

渤海海域新近系明化镇组断裂控藏作用定量评价 ——以黄河口凹陷中央构造脊为例

温宏雷, 邓辉, 李正宇, 高雁飞, 孙藏军, 郭轩
(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:渤海海域黄河口凹陷油气成藏条件复杂,系统分析断裂对油气成藏的控制作用有利于更好地指导研究区下步的油气勘探。对黄河口凹陷中央构造脊各级断裂的延伸长度、密度、各地质时期断距、活动速率、盖层断接厚度、分形分维值等参数进行统计对比,认为油气成藏期油源断裂活动速率决定油气的垂向输导能力,当油源断裂活动速率大于15 m/Ma时,对油气的运移能力较强;盖层断接厚度影响油气的富集层位,当盖层断接厚度小于60 m时,对油气的阻挡作用较小;断裂分形分维值调节浅层油气的运聚效率,当断裂分形分维值大于1.30时,对油气的运聚效率较高。在此基础上建立断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法,应用该方法对与黄河口凹陷中央构造脊相邻的渤中29构造区进行断裂控藏作用定量评价,并优选出浅层的6个有利圈闭作为研究区下步的油气勘探目标。

关键词:油气成藏 断裂活动速率 盖层断接厚度 断裂分形分维值 定量评价 中央构造脊 黄河口凹陷

中图分类号:TE112.3

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)04-0036-07

Quantitative evaluation of control effect of faults on hydrocarbon accumulation in the Minghuazhen Formation, Bohai Sea: A case study of central structural ridge in Huanghekou sag

Wen Honglei, Deng Hui, Li Zhengyu, Gao Yanfei, Sun Cangjun, Guo Xuan

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch Company, CNOOC China Ltd., Tianjin City, 300459, China)

Abstract: There are complex hydrocarbon accumulation conditions in Huanghekou sag, Bohai Sea. The systematical analysis of fault control effect on hydrocarbon accumulation is conducive to guiding further hydrocarbon exploration in the area. Based on the analysis of faults characteristics of the central structural ridge in Huanghekou sag, including fault extension length, density, fault throw in individual geologic period, fault activity rate, faulted caprock thickness and fractal dimensions, it is considered that the source fault activity rate during accumulation stages controls the capacity of vertical hydrocarbon migration, and the hydrocarbon vertical migration along source fault is more likely to happen when fault activity rate is more than 15 m/Ma. The faulted caprock thickness controls hydrocarbon vertical distribution, and the caprock is difficult to impede the migration of oil when the faulted caprock thickness is less than 60 m. The fault fractal dimensions control the migration and accumulation efficiency of hydrocarbon in shallow reservoirs, and the migration and accumulation efficiency of hydrocarbon is relatively high when the value of fault fractal dimensions is higher than 1.30. As a result, the quantitative evaluation method of fault-control hydrocarbon accumulation was established based on three factors including activity rate, faulted caprock and fractal dimension, and the fault control effect on hydrocarbon accumulation in Structure area Bozhong 29 near Huanghekou central structural ridge was evaluated quantitatively and 6 benefit targets were optimized as the next hydrocarbon targets.

Key words: hydrocarbon accumulation; fault activity rate; faulted caprock thickness; fault fractal dimensions; quantitative evaluation; central structural ridge; Huanghekou sag

收稿日期:2017-03-21。

作者简介:温宏雷(1988—),男,湖北武汉人,工程师,从事油气勘探综合地质研究。联系电话:(022)66500653, E-mail: wenhl3@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术”(2016ZX05024-002)。

黄河口凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷的东北部,渤海海域渤中凹陷东南部,面积约为2 570 km²。其北侧为渤南低凸起,南侧为垦东—青坨子凸起和莱北低凸起,东侧为庙西凹陷,西邻沾化凹陷和埕北凹陷,为近东西向控凹断裂和北北东向走滑断裂共同控制形成的新生界北断南超的箕状凹陷^[1-3]。黄河口凹陷中央构造脊从北至南已发现一系列油田及含油气构造,但横向对比这些油田及含油气构造可以发现,整个中央构造脊不同区域的油气成藏和富集特征都具有较大差异。总体表现为,中部区域油气最为富集,且主要分布于明化镇组下段,南部区域油气主要在古近系成藏,北部区域油气主要在古生界潜山成藏。针对黄河口凹陷中央构造脊的油气差异成藏特征,前人对其沉积相、走滑转换带的油气控藏作用等进行了研究^[4-10],但定量研究成果相对较少,且多偏向于单因素研究^[11-13]。为了更深入地探讨黄河口凹陷中央构造脊浅层油气的差异富集规律,笔者尝试从定量的角度对研究区断裂及其对油气的控藏作用进行分析,并建立断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法,以期对研究区下步的油气勘探实践起到指导作用。

1 断裂发育特征

黄河口凹陷中央构造脊在区域上受2条北北东向走滑断裂夹持(图1),其断裂类型主要分为2类。一类为北北东和东北向展布断裂,主要为2条大型的走滑断裂及其派生的次级断裂;另一类为近东西向展布的伸展断裂。前人研究结果表明^[14-16],渤海

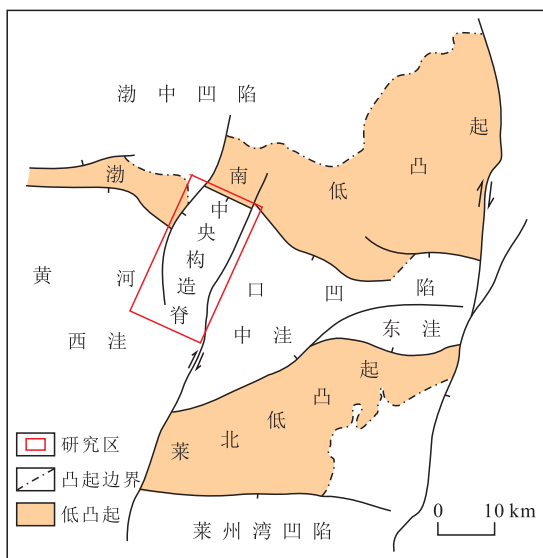


图1 黄河口凹陷中央构造脊区域构造位置
Fig.1 Structural location of the central structural ridge in Huanghekou sag

海域的走滑断裂对油气垂向运移能力较小,主要起到侧向封堵作用,因此主要针对近东西向展布的伸展断裂进行研究。

研究区近东西向展布的伸展断裂十分发育,且对油气运移的作用存在差异,可分为沟通沙河街组烃源岩及浅层储层的油源断裂、未直接沟通烃源岩但间接沟通油源断裂及储层的次级运移断裂2种类型。

受基底分带及断裂分隔作用影响,中央构造脊可划分为北部带、中部带及南部带3个区带(图2)。不同区带的断裂组合样式及发育密度具有较大差异。中央构造脊的断裂组合形式多样,可划分为6类:简单板式断裂、简单铲式断裂、简单“Y”字型组合断裂、复杂“Y”字型组合断裂、多米诺式组合断裂、负花状组合断裂。其中,北部带以发育简单板式断裂、简单铲式断裂和简单“Y”字型组合断裂为主;中部带以发育复杂“Y”字型组合断裂、多米诺式组合断裂及负花状组合断裂为主;南部带以发育复杂“Y”字型组合断裂和多米诺式组合断裂为主。

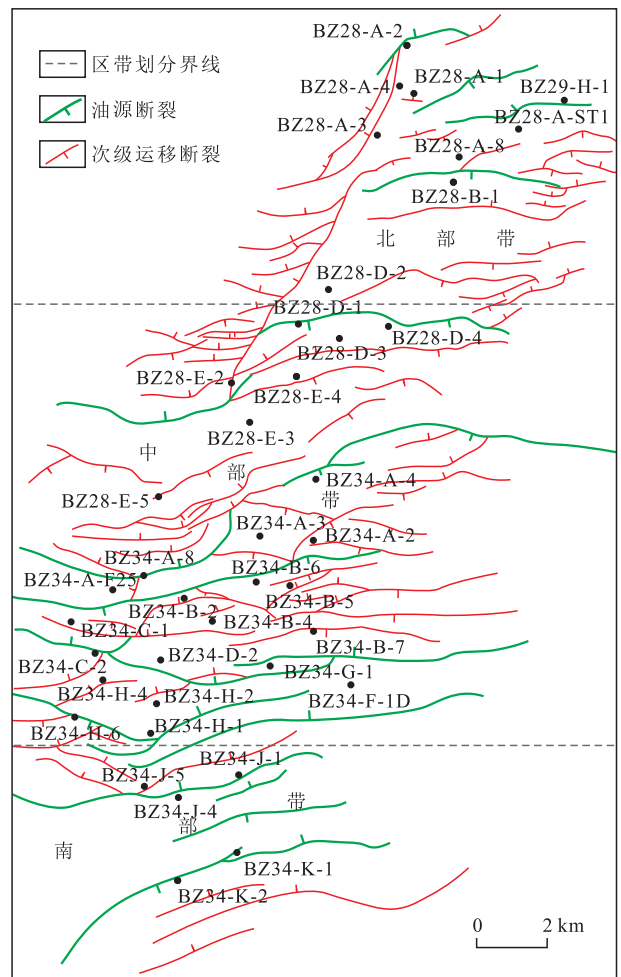


图2 黄河口凹陷中央构造脊断裂分布及区带划分
Fig.2 Distribution of faults and division of zones of the central structural ridge in Huanghekou sag

黄河口凹陷中央构造脊3个不同区带的断裂发育密度具有较明显的差异。统计各区带在古近系沙河街组(T_3 地震反射层)、东营组(T_2 地震反射层)及新近系馆陶组(T_2 地震反射层)、明化镇组下段(T_0 地震反射层)、明化镇组上段(T_0^1 地震反射层)沉积时期的断裂发育密度,发现中部带断裂相对最为发育,在 T_0 地震反射层的断裂密度最大,为0.34条/ km^2 ,断裂延伸规模为3~7 km;其次为南部带,在 T_3 地震反射层的断裂密度最大,为0.25条/ km^2 ,断裂延伸规模为5~14 km;北部带的断裂密度最小,在古近纪和新近纪的断裂密度普遍小于0.2条/ km^2 ,断裂延伸规模为5~8 km。

2 断裂控藏作用分析

统计分析黄河口凹陷中央构造脊10个已发现油田及含油气构造共计58口已钻探井的油气显示情况与研究区23条油源断裂、87条次级运移断裂之间关系的各项参数,认为油气成藏期油源断裂活动速率、盖层断接厚度以及断裂分形分维值这3个参数对油气成藏具有主要的控制作用。

2.1 油气成藏期油源断裂活动速率决定油气的垂向输导能力

断裂活动速率是指某一地层单元在一定地质时期内,因断裂活动形成的落差与相应沉积时间的比值^[17],其表达式为

$$V_f = \frac{\Delta H}{T} = \frac{(H_d - H_u)}{T} \quad (1)$$

断裂发育形态的演化具有阶段性,其活动强度也具有迁移性。只有在油气充注时期或之后,断裂活动对油气的聚集与保存才有意义^[18]。黄河口凹陷烃源岩的生烃史及油气充注史研究结果表明,自明化镇组沉积晚期(距今5.2 Ma)以来,黄河口凹陷

发育的烃源岩开始大规模的生排烃,并随即开始油气充注,因此黄河口凹陷的油气主成藏期为明化镇组沉积晚期。

对研究区不同区带油源断裂在各地质时期的断裂活动性进行统计,并与实际钻探结果进行对比,发现主要油源断裂在油气成藏期的断裂活动速率与已钻井钻遇的油气丰度呈正相关关系。

研究区中部带油源断裂活动速率整体高于北部带和南部带,且中部带浅层已发现的油气丰度也最高。北部带和南部带主要油源断裂在 T_0^1 地震反射层的断裂活动速率均较低,多为5.0~14 m/Ma,除少数断裂活动性较强的部位活动速率略高外,整体断裂活动速率均低于15 m/Ma,表明北部带与南部带发育的断裂对油气的垂向输导能力整体较差,与北部带及南部带目前浅层发现油气较少的勘探现状是吻合的,而中部带油气成藏期的主要油源断裂活动速率明显高于北部带和南部带。从统计结果来看,油源断裂在 T_0 及 T_0^1 地震反射层的断裂活动速率多大于15 m/Ma,部分断裂的平均断裂活动速率超过20 m/Ma,成为油气的垂向运移通道,有利于油气在浅层圈闭中聚集,这也是中部带探井在浅层普遍获得较好油气发现的原因之一。

此外,同一条断裂在不同构造部位的断裂活动速率差异也会影响油气的运移效率,造成油气在浅层的差异富集。例如中央构造脊北部带发育的F1断裂,其断裂活动速率由西至东逐渐降低(图3),而在该断裂展布方向自西向东不同构造部位已完钻的BZ28-D-1, BZ28-D-3和BZ28-D-4这3口探井发现的油气层厚度也明显减薄;BZ28-D-1, BZ28-D-3和BZ28-D-4井钻遇的油层厚度分别为28.8, 12.4和1.3 m,气层厚度分别为44, 9.3和0 m。中部带F35断裂在不同构造部位的断裂活动速率也具有较大差异(图3),在断裂活动速率较大处钻探的

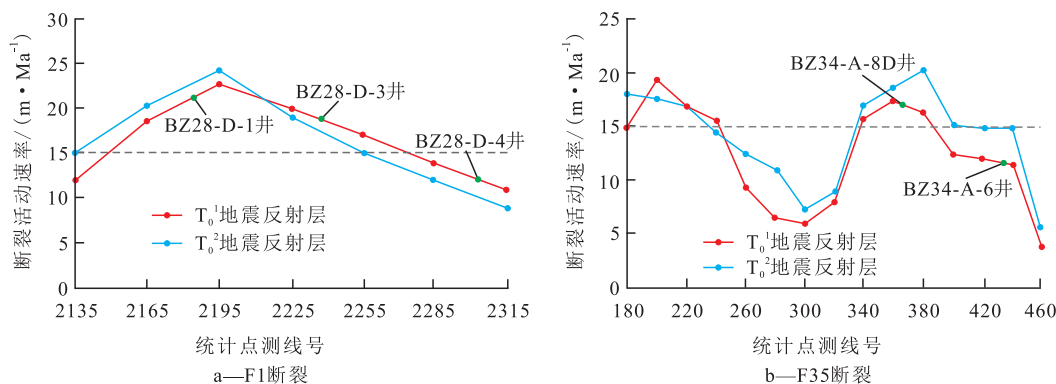


图3 黄河口凹陷中央构造脊F1和F35断裂在 T_0 和 T_0^1 地震反射层的断裂活动速率统计结果

Fig.3 Statistical results of fault activity rate of F1 and F35 based on T_0 and T_0^1 seismic reflection layer in the central structural ridge in Huanghekou sag

BZ34-A-8D井发育的油层厚度为20.9 m,也明显大于在断裂活动速率较小处钻探的BZ34-A-6井(油层厚度为10.0 m)。

2.2 盖层断接厚度影响油气的富集层位

盖层在油气的运移路径上具有垂向阻烃的重要作用,但是当盖层发育断裂时,断裂的构造演化活动会对盖层的垂向阻烃能力造成一定的影响,甚至使盖层的垂向阻烃能力完全失效^[19]。因此,引入盖层断接厚度来表征断裂对盖层垂向阻烃能力的破坏作用,盖层断接厚度即为盖层在某处的厚度与该处发育断裂的断距之差^[20],其表达式为

$$h_2 = h - h_1 \quad (2)$$

黄河口凹陷中央构造脊东二段下亚段广泛发育1套厚度约为200 m的湖相泥岩盖层^[21-22],对研究区各探井钻遇的盖层断接厚度进行统计,发现盖层断接厚度与油气的富集层位具有较好的对应关系。其中,北部带及南部带的泥岩盖层断接厚度一般为100~140 m,而中部带的盖层断接厚度普遍小于80 m。盖层断接厚度越大,油气穿过盖层运移至浅层富集的难度也越大;北部带及南部带泥岩盖层断接厚度较大,油气难以穿过盖层运移至浅层,大多富集于东二段下亚段泥岩盖层以下,BZ34-G-1井是南部带极少数盖层断接厚度较小(60.7 m)的探井,在浅层获得了良好的油气发现;而中部带盖层断接厚度较小,油气多运移至浅层富集成藏,BZ28-C-1井是中部带唯一的盖层断接厚度大于80 m的探井,该井在浅层却没有钻遇油气显示。

2.3 断裂分形分维值调节浅层油气的运聚效率

断裂分形分维值是定量表征断裂对油气运聚能力的一项参数,近年来在石油地质领域有着广泛的应用^[23-26]。断裂分形分维值反映出断裂系统的发育程度及复杂性,是表征断裂系统构造特征的一个定量指标,通常作为某一地区断裂体系的评价指标。研究表明,断裂密度越大、规模越大、组合样式越复杂,断裂分形分维值越高,断裂系统对油气的运聚能力也越强。

采用应用较为广泛的数盒子法计算得到的断裂分形分维值称为容量维,又称盒数维。其实际是一种Hausdorff维数,以覆盖为基础,取不同边长的正方形网格构成二维正交网络覆盖研究区,通过不断改变正方形网格边长,分别统计出延伸距离大于或等于正方形网格边长的断裂穿过的正方形网格数。正方形网格数与正方形网格边长为幂定律关系,其表达式为

$$N(r) = Cr^D \quad (3)$$

在实际计算过程中,对式(3)取对数得

$$\ln[N(r)] = -D \ln r + A \quad (4)$$

在双对数坐标中,正方形网格数与正方形网格边长的关系曲线为1条直线, D 即为该直线的斜率。

不同地震反射层的断裂分形分维值表征不同地质时期断裂体系整体的空间分布复杂程度及油气运聚能力。将黄河口凹陷中央构造脊3个区带划分为5个统计区,通过数盒子法对各统计区不同地震反射层进行断裂分形分维值统计。结果(表1)表明,中部带各统计区不同地震反射层的断裂分形分维值及平均值均高于北部带和南部带,尤其是表征主油气成藏期断裂体系对油气运聚能力的 T_0^1 地震反射层的平均断裂分形分维值超过1.32,远高于中部带(1.205)及南部带(1.209)。在中部带的3个统计区中,油气相对更富集的3号统计区的 T_0^1 和 T_0 地震反射层的断裂分形分维值也均为高值(大于1.42)。

表1 黄河口凹陷中央构造脊各区带不同地震反射层断裂分形分维值统计

Table 1 Values of fault fractal dimensions on different seismic reflection layers of objective area in the central structural ridge in Huanghekou sag

区带	断裂分形分维值			
	T_0^1 地震反射层	T_0 地震反射层	T_1 地震反射层	T_2 地震反射层
北部带	1.205	1.177	1.163	
中部带1号统计区	1.311	1.260	1.219	1.174
中部带2号统计区	1.320	1.295	1.255	1.213
中部带3号统计区	1.473	1.422	1.292	1.183
南部带	1.209	1.167	1.137	1.180

3 断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法

3.1 评价方法的建立

综合分析断裂对油气成藏控制作用的研究成果,认为黄河口凹陷中央构造脊断裂活动性对油气成藏的控制作用主要表现为:活动速率是关键,断盖接触控层位,分形分维定区域。基于该认识,根据浅层油气富集程度,将研究区已完钻的具有构造背景的46口探井分为北部带探井、中部带高丰度探井、中部带低丰度探井和南部带探井4种类型,其中北部带探井在浅层的油气丰度最低,基本未钻遇油气成藏,可归为低效探井;南部带探井和中部带低丰度探井在浅层有一定油气显示和油气成藏,可归为中-低效探井;中部带高丰度探井在浅层油气成藏最好,油气丰度最高,可归为高效探井。

为评价断裂的控藏作用,对研究区46口探井的油气成藏期油源断裂活动速率、盖层断接厚度及断裂分形分维值分别进行归一化处理。将这3个参数的统计数据分别除以该参数最大值,其中油气成藏期油源断裂活动速率的最大值为25 m/Ma,盖层断接厚度的最大值为180 m,断裂分形分维值的最大值为1.50,进而将得到的各参数归一化数据进行三角图投影。结果(图4)表明,依据不同的油气丰度,已钻探井具有良好的分带性,可以划分为浅层油气富集区、浅层油气成藏风险区和浅层油气成藏高风险区。其中,高效探井主要集中分布于三角图中间偏右上角区域,为浅层油气富集区;中一低效探井主要集中分布于三角图的中间区域,为浅层油气成藏风险区;而低效探井主要集中分布于三角图的边缘区域,为浅层油气成藏高风险区。基于三角图投影结果,分别确定浅层油气富集区、浅层油气成藏风险区和浅层油气成藏高风险区的油气成藏期油源断裂活动速率、盖层断接厚度及断裂分形分维值的最低门限值,并换算为实际数据,并参照已钻井在浅层的油气富集程度,对这3个参数进行综合对比,建立研究区浅层油气成藏的断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法。

运用断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方

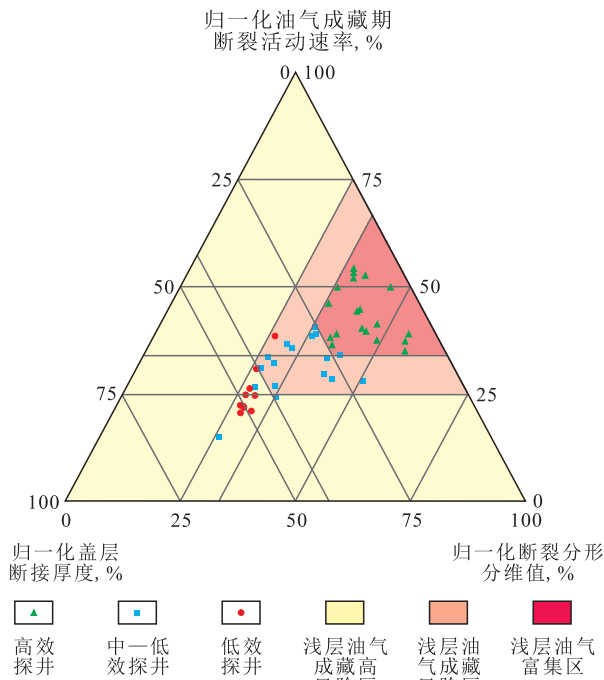


图4 黄河口凹陷中央构造脊断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价三角图

Fig.4 Triangular chart about the quantitative evaluation result of fault-control hydrocarbon accumulation based on 3 factors of fault activity rate, faulted caprock thickness and fault fractal dimensions in the central structural ridge in Huanghekou sag

法分析研究区浅层油气成藏过程中的断裂控藏作用,认为当油气成藏期油源断裂活动速率大于15 m/Ma,盖层断接厚度小于60 m,断裂分形分维值大于1.30时,油气在浅层富集成藏的可能性较大,在三角图中对应于浅层油气富集区;当油气成藏期断裂活动速率为10~15 m/Ma,盖层断接厚度为60~120 m,断裂分形分维值为1.25~1.30时,油气可能在浅层聚集成藏,但多为中等丰度,在三角图中对应于浅层油气成藏风险区;当油气成藏期断裂活动速率小于10 m/Ma,盖层断接厚度大于120 m,断裂分形分维值小于1.25时,油气难以在浅层聚集成藏,在三角图中对应于浅层油气成藏高风险区。

3.2 评价方法的应用

应用断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法对与黄河口凹陷中央构造脊相邻的渤中29构造区进行断裂控藏作用定量评价。渤中29构造区浅层发育13个较大型圈闭,其中渤中29-A构造1号圈闭已经钻探,在浅层钻探效果较为理想。统计13个圈闭的油气成藏期断裂活动速率、盖层断接厚度及断裂分形分维值,并进行归一化处理及三角图投影。结果(表2)表明,渤中29-A构造1号圈闭的三角图投影结果与实际勘探效果较为吻合,各参数数据点均位于油气富集区;其他12个未钻探圈闭的三角图投影结果具有差异,其中渤中29-B构造的3个圈闭,渤中29-C构造的2,3号圈闭以及渤中29-A

表2 渤中29构造区圈闭断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价统计结果

Table2 Statistical results about the quantitative evaluation of fault-control hydrocarbon accumulation based on 3 factors of fault activity rate, faulted caprock thickness and fault fractal dimensions in the traps of the Bozhong29 area

构造区块	圈闭编号	归一化油气成藏期断裂活动速率, %	归一化盖层断接厚度, %	归一化断裂分形分维值, %
渤中29-A	1	72	32	95
	2	79	28	93
	3	83	35	93
	4	69	38	93
	5	62	48	89
渤中29-B	1	68	43	85
	2	75	50	82
	3	72	41	82
渤中29-C	1	82	35	88
	2	62	48	88
	3	58	50	88
渤中29-D	7	70	33	88
	1	76	34	85

构造5号圈闭各参数数据点均位于浅层油气成藏风险区;而渤中29-A构造2,3,4号圈闭,渤中29-D构造1号圈闭及渤中29-C构造1和7号圈闭的断裂控藏作用评价结果较为理想,浅层油气富集成藏的可能性较大,可作为下步油气勘探的优选目标。此外,2015年12月,在渤中29-A构造2号圈闭钻探BZ29-A-3井,钻遇油层总厚度超过40 m,也表明断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法具有一定的有效性。

4 结论

油气成藏期油源断裂活动速率、盖层断接厚度以及断裂分形分维值对黄河口凹陷中央构造脊的油气差异成藏具有控制作用。其中,油气成藏期油源断裂活动速率决定油气的垂向输导能力、盖层断接厚度影响油气的富集层位、断裂分形分维值调节浅层油气的运聚效率。通过对黄河口凹陷中央构造脊断裂控藏因素的定量分析,建立断裂控藏“速-盖-维”三因素定量评价方法。应用该方法对研究区断裂控藏作用进行评价,认为当油气成藏期油源断裂活动速率大于15 m/Ma,盖层断接厚度小于60 m,断裂分形分维值大于1.30时,油气在浅层富集成藏的可能性较大;当油气成藏期断裂活动速率为10~15 m/Ma,盖层断接厚度为60~120 m,断裂分形分维值为1.25~1.30时,油气在浅层成藏多为中等丰度;当油气成藏期断裂活动速率小于10 m/Ma,盖层断接厚度大于120 m,断裂分形分维值小于1.25时,油气难以在浅层聚集成藏。应用建立的定量评价方法对与黄河口凹陷中央构造脊相邻的渤中29构造区进行断裂控藏作用评价,优选出6个钻探风险较小的圈闭作为下步浅层油气勘探目标,且近期勘探成果也证明该评价方法有一定的有效性。

符号解释:

V_f —— 断裂活动速率, m/Ma; ΔH —— 一定地质时期内断裂下降盘与上升盘地层厚度差, m; T —— 沉积时间, Ma; H_d —— 断裂下降盘地层厚度, m; H_u —— 断裂上升盘地层厚度, m; h_2 —— 盖层断接厚度, m; h —— 盖层厚度, m; h_1 —— 盖层发育断裂的断距, m; r —— 正方形网格边长; $N(r)$ —— 正方形网格数; C —— 相关系数, 若为常数, 则研究对象为分形; D —— 分形分维值; A —— 常数。

参考文献:

[1] 信延芳, 郭兴伟, 温珍河, 等. 渤海新生代盆地浅部构造迁移特

征及其深部动力学机制探讨[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1 535-1 543.

Xin Yanfang, Guo Xingwei, Wen Zhenhe, et al. Cenozoic shallow tectonic migration and the deep dynamic mechanism in the Bohai Sea[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1 535-1 543.

[2] 高祥林. 渤海中部郟庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. 地质科学, 2006, 41(2): 355-364.

Gao Xianglin. Recent activities of the Tan-Lu fault zone in the central Bohai Sea and newly generated faults during Neogene in Bohai[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(2): 355-364.

[3] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 845-851.

Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851.

[4] 姜治群, 吴智平, 李伟, 等. 断裂对黄河口凹陷新近系油气分布的控制作用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 50-54.

Jiang Zhiquan, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Effect of faults on Neogene hydrocarbon distribution in the Yellow River Estuary depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6): 50-54.

[5] 涂丹凤, 牛成民, 钱赓, 等. 利用地层压力系数分析黄河口凹陷中央隆起带新近系油气输导体系[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 23-29.

Tu Danfeng, Niu Chengmin, Qian Geng, et al. Using formation pressure coefficient to study hydrocarbon carrier system in the central uplift belt of Huanghekou sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 23-29.

[6] 于海波, 牛成民, 彭文绪, 等. 黄河口凹陷新近系断裂-砂体控藏分析——以垦利3-2构造为例[J]. 中国海上油气, 2010, 22(3): 149-154.

Yu Haibo, Niu Chengmin, Peng Wenxu, et al. An analysis of Neogene fault-sandbody control over hydrocarbon accumulations in Yellow River Mouth depression: a case of the structure Kenli3-2[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(3): 149-154.

[7] 蒋有录, 刘培, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 525-533.

Jiang Youlu, Liu Pei, Song Guoqi, et al. Late Cenozoic faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 525-533.

[8] 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 307-313.

Sun Hefeng, Zhou Xinhui, Peng Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou Sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 307-313.

[9] 王超. 不同时期形成断裂特征及其控藏作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(4): 28-32.

Wang Chao. Fault characteristics formed in different periods and their reservoir-controlling actions[J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2015, 34(4): 28-32.

- [10] 王玉秀,官大勇,张宏国,等. 郯庐走滑断裂带消递端断裂特征与油气成藏[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 56-58.
Wang Yuxiu, Guan Dayong, Zhang Hongguo, et al. Fracturing features and oil/gas reservoir forming at the pinchout end of Tanlu Strike-slip Faulting Belt[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 56-58.
- [11] 李新琦,李慧勇,于海波,等. 张家口—蓬莱断裂带渤海段断裂特征及其与油气差异成藏关系[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 16-22, 49.
Li Xinqi, Li Huiyong, Yu Haibo, et al. Fault characteristics and its relationship with differential hydrocarbon accumulation of Zhangjiakou-Penglai Fault in Bohai region[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5): 16-22, 49.
- [12] 刘哲,付广,吕延防,等. 南堡凹陷断裂对油气成藏控制作用的定量评价[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 27-34.
Liu Zhe, Fu Guang, Lü Yanfang, et al. Quantitative evaluation for control of faults on hydrocarbon accumulation in Nanpu sag[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(1): 27-34.
- [13] 魏刚,王应斌,邓津辉,等. 渤中34北区浅层油气成藏特征和主控因素分析[J]. 中国海上油气, 2005, 17(6): 372-375.
Wei Gang, Wang Yingbin, Deng Jinhui, et al. Sallow hydrocarbon accumulation characteristics and controlling factors in the northern BZ34 block[J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(6): 372-375.
- [14] 韦阿娟. 郯庐断裂增压带超压特征、成因及其定量评价——以渤海海域辽东湾锦州27段为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 47-52.
Wei Ajuan. Characteristics, origin and quantitative evaluation of overpressure in strike-slip and compression-shear booster zone of Tan-Lu Fault: A case study in JZ27 section of Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 47-52.
- [15] 柳永军,朱文森,杜晓峰,等. 渤海海域辽中凹陷走滑断裂分段性及其对油气成藏的影响[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(7): 6-10.
Liu Yongjun, Zhu Wensen, Du Xiaofeng, et al. Strike-slip fault subsections and its influence on hydrocarbon accumulation in Liaozhong Depression of Bohai Sea Area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 6-10.
- [16] 章惠,孙思敏,季汉成,等. 南堡凹陷边界断层分段特征及其对沉积体系的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 20-25.
Zhang Hui, Sun Simin, Ji Hancheng, et al. Segmentation characteristic of boundary fault in Nanpu sag and its control on sedimentary system[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 20-25.
- [17] 孙同文,吕延防,刘哲,等. 断裂控藏作用定量评价及有利区预测——以辽河坳陷齐家-鸳鸯沟地区古近系沙河街组三段上亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 790-796.
Sun Tongwen, Lü Yanfan, Liu Zhe, et al. Quantitative evaluation of control of faults on hydrocarbon accumulation and play fairway prediction: a case from Es³⁽¹⁾ in Qijia-Yuanyangou area, the Liaohhe Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 790-796.
- [18] 周心怀,牛成民,滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 469-475.
Zhou Xinhuai, Niu Chengming, Teng Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 469-475.
- [19] 张一平. 断-盖空间配置类型及其对油气成藏的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(1): 25-31.
Zhang Yiping. Spatial match types between the fault and caprock and their controls on the hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1): 25-31.
- [20] 吕延防,万军,沙子萱,等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162-174.
Lü Yanfang, Wan Jun, Sha Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 162-174.
- [21] 傅强,付晓伟,夏庆龙,等. 黄河口凹陷古近系东营组沉积层序格架与油气聚集[J]. 中国海上油气, 2010, 22(5): 290-295.
Fu Qiang, Fu Xiaowei, Xia Qinglong, et al. Sedimentary sequence framework and hydrocarbon accumulation in Paleogene Dongying Formation, Huanghekou sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(5): 290-295.
- [22] 庄新兵,邹华耀,姜雪,等. 黄河口凹陷湖相烃源岩发育机制[J]. 科技导报, 2010, 28(22): 48-54.
Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Jiang Xue, et al. Development mechanism of lacustrine source rocks in Yellow River[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(22): 48-54.
- [23] 何书,杨桥,王家鼎. 黄骅坳陷中区断裂系统分形研究[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 455-461.
He Shu, Yang Qiao, Wang Jiading. Fractal analysis of fault system of central area in the Huanghua depression[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2008, 32(4): 455-461.
- [24] 江山,刘国勇,云露. 塔河油田奥陶系断裂分形特征及与油气运聚关系[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 736-741.
Jiang Shan, Liu Guoyong, Yun Lu. Fractal feature of fracture system in Tahe Oil Field and its relation to hydrocarbon migration and accumulation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 736-741.
- [25] 徐景祯,刘晓冬,陈章明,等. 断层体系的分形维数及其对深源气运移条件的指示作用[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 76-80.
Xu Jingzhen, Liu Xiaodong, Chen Zhangming, et al. Fractal dimensions of fault systems and their hints to migration conditions of gas from deep source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 76-80.
- [26] Sunmonu L A, Dimri V P. Fractal geometry of faults and seismicity of Koyna-Warna region West India using Landsat images[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(9): 1 393-1 405.