

文章编号:0253-9985(2011)05-0637-05

渤海浅层油气富集规律

——以黄河口凹陷为例

王应斌¹, 黄雷^{2,1}, 王强¹, 张友¹

[1. 中国海洋石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300452; 2. 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069]

摘要:黄河口凹陷是渤海湾盆地的一富烃凹陷,受新构造运动影响浅层断层异常发育。利用大量的油气勘探资料对凹陷内油气聚集成藏影响因素分析认为,这些新构造运动形成的断层对浅层油气聚集起到重要的控制作用。通过对断层组合类型及其控制下的油气藏分析,最终归纳出3种不同类型的断层组合及相应的富集成藏模式,并进一步明确指出在这3类断层组合构造中针对油气富集块(区)的勘探首选目标所在:“X”型断层组合形成的垒块油藏具有油气聚集井段长,油气藏规模较大的特点,是勘探的首选目标;“包心菜式”断层组合花心部位和内花瓣部位具有较优越的成藏条件,是该类断层组合带内的优选钻探部位;“Y”型断层组合在靠近主断层的构造高部位油气藏丰度较高,是勘探的首选。

关键词:断层组合;油气富集规律;浅层;郯庐断裂;黄河口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation in the shallow reservoirs of the Bohai Bay Basin: a case study of the Huanghekou Sag

Wang Yingbin¹, Huang Lei^{1,2}, Wang Qiang¹ and Zhang You¹

(1. CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: As one of the petroliferous sags of Bohai Bay Basin, Huanghekou sag is abundant in shallow faults resulted from neotectonic movement. An analysis of the factors controlling hydrocarbon accumulation in the sag based on the abundant exploration data shows that these shallow faults play a key role in controlling hydrocarbon accumulation in the shallow reservoirs. Through the study on the fault combinations and the reservoirs under their control, we recognized three types of fault combinations and the corresponding hydrocarbon accumulation models. Moreover, we also identified the primary exploration targets for these fault combinations. For the ‘X’-type fault combination, fault block reservoirs featuring in long hydrocarbon-bearing interval and large scale are the primary targets. For the ‘cabbage’-type fault combination, the core and inner fault blocks are the primary targets. For the ‘Y’-type fault combination, the structural high near the main fault usually are the primary targets.

Key words: fault combination, hydrocarbon accumulation, shallow reservoir, Tanlu fault, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

黄河口凹陷位于渤海湾盆地东南部,是一个已被勘探所证实的富烃凹陷。20世纪80年代初,以古近系为勘探目的层,发现了BZ34-2/4油气田,近几年来相继在新近系浅层发现BZ34, BZ29-4, BZ28-2S, BZ26-3等大批油气田,使

得黄河口凹陷发现油气当量累计超过6亿方。其中所发现油气绝大多数埋藏于中浅层,具有优质、高产的特点。

中国东部最著名的郯庐走滑断裂穿越黄河口凹陷,在新构造运动中,郯庐断裂的强烈活动,使

收稿日期:2010-07-01;修订日期:2011-06-03。

第一作者简介:王应斌(1964—),男,高级工程师,油气田勘探开发。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05023)。

得凹陷内部浅层断层异常发育。这也造就了区内构造圈闭多被断层复杂化,圈闭呈多断块破碎形态产出的特征^[1-2]。限于海上勘探钻井成本高,不可能和陆上一样对每个断块构造均实施预探,因此寻找经济性好的油气聚集高丰度区块对于海域勘探显得尤为重要。

针对凹陷内浅层断层异常发育、而油气发现又多在新近系浅层内的特点,本文通过对黄河口凹陷浅层勘探发现规律的总结,在综合分析影响油气聚集丰度因素基础上,着重就不同断层类型对油气聚集的影响进行了探讨。

1 地质背景

黄河口凹陷为新生代北断南超的不对称箕状断陷,处于渤海湾盆地渤中坳陷与济阳坳陷之间的过渡区,其南北分别以渤南凸起和垦东-青坨子凸起与两坳陷主体部分相隔,郯庐断裂穿过凹陷中央,分割凹陷呈东西两部分(图 1)。

黄河口凹陷新生代地层发育齐全,先后经历了古近系断陷期和新近系坳陷期两个阶段。与渤海其他凹陷的断陷演化同步^[3],黄河口凹陷古近系断陷期经历了 4 个幕式裂陷期,相应沉积了孔店组、沙河街组一东营组。其中孔店组沉积时期主要沉积了以河流冲积扇为主的棕红色砂泥岩沉积夹薄层灰色砂泥岩沉积;沙河街组四段上部为湖相深色泥岩沉积,下部为膏盐湖等沉积;沙河街组三段沉积了灰色、深灰色泥岩为主的深水湖相沉积;沙河街组一、二段、东营组三段以深水-浅水湖相沉积为主;东营组一段和二段以三角洲相沉积为主。从目前钻井钻遇地层来看,沙河街组三



图 1 黄河口凹陷构造区划图

Fig. 1 Tectonic zonation of the Huanghekou sag

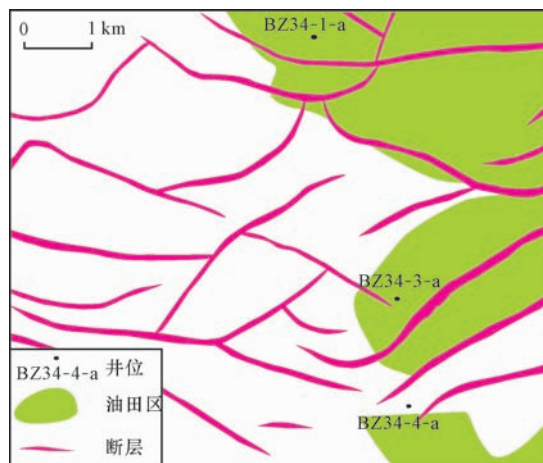


图 2 黄河口凹陷两组断层交织形成复杂断裂网络

Fig. 2 Two groups of faults networked with each other in Huanghekou sag

段中亚段、沙河街组一段及东营组三段的暗色泥岩是凹陷内主力烃源岩。新近系黄河口凹陷与渤海湾盆地其他凹陷同步进入裂后坳陷期,沉积明化镇组和馆陶组两套厚度大的杂色砂泥岩,前人普遍认为新近系属河流相沉积,最近的研究表明该区内存在浅水湖泊相沉积^[4-5]。第四纪以来新构造运动期(5.2 Ma 至今)凹陷又经历了快速沉积埋藏阶段^[6]。

受郯庐断裂活动的影响,凹陷内断层异常发育且复杂。凹陷内主要发育近 EW(或 NWW)向和 NNE 向两组走向的断裂。其中近 EW(或 NEE)的断层主要为正断层,被认为是蓬莱-张家口隐伏断层在新生代盆地中的露头^[7],这些近 EW 向断层控制着凹陷的格局,使凹陷整体呈现北断南超的箕状结构;NNE 向主断裂是郯庐断裂带在凹陷内的分支断层,具有明显的走滑性质,剖面上可见负花状构造和直立陡倾深插基底的断层,从浅层其与伴生断层的组合来看具有明显的右旋走滑性质。近 EW(或 NEE)向和 NNE 向两组走向的断裂相互交织切割,组成了区内复杂的断裂网络(图 2)。

2 油气富集成藏主控因素

目前勘探成果显示,黄河口凹陷在基础石油地质条件上,具备油气富集的物质基础与存在空间条件。首先沙河街组三段、沙河街组一段及东营组三段的暗色泥岩是凹陷内优质烃源岩(表 1),干酪根主要为 II 型,暗色泥岩段较厚,三层主

表1 黄河口凹陷主力烃源岩特征参数
Table 1 Parameters of the main source rocks in Huanghekou sag

层位	$E_3d^{2(下)}$	E_3d^3	E_3s^{1+2}	$E_2s^{3(中)}$	$E_2s^{3(下)}$
泥岩厚度/m	165	145	51	126	240
$(S_1 + S_2)/(mg \cdot g^{-1})$	4.36	6.74	6.64	19.64	19.82
SPI	1.860	2.537	0.880	6.453	12.426
TOC, %	1.1	1.5	1.8	2.4	3.7
干酪根类型	II ₂	II ₂	II ₁ - II ₂	II ₁	

力烃源岩累计厚达 600 ~ 700 m, 且均已进入成熟期。如此发育的优质烃原岩为油气的富集成藏提供了物质基础。其次, 新近系浅层存在优质的储盖组合。以前受勘探程度制约及周边陆地油田地质认识的影响, 渤海新近系被普遍认为属河流相沉积, 缺乏良好的盖层, 勘探风险较大, 束缚了渤海新近系石油勘探。然而近几年随着勘探步伐的加快以及勘探程度的加深, 发现渤海海域渤中、黄河口凹陷是新近纪的汇水中心, 在海域中南部存在浅水湖泊, 特别是在明化镇组下段中发育稳定的湖相泥岩沉积。更为重要的是还发现了浅水湖泊中一种最重要的储集体——浅水三角洲, 这就组成了凹陷内优质区域储盖组合。

另一方面, 新构造运动对凹陷内油气富集的控制影响作用也是非常重要且明显的, 这一点也被目前的勘探研究工作所证实^[8-12]。前文述及新构造运动中郯庐断裂产生复杂的网状断裂系统, 而新近系的明化镇组和馆陶组不具备生烃条件, 因此, 在浅层油气的富集成藏中这些近源断层的沟通输导作用就起到了关键因素。郯庐断裂的活动同时也形成了大量的圈闭, 成为油气富集的有利场所, 如凹陷中部的中央构造脊即是郯庐断裂带两分支断层走滑作用形成的走滑转换带, 郯庐断裂强烈的右旋张扭活动产生一系列呈雁行排列的次级断层, 强烈的挤压应力伴生“堑垒相间”的构造格局, 密集的断层成为油气下生上储的通道, 该带是黄河口凹陷内油气最为富集区。

对黄河口凹陷烃源岩生烃演化史的模拟研究表明, 凹陷内的 3 套烃源岩在馆陶组沉积末期 (距今 12 Ma) 仅达到了低成熟度, 并未进入生油高峰期, 至新构造运动期明化镇组上段 (距今 5.2 Ma) 快速沉降-充填以来, 由于烃源岩快速埋藏, 3 套主力烃源岩都进入了生油高峰期^[13-14], 因此烃源岩的活跃期, 与上述新构造运动中断层、圈闭的形

成相互匹配, 这也势必使得油气的聚集多受构造活动的影响, 而晚期成藏。

从上述构造作用对油气富集的控制影响来看, 断裂对黄河口凹陷新近系浅层的成藏起到关键控制作用, 它控制凹陷内油气纵向运移。可谓浅层油藏成也断层、败也断层。因此对黄河口凹陷浅层油气成藏主控因素的分析着眼于断层的控制作用是首要的。

3 断层圈闭油气富集成藏模式

综合分析黄河口凹陷已发现油气田中断层的控制作用, 发现不同类型断层对油气富集表现出不同的控制方式, 具有不同的富集模式。依此对富集块进行分类归纳, 总结出以下 3 类不同断层组合的成藏模式。

3.1 ‘X’型断层组合——垒块油藏

‘X’型断层组合常发育在基岩拱升的脊部, 在下挤上张的应力条件下, 形成的两条共轭断层组成, 两条共轭相交断层很难分清相互的切割关系。从地震剖面可看出断裂交叉点之上的断块体下降形成地堑, 而交叉点之下的断块体上升形成地垒, 往往上、下块窄而延伸长, 地层产状平缓, 易形成垒块油藏 (图 3)。如: BZ34-1N 油田、如 BZ13-1S, QHD34-3, BZ25-1S 和 BZ34-1 等油气田均与‘X’型断层有关。

余一欣等对渤海的‘X’型断层进行较系统的分析研究^[15], 认为该类断层对油气聚集的影响主

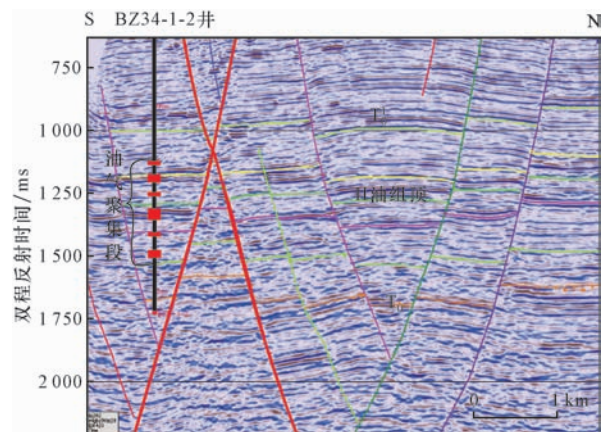


图3 黄河口凹陷‘X’型断层组合地震反射剖面
Fig. 3 Seismic section showing ‘X’-type fault in Huanghekou sag

要表现在3个方面:相关构造和地层圈闭为捕获油气奠定了圈闭基础;深层主干断裂和浅层密集发育的派生断裂可成为油气运移的有效通道;断裂活动可以改善储集层物性。

勘探实践表明,“X”型断层形成的垒块油气藏地层平缓且延伸范围大,油气纵向聚集井段长,因此具有丰度高、规模大的特点,如BZ34-1N油田。

3.2 “包心菜式”断层组合——地堑油藏与断块油藏

“包心菜式”断层组合一般发生在凹中隆部位,下挤上张应力作用下形成,也称作“似花状构造”。由呈弧形断面的沉积后断层组成,两侧断层对称的相对掉向,整个断层组合中没有明显的主断层,在断层组合的底部可以有根也可无根,两组掉向相对的断层像包心菜一样相互搭接,形成花心和花瓣(图4)。“包心菜式”断层以无主断层和“Y”型断层区分,形似负花状构造,但与严格的由走滑作用形成的负花状构造尚有差别:①成因机理上“包心菜式”断层一般发生在凹中隆,在下挤上张应力下产生,而负花状构造形成的应力具张扭性;②形态上“包心菜式”断层的断面呈弧形,且两侧断层常对称的相向掉,有根或无根,负花状构造断层的断面平直,有根且根部变陡变窄插入基底。

该类断层组合内花心处地层产状平缓,靠近断层两侧地层常常有回倾,适合油气的聚集保存,

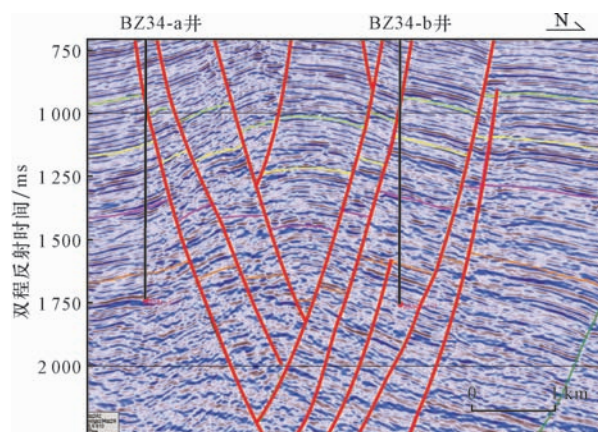


图4 黄河口凹陷“包心菜式”断层组合地震反射剖面

Fig. 4 Seismic section showing ‘cabbage’-type fault in Huanghekou sag

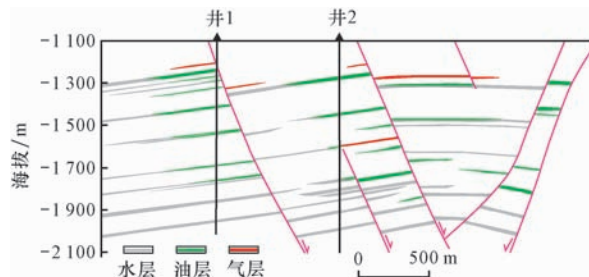


图5 黄河口凹陷“包心菜式”断层组合断块油藏剖面模式

Fig. 5 Hydrocarbon accumulation model of ‘cabbage’-type fault in Huanghekou sag

形成地堑油藏;在花瓣部位地层产状较陡,倾向远离花心,构造高部位依靠断层侧封,形成断块油藏(图5)。

“包心菜式”断层形成的花瓣可分为内花瓣和外花瓣,两者由于所处构造环境不同而具有不同的含油气性。内花瓣以离花心近为特征,构造活动强烈,油气运移活跃,地层产状陡,油气沿断层构造高部位聚集,易形成断块油藏,但由于构造活动的强烈导致不利于气的保存,因此圈闭中以油为主,且含油面积小,油柱高度低;相对内花瓣而言,外花瓣远离花心,构造活动相对较弱,油气需倒灌成藏,往往在明化镇组下部粗岩性段有油气层分布,但也很有限^[16]。鉴于该类断层组合的成藏特点,对“包心菜式”断层形成的油藏,应以钻探花心和内花瓣为主。

3.3 “Y”型断层组合——断鼻或单斜油藏

“Y”型断层组合常发生在凹、凸之间的接合部位,依附于一条大的、长期活动且沟通油源的同沉积断层存在,该断层即区别于上文“包心菜式”断层组合的主断层,该主断层之上的断层相互搭接往往形成复式“Y”型断层组合。在该类断层组合中由同沉积断层形成的滚动背斜和断层组合往往形成断鼻或单斜油藏(图6)。“Y”型断层为渤海湾盆地最常见的断层之一,该类断层组合中不同的断层组合模式、不同地层产状和断层走向搭配等都会引起油气聚集丰度的差异,对此前人已有详细的论述和成熟的勘探经验^[17-18]。总结这些经验和成果,可发现其成藏模式遵循以下规律:①沟通油源的主断层是油气运移至浅层成藏的关键;②各断层在油气聚集成藏所起到的作用中

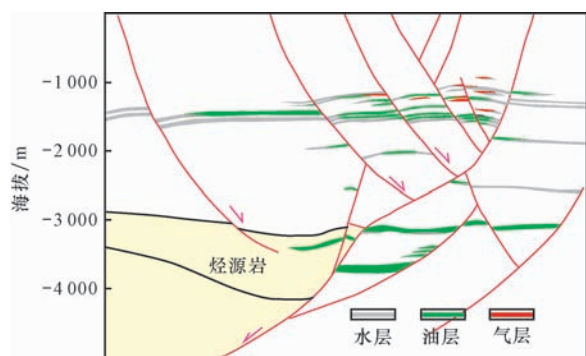


图6 黄河口凹陷“Y”型断层组合断块油藏剖面模式

Fig. 6 Hydrocarbon accumulation model of ‘Y’-type fault in Huanghekou sag

表现为顺向断层供油,反向断层封堵油气的特点;
③油气聚集的丰度很大程度上与地层产状和断层倾向之间的搭配有关。

4 结论

1) 海上钻井成本高,决定了海上勘探不只是发现油气藏,更主要是寻找油气聚集的高丰度区;黄河口凹陷浅层断裂非常发育,形成了众多中、小型规模的断块构造群,为总结高丰度油气聚集区块的聚集规律与模式提供了广泛的素材;勘探实践表明,黄河口凹陷浅层油气藏聚集的丰度主要受控于新构造运动形成的浅层断层等构造因素。

2) 对黄河口凹陷浅层断层相关油气藏进行分类总结,认识到不同的断层组合模式具有不同的成藏规律,最终将其按断层组合模式的不同分成3类,对应3种不同的油气富集模式:“X”型断层组合;“包心菜式”断层组合;“Y”型断层组合。

3) 通过不同断层组合对油气成藏影响规律的分析,可以明确不同断层组合块的含油气规律,提高预测油气聚集高丰度区块的精度,择优钻探,从而加快海上勘探进程,同时这些认识对于具类似构造背景的盆地/凹陷的油气勘探具有较大的推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 邓津辉,周心怀,魏刚,等. 郯庐走滑断裂带活动特征与油气成藏的关系——以金县地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 102–106.
Deng Jinhui, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Strike-slip fault-

ting activities in the Tanlu fault zone and their relationship with hydrocarbon accumulation—an example from Jinxian area[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 102–106.

- [2] 万桂梅,周东红,汤良杰. 渤海海域郯庐断裂带对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 450–454.
Wan Guimei, Zhou Donghong, Tang Liangjie. Control of the Tan-Lu fault zone on hydrocarbon accumulation in the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 450–454.
- [3] 汤良杰,万桂梅,周心怀,等. 渤海盆地新生代构造演化特征[J]. 高校地质学报, 2008, 14(2): 191–198.
Tang Liangjie, Wan Guimei, Zhou Xinhui, et al. Cenozoic geotectonic evolution of the Bohai Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(2): 191–198.
- [4] 何仕斌,李丽霞,李建红. 渤中坳陷及其邻区第三系沉积特征和油气勘探潜力分析[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1): 61–71.
He Shibin, Li Lixia, Li Jianhong. Tertiary sedimentology and hydrocarbon potential in Bozhong Depression and its adjacent area[J]. China offshore Oil and Gas, 2001, 15(1): 61–71.
- [5] 徐长贵,姜培海,武法东,等. 渤中凹陷上第三系三角洲的发现沉积特征及油气勘探建议[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 588–594.
Xu Changgui, Jiang Peihai, Wu Fadong, et al. Discovery and sedimentary characteristics of the neogene delta in bozhong depression and its significance for oil and gas exploration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 588–594.
- [6] 郝芳,蔡东升,邹华耀,等. 渤中坳陷超压-构造活动联控型流体流动与油气快速成藏[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2004, 29(5): 518–524.
Hao Fang, Cai Dongsheng, Zou Huayao, et al. Overpressure-tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 518–524.
- [7] 齐家富,周心怀,董荣经,等. 结构特征 of the Tan-Lu fault zone in Cenozoic basins offshore the Bohai Sea[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, (Suppl 1): 19–29
- [8] 龚再升,王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 1–7.
Gong Zaisheng, Wang Guochun. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 1–7.
- [9] 米立军. 新构造运动与渤海上第三系油气田[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 17(6): 21–28.
Mi Lijun. The neotectonism and major Neogene oil and gas fields in Bohai Sea[J]. China offshore Oil and Gas, 2001, 17(6): 21–28.

(下转第650页)

- Ren Junhu, Wang Wanchun, Kang Yan. The analysis of organic geochemistry indexes[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(3): 266–270.
- [18] 李素梅, 姜振学, 董月霞, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油成因类型及其分布规律[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 817–823.
- Li Sumei, Jiang Zhenxue, Dong Yuexia, et al. Genetic type and distribution of the oils in the Nanpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2008, 22(5): 817–823.
- [19] 包建平, 朱翠山, 倪春华. 北部湾盆地不同凹陷原油生物标志物分布与组成特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 646–652.
- Bao Jiangping, Zhu Cuishan, Ni Chunhua. Distribution and composition of biomarker in crude oils from different sags of Beibuwan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 646–652.
- [20] 庞雄奇, 郭永华, 姜福杰, 等. 渤海海域优质烃源岩及其分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 393–397.
- Pang Xiongqi, Guo Yonghua, Jiang Fujie, et al. High-quality source rocks and their distribution prediction in the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 393–397.

(编辑 高岩)

(上接第641页)

- [10] 宋岩, 王喜双. 新构造运动对天然气晚期成藏的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 103–106.
- Song Yan, Wang Xishuang. The controlling action of modern structure movement on the late accumulation of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 103–106.
- [11] 田立新, 余宏忠, 周心怀, 等. 黄河口凹陷油气成藏的主控因素[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3): 319–321.
- Tian Lixin, Yu Hongzhong, Zhou Xinhui, et al. Major control factors of petroleum accumulation in Huanghekou Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(3): 319–321.
- [12] 周心怀, 牛成民, 滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 469–482.
- Zhou Xinhui, Niu Chengming, Teng Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 469–482.
- [13] 陈斌, 邓运华, 郝芳, 等. 黄河口凹陷BZ34断裂带油气晚期快速成藏模式[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 37–41.
- Chen Bin, Deng Yunhua, Hao Fang, et al. Late-stage rapid petroleum accumulation model of BZ34 fault zone in Huanghekou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 37–41.
- [14] 彭文绪, 孙和风, 张如才, 等. 渤海海域黄河口凹陷近源晚期优势成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 510–517.
- Peng Wenxu, Sun Hefeng, Zhang Rucai, et al. Late-stage near-source preponderant hydrocarbon pooling pattern in the Huanghekou Sag of the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 510–517.
- [15] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海湾地区X型正断层及油气意义[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1080–1088.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. X-pattern normal faults in the Offshore Bohai Bay Basin and its significance on hydrocarbon[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1080–1088.
- [16] 薛永安, 王应斌, 赵建臣. 渤海上第三系油藏形成特征与规律分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 1–7.
- Xue Yongan, Wang Yingbin, Zhao Jianchen. Pool forming characteristics and regularity of the Upper Tertiary reservoirs in Bohai Bay[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 1–7.
- [17] 邓运华. 张-扭断裂与油气运移分析—以渤海油区为例[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(2): 33–37.
- Deng Yunhua. Tensional-shear faults and analysis of oil and gas migration—taking Bohai oil province for example[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(2): 33–37.
- [18] 邓运华. 渤海湾盆地上第三系油藏类型及成藏控制因素分析[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 13(6): 359–364.
- Deng Yunhua. Types and accumulation controls of Neogene oil reservoirs in Bohai Bay Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2003, 13(6): 359–364.

(编辑 张亚雄)