

塔里木盆地雅克拉断凸古构造应力场数值模拟

罗小龙^{1,2,3}, 汤良杰^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:雅克拉断凸长期处于挤压环境,逆断层发育,但在喜马拉雅早期正断层也发育。为了研究雅克拉断凸的断层发育特征,对海西晚期和喜马拉雅早期古构造应力场进行三维有限元数值模拟。结果表明,海西晚期整个研究区在挤压应力作用下皆为中、低应力值区,中、东部南侧是低应力值区,往北、往西应力值增加,该应力场导致研究区内部发育了一些规模较小的逆断层。喜马拉雅早期研究区在挤压应力作用下向上隆起,隆起幅度由西向东逐渐增加,隆起导致地层弯曲,且以边界断裂顶部附近区域弯曲度最大,导致此处的拉张应力也最大,正断层正是从此处开始发育,然后再向内发展;与此同时,研究区下部受到的挤压应力作用较小,导致内部的逆断层几乎没有进一步发育。

关键词:海西晚期;喜马拉雅早期;数值模拟;构造应力场;雅克拉断凸;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Numerical simulation of palaeotectonic stress field
in Yakela faulted salient, the Tarim BasinLuo Xiaolong^{1, 2, 3}, Tang Liangjie^{1, 2}

(1. State Key Laboratory for Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Thrust faults are widely developed in Yakela faulted salient due to long-term compression regime. However, some normal faults were also formed during the Early Himalayan. In order to decode the mechanism of formation and evolution of these faults, we conducted 3D finite element numerical simulation for the Late Hercynian and Early Himalayan stress field in the Yakela faulted salient. During the Late Hercynian, the compressive stress resulted in the low stress areas in the central and eastern parts of the Yakela faulted salient and the low to moderate stress in the west and north part. This stress field caused the development of some small-scale thrust faults in the Yakela faulted salient. During the Early Himalayan, the compressive stress induced uplifting of the study area, with the amplitude of uplifting increasing from west to east. As a result, the strata bended in the study area, with the strongest tensile stress occurring on top of the boundary fault, and normal faults were also developed in these locations and extended inwards. Meanwhile, compression stress was weak in the lower part of the whole study area, thus did not induce the further development of thrust faults in the inner parts of the study area.

Key words: Late Hercynian, Early Himalayan, numerical simulation, tectonic stress field, Yakela faulted salient, Tarim Basin

古构造应力场是指某个地质历史时期的构造应力场,是各种类型盆地的所有地质体发生构造变形(如断层、褶皱)的直接原因,是油气成藏过程中油气运移与聚集的重要动力^[1-2]。雅克拉断凸处于以挤压作用为主的盆地之中,其南北边界为轮台断裂与亚南断裂,二者最大断距皆超过2 000 m,对于研究区内部逆断层数量不多且规模较小这一现象很少有人研究,而对于中-新生代出现的正断层,许多学者做过研究并推测了其形成的原

因^[3-8],但到目前为止前人仅对研究区内部正断层的形成机理进行了初步推测,没有做过实验证明。目前研究古构造应力场的一种较为成熟的方法是以区域构造变形特征研究为基础进行反演,国内外很多学者运用该方法研究古构造应力场并取得了良好效果^[9-15]。本文以雅克拉断凸的构造分析为基础,利用Ansys软件对其海西晚期和喜马拉雅早期的古构造应力场进行三维有限元数值模拟,分析了模拟结果,探讨了研究区内部几个重要时期断

收稿日期:2013-07-19;修订日期:2013-11-08。

第一作者简介:罗小龙(1974—),男,博士研究生,含油气盆地构造解析。E-mail:lxl2001181@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41172125);中石化西北油田分公司项目(KY2010-S-053, KJ2008-29)。

层发育的主要原因。模拟结果对于拓展雅克拉断凸及邻近区域的勘探思路有较好的作用。

1 区域地质背景

雅克拉断凸位于塔里木盆地北部,是塔北隆起的一个次级构造单元,近东西走向,呈西宽东窄的狭长带状,南北向窄处仅约 20 km,宽处约 100 km,东西向长约 300 km,面积约 9 600 km²,其与周边区域的关系见图 1。轮台断裂与亚南断裂是研究区的南北边界,目前发现的油气藏主要集中在这两大断裂附近,如牙哈系列油气田、雅克拉大型凝析气田等^[16-17]。研究区的构造演化经历了震旦纪—泥盆纪和石炭纪—三叠纪伸展—聚敛构造旋回以及中—新生代陆内弱伸展—挤压构造旋回,前两个阶段以强烈挤压为主,在第三旋回中白垩系与古近系发育了大量正断层,正断层主要集中在中、东部地区,西部地区较少。

2 地质模型

地质模型的合理性决定了构造应力场数值模拟的精度,而地质模型是否合理依赖于对地下地质特征的掌握情况,尤其是被模拟时期的各种地质特征,因雅克拉断凸受后期较大的改造变化再成为现今构造,是一个已经变化了的、原型不存在的对象,如果用现今地质特征代替某个地史时期的地质特征显然不合理,所以应当恢复特定地质历史时期的区域构造背景以及各类地

质特征,才能无限接近该时期的应力场特点^[14-15,18-20]。为了实现上述目的,本文利用平衡剖面技术,在进行数值模拟的选定区域内,选择了多条测线,结合三维与二维地震剖面,完成地质构造演化图,恢复各地史时期古构造形态,另外再结合一些其它地质构造图建立三维地质模型。由于雅克拉断凸是一个西部宽、东部窄以及轴向为 NEE 向的长条状,为了很好地模拟该区域,选定了一个完全覆盖整个研究区的长方形区域,地质模型范围东西长 300 km,南北宽 150 km。

通过对雅克拉断凸的构造演化历史详细分析后认为,海西晚期与其之前的构造应力场基本相同,同时考虑到海西晚期在地史上挤压作用最强烈,因此选择这一地史时期进行模拟。另外,喜马拉雅早期发育了不少正断层,对于以挤压环境为主的研究区来讲这是一个重要的地史时期,因此又选择了这一期进行模拟。海西晚期及其之前研究区内的地质构造以逆断层为主,地层厚度约 7 km,因此确定海西晚期模型的深度为 7 km,且研究区内的地质构造皆为逆断层(图 2a)。燕山晚期至喜马拉雅早期,研究区在经历了大规模的剥蚀后,沉积了较厚的白垩系,之后沉积了古近系,正断层主要发育于此两地层之中;但在白垩系初始沉积的一段时期内正断层应没有发育,鉴于此,确定该时期的模型为在海西晚期模型基础之上覆盖 1 km 厚度的地层,名为喜马拉雅早期模型①;待部分正断层发育后,再将其增加至模型中,此模型也以海西晚期模型为基础,在其上覆盖厚度为 3 km 并包含正断层的地层,名为喜马拉雅早期模型②(图 2b)。

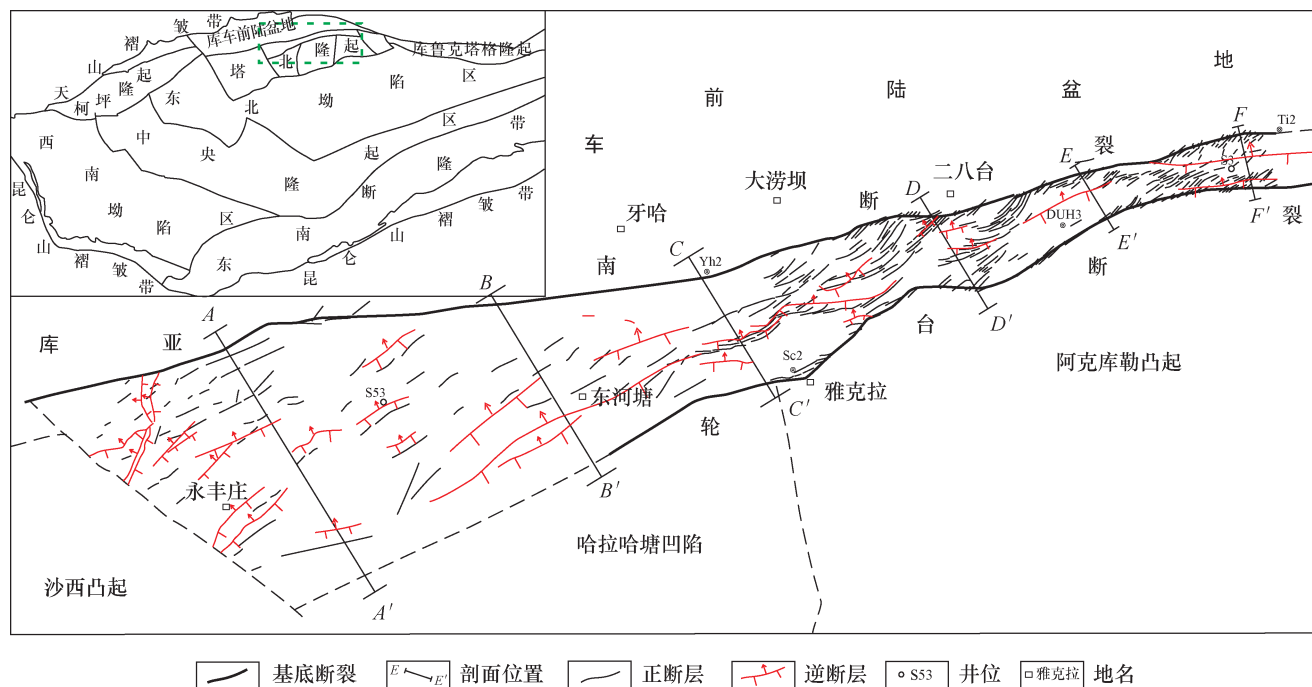


图 1 塔里木盆地雅克拉断凸构造纲要

Fig. 1 Structure outline map of Yakela faulted salient, the Tarim Basin

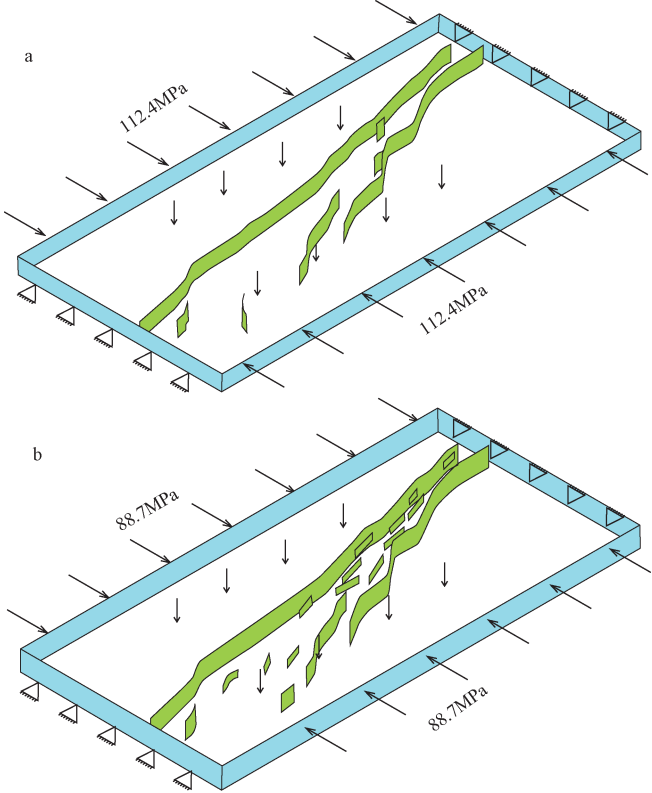


图 2 雅克拉断凸喜马拉雅早期三维力学模型
Fig. 2 3D mechanical models of the Yakela faulted salient during the Early Himalayan
a. 模型①; b. 模型②

3 数学力学模型

根据周新桂等关于雅克拉断凸各区域岩石力学实验研究结果^[21],虽然研究区岩石抗压强度由高至低依次为岩浆岩、变质岩和沉积岩,但皆表现为脆性破裂,沉积岩中的碳酸盐岩和碎屑岩亦多数发生脆性破裂,因此将雅克拉断凸及其邻区地质体按弹性体处理(表 1)。建立合理的数学力学模型主要考虑两个方面:一是岩石力学参数的选择,二是边界条件的确定^[11,22-23]。研究区海西晚期与喜马拉雅早期的最大主应力数据见表 2,模拟实验中海西晚期最大主应力($\sigma_{\max}$)为 112.4 MPa,喜马拉雅早期 $\sigma_{\max}$ 为 88.7 MPa,两期的挤压应力方向皆为近南北向^①,弹性模量 $E = 15\,000\text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.2$,密度 $= 2.7\text{ g/cm}^3$,重力加速度 $= 9.806\text{ m/s}^2$ ^[22,24]。

为减少边界效应,在建立数学力学模型过程中,计算范围比研究区大一些,北面包括库车前陆盆地最南面,南面包括轮台断裂以南一部分区域。对于边界约束,通过实验分析、比较,选择如下约束最为恰当,对三维模型底面的东西底边施加完全位移约束,从南、北两

表 1 雅克拉断凸岩石力学参数^[22]
Table 1 Parameters of rock mechanics of the Yakela faulted salient^[22]

位置	层位	岩性	弹性模量 E/MPa	泊松比
中西部	N	粉砂质泥岩	19 960	0.152
中西部	E	泥岩	12 280	0.183
中西部	E	膏岩	12 170	0.175
中西部	K	粉砂岩	12 810	0.192
西部	P	玄武岩	20 400	0.186
西部	D	粉砂岩	5 640	0.140
中西部	O	灰岩	50 400	0.242
中西部	Є	粉晶云岩	58 900	0.277
中西部	Z	板岩	38 660	0.117

表 2 雅克拉断凸现今地应力^[25]

Table 2 Current ground stress of the Yakela faulted salient^[25]

井号	岩性	时代	埋深/m	最大主应力/MPa
沙 4	砂岩	N _{1j}	3 981	88.7
沙 4	砂岩	J	5 309	108.3
沙 5	白云岩	C	5 860	119.8
沙 5	灰岩	C ₁	5 458	105.0
沙 8	泥板岩	AnZ	5 379	113.9

侧面施加 Y 方向挤压应力,模型内部为重力载荷。为了让计算机能够进行有效计算,模型中只选择了研究区内的部分断层。本次模拟采用线弹性力学模型,网格剖分采用三角形单元,海西晚期三维模型共划分 177 996 个单元,39 088 个节点,喜马拉雅早期三维模型①共划分 123 898 个单元,27 435 个节点,喜马拉雅早期三维模型②共划分 160 313 个单元,35 610 个节点。

4 模拟结果分析

把数学力学模型转换成计算模型后,加载到 Ansys 软件中可得出结果,结果包括很多,与文章有关的主要有等效应力分布图和第一主应力分布图。下面就这些图进行分析。

4.1 海西晚期应力场分析

图 3 为海西晚期等效应力云图。整体上看应力最大值位于研究区亚南断裂最东段,最小值位于东河塘断裂中部,高应力值区有 4 处,分别是亚南断裂东段邻近区域,模型北边界的东部和西部,另一个是轮台断裂西段附近区域。研究区中、东部轴部至轮台断裂之间的区域属于低应力值区,从轴部向北至亚南断裂应力值逐渐增大,西部主要为中应力值区。图 4 为第一主应力分布云图,第一主应力即最大主应力 σ_1 ,表示研究区受到

① 孙宝珊. 新疆塔里木盆地东北地区沙雅隆起构造应力场与油气移聚的关系. 地质矿产部地质力学研究所, 1989。

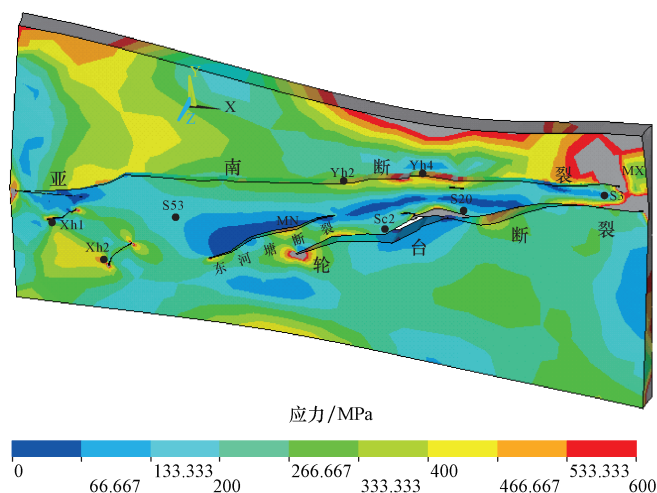


图3 雅克拉断凸海西晚期等效应力云图

Fig. 3 Equivalent stress nephogram of the Yakela faulted salient during the Late Hercynian

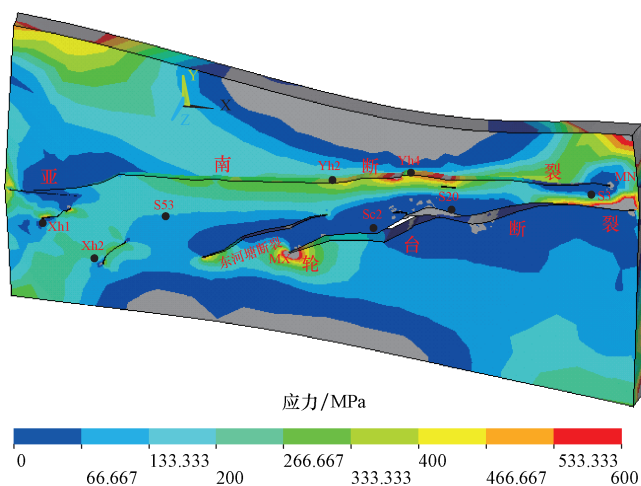


图4 雅克拉断凸海西晚期第一主应力云图

Fig. 4 Nephogram of the first major stress of the Yakela faulted salient during the Late Hercynian

的南北向挤压应力,其分布与等效应力分布不一样,其最大值在轮台断裂最西段,最小值在亚南断裂最东段。高应力值区有5处,分别为模型北边界的东、西段,亚南断裂中段 Yh4 井附近区域,以及轮台断裂两端附近区域。低应力值区分布于研究区中部靠近轮台断裂一侧的区域内。研究区西部主要为中应力值区。第一主应力与等效应力在研究区内的分布基本相同。

综合上述分析,海西晚期研究区西部是中应力值区,中、东部南侧为低应力值区,中、东部北侧的应力分布呈扇形并向亚南断裂中段高应力值处梯次增加。雅克拉断凸长期以挤压环境为主,至海西晚期挤压最为强烈,导致边界发育基底深大逆断层,最大断距达到3 000 m,但研究区内发育的逆断层数量不多且规模较小,究其原因,主要是因为高应力值区主要集中于研究区的边界断裂处,内部的压应力值比外部小得多(图3,图4),这导致边界断裂不断发展成为深大断裂,

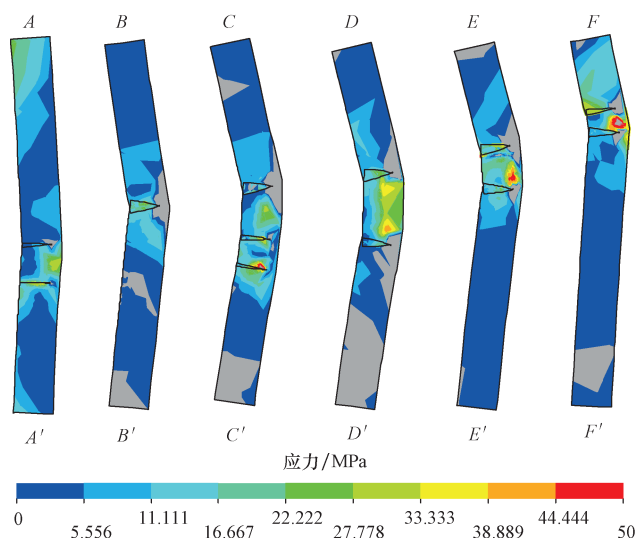


图5 喜马拉雅早期第一主应力剖面云图(剖面位置见图1)

Fig. 5 Nephogram of the first major stress of the Yakela faulted salient during the Early Himalayan (see Fig. 1 for the location)

而研究区内部只发育一些规模较小的逆断层(图1)。

4.2 喜马拉雅早期剖面应力场分析

根据喜马拉雅早期模型1计算所得的第一主应力剖面云图(西侧面透视图)可看出(图5),整个研究区处于中、低应力值区;高应力值区不多,主要位于研究区中、东部近地表区域;研究区外侧为低应力值区,亚南断裂和轮台断裂顶部至地表之间的区域也是低应力值区,且其值小于0,此时应力表现为拉张应力。图5中的各个剖面皆出现隆起现象,而研究区为隆起顶部,隆起所致的弯曲地层就会产生拉张应力,因隆起幅度从西至东逐渐增加,导致拉张应力也是由西向东逐渐增强。上述分析表明,喜马拉雅早期研究区在挤压应力作用下隆起,且以边界断裂顶部附近区域的弯曲度最大,导致该区域的拉张应力也最大,正断层就是从此区域开始发育,且东部比西部发育得好。

图6是喜马拉雅早期模型②计算所得的第一主应力云图,整体上看挤压应力主要作用于研究区。最大值在S20井附近,最小值在Dh25井的西北角。高应力值区主要集中于研究区北边界中段,南边界也有一些分散的高值区。模型南北边界至研究区边界附近的广大区域皆为低应力值区。在研究区内部,西部是低应力值区,中、东部为中、低应力值区的混合区域,正断层两端附近区域皆为低应力值区。低应力值区表明其受挤压应力作用较小,这为正断层的发育提供了较好的环境。

从喜马拉雅早期模型②计算所得的等效应力剖面云图(西侧面透视图)上可明显看出(图7),等效应力主要作用于研究区上部;低应力值区主要位于研究区下部,并以研究区底部的应力值最低,研究区下部正是

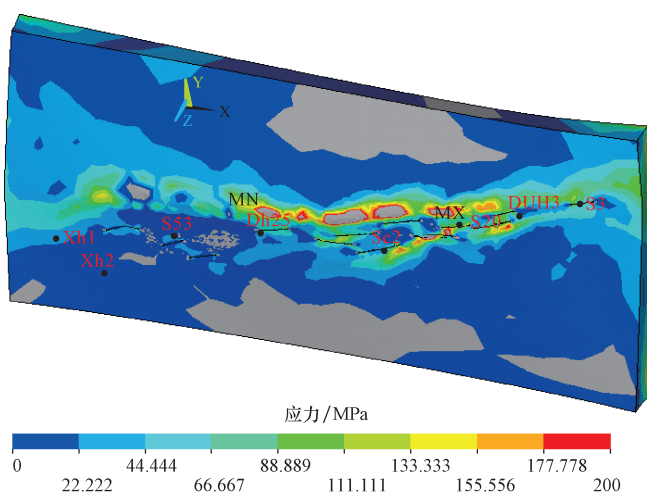


图6 雅克拉断凸喜马拉雅早期第一主应力云图

Fig. 6 Nephogram of the first major stress of the Yakela faulted salient during the Early Himalayan

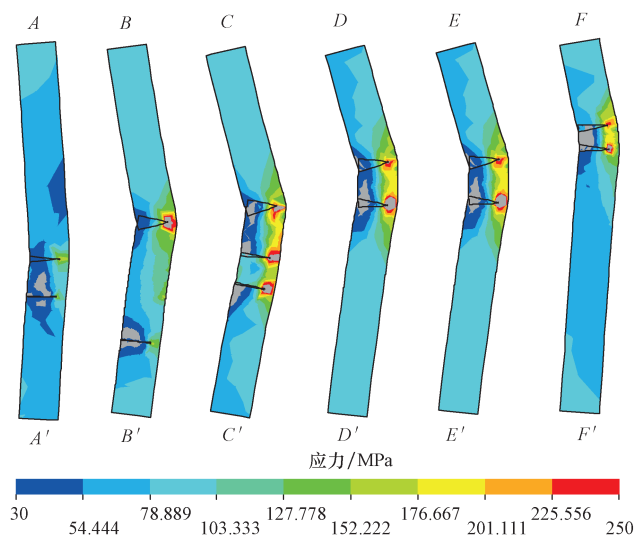


图7 喜马拉雅早期等效应力剖面云图(剖面位置见图1)

Fig. 7 Equivalent stress nephogram of the Yakela faulted salient during the Early Himalayan (see Fig. 1 for the location)

逆断层(边界断层除外)所处位置,表明喜马拉雅早期研究区内的逆断层受到的应力作用较小。从图7上还可看出整个模型向上隆起,隆起顶部为雅克拉断凸,隆起幅度从西至东逐渐增加。上述分析表明,喜马拉雅早期研究区在挤压应力作用下发生隆起,且由西向东隆起幅度逐渐增加;同时研究区内部受到的应力作用较小,导致其中的逆断层几乎没有进一步发育。

综合上述分析,喜马拉雅早期研究区在挤压应力作用下向上隆起,隆起幅度由西向东逐渐增加,隆起的地层因弯曲而产生拉张应力,拉张应力随着隆起幅度的增加而加大;正断层从研究区边界断裂顶部附近区域开始发育,然后再逐步向内发展,总体上东部比西部更加发育;同时研究区内的逆断层所受到的应力极其有限,导致其几乎没有进一步发育。

5 结论

1) 海西晚期及之前雅克拉断凸主要处于挤压环境,该期模拟结果表明,研究区北部边界—亚南断裂中部所遭受挤压应力较大,研究区其余各处所受挤压力较小,整体上西部所受挤压应力比中、东部要大些,此应力场最终导致研究区内发育了一定数量的逆断层,但规模皆不大。

2) 喜马拉雅早期模拟结果表明,该时期仍然处于挤压环境之下,但所遭受的应力比之前小,研究区在挤压应力作用下向上隆起,隆起幅度由西向东逐渐增加;隆起致地层弯曲,边界断裂顶部的弯曲度最大导致此处的拉张应力也最大,正断层就是从该处开始发育,然后再向内发展,总体上东部比西部更加发育;同时研究区内所受到的挤压作用较小,导致逆断层几乎没有进一步发育。

参 考 文 献

- [1] 孙晓庆. 古构造应力场有限元数值模拟的应用及展望[J]. 断块油气田, 2008, 15(3): 31-33.
Sun Xiaoping. Present situation and prospect of application for finite element numerical simulation of palaeotectonic stress fields [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(3): 31-33.
- [2] 张胜利. 构造应力场模拟——有限元理论、方法和研究进展[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 405-410.
Zhang Shengli. Modeling of tectonic stress field—the theory, method and related research progress of the finite element method [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(4): 405-410.
- [3] 魏国齐, 贾承造, 施央申, 等. 塔北隆起北部中生界张扭性断裂系统特征[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 19-24.
Wei Guoqi, Jia Chengzao, Shi Yangshen, et al. Tectonic characteristics and petroleum accumulation in extensional-shear fault system in Mesozoic-Cenozoic formations in the northern area of Tabei uplift, Tarim [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 19-24.
- [4] 杨春林, 吴奇之, 夏义平. 塔里木盆地北部隆起中、新生界张扭断裂系统成因及其油气聚集的作用[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4): 461-468.
Yang Chunlin, Wu Qizhi, Xia Yiping. The origin of Mesozoic-Cenozoic extension torsional fault system in the north positive element in the Tarim Basin, and its role in accumulating oil and gas [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(4): 461-468.
- [5] 罗小龙, 汤良杰, 谢大庆, 等. 塔里木盆地雅克拉断凸走滑作用及其形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 257-263.
Luo Xiaolong, Tang Liangjie, Xie Daqing, et al. Strike-slip movement and its genetic mechanism in Yakela faulted salient, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 257-263.
- [6] 汤良杰, 金之钧, 张一伟, 等. 塔里木盆地北部隆起负反转构造及其地质意义[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 93-98.
Tang Liangjie, Jin Zhijun, Zhang Yiwei, et al. Negative inversion structures and geological significance of northern uplift, the Tarim Basin, northwestern China [J]. Geosciences, 1999, 13(1): 93-98.

- [7] 陈楚铭, 卢华复, 王国强, 等. 塔里木盆地塔北隆起叠加构造分析[J]. 高校地质学报, 1998, 4(3): 394-302.
Chen Chuming, Lu Huaifu, Wang Guoqiang, et al. Analysis of superimposed structures in the north Tarim uplift, Tarim Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(3): 294-302.
- [8] 张云鹏, 任建业, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地轮南低凸起构造特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 440-447, 460.
Zhang Yunpeng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Structure features and its evolution of Lunnan low uplift, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 440-447, 460.
- [9] 范桃园, 龙长兴, 杨振宇, 等. 中国大陆现今地应力场黏弹性球壳数值模拟综合研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1249-1260.
Fan Taoyuan, Long Changxing, Yang Zhenyu, et al. Comprehensive modeling on the present crustal stress of China mainland with the viscoelastic spherical shell[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1249-1260.
- [10] 万贵龙, 张德会, 张守仁, 等. 北大港构造带东翼华北期构造应力场模拟[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 194-199.
Wan Guilong, Zhang Dehui, Zhang Shouren, et al. Simulation of tectonic stress field of the east of Beidagang tectonic belts in North China Tectonic Period[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 194-199.
- [11] 田宜平, 刘雄, 李星, 等. 构造应力场三维数值模拟的有限单元法[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, 36(2): 375-380.
Tian Yiping, Liu Xiong, Li Xing, et al. Finite element method of 3D numerical simulation on tectonic stress field[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 375-380.
- [12] 王连捷, 孙宝珊, 王薇, 等. 地应力对油气运移的驱动作用[J]. 地质力学学报, 2011, 17(2): 132-143.
Wang Lianjie, Sun Baoshan, Wang Wei, et al. Driving effect of the crustal stress on petroleum migration[J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17(2): 132-143.
- [13] Barba S, Carafa M M C, Mariucci M T, et al. Present-day stress-field modelling of southern Italy constrained by stress and GPS data[J]. Tectonophysics, 2010, 482(1-4): 193-204.
- [14] Ismail-Zadeh A, Aoudia A, Panza G F. Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the Central Mediterranean[J]. Tectonophysics, 2010, 482(1-4): 226-236.
- [15] Islam M S, Shinjo R, Kayal J R. The tectonic stress field and deformation pattern of northeast India, the Bengal basin and the Indo-Burma Ranges; a numerical approach[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(1): 121-131.
- [16] 黄继文, 顾忆, 丁勇, 等. 塔里木盆地北部地区上奥陶统烃源条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 853-858.
Huang Jiwen, Gu Yi, Ding Yong, et al. Upper Ordovician source rocks in northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 853-858.
- [17] 王旭, 沈建伟, 杨红强, 等. 塔里木盆地轮古地区轮深2井蓬莱坝组沥青浸染样式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 420-429.
Wang Xu, Shen Jianwei, Yang Hongqiang, et al. Bitumen impregnation patterns of the Lower Ordovician Penglaiba Formation in Well Lunshen-2 in Lungu area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 420-429.
- [18] 刘显太, 戴俊生, 徐建春, 等. 纯41断块沙四段现今地应力场有限元模拟[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 126-128.
Liu Xiantai, Dai Junsheng, Xu Jianchun, et al. Finite element simulation of the present mound stress field of Sha-4 Member in the Chun-41 fault block[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 126-128.
- [19] 黄立功, 钟建华, 王海侨, 等. 柴西地区构造应力场演化模拟[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 75-77.
Huang Ligong, Zhong Jianhua, Wang Haiqiao, et al. Evolution simulation of stress field in West Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 75-77.
- [20] 崔军文, 唐哲民. 塔里木盆地构造格架和构造应力场分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 231-242.
Cui Junwen, Tang Zheming. Tectonic framework of the Tarim basin and its tectonic stress field analysis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 231-242.
- [21] 周新桂, 孙宝珊, 徐宏节, 等. 雅克拉—轮台地区变形特征及控油作用研究[J]. 地质力学学报, 2001, 7(1): 33-40.
Zhou Xingui, Sun Baoshan, Xu Hongjie, et al. Tectonic deformation of Yakerla Luntai Region in North Tarim Basin and its control on oil/gas accumulation[J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 33-40.
- [22] 王延欣, 侯贵廷, 李江海, 等. 塔北隆起中西部新近纪末构造应力场数值模拟[J]. 北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本), 2008, 3(1): 52-58.
Wang Yanxin, Hou Guiting, Li Jianghai, et al. Numerical simulation of tectonic stress field at the end of Neocene in the Midwest of Northern Tarim Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis On Line(First), 2008, 3(1): 52-58.
- [23] Hou G T, Wang C C, Li J H, et al. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton[J]. Tectonophysics, 2006, 422(1-4): 89-98.
- [24] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 油田三维构造应力场、裂缝与油气运移[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4052-4057.
Wang Lianjie, Wang Hongcai, Wang Wei, et al. Relation among three dimensional tectonic stress field, fracture and migration of oil and gas in oil field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4052-4057.
- [25] 丁原辰, 孙宝珊, 汪西海, 等. 塔北油田现今地应力的 AE 法测量[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1997, 22(2): 101-104.
Ding Yuanchen, Sun Baoshan, Wang Xihai, et al. Present stress state determined by AE in the Northern Tarim oilfield[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(2): 101-104.

(编辑 张亚雄)