

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.04.014

西非下刚果盆地海底麻坑特征及与盐岩活动的关系

付志方, 孙自明, 高君, 滕彬彬

中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要:以高精度三维地震资料为基础,系统研究了西非下刚果盆地深海麻坑的形态特征及其与盐构造活动的关系。研究发现,该区海底麻坑几何形态主要有平面上圆形、剖面上深V型和平面上条形、剖面浅U型两大类,并分别分布于由浅水到深水的东西两个不同区带。进一步分析认为,该区麻坑的发育、分布与下部盐岩构造活动有密切关系,东部盐岩底辟构造带上发育由压扭应力作用下的海底地层挤压破裂并诱发流体高压喷射而形成的深V型麻坑,西部盐岩挤压逆冲构造带上发育由拉张应力作用下的沿盐岩体边界上海底地层拉张破裂而形成的U型麻坑。该区产生麻坑的海底地层破裂和流体高压均由下部盐岩构造活动所控制。

关键词:下刚果盆地;深V型麻坑;浅U型麻坑;盐底辟;盐蓬

中图分类号:P736.1 **文献标识码:**A

Seabed pockmarks and their bearing on salt movement in Lower Congo Basin of western African

FU Zhifang, SUN Ziming, GAO Jun, TENG Binbin

Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract: Based on high resolution 3D seismic data, the characteristics of seabed pockmarks and their relationship with salt movement are systematically studied in this paper. There are two types of pockmarks, i.e. the deep V-shaped and the shallow U-shaped pockmarks, distributed in the east and west of the study area respectively. The distribution pattern of pockmarks depends upon underlying salt movement. The V-type pockmark is resulted indirectly from the compressive stress on seabed caused by salt diapirs in the east area, while the U-type pockmark resulted indirectly from the extensional stress on seabed caused by salt canopy in the west area. Both the pockmarks are formed by seabed rupturing and erupting of high pressure strata water directly triggered by underlying salt structure movements.

Key words: Lower Congo Basin; deep V-type pockmark; shallow U-type pockmark; salt diapir; salt canopy

海底麻坑是一种常见的海底微地貌。尽管对于麻坑的形成机制还存在一些争议,但各国学者普遍认为,麻坑主要是由于海底地层内流体向海底强烈快速喷逸或缓慢渗漏,侵蚀海底松散沉积物而形成大小不等的凹坑。复杂多变的海洋地质环境及海底流体活动导致麻坑呈现出不同的大小和形态特征^[1]。随着现代人类生产活动范围的扩大,海底地貌特征描述具有现实意义。

西非深海上刚果盆地近几十年已成为世界油气勘探开发的热点地区,相关石油公司在深海区域采集了大量三维地震资料。这些高精度成像的三维地震资料为海底微地貌研究提供了覆盖范围广、探测深度深的资料基础。研究发现该区麻坑有其独特的形态、展布规律,且其成因与深层盐岩活动有紧密联系。

1 地质背景

下刚果-刚果扇为典型的裂谷与被动陆缘叠合含盐含油气盆地,经历了裂谷期(早白垩世凡兰吟阶至巴列姆阶)、过渡期(阿普第阶至早阿尔必阶)和被动陆缘期(早白垩世阿尔必阶至今)三个演化阶段,沉积了裂谷期陆相地层、过渡期蒸发岩和被动陆缘期海相地层三套地层层序^[2,3]。过渡期蒸发岩地层,分布区域广、沉积厚度大,原始沉积厚度一般可达1000m,对该区构造变形起着关键作用^[4,5]。中始新世到中新世,海平面大幅下降,导致西非被动陆缘盆地形成规模不等的深水浊积扇沉积,加之非洲大陆的不断抬升和被动陆缘盆地的持续沉降,该区

资助项目:国家科技重大专项“南大西洋两岸重点盆地油气富集规律与目标评价”(2016ZX05033-02)

作者简介:付志方(1966—),男,高级工程师,博士,从事地震地质综合研究,E-mail: fuzf.syky@ sinopec.com

收稿日期:2017-01-21; **改回日期:**2017-04-25. 周立君编辑

呈现明显的重力滑动构造背景^[6,7]。以过渡期蒸发盐岩为滑脱拆离层,从岸到海形成了三个特征明显的盐岩变形构造带:拉张构造带、过渡构造带、挤压变形带。

拉张构造带,原始地层倾角最陡,盐岩主要在重力作用下向深部低重力势能区流动,引起上覆地层拉张断裂塌陷。挤压变形带,原始地层最平缓,上倾方向盐岩流动到此堆积,在盐岩运动惯性和浮力作用下,向上挤压并卷入上覆地层,甚至直达海底,形成重力滑脱冲断构造区,因此海底微地貌形态相对比较复杂。过渡构造带,原始地层倾角中等,盐岩主要受重力差异负载和浮力作用,在局部原始地层倾角变化地带形成盐岩底辟,底辟平面范围较大,但纵向幅度相对较小,从而使上覆地层形成各式各样的披覆背斜构造,此类披覆构造为该地区油气成藏的主要圈闭。本研究区主要位于过渡带和挤压带上(图 1)。

相对平整的原始倾斜海底形态主要受后期盐构造运动影响,形成了多种特征明显的海底微地貌,不同的盐构造变形带上海底微地貌特征差异明显,且各自特点鲜明。

2 麻坑的形态特征及分布规律

研究区海水深度 1300~2700m,海底由北东东向南西西倾斜,海底背景倾角约 14°。麻坑发育密集带的海底总体背景相对略有起伏,无麻坑发育带的海底基本保持相对平整的原始海底沉积地貌。该区海底麻坑总体比较发育。从麻坑几何形态和类别分析,其分布基本上遵循东西分带原则,并且分别和深层盐岩底辟构造过渡带和盐岩逆冲挤压带重合(图 2)。图 2 为海底地震反射层的倾角属性来显示

的海底麻坑平面特征图。

2.1 盐岩底辟构造过渡带的麻坑形态与分布规律

该构造带上,海底麻坑平面形态总体为“点”状,为标准的圆形,或椭圆形,宽度为 10m 至 50m 不等,其剖面显现为深 V 型,深度为 20 至 100m 不等,深度是宽度的两倍左右(图 3)。较大规模的麻点平面展布以线型串珠状为主,较小级别的麻点围绕大麻点串珠周边以疑似小型串珠状分布,串珠平面展布趋势线为平行于海底走向背景的北北西至南南东(图 2)。另外也有少部分较大规模的孤立或圆形串珠分布(图 4)。

2.2 盐岩挤压逆冲带的麻坑形态与分布规律

该构造带上,海底麻坑平面形态总体为“坑”状,除少部分为圆形或椭圆形外,多呈现为新月形、香肠形或环形等长条形状,长度 1 至 10km 不等,宽度为 50m 至 200m 不等。其横切面显现为不对称的浅 U 型,深度为 10m 至 50m 不等,宽度是深度的 4 倍左右(图 5)。它们的平面展布趋势同样为平行于海底走向背景的北北西至南南东向(图 2)。

3 麻坑成因与盐岩活动的关系

前人研究认为,海底麻坑可能是海底沉积地层中的高压流体向海底快速强烈喷发或缓慢地持续溢漏而形成,也可能是由低密度、低黏度的塑性地层受到挤压,其上覆沉积物局部向上隆起,继而海底地层破裂并遭受剥蚀等作用而形成。欠压实或非压实的沉积地层、流体通道、流体超压体系以及良好的沉积盖层,是形成海底麻坑的基本要素^[8-11]。

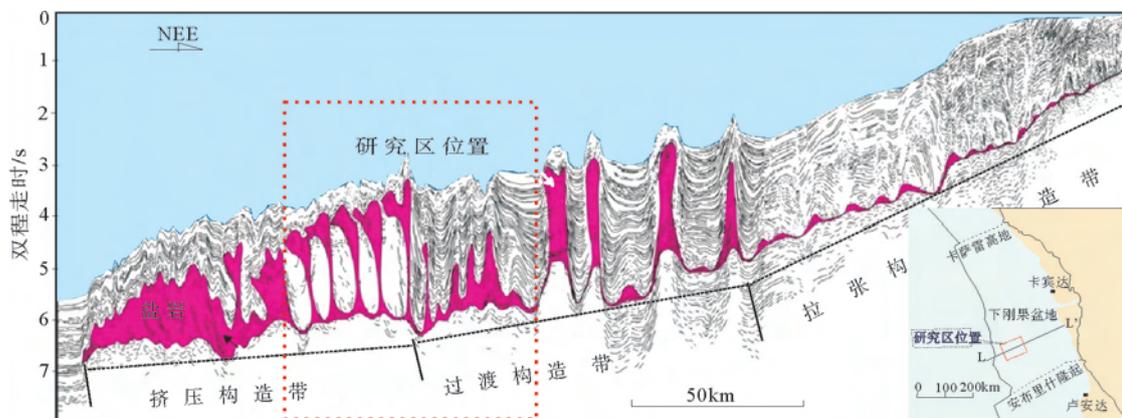


图 1 下刚果盆地地震构造剖面(据 Marton 等修改,2000)

Fig.1 Regional seismic tectonic profile of Lower Congo Basin

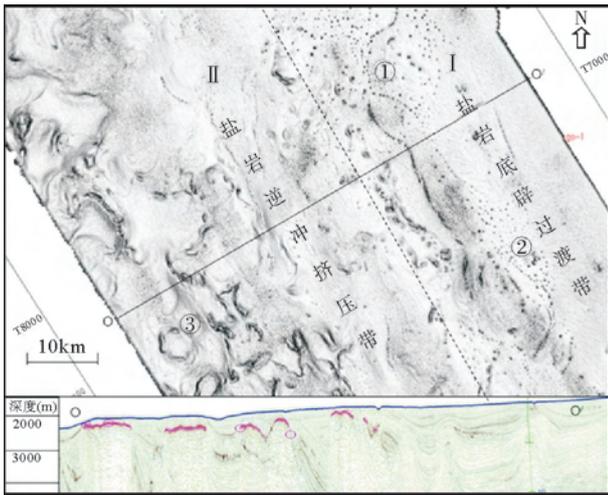


图2 海底麻坑综合分布图

Fig.2 Distribution map of seabed pockmarks

该区麻坑成因不仅有上述之共性,也有其特殊性。并且其特殊性和盐岩构造活动有着密不可分的关系。从上述麻坑形态特征和分布规律可知它们有区域上的规律性(图2)。进一步深入研究发现,盐底辟构造过渡区麻坑主要发育在盐岩底辟构造夹持的上覆地层的中心海底区域,盐底辟发育规模和范围相对较小。相反,盐岩挤压逆冲构造带麻坑主要发育在盐岩构造包络线边部区域,盐岩推覆体发育规模和范围相对大得多(图6)。图6中背景为灰度显示为麻坑平面分布图,彩色显示为盐岩分布范围和其顶面构造图。

3.1 盐岩底辟构造过渡带上麻坑成因

该带上圆形或椭圆深V型麻坑,表明有高压流体的喷射或溢漏。其流体高压体系的形成与平衡是分析麻坑形成的关键。其他相关研究文献提及的麻坑常规成因因素:气烟囱地震反射现象、明显断裂带发育、浅层水合物(BSR)强地震反射等现象^[12-19],在本研究区过典型深V型麻坑的地震剖面上未发现上述类似地震反射特征(图3)。

从麻坑在图6平面展布和在图3剖面中位置分析,串珠排列的麻坑主要位于两个盐底辟夹持的上覆沉积地层的中心线附近,从海底底面和深部沉积地层面形态看,串珠麻坑正好位于上述各层面向下弯曲转折位置,即麻坑位置地势最低、两边地层均向上微微掀斜。此类特征正好吻合该区盐岩活动规律,盐底辟的发育不仅使盐边上覆地层产生局部抬升而引起地层水流体压力在低部位急剧升高形成高压水层,同时,施加于夹持沉积地层,特别是浅表地层一个横向最大挤压应力,而垂直方向变为应力最小,引起海底地层在转折位置沿最小应力方向破裂,并且诱发浅表高压水层的喷出,形成串珠似的深V麻坑^[20](图7)。由于盐底辟生长发育的非均质性,在近北东东至南西西向挤压的大背景下,会形成各种各样的局部压扭应力场,从而产生看似不规则分布的小型V形麻坑。个别如图4显示的圆形排列的V形麻坑,是由局部小型盐岩体直接升至海底,并引起周边海底地层破裂和高压流体喷射而形成。

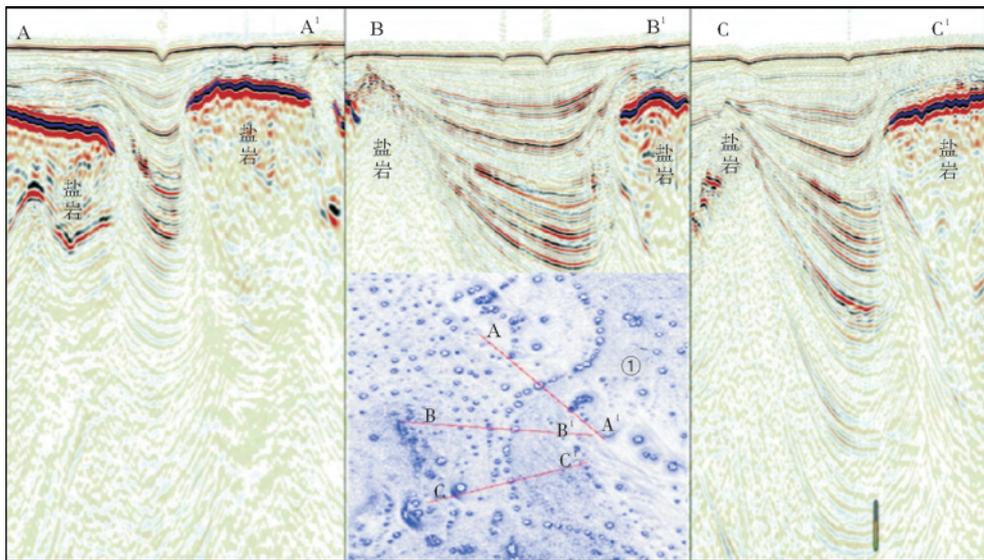


图3 过线形串珠深V型麻坑地震剖面

Fig.3 Seismic profile showing the linear bearded deep V-shaped pockmark

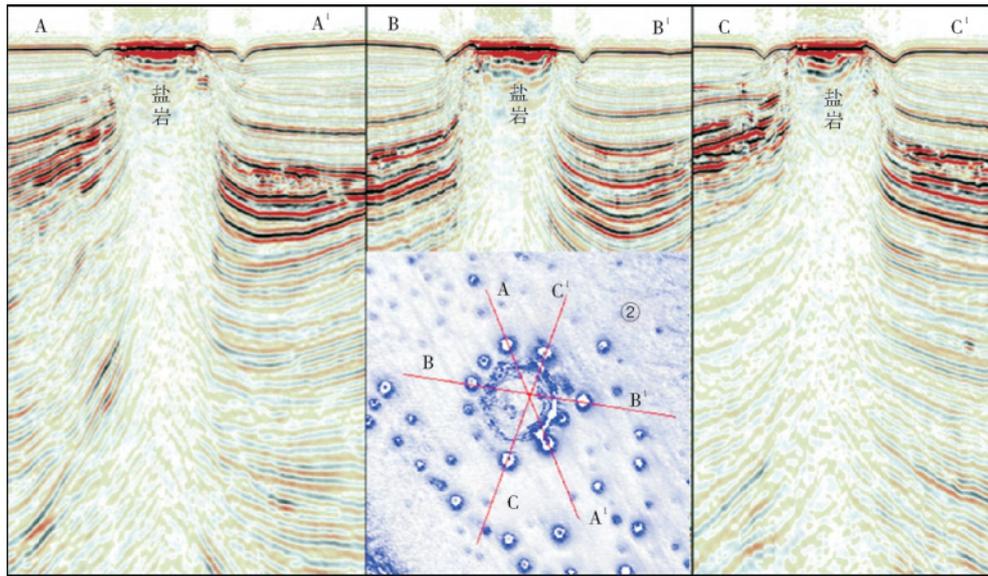


图 4 过圆形串珠深 V 型麻坑地震剖面

Fig.4 Seismic profile showing the round deep V-shaped pockmark

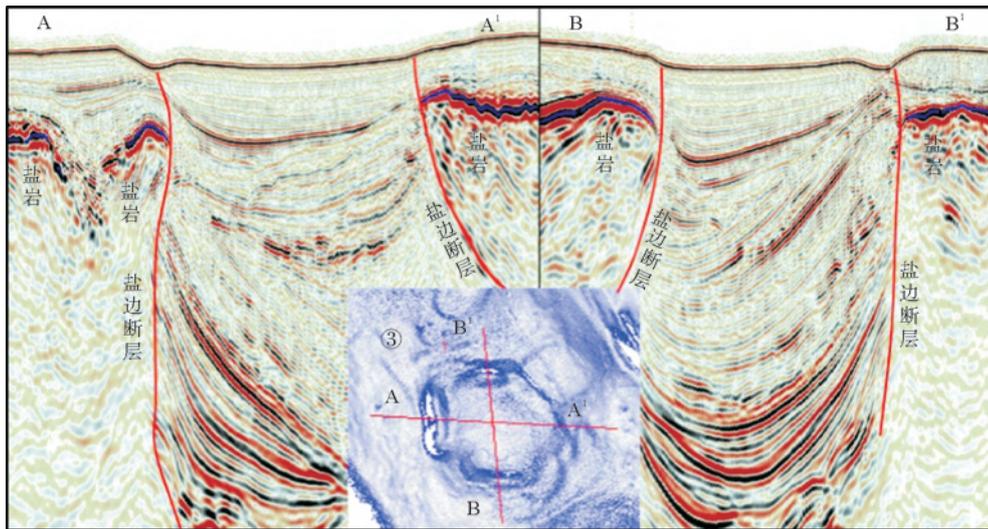


图 5 过浅 U 型麻坑地震剖面

Fig.5 Seismic profile showing the shallow U-shaped pockmark

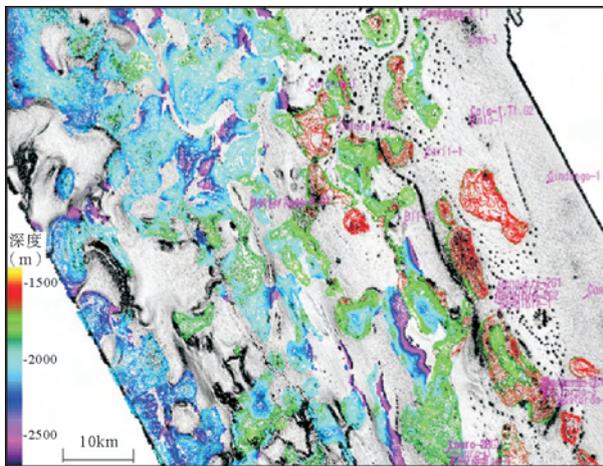


图 6 麻坑平面分布图与盐岩顶面构造叠合图

Fig.6 Overlapped plane map showing the top of salt structure and pockmarks distribution

由于盐岩以塑性流动状态挤入上覆地层,在上覆地层压力和周围应力共同作用下,盐岩和周边原始地层会形成“无缝焊接”,深部烃类气体和地下水很难沿着所谓的盐边界面向上运移。

3.2 盐岩挤压逆冲带上麻坑成因

该带上不对称浅 U 型麻坑,表明其形成与高压流体的喷射或溢漏没有直接关系。

从麻坑在图 6 平面展布和在图 5 剖面中位置分析,麻坑单体规模大、平面几何外形不规则,但总体沿着盐岩体平面包络线分布。以上特征正好与该区盐岩活动规律一致,该区盐岩虽然在深部地层内以挤压形式大规模卷入上覆地层,但是,在海底附近地层中,以大型盐蓬、岩株等形式存在,这些大型外来

盐岩体对该区带上覆地层及海底地形产生巨大的改造作用。特别是,大型盐岩体引起其周边上覆海底地层的剧烈拉张破裂形成裂口,并在海水冲刷作用下形成大型麻坑^[21]。断裂带两边不同岩性地层体构造活动的差异性形成了剖面上的不对称浅U型麻坑(图8)。该带上较大规模的构造拉张破裂形成了剖面上浅而宽的U型、平面上长条形麻坑。

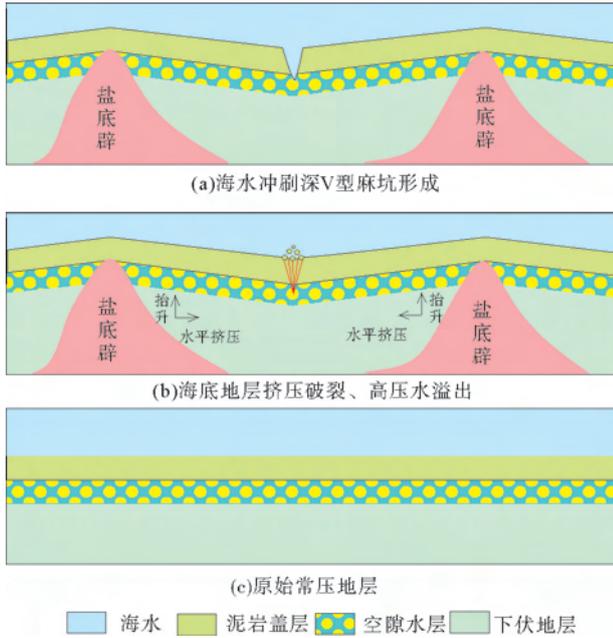


图7 深V型麻坑形成演化模式

Fig.7 Evolutionary model of deep V-shaped pockmark

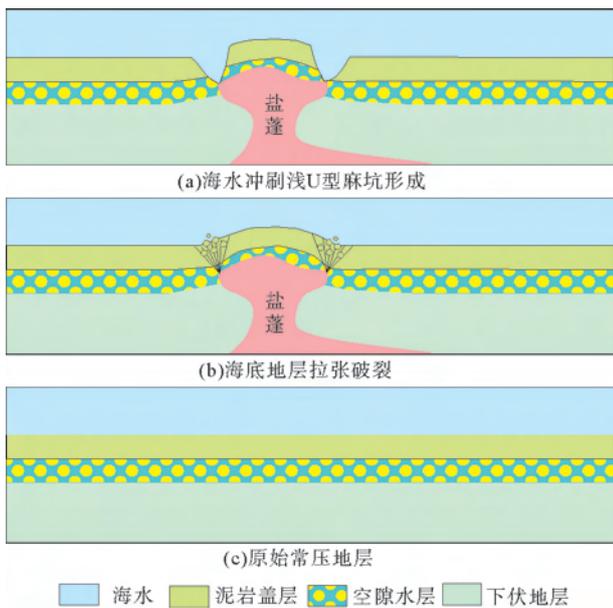


图8 浅U型麻坑形成演化模式

Fig.8 Evolutionary model of shallow U shaped pockmark

4 结论

(1)研究区,下刚果盆地海底麻坑的几何形态和分布主要由下部地层内盐岩的差异性构造活动所控制。东部的盐底辟过渡构造带上,主要在盐底辟之间的海底发育似串珠排列的圆形或椭圆形深V状麻坑。西部的盐岩挤压逆冲构造带上,主要在盐蓬、岩株边界上的海底发育条形不对称浅U状麻坑。

(2)深V型麻坑,主要由在盐岩底辟压扭应力作用下的上覆地层应力集中带的海底破裂,并诱发下部由地层挤压变形产生的高压地层水的喷射或溢漏而形成。

(3)不对称浅U型麻坑,主要由卷入到近海底地层的盐蓬、岩株引起海底的拉张变形,并在盐岩体边缘上的海底应力变化带发生机械劈裂而形成,无高压地层水溢出。

(4)该区麻坑下面的深部地层,在地震剖片上均没发现气烟囱、原始地层断裂带、浅部地层的强BSR反射等现象。该区麻坑主要为以构造成因为主的麻坑。

参考文献 (References)

[1] 罗敏,吴庐山,陈多福.海底麻坑研究现状及进展[J].海洋地质前沿,2012,28(5):33-41.[LUO Min, WU Lushan, CHEN Duofu. Research status and progress of seabed pockmarks[J]. Marine Geology Frontier,2012,28(5):33-41.]

[2] 孙自明.下刚果-刚果扇盆地沉积构造演化与油气勘探领域[J].现代地质,2016,30(6):1303-1310.[SUN Ziming. Sedimento-tectonic evolution and petroleum exploration domains of Lower Congo-Congo Fan Basin[J].Geoscience, 2016,30(6):1303-1310.]

[3] 范洪耀,陶维祥,张金森,等.下刚果-刚果扇盆地断裂特征及其对油气成藏的影响[J].海洋石油,2012,32(1):40-44.[FAN Hongyao, TAO Weixiang, ZHANG Jinmiao, et al. The fracture characteristics and its impacts on hydrocarbon accumulation in Lower Congo Basin and Congo Fan Basin[J].Offshore Oil,2012,32(1):40-44.]

[4] 邬长武,熊利平,陈焕杰,等.下刚果-刚果扇盆地油气成藏分析及有利区评价[J].石油天然气学报,2012,34(7):17-21.[WU Changwu, XIONG Liping, CHEN Huanjie, et al. The main control factor of hydrocarbon accumulation and favorable area evaluation in Lower Congo-Congo Fan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2012,34(7):17-21.]

[5] 蔡露露,王雅宁,王颖,等.西非深水沉积类型特征及油气勘探意义[J].石油学报,2016,37(1):131-142.[CAI Lulu, WANG Yaning, WANG Ying, et al. Type features and hydrocarbon exploration significance of deepwater sedimentary in West Africa

- [J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(1):131-142.]
- [6] 李涛,胡望水,于水,等.西非被动大陆边缘重力滑脱构造体系下的塑性构造[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):69-76. [LI Tao, HU Wangshui, YU Shui, et al. ductile structures in gravitational decollement structure system at passive continental margin of west African[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2012,32(3):69-76.]
- [7] Marton G, Tari G, Lehmann C. Evolution of the Angolan passive margin, West Africa, with emphasis on post-salt structural styles [C]//Atlantic Rifts and Continental Margins. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 2000, 115:129-149.
- [8] 李磊,裴都,都鹏燕,等.海底麻坑的构型、特征、演化及成因[J].海相油气地质,2013,18(4):53-58. [LI Lei, PEI Du, DU Pengyan, et al. Architecture, character, evolution and genesis of seabed pockmarks: A case study to the continental slope in Rio Muni Basin, West Africa[J].Marine Origin Petroleum Geology,2013,18(4):53-58.]
- [9] 李学杰,王大伟,吴时国,等.三沙海底峡谷识别与地貌特征分析[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(3):28-36. [LI Xuejie, WANG Dawei, WU Shiguo, et al. Geomorphology of Sansha canyon: identification and implication[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2017,37(3):28-36.]
- [10] 王一凡,苏正,苏明,等.南海北部陆坡神狐海域沉积物失稳类型探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):184-194. [WANG Yifan, SU Zheng, SU Min, et al. Sediment failures in the shenhu area, northern continental slope of the south china sea[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 2017,37(5):184-194.]
- [11] Sahling H, Bohrmann G, Spiess V, et al. Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow[J].Marine Geology,2008,249(3/4):206-225.
- [12] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin[J]. Marine Geology,2006,26(1/2):25-40.
- [13] 顾兆峰,张志,刘怀山.南黄海西部地区浅层气地震特征[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(3):65-73. [GU Zhaofeng, ZHANG Zhi, LIU Huaishan. Seismic features of shallow gas in the western area of the Yellow Sea[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2006,26(3):65-73.]
- [14] 尚久靖,吴庐山,梁金强,等.南海东北陆坡海底微地貌特征及其天然气渗漏模式[J].海洋地质前沿,2013,29(12):37-44. [SHANG Jiujing, WU Lushan, LIANG Jinqiang, et al. Microtopographic features of the northeastern slope of the South China Sea and gas seepages[J].Marine Geology Frontiers, 2013,29(12):37-44.]
- [15] 孙启良,吴时国,陈端新,等.南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义[J].地球物理学报,2014,57(12):4053-4062. [SUN Qiliang, WU Shiguo, CHEN Duanxin, et al. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep-water basins of the northern south china sea[J].Chinese Journal of Geophysics, 2014,57(12):4053-4062.]
- [16] 龚建明,廖晶,何拥军,等.日本海天然气水合物气源成因及主控因素探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):102-108. [GONG Jianming, LIAO Jing, HE Yongjun, et al. Discussion on gas origins and main controlling factors for gas hydrates in the sea of Japan[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 2017,37(5):102-108.]
- [17] 秦轲,孙运宝,赵铁虎,等.南海北部陆坡神狐海域海底滑坡地球物理响应特征及其与流体活动相关性[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(5):69-76. [QIN Ke, SUN Yunbao, ZHAO Tiehu, et al. Seismic response and genetic mechanism of the submarine landslides in Shenhu area, South China Sea [J].Marine Geology & Quaternary Geology, 2015,35(5):69-76.]
- [18] 王剑,杜向东,张树林,等.加蓬海岸盆地海底麻坑的成因机制及对油气勘探的指示[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):87-92. [WANG Jian, DU Xiangdong, ZHANG Shulin, et al. Evolution and genesis of seabed pockmarks in gabon coastal basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015,35(6):87-92.]
- [19] 李进,王淑红,颜文,等.海底泥火山及其与油气和天然气水合物的关系[J].海洋地质与第四纪地质,2015,37(6):204-214. [LI Jin, WANG Shuhong, YAN Wen, et al. Seabed mud volcano and its bearing on oil-gas and gas hydrate[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 2015,37(6):204-214.]
- [20] Harrington P K. Formation of pockmarks by pore-water escape[J].Geo-Marine Letters,1985,5(3):193-197.
- [21] Cole D, Stewart S A, Cartwright J A. Giant irregular pockmark crater in the Palaeogene of the Outer Moray Firth Basin, UK North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(5):563-577.