

缅甸若开海域生物气藏气源成因分析

王芝尧¹, 钱茂路¹, 苏俊清¹, 胡俊刚¹, 王 瑀¹, 刘志英²

(1. 中国石油大港油田分公司 勘探开发研究院, 天津 300280; 2. 中国石油渤海钻探工程公司 测井分公司, 天津 300280)

摘要: 缅甸若开盆地深水区域具备良好的生物气成藏条件和勘探前景, 生物气藏作为一种非常规天然气藏, 其成藏条件较为苛刻, 研究生物气藏的气源成因, 是成藏因素分析的首要问题。通过地震正演建模、地球化学分析等方法, 证实缅甸若开海域中方勘探区含气地震响应特征明显, 且为生物气藏。若开海域生物气烃源岩表现为“三低、一高、弱成岩”的地质特征, 即较低的有机碳下限值、较低的热演化程度、低地温环境、较高的沉积速率、岩石固结程度处于弱成岩阶段中早期。峡谷泥岩、中新统泥岩、上新统泥岩均可以为甲烷菌提供食物—物质来源, 上新统以上的泥岩不具备形成生物气的物质基础。推测研究区可能存在天然气水合物, 且受到外界因素影响, 使得压强和温度改变, 导致天然气水合物的稳定状态改变, 致使其排出大量生物甲烷气, 进而在圈闭内聚集成藏, 表现为气体不断形成、不断增压—突破封存压力界限—气体泄漏—再次压力平衡—气体再生成、再增压—再突破封存压力—气体再泄漏—再平衡的排驱模式。

关键词: 生物气藏 气源成因 天然气水合物 若开海域 缅甸

中图分类号: TE112.111

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)02-0046-06

Genesis analysis of gas source of biogenic gas reservoir in Rakhine Basin, Myanmar

Wang Zhiyao¹, Qian Maolu¹, Su Junqing¹, Hu Jungang¹, Wang Yu¹, Liu Zhiying²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin City, 300280, China;
2. Well Logging Branch, Bohai Drilling Engineering Company, PetroChina, Tianjin City, 300280, China)

Abstracts: There are good biogenic gas accumulation conditions and exploration prospects in deepwater area of Rakhine Basin in Myanmar. Biogenic gas reservoirs, as unconventional natural gas reservoirs, form under very strict conditions. It is the primary issue to study the genesis of biogenic gas—source for analysis of factors of gas accumulation. It is proved by geochemistry analysis and seismic forward modeling that the seismic response created by gas chimneys, also known as biogenic gas reservoir, is obvious in Chinese exploration area of Rakhine Basin in Myanmar. Hydrocarbon source rocks of biogas is characterized by geologic features of “three high and one low, weak diagenesis”, indicating low lower organic carbon limit, low thermal maturation, low geothermal temperature environment and high deposition rate. The rock consolidation degree shows that it was in the earlier stage of weak diagenesis. Canyon shale, Miocene mudstones and Pliocene mudstones could provide food and material source for methane bacteria. The overlying mudstones on the Pliocene mudstones does not have the material conditions of biogas formation. It is speculated that natural gas hydrate might exist in the research area, and its stability changes with the variation of pressure and temperature caused by external factors. As a result, amounts of biogenic methane gas is expelled and entrapped to form biogenic gas reservoir. The process of gas expulsion and accumulation can be described as continuous gas generation and pressure increase—breaking pressure balance—gas leak—pressure rebalancing—gas regeneration and the second pressure increase—breaking pressure balance again—the second gas leak—pressure rebalancing.

Key words: biogenic gas reservoir; genesis of gas source; natural gas hydrate; Rakhine Basin; Myanmar

收稿日期: 2016-11-11。

作者简介: 王芝尧(1981—), 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 硕士, 从事构造分析及地震解释研究。联系电话: 15902296121, E-mail: lan-taizi@sina.com。

基金项目: 中国石油海外科技专项“缅甸若开盆地深水区域油气风险勘探”(CNODC/CAL/KJZX/2015-016)。

缅甸若开盆地构造上位于孟加拉盆地的东部边缘,是新生代在印支板块对欧亚板块的俯冲碰撞作用下形成的,为典型的增生楔盆地。若开海域位于若开盆地的海域部分,面积为 $0.142 \times 10^6 \text{ km}^2$;中国石油拥有AD6,AD8和AD1这3个海域勘探权益区块,水深为30~2 200 m,其中AD6区块断层发育,AD1和AD8区块断层不发育;国外作业者权益区块内发现的Shew生物气田为中缅油气管道的气源地,紧邻中方作业区块。

迄今的勘探工作及研究表明,若开海域主要发育深水重力流沉积体系,主要含气圈闭类型为深水重力流水道充填的砂岩岩性圈闭,具备形成生物气藏的地质环境。针对该区生物气藏的气源成因一直未能形成统一且令人信服的地质认识,同时公开发布的资料非常少。笔者依托若开海域单井地质资料,采用地震正演建模和地球化学分析方法,对该区生物气藏气源成因进行分析。

1 区域地质概况

若开盆地构造演化经历了板块漂移、初始碰撞、持续碰撞和缝合拼接4个过程,岛—弧体系发育,发育挤压褶皱带、弧前构造带、岛弧带、弧后构造带和远陆(马来西亚)构造带5种类型构造带。板块的碰撞导致北部喜马拉雅物源区及东部印缅山脉物源区隆升,由恒河和布拉马普特河共同作用,裹挟着巨量碎屑,注入开阔的印度洋,形成孟加拉扇三角洲。因大陆架短而陡,重力流沉积体系发育,重力流能量巨大,裹挟着砂质沉积物,具备形成岩性油气藏的物质基础。若开盆地沉积白垩系、古近系、新近系和第四系4套地层,其中新近系是该区

的主要沉积地层,厚度最大达5 000 m。

若开盆地白垩纪处于开阔海沉积阶段,以深海—半深海泥页岩沉积为主;古近纪早期以深海—半深海泥页岩沉积为主,至晚古近纪印度板块与欧亚板块第1次碰撞,沿海岸带逐渐形成增生楔盆地,沉积了厚层泥页岩,并夹杂薄层砂岩;新近纪受东部及北部物源影响,以滨浅海三角洲—半深海深水扇沉积体系为主,见海底冲蚀峡谷,钻井揭示岩性以粉细砂岩和泥页岩为主;第四纪以来,主要以浅海沉积为主,钻井揭示岩性组合为砂泥岩薄互层特征。

2 生物气的发现

生物气藏的气源形成环境非常苛刻,要求具有低地温、弱成岩、低演化程度、高沉积速率的沉积背景。从地球物理和地球化学2个方面分析若开海域发现的气藏,确定其为生物气藏。

2.1 地球物理特征

若开海域过Well-1地震剖面具有明显的疑似“气烟囱”的地震响应特征(图1a),两侧地层地震反射特征清晰,中部地层地震反射特征杂乱模糊,顶部有“气云”状强反射;海底有“麻坑”状反射特征;过Well-2地震剖面可见平点、亮点特征(图1b)。初步判断是因为地层含气,造成地层的速度下降,地震反射出现气云屏蔽效应(该效应特征为顶部气云强反射,屏蔽下部低速反射,表现为杂乱反射或弱反射的现象)及平点、亮点地震反射特征。

针对过Well-2地震剖面(图1b)进行正演建模,根据已知单井测井的声波速度资料,分别按照含气模型和含水模型,赋予相应的地层速度,然

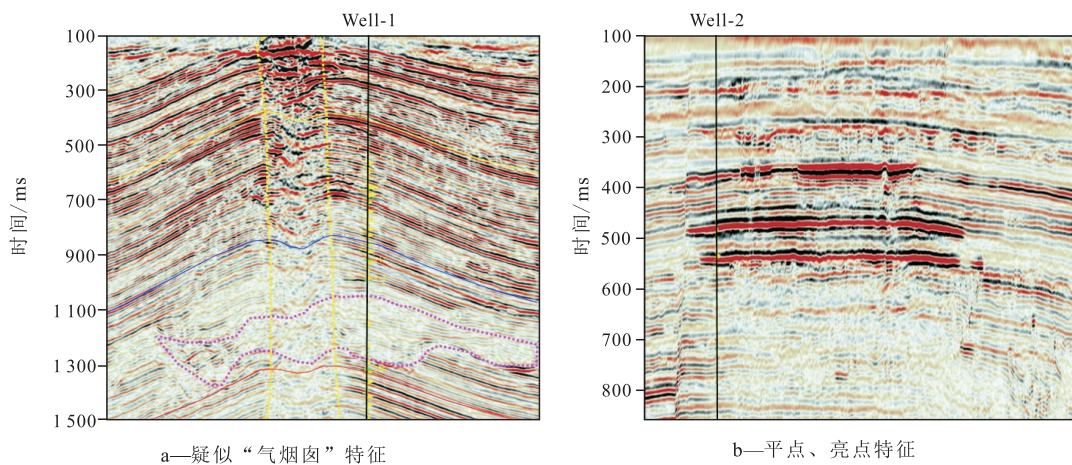


图1 典型含气地震反射特征剖面

Fig.1 Typical seismic reflection profiles of gas chimneys

后使用正演软件进行地震正演运算,可以得到2个模型的正演剖面(图2a,2b)。利用研究区含气地质模型计算得出的正演剖面与实际地震剖面的地球物理特征相似度极高,可以判定是明显的含气地震反射响应。

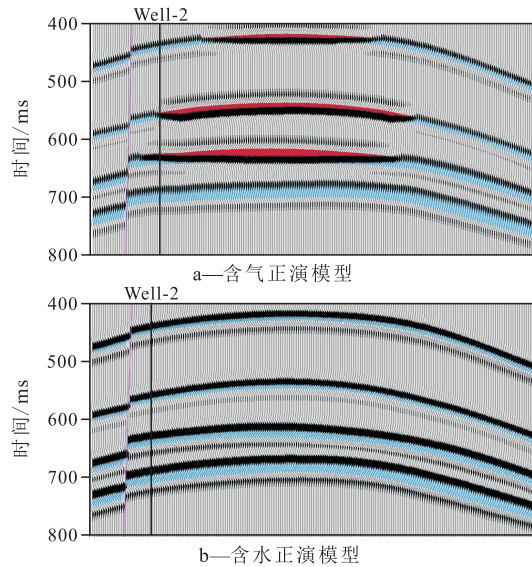


图2 地质模型正演地震反射剖面

Fig.2 Forward seismic reflection profiles based on geology models

2.2 地球化学特征

根据中外学者的研究,生物气中甲烷的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 随着气源岩成熟度(R_o)的增高而增大,生物气 $\delta^{13}C_{PDB}$ 最轻,通常小于等于 -55‰ ,且甲烷含量高;油型热成因气 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值一般为 $-55\text{‰} \sim -30\text{‰}$,煤型热成因气 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值一般为 $-43\text{‰} \sim -10\text{‰}$ ^[1-5]。将生物气的鉴别标准定为 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值小于等于 -55‰ ,在勘探钻井现场,通过随钻采样快速判定天然气类型,从理论和实践上都是可行的。中缅管道起源地Shew气田灌装气 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-75\text{‰} \sim -65\text{‰}$,证实为生物气藏。

3 气源成因分析

3.1 常规分析

若开海域所处的构造位置为大陆斜坡和深海洋盆,远离物源,有机质供给不足,上覆1 500~2 200 m的海水,为典型的沉积冷盆,地温梯度低于常规热成因生烃盆地。若开盆地生物气烃源岩总体表现为“三低、一高、弱成岩”特征(表1),即较低的有机碳下限值、较低的热演化程度、低地温环境、较高的沉积速率、岩石固结程度处于弱成岩阶段中早期。

从气源岩物质条件分析,研究区实测录井剖面

表1 缅甸若开盆地生物气烃源岩评价指标

Table1 Evaluation criteria for biogenic gas source rock in Rakhine Basin of Myanmar

气源岩分类	物质条件						环境条件				反应微生物活动				
	有机碳含量, %	氯仿沥青“A”/10 ⁶	有机酸, %	有机质类型	$R_o, \%$	总烃/总烃/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	显微组分总量, %	沉积速率/ ($\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1}$)	Pr/Ph	温度/°C	Cl ⁻ 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	腐泥组分, %	卟啉类/卟啉类/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	甾烷/甾烷/ (nC_{21}/nC_{22}^+)
非气源岩	< 0.11	< 100	< 0.1	I型	> 0.7	< 100	< 0.5	< 1	< 50	> 2	< 15或 > 85	< 6 350或 > 15 000	0	> 40	> 1 < 0.6
差气源岩	0.11~0.18	100~500	0.1~0.2	III型为主	0.5~0.7	100~200	0.5~2	1~2.5	50~500	> 2	< 15或 > 85	< 6 350或 > 15 000	0~20	10~40	> 1 < 0.6
中等气源岩	0.18~0.35	500~1 000	0.2~0.5	III型为主	0.5~0.7	200~500	2~6	2.5~4	50~500	1~2	15~25或 60~85	6 350~15 000	20~30	1~10	< 1 > 2.5
好气源岩	> 0.35	> 1 000	> 0.5	II型为主	< 0.5	> 500	> 6	> 4	> 500	< 1	25~60 (30~55最好)	6 350~15 000	> 30	< 1	< 1 0.6~2.5

显示泥岩颜色由上到下加深,上部更新统泥岩以浅灰色为主;中部上新统泥岩以灰色为主;下部中新统发育深灰色泥岩60层698 m,2套烃源岩厚度为766 m;峡谷泥岩以灰色为主。按照生物气烃源岩评价标准进行有机质丰度分析,更新统泥岩生烃潜力差,上新统泥岩生烃潜力中等,中新统泥岩生烃潜力中等—好,峡谷泥岩生烃潜力中等。该区有机质类型好,为海陆混源类型,实测到藻类及高等陆相植物化石。

从生物气成烃环境条件分析,研究区2 000~

3 200 m深度实测地温为65~85 °C,表明地温相对较低,适合甲烷菌生存。通过岩矿指标分析,研究区新近纪整体为弱成岩阶段,中新统处于中成岩A1期,半固结;上新统处于早成岩阶段B期,弱固结—半固结;而更新统处于早成岩阶段A期,弱固结。岩石疏松有利于水介质中营养物质的交换,促使甲烷菌大量活动。研究区地层沉积速率(根据区内单井实测分层,然后辅以地震剖面标定校正,得各层系地层厚度,除以地史沉积时间,可算出沉积速率)总体由下向上增大,中新统沉积速率为140 m/Ma,

上新统为 280~489 m/Ma,更新统为 475~1 085 m/Ma,高沉积速率不仅有利于沉积有机质的快速埋藏,减弱其在浅表阶段的氧化破坏,而且减少了上覆水体中不断补给的硫酸盐,有利于形成促使甲烷菌大规模繁殖的还原环境。

从微生物活动性分析,研究区镜质组反射率随着深度的增大而增大(图3),镜质组反射率为0.3%~0.8%,烃源岩处于未成熟—低成熟阶段。Pr/Ph值小

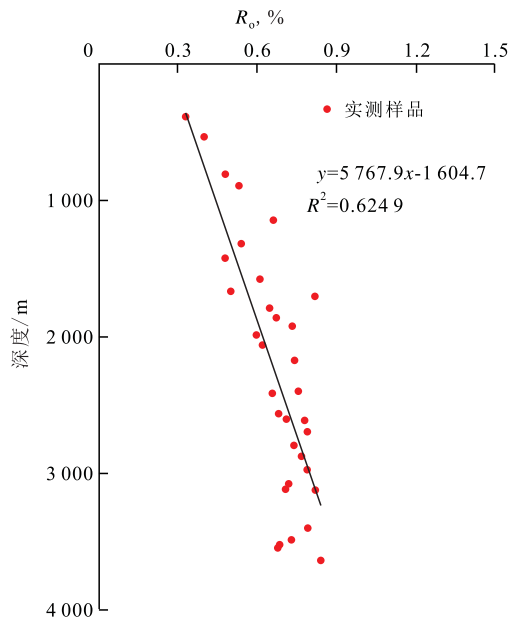


图3 缅甸若开海域镜质组反射率随深度的变化

Fig.3 Relationship between vitrinite reflectance (R_o) and burial depth in Rakhine Basin of Myanmar

于1.5,为还原环境,有利于甲烷菌大量繁殖,进而形成生物气;Ts/Tm值小于1,重排甾烷丰度不高,烃源岩演化程度低,饱和烃色谱图上出现UTM峰,有机质降解作用强烈,微生物活跃(图4)。

生物气的形成在地球化学反应中是一个发酵分解的过程,本质为甲烷菌在厌氧条件下消耗有机质的代谢产物;甲烷菌分解的可溶有机质是其食物—物质来源,而可溶有机质=总碳-不溶有机碳-无机碳。对研究区已钻探井的岩心岩屑样品进行地化分析可以计算并恢复可溶有机碳的丰度值,进而明确峡谷泥岩、中新统泥岩、上新统泥岩均可以为甲烷菌提供食物—物质来源,上新统以上的泥岩不具备形成生物气的物质基础。

3.2 推测分析

笔者依据现有资料进行分析,推测另一种生物气来源的可能,即依靠天然气水合物间歇性释放甲烷,在圈闭中聚集形成生物气藏。推测生气过程为:死亡的海洋生物被水下重力流裹挟,经过海底峡谷,从高部位的大陆架带进低部位的陆坡、洋盆区域,受甲烷菌的分解作用影响而形成大量的甲烷;在适当的温压条件下,甲烷在水合作用影响下,水分子和甲烷分子形成结晶网格状笼形固体络合物,即天然气水合物;当温压条件改变后,天然气水合物发生水解作用,1个单位体积的天然气水合物可以释放200个单位体积的生物甲烷气,巨量生

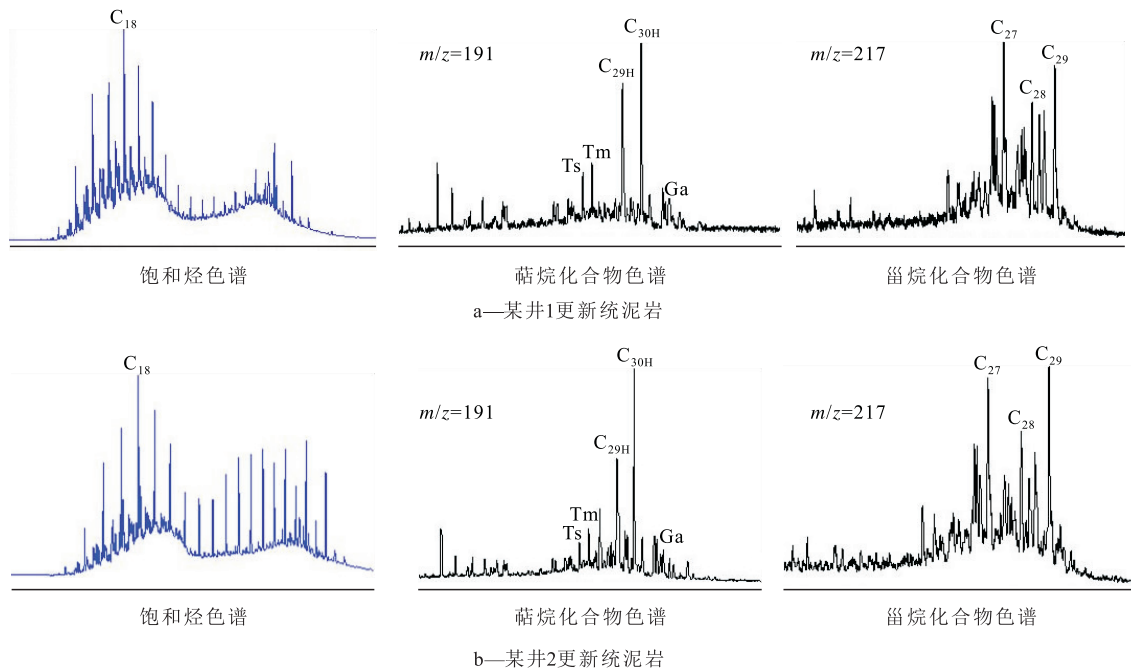


图4 缅甸若开海域生物标志化合物分析

Fig.4 Comprehensive diagrams of biomarkers in Rakhine Basin of Myanmar

物甲烷气的释放,形成高压气源;而上覆成岩作用较弱的泥岩,生物气沿应力薄弱带向上刺穿泄露,在剖面上形成“气烟囱”和亮点、平点的地震反射特征;用气体动力平衡方程表述为“气体不断形成、不断增压—突破封存压力界限—气体泄漏—再次压力平衡—气体再生成、再增压—再突破封存压力—气体再泄漏—再平衡”的生物甲烷气排驱模式。

天然气水合物实物鉴别资料较少,而且在深水区域完全依靠实物资料进行分析与鉴别,在经济角度也是不可行的,故主要依靠地震剖面进行判别,虽然地震剖面上与海底近似平行的反射同相轴,即似海底反射(BSR)与天然气水合物没有唯一性对应关系,存在多解性,但是依据加拿大地质局的统计资料(引自CNODC内部资料)表明,全球海洋已发现天然气水合物地区有99处,使用BSR反射特征判别的有76处,用BSR鉴别天然气水合物是目前应用最为广泛及最直观的方法(图5)。BSR的形成是因为含气导致地层速度降低,在地震剖面上呈亮点反射特征,同时因为天然气水合物多平行于海底地形产状,使得其亮点反射特征与海底平行,其规模有大有小。需要注意的是,由于部分天然气水合物在一定温压条件未达到水解释放生物气的条件时,其周围没有生物气存在,在地震剖面上无法发现BSR反射特征。

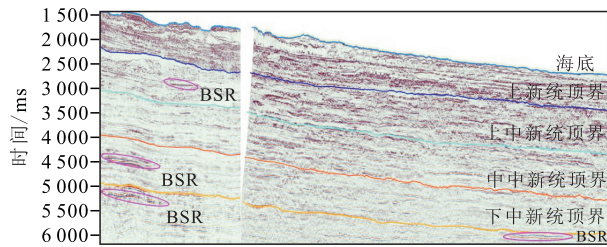


图5 若开盆地海域地震剖面BSR特征

Fig.5 BSR characteristics in seismic cross-section of Rakhine Basin

高沉积速率利于有机质未经氧化、快速埋藏,结合还原环境的特点,利于甲烷菌进行化学分解活动,形成大量生物气;同时,高沉积速率利于形成欠压实的高压条件,深水区域的冷盆背景,地温较低,在此种温压条件下,易于形成天然气水合物。

天然气水合物作为一种特殊形态的络合物,其稳定状态受温度和压强影响,这两者的变化直接导致天然气水合物体积的变化。根据范德瓦尔斯气体状态方程^[6-9]分析,当天然气水合物的压强降低,外界热流导致天然气水合物所受温度升高,必然导致其体积变大,分子间的范德华力不再束缚水分子和甲烷分子,致使甲烷释放。印支板块对欧亚板块

的持续碰撞,导致喜马拉雅山继续隆升,印度洋持续缩小,海平面继续降低;中外学者研究表明,在更新世海退期间(距今28~17 Ma),海平面下降了大约100 m,导致海底地应力减少1 MPa^[10-15],因此,天然气水合物大规模分解是可能的。板块间的汇聚碰撞致使洋壳深入地幔削减弥合,下部热流随地幔持续上涌带来巨大的热量,热传递的烘烤作用导致天然气水合物的外界温度条件升高,促使天然气水合物分解形成甲烷和水。

4 结论

若开海域地震剖面具有明显的疑似“气烟囱”的地震响应特征,甲烷 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-75\% \sim -65\%$,证实为生物气藏。若开海域生物气烃源岩表现为“三低、一高、弱成岩”的地质特征,即较低的有机碳下限值、较低的热演化程度、低地温环境、较高的沉积速率、岩石固结程度处于弱成岩阶段中早期。峡谷泥岩、中新统泥岩、上新统泥岩均可以为甲烷菌提供食物—物质来源,上新统以上的泥岩不具备形成生物气的物质基础。

推测分析研究区可能存在天然气水合物,且受到外界因素影响,使得压强和温度改变,导致天然气水合物的稳定状态改变,致使其排出大量生物甲烷气,进而在圈闭内聚集成藏,表现为气体不断形成、不断增压—突破封存压力界限—气体泄漏—再次压力平衡—气体再生成、再增压—再突破封存压力—气体再泄漏—再平衡的排驱模式。

参考文献:

- [1] Alam Mahmood, Alam M Mustafa, Curray Joseph 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.
- [2] 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.
- [3] 张英, 戴金星, 李剑, 等. 我国生物气的地化特征与勘探方向[J]. *天然气工业*, 2009, 29(9): 20-23.
Zhang Ying, Dai Jinxing, Li Jian, et al. The Geochemical behaviors and exploration domains of biogenetic gas in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 20-23.
- [4] 穆亚蓬, 王万春, 宋振响. 生物气源岩评价指标研究现状及展望[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(6): 775-779.
Mu Yapeng, Wang Wanchun, Song Zhenxiang. Present researches

- and prospects of the evaluation indicator of biogenic gas source rocks[J].*Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 775-779.
- [5] 张景茹, 何家雄, 陆军文, 等. 南海北部陆缘合浦盆地烃源岩特征与低熟油气及生物气勘探前景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(4): 107-116.
Zhang Jingru, He Jiaxiong, Lu Junwen, et al. The characteristics of hydrocarbon source rocks and exploration prospects of low mature oil and gas/bio-gas in Hepu Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 107-116.
- [6] 张丙坤, 李三忠, 夏真, 等. 南海北部海底滑坡与天然气水合物形成与分解的时序性[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(2): 434-440.
Zhang Bingkun, Li Sanzhong, Xia Zhen, et al. Time sequence of submarine landslides and gas hydrates in the northern South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(2): 434-440.
- [7] 马宏霞, 孙辉, 邵大力, 等. 缅甸若开盆地上中新统-上新统深水沉积层序地层划分及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 136-141.
Ma Hongxia, Sun Hui, Shao Dali, et al. Sequence stratigraphy of the Upper Miocene-Pliocene deepwater deposits and its controlling factors in Rakhine Basin, Myanmar[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 136-141.
- [8] 魏伟, 张金华, 吝文, 等. 天然气水合物成藏机理及主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6): 563-566.
Wei Wei, Zhang Jinhua, Lin Wen, et al. Mechanism and controlling factors of natural gas hydrate accumulation[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 563-566.
- [9] 蔡文杰, 朱光辉, 姜焯, 等. 缅甸俯冲增生带的构造特征及勘探前景[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 670-673.
Cai Wenjie, Zhu Guanghui, Jiang Ye, et al. Structural features and exploration prospect of subduction-accretionary belt in Myanmar[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 670-673.
- [10] 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.
- [11] 张朋, 梅廉夫, 马一行, 等. 孟加拉湾盆地构造特征与动力学演化: 来自卫星重力与地震资料的新认识[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 39(10): 1 407-1 422.
Zhang Peng, Mei Lianfu, Ma Yixing, et al. Tectonic features and dynamic evolution of bay of Bengal Basin: New insights into satellite-gravity and seismic data[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(10): 1 407-1 422.
- [12] 孙辉, 范国章, 吕福亮, 等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡水道复合体沉积特征[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 695-704.
Sun Hui, Fan Guozhang, Lü Fuliang, et al. Sedimentary characteristics of Pliocene slope channel complexes in the Rakhine Basin, Offshore Myanmar[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 695-704.
- [13] 李正, 张阳, 贾胜娟. 固市凹陷生物气勘探前景浅析及勘探开发建议[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(1): 52-55.
Li Zheng, Zhang Yang, Jia Shengjuan. Brief analysis on exploration prospects of bio-gas in Gushi Sag and suggestions on exploration and development[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(1): 52-55.
- [14] 贺芙邦, 游俊, 高凤英, 等. 岩石沉积学特征与岩石弹性参数的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 61-67.
He Fubang, You Jun, Gao Fengying, et al. Relationship between rock sedimentary feature and its elastic parameters[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(1): 61-67.
- [15] 刘江涛, 刘双莲, 李永杰, 等. 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(3): 53-57.
Liu Jiangtao, Liu Shuanglian, Li Yongjie, et al. Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshi-ba area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(3): 53-57.

编辑 经雅丽