

引用格式: 邓路佳, 吴孔友, 焦红岩, 等, 2022. 渤海湾盆地东营凹陷现河矿区古近系断裂体系及形成演化 [J]. 地质力学学报, 28 (3): 480–491. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021139

Citation: DENG L J, WU K Y, JIAO H Y, et al., 2022. Paleogene fault system in the Xianhe mining area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin and its evolution [J]. Journal of Geomechanics, 28 (3): 480–491. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021139

渤海湾盆地东营凹陷现河矿区古近系断裂体系及形成演化

邓路佳¹, 吴孔友¹, 焦红岩², 董 方¹, 赵海燕², 刘煜磊¹, 张法冰²
DENG Lujia¹, WU Kongyou¹, JIAO Hongyan², DONG Fang¹, ZHAO Haiyan², LIU Yulei¹, ZHANG Fabing²

1. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东 青岛 266580；
2. 中国石化胜利油田分公司现河采油厂，山东 东营 257100
1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China;
2. Xianhe Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257100, Shandong, China

Paleogene fault system in the Xianhe mining area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin and its evolution

Abstract: Controlled by the dual dynamic background, the superposition of Paleogene extension and strike-slip is obvious in the Xianhe mining area, Dongying sag, Bohai Bay Basin. It is of great significance for oil and gas exploration to clarify the superposition of the fault system. This paper is based on high-precision seismic data and drilling data. We conducted in-depth research on the fracture types and combination styles, fracture superposition, fracture activity and evolution, and regional dynamics background by using an integrated interpretation of well-log and seismic data, structural style identification, quantitative characterization of faulting and balanced profile recovery. The results show that two fracture systems, extensional and extensional-strike-slip, are developed in the Paleocene of the Xianhe mining area, and the extensional-strike-slip fractures are formed by the superposition of the previous extensional fractures with slip action. Regional faulting reached two peaks in the Paleogene, one is in the middle of Member 3 of the Shahejie Formation and the other is in the early Dongying Formation. Under the superposition of extensional and strike-slip stress, the faults in the Xianhe mining area experienced five major evolution stages: initial extensional stage (E_k-Es_4), intensely extensional stage ($Es_3^x-Es_2^x$), strike-slip stage and weak extensional stage ($Es_2^s-Es_1$), reactivation and extensional stage (Ed), and stabilization stage ($N-Q$).

Key words: Bohai Bay Basin; Dongying Sag; Xianhe mining area; fracture system; combination style; faulting; evolution stages

摘 要: 受双重动力背景控制，渤海湾盆地东营凹陷现河矿区古近系伸展与走滑作用叠加明显，明确断裂体系叠加关系对油气勘探意义重大。文章运用高精度地震资料及钻井资料，通过井震结合解释、构造样式识别、断裂活动性定量表征及平衡剖面恢复等技术手段，从断裂类型与组合样式、断裂叠加关系、断裂活动及演化、区域动力学背景等方面开展了深入研究。结果表明：现河矿区古近系发育伸展与伸展-走滑两套断裂体系，伸展-走滑断裂基于先期伸展断裂叠加走滑作用形成。古近系主干断裂存在沙三中期和东营早期两次活动高峰，受控于伸展-走滑应力叠合作用，现河矿区古近系共经历初始伸展阶段（ E_k-Es_4 ）、强伸展阶段（ $Es_3^x-Es_2^x$ ）、走滑-弱伸展阶段（ $Es_2^s-Es_1$ ）、再活化伸展阶段（ Ed ）和定型保留阶

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项（XDA14010301）

This research is financially supported by the Class A Strategic Priority Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA14010301)

第一作者简介: 邓路佳（1998—），男，在读硕士，构造地质学专业。E-mail: 582679006@qq.com

通讯作者: 吴孔友（1971—），男，博士，教授，从事于油区构造解析方向。E-mail: wukongyou@163.com

收稿日期: 2021-10-13; **修回日期:** 2022-04-07; **责任编辑:** 范二平

段(N—Q) 5个主要的断裂演化阶段。

关键词: 渤海湾盆地; 东营凹陷; 现河矿区; 断裂体系; 组合样式; 断裂活动; 演化阶段

中图分类号: P548 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 03-0480-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021139

0 引言

断裂体系是指同一时期内由统一区域应力场产生的相互联系的一系列断裂组合(吴孔友等, 2017)。随着油气勘探不断深入, 一些学者将断裂体系广泛应用于盆地构造分析中研究盆地的形成背景、演化过程等方面(张迎朝等, 2013; 吴智平等, 2018)。断裂体系发育特征作为中国东部陆相断陷盆地油气勘探研究的主要内容, 不仅关系到地震解释及构造模型的准确性, 更重要的是对烃源岩发育、储层展布、圈闭有效性、油气输导及聚集等均存在控制作用(李才等, 2014; 柴永波等, 2015; 何京等, 2017; 陈登超等, 2020)。

渤海湾盆地处于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋三大构造域相互作用交接的中心区域, 是一个在早白垩世被动裂陷盆地基础上发育起来的新生代主动裂陷盆地(李三忠等, 2010; 李理等, 2015)。漆家福等(2008)研究认为, 渤海湾盆地中的伸展断层和走滑断层为相对独立的两个构造系统, 它们在空间上相互利用、改造, 形成了复杂的构造叠加或复合关系。东营凹陷作为渤海湾盆地济阳拗陷中的二级负向单元, 受区域性伸展及郯庐断裂带走滑改造, 经历了多个演化阶段, 多期次、多展布方向、多种性质的盆地的垂向叠加与横向复合, 使得断裂体系特征尤为复杂(何斌, 2001; 薛雁等, 2013)。

现河矿区位于东营凹陷东部, 构造单元划分涉及油气资源最富的中央隆起带及油藏类型最多的广大南坡, 紧邻生油洼陷, 已发现王家岗、梁家楼、牛庄等油田(尚明忠等, 2004), 呈现出十分优越的成藏条件, 具备广阔的勘探前景。现河矿区构造复杂、断裂众多, 伸展构造与走滑构造叠加关系及形成机理不清, 很大程度上制约着该区油气的勘探进程。文章基于现河矿区高精度三维地震资料, 结合区内实际钻井情况, 识别断裂类型、总结主要断裂组合样式、厘定古近系断裂体系并揭示分布规律, 通过统计主干断裂的运动

学参数定量表征断裂的形成与活动阶段, 结合区域应力背景分析断裂形成机理, 建立现河矿区古近系断裂体系形成演化的动力学模型, 为油气勘探提供研究基础。

1 地质背景

东营凹陷地处渤海湾盆地济阳拗陷东南部, 东邻郯庐断裂带西支(图1a), 整体呈近东西向展布, 探区面积约5700 km², 北侧以陈南断裂与陈家庄凸起为邻, 东接青坨子凸起, 西为滨县凸起与青城凸起, 南侧毗邻鲁西隆起与广饶凸起, 凹陷由北至南划分为北部陡坡带、中央隆起带与南部缓坡带三大构造单元, 具有南北分带、“北断南超”的地质结构特征(云金表和赵利华, 2003; 薛雁等, 2013; 图1b)。东营凹陷是一个发育在古生代基底之上的受陈南断裂伸展断弯作用控制, 后期叠加郯庐断裂带走滑应力分量的中、新生代断陷盆地(何斌, 2001; 王颖等, 2002; 贾东等, 2005; 李理等, 2015), 新生代以来经历了古新世—渐新世裂陷、中新世以后拗陷的构造演化过程。

现河矿区位于东营凹陷东部, 横跨牛庄、利津两大生烃洼陷, 构造上贯穿东营凹陷中央隆起带与南部缓坡带, 各级别断裂发育丰富且多呈带状分布, 主要的二级构造带包括位于中央隆起的郝家—现河庄构造带、南坡的陈官庄—王家岗断裂带以及控制博兴洼陷沉积的石村断裂带。

研究区地层发育较为完全, 自下而上依次发育古近系孔店组(E_k)、沙河街组四段(E_{s4})、沙河街组三段(E_{s3})、沙河街组二段(E_{s2})、沙河街组一段(E_{s1})、东营组(E_d)及新近系与第四系(N—Q)。区内存在中生代与古近系之间(Tr)、古近系与新近系之间(T_1)的一级不整合及孔店组与沙四段之间(T'_1)、沙四段与沙三段之间(T'_0)、沙二下亚段与沙二上亚段之间(T'_3) 3个二级不整合(图1c)。

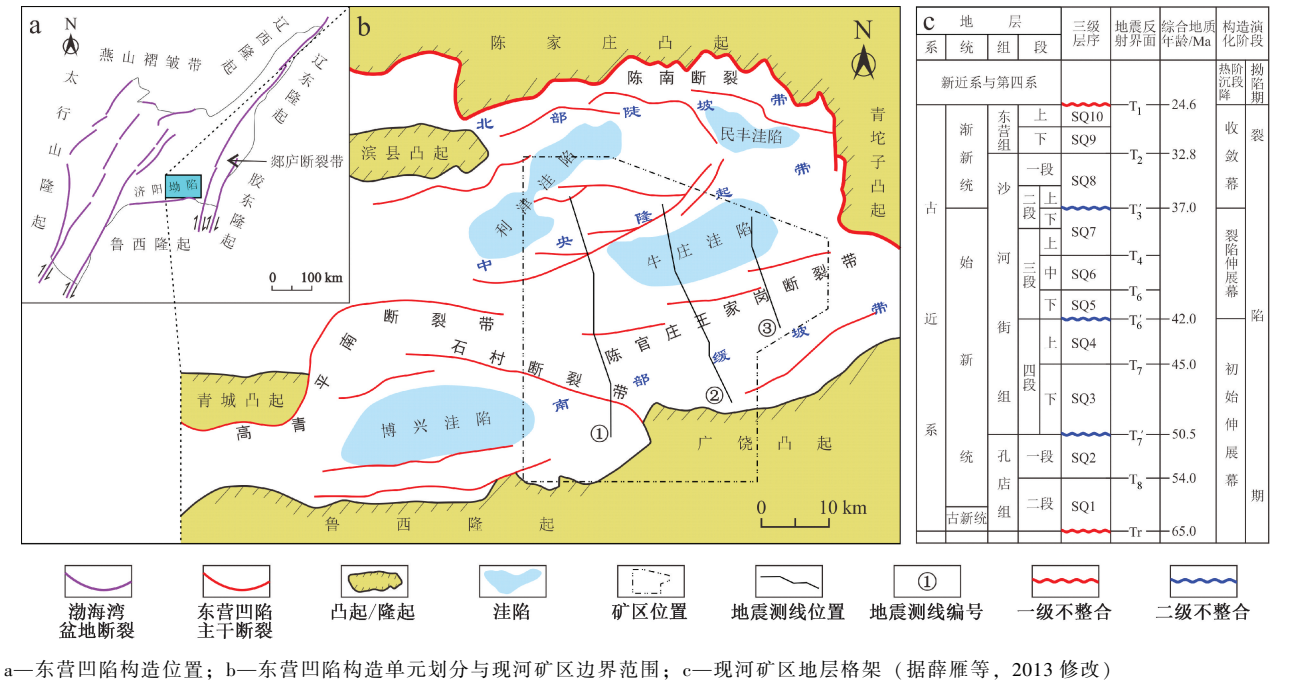


图 1 东营凹陷现河矿区构造位置与地层格架

Fig. 1 Tectonic position and stratigraphic framework of the Xianhe mining area in the Dongying Sag

(a) Tectonic position of the Dongying sag; (b) Division of tectonic units in the Dongying sag and boundary of the Xianhe mining area; (c) Stratigraphic framework of the Xianhe mining area (modified from Xue et al. , 2013)

2 断裂类型及发育特征

现河矿区古近系主要发育伸展、伸展-走滑两种类型断裂。按断裂延伸长度、切至层位及对构造、沉积的控制作用，将研究区断裂划分为二级控洼断裂（如石村断裂）、三级控带断裂（如河 125 断裂、官 136 断裂、牛庄北断裂等）与低序级小断裂 3 个级别。

2.1 伸展断裂发育特征

伸展断裂构成现河矿区古近系断裂的主体，全区皆有分布，断裂发育具有北西西向、近东西向和北东东向 3 个优势方位。石村断裂作为研究区唯一的二级控洼断裂控制着博兴洼陷的发育，其走向为北西西向，断层面南倾，剖面上呈明显铲式结构（图 2），于中生代末期发生构造反转成为伸展断裂开始接受沉积，并在古近纪持续活动（王颖等，2002）。现河矿区三级控带断裂十分发育且大都为具伸展性质的同沉积断裂，它们与储集相带的分布以及圈闭的形成有密切的关系（崔晓玲等，2013），在研究区南部缓坡带及牛庄洼陷分布较多，如牛庄北断裂、官 136 断裂、通 4 断裂、④号断裂、⑤号断裂等。这些断裂走向多为

北东东向或近东西向，断层面北倾，在剖面上具板式结构。发育在南部缓坡带的官 136 断裂、通 4 断裂等形成较早，孔店期就初具规模；靠近牛庄洼陷的牛庄北断裂、②号断裂等形成较晚，沙四期开始形成。低序级小断裂在现河矿区也发育较多，具有延伸短、断距小的特点，通常在某一时期突然活动，之后活动性迅速减弱，代表了一次短暂的断裂活动，研究区 T₆界面以下出现较多（图 2）。

2.2 伸展-走滑断裂发育特征

现河矿区伸展-走滑断裂数量相对较多，在中央隆起带、南部缓坡带分布广泛，该类断裂为三级控带断裂，平面上一般呈断裂系出现，其走向以北东向为主，少量呈北西向。北东向伸展-走滑断裂系以河 125 断裂系、牛西断裂系、丁家屋子断裂系为代表，是右旋张扭体系的产物；北西向伸展-走滑断裂系以王 66 断裂系为代表，是左旋张扭体系的产物（图 3）。其中，北西向的王 66 断裂系形成于沙三期，剖面上呈负花状构造；北东向的伸展-走滑断裂系普遍在沙三期开始萌芽，沙一期达到成熟。河 125 断裂系位于中央隆起带，是受东营凹陷塑性膏盐拱张作用叠合郯庐断裂走滑分

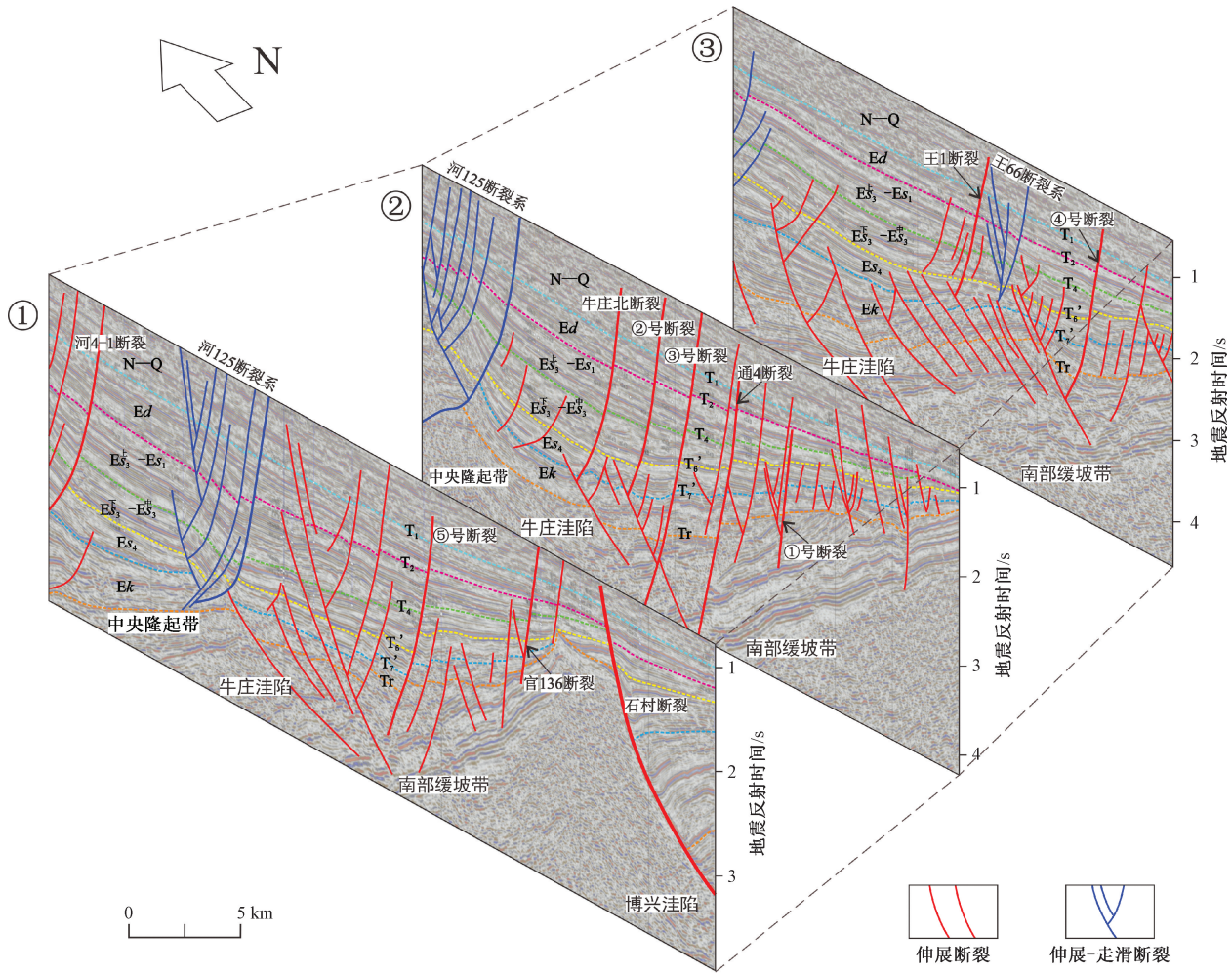


图2 现河矿区主要测线地震解释方案 (测线位置见图1)

Fig. 2 Seismic interpretation scheme of main survey lines in the Xianhe mining area (The position of the surveying line is shown in Fig. 1)

量产生 (刘泽容和李亚辉, 1997; 贾东等, 2005), 剖面组合样式以复合“Y”字形为主, 主断裂剖面上具铲状或座椅状结构 (图2), 断裂下降盘堆积的浊积砂体是有利的储油圈闭。牛西断裂系位于牛庄洼陷西部, 沙三期开始出现, 沙一期具备规模, 剖面上呈“X”型共轭样式, 平面上呈雁列式排开。丁家屋子断裂系位于南部缓坡带东部, 沙三期开始出现并规模发育, 剖面上呈明显的负花状构造或复合“Y”字形, 平面上呈雁列式排开。

3 断裂组合样式与叠加关系

在明确断裂性质与特征、合理分析断裂剖面组合的基础上, 可将东营凹陷现河矿区断裂组合样式概括为伸展断裂组合样式、伸展-走滑断裂组合样式两类。

3.1 伸展断裂组合样式

伸展断裂组合样式在现河矿区分布广泛。平面上, 发育平行式组合与斜交式组合。平行式组合由多条走向基本一致的断裂组合而成, 常见于牛庄洼陷与陈官庄-王家岗断裂带。斜交式组合表现为一条或多条分支断裂斜交终止于主干断裂, 常见于博兴洼陷东侧与利津洼陷 (图3)。剖面上主要发育“Y”字形组合、阶梯状组合、堑垒组合与屋脊式组合4种类型。“Y”字形组合按主干断裂与分支断裂倾向关系及数量进一步划分为多级“Y”字形、同向“Y”字形和反向“Y”字形, 其中, 多级“Y”字形组合呈多条分支断裂同向收敛于主干断裂, 同向与反向“Y”字形组合呈一条低序级分支断裂与主干断裂相交而成, 不同之处在于分支断裂倾向不同。阶梯状组合常见于牛庄洼陷, 包括自行消失和交于主干断裂两种类型,

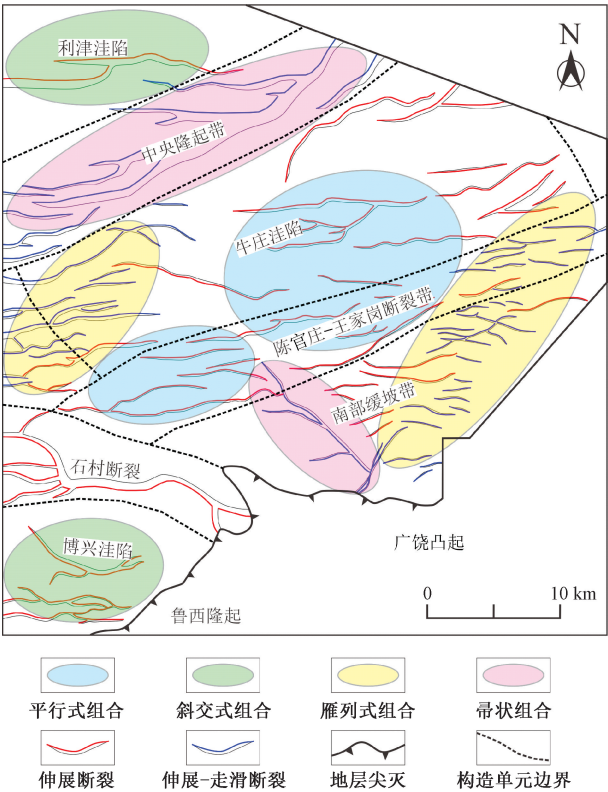


图 3 现河矿区断裂平面组合样式

Fig. 3 Plane combination style of faults in the Xianhe mining area

自行消失表现为产状相同、规模相当的正断裂依次倾斜排列，交于主干断裂表现为形态相似的正断裂依次同倾向交于主干断裂。堑垒组合由地堑及地垒构成，是走向大致平行、倾向相反的正断裂所夹持地层一盘上升或下降的组合，主要分布于南部缓坡带、牛庄洼陷与博兴洼陷。屋脊式组合按形态划分为人字形组合与人字形组合，其特征是小型正断裂交于主干断裂下盘，主要分布于牛庄洼陷（图 4）。

3.2 伸展-走滑断裂组合样式

伸展-走滑断裂组合样式在现河矿区分布较多。平面上，伸展-走滑断裂组合样式包括雁列式组合与帚状组合。雁列式组合由具有相同应力成因的一系列同级别断裂呈雁行状排列构成，主要分布于南部缓坡带与牛庄洼陷西部。帚状组合由若干条弧形断裂组合而成，呈现出一端收敛、一端撒开，多分布于南部缓坡带与中央隆起带（图 3）。剖面上主要包括负花状构造、复合“Y”字形与“X”型 3 种组合样式。负花状构造在剖面上形似花束，是伸展-走滑断裂在浅部表现的向上分叉、散开的断裂组合样式（葛双成等，1993），南

类型	组合样式	模式图	特征描述	分布范围	矿区实例
伸展断裂组合样式	“Y”字形组合	同向“Y”字形	主干断裂与低序级同倾向断裂相交而构成的组合样式	石村断裂下降盘	IL2630
		反向“Y”字形	主干断裂与低序级反倾向断裂相交而构成的组合样式	南部缓坡带牛庄洼陷中央隆起带	IL4230
		多级“Y”字形	多条分支断裂同向收敛于主干断裂的组合样式，分支断裂与主干断裂倾向相反	中央隆起带	IL3430
	阶梯式组合	自行消失	由产状相同、规模相当的伸展断裂依次倾斜排列而成，地层与断层倾向相反	牛庄洼陷	IL3830
		交于主干断裂	形态相似的伸展断裂依次同倾向相交于主干断裂之上	牛庄洼陷	连井7
	堑垒组合		由走向大致平行、倾向相反的伸展断裂及中央共用上升（下降）盘构成	南部缓坡带牛庄洼陷博兴洼陷	IL3430

图 4 现河矿区断裂剖面组合样式

Fig. 4 Section combination style of faults in the Xianhe mining area

类型	组合样式	模式图	特征描述	分布范围	矿区实例
伸展断裂组合样式	屋脊式组合	人字形	小型伸展断裂交于主干断裂下盘，构成人字形形态	牛庄洼陷	连井7
		人字形	小型伸展断裂交于主干断裂下盘，构成人字形形态	牛庄洼陷	连井6
伸展-走滑断裂组合样式	负花状构造		张性剪切断裂在浅部表现为向上分叉、散开的断裂组合，剖面上形似花束	南部缓坡带	IL1345
	复合“Y”字形		由小断距断裂相向有序交错构成的组合样式，具典型的伸展-走滑性质	中央隆起带	IL3030
	“X”型组合		两组规模相近的断裂在剖面上共轭相交组成，构成“X”型组合	牛庄洼陷西部	IL2630

部缓坡带发育较多，典型的是丁家屋子断裂系。复合“Y”字形组合主要分布于中央隆起带，是小断距断裂相向有序交错构成的断裂组合样式，具

典型的伸展-走滑性质（吴孔友等，2021），河 125 断裂系为其代表。“X”型组合由两组规模相近的断裂在剖面上共轭相交组成，典型的是牛西断裂

系(图4)。

3.3 断裂叠加关系

东营凹陷现河矿区断裂间叠加关系复杂,从不同角度可划分出不同的断裂叠加体系。

依据断裂性质与特征可划分为伸展断裂体系与伸展-走滑断裂体系:伸展断裂体系多表现为研究区南部缓坡带广泛发育的同沉积断裂,伴随着断裂上盘不断下降,不仅提供了良好的沉积储层,同时还可形成逆牵引背斜,有利于油气的聚集成藏;而伸展-走滑断裂体系则是早期伸展断裂叠加晚期走滑作用的结果,如河125断裂系、丁家屋子断裂系、牛西断裂系,走滑应力场派生出的众多小规模次级断裂对油气的运移、输导作用更为有利,表明扭张或张扭体系下的断层对油气成藏影响更为深刻。

另外,从断裂埋藏深浅角度以 T_0 层序界面为界可划分为深层断裂体系与浅层断裂体系:深层断裂体系包括先期发育的同沉积断裂、低序级小断裂和反向翘倾断块,具有数量多、组合样式丰富的特点;浅层断裂体系主要为持续活动的同沉积断裂及后期叠加走滑作用产生的断裂,如王66断裂系、丁家屋子断裂系、牛西断裂系、河125断裂系,这一时期同沉积伸展断裂活动稍有减弱,组合样式多具扭张或张扭性质(图2)。

4 断裂活动与演化阶段

4.1 断裂活动性

油气藏的形成与断裂活动性关系密切,目前关于断裂活动性研究常用的方法有生长指数法(Thorsen, 1963; 赵孟为, 1989)、断距-埋深曲线法(王洪宇等, 2020)、古落差法(赵勇和戴俊生, 2003)、断层活动速率法(李勤英等, 2000)、断层滑动速率法(张伟忠等, 2017)等,根据矿区资料和断裂发育情况,文中主要采用生长指数法和断距-埋深曲线法对断裂活动性进行定量表征。

4.1.1 生长指数分析

生长指数是指某一时期断层上盘厚度与下盘厚度之比。当生长指数等于1时,断层上下盘厚度一致,断层在这一时期不活动;当生长指数大于1时,断层开始活动,且生长指数越大,生长断层的同沉积作用越明显,断裂活动性越强(Thorsen, 1963; 赵孟为, 1989)。东营凹陷现河矿区发育大

量生长断层且断层上下盘保存较为完整,因此生长指数法在研究区断裂活动性分析方面极为适用。

文中统计了现河矿区南部缓坡带与中央隆起带共计14条主要生长断层的生长指数,以此讨论断裂活动规律(图5)。石村断裂活动较早,在孔店期活动最为强烈,此后活动性逐渐减弱,直至东营晚期又一次增强。现河矿区主要三级控带断裂生长指数出现两个极大点,说明研究区曾出现了两次断裂活动高峰,分别为沙三中期和东营早期。其中,沙三中期断裂活动最强烈,生长指数最大为1.98;东营早期断裂活动稍弱,生长指数最大为1.43。现河矿区南部缓坡带与中央隆起带断裂活动性存在差异,南部缓坡带存在沙三中期与东营早期两次明显高峰,典型的有官136断裂、通4断裂、⑤号断裂;中央隆起带同样在沙三中期活动强烈,但东营早期断裂活动不明显,如河125断裂、河4-1断裂。

4.1.2 断距-埋深曲线分析

通过量取地质剖面上不同埋深的断层滑距,绘制断距-埋深曲线可以判断不同时期断裂的活动性强弱。一般情况下,断距变化越大的时期即为断裂活动最强烈阶段。断距-埋深曲线具有4种模式(王洪宇等, 2020):①孤立模式,断裂纵向中间位置断距最大,两端位置断距最小,断距-埋深曲线呈现为“C”型;②持续生长模式,断裂随沉积作用同时活动,断裂向深层断距线性增大;③再活化模式,断裂先后经历了同沉积阶段、静止阶段和再活化阶段,断距随埋深呈线性变化,但存在明显的拐点,代表这一时期断层基本停止活动;④倾向连接模式,断裂出现两个断距极大值,且被一个断距极小值分隔,断距-埋深曲线表现出“M”型。

根据东营凹陷现河矿区几条主干断裂的断距-埋深曲线,结合生长指数统计剖面,分析断裂的主要活动时期。⑤号断裂、②号断裂、牛庄北断裂、王1断裂均属再活化模式(图6),都表现沙二末期—沙一期断层基本停止活动,生长指数接近于1,断距梯度急剧变小。其中牛庄北断裂形成较早,孔店期就强烈活动,之后在沙三中期迎来全区范围内普遍存在的第一次活动高峰,生长指数大于1,沙二末期进入活动间歇期,东营早期断距梯度有所增大,迎来第二次活动高峰。王1断裂也发育较早,自孔店—沙四期形成以来,先后经

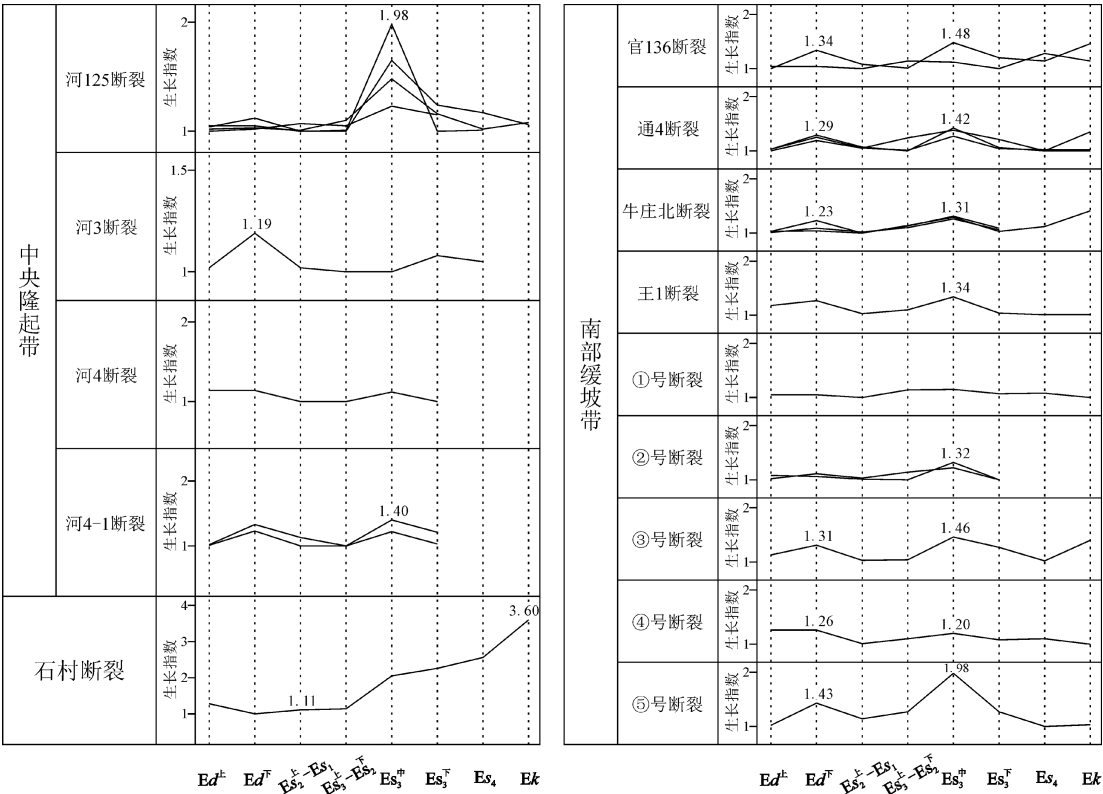
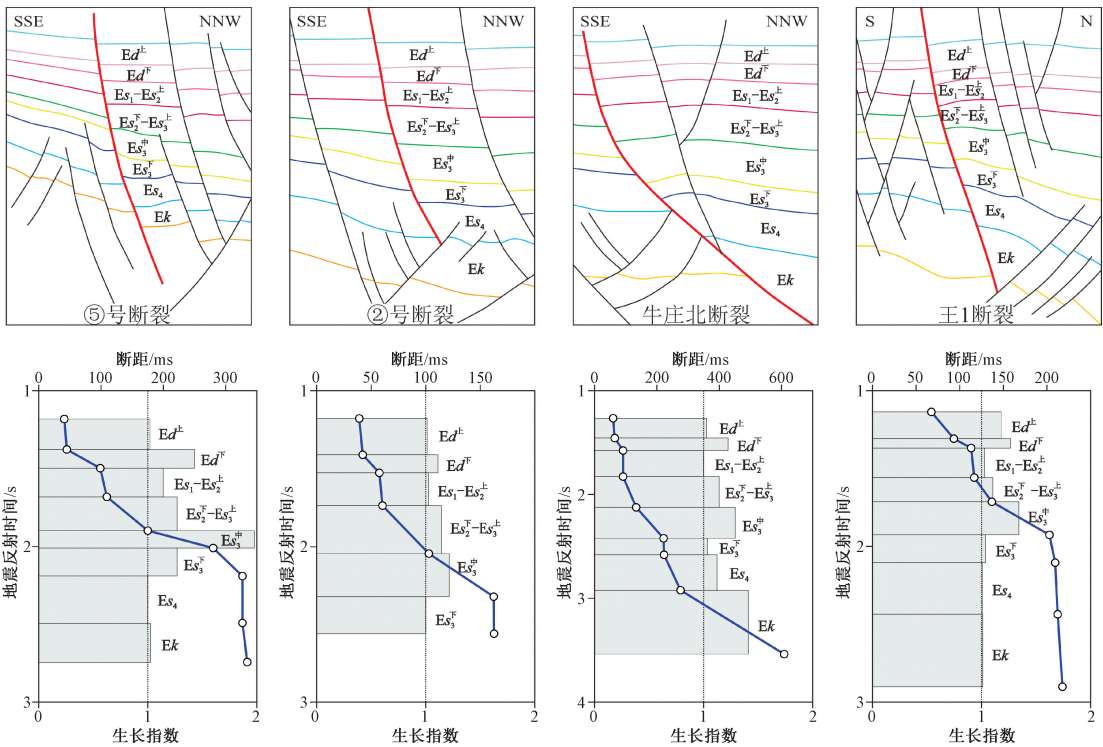


图 5 现河矿区主干断裂生长指数统计
Fig. 5 Growth index statistics of main faults in the Xianhe mining area



注：红色曲线代表主断裂，彩色曲线代表地层，蓝色折线代表断距-埋深曲线
图 6 现河矿区主干断裂断距-埋深曲线与生长指数剖面
Fig. 6 Fault displacement-buried depth curves and growth index profile of major faults in the Xianhe mining area
Red curve represents the main fault; Curves with different color represent different strata; Blue broken line represents the fault displacement-buried depth curve

历了沙三中期与东营早期两次活动高峰, 在沙二末—沙一期断层停止活动, 处于断裂静止阶段。
②号断裂发育较晚, 于沙三早期形成, 沙三中期生长指数达到极大值, 断距梯度也较大, 为断裂活动强烈期, 在沙二末—沙一期断裂静止阶段以后, 东营早期断裂活动又一次加强。

4.2 断裂演化阶段

在明确东营凹陷现河矿区断裂类型与特征、断裂组合样式几何学特征和生长指数等运动学特征的基础上, 优选切过现河矿区典型构造的地震剖面进行精细解释, 在平衡剖面原理的指导下, 运用 2D-Move 软件进行剖面演化序列恢复, 再现研究区不同类型断裂的形成演化过程。剖面演化恢复结果表明: 东营凹陷现河矿区古近系以来共经历 5 个主要断裂演化阶段。

(1) 初始伸展阶段 ($E_k-E_{s_4}$)

古新世—始新世早期, 在继承中生代末期北西—南东构造格局的基础上盆地发生构造反转 (宗国洪等, 1999; 王颖等, 2002), 使得东营凹陷现河矿区产生初始伸展断裂, 石村断裂开始拉伸, 盆地内断裂小规模发育 (图 7a、7b)。

(2) 强伸展阶段 ($E_{s_3}^{\downarrow}-E_{s_2}^{\downarrow}$)

始新世沙四段至沙三段沉积时期, 渤海湾盆地发生了一次波及范围广且强度大的区域性构造运动——济阳运动, 使东营凹陷整体呈拉张性质, 构成最主要的断陷成盆期 (杨品荣等, 2001; 史卜庆等, 2002)。此时石村断裂继承性发育, 南部缓坡带同沉积断裂开始大量出现并强烈活动, 尤其沙三中期断裂活动性最强。受塑性地层底辟上拱影响, 中央隆起带河 125 断裂开始发育, 但此时仅为伸展性质 (图 7c、7d)。

(3) 走滑-弱伸展阶段 ($E_{s_2}^{\downarrow}-E_{s_1}$)

进入渐新世, 郯庐断裂右行走滑作用加强, 东营凹陷伸展断裂活动强度有所减弱。有学者认为渤海湾盆地伸展和走滑作用具有此消彼长特征 (李理等, 2015), 因此从断裂活动角度分析, 此时应属于伸展活动间歇期, 与此对应的走滑活动达到峰值, 可能是主要的伸展-走滑断裂形成期。河 125 断裂在先存断裂基础上, 右行走滑作用加强, 转换为复合“Y”字形断裂组合, 扭动特征更加明显 (图 7e)。同时, 丁家屋子与牛西伸展-走滑断裂系发育程度增强, 派生出更多的分支断裂。

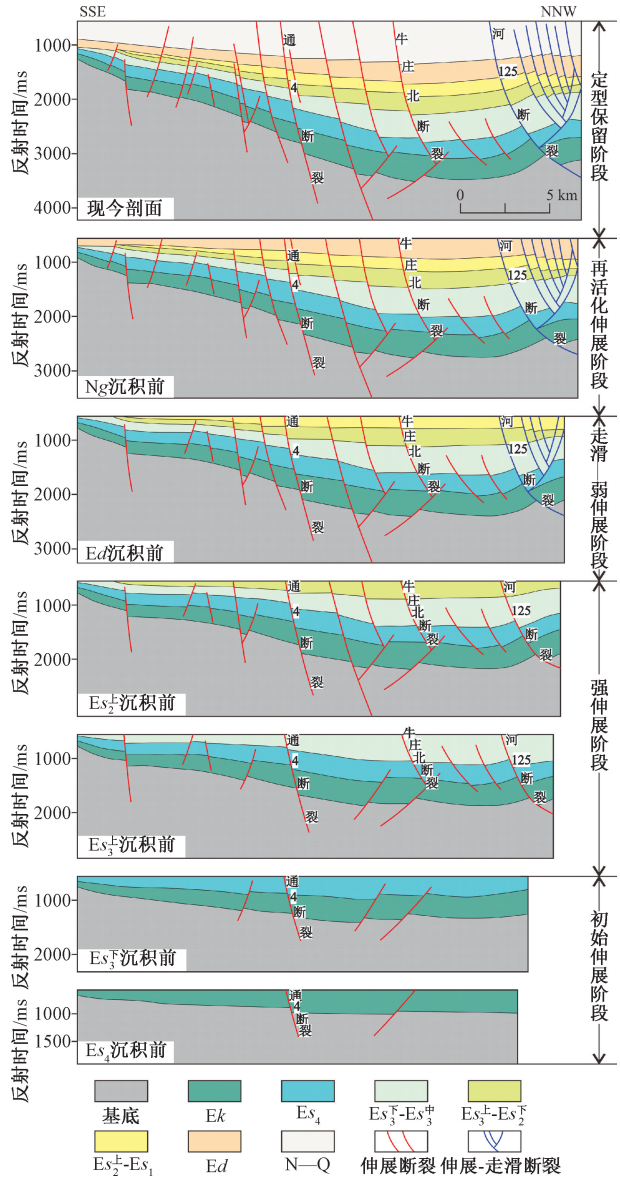


图 7 现河矿区测线②演化序列 (测线位置见图 1)
Fig. 7 Evolution sequence of Surveying line ② in the Xianhe mining area (The position of Surveying line ② is shown in Fig. 1)

(4) 再活化伸展阶段 (Ed)

渐新世晚期发生了一次强度较大的东营构造运动, 形成了众多小规模次级断层, 全区整体抬升遭受剥蚀, 构造格局仍具继承性 (图 7f)。该期断裂活动是继沙三中期之后的又一次高峰, 但较沙三中期弱, 未能产生大范围的沉降与伸展, 只是对先存构造的复杂化 (史卜庆等, 1999)。

(5) 定型保留阶段 ($N-Q$)

新近纪之后, 渤海湾盆地伸展作用明显减弱, 盆地整体处于热沉降状态, 走滑运动仍在持续发生, 但强度减弱 (漆家福等, 1995; 侯贵廷等,

2001), 此时研究区断裂发育基本定型, 盆地转向拗陷沉积 (图 7g)。

概括来说, 东营凹陷现河矿区断裂的形成与演化发生在伸展-走滑应力叠合环境下。依据伸展强度与走滑强度划分为初始伸展阶段、强伸展阶段、走滑-弱伸展阶段、再活化伸展阶段和定型保留阶段 5 个主要的断裂演化阶段, 各演化阶段赋予研究区不同时期相应的构造格架与沉积充填。

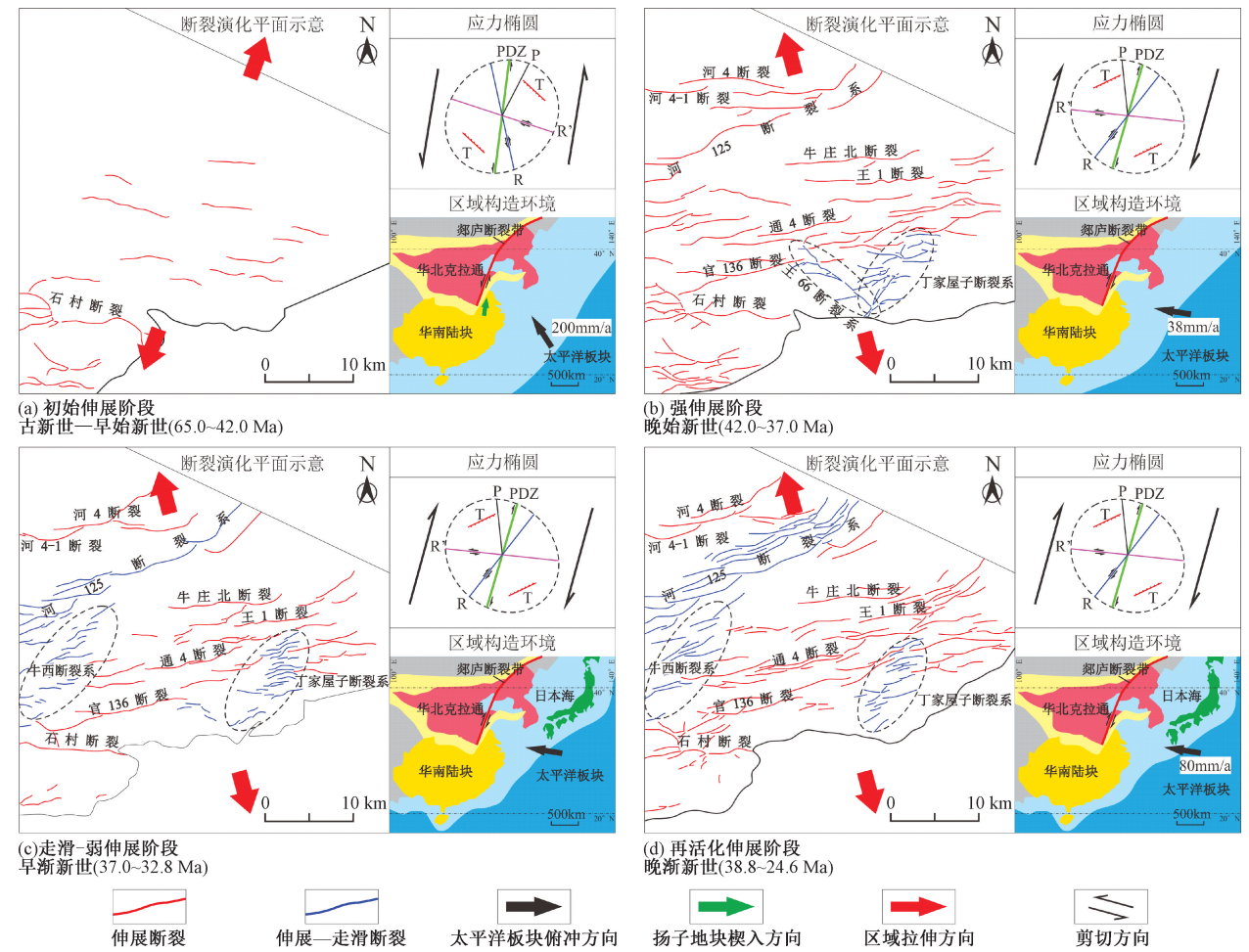


图 8 现河矿区古近系断裂体系形成演化过程 (据侯贵廷等, 2001; Hall, 2002 修改)

Fig. 8 Formation and evolution of the Paleogene fault system in the Xianhe mining area (modified from Hou et al., 2001; Hall, 2002)

古新世—早始新世 (约 65.0~42.0 Ma), 西太平洋板块呈北北西方向以 200 mm/a 的速率向欧亚大陆俯冲 (Koppers et al., 2001), 产生的弧后拉张效应形成巨大的拉伸应力场。同时扬子地块向北楔入, 持续作用于华北克拉通, 使北北东向的郯庐断裂带发生左旋走滑运动, 致使郯庐断裂带以西地区处于左旋剪切应力场 (侯贵廷等, 2001)。两种作用共同控制下, 渤海湾地区发育了

5 断裂形成机理

断裂的形成与演化阶段很大程度上受复杂的地球动力学背景影响, 板块间的相互运动是其驱动源。以板块构造理论为指导, 通过对东营凹陷现河矿区断裂演化进行动力学分析, 能够从机理上解释断裂的形成原因与演化过程 (图 8)。

一系列雁行排列的北西向断裂控制的小型断陷盆地, 北西向断裂体系控制了整个研究区的古构造格局 (Allen et al., 1997), 东营凹陷表现为一个北东断南西超的半地堑。此时, 呈北西走向的石村断裂开始以伸展形式出现, 研究区进入初始伸展阶段 (图 8a)。

晚始新世 (约 42.0~37.0 Ma), 由于库拉板块消失, 西太平洋板块运动方向从北北西向转为

北西西向,以致郯庐断裂开始大规模右行走滑(Northrup et al., 1995; 侯贵廷等, 1998; Hsiao et al., 2004; 黄雷等, 2012; 肖坤泽和童亨茂, 2020)。这一时期西太平洋板块的俯冲速率为 38 mm/a (Koppers et al., 2001), 处于最低值, 代表盆地进入强伸展活动阶段(漆家福等, 2008)。另有学者认为新生代受太平洋板块向欧亚大陆俯冲和印度板块向北推挤碰撞影响, 致使扬子地块与华北克拉通产生汇聚后挤压效应, 打破了原有的地幔热均衡, 从而导致地幔柱上的地壳发生伸展断陷(Jolivet et al., 1994; Hall, 2002; 王颖等, 2002), 伴随有研究区北东东向伸展断裂大量出现。其次, 郯庐断裂右行走滑派生出的丁家屋子右旋断裂系、王 66 左旋断裂系出现(图 8b)。

渐新世早期(约 37.0~32.8 Ma), 西太平洋板块向欧亚大陆的俯冲速率有所增大, 于此构造环境下, 郯庐断裂右行走滑活动明显加强(Koppers et al., 2001; 侯贵廷等, 2001), 现河矿区右旋张扭体系(如丁家屋子断裂系、河 125 断裂系、牛西断裂系)同步大规模出现, 此时盆地裂陷强度大幅下降, 断陷不甚发育(图 8c)。

渐新世晚期(约 32.8~24.6 Ma), 西太平洋板块以 80 mm/a 的中等速率向欧亚大陆俯冲(Koppers et al., 2001), 伴随着日本海的大规模打开与青藏高原急剧隆起, 在新的一期走滑拉分下盆地进入了新的成盆期(侯贵廷等, 2001), 岩石圈的快速拉伸、上地幔上涌以及壳下岩石圈的弹性回返导致东营运动发生(史卜庆等, 1999)。现河矿区断裂进入再伸展活动阶段, 断裂在先存构造基础上进一步复杂化(图 8d)。

6 结论

(1) 现河矿区古近系断裂包括伸展和伸展-走滑两种类型, 分别对应伸展、伸展-走滑两套断裂体系。伸展断裂构成现河矿区古近系断裂的主体, 剖面上发育“Y”字形组合、阶梯状组合、堑垒组合与屋脊式组合 4 大类共 8 种样式, 平面上发育平行式组合与斜交式组合样式。伸展-走滑断裂在现河矿区数量相对较多, 剖面上发育负花状、复合“Y”字形与“X”型 3 种组合样式, 平面上发育雁列式组合与帚状组合样式。

(2) 现河矿区古近系主干断裂存在沙三中期

和东营早期两次活动高峰。生长指数分析得出沙三中期断裂活动最强烈, 生长指数最大为 1.98; 东营早期断裂活动稍弱, 生长指数最大为 1.43。断距-埋深曲线分析表明三级控带断裂大都属再活化模式, 沙三中期活动最强, 沙二末期-沙一期断层基本停止活动, 东营早期断裂活动又一次加强。

(3) 现河矿区古近系断裂形成演化受控于伸展-走滑应力叠合作用, 共经历初始伸展阶段($E_k-E_{s_4}$)、强伸展阶段($E_{s_3}^{\text{下}}-E_{s_2}^{\text{下}}$)、走滑-弱伸展阶段($E_{s_2}^{\text{上}}-E_{s_1}$)、再活化伸展阶段(E_d)和定型保留阶段($N-Q$) 5 个主要的断裂演化阶段。

References

- ALLEN M B, MACDONALD D I M, XUN Z, et al., 1997. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 14 (7-8): 951-972.
- CHAI Y B, LI W, LIU C, et al., 2015. Controlling effect of fault activity on source rocks during Paleogene in Bohai sea area [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 22 (4): 409-414. (in Chinese with English abstract)
- CHEN D C, YANG G L, MA L C, et al., 2020. Characteristics of the strike-slip fault system and their control actions on the hydrocarbon accumulation for Weibei sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (8): 2410-2421. (in Chinese with English abstract)
- CUI X L, ZHANG X B, MA S P, et al., 2013. Developments in research of syndepositional structure [J]. *Natural Gas Geoscience*, 24 (4): 747-754. (in Chinese with English abstract)
- GE S C, CHEN H J, DING X, 1993. Flower structure and its significance to hydrocarbon exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 28 (4): 453-461. (in Chinese with English abstract)
- HALL R, 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 (4): 353-431.
- HE B, 2001. On dynamics of the Bohai bay complex faulted basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 23 (1): 27-31. (in Chinese with English abstract)
- HE J, LIU Y B, WU K, et al., 2017. Development characteristics of fault system and trap-controlling effect of strike-slip faults in south of Liaozhong Sag, East China [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 24 (2): 147-153. (in Chinese with English abstract)
- HOU G T, QIAN X L, CAI D S, 2001. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37 (6): 845-851. (in Chinese with English abstract)
- HOU G T, QIAN X L, SONG X M, 1998. The origin of the Bohai Bay Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,

- 34 (4): 91-97. (in Chinese with English abstract)
- HSIAO L Y, GRAHAM S A, TILANDER N, 2004. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift system: Paleogene structure and evolution of the Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China [J]. AAPG Bulletin, 88 (1): 71-97.
- HUANG L, WANG Y B, WU Q, et al., 2012. Cenozoic tectonic evolution of the Laizhouwan Sag in Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 86 (6): 867-876. (in Chinese with English abstract)
- JIA D, CHEN Z X, ZHANG Q, et al., 2005. Structural geometric analyses on the extensional fault-bend fold in the Dongying depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 29 (3): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- JOLIVET L, TAMAKI K, FOURNIER M, 1994. Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99 (B11): 22237-22259.
- KOPPERS A P A, MORGAN J P, MORGAN J W, et al., 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails [J]. Earth & Planetary Science Letters, 185 (3-4): 237-252.
- LI C, ZHOU D H, LV D Y, et al., 2014. Fault characteristics and its control on hydrocarbon migration in Bodong segment of Tan-Lu fault zone [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 33 (2): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- LI L, ZHAO L, LIU H J, et al., 2015. Late Mesozoic to Cenozoic extension and strike slip structures and deep background of Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 50 (2): 446-472. (in Chinese with English abstract)
- LI Q Y, LUO F Z, MIAO C Z, 2000. Research on fault activity ratio and its application [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 7 (2): 15-17. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, SUO Y H, DAI L M, et al., 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton [J]. Earth Science Frontiers, 17 (4): 64-89. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z R, LI Y H, 1997. Tectonic system and hydrocarbon accumulation in central uplift belt of Dongying Sag [J]. Journal of Geomechanics, 3 (1): 97-98, 51. (in Chinese)
- NORTHRUP C J, ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. Geology, 23 (8): 719-722.
- QI J F, DENG R J, ZHOU X H, et al., 2008. Tan-lu fault zone structure in Cenozoic basin of Bohai Sea [J]. Scientia Sinica (Terra), 38 (S1): 19-29. (in Chinese)
- QI J F, ZHANG Y W, LU K Z, et al., 1995. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay Basin province [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 19 (S1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- SHANG M Z, LI X H, WANG W L, et al., 2004. Petroleum exploration of the slope belt in the Graben Basin-a case study of the Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Experiment, 26 (4): 324-327, 332. (in Chinese with English abstract)
- SHI B Q, WU Z P, WANG J X, et al., 1999. A study on the geological characteristics and geodynamic origin of Dongying movement, Bohai Bay Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 21 (3): 196-200. (in Chinese with English abstract)
- SHI B Q, ZHENG F Y, GU Q, et al., 2002. A study on geological characteristics and geodynamic origin of Jiyang Movement, Bohai Bay Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 8 (3): 356-363. (in Chinese with English abstract)
- THORSEN C E, 1963. Age of growth faulting in Southeast Louisiana [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 13: 103-110.
- WANG H Y, FU X F, WANG H X, et al., 2020. Research on the controlling effect of quantitative analysis and evaluation of fault activity on oil and gas accumulation in Qikou sag of Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 94 (10): 3062-3073. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, ZHAO X K, GAO B Y, et al., 2002. Characteristics of tectonic evolution in Jiyang Sag [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29 (2): 181-187. (in Chinese)
- WU K Y, LIU B, LIU Y, et al., 2017. Characteristics, formation and evolution of fault system in Zhongguai uplift of Junggar Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39 (3): 406-418. (in Chinese with English abstract)
- WU K Y, LIU Y L, HU D S, et al., 2021. Types and evolution of faults in the east area of the Wushi Sag, Beibuwan Basin [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- WU Z P, LIU Y Q, ZHANG J, et al., 2018. Cenozoic characteristics and evolution of fault systems in the Liyue Basin, South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 25 (2): 221-231. (in Chinese with English abstract)
- XIAO K Z, TONG H M, 2020. Progress on strike-slip fault research and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 151-166. (in Chinese with English abstract)
- XUE Y, WU Z P, LI W, et al., 2013. Cenozoic basin structure in the Dongying sag and its control over reservoir [J]. Geotectonica et Metallogenia, 37 (2): 206-212. (in Chinese with English abstract)
- YANG P R, CHEN J, CAI J G, et al., 2001. Structural transitional stages in Jiyang depression and their significance on petroleum geology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 8 (3): 5-7. (in Chinese with English abstract)
- YUN J B, ZHAO L H, 2003. Research on molding, structural feature and formation mechanism of the central uplift belt in Dongying depression, Jiyang [J]. Journal of Geomechanics, 9 (2): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W Z, ZHA M, HAN H W, et al., 2017. Quantitative research of coupling relationship between boundary fault activity and sedimentary evolution in Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 41 (4): 18-26. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Z, GAN J, LI H, et al., 2013. Strike-slip deformation mechanism and its petroleum geology significance along south fault in

Zhu III depression under extensional tectonic setting [J]. China Offshore Oil and Gas, 25 (5): 9-15. (in Chinese with English abstract)

ZHAO M W, 1989. Discussion on the growth index of fault [J]. Experimental Petroleum Geology, 11 (3): 250-254. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, DAI J S, 2003. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 30 (3): 13-15. (in Chinese with English abstract)

ZONG G H, XIAO H Q, LI C B, et al., 1999. Evolution of Jiyang depression and its tectonic implications [J]. Geological Journal of China Universities, 5 (3): 275-282. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

柴永波, 李伟, 刘超, 等, 2015. 渤海海域古近纪断裂活动对烃源岩的控制作用 [J]. 断块油气田, 22 (4): 409-414.

陈登超, 杨贵丽, 马立驰, 等, 2020. 潍北凹陷走滑断裂体系特征及其控藏作用 [J]. 地质学报, 94 (8): 2410-2421.

崔晓玲, 张晓宝, 马素萍, 等, 2013. 同沉积构造研究进展 [J]. 天然气地球科学, 24 (4): 747-754.

葛双成, 陈焕疆, 丁晓, 1993. 花状构造及其对油气勘探的意义 [J]. 石油地球物理勘探, 28 (4): 453-461.

何斌, 2001. 渤海湾复式盆地动力学探讨 [J]. 石油实验地质, 23 (1): 27-31.

何京, 柳屿博, 吴奎, 等, 2017. 渤海海域辽中凹陷南洼断裂体系及走滑控圈模式 [J]. 断块油气田, 24 (2): 147-153.

侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民, 1998. 渤海湾盆地形成机制研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 34 (4): 91-97.

侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升, 2001. 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), 37 (6): 845-851.

黄雷, 王应斌, 武强, 等, 2012. 渤海湾盆地莱州湾凹陷新生代盆地演化 [J]. 地质学报, 86 (6): 867-876.

贾东, 陈竹新, 张愫, 等, 2005. 东营凹陷伸展断弯褶皱的构造几何学分析 [J]. 大地构造与成矿学, 29 (3): 295-302.

李才, 周东红, 吕丁友, 等, 2014. 郯庐断裂带渤东区段断裂特征及其对油气运移的控制作用 [J]. 地质科技情报, 33 (2): 61-65.

李理, 赵利, 刘海剑, 等, 2015. 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, 50 (2): 446-472.

李勤英, 罗凤芝, 苗翠芝, 2000. 断层活动速率研究方法及应用探讨 [J]. 断块油气田, 7 (2): 15-17.

李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等, 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏 [J]. 地学前缘, 17 (4): 64-89.

刘泽容, 李亚辉, 1997. 东营凹陷中央隆起带旋扭构造体系与油气

聚集 [J]. 地质力学学报, 3 (1): 97-98, 51.

漆家福, 张一伟, 陆克政, 等, 1995. 渤海湾盆地新生代构造演化 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 19 (S1): 1-6.

漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等, 2008. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38 (S1): 19-29.

尚明忠, 李秀华, 王文林, 等, 2004. 断陷盆地斜坡带油气勘探: 以东营凹陷为例 [J]. 石油实验地质, 26 (4): 324-327, 332.

史卜庆, 吴智平, 王纪祥, 等, 1999. 渤海湾盆地东营运动的特征及成因分析 [J]. 石油实验地质, 21 (3): 196-200.

史卜庆, 郑风云, 顾勤, 等, 2002. 济阳拗陷济阳运动的动力学成因试析 [J]. 高校地质学报, 8 (3): 356-363.

王洪宇, 付晓飞, 王海学, 等, 2020. 渤海湾盆地歧口凹陷断裂活动定量分析和评价对油气成藏的控制作用研究 [J]. 地质学报, 94 (10): 3062-3073.

王颖, 赵锡奎, 高博禹, 2002. 济阳拗陷构造演化特征 [J]. 成都理工大学学报, 29 (2): 181-187.

吴孔友, 刘波, 刘寅, 等, 2017. 准噶尔盆地中拐凸起断裂体系特征及形成演化 [J]. 地球科学与环境学报, 39 (3): 406-418.

吴孔友, 刘煜磊, 胡德胜, 等, 2021. 北部湾盆地乌石凹陷东区断裂类型及其形成演化 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 52-62.

吴智平, 刘雨晴, 张杰, 等, 2018. 中国南海礼乐盆地新生代断裂体系的发育与演化 [J]. 地学前缘, 25 (2): 221-231.

肖坤泽, 童亨茂, 2020. 走滑断层研究进展及启示 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 151-166.

薛雁, 吴智平, 李伟, 等, 2013. 东营凹陷新生代盆地结构特征及其控藏作用 [J]. 大地构造与成矿学, 37 (2): 206-212.

杨品荣, 陈洁, 蔡进功, 等, 2001. 济阳拗陷构造转型期及其石油地质意义 [J]. 油气地质与采收率, 8 (3): 5-7.

云金表, 赵利华, 2003. 东营凹陷中央隆起带构造特征、沙箱模拟与形成机制研究 [J]. 地质力学学报, 9 (2): 113-121.

张伟忠, 查明, 韩宏伟, 等, 2017. 东营凹陷边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 41 (4): 18-26.

张迎朝, 甘军, 李辉, 等, 2013. 伸展构造背景下珠三拗陷南断裂走滑变形机制及其油气地质意义 [J]. 中国海上油气, 25 (5): 9-15.

赵孟为, 1989. 断层生长指数探讨 [J]. 石油实验地质, 11 (3): 250-254.

赵勇, 戴俊生, 2003. 应用落差分析研究生长断层 [J]. 石油勘探与开发, 30 (3): 13-15.

宗国洪, 肖焕钦, 李常宝, 等, 1999. 济阳拗陷构造演化及其大地构造意义 [J]. 高校地质学报, 5 (3): 275-282.