

doi:10.3799/dqkx.2013.037

黄骅拗陷孔南地区古近纪构造— 地层格架和幕式演化过程

叶琳^{1,2}, 张俊霞³, 卢刚臣⁴, 张振宇¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学经济管理学院, 湖北武汉 430074

4. 东方地球物理公司研究院大港分院, 天津 300280

摘要: 以黄骅拗陷孔南地区新采集的三维地震资料和钻井资料为基础, 追踪闭合了盆地内重要的层序地层界面, 精细解释了盆地内部的主要构造和地震反射结构特征, 新识别出一条重要的构造不整合界面——枣Ⅲ(Ek_1^{III})界面, 建立了盆地同裂陷阶段的构造—地层格架, 划分了盆地新生代幕式构造演化阶段; 在此基础上, 通过断层地质属性及其组合样式分析, 并运用回剥技术和断层活动性定量计算, 深入分析了盆地同裂陷阶段不同构造幕的构造演化过程, 提出 Ek_1^{III} 界面为孔南地区新生代裂陷作用的起始界面, 代表了古近纪初期 Ek_3 - Ek_1 下亚段时期拗陷作用向 Ek_1 上- Ed 时期的裂陷作用转变的构造变革界面。之后从 Ek_1 上亚段至 Ed 沉积时期盆地的裂陷沉降又经历了由正向伸展断陷向右旋走滑伸展断陷两幕不同构造变形方式的演化阶段。在上述构造演化过程中, 盆地的断裂系统及其所控制的沉降中心发生规律性迁移, 进而制约了盆地沉积体系配置。

关键词: 黄骅拗陷; 孔南地区; 构造变革; 构造—地层格架。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2013)02-0379-11

收稿日期: 2012-09-15

Paleogene Structure-Stratigraphic Framework and Multiple Episode Evolution in Kongnan Area, Huanghua Depression

YE Lin^{1,2}, ZHANG Jun-xia³, LU Gang-chen⁴, ZHANG Zhen-yu¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Dagang Sub-Division of GRI, BGP, Tianjin 300280, China

Abstract: Based on the newly released 3D seismic and drilling data in the Kongnan Area, Huanghua Depression, we tracked several sequence boundaries on the seismic profiles and interpreted structure styles and seismic reflection characteristics, which will help us identify an important tectonic unconformity boundary(Ek_1^{III}) and further classify the episodic stages of tectonic evolution in Paleogene and build up structure-stratigraphic framework in rifting stages of the basin. Furthermore, we analyzed the detailed tectonic evolution processes of the basin with different tectonic episodes of rifting stages by means of backstripping and fault properties, combination types, activity analysis, that confirm that Ek_1^{III} boundary represents the tectonic revolutionary boundary which imply a rifting initiation from upper First member of Kongdian Formation to Dongying Formation in Kongnan Area. From Third member of Kongdian Formation to lower First member of Kongdian Formation evolution of the basin was controlled by sag effect. At rifting stage, the basin underwent processes from extensional episode to dextral strike-slip and extensional episode. Both of the fault systems and subsidence center have migrated regularly and restricted the distribution of the basin depositional system.

Key word: Huanghua Depression; Kongnan area; tectonic revolution; structure-stratigraphic framework.

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2008ZX05023-001); 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放课题基金(No. TPR-2011-02).

作者简介: 叶琳(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事含油气盆地构造解析及盆地动力学研究. E-mail: yelin572@163.com

黄骅拗陷孔南地区是渤海湾盆地最早开始沉积新生代地层的区域之一,发育古近系和新近系完整的地层充填序列,具有丰富的伸展、走滑和反转构造变形样式,记录了渤海湾盆地中部较为完整的新生代构造演化过程.前人曾依据早期的 2D 地震资料和钻井资料,对该区的沉积体系、层序地层、构造及其演化过程做过较为全面的研究,许多学者将盆地的发育和演化与盆地基底的兰聊走滑断裂带相联系,认为孔南地区盆地为发育在基底大型走滑断裂带基础上的走滑伸展盆地,其内发育了著名的孔店背斜带,形成了一套陆相断陷湖盆沉积体系(漆家福,2004;杨明慧,2009).

孔南地区的油气发现始于 20 世纪 70 年代,从那时开始,油田产业部门施工了大量的 2D 和 3D 地震,钻探了大量的探井,发现了 7 个油田.近几年,对盆地内的小型 3D 地震区块进行连片处理,形成了覆盖全盆地区域的 3D 地震数据体,为进一步开展更为精细的构造和沉积地质研究提供了重要的资料基础.该文在新 3D 连片地震资料和大量钻井资料综合解释的基础上,试图识别、追踪和闭合孔南地区盆地古近系充填序列中的一系列重要层序界面,描述重要层序界面特征,厘定其地质属性,结合构造变形特征描述以及断裂活动性的定量分析,试图建立盆地的构造—地层格架,划分盆地的构造演化阶段,确定不同构造活动幕的沉积体系配置,同时从区域上分析孔南地区盆地发育演化的动力学机制.

孔南地区处于渤海湾盆地的中部,区域构造位置特殊,对其构造发育演化的深入研究不仅对于阐明渤海湾盆地的构造发育机制具有理论意义,而且所得认识有助于今后孔南地区油气勘探预测.

1 区域地质概况

孔南地区位于渤海湾盆地黄骅拗陷南部,西邻沧县隆起,东部通过徐黑潜山带与埕宁隆起相接,盆地呈 NNE 向展布,由南至北呈喇叭状逐渐张开.沧东断层为盆地西部边缘发育的一级控盆大断裂,倾向 SEE,近 NNE 向延伸,具有明显的区段性活动特征(祁鹏等,2010);孔南地区的东部边界为规模和断距较小且呈西倾的埕西断层带.徐西断层位于沧东、埕西断层之间,走向 NNE,倾向 NWW,为盆地内部发育的二级断裂带.沧东断层与徐西断层之间沉积了较厚的新生代地层,且内部构造复杂,是该文的重点研究区域.研究区北部的孔店潜山是区内最为显著的盆内

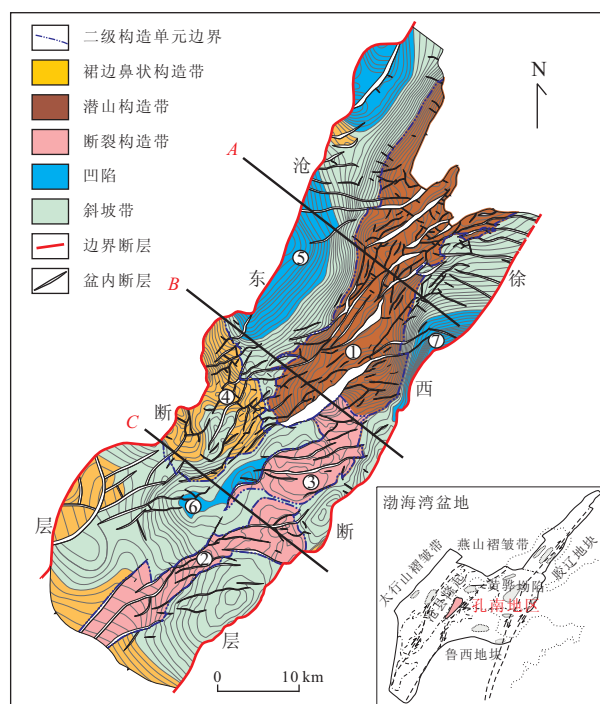


图 1 黄骅拗陷孔南地区构造位置及构造单元分布

Fig. 1 Tectonic location and subdivisions of the Kongnan area of Huanghua depression distribution

①孔店潜山构造带;②乌马营—灯明寺断裂构造带;③小集一段六拔断裂构造带;④沧州市裙边鼻状构造带;⑤沧东凹陷;⑥南皮凹陷;⑦常庄凹陷

隆起带,呈 NNE 向沿盆地轴向延伸,构造上表现为沧东铲式断层和徐西铲式断层(北段)控制的双向滑脱背斜带,伴有复杂的断裂发育.孔店潜山的東西两侧为常庄凹陷和沧东凹陷,南侧为南皮凹陷,这几个凹陷构成了盆地内主要沉降区域.除了上述显著的凸起和凹陷之外,研究区还发育一些规模稍小的,但是结构复杂的断裂构造带以及裙边鼻状构造带,这些盆内构造单元的平面分布和特征如图 1 所示.

地震、钻井、生物以及大地电磁等综合地质资料显示孔南地区的基底主要为太行结晶基底,基底之上的盖层主要由前第三系和新生代盖层组成(吴永平等,2002),发育于渤海湾盆地中部的兰聊大型走滑断裂带从研究区的基底穿过,明显控制和影响了孔南地区盆地的发育演化.盆地内的新生代盖层由古近系的孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed)地层和新近系的馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)地层组成.孔店组地层由下至上分为孔三段(Ek₃)、孔二段(Ek₂)、孔一段(Ek₁)三段,其中孔一段进一步被划分为上下两个亚段.沙河街组地层也分为三段,但由于沙二段地层在孔南地区多有缺失,且在地震资

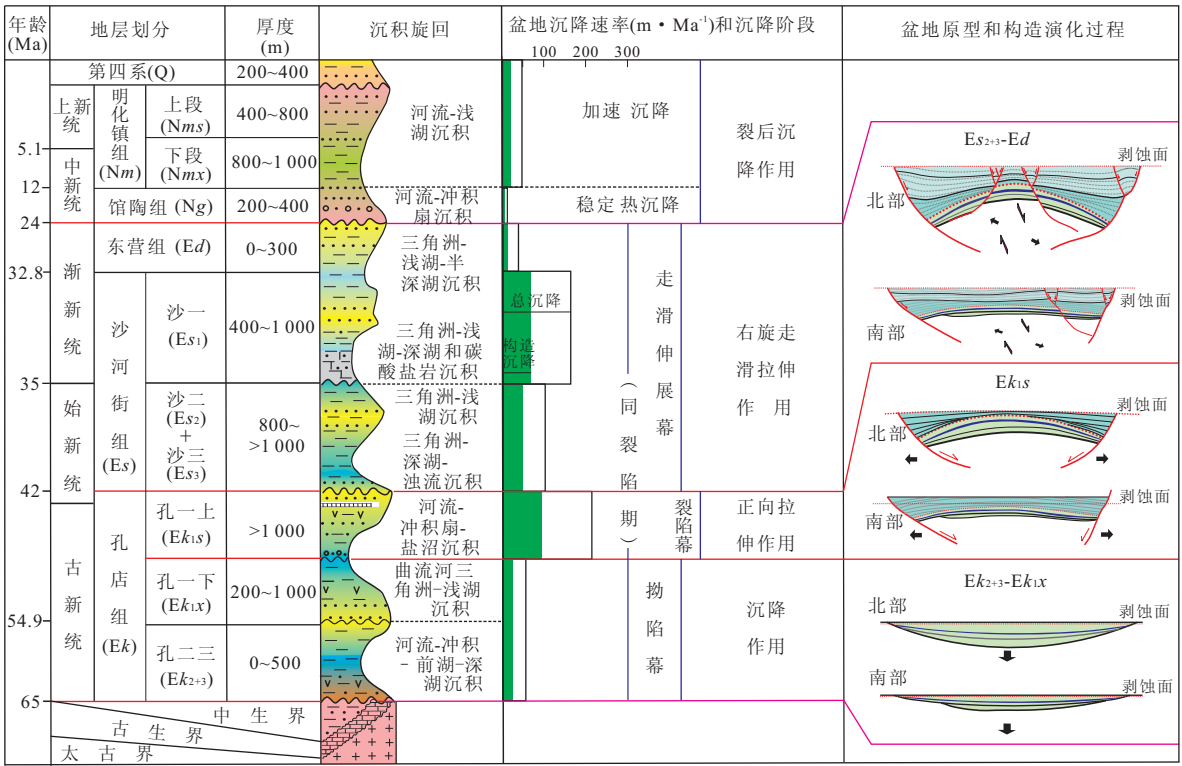


图 2 黄骅拗陷孔南地区新生代充填序列、沉降历史及演化特征

Fig. 2 Cenozoic filling sequence, subsidence history and structure evolution characters of the Kongnan area of Huanghua depression

料中难以辨识,因此与沙三段并为沙二—三段(E_{s2+3});东营组地层在孔南地区发育较薄且未全区分布,因此,研究中常与沙一段(E_{s1})合并为一套地层.馆陶组底界面是古近系与新近系的分界面,该界面之上的新近系构造简单地层厚度变化幅度较小,而界面之下古近系构造复杂,地层厚度沉积中心及堆积样式变化明显,是该文的研究重点(图 2).

2 盆地构造—地层格架

2.1 主要构造层序界面特征

作为渤海湾盆地内的典型凹陷之一,孔南地区盆地的发育演化同样经历了古近纪的同裂陷阶段和新近纪的裂后阶段,二者之间为一级层序界面—馆陶组的底界面(苗顺德等,2008;孙晶,2009;任建业等,2010;佟殿君等,2010),该界面也被称之为裂后不整合界面.而与渤海湾盆地其他凹陷不同的是,孔南地区新生代盆地的发育并不是以断陷活动开始的,从地震剖面 and 钻井沉积体系的分析来看,极有可能是从拗陷作用开始的.

图 3 是位于研究区 L1568 地震剖面图,从该图可以看出,井震标定确定的孔店组底界面对其下伏

基底地层表现出强烈的削截关系,基底内的几个标志性地层,如强反射同相轴代表的山西组和太原组的煤系地层,均一反射的奥陶系马家沟组灰岩地层侧向延伸都终止于该界面,而该界面之上,孔店组地层层层上超.这种上超下削的地震反射结构在全盆范围内都表现的非常明显,标志着孔南地区同裂陷阶段的开始.然而值得关注的是界面之上的孔店组地层沉积形态. E_{k3} 段地层在南皮凹陷局部表现为受古地形控制的槽状沉积块体,而在沧东凹陷、常庄凹陷、孔店潜山区域沉积地层厚度变化幅度不大; E_{k2} 段地层,作为孔南地区主力烃源岩,该层岩性以暗色泥岩为主,地震相表现为似平行状近等厚反射,内部呈平行—亚平行、强振幅、连续的反射特征,是孔南地区地震剖面解释中的重要标志层之一. 穿入 E_{k2} 段的钻井显示 E_{k2} 段在盆缘部位仍发育深湖一半深湖相的暗色泥岩,缺失边缘相的沉积体系,推测当时盆地的范围要超出现今沧东断裂(控盆断裂)限定的盆地范围,而超出部分由于后期断裂上升盘抬升而遭受剥蚀.

在 E_{k1} 段地层内部发育一显著的角度不整合界面,即 E_{k1}^{III} 界面,该界面将 E_{k1} 段划分为上下两个亚段. 如图 3a 所示,在常庄凹陷内,该界面显著削截

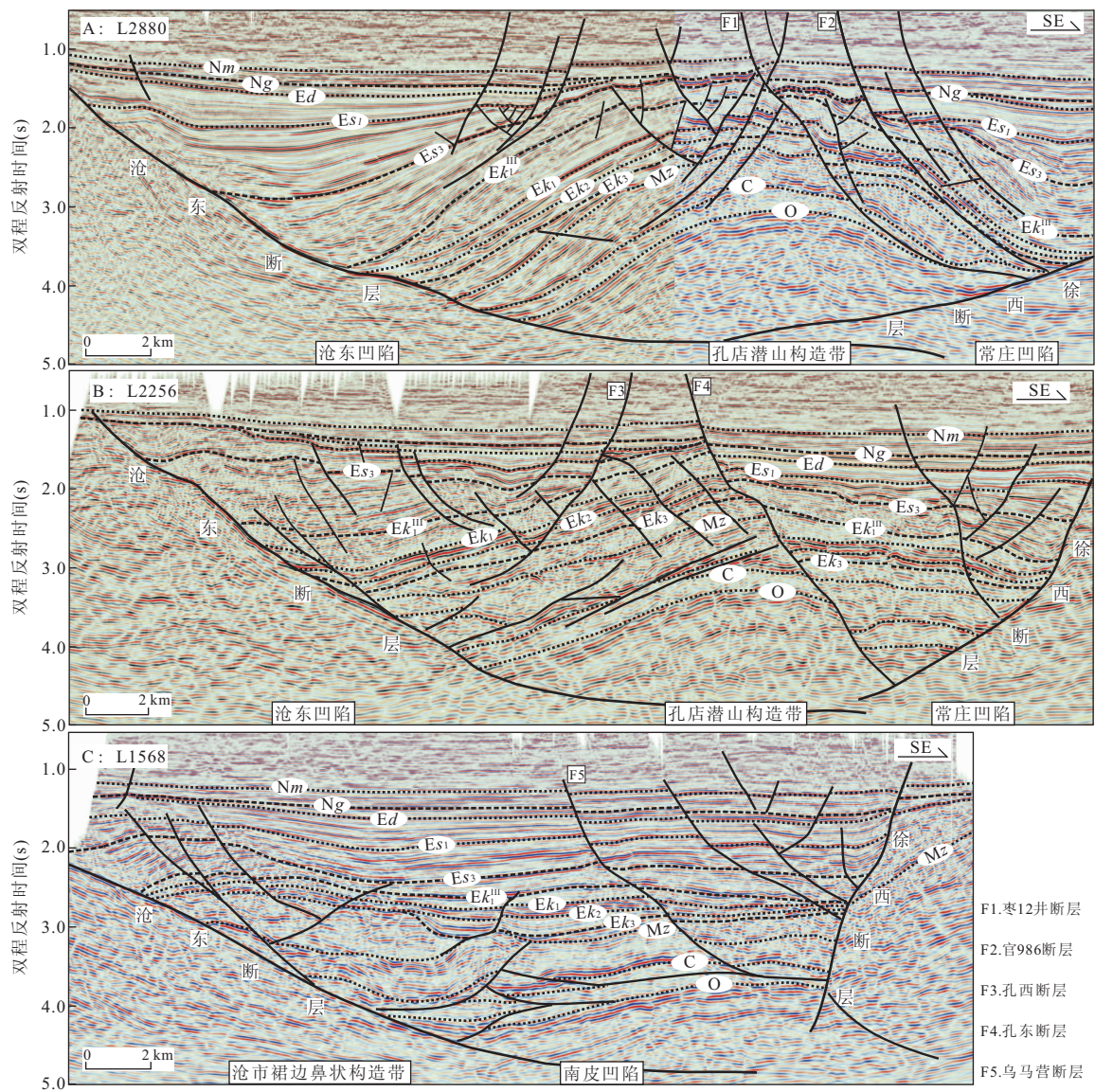


图3 黄骀拗陷孔南地区构造—地层格架及主要界面反射特征(位置见图1)

Fig. 3 Structure-stratigraphic framework and reflection characteristics of the sequence boundary in the Kongnan area of Huanghua depression

了 Ek_1 下亚段地层,而 Ek_1 上亚段地层则超覆在该界面之上,总体呈上超下削的地震反射结构特征.在穿过沧东凹陷—孔店潜山构造带—常庄凹陷区的剖面中可以看到,由于该界面对下伏地层的 truncation 作用, Ek_1 下亚段地层在剖面上自孔店潜山向沧东、徐西断层两侧地层厚度由大于 600 m 逐渐减薄至 200 m 以下,在一些部位,该界面甚至切过标志性的 Ek_2 段地层,并切入 Ek_3 段地层中.在 Ek_1^{III} 界面之上, Ek_1 上亚段地层厚度表现为向西靠近沧东断裂,或者向东靠近徐西断裂逐渐加厚呈标准的断陷湖盆楔状沉积地层形态,靠近边缘断裂的楔状地层内地震反射杂乱,连续性较差的扇形反射结构以及钻井也表明

靠近边缘断裂, Ek_1 上亚段地层具有断陷湖盆边缘相的沉积特点.显然,在上述由 Ek_3 — Ek_1 下亚段组成的拗陷盆地发育的末期,孔南地区经历了由 Ek_1^{III} 界面所代表的剥蚀作用,之后,盆地边缘断裂,即沧东断裂和徐西断裂开始正断式活动,并控制了盆地的发育演化.根据边缘断层的属性、及其与孔店背斜的配置关系,可以确定 Ek_1^{III} 界面是孔南地区盆地新生代的断陷作用的起始界面,也是盆地演化从孔一下亚段的拗陷转变为孔一上亚段拉伸断陷阶段的构造变革界面.由此,将其归属于盆地古近纪同裂陷阶段地层充填序列中的二级层序界面.

在孔南地区,普遍缺失 Es_4 段地层,孔店组地层

之上直接上覆了 E_{s3} 段地层. 从地震剖面上的地震反射结构特征来看, E_{s3} 段的底界面也是孔南地区古近纪同裂陷充填序列中的一个重要的二级层序界面, 该界面表现为区域上的不整合, 沙河街组地层上超于界面之上, E_{s3} -Ed 地层呈明显的楔状沉积形态, 不过这种楔状地层形态并不是像 Ek_1 上亚段地层那样接近边缘断层地层加厚, 而是在远离边缘断层一定的距离是地层最厚的部位, 接近边缘断层面地层具有上翘的趋势, 同时厚度有一定的变薄. 这种地层的厚度变化一般与边缘断层的走滑分量有关 (Okay *et al.*, 2000; Lazar *et al.*, 2006), 这种走滑作用的构造应力场特征将在下文中进一步阐明. 从上述所述, 可以看到盆地演化进入到 E_{s3} -Ed 沉积时期是一个以走滑伸展为特征的演化阶段, 由此, E_{s3} 段的底界面也是盆地古近系地层序列中发育的重要二级层序界面.

根据识别出来的二级层序界面, 即 Ek_1^{III} 界面和 E_{s3} 段底界面, 可以将盆地古近纪的演化进一步划分为拗陷幕、断陷幕和走滑伸展幕 3 个幕式构造演化阶段 (图 2).

2.2 盆地构造地层格架的区域变化

孔南地区沧东、徐西两条大断裂控制了盆地的基本构造格架, 但由于区域构造应力场的变化及其所控制的断裂活动方式和活动性的差异造成了盆地的构造—地层格架由北至南发生显著而规律性的变化.

盆地北部由西至东依次发育沧东凹陷、孔店潜山、常庄凹陷 3 个大型盆内二级构造单元, 其中沧东与常庄凹陷是盆地内新生代地层沉积较厚的区域 (图 3a). 沧东断层和徐西断层在盆地的北部均表现为典型的上陡下缓的铲式形态, 且在盆地的深部这两条断裂对接在一起. 断层上盘地层沿这两条断裂相向下滑过程导致了二者共同的上盘内发育了对称背斜, 即孔店潜山双向滑脱背斜式隆起带. 盆地构造地层格架总体上由西向东表现为半地堑—盆内背斜带—半地堑对称结构. 在孔店潜山的脊部, 发育一系列左阶斜列式的小型断裂, 如官 116、官 986、枣 12 井、李天木断层等, 使得背斜顶部的构造形态更加复杂.

图 3b 是研究区中部的一条代表性剖面, 位于沧东凹陷与常庄凹陷以南, 舍女寺鼻状构造带与南皮凹陷以北的狭窄区域. 从该剖面可以看出, 沧东断层由铲式开始转变为向东中等倾斜的平面状正断层, 而徐西断层仍然表现为铲式形态, 总体上, 二者所控制的盆地构造地层结构形态开始显示出不对称特

征. 孔店背斜的幅度相对于北部剖面进一步减小, 背斜的枢纽向南倾伏. 由于盆地内部两条规模较大的盆内断裂, 即西倾的孔西断裂和东倾的孔东断裂的发育, 孔店潜山隆起呈现出不对称地垒的构造形态.

盆地南部主要指南皮凹陷、沧州市鼻状构造带、小集段六拨断裂构造带与灯明寺乌马营断裂构造带所处区域. 该区段的主要特征是孔店潜山消失, 沧东断裂形态类似于中部区域, 但是其倾角已经显著变缓, 而徐西断层产状则明显变陡, 且表现为坐椅状, 这两条边界断层所控制的构造地层形态为一不对称的地堑, 盆地深部基底内发育多条中生代的逆冲断裂. 在靠近沧东断裂的位置发育了沧州市鼻状构造, 盆地的中部发育了小集断裂和乌马营断裂, 进一步使得盆地内部结构复杂化 (图 3c).

3 盆地发育演化过程分析

在盆地构造层序地层格架建立的基础上, 为了准确恢复盆地同裂陷阶段的发育演化过程, 下面试图通过对断裂属性和平面组合分析、二级构造层序厚度图的编制划分盆地同裂陷阶段的构造幕, 并以断裂活动性和沉降史回剥定量确定不同构造演化幕的基本特征.

3.1 盆地同裂陷阶段古构造格架图

图 4 是以研究区二级层序单元为基础编制的盆地同裂陷阶段不同构造演化幕的古构造格架图, 该图表示了不同构造层序 (二级层序) 发育时期活动的断裂、断裂的属性以及二级层序的厚度变化所代表的盆地沉降中心.

拗陷幕 (Ek_3 - Ek_1 下亚段): 图 4a 是盆地拗陷幕的地层厚度图, 显示该幕盆地沉降具有单一沉降中心的特征, 沉降中心位于孔店潜山与沧东凹陷部位, 最大地层厚度达 1 300 m 左右, 地层等厚线呈围绕沉降中心的环带状分布, 其展布没有明显的定向性, 沿盆地走向的地层厚度由沉降中心向南北两侧的盆地边缘逐渐减薄的趋势非常明显, 在垂直盆地走向上由于沧东断层对早期拗陷沉积地层的切割, 靠近断裂的拗陷幕时期地层厚度仍达到 1 000 m, 但总体仍具有由沉降中心向东西两侧逐渐减薄的变化形态, 表明当时盆地的沉降尚未受到大型控盆断裂的控制, 整体表现为拗陷作用.

断陷幕 (Ek_1 上): 图 4b 是断陷幕盆地地层厚度图, 可观察到盆地及控盆断裂的总体延伸方向为 NNE 向, 而地层等厚线优势延伸方向明显受沧东及

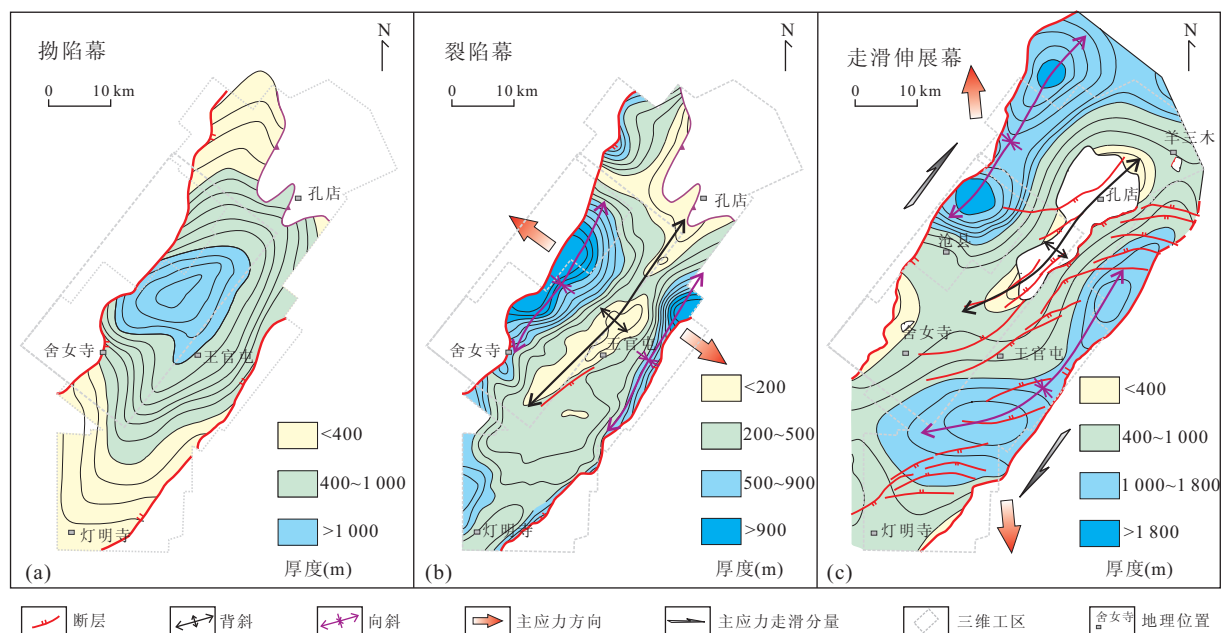


图 4 黄骅拗陷孔南地区古近纪构造演化各幕地层残余厚度,构造格架及应力分析

Fig. 4 Residual thickness, tectonic framework and stress analysis in different evolution stages during Paleogene in the Kongnan area of Huanghua depression

徐西两条断裂的控制,也为 NNE 向,且沿具多沉降中心的特点. 沉降量较大区域分别位于沧东凹陷与常庄凹陷内,沉降量都达到 1 500 m 以上. 而沧东断层舍女寺段、北桃杏段的沉降量相对较小但也超过 600 m. 沧东断层南皮段最大沉降量可达 800 m,与之相对的徐西断裂南段区域沉降量也达到 500 m 以上(沧东、徐西断层分段情况详见图 5). 等厚图同时显示地层沉积最薄的位置位于孔店潜山,表明断陷幕孔店潜山隆升已经开始发育,造成潜山顶部地层较薄. 南皮凹陷地层厚度较为均匀,相对于两侧沉降中心明显变薄,说明当时南皮凹陷仍表现为盆内的低凸起的构造属性. 总体上断陷幕盆地主要隆凹构造单元在平面上沿 NE-SW 方向延伸,并表现出中间隆起与东西两侧凹陷近平行排列的格局. 综合控盆断裂以及隆凹格局的展布认为断陷幕盆地构造发育具有正向伸展的性质,而伸展主应力方向应为垂直于构造线方向的 NW-SE 向.

伸展走滑幕(E_{s3} - E_d):图 4c 显示伸展走滑幕盆地的沉降中心展布与裂陷幕相比具有显著的变化. 沧东断层一侧的沉降中心展布的区域明显缩小,只在沧东凹陷及北桃杏部位发育,地层总厚度超过 2 000 m,而沧东断层南皮段沉降量相对较小,地层总厚度只有 600 m 左右,而舍女寺段则呈现低凸起的鼻状构造形态,地层沉积厚度不超过 400 m,沉降中心具有明显向东北迁移的趋势. 徐西断层一侧沉

降中心展布与裂陷幕时期的差别主要表现在该时期南皮凹陷区域开始大范围沉降,其构造属性由裂陷幕的相对构造高点转变为沉积地层厚度超过 1 300 m 的沉降中心. 在盆地大部分区域发育沉降的同时盆内最大的正向构造单元孔店潜山则持续隆升以至于潜山顶部的沙河街组地层减薄甚至缺失. 伸展走滑幕盆内主要沉降区域分别位于盆地的南北两端,与主要隆凹构造单元在平面中明显呈左阶斜列式展布,同时走滑伸展幕时期盆内的次级断裂大量发育,而这些断裂表现为正断的性质,走向多为 NEE-SWW 向,平面上的排布也呈斜列式甚至呈帚状. 依据盆地隆凹格局以及相关断裂的展布方向,认为伸展走滑幕盆地的主伸展应力方向应为近 S-N 向 (Laurent *et al.*, 2002; 童亨茂等, 2008).

3.2 断裂活动性定量分析

如前所述,断裂在盆地的演化过程中起了至关重要的作用,因此对断裂活动性的定量分析将有助于从定量化的角度来了解盆地的演化过程及其沉降中心的发育部位和迁移规律 (Cowie *et al.*, 2000). 断裂的活动性计算主要通过计算古落差值的方法来表征 (Wernicke and Burchfiel, 1982) (图 5). 由于之前分析 E_{k3} - E_{k1} 下亚段时期盆地仍属凹陷幕下时期盆地仍属拗陷幕,其古落差值不能反映断裂活动性的分布因此对于断陷期之前的古落差读值剔除不用. 结果显示,沧东断层在断陷幕整体开始发育,以沧州段活动性最

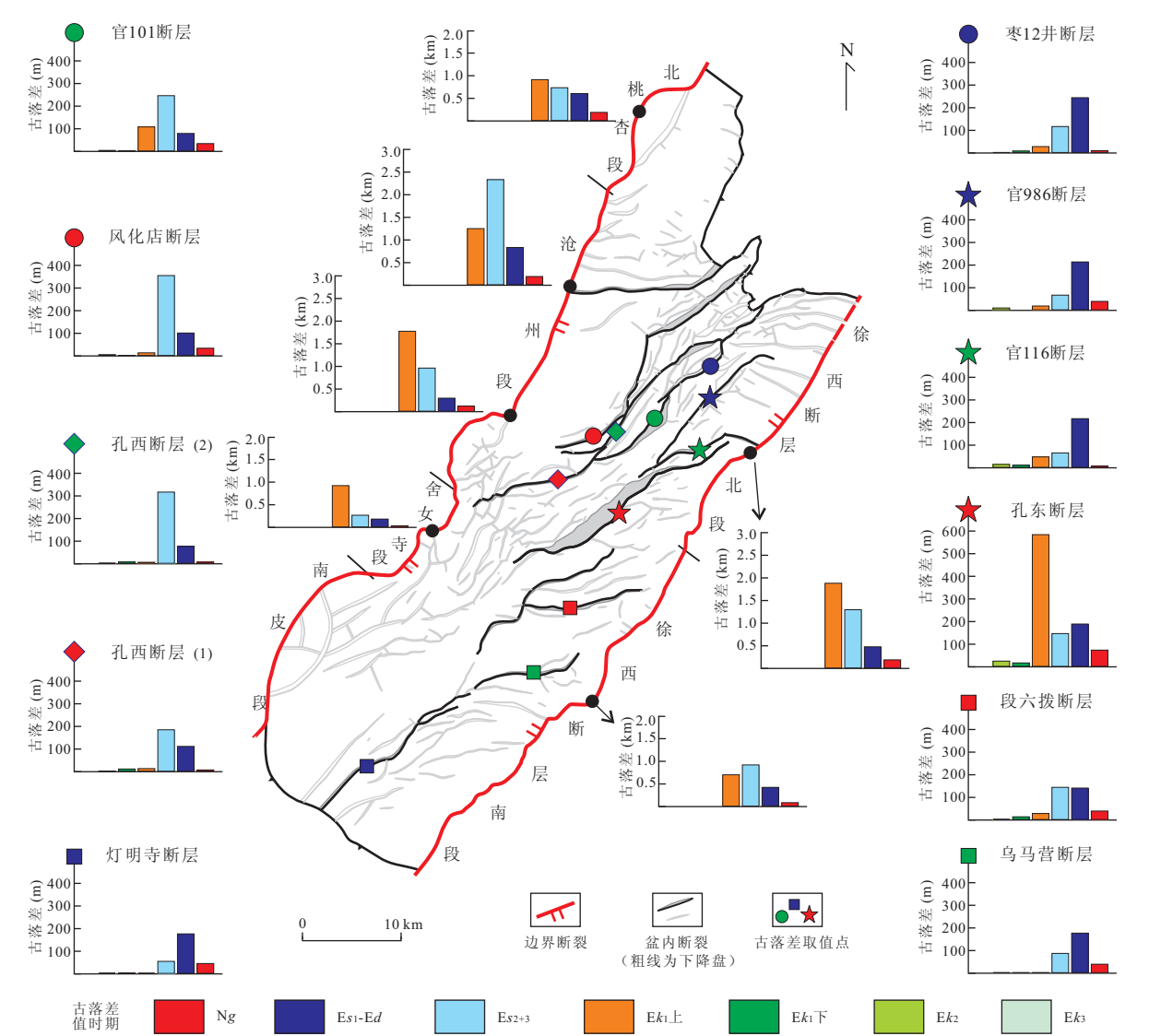


图 5 黄骅坳陷孔南地区新生代主要断裂活动性

Fig. 5 Activity of main faults during Cenozoic in the Kongnan area of Huanghua depression

强,落差值可达 1 500 m,而舍女寺、北桃杏段稍弱,落差值都在 1 000 m 以下;伸展走滑幕断裂的活动性主要集中在沧州段,及北桃杏段,以沧州段北部断裂活动性最强,其中 Es_{2+3} 与 Es_1-Ed 时期的落差值分别达到 2 300 m 和 850 m,这表明伸展走滑幕沉积中心发生了迁移.同时各段伸展走滑幕的落差值结果也表明由 Es_{2+3} 时期至 Es_1-Ed 时期沧东断层活动性是逐渐减弱的.徐西断层的古落差值显示断裂的活动性以北段较强而南段较弱,同时也表现出伸展走滑幕内边界断裂活动性逐渐减弱的特征.

孔南地区盆内断裂在孔店潜山、南皮凹陷一带极为发育.孔店潜山核部发育断裂在平面上呈斜列式展布,潜山两翼发育近东西向正断的帚状分支.潜山南部东倾的孔东、官 116、官 986 断层与西倾的孔

西、官 101 断层将孔店潜山断裂系分为两部分,而潜山北部的盆内断裂如李天木、枣 26 井、枣 12 井断层则全部向东倾斜.总体上东倾断裂断面多呈平面或座椅状倾角较陡,而西倾断裂多为上陡下缓的铲式断层在深部汇聚于新生界与中生界不整合滑脱面上;南皮凹陷内的乌马营、灯明寺断层平面展布上呈明显的帚状形态,在剖面上主断面东倾而分支断裂与主断面呈复杂“Y”字型组合形态.盆内断裂落差值分析结果显示,盆地北部孔店潜山东翼的孔东断层活动高峰期 Ek_1 上亚段时期,落差可达 600 m,在沙河街组时期活动性相对减弱.潜山西翼的孔西、官 101、风化店断层显示在 Es_3 时期剧烈活动而在 Es_1 时期活动性减弱.孔东断层以北的官 116、官 986、枣 12 井等断层则表现出从 Ek_1 上至

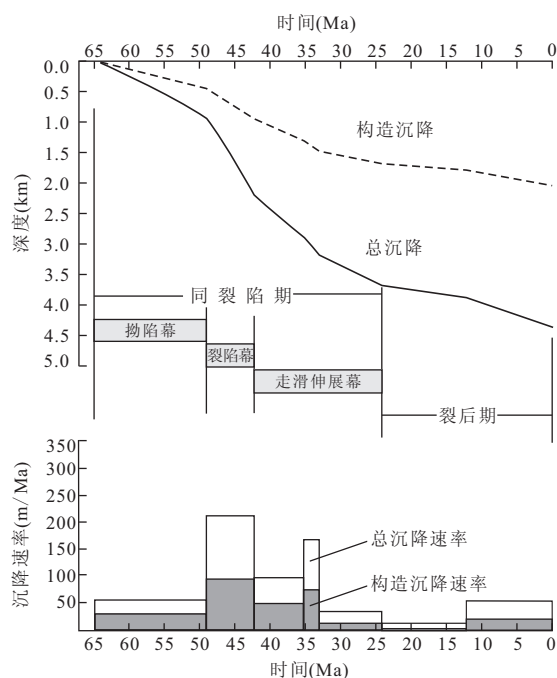


图 6 黄骅坳陷孔南地区新生代幕式构造沉降特征

Fig. 6 Cenozoic tectonic episodes characters in Kongnan area of Huanghua depression

E_{s3} 时期活动性逐渐增强的特征, 断裂的活动性在 E_{s3} 时期达到高峰. 盆地南部由北至南的段六拨、灯明寺、乌马营断裂的活动性也表现出在走滑伸展幕活动性逐渐增强变化趋势, 同时值得注意的是灯明寺、乌马营断裂发育的近东西向帚状分支断裂, 其活动时期也主要集中在 E_{s3} 时期(图 5).

结合分析控盆断裂与盆内断裂的活动规律后认为, 在断陷幕 NW-SE 向伸展应力作用下盆地发育了 NE-SW 向的控盆断裂, 同时也将盆地整体的平面展布限制在这一方向. 走滑伸展幕, 盆地的伸展主应力逐渐转为近 S-N 向, 而盆地整体仍继承了裂陷期 NE-SW 的走向, 在此构造背景下势必会产生右旋走滑分量. 随着走滑分量的产生, 控盆断裂受到的正向伸展分量则相应变小, 因而表现出控盆断裂正断活动性逐渐减弱的特征, 也导致走滑伸展幕沉降中心只沿控盆断裂附近展布而在紧贴断裂部位沉降反而减弱这一现象. 走滑伸展幕发育的盆内断裂多为 NNE-SWW 向, 是因为该方向与主应力方向交角更大因而更容易导致破裂的产生. 同时该幕近 S-N 向的主应力使得盆地内的应力向盆地南北两端集中, 从而形成 E_{s2+3} 至 E_{s1} -Ed 时期盆内断裂的活动性呈现由盆地中部向两侧逐渐增强的特点.

3.3 盆地沉降史回剥分析

实际上, 上述断裂活动性所显示出来的幕式活

动特征在沉降史回剥曲线上的表现更为显著. 图 6 是通过沉降回剥技术, 经过去压实、沉积物重力均衡及古水深校正确定的孔南地区的沉降史曲线. 由图可见孔南地区构造沉降活动具明显的幕式活动特征. 拗陷幕沉降速率相对较小, 沉降曲线的裂陷幕盆地的沉降速率明显加快, Ek_1 上时期沉降速率达到 90 m/Ma, 是沉降速率最快的一幕. 走滑伸展幕的沉降速率开始下降, 至 E_{s2+3} 时期沉降速率只有 50 m/Ma, E_{s1} 时期沉降速率略增, 为 70 m/Ma, Ed 时期沉降速率急剧减弱只有 15 m/Ma. 裂后期盆地内的断裂活动基本终止沉降速率大幅减弱, 盆地构造发育进入裂后热沉降阶段.

4 盆地发育机制探讨

孔南地区的构造演化是整个渤海湾盆地区域构造运动的响应, 而渤海湾盆地构造形成及演化的动力来源主要存在两种观点: 一部分学者认为动力主要来源于印度板块和欧亚大陆碰撞挤出效应 (Tapponnier *et al.*, 1986); 另一部分学者则认为太平洋板块与欧亚大陆之间的相互作用以及深部物质活动控制了渤海湾盆地的发育 (Northrup *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1997, 1998; Yin, 2000; Ren *et al.*, 2002). 最近的沉积学和年代学资料证明, 渤海湾的伸展与印欧大陆碰撞的时间并不一致 (Liu *et al.*, 2001; 侯增谦等, 2004, 2006; 夏斌等, 2009), 而太平洋板块俯冲对中国大陆东部造成的影响却是显而易见的, 并且通过物理模拟证实主动大陆边缘的俯冲后撤完全可以形成规模巨大、涉及范围很广的伸展构造 (Schellart and Lister, 2005). 在整个渤海湾盆地内, 根据现有资料确定的 Ek_3 - Ek_1 沉积时期地层厚度的延伸方向, 除了受到先存印支期逆冲断层的负反转控制的区域, 如济阳坳陷 (阳怀忠等, 2009) 之外, 普遍呈 NNE 向延伸 (图 7a), 并且普遍受到铲式正断层的控制 (任建业等, 2010), 本研究区的 Ek_1 上亚段沉积时期的同沉积地层分布也证实了同样的特点. 笔者认为这个时期的盆地发育的动力学背景与太平洋板块东南方向的俯冲后撤作用有关, 由此可以使得中国东部广大区域处于 NW-SE 向拉伸的应力场之下, 并诱使深部热物质上涌, 形成以沧东断裂和徐西断裂等规模较大的 NW-SE 向的控盆断裂, 盆地遭受正向拉伸, 发育了孔店双向滑脱背斜 (图 7c). 中始新世 (E_{s3} -Ed 沉积时期), 太平洋板块对欧亚大陆的俯冲由北西向转为正西向, 而欧亚大

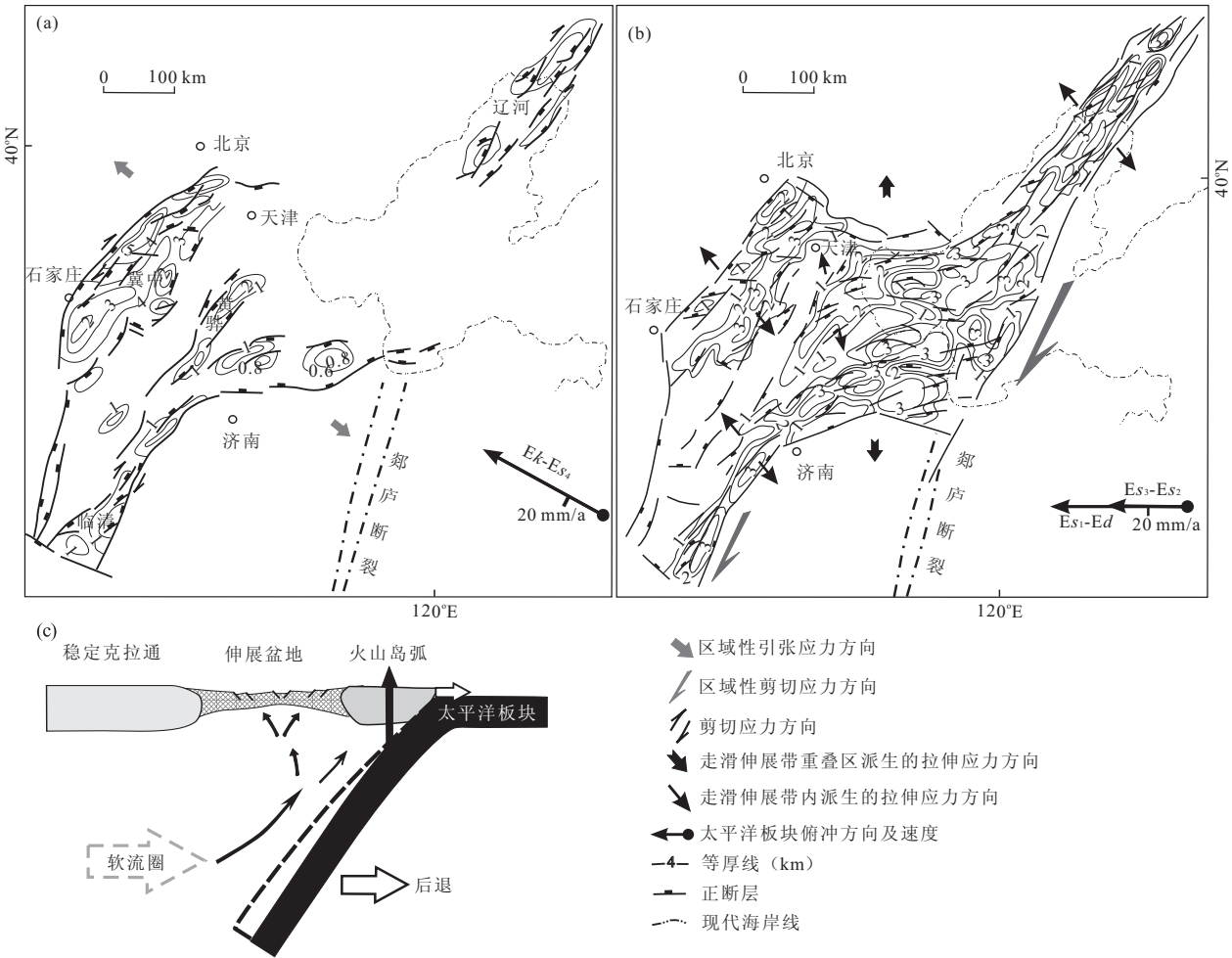


图 7 渤海湾盆地新生代构造演化动力学背景(据祁鹏等,2010 修编)

Fig. 7 Dynamic setting maps of Cenozoic tectonic in the Bohai Bay basin

a. 渤海湾盆地孔店组地层残余厚度图及太平洋板块俯冲方向(Northrup *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1997, 1998); b. 渤海湾沙河街组三段地层残余厚度图及太平洋板块俯冲方向; c. 中国东部新生代伸展盆地的形成机制(Watson *et al.*, 1987; 任建业和李思田, 2000)

陆边缘为北东向延伸,这势必造成郯庐断裂强烈右旋走滑活动(图 7b).在此作用下郯庐断裂与渤海湾盆地西部边界断裂,特别是兰聊断裂在渤海海域共同构成近南北向的伸展叠加区(祁鹏等, 2010).黄骅坳陷孔南地区位于大型伸展叠加区的边缘,受到南北向伸展应力场的影响较弱,盆地整体仍然继承了断陷初期的 NW-SE 向的伸展,但盆地的构造活动显著受到右旋走滑分量的影响,盆地的边缘断裂斜向拉伸,控制了斜列式的盆地沉降中心,并在盆内导致了一系列 NE 向左阶斜列式断裂发育以及近 EW 向的帚状分支断裂的形成.

5 讨论和结论

关于孔南地区新生带断陷活动初始发育时期一

直存在争议:一部分学者认为在 E_{k_3} 时期孔南地区已经开始断陷活动(彭海艳, 2010);而另一部分学者认为盆地的发育经历了拗陷—断拗—断陷的过程,强烈的断陷活动应开始于 E_{k_1} 时期(薛林福, 2008; 杨桥等, 2009).本次借助新采集的三维资料重新在全区范围识别的 $E_{k_1}^{III}$ 界面及其上、下地层结构形态的特征表明,孔南地区的伸展断陷作用极有可能始于 E_{k_1} 上亚段地层沉积初期.这个时期普遍晚于渤海湾盆地的其他地区,如济阳坳陷.不过现在由于 E_{k_1} 下亚段一孔三段地层遭受强烈的剥蚀,相应时期的盆地原型只能据现有的厚度和沉积特征暂时推断为拗陷型盆地,而实际的原型盆地仍然有待于今后根据新的资料来做深入的分析研究.

该文的主要结论总结如下:(1)提出了孔南地区的 $E_{k_1}^{III}$ 界面代表了孔南地区新生带断陷作用的起始界面,与 E_{s_3} 底界面一起同属于孔南地区古近纪

地层序列中发育的二级层序界面。这两条界面将孔南地区古近纪同裂陷期构造演化过程分隔为拗陷幕(Ek_3 - Ek_1 下亚段)、断陷幕(Ek_1 上)与走滑伸展幕(Es_3 - Ed)三幕。(2)孔南地区拗陷幕盆地原型为整体沉降的拗陷型湖盆,其残余地层的分布表现为中间厚向周边变薄的碟状形态;断陷幕时期盆地边缘断裂开始发育,相向倾斜的沧东和徐西大型铲式断裂开始活动,并在其共同的上盘内发育了孔店背斜带;走滑伸展幕时期盆地的构造活动为右旋张扭作用,盆内发育了 NE—NEE 向左阶斜列或帚状断裂系统,显著破坏了孔店背斜隆起带,并形成了盆地内部多个复杂的断裂构造带。

References

- Allen, M. B., Macdonald, D. I. M., Zhao, X., et al., 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. doi:10.1016/S0264—8172(97)00027—5
- Allen, M. B., Macdonald, D. I. M., Zhao, X., et al., 1998. Transtensional Deformation in the Evolution of the Bohai Basin, Northern China. In: Holdsworth, R. E., Strachan, R. A., Dewey, J. E., eds., Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, 135: 215—229. doi:10.1144/GSL.SP.1998.135.01.14
- Cowie, P. A., Gupta, S., Dawer, N. H., 2000. Implications of Fault Array Evolution for Synrift Depocentre Development: Insights from a Numerical Fault Growth Model. *Basin Research*, 12: 241—261.
- Hou, Z. Q., Mo, X. X., Gao, Y. F., et al., 2006. Early Processes and Tectonic Model for the Indian-Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdeseigneous Rocks in Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1233—1248 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Y. Q., Qu, X. M., et al., 2004. Tectonic Evolution and Mineralization Systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109—120 (in Chinese with English abstract).
- Laurent, M., Paul, G., David, D. P., 2002. Effects of Local Stress Perturbation on Secondary Fault Development. *Journal of Structural Geology*, 24: 145—153.
- Lazar, M., Ben-Avraham, Z., Schattner, U., 2006. Formation of Sequential Basins along a Strike-Slip Fault Geophysical Observations from the Dead Sea Basin. *Tectonophysics*, 421: 53—69.
- Liu, J. Q., Han, J. T., Fyfe, W. S., 2001. Cenozoic Episodic Volcanism and Continental Rifting in Northeast China and Possible Link to Japan Sea Development as Revealed from K-Ar Geochronology. *Tectonophysics*, 399(3—4): 385—401. doi:10.1016/S0040—1951(01)00132—9
- Miao, S. D., Li, Q. F., OuYang, C., 2008. Paleogene Sequence Stratigraphic Framework and Model in the Huanghua Depression. *Geology in China*, 32(2): 256—263 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Geology*, 23(8): 719—722. doi:10.1130/0091—7613(1995)023<0719:MOTPPR>2.3.CO;2
- Okay, A. I., Kashlar-Ozcan, A., Imren, C., 2000. Active Faults and Evolving Strike-slip Basins in the Marmara Sea, Northwest Turkey: A Multichannel Seismic Reflection Study. *Tectonophysics*, 321: 189—218.
- Peng, H. Y., 2010. The Research of Basin Structure and Evolution of Basin of Kongdian Formation of Kongnan Area in Huanghua Depression. Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., 2004. Two Tectonic Systems in the Cenozoic Bohai Bay Basin and Their Genetic Interpretation. *Geology in China*, 31(1): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Qi, P., Ren, J. Y., Lu, G. C., et al., 2010. Cenozoic Episodic Subsidence in the Middle and North Part of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 1041—1052 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Li, S. T., 2000. Spreading and Dynamic Setting of Marginal Basins of the Western Pacific. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 203—213 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344(3—4): 175—205. doi:10.1016/S0040—1951(01)00271—2
- Ren, J. Y., Liao, Q. J., Lu, G. C., et al., 2010. Deformation Framework and Evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(4): 461—472 (in Chinese with English abstract).
- Schellart, W. P., Lister, G. S., 2005. The Role of the East Asian Active Margin in Widespread Extensional and Strike-Slip Deformation in East Asia. *Journal of the Geological Society*, 162(6): 959—972. doi:10.1144/0016—76.4904—112
- Sun, J., 2009. The Tectonic-Sedimentary Response Model of Sequence Stratigraphy of Shahejie Period, Kongnan Area in Huanghua Depression. Jilin University, Chang-

- Chun (in Chinese with English abstract).
- Tong, H. M., Mi, R. S., Yu, T. C., 2008. The Strike-Slip Tectonics in the Western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1017—1024 (in Chinese with English abstract).
- Tong, D. J., Ren, J. Y., Shi, S. S., et al., 2010. Determination on Key Tectonic Movement Surfaces and Analysis on Evolution Process of Huanghua Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 17(2): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., 1986. On the Mechanics of the Collision between India and Asia. In: Coward, M. P., Ries, A. C., eds., *Collision Tectonics. Geological Society, London, Special Publications*, 19: 113—157. doi:10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07
- Watson, M. P., Hayward, A. B., Parkinson, D. N., et al., 1987. Plate Tectonic History, Basin Development and Petroleum Source Rock Deposition Onshore China. *Marine and Petroleum Geology*, 4(3): 205—225. doi:10.1016/0264-8172(87)90045-6
- Wu, Y. P., Fu, L. X., Yang, Y. C., et al., 2002. Effect of Mesozoic Tectonic Evolution on Hydrocarbon Accumulation in Buried Hills in Huanghua Depression. *Acta Geologica Sinica*, 23(2): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Wernicke, B., Burchfiel, B. C., 1982. Modes of Extensional Tectonics. *Journal of Structural Geology*, 4(2): 105—115.
- Xue, L. F., Sun, J., Chen, C. W., et al., 2008. Tectonic-Sedimentary Evolution of the First and Second Members of the Kongdian Formation in Southern Kongdian, Huanghua Depression. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(2): 61—68 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Lin, Q. C., Zhang, Y. Q., et al., 2009. SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from Gneiss in the Tongmai Region; Evidence for the India-Eurasia Collision Time. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 347—352 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., 2000. Mode of Cenozoic East-West Extension in Tibet Suggesting a Common Origin of Rifts in Asia during the Indo-Asian Collision. *Journal of Geophysical Research*, 105(B9): 21745—21759. doi:10.1029/2000JB900168
- Yang, H. Z., Ren, J. Y., Lu, J. B., 2009. Tectonic Styles and Kinematic Characteristics of Negative Inversion Structure in Dongying Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 493—501 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., 2009. Transfer Structure and Its Relation to Hydrocarbon Exploration in Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 816—823 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Qi, J. F., Chang, D. S., et al., 2009. Tectonopaleogeography during the Deposition of Paleogene Kongdian Formation in Kongnan Area, Huanghua Depression of Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography*, 11(3): 306—313 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109—120.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据. *地质学报*, 80(9): 1233—1248.
- 苗顺德, 李秋芬, 欧阳诚, 2008. 黄骅坳陷古近系层序地层格架特征及模式研究. *中国地质*, 32(2): 256—263.
- 彭海艳, 2010. 黄骅坳陷孔南地区孔店组盆地结构与盆地演化研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 漆家福, 2004. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释. *中国地质*, 31(1): 15—22.
- 祁鹏, 任建业, 卢刚臣, 等, 2010. 渤海湾盆地黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(6): 1041—1052.
- 任建业, 李思田, 2000. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 7(3): 203—213.
- 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等, 2010. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析. *大地构造与成矿学*, 34(4): 461—472.
- 孙晶, 2009. 黄骅坳陷孔南地区沙河街组层序地层的构造沉积响应模型(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 童亨茂, 宓荣三, 于天才, 等, 2008. 渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用. *地质学报*, 82(8): 1017—1024.
- 佟殿君, 任建业, 史双双, 等, 2010. 黄骅坳陷新生代关键性构造运动面的确定及盆地演化过程. *油气地质与采收率*, 17(2): 9—13.
- 吴永平, 付立新, 杨池银, 等, 2002. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响. *石油学报*, 23(2): 16—21.
- 薛林福, 孙晶, 陈长伟, 等, 2008. 黄骅坳陷孔南地区孔一、孔二段构造沉积演化. *沉积与特提斯地质*, 28(2): 61—68.
- 夏斌, 林清茶, 张玉泉, 等, 2009. 印度与欧亚两大陆块碰撞时间的厘定: 来自锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的证据. *地质学报*, 83(3): 347—352.
- 阳怀忠, 任建业, 陆金波, 2009. 东营凹陷负反转构造样式及其运动学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 493—501.
- 杨明慧, 2009. 渤海湾盆地变换构造特征及其成藏意义. *石油学报*, 30(6): 816—823.
- 杨桥, 漆家福, 常德双, 等, 2009. 渤海湾盆地黄骅坳陷南部古近系孔店组沉积时期构造古地理演化. *古地理学报*, 11(3): 306—313.

热烈祝贺中国地质大学《地球科学学刊》(英文版) 入选首批高校科技期刊精品工程

近日,教育部科技司公布了首批高校科技期刊精品工程入选名单(教技司[2012]343号),《地球科学学刊》(英文版)名列其中。此次入选精品工程的14种期刊全是被SCI-E收录的期刊,其中13种英文版,1种中文版(见附件)。

高校科技期刊精品工程是教育部科技司于2012年2月启动的,目的在于培育一批高校自主品牌国际一流科技期刊,大力提升我国科技期刊的国际影响力,促进我国优秀科研成果的对外传播与交流。经过主办单位推荐、专家评审,最终确定首批入选名单。

《地球科学学刊》(英文版)自2007年被SCI-E收录以来,在稿源国际化、编委国际化、审稿国际化等方面狠下功夫,采取了一系列举措,实现了快速发展。该刊已经连续三届荣获教育部科技司“中国高校精品科技期刊”和“湖北省优秀期刊”称号。

附件:高校科技期刊精品工程首批入选名单

1. Chinese Annals of Mathematics (数学年刊B辑,英文),ISSN 0252-9599,CN 31-1329/O1,复旦大学主办。
2. Chemical Research in Chinese Universities (高等学校化学研究,英文),ISSN 1005-9040,CN 22-1183/O6,吉林大学主办。
3. Chemical Journal of Chinese Universities (高等学校化学学报,中文),ISSN 0251-0790,CN 22-1131/O6,吉林大学主办。
4. Frontiers of Mathematics in China (中国数学前沿,英文),ISSN 1673-3452,CN 11-5739/O1,高等教育出版社主办。
5. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials (矿物冶金与材料学报,英文),ISSN 1674-4799,CN 11-5787/TF,北京科技大学主办。
6. Journal of Central South University (中南大学学报(英文版)),ISSN 2095-2899,CN 43-1516/TB,中南大学主办。
7. Journal of Earth Science (地球科学学刊,英文),ISSN 1674-487X,CN 42-1788/P,中国地质大学主办。
8. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Medical Edition (华中科技大学学报:医学英德文版),ISSN 1672-0733,CN 42-1679/R,华中科技大学主办。
9. Journal of Ocean University of China (中国海洋大学学报(英文版)),ISSN 1672-5182,CN 37-1415/P,中国海洋大学主办。
10. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition (武汉理工大学学报(材料科学版)),ISSN 1000-2413,CN 42-1680/TB,武汉理工大学主办。
11. Journal of Zhejiang University SCIENCE A (浙江大学学报(英文版)A辑),ISSN 1673-565X,CN 33-1236/Z,浙江大学主办。
12. Journal of Zhejiang University SCIENCE B (浙江大学学报(英文版)B辑),ISSN 1673-1581,CN 33-1356,浙江大学主办。
13. Nano Research (纳米研究),ISSN 1998-0124,CN 11-5974/O4,清华大学主办。
14. Petroleum Science (石油科学),ISSN 1672-5107,CN 11-4995/TE,中国石油大学主办。