

· 专题:双清论坛“全球海洋治理与合作的关键科学问题” ·

国际治理背景下北极海底科学探索的进展与展望*

李家彪^{1,2**} 冷疏影^{3,4} 张亮³ 丁巍伟^{1,2} 张涛^{1,2}

1. 自然资源部第二海洋研究所,杭州 310012
2. 自然资源部海底科学重点实验室,杭州 310012
3. 国家自然科学基金委员会地球科学部,北京 100085
4. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

[摘要] 北极是全球海洋国际治理中的新焦点和“新疆域”。北极的海底科学探索具有显著的敏感性和更高的技术门槛,呈现出国家需求、科学目标和装备技术高度融合的特点。在极地治理和外大陆架划界等需求的强烈刺激下,环北极国家和利益攸关国开展了广泛的科学调查和国际合作,突破冰下地震探测、冰区热液探测和冰区钻探等系列技术瓶颈,实施了多个大型海底探测与调查计划,在超慢速洋中脊深部动力机制、多圈层相互作用的热液过程与特殊生境、全球气候变化等一系列前沿基础科学问题上取得了突破性认识。作为近北极国家,我国近年来大力开展北冰洋海底科考,主导了北冰洋洋中脊国际联合考察计划(JASMINe),分别执行了JASMINe和JASMINe-2航次,并积极参与北冰洋水深图国际绘图计划(IBCAO)等国际计划,贡献科学知识和参与北极海洋治理。本文从执行背景、技术创新、重要科学认知以及对国际治理的影响等方面梳理了北冰洋主要大型海底科考计划,并对后续北冰洋海底科考的发展趋势进行了分析和展望。

[关键词] 北极治理;北冰洋;冰区海底探测;国际合作

随着全球气候变暖和人类开发利用能力的提升,极地已成为全球海洋国际治理的新焦点。北极作为海上贸易的新通道、自然资源的新产地和大国战略布局的新空间,正日益受到国际社会的关注。同时,北极极端的环境和特殊的地理位置使其成为人类活动的“新疆域”和科学研究“向极端条件迈进”的天然实验室,其科研活动因此具有高度的敏感性和超高的技术门槛。

北极海底的外大陆架划界攸关各国利益,是国际治理的重要客体。北极海底是地球系统科学多圈层相互作用的重要组成部分,蕴含诸多根本性的科学问题。由于需要在海底锚碇甚至深入海底,冰区海底的调查和研究尤为困难,需要更高的技术门槛、大规模的协同作业以及广泛的国际合作。这使得北极海底的研究呈现出国家需求、科学目标和装备技



李家彪 中国工程院院士,曾任国际标准化组织海洋技术专业委员会创始主席、自然资源部第二海洋研究所所长等。长期从事海底科学与探测技术研究,在北极海底深部探测、大陆架划界和大洋矿产勘查方面做出重要贡献,发起联合国“海洋十年”国际大科学计划。在*Nature*等期刊发表SCI论文135篇,出版专著7部,授权国际、国内发明专利18项,主持国家标准13项。曾获国家科技进步奖、何梁何利基金科学与技术进步奖、ISO卓越贡献奖等奖项。

术高度融合的特点,主要通过大型科学计划的形式开展,以集中力量形成突破式的技术和科学进步(图1)。本文梳理和总结了近年来北极大型海底科学计划的背景、技术创新、重要科学认知以及对国际治理的影响,并在此基础上,进一步分析北极冰区海底科学调查研究的主要发展趋势。

收稿日期:2024-12-07;修回日期:2024-12-20

* 本文根据国家自然科学基金委员会第366期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: jbli@sio.org.cn

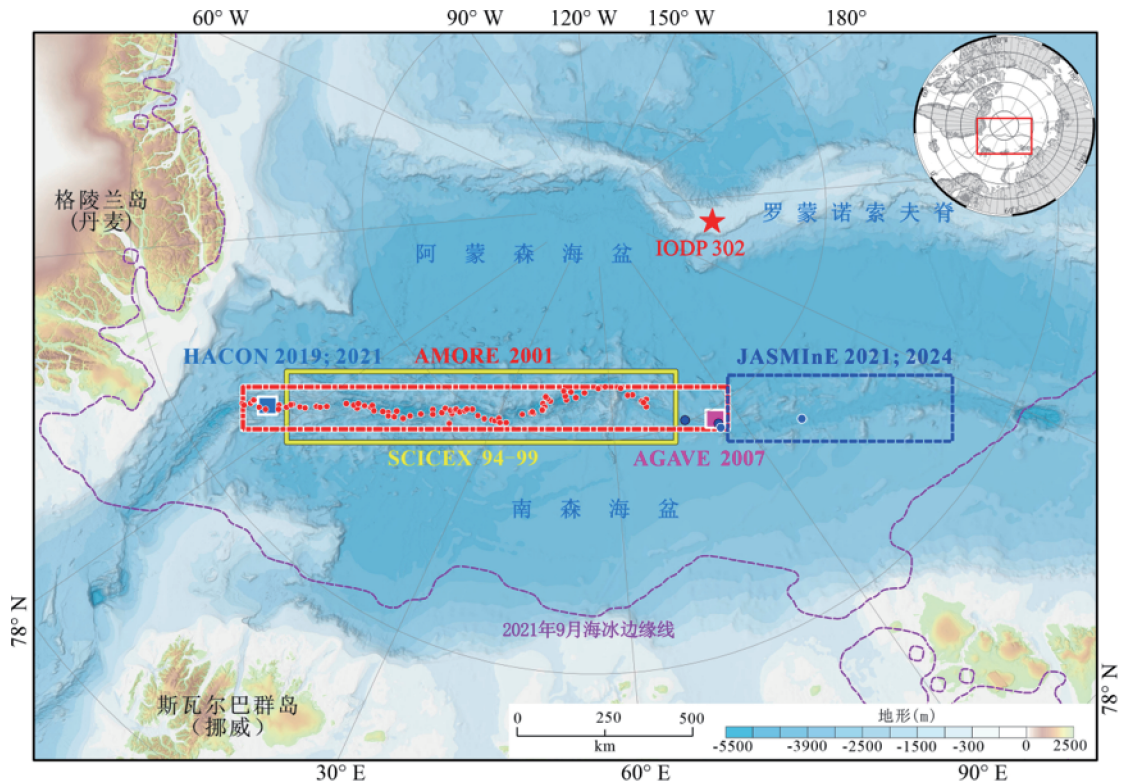


图 1 北冰洋地形图及其主体欧亚海盆的主要大型海底科学计划。黄色实线框为 SCICEX 调查范围^[1]；红色虚线框为 AMORE 调查范围^[2]；蓝色虚线框为 JASMinE 调查范围^[3]；粉色正方形点为 AGAVE 调查区域^[4]；蓝色正方形点为 HACON 调查区域^[5]；科学计划名称后为实施年份；圆点为岩石采样点^[6]，颜色对应科学计划的颜色。红色五角星为 IODP 302 位置^[7]。紫色虚线为 2021 年 9 月海冰边缘线^[8]。右上角红色框图为大图在全球的位置。地形数据为 IBCAO^[9]

1 北极海底科学探索的主要进展

1.1 外大陆架划界加速背景下的海底调查

根据《联合国海洋法公约》(以下简称“《公约》”)第 76 条规定,沿海国的大陆架包括其领海以外依其陆地领土的全部自然延伸,扩展到大陆边外缘的海底区域的海床和底土。如果从测算领海宽度的基线量起到大陆边的外缘的距离不到 200 海里,即扩展到 200 海里;对于超过其领海基线 200 海里的外大陆架,依据两个公式确定:(1) 每一定点上沉积岩厚度至少为从该点至大陆坡脚最短距离的 1%,或(2) 离大陆坡脚的距离不超过 60 海里。但大陆架在海床上的外部界限的各定点,不应超过从测算领海宽度的基线量起 350 海里,或不超过 2500 米等深线 100 海里^[10]。因此,在外大陆架划界过程中,海底地形、沉积地层、地质单元属性是最重要的科学支撑要素。为满足各自国家的外大陆架划界需求,俄罗斯、加拿大、美国、丹麦、挪威等环北极国家实施了多个以海底为对象的大型调查研究计划。

俄罗斯于 2005—2020 年执行了 Mega Project 北冰洋海底调查计划,在北冰洋的门捷列夫脊、罗蒙诺索夫脊、欧亚海盆等划界关键区域,开展了多波束

测深、反射地震、折射地震、岩石采样、重磁测量和浅地层剖面测量等海底调查,共获得了约 3.5 万千米测深数据、2.3 万千米多道地震测线、4000 千米折射地震测线、150 个声呐浮标数据以及大量的海底岩石样品^[11]。其中,在 2012 年的“Arktika-2012”调查航次中,首次利用配备了高分辨率浅地层剖面仪、侧扫声呐和电视摄像机的载人潜水器在门捷列夫脊完成了海底岩石露头区的地形地貌和地层调查,并使用抓取器、管状取样器、海底钻机以及潜艇的机械臂进行了岩心取样^[12]。通过对岩石样品进行分析,发现它们主要是以古生代的沉积岩为主,并且这些露头剖面被早白垩世(110—115 Ma)的玄武岩岩墙所贯穿^[12,13],表明门捷列夫脊的陆壳基地经历了强烈构造伸展作用和岩浆作用(表 1)。

在 2006—2016 年期间,加拿大联合丹麦、美国和挪威等国家在罗蒙诺索夫脊、阿尔法脊和加拿大海盆等划界关键区域,获得了超过 3.2 万千米的多道反射地震数据^[14]、1.8 万千米的折射地震数据、9 万千米的多波束测深、浅剖和船载重力数据、80 万平方千米的航空重力和磁力数据以及 800 千克的岩石样本^[15],其中航空重磁测量平台使用具有长航程和低速度特性的 DC3 Basler 飞机。空间重力异常

数据揭示了罗蒙诺索夫脊、埃尔斯米尔和林肯海大陆架以及阿尔法脊之间的一致地壳结构,被认为是晚白垩世(80 Ma)区域性伸展的证据,是大西洋和拉布拉多海扩张系统向北延伸的结果^[16]。根据地震数据的分析,发现加拿大海盆由伸展减薄的陆壳、过渡地壳和沿着古洋中脊对称分布的洋壳组成^[17],表明加拿大海盆是一个完整发育的洋盆,为美亚海盆的打开方式提供了关键证据。

在2001—2012年间,美国利用其海岸警卫队的破冰船“希利(Healy)”号在欧亚海盆、加拿大海盆、楚科奇边缘地等划界关键区域至少实施了13个航次,调查以多波束测深为主,并辅以地震、重力、浅剖测量以及岩石取样等,共获得1.3万千米多道地震测线、35万平方千米多波束地形数据、17个站位岩石拖网样品和12个站位柱状沉积物样^[18]。综合地质和地球物理数据的分析,发现加拿大海盆及其邻区存在三个近平行的北东向构造,反映了加拿大海盆的起源、演化过程中走滑作用的重要性^[19],进而提出了加拿大海盆的两阶段打开模型。根据岩石采

样数据的分析,发现楚科奇边缘地的基底与西斯瓦尔巴群岛的基底相似,表明楚科奇边缘地在白垩纪时期的位置应更接近罗蒙诺索夫脊和埃尔斯米尔岛^[20]。此外,基于多道地震数据的分析,认为楚科奇边缘地的西南部为陆缘裂谷,裂谷活动发生在中侏罗世—早白垩世之间^[21]。

基于上述调查,21世纪初,环北冰洋的《公约》缔约国纷纷提交了针对北冰洋的外大陆架划界提案(图2)。俄罗斯于2001年首次提出了北冰洋外大陆架划界提案,后经4次修订,在2023年提交的修订提案中提出了超过166万平方千米的外大陆架主张区^[22]。2006年,挪威提交了1.3万平方千米的外大陆架申请区并获得了大陆架界限委员会的审议通过^[23]。2014年,丹麦提交了涵盖几乎整个罗蒙诺索夫脊的格陵兰岛外大陆架划界提案^[24],主张区面积超过86.9万平方千米。2019年,加拿大提交了针对北冰洋的外大陆架划界提案^[25],主张区面积超过187.4万平方千米。2023年,非《公约》缔约国的美国也公布了阿拉斯加北部的的外大陆架区域^[26],主张

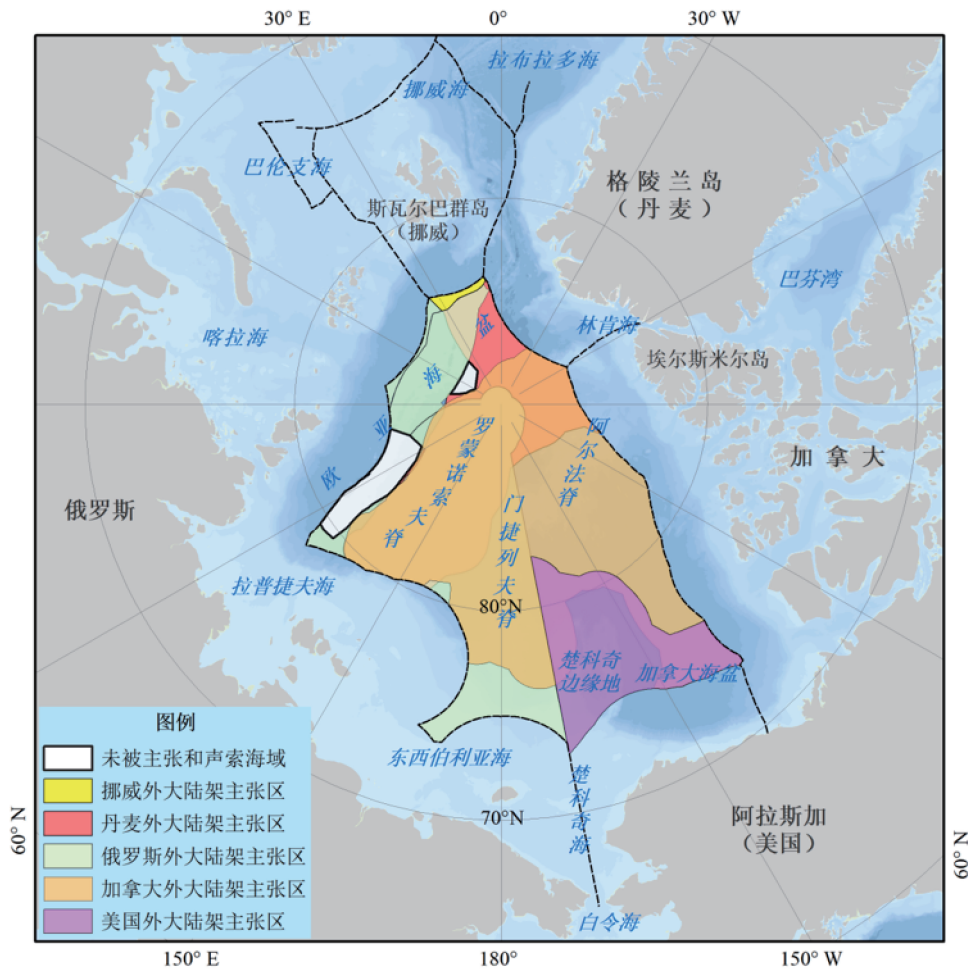


图2 北冰洋外大陆架主张区分布图。虚线为专属经济区,实线为不同国家主张的划界边界。地形数据来自 IBCAO^[9],大陆架划界信息来自[21-25],不同颜色区域表示不同国家的主张区

面积超过 51.6 万平方千米。上述环北冰洋五国主张声索的面积超过了北冰洋专属经济区以外国际水域面积的 95%。整个北冰洋仅有约 1% (11.3 万平方千米) 的面积未被主张和声索, 主要位于欧亚海盆加克洋中脊。

1.2 针对超慢速洋中脊动力过程的海底深部探测

北冰洋加克洋中脊是世界上扩张速率最慢的洋中脊, 具有独特的岩浆、构造特征及地球动力学机制^[26, 27]。由于加克洋中脊位于高纬区域 (81°—87°N), 海冰覆盖率高 (密集度 > 80%), 这一区域的海底探测更加依赖先进的冰下海底探测平台、技术和作业方法。前人通过采用冰下核动力潜艇作业、双破冰船破冰作业、冰下设备的精准定位等方式, 在加克洋中脊地形地貌、海底火山活动和壳幔深部结构等方面取得了重大突破^[1, 2, 28-31]。

为了避免北冰洋密集海冰、恶劣天气条件对水面船基科考的影响, 发挥核动力潜艇作业区域不受限和长航时的优势, 美国海军和海洋研究机构在 1994 年发起了利用核动力潜艇的科学冰原演习计划 (Science Ice Exercise, SCICEX), 获取了北冰洋海冰、水文、地形、重力等综合测量数据 (表 1)。该计划为核动力潜艇配备了海底测绘吊舱、重力仪等海底探测设备。其中海底测绘吊舱专门用于绘制三维海底地形图, 主要由条带测深侧扫声呐、高分辨率海底剖面仪和数据采集与质量控制系统三部分组成。该计划首次测绘了加克洋中脊区域的高精度海底地形, 并为 IBCAO 计划提供了大量有价值的数^[1]。

1999 年底, 美国具备强大破冰能力的“希利”号

科考破冰船服役。在 2001 年“希利”号的首个科学航次中, 美国和德国发起了由“希利”号和“极星 (Polarstern)”号联合执行的北冰洋洋中脊考察计划 (Arctic Mid-Ocean Ridge Expedition, AMORE), 对加克洋中脊开展了地质和地球物理等多学科的综合海底探测。该计划首次利用双船作业方式开展了地震调查, 其中“希利”号负责在前进行航道破冰, “极星”号在后负责拖曳气枪和拖缆, 并使用声呐浮标作为地震信号检波器; 为了监测地震活动性, 将地震仪置于浮冰上开展了冰上地震调查; 同时, 利用带摄像机的深海拖体等设备对海底热液喷口进行了探测。该计划发现加克洋中脊之下的地幔整体上仅经受了较低程度的部分熔融^[28], 可能具有较低的地幔温度^[2]; 岩浆活动与扩张速率之间不存在任何直接的岩石学上的相关性, 岩石圈顶部的冷却并非决定洋中脊处地壳厚度的最重要因素^[2, 28-30]; 首次发现了加克洋中脊热液喷发的证据^[31], 也促成了此后 Aurora 热液喷口的发现。

2021 年, 中国发起并主导了 JASMIInE 计划, 俄罗斯、美国、德国、法国、挪威、加拿大等国家参与, 在加克洋中脊开展大规模海底综合地质地球物理探测, 聚焦于洋壳结构、热液系统等前沿科学问题。该计划由“雪龙 2”号于 2021 年和 2024 年分别执行了 JASMIInE 和 JASMIInE-2 航次, 主要开展了海底主动/被动源地震、海底大地电磁、电视抓斗取样和光学拖体观测、水下自治机器人 (AUV) 近海底调查等综合性海底探测 (图 3, 表 1)。该计划创新性地使用



图 3 我国主导的北冰洋洋中脊国际联合考察 (JASMIInE) 计划作业模式图; OBEM 为海底电磁仪

了“伪双船”主动源地震调查技术,即单船先沿测线破冰并布放海底地震仪(OBS),再折返破冰并进行放炮接收作业;首次通过对OBS加装超短基线信标、短基线和多点定位技术实现冰下OBS精准定位,提高了密集冰区的回收效率,使得大规模开展海底地震和电磁等台站观测成为可能^[3]。通过JASMIInE航次,首次证明了超慢速扩张洋中脊岩浆整体超强变化、局部异常丰富的活动特征,极大丰富和完善了全球洋中脊动力演化理论^[32];JASMIInE-2航次的研究成果正在整理发表中。

1.3 针对特殊生境和多圈层相互作用的海底热液探测

北冰洋的海底热液活动主要集中在洋中脊区域,在硫化物矿产、深部壳幔与底层海水的热量和物质交换、特有生物群落和生态环境方面均具有重要意义。目前,在全球开阔大洋已开展了大量海底热液探测和取样,发现了超过400处海底热液活动区。不同于开阔大洋,北冰洋海底热液探测受海冰覆盖和调查船随海冰漂移的影响,冰下无人遥控潜器(ROV)和光学探测拖体难以对热液喷口这种小型目标实现精确过顶拍摄和取样。尽管加克洋中脊显示了大量热液羽流异常,但目前仅在加克洋中脊最西端发现了1处热液活动区^[31](Aurora热液区,图4a、4c)。近年来,随着国际上多个北极大规模海底热液探测计划的实施,冰下AUV和“子母式”ROV等技术取得了重大突破,大幅提升了极地冰下海底热液探测能力,并发现了多个深海生物群落。

加克洋中脊的海底热液探测始于2001年的AMORE计划,该航次对洋中脊西段(8°W—85°E)长约1100千米的区域开展了大范围海底热液探测

(图1)。通过在岩石拖网、温盐深剖面仪(CTD)以及电视抓斗上部部署新型自动羽流记录仪(MAPRs),在加克洋中脊西段成功识别出多达12个分散的热液异常区(图4a)。在成功部署的145个MAPRs中有119个显示出浊度异常(占82%),并且有58个显示了浊度和温度相吻合的双异常,异常频率显著高于同时期全球其他洋中脊区域,首次证明了加克洋中脊具有丰富的热液活动^[31]。此外,在加克洋中脊最西端的水柱剖面异常处(82°53'N,6°15'W),拖网还获取了新鲜的硫化物烟囱样品,水下摄像拖体也观测到了水柱浊度异常和丰富的生物活动,相关证据均间接证明了该区域热液活动的存在,为加克洋中脊首个热液喷口(Aurora热液区)的发现奠定了基础(表1)。

2007年,作为国际极地年项目的一部分,美国、瑞典、日本和德国科学家联合发起了北极加克洋中脊热液喷口考察计划(The Arctic Gakkel Vents Expedition, AGAVE,图1,表1)。该航次将海底科学研究与冰下潜器试验互补性地结合在一起。利用Oden破冰船搭载两款深水AUV(其中,PUMA号AUV负责热液羽流探测;JAGUAR号AUV负责地形、磁力测量以及影像拍摄)和一款冰下摄像与取样平台(CAMPER)(负责高分辨率摄像与取样),在加克洋中脊热液喷口附近开展地质、化学和生物调查。两款AUV均针对冰下探测特别打造,包含了上下两个舱体,顶部舱体提供浮力,底部舱体负责重载。这种设计方案保证了AUV具有较高的稳心高度,使其在冰下探测时拥有更好的稳定性。此航次在加克洋中脊85°E区域发现了Oden火山,并在该区域探测到两个不同深度的热液羽流异常,推测可

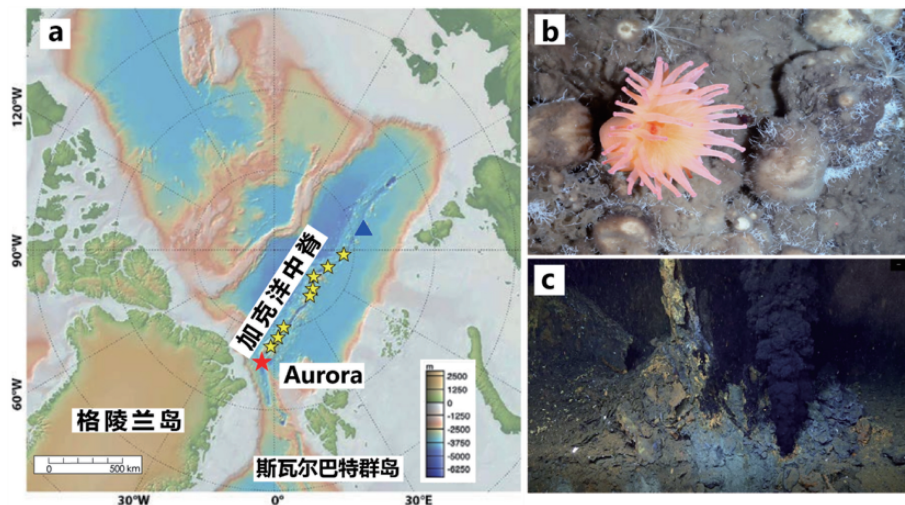


图4 (a) 黄色五角星为加克洋中脊热液水柱异常,红色五角星为Aurora热液区(根据[33]修改);(b) 加克洋中脊海山上“海绵花园”大型生物群落,位于图(a)中蓝色三角形位置;(c) Aurora热液活动区黑烟囱^[33]

能分别由高温热液喷口和低温弥散流产生。同时, 85°E 火山脊上还发现了罕见的深海爆炸式火山活动, 指示了大规模火山碎屑喷发可能在全球洋中脊火山系统中普遍发生, 并支持超慢速扩张洋中脊拥有独特的地壳增生和构造伸展模式^[4,33]。

2019 年, 挪威、美国、德国和葡萄牙科学家共同发起了海冰覆盖下的热液喷口航次(The Hot Vents in an Ice-Covered Ocean, HACON), 该航次作为 FRINATEK HACON 计划的重要组成部分, 旨在围绕 Aurora 热液区黑烟囱生态系统开展多学科调查, 研究北冰洋在全球洋盆生物连通性以及生物地理分布中的作用^[5]。航次利用挪威 Kronprins Haakon 破冰船布放阿尔弗雷德·魏格纳研究所(AWD)的海底观测和测深系统(OFOBS), 证实 Aurora 热液区至少有三个黑烟囱被稀疏的软体动物和双壳类群落占据^[5]。然而, 由于技术故障, 伍兹霍尔海洋研究所的混合型遥控潜水器/自主水下航行器(NUD)未能到达 Aurora 热液区进行样本采集。2021 年, HACON 航次再次利用 Kronprins Haakon 破冰船重返 Aurora 热液区, 即 HACON21 航次^[34]。该航次也是联合国海洋科学促进可持续发展十年(以下简称“海洋十年”)“挑战者 150”计划的一部分, 计划在 Aurora 热液区开展首次 ROV 调查, 采集地质、地球化学、物理海洋学、微生物学等样品和数据。除常规采样装备(CTD、多管、重力取样器)外, 船上还特别配备了 REV Ocean 公司的“子母式”ROV^[34]。潜器通过调查船月池下放至冰下 100 米处后, 自动释放 Aurora ROV 前往热液喷口进行拍摄和取样。该技术不仅避免了 ROV 和光学拖缆与海冰的碰撞接触, 而且最大限度地利用了 ROV 的冰下作业时间, 是极地冰下热液探测技术和潜器操作的重大突破。通过该项技术, 航次对 Aurora 热液区进行了全面调查, 获得了大量新的数据和样本, 实现了北极冰下深海热液喷口的首次 ROV 调查和采样(表 1)。

2023 年, 德国“极星”号执行了 PS138 航次, 该航次利用 OFOBS 系统在加克洋中脊开展深海拖体观测, 旨在寻找热液喷口和极端环境下的生物分布特征。OFOBS 系统通过光纤电缆与破冰船连接, 作业深度可达 6 000 米, 集成了拍摄影像和视频的摄像系统、条带宽度达 100 米的侧扫测深系统和具备避障功能的前视声呐系统^[35]。利用该系统发现了北冰洋最深的“海绵花园”: 在加克洋中脊附近的海山, 直径达 50 厘米的棕色海绵广泛分布于水深 1 500 米

至 2 000 米的区域(图 4b)。该航次极大促进了对加克洋中脊深海极端环境下的底栖生物量和生态特征的认识。

与 HACON21 航次同年, 中国牵头实施了 JASMINe 计划, 利用“雪龙 2”号破冰船在观测资料匮乏的加克洋中脊东段实施热液探测(图 1), 探究热液形成驱动机制和极端环境下热液生物地理分布效应等关键科学问题。航次配置了大量用于热液探测的先进装备, 包括热液羽流探测传感器、深海智能光学探测系统、“探索 4500”AUV 和电视抓斗^[3]。航次共完成 14 条水柱剖面、10 条近底光学调查测线、2 个 AUV 探测潜次, 取得了约 600 千克的岩石和 5.8 米长的沉积物岩心等样品。首次在加克洋中脊东段取得大量地质样品和影像资料, 并发现 85°E 区域的 Jessica 火山与 Duque 火山之间存在明显的局部地磁异常, 可能与热液活动导致的热退磁或洋壳蚀变有关。同时, 调查资料显示了北冰洋加克洋中脊热液系统具有异常范围大、信号强和生物匮乏的独特特征。航次取得的成果和认识促成了我国首个极地领域的联合国“海洋十年”项目“多圈层动力过程及其环境响应的北极深部观测”(ADOMIC)的立项。

1.4 全球气候变化背景下的大洋钻探与古海洋研究

综合大洋钻探计划(Integrated Ocean Drilling Program, IODP) 302 航次, 也称为北极钻探航次(Arctic Coring Expedition, ACEX), 是北冰洋中央区第一个 IODP 钻探航次, 也是北冰洋目前唯一的密集冰区的大洋深钻(表 1)。该计划于 2004 年夏季完成, 钻探站位位于距北极点约 250 公里的罗蒙诺索夫脊上(图 1), 其主要科学目标是确定北冰洋中央区在古近纪之后的古环境变化, 并揭示其在全球气候演变中的作用, 同时获取欧亚海盆早期构造演化信息^[7]。

在技术层面, 与其他非极区的深海/大洋钻探计划不同, IODP 302 航次首次使用了一种全新的多船协作模式来完成在北冰洋重冰区的海底钻探。它使用了三艘船, 其中 Vidar Viking 号是钻探船, 另外两艘是破冰船 Oden 号和 Sovetskiy Soyuz 号(图 5)。Sovetskiy Soyuz 号核动力破冰船在最外围, 在海冰漂流方向的上游将整块的大冰破碎为小块浮冰, Oden 号破冰船在钻探船附近进行转圈破冰和清冰, 以保障 Vidar Viking 号的钻探工作^[7]。

通过对采集岩芯的分析, 并结合区域地质地球物理数据, 该航次取得了许多重要科学发现, 如在古

新世—始新世极热事件(PETM)期间北冰洋表层的高水温、始新世时期更淡的北极海水、最老可到始新世中期的冰筏碎屑、始新世中期富含有机碳的环境以及早、中中新世交界处北冰洋通过弗拉姆海峡向北大西洋的通风等^[36]。

IODP 302 的研究成果为科学家们了解北冰洋的古气候变化,更好地预测未来的气候变化趋势以及制定应对气候变化的政策提供了科学依据。此外,该项目首创的三船作业模式也对类似的重冰区钻探和其他海底作业具有借鉴意义。

除了深海钻探之外,北冰洋也有一些基于用活塞柱、重力柱等设备获取的浅表段沉积物岩芯来进行古气候、古海洋学研究的重要国际合作计划,其中2005年的希利—奥登穿越北冰洋航次(Healy-Oden Trans-Arctic Expedition, HOTRAX'05)是第一个以古气候、古海洋学研究为主的穿越北冰洋的科考航次。HOTRAX'05 依托美国破冰船“希利”号和瑞典破冰船 Oden 号,从整个北冰洋获取了21个平均长度约为12米的活塞岩芯,形成了穿越北冰洋的完整剖面^[37]。利用这些岩芯建立了北冰洋晚第四纪地层格架,并揭示了相应的沉积模式和古海洋过程。

1.5 整合碎片化数据的北冰洋海底大型绘图计划

(1) 北冰洋水深图国际绘图计划

IBCAO 项目得到了联合国教科文组织政府间海洋学委员会(IOC)和国际北极科学委员会(IASC)等国际组织的批准,旨在形成一套北冰洋海域(64°N 以北)详细、准确的测深数据集,以满足制图人员、科研人员和其他需要了解北冰洋海底地形的人员和机构的工作需求。该项目始于1997年,迄今为止已有来自瑞典、美国、俄罗斯等主要环北极国家和德国、



图5 IODP 302 航次首创的三船作业模式,两艘破冰船(远处)在上游破冰保障钻探船(近处)顺利作业(M. Jakobsson 摄,图片下载自 ECORD/IODP)

中国等国的科研人员参与。

IBCAO 项目广泛整合了科考船、渔船、潜艇等多种来源获取的测深数据,最新的版本为2020年发布的4.0版。该版本采用了一种改进的网格算法,并考虑到测深数据的横向分辨率随深度而变化,因而采用了变网格单元尺寸的方式,使得北冰洋海底的细节得到了更好的展示^[38]。

IBCAO 项目的成果更好地揭示了北冰洋海底的地形特征,对于研究北极地区的地质构造、冰冻圈变化、海洋环流和生态环境效应等具有重要意义^[38],也对北极地区的资源勘探、海上交通安全和环境保护等产生了积极影响。

(2) 环北冰洋重磁异常图绘图计划(Circum-Arctic Mapping Project-Gravity and Magnetic Maps, CAMP-GM)

地球物理数据对于了解地质结构和构造演化,从而指导油气等矿产资源的勘探具有重要意义。为解决当时北极地区重磁数据零散且基准不统一的问题,2005年,挪威、俄罗斯、瑞典、芬兰等多个国家共同开展了CAMP-GM国际合作项目,旨在编制环北极地区的重磁异常数字地图^[39]。

CAMP-GM 项目利用了参与国家提供的最新的重磁异常网格数据。这些数据经过统一的基准和格式转换以及数据融合,最终编制成分辨率为 2×2 千米,向上延拓至1千米的网格^[39]。

这两个新的重磁数据集展现出许多地质构造单元的细节,能更好揭示洋陆过渡区域的精细特征和微陆块、火山岩省的清晰轮廓^[39],对探究北极地区的地质构造、板块运动、构造演化以及资源分布起到了重要作用。

(3) 北极构造地层图集绘图计划(Tectonostratigraphic Atlas of the Arctic)

该计划是2003年发起的环北极1:500万地质图集绘图计划的子计划^[40],目前的一个主要成果是《北极构造地层图集(俄罗斯东部及邻近地区)》,它包含北冰洋欧亚陆缘和邻近的从巴伦支海、卡拉海至楚科奇边缘地的地质和地球物理数据^[41]。2021年的专著《北极大地构造》又在上述图集的基础上,增补了大量资料^[40]。

这些成果基于最新的北冰洋地震数据和海底岩石样品的研究结果,认为中央区的阿尔法—门捷列夫脊是陆壳性质,并且与邻近的陆架在地质成因上是紧密相联的。这项计划对北极地质研究和资源勘探都有重要意义。

表 1 北极海底探测大型科学计划表

计划名称	主导国家	发起时间	执行船只	主要实验	主要认识
SCICEX	美国	1994 年	鲟鱼级攻击核潜艇	海冰、水文、地形、重力等调查	首次获取了加克洋中脊区域的高精度海底地形
AMORE	美国、德国	2001 年	希利号、极星号	地震、岩石取样等综合地质地球物理调查	加克洋中脊之下的地幔整体上仅经受了较低程度的部分熔融,可能具有较低的地幔温度;岩浆活动与扩张速率之间不存在任何直接的岩石学上的相关性,岩石圈顶部的冷却并非决定洋中脊处地壳厚度的最重要因素;首次发现了加克洋中脊热液喷发的证据
IODP 302	国际	2004 年	奥登号、苏联号、Vidar Viking 号	深海钻探取样	古新世—始新世极热事件(PETM)期间北冰洋表层的高水温、始新世时期更淡的北极海水、最老可到始新世中期的冰筏碎屑、始新世中期富含有机碳的环境以及早、中中新世交界处北冰洋通过弗拉姆海峡向北大西洋的通风等
Mega Project	俄罗斯	2005 年	费奥多罗夫院士号	多波束、反射地震、折射地震、岩石采样、重力、磁力、浅地层剖面等调查	门捷列夫脊的陆壳基地经历了强烈构造伸展作用和岩浆作用
AGAVE	美国、瑞典、日本、德国	2007 年	奥登号	AUV 近海底地形、磁力、摄像和热液羽流探测	在 Oden 火山区域探测到两个不同深度的热液羽流异常;在 85°E 火山脊上还发现了罕见的深海爆炸式火山活动,指示了大规模火山碎屑喷发可能在全球洋中脊火山系统中普遍发生,并支持超慢速扩张洋中脊拥有独特的地壳增生和构造伸展模式
HACON	挪威、美国、德国、葡萄牙	2019 年	哈康王子号	ROV 地质、化学、微生物和物理海洋取样调查	对 Aurora 热液区进行了全面调查,获得了大量新的数据和样本,实现了北极冰下深海热液喷口的首次 ROV 调查和采样
JASMinE	中国、俄罗斯、美国、德国、法国、挪威、加拿大	2021 年	雪龙 2 号	海底主动/被动源地震、海底大地电磁、电视抓斗取样和光学拖体观测、AUV 近海底调查等探测	首次证明了超慢速扩张洋中脊岩浆整体超强变化、局部异常丰富的活动特征

2 北极海底科学调查研究的发展趋势

如上所述,在北极快速变化和全球治理的背景下,北极的外大陆架划界显著加快,北极海底空间和矿产资源的战略价值愈发凸显。为此,环北极国家及利益攸关国正整合大量资源,利用冰区大型平台(破冰船、冰下潜艇、多船作业),构建了独特冰下技术和作业体系(子母式 ROV、可控上浮 AUV、冰下台站精准定位),执行了多个大型科学计划,促进了北极海底热液活动、地壳构建、深部动力及演化过程的认识,成果已经支撑了多个国家的外大陆架划界案,并将深刻影响未来“新疆域”海底活动规则的制定与话语权。

基于目前国家需求以及科技的发展趋势,我们认为北极海底调查与研究的主要发展方向如下:

2.1 破冰船的快速成长和迭代升级促进新的北极海底活动

破冰船是极地海底调查的最主要平台,其有限的数量也是此前北极海底调查的主要制约因素之一。随着极地竞争的加剧,环北极国家和利益攸关国正计划大幅提升破冰船数量和能力,有望大幅促进海底科学考察的数量和规模。

目前,国际上拥有破冰船的国家仅有俄罗斯(40 多艘)、加拿大(7 艘)、中国(4 艘)、美国(2 艘)、德国(1 艘)、韩国(1 艘)、日本(1 艘)等少数国家。俄罗斯是全球拥有破冰船最多的国家,但是其破冰船主

要为航道破冰等服务,仅有少数用于科学考察。美国和德国的破冰船均已经老化,超期运行多年,接近退役,正在积极推动破冰船的更新换代建设计划。基于加拿大、芬兰和美国之间的三方协议,加拿大 Seaspan 造船厂将在未来十年为其盟友提供多达 90 艘的破冰船,其中为加拿大提供 21 艘。为了持续巩固其极地破冰能力的领先地位,俄罗斯的核动力重型破冰船的建造正在持续进行。德国“极星 2”号建造计划已经获批,韩国也在积极建造“阿里郎 2”号破冰船。我国下一代重型科考破冰船目前处于研发的最后阶段^[42]。此外,一些特型的破冰科考平台也逐步浮现。2019 年,多学科漂浮观测站极地气候研究(MOSAIC)计划是迄今为止最大规模的全年北极科考计划;2022 年,俄罗斯建造的冰上漂流平台(Ice-resistant Platform)下水,能够实现北极冰区的全季节的连续漂流观测。破冰船数量和类型的提升将为包括海底在内的极地科考提供更多的作业机会、作业方式和时间窗口。

2.2 关键技术装备的跨越式发展快速提升北极海底的科考水平

北极的海冰覆盖和特殊地理位置决定了其海底研究程度相对较低。然而,在极地卫星、冰下潜器和海底深部探测等技术的快速发展下,北极海底科考有可能在多个领域快速缩小与开阔大洋海底的调查研究的差距,实现跨越式的发展。

(1) 极地卫星大幅提高海底重力和地形的覆盖率和分辨率;在开阔大洋,卫星测量海面高度并反演重力可以提供大约 2 千米空间分辨率、1 毫伽精度的重力数据,并可以进一步推导出一定波长的地形信息。在极区,海冰的覆盖导致了海面高度的测量精度较差,再加上前期极地测高卫星数量较少(仅 ERS1、ERS2 和 ENVISAT),北极的重力和地形数据的覆盖率、分辨率和精度都一直较低。近年来,随着 ICESat-2、CryoSat-2、Sentinel-3 等极地测高卫星和能够直接测量重力的 GRACE 和 GRACE-FO 等卫星的发射,卫星测高反演的重力已经覆盖整个北冰洋,精度达到 3.8 毫伽,分辨率达到 7 千米,相应推导的地形数据与实测数据的标准差为 81.5 米^[43]。未来,随着北极海冰融化带来的卫星测量海面高的精度的进一步提高以及更多的测高卫星(CRISTAL、Sentinel-6A 和 HY-2)投入应用,北极测高反演重力和地形数据的分辨率和精度都将会逐步逼近开阔大洋的水平。

(2) 冰下有人、无人潜器大幅提高海底观监测

时空分辨率;冰下 AUV 在高分辨率测绘和寻找追踪海底小目标等方面具有不可替代的优势。冰区冰层、极低温环境以及冰下导航的复杂性使得 AUV 的释放回收变得非常困难。近年来随着导航定位、能源效率、续航能力和通讯技术的提升,全球已有 75 个航次成功进行极地冰区的 AUV 调查^[44],包括:2007 年,美国 AGAVE 航次首次在冰层内进行 AUV 的布设与回收^[45],下潜深度最深达到 4 100 米,是当时世界上 AUV 最深的下潜;我国在多次北极考察中使用了 AUV,尤其是在 2021 年中国第 12 次北极科学考察中,中国科学院沈阳自动化研究所改造的“探索 4500”AUV 在水深超过 3 000 米的密集冰区进行了热液探测试验^[27]。未来,随着冰下通信导航、AUV 能源与续航技术的不断进步以及机器学习的深入应用,AUV 可实现长时间续航、多 AUV 编队测量,在地形测绘的同时自动识别和追踪目标体。这将促进北极冰下的热液活动、元素传播、火山和地震活动等的观测。载人潜器的优势在于科考人员可直接在海底进行观察,能更好地在现场做出决策,以及执行更为复杂、精细的操作,但是冰区的风险性使得极地冰下载人潜器的使用远远落后于开阔大洋,所以仅有俄罗斯成功进行过冰下载人深潜。目前,我国“探索三号”科考船也具备极区深潜的支持能力。

(3) 冰下海底深部探测与钻探取样前景可期:随着 2021 年和 2024 年我国 JASMINe 计划的顺利执行,已经基本解决了海底地震炸测、海底设备冰下台站的回收两个最为困难的技术瓶颈,促进了国际海底深部探测的大规模开展。在 2022—2023 年的北冰洋海洋—岩石圈相互作用航次中(ALOIS),德国极地研究所在 Aurora 热液喷口周边布设了 8 个长周期 OBS,并持续观测了一年。挪威和美国也积极谋划在密集冰区使用 OBS 进行海底主动源地震探测及被动长期监测航次。未来,在攻克密集冰区冰下定深的地震震源、冰下的多道地震电缆作业和冰下长极距大地电磁等技术难题后,冰区海底探测能力将进一步提高,并将极大促进对极区岩石圈结构的认知。钻探方面,ACEX 计划(IODP 302 航次)的成功表明,在高精度的天气、海冰数值预报与基于现场智能化海冰测量系统的短期海冰运动预测的支持下,利用多船破冰协作的模式,在北冰洋任何其他区域进行钻探几乎都可取得同样的成功。在 ACEX 航次之后,ACEX2 计划于 2018 年在罗蒙诺索夫脊南部进行钻探取样,然而由于协调破冰船的原因,该计

划一直被延迟^[46]。未来,在北冰洋进行进一步的科学钻探是了解北冰洋古气候和构造演化的关键举措。

2.3 北极治理推动交叉融合的大型海底科学国际科学计划

联合国“海洋十年”被誉为“一生一次”的机遇,其核心目标包括深化科学认知、支持技术创新和发展以及促进国际合作等,这些目标均与极地海底科考的特点高度契合。《预防中北冰洋不管制公海渔业协定》强调在资源开发前,须充分了解区域生态环境及其承载能力。极地海底探测可以评估资源分布,同时帮助建立环境基线数据,用于衡量开发活动对生态系统的潜在影响,为制定快速变化下北极的环境政策提供科学依据。

在国际地缘政治敏感的北极区域,联合国“海洋十年”为北极多学科交叉的国际合作提供了绝佳的平台。近年来,北极冰区的主要海底探测均和“海洋十年”相关联,如:2021年,挪威等国热液探测航次 HACON 航次与“挑战者 150”计划,2024年我国的 JASMINE-2 与我国极地领域的第一个联合国“海洋十年”项目 ADOMIC,2024年挪威领衔的北冰洋海洋深部调查(Ocean Census Arctic Deep Expedition)与海洋普查(Ocean Census)计划等。

3 结 语

未来,北极环境的脆弱性和敏感性将进一步凸显海底认知在地球系统科学中的关键地位,包括我国在内的极地利益攸关国应充分利用“海洋十年”和《预防中北冰洋不管制公海渔业协定》等大型国际合作框架,积极发起以本国为主的国际合作科学计划,推动以海底圈层与外部圈层交互作用为核心的交叉研究,如:海底地形地貌对海底洋流和生境的作用、冻土和天然气水合物的泄漏、热液喷口释放的元素物质及其生态效应、海底火山的碳排放和海底的碳埋藏等。

参 考 文 献

- [1] Edwards MH, Coakley BJ. SCICEX Investigations of the Arctic Ocean System. *Geochemistry*, 2003, 63(4): 281—328.
- [2] Michael PJ, Langmuir CH, Dick HJB, et al. Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkell ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 2003, 423(6943): 956—961.
- [3] Ding WW, Niu XW, Zhang T, et al. Submarine wide-angle seismic experiments in the High Arctic: The JASMinE Expedition in the slowest spreading Gakkell Ridge. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, 1(3): 100076.
- [4] Pontbriand CW, Soule SA, Sohn RA, et al. Effusive and explosive volcanism on the ultraslow-spreading Gakkell Ridge, 85° E. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(10): 1—22.
- [5] Bünz S, Ramirez-Llodra E. RV Kronprins Håkon (cruise no. 2019708). CAGE-Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate Report Series, 2022, 7.
- [6] Thiede J, Snow JE. Petrological analysis of dredge samples from POLARSTERN cruise ARK-XVII/2 (AMORE) to the Arctic Ocean. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.131152>.
- [7] Expedition 302 Scientists. Expedition 302 summary. In: Backman J, Moran K, McInroy DB, Mayer LA, and the Expedition 302 Scientists. *Proc. IODP, 302: Edinburgh (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.)*. 2006. doi:10.2204/iodp.proc.302.101.2006.
- [8] Fetterer F, Knowles K, Meier WN, et al. Sea Ice Index. (G02135, Version 3). Boulder, Colorado USA. National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>. [describe subset used if applicable]. Date Accessed 12-18-2024.
- [9] Jakobsson M, Mayer LA, Bringensparr C, et al. The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 176.
- [10] Rosenne S. United Nations convention on the law of the sea. *United Nations Convention on the Law of the Sea*, 1997, 29(3): 1—207.
- [11] Nikishin AM, Petrov EI, Cloetingh S, et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1-Data collection. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103559.
- [12] Avetisov GP, Butsenko VV, Chernykh AA, et al. The current state of the Arctic Basin study. In: Piskarev A, Poselov V, Kaminsky V (eds). *Geologic Structures of the Arctic Basin*. Springer, 2019, pp. 1—69.
- [13] Skolotnev SG, Fedonkin MA, Korniyuchuk AV. New data on the geological structure of the southwestern Mendeleev Rise, Arctic Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2017, 476(1): 1001—1006.
- [14] Chian D, Lebedeva-Ivanova N. Atlas of sonobuoy velocity analyses in Canada Basin. *Geological Survey of Canada, Open File*, 2015, 7661: 55.
- [15] 方银霞,尹洁.大陆架界限委员会的工作进展及全球外大陆架划界新形势. *国际法研究*, 2020, 7(6): 61—69.
- [16] Døssing A, Hopper JR, Olesen AV, et al. New aero-gravity results from the Arctic: Linking the latest Cretaceous-early Cenozoic plate kinematics of the North Atlantic and Arctic Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4044—4065.
- [17] Chian D, Jackson HR, Hutchinson DR, et al. Distribution of crustal types in Canada Basin, Arctic Ocean. *Tectonophysics*, 2016, 691: 8—30.

- [18] Mayer LA, Armstrong AA. U. S. Law of the Sea Cruise to Map and Sample the US Arctic Ocean Margin (Healy 1202 Cruise Report). University of New Hampshire (UNH), Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM)/Joint Hydrographic Center (JHC). 2012.
- [19] Hutchinson DR, Jackson HR, Houseknecht DW, et al. Significance of northeast-trending features in Canada Basin, Arctic Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(11): 4156—4178.
- [20] Brumley K, Miller EL, Konstantinou A, et al. First bedrock samples dredged from submarine outcrops in the Chukchi Borderland, Arctic Ocean. *Geosphere*, 2015, 11(1): 76—92.
- [21] Ilhan I, Coakley BJ. Meso-Cenozoic evolution of the southwestern Chukchi Borderland, Arctic Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 95: 100—109.
- [22] 大陆架界限委员会. EXECUTIVE SUMMARY. Russian Federation. (2001-10-20)[2024-11-27]. https://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/submission_rus.htm.
- [23] 大陆架界限委员会. 大陆架界限委员会主席关于委员会工作进展情况的说明[EB/OL]. (2009-4-20)[2024-11-27]. <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n09/307/57/pdf/n0930757.pdf>.
- [24] 大陆架界限委员会. The North-Eastern Continental Shelf of Greenland; EXECUTIVE SUMMARY[EB/OL]. (2013-11-26)[2024-11-27]. https://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/dnk68_13/DNK2013_ES.pdf.
- [25] 大陆架界限委员会. Partial Submission of Canada to the Commission on the Limits of the Continental Shelf regarding its continental shelf in the Arctic Ocean; Executive Summary [EB/OL]. Canada. (2019-5-23)[2024-11-27]. https://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/can1_84_2019/CDA_ARC_ES_EN_secured.pdf.
- [26] 美国政府. The Outer Limits of the Extended Continental Shelf of the United States of America; Executive Summary [EB/OL]. (2023)[2024-11-27]. https://www.state.gov/wp-content/uploads/2023/12/ECS_Executive_Summary.pdf.
- [27] Dick HJB, Lin J, Schouten H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, 2003, 426(6965): 405—412.
- [28] Liu CZ, Snow JE, Hellebrand E, et al. Ancient, highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 2008, 452(7185): 311—316.
- [29] Klein EM. Spread thin in the Arctic. *Nature*, 2003, 423: 932—933.
- [30] Jokat W, Ritzmann O, Schmidt-Aursch MC, et al. Geophysical evidence for reduced melt production on the Arctic ultraslow Gakkel mid-ocean ridge. *Nature*, 2003, 423(6943): 962—965.
- [31] Edmonds HN, Michael PJ, Baker ET, et al. Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading Gakkel ridge in the Arctic Ocean. *Nature*, 2003, 421(6920): 252—256.
- [32] Zhang T, Li JB, Niu XW, et al. Highly variable magmatic accretion at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge. *Nature*, 2024, 633(8028): 109—113.
- [33] Ramirez-Llodra E. Hot vents beneath an icy ocean. *Oceanography*, 2023, 36(1): 6—17.
- [34] Bünz S, Ramirez-Llodra E. Hot Vents in an Ice-Covered Ocean - HACON21 expedition. CAGE - Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate Report Series, 2022, 9.
- [35] Boetius A, Bienhold C. (2024): The Expedition PSI38 of the Research Vessel POLARSTERN to the Arctic Ocean in 2023 /Bornemann H, Amir S (editors), Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 0788, 288 p. doi:10.57738/BzPM_0788_2024.
- [36] Backman J, Moran K. Expanding the Cenozoic paleoceanographic record in the Central Arctic Ocean: IODP Expedition 302 Synthesis. *Central European Journal of Geosciences*, 2009, 1(2): 157—175.
- [37] Darby DA, Polyak L, Jakobsson M. The 2005 HOTRAX expedition to the Arctic Ocean. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(1/2): 1—4.
- [38] Jakobsson M, Mayer LA, Bringensparr C, et al. The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 176.
- [39] Gaina C, Werner SC, Saltus R, et al. Chapter 3 Circum-Arctic mapping project: New magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic. *Geological Society, London, Memoirs*, 2011, 35(1): 39—48.
- [40] Petrov OV, Smelror M. *Tectonics of the Arctic*. Springer, 2021.
- [41] Petrov OV, et al. *Tectonostratigraphic Atlas of the Arctic (eastern Russia and adjacent areas)*. Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН, 2017, 5(1): 34—34.
- [42] Konrad 2024. China Fast-Tracks Construction of New Icebreaker. <https://gcaptain.com/china-fast-tracks-construction-of-new-icebreaker/>.
- [43] Abulaitjiang A, Andersen O, Cotton D, et al. The Contribution of DTU17 Marine Gravity for the Arctic Bathymetry Prediction, 25 years of progress in radar altimetry symposium. 2018.
- [44] Fan SS, Bose N, Liang ZM. Polar AUV challenges and applications: A review. *Drones*, 2024, 8(8): 413.
- [45] Kunz C, Murphy C, Singh H, et al. Toward extraplanetary under-ice exploration: Robotic steps in the Arctic. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(4): 411—429.
- [46] 王汝建, 肖文申, 章陶亮, 等. 极地地质钻探研究进展与展望. *地球科学进展*, 2017, 32(12): 1236—1244.

Progress and Prospects of Submarine Scientific Investigations in the Arctic Ocean under the Framework of Global Governance

Jiabiao Li^{1,2*} Shuying Leng^{3,4} Liang Zhang³ Weiwei Ding^{1,2} Tao Zhang^{1,2}

1. *Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012*

2. *Key Laboratory of Submarine Geosciences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012*

3. *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

4. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The Arctic has emerged as a new focal point and ‘new frontier’ in global ocean governance. Submarine scientific investigations in the Arctic exhibit notable sensitivity and higher technical thresholds, characterized by a strong integration of national needs, scientific objectives, and technological equipment. Driven by the compelling demands of polar governance and extended continental shelf delineation, Arctic and stakeholder nations have engaged in extensive international cooperation, overcoming a series of technical bottlenecks such as sub-ice seismic exploration, and hydrothermal exploration and drilling in ice-covered regions. Multiple large-scale submarine exploration and survey programs have been implemented, yielding groundbreaking insights into fundamental scientific questions such as the geodynamics of ultra-slow spreading mid-ocean ridges, hydrothermal processes and unique habitats involving multi-spheric interactions, and global climate change. As a near-Arctic nation, China has actively contributed to knowledge and participated in Arctic’s ocean governance through submarine scientific investigations of Arctic Ocean in recent years. China has led the Joint Arctic Scientific Mid-ocean ridge Insight Expedition (JASMIInE) and actively participated in international initiatives such as the International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). This paper reviews the major large-scale submarine scientific investigation programs in the Arctic Ocean, focusing on the background, technological innovations, significant scientific findings, and their impact on international governance. It also provides an outlook on the future trends of submarine scientific investigations in the Arctic Ocean.

Keywords Arctic governance; Arctic Ocean; ice zone submarine exploration; international cooperation

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Author, Email: jbli@sio.org.cn