

郭兴伟,张训华,吴志强,等.大陆架科学钻探 CSDP-2 井科学目标及初步成果.吉林大学学报(地球科学版),2019,49(1): 1-12.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20180235.
Guo Xingwei, Zhang Xunhua, Wu Zhiqiang, et al. Scientific Objectives and Preliminary Progresses of CSDP-2 Well in Continental Shelf Drilling Program. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49 (1): 1-12.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20180235.

大陆架科学钻探 CSDP-2 井科学目标及初步成果

郭兴伟^{1,2},张训华^{2,3},吴志强^{1,2},肖国林^{1,2},侯方辉^{1,2},刘 健¹

1.中国地质调查局青岛海洋地质研究所,山东 青岛 266071

2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东 青岛 266071

3.中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210026

摘要:大陆架科学钻探(CSDP),是一个在我国大陆架上实施的以钻探我国陆架区深部地层为目的的科学计划,是介于大陆科学钻探(ICDP)和大洋科学钻探(DSDP, ODP, IODP)之间的大陆架地球科学探索计划。首批两口科学钻探井布设在南黄海陆架上,CSDP-1 井的主要目标为第四纪及其环境演化,CSDP-2 井则瞄准中—古生界海相地层及其资源环境效应。CSDP-2 井的科学目标为揭示中—古生界的地层时代、沉积环境、构造演化,详细标定钻遇地层的地球物理性质,系统评价其油气生储盖特征,以及开发和探索钻探与井中观测等技术。CSDP-2 井完井深度 2 843.18 m,创造了全球陆架全取心钻探的最深记录,综合取心率 97.7%,其中中—古生界取心 2 198.10 m,取心率 99.3%,先后钻遇第四系—新近系,下三叠统青龙组,二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组和栖霞组,石炭系船山组、黄龙组和高骊山组,泥盆系五通组,志留系坟头组和高家边组。初步建立钻遇中—古生界的岩性剖面、地球物理性质剖面、地层时代和沉积环境格架,厘定印支期和加里东期两个不整合面,以及孤峰组和龙潭组之间的断层滑脱面,并通过对烃源岩系统评价发现 4 套好的烃源岩。下一步工作将在进一步厘定地层年龄的基础上,深入探讨沉积环境演化、构造和热演化历史,以及结合区域资料恢复古地理环境。

关键词:大陆架;科学钻探;南黄海;中—古生界;油气

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20180235

中图分类号:P31;P56;P67

文献标志码:A

Scientific Objectives and Preliminary Progresses of CSDP-2 Well in Continental Shelf Drilling Program

Guo Xingwei^{1,2}, Zhang Xunhua^{2,3}, Wu Zhiqiang^{1,2}, Xiao Guolin^{1,2}, Hou Fanghui^{1,2}, Liu Jian¹

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, Shandong, China

3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210026, China

收稿日期:2018-09-04

作者简介:郭兴伟(1978—),男,教授级高级工程师,主要从事海洋地质构造方面的研究,E-mail: xwguo_qd@126.com

通信作者:张训华(1961—),男,研究员,主要从事海洋地质构造和地球物理方面的研究,E-mail: xunhuazh611102@sina.com

基金项目:国家海洋地质专项(DD20160147);国家自然科学基金项目(41776081);国家海洋地质专项(DD20189643)

Supported by National Marine Geology Special Project of China (DD20160147), National Science Foundation of China (41776081) and National Marine Geology Special Project of China (DD20189643)

Abstract: Continental Shelf Drilling Program (CSDP) is a scientific plan for deep stratigraphic sequence drilling on the continental shelf of China. This plan is initially defined as the Earth Science Discovery Program between Continental Scientific Drilling (ICDP) and Ocean Scientific Drilling (DSDP, ODP, IODP). So far, two wells have been completed in the South Yellow Sea. The main target of well CSDP-1 is the Quaternary and its environmental evolution, while well CSDP-2 is aimed at the Mesozoic and Paleozoic marine strata and its resource and environmental effects. The scientific objectives of well CSDP-2 are 1) to reveal stratigraphic sequences, sedimentary environment and tectonic evolution of the Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea; 2) to calibrate the geophysical properties of the strata; 3) to evaluate the hydrocarbon system; and 4) to conduct long-term in-hole geophysical observations. The depth of CSDP-2 well is 2 843.18 m, the deepest record of core drilling projects in the continental shelf. The core recovery rate is 97.3%, of which the Mesozoic-Paleozoic stratum is 2 198.10 m with a core recovery rate of 99.7%. CSDP-2 borehole has drilled Quaternary-Neogene, Lower Triassic Qinglong Formation, Permian Dalong Formation, Longtan Formation, Gufeng Formation and Qixia Formation, Carboniferous Chuanshan Formation, Huanglong Formation and Gaolishan Formation, Devonian Wutong Formation, Silurian Fentou Formation and Gaojiabian Formation. The stratigraphic framework, geophysical property profile, sedimentary sequences and ages were calibrated and preliminarily established. Two unconformities developed in Indosinian and Caledonian periods, and the detachment zone between Longtan Formation and Gufeng Formation was discerned. Four sets of good source rocks indicate the oil and gas exploration potential in this area.

Key words: continental shelf; scientific drilling; South Yellow Sea; Mesozoic-Paleozoic sequences; oil gas

0 引言

“上天、入地、下海、登极”,是人类探索大自然奥秘的四大壮举。科学钻探是“入地”的重要途径之一,被称为深入地球内部的“望远镜”^[1],是解决基础地球科学及资源、环境和灾害等问题的重要方式。大洋和大陆都有国际知名的钻探计划。始于 1968 年的“深海钻探计划”(DSDP),因为验证了板块构造理论而闻名于世,随后的“大洋钻探计划”(ODP)和“综合大洋钻探计划”(IODP),接连取得科学突破,改变了整个地球科学发展的轨迹^[2]。自 1996 年开始实施的“国际大陆钻探计划”(ICDP)在全球钻探了近 100 口深浅不一的科学探井,其地学目标俱是地学前沿但又不尽相同^[3]。

20 世纪 90 年代以来,由我国科学家主导实施了多个大洋和大陆钻探计划。在我国南海实施的 ODP184 航次^[4]、IODP349 航次^[5]、IODP367/368 航次^[6-7]等大洋钻探航次,分别聚焦东亚季风、海底扩张和大陆裂解等科学目标。在苏鲁造山带^[8]、青海湖^[9]、松辽盆地^[3]等开展了大陆科学钻探,分别聚焦超高压变质带形成和折返机制、高精度东亚古环境演化、白垩纪陆相环境演化,都获得了很多的新认

识,取得了很多新突破。

大陆架是联系大陆和大洋之间的纽带,既记录着古老陆块陆核形成、基底固化、盖层形成等古全球构造阶段的历史,又受印支期以来现代板块运动影响发育大陆边缘从而记录了其沉积、构造和环境演化历史^[10-12]。在中国大陆架开展科学钻探,是中国海洋地质科学家们多年来的夙愿。

1 大陆架科学钻探在中国

中国大陆架地处太平洋板块、欧亚板块和印度洋板块的转换交接地带,沉积地层蕴含着青藏高原隆升、大江大河入海^[13-14]、东亚大陆边缘洋陆转换、边缘海盆地基底归属等重要科学信息,是解决系列重大科学问题的天然实验室和宝库。实施大陆架科学钻探,则是打开这一天然宝库的钥匙。

“大陆架科学钻探”计划,聚焦中国大陆架以及东亚大陆边缘的形成演化,以中国大陆架的地层、构造、环境和资源等科学问题作为具体目标,以获取连续的大陆架海底岩心为手段,进行多学科多目标的综合研究。计划由中国地质调查局主持,青岛海洋地质研究所联合国内多家科研和生产单位实施,自 2011 年正式开展,2013 年和 2015—2016 年在前期

工作基础较好、科学目标较明确的南黄海分别钻探了 CSDP-1 井和 CSDP-2 井。

CSDP-1 井钻探工程实施顺利,利用岩心的综合研究也达到了预设的科学目标。首次在中国陆架区实现钻穿第四纪底界的全取心钻探,勘 407 号钻探船创造了 300.1 m 的中国陆架区全取心钻深记录;首次建立了南黄海陆架区第四纪以来地层格架;多指标综合研究首次揭示晚上新世以来南黄海陆架的形成时间在 1.66 Ma 左右;创建了南黄海沉积物物源示踪体系,首次揭示了南黄海陆架区在 0.85 Ma 之前主要为长江物质,其后有黄河物质进入^[15]。

2 南黄海中—古生界重大地学问题与大陆架科学钻探

南黄海是我国大陆架的重要组成部分,是扬子块体在海区的延伸,北与苏鲁造山带相邻,西以郯庐断裂与华北块体分界,西南与下扬子块体陆区相连,南以江山—绍兴断裂在海区东延断裂与华南块体相

邻,东与朝鲜半岛相邻,与朝鲜半岛的构造分界至今尚存争议。在前震旦纪变质岩基底之上,经历震旦纪—早古生代克拉通发育、晚古生代—中三叠世海相台地发育、晚三叠世—早白垩世剥蚀定型发育、晚白垩世—古近纪断陷发育和新近纪—第四纪拗陷发育多个阶段。依据其陆相断陷盆地的沉积展布范围及地层发育特征,自北而南可进一步划分出 5 个二级构造单元,即千里岩隆起、北部拗陷、中部隆起、南部拗陷及勿南沙隆起^[16-19](图 1,图 2)。

自 20 世纪 60 年代以来,在南黄海以区域地质调查、环境地质调查和油气普查勘探为目的的地质调查工作一直持续,并且投入了巨大的工作量,重力、磁力基本实现 1:50 万比例尺测网全覆盖,长排列二维多道地震 62 359 km,石油钻井 29 口。经过半个多世纪的调查和研究,对于重力、磁力等地球物理特征和沉积地层分布、盆地性质、构造演化等都有基本的认识,但也存在诸多问题,其中有些问题也是当今科学前沿和热点。

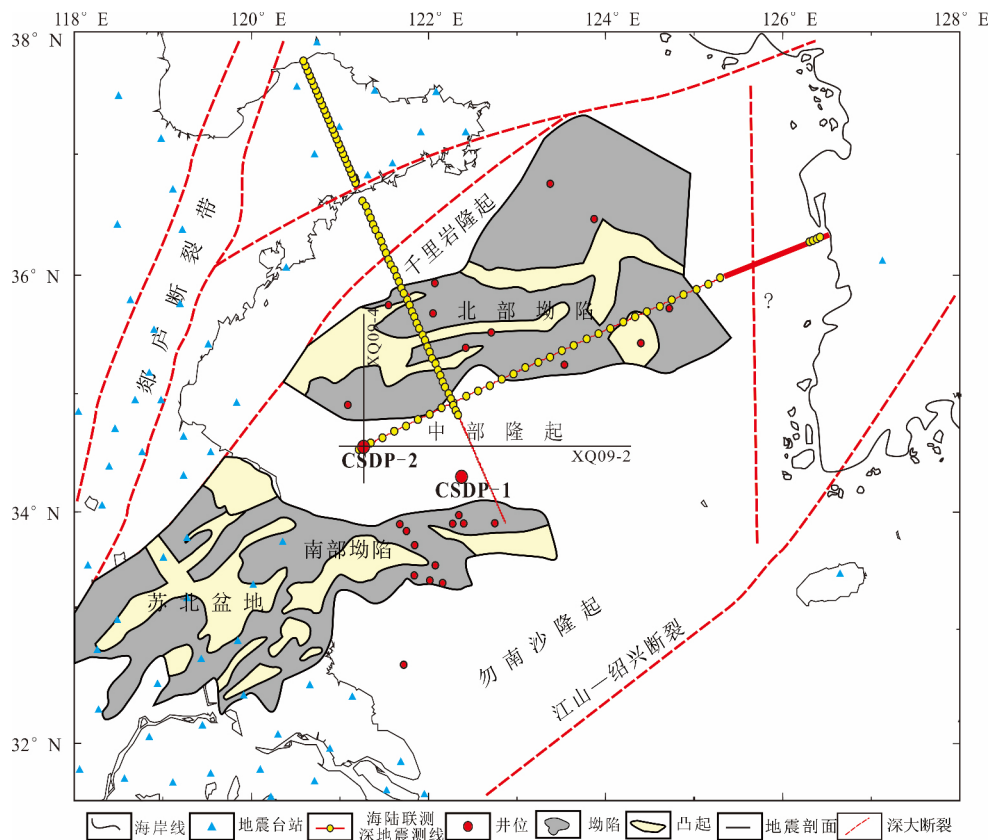


图 1 南黄海构造区块简图

Fig.1 Sketch structural map of the South Yellow Sea

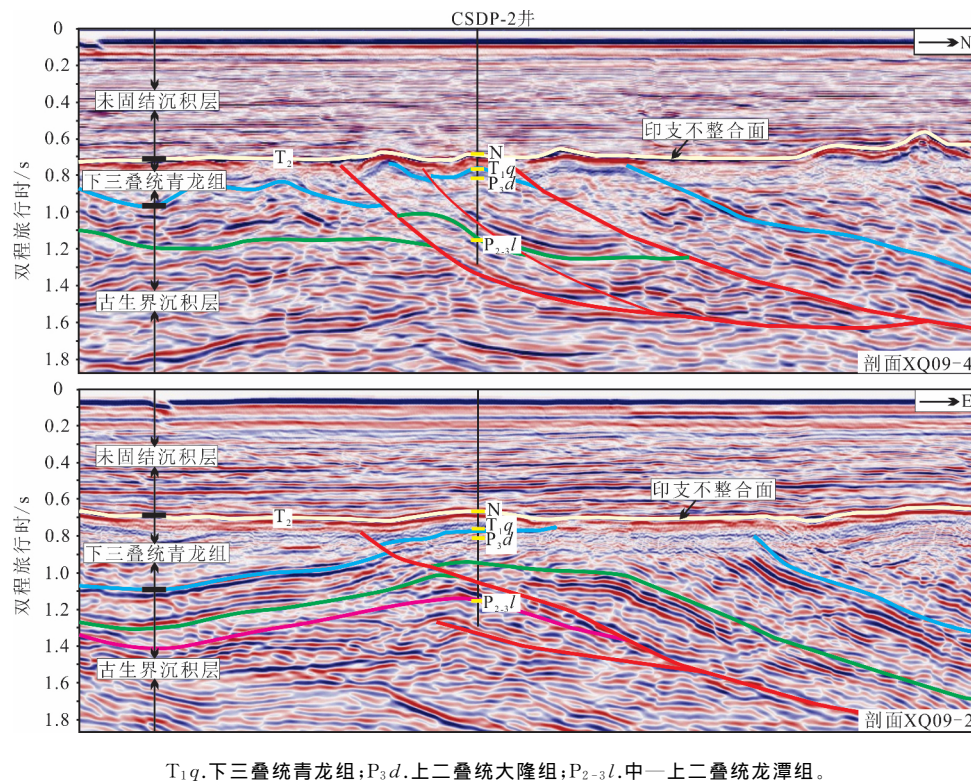


图 2 南黄海中中部隆起过 CSDP-2 井地震剖面及构造解释结果(剖面位置见图 1)

Fig.2 Seismic profiles and structural interpretation of CSDP-2 Well in the central uplift of the South Yellow Sea (See Fig.1 for the location of the profiles)

2.1 南黄海中—古生代地层认识不清,制约破解沉积、构造、环境、资源等问题

南黄海中—新生代陆相盆地一直未有有效油气突破,受刘光鼎院士^[20]中国油气资源“二次创业”观点的启示,20 世纪末油气勘探逐渐转入中—古生界海相地层。2006 年采用长排列+大容量气枪阵列震源的多道地震勘探新技术,首次在中部隆起上获得了 T_2 界面以下清晰的层状地震反射,证实了区内发育海相沉积地层,不是火成岩^[21]。但是,对发育中—古生界海相地层的时代还是有多种认识:或认为下三叠统青龙组和上二叠统大隆组及龙潭组几乎没有残余^[22-23],甚至可能缺失石炭系以下地层^[24];或认为中—古生代海相残余地层发育较齐全^[25-26]。这些不同认识,严重削弱了对南黄海中—古生界海相地层沉积、构造等演化历史的研究。

2.2 南黄海区域构造问题的破解,需获取中—古生界样品

扬子块体和苏鲁造山带如何在海区东延,既是重大的区域构造问题,也是科学热点之一。南黄海位于下扬子区陆域部分以东,南部坳陷和陆区苏北

盆地相连,中部隆起和陆区滨海隆起相连。虽然南黄海是下扬子块体一部分的观点得到广泛的认同,但南黄海是以朝鲜半岛西缘断裂带与朝鲜半岛为界,朝鲜半岛整体属于华北块体,还是南黄海与京畿地块同属扬子块体,临津江带和沃川带作为苏鲁造山带和江绍断裂的东延,一直有多种意见和模式^[27-33]。南黄海是否存在泥盆纪地层?古生代地层古生物能否与下扬子区和朝鲜半岛对比?如果能获取中—古生界海相地层的实物样品,无疑会在古地理、古气候、古环境,以及构造演化方面为该问题的解决提供重要线索。

2.3 研究南黄海中—古生代沉积环境变迁及事件,需获取连续沉积记录

针对南黄海中—古生代沉积环境变迁和各地质时代沉积相的研究,以往都通过地震剖面,结合少量钻井,以及与下扬子区对比来进行。虽然获得了框架性的认识^[34-36],但其与下扬子陆区的沉积相带相对位置、物质来源等,在只有 7 口井钻遇中古生界、钻遇最古老地层为石炭纪高骊山组的情况下,不甚清晰。我们需要利用连续取心的科学钻井,进行环

境恢复和古地理重建。并且,发生在奥陶纪末、泥盆纪晚期 F/F(法门阶和弗拉阶)、二叠纪末的 3 次生物大灭绝事件,伴随剧烈的大气 CO_2 、温度(包括冰室效应和温室效应)、海洋酸化、海平面变化和海水缺氧等全球性的气候、环境剧变^[37-38],相应的环境记录都有可能南黄海科学钻探井的连续沉积岩心中找到,这些事件的成因是当今国际环境研究的前沿和热点。

2.4 南黄海中部隆起的系统油气生储盖特征研究,需实物样品支撑

南黄海中部隆起被认为是重要的油气远景区^[39],中、上扬子区海相油气勘探目前已发现了威远、普光、龙岗等多个大型气田^[40-43]及五峰组、龙马溪组等多处工业油气流^[44]。然而勘探面积达 $10.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的南黄海盆地仅有 7 口井钻遇中—古生界,其中钻遇最古老地层的 CZ12-1-1 井揭露至石炭系高骊山组,且缺失地层较多;而最具勘探前景的中部隆起区尚无钻井,其烃源岩、储层和盖层特征的研究仍局限在定性认识和借鉴陆区苏北盆地甚至上扬子区,据此总结出的成藏理论和模式,其可靠性大打折扣。在南黄海中部隆起钻取中—古生界海相地层中的烃源岩、储层和盖层样品,获得一手资料,是最佳选择。

2.5 系统研究地球物理性质,有助于提高南黄海地震采集与处理质量

南黄海的地震勘探还存在许多难点:一是由于印支期至早燕山期的构造运动,南黄海普遍存在一个印支不整合面,其下为海相地层,其上为陆相沉积地层,地震波速度由其上的 $2\,000 \text{ m/s}$ 左右直接增加至其下的 $5\,000 \text{ m/s}$ 以上,造成地震波强折射和能量衰减,界面以下有效反射变弱,至深部甚至很难获得有效反射信号^[28];二是由于没有钻至下古生界的钻井,岩石物性参数都借鉴南部拗陷或陆区,无法建立可靠的岩性和物性关系模型,也无法建立精确的时深转换标尺;三是逆冲推覆造成的构造样式存在多种解释,也给处理参数选取和模式解释提高了难度。如果在中部隆起实施科学钻探并进行 VSP(vertical seismic profiling)测井,建立波速随物性和深度变化的标尺,将极大地促进地震处理和解释工作^[39, 45]。

钻探后的井孔可实施井中观测(地震、应力、温度)。虽然陆区地震观测台站密集,但是东部海区基本为空白,韩国共享的地震台站也只有 3 个,在井中

进行地震观测不仅可将信噪比提高 1~2 个数量级,而且可构建井区周围的构造显微镜,精细研究其带来的构造信息。另外,利用地震数据,结合 2 条南海的 OBS(ocean bottom seismograph)测线^[46-47],可进行进一步的深部结构研究。

2.6 自主研发钻探平台和创新改进钻探技术是高效高取心率获取岩心的保障

在海洋实施钻探,钻探平台无疑是最重要的载体,其必须具备抗击五十年一遇台风的能力,也必须能承载钻机等工程设备开展作业,以及作业人员的日常工作和生活。石油钻探平台,无论安全性还是作业能力都是上上之选,但其动辄数十万元日费的高昂成本,不是全取心科学钻探这种耗时耗力的科学工程的首选,需研发适应工区水深的轻型钻探平台来实施该项目^[48]。以往钻获未固结海洋沉积物和钻获固结岩石,有不同的钻井工艺,也是由不同的队伍来完成;在南黄海中部隆起实施科学钻探,需两者兼顾取得高取心率,就需要针对可能钻遇地层进行钻具和钻井液配方等的创新和改进^[49],以保障科学钻探工程的顺利实施。

3 大陆架科学钻探 CSDP-2 井科学目标

大陆架科学钻探 CSDP-2 井的科学目标是多学科方向的,简明扼要的归纳为:地层、构造、资源、环境、地球物理与观测、钻探技术。

具体来讲就是:在南黄海中部隆起实施大陆架科学钻探 CSDP-2 井,全取心钻进 $2\,800 \text{ m}$,获取中—古生界的连续海相地层岩心,进行常规测井、井温测井、井径测井和 VSP 测井等,进行岩屑、荧光和气测等录井。通过自主研发浅水区海洋钻探平台降低钻探成本;通过创新或改进钻探技术获取尽量高取心率的连续岩心样品。在对古生物地层系统厘定的基础上,结合其他必要的测年技术,系统确定岩心的地层时代。利用古温标、测井资料,结合岩性对比等,综合识别钻遇地层存在的不整合面、断层等构造记录,恢复热演化和构造演化历史。根据地层岩性组合、沉积间断,结合测井、物性、岩石物质组成等资料,系统分析沉积环境变迁,并对关键的环境或气候事件进行识别和高分辨率研究。充分利用连续岩心,系统评价烃源岩、储层和盖层特征,为油气勘探提供基础数据。系统测定孔隙度、渗透率、电阻率、磁化率、热导率等物性参数,建立南黄海地区标准的岩性-物性模型以及深度-速度模型,为地震资料采

集、处理和解释提供基本参数。建立地震台站,实施井中观测,获取地震波、应变和井温随时间的基础数据,结合南黄海深部地震探测等基础资料,构建工区的构造放大镜,提高东部海区的减震防灾能力。利用地层、沉积、构造、地球物理、油气特征等资料,综合研究贯穿南黄海中—古生代的古地理格局、构造演化格架,并探索其地球动力学机制。

4 大陆架科学钻探 CSDP-2 井初步成果

4.1 高标准完成钻探工程

自主研发了“探海一号”浅水轻型的钻探平台^[50-51],用于实施 CSDP-2 井的钻探工程。自 2015 年 3 月 29 日开钻,至 2016 年 9 月 13 日完成钻井和测井、录井作业,历时 534 d,经受了数个 14 级台风考验,全井进尺 2 843.18 m,取岩心 2 744.71 m,全井取心率 97.7%。前新近系钻进 629.10 m,实际总进尺(自海底)595.80 m,获取岩心 546.61 m,取心率 91.7%;中、古生代地层总进尺 2 214.08 m(629.10~2 843.18 m),获取岩心长度 2 198.10 m,取心率 99.3%。先后钻遇第四系—新近系,下三叠统青龙组,二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组和栖霞组,石炭系船山组、黄龙组和高骊山组,泥盆系五通组,志留系坟头组和高家边组^[52-54](图 3)。对全井进行了自然电位、自然伽马、电阻率、补偿中子、补偿密度、声波时差等常规测井和井径测井,在 2 000 和 2 800 m 深度分别进行了 3 次和 2 次测井,在 2 720 m 以上井段实施了 VSP 测井。对全井进行了钻进参数、岩屑、钻井液等常规录井,对 629.10 m 以下的岩石层进行了针对油气的气测录井和荧光录井。

4.2 首次在南黄海海相地层中发现油气显示

在钻探过程中,发现油气显示共 62 处,其中富含油 10 处、油浸 37 处、气测高幅异常段 5 处,首次在南黄海中—古生界海相地层中发现油气显示。油气显示有多段:在大隆组和龙潭组,整个井段断断续续气测录井和荧光录井均显示异常;五通组部分井段显示荧光异常;而志留纪地层断断续续显示气测异常,其中以大隆组油气显示级别最高^[55-56]。例如:在 866.00 m 处大隆组的泥质灰岩裂隙中,发现油迹,对应的气测录井显示,全烃体积浓度最大超过 0.30%,荧光分析显示为“油迹-油浸”,油气显示长度超过 10.00 m;在 885.00 m 处大隆组的灰质粉砂岩,在放置数小时后,沿方解石脉有原油渗出,对应的气

测录井,全烃体积浓度最大达到 0.37%,荧光分析显示也为“油迹-油浸”,油气显示长度大约 4.00 m^[57]。

4.3 建立多个基础数据剖面

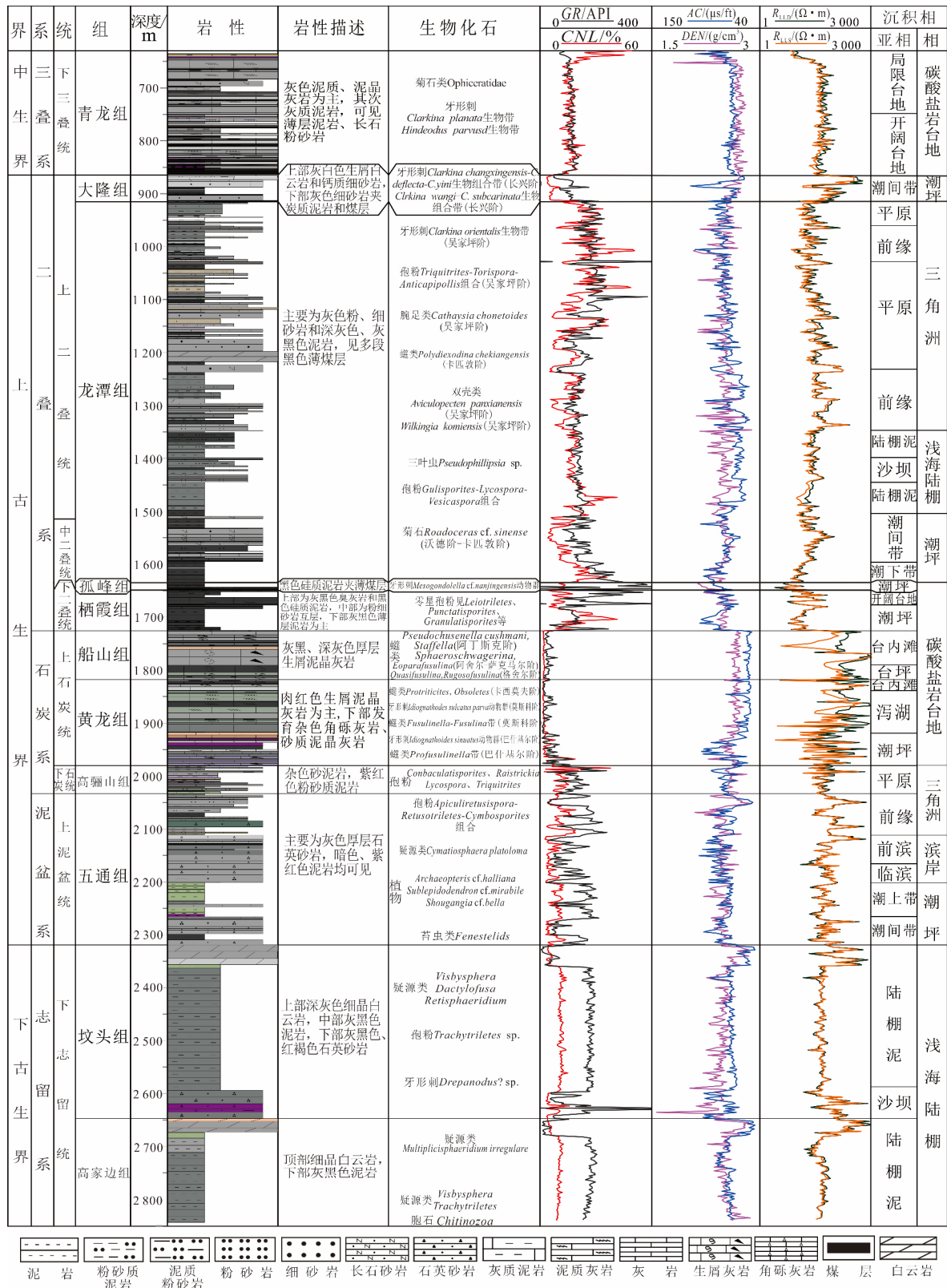
在岩心用于地层和资源环境等具体的科学目标研究之前,我们对其进行了基础数据的测定并建立数据库。对中—古生代海相地层的岩心,建立了厘米级的岩性剖面,并对岩心进行扫描,建立数据岩心图像数据库。除了测井数据之外,对多个地球物理性质参数进行系统测定,并建立了剖面,包括地震波速度(v_p , v_s)、孔隙度、渗透率、密度、磁化率、热导率等。测定并建立了系统的地球化学剖面,包括 O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti 和 P 共 9 种主量元素,38 种微量元素。

4.4 初步获得几点重要认识

在获取岩心后,针对大陆架科学钻探 CSDP-2 井设定的科学目标,开展了系统细致的研究,并初步获得了几点重要认识。

1)南黄海中部隆起的地层与下扬子地层大同小异,处于扬子地层大区之上。CSDP-2 井的地层印支面之下钻遇三叠纪青龙组,底部为晚奥陶世—早志留世高家边组,除加里东面之外,无明显地层缺失和倒置。在 CSDP-2 井中发现了大量化石,可与下扬子区地层对比,包括三叠纪蛇菊石 *Ophiceratidae* 和二叠纪菊石 *Roadoceras* cf. *sinens*^[58],三叠纪牙形刺 *Clarkina planata* 和 *Hindeodus parvus* 生物带、二叠纪牙形刺 *Clarkina changxingensis*-*C. deflecta*-*C. yini* 和 *Clarkina wangi*-*C. subcarinata* 生物带,以及泥盆纪的植物化石 *Archaeopteris* cf. *halliana* 等^[59]。晚泥盆世晚期的古羊齿和亚鳞木等植物大化石和大量标志性孢子,更是证实了扬子块体的东北界限可东延至朝鲜半岛中部^[59]。

2)南黄海中部隆起受印支—早燕山运动影响非常大,整体表现为多期次逆冲推覆构造,最大的地层倾角出现在龙潭组内部,大于 80°;滑脱面不是在某一特定地层内部,而是多个软弱层都发生,在 CSDP-2 井中最大的滑脱层是孤峰组顶部/龙潭组底部,因为此处为泥岩夹煤线的软弱层。印支—早燕山运动造成的青龙组顶部的剥蚀量高达 1 200~1 400 m^[59]。受加里东运动影响,中部隆起以垂向的抬升为主,表现为中上志留统和下中泥盆统的缺失,但在早二叠世栖霞组之下地层未发生大规模的逆冲推覆构造。



GR.自然伽马;CNL.补偿中子;AC.声波时差;DEN.密度; R_{LLD} .深侧向电阻率; R_{LLS} .浅侧向电阻率。英尺(ft)为非法定计量单位,1 ft=0.304 8 m,下同。

图 3 大陆架科学钻探 CSDP-2 井综合柱状图

Fig.3 Comprehensive histogram of CSDP-2 Well, Continental Shelf Drilling Program

3) 针对 CSDP-2 井的烃源岩和储层进行了系统研究和评价。通过烃源岩地化指标的系统测定和分析, 得出二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组—栖霞组和志留系高家边组底部 4 套地层为主力烃源岩层, 其生烃能力与下扬子区相当, 并且栖霞组源岩品质高于陆区的结论^[54-55]。对储层的研究表明, 南黄海中部隆起的储层并不理想, CSDP-2 井海相地层的孔隙度都在 2% 以内, 只能在寻找超低孔、超低渗致密储层方面寻求突破。

4) 通过声波测井资料合成地震记录处理和 VSP 测井标定, 建立了地震反射波组与地层岩性界面的对应关系, 得到 T_{10} 反射界面对应二叠系栖霞组底界, 而不是传统认识的龙潭组底界的新认识。通过 VSP 走廊叠加剖面与多道地震剖面的对比标定, 识别出海相残留盆地基底的地震反射特征, 为地震资料解释与层位标定乃至后期的反演处理提供了重要依据^[60-62]。

5 结论

1) 大陆架科学钻探计划是介于大洋钻探计划和大陆钻探计划之间的科学计划, 是探索中国大陆架地区陆架形成演化及其资源环境效应的多学科多目标综合计划。CSDP-2 井是这一计划在南黄海实施的第二口科学钻探井。

2) 大陆架科学钻探 CSDP-2 井设定了多学科的科学目标, 既关注中—古生界海相地层的沉积和构造演化, 也关注其资源环境效应, 并对实现科学目标的地球物理与观测、钻探技术等进行研究和开发。

3) 通过对大陆架 CSDP-2 井的钻探, 获得了一些初步的重要认识, 包括: 南黄海中部隆起的地层与下扬子地层大同小异, 处于扬子地层大区之上; 南黄海受加里东运动和印支—早燕山运动影响, 前者主要为垂向运动, 后者主要为逆冲推覆构造活动, 而且对南黄海改造非常大; 钻探的岩心中有 4 套地层为主力烃源岩层, 储层条件不理想; 得到了更加清晰的地震反射波组与地层岩性界面的对应关系, 与之前认识相比有所进步。

参考文献 (References):

- [1] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 1-8.
Xu Zhiqin. The Scientific Goals and Investigation Progresses of Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (1) : 1-8.
- [2] 汪品先. 我国参加大洋钻探的近十年回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 322-326.
Wang Pinxian. China's Participation in the Ocean Drilling Program: Decade Retrospect and Future Prospect[J]. Advanced in Earth Science, 2014, 29(3): 322-326.
- [3] 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 9-20.
Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wu Heyong, et al. Preliminary Achievement of the Chinese Cretaceous Continental Scientific Drilling Project-SK-1 [J]. Acta Geological Sinica, 2008, 82(1): 9-20.
- [4] 汪品先, 赵泉鸿, 翦知湓, 等. 南海三千万年的深海记录[J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2524-2535.
Wang Pinxian, Zhao Quanhong, Jian Zhimin, et al. Thirty Million Years of Deep Sea Records in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(23): 2524-2535.
- [5] Li Chunfeng, Xu Xing, Lin Jian. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349 [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 15: 4958 - 4983.
- [6] Sun Zhen, Stock J, Klaus A, et al. Expedition 367 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin[R/OL]. [2018-08-29]. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.367.2018>.
- [7] Jian Zhimin, Larsen H C, Alvarez Zarikian C A, et al. Expedition 368 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin[R/OL]. [2018-08-29]. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.368.2018>.
- [8] 许志琴, 杨文采, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探的过去、现在和未来: 纪念中国大陆科学钻探实施 15 周年、国际大陆科学钻探委员会成立 20 周年[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2109-2122.
Xu Zhiqin, Yang Wencai, Yang Jingsui, et al. 15 Year of Hardship and Struggle History and the Prospects for the Future of the Chinese Continental Scientific Drilling Program (CCSD): In Memory of the 15 Year Anniversary of CCSD and 20 Year Anniversary of ICDP[J]. Acta Geological Sinica, 2016, 90 (9) : 2109-2122.
- [9] An Zhisheng, Li Ai, Song Yougui, et al. Lake Qinghai Scientific Drilling Project[J]. Scientific Drilling, 2006, 1: 20-22.
- [10] 朱夏. 关于中国大陆边缘构造演化[J]. 海洋地质与第

- 四纪地质, 1987, 7(3): 115-120.
- Zhu Xia. On the Evolution of Continental Margins of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(3): 115-120.
- [11] 郭兴伟, 张训华, 温珍河, 等. 中国海陆及邻域大地构造格架图编制[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(12): 4005-4015.
- Guo Xingwei, Zhang Xunhua, Wen Zhenhe, et al. Compilation of the Tectonic Framework Map of China and Land and Adjacent Regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4005-4015.
- [12] 张训华, 郭兴伟. 块体构造学的大地构造体系[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(12): 3861-3868.
- Zhang Xunhua, Guo Xingwei. Block Tectonics and Its Geotectonic System [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 3861-3868.
- [13] 郑洪波, 汪品先, 刘志飞, 等. 东亚东倾地形格局的形成与季风系统演化历史寻踪[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(11): 1150-1160.
- Zheng Hongbo, Wang Pinxian, Liu Zhifei, et al. Carving the History of East Asia's East-Tilting Topography and East Asian Monsoon[J]. *Advance in Earth Science*, 2008, 23(11): 1150-1160.
- [14] 梅西, 张训华. 新生代以来中国陆架海区的地层及环境演化: “大陆架科学钻探项目”的科学目标[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(2): 1-8.
- Mei Xi, Zhang Xunhua. Stratigraphy and Environmental Evolution of China's Continental Shelf Since Late Cenozoic: Scientific Targets of CSDP[J]. *Marine Geology Letters*, 2015, 31(2): 1-8.
- [15] Liu Jian, Zhang Xunhua, Mei Xi, et al. The Sedimentary Succession of the Last ~ 3.50 Myr in the Western South Yellow Sea: Paleoenvironmental and Tectonic Implications[J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [16] 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等. 南黄海古生代以来构造演化[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(2): 124-128.
- Yao Yongjian, Xia Bin, Feng Zhiqiang, et al. Tectonic Evolution of the South Yellow Sea Since the Paleozoic [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(2): 124-128.
- [17] 庞玉茂, 张训华, 肖国林, 等. 下扬子南黄海沉积盆地构造地质特征[J]. *地质论评*, 2016, 62(3): 604-616.
- Pang Yumao, Zhang Xunhua, Xiao Guolin, et al. Structural and Geological Characteristics of the South Yellow Sea Basin in Lower Yangtze Block [J]. *Geological Review*, 2016, 62(3): 604-616.
- [18] 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 61-68.
- Hou Fanghui, Zhang Zhixun, Zhang Xunhua, et al. Geological Evolution and Tectonic Styles in the South Yellow Sea Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(5): 61-68.
- [19] 张训华, 张志珣, 蓝先洪, 等. 南黄海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- Zhang Xunhua, Zhang Zhixun, Lan Xianhong, et al. *Regional Geology of the South Yellow Sea* [M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2013.
- [20] 刘光鼎. 雄关漫道真如铁: 论中国油气二次创业[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 186-190.
- Liu Guangding. Building the Next Great Wall: The Second Round of Oil & Gas Exploration of China[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(2): 186-190.
- [21] 吴志强, 郝天珩, 张训华, 等. 扬子地块与华北地块在海区的接触关系: 来自上下源、长排列多道地震剖面的新认识[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1692-1705.
- Wu Zhiqiang, Hao Tianyao, Zhang Xunhua, et al. Contact Relationships Between the North China Block and the Yangtze Block: New Constraints from Upper/Lower-Source and Long Spread Multi-Channel Seismic Profiles[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1692-1705.
- [22] 张海啟, 陈建文, 李刚, 等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(3): 107-113.
- Zhang Haiqi, Chen Jianwen, Li Gang, et al. Discovery from Seismic Survey in Laoshan Uplift of the South Yellow Sea and the Significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(3): 107-113.
- [23] 戴春山. 中国海域含油气盆地群和早期评价技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- Dai Chunshan. Oil Gas Basin Group of China Seas and Early Resource Assessment Techniques[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2011.
- [24] 郝天珩, 黄松, 徐亚, 等. 关于黄海深部构造的地球物理认识[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1315-1326.
- Hao Tianyao, Huang Song, Xu Ya, et al. Geophysical Understandings on Deep Structure in Yellow Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(6): 1315-1326.
- [25] 黄松, 郝天珩, 徐亚, 等. 南黄海残留盆地宏观分布特征研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1344-1353.
- Huang Song, Hao Tianyao, Xu Ya, et al. Study on

- Macro Distribution of Residual Basin of South Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(6): 1344-1353.
- [26] 张训华, 杨金玉, 李刚, 等. 南黄海盆地基底及海相中、古生界地层分布特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4041-4051.
- Zhang Xunhua, Yang Jinyu, Li Gang, et al. Basement Structure and Distribution of Mesozoic-Paleozoic Marine Strata in the South Yellow Sea Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4041-4051.
- [27] 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 45-56.
- Zhang Wenyu. Marine and Continental Geotectonics of China and Its Environs [M]. Beijing: Science Press, 1986: 45-56.
- [28] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理场特征[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- Liu Guangding. Geologic-Geophysics Features of China Seas Adjacent Regions [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [29] 翟明国, 郭敬辉, 李忠, 等. 苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸: 造山带、前寒武纪基底以及古生代沉积盆地的证据与制约[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 415-428.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Li Zhong, et al. Extension of the Sule UHP Belt to the Korean Peninsula: Evidence from Orogenic Belts, Precambrian Basements, and Paleozoic Sedimentary Basins [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 415-428.
- [30] 翟明国. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2016, 32(10): 2915-2932.
- Zhai Mingguo. Comparative Study of Geology in North China and Korean Peninsula: Research Advance and Key Issues [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(10): 2915-2932.
- [31] 马寅生, 崔盛芹, 施伟, 等. 中国东部—朝鲜半岛海陆构造格局及含油气盆地特征[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Shi Wei, et al. Tectonic Framework and Development of Petroleum Basin in East China-Korean Peninsula [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [32] 郝天珧, Suh Mancheol, 刘建华, 等. 黄海深部结构与中朝—扬子块体结合带在海区位置的地球物理研究[J]. 地学前缘, 2003, 11(3): 51-61.
- Hao Tianyao, Suh Mancheol, Liu Jianhua, et al. Deep Structure and Boundary Belt Position Between Sino-Korean and Yangtze Blocks in Yellow Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 11(3): 51-61.
- [33] Yin An, Nie Shangyou. An Indentation Model for the North and South China Collision and the Development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, Eastern Asia [J]. Tectonics, 1993, 12(4): 801-813.
- [34] 纪友亮, 周勇, 王改为, 等. 下扬子地区古生界海相碳酸盐岩层序地层发育模式及储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 724-732.
- Ji Youliang, Zhou Yong, Wang Gaiwei, et al. Sequence Stratigraphic Models and Reservoir Prediction of the Paleozoic Marine Carbonates in the Lower Yangtze Area [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 724-732.
- [35] 徐旭辉, 周小进, 彭金宁. 从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 523-531.
- Xu Xuhui, Zhou Xiaojin, Peng Jinning. Exploration Targets in Southern Yellow Sea Through Analysis of Tectono-Depositional Evolution and Hydrocarbon of Marine Basin in Yangtze Area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 523-531.
- [36] 张敏强, 高顺莉, 谭思哲. 南黄海盆地中、古生界地质特征及勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 24-34.
- Zhang Mingqiang, Gao Shunli, Tan Sizhe. Geological Characteristics of the Meso-Paleozoic in South Yellow Sea Basin and Future Exploration [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 24-34.
- [37] 戎嘉余, 黄冰. 生物大灭绝研究三十年[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(3): 377-404.
- Rong Jiayu, Huang Bing. Study of Mass Extinction over the Past Thirty Years: A Synopsis [J]. Scientia Sinica Terrae, 2014, 44(3): 377-404.
- [38] 沈树忠, 张华. 什么引起五次生物大灭绝? [J]. 科学通报, 2017, 62: 1119-1135.
- Shen Shuzhong, Zhang Hua. What Caused the Five Mass Extinctions [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62: 1119-1135.
- [39] 张训华, 肖国林, 吴志强, 等. 南黄海油气勘探若干地质问题认识与探讨[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Zhang Xunhua, Xiao Guolin, Wu Zhiqiang, et al. Understanding and Discussion on Several Geological Problems of Oil and Gas Exploration in the South Yellow Sea [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [40] 赵文智, 徐春春, 王铜山, 等. 四川盆地龙岗和罗家寨—普光地区二、三叠系长兴—飞仙关组礁滩体天然

- 气成藏对比研究与意义[J].科学通报,2011,56(28/29):2404-2412.
- Zhao Wenzhi, Xu Chunchun, Wang Tongshan, et al. Comparative Study of Gas Accumulations in the Permian Chang Xing Reefs and Triassic Feixianguan Oolitic Reservoirs Between Longgang and LuoJiazhai in the Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(28/29): 2404-2412.
- [41] Ma Yongsheng, Zhang Shuichang, Guo Tonglou, et al. Petroleum Geology of the Puguang Sour Gas Field in the Sichuan Basin, SW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(4): 357-370.
- [42] Wei Guoqi, Chen Gengsheng, Du Shangming, et al. Petroleum Systems of the Oldest Gas Field in China: Neoproterozoic Gas Pools in the Weiyuan Gas Field, Sichuan Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(4/5): 371-386.
- [43] Guo Tonglou. Reservoir Characteristics and Its Controlling Factors of the Changxing Formation Reservoir in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2381-2391.
- [44] 邱小松, 杨波, 胡明毅. 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1274-1283.
- Qiu Xiaosong, Yang Bo, Hu Mingyi. Characteristics of Shale Reservoirs and Gas Content of Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle Yangtze Region [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1274-1283.
- [45] 吴志强, 肖国林, 董贺平, 等. 基于南黄海盆地海相油气的海洋立体宽线地震勘探技术设想[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(8): 56-60.
- Wu Zhiqiang, Xiao Guolin, Dong Heping, et al. A Suggestion of Marine Tridimensional Wide Line Seismic Technique for Exploration of Marine Carbonate Reservoir in the South Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology Letters, 2012, 28(8): 56-60.
- [46] 吴志强, 郝天珧, 唐松华, 等. 立体气枪阵列延迟激发震源特性及在浅海区 OBS 探测中的应用[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2573-2586.
- Wu Zhiqiang, Hao Tianyao, Tang Songhua, et al. Tridimensional Air-Gun Array with Delay Fired Source Signal Characteristics and the Application in OBS Exploration in Shallow Seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2573-2586.
- [47] 赵维娜, 张训华, 孟祥君, 等. 南黄海 OBS 数据转换横波分析及其地质意义[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1479-1490.
- Zhao Weina, Zhang Xunhua, Meng Xiangjun, et al. Analysis of Converted Shear-Waves Based on OBS Data in the South Yellow Sea and Its Geological Implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(4): 1479-1490.
- [48] 陈师逊, 宋世杰. 中国东部海区科学钻探施工技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(12): 1-5.
- Chen Shixun, Song Shijie. Discussion of Scientific Drilling Construction Technology in Eastern Sea Area of China [J]. Exploration Engineering (Rock Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 1-5.
- [49] 宋世杰, 李晓东, 陈师逊. 南黄海大陆架科钻 CSDP-2 井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4): 10-13.
- Song Shijie, Li Xiaodong, Chen Shixun. Study on Seawater Flushing Fluid and Its Application in Quaternary and Neogene Strata for CSDP-02 [J]. Exploration Engineering (Rock Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 10-13.
- [50] 宋宝杰, 栾东平, 杨芳, 等. “探海 1 号”大陆架科学钻探平台的设计与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(9): 9-13.
- Song Baojie, Luan Dongping, Yang Fang, et al. Design and Application of “Tanhai No.1” Platform for the Continental Shelf Scientific Drilling [J]. Exploration Engineering (Rock Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(9): 9-13.
- [51] 董海燕, 单文军, 宋世杰, 等. 南黄海大陆架科学钻探 CSDP-02 井钻探施工技术[J]. 地质与勘探, 2017, 53(2): 334-342.
- Dong Haiyan, Shan Wenjun, Song Shijie, et al. Technologies Used at the Well CSDP-02 of the Scientific Drilling on the Continental Shelf in the Southern Yellow Sea [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(2): 334-341.
- [52] 蔡来星, 王蛟, 郭兴伟, 等. 南黄海中部隆起中—古生界沉积相及烃源岩特征: 以 CSDP-2 井为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(4): 1030-1046.
- Cai Laixing, Wang Jiao, Guo Xingwei, et al. Characteristics of Sedimentary Facies and Source Rocks of Mesozoic in Central Uplift of South Yellow Sea: A Case Study of CSDP-2 Coring Well [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(4): 1030-1046.
- [53] 蔡来星, 郭兴伟, 徐朝晖, 等. 南黄海盆地中部隆起上古生界沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 695-

705.
Cai Laixing, Guo Xingwei, Xu Zhaohui, et al. Depositional Environment of Upper Paleozoic in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 695-705.
- [54] 高小惠, 张训华, 蔡来星, 等. 南黄海中部隆起 CSDP-2 井志留系—石炭系岩石学特征及其沉积相[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(1): 53-64.
Gao Xiaohui, Zhang Xunhua, Cai Laixing, et al. Silurian-Carboniferous Petrographic Features and Depositional Facies of Well CSDP-2 in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(1): 53-64.
- [55] 肖国林, 蔡来星, 郭兴伟, 等. 南黄海中部隆起 CSDP-2 井中—古生界烃源岩精细评价[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(12): 24-36.
Xiao Guolin, Cai Laixing, Guo Xingwei, et al. Detailed Assessment of Meso-Paleozoic Hydrocarbon Source Rocks: Implication from Well CSDP-2 on the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology Letters*, 2017, 33(12): 24-36.
- [56] 蔡来星, 肖国林, 郭兴伟, 等. 南黄海盆地科学钻探 CSDP-2 井上古生界—中生界烃源岩评价及海相油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2018, 39(6): 660-673.
Cai Laixing, Xiao Guolin, Guo Xingwei, et al. Evaluation of Upper Paleozoic Source Rocks in Well CSDP-2 and Marine Oil & Gas Exploration Prospect in the South Yellow Sea Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(6): 660-673.
- [57] 郭兴伟, 朱晓青, 宋世杰. 大陆架科钻 CSDP-2 井在南黄海海相地层中首次钻遇油气显示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(5): 125.
Guo Xingwei, Zhu Xiaoqing, Song Shijie. First Discovery of Hydrocarbon Show in the Marine Stratum of Central Uplift, the South Yellow Sea from CSDP-2 Well, Chinese Shelf Drilling Program [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 125.
- [58] 郭兴伟, 朱晓青, 牟林, 等. 南黄海中部隆起二叠纪—三叠纪菊石的发现及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 121-128.
Guo Xingwei, Zhu Xiaoqing, Mu Lin, et al. Discovery of Permian-Triassic Ammonoids in the South Yellow Sea and Its Geological Implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 121-128.
- [59] 郭兴伟, 徐洪合, 朱晓青, 等. 发现 of Late Devonian Plants from the Southern Yellow Sea Borehole of China and Its Palaeo-Geographical Implications [J/OL]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. [2017-08-28]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.08.039>.
- [60] Pang Yumao, Guo Xingwei, Han Zuozhen, et al. Mesozoic-Cenozoic Denudation and Thermal History in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin and the Implication for Hydrocarbon Systems: Constraints from the CSDP-2 Borehole [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 355-369.
- [61] 张晓华, 张训华, 吴志强, 等. 南黄海中部隆起中—古生界地层发育新认识: 基于大陆架科学钻探 CSDP-02 井钻探成果[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6): 2369-2379.
Zhang Xiaohua, Zhang Xunhua, Wu Zhiqiang, et al. New Understanding of Mesozoic-Paleozoic Strata in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin from the Drilling of Well CSDP-02 of "Continental Shelf Drilling Program" [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2369-2379.
- [62] 吴志强, 郭兴伟, 祁江豪, 等. 大陆架科学钻探南黄海 CSDP-2 井的垂直地震剖面资料采集技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(3): 199-205.
Wu Zhiqiang, Guo Xingwei, Qi Jianghao, et al. Vertical Seismic Profiling Data Acquisition from Well CSDP-2 in the Central Uplift of South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(3): 199-205.