

# 南海深水海山上的新发现

周怀阳, 朱启宽, 季福武, 杨群慧

同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

**摘要** 在国家自然科学基金委重大研究计划“南海深部计划”指导下,于2013—2019年期间,分别运用载人或遥控深潜器,针对南海深海盆中的部分海山开展了4个科学探测航次,在南海首次发现了大面积的高丰度铁锰结核分布区、“南溟”古热液区和惊人的冷水珊瑚生态林。这些发现不仅为深入认识南海不同时空尺度演化的复杂过程及相互作用开辟了新的研究领域,还探索实践了中国海洋高新技术发展与前沿基础科学研究紧密结合并相互促进的高效创新研究模式。

**关键词** 南海;海山;铁锰结核;古热液区;冷水珊瑚林

南海深海盆的海底并不平坦。实际上,南海海底地貌的主要特征之一就是分布有众多大大小小、高高低低、形态各异的海山。在南海水深大于2500 m的深海盆中,高出平坦海底200 m、坡度大于10°的海山总面积约占该深海盆总面积78万km<sup>2</sup>的1/10。这些海山,不仅是人类认识地球内部的重要窗口,也显著影响并记录了深海环流、沉积和物质运输、以及底栖生物生态的变化。尽管以往国内外已有大量针对南海海底的调查研究航次,但是由于受到调查手段分辨率的限制,人们对南海海山的实际了解相当粗略。

充分运用各种海洋高新技术手段,解剖南海这只“麻雀”,从骨(构造)、肉(沉积)和血(生物地球化学)3个不同时空尺度研究南海的生命史,是实施

“南海深部计划”的基本指导思想。为此,运用载人或遥控深潜器,针对南海海山等科学目标,在南海先后开展了7000 m水深载人深潜器“蛟龙号”首个应用性试验航次(2013年6月10日至7月11日)、搭载租借加拿大国家科学深潜中心的无人深潜器“ROPOS”的“嘉庚”号科考船遥控深潜航次(2018年4月17日至5月16日)与4500 m水深载人深潜器“深海勇士”号科考航次(2018年5月10日至5月24日、2019年7月17日至8月6日)4个深潜航次,对部分南海海山开展了局部的精细调查研究(图1),在两座海山上首次发现了大面积富集的多金属铁锰结核,在一座海山上发现了古热液活动区,还发现并基本确定了南海冷水珊瑚的存在及其分布特征。

收稿日期:2020-04-26;修回日期:2020-06-30

基金项目:国家自然科学基金南海深部计划及其重点项目(91428207)

作者简介:周怀阳,教授,研究方向为海洋地质地球化学,电子信箱:zhouhy@tongji.edu.cn

引用格式:周怀阳,朱启宽,季福武,等.南海深水海山上的新发现[J].科技导报,2020,38(18):83-88;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.013

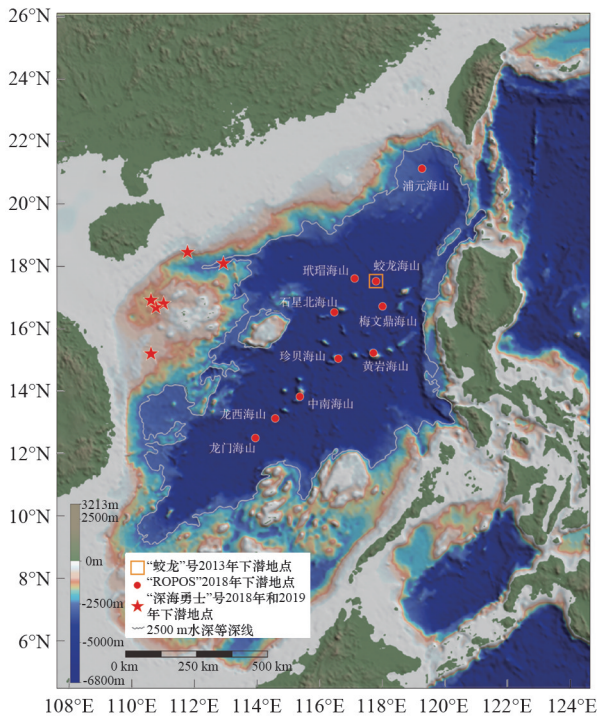


图1 南海深部计划4个下潜航次下潜观察采样地点

## 1 南海海山上高丰度大面积分布铁锰结核的发现及意义

铁锰结核(也称多金属结核)是现代海洋沉积的一种特殊产物,以极度富集铁和锰的氧化物和氢氧化物为特征。因为其中含有较高含量的具有潜在经济价值的铜、镍、钴和稀土等有用金属元素,加上其巨大的资源量,被人们当作陆地同类金属资源枯竭后潜在的替代性资源,在20世纪60—70年代,在全球范围内掀起了对大洋铁锰结核的调查研究热潮,并催生形成了《国际海洋法》,建立了现代国际海底资源的勘探开发制度<sup>[1]</sup>。中国在1991正式成立的“中国大洋矿产资源研究开发协会”,即是为了代表中国在《国际海洋法》授权成立的“国际海底管理局”申请铁锰结核的勘探合同区,体现中国在国际海底的相关权益。

在国内外以往针对南海海底的多次调查航次中,用地质拖网或其他基于海面科考船的地质采样手段,在南海海底也有采到过铁锰结核或结壳,但因当时的数据十分有限,中国国内部分专家认为这

些样品与分布在太平洋、印度洋和大西洋等世界大洋的海底铁锰结核不同,甚至不能被称为普遍意义上的铁锰结核。一直萦绕在大家心中最关键的问题是,根据对世界大洋铁锰结核100多年以来的研究,一般认为,在众多影响铁锰结核生长或赋存的因素中,出现铁锰结核的区域沉积速率较低是最主要的影响因素之一,作为大陆边缘海的南海,其沉积速率比大洋的要高2~3个数量级,在南海怎么会出现铁锰结核?或者是这些铁锰结核究竟分布在南海海底具体什么位置?到底有多少铁锰结核?

于2013年6月在南海执行南海深部计划航次任务的深潜航次是中国自主研发的7000 m载人深潜器“蛟龙”号工程试验成功之后的首个应用性试验航次。蛟龙海山很小很深,在“蛟龙”号下潜之前尚是一座无名小海山。该海山仅高出周围4000 m,水深海盆海底约500~600 m,由呈东北—西南向排列的一高一低两个小山头构成,西南方向上较高山头的水平直径也只有约5 km。“蛟龙”号在蛟龙海山及其周围一共开展了4次下潜,在蛟龙海山3500 m水深的主峰破火山口峡口和3300 m水深的山顶阶地及其附近发现有大量成片分布的铁锰结核(图2)。这些铁锰结核大多呈圆形或椭圆形、直径为6~15 cm不等,赋存于沉积物上面,结核表面可见微薄层或零星沉积物。结核覆盖率达30%~50%,完全可与太平洋多金属结核潜在资源区的结核高丰度值相媲美。蛟龙海山次峰及外围4000 m水深的海盆里不存在结核。2018年“ROPOS”遥控



注:左上插图是ROPOS遥控机器人的机械手操作网兜进行结核采样的近照,土黄色部分为海洋正常沉积物

图2 蛟龙海山上成片密集分布的铁锰结核

深潜航次期间,在蛟龙海山上又开展了2次下潜,基本摸清了铁锰结核在蛟龙海山主峰破火山口峡口和山顶附近的分布边界,蛟龙海山上铁锰结核密集分布的范围大约有50万 $\text{m}^2$ 。2018年“ROPOS”遥控深潜航次期间还访问了南海海盆中的其他9座海山,发现在“蛟龙”西面的“玳瑁”海山上1700 m左右水深处约1500 m长的范围内有大片密集分布的铁锰结核出现。“ROPOS”访问过的其他海山路线上没有见到结核或只见到有零星分布的结核。

总的来说,南海海山上的结核均主要为水成成因结核,即围绕核心十分缓慢地生长形成结核的成矿物质直接来源于上覆海水。南海结核的含锰矿物组成主要为水羟锰矿,结核内碎屑物质(Al、Si等组分)含量较高。南海结核主要成矿元素(Fe、Mn、Co、Ni等)含量介于世界上其他大洋和边缘海的铁锰结核含量之间。值得注意的是,南海结核中Th、Pb、Ce元素明显高于其他海区,稀土元素也高于除菲律宾海外的其他海区。初步研究还表明,南海海山结核的生长速率也接近深海大洋海山基岩上的水成型结壳(1.95~4.41 mm/Ma)。

尽管对铁锰结核的研究已经有100多年的历史,但有关铁锰结核的形成机制及其分布等方面的一些根本问题至今仍未得到真正解决。相对东太平洋CC区大面积分布的结核或西太平洋海山上的铁锰结核来说,南海海山结核的存在,除有一定的潜在金属资源价值和生长环境记录意义之外,更重要的是,让人们可以像解剖麻雀一样,为这些关键问题的解决提供一个难得的机会。同时,本项发现也为中国正在研发中的深海铁锰结核开采设备提供了离中国本土最近、水深较浅的绝佳海试地点。

## 2 南海龙西海山“南溟”古热液区的发现及初步研究

以热液沉淀物(烟囱、丘体等)和热液羽流等为标志的现代海底热液活动的发现和研究的20世纪下半叶海底科学最重要的研究进展之一。海底热液活动的研究对地球内外能量和物质循环、生命起

源和深部生物圈、金属资源勘探等方面都有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。尽管南海海底已经不存在现代意义上的火山活动,但因为南海深海盆海底及海山基本上都是由深部岩浆喷发冷凝形成的火山岩构成,在南海海底及海山上应该曾经发生过大量由深部岩浆或其他热源驱动形成的热液活动,而且,这些热液活动也应该是南海海底形成过程的重要组成部分之一,然而,在南海深部计划执行之前,还没有发现有南海海底热液活动的报道。

在2018年南海“ROPOS”遥控深潜航次中,于5月1日在南海古扩张中心附近的龙西海山的顶部(水深2900~3000 m左右)发现了“南溟”古热液区(图3)。在观察到的长约700 m的范围内密集出现了至少16个形态多样的热液沉淀物丘体。这些丘体都高出海底火山岩基岩或者基岩上薄层沉积物一定的高度,大多数丘体呈圆丘状或不规则圆丘状,最大的热液沉淀物丘体高约1 m、水平直径有几十厘米至一米多,少数丘体呈破碎的长条形,像风化倒坍的烟囱。

采集到的热液丘样品都呈现出低温( $<120^{\circ}\text{C}$ )热液沉积的特征,主要为Fe-Si氧化物和氢氧化物组合的无定形矿物或矿物集合体(图4)。一般认为,这些Fe-Si组合构成的丝缕状结构形态与不同习性的热液铁氧化物菌的代谢活动有关。此外,局部样品还含有较多的 $10\text{\AA}$  锰酸盐矿物(钡镁锰矿)和以Fe-Si为主要成分呈小薄片状的热液成因绿脱石。通过U-Th(3个样品)和 $^{14}\text{C}$ (4个样品)两种方法,获得“南溟”热液沉淀物的年龄大致为5200—14300 a。“南溟”热液丘上很薄的水成型铁锰结壳盖层以及局部热液沉淀物中非常高的磷含量似乎也支持这个测年结果,即“南溟”热液区的热液活动较为年轻、热液活动历时也较长。在南海针对洋壳的大洋钻探已经证实,约16 Ma之前,南海岩浆活动形成的洋壳已停止扩张,在“南溟”热液区这么年轻的热液活动同位素年龄、这么大范围分布的热液沉淀物丘,不仅说明在古扩张中心的龙西海山的形成年龄可能比较年轻,而且意味着,此处有比较长时间的火山岩浆活动或者海底深部的异常热供应维持了相当长的时间。

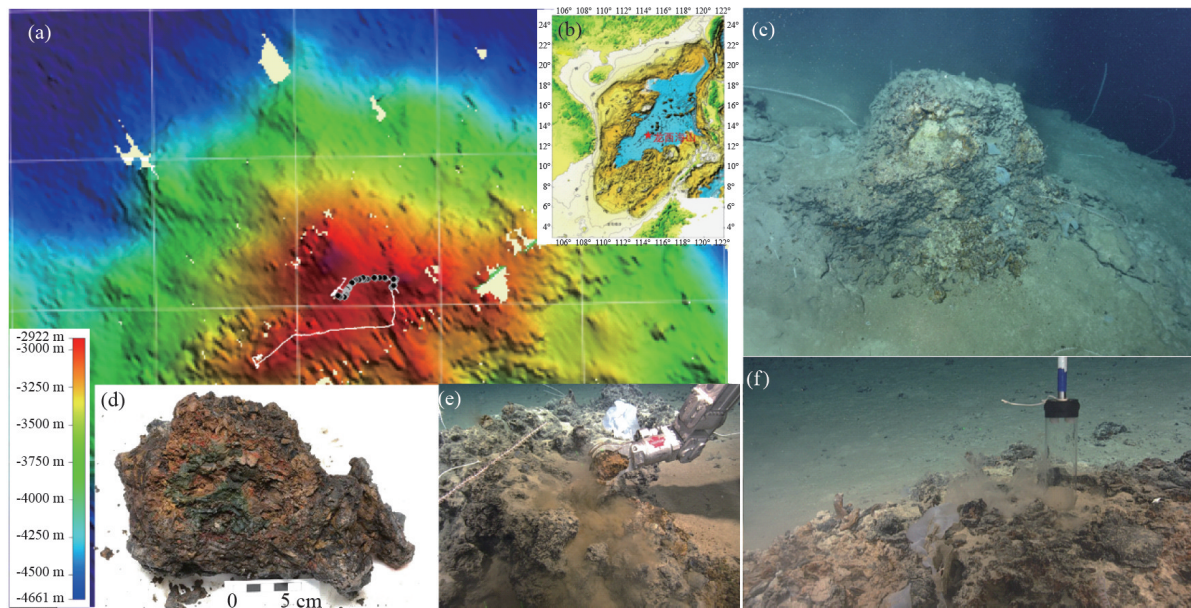
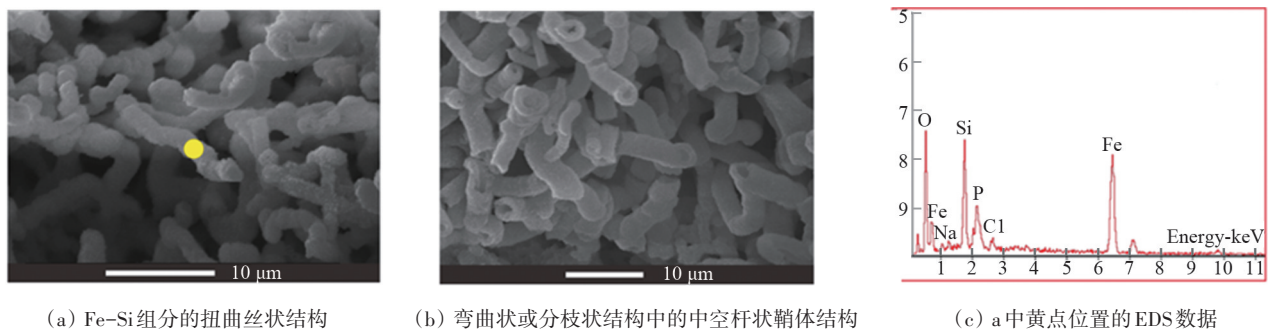


图3 南海龙西海山“南溟”热液区位置、热液沉淀物丘形态、采样及样品照片  
(a) 龙西海山山顶(水深3019 m)的“南溟”热液区(长度>700 m)中的热液丘(黑点),白线为ROV航迹;(b) 龙西海山及其“南溟”热液区(红星)在南海的位置;(c) 一个热液丘的形态(白黄色为已经采过样部分);(d) 热液样品照片;(e) ROV机械手在一个热液丘上采样;(f) ROV机械手采短柱状热液沉淀物样品

图3 南海龙西海山“南溟”热液区位置、热液沉淀物丘形态、采样及样品照片



(a) Fe-Si组分的扭曲丝状结构

(b) 弯曲状或分枝状结构中的中空杆状鞘体结构

(c) a中黄点位置的EDS数据

图4 “南溟”热液区低温热液沉淀物的SEM及EDS分析结果

在龙西海山的发现,可能只是南海热液活动的冰山一角,不仅在龙西海山上,还有因为航次时间限制或者已被沉积物掩埋,而没能观测到的其他热液丘或热液烟囱以及高温的热液硫化物存在,在南海的其他海山上,也应该能够发现更多不同特征和活动时间热液活动产物。对南海热液活动的持续调查与研究,将为全面认识南海海盆的形成历史和物质循环机制、认识边缘海深部生物圈和地幔性质等揭开新的华章。

### 3 南海冷水珊瑚林生态系统的发现

冷水珊瑚不仅是一个重要的深海生态系统,还是中-深层海水环境变迁良好的记录载体<sup>[3]</sup>。2018年,利用“ROPOS”遥控深潜器和“深海勇士”号载人深潜器,首次在南海发现规模生长的冷水珊瑚生态系(图5)。2019年,“深海勇士”号载人深潜器航次又在西沙海域的冷水珊瑚林开展了系统的研究。

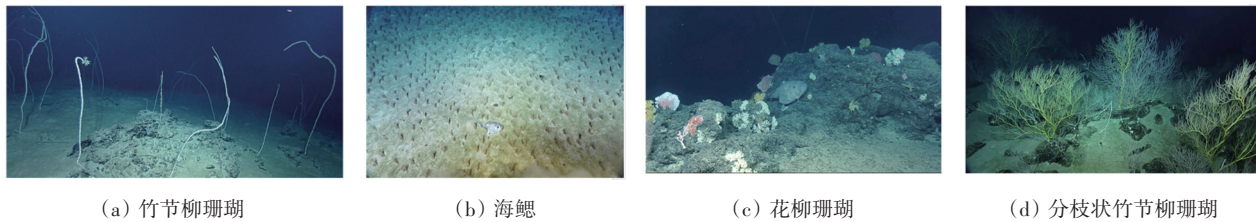


图5 “ROPOS”遥控潜器和“深海勇士”号载人潜器拍摄的南海冷水珊瑚种属

南海冷水珊瑚主要发育在 800~1800 m 上下的中深水区,在 3000~3700 m 水深的海山上也有发现。珊瑚固着在裸露的基岩上,通过滤食海水中的有机物颗粒(例如“海雪”)为生。观测发现,冷水珊瑚群就像深海的园林区,南海珊瑚林生长密度较高,100 m<sup>2</sup> 面积内发现的珊瑚有 20~140 株,部分站位甚至可以达到 180 株。南海的冷水珊瑚以软珊瑚目中的竹节柳珊瑚、丑柳珊瑚和花柳珊瑚为主,也包括部分石珊瑚目品种。高大的竹珊瑚像树木,大部分长度在 1~2 m,部分拉直长度甚至超过 5 m。低矮的扇珊瑚和海绵之类像灌木,而贴在海底的海绵、苔藓虫相当于草本植物。这个园林为游泳和爬行的海洋动物包括章鱼、海星等提供了栖居地,就像陆地树林是鸟兽的家园一样<sup>[4]</sup>。南海冷水珊瑚生态系统的研究将为人们深入认识海洋生物泵和深海碳循环及其历史演化开辟一个崭新的领域。

受航次时间和深潜器行进速度的限制,在深潜器已到过的大多数海山上,实际观测和采样的路线一般只有不到 10 km 的一条。在完全黑暗的深海中,海水对可见光的吸收十分强烈,现有深潜器上的灯光仅能看清深潜器前方和左右一二十米远的物体。也就是说,科学家至今的发现仅仅揭开了南海神秘面纱的一隅,还有许多的海山和地方等待着

人类目光的触及。运用深潜器等新技术对南海海底的新发现再次证谬了“对南海海底的了解已差不多”的论调。

感谢下潜航次的组织和支持单位(同济大学、中国大洋矿产资源研究开发协会、原国家海洋局北海分局、中国科学院三亚深海科学与技术研究所、厦门大学等)、参加航次全体人员的共同努力及汪品先院士的悉心指导;辛仁杰帮助绘制图 1,李建如帮助确定图 5 冷水珊瑚的种属。

#### 参考文献 (References)

- [1] Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 158-169.
- [2] Tagliabue A, Bopp L, Dutay J, et al. Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 252-256.
- [3] 汪品先. 深水珊瑚林[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(12): 1222-1233.
- [4] Li J R, Wang P X. Discovery of deep-water bamboo coral forest in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 15453.

## Discoveries about seamounts in deep basin of South China Sea

ZHOU Huaiyang, ZHU Qikuan, JI Fuwu, YANG Qunhui

School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract** In the South China Sea, about one tenth of the deep basin area with water depth more than 2500 m is occupied by various seamounts. Supported by the NSFC program “Deep Water in South China Sea”, more than ten seamounts were explored for the first time by four dive cruises with the HOV and the ROV from 2013 to 2019, respectively. Among the achievements in these cruises, three exciting discoveries are made, including two large ferromanganese nodule fields, the fossil hydrothermal field and the extensive deep-water coral forests. The two large ferromanganese nodule fields are on two seamounts, the Jiaolong seamount of about 3500 m deep and the Taimao seamount of 1700 m in water depth, respectively. The size of a ferromanganese nodule field on the top of the Jiaolong seamount is about 500000 m<sup>2</sup> with a nodule coverage from 30% to 50%. Nearly all nodules are hydrogenetic in their origin. Besides the exceptionally high Th, Pb, Ce contents, the contents of potential economic valued elements Mn, Cu, Co, Ni etc. are found between open oceans and other marginal seas. The fossil hydrothermal field is named the “Nanming”, with at least 16 extinct hydrothermal mounds along a 700m long diving survey track on the top of the Longxi seamount (about 3019 m in water depth) close to the residue spreading ridge of the South China Sea. Preliminary studies show that the low-temperature hydrothermal precipitates (mainly Fe-Si-Mn-P assemblages) are of a young age from about 5200 years BP to 14300 years BP, similar to the age of the active magmatism in the area. The fascinated deep-water corals or coral forests are discovered to live extensively on the seamounts over the South China Sea, mainly at the water depth from 800m to 1800m. There are also some corals growing on seamounts as deep as in water depth from 3000 m to 3700 m. All these discoveries shed a new light for us to understand the mechanism of the South China Sea system from earth interior to exosphere in multiple scales.

**Keywords** South China Sea; seamount; ferromanganese nodule; fossil hydrothermal field; deep-water coral forest ●



(责任编辑 祝叶华)