

宝坻断层的几何学与运动学特征: 兼论燕山褶皱带与渤海湾盆地的构造关系*

张煜颖¹ 何登发^{1,2**} 单帅强¹ 崔永谦³

ZHANG YuYing¹, HE DengFa^{1,2**}, SHAN ShuaiQiang¹ and CUI YongQian³

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

3. 中国石油华北油田分公司地球物理勘探研究院, 任丘 062552

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Enrichment Mechanism, Ministry of Education, Beijing 100083, China

3. Geophysical Exploration Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China

2018-11-08 收稿, 2019-02-22 改回.

Zhang YY, He DF, Shan SQ and Cui YQ. 2019. Geometry and kinematics of the Baodi fault and its implication on the structural relationship between Yanshan Fold Belt and Bohai Bay Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 35(4): 1143–1160, doi: 10.18654/1000-0569/2019.04.11

Abstract The Baodi fault, as the boundary normal fault of the northwestern margin of the Bohai Bay Basin, is located at the coupling area of the Yanshan Fold Belt and the Bohai Bay Basin. It controlled the Mesozoic to Cenozoic sedimentary and tectonic evolution of the Wuqing sag while being influenced by both the Paleo-Asian tectonic domain and the Pacific tectonic domain, and experienced a complex tectonic evolution process. The Baodi fault strikes generally EW for 68km, with the detachment reaching 10 ~ 15km at depth. The architecture of the main surface as well as the detachment of the Baodi fault can be subdivided by three vertical axial planes into four segments, most part of the fault surface exhibits listric normal fault characteristic while the middle part shows a sigmoidal shape. The overall displacement-distance (D-X) profile of the Baodi fault is also obviously segmented while being in good correlation with its geometric segmentation, which suggests that its multiple lateral turns is highly related to its growth history. The D-X profiles of the base Paleogene, the base Dongying Formation and the base Neogene indicate that it was gradually linked from several fault segments during the sedimentation period of the Shahejie Formation, and the integral fault surface was formed before the sedimentation period of the Dongying Formation. Its activity gradually weakened in the Neogene, causing the scale of the rift it controlled to shrink during the same time at the same time. Since the Mesozoic, the Wuqing sag and the southern Yanshan Fold Belt experienced 6 main periods of tectonic evolution, i. e., the Triassic, the Early-Middle Jurassic, the Middle-Late Jurassic, the Cretaceous, the Paleogene, and the Neogene-Quaternary respectively, among which apparent differentiation appears in the structural-sedimentary response of the two areas since the period of Cretaceous. Therefore, the study of the Baodi fault and the Wuqing sag is of great significance in determining the time and space of the intracontinental deformation of the Yanshan Orogen as well as its coupling relationships with the Bohai Bay Basin.

Key words Jizhong depression; Wuqing sag; Baodi fault; Yanshan Movement; Structural evolution

摘要 宝坻断层是渤海湾盆地西北缘的边界正断层, 地处燕山褶皱带与渤海湾盆地耦合的关键部位。宝坻断层处在古亚洲构造域与太平洋构造域之交叠部位, 经历了复杂的构造演化过程, 其在中生代-新近纪的构造活动控制了武清凹陷的沉积和构造演化。宝坻断层整体走向近 EW 向, 延伸长度约 68km, 最大位移达 14.2km, 滑脱面深度约 10 ~ 15km。横向上其主体断面及滑脱面均存在较明显的分段性, 通过 3 个垂向转折轴面可划分为 4 段。剖面上该断层大部分呈上陡下缓的犁式正断层特

* 本文受国家科技重大专项(2017ZX05001-001) 和国家重点研发计划(2017YFC0601405) 联合资助。

第一作者简介: 张煜颖, 男, 1986, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: ouzy@126.com

** 通讯作者: 何登发, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 构造地质学、石油地质学专业, E-mail: hedengfa282@263.net

征,中段部分区域为“坡坪式”结构。宝坻断层整体位移在横向上的变化与其几何学上的分段有着较好的相关性,表明其现今多次转折的结构与其生长过程密切相关。古近系底面、东营组底面及新近纪底面位移-距离曲线特征表明,沙河街组沉积期,各个断层在相对独立发育后,因横向生长而逐渐发生硬连接,至东营组沉积期之前形成整体断面,其活动于新近纪逐渐减弱,所控断陷规模萎缩。中生代以来,武清凹陷-燕山褶皱带主要受三叠纪、早中侏罗世、中晚侏罗世、白垩纪、古近纪和新近纪-第四纪6个构造演化阶段的影响,其中,三叠纪-侏罗纪末期,武清凹陷与燕山褶皱带经历了相似的构造演化过程,而自白垩纪以来,两者的构造-沉积响应出现了明显的分异。因此对宝坻断层及武清凹陷的构造解析对厘定燕山构造带陆内变形的时空范围及其与渤海湾盆地的耦合关系有着重要意义。

关键词 冀中拗陷;武清凹陷;宝坻断层;燕山运动;构造演化

中图法分类号 P542

在伸展构造环境下,正断层对于上地壳尺度的形变起着主要的调节作用(Whipp *et al.*, 2016),盆地边界断层是伸展盆地构造变形和沉积充填至关重要的边界条件和控制因素(Peacock and Sanderson, 1991; Suppe *et al.*, 1992; Xiao and Suppe, 1992; Shaw *et al.*, 1997; Walsh *et al.*, 2003; Cowie *et al.*, 2005)。

大量学者通过钻井、地震、露头、深部地球物理、岩相学及年代学等手段对控制整个渤海湾盆地的边界断层开展了研究,建立了太行山山前断层(徐杰等, 2000, 2001; 张家声等, 2002; 李松林等, 2011; 杨晓平等, 2016)和郯庐断裂带(Xu *et al.*, 1987; Zhu *et al.*, 2005, 2010; Chen *et al.*, 2006; Wang, 2006)的几何学模型及其中生代以来的构造演化模型,揭示了渤海湾盆地构造演化的主控因素及其与太行山隆起的耦合关系。对盆地内部边界断层,得益于石油工业地震及钻井资料,结合岩相学及地球物理学等方法,往往能建立较为精细的断面几何学、运动学模型,进而讨论正断层的生长发育模式及盆地的构造演化,例如窦立荣(2000)通过对二连盆地边界断层平面几何学及沉积地层厚度的分析,讨论了边界断层生长发育过程及其对油气系统的控制,桂宝玲等(2012)通过对渤海湾盆地大兴断层几何学的分析及其运动学的正演数值模拟,讨论了其对廊园凹陷形成演化的控制及成因机制的约束, Gao *et al.* (2014) 建立了渤海湾盆地民丰洼陷的三维几何学、运动学模型, Gui *et al.* (2014) 通过伸展断层相关褶皱理论对松辽盆地彰武断陷生长地层进行了精细分析,建立了彰武断陷侏罗纪以来的构造-沉积演化模型。

盆地与相邻造山带之间在时-空上是相互关联、相互制约的,他们之间的构造关系和相互影响是对深部物质运动过程的反映。自Wong (1926, 1927, 1929) 提出燕山运动以来,众多学者应用基于露头的构造地质学分析、地球化学分析及基于地震台网的接受函数分析等手段,对燕山造山带的地壳厚度、岩浆岩活动、构造运动期次及时限、构造地层序、构造格架及成因机制等进行了大量的研究(任纪舜等, 1990; 赵越等, 1994, 2004, 2006; 王瑜, 1996, 1998; Davis *et al.*, 2001; 张长厚等, 2004a, b, 2012; 吴福元等, 2008; 张宏仁等, 2013; Li *et al.*, 2016; 王瑜等, 2018)。周立宏等(2003)基于渤海湾盆地内地震勘探及解释结果,讨论了渤海湾盆地燕山期的构造特征; 李伟等(2010)通过对渤海湾盆地大量地震测

线的分析解释,将渤海湾盆地燕山期构造演化划分为燕山早期(侏罗纪)、燕山中期(早白垩世)及燕山晚期(晚白垩世)三个主要阶段,并讨论了各个期次的构造特征及盆地转型; 何登发等(2017, 2018)基于冀中拗陷内大量的钻井及三维地震资料,通过对冀中拗陷内古潜山地层系统、断裂系统、三维地质结构及成因机制等方面的分析,认为冀中拗陷内潜山经历了前中生代建造形成、侏罗纪晚期挤压、白垩纪-古近纪多幕伸展裂陷和新近纪-第四纪热沉降埋藏的形成过程。

宝坻断层分割了燕山中段南部与渤海湾盆地北侧,掩伏于新近系-第四系之下,未出露地表,控制了冀中拗陷北部武清凹陷中-新生界的沉积。其几何学、运动学特征是讨论武清凹陷构造演化及燕山褶皱带-渤海湾盆地耦合关系的重要基础。本文通过对武清凹陷内80余条全长约3000km的地震测线及30余口钻井资料的研究,结合区域地质填图成果,建立了冀中拗陷北部边界断层——宝坻断层的三维断面模型,分析了其几何学、运动学特征及其对武清凹陷构造演化的控制,并进一步探讨了燕山褶皱带与渤海湾盆地之间的构造关系。

1 区域地质背景

1.1 构造背景

渤海湾盆地是中国东部典型的陆内裂谷盆地(李德生, 1982; 何登发等, 2017),其北缘与燕山褶皱带相邻,西侧以太行山山前断层为界与太行山隆起相邻,南界为鲁西隆起,东界为郯庐断裂带(图1a)。渤海湾盆地西北隅既是盆-山结合的关键部位,又处于燕山造山带与太行山隆起相交、构造方向由北东向转为近东西向的部位,同时也是古亚洲洋构造域与太平洋构造域之交叠部位(张长厚等, 1996, 2006, 2011; 翟明国等, 2004; Yin, 2010)。

宝坻断层是渤海湾盆地冀中拗陷(图1a)北部武清凹陷北缘(图1b)的边界正断层,其生长发育直接控制了武清凹陷的沉积和构造演化。若以宝坻断层为界,其北侧的燕山褶皱带中段整体以近EW走向构造为主导(张长厚等, 2004a),其晚古生代以来所经历的构造变形主要有以下三期: 1) 270~200Ma, 在由北向南的挤压作用之下(王瑜, 1996, 1998),发生涉及中地壳层次的韧性剪切变形,伴随大量岩浆活动的出



图2 武清凹陷综合地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Wuqing sag based on well data

砾岩,粒度下粗上细,中间夹有少部分砂岩、粉砂岩和泥岩;白垩系底部同样为一套火山碎屑岩,向上过渡为砂岩,二者之间发育有薄层砾岩(赵越,1990;渠洪杰等,2006;许欢等,2011)。燕山地区古近系-新近系大面积缺失,而武清凹陷内发育 >5500m 的古近系裂陷沉积和 >3000m 的新近纪沉积。第四系在燕山地区局部沉积,而覆盖于整个武清凹陷之上。

2 宝坻断层几何学与运动学特征

2.1 宝坻断层的几何学特征

断层面在空间上可视为由多个横向或纵向轴面分隔的复杂曲面,其中与断层走向一致的横向轴面刻画了断层垂向上倾角的变化特征,而与断层走向垂直的垂向轴面标志着断

层走向、倾向的明显改变,因而也是断层分段的证据之一(桂宝玲等,2012)。复杂的大型边界正断层往往是由多条较小的断层在生长过程中连锁形成的,因而其拓扑形态的最终形成与其演化过程有着密不可分的联系(Peacock,2002;Cowie et al.,2005)。

为了更好地理解宝坻断层的三维空间结构及其对盆地的控制,通过对武清凹陷内 80 余条全长约 3000km 二维测线的精细构造解释,基于凹陷内 30 余口探井合成记录所建立的速度场,建立了其三维断面模型(图 4a)。宝坻断层整体走向近 EW,倾向 SSE,延伸长度约 68km,最大位移达 14.2km。其几何结构在横向上表现出明显的段落性,平面上近似弧形,垂向上整体表现为上陡下缓的犁式正断层,部分位置表现为坡坪式正断层。

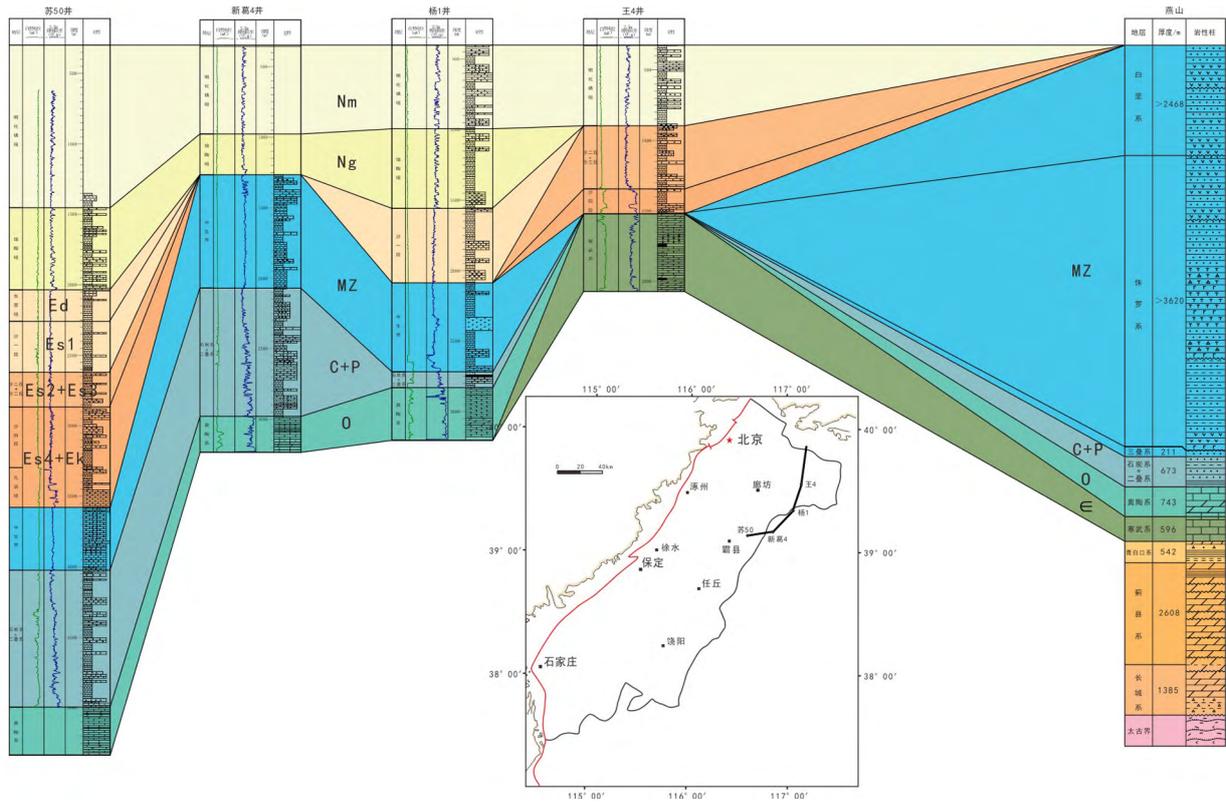


图3 武清凹陷钻遇地层与燕山褶皱带地层对比图(过苏50井、新葛4井、杨1井及王4井)

Fig. 3 Correlation profile of strata between Wuqing sag and Yanshan Fold Belt (crossing Su 50 well, Xing 4 well, Yang 1 well and Wang 4 well)

宝坻断层的三维结构模型清晰地显示了以下几个特征:垂向上以上陡下缓的犁式结构为主;横向上分段性明显,以3个上凸型垂向转折轴面分为4个较小的弧形段,自西向东记为西一段、西二段、中段及东段,每段内部还存在多个垂向转折,对应与平面断层曲线上的锯齿状转折;滑脱面深度随着横向上的分段变化明显,西一段及西二段滑脱面呈较为整体的下凹弧面,深度达14km,该滑脱面同时也是大兴断层、河西务断层等的滑脱面;中段滑脱面独自呈下凹柱面,通过两个上凸垂向轴面与相邻滑脱面分隔,深度达15km;东段滑脱面整体较平,深度明显低于其他段,约10km。

宝坻断层倾角变化范围为 $0^{\circ} \sim 65^{\circ}$ (图4b),其变化特征主要可归纳为两类:一类是上部高陡,且倾角很快变缓至 $<10^{\circ}$,横向上存在较大转折的陡倾型;另一类是上部相对较缓倾($30^{\circ} \sim 50^{\circ}$),且断层进入滑脱面的过程较为平缓的缓倾型。西一段、西二段西侧、中段东侧为陡倾型,西二段东侧、中段西侧与东段为缓倾型。

宝坻断层的断面倾向主要分布于 $100^{\circ} \sim 250^{\circ}$ 区间(图4c),这与宝坻断层走向上整体近EW向的特征相吻合,但是从其平面分布特征来看,可将其划分为 $180^{\circ} \sim 250^{\circ}$ 及 $100^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 两个区间,随着断层段的变化,这两个区间交替出现,对应各段本身的弧形特征。其中西一段上部弧形特征不明显,断面整体较平,倾向分布于 $150^{\circ} \sim 200^{\circ}$ 范围内,主体倾向S;

西二段、中段及东段均表现出西侧倾向集中于 $100^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围,东侧倾向集中于 $180^{\circ} \sim 250^{\circ}$ 范围的弧形特征,且从断层上部至进入滑脱面均存在这一特征。

2.2 宝坻断层的运动学特征

剖面上,宝坻断层上盘的褶皱变形与其本身形态关系密切,其中新生界沉积地层表现出明显的生长特征。宝坻断层本身多段、多次横向转折的几何学特征及其上盘地层结构的复杂变化表明其现今结构受多期构造作用叠加影响,其现今断面的形成是多个断层段横向生长、连锁成统一断面的过程(Jackson *et al.*, 2013; Bonini *et al.*, 2015; Khani *et al.*, 2015)。

宝坻断层整体位移存在明显的分段性,且这一分段特征与其几何学上的分段有着较好的相关性(图3、图4)。宝坻断层最大位移达14.2km,发生于西二段东侧,各段中西一段位移最小,最大处为3.8km;中段最大位移为13.4km,发生于中段西侧;东段最大位移为7.9km,发生于东段西侧。

宝坻断层古近系底面位移-距离曲线呈现清晰的四段式结构,各段之间由位移低值点分隔,每一段各呈钟形,据此推测沙河街组沉积期可能是宝坻断层由多个断层段经横向生长逐渐连锁成整体断面的时期。但同时,古近系底面位移始终大于东营组底面位移,沙河街组地层岩宝坻断层上盘始终

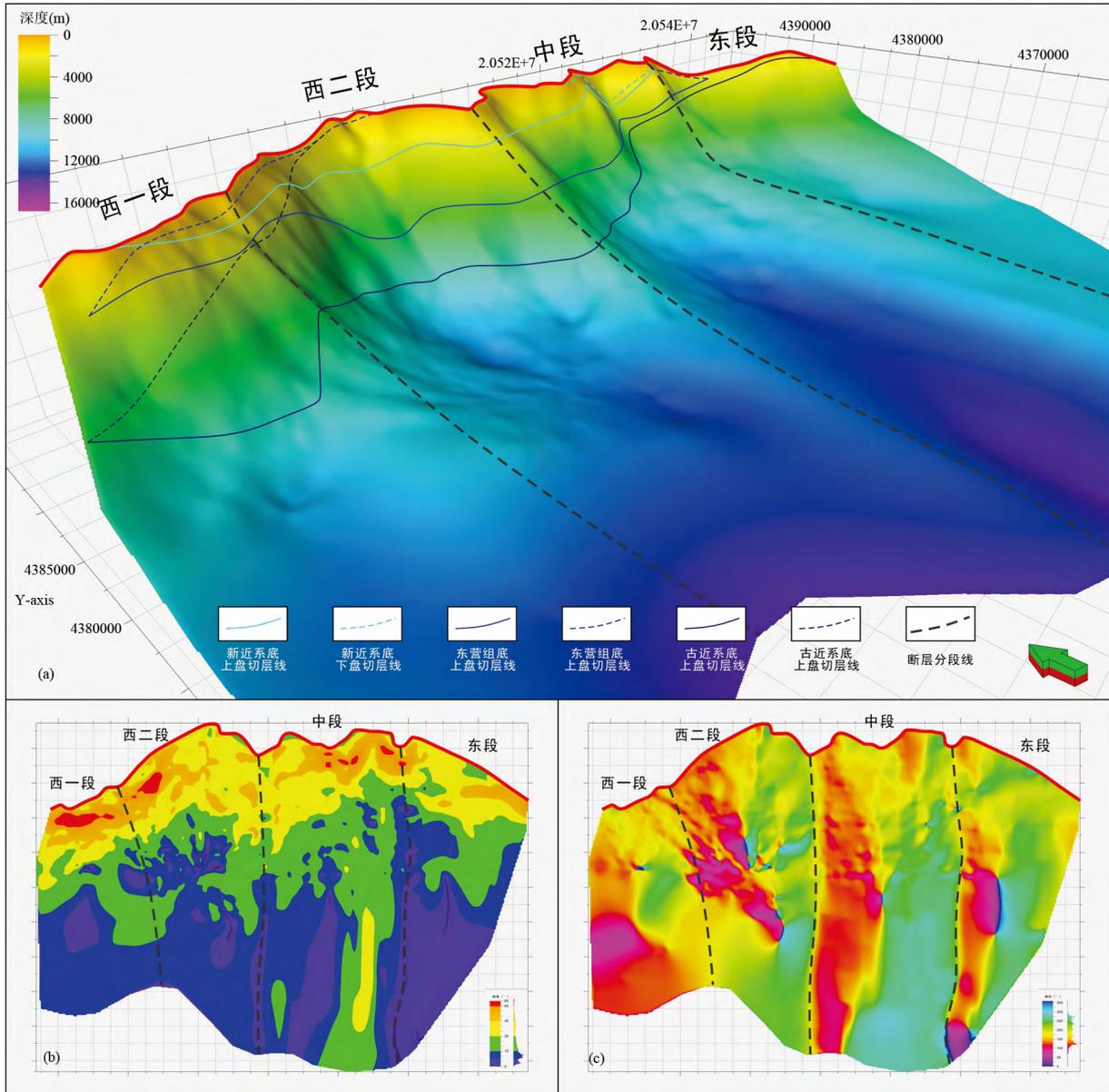


图4 宝坻断层三维构造模型及切层线投影 (a)、倾向平面投影(b)及倾角平面投影(c)

Fig. 4 3-D structural model with displacement projection (a), dip map of (b) and dip azimuth map (c) of the Baodi fault

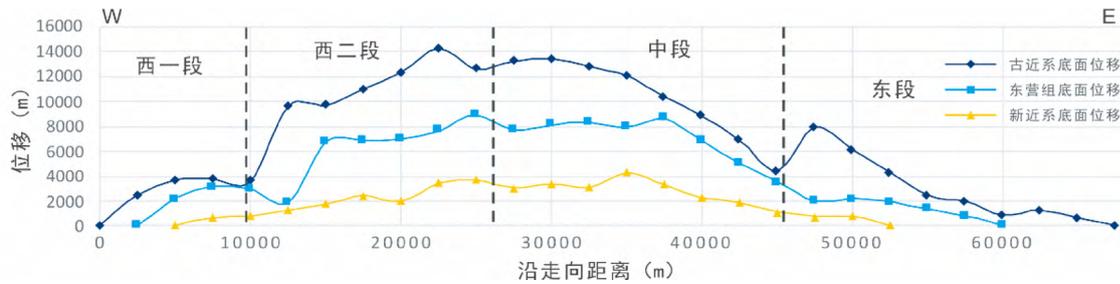


图5 宝坻断层位移距离曲线

Fig. 5 Displacement-distance profile of Baodi fault

在增厚,说明至东营组沉积之前,各个分段的连锁已经完成,整体断面已经形成(图5)。

东营组底面最大位移为 8.9km,发生于西二段东侧,其位移距离曲线的分段性明显弱于古近系底面,整体更接近于

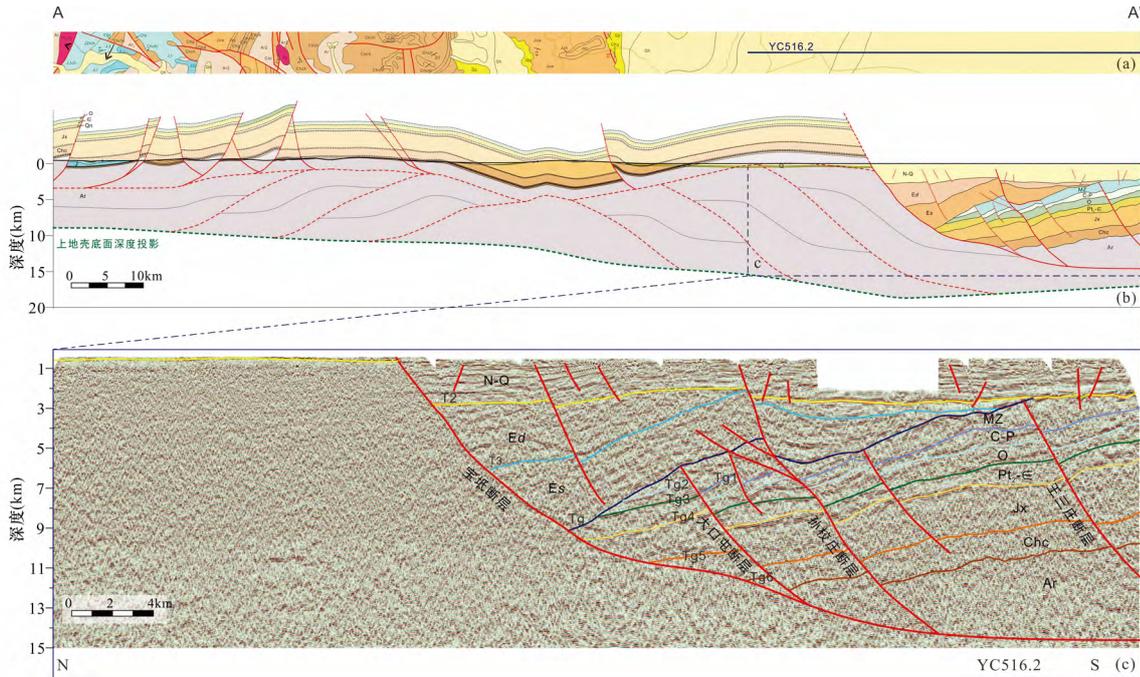


图6 燕山褶皱带中段南部-武清凹陷地质廊带图(a)、AA'构造地质剖面(b)及武清凹陷地震剖面YC516.2(c)

Fig. 6 Geological corridor map of Central Yanshan Fold Belt-Wuqing sag (a), geological profile AA' (b) and seismic profile YC516.2 in Wuqing sag (c)

三段式结构,表明宝坻断层西二段与中段在东营组沉积期以整体形式控制上盘地层沉积。此外,东营组沉积期,宝坻断层东侧端点以西约8km处断距已减为0,表明其最东段该期已经停止活动。

新近系底面最大位移为4.3km,发生于中段中部,宝坻断层新近纪活动已经明显减弱,且断层端点收缩,其中西侧长约5km和东侧长约16km的断层段已停止活动。

3 燕山褶皱带中段南部与武清凹陷的地质结构特征

3.1 剖面地质结构特征

燕山地区上地壳物质组成主要为相对坚硬的结晶基底及稳定的沉积盖层(张长厚等,2011),对于燕山地区的深部地质结构,众多学者通过深反射地震剖面(熊小松等,2011; Zhang *et al.* 2014)、接收函数波形反演(Chen, 2010)、剪切波波速及射线各向异性成像(Zheng *et al.* 2007, 2017)等方法进行了讨论。多种深部地球物理资料反映,燕山中部南段上地壳厚度较为稳定,由北向南逐渐加深,深度约8~12km,向渤海湾盆地过渡后,上地壳厚度明显增加,武清凹陷内厚度约20km,上地壳内部存在清晰的分层结构(李秋生等,2008; 齐刚等,2015; 王椿镛等,2017)。基于这一特征,联合燕山地区地质图及武清凹陷内地震剖面,建立了燕山褶皱带中段南部-武清凹陷构造地质剖面(图6b)。

燕山中段与其毗邻的渤海湾盆地西北缘之间地形由燕山南部的起伏山地逐渐过渡至武清凹陷的第四纪平原,该剖面中燕山地区太古宇-元古界大面积出露地表,侏罗系髫髻山组及土城子组局部沉积于剖面北侧,武清凹陷一侧整体被第四系覆盖(图6a)。燕山地区的变形主要为上地壳中上下脱耦的浅层基底卷入的断层转折褶皱及深部叠瓦状构造导致的地层隆升(图6b)。

盆地地震剖面显示,武清凹陷主要发育三期明显的角度不整合,从上到下依次为:新近系底角度不整合,表现为北侧新近系对东营组的削截,南侧新近系底对中生界的削截;古近系底不整合,表现为剖面北侧古近系对“待建系”-寒武系、奥陶系、石炭二叠系及中生界的削截,南侧古近系底向中生界顶超覆;中生界底不整合,表现为中生界底面对石炭二叠系的部分削截。

宝坻断层上盘古生界及以下地层保留相对完整,为较为稳定的沉积,中生界内部结构较为复杂,古近系为箕状裂陷沉积,新近系-第四系以坳陷沉积为主;断层下盘除上部1000m之上为第四系稳定坳陷沉积,下伏地层无明显反射结构,与上盘地层对比推测为太古界变质岩(图6c)。

该剖面切过宝坻断层中段,此处宝坻断层呈“坡坪式”结构,滑脱面深度达14500m,其上盘发育多条同向剪切断层。依据断层顶部终止的层位及其所控制地层的厚度变化,可推测断层于剖面所在处的活动时间。其中,大口屯断层发育于中生代,控制了上盘局部中生代沉积,于古近纪前停止活动;孙校庄断层于中生代开始活动,至古近纪趋于停止,且后缘

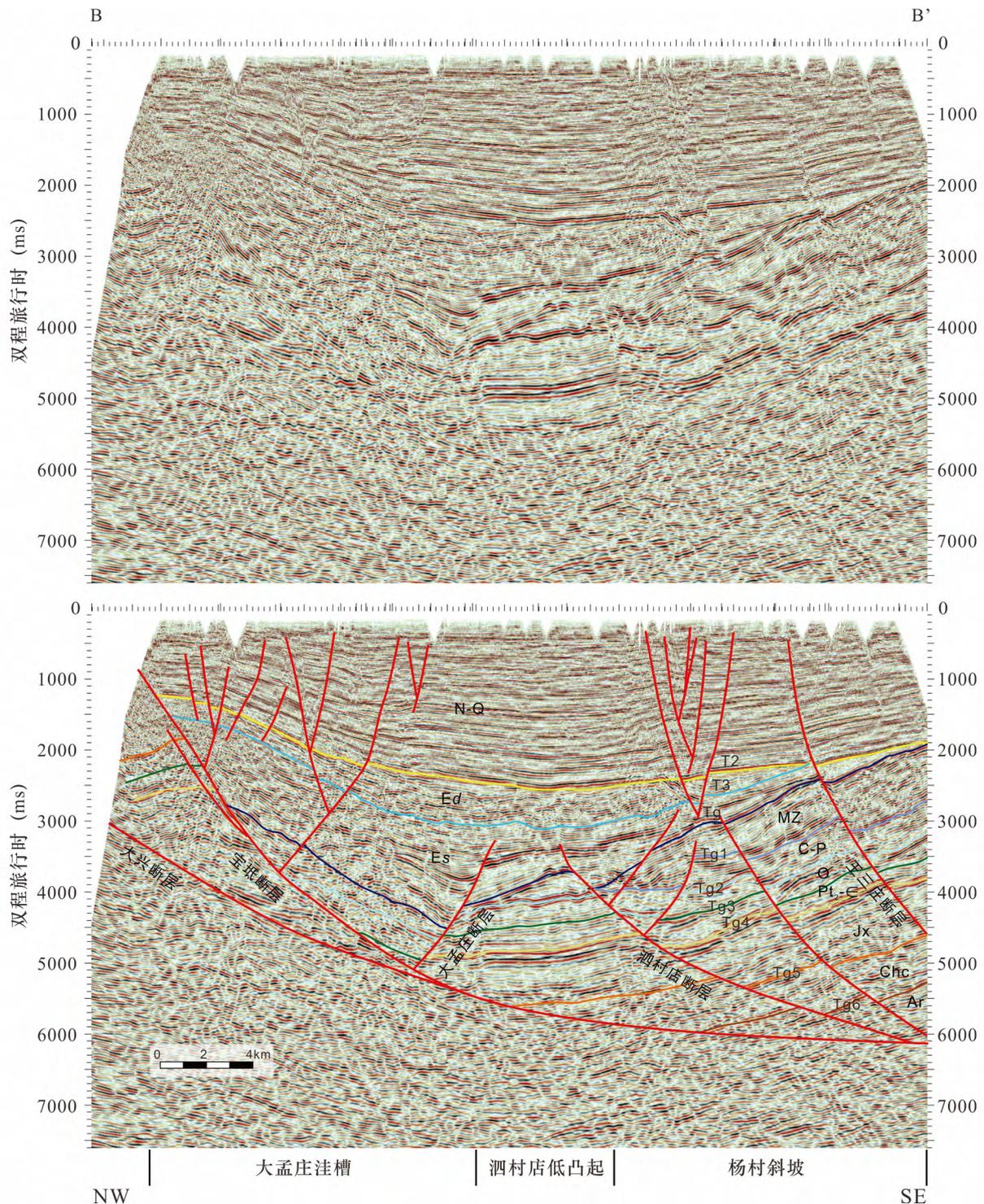


图7 过宝坻断层西二段地震剖面 BB'

Fig.7 Seismic profile BB' crossing the west-2 segment of the Baodi fault

出现多条分支,新近纪以来在原有断面基础上向上传播并持续活动至第四纪;王三庄断层于中生代活动,导致其上盘中生界加厚,至古近纪前停止活动(图6c)。

剖面 BB' 全长 36km,记录双程旅行时长达 7600ms,依次切过大兴断层底部、宝坻断层西一段、大孟庄断层、泗村店断

层及王三庄断层,主要反映武清凹陷西北侧构造特征(图7)。剖面处新近系底不整合于 NW 及 SE 侧,截断了下伏古近系东营组;古近系底不整合于西北侧,截断了下伏石炭-二叠系及中生界,SE 侧古近系超覆于中生界之上。

剖面处古生界及其之下地层尽管为多个断裂切开,但整

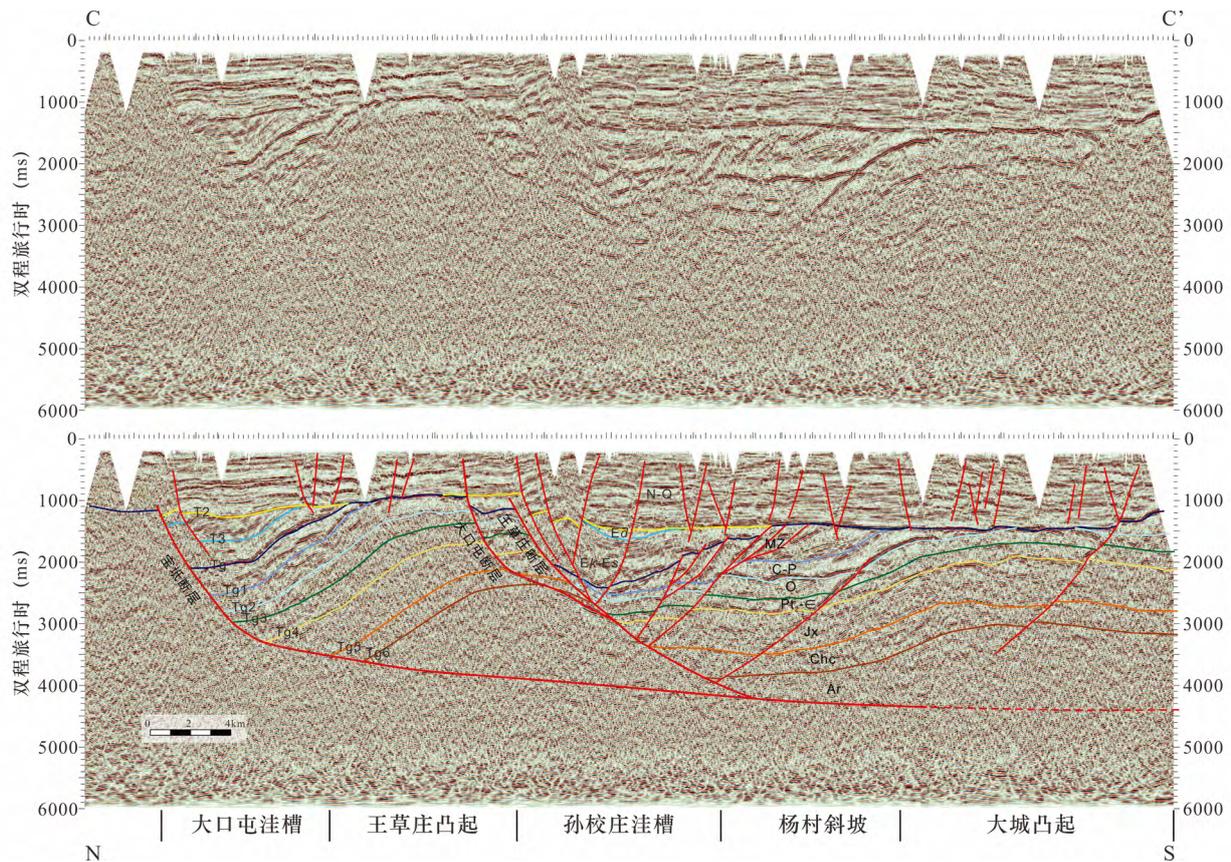


图8 过宝坻断层中段地震剖面 CC'

Fig. 8 Seismic profile CC' crossing the central segment of the Baodi fault

体保存较为完整,仅石炭-二叠系顶部于NW侧遭受剥蚀;中生界由NW向SE方向逐渐加厚,且NW一侧超覆于石炭-二叠系之上;古近纪地层整体接近箕状,沉积中心位于大孟庄断层发育位置,沙河街组明显厚于东营组;新近纪沉积较厚,沉积中心位于大孟庄断层与泗村店断层之间,内部发育多个断距较小的高陡正断层。

该剖面所切过的大兴断层东北段与宝坻断层西南段走向接近,平面上呈叠置关系,该剖面体现了这两条断层之向深部间距逐渐减小,归于同一滑脱面的几何特征。宝坻断层的西一段受太行山前断层及大兴断层等影响,整体走向与其他段明显不同,呈NE-NEE走向,整体上陡下缓呈较为典型的犁式特征,其上部后缘出现了较小的分支断片。宝坻断层上盘出现了众多次级断层,且反向剪切断层多位于NW侧,而同向剪切断层则多位于SE侧。大孟庄断层以反向剪切断层的形式交于宝坻断层之上,上部终止于沙河街组内部,整体倾角较陡。泗村店断层以同向剪切断层的形式归于宝坻断层滑脱面之上,表现出上陡下缓的特征,上部端点同样位于沙河街组内部,其上发育两条反向剪切断层,其中,偏东南侧的断层为活动于中生代的伸展断层。而王三庄断层倾向与宝坻断层相同,整体较陡,上部一直延伸至第四系内。

剖面CC'全长54.8km,记录双程旅行时长6000ms,依次

切过了宝坻断层中段、大口屯洼槽、王草庄凸起、大口屯断层、王草庄断层、孙校庄洼槽、杨村斜坡和大城凸起,主要反映了武清凹陷东侧及宝坻断层中段东侧的构造特征(图8)。

剖面处新近系底于大口屯洼槽及孙校庄洼槽削截古近系,于王草庄凸起、杨村斜坡及大城凸起削截中生界及石炭-二叠系,古近系底在两个洼槽底部削截中生界,在斜坡带超覆于中生界之上。中生界底在两个凹槽处及杨村斜坡削截了石炭-二叠系。

剖面处太古宇、中上元古界及下古生界均保存较完整,石炭-二叠系遭受不同程度剥蚀;中生界在两个洼槽中表现出不同的沉积特征,大口屯洼槽中表现为比较典型的半地堑特征,整体受控于宝坻断层由北向南减薄,孙校庄洼槽中则是整体向南增厚,且于大城凸起处被上覆的新近系削截,内部发育多个反向剪切断层;两个洼槽中古近系均呈半地堑特征由北向南减薄,顶部被新近系削截,但大口屯洼槽中东营组与孔店-沙河街组厚度接近,而孙校庄洼槽中孔店-沙河街组沉积明显厚于东营组沉积;新近系厚度在王草庄断层以南明显整体加厚。

宝坻断层该段平面上为仅EW走向,剖面上呈典型的犁式特征,滑脱面深度约4400m(TWT),主控了大口屯洼槽的沉积;大口屯断层已接近东侧断层端点,断距较小,其与王草

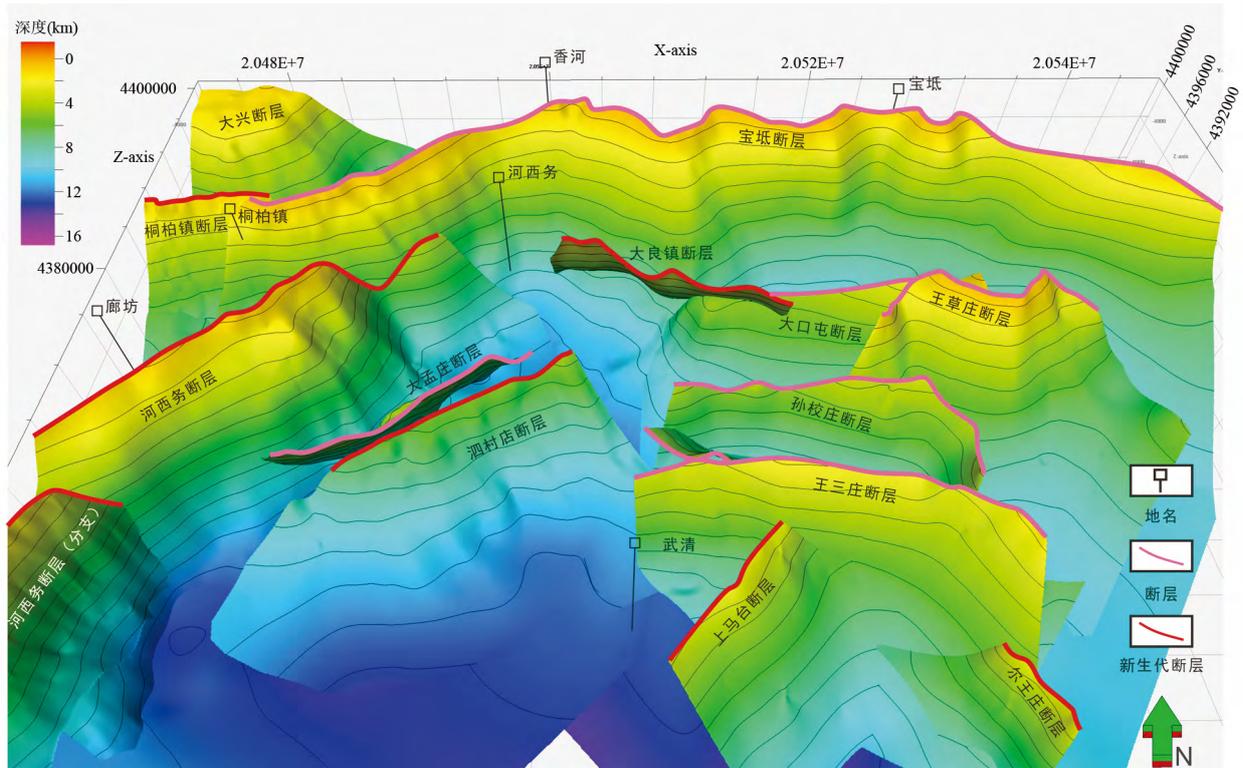


图9 武清凹陷主要断层三维结构模型

Fig. 9 3-D structural model of the main faults in Wuqing sag

庄断层不仅平面上呈叠置关系,且该段纵向上亦发生了硬连接;王草庄断层整体呈犁式特征,向上存在多个分支,且其所控制的孙校庄洼槽内亦存在多个反向剪切断层与其断面相交,其中,该剖面位置上,洼槽内的断层多活动于古近纪-新近纪,而杨村斜坡上的剪切断层多活动于中生代-古近纪早期;自杨村斜坡向大城凸起过渡处,还存在一条发育于晚古生代的断层,由于其中生代-古生代的裂陷活动中随王草庄断层上盘地层发生旋转变形,现今表现出较缓的倾角;大城凸起上还存在一条活动于新近纪的断层,断距较小但切穿了整个大城凸起,与宝坻断层等归于同一深部滑脱面。

3.2 武清凹陷内主要断层的三维结构模型

武清凹陷内主要发育 NE-NNE 及近 EW 走向两组的断层(图9)。其中,NE-NNE 走向断层主要受太行山山前断层控制,深部大多与太行山山前断层归于同一滑脱面,该组断层主要包括大兴断层、宝坻断层西段、河西务断层、大孟庄断层、泗村店断层、上马台断层及尔王庄断层,主要发育于武清断层西侧及东南侧杨村斜坡-大城凸起上。这一组断层属于冀中拗陷北部最为发育的 NE-NNE 向断裂体系,控制了冀中北部多个西断东超的凹陷的形成演化,并导致众多 NE 向条带状潜山带的发育(何登发等 2017, 2018),其伸展活动主要发生于古近纪-新近纪早期。

而近 EW 走向断层,包括大良镇断层、大屯口断层、王草

庄断层、孙校庄断层、王三庄断层,主要分布于武清凹陷东北侧,同时也处于冀中拗陷的东北角。该组断层空间上未与相临近的 NE 走向断层发生硬连接,向下归于宝坻断层滑脱面。除这组断层外,在整个冀中拗陷控制凹陷的边界断层中,仅南部的衡水断层呈近 EW 走向。

3.3 武清凹陷内新生界底面及中生界底面构造特征

武清凹陷新生代以来主要经历了古近纪的裂陷伸展及新近纪-第四纪的拗陷沉降。伸展活动整体控制了武清凹陷新生代以来的构造,古近系底面构造图清晰地反映了多条伸展断层活动所导致的上盘旋转下降形成的断陷及下盘抬升形成的下盘背斜(图10),武深1-武深6井处,发育与断层走向垂直的横向背斜。

整个武清凹陷新生代以来的构造形迹以 NE 走向为主导,河西务断层北段及宝坻断层成同向逼近的构造排列形式,控制了上盘整体呈 NE 走向的凹陷条带和整体倾向 NW 的断陷斜坡(杨村斜坡)。王草庄断层向 SE 方向的伸展,导致了孙校庄洼槽的形成,将武清凹陷东南部整体呈 NE 走向的大型凸起分割成了其北侧的王草庄凸起及其南侧的大城凸起。武清凹陷古近系底面的构造特征是对冀中拗陷北部古近纪 NW-SE 至 NNW-SSE 向张应力的响应,这一时期,凹陷内宝坻断层、杨税务断层、王三庄断层等近 EW 向断层的构造活动实际上是在先存断层活化的基础上进行的。

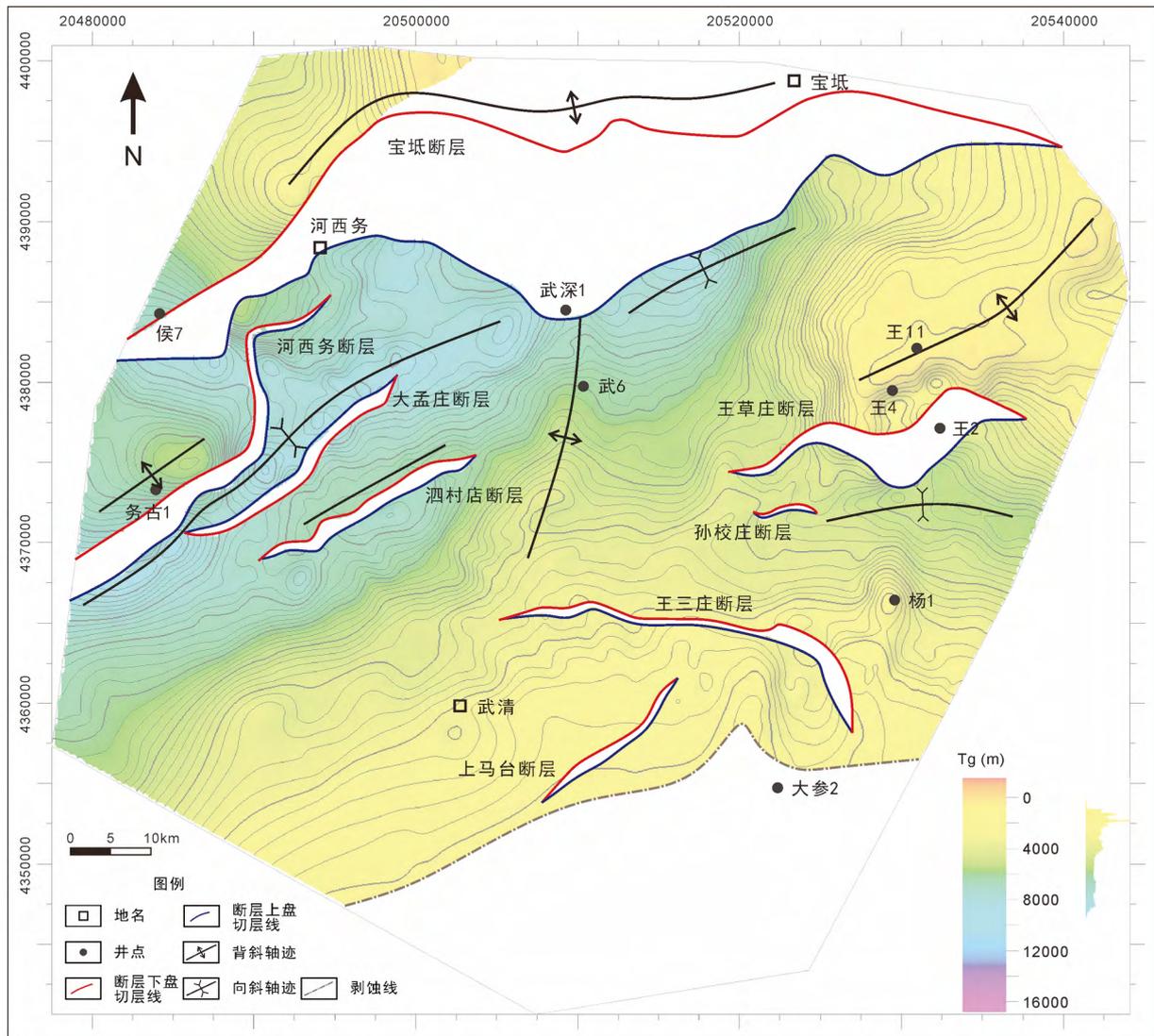


图 10 新生界底面(Tg) 构造图

Fig.10 Structural map of the Cenozoic base (Tg)

武清凹陷中生界沉积主要分布于凹陷东南侧杨村斜坡、王草庄凸起及大城凸起上,整体受古近纪 NW-SE 向大幅度伸展改造形成西北低东南高的结构(图 11)。中生界底面被多个近 EW 走向断层,以及 NE 走向的上马台断层所切割。中生界的剥蚀主要发生在河西务断层上盘一侧、武清断层西侧、王草庄凸起及大城凸起,从其剥蚀线 NE-NNE 走向的形迹可大致判断该剥蚀是在 NW-SE 至 NWW-SEE 向的挤压应力环境下形成的,形成时间应为中-晚侏罗纪。

与古近系底面构造图对比,结合地震剖面上断层大致活动时间的信息,可知武清凹陷内宝坻断层、大口屯断层、孙校庄断层、王草庄断层、王三庄断层等近 EW 走向断层于中生界沉积前受近 NS 向挤压构造影响发生逆冲活动,早侏罗世受 NS 向伸展作用控制一系列近 EW 向裂隙沉积,其中宝坻断层在中晚侏罗世受 NW-SE 向挤压再度发生逆冲活动,古近纪宝坻断层、王三庄断层、王草庄断层在 NW-SE 向伸展作

用下持续活动,而大口屯、孙校庄断层几乎不活动。

4 讨论

4.1 武清凹陷的构造演化

基于对 CC' 剖面的平衡复原,结合对武清凹陷内不整合面、断层几何学及运动学特征、地层沉积特征和构造变形的分析与区域构造事件,建立了渤海湾盆地北部武清凹陷晚古生代以来的构造演化过程(图 12)。

在华北克拉通形成之后,中元古代-奥陶纪末期,武清凹陷均处于克拉通内部,接受较稳定的浅海型地台盖层沉积,形成了太古宇-中新元古界-上古生界厚度变化相对较小的稳定沉积。该时期燕山-武清凹陷地层沉积厚度及沉积相均较为一致(图 3),渤海湾盆地与燕山处于较为统一的克拉通内

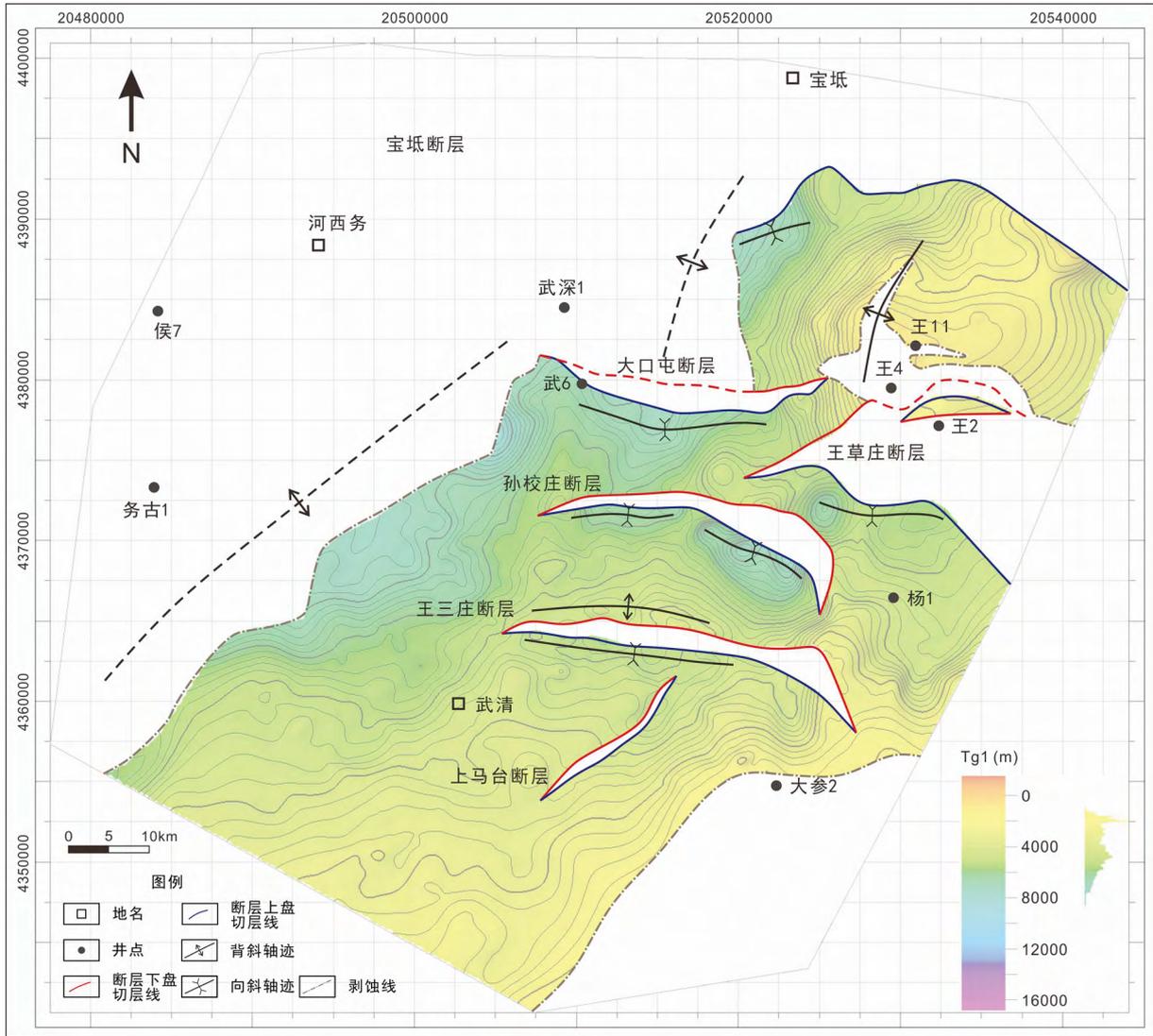


图 11 中生界底面 (Tg1) 构造图
Fig. 11 Structural map of the Mesozoic base (Tg1)

沉积环境。

石炭-二叠纪,武清凹陷接受海陆交互沉积,整体较为稳定。剖面上发育一条终止于石炭-二叠系下部,断距较小的孤立伸展断层,该期剖面伸展量仅 0.26km,伸展率 0.6%。该期武清凹陷内地层沉积厚度略厚于燕山地区。

三叠纪,武清凹陷受北部板块汇聚影响,深部发育逆冲断层活动导致了上覆断层转折褶皱的形成及石炭-二叠系地层的剥蚀,但研究区内该期构造活动较弱,通过平衡剖面恢复得到的挤压量为 0.34km,地层缩短率 0.7%。

早侏罗世,武清凹陷内发生裂隙-拗陷活动,受控于近 EW 走向断层(图 9、图 12),在构造演化剖面上亦可识别出较明显的伸展断层;中-晚侏罗世,武清凹陷受 SE 向 NW 方向挤压作用,导致中生界大范围剥蚀;白垩纪武清凹陷整体为区域性隆起。在早侏罗世-白垩纪构造叠加影响下,武清凹陷整体伸展量 1.6km,伸展率 3.27%。

古近纪孔店组-沙河街组沉积期,武清凹陷内发生大规模裂陷,对应于冀中拗陷裂陷 I-II 幕,主要受控于 NE 向断层。演化剖面伸展量达 3.1km,伸展率 6.34%。

古近纪东营组沉积期,武清凹陷持续处于裂陷活动中。东营组沉积末期,武清凹陷进入断-拗转换阶段,导致东营组较大范围遭受剥蚀。该期演化剖面伸展量为 1.1km,伸展率 2.12%。

新近纪-第四纪武清凹陷整体进入热沉降期,但新近纪早期仍有部分断层活动,形成了众多发育于新近系内部的伸展断层,它们大多呈近 EW 走向。该期演化剖面伸展量为 0.8km,伸展率为 1.52%。

4.2 邻区主要构造事件及武清凹陷-燕山褶皱带的构造响应

通过对武清凹陷-燕山褶皱带的盆地发育与构造演化的

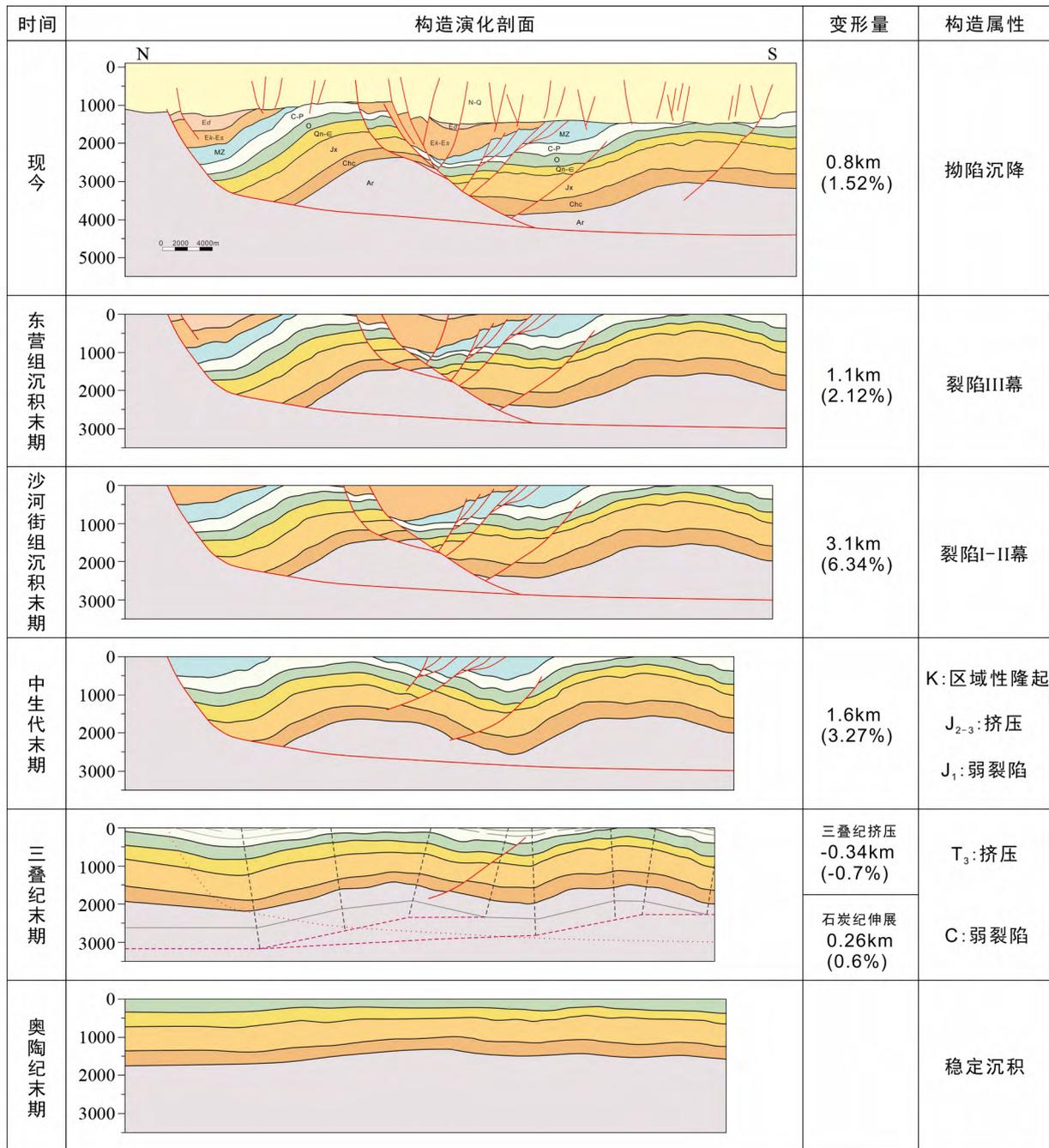


图 12 武清凹陷构造演化剖面

Fig.12 Structural evolution profiles of the Wuqing sag

分析 结合前人对周缘大地构造演化的讨论,该地区中生代以来的构造演化可划分为以下 6 个阶段:

1) 三叠纪近南北向挤压阶段。受北部板块汇聚影响(王瑜,1996,1998;王瑜等 2018),三叠纪武清凹陷内形成近 EW 走向挤压构造,凹陷内可于多条地震剖面内识别出该期构造,主要表现为与王草庄断层等近 EW 走向断裂的冲断活动以及中生界底面对石炭二叠系地层的削截(图 6、图 8、图 9)。虽然三叠纪期构造在武清凹陷内表现出的活动强度不大(图

12),但该期构造所形成的近 E-W 走向构造对后期构造变形有着重要影响。此时燕山构造带亦处于挤压应力体制下,燕山南带局部于晚三叠世形成了近东西向或北东东向的挠曲型盆地,其中除局部三叠系连续沉积于二叠系之上,大部分不整合与奥陶系灰岩之上(刘少峰等 2004a; Li *et al.* 2004; Liu *et al.* 2018; 张长厚等 2004a; Wang *et al.* 2011)

2) 早-中侏罗世克拉通内拗陷沉积。武清凹陷内可识别出受控于 EW 走向断层控制的局部裂陷和大范围的拗陷沉

积(图 11) 构造演化剖面上亦可识别出伸展断层活动(图 12)。此时燕山构造带内发育东西向分布的盆地,且范围向南北扩展,构造活动加强,沉降深度加大(Li *et al.*, 2004; 刘少峰等, 2004a; 吴智平等, 2007)。

3) 中晚侏罗世 NW-SE 向挤压。武清凹陷受控于西太平洋伊佐奈歧板块俯冲的影响(Maruyama, 1997), 处于 NW-SE 向挤压环境之下(刘少峰等, 2004a, b; 吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2012), 凹陷西北侧中生界大范围剥蚀, 剥蚀线呈近 NE 走向(图 11), 这一结构与冀中拗陷北部前中生代地层 NW 侧整体遭受剥蚀的特征一致(何登发等, 2017)。此时燕山构造带处于挤压-压扭的构造环境下, 燕山南带形成了一系列 NE 走向的盆地, 盆地群具东西向或北东向带状分布特征(Li *et al.*, 2004), 为逆冲推覆前缘沉积(张长厚等, 2004a) 或前陆性质沉积(Li *et al.*, 2004)。

4) 白垩纪武清凹陷内钻井及地震资料均无明显沉积记录, 处于整体隆升阶段, 而此时燕山褶皱带内在多幕裂陷作用下盆地全分布, 主体属伸展盆地性质(Li *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2015)。

5) 古近纪 NW-SE 向伸展。渤海湾盆地发育大规模裂陷, 并表现出幕式活动特征(马杏垣等, 1983; 徐杰和计凤桔, 2015)。孔店组-沙河街组沉积期, 武清凹陷内发生裂陷活动, 对应于冀中拗陷裂陷 I-II 幕, 主要受控于 NE 向断层, 盆地走向以 NE-NNE 向为主。东营组沉积期, 伸展应力方向由 NW-SE 逐渐转变为近 N-S 向, 盆地发育逐渐由 NW 向 SE 方向迁移(何登发等, 2018)。东营组沉积末期, 武清凹陷进入断-拗转换阶段, 导致东营组较大范围遭受剥蚀。该阶段燕山构造带内无明显构造响应, 未见古近系出露。

6) 新近纪-第四纪拗陷作用。新近纪-第四纪渤海湾盆地整体进入裂后热沉降阶段, 武清凹陷整体进入拗陷期, 但新近纪早期仍有部分断层活动, 形成了众多发育于新近系内部的伸展断层, 大多呈近 EW 走向(徐杰和计凤桔, 2015)。燕山构造带内仅局部沉积第四系。

5 结论

(1) 宝坻断层整体走向近 EW 向, 大部分断面呈上陡下缓的犁式正断层特征, 中段部分区域表现为“坡坪式”结构, 其延伸长度约 68km, 最大位移达 14.2km。

(2) 宝坻断层横向上分段性明显, 基于其三维结构及其断面倾向变化, 以 3 个垂向转折轴面将其分为西一段、西二段、中段及东段共四段, 且其滑脱面结构也存在较明显的分段性, 深度约 10~15km。

(3) 宝坻断层整体位移存在明显的分段性, 且这一分段特征与其几何学上的分段有着较好的相关性, 表明其现今多次转折的结构与其生长过程密切相关。古近系底面、东营组底面及新近纪底面位移-距离曲线特征表明, 其于沙河街组沉积期由多个断层段逐渐连锁, 至东营组沉积期之前形成整

体断面, 其活动于新近纪逐渐减弱, 且断层两端先停止活动。

(4) 中生代以来, 武清凹陷-燕山褶皱带主要受三叠纪、早-中侏罗世、中-晚侏罗世、白垩纪、古近纪和新近纪-第四纪 6 个构造演化阶段的影响, 三叠纪-侏罗纪末期, 武清凹陷与燕山褶皱带经历了相似的构造演化过程, 而自白垩纪以来, 两者的构造-沉积响应出现了明显的分异, 这表明白垩纪燕山褶皱带内的沉积与古近纪-新近纪集中于武清凹陷及渤海湾盆地的沉积可能有着不同的深部构造背景。

致谢 感谢管树巍教授、鲁人齐副研究员和本刊编辑对本文提出的宝贵修改意见。中石油华北油田分公司地球物理研究院提供了相应的钻井和地震资料, 在此表示诚挚的感谢!

References

- Allen MB, Macdonald DIM, Zhao X, Vincent SJ and Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two-phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 14(7-8): 951-972
- Bonini L, Basili R, Toscani G, Burrato P, Seno S and Valensise G. 2015. The role of pre-existing discontinuities in the development of extensional faults: An analog modeling perspective. *Journal of Structural Geology*, 74: 145-158
- Cao XZ, Li SZ, Xu LQ, Guo LL, Liu LP, Zhao SJ, Liu X and Dai LM. 2015. Mesozoic-Cenozoic evolution and mechanism of tectonic geomorphology in the central North China Block: Constraint from apatite fission track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 41-53
- Chen A. 1998. Geometric and kinematic evolution of basement-cored structures: Intraplate orogenesis within the Yanshan Orogen, northern China. *Tectonophysics*, 292(1-2): 17-42
- Chen L, Zheng TY and Xu WW. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09312
- Chen L. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 120(1-2): 96-115
- Cowie PA, Underhill JR, Behn MD, Lin J and Gill CE. 2005. Spatio-temporal evolution of strain accumulation derived from multi-scale observations of Late Jurassic rifting in the northern North Sea: A critical test of models for lithospheric extension. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(3-4): 401-419
- Davis GA, Zheng YD, Wang C, Darby BJ, Zhang CH and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. *Geological Society of America Memoir* 194: 171-197
- Dou LR. 2000. Boundary fault propagation pattern and its application to the formation of petroleum systems in the Erlian basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2): 27-30 (in Chinese with English abstract)
- Du JH. 2002. Buried Hill Oil and Gas Complex Zone in Jizhong Sub-basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 564-570 (in Chinese)
- Du JH, Zhao XZ, Zhang YM, Zhang RF, Cao LZ and Tian JZ. 2012. Great discovery made in risk exploration of Niudong1 well and its significance. *China Petroleum Exploration*, 17(1): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- Gao LM, He DF, Gui BL, Wang JH and Chen WJ. 2014. Three-dimensional geometrical and kinematic characteristics of boundary

- faults in Minfeng subsag Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 598–606
- Gui BL, He DF, Yan FW and Zhang WJ. 2012. 3D geometry and kinematics of Daxing fault: Its constraints on the origin of Langgu Depression, Bohai Gulf Basin, China. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 86–99 (in Chinese with English abstract)
- Gui BL, He DF, Chen WJ and Zhang WJ. 2014. Migration of growth axial surfaces and its implications for multiphase tectono-sedimentary evolution of the Zhangwu fault depression, southern Songliao Basin, NE China. *Journal of Geodynamics*, 75: 53–63
- He DF, Cui YQ, Zhang YY, Shan SQ, Xiao Y, Zhang CB, Zhou CA and Gao Y. 2017. Structural genetic types of paleo-buried hill in Jizhong depression, Bohai Bay Basin, *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1338–1356 (in Chinese with English abstract)
- He DF, Cui YQ, Shan SQ, Xiao Y, Zhang YY and Zhang CB. 2018. Characteristics of geologic framework of buried-hill in Jizhong depression, Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology*, 53(1): 1–24 (in Chinese with English abstract)
- Huabei Petroleum Exploration and Development Research Institute. 1982. *The Buried Hill Reservoir*. Beijing: Petroleum Industry Press, 117–128 (in Chinese)
- Jackson CAL, Chua ST, Bell RE and Magee C. 2013. Structural style and early stage growth of inversion structures: 3D seismic insights from the Egersund Basin, offshore Norway. *Journal of Structural Geology*, 46: 167–185
- Khani HF and Back S. 2015. The influence of pre-existing structure on the growth of syn-sedimentary normal faults in a deltaic setting, Niger Delta. *Journal of Structural Geology*, 73: 18–32
- Li CM, Zhang CH, Cope TD and Lin Y. 2016. Out-of-sequence thrusting in polycyclic thrust belts: An example from the Mesozoic Yanshan belt, North China Craton. *Tectonics*, 35(9): 2082–2116
- Li DS. 1982. The structural characteristics of the eastern China petroliferous basins. *Petroleum Exploration and Development*, (2): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Qian XL and Gu YC. 1998 Outline of Paleoproterozoic tectonic division and plate tectonic evolution of North China Craton. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 23(3): 230–235 (in Chinese with English abstract)
- Li QS, Gao R, Zhang CK, Zhao JR, Guan Y and Zhang JS. 2008. Remainder crustal root and decoupling-main characteristics of crust structure beneath the Yanshan Intracontinent Orogen. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(2): 129–136 (in Chinese with English abstract)
- Li SL, Lai XL, Liu BF, Wang ZS, He JY and Sun Y. 2011. Differences in lithospheric structures between two sides of Taihang Mountain obtained from the Zhucheng-Yichuan deep seismic sounding profile. *Science China (Earth Sciences)*, 54(6): 871–880
- Li SZ, Suo YH, Dai LM, Liu LP, Jin C, Liu X, Hao TY, Zhou LH, Liu BH, Zhou JT and Jiao Q. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64–89 (in Chinese with English abstract)
- Li W, Wu ZP and Zhao WD. 2010. Structural characteristics and basin transformation in the Bohai Bay basin in the Yanshan era. *Progress in Geophysics*, 25(6): 2068–2077 (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Liu SF, Zhang JF and Wang QC. 2004. Typical basin-fill sequences and basin migration in Yanshan, North China: Response to Mesozoic tectonic transition. *Science in China (Series D)*, 47(2): 181–192
- Liu SF, Li Z and Zhang JF. 2004a. Mesozoic basin evolution and tectonic mechanism in Yanshan, China. *Science in China (Series D)*, 47(Suppl. 2): 24–38
- Liu SF, Zhang JF, Li Z and Wang QC. 2004b. Late Jurassic basin-fill record and its implication for basin margin tectonism, Chengde Yanshan Mountains, North China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 245–254 (in Chinese with English abstract)
- Liu SF, Lin CF, Liu XB and Zhuang QT. 2018. Syn-tectonic sedimentation and its linkage to fold-thrusting in the region of Zhangjiakou, North Hebei, China. *Science China (Earth Sciences)*, 61(6): 681–710
- Ma XY, Liu HF, Wang WX and Wang YP. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 22–32 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G and Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750Ma to the present. *Island Arc*, 6(1): 121–142
- Min B, Xin WJ, Zhang HJ, Lv YH and Li XY. 2015. Sequence stratigraphy and reservoir potential in the Wenan inner-slope of the Baxian sag, Bohai Bay Basin, eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 68: 695–704
- Peacock DCP and Sanderson DJ. 1991. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journal of Structural Geology*, 13(6): 721–733
- Peacock DCP. 2002. Propagation, interaction and linkage in normal fault systems. *Earth-Science Review*, 58(1–2): 121–142
- Qi G and Chen QF. 2015. Distribution of the crustal thickness and Poisson's ratio beneath the junction of the Taihangshan and the Yanshan tectonic belts. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(9): 3239–3250 (in Chinese with English abstract)
- Qu HJ, Meng QR and Zhang YL. 2006. Late Jurassic volcano-sedimentary sequences, filling process and evolution of basins in the Chengde area, Yanshan tectonic belt, China. *Geological bulletin of China*, 25(11): 1326–1337 (in Chinese with English abstract)
- Ren JS, Chen TY, Niu BG, Liu ZG and Liu FR. 1990. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 1–205 (in Chinese with English abstract)
- Shawn JH, Hook SC and Sitohang EP. 1997. Extensional fault-bend folding and synrift deposition: An example from the central Sumatra Basin, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 81(3): 367–380
- Sun DS, Liu CY, Yang MH, Du JH, Zhang YM and Zhang RF. 2004. Study on complex extensional structures in the middle Jizhong depression in the Bohai bay basin. *Geological Review*, 50(5): 484–491 (in Chinese with English abstract)
- Suppe J, Chou GT and Hook SC. 1992. Rates of folding and faulting determined from growth strata. In: McClay KR (ed.). *Thrust Tectonics*. New York: Chapman and Hall, 105–121
- Walsh JJ, Bailey WR, Childs C, Nicol A and Bonson CG. 2003. Formation of segmented normal faults: A 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8): 1251–1262
- Wang CY, Wu QJ, Duan YH, Wang ZS and Lou H. 2017. Crustal and upper mantle structure and deep tectonic genesis of large earthquakes in North China. *Science China (Earth Sciences)*, 60(5): 821–857
- Wang Y. 1996. Tectonic Processes of the Inner Mongolia-Yanshan Orogenic Belt in Eastern China during the Late of Late Paleozoic-Mesozoic. Beijing: Geological Publishing House, 1–142 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 1998. Evolution and Dynamics of the Orogenic Belts and Basins in North China since the Mesozoic. Beijing: Geological Publishing House, 1–92 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 2006. The onset of the Tan-Lu fault movement in eastern China: Constraints from zircon (SHRIMP) and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Terra Nova*, 18(6): 423–431
- Wang Y, Zhou LY and Li JY. 2011. Intracontinental superimposed tectonics: A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5–6): 1033–1055
- Wang Y, Sun LX, Zhou LY and Xie YT. 2018. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China. *Science China (Earth Sciences)*, 61(5): 499–514
- Wei HH, Meng QR, Wu GL and Li L. 2012. Multiple controls on rift basin sedimentation in volcanic settings: Insights from the anatomy of a small Early Cretaceous basin in the Yanshan belt, northern North

- China. Geological Society of America Bulletin, 124(3-4): 380-399
- Whipp PS, Jackson CAL, Schlische RW, Withjack MO and Gawthorpe RL. 2016. Spatial distribution and evolution of fault-segment boundary types in rift systems: Observations from experimental clay models. Geological Society, London, Special Publications, 439: 79-107
- Wong WH. 1926. Crustal movement in Eastern China. In: Proceeding of the 3rd Pan-Pacific Science Congress. Tokyo, 642-685
- Wong WH. 1927. Crustal movements and igneous activities in eastern China since Mesozoic time. Acta Geologica Sinica, 6(1): 9-37
- Wong WH. 1929. The Mesozoic orogenic movement in eastern China. Acta Geologica Sinica, 8(1): 33-44
- Wu FY, Xu YG, Gao S and Zheng JP. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract)
- Wu KY, Wang YJ and Li ZQ. 2010a. Palaeo-karst development model of the Pre-Tertiary carbonate rock in Jizhong depression. Carsologica Sinica, 29(4): 402-409 (in Chinese with English abstract)
- Wu KY, Wang YJ, Zhang JL and Zang MF. 2010b. Development rule and controlling factors of Pre-Tertiary Karst in Jizhong depression, Bohaiwan basin. Marine Origin Petroleum Geology, 15(4): 14-22 (in Chinese with English abstract)
- Wu ZP, Hou XB and Li W. 2007. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the eastern North China block. Geotectonica et Metallogenia, 31(4): 385-399 (in Chinese with English abstract)
- Xiao HB and Suppe J. 1992. Origin of rollover. AAPG Bulletin, 76(4): 509-529
- Xiong XS, Gao R, Zhang XZ, Li QS and Hou HS. 2011. The Moho depth of North China and Northeast China revealed by seismic detection. Acta Geoscientia Sinica, 32(1): 46-56 (in Chinese with English abstract)
- Xu H, Liu YQ, Liu YX and Kuang HW. 2011. Stratigraphy, sedimentology and tectonic background of basin evolution of the Late Jurassic-Early Cretaceous Tuchengzi Formation in Yinshan-Yanshan, North China. Earth Science Frontiers, 18(4): 88-106
- Xu J, Gao ZW and Song CQ. 2000. The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang Mountain. Seismology and Geology, 22(2): 111-122 (in Chinese with English abstract)
- Xu J, Gao ZW, Sun JB and Song CQ. 2001. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments: A case study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain. Acta Geologica Sinica, 75(2): 165-174 (in Chinese with English abstract)
- Xu J and Ji FJ. 2015. The Structure and Evolution of the Bohai Bay Basin. Beijing: Seismological Press, 41-50 (in Chinese)
- Xu JW, Zhu G, Tong WX, Cui K and Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 134(4): 273-310
- Yang MH, Liu CY and Yang BY. 2001. Tectonic transform of the Mesozoic and their relations to hydrocarbon traps in the Jizhong (central Hebei Province) basin, China. Geotectonica et Metallogenia, 25(2): 113-119 (in Chinese with English abstract)
- Yang XP, Liu BJ, Zhan Y, Ji JF, Xu XW, Feng SY, Gao CJ, Zhao WL, Liang WG and Du XQ. 2016. Survey of crustal structure and fault activity around southern Shijiazhuang in the eastern margins of Taihangshan Mts. Chinese Journal of Geophysics, 59(2): 528-542 (in Chinese with English abstract)
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. Tectonophysics, 488(1-4): 293-325
- Zhai MG, Meng QR, Liu JM, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF, Liu W, Shao JA and Zhu RX. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics. Earth Science Frontiers, 11(3): 285-294 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH and Song HL. 1996. Tectonic features and deformation mechanism of Mesozoic thrust tectonics in Yanshan intraplate orogen. Journal of Geomechanics, 12(3): 21-22 (in Chinese)
- Zhang CH, Wu GG, Xu DB, Wang GH and Sun WH. 2004a. Mesozoic tectonic framework and evolution in the central segment of the intraplate Yanshan orogenic belt. Geological Bulletin of China, 23(9): 864-875 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH, Xu DB, Zhang WJ, Cope T, Wang GH, Sun WH, Xiao WF, Zhang ZY and Zhang JL. 2004b. Syntectonic sedimentation analysis applied to the reconstruction of the thrusting deformation process: An example from the Mesozoic thrust tectonics in eastern Yanshan Orogenic Belt, south of Lingyuan City, western Liaoning Province. Earth Science Frontiers, 11(3): 227-243 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH, Zhang Y, Li HL, Wu GG, Wang GH, Xu DB, Xiao WF and Dai L. 2006. Late Mesozoic thrust tectonics framework in the western part of the Yanshan orogenic belt and the Western Hills of Beijing: Characteristics and significance. Earth Science Frontiers, 13(2): 165-183 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH, Li CM, Deng HL, Liu Y, Liu L, Wei B, Li HB and Liu Z. 2011. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China craton. Science China (Earth Sciences), 54(6): 798-822
- Zhang CH, Deng HL, Li CM, Liu Z, Deng HD and Teng F. 2012. An out-of-syncline thrust model for the "Chengde Thrust Sheet" in central intraplate Yanshan Orogenic Belt, northern North China Craton. Earth Science Frontiers, 19(5): 27-40 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HR, Zhang YK, Cai XM, Qu HJ, Li HL and Wang M. 2013. The triggering of Yanshan Movement: Yanshan Event. Acta Geologica Sinica, 87(12): 1779-1790 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JS, Xu J, Wan JL, Zhang JX and Gao ZW. 2002. Meso-Cenozoic detachment zones in the front of the Taihang Mountains and their fission-track ages. Geological Bulletin of China, 21(4): 207-210 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Gao R, Li HY, Hou HS, Wu HC, Li QS, Yang K, Li C, Li WH, Zhang JS, Yang TS, Keller GR and Liu M. 2014. Crustal structures revealed from a deep seismic reflection profile across the Solonker suture zone of the Central Asian Orogenic Belt, northern China: An integrated interpretation. Tectonophysics, 612-613: 26-39
- Zhao XZ, Jin Q, Zhang L, Liang HB and Jin FM. 2010. Accumulation conditions and perspectives of coal-derived hydrocarbon of Carboniferous-Permian in northern Jizhong depression, Bohai bay basin. Petroleum Geology & Experiment, 32(5): 459-464 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XZ, Jin FM, Wang Q and Bai GP. 2015. Buried-hill play, Jizhong subbasin, Bohai Bay basin: A review and future prospectivity. AAPG Bulletin, 90(1): 1-26
- Zhao Y. 1990. The Mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area. Geological Review, 36(1): 1-13 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia. Scientia Geologica Sinica, 29: 105-119 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Xu G, Zhang SH, Yang ZY, Zhang YQ and Hu JM. 2004. Yanshanian Movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. Earth Science Frontiers, 11(3): 319-328 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Song B, Zhang SH and Liu J. 2006. Geochronology of the inherited zircons from Jurassic Nandaling basalt of the Western Hills of Beijing, North China: Its implications. Earth Science Frontiers, 13(2): 184-190 (in Chinese with English abstract)
- Zheng TY, Chen L, Zhao L and Zhu RX. 2007. Crustal structure across the Yanshan belt at the northern margin of the North China Craton. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 161(1-2): 36-49
- Zheng TY, Duan YH, Xu WW and Ai YS. 2017. A seismic model for crustal structure in North China Craton. Earth and Planetary Physics, 1(1): 26-34

- Zhou LH, Li SZ, Liu JZ and Gao ZP. 2003. The Yanshanian structural style and basin prototypes of the Mesozoic Bohai Bay Basin. *Progress in Geophysics*, 18(4): 692 - 699 (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Wang YS, Liu GS, Niu ML, Xie CL and Li CC. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27(8): 1379 - 1398
- Zhu G, Niu ML, Xie CL and Wang YS. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin. *The Journal of Geology*, 118(3): 277 - 293
- Zhu RX, Xu YG, Zhu G, Zhang HF, Xia QK and Zheng TY. 2012. The craton destruction in North China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 42(8): 1135 - 1159 (in Chinese)
- Zhu RX, Fan HR, Li JW, Meng QR, Li SR and Zeng QD. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China (Earth Sciences)*, 58(9): 1523 - 1537
- 附中文参考文献**
- 窦立荣. 2000. 二连盆地边界断层的生长模型及其对含油气系统形成的控制. *石油勘探与开发*, 27(2): 27 - 30
- 杜金虎. 2002. 冀中拗陷古潜山复式油气聚集区. 北京: 科学出版社, 564 - 570
- 杜金虎, 赵贤正, 张以明, 张锐锋, 曹兰柱, 田建章. 2012. 牛东1风险探井重大发现及其意义. *中国石油勘探*, 17(1): 1 - 7
- 桂宝玲, 何登发, 闫福旺, 张文君. 2012. 大兴断层的三维几何学与运动学及其对廊固凹陷成因机制的约束. *地学前缘*, 19(5): 86 - 99
- 何登发, 崔永谦, 张煜颖, 单帅强, 肖阳, 张传宝, 周从安, 高园. 2017. 渤海湾盆地冀中拗陷古潜山的构造成因类型. *岩石学报*, 33(4): 1338 - 1356
- 何登发, 崔永谦, 单帅强, 肖阳, 张煜颖, 张传宝. 2018. 渤海湾盆地冀中拗陷古潜山的三维地质结构特征. *地质科学*, 53(1): 1 - 24
- 华北石油勘探开发设计研究院. 1982. 潜山油气藏. 北京: 石油工业出版社, 117 - 128
- 李德生. 1982. 中国东部含油气盆地的构造特征. *石油勘探与开发*, (2): 1 - 14
- 李江海, 钱祥麟, 谷永昌. 1998. 华北克拉通古元古代区域构造格架及其板块构造演化探讨. *地球科学—中国地质大学学报*, 23(3): 230 - 225
- 李秋生, 高锐, 张成科, 赵金仁, 管焯, 张季生. 2008. 残余壳根与“三明治”结构——燕山造山带中段地壳结构的主要特征. *地球学报*, 29(2): 129 - 136
- 李松林, 赖晓玲, 刘宝峰, 王志铄, 何加勇, 孙译. 2011. 由诸城-宜川人工地震剖面反演结果看太行山两侧岩石圈结构的差异. *中国科学(地球科学)*, 41(5): 668 - 677
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. *地学前缘*, 17(4): 64 - 89
- 李伟, 吴智平, 赵文栋. 2010. 渤海湾盆地地区燕山期构造特征与盆地转型. *地球物理学进展*, 25(6): 2068 - 2077
- 刘少峰, 李忠, 张金芳. 2004a. 燕山地区中生代盆地演化及构造体制. *中国科学(D辑)*, 34(增1): 19 - 31
- 刘少峰, 张金芳, 李忠, 王清晨. 2004b. 燕山承德地区晚侏罗世盆地充填记录及对盆缘构造作用的指示. *地学前缘*, 11(3): 245 - 254
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中-新生代裂陷作用和伸展构造. *地质学报*, 57(1): 22 - 32
- 齐刚, 陈棋福. 2015. 太行山与燕山交汇部位的地壳厚度与泊松比分布特征. *地球物理学报*, 58(9): 3239 - 3250
- 渠洪杰, 孟庆任, 张英利. 2006. 燕山构造带承德地区晚侏罗世盆地火山-沉积地层充填过程和构造演化. *地质通报*, 25(11): 1326 - 1337
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1 - 205
- 孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 杜金虎, 张以明, 张锐锋. 2004. 渤海湾盆地冀中拗陷中区中生代复合伸展构造. *地质评论*, 50(5): 484 - 491
- 王椿镛, 吴庆举, 段永红, 王志铄, 楼海. 2017. 华北地壳上地幔结构及其大地震深部构造成因. *中国科学(地球科学)*, 47(6): 684 - 719
- 王瑜. 1996. 中国东部内蒙古-燕山造山带晚古生代晚期-中生代的造山作用过程. 北京: 地质出版社, 1 - 142
- 王瑜. 1998. 中生代以来华北地区造山带与盆地的演化及动力学. 北京: 地质出版社, 1 - 92
- 王瑜, 孙立新, 周丽云, 谢玥婷. 2018. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论. *中国科学(地球科学)*, 48(5): 521 - 535
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. *岩石学报*, 24(6): 1145 - 1174
- 吴孔友, 王雨洁, 李竹强. 2010a. 冀中拗陷前第三系碳酸盐岩岩溶发育模式. *中国岩溶*, 29(4): 402 - 409
- 吴孔友, 王雨洁, 张瑾琳, 臧明峰. 2010b. 冀中拗陷前第三系岩溶发育规律及其控制因素. *海相油气地质*, 15(4): 14 - 22
- 吴智平, 侯旭波, 李伟. 2007. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨. *大地构造与成矿学*, 31(4): 385 - 399
- 熊小松, 高锐, 张兴洲, 李秋生, 侯贺晟. 2011. 深地震探测揭示的华北及东北地区莫霍面深度. *地球学报*, 32(1): 46 - 56
- 许欢, 柳永清, 刘燕学, 旷红伟. 2011. 阴山-燕山地区晚侏罗世-早白垩世土城子组地层、沉积特征及盆地构造属性分析. *地学前缘*, 18(4): 88 - 106
- 徐杰, 高战武, 宋长青. 2000. 太行山山前断裂带的构造特征. *地震地质*, 22(2): 111 - 122
- 徐杰, 高战武, 孙建宝, 宋长青. 2001. 区域伸展体制下盆-山构造耦合关系的探讨——以渤海湾盆地和太行山为例. *地质学报*, 75(2): 165 - 174
- 徐杰, 计凤桔. 2015. 渤海湾盆地构造及其演化. 北京: 地震出版社, 41 - 50
- 杨明慧, 刘池阳, 杨斌谊. 2001. 冀中拗陷中生代构造变形的转换及油气. *大地构造与成矿学*, 25(2): 113 - 119
- 杨晓平, 刘保金, 詹艳, 姬计法, 徐锡伟, 鄧少英, 高翠君, 赵万里, 梁贵平, 杜晓泉. 2016. 太行山东缘石家庄南部地壳结构及断裂活动性探测. *地球物理学报*, 59(2): 528 - 542
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004. 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. *地学前缘*, 11(3): 285 - 297

- 张长厚, 宋鸿林. 1996. 燕山板内造山带中生代逆冲构造样式及形成过程. 地质力学学报, 2(3): 21-22
- 张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 王根厚, 孙卫华. 2004a. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化. 地质通报, 23(9): 864-875
- 张长厚, 徐德斌, 张维杰, Cope T, 王根厚, 孙卫华, 肖伟峰, 张忠义, 张军龙. 2004b. 同构造沉积分析反演逆冲构造变形过程——燕山东段凌源南部中生代逆冲构造变形过程研究. 地学前缘, 11(3): 227-243
- 张长厚, 张勇, 李海龙, 吴淦国, 王根厚, 徐德斌, 肖伟峰, 戴凛. 2006. 燕山西段及北京西山晚中生代逆冲构造格局及其地质意义. 地学前缘, 13(2): 165-183
- 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 2011. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. 中国科学(地球科学), 41(5): 593-617
- 张长厚, 邓洪菱, 李程明, 刘孜, 邓洪旦, 滕飞. 2012. 燕山板内造山带中部“承德逆冲构造”的褶皱相关断裂构造模型. 地学前缘, 19(5): 27-40
- 张宏仁, 张永康, 蔡向民, 渠洪杰, 李海龙, 王猛. 2013. 燕山运动的“绪动”——燕山事件. 地质学报, 87(12): 1779-1790
- 张家声, 徐杰, 万景林, 张剑玺, 高占武. 2002. 太行山山前中-新生代伸展拆离构造和年代学. 地质通报, 21(4): 207-210
- 赵贤正, 金强, 张亮, 梁宏斌, 金凤鸣. 2010. 渤海湾盆地冀中坳陷北部石炭-二叠系煤成油气成藏条件及勘探前景. 石油实验地质, 32(5): 459-464
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评, 36(1): 1-13
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105-119
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319-328
- 赵越, 宋彪, 张拴宏, 刘健. 2006. 北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义. 地学前缘, 13(2): 184-190
- 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 高振平. 2003. 渤海湾盆地燕山期构造特征与原型盆地. 地球物理学进展, 18(4): 692-699
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学(地球科学), 42(8): 1135-1159