

基于岩性精细识别基础上的 砂砾岩储层研究 ——以渤海 CFD 油田为例

孙风涛,田晓平,吕世聪,柳佳期,张 越
(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:砂砾岩体多位于陡坡带,具有纵向厚度大,粒径粗,泥岩不发育,岩相变化快,储层非均质强等特点。储层评价存在一定的困难,特别在海上油田探井较少、各项资料缺少、可类比油田较少的情况下,更增加了精细研究该类储层的难度。以渤海 CFD 油田的岩心、壁心、薄片、粒度、测井等资料为基础,通过岩矿与测井结合的研究,提出一套岩性判别模式,从而精确识别出储层段岩性。通过孔隙类型、孔隙结构、物性等微观特征描述,分析了沉积微相、岩性与物性的关系,指出本研究区储层物性的主控因素是岩性,从而确定了井点的优势储层。以层序地层格架为基础,井震结合,提取地震属性,在相控模式的指导下,预测出平面储层分布。这种由点到面的研究思路,为油田开发方案的合理编制提供了较为详实的地质基础。同时,为相似地质条件和资料基础的巨厚储层精细描述提供了技术和方法借鉴。

关键词:砂砾岩;沉积相;岩性识别;储层评价;优势储层

中图分类号:P618.130.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.02005

我国东部中、新生代陆相湖盆多以断陷性质为主,其陡坡带砂砾岩体发育,很多研究表明砂砾岩的成藏可能性大。随着勘探形势的发展,寻找新的储集层已成为当前各油田所面临的重要研究课题。砂砾岩体作为特殊的储层类型之一越来越被众多学者重视^[1-4]。渤海油田近年在渤中凹陷北部陡坡带扇三角洲砂砾岩储层中发现了砂砾岩体油藏,在近源快速沉积的背景下,渤海 CFD 油田东三段发育一套巨厚砂砾岩体。该套砂砾岩体具有以下特征:①纵向上储层厚(140 多米),含油

井段长,泥岩不发育,岩相变化快(细砂岩、中粗砂岩、含砾砂岩、砂砾岩),储层非均质强(渗透率 4.7~177.0 mD);②储层埋藏较深(3 000 m 左右),受地震资料品质影响,预测砂砾岩体优势储层分布存在困难;③钻井资料较少(单井井控面积 2.5 km²),储层连通性难以确定。这些储层问题大大增加了油田开发的难度和风险。为此,有必要开展以揭示中深层砂砾岩储层特征为重点的储层精细研究,搞清每个期次展布特点,评价优质储层,以便有针对性地实施开发方案。

1 岩矿与测井结合的精细岩性识别

砂砾岩体中多种岩性并存,物性差异大,岩性识别是描述、评价砂砾岩体的一项重要内容^[5,6]。

收稿日期:2017-09-22

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:孙风涛(1978—),硕士,高级工程师,主要从事石油地质研究工作。E-mail: sunft@enooc.com.cn

在有取心资料的井段,根据岩心区分岩性比较简单,而在没有取心的大部分井段中如何准确划分岩性?测井资料是全井段的资料,本文采用岩矿与测井的充分结合来精细识别 CFD 油田东三段砂砾岩体的岩性。在基础资料丰富的层段,首先利用岩心、壁心、铸体薄片等岩矿资料,识别出岩性。CFD 油田东三段按碎屑岩砾石含量及颗粒粒度分级标准,共识别出 5 种岩性(泥岩、细砂岩、中粗砂岩、含砾砂岩、砾砂岩)(图 1)。细砂岩粒径在 0.125~0.25 mm 之间,岩石成分主要见石英、钾长石、斜长石和火成岩、变质岩岩屑,斜长石绢云母化和钾长石高岭土化现象常见。粒间填隙物主要为白云石和铁白云石,部分泥质,碳酸盐矿物呈斑块状胶结、交代碎屑颗粒,泥质孔隙式分布,少量石英加大;中粗砂岩粒径在 0.25~2 mm 之间,岩石成分主要见石英、钾长石、斜长石和火成岩、变质岩岩屑,斜长石绢云母化和钾长石高岭土化现象常见。粒间填隙物主要为碳酸盐矿物,包括方解石、白云石和菱铁矿,碳酸盐矿物呈斑块状胶结、交代碎屑颗粒,少量泥质和重结晶的高岭石;含砾砂岩表现为砂岩,含有较少的砾石,在 5%~30%之间,岩石成分主要见石英岩岩块、花岗斑岩岩块、花岗岩岩块,少量的石英和长石。填隙物主要见少量泥质和高岭石,局部富集;砾砂岩砾石含量较高,在 30%~50%之间,岩石成分主要见石英岩岩块、花岗斑岩岩块、碳酸盐岩岩块、

砂岩岩块,少量的石英和长石。填隙物主要见少量泥质和高岭石,局部富集。然后用岩矿分析资料标定测井资料,建立岩相—测井相对应模式数据库。总结出每种岩性的测井响应特征,特别是密度、中子、双中子的测井响应特征和响应值(表 1)。表 1 中各岩性密度稍有差别,中子差别较小。对于一般的砂泥岩地层,中子和密度曲线交会可以比较容易的划分砂岩和泥岩,但是对于含砾的地层,中子和密度的测井响应将会变得复杂,含砾或含泥均可能导致曲线出现相反的变化,混淆解释人员的视线,导致难以识别储层的物性发育情况。渤海油田大量岩心分析结果表明,黏土矿物的密度响应值与砂岩骨架密度响应值相差不大,都为 2.65 g/cm³,而中子响应值相差较大(砂岩中子响应值为 -5%,黏土矿物中子响应值为 42%左右)。根据这一原理重构了一条纯砂岩的中子曲线,利用重构的中子曲线与实测的中子曲线差值(双中子差值)评价储层的含泥质特征。两者差别越大,说明储层含泥质越重,两者差别越小,储层岩性越纯。以中子、密度以及双中子差值为样本,利用聚类分析法精细识别出整个储层段的岩性(以 1 井为例,图 2)。从识别结果看,1 井的这套巨厚储层岩性上段 2 926~2 960 m 主要为中粗砂岩,中段 2 926~3 025 m 主要为含砾砂岩,下段 3 025~3 077 m 主要为砾砂岩。

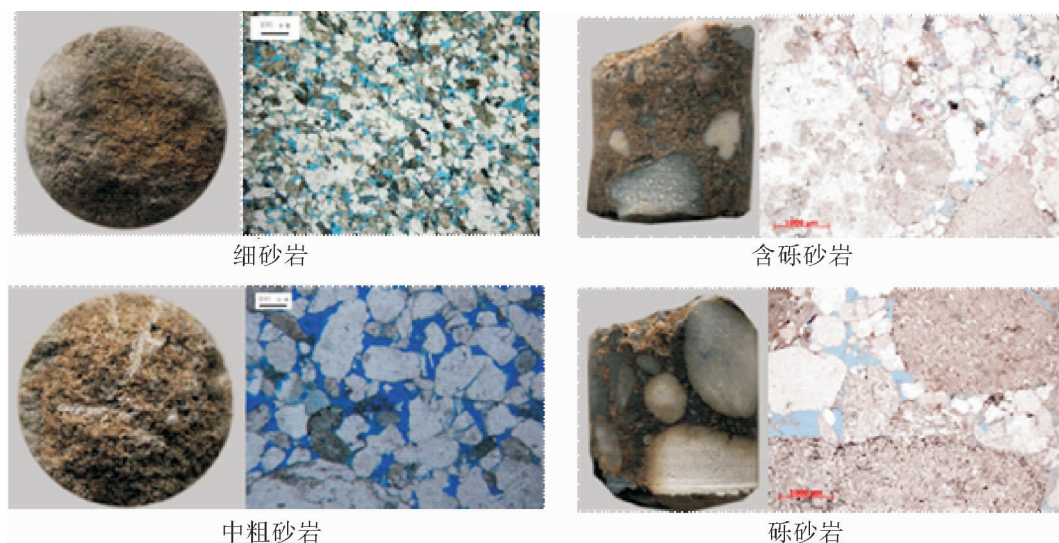


图 1 CFD 油田东三段岩性图版

Fig. 1 The lithology chart of the 3rd Member of the Dongying Formation in CFD Oilfield

表 1 各岩性测井响应特征

Table 1 The logging response characteristics of each lithology

岩性	密度响应值/(g/cm ³)	中子响应值/f	双中子差值/f
泥岩	2.48~2.56	0.13~0.17	0.09~0.14
细砂岩	2.40~2.48	0.13~0.17	0.04~0.08
中粗砂岩	2.35~2.40	0.13~0.16	0.01~0.04
含砾砂岩	2.38~2.45	0.09~0.13	0.01~0.03
砂砾岩	2.45~2.57	0.06~0.11	0.02~0.07

2 沉积相研究

渤中凹陷是渤海海域内面积最大的凹陷,位于渤海湾盆地中心,是渤海湾盆地的沉积中心和生油中心^[7]。按照赵澄林^[8]对渤海盆地古近系碎屑岩储层沉积相划分方案,渤中凹陷主要沉积相可分为“三扇一沟”,即湖底扇、扇三角洲、三角洲和非扇沟道。CFD 油田位于该盆地中心的北部陡坡带,根据 CFD 油田的构造位置,结合区域沉

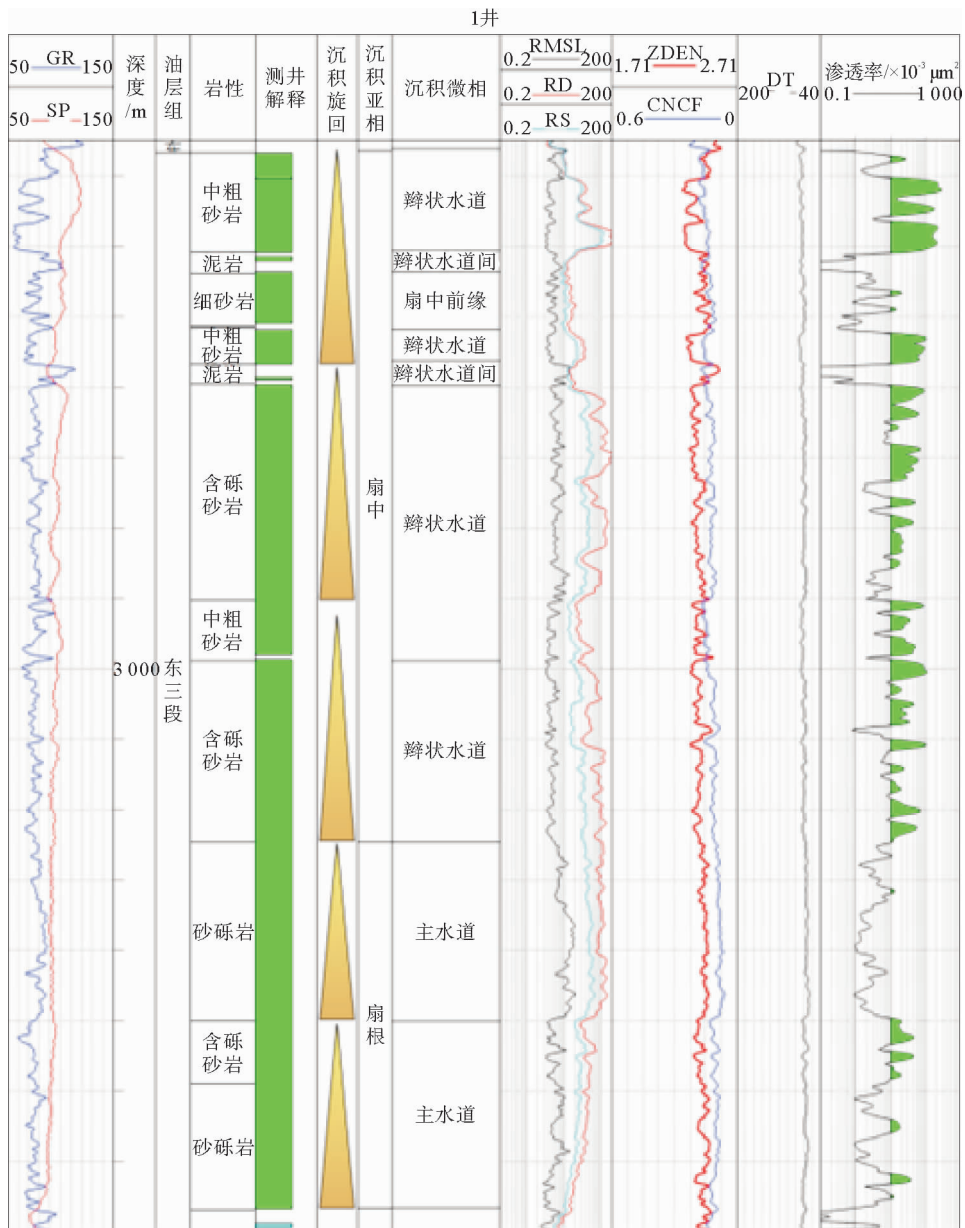


图 2 岩性与单井相图(1井)

Fig. 2 Lithology and sedimentary facies of well 1

积研究成果,对 CFD 油田过井地震剖面反射构型及井上沉积序列进行分析,最终确定 CFD 油田东三段为退积型扇三角洲沉积。

退积型扇三角洲的岩性、形态和分带特点类似于山麓冲积扇,故可将其划分为扇根、扇中和扇端 3 个砂体亚相带^[9]。扇根可进一步分为主水道和主水道间微相,扇中可进一步划分为辫状水道微相、扇中前缘和辫状水道间微相。

(1)主水道 位于扇根部位,岩性以块状砂砾岩或含砾粗砂岩为主,分选差,物性差。绝大部分为块状混杂堆积,层理不发育,局部地区可显示韵律沉积。在水道的顶部偶见平行层理、波状交错层理、并可见层内变形构造。底部多具冲刷面和河道滞留沉积。自然伽马曲线为典型的钟形或箱形(图 3a),钟形曲线反映水流能量向上逐渐减弱或碎屑物质供应能量减少,箱形曲线反映物源供应充足,水流能量较稳定^[10]。

(2)水道间微相 洪水溢出主水道后在水道之间(对单个水道而言为主水道侧源)沉积而成。岩性主要为灰色含砾泥岩和泥质粉砂岩。该微相在 CFD 油田内发育较少。

(3)辫状水道微相 辫状水道是扇中的主要沉积类型,也是扇三角洲沉积体系的主要储层,在整个扇三角洲沉积中占有重要地位,是 CFD 油田东三段最主要的优质储层相带。岩性以块状中粗砂岩和含砾砂岩为主,分选好,物性好,具有向上变细的正旋回,测井曲线表现为典型的钟形或近似箱形(图 3b)。

(4)扇中前缘 扇中前缘是辫状水道向盆地方向的延伸,粒度较细,沉积于水动力较弱的环境中。岩性主要为浅灰色、层状细砂岩或粉砂岩,分选好,物性差。自然伽马曲线表现为明显的钟形,旋回特征为正旋回,反映粒度自下而上由粗变细,水体能量逐渐减弱。

依据测井曲线响应和岩性特征对 CFD 油田进行单井沉积微相划分,以关键井 1 井为例(图 2)。1 井上半部(2 930~3 020 m)主要发育中粗砂岩和含砾砂岩,测井曲线近似箱形,属辫状水道沉积。电阻率曲线表现为高低状互层,高阻层为河道水流沉积,低阻为河道水流间的“细粒漫流”沉积。由于辫状水流在扇面不断迁移游荡,在横剖面上高阻层和低阻层经常横向突变。下半部(3 020~3 050 m)主要发育砂砾岩,测井曲线为典型钟形,属主水道沉积。电阻率曲线呈高阻块状形态,该部位最早接受沉积,加上后期洪水的冲洗渗漏,导致底部沉积物含泥量高,向上含泥量递减,故电阻率值由下向上增高(1 井 3 050~3 080 m)。相应的渗透率变化趋势使自然电位曲线的负偏幅度也向上增大。电阻率和自然电位曲线共同组成漏斗形状,表现为粒度向上变粗的假象,实际上这种假象是含泥量下高上低造成的,颗粒的平均中值仍是下粗上细。

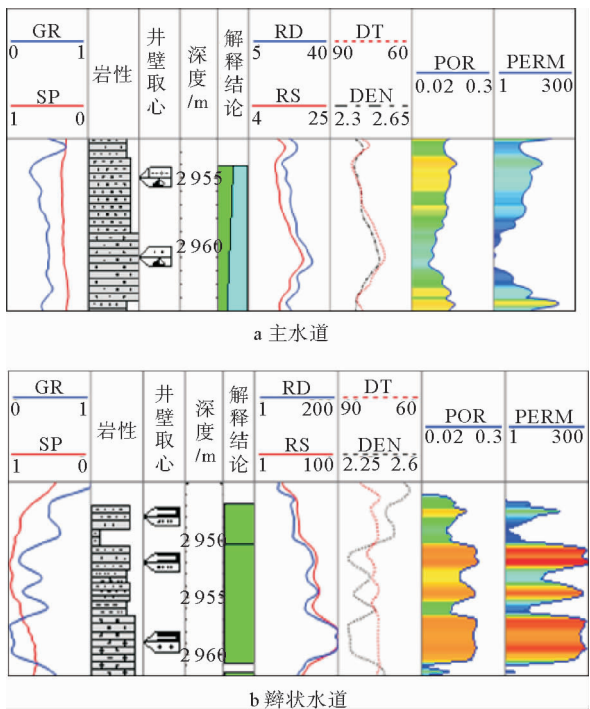


图 3 沉积微相的测井响应特征

Fig. 3 The logging response characteristics of each sedimentary facies

3 岩性识别基础上的储层评价

砂砾岩体一般具有储层非均质强的特点,引起这种强非均质性的主控因素是什么? 利用研究区 91 块岩心和 18 块旋转壁心物性分析样品资料进行研究,本次岩心研究主要分析了不同粒度的岩性与渗透率之间的关系(图 4)。壁心研究主要分析了物性与深度的关系,发现物性与深度无相关性。从图 4 可以看出,中粗砂岩的物性最好,主要分布在 $>100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的范围内;含砾砂岩

的物性其次,主要分布在 $10.0 \sim 100.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;砂砾岩和细砂岩的物性最差,主要分布在 $1.0 \sim 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。

砂岩储层物性演化与沉积成岩过程中发生的成岩作用息息相关,成岩作用包括压实作用、胶结作用、交代作用和溶蚀作用^[11]。CFD 油田砂砾岩体具有快速沉积背景,岩石成熟度低,受后期成岩作用影响较弱,压实作用是影响其储层物性的主要因素^[12-14],沉积物粒度和分选是影响成岩压实作用的两个重要因素。在相同条件下,分选越好,储层的渗透率越大,物性越好。分选较好时,代表水动力条件较强的沉积环境,高能环境下泥质充填物大多不易沉积^[15];分选很差时,多为大套杂基支撑砂砾岩,压实作用往往导致杂基致密化。如图 1 所示的本研究区的 4 种岩性,砂砾岩分选最差,含砾砂岩具有一定的分选,中粗砂岩和细砂岩分选最好。通过统计分选相当的中粗砂岩和细砂岩的孔隙类型分布发现,中粗砂岩原生孔隙保存好,孔隙中 $>60\%$ 的孔隙为原生孔隙,细砂岩原生孔隙保存的较少,其保存比例大部分都在 10% 以下。这说明分选相当,不同粒径的砂岩抵抗上覆载荷的能力不同,粒度粗的岩性,抗压实能力强,原生孔隙保存好;而粒度细的岩性,抗压实能力弱,减孔率快,原生孔隙保存的较少。通过以上分析表明,砂砾岩体的物性主要和岩性相关,本油田的优势岩性为中粗砂岩和含砾砂岩。岩性与沉积关系密切,岩石的粒径大小主要受沉积相控制。从沉积相研究中可知,砂砾岩主要为扇根沉积亚相,中粗砂岩和含砾砂岩主要为扇中沉积亚相。即平面的优质储层主要分布在扇中部分。

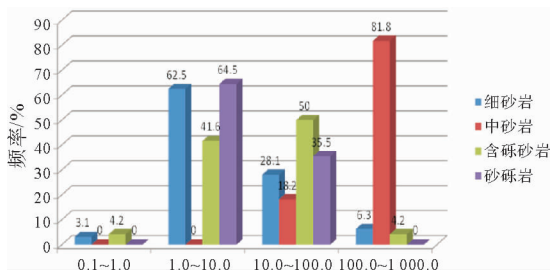


图 4 岩性与物性关系(岩心)

Fig. 4 The relation between lithology and physical properties(core)

4 相控约束的储层预测

通过上述研究,确定了本区的优势岩性和优势沉积亚相。如何刻画优势岩性的平面展布,即如何定量或半定量的刻画出扇中的平面位置。针对研究区主要目的层段储层纵向发育特征,选择沿目的层段进行地震属性提取,根据地震属性的变化特征,在退积型扇三角沉积模式的指导下,结合储层的某些测井响应特征,对地震属性进行分析,从而定性判断储层的分布情况。

地震属性分析就是利用从三维地震数据体中提取出的大量的、丰富的地震属性,与井点处测井资料和地质资料揭示的储层特征建立地震属性与储层参数的关系,将地震属性转换为相应的储层参数,利用少量样本建立起的这种关系进行全区预测,揭示储层总体分布特征。地震属性数目众多,不同类型的地震属性具有不同的物理和地质意义,这就决定了不同类型的地震属性具有不同的应用方向和不同的预测目标。在实际应用过程中,要根据所预测的对象选用合适的地震属性进行预测,使预测结果合理可靠^[16,17]。根据研究区资料情况和预测目的,在东三段提取地层属性切片,观察地震响应特征。针对 1 井区主力层,按照高分辨层序地层的对比结果^[20],自上而下划分了 5 期沉积旋回(图 2),并按其划分方案对每一期沉积旋回提取层间属性,切片时窗 $10 \sim 25 \text{ ms}$,对应地层厚度 $20 \sim 30 \text{ m}$ 。分别提取了包括均方根振幅、平均振幅、平均能量等地震属性进行储集相带及砂体平面分布的研究,如图 5 所示,各个参数对地质规律的响应存在一定的差异。由井上砂厚及砂地比统计可知,均方根振幅属性与砂厚及砂地比有较好的正相关性,优选均方根振幅属性。均方根振幅属性总体上为呈 NS 向展布的朵叶体,平面形态与扇三角洲相符,朵叶体内部高振幅值呈条带状自北向南展布,呈现辫状水道特征,1 井钻遇辫状水道。中等振幅区为扇中前缘微相,低振幅区为湖相泥岩。由此可见,均方根振幅能够有效识别东三段有利储层相带和岩性的平面变化。利用均方根振幅属性,结合退积型扇三角洲沉积模式,预测出平面优势储层展布,即图 5 均方根振幅属性图上蓝线所圈定的范围,从而有效指

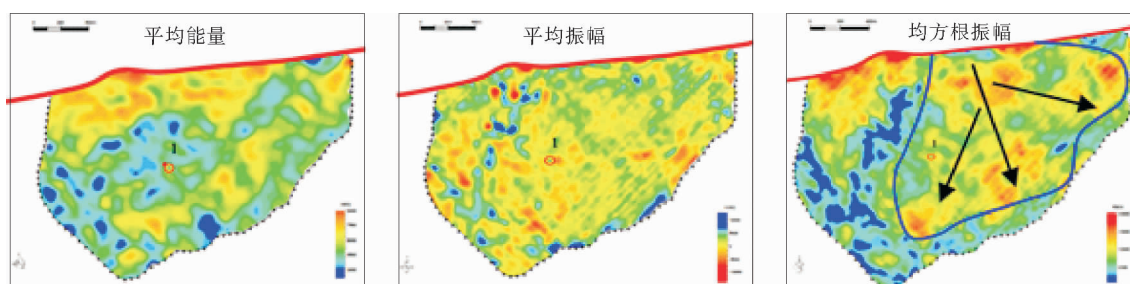


图5 1井区东三段地层切片地震属性对比

Fig. 5 Comparison of seismic attributes in well 1 area

导了开发井的井位部署。

5 结论

(1)以岩心、壁心、薄片、粒度、地震、测井等资料为基础,以点一面结合为主线开展研究。首先识别出基础资料丰富层段的岩性,然后通过岩矿与测井充分结合,根据渤海地区的经验,利用重构中子曲线的方法精确识别出砂砾岩体的岩性,主要包括中一粗砂岩、含砾砂岩和砂砾岩。

(2)在精细识别岩性的基础上,通过对沉积相、岩性、物性等分析认为,影响物性的主控因素是岩性,而岩性主要受沉积相控制,最终确定井点优势岩性为中一粗砂岩和含砾砂岩,平面优势储层主要分布在扇中的辫状水道微相。

(3)以层序地层学理论为基础,结合研究区的测井曲线及岩心特征,对砂砾岩体自上而下划分了5个沉积旋回,以沉积旋回划分方案为基础进行切片的提取与优选,最终优选出均方根振幅属性。在退积型扇三角洲沉积模式的指导下,井震结合,定量预测出平面优势储层展布范围。

(4)中深层储层的定量表征一直是渤海储层研究的难点和重点,本文通过多信息,多专业的结合,在沉积模式的指导下,对优势储层的定量描述做了尝试,有效指导了开发方案的部署,降低了开发风险。同时为相似地质条件的巨厚复杂储层精细描述提供了技术和方法借鉴。

参考文献:

[1] 高祥成,钟建华,雷敏,等.东营凹陷北部陡坡带深层砂砾岩体沉积特征及控制因素——以丰深1地区为例[J].石油地质与工程,2008,22(1):7-8.
[2] 于建国,姜秀清.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的内幕研究

[J]. 复式油气田,1998(1):47-50.

- [3] 谢风猛,武法东,陈建渝,等.渤海湾盆地滨南油田砂砾岩储层空间展布与成藏规律[J].石油实验地质,2002,24(4):335-337.
[4] 董春梅,林承焰,侯连华,等.储集砂砾岩体成因、分布规律及形成条件探讨——以辽河西部凹陷高升油田高二、三区为例[J].石油实验地质,1996,18(3):289-293.
[5] Sang H L, Arun K, Akhil D G. Electrofacies Characterization and Permeability Predictions in Complex Reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2002(6):238-246.
[6] 刘传虎,高永进.砂砾岩扇体油藏测井解释难点与对策[J].特种油气藏,2011,18(6):35-37.
[7] 杨香华,陈红汉,叶加仁,等.渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析[J].中国海上油气(地质),2000,14(4):225-231.
[8] 吴磊,徐怀民,季汉成.渤中凹陷大型湖泊三角洲的发育特征及油气勘探前景[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(1):81-88.
[9] 于兴河.碎屑岩系油气储层沉积学[M].北京:石油工业出版社,2008.
[10] 杨国涛,李娜,吴鑫,等.南堡凹陷拾场次凹沙三段优势储层预测技术[J].特种油气藏,2014,21(6):10-14.
[11] 施和生,雷永昌,吴梦霜,等.珠一坳陷深层砂岩储层孔隙演化研究[J].地学前缘,2008,15(1):171-175.
[12] 万欢,黄文辉,王华军.东营凹陷北部陡坡带沙河街组四段砂砾岩成岩作用[J].特种油气藏,2012,19(3):39-42.
[13] 朱庆忠,李春华,杨合义.廊固凹陷沙三段深层砾岩体油藏成岩作用与储层孔隙关系研究[J].特种油气藏,2003,10(3):15-17.
[14] 王艳红,袁向春,范二平,等.盐家油田永921块沙四上砂砾岩储层特征研究[J].特种油气藏,2014,21(1):31-34.
[15] 王永诗,王勇,朱德顺,等.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩优质储层成因[J].中国石油勘探,2016,21(2):28-36.
[16] 付检刚.地震属性分析在大庆长垣北二西区块储层预测中的应用[D].大庆:东北石油大学,2011.
[17] 高文博.红台地区储层预测应用研究[D].荆州:长江大学,2012.

LITHOLOGICAL SCRUTINY OF A SANDY CONGLOMERATE RESERVOIR: TAKING CFD OILFIELD IN BOHAI AS AN EXAMPLE

SUN Fengtao, TIAN Xiaoping, LV Shicong, LIU Jiaqi, ZHANG Yue

(Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: The sandy conglomerate usually has large thickness, coarse grain size, less mud, dramatic change in lithofacies and strong heterogeneity. Such properties will bring difficulties to reservoir evaluation, especially in offshore area when oil exploration wells are few. This paper takes the CFD oilfield in the Bohai Bay as an example. Data of core, thin section, grain size, and logging are integrated. Combined the logging with lithology, a set of lithology discrimination model is made for reservoir identification. By description of microscopic features of pore types, pore structures and properties, we analyzed the relationship of sedimentary microfacies, lithology and properties. It is considered that lithology is the major controlling factor of reservoir property, upon which the most favorable reservoir is identified. Finally, the prediction of the spatial distribution pattern of reservoir is made with seismic attributes extracted. The results have founded a detailed geological basis for oilfield development program and provided technical references for describing the thick reservoir formed under similar geological conditions.

Key words: sandy conglomerate; sedimentary; facies; lithology; recognition; reservoir evaluation; superiority reservoir