Earth Science—Journal of China University of Geosciences 2010年11月

doi:10.3799/dqkx.2010.118

# 渤海湾盆地黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程

鹏1,任建业1,2,3,卢刚臣1,4,史双双1,佟殿君1,张俊霞5 祁

- 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. 教育部含油气盆地构造研究中心中国地质大学分中心,湖北武汉 430074
- 4. 东方地球物理公司研究院大港分院,天津 300280
- 5. 中国地质大学经济管理学院,湖北武汉 430074

摘要:黄骅坳陷中北区是位于渤海湾盆地中部的一个重要新生代构造单元,构造层序界面分析、同生断裂活动和盆地沉降史 回剥分析表明该区经历了幕式沉降过程,沉降中心显示出规律性的迁移演化特征. 馆陶组底界面为区域性裂后不整合界面, 将研究区的演化划分为裂陷期和裂后期. 在裂陷期的充填序列中,沙一段底界面为整个研究区都可以识别的显著的角度不整 的性质表明该幕构造活动为北西南东向伸展作用所致,而裂陷 f II 幕发育了  $f E_{S_1}-f E_{d}$  地层,为近南北向拉伸作用的结果. 裂后 期,从早到晚则表现为由稳定热沉降到加速沉降的过程.分析认为上述盆地的幕式沉降过程与区域应力场的转变密切相关, 受控于周缘板块的动力学事件,尤其是晚始新世之后,太平洋板块对欧亚大陆向西的加速俯冲,促使了郯庐断裂右旋活动向 南延伸和穿过黄骅坳陷的兰聊断裂北段的活化,形成了位于渤海海域的南北向伸展叠加区,从根本上改变了黄骅坳陷中北区 应力场的分布,由此导致了盆地同裂陷阶段的幕式演化.

关键词: 黄骅坳陷;幕式沉降;新生代;地质构造.

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2010)06-1041-12

收稿日期: 2010-03-21

Vol. 35

Nov.

No. 6

2 0 1 0

# Cenozoic Episodic Subsidence in the Middle and North Part of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

QI Peng<sup>1</sup>, REN Jian-ye<sup>1,2</sup>, LU Gang-chen<sup>1,4</sup>, SHI Shuang-shuang<sup>1</sup>, TONG Dian-jun<sup>1</sup>, ZHANG Jun-xia<sup>5</sup>

- 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. Secondary Center of CUG, Structural Research Center of Oil & Gas Bearing Basin, Ministry of Education, Wuhan 430074, China
- 4. Dagang Sub-division of GRI, BGP, Tianjin 300280, China
- 5. Faculty of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The middle and north area of Huanghua depression, located in the middle of the Bohai Bay basin, is a significant Cenozoic tectonic unit. This study area underwent the episodic subsidence and the subsidence center migrated regularly which was interpreted through the analysis of the tectonic-sequence surface, syn-sedimentary fault's activity and the back-stripping of the subsidence history. The bottom interface of Guantao Formation is a regional post-rifting unconformity surface and divides the basin's Cenozoic evolution into rifting and post-rifting stage. In the filling sequence of the rifting stage, the bottom interface of the first member of Shahejie Formation is also a regional recognizable angle disconformity surface in the whole basin and divides the rifting stage into Episodic I and Episodic II. The geometry feature and property of the fault system shows that the tectonic deformation of the study area was controlled by the NW-SE extending stress field in the rifting Episodic I from Es3 to Es2. However, the extending stress field turned to NS in the Episodic [I from Es1 to Ed. In the post-rifting stage, the middle and north area of Huanghua depression underwent stable subsidence at early stage and accelerated subsidence at late stage. This ep-

基金项目:国家重大科技专项(No. 2008ZX05023-004-06);国家自然科学基金项目(No. 40672089);国家重点基础研究发展计划"973"项目 (No. 2007CB41170502).

isodic subsidence process is closely related to the change of the regional extending stress field orientation which was controlled by the tectonic events of the surrounding plates. Especially, the accelerated westward subduction from the Pacific Plate to the Eurasia Plate triggered the southward expanding of the dextral slipping of the Tanlu fault and the activity of the north section of the Lanliao fault through the Huanghua depression after the Late Eocene. The continued dextral slipping between the east and west boundary faults created a NS trending extensional overlap at the Bohai Sea, completely changed the stress field distribution in the middle and north area of Huanghua depression, and generated the episodic evolution in the rifting stage.

Key words: Huanghua depression; episodic subsidence; Cenozoic; tectonics.

盆地的形成和发展演化过程显示出特有的节律 性或阶段性,常常表现出快速沉降和缓慢沉降的交 替过程,这种演化过程对裂陷盆地的同沉积断裂活 动、构造格局变迁、沉积充填和油气成藏等都会产生 重要影响(林畅松等,2004). 长期以来,众多学者从 不同角度对黄骅坳陷中部的歧口凹陷和北部的北塘 凹陷的形成演化分别进行了讨论,对演化阶段的划 分和动力学背景众说纷纭(许浚远等,1996;樊敬亮 等,2004). 笔者在对高精度三维地震的精细解释的 基础上,通过对重要不整合界面的刻画,利用沉降史 定量分析方法划分了黄骅坳陷中北区的演化幕次, 并结合研究区不同时期的沉积分布特征,对其不同 裂陷幕的沉积充填过程、古构造格架和古应力场方 向进行了详细的分析,最后,结合渤海湾盆地周缘板 块,尤其是太平洋板块对欧亚大陆俯冲的变化过程, 探讨了黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程的区域 动力学背景,以期为渤海湾盆地的形成机制研究提 供新的思路.

### 1 区域地质概况

黄骅坳陷位于渤海湾盆地的中部,是重要的新生代沉降单元之一.整体上,黄骅坳陷被塘沽一新港潜山和扣村一羊三木潜山自北向南分割成北、中、南3个勘探区域,中北区对应的是歧口凹陷和北塘凹陷,其东部为沙垒田凸起,南接埕宁隆起,西南与孔店潜山构造带相邻,西北背靠沧县隆起,北部为燕山褶皱带(图1).沧东断裂是盆地内最重要的边界断层,呈北东向延伸,是发育于上地壳的上陡下缓的铲式断层,并在深部发生滑脱.歧口凹陷被北大港和南大港潜山分隔成的1个主凹及3个次凹,即歧口主凹、板桥次凹、歧北次凹和歧南次凹;而北塘凹陷作为次级凹陷存在,被北东向的大神堂潜山和涧南潜山分隔成梳状.在东西方向上,渤海西海岸线将黄骅坳陷中北区分成西部的陆上部分和东部的海域部分.两者在结构上差异巨大,陆上表现为由沧东断

层、港西断层和南大港断层分别控制的板桥次凹、歧北次凹和歧南次凹共同构成的多米诺式箕状半地堑式,海域则表现为由海河断层和以羊二庄断层为代表的埕北断阶带共同控制的完整大型复杂地堑.地球物理资料揭示,对应着海岸线位置的黄骅一德州一东明深部基底走滑构造带从北塘凹陷东斜坡以SW-SSW 向经过歧口凹陷,延伸至孔南地区的吴桥凹陷,在区域上和与兰聊走滑断裂位置相当(漆家福,2004),推测是兰聊断裂向北延伸的分支.研究区内的断层走向多为 NE 或 NNE 向和近 EW 向.

地震、钻井和生物地层等多项地质资料揭示,黄骅坳陷中北区地层由前第三系基底和新生代盖层构成,基底地层自下而上分别为前寒武系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系和中生代地层.新生代盖层地层由第三系沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和第四系地层构成,与邻区相比,缺失孔店组和沙四段地层(图 2). 馆陶组底界是一个区域上可对比的不整合界面,将盆地演化划分为古近纪的裂陷期和新近纪一第四纪的裂后期. 馆陶组底界之下的古近系构造层序表现出强烈的差异性,无论是分布范围还是地层厚度,都变化巨大,而且岩性也往往具有突变特征,断层活动强烈,而该界面之上的新近系及第四系地层总体厚度变化不大,岩性过渡具有区域性坳陷的特点,覆盖了下伏的所有岩系,断层的活动则十分微弱.

### 2 重要构造界面的特征

前人对研究区的层序界面做过一些研究(许淑梅等,2001),沙三段底界面和馆陶组底界面等都是盆地内部的重要构造层序界面,前者代表了盆地新生代裂陷作用的开始,而后者为盆地内部反映裂陷期和裂后期分界的裂后不整合界面,这些界面在地震剖面上都是十分清晰的,在此不再赘述.值得关注的是本次研究中重新识别出来的一个构造层序界面一沙一段底界面.在高精度 3D 地震剖面上,沙河街

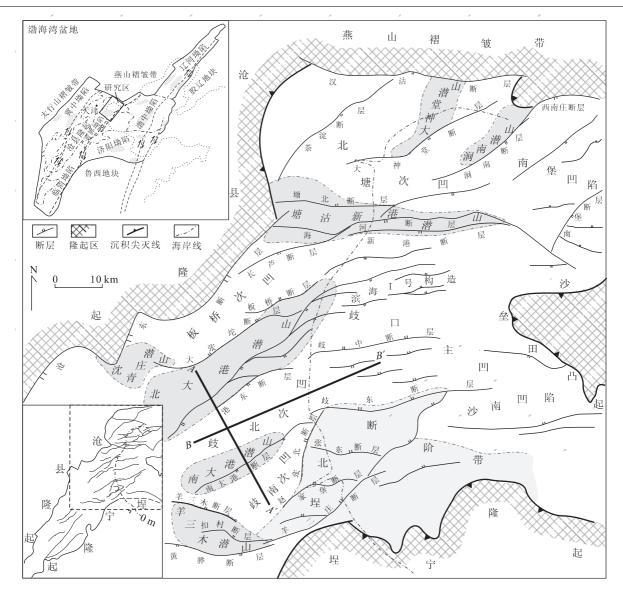


图 1 黄骅坳陷中北区构造位置和构造单元分布

Fig. 1 Tectonic location and subdivisions of the middle and north part of Huanghua depression distribution

组一段底界面( $Es_1$ )是一个全区可以追踪的强反射界面,该界面对其下伏地层表现为削截关系,而在该界面之上地层上超(图 3). 这种下削上超的地层反射结构表现得非常清晰. 另外一个重要的特征是,一些控制早期小型断陷盆地的断层向上延伸多终止在该界面(图 3),平面上这些断层为 NE 向延伸,为  $Es_3 - Es_2$  时期活动的断层,而该界面发育之后的  $Es_1 - Ed$  时期,早期 NE 向断层的活动大幅减弱,而同沉积断层的优势延伸方向转变为近东西向(见后文详述). 在沉积充填方面,该界面控制了沉积旋回,表现为下部的相对快速的  $Es_3$  时期的水进序列,上部为  $Es_2$  时期逐渐的水退过程. 上述这些特征表明  $Es_1$  界面是盆地裂陷期内发育的一个重要构造变革或转换面,不仅控制了盆地裂陷期的主要构造变化,

同时也控制了沉积物展布优势方向的变化和沉积沉 降中心的迁移.

### 3 沉降史分析及构造幕划分

应用沉降回剥分析技术,经过去压实、沉积物重力均衡及古水深校正后(李思田等,2004),对黄骅坳陷中北区的沉降史进行了恢复,结果表明研究区在裂陷期发育过程中, $E_{s_3}-E_{s_2}$  沉积时期和  $E_{s_1}-E_d$  沉积时期都表现出沉降速率由快到慢,沉降量由大到小的变化特征. 如图 4 所示,沙河街组三段构造沉降速率最快,可达 440 m/Ma,黄骅坳陷中北区表现出强烈的断陷特征,沙二段时期沉降速率显著减小为 80 m/Ma,之后在沙一段时期盆地的沉降速率再

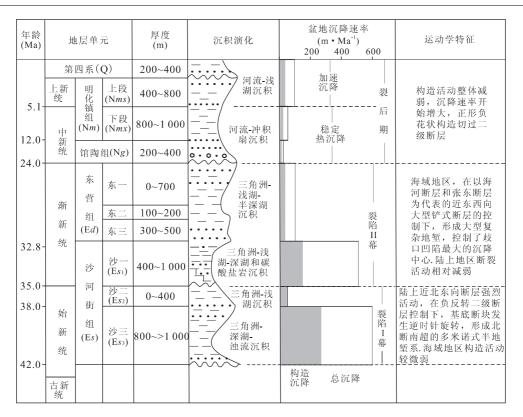


图 2 黄骅坳陷中北区新生代充填序列、沉降历史及构造特征

Fig. 2 Cenozoic filling sequence, subsidence history and structure characters of the middle and north part of Huanghua depression

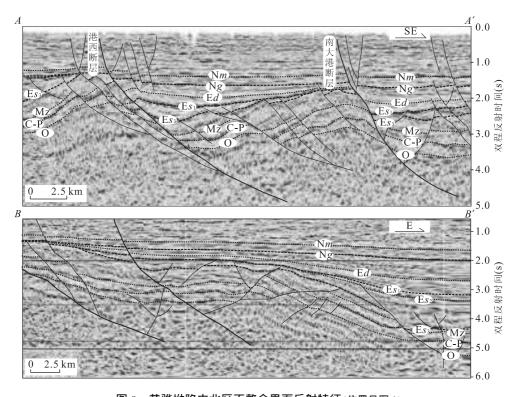


图 3 黄骅坳陷中北区不整合界面反射特征(位置见图 1)

Fig. 3 Reflection characteristics of the unconformity in the middle and north part of Huanghua depression

次增大,达到 230 m/Ma,东营组构造沉降速率最慢,仅为 80 m/Ma,沉降曲线的斜率也十分小,标志

着断坳转换的过渡期. 根据上述沉降速率的变化特征,结合前文的构造层序界面的分析,本文以沙一段

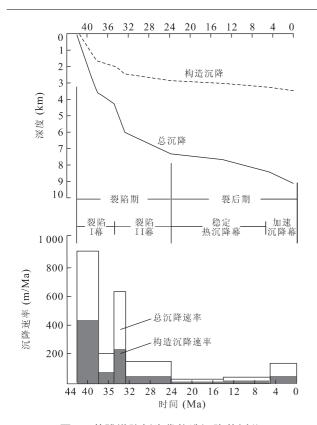


图 4 黄骅坳陷新生代构造沉降幕划分

Fig. 4 Cenozoic tectonic episodes of Huanghua depression

底界面为界将研究区的裂陷期划分为  $Es_3 - Es_2$  组成的裂陷 I 幕和  $Es_1 - Ed$  组成的裂陷 II 幕.

从图 4 还可以看出,研究区的裂后期沉降速率整体上大幅减弱,馆陶组沉积时期构造沉降速率只有  $20\sim30~\text{m/Ma}$ ,但在后期呈现出逐渐变大的过程,甚至在 Nms-Q 沉积时期发生了成倍增长,沉降量曲线的斜率也相应增大,这一点与 Mckenzie (1978)提出来的幂指数衰减的裂后期热沉降特征截然相反,反映了裂后期的异常加速沉降过程. 据此,我们将裂后期划分为稳定热沉降幕(Ng-Nmx)和加速沉降幕(Nms-Q).

### 4 古构造格架的建立和分析

笔者在对研究区精细地震解释的基础上,编制了裂陷 I 幕和裂陷 II 幕的地层厚度图,并结合断层的活动性,重点对黄骅坳陷中北区裂陷期的充填过程、古构造格架、古应力场方向进行了描述和分析.

#### 4.1 古近纪裂陷期沉降过程

地震剖面显示,研究区沙河街组与下伏中古生 界直接接触,缺失了古近纪早期的孔店组地层,说明 黄骅坳陷中北区在 Ess 沉积时期之前一直处于隆起 剥蚀状态. 盆地新生代的充填始于 Es<sub>3</sub> 沉积时期,由此黄骅坳陷中北区开始大规模的裂陷活动,形成了典型的断陷型盆地.

4.1.1 裂陷 I 幕(Es3 - Es2 沉积时期) Esa 时期的断层走向的统计分析,表明黄骅坳陷中 北区在裂陷I幕早期形成了以北东向断层为主体的 断裂系,同时伴生有北北东向和少许近东西向的断 裂(图 5),并且这些断裂在剖面上均表现为正断层, 表明这个时期 NW-SE 向的拉伸作用控制了研究区 盆地的变形和沉降, 在北东走向的盆地边界沧东断 层大规模活动的影响下,位于其上盘的二级断裂港 西断层、南大港断层、羊二庄断层,以及一些反向调 节断层,如大张坨断层等也开始强烈活动(图 5a, 6a). 虽然塘沽一新港潜山作为北西西向构造转换带 分隔了歧口凹陷和北塘次凹,但是北塘次凹内的主 要北东向断裂在这一时期也具有相同的活动特征, 如茶淀断层、大神堂断层和涧南断层的平均古落差 都在350 m以上, 近东西向断层主要分布在歧口凹 陷的海域地区,这一时期活动性较弱(图 6a).

在这一时期强烈活动的北东向沧东断层、港西 断层、港东断层、南大港断层、茶淀断层和大神堂断 层等控制了板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹、歧口主 凹和北塘次凹等多个次级沉积一沉降中心,这些次 级凹陷的厚度等值线都表现出北东向延伸(图 5a, 6a), 值得注意的是歧口主凹的沉降中心的西部边界 表现为近南北向延伸,这主要是受到基底沿岸走滑 断裂带活动的影响所致(王光奇等,2003),板桥次凹 受沧东断层和大张坨断层的共同控制,主要接受来 自沧东降起和北大港潜山的物源,在靠近沧东断层 一侧,形成陡坡沉积体系,低位扇三角洲具大型丘状 杂乱-双向前积反射、楔状杂乱前积反射(严德天 等,2007). 歧北次凹紧邻北大港潜山和孔店潜山,也 是其主要的沉积物来源, 歧南次凹受南大港断层、羊 三木-扣村断层和张北断层的控制,形态上大致为 一小型菱形盆地,南大港断层和张北断层较陡,控制 了两侧潜山物源形成低位扇三角洲的沉积,羊三木 一扣村断层断距小,控制了湖扩体系域和高位扇体 的发育. 歧口主凹是盆地深度最大的地区,发育大面 积的暗色泥岩.

Es₂ 沉积时期,黄骅坳陷中北区相对隆升,发生大规模水退,湖盆仅仅发育在歧口海域地区,北塘次凹、沧东断层以北、赵家堡断层以南均没有沙二段的沉积(图 5b,6b). 湖盆水体较浅,沉积物厚度不超过700 m. 该时期断裂活动很弱,研究区的沉降基本不

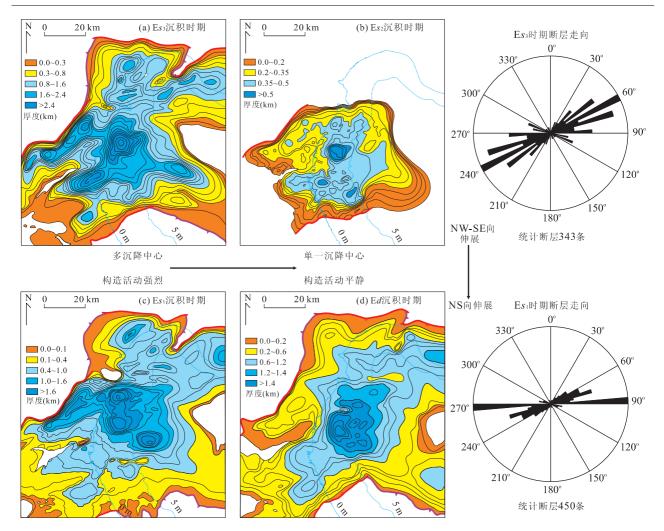


图 5 黄骅坳陷中北区古近纪幕式沉积充填过程及应力场的转变

Fig. 5 Cenozoic episodic filling processes and change of the stress field in the middle and north part of Huanghua depression

受盆内断裂的控制,而是以整体上的平静沉降为主,沉积一沉降中心汇聚为歧口主凹的单一沉降中心.因此,在北西一南东向区域伸展应力场由强到弱的变化过程中,黄骅坳陷中北区在裂陷 I 幕经历了由多个北东向的沉降中心向单一无定向的沉降中心的转变过程

**4.1.2** 裂陷 II 幕( $Es_1 - Ed$  沉积时期) 在经历了  $Es_2$  沉积时期短暂的区域性隆升之后,黄骅坳陷中 北区又一次全面进入裂陷阶段. 从图 5c 可以看出,该区在  $Es_1$  沉积时期也存在多个独立的沉积一沉降中心,但和  $Es_3$  沉积时期相比发生了显著的变化,海域地区表现出多个东西展布的深沉降中心. 陆上的歧北次凹和歧南次凹的沉降作用减弱,板桥次凹受盆地边界沧东断层的控制仍然表现为北东向展布的特点,但是与早期相比,沉积沉降中心已经沿沧东断层向 NE 方向明显迁移.

港西和港东断层活动性减弱,歧北次凹的 Es<sub>1</sub>

地层厚度的优势展布方向发生了顺时针旋转,转为 近东西向: 歧南次凹沉积厚度趋势的定向性已经非 常不明显,在海域地区,近东西向断层显著活动,如 歧东断层、歧中断层和海河断层等(图 6c), 在海河 新港断层的下降盘形成了东西向延伸的狭长沉降 带,在剖面上也能看到地层向断层一侧的快速加厚. 在海河断层和歧中断层的控制下,沉积物由于重力 作用均向断层面方向滑塌,在这两个断层中间,地层 发生相对上拱造成顶部引张,形成东西向的滨海一 号大型花状构造(图 6c), 在北塘次凹内,海域地区 尤其是靠近海河断层的地区,地层厚度等值线有东 西向延展的趋势,但是远离这一区域,厚度等值线呈 北东向展布,表明茶淀断层、大神堂断层依然有一定 的活动性,这些正断层以及其所控制的沉积中心的 特征表明,该时期黄骅坳陷中北区处于近南北向的 应力场控制下,且更集中在盆地的海域地区.

Ed 沉积时期,不管是北东向断层还是东西向断

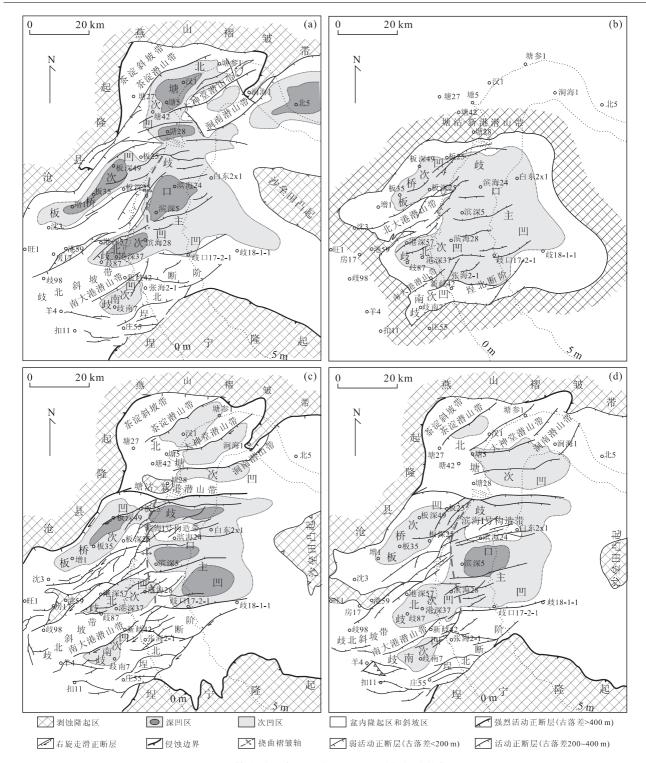


图 6 黄骅坳陷中北区古近纪沉积时期构造格架

Fig. 6 Paleogene tectonic framework in different stages of the middle and north part of Huanghua depression a. Es3 沉积时期; b. Es2 沉积时期; c. Es1 沉积时期; d. Ed 沉积时期; 断层名称见图 1

层,活动性都发生了大幅度减弱,二级断裂的古落差均在 300 m 以下,有的甚至不到 50 m,对各个次凹内的沉积控制作用也不明显(图 5d,6d).该时期研究区内只在海域地区的歧口主凹发生了较大规模的沉降,并且和周缘的板桥次凹、歧北次凹和歧南次凹

相连通,表明整个黄骅坳陷中北区已经开始成为统一的沉降单元. 东营组沉积厚度相对于沙河街组一段而言,变化不大,稍许减薄,但是沉积一沉降中心已经不受海河一新港断裂带控制了,沉降中心发生了向南的迁移(图 5d,6d).

在裂陷 II 幕,黄骅坳陷中北区依然接受周缘隆起区的物源沉积,如东部沙垒田凸起和南部埕宁隆起,但是最主要的还是来自北部的燕山褶皱带和西北部的沧县隆起.北部的燕山物源体系由冲积扇、辫状河三角洲和水下扇构成,西北部的沧县物源主要由扇三角洲、水下扇和滑塌浊积扇构成(蒲秀刚等,2009;王华等,2009).盆内的古潜山也是重要的物源供给,如北大港潜山和孔店潜山.

根据这个时期活动断裂的统计结果和断裂的性质分析,在裂陷 II 幕时期,黄骅坳陷中北区的应力场方向已经由裂陷 I 幕的北西一南东向拉伸转变为近南北向拉伸. 受此影响,研究区陆上北东向正断层虽然继承性发育,但活动性明显减弱,且已经表现出一定的走滑分量. 相比较而言,渤海海域近东西向的正断层活动性整体增强. 与此相对应,黄骅坳陷中北区的沉降中心发生了向东的迁移,优势展布方向由北东向转为近东西向. 在裂陷 II 幕晚期,南北向伸展应力场减弱,黄骅坳陷中北区再次形成单一的沉降中心.

#### 4.2 新近纪裂后期沉降过程

黄骅坳陷中北区在新近纪全面进入裂后沉降期,构造活动十分微弱,对盆地的沉积基本不起控制作用.从沉降史恢复来看,自馆陶组到第四系,沉降速率是逐渐增大的,尤其是明化镇组上段一第四系,相对于馆陶组的沉降速率而言,几乎增长了两倍以上.因此,研究区裂后期演化可以划分为稳定热沉降幕(馆陶组一明化镇组下段)和加速沉降幕(明化镇组上段一第四系).

馆陶组沉积时期,黄骅坳陷中北区扩张十分微 弱, 该期区域构造应力场进入调整阶段, 断陷期强烈 的水平拉张应力不再占据主导地位,取而代之的是 区域热沉降控制的裂后期坳陷作用,盆地构造变形 表现为海域强、陆地部分弱的特点,而海域地区则又 呈现北强南弱的特色. 馆陶组和明化镇组下段地层 覆盖全区发育,地层厚度变化范围比较大,均在 500 m以上, 在歧口主凹最大厚度可以达到约 1 100 m, 沉降速率可以达到 160 m/Ma. 明上段一第 四系地层的厚度在全区内普遍较大,大部分地区在 600~900 m 之间, 歧口凹陷地层厚度超过了 1 400 m. 明上段一第四系沉积时期的加速沉降幕, 断裂活动性又开始活跃,甚至形成迄今仍然在海底 活动的断裂系统,沉降中心有进一步向东迁移的趋 势,显示黄骅坳陷中北区在裂后期继承了古近纪晚 期位于海域的沉降中心.

黄骅坳陷中北区在新近纪主要发育辫状河沉积为主的沉积体系,物源主要来自四个方向,分别为北部的燕山物源、西部的沧县物源、南部的埕宁物源,以及来自西南方向的可能与古黄河沉积相关的物源(孙小霞等,2006).

## 5 讨论与结论

黄骅坳陷中北区是渤海湾地区的一个典型的新生代断陷盆地,其形成和演化过程与渤海湾盆地密切相关.作为中国东部第二大含油气盆地,渤海湾盆地的沉积、构造形成和演化机制一直是学术界关注的热点.众多国内外学者围绕着这一话题进行了激烈的讨论,归结起来大致有两类不同的观点:一类以Tapponnier et al. (1986)为代表,认为渤海湾盆地以及亚洲东部其他伸展盆地都是由于印度板块和欧亚大陆碰撞挤出效应的构造响应;另一类学者则持相反的观点,认为印欧板块的碰撞对这些伸展盆地的形成基本不起作用或者影响很弱,而真正起控制作用的是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(Northrup et al., 1995; Allen et al., 1997, 1998; Yin, 2000; Ren et al., 2002).

因为现有的沉积学和年代学等资料证实印欧大陆碰撞的峰值时间为中始新世(侯增谦等,2004,2006;夏斌等,2009),即便是开始碰撞也是在古新世(王成善等,2003;侯增谦等,2006),而渤海湾盆地及邻区的伸展活动和火山爆发在晚白垩世就开始了(Liu et al.,2001; Ren et al.,2002). 印欧大陆碰撞在时间上与中国东部及邻区伸展事件的不匹配,大大降低了其说服力;另一方面,印欧大陆碰撞的远程效应到底有多强,能不能影响到远东地区,一直饱受争议,而中国大陆东部对太平洋板块俯冲的近距离构造响应是显而易见的. 与此同时, Schellart and Lister(2005)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.

郯庐断裂作为渤海湾盆地的东部边界,是欧亚大陆与太平洋板块之间的相互作用向渤海湾盆地传递的重要桥梁.两个巨型板块之间的任何活动都会在渤海湾盆地内部留下痕迹,最直接的表现就是反映在盆地内部次级构造单元的幕式演化,黄骅坳陷中北区的新生代沉降过程也不例外.在新生代早期,即古新世一早始新世时期(Ek-Es4 沉积时期),由于太平洋板块东南方向的俯冲后撤作用使得欧亚大陆

东部处于北西南东向拉伸的应力场之下,并诱使深部热物质发生了上涌(图 7a). 因此,渤海湾盆地在晚白垩世末期短暂的抬升之后再次进入裂陷期,孔店组地层充填在西部冀中坳陷、临清坳陷,中部黄骅坳陷孔南地区以及东部辽河坳陷等北东向地堑和半地堑中(图 7b),而渤中坳陷、济阳坳陷的北部和黄

骅坳陷的东部仍然处于隆起剥蚀阶段. 显然,郯庐断裂在这一时期对渤海湾盆地的控制仅仅局限于北部的辽河坳陷. 到中始新世( $Es_3$  沉积时期),太平洋板块对欧亚大陆的俯冲速度降到 Ek 沉积时期的一半(Northrup et al., 1995),在渤海湾盆地维持更松弛的应力环境,断陷作用进一步加强. 此时,一个更重

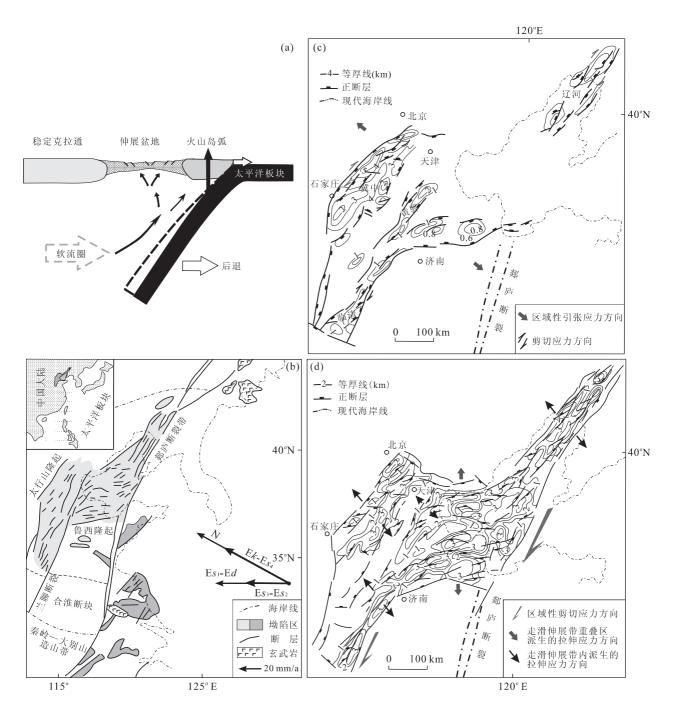


图 7 渤海湾盆地新生代构造演化动力学背景

Fig. 7 Dynamic setting maps of Cenozoic tectonic in the middle and north part of Huanghua depression a. 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);b. 新生代太平洋板块对欧亚板块俯冲的变迁过程,据 Northrup et al. (1995)、Allen et al. (1998)和 Zhang et al., 2003 修改;c. 渤海湾盆地孔店组地层残余厚度图(Allen et al., 1997);d. 渤海湾沙河街组三段地层残余厚度图(田克勤等,2000)

要的因素在于太平洋板块对欧亚大陆的俯冲由北西 向转为正西向,而欧亚大陆边缘为北东向延伸,必然 造成郯庐断裂强烈右旋走滑活动(图 7c,7d). 在这 一背景下, 郯庐断裂快速向南延伸, 与渤海湾盆地西 部边界断裂,特别是与兰聊断裂之间形成的重叠区 段共同形成的转换伸展作用在渤海海域派生出近南 北向伸展叠加区,之前在 Ek-Es4 沉积时期处于隆起 的地区开始发生了裂陷作用,整个渤海海域类似于 一个拉分盆地(Allen et al., 1998), 沉积物基本上 覆盖了整个渤海湾盆地(图 7d). 但是黄骅坳陷中北 区却位于这个大型伸展叠加区的边缘,受到近南北 向伸展应力场的影响较弱,仍然继承早期北西一南 东向的伸展,在陆上区域形成了多个北东走向的北 断南超的半地堑(图 5a,6a),这是黄骅坳陷中北区 裂陷 I 幕的典型构造特征. 研究区在 Esz 沉积时期 发生短暂抬升之后,在渐新世早期(Es: 沉积时期) 发生了再一次强烈裂陷,进入了裂陷 II 幕,但是伸 展的方向由裂陷 I 幕的北西 — 南东向转为近南北 向,而且构造活动的重心迁移到了东部的海域地区. 这应该是因为太平洋板块对欧亚大陆的向西俯冲突 然加速(图 7c),使郯庐断裂右旋走滑变得更为强 烈,穿过黄骅坳陷的兰聊断裂北段发生活化,这样就 使得南北向伸展叠加区扩展到了黄骅坳陷,使应力 场发生了根本性的改变(图 5), 与此同时,环渤海地 区的盆地也发生了深刻地变化, 郯庐断裂的强烈走 滑使辽东湾的裂陷作用在该时期达到了最大(Hsiao et al., 2004), 增强的南北向伸展作用不仅使济阳 坳陷大部分东西向断层迅速形成,沉降中心发生了 向北的迁移(韩会军和郑德顺,2007),而且使渤中坳 陷的裂陷作用再一次活化,并在 Ed 时期湖扩范围 达到顶峰(吴磊等,2006).

新近纪之后,太平洋板块对欧亚大陆的俯冲重新回到了北西方向(图 6c),使整个中国东部处于微弱挤压环境中,结束了古近纪大规模的裂陷过程,进入了裂后热沉降期.同时,太平洋板块北西向俯冲的再次提速,造成了渤海湾盆地的整体抬升,在馆陶组底部形成了区域性的不整合界面,构造活动以压扭为主,正形负花状构造广泛发育.沉降史回剥分析反映出新近纪盆地的构造沉降并没有遵循经典的均匀伸展模型(Mckenzie,1978),不仅没有发生衰减,反而在 Nms—Q 沉积时期出现了快速增加.这种不同于均匀热沉降的现象在中国东部其他盆地也有发现,控制因素十分复杂,将其形成机制仅仅归因于板块的重组事件是不够的,深部的动力学过程也具有

显著意义,有待于进一步的工作.

#### 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
- Fan, J. L., Qi, J. F., Gao, A. H., et al., 2004. Genetic analysis of discontinuous of tectonic line on both sides of coastline in Huanghua basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 33(3): 287 291 (in Chinese with English abstract).
- Han, H. J., Zheng, D. S., 2007. Characteristic contrast of Mesozoic and Cenozoic faults of eastern and western structure units in Jiyang depression and its controlling factors. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 14(3):12-15 (in Chinese with English abstract).
- 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 Gangdese igneous 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).
- 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. *AAPG Bull.*, 88 (1): 71 97. doi: 10. 1306/09090302019
- Li, S. T., Xie, X. N., Wang, H., et al., 2004. Sedimentary basin analysis: principle and application. Higher Education Press, Beijing, 275—280 (in Chinese).
- Lin, C. S., Zhang, Y. M., Li, S. T., et al., 2004. Episodic rifting dynamic process and quantitative model of Mesozoic-Cenozoic faulted basins in eastern China. Earth Science—Journal of China University of Geo-

- sciences, 29(5):583-588 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Mckenzie, D., 1978. Some remarks on the development of sedimentary basin. Earth and Planetary Science Letters, 48(1): 25 32. doi: 10. 1016/0012 821X(78) 90071—7
- 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
- Pu, X. G., Zhou, L. H., Zhou, J. S., et al., 2009. Study on the sedimentary system of Member 1-S of Shahejie Formation and Dongying Formation of the Qikou sag in Bohaiwan basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 36 (1):45-50 (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).
- 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
- 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: 10.1144/0016-764904-112
- Sun, X. X., Li, Y., Qiu, D. Z., et al., 2006. The heavy minerals and provenances of the Neogene Guantao Formation in the Huanghua depression. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(3):61—66 (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. *Geo*-

- logical Society, London, Special Publications, 19: 113
  —157. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1986. 019. 01. 07
- Tian, K. Q., Yu, Z. H., Feng, M., et al., 2000. Hydrocarbon geology and exploration of the deep Paleogene strata in Bohaibay basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 100—107 (in Chinese).
- Wang, C. S., Li, X. H., Hu, X. M., 2003. Age of initial collision of India with Asia: review and constraints from sediments in southern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 77 (1):16-24 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Q., Qi, J. F., Yue, Y. F., 2003. Formation and evolution of the Cenozoic tectonics within and surrounding the Qikou sag. *Chinese Journal of Geology*, 38(2): 230-240 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Bai, Y. F., Huang, C. Y., et al., 2009. Reconstruction and application of the Paleogene provenance system of the Dongying Formation in Qikou depression. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 34(3):448—456 (in Chinese with English abstract).
- 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, L., Xu, H. M., Ji, H. C., 2006. Evolution of sedimentary system and analysis of sedimentary source in Paleogene of Bozhong sag, Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1):81—88 (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).
- Xu, J. Y., Zhang, L. Y., Yang, D. S., et al., 1996. Tectonic evolution of Qikou depression in the Bohaiwan basin of East China. Experimental Petroleum Geology, 18(4): 348-355 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. M., Zhai, S. K., Li, S. Z., et al., 2001. Seismic reflections and sequence division of lower Tertiary in Qikou sag. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 31(5): 739-746 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. T., Wang, H., Xiao, D. Q., et al., 2007. Sedimentary systems of the third member of Shahejie Formation, central Huanghua depression. *Petroleum Exploration and Development*, 34(3): 328 334 (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

#### 附中文参考文献

- 樊敬亮,漆家福,高爱华,等,2004. 黄骅盆地海岸线两侧构造 线不连续之成因分析. 中国矿业大学学报,33(3): 287-291.
- 韩会军,郑德顺,2007. 济阳坳陷东西部构造单元中一新生代 断裂特征对比及其控制因素. 油气地质与采收率,14 (3): 12-15.
- 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.
- 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.
- 李思田,解习农,王华,等,2004. 沉积盆地分析基础与应用. 北京:高等教育出版社,275-280.
- 林畅松,张燕梅,李思田,等,2004.中国东部中新生代断陷盆 地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型.地球科 学——中国地质大学学报,29(5):583—588.
- 蒲秀刚,周立宏,周建生,等,2009. 歧口凹陷沙一上亚段一东营组沉积体系. 成都理工大学学报(自然科学版),36 (1):45-50.
- 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.

- 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.
- 孙小霞,李勇,丘东洲,等,2006. 黄骅坳陷新近系馆陶组重矿 物特征及物源区意义. 沉积与特提斯地质,26(3): 61-66.
- 田克勤,于志海,冯明,等,2000. 渤海湾盆地下第三系深层油气地质与勘探. 北京:石油工业出版社,100-107.
- 王成善,李祥辉,胡修棉,2003. 再论印度—亚洲大陆碰撞的 启动时间. 地质学报,77(1): 16—24.
- 王光奇,漆家福,岳云福,2003. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化. 地质科学,38(2): 230-240.
- 王华,白云风,黄传炎,等,2009. 歧口凹陷古近纪东营期古物源体系重建与应用. 地球科学——中国地质大学学报,34(3): 448-456.
- 吴磊,徐怀民,季汉成,2006. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析. 海洋地质与第四纪地质,26 (1): 81-88.
- 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.
- 许浚远,张凌云,杨东胜,等,1996. 歧口凹陷构造演化. 石油 实验地质,18(4),348-355.
- 许淑梅,翟世奎,李三忠,等,2001. 歧口凹陷滩海区下第三系 地震反射特征及层序划分. 青岛海洋大学学报,31(5): 739-746
- 严德天,王华,肖敦清,等,2007. 黄骅坳陷中部沙三段沉积体 系分析. 石油勘探与开发,34(3): 328-334.