

文章编号:1009-2722(2018)06-0001-07

# 福尔摩沙海脊冷泉区海底 表征规模及其分布规律

王 冰<sup>1,2</sup>, 栾振东<sup>1</sup>, 张 鑫<sup>1,2,3</sup>, 杜增丰<sup>1</sup>, 席世川<sup>1,2</sup>, 李连福<sup>1,2</sup>, 连 超<sup>1</sup>, 梁政委<sup>1,2</sup>, 阎 军<sup>1</sup>

(1 中国科学院海洋研究所地质室海洋地质与环境重点实验室, 深海极端环境与生命研究中心, 青岛 266071;

2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 青岛海洋科学与技术国家实验室, 青岛 266061)

**摘 要:**福尔摩沙海脊冷泉系统是我国南海北部陆坡最活跃的冷泉系统之一,也是我国冷泉系统研究的重要场所。通过综合利用水深数据以及连续 3 年的近海底影像资料,对该冷泉区的海底表征表现形式、规模和分布特征等做了描述。该冷泉系统发育了形态各异的自生碳酸盐岩、繁茂的化能自养生物群落、活动的流体喷口等特征性的海底冷泉系统表征。分析表明,自生碳酸盐岩的广泛发育与出露于海底导致了该区异常的地形特征。研究区内生物群落的分布主要受控于海底流体逸出海底的位置及其活跃程度,因此主要沿裂隙等海底流体优势通道发育。这些优势通道的发育能够有效疏导和汇聚露体运移至海底以维持化能自养生物群落,而化能自养生物群落对甲烷等有效成分的消耗促进了海底流体向海底运移。简言之,冷泉系统的海底表征是海底流体的重要产物,而海底表征亦可反作用于海底流体,主要影响其运移路径和有效通量。

**关键词:**海底冷泉;海底流体;自生碳酸盐;化能自养生物群落

中图分类号:P737.27

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.06001

海底冷泉主要是指富含甲烷的流体逸出或喷出海底所形成的流体系统<sup>[1,2]</sup>,是继海底热液流体系统之后的又一重大发现。将其命名为冷泉,主要是因为与热液系统相比,冷泉系统流体温度仅稍高于或与其周围海水一致。冷泉系统是海底流体系统的重要组成部分,是地球浅部圈层物质与能量交换的重要通道,也是研究海底碳循环和极端环境生命活动的重要场所。因此,自 20 世纪 80 年代首次发现以来,海底冷泉系统就一直是海洋地质和生物研究的热点<sup>[3]</sup>。随着海洋调查技术手段的提升,特别是搭载多种声学调查设备和

传感器的深潜器在近海底调查中的广泛应用,以及调查范围的扩大和海底冷泉系统有效识别信息的积累,经过四十多年的调查与研究,人们已经在世界众多海域都发现了海底冷泉系统的存在,并且对其空间组成、流体组分、化学过程、海底表征的形成和演化过程等都有了较为深入的认识。已有研究成果表明,发育成熟的海底冷泉系统主要包括海底下伏流体藏,海底表征以及连接二者的流体通道体系三部分<sup>[4]</sup>。冷泉流体主要由孔隙水、甲烷以及可能存在的液化细粒沉积物等物质组成,并含有少量的硫化氢、二氧化碳等组分。其中流体中的甲烷组分主要有两种来源,形成于浅部地层的生物成因气和形成于深部地层并运移至海底的热降解气,也可能是两种成因气体的混合。冷泉系统的海底表征主要包括自生碳酸盐岩结壳、化能自养生物群落、还原性沉积物、气泡流除,

收稿日期:2018-03-03

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

作者简介:王 冰(1987—),女,在读博士,主要从事海底流体研究工作. E-mail:includeint@126.com

以及近海底水体甲烷浓度高异常等表现形式。富甲烷流体在浮力和/或压力作用下沿断层、构造斜面等优势通道由下伏地层向海底运移的过程中,在微生物的作用下发生冷泉系统的基础化学反应,即甲烷厌氧氧化与硫酸根还原反应<sup>[5,6]</sup>,可简单表述为:



这一化学过程会增加孔隙水中碳酸氢根的浓度和碱度,进而有利于自生碳酸盐的析出,形成形态各异的自生碳酸盐岩。除流体本身所携带甲烷之外,该反应所形成的  $\text{H}_2\text{S}$  等产物也是维持冷泉系统海底化能自养生物群落的重要能源物质。冷泉系统的海底表征及其分布规律忠实地记录和反应了海底流体系统的发育过程和现阶段活动特点<sup>[7,8]</sup>,因此,分析和识别冷泉系统的海底表征是综合研究冷泉系统的重要前提。

我国目前所发现的海底冷泉主要集中于中国南海北部,包括2个流体活动依然非常活跃的冷泉系统,一个发现于2007年<sup>[9]</sup>,位于台湾西南海域福尔摩沙海脊上的冷泉系统;另一个发现于2015年<sup>[10]</sup>,位于琼东南海域的“海马”冷泉系统。由于中国科学院战略性先导科技专项(A类)“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响(WPOS)”项目的海上调查始于2014年,综合当时已有研究内容和现实条件,福尔摩沙海脊冷泉系统被定为WPOS专项海上调查的代表性海区之一。经过2014—2016年连续3年的近海底调查,获得了覆盖整个福尔摩沙冷泉区的较高精度水深资料和大量影像资料。基于这些资料,初步识别和描述了福尔摩沙海脊冷泉区海底表征,并首次统计了海底表征的规模及分布规律,进而讨论了该冷泉系统的与流体之间的相互作用。

## 1 调查区地质背景

福尔摩沙海脊位于台湾西南海域,构造上属于被动大陆边缘和台湾西南变形带前缘<sup>[11,12]</sup>。该海脊脊线为NW—SE走向,纵向长约30 km,横向最宽处约为5 km,两翼坡度较陡,最大可超过30°。福尔摩沙海脊发育有南北2个脊顶,整体位于海脊北部,间隔约2 km,北侧脊顶水深约为1100 m,南侧脊顶水深约为1120 m,整体地形由

北向南方向倾斜,并且逐渐向SE方向延伸。与中国南海北部陆坡其他海脊相似,该海脊是海底经重力流和底流侵蚀后所形成的典型残余正地形,而其西,北,东三侧最大深度达800 m的海底峡谷则有效控制了该海脊的形态特征和演化过程。福尔摩沙海脊特殊的沉积和构造背景,主要包括巨厚的沉积层以及断层等优势通道的广泛发育,为冷泉系统的形成提供了良好的地质条件。

本文研究的福尔摩沙海脊冷泉区位于其南侧脊顶处,区内发育有典型的冷泉系统海底表征,主要包括大规模出露的自生碳酸盐岩结壳、化能自养生物群落、气泡流等几种类型<sup>[13,14]</sup>。已有地震资料显示,在福尔摩沙海脊南侧脊顶下伏地层180~460 m深度范围内,发育有近于连续并且两侧接近对称的似海底反射层(BSR)<sup>[12,15]</sup>。该BSR仅在脊顶对应剖面处有间断,并且该间断与脊顶冷泉之间有近于垂直的信号异常带相连接,研究者将其解释为下伏流体向海底运移的通道系统。冯东等<sup>[1]</sup>通过研究该区自生碳酸盐岩地球化学特征指出,天然气水合物分解所形成的流体是本冷泉系统流体的重要组成部分。根据冷泉区的地震资料和热流数据,有研究者认为在浮力和海底化能自养生物群落消耗所形成的浓度梯度作用下,富甲烷流体和由山脊两翼补充进运移体系的底层海水沿近于垂直的优势通道向海底运移,最终到达海底,维持海底化能自养生物群落<sup>[16,17]</sup>。

## 2 研究方法

在执行WOPS专项2015年海上调查航次的过程中,利用搭载于“发现”遥控无人潜水器(ROV)的R2-Sonic深水多波束系统对福尔摩沙海脊南侧海脊区进行了近海底全覆盖式水深调查,获得了以南侧脊顶冷泉区为中心的2 km×1 km范围内较高分辨率的水深数据。在数据采集过程中,ROV以0.8 kn速度距海底约15 m进行定高飞行,水下定位采用长基线系统为主,超短基线系统为辅的定位方法,有效精度可达亚米级别。对原始数据的后处理和初步成果展示利用Caris软件进行,主要包括潮位、声速、设备姿态等参数的校正,噪声和干扰数据的剔除,以及有效数据的导出等基础操作,最终获得了水深数据的2 m栅

格化文件。进而,利用 Surfer 绘图软件将数据成图,以获得研究区较高精度的海底地形图。

除水深资料外,通过 2014—2016 年连续 3 年对冷泉区的近海底调查,笔者还获得了几乎覆盖整个冷泉系统的原位高清影像资料。综合识别和统计多个潜次的有效海底信息并结合水深数据,初步获得了福尔摩沙海脊冷泉区主要海底表征及其规模和分布规律等基础资料。

### 3 结果

#### 3.1 福尔摩沙海脊冷泉区地形特征

根据调查区水深地形图(图 1a,b)可以看出,福尔摩沙海脊南侧脊顶区水深最浅处约为

-1 125 m,该区 -1 140 m 等深线近于呈圆形闭合,即在地形上表现为山脊上直径约为 70 m,高差约为 25 m 的圆丘状凸起。根据局部放大地形图可以看出,脊顶区地形复杂,微地貌发育,在该分辨率水深地形图上主要表现为小型丘状正地形在 -1 140 m 水深线圈定区域及其北侧外坡处随机分布。

#### 3.2 福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征

“发现”ROV 在福尔摩沙海脊冷泉区进行近海底观测和取样过程中,其配备的深水超高清摄像系统清晰有效地记录了调查区的海底信息。通过对这些影像资料的分析 and 识别可以看出,该冷泉系统的海底表征主要包括自生碳酸盐岩、生物化能自养生物群落、冷泉喷口处的气泡流等几种类型。

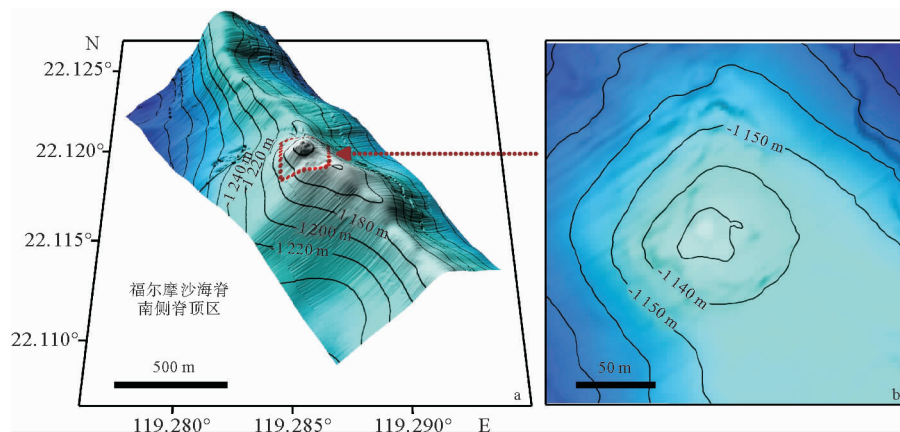


图 1 福尔摩沙海脊南侧脊顶区海底地形图

Fig. 1 Topographic map of the south summit of the Formosa Ridge

形态各异的自生碳酸盐岩是该冷泉系统最显著的海底表征之一,主要包括上表面平坦并且在横断面处常可观察到层理结构的硬底状的自生碳酸盐岩(图 2a,c),形态不规则并且较难观察到层理结构的自生碳酸盐岩(图 2b)以及多见于以上两类自生碳酸盐岩顶部的规模较小并发育有管状流体通道的自生碳酸盐岩(图 2c)。其中前 2 种自生碳酸盐岩常被断裂或裂隙切割,裂隙间距和深度都可达数米。

化能自养生物群落是该冷泉系统另一个显著的海底表征(图 2d—f)。该冷泉系统的生物群落以大型生物白色的柯氏潜铠虾和深棕色贻贝为主,并包括多毛类、帽贝、藤壶、海葵、海绵、蜘蛛蟹

等多种生物类型。贻贝底栖于自生碳酸盐岩之上,根据底栖贻贝的个体密度,可以将贻贝群落分为离散型和密集型 2 类,前者主要表现为贻贝密度较小,贻贝零星或小簇底栖于自生碳酸盐岩表面(图 2d);后者则是贻贝密度大,个体间几乎没有海底外露,甚至有贻贝直接附着于下层贻贝壳之上(图 2e,f)。白色的潜铠虾主要表现为聚集在一起形成个体数目众多的潜铠虾群,独立或成片叠加分布在贻贝密集区上部(图 2e,f),也有少部分潜铠虾个体零星分布于生物群落其他位置。需要指出的是,该冷泉系统的化能自养生物群落未见蛤,管状蠕虫等广泛发育于其他冷泉生物群落的特征性生物。

主要成分为甲烷的气泡自活动的冷泉喷口逸出,形成气泡流是该冷泉系统另一海底表征(图2f)。经过连续3年的近海底观测,在该冷泉区发

现了多个有气泡喷出的活动流体喷口(图3)。同时还发现,这些流体喷口并不是一直处于活动状态,而是体现出间歇性或瞬时性的特点。

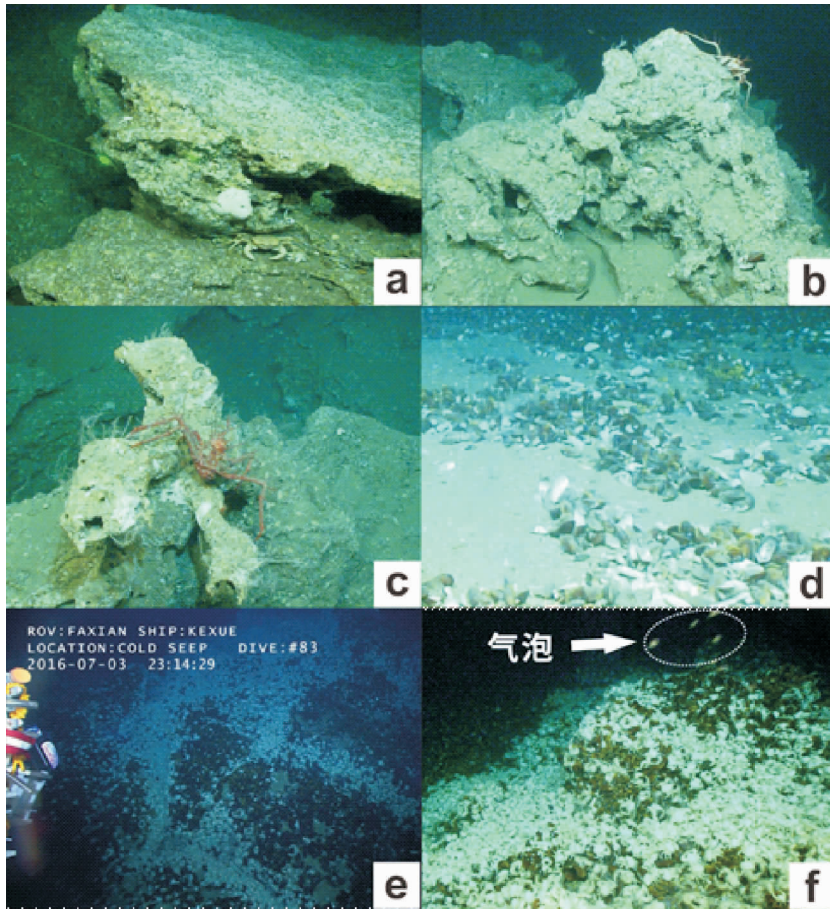


图2 福尔摩沙海脊冷泉区主要海底表征

Fig. 2 Surficial features of the Formosa Ridge cold seep site

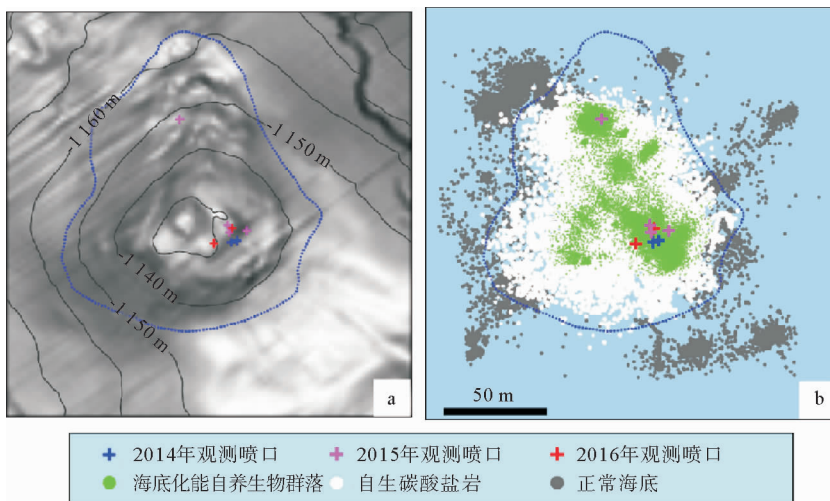


图3 福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征规模及分布特征

Fig. 3 Scales and distribution patterns of the surficial features of the Formosa Ridge cold seep site



### 3.3 福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征规模及分布

综合分析和统计连续 3 年的近海底影像资料,并结合水深地形资料,笔者初步获得了福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征的规模和分布信息(图 3)。总体而言,福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征整体表现为局部被化能自养生物群落覆盖的巨大自生碳酸盐岩丘,并伴有活动流体喷口分布于生物群落之间。

通过识别和统计视频资料中海底自生碳酸盐岩的位置信息可知,自生碳酸盐岩在该冷泉区广泛并且连续发育,形成巨大的自生碳酸盐岩基底。对比图 3a、b 可以看出,自生碳酸盐岩分布区与相应微地貌发育的复杂地形区具有良好的对应关系。因而可以推测,虽缺乏海底影像资料证实,脊顶北坡处复杂的微地貌特征亦是形态各异自生碳酸盐岩出露的结果。综合脊顶地形异常区和已有自生碳酸盐岩分布信息,可以得出,该冷泉系统自生碳酸盐岩范围大致为图中蓝色虚线标定区域,其南北长约 145 m,东西长约 120 m,面积约为 9 500 m<sup>2</sup>,S—N 向水深剖面上呈现出北低南高丘状形态特征。

根据已有近海底影像资料,该冷泉系统以贻贝和潜铠虾为主的化能自养生物群落全部位于巨大的自生碳酸盐岩基底上,主要包括南北 2 个较大生物区以及大致沿 NE—SW 向排列的多个较小生物区。生物区总面积约为 2 000 m<sup>2</sup>,其中最大生物区位于脊顶南东侧,总面积约为 800 m<sup>2</sup>,较小生物区位于脊顶北侧坡处,面积约为 300 m<sup>2</sup>,另有较小生物区在两较大生物区之间大致沿 NE—SW 向分布。位于冷泉区 SE 侧的最大生物区,地形复杂,生物量巨大,其中心区域的自生碳酸盐岩几乎全被密集型贻贝群覆盖,上覆有数量巨大的潜铠虾群并主要沿自生碳酸盐沿巨大裂隙或凹陷分布(图 2e),特征明显。观测到的流体喷口全都位于 2 个较大生物区内,并且潜铠虾群具有良好的对应关系。

## 4 讨论

### 4.1 福尔摩沙海脊南侧脊顶地形异常区与海底自生碳酸盐岩之间的对应关系

有研究认为,自生碳酸盐岩形成于海底浅表

层,其出露于海底是其上覆尚未固结沉积物被剥蚀的结果<sup>[18,19]</sup>。该冷泉系统自生碳酸盐岩整体表现为巨大的自生碳酸盐岩丘,并且发育有深度和宽度可达数米的裂隙。这些裂隙对自生碳酸盐岩丘进行切割,形成巨大的自生碳酸盐岩岩体,进而表现为异常的海底地形地貌特征。部分裂隙及其周围自生碳酸盐岩岩体会覆盖有生物量巨大的化能自养生物群落,然而贻贝群和潜铠虾群的出现并没有明显改变自生碳酸盐岩和裂隙的主要特征,换言之,生物区海底地形特征体现了下伏自生碳酸盐岩硬底形态特征。总体而言,自生碳酸盐岩丘及其裂隙的形成和演化,整体上控制了南侧脊顶冷泉区的地形特征。

根据局部形态特征,该冷泉系统的海底自生碳酸盐岩主要包括自生碳酸盐岩硬底、形态不规则的自生碳酸盐岩结构以及发育有流体通道的自生碳酸盐岩等几种形态特征。自生碳酸盐岩的原生形态特征忠实地记录了其形成时期相应位置冷泉流体的活动状态。如上表面平坦并且下伏岩体中层理结构明显的硬底结构表明,冷泉活动的周期性及其流体倾向于沿沉积层理运移并胶结沉积物的活动特征,而形态不规则的自生碳酸盐岩则是流体倾向于沿优势通道向海底运行并胶结沉积物的活动过程。这两种形态的自生碳酸盐岩岩体亦常被深度和宽度可达数米的裂隙切割。这些形态各异的自生碳酸盐岩的出露和演化进一步复杂了冷泉区的海底地形特征。

### 4.2 福尔摩沙海脊冷泉系统海底表征的分布特征与海底流体的相互关系

该自生碳酸盐岩岩丘上,主要发育有南北 2 个主要生物区及其中间发育的近似沿 NE—SW 方向排列的几个小型生物区,总面积约为 2 000 m<sup>2</sup>。对于较大生物区而言,生物区内贻贝和潜铠虾大致呈环状分布,即由边缘的离散型贻贝群,逐渐过渡为有潜铠虾零星分布的密集型贻贝群,最内侧表现为由个体众多的潜铠虾群覆盖的密集型贻贝群。相对于底栖的贻贝而言,可自由移动的潜铠虾对甲烷、硫化氢等营养成分浓度变化具有更灵敏的响应,因此,潜铠虾群主要集中分布于营养物质丰富的区域。换言之,冷泉流体逸出海底的位置和活动强度控制了生物分布特征。需要指

出的是,环状结构主要表明不同类型的贻贝群和潜铠虾群的相对位置关系,并不是生物区或贻贝群及潜铠虾群的分布形态。如在2个较大生物区中,都可以观测到潜铠虾群常位于裂隙发育的凹陷处呈线性分布。这主要是因为切割自生碳酸盐岩丘的巨大裂隙可作为冷泉流体运输的优势通道,可以为上覆生物群落提供充足的能量物质,是流体活动强度控制生物分布的另一种表现形式。

多个化能自养生物群落的发育说明在相应生物群落下方发育有海底流体运移的优势通道。下伏流体系统输运的流体经由该巨型自生碳酸盐岩的汇聚主要沿岩体中发育的优势通道运移指海底,维持海底生物群落的发展。因此,从某种意义上说,自生碳酸盐岩的发育在表现流体通道“自我封闭效应”的同时,也会对海底流体有一定的汇聚疏导作用。而且生物群落对海底流体中甲烷、硫化氢等有效物质的消耗,也会正向促进冷泉流体向海底的运移。该冷泉化能自养生物群落中缺少蛤、管状蠕虫等特征性冷泉生物的发育,这也可能是由于该冷泉系统巨厚的自生碳酸盐岩基底不再适合这些化能自养生物的栖息和生长。总体而言,该冷泉系统的化能自养生物群落主要受控于流体活动强度而主要沿海底流体运移优势通道分布,而自生碳酸盐岩和化能自养生物群落的发育也会反作用于海底流体活动。

## 5 结论

通过综合分析福尔摩沙海脊冷泉区水深数据和连续3年的近海底视频资料并描述了该冷泉系统的海底表征的表现形式及其规模,分析了控制其分布规律的影像因素,并简单讨论了冷泉系统的海底表征与流体活动之间的相互作用。研究表明,福尔摩沙海脊冷泉系统主要表现为局部由化能自养生物群落覆盖的巨大自生碳酸盐岩体,并且有活动的流体喷口分布于生物群落之中。该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结构、繁茂的化能自养生物群落、活动的流体喷口等几种形式。形态各异的自生碳酸盐岩出露是冷泉区地形复杂,微地貌发育的主要因素。福尔摩沙海脊流体系统的化能自养生物群落全部发育于自生碳酸盐岩硬底之上,其分布和繁茂程

度主要受控于流体逸出海底的位置和活动强度,而流体的活动强度主要受控于优势通道的发育,因此该系统生物区主要沿发育有优势流体通道的裂隙分布。总体而言,笔者对该冷泉系统的海底表征和流体活动已经具有了良好的认识。然而该冷泉系统的下伏结构特征、活动阶段、流体通量等方面依然缺少有效资料,因此,对该冷泉系统还需更深入的研究。

### 参考文献:

- [1] Feng D, Chen D. 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 geoaoustic imaging of the Wairarapa area, Hikurangi margin[J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1): 49-58.
- [3] 孙治雷, 魏合龙, 王利波, 等. 海底冷泉系统的碳循环问题及探测[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(3): 442-450.
- [4] Talukder A R. Review of submarine cold seep plumbing systems: leakage to seepage and venting[J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 255-272.
- [5] 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(3/4): 219-238.
- [6] Boetius A, Elvert M, Samarkin V, et al. Molecular biogeochemistry of sulfate reduction, methanogenesis and the anaerobic oxidation of methane at Gulf of Mexico cold seeps[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(17): 4267-4281.
- [7] Birgel D, Feng D, Roberts H H, et al. Changing redox conditions at cold seeps as revealed by authigenic carbonates from Alaminos Canyon, northern Gulf of Mexico [J]. *Chemical Geology*, 2011, 285(1-4): 82-96.
- [8] Karaca D, Hensen C, Wallmann K. Controls on authigenic carbonate precipitation at cold seeps along the convergent margin off Costa Rica[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(8). <https://doi.org/10.1029/2010GC003062>
- [9] Hideaki M, Saulwood L, Char-Shine L, et al. Discovery of "hydrothermal" chemosynthetic community in a cold seep environment, Formosa Ridge: preliminary results from NT07-05 Cruise, off southwestern Taiwan[C]//日本地質学会學術大會講演要旨 第114年學術大會(2007札幌). 一般社団法人日本地質学会, 2007: 192-192.

- [10] Sun Y, Liang Q, Sun J, et al. The mitochondrial genome of the deep-sea tubeworm *Paraescarpia echinospica* (Siboglinidae, Annelida) and its phylogenetic implications[J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2018, 3(1): 131-132.
- [11] Tsai Y, Chi W, 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 Fall Meeting Abstracts*. 2011, 1: 1542.
- [12] Liu C S, Morita S, Liao Y H, et al. High-resolution seismic images of the Formosa Ridge off Southwestern Taiwan where "hydrothermal" chemosynthetic community is present at a cold seep site[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*, Vancouver, British Columbia, Canada. 2008.
- [13] Lin S, Lim Y, Liu C S. Formosa ridge, a cold seep with densely populated chemosynthetic community in the passive margin, Southwest of Taiwan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): A582-A582Suppl. <http://ntur.lib.ntu.edu.tw/handle/246246/211309>
- [14] Feng D, Cheng M, 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.
- [15] Wang X J, Liu B, Qian J, et al. Geophysical evidence for gas hydrate accumulation related to methane seepage in the Taixinan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.011>
- [16] Chen L, Chi W C, Wu S K, 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.
- [17] 森田澄人, 町山栄章, 徐 垣, 等. 台湾南西沖, 海底マウンド分布域の流体循環[J]. *地学雑誌*, 2009, 118(3): 424-434.
- [18] 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(11-13): 1268-1291.
- [19] Paull C K, Schlining B, Ussler III W, et al. Distribution of chemosynthetic biological communities in Monterey Bay, California[J]. *Geology*, 2005, 33(2): 85-88.

## SURFICIAL FEATURES AND DISTRIBUTION PATTERNS OF THE COLD SEEP SYSTEM ON FORMOSA RIDGE

WANG Bing<sup>1,2</sup>, LUAN Zhendong<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2,3</sup>, DU Zengfeng<sup>1</sup>,  
XI Shichuan<sup>1,2</sup>, LI Lianfu<sup>1,2</sup>, LIAN Chao<sup>1</sup>, LIANG Zhengwei<sup>1,2</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The Formosa Ridge cold seep system is one of the most active cold seep sites located at the passive continental margin of the South China Sea. Based on the bathymetric data and video data collected by the multibeam echo sounder system and high-definition cameras mounted on the Remotely Operated Vehicle, the seabed topographic features of the cold seep site and the surficial features of the cold seep system were described. The main surficial features of the cold seep system include authigenic carbonate crusts, chemosynthetic communities, and gas plumes. The development of carbonate structures with various morphological features caused the anomalous seabed topographic features of the cold seep site. The distribution of the chemosynthetic communities was controlled by the positions of seabed fluids venting or emission through the seabed, which correlate well with the fissures or fractures developed within the authigenic carbonate crust. However, not all fissures and fractures could serve as favorable conduits for the migration of seabed fluids. To some degree, the surficial features of the cold seep system could effectively influence the migration conduits of the seabed fluid flows.

**Key words:** cold seeps; seabed fluid flow; authigenic carbonate; chemosynthetic communities