

自主式深海海底溶质通量原位观测站研究进展

于新生^{1,2}, 阎子衿¹, 朱明亮³, 李 栋⁴, 姜子可¹, 崔尚公¹

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266100; 4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 针对深入了解深海海底界面的物理、化学和生物动态变化过程及机制的观测需求, 综述了自主式海底观测站(着陆器, lander)在深海海底溶质通量监测的研究进展。探讨了海底观测站的设计与实施技术, 分析总结了深海自主式原位观测站在沉积物-水界面化学组分通量的观测机理, 讨论了自主式海底观测站的国内外发展现状。自主式海底观测站具有可灵活机动选择观测地点、操作简单、便于多参数综合测量的特点, 为获取深海海底长时空尺度综合参数资料提供了有效的技术支持。根据目前深海生物地球化学循环研究特点, 提出了自主式海底观测站面临的问题与发展建议。

关键词: 深海海底; 原位观测; 溶质通量; 自主式海底观测站; 生物地球化学

中图分类号: P715.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2017)06-0150-12

DOI: 10.11759/hyxx20161212001

海洋占地球总面积的 71%, 其中 50% 是水深超过 3 000 m 的深海海域^[1]。深海海底不但蕴藏着丰富的油气资源、生物资源以及天然气水合物等新能源, 同时也是研究板块活动及天然地震震源的关键区域^[2]。深海海底界面存在复杂的物质-能量交换与生态过程, 海底沉积物是存储和埋藏有机质重要场地, 对调节海洋氮循环和碳循环都起着重要影响^[3]。近几十年来, 随着深海资源勘探开发与研究的发展, 迫切需要长时序、连续的深海海底观测资料, 如海底边界层(bottom boundary layer, BBL)动力过程对海底管线引起的危害作用^[4]、有机质降解和扩散对调节海洋氮、碳、磷循环及海底生态系统的影响^[5]、海底渗漏温室气体对全球气候变化的贡献等^[6]。因此, 获取长期、实时、多学科的海底综合观测资料是掌握海底工程引起的环境变化、开展生物圈、地球圈、水圈的多圈层相互作用及多尺度过程耦合研究的关键。基于科考船进行深海海底考察与采样的传统方法存在着观测资料在空间及时间尺度上的不连续性, 制约了对深海海底动态变化过程的深入认识^[7], 因此开发海底原位观测的新技术新方法是深海研究的关键目标之一。

随着近十年传感器与计算机材料技术的快速发展, 各种深海观测新技术与新方法有了极大的发展, 为拓宽海洋观测时空尺度, 开创深海研究的新时代提供了支撑^[8]。在空间尺度上, 水下遥控航行

器(remote operated vehicle, ROV)、自航式观测技术((autonomous underwater vehicle, AUV)、水下滑翔机(gliders)等可以将观测范围拓展至数百至数千公里, 利用其自身的巡航模式实现水下的大尺度连续观测^[9-11]。但是 AUV 受体积、推进器功耗及电池比能量等因素的制约, 其在水下连续工作时间通常不超过 2~3 d; ROV 利用光纤电缆将水下观测系统与调查船连接, 通过电缆实现电源和数据资料的双向传输, 使水下设备所搭载的传感器及执行机构可以在水下无限期地连续观测和作业, 但是船只受海况及其他因素影响, 难以对某一特定地点进行 10 d 以上的连续观测; Gliders 具备水下长期续航能力, 可以连续工作几个月甚至 1 年, 但是 Gliders 属于大空间尺度检测的动态观测平台, 无法实现定点长期观测, 同时由于 Gliders 属于非动力推进装置, 对所搭载的传感器负载具有严格的重量和体积要求。海底潜标是一种结构简单、性能可靠的长期定点观测系统, 可以获取水柱体剖面秒至年的高频率连续观测资料, 但是

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176089, 41176078); 国家“863”计划(2012AA09A20103, 2009AA09Z201)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271547, No.41401644; The National High Technology Research and Development Program of China, No. 2012AA09A20103, No. 2009AA09Z201]

作者简介: 于新生(1960-), 男, 山东青岛人, 教授, 博士, 主要从事海底观测与信息技术, 电话: 0532-66782913, E-mail: xsyu@ouc.edu.cn

潜标需要较大的锚系重块提供稳定的负浮力,所搭载传感器距海底约几米至几十米的距离,因此潜标系统适于水柱体剖面观测,难以满足底栖边界层(BBL)和沉积物界面的动态变化实时变化监测的应用需求^[12]。

近年来,通过在海底布设通讯电缆,电缆一端位于陆地岸站,围绕着海底电缆建立一系列海底观测传感器节点,通过海底接驳盒将节点传感器的测量数据实时传输到陆地岸站,实现了深海海底边界层、海底界面及水体的长期、连续观测数据的实时监测采集。譬如,美国于1998年启动了“NEPTUNE”计划,在太平洋的胡安·德富卡(Juan de Fuca)板块区铺设了长达3 km长的宽带海底主光缆,围绕着海底主光缆设置了50多个定点观测节点,同时搭建了为深海AUV充电及数据回放的停泊节点^[13]。目前一些国家也相继启动了深海海底多节点观测网的建设计划。譬如日本在建的海底实时观测网 ARENA (advanced real-time earth monitoring network in the area)和用于地震和海啸监测的 DONET 观测网(dense ocean-floor network system for earthquakes and tsunamis); 欧共体制定了欧洲海底观测网建设计划 ESONET (European seafloor observatory network); 加拿大布设了 VENUS (the victoria experimental network under the sea)实验网并建设了 NRPTUNE 在加拿大的局域网部分^[14-16]。中国在20世纪90年代启动了深海观测网开发计划,在南海取得了一些标志性的成果^[17-20],使得中国在国际海底观测网技术领域占有一席之地。海底观测网虽然拥有其他技术无可比拟的优点,但是建设海底观测网络系统需要在深海海底铺设电缆,其铺设工程造价昂贵,并且一旦网络系统建设完毕,其结构是永久性的,整体观测装置将无法移动到别的区域;此外各节点的维护需要依赖于ROV的技术支撑,运行和维护成本较高。

自主式海底观测站(着陆器,lander)是一种可在水面抛弃式投放,自由降落到海底,利用所搭载传感器及仪器装置在水下进行自动连续观测与原位实验的集成化装置。通过科考船发射声学释放指令可将重块与自主式海底观测站系统脱离,系统依靠自身携带的浮力装置返回水面,实现观测站地回收。自主式海底观测站可针对海底或近海底边界层的物理、化学、地质及生态系统的特性,搭载不同功能的传感器及仪器设备,与数据采集/控制系统形成了一个独立的水下综合测量或实验装置,为快速实现多参数的长期、连续、自容式原位观测及海底试验提

供了一种便捷的观测手段。海底自主式观测站体积紧凑,对科考船的配置装备无特殊要求,可实现快速投放与回收,因此具有便于快速实施观测、灵活机动性强、维护成本低、可以实现海底沉积物表层及上覆水的微剖面梯度变化实时监测等特点,为海底长期观测网络提供了一种高效互补技术支撑^[21]。

海底沉积物界面既是化学物质和有机质交换界面、也是有机质及污染物富集的场所,同时也是植物、动物、微生物和细菌重要的活动和栖息地^[22]。早期成岩、颗粒有机碳的降解、以及金属颗粒的溶解等作用在沉积物及上覆水形成化学物质的梯度扩散变化过程,这些沉积物与水体的耦合和交换作用,对了解海底生物地球化学及底栖生态系统对全球物质循环的贡献具有重要意义^[23]。虽然自主式海底观测站技术在美国、欧洲等国家的海洋生态与环境研究、海洋地球化学通量与生物资源观测、海底沉积物搬运过程等方面得到了广泛的应用,由于中国开展深海观测技术方法研究较晚,国内在自主式海底观测站的应用研究报道有限。本文对国内外当前自主式海底观测站在深海生物地球化学观测的发展现状及特点进行展望与分析,综述海底界面溶质通量监测的箱式实验室观测站、沉积物-水剖面海底原位观测站、基于涡动相关原理的边界层通量监测观测站、以及移动式海底观测站技术特点,以期对相关研究工作提供参考,推进中国在深海原位观测技术与方法的研究和发展。

1 深海自主式原位观测站系统结构

海底自主式原位观测站通常从水面直接投放,依靠所携带配重所产生的负浮力自由降落至海底表面;回收时通过水面船只发送声学指令,启动观测平台中的声学释放器机构,使得配重与观测系统分离,原位观测平台依靠浮力系统提供的正浮力上升至水面,借助于观测平台上的无线电信标或GPS定位信标进行系统定位回收。底栖自主升降观测站由观测框架平台、传感器/原位实验装置、数据采集系统、水下电源、浮力系统、释放系统组成。为减少观测平台对海底环境的干扰并为观测平台在水下提供稳定的保障,平台框架结构多采用3支撑架或4支撑架开放平台结构^[21],每个支撑腿都采用脚垫结构,增加支架与海底的接触面积,阻止系统在海底下陷。从安装观测仪器、实验设备空间和甲板操作性角度考虑,框架的外形尺寸通常现在1~5 m,高度控制在

3 m 之内。如图 1 所示, 2009 年在国家 863 计划资助下, 中国海洋大学设计并制造了基于 4 支撑架开放平台结构的深海边界层自主式原位观测站, 整体外形尺寸为 1.5 m×1.5 m, 高度为 2.0 m; 具有自供电、数据自容, 可进行多参数同步监测^[24]。

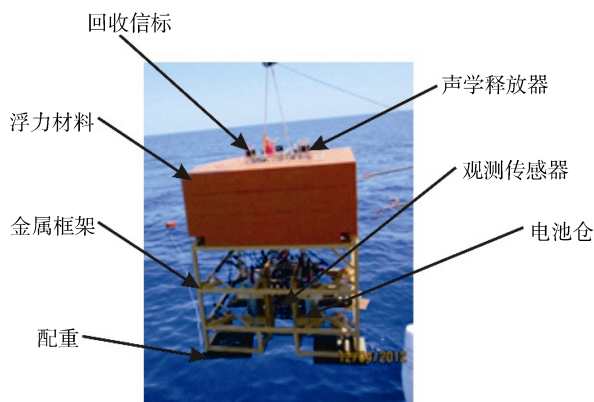


图 1 中国海洋大学研制的 4 支撑架自主升降式海底边界层地球化学底要素观测站

Fig. 1 Autonomous lander with four-legged frame for measuring benthic biogeochemical parameters, developed by the Ocean University of China

海底自主式原位观测站框架主要为各种仪器设备、浮力系统、释放系统安装提供支撑, 在满足机械强度的前提下应采用低密度材料, 因为随着框架重量增加, 需要提供相应的正浮力, 添加浮力装置会导致系统整体体积增大, 对设备的运输、甲板上作业及安装等带来一系列问题。因此结构框架材料的选取需要综合考虑重量、机械强度、加工性能、耐海水腐蚀能力及成本等因素。钛合金具有较高的抗海水腐蚀能力和强度, 其重量比不锈钢要低 44%, 适于长期观测应用结构设计; 不锈钢具有较好耐海水腐蚀和较高的强度、成本相比较低、便于加工, 但是密度较大。高强度铝合金具有较高的机械强度和较轻的比重系数, 可是其耐海水腐蚀能力较弱, 并且需要增加防腐措施。虽然复合材料拥有质量轻、机械强度高的特点(如玻璃纤维及碳纤维等), 因为原材料加工工艺复杂, 加工成本高, 在深海应用的可靠性有待于进一步验证。表 1 给出上述材料的密度与弹性模量。

浮力系统是保证自主升降式海底原位观测站能够返回水面的重要装置之一, 通常与观测平台集成一体, 提高自主升降式海底原位观在水下具的稳定性。深海浮力系统可采用深海玻璃浮球、或基于玻璃微珠或陶瓷球制作的复合材料。商品化玻璃浮

表 1 海底观测站框架材料的密度和弹性模量系数

Tab. 1 List of material densities and moduli of elasticity used in benthic landers

材料	比重(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	成本
铝合金	2 600~2 850	70	中等
钛合金	4 500	114~118	高
不锈钢	7 950	210	中等
复合材料	1 500	120~140	低

球标准耐压能力为 60 MPa, 可以直接用于 6 000 m 水深的系统设计。采用中空玻璃微珠制作大于 60 MPa 压力的浮力材料在浮力系数、制作工艺以及成本方面尚都面临一些技术难题, 有待于进一步的完善。利用陶瓷球制作的浮力材料具有较高的抗压能力, 譬如采用氧化铝陶瓷制作的浮力球可承受 83 MPa 压力, 提供的浮力系数高于 54%^[25], 随着新工艺新材料研究的不断深入, 基于陶瓷微球的浮力材料将在深海浮力材料应用中占有一席之地。

自主升降式海底原位观测站多采用自容式工作模式, 水下工作时间取决于电池的放电能力及数据存储空间。因此在传感器的选型上首选低功耗的仪器设备, 电池选用比能量高的电池, 譬如锂锰电池、锂聚合物电池及锂亚硫酰氯电池等。从可操作性方面考虑, 应考虑选用比能高的可充电电池^[26]。近年来在环保理念的驱动下, 混合动力与电动汽车的高效电池研究有了长足的进展, 这些先进的供电技术也相继被引进了水下自动观测装置, 譬如与传统充电电池相比, 燃料电池或混合燃料电池可提高 AUV 水下续航能力 3~6 倍以上^[27-28]。随着水下系统优化及安全性的进一步改进, 燃料电池或混合燃料电池有望替代现有供电技术方案, 为拓展水下自主观测系统的应用时间提供有效的技术支撑。

自主升降海底原位观测站投放方式是采用水面自由投放, 即在水面实施投放系统, 依靠系统的配重所产生重力使其自由下降到海底, 因此坐底式海底定点观测系统的下沉和上升速度控制是安全回收系统的重要保障。如果下降的速度过快, 系统到达海底表面时所产生的惯性将对观测站的仪器设备产生不良影响^[21], 如果速度过慢, 系统到达海底表面所需的时间太长, 同时受水平海流的影响, 导致着陆地点与预定观测位置的偏差增大。在回收过程中, 增加上浮速度需要配置较大的正浮力装置, 而大浮力装置会带来整体体积增大的问题, 伴随着体积增大而带来的投放和回收操作上的一系列问题。实际应

用实验结果表明,自主升降式原位观测系统的下降和上升速度控制在 30~60 m/min 为最佳选择^[21, 29]。配重释放机构多采用双声学释放器并联释放机构提供冗余释放保障,商品化声学释放器产品提供了较多的选择余地,如机电驱动脱钩、熔断释放或爆炸断裂等方式。

水面直接投放方法虽然有着操作简单、投放速度快等优点,但是也存在着受海流等动力要素影响,系统在海底着陆地点与预期存在较大偏差的问题^[30]。借助于可视化“投放器”,将自主升降底栖原位观测站通过科考船上的深海同轴电缆或铠装光缆投放到特定的观测区域^[31],可以实现“选择着陆地点”以及系统“软着陆”功能。通过投放器上的摄像装置人工选取合适“着陆”地点,譬如海底天然气水合物的泄露点、泥隆堆、以及热液喷口附近区等。投放器主要由远程通信装置、水下摄像系统、水下照明光源以及机电释放机构组成,投放器与甲板控制端通过深海同轴电缆或铠装光缆进行实时图像信息传输,利用投放器上的摄像机在距海地 1~50 m 范围内可获取海底环境信息,在甲板上根据水下观测图像选定合适着陆地点后,启动投放器“投放”指令,投放器与自主升降底栖原位观测站分离,自主底栖原位观测站依靠配重的负浮力降落到海底,从而实现米级精度着陆^[32]。

2 自主式海底原位箱式实验室观测站

基于底栖原位箱式海底界面溶质通量的定量检测方法是研究沉积物边界物质通量变化应用时间最长的观测方式,通过测量覆盖在单位沉积物面积的底栖原位箱式溶质浓度变化,如溶解氧、氮、磷、碳或甲烷(CH₄),即可计算得出溶解物质的含量,获取沉积物-水界面物质交换的单位体积内的变化量。即利用已知面积和高度的箱式实验室置于海底,使得来自于沉积物中的溶解物质封闭在箱式实验室的水体中,在封闭水体中的沉积物-海水界面上,沉积物中的溶解物质随着周边环境变化与海水进行交换,来自海底沉积物的溶解化学物质浓度增加,而被沉积物吸收的化学物质降低,从而可以定量评估界面溶质交换通量变化过程。

自主升降式原位观测站是在深海海底进行原位培养实验的有效技术手段,当观测站在海底着陆后,通过观测平台的机电控制机构,可以精确地将原位箱式培养实验室插入沉积物中,在海底形成一个封

闭的箱式培养室,利用培养室中的传感器对封闭实验室内化学组分浓度进行时序变化测量,通过公式(1)可以定量地评估溶质在海底界面通量变化:

$$F = \frac{(C_f - C_i)V}{At} \quad (1)$$

其中, F 是界面溶质通量(mmol/(m²·h)或 μmol/(m²·h)), C_i 和 C_f 分别是溶质测量的起始浓度和终止浓度(mmol 或 μmol), V 是培养实验室内水体的体积(L), A 是培养实验室所覆盖的海底面积(m²), t 是测量的时间(h)。在回收箱式原位培养实验室时,可利用所携带的水样和沉积物采样器采集水样和沉积物样品,便于在实验室内利用同位素方法对所采集的样品进行深入分析和对比研究。表 2 是国外研制的具有代表性的海底原位箱式实验室观测站技术指标。

20 世纪 90 年代美国斯克里普斯海洋研究所 Smith 团队研制的 FVR(Free Vehicle Respirometer)实现了深海海底表层沉积物的溶解氧消耗量实时观测^[30, 33]。该自主式海底观测站搭载了相机、极谱氧电极和 4 个底栖箱式实验室构成的一体化的底栖实验平台,利用电机可以将底栖实验仓缓慢地推入沉积物中(插入深度约为 15 cm),在原位箱式培养实验室内利用旋转搅拌器模拟实验箱外的动力环境。系统回收时,4 个底栖实验箱在执行机构控制下,将沉积物样品封闭在仓内,形成 4 个底泥采样器,所采集的沉积物样品用于实验室分析。随后 Smith 教授团队对 FVR 进行了改进,开发了 FVGR(Free Vehicle Grab Respirometers)和 FVGR-II 原位观测站,增加了时间序列水样采集器,通过对所采集水样及沉积样品的实验室分析,可进行底栖颗粒有机碳、有机氮、表层沉积物耗氧量的定量评估,为沉积物-海水界面物质交换的定量评估提供了新的技术方法^[34-35]。美国德克萨斯农工大学研制的 GoMEX 原位观测站(Gulf of Mexico Lander)与 FVGR 功能类似,在观测平台上搭载两个密闭的底栖箱式实验室,一个水下相机,每个底栖箱式实验室配有溶解氧探头和温度探头,水泵以及搅拌器,水下工作时间为 8~36 h,可实现表层沉积物中微生物代谢过程氧的通量测量及沉积物表面生物膜代谢过程的原位定植实验^[36-37]。

近年来,荷兰海洋研究所开发的 BOLAS (Benthic Oxygen Lander System)观测站采用两个相机,由熔断机构触发 2 个 1.7 L 采水器,搭载了两个沉积物采样器和两个底栖箱式实验室。其中一个底栖箱式实验室装有磁搅拌器,两套时间序列采水器一个用于

表 2 国外研制的部分深海原位箱式实验室观测站

Tab. 2 Summary of in-situ landers with benthic chambers for deep sea applications

海底原位 厢式观测站	研制 国家	框架 支撑结构	外形尺寸 宽(m)×高(m)	原位传感器及仪器设备	最大工作 水深(m)	下沉/上升 速度(m/min)	参考 文献
FVR	美国	3 支撑架	2.2×2.3	极谱氧电极, 采水器, 箱式底栖实验室, 相机	7000	52	[30]
FVGR,	美国	3 支撑架	2.7×4	极谱氧电极, 底栖箱式实验室, 注射式小型采水器, 相机	6000	47~55	[33-34]
FVGR II	美国	4 支撑架	4.2×4	极谱氧电极, 底栖箱式实验室, 注射式小型采水器, 相机	6000	60	[35]
GoMEX	美国	4 支撑架	2×3	底栖箱式实验室, 温度探头, 溶解氧探头, 注射式小型采水器	6000	60	[36]
BOLAS	荷兰	3 支撑架	3×4.5	溶解氧探头, 电导率探头, 注射式小型采水器, 箱式底栖实验室	6000	60	[38]
ALBEX	荷兰	3 支撑架	3×3	ADCP, CTD, 相机, 摄像机, 透射浊度仪, 荧光仪, 沉积物捕获器, 底栖箱式实验室	6000	60	[39-40]
LUISE	丹麦与 德国	3 支撑架	2.9×1.7	底栖箱式培植实验管, 跟踪试剂注射器	6000	42~60	[41]
RAP2	法国	4 支撑架	2.5×3.0×2.0 (长×宽×高)	多普勒海流计, 水样采集器, 底栖箱式培植实验室, 数字相机	6000	60	[42]
BIGO	德国	3 支撑架	2.1×2.6	底栖箱式实验室, CTD	6000	60 或采用投 放器投放	[43]
FLUFO	德国	3 支撑架	2.0×2.5	原位箱式实验室, ADCP, CTD, 相机	6000	30~60 或采用 投放器投放	[44]
VESP	德国	4 支撑架	2.0×3.0	水样采集器, 底栖箱式实验箱体, 热流计, CTD, 声学海流计	4000	60 或采用投 放器投放	[45]
GoTEBORG	瑞典	4 支撑架	2.4×3.4	底栖实验室, DO 探头, 电导率探头, 矢量海流计, ADCP, OBS, 相机	6000	60	[46]

底栖箱式实验室内的水样采集, 另一个采集底栖实验室外的水样, 在观测站的上部还可搭载两个沉积物捕获器。当观测站达海底后, 利用电机将底栖实验室缓慢地插入到沉积物中, 当电导率探头触到沉积物时, 电导率发生变化, 停止插入, 开始按事先预定设定的时间间隔采集底栖实验室内上覆水, 根据所采集的水样分析沉积物-水界面的氮及氧的通量变化^[38]。荷兰海洋研究所研制的另一台多功能底栖原位观测站 ALBEX(Autonomous Lander for Biological Experiments), 可进行海底沉积物中的氧消耗速率实时测量, 进行沉积物中碳矿化作用的估算。该观测站搭载 3 个原位箱式培育室, 并集成 1 个沉积物捕获器, 每个箱内有一个溶解氧传感器和搅拌器, 模拟海底物质交换环境, 可以记录溶解氧、浊度以及底流等参数, 为研究生物与海底物理环境之间的影响过程提供了有效支撑^[39-40]。

丹麦 KC 公司与德国不莱梅马克斯普朗克海洋研究所设计了原位培植实验观测站 LUISE(Lander for Underwater in Situ Experiments), 观测平台中部装有 6 个箱式培养实验管, 管内分别装有注射器, 在海底利用电机可以将柱状培养管和注射针头插入 60 cm 厚的沉积物中, 根据事先编制的程序依次将跟踪试剂注入到沉积物中进行原位培植实验, 系统回收后, 将柱状培养管的沉积物样品带到实验室内分别测量培养管中未注射与注射示踪剂沉积物中的 H₂S, FeS, FeS₂, S 等剖面变化, 用于评估沉积物中细菌对化学物质的消耗影响^[41]。

针对多数报道的底栖观测站缺少近海底动力要素参数不足, 法国海洋开发研究院(IFREMER)研制了底栖观测站 RAP2(Respirometre Autonome Grande Profondeur), 该观测站除了携带 3 个底栖箱式实验室, 还携带边界层海流测量的声学海流计, 程控序列水

样采集器, 水下摄像机^[42]。当观测站在海底着陆后, 3 个底栖箱式实验室在步进电机驱动下分别插入约 9 cm 厚的沉积物中, 然后在底栖实验室中注入定量的 NaF, 利用搅拌器模拟底流, 同时按时序采集水样, 系统回收后对水样及沉积物样品进行分析, 评估沉积物中微生物代谢活动与营养盐、硅、氮、磷及溶解氧通量变化的关系。

德国赫姆基尔海洋研究所近十年来开发了一系列的底栖原位观测站, 其中具有代表性的是用于沉积物界面生物地球化学作用观测的 BIGO (Biogeochemical Observatory) 观测站, 在支撑架中部安置两个直径为 28.8 cm 的原位箱式实验室, 一个原位箱式实验室配有氧气补偿装置, 观测站采用可视化有缆“投放器”布放到海底。系统在海底着陆 2~3 h 后, 底栖实验室以 30 cm/h 的速度缓慢插入沉积物中, 观测站上搭载的 8 个序列水样依次抽取两个底栖箱内的水样, 观测结束时底栖箱底部执行封闭操作, 将沉积物保存在箱体内一同回收, 通过在实验室内对表层沉积物的 O_2 、 SO_4^{2-} 、 HS^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 Fe_2^+ 、Si、 Br^- 、 I^- 、总氮含量以及水样中的 O_2 、 N_2 、Ar、N、 PO_4^{3-} 、Si、 SO_4^{2-} 等浓度的检测, 为评估沉积物-水剖面的物质通量提供了新的方法^[43]。2009 年 Linke 等利用 BIGO 观测站在水合物渗漏区进行了 4 h 的海底总氧消耗及甲烷通量观测, 验证了总耗氧量与甲烷通量变化的相关性^[44]。德国赫姆基尔海洋研究所研制的专用的海底天然气水合物喷发机制观测站——VESP (Vent Sampler), VESP 携带 5 个水样采集器, 底部覆盖面积为 $1 m^2$ 的箱体, 内部安置热流计, 电极驱动注射式采水器、热敏电阻式流量计等, 同时携带 CTD、声学海流计^[45]。FLUFO (Fluid Flux Observatory) 是一个用于进行海底界面物理与化学综合因素对底部流体及化学物质的影响研究的观测站, 特别是天然气水合物的原位观测, 与 BIGO 一样也携带两个原位箱式实验室, 同时搭载了海流计用于测量流体和气体通量以及相关的控制参数, 可以用来定性或定量地解释复杂物理、化学环境变化与溢流的关系或对溶解化学物质释放速率的影响^[45]。

瑞典哥德堡大学开发了 GoTEBORG (Goteborg chamber and profile) 底栖观测站, 该观测站可搭载 4 个底栖箱式培植实验室, 每个实验箱内装有溶解氧和电导率探头, 底栖箱式培植实验室插入沉积物深度为 13~21 cm, 携带 9 个时间序列水样采集器, 具有 90 多种不同的控制模式进行原位实验, 譬如转速

调节、传感器采集频率变更等, 实现了沉积物-水界面的氧、有机碳、营养盐、金属离子的通量监测^[46]。

3 自主式沉积物-海水剖面测量原位观测站

随着深海原位化学传感器研究不断深入, 新型化学传感探头达到微米级直径, 可直接插入沉积物中实现化学物质梯度分布测量^[47]。这些 5~20 μm 直径的微型传感器探头集成在自主式底栖原位观测站, 替代原位培养实验室, 通过步进电机控制微电极传感器在垂直方向的运动步长, 实现了沉积物-海水界面的垂直剖面测量。根据 Fick's 第一定律, 假设已知探测沉积物的孔隙率和粒径分布, 可利用 Fick's 公式(2)计算底栖溶质通量变化^[48]:

$$J = -\phi D_s \frac{dC}{dz} \quad (2)$$

其中, J ($mmol/(m^2 \cdot d)$) 是某一溶质在沉积物-水界面的扩散通量, D_s ($m^2 \cdot d$) 是沉积物扩散系数, ϕ 是沉积物孔隙度, dC/dz ($mmol/m^4$) 是溶质在沉积物-水界面垂直梯度的浓度分布。沉积物的孔隙度可以利用电导率传感器直接测量, 也可以对采集的沉积物样品称质量。分子物扩散系数计算采用 $D_s = D_w / \theta^2$, 其中 D_w ($m^2 \cdot d^{-1}$) 是溶质在水体的扩散系数; θ^2 是沉积物弯曲效应的实际分子弯曲半径, 可采用估算方法获得: $\theta^2 = 1 - 2 \ln \phi$ 。

德国赫姆基尔海洋研究所研制的 PRFL (profiler lander) 剖面系统搭载两个玻璃纤维制作的框架, 上部玻璃纤维框架可以在 x 轴或 y 轴以毫米级单位位移, 最大行程 50 cm; 下部框架安装有微电极传感器, 在 z 轴方向按照预先设置的位移尺度进行垂直平面测量, 传感器平台上集成了溶解氧、硫、和 pH 传感探头, 可以实现 50 cm 范围内的剖面实现沉积物-水界面物质含量测量。PRFL 原位观测站同时集成了 1 台流速剖面测量 ADCP, 1 台矢量海流计测量近海底边界流速, 水下成像系统提供了海底沉积物表面的地貌变化信息^[49]。

韩国海洋科学研究院设计制作了小型化自制式深海剖面观测站 NAFRI BelpI (National Fisheries Research and Development Institute, Benthic lander microprofiler), 4 个支撑框架结构, 工作水深可达 3 000 m, 剖面移动平台可携带 3 个微电极传感器, 可以进行垂直剖面的 O_2 、 pCO_2 、 H_2S 、或 N_2O 的测量, 最小垂直移动步长根据实验要求可以设置为 50,

100 或 200 μm ^[50]。

在欧供体资助的项目 BENBO(Benthic Boundary Program)中,英国和丹麦合作研制了 BENBO 三角支架底栖观测站进行深海海底生物物理及生物地球化学过程监测^[51]。在观测站的中部装有步进驱动的垂直运动监测平台,平台上的微电极探头在垂直运动过程中,对上覆水及沉积物孔隙水剖面进行亚毫米级分辨率 O_2 、pH 测量。也可搭载 30 cm×30 cm 箱式底栖实验室模块,进行界面的化学物质通量测量;同时该观测站还可搭载管式沉积物取样器,间隔水样采样器等设备,便于实验室内的样品分析。

近十年来由于荧光材料的快速发展,基于平面光极传感器的海底观测技术为测量二维化学组分剖面变化提供了新的技术方法^[52]。平面光极基于数码相机记录探测平面发射的荧光强度,根据 Stern-Volmer 方程对每个像素的荧光强度或荧光寿命进行分析,可获得被观测物质浓度变化分布。平面光极的优势在于可同时获得微米级分辨率的两维空间分动态变化信息,而微电极传感器只能提供单点的梯度变化数据^[53]。Glud 等开发了集溶解氧微电极传感器和溶解氧平面光极为一体的海底观测站试验样机^[54],实现了深海沉积物-水界面微米级至厘米级溶解氧剖面动态分布变化连续观测。但是平面光极传感技术在实际应用所面临的挑战性问题是在插入海底界面过程中会破坏表层沉积物结构、响应时间较长,这些问题还有待于在今后结构设计及应用研究中进一步改进和完善。

随着商品化微型化学传感器的性能不断完善,自主式微剖面观测站已从实验室样机研制阶段向商品化产业化发展。总部位于丹麦的 Unisense 公司提供可用于深海或浅海的 Miniprofiler MP4 剖面原位观测产品,工作水深范围为 300~6 000 m,同时可搭载 Unisense 公司销售的 8 个微电极传感器,如 O_2 、 H_2 、 H_2S 、pH、氧化还原电极及温度探头等^[55],为亚毫米级的 1 维和 2 维空间沉积物-水界面的梯度变化检测提供了技术支持。

4 基于涡动相关方法的自主式边界层溶质通量原位观测站

几十年的海底原位监测技术发展及观测数据积累,证明传统概念中深海海底溶质在边界层基本处于均匀分布的片面性^[56]。观测研究表明在深海生物及细菌作用下,溶质在边界层不同空间尺度(千米~

毫米)呈现出较大的异质性,譬如陆坡、海底峡谷、低氧区、珊瑚礁、冷泉喷口等^[57]。因此开展深海边界层动态变化实时监测研究,对深入了解海洋中的物质循环及交换过程机理具有重要意义^[58],Berg 等首次提出利用矢量海流计和高速溶解氧传感探头同步测量单点的涡动湍流和溶解氧浓度评估边界层溶解氧通量变化,证明基于非接触式测量的涡动相关技术可用于沉积物-水界面溶解氧通量定量评估^[59]。根据水体在扩散边界层及内边界层的作用,其垂直通量用可表示为:

$$J = -D \frac{dC}{dz} + wC \quad (3)$$

其中, w 是垂直速度, C 是溶质的浓度, D 是溶质的分子扩散系数, $\frac{dC}{dz}$ 是溶质在沉积物-水界面浓度的垂直梯度分布。在流速较强环境下,由于湍流对流对垂直方向上地传输起主导作用,因此可以忽略公式中的(3)中的第 1 项。其平均垂向涡动通量可通过计算垂向速度和溶质浓度变化的相关性获得:

$$\text{Flux} = \overline{w'C'} \quad (4)$$

其中, w' 是垂直流速, C' 是溶质的浓度,上划线表示采样间隔内的平均值。垂向流速由变化流速和平均流速组成,表示为 $w = w' + \bar{w}$; 溶质的浓度由瞬间变化浓度和平均浓度组成,即 $C = C' + \bar{C}$,这样边界层溶质的通量就简化成计算溶质和垂直方向上流速的协方差。

与自主式海底原位箱式实验室及沉积物-海水剖面测量方法观测站相比,涡动相关技术的最大优势在于测量过程中不需要与沉积物接触,对海底沉积物及生物栖息地不产生干扰,并且可用于 100 m^2 大面积的溶质通量变化评估^[60]。目前美国、德国、英国、日本等国家相继研制了自容式水下涡动相关原位观测站,美国俄勒冈州立大学制作的 BOXER 海底观测站采用三角框架,高 1.8 m,宽 2.3 m,利用声学矢量流速仪和低噪声溶解氧电极以 64 Hz 同步采集,观测站同时还集成了 CTD 及水下相机^[61]。欧共体成员国合作研制了多种形式的自容式水下涡动相关原位观测站,采用响应时间小于 0.3 s 的溶解氧微电极,同步采集速率为 64 Hz,开展了在潮汐动力要素影响下英国北海渗透沉积物的边界层及沉积物-水界面的氧通量动态变化研究^[62]、硬质海底的氧交换速率观测研究^[63]、深海冷水区珊瑚礁表面的耗氧速率动态变化观测研究等^[64]。日本港湾与空港技术研究

所利用涡动相关原位观测站分别对白天和黑天潮间带、河口,以及潮汐、海浪、等底栖溶氧通量的动态变化进行了观测研究^[65-66]。因此涡动相关原位观测技术在不适宜实施箱式实验室及剖面传感器的海底,如深海峡谷、礁石地质区等的溶质通量异质性变化观测中具有广阔的应用前景^[67]。

5 自主式溶质通量原位移动观测站

在海底观测中,自主式海底观测站的原位观测时空尺度受其外形限制,通常在 $1\sim 2\text{ m}^2$ 。为提升自主式底栖原位观测站空间尺度资料获取能力,美国蒙特里海湾水族馆研究所研制了首台深海海底移动观测站(ROVER—漫游者)^[68],与星球自动移动机器人一样,ROVER 可以在水深 6 000 m 的海底自动移动,连续观测能力可达 6 个月,在海底可实现 30 个点的沉积物-水界面剖面及原位箱式实验室观测。基于新的传感器设备和材料,第二代 ROVER 在观测能力和性能都得到了优化,体积更加紧凑,在水下运动范围可达 40 km,集成了 2 台高分辨率深海摄像机和 1 个避障声呐与 1 个导航声呐,观测平台上的声学调制解调器用于观测数据的无线传输^[69]。

德国 16 个科研院所联合开发了深海水下履带移动观测平台实验样机 TRAMPER,工作水深 4 500 m,最大移动速度 13 m/min,集成了沉积物-水剖面溶解氧微电极,在每星期观测 1 次的采样间隔设置下可在水下工作 1 年^[70],由于配备了基于地形导航系统,极大提高其水下工作灵活性和工作范围。近年来德国又开发了与定点观测站协同作业的 VIATOR 自主式移动观测平台,并与加拿大联合研制了可通过海底观测网对其观测/作业进行控制的 Wally 样机^[71]。目前 Wally 已经完成了与加拿大 NEPTUNE 海底观测网的连接调试,譬如利用 Wally 可实现海底观测网无法完成的异常环境中的热液喷口活动实时监测^[72],为拓展海底观测网的观测空间尺度能力提供了新方法。

6 自主式溶质通量原位观测站研发建议

近几十年围绕着海底边界层溶质通量监测开发了的各种原位观测技术方法,在观测时空尺度方面存在较大的差异,如图 2 所示。自主式海底原位箱式实验室观测站内部通过搅拌或转子只是模拟外界动力环境,无法再现真实外界环境变化过程;此外箱体覆盖空间误差较大,可引起人为测量误差。自主式

沉积物-海水剖面测量原位观测站所采用的海洋化学传感器,普遍面临着使用寿命较短、容易产生信号漂移等难题,难以满足长期自动监测应用需求。基于涡动相关方法的自主式边界层溶质通量原位观测站在微观时空尺度观测方面存在局限性,计算的溶质通量变化受观测仪器的采样时间及响应分辨率制约存在较大的误差,此外流速仪的功耗制约了其水下工作时间;自主式溶质通量原位移动观测站是 AUV 技术与自主式原位观测站优势互补的观测系统,为实现大空间范围定点实时观测提供了新的技术手段,但是其面临与 AUV 类似的问题,受功耗与携带仪器负载的限制,此外在海底移动过程中对表面沉积物会产生影响,带来测量误差。

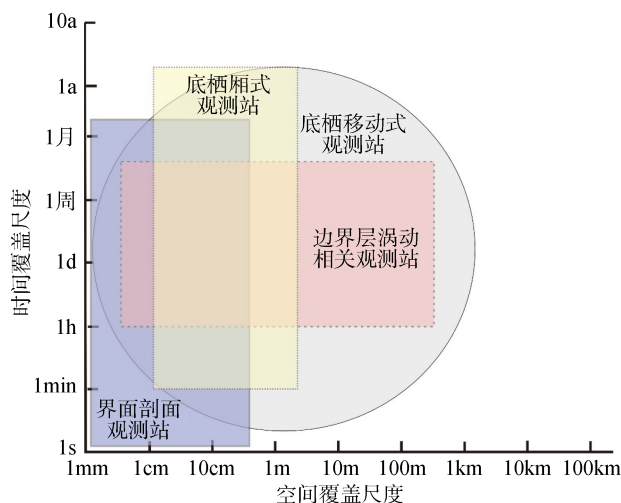


图 2 各种自主式海底原位观测站在空间和时间观测尺度
Fig. 2 Spatial and temporal coverage of different lander systems

自主式海底原位观测站在今后研制与应用中,要针对不同的海底属性和时空尺度观测,在观测站的灵活性,综合观测能力、仪器设备通用性、可靠性等方面不断完善,以适应不同的深海观测研究需求。譬如最近德国赫姆基尔海洋研究所研制的模块化、大负载搭载能力(400 kg)的底栖观测站 HiCAP(High Capacity and Payload),便于多传感器集及原位定植培养实验装置搭载,在 5.4 m^2 内进行生物、物理、化学以及地质等多项现场试验及监测,实现物理、化学监测及底栖原位实验等多要素的实时观测目标。

传感器是获取深海溶质实时变化的重要手段,目前受传感器技术的限制,所测量的无机或有机溶解物质通量指标有限,因此进一步完善现有原位传感器性能、开发新一代高效、可靠的传感技术,在压

力、灵敏度、稳定性、精度使用寿命等方面取得突破性进展,实现深海海底 CO_2 、 CH_4 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 H_2S 、 Fe^{+2} 、 Mn^{2+} 等多种指标的实时检测,是深海原位观测站发展急需解决的重要课题之一。

经过几十年的验证,底栖原位箱通量观测方法所提供的沉积物界面通量资料具有良好参考性,我们建议所开发的各种边界层溶质通量观测站都应集成底栖原位箱装置用于对比验证,尤其是在渗透性沉积物区域。此外,目前采用的水样采样器尚难以提供高分辨率的溶质及颗粒在海底边界层空间及时间地变化信息,因此开发新型的高分辨率水样采集或实时监测装置也是自主式原位观测站急需解决的问题之一。

结合现代网络发展的先进成果,建议优先开发水下无线通信和新能源供给技术,提升海底观测站的自动观测能力;开展 AUV、ROV、Glider、潜标、水面浮标等观测技术的无线或有线组网技术研究,构建从海底到水体、从水体到水面的三维立体空间观测体系。实现长时序、大时空尺度、高分辨率的边界层溶质通量定量评估与监测,是构建深海生物地球化学循环原位观测系统未来发展的主要方向。

7 结论

深海的复杂性及高压力的特殊环境,使得人类对深海海底的物理、化学、生态系统的变化规律及其对全球作用认识非常有限,缺少长期、连续的海底宏观和微观现场观测综合数据资料,譬如颗粒通量评估、溢出气体流量监测、沉积物-海水界面流体及气体流量测量、沉积物-海水界面的碳、氮、磷等在生物地球化学循环以及底栖生态活动对沉积物物质通量的影响等。与现有的 AUV、ROV、海底观测网系统相比,自主式海底观测站提供了一种低成本、高效的水动力作用下海底化学物质输送、交换的原位监测技术方法。自主式沉积物-水剖面原位海底观测站可以提供深海海底溶质的高分辨率微观梯度动态变化信息,是了解沉积物-水界面溶质微观异质性分布及动态变化唯一有效手段;海底原位箱式实验室观测站为获取生物扰动对沉积物溶质通量变化提供了可靠数据;涡动相关原位观测站无需与海底接触,即可定量评估大面积溶质通量变化。自主式海底原位观测站在原位高时空分辨率具有独特的优势,但是在空间尺度、跨年观测能力方面有着一定的局限性,随着高性能供电系统、新型传感技术及先进观

测方法等关键问题的研究突破,推进移动式海底原位观测站或无线观测站网络系统等方面的发展进度,提升长时序、大覆盖面积的连续观测能力,对提高人类对深海海底界面物质通量动态变化过程、海底生态系统探索水平具有重大意义。

参考文献:

- [1] Danovaro R, Company J B, Corinaldesi C, et al. Deep-sea biodiversity in the Mediterranean Sea: the known, the unknown, and the Unknowable[J]. Plos One, 2010, 5(8): e11832.
- [2] Delaney J, Heath G, Chave A, et al. NEPTUNE real time, long-term ocean and earth studies at the scale of tectonic plate[C]//MTS/IEEE Conference Committee. Proceedings Oceans 2001 MTS/IEEE. Holland: IEEE Press, 2001, 3: 1366-1373.
- [3] Berner R A. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance[J]. American Journal of Science, 1982, 282: 451-473.
- [4] Draper S, AN Hong-wei, CHENG Liang, et al. Stability of subsea pipelines during large storms[J]. Philosophical Transactions A, 2015, 373: 20140106.
- [5] Jones D B, Yool A, WEI Chin-Lin, et al. Global reductions in seafloor biomass in response to climate[J]. Global Change Biology, 2014, 20(6): 1861-1872.
- [6] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed[J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23: 147-154.
- [7] 李颖虹, 王凡, 任小波, 海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 715-722.
Li Yinghong, Wang Fan, Ren Xiaobo. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 715-722.
- [8] Bell K L C, Elliott C, Martinez C, et al. New frontiers in ocean exploration: The E/V Nautilus and NOAA ship Okeanos explorer 2011 field season[J]. Oceanography Supplement, 2012, 25(1): 1-68.
- [9] Paull C, Stratton S, Conway M, et al. Deep sea vibro-coring system improves ROV sampling capability[J]. EOS, 2001, 82(30): 325-326.
- [10] Wynn R B, Huvenne V A, Bas T P, et al. Autonomous underwater vehicles(AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. Marine Geology, 2014, 352: 451-468.
- [11] Rudnick D L. Ocean research enabled by underwater gliders[J]. Annual Review of Marine Science, 2016, 8: 519-541.
- [12] Vidard A, Anderson D, Balmaseda M. Impact of ocean

- observation systems on ocean analysis and seasonal forecasts[J]. American Meteorological Society, 2007, 135(2): 409-429.
- [13] Rabinovich A B, Eble M C. Deep-ocean measurements of Tsunami Waves[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(12): 3281-3312.
- [14] Kasahara J, Shirasaki Y, Asakawa K, et al. Scientific application of ARENA networks[C]// Kasahara J, Tokio A D. Proceedings of 3rd International Workshop of Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Japan: IEEE Press, 2003: 272-275.
- [15] Friede I G, Mienert J, Person R, et al. ESONET-European sea floor observatory network[J]. Elsevier Oceanography Series, 2003, 69: 291-294.
- [16] Jones N. Undersea project delivers data flood[J]. Nature, 2010, 464: 1115.
- [17] Li Xin, Fu Bin, Hu Song, et al. China's sea floor observatory network R&D: Current status and prospects[C]//IEEE. Proceedings of 2012 Oceans. Korea: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [18] 彭晓彤, 周怀阳, 吴邦春, 等. 美国 MARS 海底观测网络中国节点试验[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 991-996.
Peng Xiaotong, Zhou Huaiyang, Wu Bangchun, et al. Test China node on Monterey Accelerated Research System (MARS)[J]. Advanced in Earth Sciences, 2011, 26(9): 991-996.
- [19] 卢汉良, 李德骏, 杨灿军, 等. 深海海底观测网络水下接驳盒原型系统设计与实现[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(1): 8-13.
Lu Hanliang, Li Dejun, Yang Canjun, et al. Design and implementation of underwater junction box prototype system for seafloor observatory network[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(1): 8-13.
- [20] 李建, 陈荣裕, 王盛安, 等. 国际海洋观测技术发展趋势与中国深海台站建设实践[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(2): 123-133.
Li Jian, Chen Rongyu, Wang Sheng'an, et al. Development of international marine observation system and construction of deep-sea station in China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(2): 123-133.
- [21] Tenberg A, Bovee F, Hall P, et al. Benthic chamber and profiling Landers in oceanography: a review of design, technical solutions and functioning[J]. Progress in Oceanography, 1995, 35: 253-294.
- [22] Shine J P, Ika R, Ford T. Relationship between oxygen consumption and sediment-water fluxes of heavy metals in coastal marine sediments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1998, 17(11): 2325-2337.
- [23] Huettel M, Berg P, Kostka J E. Benthic exchange and biogeochemical cycling in permeable sediments[J]. Annual Reviews of Marine Science, 2014, 6: 23-51.
- [24] 赵广涛, 于新生, 李欣, 等. Benvir: 一个深海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 for benthic environmental monitoring[J]. High Technology Letters, 2015, 25(1): 54-60.
- [25] Jiang Bo, Bulgan G, Sturzenegger P N, et al. Ceramic spheres-A novel solution to deep sea buoyancy modules[J]. Material, 2016, 9(7): 529.
- [26] Hasvold O, Storkersen N J, Forseth S, et al. Power sources for autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2006, 162: 935-942.
- [27] Mendez A, Leo T J, Herreros M. Current state of technology of fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles[J]. Energies, 2014, 7: 4676-4693.
- [28] Ghezel-Ayagh H, Jolly S, Sanderson R, et al. Hybrid SOFC-battery power system for large displacement unmanned underwater vehicles[J]. ECS Transactions, 2013, 51(91): 95-101.
- [29] Parker W, Doyle K, Parker E, et al. Consideration of Lander/interface interactions and their design implications[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 285-286: 179-190.
- [30] Smith K L Jr, Glifford G, Elliason A, et al. A free vehicle for measuring benthic community metabolism[J]. Limnology and Oceanography, 1976, 21: 164-170.
- [31] Pfannkuche O, Linke P. GEOMAR lander as long-term deep-sea observatories[J]. Sea Technology, 2003, 44: 50-55.
- [32] Beranzoli L, Braun T, Calcara M, et al. Mission results from the first GEOSTAR observatory(Adriatic Sea, 1998)[J]. Earth Planets and Space, 2003, 55: 361-373.
- [33] Smith K L Jr. Benthic community respiration in the N.W. Atlantic Ocean: in situ measurements from 40 to 5200 m [J]. Marine Biology, 1978, 47(4): 337-347.
- [34] Smith K L Jr, White Jr, Laver M. Oxygen uptake and nutrient exchange of sediments measured in situ using a free vehicle grab respirometer[J]. Deep Sea Research, 1979, 26(3): 337-346.
- [35] Smith K L Jr, Baldwin R, Karl D, et al. Benthic community responses to pulses in pelagic food supply: North Pacific Subtropical Gyre[J]. Deep Sea Research, 2002, 49: 971-990.
- [36] Rowe G, Boland G, Phoel W, et al. Deep-sea floor respiration as an indication of lateral input of biogenic detritus from continental margins[J]. Deep Sea Research II, 1994, 41: 657-668.
- [37] Rowe G, Boland G, Escobar B, et al. Sediment community biomass and respiration in the Northeast water

- Polynya Greenland: a numerical simulation of benthic lander and spade core data[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 10(1): 497-515.
- [38] Tahey T, Duineveld G, Dewilde P, et al. Sediment O₂ demand density and biomass of the benthos and phytopigments along the northwestern Adriatic coast: the extent of Po enrichment[J]. *Oceanologica Acta*, 1996, 19: 117-130.
- [39] Lavaleye M, Duineveld G, Lundalv T, et al. Cold-water corals on the Tisler Reef: preliminary observations on the dynamic reef environment[J]. *Oceanography*, 2009, 22(1): 77-84.
- [40] Duineveld G C, Lavaleye M S S, Berghuis E M. Particle flux and food supply to seamount cold-water coral community(Galicia Bank, NW Spain)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 277: 13-23.
- [41] Greeff O, Glud R N, Gundersen J, et al. A benthic lander for tracer studies in the sea bed: in situ measurements of sulfate reduction[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18: 1581-1594.
- [42] Khripounoff A, Caprais J, Crassous P. Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule field of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5000 m depth[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(3): 2033-2041.
- [43] Sommer S, Linke P, Pfannkuche O, et al. Seabed methane emissions and the habitat of frenulate tubeworms on the Captain Arutyunov mud volcano(Gulf of Cadiz)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 382: 69-86.
- [44] Linke P, Sommer S, Rovelli L, et al. Physical limitations of dissolved methane fluxes: The role of bottom-boundary layer processes[J]. *Marine Geology*, 2010, 272: 209-222.
- [45] 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*, 1994, 41: 721-739.
- [46] Ekeröth N, Kononets M, Walve J, et al. Effects of oxygen on recycling of biogenic elements from sediments of a stratified coastal Baltic sea basin[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154: 206-219.
- [47] Moore T S, Mullaugh K M, Holyoke R R, et al. Marine chemical technology and sensors for marine waters: Potential and Limits[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 91-115.
- [48] Cathalot C, Rabouille C, Sauter E, et al. Benthic oxygen uptake in the Arctic ocean margins- A case study at the deep-sea observatory HAUSGARTEN (Fram Strait)[J]. *Plos One*, 2015, 10(10): e0138339.
- [49] Glud R N, Gundersen J K, Roy H, et al. Seasonal dynamics of benthic O₂ uptake in a semienclosed bay: Importance of diffusion and faunal activity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3): 1265-1276.
- [50] Lee J S, Kim E S, Kahng S H, et al. Development and application of a novel miniature in situ microprofiler (NAFRI BelpI)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 4: 489-495.
- [51] Black S K, Fones R G, Peppe C O, et al. An autonomous benthic lander: preliminary observations from the UK BENBO thematic programme[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21: 859-877.
- [52] Jiang Zike, Yu Xinsheng, Zhai Shikui, et al. Ratiometric dissolved oxygen sensors based on ruthenium complex doped with silver nanoparticles[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 548.
- [53] 李栋, 姜子可, 于新生, 等. 生物扰动下海底沉积物-水界面溶解氧二维观测方法[J]. *海洋科学*, 2014, 3(5): 89-94.
- Li Dong, Jiang Zike, Yu Xinsheng, et al. Two-dimensional dissolved oxygen distribution at bioturbated sediment-water interface(SWI)[J]. *Maine Sciences*, 2014, 38(5): 89-94.
- [54] Glud R N, Wenzhofer F, Tengberg A, et al. Distribution of oxygen in surface sediments from central Sagami Bay, Japan: In situ measurements by microelectrodes and planar optodes[J]. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 1974-1987.
- [55] Breuer E R, Law G T W, Woulds C, et al. Sedimentary oxygen consumption and micro distribution at site across the Arabian Sea oxygen minimum zone(Pakistan margin)[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2009, 56: 296-304.
- [56] Boetius A, Wenzhofer F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 725-734.
- [57] Danovaro R, Carugati L, Corinaldesi C, et al. Multiple spatial scale analyses provide new clue on patterns and drivers of deep-sea nematode diversity[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2013, 92: 97-106.
- [58] Donis D, McGinnis D F, Holtappels M, et al. Assessing benthic oxygen fluxes in oligotrophic deep sea sediments (HAUSGARTEN observatory)[J]. *Deep Sea Research I*, 2016, 111: 1-10.
- [59] Berg P, Roy H, Janssen F, et al. Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 261: 75-83.
- [60] Berg P, Roy H, Wiberg P L. Eddy correlation flux measurements: The sediment surface area that contributes to the flux[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52: 1672-1684.
- [61] Reimers C E, Ozkan-Haller H T, Berg P, et al. Benthic

- oxygen consumption rates during hypoxic conditions on the Oregon continental shelf: Evaluation of the eddy correlation method[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: C02021.
- [62] McGinnis D F, Sommer S, Loke A, et al. Quantifying tidally driven benthic oxygen exchange across permeable sediments: An aquatic eddy correlation study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(10): 6918-6932.
- [63] Glud R N, Berg P, Hume A, et al. Benthic O₂ exchange across hard-bottom substrates quantified by eddy correlation in a sub-Arctic fjord[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 417: 1-12.
- [64] Cathalot C, Oevelen D V, Cox T J, et al. Cold-water coral reefs and adjacent sponge grounds: hotspots of benthic respiration and organic carbon cycling in the deep sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2015, 2(37): 1-12.
- [65] Kuwae T. Direct measurement of benthic oxygen flux using eddy-covariance technique[J]. *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, 2016, 22(1): 47-56.
- [66] Yamaoto S, Kayanne H, Tokoro T, et al. Total alkalinity flux in coral reef estimated from eddy covariance and sediment pore-water profiles[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60: 229-241.
- [67] Aline M, Dominique D, Nicolas S, et al. Spatial and temporal variability of CO₂ fluxes at the sediment-air interface in a tidal flat of temperate lagoon (arcachon bay, France)[J]. *Journal of Sea Research*, 2016, 109: 13-19.
- [68] Smith Jr K L, Glatts R C, Baldwin R J, et al. An autonomous, bottom-transecting vehicle for making long time-series measurements of sediments community oxygen consumption to abyssal depths[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1601-1612.
- [69] McGill P R, Sherman A D, Hoson B W, et al. Initial deployments of the Rover: an autonomous bottom transecting instrument platform [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2009, 4(2): 50-66.
- [70] Wenzhoefer F, Lemburg J, Hofbauer M, et al. TRAMPER- An autonomous crawler for long-term benthic oxygen flux studies in remote deep sea ecosystems[C]//MTS/IEEE. *Oceans 2016. USA: IEEE Press*, 2016: 1-16.
- [71] Wedler A, Hellerer M, Rebele B, et al., ROBEX- Components and methods for the planetary exploration demonstration mission[C]//ESA/ESTEC. *Proceeding of 13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation. The Netherlands: European Space Agency*, 2016: 10-13.
- [72] Purser A, Thomsen L, Barnes C, et al. Temporal and spatial benthic data collection via an internet operated deep sea crawler[J]. *Methods in Oceanography*, 2013, 5: 1-18.

Review of seabed landers for monitoring solute fluxes in deep sea

YU Xin-sheng^{1, 2}, YAN Zhi-jin¹, ZHU Ming-liang³, LI Dong⁴, JIANG Zi-ke¹,
CUI Shang-gong¹

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Detection Technology, Qingdao 266100, China; 3. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266100, China; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, the Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Dec. 12, 2016

Key words: deep seafloor, in-situ devices, solute flux, benthic lander, biogeochemistry

Abstract: To understand physical, chemical, and biological transportation mechanisms across the deep sea floor has been a major challenge in deep sea research. Lander equipment can be deployed from a ship and sink by its own gravity through the water column. Once it has landed smoothly on the sea floor, the lander can conduct a variety of sea-floor measurements and experiments and bring samples and collected data back to the surface. In this paper, we provide current information on benthic landers designed to monitor the biogeochemical processes of the deep seabed. We discuss applications of these systems along with their associated advantages and disadvantages.

(本文编辑: 刘珊珊)