

海洋区域地质调查技术方法进展

闫凯^{1,2,3}, 孙军², 杨慧良², 吴志强^{2,3}, 郭兴伟^{2,3}, 温珍河^{2,3}, 侯方辉^{2,3}

(1. 中国石油大学(华东) 青岛 266580; 2. 青岛海洋地质研究所 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室矿产资源评价与探测技术功能实验室 青岛 266235)

摘要:近年来,我国海洋区域地质调查工作取得长足进步,在完成了中国海域1:100万海洋区域地质调查全覆盖基础上,在海洋环境、油气和天然气水合物等方面均有新发现和新突破。文章综述了我国区域地质调查中常规和非常规的各种技术方法,以及调查船和平台的特点和适用性,并指出目前我国海洋区域地质调查技术方法已步入快速发展阶段,虽然部分海洋区域地质调查技术在国际上已成为行业标准,如深海钻探技术,但仍存在部分高端技术方法短缺、调查装备受制于人等问题。期望随着我国海洋地质调查投入的不断加大,调查技术方法预期会不断突破,未来有望达到国际海洋区域地质调查领域的领军水平,不断为海洋区域地质调查提供支持和注入新动力。

关键词:海洋区域;地质调查;海洋地质;基础地质;调查现状

中图分类号:P736

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2018)09-0107-08

Progress in Technologies and Methods of Regional Marine Geology Survey

YAN Kai^{1,2,3}, SUN Jun², YANG Huiliang², WU Zhiqiang^{2,3},
GUO Xingwei^{2,3}, WEN Zhenhe^{2,3}, HOU Fanghui^{2,3}

(1. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology/ Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao 266237, China)

Abstract: In recent years, China's marine regional geological survey has made great progress. Based on the complete coverage of 1:100 million marine regional geological survey, new discoveries and breakthroughs had been made in marine environment, oil and gas and gas hydrate. This paper reviewed the regional geological survey of China in conventional and unconventional methods, and the characteristics and applicability of survey ship and platform, and pointed out that the technical methods of marine regional geological survey in China had stepped into the stage of rapid development, although some regional marine survey technologies had become the industry standard in the world, such as deep-sea drilling technology, but there were still some high-end technology, prob-

收稿日期:2018-03-06; 修订日期:2018-07-25

基金项目:国家海洋地质专项项目(DD20160147);国家自然科学基金项目(41776081,41210005);地质调查专项(12120100400050013).

作者简介:闫凯,硕士研究生,研究方向为海洋地质学

通信作者:杨慧良,高级工程师,硕士,研究方向为海洋地球物理

lems such as shortage of heteronomy survey equipment. It was expected that with the increasing investment in China's marine geological survey, the survey technologies and methods were expected to continue to break through. In the future, it is expected to achieve the leading level in the field of international marine geological survey, and continue to provide support and new impetus for marine regional geological survey.

Key words: Marine and ocean space, Geologic survey, Marine geology, Basic geology, Survey status

0 引言

海洋区域地质调查内容主要包括地形地貌、海底底质、海底浅层地质、地质构造、海洋环境和海底矿产资源评价等。海洋区域地质调查目的在于运用海洋调查新技术方法手段,系统地采集海洋地质基础数据,查明或基本查明测区地质特征及矿产资源分布,为国家提交基础地质图件和相应调查报告;为海洋经济建设与可持续发展提供区域性科学依据;为国土资源开发利用、管理规划及资源保护服务;对海洋新能源开发,海洋地质灾害预防,维护国家海洋权益等,都有重要的调查意义^[1-2]。

近年来,随着海洋区域地质调查范围从近海逐步扩展到深海,调查方式从船载调查逐渐发展为船载调查、航空物探遥感及水下探查的立体式综合调查。伴随海洋区域地质调查覆盖范围不断扩大,国家主权权益维护、环境保护和能源矿产勘探开发的支撑力度不断加强,在2015年首次实现了我国管辖海域300万km²余1:100万海洋区域地质调查全覆盖;在2017年成功实现了南海海域天然气水合物的试开采^[3]。相比国外海洋区域地质调查技术水平,我国偏低。如美国、日本在20世纪90年代就实现了1:100万的海洋区域地质调查,并进行了多次不同比例尺的海洋区域调查;俄罗斯针对有远景的区域进行了1:20万的大比例尺调查;韩国在2009年实现1:25万海洋区域地质调查^[4]。面对海洋区域地质调查工作的全面推进,我国海洋区域地质调查形势依然严峻。

海洋区域地质调查技术方法包括两大类:一是海洋地质调查技术方法;二是海洋地球物理调查技术方法。海洋地质调查技术方法包括表层地质取样、柱状地质取样和海底钻探(浅钻)。地球物理调查技术方法包括水深测量(单波束测深、多波束测

深)、侧扫声呐测量、浅地层剖面测量、地震测量(单道地震、多道地震与小多道地震)、重力测量(船载重力、卫星重力和航空重力)、磁力测量(船载磁力、卫星磁力和航空磁力)和OBS探测技术等。另外,航空航天遥感技术、ROV/HOV技术、雷达测量技术以及钻探平台技术等非常规技术也逐步应用于海洋区域地质调查中。本研究在海洋区域地质调查实践的基础上,结合前人研究成果,系统介绍了海洋区域地质调查技术的发展状况,总结了各调查技术方法的优、缺点,并探讨了各调查方法未来的发展趋势。

1 海洋地质调查技术方法

1.1 表层地质取样

表层地质取样采用蚌式抓斗取样器、箱式取样器、地质拖网等方法采集,其采用的方法多为传统采样手段,主要了解海底表层地质类型、物源及其分布规律等。

随着海洋区域地质调查技术的进步,表层地质取样技术逐步向可视化、可控化、动力化以及水下自动定位方向发展,如电视抓斗、ROV系统取样等。新型海底取样设备便于取样工作和安全防护,可直接对取样目标进行取样,大幅度提高作业效率。

1.2 柱状地质取样

柱状地质取样采用重力活塞取样器、大型重力活塞取样器、振动活塞取样器等方法取样,上述3种采样方式为传统活塞式取样,其目的为了解表层沉积物的类型、物理化学特征和分布规律等。

传统的重力活塞受自重和下落高度的影响,取样长度一般较短,且重锤回收在舷边作业,危险性较高;马达动力、海流等因素影响限制了常规振动取样器的使用。因此,针对常规柱状取样器的局限性,新型触探杆触发的重力活塞取样器节省了安装

与拆重锤等繁琐步骤,在生产以及安全操作上相比原先的重力活塞取样器具有很大优势^[7]。新型的液动冲击海底取样器具有取样速度快、取样质量高、取样深度大等优点,针对重点研究的目标层,能多次获取样品^[8]。

1.3 海底地质钻探(浅钻)

海底地质钻探(浅钻)主要采用海底浅层岩芯钻取机、液动海底冲击式勘探器、回转式海底取样器等方法来获得海底浅部地层岩芯。海底地质钻探目的在于了解沉积物类型、分布特征、地层厚度和沉积结构及沉积环境等。海底地质浅层钻探为海洋区域地质调查获取大量的实物样品信息,既是对地球物理手段揭示地层特征的验证,也是其补充。

我国海底地质浅层钻机于2003年研制成功,2004年在“大洋一号”科考船上成功采集了大量海底沉积物样品^[9]。海底地质钻探技术发展趋势逐渐向自动化、数字化方向发展。相比于国外的海底定点取样技术,我国还未能实现该技术全部国产化。

2 海洋地球物理调查技术方法

海洋地球物理调查技术方法主要利用地球物理调查方法获取数据资料来查明海底地形特征、地层结构、地质构造及其展布规律,初步探明海底矿产的类型、规模及分布,为矿产资源前景评价提供基础数据。

2.1 水深测量

水深测量是了解水深变化和海底地形、地貌特征的主要技术手段。水深测量方法包括单波束测深与多波束测深。单波束根据频率可分为单频测深仪和双频测深仪,其主要工作频率约在10~200 kHz变化范围,测量精度受限于水深变化和相应的频率。我国1:100万海洋区域地质调查已实现单波束同步测深全覆盖。多波束测深较单波束测深具有测量范围大、高精度、高密度和高效率的特点。多波束测深主要工作频率在10~400 kHz范围内,测量方式分为等角、等距和高密度模式,不同测量方式下,获得的测深点数不同。多波束测深系统已实现全海域水深测量,其中浅水多波束系统测量精度达1 cm。

水深测量技术的发展受限于传统结构模型、成

图方法理念的落后以及波束角与水深变化等因素,因此,大力发展精密水深测量技术是未来海洋区域地质调查的必然趋势^[10-14]。

2.2 侧扫声呐测量

侧扫声呐测量主要是了解海底地形、地貌等变化,其测量方式分为单频与双频模式。单频测量工作深度在1 km以内。双频侧扫声呐测量频率分为低、高频,测量工作深度约2 km。

侧扫声呐测量技术的散射和噪声干扰问题是制约侧扫声呐测量技术发展的关键因素^[13,15-16]。目前我国海洋区域地质调查使用的相关侧扫声呐仪器基本从国外进口,国产侧扫声呐技术仍需大力发展。

2.3 浅地层剖面测量

浅地层剖面测量是利用声波穿过不同的地层时存在界面反射特性来反映沉积物地质属性,对查明海底浅部地层结构、沉积环境、浅部潜在地质灾害因素等具有重要作用^[17]。前几年应用比较广泛的SES系列、SBP系列,如SES-96参量阵浅地层剖面仪,主频100 kHz;差频4 kHz、5 kHz、6 kHz、8 kHz、10 kHz、12 kHz;工作范围1~400 m;穿透深度最大可达50 m;分辨率最高可达5 cm。在“海洋地质九号”调查船设备测试中搭载的Para sound P70全海深浅剖测量系统,其测量工作水深达12 000 m;穿透深度达200 m;最高距离分辨率达6 cm。

随着海洋地质调查工作的持续进行,对浅地层剖面测量的震源能量、发射频率、穿透深度及分辨率等技术要求也不断提高,未来浅地层剖面测量技术的发展趋势主要以参量阵技术和超宽频浅层剖面系统技术为发展目标,把高精度,低能耗作为研究方向^[13,18]。

2.4 海洋地震测量

海底底部具有复杂的介质环境,地震波在其中传播会遇到不同的反射强度,地震测量技术就是利用不同介质具有不同信号反射波的特点来获取海底地层数据,地震测量分为单道地震测量、小多道地震测量以及多道地震测量。

传统的多道地震测量排列长、道间距大、近海

施工复杂,通常适用于海底千米深度以下深层探测,用于探测海底地层结构、地质构造及海洋油气资源等;单道地震测量技术其主要用于浅部的地层,了解地层厚度、层序与结构构造以及构造运动等,成本相对多道地震要小,但缺少多次覆盖,信噪比低等缺点。目前用于海洋区域地质调查的地震勘探基本采用多枪组合方式(GI枪或G枪阵),相对于电火花震源,气枪震源能量大具有更强的穿透能力,根据海底状况,能最大穿透地层1 000 m,可以在高噪声背景下工作,缺点在于不适合深水作业,拖拽不便利,有汽包效应干扰等^[19-22]。

小多道高精度海洋地震探测技术能采取前两者技术方法中的优点,但也有介于两者之间的缺点。由于国外对我国实施小道距高分辨率海洋地震全数字拖缆技术出口限制,因此,发展海洋小多道地震高精度探测技术对我国海洋区域调查技术提高有极大帮助,不仅体现在我国海洋基础调查能力提升方面,更重要的是打破国外对该技术的封锁^[23-28]。

2.5 海洋重力测量

海洋重力测量主要研究测区内重力场变化,研究重力异常变化,进而研究地质构造、地壳结构和勘探海底矿产等。海洋区域地质调查的重力测量方法包括:海底重力测量、船载重力测量、海洋航空重力测量和海洋卫星重力测量。就测量精度而言,一般认为海底重力测量最高,船载重力测量较高,海洋航空重力测量次之,海洋卫星重力测量最低。目前应用较广的为船载海洋重力仪,其中KSS-31M型重力仪最为普遍,随着调查精度要求的提高,德国Bodenseewerk公司在KSS-31M型重力仪基础上研制了高性能的KSS-32M重力仪。

目前,海洋重力测量仪器的测量精度主要受控于传感器敏感度和陀螺平台稳定性等因素,因此,海洋重力测量仪器发展方向是提高传感器精度及陀螺平台稳定性^[29]。航空重力测量随着技术的进步已投入到调查实践中,其中,对重力异常高频分量非常敏感的航空重力梯度测量技术,有着广阔的国防与科研应用前景,但该技术为对我国实施封锁的国外高精尖技术,因此突破此技术对海洋区域地

质调查有着重大科研与经济意义^[30]。卫星测高技术为海洋重力测量拓宽了领域,并且成为海洋重力数据的一个重要数据来源^[31]。

2.6 海洋磁力测量

海洋磁力测量对研究地磁场及其变化、地质构造和海底矿产探测等具有重要意义。海洋磁力测量方式主要包括:海洋船载磁力测量、海洋航空磁力测量和海洋卫星磁力测量。就当前的技术测量精度而言,一般认为船载磁力测量最高,航空磁力测量次之,卫星磁力测量最低。海洋船载磁力测量仪器,如Sea SPY海洋磁力仪,具有高灵敏度,高精度,全方向探测等优点,可在全球工作,没有温度漂移,工作温度在 $-45^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

近年来海洋船载磁力测量技术由传统的磁通门式传感器更新为钽光泵式传感器,该技术大幅度提高了传感器的灵敏度和精度,并且由单一探头升级为多探头同时工作,减小了测区内的测量误差,提高了测量数据质量^[32-33]。航空磁力测量与国外的差距在于全轴梯度测量和三分量测量技术的成熟运用,并且国内对动态噪声的压制还未达到国际水平^[34]。

2.7 OBS探测技术

OBS探测技术是将海底地震仪(Ocean Bottom Seismometer, OBS)直接放置在海底的地震探测系统,是海洋深地震探测的主要方法之一。按照记录信号源频率的不同,OBS可以分为短周期和长周期(宽频带),短周期OBS用于对海洋人工地震剖面的探测(人工源探测),探查洋壳和地幔的速度结构及板块俯冲带、海沟、海槽演化的动力学特征等;长周期OBS用于观测天然地震(被动源探测),等同于在海底布设流动地震台站,研究天然地震的地震层析成像以及地震活动性和地震预报等。与多道地震探测相比,OBS摆脱了电缆的束缚,直接沉入海底,消除了海水层对地震信号的衰减影响,具有非常深的探测深度;三分量OBS避免了地震横波在海水中不能传播的限制,可以接收到转换横波信号,为地层岩性的识别提供了依据^[35-37]。

随着OBS探测技术的发展和制造成本的下降以及海洋地球科学发展的急切需求,以OBS为技术

手段的海洋地震观测系统被广泛应用于海底结构探测、海洋地震监测以及海洋资源勘探等方面^[36]。我国 OBS 探测技术起步晚,但进展迅速,在南海、渤海、黄海、东海以及深海大洋探测陆续取得重要成果^[35,38-42]。探测方法也由单一的二维测线探测转向海陆联合探测、三维 OBS 探测、纵横波研究及被动源观测等多元结合的测量方法^[43]。

3 非常规区域调查方法

进入新世纪以来,随着海洋区域地质调查工作的迅速发展,新技术、新方法不断创新,越来越多的新的海洋调查装备和技术手段应用于海洋地质调查工作中^[44-48],其中包括遥感探测技术、ROV/HOV 技术以及雷达测量技术等^[49-53]。

随着航空磁力测量技术与遥感探测技术等多元信息融合日益成熟,遥感探测技术凭借其综合性应用技术特征和优势,在地质矿产、海洋渔场调查和气象预报等领域均发挥重要作用^[54-56]。遥感探测技术的引进和应用,改变了地理分析的模式和流程,为海洋区域地质调查填图增加了新的数据框架,已成为当前海洋地学发展中具有重要意义的变化和动向之一。

ROV 探测技术是水面母船的技术人员通过电缆脐带操纵或控制潜水器,利用搭载的水下电视、声呐、机械手等专用设备进行水下观察和作业。随着海洋科技的不断进步,深海调查对探测技术手段要求也越来越高,借助 ROV 系统进行水下高精度定位、高精度操控,实现海底原位观测,满足原位可视、精准取样、实时监控以及人工干预的技术要求。近些年来,我国水下探测人工智能系统快速发展,“海马”号、“蛟龙”号、“发现”号、“深海勇士”号等水下机器人或深潜器在海洋探测方面发挥了巨大的作用,取得了显著的成果^[57-59]。目前国内 ROV/HOV 技术仍然处于起步阶段,随着海洋调查技术的不断发展和完善,利用该技术进行海洋区域地质调查将会大幅度提高调查精度和装备水平^[57-59]。

应用于海洋区域地质调查的雷达测量技术,不仅能够进行地质填图,还可使用于滑塌沉积和海底浅层(包括全新世海岸沉积,第四纪沉积等)等沉积地形,分辨率高达 1 m^[63-65]。该技术在国内外还未成

熟运用,更多的是在海岸线和内陆的勘探测量,而且对海洋区域调查机载雷达的技术要求要远远高于内陆雷达测量^[63-64]。雷达测量技术与遥感测量技术是实时监测手段,如果能够与其他地球物理勘探方法获得的数据相结合,能有利于提高区域地质调查数据的准确性和测量精度。

4 海洋调查船与钻探平台

4.1 海洋调查船

随着海洋调查工作的推进,由于测量方式的多样化以及测量范围的扩大,20 世纪 80 年代的调查设备已不能满足目前测量的需求,因此对调查设备需求迫切,我国加大了对相关海洋科研单位的装备投入^[66-67]。进入 21 世纪后,先后装备了多艘科考船,极大地提高了船舶驾驶和海洋调查的自动化水平,实现了高程度的网络化覆盖,便于与陆上系统及其他调查船之间联网,实现了资源、数据库资料共享和调查数据交换等。

如“海洋地质九号”是一艘多功能综合地质调查船,拥有国际上最先进的综合导航定位系统等 10 余套调查设备系统,其代表了我国调查船舶设计和制造的最高水平。“海洋地质八号”是一艘专业的地球物理调查船,采用了高分辨率短道距三维地震测量系统等国际先进地球物理设备系统,满足重点海域的水合物调查、油气资源调查等工作需求。

目前装备的多艘调查船舶逐步向计算机网络化、自动化、建造模块化、船型多样化、调查学科专业化及深潜需求加大等船舶研究方向发展,有利于我国进入深海,有助于探索更多的未知和有待解决的海洋科学问题。

4.2 海洋钻探平台

深海钻探经过多年的发展,其勘探领域已达到水深 6 000 m 的深海区。随着深海油田的不断发现,创新了一些适用于深海开发的海上勘探处理装置。深海钻探平台的发展,对于研究深海构造、地质演化以及板块运动都有重大的科学研究和经济意义。

多年来,随着深海钻探技术的进步,其钻探技术取得了惊人的研究成果^[70-74]。海洋钻探平台被少数国家长期垄断的局面被打破,目前我国深海钻探

取样技术已步入国际领先前列,如高强度锚链、DPS3全动力定位,拥有全球第一艘同时具备3 000米级深水铺管能力及4 000吨级重型起重能力的深水铺管起重船。海洋钻探技术将呈现出多渠道、多国化的发展局面,并且海洋钻探平台向自动化方向发展。

海洋调查船舶与钻探(科研、油气开发)平台快速发展,展现出了蓬勃的发展潜力。从小型钻探平台(如,大陆架科学钻探CSDP-2井)到大型现代化钻探平台(如“海洋石油981”深水半潜式钻探平台)都体现出国内海洋钻探全面发展和整体实力的提升^[1]。要充分利用“引进来,走出去”的技术指导思想,把国内的“科研短板”不断缩小,为大洋钻探和极地钻探,积累经验和明确研究方向。

5 讨论

常规海洋区域地质调查技术方法,有明确的研究目标和成熟的测量技术方法,可获取调查区的基础地质状况,其中对近海地形地貌、海底地质类型、地质构造、浅部地层的分布规律以及物质来源等调查,基本满足目前我国科研与经济的要求。在海洋区域地质调查基础上,对海洋油气、矿产资源探测的进一步调查和勘探,也基本能满足海岸带环境、天然气水合物、油气资源等的需求。但随着技术的进步和探测范围、探测深度的加大以及面对国外高端技术的封锁,其常规技术方法已不满足深海的地质调查需求。

近年来,非常规海洋区域地质调查技术方法的逐渐成熟,对弥补常规调查技术的短板发挥了重要作用。ROV/HOV技术的应用和研究,对水下地质取样、生物标本获取以及搭载调查设备,可多次,多地点精准取样。缺点是水下活动范围受限于缆绳长度或者导航范围。目前深海钻探平台研究建设,其技术已跻身国际领先水平,如“海洋石油981”深水半潜式钻探平台。

中国现有涉海科研机构百余个、科研人员高达13 000余人,未全部实现配备现代化测量设备、现代船舶和相关专业人员的培训。因此,为我国满足海洋勘探长远发展的战略要求,要尽快实现现代化测量技术方法,替换老旧调查设备,并重视专业技术人员的引进和培训。

对于深海区域地质调查,我国还处于落后阶段;对于浅海的动态监测,已无法满足当前的社会发展需求;对于海岸带的演化趋势,是否能够满足未来经济发展和环境保护,仍要不定期坚持勘查和测量,为我国海洋环境保护和海洋经济发展树立安全“隔离带”^[76-78]。

6 结论

常规海洋区域地质调查技术方法、调查设备及钻探平台方面,利用我国现有的海洋区域地质调查技术方法,完成了大比例尺海洋区域调查全覆盖及重大科研项目。近年来,我国迅速更换调查设备,加快了海洋区域地质调查工作速度。深海钻探技术,已崭露头角,如“海洋石油981”深水钻探平台则代表了国际领先水平。而浅海、深海的探测技术、仪器和相关人员配备等仍有缺口,与当前的调查形势需求相比无法承担其重大调查任务。一些被国外限制的高精尖技术,国内尚未得到有效解决,并且海洋区域地质调查开始出现调查船多于调查任务的现象,应统筹规划好相关调查船舶。

非常规海洋区域地质调查技术方法方面,ROV/HOV等技术取得突破性进步,并取得重大科研成果。雷达测量技术与遥感探测技术等多元技术的融合,对海洋环境监控和海底生物活动等逐渐显现实时动态监测的优势。

随着我国海洋探测技术的快速发展,国外高精尖仪器的引进,以及相关技术人员的培养等,相信在不久的将来,在很大程度上能够实现近海海域动态监测和测量,在远海的地质勘探中能够进行详细的地质科学研究。

参考文献

- [1] 蓝先洪,张志珣,李日辉,等.我国海域基础地质调查现状与问题[J].海洋地质动态,2010,26(10):40-44.
- [2] 张润丽.中国地质调查科学发展途径与战略研究[D].武汉:中国地质大学,2014:1-150.
- [3] 莫杰,王文海,彭娜娜,等.我国海洋地质调查研究新进展[J].中国地质调查,2017,4(4):1-8.
- [4] 许东禹.国外地质调查所海洋地质测绘概况和我们的建议[J].海洋地质动态,2000(3):1-5.
- [5] 耿雪樵,徐行,刘方兰,等.我国海底取样设备的现状与发展趋

- 势[J].地质装备,2009,10(4):11-16.
- [6] 王俊珠,刘碧荣.多管取样器常见故障及原因分析[J].科技资讯,2013,26:75-76.
- [7] 王俊珠.新型重力活塞取样器的可行性研究[J].科技与企业,2013(23):337.
- [8] 卢春华,邵春,鄢泰宁,等.新型液动冲击海底取样器及触探技术[J].工程勘察,2010,38(8):27-30.
- [9] 于彦江,胡波,姚永坚,等.深海浅钻在海洋区域地质调查中的应用[J].海洋地质前沿,2013,29(11):44-49.
- [10] 罗凯.水深测量研究进展及研究意义[J].科技创新导报,2008(13):180.
- [11] 胡银丰,朱辉庆,夏铁坚.现代深水多波束测深系统简介[J].声学与电子工程,2008(1):46-48.
- [12] 李海森,周天,徐超.多波束测深声呐技术研究新进展[J].声科学技术,2013,32(2):73-70.
- [13] 吴自银,郑玉龙,初凤友,等.海底浅表层信息声探测技术研究现状及发展[J].地球科学进展,2005(11):58-65.
- [14] 廖剑波.海洋多波束测深技术应用研究[J].科技资讯,2013(27):40-41.
- [15] 朱维庆,刘晓东,张东升,等.高分辨率测深侧扫声呐[J].海洋技术,2005(4):29-35.
- [16] 李勇航,牟泽霖,万芄.海洋侧扫声呐探测技术的现状及发展[J].通讯世界,2015(3):213-214.
- [17] 李长勤,蔡春麟,周政,等.浅地层剖面测量在海洋井场调查中的应用和解释[J].海洋地质前沿,2014,30(9):59-63.
- [18] 李平,杜军.浅地层剖面探测综述[J].海洋通报,2011,30(3):344-350.
- [19] 杨文达,刘望军.海洋高分辨率地震技术在浅部地质勘探中的运用[J].海洋石油,2007(2):18-25.
- [20] 岳保静.单道地震资料处理方法及应用[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2010:1-101.
- [21] 邢磊.海洋小多道地震高精度探测关键技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2012:1-155.
- [22] 褚宏宪,杨源,张晓波,等.高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J].海洋地质前沿,2012,28(12):70-74.
- [23] 杨勤勇,徐丽萍.地震勘探技术新进展[J].勘探地球物理进展,2002,25(1):5-10.
- [24] 刘建勋.提高海上单道反射地震记录信噪比和分辨率的方法技术[J].物探化探计算技术,2007(S1):116-120+10+9.
- [25] 赵锴.地震勘探技术新进展:中国地球物理学会年会地震新技术简介[J].中国煤田地质,2007,19(2):54-55.
- [26] 程建远,王寿全,宋国龙.地震勘探技术的新进展与前景展望[J].煤田地质与勘探,2009,37(2):55-58.
- [27] 吴志强,闫桂京,童思友,等.海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J].地球物理学进展,2013,28(6):3056-3065.
- [28] 刘依谋,印兴耀,张三元,等.宽方位地震勘探技术新进展[J].石油地球物理勘探,2014,49(3):596-610.
- [29] 张向宇,徐行,廖开训,等.多型号海洋重力仪的海上比测结果分析[J].海洋测绘,2015,35(5):71-74,78.
- [30] 王静波,熊盛青,周锡华,等.航空重力测量系统研究进展[J].物探与化探,2009,33(4):368-373.
- [31] 金翔龙.海洋地球物理技术的发展[J].东华理工学院学报,2004(1):6-13.
- [32] 秦清亮.海洋磁力测量技术设计关键技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015:1-71.
- [33] 高维,舒晴,屈进红,等.国外航空物探测量系统近年来若干进展[J].物探与化探,2016,40(6):1116-1124.
- [34] 熊盛青.我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势[J].地球物理学进展,2009,24(1):113-117.
- [35] 祁江豪,张训华,吴志强,等.南黄海 OBS 2013 海陆联合深地震探测初步成果[J].热带海洋学报,2015,34(2):76-84.
- [36] 夏少红,曹敬贺,万奎元,等.OBS 广角地震探测在海洋沉积盆地研究中的作用[J].地球科学进展,2016,31(11):1111-1124.
- [37] 吴志强,陈建文.OBS 在我国海洋深部地质调查中的应用现状和前景[J].海洋地质动态,2008(9):35-42.
- [38] 欧阳青,吴振利,卫小冬,等.南海海盆残留扩张中心地壳速度结构对比及构造意义[J].科学通报,2017,62(21):2380-2391.
- [39] 支鹏遥,刘保华,华清峰,等.渤海海底地震仪探测试验及初步成果[J].地球科学进展,2012,27(7):769-777.
- [40] 刘丽华,吕川川,郝天珧,等.海底地震仪数据处理方法及其在海洋油气资源探测中的发展趋势[J].地球物理学进展,2012,27(6):2673-2684.
- [41] 栾锡武,秦蕴珊,张训华,等.东海陆坡及相邻槽底天然气水合物的稳定域分析[J].地球物理学报,2003(4):467-475.
- [42] 吴振利,李家彪,阮爱国,等.南海西北次海盆地壳结构:海底广角地震实验结果[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1463-1476.
- [43] 孟祥君,张训华,吴志强,等.OBS 调查技术方法及其在南黄海的应用[J].海洋地质前沿,2014,30(7):60-65.
- [44] 李廷桓.综合技术在南海北部区域海洋工程地质调查中的应用[J].地球科学进展,1993,8(2):66-70.
- [45] 寿嘉华.我国海洋地质工作发展战略[J].地质通报,2002,21(12):803-806.
- [46] 徐晓芳,邓玉友,何展翔.从 76 届 SEG 年会看综合物化探技术的发展方向[J].物探装备,2007,17(1):18-20.
- [47] 牟宝川,李晓斌,郭芳.宝石钻机迈向海洋地质勘探领域[N].中国石油报,2015-10-20(004).
- [48] 曾凡祥,彭朝旭,易锋.ORCA 海洋综合导航定位系统测线设计与实现[J].海洋地质前沿,2015,11:58-63.

- [49] YOUNG P D, COX C S. Electromagnetic active source sounding near the East Pacific Rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 1981, 8: 1043-1046.
- [50] MACGREGOR L M, SINHA M C. Use of marine controlled source electromagnetic sounding for sub-basalt exploration[J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 48: 1091-1106.
- [51] 孙卫斌, 李德春. 海洋油气电磁勘探技术与装备简介[J]. *物探装备*, 2006, 16(1): 16-18, 32.
- [52] 何展翔, 余刚. 海洋电磁勘探技术及新进展[J]. *勘探地球物理进展*, 2008, 31(1): 2-9.
- [53] 田伟男. 浅析海洋可控源电磁勘探技术及前景[J]. *科技展望*, 2016, 26(15): 93.
- [54] 黄海. 我国地学领域遥感应用新进展[J]. *国土资源遥感*, 1996(1): 9-15, 25.
- [55] 薛重生. 遥感技术在区域地质调查中的应用研究进展[J]. *地质科技情报*, 1997(增刊).
- [56] 陈星. 遥感技术在区域地质调查中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 1-47.
- [57] 许竞克, 王佑君, 侯宝科, 等. ROV的研发现状及发展趋势[J]. *四川兵工学报*, 2011, 32(4): 71-74.
- [58] 盛堰, 谭鹰, 陈宗恒, 等. ROV在我国海洋区域地质调查中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(11): 67-71.
- [59] 彭登, 徐行, 徐鸣亚, 等. ROV专用的海底热流探测技术与应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(1): 295-299.
- [60] 朝胜, 陈惠玲. 我国成功研发首台4500米级深海遥控作业型潜水器(海马号ROV)[J]. *黑龙江科技信息*, 2014(12): 1-2.
- [61] 张璐晶. 探秘蛟龙号中国的深海藏宝图[J]. *中国经济周刊*, 2013(49): 26-35.
- [62] 亓夫军, 叶旺全, 任立辉, 等. 深海拉曼光谱仪多平台工作模式的设计与海试[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(1): 147-152.
- [63] COVENEY S, MONTEYS X. Integration Potential of INFO-MAR Airborne LIDAR Bathymetry with External Onshore LIDAR Data Sets[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62: 19-29.
- [64] 陈涛. 机载激光雷达技术在构造地貌量化研究中的应用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2014: 1-191.
- [65] 宫鹏, 黄华兵. 激光雷达技术在我国地形测图中应用前景广阔[J]. *地理信息世界*, 2008(6): 45-48.
- [66] 曾宪军, 伍忠良, 郝小柱. 海洋地质调查方法与设备综述[J]. *气象水文海洋仪器*, 2009(1): 111-117+120.
- [67] 刘广琦, 徐其成. 加大海洋地质勘探力度[N]. *中国国土资源报*, 2013-9-26(002).
- [68] 张毅. “大洋一号”科学考察记录[J]. *测绘地理信息*, 2013, 38(5): 82-84.
- [69] 吴刚, 于建军. 我国自主研发的新一代海洋科学综合考察船“科学”号[J]. *中国造船*, 2014, 55(1): 83-89.
- [70] 王勇. 90年代亚洲海洋平台的建设[J]. *中国海洋平台*, 1993(6): 234-241.
- [71] 周振威, 孙树民. 深海海洋平台发展综述[J]. *广东造船*, 2012, 31(3): 63-66+77.
- [72] 黄维, 张志勤, 邢娜, 等. 中国海洋平台制造业现状及钢企对策[J]. *冶金经济与管理*, 2012(3): 24-27.
- [73] 赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 等. 我国海洋钻探技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9): 43-48+70.
- [74] 阮海龙. 海洋地质调查压入活塞取样钻具研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 1-82.
- [75] 史三东. 走近“海洋石油981”深水钻井平台[J]. *国防科技工业*, 2012(6): 52-54.
- [76] 王志雄, 高平, 莫杰. 海底地质勘查现代技术方法的应用现状及发展趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2): 109-114.
- [77] 莫杰, 肖菲. 世界深海技术的发展[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(6): 65-70.
- [78] EIDESMO T, ELLINGSRUD S, MACGREGOR L M, et al. Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas[J]. *First Break*, 2002, 20: 144-152.