

莺歌海盆地水溶相天然气析出成藏特征

刘江涛^{1,2}, 黄志龙², 朱建成³, 童传新³

(1. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国海洋石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524047)

摘要:通过莺歌海盆地的烃源岩、温压特征及底辟活动规律研究,对水溶气出溶成藏的条件进行分析,并根据天然气的地球化学和同位素特征,研究水溶气出溶成藏的证据。结果表明:莺歌海盆地烃源岩气源供给充足,中浅层和深层天然气溶解度差异大,底辟构造周期性开启提供了流体向上运移的通道,具备水溶气运移出溶成藏的理想条件;在中浅层 1.5~2.0 km 深度范围内,天然气干燥系数较大、异构烷烃与正构烷烃含量比值大、甲烷碳同位素组成偏重、芳烃富集,表明水溶气出溶成藏是中浅层气藏形成的重要机制之一;在底辟活动期间,深层溶解大量天然气的水沿着底辟形成的断裂运移至中浅层,由于温压大幅度降低,天然气从水中释放,进入到底辟上部或附近的圈闭中形成气藏。

关键词:水溶气; 出溶; 莺歌海盆地; 地球化学特征; 成藏

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A

Characteristics of water-soluble gas exsolution and accumulation in Yinggehai Basin

LIU Jiang-tao^{1,2}, HUANG Zhi-long², ZHU Jian-cheng³, TONG Chuan-xin³

(1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. CNOOC Zhanjiang Branch Company, Zhanjiang 524047, China)

Abstract:Based on geochemical parameters and carbon isotope values of the natural gas, the exsolution and accumulation conditions of the water-soluble gas reservoir in Yinggehai Basin were analyzed through systematic analyses of the characteristics of the source rock, the temperature-pressure relationship and the diapiric action. The results show that Yinggehai Basin has perfect conditions for water-soluble gas accumulation, including a sufficient gas source, a very wide range of solubility between the mid-shallow layer and the deep layer, and a fluid pathway by periodic diapiric activities. In the mid-shallow layer (depth ranging from 1.5 km to 2.0 km), the natural gas reservoir is characterized by high dry coefficients, large content ratios of isoalkane and normal paraffin hydrocarbons, heavier methane carbon isotope $\delta^{13}\text{C}$, and abundant aromatic hydrocarbons. The exsolution and accumulation of water-soluble gas is one of the crucial mechanisms of gas reservoir formation in the mid-shallow layer in Yinggehai Basin. During diapiric activities, water dissolves a great deal of gas which migrates to the mid-shallow layer through faults formed by diapirs. The gas is released from water due to temperature and pressure drop, and enters into the traps in or near diapir belts to form gas reservoir.

Key words:water-soluble gas; exsolution; Yinggehai Basin; geochemical characteristics; accumulation

在地下含油气系统内,地下水始终伴随着油气生成、运移和聚集的全过程,天然气广泛而大量地溶解于水^[1]。美国、意大利、匈牙利、伊朗和日本等国

家都发现了水溶气藏,有些国家已经投入了开发^[1-3]。中国也有丰富的水溶气资源,包括四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地等^[2,4-6]。自 20 世纪

60年代开始,国外就有学者对水溶相天然气进行了研究^[7-8];中国对水溶气运移成藏研究起步较晚,自90年代初期开始,相继有学者研究了水溶相天然气的成藏特征、资源潜力和天然气在水中的溶解度特征^[4,9-11]。进入21世纪以来,广大学者的研究主要集中于水溶相天然气运聚成藏前后地球化学参数的变化特征和水溶气成藏机制方面^[5,6,12-14]。莺歌海盆地是典型的高温高压盆地,水溶气资源丰富,但过去鲜有学者对该盆地的水溶气成藏条件和成藏特征进行研究。因此,笔者根据莺歌海盆地地质特征,对水溶气出溶成藏的有利地质条件进行研究,并从天

然气地球化学和同位素特征方面分析水溶气出溶成藏的证据,最后剖析水溶气出溶成藏过程。

1 地质概况

莺歌海盆地是在印支板块和华南板块的古缝合带上发育起来的受岩石圈拉伸和红河断裂走滑双重机制控制的伸展-转型型新生代盆地,位于中国南海北部海南省与越南之间,盆地形态呈NNW走向的长条形(图1)。以①号断裂带为界,莺歌海盆地可以划分为临高凸起带、莺东斜坡带和中央凹陷带3个构造单元。本文研究区为中央凹陷带。

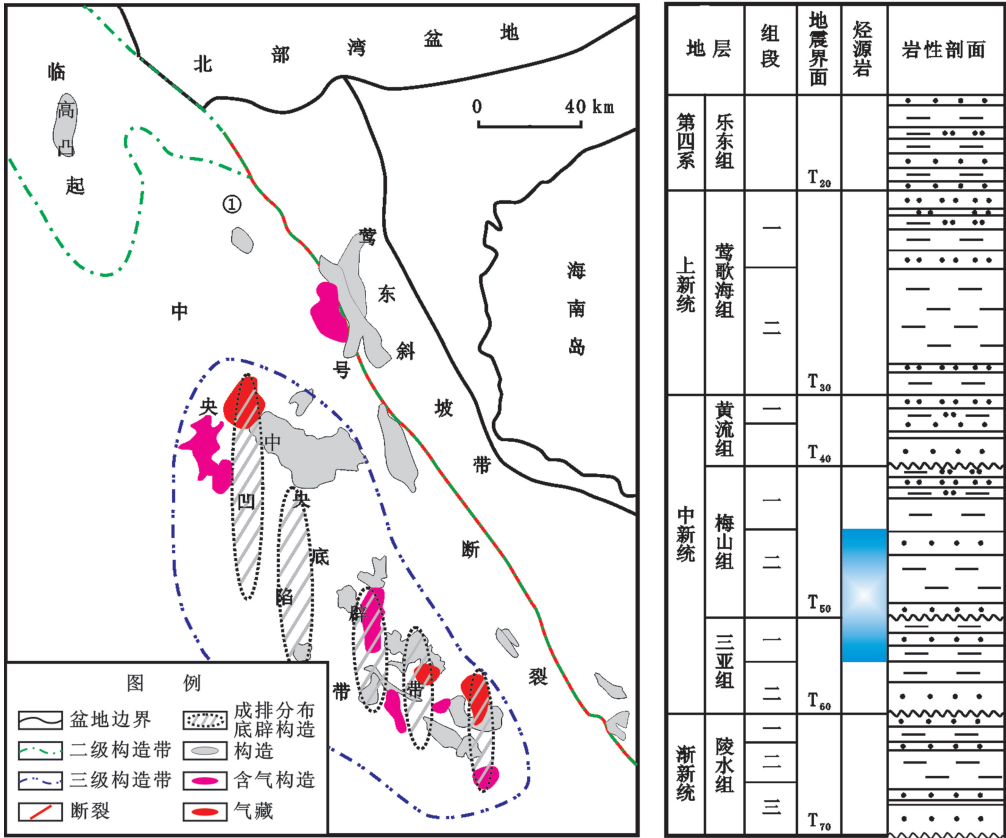


图1 莺歌海盆地构造单元和沉积地层简图

Fig.1 Basic framework of tectonic units and formation diagram in Yinggehai Basin

莺歌海盆地在新近纪为拗陷阶段,地层沉降速率较高、厚度巨大、沉积物颗粒细。快速沉积带来的压实不均衡,加之高温条件下的水热增压和生烃(特别是生气)作用,使莺歌海盆地发育了强烈的超压。在盆地中央凹陷带,超压最强烈,为了便于阐述,将超压顶界面之上的过渡带和正常压力带称为中浅层,超压顶界面之下称为深层,但其深度界面并不完全相同,约为1.6~2.0 km,深层压力系数为1.6~2.4。由于盆地基底之下具有充足的热源供给,盆地具有较高的大地热流和地温梯度,平均地温

梯度为3.5~4.25℃/100 m。

中央凹陷带发育呈雁行排列的五排泥-流体底辟构造。多期活动的泥-流体底辟在形成圈闭的同时,也形成了沟通深部天然气垂向运聚的主要输导通道。目前在中央底辟带中浅层发现的D1-1、L22-1等多个气田和含气构造均与底辟有关。

2 水溶相天然气析出成藏的地质条件

水溶气成藏的实质是在温度和压力改变的情况下,溶解于水的天然气脱溶成为游离气而成藏。首

先,必须有充足的气源和较高的溶解度保证水中的溶解气量;其次,有引起水溶气温度和压力改变的地质事件。因此,本文主要从气源供给、天然气溶解度和引起温压条件改变的地质事件3个方面来分析莺歌海盆地水溶气析出成藏的地质条件。

2.1 烃源岩气源供给充足

莺歌海盆地新生界发育两套烃源岩:中新统海相泥岩(三亚组、梅山组)和上中新统—上新统海相泥岩(黄流组、莺歌海组)。其中,三亚组和梅山组是盆地内最主要的烃源岩,主要分布于盆地中央凹陷带,是一套半封闭浅海及半深海砂泥岩地层,地层最大厚度可达5.0 km,泥岩类含量大于70%。目前发现的浅层天然气都来自于该套源岩。研究区高地温梯度加速了有机质向烃类的生成转化。盆地中央底辟带的有机质成熟门限深度一般为2.3~2.7 km,局部甚至小于2.0 km,梅山组和三亚组烃源岩埋深一般大于3.0 km,因此烃源岩多已进入成熟门限,深部有些已

进入高成熟门限。在多层资源评价中,盆地天然气资源量均大于 $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有巨大的资源基础,并且这些资源主要分布在中央凹陷带^①。

2.2 中浅层和深层天然气溶解度差异大

天然气在水中的溶解度主要受温度、压力和地层水矿化度的影响,其中压力对溶解度影响最明显,其次是温度,地层水矿化度影响较小^[10-11]。莺歌海盆地是典型的高温超压盆地,从中央凹陷带实测压力系数和温度数据可以看出(图2),深层普遍发育高压,压力系数甚至可以达到2.4,并具有较高的温度梯度,中浅层和深层的温压差异巨大。根据物理模拟实验的结果,在深层天然气溶解度为 $8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{m}^3$,而中浅层约为 $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{m}^3$,天然气在深层的溶解度比在中浅层高出两倍以上^[15]。因此,在气源充足的前提下,水溶相天然气资源量巨大,为天然气水相运移和出溶成藏奠定了坚实的物质基础。

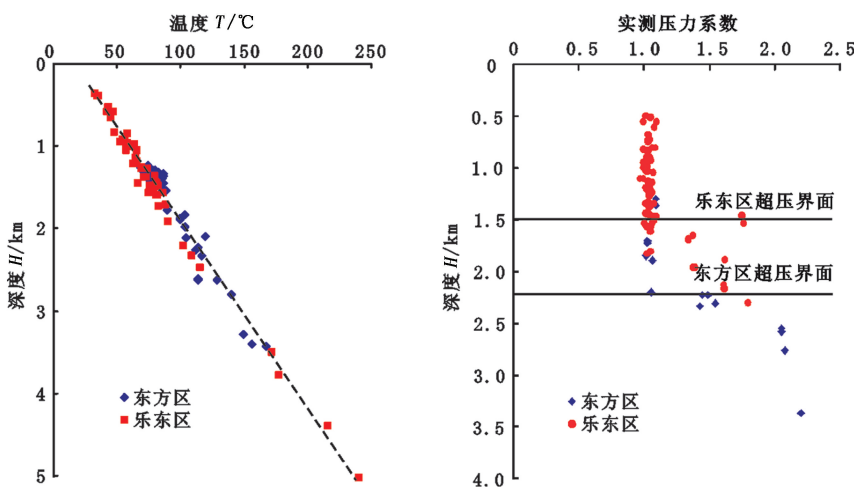


图2 莺歌海盆地中央凹陷带实测温度和压力系数随深度的变化

Fig.2 Changes of measured temperature and pressure factor with depth in central depression belt of Yinggehai Basin

2.3 引起水溶相天然气出溶成藏的地质事件

水溶相天然气在运移的过程中,常常由于地质条件的改变(如沿断层垂向运移或基底抬升),使温度和压力发生明显的降低,从而导致地层水中溶解的天然气过饱和并释放,形成游离气。莺歌海盆地新近纪处于塑性引张和热沉降阶段,断裂不发育,本应缺乏沟通深浅层的垂向通道,但由于众多底辟的存在,为深部流体的垂向释放提供了通道。前人对莺歌海盆地底辟活动期次做了大量研究,目前普遍认为可以明显识别的底辟活动主要有3期^[16-21](图

3)。第一期发生于中新统梅山组沉积末期,流体包裹体均一温度为 $120 \sim 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$;第二期发生于上新统莺歌海组二段沉积时期,流体包裹体的均一温度为 $160 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$;第三期发生于第四系乐东组沉积时期,流体包裹体的温度高于 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据研究区中新统三亚组和梅山组烃源岩的生排烃历史^①,在第二期底辟活动时期,中新统三亚组烃源岩进入生烃高峰,并一直延续至第三期底辟活动开始前,而第三期底辟活动时期,梅山组烃源岩进入排烃高峰,底辟活动时期与生排烃历史匹配良好,有利于水溶相天

① 陈希仁,冼仲猷. 莺歌海盆地的基本石油地质条件[R]. 中海石油湛江分公司勘探开发研究院,1999.

然气的聚集和排出。另外,在底辟活动期间,深浅地层巨大的压力差为水溶相天然气的运移提供了强劲的动力;由于底辟活动,在中浅层底辟构造或附近形成大量低幅度圈闭。

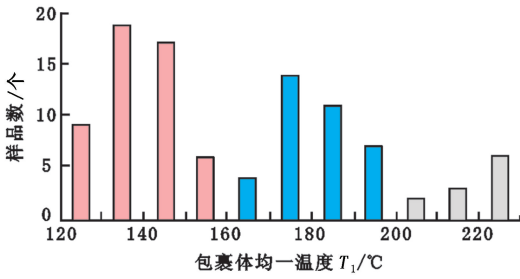


图 3 莺歌海盆地某气田流体包裹体均一温度
Fig. 3 Homogenization temperature of some gas field in Yinggehai Basin

3 水溶相天然气出溶成藏的地球化学证据

水溶气出溶成藏理论指出了水溶气出溶成藏的可能性,但需要甄别现存的气藏是否为水溶气出溶成藏。由于天然气各组分在水中的溶解度不同,天然气溶解于水及经过初次运移后组分特征会发生变化,这就为判别水溶气出溶成藏提供了依据。刘朝

露^[12]通过物理模拟实验技术研究表明水溶作用导致天然气“甲烷化”、芳烃中苯和甲苯含量显著增加;张晓宝^[13]、秦胜飞^[5-6]、李伟^[14]等分别研究了中国吐哈盆地台北凹陷、和田河气藏和四川盆地上三叠统须家河组气藏的天然气出溶成藏特征,提出了异构烷烃与正构烷烃之比、芳香烃、碳同位素等一系列判别水溶气的地球化学指标。

3.1 天然气组分特征

天然气各组分在水中的溶解度不同,溶解度相对高的气体组分会在出溶后富集^[12]。随着碳数增加,正构烷烃分子在地层水中的溶解度逐渐降低,因此水溶气从水中脱溶后,干燥系数明显增大,即“甲烷化”^[12]。同理,由于轻烃在水中的溶解度次序为芳烃>环烷烃>链烷烃,异构烷烃溶解度大于正构烷烃,因此水溶气析出的游离气中,异构烷烃、芳烃、苯、甲苯的含量都会明显增加^[5-6,12,14]。通过对研究区煤型热成因气样品组分随深度变化特征进行统计发现,随着深度变浅,乐东区 and 东方区的干燥系数均有逐渐增大的趋势(图 4),但二者斜率不同,这与乐东区 and 东方区超压发育特征不同有关。乐东区超压顶界面浅,在超压发育的地层,相同深度情况下乐东区的压力系数要大于东方区,因此乐东区天然气“甲

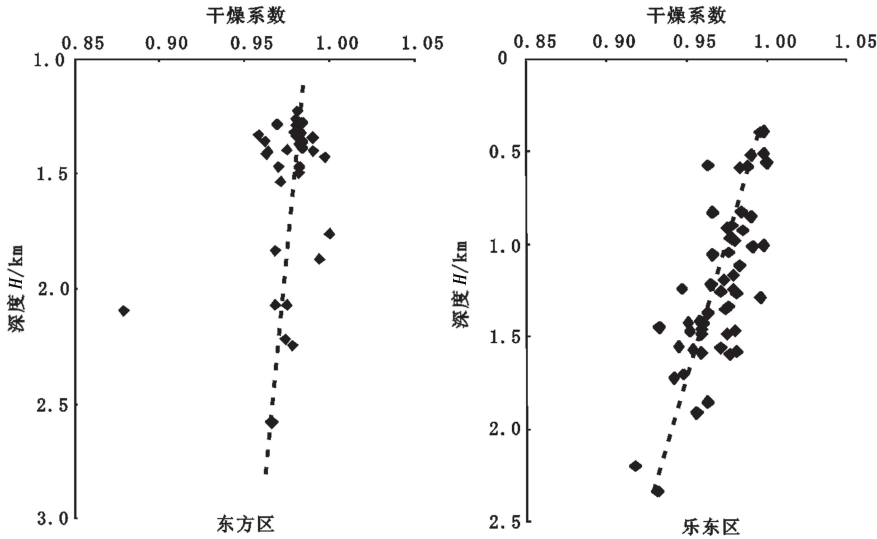


图 4 干燥系数随深度的变化
Fig. 4 Changes of gas drying coefficient with depth

烷化”特征更加明显。 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 、 iC_6/nC_6 和 iC_7/nC_7 随深度变浅都具有较明显的变化,约在 1.0 km 深度出现异常增大(图 5),并且随着碳数的增加,正构烷烃和异构烷烃之比的最大值所对应的深度逐渐变浅;芳烃、苯以及甲苯的含量与异构烷烃和正构烷烃含量的比值变化规律一致,只是含量异常

增大的深度稍有不同,约在 1.5 km 出现明显的增大(图 6)。不同碳数异构烷烃最富集的深度不同,芳香烃和异构烷烃最富集的深度不同,这种现象与天然气各组分的溶解度差异有关,与水溶气出溶导致的“甲烷化”、异构烷烃、芳烃富集同理,溶解度大的气体,随着温度和压力降低,先于溶解度低的气体析出。

芳烃的溶解度大于烷烃,随着碳数增加,异构烷烃溶解度逐渐降低,因此芳烃最富集的深度最大,而异构

烷烃最富集的深度随着碳数增加而逐渐变小。

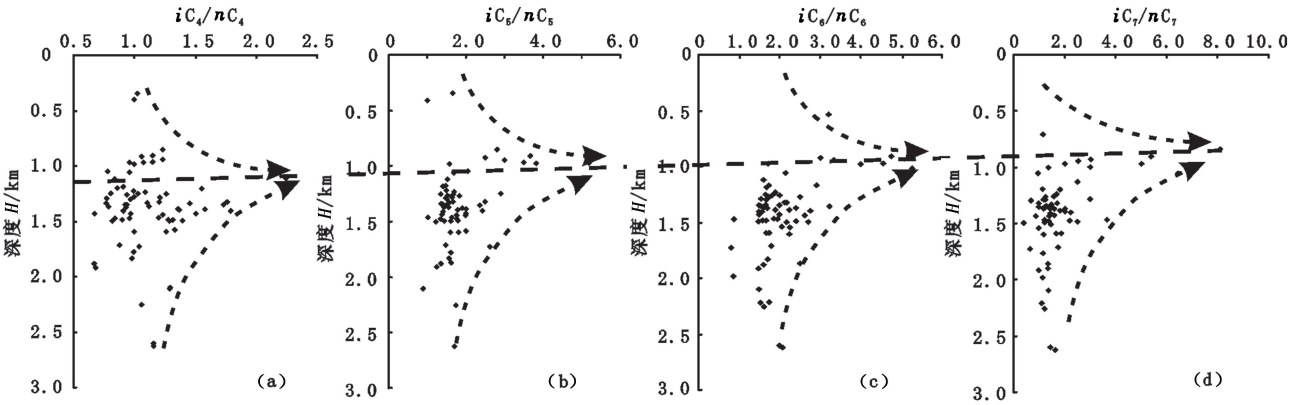


图 5 异构烷烃与正构烷烃含量之比随深度的变化

Fig. 5 Changes of isoparaffin and normal paraffin hydrocarbons ratios with depth

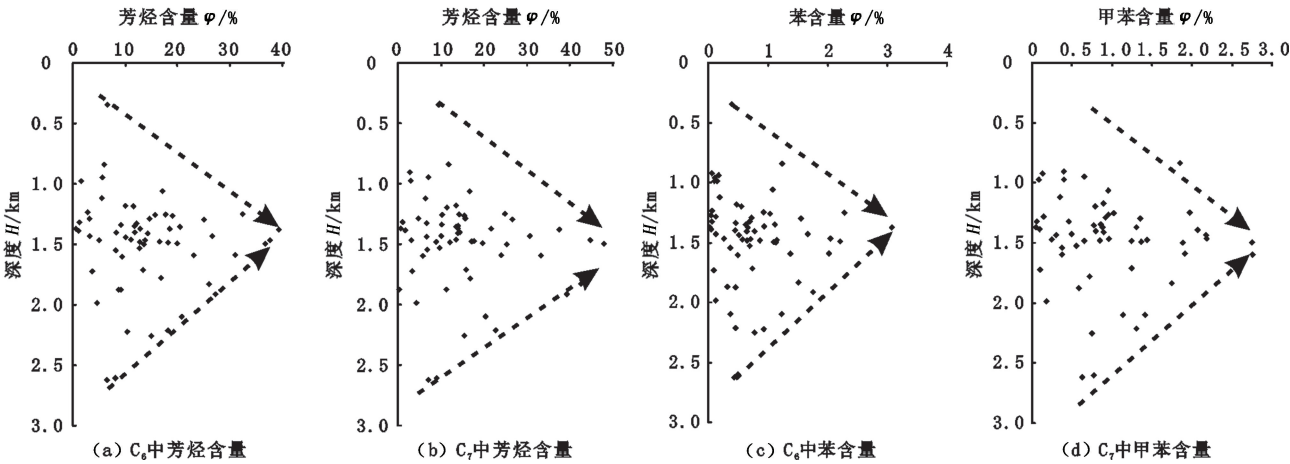


图 6 芳烃、苯、甲苯含量随深度的变化

Fig. 6 Changes of aromatics, benzene, toluene content with depth

3.2 碳同位素特征

水溶作用可以使碳同位素发生分馏作用。由于 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 极性大于 $\delta^{12}\text{CH}_4$, 导致 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 溶解度大于 $\delta^{12}\text{CH}_4$, 因此水溶气中会富集 $\delta^{13}\text{CH}_4$, 温度、压力降低后, 释放出的天然气的碳同位素也会偏重^[13, 22-23]。莺歌海盆地中央底辟带东方区和乐东区的天然气同位素表现出明显的分段特征, 大约以 1.5 km 为界, 由深及浅, 下部地层碳同位素逐渐变重, 约在 1.5 km 出现明显的增加; 而上部地层碳同位素迅速变轻 (图 7)。

天然气从深部向浅层的运移主要通过流体的快速混相涌流完成, 碳同位素分馏效应主要由于水溶气析出引起, 因此在大于 1.5 km 的地层, 由深及浅随着水溶气的析出碳同位素逐渐变重; 而在莺歌海盆地中央底辟带 0.5 ~ 1.5 km 的浅层生成了大量的生物气, 生物气的碳同位素极轻^[23-25], 因此在深度

小于 1.5 km 的地层天然气碳同位素由于生物气的混入而明显变轻。

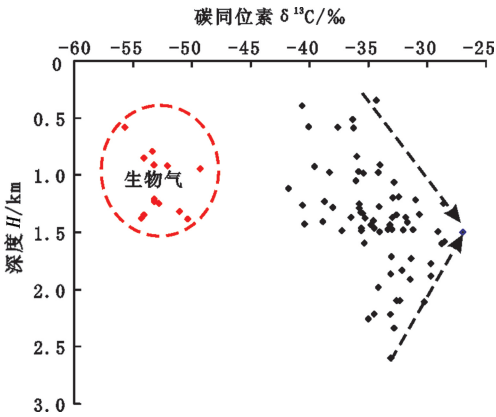


图 7 甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 随深度的变化

Fig. 7 Changes of methane carbon isotope $\delta^{13}\text{C}$ with depth

4 水溶气出溶成藏过程

晚中新世以来,盆地的沉降速度明显加快,充填了巨厚的欠压实泥岩,由于断裂发育少,排液不畅,形成了超压,随着盆地边界断层的右旋走滑作用,地层沿主应力方向发生破裂,加之深部地幔热活动引起的热动力作用,流体和部分塑性泥岩通过破裂向上释放,形成底辟。随着压力释放,盆地再次进入聚集流体的过程,当深部的地层压力超过地层的破裂压力时,形成再一次的底辟释放流体的过程。油气成藏的基本控制要素包括储盖层、输导通道、圈闭等成藏要素与排烃期的时间匹配关系^[26],研究区烃源岩排烃、底辟活动、盖层发育以及圈闭形成等各成藏要素的时空匹配关系良好,有利于研究区天然气的形成、运移、聚集和保存(图 8)。其成藏过程为:中新世晚期,第一期底辟活动开始,圈闭开始形成,此时烃源岩未达排烃高峰期,水中溶解的天然气量有限,难以出溶;上新世早期,第二期底辟活动开始,中央凹陷底辟带主要圈闭定型,此时三亚组烃源岩处于排气高峰期,紧邻两套烃源岩的盖层(或烃源岩本身)早已形成封闭能力,因此在本次底辟活动期间大量天然气以水溶气的形式向上运移,到中浅层后,随着温度和压力的骤降,水溶气过饱和,释放出大量的游离气,形成气藏;第四纪的第三期底辟活动中,圈闭继续得到加强或改造,三亚组和梅山组烃源岩均达到排烃高峰期,大量水溶相天然气再次向上运移、出溶、成藏。

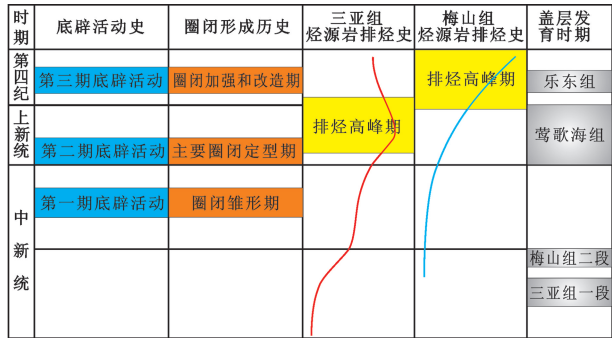


图 8 成藏要素时空匹配关系

Fig. 8 Matching condition of space-time of accumulation elements

5 结 论

(1)莺歌海盆地烃源岩气源供给充足;中浅层和深层天然气溶解度差异大;底辟构造周期性开启提供了流体向上运移的通道,具备理想的水溶气出

溶成藏条件。
(2)在中央凹陷带中浅层 1.0~1.5 km,天然气干燥系数较大、异构烷烃与正构烷烃含量比值大、甲烷碳同位素组成偏重、芳烃富集,是水溶气脱溶聚集成藏的主要层段。

(3)水溶气出溶成藏过程为:中下中新统三亚组和梅山组烃源岩生成的天然气在深部地层高温、高压的封闭条件下大量溶解于水,随着底辟的周期性开启,在深层异常压力驱使下,溶解大量天然气的水沿着底辟形成的断裂从深部地层运移至中浅层,由于压力和温度大幅度降低,天然气从水中释放,并进入到底辟上部或附近的断块、背斜和岩性圈闭中形成气藏。

参考文献:

[1] 张子枢. 水溶气浅论[J]. 天然气地球科学,1995,31(6):29-35.
ZHANG Zi-shu. Primary discussion on water soluble-gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1995,6(5):29-34.

[2] BATINO R, The ostwald coefficient of gas solubility[J]. Fluid Phase Equilibria, 1984,15(3):231-240.

[3] 武晓春,庞雄奇,于兴河,等. 水溶气资源富集的主控因素及其评价方法探讨[J]. 天然气地球科学,2003,14(5):416-421.
WU Xiao-chun, PANG Xiong-qi, YU Xing-he, et al. Discussion on main control factors and evaluation methods in the concentration of water soluble gas[J]. Natural Gas Geosciences, 2013,14(5):416-421.

[4] 王雪吾,刘济民. 我国水溶性天然气资源分析与预测[J]. 天然气工业,1994;14(4):18-21.
WANG Xue-wu, LIU Ji-min. Analysing and predicting the resources of water-soluble gas in China[J]. Natural Gas Industry, 1994,14(4):18-21.

[5] 秦胜飞,赵靖舟,李梅,等. 水溶天然气运移地球化学示踪:以塔里木盆地和田河气田为例[J]. 地学前缘,2006,13(5):524-532.
QIN Sheng-fei, ZHAO Jing-zhou, LI Mei, et al. A case study:geochemical tracing indices on the migration of water-soluble gasesin Hetianhe gas field, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers,2006,13(5):524-532.

[6] 秦胜飞,邹才能,戴金星,等. 塔里木盆地和田河气田水溶气成藏过程[J]. 石油勘探与开发,2006,33(3):282-288.
QIN Sheng-fei, ZOU Cai-neng, DAI Jin-xing, et al. Water-soluble gas accumulation process of Hetianhegas field in Tarim Basin[J]. Petroleum Explorationand Development, 2006,33(3):282-288.

- [7] MCAULIFFE C. Solubility in water of C_1 - C_9 hydrocarbons[J]. *Nature*, 1963, 200: 1092-1093.
- [8] PRICE L C. Aqueous solubility of petroleum as applied to its origin and primary migration[J]. *AAPG Bull*, 1976, 60(2): 213-243.
- [9] 孙永祥. 初探地下水溶解气及其对气藏的影响[J]. *石油勘探与开发*, 1992, 19(2): 41-47.
SUN Yong-xiang. Discussion on the dissolved gas in groundwater and its effect on the formation of gas reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1992, 19(2): 41-47.
- [10] 郝石生, 张振英. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义[J]. *石油学报*, 1993, 14(2): 12-22.
HAO Shi-sheng, ZHANG Zhen-ying. The characteristic of the solubility of natural gas in formation waters and its geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1993, 14(2): 12-22.
- [11] 范泓澈, 黄志龙, 袁剑, 等. 高温高压条件下甲烷和二氧化碳溶解度试验[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 6-12.
FAN Hong-che, HANG Zhi-long, YUAN Jian, et al. Experiment solubility of CH_4 and CO_2 at high temperature and high pressure[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(2): 6-12.
- [12] 刘朝露, 李剑, 方家虎, 等. 水溶气运移成藏物理模拟实验技术[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(1): 32-36.
LIU Zhao-lu, LI Jian, FANG Jia-hu, et al. Experimental investigation on physical simulation of gas dissolved in water during migration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(1): 32-36.
- [13] 张晓宝, 徐永昌, 刘文汇, 等. 吐哈盆地水溶气组分与同位素特征形成机理及意义探讨[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 705-709.
ZHANG Xiao-bao, XU Yong-chang, LIU Wen-hui, et al. A discussion of formation mechanism and its significance of characteristics of chemical composition and isotope of water-dissolved gas in Turpan-Hami Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 705-709.
- [14] 李伟, 秦胜飞, 胡国艺, 等. 水溶气脱溶成藏: 四川盆地须家河组天然气大面积成藏的重要机理之一[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 662-670.
LI Wei, QIN Sheng-fei, HU Guo-yi, et al. Accumulation of water-soluble gas by degasification: one of important mechanisms of large gas accumulations in the Xujiahe formation, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 662-670.
- [15] 刘江涛. 莺歌海盆地中深层高温高压环境天然气成藏条件研究[D]. 北京: 中国石油大学资源与信息学院, 2010: 21-41.
LIU Jiang-tao. Accumulation conditions of gas reservoir of medium-deep layer with high temperature and pressure in Yinggehai Basin[D]. Beijing: Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, 2010: 21-41.
- [16] 郝芳, 李思田, 龚再生, 等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. *中国科学: D 辑*, 2001, 31(6): 471-476.
HAO Fang, LI Si-tian, GONG Zai-sheng, et al. Yingge Sea Basin diapiric development of mechanisms and episodic fluid injection[J]. *Science in China (ser D)*, 2001, 31(6): 471-476.
- [17] 解习农, 刘晓峰, 胡祥云. 超压盆地中泥岩的流体压裂与幕式排烃作用[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(4): 59-63.
XIE Xi-nong, LIU Xiao-feng, HU Xiang-yun. Hydrofracturing and associated episodic hydrocarbon-expulsion of mudstones in overpressured basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1998, 17(4): 59-63.
- [18] 龚再升, 陈红汉, 孙永传. 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[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(1): 68-74.
GONG Zai-sheng, CHEN Hong-hai, SUN Yong-chuan. Coupling features between the auto-vibration of fluid pressure and the episodic migration of gases in the Yinggehai Basin[J]. *Science in China (ser D)*, 1999, 29(1): 68-74.
- [19] 黄春菊, 陈开远, 李思田. 莺歌海盆地泥底辟活动期次分析[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 44-46.
HUANG Chun-ju, CHEN Kai-yuan, LI Si-tian. Periodicities of diapiric rise in the Yinggehai Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 44-46.
- [20] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 264-265.
- [21] 孙玉梅, 郭迺熾. 莺歌海盆地 CO_2 气成因探讨[J]. *中国海上油气: 地质*, 1998, 12(3): 160-164.
SUN Yu-mei, GUO Nai-yan. Genesis of CO_2 in Yinggehai Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1998, 12(3): 160-164.
- [22] 戴金星. 碳氢同位素组成研究在油气运移上的意义[J]. *石油学报*, 1988, 9(4): 27-32.
DAI Jin-xing. A study of time composition of C and H isotopes and their significance in the migration of oil and gas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1988, 9(4): 27-32.
- [23] 徐永昌. 天然气成因理论及其应用[M]. 北京: 科学

出版社,1994.

[24] 戴金星,陈英. 中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志[J]. 中国科学:B 辑,1993,23(3):303-310.

DAI Jin-xing, Chen-ying. The characteristics of carbon isotopes and the sign to discrimination of alkyl combination in biogas, China[J]. Science in China (ser D), 1993,23(3):303-310.

[25] 徐永昌,沈平,刘文汇,等. 一种新的天然气成因类型-生物热催化过渡带气[J]. 中国科学:B 辑,1990,20(9):975-980.

XU Yong-chang, SHEN Ping, LIU Wen-hui, et al. A kind of new origin of the natural gas: bio-thermocatalytic transitional zone gas [J]. Science in China (ser B), 1990,20(9):975-980.

[26] 辛也,王伟锋,吴孔友,等. 准噶尔盆地西北缘乌-夏断裂带油气成藏组合特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):32-38.

XIN Ye, WANG Wei-feng, WU Kong-you, et al. Oil-gas plays characteristics analysis of Wu-xia fault belt, the northwestern margin in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(2):32-38.

(编辑 徐会永)