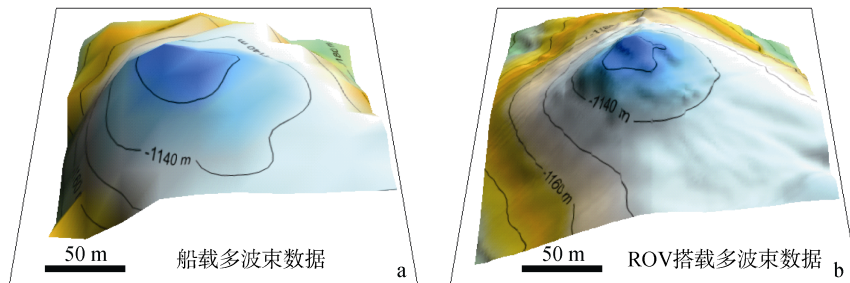


图 5 船载水深数据(a)与 ROV 近海底水深数据对比(b)

Fig. 5 Seabed relief maps of the cold seep site created with bathymetric data collected using both R/V- and ROV-mounted multibeam echo sounder systems

4.2 福尔摩沙海脊冷泉系统的海底表征与海底地形地貌之间的响应

冷泉系统的海底表征, 如裸露的自生碳酸盐岩丘和结壳、化能自养生物群落以及流体逸出海底所形成的麻坑、泥火山等, 能够有效的改变和复杂化其发育区的海底地形地貌特征^[3, 21-23]。

区内出露的巨大自生碳酸盐岩丘是脊顶海底松散沉积物逐渐被侵蚀, 抗风化能力强的自生碳酸盐岩暴露于海底的结果^[24-25], 与异常地形区内的丘状或脊状正地形具有良好的对应关系。在该自生碳酸盐岩岩丘边界进行沉积物插管取样操作时, 发现浅表层沉积物下伏有硬底结构, 表明该冷泉系统自生碳酸盐岩岩丘的整体规模可能要远大于出露于海底的岩丘规模。具有层状结构的自生碳酸盐是该区自生碳酸盐岩的重要形态特征之一, 是海底浅表层层状沉积物被自生碳酸盐胶结的表现。在这种自生碳酸盐结构中, 还可观察到层位缺失的现象, 即相应层位的松散沉积物被底流侵蚀, 表明了冷泉流体活动的间断性或周期性。在自生碳酸盐岩结壳或者硬底上, 常发育有裂隙或者断裂, 两侧位移距离从零到数米, 并且常见生物沿断裂或裂隙分布, 表明这些断裂或裂隙可以作为了冷泉流体运移的良好

通道。这种裂隙或断裂可能有以下成因: 一种是外力作用, 即自生碳酸盐岩在重力作用下, 断落于下伏岩层, 该断裂常发育在有层位间断的层状自生碳酸盐岩结构中, 并且一般规模较小, 形状不规则, 常在垂直方向上有一定位移。另一种则是内力作用, 即自生碳酸盐岩在形成过程中, 因为被胶结沉积物体积变大, 上覆先形成的自生碳酸盐层在下伏新成自生碳酸盐体积膨胀的作用下, 形成裂隙或者断裂。这种断裂或裂隙的形成成为海底流体向上运移提供了优选通道, 换言之, 这些通道的形成对海底流体起到了汇聚和导向作用, 进而影响到生物群落的分布。

密集型贻贝群落位于脊顶东侧和南侧, 主要发育在脊顶两侧的断裂凹陷中, 表明该处有大量冷泉流体溢出以支持该生物繁茂区的生命活动。相对于固着在自生碳酸盐岩岩体表面的贻贝群落而言, 柯氏潜铠虾迁移的灵活性使其对甲烷浓度具有更灵敏的响应^[26], 主要体现为个体众多的潜铠虾集中分布在冷泉流体活跃区域, 因此在近海底原位观测时, 可将潜铠虾集中区标定为寻找冷泉喷口的重点区域。除了生物活跃区外, 自生碳酸盐断裂的底部常被大量贝壳覆盖。这些贝壳壳体完整, 方向各异, 而且

贝壳大小与生物繁茂区发育贻贝接近,推测这些地区流体活动停止不久。而某些位于自生碳酸盐岩体顶部并由流体通道发育的枝杈状自生碳酸盐则表明相应区域冷泉流体活动已经结束了较长时间。这些区域内流体活动的停止,可能原因有以下两种或是二者共同作用的结果:冷泉系统的整体萎缩,即向上运移的冷泉流体量减小,不足以支持包含消亡区域的生物群落;冷泉流体通道的转移,即由于自生碳酸盐岩的自我封闭效应,原始活跃的冷泉通道被堵塞,导致了冷泉流体向上运移主通道和溢出海底位置的迁移,进而导致了原来喷口处生物群落的消亡。

还原性沉积物主要分布于该冷泉系统边缘地区,表明这些地区有富 CH_4 流体向海底运移,并在 CH_4 厌氧氧化细菌和硫酸盐还原菌的作用下与浅表层沉积物孔隙水中 SO_4^{2-} 发生反应,形成 H_2S 等还原性物质,使得沉积物呈现为黑色并具有强烈的 H_2S 气味。结合福尔摩沙海脊海底地形地貌特征与自生碳酸盐自我封闭效应,形成还原性沉积物的流体主要有以下两种运移路径:一种是沿主通道向上运移的流体遇上覆连续自生碳酸盐岩体阻碍而使得部分流体改变运移方向开始横向运移,并在自生碳酸盐体边界溢出海底;另一种则是与出露于海底的自生碳酸盐岩层相似,沉积物下伏自生碳酸盐结壳上也发育裂隙或断裂构造,向上运移的流体沿这些裂隙或断裂构造溢出海底。简言之,冷泉流体在自生碳酸盐岩体上溢出则形成喷口,在被沉积物覆盖的海底溢出,则形成还原性沉积物。

值得注意的是,福尔摩沙海脊冷泉系统并未发现管状蠕虫的大量发育。管状蠕虫底栖于硬底之上,并以 H_2S 为主要能量来源,管状蠕虫的鳃状羽可以获取水体中的 H_2S ,而其根部可以深入到硬底之下的沉积中获得 H_2S ^[7]。冷泉区水体中 H_2S 浓度较低,所以一般认为冷泉区发育的管状蠕虫其 H_2S 主要来源于下伏沉积物。本冷泉系统缺乏管状蠕虫的发育,其原因很可能是因为自生碳酸盐岩厚度太大,在阻碍流体向上运移的同时使得管状蠕虫根部无法到达沉积物并摄取其中的 H_2S 。本冷泉区的生物群落和贝壳堆积都覆于自生碳酸盐岩硬底之上,这些表征的出现并没有改变其下伏自生碳酸盐岩的形态特征,而其海底形态则直接反映了其下伏自生碳酸盐岩硬底的形态特征。还原性沉积物则并未表现出异常的地形地貌特征。因此整体而言,冷泉区的地形地貌特征主要受控于自生碳酸盐岩的发育和演化。

5 结论

我们利用船载和水下多波束测深系统分别获得了包含福尔摩沙海脊冷泉系统在内的较大范围和重点调查区的水深数据并进行了对比。结果表明,近海底高分辨率水深数据能够精确的展示冷泉区海底地形地貌特征,是冷泉研究必不可少的基础资料。对深海区域海底地形地貌的调查,需将船载和水下近海底多波束测深系统有效结合起来,才能获得不同尺度和精度的有效数据,满足科研或后续调查的资料需求。综合分析近海底多波束数据和 ROV 近海底影像资料可知,福尔摩沙海脊冷泉系统的海底表征主要包括形态各异的自生碳酸盐岩体或结壳,化能自养生物群落,气泡流和还原性沉积物等几种类型,而冷泉区的地形地貌特征主要受控于自生碳酸盐岩的发育和演化。与其他海区冷泉系统相比,福尔摩沙冷泉区缺少管状蠕虫的发育,结合冷泉区海底地形地貌特点和海底表征,推测其与该冷泉系统发育有巨厚的自生碳酸盐岩层有关。

参考文献:

- [1] Feng Dong, Chen Duofu. Authigenic carbonates from an active cold seep of the northern South China Sea: New insights into fluid sources and past seepage activity[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 74-83.
- [2] Klauke I, Weinrebe W, Petersen C J, et al. Temporal variability of gas seeps offshore New Zealand: Multi-frequency geoacoustic imaging of the Wairarapa area, Hikurangi margin[J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1): 49-58.
- [3] Judd A, Hovland M. Seabed Fluid Flow: the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [4] Treude T, Niggemann J, Kallmeyer J, et al. Anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction along the Chilean continental margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2767-2779.
- [5] Roberts H H, Feng Dong, Joye S B. Cold-seep carbonates of the middle and lower continental slope, northern Gulf of Mexico[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(21): 2040-2054.
- [6] FiShER C, Roberts H, Cordes E, et al. Cold seeps and associated communities of the Gulf of Mexico[J]. *Oceanography*, 2007, 20(4): 118-129.
- [7] Joye S B, Boetius A, Orcutt B N, et al. The anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps[J]. *Chemical Geology*,

- 2004, 205(3): 219-238.
- [8] Dumke I, Klaucke I, Berndt C, et al. Sidescan backscatter variations of cold seeps on the Hikurangi Margin (New Zealand): Indications for different stages in seep development[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34(2-3): 169-184.
- [9] Suess E. Marine cold seeps[C]//Timmis K N. *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Heidelberg: Springer, 2010: 185-203.
- [10] Linke P, Suess E, Torres M, et al. In situ measurement of fluid flow from cold seeps at active continental margins[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1994, 41(4): 721-739.
- [11] Talukder A R. Review of submarine cold seep plumbing systems: Leakage to seepage and venting[J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 255-272.
- [12] Zhang Xin, Du Zengfeng, Luan Zhendong, et al. In situ Raman detection of gas hydrates exposed on the seafloor of the South China Sea[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(10): 3700-3713.
- [13] Han Xiqiu, Yang Kehong, Huang Yongyang. Origin and nature of cold seep in northeastern Dongsha area, South China Sea: Evidence from chimney-like seep carbonates[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3689-3697.
- [14] Tong Hongpeng, Feng Dong, Cheng Hai, et al. Authigenic carbonates from seeps on the northern continental slope of the South China Sea: new insights into fluid sources and geochronology[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 260-271.
- [15] Ge Lei, Jiang Shaoyong, Swennen R, et al. Chemical environment of cold seep carbonate formation on the northern continental slope of South China Sea: Evidence from trace and rare earth element geochemistry[J]. *Marine Geology*, 2010, 277(1): 21-30.
- [16] Chen Duofu, Huang Yongyang, Yuan Xunlai, et al. Seep carbonates and preserved methane oxidizing archaea and sulfate reducing bacteria fossils suggest recent gas venting on the seafloor in the Northeastern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(5): 613-621.
- [17] Tsai Y, Chi Wucheng, Liu C, et al. Two-dimensional heat transfer modeling of the Formosa Ridge offshore SW Taiwan: Implication for fluid migrating paths of a cold seep site[C]//AGU. *AGU Fall Meeting Abstracts*. San Francisco Marriott Marquis: American Geophysical Union, 2011, 1: 1542.
- [18] Hsu Hohan, Liu Charshine, Morita S, et al. Seismic imaging of the Formosa Ridge cold seep site offshore of southwestern Taiwan[J]. *Marine Geophysical Research*, 2017 (Supplement 1): 1-13.
- [19] Feng Dong, Cheng Ming, Kiel S, et al. Using Bathymodiolus tissue stable carbon, nitrogen and sulfur isotopes to infer biogeochemical process at a cold seep in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 104: 52-59.
- [20] Chen Liwen, Chi Wucheng, Wu Shaokai, et al. Two dimensional fluid flow models at two gas hydrate sites offshore southwestern Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 245-253.
- [21] Dupré S, Woodside J, Klaucke I, et al. Widespread active seepage activity on the Nile Deep Sea Fan (offshore Egypt) revealed by high-definition geophysical imagery[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1): 1-19.
- [22] Bayrakci G, Scalabrin C, Dupré S, et al. Acoustic monitoring of gas emissions from the seafloor. Part II: A case study from the Sea of Marmara[J]. *Marine Geophysical Research*, 2014, 35(3): 211-229.
- [23] Sahling H, Blum M R, Borowski C, et al. Seafloor observations at Campeche Knolls, southern Gulf of Mexico: coexistence of asphalt deposits, oil seepage, and gas venting[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13: 4491-4512.
- [24] Peckmann J, Reimer A, Luth U, et al. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea[J]. *Marine Geology*, 2001, 177(1): 129-150.
- [25] Naehr T H, Eichhubl P, Orphan V J, et al. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: a comparative study[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(11): 1268-1291.
- [26] Tsuchida S, Suzuki Y, Fujiwara Y, et al. Epibiotic association between filamentous bacteria and the vent-associated galatheid crab, *Shinkaia crosnieri* (Decapoda: Anomura)[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2011, 91(1): 23-32.

Topographic and geomorphological features of the Formosa Ridge cold seep system, the Southwestern Taiwan Island

WANG Bing^{1,2}, LUAN Zhen-dong^{1,3,4}, ZHANG Xin^{1,3,4}, XI Shi-chuan^{1,2}, LI Lian-fu^{1,2}, LIAN Chao³, YAN Jun¹, CHEN Chang-an¹

(1. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center of Deep Sea Research, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory for Marine Geology and Environment, pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266061, China)

Received: Nov. 20, 2017

Key words: cold seeps; the Formosa Ridge; seabed surficial expressions; seabed topographic and geomorphological features

Abstract: The south summit of the Formosa Ridge, located in the Southwestern Taiwan Island, is one of the most active cold seep sites observed around the passive South China Sea continental margin. Based on bathymetric data obtained from both R/V-and ROV-mounted multibeam echo sounder systems and video and image data recorded by ROV, the topographic and geomorphological features of the cold seep site and the seabed surficial expressions of the cold seep system are described and analyzed. It has been shown that, compared with that of the cold seep site collected by the R/V mounted multi-beam system, bathymetric data acquired with a near seabed ROV-mounted multibeam echo sounder system had a higher accuracy and resolution, and that both macro- and micromorphological features of the survey site can be displayed on the relief map created with it. According to the video and image data collected by ROV, the Formosa Ridge cold system is characterized by a huge authigenic carbonate mound with flourishing chemoautotrophic communities and sporadic seep vents. The seabed surficial expression of this cold seep system mainly include authigenic carbonate structures with various morphological features, chemoautotrophic communities, sporadic seep vents, and reductive sediments, all of which correlate well with the seabed topographical and geomorphological characteristics.

(本文编辑: 刘珊珊)