基于实测影像的深海热液羽流流场与物质能量输入特性反演研究

陈亚楠^{1†}, 楼映中^{1†}, 贺治国^{1,2*}, 王叶剑³, 邱中炎³, 韩喜球^{1,3*}

1. 浙江大学海洋学院, 舟山 316012;

2. 教育部海洋传感技术与装备工程研究中心, 舟山 316012;

3. 自然资源部海底科学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

† 同等贡献

* E-mail: hezhiguo@zju.edu.cn; xqhan@sio.org.cn

收稿日期: 2021-01-27; 接受日期: 2021-08-04; 网络版发表日期: 2021-10-08

国家自然科学基金(批准号: 52171276, 91951201)、中国大洋矿产资源与研究开发协会“十三五”课题(编号: DY135-S2-1-07)和中央高校基本科研业务费校长专项(编号: 2017XZZX001-02A)资助

摘要 深海热液羽流是岩石圈与水圈进行物质能量交换的关键媒介, 对海洋元素循环和海水化学成分的演化有重要影响. 本研究基于实测影像资料对西北印度洋卧蚕-1号热液区热液喷口羽流进行了定量分析, 以区域互相关算法为基础计算了热液羽流的流场结构, 并进一步估算了卧蚕-1号“火焰山”热液喷口释放的热量和物质通量. 结果表明, 热液羽流中心线上的垂向速度在初始动量和浮力通量的共同作用下随羽流上升呈增大趋势, 羽流中心线最大垂向速度约15.5 cm/s, 最大水平速度约10.3 cm/s. 受卷吸和边界剪切作用, 热液羽流体积流量随上升高度增加近似线性增加. 经估算, 该喷口向海洋输入的热量约 1.35 ± 0.11 MW, 所释放的Fe元素约 3661 ± 323 kg/a. 研究结果为慢速扩张洋脊深海热液羽流动力特性和热液区物质与能量交换提供了科学参考依据.

关键词 深海热液羽流, 图像分析, 互相关算法, 热量输入, 物质输入

1 引言

海底热液喷口是联系地球岩石圈、水圈和生物圈的重要纽带^[1], 从热液喷口释放出来的热液流体往往具有极高的温度($200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$)^[2,3]并携带有丰富的来自地球深部的金属元素^[4,5], 其营造的独特温盐环境是孕育生命的摇篮^[6], 繁荣的生物群落和独特的生态结

构给物种起源研究提供了新的角度^[7], 是海洋科学和生命科学领域的研究前沿. 高温热液流体与环境海水混合后迅速冷却, 在海底沉淀资源量可观的多金属硫化物堆积体, 并以热液羽流的形式随洋流迁移, 在深海物质和能量循环中扮演着重要的角色, 对海水化学成分演化和全球气候产生重要影响^[8]. 探测热液羽流已成为海底多金属硫化物资源勘探十分重要的手段^[9].

引用格式: 陈亚楠, 楼映中, 贺治国, 等. 基于实测影像的深海热液羽流流场与物质能量输入特性反演研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1705–1715
Chen Y N, Lou Y Z, He Z G, et al. Flow fields and outputs of the hydrothermal plume at the Wocan-1 field based on an *in-situ* video (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1705–1715, doi: 10.1360/SST-2021-0041

获取深海热液羽流流场结构、热量与物质的输入对于示踪海底热液喷口、勘查多金属硫化物资源和估算热液喷口物质和能量收支具有重要的意义。

热液羽流现场观测是建立热液羽流流场结构的关键步骤, 可分为接触式测量^[10]和非接触式测量。接触式杯型流速计和涡轮流速计曾被Germanovich等^[11]用于测量深海极端环境下的热液羽流运动特性, 104组测量结果表明高温热液羽流(300°C以上)输入的热量从0.1~21.6 MW不等, 相差可达数百倍。非接触式测量包括声学测量和光学测量。声学测量依赖于多普勒效应反演流场结构^[12], Xu等^[13]对Juan de Fuca洋中脊环境的监测结果表明, 潮汐和大气环流等大尺度运动会对热液羽流流场结构产生周期性影响, 热液羽流的流速(0.11~0.24 m/s)和流量(1.93~5.09 m³/s)均会出现周期性波动。

光学测量即利用光学成像的方式记录热液羽流的运动轨迹, 对流场无干扰。相比声学测量, 光学测量的分辨率可提高几十至几百倍, 能更准确地反映热液羽流流场结构。在早期光学系统不发达的阶段, 可通过记录热液羽流涡旋上升指定距离的时间估算热液羽流的流速^[14,15], 揭示了热液羽流的运动趋势。近年来, 得益于相机硬件和深海潜航技术的发展, 潜航器可在深海拍摄高分辨率热液羽流视频, 这使利用图像测速技术定量分析热液羽流成为可能。Crone等^[16]曾采用不同OPV(optical plume velocimetry)技术计算了实验室理想垂向羽流的流场结构。结果表明, 相比湍流结构匹配和图像谱分析, 图像区域互相关算法的计算效率和准确度都较高。该方法还被用于估算2010年墨西哥湾原油泄露事件的环境影响^[17]。Mittelstaedt等^[18]建立了DFV(diffuse flow velocimetry)算法, 根据热液羽流和环境水体的折射率差异追踪了图像中受折射影响区域的运动轨迹, 并将该方法应用于中大西洋海脊Lucky Strike区域的热液羽流测量, 测量结果显示该区域单热液喷口输入的热量约1.07±0.66 MW^[19]。

由于深海热液羽流所处环境复杂、深海测量难度大和高分辨率热液羽流视频资料稀缺等原因, 现阶段直接研究深海热液羽流影像资料的相关实践极少。本文基于准确度较高的图像区域互相关算法^[16], 对印度洋卡尔斯伯格脊(Carlsberg Ridge, CR)卧蚕-1号热液区“火焰山”喷口羽流高清影像资料进行了定量分析, 获得了热液羽流的流场结构, 并进一步估算了热液羽流

的热量和物质输入通量。

2 研究区域概况

卡尔斯伯格脊(CR)位于西北印度洋2°S~10°N之间, 属于慢速扩张洋中脊, 其半扩张速率为12~13 mm/a^[20,21]。卧蚕热液区位于卡尔斯伯格脊(CR)的一处北西-南东方向的脊轴新火山脊上, 由卧蚕-1号区和卧蚕-2号区组成, 两者相距约2.7 km(图1)。该热液区是我国科学家于2013年实施中国大洋28航次期间发现, 为国际上首个在卡尔斯伯格脊发现的海底硫化物矿床^[22]。在2017年中国大洋38航次中, “蛟龙号”载人深潜器首次下潜至卧蚕热液区并对其进行近距离观察和采样, 获取了喷口区大量高清视像资料和相关地质、生物样品。调查表明, 卧蚕热液区是一处由洋中脊岩浆作用控制的大型高温热液系统, 其范围约450 m×400 m, 热液喷口的流体温度达359°C, 呈强酸性(pH~3), 区内发现17处活动黑烟囱/烟囱群和8处非活动烟囱, 主要产出的富Cu-Zn型硫化物^[23]。基于全球洋流数据库OS-CAR(ocean surface current analyses real-time), 观测期间该区域表层海洋洋流运动方向为西南方向, 大小约14 cm/s; 深海综合锚系底流实测资料显示, 卧蚕热液区所处环境的底层洋流月平均流速约8 cm/s, 运动方向整体与脊轴线平行, 约东南方向45°^[24]。

3 视频和图像处理

3.1 图像预处理

本视频资料是由配备电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)相机的“蛟龙号”载人深潜器在中国大洋第38航次西北印度洋区域采集到的, 拍摄对象为“火焰山”热液羽流, 视频分辨率为1920×1080像素, 最小像素对应的实际长度为1 mm, 帧率为25 Hz, 色彩格式为彩色。将视频按25 Hz转换成图像帧, 并对每张图像进行灰度化, 最终可得到热液羽流图像序列1500张。

由于热液羽流所处环境复杂、潜水器点光源照射不均及生物活动等因素, 图像中会出现颗粒混入、局部过曝、暗斑、遮挡等问题; 另外, 光线在相机内传播时, 也会产生额外的电磁噪点^[25]。为提高图像质量和反演精度, 本文采用高斯低通滤波器对图像进行降噪, 并进一步采用对比度受限的自适应直方图均衡法

图 1 卧蚕-1号热液区海底地形图

Figure 1 Bathymetry map of the survey area over Carlsberg Ridge and the location of the Wocan-1 Hydrothermal Field.

(contrast limited adaptive histogram equalization, CLANE)增强图像信噪比, 以提高区域互相关算法检测正确率^[26].

3.2 图像区域互相关算法

图像区域互相关算法在实验流体力学中应用广泛, 是粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)^[27,28]和粒子图像追踪测速技术(particle tracking velocimetry, PTV)^[29]的核心算法. 区域互相关算法的基本原理是计算前后两张图像中判读窗口的相似性, 以最大相似点的位移作为判读窗口的位移. 随热液羽流喷出的丰富多样的物质组成, 经复杂的物理化学作用会形成硫酸钙、硫化亚铁、二硫化亚铁铜等各种颗粒, 粒径从0.1~500 μm 不等^[30], 颗粒与环境水体较大的灰度差成为应用区域互相关算法的理论基础. 区域互

相关算法可采用直接相关函数计算^[31]:

$$R(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j f(i, j) g(i+x, j+y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y f^2(i, j) \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y g^2(i, j)}}, \quad (1)$$

式中, $f(i, j)$ 和 $g(i, j)$ 分别是前后图像判读窗口的灰度函数, i 和 j 为判读窗口中的水平位置坐标和垂直位置坐标, X 和 Y 分别为判读窗口的长和宽, x 和 y 是判读窗口的水平位移量和垂直位移量, $R(x, y)$ 为相关函数, 满足 $-X \leq x \leq X$, $-Y \leq y \leq Y$, 其代表了判读窗口不同位移量下的相似性. 为了提高计算效率, 常将 $g(i, j)$ 和 $f(i, j)$ 之间的关系写为

$$g(i, j) = f(i, j) * m(i, j), \quad (2)$$

式中, $m(i, j)$ 为位移函数, $*$ 代表卷积, 求出位移函数即

可得到判读窗口的平均位移. 对上述式子采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT), 可得^[25]

$$\Phi(U, V) = F^*(U, V)G(U, V) / |F(U, V)|, \quad (3)$$

式中, $\Phi(U, V)$ 为位移函数 $m(i, j)$ 经傅里叶变换后的函数, $F(U, V)$ 和 $F^*(U, V)$ 分别是 $f(i, j)$ 经傅里叶变换后的函数和共轭函数, $|F(U, V)|$ 为 $F(U, V)$ 的模, $G(U, V)$ 是 $g(i, j)$ 经傅里叶变换后的函数. 对 $\Phi(U, V)$ 做反傅里叶变换即可得到位移函数 $m(i, j)$, $m(i, j)$ 峰值相对判读窗口中心的位移即判读窗口的平均速度. 为了降低羽流周围复杂环境对计算结果的干扰, 选取仅包含热液羽流体的局部图像作为计算区域(图2红色虚线范围), 本文采用窗口平移和双层网格嵌套的计算方案, 一级判读窗口大小为 64×64 像素, 二级判读窗口大小为 32×32 像素, 计算结果产生伪矢量通过滤波消除^[32].

4 结果与分析

4.1 羽流流场结构

深海热液羽流的时均流场结构(60 s平均)如图3(a)所示, 随上升高度增加, 热液羽流速度在近喷口区域呈增大趋势, 0.1 m/s 速度等值线横向扩展显著: 其截面宽度在高度 $25 \sim 40 \text{ cm}$ 内快速从 7.3 cm 增长至 21.9 cm , 在高度 40 cm 之后扩展速度放缓, 在高度 48 cm 时达到最

图2 热液羽流图像(红色虚线范围为计算区域)

Figure 2 Video image of the hydrothermal plume (red dotted line shows the region of interest).

大值 24.4 cm , 反映了羽流在近喷口区域因卷吸作用而迅速扩张的流动特征. 此外, 羽流截面速度呈非对称结构, 左侧流速矢量垂直向上, 右侧流速矢量则有明显的右向倾斜. 研究区域内羽流最大速度为 18.6 cm/s , 出现在水平位置 28.1 cm 、垂向位置 47.8 cm 处. 热液羽流中部区域(图3(a)黄色矩形框)的平均瞬时速度变化如图3(b)所示, 速度时间序列呈波动状态, 速度均值为 $16.4 \pm 8.9 \text{ cm/s}$, 表明热液羽流的流速在深海复杂环境下具有显著的波动特征.

根据各水平截面最大速度确定羽流中心线^[33], 羽流离开喷口后有右偏的趋势, 速度中心线位于羽流体的右侧区域(图4(a)), 这可能是当地深海底层流影响的结果. 图4(b)为特征截面s1和s2的水平速度分布, 虚线为各截面中心线的位置, s1截面的水平速度关于中心线对称, 并呈类高斯分布形态, 水平速度在中心线处取得最大值 6.3 cm/s . s2截面的水平速度结构受底流影响存在一定的右向倾斜, 最大速度出现在水平位置 25.9 cm 处(8.6 cm/s). 特征截面s1和s2的垂向速度均呈类高斯分布且表现出良好的对称结构(图4(c)): s1截面的最大垂向速度出现在中心线处, 为 12.4 cm/s , 在浮力和羽流卷吸作用下, s2截面的垂向速度较s1截面具有显著的横向扩展, 曲线两侧均外拓约 5 cm , 中心线位于截面的右侧区域, 最大垂向速度出现在水平位置 22.3 cm 处(12.4 cm/s).

图5(a)为热液羽流水平速度分布图, 其中黑色虚线为中心线位置, 红色实线为 4 cm/s 速度等值线; 图5(b)为羽流中心线上的水平速度分布, 水平速度集中在羽流体的右侧区域并近似关于中心线对称, 等值线截面宽度随羽流上升持续扩展, 表明羽流尚未达到稳定状态; 中心线上的水平速度持续增大且加速度逐渐减小: 在高度 30 cm 以内, 速度增长较快, 增长率约 $5.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; 在高度 30 cm 以上, 速度增长率降为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 研究区域内最大水平速度为 10.3 cm/s . 当水平底流绕过热液羽流时, 会在热液羽流背对底流区域形成负压, 产生水平压力差, 形成和底流方向一致的水平驱动力, 驱动热液羽流水平运动. 随着羽流上升, 高度越高的羽流流体受到的水平底流作用时间越长, 羽流水平速度与底流速度之间的速度差减小, 由绕流引起的负压也相应减弱, 热液羽流水平速度最终会趋于和底流速度一致, 根据图5(a)可以推断, 此时热液羽流水平速度尚未达到稳定, 可以估算当地海底

图3 热液羽流流场结构。(a) 时间平均流场, 其中红线为0.1 m/s速度等值线; (b) (a)图黄框区域内瞬时速度随时间变化, 其中红色虚线表示该区域平均速度

Figure 3 Flow fields of the hydrothermal plume. (a) Mean velocity fields, the red line represents the 0.1 m/s isoline; (b) time-dependent variations in local velocities (yellow rectangle in (a)), the red dotted line shows the mean velocity of this region.

底流特征速度大于10.3 cm/s, 这与海底锚系上的海流计实测结果(3.5~11 cm/s)相吻合^[24]。

图6(a)为热液羽流垂向速度分布图, 红色实线为5 cm/s速度等值线, 黑色虚线为中心线位置, 其上的垂向速度分布如图6(b)所示, 羽流垂向速度结构由于边缘卷吸作用呈倒锥形, 中心线位于羽流体的右侧区域, 等值线截面宽度在高度40 cm内增长较快, 在40 cm之上增长减缓。热液羽流以一定速度离开喷口后, 由于热液流体的密度显著低于环境水体(约为后者的80%),

因此受到环境水体给予的较强浮力作用, 中心线垂向速度在近喷口区域随羽流上升呈加速状态, 增长率约 $2.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 研究区域内的最大垂向速度出现在上升高度47.7 cm处, 其值为15.5 cm/s。

4.2 羽流流量

热液羽流流量是影响羽流与海洋间物质能量交换的重要参数, 可基于4.1节的热液羽流流场进行估算。本文将深海热液羽流的横截面简化成圆形^[3], 以式(4)

图 4 (a) 羽流速度中心线; (b) 特征截面的水平速度和(c)垂向速度

Figure 4 (a) Plume centerline; (b) the horizontal velocity profile and (c) the vertical velocity profile of two cross-sections (s1 and s2).

图 5 热液羽流水平速度分布(a)和中心线水平速度分布(b)

Figure 5 (a) Horizontal velocity fields of the hydrothermal plume and (b) the horizontal velocity profile along the plume centerline.

计算热液羽流不同高度的体积流量:

$$Q(z) = \sum_{\eta=1}^k v(z, x_{\eta}) A(z, x_{\eta}) s^2, \quad (4)$$

式中, z 为截面高度, x_{η} 为截面 z 上第 η 个水平像素点的中心坐标, k 为截面 z 的水平像素总数, s 为图像比尺(米/像素), $Q(z)$ 为截面 z 的体积流量, $v(z, x_{\eta})$ 为截面 z 第 η 个水

图 6 热液羽流垂向速度分布(a)和中心线垂向速度分布(b)

Figure 6 (a) Vertical velocity fields of the hydrothermal plume and (b) the vertical velocity profile along the plume centerline.

平像素点处的垂向速度, $A(z, x_\eta)$ 为 $v(z, x_\eta)$ 对应的圆环面积, 可由式(5)计算:

$$A(z, x_\eta) = \frac{\pi}{2} \left[\left(|x_\eta - x_c(z)| + 0.5 \right)^2 - \left(|x_\eta - x_c(z)| - 0.5 \right)^2 \right] + \frac{\pi}{4} I, \quad (5)$$

式中, $x_c(z)$ 为羽流中心线在截面 z 的水平像素中心坐标, I 为判断因子, 可由式(6)计算:

$$I = \begin{cases} 1 & x_\eta = x_c(z), \\ 0 & x_\eta \neq x_c(z). \end{cases} \quad (6)$$

热液羽流在上升过程中, 由于卷吸作用, 羽流会卷吸较冷的环境水体并携带其共同运动^[34]. 在该机制下, 羽流实验结果以及羽流积分模型理论均发现在近喷口区域, 羽流截面流量随羽流上升近似线性增加^[35-37]. 经式(4)计算的羽流流量分布如图7所示, 本研究也观察到截面流量与上升高度之间的强线性关系(相关系数为 $R^2=0.975$), 这佐证了本文估算的羽流流场结构和喷口流量是合理的.

根据视频资料和流场结构(图3), 并考虑单个流速矢量的实际长度, 估计喷口位于高度 22 ± 0.2 cm 处, 据此反演可得热液口流量 Q 约 $9.3 \pm 0.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. 进而,

图 7 羽流截面流量随上升高度变化

Figure 7 Volume fluxes of the plume as a function of plume rises.

可由式(7)计算喷口的热量输入 ϕ_q ^[38]:

$$\phi_q = \rho_a C_p Q (T - T_a), \quad (7)$$

式中, ρ_a 为环境海水密度 (kg/m^3), C_p 为环境海水比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 其在高压下的取值根据 Sun 等人^[39]提供的参数确定, T 为卧蚕-1 号热液喷口温度 (约

359°C), T_a 为环境海水温度(1.5°C), 计算可得卧蚕-1号热液喷口的热量输入 ϕ_q 约1.35±0.11 MW.

5 讨论

5.1 误差分析

由于深海热液羽流现场环境和观测设备的限制, 基于视频分析热液羽流流场结构仍存在一定误差, 主要来源包括: (1) 热液羽流周围环境中各种底流、矿物颗粒和生物活动会干扰相机成像, 降低图像信噪比; 同时影像资料分辨率也限制了互相关算法的反演精度, 反演精度随分辨率增加呈增大趋势; (2) 相机拍摄的是热液羽流三维结构的二维投影, 图像存在一定程度的偏移; (3) 相机倾斜导致的切向畸变会引起一定程度的透视现象, 使图像不同区域实际分辨率不一致^[40], 该畸变可以通过测量相机拍摄平面和热液羽流成像平面的夹角进行坐标转换矫正, 在本研究中, 热液羽流图像并未出现明显的透视现象, 因此由相机倾斜而导致的计算误差较小; (4) 热液羽流与海水间的折射率差异造成光线偏移, 模糊羽流边缘; (5) 图像互相关算法可能会对流速造成一定程度的低估^[28].

由4.1节可知, 卧蚕-1号热液区的海洋底流速度大于TAG(26°N)区域的底流速度(1~3 cm/s)^[41]. 根据海洋温盐循环理论^[42], 西北印度洋低纬度区域的自西向东深层流可能影响了卧蚕-1号热液区的底流. 此外, 该区域的全日分潮^[43]可能会造成底流出现周期约24 h的波动; 由于本文的观测数据是60 s的视频资料, 周期较大的动力过程如风应力^[44]、气候变化^[45]以及海水压力

变化^[45]等对流场的影响还有待长期观测. 相应地, 热液喷口位置、流速等的估算误差也会对热液羽流输入的热量和物质估算带来一定的误差.

5.2 热量输入及物质输入估算

卧蚕-1号热液区的赋矿围岩为玄武岩^[46], 在东太平洋海隆(East Pacific Rise, EPR)以及大西洋洋中脊(Mid-Atlantic Ridge, MAR)也存在类似的热液喷口, 其中EPR为快速扩张洋脊, MAR与卡尔斯伯格脊(CR)同为慢速扩张洋脊. 三个区域的典型高温热液喷口特征如表1所示, 其中CBC(central black smoker complex)烟囱群由3个黑烟囱组成. 当水深接近, 海水的 ρ 与 C_p 差异较小^[39], 由于EPR(21°N)和大西洋洋中脊TAG(26°N)热液区的热液羽流流量大于卧蚕-1号“火焰山”热液喷口流量, 估算出的卧蚕-1号“火焰山”热液羽流输入的热量仅为TAG(26°N)中CBC单个喷口输入热量的1/10, 与EPR(21°N)中热量输入最小的喷口相当, 这表明“火焰山”热液喷口向海洋释放的热量较低(在视频采集时间段). 地壳浅层的岩浆热源供给以及洋壳渗透率是影响热量输入大小的关键因素^[41], “火焰山”喷口较低的流量和热量输入可能暗示其热液流体通道欠畅或岩浆热源供给偏低.

根据热液喷口流量和金属元素浓度, 可进一步估算热液喷口释放的物质质量, 可由式(8)计算由卧蚕-1号“火焰山”热液喷口释放进入海洋的元素质量^[38]:

$$m = Q\rho_p CM, \quad (8)$$

式中, C 为摩尔分数, M 为摩尔质量(kg/mol), ρ_p 为热液羽流的密度, 此处以0.8 kg/m³计算^[50]. 根据卧蚕-1号

表 1 CR, EPR和MAR洋中脊典型热液区高温热液喷口物理性质

Table 1 Physical properties of representative hydrothermal vents on the CR, EPR, and MAR

热液区	6°N, CR	21°N, EPR ^[47,48]	TAG(26°N), MAR ^[41,47]
扩张速率 (cm/a)	2.4	9.2	2.4
热液喷口	卧蚕1号“火焰山”	Southwest Vent, National Geographic Vent	CBC
赋矿围岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
热液温度 (°C)	359	276~351	345~365
热液速度 (m/s)	0.19	1~2.4	1.1~1.7
热液口流量 (m ³ /s)	0.00093±0.00007	0.0012~0.011	0.035~0.054
热液口热量输入 (MW)	1.35±0.11	1.3~10	55~86
矿床年龄 (a)	—	40000	50000 ^[49]

“火焰山”喷口流体的分析结果, 铁元素的浓度为 $2803 \pm 28 \mu\text{mol/kg}$ ¹⁾, 因此, 可估算得到卧蚕-1号“火焰山”热液喷口向海洋输入的铁通量约 $3661 \pm 323 \text{ kg/a}$.

6 结论

基于图像区域互相关算法, 对西北印度洋卧蚕-1号“火焰山”热液羽流实测影像资料进行了分析, 主要

结论如下.

(1) 在初始动量和浮力通量的影响下, 羽流中心线最大垂向速度约 15.5 cm/s , 低于EPR(21°N)和TAG(26°N)区域的典型热液羽流流速; 羽流中心线最大水平速度约 10.3 cm/s , 表明该区域底流速度较大.

(2) 热液羽流流量随羽流上升近似线性增加, 据此估计卧蚕-1号“火焰山”热液喷口向海洋输入的热量约 $1.35 \pm 0.11 \text{ MW}$, Fe通量约 $3661 \pm 323 \text{ kg/a}$.

致谢 感谢中国大洋38航次全体成员在深海影像采集中的付出.

参考文献

- Li J B. Modern Metallogeny and Geology of Submarine Hydrothermal Sulfide (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [李家彪. 现代海底热液硫化物成矿地质学. 北京: 科学出版社, 2017]
- Wang J, Liu Q, Chen J, et al. Total mercury flux and offshore transport via submarine groundwater discharge and coal-fired power plant in the Jiulong River estuary, China. *Mar Pollution Bull*, 2018, 127: 794–803
- Hodgkinson M R S, Webber A P, Roberts S, et al. Talc-dominated seafloor deposits reveal a new class of hydrothermal system. *Nat Commun*, 2015, 6: 10150
- Breier J A, Toner B M, Fakra S C, et al. Sulfur, sulfides, oxides and organic matter aggregated in submarine hydrothermal plumes at 9°50'N East Pacific Rise. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 88: 216–236
- Jiang Z J, Han X Q, Wang Y J, et al. Characteristics of water chemistry and constituents of particles in the hydrothermal plume near 6°48'N, Carlsberg Ridge (in Chinese). Northwest Indian Ocean, *J Mar Sci*, 2017, 35: 34–43 [蒋紫靖, 韩喜球, 王叶剑, 等. 印度洋卡尔斯伯格脊6°48'N附近热液羽状流水化学参数异常和颗粒物成分特征. 海洋学研究, 2017, 35: 34–43]
- Gollner S, Riemer B, Martínez Arbizu P, et al. Diversity of meiofauna from the 9°50'N East Pacific Rise across a gradient of hydrothermal fluid emissions. *PLoS ONE*, 2010, 5: e12321
- Li J H, Niu X L, Feng J. The identification of the seabed black smoker chimney and its implication for scientific research (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2004, 19: 17–25 [李江海, 牛向龙, 冯军. 海底黑烟囱的识别研究及其科学意义. 地球科学进展, 2004, 19: 17–25]
- Xia J X, Li C, Ma Y F. Deep-sea hydrothermal activities: A hot research topic (in Chinese). *J Geomech*, 2007, 13: 118, 179–191 [夏建新, 李畅, 马彦芳. 深海底热液活动研究热点. 地质力学学报, 2007, 13: 118, 179–191]
- Lou Y Z, He Z G, Han X Q, et al. Numerical modeling of hydrodynamic processes of deep-sea hydrothermal plumes: A case study on Daxi hydrothermal field, Carlsberg Ridge (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 194–208 [楼映中, 韩喜球, 贺治国, 等. 深海热液羽流动力学特性的数值模拟研究: 以卡尔斯伯格脊大碯热液区为例. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 194–208]
- Zhu M L. Study of measurement method for seafloor hydrothermal vent flow field based on optical image sequence (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Qingdao: Ocean University of China, 2012 [朱明亮. 基于光学图像序列的海底热液喷口流场测量方法研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2012]
- Germanovich L N, Hurt R S, Smith J E, et al. Measuring fluid flow and heat output in seafloor hydrothermal environments. *J Geophys Res Solid Earth*, 2015, 120: 8031–8055
- Jackson D R, Jones C D, Rona P A, et al. A method for Doppler acoustic measurement of black smoker flow fields. *Geochem Geophys Geosyst*, 2003, 4: 1095
- Xu G, Jackson D R, Bemis K G, et al. Observations of the volume flux of a seafloor hydrothermal plume using an acoustic imaging sonar.

1) 韩喜球等, 数据未发表.

- [Geochem Geophys Geosyst](#), 2013, 14: 2369–2382
- 14 Rona P A, Trivett D A. Discrete and diffuse heat transfer atashes vent field, Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge. [Earth Planet Sci Lett](#), 1992, 109: 57–71
- 15 Ramondenc P, Germanovich L N, Von Damm K L, et al. The first measurements of hydrothermal heat output at 9°50'N, East Pacific Rise. [Earth Planet Sci Lett](#), 2006, 245: 487–497
- 16 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
- 17 Crone T J, Tolstoy M. Magnitude of the 2010 gulf of Mexico oil leak. [Science](#), 2010, 330: 634
- 18 Mittelstaedt E, Davaille A, Van Keken P E, et al. A noninvasive method for measuring the velocity of diffuse hydrothermal flow by tracking moving refractive index anomalies. [Geochem Geophys Geosyst](#), 2010, 11: Q10005
- 19 Mittelstaedt E, Escartín J, Gracias N, et al. Quantifying diffuse and discrete venting at the Tour Eiffel vent site, Lucky Strike hydrothermal field. [Geochem Geophys Geosyst](#), 2012, 13: Q04008
- 20 Chaubey A K, Bhattacharya G C, Murty G P S, et al. Spreading history of the Arabian Sea: Some new constraints. [Mar Geol](#), 1993, 112: 343–352
- 21 Ramana M V, Ramprasad T, Raju K A K, et al. Geophysical studies over a segment of the Carlsberg Ridge, Indian Ocean. [Mar Geol](#), 1993, 115: 21–28
- 22 Wang Y, Han X, Petersen S, et al. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. [Ore Geol Rev](#), 2017, 84: 1–19
- 23 Qiu Z Y, Han X Q, Wang Y J. Deep diving observations of hydrothermal activities in the northwest Indian Ocean (in Chinese). In: The 6th National Sedimentological Congress. Nanjing, 2017 [邱中炎, 韩喜球, 王叶剑. 西北印度洋现代海底热液活动之载人深潜观察. 见: 第六届全国沉积学大会. 南京, 2017]
- 24 Han X Q, Wang Y J, Wu Z C, et al. Field report of Chinese DY57th cruise (in Chinese). Internal Report. Hangzhou: Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2020 [韩喜球, 王叶剑, 吴招才, 等. 中国大洋57航次第二航段现场报告. 内部报告. 杭州: 自然资源部第二海洋研究所, 2020]
- 25 Chen Q G, Chen H, Zhong Q, et al. Principles and Practices of High-Frequency Image Velocimetry System (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2017 [陈启刚, 陈槐, 钟强, 等. 高频例子图像测速系统原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 2017]
- 26 Shavit U, Lowe R J, Steinbuck J V. Intensity capping: A simple method to improve cross-correlation PIV results. [Exp Fluids](#), 2007, 42: 225–240
- 27 Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry. [Exp Fluids](#), 2005, 39: 159–169
- 28 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
- 29 Maas H G, Gruen A, Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows. [Exp Fluids](#), 1993, 15: 133–146
- 30 Santilli K, Bemis K, Silver D, et al. Generating realistic images from hydrothermal plume data. In: IEEE Visualization. Austin, 2004. 2004
- 31 Huang H T, Fiedler H E, Wang J J. Limitation and improvement of PIV. [Exp Fluids](#), 1993, 15-15: 263–273
- 32 Zhang W, Zhao L, He Z G, et al. Characteristics of plumes in linearly stratified salt-water (in Chinese). [Adv Water Sci](#), 2016, 27: 602–608 [张巍, 赵亮, 贺治国, 等. 线性层结盐水中的羽流运动特性. 水科学进展, 2016, 27: 602–608]
- 33 Devenish B J, Rooney G G, Webster H N, et al. The entrainment rate for buoyant plumes in a crossflow. [Bound-Layer Meteorol](#), 2010, 134: 411–439
- 34 List E J. Turbulent jets and plumes. [Annu Rev Fluid Mech](#), 1982, 14: 189–212
- 35 He Z, Lou Y. Integral model for multiple forced plumes arranged around a circle in a linearly stratified environment. [Phys Rev Fluids](#), 2019, 4: 123501
- 36 Turner J S. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 1973
- 37 Baines W D. A technique for the direct measurement of volume flux of a plume. [J Fluid Mech](#), 1983, 132: 247–256
- 38 Baker E T, Massoth G J. Characteristics of hydrothermal plumes from two vent fields on the Juan de Fuca Ridge, northeast Pacific Ocean. [Earth Planet Sci Lett](#), 1987, 85: 59–73
- 39 Sun H, Feistel R, Koch M, et al. New equations for density, entropy, heat capacity, and potential temperature of a saline thermal fluid. [Deep Sea Res Part I-Oceanographic Res Papers](#), 2008, 55: 1304–1310
- 40 Wang J, Shi F, Zhang J, et al. A new calibration model of camera lens distortion. [Pattern Recognit](#), 2008, 41: 607–615

- 41 Goto S, Kinoshita M, Schultz A, et al. Estimate of heat flux and its temporal variation at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge 26°N. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2434
- 42 Elias S. Encyclopedia of Quaternary Science. Amsterdam: Elsevier, 2006. 737–747
- 43 McCammon C, Wunsch C. Tidal charts of the Indian Ocean north of 15°S. *J Geophys Res*, 1977, 82: 5993–5998
- 44 Thomson R E, Mihály S F, Rabinovich A B, et al. Constrained circulation at Endeavour ridge facilitates colonization by vent larvae. *Nature*, 2003, 424: 545–549
- 45 Sohn R A, Thomson R E, Rabinovich A B, et al. Bottom pressure signals at the TAG deep-sea hydrothermal field: Evidence for short-period, flow-induced ground deformation. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L19301
- 46 Popoola S O, Han X, Wang Y, et al. Mineralogical and geochemical signatures of metalliferous sediments in Wocan-1 and Wocan-2 hydrothermal sites on the Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Minerals*, 2019, 9: 26
- 47 Hannington M D, de Ronde C D J, Petersen S. Sea-floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. 111–141
- 48 Converse D R, Holland H D, Edmond J M. Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N): Implications for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 69: 159–175
- 49 Lalou C, Reyss J L, Brichet E, et al. Hydrothermal activity on a 10⁵-year scale at a slow-spreading ridge, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge 26°N. *J Geophys Res*, 1995, 100: 17855–17862
- 50 Kretschmar U, McBride D. The Metallogeny of Lode Gold Deposits. Amsterdam: Elsevier, 2015. 151–198

Flow fields and outputs of the hydrothermal plume at the Wocan-1 field based on an *in-situ* video

CHEN YaNan¹, LOU YingZhong¹, HE ZhiGuo^{1,2}, WANG YeJian³,
QIU ZhongYan³ & HAN XiQiu^{1,3}

¹ Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316012, China;

² Engineering Research Center of Oceanic Sensing Technology and Equipment of Ministry of Education, Zhoushan 316021, China;

³ Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration & Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Deep-sea hydrothermal plumes are an essential medium for exchanging the heat and elements between the lithosphere and hydrosphere and contribute to elemental cycling and marine chemistry evolution. In this paper, based on field video footage of a black smoker recorded at the Wocan-1 hydrothermal field on the slow-spreading Carlsberg Ridge in the northwestern Indian Ocean, the flow fields of the “Huoyanshan” hydrothermal plume were calculated using a cross-correlation algorithm. In addition, the heat and chemical outputs of the hydrothermal vent are investigated using the estimated source volume flux and fluid properties obtained from *in-situ* measurements. The results reveal that as the plume rises, the vertical velocity along the plume centerline increases, reaching a maximum value of approximately 15.5 cm/s. This tendency is attributed to the combined effect of initial momentum flux and buoyancy flux. The maximum horizontal velocity along the plume centerline is approximately 10.3 cm/s, indicating a strong deep ocean current on the Carlsberg Ridge. Due to plume entrainment, the volume flux of the hydrothermal vent linearly increases with increasing plume rise. Furthermore, the heat and iron outputs from the “Huoyanshan” hydrothermal vent were estimated as 1.35±0.11 MW and 3661±323 kg/a, respectively. These results provide valuable insights into the plume dynamics of submarine hydrothermal vents and the deep-sea thermal and elements balance.

hydrothermal plume, image analysis, cross-correlation algorithm, heat output, chemical output

doi: 10.1360/SST-2021-0041