

基于“发现”号缆控水下机器人的 深海原位探测/取样/实验技术 研发与科学应用

杜增丰 连超 席世川 栾振东 张鑫 阎军

(中国科学院海洋研究所 266071)

海洋关乎一个国家的科学研究、国防安全以及未来发展空间等重大问题。由于缺少先进的探测平台和技术装备,长期以来我国深远海探测基本处于“望洋兴叹”的状态。习近平总书记在2016年全国科技创新大会上指出,深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏,并提出“深海进入”、“深海探测”、“深海开发”的深海战略,推进我国深远海探测研究,指导海洋强国建设。到目前为止,随着“科学”号、“东方红3”号、“深海一号”等综合科学考察船的建成与成功使用,我国已具备进入深海、探测深海、开发深海的前提条件。船载“发现”号缆控水下机器人(Remote Operated Vehicle,以下简称ROV)和基于“发现”号ROV的一系列深海原位探测、综合取样装备的成功运用和深海原位实验的开展,使我们实现了深海探测“下得去,看得清,采得上,测得准,功能全,用得起”的目标,提升了我国深远海探测能力。

1. “发现”号ROV的组成和作业能力

作为“科学”号海洋综合科学考察船的重要组成部分,“发现”号ROV是中国科学院海洋研究所深度定制的4500米级科考型水下机器人。“发现”号长3米,宽1.7米,高2米,空气中净重4000千克,功率100马力,最大负载为450千克。自2014年3月交付使用以来,已跟随“科学”号科考船在太平洋多个海区进行科学考察,下潜至深海冷泉、热液、海山

等特殊地质环境进行观测、取样、探测等。截止到2020年6月16号,“发现”号ROV累计下潜次数已近250次。

作为水下科考利器,“发现”号靠什么独门绝技驰骋水下呢?首先,“发现”号拥有分布在ROV本体不同位置的水下高清摄像头和LED照明光源作为它的眼睛,这是“发现”号ROV在水下行进以及科考最直观的依据。除此之外,“发现”号还配备了生物和沉积物取样器,在后边还装备了CTD取水瓶、生物的取水装置和原位拉曼探针(图1)。“发现”号ROV拥有两只灵活程度不亚于人类手臂的T4机械臂,用于水下精准探测和取样。“发现”号ROV还拥有种类众多的传感器,其中姿态传感器、前置声呐等用于水下行进的参考,二氧化碳、甲烷等传感器作为探测单元,获取水下高精度原位理化参数。

2. 基于“发现”号ROV的原位探测

作为一种重要的海洋地质调查方法,海洋地球物理调查技术主要通过获取数据资料来查明海底地形地貌特征、地层结构和地质构造,其中深海近底高精度探测技术在揭示冷泉、热液区物质与能量输运中具有重要的现实意义。中国科学院海洋研究所科研团队基于“发现”号ROV对西太平洋关键海域开展了高精度近海底的地球物理探测。基于近海底三维激光扫描测量,首次获取了厘米级高分辨率的地形图。针对指示深海流体活动和成矿作

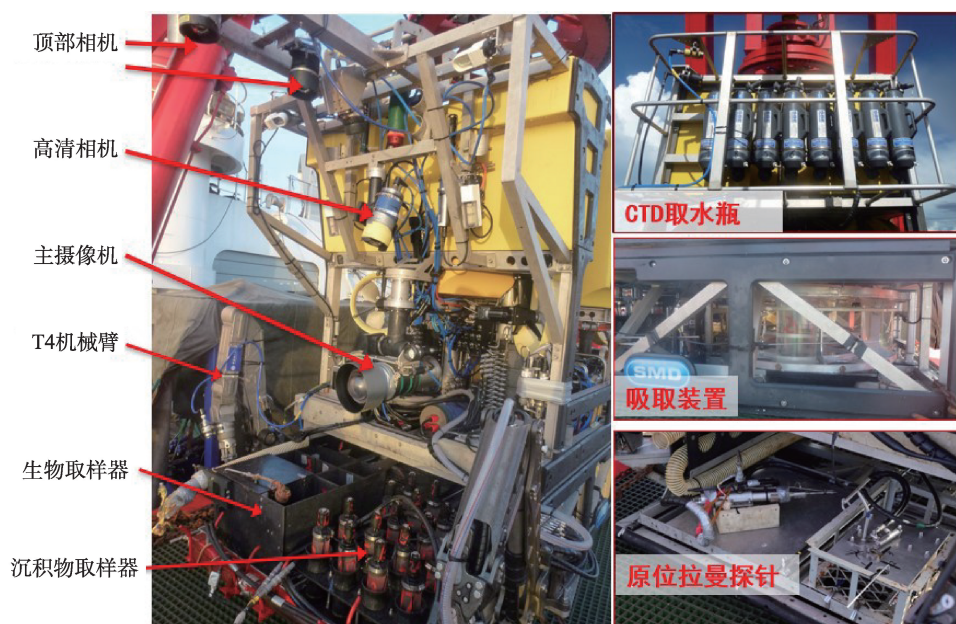


图1 “发现”号ROV组成及搭载装置

用的基本参数——温度,科研团队研制了可用于深海原位探测的温度梯度传感器,测量范围0~800 °C,精度可达0.5 °C,并且耐压20 MPa;目前已经取得了大量热液梯度温度数据,并成功测量了南海台西南冷泉区域、马努斯海盆、冲绳海槽等热液区喷口的温度(图2(a))。

长期以来,深海极端环境理化参数无法准确测定。为此,科研团队研发了世界首台耐高温原位拉曼光谱探针(Raman insertion Probe-RiP,简称RiP系统)^①,其整体性能指标尤其是对深海高温高腐蚀性

热液喷口流体的原位探测能力,已经达到了国际领先水平(图2(b))。同时拓展研发了适用于深海固体、液体以及气体目标物的系列化拉曼光谱探针(图3)。这些探针搭载HOV、ROV等多种类型的水下潜器下潜到深海冷泉、热液等极端环境中,对深海沉积物孔隙水、冷泉/热液喷口流体、天然气水合物、海底岩石矿物^②等多种水下目标进行原位探测与定量分析,以获取深海环境的原位数据。该系列化拉曼探针已经搭载中美两国多艘科考船和深潜器对全球典型的深海热液、冷泉区域进行了六年十

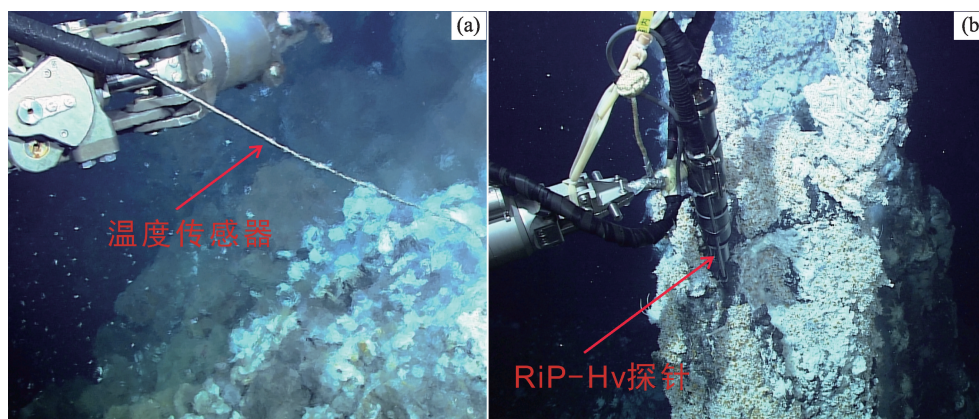


图2 基于“发现”号的原位探测(a)温度梯度传感器;(b)在深海热液喷口原位探测的RiP-Hv探针

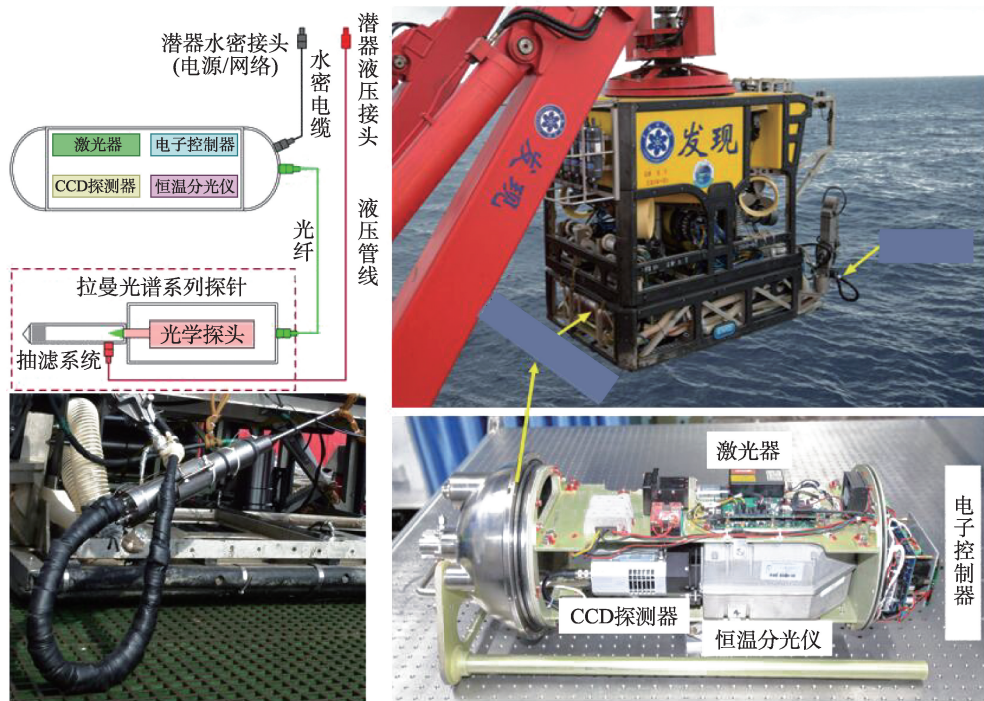


图3 基于“发现”号ROV的RiP系统及其结构图(改自文献②)

几个航次近百个潜次的科学应用;其中,在西南印度洋热液区开展的原位探测,为自然资源部对该金属硫化物矿区的环境评价提供了宝贵的实测资料。

基于RiP系统,在国际上首次获取了温度高达290℃的热液喷口流体的原位拉曼光谱数据,并初步获取了热液喷口流体中的原位化学成分^①。通过在实验室内建立高温高压模拟装置,建立了一系列基于RiP系统的高温定量模型,成功确定了冲绳海槽热液流体中的二氧化碳及硫酸根的原位浓度^③。这是国际上首次有关于高温热液流体原位二氧化碳、硫酸根浓度的报道。通过对比冲绳海槽中部热液同一喷口的数据发现,原位测量的二氧化碳浓度比实验室保压取样样品二氧化碳浓度高出三倍以上。这一成果表明,热液活动对全球碳循环以及气候变化的影响很有可能被大大低估。此外,RiP系统还在深海热液区发现了自然状态下存在超临界二氧化碳,为地球初始有机物的形成和生命起源提出了新的可能^④;在热液区观测到一种特殊的气相热液喷发系统,加深了对深海热液系统发育过程的

认识^⑤。

RiP系统除了在深海高温高腐蚀性热液区取得突出的原位探测成果,还在国际上首次发现南海冷泉海域裸露在海底表层的天然气水合物并获取了原位拉曼光谱,进而分析了该天然气水合物的成分、笼型结构、笼占比等理化性质^⑥。通过对生物群落内部间隙水开展的RiP原位拉曼光谱测量,获得间隙水中硫酸根、甲烷、硫化氢、溶解氧的浓度梯度变化,揭示了生物群落中存在一种AOM反应过程,这对研究冷泉喷口附近化能合成生物群落的物质及能量转移方式和途径提供了一种全新的思路^⑦。

3. 基于“发现”号ROV的原位保真取样

基于“发现”号ROV,科研团队自主研发了体系化的深海原位取样系统,主要包括深海可视化智能取样系统、深海流体/固体保真取样装置、深海岩芯钻机、深海高通量采水器、小型抓斗采样器等综合

取样装备,实现了地质、生物等多类样品的精确获取和保真回收(图4),较好地响应了深海特殊生境的探测需求,在深海环境综合探测研究中发挥了重要的协同作用。

目前,科研团队聚焦南海冷泉、冲绳海槽热液等深海极端环境,采用点、线、面相结合的调查方法完成原位探测和取样工作。利用大容量时间序列沉积物捕获器在冷泉环境放置一年,按照预置的时间系统程序自动进行定时和分步采样,识别沉积物来源、对沉积速率量化并提取有效物源判识参数;利用缆式温度链在深海环境下探测局部特殊地质体中精细的热状态和热结构,包括热液口垂向和横向的温度梯度,用于热液喷口物质能量交换的研究;利用深海岩芯钻机实现水下多角度作业和自动钻孔,并能在钻孔完成后自动断芯,获取短距离海底岩石样品;利用深海原位流体高通量采水器一次性可获得大通量的原位保真水体,其获取的速度和体积已实现了可视化控制;利用深海样品保真转运器,实现了固态样品(沉积物和大型生物)的保温保压获取;利用深海多通道原位保压流体高通量采样器,借助ROV深海摄像观测技术,同时获取了沉积

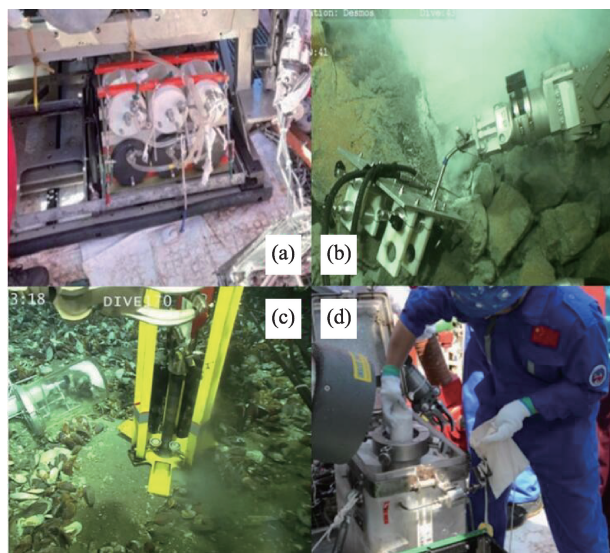


图4 “发现”号ROV的原位保真取样装置
(a) 高通量深海原位水体采样装置;(b) 多通道保真流体取样器;
(c) 深海水下钻机取样器;(d) 深海样品保真转运器

物/海水界面、生物群落内部的流体样品。

4. 基于“发现”号ROV的原位实验

科研团队通过“科学”号科考船深海综合探测与精准取样体系建设,以“发现”号ROV为平台,把实验室搬到了海底。2018年,为了研究水合物在深海埋藏条件下的动态生成与分解过程,通过“发现”号ROV布放在我国南海冷泉喷口附近的深海极端环境长期观测系统,长期观测和收集到了装置内水合物的变化情况;在长达659的布放周期内(2018年8月4日至2020年5月2日,有效记录数据时间为414天),在国际上首次获取了水合物动态生成与分解的视频资料。2020年,升级后的深海极端环境长期观测系统在我国南海冷泉喷口附近对收集装置内的水合物进行了连续8天的视频数据记录。“发现”号ROV RiP系统原位测量了现场合成水合物的笼型、饱和度等物理化学特性并发现冷泉流体中矿物颗粒在水合物快速形成中起到关键作用^⑧。

基于“发现”号ROV平台的深海作业能力,科研团队自主研发了深海大型生物原位实验装置,实现了样品的采集及同位素液体定时定量加注或气体定量加注,进行原位或移位培养,保证样品处于原位环境不受扰动或实现样品特定环境的模拟胁迫。原位实验完成后,利用自研大型生物原位固定设备,还能实现样品与RNAlater、多聚甲醛等目的试剂的定量孵育,达到样品原位保真固定的效果。这些原位实验研究让科研人员得以在深海现场测定微生物和大型生物共生菌固碳速率与迁移转换过程,深化了对深海冷泉系统的科学认知,为进一步评估极端环境在全球碳循环中的功能作用提供了理论依据和数据支撑。

5. 基于“发现”号ROV建立深海特定环境场信息系统

基于“发现”号ROV的三维光学扫描技术,科

研团队采用航空摄影矫正的方法完成了近海底图像的拼接,在国内首次获得了具有完整地理信息的大比例尺深海海底高清全幅影像资料;以此为底图,首次引入VR系统对近海底影像资料和数据进行解释,并将该系统灵活地运用于海洋科普中,实现了科研与科普的有效结合。

利用“发现”号ROV搭载的深海激光拉曼光谱原位定量探测系统、多参数传感器集成系统等原位探测装备,获取深海极端环境下温度、深度、盐度、流速等物理参数及K、Ca、Mg、CO₂、CH₄、SO₄²⁻等目标物的浓度,原位测定pH、Eh等关键化学参数,结合所获取的地形特征,可建立研究区域的深海理化环境场。

利用“发现”号ROV布放的高精度高分辨率海流观测系统,尝试建立三维、时空高分辨率的水动力模型;利用布放的长期原位摄像系统,获得浮游生物、游泳动物、底栖动物、赤潮藻类、污损生物的图像信息,尝试利用形态鉴定和宏基因组方法获取其生物多样性信息;利用布放的长期定点观测系统搭载多种海洋物理化学环境原位探测传感器,对冷泉/热液等特殊生境近海底区域的关键物理化学要素进行长时间连续观测,结合已构建的高分辨率地理信息系统,完成近底层环境场数据库的构建,逐步建立深海特定环境场信息系统。

6. 结语

科学技术是第一生产力,蕴藏着丰富矿产和生物资源的深海尤其需要科学技术的进入。国家重大科技基础设施“科学”号海洋科学综合考察船搭载的“发现”号ROV,在深海探测研究领域独具特色。基于“发现”号ROV,大量原位探测和保真取样装置的自主研制得以开展;其上搭载的RiP系统、传感器集成装置及其布放的深海长期观测系统,成功实现了深海长期原位探测;基于保压流体装置、生物取样装置和大容量取水装置等,成功实现了样品的保真取样。同时,以深海近底为实验室开展的原

位实验得以开展,一些诸如天然气水合物形成机制、深海极端环境下生物生存策略及其与环境互作等现象得以发现和深入研究。“发现”号ROV多方位的深海原位调查能力,不仅强力支撑了我国深海科学研究,也可为我国发展深海综合调查技术提供极富价值的参考。同时,上述基于“发现”号ROV研制的各种深海装备,在设计之初已经考虑了多潜器平台的搭载需求,并且部分装备已经搭载“蛟龙”号载人潜水器,“海星6000”、“海龙III”号ROV等深海潜器平台开展了示范性应用,相信在我国深海进入、深海探测和深海开发战略实施中将起到重要的技术引领作用。

参考文献

- ① Zhang X, 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. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*.123, (2017) 1.
- ② Xi S, et al. Laser Raman detection of authigenic carbonates from cold seeps at the Formosa Ridge and east of the Pear River Mouth Basin in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*.168, (2018) 207.
- ③ Li L, et al. In Situ Quantitative Raman Detection of Dissolved Carbon Dioxide and Sulfate in Deep-Sea High-Temperature Hydrothermal Vent Fluids. *Geochemistry Geophysics Geosystems*.19, (2018) 1809.
- ④ Zhang X, et al. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system. *Science Bulletin*.65, (2020) 958.
- ⑤ Li L, et al. Hydrothermal Vapor-Phase Fluids on the Seafloor: Evidence From In Situ Observations. *Geophysical Research Letters*.47, (2020) e2019GL085778.
- ⑥ Zhang X, et al. In situ Raman Detection of Gas Hydrates Exposed on the Seafloor of the South China Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*.17, (2017) 3700.
- ⑦ Du Z, et al. In situ Raman Quantitative Detection of the Cold Seep Vents and Fluids in the Chemosynthetic Communities in the South China Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*.19, (2018) 2049.
- ⑧ Du Z, et al. In situ Raman spectroscopy study of synthetic gas hydrate formed by cold seep flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*.168, (2018) 197.