

文章编号:1009-2722(2018)11-0033-08

歧南断阶带明下段低阻油层地质成因

李振鹏,贾海松,潘广明,吴金涛,陈丽祥

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:为了更好地预测区域内低阻油层分布,以岩心、室内试验数据及薄片资料为基础,对歧南断阶带明下段低阻油层的成因机理及控制因素进行了研究。结果表明:研究区低阻油层成因机理主要包括低幅构造、复杂孔隙结构、黏土矿物附加导电性、砂泥岩薄互层、淡水水入侵及钻井液污染 6 个方面。低阻油层地质成因包括构造、沉积及成岩作用 3 个方面,明下段沉积时期频繁而强烈的断层活动导致原生油藏发生淡水水侵,同时形成低幅构造,导致低幅构造型低阻油藏发育。受可容空间与沉积物供给比值变化影响,研究区内发育砂泥薄互层型及复杂孔隙结构型低阻油层。早成岩阶段较弱的成岩作用导致研究区发育黏土矿物附加导电性及钻井液污染型低阻油层。受以上 3 种因素影响,歧南断阶带明下段地层中低阻油层主要发育于与断层相接的低幅构造区域内的弱水动力区。

关键词:低阻油层;成因机理;地质成因;明下段;歧南断阶带;渤海

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.11005

歧南断阶带位于渤海西部海域,在构造位置上位于黄骅坳陷歧口凹陷的南侧,是埕子口凸起向歧口凹陷过渡的斜坡—断阶构造带^[1](图 1),自上而下发育的地层有第四系平原组,新近系明化镇组、馆陶组及古近系东营组、沙河街组,其中新近系明化镇组下段为研究区内主力含油层位之一,其内部发育大量低阻油层。

依据油层的电性特征,可将低阻油层分为 2 类^[2,3]:①绝对低电阻率油层,该类油层电阻率绝对值较低,多低于 $5 \Omega \cdot \text{m}$;②相对低电阻率油层,该类油层电阻率绝对值较高,多在 $5 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,但与水层电阻率值之间差别不明显。前人对低阻油层的成因机理及识别方法已做过大量研究^[4-6],然而目前对低阻油层的认识尚有以下不足:①多限于对低阻油层某一项成因机理及相应识别方法

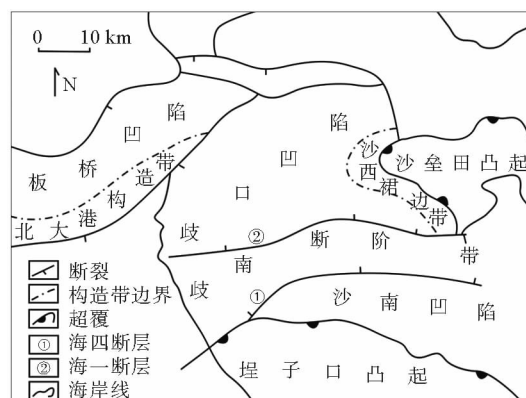


图 1 歧南断阶带构造位置图

Fig. 1 Tectonic map of Qinan fault step belt

的研究,无法准确全面地识别区域内发育的低阻油层;②对低阻油层的地质成因研究较少,无法对低阻油层有利发育区域进行有效预测。

本文以歧南断阶带新近系明化镇组下段地层为例,通过对研究区内取心井(5 口)的岩心观察、综合分析薄片鉴定(115 块)、黏土矿物(129 块)、流体分析(398 样次)及常规物性分析(615 块)等资料,首先对歧南断阶带内低阻油层的成因机理

收稿日期:2018-05-15

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

作者简介:李振鹏(1986—),男,硕士,工程师,主要从事沉积储层及油气勘探研究工作。E-mail: lizhp11@cnooc.com.cn

进行了总结,在此基础上从构造、沉积及成岩作用 3 个方面对低阻油层的地质成因进行了分析,并对不同地质成因背景的低阻油层展布进行了预测,有效地指导了区域内低阻油层的勘探开发。

1 区域概况

受断层活动影响,歧南断阶带范围内构造破碎,海 1 及海 4 两条主干断层控制了区域的构造演化、沉积发育、油藏类型及流体分布^[7]。主力含油层位明下段沉积时期断层活动减弱,歧南断阶带整体处于拗陷充填阶段,研究区范围内地形平缓,圈闭构造幅度较低,仅为 15~30 m;同时研究区明下段沉积时期主要发育曲流河相沉积,纵向上砂泥岩互层变化频繁,泥岩以棕红色及灰绿色为主,砂岩厚度较薄,平均厚度为 7.1 m;储层岩性多为灰绿色中细砂岩,砂岩成分成熟度较低,以长石岩屑及岩屑长石砂岩为主;储层埋深中等,在 1 400~2 300 m 之间,成岩演化阶段多位于早成岩 A 期及 B 期,储层物性较好,平均孔隙度为 32%,

平均渗透率为 $1\,297\times10^{-3}\,\mu\text{m}^2$;由于研究区构造较为破碎,油藏类型多为构造层状及构造岩性油藏,含油层段较长,平均为 700 m;油水关系复杂,地层原油黏度介于 1.1~5.8 mPa·s 之间,地层水矿化度较低,平均矿化度为 3 625 mg/L。受上述因素影响,研究区内低阻油层成因机理复杂,常规电测曲线识别难度大,在实际解释工作中低阻油层极易与水层混淆,导致油层错射、漏射现象的发生。随着研究区内油田勘探开发难度的不断加大,寻找低阻油层在内的隐蔽性油藏已成为实现油田增储上产的重要途径。

2 低电阻率油层成因机理

录井、测井及测试资料表明歧南断阶带明下段发育大量低阻油层,占总油层厚度的 40%^[8],其电阻率绝对值较低,与水层之间差别较小。以 QK17-2-2D 井为例,DST 测试表明 1 840~1 960 m 井段位置处油层平均电阻率为 $3.7\,\Omega\cdot\text{m}$,水层平均电阻率为 $6.0\,\Omega\cdot\text{m}$ (图 2)。

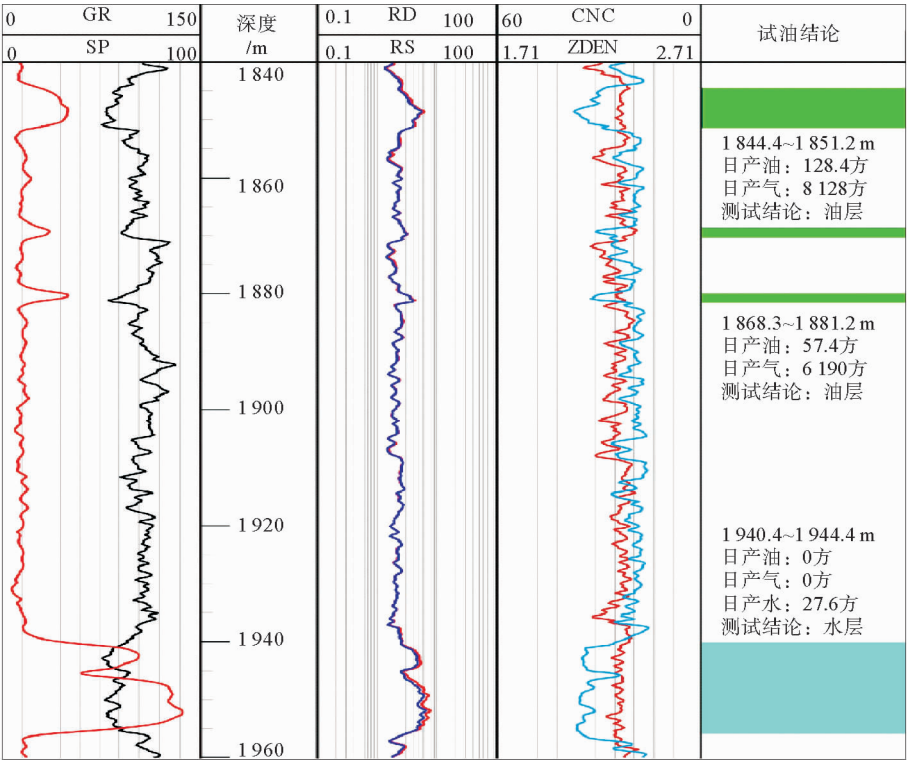


图 2 QK17-2-2D 井低阻油层测井曲线特征

Fig. 2 Logging curve characteristics of low resistivity oil layers, QK17-2-2D well

综合分析构造、沉积、成岩及流体特征^[9],根据低阻油层类型将歧南断阶带明下段低阻油层成因机理总结为6个方面:

2.1 绝对低电阻率油层成因类型

2.1.1 低幅构造及复杂孔隙结构

油气在储集层中成藏的过程是在浮力驱动下不断克服毛管压力的过程,构造幅度和孔隙结构分别决定了油气成藏过程中浮力和毛细管力的大小^[10,11]。构造幅度越低,孔隙结构越复杂,油气越难以进入相对细小的孔喉空间,从而导致油藏含水饱和度越高,地层电阻率值越小。

歧南断阶带明下段地层平缓,圈闭构造幅度平均仅15~30 m,导致油藏成藏动力较弱。同时压汞分析表明歧南断阶带明下段范围内储层主要发育2种孔隙结构类型:①河道及边滩成因的Ⅰ类储层,该类储层排驱压力 <0.05 MPa,毛细管中值压力约为0.08 MPa,最大进汞饱和度在90%左右,孔喉分选性较好,平均孔隙喉道半径为16~20 μm ;②决口扇及废弃河道成因的Ⅱ类储层,该类储层排驱压力为0.08 MPa,毛细管中值压力约为0.5 MPa,最大进汞饱和度在70%左右,平均孔隙喉道半径为6~10 μm (图3)。因此,歧南断阶带内较低的构造幅度及较差的孔隙结构导致Ⅱ类储层发育区油水分异程度较差,油藏中含水饱和度高,低阻油层广泛发育。

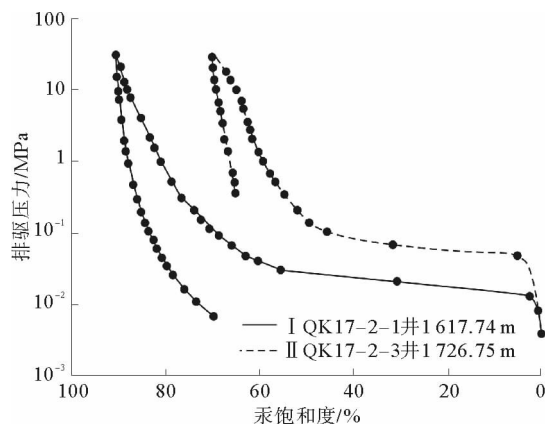


图3 歧南断阶带明下段压汞曲线

Fig. 3 Mercury pressure curves of lower Minghuazhen Formation in Qinan fault step belt

2.1.2 黏土矿物附加导电性

当地层水矿化度较低时,蒙脱石及伊蒙混层等黏土矿物的存在是导致油层电阻率降低的重要因素^[12],其作用机理主要包括以下3个方面:①由于黏土矿物颗粒细小,黏土矿物的充填导致颗粒间孔隙结构复杂,一方面增加了油气成藏阻力,导致含油饱和度下降;另一方面导致岩样中发育大量束缚水,从而导致其所在油层段电阻率值降低;②黏土矿物具有较强的吸水能力,且多以“薄膜状”及“黏土桥”的形式存在于颗粒表面,极易形成束缚水导电回路使岩石骨架的附加导电性更强,导致油层电阻率值降低;③黏土矿物的吸附性使其可以与周围介质发生阳离子交换,从而产生附加导电性使油层电阻值降低。

黏土矿物中以蒙脱石及伊/蒙混层矿物的吸水性及附加导电性最强,绿泥石、伊利石次之^[13],分析化验结果表明歧南断阶带明下段低电阻率油层中的黏土矿物含量最高可达35.3%,且多以薄膜状的伊/蒙混层、黏土桥形式存在的蒙脱石或伊利石及蠕虫状高岭石为主(图4),是导致油层段电阻率降低的重要因素。

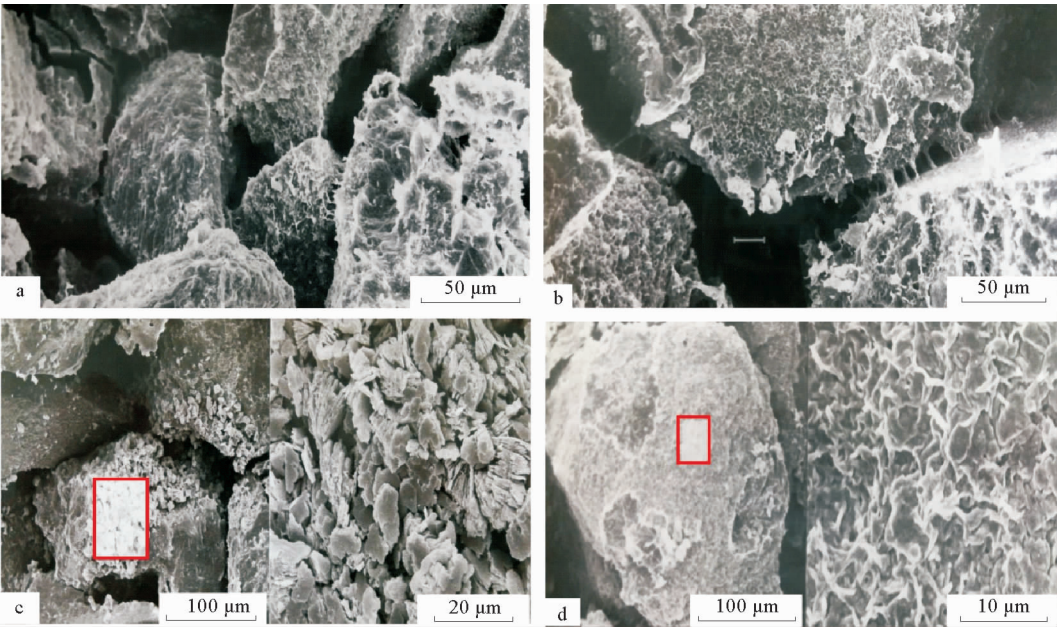
2.1.3 砂泥岩薄互层

受常规电阻率仪器分辨率的影响,当电阻率不同的地层互相叠加时,所测得电阻率无法真实反映地层电阻率^[14]。前人研究表明,地层电阻率值主要受低电阻率层段影响,即使只有极少部分的薄层泥质条带的存在,也可使油层电阻率大幅降低。歧南断阶带明下段部分油层厚度较薄,介于1~3 m之间,砂地比值较低,呈“泥包砂”形式。普通侧向电阻率测井仪器纵向最小分辨率在0.8 m,因此受低电阻率围岩影响导致油气层电阻率下降明显。

2.2 相对低电阻率油层成因类型

2.2.1 淡水水侵

地层水分析化验资料表明,歧南断阶带明下段地层内油水层之间地层水矿化度差别较大,油层段地层水矿化度平均为5 110 mg/L,水层段地层水矿化度则为1 789 mg/L。同时钻井过程中使用矿化度 $>10\ 000$ mg/L的盐水泥浆,自然电位测井结果显示油层段曲线幅度与水层相比明显降低(图2),进一步表明歧南断阶带明下段油层



(a)石英颗粒表面附有薄膜状伊蒙混层矿物,QK17-2-3井,1 736.70 m;(b)颗粒间发育“桥状”伊利石,QK17-2-3井,1 740.45 m;(c)颗粒表面及粒间充填发育的蠕虫状高岭石,QK17-2-3井,1 741.70 m;(d)颗粒表面伊利石/蒙脱石化,发育溶蚀孔,QK17-2-3井,1 740.45 m

图 4 歧南断阶带明下段黏土矿物扫描电镜特征

Fig. 4 SEM characteristics of clay minerals of Lower Minghuazhen Formation, Qinan fault step belt

段地层水矿化度较高。受该因素影响,同一油藏剖面中含高矿化度束缚水的油层与低矿化度的水层相间发育,油水层之间的电性差异变小,导致油水层识别困难。

2.2.2 钻井液污染

歧南断阶带明下段储层埋深浅、物性好,对研究区 262 块取心样品物性分析表明表明储层平均孔隙度为 32%,平均渗透率为 $1\,297\times10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,属于特高孔特高渗储层。同时原油类型为轻质油,地下黏度仅 5.8 mPa·s,原油流动性好,导致钻井过程中盐水泥浆钻井液易侵入使侵入带范围变大^[15]。同时,由于测井系列多采用侧向测井^[16],导致视电阻率值对侵入带电阻率变化较为敏感,从而导致油层视电阻率值明显下降。

3 低阻油层地质成因

综合以上分析可见,油层低阻特征是储层岩性、物性、流体等多种因素在电性特征上的体现,而不同的地质条件决定了以上各因素的形成与分布。在弄清低阻油层成因机理的基础上,进一步研究低阻油层的地质成因,不仅可以帮助预测低

阻油层分布,同时也利于建立针对性的识别方法。歧南断阶带明下段低阻油层地质成因主要包括构造、沉积及成岩作用 3 个方面。

3.1 构造活动

歧南断阶带明下段沉积时期处于裂陷后期的热沉降阶段,该时期构造活动虽相较于古近纪断陷期明显减弱,但并没有表现出完全平静的拗陷热沉降特征。区域内浅层断裂密度大,数量多,活动强度大,与主断裂形成复式“Y 型”及帚状复式“Y 型”两种组合样式,统计结果表明歧南断阶带明下段共发育 101 条断层,断层活动速率平均为 85 m/Ma^[17]。构造活动对歧南断阶带明下段内低阻油层的影响主要体现在 3 个方面:首先晚期强烈活动的小断层一方面易与凹陷内主断层搭接,沟通油源与储集层形成有效圈闭,从而为低阻油层的形成提供了物质基础;但同时强烈的断层活动又是油气成藏的破坏因素,油气成藏之后强烈的断层活动使油藏与浅层地表水沟通,形成天然水淹,受储层非均质性影响,储层物性较好的厚油层段首先受到水洗,地层水矿化度变低,从而导致水层电阻率变高;此外,由

于裂隙后期构造应力场较弱,断层间地层形变量很小,圈闭样式多为微地垒及小型断鼻构造(图 5),较低的构造幅度不利于油水分异,从而

导致油层段含水饱和度较高,导致电阻率变低^[18]。歧南断阶带明下段内广泛发育低阻油层,为低阻油层形成的主控因素。

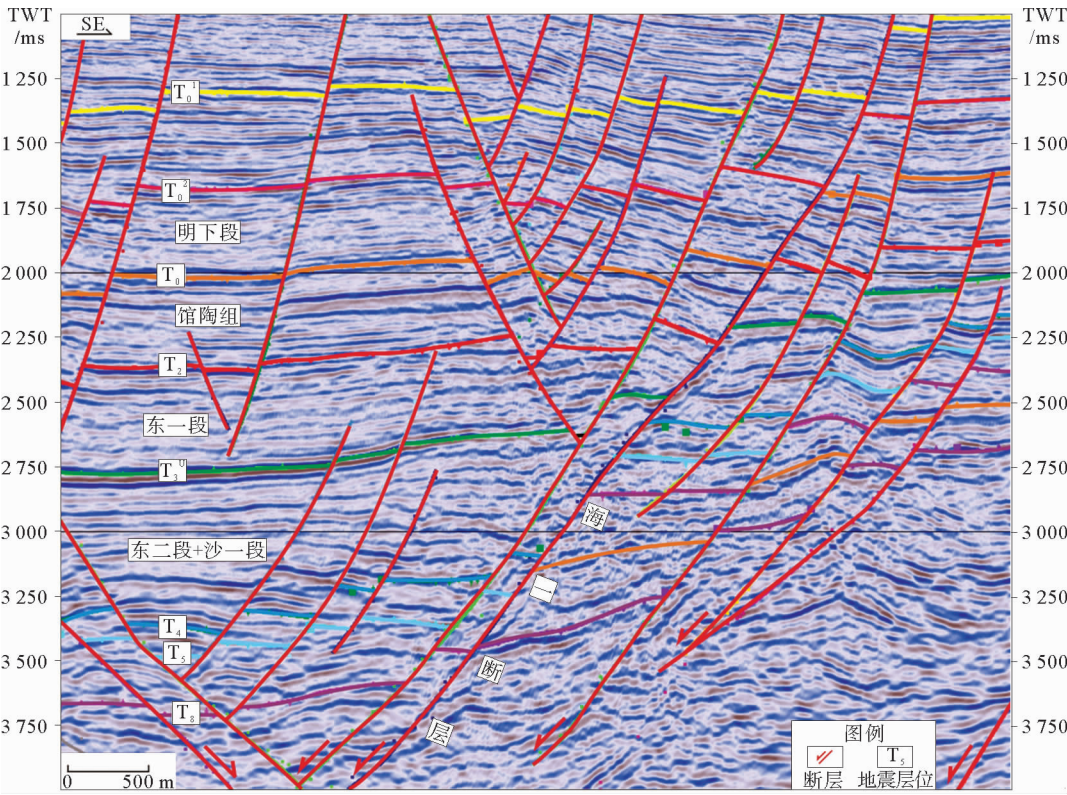


图 5 歧南断阶带明下段低幅度构造及断层展布特征

Fig. 5 Characteristics of low amplitude structure and fault in Lower Minghuazhen Formation, Qinan fault step belt

3.2 沉积微相

不同的沉积微相类型反应沉积物沉积时期不同的水动力能量及水流持续性,不同下形成的砂体,其结构、分选、粒度及厚度均会有所不同,从而决定了原始孔渗性有所差异^[19]。明下段沉积时期,歧南断阶带内储层主要为曲流河相砂体。受构造、气候及物源供给等多因素影响,纵向上不同的可容空间与沉积物供给比值(A/S)条件下发育不同类型的沉积微相及砂体叠置样式(图 6)。

当 A/S<1 时,河道迁移摆动能力相对较强,河道类型多表现为低弯度曲流河,多期河道之间

平面上连片、垂向上叠置发育,形成复合河道砂体,沉积微相类型主要为河道及点坝沉积。低 A/S 比值条件下,河道砂体侧向上频繁的迁移摆动造成了纵向上频繁的砂泥岩互层沉积,从而为薄互层型低阻油层的发育创造了条件。当 A/S>1 时,河道弯曲度逐渐增大,侧向迁移能力减弱,河道规模变小,砂体变薄,砂体叠置程度与连续性变差,河道砂体呈透镜状发育于细粒泛滥平原沉积内,沉积微相类型包括河道、点坝、决口扇及废弃河道沉积。高 A/S 比值条件下由于水动力条件较弱,部分储层泥质含量较高,从而导致低阻油层发育。

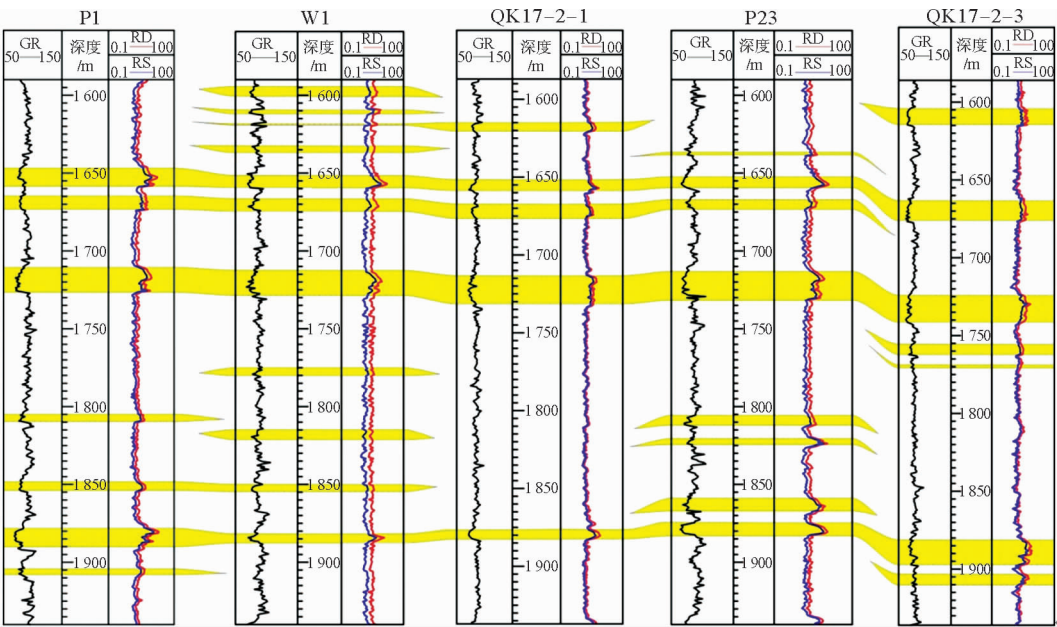


图 6 岐南断阶带明下段砂体展布特征

Fig. 6 Sand distribution in Lower Minghuazhen Formation, Qinan fault step belt

3.3 成岩作用

岐南断阶带明下段储层埋深多在 1 400～1 800 m 之间,测试结果显示研究区内明下段古地温为 55～75 ℃。对明下段黏土分析样品进行统计分析,结果表明黏土矿物类型主要为蒙皂石、伊蒙混层矿物及高岭石,其中 63% 的样品黏土矿物类型主要为蒙皂石,含量为 41%～86%,平均含量为 67%;高岭石含量为 5%～48%,平均含量 24%;其余 27% 的样品黏土矿物类型主要为伊蒙混层矿物,含量 76%～92%,平均含量为 85%,其内部蒙皂石层含量平均为 77%(表 1)。颗粒之间以点接触为主,孔隙类型

主要为原生粒间孔,约占总孔隙的 95% 左右。结合研究区实际资料情况,依据碎屑岩成岩阶段划分标准^[19],将岐南断阶带明下段成岩演化阶段划分为早成岩阶段。

岐南断阶带明下段成岩作用对低阻油层的影响主要体现在两个方面:首先岐南断阶带明下段地层埋深较浅,压实及胶结等成岩作用较弱,从而导致储层物性较好,钻井过程中盐水泥浆易侵入地层,导致油层电阻率降低。其次是对纵向上黏土矿物分布的控制作用,早成岩阶段由于地层温度及压力较低,储层中黏土矿物类型主要为蒙皂石及伊蒙混层矿物,形成黏土矿物附加导电型低电阻率油层。

表 1 岐南断阶带明下段黏土矿物含量分析表

Table 1 Clay mineral content of Lower Minghuazhen Formation in Qinan fault step belt		矿物含量/%				黏土矿物相对含量/%				
井号	深度/m	石英	长石	碳酸盐岩	黏土矿物	蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊蒙混层
QK17-2-3	1 725.5	32.7	38.5	1.5	27.3	72.0	3.0	21.0	4.0	0.0
	1 732.7	35.6	38.6	0.0	25.8	60.0	2.0	34.0	4.0	0.0
	1 739.0	41.2	44.9	0.0	13.9	59.0	6.0	30.0	5.0	0.0
	1 813.8	30.0	27.0	0.0	42.0	0.0	5.0	13.0	5.0	77.0
	1 814.2	37.0	23.0	4.0	34.0	0.0	5.0	8.0	2.0	85.0

对研究区内已钻遇的低阻油层进行统计,结果显示与构造活动相关的低幅构造及淡水水侵成因的储量占低阻油层总储量的62%,与沉积作用形成的钻井液污染及砂泥岩薄互层储量占总储量的17%,与成岩作用相关的复杂孔隙结构及黏土矿物附加导电性相关的储量占总储量的21%。构造活动为低阻油层形成发育的主控因素,而沉积及成岩作用在其基础上进一步影响了低阻油层的分布。综合以上分析,与断层相接的低幅构造区域内的弱水动力沉积相带区为歧南断阶带明下段地层中低阻油层主要发育部位,同时也是该地区低阻油层的有利勘探目标区带。

4 结论

(1)歧南断阶带明下段低阻油层共包括2种类型:①低幅构造、复杂孔隙结构、黏土矿物附加导电性及砂泥岩薄互层成因的绝对低电阻率油层;②淡水水侵及钻井液污染成因的相对低电阻率油层。

(2)低阻油层地质成因包括构造活动、沉积微相及成岩作用3个方面:构造活动形成淡水水侵型及低幅构造型低阻油藏;受可容空间与沉积物供给比值(A/S)不断变化影响,明下段地层内纵向上发育不同类型的沉积微相及砂体叠置样式,从而形成砂泥岩薄互层型及复杂孔隙结构型低阻油层;早成岩阶段较弱的成岩作用导致发育黏土矿物附加导电型及钻井液污染型低阻油层。

参考文献:

[1] 李振鹏,张国坤,汪跃,等.歧南断阶带沙河街组储层特征及物性主控因素[J].断块油气田,2018,5(3):294-299.
[2] 曾文冲,欧阳健,何登春.测井地层分析与油气评价[M].北京:石油工业出版社,1987:45-51.
[3] 孙建孟,陈钢花,杨玉征.低阻油气层评价方法[J].石油学

报,1998,19(3):83-88.
[4] 赵国欣.改进的双水模型在曲堤油田低电阻油层中的应用[J].油气地质与采收率,2008,15(6):39-51.
[5] 单祥,季汉成,刘计国,等.尼日尔Agadem区块古近系Sokor1组低阻油层成因[J].东北石油大学学报,2014,38(2):27-33.
[6] 齐颖,黎小伟.J油田低阻油层成因的微观机理[J].海洋地质前沿,2014,30(8):42-46.
[7] 李振鹏.歧南断阶带沙一段湖底扇沉积及砂体展布特征[J].特种油气藏,2018,25(5):51-55.
[8] 桑华.渤海油田低阻油气藏测井识别评价方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
[9] 杨春梅.临南洼陷深层碎屑岩次生孔隙特征及其地质意义[J].断块油气田,2008,15(6):1-4.
[10] 林景晔,许利群,杨辉.石油聚集成藏的物理学原理——毛-浮方程[J].大庆石油地质与开发,2008,27(1):22-25.
[11] 杨通佑.石油及天然气储量计算方法[M].北京:石油工业出版社,1987:87-108.
[12] 付明世,李文海,贾瑞忠,等.文留油气田滚动勘探开发研究[J].特种油气藏,2005,12(3):14-17.
[13] 应凤祥,罗平,何东博,等.中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M].北京:石油工业出版社,2004.
[14] 杨春梅.油田开发中后期测井响应变化机理及储层性质研究[D].北京:中国石油大学(北京),2005.
[15] 尹旭,彭仕宓,陈建文,等.低阻油层判别技术在吉林油田区的应用[J].大庆石油地质与开发,2008,27(1):126-129.
[16] 王博,赵军,王森,等.断块低阻油层测井识别与评价[J].岩性油气藏,2012,24(6):110-114.
[17] 张国良,陈国童.歧口凹陷断裂对油气运聚的控制作用[J].中国海上油气(地质),1996,10(5):290-296.
[18] 祁鹏,任建业,艾能平,等.歧口凹陷后裂陷期构造特征与浅层油气成藏[J].石油地球物理勘探,2011,46(6):970-977.
[19] 应凤祥,何东博,龙玉梅,等.SY/T 5477—2003碎屑岩成岩阶段划分[S].北京:石油工业出版社,2003.
[20] 李振鹏,黄建廷,曲炳昌,等.渤海海域歧南断阶带明下段河湖交替相沉积[J].科学技术与工程,2018,18(4):255-262.

GEOLOGICAL GENESIS OF LOW-RESISTIVITY OIL LAYERS OF MINGHUAZHEN FORMATION IN QINAN FAULT STEP BELT

LI Zhenpeng, JIA Haisong, PAN Guangming, WU Jintao, CHEN Lixiang

(CNOOC (China) Tianjin Branch of Bohai Sea Oil Field Research Institute, Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to better predict the distribution pattern of low resistivity oil layers of the Lower Minghuazhen Formation in the Qinan fault step belt, genetic mechanism and controlling factors of the layers were studied on the basis of core observation, thin section analysis and laboratory testing data. Results show that the genetic mechanism of the low-resistivity oil layers in the Qinan fault step belt depends upon six factors: the low structural amplitude, the complex pore structure, the additive conductivity of clay minerals, the thin sand-shale interbedding, the natural water flooding and the drilling fluid pollution. The geological origin of low resistivity reservoirs includes three aspects: tectonics, sedimentation and diagenesis. Frequent and intense faulting activities lead to natural water flooding and the formation of low amplitude structures. The frequent change in the ratio of accommodation space and sediment supply leads to the formation of the reservoir consisting of thin sand-shale interbedded deposits with complex pore structures. The weak diagenesis of the early diagenetic stage leads to the formation of additive conductivity of clay mineral and drilling fluid pollution. Influenced by the above-mentioned three factors, the low resistivity oil layers of lower Minghuazhen Formation in the Qinan fault step belt mainly develop in the weak hydrodynamic zones of the low amplitude structural areas with connection to faults.

Key words: low-resistivity oil layers; genetic mechanism; geologic origin; Lower Minghuazhen Formation; Qinan fault step belt; Bohai Sea