

doi: 10.12029/gc20160413

谢昭涵, 鲜地, 罗静爽, 等. 贝尔凹陷苏德尔特构造带的形成与演化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1266–1279.

Xie Zhaohan, Xian Di, Luo Jingshuang, et al. The formation and evolution of Sudeerte tectonic belt in Beier depression[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1266–1279(in Chinese with English abstract).

## 贝尔凹陷苏德尔特构造带的形成与演化

谢昭涵<sup>1,2,3</sup> 鲜地<sup>4</sup> 罗静爽<sup>5</sup> 杨宝泉<sup>4</sup> 乐靖<sup>4</sup> 王少波<sup>6</sup>

(1. 东北石油大学 CNPC 断裂控藏研究室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学“非常规油气成藏与开发”省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318; 3. 黑龙江省科技创新团队“断裂变形、封闭性及流体运移”, 黑龙江 大庆 163318; 中海油研究院总院, 北京 100028; 5. 大庆油田有限责任公司第二采油厂, 黑龙江 大庆 163256; 6. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280)

**摘要:** 苏德尔特构造带是海拉尔盆地贝尔凹陷的重要油气聚集带之一。使用平衡剖面技术和基于斜向剪切模型的人字形桁架法对苏德尔特构造带及其两侧的贝西断陷和贝中断陷进行了详细的构造几何学和运动学解析, 认为在南屯期近 SN 向伸展, 形成近 EW 向断陷盆地群之后, 又叠加了大磨拐河组早期的短时间 NW 向伸展, 以及此后的坳陷沉降, 才形成了苏德尔特构造带特殊的构造样式。贝中断陷的东侧边界断层是整个贝尔凹陷在大磨拐河组早期伸展的主干边界断层, 并且断层面具有坡坪式特征。苏德尔特构造带是发育于第一阶断坪上部的“滚动背斜”, 是重力和边界断层几何形态共同控制的结果, 形成机制属于重力影响下的横弯褶皱作用, 而非侧向挤压引起的纵弯褶皱作用。

**关键词:** 贝尔凹陷; 苏德尔特构造带; 构造演化; 坡坪式断层; 滚动背斜

**中图分类号:** P542.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016)04-1266-14

### The formation and evolution of Sudeerte tectonic belt in Beier depression

XIE Zhao-han<sup>1,2,3</sup>, XIAN Di<sup>4</sup>, LUO Jing-shuang<sup>5</sup>, YANG Bao-quan<sup>4</sup>, LE Jing<sup>4</sup>, WANG Shao-bo<sup>6</sup>

(1. Laboratory of CNPC Fault Controlling Reservoir, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. The State Key Laboratory Base of Unconventional Oil and Gas Accumulation and Exploitation, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 3. Science and Technology Innovation Team in Heilongjiang Province “fault Deformation, Sealing and Fluid Migration”, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 4. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 5. NO.2 Oil production Plant of Daqing oilfield Company Ltd., Daqing 163256, Heilongjiang, China; 6. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

**收稿日期:** 2015-05-05; **改回日期:** 2015-07-20

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研项目“海拉尔-塔木察格盆地被动裂谷盆地成因机制研究”(20112322120002)、“断层变形、封闭性及与流体运移”科技创新团队(已批复, 批号暂无)、东北石油大学研究生创新科研项目“贝尔凹陷断裂演化特征及控藏作用”(YJSCX2015-004NEPU)资助。

**作者简介:** 谢昭涵, 男, 1988 年生, 博士生, 地质资源与地质工程专业, 从事盆地构造演化及控藏作用研究; E-mail: 569430279@qq.com。

**Abstract:** The Sudeerte tectonic belt is one of the most important hydrocarbon accumulations in Beier depression of Hailar basin. From the detailed structural geometry and kinematics analysis of Sudeerte tectonic belt and peripheral Beixi subdepression and Beizhong subdepression using balanced section technique and herringbone truss method based on inclined shear model, the authors detected that the special structure style was caused by a series of extensions: the direction of extension in Nantun Formation was nearly NW-striking, forming an EW-trending rift basin group, then the direction changed to northwest in a short period of early Damoguaihe Formation stretching and continued thermal depression to the present. The boundary faults in the east of Beizhong subdepression were the major boundary faults of Beier depression in the extension of early Damoguaihe Formation, and show a ramp-flat listric feature. Sudeerte tectonic belt is "roll-over anticline" formed in the upper part of the first fault floor due to the combined effect of gravity and geometry of boundary fault. It is thus held that the mechanism of anticline type of Sudeerte tectonic belt is bending fold rather than buckle fold.

**Key words:** Beier depression; Sudeerte tectonic belt; tectonic evolution; ramp-flat listric fault; roll-over anticline

**About the first author:** XIE Zhao-han, male, born in 1988, doctor candidate, majors in geological resources and geological engineering, engages in research on basin tectonics and reservoir controlling; E-mail: 569430279@qq.com.

**Fund support:** Supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20112322120002.); Graduate Student Innovation Research Projects of Northeast Petroleum University (No. YJSCX2015-004NEPU).

传统认为褶皱通常是挤压或走滑作用形成的,受控于伸展作用的褶皱相对研究较少,因此伸展盆地中存在的褶皱经常被认为是短时间的区域性挤压或走滑造成的,这也被作为盆地构造演化过程中挤压反转事件的证据。近年来,随着盆地构造研究的不断进展,国外对伸展褶皱的研究也不断深入,一些学者分别在苏伊士湾<sup>[1]</sup>、北海盆地<sup>[2]</sup>、墨西哥湾盆地<sup>[3]</sup>、红海地区<sup>[4]</sup>和东非裂谷<sup>[5]</sup>等地区对伸展褶皱进行了研究,伸展环境下能够形成褶皱已成为普遍的认识,且成因和背景多样,而国内对这方面的研究还较为薄弱<sup>[6-8]</sup>。

多年来,对海拉尔盆地构造演化的认识并不统一。2005年之前,张晓东<sup>[9]</sup>、罗群<sup>[10]</sup>、陈守田<sup>[11]</sup>等将海拉尔盆地的演化大致分为初始伸展、断陷强烈伸展、拗陷快速沉降和盆地萎缩4个阶段,未对盆地内的一些大规模褶皱进行充分解释;2005年之后,一些学者开始对盆地内的褶皱进行研究,刘志宏<sup>[12-15]</sup>、柳行军等<sup>[12,14]</sup>提出海拉尔盆地存在大量挤压构造,认为乌拉逊—贝尔凹陷在长期伸展演化过程中经历两次挤压作用,分别为早白垩世大磨拐河期—伊敏期早期和伊敏期末期,认为第一期的挤压强度很大,具有造山带构造特征,局部受剥蚀,而构造低部位接受沉积,第二期挤压强度小得多,盆地整体抬升,形成大范围的削截不整合<sup>[16,17]</sup>。对于第二期挤压的认识普遍不存在疑问,但对于第一期挤压的构造解析存在很多问题。从盆地构造形态上看,仅贝

尔凹陷和乌拉逊凹陷内局部形成了大规模的褶皱,如苏德尔特构造带等,但苏德尔特构造带并不显示任何逆断层,仅从褶皱、削截和超覆这些构造特征来断定第一期挤压的存在是有待商榷的,实际上,在伸展背景下同样能够形成这些构造。

## 1 地质概况

海拉尔盆地位于内蒙古自治区北部呼伦贝尔盟境内,大兴安岭西侧,是一个“断拗”叠合型盆地,盆地构造演化经历了裂陷期—断拗转化期—拗陷期3个时期<sup>[18]</sup>(图1)。贝尔凹陷是海拉尔盆地中部断陷带内最南端的一个二级构造单元,苏德尔特构造带位于贝尔凹陷西南部,贝西断陷带和贝中断陷带之间,NE走向,由南屯组、布达特群以及更早的古生界基底构成的一个背斜式构造(图2)。贝尔凹陷主要经历三大演化阶段,分别为铜钵庙组和南屯组对应的裂陷阶段、大磨拐河组对应的断—拗转化阶段,以及伊敏组和青元岗组对应的拗陷阶段<sup>[19]</sup>。贝尔凹陷发育两套断裂系统(图2),以南屯组顶部T<sub>22</sub>反射层为界,T<sub>22</sub>以下为裂陷期形成的下部断层系,为对倾或背倾或多米诺式的控陷正断层,走向多为NEE向,T<sub>22</sub>以上为断拗转化期和拗陷期形成的上部断层系,规模和断距都相对较小,走向存在NEE向和NW向两个优势方向,由于大磨拐河组塑性泥岩的存在,两套断裂系统多数均终止于大磨拐河组内。

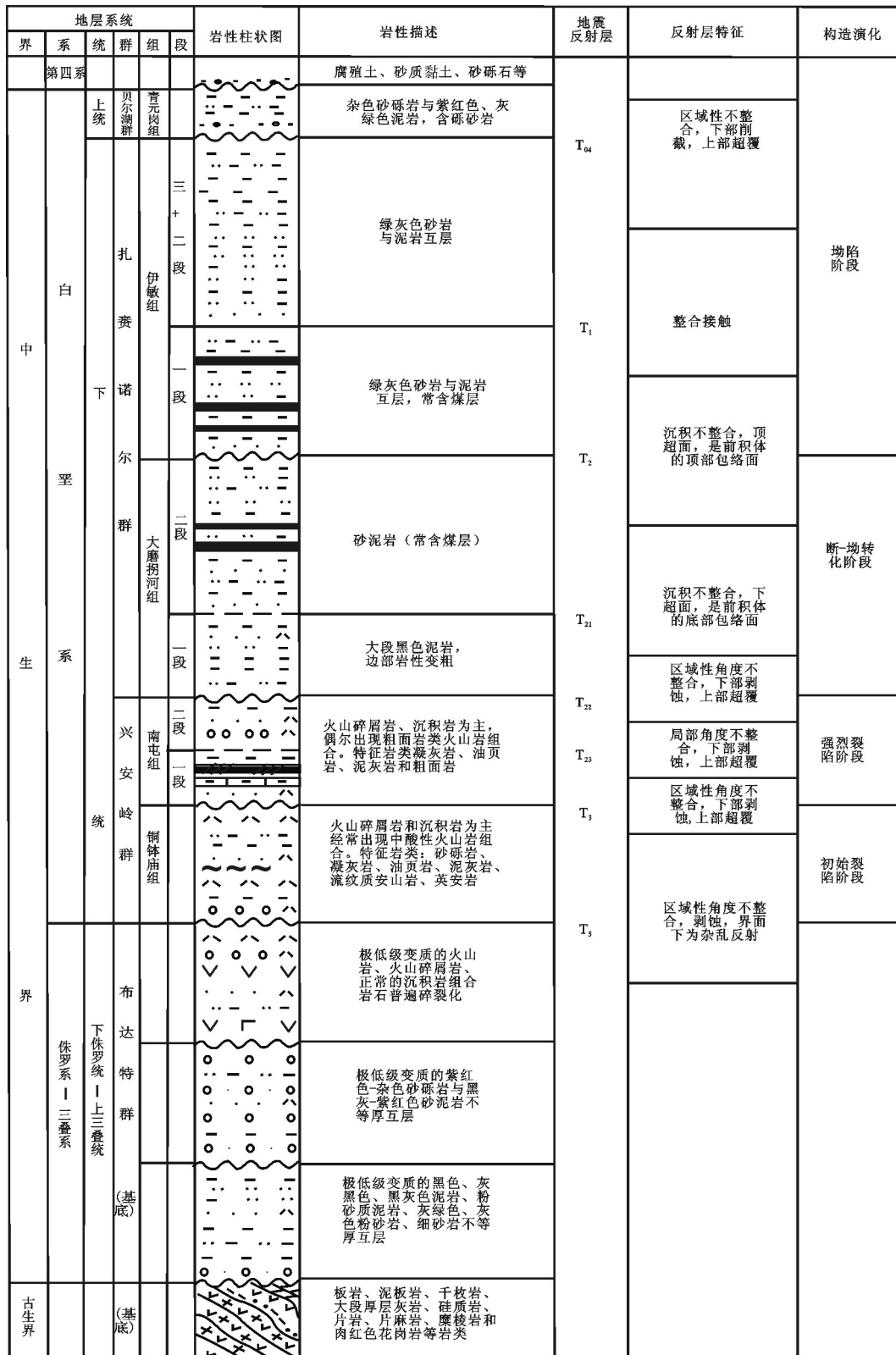


图1 贝尔凹陷地层综合柱状图  
Fig.1 Comprehensive columnar section of Beier Depression

前人的研究普遍认为苏德尔特构造带是侧向挤压作用形成的背斜构造,于南屯组沉积时期受右旋张扭作用形成阶梯式断层,在南屯组末期—大磨拐河组初期遭受一次北西—南东向的反转挤压隆升,造成苏德尔特构造带抬升被剥蚀,形成南屯组顶部(T<sub>22</sub>反射层)区域性的不整合,此后接受大磨拐河组沉积,深层构造定型<sup>[20-23]</sup>。但实际上苏德尔特构造带除形成局部隆起之外,并不存在任何逆冲断层或逆冲作用控制的褶皱,即没有明显证据支持苏德尔特构造带是局部反转作用形成的这一观点。本文根据构造平衡原理,对苏德尔特构造带及其两侧断陷,进行了详细的构造几何学、运动学解析,认为贝中断陷带的边界断层是坡坪式正断层,形成于

南一段沉积时期,苏德尔特构造带是该坡坪式正断上层上盘的大型“滚动背斜”,是在“横弯褶皱”作用下形成的背斜式褶皱,受到南屯组末期区域性剥蚀而形成的独特构造。

## 2 苏德尔特构造带及其邻区构造样式

苏德尔特构造带是一个被断层复杂化的背斜构造,其东侧的贝中断陷带在剖面上具有地堑特征,贝中断陷带东侧受两条分段侧列的主干边界断裂控制,主要在南屯期活动,显示了对南屯组的沉积控制作用,西侧靠近苏德尔特构造带存在1~2条较大规模的断裂,但活动时间较长,对南屯组有控

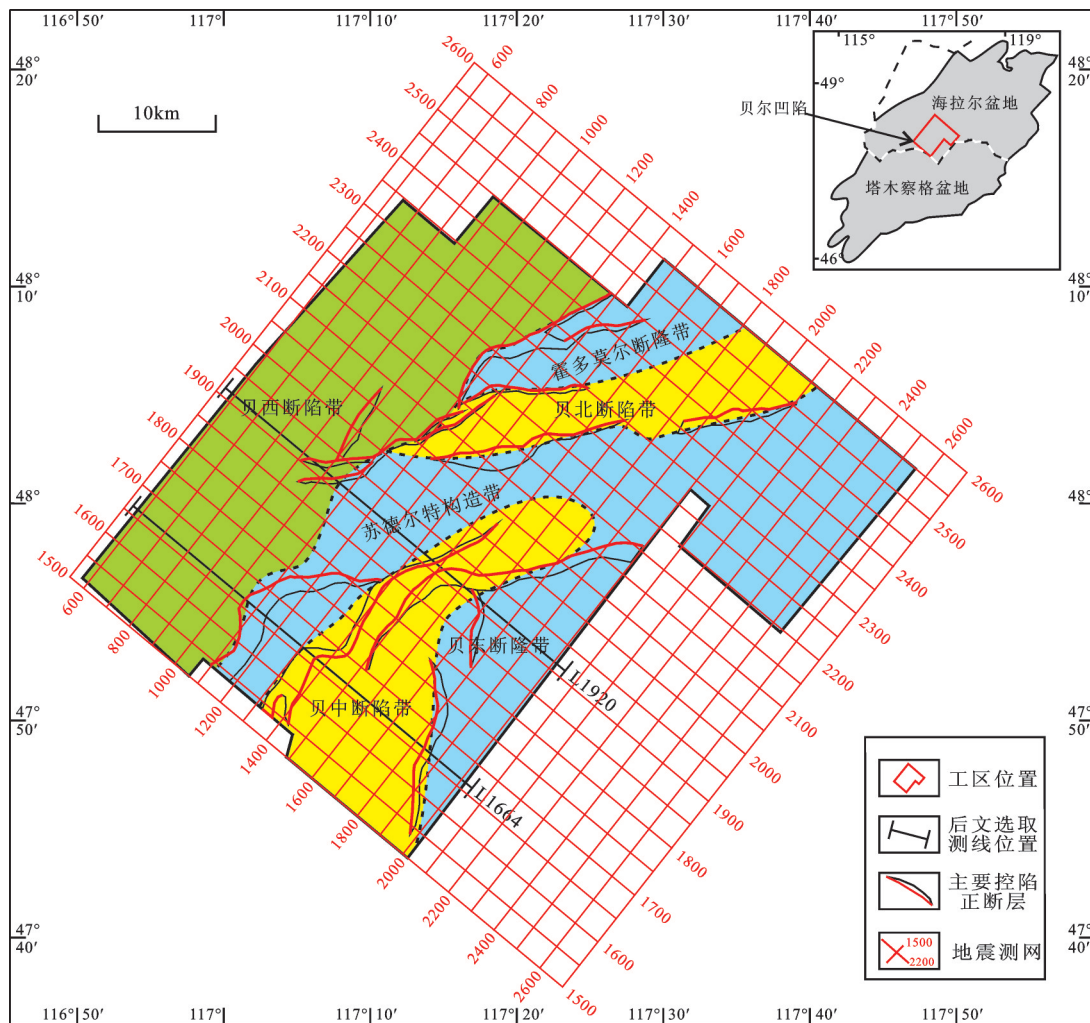


图2 贝尔凹陷深层构造纲要图  
Fig.2 Tectonic outline map of Beier Depression

制作用,但弱于东侧边界断层(图3),贝中断陷带基底面总体平缓,深度变化不大,仅在苏德尔特构造带大幅度升高。西侧的贝西断陷带内,断裂呈现“多米诺”式正断层组合,深部断裂都为NNW倾向,贝西断陷带基底面倾角较大,与断层对倾,显现断块旋转的特征。切穿基底的断裂主要发育于苏德尔特构造带两侧的次凹中,构造带内部的基底断裂较少,在南部的L1664测线,苏德尔特构造带仅有两条边界断裂切穿基底,随着构造带向北延伸,范围变大,切穿构造带基底的断裂数量增加,但规模都较小,未构成凸起和凹陷的边界。苏德尔特构造带两侧凹陷内充填了很厚的大磨拐河组一段(大一段)和伊敏组,最大厚度超过3000 m,而苏德尔特构造带的浅部地层厚度仅为500~1000 m。南屯组明显从两侧凹陷向构造带凸起变厚,而后期的的大磨拐河组及以上地层向构造带方向逐渐变薄,其中大一段在凹陷内部向构造带方向就已经尖灭,构造带上部缺失南屯组一段(南一段)和大一段。在平面上,背斜式的苏德尔特构造带走向NE-NEE向,与贝西断陷的边界断层走向基本一致,由南向北逐渐变平缓并过渡至其他构造。

图3显示了苏德尔特构造带的构造样式的上述宏观特征,还具有以下5个特点:

(1)贝中断陷东西两侧各存在一条主干边界断层,产状存在一定的上陡下缓趋势;而贝西断陷仅在东侧存在一条主干边界断层,内部存在几条切穿基底的断层,但西侧基底的整体趋势表现为宽缓的斜坡,并不存在洼槽的边界断层。

(2)在贝西断陷、苏德尔特构造带和贝中断陷内部都发育一系列的次级基底正断层和盖层正断层,其中贝西断陷中发育的断层数量相对较多规模也较大。

(3)贝西断陷的裂陷期地层(南屯组)具有多个沉积中心,都在断层附近,多条基底断层均具有控陷作用,但断层下盘也有地层沉积,具有一定的拗陷特征,贝西断陷的深部地层具有“碟状”沉积特征。

(4)贝中断陷的南屯组沉积中心在东侧的边界断层附近,西侧的边界断层实际上控陷强度很弱,晚期活动产生较大的断距。一个较为特殊的现象,是南二段在贝中断陷的西侧倾角很大,在贝中断陷西侧边界断层附近具有强烈的“牵引”特征。

(5)贝西断陷内的大磨拐河组一段,向构造带方向和西侧远端同时尖灭,超覆于南屯组之上,基本不受断层控制。贝中断陷内的大一段表现为东断西超的“半地堑”特征,地层厚度中心受控于东侧的边界断层。大一段下部的南屯组未被剥蚀,而在大一段未覆盖的区域南屯组均受到剥蚀形成削截,此外大一段与大二段整合接触,证明南二段地层被剥蚀发生于大一段沉积时期。

图4为贝尔凹陷L1920测线的剖面图,与L1664测线的规律类似,但相比具有以下差异:①L1920剖面发育大范围的潜山,但与L1664剖面中部简单的地垒构造不同,潜山被大量断层切割复杂化。②L1664剖面中部地垒在南屯组沉积时期位于控陷断层下盘,因此未沉积南屯组,而L1920剖面的中部在南屯期强烈活动,形成多米诺式断层,控制了南屯

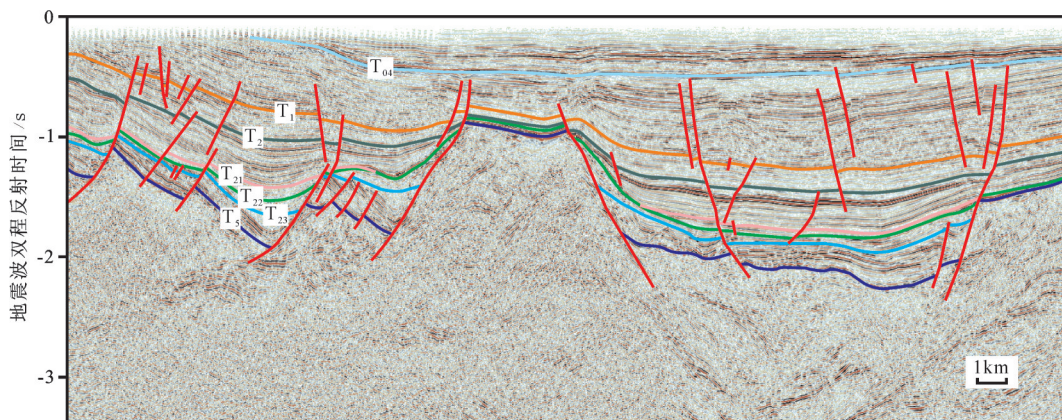


图3 贝尔凹陷L1664测线剖面图(测线位置见图2)

Fig.3 Section across the seismic line of L1664 in Beier Depression (the location of seismic line is indicated in Fig. 2)

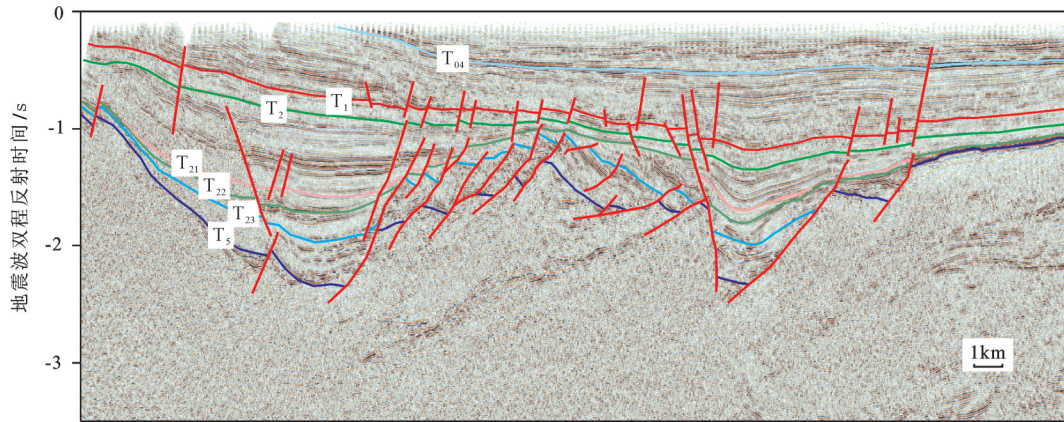


图4 贝尔凹陷L1920测线剖面图(测线位置见图2)

Fig.4 Section across the seismic line of L1920 in Beier Depression (the location of seismic line is indicated in Fig.2)

组沉积。③两条测线的 $T_{22}$ 反射层都显示削截角度不整合,地层遭到大量剥蚀,显示了南屯组沉积后的地层有局部的相对抬升,但由于剥蚀区域的地层沉积展布有差异,导致L1664剖面被剥蚀的是基底地层,而L1920剖面是南二段被剥蚀。

### 3 贝中断陷边界断层的深部产状趋势

贝中断陷的边界断层是海拉尔盆地中部断陷带的主干边界断层之一,控制整个中部断陷带的构造演化和地层沉积。主干边界断层的断面形态直接影响其上盘地层的沉积,控制盆地(或凹陷、洼陷)的结构形态。但受限于地震数据,并不能直接观察到主干边界断裂的深部形态。前人建立了多种模型利用盆地形态来确定主干边界断层形态,包括滑动线(slip line)模型、斜向剪切(inclined shear)模型、恒定位移(constant displacement)模型、恒定水平断距(constant heave)模型和恒定地层长度(constant bed length)模型等<sup>[24-30]</sup>。本文采用断层上盘的斜向剪切模型图解法确定贝中断陷两条主干边界断层的深部产状,通常剪切角范围为 $\alpha=20\sim 40^\circ$ <sup>[31]</sup>,经过多次不同剪切角的实验,在本工区当剪切角为 $30^\circ$ 时,预测结果最符合浅部已知的断层产状。由于贝尔凹陷具有“下断上坳”的结构,边界断层在坳陷期基本不再活动,坳陷期地层并不受断层控制,因此,为消除后期构造运动和地层沉积的影响,先将剖面进行时深转换,使用平衡剖面技术,将盆地的剖面恢复至南屯组沉积后,利用地震反射轴

的趋势外推恢复剥蚀量,再使用人字形桁架法进行图解分析<sup>[32-37]</sup>。图解结果(图5-a、b,图5-b中构造带上部的地层被大量断层切割复杂化,因此使用一条趋势线代表构造带上部的地层)可以看出,贝中断陷的两条边界断层均呈现坡坪式断层特征:第一阶断坡延伸至7~8 km深度后,变为低角度的断坪,此后再变为高角度的断坡向深部延伸并再次拆离,但由于地震数据范围有限,无法进一步预测出第二级断坪的拆离面深度。

### 4 苏德尔特构造带的形成机制

伸展盆地的几何形态在很大程度上受控于主干边界断层的产状,主干边界断层和上盘中次级断裂构成了伸展连锁断层系统,伸展盆地的形态就由伸展连锁断层系统决定<sup>[38]</sup>。砂箱物理模拟和实际地质资料都显示,铲式正断层和坡坪式正断层控制的连锁断层系统有明显的差异。如图6所示,简单的铲式正断层上盘形成半地堑式的断陷,断陷直接发育在断层旁侧,断陷地层从断陷远端向边界断层逐渐增厚,厚度中心受控于边界断层;坡坪式断层上盘在主干边界断层旁侧发育半地堑,中部形成一个背斜式凸起,远端形成碟状凹陷,半地堑的沉积特征与铲式正断层模式类似,地层沉积受边界断层控制,背斜式凸起发育于断坪附近,略远离边界断裂方向,相当于一个滚动背斜,在伸展量大的时候背斜顶部形成垮塌“地堑”<sup>[39]</sup>,远端碟状凹陷发育于第二级断坡的上部,被前人称为断坡向斜(ramp syncline)<sup>[38, 39]</sup>,沉积中心通常不受控于断层,具有坳

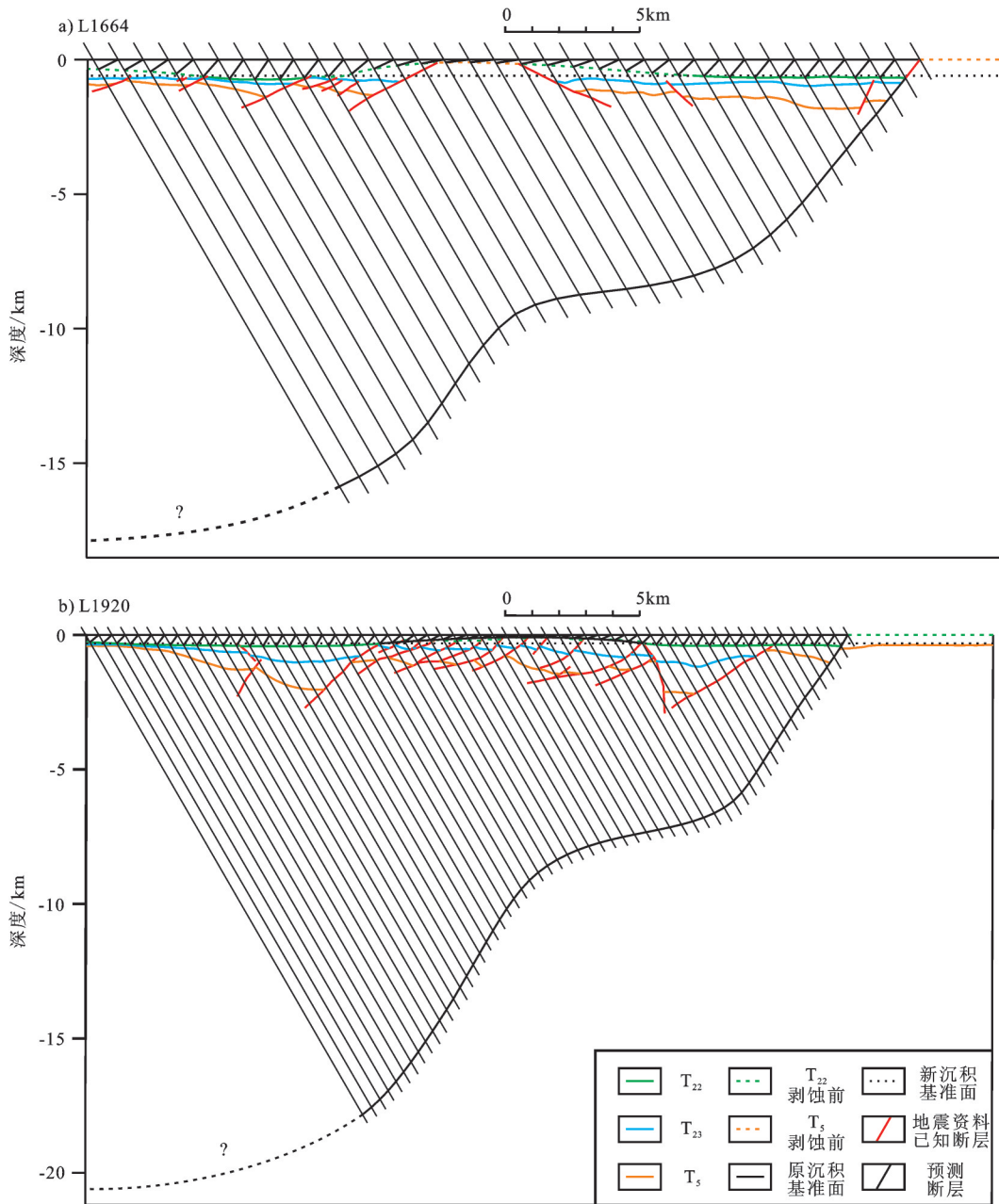


图5 桁架法确定主干边界断层深部形态  
Fig.5 Major boundary fault trajectory as predicted by Chevron construction

陷特征。当断坡向斜被主干边界断层上盘的调节性断层复杂化时,也可能表现为类似半地堑或地堑特征<sup>[38]</sup>。

贝中断陷东侧的边界断层以坡坪式断层的形式在中地壳中拆离滑脱,其他的伸展断层都发育在其上盘断块中,包括基底断层、基底次级断层和盖层断层等,共同形成了贝尔凹陷的伸展连锁断层系

统,控制贝尔凹陷的形成与演化。背斜式的苏德尔特构造带实际上是这个坡坪式断层上盘的“滚动背斜”,位于断坪附近,而贝西断陷对应的则是第二级断坡上部的“断坡向斜”,因此贝西断陷主要表现为碟形沉积特征,被几条基底断裂切割并复杂化。

主干边界断层的上盘断块因重力作用而发生下降、破裂和褶皱变形,从而产生伸展位移。

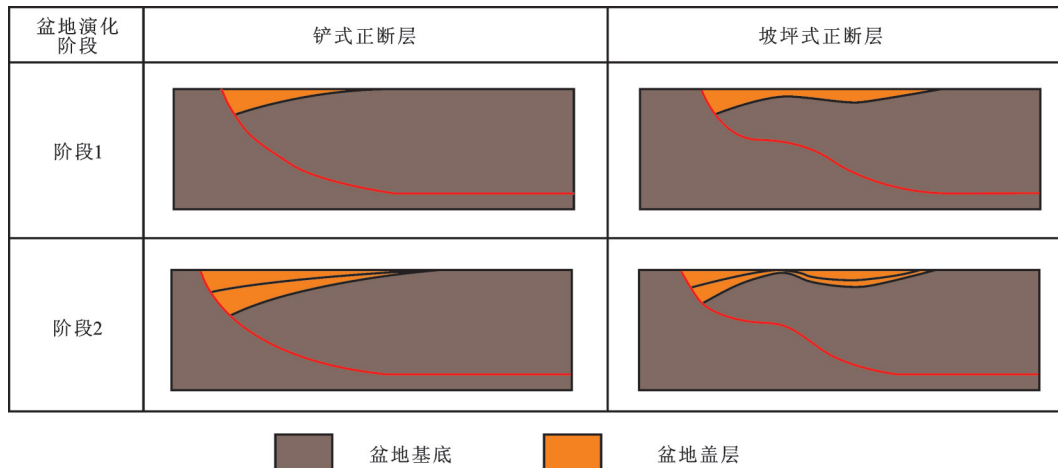


图6 铲式正断层和坡坪式正断层上盘沉积凹陷的理想演化模式

Fig.6 Conceptual diagram showing the evolution of the sedimentary sags in the hanging-walls of listric and ramp-flat normal faults

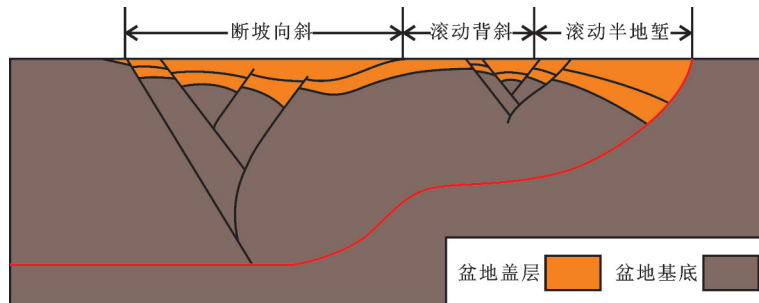


图7 坡坪式断层上盘发育特征的砂箱模拟结果<sup>[39]</sup>

Fig.7 Sand-box model showing evolution of the sedimentary sags hanging-wall of ramp-flat normal faults<sup>[39]</sup>

McClay et al.<sup>[39]</sup>曾通过砂箱物理模拟实验研究了不同产状主干边界断层上盘变形的特征,证实主干边界断层的几何形态是其上盘断块运动和盆地形成规律的主控因素。贝中断陷的东侧边界断层是盆地的主干边界断层,其西侧的贝中、贝西断陷和苏德尔特构造带共同作为断层上盘,相对东侧的基底隆起作水平伸展运动。因此贝中断陷的东侧边界断层形态和运动特征控制了整个上盘的构造演化。背斜式的苏德尔特构造带是坡坪式边界断层上盘下滑过程中形成的“滚动背斜”,属于“横弯褶皱”,并非前人认为的水平挤压反转引起的“纵弯褶皱”,地震剖面上观察不到压性构造,也否定了纵弯褶皱机制的观点(图3~图4)。同时在滚动背斜两侧分别形成半地堑和碟状洼陷,构成了同一时期、相同区域应力作用下,背斜两侧迥异的盆地形态。

## 5 苏德尔特构造带的演化过程

盆地的构造样式和地层沉积特征记录了盆地的构造演化。本文基于构造平衡原理,使用回剥方法和2Dmove软件恢复盆地的构造演化和地层沉积特征(图8~图9)。

从地层沉积特征和断层分布来看,苏德尔特构造带所在的贝尔凹陷演化主要分为三大阶段,即南屯期对应的断陷阶段、大磨拐河期对应的断拗转化阶段和伊敏期至现今对应的拗陷阶段。

南屯期贝尔凹陷受到近S-N向拉张,形成多条近E-W向的控陷正断层,贝西断陷形成半地堑,贝中断陷受控于对倾的断层形成地堑,这些地堑和半地堑的走向都为E-W向。南屯期的控陷正断层还未形成坡坪式特征,形成典型的小型断陷盆地群,



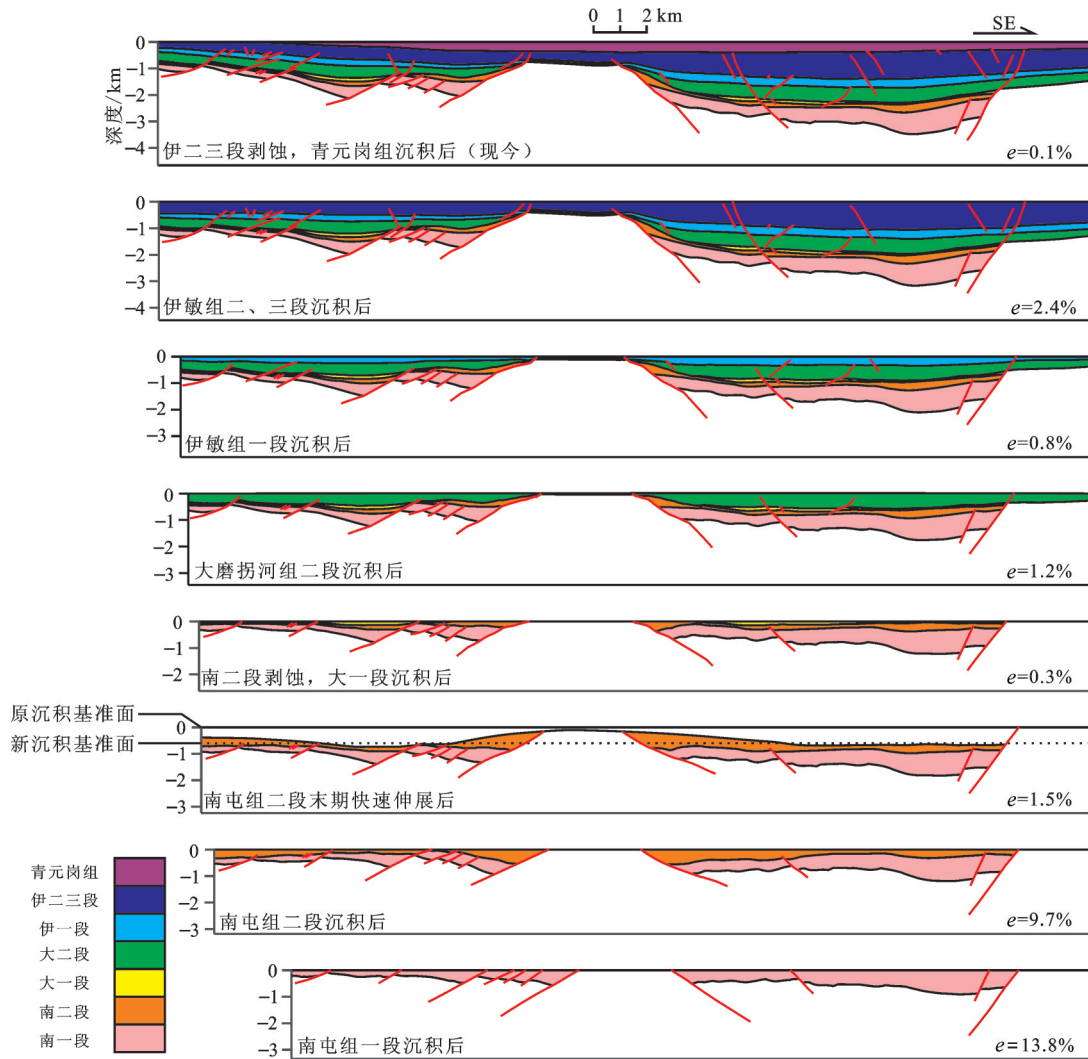


图8 贝尔凹陷L1664测线构造演化剖面( $e$ 为伸展率)

Fig.8 Tectonic evolution sections across the seismic line of L1664 in Beier Depression ( $e$  is extension ratio)

而苏德尔特构造带中部南屯组厚度较大,而南部未沉积南屯组,这为后期的构造演化差异奠定了基础。

大磨拐河期贝尔凹陷NW向伸展,但伸展作用已经减弱,此时盆地抬升沉积基准面下降,大一段沉积范围急剧减小。申家年(2012)提出:贝尔凹陷临区的乌尔逊凹陷在大磨拐河期古地温相对南屯期是提高的<sup>[40]</sup>,并且在海拉尔盆地南屯期与大磨拐河期之间还发育一期伊列克得组火山岩<sup>[41]</sup>,主要为富钾的玄武岩类,证明为大陆裂谷、地幔柱或热点背景<sup>[42]</sup>,虽然伊列克得组发育于海拉尔盆地其他区域,在海拉尔盆地中部断陷带未发育,但也造成整个海拉尔盆地在大磨拐河期的古地温是相对升高的。地温升高造成断层形成更浅的拆离面,断陷东

侧的边界断层演化为坡坪式断层。两条坡坪式断层很好地解释了大一段沉积时期的构造演化:坡坪式断层造成苏德尔特构造带基本保持不动而两侧下降,苏德尔特构造带位于断坪上部形成背斜,而贝西断陷带和贝中断陷带的下部分别为坡坪式断层的两级断坡,分别形成断坡向斜和半地堑。大一段沉积时期的盆地沉积特征是高处剥蚀与低处沉积同时发生,包括主干边界断层的下盘基底也被剥蚀,从而导致现今视断距小于真实断距,掩盖了主干边界断层的真实断距,贝西断陷内大一段在东西两侧上超,而贝中断陷内大一段仅在西侧上超,东侧发育边界断层,控制了大一段沉积,具有半地堑特征(图8~图9)。坡坪式断层仅有两条,发育于贝

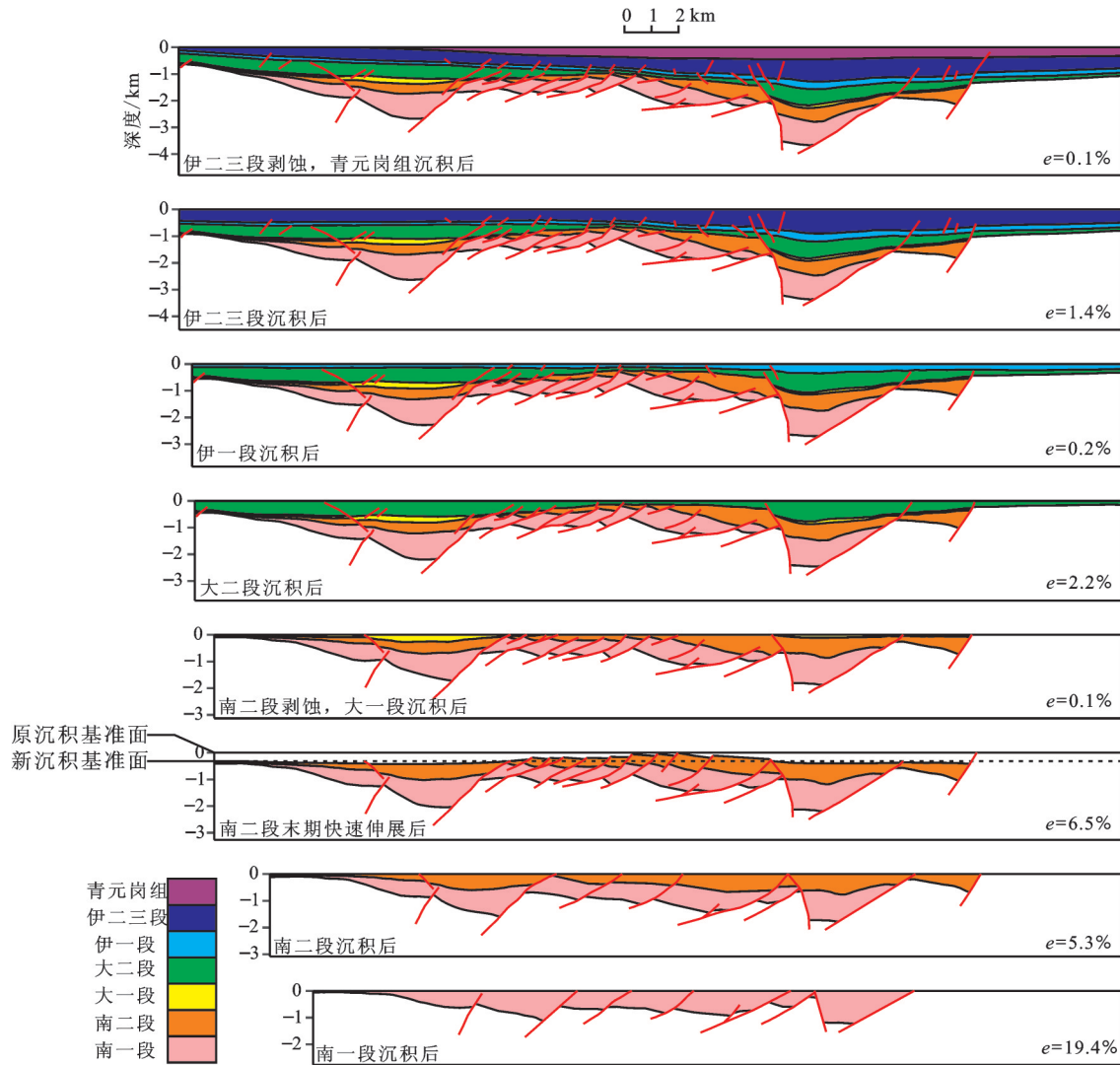


图9 贝尔凹陷1920测线构造演化剖面( $e$ 为伸展率)

Fig.9 Tectonic evolution sections across the seismic line of L1920 in Beier Depression ( $e$  is extension ratio)

尔凹陷南部,北部不再发育边界断层,造成苏德尔特构造带在南部隆起明显,向NE方向逐渐变缓(图2)。

本区发生两次大范围的剥蚀,发生时间分别为大一段沉积早期和青元岗期。大一段沉积早期的剥蚀集中于苏德尔特构造带和贝尔凹陷外部的基底,  $T_{22}$ 反射层(南二段顶面)表现为大范围的削截不整合,而贝西、贝中断陷的构造低部位未被剥蚀并且同时接受了大磨拐河组一段的沉积,贝西断陷的大一段向两侧楔状减薄,贝中断陷的大一段东侧受控于边界断层,西侧逐渐减薄尖灭。前人和笔者的研究结果<sup>[43]</sup>均显示,大磨拐河组沉积时期区域伸展率为2%~3%,大二段的厚度相当大而大一段厚度很

小,是由于大一段沉积时期盆地整体抬升,沉积基准面相对下降,不仅造成当时负向构造可容空间减小,连同边界断层下盘的基底也被剥蚀,导致大一段厚度很小,且地层分布范围也相当有限。

造成盆地断陷构造层定型的重要事件是南屯组末期的剥蚀,在坡坪式边界断层的控制下,苏德尔特形成背斜,两侧分别形成负向构造,到大磨拐河组一段沉积时期,苏德尔特构造带和盆地外侧的基底一同露出水面被剥蚀,在苏德尔特构造带南段,由于构造带内未沉积南屯组,造成基底岩石被剥蚀(图3,图5-a,图8),而在苏德尔特构造带北段,南屯组被剥蚀,未波及基底(图4,图5-b,图9),

同时两侧的半地堑和断坡向斜继续接受大一段沉积。大一段沉积后,盆地表面重归于平缓,边界断层基本停止活动,贝尔凹陷发生整体沉降,大二段、伊敏组和青元岗组依次沉积在贝尔凹陷以及其两侧的基底之上,形成连续稳定的地层。

断陷构造层定型之后伸展强度大大减弱,盆地整体接受稳定的沉积,地层不再受控于断层活动,进入盆地的拗陷期。直至伊敏组沉积末期盆地发生较强烈反转,剖面西侧局部抬升,造成贝西断陷的伊敏组和青元岗组地层被大量剥蚀,在T<sub>04</sub>反射层形成区域不整合,形成了现今的构造形态。

### 6 讨 论

苏德尔特构造带形成于大磨拐河期早期,过去人们研究苏德尔特构造带的成因时,多将其解析为挤压成因的背斜,并在地震工区中解释出一些压性构造和走滑构造<sup>[12-15]</sup>。笔者综合研究贝尔凹陷和邻近的乌尔逊凹陷的地震解释和构造变形认为,乌尔逊凹陷在大磨拐河期的构造变形完全为伸展性质,因此若将贝尔凹陷大磨拐河期的变形性质定为挤压,这在同一构造背景控制下,是不合理的。基于伸展背景和盆地区域性的抬升,对苏德尔特构造带的演化机制进行解析,受控于坡坪式边界断层是一个较好的解释。

综合比较海拉尔盆地贝尔凹陷苏德尔特构造

带、渤海湾盆地黄骅凹陷孔店凸起和McClay(1991)的砂箱构造模拟结果<sup>[39]</sup>的形态特征,整体上三者都具有半地堑、断坪背斜和断坡向斜的特征,但由于坡坪式断层形成之前的构造形态不同,最终形成的剖面特征也有一定差异。孔店凸起剖面a(图10-a)与苏德尔特构造带有相当好的相似性(定为第一类),孔店凸起剖面b(图10-b)与砂箱构造模拟的结果有较好的相似性(定为第二类),这两类特征剖面的主要区别在于第二类剖面在远端存在一条与主边界断层对倾的大规模断层,如图10-b的徐西断层和图7中最左侧的断层。但砂箱实验中的对倾断层延伸长断距小,基本不具有控陷作用,图10-b的徐西断层对沙一段沉积之前的地层具有相当明显的控陷作用,直到沙一段和东营组沉积时才具有碟状沉积特征。实际上这两者形成机制完全不同:徐西断层的形成时间为沧东断层转为坡坪式之前,到沧东断层成为盆地主边界断层时,徐西断层基本停止活动;而砂箱实验中的对倾断层是实验设计缺陷导致的,用于模拟断层面的塑料布具有微弱弹性,实验开始的早期塑料布还未绷紧,因此伸展早期变形集中在移动挡板附近,在主边界断层的远端形成对倾的断层。笔者改进了McClay的实验<sup>[39]</sup>,先将断层面的塑料布绷紧再开始实验,结果这条反向断层不再出现,证实了笔者的分析。

从孔店凸起的地层沉积特征(图10-b)来看晚

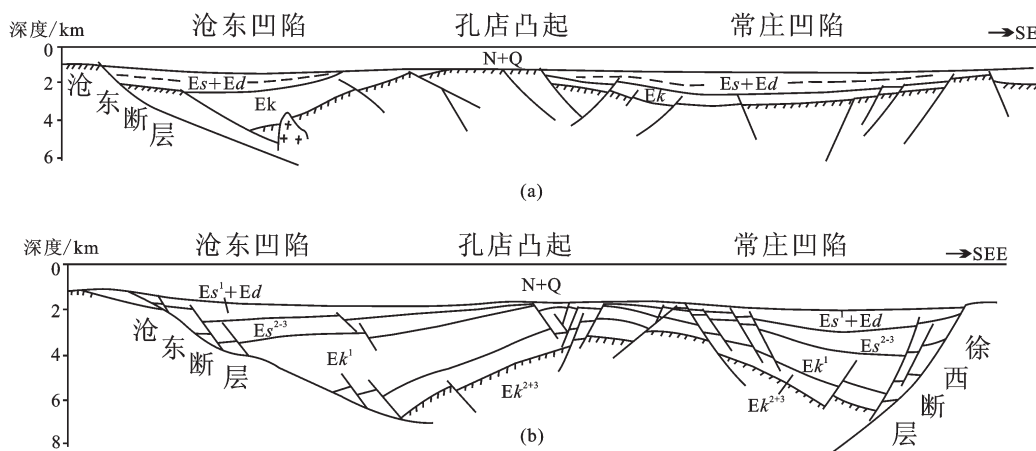


图10 过孔店凸起的联合剖面<sup>[38]</sup>

a-K85-138测线;b-K85-120测线;N+Q—新近和第四系;Es'+Ed—沙一段和东营组;Es'<sup>2-3</sup>—沙二、三段;Ek<sup>1</sup>—孔一段;Ek<sup>2-3</sup>—孔二、三段

Fig.10 Geological cross-sections across Kongdian arch<sup>[38]</sup>

a-Line K85-138;b-Line K85-120;N+Q—Neogene and Quaternary;Es'+Ed—Member 1 of Shahejie Formation and Dongying Formation; Es'<sup>2-3</sup>—Member 2 and 3 of Shahejie Formation;Ek<sup>1</sup>—Member 1 of Kongdian Formation;Ek<sup>2-3</sup>—Member 2 and 3 of Kongdian Formation

期(沙一期及之后)才显现出受控于坡坪式断层,形成断坡凹陷的特征,早期(沙一段沉积前)坡坪式断层并未形成,这与苏德尔特构造带的贝西断陷带构造特征一致(南屯期形成小规模断陷盆地群受控于多条断层,大磨拐河期形成坡坪式断层)。漆家福(1994)认为沧东断层转为坡坪式的原因是在剖面上整个盆地发生了一定的旋转<sup>[38]</sup>,而笔者认为贝尔凹陷边界断层转为坡坪式的原因是大磨拐河期地温上升导致的滑脱面上升。

贝尔凹陷的东侧边界断层,初始形成于南屯期的断陷作用,南屯期主干边界断层的拆离面较深,深度与笔者根据桁架法推算的第二阶断坪相同(17~21 km);而海拉尔盆地在南屯期之后,大磨拐河期之前还发生了一期短暂火山活动,形成伊列克得组火山岩<sup>[44-46]</sup>,尽管伊列克得组在中部断陷带并不发育,但发育于周边其他地区,伊列克得组富钾的玄武岩类通常与地幔上涌或岩石圈减薄有关,这也解释了为什么在大磨拐河早期仍然具有一定断陷特征。

综上所述,伸展环境下的坡坪式断层很好地解释了孔店凸起和苏德尔特构造带的形成,但坡坪式断层的成因还需要进一步研究,需要更多的证据支撑其真实形成机制。此外,在对伸展环境下的盆地进行研究时,地震往往不能显示基底中的断层形态,基于斜向剪切的人字形桁架法能够很好地分析边界断层形态。在盆地整个的构造演化过程中,单独的一条断层可能在不同时期具有不同的活动特征,同一条断层在不同时期往往对盆地具有两种甚至更多的控制作用,因此应该根据不同构造变形时期对断层的作用进行差异性的分析。

## 7 结 论

在南屯组沉积时期,贝尔凹陷在近SN向伸展作用下形成多个近EW走向的小规模断陷盆地群,在大磨拐河组期,盆地转为NE向伸展,在贝中断陷东侧形成坡坪式的主干边界断层,控制苏德尔特构造带的半地堑-断坪上部滚动背斜-断坡向斜的构造面貌,同时盆地抬升造成中部滚动背斜被剥蚀,两侧低洼处接受新的大一段沉积,而后盆地进入拗陷期,再次稳定沉降,形成了现今的盆地形态。

苏德尔特构造带是伸展作用下坡坪式边界断层和重力控制的“横弯褶皱”,而非前人所认为的挤

压作用下的“纵弯褶皱”。

**致谢:**感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

## 参考文献(References):

- [1] Jackson C, Gawthorpe R L, Sharp I R. Style and sequence of deformation during extensional fault-propagation folding: examples from the Hammam Faraun and El-Qaa fault blocks, Suez Rift, Egypt[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(3): 519-535.
- [2] Withjack M O, Meisling K E, Russell L R. Forced folding and basement-detached normal faulting in the Haltenbanken area, offshore Norway[J]. *AAPG. Special Volumes*, 1989, 37: 567-575.
- [3] Pashin J C. Revitalizing Gilbertown oil field: characterization of fractured chalk and glauconitic sandstone reservoirs in an extensional fault system[J]. *Geological Survey of Alabama Bulletin*, 2000, 168: 1-81.
- [4] Khalil S M, McClay K R. Extensional fault-related folding, northwestern Red Sea, Egypt[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(4): 743-762.
- [5] 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.
- [6] 汪新文. 伸展褶皱作用及其油气勘探意义[J]. *现代地质*, 2008, 22(1): 60-69.  
Wang Xinwen. Extensional folding and its significance for oil-gas exploration[J]. *Geoscience*, 2008, 22(1): 60-69 (in Chinese with English abstract).
- [7] 樊俊雷, 曹远志, 韩伟. 伸展断层相关褶皱作用研究进展[J]. *内蒙古石油化工*, 2008, 34(22): 6-7.  
Fan Junlei, Cao Yuanzhi, Han Wei. Research progress on the folding corresponding to fault-stretched[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2008, 34(22): 6-7 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张莹. 伸展褶皱及其对油气聚集的控制作用——以海拉尔盆地贝中次凹为例[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(2): 16-20, 76.  
Zhang Ying. Extensional fold and their control effect on oil and gas accumulation: A case study from Beizhong sub-depression in Hailar Basin[J]. *Northwest Oil & Gas Exploration*, 2012, 24(2): 16-20, 76 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张晓东, 刘光鼎. 海拉尔盆地的构造特征及其演化[J]. *石油实验地质*, 1994, 16(2): 119-127.  
Zhang Xiaodong, Liu Guangding, Wang Jialin. Structural characters of the Hailar Basin and its geological evolution[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1994(02): 119-127 (in Chinese with English abstract).
- [10] 罗群, 庞雄奇. 断陷盆地群的含油气系统特征——以海拉尔盆地乌尔逊、贝尔凹陷为例[J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(1): 27-30.  
Luo Qun, Pang Xiongqi. Characteristics and comparison of

- petroleum systems in faulted basin group—an example of Wuerxun and Beir sags in Hailar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(1):27–30(in Chinese with English abstract).
- [11] 陈守田, 刘招君, 刘杰烈. 海拉尔盆地构造样式分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(1):39–42.  
Chen Shoutian, Liu Zhaojun, Liu Jielie. Analysis on structural style in the Hailaer basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(1): 39–42(in Chinese with English abstract).
- [12] 刘志宏, 柳行军, 王芑, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷挤压构造的发现及其地质意义[J]. 地质前缘, 2009, 16(4):138–146.  
Liu Zhihong, Liu Xingjun, Wang Peng, et al. Discovery of compressional structure in Wuerxun–Beier Sag in Hailar Basin and its geological significance[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 138–146 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘志宏, 任延广, 李春柏, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷的构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(2):151–156.  
Liu Zhihong, Ren Yanguang, Li Chunbai, et al. Structural features and their impacts on hydrocarbon accumulation in Urxunbeier Depression in Hailaer Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(2):151–156(in Chinese with English abstract).
- [14] 柳行军, 刘志宏, 冯永玖, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷构造特征及变形序列[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2): 215–220.  
Liu Hangjun, Liu Zhihong, Feng Yongjiu, et al. Structural characteristics and deformation sequence of the Urxun Sag in Hailaer Basin, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(2): 215–220(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘志宏, 万传彪, 任延广, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷的地质特征及油气成藏规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4):527–534.  
Liu Zhihong, Wan Chuanbiao, Ren Yanguang, et al. Geological features and the rule of oil and gas accumulation of Urxun–Beier Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(4):527–534(in Chinese with English abstract).
- [16] 李松, 毛小平, 汤达祯, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷煤成气资源潜力评价[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1350–1358.  
Li Song, Mao Xiaoping, Tang Dazhen, et al. Resource assessment of coal–derived gas in Huhehu depression, Hailar Basin[J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1350–1358(in Chinese with English abstract).
- [17] 崔军平, 任战利, 肖晖. 海拉尔盆地呼和湖凹陷热演化史与油气关系[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 522–527.  
Cui Junping, Ren Zhanli, Xiao Hui. Relations between the thermal history and petroleum generation in the Huh Lake depression, Hailar basin[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 522–527(in Chinese with English abstract).
- [18] 金利洪. 塔木察格盆地南贝尔凹陷油气成藏规律[J]. 中国地质, 2013, 40(3):939–948.  
Jin Lihong. Hydrocarbon accumulation regularity of south Buir sag in Tamtsag Basin. [J]. Geology In China, 2013, 40(3):939–948 (in Chinese with English abstract).
- [19] 储呈林, 林畅松, 朱德丰. 海拉尔盆地乌南凹陷下白垩统沉积充填演化及构造控制[J]. 现代地质, 2010, 24(4): 669–677.  
Chu Chenglin, Lin Changsong, Zhu Defeng. Sedimentary filling evolution and tectonic control of the lower Cretaceous of the Wunan Depression in Hailaer Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(4): 669–677(in Chinese with English abstract).
- [20] 康德江, 张斌迟. 潜山构造运动与油气的运聚成藏——以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(5): 767–772.  
Kang Dejiang, Zhang Binchi. Tectonic movement of buried hill and hydrocarbon accumulation—an example from Beier Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(5):767–772(in Chinese with English abstract).
- [21] 任丽华, 林承焰, 李辉, 等. 海拉尔盆地苏德尔特构造带布达特群裂缝发育期次研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 484–490.  
Ren Lihua, Lin Chengyan, Li Hui, et al. Development period of fractures in the Budate Group in the Sudeerte Structural Zone, Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3):484–490(in Chinese with English abstract).
- [22] 杨婷, 金振奎, 张雷, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷贝西地区南屯组层序地层特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 629–638.  
Yang Ting, Jin Zhenkui, Zhang Lei, et al. Sequence stratigraphic characteristic of the Nantun Formation in the western area of Beier Depression, Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(3): 629–638(in Chinese with English abstract).
- [23] 应丹琳, 潘懋, 李忠权, 等. 乌尔逊凹陷反向断层及与油气的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 244–250.  
Ying Danlin, Pan Mao, Li Zhongquan, et al. Relationship between antithetic faults and hydrocarbon in Wuerxun depression, Hailaer basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Sci. & Technol. Ed., 2012, 39(3):244–250(in Chinese with English abstract).
- [24] Dula W F. Geometric models of listric normal faults and rollover folds[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(10):1609–1625.
- [25] Graham W, Ian V. The geometry of listric normal faults and deformation in their hanging walls[J]. Journal of Structural Geology, 1987, 9(7):789–795.
- [26] White N J, Jackson J A, McKenzie D P. The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls[J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8(8):897–909.

- [27] White N J. constraints on the measurement of extension in the brittle upper crust[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 1987, 67:269–279.
- [28] Verrall P. Structural interpretation with application to North Sea problems[M]. Joint Association for Petroleum Exploration Courses (U.K.), Course Notes, 1981:121–138.
- [29] Gibbs A D. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics[J]. Journal of Structural Geology, 1983, 5(2):153–160.
- [30] Davison I. Listric normal fault profiles: calculation using bed-length balance and fault displacement[J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8(2):209–210.
- [31] Martha Oliver Withjack E T P. Prediction of normal-fault geometries—A Sensitivity Analysis[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(11):1860–1873.
- [32] Maloney D, Davies R, Imber J, et al. Structure of the footwall of a listric fault system revealed by 3D seismic data from the Niger Delta[J]. Basin Research, 2012, 24(1): 107–123.
- [33] Uzkeda H, Poblet J, Bulnes M. Shear angle and amount of extension calculations for normal faults emanating from a detachment: Implications on mechanisms to generate rollovers[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 67:20–36.
- [34] Uzkeda H, Bulnes M, Poblet J, et al. Buttressing and reverse reactivation of a normal fault in the Jurassic rocks of the Asturian Basin, NW Iberian Peninsula[J]. Tectonophysics, 2013, 599:117–134.
- [35] Resor P G, Pollard D D. Reverse drag revisited: Why footwall deformation may be the key to inferring listric fault geometry[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 41:98–109.
- [36] Grima C, Costard F, Kofman W, et al. Large asymmetric polar scarps on Planum Australe, Mars: Characterization and evolution[J]. Icarus, 2011, 212(1):96–109.
- [37] Spahić D, Exner U, Behm M, et al. Listric versus planar normal fault geometry: an example from the Eisenstadt–Sopron Basin (EAustria)[J]. International Journal of Earth Sciences, 2011, 100(7):1685–1695.
- [38] 漆家福, 陆克政, 张一伟, 等. 黄骅盆地孔店凸起的形成与演化[J]. 石油学报, 1994(S1):27–33.
- Qi Jiafu, Lu Kezheng, Zhang Yiwei, et al. The formation and evolution of Kongdian high in Huanghua Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 1994(S1): 27–33(in Chinese with English abstract).
- [39] McClay K R, Scott A D. Experimental models of hangingwall deformation in ramp–flat listric extensional fault systems[J]. Tectonophysics, 1991, 188(1):85–96.
- [40] 申家年, 杨晨, 于勇. EASY% Ro法在地温梯度恢复中的局限性——以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, (Z2):148–154.
- Shen Jianian, Yang Chen, Yu Yong. The limitations of EASY%Ro in geothermal gradient inversion: a case study of Wuxun Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, (Z2): 148–154(in Chinese with English abstract).
- [41] 鄯瑞卿. 大庆探区外围中、新生代断陷盆地群油气地质条件及远景评价[D]. 长春: 吉林大学, 2009:24.
- Qie Ruiqing. Oil and gas geological condition and prospect evaluation in the peripheral down-faulted basins group of Mesozoic and Cenozoic era, Daqing Exploration Area[D]. Changchun: Jilin University, 2009:24(in Chinese with English abstract).
- [42] 葛文春, 林强, 李献华, 等. 大兴安岭北部伊列克得组玄武岩的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2000, 20(3):14–18.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Li Xianhua, et al. Geochemical characteristics of basalts of the early Cretaceous Yilikede Formation, north Daxing'anling[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000, 20(3): 14–18(in Chinese with English abstract).
- [43] 闫磊, 刘招君, 方石, 等. 塔南凹陷南屯组–大磨拐河组构造特征及与油气藏关系[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(1):1–5, 172.
- Yan Lei, Liu Zhaojun, Fang Shi, et al. Structural feature of Nantun–Damoguaihe formation in Tanan Depression and its relation with oil–gas reservoir[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- [44] 李萍萍, 葛文春, 张彦龙. 海拉尔盆地西北部火山岩地层划分的锆石U–Pb年代学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2482–2494.
- Li Pingping, Ge Wenchun, Zhang Yanlong. Division of volcanic strata in the northwestern part of Hailar Basin: evidence from zircon U–Pb dating. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2482–2494 (in Chinese with English abstract).
- [45] 田京, 李进文, 王润和, 等. 内蒙古额仁陶勒盖地区侵入岩LA–ICP–MS锆石U–Pb年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 2014, 41(4):1092–1107.
- Tian Jing, Li Jinwen, Wang Runhe, et al. Zircon LA–ICP–MS U–Pb ages and geochemical features of intrusions in Erentaolegai area of Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2014, 41(4):1092–1107(in Chinese with English abstract).
- [46] 陈丽丽, 程志国. 内蒙古兴安盟杜尔基地区花岗岩岩石学及锆石U–Pb年龄[J]. 中国地质, 2015, (4): 891–908.
- Chen Lili, Cheng Zhiguo. Petrology and zircon chronology of the Dorolj granite in Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, (4): 891–908(in Chinese with English abstract).