

DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.000847

南堡凹陷北端古近系地层构造解析

——断层链接处“变换生长”现象及其意义

刘晓文¹, 常迪², 施尚明¹, 何春波¹, 魏华彬¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 青海油田天然气开发公司, 青海 格尔木 816000)

摘要: 选择构造位置最为典型的南堡凹陷北端作为研究区, 利用三维地震资料精细解释成果, 针对不同时期开展了活动断裂分析、沉降中心位置分析等工作。明确了研究区沙三期主控断层活动强度最大位置走向与次级活动断层主要走向均为北东向, 至沙一期转变为近东西向。通过观察主控断层的三维空间形态, 提出西南庄断层和柏各庄断层链接处存在“变换生长”现象, 表现为断层深部连续、至浅部分开, 且走向发生改变。同时指出与先存断层走向相差近 45° 方向的伸展应力条件是产生该现象的原因, 揭示了该区域应力体制转换后的性质为南北向伸展而非走滑。研究结果表明: 研究区在沙三期的应力体制为强烈的北西—南东向伸展; 沙二时期为应力体制过渡时的平静期(剥蚀期); 从沙一期开始应力体制变为强烈的南北向伸展, 并派生出走滑分量; 东营期后强度减弱。南堡凹陷与研究区应力体制一致。

关键词: 南堡凹陷; 柏各庄断层; 西南庄断层; 构造解析; 伸展构造; 断层“变换生长”现象

中图分类号: P 548 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2018)06-1287-08

Structure analysis of the Paleogene strata in the northern Nanpu sag: The “transfer growth” phenomenon in fault links and its significance

LIU Xiaowen¹, CHANG Di², SHI Shangming¹, HE Chunbo¹, WEI Huabin¹

(1. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Natural Gas Exploration Company, Qinghai Oilfield, Geermu, Qinghai 816000, China)

Abstract: The north of Nanpu sag, the most typical area in tectonic position, was chosen as the research area. Based on the detailed interpretation of 3D seismic data, the activity faults and the settlement center position in different periods were analyzed. It is clear that the trend of the most active part on the major faults and the main trend of secondarily active faults were both NE during E₂s³ period of the research area, and transformed to nearly EW at E₂s¹ period. By observing the three-dimensional shape of the main control faults, the phenomenon of “transfer growth” in the Xi’nanzhuang and Baigezhuang fault links was found, which is characterized by a continuous fault in the depth, and separation into two sections in the shallow with a changing trend. Meanwhile, it is pointed out that the extension stress at the direction of nearly 45° away

收稿日期: 2018-01-05

基金项目: 国家青年科学基金项目(41702153); 东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2015-001NEPU)

通信作者: 施尚明(1956—), 男, 辽宁省铁岭市人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事石油地质与储层评价方面的研究。

E-mail: ssm@nepu.edu.cn Tel: 0459-6503162

引用格式: 刘晓文, 常迪, 施尚明, 等. 南堡凹陷北端古近系地层构造解析: 断层链接处“变换生长”现象及其意义[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1287-1294.

LIU Xiaowen, CHANG Di, SHI Shangming, et al. Structure analysis of the Paleogene strata in the northern Nanpu sag: The “transfer growth” phenomenon in fault links and its significance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1287-1294.

from the pre-existing fault trend is the cause of the phenomenon, which reveals that the nature of the regional stress regime was a NS extension rather than a strike-slip. The results confirmed that the stress system of E_2s^3 period in the study area was a strong NW-SE orientated extension. E_2s^2 period was a calm period (also a period of erosion) when the stress system transformed. At the beginning of E_2s^1 period, the stress system transformed into a strong SN extension, and derived a strike-slip correspondingly. After Dongying period, the stress intensity was weakened. The stress system of Nanpu sag is consistent with the study area.

Key words: Nanpu sag; Baigezhuang fault; Xi'nanzhuang fault; structure analysis; extension tectonics; "transfer growth" phenomenon in fault

南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷北部,受柏各庄断层、西南庄断层和高柳断层在新生代强烈活动的控制,是一个具有“北断南超”半地堑结构的箕状凹陷^[1-3].文献^[4-10]研究表明,南堡凹陷构造特征复杂,受边界断层与先存断层影响,平面上存在平行状、平行交织状、“梳状”和“帚状”等断层组合形式,剖面上发育复式“y”形、复式“X”形、“多米诺式”、“阶梯式”和“铲式扇”等断块构造样式.然而其成因机制尚未有定论.从公开发表的论文来看,沙三—沙二时期的应力条件为北西—南东向伸展并发育北东向正断层这一观点被普遍认可^[11-23].而沙一—东营时期发育的走滑构造成因仍有所争议,主要分为两种观点:一是走滑应力条件作用下直接形成走滑构造^[14-18];二是先存断层在南北向伸展应力条件作用下间接(派生)形成走滑构造^[19-23].两种观点虽均能合理地解释南堡凹陷复杂的构造特征,但是区域应力体制却截然不同.

研究区(南堡凹陷北端)包含西南庄断层、柏各庄断层与高柳断层所围陷的三角区以及高柳断层面上盘部分区域(图 1),是一个能够以最小工作面积来解析南堡凹陷主控断层的构造演化的典型区块.其新生界地层以沙一段底界平行不整合面和馆陶组底界角度不整合面为划分依据,自下而上可以划分为 3 套构造层:沙三段构造层、沙一段—东营组构造层和馆陶组—第四系构造层.

笔者利用“从部分到整体”的研究思想,选择南堡凹陷北端作为研究范围,通过对其进行精细构造解析,分析不同时期的应力体制,为南堡凹陷的成因演化提供证据补充.

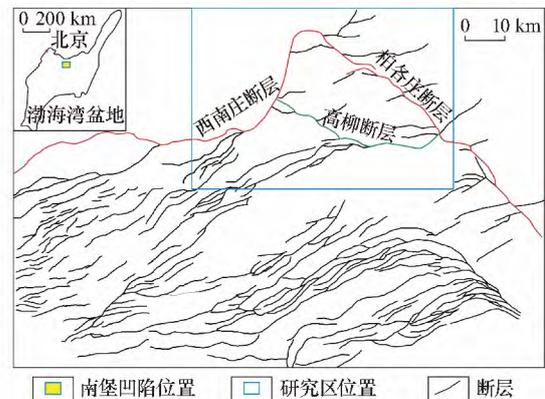


图 1 南堡凹陷构造单元划分及工区位置
Fig. 1 Division of tectonic units in Nanpu sag and the location of study area

1 构造特征解析

研究区以西南庄断层和柏各庄断层为边界,平面上近似三角形,整体表现为下凹的负向构造,区内断层十分发育.

1.1 断层总体特征

1) 断层性质:从剖面上看,研究区内所有断层均为正断层,其中部分断层可能兼具走滑性质,需结合应力条件与断层走向作进一步判断.

2) 断层的走向:本区发育三组不同走向的正断层,分别为北东向、近东西向和北西向.从各层位底面断层走向玫瑰花图(图 2)中可以看出,馆陶组底面断层走向主要为北东向和近东西向;东营组底面断层走向以近东西向为主;沙一段底面断层走向主要为北东向和近东西向;沙三段底面断层走向以北东向为主.

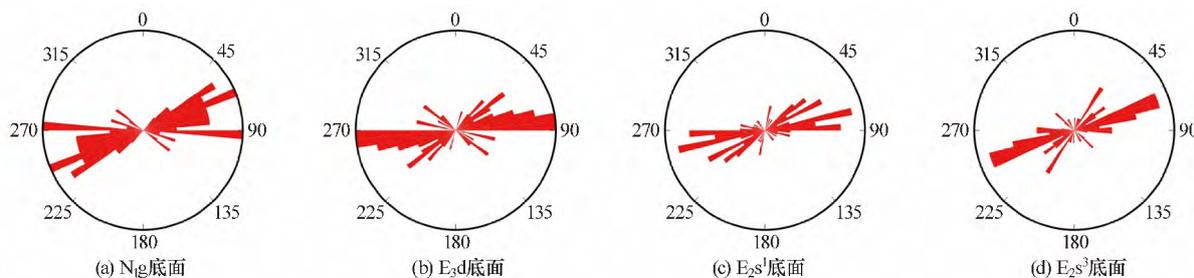
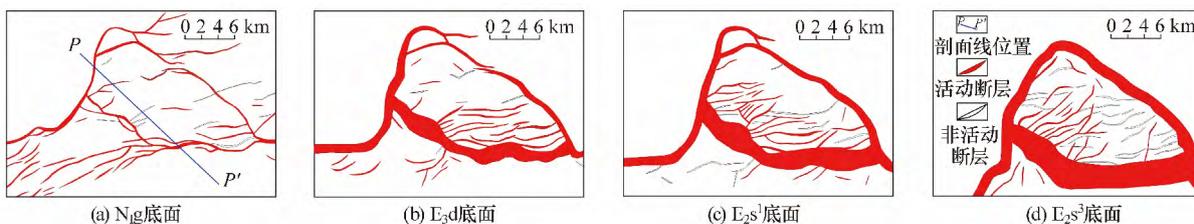


图 2 各层位底面断层走向玫瑰花图
Fig. 2 Rose diagram of fault strike on the bottom of each layer

3) 断层规模: 为分析区域应力条件的影响, 本次研究的断层延伸长度不低于 1.5 km. 除主控断层之外, 最大延伸长度可达 15.0 km, 最大垂直断距可达 1.2 km.

4) 活动期次: 通过分析各时期活动断层分布

图可以发现(图 3), 除主控断层具有长期活动的特点之外, 次级断层可以依据走向的不同划分为两个活动时期: 沙三期和沙三期后. 沙三期次级活动断层的走向主要为北东向, 而沙三期后次级活动断层的走向为近东西向和北东向, 以近东西向为主.



注: (b)~(d)图中西南庄断层与柏各庄断层因下盘剥蚀, 平面断距为示意
图 3 各层位底面活动断层分布
Fig. 3 The distribution of the active faults on the bottom of each layer

1.2 主控断层特征与演化

1) 西南庄断层和柏各庄断层

西南庄断层与柏各庄断层平面相连, 且同为研究区的控陷断层, 活动时间均可追溯到中生代末期^[14]. 因此, 其活动特征具有一定关联性.

其中, 柏各庄断层整体走向呈北西向, 倾向南西. 具体到不同位置的走向有一定差异, 局部存在近东西走向. 垂向上, 该断层从基底开始发育并断穿至地表, 揭示其长期活动的特征; 浅层断面倾角在 50°~70°之间, 上陡下缓, 呈铲式形态.

西南庄断层走向分段特征明显. 在研究区内, 断层西部走向为近东西向, 倾向向南; 断层东部走向为北东向, 倾向为南东东. 垂向上, 同样为从基

底断穿至地表, 剖面形态特征也与柏各庄断层相近.

利用沉降中心的位置可以判断西南庄断层与柏各庄断层同一时期的相对活动性, 以及同一断层不同位置的相对活动性. 由于东营期末存在区域角度不整合, 存在大量的地层剥蚀, 因此未对该时期进行分析. 研究区内沙三段与沙一段的地层等厚图(图 4)揭示, 沙三段地层沉降中心位于西南庄断层的北东走向段附近, 而沙一段沉降中心位于两条断层的东走向段附近. 说明沙三沉积时期主控断层的北东走向段构造活动强度更大; 沙一沉积时期东西走向段构造活动强度更大.

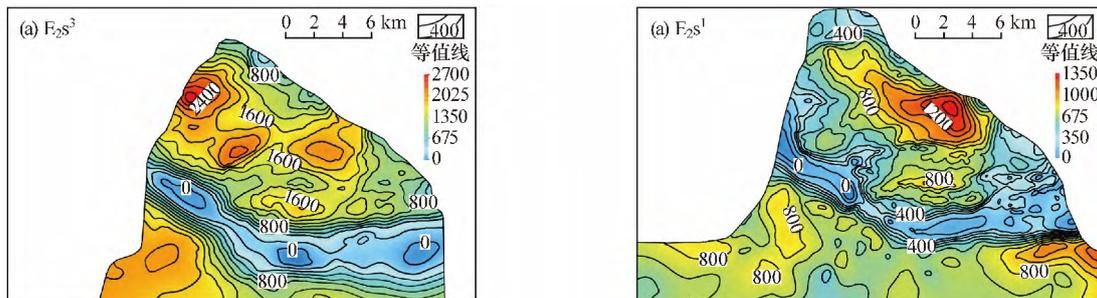


图 4 南堡凹陷北端地层厚度
Fig. 4 The stratigraphic thickness of northern Nanpu sag

2) 高柳断层

高柳断层受西南庄断层和柏各庄断层限制, 其

走向具有分段性,西段为北西向,东段为东西向,断层面南倾,倾角 $44^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间,剖面呈坡坪式形态.沙三段沉积时期活动较弱,从沙一段沉积开始活动显著增强,为主动正断层.

高柳断层发育时期判断如下:高柳断层受西南庄断层与柏各庄断层限制,因此判断高柳断层是在两条主控断层形成之后发育.其走向具有分段性,西段为北西向,东段为东西向,因此认为形成两段的应力条件与形成时期应有所不同.对沙三段底面构造特征进行分析发现,沙三期形成的北东向次级断层受高柳西段限制,因此认为高柳西段在沙三段沉积前已经发育.从地层厚度图上观察(图 4a),东段上下盘厚度大致相当,即生长指数接近 1.0.因此认为高柳断层东段在沙三期没有活动,是在沙一期与东西向的次级断层在同一应力条件(南北向伸展作用)下形成.

1.3 构造样式

本区主要发育伸展构造样式和走滑构造样式,以伸展构造样式为主.

平面上,斜交式组合样式和平行式组合各目的层普遍发育,但走向有所不同.在沙三段底面,北东走向和东西走向断层组合均有发育,且东西走向断层切割北东走向断层;而沙一段、东营组、馆陶组底面断层组合主要呈近东西走向.另外,馆陶组底面发育雁列状组合、帚状组合样式;东营组底面发育雁列状组合样式.

剖面上,发育有阶梯状、地垒、地堑、“y”形组合样式(图 5).

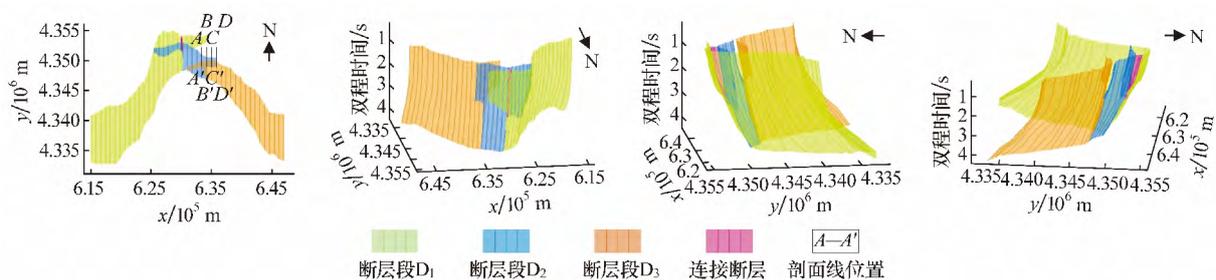


图 6 西南庄断层和柏各庄断层三维透视图

Fig. 6 Three-dimensional perspective maps of Baigezhuang fault and Xi'nanzhuang fault

如果将断层面比喻成一张纸,那么“变换生长”现象在形态上就如同这张纸被部分撕开:深部依旧相连,浅部却已经一分为二,而且走向也发生明显的变化.如图 6 所示,3 个断层段在深部连续,至浅部,断层段之间分开,分段处的走向由深部的北西向变为近东西向.

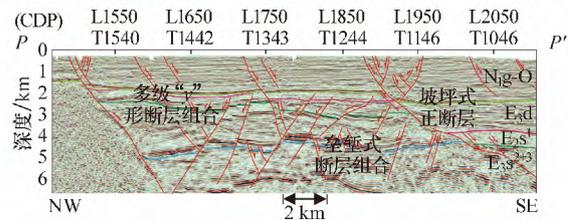


图 5 典型深度域地震剖面(剖面位置见图 3a)
Fig. 5 A typical seismic profile in depth domain

2 断层链接处“变换生长”现象

西南庄断层和柏各庄断层分别是在先存构造基础上发育而形成的.通过观察两条断层不同时期的平面形态(图 3),从东营组沉积早期开始(图 3b),柏各庄断层在平面上分为二,且分段处走向发生改变.进一步观察发现,西南庄断层和柏各庄断层的链接处也具有分段现象,只是通过调节断层相连,并从沙一段沉积早期便已发育(图 3c).笔者将这种断层向上生长时,局部分开且走向改变的现象称为“变换生长”现象.并针对该现象开展了进一步研究.

2.1 几何特征

图 6 展示了西南庄断层和柏各庄断层的空间立体形态特征.上述提及的两处断层“变换生长”现象将连续的两条主控断层分为 3 个断层段,自西向东依次标记为 D_1 , D_2 和 D_3 . D_1 代表了西南庄断层, D_2 和 D_3 代表了柏各庄断层.两条断层链接处(D_1 和 D_2 之间)发育一条调节断层.

在地震剖面上,可以观察到相邻两个断层段主次关系的变换.图 7 中,断层段 D_2 和 D_3 在“变换”中心位置(图 7b, 7c)表现为同向“y”形断层组合.但区别是,图 7b 中,主断层为 D_2 ;而图 7c 中,主断层变为 D_3 .在远离中心的两侧(图 7a, 7d), D_2 和 D_3 逐渐分开形成两条孤立的断层.

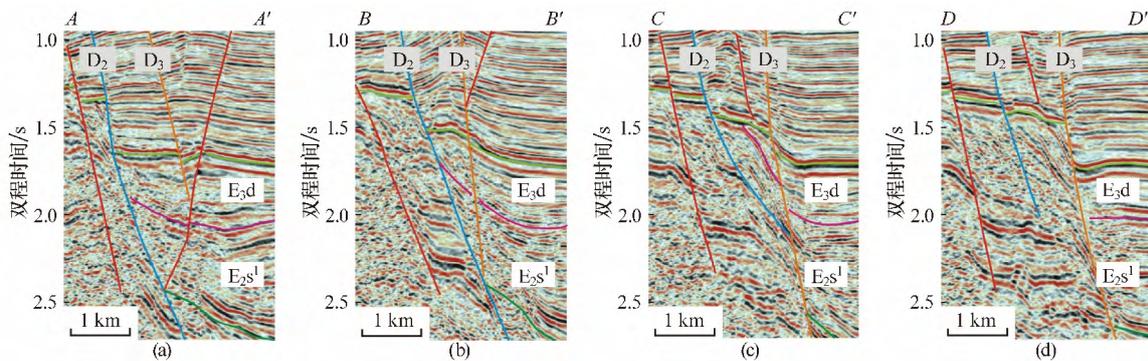


图 7 断层“变换生长”现象地震剖面(剖面位置见图 6)

Fig. 7 “Transfer growth” in fault observed by seismic profiles

2.2 演化过程

断层段 D_1 和 D_2 之间的“变换生长”现象从沙一段沉积早期开始出现,发育时期较早,即相对“年老”。断层段 D_2 和 D_3 之间的“变换生长”现象从东营组沉积早期才开始出现,发育时期较晚,即相对“年轻”。二者的区别特征主要表现为前者有断层连接,后者无断层连接。

据此笔者将该现象的演化过程分为 3 个阶段:早期——“主断层正常生长”阶段;中期——“断层局部分开、走向改变并侧向延伸”阶段;晚期——“调节断层形成”阶段。建立了断层“变换生长”模式,如图 8 所示。

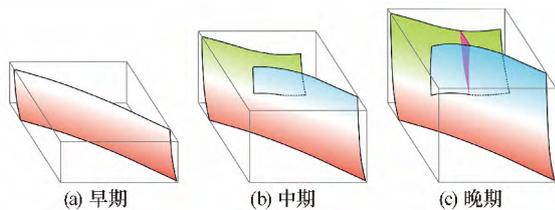


图 8 断层“变换生长”模式

Fig. 8 Mode pattern of “transfer growth” in fault

2.3 形成机理

断层的形态主要受区域应力条件、区域边界几何形态、先存构造及基底岩性的影响^[24-30]。在本区,西南庄断层和柏各庄断层本身既是构造边界又是断至基底的断层,至于岩性因素则难以使主控断层的走向产生如此大的改变。那么,导致两条主控断层出现“变换生长”现象的外部原因必然是区域应力条件的改变。

在断层“变换生长”处,断层走向变为近东西向,说明此时作用于该断层的应力条件为南北向伸展。

根部主断层的走向为北西向,那么继续活动时的破裂趋势仍应是北西向。当区域伸展方向为南北向时,二者便存在近 45° 的夹角。这一角度恰好使两方面控制因素相互牵制,即后期的破裂变形将同

时受到根部主断层与区域应力条件的共同控制。一方面成为主断层向上生长的延续,整体走向仍为北西向;另一方面又在区域应力条件作用下,局部沿近东西向破裂。“变换生长”处断层形态复杂,随着伸展应力的持续作用,地层出现不均匀错断,并产生调节断层。

该现象最早发育在西南庄断层和柏各庄断层链接处,说明该处是应力集中的地方,在变化的应力场作用下,最容易产生新的构造变形。

2.4 在构造解析中的意义

断层“变换生长”现象作为断层演化过程中的一种特殊现象,在构造解析中必然具有特殊的意义。

该现象的出现是应力体制转换的反映,并可以确定转换后的应力体制的性质与方向:性质为伸展性质,方向与“变换”处的断层走向垂直。若区域边界断层出现该现象,将直接揭示区域应力体制。为区域应力解析提供了新的思路。

在本区,西南庄断层和柏各庄断层作为区域边界断层,从沙一早期开始出现该现象,可以证明沙一早期以后的区域应力体制为南北向伸展。

3 构造成因解析

3.1 各时期应力条件分析

本次研究综合考虑了活动断层走向、主控断层活动强度的相对大小与走向的关系、以及西南庄断层和柏各庄断层“变换生长”现象,对各时期的应力条件进行分析。

1) 沙三期

沙三段底面活动断层走向主要为北东向,性质为正断层,断层组合为伸展构造样式。主控断层的北东走向部分活动强度最大。因此确定研究区在沙三期表现为北西——南东方向伸展,这与前人认识一致。

2) 沙二期

沙二段地层在本区缺失,表现为沙一段与沙三段之间存在的平行不整合,说明沙二(后)期构造活动强度减弱,导致本区沉降缓慢并接受剥蚀。文献[21]亦指出沙二期是南堡凹陷应力体制转换的过渡阶段。

3) 沙一—东营期

沙一段与东营组底面活动断层走向主要为近东西向,表现为伸展构造样式,并有一定数量的北东向(走滑)正断层和少量北西向(走滑)正断层发育。沙一时期主控断层的東西走向部分活动强度最大。

前已述及,可以形成上述构造特征的应力体制有:南北向的伸展应力体制以及北东向右旋走滑或是北西向左旋走滑应力体制。而本次研究提出柏各庄—西南庄断层的存在“变换生长”现象有力地证明了区域应力体制是南北向伸展,并非走滑。北东向(走滑)正断层是在先存断层影响下形成的。

4) 东营期后

馆陶组底面活动断层走向既有近东西向,又有北东向,东西向断层系统呈斜交式和平行式,为伸展构造样式,北东向断层系统呈雁列式和帚状,为走滑构造样式。这是由于在该时期,研究区继续受到南北向伸展应力作用,在北东向和北西向的主控断层影响下派生出走滑分量,形成走滑构造。鉴于主控断层断距较小,说明该时期应力强度减弱。

综上所述,研究区在沙三期表现为北西—南东方向伸展;沙二时期是应力体制过渡时的平静期(剥蚀期);在沙一至东营期表现为近南北向伸展,并派生出北东与北西向走滑应力;东营组沉积后期,继续受近南北向伸展应力作用,但是强度减弱。

3.2 关于南堡凹陷应力体制的分析

西南庄断层和柏各庄断层是本次研究区的主控断层,亦是整个南堡凹陷的主控断层。该断层发育的“变换生长”现象证明了从沙一期开始,南堡凹陷北端的区域应力体制为南北向伸展而非走滑,同时也证明了整个南堡凹陷的应力体制为南北向伸展而非走滑,即南北向伸展作用是形成南堡凹陷走滑构造的控制因素(因),走滑构造是被动的(果)。

4 结 论

本次研究取得以下结论:

1) 研究区断层均为正断层性质(部分兼有走滑性质),走向以北东向和东西向为主;主要发育伸展构造样式,其次为走滑构造样式。

2) 在沙三时期主控断层的北东走向部分活动强度最大,次级活动断层的走向主要为北东向。在沙一时期与东营期主控断层的東西走向部分活动强度最大,次级活动断层的走向为近东西向和北东向(以近东西向为主)。

3) 首次提出断层“变换生长”现象,并将其定义为:断层向上生长时,受斜向伸展应力控制,局部分开且走向改变的现象。该现象的出现指示应力条件发生了变化。

4) 本区西南庄断层和柏各庄断层作为主控断层,在链接处发育“变换生长”现象,发育时期为沙一段沉积早期。证实了沙一期以后的区域应力体制为南北向伸展,并非走滑体制。

5) 南堡凹陷北端在沙三期的应力体制为强烈的北西—南东方向伸展;在沙一期开始的应力体制为强烈的南北方向伸展,并派生出走滑分量,只是在东营期后强度减弱;沙二时期是应力体制过渡时的平静期(剥蚀期)。南堡凹陷的应力体制与其一致。

参考文献:

- [1] 丛良滋,周海民.南堡凹陷主动裂谷多幕拉张与油气关系[J].石油与天然气地质,1998,19(4):296-301.
CONG Liangzi, ZHOU Haimin. Polyphase pulls and aparts of active rift in Nanpu depression and their relationship with oil and gas[J]. Oil & Gas Geology, 1998,19(4):296-301.
- [2] 周海民,魏忠文,曹中宏,等.南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J].石油与天然气地质,2000,21(4):345-349.
ZHOU Haimin, WEI Zhongwen, CAO Zhonghong, et al. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag[J]. Oil and Gas Geology, 2000,21(4):345-349.
- [3] LIU X, ZHANG C. Nanpu sag of the Bohai Bay basin: A transtensional fault-termination basin[J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(6): 755-767.
- [4] 周天伟,周建勋.南堡凹陷晚新生代X型断层形成机制及其对油气运聚的控制[J].大地构造与成矿学,2008,32(1):20-27.
ZHOU Tianwei, ZHOU Jianxun. Formation mechanism of X-pattern normal faults during late Cenozoic and their impact on hydrocarbon accumulation in the Nanpu sag of Bohai Bay basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(1): 20-27.
- [5] 张军勇,唐建超,马辉,等.南堡凹陷断裂特征及对油气藏的控制作用[J].石油地球物理勘探,2011,46

- (1):134-138.
ZHANG Junyong, TANG Jianchao, MA Hui, et al. Fault characteristics in Nanpu sag and their control of reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(1):134-138.
- [6] 范柏江,刘成林,柳广弟,等.南堡凹陷断裂系统形成机制及构造演化研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2010,25(2):13-17.
FAN Baijiang, LIU Chenglin, LIU Guangdi, et al. Forming mechanism of the fault system and structural evolution history of Nanpu sag[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition), 2010, 25(2):13-17.
- [7] 孙永河,赵博,董月霞,等.南堡凹陷断裂对油气聚集成藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2013,34(4):540-549.
SUN Yonghe, ZHAO Bo, DONG Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4):540-549.
- [8] 曹宇.南堡凹陷断裂系统类型及其控藏作用[J].大庆石油地质与开发,2016,35(4):22-27.
CAO Yu. Fault system types and controlling actions on the reservoir formation in Nanpu sag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(4):22-27.
- [9] ZHANG C, LIU X, REN J. Tectonic-Hydrocarbon accumulation of Laoyemiao region in the Nanpu sag, Bohai Bay basin[J]. Acta Geologica Sinica(English edition), 2009, 83(5):951-961.
- [10] HIGGINS R I, HARRIS L B. The effect of cover composition on extensional faulting above re-activated basement faults: results from analogue modelling [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(1):89-98.
- [11] 祁鹏,任建业,卢刚臣,等.渤海湾盆地黄骅拗陷中北区新生代幕式沉降过程[J].地球科学(中国地质大学学报),2010,35(6):1041-1052.
QI Peng, REN Jianye, LU Gangchen, et al. Cenozoic episodic subsidence in the middle and north part of Huanghua depression, Bohai Bay basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2010, 35(6):1041-1052.
- [12] 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.
- [13] 刘晓文,施尚明,何春波,等.辽河拗陷黄金带油田构造变形特征及控藏作用[J].中国矿业大学学报,2016,45(3):562-567.
LIU Xiaowen, SHI Shangming, HE Chunbo, et al. Structural deformation features and its control on hydrocarbon accumulation in Huangjindai oilfield, Liaohe depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3):562-567.
- [14] 董月霞,汪泽成,郑红菊,等.走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制[J].石油勘探与开发,2008,35(4):424-430.
DONG Yuexia, WANG Zengcheng, ZHENG Hongju, et al. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4):424-430.
- [15] 马乾,张军勇,李建林,等.南堡凹陷扭动构造特征及其对油气成藏的控制作用[J].大地构造与成矿学,2011,35(2):183-189.
MA Qian, ZHANG Junyong, LI Jianlin, et al. Characteristics of the shear structures in Nanpu sag and their controls on hydrocarbon accumulation[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2):183-189.
- [16] 刘晓峰,董月霞,王华.渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造[J].地球科学(中国地质大学学报),2010,35(6):1029-1034.
LIU Xiaofeng, DONG Yuexia, WANG Hua. Antiformal negative flower structure in Nanpu sag, Bohai Bay basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2010, 35(6):1029-1034.
- [17] 张翠梅,刘晓峰,南堡凹陷边界断层及成盆机制[J].石油学报,2012,33(4):581-587.
ZHANG Cuimei, LIU Xiaofeng. The boundary faults and basin-formation mechanism of Nanpu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4):581-587.
- [18] 胡明,姜宏军,付广,等.似花状断裂密集带富油差异性:以渤海湾盆地南堡凹陷中浅层为例[J].石油与天然气地质,2016,37(4):528-537.
HU Ming, JIANG Hongjun, FU Guang, et al. Characterization of petroleum pooling patterns in dense flower-like fault belts: Taking the middle and shallow layers in Nanpu sag of Bohai Bay basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4):528-537.
- [19] 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. Cenozoic tectonic

- deformation mechanism in Bohai Bay basin: physical simulation and discussion[J]. *Science in China (Ser D)*, 2006, 36(6): 507-519.
- [20] 周天伟, 周建勋, 董月霞, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(1): 12-17.
ZHOU Tianwei, ZHOU Jianxun, DONG Yuexia, et al. Formation mechanism of Cenozoic fault system of Nanpu sag in Bohai Bay basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(1): 12-17.
- [21] 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析[J]. *地质学报*, 2013, 87(11): 1647-1661.
TONG Hengmao, ZHAO Baoyin, CAO Zhe, et al. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu sag, Bohai Bay basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(11): 1647-1661.
- [22] 梁杰, 于福生, 刘国玺, 等. 南堡凹陷分期异向伸展变形叠加特征: 来自砂箱物理模拟实验的启示[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 139-148.
LIANG Jie, YU Fusheng, LIU Guoxi, et al. Deformation superimposition characteristics resulting from stretching direction changes in Nanpu sag: Insight from physical modeling[J]. *Geoscience*, 2014, 28(1): 139-148.
- [23] ZHANG J, JIANG Z, GIERLOWSKI-KORDESCH E, et al. A double-cycle lake basin formed in extensional to transtensional setting: The Paleogene Nanpusag, Bohai Bay basin, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 349: 15-32.
- [24] 周建勋, 漆家福, 童亨茂. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 33.
ZHOU Jianxun, QI Jiafu, TONG Hengmao. *Sandbox simulation experiment method in basin structure research*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 33.
- [25] BONINI L, BASILI R, TOSCANI G, et al. The role of pre-existing discontinuities in the development of extensional faults: An analog modeling perspective[J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 74: 145-158.
- [26] BONINI L, BASILI R, TOSCANI G, et al. The effects of pre-existing discontinuities on the surface expression of normal faults: Insights from wet-clay analog modeling[J]. *Tectonophysics*, 2016, 684: 157-175.
- [27] WITHJACK M O, JAMISON W R. Deformation produced by oblique rifting[J]. *Tectonophysics*, 1986, 126(2): 99-124.
- [28] ROCHE V, HOMBERG C, ROCHER M. Fault nucleation, restriction, and aspect ratio in layered sections: Quantification of the strength and stiffness roles using numerical modeling[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2013, 118(8): 4446-4460.
- [29] TVEDT A B M, ROTEVATN A, JACKSON C A L, et al. Growth of normal faults in multilayer sequences: a 3D seismic case study from the Egersund basin, Norwegian North Sea[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 55: 1-20.
- [30] TONG H, KOYI H, HUANG S, et al. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models[J]. *Tectonophysics*, 2014, 626: 197-212.

(责任编辑 姚志昌)