



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

## 海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望

张云山, 贾永刚, 尉建功

### A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep

ZHANG Yunshan, JIA Yonggang, and WEI Jiangong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021052002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 生物载体对海底冷泉-热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

#### 海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

#### 南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

#### 海洋环境中甲烷好氧氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67

#### 海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

#### 特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张云山,贾永刚,尉建功.海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(2): 200-213.  
ZHANG Yunshan, JIA Yonggang, WEI Jiangong. A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 200-213.

# 海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望

张云山<sup>1</sup>, 贾永刚<sup>1,2,3</sup>, 尉建功<sup>4</sup>

1. 中国海洋大学, 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100  
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061  
3. 中国海洋大学, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100  
4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

**摘要:**海底冷泉多由海底天然气渗漏形成,是以水、碳氢化合物、硫化氢或二氧化碳为主要成分的流体。它既是海底天然气水合物存在的标志,又与温室效应、海洋生态环境、冷泉生物群落等问题密切相关,对海底冷泉的流体渗漏通量和化学组成进行测定,对认识上述问题有重大意义。与实验室化学分析和数值模拟相比,原位观测可保证数据的可靠性和真实性,作为冷泉原位观测的主要手段,冷泉原位观测装置在近20年发展迅速。本文根据观测目标和观测原理将海底冷泉原位观测装置分为3类,即冷泉渗漏气体通量原位观测装置、冷泉渗漏液体通量原位观测装置以及冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置,并从设计意义、工作原理以及解决的科学问题等方面梳理了国内外海底冷泉原位观测装置的发展,分析了各个装置的优势、局限性以及适用范围,最后展望了海底冷泉原位观测装置未来的发展方向。

**关键词:**冷泉;甲烷渗漏;原位观测;观测装置

中图分类号:P744.4 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021052002

## A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep

ZHANG Yunshan<sup>1</sup>, JIA Yonggang<sup>1,2,3</sup>, WEI Jiangong<sup>4</sup>

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China  
2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China  
3. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China  
4. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

**Abstract:** Marine cold seep, mainly formed by the seepage of natural gas hydrate, is a fluid composed mainly of water, hydrocarbons, hydrogen sulfide and or carbon dioxide. It is not only a sign of the existence of seabed gas hydrate, but also a substance closely related to greenhouse effect, marine ecological environment, cold seep biological community and other issues. The measurement of the fluid leakage flux and chemical composition of cold seep is of great significance for understanding the issues mentioned above. Compared with laboratory chemical analysis and numerical simulation, in-situ observation can ensure the reliability and authenticity of data. As a main mean, in-situ observation equipment of cold seep has developed rapidly in the past two decades. In this paper, according to its objectives and principles, the in-situ observation equipment of the cold seep is divided into three types: the in-situ observation equipment for the leakage gas flux of the cold seep, the in-situ observation equipment for the leakage liquid flux of the cold seep and the in-situ observation equipment for the chemical composition of the seepage fluid of the cold seep. The development of in-situ observation equipment for cold seep at home and abroad is summarized in this paper from the aspects of design significance and working principle. And the advantages, limitations and application range of the equipment are discussed. In the end, the future development direction of the in-situ observation equipment for the cold seep is prospected.

**Key words:** cold seep; methane seepage; in-situ observation; observation equipment

---

资助项目:国家重点研发计划项目“海底沉积物力学特性的原位测试装置”(SQ2018YFC030044);国家自然科学基金重点项目“内孤立波对南海水合物试采区海底面稳定性影响研究”(41831280)

作者简介:张云山(1999—),男,硕士研究生,主要从事天然气水合物勘探及开发方面的研究, E-mail: zhang894126621@163.com

通讯作者:贾永刚(1965—),男,教授,主要从事海洋地质工程方面的研究, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

尉建功(1984—),男,高级工程师,主要从事天然气水合物勘查与开发方面的研究, E-mail: weijiangong007@163.com

收稿日期:2021-05-20; 改回日期:2021-07-06. 蔡秋蓉编辑

冷泉是以水、碳氢化合物、硫化氢或二氧化碳为主要成分, 受压力梯度影响从沉积体中运移和排放出, 温度与海水相近并具有一定流速的流体<sup>[1-3]</sup>。冷泉在全球分布较广(图 1), 广泛发育于活动和被动大陆边缘海底<sup>[4-6]</sup>。迄今为止, 我国海域共发现有 7 大冷泉区, 主要分布于东海(冲绳海槽)和南海(台西南海域、东沙群岛、西南海域、神狐海域西南海槽以及西沙海槽)<sup>[7]</sup>, 仅在南海北部就存在 30 多个渗漏点<sup>[8-9]</sup>。海底冷泉多由天然气水合物渗漏形成, 会向海洋和大气排放大量 CH<sub>4</sub>, 与天然气水合物资源、温室效应以及极端环境下生物的演化等重大问题密切相关<sup>[10-12]</sup>。因此, 1983 年冷泉在墨西哥湾佛罗里达陡崖一经发现<sup>[13]</sup>, 便迅速成为研究热点。

目前, 冷泉的研究方法主要有地球物理方法、地球化学方法、地球生物方法以及原位观测方法。地球物理方法主要包括地震探测、多波束测深、旁侧声呐、浅地层剖面仪、海底可视观测等<sup>[8,14]</sup>, 能够有效识别海底地形地貌, 识别海底冷泉地质标志和冷泉运移通道, 识别可能发生海底渗漏的区域。地球化学方法主要通过对冷泉区海水溶解成分、孔隙水以及沉积物中的特殊离子进行分析, 识别天然气水合物资源以及冷泉渗漏特征。例如, 冷泉系统中与甲烷厌氧氧化耦合的微生物硫酸盐还原作用

(AOM-MSR) 是甲烷最主要的消耗方式, 冷泉系统中硫的生物地球化学过程及其沉积记录的研究为探究甲烷在地球表层环境演化中的角色奠定了基础<sup>[15]</sup>; 测定海底沉积物孔隙水中的 CH<sub>4</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度及溶解无机碳的碳同位素组成可以用来识别目前正在发生的甲烷渗漏活动<sup>[16]</sup>; 对海底表层沉积物的元素分析可以了解冷泉区域冷泉形成背景以及碳酸盐岩的形成机理<sup>[17]</sup>。此外, 研究冷泉区 C、S 等元素的化学反应, 对地球化学循环、海洋生态环境以及温室效应等有重要意义。冷泉生物系统是依托海底冷泉形成的重要生物群落, 也是指示海底冷泉非常直接的标志, 而且冷泉生物群落一定程度上能指示流体流动方向和大小等特性<sup>[18]</sup>, 研究冷泉生物对冷泉生命的起源与演化也有重要意义<sup>[19-20]</sup>。

冷泉原位观测主要观测指标有渗流通量、温度、pH、电导率、CH<sub>4</sub>浓度、CO<sub>2</sub>浓度等。相较于实验室分析, 在海底冷泉区直接对渗漏流体进行分析, 能最大限度地保证样品的原始性和可靠性, 而且还可以长时间连续地获取数据, 对冷泉流速、物质浓度变化等研究具有重要意义。此外, 对冷泉渗漏通量进行观测, 也具有十分重要的意义。甲烷既是重要温室气体<sup>[21]</sup>, 又是地球上碳的主要存在形式之一<sup>[22]</sup>, 测量海底冷泉渗漏通量对全球温室效应和

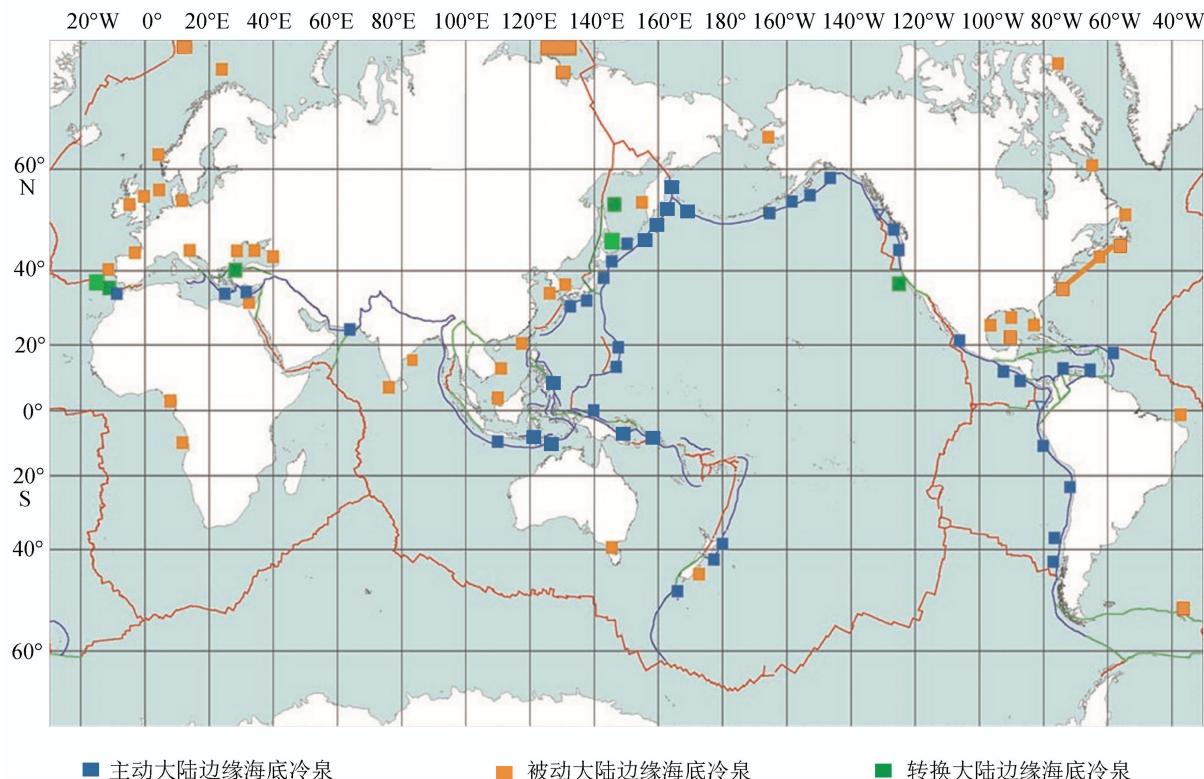


图 1 全球冷渗漏位置<sup>[6]</sup>

Fig.1 Schematic map showing global distribution of cold seeps<sup>[6]</sup>

全球碳循环的研究有重要意义<sup>[23-25]</sup>。冷泉原位观测在海底冷泉调查研究中具有不可替代的作用。

## 1 冷泉渗漏气体通量原位观测装置

由于和温室效应、碳地球化学循环等问题密切相关,冷泉渗漏气体通量监测一直是国内外研究的重点。原位监测冷泉渗漏气体通量的方法有很多,用于海底冷泉渗漏气体通量原位观测的装备也有很多,但目前并没有统一的分类方法。本文根据工作原理,将这些装备分为冷泉渗漏气体通量直接观测装置和冷泉渗漏气体通量间接观测装置两种。

### 1.1 冷泉渗漏气体通量直接观测装置

最早的冷泉渗漏气体通量直接观测装置于2001年由加州大学计算地球系统科学研究所Washburn等<sup>[26]</sup>研发,该装置是一个漂浮式气泡通量测量装置(图2),用于测量从海底上升到海面的冷泉渗漏气体通量。该装置通过圆锥形收集器收集海底渗漏产生的气泡,气泡和海水在收集室内形成气-水界面,使收集室与周围海水之间的压力差发生变化。当收集室与周围海水之间的压力差达到预

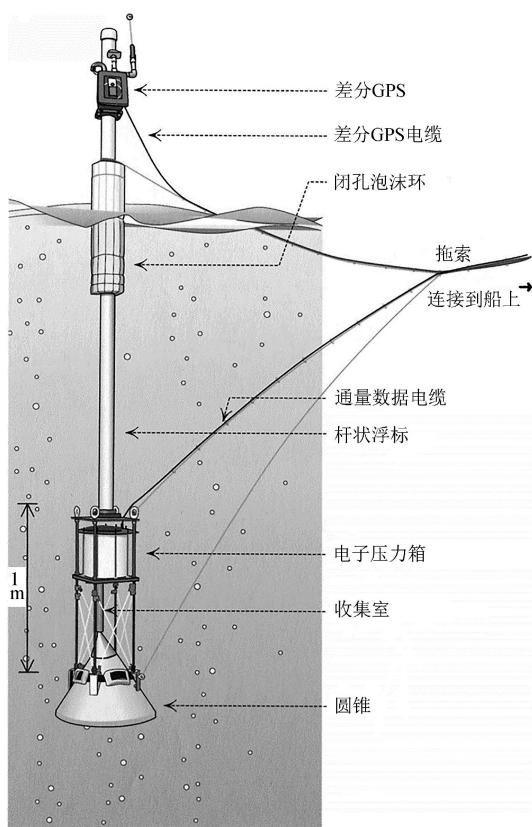


图2 通量浮标示意图<sup>[26]</sup>

Fig.2 Gas-capture buoy for measuring bubbling gas flux<sup>[26]</sup>

设的压差值,微型计算机将收集室的电磁阀打开,收集室中收集的气体被释放,然后开始新一轮的收集。根据记录的电磁阀打开的次数,可知部署时间内海底冷泉渗漏气泡通量。该装置布设简便,工作时基本实现自动化,测量方便,但是受潮汐和波浪影响较大,只能在无风少浪的情况下使用。

与漂浮式气体通量测量装置相比,坐底式的气体通量测量装置受潮汐和波浪影响较小,可以固定在冷泉渗漏地点进行观测。2005年,加州大学斯克里普斯海洋科学研究所Leifer等<sup>[27]</sup>研发了一个海底冷泉渗漏流量测定装置(图3)。该装置在布放时底面镶入海底,圆锥与海底面形成密封状态。工作时圆锥形收集器收集海底冷泉渗漏产生的气泡,气泡使帐篷内的海水产生上升流,经过滤网过滤后,驱动涡轮机转动,根据涡轮的旋转速度,计算气泡通量。该装置结构简单,布设方便,受潮汐和风浪影响较小,但对于渗漏气泡通量较小的区域精确度不高,适用于渗漏气泡通量较大的地区。

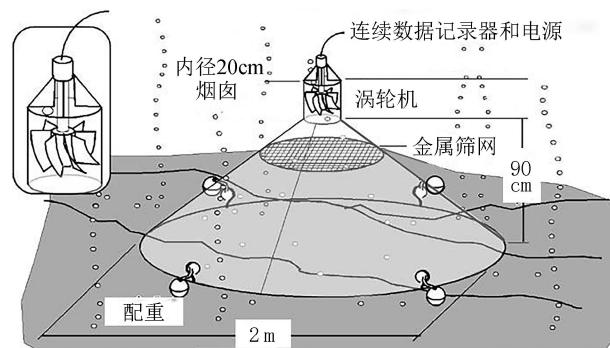


图3 涡轮渗漏示意图<sup>[27]</sup>  
Fig.3 Schematic diagram of CAT meter<sup>[27]</sup>

2012年,中国科学院边缘海地质重点实验室邸鹏飞等<sup>[28]</sup>研制了一套海底冷泉渗漏气体原位在线测量装置(图4),用于测量海底冷泉气泡渗漏通量。与通量浮标原理类似,该装置同样采用排空气法测量海底渗漏气体通量,理论上可测量通量极小的海底渗漏,但并不适用于气体通量较大的地区。通过试验测得的测量范围为0~15 300 mL/min,测量误差为±1%。

同样基于排空气原理,美国新罕布什尔大学海岸和海洋测绘中心Padilla等<sup>[29]</sup>研发了一套气泡捕捉装置(图5)。相较于前两种装置,该装置搭载有水下摄影机,且气体收集室是一个量筒,可实现冷泉渗出气体通量的实时观测。

由于此类装置测量范围较小且成本较高,因此近年来对其研究较少。但此类装置可应用于微小渗漏气体通量的测量且精度较高,可作为间接测量

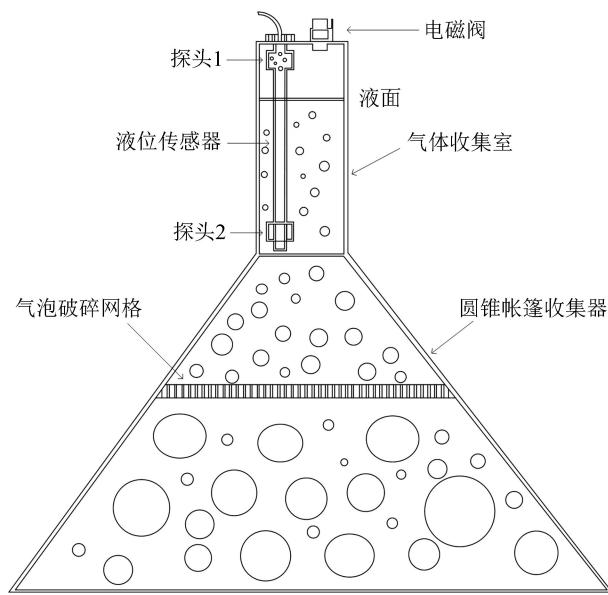
图 4 海底冷泉天然气渗漏原位在线测量装置<sup>[28]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of in situ on-line measuring device of gas flux at marine seeping sites<sup>[28]</sup>

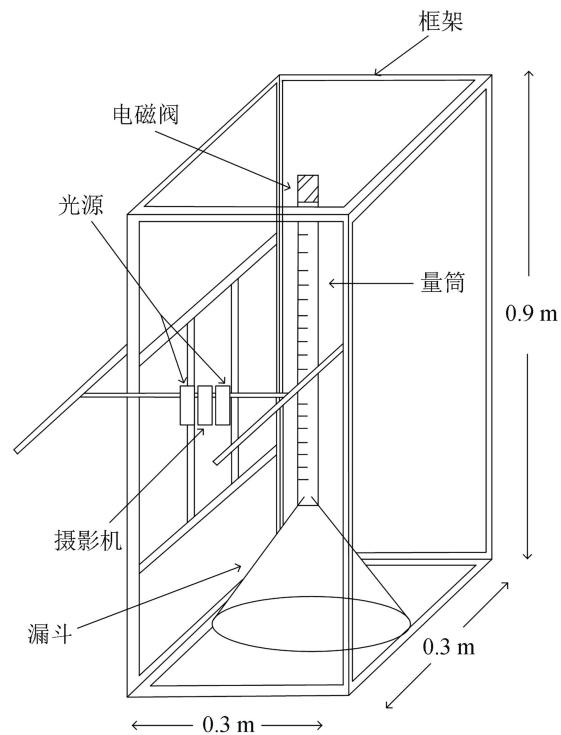
图 5 气泡捕捉装置<sup>[29]</sup>

Fig.5 Bubble catch device schematic<sup>[29]</sup>

装置的辅助装置, 提高间接测量的精确度。

## 1.2 冷泉渗漏气体通量间接观测装置

由于冷泉渗漏气体通量直接观测装置容易对冷泉渗漏气泡产生扰动且测量范围较小, 有学者研究了非接触式的气泡通量测量的装置, 这些装置按照工作原理可分为基于声学信号的气泡通量测量

装置和基于光学信号的气泡通量测量装置。

### 1.2.1 基于声学信号的气泡通量观测装置

基于声学信号的冷泉渗漏气体通量测量装置可以在不对气泡产生扰动的情况下进行气体通量测量, 是近年来冷泉渗漏气体通量的主要测量方式之一。

2004 年, 德国莱布尼茨海洋科学研究所 Greinert 等<sup>[30]</sup>进行了一项利用声波测量海底渗漏气泡通量的实验(图 6)。他们利用安装在底座上的换能器向水平方向发射单束声波, 根据回波强度计算气泡通量, 气泡通量越大, 回波强度越强。

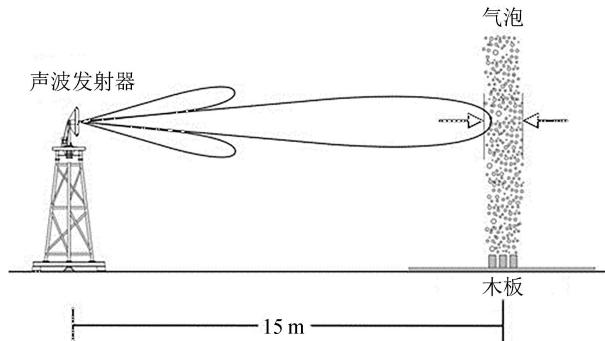
图 6 船坞实验装置<sup>[30]</sup>

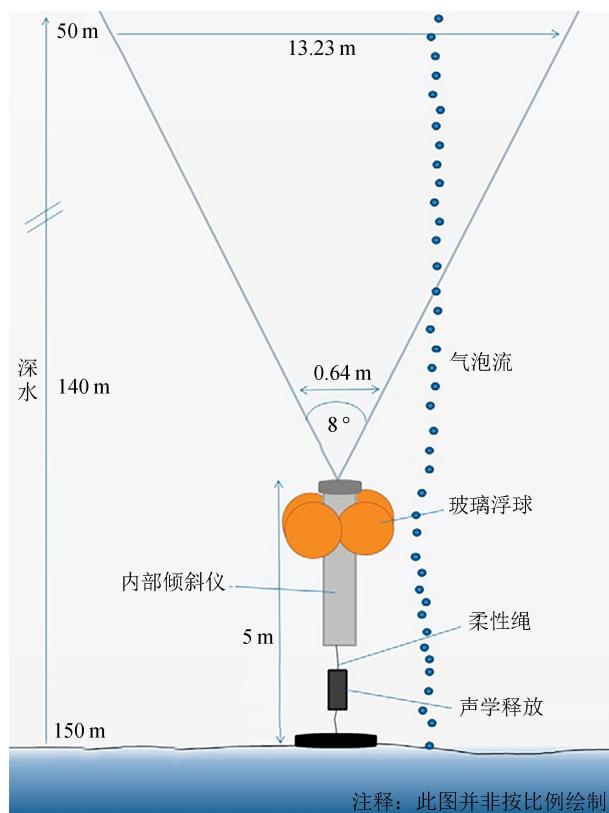
Fig.6 Scheme of the experimental set-up in the ship dock<sup>[30]</sup>

但由于该设备发射的声波为单波束声波, 水平测量范围有限, 于是他们又在该装置的基础上研发了基于多波束声波的 GasQuant 系统<sup>[31]</sup>。

GasQuant 系统是一个坐底式观测系统, 工作时可由固定在底座以上 3 m 处的换能器发射由 21 条光束组成的水声扫描带, 每条光束垂直宽 1.5°, 水平宽 3°, 发射频率为 180 kHz, 覆盖总扫描带角度 63°。该装置发射的声波水平有效测量距离为 60 m, 可部署在距离渗漏较远处, 因此, 基本不对沉积物和气泡产生扰动, 但由于体积较大, 布设工作较为繁琐, 且换能器位置固定, 回波很难反映气泡的流动信息。

与 GasQuant 系统相比, 向上发射声波的水柱剖面仪, 可以反映海水中气泡的运动信息(图 7)。水柱剖面仪最初由加拿大 ASL Environmental Sciences 公司研发, 用于观察浮游生物和鱼类<sup>[32]</sup>, 经华盛顿大学 Salmi 等<sup>[33]</sup>改进后, 可以用于冷泉渗漏气泡通量测量。该装置工作时换能器向上发射的声波, 在海水中可向上穿透 100 m, 根据回声信号可以获得海底渗漏气体通量和气泡的运动特征, 但在实际应用中易受海洋悬浮物和生物的干扰。

近年来, 随着遥控潜水器(ROV)的发展以及人们对于声波认识的加深, 许多学者<sup>[34-35]</sup>利用拖鱼或 ROV 搭载声呐系统对冷泉渗漏气体通量进行观

图 7 声学剖面仪<sup>[33]</sup>Fig.7 Schematic diagram of the water column profiler<sup>[33]</sup>

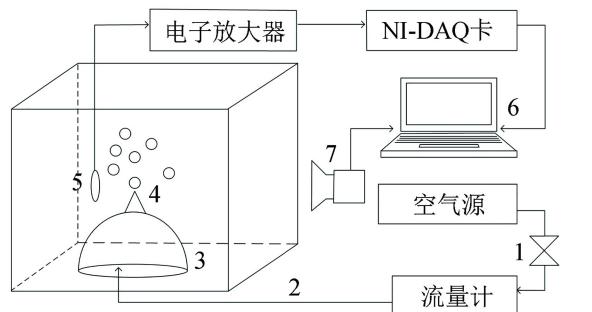
测。相较于布设在海底的仪器来说,这种观测方法更加灵活、观测面积更大,但不适用于精细的渗漏通量测量,在实际应用中可搭配气体通量直接观测装置使用。

除了可以利用主动声呐对冷泉渗漏气体通量进行观测外,还可使用被动声呐对气体通量进行观测。被动声呐法是指被动接受气泡本身产生的声波以测量气泡通量,不同于主动声呐法,采用被动声呐法可以减少海洋悬浮物干扰。

不莱梅大学海洋边缘研究中心 Nikolovska 等<sup>[35]</sup>首次提出利用被动声呐进行海洋渗漏气体通量测量,并开发了一套实验装置(图 8)。

该装置首先由气源产生气体,气体经流量计进入收集器,用水听器记录气体流经收集器上方的喷嘴的声音信号,在计算机上基于 Morlet 小波分析记录的声音信号序列,获取气体通量。用流量计测得的气体通量与基于 Morlet 小波分析获得气体通量进行比较,发现该装置测量精准度较高。

之后斯克里普斯海洋学研究所 Wiggins 等<sup>[37]</sup>利用被动声呐测量装置在苏格兰和挪威之间的北海 22/4b 井场进行了长期的原位观测,获取了该地区长达 7 个月的声学数据。但该方法获取的声学数据比较复杂,不仅有气泡的声音,而且还有生物产

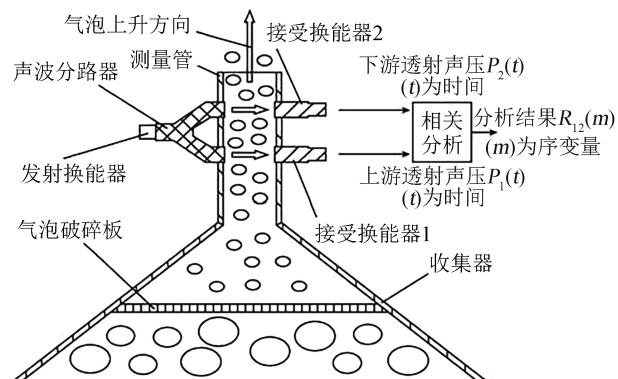


1-压力调节器; 2-供气软管; 3-气体收集器; 4-喷嘴;  
5-水听器; 6-虚拟仪器记录仪和数据处理单元; 7-摄像机

图 8 被动声呐实验装置<sup>[36]</sup>Fig.8 Experimental set-up of passive sonar<sup>[36]</sup>

生的声音。被动声呐只能大致获得该地区冷泉气体喷发速率,无法准确获取气体通量。

广东工业大学龙建军等<sup>[38]</sup>设计了用声波分路器将一个换能器发射的声波分为两路,然后利用同源声波互相关方法测量海底渗漏气体通量的装置(图 9),胡柳<sup>[39]</sup>和张浩<sup>[40]</sup>利用这一装置研发了坐底式海底冷泉渗漏声波测量装置。该装置首次采用了同源声波对冷泉渗漏气体进行观测,回波信号较为稳定,但在实际应用中声波分布器使得声波损失较大。

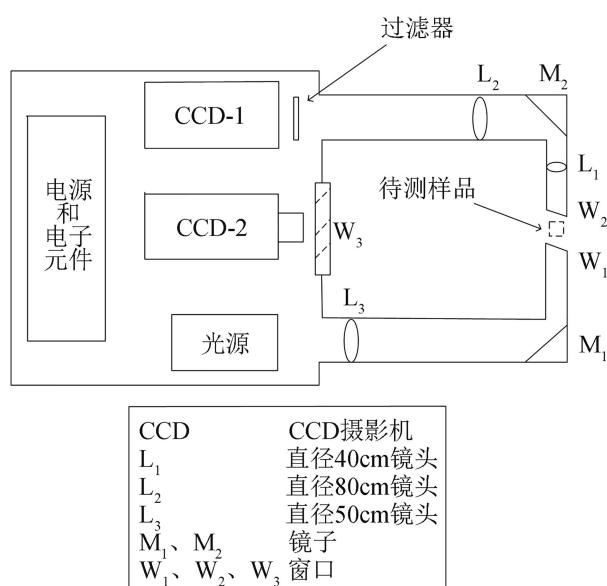
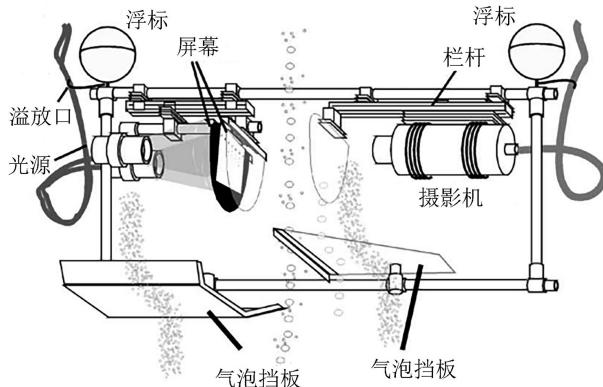
图 9 气泡流量测量装置<sup>[38]</sup>Fig.9 Schematic diagram of the bubble flow measuring device<sup>[38]</sup>

### 1.2.2 基于光学信号的气泡通量观测装置

光信号虽在水中传播距离较短,但在海底冷泉渗漏气体观测中仍有应用空间。

2003 年,加州大学圣巴巴拉分校 Leifer<sup>[41]</sup>使用了荷兰海牙 TNO 物理和电子实验室开发的微型气泡测量装置(图 10)和爱尔兰国立高威大学开发的大型气泡测量装置(图 11)观测了海底冷泉渗漏气体。

大型气泡测量系统可观察的气泡范围为 200~5 000 μm,可在冷泉渗漏地点进行原位观测。微型气泡测量系统可观察的气泡范围为 15~500 μm,可观测冷泉渗漏附近海水中的气泡通量,确定气泡的

图 10 微型气泡测量装置<sup>[41]</sup>Fig.10 Schematic mini-bubble measurement system<sup>[41]</sup>图 11 大型气泡测量装置<sup>[42]</sup>Fig.11 Schematic diagram of Large-bubble measurement system<sup>[42]</sup>

背景分布特征。两套装置需水平平行部署, 且相机和屏幕的方向垂直于水流方向, 以此提高测量精准度。

大型气泡测量装置工作时, 气泡由水下灯背光照明, 照射在半透明的屏幕上, 水下摄像机获取气泡流动图像, 然后运用图像处理软件计算气泡的直径。当气泡流太密时, 需要加装挡板, 挡板防止气泡距离摄影机过近或通过上升到灯光和照明屏之间产生阴影。微型气泡测量装置工作原理与大型气泡测量装置类似, 不过为了减小体积, 微型气泡测量装置安装了多面镜子, 利用反射原理, 测量气泡通量。

较声学装置来说, 光学测量装置对渗漏气泡的观测更加直观, 但对渗漏气体通量的测量范围有待提高。

近年来, 得益于 ROV 的发展, 许多学者<sup>[43-45]</sup>开

始利用 ROV 搭载水下摄影装置对冷泉羽状流进行观测, 根据气泡的大小和上升速率对冷泉渗出气体通量进行估算, 这大大提高了观测的灵活性。

## 2 冷泉渗漏液体通量原位观测装置

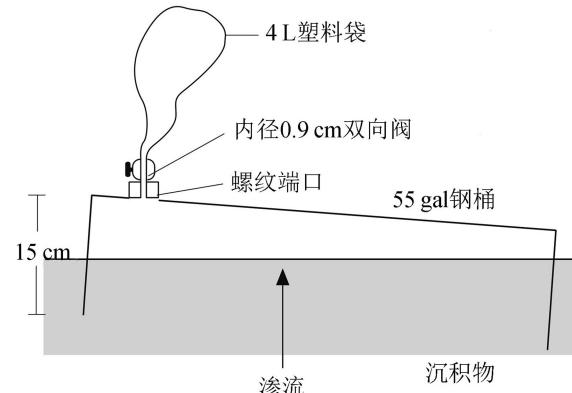
海底冷泉除了会产生渗漏气体外, 还会产生渗漏液体, 对海底冷泉渗漏液体通量进行测量也是冷泉原位观测的研究方向之一。冷泉渗漏液体富含碳氢化物、硫化物、碳酸盐等物质, 其通量观测于研究海洋环境变化、海底生物群落演化等问题有十分重要的意义。测算冷泉渗漏液体通量的方法也有很多, 目前并未形成统一的方法。根据工作原理, 冷泉渗漏液体通量原位观测装备可分为直接观测装置和间接观测装置两种。

### 2.1 冷泉渗漏液体通量直接观测装置

最早的冷泉渗漏液体通量直接观测装置, 由佛罗里达州立大学 Cable 等<sup>[46]</sup>研发, 他们根据滑铁卢大学 Lee 等<sup>[47]</sup>设计的用于测量地下水向湖泊中渗透的水和化学物质的通量简易渗流计, 研发了用于测量海底冷泉渗漏液体量的渗流计(图 12)。

该仪器布设时将下部的敞口钢桶斜着缓慢插入沉积物中, 上部留大约 2 cm 的空隙, 保持进气孔在钢桶的最高点。布设完成后打开钢桶和海水之间的阀门静止 24 h, 保持钢桶内与背景环境平衡。待钢桶与背景环境平衡后, 关闭连接钢桶与海水的阀门, 打开连接钢桶与塑料袋的阀门, 海底渗漏液体进入钢桶, 钢桶内的液体进入塑料袋, 根据塑料袋中的海水量可获得该地区的液体渗漏通量。该仪器结构简单, 成本较低, 但收集袋的容积有限, 收

~~~~~  
水面

图 12 改进后的渗流计<sup>[46]</sup>Fig.12 Schematic diagram of improved seepage cylinder<sup>[46]</sup>

集时间很难精确把握, 测量渗漏液体通量的精确度不高, 并不适用于冷泉渗漏流体通量的准确测量。

## 2.2 冷泉渗漏液体通量间接观测装置

冷泉渗漏液体通量间接观测装置是通过对渗漏区海水进行采样, 待装置回收后结合实验室分析获得海底冷泉流体通量的一类观测装置。

1994年, 德国亥姆霍兹基尔海洋研究中心 Linke等<sup>[48]</sup>开发了一套海底渗漏通量测量装置(图13)。这套装置同样以敞口钢桶为底座, 布设时将钢桶边缘掺入沉积物中, 与顶部的排气孔形成半密封空间。布设完成后海水充满圆桶, 海底冷泉渗漏流体会与钢桶内的海水混合, 通过安装在圆桶内的6个采样瓶依次定时采集的钢桶中海水的样本, 回收后进行实验室分析, 根据采样瓶中溶解组分浓度的变化确定此处的渗漏流体通量。

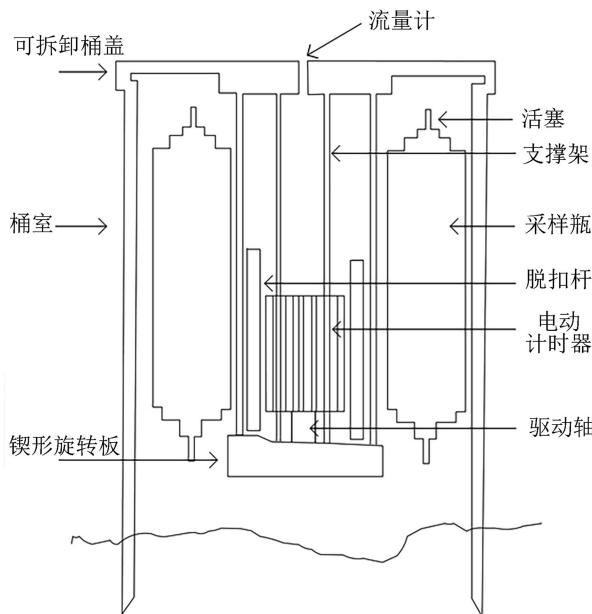


图 13 海底观测桶<sup>[48]</sup>

Fig.13 Schematic diagram of the Benthic Barrel<sup>[48]</sup>

除采集样品进行实验室分析外, 还可将机械式或利哈伊大学 Michael 等<sup>[49]</sup>设计的热敏电阻流量计通过潜水器插入位于圆桶上部的排气孔, 直接记录海底渗漏的流量。此外, 该仪器还可改装为内部装有5个采样瓶和CTD探头的配置, 以便对观测地点的电导率、温度、压力进行观测。该装置虽可对冷泉渗漏液体通量进行直接和间接两种方式的观测, 但它采样时的时间分辨率不高, 而且采样还具有一定偶然性, 只能适用于流速较小的渗漏区。

与该原理类似, Sommer 等<sup>[50]</sup>研制了 BIGO 和 FLUFO, 他们工作时都需要插入海底沉积物中形成

半密闭环境, 然后利用内部的采样瓶依次对仪器内部的海水进行采样, 回收后结合实验室分析确定冷泉渗漏通量。这两个装置内部带有圆盘和泵, 可将装置内部海水混匀, 保证每次采集样品的合理性, 目前已在多地应用。

加州大学斯克里普斯海洋学研究所 Michael 等<sup>[51]</sup>基于渗透压和同位素示踪原理研发了一套海底冷泉渗漏流体化学和通量测量仪(图14)。该装置同样利用采样的方式采集渗漏液体, 在采样期间可自主运行, 待装置回收后对采集到的样品进行实验室分析, 以获得渗漏液体通量和化学组成信息。

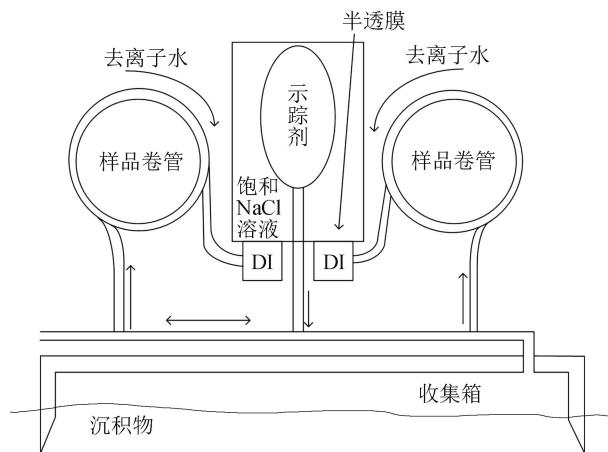


图 14 海底冷泉渗漏流体化学和通量测量仪<sup>[51]</sup>

Fig.14 Schematic diagram of the chemical and aqueous transport meter<sup>[51]</sup>

该装置部署时需将下口敞开的收集箱插入沉积物中, 使之形成半密封空间。测量向上的渗流时, 海底渗流进入收集箱, 然后沿 I/O 管向外流出; 测量向下的渗流时, 收集箱中的海水向下流动, 海水通过 I/O 管补给进入收集箱。

工作时去离子水通过半透膜进入饱和 NaCl 溶液, 其中装有示踪剂的弹性容器, 使示踪剂流入 I/O 管。在海水通过 I/O 管时, 示踪剂会以恒定的速率注入管道中的海水, 示踪剂采用 RbCl 溶液, 与海水组分不同也不会相互反应。样品卷管最初都装满去离子水, 随着去离子水进入饱和 NaCl 溶液, 流入或流出 I/O 管的部分流体被收集在样品卷管中, 待装置回收后进行实验室分析。此装置不仅可以分析海底冷泉渗漏流体通量, 还可以根据样品卷管中不同时间采集到的样品中含有示踪剂的浓度获得不同时间海底冷泉渗漏流体的渗漏速率, 但该装置布设时同样会对沉积物产生扰动, 实际应用时要防止 I/O 管堵塞。

基于海底冷泉渗漏流体化学和通量测量仪的渗透原理, Jannasch 等<sup>[52]</sup>研制了一个渗透取样器

OsmoSampler(图 15a), Solomon 和 Kastne 等<sup>[53-54]</sup>使用多个渗透取样器开发了一套海底甲烷流体流量计 MOSQUITO(图 15b), 旨在观测冷泉渗漏区不同深度、不同位置的液体流量变化, 冷泉渗漏液体微尺度变化特征。

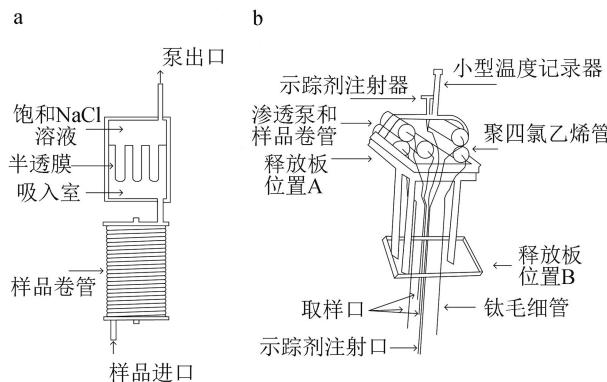


图 15 甲烷流体流量测量装置<sup>[54]</sup>  
a. 渗透泵, b. 渗透取样器。

Fig.15 Schematic diagram of methane flow measurement device<sup>[54]</sup>  
a. Schematic diagram of an Osmo sampler, b. schematic representation of a MOSQUITO.

该装置通过载人潜水器或水下机器人进行部署, 布设完成后钛毛细管和样品取样管在释放板作用下插入海底沉积物中, 示踪剂作为点源注入海底沉积物, 示踪剂连同沉积物中的孔隙水一起被采集, 根据示踪剂的浓度计算该地区的渗流通量。此装置可在低至中等流体流速地区进行为期 1 年以上的原位观测, 但无法应用于高流体流速地区。

除 Jannasch、Solomon 和 Kastne 外, LaBonte 等<sup>[55]</sup>也基于海底冷泉渗漏流体化学和通量测量仪的渗透原理开发了一套高时间分辨率的光学流量计(图 16)。

该装置工作原理与海底冷泉渗漏流体化学和通量测量仪类似, 但渗漏流体流速主要是通过对渗漏流体示踪剂含量的荧光监测和透光检测确定, 具有高时间分辨率的特点。

目前, BIGO、FLUFO 以及基于渗透原理的取样装置在世界各地得到广泛应用。虽在观测时有一定误差, 但仍在可接受范围内, 迄今为止未见有进一步研究。

### 3 冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置

海底冷泉原位观测除了对冷泉渗漏气体和流体进行观测外, 还包括对海底冷泉化学组分的观测。对海底冷泉区海水进行原位地球化学观测可

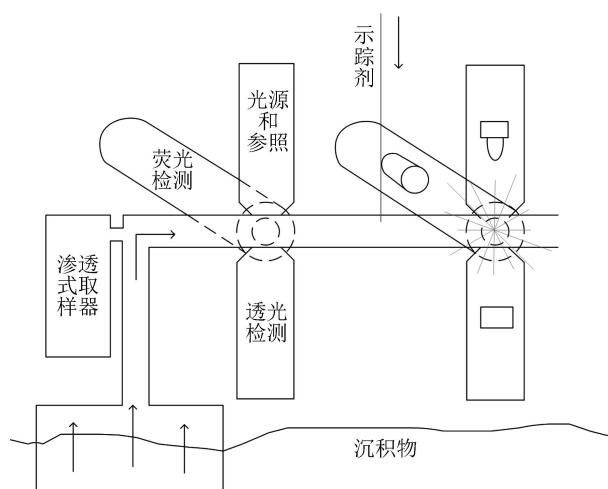


图 16 光学流量计<sup>[55]</sup>  
Fig.16 Schematic diagram of the optical tracer injection system<sup>[55]</sup>

以实时获得海水中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等物质的浓度, 对于观测冷泉渗漏化学物质通量、海洋环境变化、获得长时间序列的冷泉渗漏速率具有重要意义。根据工作原理, 冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置可分为模拟实验室原理的冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置和多学科地球化学观测站。

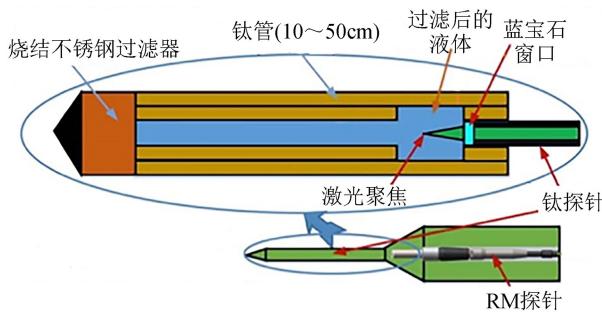
#### 3.1 模拟实验室原理的冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置

模拟实验室原理的冷泉渗漏流体化学组分原位观测装置是指利用观测仪器在海底冷泉区对海水进行取样, 然后原位模拟实验室流程对冷泉进行分析, 以获得海底冷泉化学组分的方法。

在海底温压下进行冷泉化学组分分析, 拉曼光谱有很大的应用前景。拉曼光谱是一种分子指纹光谱, 在物质成分识别和定量分析领域已得到广泛应用<sup>[56-59]</sup>。常温常压下的拉曼光谱定量分析方法已经比较成熟, 但深海条件较为复杂, 人们对在此条件下的各种粒子的拉曼光谱认识比较有限, 因此拉曼光谱以前在深海多用于定性研究<sup>[60-61]</sup>。近年来, 随着实验室深海极端环境模拟实验工作的进展, 人们逐渐掌握了深海极端环境下  $\text{CH}_4$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_2$  等目标物的拉曼光谱特征, 这为拉曼光谱技术在深海原位观测的应用打下基础。

2017 年, 中国科学院海洋研究所张鑫等<sup>[62]</sup>研发了一套基于拉曼光谱的深海插入探针。该探针装配有两套探头, 一套适用于海底热液原位观测, 一套适用于海底冷泉原位观测, 本文主要介绍适用于海底冷泉原位观测的探头(图 17)。

该探针由 ROV 搭载插入指定区域, 可以测量冷

图 17 基于拉曼光谱的冷泉探针<sup>[62]</sup>Fig.17 Schematic diagram of the probes for studying cold seep fluids<sup>[62]</sup>

泉区  $\text{CH}_4$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等粒子浓度以及温度。工作时，冷泉样品通过 ROV 上的液压泵，经探头顶部进入直径为 2 mm 的通道，然后利用探头内部的光学单元进行测量。

在每次拉曼测量之前，都要用海水冲洗整个系统并收集背景海水拉曼光谱。背景海水光谱将与水下机器人潜水的首个海水光谱进行比较，以检查光学元件表面上吸附的物质是否有残留拉曼信号。该装置可有效测量冷泉区  $\text{CH}_4$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等离子浓度，但由于人们对深海条件下各离子拉曼光

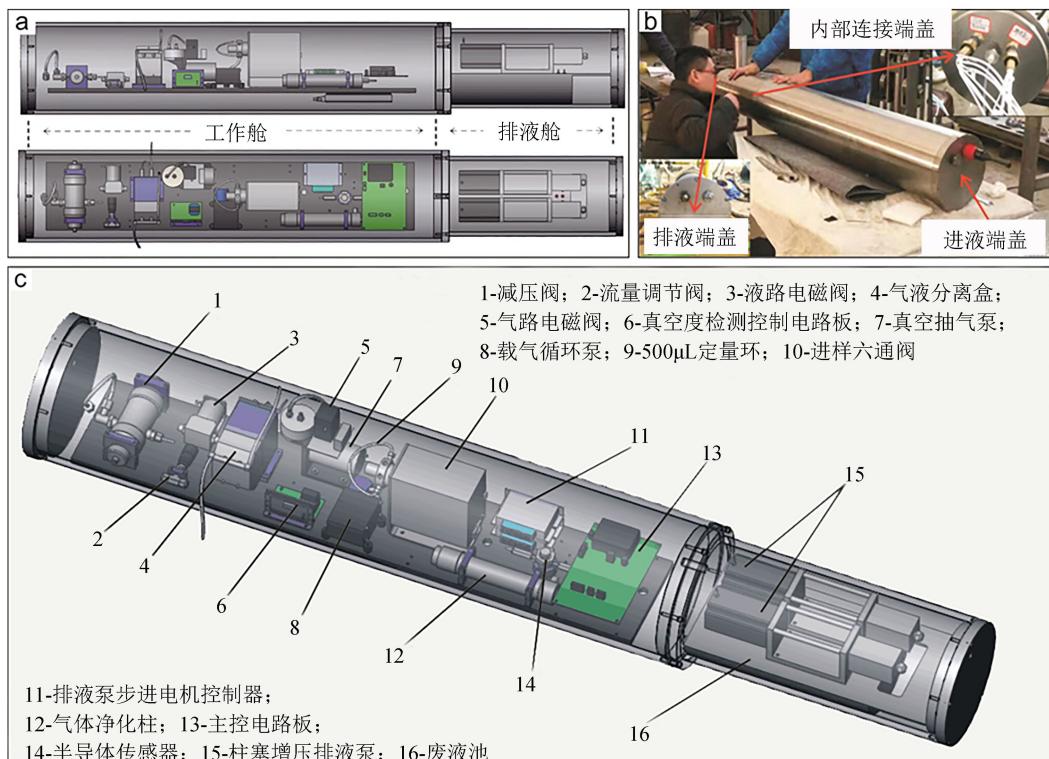
谱认识的有限性，可见检测的离子不多，未来还有很大发展空间。

利用观测设备直接将海底温压条件转化为正常温压条件，然后进行模拟实验室分析，可解决常规分析方法在海底温压下不可用的问题。中国地质大学申正伟等<sup>[63]</sup>研制了一套深海溶解甲烷原位探测仪（图 18）。

该装置包括减压稳流单元、脱气检测单元以及气液处理单元，工作原理为将复杂的海底高压环境转换为常压环境，以保护内部部件和形成良好的检测环境。海水被采集进入仪器后模拟实验室检测流程，先将海水中的气体分离，然后对分离出的气体进行甲烷含量的检测。

工作时（图 19），海水经过滤器进入耐压仓，经过减压稳流系统后降为匀速海水，然后由脱气系统将海水中的气体分离出来。分离出的气体经过干扰空气净化器过滤后与半导体传感器发生反应，传感器的电阻发生变化，以此来检测海水中的甲烷浓度。脱气后的海水进入气液处理系统，最后增压排出舱外。

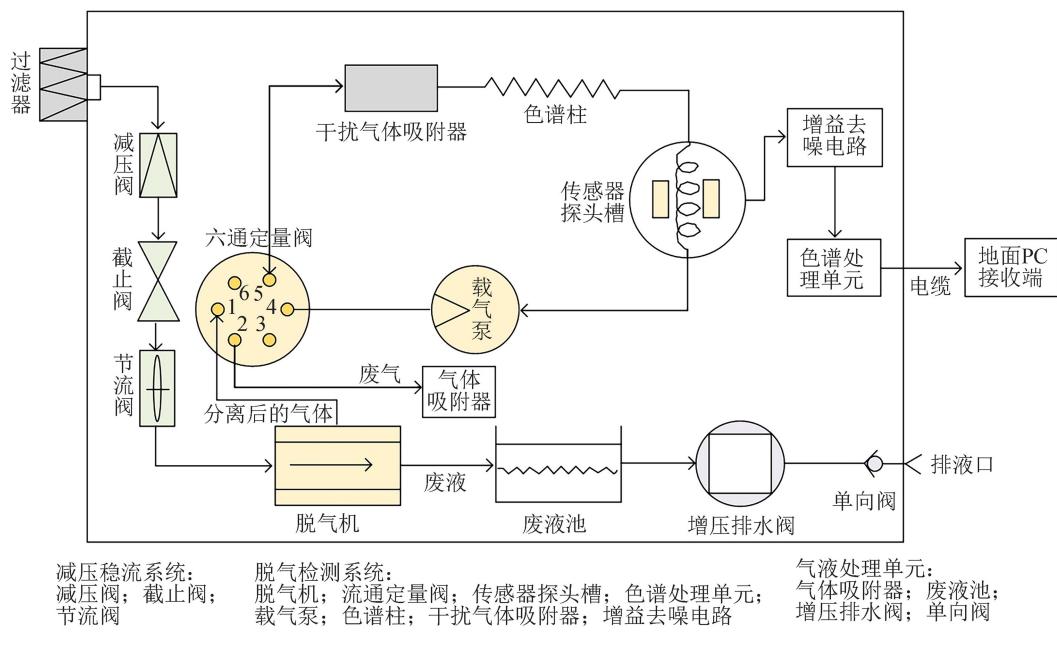
此装置模拟实验室环境，脱气率高，测量精确

图 18 深海溶解甲烷原位长期监测仪器<sup>[63]</sup>

a. 侧视及俯视图，b. 实物图，c. 各部件布局图。

Fig.18 In-situ long-term monitoring instrument for deep-sea dissolved methane<sup>[63]</sup>

a. Side view and top view, b. physical drawing, c. layout drawing of various components.

图 19 深海溶解甲烷探测仪器工作原理图<sup>[63]</sup>Fig.19 Schematic diagram of the in-situ long-term monitoring instrument for deep-sea dissolved methane<sup>[63]</sup>

度较高, 所用甲烷传感器体积小、操作简便、可实现原位实时连续观测, 并且可与其他化学、物理传感器集为一体进行甲烷海底观测<sup>[64-65]</sup>, 但是只能对 CH<sub>4</sub> 浓度进行检测, 还有进一步的提升空间。

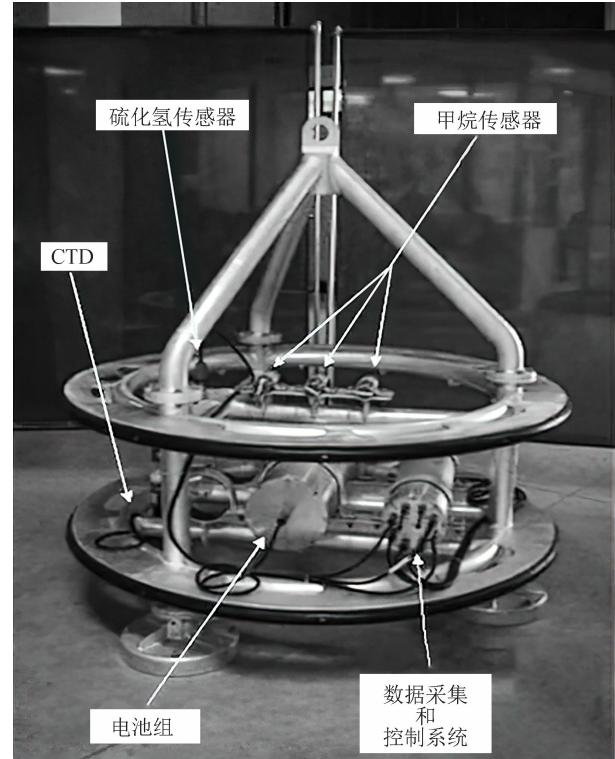
### 3.2 多学科地球化学观测站

多学科地球化学观测站基于各种化学传感器研发, 不需要模拟实验室工作流程对海水进行化学分析。利用坐底式地球化学观测站对海底冷泉渗漏进行多学科分析, 对于认识海底天然气水合物的分解、碳氢化合物运移、冷泉生物群落演化、冷泉流体活动特征等有重要的科学意义<sup>[66-68]</sup>。

1998 年, 意大利国家地球物理研究所 Beranzoli 等<sup>[69]</sup>研制了第一个适用于海底冷泉区的坐底式多学科海底观测系统(GEOSTAR)。该装置设计工作水深 4 000 m, 最多可在水下工作 1 年, 装有用于地震、地磁、重力、地球化学和海洋学测量等多学科传感器, 可测量电导率、温度、深度、湍流、pH、Eh、H<sub>2</sub> 和 HS 浓度等指标, 但该装置结构复杂, 布设繁琐, 且无法对 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 等关键性指标进行观测。

之后, 意大利国家地球物理和火山学研究所 Marinaro 等<sup>[70]</sup>研制了一套用于长期探测海底甲烷泄漏的气体监测装置(GMM)(图 20)。该装置结构简单, 可观测海底 CH<sub>4</sub> 浓度、H<sub>2</sub>S 浓度、温度、盐度、深度, 最多可在水下运行 1 年, 但对海底地球化学观测指标仍较少。

德国基尔海洋地球科学研究中心 Pfannkuche

图 20 GMM 气体监测装置<sup>[70]</sup>Fig.20 The gas monitoring module<sup>[70]</sup>

等<sup>[71]</sup>研发了一套海底边界层观测系统(GEOMAR), 设计深度 6 000 m, 可在海底自主工作 6 至 12 个月。GEOMAR 为多学科观测装置, 搭载有标准有效载荷设备包括声学多普勒海流剖面仪、电流表、CTD、立体深海摄像系统、多波束回声测深仪、沉

积物收集器、海水取样器, 可观测海底边界层海流测量、颗粒通量量化、声学气泡尺寸成像气流量化、大型海底活动监测、沉积物-水界面流体和气流测量、沉积物-水界面生物地球化学通量(氧化剂、甲烷、营养物)、深海沉积物和地球生物指标(食物富集、示踪剂添加、物理和化学环境参数变化)。除此之外, GEOMAR 系统上搭载 BIGO 和 FLUFO, 使其具备了观测海底边界层  $O_2$  浓度和海底冷泉排放  $CH_4$  通量的能力。GEOMAR 应用前景十分广泛, 未来搭载的传感器种类也可根据观测需要进一步添加。

国内方面, 中国海洋大学赵广涛<sup>[72]</sup>研发了一套海底边界层原位监测装置 Benvir(图 21), 旨在获取近海底边界层  $CH_4$ 、 $CO_2$ 、海流、温度、盐度、压力、浊度等参数的长时间序列变化数据<sup>[73]</sup>, 设计工作水深 4 000 m, 工作温度零下 5~45 °C, 电源自给, 数据自容储存, 最多可在水下工作 40 d。

该装置搭载有水下摄像装置, 在布放时可采用可视化布放, 在复杂地形的坐底成功率较高。回收时利用声学释放单元和信标单元, 装置接收到信号后释放配重, 仅回收观测单元和控制单元, 待回收单元在浮力材料作用下升至海面, 然后利用信标单元查找系统位置进行回收。

除了进行常规的冷泉观测外, 该装置还可在近海底海水中进行垂向上的微尺度观测。其自身装有水下电机, 可驱动传感器组合进行垂向移动, 每次移动距离 5~10 cm, 最大移动距离 50 cm, 可实现对近海底边界层微尺度剖面的数据监测, 结合湍流数据, 可以用来估算海底边界层物质扩散通量。但该装置在水下运行时间较短, 整体结构也会对水下湍流产生扰动, 影响测量精度。

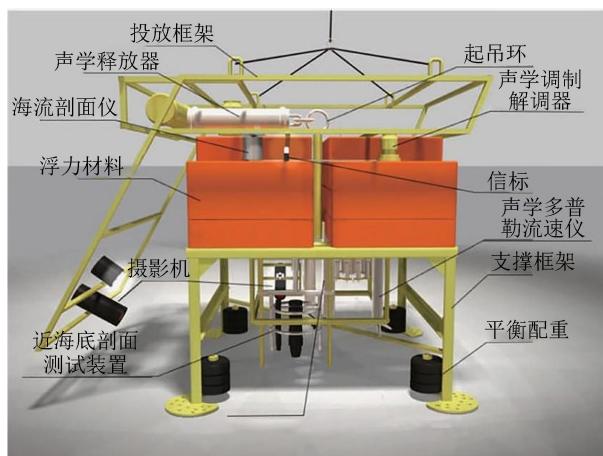


图 21 Benvir 海底边界层原位监测装置<sup>[72]</sup>

Fig.21 Benvir-in situ deep-sea observation system<sup>[72]</sup>

## 4 结论与展望

近几十年来, 海底冷泉因和天然气水合物资源、温室效应、物质地球化学循环、极端环境下的生物演化等问题联系密切而备受关注, 海底冷泉原位观测装置也随之发展。海底冷泉原位观测仪器因成本较高且观测范围较小而发展缓慢, 但在冷泉精细化、定量化研究中仍有不可替代的作用。海底冷泉渗漏流体通量以及渗漏流的化学组成都形成了相应的原位观测方法, 并在实际观测中应用, 解决了海底冷泉原位观测装备从无到有的问题。

经过 20 年的发展, 海底冷泉原位观测装备在自主观测、观测时间、观测精度、可观测目标等方面取得了巨大进步, 但是目前存在的原位观测装置仍存在一些问题。渗漏气泡和渗漏液体原位观测装置布设后存在对沉积物的扰动, 观测精度也有待提高; 基于声学和光学原理的观测装置存在信号强度不高, 对致密气泡测量不准确, 易受悬浮物和海洋生物影响; 对于深海条件下的各元素的拉曼光谱认识不足; 多学科地球化学观测站传感器精度有待提高, 传感器类型有待丰富。

为了适应发展需要, 对冷泉进行精细、全面的研究是不可或缺的, 冷泉原位观测发展之路任重而道远。纵观国内外海底冷泉观测仪器的发展, 为满足未来海底冷泉原位观测的需要, 海底冷泉观测仪器的发展方向包括:

(1) 海底冷泉水深较深且地形复杂, 对原位观测仪器的布设提出了较高要求, 未来冷泉原位观测装置需要向布设方便、布设成功率高的方向发展。在布设后, 原位观测装置会对海底沉积物产生扰动, 怎样减小原位观测装置对海底沉积物的扰动也是需要努力的方向。

(2) 海底冷泉渗漏是复杂的、动态的过程, 海底边界层同样也是复杂的、动态的区域, 这决定了渗漏流体在时间和空间上是复杂多变的。目前的海底冷泉原位观测均为单个独立的观测, 各个观测之间并没有形成联系。未来的冷泉原位观测应向大空间、多尺度、长时间序列发展, 最终形成完整的海洋观测网。

(3) 海底冷泉渗漏流体成分复杂, 目前的坐底式地球化学观测站仅局限于对  $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $H_2S$  等少数几种粒子的观测, 未来应扩展冷泉观测目标, 充分认识海底冷泉渗漏组分。实现这一目标依赖于传感器的发展, 适用于海底观测的高灵敏度传感器

也是未来的研究方向之一。

(4) 目前利用声学信号和光学信号的原位观测装置对致密气泡的观测效果一般, 对海洋生物等干扰物的识别并不明显。未来需进一步加强气泡对声学和光学信号响应的研究, 降低杂质干扰, 拓宽观测冷泉渗漏的流量范围。

(5) 未来冷泉原位观测应与地球物理探测、实验室化学分析、海洋生物研究、海洋潮流湍流研究、海洋地质构造等研究相结合, 确定冷泉气源, 寻找渗流通道, 分析海底冷泉的影响因素, 从多学科、多角度充分掌握海底冷泉活动机制。

**致谢:** 感谢孙志文博士和薛凉博士在写作时给予的帮助。

### 参考文献 (References)

- [1] 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 Zhong, YANG Huaping, HUANG Qiyu, et al. Characteristics of cold seeps and structures of chemoauto-synthesis-based communities in seep sediments [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(6): 73-82.]
- [2] Talukder A R. Review of submarine cold seep plumbing systems: leakage to seepage and venting [J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 255-272.
- [3] Cao L, Lian C, Zhang X, et al. In situ detection of the fine scale heterogeneity of active cold seep environment of the Formosa Ridge, the South China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2021, 218: 103530.
- [4] Ho S, Cartwright J A, Imbert P. Vertical evolution of fluid venting structures in relation to gas flux, in the Neogene-Quaternary of the Lower Congo Basin, Offshore Angola [J]. *Marine Geology*, 2012, 322-334: 40-55.
- [5] Suess E. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(7): 1889-1916.
- [6] Suess E. Marine cold seeps: background and recent advances [M]// Wilkes H. *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate*. Cham: Springer, 2018: 1-21.
- [7] 席世川, 张鑫, 王冰, 等. 海底冷泉标志与主要冷泉区的分布和比较 [J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(2): 7-18. [XI Shichuan, ZHANG Xin, WANG Bing, et al. The indicators of seabed cold seep and comparison among main distribution areas [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(2): 7-18.]
- [8] Feng D, Chen D F. 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.
- [9] Wang J L, Wu S G, Kong X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 17-26.
- [10] Leifer I, Boles J, Luyendyk A B. Measurement of oil and gas emissions from a marine seep [C]//New Energy Development and Technology (EDT-009) Working Paper January 2007. California: University of California Energy Institute, 2007: 1-22.
- [11] 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.
- [12] 阴家润, 王薇薇. 深海洋底热泉生态系和冷泉生物研究综述 [J]. 地质科技情报, 1995, 14(2): 31-36. [YIN Jiarun, WANG Weiwei. Hydrothermal vent ecosystem and cold seep community of deep sea [J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(2): 31-36.]
- [13] Paull C K, Hecker B, Commeau R, et al. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa [J]. *Science*, 1984, 226(4677): 965-967.
- [14] 耿明会, 关永贤, 宋海斌, 等. 南海北部天然气渗漏系统地球物理初探 [J]. *海洋学研究*, 2014, 32(2): 46-52. [GENG Minghui, GUAN Yongxian, SONG Haibin, et al. Preliminary geophysical studies of the natural gas seepage systems in the northern South China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(2): 46-52.]
- [15] 冯东, 宫尚桂. 海底冷泉系统硫的生物地球化学过程及其沉积记录研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(6): 1047-1056, 1046. [FENG Dong, GONG Shanggui. Progress on the biogeochemical process of sulfur and its geological record at submarine cold seeps [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(6): 1047-1056, 1046.]
- [16] 程俊, 王淑红, 黄怡, 等. 天然气水合物赋存区甲烷渗漏活动的地球化学响应特征 [J]. *海洋科学*, 2019, 43(5): 110-122. [CHENG Jun, WANG Shuhong, HUANG Yi, et al. Geochemical response characteristics of methane seepage activities in gas hydrate zones [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(5): 110-122.]
- [17] 王旭东, 黄慧文, 孙跃东, 等. 北印度洋海底冷泉流体活动研究进展 [J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(6): 82-89. [WANG Xudong, HUANG Huiwen, SUN Yuedong, et al. Recent progress on submarine cold seep activity of the northern Indian Ocean [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(6): 82-89.]
- [18] 杨艺萍, 唐灵刚, 向荣, 等. 东沙西南海域表层沉积物底栖有孔虫群落特征及其对冷泉活动的指示意义 [J]. *微体古生物学报*, 2017, 34(3): 237-246. [YANG Yiping, TANG Linggang, XIANG Rong, et al. Benthic foraminiferal assemblage and its implications for cold seepage in the southwestern area off dongsha islands, South China sea, China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2017, 34(3): 237-246.]
- [19] 刘浩东. 南海北部陆坡冷泉和非冷泉沉积物古菌多样性研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2013. [LIU Haodong. Study on the archaeal diversity in sediments of cold seeps and none cold seeps from northern slope of South China Sea [D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [20] Lu R, Gao Z M, Li W L, et al. Asgard archaea in the haima cold seep: Spatial distribution and genomic insights [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, 170: 103489.
- [21] 张福凯, 徐龙君. 甲烷对全球气候变暖的影响及减排措施 [J]. *矿业安全与环保*, 2004, 31(5): 6-9, 38. [ZHANG Fukai, XU Longjun. Effect of methane on global warming and mitigating measures [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2004, 31(5): 6-9, 38.]

- [22] 陈汉宗, 周蒂. 天然气水合物与全球变化研究[J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 38-43. [CHEN Hanzong, ZHOU Di. The study of gas hydrates and its relation with global changes [J]. *Advances in Earth Science*, 1997, 12(1): 38-43.]
- [23] 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]. *应用海洋学报*, 2016, 35(3): 442-450. [SUN Zhilei, WEI Helong, WANG Libo, et al. Focus issues of carbon cycle and detecting technologies in seafloor cold seepages [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(3): 442-450.]
- [24] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed [J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 147-154.
- [25] Wu J G, Wu T T, Deng X G, et al. Acoustic characteristics of cold-seep methane bubble behavior in the water column and its potential environmental impact [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(5): 133-144.
- [26] Washburn L, Johnson C, Gotschalk C C, et al. A gas-capture buoy for measuring bubbling gas flux in oceans and lakes [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(8): 1411-1420.
- [27] Leifer I, Boles J. Turbine tent measurements of marine hydrocarbon seeps on subhourly timescales [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C1): C01006.
- [28] 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 [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 83-87.
- [29] Padilla A M, Loranger S, Kinnaman F S, et al. Modern assessment of natural hydrocarbon gas flux at the coal oil point seep field, Santa Barbara, California [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(4): 2472-2484.
- [30] Greinert J, Nützel B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of methane bubble fluxes at cold seeps [J]. *Geo-Marine Letters*, 2004, 24(2): 75-85.
- [31] Greinert J. Monitoring temporal variability of bubble release at seeps: The hydroacoustic swath system GasQuant [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C7): C07048.
- [32] Lemon D D, Gower J F R, Clarke M R. The acoustic water column profiler: a tool for long-term monitoring of zooplankton populations[C]//MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2001: 1904-1909.
- [33] Salmi M S, Johnson H P, Leifer I, et al. Behavior of methane seep bubbles over a pockmark on the Cascadia continental margin [J]. *Geosphere*, 2011, 7(6): 1273-1283.
- [34] Leifer I, Chernykh D, Shakhova N, et al. Sonar gas flux estimation by bubble insonification: application to methane bubble flux from seep areas in the outer Laptev Sea [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(3): 1333-1350.
- [35] 王冰, 宋永东, 杜增丰, 等. 基于“发现”号ROV的近海底综合声学调查系统及其在台西南冷泉调查中的应用[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 889-898. [WANG Bing, SONG Yongdong, DU Zengfeng, et al. An integrated underwater acoustic survey system and its application in the investigation of the cold seep site off southwestern taiwan [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 889-898.]
- [36] Nikolovska A, Waldmann C. Passive acoustic quantification of underwater gas seepage[C]//OCEANS 2006. Boston, MA, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [37] Wiggins S M, Leifer I, Linke P, et al. Long-term acoustic monitoring at North Sea well site 22/4b [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 776-788.
- [38] 龙建军, 黄为, 邹大鹏, 等. 海底天然气渗漏流量声学测量方法及初步实验研究[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 100-105. [LONG Jianjun, HUANG Wei, ZOU Dapeng, et al. Method of measuring bubble flow from cool seeps on seafloor using acoustic transmission and preliminary experiments [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 100-105.]
- [39] 胡柳. 冷泉渗漏声波测量装置主体研制与气泡-水声学特性的实验研究[D]. 广东工业大学, 2014. [HU Liu. Development of seepage acoustic measuring device and experimental study on bubble-water acoustic properties[D]. Master Dissertation of Guangdong University of Technology, 2014.]
- [40] 张浩. 海底冷泉渗漏气体流量声波测量仪的研究与开发[D]. 广东工业大学, 2015. [ZHANG Hao. Research and experimental study on acoustic measuring instrument of gas seeping on seafloor[D]. Master Dissertation of Guangdong University of Technology, 2015.]
- [41] Leifer I, Leeuw G D, Cohen L H. Optical measurement of bubbles: system design and application [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(9): 1317-1332.
- [42] Leifer I. Characteristics and scaling of bubble plumes from marine hydrocarbon seepage in the Coal Oil Point seep field [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C11): C11014.
- [43] Leifer I. Seabed bubble flux estimation by calibrated video survey for a large blowout seep in the North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 743-752.
- [44] Wang B 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]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(4): 2203-2230.
- [45] Di P F, Feng D, Tao J, et al. Using time-series videos to quantify methane bubbles flux from natural cold seeps in the South China Sea [J]. *Minerals*, 2020, 10(3): 216.
- [46] Cable J E, Burnett W C, Chanton J P, et al. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45(3): 367-375.
- [47] Lee D R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(1): 140-147.
- [48] 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.
- [49] Labarbera M, Vogel S. An inexpensive thermistor flowmeter for aquatic biology [J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, 21(5): 750-756.
- [50] Sommer S, Pfannkuche O, Linke P, et al. Efficiency of the benthic filter: Biological control of the emission of dissolved methane from sediments containing shallow gas hydrates at Hydrate Ridge [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(2): GB2019.
- [51] 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 Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, 48(9): 2121-2146.

- [52] Jannasch H W, Wheat C G, Plant J N, et al. Continuous chemical monitoring with osmotically pumped water samplers: OsmoSampler design and applications [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2004, 2 (4): 102-113.
- [53] Kastner M, Jannasch H, Weinstein Y, et al. A new sampler for monitoring fluid and chemical fluxes in hydrologically active submarine environments [C]//OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings. Providence, RI, USA: IEEE, 2000: 109-112.
- [54] 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.
- [55] Labonte A L, Brown K M, Tryon M D. Monitoring periodic and episodic flow events at Monterey Bay seeps using a new optical flow meter [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112 (B2): B02105.
- [56] 田国辉, 陈亚杰, 冯清茂. 拉曼光谱的发展及应用 [J]. *化学工程师*, 2008, 22 (1): 34-36. [TIAN Guohui, CHEN Yajie, FENG Qingmao. Development and application of Raman technology [J]. *Chemical Engineer*, 2008, 22 (1): 34-36.]
- [57] 伍林, 欧阳兆辉, 曹淑超, 等. 拉曼光谱技术的应用及研究进展 [J]. *光散射学报*, 2005, 17 (2): 180-186. [WU Lin, OUYANG Zhaohui, CAO Shucao, et al. Research development and application of Raman scattering technology [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2005, 17 (2): 180-186.]
- [58] 杜增丰. 基于 DOCARS 和 LCOF-Raman 的酸根离子探测和沉积物孔隙水的光谱分析 [D]. 中国海洋大学, 2015. [DU Zengfeng. Detection of acid radical ions with DOCARS and LCOF-Raman system and spectral analysis of sediment pore water [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [59] 张鑫. 深海环境及深海沉积物拉曼光谱原位定量探测技术研究 [D]. 中国海洋大学, 2009. [ZHANG Xin. Quantitative applications of Raman technique for deep-sea environment and sediment detection new technique for deep-sea sediment pore water and methane hydrates in situ detection [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2009.]
- [60] 杜增丰, 张鑫, 郑荣儿. 拉曼光谱技术在深海原位探测中的研究进展 [J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15 (1): 2-12. [DU Zengfeng, ZHANG Xin, ZHENG Ronger. Research progress and prospect of laser Raman spectroscopy for in-situ detection in deep ocean [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15 (1): 2-12.]
- [61] 赵永柱. 光纤内共振拉曼光谱法探测水中痕量生物分子 [D]. 吉林大学, 2004. [ZHAO Yongzhu. Trace analysis of biological molecules in water by means of the resonance raman spectra in liquid-core optical fiber [D]. Master Dissertation of Jilin University, 2004.]
- [62] Zhang X, Du Z F, Zheng R E, et al. Development of a new deep-sea hybrid Raman insertion probe and its application to the geochemistry of hydrothermal vent and cold seep fluids [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017, 123: 1-12.
- [63] 申正伟. 深海溶解甲烷原位长期探测技术研发及应用研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2018. [SHEN Zhengwei. Research and development of in-situ long-term detection technology for deep-sea dissolved methane and its application [D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [64] 申正伟, 孙春岩, 贺会策, 等. 深海原位溶解甲烷传感器(METS)的原理及应用研究 [J]. *海洋技术学报*, 2015, 34 (5): 19-25. [SHEN Zhengwei, SUN Chunyan, HE Huice, et al. The Principle and Applied Research of In-situ METS for Dissolved Methane Measurement in Deep Sea [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34 (5): 19-25.]
- [65] 于新生, 李丽娜, 胡亚丽, 等. 海洋中溶解甲烷的原位检测技术研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26 (10): 1030-1037. [YU Xinsheng, LI Lina, HU Yali, et al. The development of in situ sensors for dissolved methane measurement in the sea [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2011, 26 (10): 1030-1037.]
- [66] 赵静, 梁前勇, 尉建功, 等. 南海北部陆坡西部海域“海马”冷泉甲烷渗漏及其海底表征 [J]. *地球化学*, 2020, 49 (1): 108-118. [ZHAO Jing, LIANG Qianyong, WEI Jiangong, et al. Seafloor geology and geochemistry characteristic of methane seepage of the “Haima” cold seep, northwestern slope of the South China Sea [J]. *Geochimica*, 2020, 49 (1): 108-118.]
- [67] 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.
- [68] 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 [J]. *地球物理学进展*, 2008, 23 (5): 1592-1602. [DI Pengfei, FENG Dong, GAO Libao, et al. In situ measurement of fluid flow and signatures of seep activity at marine seep sites [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23 (5): 1592-1602.]
- [69] Beranzoli L, De Santis A, Etiope A G, et al. GEOSTAR: a geophysical and oceanographic station for abyssal research [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 108 (2): 175-183.
- [70] Marinaro G, Etiope G, Gasparoni F, et al. GMM—a gas monitoring module for long-term detection of methane leakage from the seafloor [J]. *Environmental Geology*, 2004, 46 (8): 1053-1058.
- [71] Pfannkuche O, Linke P. GEOMAR landers as long-term deep-sea observatories: applications and developments of lander technology in operational oceanography [J]. *Sea Technology*, 2003, 44 (9): 50-55.
- [72] 赵广涛, 于新生, 李欣, 等. Benvir: 一个深海海底边界层原位监测装置 [J]. *高技术通讯*, 2015, 25 (1): 54-60. [ZHAO Guangtao, YU Xinsheng, LI Xin, et al. Benvir: A in situ Deep-sea observation system for Benthic environmental monitoring [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2015, 25 (1): 54-60.]
- [73] 徐翠玲. 南海冷泉区甲烷渗漏过程的原位观测研究 [D]. 中国海洋大学, 2013. [XU Cuiling. In situ observation of methane seepage in the South China Sea [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2013.]