

文章编号:1009-2722(2014)06-0027-06

# 墨西哥湾深水油气勘探研究特点 与发展趋势

赵 阳,卢景美,刘学考,张树林

(中海油研究总院,北京 100027)

**摘 要:**墨西哥湾深水勘探区带是近年深水勘探活动最活跃的地区之一,通过对其石油地质条件以及勘探特点的综合分析,认为其具有优越的石油地质条件,其勘探研究具有 4 个特点:①地震技术革新极大推进了该区的勘探研究;②盐岩活动控制圈闭和油气藏的形成;③墨西哥湾深水圈闭勘探呈明显的分带性;④圈闭落实和储层发育程度是主要勘探难点。并指出盐下圈闭落实和储层预测是制约该盆地勘探成功率的两大关键问题,而盐下地震成像、古盐构造恢复和古沉积水道的预测是解决这两大关键问题的主要手段。

**关键词:**墨西哥湾;深水;勘探;盐构造

中图分类号:TE122 文献标识码:A

海洋油气的勘探开发是陆地石油开发的延续,经历了一个由浅水到深水、由简到复的发展过程<sup>[1]</sup>。全球陆地和浅海经过长期的勘探开发,重大油气发现的数量已越来越少,规模越来越小。同时,在高油价刺激下,石油公司纷纷将目光转向探明程度还很低的深海,未来世界新增储量,将主要依赖海洋深水海域和极地地区。全球深水油气资源非常丰富,根据 2008 年资料统计,31%的油气储量发现于陆上,40%的储量发现于浅水(<500 m),29%的储量发现于深水(>500 m)。近年全球获得的重大勘探发现中,有近 50%来自深水水域。

当前,世界深水油气勘探主要集中在墨西哥湾以及南大西洋两岸的巴西与西非沿海 3 大海域,被称为深水油气勘探的“金三角”<sup>[2-6]</sup>,它们集中了当前世界大约 84%的深水油气钻探活动。

其中墨西哥湾最多<sup>[3]</sup>,同时有 30 多部深水钻机在此从事勘探活动;其次为巴西;第 3 为西非。近年来,全球深水不断获得大发现而掀起了深水勘探的热潮,深水领域已成为世界油气勘探的重要战略接替方向,而且勘探水深不断增加,全球最深的探井水深已经超过 3 000 m,位于墨西哥湾深水区。

墨西哥湾位于美国、墨西哥和古巴相环抱的海域,浅水区陆架宽阔,其后,水深向南快速加大。本文所提及的墨西哥湾深水盆地(DWGoM)主要指水深超过 400 m 的美国一侧的墨西哥湾海域,其面积为 41 万 km<sup>2</sup><sup>[7]</sup>(图 1),现有 7 443 个油气勘探开发区块。

据统计,美国墨西哥湾排行前 20 位的高产油气田全部位于深水区。2000 年底开始,墨西哥湾深水油气田的产量已超过浅水区的油气田<sup>[8]</sup>。据美国 MMS 统计,美国墨西哥湾深水区 2007 年石油产量已经接近全美国产量的五分之一,而且还呈逐年增长的趋势,不断有大的新发现。截至 2012 年,仅在 >1 500 m 的超深水区的油气发现就多达 75 个,勘探活动非常活跃。尽管受 2010

收稿日期:2014-01-13

基金项目:国家科技重大专项“大陆边缘盆地类比与油气成藏规律研究”(2011ZX05030-001)

作者简介:赵 阳(1976—),男,博士,主要从事海外油气勘探研究工作。E-mail:zhaoyang3@cnooc.com.cn

年 BP 公司 Macondo 目标钻探事故的影响,墨西哥湾深水钻探活动一度陷入低潮,但随着新政策的出台,该区钻探活动正逐步恢复,预计 2014 年能重新恢复进入新的钻探和发现活跃期。

随着中海油成功收购尼克森公司,从而获得大量墨西哥湾深水区的勘探资产,因此对该区域的勘探特点和潜力进行分析和总结显得尤其必要和迫切。

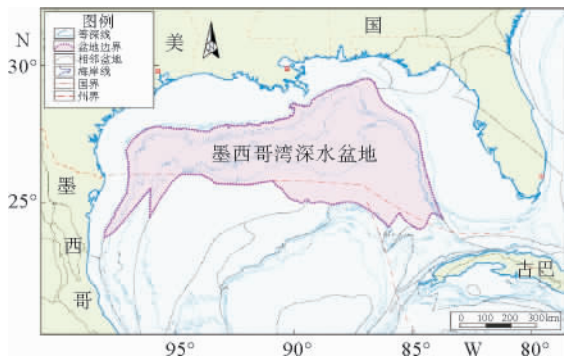


图 1 墨西哥湾深水盆地(DWGoM)位置(据文献[7])

Fig. 1 Location Map of Deep Water Gulf of Mexico Basin (from reference [7])

## 1 墨西哥湾深水盆地地质特征

### 1.1 沉积地层

墨西哥湾深水盆地主要接受了中生代以来的巨厚沉积(图 2)。新生代的沉积主要为陆源碎屑岩;白垩系上部主要为碎屑岩夹泥灰岩和白垩;白垩系下部以碎屑岩为主,上部为碳酸盐岩;上侏罗统底部为碎屑岩,中部主要为碳酸盐岩,上部多为碎屑岩;中侏罗统以发育厚层盐岩为主要特征。

墨西哥湾深水盆地的盐岩非常发育,基本上覆盖整个深水区;盐岩活动也非常剧烈,盐底辟强烈刺穿甚至达到接近现今的海底。另外,在新生代地层中还有一套特殊的地层,就是侏罗系的盐岩在后期构造和沉积作用下被挤入新生代地层中,形成规模巨大的盐篷、盐株、盐席、盐墙、盐焊和盐舌等次生盐构造(图 3),而且由于盐岩的发育和构造样式的复杂多变,使得在整个深水盆地的海底地貌崎岖复杂。

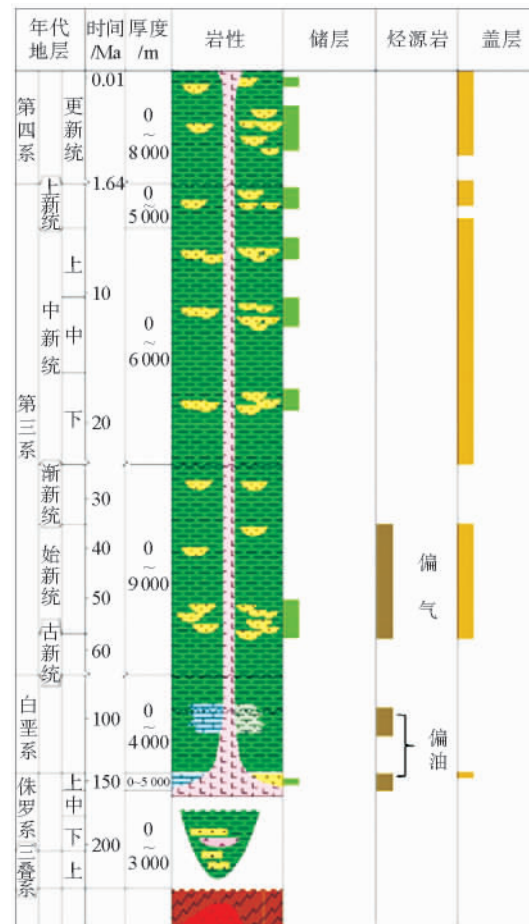


图 2 墨西哥湾深水盆地石油地质条件综合柱状图(据文献[7])

Fig. 2 Stratigraphic Chart of DWGoM (from reference [7])

### 1.2 烃源岩

墨西哥湾深水区有 3 套烃源岩得到证实,为:上侏罗统, II 型干酪根;下白垩统, II 型干酪根;古新统一始新统, II / III 型干酪根。其中,上侏罗统和下白垩统的海相泥岩、泥灰岩和碳酸盐岩是最主要的烃源岩;上侏罗的 Tithonian 和下白垩的 Neocomian 烃源岩厚度在 150~200 m 之间, TOC 含量为 5%, 氢指数 (HI) 在 550~700 mgHC/g 之间,基本上在全区广泛分布,为墨西哥湾深水盆地最主要的烃源岩。

### 1.3 储盖组合

墨西哥湾深水区的储集层包括第三系的砂岩储层和白垩系的碳酸盐岩储层,另外在深水区的东部还发现了侏罗系的砂岩储层。其中第三系砂

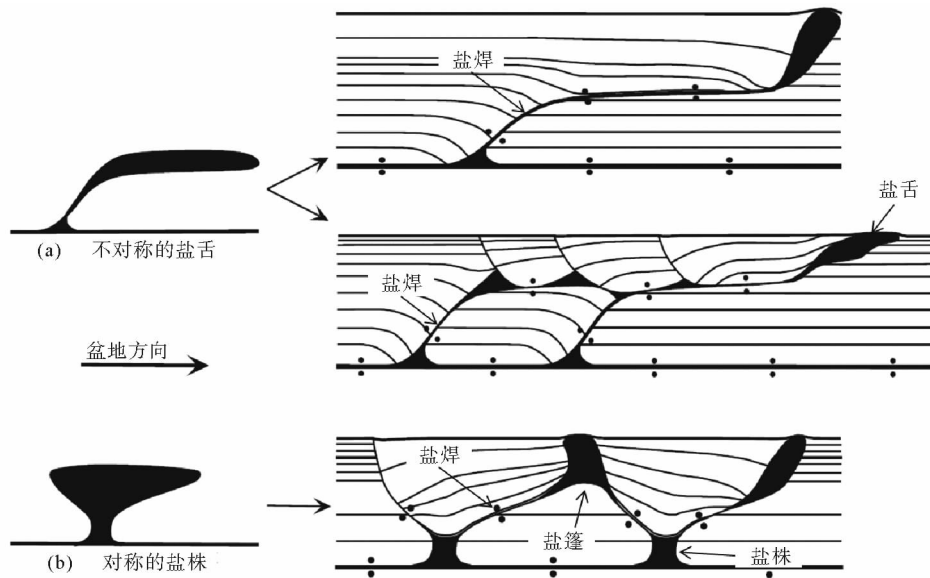


图3 墨西哥湾深水盆地次生盐构造样式简图(据文献[9])

Fig. 3 Sketch Map of salt structures in DWGoM (from reference [9])

岩储层最发育,为力储层,孔隙度为17%~30%;中新统储层是深水区至关重要的储层,已发现的深水储量最多,超过整个深水盆地总储量的60%;古近系(Wilcox储层)已经有多个油气田发现且勘探活动越来越活跃(现今的发现量约占整个深水盆地总储量的15%),是深水勘探的热点和后备储量的主战场;同时,近年来在中西部白垩系的碳酸盐岩和东部侏罗系的砂岩储层内也获得了油气发现,开辟了墨西哥湾深水勘探的新领域。

古近纪以来该盆地的沉积特征整体上是泥多砂少,大量连续分布的海相泥岩是最主要的盖层。次生的盐墙、盐焊等同样提供了非常优越的上倾遮挡和侧封条件。在墨西哥湾东部的上侏罗风成砂勘探区带,因其烃源岩直接上覆在风成砂储层之上,所以其主要盖层就是上覆的烃源岩。

经统计,已发现的油气田类型主要以构造型为主,而且主要是与各种盐构造有关的圈闭类型,其次是构造-岩性复合型。

## 2 墨西哥湾深水盆地勘探特点

基于墨西哥湾深水盆地上述的一系列地质特征,该区域的油气勘探研究也呈现出明显的特殊性。

### 2.1 地震技术革新极大推进了该区的勘探研究

墨西哥湾深水盆地地质条件复杂,水体深、盐岩活动强烈,目的层深达近万米且往往为盐下储层。由于通过钻井、测井等直接获得的资料有限,勘探研究所需信息绝大部分依赖于地震资料。所以,如何提高地震数据的质量、精确描述盐构造的几何形态是墨西哥湾勘探成功的关键技术问题。在该区域盐下,常规地震采集和处理效果不好,成像较差,很难达到勘探的要求。为此,该地区的地震资料从采集、处理到重采集和重处理在不断地进行攻关和尝试。采集方面从常规的窄方位角(NAZ)到宽方位角采集(WAZ)、富方位角(RAZ)到全方位角采集(FAZ);处理方面从常规的克希霍夫偏移(Kirchhoff)、波动方程偏移(WEM)、射束波动方程(BEM)到垂直横向各向同性(VTI)和倾斜横向各向同性(TTI)、再到逆时偏移(RTM)以及这些方法的组合,每一项技术进步与革新都促使墨西哥湾深水勘探不断向纵深发展,可以说该地区在地震资料采集和处理方面一直是引领各种最新技术和方法的试验场和推广地。通过持续不断的技术攻关,使得墨西哥湾深水盐下深层的地震成像得到了明显的改善,不仅使成像深度大大提高,而且使盐下构造的细节特征得以展现(图4)。目前,宽方位角地震资料已经覆

盖墨西哥湾深水的大部分区域,有些地区甚至是多次覆盖,这为该区域的油气勘探提供了最宝贵的资料基础。

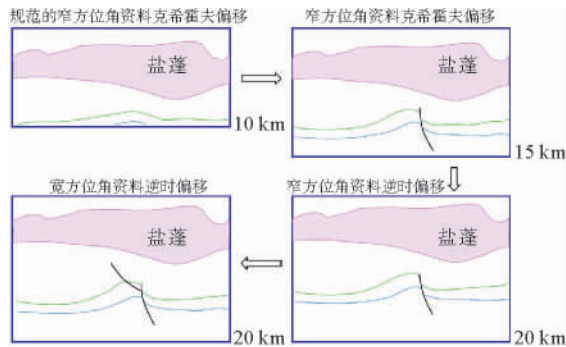


图 4 地震采集与处理技术发展与成像效果的关系  
Fig. 4 Imaging Improvement by Progress of Seismic acquisition and processing Techniques

### 2.2 盐岩活动控制圈闭和油气藏的形成

在墨西哥湾深水盆地,厚层的盐岩以及后期的再次活动对油气的生成、运移和聚集成藏都起着至关重要的作用。McBride 等<sup>[10]</sup>认为重力及新生代沉积物的进积作用对该地区盐运动有重要的控制作用。第三纪以来,特别是渐新世以来,一直到第四纪,墨西哥湾海岸沉积速率非常大(图 5),快速沉积和不均匀的沉积载荷造成了盐岩持续剧烈的活动,并伴随形成了类型多样的盐构造形式。

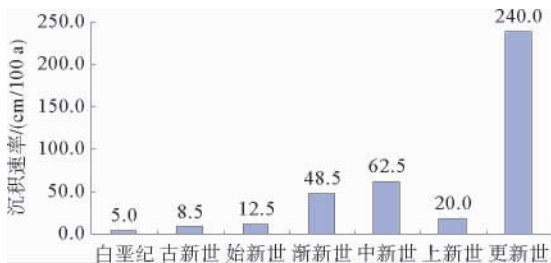


图 5 墨西哥湾海岸沉积速率统计  
Fig. 5 Variation of deposition rate with time near the GoM Coast

盐及盐活动对油气成藏的形成过程起着全方位的作用,主要表现为:①导致圈闭的形成(包括

构造、断层和岩性尖灭);②盐发育区、盐活动强烈区往往是沉积中心所在;③由于盐岩密度较低,上覆厚层盐岩对下伏地层的载荷相对较小,有利于盐下储层孔隙的保存;④可以作为良好的盖层;⑤有利于油气运移;⑥影响热流、源岩成熟度和成岩变化等<sup>[11,12]</sup>。该地区盐岩活动复杂多变,非常有利于形成与盐相关的各种圈闭类型,包括周围盐撤出或中部盐上拱造成的 4 面下倾背斜(4-way)圈闭和盐盖、盐株、盐熔带、盐断层遮挡的 3 面下倾构造(3-way)圈闭等。

得益于该盆地烃源岩和各种盐构造的发育,在墨西哥湾深水区圈闭数量非常多,尽管形成的巨型圈闭的数量有限,但是中型圈闭发育极其丰富,非常有利于生成油气的聚集,总资源量规模巨大。

### 2.3 深水区圈闭勘探呈明显的分带性

墨西哥湾深水盆地的油气勘探具有明显的分带性,不同的勘探区带在深水盆地的平面分布存在较强的规律性(图 6),主要包括传统的中新统勘探区带、上新统勘探区带和古近系 wilcox 勘探区带,以及近年来涌现出来的深水白垩系勘探区带、超深水盐下上新统勘探区带和东部深水侏罗系风成砂勘探区带。无论哪个勘探区带,其圈闭类型和油气成藏均与盐活动具有密切的联系。

在当前勘探背景下,墨西哥湾深水最重要的勘探区带为中新统勘探区带、古近系 wilcox 勘探区带和东部侏罗系风成砂勘探区带。在靠近陆架一侧主要为中新统的各类圈闭分布区,而古近系的各类圈闭主要位于靠近盆地一侧深水—超深水区,东部侏罗系风成砂勘探区带主要分布于盆地东部的超深水区域。这一规律性和区域沉积背景是密切相关的。新近纪时,盆地物源主要来自西北部的山系,地势较陡,沉积物可以被直接输送到深水区;中新世以来,盆地沉积物源主要来自北部的密西西比水系,沉积物主要沿着陆架大量堆积。

### 2.4 圈闭落实和储层发育程度是主要勘探难点

墨西哥湾深水区早期的勘探目标主要是那些构造相对简单、地震成像好的圈闭,所以成功率非常高。随着勘探活动的持续进行,这种类型的圈闭越来越少,待勘探构造越来越复杂,尽管地球物

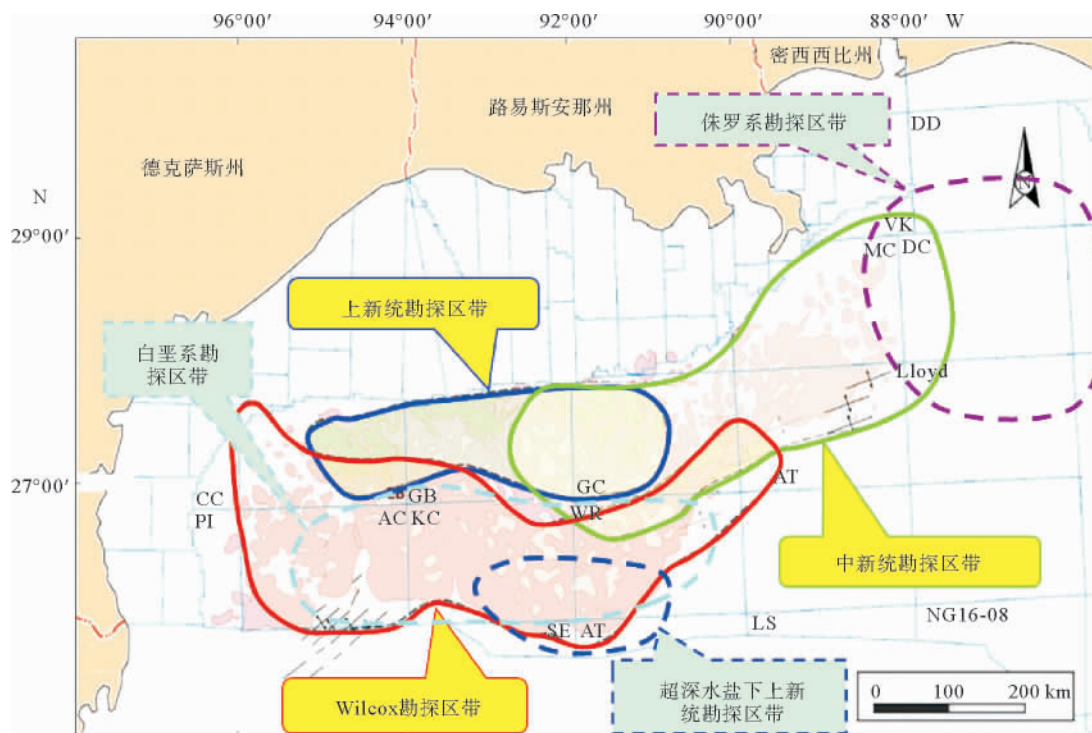


图6 墨西哥湾深水盆地主要勘探区带分布

Fig. 6 Distribution of exploration plays in DWGoM

理技术提高很快,但是这些复杂地质条件地区的盐下目标地震成像仍不理想,勘探成功率也有所下降,圈闭落实成为该区各个区带勘探的主要难点。

在储层方面各个区带均有特点:中新统储层主要是规模不等的水道相砂体,储层质量好,但其分布明显受古水道控制,所以如何准确预测主古道位置是储层预测的关键;古近系 Wilcox 储层砂体广泛分布,但其储层质量相对较差,属于中孔低渗储层,所以储层物性是其主要风险;东部侏罗系风成砂勘探区带作为一个新的勘探领域,研究程度还较低,虽然其储层物性相对较好,但风成砂的分布范围尚不清楚,储层是否存在是该区带的主要储层风险。

### 3 技术难点、研究方向和发展趋势

当今墨西哥湾深水盆地的油气勘探,尤其是深水盐下目标的油气勘探仍旧面临着诸多挑战。其中盐下圈闭落实和储层预测是制约勘探成功率的两大关键问题,而盐下地震成像、古盐构造

恢复和古沉积水道的预测是解决这两大关键问题的主要手段,所以近期墨西哥湾深水的研究方向将主要是围绕这些问题展开,这也是各大油公司致力于解决的技术难点。但是,所有这些问题的解决,在很大程度上都要依赖于深水盐下地震采集和处理技术的提高。

虽然宽方位角地震采集以及各种先进的深度偏移技术大大改进了对盐下圈闭的认识程度,但由于盐构造的复杂性,在有些地区仍达不到圈闭落实要求,盐下地震成像的改善仍是亟待攻关的技术难题。现在已经在实验采集的全方位角地震采集技术和逐渐得到广泛应用的倾斜横向各向异性(TTI)逆时偏移(RTM)技术等显示出优于常规的技术优势,这将是近期深水盐下地震采集和处理技术的主要发展方向。

得益于这些地球物理技术的发展和盐下地震成像的改善,以及更多钻井的探测,地质家们对于该区复杂的构造和沉积模式的认识会更加客观,对古盐构造恢复和古沉积水道的预测将更加准确,从而推动深水盐下油气勘探成功率的稳步提高。



## 参考文献:

- [1] 江怀友,赵文智,裘怿楠,等.世界海洋油气资源现状和勘探特点及方法[J].中国石油勘探,2008(3):27-34.
- [2] 梁杰,杨艳秋,龚建明,等.墨西哥湾深水油气勘探对我国的启示[J].海洋地质动态[J],2009,25(1):17-19.
- [3] 吕福亮,贺训云,武金云,等.世界深水油气勘探形势分析及对我国深水油气勘探的启示[J].海洋石油,2007,27(3):41-45.
- [4] 陈建文.深水盆地油气勘探新领域[J].海洋地质动态,2003,19(8):38-41.
- [5] 吴时国,袁圣强.世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J].天然气地球科学,2005,16(6):693-699.
- [6] 张抗.向广阔的世界海洋石油市场进军[J].海洋石油,2005,25(1):32-37.
- [7] IHS. Deep water Gulf of Mexico Basin, United States, Mexico, Cuba[R]. Basin Monitor, 2012.
- [8] 李振鹏,孟彦如,龚建明,等.墨西哥湾深水储层特征[J].2009,25(6):6-9.
- [9] Rowan M G, Ratliff R A, Trudgill B D, et al. Emplacement and evolution of the Mahogany salt body, central Louisiana outer shelf, northern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 947-969.
- [10] McBride B C, Rowan M G, Weimer P. The evolution of allochthonous salt systems, northern Green Canyon and Ewing Bank (offshore Louisiana), northern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (5B): 1 013-1 036.
- [11] McBride B C, Weimer P, Rowan M G. The effect of allochthonous salt on the petroleum systems of northern Green Canyon and Ewing Bank (offshore Louisiana), northern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (5B): 1 083-1 112.
- [12] 梁杰,龚建明,成海燕.墨西哥湾盐岩分布对油气成藏的控制作用[J].海洋地质动态,2010,26(1):25-30.

## OIL AND GAS EXPLORATION IN DEEP WATER AREA OF GULF OF MEXICO

ZHAO Yang, LU Jingmei, LIU Xuekao, ZHANG Shulin  
(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** The deep water area of the Gulf of Mexico Basin (DWGoM) is one of the most active areas in the world for oil and gas exploration. Integrated analysis of petroleum geologic conditions and exploration status suggests that the basin is excellent for petroleum accumulation, and there are four characteristics in terms of exploration. ① there are complex geologic settings, and seismic data imaging is essential for exploration; ② salt movement is the key to trap formation and oil accumulation; ③ the distribution of exploration plays is characterized by obvious zonation; ④ the main risks of exploration in this area depend upon the reliability of trap and the availability of reservoirs. Data also indicate that subsalt trap evaluation and reservoir prediction are the two major problems affecting the outcome of exploration in this basin, and the main methods to solve the problems are the improvement of subsalt seismic imaging, restoration of salt palaeostructure and prediction of sedimentary palaeochannels.

**Key words:** Gulf of Mexico (GoM); deep water; exploration; salt structure