

Benvir: 一个深海海底边界层原位监测装置^①

赵广涛^{②*} 于新生* 李欣^{**} 孙剑* 张晓东* 张书文^{***} 王项南^{****} 李芝凤^{****}
曹瑞雪^{***} 徐翠玲* 何雨昉* 赵利* 缪雄谊* 冷传旭*

(* 海洋科学与探测技术教育部重点实验室 青岛 266100)

(** 中国海洋大学信息与工程学院 青岛 266100)

(*** 广东海洋大学陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室 湛江 524088)

(**** 国家海洋技术中心 天津 300112)

摘要 研制了一个可移动的自容式深海海底边界层原位监测装置(简称 Benvir)。该装置采用模块化、开放式结构设计,自容式数据存储,较国际上其它海底原位监测装置具有较小的体积和空气重量,最大工作水深 4000m。Benvir 可集成一系列原位环境监测传感器,包括监测甲烷、二氧化碳、溶解氧、pH、电导率的化学传感器和监测温度、压力、浊度的物理传感器以及测量流速的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)和测量湍流的声学多普勒流仪(ADV),具备近海底边界层多环境参数的原位、定点、连续和同步观测,以及近海底微尺度剖面的监测功能。Benvir 在观测海底冷泉活动与甲烷渗漏过程和进行海底界面生物地球化学研究方面具有良好的应用前景。

关键词 海底边界层, 原位观测, 冷泉

0 引言

海底界面的生物、物理、化学性质对全球海洋环境变化有着重要的指示意义。在过去几十年里,浮标、锚系、无人遥控潜水器、无缆水下机器人等技术装备加深了人们对深海的了解,但其仅能提供较少时间段的现象和数据。为了进一步加深对海底界面过程的了解,一些具备长时序观测能力的海底观测站技术得到重视和发展。由于基于海底光缆的网络观测系统需要铺设深海海底通讯电缆,海底电缆建设的投入及维护费用较高,并且一旦网络系统建设完毕,其结构是永久性的,无法移动到别的区域,这就制约了对新发现的海底热液活动区、天然气水合物区、深海油气开发区的观测研究,因此,自 20 世纪 90 年代以来,成本低、机动性高的可根据观测需求投放到任意选定区域的深海可拓展原位座底式观测

系统,逐渐发展成为海底监测网络的重要观测技术,它支撑了我们对海底进行原位长时序观测的能力。

首次实施的深海海底界面座底式观测系统是美国于 1970 年布放的海底呼吸计 FVGR 和用于锰结区观测的着陆器 MANOP-Lander^[1],主要用于深海沉积物通量和海底地磁观测。随后 Scripps 研究所研制了深海海底生物化学观测站 ROVER^[2],该观测站工作水深可达 6000m,连续工作最长时间为 6 个月。近年来欧洲共同体成员国研发了近 60 多套座底式海底边界观测站,在国际上处于领先地位。譬如,德国研制的喷口采样系统 VESP^[3]、基于 Geomar 着底系统的生物地球化学观测站 BIGO 和海底流体通量观测站 FLUFO^[4,5];英国、丹麦等国家研制的用于深海海底沉积动力过程研究的海底边界计划观测站 BENBO^[6];荷兰科学家在 2005 年研制出的多学科、多参数监测系统 BOBO^[7];意大利、法国等国家

① 863 计划(2009AA09Z201)资助项目。

② 男,1964 年生,博士,教授;研究方向:海底矿产资源与成矿作用;联系人, E-mail: gtzhao@ouc.edu.cn
(收稿日期:2014-05-17)

联合研制的水深 6000m 的海底地球物理监测系统 GEOSTAR^[8], 该观测站采用简化的无人遥控潜水器投放与回收装置, 减少了回收时所必需的浮力系统, 在水下定位以及操作的灵活性方面均有了很大的提高。

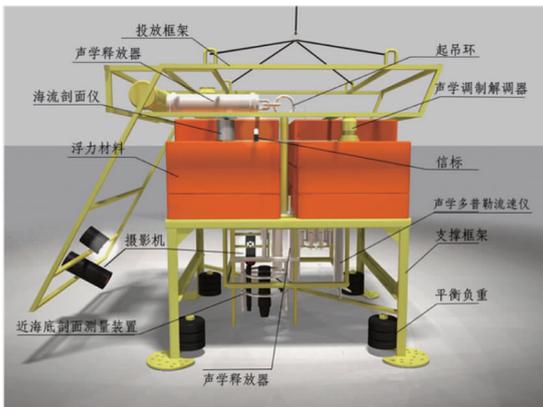
近年来, 与海底冷泉渗漏有关的生物地球化学过程以及环境效应研究受到科学家的广泛关注, 并在典型海域(黑海、墨西哥湾等)开展了海底原位观测研究^[9-11]。与此同时, 中国科学家在南海、东海也开始酝酿致力于该领域的研究^[12, 13], 迫切需要发展支撑这一研究的海底原位观测技术。为此, 从 2009 年开始, 在中国国家科技部支持下, 我们考虑到中国东海和南海海底天然气水合物的研究需求以及深海海底边界层在成矿、沉积和生物作用过程中的特殊意义, 新设计了一套深海海底边界层原位观测系统(benthic environmental observation system, 简称 Benvir), 目的是建立海底界面多参数、长时序、原位观测技术平台, 以获取海底边界层的物理、化学、环境

等参数的协同性变化特征。

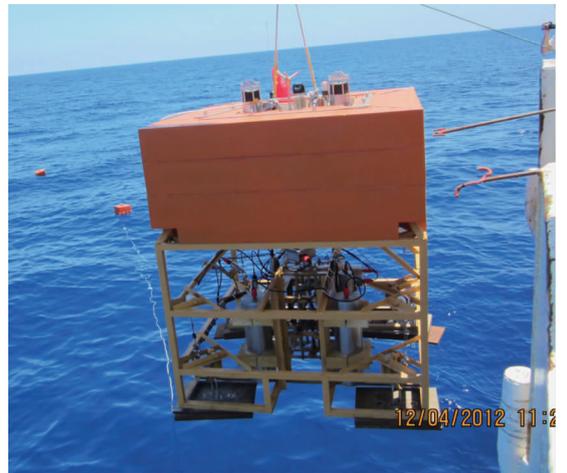
1 Benvir 的框架与功能

Benvir 是小型的移动式坐底观测平台, 电源自给、数据自容, 具备在深海和特殊海洋环境(如海底冷泉发育区)下进行原位、多参数短期—中期同步监测的能力。

Benvir 观测系统的设计图和样机图如图 1 示, 包含系统主体和可视化投放两部分。其中主体部分包括: 结构平稳的四脚框架; 由浮力材料、负重和声学释放器等组成的投放和回收系统; 由传感器、水下电机和海底摄像机组成的观测模块; 以及由电池和微型嵌入式计算机组成的控制系统。在具备铠装缆绳的调查船上, 可实现对 Benvir 的可视化投放, 可视化投放部分包括投放框架、水下电源、水下摄像机和声学释放器。



(a) 设计图



(b) 样机图

图 1 Benvir 系统设计图和样机图

Benvir 和国际上的类似观测平台的主要技术参数见表 1。表中, DO 为溶解氧(dissolved oxygen); CTD 为温盐控仪, 探测海水的盐度即电导(conductance)、温度(Temperature)及深度(Depth); ADCP 为声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler), 用于流速剖面测量; ADV 是声学多谱流速仪(acoustic Doppler Velocimeter), 用于测量湍流。与同类观测相比, Benvir 具有较小的体积和空气重

量, 因而便于中小型船只搭载和在浅水海域观测; 设计工作水深为 4000m, 工作温度范围为 $-5 \sim 45^{\circ}\text{C}$, 具备在冷泉、天然气水合物和海底金属结核结壳等发育地区的观测能力; 采用可集成不同的传感器组合的开放式结构设计; 安装了水下电机, 能带动传感器组合在垂直剖面上移动, 实现海底边界层的微尺度剖面测量和近距离观测(传感器探头与海底界面距离 $< 10\text{cm}$); 采用电源自给和自容式数据存储, 并

配备安全的投放和回收技术,使系统摆脱海底观测网络的限制,实现深海观测和系统的移动性能。以

下介绍 Benvir 系统的框架设计、投放与回收技术、系统技术与研发以及海洋试验。

表1 Benvir 和其它观测平台的主要技术参数对比

监测装置 技术指标	Benvir	气体监测 模块(GMM) ^[14]	冷水珊瑚礁 海底监测 系统 ^[15]	Banyuls lander ^[16]	Göteborg lander ^[16]	Geomar modular lander system ^[4,5]	BOBO ^[7]
整体外型 尺寸	1.5m × 1.5m × 2.0m	直径 1.5m, 高 1.55m	高 > 4.5m	2.1mm × 2.1mm × 3.3mm	2.4m × 2.4m × 3.4m	-	直径 4m, 高 > 2m
最大工作 水深	4000m	1000m	1200m	2000m	6000m	6000m	5000m
系统集成 传感器/ 仪器	CH ₄ 、CO ₂ 、pH、DO 传感器及 CTD, ADCP,ADV,浊 度仪和摄像机	H ₂ S、CH ₄ 传感器及 CTD	高清摄像机、 海流计、 ADCP、CTD	DO 传感器、 CTD	DO 传感器、 CTD	摄像机、 ADCP、CTD、 底栖舱	ADCP、CTD、 透射仪、 沉积物 捕获器
边界层底 界面深度	< 10cm	无	无			离海底大于 1m	
测量精度							
容式数据 存储容量	4GB	16MB ~ 1GB					
水下连续 工作时间	40d	3mon ~ 1yr		0.5 ~ 7d	40d	6mon ~ 1yr	> 1yr
仪器/传 感器接口	256 开放式 串行接口						
数据采集 间隔	1s ~ 24h(可编程)		5min ~ 24h				
升、降 平均速度	≤ 1m/s			降 55m/min, 升 70m/min	降 40m/min, 升 80m/min		降 57m/min

1.1 系统框架设计

采用数学建模方法分析了框架结构对海底流场的干扰程度,并对建立的小比例尺系统结构模型进行水槽模拟实验,最终确定系统结构。Benvir 的整体外型尺寸为 1.5m × 1.5m × 2.0m,较国际上其它海底原位监测装置具有较小的体积和空气重量,能适应搭载中小型船只在不同海域施工。采用四个支柱的框架使结构平稳,并且可以作为不同传感器组合的安装平台。

对系统重量、体积、电容、下降和上升速度等进行详细设计,以使系统在 4000m 的海洋深度范围内协调运行和保持安全(系统自动升、降平均速度低于 1m/s)。适当强度且轻的框架材料,不仅使整个系统易于操作,还能减少昂贵的浮力材料的需求。Benvir 的框架采用 316 合金,具有更轻的重量和更强的抗腐蚀性。

1.2 投放与回收模块

Benvir 设计有盲投或有缆可视投放两种方式。系统盲投方法适用于广阔的大陆架和深海平原等平坦地区。盲投时系统在水中自由落体,可以在甲板利用声学释放器通信进行实时跟踪测距,直到系统安全坐底。

系统在海底的着落位置通过超短基线声学定位,即系统初始投放点为零点,根据调查船漂移位置(经纬度)、水深和释放器测距数据等计算。回收时,声学释放器控制释放配重,在浮力材料的作用下,系统平稳上升,到达海面后,利用信标系统查找系统位置。

可视化投放装置基于船载计算机和铠装电缆,包含投放架、声学释放器、水下摄像装置,可以实现水下可视化监控和铠装缆实时通信、传输。可视化投放提高了系统安全性,适用于麻坑、泥火山和海底

峡谷等地形起伏较大的区域, 而且对投放地点可以进行有的放矢选择。

2 系统技术与开发

2.1 传感器组合

由于采用开放式的结构设计, Benvir 可搭载不同的传感器组合, 以适应不同的研究目的。目前, Benvir 架装的传感器包括化学传感器(甲烷、二氧化碳、溶解氧、pH、电导率)和物理传感器(ADCP、ADV、温度、压力、浊度), 还可具备海底摄像监视功能, 详细技术指标见表 2。

表 2 Benvir 目前架装的传感器和详细技术指标

传感器	型号	技术指标				
		量程	分辨率	精度	工作水深	工作温度
CH ₄	Long John CH ₄ -0510-004	30nmol/L ~ 50 μ mol/L	< 3nmol	\pm 3nmol/L	4000m	0 ~ 50 $^{\circ}$ C
CO ₂	Arctic	0 ~ 6000ppm	< 1ppm	\pm 1%	4000m	- 2 ~ 15 $^{\circ}$ C
DO	MoS Oxygen	0 ~ 20mg/l	0. 1%	\pm 1. 5%	6000m	- 2 ~ 38 $^{\circ}$ C
pH	106 系列	2 ~ 11	0. 01	\pm 0. 05	6000m	- 2 $^{\circ}$ C ~ 38 $^{\circ}$ C
ADV	Vector	0. 1, 0. 3, 2, 7m/s	—	\pm 0. 1mm/s	6000m	- 5 ~ 45 $^{\circ}$ C
ADCP	Aquadopp	\pm 10m/s	—	\pm 0. 005m/s	6000m	- 5 ~ 45 $^{\circ}$ C
温度	Model 620 CT	- 5 ~ 35 $^{\circ}$ C	0. 001 $^{\circ}$ C	\pm 0. 005 $^{\circ}$ C	6000m	—
电导率		0 ~ 80ms/cm	0. 002ms/cm	\pm 0. 01ms/cm	—	—
浊度		0-2500FTU	—	\pm 0. 05%	4000m	—
摄像	Muti-seacam S/N3008-T	—	—	—	4000m	—
压力计	PA500/6-S	—	—	—	6000m	—

对化学参数和海流流速进行同步观测, 可用于计算海底物质释放的瞬时通量, 并精细刻画近海底界面物质的运移过程。近底层海流剖面利用 Nortek 公司的小阔龙 600kHz 的 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)测量, 能够监测海底以上 70m 的水流, 湍流观测则通过威龙 Vector 传感器。浊度通过浊度仪和光学被散射装置获得。温度和电导率传感器采用高精度的 Model 620 CT 系列, 高度测量采用 PA500/6-S 系列高度计。冷泉活动、泥底辟和深海生物等地质特征可以通过原位摄像机获得。

2.2 水下电机

物质通量在很大程度上控制着海底边界层的生物地球化学过程及生态系统, 而对海底边界层物质

CH₄、CO₂、DO 和 pH 是海底界面重要的地球化学和生物地球化学参数, 特别在海底冷泉地区甲烷常呈现高时序变化的高浓度异常, 并可能引起其他化学参数的改变。我们首次将 Contro 公司的 Arctic 型号的 CO₂ 传感器和 Long John CH₄-0510-004 型号的 CH₄ 传感器, 集成在海底原位观测系统, 与传统采样配合实验室分析相比, 减少了采样过程中气体溢出导致参数失真, 并能获得甲烷和二氧化碳浓度的时间序列数据。pH 和 DO 分别通过 AMT 公司 106 型号的 pH 传感器和 MoS Oxygen 型号的 DO 传感器获得。

通量的准确估算取决于对海底冷泉非均匀活动的全过程了解, 需要精细刻画和量度海底物质运移过程及其瞬时通量的变化和影响因素。

Benvir 采用深水无刷电机和丝杠控制传感器组件垂向位移, 即通过水下电机推动多传感器沿中间丝杠轴上、下多次移动(每次移动步长由高度计控制, 可为 5 ~ 10cm, 水下电机的螺距为 1mm, 行程范围约为 500mm), 实现多传感器对近海底边界层微尺度剖面的数据测量。结合湍流数据, 可以用来估算海底边界层的物质扩散通量。

2.3 通讯及控制系统

Benvir 的监测模块在海底的自动运行由通讯和控制系统管理, 包括: 采样控制和定时, 传感器信号

调节和数据处理,数据格式化、数据传输和存储,以及功率控制和配电。

控制系统设计见图2,采用嵌入式系统,双系统冗余设置。DO和pH传感器的模拟输出与嵌入式系统板模拟输入通道相连。CTD、ADCP、ADV以及浊度、CH₄、CO₂传感器等通过RS-232接口分别与

CAN协议转换器相连,所有CAN协议转换器通过CAN总线再与嵌入式系统板相连。嵌入式系统板也通过CAN总线和CAN协议转换器控制电机的动作。模块化的设计不仅减少费用,而且能保持系统稳定性和简化现场维修。

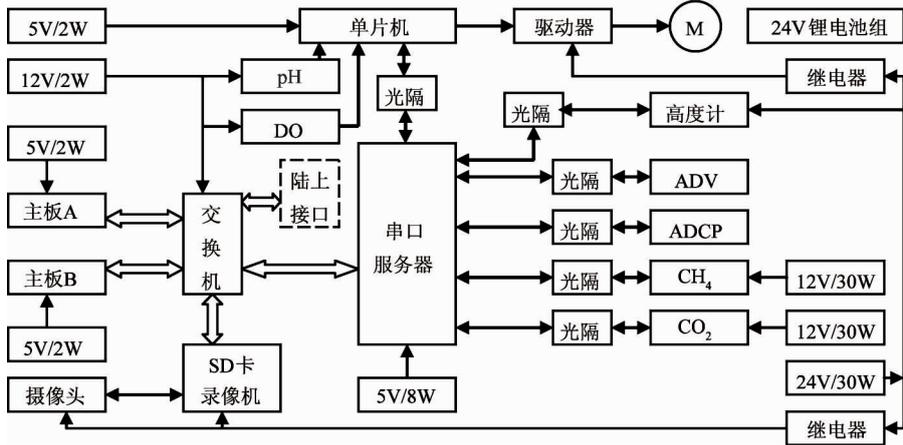


图2 Benvir控制模块设计

为了增加系统长期观测的能力(如1~6个月),足够的电源和数据存储是必需的。电池组的设计方案是:每8节锂电池串联后得到28.8V的电压,再由12组并联构成12×8=96节锂电池的水密电池筒,然后用两个电池筒并联供电。各个模块的不同供电电压,由不同的DC/DC完成电压变换。为了减少电源需求,所有的传感器间歇性运行,例如ADCP每天进行10个传输周期,每次持续1min。采用2个锂电池组并联使用,总容量192Ah,可以提供系统数据采集周期为4h、工作40天的用电需求。

数据采集为自容式存储,周期以30min为一个基本单位,总存储容量为4G。在系统回收之后按不同传感器采集格式分别处理,进行综合分析研究。

3 海上试验

根据以上设计方案,成功完成了Benvir样机的制作。为了检测系统的性能和进一步优化,我们对样机进行了水池实验和两次深海试验。在正式海试之前,完成了样机的陆地统调和水池试验,检测了系

统及其各单元水下长时间工作的性能和稳定性(系统水下工作36天)。由于搭载船只条件的限制,两次海洋试验均采用盲投方式投放。

第一次海试搭载“东方红2号”调查船于南海中央海盆(见图3 HS-1站位)进行,试验站位水深3889m,深海持续观测近15天。海试成功验证了Benvir在深水条件下投放和回收的安全性,并且获取了多参数同步监测数据和视像资料。

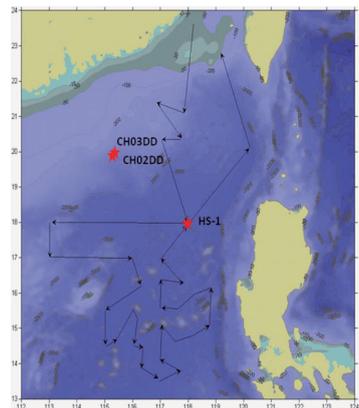


图3 Benvir南海海试站位图

第二次深海试验于 2012 年 9 月搭载“海洋四号”调查船在南海北部陆坡冷泉区进行试验共完成了 2 个站位的投放、回收以及坐底持续观测(图 3, 水深分别为 1150m 和 1251m), 观测时间分别为 25h 和 108h。本次试验首次获取到我国南海冷泉区近海底界面的多环境参数时序观测数据, 经对比检验发现, 所获取的甲烷、二氧化碳、pH、DO、温度、电导率、压力和海流等环境参数均可靠合理。各传感器每隔 30min 同步启动一次, 数据采集时常和采集频率汇总如表 3, 原始数据、数据质量分析及冷泉活动研究见文献[17,18]。

表 3 第二次海试定点观测数据采集情况

站点	观测参数	采集频率 (Hz)	单次数据 采集时间 (s)	观测时间
CH03 DD	ADV、温度、电导率、压力	64	180	12 日 09:05 ~ 13 日 13:32
	ADCP、浊度	1	180	
	CH ₄ 、CO ₂ 、pH、DO	1	10	
CH02 DD	CH ₄ 、CO ₂ 、pH、DO	1	10	13 日 21:01 ~ 18 日 09:02

4 结论

深海海底边界层原位监测装置(Benvir)是一个小型的可移动式观测平台, 该装置可实现近海底边界层多环境参数的原位、定点、连续和同步观测。Benvir 采用模块化、开放式结构设计, 自容式数据存储, 较国际上其它海底原位监测装置具有较小的体积和空气重量。Benvir 采用水下电机带动传感器实现对近海底边界层微尺度剖面的数据测量, 结合底流流速(湍流)数据, 可以用来估算海底边界层的物质扩散通量。

Benvir 特别适合针对特定海域(如海底冷泉活动区)的海底界面环境进行长时序原位监测, 并记录近海底边界层多环境参数的微尺度变化过程。Benvir 可为目前开展的海底渗漏过程、碳循环及全

球变化、海底界面生物地球化学研究以及海底水合物资源的勘探开发提供技术支撑。

作为国内首个针对海底冷泉的深海观测平台, Benvir 在技术上仍有待进一步提高。例如, 随着国际上传感器技术的发展, 应配备更高灵敏度的甲烷和二氧化碳传感器^[19,20], 要进行三维微剖面测量, 而不仅是垂直微剖面测量, 另外要装载海水样品采集装置用于对传感器数据更精确的验证, 等等。

参考文献

- [1] Tengberg A, De Bovee F, Hall P, et al. Benthic chamber and profiling landers in oceanography—a review of design, technical solutions and functioning. *Progress in Oceanography*, 1995, 35(3): 253-294
- [2] Smith Jr K L, Glatts R C, Baldwin R J, et al. An autonomous, bottom- transecting vehicle for making long time-series measurements of sediment community oxygen consumption to abyssal depths. *Limnol. Oceanogr*, 1997, 42: 1601-1612
- [3] Linke P, Suess E, Torres M, et al. In situ measurement of fluid flow from cold seeps at active continental margins. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1994, 41(4): 721-739
- [4] Linke P, Pfannkuche O, Sommer S, et al. Benthic long-term Observatories based on Lander Technology. In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly. *American*, 2003, 1: 1165
- [5] Pfannkuche O, Linke P. GEOMAR landers as long-term deep-sea observatories. *Sea Technology*, 2003, 44(9): 50-55
- [6] Black K S, Fones G R, Peppe O C, et al. An autonomous benthic lander: preliminary observations from the UK BENBO thematic programme. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(8): 859-877
- [7] Mienis F, de Stigter H C, Duineveld G, et al. Hydrodynamic controls on carbonate mound development: long term in situ seabed BOBO-lander observations and CTD-casts at the SW Rockall Trough Margin and in the Gulf of Cadiz. In: IEEE OCEANS, Europe, 2007. 1-6
- [8] Beranzoli L, De Santis A, Etiope G, et al. GEOSTAR: A Geophysical and oceanographic station for abyssal research. *Physics of the earth and planetary interiors*, 1998, 108(2): 175-183
- [9] 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

- ses. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3): 541-557
- [10] 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(1): 95-105
- [11] Suess E. Marine gas hydrate research: changing views over the past 25 years. In: Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates, Edinbu, Scotdan, United Kingdom, 2011
- [12] 尹希杰,周怀阳,杨群慧等. 南海北部甲烷渗漏活动存在的证据:近底层海水甲烷高浓度异常,海洋学报, 2008, 30(6):69-75
- [13] 杨涛,蒋少涌,葛璐等. 南海北部神狐海域浅表层沉积物中孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义. 科学通报, 2009, (020):3231-3240
- [14] Marinaro G, Etiopie G, Gasparoni F, et al. GMM—a gas monitoring module for long-term detection of methane leakage from the seafloor. *Environmental Geology*, 2004, 46(8): 1053-1058
- [15] Roberts, Murray J, Oliver C, et al. Monitoring environmental variability around cold-water coral reefs; the use of a benthic photolander and the potential of seafloor observatories. In: Cold-Water Corals and Ecosystems, Berlin, Germany, 2005. 483-502
- [16] Tengberg A, De Bovee F, Hall P O J, et al. The Banyuls and Göteborg benthic landers: two modular autonomous instruments for biogeochemical sea floor studies. *Prog oceanog*, 1995, 35:253-294
- [17] 徐翠玲. 南海冷泉区甲烷渗漏过程的原位观测研究: [硕士学位论文]. 青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院, 2013
- [18] 何雨旸. 白云凹陷东南部近海底溶解甲烷浓度变化及其对冷泉活动的指示意义:[硕士学位论文]. 青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院, 2013
- [19] 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. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1030-1037
- [20] 赵广涛,徐翠玲,何雨旸等. 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, 12

Benvir: A in situ Deep-sea observation system for Benthic enviromental monitoring

Zhao Guangtao^{*}, Yu Xinsheng^{*}, Li Xin^{**}, Sun Jian^{*}, Zhang Xiaodong^{*}, Zhang Shuwen^{***}, Wang Xiangnan^{****},
Li Zhifeng^{****}, Cao Ruixue^{***}, Xu Cuiling^{*}, He Yuyang^{*}, Zhao Li^{*}, Miu Xiongyi^{*}, Leng Chuanxu^{*}

(* Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(** College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(***) Key Laboratory of Climate, Resource and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea,

Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088)

(**** National Ocean Technology Center, Tianjin 300112)

Abstract

A novel self-contained benthic environmental observation system (called Benvir) for in-situ monitoring of the deep-sea benthic boundary layer was designed and implemented. The system has a modular, open architecture and a self-contained data storage, with the smaller size and air-weight compared to other in-situ benthic monitoring systems. The Benvir can integrate a variety of sensors and devices for in-situ measurement, including chemical sensors of methane, CO₂, dissolved oxygen (DO), pH, conductivity, etc., and physical sensors of temperature, pressure, turbidity, as well as the acoustic Doppler current profile (ADCP) for measuring of flow velocity and the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for measuring of turbulence, with the function of in-situ, continuous, and synchronous measurements in the water depth up to 4000m and the unique capability of profiling across the water-sediment interface. The Benvir is an effective tool for monitoring of the process of benthic methane seepage and study of biogeochemical processes in the benthic boundary layer.

Key words: benthic boundary layer, in-situ observation, cold seeps