

渤海湾盆地渤中凹陷油藏断裂特征及对成藏的控制作用

王冠民¹,熊周海¹,张健²,郭永华³,林国松³,付尧¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;

2. 中国石油大庆油田采油八厂,黑龙江 大庆 163514; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300457]

摘要:渤中凹陷是环渤海湾盆地的沉积沉降中心,也是环渤海湾盆地重要的富油气凹陷之一。目前在凹陷周边所发现的油藏绝大部分是受断裂控制的构造或构造-岩性油气藏,这些断裂对油气藏的控制方式和影响程度,直接决定构造圈闭的评价结果和勘探部署方案。对渤中凹陷目前已发现的237个中浅层油气藏构造特征进行精细解剖,统计对比了断裂的级别、成因类型、断距、断层活动性、断层产状、组合样式、平面形态、遮挡类型、断层泥比率等指标与相应的油藏发育程度,发现在主断裂与次级断裂的合理配置的前提下,渤中凹陷中浅层有利于成藏的断裂特征为:走向NNE、近EW和NE,倾角 $66^{\circ} \sim 80^{\circ}$,断距20~150 m,断层活动速率在10~30 m/Ma,断层泥比率SGR大于0.3,断裂带泥质含量 R_m 大于0.35,组合样式为斜交式、雁列式、Y字形、似花状和阶梯状,并且断裂以反向遮挡为主。平面上在断裂相交处、凸形增压段更有利于油气聚集成藏。本质上说,断层封闭性是控制构造圈闭成藏的关键,断裂活动速率、规模和断裂类型是影响封闭性的根源。

关键词:成藏;封闭性;控藏因素;断裂;渤中凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characterization of fault system and its control on reservoirs in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

Wang Guanmin¹, Xiong Zhouhai¹, Zhang Jian², Guo Yonghua³, Lin Guosong³, Fu Yao¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. The 8th Oil Plant, PetroChina Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163514, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300457, China]

Abstract: The Bozhong Sag is not only the depocenter of the Bohai Bay Basin, but also an important oil/gas-bearing sag in the Bohai Bay Basin. The reservoirs surrounding the Bozhong Sag are mostly fault-controlled structural or structural-lithological reservoirs. The patterns and degrees that these faults control on petroleum reservoirs directly determine the evaluation of structural traps and exploration strategy. By detailed structural characterization of 237 petroleum reservoirs with shallow to medium depth in the Bozhong Sag, this paper statistically analyzed multiple parameters, e. g., faulting classification, faulting mechanism, fault throw, faulting activity, fault strike/dip, combination styles, plain view geometry, screening types, SGR, etc. Our study suggested that, with proper assemblage of primary faults and minor faults, faulting characteristics contributing to petroleum accumulation includes: striking NNE or EW/NE, dip angle of $66^{\circ} - 80^{\circ}$, fault throw of 20 - 150 m, faulting rate of 10 - 30 m/Ma, $SGR > 0.3$, $R_m > 0.35$, multiple assemblage styles (e. g., oblique crossing, en echelon, Y-shape, semi-flower and stepwise faults) and antithetic screening. In plain view, it is more favorable for hydrocarbon accumulation in positions where faults are intersecting and convex section. In general, fault sealing property is the key factor controlling hydrocarbon accumulation in structural traps. The fault sealing property is determined by faulting rate, scale and fault types.

Key words: hydrocarbon accumulation, fault sealing property, controlling factor, fracture, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

渤中凹陷是环渤海湾盆地的沉积和沉降中心^[1-3],同时也是一个规模巨大的富油气凹陷^[4]。由

于新近系沉积巨厚,最大厚度超过4 000 m,这使得渤中凹陷的油气勘探开发主要局限于周边的石臼坨凸

收稿日期:2015-10-22;修订日期:2016-12-20。

第一作者简介:王冠民(1969—),男,博士、教授,沉积学及石油地质学。E-mail: wangguanmin@upc.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05023-001-004-002;2011ZX05023-001-013)。

起、沙垒田凸起、渤南低凸起等构造带的中浅层,盆地的整体勘探程度还很低。

在目前已发现的中浅层油气藏中,除极少数岩性油气藏和潜山油气藏以外,几乎都受断裂的控制。由于渤中凹陷构造活动强、时间长,断裂的类型、形态、级别、应力状态等在不同区块的差别较大,导致断裂对油气成藏的控制作用亦存在很大的差异性。

本文在渤中凹陷大量三维地震解释基础上,解剖了237个中浅层油气藏,分析断裂特征与油气藏之间的配置关系,统计断裂的各种参数对油气成藏的控制,明确有利断块圈闭成藏的控制因素,并建立渤中凹陷的断裂控藏模式,可为今后渤中凹陷断块圈闭的评价和勘探部署提供依据。

1 断裂体系特征

渤中凹陷受郑庐断裂带和先存断裂的影响,断裂平面分布广泛,走向以NE、NEE、近EW和NW向为主,尤其在凸起周边分布密集,凹陷中央断裂欠发育,呈零星分布(图1)。

1.1 断裂级别划分

断裂因级别不同,其规模不一,作用各异^[5-6]。综合考虑断裂的规模、对沉积和成藏的控制作用等因素,可把渤中凹陷的断裂分为一级、二级和三级(图1)。

一级断裂的发育始于中生代末期,止于第四纪,形成各凸起的边界大断裂。其规模大、延伸远、连续性强,但数量少,往往单独存在,呈近EW和NEE向展布,控制着凹陷的形成和充填演化,并沟通深层的烃源岩与浅部储层,为油气的有利输导通道(图1,图2)。二级断裂始于古近纪初期,止于新近纪或第四纪,其规模仅次于一级断裂,数量也少,分布在凸起附近,走向以EW、NNE和NEE向为主,一定程度上控制了洼陷的形成和发育,并沟通深部油源,亦是油气垂向运移的有利通道(图1,图2)。三级断裂主要发育在新近系中,多为新构造运动所成。其规模小、数量多,多集中在一起形成断裂带或各种断裂组合,全区广泛分布,走向多为EW、NNE、NEE及NNW向,可发育各种断块圈闭,并储集油气(图1,图2)。

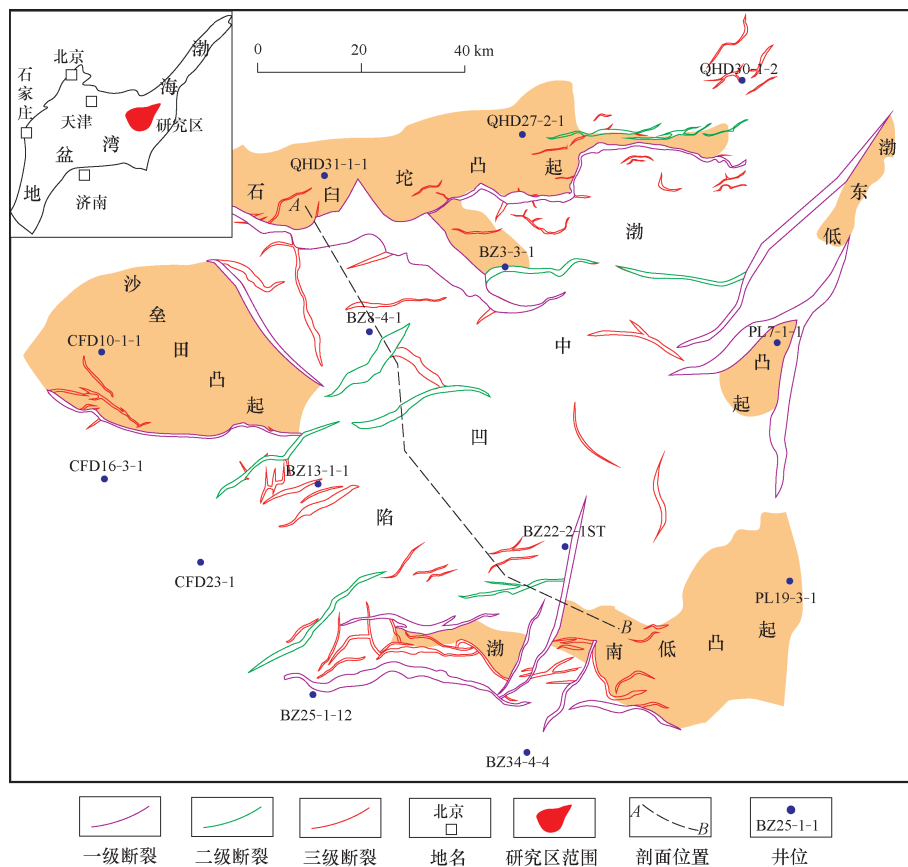


图1 渤中凹陷基底不同级别断裂平面分布

Fig. 1 Map showing distribution of basement faults of various classes in the Bozhong Sag

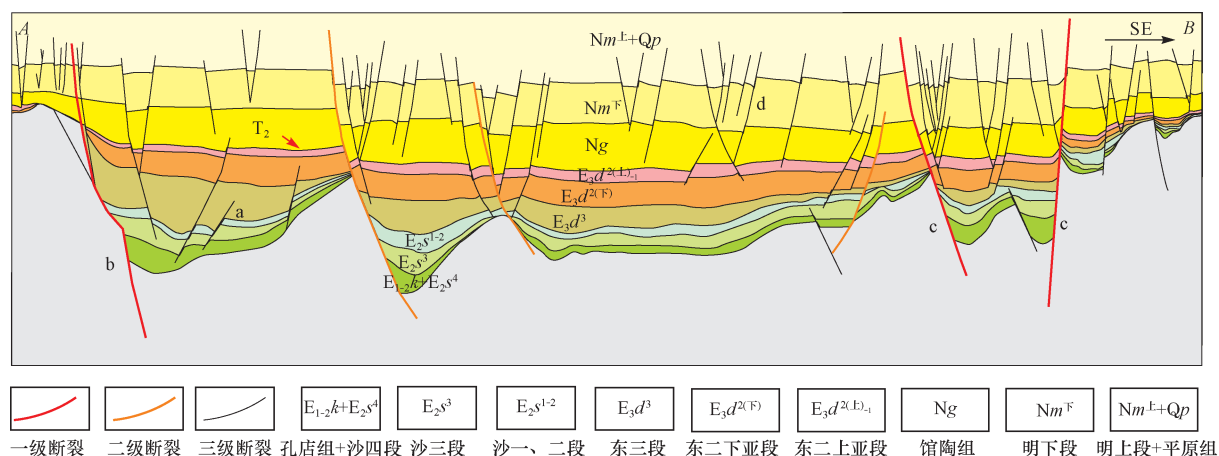


图2 渤中凹陷、断裂级别划分与成因类型(剖面位置见图1)

Fig. 2 Scale classification and genetic types of fault systems in the Bozhong Sag (see Fig. 1 for the profile location)

a. 消亡型断裂; b. 继承型断裂; c. 继承-改造型断裂; d. 新生型断裂

1.2 断裂发育期次

渤中凹陷古近纪受南北向拉张,表现出明显的伸展作用;新近纪受太平洋板块俯冲作用,导致郯庐断裂带右行,并对渤中凹陷产生影响,使得大型断裂具有一定的剪切性质^[7-9]。渤中凹陷古近纪和新近纪受力性质不同,导致相应地层中的断裂特征差别较大,垂向上可分为两套断裂系统。

这两套断裂系统包括早期断裂系统和晚期断裂系统,二者以 T_2 为界,如图2所示。两套断裂系统中的断裂规模、数量、力学性质等方面都具有较大差别。早期断裂系统主要发育在古近系中,由伸展作用形成,包括长期发育的一级、二级主断裂和少量三级断裂,其中三级断裂规模小,数量少,垂向延伸较短;晚期断裂系统主要发育于新近系中,形成于拉张应力和剪切应力的共同作用下,主要由晚期发育的三级断裂和长期发育的一二级主断裂组成,常见有走滑伸展断层、伸展走滑断层和走滑断层等,部分三级断裂可由主断裂在新近系中派生。晚期断裂一般规模小,数量多,常聚集在一起形成断裂带或各种断裂组合,距主断裂越近,断裂密度越大。

1.3 断裂成因类型

渤中凹陷的断裂按照力学性质和发育的时间,又可分为消亡型、继承型、继承-改造型和新生型断裂^[10](图2)。消亡型断裂是指发育于古近纪,而在新近纪消失的断裂,其发育时间短,规模小,数量少,多为三级断裂(图2a)。继承型断裂是指在古近纪和新近纪持续受伸展作用所形成的正断层,其规模大,延伸远,往往为一级或二级断裂(图2b),主要分布在渤南低凸起周围及石臼坨凸起东南部位,分布范围较为局

限。继承-改造型断裂是指在古近纪受伸展作用,而在新近纪受剪切作用发育形成的断裂,亦为一级断裂或二级断裂(图2c),其分布范围较广。新生型断裂指新近纪发育的断裂,均为三级或更高级的断裂,其规模小,数量多,全区广泛分布,受郯庐断裂右旋剪切作用影响,具有一定的走滑性质(图2d)。沟通古近系油源的一、二级断裂长期活动,是环渤中凹陷区中浅层油气成藏的关键^[11]。

1.4 断裂组合样式

断裂组合样式包括平面和剖面两个方向。平面组合样式在渤中凹陷有平行式、斜交式、帚状、雁列式、网格状、走滑双重构造等平面组合样式(图1)。其中网格状断裂主要由走向分别为近EW方向和SN方向近于垂直的两组断裂相交组成,且两组断裂多呈拉张性质,主要分布在渤南低凸起附近的古近系(图1)。走滑双重构造由一组同向叠瓦状排列的次级走滑断裂和两侧围限的主走滑断层形成,在剖面上呈现花状构造,主要分布于渤南低凸起的中东部地区(图1)。

断裂的剖面组合样式繁多,以地堑、地垒、阶梯状、Y字形、花状构造和似花状构造等组合样式较为常见(图2)。其中,Y字形组合由一条主干断裂和多条倾向相反的次级断裂组合而成,次级断裂多为新生型的三级断裂。花状构造大多分布在渤南低凸起东部和渤东低凸起区,主要受郯庐断裂东支走滑作用的影响。似花状构造是在剪切作用和拉张作用共同影响下形成,主要分布于石臼坨和沙垒田凸起地区。此外,渤中凹陷早期断裂系统多以单条或组合成阶梯状、垒堑式等样式存在,晚期的往往形成多级Y字形,花状,似花状等组合样式(图2)。

2 断裂规模对成藏作用的控制

2.1 断裂级别与油气成藏

级别大的断裂,尤其是一级和二级主干断裂,垂向断距大,活动强烈,断层封闭性弱,往往不利于油气成藏;反之,很小级别的断裂,活动性弱,不利于油气输导,成藏作用亦差。只有断裂级别适中,如三级断裂,既有利于油气输导运移,又有利于油气聚集成藏。通过对渤中凹陷237个已发现油气藏的断裂体系进行研究分析,发现三级断裂控制的油藏最多,超过了50%(图3a),一级和二级断裂控制的油藏较少。规模上,利于油气成藏的一级或二级断裂平面延伸长度多集中在6~20 km(图3c),三级断裂多集中在3~8 km(图3d)。

2.2 断距与油气成藏

渤中凹陷有利于油气成藏的断裂断距多分布在20~150 m,占总数的62%(图3b)。断距相对较小时,断层封闭性好,利于成藏;反之,断裂的断距越大,活动性增强,产生的诱导裂缝可能增多,断裂易呈开启状态,降低封闭能力,对油气更多地起输导作用,不利于油气聚集成藏。

2.3 断层活动性与油气成藏

渤中凹陷及其周边凹陷的沙街组 and 东营组主力烃源岩,到新近纪以来才进入大规模生排烃期^[12-15],

故只有新近纪以来的断裂活动对中浅层油气成藏才有实际意义^[16]。通过对研究区明化镇组上段和第四系断层的活动速率统计,并结合已发现的油气藏进行综合分析(图4),结果表明,在断层活动速率中等(10~30 m/Ma)或弱(<10 m/Ma)时,断裂封闭能力强,不易破坏先成的油气藏,对油气聚集保存较为有利;但当断裂活动强烈(>30 m/Ma)时,断裂呈开启状态,产生的诱导裂缝多,断裂封闭性差,常对油气主要起输导和破坏作用,不利于油气聚集成藏。

3 断裂要素及形态对成藏作用的控制

不同形态的断裂,断面受力性质和程度会有差异,可进一步导致封闭性不同,使成藏作用也存在很大的差异。

3.1 断裂走向、倾向与油气成藏

通过对控藏断裂的走向、倾向进行统计分析,发现断裂走向以NEE向为主的油气藏占总数的39%,其次为NE向和EW向,三者共占78%;倾向以N,S,NW和SE向为主,占总数的86%。研究区受NE向郯庐断裂带走滑作用的影响,主断裂大多为NE和近EW向,对油气起输导作用;与其伴生的次级断裂多为NEE向,可发育构造圈闭,对输导的油气起再次分配和聚集成藏的作用。故渤中凹陷与油气藏相关的断裂走向以NE、近EW和NEE向为主,而SW走向的断层则处于应力挤压状态,对油气的运移和成藏不利。

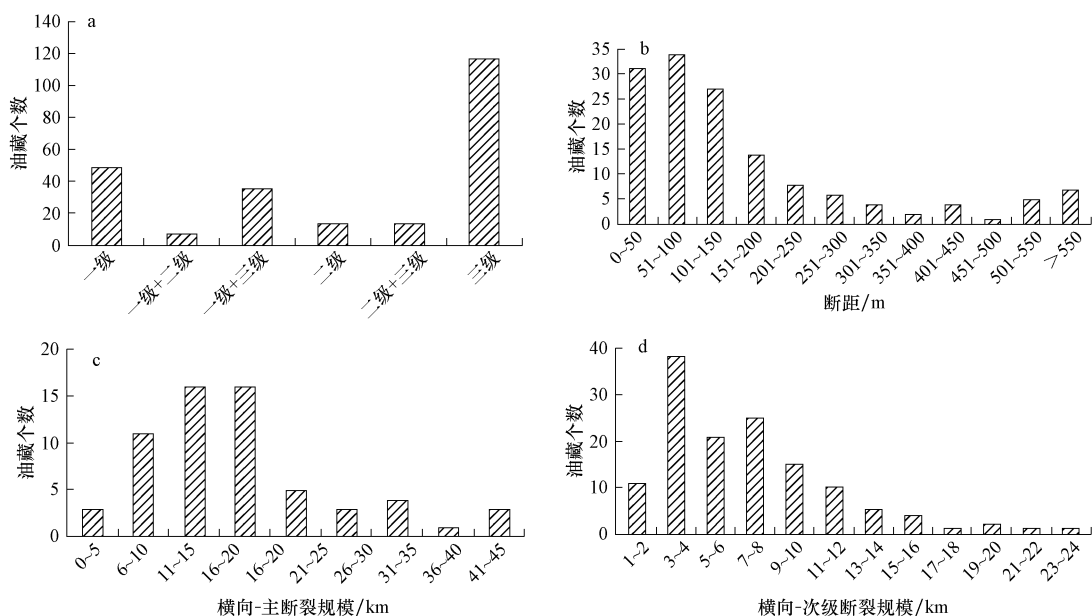


图3 渤中凹陷断裂级别(a)、断距(b)及规模(c,d)与所对应的油气藏数量

Fig. 3 Number of petroleum reservoirs responding to fault class (a), fault throw (b) and scale (c, d) in the Bozhong Sag

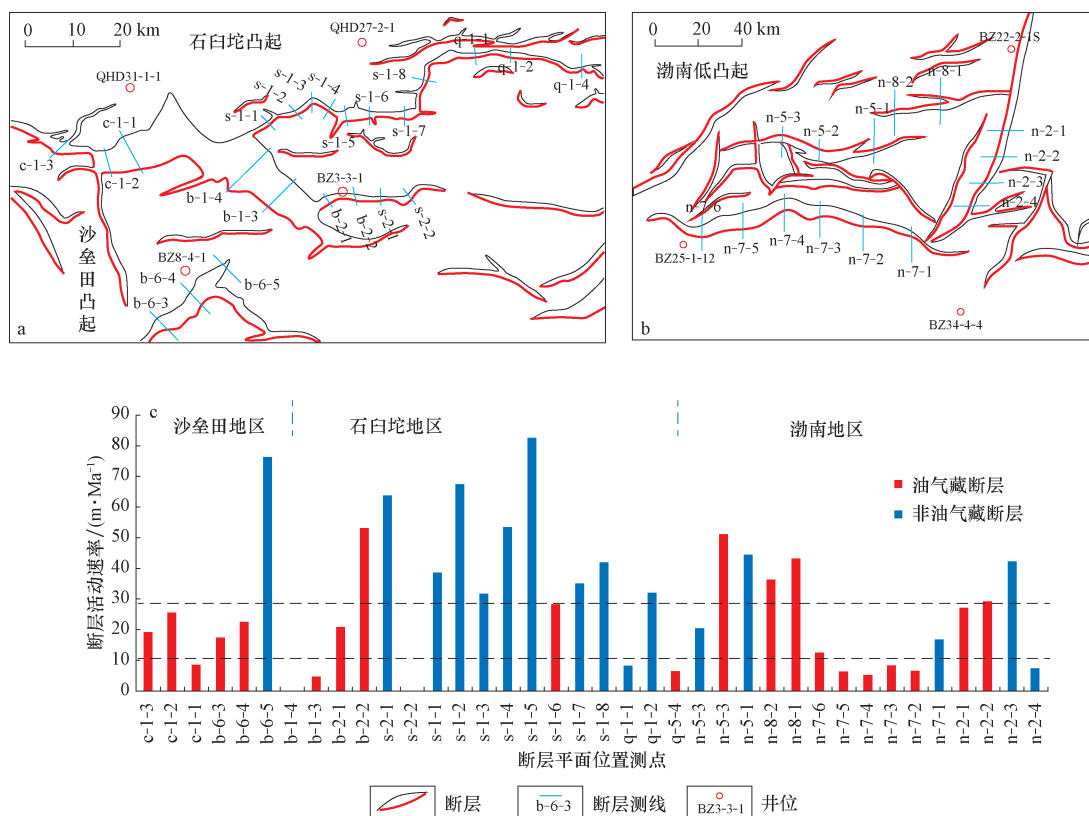


图4 渤中凹陷断层活动速率与油藏之间的对应关系

Fig. 4 Relationship between faulting rate and petroleum reservoirs in the Bozhong Sag.

a. 石臼坨、沙垒田凸起断层测线位置; b. 渤南低凸起断层测线位置; c. 不同地区断层活动速率柱状图(红色为油气藏断层, 蓝色为非油气藏断层)

3.2 断裂倾角与油气成藏

研究区与油藏相关的断裂, 倾角主要集中在 $66^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (图 5a), 与其有关的油藏占总数 74%。在渤中凹陷, 倾角较小的断裂不甚发育, 形成的油藏数量也不多; 倾角较大的断裂, 断面陡倾, 缺乏上覆地层的重力分压, 断裂长期呈开启状态, 断裂封闭性较差^[17-18], 成藏条件也不利。倾角处在 $66^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的断裂数目多, 形成的构造圈闭也多, 且上覆地层的重力分压促使断裂封闭性增强, 遮挡条件好, 利于油气聚集保存。

3.3 断裂上、下盘与油气成藏

通过对研究区与断裂上下盘相关性较为明显的 183 个油气藏进行统计, 结果表明, 上升盘和下降盘油气藏发育数量相当, 分别为 87 和 96 个。但若从断裂级别的角度分析, 两者存在较大差异。

在与一、二级断裂有关的 78 个油气藏中, 下降盘发育油气藏的有 58 个, 占 74%。这是由于一、二级断裂下降盘地层发育齐全, 层位多, 并且一、二级断裂多为同沉积断裂, 易形成滚动背斜圈闭, 而上升盘多为主动盘, 诱导裂缝带发育^[19-21], 利于油气输导运移, 进一

步促使油气在下降盘的圈闭中聚集成藏。而与三级断裂有关的 105 个油气藏中, 上升盘发育的油气藏有 67 个, 占 64%, 这是由于研究区的三级断裂多为正断层, 反向遮挡封闭性好, 受上覆地层压力(重力分量)大, 封闭能力更强, 更有利于油气的聚集保存。

3.4 断裂遮挡类型与油气成藏

通过对研究区与断裂遮挡类型相关的油气藏数据点进行统计表明, 渤中凹陷以断裂反向遮挡成藏为主。一级和二级断裂中, 断裂反向遮挡成藏占 77%; 在三级断裂中, 断裂反向遮挡成藏占 74% (图 5b)。渤中凹陷在走滑拉张作用下, 以正断层发育为主, 正断层的下盘为被动盘, 基本不活动, 诱导裂缝不发育, 在断层活动期油气容易注入, 断层活动间歇期则易形成侧向封堵; 上盘在拉张断落过程中, 往往形成逆牵引构造, 孔隙性较差, 油气相对较难注入和成藏。

3.5 断裂组合样式与油气成藏

渤中凹陷的断裂平面组合样式多样, 其中斜交式和雁列式最利于油气聚集成藏(图 5c), 占油藏总数的 77%。剖面组合样式中 Y 字形、多级 Y、似花状和阶梯

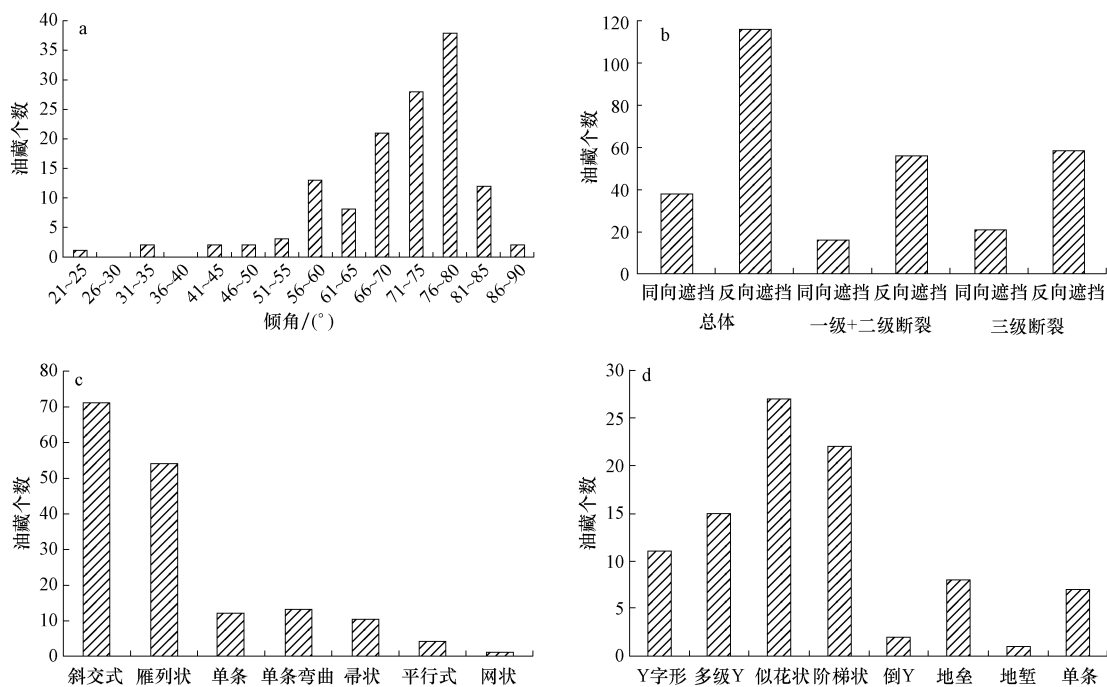


图5 渤中凹陷断层倾角(a)、遮挡类型(b)、平面组合样式(c)和剖面组合样式(d)与所对应油藏数量柱状图

Fig. 5 Histograms of petroleum reservoirs related to fault dip(a), cover types(b), plain view combination(c) and section view combination(d) in the Bozhong Sag

状等易于成藏,占81%(图5d)。平面斜交式多与剖面Y字形对应,雁列式多与阶梯状和似花状对应,这些组合既有继承型或继承-改造型主断裂沟通油源,垂向输导油气,又有新生型次级断裂再分配油气,并形成构造圈闭,二者耦合,促进油气聚集成藏,典型者如渤中28-2南油田^[22]。

3.6 断裂平面形态与油气成藏

有研究认为断裂平面交叉点是油气垂向运移的优势通道^[15],易于成藏。通过对浅层与断裂平面形态明显相关的107个油气藏的统计表明,由相交断裂构成的断块油气藏为44个,占41%;单条断裂构成的断鼻油气藏为63个,占59%。在单条断裂中,与单凸形相关的油气藏有6个,与单凹形相关的油气藏的有15个,与复杂弯曲形态相关的油气藏有42个。进一步对这3种形态进行细化分析表明,断裂凸出处最容易成藏,油藏数有37个,占总数的58.7%,断裂凹进处、平直处的油藏分别有14个和12个。这是由于凸出处位置圈闭与构造面匹配易成三面遮挡的断鼻状构造,圈闭有效性好;平直或者凹形断裂,与构造面组合形成有效断鼻圈闭的几率相对较低。

3.7 断层泥比率与油气成藏

断裂带泥质含量的多少也是评价构造圈闭有效性

的重要因素之一。本文采用断层泥比率(SGR)法和断裂带泥质含量(R_m)法^[23-25]表示断层封闭能力。

通过对渤中凹陷石臼坨凸起区和渤南低凸起区断块油藏的断层泥质含量进行分析,断层泥质参数 SGR 及 R_m 分布如图6所示,该图显示绝大多数油藏的 SGR 大于0.3, R_m 大于0.35。故可以认为,当 SGR 和 R_m 值大于该范围时,断层封闭性较好,可促使油气聚集成藏。渤南低凸起区的断层活动速率中等偏弱(图4c), SGR 和 R_m 很多比石臼坨凸起区的更大(图6),断层封闭性更好,更有利于油气成藏。

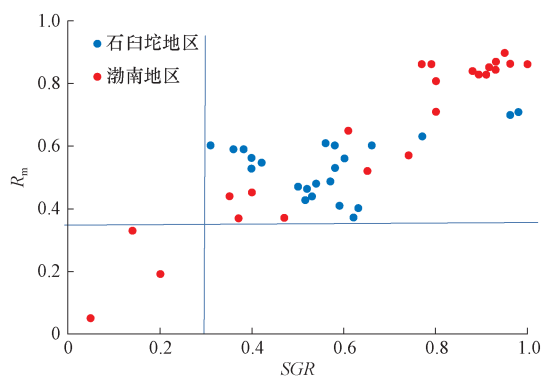


图6 渤中凹陷断块油藏的断层 SGR 及 R_m 参数分布

Fig. 6 Distribution of SGR and R_m for the faulting-related petroleum reservoirs in the Bozhong Sag.

4 断裂控藏关键因素及控藏模式

4.1 断裂控藏的关键因素

通过对渤中凹陷 237 个油气藏的成藏控制因素及有利条件所对应油藏的比例进行统计(表 1),结果表明,走向 NNE、近 EW 和 NE 向,倾角为 66°~80°,断距 0~150 m,断层活动速率在 10~30 m/Ma,SGR 大于 0.3、 R_m 大于 0.35,组合样式为斜交式、雁列式、Y 字形、似花状和阶梯状的断裂对油气成藏较为有利,并且断裂以反向遮挡成藏为主,断裂相交处,凸出处增压段更有利于油气聚集成藏。

4.2 渤中凹陷断裂控藏模式

根据渤中凹陷断裂对油气藏的控制作用统计(表 1),可建立渤中凹陷的断裂控藏模式(图 7)。渤中凹陷目前所发现的油气藏主要分布在盆地边缘的凸起带和陡坡带,油气主要通过断裂在浅层馆陶组及明化镇组下段大量富集。主断裂规模大,延伸远,切割深,沟通油源,为油气垂向运移的主要通道,控制了油气的垂向分布。新生型的次级断裂再次分配油气,不仅使得油气的分布范围在平面上扩大,而且形成构造圈闭,控制着浅层油气的平面分布。主断裂与次级断裂的合理配置,是油气能够在中浅层成藏的前提条件。

直接与一、二级主断裂有关的油气藏,断裂规模一

表 1 渤中凹陷油气成藏有利因素分析
Table 1 Favorable factors summary of oil and gas accumulation in the Bozhong Sag

成藏控制因素	层位	构造带类型	断裂级别	上升盘 & 下降盘		断裂横向规模	
				一、二级	三级	一、二级	三级
有利条件	Ng Nm ^下	凸起带 陡坡带	三级	下降盘	上升盘	6~20 km	3~8 km
所占百分比/%	50	71	58	74	64	69	63
成藏控制因素	走向	倾向	倾角	断层活动速率	断裂平面组合	断裂剖面组合	
有利条件	NNE,近 EW,NE	N,S,NW,SE	66°~80°	0~30 m/Ma	斜交式 雁裂式	Y 字形、多级 Y、似花状、阶梯状	
所占百分比/%	78	86	74	78	77	81	
成藏控制因素	断距	断裂类型	断层遮挡类型	平面形态	断层泥比率	圈闭类型	
有利条件	0~150 m	继承-改造型 新生型	反向遮挡	断裂相交处 断裂凹形处	SGR>0.3 R_m >0.35	断块 断鼻	
所占百分比/%	62	85	75	76	90	59	

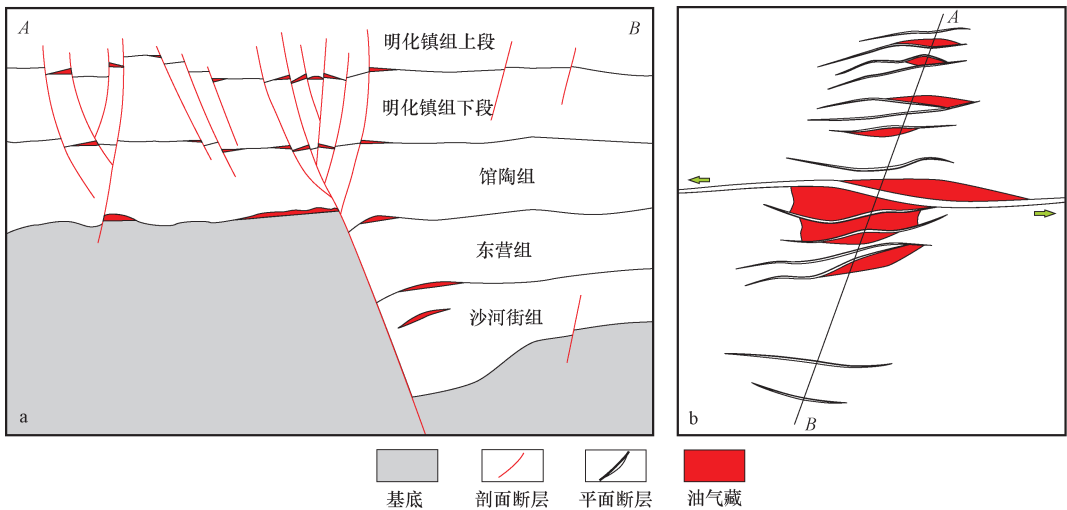


图 7 渤中凹陷断裂控藏模式
Fig. 7 Model that faults controlling oil reservoirs in the Bozhong Sag
a. 剖面;b. 平面

般不会太大,多属于继承改造型,走向多呈 NNE、NE、EW 向,有利于油气的垂向输导运移,在下降盘多发育滚动背斜。

对于次级断裂,所形成的圈闭有效性是控制油气成藏的关键因素,突出表现在断层封闭性上。本质上,断层的产状、规模、活动速率、断距、遮挡类型等,都不同程度地影响着断层的封闭性。次级断层多为受伸展作用或走滑拉伸作用形成的正断层,常表现出同向输导、反向遮挡的特征,故油气藏多集中在断裂上升盘。在剖面呈花状、似花状和 Y 字形的断裂中,油气藏多分布在浅部断裂反向遮挡处,花心处一般不成藏,除非两侧断裂都形成滚动背斜,构成断背斜圈闭。平面上,在断裂的相交处、凸出处,易形成断鼻构造,对成藏有利,其中单凸形断裂中部及弯曲断裂尾部凸出处尤为有利。若断裂具有走滑性质,则走滑增压段封闭性较好(图 7b),有利于油气聚集成藏。

5 结论

1) 渤中凹陷继承型和继承-改造型断裂多属于一、二级主断裂。在古近纪和新近纪都有活动,规模大、延伸远,沟通油源,以垂向输导油气为主,圈闭成藏为辅;新生型断裂多为晚期新近纪发育的三级断裂,其规模小但数量多,以发育构造圈闭为主。主断裂与新生型次级断裂的合理配置,为油气成藏提供良好的前提条件。

2) 目前渤中凹陷所发现的油气藏主要以断裂控制的构造油气藏为主。通过对断裂各因素与油气藏发育程度的分析,认为有利于成藏的断裂特征为:走向 NNE、近 EW 和 NE 向,倾角为 $66^{\circ} \sim 80^{\circ}$,断距 20 ~ 150 m,断层活动速率在 10 ~ 30 m/Ma, SGR 大于 0.3, R_m 大于 0.35,组合样式为斜交式、雁列式、Y 字形、似花状和阶梯状的断裂对油气成藏较为有利,并且断裂以反向遮挡成藏为主,断裂相交处、凸形增压段更有利于油气聚集成藏。

3) 本质上说,构造圈闭的断层封闭性仍然是渤中凹陷控制油气成藏的关键因素,断层的产状、规模、断裂类型、活动速率、断距、遮挡类型、断层泥比率等要素,都是断层封闭性的不同表现方面。其中,断裂活动速率、规模和断裂类型是影响封闭性的根源。

参 考 文 献

- [1] 任拥军,杜雨佳,郭潇潇,等. 渤中凹陷古近系优质烃源岩特征及分布[J]. 油气地质与采收率,2015,22(1):5-13.
Ren Yongjun, Du Yujia, Guo Xiaoxiao, et al. Characteristics and distribution of Paleogene high-quality source rocks in Bozhong sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 5-13.
- [2] 吴磊,徐怀民,季汉成. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2006,26(1):81-88.
Wu Lei, Xu Huaimin, Ji Hancheng. Evolution of sedimentary system and analysis of sedimentary source in Paleogene of BoZhong Sag, Bohai Bay[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2006, 26(1): 81-88.
- [3] 王冠民,庞小军,张雪芳,等. 渤中凹陷古近系石南断层活动性及其对油气成藏条件的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):859-866.
Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Zhang Xuefang, et al. Activity of Shinnan fault and its control on hydrocarbon accumulation in the Paleogene in Bozhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 859-866.
- [4] 谢武仁. 渤中凹陷古近系成岩层序与优质储层研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006.
Xie Wuren. The study of diagenetic sequence and advantaged reservoir of Paleogene System in the Bozhong depression[D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2006.
- [5] 樊生利,王秀林,苏玉山. 东濮凹陷断裂系统构造格局与油气聚集[J]. 断块油气田,1995,2(3):16-23.
Fan Shengli, Wang Xiulin, Su Yushan. The fault system and structure framework in Dongpu Depression and its petroleum accumulation[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 1995, 2(3): 16-23.
- [6] 马海陵. 巴楚隆起断裂构造特征及演化[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.
Ma Hailong. The structural styles and petroleum distribution in Bachu Area of tarim basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010.
- [7] 殷秀兰,张清久. 渤海海域构造应力场演化及其在油气聚集中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质,2007,27(5):45-50.
Yin Xiulan, Zhang Qingjiu. Evolution of the structural stress and its function during oil/gas accumulation in Bohai sea[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2007, 27(5): 45-50.
- [8] 侯贵廷,钱祥麟,宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报,1998,34(4):503-509.
Hou Guiting, Qian Xianglin, Song Xinmin. The origin of the Bohai Bay Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 503-509.
- [9] 贾志斌,田新琦,孟祥顺. 渤海湾盆地成因机制与油气评价[J]. 石油地球物理勘探,2003,38(1):62-66.
Jia Zhibin, Tian Xinqi, Meng Xiangshun, et al. Mechanism of contributing factor for Bohai Bay basin and appreciation of oil/gas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(1): 62-66.
- [10] 王冠民,熊周海,张健,等. 渤中凹陷断裂成因类型及其对成藏的控制作用[J]. 地质力学学报,2016,22(2):346-356.
Wang Guanmin, Xiong Zhouhai, Zhang Jian, et al. Genetic types of the fracture and its control on hydrocarbon accumulation in Bozhong Sag[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(2): 346-356.
- [11] 王昕,王永利,官大勇,等. 环渤中凹陷斜坡区浅层油气地质特征与勘探潜力[J]. 中国海上油气,2012,24(3):12-16.

- Wang Xin, Wang Yongli, Guan Dayong, et al. Shallow petroleum geology and exploration potential in the slope area, circum-Bozhong sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(3): 12–16.
- [12] 孙玉梅, 李友川, 龚再升, 等. 渤海湾盆地渤中坳陷油气晚期成藏的流体包裹体证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(1): 24–33.
- Sun Yumei, Li Youchuan, Gong Zaisheng, et al. Fluid inclusion evidence for late-stage petroleum accumulation, Bozhong Depression, Bohai Gulf Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting, Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(1): 24–33.
- [13] 徐春强, 王德英, 张新涛, 等. 渤中凹陷西斜坡新近系油气成藏主控因素及有利勘探方向[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(2): 217–224.
- Xu Chunqiang, Wang Deying, Zhang Xintao, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation and prediction of favorable exploration zone of Neogene in the western slope of Bozhong Sag[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(2): 217–224.
- [14] 胡雄, 梁为, 李洋冰, 等. 黄河口凹陷流体包裹体成藏年代和充注期次研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(6): 868–873.
- Hu Xiong, Liang Wei, Li Yangbing, et al. Research on the age of hydrocarbon accumulation and filling and filling history of fluid inclusions in Huanghekou Depression[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(6): 868–873.
- [15] 孙永河, 赵博, 董月霞, 等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 540–549.
- Sun Yonghe, Zhao Bo, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 540–549.
- [16] 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.
- [17] 万旸. 断层垂向封闭性物理模拟实验研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- Wan Yang. The physical simulation experiment research on vertical sealing of fault [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [18] 刘启东, 李储华, 卢黎霞. 高邮凹陷断层封闭性研究[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 58–61.
- Liu Qidong, Li Chuhua, Lu Lixia. Study on the fault sealing properties in Gaoyou Sag[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(2): 58–61.
- [19] 吴智平, 陈伟, 薛雁. 断裂带的结构特征及对油气的输导和封堵性[J]. *地质学报*, 2010, 84(4): 570–578.
- Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan. Structural Characteristics of Faulting Zone and Its Ability in Transporting and Sealing Oil and Gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 570–578.
- [20] 罗群. 断裂带的输导与封闭性及其控藏特征[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(5): 474–479.
- Luo Qun. Transporting and sealing capacity of fault belt and its controlling on reservoir[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(5): 474–479.
- [21] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(3): 328–336.
- Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lu Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(3): 328–336.
- [22] 周心怀. 渤中28-2南油田成藏模式及其勘探意义[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(5): 1–5.
- Zhou Xinhuai. The accumulation model of BZ28-2S oilfield and its exploration significance [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(5): 1–5.
- [23] 付广, 孟庆芬. 断裂带封闭油气所需泥质含量物理模拟[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(3): 234–237.
- Fu Guang, Meng Qingfen. Physical simulation of shale content requirement in fault zone sealing oil and gas [J]. *Xin. Jiang Petroleum Geology*, 2005, 26(3): 234–237.
- [24] 马洪, 柳广弟, 朱立林, 等. 地震资料在断层封闭性评价中的应用与探讨[J]. *勘探地球物理进展*, 2008, 31(1): 48–52.
- Ma Hong, Liu Guandi, Zhu Lilin, et al. Evaluation of fault sealing seismic data and its application [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2008, 31(1): 48–52.
- [25] 刘玉梅, 杨桂茹, 武国华. 利用声波时差测井信息定性判断断层封闭性[J]. *大庆石油学院学报*, 2009, 33(2): 6–9.
- Liu Yumei, Yang Guiru, Wu Guohua. Qualitative judgment of fault sealing by using acoustic logging information [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2009, 33(2): 6–9.

(编辑 张亚雄)