

特色专题

深海科技前沿探索与展望

翦知湓, 俞恂, 汪品先

摘要 深海是生命的秘境、资源的宝库和国家安全的屏障,是人类未来可持续发展的重要战略空间。建设海洋强国,必须要向深海进军。2025 年政府工作报告首次将“深海科技”纳入新兴产业领域。本文指出了依托“深钻、深潜、深网”技术的突飞猛进,中国已具备国际先进水平的“深海进入、深海探测、深海开发”技术能力,在深海钻探、深潜探索、深网观测等领域取得系列重要进展,“南海深部计划”更斩获低纬驱动等突破性成果。未来,南海探索将向南部海盆拓展,中国深海研究将进一步迈向全海深、全海域,推动深海与极地探索深度融合。深海蕴藏丰富宝贵资源,当前中国正面临从深海出发、创建地球系统科学“中国学派”的历史机遇,亟待以南海为基础,放眼大洋,加快布局深海科技,发展深海资源新质生产力,推动“深钻、深潜、深网”技术智能化融合与多学科协同,借助大数据等新技术与配套技术创新等,为建成海洋强国和世界科技强国提供支撑。

关键词 深海科技;深海资源;深海钻探;深潜探索;深网观测

中国是海洋大国,随着社会经济持续发展与综合国力逐步提升,中国的国家利益也突破传统领土、领海的界限,不断向深海海底扩展和延伸。面对新一轮日趋激烈的深海竞争和中国的海洋战略需求,党的十八大首次提出“建设海洋强国”,党的二十大进一步提出“发展海洋经济,保护海洋生态环境,加快建设海洋强国”。当前,建设海洋强国已成为实现中华民族伟大复兴的重大战略任务,是中国“十五五”规划的重要目标之一。“海洋强国”必须强在科技上,必须建设面向深海、面对国际的深海科技,只有成为深海强国才能与中国在世界的地位相匹配,才能保障中国社会经济的可持续发展。2025 年政府工作报告首次将“深海科技”纳入新兴产业领域,标志着深海科技已上升为国家战略。

深海过程跨越从极微观的细胞代谢到极宏观的

地球板块运动,是典型的多学科交叉研究领域,一直是地球科学和生命科学的突破口。21 世纪地球科学进入“地球系统科学”发展的新阶段,其中深海又是关键。要进入深海,必须克服上覆海水的巨大压力,承受海底之下高温、高压等极端条件,唯有高精尖的技术装备方能实现。探索深海的尖端科技主要是“三深”,包括深海钻探、深潜探索和深网观测。近年来,中国的“深钻、深潜、深网”技术突飞猛进,中国“梦想号”钻探船已入列、“奋斗者号”载人深潜器已就位、海底科学观测网即将联通,具备了国际先进水平的“深海进入、深海探测、深海开发”技术能力,但尚未在重大科学创新上充分发挥作用。当前,面临革新板块构造理论、创建气候演变新理论的地球系统科学“中国学派”的历史机遇。南海是中国深海探索的主要战场,在立足南海的同时需放眼大洋,形成全海深、全海域的深海探索能力。此外,大洋深处蕴藏着种类繁多、储量巨大的深海资源,这些资源对于缓解资源

同济大学海洋地质全国重点实验室,上海 200092

收稿日期: 2026-01-12; 修回日期: 2026-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(L2524080); 国家重点研发计划项目(2025YFF0811901)

作者简介: 翦知湓,教授,中国科学院院士,研究方向为海洋地质学,电子信箱: jian@tongji.edu.cn

引用格式: 翦知湓,俞恂,汪品先. 深海科技前沿探索与展望[J]. 科技导报, 2026, 44(3): 57-65; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.01.00045

短缺、推动科技创新、促进经济发展具有不可估量的价值。因此,亟待加强深海科学与技术的协同创新,发展高质量海洋新质生产力,为2035年建设成为海洋强国和世界科技强国提供根本支撑。

1 “三深”探索进展

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,但要得到这些宝藏,就必须在深海进入、深海探测和深海开发方面掌握关键技术”。其中,最前沿、最核心的就是“深钻、深潜、深网”技术。深钻是指从海底往下钻探获取沉积物和岩石样品,揭示地球深部奥秘;深潜是指利用载人和无人潜水器到达深海海底,实现原位观测与精细采样;深网则是指在海底布置观测网,实现长期、连续、实时的立体感知。20世纪,欧美发达国家依托大洋钻探、载人深潜等高科技手段到达深海海底,促成了深海研究的一系列新发现,验证了地球动力的板块构造理论、气候演变的米兰科维奇理论,发现了颠覆生物演化认知的海底“热液生物群”,使地球科学出现一次又一次重大突破。然而,由于资金投入、工艺水平等条件所限,20世纪中国的深海技术能力乏善可陈,从而在国际深海研究和重大理论突破方面贡献寥寥,在国际海底资源开发、大洋权益争取等方面也长期受制于人。改革开放,尤其21世纪以来,中国探索深海的技术突飞猛进,“奋斗者”号载人潜水器、“梦想”号大洋钻探船、海底科学观测网等一批大科学设施投入运行,具备了国际先进水平的“深海进入、深海探测、深海开发”技术能力。直到目前,全球只有3个国家“三深”齐备:美国、日本和中国。然而,美国暂时退出了国际大洋钻探计划,日本的钻探船“地球号”又无法长期和连续地执行科学大洋钻探航次。虽然欧洲提出过“三深”并举的深海和海底前沿项目(Deep Sea and Sub-Seafloor Frontier, DS³F)^[1],但是,受困于技术手段的缺乏该计划迟迟未能开展。反观中国,虽已拥有“三深”尖端技术平台,但尚未在重大科学创新上充分发挥作用。未来的5~10年,中国将“三深”技术和科学高度结合,研制新一代深海智能探测装备体系,将具备参与乃至引领国际深海前沿探索的全域能力。

1) 深海钻探。从深海海底钻探地壳,是探索深海难度最高、耗费最大的技术。1968年美国发起大洋钻探国际大科学计划,历经深海钻探(Deep Sea Drilling Project, DSDP)、大洋钻探(Ocean Drilling Program, ODP)、综合大洋钻探(Integrated Ocean Drilling Program, IODP)和国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP)4个阶段,前后有美国、日本、欧盟15国、中国、澳/新联盟、韩国、印度、巴西和苏联等参与涉及近30个国家和地区,通过大洋钻探研究,以大西洋的大陆板块张裂为蓝本,验证了地球动力的板块构造理论;以西欧-北美的北半球冰盖和北大西洋深层环流作为驱动力,建立了气候演变的米兰科维奇理论,有力促进了地球科学在过去半个世纪的快速发展^[2]。尽管2025年后美国暂时退出,但是欧盟和日本将联合第三阶段的国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP³)。2020年,国际学术界正式发布面向2050年的大洋钻探科学框架,展示了人类对于未来大洋钻探的科学愿景^[3-4]。

中国于1998年以“参与成员”身份加入大洋钻探,年付50万美元;2013年成为“全额成员”,年付300万美元。20多年来,中国自主设计和主持了4个南海大洋钻探航次(1999年ODP第184航次、2014年IODP第349航次、2017年IODP第367~368航次),使得南海一跃成为世界边缘海研究的典范^[5]。2023年,中国首次试航“梦想号”钻探船,实现了深海科学钻探能力的重大突破。实际上,人类钻穿地壳与地幔边界“莫霍面”的梦想已提出60余年,至今未竟,核心障碍在于“硬岩钻探”技术。国际大洋钻探50余年来,硬岩平均取芯率不足1/2,最大硬岩进尺仅约2000 m。中国“梦想号”虽已就位,但要挑战钻透数千米坚硬玄武岩、辉长岩的洋壳,抵达莫霍面,仍面临超高温高压材料、高效破岩工艺、智能随钻测量等一系列尖端技术的系统集成短板。同时,服务于钻探选址的深部地球物理精细探测技术,以及保障超深水安全作业的高精度重返与井控技术,中国与美日欧等领先国家仍有明显差距。可以说,没有深海硬岩钻探技术的突破,中国就难以在揭示地球深部动力、探索深部生物圈等最前沿领域获得独特样本和数据,叩问地球深部的科学原创将受阻。

当前,国际大洋钻探格局正在发生深刻变化,这为中国大洋钻探的进一步发展提供了难得的战略机遇。“十五五”时期,中国正在积极推进发起“以我为主”的新一轮国际大洋钻探计划——深部大洋钻探计划(Deep Ocean Drilling Program, DODP),自主组织国际大洋钻探航次,建设并运行大洋钻探国际岩芯实验室,将一举确立中国在国际大洋钻探中的领导地位。

2) 深潜探索。“三深”中以载人深潜的社会影响最大,也是挺进深海最直接的手段。20世纪60年代以来,随着深潜技术的发展,人类才能对深海生物开展系统研究。美国于1977年在东太平洋发现海底热液喷口和黑暗食物链,2000年在北大西洋洋中脊附近发现“迷失之城”白烟囱^[6],颠覆生物起源和演化的理论认知。2023年联合国达成“国家管辖范围以外区域海洋生物多样性(marine biological diversity of areas beyond national jurisdiction, BBNJ)协定”,对于海洋生物与环境的协同发展提出了更高的要求,而其中最不清楚的就是深海及海底的“深部生物圈”。随着遥控技术和人工智能的发展,许多极端环境的探索已经可以由机器人代替。无人潜水器已经成为深潜探索和工程服务的主力,通过缆绳连接的无人遥控潜水器(remotely operated vehicle, ROV),可以由科学家在船上操纵,开展为时更长、效率更高、能量更大的深海探索;而水下自主航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)不需要缆线,可长时间、大范围在海洋内部作业。

经过多年努力,中国逐步提高自主国产水平,拥有了不同深度的载人深潜器,建成能潜入深海7000 m的“蛟龙号”、潜入深海4500 m的“深海勇士号”和万米全水深的“奋斗者号”等载人潜水器,发展了“潜龙”“探索”“海马”“海斗”“海燕”“海翼”等系列无人潜器,已形成谱系化、全海深的深潜作业能力^[7]。尤其是,“奋斗者号”于2020年成功坐底马里亚纳海沟,标志着中国掌握了全海深载人深潜技术。2022年,中国主动发起“全球深渊深潜探索计划”,已联合新西兰、俄罗斯、智利等多国科学家,系统探索了全球9条主要海沟,并于2025年在《Nature》报道了阿留申海沟9533 m深处极端繁盛的化能合成生命,刷新了人类对生命极限的认知,揭示了深渊化能生物代谢途径和深渊适应机制的独特性^[8]。在此基础上,结合热液、冷

泉^[9]、海山冷水珊瑚^[10]3大底栖生态系统和海底下深部生物圈调查,有望在“十五五”期间进一步揭示深海及海底生物多样性与环境的协同演化,提出应对BBNJ重构全球海洋秩序的“中国方案”。

当前,潜器作业在海底目标自主识别、智能路径规划、灵巧作业(尤其生物抓取)等方面自动化程度低,导致宝贵的海底作业时间大量消耗在搜寻和尝试上。同时,单个潜器作业范围和时间有限,而载人潜器与多种无人潜器(AUV/ROV)之间缺乏智能协同作业能力,无法形成“集群作战”优势。因此,“智能”与“协同”能力不足制约了对广阔海底的探测效率,已成为将中国深潜“硬件优势”转化为重大科学发现“产出优势”的瓶颈。

3) 深网观测。21世纪国际海洋科技发展最令人瞩目的是海底观测系统。将观测平台放至海底,将传感器甚至分析仪器置于水里,可以对海底以下深处到整个水层进行长期连续的实时原位观测,不仅为观测地球过程开辟了全新的场景,而且也改变了人类与海洋的关系及海上国防安全的概念,标志着海洋开发和研究的新阶段。2009年,加拿大建成了第1个大型深海海底观测网NEPTUNE-Canada,缆线长800 km;2015年,日本建成面对太平洋的海底海啸观测网S-net,缆线总长5700 km;2016年,美国建成了由近海、区域、全球3大海底观测系统组成的“海洋观测计划”(Ocean Observatories Initiative, OOI)^[11]。海底观测从近岸网到区域网,已经进入全球网的新时代,不仅使海洋科学研究进入探索亚中尺度和湍流过程的新阶段,还可以对海底火山喷发进行现场直播。

中国海底观测系统的研发自21世纪初开始起步,以同济大学东海小衢山海底观测系统和中国科学院声学研究所南海海底观测网试验系统等为典型代表^[12]。2017年,由同济大学牵头、中国科学院声学研究所共建的“海底科学观测网”国家重大科技基础设施立项成立,包括东海海底观测子网、南海海底观测子网、监测与数据中心及配套工程。目前,“海底科学观测网”的标志性构筑物——“同济·海一号”东海多圈层观测塔已于2023年建成,可搭载多种类、多数量的观测设备,实现大气圈、水圈和岩石圈的全方位、综合性、长期实时的高分辨率立体观测。“海底科学观测网”预计于2026年建成并投入使用,将成为总体

水平国际一流、综合指标国际先进的海底观测研究设施,为中国的海洋科学研究建立开放共享的重大平台,并服务于海洋资源开发、海洋灾害预测等多方面的综合需求。

现有海底观测网主要依赖预先铺设的固定光电电缆,如同在深海中建设了少数几个“固定气象站”,其建设维护成本极高,且一旦布设便难以移动。面对广袤、动态变化的深海,尤其是远离岸基的深远海及突发性海洋事件,现有“深网”往往鞭长莫及。因此,发展低成本、可快速布放与回收、能自主组网的深海智能微网,构建固定与移动相结合的深海微网体系,已成为国际紧迫趋势。此外,深海核心传感器的长期稳定性、可靠性,以及如何高效处理、融合与挖掘观测网产生的海量、多源、异构数据,从中实时提取科学知识 with 预警信息,都是横亘在我们面前的现实难题。没有智能、灵活、坚韧的“深网”,将限制人类对深海动态过程的认知。

2 再探南海

1) 南海成果回望。中国深海的科学探索起步晚、发展快,通过近 20 多年的努力使南海成为深海研究的国际前沿。最为突出的是国家自然科学基金委员会支持的“南海深海过程演变(2011—2018 年)”重大研究计划(南海深部计划),中国科学家对此作出了突破性的贡献。“十五五”期间有待再接再厉、乘胜追击。

南海深部计划下设 50 多个重点项目,全国有 32 个单位共计 700 多人参加研究,为期 8 年^[13]。“南海深部计划”旨在从现代过程和地质记录入手,构建边缘海的生命史。若把南海当作麻雀来解剖,深海盆地的构造演变相当于骨架,深海沉积及古海洋学演变相当于肉,海水的生物地球化学相当于血,该计划的科学目标就是在三者连接的高度上探索南海的生命史。气候演变的驱动机制,是地球历史研究的基本问题之一。通过南海深海沉积的研究,发现了低纬区水、碳循环直接响应地球轨道变化的证据,揭示出气候演变的“低纬过程”驱动机制,提出了低纬过程也能驱动全球气候变化的新认识,质疑北极冰盖决定一切的传统观点。大陆如何破裂形成海洋盆地,是地球动力学的根本性问题。通过洋陆过渡带基底的探索,发

现作为西太平洋俯冲带产生的边缘海盆地,南海有着岩浆活动始终活跃、岩石圈破裂迅速等一系列特色,不同于归属超级大陆瓦解阶段形成大西洋的“板内张裂”,质疑大西洋模式作为海盆成因机制的普适性,据此提出海盆形成的“板缘张裂”新机制。通过深水锚系长期观测和深潜技术的应用,发现了南海深海环流的气旋式结构特征,实现了深海沉积的等深流和浊流搬运的现场观测,取得了微型生物碳泵和碳、氮耦合等生物地球化学方面的研究突破,显示边缘海所独有的洋陆相互作用特质,构成海洋和地球科学领域的新视角、新方向^[14]。

2) 南海研究展望。南海深部计划的 3 大发现(低纬驱动、板缘张裂、洋陆相互作用),有待在“十五五”期间进一步探索、论证假设,实现进一步的突破。气候演变“低纬驱动”新假说近年来得到了低纬水循环的证据支持,但并不成熟。一方面,需要拓宽时空概念,从暖室期和冰室期、从低纬到高纬整体上探讨气候变化模式;另一方面,需要拓宽气候变化过程的内涵,将大陆地下水的水循环、到大洋溶解有机质的碳循环纳入气候模型,建立低纬过程驱动气候变化的新模式,而南海和印度—西太平洋暖池将成为建立新模式的试验基地。“板缘张裂”新机制的研究基地,应当是以南海为核心的西太平洋边缘海。这一系列边缘海盆地的形成年龄由大陆向大洋变新,整体上反映出弧后扩张的总趋势,应当是有成因联系的系统。而边缘海深海盆对于洋陆相互作用和全球环境演变的影响,至今仍是研究中的缺口,属于地球表层系统中有待回答的一个重大问题。

通过南海深部计划,中国已经掌握了南海深部探索的主导权,不但使南海成为中国深海研究的基地,也促成南海成为世界深海研究程度最高的边缘海。同时也必须意识到,迄今为止,中国深海探索的重心局限于南海北部,有待在新的 10 年里发起新的大型计划探索南部海盆。作为低纬区面积最大的大陆架,巽他陆架有着极其平缓的坡度,并随全球海平面波动发生周期性的淹没和暴露,是“海洋大陆”(maritime continent)的重要组成部分。大量数值模拟和计算认为,海洋性大陆的大规模海陆格局变迁会通过改变海洋和大气环流、硅酸盐岩和碳酸盐岩风化、有机碳埋藏等过程,影响全球碳循环和水循环,进而调控全球

气候演化。但是,上述一系列假说尚缺乏直接地质证据的检验。巽他陆架大洋钻探是解开上述一系列科学问题的重要研究对象。

可以预期,中国必将组织更强的队伍、以更大的投入推进南海深部研究,而且将与全球南方、“一带一路”等倡议相呼应,加强国际合作,进而使南海成为全球海洋科学的天然实验室,使南海研究计划成为多学科、多系统科学合作的榜样^[14],同时将深海科学作为推动南海国际合作、促进民间外交的新途径。美国作家罗伯特·卡普兰(Robert D. Kaplan)认为现在中美的南海之争,相当于百年前欧美的加勒比海之争,能否在南海取得成功,将决定中国大国崛起的命运^[15]。因此,进一步确立中国在南海深海科学上的主导权,是国家海洋战略的重要环节。

3 放眼大洋

中国的深海研究不再局限于边缘海,已经走向世界大洋,向全海深和全海域拓展和延伸,逐步建立深海科技队伍、发起国际大科学计划,并赢得国际声誉。“十五五”期间将进军全球各大深渊,促进从低纬到两极的“太平洋-极地计划(太极计划)”,将深海和极地结合起来。

1) 全海深:深渊计划。近年来,中国深海探索已经走向世界大洋,已建成全球最完整的深潜装备矩阵,载人深潜器有“蛟龙号”“深海勇士号”“奋斗者号”,无人深潜器包括“海斗”“潜龙”“海马”等系列,配套科考船“探索一号”“探索二号”“探索三号”和“深海一号”等形成移动基地。现如今,中国已携手来自10个国家共100多位科学家通过200多潜次到达了马里亚纳海沟、克马德克海沟、普伊斯哥海沟等全球9条深渊深处,实现了从国际“跟跑”到“领跑”的跨越。

深渊指海洋中深度大于6000 m的海沟或断裂带区域,那里压力大、温度低、黑暗无光、地震密集,是地球上的神秘之处。2022年,中国科学院启动“全球深渊深潜探索计划”,并于2025年获批成为联合国“海洋十年”全球深渊探索计划,重点解决深渊生命起源与演化、板块俯冲与演化、深渊碳循环与全球变化等关键科学问题。

2022年,中国科学院深海科学与工程研究所联合

新西兰国家水和大气研究所组织实施了克马德克海沟联合科考,挺进南太平洋,这是中国首次与西方发达国家深潜合作,以中国科考船、载人深潜器为作业平台,开展系统性深渊科考作业。2024年,联合印度尼西亚国家研究创新署组织爪哇海沟联合科考航次,在爪哇海沟下潜22次,其中14次下潜超过6000 m水深,完成了东北印度洋的首次深渊探索;随后又与俄罗斯联合转战全球最高纬度、最低温度、最大宽度的深渊海沟——西北太平洋千叶-堪察加、阿留申海沟,“奋斗者号”全海深载人潜水器37 d完成31个潜次任务,其中7次下潜超过9000 m水深。2025年,中国领导国际科学家团队,首次挑战位于“魔鬼西风带”的新西兰普伊斯哥海沟,实现了人类首次下潜到该海沟最深处的壮举,在恶劣海况下,争分夺秒完成75 h内5次下潜,带回大量珍贵样本。

2) 全海域:太极计划。随着全球经济和中国科技的发展,海洋科学正在从原来的近岸浅海型向深海大洋拓展,极地海域的研究正是这种拓展趋势中的亮点所在。2025年7—10月,中国第15次北冰洋科学考察由“雪龙2号”“极地号”“深海一号”和“探索三号”4船共同开展,是中国自20世纪末开启北极科考以来规模最大的一次。“奋斗者号”与“蛟龙号”在北冰洋实现水下联合作业,完成了双潜器定位搜索、标志物互换、水下运动拍摄,创新了中国双潜器冰下海底协同作业模式,开创了世界载人深潜史上的新纪元。中国科考队在北冰洋下极其缓慢扩张的加克洋中脊进行深潜作业,凭借着精湛的技术和顽强的意志,在29 d内完成了32个潜次,最大下潜深度达到5277 m,标志着中国成为目前世界上唯一在北极密集海冰区进行连续载人深潜的国家。这次北极科考将中国载人深潜从“全海深”拓展至“全海域”,赢得了国际声誉。

从中国的地理位置和直接的国家利益出发,除南海以外的西太平洋是走向深海的必然选择。因此,下一步要放眼整个太平洋,建议“十五五”期间设立从低纬到两极的“太平洋-极地计划(太极计划)”,从西太平洋暖池向北通过白令海进入北冰洋,向南通过南大洋的太平洋段进入罗斯海,将深海和极地结合起来。海洋科学历来以大西洋为标准,从北大西洋深层水形成区到南极威德尔海,构成了有深部海水翻转的经向环流,被认为是地球上长期气候变化的控制机制。其

实南大洋太平洋段的罗斯海拥有南极最大的冰架,是南极底层水又一个产地,同样是研究南大洋的关键海域。2005年开始的南极地质钻探计划(Antarctic Drilling Project, ANDRILL),在罗斯海冰架和海冰上钻探海底沉积层,在上部600 m地层中发现了500万年来的38次冰期旋回,直接记录了西南极的冰盖消长,发现西南极冰盖曾经一度完全消融的“超级间冰期”^[16]。可见,罗斯海和南大洋太平洋段的探索,有着十分光明的前景。气候变化研究的新近进展,说明热带太平洋表层以下的海水受南极来水的严重影响,对于低纬区的生产力和碳循环都有重要作用^[17],然而高、低纬区相互作用的国际研究大多集中在大西洋,难以回答太平洋的问题。因此,在西太平洋开展从暖池到南大洋的研究,必将能提供新的视角,为中国在海洋学和气候变化研究上作出国际贡献开拓新领域。

4 深海资源

随着全球海洋经济的快速发展,深海资源逐渐成为人类探索的新热点。深海资源主要包括油气资源、天然气水合物、矿产资源和生物资源等。这些资源的开发,对于满足人类的需要、推动经济的发展具有重要意义。

深海是全球油气产业最重要的发展领域,也是中国油气能源增储上产的重要领域。国际上一般将水深超过300 m海域的油气资源定义为深水油气,1500 m水深乃至更深的称为超深水。数据显示,全球超过70%的油气资源蕴含在海洋中,其中40%来自深水区域,远超常规油气田的资源潜力,因此,深水油气资源将成为新一轮能源争夺主阵地。国际上,深海油气勘探开发起步于20世纪七八十年代,墨西哥湾、北海、西非、南美等全球主要深水海域均已建成规模性深水油气田,且重大深水油气发现持续不断。南海石油储藏丰富,被誉为“第二个波斯湾”,占中国油气总资源量的1/3,其中70%的储量蕴藏于深海深水区域^[18]。中国已建成多个大型自营深水油气田,“深海一号”的建成投产标志着中国海洋石油勘探开发能力全面进入“超深水时代”,已经具备较为成熟的1500 m深水油气勘探开发能力。当前,中国深海油气勘探开

发尚处于起步阶段,虽已在部分技术与装备领域实现了局部突破,但在整体技术能力、技术水平方面尚处于跟跑阶段。未来,中国深海油气开发将向3000 m以深海域挺进,在超深水油气勘探开发、钻完井和海洋工程技术与装备体系等方面面临的难题,亟需在“十五五”期间攻关解决。

深海蕴藏天然气水合物,俗称“可燃冰”。国际上,美国在阿拉斯加北坡陆域冻土区开展了多次水合物试验,并与日本在该区域合作开展陆域冻土带天然气水合物长期试采;日本在2013年和2017年完成2次海域试采后,2023年在志摩半岛海域再次完成了短期开采试验。加拿大、韩国、印度主要在开展相关基础研究,通过钻探等调查手段,查明各自资源禀赋。中国成功实施两轮海域天然气水合物试采,基本摸清中国南海海域水合物资源家底。面对中国海域天然气水合物产业化开发的需求和部署,目前还存在着支撑产业化开发的、单个较大储量的天然气水合物矿藏储备不足,高产、稳产等产业化开发技术和低成本开发工艺尚未建立,产业化开发长期、高效的地质环境安全评估机制不成熟等关键技术问题,都亟需在“十五五”期间攻关解决。

深海具有种类丰富且资源量巨大的金属矿产资源,是未来接替和补充陆地金属矿产资源短缺的重要途径。深海金属矿产包括多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物和深海稀土4类,其富含Co、Ni、Mn、Cu、稀土元素(rare earth elements, REE),以及Mo、Te、Pt等关键战略金属,其中Co、Ni、Mn等资源量巨大,远超陆地。多金属结核分布在水下4000~5000 m深海平原的表面,其中锰结核发现得最早。但是,受限于开发技术条件和环境保护需要,锰结核一直没有实现商业开采。富钴结壳呈层状附着在海山的岩石表面,矿藏位置较浅、经济价值高、储量丰富。据估计,仅太平洋的钴储量就达5000万t,相当于陆地储量的7倍。但是,贴在岩石上的结壳只有几厘米厚,开采起来并不容易。多金属硫化物分布在深海热液区,是块状的金属硫化物矿;深海稀土富集于远洋沉积物中,是近年来在深海盆地中发现的一种富含稀土元素的新型海底矿产资源,资源储量巨大,尤其富集重稀土,重稀土比要高于中国南部的稀土矿^[19],是未来重稀土资源开发利用的潜在矿区,目前,中国在深

海稀土的开发利用方面还处于起步阶段。近年来,随着清洁能源技术快速发展,深海金属矿产开采再度被提上日程,但是采矿可能带来的环境问题尚未找到解决办法。如何实现深海矿藏绿色开发^[20],是“十五五”期间不可回避的重要议题。

深海拥有全球最大的生态系统,是生命的起源地和生物资源的最大宝库。深海生物资源的开发利用,须改换思路、另辟蹊径,避免过度捕捞,转而着重于海洋生物多样性的开发。全球大洋大约有 220 万种动物、10 亿种类型的微生物。探索发现,不但深海沉积物里有细菌,海底玄武岩甚至下地壳里也有微生物^[21]。这类生活在地下深处岩石孔隙里的微生物分布极广,构成了地球上最底层的“深部生物圈”,是地球上最大的生态系统。深海生物具有各种各样的“特殊功能”,有的能适应高温高压,有的能在还原缺氧环境下繁盛,提供这些特殊功能的基因是无价之宝,可能给人类带来全新福祉。可见,基因资源是深海生物资源开发的全新方向,相关应用已经初见端倪,在生物制药领域有较为突出的潜力。

5 迎难而上

近年来,深海技术的不断创新,深海科学的飞跃发展,为人类进一步认识海洋、开发海洋创造了条件。“三深”将海洋科技推进到新时期的同时,也面临越来越多的挑战。在大洋钻探方面,日本投入 8.5 亿美元巨资建造“地球号”钻探船,2007 年正式启用服务于大洋钻探时雄心勃勃计划“打穿地壳”。然而,受困于经费与技术发展,2013—2024 年,“地球号”一共只执行了 5 个大洋钻探航次,处于半停顿状态。同样的困难经历也发生在“深网”的发展过程中。2009 年底,加拿大 NEPTUNE 海底观测网络系统作为世界上第 1 个基于电缆的海底观测网络竣工(设计寿命 25 年),设立了板块构造过程与地震动力学、海底流体通量和天然气水合物动力学、区域性海洋/气候动力学及对海洋生物的影响、深海生态系统动力学等深海前沿科学问题,观测对象包括海洋生物、天然气水合物、沉积物、地震、热液和火山等^[22]。然而,建成运行的加拿大 NEPTUNE 系统陷入了获取数据种类和数量繁多,科学应用乏人的被动局面。另一方面,数

据共享机制尚未完善,各国出于科研竞争或国家安全考虑,仍有大量观测数据未开放。此外,重大基础设施建设计划往往也会遇到意想不到的难题,探索深海常常遇到巨大的投资规模和技术难度。

当前,美、日、欧等国家和地区正加速推动“三深”技术的智能化融合与前沿科学布局,中国的“三深”技术和装备也必须向智能化发展,突破“深钻、深潜、深网”能力提升的技术瓶颈,发展“深钻、深潜、深网”联合应用的技术装备,拓展海底硬岩钻探、潜器智能化和协同作业、可重部署的深海智能微网等全球领先的“中国技术”,具备钻穿地壳“莫霍面”的能力,实现深海钻探、原位实验、连续观测与协同作业,稳定获得深海海底原位、长期、连续的现场观测数据以及样品材料,方能将中国的设施优势彻底转化为创新优势与发展优势,最终实现从“装备并跑”到“科学—技术全面引领”的历史性突破。

面对新式重大计划遇到的难题和困难,一方面,要采用大数据、人工智能(artificial intelligence, AI)等信息科学新技术。海底观测网产生的数据具有海量、多源、异构的特点,传统处理方法难以应对,海底观测网通过集成大数据与 AI 技术,实现了从数据采集、处理到应用的全链条智能化升级,显著提升了海洋监测的效率与精度。另一方面,要发展配套技术。依靠钻探单一手段解决科学问题的时代正在消逝,而与深网观测、深潜探索相结合的“三深”技术,正在成为未来大洋钻探的新形式。例如,在钻井中设置“海底井塞”(circulation obviation retrofit kit, CORK),对海底下的流体运动进行长期实时监测,甚至进行微生物培养实验,就是大洋钻探成功的案例^[23]。“三深”技术的联合应用,有望突破“三深”手段各自的局限性,充分发挥三大科学设施在地球系统科学研究上的作用。

深海科技研究的困难还来自项目内部,以及单位和系统之间的协调与合作。自然科学范围极广,研究工作的形式也极其多样,深海探索永远离不开团队的合作,协同作战至关重要。简单来讲,深海探索涉及地质、生物、材料、机械、通信等多学科交叉,单一机构难以掌握全部核心技术。例如,载人深潜器需要高强度耐压材料(材料科学)、精准操控系统(机械工程)、生命支持技术(生物医学)的协同;又如,深海观测网依赖水下传感器(电子工程)、数据传输(通信技

术)、能源供应(能源科学)的整合。南海深部计划的成功,靠的就是协作,不同单位、不同学科,围绕着一个科学问题反复探讨、共同攻关。没有科学与技术的结合,没有生产部门、科研院所和高校的合作,没有原先不相干专业的相互渗透,南海深部计划不可能成功。2025年北极深潜任务的成功,不仅验证了中国载人潜水器和深潜作业母船在极地冰区的作业能力,更确立了中国在载人深潜技术领域的国际领先地位。该任务由自然资源部和中国科学院联合组织,中国科学院深海科学与工程研究所牵头实施,多家科研单位的通力合作,从项目立项到装备研制,从人员培训到任务执行,靠的也是协作。深海科技的合作本质是“人类命运共同体”在海洋领域的实践。从技术突破到资源治理,从科学发现到生态保护,唯有通过开放、包容、互信的协作,才能解锁深海这一“地球最后边疆”的潜力。

中国的海洋事业正在经历着黄金时期,国内正值科教兴国的高潮,国际恰逢世界经济发展放慢,为中国“弯道超车”提供了机遇。深海科技竞争,是一场关乎未来国运的国际竞争。“三深”技术作为这场较量的核心装备,其发展已进入决定成败的关键赛点。只要全国协力同心挺进深海,过好华夏振兴之路的“海洋关”,必将为世界科学作出前所未有的历史贡献^[24]。

参考文献 (References)

- [1] Kopf A J, Camerlenghi A, Canals M, et al. The deep sea and sub-seafloor frontier[J]. Germany: European Commission, 2012: 1–57.
- [2] 中国大洋发现计划办公室, 海洋地质国家重点实验室(同济大学). 大洋钻探五十年[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [3] Koppers A A P, Coggon R. Exploring Earth by scientific ocean drilling: 2050 science framework[M]. San Diego: University of California, 2020.
- [4] 拓守廷, 王文涛. 国际大洋钻探2050科学框架及其对未来大洋钻探发展的启示[J]. 地球科学进展, 2022, 37(10): 1049–1053.
- [5] Wang P X. New insights into marine basin opening[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 870.
- [6] Lissenberg C J, McCaig A M, Lang S Q, et al. A long section of serpentinized depleted mantle peridotite[J]. Science, 2024, 385(6709): 623–629.
- [7] 李硕, 赵宏宇, 封锡盛. 中国深海机器人研究进展与发展建议[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 49–59.
- [8] Peng X T, Du M R, Gebruk A, et al. Flourishing chemosynthetic life at the greatest depths of hadal trenches[J]. Nature, 2025, 645(8081): 679–685.
- [9] Su L, Marshall I P G, Teske A P, et al. Genomic characterization of the bacterial phylum candidatus effluviacota, a cosmopolitan member of the global seep microbiome[J]. mBio, 2024, 15(8): e00992–e00924.
- [10] Luo L Q, Dang H W, Zeng Z W, et al. Zonation of a cold-water coral garden on the northern continental slope of the South China Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2025, 224: 104574.
- [11] 陈旭光, 寇海磊, 牛小东, 等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 1–14.
- [12] 吕枫, 翦知潜. 海底观测网技术研究与应用进展[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 79–91.
- [13] 汪品先. 南海深部过程的探索[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 6–20.
- [14] 汪品先, 翦知潜. 探索南海深部的回顾与展望[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(10): 1590–1606.
- [15] Quilop R J G. Asia's cauldron: The South China Sea and the end of a stable Pacific[J]. Philippine Political Science Journal, 2015, 36(1): 110–112.
- [16] Naish T, Powell R, Levy R, et al. Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations[J]. Nature, 2009, 458(7236): 322–328.
- [17] Jian Z M, Yu J M, Wang Y, et al. Equatorial Pacific Sea-air CO₂ exchange modulated by upper ocean circulation during the last deglaciation[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(22): e2023GL105169.
- [18] 周守为, 李清平, 朱海山, 等. 海洋能源勘探开发技术现状与展望[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 19–31.
- [19] Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(8): 535–539.
- [20] 李家彪, 王叶剑, 刘磊, 等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 92–102.
- [21] Li J T, Mara P, Schubotz F, et al. Recycling and metabolic flexibility dictate life in the lower oceanic crust[J]. Nature, 2020, 579(7798): 250–255.
- [22] Committee on Seafloor Observatories. Challenges and opportunities, ocean studies board, national research council [M]//Illuminating the Hidden Planet: The Future of Seafloor Observatory Science. Washington DC: National Academy Press, 2000.
- [23] Orcutt B N, Sylvan J B, Knab N J, et al. Microbial ecology of the dark ocean above, at, and below the seafloor[J].

Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2011, 75(2): 361–422.

[24] 汪品先. 深海的机遇与中国的选择[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(18): 6–11.

Frontiers and prospects of deep-sea science and technology

JIAN Zhimin, YU Xun, WANG Pinxian

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract The deep sea is not only a mystery of life and repository of resources, but also a critical element of national security, constituting a vital strategic domain for the sustainable development of humanity. To develop China into a strong maritime nation, it is imperative to advance into the deep sea. To this end, the 2025 Government Work Report has, for the first time, identified "deep-sea science and technology" as an emerging industry. This article highlights that, thanks to rapid advancements in "deep drilling, deep diving, and deep-sea networking" technologies, China has developed world-class capabilities in "deep-sea access, deep-sea exploration, and deep-sea development." Significant progress has been made in areas such as deep-sea drilling, deep-sea diving, and deep-sea observation networks. Notably, the "South China Sea Deep-Sea Research Initiative" has achieved breakthrough results, including the discovery of low-latitude drivers. In the future, exploration in the South China Sea will expand to the southern basin, and China's deep-sea research will advance toward full-ocean-depth and all-sea-area investigations, promoting deeper integration between deep-sea and polar exploration. The deep sea holds abundant and valuable resources. Currently, China faces a historic opportunity to establish a "Chinese School" of Earth system science, starting from deep-sea research. It is essential to build upon the foundation of the South China Sea, broaden the perspective to the global ocean, accelerate the strategic development of deep-sea science and technology, foster new productive forces in deep-sea resource utilization, and promote the intelligent integration of "deep drilling, deep diving, and deep-sea networking" technologies with multidisciplinary collaboration. Leveraging new technologies such as big data and supporting technological innovations will provide crucial support for China's goals of becoming a maritime power and a global leader in science and technology.

Keywords deep-sea science and technology; deep-sea resources; deep-sea drilling; deep-sea diving; deep-sea observation network ●



(责任编辑 王丽娜)