南海北部琼东南海域活动冷泉流场特征初探

张铨¹, 宋海斌^{1*}, 王宏斌², 陶军², 关永贤², 龚屹¹, 范文豪¹, 耿明会²

1. 同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

2. 广州海洋地质调查局, 广州 510075

* 联系人, E-mail: hbsong@tongji.edu.cn

2019-10-07 收稿, 2020-02-07 修回, 2020-02-08 接受, 2020-04-08 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFC0310000, 2017YFC0306703)、“全球变化与海气相互作用”专项国际合作项目(GASI-GEOGE-05)和国家自然科学基金(41976048, 41576047)资助

摘要 冷泉是甲烷流体运移的一种重要地质过程. 作为一种重要的温室气体, 海底冷泉处渗漏的甲烷流体, 对全球气候变化具有重要的影响. 因此, 冷泉流场的研究对于冷泉地质过程和全球气候变化都具有重要的意义. 本研究基于PIV(particle image velocimetry)技术, 对南海琼东南海域新发现的活动冷泉视频资料进行了活动冷泉的流速流场的模拟定量研究. 研究区活动冷泉的释放有两种形式: 一种是天然气水合物分解形成甲烷气泡, 缓慢地逸散至海水; 另一种则是含甲烷流体从喷口快速喷发形成羽状流. PIV计算的结果显示, 活动冷泉羽状流运动方向整体向上, 内部为复杂的湍流, 其流线呈现出蜿蜒的形态, 冷泉羽状流的运动方向与流速大小均随时间的改变而改变. 尽管存在一定的系统误差, 但PIV计算的结果仍然是可信的, 并且具有低成本、速度快、分辨率高等独特的优势. 与热液流场相比, 冷泉流场的研究程度相对较低, 未来需要更多的工作来定量描述冷泉流场, 并分析冷泉流场的变化规律.

关键词 活动冷泉, 流场, 天然气水合物, 粒子图像测速

冷泉是海底流体(特别是富甲烷流体)从海底沉积物向水体运移的地质过程^[1~3]. 冷泉流体中的甲烷在细菌作用下为化能自养生物提供能量, 进而形成繁盛的冷泉生物群落^[4~6]和冷泉碳酸盐岩^[6~9]. 冷泉流体的渗漏速率与冷泉生物的分布密切相关^[10]. 同时, 甲烷是除了水蒸气、二氧化碳之外非常重要的一种温室气体^[11,12], 冷泉流体中甲烷通过气泡、垂向湍流、水合物漂浮等方式快速到达海洋上层, 并最终进入大气^[13~16]. 因此, 分析海底冷泉流速流场, 对于冷泉地质过程和全球气候变化研究都具有重要的意义.

目前, 常见的海底冷泉观测方法包括声学、地球化学和光学方法. 声学方法包括单波束、多波束声呐系统、侧扫声呐系统、地震海洋学观测和原位水声学观

测^[17~21]. 其中, 应用最为广泛的是多波束声呐系统. 多波束声呐系统是利用气泡与海水直接存在较强的波阻抗界面, 入射波遇到该界面就会通过反射/散射的原理实现对水体中气泡的探测^[22]. 在多波束声学图像上, 海底冷泉羽状流表现为火焰形态^[22~24]. 利用多波束声呐系统, 可以测量冷泉羽状流的位置、高度、宽度、分布范围等参数, 初步开展对冷泉羽状流的半定量研究^[17,24]. 但是, 多波束声呐系统通常获得的是羽状流纵向、瞬时的特征, 主要用于冷泉羽状流的探测和定位. 因此, 为获得羽状流横向、时间序列的特征, 前人发展了原位的水声学观测系统, 其基本原理与多波束声呐系统类似, 不同的是原位回声观测系统是平行于海底测量^[14,25,26]. 此外, 刘润华等人^[27]利用超声多普勒测量的

引用格式: 张铨, 宋海斌, 王宏斌, 等. 南海北部琼东南海域活动冷泉流场特征初探. 科学通报, 2020, 65: 1130–1140

Zhang K, Song H B, Wang H B, et al. A preliminary study on the active cold seeps flow field in the Qiongdongnan Sea Area, the northern South China Sea (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1130–1140, doi: 10.1360/TB-2019-0582

原理,通过多普勒频移计算出渗漏气泡的平均速度为0.28~0.47 m/s;秦华伟等人^[28]利用透射声波法测量出气泡流的上升速率和气泡流量,进而估测出冷泉区气泡泄漏量和气泡的分布范围。但是,这些利用原位声学方法测量冷泉气泡渗漏速度的方法仍停留在实验室阶段。

原位地球化学测量主要关注的是渗漏甲烷的通量。目前,国际上较为成熟的海底甲烷通量测量方法有两种:(1)流体渗漏速率原位测量配以室内甲烷浓度分析;(2)底栖室流体连续取样配以室内甲烷浓度分析^[10,29-31]。但是,这两种方法中甲烷浓度的测量仍依赖于室内甲烷浓度的分析技术,如气相色谱仪,因此二者实际上属于半原位的观测^[29]。

基于光学图像的冷泉流场测量方法主要是针对气泡的行为,且均未给出冷泉的流速流场图像^[31-34]。如Leifer等人^[33]在实验室中采用高分辨率高速摄像机获取气泡流动图像,用图像处理软件计算气泡直径和气泡流速,但是该方法需要大电量的光源,适宜短时观测。此外,Wang等人^[34]对ROV采集的视频图像逐帧分析,研究了甲烷气泡的分布、大小、运动形态等性质,但是并未用光学图像给出冷泉流场。

粒子图像测速技术(particle imaging velocimetry,

PIV)是20世纪70年代末发展起来的一种瞬态、多点、无接触式的流体力学测速方法,它可以在同一瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息,提供丰富的流场空间结构及流动特性^[35]。南海北部近年来发现了大量的冷泉活动^[2,36-38],特别是广州海洋地质调查局在2019年通过“海马”号ROV(Remote Operated Vehicle)在琼东南海域新发现了多处活动冷泉喷口,将其命名为“海马冷泉区(Haima cold seep area)”([图1](#))。本研究将基于PIV技术分析这些活动冷泉视频资料,对活动冷泉的流速流场开展研究。

1 区域地质背景

南海位于中国南部,欧亚板块、印度-澳大利亚板块与太平洋板块及菲律宾海板块相互作用影响的交会处,是西太平洋重要的边缘海^[39]。自中生代末期以来,南海经历了古南海裂开-萎缩、新南海裂开-萎缩两大边缘海旋回,形成了台西南、珠江口、琼东南、中建南等一系列沉积盆地^[40,41]。研究区位于南海北部的琼东南盆地,水深约600~1600 m([图1](#))。

冷泉活动在南海分布广泛,主要位于水深200~3000 m的南海北部陆坡一带^[42]([图1](#))。典型的冷泉系统

图1 海马冷泉区位置示意图。据文献^[2,42]修改

Figure 1 Location of Haima cold seep area in the northern South China Sea. Modified after Refs. ^[2,42]

包括流体源、通道系统以及在海底或近海底的喷发/泄露结构组成^[43,44]。冷泉系统的渗漏活动,往往是由超压驱动的,这种超压可能来自于构造挤压、拉伸或沉积物的快速沉降等因素^[44]。海马冷泉区活跃的冷泉活动可能受到下伏气烟囱构造的控制^[45,46],来自深部的热成因气和来自浅部的生物成因气,沿气烟囱内部向上运移,在浅部形成了天然气水合物,天然气水合物受温度压力变化发生分解而发生渗漏,形成了冷泉^[45]。

2 数据与方法

2.1 视频资料与处理

视频数据由广州海洋地质调查局于2019年在琼东南海域的调查航次提供。视频采集由“海马号”完成。ROV最大工作水深4500 m,照明系统配备6个250 W卤素灯和2个575 W HMI(hydrargyrum medium-arc iodide)灯,视频系统含1台高清变焦摄像机,1台微型彩色摄像机和1台可扩展广角摄像机^[47]。本次所使用的视频分辨率为1280×720(1.78:1),帧速率为25.00和29.97 fps,视频编码格式为mpeg2video(表1)。在进行分析时,使用ffmpeg软件(<https://ffmpeg.org/about.html>)提取出每帧图像,提取图像为jpeg格式,分辨率为1280×720和1980×1080,水平分辨率和垂直分辨率均为96 dpi(表1)。

2.2 PIV技术

PIV技术的基本原理是在待研究流体中放入感光性示踪粒子,用示踪粒子的运动等效流体的运动。用照相机设备采集示踪粒子运动过程中的数字图像,最后利用相应的图像处理算法计算出流体运动的矢量场和其他相关信息^[48]。本研究进行PIV分析使用的软件为Garcia^[49]和Thielicke等人^[50,51]编写的开源软件,计算流场的图像处理算法采用互相关算法,分析时使用窗口大

小为24×24, 32×32和64×64 pixels网格,移动长度为窗口大小的50%。

3 结果

3.1 研究区活动冷泉释放的形式

从视频资料中可以发现,研究区活动冷泉的释放有两种形式:一种是天然气水合物分解形成甲烷气泡,缓慢地逸散至海底;另一种则是含甲烷流体从喷口快速喷发形成羽状流。如图2(a)所示,图中白色冰状固体为天然气水合物,呈块状分布于海底泥质沉积物中,甲烷气泡自天然气水合物中冒出,形成圆形透明的甲烷气泡,并在浮力的作用下逸散至海水。图2(b)则为天然气水合物分解后形成的甲烷气泡逸散至海水时,呈现出如雪花状向上漂浮的羽状流。在该处羽状流的下方,可见大量的贻贝,反映了该处繁盛的冷泉生物群落。图2(c)中可见3处快速喷发的羽状流,其大致形态呈锥状,中心线方向与海底呈约70°夹角,其中右侧的羽状流呈白色不透明状,而中间和左侧的羽状流则呈灰色半透明状,反映了喷发流体的性质存在差异。值得注意的是,在研究区还发现了向上漂浮的淡黄色片状气泡(图2(d)),我们怀疑是甲烷气泡在水中重新结晶形成了天然气水合物,形成气泡伴随水合物(gas hydrate-coated methane bubbles)的状态向上漂浮^[52],但是由于视频分辨率和采样手段的限制,缺乏更多的证据。

3.2 活动冷泉气泡的流场研究

如图3所示,为Seep 262第30帧的ROV图像。在图像中,采样器的实际长度为100 mm(图3(a)),在图像上的长度为226.25 pixel,据此可以将像素单位pixel转化为实际的长度单位,即1 px=0.442 mm。视频帧速率为29.97 fps,则每帧图像之间的时间间隔为33.367 ms。因

表1 ROV视频图像参数

Table 1 ROV Video image parameters

视频序号	视频时长(s)	视频分辨率	帧速率(fps)	每帧时间间隔 (frame/s)	像素点与实际长度 (px/mm)
Seep 2	10	1280×720	25	0.0400	未知
Seep 5	10	1280×720	25	0.0400	未知
Seep 9	10	1280×720	25	0.0400	未知
Seep 10	10	1280×720	25	0.0400	未知
Seep 13	10	1280×720	25	0.0400	未知
Seep 262	169	1920×1080	29.97	0.0333	0.442

图2 研究区不同的冷泉释放类型. (a) 天然气水合物分解形成的甲烷气泡; (b) 大面积的甲烷气泡逸散形成的羽状流; (c) 快速喷发的羽状流; (d) 淡黄色片状气泡

Figure 2 Types of cold seeps in the study area. (a) Methane bubbles formed by the decomposition of natural gas hydrate; (b) a large area of methane bubbles escaping; (c) rapid eruptive plumes; (d) yellow sheet bubbles

图3 利用原始图像(a)进行PIV计算得到的甲烷气泡上升的矢量场(b)、速度场(c)和涡度场(d)

Figure 3 The original image (a), vector field (b), velocity field (c) and vorticity field (d) of methane bubbles calculated by PIV technology

此, 可以将PIV计算的单位转换为实际的速度单位, 即 $1 \text{ px/frame} = 0.147 \text{ m/s}$. 从图中可以看出, 甲烷气泡并非简单地垂直向上运动, 而是带有复杂变形的螺旋向上的运动, 甲烷气泡的平均半径约为 4.889 mm , 运动速度约为 0.238 m/s , 甲烷气泡流场的涡度为 $-28.5162 \sim 32.6462/\text{s}$.

3.3 活动冷泉羽状流流场的定量研究

如图4(a)所示, 为Seep 5中第21帧时刻的快速喷发

的冷泉羽状流, 利用PIV计算了该羽状流的流速场(图4(b))、垂向流速场(图4(c))、水平流速场(图4(d))、加速度场(图4(e))和沿流线方向的速度变化(图4(f)). 该处羽状流的速度在 $0.00756 \sim 10.984 \text{ px/frame}$ 、垂向流速在 $-10.842 \sim 5.055 \text{ px/frame}$ (以垂直向下为正方向)、水平流速 $-6.377 \sim 5.828 \text{ px/frame}$ (以水平向右为正方向)、加速度 $-233.077 \sim 169.617 \text{ px/frame}^2$. 图3(a)中最左侧的羽状流流场较为清晰, 整体呈向上发散的锥形, 其内部主要为垂向的流动(图4(c)), 但其中心线并不与地面垂

图4 Seep 5冷泉喷口处的流场. (a) 原始图片; (b) 流速场; (c) 垂向流速场; (d) 水平流速场; (e) 加速度场; (f) 沿流线方向的速度变化
Figure 4 The flow field of Seep 5. (a) Origin picture; (b) velocity field; (c) vertical component field; (d) horizontal component field; (e) acceleration field; (f) velocity along the streamline

直,而是呈约77°的夹角.从水平流速场来看,冷泉喷口处应该存在沿水平方向的背景流场,致使冷泉喷口中心线倾斜.图4(b)中白色实线为选取的靠近羽状流中心线的一条流线,其形态并非为简单的直线,而是呈蜿蜒的曲线,反映冷泉流体并非沿直线向上流动,而是蜿蜒向上的.沿流线速度分布如图4(f)所示,可以发现沿流线方向的速度自下而上呈现先增大后减小的空间分布,也并非简单的一个速度值.综上,我们发现羽状流表现为整体向上的羽流,但是其内部却存在许许多多不同尺度的湍流涡,在羽状流边缘湍流涡还会包卷海水进入羽状流内,改变羽状流的浓度(图4(a)).

3.4 活动冷泉羽状流流场的动态变化

Seep 5中共有3处冷泉喷口(图4(a)),在速度场上表现为高于背景速度场的锥形高值区域(图4(b)).其中,第17~20帧的速度场如图5所示,每帧图像之间的时间间隔为40 ms.其速度变化如表2所示,其平均速度呈现出先略微增大,后略微减小的变化,反映在短短的120 ms内,流速场就已经发生了改变.对图5中的白色矩形区域来说,在第17帧(图5(a))时,该区域流体基本为垂直向

上流动,平均速度约为10 px/frame;在第18帧时(图5(b)),该区域流体约呈45°向上流动,平均速度约为5 px/frame;在第19帧时(图5(c)),该区域流体又变为垂直向上流动,平均速度约9 px/frame;在第20帧时(图5(d)),该区域流体呈下部向45°方向,上部呈垂直向上流动,平均速度约4 px/frame.在第17~18帧时,我们发现白色矩形区域下方的流体为垂直向上运移的,但是到18帧时,原来17帧中白色区域下方处流体与17帧中白色区域左下方的流体发生了混合,致使流动速度和方向都发生了改变(图5).因此,羽状流内部为伴随着强烈混合的、复杂的动态湍流运动.

4 讨论

4.1 基于PIV方法计算冷泉流场的可行性

(1) PIV技术自20世纪被提出以来^[36],已经在流场测量中得到了广泛应用^[48,53],目前已经发展了互相关算法^[54]、光流法^[55,56]等一系列算法,成为光学测速流场研究中最广泛的一种技术^[53,57].

(2) 海底冷泉与海底热液虽然属于不同的海底流

图5 PIV计算的速度场序列. (a) 第17帧; (b) 第18帧; (c) 第19帧; (d) 第20帧

Figure 5 Velocity field series calculated by PIV. (a) Frame 17; (b) Frame 18; (c) Frame 19; (d) Frame 20

体活动,但二者在喷出海底后都往往会形成与周围海水存在性质差异的羽状流,在同一个海洋系统中,二者具有千丝万缕的联系^[1].前人已经利用PIV方法对热液喷口的流场进行了计算^[58,59].Crone等人^[58]提出了一种光学羽流测速(optical plume velocimetry)的新技术,他们在实验室内利用热液喷口模型对图像相关测速方法进行了验证,取得了比较理想的结果,并用该方法对图像相关测速方法进行了验证,获得了热液喷口的流速数据.Zhang等人^[59]利用PIV技术对ROV采集的洋中脊处的热液羽流视频图像进行分析,得到了该处热液羽流的瞬时速度场、平均垂向速度场、热液羽流夹卷系数等参数,并计算了热液羽流的垂直通量.前人在海底热液流场中的工作为我们提供了重要的借鉴,也证明了PIV方法在计算海底流体流场方面的可行性.

(3) 基于PIV方法估算的海底冷泉气泡的流速,与实验室测量和前人野外测量的速度具有很好的一致性^[21,60].Rehder等人^[60]通过视频图像研究了冷泉气泡的上升速度和气泡溶解行为,并在俄勒冈水合物脊进行了野外观测,发现气泡的平均上升速度约为0.251 m/s,平均溶解速度约为18.9 $\mu\text{m/s}$.秦华伟等人^[28]利用声学方法在实验室测量得到的冷泉气泡流平均上升速度为0.2031 m/s.本研究中利用PIV方法计算的冷泉气泡的运动速度约为0.238 m/s,与前人的研究成果具有很好的一致性.

(4) PIV方法与传统声学方法和地球化学方法相比,具有独特的优势.PIV方法仅需要对ROV图像进行简单的处理即可进行,不需要增加新的特殊的装备,成本较低;PIV技术属于非接触式测量,不会对待测流体产生干扰,得到的结果更为可靠^[53];视频图像的分辨率可达到1920×1080甚至更高,可以研究羽状流细微结构的变化.

4.2 PIV方法的误差分析

(1) ROV拍摄的视频图像实际上是三维空间在二维平面上的投影,由于缺少拍摄时深潜器相对于羽状流的位置和参考标尺,往往难以对拍摄的图像进行几何校正,干扰计算的结果^[61].并且,本研究中的PIV方法仅仅得到的是二维流速场,与羽状流真实的三维流场存在天然的误差.

(2) 互相关窗口大小的选择会直接影响互相关结

表2 Seep 5流速场变化(px/frame)

Table 2 Velocity changes of Seep 5 (px/frame)

序号	最小值	最大值	平均值
Seep 5-17	0.00569	12.460	2.217
Seep 5-18	0.00295	11.062	2.274
Seep 5-19	0.00751	11.197	2.076
Seep 5-20	0.00714	10.150	1.472

果的精确度.若窗口太大,则窗口中包含的信息过多,这会增加平均效应,不利于反映流体真实的流场.若窗口太小,可能无法包含完整的“粒子”,降低结果准确度的同时还会增加计算量.当流体运动较快时,还有可能因为窗口太小出现“失配”现象^[62].

5 结论与展望

本研究主要利用了PIV技术对南海北部琼东南海域活动冷泉的流场进行了初步定量化的研究.研究结果表明,与传统的声学 and 地球化学方法相比,PIV技术可以提供丰富的流场空间结构及流动特性,具有独特的优势.

研究区活动冷泉的释放有两种形式:一种是天然气水合物分解形成甲烷气泡,缓慢地逸散至海水;另一种则是含甲烷流体从喷口快速喷发形成羽状流.冷泉羽状流流场呈现出以下特点:(1)冷泉羽状流的流体运动方向整体向上,内部则为复杂的湍流;(2)冷泉羽状流的流线呈现蜿蜒的形态;(3)冷泉羽状流的运动方向与流速大小都随时间的改变而改变.

尽管存在一定的系统误差,但是利用PIV结果来分析相对的时空变化是可靠的.而且实际上,PIV计算的结果与其他方法测量的结果较为一致,说明利用PIV对冷泉流场进行定量的研究是相对可靠的.对PIV计算得到的流场的分析,与对ROV视频的直观认识和前人对羽状流的观测也比较一致^[14,17,25,59].

海底冷泉与海底热液是两种非常重要的地质过程.前人对热液流场开展了大量的研究,建立了多种热液流场的羽流模型^[63-65].冷泉流场与热液流场具有一定的相同之处,但是研究的程度相对较低.如何更好地定量描述冷泉流场,并分析冷泉流场的变化规律,是今后重要的研究方向.

致谢 感谢广州海洋地质调查局“海马号”ROV的工作人员,感谢匿名审稿人的意见.

参考文献

- 1 Judd A G, Hovland M. Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 2 Feng D, Qiu J W, Hu Y, et al. Cold seep systems in the South China Sea: An overview. *J Asian Earth Sci*, 2018, 168: 3–16
- 3 Chen D F, Chen X P, Chen G Q. Geology and geochemistry of cold seepage and venting-related carbonates (in Chinese). *Acta Sedimentol Sin*, 2002, 20: 34–40 [陈多福, 陈先沛, 陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征. *沉积学报*, 2002, 20: 34–40]
- 4 Michaelis W, Seifert R, Nauhaus K, et al. Microbial reefs in the Black Sea fueled by anaerobic oxidation of methane. *Science*, 2002, 297: 1013–1015
- 5 Chen Z, Yang H P, Huang Q Y, et al. Characteristics of cold seeps and structures of chemoautotrophy-based communities in seep sediments (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2007, 26: 73–82 [陈忠, 杨华平, 黄奇瑜, 等. 海底甲烷冷泉特征与冷泉生态系统的群落结构. *热带海洋学报*, 2007, 26: 73–82]
- 6 Chen D F, Huang Y X, Feng D, et al. Seep carbonate and preserved bacteria fossils in the northern of the South China Sea and their geological implications (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2005, 24: 185–189 [陈多福, 黄永祥, 冯东, 等. 南海北部冷泉碳酸盐岩和石化微生物细菌及地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24: 185–189]
- 7 Feng D, Chen D F, Su Z, et al. Anaerobic oxidation of methane and seep carbonate precipitation kinetics at seafloor (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2006, 26: 125–131 [冯东, 陈多福, 苏正, 等. 海底甲烷厌氧氧化与冷泉碳酸盐岩沉淀动力学研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26: 125–131]
- 8 Feng D, Chen D F, Su Z, et al. Characteristics of cold seep carbonates and microbial processes in gas seep system (in Chinese). *Geoscience*, 2005, 19: 26–32 [冯东, 陈多福, 苏正, 等. 海底天然气渗漏系统微生物作用及冷泉碳酸盐岩的特征. *现代地质*, 2005, 19: 26–32]
- 9 Guan H X, Feng D, Wu N Y, et al. Fatty-acids and their $\delta^{13}\text{C}$ characteristics of seep carbonates from the northern continental slope of Gulf of Mexico (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 367–373 [管红香, 冯东, 吴能友, 等. 墨西哥湾北陆坡区冷泉碳酸盐岩脂肪酸及碳同位素特征. *科学通报*, 2010, 55: 367–373]
- 10 Tryon M D, Brown K M. Fluid and chemical cycling at Bush Hill: Implications for gas- and hydrate-rich environments. *Geochem Geophys Geosyst*, 2004, 5: Q120004
- 11 Linke P, Sommer S, Rovelli L, et al. Physical limitations of dissolved methane fluxes: The role of bottom-boundary layer processes. *Mar Geol*, 2010, 272: 209–222
- 12 Schmale O, Leifer I, Deimling J S, et al. Bubble transport mechanism: Indications for a gas bubble-mediated inoculation of benthic methanotrophs into the water column. *Cont Shelf Res*, 2015, 103: 70–78
- 13 Suess E, Torres M E, Bohrmann G, et al. Seafloor methane hydrates at hydrate ridge, Cascadia Margin. In: Paull C K, Dillon W P, eds. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. Washington DC: American Geophysical Union, 2001. 87–98
- 14 Greinert J, Nützel B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of methane bubble fluxes at cold seeps. *Geo-Mar Lett*, 2004, 24: 75–85
- 15 McGinnis D F, Greinert J, Artemov Y, et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere. *J Geophys Res-Oceans*, 2006, 111: C09007
- 16 von Deimling J S, Rehder G, Greinert J, et al. Quantification of seep-related methane gas emissions at Tommeliten, North Sea. *Cont Shelf Res*, 2011, 31: 867–878
- 17 Greinert J, Artemov Y, Egorov V, et al. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244: 1–15
- 18 Westbrook G K, Thatcher K E, Rohling E J, et al. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L15608
- 19 Klaucke 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. *Mar Geol*, 2010, 272: 49–58
- 20 Chen J X, Song H B, Guan Y X, et al. A preliminary study of submarine cold seeps apply in seismic oceanography techniques (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 604–616 [陈江欣, 宋海斌, 关永贤, 等. 海底冷泉的地震海洋学初探. *地球物理学报*, 2017, 60: 604–616]
- 21 Luan X W, Liu H, Yue B J, et al. Characteristics of cold seepage on side scan sonar sonogram (in Chinese). *Geoscience*, 2010, 24: 474–480 [栾锡武, 刘鸿, 岳保静, 等. 海底冷泉在旁扫声纳图像上的识别. *现代地质*, 2010, 24: 474–480]
- 22 Colbo K, Ross T, Brown C, et al. A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2014, 145: 41–56
- 23 Luan X W, Zhao K B, Obzhirov A, et al. Identification and basic characteristics of shallow gas hydrate in Okhotsk sea (in Chinese). *Sci China Ser D Earth Sci*, 2008, 38: 99–107 [栾锡武, 赵克斌, Obzhirov A, 等. 鄂霍次克海浅表层天然气水合物的勘查识别和基本特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 99–107]

- 球科学, 2008, 38: 99–107]
- 24 Liu B, Liu S X. Gas bubble plumes observed at north slope of South China Sea from multi-beam water column data (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2017, 39: 83–89 [刘斌, 刘胜旋. 南海北部陆坡气泡羽状流的发现: 多波束水体数据. *海洋学报*, 2017, 39: 83–89]
 - 25 Greinert J. Monitoring temporal variability of bubble release at seeps: The hydroacoustic swath system GasQuant. *J Geophys Res*, 2008, 113: 827–830
 - 26 Deimling J S V, Brockhoff J, Greinert J. Flare imaging with multibeam systems: Data processing for bubble detection at seeps. *Geochem Geophys Geosyst*, 2007, 8: 57–77
 - 27 Liu R H, Zou D P, Long J J, et al. Experimental study on ultrasonic doppler measurement of the velocity of seafloor leakage bubbles (in Chinese). *J Ocean Technol*, 2016, 35: 46–50 [刘润华, 邹大鹏, 龙建军, 等. 超声多普勒测量海底渗漏气泡流速的实验研究. *海洋技术学报*, 2016, 35: 46–50]
 - 28 Qin H W, Fan X H, Cai Z, et al. Acoustic detection of flow rate and flux of bubbles in cold spring area of the ocean (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2016, 35: 35–39 [秦华伟, 范相会, 蔡真, 等. 海底冷泉区气泡流量流速的声学探测机理研究. *热带海洋学报*, 2016, 35: 35–39]
 - 29 Zhao G T, Xu C L, Zhang X D, et al. Research progress in *in-situ* observations of dissolved methane seepage fluxed across the water-sediment interface (in Chinese). *Period Ocean Univ China*, 2014, 44: 73–81 [赵广涛, 徐翠玲, 张晓东, 等. 海底沉积物-水界面溶解甲烷渗漏通量原位观测研究进展. *中国海洋大学学报*, 2014, 44: 73–81]
 - 30 Di P F, Feng D, Gao L B, et al. *In situ* measurement of fluid flow and signatures of seep activity at marine seep sites (in Chinese). *Prog Geophys*, 2008, 23: 1592–1602 [邸鹏飞, 冯东, 高立宝, 等. 海底冷泉流体渗漏的原位观测技术及冷泉活动特征. *地球物理学进展*, 2008, 23: 1592–1602]
 - 31 Di P F, Chen Q H, Chen D F. *In situ* on-line measuring device of gas seeping flux at marine seep sites and experimental study (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2012, 31: 83–87 [邸鹏飞, 陈庆华, 陈多福. 海底冷泉渗漏气体流量原位在线测量技术研究. *热带海洋学报*, 2012, 31: 83–87]
 - 32 Leifer I, Patro R K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study. *Cont Shelf Res*, 2002, 22: 2409–2428
 - 33 Leifer I, de Leeuw G, Cohen L H. Optical measurement of bubbles: System design and application. *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20: 1317–1332
 - 34 Wang B, Socolofsky S A, Breier J A, et al. Observations of bubbles in natural seep flares at MC 118 and GC 600 using *in situ* quantitative imaging. *J Geophys Res Oceans*, 2016, 121: 2203–2230
 - 35 Sun B S. Quantifying discrete hydrothermal venting flux by optical image plume velocimetry: A case study on the Longqi field, SWIR (in Chinese). Master Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2017 [孙宝石. 利用光学图像序列测速计算热液热通量和物质通量——以SWIP龙旗热液区为例. 硕士学位论文. 上海: 同济大学, 2017]
 - 36 Wu D D, Ye Y, Wu N Y, et al. Early diagenesis records and chemical composition abnormalities in pore water for methane-seep in sediments from the southern Qiongdongnan Basin (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2009, 31: 86–96 [邬黛黛, 叶瑛, 吴能友, 等. 琼东南盆地与甲烷渗漏有关的早期成岩作用和孔隙水化学组分异常. *海洋学报*, 2009, 31: 86–96]
 - 37 Wu N Y, Yang S X, Wang H B, et al. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, Northern South China Sea (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 6: 1641–1650 [吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系. *地球物理学报*, 2009, 6: 1641–1650]
 - 38 Han X Q, Yang K H, Huang Y Y. Origin and nature of cold seep in northeastern Dongsha area, the South China Sea: Evidence from chimney-like seep carbonates (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1865–1873 [韩喜球, 杨克红, 黄永祥. 南海东沙东北冷泉流体的来源和性质: 来自烟囱状冷泉碳酸盐岩的证据. *科学通报*, 2013, 58: 1865–1873]
 - 39 He J X, Zhang W, Lu Z Q, et al. Petroleum system and favorable exploration directions of the main marginal basins in the northern South China Sea (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2016, 27: 943–959 [何家雄, 张伟, 卢振权, 等. 南海北部大陆边缘主要盆地含油气系统及油气有利勘探方向. *天然气地球科学*, 2016, 27: 943–959]
 - 40 Zhang G C, Xie X J, Wang W Y, et al. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South China Sea (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 34: 611–627 [张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力. *石油学报*, 2013, 34: 611–627]
 - 41 Wang D W, Wu S G, Wang Y M, et al. Deep-water sediment cycles in the Qiongdongnan Basin (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 933–943 [王大伟, 吴时国, 王英民, 等. 琼东南盆地深水重力流沉积旋回. *科学通报*, 2015, 60: 933–943]
 - 42 Zhao B, Liu S X, Li L Q, et al. Distribution pattern of cold seeps in South China Sea and its geological significance (in Chinese). *Mar Geol Front*, 2018, 34: 34–43 [赵斌, 刘胜旋, 李丽青, 等. 南海冷泉分布特征及油气地质意义. *海洋地质前沿*, 2018, 34: 34–43]
 - 43 Ceramicola S, Dupré S, Somoza L, et al. Cold seep systems. In: Micallef A, Krastel S, Savini A, eds. *Submarine Geomorphology*. Berlin: Springer, 2018. 367–387
 - 44 Wu N Y, Sun Z L, Lu J G, et al. Interaction between seafloor cold seeps and adjacent hydrothermal activities in the Okinawa Trough (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2019, 39: 23–35 [吴能友, 孙治雷, 卢建国, 等. 冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39: 23–35]
 - 45 Wang J, Wu S, Kong X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *J Asian Earth*

- Sci, 2018, 168: 17–26
- 46 Ye J, Wei J, Liang J, et al. Complex gas hydrate system in a gas chimney, South China Sea. *Mar Pet Geol*, 2019, 104: 29–39
- 47 Chen Z H, Tian L Y, Hu B, et al. Application of “HAIMA” ROV in gas hydrates exploration (in Chinese). *J Ocean Technol*, 2018, 37: 24–29 [陈宗恒, 田烈余, 胡波, 等. “海马”号ROV在天然气水合物勘查中的应用. *海洋技术学报*, 2018, 37: 24–29]
- 48 Weitbrecht V, Seol D G, Negretti E, et al. PIV measurements in environmental flows: Recent experiences at the Institute for Hydromechanics in Karlsruhe. *J Hydro-Environ Res*, 2011, 5: 231–245
- 49 Garcia D. A fast all-in-one method for automated post-processing of PIV data. *Exp Fluids*, 2011, 50: 1247–1259
- 50 Thielicke W. The flapping flight of birds: Analysis and application. Doctor Dissertation. Groningen: University of Groningen, 2014
- 51 Thielicke W, Stamhuis E J. PIVlab-time-resolved digital particle image velocimetry tool for MATLAB. PIV Verison 2.02. Published under the BSD license, programmed with MATLAB, 2014.
- 52 Sauter E J, Muyakshin S I, Charlou J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 243: 354–365
- 53 Cao X, Liu J, Jiang N, et al. Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications. *Energy Build*, 2014, 69: 367–380
- 54 Fincham A, Delerce G. Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms. *Exp Fluids*, 2000, 29: S013–S022
- 55 Keane R D, Adrian R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Appl Sci Res*, 1992, 49: 191–215
- 56 Zhong Q L. Research on PIV optical flow algorithms in hypersonic flows and its applications (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017 [钟强龙. 基于光流的高超声速流场 PIV 算法研究及应用. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2017]
- 57 Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry. *Exp Fluids*, 2005, 39: 159–169
- 58 Crone T J, McDuff R E, Wilcock W S D. Optical plume velocimetry: A new flow measurement technique for use in seafloor hydrothermal systems. *Exp Fluids*, 2008, 45: 899–915
- 59 Zhang X, Lin J, Jiang H. Time-dependent variations in vertical fluxes of hydrothermal plumes at mid-ocean ridges. *Mar Geophys Res*, 2019, 40: 245–260
- 60 Rehder G, Brewer P W, Peltzer E T, et al. Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 21–21-4
- 61 Karlstrom L, Hurwitz S, Sohn R, et al. Eruptions at lone star geyser, Yellowstone National Park, USA: 1. Energetics and eruption dynamics. *J Geophys Res Solid Earth*, 2013, 118: 4048–4062
- 62 Spencer A, Hollis D. Correcting for sub-grid filtering effects in particle image velocimetry data. *Meas Sci Technol*, 2005, 16: 2323–2335
- 63 Balkovsky E, Shraiman B I. Olfactory search at high Reynolds number. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 12589–12593
- 64 Farrell J A, Murlis J, Long X, et al. Filament-based atmospheric dispersion model to achieve short time-scale structure of odor plumes. *Environ Fluid Mech*, 2002, 2: 143–169
- 65 Jiu H F, Pang S, Han B. Modeling and simulation of hydrothermal plume model (in Chinese). *Comput Simul*, 2015, 32: 404–408 [纠海峰, 庞硕, 韩冰. 热液羽状流模型的建立与仿真. *计算机仿真*, 2015, 32: 404–408]

Summary for “南海北部琼东南海域活动冷泉流场特征初探”

A preliminary study on the active cold seeps flow field in the Qiongdongnan Sea Area, the northern South China Sea

Kun Zhang¹, Haibin Song^{1*}, Hongbin Wang², Jun Tao², Yongxian Guan², Yi Gong¹, Wenhao Fan¹ & Minghui Geng²

¹ State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

* Corresponding author, E-mail: hbsong@tongji.edu.cn

Cold seep is an important geological process of methane fluid migration. Methane plumes at these seeps have a significant impact on the local carbon budget and may trigger massive precipitation of carbonates and cold-seep biome. As a powerful greenhouse gas, methane seeping/venting from a cold seep may be released into the atmosphere and have a huge effect on climate. Research on cold seep flow field is of great significance for understanding geological processes of cold seep and their impacts on global climate change.

Several methods have been used to observe cold seeps, e.g., acoustical, geochemical, and optical methods. However, no flow field image of Haima cold seeps was shown by these methods so far. The particle image velocimetry (PIV) method is a commonly used approach in the study of fluid dynamics. It tracks the motion of tracer particles in a flow field over a small time interval, so that the instantaneous velocity field can be calculated using a spatial cross-correlation method. In this study, we applied the PIV method to analyze *in-situ* video image sequences of the newly discovered, active cold seep in the Qiongdongnan Basin of the northern South China Sea during 2019, and obtained some quantitative, preliminary information about the flow.

According to the video image sequences, there are two ways of methane seeping from the seafloor in the study area. One is via methane bubbles, which are formed through gas hydrate decomposing, and then slowly escaping from the seafloor. The other is via plumes of methane-containing fluid, which erupt rapidly from the vent. Gas hydrate-coated methane bubbles may also exist over the cold seep. The velocity of the plumes is between 0.00756 and 10.984 px/frame, and the accelerated velocity is -233.077 to 169.617 px/frame² (negative for velocity decreasing with time). The vertical velocity is -10.842 to 5.055 px/frame (positive direction for downward), and the horizontal velocity is -6.377 to 5.828 px/frame (positive direction to the right). The velocity of methane bubbles is about 0.238 m/s, consistent with previous studies' findings; this agreement demonstrates the viability of the PIV method. These results show that the direction of the cold seep flow is generally upward. However, its internal flow field involves complex turbulence. The direction and velocity of the cold seep flow change with time, and its streamlines are sinuous.

Although there are some velocity deviations, our results show that the PIV method is feasible for calculating the flow field image, and that it has some unique advantages, e.g., it is low-cost, non-invasive, and has high resolution. However, we stress that these results are preliminary, and research on cold seep flow field is just beginning. Compared to hydrothermal vents, the flow field of cold seeps is still poorly understood and more studies are needed, such as describing the cold seep flow field quantitatively and analyzing how and why it changes.

active cold seeps, flow field, gas hydrate, particle image velocimetry

doi: [10.1360/TB-2019-0582](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0582)