

引用: 张宏国, 吕丁友, 官大勇, 等. 辽东湾地区辽中凹陷东营组湖底扇成藏差异性研究 [J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):95-106.

Zhang Hongguo, Lv Dingyou, Guan Dayong, et al. Study on hydrocarbon accumulation difference of sub-lacustrine fan in Dongying Formation in Liao Zhong Sag, Liaodong Bay [J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):95-106.

辽东湾地区辽中凹陷东营组湖底扇成藏差异性研究

张宏国 吕丁友 官大勇 王启明 刘军钊

(中海石油(中国)有限公司天津分公司)

摘要: 渤海油田隐蔽油气藏勘探集中于辽中凹陷东营组湖底扇, 不同构造区带湖底扇勘探成效差异很大。通过对辽中凹陷构造格架、沉积体系特征的对比研究, 结合已钻湖底扇油气藏分布规律, 认为深层汇聚能力、区域泥岩盖层厚度和烃源超压三大主控因素决定了湖底扇油气富集的程度, 特别是深部结构特征形成的汇聚脊对他源型湖底扇高丰度油气藏形成具有至关重要的作用。据此将辽中凹陷东营组湖底扇成藏分为“汇聚脊—断层”“输导脊—断层”“烃源岩—断层”3种运移模式。辽中凹陷南洼凹陷区发育反转型汇聚脊, 中洼西斜坡带发育断隆型汇聚脊, 是寻找高丰度湖底扇油气藏的有利区带。上述运移模式的建立对他源成藏层系勘探具有一定的借鉴意义。

关键词: 辽中凹陷; 东营组; 湖底扇; 运移模式; 汇聚脊

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.03.009

Study on hydrocarbon accumulation difference of sub-lacustrine fan in Dongying Formation in Liao Zhong Sag, Liaodong Bay

Zhang Hongguo, Lv Dingyou, Guan Dayong, Wang Qiming, Liu Junzhao

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd.)

Abstract: The exploration of subtle reservoirs in Bohai Oilfield is concentrated in the sub-lacustrine fan of Dongying Formation in Liao Zhong Sag, which has greatly different results in different structural zones. The correlation study of structural framework and sedimentary system characteristics in Liao Zhong Sag, and the distribution law of sub-lacustrine fan oil and gas reservoirs from well data, indicate that the enrichment degree of hydrocarbon in sub-lacustrine fan is mainly controlled by three factors, namely the accumulation capability in deep formation, thickness of regional mudstone caprock and overpressure of source kitchen. In particular, the catchment ridge formed in deep structures plays an important role in forming high-abundant external source type sub-lacustrine fan oil and gas reservoirs. Based on this understanding, hydrocarbon migration and accumulation pattern of sub-lacustrine fan oil and gas reservoirs in Dongying Formation in Liao Zhong Sag is divided into three types, i.e., “catchment ridge – fault”, “transporting ridge – fault” and “source rock – fault”. The inversion type catchment ridge in the sag areas of southern sub-sag, and fault – uplifting type catchment ridge in the western slope of central sub-sag in Liao Zhong Sag are favorable plays for searching for high abundant sub-lacustrine fan oil and gas reservoirs. The above migration model has a certain reference significance for the exploration of other external source type oil and gas reservoirs.

Key words: Liao Zhong Sag, Dongying Formation, sub-lacustrine fan, migration model, catchment ridge

基金项目: 国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术(三期)”(2016ZX05024-002-006); 中国海油“七年行动计划”重大科技专项课题“渤海油田上产4000万吨新领域勘探关键技术”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 08 TJ); 中海石油(中国)有限公司自立科研项目“渤海海域典型地区汇聚脊控藏机理研究”(ZZKY-2019-TJ-01)。

第一作者简介: 张宏国(1986-), 男, 山东寿光人, 硕士, 2012年毕业于中国石油大学(华东), 高级工程师, 现主要从事渤海海域石油地质及油气勘探研究工作。地址: 天津市滨海新区海川路2121号海洋石油大厦B座, 邮政编码: 300459。E-mail: zhanghg2@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-11-16; 修改日期: 2021-04-19

0 引言

随着渤海油田勘探程度不断提高, 剩余构造圈闭数量越来越少, 规模越来越小, 隐蔽油气藏勘探方兴未艾^[1]。渤海油田隐蔽油气藏勘探始于20世纪80年代, 主要集中于凸起区、凹陷带中央反转带及陡坡带新近系明化镇组构造—岩性油气藏^[2-3], 发现了石臼坨凸起秦皇岛32-33油田群、黄河口凹陷渤中28-34油田群、黄河口凹陷北部陡坡带渤中29-4—渤中29-6油田群、莱北低凸起垦利6-1油田等。渤海油田古近系隐蔽油气藏勘探正处于快速发展阶段, 2013年发现秦皇岛29-2地层型油气藏, 借鉴渤海湾盆地陆上油田特别是中国近海隐蔽油气藏实践^[4-8], 古近系湖底扇日益成为渤海油田重要的勘探接替领域。截至2019年年底, 渤海油田以古近系湖底扇为目的层系的钻井共计14口, 其中辽中凹陷钻井12口, 勘探程度较低。

辽中凹陷在东营组沉积期东、西两侧物源充足, 发育大规模三角洲沉积体系, 在坡折作用下三角洲前缘滑塌, 发育大量浊积扇体^[9], 是渤海油田古近系湖底扇勘探主战场。前期在湖底扇沉积模式、储层预测等方面做了大量工作^[10-14], 对湖底扇储层把握程度较高, 12口已钻井扇体厚度为38~242m, 平均厚度为127m, 其中10口井砂岩含量为48%~85%, 平均砂岩含量为63%。但是不同构造单元, 甚至相同构造单元的湖底扇勘探成效迥然, 因此对于源外成藏的东营组湖底扇而言^[15-16], 油气运聚条件是制约勘探成效的关键。渤海油田油气运移与运移模式方面文献集中于凸起区、陡坡带及凹陷带中央走滑反转带^[17-19], 而湖底扇所在的斜坡带、凹陷带鲜见报道。本文在三维连片地震的基础上, 通过构造地层格架、湖底扇发育规律分析, 结合不同构造单元湖底扇勘探实例对比剖析, 建立东营组湖底扇油藏油气运移模式, 明确成藏主控因素, 达到预测源外岩性圈闭含油气丰度的目的。

1 地质概况

辽东湾地区在辽西1号、辽西2号等大断裂活动和区域性构造抬升共同控制下形成若干北东向构造单元^[20], 自东向西分别为辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西凸起、辽西凹陷。辽中凹陷整体呈长条状(图1a), 分为南洼、中洼、北洼3个次级单元, 主力烃源岩层系为沙河街组三段(沙三段)与沙河

街组一段(沙一段)^[15-16]。辽中凹陷为渤海油田三大富烃凹陷之一, 是辽东湾探区油气富集程度最高的区带(图1b), 从南往北发现了旅大10-1、绥中36-1、锦州25-1南等大中型油气田^[17], 凹陷区走滑反转带也发现了旅大27-2、旅大6-2、金县1-1等亿吨级油田^[19, 21]。辽中凹陷烃源充足, 东营组岩性圈闭埋深适中, 是渤海油田隐蔽油气藏勘探的主战场。已钻井揭示湖底扇分布在东营组二段下亚段(东二下亚段)及东营组三段(东三段)^[9], 表现为巨厚湖相泥岩中的粉—细砂岩, 成藏差异性明显。

2 构造地层格架

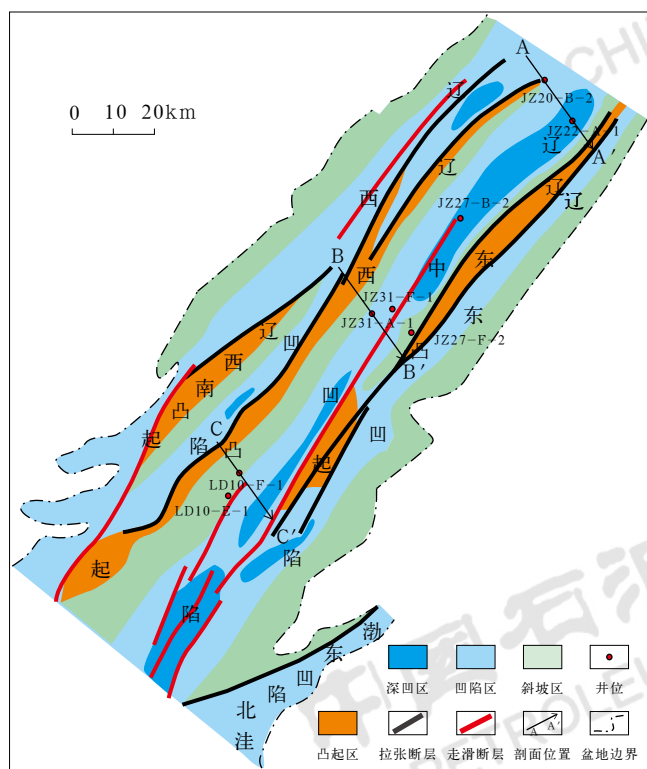
受郯庐断裂晚期差异性活动影响, 辽中凹陷的凹陷区发育走滑反转构造^[22], 主要分布在南洼、中洼。辽中凹陷向西以缓坡与辽西凸起相连, 东侧构造样式差异明显, 南洼以走滑反转带与辽东凹陷相连, 中洼以反转带、陡坡带与辽东凸起相连, 北洼以陡坡带与辽东凸起相连。湖底扇主要发育在斜坡区与凹陷区, 下面就上述两个区带做重点分析。

2.1 构造特征

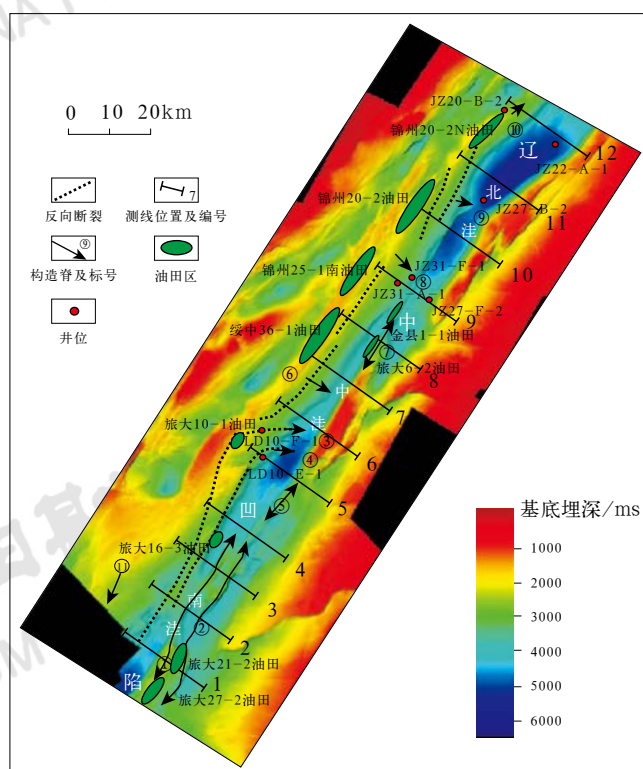
辽中凹陷斜坡区高部位发育北东向反向断裂形成的断隆带(图1b), 反向断裂性质、活动强度有所差异, 凹陷区走滑断裂在活动强度方面也不同。其中, 南洼对应的反向断层近乎直立, 为典型走滑断层, 平面上连续性好, 断隆带对应旅大16-3油田, 凸起区对应旅大9-3构造, 凹陷区走滑反转作用明显, 形成北东向①号、②号构造脊, 整体呈背斜形态。北洼对应的斜坡反向断层倾角略小, 走滑性质明显, 反向断层连续性变差, 断隆带无钻井, 对应南东向⑧号、⑨号构造脊, 凸起区对应锦州25-1南油田、锦州20-2油田, 凹陷区走滑反转不明显。中洼南部对应的斜坡反向断层走滑性质同样明显, 受南北向走滑体系控制形成了近东西走向的帚状大断层, 走滑—拉张性质明显, 形成③号、④号构造脊, 断隆带对应旅大10-F含油构造, 凸起区对应旅大10-1油田; 中洼北部对应的斜坡反向断层倾角相对较小, 具有一定的走滑性质, 形成南东向⑥号构造脊, 断隆带对应绥中36-B含油构造、锦州25-B含油构造, 凸起区对应绥中36-1油田。斜坡反向断层属于早期活动断层, 切穿潜山、沙河街组, 东营组演化为雁列式小断层。反向断层为油气横向运移的终止点^[23-24], 因此, ⑥号、⑧号、⑨号构造脊高部位受反向断层遮挡形成汇聚脊, 可为

东营组湖底扇提供良好的深层汇聚背景。帚状大断层形成③号、④号构造脊,即油气运移的“高速公路”,但没有油气侧向运移终止点,与汇聚脊有明显区别^[25],对东营组湖底扇成藏的贡献相对较小。凹陷区①号、

②号、⑤号、⑦号构造脊反转形成背斜圈闭,也属于汇聚脊类型。从深层汇聚角度,南洼凹陷区发育反转型汇聚脊,中洼、北洼斜坡带发育断隆型汇聚脊,对东营组湖底扇成藏具有积极意义。



(a) 辽东湾地区构造单元划分



(b) 辽中凹陷基底三维可视化

图1 辽东湾地区地质略图

Fig.1 Simplified geological map of Liaozhong Sag

2.2 地层特征

辽中凹陷发育沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组、平原组,古近系主沉降中心位于辽中北洼(图1b),中洼存在次级沉降中心^[26];新近系主沉降中心位于辽中凹陷南洼,北洼存在次级沉降中心。凹陷区、斜坡区低部位地层发育齐全;斜坡区高部位一般缺失沙三段,东营组厚度逐渐减薄;凸起区由南向北构造逐渐降低,南洼、中洼对应的凸起区一般缺失沙河街组,北洼对应的凸起区仅存在一定厚度的沙一段+沙二段。

东营组湖底扇一般发育在湖相细粒沉积环境中^[27],特别是对于凹陷带湖底扇而言,东三段泥岩盖层的厚度影响断层的垂向运移量。沿辽中凹陷长轴方向(北东向)统计凹陷区东营组厚度发现(图2),

南洼(测线1~3)受走滑反转影响,东三段厚度最大约为1504m;中洼(测线4~9)东三段厚度有所增加,最大约为2112m,按照地层厚度分布规律可细分为中南次洼(测线4~6)和中北次洼(测线7~9);北洼(测线10~12)是东三段沉积中心,厚度整体较大,最大约为3008m。东三段厚度整体呈现北厚南薄的特征,东二下亚段厚度也具有类似的分布规律。斜坡区东营组泥岩厚度要普遍小于凹陷区,厚度变化趋势与凹陷区相似。因此,当湖底扇处于相同层系时,中洼、南洼东营组泥岩盖层厚度较小,断层垂向运移量相对较大。

2.3 湖底扇纵向分布规律

辽中凹陷由于独特的古构造背景,具有发育规模型湖底扇的先天条件。受物源供应强弱及古地貌差异

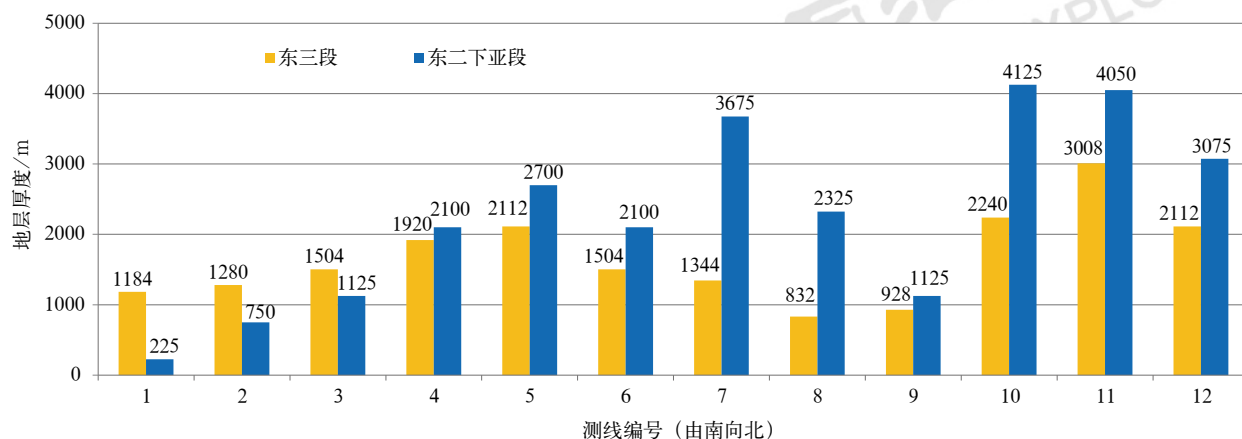


图2 辽中凹陷凹陷带东营组厚度最大值统计

Fig.2 Statistics of maximum thickness of Dongying Formation in sag areas in Liao Zhong Sag

控制^[12],湖底扇南北分布层位具有时空差异性。其中,南洼发育东三段湖底扇;中洼主要发育东三段湖底扇,少量东二下亚段湖底扇;北洼发育东二下亚段湖底扇(图3)。

辽中凹陷北洼东三段沉积时期,以强断陷为主要特征,由于缺乏相应的物源供给,不发育大型辫状河三角洲体系,以深湖相泥岩沉积为主;到东二下亚段沉积时期,北部的辽河水系发育大面积辫状河三角洲,沿北洼长轴方向注入和推进,在凹陷区有利的坡折位置发育多个规模型湖底扇,特别是在东二下亚段的高位体系域时期,湖底扇极为发育(JZ27-F井—JZ22-A井区),广泛分布在凹陷区,数量多^[11]。

辽中凹陷中南次洼东三段沉积时期,辽中凹陷主要受来自西部的燕山褶皱带物源供给影响,沿辽西凸起中南部四大物源通道注入,发育远源辫状河三角洲沉积,三角洲砂体在斜坡区沉积坡折等地貌突变处发生滑塌,易于形成湖底扇沉积,其中南洼三角洲砂体推进距离较远,湖底扇均发育在凹陷区(尚未钻遇),中洼三角洲砂体推进距离较近,湖底扇均发育在斜坡区(LD10-E井—LD10-F井—JZ31-A井区);东二下亚段沉积时期,由于地貌填平补齐作用,古地貌差异缩小,沉积坡折坡度变缓,虽然有大型远源辫状河三角洲发育,但古地貌条件不利于湖底扇形成和发育,仅在局部可容纳空间较大地区有小型湖底扇发育(JZ31-F井区)。

3 运移模式建立与主控因素分析

油气运聚条件是东营组源外湖底扇勘探的关键,

源外层系成藏丰度高低与深层的油气汇聚能力密不可分^[23],凸起区绥中36-1、旅大10-1等东营组大油田、走滑反转带金县1-1、旅大6-2等东营组亿吨级油田均处于良好的深层汇聚背景之上,莺歌海盆地、琼东南盆地底劈之上也有良好的发现^[28]。本次研究在深层汇聚能力评价的基础上,对辽中凹陷典型湖底扇运移模式进行剖析,明确斜坡区、凹陷区东营组湖底扇油气运移模式与主控因素。

3.1 斜坡区

3.1.1 JZ20-B-2井

JZ20-B-2井位于辽西凸起北倾没端,处于斜坡背景,东、西被辽中凹陷北洼、辽西凹陷北洼夹持,沙三段与沙一段为主力烃源岩层,东二下亚段发育湖底扇。湖底扇厚度为211.8m,砂层厚度为102.9m,砂岩含量为48.6%,钻遇油气层厚度为26.4m,探明烃柱高度为88m,测试日产油超过100m³,日产天然气超过50×10⁴m³,勘探成效较好。

JZ20-B-2井深部沙二段发育断超型圈闭,辫状河三角洲前缘砂体发育,属于源内成藏,储量规模大,成藏丰度较高,约为200×10⁴t/km²,为浅层的东二下亚段湖底扇提供良好的深层汇聚条件,长期活动的断裂沟通了沙二段油藏与东二下亚段湖底扇,油气运移路径通畅(图4)。从东二下亚段湖底扇与沙二段油源对比,以及天然气组分分析看,两者亲缘性明显(表1),进一步验证了沙二段油气藏为东二下亚段湖底扇油气成藏提供油气来源。因此,JZ20-B-2井东二下亚段湖底扇属于“汇聚脊—断层”运移模式。

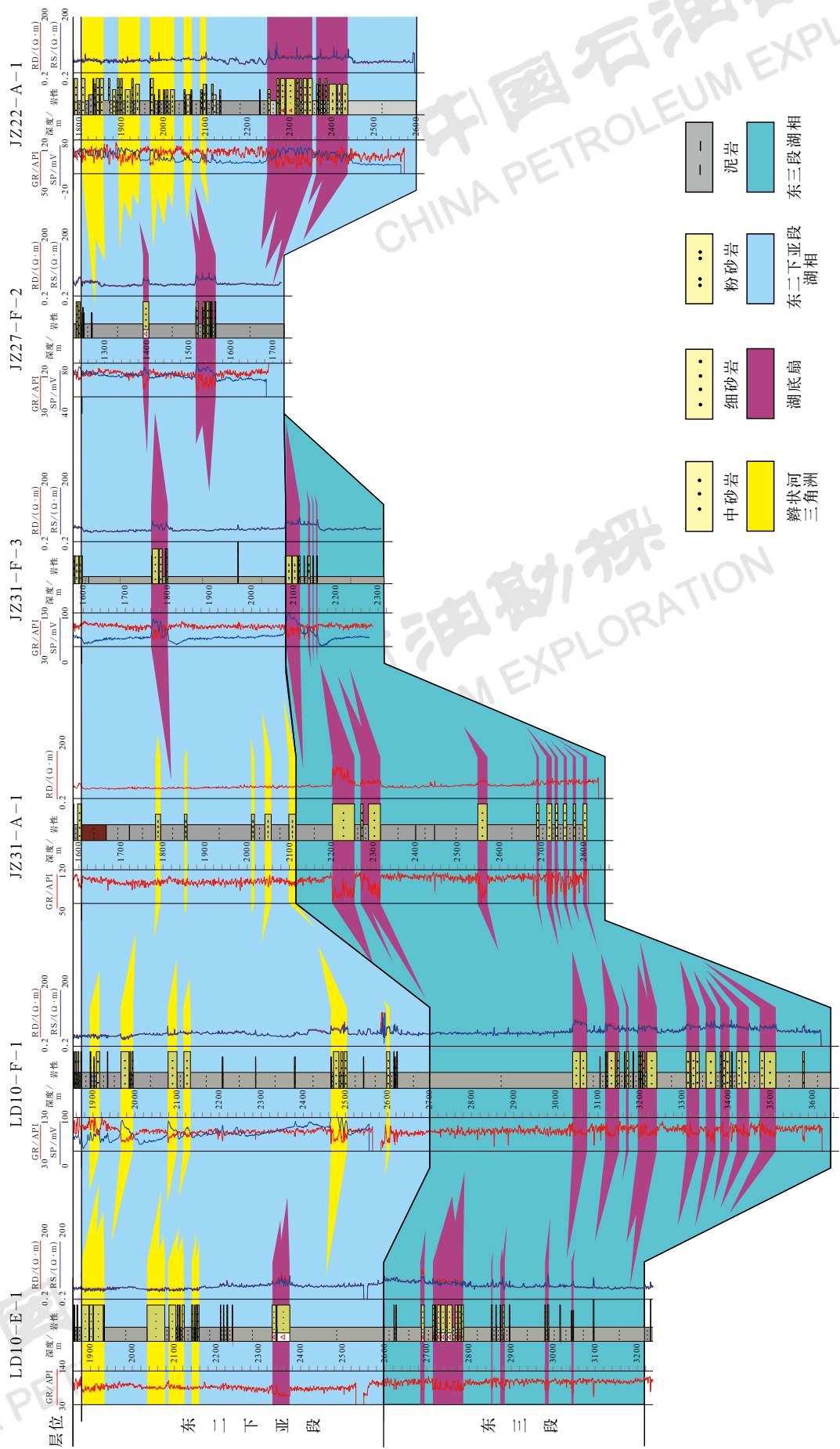


图 3 辽中凹陷东营组湖底扇连井剖面
Fig.3 Cross well profile of sub-lacustrine in Dongying Formation in Liaozhong Sag

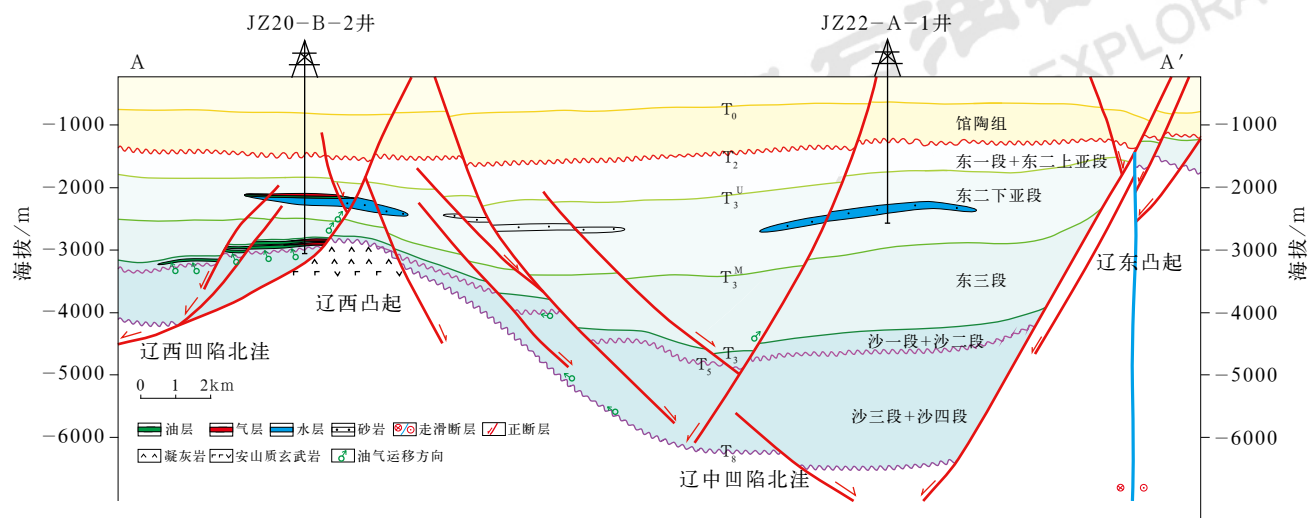


图4 过JZ20-B-2井油藏剖面(剖面位置见图1a)

Fig.4 Hydrocarbon accumulation profile cross Well JZ20-B-2 (profile location as in Fig.1a)

表1 JZ20-B-2井天然气组分数据表

Table 1 Natural gas components of Well JZ20-B-2

层位	相对密度	天然气组分/%									
		甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	己烷及以上	氮气	二氧化碳
东二下亚段	0.653	88.30	6.11	2.63	0.49	0.90	0.30	0.28	0.25	0.40	0.35
沙二段	0.682	84.70	7.19	3.08	0.55	0.97	0.27	0.26	0.21	0.31	2.45

3.1.1.2 LD10-F-1井

LD10-F-1井位于辽中凹陷中洼西斜坡,紧邻中洼生烃中心,沙三段与沙一段为主力烃源岩层,东三段也具有一定的油源贡献,湖底扇主要位于东三段,构造区对应的凸起区发现旅大10-1油田(图1a)。

LD10-F-1井东三段湖底扇厚度为412.6m,砂岩厚度为231.5m,砂岩含量为56.1%。该井湖底扇钻遇油层厚度为49.4m,顶部见气层,油层普遍见水,探明烃柱高度为25~45m(图5)。

LD10-F-1井深部潜山发育近东西向构造脊,

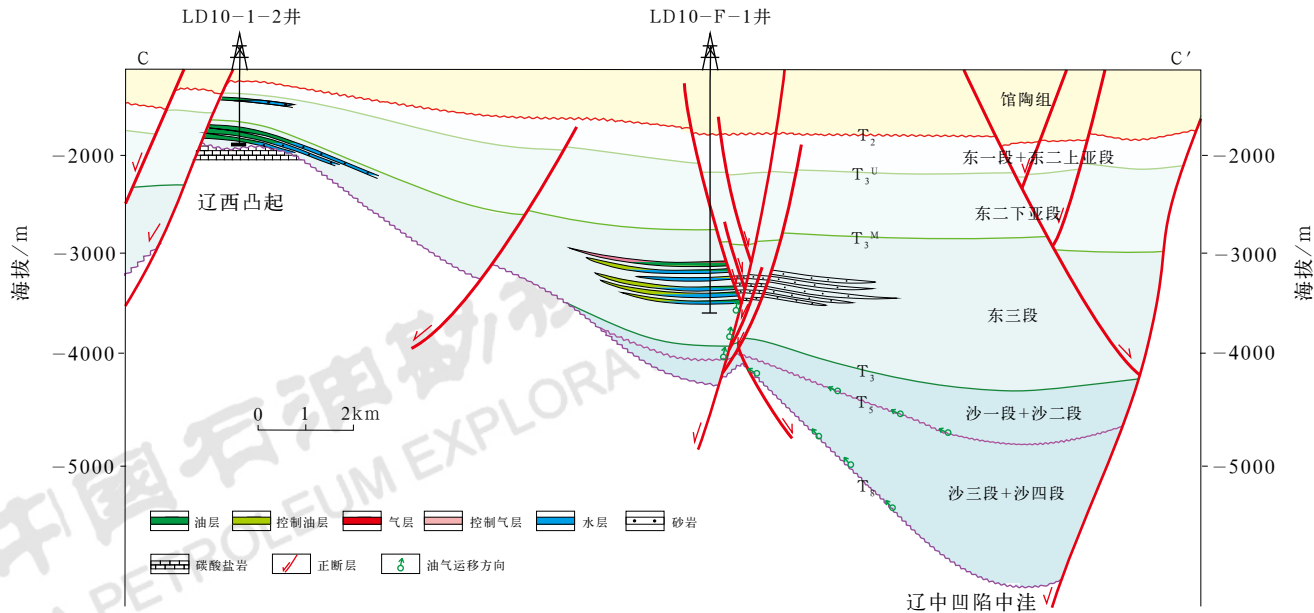


图5 辽中凹陷中洼过LD10-F-1井油藏剖面(剖面位置见图1a)

Fig.5 Hydrocarbon accumulation profile cross Well LD10-F-1 in central sub-sag (profile location as in Fig.1a)

构造脊的形成与近东西向大断层关系密切,构造脊高点均依附于大断层(图1b)。凹陷区油气优先沿潜山不整合面横向运移,斜坡区不存在横向运移的终止点,即不存在深层汇聚,因此长期活动大断层的垂向分流量相对有限,从而导致东三段湖底扇油层普遍见水。因此,LD10-F-1井东三段湖底扇属于“输导脊—断层”运移模式。

3.1.3 JZ27-F-2 井

JZ27-F-2井位于辽中凹陷北洼与辽东凸起之间的斜坡区,沙三段与沙一段为主力烃源岩,东二下亚段发育湖底扇。湖底扇砂体厚度为14.0m,钻遇含油层厚度为12.7m。该井深部无任何构造背景,长期活动大断层沟通烃源岩和湖底扇。凹陷区油气优先沿潜山不整合面横向运移,斜坡区不存在横向运移的终止点,即不存在深层汇聚背景,长期活动大断层的垂向分流量相对有限,加上东三段泥岩盖层的影响,从而使东二下亚段湖底扇含油丰度低。因此,JZ27-F-2井东二下亚段湖底扇属于“烃源岩—断层”运移模式。

3.1.4 运移主控因素分析

斜坡区油气运移已经形成优势运移路径,在东三

段湖底扇下伏泥岩厚度较小的条件下,汇聚脊是否发育、输导脊是否发育、断层与脊(汇聚脊、输导脊)的配置关系决定了垂向运移量。当斜坡区不发育输导脊时,断层仅仅与深部发散式运移路径接触,基本没有垂向运移量,油藏丰度极低,如JZ27-F-2井;当斜坡区发育输导脊时,断层与优势运移路径接触,若断层活动强度大,也能形成一定规模的垂向运移量,具备形成低—中等丰度油气藏的潜质,如LD10-F-1井;当斜坡区发育汇聚脊时,相当于对凹陷区油气进行了先期的富集,若切脊断层成藏期活动强度大,可以发生规模性垂向运移,具备形成高丰度油气藏的运移条件,如JZ20-B-2井。除此之外,断层在成藏期活动强度也是影响油气垂向运移的重要因素。

3.2 凹陷区

3.2.1 JZ31-A-1 井

JZ31-A-1井处于辽中凹陷北洼凹陷区(图1a),沙三段与沙一段为主力烃源岩层,东三段发育湖底扇。JZ31-A-1井湖底扇厚度为114.0m,砂层总厚度为74.1m,砂岩含量为65.0%。该井湖底扇钻遇气层厚度为32.2m,探明气柱高度为30m(图6)。

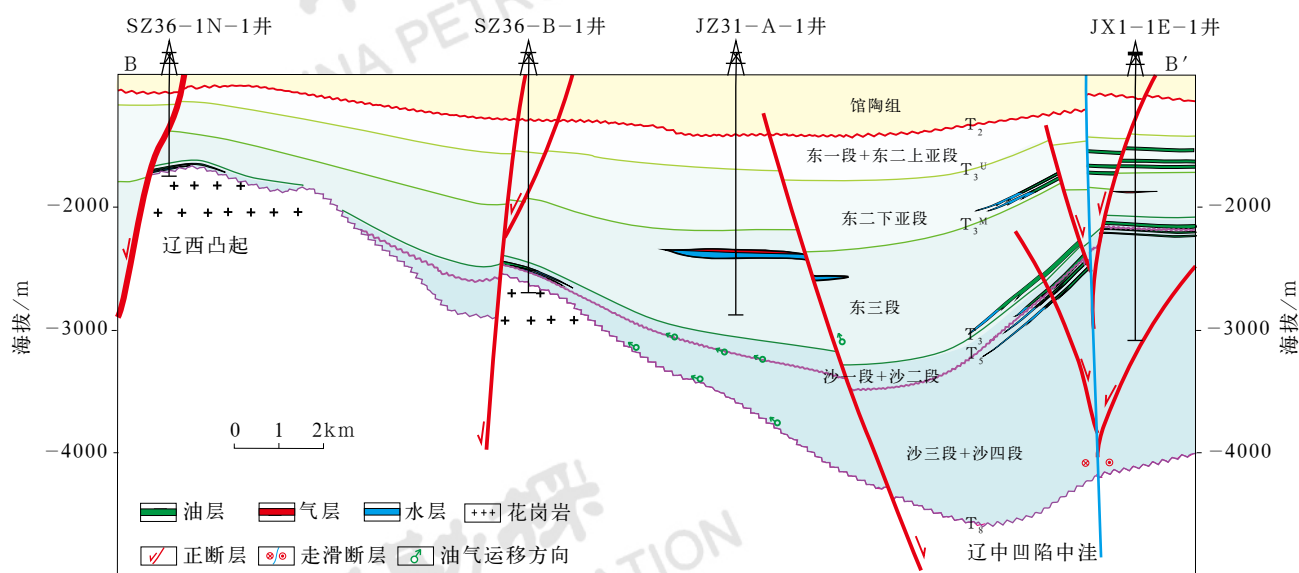


图6 过JZ31-A-1井油藏剖面(剖面位置见图1a)

Fig.6 Hydrocarbon accumulation profile cross Well JZ31-A-1 (profile location as in Fig.1a)

JZ31-A-1井深部不发育构造背景,仅依靠长期活动断层沟通烃源岩和东二下亚段湖底扇,因此在深层无汇聚背景、东营组泥岩盖层厚度大等因素控制下,断层垂向运移量十分有限,凹陷内生成的油气沿潜山

不整合面向斜坡区、凹陷区运移,形成了绥中36-2含油构造、绥中36-1北含油构造,仅有少量的天然气沿断层垂向运移至湖底扇成藏。因此,JZ31-A-1井东三段湖底扇属于“烃源岩—断层”运移模式。

3.2.2 JZ22-A-1 井

JZ22-A-1 井位于辽中凹陷北洼凹陷区, 沙三段与沙一段为主力烃源岩, 东二下亚段发育湖底扇(图4)。该井钻遇湖底扇厚度为 204.5m, 砂岩厚度为 117.3m, 砂岩含量为 57.4%, 其中油气显示厚度为 65.5m, 测井综合解释为水层。该井深部无汇聚背景, 长期活动大断层沟通烃源岩和湖底扇, 断层的垂向分流量极少, 加上东三段巨厚泥岩盖层的影响, 使东二下亚段湖底扇仅见油气显示。因此, JZ22-A-1 井东二下亚段湖底扇也属于“烃源岩—断层”运移模式。

3.2.3 运移主控因素分析

辽中凹陷的凹陷区沙三段广泛发育巨厚泥岩, 泥岩不均压压实从而产生超压, 沉积速率高于 $700\text{m}/\text{Ma}^{[29]}$, 且具备良好的生烃能力。另外东营组区域泥岩盖层厚度较大, 也是影响垂向运移量的因素。因此, 除深层汇聚这一决定性因素, 烃源超压、东营组泥岩盖层也对油气垂向运移有一定的影响。

例如, 处于辽中凹陷中洼的锦州 31-1 气田, 深层无汇聚背景, 沙三段厚度小、埋深浅, 压力系数为 1.2~1.4, 发育东营组湖底扇, 下伏东营组泥岩厚度为 810~1250m, JZ31-A-1 井、JZ31-F-1 井岩屑无油气显示, 仅有少量天然气沿断层垂向运移至湖底

扇。与 JZ31-F-1 井相比, JZ31-A-1 井下伏泥岩厚度相对较小, 其气层厚度为 33.2m, 高于 JZ31-F-1 井的 16.1m (图7)。JZ22-A-1 井和 JZ27-B-2 井处于北洼凹陷区正上方, 均无汇聚背景, 沙三段厚度大、埋藏浅, 压力系数为 1.8~1.9, 下伏东营组泥岩厚度为 2150~2200m。JZ22-A-1 井东营组湖底扇储层发育, 砂体厚度为 117.3m, 岩屑油气显示厚度为 65.5m, 含油饱和度为 0~31.3%, 平均为 18.0%, 测井解释均为水层; JZ27-B-2 井钻遇扇体边部, 储层不发育, 仅发育 0.8m/1 层粉砂岩, 测井解释含油水层厚度为 0.8m, 含油饱和度为 45.4% (图7)。这说明在显著生烃超压的助力下, 即使有 2150~2200m 厚的东营组泥岩盖层, JZ22-A-1 井、JZ27-B-2 井仍有原油充注, 而 JZ31-A-1 井、JZ31-F-1 井生烃超压不明显, 在 810~1250m 厚的泥岩盖层下仅有天然气充注。因此, 生烃超压和泥岩盖层条件是凹陷区东营组湖底扇成藏的重要影响因素。除此之外, 常规的断层晚期活动强度也会影响断层垂向运移能力, 当沙河街组超压条件和东营组泥岩盖层厚度相当时, JZ27-B-2 井对应断层晚期断距为 120m, JZ22-A-1 井断层晚期断距为 32m, JZ27-B-2 井原油垂向运移量较多, 含油饱和度相对较高。

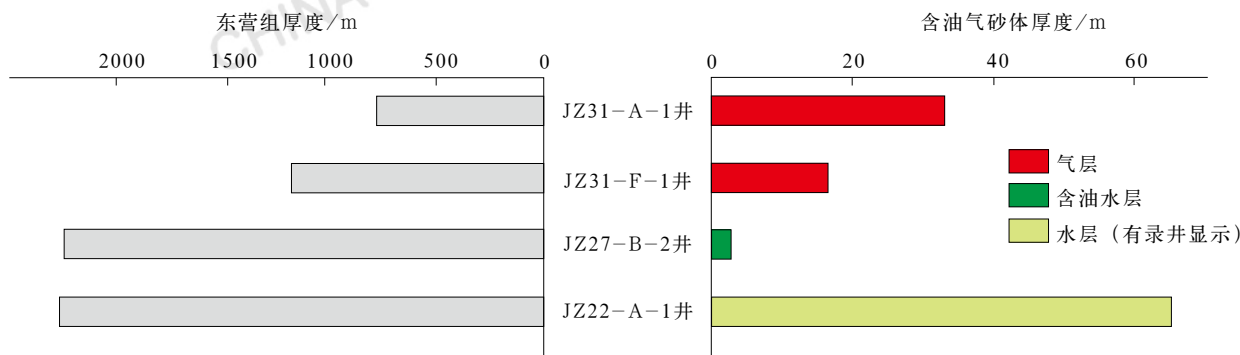


图7 辽中北洼湖底扇东营组厚度和含油气性统计

Fig.7 Statistics of formation thickness and oil-bearing properties of sub-lacustrine of Dongying Formation in the northern sub-sag

4 运移模式划分

深层汇聚脊是东营组湖底扇油气成藏丰度的主控因素。凹陷区沙河街组生成的油气运移遇到侧向终止点(断隆构造、超覆构造、断超构造等)便聚集形成原生气藏, 即汇聚脊; 若没有侧向终止点, 则油气沿不整合面横向输导, 在斜坡带过而不留, 最终到达凸起区成藏, 即斜坡区存在输导脊。因此, 汇聚脊包

括汇、聚两个部分, 其中汇是指形成油气优势运移路径, 而聚则是指优势运移路径之上的终止点, 与圈闭的概念相似。汇聚脊对应的 JZ20-B-2 井、输导脊对应的 LD10-F-1 井、无脊对应的 JZ31-A-1 井和 JZ22-A-1 井, 成藏丰度差异明显。因此, 按照深层汇聚条件(汇聚脊、输导脊、无脊)将运移模式分为三大类 11 种(图8)。

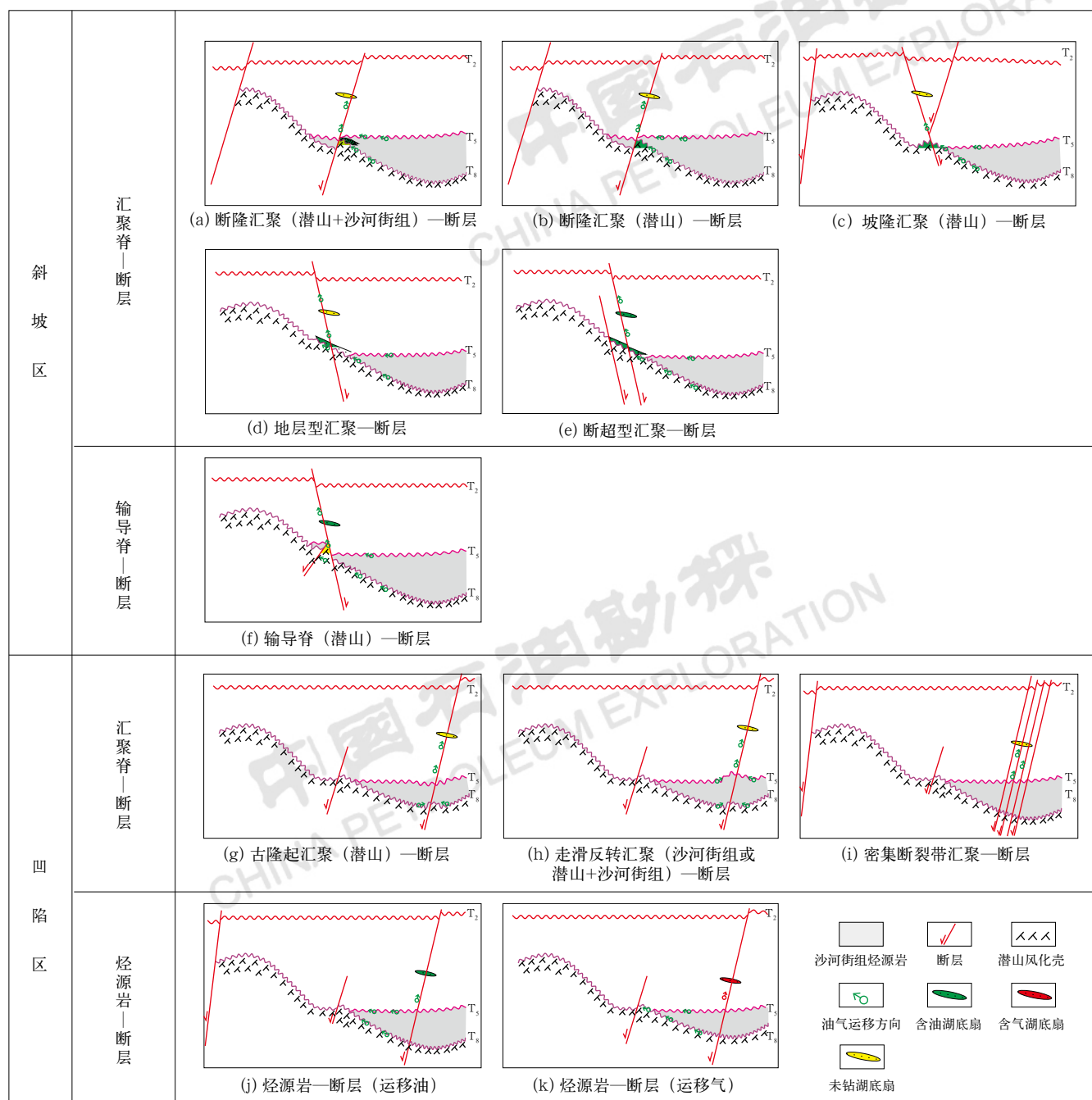


图8 辽中凹陷斜坡区、凹陷区油气运移模式

Fig.8 Hydrocarbon migration models in slope and sag areas in Liao Zhong Sag

4.1 斜坡区

辽中凹陷斜坡区深层既包括断隆、坡隆等构造性汇聚脊,也包括地层型、断超型等隐性汇聚脊,相应的形成5种运移模式(图8a—e)。其中,断隆汇聚—断层模式一般发育在斜坡较高部位,沙河街组可能披覆于潜山之上,往往形成潜山、沙河街组双重汇聚的效果,汇聚空间较大(图8a、b);坡隆汇聚—断层模式一般发育在大断层下降盘的滚动背斜区,或者火

山岩上拱区,一般以潜山汇聚为主(图8c);地层型汇聚—断层模式一般发育在凸起边缘,沙河街组砂岩超覆于潜山不整合面之上,形成地层型汇聚(图8d);断超型汇聚—断层模式一般发育在斜坡高部位,大断层完全错断沙河街组砂体形成断超型汇聚(图8e)。

关于断隆汇聚—断层模式,辽中凹陷西斜坡区高部位发育北东向反向断层,稳定分布,发育断隆型汇聚脊,潜山风化壳受限于潜山岩性,汇聚空间有限,

因此在沙河街组砂体发育的条件下,有可能形成断隆汇聚(沙河街组)一断层模式,有望成为辽中凹陷西部斜坡区重要的储量接替区。近期在辽中凹陷中洼斜坡区钻探 LD10-F-2 井,获得良好勘探成效,油气层厚度超过 100m,最大油柱高度为 150m,最大气柱高度为 195m,测试获得高产轻质油气流,证实了斜坡区深层汇聚脊的控藏作用。

4.2 凹陷区

凹陷区发育古隆起、走滑反转、密集断裂带等 3 种类型汇聚脊,相应的形成 3 种油气运移模式(图 8g—i)。在古隆起汇聚一断层模式中,古隆起一般指基底潜山(图 8g);在走滑反转汇聚一断层模式中,走滑反转的时期和强度是影响汇聚的关键因素,反转时期较早、反转强度较大时,潜山和沙河街组可形成双重汇聚的效果(图 8h);密集断裂带汇聚一断层模式中,密集断裂带是指一系列在相同应力场背景下密集发育的断裂体系,应力的大规模释放形成低势区,从而有一定的汇聚效果(图 8i)。

关于走滑反转汇聚一断层模式,辽中凹陷南洼、中洼在东营组沉积早期反转,新近纪反转定型,潜山、沙河街组均发生一定程度反转,其中辽中凹陷南洼凹陷区反转强度较大,在沙河街组形成了背斜圈闭,具有良好的汇聚背景,因此辽中凹陷南洼反转区具备形成高丰度湖底扇油气藏的潜质。

关于凹陷区密集断裂带汇聚一断层模式,尚无湖底扇勘探实例(图 8i),但其具备规模性垂向运移能力已被证实。绥中 36-1 油田油区主力油层为东二下亚段辫状河三角洲前缘砂体,以断裂为界分为凸起区和斜坡区。钻探结果表明,位于斜坡区最低部位的 15 井东二下亚段砂体的第 5、第 9 小层解释为水层,录井见 C 级油气显示;位于斜坡区较高部位的 C2 井第 5 小层为油层,第 9 小层为水层,凸起区 5 井对应的第 5、第 9 小层均为油层(图 9),这说明油田的斜坡区油藏是油气沿断裂带垂向运移,然后沿东二下亚段砂体横向运聚成藏。这也表明,凹陷区密集断裂带释压程度高,形成明显的低势区,具备一定汇聚能力,因此凹陷区密集断裂带上方的岩性圈闭也具有勘探潜力。

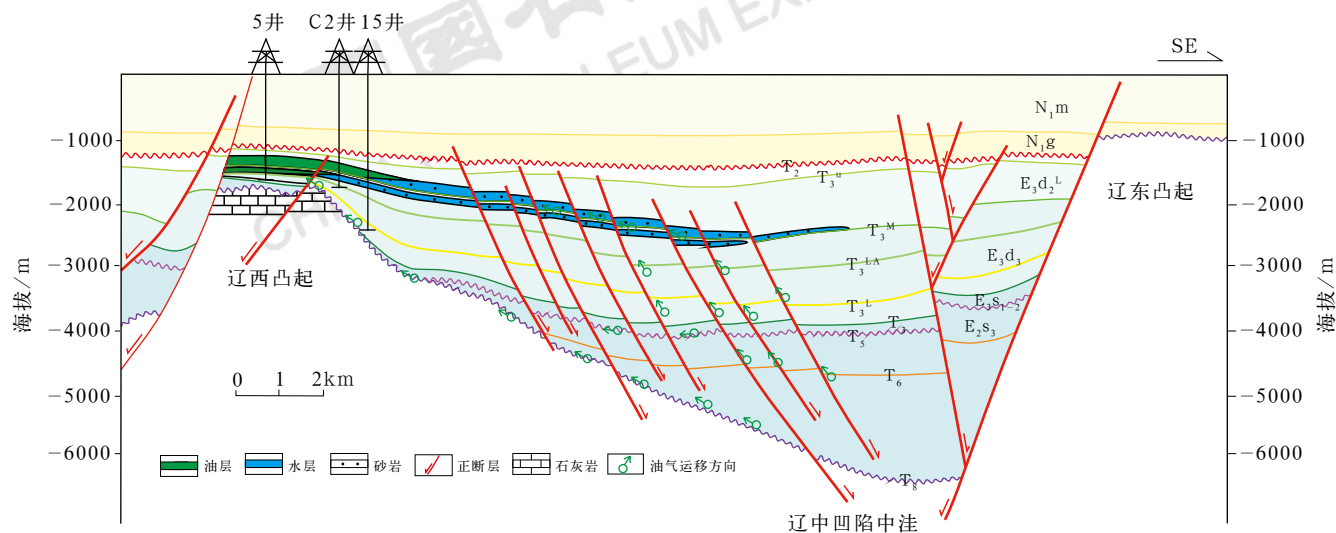


图9 辽中中洼过绥中 36-1 油田油藏剖面

Fig.9 Hydrocarbon accumulation profile cross Oilfield SZ36-1 in central sub-sag

5 结论

(1) 辽中凹陷西部斜坡区发育反向断层,形成断隆构造;凹陷区受走滑断层影响发育反转构造。辽中凹陷湖底扇分布的区带和层系差异性明显,南洼湖底扇主要发育在东三段,分布在凹陷区;中洼湖底扇主要发育在东三段,分布在斜坡区;北洼湖底扇主要发育在东二下亚段,分布在凹陷区。

(2) 辽中凹陷的凹陷区已钻揭湖底扇无深层汇聚背景,东营组区域泥岩盖层封盖能力较强,仅形成少量天然气藏;斜坡区已钻湖底扇深层汇聚能力差异明显,当断层切至汇聚脊时,垂向运移量充足,形成高丰度油气藏。

(3) 汇聚脊的发育控制了辽中凹陷东营组湖底扇油气成藏丰度。其他条件相当时,汇聚脊一断层型湖底扇油气成藏丰度较高,输导脊一断层型湖底扇油气

成藏丰度中等,烃源岩—断层型湖底扇油气成藏丰度较低。另外,凹陷区东三段泥岩盖层、沙河街组生烃超压也影响油气垂向运移量。

(4) 辽中凹陷凹陷区优先寻找凹中隆汇聚脊、反转汇聚脊,“沿脊寻断找扇”;斜坡区优先寻找断隆汇聚脊、坡隆汇聚脊,断超汇聚脊多发育在凸起倾没端,当潜山风化壳与沙河街组砂岩形成复合型汇聚脊时,深层汇聚能力更强,更有利于寻找高丰度油气藏。

参考文献

- [1] 薛永安,柴永波,周园园. 近期渤海海域油气勘探的新突破[J]. 中国海上油气, 2015,27(1):1-9.
Xue Yong'an, Chai Yongbo, Zhou Yuanyuan. Recent new breakthrough in hydrocarbon exploration in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(1):1-9.
- [2] 杨海风,牛成民,柳永军,等. 渤海垦利6-1新近系大型岩性油藏勘探发现与关键技术[J]. 中国石油勘探, 2020,25(3):28-36.
Yang Haifeng, Niu Chengmin, Liu Yongjun, et al. Discovery and key exploration technology of KL6-1 large lithologic oil reservoir of Neogene in the Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(3):28-36.
- [3] 王德英,于娅,张黎,等. 渤海海域石臼坨凸起大型岩性油气藏成藏关键要素[J]. 岩性油气藏, 2020,32(1):1-10.
Wang Deying, Yu Ya, Zhang Li, et al. Key factors for reservoir formation of large lithologic reservoirs in Shijiutuo Uplift, Bohai Sea[J]. Lithologic Reservoirs, 2020,32(1):1-10.
- [4] 周立宏,陈长伟,韩国猛,等. 断陷湖盆异重流沉积特征与分布模式——以歧口凹陷板桥斜坡沙一下亚段为例[J]. 中国石油勘探, 2018,23(4):11-20.
Zhou Lihong, Chen Changwei, Han Guomeng, et al. Sedimentary characteristics and distribution patterns of hyperpycnal flow in rifted lacustrine basins: a case study on lower Es₁ of Banqiao slope in Qikou Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(4):11-20.
- [5] 周心怀,高顺莉,高伟中,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2):153-164.
Zhou Xinhui, Gao Shunli, Gao Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(2): 153-164.
- [6] 胡德胜,范彩伟,朱洪涛,等. 涠西南凹陷流一段高位体系域湖底扇沉积特征及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2020,25(5):23-31.
Hu Desheng, Fan Caiwei, Zhu Hongtao, et al. Sedimentary characteristics and exploration significance of sub-lacustrine fan of highstand system tract in the first member of Liushagang Formation in the Weixinan Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(5):23-31.
- [7] 薛永安,张新涛,牛成民. 辽西凸起南段斜坡带油气地质新认识与勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2019,24(4):449-456.
Xue Yong'an, Zhang Xintao, Niu Chengmin. New geological understandings and prospecting breakthrough in slope zone of southern Liaoxi uplift[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4):449-456.
- [8] 宋明水. 渤海海域埕岛东坡东营组砂体成因及油气富集特征[J]. 中国石油勘探, 2020,25(4):31-42.
Song Mingshui. Sand body genesis and hydrocarbon accumulation characteristics of the Dongying Formation in the east slope of the Chengdao area, Bohai Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(4):31-42.
- [9] 朱筱敏,董艳蕾,杨俊生,等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2008,38(增刊1):1-10.
Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Yang Junsheng, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary system distribution of paleogene in Liaodong Bay area[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2008,38(S1):1-10.
- [10] 吴奎,吴俊刚,张中巧,等. 辽中凹陷北部湖底扇沉积模式及地震响应特征[J]. 东北石油大学学报, 2012,36(5):33-37,50.
Wu Kui, Wu Jungang, Zhang Zhongqiao, et al. Sedimentary model and seismic response characteristics of the sublacustrine fan in northern Liaozhong Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012,36(5):33-37,50.
- [11] 刘艺萌,张黎,黄晓波,等. 辽中凹陷北洼古近系东二下亚段湖底扇沉积类型及时空演化机理分析[J]. 沉积学报, 2019,37(6):1280-1295.
Liu Yimeng, Zhang Li, Huang Xiaobo, et al. Sedimentary types and genetic mechanism of the space-time evolution of sublacustrine fans of the paleogene in lower Ed₂ Formation, northern sub-sag of the Liaozhong Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019,37(6):1280-1295.
- [12] 项华,徐长贵. 渤海海域古近系隐蔽油气藏层序地层学特征[J]. 石油学报, 2006,27(2):11-15.
Xiang Hua, Xu Changgui. Sequence stratigraphic characteristics of subtle oil-gas pool in the palaeogene of Bohai Sea area[J]. Acta Perolei Sinica, 2006,27(2):11-15.
- [13] 高伟,张志军,郭军,等. 辽东湾地区东营组湖底扇地震响应机理分析及储层描述[J]. 中国海上油气, 2017,29(5):48-55.
Gao Wei, Zhang Zhijun, Guo Jun, et al. Seismic response mechanism analysis and reservoir description for sub-lacustrine fan of Dongying Formation in Liaodong Bay[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017,29(5):48-55.
- [14] 王志萍,王保全,刘艺萌,等. 渤海油田JZ31构造东二段湖底扇地震沉积学研究[J]. 断块油气田, 2017,24(4):452-455.
Wang Zhiping, Wang Baoquan, Liu Yimeng, et al. Seismic sedimentology research on sub-lacustrine fan of second member of Dongying Formation in JZ31 structure of Bohai Oilfield[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2017,24(4):452-455.
- [15] 田金强,邹华耀,周心怀,等. 辽东湾地区烃源岩生物标志物特征与油源对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011,35(4): 53-58.
Tian Jinqiang, Zou Huayao, Zhou Xinhui, et al. Biomarker characteristics of source rocks and oil-source correlation in Liaodong Bay[J]. Journal of China University of Petroleum (Science & Technology Edition), 2011,35(4):53-58.
- [16] 侯庆杰,金强,牛成民,等. 辽东湾地区主力烃源岩分布特征与主控因素[J]. 地球科学, 2018,43(6):2160-2171.
Hou Qingjie, Jin Qiang, Niu Chengmin, et al. Distribution

- characteristics and main controlling factors of main hydrocarbon source rocks in Liaodong Bay area[J]. *Earth Science*, 2018,43(6):2160–2171.
- [17] 李维莲, 刘震, 刘俊榜, 等. 辽东湾地区辽西低凸起油气田成藏地质条件的差异[J]. *石油与天然气地质*, 2010,31(5):664–670.
Li Weilian, Liu Zhen, Liu Junbang, *et al.* Differences of geological conditions of hydrocarbon accumulation among fields in the Liaoxi low Uplift, the Liaodong Bay[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010,31(5):664–670.
- [18] 杨宝林, 叶加仁, 王子嵩, 等. 辽东湾断陷油气成藏模式及主控因素[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014,39(10):1507–1520.
Yang Baolin, Ye Jiaren, Wang Zisong, *et al.* Hydrocarbon accumulation models and main controlling factors in Liaodong Bay Depression[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014,39(10):1507–1520.
- [19] 肖锦泉, 李坤, 胡贺伟, 等. 辽东湾断陷辽中凹陷金县1-1油田构造特征与油气成藏[J]. *天然气地球科学*, 2014,25(3):333–340.
Xiao Jinquan, Li Kun, Hu Hewei, *et al.* Tectonic feature and hydrocarbon accumulation of Jinxian1-1 Oilfield at Liaozhong Sag in Liaodongwan Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014,25(3):333–340.
- [20] 李伟, 戚建庆, 周东红, 等. 辽东湾断陷辽西凸起的形成与演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2019,43(5):911–923.
Li Wei, Qi Jianqing, Zhou Donghong, *et al.* Formation and evolution of Liaoxi Dome, Liaodong Bay Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019,43(5):911–923.
- [21] 刘丰, 吴奎, 王冰洁, 等. 辽东湾断陷辽中南洼旅大16油田原油特征差异与成藏过程[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017,36(1):1–9.
Liu Feng, Wu Kui, Wang Bingjie, *et al.* Differences of the crude oil characteristics and hydrocarbon accumulation process for Oilfield Luda 16 in south Liaozhong Sag of Liaodong Bay Depression[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2017,36(1):1–9.
- [22] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海辽东湾断陷走滑断裂差异变形特征[J]. *石油与天然气地质*, 2014,35(5):632–638.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, *et al.* Differential deformation of strike slip faults in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014,35(5):632–638.
- [23] 薛永安. 渤海海域油气运移“汇聚脊”模式及其对新近系油气成藏的控制[J]. *石油学报*, 2018,39(9):963–970,1005.
Xue Yong'an. The “catchment ridge” model of hydrocarbon migration in Bohai Sea and its control on Neogene hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018,39(9): 963–970,1005.
- [24] 王德英, 薛永安, 于海波, 等. 渤中凹陷斜坡类型与新近系油气成藏特征[J]. *中国海上油气*, 2019,31(4):9–18.
Wang Deying, Xue Yong'an, Yu Haibo, *et al.* Slope types and Neogene hydrocarbon accumulation characteristics of Bozhong Sag in Bohai Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019,31(4):9–18.
- [25] 张宏国, 王昕, 官大勇, 等. 渤海海域蓬莱9-A油田输导脊研究及应用[J]. *中国石油勘探*, 2018,23(4):51–57.
Zhang Hongguo, Wang Xin, Guan Dayong, *et al.* Research and application of transport ridges in Penglai 9-A Oilfield in Bohai Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018,23(4):51–57.
- [26] 徐长贵, 朱秀香, 史翠娥, 等. 辽东湾断陷古近系东营组泥岩对油气藏分布的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2009,30(4):431–437.
Xu Changgui, Zhu Xiuxiang, Shi Cui'e, *et al.* Control of the Dongying Formation mudstone upon the distribution of hydrocarbon accumulation in the Liaodong Bay Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009,30(4):431–437.
- [27] 吴小红, 吕修祥, 加东辉, 等. 辽中凹陷东营组重力流发育机制及沉积构成[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009,31(4): 18–23.
Wu Xiaohong, Lv Xiuxiang, Jia Donghui, *et al.* Formation mechanism and facies architecture of gravity current of Dongying Formation in Liaozhong Sag[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009,31(4):18–23.
- [28] 杨东升, 赵志刚, 杨海长, 等. 琼东南盆地乐东—陵水凹陷底辟构造及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2018,23(3):64–73.
Yang Dongsheng, Zhao Zhigang, Yang Haizhang, *et al.* Diapir structure and its significance to hydrocarbon accumulation in Ledong–Lingshui Sag, the Qiongdongnan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018,23(3):64–73.
- [29] 彭波, 郝芳, 邹华耀. 辽东湾地区辽中北洼超压的发育演化及油气幕式成藏[J]. *地质评论*, 2013,59(6):1257–1267.
Peng Bo, Hao Fang, Zou Huayao. Development and evolution of overpressure and episodic hydrocarbon accumulation in northern Liaozhong subdepression of Liaodong Bay area[J]. *Geological Review*, 2013,59(6):1257–1267.