

渤海湾盆地渤南低凸起西段低角度正断层分段生长特征及其油气地质意义

娄瑞^{1,2}, 孙永河^{1,2}, 张中巧³

[1. 重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331;

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459]

摘要: 为了研究渤海湾盆地渤南低凸起低角度正断层分段生长诱发的时空差异演化特征及控藏机制, 基于最新三维地震资料, 精细刻画表征了断层分段生长过程及差异演化特征, 结合区域构造背景, 探讨断层成因机制及对油气成藏的控制作用。结果表明: 渤南低凸起南边界 F_1 断层和 F_2 断层均为低角度正断层, 源于中生代NWW—近EW向先存逆冲断层发生负反转, 在新生代发生再次活化。 F_1 断层具有平面上分段连接、垂向上多幕活动的特征, 中段继承原有断面持续活动, 西段和东段分别与裂陷Ⅱ幕新生NEE向断层和裂陷Ⅲ幕新生近EW向断层垂向搭接形成现今形态。低角度正断层对油气成藏的控制作用主要表现为: ①低角度正断层断控侧沉积规模大, 可提供充足的可容纳空间, 形成规模陡坡砂体; ②长期活动的低角度正断层是垂向油气运移通道, 控制了油气垂向上的富集层位; ③低角度正断层多期活动改造了深部储层物性, 断层活动强度与优质储层的发育密切相关。

关键词: 差异演化; 分段生长; 控藏机制; 低角度正断层; 渤南低凸起; 渤海湾盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Segmented growth of low-angle normal faults in the western Bonan swell, Bohai Bay Basin and its petroleum geological significance

LOU Rui^{1,2}, SUN Yonghe^{1,2}, ZHANG Zhongqiao³

[1. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Complex Oilfield Exploration and Development, Chongqing 401331, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China]

Abstract: A fine characterization of the segmented growth process and differential evolution characteristics of these faults is conducted using the latest 3D seismic data to investigate the segmented growth-induced spatiotemporally differential evolution and mechanisms governing hydrocarbon accumulation of the low-angle normal faults in the Bonan swell within the Bohai Bay Basin. Furthermore, we explore the genetic mechanisms of these faults and their controlling effects on hydrocarbon accumulation while considering the regional tectonic setting. The findings indicate that faults F_1 and F_2 at the southern boundary of the Bonan swell are low-angle normal faults. Both originated from the Mesozoic NWW- to nearly-EW-trending pre-existing thrust faults, which underwent negative inversion and subsequent reactivation during the Cenozoic. Fault F_1 exhibits segmented connections laterally and multiple episodes of activity vertically; its central segment inherits continuous activity from the original fault plane, while its western and eastern segments vertically overlap with the NEE-trending fault newly formed during the rifting episode II and the nearly-EW-trending fault during the rifting episode III, respectively. These collectively create the present morphology of fault F_1 . The controlling effects of the low-angle normal faults on hydrocarbon accumulation are as follows: (1) The fault-controlled sides exhibit a large

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-05-15。

第一作者简介: 娄瑞(1997—), 女, 博士研究生, 断层分段生长及含油气盆地构造解析。E-mail: lorii0504@163.com。

通信作者简介: 孙永河(1979—), 男, 教授、博士研究生导师, 盆地构造解析与油气成藏。E-mail: syh79218@163.com。

基金项目: 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(重点项目)(CSTB2022NSCQ-LZX0020); 重庆英才创新领军人才项目(教育领域)(0255-19230101042)。

sedimentary scale, thus providing sufficient spaces for deposition. Consequently, large-scale sand bodies on steep slopes are developed. (2) The low-angle normal faults, which have remained active for a prolonged time, provide channels for vertical hydrocarbon migration and determine the horizons of vertical hydrocarbon enrichment. The multiphase activity of these faults has transformed the physical properties of deep reservoirs, with the activity intensity being closely related to the formation of high-quality reservoirs.

Key words: differential evolution, segmented growth, mechanism governing hydrocarbon accumulation, low-angle normal fault, Bonan swell, Bohai Bay Basin

引用格式: 娄瑞, 孙永河, 张中巧. 渤海湾盆地渤南低凸起西段低角度正断层分段生长特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 710–721. DOI: 10. 11743/ogg20240310.

LOU Rui, SUN Yonghe, ZHANG Zhongqiao. Segmented growth of low-angle normal faults in the western Bonan swell, Bohai Bay Basin and its petroleum geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 710–721. DOI: 10. 11743/ogg20240310.

正断层是含油气盆地在伸展过程中产生的典型地质构造,其构造特征不仅控制盆地沉积格架的建立^[1],还作为油气成藏要素影响油气成藏过程^[2]。传统正断层符合经典安德森理论模式^[3]和摩尔-库伦破裂准则^[4],倾角在 45° 以上。随着勘探程度不断提高,低角度正断层的出现逐渐被学者接受。低角度正断层一般指倾角低于 35° ,具有较大水平位移的正断层^[5–6]。最早于20世纪初在拆离盆地中被发现,断层沿拆离带发生滑脱来调节地壳中脆-韧性地层的变形转换,也称拆离断层^[7]。近年来,越来越多的低角度正断层作为边界断层在断陷盆地内出现,如泰国湾盆地的清迈断层^[8]、珠江口盆地恩平和西江等洼陷的边界断层^[9–10]、渤海湾盆地的牛东断层^[11]和石南1号断层^[12]等。前人研究指出,有别于拆离断层的成因机制,断陷盆地内低角度正断层部分是高角度正断层旋转的结果^[13],部分是由低角度先存逆冲断层发生负反转而成^[14]。逆冲断层再活动需要某一主应力方向发生旋转^[6],或断层岩具有异常低摩擦系数^[15]等特定地质条件,因此,这类断层演化通常伴随着区域板块俯冲和岩浆活动^[16–17]等过程。

近年来关于中国低角度正断层的研究主要集中在南海珠江口盆地^[9–10,18],学者对断层展布特征和成因机制进行了大量研究。但在研究过程中通常将目标断层当作均一地体,忽略其在平面和垂向上的分段特征。在多幕活动的断陷盆地内,不同断层段之间的差异演化特征会极大影响盆地结构^[19]。此外,围绕断层显示的油气在聚集位置和聚集程度上均有很大差别^[9–10],低角度正断层的控藏机制尚不明确。因此,本文利用三维地震资料,选取渤海湾盆地渤南低凸起西段边界断层作为研究目标来

分析低角度正断层的分段生长特征和差异演化过程,并讨论该断层差异演化成因及其对油气成藏的控制作用。

1 地质背景

渤海湾盆地是发育在华北板块东缘的大型中-新生代叠合陆内断陷盆地,夹持于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋构造域之间^[20–21]。自成盆以来,主要经历中生代印支期、燕山期和新生代喜马拉雅期3期构造旋回,形成了多走向先存断层体系和隆-凹相间的构造格局^[22]。渤南低凸起西段位于渤海湾盆地渤中凹陷中南部,整体表现为近EW向展布的古隆起,南、北两侧以边界断层为界与黄河口凹陷和渤中凹陷相连,东、西两侧与郑庐断裂带东支和西支相接(图1b)。

钻井揭示研究区内覆盖太古宇花岗岩,在某些构造高部位直接暴露,局部残留古生界白云岩和中生界火山岩^[23]。新生界自下而上发育裂陷I幕孔店组(Ek)、裂陷II幕沙河街组(Es)、裂陷III幕东营组(Ed)和拗陷期馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)(图1c),凸起之上大部分前新生界直接与东营组二段不整合接触。渤南低凸起西段油气资源丰富,至今已发现BZ26-5, BZ25-1和BZ27-2等多个富油构造围绕边界断层分布^[24–25],体现出断层对油气成藏的控制作用。油气垂向富集层位丰富,既有以馆陶组和明化镇组为目的层的浅层油田BZ26-2和BZ25-1S,也有以沙河街组和孔店组为目的层的深层油田BZ27-2和BZ25-1,2023年大型变质岩潜山油田BZ26-6的发现证实了太古宇也存在巨大的资源潜力^[23]。

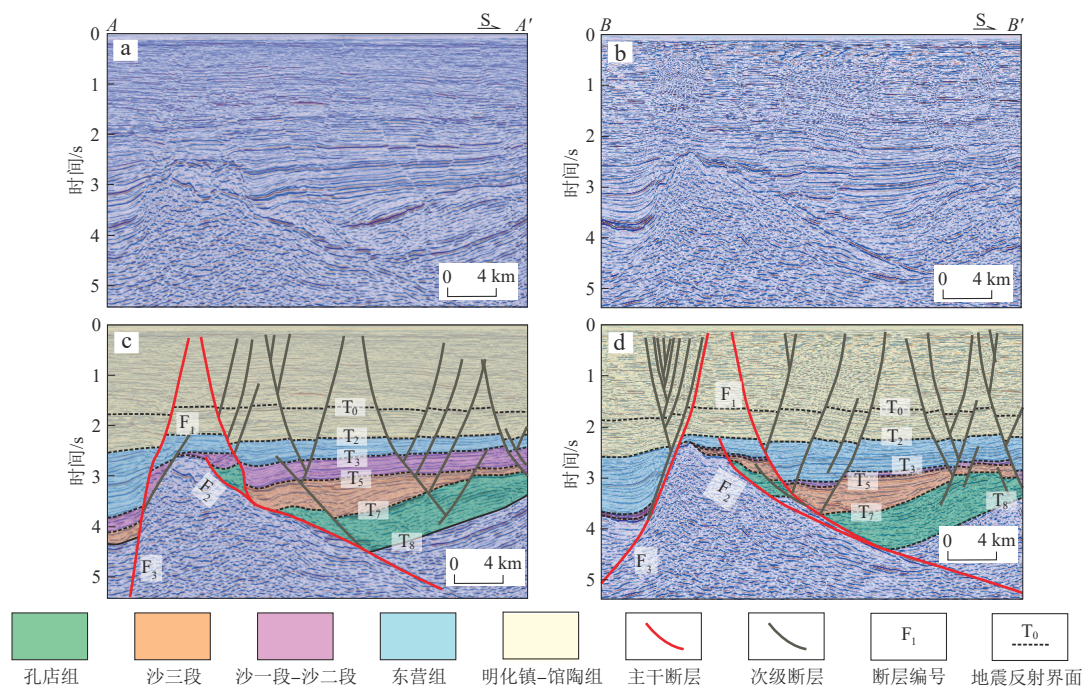


图2 渤南低凸起西段构造剖面特征(剖面位置见图1)

Fig. 2 Characteristics of structural sections in the western Bonan swell (see Fig. 1 for the section locations)

a. A—A'地震剖面;b. B—B'地震剖面;c. A—A'地质解释剖面;d. B—B'地质解释剖面

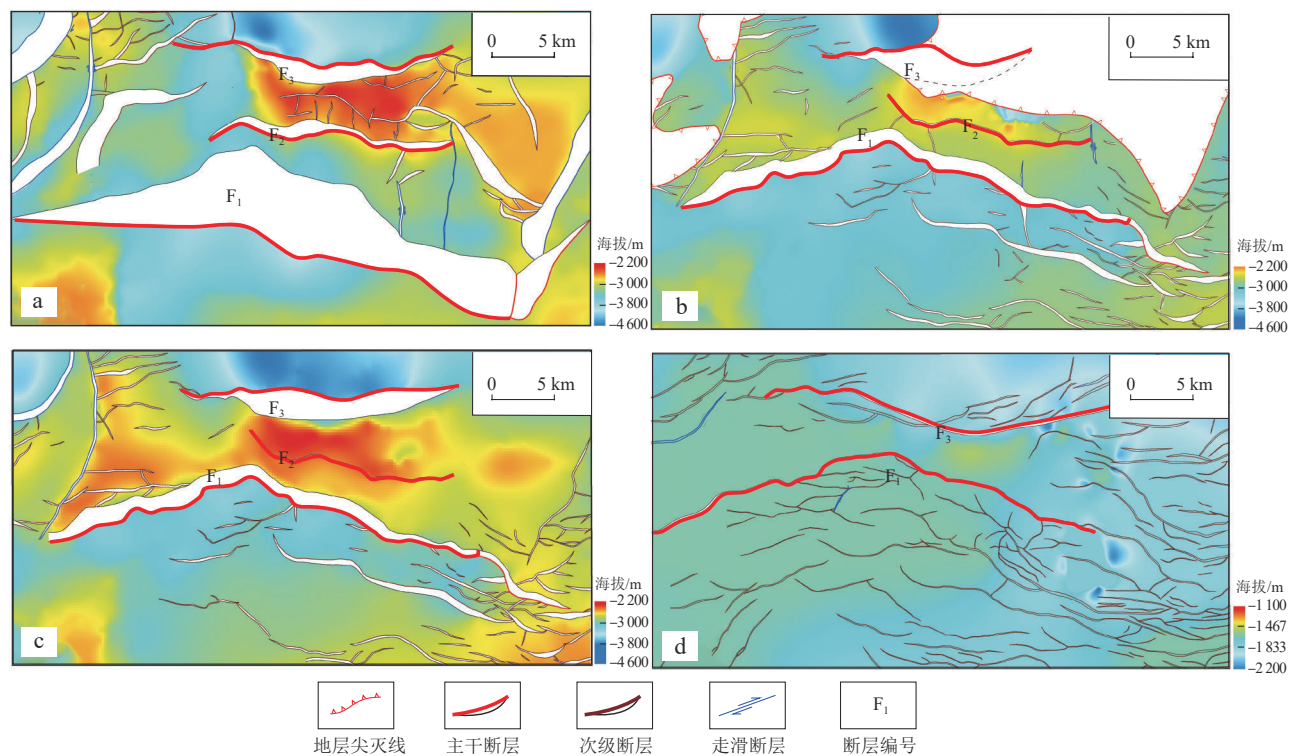


图3 渤南低凸起西段各地震反射界面断层平面分布

Fig. 3 Maps showing the planar distribution of faults on various seismic reflectors of the western Bonan swell

a. T_8 ; b. T_5 ; c. T_3 ; d. T_0

度增加,走向弯曲变化更加明显,断层两盘均与 T_8 层位下盘轨迹变化一致,凸起范围穿过 F_2 断层逐渐向南扩展, F_2 断层规模变小,且在 F_1 断层上盘和端部有与之走

向相同的次级断层发育(图3b)。在东营组底界面(T_3),断层平面展布与 T_5 反射层相似, F_1 断层和 F_3 断层长度持续增加,凸起南边界扩展至 F_1 断层处,表明此时

期 F_1 断层对研究区隆升构造格局控制作用明显(图3c)。明化镇组底界面(T_0), F_2 断层轨迹彻底消失, F_1 断层和 F_3 断层表现为线性延伸的弯曲断层,长度达到最大,大量近EW向新生断层出现在 F_1 断层上盘凹陷范围内。进入拗陷期后,盆地整体进入裂后热沉降阶段,沉积厚度均匀,凸起形态已不明显(图3d)。

2.1.3 断层产状特征

断面埋深等值线图突出了断层演化过程中 F_1 断层和 F_3 断层的断面形态特征(图4a)。沿断层倾向, F_1 断层和 F_3 断层的断面深度逐渐增加,其中 F_1 断层断面等值线密度逐渐稀疏, F_3 断层断面等值线间隔大致相等,反映出 F_1 断层具有铲式断层、 F_3 断层具有板式断层的特征。沿断层走向, F_1 断层断面等值线存在2个明显拐点将断面分成3段,拐点两侧断层走向发生变化。 F_3 断面等值线与断层走向近平行,未有突变发生。

断面倾角等值线图显示了 F_1 断层和 F_3 断面倾角变化趋势(图4b)。沿断层倾向,断层倾角逐渐变缓,其中 F_1 断层倾角变化大,上、下分段特征明显,上段倾角陡,普遍大于 50° ,下段倾角缓,最小为 8° ,最大为 35° ,主要分布在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 区间内,属低角度正断层; F_3 断层倾角变化小,断层主体倾角为 60° 左右,在浅部1000 m深度以内倾角最大可达 75° 。

2.2 断层分段生长及差异演化

大量研究结果表明,多数长期活动的大规模断层是由早期的孤立断层段经晚期连接形成的^[26-27]。因此

编制断距-距离曲线、断层活动速率、断距埋深曲线和生长指数来表征断层分段生长特征及差异演化过程。

2.2.1 分段生长特征

断距-距离曲线显示整条 F_1 断层最大断距出现在孔店组底部并向浅部逐层减小,各层系间断距变化强烈(图5)。断层主体在测线L1030和L1510附近存在2处明显位移降将断层整体分为3段:西段走向NEE向,最大断距达1200 m;中段走向NW向,最大断距超1250 m;东段走向近NNW向,最大断距仅450 m。各断层段的位移模式为近似“C”型或半“C”型的剖面,即断距最大值出现在断层中心,向断层端部方向逐渐减小,表明过去是孤立的断层段。两处位移降分别为900 m和400 m,根据断距回剥曲线发现,沙河街组沉积前, F_1 断层为3条孤立断层段(图5d),沙三段沉积后,各断层段之间以硬连接的形式相互作用在一起(图5c)。断层活动速率柱状图也显示出同样的分段性,其中西段和中段在裂陷期活动速率明显大于东段,平均断层活动速率超25 m/Ma,东段大约为15 m/Ma。但在后裂陷期东段活动速率占据优势,明显高于西、中2段,整体呈现出 F_1 断层活动强度自西向东迁移(图5e)。

通过 F_2 断层断距-距离曲线(图6a),可以看出, F_2 断层主要在断陷层内活动,少数上穿到 T_2 反射层。 T_8 层位断距曲线起伏变化明显,存在3个断距高值和其间2个低值点将 F_2 断层分为3段。相比之下, F_3 断层的断距-距离曲线与上述2条断层存在明显区别(图6b),断距展布成不对称“C”型,无低值点出现,表明 F_3 断层是

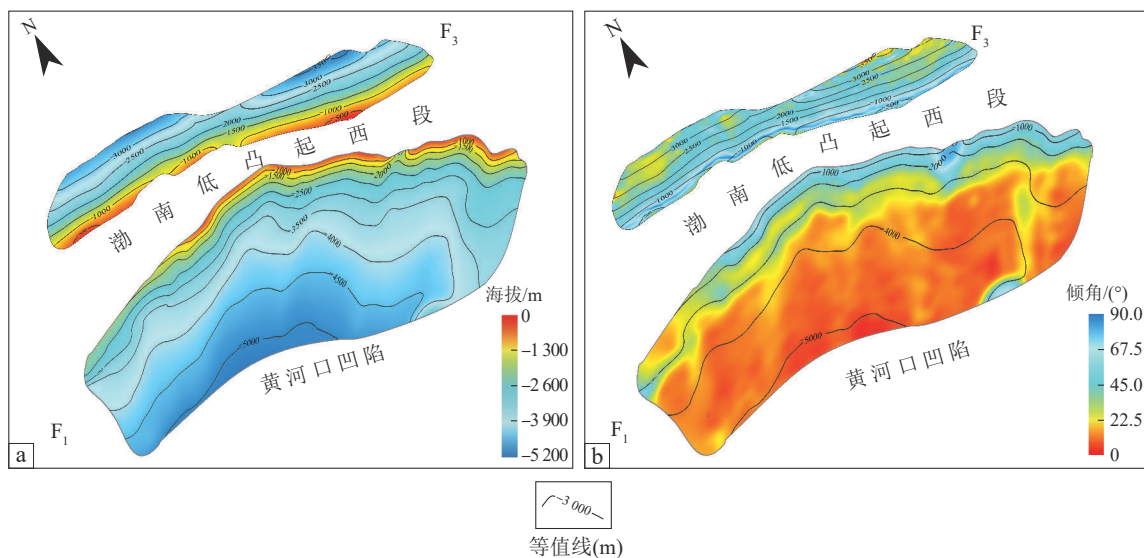


图4 渤南低凸起 F_1 和 F_3 断层断面埋深(a)和断面倾角等值线图(b)

Fig. 4 Contour maps showing the burial depths (a) and dip angles (b) of the fault planes of F_1 and F_3 in the Bonan swell

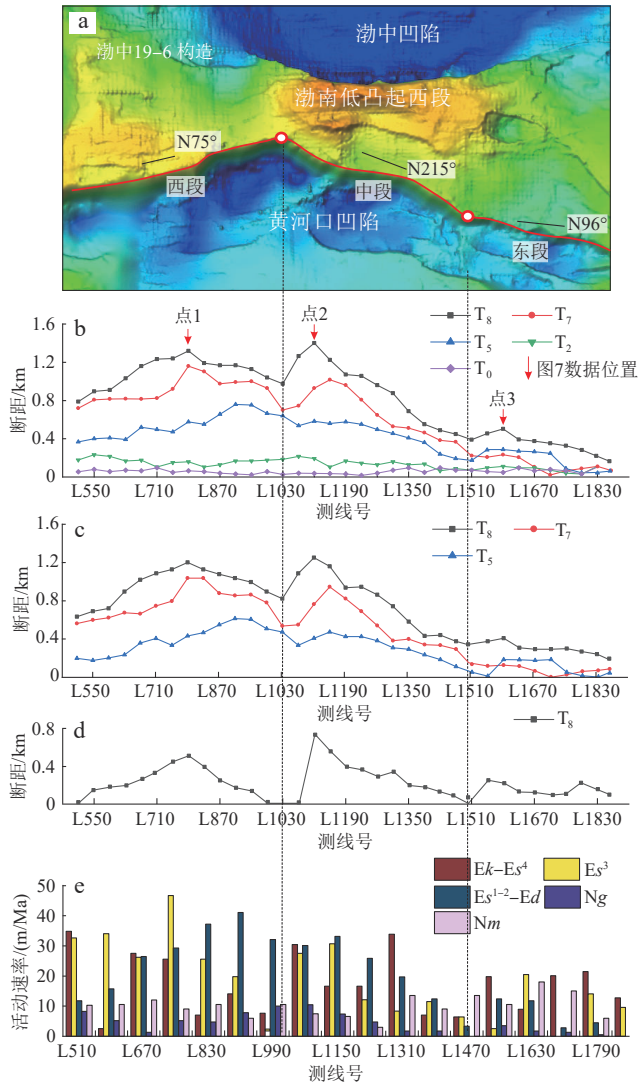


图5 渤南低凸起 F_1 断层平面形态、各时期断距分布及活动速率
Fig. 5 The planar morphology and the throw of fault F_1 and activity rates in various periods of fault F_1 development in the Bonan swell

a. T_8 层位 F_1 断层平面形态; b. F_1 断层断距-距离曲线; c. 东营组沉积前 F_1 断层断距回剥曲线; d. 沙河街组沉积前 F_1 断层断距回剥曲线; e. F_1 断层各时期活动速率柱状图

T_0 : 新近系明化镇组底界面; T_2 : 新近系馆陶组底界面; T_5 : 古近系沙一段-沙二段底界面; T_7 : 古近系沙河街组底界面; T_8 : 古近系孔店组底界面

一条孤立生长断层,不存在分段现象。

2.2.2 多幕活动特征

选取 F_1 断层不同位置典型剖面编制断距-埋深曲线和生长指数来恢复各断层段活动时期和活动强度(图7)发现, F_1 断层西、中、东3段均为长期活动断层,最大断距出现在孔店组底部。在 T_2 反射层之上断距-埋深曲线和生长指数特征相似,表现出断层活动的一致性,此时 F_1 断层应为1条完整断层(图7a—c)。但在

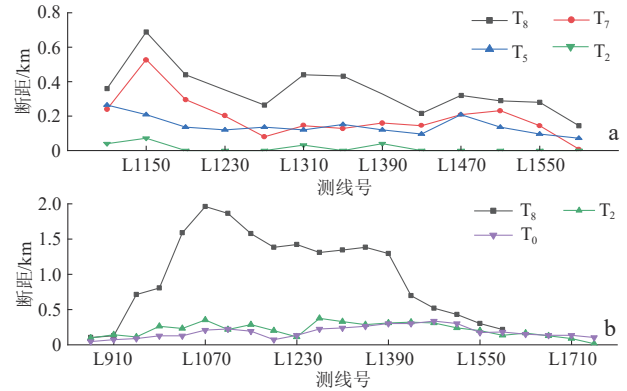


图6 渤南低凸起 F_2 断层(a)和 F_3 断层断距-距离关系曲线(b)
Fig. 6 Throw vs. distance curves of faults F_2 (a) and F_3 (b) in the Bonan swell

T_0 : 新近系明化镇组底界面; T_2 : 新近系馆陶组底界面; T_5 : 古近系沙一段-沙二段底界面; T_7 : 古近系沙河街组底界面; T_8 : 古近系孔店组底界面

裂陷期各断层段活动特征存在明显差异: F_1 断层西段在剖面上表现为上陡下缓的“铲式”特征,孔店组厚度在断层两侧变化不明显(图7d)。断距-埋深曲线在孔店组地层内保持近似直立,垂直断距向上不变,表明断层成核于沙三段沉积时期后向下传播至孔店组内(图7a)。 F_1 断层中段与 F_2 断层在剖面上共同组成“铲式扇”构造,控制裂陷期地层稳定发育(图7e),累积断距由上至下逐渐增大,断距梯度一直保持正梯度。各时期生长指数(EI ,无量纲)均大于1,自孔店组底界向上逐渐变小,说明断层持续活动,但活动强度逐渐减弱(图7b)。 F_1 断层东段在剖面上表现为“座椅式”特征,上段高角度断层向上传播至3.5 s时,变为倾角极缓的断层,下段倾角变大并深部持续延伸。倾角极缓断层段上方形成局部背斜,控制浅层似花状构造发育(图7f)。生长指数在沙三段沉积期明显小于西、中2段,说明该断层段在强裂陷期活动强度最弱(图7c)。

3 断层成因机制探讨

3.1 低角度正断层形成动力背景

长期以来,渤海湾盆地各走向断层形成机制存在较大争议,这与盆地自身复杂的动力学机制有关。目前主流观点为:渤海湾盆地是以伸展断陷为主,走滑拉分为辅,2种构造应力模式相互叠加干涉的复合成因盆地^[28]。中生代印支运动和燕山运动的产物作为基底先存构造^[22,29]在新生代3期裂陷作用下发生不同程度的再活化^[30-31]。由于渤南低凸起处于渤海海域走滑活动最强烈的地区之一,其内部断裂体系具有伸展-

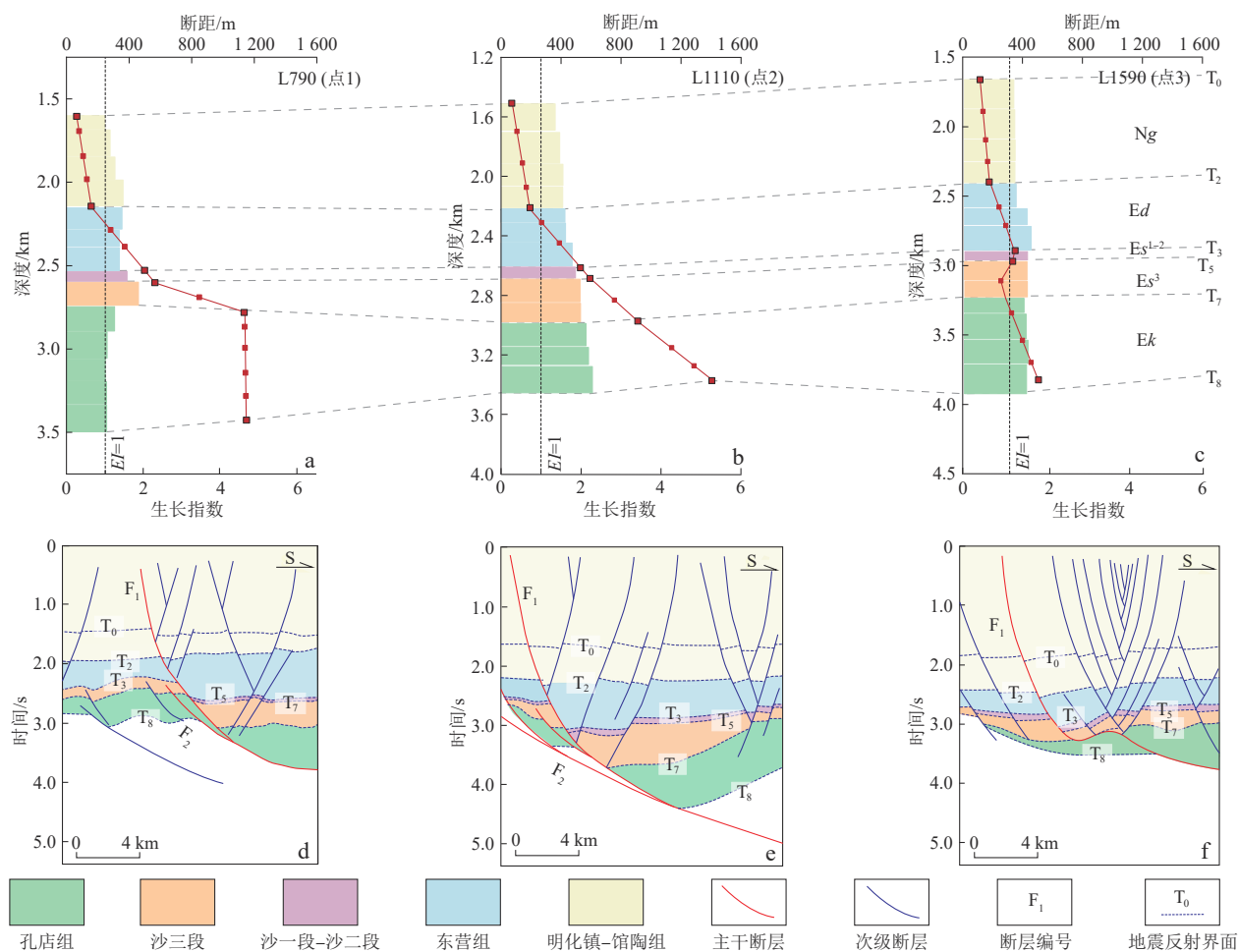


图7 渤南低凸起 F_1 断层各段断距-埋深曲线、生长指数及对应地质解释剖面(数据位置见图5)

Fig. 7 Throw vs. burial depth curves, growth indices, and geological sections of the various segments of fault F_1 in the Bonan swell (see Fig. 5 for data locations)

a. F_1 断层西段断距-埋深曲线、生长指数;b. F_1 断层中段断距-埋深曲线、生长指数;c. F_1 断层东段断距-埋深曲线、生长指数;
d. 过 F_1 断层西段地质解释剖面;e. 过 F_1 断层中段地质解释剖面;f. 过 F_1 断层东段地质解释剖面
(折线为断距-埋深曲线,条形图为生长指数; EI ,生长指数,无量纲。)

走滑叠合成因机制^[21-23]。但与其他地区相比,近EW向正断层与NNE向走滑断层走向近似垂直切割,裂陷期,近EW向断层发生强烈伸展作用控制凹陷沉积,NNE向走滑断层活动弱,对地层沉积控制作用不明显;拗陷期,NNE向走滑断层活动性变强,逐步代替近EW向正断层成为主导断层,因此渤南低凸起内近EW向断层演化过程相对独立,仅晚期遭受走滑改造作用。

断层变形解析结果显示, F_1 断层和 F_2 断层深部归于同一低角度断面,属低角度正断层。就深部NNW—近EW向低角度正断层而言,前人已做过详细研究^[32-33],从区域三维地震剖面上,渤南低凸起及相邻的黄河口凹陷和渤中凹陷表现为由强振幅反射先存断面组合而成的典型逆冲叠瓦状构造样式,逆冲褶皱变形强烈,其中渤南低凸起西段发育秃顶构造样式,渤中凹陷主要发育薄底构造,地层保存较完整(图8)。结合断层形

成动力背景,合理判定研究区内低角度断层段源于印支期SN向挤压作用下形成的NNW—近EW向逆冲断层的复活,在后续伸展应力环境中发生负反转作用成为正断层,位置上处于渤海海域逆冲推覆体系的第一级台阶^[33]。

3.2 低角度正断层差异演化成因

在裂陷I幕和裂陷II幕,先存低角度断层向上演化成 F_1 断层和 F_2 断层2条分支断层,它们同期活动控制孔店组-沙三段沉积,而在裂陷III幕及以后, F_2 断层断层停止生长, F_1 断层变为主控断层(图2),并且具有平面上分段连接、垂向上多幕活动的特点:深部为近EW向低角度断面,浅部由NEE,NW和NNW—EW向3组中-高角度断层连接而成。复杂的断层结构表明 F_1 断层并非简单成因,而是在新生代3期裂陷作用下,

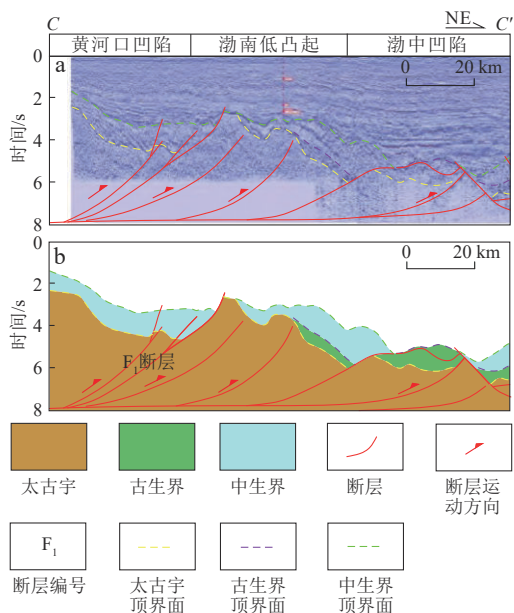


图8 过渤南低凸起西段典型逆冲推覆体系地震和地质解释剖面^[33](剖面位置见图1b)

Fig. 8 Seismic and geological sections^[33] of the typical thrust nappe system along the western Bonan swell (see Fig. 1b for the section locations)

a. C—C'地震剖面; b. C—C'地质解释剖面

NWW—近EW向低角度断层作为先存薄弱构造发生了具有明显差异的再活动。仅 F_1 断层中段断距自 T_8 界面向浅部逐渐减小,断层走向始终与先存断层走向保持一致,符合断层发育的简单模式,即先存断层持续生长,断距在最深的层位上最大,向上逐渐减小(图9a₁—a₃);西段和东段均在裂陷层内出现断距极大值,并且活动强度自西向东发生迁移,符合断层发育的复杂模式。复杂模式为新生断层与先存断层剖面上组合成一条断层,断距极大值出现在新生断层形成时期(图9b₁—b₃),如 F_1 断层东段浅部成核于裂陷Ⅲ幕SN向伸展应力场下,新生断层走向与先存断层走向一致,仍为NWW—近EW向。若新生断层形成时期应力场方向发生了旋转,那么2期断层之间会以斜交方式相连(图9c₁—c₃),如西段浅部成核于裂陷Ⅱ幕NW—SE向伸展环境中,造成新生断层更倾向于区域应力场方向,为NEE向。

区分简单模式和复杂模式的重中之重要明确断层的形成时间,即断距—埋深曲线中极大值的位置。断层走向与伸展应力场方向的关系主要决定了不同走向断层段活动强度发差异的原因,走向为NEE向的西段,在沙一段—沙二段沉积期NW—SE向伸展应力场下活动强,而走向为NWW向的东段在东营期近SN向伸展应力场下活动强。基底先存断层负反转作用导致下部断层面倾角平缓,上部高角度断层源于3种不同的

生长方式,共同形成现今复杂的构造样式。相较于普通正断层,低角度断层更难发生再活化^[34-35],因此仅先存活动强度最大的中段能沿着低角度断面持续向上生长,而西段和东段则是不同时期的新生断层形成后向下传播,与低角度断面发生搭接,后继承低角度断面继续生长。

4 油气地质意义

近年来的勘探实践已经证实渤南低凸起西段具有深—中—浅层立体成藏特征,整体是一个复合含油气系统,边界低角度断层是控制多层系立体差异化成藏的关键因素。一方面低角度断层与陡坡带砂体的空间配置关系控制汇聚脊的形成规模。另一方面,低角度正断层长期活动可作为垂向运聚体系控制油气垂向富集层位。此外,对于以低孔、低渗为主要特征的深埋储层,低角度断层多期活动会改造储层性能,进而控制油气优势富集部位。

4.1 深部汇聚成脊

按照汇聚脊结构要素组成,可将汇聚脊分为不整合—断层型和砂体—断层型2种。对于砂体—断层型汇聚脊而言,深层的陡坡砂体发育至关重要。断层强烈活动产生的大量位移会为物源入盆及陡坡砂体的形成提供良好场所。以BZ25-1油田为例,构造上处于渤南低凸起西倾末端NS向走滑断层与NE向 F_1 断层西段所夹持的封闭区域内。

沉积相图显示BZ25-1构造主要沉积物源方向为NE—NEE向(图10)。这是由于裂陷期 F_1 断层强烈活动,并且断面低缓导致断控侧沉积规模大,为该区物源沉积提供了充足的可容纳空间,沉积物沿着陡坡带自SW向NE部推进,形成NE走向的砂体展布。

4.2 浅部调整控运

长期活动断层作为输导断层在多幕活动时可为油气垂向运聚提供“高速公路”。断层输导能力的强弱直接影响油气的分布层系和富集规模。勘探实践表明,渤南低凸起西段内古近系孔店组至新近系明下段储层内均有油气富集,其中以馆陶组—明化镇组为主要目的层的BZ25-1S, BZ26-3和BZ26-2等新近纪油田围绕 F_1 断层和 F_3 断层分布,且油田内部还存在越靠近输导断层油气富集层系越多、富集层位越浅的现象(图11a)。

这是由于低角度断层平面辐射范围广,更容易与晚期断层发生垂向连接,形成输导断层,其输导能力取决

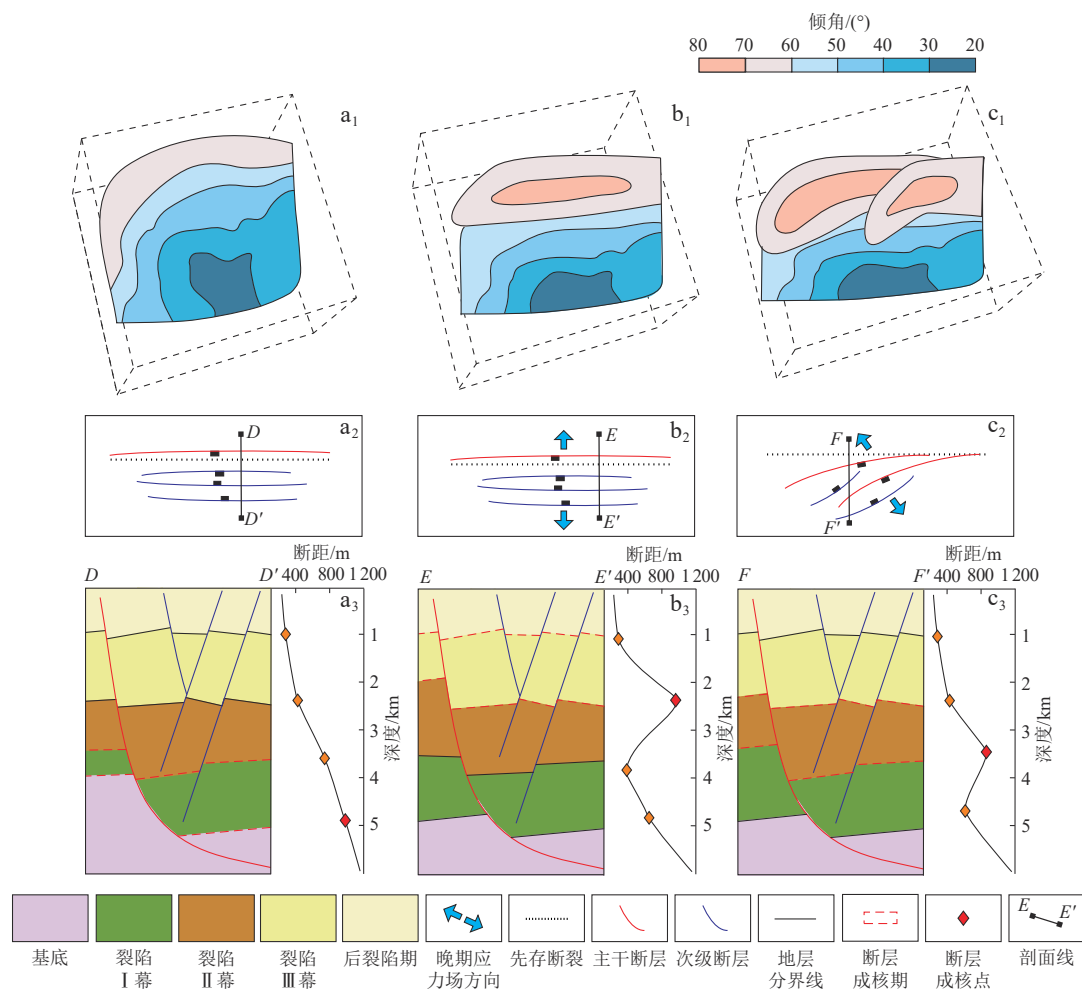


图9 渤南低凸起多幕伸展条件下低角度正断层发育模式

Fig. 9 Developmental model of low-angle normal faults under multi-episode extension of Bonan swell

a_1 — a_3 . 先存断层持续活动模式的断面模式图、平面图、剖面图及断距—埋深曲线; b_1 — b_3 . 不变应力场方向的新生断层与再活化的先存断层组合模式的断面模式图、平面图、剖面图及断距—埋深曲线; c_1 — c_3 . 改变应力场方向的新生断层与再活化的先存断层组合模式的断面模式图、平面图、剖面图及断距—埋深曲线

(a_2 — c_2 黑色填充方框代表断层下降盘。)

于断层活动时期断—盖空间配置关系和断层静止时期凸面脊分布两方面因素。断—盖空间配置关系可以用来表征断层活动破坏盖层完整性的能力,断距越大,盖层越薄,油气越容易突破盖层向浅部运移。通常用断盖比法和断接厚度法^[36]来厘定断层垂向封闭下限。目前研究区内主要发育1套东营组二段下亚段区域盖层,前人用断接厚度法厘定出断层输导油气厚度上限为95 m。沿断层走向计算 F_1 断层各处断接厚度发现, F_1 断层大部分断接厚度均小于此临界值,说明大部分断层段具有垂向输导能力,仅东段有部分断接厚度值高于临界值,能使油气封闭在盖层之下(图11b)。凸面脊是指断层表面类似砂体输导脊低势脊状区,能够汇聚并运移大部分油气,可依靠断面曲率法和断面埋深等值线法识别并勾画凸面脊轮廓^[37]。断面埋深等值线显示 F_1 断层平面发育5

个凸面脊(图11c),2个明显的凸面脊位于断层段连接部位(3号和4号),剩余3个分布在 F_1 断层西段和东段末端(1,2和5号),其中3号凸面脊与BZ26-3油田位置重合,1号和2号凸面脊与BZ25-1S油田位置重合,再次说明凸面脊发育的位置有更强的油气垂向分配能力,决定浅层油气的富集程度。因此,在深部陡坡砂体良好发育的前提下, F_1 断层的4号凸面脊位置将是浅层(馆陶组—明化镇组下段)油气勘探的有利部位。

4.3 局部改造优质储层

钻井岩心和成像测井等资料显示,研究区深部孔店组一沙三段储层整体上具有低孔、低渗特征,储集空间以次生溶蚀孔和裂缝为主体,储层非均质性极强。优质储层的发育受表层风化壳和裂缝共同控制,断层活动是

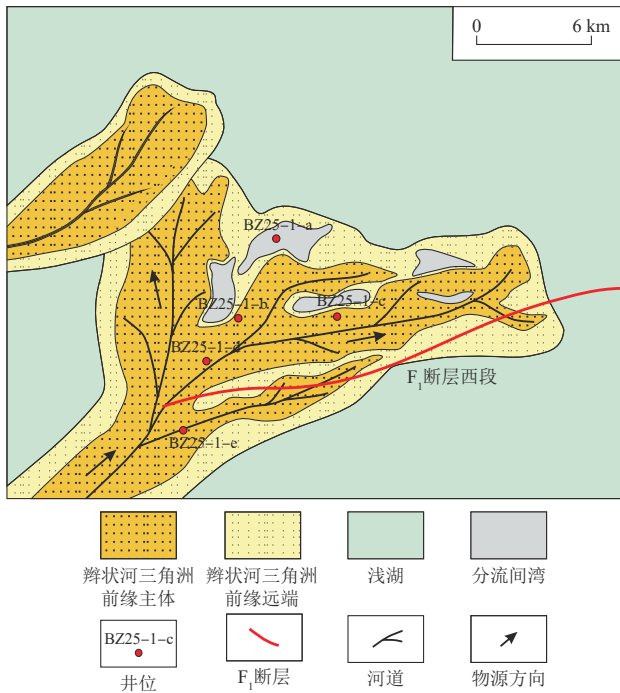


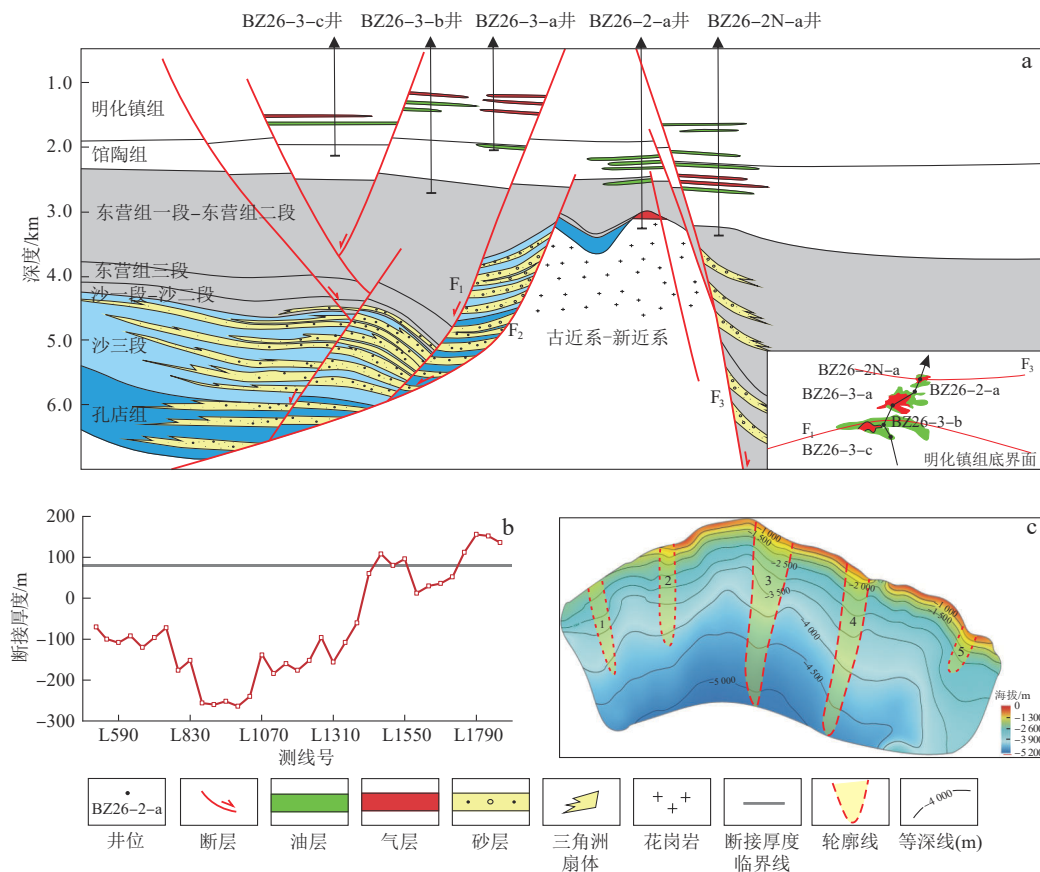
图10 BZ25-1/S油田沙二段沉积体系展布

Fig. 10 Planar distribution of the sedimentary system in the Sha 2 Member, BZ25-1/S oilfield

改造储层的重要途径,主要体现在3个方面:①断层活动会造成下盘掀斜隆升,抬高地势隆起幅度,增强风化淋滤作用,加大风化壳厚度及孔隙占比;②裂缝通常沿断层呈带状分布,越靠近断层,裂缝密度越高,且断层活动强度影响裂缝发育规模,断层活动强度越大,裂缝规模越大;③断层晚期发生再活动,不仅可以促使新裂缝在旧裂缝附近产生,还可使早期闭合缝再度开启使其成为有效储层。 F_1 断层各段断层活动特征显示,西段和中段在裂陷Ⅰ幕和裂陷Ⅱ幕活动强度大,东段在裂陷Ⅲ幕活动强度大,结合实际生产测试资料来看,断层活动强度与优质储层的发育有很强匹配性^[38],分布在 F_1 断层西段和中段的油田以沙三段为优质储层,油气勘探效果好,而分布在东段的油田以沙一段-沙二段为优质储层。

5 结论

1) 渤南低凸起南边界断层 F_1 断层为低角度生长正断层,断层变形解析结果显示, F_1 断层具有平面上分段连接、垂向上多幕活动的特征。深部为近EW向低角度

图11 BZ26-2和BZ26-3陡坡汇聚型浅层成藏模式(a)、 F_1 断层断接厚度折线图(b)和 F_1 断层凸面脊分布(c)Fig. 11 Diagram showing the shallow hydrocarbon accumulation of the convergence type on steep slopes in oilfields BZ26-2 and BZ26-3 (a), line chart showing the juxtaposition thicknesses of fault F_1 (b), and map showing the distribution of convex ridges along fault F_1 (c)

正断层,倾角在 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$,浅部由西段NEE向、中段NNW向和东段EW向高角度正断层连接而成,倾角约 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。中、西两段断层活动强,东段断层活动弱。

2) F_1 断层低角度正断层源于中生代NNW—近EW向先存逆冲断层后发生负反转,并在新生代发生时空差异再活化。其中仅中段符合断层生长简单模式,即先存断层继承原有断面在新生代持续向上生长,断距最大值出现在最深层。西段和东段符合断层生长复杂模式,分别由裂陷Ⅱ幕新生的NEE向断层和裂陷Ⅲ幕新生的近EW向断层成核后向下传播,与先存低角度断面发生连接,断距极大值出现在新生断层形成时期。相较于正常倾角正断层,低角度正断层极难发生再活动,因此多出现晚期形成断层与先存低角度断层垂向搭接的现象。

3) 低角度正断层在油气运聚过程中的作用体现在3个方面:①低角度断层段物源供给量大,断控侧沉积规模大,可提供更加充足的容纳空间,形成规模性陡坡砂体;②低角度断层与晚期新生断层连接后可作为垂向运聚体系控制油气垂向富集层位;③对于以低孔、低渗为主要特征的深埋储层,低角度断层多期活动会改造储层性能,进而控制油气优势富集部位。

参 考 文 献

- [1] 康海亮,林畅松,牛成民,等. 渤海西部海域沙垒田凸起古近系边缘断裂构造样式与沉积充填响应[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2): 254-261, 348.
KANG Hailiang, LIN Changsong, NIU Chengmin, et al. Faulting structure styles and their depositional filling response of the Paleogene margin of Shaleitian uplift, western Bohai Sea area[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2): 254-261, 348.
- [2] 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.
- [3] ANDERSON E M. The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [4] 童亨茂,王建君,赵海涛,等. “摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(9): 1948-1957.
TONG Hengmao, WANG Jianjun, ZHAO Haitao, et al. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(9): 1948-1957.
- [5] AXEN G J. Research Focus: Significance of large-displacement, low-angle normal faults[J]. Geology, 2007, 35(3): 287-288.
- [6] MORLEY C K. The widespread occurrence of low-angle normal faults in a rift setting: Review of examples from Thailand, and implications for their origin and evolution [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133: 18-42.
- [7] FOSSEN H, ODINSEN T, FAERSETH R B, et al. Detachments and low-angle faults in the northern North Sea rift system [M]// NØTTVEDT A. Dynamics of the Norwegian Margin. London: Geological Society of London, 2000: 105-131.
- [8] MORLEY C K. Geometry and evolution of low-angle normal faults (LANF) within a Cenozoic high-angle rift system, Thailand: Implications for sedimentology and the mechanisms of LANE development[J]. Tectonics, 2009, 28(5): TC5001.
- [9] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. A low-angle normal fault and basement structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights into Late Mesozoic to Early Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea area [J]. Tectonophysics, 2018, 731/732: 1-16.
- [10] 邓棚,梅廉夫,杜家元,等. 珠江口盆地西江主洼低角度边界正断层特征及成因演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 606-616.
DENG Peng, MEI Lianfu, DU Jiayuan, et al. Characteristics and genetic development of a low-angle boundary normal fault in Xijiang main sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 606-616.
- [11] 董大伟,李理,刘建,等. 冀中坳陷中北部新生代构造演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 771-780.
DONG Dawei, LI Li, LIU Jian, et al. Cenozoic tectonic evolution in the north-central Jizhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 771-780.
- [12] 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 Shinan fault and its control on hydrocarbon accumulation in the Paleogene in Bozhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 859-866.
- [13] WHITNEY D L, TEYSSIER C, REY P, et al. Continental and oceanic core complexes [J]. GSA Bulletin, 2013, 125 (3/4): 273-298.
- [14] LI Jianhua, ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, et al. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China[J]. Tectonophysics, 2013, 606: 97-115.
- [15] HAINES S H, VAN DER PLUIJM B A. Patterns of mineral transformations in clay gouge, with examples from low-angle normal fault rocks in the western USA [J]. Journal of Structural Geology, 2012, 43: 2-32.
- [16] BUCK W R. Modes of continental lithospheric extension [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96(B12): 20161-20178.
- [17] PARSONS T, THOMPSON G A. Does magmatism influence low-angle normal faulting?[J]. Geology, 1993, 21(3): 247-250.
- [18] 何勇,梅廉夫,施和生,等. 低角度断陷盆地成因模式及结构特征——以珠江口盆地恩平低角度断陷为例[J]. 海相油气地质, 2018, 23(3): 73-81.

- HE Yong, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Structural characteristics and genetic model of the low-angle fault depression: A case in Enping Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(3): 73–81.
- [19] 刘哲, 吕延防, 孙永河, 等. 同生断裂分段生长特征及其石油地质意义——以辽河西部凹陷鸳鸯沟断裂为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(5): 793–799.
- LIU Zhe, LYU Yanfang, SUN Yonghe, et al. Characteristics and significance of syngenetic fault segmentation in hydrocarbon accumulation, an example of Yuanyanggou fault in western sag, Liaohe Depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(5): 793–799.
- [20] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(8): 1037–1046.
- ZHAI Mingguo. Cratonization and the ancient North China continent: A summary and review [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(8): 1037–1046.
- [21] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64–89.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64–89.
- [22] 于福生, 漆家福, 王春英. 华北东部印支期构造变形研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(4): 402–406.
- YU Fusheng, QI Jiafu, WANG Chunying. Tectonic deformation of Indosinian period in eastern part of North China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(4): 402–406.
- [23] 张新涛, 曲希玉, 许鹏, 等. 渤海湾盆地深层砂砾岩储层孔-缝成因机制及演化特征——以渤中19-6构造古近系孔店组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 707–719.
- ZHANG Xintao, QU Xiyu, XU Peng, et al. Genesis and evolution of pore-fractures in deep sandy conglomerate reservoirs in Bohai Bay Basin: Taking the Paleogene Kongdian Formation in Bozhong 19-6 structure as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 707–719.
- [24] 吕丁友, 侯东梅, 杨庆红, 等. 渤南低凸起西段构造成因机制与油气成藏规律研究[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(4): 229–233.
- LYU Dingyou, HOU Dongmei, YANG Qinghong, et al. A study on structure origins and hydrocarbon accumulation pattern in the west part of Bonan lower-uplift [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(4): 229–233.
- [25] 薛永安, 许鹏, 汤国民. 渤中凹陷西南环特大型高产油气聚集带的发现与勘探启示[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(3): 1–11.
- XUE Yongan, XU Peng, TANG Guomin. Discovery and exploration implications of super-large high-yield oil and gas accumulation zone in the southwest belt of Bozhong Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(3): 1–11.
- [26] CHILDS C, NICOL A, WALSH J J, et al. The growth and propagation of synsedimentary faults [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(4): 633–648.
- [27] BAUDON C, CARTWRIGHT J. Early stage evolution of growth faults: 3D seismic insights from the Levant Basin, Eastern Mediterranean [J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(7): 888–898.
- [28] 胡志伟, 徐长贵, 王德英, 等. 渤海海域走滑断裂叠合特征与成因机制[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 254–267.
- HU Zhiwei, XU Changgui, WANG Deying, et al. Superimposed characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults in the Bohai Sea, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 254–267.
- [29] 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏[J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(8): 1135–1159.
- ZHU Rixiang, XU Yigang, ZHU Guang, et al. Destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 42(8): 1135–1159.
- [30] WANG Guangzeng, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Deep-shallow coupling response of the Cenozoic Bohai Bay Basin to plate interactions around the Eurasian Plate [J]. *Gondwana Research*, 2020, 102: 180–199.
- [31] ZHU Guang, LIU Guosheng, NIU Manlan, et al. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(1): 135–155.
- [32] 徐聪, 李理, 符武才. 鲁西地块中-新生界裂缝发育特征及构造应力场分析[J]. *地质科学*, 2021, 56(3): 829–844.
- XU Cong, LI Li, FU Wucai. Development characteristics of fractures in the Mesozoic and Cenozoic and structure stress field analysis of the Luxi Block [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(3): 829–844.
- [33] 吕丁友, 杨海风, 于海波, 等. 渤海海域印支期逆冲推覆体系的分带性及其动力学成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 720–734.
- LYU Dingyou, YANG Haifeng, YU Haibo, et al. Zonation and dynamic genetic mechanism of the Indosinian thrust nappe system in Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 720–734.
- [34] CLEMENZI L, STORTI F, BALSAMO F, et al. Fluid pressure cycles, variations in permeability, and weakening mechanisms along low-angle normal faults: The Tellaro detachment, Italy [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127(11/12): 1689–1710.
- [35] BOLOGNESI F, BISTACCHI A. Weakness and mechanical anisotropy of phyllosilicate-rich cataclasites developed after mylonites of a low-angle normal fault (Simplon Line, Western Alps) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2016, 83: 1–12.
- [36] WELSH K E, DEARING J A, CHIVERRELL R C, et al. Testing a cellular modelling approach to simulating late-Holocene sediment and water transfer from catchment to lake in the French Alps since 1826 [J]. *The Holocene*, 2009, 19(5): 785–798.
- [37] 付广, 李佳静, 于桐. 油源断裂输导油气时期厘定方法的改进及其应用——以渤海湾盆地歧口凹陷南大港断裂为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1481–1488.
- FU Guang, LI Jiajing, YU Tong. Improvement of method for timing of hydrocarbon migration along source rock-rooted faults and its application: A case of the South Dagang fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1481–1488.
- [38] 王梓颐, 李洪博, 郑金云, 等. 珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 626–636.
- WANG Ziyi, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 626–636.