

刘平,童传新,曾小明,等. 莺歌海盆地乐东斜坡乐东区中深层地层水特征及其与油气关系[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8):44-50.

莺歌海盆地乐东斜坡乐东区中深层地层水特征及其与油气关系

刘平,童传新,曾小明,李伟,宋鹏
(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘要:油气田伴生地层水地球化学特征蕴含多种油气地质及水文地质信息,可以为油气成藏的圈闭条件评价及展布特征分析等提供重要的信息和佐证。由于油气田地层水与油气藏伴生且受成烃成藏环境及后期保存条件等多种地质因素的影响,故其地质地球化学特征与油气运聚成藏过程及后期圈闭保存条件等密切相关。莺歌海盆地乐东区中深层高温超压大气田伴生地层水总矿化度异常高(60 000~80 000 mg/L),pH 值为 6~8,属于弱酸—弱碱性的盐水和卤水,其地层水类型属 CaCl₂ 水型,为一种非常特殊的高矿化度气田伴生地层水。通过莺歌海盆地乐东区中深层气田伴生地层水 pH 值、常规离子组成、主要元素及其组合特点等统计分析,获取了这种高温超压大气田伴生地层水的大量地质地球化学信息,并深入分析探讨了其与天然气运聚成藏及其分布的成因联系。

关键词:莺歌海盆地;乐东区中深层;大气田伴生地层水;高矿化度;天然气成藏

中图分类号:P744.4;TE121.1 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.08006

0 引言

莺歌海盆地中央泥底辟带中深层高温超压天然气勘探领域,近年来陆续在西北部东方区东方 13-1/13-2 中深层上中新统黄流组获得天然气勘探的重大突破,勘探发现了超千亿立方米的高温超压大气田^[1]。近期在其东北部乐东区凹陷斜坡处中深层,通过艰苦的探索亦取得了天然气勘探里程碑式的重大突破,勘探发现了乐东 10 区大气田。该气田具有超高温(>180 °C)、强超压(压力

系数 2.19)、埋藏深(4 000 m)等特点,属于一个分布在凹陷斜坡带水道砂的高温超压大气田,勘探潜力巨大。勘探实践表明,乐东 10-1 区天然气成藏地质条件独特,其主力成藏水道内部存在多期次砂体叠置,气田气水关系复杂。因此,该区含气水道砂体的期次划分及沉积充填特点、天然气运聚成藏模式、优质储层分布规律等关键油气地质问题,尚须开展进一步的深入分析研究。本文拟通过乐东 10 区所获中深层上中新统黄流组二段高温超压气田伴生地层水信息,分析探讨其与天然气运聚成藏之成因联系,以期为该区的天然气勘探及天然气成藏地质评价等有所裨益。

1 区域地质背景

南海西北部莺歌海盆地属于快速沉降沉积且

收稿日期:2019-04-25

基金项目:“十三五”国家科技重大专项课题“莺歌海盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)”(2016ZX05024-005)

作者简介:刘平(1978—),博士,工程师,主要从事海洋油气勘探开发研究工作。E-mail:liuping7@cnooc.com.cn

充填巨厚非常年轻的新生代盆地,主要由莺西斜坡、中央坳陷、莺东斜坡 3 个一级构造单元组成^[2-5]。受泥岩欠压实强超压和晚期区域右旋走滑剪切构造应力场的共同作用,盆地形成了一系列泥-流体底辟构造并构成了一个展布规模达 20 000 km² 的中央泥底辟过渡带^[6],近年来天然气勘探发现的主要为与底辟构造有关的浅层和中深层气田和含气构造。乐东 10 区气田位于莺歌海盆地中央坳陷乐东区东北部,且靠近莺东斜坡带南段(图 1),区域上处于大型鼻状构造背景下,气田储层主要为受海南隆起物源控制的上中新统黄流组重力流水道—海底扇储层,上覆上新统莺二段大套厚层泥岩,总体上构成了泥包砂储盖组合类型,属于一个构造背景下形成的岩性圈闭。该区深部的中中新统梅山组、下中新统三亚组发育高成熟烃源岩,生烃潜力大烃源条件较好^[1],同时乐东 10 区气田位于凹陷斜坡带南段鼻状凸起变形区,处在相对高部位构造脊低势区,其附近由于盆地走滑伸展形成的深部断裂、微裂隙发育,为该区天然气运聚成藏提供了优势运聚通道,故形成了地质储量超千亿立方米的高温超压大气田——乐东 10 大气田。

2 气田伴生地层水地球化学特征

2.1 地层水离子组成特征

本区气田伴生地层水离子组成中阳离子以 Na⁺、K⁺ 等离子为主,其次为 Ca²⁺ 及 Mg²⁺。阴离子主要为 HCO₃⁻、Cl⁻ 和 SO₄²⁻。从表 1 中可知:Cl⁻ 及 HCO₃⁻ 含量分别为 1 523 ~ 35 221 mg/L 和 1 922 ~ 22 643 mg/L,其占阴离子总量的

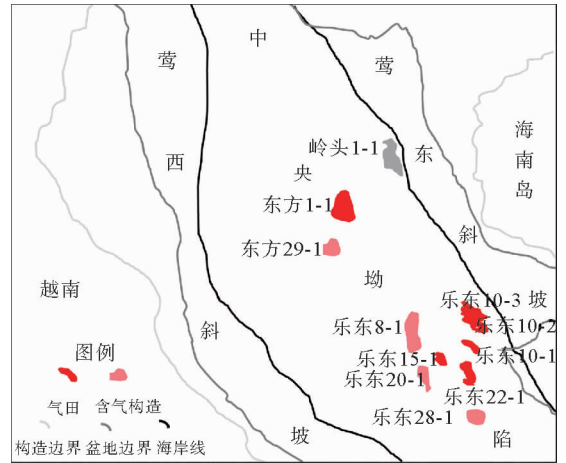


图 1 莺歌海盆地乐东 10 区位置图

Fig. 1 The location of Ledong-10 district in Yinggehai Basin

26.31%~75.41%和 19.42%~58.07%。其中,阴离子组成中 Cl⁻ 含量平均为 11 506.86 mg/L,而 HCO₃⁻ 含量相对较低平均为 8 325.80 mg/L;阳离子组成中 K⁺ + Na⁺ 含量为 3 274 ~ 33 333 mg/L,为阳离子的主体,占到阳离子总量的 97.37%~99.98%。Na⁺ + K⁺ 含量平均可达 14 905.93 mg/L,而 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 含量较低。

乐东 10 区气田伴生地层水中不同离子含量变化幅度较大。其中,阳离子组成中以 Na⁺ 居绝对优势,含量达到 97% 以上,阴离子组成中以 Cl⁻ 和 HCO₃⁻ 为主,且 Cl⁻ 含量高于 HCO₃⁻ 含量,这是由于在晚中新世黄流组沉积时期整体为浅海环境,有利于钠盐富集。HCO₃⁻ 成因除与元素的地球化学性质有关外,亦可能与该区地层富含二氧化碳流体,进而改变了地层系统之水环境中离子富集条件,故而有利于地层水中富集 HCO₃⁻。

表 1 乐东 10 区气田伴生地层水主要离子含量分布特征

Table 1 Distribution of main ions in the stratigraphic water from Ledong-10 district

层位(范围/平均值)	深度范围/m	地层水离子含量/(mg/L)					
		K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
黄流组一段	3 711~3 711	11 529~28 000	11~52	1~17	1 644~8 424	3330~6451	12 700~26 332
		17 166.67	29.67	11	3 995	4 485.67	17 508.33
黄流组二段	3 856.4~4 215.48	3 274~28 980	4~119	1~8	110~12 720	1 922~16 100	3 344~35 221
		15 020.05	51.24	4.05	5 039.43	6 981.86	13 107.43
梅山组一段	4 062.1~4 158.3	4 821~33 333	1~117	1~38	170~13354	8 587~22 643	1 523~19 337
		17 070	52.3	16	5 538.1	13 629.7	8 794.3
梅山组二段	4 052.8~4 151	3 274~26 407	28~260	2~57	257~15 916	1 922~17 415	3 435~17 723
		9 769.33	115.5	21.17	4 587.33	6 109.83	7 425.17

2.2 地层水矿化度

地层水矿化度是指水中含有的各种矿物元素总含量,其大小受沉积环境、埋藏深度等条件的影响。本区地层水的总矿化度偏高,一般均在 18 000 mg/L 以上,峰值为 40 000~90 000 mg/L (图 2 左),属于高矿化度的盐水及卤水范畴,具有咸水的特点。矿化度与盐类离子之间有着一定的相关关系。研究区地层水矿化度与 Cl^- 和 Na^+ 之间的线性关系非常明显,而 SO_4^{2-} 离子次之, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相关性最小,表明地层水中的 Cl^- 在一定

程度上控制着总离子量。

根据本区 40 个水样资料,剔除受到泥浆、海水以及浅层淡水注入影响到水样,结合区域 DST、测压取样得到的地层水水分析资料,研究地层水矿化度随深度的变化规律。乐东 10 区地层水矿化度在垂向上的变化规律:随地层埋深加大地层水矿化度变小。从区内已有的水分析资料可以看出,上中新统黄流组二段地层水总体上表现为,矿化度随深度增加反而逐渐减少(图 2 右)。明显可以看出该段分割成不同的水动力系统。

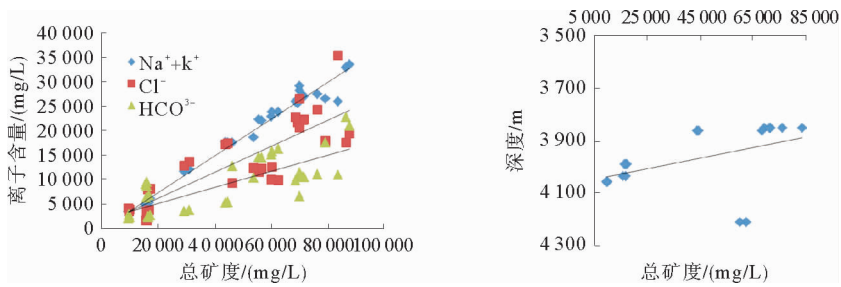


图 2 乐东 10 区气田伴生地层水矿化度与离子含量、深度关系图

Fig. 2 Relationship of salinity, ion content and depth of stratigraphic water from Ledong-10 district

2.3 pH 值

从乐东 10 区气田已有的水分析资料来看,该区中深层地层水的 pH 值多数为 7~10,平均为 8.4,显示碱—强碱性。乐东 10 区各层段储层岩性、储集空间存在显著差异,黄流组储层以粒间孔、粒间溶孔为主,连通性较好,储层孔隙度主要分布在 5%~10%。通过区内岩心扫描电镜资料发现粒间碳酸岩胶结物基见溶蚀残余物,储层形成过埋藏溶蚀增孔作用,表明区内储层的粒间孔隙是胶结物或基质溶蚀后形成。由此可以推测乐东 10 区地层水之前存在酸性环境,地层水交换较为频繁,地层水基本没有保留了原始水的特征。

2.4 气田伴生地层水水型

根据油气田形成的不同地质环境,一般将油气田伴生地层水划分为 4 种类型^[7]:低矿化度的地表水 Na_2SO_4 型、深层高矿化度 CaCl_2 型水、两者过渡类型为 MgCl_2 型水以及浅层至深层矿化度增高的 NaHCO_3 型水。很多专家及李贤庆

等^[8]均发现水型与油气藏保存具有相关性及成因联系。强调指出: CaCl_2 型水代表水交替完全停止的封闭环境水型,有利于油气藏保存,代表其油气藏圈闭保存条件好; MgCl_2 水型代表海水沉积环境,亦对油气藏保存极为有利; Na_2SO_4 水型是属于与地表水沟通性较好的水型,表明其圈闭的封闭差,对油气藏保存不利; NaHCO_3 型水有一定的交换能力,代表其封闭性较差,可能对油气藏会产生一定的破坏作用。乐东 10 区气田地层水的总矿化度偏高,一般多在 50 000 mg/L 以上,峰值为 40 000~90 000 mg/L,且属于 CaCl_2 型,表明其气藏圈闭的封闭条件非常好。

3 气田伴生地层水化学特征与天然气成藏

利用地层水有机组分的差异可直接找油,比如油层伴生地层水中的气态烃与液态烃,尤其是油层伴生地层水中苯系化合物以及酚含量高,且甲苯/苯一般>1,即是很多油田地层水的重要

标志性特征。其次油田地层水中常含数量不等的环烷酸、脂肪酸和氨基酸等。同时,根据油气田地层水水化学资料还可以判断油气运移、聚集和保持条件,比如高矿化度,氯化钙型地层水即反映地层水与渗透水交替缓慢或者停止;地层水的脱硫系数($rSO_4^{2-} \times 100/rCl^-$)、钠氯系数(rNa^+/rCl^-)等则可以反映地层水流动的环境和油气运移方向。

3.1 地层水特征系数与油气关系

3.1.1 矿化度与油气关系

不少专家学者^[10-16]研究矿化度与油气成藏关系发现总矿化度对地层水的化学性质起着主导作用,反映不同的地质环境和油气保存条件。史建南等^[11]通过研究大民屯凹陷地层水矿化度与油气聚集的关系发现:高矿化度本身与油气藏的形成、分布有着密切关系,矿化度升高的方向一般是油气的聚集方向。

研究区乐东 10 区地层水总矿化度平均为 40 472.76 mg/L,其中黄流组一段地层水总矿化度平均为 43 490.33 mg/L,黄流组二段地层水总矿化度平均为 40 968.76 mg/L;而梅山组一段地层水总矿化度平均为 45 633.4 mg/L,梅山组二段地层水总矿化度平均为 28 627 mg/L。黄流组一段目前取到的样品主要为氯化钙以及氯化镁型,意味着本段主要为封闭性成藏环境,有利于有气的聚集。黄流组二段平面上主体是碳酸氢钙型,在乐东 10-2 井区同时存在氯化钙、碳酸氢钙以及硫酸钠 3 种水型,说明黄流组二段成藏环境复杂,成藏水动力系统多变,导致目前各自独立的成藏体系,在面上体现为一个独立的气藏,目前的勘探实践也证实了这一点。梅山组一段二段地层水水型均以碳酸氢钠为主另外对于碳酸氢钠水型而言,高矿化度指示的方向更利于油气的聚集,但同时也意味着气藏组分中二氧化碳的含量增高的风险。

3.1.2 变质系数与油气关系

变质系数亦称钠氯系数,是表征地层封闭性好坏,油田水变质程度,地层水活动性的重要水文地球化学参数。由于 Cl^- 化学性质稳定, Na^+ 而变化较明显,在地层水形成过程中,一般会沿着地层年代有降低的趋势,可以间接反映油气的保存

环境。其值越大,表明地下水变质强度大,受渗入水影响越明显,对烃类的保存越不利;反之则对烃类的保存有利。标准海水 rNa^+/rCl^- 值为 0.85,经强烈蒸发浓缩的海相(或陆相)沉积水变质系数一般 <0.85 ,盐岩层溶滤水一般近于 1 或 >1 ,与外界有交换的地下水的 rNa^+/rCl^- 值一般 >1 。

本区地层水钠氯系数为 0.74~3.41,黄流组一段变质系数 >0.89 ,黄流组二段变质系数为 0.74~2.43,梅山组总体变质程度较高(图 3)。总体上变质强度大,受渗入水影响明显,为盐岩层溶滤而成。垂上而言,黄流组二段受渗入水影响少有利于烃类的保存。结合目前的油气勘探测试结果,黄流组一段气藏分布在变质系数为 1 以下的地区,黄流组二段气藏主要分布在变质系数 <1.5 的地区,而梅山组一段气藏跟变质系数为 1.8~1.9,但梅山组二段则分布在平面上变质系数较高的位置。

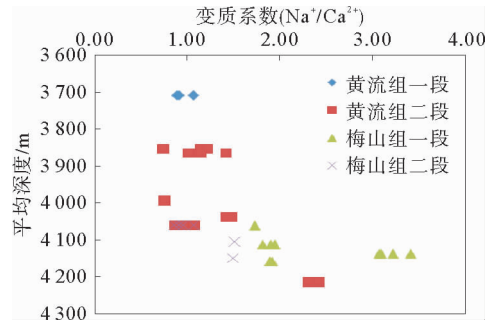


图 3 乐东 10 区气田平均深度-气田伴生地层水变质系数分布散点图

Fig. 3 Scatter plot of average depth vs metamorphic coefficient distribution of stratigraphic water in the Ledong-10 district

3.1.3 脱硫系数与天然气运聚关系

脱硫系数($100rSO_4^{2-}/rCl^-$)是反映地下水氧化还原环境的重要指标。据国内外的统计,脱硫系数越小,地层越封闭。该参数 <1 时,地层是完全封闭的;为 1~3 时,地层是较封闭的;当 $>3\sim5$ 时,说明地层有一定的开启性或是开启的^[9]。脱硫作用进行得是否彻底主要与水的化学类型、膏岩层的影响、地层开启程度、地层温度有关。

乐东 10 区脱硫系数变化范围较大,为 1.38

~89.80, 全都>1(图4)。反映本区地下为非还原环境, 主要原因主要有: 一是与膏岩层的影响有关, 因为膏岩层有大量的硫酸岩补给, 使脱硫作用很难进行彻底; 二是与地层温度有关, 因为细菌的活动而引起的脱硫作用是在60~70℃下进行的, 本区温度高达200℃左右, 不利于脱硫作用的进行。但有意思的是, 除了乐东10-15井区, 从上到下, 脱硫系数与含气分布有很好的正相关性, 意味着脱硫系数越大烃类气更容易成藏。

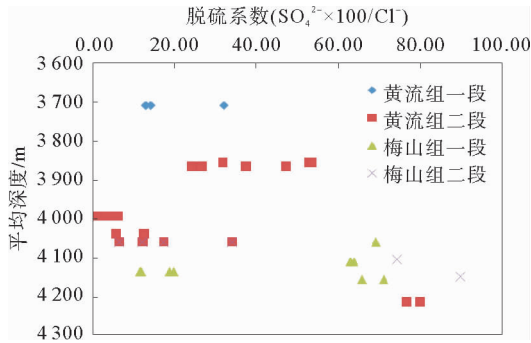


图4 乐东10区平均深度-脱硫系数分布散点图

Fig. 4 Scatter plot of average depth vs desulfurization coefficient of stratigraphic water in Ledong-10 district

3.1.4 碳酸盐平衡系数与油气关系

碳酸盐平衡系数是一个指示地层封闭程度与油气方向的指标, 其值越小含油气越有利^[9]。但对于本区高温高压含二氧化碳的气藏却又是另外一种情况, 因为有 $\text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HCO}_3^-$ 。相当于高温高压下, 气藏中 CO_2 与地层水中存在饱和、过饱和溶解, 生成碳酸刚好完全电离并和碱性物质反应生成碳酸氢根。所以本区碳酸盐平衡系数在含有二氧化碳的气藏的地层中普遍较高(图5)。

3.2 气田伴生地层水分布与油气运聚关系

基于对乐东10区已钻井沉积储层、盖层气柱和运移裂隙等成藏条件的综合研究, 总结了该区轴向水道—海底扇高温超高压成藏新模式: “微断裂垂向沟源, 晚期高压驱动运移, 大型构造脊和砂体汇聚, 轴向重力流水道—海底扇储集, 高质量泥岩盖层封盖成藏”(图6)。其具体成藏过程是:

中新世黄流组早期受盆地左行走滑作用影

响, 乐东区凹陷斜坡带发育大量NW向隐伏走滑断裂, 在断裂带附近的古海底形成破碎薄弱带。坡折带之上的梅山组三角洲提供充足物源, 经再次搬运在坡折带之下形成重力流沉积。重力流在古地形控制下沿盆地轴向流动, 侵蚀古海底破碎薄弱带, 形成北西向水道切谷, 在地势相对宽缓区域沉积水动力减弱, 碎屑物质大规模卸载, 发育多期轴向水道—海底扇沉积。黄流组晚期主要沉积浅海相砂泥互层, 泥质含量高、压实作用强, 与莺歌海组半深海巨厚层欠压实泥岩组合形成了高质区域盖层, 具有良好的封闭能力, 同时受盆地左行走滑作用影响, 乐东10区附近挤压褶皱开始形成大型鼻状构造脊, 伴生了多期近东西向张性T断裂, 初步形成了大型构造脊、走滑断裂与T断裂微断裂组合构成的油气运移通道体系。第四纪乐东组时期, 乐东10区构造脊抬升完毕, 形成现今宽缓的鼻状构造形态, 使其上的中新世水道—海底扇砂岩位于构造高点, 乐东区中深层岩性圈闭基本定型。随着乐东区中深层的埋深、温度和压力增大, 梅山、三亚组烃源岩进入高熟阶段大量生烃, 在晚期超压驱动下发生大规模排烃运移; 同时走滑断裂伴生的微裂隙在晚期生烃增压作用下活化开启, 沟通三亚、梅山组烃源和黄流组圈闭, 成为立体的高效的油气运移通道体系。油气在晚期深部地层超压驱动下, 通过走滑断裂、微裂隙先垂向运移至各期水道—海底扇储集体, 受到高质量泥岩盖层的封盖作用后, 沿构造脊和砂体经过一定距离的横向运移到岩性圈闭高部位富集成藏。

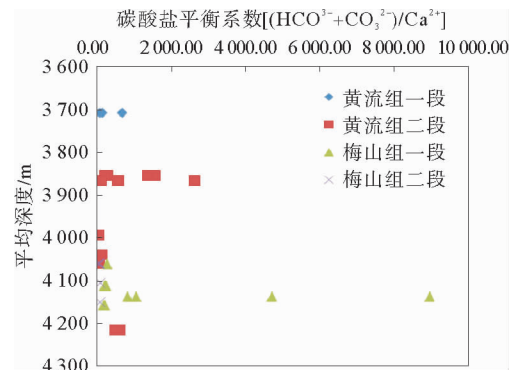


图5 乐东10区平均深度-碳酸盐平衡系数分布散点图

Fig. 5 Scatter plot of average depth vs carbonate equilibrium coefficient of stratigraphic water in Ledong-10 district

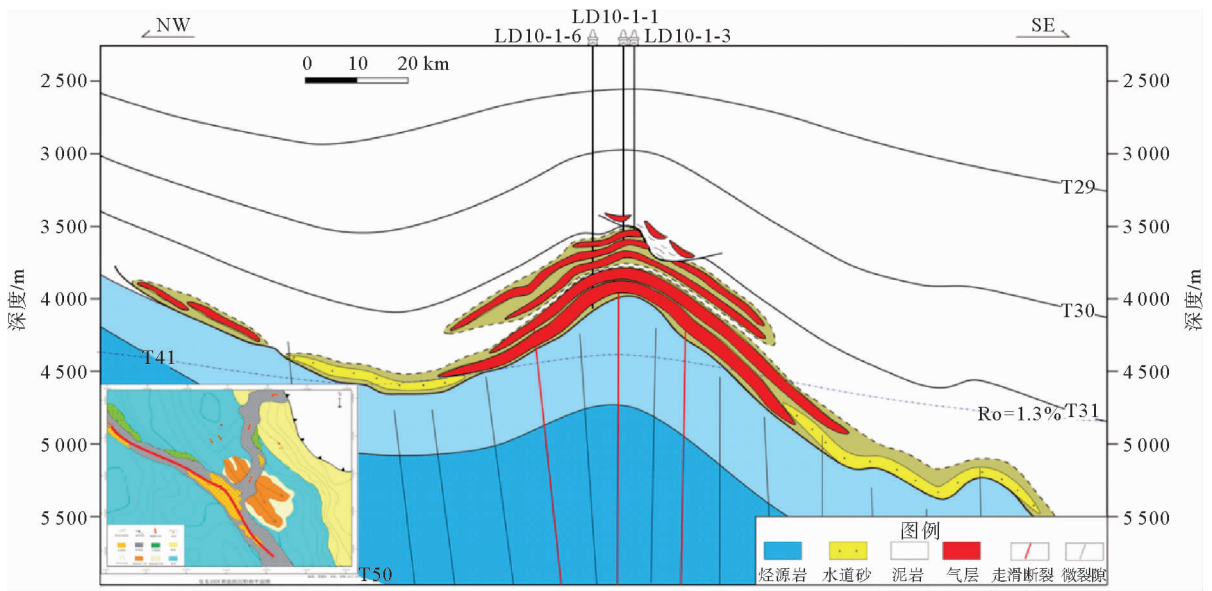


图6 乐东10区气田水道砂体沉积特征及天然气成藏模式

Fig. 6 Hydrocarbon accumulation model of a fluvial sandbody in Ledong-10 district

4 结论

莺歌海盆地莺东斜坡乐东10区地层水普遍显示高矿化度特征,一般矿化度升高的方向为油气聚集的方向,同时以 CaCl_2 型和高矿化度的 NaHCO_3 型为主的地层水亦指示油气聚集的有利条件。变质系数结果结合油气勘探测试结果,从黄流组一段,二段、梅山组一段至梅山组二段气藏分布区域变质系数升高,黄流组一段更利于烃类的保存。同时,脱硫系数测试结果显示该区地下为非还原环境,但该区脱硫系数与含气分布之间存在很好的相关性,与一般情况下脱硫系数小利于油气保存的性质有所不同,且乐东10区高温高压含二氧化碳的气藏的碳酸岩平衡系数的普遍高值,说明了该区气藏成藏的特殊性。综合乐东10区钻井沉积储层、盖层气柱和运移裂隙等成藏条件提出该区轴向水道—海底扇高温超高压成藏新模式:“微断裂垂向沟源,晚期高压驱动运移,大型构造脊和砂体汇聚,轴向重力流水道—海底扇储集,高质量泥岩盖层封盖成藏。”

参考文献:

[1] 刘志杰,卢振权,张伟,等.莺歌海盆地中央泥底辟带东方

区与乐东区中深层成藏地质条件[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(4):49-61.

[2] 张启明.莺-琼盆地的演化与构造——热体制[J].天然气工业,1999(1):36-42.

[3] 郝芳,董伟良,邹华耀,等.莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J].石油学报,2003,24(6):79-85.

[4] 王振峰,胡代圣.莺歌海盆地中央泥拱构造带大气田勘探方向[J].天然气工业,1999,19(1):28-30.

[5] 裴健翔,于俊峰,王立锋,等.莺歌海盆地中深层天然气勘探的关键问题及对策[J].石油学报,2011,32(4):573-579.

[6] 郝芳,李思田,龚再升,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:地球科学),2001(6):471-476.

[7] 林腊梅,王伟峰.油气田水文地质学[M].东营:中国石油大学出版社,2010:64-65.

[8] 李贤庆,侯俊杰,张爱云.油田水地球化学研究进展[J].地质科技情报,2001(2):51-54.

[9] 高锡兴.中国含油气盆地油田水[M].北京:石油工业出版社,1994:358-359.

[10] 严金泉,胡晓凤.江汉盆地下三叠统—石炭系水文地质条件及对油气保存条件的影响[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(2):42-44.

[11] 史建南,姜建群,张福功,等.大民屯凹陷地层水水文地质特征与油气聚集关系[J].海洋地质动态,2003,19(11):24-30.

[12] 陈建平,查明,周瑶琪.准噶尔盆地西北缘地层水化学特征与油气关系研究[J].地质地球化学,2000,28(3):

54-58.

[13] 张宗峰, 查明, 高长海. 大港油田埕北断阶区地层水化学特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 268-374.

[14] 曹海防, 夏斌, 张娣, 等. 松辽盆地地层水化学特征及其流体-岩石相互作用探讨[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 566-572.

[15] 刘桂凤, 吴运强, 赵增义, 等. 克拉玛依百口泉油田地层水化学特征与油气成藏关系[J]. 中外能源, 2007, 12(1): 29-34.

[16] 张伟, 何家雄, 龚晓峰, 等. 莺歌海盆地中央泥底辟带气田水地球化学特征及其油气地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 119-128.

CHARACTERISTICS OF STRATIGRAPHIC WATER IN THE MIDDLE AND DEEP LAYERS OF LEDONG DISTRICT, YINGDONG SLOPE, YINGGEHAI BASIN AND ITS RELATIONSHIP WITH OIL AND GAS

LIU Ping, TONG Chuanxin, ZENG Xiaoming, LI Wei, SONG Peng

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guandong 524057, China)

Abstract: Associated stratigraphic water in an oil and gas field contains a variety of information on oil and gas geology and may provide important evidence for evaluation of trap conditions and the distribution patterns of hydrocarbon accumulations. It is closely associated with oil and gas reservoirs and affected by many geological factors, such as hydrocarbon formation and storage conditions, post-storage conditions, geological and geochemical characteristics related to hydrocarbon migration and accumulation processes and the later trapping and preservation conditions. The total mineralization or salinity of the associated stratigraphic water in the middle-deep layers of the gas fields under high temperature and overpressure in the Ledong District of the Yinggehai Basin is abnormally high (60 000 mg/L-80 000 mg/L). It is a kind of weak acid-weak alkaline brine rich in CaCl_2 with a pH of 6-8. Based upon the geological and geochemical characteristics of the associated stratigraphic water, we discussed in this paper the genetic relationship between the stratigraphic water and the migration and accumulation of gas.

Key words: the Yinggehai Basin; middle and deep layers of Ledong District; associated stratigraphic water in a gas field; high salinity; natural gas accumulation