

王琦,孙永河,付晓飞,等. 冀中坳陷南部中—新生代构造转换及其油气地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 447–460. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220175.

Wang Qi, Sun Yonghe, Fu Xiaofei, et al. Mesozoic – Cenozoic Tectonic Transition and Its Significances for Petroleum Exploration in the Southern Jizhong Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 447–460. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220175.

冀中坳陷南部中—新生代构造转换 及其油气地质意义

王琦^{1,2}, 孙永河^{2,3}, 付晓飞^{1,2}, 张万福⁴, 李熹微⁵, 王有功^{1,2}, 彭贤锋⁴

1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318
2. “油气藏及地下储库完整性评价”黑龙江省重点实验室, 黑龙江 大庆 163318
3. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331
4. 东方地球物理公司研究院地质研究中心, 河北 涿州 072751
5. 中国石油华北油田公司勘探部, 河北 任丘 062552

摘要: 为了分析冀中坳陷南部中—新生代构造转换机制及其与油气分布的关系, 基于地震解释资料, 对该区地质结构特征、构造演化及构造转换过程进行研究, 并对其油气地质意义进行了探讨。结果表明: 冀中坳陷南部衡水调节带两侧地质结构存在明显差异, 北部为“双断—双向滑脱—背倾半地堑”结构, 南部为“多断—单向滑脱—复式半地堑”结构; 冀中坳陷南部地区中—新生代构造演化大致分为基底演化(中生代)、初始裂陷演化(孔店组—沙四段沉积时期)、强裂陷演化(沙三段—沙二段沉积时期)、弱裂陷演化(沙一段—东营组沉积时期)及后裂陷演化(馆陶组沉积时期以来)5个阶段; 冀中坳陷南部经历了基底 NNE 向构造体系向新生代 NE 向构造体系的转换, 区域中—新生代以来应力场变化是冀中坳陷多方位复杂构造形成的原因; 冀中坳陷南部构造转换作用通过影响洼槽迁移进而影响有效烃源岩分布, 通过控制砂体入盆通道影响储层砂体展布, 构造变换过程中主干断层位移梯度变化导致横向背斜形成指示油气富集的有利部位。构造体制转换形成的不同规模变换构造具有一定勘探潜力。

关键词: 渤海湾盆地; 冀中坳陷; 断层活动性; 构造转换; 构造演化; 油气分布

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220175

中图分类号: P618.13; TE12

文献标志码: A

Mesozoic – Cenozoic Tectonic Transition and Its Significances for Petroleum Exploration in the Southern Jizhong Depression

Wang Qi^{1,2}, Sun Yonghe^{2,3}, Fu Xiaofei^{1,2}, Zhang Wanfu⁴, Li Xiwei⁵,

收稿日期: 2022–06–13

作者简介: 王琦(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事含油气盆地地震解释及构造控藏作用方面的研究, E-mail: wangqi7391@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172162); 黑龙江省优秀青年人才支持项目(140119002); 中国石油科技创新基金(2020D–5007–0108)

Supported by the National of Nature Science Foundation of China (42172162), the Project of Excellent Young Talents in Heilongjiang Province (140119002) and the Innovation Found of CNPC(2020D–5007–0108)

Wang Yougong^{1,2}, Peng Xianfeng⁴

1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China

2. Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir and Underground Gas Storage Integrity Evaluation of Heilongjiang Province, Daqing 163318, Heilongjiang, China

3. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

4. Geological Research Center of Research Institute, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou 072751, Hebei, China

5. Exploration Department of Huabei Oilfield Company, CNPC, Renqiu 062552, Hebei, China

Abstract: In order to analyze the Mesozoic-Cenozoic tectonic transition and its significance for oil and gas distribution in the southern Jizhong depression, based on seismic data, geological structure characteristics, structure evolution and tectonic transfer of the southern Jizhong depression are analyzed, at the same time, the geological significance for petroleum exploration are discussed. The study shows the differences in the geological structure and evolution on the two sides of the Hengshui accommodation zone (HAZ). The northern part of the HAZ is characterized by a half-graben controlled by double detachment faults with opposite dips, and the southern part of the HAZ is characterized by a compound half-graben controlled by a single detachment fault with multiple faults. The Mesozoic-Cenozoic evolution of the southern Jizhong depression can be divided into the following five periods: basement evolution stage (Mesozoic), initial rift evolution stage ($E_k - E_s^4$), strong rift evolution stage ($E_s^3 - E_s^2$), weak rift evolution stage ($E_s^1 - E_d$) and post-rift evolution stage (after N_g). The southern Jizhong depression has experienced a tectonic transition from basement NNE structural systems to Cenozoic NE systems, and the change of the stress field during the Mesozoic to Cenozoic is the dynamic reason for the formation of multi-directional complex structures. The Cenozoic transition affects the distribution of effective source rocks by affecting the migration of troughs, and influences reservoir sand distribution by controlling sand entry channels. The gradient change of displacement of main faults during structural transformation results in transverse anticline forming a favorable position indicating oil and gas enrichment. The transform structures formed by the tectonic transfer in different scales have a certain exploration potential.

Key words: Bohai Bay basin; Jizhong depression; fault activity; tectonic transition; structural evolution; hydrocarbon distribution

0 引言

盆地构造转换是盆地演化过程中普遍存在的现象,主要由区域应力场方向变化引起。这种构造转换控制着复杂断层的发育^[1-2]、盆地地层的沉积充填^[3]、圈闭的发育及流体的运移^[4]等。盆地经历单期伸展,可形成与伸展方向接近正交的正断层^[5],而大多数盆地都经历了多期非共轴的伸展变形,断裂发育特征复杂,如渤海湾盆地^[6-9]、北海盆地^[10-12]、泰国湾盆地^[13]及东非裂谷盆地^[14]等。复杂裂陷盆地多期次的构造转换已经成为盆地构造领域研究的热点。近年来,构造转换形成各类变换构造的理论已经广泛应用于盆地构造变形的研究中^[15-19],勘探实践中相继发现许多与变换构造有关的油气田,证

实变换构造是油气富集的有利部位^[20-22]。

我国东部渤海湾盆地受多期构造活动控制,新生代广泛发育 NNE—NE 向的伸展构造及 NW 向的调节带,这种多方位构造分割了盆地,控制了盆地的形成和演化,造成了盆内结构的差异^[19]。冀中坳陷作为渤海湾盆地西部的一个重要的断陷,受不同走向、不同性质基底先存断层及多期构造演化的影响,发育复杂的构造样式,其中,南部地区构造演化主要受 NW 向衡水调节带控制^[23-26]。近年来,勘探已经证实,冀中坳陷南部地区剩余资源量丰富,多口井获得了规模储量,展示了良好的勘探潜力。但是该区构造样式较为复杂,特别是衡水调节带两侧地层结构、断层组合差异明显,油气分布规律不清,并且多方位断层的成因机制、构造演化过程及衡水调

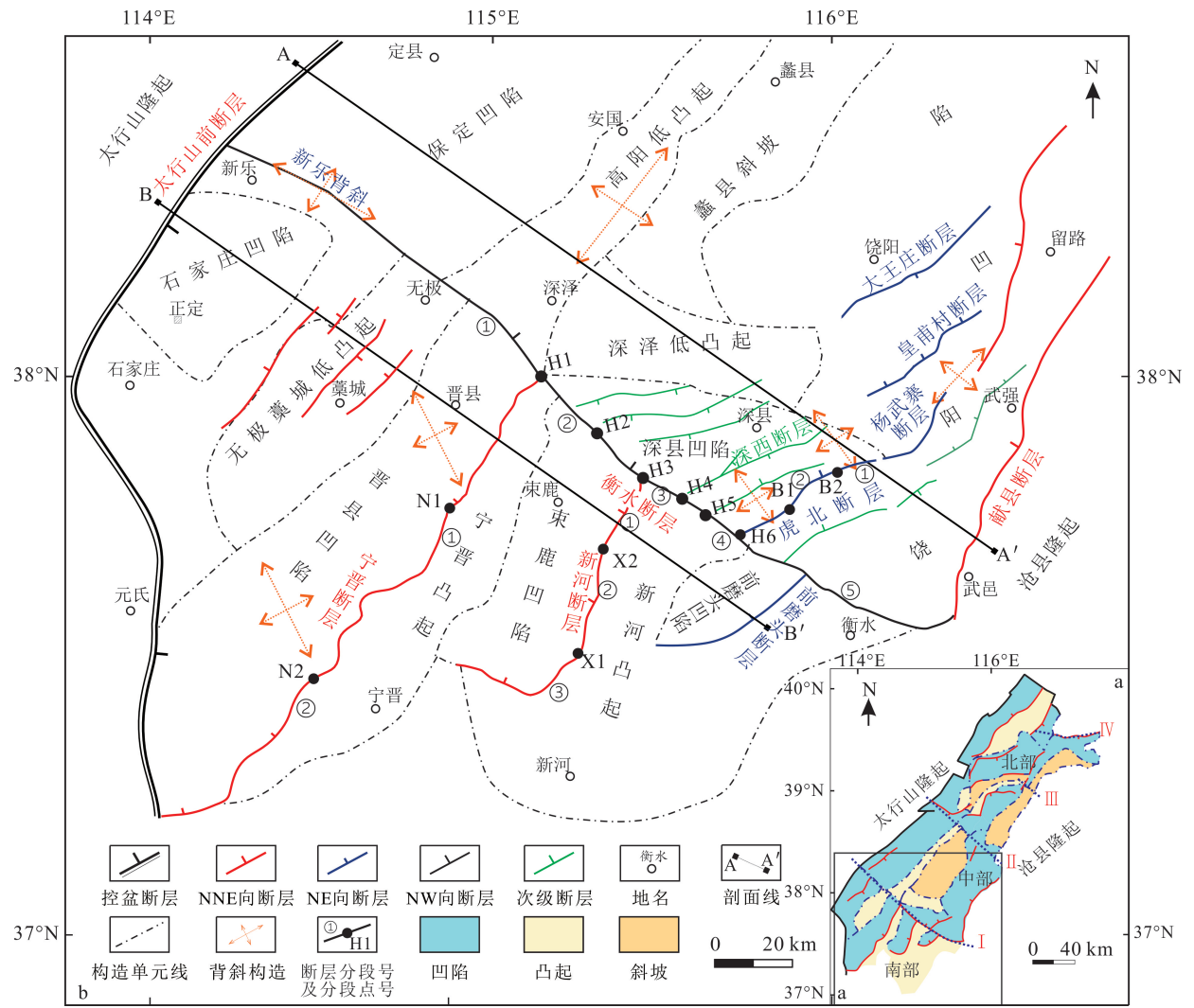
节带与邻区之间的相互作用关系等有待进一步明确,制约了该区的下一步勘探。本文通过对冀中拗陷南部构造特征的分析 and 断层活动时期的厘定,明确多方位断层的变形特征及成因机制,建立中—新生代构造演化过程及构造变换模式,以期揭示多期构造转换与油气分布的关系,为该区油气勘探提供借鉴和指导。

1 区域地质背景

渤海湾盆地位于华北克拉通陆内中心。华北克拉通受周围造山带和板块活动的影响,经历了太古宙以来的陆块形成、裂解、拼接;稳定的华北克拉通形成于古元古代末期^[27];中、新元古代—古生代,华

北克拉通内部整体以稳定的升降为主^[28];晚古生代—早中侏罗世,南北两侧大洋关闭,板块边缘碰撞,开始挤压造山,盆地内发育 EW 走向逆冲构造;中—新生代以来,受太平洋构造域的影响^[29-32],渤海湾盆地经历多期的构造变形及转换,最终形成了现今盆地复杂的格局。

冀中拗陷位于渤海湾盆地西北部,由多条横向构造带分割为北部、中部和南部地区。冀中拗陷南部地区共发育 13 个构造单元,包括保定凹陷、高阳低凸起、蠡县斜坡、饶阳凹陷、深泽低凸起、深县凹陷、石家庄凹陷、无极藁城低凸起、晋县凹陷、宁晋凸起、束鹿凹陷、新河凸起及前磨头凹陷等(图 1)。构造单元走向以 NNE、NE 向为主,中部发育一条 NW



I. 衡水调节带; II. 徐水调节带; III. 里澜调节带; IV. 宝坻—桐柏镇调节带。

图 1 冀中拗陷构造(a)及冀中拗陷南部地区构造单元(b)图

Fig.1 Jizhong depression tectonic unit (a) and its southern tectonic framework map (b)

向衡水断层^[19],其对两侧构造单元起到明显的分隔作用。

冀中拗陷南部地区整体发育在前新生界基底之上,新生界自下而上包括古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed)、新近系馆陶组(Ng),其中古近系是冀中拗陷重要的富油气层系,岩性以陆相碎屑岩为主(图 2)。

2 构造特征

2.1 地层结构特征

研究区广泛发育不同级别的断层,其中一级断

层包括太行山前断层、献县断层、新河断层、宁晋断层、衡水断层等控拗断层,同时,受主干断层控制,还发育多条二级断层,如前磨头断层、虎北断层、杨武寨断层、皇甫村断层、大王庄断层等,另外在拗陷内发育多条次级断层控制局部构造带。

受主干断层差异的影响,衡水断层南北两侧盆地结构存在明显的差异,从南北两侧的区域骨架剖面(图 3)可以看出:衡水断层东北部为“双断-双向滑脱-背倾半地堑”结构(图 3a),西侧太行山前断层上盘控制西断东超的保定凹陷,孔店组—沙二段靠近断层厚度较大,沙一段以来沉积受断层影响较

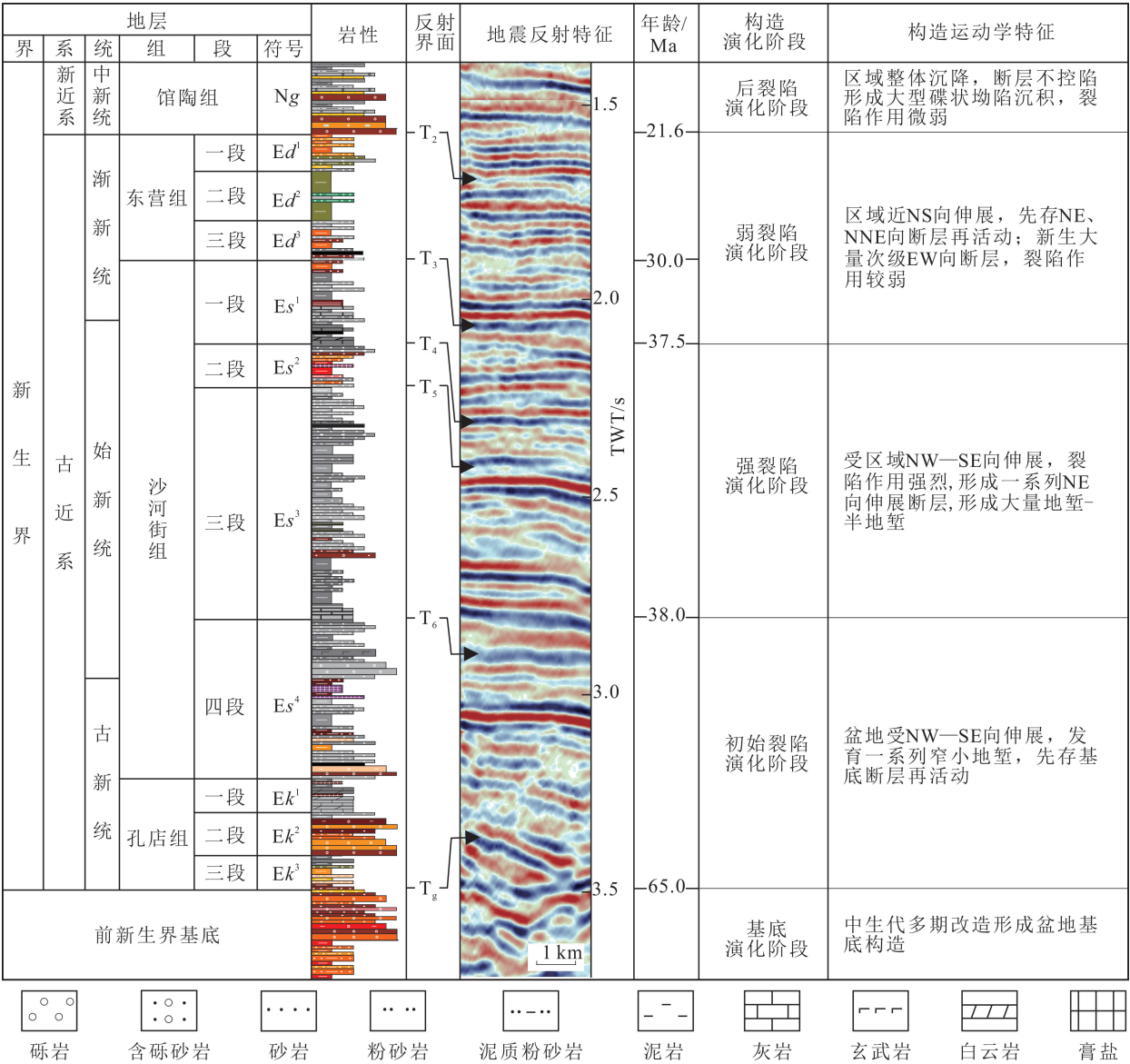
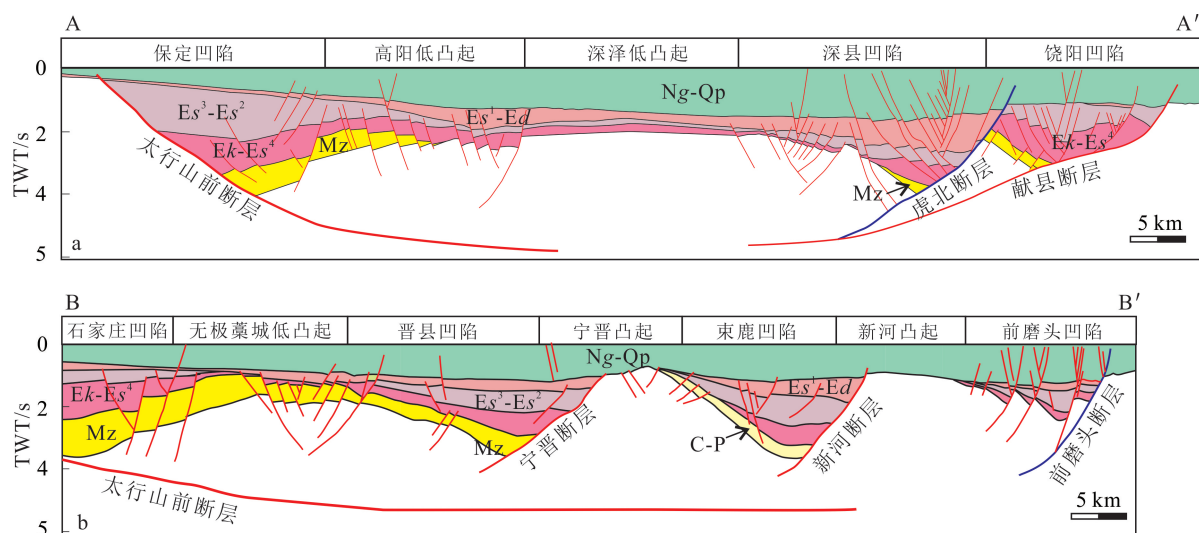


图 2 冀中拗陷南部地区地层发育、构造演化阶段及构造变形特征

Fig.2 Stratigraphic development, tectonic evolution stages and structural characteristics in southern Jizhong depression



a. 衡水断层东北部; b. 衡水断层西南部。Mz, 中生界; Qp, 第四系。

图3 冀中坳陷南部地区典型地质剖面

Fig.3 Typical geological profile of southern Jizhong depression

小,表明太行山前断层在古新世—始新世发生了强烈的伸展变形,渐新世以来断层活动明显减弱;东侧献县断层上盘古近系厚度向西逐渐减薄,说明古近纪献县断层控制地层的沉积,同时上盘产生大量三、四级调节断层,相比于西侧,东侧次级断层发育数量较多;东、西两个半地堑呈背倾特征,太行山前断层和献县断层作为边界大断层向下收敛于深部同一滑脱层,中部地区受两侧对倾的边界断层滑动影响,西翼陡、东翼缓,核部古近系薄、两翼逐渐增厚,反映其与古近纪两侧断层强烈伸展有关。

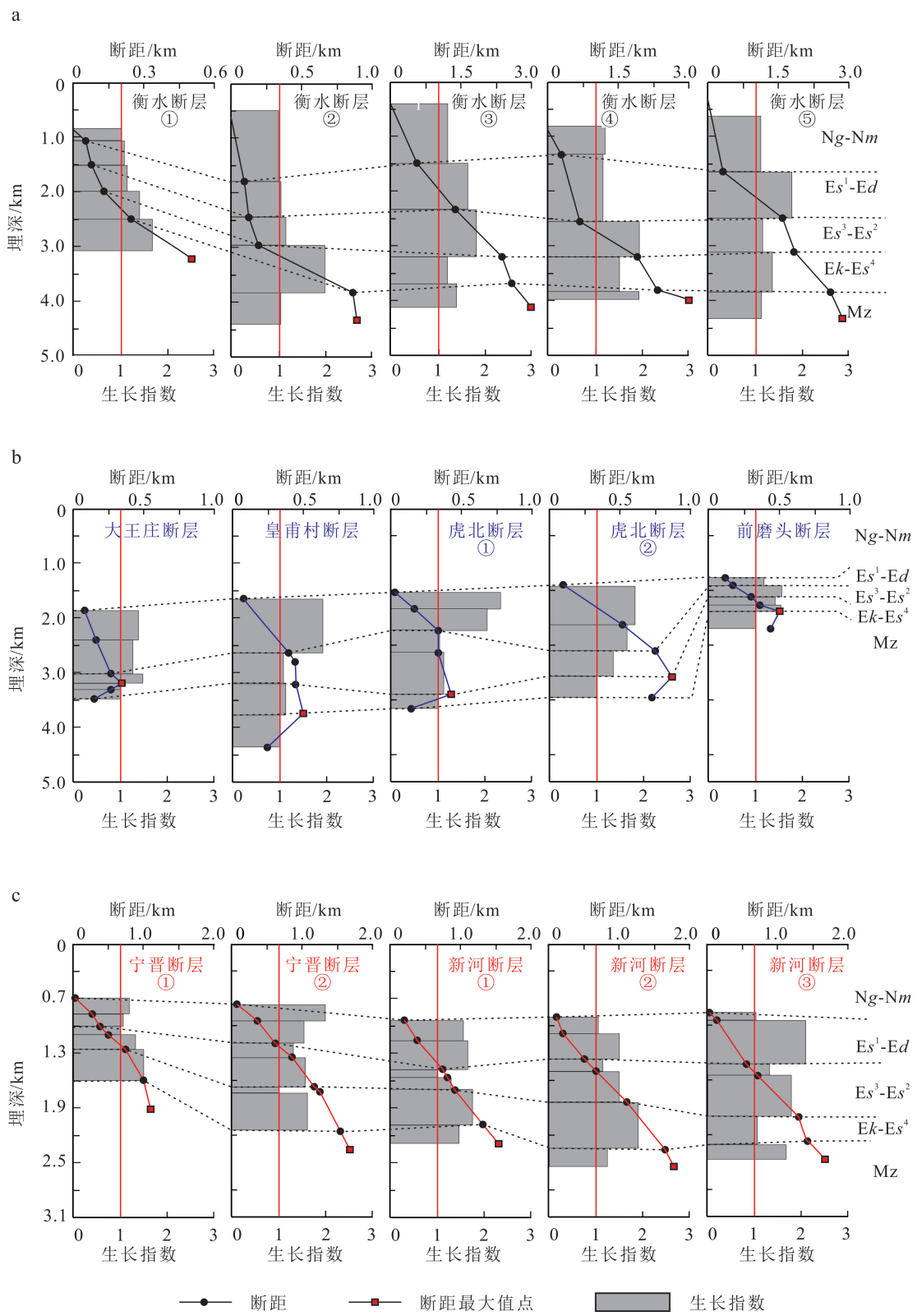
衡水断层西南部整体为“多断—单向滑脱—复式半地堑结构”(图 3b),西侧太行山前断层控制整体结构,同时发育宁晋断层、新河断层及前磨头断层等西倾的二、三级断层,这些断层向下收敛于太行山前断层面之上,并控制晋县凹陷、束鹿凹陷、前磨头凹陷等箕状半地堑发育;此外衡水断层南部次级断层广泛发育,西侧次级断层多分布于无极藁城低凸起上,这些断层向下断至基底,上部多终止于古近系内,结合地层厚度及断层活动性,认为这些断层为中生代产生。东侧次级断层主要发育在古近系—第四系凹陷内,主要为二、三级控凹断层新生代活动伴生的次级断层。古近系分布于各箕状半地堑内,并明显受控于控凹断层,凹陷之间分别发育无极藁城低凸起、宁晋凸起及新河凸起,呈现“凹凸相间”结构;新近系—第四系整体沉积在古近系盆地之上,构成现今复式半地堑构造格局。

2.2 主干断层活动性

本文采用断距—埋深曲线法、生长指数(EI)等方法^[33-34]分析正断层活动性。断距—埋深曲线法是通过建立断层垂直断距与埋深的变化关系曲线来反映断层的生长过程,曲线中断距最大值点代表断层成核点,断距—埋深曲线斜率变化反映断层活动快慢。生长指数法反映断层活动强弱,EI是指正断层上盘与下盘同一地层厚度的比值,若 $EI > 1$,表明断层发生了同沉积活动,且EI值越大活动越强,同沉积作用越明显;若 $EI \leq 1$,则表明断层不活动。

图4为研究区不同走向主干断层断距—埋深曲线及生长指数统计图。其中:NW走向的衡水断层(图4a)成核点(断距最大值点)位于基底地层中,且向上断距逐渐减小,EI值在沙河街组沉积时期较大,说明衡水断层是一条基底形成、新生代以来长期活动的主干断层。NE走向的大王庄断层、皇甫村断层、虎北断层及前磨头断层(图4b)成核点大多位于孔店组—沙四段,并且向上和向下断距均逐渐降低,说明这些断层在孔店组—沙四段沉积时期形成;EI值在沙一段—东营组较大,说明该时期活动强烈。而NNE走向的宁晋断层、新河断层(图4c)成核点位于前新生代基底地层,断距向上减小;表明断层在基底成核并且长期活动,沙三段—沙二段EI值较大,表明沙三段—沙二段经历强烈活动。

断层活动性分析结果表明:NW、NNE向主干断层在前新生代基底时期成核,新生代以来持续活



a. NW 向主干断层(衡水断层); b. NE 向主干断层; c. NNE 向主干断层。Nm. 明化镇组。

图 4 冀中拗陷南部地区不同走向主干断层断距-埋深曲线及生长指数统计图

Fig.4 Throw vs. depth plots and expansion index for main faults with different trends in southern Jizhong depression

动;而 NE 走向的主干断层形成于孔店组—沙四段沉积时期,后持续活动;以上主干断层在新生代均长期活动,但 NNE 走向断层和 NW 向衡水断层形成早于 NE 走向主干断层。

2.3 主干断层分段生长特征

自然界中大型断层通常是由多条小断层分段连接而成,断层分段生长形成的局部变换构造为油气

聚集成藏提供了有利的圈闭条件^[35-36]。断距-距离曲线通过沿断层走向统计同一层位断层垂直断距的变化来表征断层的分段性,曲线中极小值点代表断层分段点。本次研究以衡水断层、虎北断层、新河断层、前磨头断层为例(图 5),分析不同走向断层分段性。

通过衡水断层断距-距离曲线(图 5a)可以看出,曲线存在三个极小值点(对应 H3、H4、H6 三个

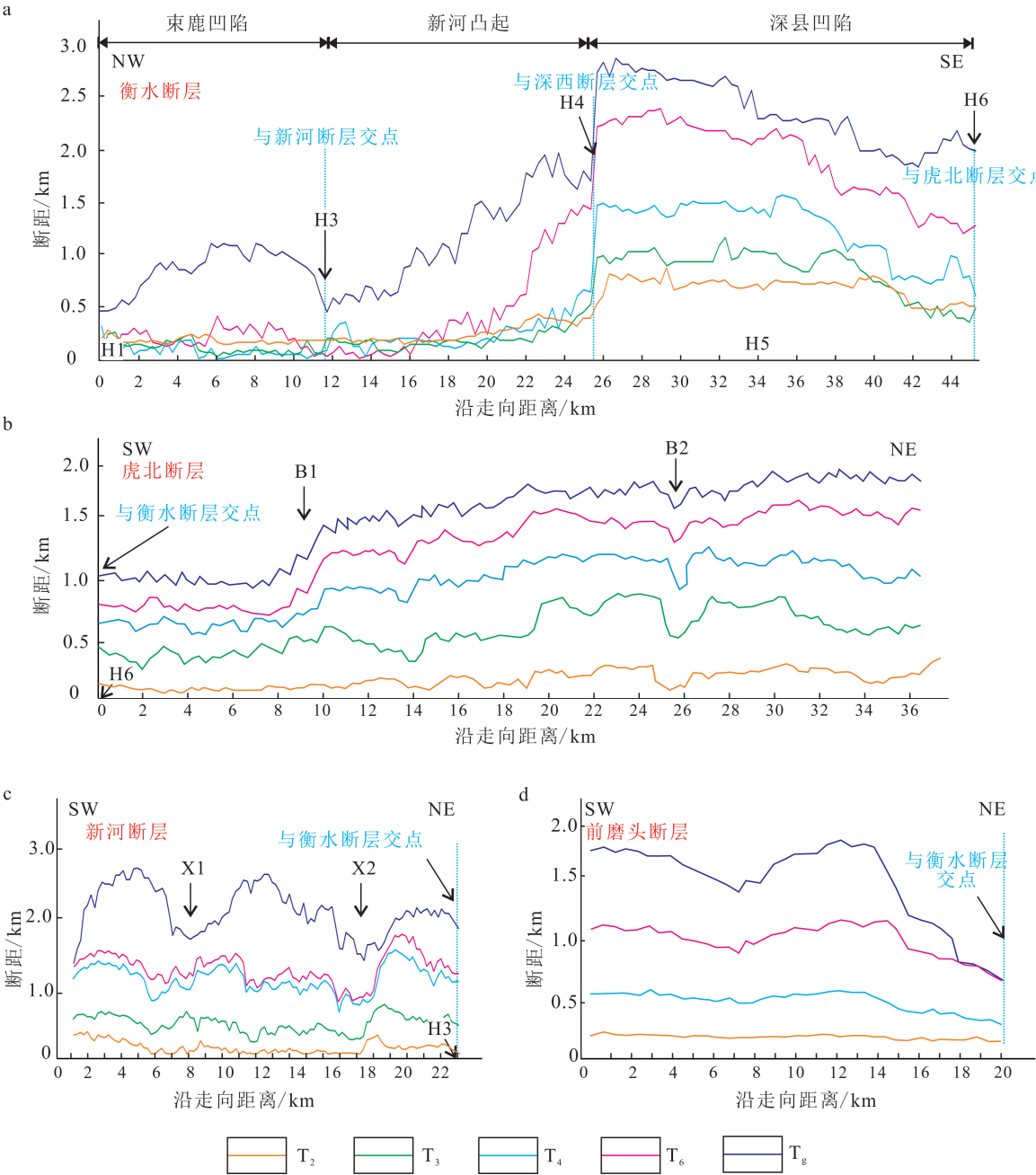


图 5 衡水断层(a)、虎北断层(b)、新河断层(c)和前磨头断层(d)的断距-距离曲线
Fig.5 Throw vs. distance plots for the Hengshui (a), Hubei (b), Xinhe (c) and Qianmotou (d) faults

分段点),其中 H3 点为新河断层与衡水断层交点, H4 点为深西断层与衡水断层交点, H6 点为虎北断层与衡水断层交点,虎北断层以东为一个完整段。因此衡水断层可以分为 4 个亚段,即束鹿亚段(H1—H3)、新河亚段(H3—H4)、深南亚段(H4—H6)及孙虎亚段(H6 以东),衡水断层这种分段性的特征是其两侧多方位断层相互作用的结果。

虎北断层的断距-距离曲线(图 5b)存在两个极小值点,说明虎北断层具有三段式分段生长特征;曲线中断距向靠近衡水断层方向逐渐降低,对比 H6 处的断距,可以看出虎北断层 H6 处的断距明显小于衡水断层的断距(图 5a、b),说明虎北断层在孔店组一沙四段形成时并未与衡水断层相交,断层成核位置远离衡水断层,后期活动才逐渐生长并与之连接的。

新河断层断距-距离曲线(图 5c)存在两个极小值点,说明新河断层是由 3 个孤立断层段分段生长连接形成的,南段最大断距为 2.8 km,中段和北段最大断距分别为 2.7 和 2.0 km;值得注意的是,在新河断层与衡水断层相交点 H3 处,新河断层 T_g 反射层断距为 1.8 km,明显大于衡水断层在此处的断距(图 5a),说明新河断层与衡水断层在前新生代就已经相交。

前磨头断层为前磨头凹陷的边界断层,其断距-

距离曲线(图 5d)各层断距向 NE 方向逐渐降低,断距最大值位于断层中段(约 2.0 km),而前磨头断层与衡水断层交叉点处断距仅为 0.8 km,这一点与虎北断层规律相似,说明前磨头断层初始形成远离衡水断层。由此可见,衡水断层为 NNE 向基底断层伸展伴生的变换断层,新生代 NE 向断层晚期“相交”形成现今两侧多方位断层相互作用关系。

3 冀中拗陷南部地区构造体制转换

3.1 冀中拗陷南部构造演化过程

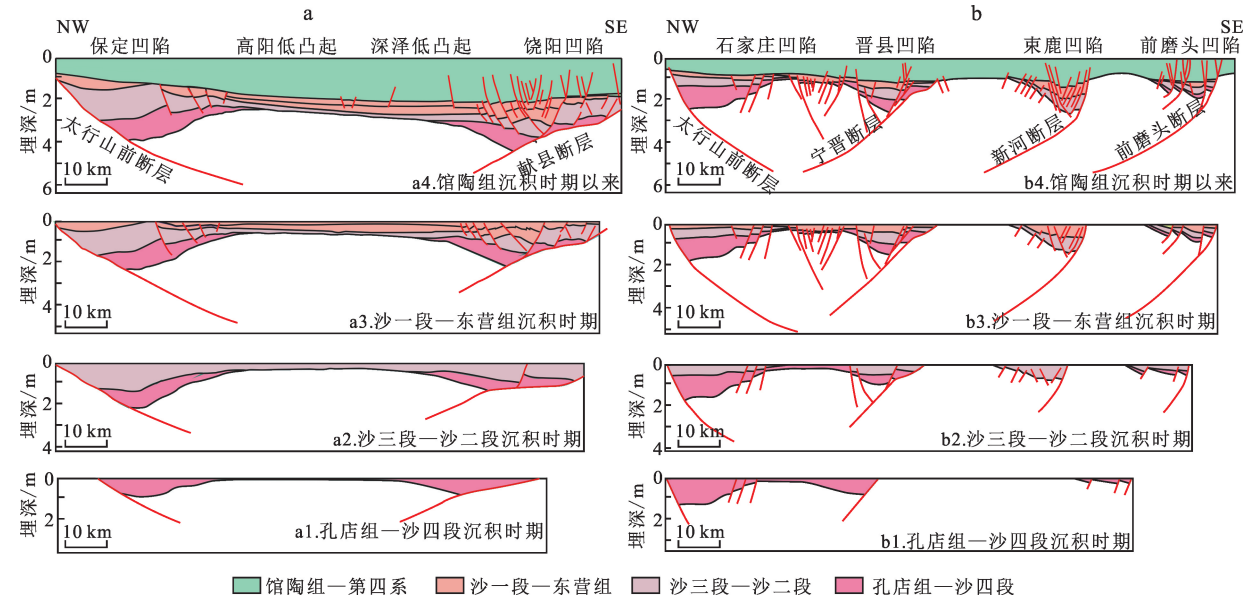
结合区域构造演化(图 2),将冀中拗陷南部地区衡水断层构造演化划分 5 个阶段。

3.1.1 基底演化阶段

晚侏罗世—早白垩世,受太平洋板块 NNW 向高速俯冲的影响^[30-33],渤海湾盆地内部发育大量 NE—NNE 向裂谷及一系列 NNE 向基底断层、NW 向变换调节带(例如衡水调节带);晚白垩世,太平洋板块俯冲角度改变,渤海湾盆地进入燕山运动 B 幕演化阶段,盆地发生抬升剥蚀,使得现今渤海湾盆地前新生代地层具有残留分布的特征。形成的断层作为基底先存断层,既控制残余地层的分布,又影响新生代的构造变形。

3.1.2 初始裂陷演化阶段

孔店组一沙四段沉积时期(图 6a1、b1),在区域



a. 衡水断层以北构造演化过程(剖面位置见图 1AA'); b. 衡水断层以南构造演化过程(剖面位置见图 1BB')。

图 6 冀中拗陷南部典型剖面构造演化过程

Fig.6 Structural evolution process of typical sections in southern Jizhong depression

伸展作用的影响下,先存基底断层发生复活,这一时期,衡水断层北部为太行山前断层和献县断层控制的两个独立半地堑,地层沉积在半地堑内部,中部高阳低凸起上无孔店组—沙四段地层(图 6a1);同时新产生的正断层剖面上呈多米诺式或堑垒式组合样式,平面为 NE 走向展布。衡水断层以南地区 NNE 向二级断层(宁晋断层、新河断层等)持续活动,孔店组—沙四段主要分布在靠近太行山前断层的半地堑内,东侧前磨头断层的雏形开始出现(图 6b1)。

3.1.3 强裂陷演化阶段

沙三段—沙二段沉积时期(图 6a2、b2),受区域强烈伸展作用的影响,衡水断层北部地区太行山前断层、献县断层强烈伸展使得上盘沉积较厚的沙三段—沙二段,同时在中部沉积较薄的高阳低凸起;衡水断层以南地区(图 6b)太行山前断层、宁晋断层、新河断层及前磨头断层持续伸展,沙三段—沙二段受断层控制分布在各凹陷中,同时凹陷内部产生若干次级断层,奠定了断陷的基本形态。

3.1.4 弱裂陷演化阶段

沙一段—东营组沉积时期(图 6a3、b3),衡水断层以北地区裂陷作用逐渐减弱,先存的断层在斜向伸展作用下复活,与伸展方向高角度相交的 NE 向

断层较 NNE 向更易复活;因此虎北断层上盘沙一段—东营组厚度明显大于 NNE 向献县断层,同时 NNE 向献县断层在斜向伸展的作用下,倾角逐渐变缓。衡水断层南部地区太行山前断层、宁晋断层及新河断层继承性活动,断面倾角逐渐变缓,呈铲型,浅层新生大量次级断层,地层分布在各个凹陷内,厚度小于衡水断层北部。

3.1.5 后裂陷演化阶段

馆陶组沉积时期以来(图 6a4、b4),盆地以整体热沉降活动为主,先存主干断层均不同程度复活,剖面以“似花状”断层组合样式为特征。衡水断层两侧没有明显的差异,主要以地层的填平补齐、独立半地堑联合为特征,最终形成盆地现今的构造格局。

3.2 中—新生代构造转换及成因机制

冀中坳陷南部现今多方位展布的断层体系及复杂的地质结构是中—新生代以来多期伸展变形叠加的结果。基底演化阶段,受泛太平洋构造域的影响,研究区经历了晚侏罗世—早白垩世的 NW—SEE 方向伸展,发育一系列 NNE 走向的基底伸展断层(新河断层、宁晋断层及献县断层)及 NW 向调节带(衡水断层),控制洼槽局部分布(图 7a),西侧太行山前断层分段活动形成新乐背斜,献县断层、宁晋

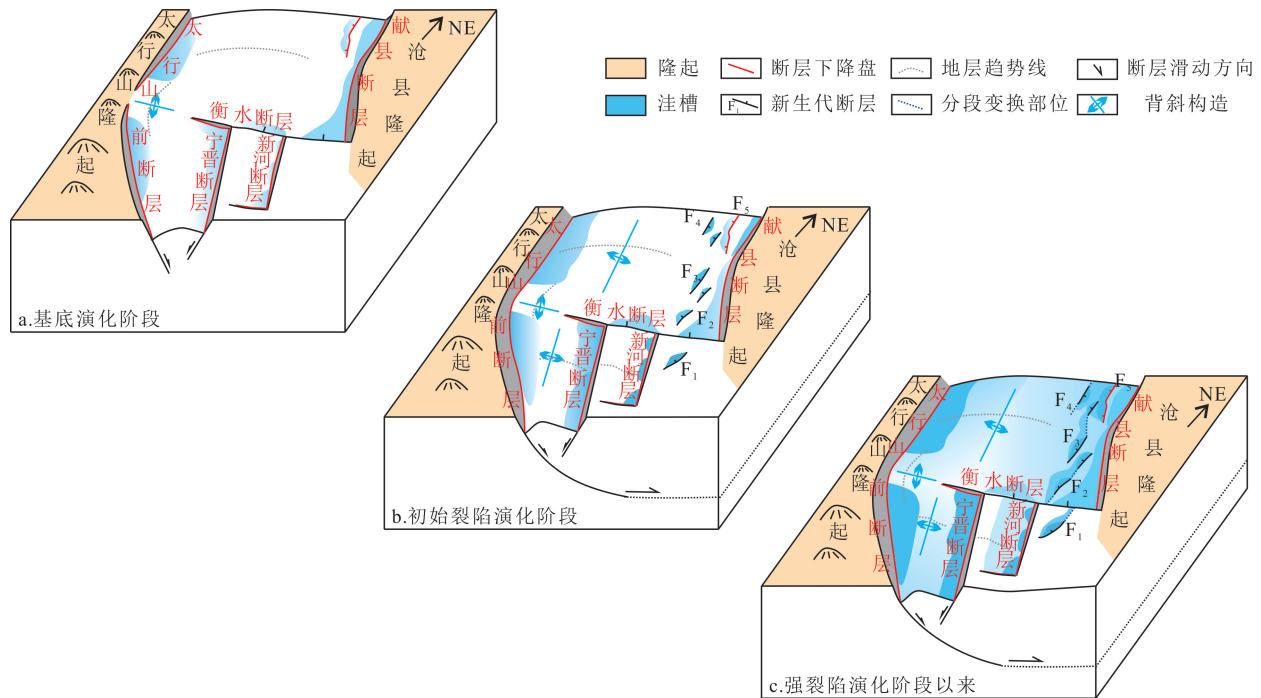


图 7 冀中坳陷南部新生代构造演化模式图

Fig.7 Cenozoic tectonic evolution model in southern Jizhong depression

断层、新河断层差异伸展形成 NW 向衡水变换断层,奠定了冀中拗陷南部构造的雏形。进入新生代,由于太平洋板块俯冲速率和俯冲方向的不断变化,研究区经历多期伸展变形:初始裂陷演化阶段(孔店组—沙四段沉积时期),在太平洋板块俯冲及海沟后撤的作用下^[37-38],研究区经历 NW—SE 向伸展, NNE 向基底先存断层斜向伸展再活动,控制早期洼槽进一步扩大,同时拗陷内新生一系列 NE 向断层(前磨头断层、虎北断层、大王庄断层等)控制局部洼槽新生(图 7b);强裂陷演化阶段以来(沙三段—沙二段沉积时期),在 NW—SE 向强烈的拉张应力作用下,NNW 向及 NW 向基底断层发生斜向伸展再复活,初始裂陷形成的 NE 向断层持续生长,凹陷范围进一步扩大(图 7c);弱裂陷演化阶段(沙一段—东营组沉积时期)及后裂陷演化阶段(馆陶组沉积时期以来),区域上受太平洋板块俯冲方向的变化以及印度板块与欧亚板块陆—陆碰撞远场应力的共同作用,冀中拗陷南部经历 N—S 向伸展,强度逐渐减弱,盆地由断陷向拗陷转化,最终形成现今的构造格局。

因此,冀中拗陷南部经历了基底 NNE 向构造体系向新生代 NE 向构造体系的转换,区域中—新生代以来应力场变化是冀中拗陷多方位复杂构造形成的原因。

4 油气地质意义

多期构造转换形成的不同规模变换构造对烃源岩分布、储层砂体的展布及构造圈闭的形成等方面同样具有控制作用(图 8)。

4.1 主干断层多期分段活动控制洼槽的形成及有效烃源岩的范围

冀中拗陷南部地区新生代烃源岩以孔店组—沙四段和沙三段为主,主干断层的多期分段活动控制洼槽迁移生长,进而影响有效烃源岩的分布。以束鹿凹陷新河断层为例,新河断层具有三段式生长特征,控制上盘 3 个古近系洼槽的展布,因此束鹿凹陷沙三段烃源岩分布在 3 个洼槽当中。对于整个冀中拗陷南部地区,受多期构造转换的影响,有效烃源岩的分布明显受控主干断层下降盘洼槽分布,如虎北断层、留楚—皇甫村断层、大王庄断层等,沿 NE 向

断层分布的烃源岩为断层附近的油田(榆科油田、留楚油田、大王庄油田等)提供充足的油气源供给(图 8a)。

4.2 构造转换控制变换构造发育决定储层砂体的展布

多期构造体制转换形成的不同类型的变换构造,尤其是断层分段连接部位通常是控制沉积物源进入汇水盆地的通道^[39-42],进而控制盆内沉积体系及砂体的展布。冀中拗陷南部地区受衡水断层变换作用的影响,主干断层本身(如虎北断层)、两条断层相互叠覆作用区域发育不同规模类型的变换构造。这些构造部位发育的砂体一旦邻近生烃凹陷,便于油气聚集成藏,如杨武寨油田,北部砂体沿留路断层与杨武寨东断层之间的转换斜坡进入盆内,南部发育虎北洼槽和杨武寨东洼槽两个生烃洼槽(图 8a),为杨武寨油田油气聚集提供了烃源岩和基础良好的储层。研究区类似油田还有束鹿凹陷的台家庄油田、荆丘油田,晋县凹陷的赵州桥油田等。

4.3 位移梯度变化导致横向背斜形成指示油气富集有利部位

断层分段活动导致沿断层走向位移梯度存在变化,这种位移梯度的变化常会在断层上盘发育横向背斜,为油气成藏提供圈闭条件^[35-36]。从油气运聚角度来讲,局部发育的变换构造带往往处于构造高部位,油气运聚的低势区是油气成藏的优势部位。以晋县凹陷南部为例,宁晋断层沿走向具有三段式发育的特征,中段与南段的分段连接处发育南柏舍横向背斜,同时该构造紧邻烃源岩分布区且位于沉积砂体范围内(图 8a);因此烃源岩生成的油气能够沿着输导通道向南柏舍背斜高部位运聚成藏,使得南柏舍背斜成为油气富集区(图 8b)。研究区荆丘油田、深南油田及榆科油田具有相同的成藏模式(图 8a),油气富集于主干断层位移梯度变化形成的横向背斜圈闭中。

冀中拗陷中—新生代多期次的构造转换过程影响了有效烃源岩、沉积储层及有利圈闭等成藏因素,已探明的储量分布大多数与构造转换过程形成的变换构造有关,这也为下一步冀中拗陷乃至渤海湾盆地的油气勘探提供了一种可以借鉴的思路。

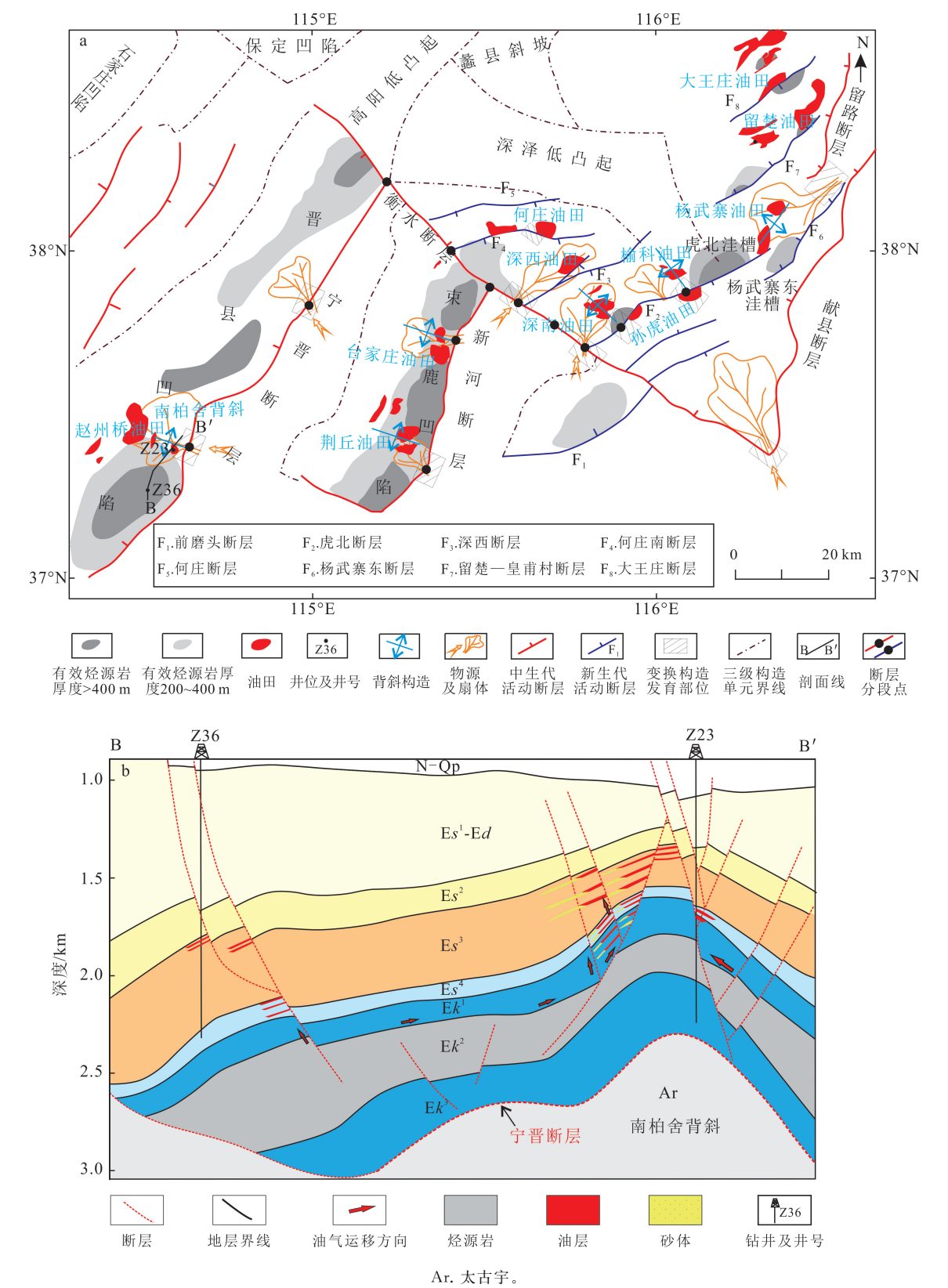


图 8 冀中坳陷南部地区主要油藏平面分布(a)和晋县凹陷南柏舍背斜成藏剖面图(b)

Fig.8 Main reservoirs plane distribution of southern Jizhong depression (a) and Nanbaishe anticline in Jinxian sag reservoir forming profile (b)

5 结论

1)衡水断层北部为太行山前断层与献县断层控制的“双断-双向滑脱-背倾半地堑结构”,衡水断层以南为太行山前断层主控的“多断-单向滑脱-复式半地堑结构”;NNE 向、NW 向主干断层形成早于 NE 向主干断层。

2)冀中坳陷南部地区中—新生代构造演化经历了基底演化(中生代)、初始裂陷演化(孔店组—沙四段沉积时期)、强裂陷演化(沙三段—沙二段沉积时期)、弱裂陷演化(沙一段—东营组沉积时期)和后裂陷演化(馆陶组沉积时期以来)5 个阶段以及基底 NNE 向构造体系向新生代 NE 向构造体系的转换,区域应力场变化是冀中坳陷多方位复杂构造形成的原因。

3)主干断层多期分段活动控制洼槽迁移影响有效烃源岩的分布;构造转换控制变换构造发育决定储层砂体展布;主干断层位移梯度变化形成的横向背斜构造,指示油气富集有利部位。

参考文献(References):

[1] Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of Rift Oblique and Rift Parallel Pre-Existing Fabrics During Extension and Their Effect on Deformation Style: Examples from the Rifts of Thailand[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (10): 1803 - 1829.

[2] Chen X P, Li W, Wu Z P, et al. The Tectonic Transition from Rifting to Strike-Slip in the Liaodong Bay Depression, Offshore China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 139: 105598.

[3] Ge J W, Zhu X M, Zhao X M, et al. Tectono-Sedimentary Signature of the Second Rift Phase in Multiphase Rifts: A Case Study in the Lufeng Depression (38 - 33.9 Ma), Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104218.

[4] 任健, 吕丁友, 陈兴鹏, 等. 渤海东部先存构造斜向拉伸作用及其石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 530 - 541.

Ren Jian, Lü Dingyou, Chen Xingpeng, et al. Oblique Extension of Preexisting Structures and Its Control on Oil Accumulation in Eastern Bohai Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 530 - 541.

[5] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono - Sedimentary Evolution of Active Extensional Basins [J]. *Basin Research*, 2000, 12(3/4): 195 - 218.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Gong Z, Zhu W, Chen P P H. Revitalization of a Mature Oil-Bearing Basin by a Paradigm Shift in the Exploration Concept: A Case History of Bohai Bay, Offshore China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(5): 1011 - 1027.

[9] Wang D, Wu Z, Yang L, et al. Influence of Two-Phase Extension on the Fault Network and Its Impact on Hydrocarbon Migration in the Linnan Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 145: 104289.

[10] Badlye M E, Price J D, Dahl C R, et al. The Structural Evolution of the Northern Viking Graben and Its Bearing upon Extensional Modes of Basin Formation[J]. *Journal of the Geological Society*, 1988, 145(3): 455 - 472.

[11] Bartholomew I D, Peters J M, Powell C M. Regional Structural Evolution of the North Sea: Oblique Slip and the Reactivation of Basement Lineaments[C]// *Geological Society of London. Petroleum Geology Conference Series*. London: Geological Society of London, 1993: 1109 - 1122.

[12] Reeve M T, Bell R E, Duffy O B, et al. The Growth of Non-Colinear Normal Fault Systems; What Can We Learn from 3D Seismic Reflection Data? [J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 70: 141 - 155.

[13] Morley C K. The Impact of Multiple Extension Events, Stress Rotation and Inherited Fabrics on Normal Fault Geometries and Evolution in the Cenozoic Rift Basins of Thailand [J]. *Geological Society of London-Special Publications*, 2017, 439 (1): 413 - 445.

- [14] Korme T, Acocella V, Abebe B. The Role of Pre-Existing Structures in the Origin, Propagation and Architecture of Faults in the Main Ethiopian Rift[J]. *Gondwana Research*, 2004, 7(2): 467–479.
- [15] Dahlstrom C D A. Structural Geology in the Eastern Margin of the Canadian Rocky Mountains[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1970, 18(3): 332–406.
- [16] Faulds J E, Varga R J. The Role of Accommodation Zones and Transfer Zones in the Regional Segmentation of Extended Terranes[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1998, 323: 1–45.
- [17] Fossen H, Rotevatn A. Fault Linkage and Relay Structures in Extensional Settings: A Review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 14–28.
- [18] Tao Z, Alves T M. Impacts of Data Sampling on the Interpretation of Normal Fault Propagation and Segment Linkage[J]. *Tectonophysics*, 2019, 762: 79–96.
- [19] Wang Q, Sun Y, Zhang W, et al. Structural Characteristics and Mechanism of the Hengshui Accommodation Zone in the Southern Jizhong Subbasin, Bohai Bay Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105558.
- [20] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer Zones in the East African Rift System and Their Relevance to Hydrocarbon Exploration in Rifts[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(8): 1234–1253.
- [21] Morley C K. Developments in the Structural Geology of Rifts over the Last Decade and Their Impact on Hydrocarbon Exploration[J]. *Composite Structures*, 1995, 80(1): 1–32.
- [22] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(4): 43–50.
Qi Jiafu. Structural Transfer Zones and Significance for Hydrocarbon Accumulation in Rifting Basins[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(4): 43–50.
- [23] 杨旭升, 刘池阳, 杨斌谊, 等. 冀中坳陷衡水转换断裂带特征及演化[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, 32(3): 5–8.
Yang Xusheng, Liu Chiyang, Yang Binyi, et al. Characteristics and Evolution of Hengshui Transfer Fault Zones in Jizhong Depression [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(3): 5–8.
- [24] 劳海港, 吴孔友, 陈清华. 冀中坳陷调节带构造特征及演化[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(3): 294–309.
- Lao Haigang, Wu Kongyou, Chen Qinghua. Geologic Character and Evolution of the Accommodation Zone in the Jizhong Depression [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(3): 294–309.
- [25] 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 等. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制[J]. *地质前缘*, 2013, 20(4): 88–103.
Cao Xianzhi, Li Sanzhong, Liu Xin, et al. The Intraplate Morphotectonic Inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and Its Mechanism[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 88–103.
- [26] 李理, 王晶. 冀中坳陷衡水—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.
- [27] 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. *地质前缘*, 2004, 11(3): 285–297.
Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming, et al. Geological Features of Mesozoic Tectonic Regime Inversion in Eastern North China and Implication for Geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 285–297.
- [28] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(5): 583–592.
Zhu Rixiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, et al. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton [J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41(5): 583–592.
- [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 Science*, 2012, 42(8): 1135–1159.
- [30] 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 62(9): 1340–1350.
Zhu Rixiang, Xu Yigang. The Subduction of the West Pacific Plate and the Destruction of the North China Craton[J]. *Science China: Earth Science*, 2019, 62(9): 1340–1350.

- [31] 温常贵, 真允庆, 刁谦, 等. 华北克拉通东部岩石圈破坏与幔柱的成因[J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(1): 1-17.
Wen Changgui, Zhen Yunqing, Diao Qian, et al. Lithosphere Destruction and Mantle Plume Genesis of Eastern North China Craton[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2016, 31(1): 1-17.
- [32] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249-267.
Suo Yanhui, Li Sanzhong, Cao Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic Inversion Tectonics of East China and Its Implications for the Subduction Process of the Oceanic Plate[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 249-267.
- [33] 王琦, 张万福, 孙永河, 等. 长岭断陷断层活动特征及控藏作用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 55(5): 1182-1191.
Wang Qi, Zhang Wanfu, Sun Yonghe, et al. Control of Fault Activity on Natural Gas Accumulation in Changling Fault Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 55(5): 1182-1191.
- [34] Mansfield C S, Cartwright J A. High Resolution Fault Displacement Mapping from Three-Dimensional Seismic Data: Evidence for Dip Linkage During Fault Growth[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18(2/3): 249-263.
- [35] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义[J]. 古地纪学报, 2008, 10(5): 125-130.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Structural Transfer Zones and Their Hydrocarbon Significances in Bohai Bay Area[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(5): 125-130.
- [36] 杨明慧. 渤海湾盆地变换构造特征及其成藏意义[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 816-823.
Yang Minghui. Transfer Structure and Its Relation to Hydrocarbon Exploration in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 816-823.
- [37] 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.
- [38] 马钰凯, 孙永河, 马妍, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷构造演化及断裂带成因[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 526-539.
Ma Yukai, Sun Yonghe, Ma Yan, et al. Tectonic Evolution and Genesis of Fault Zones in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 526-539.
- [39] 史文东, 彭尚谦, 姜凤玖. 东辛油田断裂转换带与油气富集[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 14-17.
Shi Wendong, Peng Shangqian, Jiang Fengjiu. Relationship Between Petroleum Accumulation and Transfer Zone in Dongxin Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 14-17.
- [40] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中 19-6 区中—新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1334-1346.
Wang Deying, Liu Xiaojian, Deng Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic Tectonic Transformation and Its Control on the Formation of Large-Scale Reservoirs in the Archean Buried Hills in Bozhong 19-6 Area, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1334-1346.
- [41] 王海学, 吕延防, 付晓飞, 等. 裂陷盆地转换带形成演化及其控藏机理[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 105-113.
Wang Haixue, Lü Yanfang, Fu Xiaofei, et al. Formation, Evolution and Reservoir-Controlling Mechanism of Relay Zone in Rift Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(4): 105-113.
- [42] 赵少泽, 李勇, 程乐利, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷沙河街组烃源岩特征及沉积环境[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 627-632.
Zhao Shaoze, Li Yong, Cheng Leli, et al. Characteristics and Depositional Environment of Source Rocks in Shahejie Formation, Cangdong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(5): 627-632.