

冀中坳陷中北部新生代构造演化特征

董大伟¹,李 理¹,刘 建²,李继岩²

[1. 中国石油大学 地球科学与技术学院,山东 青岛 266555; 2. 中国石化 胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257000]

摘要:在精细地震解释的基础上,采用断层落差法、断层活动强度法、平衡剖面技术和构造物理模拟实验等技术手段,确定了研究区的构造发育特征与构造形成演化过程,并讨论了构造形成机制。结果表明,冀中坳陷中北部在新生代伸展过程中以伸展构造样式为主,兼有走滑构造样式。其中,霸县凹陷以翘倾和滑动断阶构造样式为主,饶阳凹陷背斜构造样式占优,其最北部以走滑构造样式为主。受控于控凹断层的活动性,霸县凹陷和饶阳凹陷不同沉积时期,伸展强度具有较大差异性。饶阳凹陷自南向北受控于留路、河间和马西断层,凹陷的伸展量具有早期(E_k — E_s^4)“南部大于中北部”,向中、晚期(E_s^3 — E_d)逐渐过渡为“中北部大于南部”的特征。霸县凹陷受控于牛东断层沿走向活动性差异,具有南段“早期强—中晚期弱”、中段“早期弱—中期强—晚期较弱”和北段“早期弱—中晚期强”的构造演化过程。利用构造物理模拟实验验证研究区断层发育过程,实验结果与断层发育特征具有很强的相似性,说明构造几何学和运动学特征分析的正确性。基于以上研究,将饶阳凹陷和霸县凹陷的构造演化过程划分为断陷弱早期、断陷强中期和断陷较强晚期3个阶段,并探讨了研究区构造发育演化的形成机制和深部背景。

关键词:伸展构造;走滑构造;构造物理模拟实验;新生代;冀中坳陷

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Cenozoic tectonic evolution in the north-central Jizhong Depression

Dong Dawei¹, Li Li¹, Liu Jian², Li Jiyan²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Geological Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: On the basis of fine seismic interpretation, various methods including fault throw method, fault activity intensity method, balanced cross-section technique and physical simulation are adopted in this paper to analyze the Cenozoic tectonic characteristics and evolution process as well as the forming mechanism of structures. The results show that the north-central part of Jizhong Depression was dominated by extensional structures in the Cenozoic, with strike-slip structure style also occurring. In Baxian Sag, tilting and sliding fault terrace structural styles were predominant. While Raoyang Sag was dominated by anticline structural style except for its northernmost part where strike-slip structure style was common. The extensional intensity shows large diversity in different periods in both Baxian Sag and Raoyang Sag, strictly controlled by the activity of boundary faults. Raoyang Sag was controlled by Liulu, Hejian, and Maxi faults from south to north. The extension of sag as characterized by transition from “south being larger than central-north” in E_k — E_s^4 to “central-north being larger than south” in E_s^3 — E_d . Baxian Sag was controlled by the diversity of Niudong fault activity along strike, featuring in the tectonic evolution of “strong early stage but weak middle and late stages” in south, “weak early stage strong middle stage and weak late stage” in the central, and “weak early stage but strong middle and late stages” in north. The physics simulation experiment validates the fault development process of research area. The experiment result has strong similarity with the development characteristics of the faults, demonstrating the correctness of tectonic geometry and kinematics characteristic analysis. On the basis of above research, the tectonic evolution process of Raoyang Sag and Baxian Sag is divided into three stages, namely weak early stage, strong middle stage, and fair late stage. Finally, the mechanism and deep background of tectonic formation and evolution are discussed.

Key words: extensional structure, strike-slip structure, physical simulation, Cenozoic tectonic, Jizhong Depression

冀中坳陷及邻区是地学研究程度相对较高的地区之一。国内外很多学者对霸县凹陷、饶阳凹陷和

收稿日期:2013-09-23;修订日期:2013-10-30。

第一作者简介:董大伟(1984—),男,博士研究生,地质学。E-mail:18105468200@163.com。

通信作者简介:李理(1967—),女,博士、教授,构造地质学。E-mail:lilywmwys@upc.edu.cn。

基金项目:中国石油冀中富油凹陷二次勘探潜力与方向研究项目(HBYT-WTY-2011-JS-303);中央高校基本科研业务费专项(11CX06004A)。

徐水-文安变换带都进行过深入的研究,取得了较多的研究成果^[1-5]。冀中坳陷北部地区伸展构造是断陷盆地的构造样式之一,它是以大兴铲状正断层为主体,牛东断层与其呈锐角相交构成帚状样式的大型伸展构造。在其发育过程中,首先是大兴断层上盘岩体拆离,霸县凹陷断裂发育,主要为同生正断裂、后生正断裂以及走滑断裂,其中以同生正断裂为主;饶阳凹陷是一个东断西超的新生代箕状断陷,内部发育了一系列伸展构造和走滑构造,伸展构造是主体,古近纪由早至晚伸展方向由近东西向到北西-南东向再到近南北向顺时针旋转,右行走滑构造也很明显。古近系,在北部西断东超的霸县凹陷和其南部东断西超的饶阳凹陷之间出现了徐水-文安变换带,其演化具有以下两个方面的特征:燕山晚期 NWW 向的古构造格局的影响了其早期发育,其面貌既具有继承燕山晚期 NWW 向构造格局的一面,又具有喜马拉雅早期 NNE 向构造格局的一面;由南向北逐渐迁移,并且规模逐渐变小^[6-7]。

尽管前人的研究成果丰硕,但基本都是对两个凹陷(饶阳凹陷与霸县凹陷)单独开展的研究。本文在两个凹陷地震解释的基础上,建立构造几何学模型,通

过对基底断裂构造样式、运动学分析和构造物理模拟实验,确定研究区活动期次和徐水-文安变换带的形成机制,并初步探讨研究区发育演化的形成机制和深部背景。

1 区域地质概况

冀中坳陷北依燕山隆起,南抵邢衡隆起,西临太行山隆起,东至沧县隆起,总体 NE-SW 走向,面积约 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。坳陷内被两条近东西-北西西向横向转换调节构造带,即无极-衡水断裂带和徐水-安新-文安断裂构造带分割成南、中、北三分格局。其中北区发育霸县凹陷、廊固凹陷、武清凹陷;中区发育有饶阳凹陷和保定凹陷,南区发育有束鹿凹陷、晋县凹陷等,本文对中北部的饶阳和霸县凹陷展开研究。

2 冀中坳陷中北部构造特征

2.1 断层基本特征

新生代时期,研究区以伸展构造发育为主要特色的

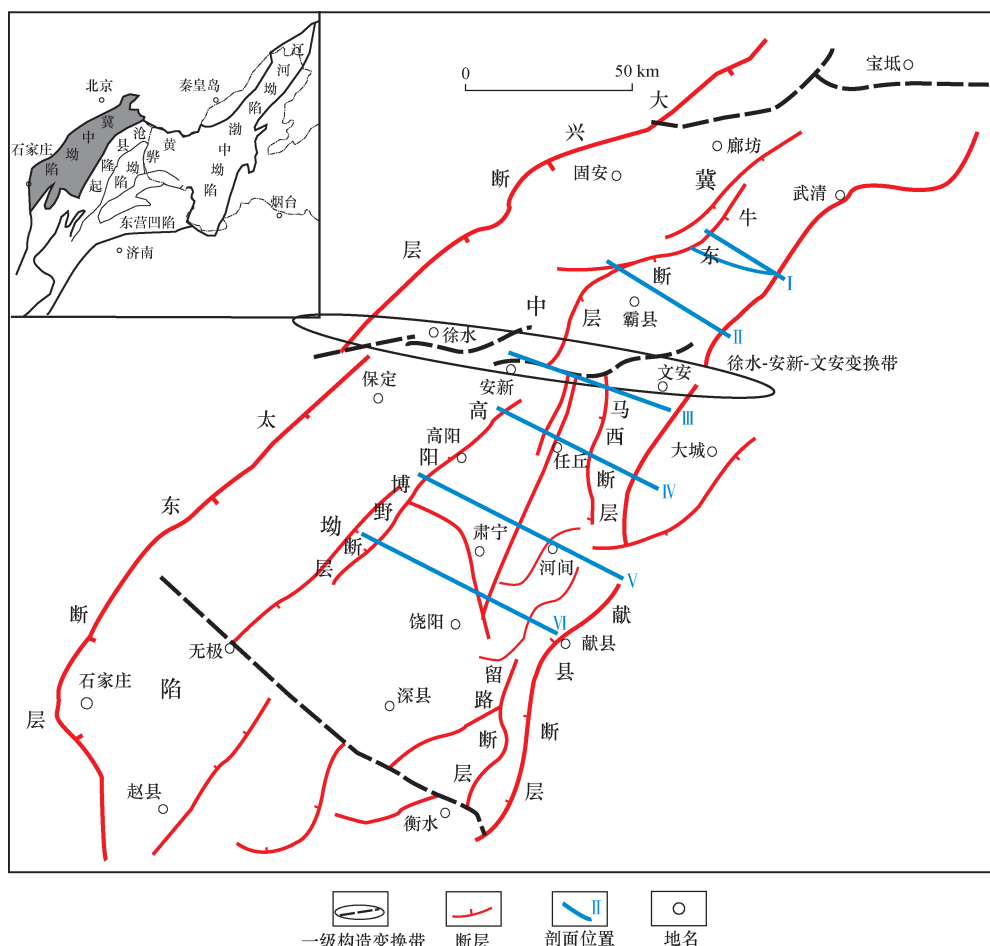


图1 冀中坳陷中北部构造格局

Fig. 1 Structure framework of the north-central Jizhong Depression

伸展型凹陷,霸县凹陷和饶阳凹陷形成和演化过程复杂。霸县凹陷是受牛东断层控制的单断、单洼槽凹陷,自西向东为背斜带-洼槽-斜坡带,断层展布具有多方向性,但无论从数量上还是规模上均以 NNE 向、NE 向断裂体系为主(图 2a);饶阳凹陷是受太东断裂和献县断裂共同控制的纯剪伸展的双断型凹陷,发育北东向为主、北西向为辅的两组断裂体系(图 2b)。

2.2 断层平面展布特征

通过解析断层平面分布,研究区组合形式有网状、梳状、雁列式、斜交式、平行式、S 型等(图 3)。梳状组合是指多条断层相互平行分布,且共同相交、终止于一条断层之上,形成类似梳状形态,例如里兰断层与渔城潜山带(图 3a);帚状组合由多条弧形断层发生走滑,

它们一端向主走滑断层收敛汇聚,而另一端向外撒开。其与主断层在平面上的旋向相同,多为主走滑断层活动时形成的次生断层。研究区内明显的是马西断层南段,有一系列的北北东走向的次级断裂呈锐夹角交汇于马西断裂(图 3c);马西断裂带北部东侧雁列式断裂与南部的帚状断裂,在平面上组成巨大“S”型构造(图 3b)。

2.3 剖面组合样式

研究区剖面组合样式主要有 3 种类型(图 4),分别为翘倾、花状构造及背斜构造样式。

从断层的几何形态看,全区以伸展构造样式为主,兼有走滑构造样式。霸县凹陷翘倾、滑动断阶构造样式占优势;饶阳凹陷背斜构造样式占优势,饶阳凹陷最北部以走滑构造样式为主。

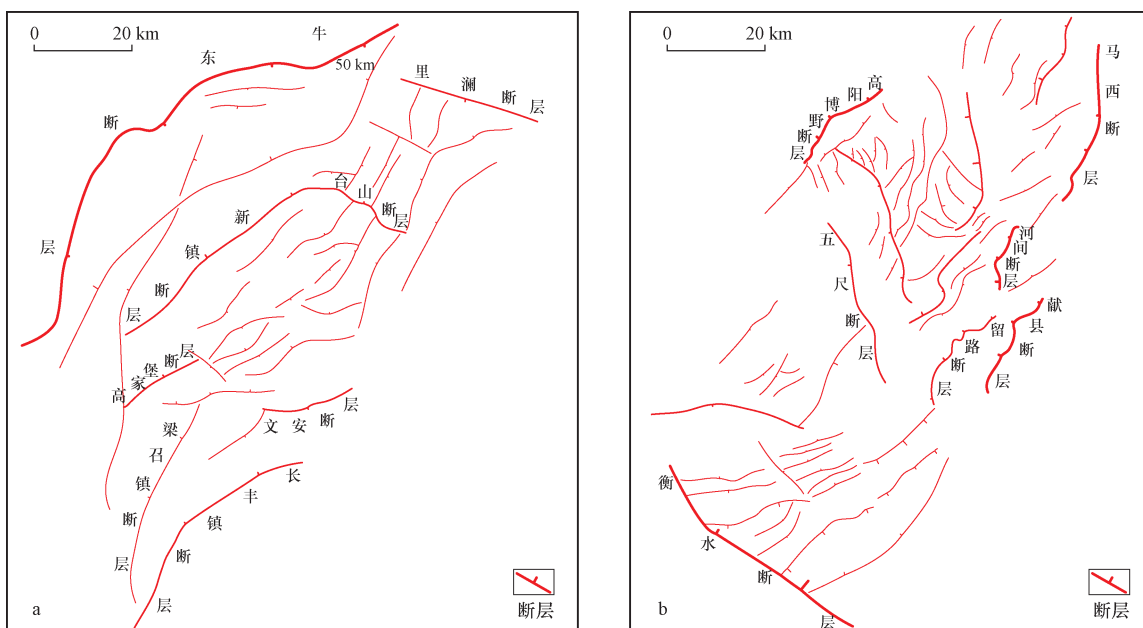


图 2 冀中坳陷中北部断裂系统

Fig. 2 Faults systems in the north-central Jizhong Depression

a. 饶阳凹陷断裂系统; b. 霸县凹陷断裂系统

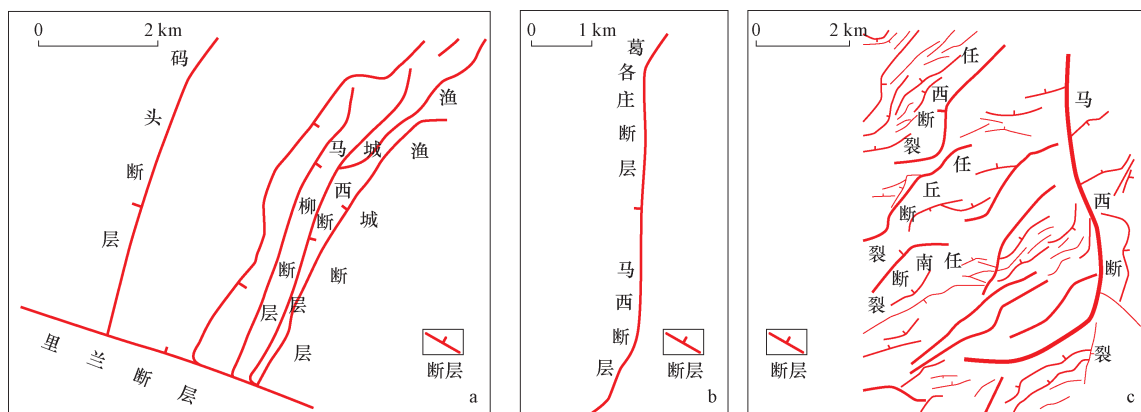


图 3 断层平面组合样式

Fig. 3 Plane assemblage types of faults

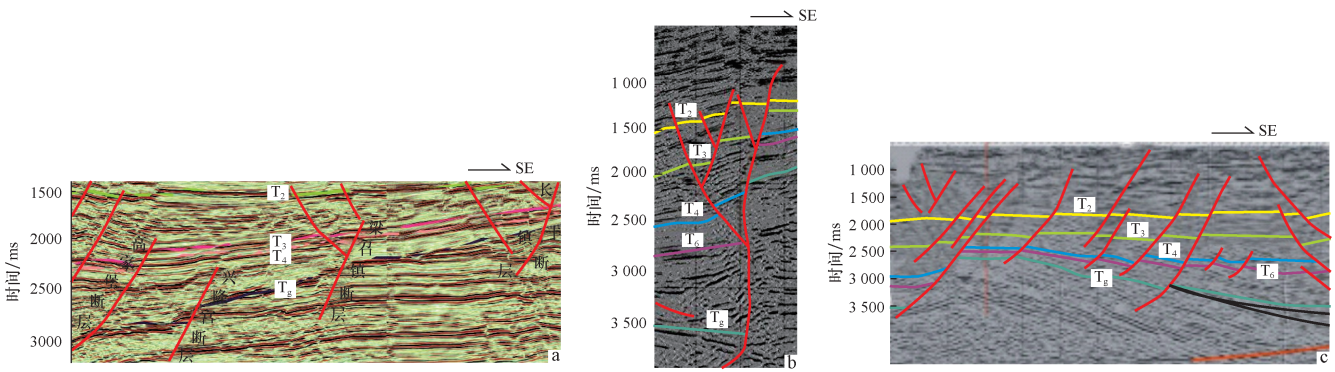


图 4 断层剖面组合样式

Fig. 4 Profile assemblage types of faults

a. 霸县凹陷顺向翘倾断块; b. 饶阳凹陷北部花状构造; c. 饶阳凹陷潜山披覆背斜

3 古近系构造演化过程

3.1 断层运动学特征

利用断层的落差、活动速率和剖面的伸展量研究研究区运动学特征。断层的落差即断层两盘相当层的铅直断距,它能够反映构造沉降幅度。在沉积补偿的前提下,不考虑压实作用的影响,相当层的厚度差(Δh)可以反映断层活动形成的构造沉降^[7-8]。对于边界正断层,下盘上升遭受剥蚀,构造沉降幅度包含了下盘剥蚀的厚度,因此断层的落差为上盘沉积厚度+下盘剥蚀厚度^[9]。再将 Δh 与地层沉积时间相比,得到断层的活动速率(R_f)。伸展量计算为: l_1-l_2 (l_1, l_2 分别为 I 时期沉积前、II 时期沉积前两个平衡剖面的长度)。对图 5 中垂直断层的 6 个剖面进行构造演化分析,对于边界断层利用趋势面法恢复出下盘剥蚀量,计算出运动学参数(表 1,表 2)。

马西、河间、留路断层分别控制着饶阳凹陷北、中、南部的构造演化,自孔店组-沙四段沉积时期到沙一段-东营组沉积时期,这 3 条断层活动性具有较大的差异性(表 1),其中马西断层和河间断层活动性表现为“早期弱-中晚期强”(图 5 IV、V)、留路断层活动性

表 1 控凹断层落差与活动速率

Table 1 Fault throw and activity rate of sag-controlling faults

断层	Ek + Es ⁴ (65 ~ 43 Ma)		Es ² + Es ³ (43 ~ 37 Ma)		Es ¹ + Ed (37 ~ 24.6 Ma)	
	Δh / m	R_f / (m · Ma ⁻¹)	Δh / m	R_f / (m · Ma ⁻¹)	Δh / m	R_f / (m · Ma ⁻¹)
马西断层	345	15.7	276	46.0	620	50.0
河间断层	138	6.3	240	40.0	450	36.0
留路断层	640	29.0	150	25.0	280	22.3
牛东断层	北段	525	23.0	400	66.7	940
	中段	550	25.0	480	80.0	600
	南段	780	35.5	210	35.0	190

注:早期:Ek—Es⁴;中期:Es²—Es³;晚期:Es¹—Ed。

表 2 冀中坳陷中北部古近系伸展量

Table 2 Statistics of the Paleogene extension in the north-central Jizhong Depression

时期	伸展量/km					
	饶阳			霸县		
	南部	中部	北部	南部	中部	北部
Ed	0.5	1.0	1.4	1.0	2.0	3.1
Es ¹	1.1	2.0	3.5	1.5	3.0	5.0
Es ² + Es ³	2.0	0.8	1.3	2.0	5.0	3.5
Es ⁴ + Ek	2.4	0.4	0.5	4.0	3.4	1.0

为“早期强-中晚期弱”(图 5 VI)。受控于上述 3 条断层活动的差异性,饶阳凹陷的伸展量具有早期“南部大于中北部”、向中晚期逐渐过渡为“中北部大于南部”的特征(表 2)。另外控制霸县凹陷构造演化的牛东断层沿着走向活动性不同,具有南段“早期强-中晚期弱”(图 5 II)、中段“早期弱-中期强-晚期较弱”、北段“早期弱-中晚期强”(图 5 I)的构造演化过程(表 1),导致了霸县凹陷不同构造部位伸展量的差异性,表现为早期“南部大于中北部”、中期“南部最弱、中部最强、北部次之”、晚期“南部小于中北部”的整体特征。整体来看,同一时期,牛东断层的活动强度大于其他 3 条断层,导致霸县凹陷的伸展率总体大于饶阳凹陷(表 2)。

3.2 构造物理模拟实验

构造模拟实验(experiments of structural modeling)是研究和模拟自然界地质构造现象成因机制、变形特征和动力学过程的方法^[10-11]。

3.2.1 实验模型设计

构造物理模拟实验遵循的原理主要有相似原理、选择原理、分解原理、逐步逼近原理、统计的原理等五个原则,其中相似性原理最为重要^[12-14]。

依据构造物理模拟实验的基本原则,实验使用的材料以及边界条件等均按冀中坳陷地质背景设计。通过研究,研究区古近系以拉张为主,伴生右旋走滑分

量,冀中坳陷北部拉伸量比中部拉伸量大,根据表2中各时期饶阳、霸县伸展量的比值约为1~2.85,以及多次试验效果和设备的参数设定,将各轴速度确定为: $v_1=0.01\text{ cm/s}$; $v_2=0.02\text{ cm/s}$; $v_3=0.03\text{ cm/s}$; $v_4=0.01\text{ cm/s}$ 。实验材料主要有天然石英砂、凡士林、胶

皮和弹性塑料薄膜等(石英砂代表地层;凡士林增加粘度;胶皮代表基底;弹性塑料薄膜预置先期断层)。模板长度为41 cm,宽为23 cm(相似系数为 2.9×10^{-6}),岩层厚度为3.8 cm(相似系数为 4.8×10^{-6})(图6)。地质分析表明,冀中坳陷中生代发育的北西向的

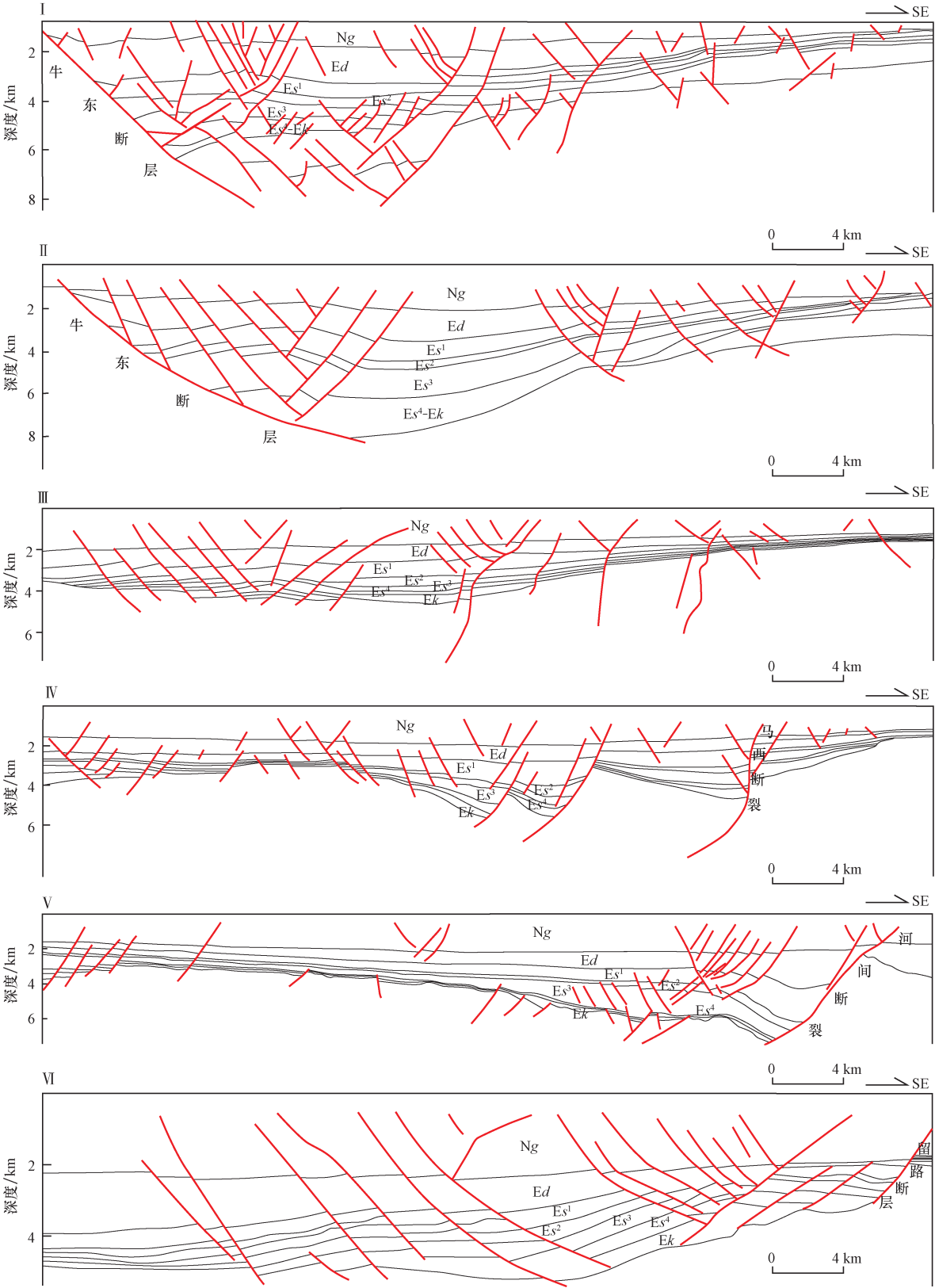


图5 冀中坳陷中北部伸展断层演化剖面(剖面位置见图1)
Fig. 5 Extensional fault profile in the north-central Jizhong Depression(see the profile location in Fig. 1)

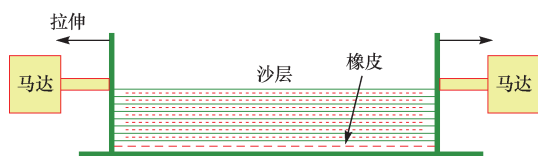


图6 实验模型剖面示意图

Fig. 6 Sectional view of the physical model

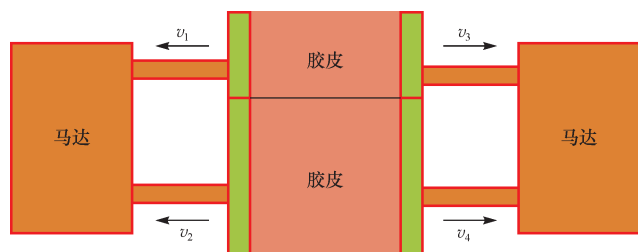


图7 实验模型平面示意图

Fig. 7 Plane view of the physical model

断层,大兴断层、保定石家庄断层、献县断层、高阳-博野断层等是前新生代的产物,并切入基底^[15-16]。先存的断层必定在断层处形成基底的薄弱带,对后期的变形产生影响。据此,参考新生界底构造图,在上述断层和其它基底断层处预置断层,设计出地质模型(图7)。上面铺好石英砂。本次实验主要模拟新生代以来在伸展拉伸作用下冀中拗陷内断裂的发育和凹陷的形成。

3.2.2 实验过程分析

实验历时 15 min,模拟时间新生代古近纪(65 - 23.3 Ma),时间相似比为 2.78 Ma/min,相当于 8 min - 43 Ma ($Ek-Es^4$); 10.2 min - 37 Ma (Es^3-Es^2); 15.2 min - 23.3 Ma (Es^1-Ed)。

在 $Ek-Es^4$ 沉积时期,冀中拗陷西北部大兴断裂与东南部献县断裂强烈活动,在这两条断裂和古构造

格局的控制下,由于南北的伸展量不同,形成了趋近 EW 向横向构造变换带(图 8a)。在 Es^3-Es^2 沉积时期,控制霸县凹陷形成的牛东断裂中段和控制饶阳凹陷形成的留路断层、马西断层中北段强烈活动,由于它们的共同作用,这一时期的变换带北移(图 8b)。在 Es^1-Ed 沉积时期,马西断层和牛东断层北段强烈活动,变换带在它们共同作用下继续向北移,走向为 NWW - SEE(图 8c)。

模拟还可以看出大兴断层和保定-石家庄断层作为主控断层在伸展拉伸作用下首先活动,控制全区的构造格局。在差异伸展作用下大兴断层与保定-石家庄断层在结合部出现构造变换带。在主断层的对侧,作为主断层的应力调节结果,以洼槽和斜坡带的形式出现。

4 凹陷构造演化过程及动力学机制

4.1 构造演化过程

受控于 4 条边界控凹断层活动时期和活动性的差异性,饶阳凹陷和霸县凹陷新生代断陷阶段始于孔店组沉积时期,止于东营组沉积时期,可以划分为断陷强早期、断陷弱中期、断陷强晚期 3 个阶段。

断陷弱早期 (Es^4-Ek): 该时期断层活动速率较弱,但控制霸县凹陷和饶阳凹陷的牛东断层南段和留路断层强烈活动,两个凹陷的南部伸展量最大。研究区内这个时期的沉积和沉降中心受这些活动断层强烈控制,呈 NNE 向延伸。北北东走向的留路断层和牛南断层的正断层活动性质表明,该时期研究区主要受控于 NWW - SEE 向伸展作用。

断陷强中期 (Es^3-Es^2): 控制霸县凹陷和饶阳凹陷的牛东断层中北段、河间断层、马西断层活动性逐渐

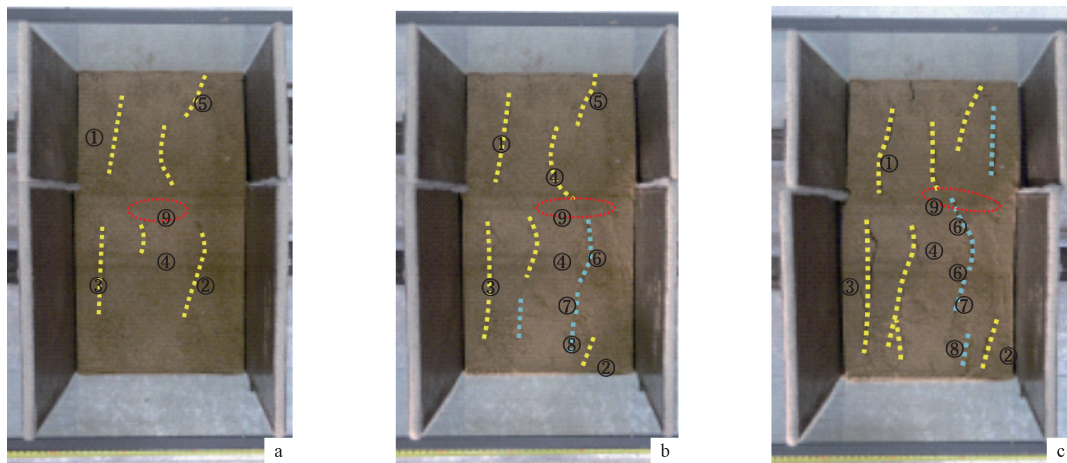


图8 断层发育演化过程

Fig. 8 Process of fault evolution

①大兴断裂;②献县断裂;③石家庄断裂;④牛东断裂;⑤宝坻断裂;⑥马西断裂;⑦河间断裂;⑧留路断裂;⑨徐水-文安变换带

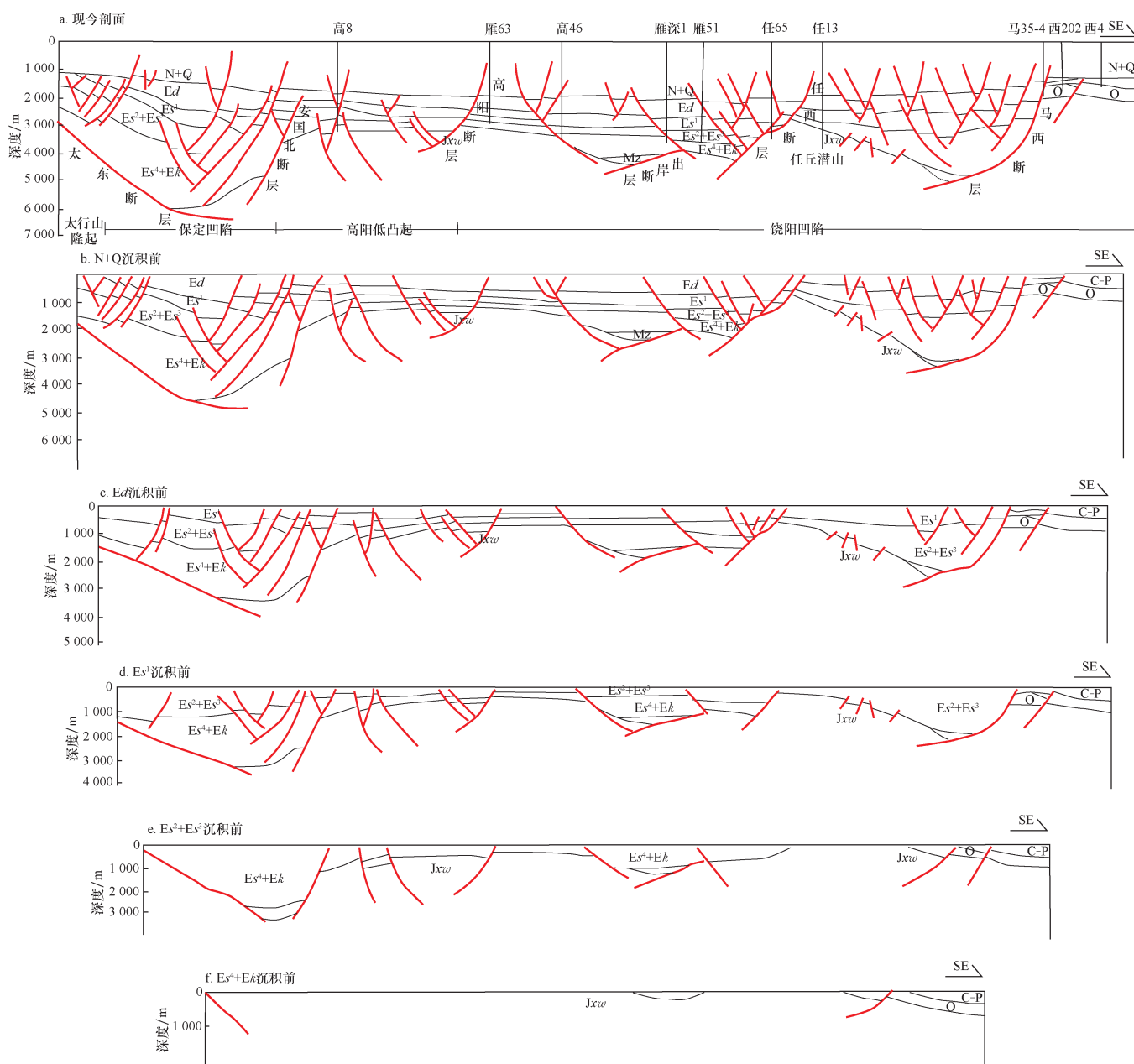
图9 冀中坳陷中部(饶阳凹陷)构造平衡剖面^①

Fig. 9 Structural balanced sections in the central Jizhong Depression(the Raoyang Sag)

增大,研究区内主要沉降中心向中北区迁移,但该时期凹陷的伸展量整体较小,发生了短暂的抬升。断层主要为NE方向延伸,沉降和沉积中心受断层的同生活动作用控制,凹陷向东北向延伸。通过主要活动断层的正断层性质及其延伸来判断,该时期研究区主要受控于NNW-SSE向伸展作用。

断陷较强晚期(Es^1 — Ed):在经历了中期短暂区域性隆升之后,研究区又一次进入较强断陷阶段,沉降中心继续往北迁移,边界主断层牛东断层北段和马西断层发生强烈活动,导致两个凹陷的北部在此时期断层的活动速率和伸展率达到最大值,该时期控制研究区控制研究区受控于近SN向伸展作用。

4.2 动力学机制

研究区上述构造演化是冀中坳陷构造演化的一个缩影,分析横切冀中坳陷中、北部构造演化剖面(图9,图10)可以看出,中部饶阳凹陷在孔店—沙四期,西部太行山东缘断层(太东断层)强烈活动,控制了保定凹陷的发育,东部献县断层、马西断层活动弱;进入沙三—沙二期,西倾的边界断层献县断层基本不活动,马西断层强烈活动,而西部的太东断层活动趋于减弱。上述两个时期为饶阳凹陷的主要发育时期。到了沙一—东营期,断层活动相对减弱,东部马西断层活动由强变弱,西部则相反,由弱变强,剖面上,饶阳凹陷

①吴孔友. 冀中探区前第三系基底结构以及潜油幕成藏条件与勘探方向研究. 中国石油华北油田分公司, 2009.

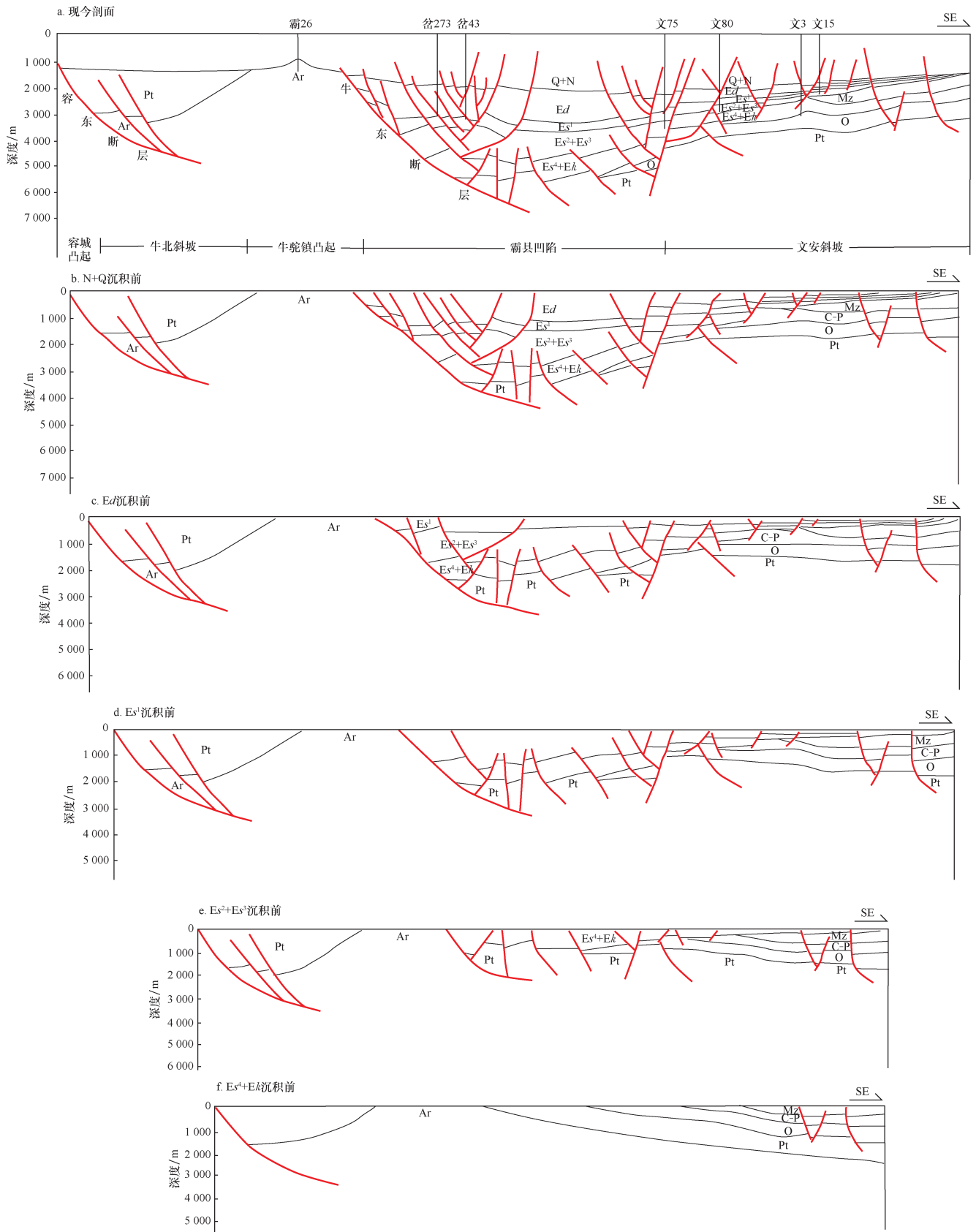


图 10 冀中拗陷北部(霸县凹陷)构造平衡剖面^①

Fig. 10 Structural balanced section in the northern Jizhong Depression(the Baodian Sag)

是受东倾边界断层和西倾边界断层控制的双断地堑式。北部的霸县凹陷剖面上则是受西倾断层控制的单断半地堑,孔店一沙四期,受控于西部边界断层太东断层的强烈活动,牛东断层开始形成,控制了霸县凹陷的

^①吴孔友. 冀中探区前第三系基底结构以及潜油幕成藏条件与勘探方向研究. 中国石油华北油田分公司, 2009.

雏形;沙三—沙二期,牛东断层强烈活动,霸县凹陷随之强烈发育;沙一—东营期,断层活动总体减弱,牛东断层由弱到强。因此,研究区孔店—沙四期西部断层活动强烈,沙三—沙二期,构造活动强度向东迁移,沙一—东营期,构造活动由南向北迁移。总体来看,断层活动由早到晚由西向东、由南向北迁移。

此外,牛东断层和马西断层沙三期以来明显受走滑作用的影响,剖面上负花状构造明显,平面上牛东断层和马西断层组成“S”形展布,在南部派生断层增多,呈帚状撒开。

通过分析,我们可知,凹陷结构是中、北部构造差异的根本,伸展作用的迁移、叠加走滑作用的不同,是研究区构造差异的主控因素。

上述断层活动规律及造成的研究区构造差异受控于渤海湾盆地及周缘区域构造背景,为地球深部背景的反映。中生代晚期约 140 Ma,太平洋板块向欧亚板块的 NW 向斜向高速俯冲,古新世—早始新世,太平洋板块的俯冲方向仍然是 NW 向,但速度明显降低^[17-20],在渤海湾盆地产生了一系列 NNE 向的断层。研究表明,太行山东缘断层活动从 134 ~ 93 Ma 至 68 ~ 52 Ma 由西向东迁移^[21],其中 K—Ar 断层泥测年得到了 113.42 Ma ± 2.31 Ma 的活动年龄^[22]。故而造成冀中坳陷控凹断层由西向东迁移。始新世约 43 Ma,太平洋板块由 NNW 向俯冲转为 NWW 向俯冲,俯冲速度降至最低,渤海湾盆地地壳伸展、减薄作用达到鼎盛时期,受 NW—SE 近水平伸展,冀中坳陷饶阳凹陷和霸县凹陷强烈发育,渤海湾盆地的东边界—郯庐断裂带此时为右行走滑^[23],马西断层和牛东断层也表现出明显的走滑性质(一直持续到渐新世末期),研究区受伸展和走滑双重控制,并因凹陷结构的差异,以徐水—文安变换带为界,表现出不同的构造演化特征,总体上由南向北迁移。地震层析成像结果发现西太平洋俯冲带和印度—澳大利亚板块俯冲带构成一个向北开口的 V 字型凹槽,且向北变宽、抬升,迫使东亚地幔或软流圈向北运移^[24],则是研究区构造由南向北迁移的深部背景。

5 结论

通过综合分析断层的几何学、断层的活动速率、伸展量和构造物理模拟实验等多个因素,得出以下结论。

1) 霸县凹陷断层展布具有多方向性,但无论从数量上还是规模上均以 NNE 向、NE 向断裂体系为主,翘倾、滑动断阶构造样式占优势;饶阳凹陷发育 NE 向为主、NW 向为辅的两组断裂体系,饶阳凹陷背斜构造样式占优势,其最北部以走滑构造样式为主。

2) 受控于控凹断层的活动性,霸县凹陷和饶阳凹陷不同沉积时期,伸展强度具有较大差异性。饶阳凹陷自南向北受控于留路、河间、马西断层,凹陷的伸展量具有早期($E_k-E_s^4$)“南部大于中北部”、向中晚期($E_s^3-E_d$)逐渐过渡为“中北部大于南部”的特征。霸县凹陷受控于牛东断层沿走向活动性差异,南段“早期强—中晚期弱”、中段“早期弱—中期强—晚期较弱”、北段“早期弱—中晚期强”的构造演化过程。

3) 大兴断层和保定—石家庄断层作为主控断层在伸展拉伸作用下首先活动,控制全区的构造格局。在差异伸展作用下大兴断层与保定—石家庄断层在结合部出现构造变换带。在主断层的对侧,作为主断层的应力调节结果,以洼槽和斜坡带的形式出现。构造变化带逐渐向北移,其规模也逐渐变小。

4) 断陷阶段始于孔店组沉积时期,止于东营组沉积时期,可以划分为断陷强早期、断陷弱中期、断陷较强晚期 3 个阶段。其应力场由断陷早期 NWW—SEE 向拉伸—断陷中期 NNW—SSE 向拉伸—断陷晚期近 SN 向的拉伸。

致谢:研究过程和物理模拟实验得到了中国石油大学(华东)博士生赵利、孙钰皓硕士、刘卉以及硕士生刘海剑、王晶的帮助,图件完成过程中得到博士生赵利及硕士生刘海剑的帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 李不龙. 陆相断陷盆地油气地质勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
Li Pilong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [2] 翟光明. 中国石油地质志(卷五)华北油田[M]. 北京:石油工业出版社,1988.
Zhai Guangming. Petroleum geology of China (Vol 5): Huabei oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [3] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊,等. 冀中坳陷古近纪的伸展构造[J]. 地质论评,2002,48(1):58—67.
Yang Minghui, Liu Chiayang, Yang Binyi, et al. Extensional structures of the Paleogene in the Central Hebei Basin, China [J]. Geological Review, 2002, 48(1): 58—67.
- [4] 孙冬胜,刘池阳,杨明慧,等. 渤海湾盆地冀中坳陷中区新生代复合伸展构造[J]. 地质论评,2004,50(5):485—491.
Sun Dongsheng, Liu Chiayang, Yang Minghui, et al. Study on Complex extensional structures in the middle Jizhong Depression in the Bohai Bay Basin [J]. Geological Review, 2004, 50(5): 485—491.
- [5] 张文朝,崔周旗,韩春元,等. 冀中坳陷老第三纪湖盆演化与油气[J]. 古地理学报,2001,3(1):45—49.
Zhang Wenchao, Cui Zhouqi, Han Chunyuan, et al. Evolution of Palaeogene lacustrine basins and oil and Gas potentials in the central Hebei Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 45—49.
- [6] 王定一,梁苏娟. 任丘大油田形成与变换带演化[J]. 石油与天然气地质,2001,22(1):9—13.

- Wang Dingui, Liang Sujuan. Evolution of transformation belt and formation of big oilfield in Renqiu [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22 (1): 9–13.
- [7] 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): 295–309.
- 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): 295–309.
- [8] 赵勇, 戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13–15.
- Zhao Yong, Dai Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13–15.
- [9] 马晓鸣, 戴俊生. 应用落差分析研究高邮凹陷南断阶主控断层[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(4): 32–34.
- Ma Xiaoming, Dai Junsheng. Study on the control faults in south fault terrace of Gaoyou Sag by fault throw analysis [J]. Journal of Xian Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(4): 32–34.
- [10] Wernicke B, Burchfiel B C. Models of extensional tectonic [J]. Journal of Structural Geology, 1982, 4(3): 105–115.
- [11] 时秀朋, 李理. 构造物理模拟实验方法的发展与应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1729–1734.
- Shi Xiupeng, Li Li. The development and application of structure physical modeling [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1729–1734.
- [12] 时秀朋, 李理. 鲁西隆起中—新生代伸展构造演化的模拟试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 26–19.
- Shi Xiupeng, Li Li. Modeling experiments of structural evolution since late Mesozoic in west Shandong uplift, China [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(3): 26–19.
- [13] 王勇, 熊伟, 崔营滨. 东营凹陷陡坡带构造演化物理模拟[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 449–452.
- Wang Yong, Xiong Wei, Cui Yingbin. Physical modeling of structural evolution in steep slope zone of Dongying Sag [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4): 449–452.
- [14] McClay K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies [J]. Marine and Petroleum Geology, 1990, 7(4): 206–233.
- [15] 徐杰, 高战武, 宋长青, 等. 太行山山前断裂带的构造特征[J]. 地震地质. 2000, 22(2): 111–122.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing, etc. The Structural Characters of the piedmont fault zone of Taihang Mountain [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(2): 111–122.
- [16] 卢浩, 蒋有录, 徐昊清. 饶阳凹陷主断层活动期与新近系油气成藏关系[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 594–597.
- Lu Hao, Jiang Youlu, Xu Haoqing. Relationship between fault activity period and Neogene oil-gas accumulation in Raoyang Sag [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(5): 594–597.
- [17] 李三忠, 索艳慧. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 1363–1377.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui. Pull-apart basins within the north China craton: structural pattern and evolution of Huanghua depression in Bohai bay basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1363–1377.
- [18] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, (1): 23–32.
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, (1): 23–32.
- [19] 李三忠, 张国伟. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 80–107.
- Li Sanzhong, Zhang Guowei. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 80–107.
- [20] Shigenori Maruyama, Yukio Isozaki. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. The Island Arc, 1997, 8(6): 121–142.
- [21] 张家声, 徐杰, 万景林, 等. 太行山山前中—新生代伸展拆离构造和年代学[J]. 地质通报, 2002, 21(4–5): 207–210.
- Zhang Jiasheng, Xu Jie, Wang Jinglin. Meso-Cenozoic detachment zones in the front of the Taihang Mountains and their fission-track ages [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(4–5): 207–210.
- [22] 闫淑玉, 张进江, 王晓先, 等. 太行山东缘断裂南支断层性质及断层泥 K-Ar 同位素定年[J]. 地质科学, 2012, 47(1): 1–12.
- Yan Shuyu, Zhang Jinjiang, Wang Xiaoxian, et al. The character of southern branch fault in eastern marginal fault zone of Taihang Mountain an K-Ar dating of fault gouge [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(1): 1–12.
- [23] 王先美, 钟大赉, 李理, 等. 鲁西北西向断裂系与沂沭断裂带晚中生代演化关系及其动力学背景探讨[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 166–190.
- Wang Xianmei, Zhong Dalai, Li Li, etc. Relationship between NW faults of West Shandong and Yi Shu fault zone in Late Mesozoic and their geotectonic setting operations. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 166–190.
- [24] 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, 2009, 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, 2009, 17(4): 64–89.

(编辑 董立)