

渤海西部孔店组—沙河街组盆地构造特征及形成动力机制

李明刚¹,吴景富¹,吴克强¹,刘朋波²,杨海峰²

[1. 中海油研究总院,北京 100027; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海油田勘探开发研究院,天津 300452]

摘要:为了揭示孔店组—沙河街组烃源岩层系的分布特征,指导渤海西部区带评价和目标优选,在整体研究和对比分析的基础上,运用油区构造解析理论,对渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期盆地的构造特征进行了分析,并对其形成动力机制进行了探讨。研究认为,盆地结构受基底构造控制,对应不同类型的结晶基底,构造变形东西分区,同时受到 NE—NNE 向和 NW—NW 向两组共轭先存基底断裂作用,西区具有东西分带、南北分块的特点,而东区则具有南北分带、东西分块的特点;孔店组—沙河街组不同沉积时期盆地构造特征差异较大,总体表现出拗断—断陷—断拗(拗陷)的演化序列特征;地幔底辟诱导的与地幔隆起轴向垂直的引张应力场控制了渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期的构造变形,其中东区的构造变形主要受近 SN 向引张应力场控制,西区则总体存在 NW—SE 向和近 SN 向两个引张应力场叠加的构造环境。

关键词:油区构造解析;构造特征;动力机制;孔店组;沙河街组;渤海西部

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Structure features and dynamic mechanism of basin formation in Kongdian-Shahejie periods in western Bohai Sea

Li Minggang¹, Wu Jingfu¹, Wu Keqiang¹, Liu Pengbo², Yang Haifeng²

(1. Research Institute of CNOOC, Beijing 100027, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Bohai Oilfield, Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China)

Abstract: Based on the overall study and comparative analysis, the theory of oilfield structural analysis was used to understand the structure features and dynamic mechanism of basin formation during the deposition of the Kongdian and Shahejie formations in Western Bohai Sea, so as to reveal the distribution of source rocks in the Kongdian and Shahejie formations and guide play evaluation and exploration target selection. Basin architecture was controlled by basement structure, and tectonic deformation was different in the east and west due to the difference of crystalline basement types. In addition, the tectonic deformation was influenced by two pre-existing NE-NNE-trending and NW-NW-trending conjugate basement faults, resulting in the E-W zonation and N-S segmentation in the west part while E-W segmentation and N-S zonation in the east part. Structure features in different deposition periods of Kongdian formation and Shahejie formation vary largely, showing an evolutionary sequence of downwarp-fault depression-fault depression and fault-downwarp depression (depression). And the structural deformation during deposition the Kongdian and Shahejie formations in western Bohai Sea was controlled by vertical extensional stress field induced by mantle diapir and uplift. Tectonic deformation in the east part was mainly controlled by the near SN extensional stress field, while that in the west part was controlled by the superimposed NW-SE and near SN extensional stress fields.

Key words: oilfield structural analysis, structure feature, dynamic mechanism, Kongdian Formation, Shahejie Formation, western Bohai Sea

渤海西部位于渤海湾新生代盆地的中北部,“N”型盆地结构中间的过渡和联系部位,具体涵盖了南堡凹陷、北塘凹陷、歧口凹陷、沙南凹陷、埕北凹陷以及沙垒田凸起、埕北低凸起、埕子口凸起等8个新生

代盆地三级构造单元,表现出“五凹三凸”的隆凹相间的构造格局(图1)。目前,大量学者在这一地区已经做了较多的研究工作^[1-7],但多是针对某一个凹陷单独分析,没有系统、整体研究,致使不同构造单元

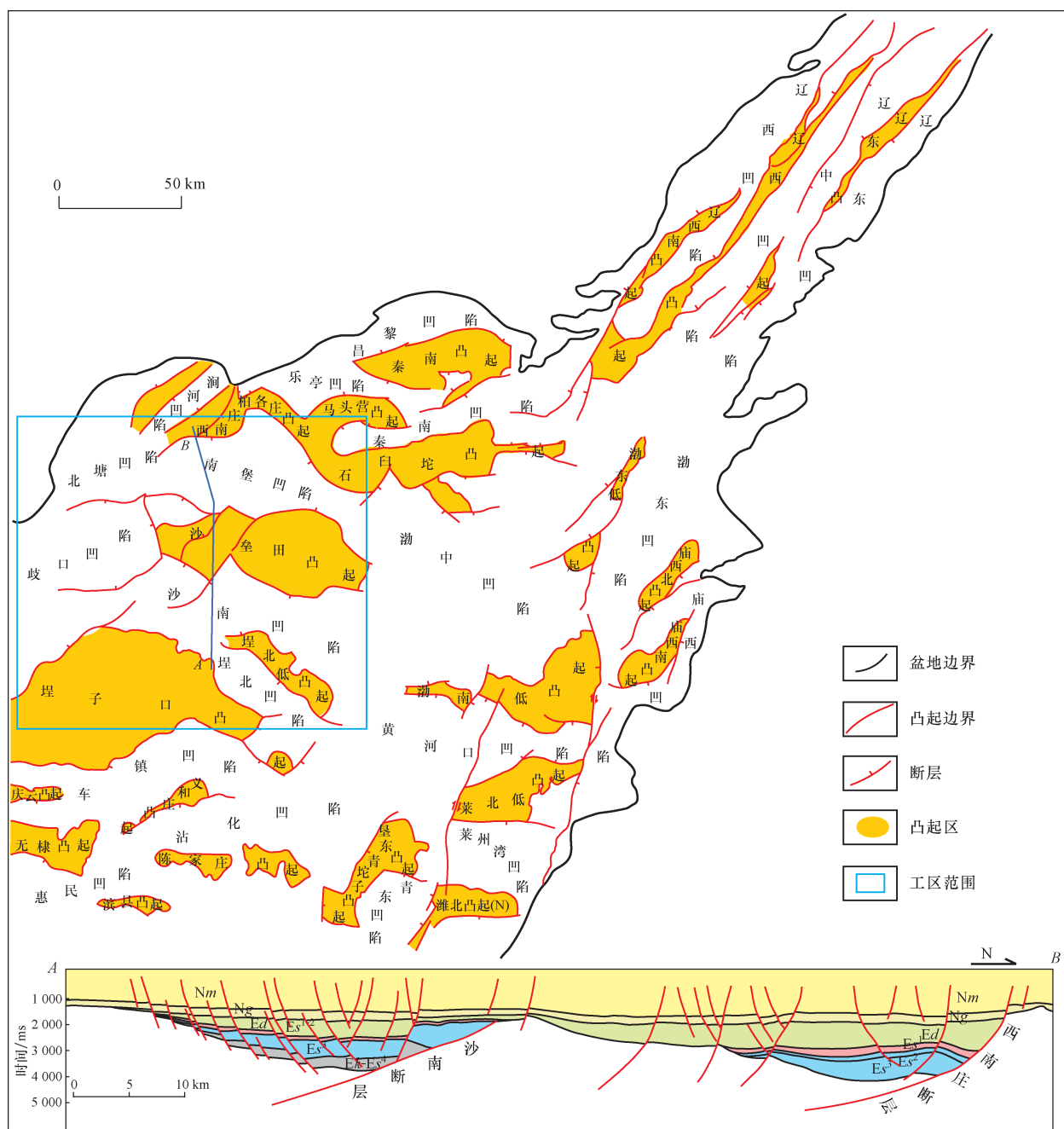


图1 渤海海域及围区构造单元划分

Fig. 1 Structure division of Bohai Sea and its surrounding area

的研究程度差异较大,尤其是海域部分研究程度非常低,探明的油气当量远远少于周边陆域。因此,在以“富生烃凹陷理论”指导渤海湾盆地油气勘探的今天,加强孔店组—沙河街组烃源岩层系构造变形特征和形成演化研究,是提高渤海西部油气勘探效益的迫切需求。

文章在 seismic 剖面系统解释、整体成图的基础上,以渤海西部深层孔店组—沙河街组烃源岩层为研究对象,分析这一构造层系的变形特征和形成机制,揭示孔店组—沙河街组烃源岩层系的分布特征,指导渤海西部区带评价和目标优选,对于实现渤海西部地区新一轮油气储量突破具有重要意义。

1 孔店组—沙河街组沉积时期盆地构造特征

断层活动是古近纪断陷盆地主要的构造变形特征。断层强烈切割前古近系盆地基底,导致断块体差异升降运动和旋转变形,使得渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期断陷盆地在剖面上总体表现出一系列的半地堑和不对称地堑构造形态(图1)。同时受到主边界断层产状和位移量等沿走向变化以及盆地内部断层的组合特征和活动性的影响,不同区域具体的构造变形特征各异。

1.1 盆地结构特征

盆地沉积盖层的结构与基底构造密切相关。一般而言,同一类型的结晶基底在后期的构造变形过程中表现为相对稳定的刚性块体,而不同类型结晶基底的拼接线附近是相对的构造薄弱部位,往往是后期构造相对活跃的地带。渤海西部地区处于不同类型的结晶基底拼接部位,构造变形复杂。受到不同类型结晶基底的构造力学性质不同的影响,在后期构造变形过程中,不同类型结晶基底对应的沉积盖层的结构有所差异。总体来讲,大体以 NE 走向的埕西—羊二庄—西南庄断裂为界,渤海西部地区沉积盖层可以划分为构造特征明显不同的东西两区:西区构造等值线 NE—NNE 走向,具有西断东超的盆地结构;而东区构造等值线 NW—NNW 走向,盆地具有北断南超的特征(图 2)。

1.2 构造变形特征

基底断裂是盆地中的构造弱化带,受到相对较小

的应力就能够再活动,比产生新的破裂面要容易得多^[8]。基底断裂在盆地后期的构造变形中可能被迁就、利用或限制新生构造要素的变形、变位,是一种重要的先存构造^[9],对裂陷盆地的形成和演化有重要的影响^[10]。通过布格重力异常特征的具体分析,渤海西部古近纪盆地基底存在 NE—NNE 向和 NW—NNW 向两组共轭断裂,共同构成了网状的基底断裂系统。其中,NW—NNW 向基底断裂继承性活动,在古近纪盆地中发育比较明显,如西南庄—柏各庄断层、新港断层、沙南断层和埕北断层等,它们多为张家口—蓬莱断裂系在这一地区的分支断层^[11-12]。然而,NE—NNE 向基底断层的发育并不明显,没有连续的切穿所经之处的古近纪沉积盖层,断层主体多隐伏在盆地基底之中,只是在局部沉积盖层中有出露,如 NNE 走向的张北断层和 NE 走向的海 4 断层、羊二庄断层及南堡 1 号、南堡 2 号、南堡 3 号断层等。但是古近系具体的构造变形特征能够反映 NE—NNE 向基底断裂的存在,在这组隐伏基底断裂附近,构造梯度增大,构造线变得

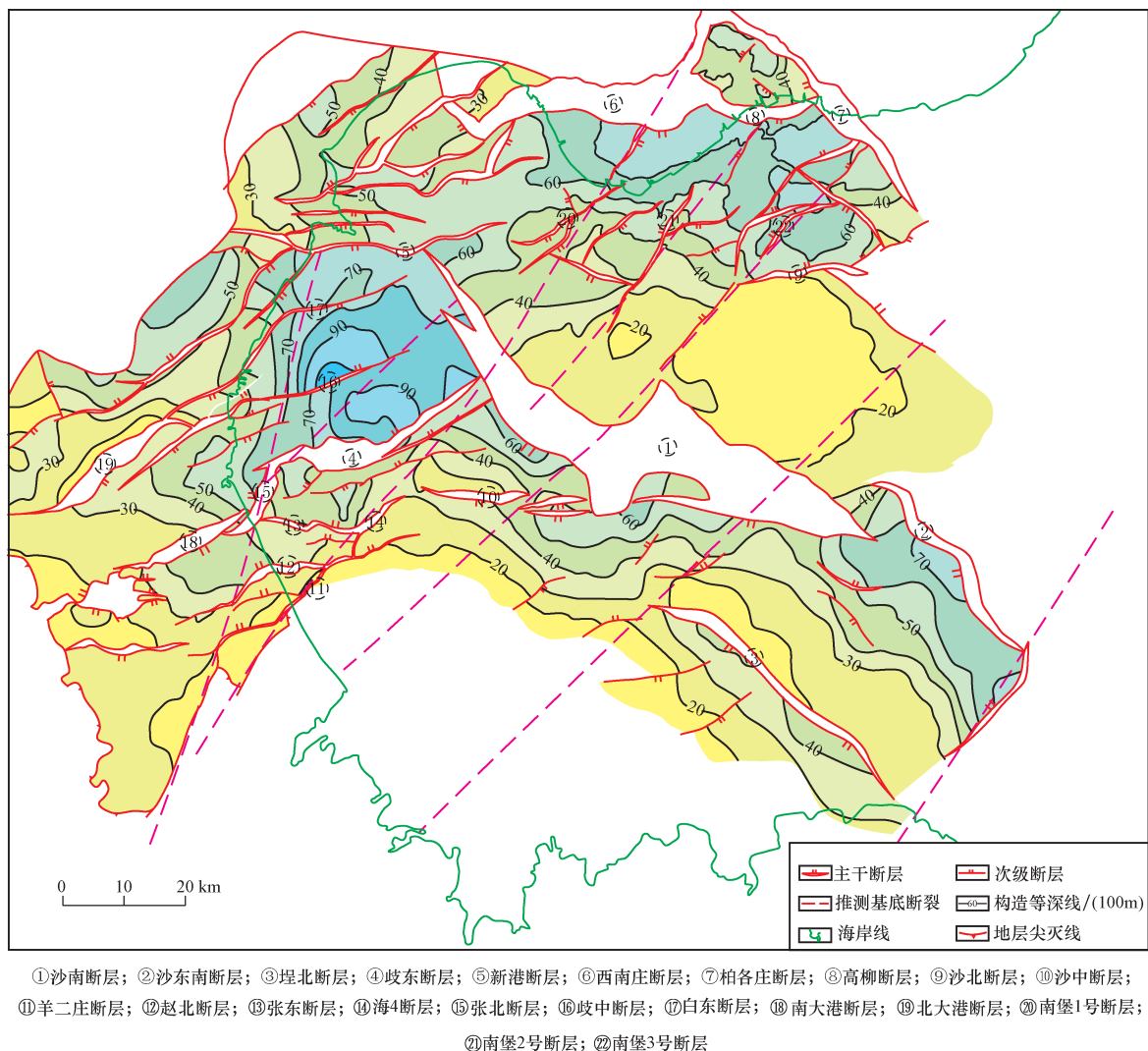


图2 渤海西部古近系底界构造

Fig. 2 The Paleogene bottom structure in western Bohai Sea

密集,走向发生明显偏转;断层走向发生突变,甚至是尖灭消失,多条断层表现出雁列和羽状组合特点(图2)。此外,在浅部新近纪地层中,断层构成了多组 NE 向展布的雁列断层带,这种构造现象应该是 NNE 向基底断层在后期发生走滑变形后在沉积盖层中的响应。

渤海西部东、西两个构造区受 NE - NNE 向和 NW - NWW 向两组先存基底断裂控制表现出“分带、分块”构造格局。其中,西区具有东西分带、南北分块的构造格局,而东区则具有南北分带、东西分块的特点(图2)。NW - NWW 向基底断裂在东区总体上表现出伸展正断层性质,是控制孔店组—沙河街组沉积时期断陷形成和演化的主干断层,而 NE - NNE 向基底断裂总体上表现出走滑位移变形,对断陷的控制不明显,但是它们控制了局部构造带的展布,将 NW - NWW 向带状展布的断陷带分割成不同的块体。在渤海西部西区这两组断层的功能正好相反,NE - NNE 向基底断裂总体上表现出伸展正断层性质,而 NW - NWW 基底断裂具有走滑位移变形,因而使得西区具有东西分带、南北分块的特点。单个断块受 NW - NWW 向和 NE - NNE 向两组基底断裂的控制和影响,在平面上表现出

“三角形”或“扇形”的结构形态。

1.3 构造单元特征

盆地内部构造单元通常依据基底的起伏、沉积盖层的厚薄、构造变形特征和断层的分割作用等构造要素进行划分。渤海西部地区发育了南堡凹陷、北塘凹陷、歧口凹陷、沙南凹陷、埕北凹陷和沙垒田凸起、埕北低凸起和埕子口凸起等 8 个二级构造单元。不同凹陷和凸起间分界线有两种形式:一是以断裂为界,断裂多表现为大型边界铲式正断层性质,对古近系沉积厚度有明显的控制作用;二是以沉积地层厚度等值线或尖灭线为界,表明凹陷和凸起之间以斜坡的形式自然过渡,没有明确的边界。同时依据主要成盆期(沙三段沉积时期)的构造变形特征,在渤海西部不同凹陷内进一步划分出了 10 个洼陷和 16 个构造带共 26 个三级构造单元(图3)。

洼陷是凹陷内的相对负向构造单元,基底埋藏相对较深。渤海西部洼陷的发育和分布与主干基底断层密切相关,总体上受 NW 和 NEE - 近 EW 主干断层控制,单个洼陷沿着断层下降盘呈近东西向串联带状分布,多个洼陷带在南北向上复合构成洼陷区。

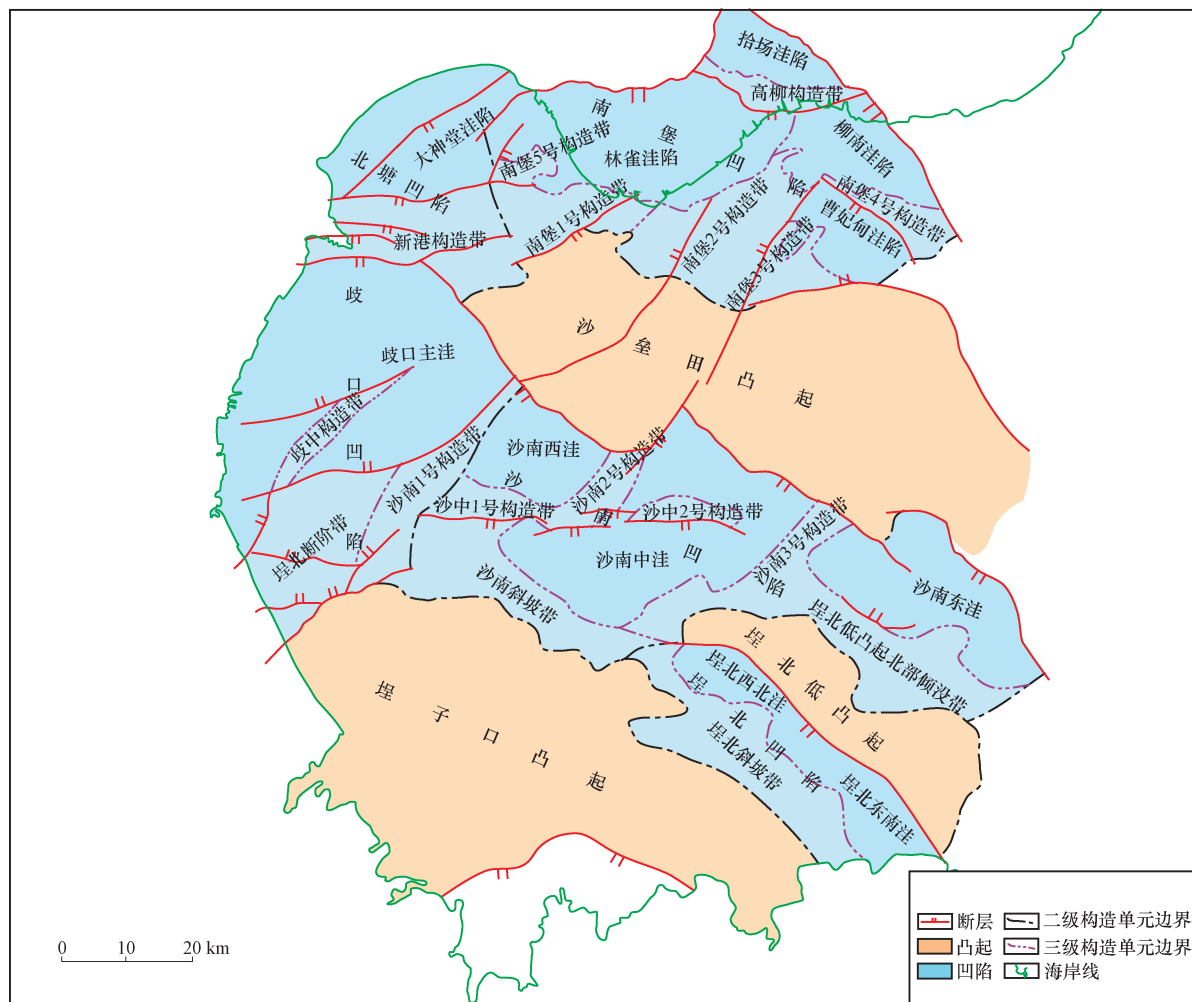


图3 渤海西部构造单元划分

Fig. 3 Structure division in western Bohai Sea

构造带是凹陷内具有成因联系的正向构造单元,可以划分为4类。

第一类是斜坡带(断阶带),如沙南斜坡带、埕北斜坡带、埕北低凸起北部倾没带和埕北断阶带等。这类构造带与盆地基底差异升降运动有关,是凹陷盆地中基底沉降幅度相对较小的区域,主要分布在凹陷向周边凸起过渡的区域,表现出南高北低的缓坡状,构造走向与凹陷走向一致。斜坡带上常发育一系列与地层倾向同向或相反的断层构成“多米诺式”断块构造,对于反向多米诺断块构造来讲,其断棱处多发育潜山型断块圈闭。

第二类是基底断块构造带,如沙中1号构造带、新港构造带和高柳构造带等。这类构造带在凹陷内部沙中、新港和高柳等主干基底断层的下盘呈带状分布,构造走向为近EW向。构造带受基底断层控制明显,是基底断层在发生伸展变形时,其上盘地层沉降引起的断面瞬时卸载作用导致其下盘发生均衡上升造成的断块构造。

第三类是走滑断层构造带,如沙南1号构造带、沙南2号构造带、沙南3号构造带、歧中构造带、南堡1号构造带、南堡2号构造带、南堡3号构造带、南堡4

号构造带和南堡5号构造带等。这类构造带主要受基底断层走滑变形控制,多沿着走滑断层呈带状展布,除了南堡4号构造带走向为NW向外,其它构造带均表现出NE走向。在凹陷内部各构造带呈现出“山脊”状横亘在不同洼陷之间,并有向洼陷倾伏消失的趋势。

第四类是逆牵引构造带,如沙中2号构造带。这类构造带分布较为局限,主要分布在主干基底断层的下降盘,是在伸展变形过程中,上盘地层受断面形态约束而形成的滚动背斜构造。

2 孔店组—沙河街组沉积时期盆地构造演化

渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期盆地可以划分为孔店组—沙四段、沙三段和沙一、二段三个演化阶段,不同演化阶段盆地的结构特征既有联系也有差异。

2.1 孔店组—沙四段沉积时期盆地构造特征

如图4所示,渤海西部地区孔店组—沙四段沉积

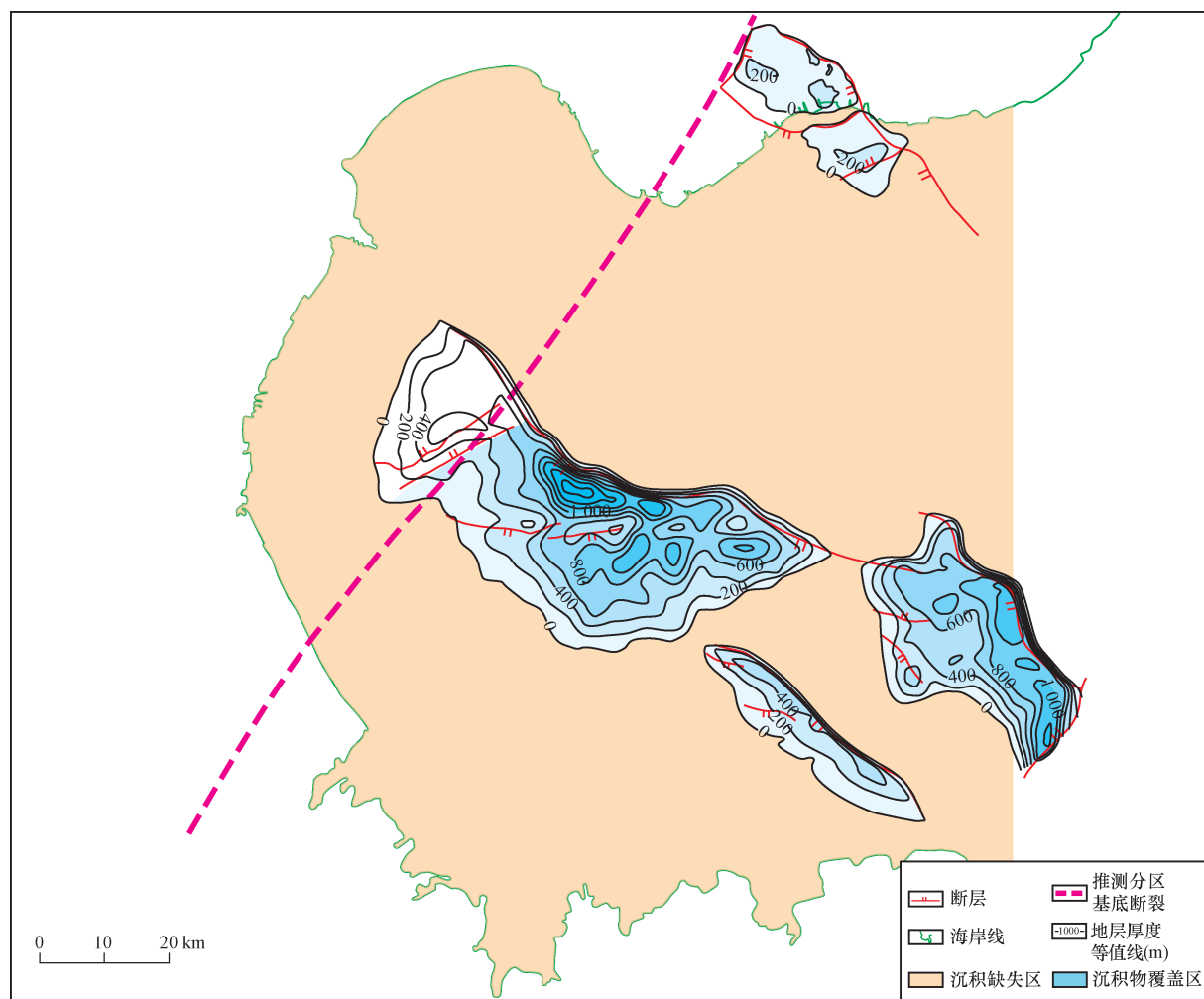


图4 渤海西部沙四段—孔店组残留地层分布与活动断层关系

Fig. 4 Relationship between residual stratum distribution and fault activity in the 4th member of the Shahejie Formation and the Kongdian Formation in western Bohai Sea

时期盆地主要分布在东区,其中在沙南地区可能向西延伸到歧口凹陷内,但是由于埋深较大,不能够确定。

残留地层厚度等值线整体 NW 向展布,分布较为局限、分散,虽然存在多个沉积-沉降中心,但是除了沙南西洼外,其它局部沉积-沉降中心残留地层厚度与周围区域相比没有明显差距,地层厚度变化不大,表明断层活动强度较小,对地层的控制作用有限,盆地总体表现为“拗断”结构。

NW 向断层是沙四段—孔店组沉积时期的主要活动断层,地层在一定程度上受这组断层控制,NW 走向的沙南断层、沙东南断层、埕北断层和柏各庄断层等总体构成了沙四段—孔店组残留地层的东北边界,地层沿着这些边界断层下降盘 NW 向“条带状”展布。同时,孔店组—沙四段残留地层厚度整体表现出中部(沙南凹陷)厚,南、北(埕北凹陷和南堡凹陷)薄的特点,表明这一沉积时期盆地的构造变形强度中间大,南北两侧小的特点。

2.2 沙三段沉积时期盆地构造特征

渤海西部沙三段沉积时期盆地总体呈现出“凹凸相间”的构造格局(图5),与孔店组—沙四段沉积时期

相比,沙三段沉积时期的断陷盆地范围明显扩大,向西覆盖了整个渤海西部的西部地区。残留地层厚度等值线走向在渤海西部东、西区明显不同,东区厚度等值线整体走向为 NW-NWW 向,而西区则表现为 NE-NEE 向。

沙三段沉积时期,渤海西部发育 NW 向、NE 向和近 EW 向 3 组不同走向活动断层,断层活动非常强烈。其中西区发育的断层以 NE-NEE 向为主,而 NW 向断层构成了控制东区的主边界断层。沉积-沉降中心都沿着主边界断层下降盘成串联带状分布,显示了边界断层对沉积地层具有明显的控制作用,盆地总体表现出“断陷”结构。比较而言,西部地区的地层厚度比东区总体上要略大,显示了这一时期沉积-沉降作用总体向西迁移的趋势,也表明了沙三段沉积时期裂陷作用强度有从东向西逐渐加强的趋势。

2.3 沙一段和沙二段沉积时期盆地构造特征

渤海西部沙一段和沙二段沉积时期盆地(图6)与沙三段“凹凸相间”的构造格局相比,变得更为“平坦”,总体上表现为一个沉降带(沙南-埕北沉降带)

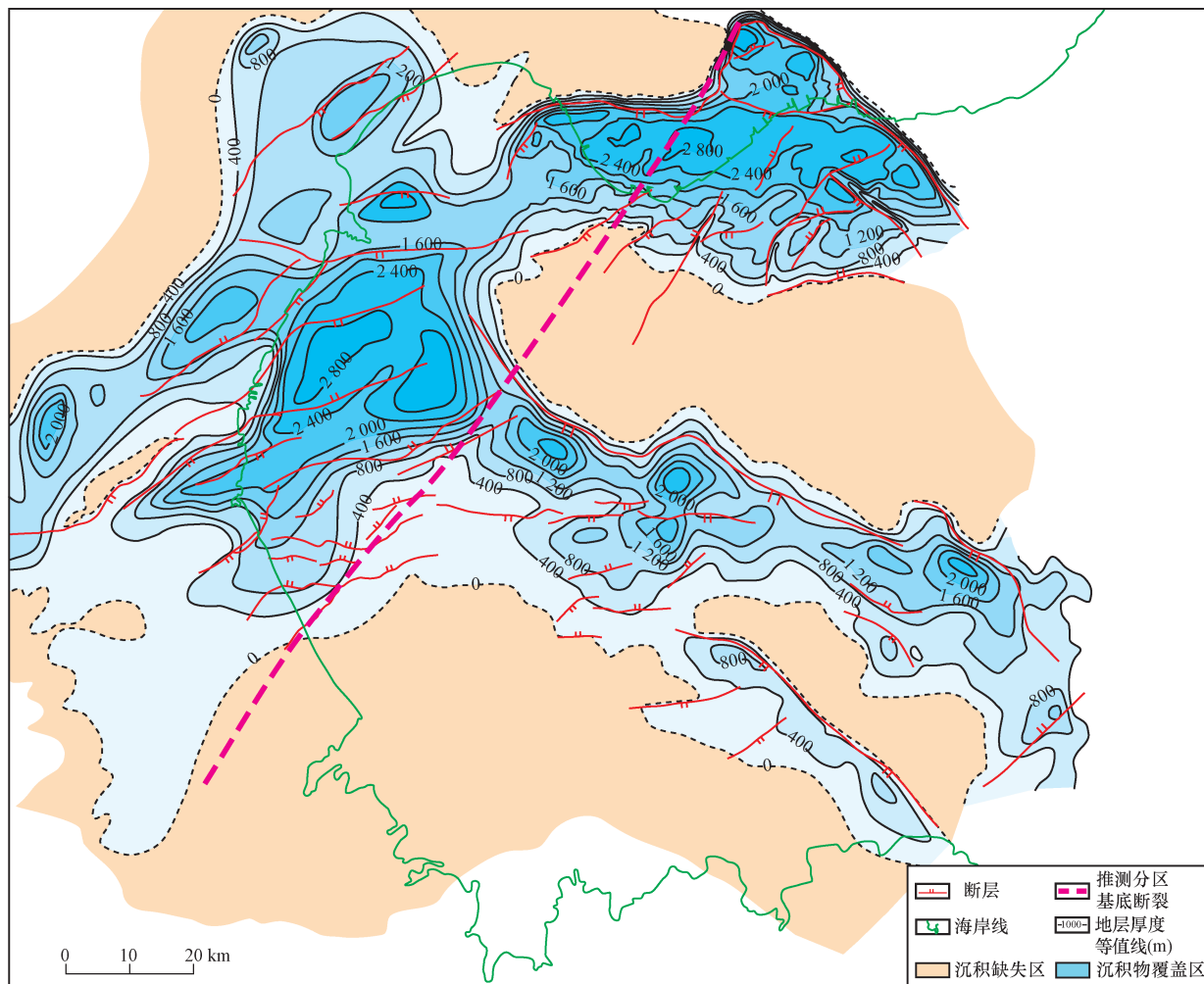


图5 渤海西部沙三段残留地层分布与活动断层关系

Fig. 5 Relationship between residual stratum distribution and fault activity in the 3rd member of the Shahejie Formation in western Bohai Sea

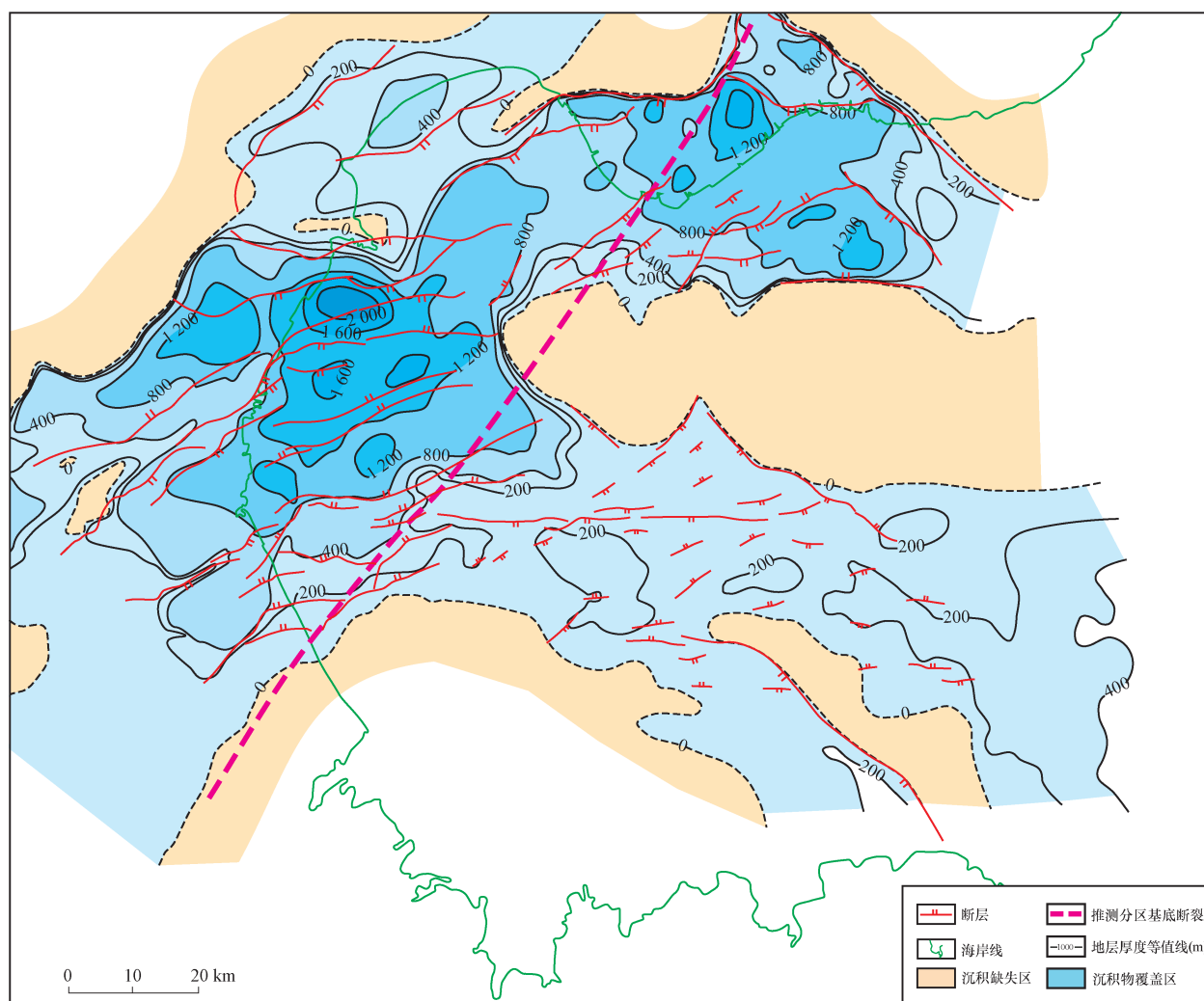


图6 渤海西部沙一段和沙二段残留地层分布与活动断层关系

Fig. 6 Relationship between residual stratum distribution and fault activity in the 1st and 2nd members of the Shahejie Formation in western Bohai Sea

和两个沉降区(南堡沉降区和歧口沉降区)。残留地层厚度等值线走向与沙三段沉积时期有一定的继承性。

沙一段和沙二段沉积时期,渤海西部发育的规模较小断层数量增多,密度变大,NW向断层的规模明显变小,全区NEE—近EW向断层更为发育。不同区域断层活动强度差异较大,总体表现出“西大东小”的特点。东区断层活动强度小,构造变形微弱,尤其是NW向主边界断层的活动性急剧减弱,甚至不活动,对地层沉积基本不起控制作用,地层稳定沉积,厚度相对较薄,变化不大,盆地总体表现为“拗陷”结构。西区NE和近EW向断层发生继承性活动,断层活动强度相对较大,对地层沉积具有一定控制作用,盆地总体表现为“断拗”结构。

3 孔店组—沙河街组沉积时期盆地构造形成机制

渤海西部位于渤海湾新生代盆地的中北部,其形成演化首先应服从整个渤海湾盆地的动力学机制。

3.1 渤海湾新生代盆地形成的动力学

目前,关于渤海湾新生代盆地形成的动力学机制认识还不统一。一些学者认为,渤海湾新生代盆地是在裂陷作用过程中形成的,因而具有伸展盆地的构造特征^[13];另一些学者则强调深断裂带的走滑剪切作用对渤海湾新生代盆地形成的控制作用,认为具有走滑拉分盆地特征^[14-15];也有一些学者认为岩石圈的裂陷伸展作用和盆地区的一些深断裂走滑作用对渤海湾新生代盆地的形成、演化均有不同程度的影响^[16]。这几种观点差异主要体现在地幔底辟作用和板块边界活动这两种动力机制对盆地形成和演化的贡献上。现今的油气勘探实践证实,渤海湾新生代盆地存在的伸展构造和走滑构造是两个相对独立的构造变形系统,因此单用地幔底辟作用或板块边界作用一种动力机制解释整个渤海湾新生代盆地的构造变形特征很难能够圆满。所以本文认为渤海湾新生代盆地存在双动力系统,即地幔热底辟作用和板块边界作用诱导的应力场对渤海湾新生代

盆地的形成和演化都有重要影响,地幔底辟控制裂陷作用,使岩石圈裂陷伸展方向与地幔隆起轴向近垂直,板块边界作用使深断裂发生走滑变形,走滑方向与区域应力场方向有关。同时,不同地质时期,这两种动力学因素所占比例不同。古近纪,渤海湾盆地主要受地幔底辟作用控制,断陷盆地基本沿着地幔隆起轴向分布。新近纪,地幔底辟作用逐渐减弱,板块边界作用加强,逐渐处于主要地位。在板块边界作用下,引起深断裂发生走滑变形,进而控制盆地后期构造格局。具体来看,NE走向的郯庐断裂和聊兰-埕西断裂右旋走滑,而NW走向的北京-蓬莱断裂左旋走滑,这两组共轭走向深断裂相交的两个区域(歧口凹陷和渤中凹陷),应力集中释放,地壳强烈伸展断陷。同时,由于郯庐断裂的右旋走滑相对强烈,使得整个渤海湾盆地发育逐渐向渤中凹陷汇聚,存在自西(南)向东(北)的迁移趋势,最终表现为一个以渤中凹陷为沉积中心的统一的渤海湾盆地。

3.2 渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期的动力学

渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期盆地发育了大量不同走向的正断层,表现出明显的伸展构造变形特点,同时走滑构造变形的痕迹相对较少。因此,渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期构造变形主要受地幔

底辟作用诱导的引张应力场控制,板块边界作用对研究区的构造变形影响相对微弱。地幔底辟诱导的引张应力场方向总体与地幔隆起轴向垂直,由于地幔隆起轴在不同区域走向可能不同,从而导致引张应力场方向在区域上可以发生变化。

地壳厚度图显示渤海湾古近纪盆地区深部构造总体上呈NNE走向,大致存在“三纵一横”四条莫霍面隆起带。“三纵”是指NNE向展布的下辽河-辽东湾-渤中-昌潍隆起带、北塘-临清-东濮隆起带和冀中-汤阴隆起带。“一横”是NNW-近EW走向的连接下辽河-辽东湾-渤中-昌潍隆起带和北塘-临清-东濮隆起带的歧口-渤中莫霍面隆起带。其中,渤海西部东区整体处于NNW-近EW走向的歧口-渤中莫霍面隆起带,推测发育近SN向引张应力场(图7)。在近SN向引张应力场作用下渤海西部东区的NW-NWW向基底断裂强烈伸展变形,而NE-NNE向基底断层则以走滑为主,使得孔店组—沙河街组沉积时期盆地沿NW-NWW向条带状展布,具有南北分带、东西分块的构造格局。对于渤海西部西区,由于处于NNE走向的北塘-临清-东濮莫霍面隆起带和NNW-近EW走向的歧口-渤中莫霍面隆起带的交汇部位,构造应力场复杂,总体存在NW-SE向和

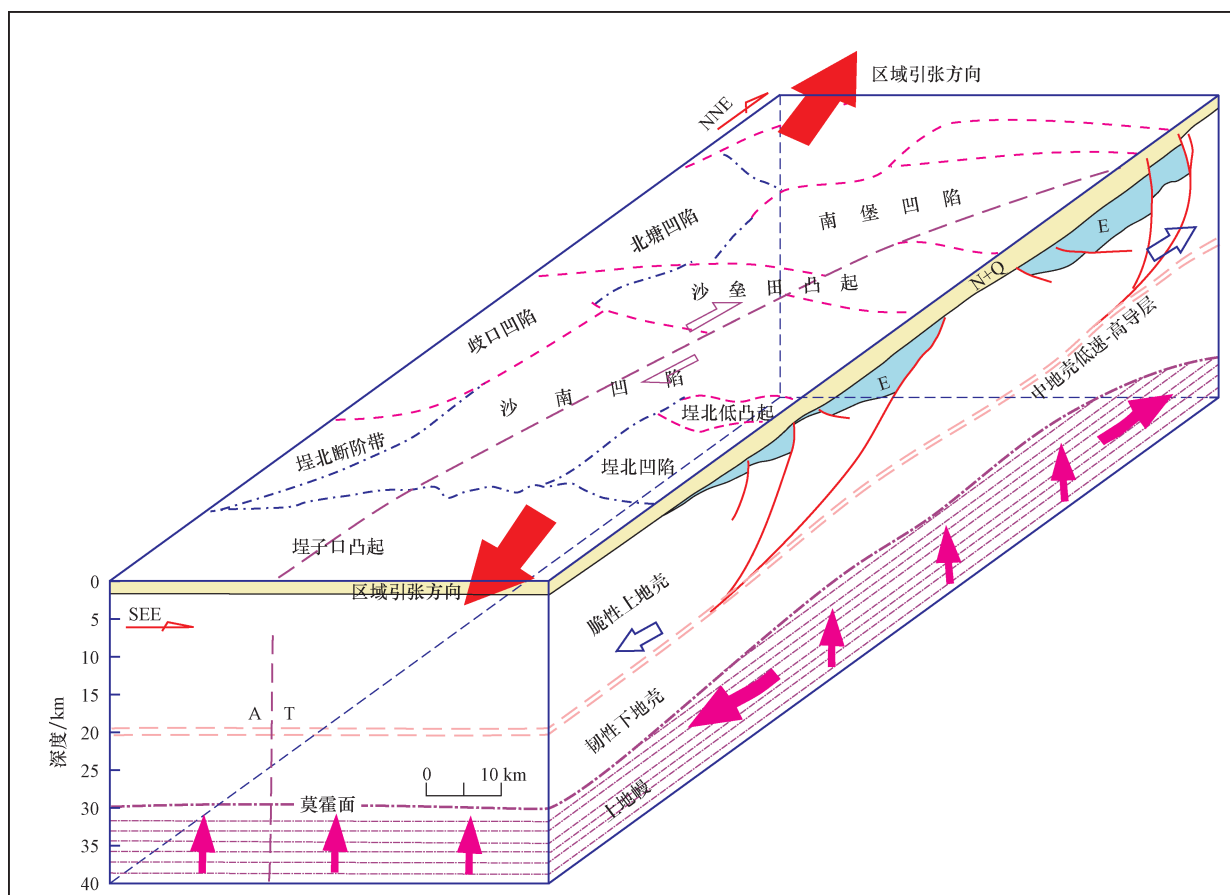


图7 渤海西部东区构造动力学模式

Fig. 7 Tectonic dynamics model in the east area of western Bohai Sea

近SN向引张应力场。在这两个引张应力场作用下,孔店组—沙河街组沉积时期盆地发生了强烈的伸展断陷,NW—NWW向和NE—NNE向两组先存基底断层伸展位移变形明显,对沉积地层都有控制作用,这两组基底断层按照应力场分析应该同时存在一定走滑位移变形,但可能是受伸展作用的约束而变得不明显。比较而言,NE—NNE向基底断层的活动强度总体要大,使得西区整体具有东西分带、南北分块的特点。

4 结论

渤海西部孔店组—沙河街组沉积时期,盆地大体以NE走向的埕西—羊二庄—西南庄断裂为界,可以划分为构造特征明显不同的东、西两区。西区具有东西分带、南北分块的构造格局,而东区则具有南北分带、东西分块的特点。不同沉积时期的盆地构造特征差异较大。孔店组—沙四段沉积时期,盆地主要分布在东区,总体表现为NW向展布“拗断”结构;沙三段沉积时期,盆地全区分布,西区受NE—NEE向基底断裂控制,东区受NW—NWW向基底断裂控制,总体呈现出“凹凸相间”的“断陷”结构;沙一段和沙二段沉积时期,西区继承性发育,具有“断拗”特征,而东区表现为“拗陷”结构。孔店组—沙河街组沉积时期构造变形主要受地幔底辟作用诱导的引张应力场控制。东区的构造变形主要受近SN向引张应力场控制,西区则总体存在NW—SE向和近SN向两个引张应力场叠加的构造环境。

参 考 文 献

- [1] 李家康. 渤西地区断裂体系与油气运聚[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(4): 233—239.
Li Jiakang. Fault system and hydrocarbon migration and accumulation in Boxi area[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2000, 14(4): 233—239.
- [2] 方立敏, 罗群. 北塘凹陷断裂特征与油气分布规律[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003, 18(4): 1—6.
Fang Limin, Luo Qun. Characteristics of the fractures and distribution of petroleum in Beitang depression[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition), 2003, 18(4): 1—6.
- [3] 郑红菊, 董月霞, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡富油气凹陷烃源岩的形成及其特征[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 78—83.
Zheng Hongju, Dong Yuexia, Wang Xudong, et al. The generation and characteristics of source rocks in Nanpu oil-rich depression, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 78—83.
- [4] 范柏江, 刘成林, 庞雄奇, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 192—198, 206.
Fan Bojiang, Liu Chenglin, Pang Xiongqi, et al. Control of fault system on hydrocarbon accumulation in Nanpu Sag, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 192—198, 206.
- [5] 黄曼宁, 董月霞, 庞雄奇, 等. 南堡凹陷构造型油气藏分布主控因素及预测方法[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 695—704.
Huang Manning, Dong Yuexia, Pang Xiongqi, et al. Controlling factors of structural reservoir distribution and its prediction method in Nanpu depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 695—704.
- [6] 樊敬亮, 黄志全, 樊卫花. 歧口凹陷新生代构造演化与油气[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 536—541.
Fan Jingliang, Huang Zhiquan, Fan Weihua. Cenozoic tectonic evolution of Qikou Sag and its relations to hydrocarbon[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2004, 34(4): 536—541.
- [7] 史集建, 付广, 吕延防, 等. 歧口凹陷沙河街组一段中部区域盖层封气能力综合评价[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 671—681.
Shi Jijian, Fu Guang, Lü Yanfang, et al. Comprehensive evaluation of regional seal in middle of the first member of Shahejie Fm in Qikou Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 671—681.
- [8] Marques F O, Nogueira C R. Normal fault inversion by orthogonal compression: sandbox experiments with weak faults[J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(1): 761—766.
- [9] Giambiagi L B, Alvarez P P, Estanislao Godoy E, et al. The control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua fold and thrust belt, southern Andes[J]. Tectonophysics, 2003, 369(2): 1—19.
- [10] Nieto-Samaniego, Angel F. Stress, strain and fault patterns[J]. Journal of Structural Geology, 1999, 21(8—9): 1065—1070.
- [11] 高战武, 徐杰, 宋长青, 等. 张家口—蓬莱断裂带的分段特征[J]. 华北地震科学, 2001, 19(1): 35—42.
Gao Zhanwu, Xu Jie, Song Changqing, et al. The segmental character of Zhangjiakou-Penglai fault[J]. North China Earthquake Sciences, 2001, 19(1): 35—42.
- [12] 李西双, 刘宝华, 华清峰, 等. 张家口—蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 332—341.
Li Xishuang, Liu Baohua, Hua Qingfeng, et al. Characters of Zhangjiakou-Penglai fault zone activity in the Bohai Sea since late quaternary[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(3): 332—341.
- [13] 周建勋, 周建生. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(6): 507—519.
Zhou Jianxun, Zhou Jiansheng. Mechanism of Cenozoic structural deformation in Bohai Bay Basin: physical simulation and discussion[J]. Science in China(Series D), 2006, 36(6): 507—519.
- [14] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 503—509.
Hou Guiting, Qian Xianglin, Song Xinmin. The origin of the Bohai Bay Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 503—509.
- [15] 肖尚斌, 高喜龙, 姜在兴, 等. 渤海湾盆地新生代的走滑活动及其石油地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(4): 321—328.
Xiao Shangbin, Gao Xilong, Jiang Zaixing, et al. Cenozoic dextral strike-slip motion in Bohai Bay Basin and its meaning to petroleum geology[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(4): 321—328.
- [16] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 15—22.
Qi Jiafu. Two tectonic system in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 15—22.

(编辑 董立)