

# 海底冷泉流体渗漏的原位观测技术及冷泉活动特征

邸鹏飞<sup>1,3</sup>, 冯 东<sup>1</sup>, 高立宝<sup>4</sup>, 陈多福<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广州 510640; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 核工业二零三研究所, 咸阳 712000)

**摘 要** 海底冷泉渗漏是海洋环境中广泛分布的自然现象. 本文主要介绍海底冷泉原位观测技术及全球几个典型冷泉渗漏活动地区的原位观测结果. 冷泉渗漏活动主要发育在海底裂隙和断层发育的地区, 海底常有泥火山、麻坑、水合物、冷泉生物群落和冷泉碳酸盐岩的发育. 冷泉渗漏主要包括液体和气体两种形式, 流体流动包括上升流和下降流两种方式, 流量变化大, 主要与海底环境及构造作用有关. 烃类渗漏是以气泡、油滴的形式沿断层向海底喷溢, 释放大, 运移过程主要受涌浪、静水压力和裂隙压力等因素控制. 冷泉渗漏活动是复杂的水文地质过程, 受水合物形成和分解产生的气藏的充注和排空、深部常规油气藏的破坏及海底环境变化等多种作用的控制.

**关键词** 冷泉, 流体渗漏通量, 原位测定, 天然气水合物

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)05-1592-11

## In situ measurement of fluid flow and signatures of seep activity at marine seep sites

DI Peng-fei<sup>1,3</sup>, FENG Dong<sup>1</sup>, GAU Li-bao<sup>4</sup>, CHEN Dou-fu<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

**Abstract** Cold seepage is a widely observed phenomenon in marine environment worldwide. This paper focuses on a review of the in situ measurement of cold seep and its results of several typical active cold seeps in the world. Seepage activity is generally associated with the seafloor fractures and faults. Mud volcanoes, pockmarks, hydrate, cold seep communities, and seep carbonate are common at the seep sites. Basically, there are two types of fluids, liquid and gas, and two modes of fluid flow, upward and downward flow at seep sites. The flux of fluid changes greatly, which is usually controlled by the geological settings. Hydrocarbon seepage erupts along a fault to seabed as bubbles and oil drops, releasing large amount of hydrocarbons. This process is controlled mainly by swell, hydrostatic pressure, and fracture pressure and so on. Seepage activity is a complicated hydrogeology process that is mainly correlated with hydrate formation and decomposition related to the filling and emptying of gas reservoir, destruction of deep oil and gas reservoir, and submarine environmental change.

**Keywords** cold seep, fluid flux, in situ measurement, gas hydrate

### 0 引 言

天然气为主的冷泉流体向海水的喷溢活动广泛发育在大陆边缘海底<sup>[1]</sup>, 是海洋环境中一种非常广

泛的自然现象<sup>[2]</sup>, 这种海底的冷泉活动每年约有 20Tg 的甲烷从海洋进入大气<sup>[3]</sup>. 海底冷泉烃类气体的来源之一是天然气水合物分解产生的甲烷. 海底沉积层中的天然气水合物的量是巨大的, 初步估计

收稿日期 2008-03-10; 修回日期 2008-06-24.

基金项目 国家“863”海洋技术领域前沿探索项目(2007AA09Z221). 国家基金项目(40725011 和 U0733003)资助.

作者简介 邸鹏飞, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事海底冷泉及天然气水合物研究. (E-mail: dipf06@gig. ac. cn)

\* 通讯作者: 陈多福(E-mail: cdf@gig. ac. cn)

海底甲烷水合物矿床约有 2000Tg<sup>[4]</sup>,而且,甲烷是一种强温室效应气体,其效应是相同质量二氧化碳的 20 倍以上,如果大规模水合物分解产生的甲烷通过水体进入到大气中,将会造成大量海底生物灭绝,导致全球碳循环和气候发生重大变化<sup>[5,6]</sup>.有证明表明,在第四纪、古新世/始新世界线附近、早白垩世、早-中侏罗世及二叠/三叠纪界线附近都发生过大规模的海底生物灭绝事件,可能与大规模甲烷水合物分解产生的甲烷释放事件有关<sup>[7~11]</sup>.同时,大陆坡海底冷泉是化学自养生物群及渗漏型天然气水合物发育的理想场所<sup>[5,12,13]</sup>.全球冷泉分布广泛,从热带海域到两极极区、从浅海陆架到深海海沟均有分布<sup>[14]</sup>,其中现代(活动)冷泉分布在除南北极区外的各大洋<sup>[14,15]</sup>,主要沿美国阿拉斯加州、俄勒冈州、加利福尼亚州及中美洲国家和秘鲁、日本,新西兰的大陆边缘分布(图 1).因此,观测海底冷泉渗漏对于认识海底天然气水合物的形成与分解、烃类气体运移机制、冷泉流体活动特征及其控制因素等有重要的科学意义.

海底冷泉流体活动观测内容主要有流体或气体的流量、温度等.应用温度传感器直接对冷泉活动区海底水体和沉积物的温度进行测定,而冷泉流量的

测定主要是通过化学和流体输送测量仪和涡轮渗漏帐篷流量计进行测定,测定的数据直接记录并保存在海底的存储器中.然而我国在这方面的研究才刚刚起步,还没有对南海冷泉渗漏系统中渗漏天然气的量、海底温度等进行较长时间的原位定量测定,目前的研究主要是采用地球物理等方法探测南海底部发育的 BSR 和海底冷泉渗漏区,并采用地球化学方法分析南海底部存在天然气水合物的发育环境等<sup>[16,17]</sup>.加强海底冷泉流体渗漏的原位观察对于研究南海正在活动的海底冷泉渗漏系统有重要意义.

目前海底冷泉渗漏观测主要集中在墨西哥湾布什山、卡斯特水合物脊及圣塔芭芭拉海峡 Coal Oil Point(简称 COP)渗漏区.通过对这三个冷泉活动区的海底实地的原位观测表明,海底冷泉天然气渗漏活动在不同的沉积截面的能量和物质在时间上和空间上都是多变的.在不同的冷泉发育区或同一渗漏区的不同的渗漏点,海底冷泉渗漏的流量有较大的变化范围,这些特征可能与海底地质背景和沉积物的渗透率有关,由生物泵作用、潮汐作用及构造作用等多种机制控制<sup>[19~22]</sup>.本文重点介绍主要的几种海底冷泉观测技术及世界三个典型海底冷泉活动区的观测结果,及冷泉渗漏活动特征与控制因素.

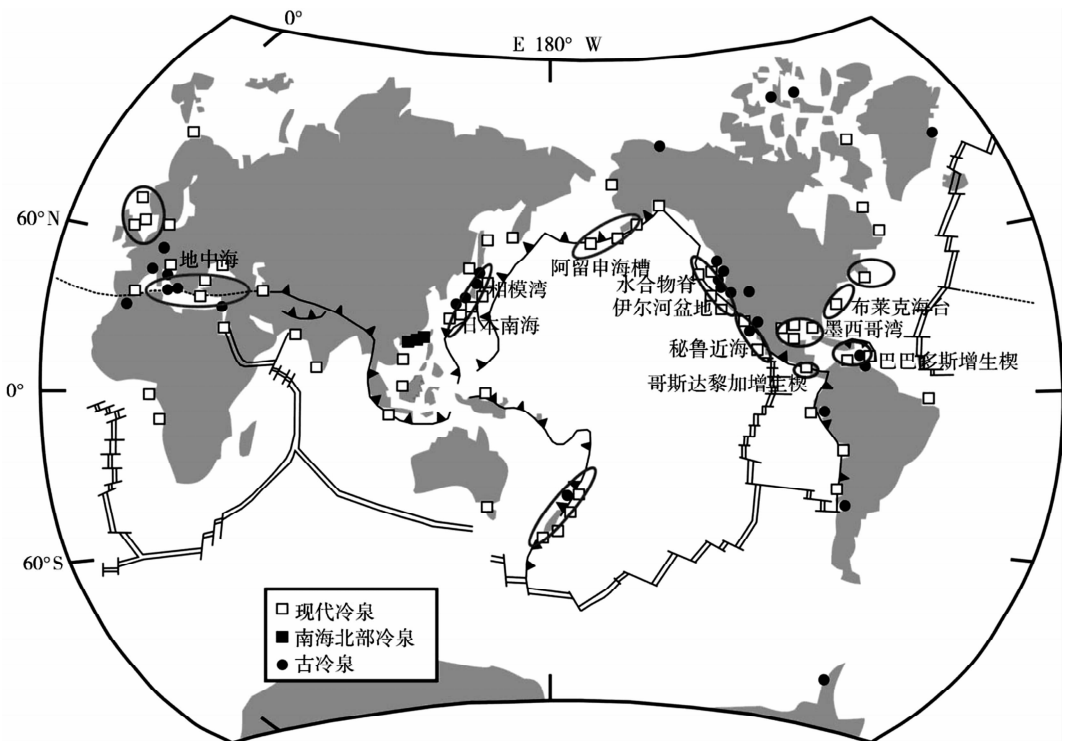


图 1 全球现代(活动)冷泉及我国南海北部冷泉分布图<sup>[14,18]</sup>

Fig. 1 Distribution map of modern cold seepages around the world and in northern South China Sea<sup>[14,18]</sup>

## 2 观测仪器和技术原理

### 2.1 化学和流体输送测量仪(CAT)

图2为化学和流体输送测量仪的组成示意图(简称CAT测量仪,英文为The chemical and aqueous transport meter)<sup>[19,23,24]</sup>,它主要用于测量海底流体向上和向下流动的流量及流体的Na、Mg、Ca、K、S等主要元素含量.该仪器主要由底部敞开的收集箱(A)、入口或出口管(I/O管)、样品管卷(B1和B2)、示踪剂溶液室(C),NaCl饱和溶液室(D)、去离子水室(DI)和单向渗透隔膜泵(M1和M2)组成.测量的流量范围为0.01~1500 cm/a,时间分辨率为总时间的0.5%<sup>[19,24]</sup>.

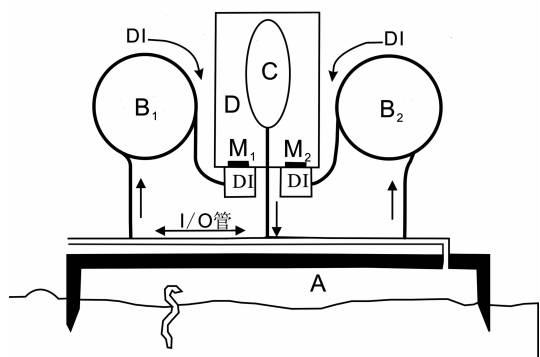


图2(A)化学和流体输送(CAT)测量仪示意图<sup>[19,23,24]</sup>.

Fig. 2 A. Schematic representation of CAT meter<sup>[19,23,24]</sup>.

A:收集箱,与海底密封;B1和B2:样品卷管并充满去离子水;C:示踪剂溶液,其包裹膜为受压易变形的弹性膜;D:NaCl饱和溶液的盐室;DI:去离子水室;M1和M2:单向渗透隔膜,用于分隔去离子水室和盐室,并可以在化学浓度差的作用下使DI室中的去离子水通过单向渗透隔膜渗透到盐室中.

CAT测量仪基本原理是CAT测量仪主要使用化学示踪剂(3%的RbCl)的稀释程度来测量流过收集箱顶部I/O管的流体流量.CAT测量仪的收集箱陷入到沉积物内,与海底形成密封状态,海底向上渗漏的流体进入收集箱,沿I/O管向外流出CAT测量仪,而向下渗漏则是收集箱内的海水向海底之下渗漏,外部海水沿I/O管流向收集箱而得到补充.单向渗透隔膜泵是CAT测量仪的关键,其工作原理是单向渗透隔膜分隔去离子水室(DI)和NaCl饱和溶液的盐室(D),由于去离子水和NaCl饱和溶液存在着浓度差,去离子水室中的去离子水在确定的

温度下恒速地通过单向渗透隔膜流入盐室,使盐室中的NaCl饱和溶液稀释,导致NaCl溶液体积增大,挤压示踪剂室(C)的易变形的非渗透隔膜,使示踪剂室中与渗漏流体密度相近但成分不同的示踪剂溶液恒速地注入到流过I/O管中,与I/O管流过的水流相混合,自动记录了二个渗透隔膜泵(M1和M2)的渗漏速率 $P_1$ 和 $P_2$ .由于去离子水注入到盐室中,使样品卷管中的去离子水流入到去离子水室中得以补充.同时把流过收集箱顶部的I/O管的渗漏流体或混入了示踪剂的渗漏流体引入到二个样品卷管中,在仪器回收后,割开样品卷管,把流体分成每个在1.0~4.0cm<sup>3</sup>的样品,对样品进行二次抽样后,用电感耦合等离子体(ICP-OES)分析旋管中示踪剂(RbCl)在样品中的浓度( $C_{sample}$ )和流体中主要离子浓度(Na、Mg、Ca、K、S、Sr、B、Li),同时测定样品中的示踪剂(RbCl)浓度( $C_{sample}$ ),计算流速.

图3显示了两个样品卷管中示踪剂的稀释程度来确定流体流动速率和方向.如果B<sub>1</sub>样品卷管中含有示踪剂,则测定的流量速率( $q$ )小于B<sub>1</sub>渗透泵速率( $P_1$ ).如果B<sub>1</sub>样品卷管中不含示踪剂,则 $q > P_1$ .这种关系上升流和下降流都适用,在计算时使公式中的 $P_1$ 和 $P_2$ 、M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>相对位置调换.当 $q < P_1$  ( $f_2 = 1$ ),流量速率( $Q$ )用下面公式确定:

$$(1) \quad Q = P_1(1 - f_1)/A, \text{ 或 } f_1 = 1 - q/P_1$$

当 $q > P_1$  ( $f_1 = 0$ ),流量速率 $Q$ 用下面公式确定:

$$(2) \quad Q = (P_1/f_2 + P_2/f_2 - P_2)/A, \text{ 或 } f_2 = (P_1 + P_2)/(q + P_1)$$

其中 $f$ 是示踪剂在样品中的分数( $C_{sample}/C_{tracer}$ ), $C$ 分别是作为示踪剂的化学试剂在样品和示踪剂中的浓度. $f_1$ 是样品卷管B<sub>1</sub>中示踪剂在样品中的分数; $f_2$ 是样品卷管B<sub>2</sub>中示踪剂在样品中的分数.

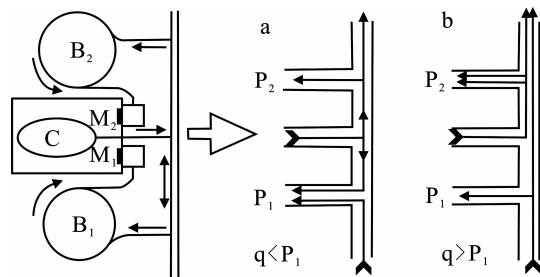


图3 示踪剂浓度与流量速率示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 3 Tracer concentration vs. flux rate<sup>[24]</sup>

(a)在 $q < P_1$  ( $q$ 是测定的流量速率, $P_1$ 是渗透泵M<sub>1</sub>的速率),表示样品卷管B<sub>1</sub>中为渗漏流体和示踪剂的混合溶液,而样品卷管B<sub>2</sub>中是无渗漏流体的纯示踪剂溶液,即 $f_2 = 1$ ; (b)在 $q > P_1$ ,表示样品卷管B<sub>2</sub>中是混合溶液,而样品卷管B<sub>1</sub>中为不含示踪剂的纯渗漏流体,即 $f_1 = 0$ .

## 2.2 涡轮渗漏帐篷流量测定装置

图 4 为涡轮渗漏帐篷(Turbine seep-tent)流量测定装置示意图<sup>[3,25,26]</sup>,主要由数据记录仪、光学编码器、涡轮、烟筒、气泡破碎格子、漏斗状圆锥帐篷等组成.当渗漏的气体流量 $>5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ,才能持续有足够的能量使涡轮旋转而测定渗漏速率<sup>[4]</sup>,因此测定的流速范围在 $5 < Q < 23,600 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ <sup>[3,25]</sup>.观测过程是底部直径为 2 m 的圆锥帐篷陷入进沉积物中,与海底形成密封状态,沿着海底裂隙渗漏出的气泡上升进入到圆锥帐篷里的海水中,上升气泡推动底部海水形成上涌流体驱动涡轮旋转,通过测定涡轮的旋转速率( $R$ )计算烃类气体的渗漏流速( $Q$ )<sup>[25,26]</sup>.破碎网格的作用是上升气泡穿过破碎网格使气泡尺度分布变均匀,减少气泡尺度对上涌流体流动的影响,同时破碎格子可以防止碎屑进入,堵塞涡轮<sup>[26]</sup>.涡轮轴上的四块磁体检测到涡轮的旋转角速度,旋转穿过霍尔效应传感器并产生脉冲,多通道数据记录仪记录每个时间间隔的脉冲数来确定最高的时间分辨率(0.2 s).海底渗漏的烃类气体也常含有原油,因此从渗漏口冒出的含油气泡,在上升通过油气分离器将原油则吸附在圆锥帐篷的内表面或者收集在 1 升的样品罐内,气泡则继续上升推动涡轮旋转<sup>[4]</sup>.待仪器回收后,用二氯乙烷清洗帐篷的内表面或样品罐,可以得到渗漏原油的流量.气体流量作为旋转速率的函数是通过标定实验校准后得到的,气体流量( $Q$ )与旋转速率( $R$ )之间存在着拟合关系:

$$(3) Q = 104.42 \times R^{1.82},$$

其中  $Q$  是气体流量( $L/s$ ), $R$  是旋转速率(每秒转数).或者气体流量  $Q$  与脉冲速率  $P$  也存在着拟合关系:

$$(4) Q = 0.0023 \times P^{2.059},$$

其中  $Q$  是气体流量( $L/s$ ), $P$  是脉冲速率(Hz).

## 3 海底冷泉流体渗漏区原位观测

### 3.1 美国墨西哥湾布什山冷泉渗漏区

墨西哥湾北部布什山(Bush Hill)是冷泉渗漏活动发育的典型地区<sup>[27]</sup>,水深约为 540 m,主要沿长约 100 m 的 NE 倾向断裂分布,海底表面被管状蠕虫、贝类、菌席等冷泉生物群和冷泉碳酸盐岩覆盖,同时发育有天然气水合物,局部地区天然气水合物呈丘状出露于海底<sup>[28]</sup>.海底观测表明天然气渗漏气泡等沿着断层正在向海底喷溢,在地震剖面上清晰地显示了渗漏通道和断层与深部的盐丘构造有关<sup>[29]</sup>.在野外可以观测到的连续渗漏的天然气泡和油滴及海表面的油花,同时通过卫星遥感可以观测这种渗漏在海表面形成的油膜,表明该区是一个正在活动的冷泉区,渗漏流体主要来源于在 6~10 km 深的中生代含油气系统<sup>[28]</sup>.

应用 CAT 测量仪(图 1)对布什山的海底冷泉渗漏进行了 3 个月的长期观测,在海底不同颜色的细菌席、碳酸盐岩、水合物等 6 个地点进行了观测(表 1).6 个地点测得的平均流速 0.063~0.75 mm/d.在白色细菌席(仪器 J 和 L)的流体渗漏速率最高,与冷泉流体喷溢有关,J 和 L 测定的流速分别为 16 mm/d 和 19 mm/d.除了喷发事件之外,流动速率大约在 0.03~0.3 mm/d,其中 L 为无冷泉生物群的点,测定的流体化学成分与海水相似,可能是渗入断层中的海水与断层流体混合而产生的流体.仪器 M 和 N 观测的流动速率与 J 和 L 相似,约 0.03~0.3 mm/d,存在有小喷溢事件的发生.M 和 N 点、J 和 L 点具有非常相似的流动形式和速率,可能是布什山渗漏区的典型流动特征.在临近水合物丘的红色细菌席(仪器 K 和 O)观测到了周期性的下降流,流速很低,可能是气藏中气体向外喷溢,使气藏收缩后需流体补充形成的下降流,表明 K 和 O 地点可能与地下的气藏和含气流体的通道相连<sup>[27]</sup>.其中 K 和 N 点仪器回收后丢失了部分记录,可能是样品卷管中收集的流体去气和排空造成的.由于只有在上升流阶段才能收集到含气流体,因此记录的丢失部分应该是上升流,同时流体很快进入收集箱

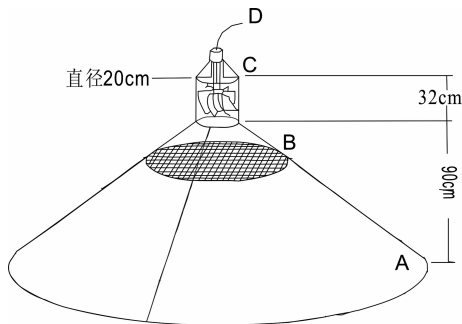


图 4 涡轮渗漏帐篷示意图及嵌入的涡轮细节<sup>[3,25,26]</sup>

Fig. 4 Turbine seep-tent schematic and inset showing turbine details<sup>[3,25,26]</sup>

A:圆锥帐篷,底部直径 2 m,高 90 cm,与海底密封;B:气泡破碎网格;C:流量测量烟筒,由直径 20 cm,高 32 cm 的烟筒、光学编码器和倾斜 45°的涡轮刀片组成,用于流量测定及数据转换;D:数据记录仪.

中. 在仪器回收后对样品卷管里的流体进行二次抽样和分析表明, M 和 N 点有富集甲烷的流体从海底向上渗漏, 流体中硫(S)和钙(Ca)的浓度是海水的浓度的 50~70%<sup>[27]</sup>. 然而, 水合物丘的临近地区(O 点)流体的化学成分与海水相近, 表明有足够多的海水注入, 而使其注入的驱动力可能是 BSR 之下甲烷气体的排空和充注引起气藏的收缩和膨胀<sup>[27]</sup>. 远离水合物丘的地区, 渗漏活动性比较弱, 海水的注入不能改变渗漏流体的化学成分. 细菌席指示明显的上升流, 且颜色不同指示不等的流量速率, 底栖生物蛤类等指示下降流, 是海底沉积物高渗透率的标志. 流体喷溢可能与当地的地质背景有关, 流体沿着渗漏通道流动形成上升流<sup>[29]</sup>.

表 1 CAT 测量仪展布在布什山的情况<sup>[27]</sup>

Table 1 Summary of CAT deployment at the Bush hill<sup>[27]</sup>

仪器	地点描述	流量范围	平均流量
J	大块密集白色细菌席	0.015~16	0.75
K	临近水合物丘的红色小细菌席	-0.013~>3	>0.3
L	无生物, 白色细菌席附近, 断层延伸线	0.0015~19	0.38
M	中等规模白色细菌席	0.011~0.9	0.063
N	块状白色细菌席, 碳酸盐岩	0.0003~0.74	0.11
O	临近水合物丘密集红色/桔红色细菌席	-0.014~≥4	0.55

注: 单位是 mm/d

出露在海底的水合物丘及海底沉积物直接或间接地受到海底温度、流体的流动和生物的活动及潮汐作用等多种作用的影响. 水合物丘的裂缝及周围沉积物的分布说明水合物丘正在增长<sup>[30]</sup>. 通过对水合物丘、海底沉积物及底部海水的温度原位观测表明, 水合物丘、海底沉积物和底部海水温度变化基本一致(表 2). 在海水温度变化的过程中, 海底监控图像没有观察到水合物丘的分解并产生气泡, 表明了出露在海底的水合物丘没有受到海水温度短期变化的影响. 但海水温度增加几个小时以后, 气体喷溢活动或流体渗漏的速度会增加, 同时使海底沉积物发生悬浮, 水合物丘可能发生了分解<sup>[31]</sup>, 图 5 中显示了气体流量和水温之间的相关性(虚线指示的位置), 即水温增加后会引引起气体流量的增加<sup>[32]</sup>. 海底观测表明生物活动和沉积物动荡没有改变水合物丘的形状和大小, 没有对水合物丘产生明显的影响<sup>[30]</sup>. 海底水合物丘表面覆盖着松散沉积物, 使海水温度变化对其影响减少. 在温度和悬浮泥沙的能

谱分析中所显示的频率峰值表明了潮汐和惯性流是加速覆盖在水合物丘上沉积物变化的驱动力, 然而高频率的沉积物变化可能与流体的间歇性高速渗漏有关, 与潮汐变化无关<sup>[30]</sup>. 水合丘分解或气体喷溢也可能使海底水合物丘临近地区的沉积物发生改变.

表 2 温度观测数据结果<sup>[28,30]</sup>

Table 2 Data of temperature observation<sup>[28,30]</sup>

遥感装置	监测地点	结果	平均值
温度探头 #1	丘状水合物	6.59~9.82°C	7.85°C
温度探头 #2	海底沉积物	6.59~9.66°C	7.86°C
热敏电阻器	海底底部水	6.64~9.73°C	7.90°C

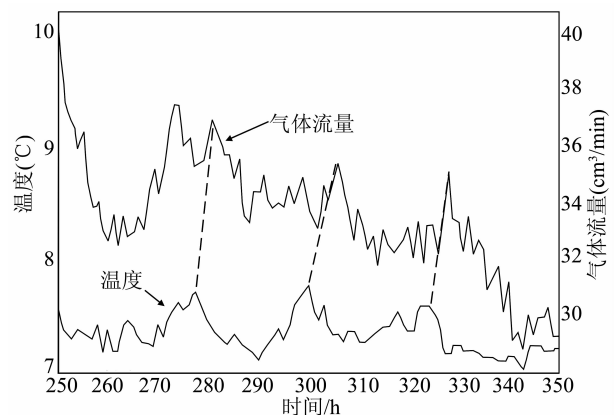


图 5 水温和气体流量之间的相关性<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Correlation between water temperature and gas flux<sup>[32]</sup>

### 3.2 卡斯特水合物脊渗漏区

水合物脊(Hydrate Ridge)海底是一个强水文地质活动地区, 冷泉渗漏和天然气水合物广泛发育, 主要分布在海底南部和北部高地<sup>[13,33]</sup>, 冷泉流体渗漏和气体喷溢与海底断裂有关<sup>[29]</sup>. 水深 800 m 的水合物脊南部高地广泛发育的断层使海底的碳酸盐岩结壳发生了破裂, 产生大量的流体渗漏活动, 伴随着周期性的甲烷气体喷溢, 海底沉积了富含有机质的松散沉积物, 冷泉生物群落(蚌、蛤、蠕虫、细菌席)呈斑块状产出, 并呈线状分布, 并观测到水合物出露于海底沉积物中<sup>[33~34]</sup>. 水深 600 m 的水合物脊北部高地海底发育有大量的碳酸盐岩生物丘(carbonate chemoherm)和松散沉积物, 面积约 1.5 km<sup>2</sup><sup>[35]</sup>. 渗漏区主要集中发育在该地区海底地形的最高点附近, 气体喷溢的间歇性与潮汐周期一致, 而且气体的喷溢活动发生在低潮或高潮期间<sup>[33]</sup>. 矿物的脱水作用和成岩作用增加了流体来源, 流体可以通过多种通

道渗漏进入海水<sup>[33]</sup>.

CAT 测量仪对水合物脊北部和南部高地的冷泉活动进行了 8 个地点的观测,图 6 为观测结果.在水合物脊北部高地,面积约 40 m<sup>2</sup> 的密集生物蛤的覆盖区(clam 1 生物蛤区,F 点)主要为下降流,第一周记录了下降流,流量 > 5 cm/a,随后流量以几 mm/a 的速率下降.E 点(clam 1 区域边缘附近)记录的下降流平均流量仅 0.5 cm/a,流速变化不大.面积约 2 m<sup>2</sup> 的生物蛤区域边缘(clam 3 生物蛤区,C 点)流量变化大,上升流最高为 50 cm/a 和下降流最低为 10 cm/a,周期变化短,频率高,流动方向转变约为 7~15 d,可能处在该地区的高渗透性沉积物之上<sup>[23]</sup>.在距生物蛤区域外的 4 m 处(A 点)记录的流量速率小于 1 mm/a,且周期变化长,频率低,流动方向转变约为 11~12 d.所有生物蛤区域记录的流速均小于 10 cm/a 左右的下降流,是生物蛤区域流体流动的典型模式.

水合物脊南部高地冷泉生物群顶点东南部的细

菌席(H 点)记录了流体高流出速率,流速高达 1000 cm/a,是相对持续的似海水孔隙流体,可能是海水大量涌入稀释了流体中的 Ca、S 的浓度.而另外两个细菌席发育点(B 和 D 点)的流量速率分别为 250 cm/a 和 150 cm/a,并且发生高频率的波动,流量高频率长周期的变化指出孔隙流体成分在似海水和低 Ca、S 的浓度之间发生变化,可能与深部构造作用引起的矿物去水作用和成岩反应有关,增加了流体的来源<sup>[[33,36,37]</sup>,流体中 S 和 Ca 的浓度比海水的浓度值低,表明流体中 S 的来源是海水硫酸盐是在甲烷缺氧氧化细菌作用下形成的<sup>[19,38]</sup>.两处的流量速率的波动变化与该地区水合物形成与分解改变了沉积物渗透率变化有关.在细菌席外的 200 m 处的几处斑块状发育的贝壳和碳酸盐岩处,明显观测流量速率从 mm/a 到 cm/a 变化,与哥斯达黎加剪切带地区的流动速率在 mm~cm/a 间的变化一样,可能是由该地区的地形控制的<sup>[22]</sup>.

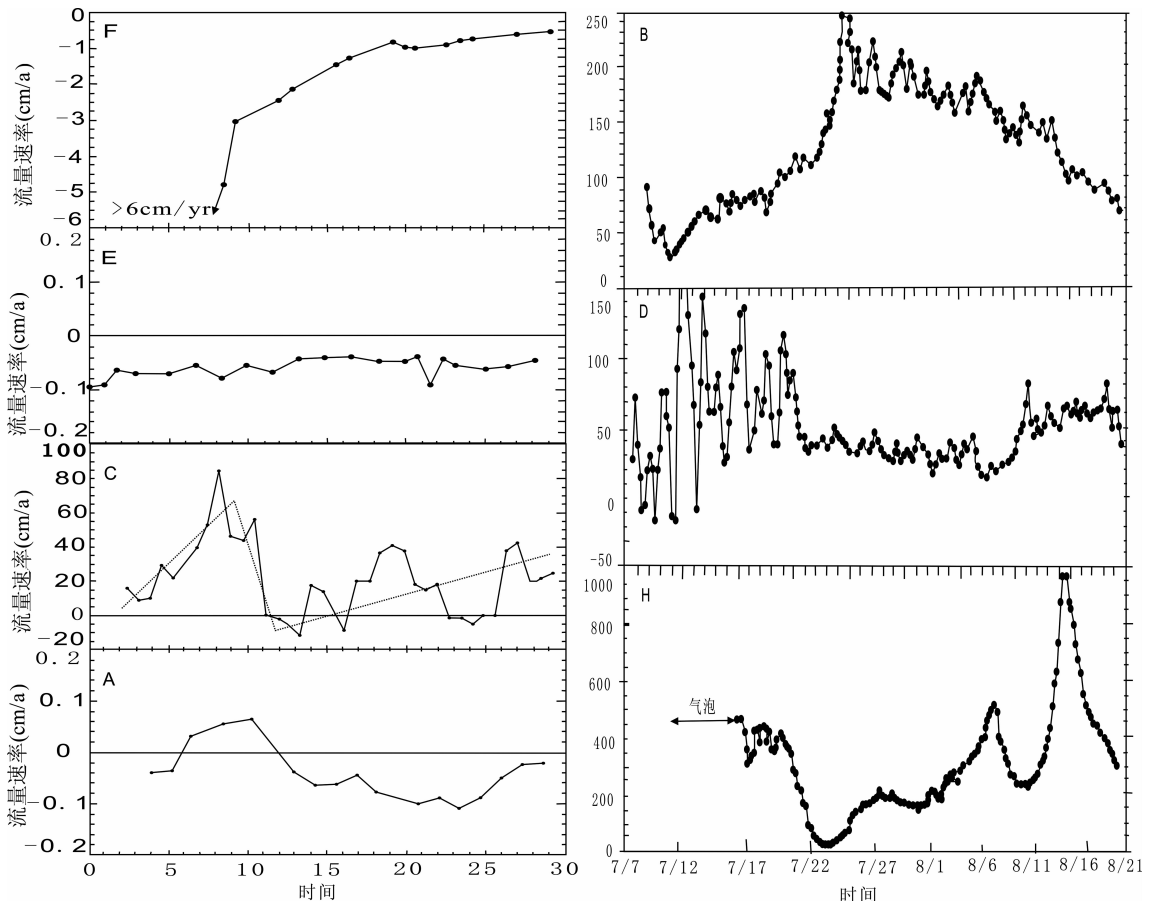


图 6 分别展布在水合物脊北部和南部的仪器 A、C、E、F 和仪器 B、D、H 的流量速率<sup>[19,23]</sup>

Fig. 6 Flux rate for meter A, C, E, F and B, D, H for deployment on the northern and southern HR respectively<sup>[19,23]</sup>

Clam1(F/E) 蛤密集覆盖区、细菌席和足够多的沉积物, Clam3(A、C) 发育活的幼年生物蛤. F 适度递减的下降流, A 缓慢上升流和下降流的变化, B、D、H 记录的是高流量和多频率周期变化

### 3.3 圣塔芭芭拉海峡 COP 渗漏区

圣塔芭芭拉海峡 COP 渗漏区每天约有  $1.5 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5 \text{ m}^3$  的甲烷气体释放到大气中<sup>[33]</sup>. 大多数冷泉渗漏口沿 Ellwood 断层呈线状分布<sup>[3,4]</sup>. 其中水深约 22 m 的 Shane 渗漏区海底发育了细菌席、烃类喷溢火山 (Hydrocarbon volcanoes-HC) 或焦油喷溢火山 (tar volcanoes) 及焦油球状物的喷溢<sup>[3]</sup>. Shane 渗漏区表面覆盖了约 2~3 m 含 1~2% 总有机碳的细粉沙沉积, 在 Monterey 基底之上的沙体上部 30 cm 的沙质沉积主要是由焦油固结的细粉沙组成, 则表明喷溢出的有机物质含有大量的焦油, 而且 HCV 的火山通道可能也是由焦油固结细粉沙组成<sup>[25,26,39]</sup>.

利用涡轮渗漏帐篷流量测定装置对水深约 22 m 的 Shane 渗漏区冷泉活动进行观测. 在观测期间, Shane 渗漏区海底形态明显发生了变化, 包括新的 HCV 的出现和重新分布, 以及火山通道的消失和重现<sup>[3,26]</sup>. 3 号 HCV 的出现可能是由于 1 号和 2 号 HCV 的通道被堵塞, 气体沿着其它裂隙渗漏形成的<sup>[26]</sup>. 在 HCV 形成的同时, 渗漏口周围的沉积物也发生了变化, 由细沙逐渐变成卵石<sup>[26]</sup>. HCV 形成的火山墙比海底高出约 50~100 cm, HCV 渗漏口排列成东西走向, 可能是受东西向的断裂构造控制<sup>[36]</sup>.

涡轮渗漏帐篷流量测定装置观测 Shane 渗漏区的流量变化如图 6 所示, 1~3 号 HCV 的流量有下降趋势, 与潮汐变化趋势基本一致, 几乎在同一个时间停止, 且振动频率均是 7 s, 与涌浪频率相符合, 驱动力可能是涌浪作用<sup>[3]</sup>, 海底沉积物形态也表明了涌浪作用非常明显<sup>[25]</sup>. 图 6 显示 1 号和 3 号 HCV 的喷溢过程有着相对应的关系, 它们分别在 14:14 和 14:10 发生了短暂性喷溢, 而且在喷溢期间, 潮汐高度从 19.8 m 上升到 20.2 m. 1 号 HCV 在 14:14 时的喷发, 3 号 HCV 同时出现了响应, 即流量急剧下降. 在喷发前十几秒里, 1 号 HCV 的流量逐渐下降直至最低, 而 3 号 HCV 流量速率却开始逐渐增加, 达到最高值. 然后 1 号 HCV 的流量在 2 秒内突然急剧增加, 达到 200 L/s, 喷溢持续了 5 s, 释放出  $0.42 \text{ m}^3$  的甲烷气体. 1 号 HCV 在喷溢完后, 流量开始逐渐下降, 但比开始值大, 而在 3 号 HCV 在喷发 30 s 后, 流量下降到了最小值, 随后流量值维持不变. 因此 Leifer 等认为 1 号和 3 号 HCV 可能是相互连通的<sup>[3]</sup>. 而 2 号 HCV 的喷发过程变化不大, 与喷溢过程无关.

在 COP 渗漏区的海底裂隙通道中, 冷泉流体除烃类气体外, 还存在原油、焦油和水, 在 HCV 附近喷溢出的烃类喷发物中包含有甲烷、原油和焦油等有机物质, 其中甲烷和原油分别以气泡、油滴等形式喷溢到海水中, 而焦油则以固态形式存在于海底沉积物中. 在裂隙通道内有原油和焦油由于它们粘度大, 不易流动, 与烃类气体的物理化学性质不同, 图 7 中 1 号 HCV 流速的下降部分可能是裂隙通道被原油或焦油物质堵塞, 阻碍烃类气体向海水喷溢, 而数据丢失部分可能是潮汐作用把帐篷从渗漏点移开了, 没有记录<sup>[3]</sup>. 因此裂隙中喷溢出原油越多, 烃类气体的运移速率就越小. 海底的原位测定表明气体每分钟释放  $100 \text{ cm}^3$ , 同时大约有 1~2 升的原油喷出<sup>[4]</sup>.

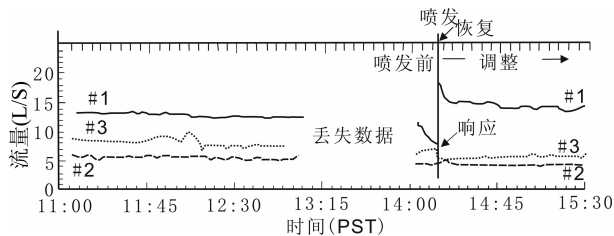


图 7 修正到标准温度压力下三个渗漏帐篷的流量<sup>[3]</sup>

Fig. 7 Flux corrected to standard temperature and pressure for the three turbine seep-tents<sup>[3]</sup>

1-3 号 HCV 从 11:00 到 15:30 的喷发过程, 14:14 是 1 号 HCV 的喷发时间点, 也是 3 号 HCV 喷发的下降点.

## 4 海底冷泉活动机制

### 4.1 冷泉活动和流量变化机制

观测表明冷泉流体活动是一个动态、复杂的水文地质过程<sup>[40]</sup>, 冷泉流体喷溢是多种作用共同的结果, 并且冷泉流体渗漏可以提供冷泉生物群营养物质. 同时, 冷泉生物群也能指示流体流动方向和大小, 以甲烷氧化为能源的化能自养生物表明有携带营养物质的冷泉发育<sup>[24,41]</sup>, 水合物和冷泉生物群指示了附近有烃类气体渗漏点. 通过对冷泉活动的原位观测, 发现流体流量在时间和空间上的变化的控制因素主要有潮汐作用、构造作用、孔隙流体与海水的浓度差产生的对流、生物泵作用(海底生物活动改流体的流动方式)等<sup>[20~23,42]</sup>, 但是它们不能解释流体流动的全部现象. 要了解冷泉流体活动, 不仅要考虑到引起海底沉积变形的构造作用, 也要考虑到水文地质过程中其它驱动力影响, 而且要与渗漏地区地质特征相联系.

#### 4.1.1 气藏充注与排空

冷泉渗漏发育地区常是在地形上的最高点,也是冷泉生物群及流动方向改变的地点.这些地点耦合于深部流体的流动系统,并伴有气体充注,沉积层的渗透率变化,以及潮汐作用等浅部过程的叠加. Tryon 等<sup>[23,33]</sup>根据水合物脊渗漏区观测到的流体时空变化特征,提出了冷泉流体活动的气体驱动瞬间流动三阶段模型(图 8),由于海底天然气水合物稳定带之下存在的盐丘构造释放热量及离子( $\text{Cl}^-$ 和 $\text{Na}^+$ ),引起天然气水合物分解,并在水合物稳定带之下形成气藏(图 8A).在充注期间气藏体积增大,孔隙流体沿渗透性沉积物和裂隙流入气藏,当到一定体积后,游离气形成的浮力扩张断层,气体则沿着断层向上渗漏,随后气藏压力降低,体积减少,流体沿渗透性沉积物和裂隙形成回流补充气藏.这种气藏的周期性充注和排空引起海底冷泉活动的周期性时空变化,如下降流及流动方向的转变可能耦合于 BSR 之下的气藏中气体的周期性排放<sup>[26]</sup>.海底喷口存在的与海水特征相似的流体的流入和流出,及其化学成分的变化,均表明了海水在海底沉积层的上部发生了回流(图 8).气体、流体由于性质和驱动力的不同,而沿着不同方向和通道运移,当海底沉积物被扰动后,观测到的气泡沿着裂缝从沉积物或细菌席断续冒出,这可能与气藏中气体过度充注,向海底渗漏形成.如布什山渗漏区,其地震剖面上显示在水合物稳定带下有广泛发育的盐丘构造<sup>[29]</sup>,可能导致水合物稳定带之下气藏的形成,并引起布什山冷泉渗漏活动的发育.

#### 4.1.2 水合物分解和油气藏的破坏

沉积物渗透率分布随时间变化则受气体渗漏、

天然气水合物形成与分解的影响,从而影响流速的变化<sup>[19]</sup>.沉积物不断沉降聚集,加剧了海底水合物稳定区温度变化,及构造作用抬升了水合物层,使水深变浅而引起稳定带底部水合物的不稳定,导致水合物的分解,从而形成海底冷泉的发育.沿着裂隙上升的饱和甲烷流体在运移到水合物新的稳定带后,一部分在合适的条件下形成水合物,使得沉积物渗透率变小,阻碍了流体向上流动,导致流动速率的降低,并且引起流动方向的转变.一部分分解的甲烷气体形成气藏,在其后的排空过程中沿着裂隙直接渗漏进入海底,气体在沉积物中的扩散加大了沉积物的孔隙度,提高了沉积物的渗透率,引起冷泉流体沿着裂隙向上渗漏.上升的甲烷气体扩散到沉积物中,在地表形成丘状水合物,改变沉积物的流体通道,促使新通道的形成.如卡斯特水合物脊渗漏地区,由于卡斯特古陆边缘增生楔向海方向的增生降低了静水压力,抬高了地温梯度,形成了水合物的形成环境<sup>[19]</sup>.但由于冲断作用形成近平行的背斜,抬升了圈闭地层,造成水深变浅,引起天然气水合物分解,在新的水合物稳定带下(HSZ)形成气藏,造成冷泉沿着断裂向上渗漏.

此外,海底之下深部的油气藏的破坏也可引起海底冷泉的发育,并引起渗漏的流量变化.油气藏中的原油及气体沿着断层的裂隙向上运移,推动着裂隙中的流体向上渗漏.当油气藏中的原油和气体沿着裂隙运移完后,油气藏里的空间增大,使裂隙中的流体进入补存,引起海底表面形成下降流.

#### 4.2 烃类气体运移机制

渗漏区烃类气体的运移是一个复杂的物理化学过程.裂隙中上升的烃类气体在运移过程中主要受

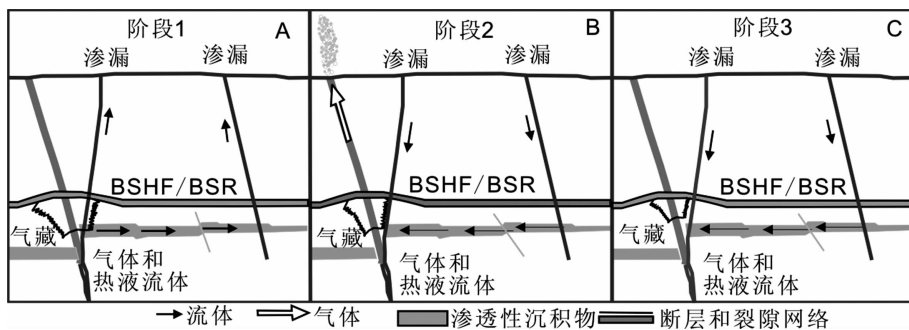


图 8 气体驱动瞬间流体流动三个阶段模型<sup>[23,33]</sup>

Fig. 8 Three-stage model for gas-driving transient fluid flow<sup>[23,33]</sup>

A: 阶段 1 为气体和热液流体缓慢注入气藏,气藏体积增大,流体沿渗透性沉积物和裂隙渗漏;B: 阶段 2 为游离气形成气泡的浮力使断层扩张,气体沿着断层快速渗漏;C: 阶段 3 为气藏体积减少,压力降低,海水和流体分别沿着裂隙和渗透性沉积物形成回流. BSR 为海底拟反射层,BSHF 为水合物稳定带底部



到游离气形成的孔隙压力( $P_F$ )和静水压力( $P_H$ )的影响<sup>[3,43]</sup>. 由于涌浪可以改变静水压力,影响着烃类气体的运移过程和流量变化. 同时沿着裂隙运移的喷溢物除天然气外,还包括原油、焦油和水,由于它们的物理化学性质不同,可能会相互影响,即原油和焦油的粘性会降低烃类气体的运移速率,而烃类气体形成的孔隙压力会导致原油和焦油喷溢. Leifer等<sup>[3]</sup>基于裂隙中烃类气体运移特征,提出的裂隙原油沉积模型. 当海底涌浪发生时,静水压力增大即( $P_H > P_F$ ),阻碍裂隙中烃类气体向海水喷溢. 同时裂隙壁粘附原油,由于其粘性较大,沿裂隙壁运移速率低,阻碍烃类气体运移. 在此期间,粘附在裂隙壁上的原油随时间会受到物理、化学、生物作用降解形成不能运移的焦油,焦油逐渐封闭裂隙通道,导致烃类气体渗漏的快速下降(即图7中1号HCV喷发前的快速下降). 当裂隙中烃类气体形成的孔隙压力大于静水压力时,即烃类气体流量会下降到最低值,然后在喷出裂隙中的焦油后,即喷溢流量达到最高值,随着焦油的喷出,烃类气体的流量会逐渐降低,但仍然比开始时的流量高(如图7中1号HCV喷发后流量变化比开始的值大). 由于1号HCV和3号HCV的裂隙通道可能是连通的,则1号HCV的流量变化与3号1号HCV的流量变化相反. 因此,烃类气体在裂隙中的运移过程很复杂,流量变化范围很大,不仅受到涌浪影响,还受到裂隙中原油和焦油的影响.

除了原油、焦油在烃类气体运移中起着重要作用外,水在烃类气体运移过程中也有影响. 以气泡形式存在的烃类气体沿着狭窄裂隙运移,气泡周围会附着很薄的一层水,水不能沿着气泡边缘流动,因此气泡上升是局部超压大于静水压力. 同时水的存在可以使气体从溶解状态改变成气体形式. 尽管毛细管压力把气泡贴在裂隙壁上,但形成的超压可以使气泡通过裂隙. 当流体上升时,静水压力降低引起流体达到超饱和状态,使气体脱溶,形成气泡,提高上升压力,促使烃类气体向上运移<sup>[3]</sup>. 因此烃类气体喷溢与流体渗漏有一定的联系.

同一渗漏区不同渗漏口之间可能是通过裂隙、断层、未固结的沉积物相互连通,并且流量变化之间存在着如图7所示的相关性. 在相连通的通道中运移的渗漏烃类气体的渗漏流量变化并不同时,存在有时间差,可能是由于相互连通的渗漏口之间的油气运移时间的不同<sup>[3]</sup>.

尽管涌浪作用影响着气体流量变化,但改变油-

气比率和流量变化的最主要原因是海底之下裂隙中原油和气体流量间的相互作用. 在海底的裂隙通道里除了烃类气体外,还存在原油、焦油、水,它们都影响着气体的运移速率. 原油和水被气泡挤压粘附在裂隙壁上,由于原油、水和烃类气体的物理化学性质不同,原油粘度大,不易流动,而烃类气体流动性强,因此它们在裂隙中运移速率也不相同,原油和水会阻碍烃类气体运移.

## 5 结 论

近年通过对冷泉渗漏地区实地的原位观测,证实冷泉流体流量随时间是变化的,并且烃类气体喷溢过程及流量也是变化的,表明冷泉流体的渗漏正处于一个动态、复杂的水文地质活动过程中,它们受BSR之下的气藏或者深部油气藏系统的复杂地质构造环境的影响. 冷泉流体渗漏活动主要与海底构造作用、甲烷气体变化特征和海底环境特征、海底冷泉生物群等有关,也有可能是多种因素的共同控制. 海底的涌浪作用、裂隙中原油、水和气体的相互作用以及源区特征影响着烃类气体的运移过程.

然而在冷泉流体渗漏活动特征和烃类气体喷溢的研究中仍有许多问题需要验证. 如冷泉流体的来源,是深部流体还是水合物分解产生的流体,烃类气体来源于原地有机质的生物降解还是水合物分解,或者来源于深部油气藏;生物扰动、温压和盐度变化是如何影响海底甲烷水合物的稳定;烃类气体渗漏过程中焦油、原油、水和烃类气体如何沿着裂隙运移及它们在运移过程中是如何相互作用的等. 对海底冷泉渗漏活动区进行长期原位观测是更深入认识海底冷泉渗漏区流体活动的特征及动力学机制等的有效手段.

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Judd A G, Hovland M, Dimitrov L I, *et al.* The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change[J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 109~126.
- [2] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed[J]. *Geo-Marine Letter*, 2003, 23(3-4): 147~154.
- [3] Leifer I, Boles J. Measurement of marine hydrocarbon seep flow through fractured rock and unconsolidated sediment[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(4): 551~568.
- [4] Leifer I, Boles J, Luyendyk A B. Measurement of Oil and Gas Emissions from a Marine Seep[Z]. 2007, 1~22.
- [5] 陈 忠, 颜 文, 陈木宏, 等. 海底天然气水合物分解与甲烷归宿研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 394~400.

- Chen Z, Yan W, Chen M H, *et al.* Advances in Gas Hydrate Dissociation and Fate of Methane in Marine Sediment[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(4):394~400.
- [6] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 地球系统中的天然气水合物—天然气体系研究展望[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 232~243.
- Wang S H, Song H B, Yan W. Study expectation of gas hydrate2gas system in earth system[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 232~243.
- [7] Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, *et al.* Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during quaternary interstadials[J]. *Science*, 2000, 288(5463): 128~133.
- [8] Dickens G R, Owen J R O K R M. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the paleocene[J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(6): 965~971.
- [9] Jahren A H, Arens N C, Sarmiento G, *et al.* Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the Early Cretaceous[J]. *Geology*, 2001, 29(2): 159~162.
- [10] Hesselbo S P, Darren R, Gröcke, Jenkyns H C, *et al.* Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event[J]. *Nature*, 2000, 406: 392~395.
- [11] Heydari E, Hassanzadeh J. Deev jahi model of the permian-triassic boundary mass extinction: a case for gas hydrates as the main cause of biological crisis on earth[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 163(1-2): 147~163.
- [12] 宋海斌. 天然气水合物体系动态演化研究(II):海底滑坡[J]. *地球物理学进展*. 2003, 18(3): 503~511.
- Song H B. Researches on dynamic evolution of gas hydrate system(II): Submarine slide[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(3): 503~511.
- [13] Macdonald I R, Leifer I, Sassen R, *et al.* Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere[J]. *Geofluids*, 2002, 2(2): 95~107.
- [14] Campbell K A. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 232: 362~407.
- [15] Campbell K A, Farmer J D, Des Marais D. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and paleoenvironments[J]. *Geofluids*, 2002, 2: 63~94.
- [16] 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005(3): 185~189
- 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[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2005(3): 185~189.
- [17] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现:海底天然气渗漏活动的新证据[J]. *科学通报*, 2006. 51(9):1065~1072.
- Chen Z, Yan W, Chen M H, *et al.* Discovery of seep carbonate nodules as new evidence for gas venting on the northern continental slope of South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(10): 1228~1237
- [18] 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[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(6):73~82.
- Chen Z, Yang H P, Huang C Y, *et al.* Characteristics of cold seeps and structures of chemoauto-synthesis-based communities in seep sediment[J]. 2007, 26(6):73~82.
- [19] Tyon M D, Brown K M. Complex flow patterns through Hydrate Ridge and their impact on seep biota[J]. *Geophysical Research Letter*, 2001, 28(14): 2863~2833.
- [20] Wallmann K, Linke P, Suess E, *et al.* Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(24): 5209~5219.
- [21] Wang K, Davis E E. Theory for the propagation of tidally induced pore pressure variations in layered seafloor formations[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. 1996, 101(B5): 11483~11496.
- [22] Tryon M D. The development and application of a new benthic aqueous flux meter for very low to moderate discharge rates[D]. San Diego: University of California, San Diego, 2002.
- [23] Tryon M D, Brown K M, Torres M E, *et al.* Measurements of transience and downward fluid flow near episodic methane gas vents, Hydrate Ridge, Cascadia[J]. *Geology*, 1999, 27(10):1075~1078.
- [24] Tryon M, Brown K, Dorman L, *et al.* A new benthic aqueous flux meter for very low to moderate discharge rates[J]. *Deep-Sea Research*, 2001, 48(9): 2121~2146.
- [25] Leifer I, Boles J. Turbine tent measurements of marine hydrocarbon seeps on subhourly timescales[J]. *Journal of Geophysical Research(Ocean)*, 2005, 110(1):C01006.
- [26] Leifer I, Boles J R, Luyendyk B P, *et al.* Transient discharges from marine hydrocarbon seeps: spatial and temporal variability[J]. *Environmental Geology*, 2004, 46(8): 1038~1052.
- [27] Tryon M D, Brown K M. Fluid and chemical cycling at Bush Hill: Implications for gas-and hydrate-rich environments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(12): 1~7.
- [28] Macdonalda I R, Bender L C, Vardaro M, *et al.* Thermal and visual time-series at a seafloor gas hydrate deposit on the Gulf of Mexico slope[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1-2): 45~59.
- [29] Neurauter T W, Bryant W R. Seismic expression of sedimentary volcanism on the continental slope, northern Gulf of Mexico[J]. *Geo-Marine Letters*, 1990, 10(4): 225~231.
- [30] Vardaro M F, Macdonald I R, Bender L C, *et al.* Dynamic processes observed at a gas hydrate outcropping on the continental slope of the Gulf of Mexico[J]. *Geo-Marine Letters*,

- 2006, 26(1): 6~15.
- [31] Roberts H H, Carney R S. Evidence of episodic fluid, gas, and sediment venting on the northern Gulf of Mexico continental slope[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(7-8): 863~879.
- [32] Roberts H, Wiseman W Jr, Hooper J, Humphrey G. Surficial gas hydrates of the Louisiana continental slope—initial results of direct observations and in situ data collection[C]. *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, 1998.
- [33] Tryon M D, Brown K M, Torres M E. Fluid and chemical flux in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on Hydrate Ridge, OR, II: Hydrological processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3-4): 541~557.
- [34] 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[J]. *沉积学报*. 2002, 20(1): 34~40.  
Chen D F, Chen X P, Chen G Q. Geology and geochemistry of cold seepage and venting related carbonates[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 34~40.
- [35] Bohrmann G, Greinert J, Suess E, *et al.* Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability[J]. *Geology*, 1998, 26(7): 647~650.
- [36] Hornafius J S, Quigley D, Luyendyk B P. The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (Coal Oil Point, Santa Barbara Channel, California): Quantification of emissions [J]. *Journal of Geophysical Research (Ocean)*, 1999, 104 (C9): 20703~20711.
- [37] Leifer I, Clark J. Modeling Trace Gases in Hydrocarbon Seep Bubbles. Application to Marine Hydrocarbon Seeps in the Santa Barbara Channel[J]. *Russian Journal of Geology and Geophysics*, 2001, 43(7): 613~621.
- [38] Solomon E A, Kastner M, Jannasch H, *et al.* Dynamic fluid flow and chemical fluxes associated with a seafloor gas hydrate deposit on the northern Gulf of Mexico slope[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(1-2): 95~105.
- [39] Fischer P. J. Natural gas and oil seeps, Santa Barbara Basin, California[R]. In *California Offshore Gas, Oil, and Tar Seeps*. State Lands Commission Report, 1977. 1~62.
- [40] Woodside J M, Garrison R E, Moore J C, *et al.* Contributions from the combined 7th International Conference on Gas in Marine Sediments and the NATO Advanced Research Workshop on Seafloor Hydrocarbon Seeps, Geology Institute, Azerbaijan Academy of Sciences, Baku, 7 - 11 October 2002[J]. *Geo-Mar Lett.* 2003, 23(3-4): 137~139.
- [41] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜, 等. 海域天然气水合物勘测的地球物理方法[J]. *地球物理学进展*. 2008, 1(23): 210~219.  
Luan X W, Zhao K B, Sun D S, *et al.* Geophysical methods for marine gas hydrate exploration[J]. 2008, 1(23): 210~219.
- [42] Henry P, Foucher J, Pichon X L, *et al.* Interpretation of temperature measurements from the Kaiko-Nankai cruise: Modeling of fluid flow in clam colonies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109(3-4): 355~371.
- [43] Leifer I, Clark J F, Luyendyk B, *et al.* Identifying future directions for subsurface hydrocarbon migration research[N]. *Eos*, (364).