

海洋地质十号船钻探系统及其 在海洋地质调查中的应用

王世栋, 田烈余, 王俊珠, 陈以沫

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:能源需求持续增长及环境污染防治、应对气候变化要求加快能源结构调整, 迫切需要海洋地质调查工作作为油气勘探开发提供新的靶区, 为天然气水合物商业化勘查开发提供基础支撑。我国自主设计、建造的海洋地质十号船填补了我国小吨位大钻深海洋地质钻探船的空白, 提升了海洋地质调查能力, 也标志着我国海洋地质综合调查能力跻身世界前列, 并为未来的大洋钻探提供了宝贵的经验。海洋地质十号船钻探系统针对不同地层采用不同的取心工具, 顺利完成了南海某海域的钻探取心任务(A、B两个钻孔)。针对海洋钻探作业风险, 制定的应对措施, 保证了海洋地质十号船钻探作业的正常施工。实践证明, 海洋地质十号船钻探系统可圆满完成了海洋地质钻探取心任务。

关键词:海洋地质调查; 大洋钻探; 海洋地质十号船; 钻探船; 绳索取心钻进; 钻井液

中图分类号:P634;P744.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2020)02-0024-06

Drilling system on Marine Geology - 10 Ship and its application in marine geological survey

WANG Shidong, TIAN Lieyu, WANG Junzhu, CHEN Yimo

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China)

Abstract: Continued growth in energy demand, prevention and control of environmental pollution, and response to climate change require accelerated energy structure adjustment. Marine geological surveys are urgently required to provide new target areas for oil and gas exploration and development, which provide basic support for the commercial exploration and development of natural gas hydrates. China's independently designed and built Marine Geology - 10 Ship fills the gaps in our country's small tonnage and large deep marine geological drilling ships, which enhances our marine geological survey capabilities, and marks China's comprehensive marine geological survey capabilities are among the best in the world and provides valuable experience for the future ocean drilling. The drilling system of Marine Geology - 10 Ship uses different coring tools for different strata, and successfully completed drilling A and B holes for coring work in a South China Sea region. In view of the risks of marine drilling operations, the countermeasures formulated by Marine Geology - 10 Ship have ensured the normal drilling operations. Practice has proved that the drilling system of Marine Geology - 10 Ship successfully completed the coring work of marine geological drilling.

Key words: marine geological survey; ocean drilling; Marine Geology - 10 Ship; drilling ship; wireline core drilling; drilling fluid

0 引言

能源需求持续增长及环境污染防治、应对气候

变化要求加快能源结构调整, 迫切需要海洋地质调查工作作为油气勘探开发提供新的靶区, 为天然气水

收稿日期: 2019-11-08; 修回日期: 2020-01-02 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.02.003

基金项目: 国家重点研发项目“水合物开发环境原位监测与探测技术”(编号: 2017YFC0307700)

作者简介: 王世栋, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 主要从事钻探技术相关研究工作, 广东省广州市黄埔区广海路188号大院, 956601787@qq.com。

引用格式: 王世栋, 田烈余, 王俊珠, 等. 海洋地质十号船钻探系统及其在海洋地质调查中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2): 24-29.

WANG Shidong, TIAN Lieyu, WANG Junzhu, et al. Drilling system on Marine Geology - 10 Ship and its application in marine geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2): 24-29.

合物商业化勘查开发提供基础支撑。“十三五”规划纲要中提出 100 项重大工程,其中第 26 项是“发展深海探测、大洋钻探、海底资源开发利用、海上作业保障等装备和系统。推动深海空间站、大型浮式结构物开发和工程化”;第 60 项是“推动致密油、油砂、深海石油勘探开发和油页岩综合利用”。中国地质调查局以天然气水合物的勘探和试采为主攻方向,兼顾全海域的大洋科学钻探,开展大型钻探船的研制,这对地质钻探来说是一个极有前景的全新领域。我国自主设计、建造的海洋地质十号船填补了我国小吨位大钻深海洋地质钻探船的空白,提升了海洋地质调查能力,也标志着我国海洋地质综合调查能力跻身世界前列,并为未来的大洋钻探提供了宝贵的经验^[1-6]。

1 海洋地质十号船简介

海洋地质十号船是一艘以举升式岩心钻探为主、兼顾地球物理调查和海洋水文环境调查的综合调查船。它的投入使用将填补我局海洋地质调查钻探船的空白,提升我国中深水的资源调查和海岸带综合地质调查能力。海洋地质十号船采用全电力推进系统,选用 2 套全回转舵桨和 2 套槽道式艏侧推,具有良好的航向稳定性和灵活的操作性能,在直航时具有良好的航向稳定性。配备 DP-2 动力定位系统和锚泊定位系统。为多种调查作业方式提供可靠的定位方式。海洋地质十号船采用模块化设计,固定装船设备有地质钻探系统、万米单波束测深仪、中深水多波束测深系统、中深水浅地层剖面仪、海洋重力测量系统、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、超短基线水下定位系统、万米绞车及 A 型架系统、液压折臂吊。海洋地质十号船还可以进行海洋井下式原位静力触探(CPT)作业。图 1 为海洋地质十号船。



图 1 海洋地质十号船

Fig.1 Marine Geology - 10 Ship

海洋地质十号船钻探系统(图 2)主要技术参数如表 1 所示。



图 2 海洋地质十号船钻探系统

Fig.2 Drilling system on Marine Geology - 10 Ship

表 1 海洋地质十号船钻探系统技术参数

Table 1 Drilling parameters of Marine Geology - 10 Ship

项 目	参 数
水深+钻深/m	≥1100
最大地层钻深/m	200 m(具体钻深因地层而异)
井架有效高度/m	24.5
额定载荷/kN	600
最大静钩载/kN	600
最大钩速/(m·s ⁻¹)	0.7
最大钻柱重量/kN	400
提升方式	油缸举升
顶驱输入功率/kN	300
顶驱中心通道直径/mm	127
升降补偿装置补偿能力/m	±1.5
升降补偿提升能力/kN	400
基盘绞车提升能力/kN	300
取样绞车拉力/kN	30(速度 0~80 m/min)
泥浆泵组型号及台数	Gardner Denver Pump - 160 kW×2
泥浆舱(池)容量/m ³	约 20×2 个
散料存储量(含甲板)/t	约 30
供电电源	690 V, 50 Hz, AC
输入电压(船体提供)	三相三线 690 V±10%, 50 Hz±5%(800 kW); 三相三线 400 V±10%, 50 Hz±5%(100 kW)
气源压力(船体提供)/MPa	0.7~1.0

2 海洋钻探施工步骤

海洋地质十号船采用裸眼钻井,即采用无隔水管或套管,钻井液采用无循环开放式直排的工艺进行钻探施工。钻井液使用环保型黄原胶+海水,并按照黄原胶:海水=3~6:1000 的比例进行调配。

黄原胶为抗盐抗钙大分子聚合物产品,它的作用机理是大分子聚合物充分水化后形成线型和网状结构,将水相分子粘连在大分子聚合物上,进而提高钻井液的粘度。所以在使用上要充分进行搅拌,加入速度要进行控制,减少结团抱球,影响使用效果。钻头通过钻杆直接下放至海底进行钻进,钻井液通过钻杆注入,上返至海床面孔口后直接排入海水中^[1-9]。图3为海洋地质十号船钻井方式示意图^[5-11]。

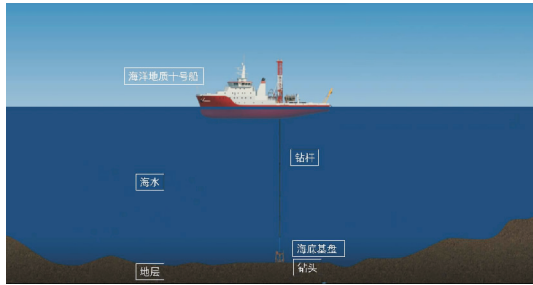


图3 海洋地质十号船钻井方式示意图

Fig.3 Schematic diagram of the drilling method by Marine Geology - 10 Ship

钻柱总成由钻头、BHA、钻铤($7\frac{1}{2}$ in OD \times 4 $\frac{25}{32}$ in ID \times 15 ft, 1 in=25.4 mm, 1 ft=0.3048 m,下同)、钻杆($5\frac{1}{2}$ in OD \times 4 $\frac{25}{32}$ in ID \times 30 ft,含接头长度)组成,钻柱有序下入海底,再将海底基盘下至海底泥面。采用 $5\frac{1}{2}$ in 钻杆进行钻进,利用绳索取心钻具(取样长度3~4 m)进行岩心采取。

(1)打开月池盖,通过左右基盘绞车平稳下放海底基盘,到月池海水面位置停止。

(2)BHA、钻铤、钻杆连接方法:先将钻头、BHA、2 m短钻杆连接成一根立柱;抓管机将BHA立柱、钻铤、钻杆、依次从钻杆盒取出输送给水平动力猫道;水平动力猫道将钻杆输送给液压顶驱,顶驱吊环扣合钻杆(或钻铤)接头位置,上提钻杆(或钻铤);顶驱将钻具提起至竖直位置并到合适高度,打开气动卡瓦。

下行顶驱将钻具缓慢插入气动卡瓦,缓慢穿过海底基盘海底钳,缓慢下放钻杆,缓慢下放海底基盘,将钻杆预留合适高度以便和下一根钻杆进行连接,海底基盘随钻杆下放位置预留合适高度后停止,等待第二根钻具连接再随钻具一起下放;液气大钳完成低位钻杆(或钻铤)扣连接;打开气动卡瓦,下放顶驱,重复操作,直至完成所有钻具的连接,完成海底基盘和钻柱的下放,下放直至离海底1 m以内

时,保持顶驱吊卡关闭状态。

此时进行第一回次和第二回次表层样取;待第一、二回次表层样取心结束后,将钻柱、海底基盘一次下放至海底,然后利用顶驱背钳完成顶驱中心管和钻柱的连接,依次进行取心。

(3)开钻前进行水深测量,每回次进行水深校正。在钻探过程中随时进行孔深校正。

3 取心工具系统

针对不同地层采用不同的取心工具,具体分为取软泥绳索钻具、取砂绳索钻具、液动冲击绳索钻具和钻井液静压绳索钻具^[10-18]。

3.1 钻井液静压取样钻具

压入取样时,泵压逐渐增加,达到销钉的抗剪极限强度时,剪断销钉,内取样筒射入海底软层。注意观察泵压变化:第一种情况,开始压力不断增高,达到一定数值后,在1~2 s内压力突然下降,说明内取样筒已完全压入沙层或土层(1.6~4.5 m),可以回转外筒钻进1.6~4.5 m,停泵从顶驱的中心孔投入绳索打捞器,抓住内取样筒的矛头,启动绳索取心绞车,将内取样筒打捞到船上;第二种情况,开始压力不断增加,但达到一定数值后不再增加,说明销钉未被剪断,泵压未出现跳动,说明密封机构密封性能不足,需将内取样筒提至船上,更换密封圈,然后再投入外筒中,重复第一种情况的操作^[17]。

3.2 软泥取样钻具

采样时,开启顶驱和泥浆泵,将钻进参数调至设定值,关注泥浆泵泵压变化。利用顶驱传递动力使钻具回转,外管连接钻头切削地层,而内管在钻进过程中保持不动,取样过程中当钻压突然升高,说明岩心发生了堵塞或者已经取满岩心,应立即停止钻进,打捞岩心,从顶驱的中心孔投入绳索打捞器,抓住内管总成的矛头,启动绳索取心绞车,将内管总成打捞到船上,卸下超前钻头,将装有样品的PC管用克丝钳从内管中抽出,样品管的两端用塑料堵头及密封胶带封住,即完成一次样品采取。

3.3 砂取样钻具

采样时,开启顶驱和泥浆泵,将钻进参数调至设定值,关注泥浆泵泵压变化。利用顶驱传递动力使钻具回转,外管连接钻头切削地层,内管在钻进过程中跟随外筒一起转动,取样过程中当钻压突然升高,说明岩心发生了堵塞或者已经取满岩心,应立即停

止钻进,打捞岩心,从顶驱的中心孔投入绳索打捞器,抓住内管总成的矛头,启动绳索取心绞车,将内管总成打捞到船上,卸下超前钻头,将装有样品的 PC 管用克丝钳从内管中抽出,样品管的两端用塑料堵头及密封胶带封住,即完成一次样品采取。

3.4 液动冲击取样钻具

采样时,开启顶驱和泥浆泵,将钻进参数调至设定值,关注泥浆泵泵压变化。第一种状况:钻进地层为软层时,泵压一直未有明显变化,取样器超前压入,内管总成进行不回转取样,避免扰动样品;第二种状况:钻进地层为硬层时,泵压开始升高,并经过一段时间(根据水深不同而不同)稳定在一定数值,冲击锤开始工作,进行冲击回转钻进取样作业。采样完成后,停泵从顶驱的中心孔投入绳索打捞器,抓住内管总成的矛头,启动绳索取心绞车,将内管总成打捞到船上,卸下超前钻头,将装有样品的 PC 管用克丝钳从内管中抽出,样品管的两端用塑料堵头及密封胶带封住,即完成一次样品采取。

4 海洋地质钻探实践

为调查南海某海域的海洋地质条件,安排钻探取心任务钻孔 A、B 两个孔,水深分别为 47 和 105 m,该海域属于低纬度热带季风气候,冬季盛行东北风,夏季盛行东南风和西南风。夏秋期间常受热带风暴和台风侵袭。测区终年无雾。年平均气温 25.5℃,7 月份气温最高,月平均 28.3℃,1 月份气温最低,月平均 20.7℃。潮流性质为不规则日潮型,以日潮为主,每月 14 d 为日潮,日潮时最高潮位 2.2 m,持续 16 h,最低潮位 0.6 m,平均潮位 1.03 m,最大潮差 2.26 m,最小潮差 0.06 m。平均潮差 0.79 m。每回次下钻前和回次提钻前都进行水深校正,消除潮汐变化的影响。

钻探取心任务要求岩心管内径 ≤ 72 mm,泥质层岩心采取率应达到 85%,砂质层岩心采取率应达到 60%。海洋地质十号船使用船载钻探系统和绳索取心工具获取岩心,针对不同地层采用不同的取心工具,具体分为取软泥绳索钻具、取砂绳索钻具、液动冲击绳索钻具和钻井液静压绳索钻具。内衬管孔直径为 84 mm,刀口孔径 82 mm,岩心直径 82 mm。统计地层的岩心采取率,A、B 两个孔的岩心采取率符合设计要求,如表 2 所示。泥质层采取率分别达到 98.34%、86.32%,超过泥质层岩心采取率

要求。砂质层采取率分别达到 76.45%、79.73%,超过砂质层岩心采取率要求。

表 2 岩心采取率统计

Table 2 Summary of core recovery

站名	取样位	样品总长 度/m	砂层进尺深 度/m	砂层样品长 度/m	泥质层		砂质层	
					采取率/%	规范值	实际值	采取率/%
A	97.26	92.63	13.76	10.52	85	98.34	60	76.45
B	173.60	140.68	139.10	110.90	85	86.32	60	79.73

5 安全风险应对措施

对钻探作业制定了安全风险应对措施如下^[16-25]。

5.1 复杂海况影响的应对方案

由于调查区域内受海流、潮汐及阵风影响的可能性较大,因此船到达工区后应先对站位海域进行 24 h 的海流及潮汐观测,同时做好气象、海况预报的收集,根据海上的实际情况对各个钻孔施工的先后顺序进行灵活安排,全面评估一个钻孔的作业周期(5~6 d)是否都有良好海况及天气作为保证,尽量避开大潮期。

当海流流速过大、涌浪过大或遇较大阵风而影响施工时,即刻停工,并安排钻井现场的值班,同时加强船舶定位的稳定性观察,避免危及人员和设备安全的情况出现。

5.2 渔业活动及过往商船影响的应对方案

由于施工工区临近陆地,渔业活动频繁,即使在禁渔期,该区域作业也易受到渔船、渔网的影响,其应对方案是在海洋地质十号船到达工区前,派一条护航船提前到达工区,对调查区域进行提前巡视,对在该区域内的渔船进行劝离,对施工实施区域内的废旧渔网进行清理。海洋地质十号船到达工区后,该护航船在附近进行警戒。同时,在该区域作业过程中,驾驶台和业务部人员加强沟通和配合,驾驶台和后甲板人员加强瞭望。

5.3 高空作业危险的应对方案

高空作业人员进行岗前高空作业培训,上岗时配备必要的安全带、安全绳、雨衣、防滑手套、对讲机、自救工具、食物等,人员定时轮换,加强夜间照明,并对作业面进行全天候视频监控,船摇晃过大时,停止作业。

5.4 钻机的机械、电气、液压等系统运行影响的应对方案

加强作业人员的安全培训,严格执行设备操作规程和施工规则,定期检查保养设备,指定专人对高危部件、装置实时监控,发现异常立即停工检修,将隐患消除在萌芽状态。

5.5 管材、钻具搬运影响的应对方案

合理布置管材、钻具的存放位置和存放次序,尽量减少移动次数。合理安排好搬运的路线和空间,做好相关培训和应急措施,以机械搬运为主,人力搬运为辅。

5.6 海底底质对钻探施工影响的应对方案

在复杂地层钻进时,要合理选择顶驱转速、泵的排量、钻井液密度、钻井液粘度、钻速等相关参数,严密注意钻压、悬重、泵压等的变化,防止大钻速钻进,做到上行钻柱相对快、下行钻柱相对慢的操作节奏。一旦发生埋钻或卡钻要缓慢提钻,加大钻井液的排量和泵压,以便在钻柱外环空形成液体流动通道。

如果埋钻严重,无法拔起钻柱,只有采取弃钻措施。首先做好相应的设备工作参数记录,向主管部门提供弃钻方案,必须征得主管部门同意后方可实施弃钻方案。然后做好安全措施,利用钢丝绳牵引钻柱从船月池口缓慢下放至船底以下位置后,剪断钢丝绳将钻柱抛弃,以损失钻柱换来船舶的安全撤离。钻柱抛弃后将弯曲变形倒向海底。

6 结语

实践证明,海洋地质十号船钻探系统圆满地完成了海洋地质钻探取心任务。

(1)海洋地质十号船填补了我国小吨位大钻深海洋地质钻探船的空白,提升了海洋地质调查能力,也标志着我国海洋地质综合调查能力跻身世界前列,并为未来的大洋钻探提供了宝贵的经验。

(2)海洋地质十号船采用裸眼钻井,即采用无隔水管或套管,环保型钻井液采用无循环开放式直排的工艺进行钻探施工。这种钻井方式是一种适合于海洋地质十号船、高效率的钻井方式。

(3)海洋地质十号船钻探系统能适应不同类型复杂地层的取心工作,针对不同地层采用不同的取心工具,具体分为取软泥绳索钻具、取砂绳索钻具、液动冲击绳索钻具和钻井液静压绳索钻具。

(4)针对海洋钻探作业风险,海洋地质十号船制定的应对措施保证了海洋地质十号船钻探作业的正常施工。

(5)海洋地质十号船的钻探系统是一套新设计理念、不同于传统的钻探系统,对其认识、了解进而熟悉需要一个过程,厂家也在对其进行不断的整改中。

参考文献(References):

- [1] 林间,李家彪,徐义刚,等.南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J].海洋学报(中文版),2019,41(10):125-140.
LIN Jian, LI Jiabiao, XU Yigang, et al. Ocean drilling and major advances in marine geological and geophysical research of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019,41(10):125-140.
- [2] 汪品先.大洋钻探与中国的海洋地质[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(1):7-14.
WANG Pinxian. Ocean drilling and marine geology in China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019,39(1):7-14.
- [3] 何桥宝.海洋地质调查船地质钻探系统集成设计[J].广东造船,2018,37(4):28-31.
HE Qiaobao. Integrated design of geological drilling system for marine geological survey ship[J]. Guangdong Shipbuilding, 2018,37(4):28-31.
- [4] 王达,李艺,周红军,等.我国地质钻探现状和发展前景分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):1-9.
WANG Da, LI Yi, ZHOU Hongjun, et al. Analysis on present situation of geological drilling in China and the development prospects [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):1-9.
- [5] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1-31.
- [6] 赵尔信,蔡家品,贾美玲,等.海洋深水钻探船及取样技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):152-154.
ZHAO Erxin, CAI Jiapin, JIA Meiling, et al. Offshore deep water drilling ship and technology of sample[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(S1):152-154.
- [7] 阮海龙,陈云龙,赵义海,等.海洋超深水地质调查钻探实践[J].地质装备,2018,19(1):3-6.
RUAN Hailong, CHEN Yunlong, ZHAO Yihai, et al. Drilling practice in marine ultra-deep water geological survey[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018,19(1):3-6.
- [8] 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.
ZHAO Erxin, CAI Jiapin, JIA Meiling, et al. Marine drilling technique in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(9):43-48,70.

- [9] 叶建良, 张伟, 谢文卫. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(2): 1-8.
YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2): 1-8.
- [10] 吴秋云, 赵尔信. TK-1 型压入活塞式取样器运动阻力计算及海上取样试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(6): 16-19.
WU Qiuyun, ZHAO Erxin. Calculation of resistance to motion of TK-1 press piston sampler and marine sampling test [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(6): 16-19.
- [11] 秦毅. 桂北地区罗地 1 井钻探施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(1): 56-59, 88.
QIN Yi. Practice of Well Luodi-1 drilling construction in North of Guangxi[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(1): 56-59, 88.
- [12] 邝光升, 孙宇, 杨建军, 等. 云阳黄岭岩盐矿 ZK0001 深孔取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(3): 53-56, 61.
KUANG Guangsheng, SUN Yu, YANG Jianjun, et al. Coring technology for deep hole ZK0001 of Huangling Rock Salt Mine in Yunyang[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 53-56, 61.
- [13] 郝海洋, 宋继伟, 蒋国盛, 等. 南方页岩气基础地质调查黔普地 1 井钻井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 23-29.
HAO Haiyang, SONG Jiwei, JIANG Guosheng, et al. Drilling technology of Well Qianpudi-1 for basic geological survey of shale gas in Southern China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8): 23-29.
- [14] 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 419-426.
WU Shimin, ZHOU Di, QIU Xuelin. Tectonic setting of the northern margin of South China Sea[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(4): 419-426.
- [15] 阎贫, 刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 1-12.
YAN Pin, LIU Hailing. Analysis on deep crust sounding results in northern margin of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 1-12.
- [16] 王世栋, 张志刚, 耿雪樵, 等. 考虑方位漂移的水平井眼轨道设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(7): 14-18.
WANG Shidong, ZHANG Zhigang, GENG Xueqiao, et al. Horizontal well trajectory design based on azimuth drift[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(7): 14-18.
- [17] 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.
RUAN Hailong. Development of piston coring tool for marine geological survey[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [18] 李家彪. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 2993-3003.
LI Jiabiao. Dynamics of the continental margins of South China Sea: scientific experiments and research progresses [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 2993-3003.
- [19] 郝天兆, 徐亚, 孙福利, 等. 南海共轭大陆边缘构造属性的综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3098-3116.
HAO Tianyao, XU Ya, SUN Fuli, et al. Integrated geophysical research on the tectonic attribute of conjugate continental margin of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3098-3116.
- [20] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 35-53.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China Sea: problems, advances and controversies [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 35-53.
- [21] 汪品先. 追踪边缘海的生命史: “南海深部计划”的科学目标[J]. 科学通报, 2012, 57(24): 3093-3114.
WANG Pinxian. Tracing the life history of a marginal sea—on the “South China Sea Deep” research program[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3093-3114.
- [22] 丁仲礼. 中国大洋钻探二十年[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3866-3867.
DING Zhongli. Twenty years of ocean drilling in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3866-3867.
- [23] 汪品先. 大洋钻探五十年: 回顾与前瞻[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3868-3876.
WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3868-3876.
- [24] 翦知潜. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3877-3882.
JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research—progress of China’s participation in ocean drilling[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3877-3882.
- [25] 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)编. 大洋钻探五十年[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
IODP China Ocean Discovery Program Office, State Key Laboratory of Marine Geology (Tongji University). Fifty years of ocean drilling [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.

(编辑 韩丽丽)