

# 渤海 QHD 油田馆陶组低阻油层成因分析

金宝强,陈建波,陈红兵,甄宗玉,舒 晓

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

**摘要:**渤海 QHD 油田馆陶组二段 2 小层发育一套电性特征和录井特征较为典型的低阻油层,因对其成因、流体类型及产能认识不清,一直未开发动用。为有效解决 QHD 油田产量接替问题,以该套低阻油层为研究目标,采用宏观和微观相结合的方法,通过分析地层水矿化度、沉积特征、构造圈闭等地质成因,明确了弱水动力条件沉积、低幅构造和岩性圈闭是低阻油藏形成的主控因素,为微观机理研究提供依据。综合利用岩心、薄片及分析化验等资料,对储层的岩石粒度、孔隙结构、黏土矿物、束缚水饱和度及导电矿物等微观成因进行分析,认为岩石粒度细和黏土矿物使孔喉结构复杂化以及束缚水饱和度偏高是低阻油层的主控因素。通过试采评价,证实了该套低阻油层具有较好产能,落实低阻储量约  $1\,000\times 10^4\text{ t}$ ,初步建成  $20\times 10^4\text{ t}$  年产能规模,充分证实了低阻成因分析的合理性,为类似老油田挖潜和新区勘探提供借鉴。

**关键词:**低阻油层;地质成因;微观机理;试采评价;渤海

**中图分类号:**TE321 **文献标志码:**A

## Genesis analysis of low resistivity reservoirs in Guantao Formation of QHD Oilfield in Bohai Bay

JIN Baoqiang, CHEN Jianbo, CHEN Hongbing, ZHEN Zongyu, SHU Xiaoxiao

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** A set of low resistivity oil layers with electrical characteristics and typical logging characteristics is developed in the second layer of the second member of Guantao Formation in QHD Oilfield in Bohai Bay. Due to an unclear understanding of their genesis, fluid types, and productivity, the set of layers has not been used for development. In order to effectively solve the problem of production replacement in the QHD Oilfield, this set of low-resistance oil layers is used as the research target, and a combination of macro and micro methods is adopted. Through the analysis of geological causes such as formation water salinity, sedimentary characteristics, structural traps, etc., it is clear that weak water dynamic condition deposition, low-amplitude structures, and lithological traps are the main controlling factors for the formation of low-resistance reservoirs, which provides information for micro-mechanism research. Through the comprehensive use of core, thin slices, and analytical laboratory data, it was analyzed the micro-genesis of the rock particle size, pore structure, clay minerals, irreducible water saturation, and conductive minerals of the reservoir. The analysis results indicated that the fine-grained rock and clay minerals complicate the pore throat structure, and high saturation of irreducible water are the main controlling factors for low-resistance oil layers. Through trial production evaluation, it was confirmed that this set of low resistance oil layers has good production capacities. The establishment of low-resistance reserves of about  $1\,000\times 10^4\text{ t}$  and the preliminary establishment of a  $20\times 10^4\text{ t}$  annual oil production scale fully confirm the rationality of the low-resistance cause analysis. This can provide a reference for tapping the potential of similar old oilfields and exploring new areas.

**Key words:** low resistance oil reservoir; geological origin; micro-mechanism; trial mining evaluation; Bohai Bay

QHD 油田位于渤海中部海域石臼坨凸起,是被南堡、秦南和渤中三大富烃凹陷环绕的大型低幅构造,油气富集条件优越。QHD 油田于 2001 年投产,主要生产层为明化镇组下段和馆陶组上段,均为常规油藏。在馆陶组中部馆二段 2 小层(下称 NgII2 小层)存在着一套低阻层,初步分析为低阻油层,因其和上下水层电性特征相似,流体类型、产能及成因

机理尚不明确,早期开发中认识不清。随着 QHD 油

收稿日期:2021-01-04;改回日期:2021-02-18。

第一作者简介:金宝强(1979—),硕士,高级工程师,现主要从事油气田地质综合研究工作。E-mail: jinbq@cnooc.com.cn。

基金项目: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)。

田主力开发层位逐渐进入高采出、高含水阶段,油田产量递减加大,亟需寻找有效产量接替,因此,对该套低阻油层的开发及成因分析被列为油田的重点。

根据前人研究成果,一般将油层的电阻增大率(即油层电阻率与邻近水层电阻率之比)小于2的油层定义为低阻油层<sup>[1]</sup>。低阻油层的成因极为复杂,常见成因有高束缚水含量、黏土附加导电和油层厚度薄等,通常是多种地质因素综合作用的结果<sup>[2]</sup>。目前,国内外对低阻油层的研究多集中在测井识别和微观机理方面<sup>[3-13]</sup>,对低阻油层宏观成因或综合成因研究较少,而沉积微相和地层圈闭等宏观地质成因对指导低阻油层判别及开发具有重要意义。

1 低阻油层特征

QHD油田低阻油层分布比较单一,发育于已开发层位之下大段水层之间,层位为NgII2小层,厚度11~15 m。据研究区测井数据统计(见图1),低阻油层自然伽马(*GR*)值为50~60 API,储层密度2.2~2.3 g/cm<sup>3</sup>,均略高于上下水层,其地层电阻率值为2.4~3.7 Ω·m,而上下相邻水层地层电阻率值为2.5~6.5 Ω·m,总体上油层电阻率低于水层电阻率,电阻增大率为0.37~1.48,具有典型的低阻油层特征。从录井显示(见图2)看,低阻段岩性为含砾细砂岩,局部砾径较大,可达2~4 mm,泥质含量较上下水层高。气测全量(*TG*)普遍大于3%~10%,气测显示普遍比常规油层差,但明显好于相邻上下水层。*C*<sub>1</sub>-*C*<sub>4</sub>烃组分齐全,荧光显示级别C—D级,岩屑荧光面积20%~40%,明显好于水层。

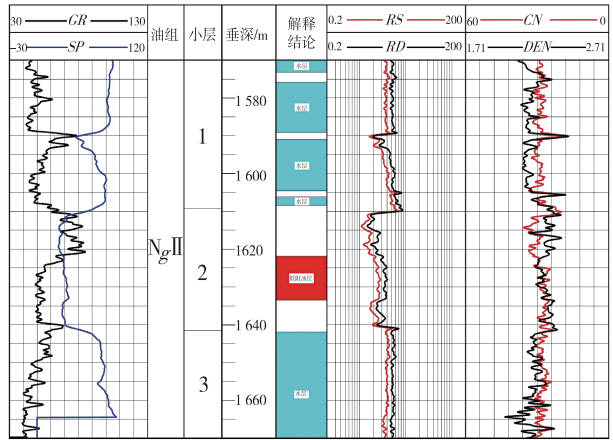


图1 QHD油田低阻油层测井显示特征

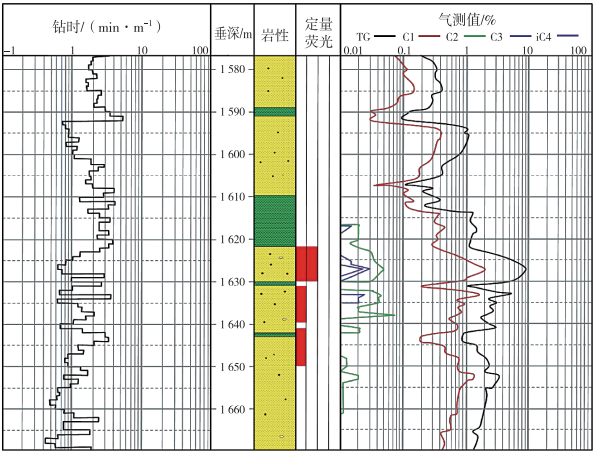


图2 QHD油田低阻油层录井显示特征

2 宏观地质成因分析

低阻油层的地质成因类型多样,储层低阻特征是岩性、物性、含油性、水性等多种因素的综合响应,不同地质条件下各种因素的贡献程度不完全相同<sup>[14-16]</sup>。尝试从地层水矿化度、沉积作用、构造圈闭及成藏模式分析低阻油层成因的宏观背景,为微观机理研究及识别评价提供地质依据。

2.1 地层水矿化度

根据QHD油田馆陶组地层水分析资料,已开发层位NgII1小层地层水总矿化度3 200~5 400 mg/L,NgII2小层地层水总矿化度4 400 mg/L,两个层位矿化度值基本相当。据统计,钻井液的总矿化度值通常在10 000 mg/L以上,明显高于低阻油层的地层水矿化度,且钻井液侵入对测井电阻率的影响是系统性的,即油层、水层电阻率均会有所降低,且低阻油层储层物性相对较差,影响较小<sup>[17]</sup>。因此,QHD油田NgII2小层低阻油层受地层水矿化度及钻井液侵入影响较小,可排除该因素。

2.2 储层沉积特征

QHD油田NgII段主要发育辫状河沉积,地层厚度330~370 m,砂层厚度290~330 m,砂地比85%以上,纵向上划分4个小层,岩性以细砂岩和含砾细一中砂岩交互沉积为主,总体为高孔高渗储层。低阻油层发育在NgII2小层,上下均为大段水层,油层段集中,油层厚度10~15 m。从纵向沉积看,NgII3小层主要为细砂岩夹少量砾岩及薄层泥岩,砂岩*GR*曲线表现为连续箱型特征,表现为较强水动力条件下的辫状河沉积,泥质含量较低,且多套河道垂向切割叠置;NgII2小层底部为薄层泥岩和致密砂岩沉积,厚度7~9 m,表现为长期出露地表

的氧化环境,后期成岩作用较强,致使砂岩较致密。中部为含砾粉—细砂岩沉积,厚度10~15 m,含砾明显增多,GR曲线表现为低幅箱型向钟型过渡特征,泥质含量较高,SP曲线回返幅度小,明显低于上下水层,指示渗透性相对较差。顶部为泥岩沉积,厚度7~13.5 m,沉积上表现为最大湖泛面附近沉积,泥质较纯,可作为优质盖层;NgIII小层沉积特

征与NgII3小层基本一致,表现为水动力较强的辫状河道沉积(见图3)。王友净等<sup>[14]</sup>研究表明,弱水动力低能环境下形成的泥质含量高的储层易形成低阻油层,总体上,QHD油田NgII2小层低阻油层为区别于上下高能环境的相对低能环境沉积,泥质含量较高,储层物性比上下储层差,具备形成低阻油层的沉积条件。

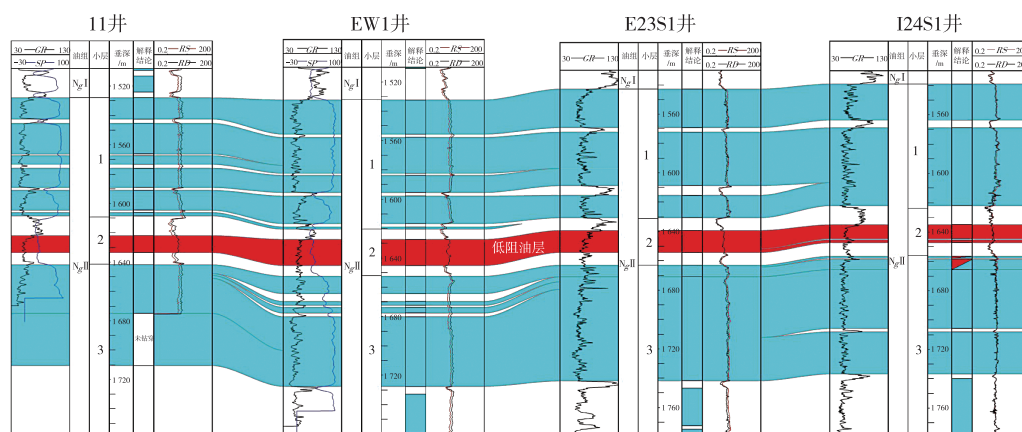


图3 NgII段(1-3小层)储层测井响应特征对比

## 2.3 构造圈闭特征

根据区域层位及构造解释,馆陶组地层整体构造形态为北高南低的单斜构造,低阻油层分布在QHD油田南侧构造斜坡上,如图4所示,低阻区块南北两侧发育多条断层,断距20~30 m,对油气成藏具有较好的输导和封堵作用;根据地震振幅属性及同相轴特征,东西两侧及内部多处地震同相轴出

现明显断开迹象,指示了砂体尖灭特征,储层平面上被分割为多个小砂体,砂体边界具有较好的侧向封堵作用。从圈闭幅度看,整体幅度较低,其中东西两侧构造幅度略高,在30 m左右,中间构造幅度低,在10 m左右。整体上,低阻区块构造幅度低,发育构造岩性圈闭,具有较好的封堵条件,具备形成低幅、低阻油藏的圈闭要素。

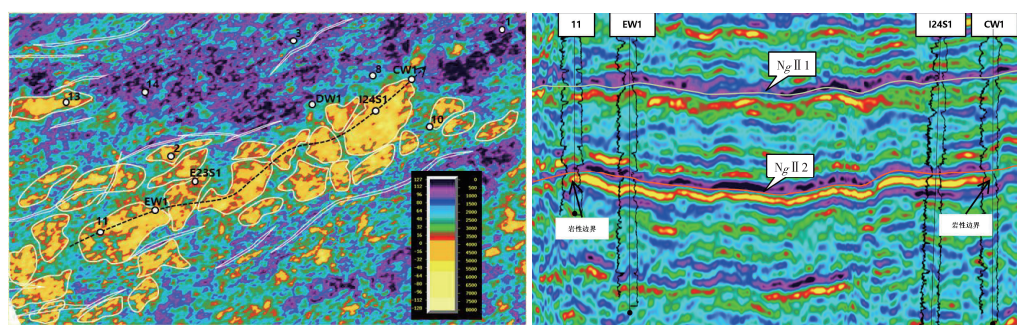


图4 低阻油层(NgII2小层)振幅属性、断层分布及地震剖面

## 2.4 低阻成藏模式

据渤海石臼坨凸起油气输导体系研究结果<sup>[18]</sup>,QHD油田油源主要来自凸起南倾末端的渤中凹陷,馆陶组富砂沉积是油气横向运移的重要通道,油层在馆陶组内部局部高点及有利圈闭富集成藏,因此,保存条件是馆陶组成藏的关键因素。由于NgII2小层顶部具有厚度较大的高GR泥岩段,油气

封盖条件优越,低阻区块南北断层分割,东西两侧岩性尖灭,具有很好的侧向封堵条件。由于油气运移距离较远,构造幅度低,烃源岩压力消耗殆尽,垂向驱替压力较低,同时由于储层物性较差,微小孔隙多,储层排驱压力高,油气难以将储层中的束缚水驱替出去,使得油层具有较高的束缚水饱和度,致使油层电阻率偏低。由于研究区构造幅度较低



和油气充注能力弱,不排除构造低部位及小砂体内部存在未驱替完全的自由水。

3 微观成因机理分析

低阻油层在岩石物理的微观因素上主要包括黏土矿物、高束缚水饱和度、复杂的孔隙结构及导电矿物等<sup>[19]</sup>,且通常是多种因素共同作用的结果。

3.1 粒度及孔隙结构

研究表明,岩石颗粒越细,颗粒之间的孔喉半径就越小,毛管压力会加大,使毛管中水的含量上升,促使电阻率降低<sup>[20]</sup>。根据岩屑岩粒度分析,低阻油层的岩性主要以粉砂岩为主,占到 50% 以上,细砂、中砂、粗砂岩次之,总体占比 30% 左右,大型砾石和黏土矿物较少。Folk 分类参数统计表明,粒度中值( $M_d$ )大部分小于 0.05 mm,分选系数( $S_o$ )3~5,总体上粒度较细,分选较差。压汞法毛管压力曲线分析结果(见图 5)表明,QHD 油田 NgII2 小层低阻油层孔隙结构差异较大,细歪度和粗歪度并存,微孔隙和渗流孔使储层束缚水含量增高,易形成低阻油层。

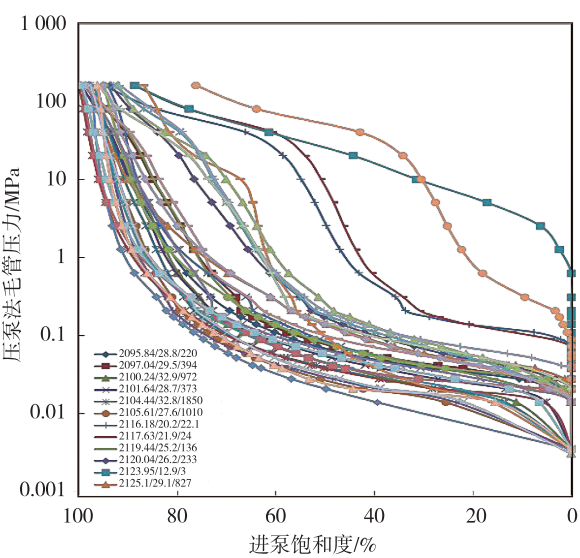


图 5 低阻油层压汞法毛管压力曲线

3.2 黏土矿物组成及影响

X-衍射分析表明,储层中黏土矿物含量为 10%~20%,属中等黏土矿物储层,黏土矿物主要以伊-蒙混层为主,其质量分数达到 77%,其中伊利石占 80%,蒙皂角石占 20%,其次为高岭石、伊利石和绿泥石,质量分数分别为 13%,5%,3%(见表 1)。

表 1 低阻油层段部分样品黏土矿物定量分析数据

样品 编号	井深/ m	黏土矿物含量/ %						伊/蒙混层比/ %		绿/蒙混层比/ %	
		蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层	蒙皂石层	伊利石层	蒙皂石层	绿泥石层
1	2 100.44	0	1	3	1	95	0	20	80	0	0
2	2 100.86	0	5	3	1	91	0	20	80	0	0
3	2 101.45	0	7	5	1	87	0	20	80	0	0
4	2 101.85	0	3	8	2	87	0	20	80	0	0
5	2 102.45	0	3	6	2	89	0	20	80	0	0
6	2 102.85	0	10	12	8	70	0	20	80	0	0
7	2 103.45	0	15	19	6	60	0	20	80	0	0
8	2 103.87	0	4	22	5	69	0	20	80	0	0
9	2 104.44	0	4	13	4	79	0	20	80	0	0
10	2 104.84	0	5	28	7	60	0	20	80	0	0
11	2 105.45	0	3	7	2	88	0	15	85	0	0

如图 6a 所示,扫描电镜分析可见,丝片状、曲片状伊蒙混层在粒表粒间均有发育,把原生孔隙和次生孔隙分割成无数小孔隙,破坏了储层的渗透性。高岭石虽然是比较稳定的非膨胀性黏土矿物,但抗机械力能力不强,在压实、流体冲击等作用下易形成鳞片状的微粒<sup>[21]</sup>,如图 6b 所示,高岭石呈弯曲片状,部分发生蚀变,充填在粒间孔内,损害了储层的

有效性。总体上,黏土矿物使储层结构复杂化,微孔隙与渗流孔隙并存,形成发育的束缚水网络,导致束缚水饱和度高,使油水区电性差异减小而形成低阻油层。

3.3 高束缚水饱和度

根据核磁共振测试结果,QHD 油田 NgII2 小层岩心束缚水饱和度 39%~50%,束缚水含量高,是低



阻油层形成的主要原因。岩石高束缚水是岩石自身细岩性和毛细孔隙结构复杂综合作用的结果<sup>[22]</sup>,本区的低阻油层在岩性及孔喉结构方面均有明显的成因条件。岩心观察及粒度分析可知,低阻油层段为粉—细砂岩,粒度中值( $M_d$ )在0.05以下,较馆陶组其他层位的细砂岩明显偏细,造成岩石颗粒比表面积增大,亲水性增强,岩石束缚水偏高,因此,岩性较细是束缚水饱和度偏高的重要因素。从岩

石铸体薄片(见图7)可以看出,孔隙类型以粒间孔和粒间溶蚀孔为主,孔径范围0.02~0.40 mm,颗粒磨圆度为次圆—次棱,以线—点状接触为主,孔隙连通性一般。如前文所述,黏土矿物中伊—蒙混层占据主导,进一步将孔隙结构复杂化,孔喉的排驱压力增大,成藏时流体驱替难度大,易形成高束缚水,因此,孔喉结构复杂是本区束缚水饱和度高的另一个重要因素。

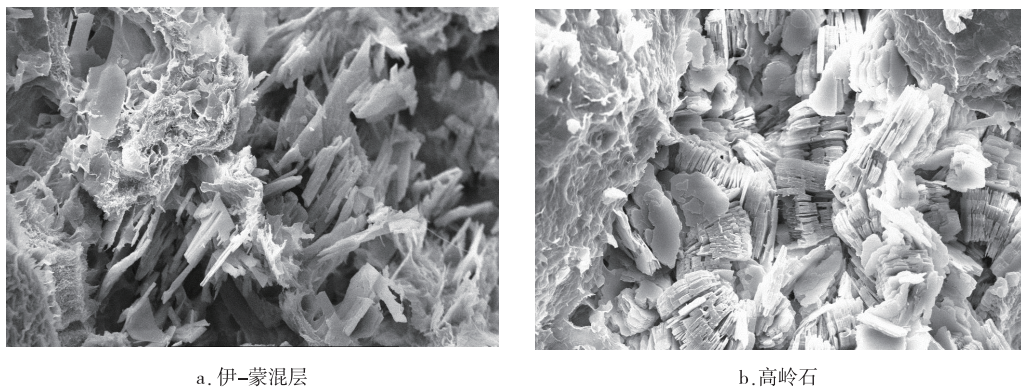
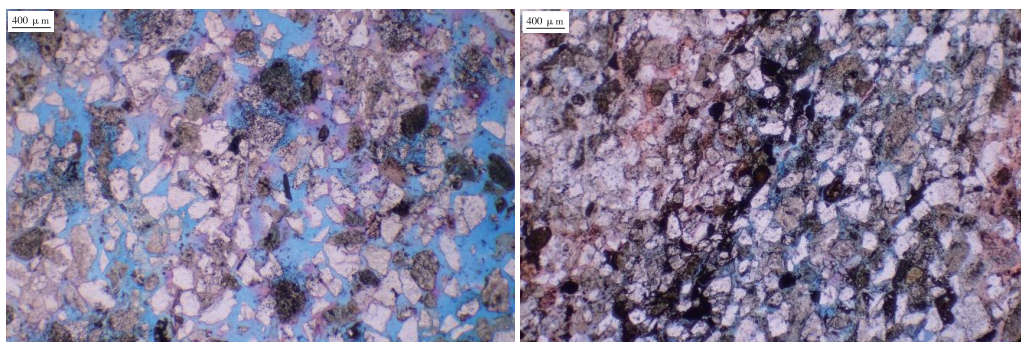


图6 低阻油层岩石样品扫描电镜特征



2 095.05 m:孔隙分布不均,孔隙多为粒间孔和粒间溶蚀孔; 2 118.04 m:孔隙不发育,孔隙多为粒间孔和粒间溶蚀孔,填隙物多为泥质和米粒状高岭石,孔径0.04~0.30 mm;填隙物泥质重,局部富集,孔径0.03~0.20 mm

图7 低阻油层岩石铸体薄片孔隙结构及填隙物特征

### 3.4 导电矿物

岩石中含有导电性良好的金属矿物(如黄铁矿、磁铁矿、褐铁矿等),可以使储层的电阻率降低。通过重矿物鉴定,陆源碎屑成分占98%,其中,陆源碎屑中磁铁矿占2/3左右,其次为石榴子石,占1/3左右;自生矿物占比较低,仅2%,全部为黄铁矿。但从岩石薄片分析,重矿物在岩石中的面积百分比低于2%,因此,即使重矿物中的磁铁矿和黄铁矿具有较好的导电性,对本区低阻油层形成的贡献也较小,可忽略不计。

## 4 应用效果

根据上述对宏观地质成因及微观成因综合分

析,明确了QHD油田馆陶组NgII2小层低阻油层潜力的可靠性,为低阻油层评价及开发提供了依据。设计利用E23S1井和I7H1井评价试采,证实该套低阻油层具有较好产能,新增低阻储量约1 000×10<sup>4</sup> t。目前针对NgII2小层低阻油藏编制了整体开发方案,已实施调整井13口,实钻构造、储层认识与钻前设计基本一致,单井平均初期日产油60 m<sup>3</sup>/d,初步建成20×10<sup>4</sup> t的年产油规模,该区块已成为QHD油田特高含水期主要的产量接替区。

## 5 结论

(1)研究区具有易形成低阻油藏的地质因素,其低阻油层的发育主要受沉积环境和造幅圈闭的

影响,储层物性差,泥质含量高,构造幅度低,岩性圈闭封堵条件好,为低幅、低阻油藏形成提供充分条件。

(2)低阻油层的微观成因受储层岩性、孔隙结构及高束缚水饱和度的共同作用,岩石粒度整体偏细,局部孔喉结构较小,伊-蒙混层进一步将孔隙结构复杂化,微小孔隙造成储层排驱压力高,束缚水增多,为低阻油层形成提供了必要条件。

(3)宏观成因和微观成因具有必然的内在联系,通过多因素、多方法综合分析 with 油田开发生产实践紧密结合,成功为油田持续稳产找到有效储量接替,对老油田挖潜及新区勘探有很好的指导。

#### 参考文献:

- [1] 欧阳健,毛志强,修立军,等.测井低对比度油层成因机理与评价方法[M].北京:石油工业出版社,2009.
- [2] 江艳平,窦松江,张东星,等.尼日尔 Agadem 油田 E1 油组低阻油层成因分析[J].断块油气藏,2017,24(5): 628-631.
- [3] 廖明光,唐洪,苏崇华,等.W 低阻油藏高不动水饱和度的成因及对低阻油层的影响[J].石油实验地质, 2010,32(4):353-357,361.
- [4] 汪瑞宏,崔云江,陆云龙,等.渤海油田中深层低阻油层测井特征及识别[J].海洋地质前沿,2016,32(11): 26-31.
- [5] 郑维才,陈为贞,高聚同,等.孤东油田北部地区低阻油层研究与挖潜[J].油气地质与采收率,2007,14(4): 45-47.
- [6] 杨娇,陆嫣,刘伟新,等.珠江口盆地 W 油田低阻油层特殊成因机理[J].中国海上油气,2014,26(4):41-45.
- [7] 居字龙,唐辉,刘伟新,等.珠江口盆地高束缚水饱和度成因低阻油层地质控制因素及分布规律差异[J].中国海上油气,2016,28(1):60-68.
- [8] 杨春梅,周灿灿,程相志.低电阻率油层成因机理分析及有利区预测[J].石油勘探与开发,2008,35(5): 600-605.
- [9] 赵军龙,李甘,朱广社,等.低阻油层成因机理及测井评价方法综述[J].地球物理学进展,2011,26(4): 1334-1342.
- [10] 郑华,李云鹏,徐锦绣,等.渤海海域低阻油层地质成因机理与识别——以辽东湾旅大 A 油田为例[J].断块油气田,2018,25(1):22-28.
- [11] 程妮,李和,张锦峰,等.靖边青阳岔油区低阻油层形成因素分析[J].特种油气藏,2010,17(6):60-62.
- [12] 王赛英,赵冠军,张萍,等.低阻油层形成机理及测井识别方法研究[J].特种油气藏,2010,17(4):10-14.
- [13] 林国松,康凯,郭富欣,等.渤海海域蓬莱油田低阻油层成因模式研究[J].特种油气藏,2019,26(3):68-73.
- [14] 王友净,宋新民,何鲁平,等.高尚堡深层低阻油层的地质成因[J].石油学报,2010,31(3):426-431.
- [15] 张艳红,赵其磊,席天德,等.濮城地区深层低电阻率油层形成机理与识别[J].石油勘探与开发,2004,31(4):93-95.
- [16] 赵军,宋帆.塔里木盆地低电阻率油层成因与评价[J].地球科学(中国地质大学学报),2004,29(3):317-322.
- [17] 秀锦绣,吕洪志,刘欢,等.渤海 LD 油田低阻油层成因机理与评价方法[J].中国海上油气,2018,30(3): 47-55.
- [18] 牛成民,杜晓峰,邹华耀,等.渤海海域石臼坨凸起油气输导体系与运聚模式[J].中国海上油气,2016,28(3):44-49.
- [19] 王兆峰,刘媛,杨智刚,等.K 油田白垩系低阻油层成因及识别方法研究[J].石油天然气学报,2013,35(1):99-103.
- [20] 王艳,陈清华.苏北盆地低阻油层的成因及识别[J].断块油气田,2009,16(1):31-33.
- [21] 杨胜来,魏俊之.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,2004.
- [22] 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.

(编辑 谢 葵)