

# 吐哈盆地哈密坳陷逆断层活动性及演化

姜素华<sup>1</sup>, 宋传会<sup>1</sup>, 李三忠<sup>1,2</sup>, 张红艳<sup>1</sup>, 杨晓婕<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100)

**摘要:**在构造解释及断层受力机制分析的基础上,根据逆断层两盘剥蚀与沉积的关系,将哈密坳陷逆断层活动的地质模型归纳为单向逆冲型、逆冲生长型和基底抬升型,并提出针对这3种类型逆断层活动量的计算方法,对主要断层在印支期、燕山期和喜山期的活动强度进行研究。结果表明:火石镇凹陷内的断层在印支期活动最为强烈,燕山期断层活动变弱,喜山期只有南部边界断层活动增强;三堡凹陷内的断层在印支期开始活动,燕山期断层活动最为强烈,喜山期断层基本停止活动;断层活动的差异性直接影响着各凹陷构造格局的形成与演化,火石镇凹陷构造格局早在印支运动就基本定型,而三堡凹陷的构造格局在晚燕山运动后才最终定型。

**关键词:**哈密坳陷; 逆断层; 地质模型; 断层活动性; 断层演化

**中图分类号:**TE 121.2 **文献标志码:**A

## Activities and evolution of thrust faults in Hami depression, Tu-Ha Basin

JIANG Su-hua<sup>1</sup>, SONG Chuan-hui<sup>1</sup>, LI San-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-yan<sup>1</sup>, YANG Xiao-jie<sup>1</sup>

(1. College of Marine Geoscience in Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Exploration Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

**Abstract:**Based on the interpretation of seismic profiles and analysis of fault pattern, three different geological models named single-force thrusting, double-force slipping and basement uplifting were proposed by analyzing the relationship between denudation and sedimentation at the two sides of the fault in Hami depression. Three test fault activity formulas for those different models were given to calculate vertical displacements of the major faults during the Indosinian, the Yanshanian and the Himalayan periods. The results show that the thrusting in Huoshizhen sag is intensive during the Indosinian period, but became weaker and weaker during the Yanshanian period, the activity of fault enhanced only in the south boundary during the Himalayan period. While the thrusting in Sanbao sag initiated during the Indosinian period, and became more intensive during the Yanshanian period, then terminated during the Himalayan period. Differentiation of the fault activity in different sags directly control the formation and evolution of the structural patterns in these sags. The tectonic framework of Huoshizhen sag basically developed during the Indo-china movement, while that of Sanbao sag finally developed after the Yanshanian movement.

**Key words:**Hami depression; thrust fault; geological model; fault activity; fault evolution

断层活动性分析是研究构造演化和油气运聚成藏的基础<sup>[1-3]</sup>,传统的断层活动性研究多基于正断层的地质模型,利用断层落差、生长指数、断层活动速率<sup>[4-5]</sup>等参数来描述断层的活动性,这对中国东部的断层活动研究和油气勘探都起到了积极的作用。对于中国西部的叠合含油气盆地来说,逆断层发育广

泛,且地层剥蚀严重<sup>[6]</sup>,传统的针对伸展区的断层活动性计算方法受到了限制。随着西部油气勘探的不断深入,逆断层的活动性及逆冲推覆带的研究逐渐受到人们的重视<sup>[7-14]</sup>,不少学者对逆断层逆冲时间的确定<sup>[15]</sup>和逆冲导致的地层缩短<sup>[16]</sup>等方面进行了研究,但对于逆断层在其发育期的定量表征并未

进行深入的探讨,用单一地质模式分析不同逆冲带的断层活动性,其适用性较差,不能达到精确定量表征的目的。因此,笔者依据哈密凹陷主要沉积时期不同类型断层的活动特征,分别建立单向逆冲型、逆冲生长型和基底抬升型3种地质模型,对逆断层的活动量和演化特征进行研究。

### 1 哈密凹陷的逆断层展布特征

哈密凹陷位于吐哈盆地东部,由北部的三堡凹陷、南部的火石镇凹陷和东部的黄田凸起组成。通

过对地震资料解释及断裂系统组合的分析,发现坳陷内断层主要为 NNE、NWW 和 NE 向平板式逆冲断层(图 1);从断层走向玫瑰花图可以看出,哈密凹陷断层走向多为 NNE 向,倾向以 SEE 向为主。根据断层的规模和对现今构造格局控制作用的不同,将哈密凹陷的断层划分为 I 级、II 级、III 级 3 个级别,其中 I 级断层控制一级构造单元,为坳陷的边界断层,II 级断层是控制坳陷内部二级构造单元的主断裂,为凹陷或者凸起的边界断层,III 级断层主要控制凹陷内构造带,为凹陷内部圈闭的边界断层。

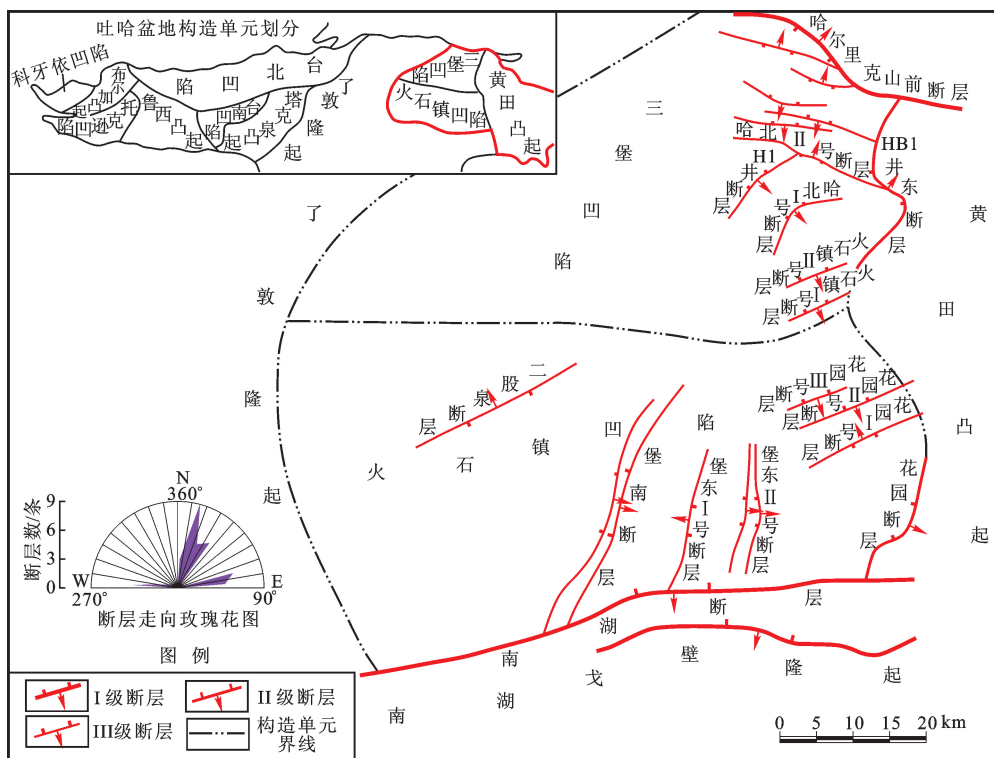


图 1 哈密凹陷构造单元划分与断层平面分布

Fig. 1 Tectonic units and faults distribution of Hami depression

(1) I 级断层。坳陷内有 2 条 I 级断层,分别是南湖断层和哈尔里克山前断层。南湖断层近 EW 走向,平面延伸长度大于 65 km,最大断距超过 5 km,是哈密凹陷的南部边界断层;哈尔里克山前断层 NWW 走向,最大断距超过 4 km,控制了哈密凹陷的北部边界。

(2) II 级断层。坳陷内有 2 条 II 级断层,分别是花园断层和 HB1 井东断层。花园断层 NNE 走向,平面延伸长度大于 15 km,最大断距大于 2 km,为火石镇凹陷与黄田凸起的界线;HB1 井东断层 NNE 走向,平面延伸长度大于 25 km,最大断距大于 3 km,分割了三堡凹陷与黄田凸起。

(3) III 级断层。坳陷内 III 级断层数量较多,属

于“控圈断层”,延伸长度为 10 ~ 30 km,断距为 0.5 ~ 2.0 km,如二股泉断层、堡南断层、堡东 I 号断层、堡东 II 号断层、花园 I 号断层、花园 II 号断层、火石镇 I 号断层、火石镇 II 号断层、哈北 I 号断层、哈北 II 号断层、H1 井断层等。火石镇凹陷 III 级断层的断距普遍比三堡凹陷大。

#### 1.1 逆断层活动性研究方法

在对断裂系统解释的基础上,通过分析断层所受挤压力的方向和受力机制,确定出该区断层活动的主要期次为印支期、燕山期和喜山期,再根据断层两盘剥蚀与沉积的关系,可将哈密凹陷逆断层归纳为 3 种类型的地质模型,即单向逆冲型、逆冲生长型和基底抬升型(图 2),分别给出了断层活动量的计

算方法。

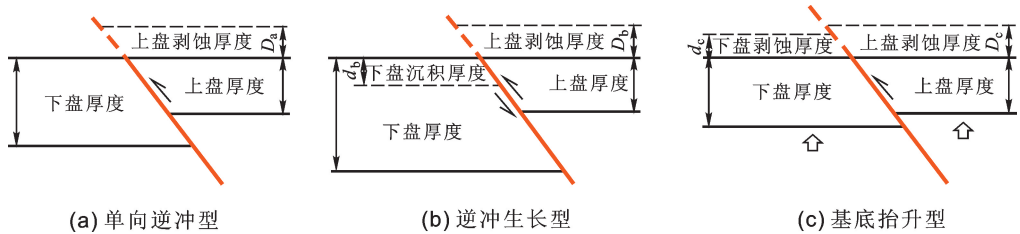


图2 三类逆断层相关的剥蚀模型

Fig. 2 Three thrust-related erosional models

单向逆冲型是指逆断层下盘不活动,仅上盘受挤压应力沿断层向上逆推,上盘推覆的地层被剥蚀,这是一种单向应力模型(图2(a))。在这种地质模型中,上盘剥蚀的厚度可视为断层逆推的垂向活动量,即

断层的活动量 = 上盘剥蚀厚度 ( $D_a$ )。

逆冲生长型是一种双向挤压应力模型,断层两盘同时受到挤压,上盘向上逆推,下盘向下俯冲,上盘推覆的地层被剥蚀,同时由于下盘俯冲进一步增大了可容空间,下盘地层得以继续沉积。这是一种传统的生长逆断层模型,在以往的逆断层活动性评估中,根据断层两盘错动的界线确定断距,比较简洁实用,此时考虑到断层的实际活动量不仅与上盘的地层剥蚀厚度有关,还与下盘地层的沉积有关(图2(b))。在这种地质模型下,断层的实际活动量为上盘剥蚀厚度与下盘沉积厚度之和,即

断层的活动量 = 上盘剥蚀厚度 ( $D_b$ ) + 下盘沉积厚度 ( $d_b$ )。

基底抬升型是由于下部基底抬升引起向上的挤压力,地层整体隆起或掀斜,同时引发岩石破裂,形成断层,在垂向上断层上下两盘同时抬升,在平面上,由于挤压应力在平面上的方向性,导致断层上盘在抬升的同时沿断层面逆冲(图2(c)),在这种情况下,断层的实际活动量是两盘地层的相对剥蚀量。

断层的活动量 = 上盘剥蚀厚度 ( $D_c$ ) - 下盘剥蚀厚度 ( $d_c$ )。

## 1.2 研究实例

(1) 单向逆冲型。单向逆冲型断层主要分布在坳陷西南部和东北部,该类断层上盘发生逆冲,幅度不大,下盘地层形态平缓,未见褶皱下凹或抬升牵引现象,如南湖断层和二股泉断层均属此类。以二股泉断层在三叠纪的活动为例(图3),认为断层下盘紧邻断层处未发生剥蚀,根据地层对比法确定其剥蚀厚度,图3中  $D_a$  即断层上盘剥蚀部分,在地震剖面上读数为 350 ms,时深转换后得到上盘剥蚀厚度

700 m。由于逆冲强度小,忽略对断层下盘的影响,且断层未断至侏罗系,因此可直接将上盘剥蚀厚度视为二股泉断层在三叠纪的活动量,即 700 m。

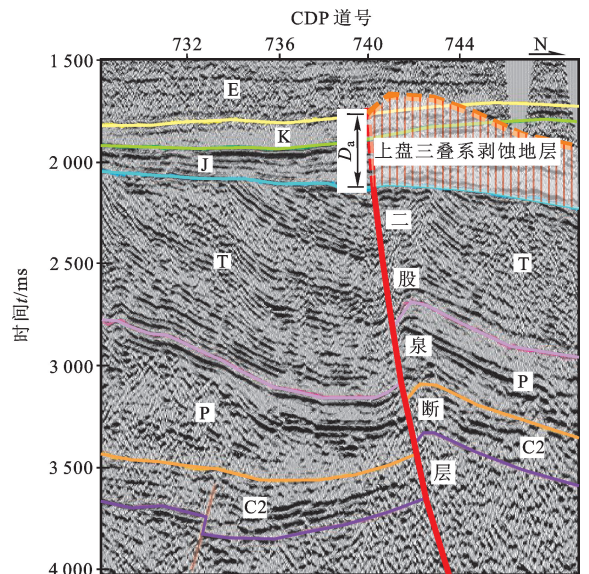


图3 单向逆冲型的二股泉断层  
(南北向 484 地震剖面)

Fig. 3 Seismic profile showing single-force thrusting model of Erguquan fault (SN484)

(2) 逆冲生长型。逆冲生长型断层主要分布在哈密坳陷南部和北部,该类断层上盘逆冲隆起,抬升幅度较大,下盘褶皱下凹,地层在断层附近有滑动牵引现象。以堡南断层在三叠纪的断层活动为例(图4),由于断层上盘大幅度逆冲推覆,导致上盘三叠系剥蚀严重,根据构造横剖面法及地层对比法确定其剥蚀厚度,图4中  $D_b$  即为堡南断层上盘靠近断层的剥蚀地层厚度;同时下盘受挤压下凹,使得断层下盘地层的沉积厚度明显增加,越靠近断层,沉积的地层厚度越大,图中  $d_b$  为下盘靠近断层的沉积地层厚度。 $D_b$  在地震剖面上为 100 ms,时深转换后厚度为 200 m,  $d_b$  在地震剖面上为 640 ms,时深转换后厚度为 1450 m。因此,堡南断层三叠纪活动量为 ( $D_b + d_b$ ) 共计 1650 m(图4)。

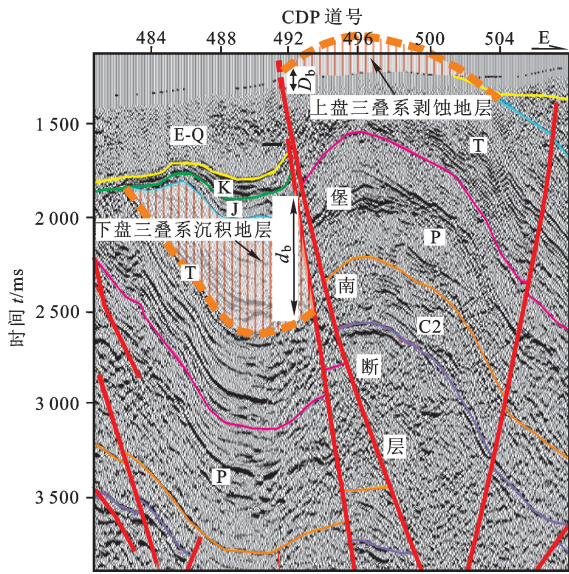


图4 逆冲生长型的堡南断层  
(东西向 720.8 地震剖面)

Fig. 4 Seismic profile showing double-force slipping model of Baonan fault (EW720.8)

(3) 基底抬升型。基底抬升型断层主要分布在坳陷东部,该类断层附近基底抬升明显,地层呈现明显的逆冲牵引现象,断层上下两盘剥蚀均较严重,如花园断层、HB1 井东断层、火石镇 I 号断层、火石镇 II 号断层等均属此类。以火石镇 I 号断层在三叠纪的活动为例(图 5),三叠系地层整体表现为基底抬升逆冲,由于断层上下两盘同时逆冲,断层的活动量为二者的相对逆冲幅度,根据构造横剖面法确定剥蚀厚度,图 5 中  $D_c$  为断层上盘三叠系剥蚀部分,地

震剖面上为 640 ms,时深转换后得到上盘剥蚀厚度为 1400 m,  $d_c$  为断层下盘三叠系剥蚀部分,地震剖面上为 120 ms,时深转换后得到下盘剥蚀厚度约为 250 m,将  $(D_c - d_c)$  视为断层在三叠纪的活动量,共计 1150 m。

将哈密坳陷各时期活动的主要断层按上述 3 种地质模型进行分类,考虑到走滑分量会对计算的断层活动量有影响,在选用地震剖面时,尽量选用断层走向与受力方向垂直的剖面点,避免走滑分量的影响,提高计算的精度,依次计算出各断层在印支期、燕山期和喜山期的活动量(表 1)。

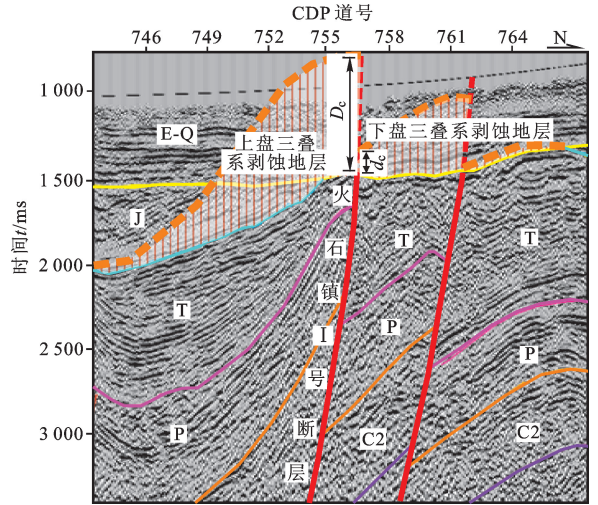


图5 基底抬升型的火石镇 I 号断层  
(南北向 525.8 地震剖面)

Fig. 5 Seismic profile showing basement uplifting model of Huoshizhen No. I fault (SN525.8)

表 1 哈密坳陷主要断层要素

Table 1 Structural elements of major faults in Hami depression

断层名	级别	走向	倾向	倾角 $\theta/(\circ)$	延伸长度 $L/\text{km}$	活动 时间	断穿 层位	主活动期断层活动量/m		
								印支期 (T)	燕山期 (J-K)	喜山期 (E)
南湖断层	I	EW	S	>70	>65	$T_1$ -Q	C-Q	2500	400	2000
哈尔里克山前断层	I	NWW	NNE	>70	>20	$P_2$ -E	C-E	2800	400	600
花园断层	II	NNE	SEE	>70	>15	$T_1$ -J	C-J	1700	100	—
HB1 井东断层	II	NNE	SEE	>70	>25	$T_3$ -K	C- $T_3$	2100	2500	—
堡南断层	III	NNE	SEE	>60	>40	$T_3$ -Q	C-Q	1650	300	800
二股泉断层	III	NEE	NNW	>70	26	$T_3$	C- $T_3$	700	—	—
堡东 I 号断层	III	NNE	NWW	>70	20	$T_3$ -J	C-J	300	150	—
堡东 II 号断层	III	NNE	SEE	>70	22	$T_3$ -J	C-J	1000	150	—
花园 I 号断层	III	NEE	NNW	>80	27	$P_2$ - $T_3$	C- $T_3$	600	—	—
花园 II 号断层	III	NEE	SSE	>70	11	$P_2$ - $T_3$	C- $T_3$	1000	—	—
火石镇 I 号断层	III	NEE	SSE	>60	>10	$T_1$ -K	C- $T_1$	1150	200	—
火石镇 II 号断层	III	NEE	SSE	>60	>10	$T_1$ -K	C- $T_3$	1100	200	—
哈北 I 号断层	III	NNE-EW	SSE-S	>70	17	$T_1$ - $T_3$	C- $T_3$	400	500	—
哈北 II 号断层	III	NWW	NNE	>70	23	$T_1$ - $T_3$	C- $T_3$	300	—	—
H1 井断层	III	NE	NW	>60	>10	$T_3$	C- $T_3$	100	400	—

注:“—”表示断层已停止活动。

## 2 哈密坳陷的逆冲作用与演化

### 2.1 逆断层在不同时期的演化特征

(1) 印支期。哈密坳陷中的绝大多数断层在印支期形成,断层活动量大,断穿层位较老(表1)。南部的火石镇凹陷受花园断裂的 NWW 向挤压作用影响,在其内部形成一系列 NNE 向的Ⅲ级断层,断层以逆冲活动为主,断层活动幅度较大,对比分析断层在各个时期的活动量可以看出,火石镇凹陷印支期断层的活动强度明显大于其他期次(图6(a))。此时,坳陷的边界断层活动最为强烈,表现为南部受觉罗塔格山活动的影响,南湖断层活动性较强,并且切割所有凹陷内部的印支期 NNE 向断层;北部受哈尔里克山活动的影响,在三堡凹陷内部形成大量平行于哈尔里克山前断层的 NWW 向断层,这些断层多呈小幅逆冲,其断层活动强度小于火石镇凹陷。

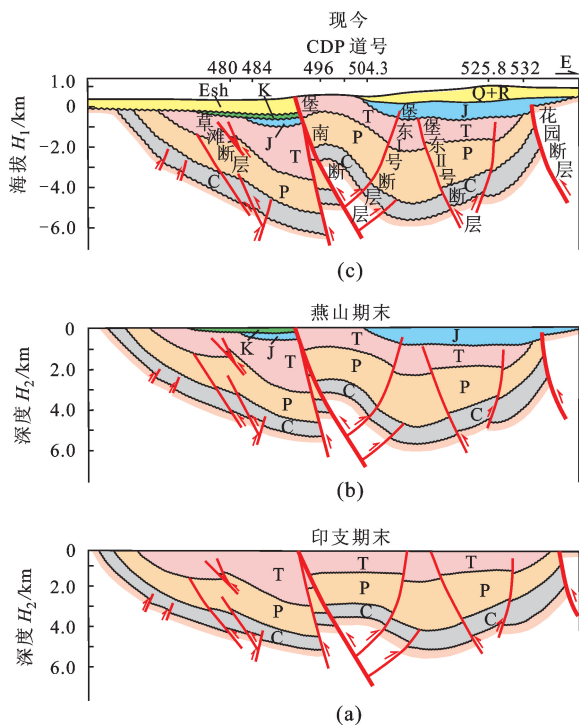


图6 火石镇凹陷断层演化(东西向720.8剖面)

Fig.6 Evolution of thrusting of Huoshizhen sag (EW720.8)

(2) 燕山期。燕山期断层的活动具有继承性,火石镇凹陷内断层继承性逆冲,幅度不大(图6(b))。但坳陷东北部大规模抬升,侏罗系中上统遭受剥蚀,三堡凹陷内大量 NWW 向断层活动加强,活动强度最大的是 HB1 井东断裂,其活动量大于印支期,为 2500 m,并作为边界断裂进一步控制了三堡凹陷的沉积与发展。

(3) 喜山期。喜山期断层的活动具有差异性,

坳陷南部山系继续向北逆冲,逆冲幅度较大,火石镇凹陷内 NEE 向构造带进一步压扭(图6(c))。三堡凹陷受喜山运动影响不大,保持了 NNE 向断裂控制凹陷边界、内部北西向断裂与北部边界断裂平行排列的基本构造格局。

### 2.2 断层演化对哈密坳陷现今构造格局的影响

哈密坳陷不同区域的断层演化,对现今构造形态形成具有重要的影响,由于三叠纪断层的强烈活动,造成了三叠系与侏罗系及以上地层的明显角度不整合,各时期断层的活动和演化在各构造单元具有明显的差异。

(1) 火石镇凹陷。哈密坳陷南缘的南湖断裂在印支末期大幅逆冲,构成现今坳陷的南部边界。火石镇凹陷内的堡南、堡东等一系列的 NNE 向构造带,均伴随着堡南断层、堡东 I 号断层和堡东 II 号断层在印支期的强烈活动形成,坳陷南部印支期形成的 NNE 向断层奠定了火石镇凹陷现今的构造格局。由于燕山期和喜山期的断层活动明显减弱,虽然经过褶皱与隆升改造,构造幅度有所增加,但总的构造格局基本保持不变(图6)。

(2) 三堡凹陷。哈密坳陷北部哈尔里克山前断层在印支期形成,到喜山期才逐渐停止活动,是现今坳陷的北部边界。三堡凹陷内的哈北构造带在印支期伴随哈北 I 号断层和哈北 II 号断层的发育形成构造锥形,后经燕山期的地层褶皱使构造形态更加明显。印支期断层的活动最初奠定了三堡凹陷构造的锥形,后经燕山期地层褶皱和断层活动的进一步改造而形成现今的构造形态。

(3) 黄田凸起西翼。黄田凸起西翼的南部被花园断层与火石镇凹陷分割,北部被 HB1 井东断层与三堡凹陷分割。花园断层在印支期的强烈活动,形成了火石镇凹陷东部的现今构造形态。HB1 井东断层在印支期已经形成,燕山期的大幅逆冲使黄田凸起基本定型,三堡凹陷东部地层受其影响发生掀斜,这种构造形态维持至今。

总之,哈密坳陷现今的构造格局是在印支期形成,经过燕山期的局部改造,在喜山期定型。造成不同区域断层活动性差异的原因,主要是哈密坳陷总体受印支期和燕山期两期南、北造山带挤压,在此逆冲构造格局的背景下,坳陷又受到了敦隆起的影响,为统一应力场下多期不连续逆冲事件形成的逆冲构造格局。

## 3 结论

(1) 哈密坳陷的逆断层可分为单向逆冲型、逆

冲生长型和基底抬升型3种类型,依据这3种地质模型可以精确地表征各时期不同类型断层的活动性。

(2)在哈密凹陷的不同区域、不同时期的断层活动性存在明显的差异。火石镇凹陷内断层的逆冲幅度高峰在印支期,控坳边界断层在喜山期仍有大幅活动;三堡凹陷内断层形成于印支期,断层的逆冲幅度高峰出现在燕山期。

(3)断层活动与演化的结果直接影响现今的构造格局,早期的印支运动直接奠定了火石镇凹陷现今的构造格局;三堡凹陷的构造形态却经历了燕山期地层褶皱和断层活动的改造,在晚燕山运动后才最终定型。

### 参考文献:

- [1] 杨克绳. 中国含油气盆地结构和构造样式地震解释[M]. 北京:石油工业出版社,2006:434-464.
- [2] 陈中红,查明,吴孔友. 准噶尔盆地陆梁地区油气运移方向研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):19-22.  
CHEN Zhong-hong, ZHA Ming, WU Kong-you. Hydrocarbon migration direction in Luliang section of Junggar Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(2):19-22.
- [3] 邵文斌,寿建峰. 柴达木盆地尕斯断陷古近系:新近系的沉积演化规律与储集体分布[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(6):12-16.  
SHAO Wen-bin, SHOU Jian-feng. Sedimentary evolution and reservoir distribution of tertiary in Gasi fault sag of Qaidam Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(6):12-16.
- [4] 陈刚,戴俊生,叶兴树,等. 生长指数与断层落差的对比研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(3):20-23.  
CHEN Gang, DAI Jun-sheng, YE Xing-shu, et al. A comparison of the fault growth index with fault throw[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007,29(3):20-23.
- [5] ROCKWELL T K, KELLER E A, CLARK M N. Chronology and rates of faulting of Ventura River terraces, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984,95:1466-1474.
- [6] 袁明生,梁世军,燕列灿,等. 吐哈盆地油气地质与勘探实践[M]. 北京:石油工业出版社,2002:21-22.
- [7] 张德林. 二连盆地的逆断层运动及其对油气藏形成的影响[J]. 石油地球物理勘探,1994,29(5):637-641.
- ZHANG De-lin. Reverse fault movement and its impact on the reservoir formation in Erlian Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1994,29(5):637-641.
- [8] 王爱国,石玉成,袁道阳. 断层活动方式与地震地表变形分布特征研究[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):237-243.  
WANG Ai-guo, SHI Yu-cheng, YUAN Dao-yang. Study on regularity of ground deformation of earthquake and active pattern of fault[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009,29(3):237-243.
- [9] 刘和甫,梁慧社,蔡立国,等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1994,19(6):727-740.  
LIU He-fu, LIANG Hui-she, CAI Li-guo, et al. Evolution and structural style of Tianshan and adjacent basins, Northwestern China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1994,19(6):727-740.
- [10] 胡建中,谭应佳,张平,等. 塔里木盆地西南缘山前带逆冲推覆构造特征[J]. 地学前缘,2008,15(2):222-231.  
HU Jian-zhong, TAN Ying-jia, ZHANG Ping, et al. Structural features of Cenozoic thrust-fault belts in the piedmont of southwestern Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008,15(2):222-231.
- [11] 胡望水,谢锐杰,官大勇,等. 柴达木盆地西部新生代生长构造格架与油气聚集[J]. 地学前缘,2004,11(4):425-433.  
HU Wang-shui, XIE Rui-jie, GUAN Da-yong, et al. Growth structural framework and hydrocarbon accumulation in Cenozoic in the west Qaidam Basin, Northwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2004,11(4):425-433.
- [12] KENNETH Daves, BURBANK Douglas W, DONALD Fisher, et al. Thrust-fault growth and segment linkage in the active Ostler fault zone, New Zealand[J]. Journal of Structural Geology, 2005,27:1528-1546.
- [13] EDWARD Sobel, TREVOR Dumitru. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102(B3):5043-5063.
- [14] AVOUAC J P, TAPPONNIER P, BAI M H, et al. Active thrusting and folding along the northern Tian Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993,98(B4):6755-6804.

(下转第14页)