

张震,张新涛,徐春强,等.断-砂耦合接触分析在油气运移中的应用——以曹妃甸 A 油田明下段为例[J].海洋地质前沿,2020,36(7):49-55.

断-砂耦合接触分析在油气运移中的应用

——以曹妃甸 A 油田明下段为例

张震,张新涛,徐春强,杨传超,郭瑞

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:断-砂耦合接触关系决定了输导体系有效性及油气分布规律,是目前渤中凹陷西斜坡明下段构造-岩性油气勘探中的关键问题。利用西斜坡曹妃甸 A 油田多口钻井的录井、测井数据及三维地震资料,确定了断层-砂体的剖面、平面接触关系,并总结出顺向型、侧向型和复合型 3 种类型断层-砂体油气运移方式。尝试建立了断-砂耦合接触关系半定量描述思路与方法,明确了本区顺向型与侧向型油气运移效率的相对比值约为 1.7,在此基础上探讨了断-砂有效接触面积与砂体中油柱高度之间的关系。实践证明,该方法用于判别曹妃甸 A 油田潜力砂体的油柱高度是可行的,对成熟探区构造-岩性油气勘探具有重要参考意义。

关键词:输导体系;断-砂耦合;油气运移;明下段;曹妃甸 A 油田

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.086

0 引言

断层是油气由深层向浅层垂向运移的主要通道,而油气在垂向运移过程中,常常围绕油源断层两侧呈“顺藤结瓜”式分布,即沿断层垂向运移的油气横向有效进入两侧储集砂体内才能完成成藏^[1-2]。然而,勘探证实不同油源断层之间或同一油源断层两侧不同砂体之间油气分布存在很大差异,如何合理分析这种油气在垂向上分布的差异性,进而有效指导井位部署具有重要意义。渤海油田近年来不断加大浅层油气勘探力度,发现了一大批极浅水三角洲河道砂体与断层匹配型油气藏,其中断层和砂体如何有效耦合是这类油气藏成藏的关键,因而断层-砂体耦合控藏的研究逐渐引起重视^[3-5]。前人通过物理模拟实验对断-砂耦合分流油气进行了一些研究,但用于油田井位部署较少^[6-7];部分学者总结勘探实践,建立了“断-砂接触长度”等定性或半定量的研究

方法,但地质模型建立的过于简单,且在半定量分析断层与砂体耦合关系时,仅考虑了顺向运移的模式,而实际的钻探表明,侧向运移也可以成藏^[8-12]。

在前人研究的基础上,本文以渤中凹陷西斜坡中央构造带油气相对富集的曹妃甸 A 油田为例,通过对明化镇组下段油气运移的输导体系研究,总结不同断-砂接触关系类型、分布特征以及不同断层-砂体的油气运移的方式,探讨不同类型运移方式的油气运移效率相对比值,进而尝试建立断-砂有效接触面积与油柱高度之间的半定量关系,以期进一步揭示曹妃甸 A 油田浅层油气成藏规律,为渤中凹陷以及相似地区浅层复杂断块油气藏的勘探评价提供一定的指导意见。

1 地质概况

渤中凹陷位于渤海湾盆地海域中部,是海域内面积最广、新生界沉积厚度最大的凹陷,整体形态东断西超,呈箕状,四周被石臼坨凸起、沙垒田凸起、渤南低凸起和渤东低凸起包围^[13]。曹妃甸 A 油田位于渤中凹陷西斜坡的中央构造带上,紧邻沙垒田凸起,背山面洼(图 1),是油气运移的有利指向区,

收稿日期:2020-01-21

资助项目:“十三五”国家科技重大专项子课题“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05024-002-006)

作者简介:张震(1988—),男,硕士,工程师,主要从事油气成藏方面的研究工作. E-mail: zhangzhen18@cnooc.com.cn

具有晚期、近源、快速成藏的特征。构造精细解释结果表明,该构造为受控于NW向张-蓬断裂左旋走滑的一个复杂断块;已钻井和沉积相分析表明,该区新近系明化镇组下段发育极浅水三角洲沉积体,以砂泥岩不等厚互层为特征,极浅水三角洲前缘砂体与湖相泥岩组成有利的储盖组合。断层与砂体的发育构成了曹妃甸A油田浅层油气富集成藏的有利地质条件。

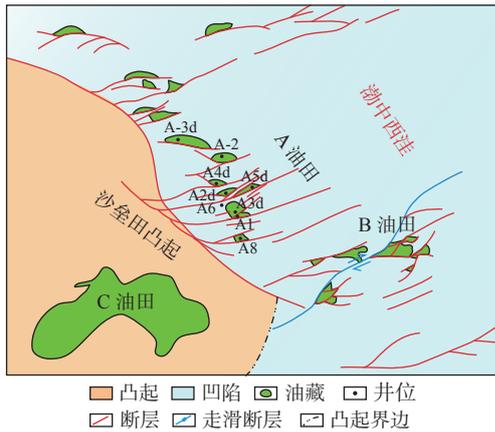


图1 曹妃甸A油田区域位置

Fig.1 Regional location of Oilfield CFD A

2 油气输导体系

2.1 断层输导体系

受控于张-蓬断裂左旋走滑和新构造运动的影响,曹妃甸A油田断裂活动性强,断层非常发育^[14]。中生代末期该构造主要受张-蓬断裂带影响,形成“两洼一脊”的构造格局,发育一系列近SN向的断层。新近纪早期的拉张作用强化了之前形成的洼隆格局;晚期受NW向走滑断层再次活化及新构造运动的影响,发育多组雁行式断层,浅层圈闭被复杂化。根据断层发育规模及断穿层位,可将其划分成2类,分别为断穿古近系大断层和新近系内部次级断层(图2)。前者多断至烃源岩或潜山顶面,能够将深部烃源岩或潜山顶面富集油气与浅层储集砂体相沟通,构成了油气垂向运移输导体系,促使油气在浅层富集成藏;而后者为新构造运动产生的次级断层,多伴生于大断层,其断距小、延伸距离短,无明显控沉积作用,主要使浅层圈闭复杂化,该类断层与油源断层相互切割,将垂向运聚的油气进行

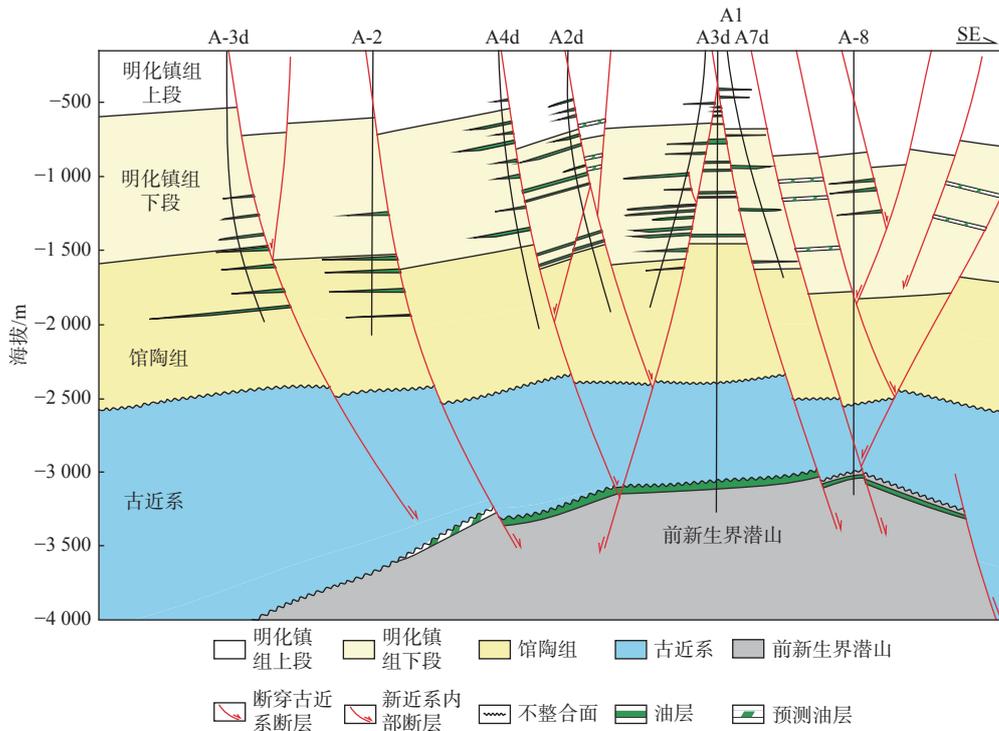


图2 曹妃甸A油田断层输导体系

Fig.2 Fault transmission system in Oilfield CFD A

横向再分配或运移至更浅的地层,构成了油气从烃源岩运移到浅层圈闭的输导体系,对该区明化镇组下段的油气运聚起到了关键输导作用。

2.2 砂体输导体系

砂体的分布特征受控于沉积相的展布,决定了油气横向运移方向及油气藏分布^[15-17]。曹妃甸 A 油田新近系主要发育 2 种类型砂体,馆陶组辫状河砂体和明化镇组下段极浅水三角洲砂体,其中馆陶组砂体呈块状、厚度大、含砂率高,骨架砂体是油气横向运移的最重要的输导通道;而明化镇组下段的极浅水三角洲前缘砂体与湖相泥岩互层,形成良好的储盖组合,相比于馆陶组辫状河砂体

更有利于油气聚集成藏,是曹妃甸 A 油田最主要的勘探层系。

3 断-砂耦合接触关系

3.1 断-砂运移方式类型及分布特征

断-砂耦合接触关系决定了油气输导体系的有效性,也决定了他源型油气藏的形成与分布^[18-20]。根据不同的断-砂耦合接触关系,对曹妃甸 A 油田已钻遇的 54 个砂体进行分类总结,共划分出顺向型、侧向型、复合型 3 种类型的断-砂油气运移方式(图 3)。

运移方式	断层样式	平面特征	剖面特征	油藏特征	典型砂体
a. 顺向型	单断式			推测油柱高度 平均为 14~25 m	sand6
b. 侧向型	单断式			油柱高度为 13~16 m 平均为 14 m	sand41
				油柱高度为 12~18 m 平均为 14 m	sand43 sand42
c. 复合型	双断式			油柱高度为 14~36 m 平均为 24 m	sand21 sand44
	多断式			油柱高度为 18~42 m 平均为 26 m	sand31 sand32

构造等值线/m 砂体 平面断层 剖面断层 油气运移方向

图 3 研究区明化镇组下段断-砂运移方式

Fig.3 Fault-sand migration systems of in Lower Member of Minghuazhen Formation in the study area

(1)顺向型:指油气在砂体中横向运移时,沿着近垂直于断层走向的方向,由断-砂接触的低部位向砂体高部位运移;此种类型砂体在低部位仅与单条油源断层耦合接触,且砂体顶面等值线近平行于断层走向(图 3a)。由于研究区断层极其发育,砂体常与多条断层接触。因此,顺向型运移方式在研究区分布少,多位于断层稀少的局部区域,目前还未得到钻井证实,推测其对油柱高度影响的介于侧向型

与复合型之间。

(2)侧向型:指油气在砂体中横向运移时,顺着断层走向的方向,由断-砂接触的低部位向断-砂接触的高部位运移;此种类型砂体在高部位仅与单条油源断层耦合接触,且砂体顶面等值线近垂直于断层走向(图 3b)。侧向型运移方式在研究区分布也相对较少,其砂体多沿着油源断层走向展布,呈条带状展布,其含油砂体的油柱高度范围为 12~18 m,

平均值为 14 m, 此种运移方式的油气运移效率相对最弱, 从而对油柱高度的影响也较弱。

(3) 复合型: 指砂体在低部位和高部位分别与油源断层耦合接触, 既存在顺向运移方式, 也存在侧向运移方式(图 3c)。该种运移方式在研究区分布范围最广, 尤其是在断层密集处, 其断-砂接触面积也相对较大, 钻遇含油砂体的油柱高度范围为 14~42 m, 平均值为 25 m, 此种运移方式的油气运移效率相对较强, 复合型运移方式对油柱高度的影响明显大于侧向型运移方式。

如上文所述, 不同类型运移方式对砂体油柱高度的影响存在明显差异。针对这种差异性, 本文尝试建立研究区断-砂耦合半定量描述的思路和方法, 并以此为基础探讨不同运移方式的油气运移效率相对比值以及断-砂耦合有效接触面积对油柱高度的影响。

3.2 断-砂耦合半定量研究方法

曹妃甸 A 油田的钻探结果证实, 断层与砂体的耦合接触关系和有效接触面积对明下段油柱高度具有明显控制作用, 而断-砂耦合定量描述则是预测钻前砂体油柱高度的一种方法。该方法是根据已钻含油气砂体的断-砂接触面积与油柱高度之间的关系来推测未钻砂体的油柱高度。上文的断-砂接触面积指有效接触面积, 即储集层段中砂体与有效运移断面(断面脊)的接触面积, 其值能较真实反映断-砂耦合运移油气的情况, 值越大, 运移油气能力越强。以明化镇组下段极浅水三角洲为例, 其假设条件为: ①与砂体接触的油源断层均具有油气运移

能力; ②断层为油气垂向运移通道, 砂体为油气横向运移通道。

本文将运移效率定义为断层与砂体单位有效接触面积的油气充注能力, 其中将顺向运移的效率定义为 a , 侧向运移的效率定义为 b , 则复合型运移的砂体油柱高度可用(1)式表征; 侧向型运移的砂体油柱高度, 可以(2)式表征。

$$(aL_1H_1 + bL_2H_1) \cdot C = h_1 \quad (1)$$

$$bL_3H_2 \cdot C = h_2 \quad (2)$$

式中: a 为顺向运移效率, 无量纲;

b 为侧向运移效率, 无量纲;

H_1 为复合型砂体的断-砂接触厚度, m;

H_2 为侧向型砂体的断-砂接触厚度, m;

h_1 、 h_2 为油柱高度, m;

C 为与运移有关的综合系数, 无量纲;

L_1 为复合型砂体中顺向运移断层的断-砂接触长度, km;

L_2 为复合型砂体中侧向运移断层的断-砂接触长度, km;

L_3 为侧向型砂体中侧向运移砂体的断-砂接触长度, km。

分别选取复合型砂体 A4d-1018.5(图 4a) 与侧向型砂体 A4d-1056.6(图 4b), 将 2 个砂体的断-砂接触长度、砂体厚度以及油柱高度代入公式, 即求出 a 与 b 的比值为 1.6。断-砂接触长度与断-砂接触的砂体厚度这 2 个参数如何合理的选取至关重要, 将影响断-砂有效接触面积的真实性, 也将影响油气运移效率比值的可靠性。

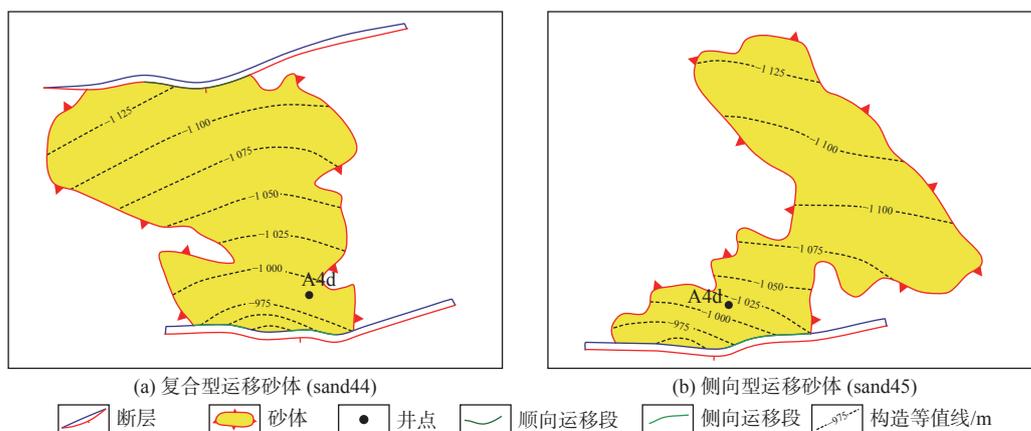


图 4 复合型运移砂体与侧向型运移砂体

Fig.4 Compound migration sand bodies and lateral migration sand bodies

(1)断-砂接触长度的选取:通过精细刻画成藏期断面脊的位置,确定有效地油气运移断面,选取这部分断面与砂体接触的长度作为断-砂接触长度;

(2)断-砂接触的砂体厚度选取:结合岩性反演体,同时考虑到断-砂附近地震资料的影响,选取有效运移断面上下盘 20 ms 处的砂体,计算其与有效运移断面的平均接触厚度,作为断-砂接触的砂体厚度。

在该区选取多组油柱高度确定且邻近的砂体,按照上述方法,计算出了 a 与 b 的比值为 1.4~2.1,选取平均值 1.7 作为该区顺向运移效率与侧向运移效率的比值。在明确顺向运移效率与侧向运移效率相对比值的基础上,进而探讨断-砂有效接触面积与油柱高度之间的关系。本文将断-砂接触长度(L)

定义为侧向运移的断-砂接触长度(L_2 乘以侧向运移效率 1)与顺向运移的断-砂接触长度(L_1 乘以顺向运移效率 1.7)之和。按照上述方法,计算出多个砂体有效的断-砂接触面积(表 1),然后将此断-砂接触面积与油柱高度的数值进行拟合(图 5),进而得到了二者之间的关系式(3)。

$$h = -0.0018A^2 + 0.4418A + 15.037 \quad (3)$$

$$A = 1.7 \cdot L_1H + L_2H \quad (4)$$

式中: A 为断-砂有效接触面积, $m \cdot km$;

L_1 为顺向运移断-砂接触长度, km ;

L_2 为侧向运移断-砂接触长度, km ;

H 为砂体厚度, m ;

h 为油柱高度, m 。

表 1 曹妃甸 A 油田断层与砂体耦合数据统计表

Table 1 A statistic of fault and sand body couples in Oilfield CFD A

砂体名称	含油气性质	砂体厚度 H/m	L_1 (顺向)/ km	顺向运移效率 a	L_2 (侧向)/ km	侧向运移效率 b	L/km	断-砂有效接触面积 $A/m \cdot km$	油柱高度 h/m
A2d-954.6	顶油底水	12.0	0.12	1.70	1.31	1.00	1.51	18.17	21
A2d-1037.6	顶油底水	27.6	2.18	1.70	0.92	1.00	4.63	127.68	41
A3d-921.8	顶油底水	12.7	0.32	1.70	0.38	1.00	0.93	11.78	24
A3d-944.2	顶油底水	22.0	1.82	1.70	1.84	1.00	4.93	108.55	42
A3d-1049.1	顶油底水	26.9	0.57	1.70	1.60	1.00	2.57	69.11	31
A3d-1113.0	顶油底水	10.6	—	—	0.81	1.00	0.81	8.59	16
A4d-867.5	顶油底水	4.0	—	—	1.51	1.00	1.51	6.04	12
A4d-1018.5	顶油底水	16.0	1.72	1.70	1.87	1.00	4.79	76.70	42
A4d-1050.6	顶油底水	10.1	—	—	1.82	1.00	1.82	18.38	28

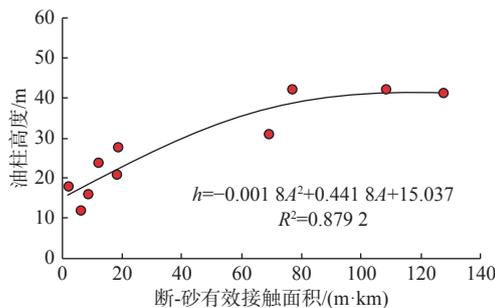


图 5 断-砂耦合有效接触面积与油柱高度拟合图

Fig.5 Fitting diagram of coupling contact area of sand and oil column height

3.3 应用效果

根据曹妃甸 A 油田建立的断-砂耦合定量研究方法,对该构造的后续评价井 A5d 井预测砂体

的油柱高度进行预测。其中,预测砂体的厚度根据已钻砂体与地震振幅属性之间的响应关系确定,断-砂接触长度、不同运移方式的运移效率等参数为已知条件,油柱高度则根据拟合公式(3)计算取得。结果表明(表 2),预计钻遇 5 套砂体,根据岩性反演预测厚度分别为 10、8、25、10、11 m;预测断-砂接触面积为 52.84、18.18、75.73、35.04、49.24 $m \cdot km$;预测油柱高度分别为 28.6、21.5、33.3、25.0、27.9 m。其中, A5d-2、A5d-2 砂体的油柱高度较小,与预测值相差较大,分析认为其与断层另一盘的砂体对接,侧向封堵条件相对较差,影响了其油气充注成藏;其他砂体钻后证实的油柱高度与钻前预测值误差率约为 15%,表明该方法具有一定可行性。

表2 曹妃甸A油田A5d井断-砂耦合预测与实钻结果对比

Table 2 Prediction of coupled fracture-sand in well A5d in Oilfield CFD A and comparison with actual drilling results

砂体	砂体厚度/m		断-砂接触长度(顺向) L_1 /km		顺向运移效率	断-砂接触长度(侧向) L_2 /km		侧向运移效率	断-砂有效接触面积/m ² ·km		油柱高度/m	
	预测	实钻	预测	实钻		预测	实钻		预测	实钻	预测	实钻
A5d-1	10.0	5.9	2.22	2.22	1.7	1.51	1.51	1.0	52.84	31.18	28.6	5.5
A5d-2	8.0	5.3	0.79	0.79	1.7	0.93	0.93	1.0	18.18	12.05	21.5	11.3
A5d-3	25.0	21.2	1.17	1.17	1.7	1.04	1.04	1.0	75.73	64.21	33.3	27.9
A5d-4	10.0	7.1	1.84	1.84	1.7	0.92	0.92	1.0	40.48	28.74	26.1	20.4
A5d-5	11.0	9.7	1.38	1.38	1.7	0.45	0.45	1.0	41.76	36.82	26.3	31.0

4 结论

(1)断层和砂体构成了曹妃甸A油田明化镇组下段的油气输导体系,断至烃源岩或潜山顶面的油源断层和有利储集层段中的砂体共同控制了明下段油气富集程度,且断-砂耦合接触关系也决定了输导体系的有效性及其油气分布规律。

(2)研究区明下段断-砂运移方式存在顺向型、侧向型和复合型3种类型,其中复合型分布最广,侧向型次之,顺向型较少;复合型运移方式的油气运移效率相对较强,且对油柱高度的影响明显大于侧向型运移方式;侧向型运移方式的油气运移效率相对最弱,从而对油柱高度的影响也较弱。

(3)尝试建立断-砂耦合半定量描述思路和方法,合理选取断-砂接触长度及砂体厚度值,明确该区顺向型与侧向型的油气运移效率相对比值约为1.7,在此基础上建立了断-砂有效接触面积与油柱高度之间的关系,合理预测未钻潜力砂体的油柱高度,误差率约为15%。

参考文献:

- 系[J]. 海洋石油, 2001(1): 14-20.
- [6] 沈朴,张善文,林会喜,等. 油气输导体系研究综述[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 4-8, 111.
- [7] 赵忠新,王华,郭齐军,等. 油气输导体系的类型及其输导性能在时空上的演化分析[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 527-532, 536.
- [8] 武芳芳,朱光有,张水昌,等. 塔里木盆地油气输导体系及对油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 332-341.
- [9] 张新涛,牛成民,黄江波,等. 黄河口凹陷渤中34区明化镇组下段油气输导体系[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 27-30, 113.
- [10] 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.
- [11] 钱庚,牛成民,杨波,等. 渤海南部莱西构造带新近系油气优势输导体系[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 34-41, 50.
- [12] 杜学斌,解习农,任建业,等. 济阳拗陷中生界古潜山油藏输导体系及成藏模式[J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 22-26.
- [13] 徐长贵,周心怀,杨波,等. 渤中凹陷石南陡坡带构造-岩性复合圈闭的形成及分布规律[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 887-893.
- [14] 黄雷. 渤海海域新近纪以来构造特征与演化及其油气赋存效应[D]. 西安:西北大学, 2014.
- [15] 刘华,任景伦,蒋有录. 渤海湾盆地东营凹陷现河庄油田河31断块区输导体系特征与成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 41-46.
- [16] 张宗峰. 东营凹陷北部陡坡带砂体输导体系与油气成藏研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2009.
- [17] 刘震,张善文,赵阳,等. 东营凹陷南斜坡输导体系发育特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 84-86.
- [18] 付广,孙同文,吕延防. 南堡凹陷断-砂配置侧向输导油气能力评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 79-87.
- [19] 孙建军. 不同类型断-砂配置输导的油气特征及成藏控制作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(1): 57-63.
- [20] 徐春双,徐淑艳,孙建军. 断裂与砂泥组合的配置类型及对油气运移的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(3): 36-41.
- [1] 何登发. 断裂—岩性体油气藏特征[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 22-28, 34.
- [2] 金之钧,张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263-270.
- [3] 杜春国,郝芳,邹华耀,等. 断裂输导体系研究现状及存在的问题[J]. 地质科技情报, 2007, 26(1): 51-56.
- [4] Gudmundsson A, Berg S S, Lyslo K B, et al. Fracture networks and fluid transport in active fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(2/3): 343-353.
- [5] 葛建党. 郑庐断裂在渤中凹陷的构造特征与油气成藏的关系[J]. 海洋石油, 2001(1): 14-20.

FAULT-SAND COUPLING AND ITS APPLICATION TO HYDROCARBON MIGRATION: A CASE FROM OILFIELD CFD A

ZHANG Zhen, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, YANG Chuanchao, GUO Rui
(Tianjin Branch of CNOOC China Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The coupling contact relationship between fault and sand reservoir determines the validity of the hydrocarbon migration and transportation system. It is a key problem in shallow oil and gas exploration and evaluation on the western slope of the Bozhong Sag. Based on the logging data from 6 evaluation wells and the 3-D seismic data from the Oilfield CFD A, the connectivity boundaries of reservoir sand bodies and the types of fault-sand coupling contact are studied in this paper. Three types of oil and gas migration systems, namely the forward, lateral and composite are, classified. Using the quantitative description method for the fault-sand coupling system, it is clear that the relative efficiency of oil and gas forward migration in the shallow sand bodies in this area is about 1.7, compared to the efficiency of lateral migration. On this basis, the quantitative relationship between fault-sand contact area and oil column height is established. Practice has proved that this method is feasible for predicting the oil column height of shallow undrained sand body in similar blocks, and has important significance for reference of the exploration and evaluation of subsequent reservoirs.

Key words: migration pathways; fault-sand coupling; hydrocarbon accumulation; Lower Member of Minghuazhen Formation; Oilfield CFD A