

文章编号:1673-5005(2012)05-0025-07

饶阳凹陷新近系盖层质量及其与油气分布的关系

赵利杰¹, 蒋有录¹, 庞玉茂¹, 杨德相², 范炳达²

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油华北油田公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552)

摘要:以实验室岩心测试分析为基础,建立泥岩声波时差与实验室分析测试结果的联系,对饶阳凹陷新近系泥岩盖层封闭性进行定量研究,并结合新近系油气分布及前人对油源、输导条件的研究成果,研究盖层、油源断裂等主控因素对饶阳凹陷新近系油气成藏的作用。结果表明:研究区新近系盖层排驱压力中等偏大、分选系数较好、略细歪度,具有较好的封盖能力,新近系油藏盖层根据排驱压力值可分为好(>2 MPa)、较好(2~1.31 MPa)、中等(1.31~0.746 MPa)和差(<0.746 MPa);邻近生烃中心、油源断裂发育且盖层排驱压力大的留西、留北地区新近系油藏发育,邻近生烃中心、油源断裂发育的马西洼陷东部地区仅在盖层条件稍好的南马庄地区零星发育新近系油藏,远离生烃中心、油源断裂不发育的皇甫村地区虽然盖层条件优越,仍无法形成新近系油藏。

关键字:饶阳凹陷; 新近系; 盖层; 排驱压力; 油源断裂

中图分类号:TE 122.25 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.05.005

Sealing ability of cap rock and its relationship with hydrocarbon distribution of Neogene in Raoyang sag

ZHAO Li-jie¹, JIANG You-lu¹, PANG Yu-mao¹, YANG De-xiang², FAN Bing-da²

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

2. Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, China)

Abstract: Based on laboratory core test analysis, the relation between the mudstone acoustic and laboratory core test analysis of the Neogene cap rock in Raoyang sag was established. The quantitative study on the sealing property of Neogene cap rock in Raoyang sag was carried out. According to the previous study of hydrocarbon distribution, oil source and pathways, the effect of the cap rock, source fault and other main controlling factors during hydrocarbon accumulation were investigated. The results show that the Neogene cap rock of the study area has a medium-higher displacement pressure, good sorting coefficient and slightly fine skewness. So the Neogene cap rock has relative strong sealing ability. The Neogene cap rock is classified into four types: best(>2 MPa), well(2~1.31 MPa), moderate(1.31~0.746 MPa) and bad(<0.746 MPa) according to the displacement pressure. Neogene oil reservoir is enriched in Liuxi and Liubei area, which is adjacent to hydrocarbon generation center, source fault and high displacement pressure cap rock. Limited by the condition of cap rock, Neogene oil reservoir only scatters in Nanmazhuang area, east of Maxi sag, which is adjacent to hydrocarbon generation center and source fault too. The Huangfucun area is far away from hydrocarbon generation center and lack of source fault, although the cap rock is well, it hardly has any Neogene oil reservoir.

Key words: Raoyang sag; Neogene; cap rock; displacement pressure; source fault

盖层是位于储集层之上并能够封盖其中油气的岩层,盖层分布与封盖性能控制着油气的运移、聚集和保存^[1-2]。冀中拗陷新近系埋藏浅,储层物性相对较好,下伏沙一下、沙三上和沙四-孔店组3套烃源

岩且断裂发育^[3],但新近系油藏探明储量低,盖层作为不可忽视的成藏主控因素并未开展深入研究。因此,笔者以冀中拗陷新近系油藏最发育的饶阳凹陷为例,以实验室岩心测试分析为基础,通过岩心测

收稿日期:2012-02-16

基金项目:国家自然科学基金项目(40972094)

作者简介:赵利杰(1985-),男(汉族),山东东营人,博士研究生,主要从事油气地质及勘探研究。

井归位校正,建立泥岩声波时差与实验室分析测试结果的联系并对研究区盖层进行定量评价,结合新近系油气分布、油源和输导条件,充分认识盖层质量、烃源岩展布及油源断裂等因素在饶阳凹陷新近系油气成藏中的作用,以期为冀中坳陷新近系油气勘探提供理论依据。

1 成藏地质背景

冀中坳陷新近系探明石油储量占总探明储量的比例低^[3,4],具有明显的不均一性。饶阳凹陷作为冀中坳陷新近系油藏的主力凹陷之一,共发现 27 个新近系含油区块,以馆陶组油藏为主^[4],主要分布在留西、留北、马西等东部断阶带附近(图 1)。

饶阳凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷中东部,发育沙一下、沙三上和沙四-孔店组 3 套烃源岩。沙一下、沙三上亚段烃源岩作为饶阳凹陷新近系主力供烃岩

层,主要围绕马西、任西、河间-肃宁和饶南洼陷分布,为新近系油藏形成提供了充足的物质保障^[3,4];研究区大部分地区沙一下亚段烃源岩现均处于生低熟油阶段,各生油洼陷已进入成熟油阶段,其中河间-肃宁地区生烃范围最大、生烃能力最强,武强-杨武寨地区受强烈抬升剥蚀影响,至今未进入生油门限。沙三上亚段埋藏深度较大,生烃范围及成熟度均优于同期的沙一下亚段烃源岩^[5];饶阳凹陷新近系埋深浅,储层物性好,为油气聚集提供了优质的储集空间;东部断阶带发育的马西、河间、留路等油源断裂持续活动并强烈走滑,留路、河间断裂的中段和南段具有生长指数高、落差大的特征(图 2),对烃源岩深埋生烃及油气垂向运移起重要作用,为深层油气向新近系输导提供了运移通道^[6]。因此,在构造活跃区,饶阳凹陷新近系油藏可能受盖层影响较大,在盖层封盖性能较好的地区油藏发育并保存至今。

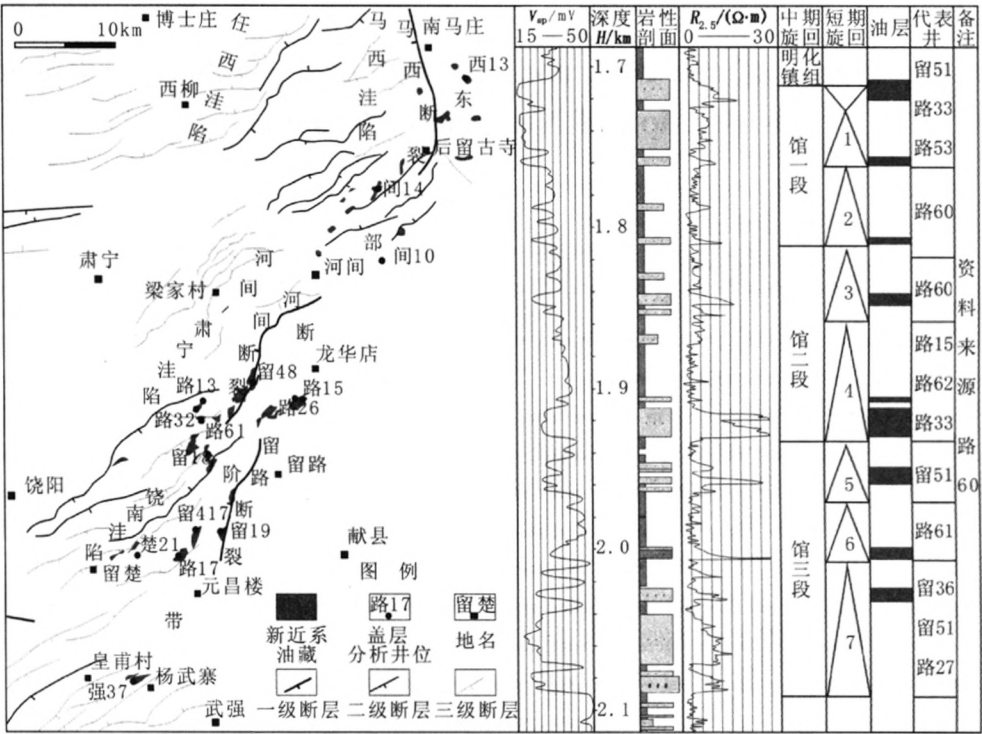


图 1 新近系油气分布及储盖组合关系

Fig.1 Neogene hydrocarbon distribution and relationship between reservoir and cap rock

饶阳凹陷新近系油藏主要分布在馆三段和馆二段底部的砂岩中,个别井在馆二段顶部和馆一段也有油气聚集。依据盖层及油层的分布特点,将饶阳凹陷新近系划分为馆三段、馆二段以及馆一段-明

化镇底部泥岩 3 套储盖组合^[4](图 1)。其中馆三中上部、馆二中部泥岩分布较广,对下伏储集层能起到较好的封盖作用。

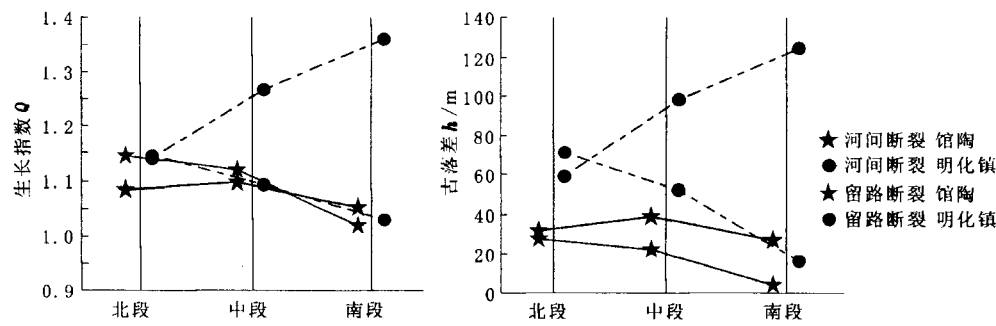


图 2 留路、河间断裂新近纪断层活动性分析评价图

Fig.2 Neogene fault activity analysis and evaluation map of Liulu and Hejian fault

2 新近系盖层实验室岩心分析

盖层的封闭机制主要包括物性封闭、异常压力封闭和烃浓度封闭^[1,7],对于新近系油气藏来说,物性封闭是盖层封堵油气的主要机制,盖层排驱压力(P_d)是反映盖层封盖能力最直接有效的参数。

鉴于饶阳凹陷新近系泥岩盖层取心资料不足、岩心质量差、破碎程度高等方面的限制,笔者选择新近系油气富集区东部断阶带的 18 块新近系泥岩盖层样品进行排驱压力等分析,部分分析测试数据如表 1 所示。

表 1 新近系盖层分析测试数据

Table 1 Analysis assay data of Neogene cap rock

井号	层位	岩心归位深度 H/km	岩性	厚度 d/m	孔隙度 $\varphi/\%$	排驱压力 p_d/MPa	最大连通半径 $r_{\max}/\mu\text{m}$	排驱压力中值 p_{50}/MPa	分选系数	相对分选系数	歪度	微观均质系数
路 32	明化镇	1.797 5	泥岩	7.5	9.32	2.989	0.246	33.081	0.115	1.276	3.069	0.414
路 17	馆一段	1.899 5	泥岩	2.0	10.51	2.178	0.338	27.491	1.567	3.765	5.323	1.289
留 48	明化镇	1.396 0	粉砂质泥岩	1.5	14.00	1.975	0.372	9.602	3.191	4.660	6.188	2.011
路 13	馆一段	1.907 6	砂质泥岩	4.5	13.92	0.481	1.529	7.137	1.500	2.329	7.291	0.468
路 61	馆三段	1.925 5	泥岩	0.5	12.56	1.836	0.400	4.552	5.972	4.392	5.652	3.558
路 61	馆三段	1.934 2	泥岩	2.0	10.81	3.063	0.240	8.957	4.938	3.151	4.638	8.231
路 61	馆三段	1.946 7	泥岩	0.5	10.88	1.243	0.591	6.776	1.934	3.352	5.696	1.105
路 60	馆三段	1.953 3	泥岩	1.5	12.18	3.139	0.234	6.968	8.211	3.396	4.424	11.986
路 15	明化镇	1.349 7	砂质泥岩	9.0	18.14	0.745	0.986	2.298	6.809	3.525	5.122	2.289

孔隙度(φ)、渗透率(k)、排驱压力和孔径(r)是评价盖层的 4 项主要指标^[8]。研究区新近系泥岩样品的排驱压力虽差别较大,为 0.4~3.2 MPa,但绝大部分都大于 0.5 MPa,具有一定的封堵能力;最大连通孔喉半径($r_{\max}$)为 0.234~1.529 μm ;排驱压力中值多为 2.2~9.6 MPa,而路 32、路 17 井高达 33.08、27.49 MPa,说明渗滤性能较差,封盖能力较高(表 1、图 3)。

毛管压力曲线反映在一定排驱压力下汞可能进入的孔隙喉道大小及喉道的孔隙容积,影响毛管曲线形态的主要因素是孔隙喉道的集中分布趋势和孔隙喉道的分布均匀程度,即孔隙喉道歪度和分选系数^[9]。由分析化验数据和实测毛管压力曲线形态可知,泥岩样品的分选系数为 0.115~8.211,平均为 3.8,说明分选较好,结合相对分选系数(1.276~4.66)表明孔喉分布较均匀;泥岩样品的歪度为 3.07~7.29,略细(表 1),反映出样品的小孔隙吼道

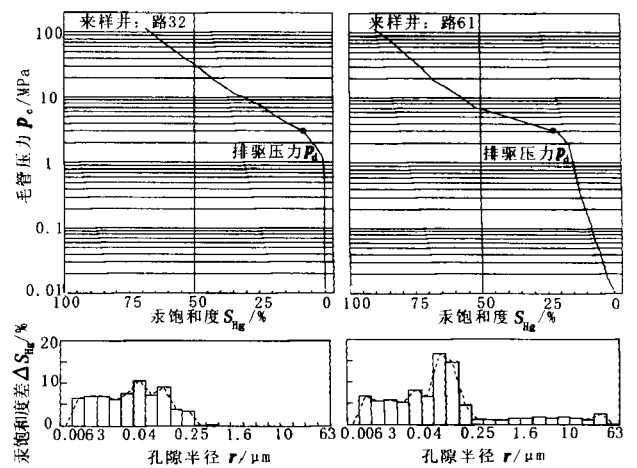


图 3 路 32、路 61 井不同深度泥岩样品毛管压力曲线及孔径分布

Fig.3 Distribution of capillary pressure curve and aperture of mudstone samples at different depth of well Lu 32 and Lu 61

所占的比例大,有利于下伏储层中油气的保存;而且

样品毛管曲线形态分选好、略细歪度(图 3),这种性质的盖层具有较均匀的孔、喉系统,但因其孔隙喉道太小,渗透性很差,因此排驱压力相对较高,封盖性好。

综合分析可知,饶阳凹陷新近系地层埋深浅、成岩压实作用弱,盖层孔隙度较大、排驱压力及中值压力中等偏大、分选系数较好、略细歪度,具有较好的封盖能力。

3 盖层评价模型及评价标准

3.1 盖层评价模型

研究发现,排驱压力作为反映盖层物性封闭能力最直接和有效的参数,与孔隙度、渗透率及孔径等参数存在明显的函数关系^[10-11],因此排驱压力可以代替其他参数来评价盖层。但排驱压力的获取受限于岩心实验分析时间长,且研究区新近系岩心平面展布差、破碎程度高,而声波时差 Δt 对岩石的孔隙结构反映明显且容易读取,因此可以建立起声波时差与排驱压力之间的评价模型。

根据研究区所测泥岩盖层排驱压力、孔隙度和声波时差数据(表 2),建立利用声波时差计算排驱压力、孔隙度的关系式,即

$$p_d = 26\,115 \exp(-0.0304\Delta t), R^2 = 0.87, \quad (1)$$
$$\varphi = 1.0718 \exp(0.0077\Delta t), R^2 = 0.93. \quad (2)$$

式中, Δt 为声波时差, $\mu s \cdot m^{-1}$; p_d 为排驱压力, MPa; φ 为孔隙度, %。

表 2 排驱压力、孔隙度与声波时差关系(部分)
Table 2 Relationship between displacement pressure, porosity and acoustic time(part)

井号	深度 H/km	声波时差 $\Delta t/(\mu s \cdot m^{-1})$	排驱压力 p_d/MPa	孔隙度 $\varphi/\%$
路 32	1.797 5	300	2.989	9.32
留 48	1.396 0	321	1.975	14.00
路 13	1.907 6	346	0.481	13.92
路 61	1.925 5	313	1.836	12.56
路 61	1.946 7	320	1.243	10.88
路 60	1.953 3	299	3.139	12.18
路 15	1.349 7	356	0.746	18.14

根据模拟公式,利用声波时差等资料对研究区馆陶组泥质盖层进行定量计算,并与相应的岩心实验分析结果进行对比。结果表明:模型计算的排驱压力(p_{d-c})与岩心实测排驱压力(p_{d-m})有较好的一致性,相对误差最大约为 10%(表 3);路 61 井在 1.925 5~1.946 7 km 3 处计算排驱压力与实测排驱压力基本一致,岩心实测排驱压力分别为 1.836、3.063 和 1.243 MPa,测井计算排驱压力分别为 1.74、2.951 和 1.163 MPa(图 4),相对误差均小于

6.5%。从而验证了该模型在研究区新近系盖层质量评价应用中的可行性。

表 3 预测排驱压力与实测排驱压力对比
Table 3 Comparison of predicted and measured displacement pressure

井号	深度 H/km	计算排驱压 力 $p_{d-c}/$ MPa	实测排驱压 力 $p_{d-m}/$ MPa	绝对 误差/ MPa	相对误 差/%
间 14	1.870 3	0.490	0.442	0.048	10.86
路 61	1.934 2	2.951	3.063	-0.112	3.66
楚 26	1.860 5	0.763	0.835	-0.072	8.62
留 417	2.153 0	1.714	1.847	-0.133	7.21
路 10	1.982 7	1.895	2.018	-0.123	6.10
强 21	1.970 5	1.142	1.234	-0.092	7.46

3.2 盖层评价标准

馆陶组下部作为研究区新近系油藏的主要储层,其泥岩盖层的排驱压力对成藏起着重要作用。根据声波时差-排驱压力盖层评价模型,在实验室岩心分析测试的基础上选取了饶阳凹陷 38 口探井,结合测井解释及分层资料,合理认识研究区新近系盖层质量的评价标准并确定盖层封堵能力下限,对研究区新近系馆三段泥岩进行盖层定量评价。

路 15、路 61 等多口井的样品取自新近系油藏的直接盖层。路 61 井在 1.926~1.928、1.939~1.941 5 和 1.948~1.953 km 钻遇了油层,各储层上覆盖层厚度为 0.5~2 m,排驱压力、孔隙度变化范围较大,分别为 1.243~3.063 MPa、10.8%~12.56%,厚度较小,但盖层封盖能力较强,其下伏油藏性质较好,地层水矿化度较研究区背景值(1.4 g/L)大,反映了较好的保存条件(图 4);路 15 井 1.350~1.370 km 也发育油藏,其上覆泥岩盖层厚度约为 8~9 m,排驱压力为 0.745 MPa,孔隙度为 18%,盖层物性相对较差,下伏储层的测井解释结果为含油水层;路 32 井 1.805~1.810 km 钻遇油藏,其上覆泥岩盖层厚度约 8 m,排驱压力为 2.99 MPa,孔隙度为 9.32%,盖层物性较好。前人研究表明,饶阳凹陷新近系油藏高度与泥岩盖层最小厚度具有正相关性。因此,在泥岩盖层排驱压力足以封堵油气且质量相近的情况下,厚度对油气富集也具有重要作用^[6,12]。

针对研究区馆三段泥岩盖层,利用盖层评价模型对不同区带的 26 口井进行排驱压力计算,并结合测井解释成果对比分析,以确定盖层对油藏的封盖能力的判断标准。结果表明,研究区新近系油藏盖层可分为最好、好、中等和差 4 类(图 5、表 4)。然而,在研究区断裂不发育且烃源条件差的地区亦存

2)、潜山及古近系储层的过滤作用^[13],新近系油藏仅零星分布于留路断层下降盘,受油源及断裂限制作用明显。杨武寨、皇甫村地区同样由于远离烃源岩且油源断裂不发育,虽然盖层条件优越,仍无法形成大规模新近系油气聚集(表5、图6)。

表5 饶阳凹陷新近系油气成藏主控因素综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of main controlling factors of Neogene hydrocarbon accumulation in Raoyang sag									
区带	油源	主力储层	构造类型	新近系储油层系	是否发育油源断裂 主控断裂	排驱压力 p_d / MPa	地层水异常	制约因素	运聚方式
马西	马西洼陷沙一下沙三上	古近系	洼陷挤压断裂背斜和马西断层面下降盘牵引断裂构造带	馆一段 馆二段	是 马西断层	0.4~0.6	发育	盖层	油气以侧向运移为主,在断裂的控制作用下,深层油气运移至浅层后沿砂体侧向运移,在盖层封堵能力好的地区聚集成藏
南马庄	马西洼陷沙一下沙三上	古近系	斜坡构造带	馆三段	是 马西断层	0.6~0.9	发育	盖层	
留西 留北	河间-肃宁和饶南洼陷沙一下	古近系	逆牵引背斜和塌陷挤压背斜构造带	明化镇组	是 河间断层 留路断层	1~2.7	发育	烃源岩	油气以垂向运移为主,在断裂的控制作用下,呈现出近源成藏的特征,浅层油气多在油源断裂两侧的储层中聚集成藏
留楚	饶南洼陷沙一下	古近系	继承性挤压背斜构造带	馆三段	是 留路断层	1~2.5	发育	烃源岩	
皇甫村	饶南洼陷沙一下	—	鼻状构造带	—	否 皇甫村、大王庄断层	1~1.6	—	烃源岩、断裂	
杨武寨	饶南洼陷沙三上	古近系	受断层滑动牵引的反向鼻状断块	馆陶组	否 杨武寨断层	0.6~1.8	—	烃源岩、断裂	

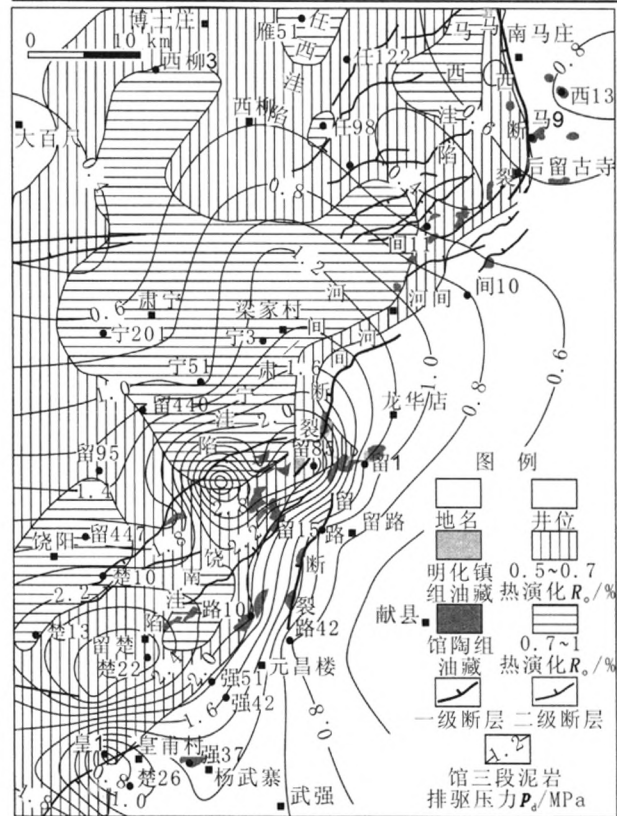


图6 饶阳凹陷新近系油藏综合评价

Fig.6 Comprehensive evaluation of Neogene reservoir in Raoyang sag

5 结 论

- (1)饶阳凹陷新近系以排驱压力值将泥岩盖层分为最好、好、中等和差。研究区新近系油藏盖层下限排驱压力最小值为0.746 MPa,声波时差最大为344.2 μs/m,孔隙度最大为15.18%。优于该下限指标的新近系圈闭盖层可不同程度地封堵油藏。
- (2)饶阳凹陷新近系油藏受烃源岩、油源断裂及盖层等因素的影响,分布具有明显的不均一性:邻近生烃中心、油源断裂发育且盖层排驱压力大的留西、留北地区新近系油藏发育;邻近生烃中心、油源断裂发育的马西洼陷东部地区仅在盖层条件好的南马庄地区零星发育新近系油藏;远离生烃中心、油源断裂不发育的皇甫村地区虽然盖层条件优越,但缺乏油源及通道,仍无法形成新近系油藏。

参考文献:

[1] 蒋有录,查明. 石油天然气地质与勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2006:128-135.

[2] 瞿建华,彭建亮,雷正军. 利用声波时差测井法评价克拉2气田盖层封闭性[J]. 天然气地球科学,2005,16(6):758-760.

QU Jian-hua, PENG Jian-liang, LEI Zheng-jun. The appraisal of cap formation enclosing capability in the Kela 2

- gas field by acoustic logging method[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(6): 758-760.
- [3] 王权,高吉宏,唐宏,等. 冀中拗陷上第三系油气藏成藏条件及分布[J]. *中国海上油气:地质*, 2001, 15(1): 56-60.
- WANG Quan, GAO Ji-hong, TANG Hong, et al. Neogene hydrocarbon accumulation and distribution in Jizhong depression[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2001, 15(1): 56-60.
- [4] 易士威,蒋有录,范炳达,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷古近系源岩特征与新近系油气来源[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(5): 475-479.
- YI Shi-wei, JIANG You-lu, FAN Bing-da, et al. Neogene petroleum source and characteristic of paleogene hydrocarbon source rock in the Raoyang sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 475-479.
- [5] 赵利杰,蒋有录,刘华,等. 饶阳凹陷烃源岩热演化特征及其与油藏分布的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(4): 1-4.
- ZHAO Li-jie, JIANG You-lu, LIU hua, et al. Thermal evolution of Paleogene source rocks and relationship with reservoir distribution in Raoyang sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(4): 1-4.
- [6] 蒋有录,卢浩,刘华,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 791-796.
- JIANG You-lu, LU Hao, LIU Hua, et al. Enrichment characteristics and major controlling factors of hydrocarbons in the Neogene of Raoyang depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 791-796.
- [7] 窦立荣,张志伟,程顶胜. 苏丹 Muglad 盆地区域盖层对油藏特征的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 22-26.
- DOU Li-rong, ZHANG Zhi-wei, CHENG Ding-sheng. Regional seal control on oil accumulation in Muglad Basin of Sudan[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(3): 22-26.
- [8] 洪峰,余辉龙,宋岩,等. 柴达木盆地北缘盖层地质特点及封盖性评价[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 8-11.
- HONG Feng, YU Hui-long, SONG Yan, et al. Geological feature and sealing property evaluation of caprock in the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 8-11.
- [9] 薛永超,程林松,付广. 大庆长垣以东地区登二段泥质岩盖层封气能力综合评价[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2005, 35(5): 626-631.
- XUE Yong-chao, CHENG Lin-song, FU Guang. Comprehensive evaluation of gas sealing ability of the lower Denglouku formation (K_1d_2) mudstone cap-rock in the East of the Daqing placanticline[J]. *Journal of Jiling University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(5): 626-631.
- [10] 陈建亮,施和生,舒誉,等. 测井盖层评价方法在珠一坳陷的应用[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(3): 157-161.
- CHEN Jian-liang, SHI He-sheng, SHU Yu, et al. The application of seal evaluation method with log data in Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 19(3): 157-161.
- [11] NELSON J S, SIMMONS E C. Diffusion of Methane and Ethane through the reservoir caprock: implication for the timing and duration of Catagewesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(7): 1064-1074.
- [12] 李慧勇,徐长贵,刘廷海,等. 陆相盆地薄层泥岩盖层形成机制,特征与油气成藏关系:以辽东湾地区中南部为例[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(1): 19-23.
- LI Hui-yong, XU Chang-gui, LIU Ting-hai, et al. The formation mechanisms and characteristics of thin-layer mudstone caprock and its relationship with hydrocarbon accumulation in the Terrestrial Basin: an example of thin-layer mudstone caprock in the south-central Liaodong Bay [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(1): 19-23.
- [13] 刘华,蒋有录,徐昊清,等. 冀中拗陷新近系油气成藏机制与成藏模式[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 928-936.
- LIU Hua, JIANG You-lu, XU Hao-qing, et al. Accumulation mechanisms and modes of Neogene hydrocarbons in Jizhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 928-936.
- [14] 刘江涛,黄志龙,王海,等. 吐哈盆地西部弧形带油气远距离运移成藏主控因素[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2010, 34(2): 24-30.
- LIU Jiang-tao, HUANG Zhi-long, WANG Hai, et al. Dominant control factors of hydrocarbon distance accumulating in western arc-like zone of Turpan-hami Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(2): 24-30.

(编辑 徐会永)