

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.04.006

渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异

李三忠^{1,2}, 索艳慧^{1,2,3}, 郭玲莉^{1,2}, 戴黎明^{1,2}, 周立宏⁴, 楼达⁴

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质功能实验室, 青岛 266237;

3. 国家海洋局海洋沉积与环境地质重点实验室, 青岛 266061; 4. 中国石油大港油田公司, 天津 300280)

摘要:以大歧口凹陷大面积高精度三维地震资料为基础,并结合前人的研究成果,系统分析了大歧口凹陷变换构造与板内其他块体间的变形差异。从对不同级别构造的控制作用分析,大歧口凹陷的变换构造带可以划分为 3 个级别:(1)近南北向的主变换带(也称一级变换带),自西向东依次为孔店东变换带、沿岸变换带和羊二庄变换带,分别对应了大歧口凹陷西部、沿岸和羊二庄 3 条基底走滑断裂带。这 3 个主变换带起到了协调大歧口凹陷东西两侧构造样式差异的作用。(2)近东西向的次变换带(也称二级变换带),自北向南依次对应大歧口凹陷的汉沽、海河-新港和歧中 3 条控凹断裂。这 3 条近东西向的控凹断裂起到了调节黄骅坳陷北、中、南三区变形差异的作用,致使大歧口凹陷主变换构造带近南北向的发育。(3)三级变换带,一般垂直于主控断裂发育,起到传递断裂之间伸展量的作用。大歧口凹陷变换构造带主要有边界主控断层的影响、先期基底构造的控制和新生代不均匀伸展作用的影响 3 个成因。变换构造带的存在和发育使大歧口凹陷内部不同时期的不同块体存在时空上的差异变形,造成了凹陷内部构造样式的差异。受太平洋板块后退式俯冲和印度-欧亚板块挤压碰撞作用的影响,黄骅坳陷新生代以来处于右旋拉张应力场作用下,表现出早期裂陷、后期拉分断陷的特征;其区域主构造应力场由孔店-沙四期的 WNW—ESE 向拉伸变为沙三-东营期的 NW—SE 向拉伸,到新近纪又发展为近 N—S 向拉伸,总体呈顺时针旋转,而这样一个构造演化过程正好可以用黄骅坳陷内大歧口凹陷的发育和演化拉分模式来成功解释。

关键词:变换构造;板内变形差异;动力学;大歧口凹陷

中图分类号:P542

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)04-0098-12

Dahlstrom^[1]在研究挤压型褶皱-逆冲断层的几何形态时首次提出变换构造带(transfer zone)的概念。变换构造带最初被定义为挤压变形带中两条主逆冲断层之间实现缩短量和位移量守恒的构造。后来,该概念被用于伸展构造中,并对变换构造带进行了分类^[2-5]。

20 世纪 90 年代开始,国内学者结合渤海湾盆地、松辽盆地等实例开展了变换构造带的研究,对伸展盆地中变换构造带的认识也逐渐深入^[6,7]。刘剑平等^[8,9]将这类构造定义为“变换构造”,并将其解释为“伸展盆地中因区域应变守恒而产生的伸展变形调节体系。这种变形调节体系有效地联结了各相对独立的伸展体系域并传递各体系域之间的应变,从而使伸展盆地各区段达到区域应变守恒”。伸展盆地中的变换构造带是有利的储集层发育区,易形

成多种类型的油气圈闭和良好的油气富集场所,具有良好的油气运移指向,这已被大量含油气伸展盆地的研究和勘探所证实。因此,在油田探区开展对变换构造的研究具有十分重要的现实和理论意义。

黄骅坳陷是中国东部渤海湾新生代盆地内油气资源最为丰富的坳陷之一。大歧口凹陷位于黄骅坳陷中北部(图 1),是目前中石油油气勘探的重点区域之一,油气资源丰富,但勘探程度较低。大歧口凹陷主要发育北东-北北东和近东西向两组构造系统,不同级别、不同类型的变换构造带也较为发育。这些变换构造带是研究大歧口凹陷乃至渤海湾盆地构造演化和油气勘探的关键部位之一。近年来,随着高精度大面积三维地震资料的广泛应用,多个科研院所对大歧口凹陷的断裂体系、构造特征、动力过程以及构造对沉积和油气的控制作用等一系列问题开展了研究工作。但总体来说,研究工作多侧重于整体认识,对于大歧口凹陷内的局部变换构造和板内变形特征的研究程度较低也很有限。因此,本文依托大歧口凹陷 5 280 km² 三维地震数据体的精细构造解释成果,在前人研究成果基础上,对大歧口凹陷变换构造带和板内变形机制开展进一步深入研究、

基金项目:国家自然科学基金(41325009,41502185);国家重点研发计划(2017YFC0601400-1);国家海洋局海洋沉积与环境地质重点实验室开放基金(MASEG201702)

作者简介:李三忠(1968—),男,教授,博导,从事构造地质学及海洋地质学的教学和研究工作,E-mail: sanzhang@ouc.edu.cn

收稿日期:2017-05-31; **改回日期:**2017-06-19. 周立君编辑

总结规律。这不仅有助于探明大歧口凹陷内部重要变换构造带的发育模式和板内变形机制,也为研究黄骅拗陷乃至整个渤海湾盆地的构造过程和动力学机制提供了重要的依据。

1 地质背景

渤海湾盆地位于印度、欧亚和太平洋三大板块交接的区域(图 1)。黄骅拗陷位于渤海湾盆地的中部,经历了早元古代吕梁运动后的地台基底形成阶段和后期新元古代、古生代和中生代 3 个构造演化阶段,奠定了其古生界底板构造骨架。在底板构造的基础上,黄骅拗陷在中生代末—新生代初开始拉张裂陷,第三系断陷盆地出现,大歧口凹陷便是其中之一^[10,11]。大歧口凹陷位于黄骅拗陷中北部,总体

构造走向呈北东—近东西向(图 1),羊二庄断裂和沧东断裂分别控制了大歧口凹陷的东部边界和西部边界;南缘的歧中断层和北缘的汉沽断层分别控制了大歧口凹陷的南部边界和北部边界(图 2);凹陷内发育有北倾的板桥、大张坨、歧中、张东、赵北、羊三木和扣村及南倾的汉沽、大神堂、涧南、海河、港东、港西和南大港等一系列次级断层(图 3)。

大歧口凹陷是渤海湾盆地新生界沉积最厚的凹陷,主体为古近纪沉积,厚 5 700 m,新近系及第四系厚 3 400 m。新生界沉积地层自老到新依次为:下始新统孔店组、沙河街组(上始新统沙三段和下渐新统沙二、沙一段)、上渐新统东营组、中新统馆陶组、上新统明化镇组和第四系平原组(表 1)。凹陷沉积以湖盆沉积体系与陆相河流沉积体系为主。

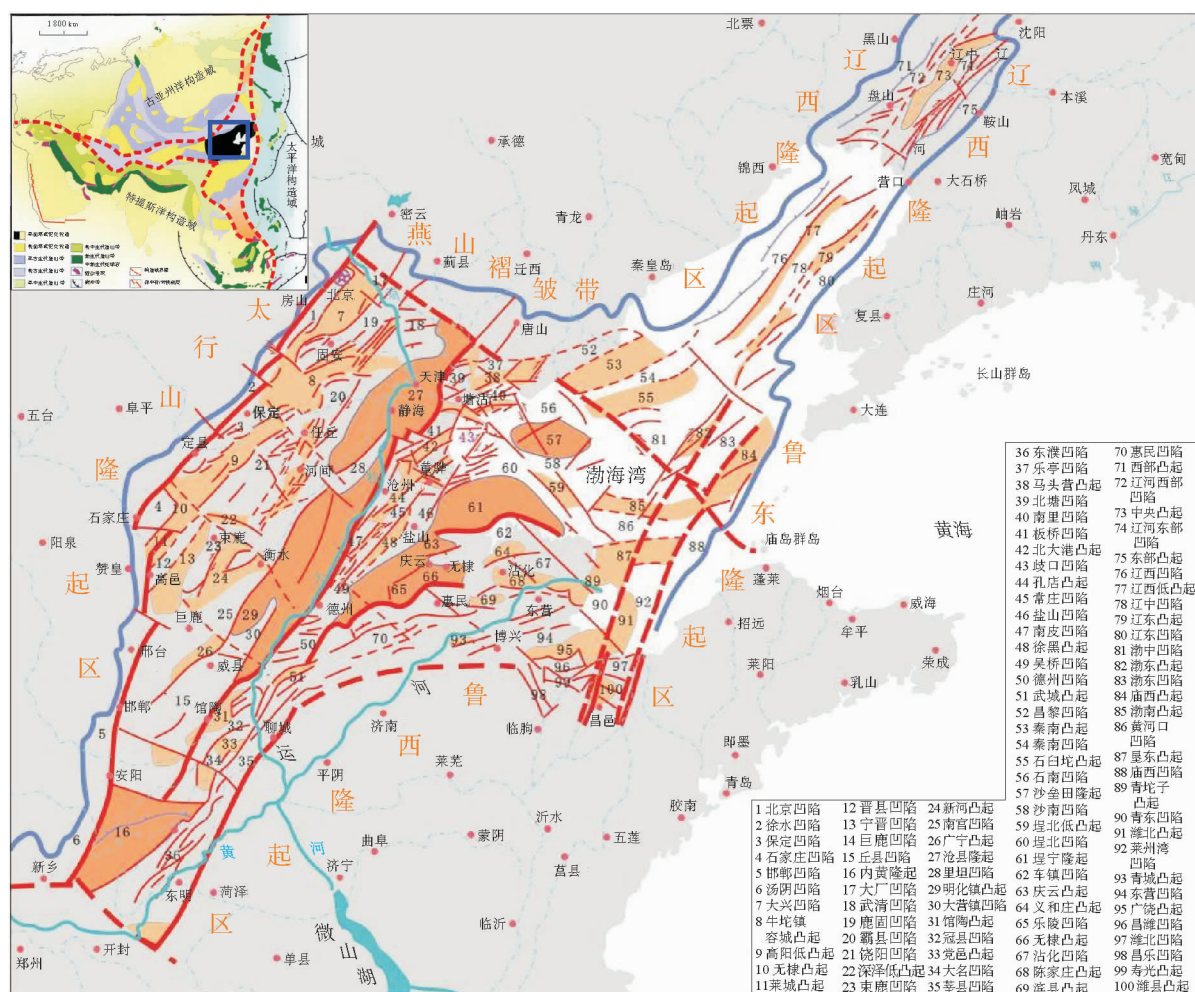


图 1 黄骅拗陷及邻区区域大地构造位置(据文献[10]修改)

Fig. 1 Tectonic map of the Huanghua Depression and adjacent areas (modified after reference [10])

表 1 大歧口凹陷地区地层简表
Table 1 Stratigraphy of the Great Qikou Sag

地质年代及代号			年龄/Ma		地层划分			构造演化	
代 (界)	纪 (系)	世 (统)	国际	歧口	歧口地层		解释层	构造运动	演化阶段
新 生 代 Kz	第四纪 Q	全新世Q ₄	0.0118	0.0118	平原组	歧口组 高湾组 杨家寺组	Qp	东营运动	区域 沉降 阶段
		更新世 Q ₁ 、Q ₂ 、Q ₃	1.806	1.8		欧庄组 杨柳青组 固安组			
	新近纪 N	上新世N ₂	5.332	5.3	明化镇组		Nm		碟状 拗陷 阶段
		中新世N ₁	23.03	12 24.6	馆陶组		Ng		
	渐新世E ₃			27.4	东营组	东一段	Ed ₁		箕状 断陷 阶段
				30.3		东二段	Ed ₂		
				32.6		东三段	Ed ₃		
				沙一段	沙一上	Es ₁			
					沙一中				
					沙一下				
	古近纪 E	始新世E ₂		33.9	38	沙二段		Es ₂	拉分 断陷 阶段
							42	沙三段	
				沙三 ₂	Es ₃ ²				
		45		沙三 ₃	Es ₃ ³				
				沙三 ₄	Es ₄				
沙三 ₅									
			孔店组	孔一段	Ek ₁	孔店运动	拓展 裂解 阶段		
				孔二段	Ek ₂				
				孔三段	Ek ₃				
古新世E ₁		55.8	56					华北升降	
	65.5								65

2 构造单元划分

2.1 前人划分方案

大歧口凹陷东部进入海域以沙垒田凸起为界与渤中坳陷相隔,南部上超到埕宁隆起之上,西北以沧东断裂为界与沧县隆起相接,西南缘以沈青庄凸起和孔店凸起为界与黄骅坳陷南区相隔。前人根据凹陷内局部沉降中心的分布特征,将其内部自北向南依次划分为北塘次凹、歧口主凹、板桥次凹、歧北次凹和歧南次凹 5 个相对独立的凹陷单元,凹陷与凹陷之间被凸起和潜山构造所分割(图 2)^[12,13]。

2.2 构造单元新划分方案

近年来,随着大量钻井资料和新的三维地震资料的采集和分析研究工作,发现歧口地区分割各次凹之间的凸起基本都被古近系所覆盖,现今的主凹和次凹在新近纪之前具有连通性,如今的凸起在新近纪之前也并不存在,故提出“大歧口凹陷”的概念。在新的构造单元划分方案中,以海河-新港构造带为

界,大歧口凹陷被分割为南、北两部分。南部的“大歧口凹陷”形似菱形,包括北大港凸起、南大港凸起两个正向构造单元和歧口主凹、板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹 4 个负向构造单元(图 2);北部为北塘凹陷,包括北塘次凹、涧南凸起、大神堂凸起和塘沽斜坡 4 个构造单元。大歧口凹陷被近南北向的沿岸基底走滑断裂和近东西向的海河-新港断裂、歧东断裂分割成 4 个断块,各断块具有不同的构造变形特征(图 2)。

3 大歧口凹陷主控断裂特征

大歧口凹陷可识别出 3 个相对独立的构造变形系统:基底逆冲褶皱构造系统、基底卷入变形的走滑构造系统和发育在盖层中的伸展构造系统。这 3 个系统形成和发展时间各不相同:逆冲褶皱构造系统发育于前第三系地层中;古近纪凹陷内区域应力场由压扭变为张扭性质,逆冲活动停止、张裂活动开始,伸展构造系统出现;而走滑构造系统在基底和盖层中均有所体现,其活动一直贯穿于凹陷的整个发展过程^[14]。本文主要讨论大歧口凹陷新生代以来的走滑和伸展断裂体系。

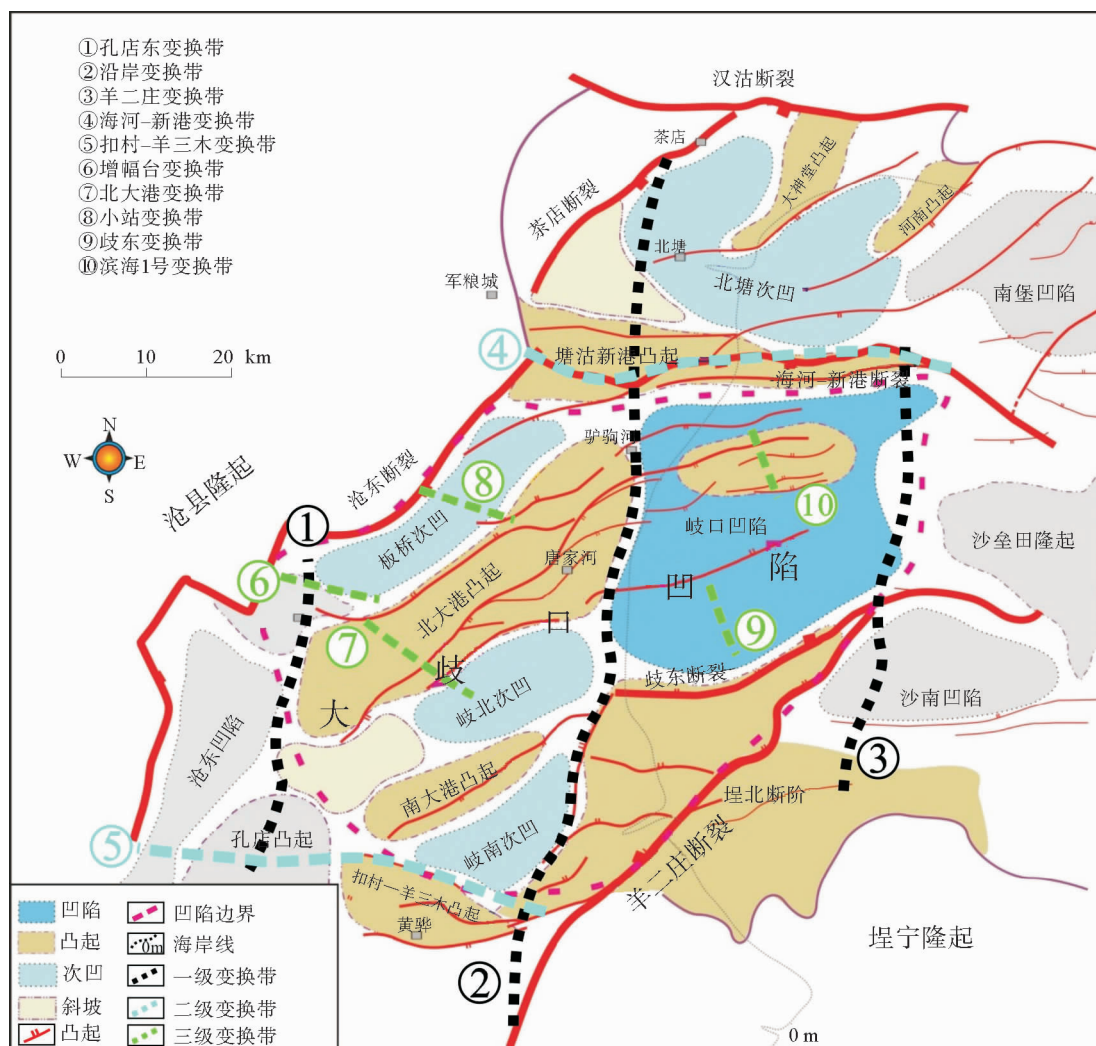


图 2 大歧口凹陷构造单元划分

Fig. 2 Tectonic units of the Great Qikou Sag

3.1 边界控拗断裂

沧东断裂系和羊二庄断裂系分别控制了大歧口凹陷的西部边界和东部边界(图 3)。

(1) 沧东断裂系

沧东断裂位于沧县隆起带东部、黄骅凹陷西部(图 2, 图 3), 是控制黄骅凹陷西部边界的一条规模较大的隐伏断裂^[15]。在深部基底中, 沧东断裂的局部地段保存了前新生代时期的逆冲断层特征; 在浅部盖层中, 断层由逆冲性质反转为正断性质, 并开始控制黄骅凹陷第三系的沉积^[16]。

在黄骅凹陷内部, 沧东断裂呈锯齿状区域性展布, 分段明显, 不同区段的产状、断距、活动强度和演化历史等特征差异明显, 自南向北依次控制了吴桥凹陷、南皮凹陷、沧东凹陷、板桥次凹和北塘次凹的边界和沉积(图 2, 图 3)。

(2) 羊二庄断裂系

羊二庄断裂系是黄骅凹陷埕西断裂的东北向延伸, 控制了黄骅凹陷的东部边界(图 2 和图 3)。该断裂北段在歧口主凹表现为张扭性质, 最大断距达 3 000~4 500 m。南段在平面上表现为向西凸的弧形, 弧形两侧断裂特征差异显著: 弧形西侧主要发育 NE 向正断层; 弧形东侧近 EW 向断层为主, 也有少量 NE 向正断层发育。羊二庄断裂两侧断层走向的改变可能是基底断层右旋走滑运动的结果^[17], 从而控制了一系列平行或斜交的地垒(或背斜)及地堑等次级构造单元的发育。

3.2 基底走滑断裂系

大歧口凹陷自西向东发育西部走滑断裂带、中部沿岸走滑断裂带和东部羊二庄走滑断裂带 3 个大型基底走滑断裂系(图 3)。

西部走滑断裂带位于沧东断裂东侧,近南北走向。平面上,沿该走滑带发育一系列左阶雁列式的次级断裂;剖面上,该走滑带主断面由上向下收敛于一个近于直立的面,但不穿过新生界底界面,两侧发育多条密集的小断面,呈典型的花状构造样式(图3A—D)。

沿岸走滑断裂带近南北走向,大致沿现今海岸线方向延伸。该断裂带由基底和盖层两套变形样式组合而成,总体表现出反转性质:基底中断层面一般不切穿 T_g 反射界面,断裂产状较陡,常见典型的负花状构造;浅部盖层中常见基底隆升背景上的花状构造、挠曲褶皱、雁列式断裂等多种组合样式,总体表现为一条高角度、具有张扭性质的走滑断层(图

3E—H)。

羊二庄走滑断裂带是控制大歧口凹陷东部边界的一条北东向的右行基底走滑断裂。在平面上,该断裂带两侧派生出的一系列次级断裂呈雁列式展布。在剖面上,一系列次级断层面面向下收敛于一条切穿古生界的近于直立的主断面,表现为典型负花状构造(图3I—J)。

3.3 东西向控凹断裂

汉沽断裂和歧中断裂分别被认为是控制大歧口凹陷的北界和南界控凹断裂,海河-新港断裂被认为是凹陷内部控制歧口主凹的控凹断裂(图2和图3)。

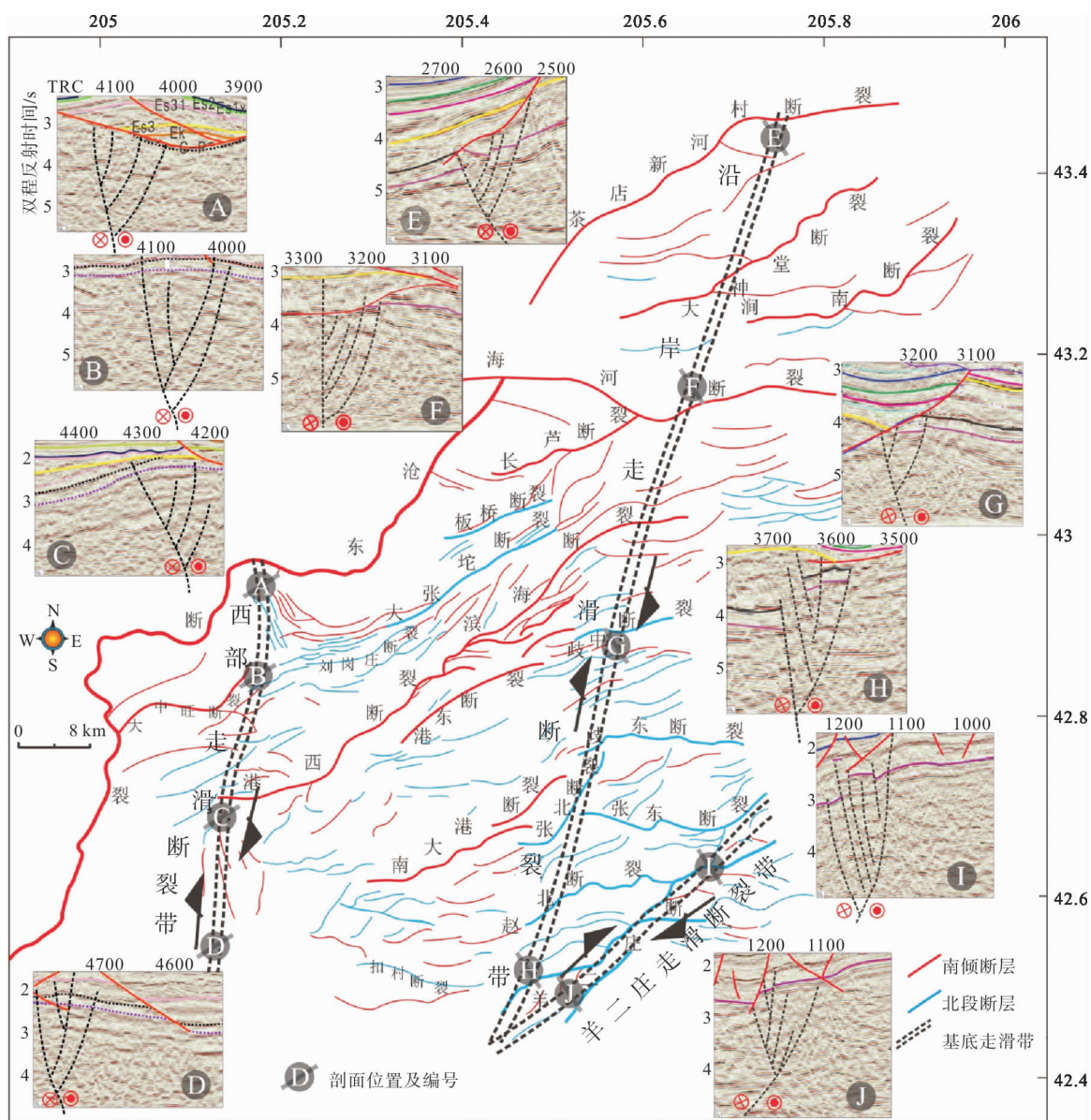


图3 大歧口凹陷主控断裂体系

Fig. 3 The main controlling fault system of the Great Qikou Sag

汉沽断裂位于大歧口凹陷北部,近东西走向、南倾、断面呈铲状。该断裂明显控制新生代尤其是沙三段的沉积和构造,沙三期之后断裂断距减小,对地层的控制作用逐渐减弱。海河-新港断裂位于大歧口凹陷中北部,近东西走向、南倾,自西向东由统一的一支拓展为南、北断裂性质明显不同的两支,南支为新港断裂,北支为海河断裂(图3)。北支的海河断裂位于沧东断裂上盘,沙三时期活动强烈,使得沙一段与沙三段地层呈角度不整合接触,进而导致大歧口凹陷北侧大面积缺失沙二段地层;南支的新港断裂位于北支海河断裂的上盘,并向下收敛至海河断裂,该断裂明显控制沙一段和东营组地层的沉积,可见其活动时间明显晚于海河断裂。自北向南,由汉沽断裂至海河断裂至新港断裂,断裂活动性向南迁移。

歧中断裂位于大歧口凹陷南部、埕宁隆起的北部斜坡上,近东西走向,控制了凹陷的南部边界(图3)。剖面上表现为向北倾的断阶结构,对沙三段地层的沉积控制作用尤为明显。其南侧的张东断裂和更南侧的赵北断裂分别控制了沙一段和东营组地层的沉积,且地层沉积厚度依次明显增大,推断大歧口凹陷南部断层自北向南拓展,且活动强度随着演化向南迁移,不同于前人的向北、向凹陷中心“节节下掉”的观点^[13]。

4 大歧口凹陷变换构造

根据变换构造带的规模及对构造分区的作用,本文将大歧口凹陷的变换构造带分为主变换带(一级变换带)、次级变换带(二级变换带)和三级变换带3个级别(图2)。

4.1 大歧口凹陷主变换构造带

主变换构造带多位于盆地基底的薄弱地带,在先期构造的基础上经后期裂隙作用改造而成,由一系列横向断裂带或走向斜坡、隐伏的褶曲带组成。主变换构造带与主伸展构造相互制约,共同控制了凹陷内二级构造带的分布范围及大歧口凹陷的构造格局。平面上,凹陷的主变换构造带主体呈近南北走向,垂直于控凹边界断裂的延伸方向;剖面上,主变换构造带连同主伸展构造将凹陷分割成不同的构造和沉积单元,并起到调节变换带两侧不同构造单元内的伸展变形和沉积模式的作用。大歧口凹陷自西向东发育孔东变换带、沿岸变换带和羊二庄变换带3条主变换构造带。

(1) 孔店东变换带

近南北向展布的孔店东变换带位于沧东断裂东侧,北起沧东断裂、南至孔店凸起。在剖面上,该变换带内可识别出对向叠覆型(图4A)和背向叠覆型(图4A,图4B)组合样式;沙三段地层角度不整合于基底褶皱隆起带上,可见沙三时期孔店变换带存在一次规模较大的构造运动。平面上,变换带东西两侧的构造展布样式差异明显:东侧表现为NE向左阶雁列式,西侧为NNE向左阶雁列式(图2)。变换带表现出走滑性质。

(2) 沿岸变换带

沿岸变换带近南北向展布,是大歧口凹陷内规模最大、起着最为重要调节作用的变换构造带。自南向北,该变换带由一系列NE或近EW向的断裂呈左阶雁列式排布而成:羊二庄断裂、赵北断裂、张北断裂、南大港断裂、港东断裂、滨海断裂、大张坨断裂、板桥断裂和长芦断裂(图3)。根据断裂的表现形式和断裂体系的特点,该变换带自南向北可分为3段:①位于歧中断裂以南的南段。浅层发育一系列次级小断层,平面上呈雁列式展布;剖面上断层面多为直立,具有花状构造的组合特征。南段的变换构造主要表现为对向叠覆型(图4E)。②中段,位于海河断裂和歧中断裂之间。平面上,该段由一系列具有右行走滑性质的断裂呈帚状排布而成,如滨海I号断裂、港东断裂等。剖面上,以东营期为时间节点,该段断裂明显有古近纪、新近纪两期活动:东营组地层顶面以下地层内部发育的断层面自西向东拓展,断层活动时间早于新近纪,并尖灭于沿岸变换带,如长芦断裂;东营组地层顶面以上地层内部发育的断层面较陡并近于直立,且具有走滑分量,断层活动时间为新近纪。该段发育同向接近型、同向叠覆型和背向叠覆型(图4D)等多种类型的变化构造。③位于海河断裂以北、整体表现为东倾的膝折斜坡的北段。受该段次级分支断裂的控制,凹陷内出现不连续分布的低凸起。发育有同向平行型和同向叠覆型两种类型的变换带,两种不同类型的变换带中间有反向断层调节(图4C)。

沿岸变换构造带东西两侧差异明显:①构造单元差异明显。变换带西侧自北向南依次由板桥次凹、北大港隆起、歧北次凹、南大港隆起和歧南次凹等一系列长轴为北东向的次凹和隆起相间排列而成;而东侧则整体表现为一个全区规模最大、沉降幅度最大、新生界地层沉积最厚的歧口主凹。②变换带两侧结构差异明显。西侧的各次级凹陷表现为一系列北断南超的多米诺式的箕状断陷结构;而东侧

的歧口主凹表现为复式地堑结构。③变换带两侧断裂体系差异明显。西侧控制各次级构造单元的主要断裂总体北东向展布、倾向南东,收敛于沿岸带;而东侧发育一系列近东西向展布、北倾的断裂系。

(3) 羊二庄变换带

羊二庄变换带北起海河-新港断裂带、南至埕北断阶带,和羊二庄走滑断裂带共同起到了控制大歧口凹陷东部边界的作用。羊二庄变换带东西两侧的地质特征尤其是地形差异显著:东西两侧整体均表现为走向大致一致的凸起与次凹或主凹相间发育的正负地形,但西侧的凸起(正地形)往往沿走向与东侧的次凹或主凹(负地形)首尾相连,表现为变换带东西两侧次级构造单位的整体错位。

4.2 大歧口凹陷次级变换带

大歧口凹陷的次级变换带,也称为二级变换带,一般垂直于近南北向的控凹边界断裂,近东西向展布,有位于凹陷南部的扣村-羊三木和凹陷中北部的海河-新港两个,规模较主变换构造带稍小。横向上,以这两个次级变换带为界,黄骅凹陷内可识别出北、中、南3个差异显著的构造系统。

海河-新港变换带位于黄骅拗陷北部,近东向展布,是分割北塘凹陷和大歧口凹陷的边界构造。沿变换带常见同向平行型和同向叠覆型的低凸起和转换斜坡,局部可见背向叠覆型的高凸起(图5A—

F)。在剖面上,以沙三地层的顶面为界,该变换带可识别出两期变形构造:早期继承了北东向的基底构造格局;晚期为沙三期以后的地层沉积时期,受构造运动的影响变换带附近沙二段地层局部缺失,沙一段地层与沙三段地层呈角度不整合接触关系,该时期的凹陷表现为近东西向展布的翘倾式断块的构造样式。

扣村-羊三木变换带表现为同向叠覆型的转换斜坡。在剖面上,该变换带中生界地层中负花状构造明显,局部出现膝折构造,地震反射轴在断层面附近杂乱无章、无法追踪(图5G—K)。为了保持伸展变形守恒,扣村-羊三木变换带吸收了邻区在破裂变形和左旋扭曲的过程中一定的伸展应变,从而造成本身伸展量明显偏小,甚至还不及相邻凹陷的一半^[18]。

4.3 大歧口凹陷三级变换带

三级变换带一般由一系列规模非常小、位于主干断裂体系内部且近于垂直主干断裂的小断层构成,起到了调节凹陷内部主干断裂系不同区段之间的走向形变、断面产状变化以及构造沉降差异的作用。大歧口凹陷内识别出大量三级变换带。这些三级变换带多沿垂直于其主控断裂的走向方向展布,但走向稍有变化,如滨海I号变换带、歧东变换带、北大港变换带和小站变换带等(图2)。

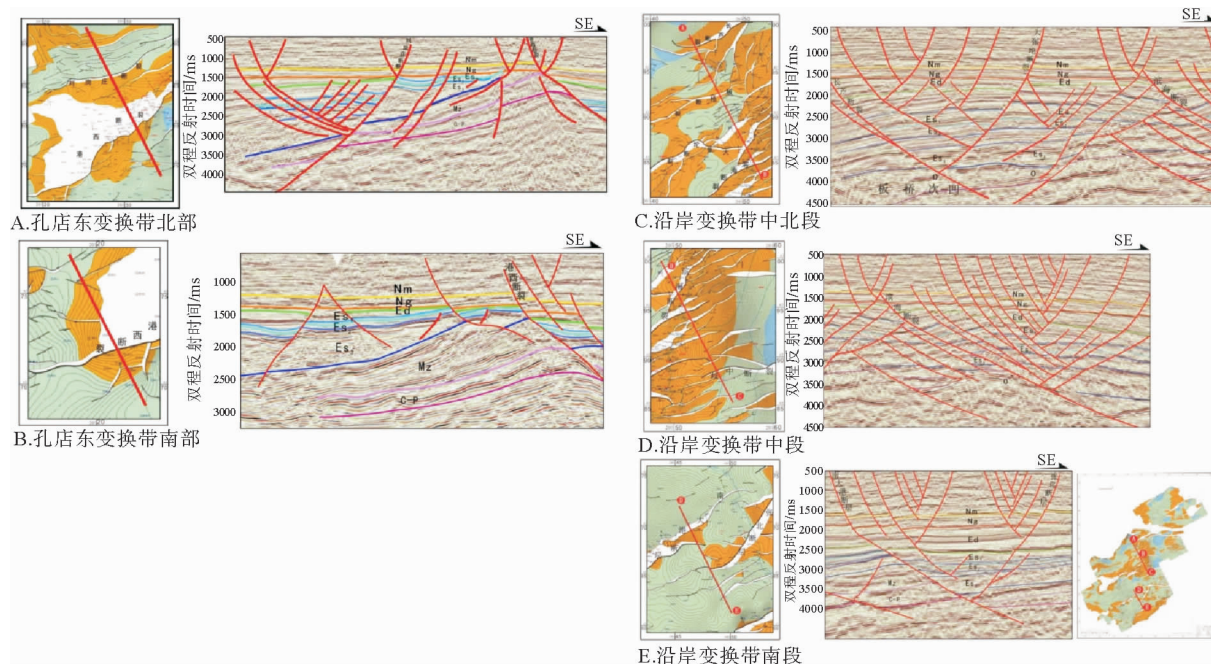


图4 主变换构造带典型剖面

Fig. 4 Typical seismic profiles of the major transfer zones of the Great Qikou Sag

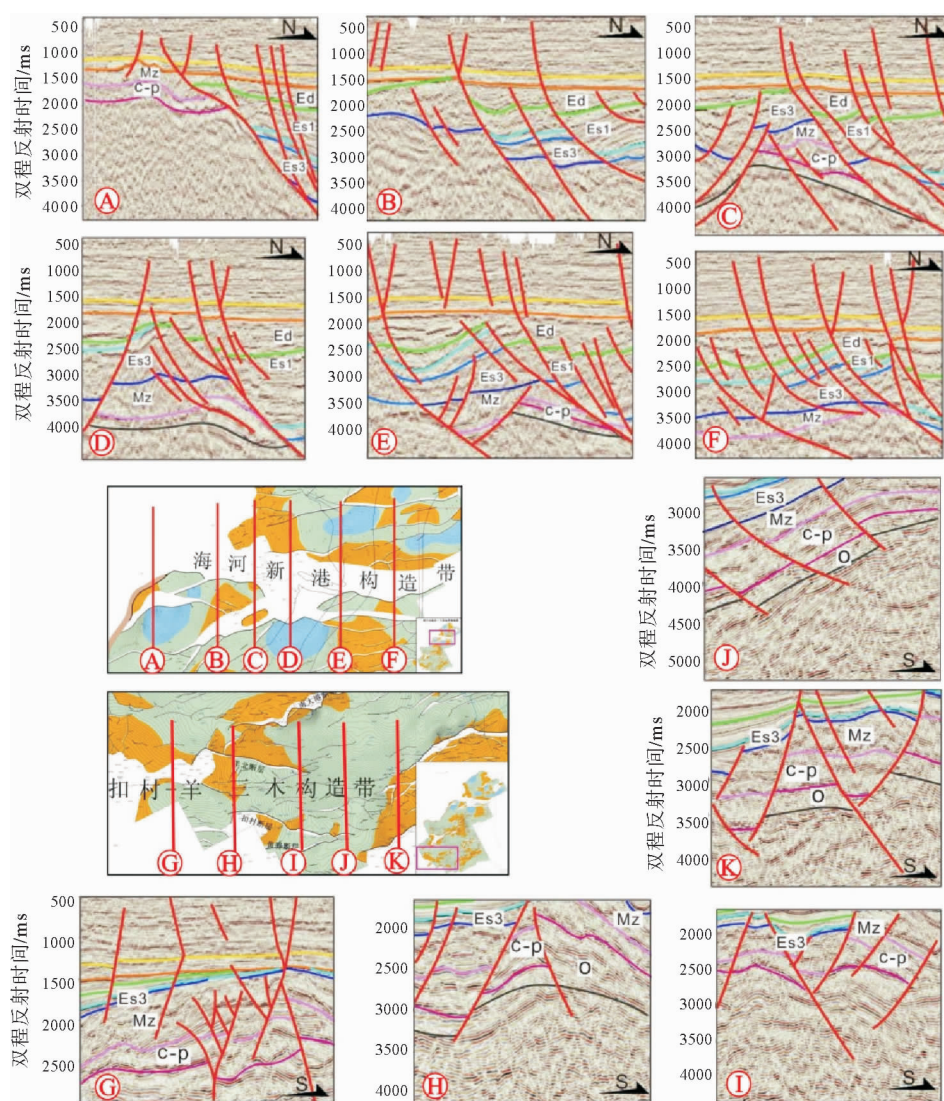


图 5 大歧口凹陷次级变换带典型剖面

Fig. 5 Seismic profiles of the second-order transfer zone of the Great Qikou Sag

大歧口凹陷内部还可识别出一些规模更小、数量更多、控制构造作用更不明显的变换带,但也起到了调节不同构造带或同一构造带内部不同单元的伸展变形的作用。这些变换带通常沿凹陷内次一级断层的上盘分布,其延伸方向依赖于其所在的主控断层,可能和主变换有明显的交角,如赵北断层、张东、南大港和茶店断层等。

4.4 大歧口凹陷变换构造的主控因素

变换构造带有多方面的控制因素,地质因素的局部不均一性也可以促使变换带的发育和形成。大歧口凹陷地区变换构造带由以下几个主要控制因素:

(1) 边界控凹断层的制约

变换构造带与边界控凹断层同是裂谷盆地裂陷

期的产物,其形成与边界控凹断层的产生、生长拓展和连接密切相关。在裂谷盆地形成的初期,多条小规模、彼此间相互独立的断层以软连接形式相连,随着断层的生长发展并逐渐以平行、叠覆或者接近等软连接或硬连接形式拓展为一条形态近于完整的、规模较大的断裂,构成了最初的控制凹陷边界的断裂系。为了保持应变守恒、调节不同空间的应变差异,变换构造带开始出现。变换构造带一般垂直于并受边界控凹断裂的制约,以软连接的凸起、背斜、转换斜坡等变形形式与主控断层结合在一起或者发育于主控断层内部。最后,应力近似的主控断层以变换构造带为纽带弯曲连接在一起,并随之发展成为一条规模更大的边界控凹断层。控制大歧口凹陷东部边界的沧东断裂,在其生长拓展过程中,为了保持应变守恒、调节断裂系不同区段的应变差异,就产

生了增福台变换带和小站变换带。

(2) 先期基底构造的控制

基底中的薄弱地带往往是变换构造带最有利的发育场所,变换构造带随之在裂谷盆地基底构造格局的基础上形成。在研究先期基底构造与裂谷体系中变换构造带的形成之间的关系的物理伸展模型中证明,区域性的变换构造带往往沿基底错开处形成,并将伸展模型分成了具有不同构造样式、不同断裂特征的区块。大歧口凹陷基底发育 WNW 和 NNW 两组断裂体系,这两组断裂将基底划分成菱形的构造型式。沿这些基底断裂发育了大歧口凹陷的主变换带和次级变换带。

(3) 新生代不均匀伸展作用

伸展作用的不均一性导致了在同一构造带内部不同区段和或相邻不同构造带之间伸展量和构造形态的差异。而这些差异需要不同的变形方式来调节:主控断裂表现出一定的斜向滑移分量来调节空间上伸展量的差异;同时,在横向上不同形式的变换构造带的出现调节了盆地或凹陷各区段、各时期拉张量的差异。以海岸线为界,大歧口凹陷被分为西部陆域和东部海域两部分,西部陆域包括板桥、歧北、歧南 3 个次凹,东部海域包括北塘和歧口两个主凹(图 2)。虽然各次凹的伸展量各不相同,但是,不同时期东部海域各单元和西部陆域各单元的总伸展量大概一致。根据变换构造带模型,变换带的两侧必然存在统一的滑脱面,从而协调这种时空上的构造差异。大歧口凹陷沧东断裂和汉沽断裂的两条边界控凹断层最终在统一应变场作用下,必然各自会出现相对统一的滑脱面(图 6)。

5 大歧口凹陷内部构造样式差异与变换构造关系

为了调节凹陷两侧构造样式的差异,大歧口凹陷的变换构造带多发育在凹陷内部盆地伸展量存在明显变化、构造样式与沉积特征具有明显差异的地带,以与主伸展构造呈高角度相交的复杂断裂带、背斜、斜坡等变形样式出现,具有扭动的特点。变换构造带的形成和发育主要与凹陷内几大断裂体系的构造分段性及相互关系密切相关,即凹陷内几大断裂体系不同时期的不同活动位置、不同活动时限、不同活动量等联合效应,导致了凹陷内复杂的构造变形和变位环境。在这些复杂因素的作用下,大歧口凹陷发育了类型、规模、相互时空关系都很复杂的变换构造。

根据断裂的活动特征,大歧口凹陷新生代的构造演化可划分为 4 个阶段:古新世初期至渐新世初期(沙四期-沙二期)的拓展裂陷-拉分断陷阶段、渐新世(沙一期-东营期)的箕状断陷阶段、中—上新世(馆陶-明化镇期)的碟状拗陷阶段和第四纪以来的区域沉降阶段(表 1)。

(1) 裂陷-断陷阶段的变换构造

大歧口凹陷的裂陷-断陷阶段为变换构造带的形成阶段。在该阶段,沧东断裂自南向北生长,到沙四时期拓展至现今板桥次凹的位置,直至沙二时期向北延伸到汉沽断裂并为之以硬连接形式相接。凹陷的沉积-沉降中心也随之自南向北迁移。

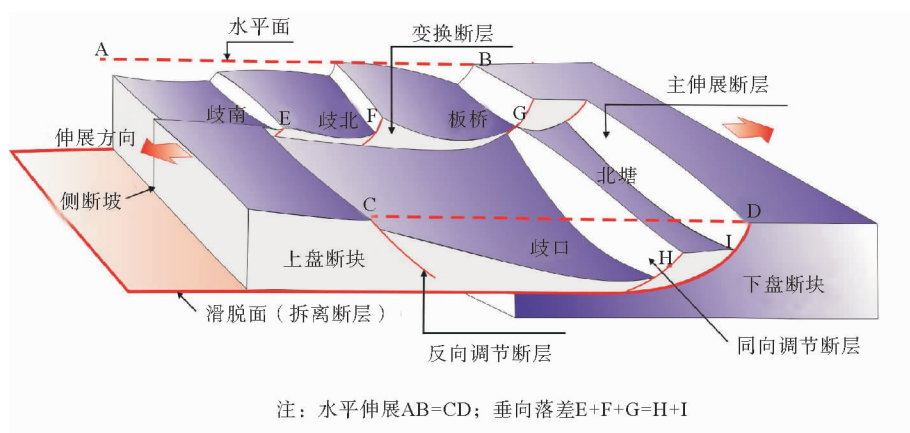


图 6 大歧口凹陷新生代构造演化平面模式图

Fig. 6 Cenozoic evolutionary model of the Great Qikou Sag

整个大歧口凹陷在该阶段表现为一个统一的湖盆,现今可识别出的各次凹陷之间地层厚度相差不大,彼此之间分隔性不明显。故推测,近南北向的主变换带在该阶段还未出现,大歧口凹陷东部海域和西部陆域具有统一的地堑式结构;而垂直于边界控凹断裂的近东西向的海河-新港和扣村-羊三木次级变换构造带已成雏形,这两条变换带自北向南将黄骅拗陷划分为北、中、南3个区块,并起到了调节不同区块之间伸展应变的作用。

(2) 箕状断陷阶段的变换构造

该阶段早期(沙一期),近东西向的海河-新港和歧东断裂的控凹作用明显增强,大歧口凹陷沿NNW方向伸展。伴随着断裂的强烈活动和凹陷的快速扩张,凹陷内部及邻区出现明显的构造分异,近南北向的主变换带逐渐形成。以沿岸变换带为界,大歧口凹陷东西构造格局存在明显差异:西部陆域受NNE—NE向滨海、北大港和南大港等同沉积断层的控制,自北向南发育3个多米诺式排列的次级箕状断陷,西部陆域总体表现为一个大型的箕状凹陷,沉降中心分布于长芦、北大港及南大港断裂控制的半地堑地区;东部海域受近EW向海河-新港和歧东断裂的控制,表现为一个大型双断的地堑结构,其沉降中心分布于歧东断裂和海河-新港断裂之间的歧口主凹的深陷区。同时,为调节东西伸展变形和沉降量的差异,沿沿岸变换带展布方向发育东倾膝状挠曲构造斜坡,基底中的走滑断裂型式转变为挠曲应变带,从而使得垂向上基底与盖层、平面上东部和西部的构造样式得以调节。经过该阶段的演化,大歧口凹陷由一个原来简单的相互连通的湖盆或凹陷,逐步分异成现今相对独立的一系列被凸起所分割的次级凹陷,大歧口凹陷的构造格局就此形成。

(3) 拗陷阶段的变换构造

该阶段,沧东、海河-新港和羊二庄等边界控凹断裂尤其是西部陆域的主控断裂活动微弱或近于停止活动,大歧口凹陷的主、次级变换带都进入相对平静的演化后期。然而,东部海域内的歧中、歧东和滨海I号等断裂的活动性质以正断转变为走滑为主,并仍持续活动。为调节断裂体系伸展量的应变守恒,东部海域上的部分三级变换带伴随其主控断裂生长、拓展迁移和不均匀伸展,进而形成了一系列由表层层控制的小型横向鼻状构造群,从而形成了东部海域的叠加在古近纪大型滚动背斜之上的负花状滚动背斜的复式构造格局。西部陆域的沉降速率明显小于东部海域,大歧口凹陷的沉降中心向东迁移至东部的歧口主凹内。

(4) 区域沉降阶段的变换构造

该阶段,大歧口凹陷自第四纪以来断裂活动均比较微弱,整个大歧口凹陷的构造活动相对平静,全区进入区域沉降阶段,第四系厚度在全区内普遍较大^[19]。东部海域局部的走滑断裂仍继续活动,制约了变换构造的进一步发展,大歧口凹陷的变换构造带进入末期衰亡阶段。

6 结论

(1)大歧口凹陷的5个次凹在凹陷形成之初是相互连通、而非相互独立的。直至沙一期分割次凹和主凹的沉积空间的凸起才开始出现,奠定了凹陷现今构造格局的雏形。各二级构造单元之间具有大概统一的演化历史。故本文将歧口主凹、板桥次凹、歧北次凹和歧南次凹4个二级构造单元统称为“大歧口凹陷”。

(2)大歧口凹陷的变换构造带可以划分为主变换带、次级变换带和三级变换带3个级别。主变换带近南北向展布,自东向西依次为孔店东、沿岸和羊二庄主变换带,分别对应了3条基底走滑断裂带,起到了协调凹陷东部海域和西部陆域构造样式差异的作用;近东西向展布的次级变换带起到了协调黄骅拗陷北、中、南三区变形差异的作用;三级变换带方向一般垂直于其主控断裂发育,起到了传递断裂之间伸展量的作用。

(3)大歧口凹陷变换构造带主要有边界主控断层的影响、基底构造先期构造的控制和新生代的不均匀伸展作用3个控制因素。变换构造带的形成和发育协调了凹陷内部不同时期、不同块体的差异变形,同时也导致了凹陷内部构造样式的差异。

参考文献(References)

- [1] Dahlstrom C D A. Balanced cross sections[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4): 743-757.
- [2] Gibbs A D. Structural evolution of extensional basin margins [J]. Journal of the Geological Society, 1984, 141(4): 609-620.
- [3] 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.
- [4] Faults J E, Varga R J. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes[C]//Faults J E, Stewart J H. Accommodation Zones and Transfer Zone: the Regional Segmentation of the Basin and

- Range Province. Geological Society of America Special Paper. Geological Society of America, 1998, 323: 1-46.
- [5] Faults J E, Olson E L, Harlan S S, et al. Miocene extension and fault-related folding in the Highland Range, southern Nevada: a three-dimensional perspective[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24(4): 861-886.
- [6] 陈发景, 汪新文, 张光亚, 等. 中国中、新生代含油气盆地构造和动力学背景[J]. 现代地质, 1992, 6(3): 317-327. [CHEN Fajing, WANG Xinwen, ZHANG Guangya, et al. Structure and geodynamic setting of oil and gas basins in the People's Republic of China[J]. Geoscience, 1992, 6(3): 317-327.]
- [7] 孙思敏. 东濮凹陷调节构造特征[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(2): 38-41, 46. [SUN Simin. Characteristics of accommodation structures in Dongpu Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(2): 38-41, 46.]
- [8] 刘剑平, 汪新伟, 汪新文. 临清拗陷变换构造研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 51-54. [LIU Jianping, WANG Xinwei, WANG Xinwen. Transition structures in Linqing Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 51-54.]
- [9] 刘剑平, 汪新文, 周章保, 等. 伸展地区变换构造研究进展[J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 27-32. [LIU Jianping, WANG Xinwen, ZHOU Zhangbao, et al. Research advance in transition structure in extended region[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(3): 27-32.]
- [10] 孟庆任, 王战, 王翔, 等. 新生代黄骅拗陷构造伸展、沉积作用和岩浆活动[J]. 地质论评, 1993, 39(6): 535-547. [MENG Qingren, WANG Zhan, WANG Xiang, et al. Tectonic extension, sedimentation and magmatism of the Cenozoic Huanghua Depression[J]. Geological Review, 1993, 39(6): 535-547.]
- [11] 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.]
- [12] 漆家福, 陆克政, 张一伟, 等. 渤海湾盆地新生代构造与油气的关系[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(S1): 7-13. [QI Jiafu, LU Kezheng, ZHANG Yiwei, et al. Relationship between tectonics and hydrocarbon in Bohai Bay Basin Province[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1995, 19(S1): 7-13.]
- [13] 王光奇, 漆家福, 岳云福. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 230-240. [WANG Guangqi, QI Jiafu, YUE Yunfu. Formation and evolution of the Cenozoic tectonics within and surrounding the Qikou Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 230-240.]
- [14] 漆家福, 杨池银. 黄骅盆地南部前第三系基底中的逆冲构造[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2003, 28(1): 54-60. [QI Jiafu, YANG Chiye. Thrust structure developed in pre-tertiary basement in south area of Huanghua Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(1): 54-60.]
- [15] 高战武, 徐杰, 宋长青, 等. 华北沧东断裂的构造特征[J]. 地震地质, 2000, 22(4): 395-404. [GAO Zhanwu, XU Jie, SONG Changqing, et al. Structural characters of the Cangdong Fault in North China[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(4): 395-404.]
- [16] 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 等. 渤海湾盆地地区前第三系构造演化与潜山油气成藏模式[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003. [ZHOU Lihong, LI Sanzhong, LIU Jianzhong, et al. Pre-Tertiary Tectonic Evolution and Buried Hill-Type Oil-Gas Development and Reservation Under the Bohai Bay Basin[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003.]
- [17] 祁鹏, 任建业, 史双双, 等. 歧口凹陷沿岸带新生代构造特征及其形成机制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 900-905. [QI Peng, REN Jianye, SHI Shuangshuang, et al. Features of the Cenozoic structure of the coastal zone in Qikou Sag and its formation mechanism[J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(6): 900-905.]
- [18] 邹光辉, 漆家福. 黄骅盆地一级构造变换带的特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 1996, 20(2): 125-128. [WU Guanghui, QI Jiafu. Characteristics and origin of first order transfer zones in Huanghua Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 20(2): 125-128.]
- [19] 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等. 黄骅拗陷构造变形格局与演化过程分析[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 461-472. [REN Jianye, LIAO Qianjin, LU Gangchen, et al. Deformation framework and evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(4): 461-472.]

TRANSFER ZONES AND DIFFERENCES IN INTRA-PLATE DEFORMATION IN GREAT QIKOU SAG OF THE BOHAI BAY BASIN

LI Sanzhong^{1,2}, SUO Yanhui^{1,2,3}, GUO Lingli^{1,2}, DAI Liming^{1,2}, ZHOU Lihong⁴, LOU Da⁴

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China; Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

3. Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, SOA, Qingdao 266061, China;

4. Dagang Oilfield Company, CNPC, Tianjin 300280, China)

Abstract: Based on the newly acquired high-resolution 3D seismic data, we analyzed the transfer zones and their bearing on differences in intra-plate deformation in the Great Qikou Sag of the Bohai Bay Basin. The transfer zones in the Great Qikou Sag can be subdivided into three orders: (1) The first-order N—S-trending major transfer zones from west to east, i. e. the East Kongdian Transfer Zone, the Coastal Transfer Zone, and the Yangerzhuang Transfer Zone, corresponding to three basement-involved strike-slip faults, respectively. The three zones play an important role in reconciling the differences in structural styles of the west and east sides of the Great Qikou Sag. (2) The three second-order transfer zones roughly in E—W trending, including the Hangu, Haihe-Xingang, and Qizhong transfer zones, corresponding to the three subbasin-controlling faults from north to south, respectively. They play a role in adjusting the differences between the south, the middle, and the north parts of the Huanghua Depression. (3) The third-order transfer zones are generally perpendicular to its master fault, with the function to transmit the extension among faults. The origin of transfer zones in the Great Qikou Sag varies. The master boundary faults control over the basement-involved structures and differentiation of Cenozoic extension. The existence and development of different transfer zones in the Great Qikou Sag may cause different deformation in different periods and different faulted-blocks in the Huanghua Depression, resulting in differences in structural styles of the different parts of the Great Qikou Sag. For examples the Huanghua Depression is influenced by the roll-back subduction of the Pacific Plate and the collision between the Indian Plate and the Eurasian Plate. The depression is under a dextral transtensional stress field in the Cenozoic, resulting in rifting during the early evolutionary period, and pull-apart faulting during the later evolutionary period. Its principal regional stress underwent clockwise rotation in Cenozoic, from the NWW—SEE-trending extension during the Kongdian- Shasi period to the NW—SE-trending extension during the Shasan-Dongying period, and near N—S-trending extension during the Neogene. Such an evolutionary process can be used to successfully explain the development and evolution of the pull-apart Great Qikou Sag.

Key words: Great Qikou Sag; transfer zone; distinct intraplate deformation; geodynamics