

# 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带 构造特征及物理模拟实验

李 萧<sup>1</sup>, 劳海港<sup>2</sup>, 胡秋媛<sup>1</sup>, 赵 利<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 胜利学院 油气工程学院, 山东 东营 257000; 2. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009;  
3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:** 依据大量地震勘探资料, 对准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带的构造特征进行了系统研究, 并将其构造演化划分为碰撞前陆盆地、前陆盆地逆冲推覆、陆内拗陷逆冲褶皱、陆内拗陷抬升剥蚀和覆盖定型 5 个阶段。在此基础上, 采用构造物理模拟实验方法对研究区典型剖面晚石炭世以来的构造演化进行了正演模拟, 取得了与实际地质情况较高的吻合度。模拟结果表明, 乌夏断裂带经历了由前陆盆地“前展式”逆冲向陆内拗陷“后展式”逆冲的转变。同时, 实验结果进一步证实, NW-SE 向挤压应力场的控制是乌夏断裂带形成、演化的根本原因, 其主要受控于板块活动及造山带、边界控盆断裂的活动等关键因素。

**关键词:** 构造特征; 物理模拟实验; 乌夏断裂带; 准噶尔盆地西北缘

中图分类号: TE121 .2

文献标识码: A

## Tectonic evolution and its physical simulation of Wuxia fault belt in the northwestern margin of Junggar Basin

Li Xiao<sup>1</sup>, Lao Haigang<sup>2</sup>, Hu Qiuyuan<sup>1</sup>, Zhao Li<sup>3</sup>

(1. Department of Oil & Gas Engineering, Shengli College of China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257000, China;  
2. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China;  
3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** The tectonic characteristics of the Wuxia fault belt in the northwestern margin of the Junggar Basin were systemically studied based on a large number of 3D seismic data. The study area has experienced five tectonic evolution periods, including the collision of foreland basin, thrust-nappe structure of foreland basin, thrusting fold of interior depression, uplift and denudation of interior depression, and cover setting. The forward modeling of the tectonic evolution of some typical profiles ever since the Late Carboniferous fit well with actual geological conditions. The results showed that the Wuxia fault belt transformed from the thrust with piggy back in foreland basin to thrusting with overstep in the interior depression. Experimental results also indicated that the formation and development of Wuxia fault belt were mainly controlled by the NW-SE oriented compressive stress field, which was mainly affected by some key factors such as plate activities, orogenic belts, and frontier basin-controlling faults.

**Key words:** tectonic characteristics; physical simulation experiment; Wuxia fault belt; northwestern margin of Junggar Basin

前陆冲断带指处于盆地与造山带间, 由造山带向盆地大规模逆掩推覆的冲断系统<sup>[1-2]</sup>。近年来, 前陆冲断带已成为我国中西部油气勘探的重点, 勘探力度逐步增大。乌夏断裂带地处准噶尔盆地西北缘前陆冲断带东段, 为盆地西北缘中构造活动最强烈的地带, 具有典型的逆冲推覆性质。前人针对乌夏断裂带的构造特征、沉积模式、油气聚集及成

藏等方面进行了研究<sup>[3-7]</sup>, 但由于前陆冲断带受多期造山运动改造, 构造变形复杂, 对其构造演化及形成机制的认识仍存在分歧, 尤其缺少一定的实际变形支持。构造物理模拟实验是真实再现盆内各种构造形迹的重要方法, 可以直观、有效地反映前陆冲断带的变形过程及构造发育特征, 进而为其动力学机制的研究提供重要依据。因此, 笔者基于乌

收稿日期: 2017-01-25; 修订日期: 2017-05-31。

作者简介: 李萧 (1987—), 硕士, 助教, 从事构造地质学研究。E-mail: 136930394@qq.com。

通信作者: 劳海港 (1978—), 博士, 讲师, 从事盆地构造解析研究。E-mail: haigang1609@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40772132) 和中国石油大学胜利学院重点科研计划项目 (KY2015013) 资助。

夏断裂带构造特征研究的基础上,结合构造物理模拟实验,对其典型剖面的发育演化进行了正演模拟,以期获得对该区现今构造发育演化的合理解释。

### 1 区域地质概况

乌夏断裂带地处准噶尔盆地西北缘前陆冲断带东段,北抵哈拉阿拉特山,南接玛湖凹陷(图 1),自晚石炭世起,经历海西晚期、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动持续发育,形成了独具特色的构造形态。依据构造位置、基底特征的不同,可将乌夏断裂带自北向南划分为山前隆起区、乌夏冲断带和南部斜坡带 3 个构造单元,整体呈现“南北分带”的构造格局(图 1)。其中,山前隆起区以挤压逆冲为主,变形强度大,地层严重剥蚀,保存有多期不整合面;中部冲断带断展褶皱发育,除顶部地层遭受剥蚀外,整体保存较好;南部斜坡带变形微弱,地层发育齐全,石炭系—第四系保存相对完整。

## 2 乌夏断裂带构造特征

### 2.1 断裂特征

乌夏断裂带是准噶尔盆地西北缘中典型的大型叠瓦冲断系统,由多条近 NE 向和 NEE 向弧形逆断层及逆掩断层组成。大量地震勘探资料表明,乌夏断裂带平面上多呈 NE 向、NEE 向延伸,均出现不同程度的弧形,主断裂弧形幅度小,次级断裂弧形幅度大,弧顶凸向盆内,断面倾向盆外;剖面上倾向 NW、NNW,冲断面多为上陡下缓,常呈逆冲叠瓦状向深部收敛;同时,上盘沉积厚度明显小于相应的下盘,且上盘一般为连续沉积,表明断裂活动具有典型的“同生性”。

依据研究区内断裂规模及其控盆作用,可将乌

夏断裂带自西向东划分为乌尔禾断裂、夏子街断裂、夏红断裂 3 条一级断裂,均为主要控盆断裂,其下又包含一系列控制次级构造形成的二级断裂。表 1 详细讨论了研究区 3 条一级断裂的构造特征。

### 2.2 构造演化分析

乌夏断裂带既继承了准噶尔盆地晚古生代以来叠合盆地的特点<sup>[8-9]</sup>,又有其独特的构造变形特征。依据区域典型剖面的地震勘探成果,结合构造演化特征及前人研究成果,笔者认为,自晚石炭世之后,乌夏断裂带经历了 5 个演化阶段。

#### 2.2.1 碰撞前陆盆地阶段(C<sub>3</sub>)

晚石炭世,伴随西准噶尔洋壳 NW 向俯冲、消减于哈萨克斯坦板块,洋盆完全闭合,陆陆发生碰撞(图 3a),产生达尔布特断裂,盆地西北缘隆起成陆,开始出现强烈的碰撞造山运动。

#### 2.2.2 前陆盆地逆冲推覆阶段(P)

晚石炭世洋盆闭合,但地壳深部的洋壳仍继续俯冲、消减。早二叠世,哈山作为乌夏断裂带北缘推覆特征最明显的推覆构造之一,已初见雏形,为乌夏断裂带 NW 向挤压变形提供了动力来源,同时伴随广泛的火山活动。

中二叠世,深部洋壳的俯冲、消减已趋于停止,火山活动趋于停息,地壳趋于稳定<sup>[10-11]</sup>,研究区发生强烈逆冲推覆,前陆盆地持续发育至高峰,达尔布特断裂为研究区在北缘的控盆断裂。造山带持续 SE 向强烈推进挤压,在山前依次前展式发育了一系列 NE 向断裂(图 3b),如乌尔禾南断裂、夏 5 井断裂。

#### 2.2.3 陆内拗陷逆冲褶皱阶段(T)

进入三叠纪,准噶尔盆地整体抬升,盆地进入整体陆内拗陷阶段,受印支运动影响,由 NW-SE 向

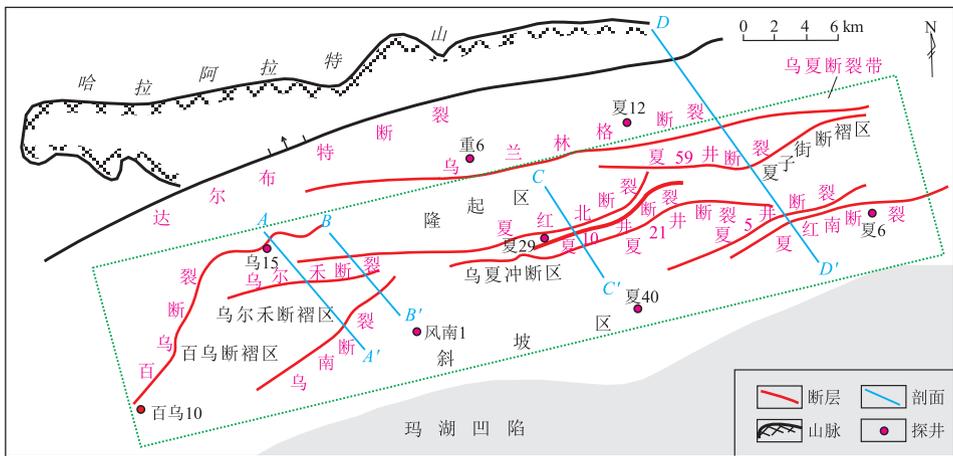


图 1 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造纲要

Fig.1 Tectonic pattern of the Wuxia fault belt on the northwestern margin of Junggar Basin

表1 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带各一级断裂构造特征

Table 1 Characteristics of first-order faults in the Wuxia fault belt on the northwestern margin of Junggar Basin

断裂名称	次级断裂	断裂产状			滑脱面	平面形态	剖面形态	断距	主要活动时期
		走向	倾向	倾角					
乌尔禾断裂	百乌断裂、乌尔禾断裂、乌南断裂	NE	NW	上部 50°~60°; 下部 10°~20°	呈勺形(图 2a,b)	断裂呈弧形,整体近平行排列	上陡下缓呈铲式,为逆掩断层(图 2a,b)	剖面断至三叠系,自下而上逐渐减小,下部断距大者可达 750 m,上部仅 50 m	晚二叠世—晚三叠世
夏子街断裂	夏 10 井断裂、夏 21 井断裂、夏红北断裂	近 EW	近 N	35°~55°	呈勺形(图 2c);石炭系和二叠系推移距离逐渐增大,可达 15 km	断裂呈弧形,夏红北断裂为前锋断层,与乌南断裂相接,整体近平行排列	剖面呈坡坪式,具平缓的“躺椅”形态;夏 21 井断裂与夏红北断裂强烈挤压破碎呈“反 Y”字形,均为逆掩断层(图 2c)	断裂西部断至二叠系,东部断至三叠系,断距下大上小,下部断距大者可达 500 m,上部仅为 75 m	三叠纪
夏红断裂	夏红南断裂、夏 59 井断裂、夏 5 井断裂	NEE	NNW	25°~50°	呈舒缓波状(图 2d);石炭系—二叠系长距离逆掩推覆,平均推移距离达 14 km	断裂呈弧形,整体近平行排列	整体以低角度逆冲为主,断面前部陡、中部平、尾部向深处逐渐收敛为一条(图 2d)	断裂西部断至二叠系顶部,中部断至侏罗系,东部断至三叠系;二叠系断距下大上小,1 400~300 m	晚二叠世—晚三叠世

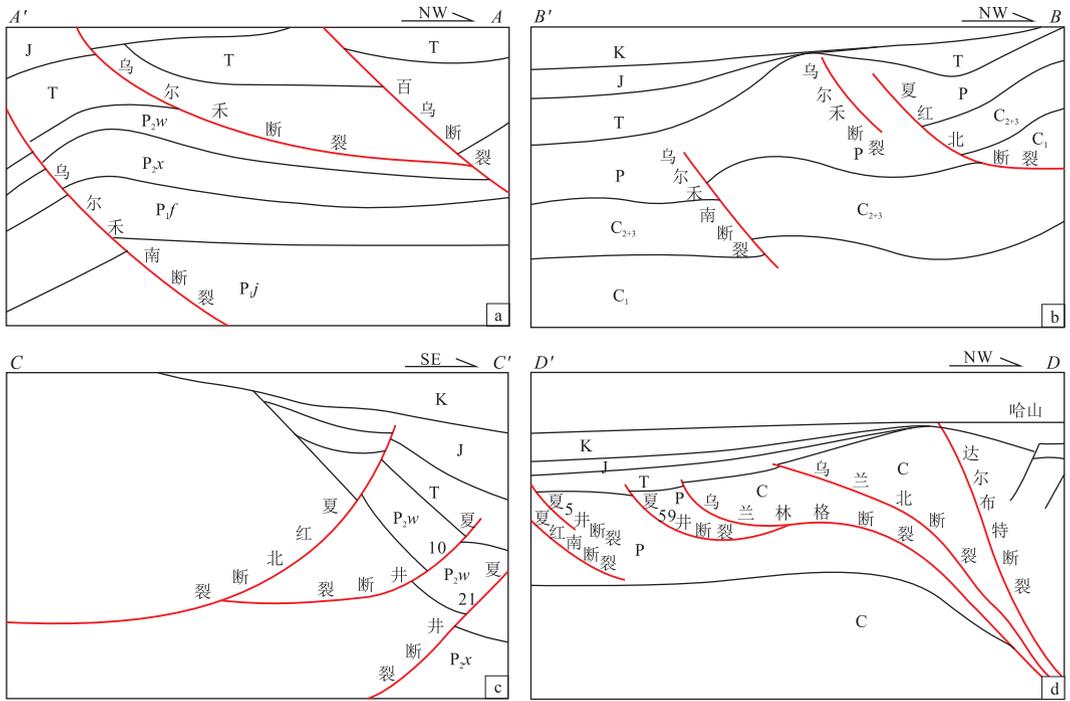


图2 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带典型剖面构造特征  
剖面位置见图 1。

Fig.2 Characteristics of typical profiles of the Wuxia fault belt on the northwestern margin of Junggar Basin

挤压转为近 SN 向挤压,并伴有左旋剪切,在乌夏断裂带自南向北后展式发育了一系列近 EW 向断裂(图 3c),如夏 21 井断裂、夏 10 井断裂东段、乌兰林格断裂等。同时,二叠纪形成的 NE 向断裂持续逆冲推覆,并伴随大规模褶皱发育。三叠纪末,受 SN 向强烈挤压和重新活动的达尔布特断裂影

响,斜坡地带持续隆起,哈山形成。

2.2.4 陆内拗陷抬升剥蚀阶段(J-K)

燕山运动早中期,为准噶尔西北缘陆内拗陷的消亡期,而乌夏断裂带仍有继承性活动,夏 59 井断裂在此阶段发育。早—中侏罗世,除哈山部分区域处于较高地势,全区稳定下沉,具有明显的超覆特

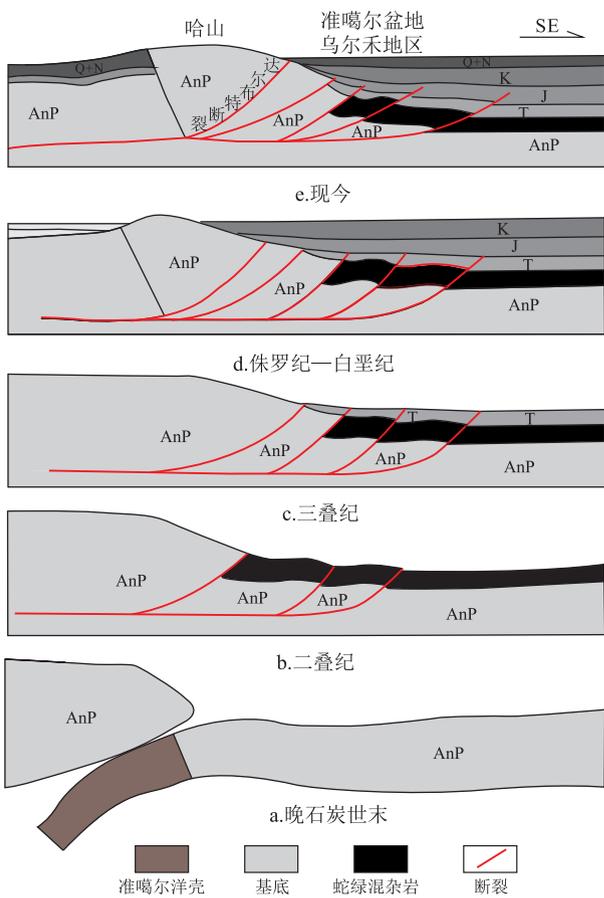


图 3 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造演化示意  
Fig.3 Tectonic evolution of the Wuxia fault belt on the northwestern margin of Junggar Basin

征(图 3d)。白垩纪时,受燕山运动晚期影响,构造活动较弱,除哈山主体仍有抬升外,乌夏断裂带断裂和褶皱基本停止。

### 2.2.5 覆盖定型阶段(N-Q)

至新生代时,整体平稳充填,自 SE 向 NW 低角度超覆,由南向北逐渐尖灭,研究区构造覆盖定型(图 3e)。

## 3 乌夏断裂带构造物理模拟实验

### 3.1 实验原理与设备

模拟实验中,实验模型与构造原型、模型材料与实际地层间均要遵循相似性原理<sup>[12-13]</sup>。本次实验采用中国石油大学(华东)自行研制的 DGU-I 型地质构造物理模拟实验装置,驱动方式为液压驱动,注液方式为平流泵自动注液。

### 3.2 实验条件与模型设计

依据前述的构造演化分析,将物理模拟实验的条件设置为:地质时期——晚石炭世(C<sub>3</sub>)以来;动力来源——板块活动及造山带、边界控盆断裂活动产生的挤压应力场;演化过程——晚石炭世以来的

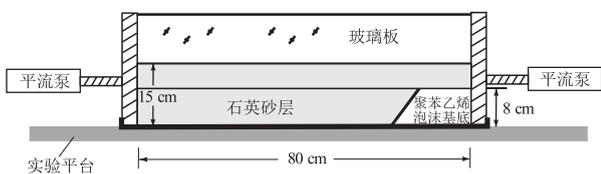


图 4 构造物理模拟实验条件示意

Fig.4 Physical modeling for tectonic evolution

持续挤压、隆升。考虑上述地质要素基础上,依据相似性原理,选择研究区典型 NW-SE 向剖面(C-C', 见图 2),设计构造物理模拟实验如下。

实验砂体尺寸长 80 cm,宽 20 cm,高 15 cm(图 4)。为便于观察,用黄色天然石英砂模拟地层,染色的石英砂模拟地质界线,模型相似系数为  $3.6 \times 10^{-6}$ 。与隆起区/造山带相比,断陷区/拗陷区具有“下强上弱”的流变学特征<sup>[14]</sup>。基于此,实验模型左侧铺设 15 cm 厚的石英砂,右侧底部铺设 8 cm 厚的聚苯乙烯泡沫基底(预设一定角度以实现深部的俯冲、消减),上部铺设 7 cm 厚的石英砂(图 4),通过两侧平流泵提供力源。

### 3.3 实验过程与结果分析

#### 3.3.1 实验过程

本次构造物理模拟实验是在着重考虑边界挤压、深部俯冲 2 大因素对逆冲构造形成、演化影响的基础上而实现的。实验结果需从统计的角度综合评价,因此在不断修正、改进过程中共进行了 5 组实验,此处仅选择拟合程度最高的一组分析、讨论。

依据区域构造演化分析,实验采用双向挤压的方式模拟乌夏断裂带的挤压逆冲活动,施力大小通过平流泵中的蒸馏水流速控制。实验历时 72 min,时间相似比为 2.86 Ma/min。其中,两侧平流泵推进的速度依次为 0.21 cm/min(0~7 min),0.25 cm/min(8~23 min),0.13 cm/min(24~41 min),0.08 cm/min(42~60 min),0.05 cm/min(61~72 min)。

#### 3.3.2 实验结果分析

根据地质模型的设计要求,乌夏断裂带典型剖面晚石炭世以来的构造演化过程在构造模拟实验中均获得再现<sup>[15]</sup>。图 5a 为初始状态,伴随持续的挤压作用,实验进行至 10 min 时砂体右侧开始发育逆冲断层①,倾向 NW,断面上陡下缓(图 5b),对应中晚二叠世研究区山前发育的夏 10 井断裂西段;23 min 时,逆冲断层①持续活动,同时在其北西侧发育逆冲断层②,产状与断层①基本一致(图 5c),对应研究区 NE 向发育的夏红北断裂。伴随断层的持续逆冲活动,研究区地层开始出现大规模

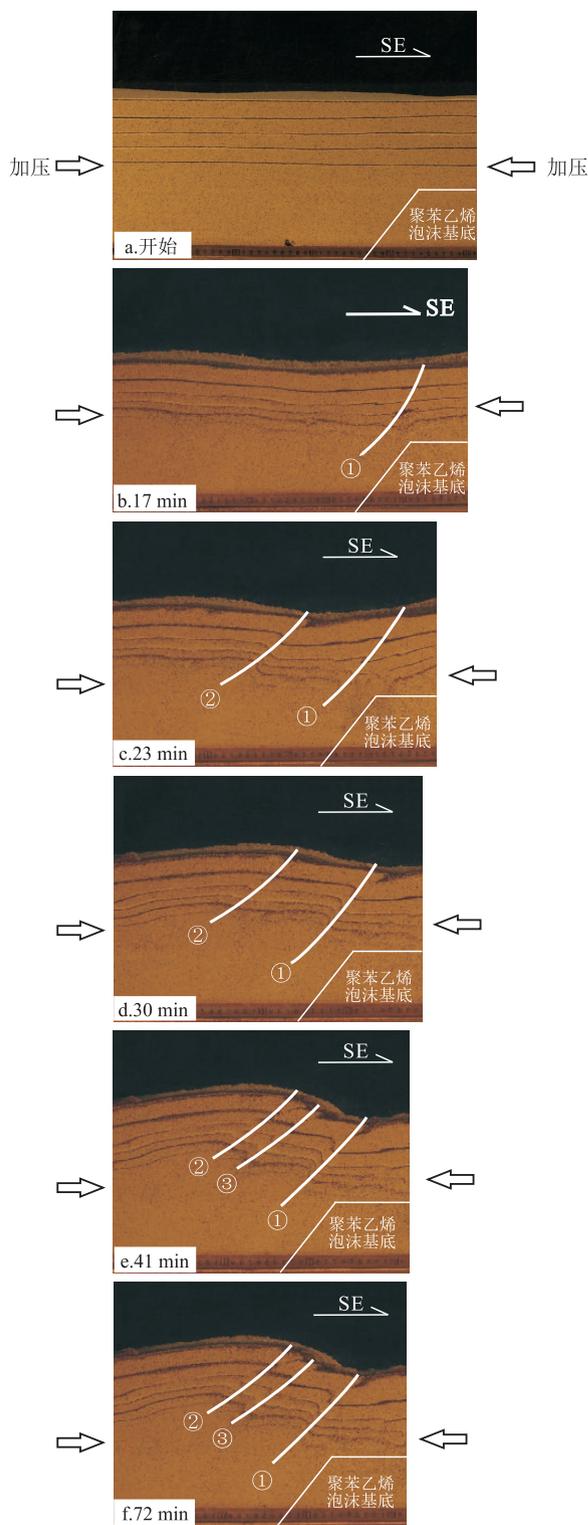


图5 准噶尔盆地西北缘  
乌夏断裂带构造物理模拟实验过程

Fig.5 Simulation process of tectonic evolution of the Wuxia fault belt on the northwestern margin of Junggar Basin

褶皱变形,30 min 时,断层②北西侧地层大幅度褶皱隆升(图 5d)。实验进行至 41 min,断层①与断层②之间发育逆冲断层③,对应三叠纪开始活动的夏 21 井断裂;同时,褶皱地带持续挤压、隆升,哈山

形成。实验持续进行至 72 min,除隆起部位有少量抬升外,剖面基本保持了前一阶段的构造特征(图 5e)。

已有研究资料表明,中寒武世—早石炭世,准噶尔盆地西北缘位于准噶尔古地块西北部的被动大陆边缘。伴随西准噶尔洋壳 NW 向俯冲、消减,陆陆碰撞,洋盆闭合,深部洋壳俯冲持续进行<sup>[16]</sup>;直至中晚二叠世,达尔布特断裂成为研究区主要的控盆断裂,造山带持续向盆内强烈挤压,这些均为研究区挤压变形提供了强大的 NW-SE 向动力来源。构造物理模拟实验证实了上述因素的主控作用,中晚二叠世山前发育的逆冲断层①——夏 10 井断裂西段,到其北西侧发育的逆冲断层②——夏红北断裂,研究区处于前陆盆地的前展式逆冲阶段。进入三叠纪,受印支运动影响产生的近 SN 向挤压应力场,一方面派生出 NW-SE 向的挤压应力场,促使前期发育的逆冲断层①、②持续活动;另一方面导致逆冲断层①、②间发育逆冲断层③——夏 21 井断裂。至此,研究区由前陆盆地的“前展式”逆冲阶段向陆内拗陷的“后展式”逆冲阶段转变。进入侏罗纪,研究区构造活动强度明显减弱,构造变形基本定型。

## 4 结论

(1) 乌夏断裂带是一组具有逆冲推覆性质的断裂带,由多条弧形逆断层及逆掩断层组成。平面上断裂多呈 NE 向、NEE 向延伸,均呈不同程度的弧形,近平行排列;剖面上倾向 NW、NNW,冲断面为勺形或舒缓波状,常呈逆冲叠瓦状向深部收敛。断裂构造活动强烈,以晚二叠世—晚三叠世活动为主,多表现为逆冲/逆掩断层性质,且断层相关褶皱发育。

(2) 乌夏断裂带自晚石炭世构造演化可分为 5 个阶段,包括晚石炭世后碰撞前陆盆地阶段、二叠纪前陆盆地逆冲推覆阶段、三叠纪陆内拗陷逆冲褶皱阶段、侏罗纪—白垩纪陆内拗陷抬升剥蚀阶段和新生代覆盖定型阶段。

(3) 乌夏断裂带典型剖面晚石炭世以来的构造演化过程,在构造物理模拟实验结果中均获得再现。断层的发育演化序列表明,乌夏断裂带经历了由前陆盆地“前展式”逆冲向陆内拗陷“后展式”逆冲的转变。同时,模拟结果进一步证实,北西—南东向挤压应力场为乌夏断裂带形成、演化的主控因素,板块活动及造山带、边界控盆断裂的活动为其提供了重要的动力来源。

## 参考文献:

- [1] Morley C K. A classification of thrust fronts [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(1): 12-25.
- [2] Vann I R, Graham R H, Hayward A B. The structure of mountain fronts [J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8(3/4): 215-227.
- [3] 蔚远江, 何登发, 雷振宇, 等. 准噶尔盆地西北缘前陆冲断带二叠纪逆冲断裂活动的沉积响应 [J]. 地质学报, 2004, 78(5): 612-625.  
Yu Yuanjiang, He Dengfa, Lei Zhenyu, et al. Sedimentary response to the activity of the Permian thrusting fault in the foreland thrust belt of the northwestern Junggar Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 612-625.
- [4] 王颖, 王英民, 赵锡奎. 构造模拟实验在构造研究中的应用: 以桩西潜山为例 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 308-312.  
Wang Ying, Wang Yingmin, Zhao Xikui. Application of simulation experiment to the study of structural evolution: An example of the Zhuangxi buried hill [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(3): 308-312.
- [5] 白振华, 孙培元, 孙宝才. 准噶尔盆地乌夏断裂带构造特征及其油气成藏意义 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25(3): 19-22.  
Bai Zhenhua, Sun Peiyuan, Sun Baocai. The structural characters and its implications for hydrocarbon accumulation in Wu-Xia fault belt, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 19-22.
- [6] 冯建伟, 戴俊生, 葛盛权. 准噶尔盆地乌夏断裂带构造演化及油气聚集 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 23-29.  
Feng Jianwei, Dai Junsheng, Ge Shengquan. Structural evolution and pool-forming in Wuxia fault belt of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(3): 23-29.
- [7] 宋永东, 戴俊生, 吴孔友. 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造特征与油气成藏模式 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(3): 17-20.  
Song Yongdong, Dai Junsheng, Wu Kongyou. Study on the structural features and hydrocarbon accumulation modes of Wuxia fault belt in the northwest margin of Junggar Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(3): 17-20.
- [8] 刘玉萍, 尹宏伟, 张洁, 等. 褶皱—冲断体系双层滑脱构造变形物理模拟实验 [J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 424-428.  
Liu Yuping, Yin Hongwei, Zhang Jie, et al. Physical modeling on double decollements structure in fold-and-thrust belt [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(4): 424-428.
- [9] 郑孟林, 金之钧. 准噶尔盆地北东向构造及其油气地质意义 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(4): 467-472.  
Zheng Menglin, Jin Zhijun. NE-trending structures and their significance on petroleum geology in Junggar Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2004, 29(4): 467-472.
- [10] 陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展 [J]. 高校地质学报, 2002, 8(3): 257-267.  
Chen Xin, Lu Huaifu, Shu Liangshu, et al. Study on tectonic evolution of Junggar Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 257-267.
- [11] 王圣柱, 林会喜, 张奎华, 等. 准噶尔盆地北缘哈山构造带油气输导系统研究 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 30-34.  
Wang Shengzhu, Lin Huixi, Zhang Kuihua, et al. Study on hydrocarbon transport system in Kazan tectonic zone at north margin of Junggar Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 30-34.
- [12] Ramberg H. Gravity, Deformation and the earth's crust in theory, experiment, and geological application [M]. London: Academic Press, 1981.
- [13] 戈红星, Vendeville B C, Jackson M P A. 前陆褶皱冲断带厚皮缩短盐构造运动的物理模拟 [J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 39-49.  
Ge Hongxing, Vendeville B C, Jackson M P A. Physical models of thick-skinned contractional salt tectonics in a foreland fold-and-thrust belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 39-49.
- [14] 胡秋媛, 李理. 鲁西地区晚中生代—古近纪伸展构造的应力场数值模拟 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 259-266.  
Hu Qiuyuan, Li Li. Numerical simulations of tectonic stress fields for Late Mesozoic—Paleogene extensional tectonics in western Shandong [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 259-266.
- [15] 胡秋媛, 董大伟, 赵利, 等. 准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 556-564.  
Hu Qiuyuan, Dong Dawei, Zhao Li, et al. Tectonic evolutionary characteristics and their causes of Chepaizi Uplift in Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 556-564.
- [16] 何登发, 尹成, 杜社宽, 等. 前陆冲断带构造分段特征: 以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例 [J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 91-101.  
He Dengfa, Yin Cheng, Du Shekuan, et al. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts: A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 91-101.

(编辑 徐文明)