

文章编号:0253-9985(2010)02-0151-07

渤东低凸起构造演化及成藏条件

王应斌¹,王海军^{2,3},孙和风¹

(1. 中海石油有限公司 天津分公司,天津 300452; 2. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心,北京 102249;

3. 中国石油大学 油气成藏机理教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:渤东低凸起位于渤海海域中部偏北地区,其形态为近北东走向的狭条状,东西剖面呈两断夹一隆的地垒形态。三套断裂体系形成了渤东低凸起深层东西分块、浅层南北分带的复杂构造特征。低凸起的构造演化可以分为凸起形成期(前古近纪东营期)、走滑构造发育期(古近纪东营期)和新构造运动期(新近纪)。由于渤东低凸起独特的地理位置,决定了渤东低凸起良好的成藏条件,三个凹陷的供烃作用、三套储层的聚烃作用、三种运移通道的输导作用、三类圈闭的藏烃作用以及良好的后期保存为低凸起的油气成藏提供了有利的保证。

关键词:构造演化;成藏条件;渤东低凸起;郯庐断裂;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

An analysis of structure evolution and reservoiring conditions in the Bodong low salient of Bohai Basin

Wang Yingbin¹, Wang Haijun^{2,3}, and Sun Hefeng¹

(1. Institute of Petroleum Exploration and Development of CNOOC Bohai Oilfield Company, Tianjin 300452, China;

2. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Key Laboratory for Petroleum Accumulation, Ministry of Education · China University of Petroleum, Beijing, 102249, China)

Abstract: The Bodong low salient is located in the central-north part offshore Bohai bay. It is a narrow N-E trending strip appearing as a horst with two faults sandwiching an uplift on the E-W section. Three sets of fault systems shape the salient into a complex structure with the deep layer being segmented in E-W direction and shallow layers being zoned in N-S direction. The salient experienced three evolution stages: the forming period, the strike-slip structure development period, and the neotectonics period. The unique geographical position of the salient played a determinant role in forming reservoirs with favorable pooling conditions. It has three hydrocarbon kitchens, three sets of reservoirs, three kinds of carrier system, and three types of traps as well as good seals, all of which provide favorable conditions for hydrocarbon pooling.

Key words: structural evolution, reservoiring condition, Bodong low salient, Tanlu fault, Bohai Bay Basin

一直以来,凸起正向构造单元都是勘探家的首选目标,其独特的构造演化史和良好的成藏条件决定了凸起有利于油气聚集。渤海海域^[1]内(低)凸起众多,在(低)凸起上已发现多个油气田及含油气构造。由于渤东低凸起具有三面邻凹的优势,应该是勘探优选区带之一。上世纪70年代以来,经过多次的勘探研究,效果并不理想。本文

结合渤东地区勘探历史,通过对低凸起构造特征及构造演化的研究^[2~4],对其成藏条件进行综合分析^[5],认为渤东低凸起成藏条件优越^[6~9],利于油气成藏。建议低凸起的勘探应结合其构造、沉积演化特征:北部以精细解释构造、落实圈闭为主;南部加强储层物性研究,划分有利相带;潜山以寻找裂缝及可能产生裂缝的有利相带为目标^[10,11]。

收稿日期:2009-06-23。

第一作者简介:王应斌(1964—),男,硕士,首席工程师,石油地质与勘探。

基金项目:中海油重点科技攻关项目(SC06TJ-TQL-004)资助。

1 区域概况

渤东低凸起位于渤海海域中部偏北地区,低凸起东西两侧被郯庐断裂的东西两分支断裂夹持,东西两侧分别为渤东凹陷和渤中凹陷,北面为辽中南洼。整个低凸起可以分为南、北两部分。(图 1)。

渤东低凸起自 70 年代以来钻井 7 口,除 BD3 井外,其它各井在深浅层都有不同级别的油气显示,发现油田 1 个,即 LD32-2 油田,石油地质储量 $6\,262.8\times 10^4\text{ m}^3$ ^①。

2 构造特征及演化

2.1 构造特征

渤东低凸起呈一北东向展布的狭长条状,具有深层东西分块、浅层南北分带的构造特征(图 1)。

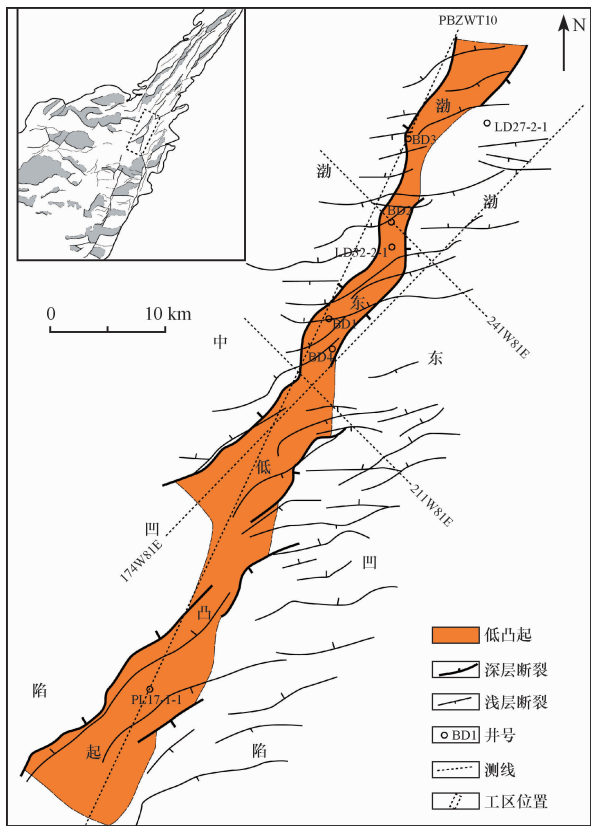


图 1 渤东低凸起构造纲要图

Fig. 1 The structure outline of the Bodong low salient

深层东西向剖面结构为两凹夹一隆的地垒状(图 2)。低凸起有北、南两个高点,被中部的低斜坡分成南北两块(图 3)。浅层,由于自古近纪东营组二段时期低凸起整体下降接受沉积,北高南低,物源来自北部的秦皇岛水系和绥河水系^①。受新构造运动和郯庐断裂运动影响,低凸起北部浅层发育北东向的雁行断裂,受深部早期断裂限制作用较弱;低凸起南部浅层断裂不如北部发育,而且受深部断裂限制作用明显,断裂主要沿早期东西断裂分布,与早期边界断裂平行或斜交尖灭,基本不穿越边界断裂(图 1)。

渤东低凸起地层可以分为基底潜山和新生界两大构造层。基底总体形态是北高南低、西高东低,主体为中生界酸性火山岩,只在 BD2 井以北发育前震旦系灰岩夹白云岩。浅层新生界主要发育古近系东营组二段及以上地层,孔店组只在南段 PL7-1 构造低位处有零散沉积,古近系沙河街组及东营组三段仅分布在凸起北端的 BD3 井区^{②③}。

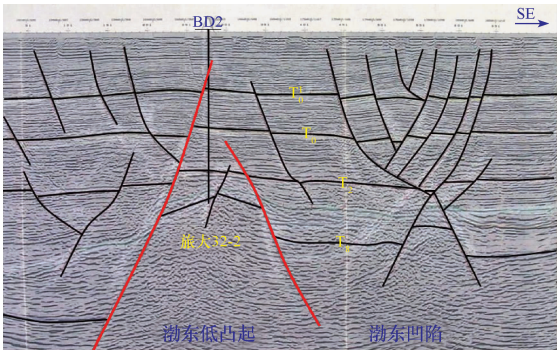


图 2 测线 241W81E

Fig. 2 The seismic line of 241W81E

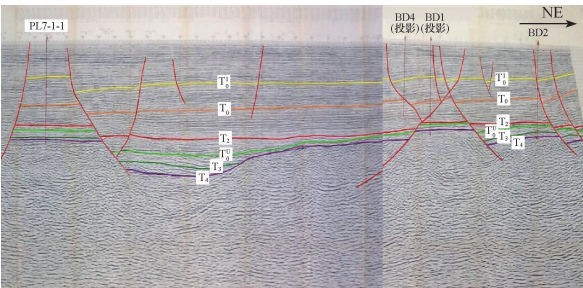


图 3 测线 PBZWT10

Fig. 3 The seismic line of PBZWT10

① 米立军. 渤东自营控区石油地质特征与勘探潜力分析. 中海石油研究中心渤海研究院,2000
② 张国良. 渤东地区石油地质条件再认识及下步油气勘探的方向. 渤海石油研究院,1997
③ 张功成. 渤东低凸起评价. 中国海洋石油勘探开发研究中心勘探部,1998

渤东低凸起的東西边界断裂具有明显的差异,西断裂带断层连续性较好,活动强烈,又可以分为北中段的渤中1号断层和南段的PL7-1断层,两条断层呈左阶排列;东断裂断层连续性差,活动较弱,由5条呈左行排列的小断层组成。东西剖面结构上,在东断裂转换处,低凸起呈一单断掀斜断块,呈斜坡与渤东凹陷相接(图4);而西部仅在渤中1号断层与PL7-1号断层转换处,低凸起呈斜坡过渡到渤中凹陷(图5)。

2.2 断裂特征

渤东低凸起发育三套断裂系统,由于各组断裂演化的差异,在平面和纵向上的复合构成渤东低凸起现今复杂的断裂特征(图1)。

2.2.1 伸展断裂系统

该断裂系统主要发育于低凸起西部,作为西边界把渤中凹陷与渤东低凸起分开。具有深度大、强度强特点。但由于受后期走滑断裂影响,使得断裂兼具有伸展、走滑特征。特别是中浅层沿断裂带发育一系列的“雁行”走滑构造。

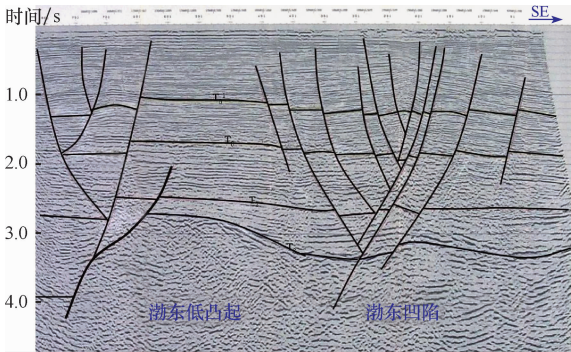


图4 测线211W81E

Fig. 4 The seismic line of 211W81E

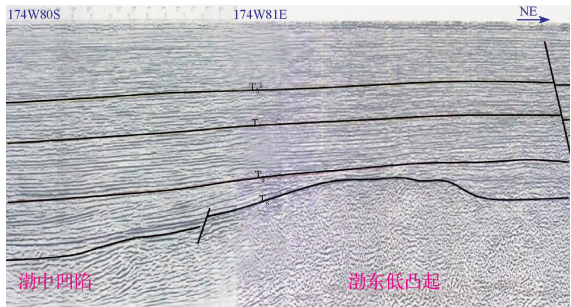


图5 测线174W81E

Fig. 5 The seismic line of 174W81E

2.2.2 走滑断裂系统

由于渤东低凸起处于郯庐断裂带中,走滑构造尤为明显,但渤东低凸起的位置偏走滑断裂带边部,早期发育的西边界断裂对走滑构造在平面上的展布也有所限制。发育的走滑构造,主要可以分为两个发育带:西部带、东部凹中反转带。

2.2.3 新生代断裂系统

新构造运动使渤海浅层普遍发育断裂,渤东低凸起也不例外,但是由于走滑断裂的继承性和持续性,低凸起内及周边新构造运动产生的断层走滑特征明显。

总的来说,渤东低凸起西部早期以伸展断裂与渤中凹陷分开,形成一西高东低的断块构造,东部呈斜坡向渤东凹陷渐变。而后,由于郯庐断裂走滑作用,一方面使西边界断裂发育“雁行”走滑构造,另一方面低凸起东部形成五条“雁行”走滑层,把渤东低凸起与渤东凹陷明显隔开。新近纪,受走滑断裂影响,新构造运动时期所发育的断层大多受走滑控制,走滑特征明显。

2.3 构造演化

渤东低凸起处于郯庐断裂中段,又处于渤中坳陷和辽东湾坳陷的分界处,渤东低凸起的构造演化与其盆地本身的结构及郯庐断裂活动紧密相连。

2.3.1 渤东低凸起的成因

渤东低凸起的成因一直是一个很复杂的问题,由于低凸起正好处于郯庐断裂带内,故以往的研究者大多认为郯庐断裂的活动是低凸起形成的直接原因,而且把低凸起东西两侧的断裂都归于走滑断裂。通过对低凸起两侧边界断裂和郯庐断裂的形态特征及活动性的对比,认为东侧的边界应该与郯庐断裂有直接原因,可以认为是郯庐断裂的走滑构造表现;而西侧的边界断裂则不应该归于郯庐断裂,西侧断裂应该是渤中坳陷沙河街组时期的伸展构造,后期在郯庐断裂强烈活动影响下,促使断裂长期活动。所以渤东低凸起的成因可以概括为“生在伸展期,长在郯庐下”。

2.3.2 渤东低凸起新生代的构造演化

渤东低凸起新生代构造演化可以分为三个阶段,每个阶段低凸起的构造特征和沉积特征各不相同(图6)。

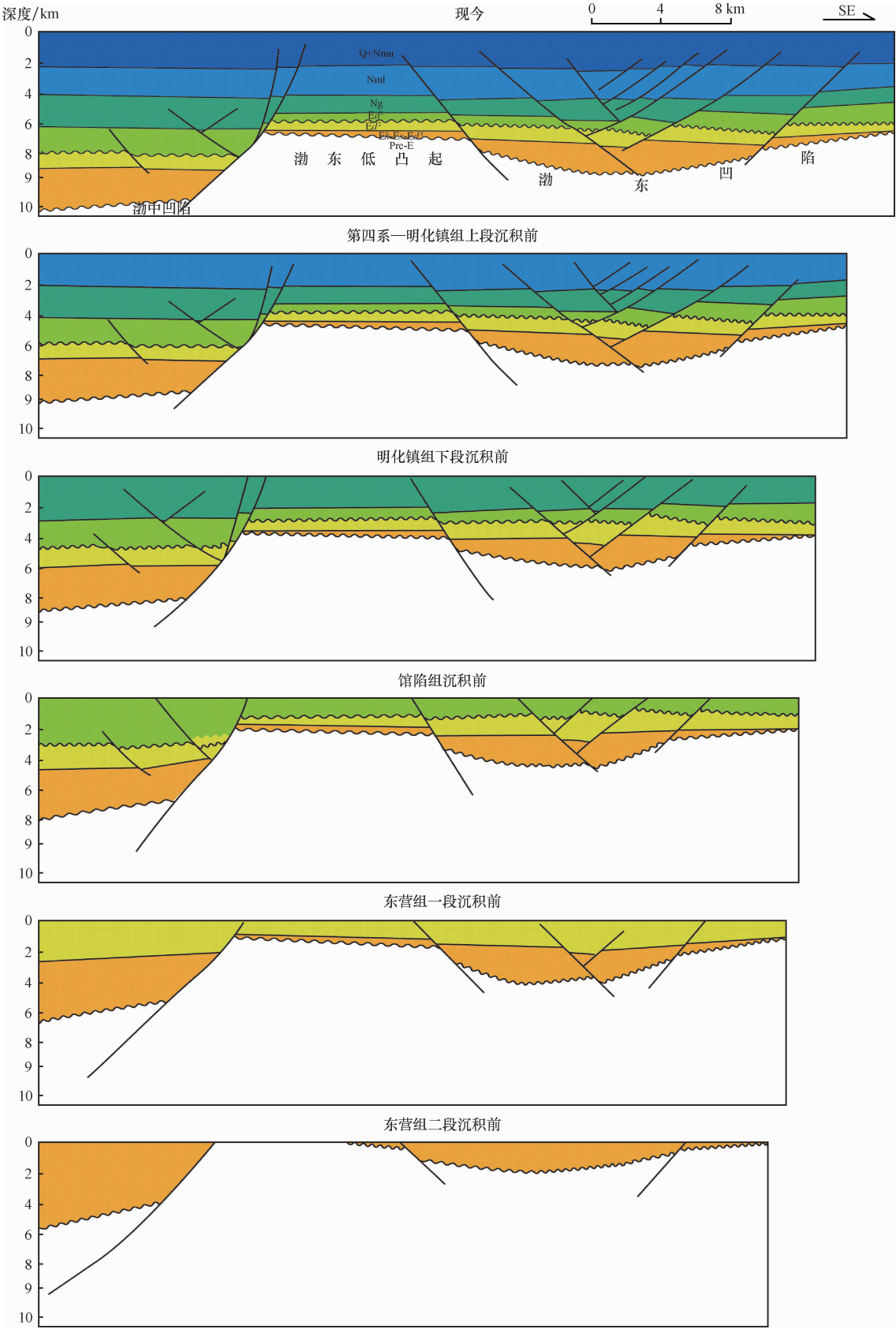


图 6 渤东低凸起 WN—SE 向构造演化

Fig. 6 The tectonic evolution of the Bodong low salient in WN - SE direction

第一阶段:东营组二段沉积前。渤东低凸起早期受东西拉伸,产生北东向西边界断裂,凸起雏形开始形成。后期在郯庐断裂活动作用下,西边界断裂持续活动,东边界断裂才开始逐渐显现出来,凸起形成。

第二阶段:东营组二段—东营组一段时期。低凸起开始下降接受沉积,总体地貌为北高南低,沉积以各种三角洲为主。这一时期郯庐断裂控制了低凸起断裂的发育,在低凸起东西边界断裂上发育了较多的雁行走滑构造,尤其是低凸起北部。

第三阶段:新近系时期。新构造运动使渤东低凸起与渤中凹陷进行整体演化,沉降中心位于渤中凹陷最中部,渤东低凸起区以辫状河、曲流河沉积为主。此时,受郯庐断裂和新构造运动走滑作用的共同影响,形成了若干条北东东向的具有走滑特征的新生断裂。



图7 渤东低凸起与周边凹陷分布示意图

Fig. 7 The distribution of the Bodong low salient and the surrounding depressions

3 成藏条件

渤东低凸起地理环境优越,具有良好的油气成藏条件。

3.1 多凹陷多层系的烃源岩

渤东低凸起四面环凹陷,三个凹陷中丰富的烃源岩为低凸起之上的油气成藏提供了充足的物质条件(图7)。其中西侧和南侧邻近渤海海域最大的生烃凹陷—渤中凹陷,凹陷烃源岩以沙河街组三段和东营组三段为主,沙河街组一、二段和东营组二段也有少量烃源岩发育,干酪根类型以Ⅰ型为主,局部地区为Ⅰ型和Ⅱ_B型。据相关资料研究表明,渤中凹陷的烃源岩多已成熟或过成熟,尤其是深部沙河街组烃源岩的 R_o 值最大可达3.0%,可以为凹陷周边的凸起提供了充足的油源^[5]。如石臼坨凸起、沙南凸起和渤南低凸起上发现的大油气田都是以渤中凹陷为主力油源区。

低凸起东侧的渤东凹陷,就目前钻井资料分析,已证实的烃源岩有东营组三段。通过与渤中凹陷的对比,渤东凹陷也应该存在沙河街烃源岩,其中烃源岩类型及成熟度都与渤中凹陷类似^[6]。另外2007年,胜利油田在渤东凹陷东斜坡钻探的胜顺1井,获高产油气流,也充分证实了渤东凹陷的生烃潜力。

北侧的辽中南洼,烃源岩研究资料较少,但与LD32-2油田相距不远的LD27-2油田,位于南洼中央反转构造带之上,LD27-2油田的发现也进一步证实了辽中南洼的供烃实力。

另外,从现在对渤东低凸起上已钻井的油气分析来看,渤东低凸起的油气聚集可以分为北部辽中南洼供烃区,中部三凹混合供烃区以及南部渤中-渤东凹陷混合供烃区。

3.2 三类有效储层发育

渤东低凸起主要发育三类储层:前第三系的潜山储集体、东营组的三角洲砂体储层体、新近系河流相砂体储集体。

渤东低凸起在东营组二段沉积前,整体为凸起,遭受剥蚀,为周边的凹陷提供物源。低凸起基底在BD2井以北为前震旦系灰岩夹白云岩,BD2井以南为中生界酸性火山岩。目前在这两套基底中已发现有油气显示。东营组时期,特别是东营组二段开始,低凸起整体下降接受沉积,物源自北向南,低凸起区以三角洲沉积为主,砂体自北向南逐渐变薄,分选较好,孔隙度和渗透平均为17%和 $70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为优质储层。BD1井和BD4井都在东营组有较好的油气发现。新近纪,渤东低凸起与渤海其它区域形成统一演化,以辫状河、曲

流河沉积为主,发育的河流相砂体成为浅层主要的储集体。从已钻井分析,浅层地层砂岩百分含量高,其中馆陶组平均为 68%,明化镇组下段平均为 40%,且从北向南有减小的趋势。由于浅层河流相砂体埋藏浅、成岩作用弱,物性良好,为油气在浅层成藏提供了良好的场所^[7]。LD32 油田所发现的油气主要聚集在明化镇组下段和馆陶组。

3.3 长期高效的输导体系

渤东低凸起区油气运移的通道可以分为三类:长期活动的边界断层(图 8a)、边界断裂转换处的斜坡砂体(图 8b)及油气从凹陷中沿浅层砂体横向运移(图 8c),这三种运移通道组成了渤东低凸起区高效的输导体系。

渤东低凸起为东西两条断裂夹持的地垒,东西两边断裂与凹陷深部源岩沟通,浅部与凸起之上的储层相接,断裂的强活动期与凹陷中源岩的生、排烃期耦合。一方面断裂带为油气的运移提供了运移通道;另一方面,断裂活动时所引起地层中地应力场及流体势能的变化也为油气的运移提供了动力^[8]。

由于低凸起边界断裂的不连续,在东西边界都存在断裂转换带,凸起沿斜坡向凹陷过渡。这种斜坡往往是砂体最为发育的地区,砂体的各种物性较好,可以作为油气运移的良好输导层。另外,凹陷中的油气也可以通过内部断裂运移至浅层,再沿浅层砂体横向运移至低凸起之上,运移距离较长。这种运移方式在渤东凹陷尤为发育,因为凹陷中存在中央走滑断裂,油气可先沿断裂垂向浅层,再进行分散聚集。

3.4 多类型圈闭的垂向叠加

渤东低凸起发育的圈闭类型多样,总的来说可以分为潜山圈闭、披覆背斜圈闭、断块圈闭(图 9)。潜山圈闭主要发育在低凸起基底中,由于基岩中孔缝发育的不均一性及上覆岩层遮挡形成。这类圈闭近油源,但是基岩中孔缝发育的极端不均质性,一方面给勘探增加了难度,另一方面也为发现大型的潜山油气藏提供了可能。披覆背斜圈闭,主要是由于低凸起之上的地层披覆于基底之上形成,这种背斜圈闭在东营组发育最为明显、幅度高;新生代地层也可能形成这种背斜圈闭,但范围变大,幅度变低。断块圈闭主要与低凸起的断裂活动有关,郯庐断裂一方面控制低凸起的发育,另一方面由其派生出的走滑构造,沿边界断裂呈雁行式排列,切割砂体,形成了多个断块圈闭。这些圈闭靠近郯庐断裂,与其相连通,油源充足。浅层新生代断裂主要控制了新生代断块圈闭的形成,新构造运动是发育于整个渤海湾盆地浅层一次构造运动,具有范围广、强度小、断裂多等特点^[9]。由于浅层一般都以河流相砂体为主,断裂切割砂体,从而形成众多的浅层断块圈闭,有利于形成浅层油气藏。

3.5 有利的后期保存

渤东低凸起虽然经历过多期的构造运动,但对中深部油气藏来讲,大断裂主要发育在凸起边部,对中深层圈闭的破坏作用较弱,后期新构造运动断裂强度较小,一般不断穿中深层,对中深层圈闭的破坏作用较小。而对浅层油气藏来讲,新构造运动对油气成藏主要以促进作用为主,晚断型断裂有利于浅层的油气成藏^①。

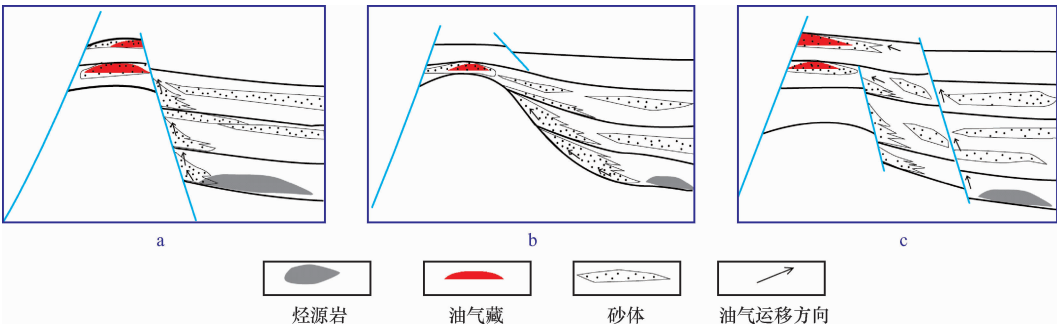


图 8 渤东低凸起油气运移方式

Fig. 8 The hydrocarbon migration modes in the Bodong low salient

① 蔡东升. 渤海断裂构造演化对成油体系及油气富集规律的控制和影响研究. 中海石油研究中心渤海研究院, 1999

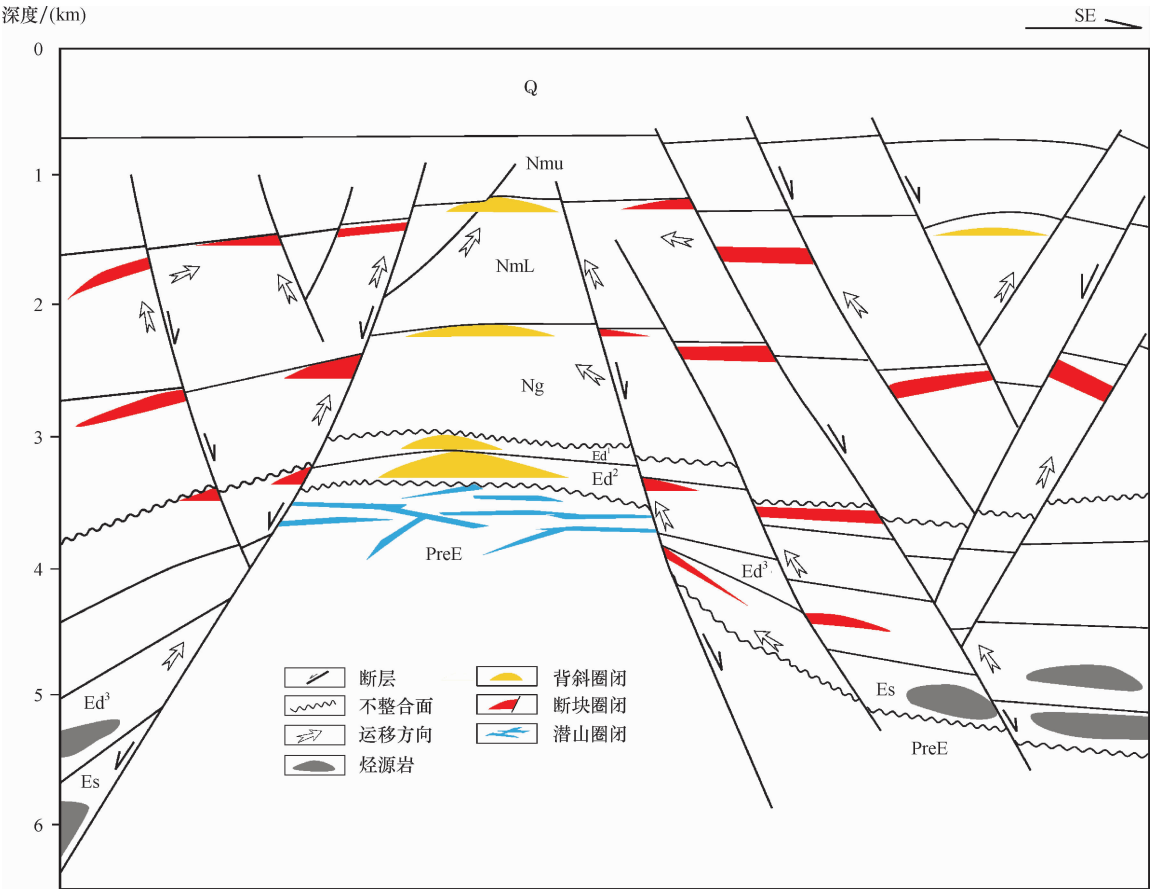


图9 渤东低凸起成藏模式图

Fig. 9 The hydrocarbon accumulation modes in Bodong salient

4 勘探建议

目前在低凸起上的7口井中除了BD3井以外,其它井在不同层系均发现油气层或油气显示。但各井未获得较高的工业油气流,其主要原因有:北部所钻探井的圈闭不落实或圈闭规模较小;而南部探井储层物性变差及深部异常高压成为勘探的“拦路虎”。在上述认识的基础上,就渤东低凸起的勘探提供如下建议:

1) 北部深、浅断裂都较发育,地层破碎,应以寻找浅层断块圈闭为主。加强北部地区的三维地震资料解释,落实圈闭构造。特别是低凸起周边的LD32-3构造、PL2-2构造及已勘探的LD32-1构造等都是进行断块油气藏勘探的有利区带。

2) 南部断裂不如北部发育,地层连续较好,主要发育由边界断裂控制的断背斜和披覆背斜圈

闭为主,规模较大。但是由于南部的沉积物大多是来自低凸起北部,随着沉积物长距离搬运及分异作用,南部的砂体变细、变薄。寻找圈闭中有利的油气聚集相带是南部勘探的重点。

3) 低凸起钻遇潜山的3口探井,即BD1、BD2和PL7-1-1,都在潜山中有油气显示,这说明渤东低凸起的潜山大有可为。再从各井钻遇情况来看,主要是由于探井区潜山储层物性较差,从而使得油气不能大规模成藏。所以加强低凸起区潜山研究,寻找潜山裂缝及可能产生裂缝的有利岩相是今后潜山勘探目标。

另外,加强钻井工艺,对所钻井区提前进行地层异常高压预测(特别是低凸起南部),钻探过程中保护好油层,做好录井工作,也是勘探成功的保证。

致谢:本文在完成过程中,参考了渤海石油研究院的部分研究成果,得到了研究院各位领导和专家的大力帮助,在此表示衷心的感谢!