

高通量深海海水原位采样及分级过滤系统*

陈永华¹ 于非¹ 李晓龙¹ 宋凯² 刘庆奎¹ 李培海¹
姜静波¹ 倪佐涛¹ 徐永平¹ 涂登志¹

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 青岛科技大学 青岛 266061)

摘要 深海悬浮颗粒物(含浮游微生物)的研究具有重要意义,但深海大洋中多数海域悬浮物的丰度很低,其研究需要较多水样(一次过滤水样超过 200L,甚至达到 1000L 以上),传统方法用采水器采水后甲板过滤费时费力。基于此,本文研制了一种高通量深海海水采样及分级过滤装置,装置包括总成深海泵、过滤装置、数据采集与控制装置,以及支撑架体、供电部件、连接机构和流量计等辅助部件。过滤装置分三级过滤(分别放置 0.22、1 和 5 μm 孔径的滤膜,并可根据需要更换组合),控制装置采用深度触发和时间触发两种工作模式,并可配套安装 CTD、荧光计等海洋环境参数测量设备。针对调查站点,将若干套(如 3 套)高通量深海海水采样及分级过滤系统分一定间隔悬挂于深海绞车缆线上,可以同步进行相应水层的海水原位过滤,从而形成多水层同步高通量原位多级过滤,以获取浮游微生物等悬浮颗粒物样品。该原位取样系统具有多层同步高通量过滤和分级采样的特点,现已被应用于海洋科考航次中,为深海悬浮颗粒物(含浮游微生物等)的研究提供了一种简约高效的样品获取方法。

关键词 高通量; 深海原位采样; 悬浮颗粒物; 多层多级过滤

中图分类号 P715 doi: 10.11693/hyhz20170500109

深海悬浮颗粒物(包括浮游微生物和悬浮泥沙等)的精确测量对研究海洋物质运输和水体要素特征具有重要意义。传统测量方法被认为是最准确的方法,通过现场取水(三点或六点法),对采集水样抽滤、称重、计算悬浮颗粒物质量浓度,但仅能得到某几层深度、较大时间间隔的悬浮颗粒物数据,耗时耗力。现代测量方法利用光学、声学、密度、介电常数等传感器间接观测悬浮颗粒物浓度,其特点是效率高、连续采集、可获得具有较高时空分辨率的悬浮颗粒物信息,但其测量精度较低,而且这些观测手段都需要在使用前进行设备校准,并受到适用深度限制(Rai *et al.*, 2015)。因此,如何实现省时省力、全水深、多层水体悬浮颗粒物浓度的测量,是目前海洋物质研究迫切需要解决的关键技术。

国内外针对水体原位采样技术的研究起始已久。

1987 年加拿大滑铁卢大学 Johnson 等(1987)研制了一种小口径的采样器,用于收集地下水中的可挥发性有机物。2003 年 Woods Hole 海洋研究所和 Mclane 公司联合研发了一种大体积水样抽滤采样系统(large volume water transfer system, WTS-LV)(Morrison *et al.*, 2000; Pfitsch *et al.*, 2003),采用微孔过滤器原位过滤水体中的悬浮颗粒物。国内,浙江大学和中南大学等单位先后开展了深海保真取样和在线检测设备的研发(陈毅章, 2004; 胡国庆, 2011; 刘玉静, 2011),但多受限于深海泵和采样量的技术瓶颈。

中国科学院海洋研究所于 2004 年起开展深海水体原位采样技术研究,针对国内外深海原位采样技术中存在的难点,多次试验并成功进行深海采样工作。自 2013 年在中国科学院战略性先导科技专项研究经费的支持下,开展深海原位抽滤取样技术的研

* 中国科学院战略性先导科技专项(A类), XDA11040306号; 国家重点研发计划, 2016YFC1402602号; 中科院科研装备研制项目, YZ201522号。陈永华, 博士, 副研究员, E-mail: chen Yonghua@qdio.ac.cn

通讯作者: 李晓龙, 博士, 高级工程师, E-mail: lixiaolong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-03, 收修改稿日期: 2017-09-15

究, 成功研制出适用于深海环境下分级过滤获取悬浮颗粒物的采样系统, 并多次应用于科考航次。本文第 1 部分详细介绍了高通量深海海水采样及分级过滤系统的结构及设计准则, 并将该系统的深度仪与国际上广泛应用的高精度传感器进行比测, 深海采样实验在文中第 3 部分进行讨论。该系统高通量和快速、便捷的采样特点, 为深海原位抽滤技术提供了技术基础。

1 系统结构

深海海水原位采样及分级过滤系统, 主要由抽滤控制及供电系统、深海泵、过滤舱、单向阀及流量计等组成(图 1), 可应用于海洋、湖泊、河流、水库等多种水体中进行浮游生物、痕量金属、沉积颗粒物等样品的采集工作。

表 1 深海海水原位采样及分级过滤系统技术指标

Tab.1 Technical parameters of The Large Volume Water Transfer and Graded Filtration System for in-Situ Sampling in Deep-sea

参数	技术指标	参数	技术指标
工作水深	4000m	压力测量精度	0.1% (FSO)
工作模式	深度阈值触发/时间触发	采样流量	约 5L/min(一类海水)
滤膜层级	3 层	通量误差	<5%
滤膜直径	200mm	尺寸	(90×57×26)cm ³
连续取样时间	>26 小时	系统总重量	35kg(空气中)

注: FSO: Full Scale Output, 满量程

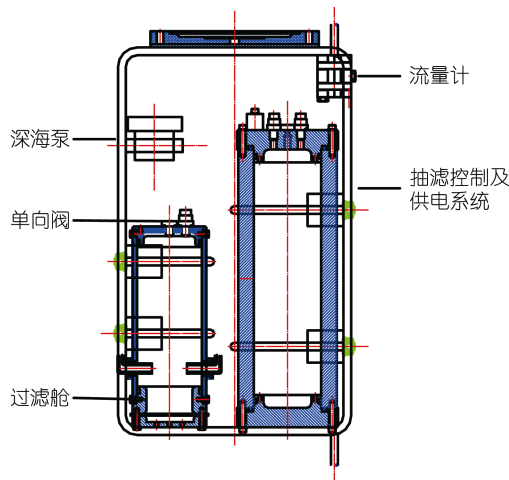


图 1 深海海水原位采样及分级过滤系统结构示意图

Fig.1 The sketch of the large volume water transfer and graded filtration system

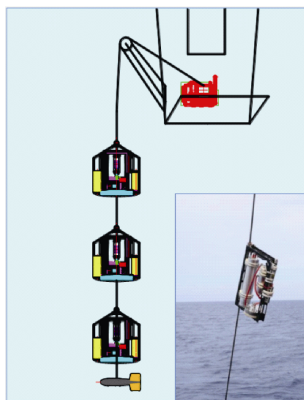


图 2 立体采样示意图

Fig.2 The multilayer sampling of the system

考虑实际海洋应用环境, 抽滤控制电路、电池以及压力传感器的采样电路均被密封在耐压大于 40Mpa 的壳体内, 压力传感器的探头与海水接触, 形成抽滤控制及供电系统, 可通过 RS-232 串口通信方式和计算机连接设置, 通信波特率为 9600Bd/s。控制电路通过时钟或深度判断, 触发深海泵工作, 泵的出水端与过滤舱体进水端连接, 形成水压均匀的流量已通过滤膜、且保证滤膜无破损。单向阀用于控制抽滤水体流向, 防止采样回流现象。采样水体的通量由流量计记录, 用以计算水体悬浮颗粒物的浓度。该系统的主要技术指标如表 1 所示, 其中过滤舱内设置多层不同孔径的滤膜, 抽滤水体依次通过滤膜的孔径由大至小变化, 从而获得不同粒径的悬浮物。另外, 滤膜的类型可根据分析物质成分的要求而更换, 滤膜数量可以通过增加或减少滤膜支盘进行调整, 通常采用 3 层滤膜结构(深海环境采用 0.22、1 和 5 μ m 孔径滤膜), 最多可安装 5 层滤膜, 相邻滤膜支盘间采用 O 型圈密封, 其间距为 10mm。对于浑浊水体(如近岸海水), 应针对取样量进行抽滤时间限制, 以防止滤膜孔径堵塞。

该系统可以多套、同缆布放使用, 实现多个水层的同步、立体采样, 如图 2 所示。基于该系统的小型化和便捷性特点, 实施同步、立体采样有利于水体剖面悬浮物变化的分析。这种方式弥补了传统采样方式无法实现多水层、同步采样的缺陷, 可以为精确地获取水体物质变化特征提供保障。

抽滤控制及供电系统中,可通过多路继电器开关控制不同水质情况下海水流通速率和工作时长,为了准确控制系统时钟的精确校时和计时,系统设有外部时钟模块,从而有效控制工作时长。通过多通道模数转换(analog to digital converter, ADC)采样模块实现多种海洋环境参数、以及抽滤系统姿态的测量,从而准确还原采样过程中的海洋环境变化。系统采用深度触发和时间触发两种工作模式。深度阈值触发模式下,该系统能够在准确的深度范围内进行原位采样,避免海流变化所产生的深度浮动问题。时间触发和深度触发模式的工作流程如图 3 所示。该系统的默认工作模式属于时间阈值模式,无需启动时设定工作参数,按照核心控制板上芯片的编写程序进行工作。时间触发和深度触发模式下,分别设定启动触发时间和触发深度值,作为启动深海泵的判断依据。时间触发模式下,启动抽滤泵后,工作时长递减至 0 时停止抽滤。深度触发模式下,如果该系统受海流影响,出现所在深度浮动超出设定深度范围,那么抽滤动

作暂停,等待系统采样深度值匹配成功后继续工作,并且抽滤动作进行的同时累加工作时间,以达到所设定工作时长后停止采样。

2 系统性能

深海海水原位采样及分级过滤系统中设有深度仪,采用高精度、液压型压力传感器,用于工作深度记录和深度阈值触发。在深度测量比对实验中,利用校准后的 SeaBird 37-CTD 和本文系统进行压力测量,最终获取相应压力转换后的深度数据,其最高采样频率分别为 1/6 和 10Hz。压力实验采用深海型密封舱,将 SeaBird 37-CTD 采样率设为 1/6Hz,原位采样系统的采样率调整为 1Hz,将两种设备的时钟调整一致。深度对比时选取采样时间一致的数据,实验过程中记录的深度值变化如图 4 所示,多次重复加压后泄压过程,获取水体压力变化以模拟不同深度情况。图 5 中对深度数据进一步比较,直线拟合为 $y=x-3.8$,深度残差在 $\pm 10\text{m}$ 内。300 至 3000m 深度范围内均方根误差为 5.72%, 0 至 300m 深度范围内均方根误差 19.70%。由于该系统压力传感器的满量程为 40Mpa,精度 $\pm 0.25\%$ FSO,因此其测量误差为 $\pm 10\text{m}$,这也带来浅水深时均方根误差较大的问题。从深度对比结果可以看到,深海原位采样系统与校准后的 SeaBird 37-CTD 在 200 至 3000m 水深范围内数据一致,浅水情况下水深比对效果较差,并在 211m 处产生奇异点,查验压力舱内结构发现,这是由加压过程中水体颗粒物对压力探头的芯体产生撞击所致。因此,对该系

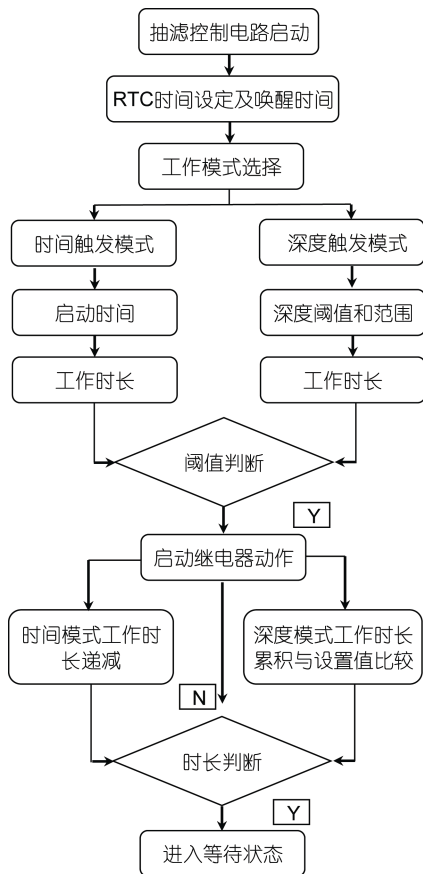


图 3 抽滤采样控制流程图

Fig.3 Flow chart of the pumping and sampling control
注: N 表示程序判断为假, Y 表示程序判断为真。

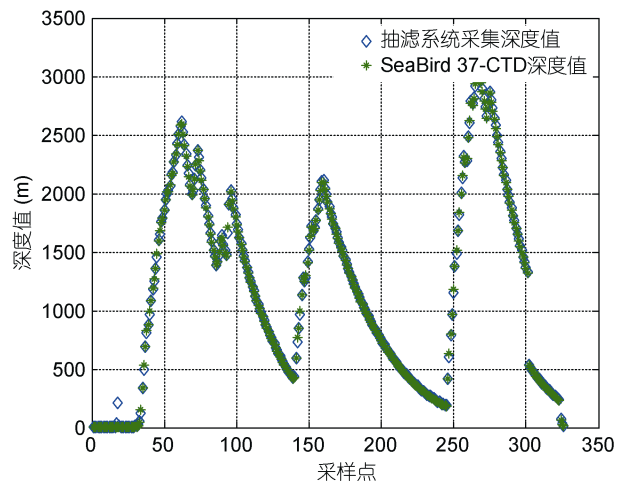


图 4 实验过程中原位采样系统与 SeaBird 37-CTD 测量深度的变化

Fig.4 Depths measured by the in situ sampling system and SeaBird 37-CTD during the experiment

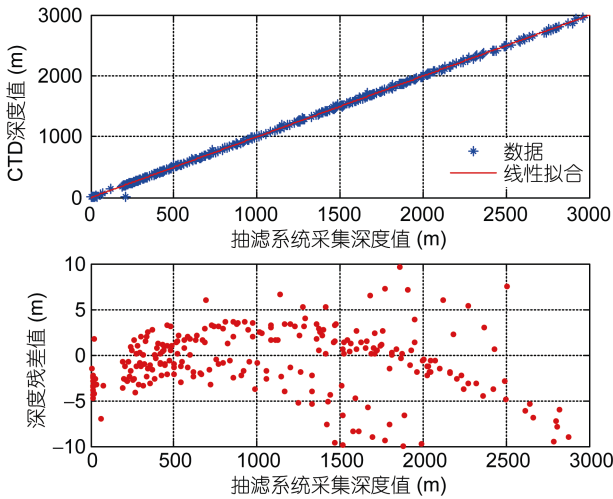


图5 原位采样系统与 SeaBird 37-CTD 测量深度对比
Fig.5 Depth comparison of the in-situ sampling system and SeaBird 37-CTD

统的深度探头处进行了滤网改进，以避免快速布放产生水体扰动、从而引起水中颗粒物的干扰。

目前，国际上相同功能的设备为 WTS-LV 采样器，其主要功能部件是柱塞泵，采用不锈钢及钛合金制成主体，最大可承受 5500m 水深压力。相对于 WTS-LV，深海海水原位采样及分级过滤系统在小型化的基础上，实现了更多层级滤膜的采样和较大范围的流量控制，两套原位抽滤系统的参数对比如表 2 所示。针对此类海洋装备的实际应用需求，该系统实现了所有部件的自主研制和深海测试及应用，尤其是深海泵的研发与应用。

表 2 原位抽滤系统参数对比

Tab.2 Parameters Comparison of foreign and domestic in-situ systems

参数	WTS-LV	本文系统
最大水深	5500m	4000 m
滤膜层级	3 层	3 层
滤膜直径	142mm	200mm
流量控制	1—4L/min	1—5L/min
系统尺寸	(92×60×33)cm ³	(90×57×26)cm ³
总重量	51kg	35kg

3 深海实验

在测试系统可靠性后，深海海水原位采样及分级过滤系统被应用于多个科考航次。其中，在“科学”号考察船的西太平洋考察应用航次中，多次使用该系统进行海水原位采样，并对抽滤工作模式、系统唤醒时长、采样时长等多种参数进行更改设置，以实现

不同海域情况中的采样可控性，并获得多个样本进行海水菌落分离。图 6 为已成型的第一代深海海水原位采样及分级过滤系统，以及其应用实验和样本照片。

本文所列举的样本采样站点位于热带深海区域 (141.0°E, 8.1°N, 图 7)，采样深度为 3505m。采集海水滤纸片样品经富集稀释涂布平板后，挑取生长起来的菌落进行划线分离。目前筛选到 25 株细菌，测序构建进化树如图 8 所示，其中 9 株细菌为 *Halomonas* sp., 6 株为 *Pseudomonas* sp., 1 株为 *Idiomarina* sp., 2 株细菌为 *Alteromonas* sp., 1 株为 *Stenotrophomonas* sp., 1 株为 *Ochrobactrum* sp., 1 株为 *Citricoccus* sp., 1 株为 *Exiguobacterium* sp., 3 株为 *Bacillus* sp.。此外我们从这些菌中筛选到 7 株细菌可降解去污剂 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate, 十二烷基

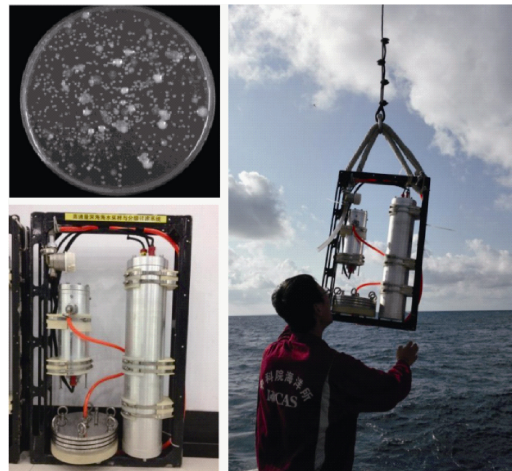


图 6 系统实验及采样照片
Fig.6 Photos of the system and sampling experiment

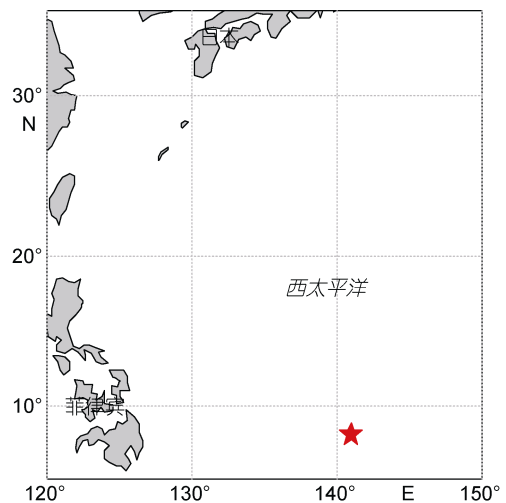


图 7 采样站点
Fig.7 A sampling site of the system

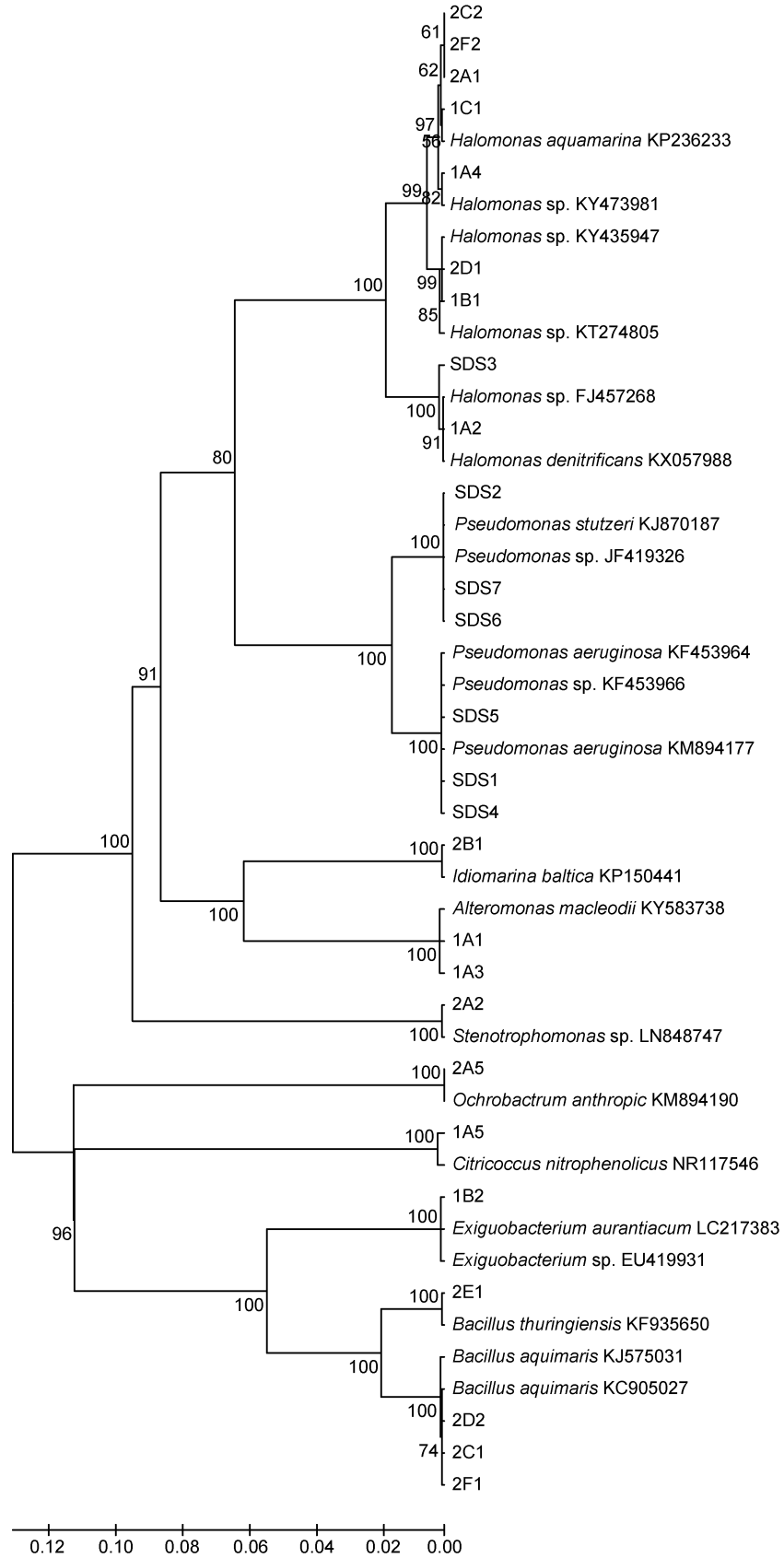


图 8 样本菌落进化树

Fig.8 The evolutionary tree of the bacterial colony samples

硫酸钠), 其中 6 株均为 *Pseudomonas* sp., 1 株为 *Halomonas* sp.。经分离的所有菌株均为海洋常见菌属, 其中菌株较多的 *Halomonas* sp. 为嗜盐菌, 多在盐度较高的海域生长(李春芳, 2015), 而本文采样点位于热带西太平洋区域, 高温高盐, 非常适宜 *Halomonas* sp. 生长。

4 结论

高通量深海海水原位采样及分级过滤系统现已研制完成, 并进行了科考应用, 其深度测量数据与应用广泛的 SeaBird 37-CTD 所测深度一致, 确保了系统应用时不同水深采样的准确性。目前深海应用实验表明, 该采样及分级过滤系统能够成功应用于海洋科考航次, 获取样本符合采样海域的生态及物理特性。由于实验室压力测试条件有限, 当前系统耐压仅为 40Mpa, 而在下一步工作中, 将设计耐压 6000m 的各部分舱体并进行实验。

参 考 文 献

刘玉静, 2011. 深海微生物量原位在线自动检测系统设计. 杭

- 州: 浙江大学硕士学位论文, 50—51
- 李春芳, 2015. 中度嗜盐嗜碱菌 *Halomonas* sp. 19—A 中相关 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白基因的克隆与功能研究. 济南: 山东大学硕士学位论文, 12—14
- 陈毅章, 2004. 深海悬浮物浓缩保真取样器保压性能及薄膜过流能力研究. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 12—15
- 胡国庆, 2011. 深海海水柱塞住复泵的研制. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 7—8
- Johnson R L, Pankow J F, Cherry J A, 1987. Design of a ground-water sampler for collecting volatile organics and dissolved gases in small-diameter wells. *Groundwater*, 25(4): 448—454
- Morrison A T, Billings J D, Doherty K W, 2000. The McLane WTS-LV: a large volume, high accuracy, oceanographic sampling pump. In: OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence, RI, USA, USA: IEEE, 2: 847—852
- Pfitsch D W, Morrison A T, 2003. Performance of large volume water transfer systems during in-situ water sampling. In: Proceedings of Oceans 2003. San Diego, CA, USA: IEEE, 4: 2242—2246
- Rai A K, Kumar A, 2015. Continuous measurement of suspended sediment concentration: Technological advancement and future outlook. *Measurement*, 76: 209—227

THE LARGE VOLUME WATER TRANSFER AND GRADED FILTRATION SYSTEM FOR IN-SITU SAMPLING IN DEEP-SEA

CHEN Yong-Hua¹, YU Fei¹, LI Xiao-Long¹, SONG Kai², LIU Qing-Kui¹, LI Pei-Hai¹,
JIANG Jing-Bo¹, NI Zuo-Tao¹, XU Yong-Ping¹, TU Deng-Zhi¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract Understanding rare suspended particulate matter (including planktonic microorganisms) in the deep sea is important but difficult to sample, for which we designed a large-sized in-situ water sampler (200—1000L), i.e., a large volume water transfer and graded filtration system. The system comprises of a deep-sea pump, a filtering device, data acquisition and control devices, a supporting frame, a power supply component, a connecting mechanism, and a flow meter, etc. The filtering device integrates membranes for three-graded filtration at 0.22, 1, and 5 μm , and an additional membrane aperture upon the need. The control device adopts two working modes: depth trigger and time trigger. The system can be added with a CTD and a fluorescence meter, etc. In addition, for a stationed site survey, several sets (such as 3 sets) of the system can be fixed at an interval on the suspension cable to work at different depths simultaneously. The system can be applied for high-level multi-layer filtration to obtain suspended particles. The system has been applied in several marine expeditions. The development of this system provides an ideal tool for deep-sea in-situ sampling technology in China.

Key words large volume water transfer; in-situ sampling in deep-sea; suspended particulate matter; multilayer and graded filtration