

冀中坳陷宝坻—桐柏镇变换带形成机制与油气意义

周从安¹, 赵利^{2,3}, 孙钰皓³, 李小冬¹, 刘海剑³

(1. 中国石油华北油田分公司地球物理勘探研究院, 河北 任丘 062552;

2. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 借助三维地震数据体资料, 通过构造剖面解释、断层落差计算、平衡剖面构造演化史分析, 以及变换带类型的划分, 对冀中坳陷宝坻—桐柏镇变换带形成机制进行研究。结果表明: 宝坻—桐柏镇变换带属于同向传递型, 内部构造样式为地垒和变换断层, 而琥珀营断层、杨税务断层等对其起反向调节作用; 沙四期变换带南北两侧伸展差异最大, 沙三期强烈活动并构造定型, 沙二—沙一时期继承性发育并迅速减弱, 东营期活动再次变强, 之后衰亡, 构造活动呈现出阶段式减弱的趋势。结合区域构造分析表明, 宝坻—桐柏镇变换带为调节大厂—武清凹陷与廊固凹陷伸展差异的构造, 构造变形与边界断层活动具有时空匹配性。最新油气勘探研究表明, 变换带两侧的强、弱构造域分别发育烃源岩和圈闭, 而变换断层则沟通源储, 故该区域是油气勘探的有利指向区。

关键词: 变换带; 伸展差异; 形成机制; 宝坻—桐柏镇; 冀中坳陷

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

THE FORMING MECHANISM OF THE BAODI-TONGBAIZHEN TRANSFER ZONE IN THE JIZHONG DEPRESSION AND ITS OIL-GAS BEARING

ZHOU Congan¹, ZHAO Li^{2,3}, SUN Yuhao³, LI Xiaodong¹, LIU Haijian³

(1. Geophysical Exploration Institute of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, Hebei, China;

2. College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, Shandong, China;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Based on the 3D seismic data, through structural section interpretation, fault throw calculation, structural evolution analysis of balanced section and classification of transfer zone types, the formation mechanism of the Baodi-Tongbaizhen transfer zone in the Jizhong Depression is studied in this article. The results indicate that: the Baodi-Tongbaizhen transfer zone is classified as synthetic collinear-type with horst and transfer fault as the main internal structural styles, while the Hupoying fault and the Yangshuiwu fault provide the conjugate accommodation. The Baodi-Tongbaizhen transfer zone acted intensively in Es4 because of the maximum differential extension, and its active intensity decreased gradually in Es3-Es1. However, the transfer zone fell into weakening again in N-Q after strong reaction in Ed. Hydrocarbon source rocks and traps developed respectively in the strong and weak structural regions on the two sides of the transfer zone, and the transfer faults connected with source reservoirs, which

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技项目 (2014E-35)

作者简介: 周从安 (1965-), 男, 高级工程师, 物探专业。E-mail: boyaa@126.com

通讯作者简介: 赵利 (1988-), 男, 讲师, 地质学专业。E-mail: orchidy@126.com

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2018-02-23

范二平编辑

makes the area a favorable oriented region for oil and gas exploration.

Key words: transfer zone; differential extension; formation mechanism; Baodi-Tongbaizhen; the Jizhong Depression

构造变换带在伸展、挤压和走滑构造体系中普遍发育,且已有研究对其“在构造变形中保持区域上缩短量或伸展量守恒”这一基本特征具有统一认识^[1-4]。只是不同学者对变换带类型的划分标准有所不同, Morley 等根据主干断层倾向及相互叠置关系^[1],将变换带 (transfer zone) 划分了三类四型; Fauld 等根据主干断层产状以及相邻块体的运动方向,将调节带 (accommodation zone) 划分了八种类型^[2]。研究区冀中拗陷内变换带十分发育,约 4:1 的长宽比使得其在新生代伸展过程中表现出明显的分段性,进而使内部亚一级构造单元之间或二级构造带内产生调节带,以调节各构造单元的变形差异^[5-7]。冀中拗陷由南向北依次发育宝坻—桐柏镇、徐水—文安、衡水—无极三个一级变换带,以及众多二、三级变换带^[8]。已有学者对衡水—无极变换带、郑州变换带等进行了研究,并分析了变换带对油气成藏的控制作用^[7-8]。宝坻—桐柏镇变换带是调节富油气的廊固凹陷和大厂凹陷的一级变换带,已有研究对其调节作用多定性分析,缺少定量分析和成因机制解析^[5,7-8]。因此,文章立足于主干断层以及调节断层的几何学特征,根据断层落差和相邻区伸展构造演化,对宝坻—桐柏镇变换带进行定量分析,并结合油气勘探成果分析了变形带对成藏控制作用,以期进一步认识和理解冀中拗陷变换带特征。

1 地质背景

冀中拗陷位于渤海湾盆地西北部,北部毗邻燕山褶皱带,西侧为太行山隆起并以太行山东缘断裂为界,东侧为沧县隆起,南侧毗邻邢衡隆起,面积大约 28400 km² (见图 1)。区域内主要有宝坻—桐柏镇、徐水—文安、衡水—无极等构造变换带,将冀中拗陷划分成四个构造单元^[5]。其中廊固凹陷、霸县凹陷和饶阳凹陷油气资源丰富,被称为富油气凹陷,目前已在这三个凹陷中发现数量众多的各种类型的油气田。宝坻—桐柏镇变换带位于冀中拗陷北部,其西南是廊固凹陷,东南部是文安斜坡,东北部是武清凹陷,北部是大厂

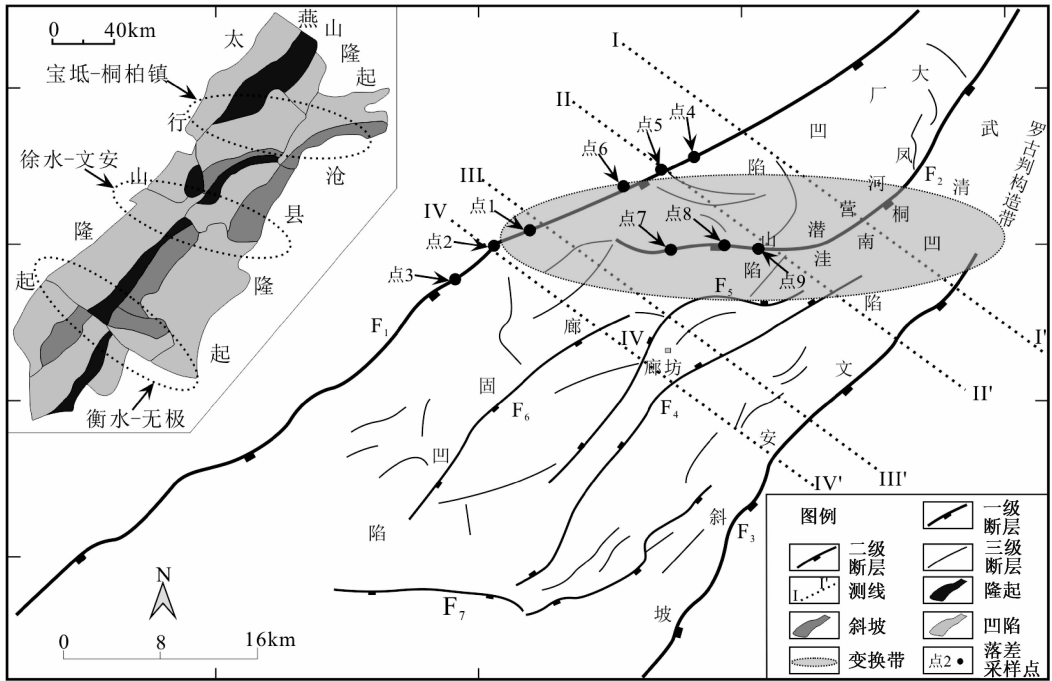
凹陷。研究区及临区发育的断裂主要有大厂—大兴断层、宝坻—桐柏镇断层、河西务断层、杨税务断层、琥珀营断层、旧州断层、永清断层等。西侧的大兴—大厂断层为一长期发展的深大断裂,属于区域拆离断层,控制了廊固凹陷、大厂凹陷等的沉积,而宝坻—桐柏镇断层、河西务断层等控制着桐南洼陷等次级构造单元的沉积。

研究区基底为太古界—下元古界构造层结晶基底,岩石经过多次混合岩化作用,还伴有混合花岗岩化作用;盖层包括中上元古界—古生界地台构造层、中生界褶皱构造层、古近纪拗陷构造层、新近纪拗陷构造层^[9]。中—新元古代地层开始褶皱,到长城纪晚期剥蚀夷平,形成统一的台地基底;蓟县运动使得区域抬升,随后接受广泛的海相沉积;加里东运动阶段,区域发生抬升剥蚀作用,沉积间断时间长达 1.4 亿年;印支运动和燕山运动,区内发生剧烈的褶皱运动,形成赞皇—冀中背斜,大部分地区遭受剥蚀,仅局部地区有沉积;古近纪是盆地的强烈断陷时期,该构造层发育了孔店组,沙河街组、东营组;新近纪早期,区域整体下沉进入盆地演化的拗陷阶段,喜马拉雅运动二期,研究区域成为统一的平原,拗陷与临区连为一体^[10]。

2 变换断层及附近控凹断裂几何学特征

宝坻—桐柏镇变换带主要由宝坻断层和桐柏镇断层组成,是北部廊固凹陷等断陷区与南部大厂凹陷、武清凹陷的分界断层,同时分割南部的大兴断层、河西务断层体系与北部的大厂断层体系等 (见图 1、图 2)。

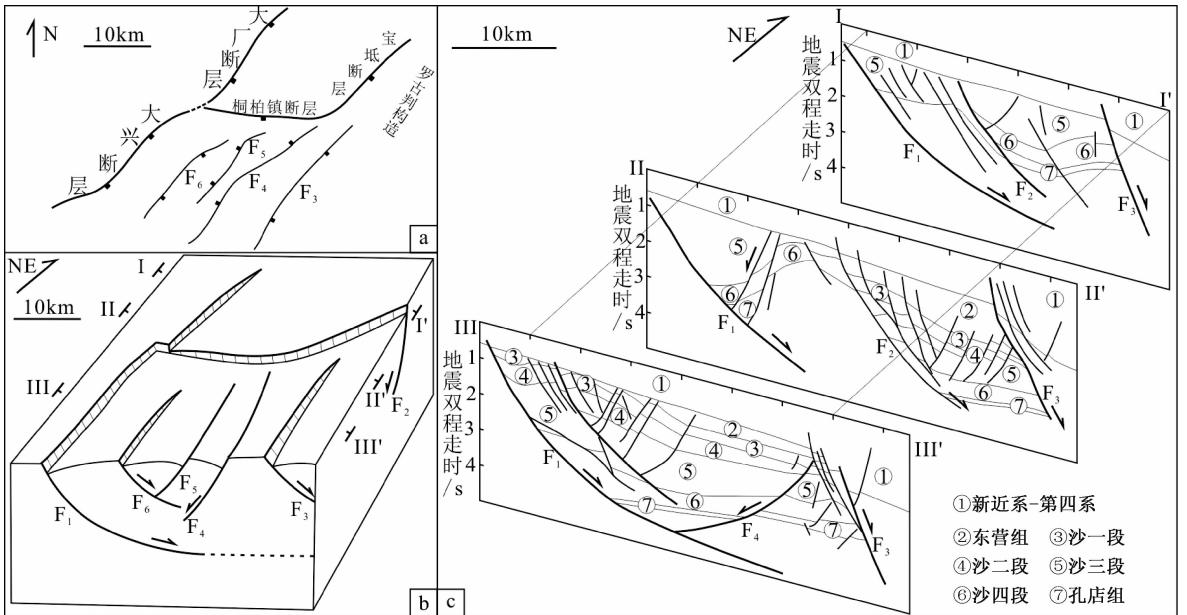
大兴断层是冀中拗陷的西边界断层,控制大兴凸起和廊固凹陷发育演化,对廊固凹陷内次级断层发育影响也很大。大兴断层整体呈北东走向延伸,长度达 70 km,是冀中拗陷最长的一条断层。该断层在研究区主要分为两段,在桐柏镇断层以北 (此段也叫大厂断层) 走向北东,是控制大厂凹陷的边界断层;在桐柏镇断层至固安之间



F₁—大厂—大兴断层; F₂—宝坻—桐柏镇断层; F₃—河西务断层; F₄—杨税务断层; F₅—琥珀营断层; F₆—旧州断层; F₇—永清断层

图1 宝坻桐柏镇变换带中生界底面发育的断裂

Fig. 1 Faults developed at Mesozoic bottom in the Baodi-Tongbaizhen transfer zone



F₁—大厂—大兴断层; F₂—宝坻—桐柏镇断层; F₃—河西务断层; F₄—杨税务断层; F₅—琥珀营断层; F₆—旧州断层

a—断裂平面展布图; b—变换带三维模式图; c—地震剖面解释图

图2 宝坻—桐柏镇变换带模式

Fig. 2 The pattern of the Bodi-Dongbaizhen transfer zone

走向北东向, 是控制廊固凹陷的边界断层。大兴断层倾角从北向南表现为由陡—缓—陡的特点, 主要控制古近纪较厚的地层沉积, 是廊固凹陷、大厂凹陷沉积的主控断层, 也是廊固凹陷伸展构

造系统的主干断裂 (见图 2a、2b)。北北东走向的河西务断层、杨税务断层等, 是东侧断阶区代表性正向、反向伸展断层, 控制着杨村斜坡区洼陷沉积和潜山变形, 是调节油气运移和成藏重要断层。

宝坻断层是大厂凹陷与武清凹陷的分界断层,北北东走向,倾向南东东;桐柏镇断层是凤河营潜山和桐南洼陷的分界断层,北北东走向,倾向南,倾角较陡,约 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。根据地地震剖面上宝坻—桐柏镇断层上、下盘地层厚度分析,该断层从古近纪早期开始发育,沙二段及之后活动加剧;上升盘沙一、沙二及沙三上、中段地层被剥蚀,下降盘地层保存完整(见图2c)。结合最新油气勘探成果分析,宝坻—桐柏镇断层对凤河营潜山带的形成起着控制作用,也是该区潜山带的主要油源断层和油气疏导断层^[11]。

根据上述平面、剖面几何学分析,宝坻—桐柏镇断层南北两侧构造变形不同,构造变形的三维组合关系符合Morley等^[1]的同向传递型变换带样式,具有调节北部大厂断层系和南部大兴断层系的几何学特征。其中,琥珀营断层、杨税务断层等对伸展起反向调节作用,河西务断层等对伸展起正向调节作用。

3 变换带运动学特征

3.1 断层落差

根据变换构造的几何学特征分析表明,变换

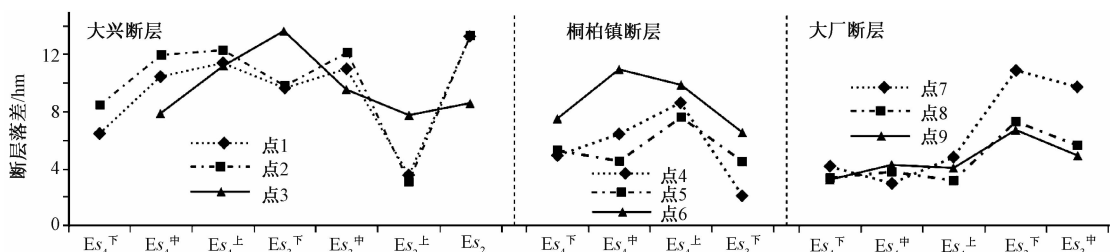


图3 变换带内主要断层落差(数据采样点见图1)

Fig. 3 Major faults throws in the transfer zone

3.2 变换带的平衡剖面恢复

宝坻—桐柏镇变换带的演化过程经历了多期次的构造叠加,发育了多条主干断层、变换断层和复杂的内部构造,为了恢复宝坻—桐柏镇变换断层带的演化过程,结合研究区构造背景综合分析,利用平衡剖面技术对优选的典型北西向II—II'、III—III'和IV—IV'测线剖面(位置见图1)进行了构造演化过程的恢复。根据恢复结果,计算了冀中富油凹陷内中生代、古近纪和新近纪时期的伸展量、伸展率和伸展速率,从而更好地反映研究区内构造发育特征和构造演化过程。

构造主要由主干断层、变换断层、变换带三个构造单元组成。而变换构造的定量研究主要从断层活动特征开始,进而开展相互差异方面分析。目前,断层活动特征的定量分析方法有很多,主要采用断层生长指数、断层落差、断层活性等参数^[12-14]。文章采用断层落差表征研究区断层活动特征,并对比主干断层活动差异及其与变换断层的匹配。其中,大兴断层、大厂断层按边界正断层,桐柏镇断层按生长正断层计算落差。

优选分析宝坻—桐柏镇变换断层带附近测线,计算大兴断层、大厂断层和桐柏镇断层各时期断层落差,结果表明:大厂断层在沙四期断层古落差为200~400 m,断层活动较弱,而在沙三早期断层落差最大,达到1000 m,活动性最强;大兴断层沙四期古落差比较大,落差约1000~1200 m左右,沙三中晚期减弱,至沙二期有所增强;宝坻—桐柏镇断层在沙四期活动较强,落差约600~1000 m,至沙三期则减弱至200~600 m(见图3)。

根据上述断层落差分析表明,边界大兴断层和大厂断层在沙四中晚期断层活动差异最大,沙三及后期活动差异逐渐减小。这与宝坻—桐柏镇断层的活动规律相吻合,表明边界主干断层与变换断层的活动具有时间匹配性。

计算结果表明:沙四期II—II'剖面与III—III'剖面的伸展量差异最大,为4.4 km,之后三条剖面中III—III'剖面与IV—IV'剖面伸展量差异最大,最大为沙三期的4.6 km;沙四期II—II'剖面与IV—IV'剖面的伸展率差异最大,为29.6%,伸展率整体表现为由北向南逐渐减小;沙四期II—II'剖面与III—III'剖面的伸展速率差异最大,且为39 m/Ma,之后三条剖面中III—III'剖面与IV—IV'剖面的伸展速率差异最大,最大为沙三期的92.9 m/Ma(见图4)。

根据上述定量分析表明,宝坻—桐柏镇变换

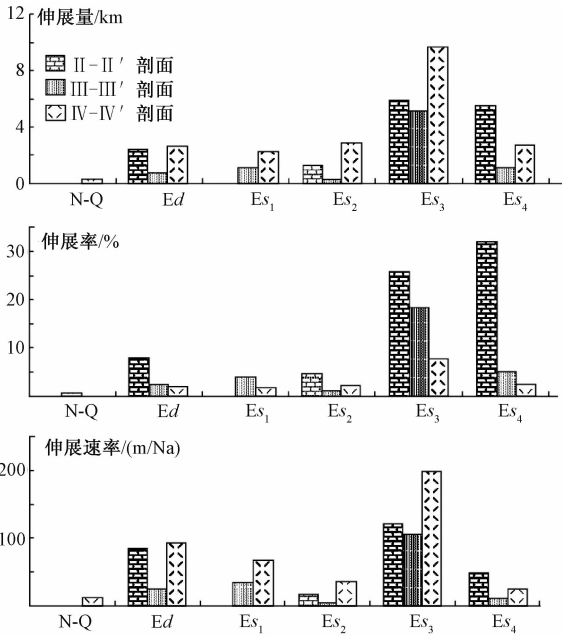


图4 II—II'、III—III'和IV—IV'测线平衡剖面的伸展量、伸展率和伸展速率

Fig. 4 The extensional amounts, rates and velocities of balanced sections in II - II', III - III' and IV - IV'

带在沙四期的伸展率差异最大, 但沙三期伸展量差异最大且活动最为强烈, 沙一—沙二期活动逐渐减弱, 东营期再次加强, 之后逐渐停止活动。这与上述大兴断层、大厂断层、宝坻—桐柏镇断层活动规律相吻合。据此推断, 变换带南北两侧凹陷的伸展差异, 促使该构造变换带的形成, 形成了不同的伸展域, 表明沙四、沙三期分别是宝坻—桐柏镇变换断层带的主要形成、发育时期。

4 变换带形成机制分析

(1) 左旋剪切期

晚侏罗世, 受北西西—南东东方向区域挤压应力, 同时叠加郟庐断裂左行走滑作用, 研究区发育具有走滑性质的北北东向逆冲断层和褶皱^[15-17]。早白垩世, 由于太平洋板块对欧亚板块俯冲方向的改变及区域挤压应力的消失, 研究区区域应力场转变为北西—南东向伸展, 大兴断层、大厂断层以及太行山前断层负反转并发育成边界控盆断层。由于冀中拗陷呈长轴状, 其内部为调节伸展差异而分成数段, 进而形成变换带雏形, 如宝坻—桐柏镇、徐水—文安、衡水—无极变换带等^[8,10]。同时受郟庐断裂的影响, 冀中拗陷发育

霸县—束鹿—邯郸深层张性走滑断层; 该断层在研究区内即为宝坻—桐柏镇断层的北北东段, 为后期的伸展断陷及变换调节作用奠定了基础^[8,16,18]。晚白垩世, 受太平洋板块俯冲方向和速率的改变影响, 中国东部应力场变为北西—南东向挤压, 研究区则抬升剥蚀^[16,19]。

(2) 孔店组沉积时期

古新世孔店组沉积时期, 软流圈大规模上涌、对流, 岩石圈于薄弱地带拉伸、减薄, 即在地壳拱曲最大处发生张性断裂^[18]。宝坻—桐柏镇变换断层带此时期继承性发育并开始向南扩展, 开始分割控制断层带两侧的构造特征。变换带北侧发育凤河营凸起, 南侧桐南洼陷开始沉积 (见图5)。

受太行山东缘隆起和大兴断层拆离作用的影响, 冀中拗陷西侧在剖面上呈现断块的翘倾活动, 其内河西务断层、杨税务断层、琥珀营断层等同步活动, 形成整体西断东隆特征。西侧为沉降的廊固凹陷、大厂凹陷等, 东侧为翘倾的牛驼镇凸起和河西务东凸起 (见图5)。

(3) 沙四—沙三段沉积时期

进入始新世沙四段沉积以后, 具有基底拆离特征的大兴—大厂断层及附近次级断层强烈活动, 使得北部 II—II'剖面 and 南部 III—III'剖面强烈伸展了 11.4 km 和 6.3 km, 占新生代总伸展量的 75.6% 和 74.5% (见图4、图5)。此时, 研究区及整个冀中拗陷进入强烈裂陷时期。该时期的强烈构造活动及 1.8:1 的伸展量差, 必然使得北北东走向的宝坻—桐柏镇断层扩展发育北东东走向段, 以分割、调节其南北两侧的伸展差异, 同时奠定了该变换带构造格局。

(4) 沙二—沙一段沉积时期

始新世晚期沙二—沙一段沉积期, 研究区断层落差和剖面伸展量较前期明显减小, 结合平衡剖面分析表明构造变形继承性发育且逐渐减弱 (见图4、图5)。该时期的廊固凹陷、大厂凹陷, 及大兴断层、大厂断层活动趋于平稳, 宝坻—桐柏镇变换带活动逐渐减弱。

(5) 东营组沉积时期

自沙一段晚期, 构造运动形式发生了重大改变, 在断裂活动整体上有所减弱的前提下, 凹陷东部地区仍然有断裂活动, 而西部地区则呈现整体抬升, 形成西高东低, 西隆东陷的构造格局。在宝坻—桐柏镇变换带的控制下, 凤河营凸起继续

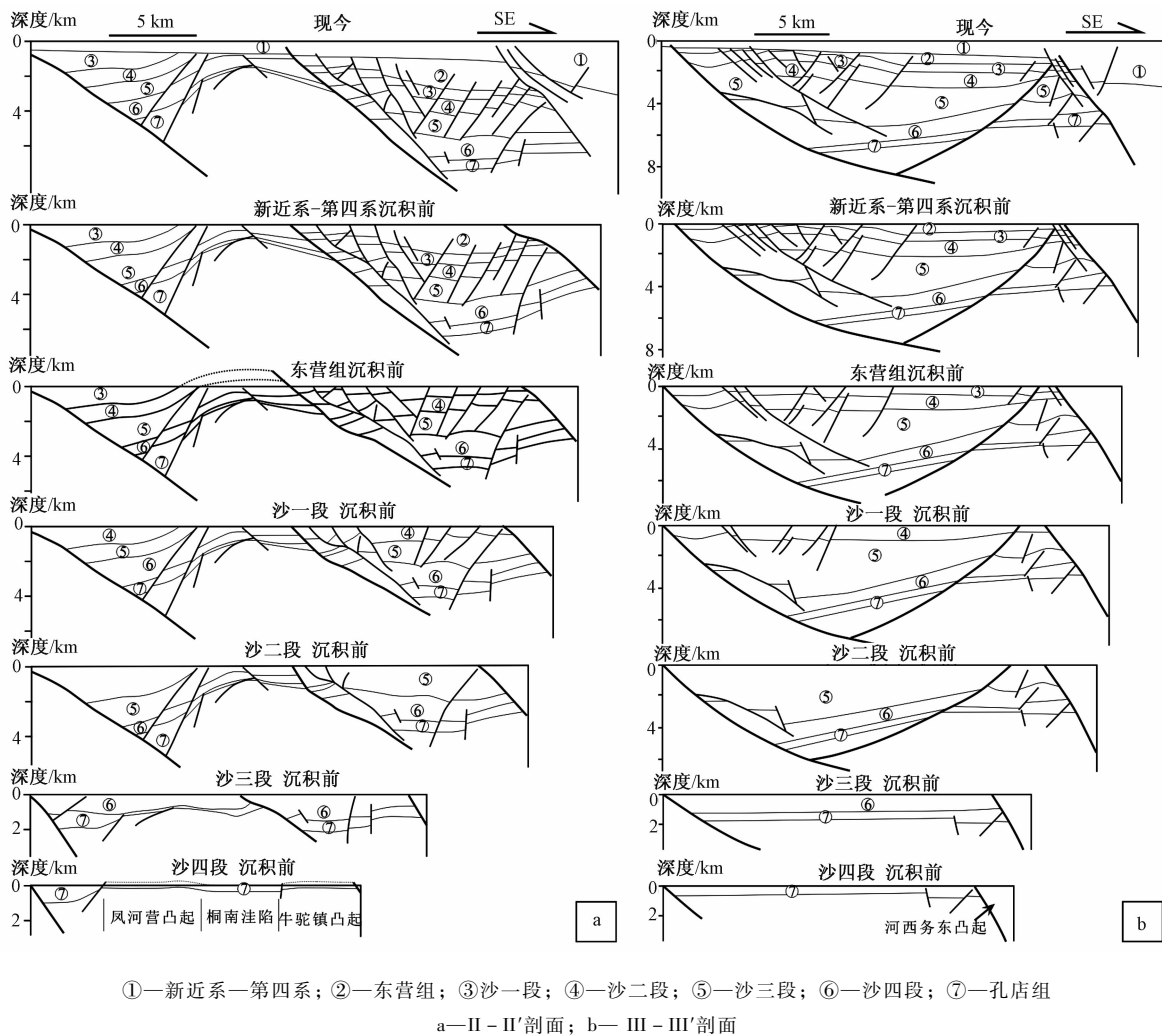


图5 研究区主测线剖面构造演化

Fig. 5 The structural evolution of crossline sections

隆升, 桐南洼陷继续沉积。

受太行山隆起的影响, 陆源碎屑向凹陷内补给充足, 沉积速率大于沉降速率, 呈明显的过补偿状态, 中—晚期已经在全区趋于平原化, 东营组末期的反转隆起导致全区大范围内处于受剥蚀状态, 残留部分的面积较小。

(6) 明化镇组—第四系沉积时期

进入新近纪, 区内仍接受剥蚀, 中新统馆陶组未发育。之后, 廊固凹陷断裂活动趋于停止或大为减弱, 宝坻—桐柏镇变换带变形作用亦趋于平静。渤海湾盆地整体进入热沉降阶段, 研究区沉积明化镇组和第四系。

5 变换带对油气成藏的控制作用

综上所述, 变换带的产生是两侧凹陷差异

伸展的结果。在这个过程中, 伸展强烈的一侧会相对形成洼陷, 多沉积发育烃源岩; 而在另一侧形成构造高部位, 形成低凸起或潜山。此处的变换断层多长期活动, 一般具有高渗透性, 可为油气二次运移提供高流体势, 使油气从洼陷向低凸起或潜山垂向运移, 而非沿输导层侧向运移到斜坡带。此外, 变换带还是砂体进入凹陷的通道, 故其储层砂体和疏导砂体非常发育。所以, 当这些低凸起或潜山附近具备圈闭条件时, 油气会在此聚集成藏。初步勘探发现, 研究区东北部的罗古判构造带位于武清—杨村凹坡转折带地区, 发育一个正向构造, 其西侧为武清凹陷南部的洼陷区, 西侧深部发育的一条西倾正断层可有效沟通洼陷区和正向构造(见图1、图2)。因此, 该区域是潜山型油气聚集、勘探有利区。

6 结论

(1) 根据构造几何学特征和调节带构造理论认为,宝坻—桐柏镇变换带属于同向传递型,内部构造样式为地垒和变换断层,而琥珀营断层、杨税务断层等对其起反向调节作用。

(2) 根据断层落差和构造平衡剖面分析表明,沙四期变换带南北两侧伸展差异最大,沙三期强烈活动并构造定型,沙二—沙一时期继承性发育并迅速减弱,东营期活动再次变强,之后衰亡,构造活动呈现出阶段式减弱的趋势。

(3) 综合区域构造分析表明,宝坻—桐柏镇变换带形成于大厂—武清凹陷与廊固凹陷的伸展差异,其构造变形与控凹断层的活动具有时空匹配性;并与徐水—文安、衡水—无极变换带将长轴状的冀中拗陷分为四段,同属于调节构造。

(4) 油气勘探研究表明,变换带两侧的强、弱构造域分别发育烃源岩和圈闭,而变换断层则沟通源储,故该区域是油气勘探的有利指向区。

参考文献/References

- [1] Morley C K, Nelson R A, Patton T L. Transfer zones in the east African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (8): 1234 ~ 1253.
- [2] Faulds J E, Varga R J. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terrains [A]. Faulds J E, Stewart J H. Accommodation Zones and Transfer Zones: The Regional Segmentation of the Basin and Range Province [C]. Colorado: Geology Society of America, 1998, 1 ~ 45.
- [3] Dahlstrom C D A. Balanced cross sections [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6 (4): 743 ~ 757.
- [4] 漆家福, 杨桥. 伸展盆地的结构形态及其主控动力学因素 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28 (5): 634 ~ 640.
QI Jiafu, YANG Qiao. Structural styles of extensional basins and their main controlling factors of dynamics [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28 (5): 634 ~ 640. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨明慧, 刘池阳, 杨斌谊. 冀中拗陷中生代构造变形的转换及油气 [J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25 (2): 113 ~ 119.
YANG Minghui, LIU Chiyang, YANG Binyi. Tectonic transform of the Mesozoic and their relations to hydrocarbon traps in the Jizhong (central Hebei province) basin, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25 (2): 113 ~ 119. (in Chinese with English abstract)
- [6] 时秀朋. 鲁西地区晚中生代以来伸展断裂系统研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2010, 1 ~ 120.
SHI Xiupeng. Late Meso-Cenozoic extensional fault system in Western Shandong [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010, 1 ~ 120. (in Chinese with English abstract)
- [7] 劳海港, 吴孔友, 陈清华, 等. 冀中拗陷鄯州变换带演化特征及控藏作用 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2012, 36 (5): 12 ~ 19.
LAO Haigang, WU Kongyou, CHEN Qinghua, et al. Evolution characteristics of Maozhou transition zone and its control function of reservoirs forming in Jizhong depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36 (5): 12 ~ 19. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李理, 王晶. 冀中拗陷衡水—无极构造变换带的特征及其成因机制 [J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41 (1): 69 ~ 76.
LI Li, WANG Jing. Characteristics and mechanism of Hengshui-Wuji transfer zone in Jizhong depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41 (1): 69 ~ 76. (in Chinese with English abstract)
- [9] 董大伟, 李理, 刘建, 等. 冀中拗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. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨明慧, 刘池阳, 孙冬胜, 等. 冀中拗陷的伸展构造系统及其构造背景 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26 (2): 113 ~ 120.
YANG Minghui, LIU Chiyang, SUN Dongsheng, et al. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong basin, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, 26 (2): 113 ~ 120. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱洁琼, 崔秀梅, 崔庆庆, 等. 凤河营潜山成藏条件再认识及勘探潜力分析 [J]. 中国石油勘探, 2012, 17 (6): 58 ~ 63.
ZHU Jieqiong, CUI Xiumei, CUI Qingqing, et al. The recognition and exploration analysis of hydrocarbon accumulation in Fengheying buried hill [J]. Petroleum Exploration in China, 2012, 17 (6): 58 ~ 63. (in Chinese)
- [12] 郑德顺, 吴智平, 李伟, 等. 济阳拗陷中、新生代盆地转型期断裂特征及其对盆地的控制作用 [J]. 地质学报, 2005, 79 (3): 386 ~ 394.
ZHENG Deshun, WU Zhiping, LI Wei, et al. Faults and their control on the basin during the transfer stage of the Jiyang depression in the Mesozoic-Cenozoic [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79 (3): 386 ~ 394. (in Chinese with English abstract)
- [13] 衣学磊, 侯贵廷. 济阳拗陷中、新生代断裂活动强度研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2002, 38 (4): 504 ~ 509.

- YI Xuelei, HOU Guiting. A study of intensity of the faults activity in Jiyang depression in Mesozoic and Cenozoic [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2002, 38 (4): 504 ~ 509. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张鹏, 王良书, 丁增勇, 等. 济阳坳陷中—新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27 (4): 467 ~ 474.
- ZHANG Peng, WANG Liangshu, DING Zengyong, et al. Characteristics and formation mechanism of the faults in Mesozoic-Cenozoic in Jiyang depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27 (4): 467 ~ 474. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董树文, 李廷栋, 钟大赟, 等. 侏罗纪/白垩纪之交东亚板块汇聚的研究进展和展望 [J]. *中国科学基金*, 2009, 23 (5): 281 ~ 286.
- DONG Shuwen, LI Tingdong, ZHONG Dalai, et al. Recent progress and perspective of the research on J-K east Asian multi-direction convergent tectonics [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2009, 23 (5): 281 ~ 286. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李理, 赵利, 刘海剑, 等. 渤海湾盆地晚中生代—新生代伸展和走滑构造及深部背景 [J]. *地质科学*, 2015, 50 (2): 446 ~ 472.
- LI Li, ZHAO Li, LIU Haijian, et al. Late Mesozoic to Cenozoic extension and strike slip structures and deep background of Bohai Bay basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50 (2): 446 ~ 472. (in Chinese with English abstract)
- [17] 朱光, 胡召齐, 陈印, 等. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地的发育过程及其对克拉通破坏的指示 [J]. *地质通报*, 2008, 27 (10): 1594 ~ 1604.
- ZHU Guang, HU Zhaoqi, CHEN Yin, et al. Evolution of Early Cretaceous extensional basins in the eastern North China craton and its implication for the craton destruction [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (10): 1594 ~ 1604. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵利, 李理. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制 [J]. *中国地质*, 2016, 43 (2): 470 ~ 485.
- ZHAO Li, LI Li. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic-Cenozoic [J]. *Geology in China*, 2016, 43 (2): 470 ~ 485. (in Chinese with English abstract)
- [19] 任建业, 于建国, 张俊霞. 济阳坳陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用 [J]. *地学前缘*, 2009, 16 (4): 117 ~ 137.
- REN Jianye, YU Jianguo, ZHANG Junxia. Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (4): 117 ~ 137. (in Chinese with English abstract)