

文章编号: 1000-0550(2014)01-0126-12

渤海湾盆地东濮凹陷膏盐岩与油气的关系^①

刘景东¹ 蒋有录¹ 谈玉明² 慕小水²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 2. 中国石化中原油田分公司 河南濮阳 457001)

摘要 从东濮凹陷蒸发岩系的地质特征出发,系统分析了膏盐岩对油气成藏诸要素的影响及其对油气分布的控制作用。研究表明,东濮凹陷烃源岩与膏盐岩共生,膏盐岩—砂泥岩过渡带烃源岩有机质丰度最高;膏盐岩发育区烃源岩有机质类型以Ⅱ₁型和Ⅰ型为主;膏盐岩的高热导作用使盐上烃源岩生烃门限深度降低和盐下烃源岩过成熟门限深度增加,有效地扩大了生烃窗范围。膏盐层下部砂岩储层孔隙度相对正常压实地层而言整体偏大,且具有随深度增加表现为先增加后减小,孔隙度最大值出现在膏盐层下部一定距离内。膏盐层不仅对油气具有很强的封堵能力,而且易于形成盐下、盐间、盐上及盐岩边缘等多种圈闭类型。膏盐层厚值区形成的异常压力明显大于膏盐层边缘区,油气更易于在膏盐层的遮挡下向膏盐层边缘区运移。综合分析认为,东濮凹陷膏盐层边缘区不仅具有良好的供烃和圈闭条件,而且具备油气充注的通道和动力条件,是最有利的油气聚集区。

关键词 膏盐岩 有机质 油气生成 油气运移聚集 油气分布 东濮凹陷

第一作者简介 刘景东 男 1984年出生 讲师 石油地质学 E-mail: ljd840911@126.com

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

据统计,全球含油气盆地和具远景的含油气盆地有近200个,有一半以上的盆地发现了具商业价值的油气田,而这其中就有58%的油气田与含盐地层有关^[1]。欧亚大陆所有含盐盆地基本上都含油气,其中一些还是世界上最大的含油气区,如中东、近东和北海的含盐盆地。在油、盐共生的盆地中,有46%的盆地的油气层产于盐系地层之下,41%的盆地的油气层产于盐系地层之上,13%的盆地的油气层产于盐系地层之间^[2]。可见,盐岩与油气有着非常密切的关系。前人研究表明,蒸发盐型的环境具有巨大的有机物质生成能力,可以形成有利的生油岩系^[2-6]。受沉积相变控制,膏盐岩周围普遍发育以牵引流为主的砂岩储集体^[7,8],石膏自身脱水也可形成具备储集能力的次生孔隙^[9-12],同时膏盐层对压实作用和其下部岩层的成岩作用有很强的抑制作用,有利于储层的原始孔隙的保存^[6,13]。膏盐层具有很高的排驱压力,在盖层分级中属于特级盖层,对油气和异常压力均具有很强的封堵能力^[14,15]。膏盐岩的塑性流动可以形成断层、裂缝^[4,5],成为有利的运移通道,也可以形成各种盐构造^[17-19],为油气聚集提供有利场所。虽然上述研究涉及到了生烃有机质、储集层、盖层和圈闭等

多个方面,但大多从单方面开展研究,缺乏深入和系统的分析,对膏盐岩发育区油气富集规律的认识存在不足。

东濮凹陷位于渤海湾盆地临清坳陷东南部,呈NNE走向,北窄南宽,面积约5300 km²。东濮凹陷北部地区具有“两洼一隆一斜坡”的构造格局,自西向东依次发育西部斜坡带、海通集洼陷、中央隆起带和前梨园洼陷,在中央隆起带内部还发育濮卫洼陷(图1)。钻遇的古近系地层有沙河街组沙四段、沙三段、沙二段、沙一段及东营组,其中沙三段地层厚度可达3000 m,可细分为沙三下、沙三中、沙三上三个亚段,古近系属于一套湖泊相的含盐碎屑岩沉积体系。东濮凹陷北部地区主要发育五套膏盐层,包括沙一段的沙一盐、沙三上亚段的沙三1盐、沙三中亚段的沙三2盐和沙三3盐,沙三下亚段的沙三4盐,除沙三1盐分布局限外,其他四套膏盐层分布广泛,以文留、卫城地区为厚度中心,膏盐层累积厚度可达950 m。勘探实践证明,东濮凹陷为渤海湾盆地油气并举的富油气凹陷,而近93.7%的石油和近80%的天然气分布于北部膏盐岩发育区,且油气在纵向上大部分分布于含膏盐层系,可见膏盐层对油气平面富集范围和纵向富集层位均具有重要的控制作用。

开展东濮凹陷膏盐层与油气关系研究,不仅有利

①国家科技重大专项(编号:2011ZX05006-004)资助

收稿日期:2012-11-29;收修稿日期:2013-05-29

于剖析东濮凹陷古近系油气成藏特征,而且对于认识断陷盐湖盆地含盐层系油气成藏规律,以及更好地挖掘其油气资源潜力具有重要的指导作用。

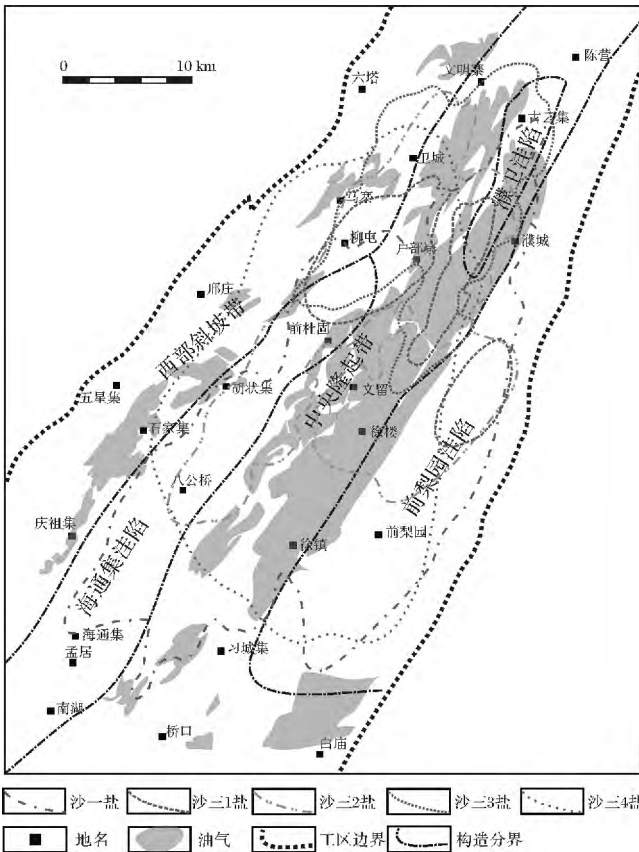


图 1 东濮凹陷北部地区构造格局及膏盐岩分布图

Fig. 1 Structural units and gypsum-salt rock distribution of northern Dongpu depression

1 蒸发岩系地质特征

东濮凹陷的蒸发岩与碎屑岩、碳酸盐岩在纵向上呈多旋回式发育,其蒸发岩系可以划分为两种组合类型,即碎屑岩—蒸发岩组合类型和碎屑岩—碳酸盐岩—蒸发岩组合类型(图 2)。其中碎屑岩—蒸发岩组合类型的岩性由下而上主要表现为砂泥岩→含膏泥岩→膏盐岩→盐岩→膏盐岩→含膏泥岩→砂泥岩的变化规律,该类型主要分布于沙三下亚段和沙三中亚段,沙三上亚段分布局限,在沙二段和沙一段分布最少。碎屑岩—碳酸盐岩—蒸发岩组合类型的岩性由下而上主要表现为砂泥岩→白云质泥岩→泥质白云岩→含膏泥岩→膏盐岩→盐岩→膏盐岩→含膏泥岩→泥质白云岩→白云质泥岩→砂泥岩的变化规律,在少数地层中碳酸盐岩表现为泥质灰岩,该类型主要分布于沙二段和沙一段,沙三段相对不发育。可以看

出,这两种组合类型的岩性变化在纵向上均可划分为膏盐岩、膏盐岩—砂泥岩过渡带和砂泥岩,相应的地层可以划分为膏盐岩发育带、膏盐岩—砂泥岩过渡带和砂泥岩发育带,反映了古水体盐度由淡水→微咸水→咸水→微咸水→淡水的旋回式变化,这主要是由于沉积时的湖盆水体始终处于淡水注入和蒸发作用的平衡体系中,当蒸发作用大于淡水注入时,水体会浓缩咸化,且随着咸化程度的增加会沉积碳酸盐—硫酸盐—氯化盐等蒸发岩。

碎屑岩—蒸发岩组合				碎屑岩—碳酸盐岩—蒸发岩组合			
岩性剖面	岩性名称	岩性变化	盐度变化	岩性剖面	岩性名称	岩性变化	盐度变化
[Pattern]	砂泥岩	砂泥岩	淡水	[Pattern]	砂泥岩	砂泥岩	淡水
[Pattern]	含膏泥岩	↑ 过渡带	↑ 微咸水	[Pattern]	白云质泥岩	↑ 过渡带	↑ 微咸水
[Pattern]	膏盐岩	↑ 膏盐岩	↑ 咸水	[Pattern]	泥质白云岩	↑ 膏盐岩	↑ 咸水
[Pattern]	盐岩			[Pattern]	含膏泥岩		
[Pattern]				[Pattern]	膏盐岩		
[Pattern]				[Pattern]	盐岩		

图 2 东濮凹陷蒸发岩系纵向组合类型

Fig. 2 Vertical compositions of gypsum-salt sediment group in Dongpu depression

2 膏盐岩对油气成藏要素的影响

2.1 有助于形成优质烃源岩

东濮凹陷古近系烃源岩包括沙三下、沙三中、沙三上亚段和沙一段,其中沙三下、沙三中亚段和沙一段烃源岩分布较为广泛,沙三上亚段分布局限。上述层系烃源岩的发育规模分别与凹陷内膏盐岩的发育规模相对应,且烃源岩与膏盐岩在纵向上互层,平面上叠置,具有明显的共生关系。为分析膏盐岩对烃源岩发育的影响,分别统计了膏盐岩发育区(包括膏盐岩发育区和膏盐岩—砂泥岩过渡带)和膏盐岩欠发育区(砂泥岩发育区)烃源岩的地球化学资料,并从空间上进行了对比。

2.1.1 有利于提高有机质丰度

研究发现,东濮凹陷北部地区烃源岩有机质丰度的高低与膏盐岩发育程度成正比。从不同层系来看,沙三下、沙三中亚段和沙一段膏盐岩发育区烃源岩的有机质丰度高,达到“较好—好”的标准,而沙三上亚段膏盐岩欠发育区烃源岩的有机质丰度相对较低,仅达到“较差—较好”的标准(表 1)。横向上,文留及其周边地区为膏盐岩发育区,综合评价烃源岩有机质

丰度高,而凹陷南部及西部等膏盐岩欠发育区烃源岩有机质丰度较低。不同岩性地层发育带及不同岩性烃源岩的有机质丰度参数对比表明,东濮凹陷膏盐岩—砂泥岩过渡带的膏泥岩、含盐泥岩有机质丰度最高,其次为膏盐岩—砂泥岩过渡带或膏盐岩发育带的盐间泥岩、盐上或盐下泥岩,砂泥岩发育带的泥岩或粉砂质泥岩有机质丰度则较低(图 3)。烃源岩与膏盐岩的距离与烃源岩有机质丰度具有明显的负相关关系,即烃源岩越靠近膏盐岩,烃源岩有机质丰度越高,当烃源岩与膏盐岩距离超过 30~40 m 时,烃源岩

有机质丰度受膏盐岩的影响明显减弱(图 4)。

为研究不同沉积带烃源岩有机质丰度差异的原因,对卫 69 井沙三中亚段膏盐岩发育带(图 5a)、膏盐岩—砂泥岩过渡带(图 5b)和砂泥岩发育带(图 5c)的泥质岩烃源岩分别进行了饱和烃气相色谱—色质分析。结果表明,膏盐岩发育带与砂泥岩发育带泥岩正构烷烃含量低,二者分布均呈偏前峰型,主峰碳分别为 C_{18} 和 C_{20} ;而膏盐岩—砂泥岩过渡带泥岩正构烷烃含量介于上述两者之间,分布呈双峰型,主峰碳为 C_{18} 和 C_{28} ,反映了膏盐岩发育带和砂泥岩发育带

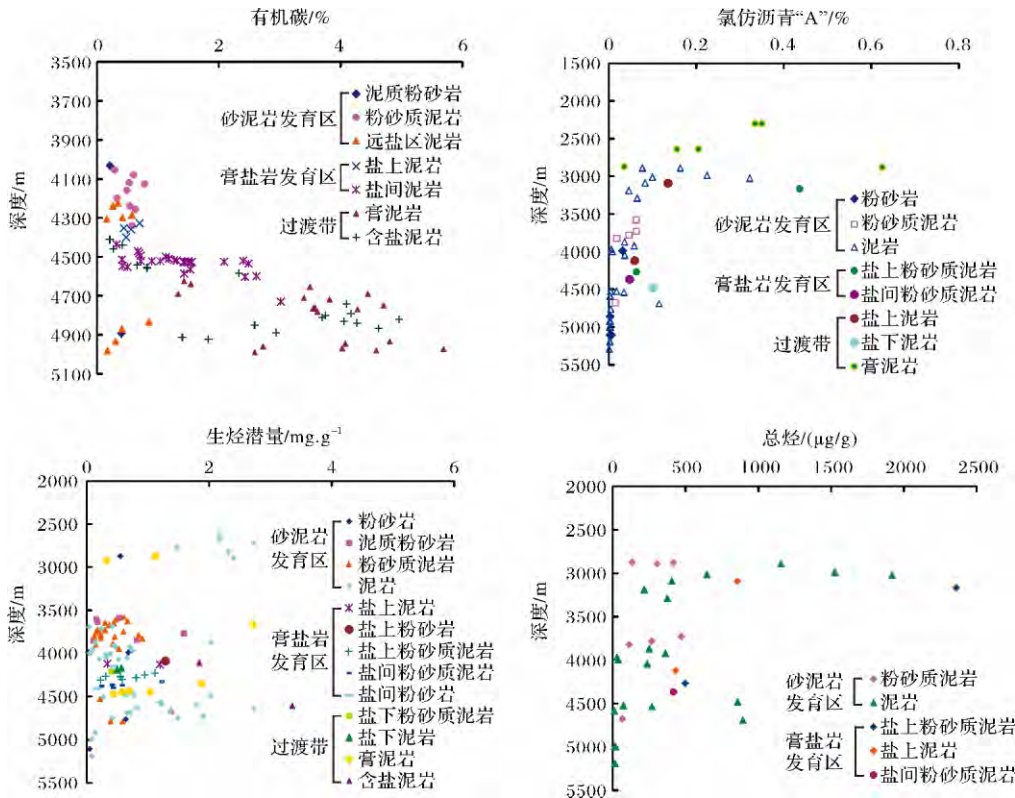


图 3 东濮凹陷北部地区不同岩性烃源岩有机质丰度对比图

Fig. 3 Organic matter abundance comparison among different source rocks in northern Dongpu depression

表 1 东濮凹陷北部古近系烃源岩有机质丰度评价表

Table 1 Evaluation for organic matter abundance of Paleozoic source rock in Northern Dongpu depression

层位	有机碳 TOC (%)		氯仿沥青“A” (%)		生烃潜量 (mg/g)		总烃 HC (ppm)		综合评价
	平均值	样品数	平均值	样品数	平均值	样品数	平均值	样品数	
	最小值~最大值		最小值~最大值		最小值~最大值		最小值~最大值		
沙三下亚段	1.36	200	0.29	120	4.27	76	3 060	71	好
	0.14~5.69		0~10.97		0.05~68.53		12~63 582		
沙三中亚段	1.08	196	0.13	123	1.97	298	1 146	142	较好—好
	0.13~14.04		0~1.39		0.01~76.33		14~11 882		
沙三上亚段	0.62	56	0.09	45	1.28	125	457	26	较差—较好
	0.17~3.36		0~1.02		0.02~13.24		35~2 563		
沙一段	1.25	62	0.15	57	6.9	52	928	40	较好—好
	0.21~10.1		0.01~1.43		0.07~72.93		67~7 175		

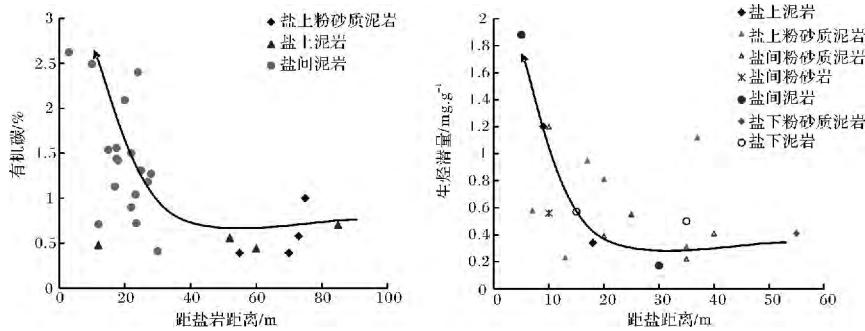


图 4 东濮凹陷北部地区烃源岩—膏盐岩垂向距离与烃源岩丰度关系图

Fig. 4 Relationship between organic matter abundance and vertical distance from source rock to gypsum-salt rock in northern Dongpu depression

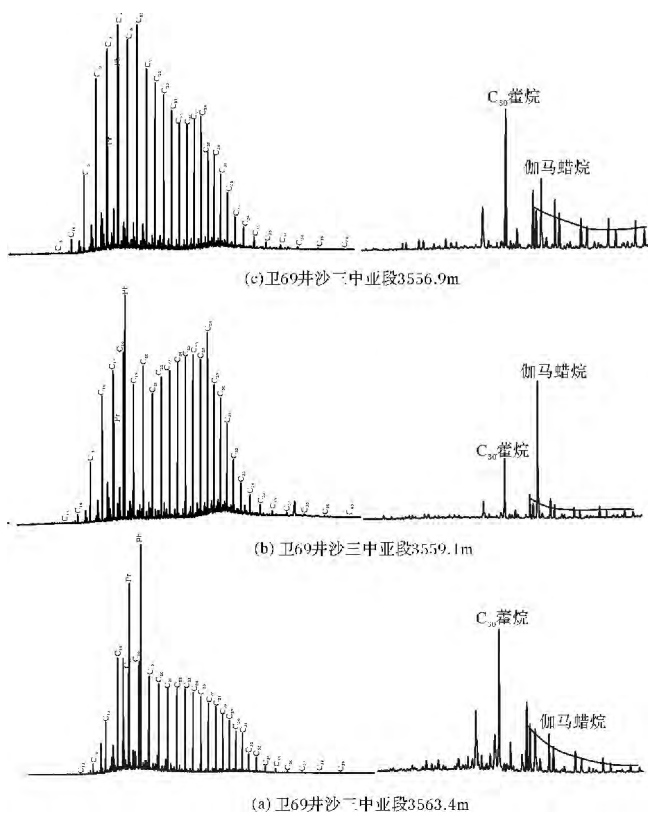


图 5 卫 69 井不同沉积地层泥岩饱和烃气相色谱—质谱图
Fig. 5 Gas chromatogram and mass spectrometry for saturated hydrocarbons extracted from different mudstones of Well Wei 69

有机质以水生生物输入为主,而膏盐岩—砂泥岩过渡带则为水生生物和部分陆源高等植物的混合输入。膏盐岩—砂泥岩过渡带烃源岩的伽马蜡烷含量最高,可以作为不同盐度水体分层的标志,认为表层水盐度小(交替出现淡水和半咸水),利于水生生物的大量繁殖,同时由于河流等不断地供给陆源生物和有机物质,所以湖泊中持续有大量的生物和有机质供给;而深水部位的底层水盐度较大,缺氧条件好,利于优质

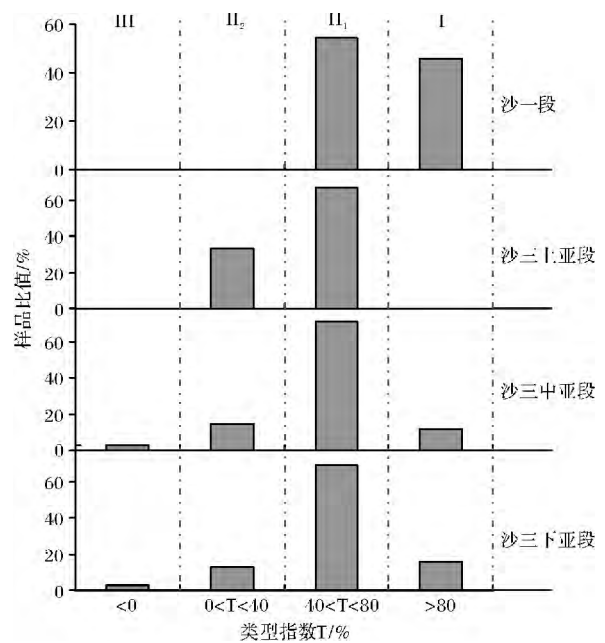


图 6 不同层段干酪根类型判识图

Fig. 6 Identification map for kerogen types of different layers

烃源岩的堆积和保存,从而造成膏盐岩—砂泥岩过渡带烃源岩的有机质丰度要好于膏盐岩发育带和砂泥岩发育带。

2.1.2 有利于形成腐泥型有机质

东濮凹陷北部地区烃源岩有机质类型同样与膏盐岩发育程度有关,但影响程度相对较弱。沙三下、沙三中亚段和沙一段膏盐岩发育区的烃源岩有机质类型以 II₁ 型干酪根为主,其次为 I 和 II₂ 型干酪根,有少量 III 型干酪根;而膏盐岩欠发育区的沙三上亚段烃源岩同样以 II₁ 型干酪根为主,但同时含有较大比例的 II₂ 型干酪根。平面上,文留及其周边的膏盐岩发育区除沙三上亚段烃源岩含 II₂ 型干酪根外,沙三中、下亚段和沙一段烃源岩干酪根均以 II₁ 型和 I

型为主;而南部的桥口、白庙等膏盐岩欠发育区沙三段和沙一段烃源岩干酪根则以 II_1 型和 II_2 型为主。由此可以看出,膏盐岩发育区易于形成 II_1 型和 I 型干酪根烃源岩,膏盐岩欠发育区易于形成 II_1 型和 II_2 型干酪根烃源岩。究其原因,沙三下、沙三中亚段和沙一段膏盐岩发育层段沉积水体盐度较大,一些嗜盐菌藻类适应高盐环境而大量繁殖,饱和烃 C_{31} 之后的长链藿烷含量较高反映了大量水生生物较为富集,并成为沉积有机质的主要来源,从而利于形成腐泥型有机质。

2.1.3 有利于扩大生烃窗范围

地温是烃源岩有机质向油气转化过程中最有效、最持久的作用因素。由于膏盐岩相对其他岩性岩石热导率较高,生热率较低,使得深部地温容易传到浅部,从而导致紧邻膏盐层的上部地层地温梯度偏低,而无盐地层,出现异常高温,而紧邻膏盐层的下部地层地温梯度则偏高于无盐地层,出现异常低温。如文留地区为沙三4盐的厚度中心,其沙三段烃源岩主要分布于沙三4盐之上,烃源岩达到生烃高峰 ($Ro = 1.0\%$) 和过成熟阶段 ($Ro = 1.3\%$) 的门限深度要明显浅于桥口、白庙等膏盐岩欠发育区;马寨地区为沙三2盐的厚度中心,其沙三段烃源岩主要分布于沙三2盐之下,烃源岩达到生烃高峰 ($Ro = 1.0\%$) 和过成熟阶段 ($Ro = 1.3\%$) 的门限深度要明显深于桥口、白庙等膏盐岩欠发育区(图7)。

膏盐层对温度的影响与其累积厚度密切相关^[20],膏盐层累计厚度越大,紧邻其上部和下部地层

的温度差异就越大。据前人研究,东营凹陷每100 m厚的膏盐层,其导热性可使其下部地层的温度比正常值降低 2°C 左右^[10]。东濮凹陷卫76井含盐地层的温度纵向变化表明,含膏盐地层及其上部和下部地层地温梯度和地温存在明显的差异,约350 m厚的含盐地层(其中膏盐岩约198 m)造成其上部和下部地温分别与正常值最大差别 $2^\circ\text{C} \sim 3^\circ\text{C}$ 。膏盐层造成的盐上和盐下地层温度异常使烃源岩生烃门限深度降低、过成熟门限深度增加,对全区来说可以有效地扩大生烃窗范围。

2.2 改善膏盐层下部储层的储集性能

受盐湖盆地沉积沉降中心控制,不同时期膏盐岩的发育位置在不断变化,空间上表现为各套膏盐岩的明显迁移,从而导致不同膏盐岩与砂岩形成“指状交叉带”式接触,砂岩层大多上伏有膏盐层。

从濮33井孔隙度—深度变化关系可以看出,膏盐层下部储层孔隙度相对膏盐岩不发育区的正常压实地层偏大 $2\% \sim 10\%$ (图8)。分析认为,导致膏盐层下部储层孔隙度偏大的原因主要包括3个方面:一是由于膏盐层较为致密,对下部地层产生明显欠压实,使下部地层保持较高的孔隙度;二是膏盐岩热导率高,下部地层热量容易散出,成岩演化作用受到抑制,使膏盐层下部储层的高孔隙度得以保存;三是膏盐层之下一般具有异常高压,且部分超过了岩石的破裂压力,易于产生裂缝,促使总孔隙度增加。

研究发现,膏盐层不仅可以使其下部储层孔隙度

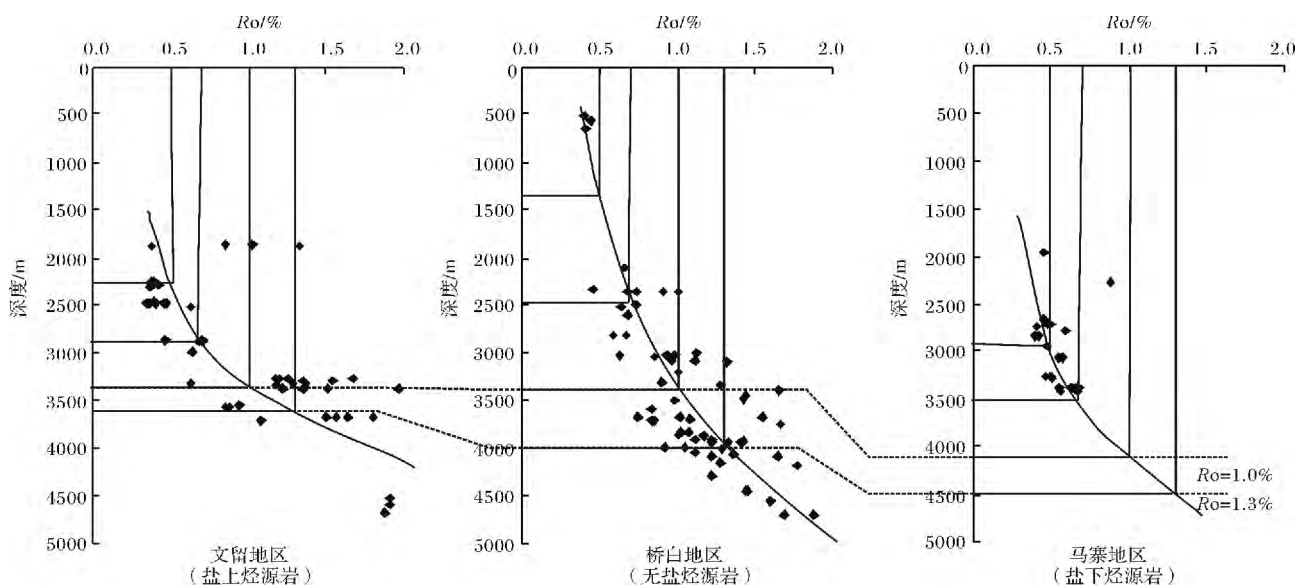


图7 不同位置烃源岩的热演化特征

Fig. 7 Thermal evolution characteristics for source rocks in different positions

明显增大,而且其下部储层孔隙度随深度的变化也遵循一定的规律。一般紧邻膏盐岩发育的地层中往往含有一定量的碳酸盐,由于碳酸盐岩的胶结作用,紧邻膏盐岩储层的孔隙度会相对较低;另外在地层成岩压实过程中,地层水的垂向渗水作用导致部分膏盐岩晶粒会渗入到膏盐岩周围储层中,也可导致储层孔隙度降低。碳酸盐和膏盐岩晶粒造成的孔隙度降低均随着与膏盐岩距离的增大而减弱。因此,膏盐层下部储层孔隙度的最大值并不是紧邻膏盐层出现,而是出现在膏盐层往下的一定距离内,如濮 33 井两套含盐地层下部储层的最大孔隙度出现的位置距离上部膏盐层约 165 m 左右,这是由于该位置碳酸盐和膏盐岩晶粒对孔隙度的影响降到最小,而随着深度的增加,由于膏盐层影响下部储层孔隙度增加的各种因素的影响逐渐减弱,从而导致孔隙度又逐渐减小。

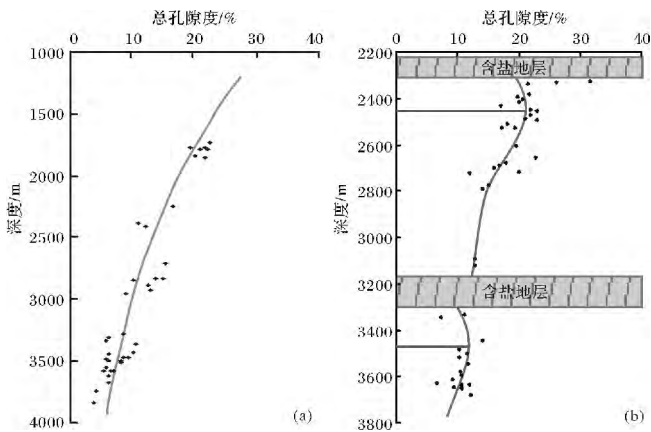


图 8 东濮凹陷储层总孔隙度随深度变化关系 (a) 膏盐岩欠发育区的正常压实情况; (b) 膏盐岩发育区膏盐层覆盖的情况(濮 33 井)

Fig. 8 Total porosity vs. depth diagram for reservoirs in Dongpu depression

2.3 膏盐层具备强封盖能力

东濮凹陷北部地区膏盐层厚度大,分布范围广,具有优越的油气封盖条件。膏盐层分布与其下部油气柱高度的统计结果表明(图 9),膏盐岩发育区大部分油气藏分布于厚度为 0~50 m 的膏盐层之下,不同厚度的膏盐层与油气藏的最大含油或含气高度没有明显的相关性,反映了膏盐层对油气的封堵能力很强,仅 50 m 厚的膏盐层就能封堵累计 500 m 的含油或含气高度。另外,膏盐层对油的最大封堵高度以 100~200 m 和 200~500 m 为主,而膏盐层对气的最大封堵高度以 <100 m 和 100~200 m 为主,说明膏盐层封堵的最大含油高度要明显大于最大含气高度。

膏盐层的发育规模与其下部原油或天然气藏的规模也具有正相关关系。随膏盐层厚度增加,原油或天然气藏规模有增大的趋势,但当膏盐层厚度较小时,也能封堵较大规模的原油或天然气藏,统计结果表明,厚度为 10 m 的膏盐层可封堵原油储量 839×10^4 t,天然气储量 14×10^8 m³,厚度为 55 m 的膏盐层可封堵原油储量 $1\ 726 \times 10^4$ t。与渤海湾盆地的泥岩盖层相比,封堵相同储量规模的原油或天然气所需要的膏盐层厚度要远小于泥岩厚度,如辽河拗陷天然气地质储量大于 10×10^8 m³ 的气藏,泥岩盖层厚度一般需要大于 100 m,黄骅拗陷储量大于 5×10^8 m³ 的较大气藏,泥岩盖层厚度都在 20 m 以上。

2.4 有利于形成多种与膏盐岩相关的圈闭

膏盐岩具有比泥岩更高的致密性,在纵向和横向上对油气均可起到很好的封堵作用,与储集层配置在一起,可以形成构造、岩性等多种圈闭类型。同时膏盐岩可塑性强,在较高的温压条件下,膏盐岩本身的构造变形影响膏盐岩上覆地层中圈闭的形成。从圈

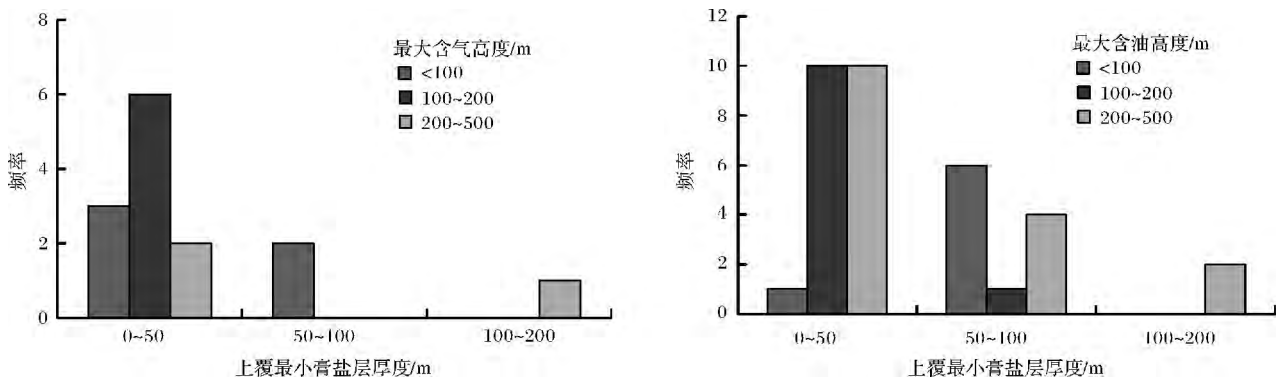


图 9 储层上覆最小膏盐层厚度与最大含气高度和最大含油高度关系图

Fig. 9 The minimum thickness of overlying gypsum-salt rock vs. the max height of oil and gas for reservoirs

闭与膏盐岩的位置关系来看,与膏盐岩有关的圈闭包括盐下、盐间、盐上及盐岩边缘四大类,其中盐下圈闭又包括盐下地垒圈闭、盐下背斜圈闭和盐下断块圈闭,盐上圈闭主要为盐上地堑式断块圈闭,盐间圈闭主要为盐间泥岩裂缝圈闭,盐岩边缘圈闭包括盐岩遮挡断块圈闭和盐岩遮挡砂体尖灭圈闭等。各种圈闭的典型模式和特征如表 2 所示。

3 膏盐岩分布与油气运移方向

3.1 对油气运移动力分布的影响

大量勘探实践表明,超压是大多断陷盆地油气运移充注的重要动力。东濮凹陷北部地区沙三段和沙一段发育多套厚层膏盐岩,平面上分布广泛,纵向上与砂泥岩互层,上覆地层沉积过程中泥岩难以垂向排液,易于形成欠压实,从而导致超压,而膏盐岩的存在又对超压的保存起到了积极作用。膏盐岩的成岩脱水作用也是异常压力的重要成因之一,石膏脱水变成硬石膏时,石膏的结晶格架中的结晶水将在变质过程中转化为游离状的自由水,当这些水进入相邻的地层孔隙中时,岩层中的流体压力将会增大。由于膏盐岩本身具有塑性强、易流动的特点,即使在构造挤压作用下,封闭层产生裂缝与断裂,膏盐岩的涂抹或充填也会一定程度上阻止异常压力的散失。

膏盐层下部地层异常压力的发育程度与膏盐层的发育规模成正比,在相似的构造条件下,膏盐层厚值区下部地层的异常压力最大。一般来说,在流体动力驱动下,油气沿动力降低方向运移,遇到合适的圈闭或较好的遮挡条件便聚集成藏,其中压力驱动为东濮凹陷流体最为重要的驱动机制之一。膏盐岩主体下部地层异常压力要大于膏盐岩边缘区,油气具有由膏盐岩向外呈发散式运移的趋势,即使有膏盐岩周边存在油气向其主体方向运移,油气大多会受异常压力侧向阻碍而在膏盐岩边缘区发生聚集。

3.2 对油气横向运移聚集的影响

从前面的分析可知,膏盐层下部有利于形成孔渗性较好的储层,同时纵向上对油气具有很强的封隔作用,这对于油气在膏盐层下部的有利砂体中发生横向运移十分有利。油气运移方向和油气分布关系的耦合关系可以作为膏盐层遮挡条件下油气发生横向运移聚集的有效证据。

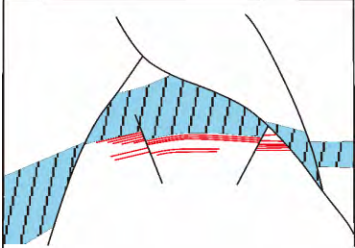
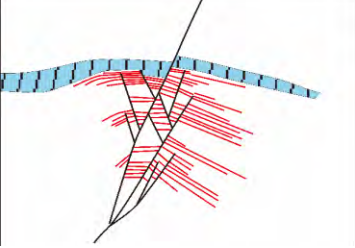
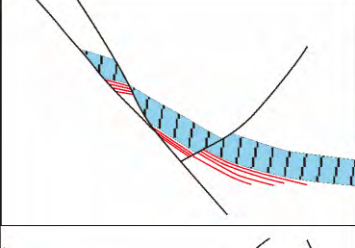
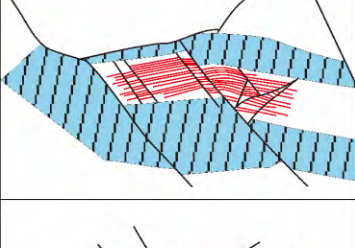
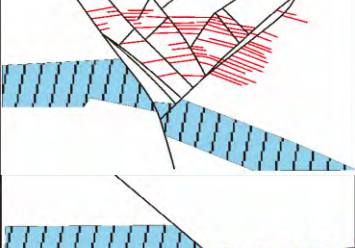
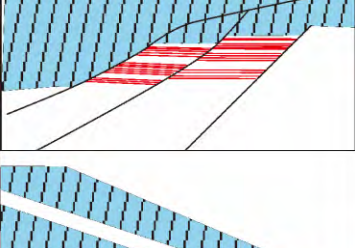

受沉积相和构造形态控制,油气沿砂体发生横向运移的路径以优势运移通道为主,主要体现为沿垂直于油气的等势线方向运移,大体上是沿垂直于地层等

高线(即砂体顶面构造脊)的方向^[21-23]。由于膏盐层的迁移变化,研究区不同区带膏盐层的下部主力砂体分布层位和分布位置不相一致,以文留地区沙三中 5 砂组和濮卫地区沙三中 3+4 砂组为例,二者均位于沙三 2 盐和沙三 3 盐之间,油气在膏盐层遮挡下有利于发生横向运移。文留地区沙三中 5 砂组的上覆膏盐层分布表现为文留西部厚度较大,文留东部相对较薄,在构造主体两侧斜坡带均发育有 2~3 个构造脊,其中文留东部斜坡带的构造脊与砂体分布具有较好的耦合性,这些构造脊都可能是优越的运移路径,实践证明在构造脊的指向区发现了一定数量的油气。而文留西部斜坡带虽然膏盐层较为发育,且同样发育构造脊,但由于砂体厚度较小,较难成为油气的运移路径,在构造脊的指向区油气聚集量较少(图 10a)。濮卫地区沙三中 3+4 砂组的上覆膏盐层分布表现为西南部厚度大,向东北方向逐渐变薄直至消失,该区发育多个斜坡带,且在各斜坡带发育多个构造脊(图 10b),其中在中北部和东部斜坡带的构造脊与砂体分布具有很好的耦合性,这些构造脊都可能是优越的运移路径,在构造脊的指向区均发现了一定数量的油气。而西南部斜坡带虽然膏盐层较为发育,且同样也发育构造脊,但由于砂体厚度较小甚至尖灭,所以很难成为油气的运移路径。

4 膏盐层与油气分布具有耦合关系

膏盐层分布与油气分布的叠合关系表明(图 11, 12),油气与膏盐层展布方向一致,均呈 NE-SW 向,大部分油气围绕膏盐层厚度中心呈环状或半环状分布,膏盐层边缘区油气相对富集,其中膏盐层边部相变带为最有利的油气聚集区。从前面膏盐层厚度与含油气高度和油气藏储量规模的关系也可以看出,大部分油气藏分布于厚度为 0~50 m 的膏盐层之下;受膏盐层封盖的油气藏,有 90% 的储量分布于膏盐层厚度小于 100 m 的范围内。综合分析膏盐层边缘区油气富集的原因主要有 3 个方面:(1)膏盐层边缘区烃源岩大部分处于膏盐岩-砂泥岩过渡带,有机质丰度高,有机质类型以 II₁ 型和 I 型为主,构造上大多处于洼陷斜坡带,部分处于或邻近洼陷沉降中心,埋深较大,具有良好的成烃条件。(2)膏盐层边缘区为膏盐岩和砂泥岩的相变带,受上覆膏盐层影响,下部砂岩储层物性较好,同时砂岩储层上部及其向膏盐岩一侧多为膏盐层所封堵,圈闭条件好。(3)相对膏盐层沉积主体和洼陷沉积中心,膏盐层边缘区的超压幅度

表 2 东濮凹陷北部地区膏盐岩相关圈闭类型
Table 2 Traps related to gypsum-salt rock in northern Dongpu depression

大类	类	典型模式	圈闭特征
	盐下地垒圈闭		构造几何形态为地垒,位于地垒上部的膏盐层由于拱升和塑性滑动呈中央厚、翼部薄的顶凸、底平形态,储集层位于膏盐层下部。
盐下圈闭	盐下背斜圈闭		构造几何形态为背斜,是由于基底升降或差异压实作用形成的背斜构造,储集层位于膏盐层下部。
	盐下断块圈闭		断层将膏盐层错开,上部以膏盐层作为直接盖层,侧向上主要被断层封堵。
盐间圈闭	盐间泥岩裂缝圈闭		夹于膏盐层间的泥岩裂缝为储集空间和渗滤通道,四周被非渗透地层封闭。
盐上圈闭	盐上地堑式断块圈闭		由于下部膏盐层的上拱,使膏盐层上部脆性地层发生断裂,并形成地堑式断层组合,在上覆盖层封堵下,形成盐上地堑式断块圈闭。
	盐岩遮挡断块圈闭		断层将膏盐层部分错开,使断层一侧的储层与另一侧的膏盐层对接,形成侧向遮挡圈闭。
盐岩边缘圈闭	盐岩遮挡砂体尖灭圈闭		由于膏盐岩由膏盐沉积中心向四周发生相变,后期的构造运动造成储集层向膏盐岩的主体上倾尖灭。

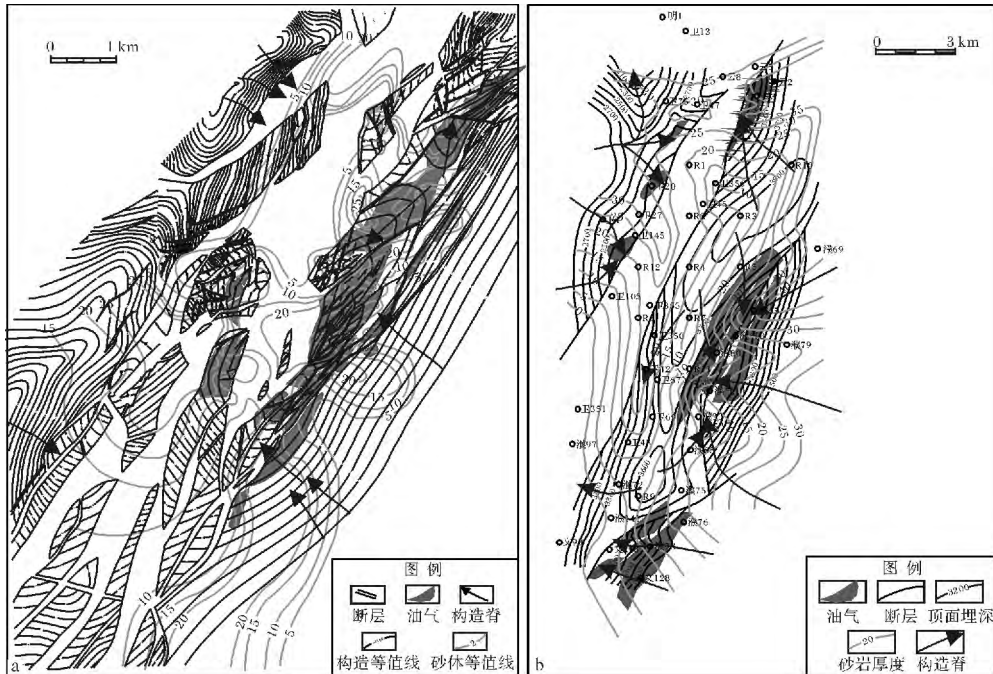


图 10 文留地区沙三中 5 砂组 (a) 和濮卫地区沙三中 3 + 4 砂组 (b) 顶面构造脊与油气运移方向
 Fig. 10 Structural ridges distribution and hydrocarbon migration direction for 5 sand group of middle part of E_{s3} in Wenliu area and 3 + 4 sand groups of middle part of E_{s3} in Puwei area

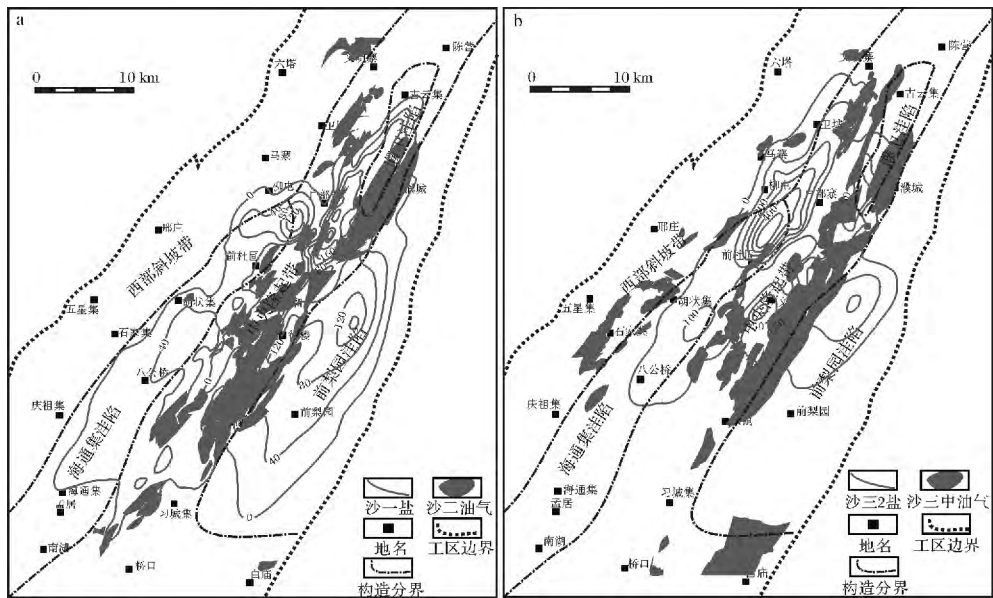


图 11 东濮凹陷沙二段油气与沙一膏盐层盖层 (a) 和沙三中亚段油气与沙三 2 膏盐层盖层 (b) 分布叠合图
 Fig. 11 Hydrocarbon distribution of E_{s2} vs. seal thickness of Sha 1 gypsum-salt rock (a) and hydrocarbon distribution of middle part of E_{s3} vs. seal thickness of Sha 3 + 2 gypsum-salt rock (b) diagrams in Dongpu depression

较低,而且膏盐层下部地层发育良好的砂岩输导体,具备油气充注的动力和通道条件。

5 结论

(1) 东濮凹陷北部地区烃源岩与膏盐岩共生,膏

盐岩发育区的烃源岩有机质丰度高于膏盐岩欠发育区,其中膏盐岩—砂泥岩过渡带的烃源岩有机质丰度最高;膏盐岩发育区烃源岩有机质类型以 II_1 型和 I 型为主;紧邻膏盐层的上部和下部地层分别具有异常高温和异常低温,导致盐上烃源岩生烃门限深度降低

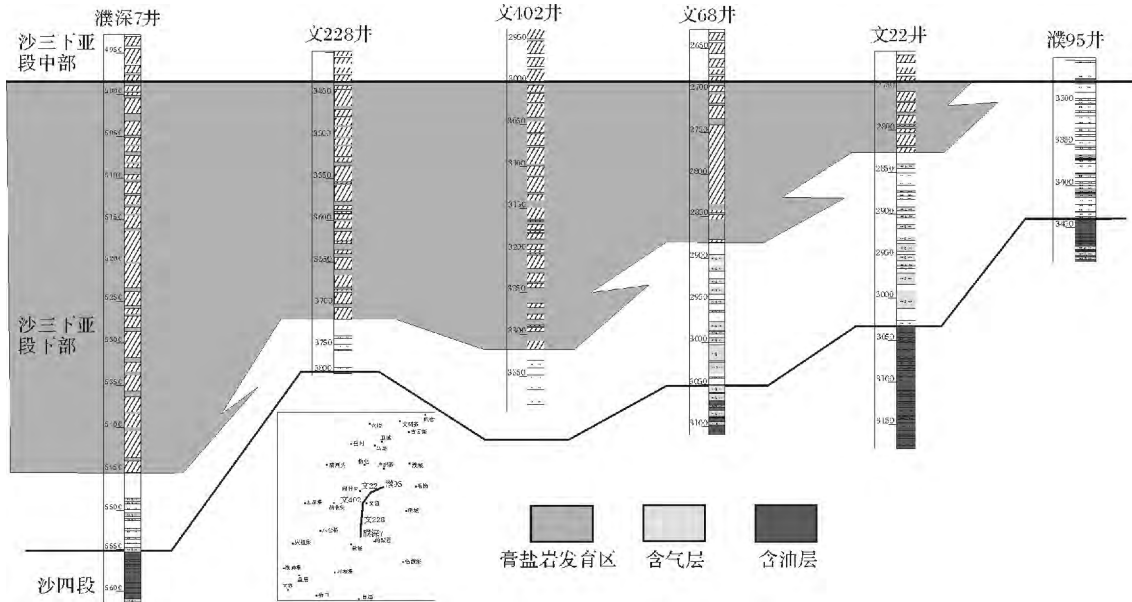


图 12 濮深 7 井—濮 95 井沙三下亚段油气与沙三 4 膏盐岩盖层分布关系图

Fig. 12 Hydrocarbon distribution of the lower part of Es₃ vs. seal thickness of Sha 3 + 4 gypsum-salt rock diagram from Well Pushen 7 to Well Pu 95

和盐下烃源岩过成熟门限深度增加,对全区来说有效地扩大了生烃窗范围。

(2) 相对正常压实地层,膏盐层使其下部砂岩储层孔隙度整体偏大,其孔隙度随深度增加表现为先增加后减小的变化趋势,孔隙度最大值并不是紧邻膏盐层出现,而是出现在膏盐层下部的一定范围内。膏盐层对油气具有很强的封堵能力,而且易于形成与膏盐岩相关的盐下、盐间、盐上及盐岩边缘等多种圈闭类型。

(3) 膏盐层对下部储层的保护及其垂向封堵作用使油气利于在膏盐层的遮挡下发生横向运移;在相似的构造条件下,膏盐层厚值区地层的异常压力要明显大于膏盐层边缘区,因而油气更易于向膏盐层边缘区的圈闭进行充注和保存。

(4) 东濮凹陷大部分油气围绕膏盐层厚度中心呈环状或半环状分布,综合分析认为膏盐层边缘区不仅具有良好的供烃和圈闭条件,而且具备油气充注的通道和动力条件,是最有利的油气聚集区。

参考文献 (References)

1 马新华, 华爱刚, 李景明, 等. 含盐油气盆地 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000 [Ma Xinhua, Hua Aigang, Li Jingming, et al. Salt Basin Bearing Hydrocarbon [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000]

2 马新华, 魏国齐, 钱凯, 等. 我国中西部前陆盆地天然气勘探的几

点认识 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 114-117 [Ma Xinhua, Wei Guoqi, Qian Kai, et al. Recognition of natural gas exploration in foreland basins of central-west China [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 114-117]

3 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997 [Sun Zhencheng, Yang Pan, Zhang Zhihuan, et al. Sedimentary Environment and Hydrocarbon Generation of Salty Lake of Cenozoic in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997]

4 湖北省石油学会. 蒸发岩与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1985 [Petroleum Society of Hubei Province. Evaporite and Oil or Gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985]

5 王东旭, 曾溅辉, 宫秀梅. 膏盐岩层对油气生成的影响 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 329-333 [Wang Dongxu, Zeng Jianhui, Gong Xiumei. Impact of gypsolith on the formation of oil and gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 329-333]

6 李凤娟. 东营凹陷沙四段膏盐层的发育特征及其对深层油气成藏的意义 [J]. 石油天然气学报, 2008, 30(5): 180-183 [Li Fengjuan. Developmental characteristics of the salt layers and its significance for deep hydrocarbon accumulation in Sha4 member of Dongying depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(5): 180-183]

7 张孝义, 王运所, 段红梅, 等. 东濮凹陷北部浅水成盐与油气分布初探 [J]. 断块油气田, 2002, 9(4): 12-14 [Zhang Xiaoyi, Wang Yunsuo, Duan Hongmei, et al. The halites formed in shallow water and hydrocarbon distribution in Dongpu depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(4): 12-14]

8 王秀林, 张孝义, 王运所, 等. 东濮凹陷盐岩成因与油气聚集 [J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(5): 11-12 [Wang Xiulin, Zhang Xiaoyi, Wang Yunsuo, et al. Discussion on genesis of halites and petrole-

- um accumulation in Dongpu depression [J]. *Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing* 2002 21(5): 11-12]
- 9 宫秀梅, 曾澹辉. 渤海洼陷古近系膏盐层对深层油气成藏的影响 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(5): 24-27 [Gong Xiumei, Zeng Jianhui. Impact of Paleocene evaporates on hydrocarbon accumulation in deep Bonan sub-sag, Jiyang depression [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2003 30(5): 24-27]
 - 10 袁静, 覃克. 东营凹陷沙四段深水成因蒸发岩特征及其与油气藏的关系 [J]. *石油大学学报: 自然科学版* 2001 25(1): 9-11 [Yuan Jing, Qin Ke. Characteristics of evaporite generated in deep water of Sha4 member in Dongying sag [J]. *Journal of the University of Petroleum, China* 2001 25(1): 9-11]
 - 11 Jowett E C, Cathles L M, Davis B W. Predicting depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 402-413
 - 12 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响 [J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 103-109 [Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting *et al.* The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their effects on mineral diagenesis in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 103-109]
 - 13 张朝军, 田在艺. 塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气 [J]. *石油学报*, 1998, 19(1): 6-10 [Zhang Chaojun, Tian Zaiyi. Tertiary salt structures and hydrocarbons in Kuiche depression of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(1): 6-10]
 - 14 张景廉, 郭彦如, 卫平生, 等. 三论油气与金属(非金属)矿床的关系 [J]. *新疆石油地质*, 1999, 20(4): 310-313 [Zhang Jinglian, Guo Yanru, Wei Pingsheng, *et al.* On the relation between petroleum and metallic (non-metallic) ore deposits: petroleum and gypsum-salt deposits [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(4): 310-313]
 - 15 齐兴宇, 张阳, 王德仁, 等. 文留油田, 中国陆相大油田 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 72-91 [Qi Xingyu, Zhang Yang, Wang Deren, *et al.* Wenliu Oil Field, Large Oil Field of Terrestrial Facies in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 72-91]
 - 16 王红军, 胡见义. 库车坳陷白垩系含油气系统与高压气藏的形成 [J]. *天然气工业: 地质勘探* 2002 22(1): 5-8 [Wang Hongjun, Hu Jianyi. The Cretaceous petroleum system and formation of high pressure reservoir in Kuqa depression [J]. *Natural Gas Industry* 2002 22(1): 5-8]
 - 17 李莉, 吴慕宁, 李大荣. 加蓬含盐盆地及邻区油气勘探现状和前景 [J]. *中国石油勘探* 2005(3): 57-63 [Li Li, Wu Muning, Li Darong. Present hydrocarbon exploration situation and prospect of salt-bearing basin in Gabon and its adjacent area [J]. *China Petroleum Exploration* 2005(3): 57-63]
 - 18 余海洋. 滨里海盆地 Kumisbek 油田南缘盐上油气成藏模式 [J]. *石油天然气学报* 2008 30(5): 37-40 [Yu Haiyang. Patterns of hydrocarbon accumulation in the upper-salt sediments in the south of Kumisbek oilfield of Precaspian Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology* 2008 30(5): 37-40]
 - 19 王连岱, 沈仁福, 吕凤军, 等. 滨里海盆地石油地质特征及勘探方向分析 [J]. *大庆石油地质与开发* 2004 23(2): 17-18 [Wang Liandai, Shen Renfu, Lü Fengjun, *et al.* Petroleum geology characteristics and exploration direction analysis of Pre-Caspian Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* 2004 23(2): 17-18]
 - 20 Lerche I 著, 蔡希源 等译. 盆地分析的定量方法: 第二卷 [M]. 北京: 石油工业出版社 2001 [Lerche I. Basin Analysis of Quantitative Methods: No. 2 [M]. Translated by Cai Xiyuan, *et al.* Beijing: Petroleum Industry Press 2001]
 - 21 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 3 版. 北京: 石油工业出版社, 2004 [Li Mingcheng. Oil and Gas Migration [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press 2004]
 - 22 姜振学, 庞雄奇, 曾澹辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究 [J]. *地学前缘* 2005 12(4): 507-516 [Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, Zeng Jianhui, *et al.* Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. *Earth Science Frontiers* 2005 12(4): 507-516]
 - 23 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法——断面优势运移通道的提出及其应用 [J]. *地质论评* 2005, 51(2): 156-163 [Luo Qun, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue. A new method for effective trace petroleum migration path—Concept of fault section dominant migrating channel and its application [J]. *Geological Review*, 2005 51(2): 156-163]

Relationship between Gypsum-salt Rock and Oil-gas in Dongpu Depression of Bohai Gulf Basin

LIU Jing-dong¹ JIANG You-lu¹ TAN Yu-ming² MU Xiao-shui²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, Zhongyuan Oil Field, SINOPEC, Puyang, Henan 457001)

Abstract: Dongpu depression is located in southeastern Bohai Bay Basin, five sets of gypsum-salt rock developed, and the maximum cumulative thickness can be up to 950 m. The lithologic variation of gypsum-salt layer can be divided into three zones including gypsum-salt zone, gypsum-salt and sand-mudstone transition zone, sand-mudstone zone. Exploration practice confirmed that gypsum-salt rock on hydrocarbon enrichment in vertical or in horizontal has an im-

portant controlling role , performing for nearly 93.7 % of oil and nearly 80% of gas in Dongpu depression distribution in the north part , and most oil and gas distributes among gypsum-salt layers.

Controls of gypsum-salt rock on pool forming elements were systematically analyzed , and the results show that the source rock in gypsum-salt and sand-mudstone transition zone has the highest organic matter abundance because of its advantage for high quality source rock accumulation and preservation , the next is that in gypsum-salt zone , and that in sand-mudstone zone have relative lower organic matter abundance. Meanwhile , the farther source rock away from gypsum-salt rock , the lower organic matter abundance it has , and when the distance between source rock and gypsum-salt rock exceeds 30 or 40 meters , the influence on organic matter abundance by gypsum-salt rock decreases significantly. For high water salinity , many halophilic bacteria and algae adapted to high salt environments thrive and become a major source of sedimentary organic matter , which is conducive to the formation of sapropelic organic matter. For the gypsum-salt rock has high thermal conductivity and low heat generation rate , it can transmit ground temperature easily from deep stratum to shallow stratum , which could result in source rock in the upper part of gypsum-salt stratum has lower temperature gradient and abnormal high temperature than that of no gypsum-salt stratum , to the contrary , source rock in the lower part of gypsum-salt stratum has higher temperature gradient and abnormal low temperature than that of no gypsum-salt stratum. The anomal temperatures in the upper and lower part of gypsum-salt stratum result in reducing the generation threshold depth and increasing the postmaturity threshold depth of source rocks , this can effectively expand the scope of hydrocarbon generation window.

The relationship between reservoir porosity and its depth shows that the porosity of reservoir covered by gypsum-salt rock has 2 ~ 10 percent larger than that of normal sediment stratum , it firstly increases and then decreases with increasing depth , and the maximum porosity appears within a certain distance from gypsum-salt rock. Statistical results on the distribution of gypsum-salt rock and the height of hydrocarbon bearing strata show that most reservoirs in gypsum-salt area distribute below 0 ~ 50 meters thickness of gypsum-salt strata , only 50 meters thickness gypsum-salt strata could seal 500 meters height of hydrocarbon , and gypsum-salt layers plugging maximum oil height is to be significantly greater than that of gas. Gypsum-salt rock has strong plasticity , which is apt to form kinds of traps under gypsum-salt , inter gypsum-salt , upper gypsum-salt and at the edge of gypsum-salt.

Under the similar structural conditions , the abnormal formation pressure under the thicker gypsum-salt rock is significantly greater than that at the edge of gypsum-salt rock , so the oil and gas is easier to be filled and preserved in the traps at the edge of gypsum-salt rock. Even there has oil and gas migrating towards gypsum-salt rocks , mostly will be affected by abnormal pressure at the edge of gypsum-salt rock and accumulated. The strong vertical packer role of gypsum-salt rock on oil and gas is conducive to its lateral migration in the sandbody below gypsum-salt layer.

Synthetical analysis lead to that hydrocarbon in northern Dongpu depression shows ring or semi-ring shaped distribution around the thickness center of gypsum-salt layer. At the edge area of gypsum-salt rock not only has good source rock and good trap conditions , but also has proper hydrocarbon charging pathway and dynamics , so it becomes the most favourable area for oil and gas accumulation.

Key words: gypsum-salt rock; organic matter; oil and gas generation; oil and gas migration and accumulation; oil and gas distribution; Dongpu depression