

莺歌海盆地天然气成藏动力学

朱伟林, 王振峰, 黄保家

中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 采用地质与地球化学、宏观与微观相结合的研究方法, 探讨莺歌海盆地的成藏动力学过程, 具体表现在, 通过成藏流体非均质性剖析揭示了底辟浅层气田多源混合—幕式充注的成藏特点, 流体活动的地球物理特征和地球化学资料显示底辟断裂为深成天然气向上运移提供了良好的通道, 而异常高压是流体压裂运移的关键动力, 并驱使梅山—三亚组烃源岩生成的天然气向上运移、聚集和散失。由于中央坳陷带气源丰富, 存在供大于散的物质基础, 尤其是“幕式”集中运移具有高的排烃效率, 因此, 莺歌海盆地底辟带浅层构造在距今 1.2~0.1 Ma 如此短暂的时间里天然气依然能够聚集成藏。

关键词: 莺歌海盆地; 成藏动力学; 底辟构造; 多源混合; 幕式充注。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2004)05-0563-06

收稿日期: 2004-06-06

Dynamics of Gas Accumulation in Yinggehai Basin

ZHU Wei-lin, WANG Zhen-feng, HUANG Bao-jia

Zhanjiang Filiale, CNOOC China Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: Based on the integrated analysis of geological and geochemical data, gas accumulation process is discussed in the Yinggehai basin by means of macro- and microapproaches. Interreservoir compositional heterogeneities in shallow gas field at diapiric structures indicate that hydrocarbon gases may undergo the processes of multiple mixing, episodic migration and accumulation. The faults at diapiric structures provide a good pathway for natural gas vertical migration from the deep source rocks into the shallow reservoirs as evidenced from high-resolution seismic images. Natural gases are derived from the Early Miocene Meishan and Middle Miocene Sanya source rocks distributed within overpressured zones. This overpressuring, together with active faulting, results in the episodic expulsion of fluids distributed within overpressured zones as a result of multiple infilling into shallow reservoir or leakage loss of hydrocarbon gases. Therefore, the short-lived rapid accumulation of hydrocarbon gases happens only about 1.2—0.1 Ma before the present time because of a plentiful of gas sources and high hydrocarbon expulsion efficiency.

Key words: Yinggehai basin; hydrocarbon accumulation dynamics; diapiric structure; multiple source mixing; episodic injection.

天然气运移成藏研究是一个难度大而又对天然气勘探十分重要的课题。在以往的运移研究中, 大多数采用构造分析方法(研究构造运动对油气聚散的影响)和流体势分析方法, 这些方法简便、快捷, 但常是简单地描述油气运移的时空匹配或趋势, 不能对油气藏形成时期和充注历史进行细致的刻画。近 10 多年来发展起来的烃类流体包裹体方法为研究储层油气运移微观信息和运聚期次提供了一种较为有效

的手段(施继锡, 1987; 肖贤明等, 2002), 但其缺点是包裹体分期难、单个包裹体均一温度测定数量多, 包裹体成分分析难度大。油气在非均质、非均衡变动的地壳中的运移和集聚是一个非常复杂的动力学过程, 也是地质—地球化学等多种因素的耦合过程。相对时序、期次等的单一性研究手段已不能满足当前生产研究和勘探的需要。为此, 本文将针对莺歌海盆地独特的地质条件, 采用微观与宏观相结合的研究

方法,在深入剖析底辟浅层气田天然气的非均质性、运聚期次和时间的基础上,论述底辟断裂通道作用和天然气运移成藏动力学过程(即运移动力、相态、通道以及它们之间的相互影响),进而建立起天然气多源混合—幕式成藏模式。这将有助于进一步圈定莺歌海盆地天然气勘探有利靶区。

1 莺歌海盆地地质背景

莺歌海盆地是一个发育于南海北部被动大陆边缘的中新生代转换伸展盆地,呈北西延伸(图 1)。它的特点是比较年轻,存在高温高压和沉积巨厚的地层,其中,下中新统—第四系沉积厚度达 8 000~10 000 m。盆地演化历史可分为两大阶段:古近纪始新—渐新世裂陷期和新近纪中新世—第四纪裂后热沉降期。始新世(?)—渐新世裂陷期沉积(T_{60} — T_{100})厚度约 4 000 m,但由于埋藏较深至今没井钻遇,发育在邻区北部湾和琼东南盆地,并以冲积相、湖相和含煤的冲积平原相为主;裂后期的新近纪—第四纪为海相沉积,厚度达 8 000 m。中新统,特别是梅山、三亚组以浅海—半深海含钙泥岩为特征,被认为是莺歌海盆地的主要烃源岩;黄流组、莺歌海组以及第四系浅海陆架砂岩、半深海砂质沉积和海相泥岩,形成良好的储—盖组合。晚期阶段发生的转换断裂、底辟作用以及底辟演化过程中的高压卸载对天

然气的垂向运移和聚集造成了深刻的影响。近几年,已在底辟带异常压力系统的顶部或上方发现了多个气田,例如 DF1-1、LD5-1、LD22-1 和 LD8-1 气田等,展示出大气区的面貌。因此,莺歌海盆地的天然气成藏动力学研究应从中央底辟构造带气田成藏条件入手。

2 底辟断裂通道与流体垂向运移特征

高压流体系统通常含有低渗的厚层泥岩,大量的烃类流体如何从这些源岩中排出呢?这是人们关注的问题。对此 Hunt(1990)认为主要是因为其内普遍存在相互联系的断裂。莺歌海盆地发育的底辟被认为与高压流体压裂卸载密切相关。莺歌海盆地中部第三系沉积厚度达 15 km,如 DF1-1 区新近系海相沉积地层厚约 8 000 m,沉积速率高达 400~780 m/Ma。由于快速加载、天然气生成和孔隙流体热膨胀,使盆地中部普遍发育超压。当压力增加到一定的程度时,可能局部诱发一些微裂缝。如果孔隙压力超过岩层的抗张强度时,就产生水力破裂。根据理论计算和实验资料,当孔隙压力 \geq 上伏地层静岩压力的 85%(即孔隙压力/静水压力=压力系数,压力系数 >1.85)时,就产生破裂。DF1-1 气田已钻遇超压,DF1-1-11 井测试数据表明,井深 2 780 m 的压力为 57.27 MPa,地层温度 135.6 °C,对应压力系数 $C_p=2.10$,地温梯度为 4.35 °C/100 m。从该井测定的压力系数与深度关系图(图 2)可见,钻井揭露的地层可分为 3 段:(1)正常压力段,压力系数 <1.2 ;(2)压力过渡段,压力系数 1.2~1.6;(3)强超压段,压力系数 >1.6 。DF1-1 底辟构造高压顶面深度大约在 2 300 m,强超压带包括了黄流下部、梅山、三亚组,并被莺歌海组页岩封盖,超压顶面的深度朝着构造轴部逐渐变浅。这种深部强超压是底辟形成、流体压裂和运移的关键动力,随着 5 Ma 以来莺歌海盆地转换伸展应力场的共同作用,导致深部塑性泥岩孔隙压力最终达到或超过地层静压力,从而刺穿顶部封闭层,产生 5 排近南北向雁行排列的底辟构造(图 1)。

底辟断裂大多呈近南北向分布,可能与莺歌海盆地右旋转换—伸展有关。区域右旋走滑—伸展最有利于近南北向张剪断裂的形成,如 DF1-1 构造 2 条主断层在南北向的延伸达 6~8 km。在高分辨率地震反射剖面上,穿层底辟断裂面近于垂直,倾角为

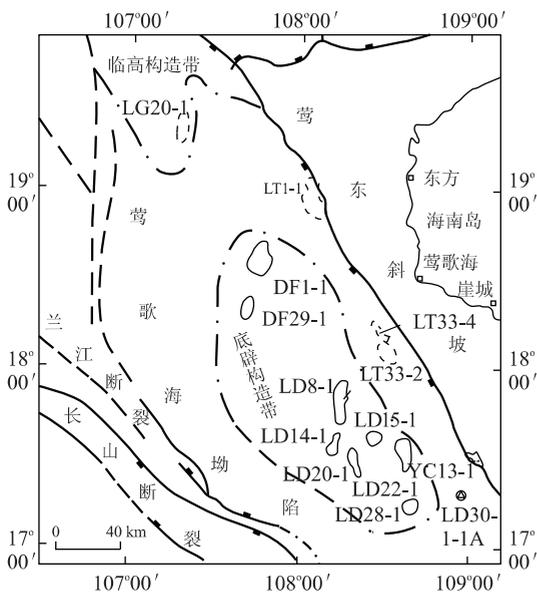


图 1 莺歌海盆地构造

Fig. 1 Regional tectonic map of Yinggehai basin

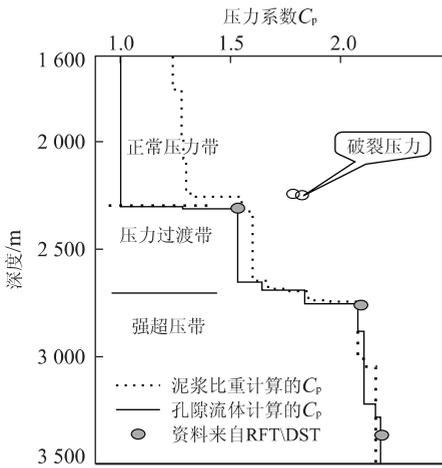


图 2 莺歌海盆地底辟带 DF1-1-11 井压力剖面

Fig. 2 Pressure section of DF1-1-11 well in diapir belt of Yinggehai basin

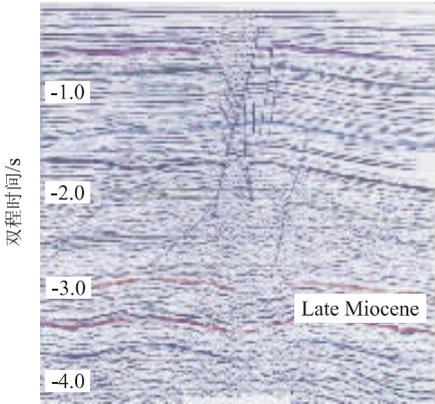


图 3 LD8-1 底辟构造地震剖面,显示底辟断裂和“底辟模糊带”

Fig. 3 Seismological section of diapir structure LD8-1

70°~90°,其延伸方向近南北向,断裂两侧断距极小,延伸长度可达几百 m,甚至 2 000 m(图 3)。图 3 上可见侧向反射连续性差的地震模糊带即“气烟囱”,这是由于裂缝和沉积物充气引起的多次反射屏蔽所致。地震资料速度分析结果表明,底辟构造顶部低速带的速度比翼部低得多,低速带(气烟囱)地震反射的连续性可使用正确速度分析和叠前深度偏移技术来改进。在高压流体沿着底辟断裂向上突破过程中,一方面,也将先存断裂激活;另一方面,沿底辟断裂面旁侧派生一些张性断裂面,其倾角相对较缓,一般 50°~80°,水平延伸方向变化较大,平面上有的呈花瓣状或放射状(如 LD15-1),剖面上与穿层底辟断裂面构成“Y”型。此外,由于热流体活动突破海底逸散后可形成塌陷断裂。在高分辨率地震剖面和

道积分剖面上,显示在底辟体上方具有密集的穿层裂隙。

这些底辟断裂为深成天然气向上运移提供了良好的通道(解习农等,1999)。流体主要是气和水趋于向较高的构造位置运移,最终大部分在异常压力带顶部附近的储层中聚集,这是流体动平衡点。随着天然气的向上排放,运移通道逐渐封闭并恢复压力直到下一次突破,这种封闭和破裂的循环过程在莺歌海盆地可能会持续几千年至数十万年。因此,大多数天然气聚集在底辟构造高压顶层附近的圈闭储层之中,并记录了多幕成藏的烙印,如上所述,LD22-1 气田至少存在 2 期来自深部的天然气充注。但在封盖层比较弱和过充注的地区,异常压力顶部储层和盖层可能破裂,导致部分流体(包括天然气)散溢或冒出海底,故在底辟上方有时还可见到气苗和麻坑。

底辟演化过程中热流体活动的痕迹为天然气向上运移提供了又一证据。如 DF1-1 底辟气田由于热流体上侵的影响导致 1 井 I/S 混层中的蒙脱石在 1 500 m 深度锐减,然而在远离底辟的 LD30-1-1A 井蒙脱石向伊利石快速转化的深度则深达 3 000 m(董伟良和黄保家,1999)。尽管人们无法知道底辟断层是否提供“泵激”作用,但热流体沿着区域断层向上输送再由底辟断裂运移到正常压力带储层并引起了底辟浅部储层“热点”异常是可以被识别的。因此,当在断层附近发现这样的“异点”时,便指示了油气运移的路径(Leach, 1993)。

3 底辟造成藏流体幕式充注特征

3.1 幕式充注证据

关于莺歌海盆地 DF1-1 气田的充注史,前人已作过深入研究(董伟良和黄保家,1999; Hao *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2002),认为有 3~4 期天然气充注储层。最近,笔者通过对 LD22-1 气田等储层天然气的非均质性研究发现,气田存在多源混合一幕式充注成藏的现象。依据天然气组成和碳同位素资料,初步将天然气的注入过程分为 3 期(图 4);第 1 期指来自储层附近未成熟泥岩的生物气最初充注该构造最顶部第四系储层,深度介于 300~600 m。其特点是:天然气以 CH₄ 为主(87.09%~88.14%),重烃含量很低,干燥系数高达 0.98~0.99,且 δ¹³C₁ 明显偏轻(-63.14×10⁻³~-55.72×10⁻³),属典型的生物气。第 2 期指来自深部中新统梅

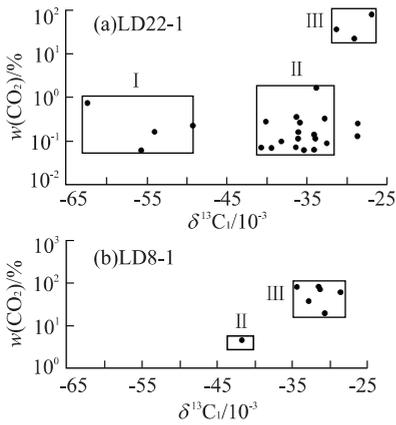


图 4 LD22-1 和 LD8-1 气田天然气幕式成藏地化特征

Fig. 4 Geochemical features of episodic accumulation in the gas fields LD22-1 and LD8-1

山—三亚组主力烃源岩偏气有机质在气窗范围生成的热成熟气继生物气之后充注储层,通常产于生物气层之下,气层埋深为 500~1 600 m。这类天然气的特点是甲烷占优势, N_2 含量相对较高(13.3%~23.7%),但有机 CO_2 含量很低,小于 1%。甲烷碳同位素值 ($\delta^{13}C_1$) 变化比较宽: $-40.15 \times 10^{-3} \sim -28.6 \times 10^{-3}$,成熟度高,显然,这些天然气从深部运移而来。就沉积有机质热解成因天然气来说,其 $\delta^{13}C_1$ 值主要与成气母质类型和热演化程度有关。莺歌海盆地主力气源中新统梅山—三亚组主要为 II 2—III,其热解生成的天然气 $\delta^{13}C_1$ 受母质类型影响很小,而主要与源岩的成熟度有关,即随着有机质热演化程度增加, $\delta^{13}C_1$ 变重。因此,从这一期富烃气的甲烷碳同位素值分布推测可能存在几个充注亚幕,但严格分开是比较困难的。第 3 期指晚期伴随着底辟强烈活动,富 CO_2 天然气大规模注入紧靠底辟断裂储层。天然气 CO_2 含量高达 21.46%~80.4%,烃气为 14.3%~61%,甲烷同位素 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-29.08\% \sim -26.92\%$,较第 2 期富烃气的 $\delta^{13}C_1$ 值重,表明其源岩成熟度很高,注入储层时间晚。二氧化碳的碳同位素重达 $-5.74 \times 10^{-3} \sim -0.56 \times 10^{-3}$, $^3He/^4He$ 通常在 $0.20 \times 10^{-7} \sim 0.98 \times 10^{-7}$,为典型壳源无机 CO_2 。

应该指出的是,由于各个底辟活动刺穿强度的差异和时间不尽相同,导致深部运移至浅层聚集的天然气组成存在较大的变化。例如在 LD22-1 气田第四系储层至今仍保存着丰富的早期注入的生物气,但 LD8-1 底辟构造已刺穿海底并造成塌陷,使早期的生物气散失殆尽,晚期聚集的富 CO_2 气伴生

的烃甲烷碳同位素值偏轻。由此说明 LD8-1 底辟比 LD22-1 底辟动刺浅层时间早并且强度大,富 CO_2 气充注也相对较晚。这与地质研究和地球物理特征相吻合。

3.2 天然气运移成藏时间的确定

本文采用近几年来发展起来的生烃动力学及碳同位素动力学研究方法推定气田成藏时间。以 DF1-1 气田为例,首先,通过模拟梅山组烃源岩干酪根热解生烃实验,获得气体产率和碳同位素数据,建立该气田下部梅山组烃源岩逼近地下条件的生烃动力学和碳同位素动力学模型;然后,基于 DF1-1 气田天然气幕式累积成藏方式(董伟良和黄保家,1999; Hao *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2002),将甲烷碳同位素数据点在图 5 的累积曲线上,初步确定为天然气充注成藏时间大约在 1.2~0.1 Ma,其中,富 CO_2 天然气的注入可能是 0.3 Ma 以后发生的事件。

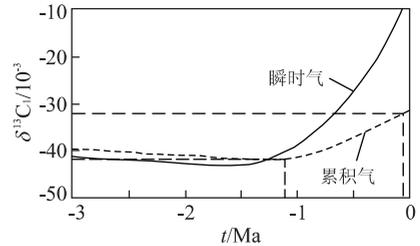


图 5 利用梅山组烃源岩(底部)天然气生成的碳同位素动力学模型确定 DF1-1 气田成藏时间

Fig. 5 Determining generating hydrocarbon time of DF1-1 with the dynamics model of carbon isotope from the bottom source rocks of Meishan Formation

4 多源混合—幕式成藏模式的构建

根据上面所述的底辟带浅层气田天然气组成非均一性的剖析、底辟断裂通道和天然气运移中超压的作用,提出莺歌海盆地底辟带天然气多源混合—幕式成藏模式(图 6)。

首先,当底辟浅层构造形成初期(被深部底辟尚未刺穿或拱裂之前),原地生成的生物气便开始注入构造的局部储层。即便此时,深部梅山组—三亚烃源岩已部分进入生烃门限(2 800 m),生成大量的烃气和比较高的 N_2 及少量有机 CO_2 。然而,由于莺歌海盆地底辟带的超压顶深度在 1 480~2 320 m 之间(张启明等,1996),故早期生成的大多数天然气由于缺乏有效的运移通道很难排出运移到上方正常或相

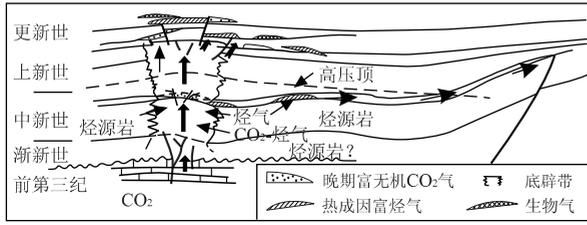


图 6 莺歌海盆地天然气运移成藏模式

Fig. 6 Natural gas migration and accumulation model in Yinggehai basin

对低压带的储层中,含气流体仍不能大量排出而滞留在裂缝或地层中,并由此进一步加剧了高压的发展和底辟的演化。正是由于底辟上裂刺穿作用与高压流体压裂为高压系统内的流体垂向上运移提供了重要通道和驱动力。天然气的这种排出和运移快速而短暂,随着高压流体释放,压力迅速下降,断裂重新封闭直到下一个底辟脉冲激活。因此,浅层气田早期阶段聚集的天然气以烃气为主,同时还有中等丰度的 N_2 和少量有机 CO_2 ,这些烃气的甲烷同位素相对偏轻,反映其成熟度比富无机 CO_2 天然气伴生的烃气低一些。

晚期,随着盆地的进一步沉降,这套含钙源岩便开始进入气窗晚期阶段并达到钙质泥岩热分解的温度,因此产生大量无机 CO_2 。与此同时,盆地在 5 Ma 以来特别是第四纪发生的转换伸展诱发区域断层的复活,为前第三系基底碳酸盐岩高温分解产生的 CO_2 向上运移提供了通道;同时,下第三系及基底先成断裂复活也可能提供一些幔源 CO_2 。因此,气田晚期大规模注入的天然气通常 CO_2 含量高、烃气含量低且甲烷同位素重,指示比较高的成熟度。由于底辟作用导致了莺歌海盆地深部流体向上运移,故 CO_2 在底辟断层相连的局部储层富集(王振峰等, 2004)。

由此可见,莺歌海盆地底辟浅层气藏存在多种成因来源天然气,生物气、热成因气和无机 CO_2 气共存;不同储层单元中烃类气、 N_2 及 CO_2 的含量明显变化是源岩渐进式熟化生气及流体运聚阶段性的综合结果。

研究表明,影响二次油气运移的 2 个最普通的作用力是浮力和压力差。在浮力引起运移的情况下,运移大多数局限于常规储层或有充分压裂的低渗透储层岩石。对于高压带和低渗透地层,油气通常不能被浮力运移,在这些地层中,具有经济意义的油气运移量必定是由压力差驱动。就莺歌海盆地底辟带而

言,来自超压带烃源区的天然气向浅层正常压力带的运移主要受异常超压驱动。运移的相态常常以水溶相或混相为主,源岩排烃并不一定受“烃饱和度”的约束。运移的通道常常是裂缝和底辟断裂;油气在圈闭中成藏要有“出溶”或“分异”过程(龚再升等, 1999)。当进入正常压力或略高于正常压力带砂层后,天然气以水溶相和游离相或混相运移为主,与浮力相比,剩余高压仍是主要驱动力,运移过程中,随着压力下降,天然气不断脱溶,逐渐变为以游离相为主,这时浮力起主要作用,并通过渗流和扩散方式聚集成藏。

诚然,底辟活动及先存断裂的激活驱使深部天然气向浅层运移并聚集于正常压力带储层的同时,亦导致了早期聚集或运移过程中天然气部分散失。在底辟构造的地震剖面上不但可见到由于深部油气垂向运移造成的“模糊带”,而且在这些底辟构造上方的浅层电火花剖面上,还可见到海底麻坑或直通海底的“气烟囱”。这些特征指示了天然气随着流体压裂突破向浅层运移、散失和聚集的过程。由于莺歌海盆地中央坳陷带气源丰富,存在供大于散的物质基础,同时,高压系统的流体“幕式”集中运移,排烃效率高,因此,天然气依然能在底辟浅层圈闭聚集成藏。

5 讨论与结论

根据莺歌海盆地天然气运聚特征分析,可以看出底辟带浅层天然气成藏条件优越,是深部高压烃源灶天然气运聚的有利场所。大规模的底辟活动,造就了大规模纵向运移条件,因此,本区最具备成藏动力条件。对该区带的勘探已经具有一套完善的技术,成功率比较高。另外,底辟带浅层的钻井周期短,一旦有发现,就可与 LD22-1、LD15-1 或 DF1-1 气田等联合开发,具有显著的经济效益,因此,仍然是当前勘探的主攻领域。

底辟中深层、底辟缘区和临高区应作为近期重要探索领域。其中,中深层是天然气向上运移的必经之路且近烃源,DF1-1-11 井的钻探说明该带具有早期形成游离气的成藏条件,关键是发育好且规模比较大的储层,给以水溶相注入的天然气造就一个良好的离析空间和输导系统;底辟缘区是指向莺东斜坡、莺西斜坡和临高隆起的过渡带,这一区域较靠近烃源灶,具有比较好的储盖组合,目的层埋藏也

不深,处于压力过渡带,又是底辟活动相对静止期深部天然气侧向运移的有利指向,若形成气藏则具有一定规模;临高带具有背斜型圈闭和大型的岩性圈闭,LG20-1-1 井的钻探成果显示该带良好的勘探前景,与底辟带可能不属于同一个含油气系统。

通过上述分析,得出本文的结论如下:(1)莺歌海盆地底辟带浅层气田具有多源混合(生物气、热成因气和无机 CO₂ 气)和幕式充注成藏的特点,天然气成藏时间比较晚,大约在距今 1.2~0.1 Ma。(2)深部烃源区的天然气向浅层运移主要受异常超压驱动,底辟断裂和流体压裂起主通道作用,底辟带浅层天然气的成藏是一个运移、聚集、散失的动平衡过程,由于“幕式”集中运移具有高的排烃效率使注入浅层圈闭的天然气供大于散,利于成藏。(3)底辟带浅层具有优越的运聚成藏条件,仍然是当前勘探的主战场,底辟缘区、中深层和临高带应为近期重点探索的领域。

References

Dong, W. L., Huang, B. J., 1999. Heterogeneity of natural gases and the episodic charging process: A case study for Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai basin. *Petroleum Exploration and Development*, 26(15): 15-18 (in Chinese with English abstract).

Gong, Z. S., Chen, H. H., Sun, Y. C., 1999. Coupling features between the auto-vibration of fluid pressure and the episodic migration of gases in the Yinggehai basin. *Science in China (Series D)*, 29(1): 68-74 (in Chinese with English abstract).

Hao, F., Li, S. T., Gong, Z. S., 2000. Thermal regime, inter-reservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang gas field, Yinggehai basin, South China Sea: Evidence for episodic fluid injections in overpressured basin. *AAPG Bulletin*, 84: 607-626.

Huang, B. J., Xiao, X. M., Dong, W. L., 2002. Migration and accumulation of natural gases and their relationship to the formation of diapir structures in the Dongfang 1-1 gas field, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 861-872.

Hunt, J., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74: 1-12.

Leach, W. G., 1993. Fluid migration, HC concentration in South Louisiana Tertiary sands. *Oil & Gas Journal*, 90: 71-74.

Shi, J. X., 1987. Organic fluid inclusions and their relationship with oil-gas migration. *Science in China (Series B)*, 3: 318-325 (in Chinese).

Wang, Z. F., He, J. X., Xie, X. N., 2004. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 203-210 (in Chinese with English abstract).

Xiao, X. M., Liu, Z. F., Liu, D. H., et al., 2002. Fluid inclusions of reservoirs: Application to studying of natural gas reservoir filling times. *Chinese Science Bulletin*, 47(12): 957-960 (in Chinese).

Xie, X. N., Li, S. T., Hu, X. Y., et al., 1999. Migration system of heat fluid and its formation mechanism in the diapir belt of the Yinggehai basin. *Science in China (Series D)*, 29: 247-256 (in Chinese).

Zhang, Q. M., Liu, F. N., Yang, J. H., 1996. Overpressure system and oil/gas accumulation. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 10(2): 65-75 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

董伟良,黄保家,1999. 莺歌海东方 1-1 气田天然气组成的非均质性和幕式充注研究. 石油勘探与开发, 26(2): 15-18.

龚再升,陈红汉,孙永传,1999. 莺歌海盆地流体压力自振荡与天然气幕式成藏的耦合特征. 中国科学(D 辑), 29(1): 68-74.

施继锡,1987. 有包裹体及其与油气运移的关系. 中国科学(B 辑), 3: 318-325.

王振峰,何家雄,解习农,2004. 莺歌海盆地泥—流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用. 地球科学——中国地质大学学报, 29(2): 203-210.

肖贤明,刘祖发,刘德汉,等,2002. 应用储层流体包裹体研究天然气气藏的成藏时间. 科学通报, 47(12): 957-960.

解习农,李思田,胡祥云,等,1999. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制. 中国科学(D 辑), 29: 247-256.

张启明,刘福宁,杨计海,1996. 莺歌海盆地超压体系与油气聚集. 中国海上油气, 10(2): 65-75.