

缅甸若开海域深水生物气藏形成条件与富集规律

范国章¹, 马宏霞¹, 邵大力¹, 丁梁波¹, 张颖¹, 王海强², 王雪峰¹, 蔡峰²

1 中国石油杭州地质研究院; 2 Chinnery Assets Limited

摘要 基于地震、钻井及有限的油气藏资料,分析了缅甸若开海域深水生物气生成的有利条件以及生物气成藏特征与富集规律。研究结果表明:①若开海域地温梯度低、沉积速率大、地层升温快,为生物气快速生成提供了有利的地质条件;②若开海域具有“陆坡控源”的生物气源岩分布规律;③叠置发育的大型水道-天然堤体系为生物气成藏提供了有利的生储盖组合;④平缓褶皱带是生物气聚集成藏的有利区带;⑤上新统和下更新统深水浊积砂岩是若开海域深水生物气勘探的重要方向。

关键词 深水; 浊流沉积; 生物气藏; 成藏规律; 若开海域; 缅甸

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

0 前言

生物气是在低温还原环境下,由厌氧细菌分解未成熟有机质而生成的以甲烷为主的天然气。它可大规模、广范围地生成,并在适当的地质条件下聚集成藏。至今,俄罗斯西西伯利亚盆地、美国墨西哥湾海域、中东黎凡特盆地及中国的柴达木盆地均已发现规模较大的生物气藏^[1-4]。据 Rice 等^[1]地球化学家估计,生物气资源占全球天然气资源的20%,具有巨大的勘探潜力,不少学者推测其很可能成为未来重要的天然气资源之一。

2004—2006年,韩国大宇(Dawoo)公司在孟加拉湾东北部缅甸若开盆地的海域相继发现了 Shwe、Shwe Phyu 和 Mya 等大中型天然气田^[5],气藏甲烷含量大于97%, $\delta^{13}\text{C}$ 为-70‰~-60‰,为典型的生物气藏。这些气田的发现拉开了这一地区生物气勘探的序幕。2015—2019年,缅甸若开海域又连续取得多个生物气藏的发现^[6],进一步揭示了该地区具有良好的生物气勘探前景。已发现生物气藏的储层类型均为深水浊积砂岩,储层物性好,孔隙度为20%~30%,渗透率为几十至几百毫达西。目前,国

内外学者针对缅甸若开海域的构造、地层、深水沉积等基本地质条件开展了大量工作^[6-11],但关于深水生物气藏形成条件和富集规律的研究比较薄弱。

本文收集了若开海域所有生物气藏的相关资料、区域资料及大洋钻探资料,利用广范围的三维地震资料和二维地震资料(覆盖若开海域陆架—陆坡—深水盆地区)及实验分析资料,从沉积、烃源岩、构造、生储盖组合、生物气藏分布特征等方面分析若开海域生物气生成、聚集成藏的有利地质条件,指出该地区生物气富集成藏的有利区带,以期对若开海域及具有类似沉积背景的地区的深水生物气勘探提供一定的指导。

1 区域地质概况

若开海域位于缅甸西海岸,基本覆盖了北自孟加拉国边界,南至14°N的整个孟加拉湾东部海岸地区。若开海域在构造单元上隶属于缅甸若开盆地^[11](图1),它的形成演化与古新世以来印度板块向缅甸板块倾斜俯冲以及增生楔不断向西迁移密切相关。晚侏罗世至早白垩世,冈瓦纳大陆裂解,印度板块与澳大利亚板块和南极洲板块分离,印度

收稿日期: 2021-12-01; 改回日期: 2022-05-11

本文受中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“海洋油气勘探关键技术研究”(项目编号:2021DJ2403)资助

第一作者: 范国章,博士,主要从事深水油气勘探地质与地球物理研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: fangz_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 马宏霞,硕士,主要从事层序地层与沉积学研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: mahx_hz@petrochina.com.cn

板块向北漂移。古新世,印度板块东北缘向缅甸板块俯冲。早始新世末期,增生楔的隆起形成了印—缅褶皱带原型,导致在西侧形成前渊盆地,在东侧形成缅甸中央盆地。始新世—早中新世,由于板块碰撞以及板块旋转,构造活动增强,导致增生楔不断向西迁移并不断隆升;随着增生楔的不断隆升,沿着增生楔水体变浅,沉降中心及沉积中心向西迁移。早渐新世,增生楔开始出露水面,首先增生楔北面出露,接着向南逐步出露水面。晚中新世末

期,随着安达曼海的开启,开始了一个重要的构造阶段,右旋转断层系统开始影响整个地区。上新世,东部的变形前缘/增生楔开始影响若开盆地的沉积序列。中更新世,若开盆地基本形成现今的构造形态^[10]。若开海域主要包括浅水区 A1—A7 区块、AD6 区块及深水区 AD1—AD14 区块(图 1)。截至目前,在 A1、A3 区块的陆架边缘、A6 区块的上陆坡以及深水 AD1、AD7、AD8 区块已经取得多个生物气发现。

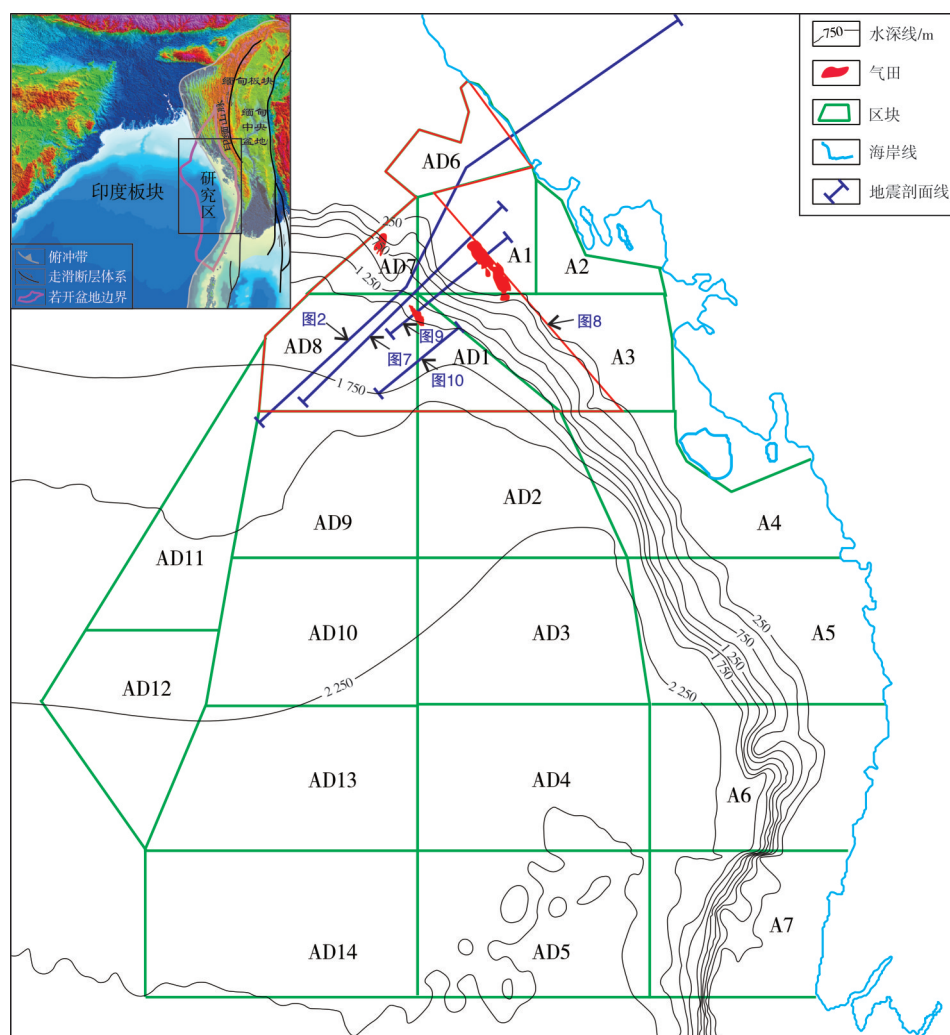


图1 研究区位置及区块、生物气田/藏分布图

Fig. 1 Location map of the study area, the exploration blocks and discovered biogas fields/plays

印度板块向缅甸板块俯冲以及增生楔不断隆升、向西迁移,若开盆地自东向西构造强度逐渐减弱,可划分为3个构造带:高陡褶皱带、平缓褶皱带及深海平原带(图2)。高陡褶皱带位于陆上及海岸地区,主要表现为相互平行的一些大型NW—SE向延

伸的背斜,一些背斜的边界为逆冲断层及逆断层。一般向内陆方向背斜隆起高度逐渐增加且核部沉积物年代变老。平缓褶皱带主要位于现今的陆架边缘以及陆坡—盆底地区,主要表现为一些平缓褶皱背斜。深海平原带为相对未变形的沉积地层^[12]。

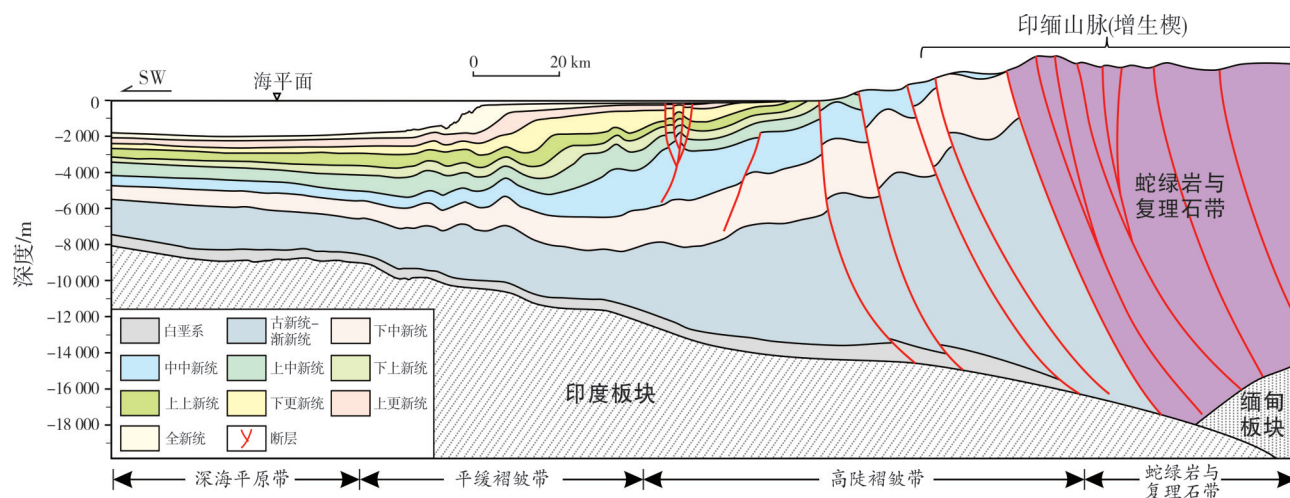


图2 缅甸若开盆地地质剖面简图(据参考文献[12],剖面位置见图1)

Fig. 2 Regional sketch section across the northern Rakhine Basin, Myanmar (cited from reference [12], location is shown in Fig.1)

2 缅甸若开海域深水生物气生成条件

生物气是甲烷菌等厌氧微生物作用于有机物而发生的一系列生物化学反应形成的,其生成机理与热解气有着明显的区别。虽然到目前为止人们还未完全掌握生物气形成的条件和机理,但是国内外学者对生物气形成机理已有许多有益的探索。生物气主要是通过乙酸发酵与 CO_2 还原两种途径形成的;对于海相环境而言,由于硫酸盐的存在,所以一般以 CO_2 还原为主;而对于陆相环境而言,由于缺少硫酸盐,所以以乙酸发酵为主,有调查研究表明淡水环境中70%的生物气是通过乙酸发酵形成的^[13-14]。

影响生物气生成的因素主要包括两个方面:一是物质条件,即丰富的可供微生物群体利用的营养源,如沉积物中的原始有机质类型、有机质富集程度;二是适宜微生物生长繁殖和维持较高活性的环境条件,如温度、沉积速率、氧化还原环境、盐度、酸碱度等^[15]。

2.1 物质基础

2.1.1 有机质丰度

丰富的有机质来源是生物气大量生成的物质基础,但是否可以采用传统的有机碳含量(TOC)来评价生物气源岩的生烃能力仍存在争议。多数学者认为生物气生成的主要底物为有机大分子被各种微生物分解形成的可溶部分,不可溶部分则与生物气的形成无关,而常规用于评价烃源岩质量的指

标 TOC 为有机质在沉积和成岩过程中,经历了各种复杂作用(首先是生物化学作用,后来是热化学作用)后保存下来的残余有机质中的碳含量,因此该指标对于生物气源岩的评价没有很好的指示意义,应考虑原始有机碳含量对生物气生成的重要性^[16]。由于地层在埋藏成岩过程中,可溶有机质部分丢失,所以难以恢复原始有机碳含量。但是,梅建森等^[17]发现柴达木盆地三湖地区第四系有机碳含量与生物气层段具有较好的一致性,即有机碳含量高,地层含气的可能性就大,且有机碳含量与原始有机碳含量具有正向线性关系,并结合生物模拟产气实验数据、试气成果和地球化学分析数据,确定了柴达木盆地第四系生物气源岩的有机碳含量下限为0.25%。

缅甸若开海域现今已发现生物气藏主要位于上新统。研究区内大多数钻井揭示了上新统一更新统,仅AD1区块的一口井揭示了中新统,其岩屑样品的有机地球化学分析表明中新统一更新统有机碳含量为0.45%~1.70%(图3a),自下至上具有有机质丰度增加的特征。虽然缅甸若开海域深水区上中新统一更新统均具备形成规模生物气的有机质基础,但是上新统一更新统有机质丰度更高,生烃潜力更大。此外,位于孟加拉湾西南部斯里兰卡附近的大洋钻探计划116航次717、718站位的有机地球化学分析表明深水有机碳含量和碳同位素组成值在中新世末期出现明显增加^[18](图3b, 3c)。由此可见,上新统一更新统具有更好的生物气潜力。

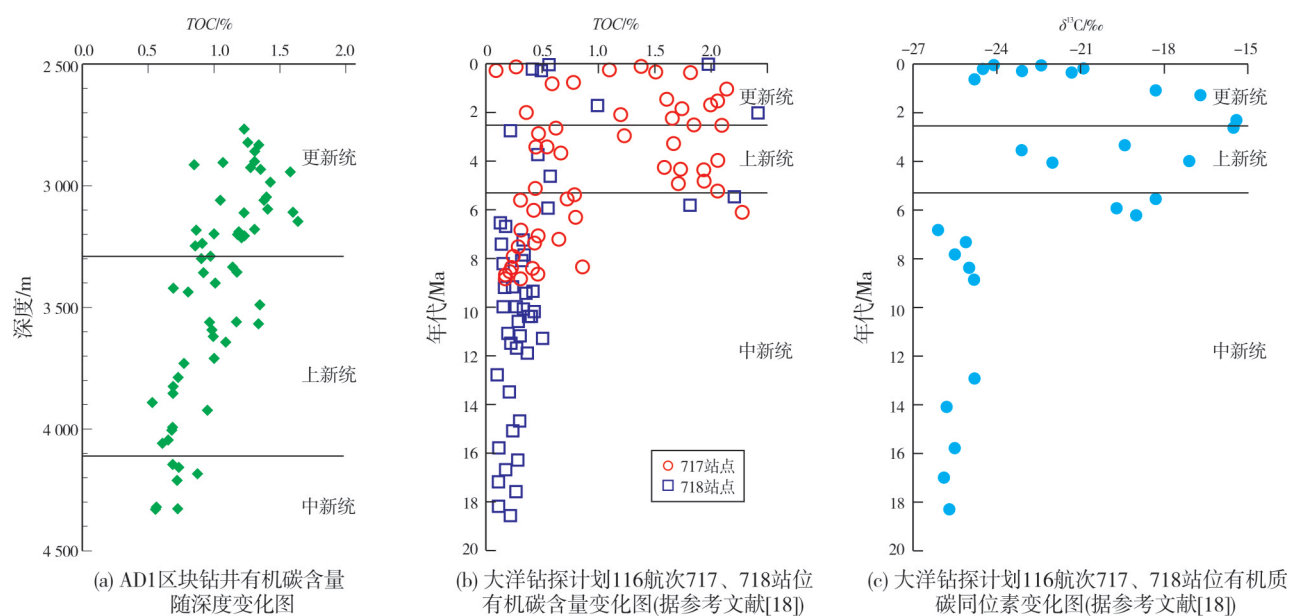


图3 孟加拉扇中新统一更新统有机碳含量及有机质碳同位素组成

Fig. 3 The TOC and $\delta^{13}C$ of organic matter in Miocene-Pleistocene of Bengal Fan

2.1.2 有机质类型

甲烷菌不具有直接分解有机质的能力,它主要依赖于发酵菌和硫酸盐还原菌分解有机质而产生的 CO_2 、 H_2 、甲酸、乙酸等取得碳源和能源而得以生存,并以此为基质进行生物化学作用而产生生物甲烷气^[19]。甲烷菌的营养来源主要是纤维素、半纤维素、糖类、淀粉及果胶等碳水化合物和海相有机质中的蛋白质,这些物质在草本植物中的含量远高于木本植物,这就决定了生物气的最佳母质为半腐殖型和草本腐殖型有机质。

对研究区泥岩样品的干酪根镜检、干酪根元素、热解、气相色谱等的分析,表明生物气的源岩类型为Ⅱ-Ⅲ型(图4),有机质具有水生生物来源和陆源高等植物来源混合的特征。正构烷烃的分布特征也表明其为混合来源,其中以 C_{18} 为主峰的低碳数正构烷烃来源于藻类等低等生物,具有明显奇偶优势的高碳数正构烷烃来源于高等生物(图5)。通常情况下,木本植物的正构烷烃以 C_{27} 和 C_{29} 为主峰,草本植物以 C_{31} 和 C_{33} 为主峰,根据这一分布特征,特别是利用这些化合物不同碳数之间的比值,可有效区分陆源有机质类型,例如正构烷烃 C_{27}/C_{31} 值变化与木本和草本植物相对变化之间的关系已在湖相沉积物研究中得到证实^[20]。缅甸若开海域较低的 nC_{27}/nC_{31} 值(约为0.7)表明草本植物占据一定优势。

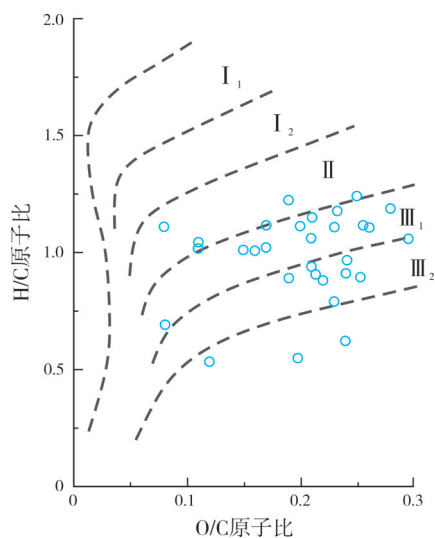


图4 缅甸若开海域烃源岩有机质类型判别图

Fig. 4 Classification chart of organic matter types in offshore Rakhine Basin, Myanmar

由上述分析推断,研究区有机质类型应以藻类和草本有机质为主。此外,前人对喜马拉雅山脉南麓尼泊尔地区的岩石样品分析发现:中新世末期,陆上植被从以C3为主的植物向以C4为主的植物转变,即从亚热带—温带森林向草原转变,陆源有机质中草本有机质的含量明显增加^[21]。大洋钻探计划116航次717、718站位的有机质碳同位素分析表明(图3c):6 Ma之前,沉积物中有机质的 $\delta^{13}C$ 值为 $-27‰$ ~ $-25‰$,为典型的C3植物有机质;6 Ma左

右, $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧增加了 10‰ , 上新统有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布于 $-18\text{‰} \sim -15\text{‰}$, 碳同位素组成值急剧增加的主要原因为来自于 C4 草本植物有机质含量的增加^[18]。因此可以推断, 缅甸若开海域上新统一更新统由于陆源草本有机质输入增加, 从而更有利于生物气大量生成。

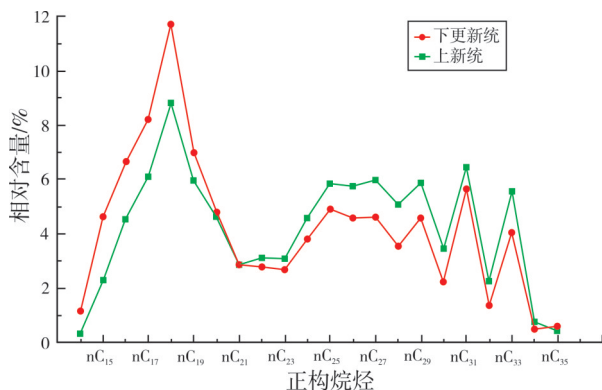


图5 缅甸若开海域下更新统、上新统烃源岩正构烷烃分布曲线

Fig. 5 N-alkanes distribution of source rocks of Lower Pleistocene and Pliocene in offshore Rakhine Basin, Myanmar

生物气的形成与细菌对有机质的改造活动有关, 细菌改造在干酪根中留下痕迹, 称之为菌解无定形体。柴达木盆地第四系生物气源岩的生物甲烷模拟实验表明, 源岩中无定形体含量与生物甲烷产率具有正相关性: 当无定形体含量为 $49.63\% \sim 55.4\%$ 时, 生物模拟甲烷潜量可达 $263.63 \sim 396.34 \text{ m}^3/\text{t}$; 当无定形体含量为 $17.5\% \sim 26.3\%$ 时, 生物模拟甲烷潜量仅为 $17.90 \sim 75.78 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[22]。研究区上新统一更新统泥岩的有机显微组分中的无定形体含量较高, 为 $34\% \sim 78\%$, 平均含量为 51.8% , 因此推断研究区具有较高的产生物甲烷的能力(图6)。

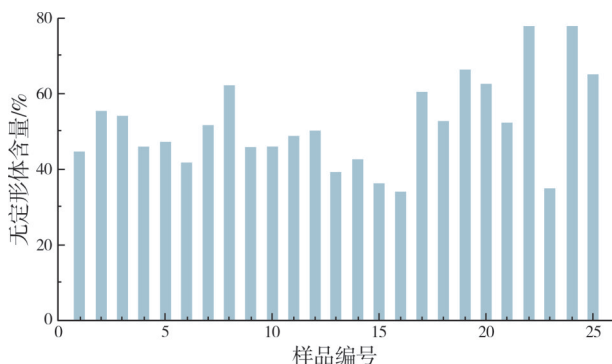


图6 缅甸若开海域上新统一更新统泥岩有机质无定形体含量柱状图

Fig. 6 Amorphonite content histogram of the Pliocene-Lower Pleistocene mudstones in offshore Rakhine Basin, Myanmar

2.2 环境条件

2.2.1 温度

众多研究表明产甲烷菌存活的环境温度为 $0 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主生气带温度介于 $25 \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然有研究表明产甲烷细菌在高于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍能存活, 然而大量的实际资料表明, 温度太高, 细菌的种类、数量都急剧减少, 细菌的个体也逐步减小, 其活性亦减弱, 对于大量生成生物甲烷意义不大^[23]。

若开海域的平均地温梯度大约为 $(2.0 \sim 2.5)\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 陆架区的地温梯度较高, 最高约为 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[11]。如此低的地温梯度导致生物甲烷生成的极限埋深可达 $3\text{ }000\text{ m}$ 。Shwe 气田埋深约为 $2\text{ }750 \sim 3\text{ }200\text{ m}$, 也证实该地区的低地温梯度扩展了生物气生成及成藏的深度范围。

2.2.2 沉积速率

快速沉积易形成厌氧还原环境, 避免有机质被氧化破坏, 从而有利于有机质的保存。高沉积速率会形成巨厚地层, 增加有机质通量, 为生成大量的生物气提供充足的气源条件。

微生物的生存和繁殖需要一定的孔隙空间, 微生物的个体大小一般为 $1 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ^[24], 高沉积速率会导致地层压实程度低、孔隙发育, 有利于微生物的生存和繁衍。另外, 快速沉积埋藏作用也减弱了上覆海水中溶解硫酸盐的不断补给, 为产甲烷菌的生存和繁殖创造有利的地层环境条件^[15]。高沉积速率也有利于形成良好的盖层, 阻止甲烷的扩散耗失, 进而使生物气得以保存。加拿大东南岸的大马南海盆浅层取心资料分析表明, 埋深同为 2 m 的岩心, 在沉积速率为 20 cm/ka 的岩心中, 甲烷含量为 $(30 \sim 40)\text{ ml/kg}$; 而在另一沉积速率为 134 cm/ka 的岩心中, 甲烷含量高达 $21\text{ }800\text{ ml/kg}$, 是前者的 500 倍^[25]。横跨若开海域的地震剖面(图7)显示: 上新世—现今, 缅甸若开海域深水至陆架区沉积速率从 30 cm/ka 增加至 90 cm/ka 。如此高的沉积速率非常有利于生物气的生成与保存。

3 缅甸若开海域深水生物气富集条件与分布规律

因为生物气形成机制与热成因油气生成机制不同, 故生物气成藏条件具有其独特之处。生物气

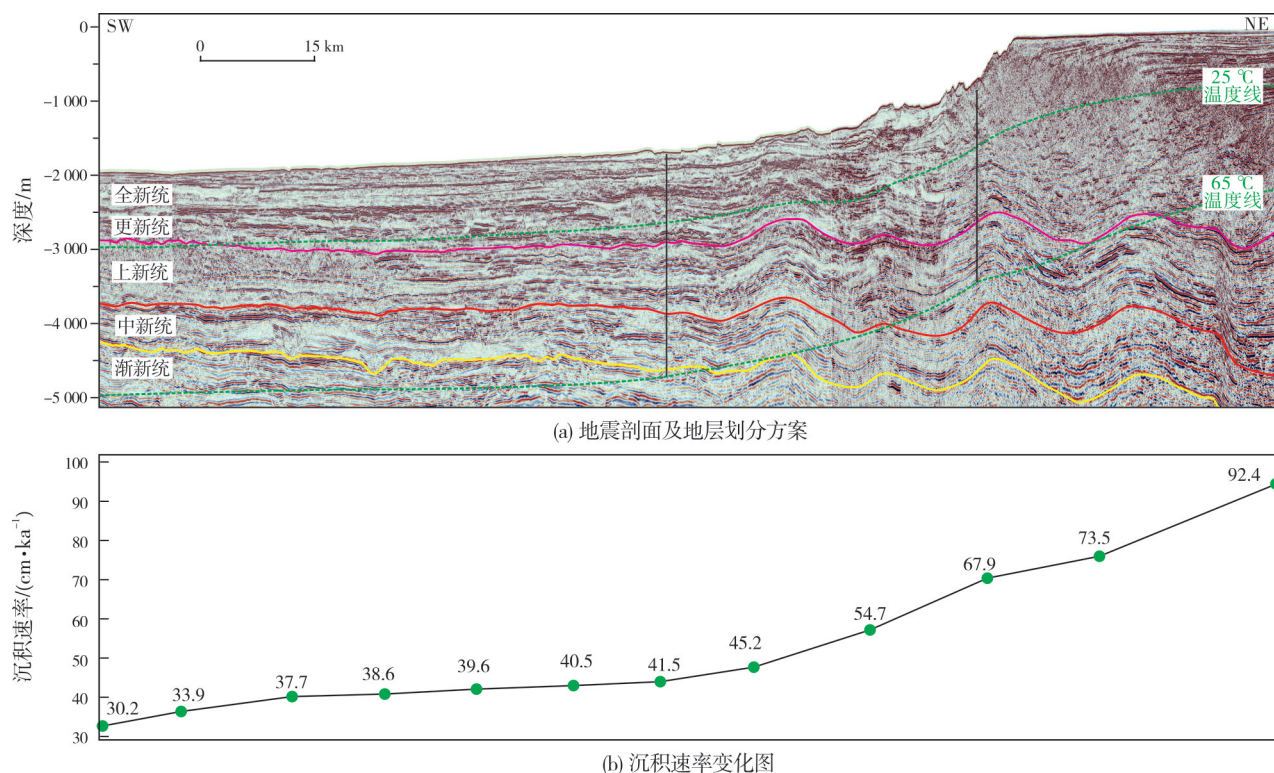


图7 若开海域陆架—深水区上新世—现今沉积速率变化(剖面位置见图1)

Fig. 7 Deposition rate during Pliocene-present of shelf to deep-water area in offshore Rakhine Basin, Myanmar (location is shown in Fig.1)

一般形成于成岩作用早期,具有埋藏浅、地层疏松、易逸散、原地聚集等特点,因此生物气能够聚集成藏必须具备大的生烃量、近烃源岩的有效圈闭以及良好的生储盖组合条件。

3.1 烃源岩控制生物气藏的分布

3.1.1 上新统是若开海域生物气富集的主要层系

无论石油工业钻井还是大洋钻探钻井均已证实,若开海域上新统有机质丰度明显高于中新统有机质丰度,且在中新世末期陆源有机母质类型从木本有机质转变为草本有机质,因此相对于中新统而言,上新统具备更好的生物气生成的有机质条件。高沉积速率表明上新世以来大量碎屑物质注入孟加拉湾,带来了丰富的有机质,也为生物气的大量生成提供了物质基础。适宜的埋深(上新统埋深约1 600~3 100 m)使得绝大多数上新统均处于生物气主力生烃窗口内(25~65 °C)(图7)。若开海域勘探实践也证实上新统浊积砂岩为若开海域的主要产层,至今在上新统浊积砂岩中已发现生物气储量约 $2\,492\times 10^8\text{ m}^3$ 。

3.1.2 陆坡控制生物气源岩展布

生物气往往形成于成岩作用早期,埋藏浅、地层疏松,游离生物气的运移方式主要是垂向运移和短距离的侧向运移。生物气具有易散失、聚集效率很低的特点,因此必须要有足够大的生烃量才能聚集成藏^[26]。关德师^[15]认为中型气藏的源岩厚度要超过700 m。受印度板块向缅甸板块俯冲作用以及陆架坡折自东向西迁移的影响(图8),若开盆地沉积地层具有东厚西薄特征。上新统已发现的生物气田基本处于陆坡沉积区内,东部陆坡区上新统泥岩厚度达1 600 m,向西泥岩厚度逐渐减薄至600 m左右(图8),陆坡厚层泥岩为生物气大量生成提供了良好的物质基础,是生物气大量生成的最有利区。

3.2 平缓褶皱带内发育的低幅度背斜构造是生物气有利聚集场所

若开盆地自西向东可以划分3个构造带(图2),构造变形具有自东向西传播的特征,东部构造变形时间早、变形强烈,西部变形时间晚、变形弱。东部高陡

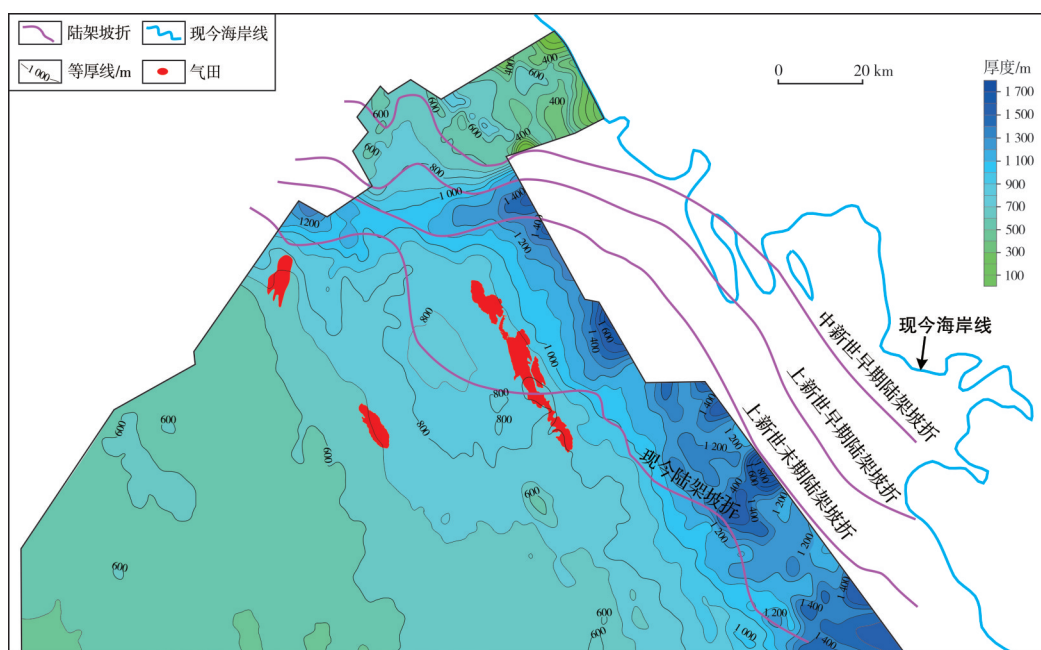


图8 缅甸若开海域北部上新统泥岩厚度分布及陆架坡折迁移轨迹

Fig. 8 Thickness contour map of the Pliocene mudstone and shelf break migration track from Pliocene to present in the northern area of offshore Rakhine Basin, Myanmar

褶皱带虽然发育多个背斜构造,但变形强烈,断裂发育,不利于生物气保存。中部平缓褶皱带主要位于现今陆架边缘及陆坡—盆底区,发育多个北西—南东向展布的低幅度背斜构造,背斜构造形态完整,形成时间晚,大约为上新世—第四纪时期^[7],构造变形时间

与上新统泥岩的生物气生烃高峰期具有良好的匹配关系,为不断生成的生物气提供了良好的聚集场所。西部深海平原带基本无构造变形,地层呈平缓单斜构造。至今若开海域所发现的生物气藏均位于平缓褶皱带内的多个低幅度背斜构造内(图9)。

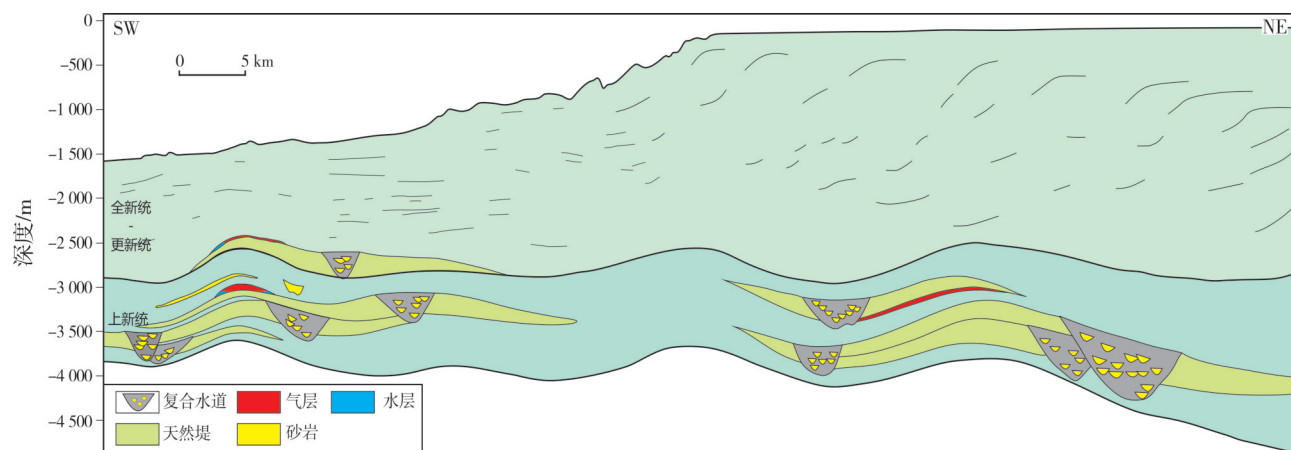


图9 缅甸若开海域过Shwe气田和Aung Siddhi气藏的的东西向地质剖面简图(剖面位置见图1)

Fig. 9 W-E geological sketch section across Shwe gas field and Aung Siddhi gas play in offshore Rakhine Basin, Myanmar (location is shown in Fig.1)

3.3 叠置发育的大型水道-天然堤体系为生物气成藏提供了有利的生储盖组合

中新世以来,若开海域广泛发育的深水重力流

沉积体系为孟加拉扇的一部分。孟加拉扇是世界上最大的细粒富泥海底扇。在深海环境中,浊流的侧向搬运量相对于正常的深海悬浮搬运通量要高5~8倍,且浊流沉积物一般来源于有机质丰度较高

的河流或者陆架地区,所以这种高沉积速率的沉积物和高有机质通量是其有机质富集的保障^[27]。深水重力流沉积发育多种沉积结构单元(峡谷、水道、天然堤、朵体及块体搬运沉积),不同沉积结构单元的有机质分布存在一定的差异。目前对于深水沉积的有机质分布特征的研究仅限于刚果扇^[28]、印度尼西亚库太盆地^[29]等少数地区,虽然未得出推广性结论,但这些研究成果对于缅甸若开海域不同沉积结构单元之间的有机质差异聚集以及生物气成藏分析具有一定的指示意义。

Baudin 等^[28]对西非刚果扇现代水道-天然堤的有机质分布研究表明:①深水区(至4 000 m)陆源有机质的贡献占据非常重要的地位(占比70%~80%);②由于有机质碎屑密度一般小于矿物颗粒密度,所以有机质碎屑一般与细粒物质(泥质、细粉沙)一起以悬浮状态溢出水道形成天然堤沉积,导致天然堤有机碳质量分数(其平均值为3%)是水道(其平均值为1.48%)的两倍;③从上游至下游,整个天然堤体系虽然沉积速率不同,但有机质类型和有机碳质量分数(大约3%)基本保持不变,这表明浊流悬浮物质溢出水道时的有机质、黏土和粉沙比例基本一致。

大型水道-天然堤是孟加拉扇非常重要的沉积结构单元类型,也构成了海底扇的大部分沉积。根据 Baudin 等^[28]对富泥刚果扇的分析,推测天然堤泥岩为孟加拉湾重要的烃源岩类型,此外研究区泥岩的实验样品分析结果也表明天然堤的 TOC 平均值为 1.37%,水道的 TOC 平均值为 0.60%。已发现的气田均紧邻大型水道-天然堤体系(图9),广泛发育的大型水道-天然堤体系带来丰富的陆源草本有机质,其生成的生物气可近源供给大型水道-天然堤体系附近的朵体、水道、天然堤砂岩,并在构造高部位聚集成藏。

上新统一更新统地层压实程度低,成岩作用弱,原生孔隙发育。浊流形成的砂质岩类一般具有中高孔、中高渗的特点,浊流砂岩(朵体砂岩、水道砂岩、天然堤漫溢砂岩等)的频繁出现构成了生物气的理想聚集场所。但生物气也易通过疏松砂泥岩以扩散的形式逸散,因此疏松砂泥岩构成的储盖组合的有效性是控制生物气富集的重要因素。深水浊流水道横向不断迁移、切割、叠加,导致研究区

缺乏全区分布的封盖性较好的泥岩。然而广泛发育的、与水道伴生的天然堤泥岩沉积厚度大,不仅可以作为良好的烃源岩,更常作为深水沉积油气系统中的重要盖层。陆架边缘一深水区频繁发生的滑动、滑塌、碎屑流等形成的泥质块体搬运沉积也能构成另一种重要盖层。此外,虽然深海远洋正常沉积的泥岩沉积速率慢、沉积厚度薄,横向展布不连续,且有时与薄层浊积泥岩很难区分,但其也可作为一种次要盖层。

通过对若开海域已发现典型生物气藏的分析发现:在同一背斜构造内,上新统气层的储盖厚度比小于1:3,水层的储盖厚度比一般大于1:2。事件性沉积的深水浊流不仅形成砂岩储层,也搬运来大量的泥质(天然堤、水道内泥岩沉积等),砂泥岩的间互沉积不仅形成了1:3~1:5的最佳储盖比,而且产自下伏源岩的生物气只需通过数米至数十米的初次运移就可进入储层。生物气一旦进入储层,便受到上覆泥岩盖层的直接遮挡,从而在储层中富集起来。

3.4 平缓褶皱带内上新统和下更新统浊积砂岩是若开海域深水生物气勘探的重要方向

一般而言,生物气源岩大量生烃的温度为25~65℃,即当研究区地层埋深处在1 000~3 000 m时,生物气就大量生成。研究区上新统的大部分地层以及下更新统的部分地层处于该深度范围内,且上新世一现今的沉积速率为30~90 cm/ka,因此上新统一下更新统具有生成生物气的有利环境条件。石油工业钻井及大洋钻探泥岩样品的实验分析结果均显示下更新统与上新统具有相似的烃源岩类型、质量及相似的地球化学指标,两者同样具有生成生物气的良好物质条件。此外,研究区自上新统至更新统均发育大规模相互叠加的水道-天然堤沉积体系,这为生物气成藏提供了有利的生储盖组合(图10)。因此,平缓褶皱带背斜圈闭内上新统和下更新统浊积砂岩具有较好的生物气成藏条件,是若开海域深水生物气勘探的有利方向。至今在缅甸若开海域上新统浊积砂岩中已经发现多个生物气藏,以及2018年发现 Aung Siddhi 气藏时,在下更新统的浊积砂岩中钻遇高度达65 m的气柱,进一步证实了上新统及下更新统具有良好勘探潜力。

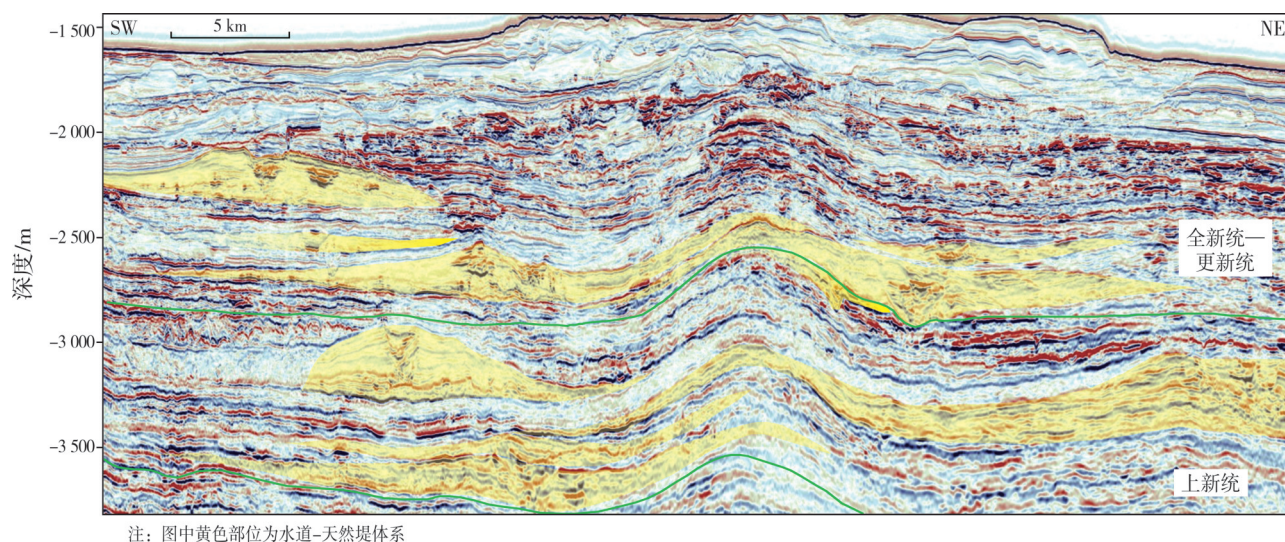


图10 缅甸若开海域东西向地震地质解释剖面

Fig. 10 The E-W seismic geological interpretation section showing large scale channel-levee systems (yellow parts) in offshore Rakhine Basin, Myanmar

4 结 论

缅甸若开海域发育的厚层深水浊流沉积属于全球最大海底扇——孟加拉扇的组成部分,其沉积速率大、地温梯度低,为生物气生成提供了良好的环境条件。上新统一更新统泥岩的高有机碳含量及以草本腐殖型为主的有机质类型为生物气生成创造了良好的物质基础;自上新世以来,若开海域东部位于陆坡区,发育巨厚层生物气源岩,具有“陆坡控源”的生物气源岩分布规律。叠置发育的大型水道-天然堤体系使水道、朵体和越岸砂岩与水道内泥岩和泥质天然堤形成良好的空间配置关系,为生物气成藏提供了有利的生储盖组合。北西向平缓褶皱带内背斜构造发育、断层活动弱、圈闭保存完整,是深水生物气有利成藏区带。下更新统与上新统具有相似的烃源岩、温度、沉积条件及生储盖条件,是若开海域深水生物气勘探的重要方向。

参考文献

- [1] RICE D D, CLAYPOOL G E. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas [J]. AAPG bulletin, 1981, 65 (1): 5-25.
- [2] 贾怀存, 康洪全, 王春修, 等. 大型生物气田形成与富集条件研究: 以东地中海黎凡特盆地为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 699-704.
JIA Huaicun, KANG Hongquan, WANG Chunxiu, et al. Accumulation conditions of large biogas fields in Levantine Basin, East Mediterranean [J]. Petroleum geology and experiment, 2018, 40(5): 699-704.
- [3] 张英, 李志生, 王东良, 等. 柴达木盆地东部天然气地球化学特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 693-700, 708.
ZHANG Ying, LI Zhisheng, WANG Dongliang, et al. Geochemical characteristics and play targets of gas in eastern Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2009, 36(6): 693-700, 708.
- [4] 魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成机理、分布规律与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84-89.
WEI Guoqi, LIU Delai, ZHANG Ying, et al. Formation mechanism, distribution feature and exploration prospect of the Quaternary biogenic gas in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2005, 32(4): 84-89.
- [5] YANG S Y, KIM J W. Pliocene basin-floor fan sedimentation in the Bay of Bengal (offshore northwest Myanmar) [J]. Marine and petroleum geology, 2014, 49: 45-58.
- [6] 周立宏, 孙志华, 汤戈, 等. 孟加拉湾若开盆地D区块上新统异重流特征与沉积模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 297-308.
ZHOU Lihong, SUN Zhihua, TANG Ge, et al. Pliocene hyperpycnal flow and its sedimentary pattern in D Block of Rakhine Basin in Bay of Bengal [J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(2): 297-308.
- [7] 王雪峰, 吕福亮, 范国章, 等. 孟加拉湾若开盆地构造特征及演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(4): 424-430.
WANG Xuefeng, LÜ Fuliang, FAN Guozhang, et al. Structural characteristics and evolution of Rakhine Basin, Bay of Bengal

- [J]. Journal of Chengdu University of Technology(science & technology edition), 2013, 40(4): 424-430.
- [8] 唐鹏程, 邵大力, 王海强, 等. 孟加拉湾若开海域晚新生代构造变形及其对油气的控制作用[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 52-60.
- TANG Pengcheng, SHAO Dali, WANG Haiqiang, et al. Late Cenozoic deformation of Arakan fold belt and its control on hydrocarbon accumulation in offshore Rakhine, Bay of Bengal [J]. Marine origin petroleum geology, 2016, 21(1): 52-60.
- [9] 马贵明, 马宏霞, 邵大力, 等. 孟加拉湾若开盆地深水沉积体系结构单元类型及演化模式[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 41-51.
- MA Guiming, MA Hongxia, SHAO Dali, et al. Structural units and evolution model of deepwater depositional system in Rakhine Basin, Bay of Bengal [J]. Marine origin petroleum geology, 2016, 21(1): 41-51.
- [10] ALAM M, ALAM M M, CURRAY J R, et al. An overview of the sedimentary geology of the Bengal Basin in relation to the regional tectonic framework and basin-fill history [J]. Sedimentary geology, 2003, 155(3/4): 179-208.
- [11] RACEY A, RIDD M F. Petroleum geology of Myanmar [M]. London: Geological Society, 2015: 93-108.
- [12] MA Hongxia, FAN Guozhang, SHAO Dali, et al. Deep-water depositional architecture and sedimentary evolution in the Rakhine Basin, northeast Bay of Bengal [J]. Petroleum science, 2020, 17(3): 598-614.
- [13] BELIAEV S S, FINKEL'SHTEIN Z I, IVANOV M V. Intensity of bacterial methane formation in ooze deposits in lakes [J]. Mikrobiologiya, 1975, 44(2): 309-312.
- [14] WHITICAR M J. Carbon and Hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane [J]. Chemical geology, 1999, 161(1/3): 291-314.
- [15] 关德师. 控制生物气富集成藏的基本地质因素[J]. 天然气工业, 1997(5): 16-20, 2.
- GUAN Deshi. Fundamental geologic factors controlling biogas accumulation [J]. Natural gas industry, 1997(5): 16-20, 2.
- [16] 刘建, 徐莹, 赵智鹏, 等. 生物气源岩评价指标体系研究[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(1): 16-23.
- LIU Jian, XU Ying, ZHAO Zhipeng, et al. Research of the evaluation indicator system for biogenic gas source rocks [J]. Marine geology frontiers, 2015, 31(1): 16-23.
- [17] 梅建森, 康毅力, 张永高, 等. 柴达木盆地生物气源岩评价及勘探方向[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 17-20.
- MEI Jiansen, KANG Yili, ZHANG Yonggao, et al. Biogas source rock evaluation in the Qaidam Basin and its exploration target [J]. Natural gas industry, 2007, 27(9): 17-20.
- [18] FRANCE-LANORD C, DERRY L A. $\delta^{13}\text{C}$ of organic carbon in the Bengal Fan: source evolution and transport of C3 and C4 plant Carbon to marine sediments [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1994, 58(21): 4809-4814.
- [19] 魏小芳, 秦积舜, 帅燕华, 等. 利用分子生物学技术分析生物气藏中甲烷形成途径[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 505-512.
- WEI Xiaofang, QIN Jishun, SHUAI Yanhua, et al. Methane production pathway in biogas reservoirs via molecular biological technique [J]. Petroleum exploration and development, 2012, 39(4): 505-512.
- [20] CRANWELL P A. Chain-length distribution of n-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change [J]. Freshwater biology, 1973, 3(3): 259-265.
- [21] HOORN C, OHJA T, QUAADE J. Palynological evidence for vegetation development and climatic change in the Sub-Himalayan Zone (Neogene, Central Nepal) [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2000, 163(3/4): 133-161.
- [22] 丁安娜, 王明明, 李本亮, 等. 生物气的形成机理及源岩的地球化学特征: 以柴达木盆地生物气为例[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 402-407.
- DING Anna, WANG Mingming, LI Benliang, et al. Biogas forming mechanism and geochemical characteristics of its source rock [J]. Natural gas geoscience, 2003, 14(5): 402-407.
- [23] 关德师, 戚厚发, 钱贻伯, 等. 生物气的生成演化模式[J]. 石油学报, 1997(3): 33-38.
- GUAN Deshi, QI Houfa, QIAN Yibo, et al. Generation and evolution model of Biogenic gas [J]. Acta petrolei sinica, 1997(3): 33-38.
- [24] 康晏, 王万春, 任军虎. 生物气生成的地球化学因素分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(4): 350-354.
- KANG Yan, WANG Wanchun, REN Junhu. Review of the geochemical factors effecting biogenic gas production [J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry, 2004, 23(4): 350-354.
- [25] RASHID M A, VILKS G. Environmental controls of methane production in Holocene basins in eastern Canada [J]. Organic geochemistry, 1977, 1(1): 53-59.
- [26] 管志强, 徐子远, 周瑞年, 等. 柴达木盆地第四系生物气的成藏条件及控制因素[J]. 天然气工业, 2001, 21(6): 1-5.
- GUAN Zhiqiang, XU Ziyuan, ZHOU Ruinian, et al. The essential conditions and controlling factors of formation of Quaternary [J]. Natural gas industry, 2001, 21(6): 1-5.
- [27] 岳会雯, 周瑶琪, 梁文栋. 深水浊积岩有机质富集规律研究进展[J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 112-121.
- YUE Huiwen, ZHOU Yaoqi, LIANG Wendong. Progress in accumulation of organic matter in deepwater turbidite [J]. Geological science and technology information, 2016, 35(6): 112-121.
- [28] BAUDIN F, DISNAR J R, MARTINEZ P, et al. Distribution

of the organic matter in the channel-levees systems of the Congo mud-rich deep-sea fan (West Africa). Implication for deep offshore petroleum source rocks and global carbon cycle [J]. *Marine and petroleum geology*, 2010, 27(5): 995–1010.

[29] SALLER A, LIN Rui, DUNHAM J. Leaves in turbidite sands: the main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia[J]. *AAPG bulletin*, 2006, 90(10): 1585–1608.

编辑:黄革萍

Deep-water biogas generation and accumulation in offshore Rakhine Basin, Myanmar

FAN Guozhang, MA Hongxia, SHAO Dali, DING Liangbo, ZHANG Ying, WANG Haiqiang, WANG Xuefeng, CAI Zheng

Abstract: Since 2004, several gas fields (Shwe, Shwe Phyu, May, Thalin etc.) have been discovered from shelf edge to deep-water (more than 1 000 m) in the Rakhine Basin, northeast Bay of Bengal. The gas is likely to be biogenic based on the methane content more than 97% and $\delta^{13}\text{C}$ ranging from -70‰ to -60‰ . The biogenic gas was trapped in turbidity sandstones (lobes, channels, levees and sandy MTCs) of NW-SE anticlines from Lower Pleistocene to Pliocene. The reservoir quality is moderate to good with the porosity of 20%–30% and the permeability from tens of millidarcy to hundreds of millidarcy. This paper uses high-resolution seismic data covering from shelf edge to the slope and basin, well data and gas play data to analyze the biogas generation and accumulation in deep-water turbidites, in the hope of providing some experiences for the biogas exploration in offshore Rakhine and other areas with the similar depositional environment. The research reveals the following results: (1) The gas bearing sandstones are buried at depth of 1 200–3 000 m below the sea level, where the reservoir temperature ranges from 30 °C to 90 °C. This is the suitable environment for methanobacteria. Low geothermal gradient, high sediment accumulation rate and rapid temperature rise provide good conditions for biogas generation. (2) The discovered gas fields are located at the Pliocene lower slope. The thick mudstones in the lower slope can generate a large amount biogas which can migrate in short distance and accumulate, and the high sedimentation rate in the slope is also good for preservation of porosity and suitable for methanobacteria to live. (3) The stacked large-scale channel-levee systems transported rich terrestrial organic materials. The biogas generated from these organic material can migrate into adjacent channel sandstones and lobe sandstones, forming the favorable source-reservoir-cap assemblages. (4) The anticlines in the gentle folded belt can trap a large quantity of biogas. (5) The organic matter in offshore Rakhine Basin mainly derived from the terrestrial plants. The experimental analysis of drilling in this area proved that the source rocks of the Pliocene–Lower Pleistocene is much better than the Miocene. In addition, the isotopic data shows that organic matters in Pliocene–Lower Pleistocene are dominated by C4 biomass which is more favorable for biogas generation than C3 biomass based on a series of experimental analysis. Thus, the Lower Pleistocene and Pliocene turbidite sandstones are the main targets for biogas exploration in the offshore Rakhine Basin.

Key words: deep-water; turbidite deposition; biogas play; generation and accumulation; offshore Rakhine Basin; Myanmar

FAN Guozhang, First author: PhD, mainly engaged in deep water petroleum geology and geophysical research. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China

MA Hongxia, Corresponding author: Master, mainly engaged in sequence stratigraphy and sedimentology. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China