

塔里木盆地巴楚隆起玛扎塔格断裂带几何学与运动学特征

张永¹, 郑孟林², 陈赅俊³, 邓铭哲⁴, 田方磊³, 张伟康³, 李英强¹

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000;

3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 4. 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:玛扎塔格断裂带位于巴楚隆起东南缘,因其部分构造出露地表及其第四纪的强烈活动特征而广受关注,探讨玛扎塔格断裂带的几何学、运动学特征不仅可为探究巴楚隆起乃至塔里木盆地应力场演变特征提供依据,也可用于间接对比塔里木盆地各期应力场在该断裂带处的强度变化。结合地震资料和地表露头地层产状,利用深浅结合手段,刻画了玛扎塔格断裂带几何学特征,以三维建模技术建立了断面三维形态,最终利用平衡剖面恢复技术还原了断裂带构造演化过程。研究认为,玛扎塔格断裂带在剖面上整体表现为分层变形特征,沿断裂带走向剖面构造样式较为一致,地表露头构造为断裂带第四纪活动的结果,断裂带三维展布中可显著识别出各构造层断面垂向叠置特征。玛扎塔格断裂带起因于早期基底形成的正断层薄弱带在早奥陶世发生反转,并在志留纪再次活动,在晚二叠世形成沿中寒武统底面滑脱断层,古近纪末期进一步活动;始新世早期,沿古近系底滑脱的新生界断层形成,并在中新世、上新世及第四纪持续性活动,将新生界逆冲至地表形成现今面貌。

关键词:三维模型; 分层变形; 几何学特征; 运动学特征; 玛扎塔格断裂带; 巴楚隆起; 塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Geometrical and kinematical characteristics of the Mazartag fault zone in Bachu Uplift, Tarim Basin

Zhang Yong¹, Zheng Menglin², Chen Jiajun³, Deng Mingzhe⁴, Tian Fanglei³, Zhang Weikang³, Li Yingqiang¹

[1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 2. *Petrochina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China*; 3. *School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*;

4. *Wuxi Branch of Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China*]

Abstract: The Mazartag fault zone at the southeastern margin of the Bachu Uplift has drawn wide attention because of its partial exposure and dents of intensive Quaternary activities. The study on the geometric and kinematical characteristics of the zone may provide a basis for exploring the evolution characteristics of the stress field in the Bachu Uplift and even the Tarim Basin, and also for an indirect observation of intensity variations of stress fields (of the basin) at the zone through various stages. The geometry of the Mazartag fault zone was then characterized and combined with seismic data and outcrop observation to establish 3D sections via 3D modeling, and to restore the evolution process with balanced section restoration. The results show that the Mazartag fault zone is characterized by layered deformation and the structural style along the fault zone is relatively consistent. The outcrops are shaped by the Quaternary activities. Vertical overlapping fault planes of each structural layer are easily identified in the 3D sections. All these suggest that the Mazartag fault zone was initially a weak normal fault zone formed in the basement that then went through the Early Ordovician inversion, Silurian reactivation, and Late Permian decollement along the bottom of the Middle Cambrian in succession. At the end of the Paleogene, the zone was activated further and started to form the Cenozoic decollement fault zone along the Paleogene in the early Eocene. The decollement faults have been active from the early Eocene, Miocene, Pliocene to Quaternary, and thrust the Cenozoic strata to the surface to take the present relief.

收稿日期:2020-05-02; 修订日期:2021-02-10。

第一作者简介:张永(1987—),男,博士、助理研究员,盆地构造解析。E-mail:zhangyong0620@126.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003);国家自然科学基金项目(41872161,41972128)。

Key words: 3D model, layered deformation, geometrical characteristics, kinematical characteristics, Mazartag fault zone, Bachu Uplift, Tarim Basin

作为组成巴楚隆起南界断裂带断裂之一,玛扎塔格断裂带由于和田河气田的发现与投产^[1],关于断裂带几何学与运动学及其储层、成藏的研究为学者们所关注。在前人的研究中,多将玛扎塔格断裂带解释为一条基底卷入型的断裂构造带,由近乎平行的玛扎塔格南断裂和玛扎塔格北断裂构成,在剖面上多将两断裂组成“Y”字形^[2-6],或由数条断裂组成扭断裂系,在剖面上表现为正花状构造^[7-8],也有学者将其解释为基底卷入构造型的共轭-非对称型膝褶带^[9],或表现为剪切断层弯曲褶皱样式^[10]。在对断裂带活动期次的讨论中,主要存在有两种主要观点,分别为将其划分为中新世、上新世和第四纪的三期冲断^[3,11-15],或者为早期正断层后期发生反转所形成^[12],并经历了加里东-海西期及喜马拉雅期的改造的四期活动的观点^[8]。虽然上述学者对玛扎塔格断裂带进行了详细的构造解释及形成期次、时间厘定,但在对断裂带的解析中普遍缺乏定量解析,尤其是对于各期断裂的构造活动强弱缺乏关注,而玛扎塔格断裂带作为巴楚隆起南界断裂东段的一部分,断裂带最近一期的活动在地表留下了完整清晰的痕迹,其活动可能响应于青藏高原的隆升活动^[16],因此定量研究玛扎塔格断裂带的几何学、运动学特征不仅有利于间接探讨巴楚隆起隆升速率、原因及时限,对于探究克拉通内构造变形对于青藏高原隆升活动的响应作用也具有重要意义。本文使用数条近垂直于玛扎塔格断裂带走向的地震剖面,结合断裂带内钻井资料,以断层相关褶皱理论为指导,通过精细定量构造解释,识别了断裂带深部变形特征,并建立玛扎塔格断裂带三维模型,探究了各期断裂活动强度特征,最终厘定了玛扎塔格断裂带的活动期次。

1 区域地质概况

玛扎塔格断裂带位于巴楚隆起西南侧,走向北西西(图1),西与古董山构造带和海米罗斯断裂带相接,东止于玛东构造带^[17],延伸长度约110 km,断裂带地表为玛扎塔格山,为该断裂带活动所形成的地表露头,主要出露古近系和新近系,断裂带其他部位主要为第四系所覆盖,钻井资料及地震层位追踪资料显示,玛扎塔格断裂带以前寒武系为基底,整体缺失中生界,中寒武统发育局限环境下盐岩层或膏盐岩层,多缺失中、上奥陶统,下奥陶统以海相碳酸盐岩为主,泥盆系仅见东

河塘组,石炭系厚度较大,主要以海相碳酸盐岩为主,二叠系可见有火山岩发育,古近系见蒸发环境下的膏岩层稳定分布,新近系和第四系主要以碎屑岩为主。鉴于盐岩及膏岩层的塑性较好,且两套岩层在断裂带分布较为稳定,可作为区域性滑脱层。

2 玛扎塔格断裂带几何学特征

玛扎塔格断裂带在平面上走向近东西,平面上可见其主要由3条断层组成,各断层之间走向平行,由西至东断裂带走向整体未发生较大变化。断裂带内有多口钻井,多钻至奥陶系,可为断裂带内层位标定提供准确钻井依据,玛扎塔格断裂带南侧还可见有鸟山断裂。玛扎塔格断裂带有多条二维地震剖面垂直其走向切过,本节选取6条剖面,结合局部地区的浅表剖面,由西向东描述断裂带在各剖面上几何学特征。

2.1 剖面几何学特征

剖面MZ05-116位于玛扎塔格断裂带最西端,结合浅表,可推测浅层构造样式为向东逆冲的背斜构造,上盘地层强烈隆升,遭受剥蚀夷平,断层 F_1 向深部产状变缓收敛至古近系底滑脱层,浅层构造整体表现为断层转折褶皱样式,断层向上突破至地表,后期遭受剥蚀,经识别分析,可知断层未发生转折时上盘地层截层角(θ)为 4.7° ,地层向斜翼间角半角(γ)为 0.59° ,根据断层转折褶皱几何形态与下伏断层定量关系^[18]可推知,断层转折角(φ)为 22° ,上盘截层角(β)约为 -5° ,断层滑移率介于1.0~1.1,新生界断层滑移量约为1.7 km;古生界中可明显识别出另一构造,经层位追踪可见,背斜顶部二叠系仅余下统部分地层,上覆新近系,剖面更北侧见阿图什组削截古近系。根据轴面划分结果可推测断层古生界中断层 F_2 形态,断层北倾,整体产状较缓,主要断开古生界,上盘地层在断层作用下发生褶皱变形,古生界构造整体仍表现为断层转折褶皱样式,断层向上可能进入古近系底部滑脱面,向下滑脱至中寒武统滑脱层中,向斜褶皱翼间角半角约为 74.7° ,断层转折角约为 30° ,断层滑移量约为2.52 km,相较于浅层变形,古生界断层滑移量更大,褶皱幅度也更大。同时,断层 F_2 下盘地层虽然也发生抬升变形,但其主要为更深部断层作用所导致;寒武系之下地层中可见有更深层的构造变形,通过寒武系的轴

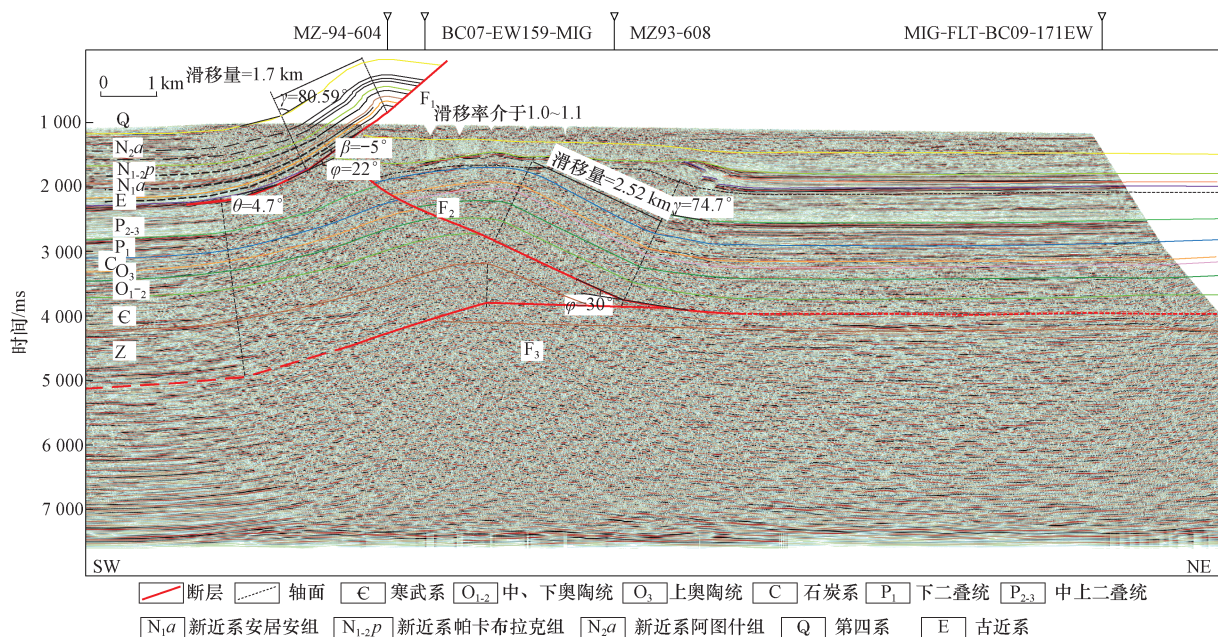


图2 玛扎塔格断裂带 MZ05-116 地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Seismic section MZ05-116 of the Mazhatage fault zone (see Fig. 1 for the section location)

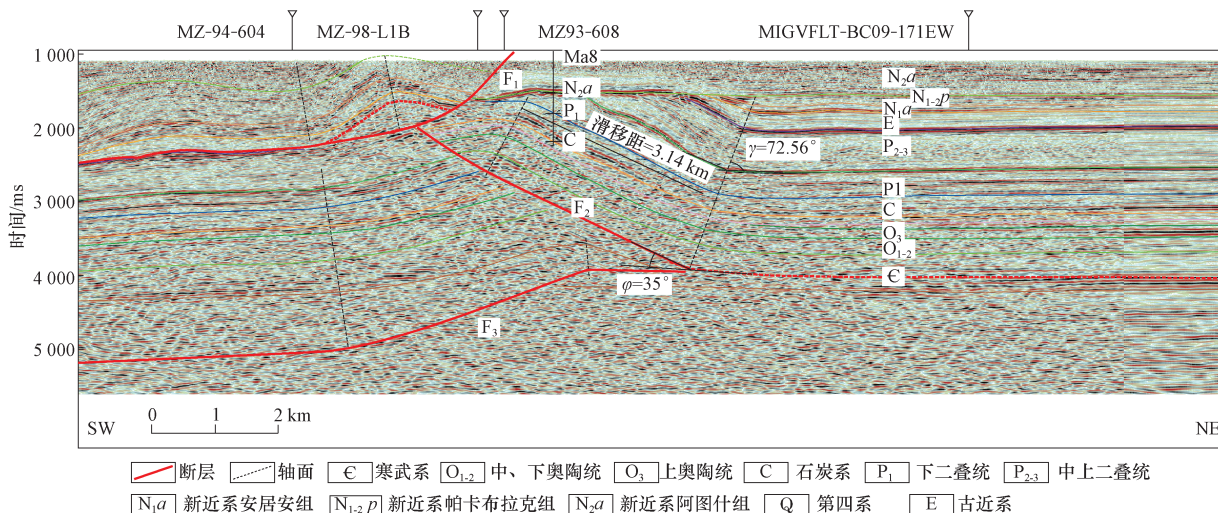


图3 玛扎塔格断裂带 OGSZ14-30 地震解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 3 Seismic interpretation of section OGSZ14-30 of the Mazhatage fault zone (see Fig. 1 for the section location)

叠统,向下其产状逐渐变缓收敛于中寒武统滑脱层中,其向斜轴面翼间角半角约为 72.56° ,据公式计算断层转折角约为 35° ,断层滑移量约为 3.14 km;中寒武统滑脱层之下仍表现出一背斜,为基底之中断层 F_3 活动结果,该断层导致古生界多套地层变形,并向上突破下寒武统底界,断至中寒武统底,位移传递到滑脱层中并将位移量沿滑脱层传递,基底断层向下收敛于基底滑脱层中。

剖面 YL-NS13 位于玛扎塔格断裂带中部,空白地震剖面中可见断裂带内地震反射品质较差,断列带内浅层明显发育有一角度不整合面,断裂带两侧浅层

地层产状显著不一致,通过切层点识别及新近系轴面可识别出新生界断层 F_1 ,可见背斜褶皱顶部,褶皱幅度较低,与上一剖面中同一断层相比,该剖面中断层所造成的断距较小, F_1 断层向上产状逐渐变陡,并向上出露地表,断层向下产状逐渐变缓收敛于古近系底部滑脱层中;根据新近系阿图什组与下伏地层的削截关系及被削截后残余地层的产状,可以推断断裂带内地层形态为一较为紧闭的背斜,断层 F_2 的活动使地层发生较大角度翘倾,背斜顶部的古近系及新近系部分地层也发生了褶皱变形,背斜顶部的古近系、上二叠统及部分下二叠统被削截, F_2 断层表现为北倾,其向上逆

冲至古近系底并为新生界沿古近系底断层所截,向下部产状逐渐变缓并收敛于中寒武统滑脱层中,该断层所形成褶皱翼间角半角约为 76.3° ,断层转折角为 27.4° ,滑移距约为 2.4 km。通过对前寒武系中同相轴的识别,可推测前寒武系中断层 F_3 的形态,其仍为主要断开寒武系及前寒武系的断层,断层向下不收敛于基底滑脱层之中,向上部仅断开了寒武系底,并导致寒武系之上的各地层发生小幅度抬升及褶皱,而后为断层 F_2 的活动所

改造,形成古生界的构造样式(图4)。

剖面 35ALL-ma 位于玛扎塔格断裂带中东部,泥盆系向南部逐渐减薄至尖灭,地震剖面中可见断裂带内地震反射品质较差,断列带内浅层发育有角度不整合面,断裂带两侧浅层地层产状显著不一致(图5),通过切层点识别及新近系轴面可识别出新生界断层 F_1 ,与上一剖面中同一断层相比,该剖面中断层所造成的断距较小, F_1 断层向上产状逐渐变陡,并出露地表,向

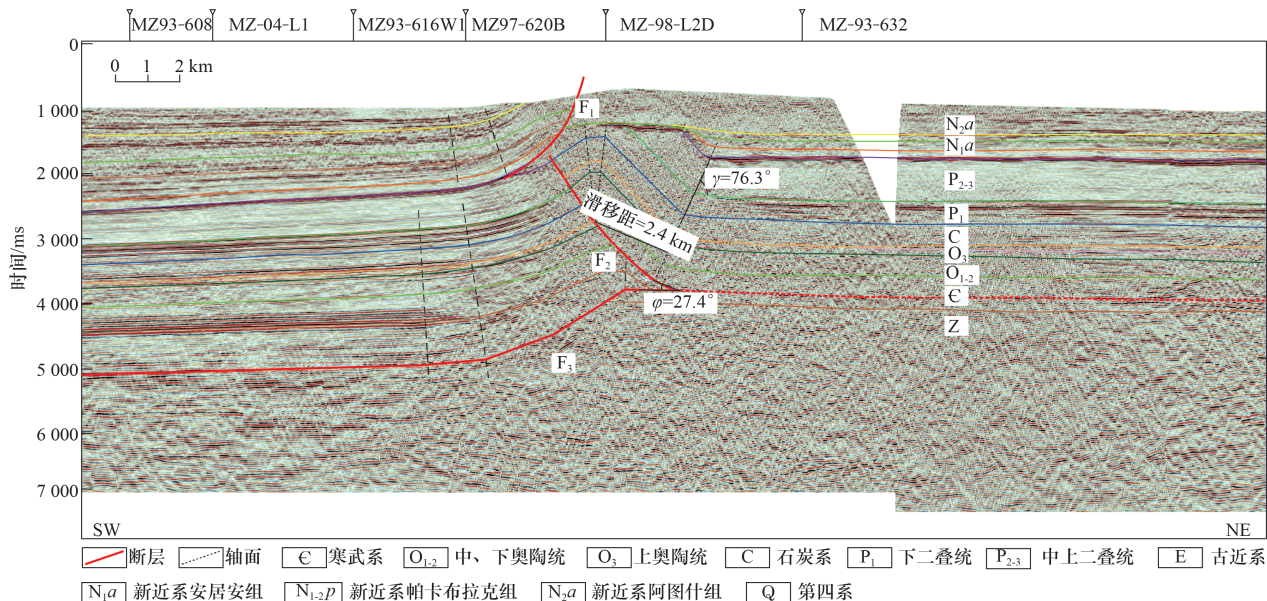


图4 玛扎塔格断裂带 YL-NS13 地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Seismic interpretation of section YL-NS13 of the Mazhatage fault zone (see Fig. 1 for the section location)

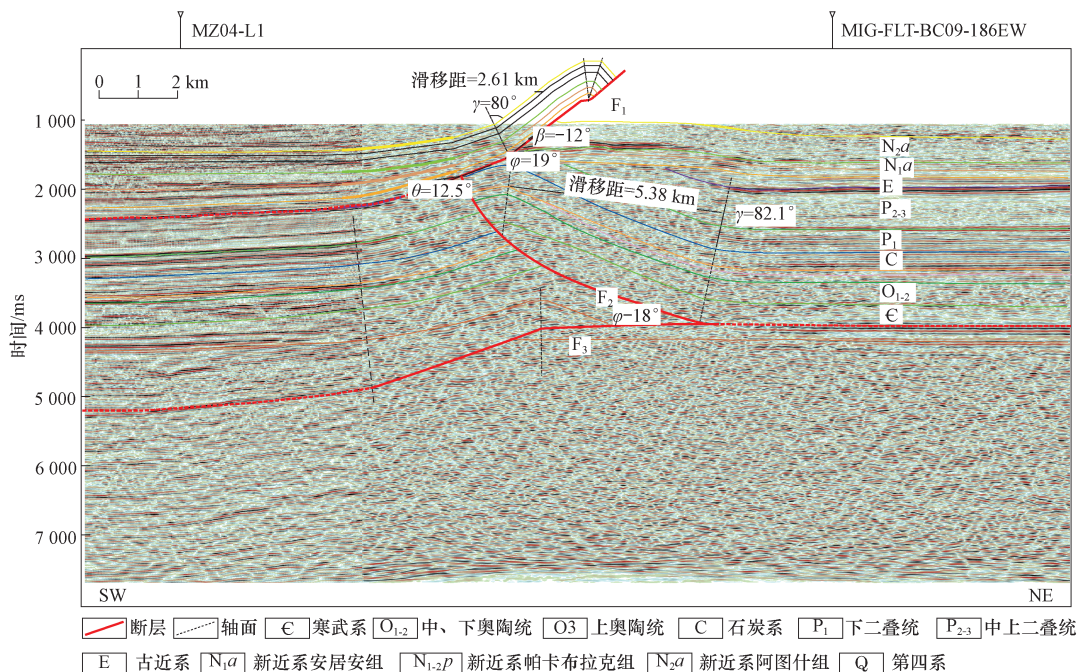


图5 玛扎塔格断裂带 35ALL-ma 地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic interpretation of section 35ALL-ma of the Mazartag fault zone (see Fig. 1 for the section location)

下产状逐渐变缓收敛于古近系底滑脱层中,通过剖面解释结果及角度关系可知,断层 F_1 所形成的向斜翼间角半角(γ)约为 80° ,断层未发生转折时与上盘地层切层角(θ)约为 12.5° ,断层转折角(φ)约为 18° ,断层转折后与上盘地层夹角(β)约为 78° ,断层滑移距约为 2.61 km ;断层 F_2 的活动使背斜顶部的古近系及新近系部分地层也发生了褶皱变形,背斜顶部的古近系、上二叠统及部分下二叠统削截, F_2 断层表现为北倾,其向上逆冲至古近系底并为新生界沿古近系底断层所截,向下部产状逐渐变缓并收敛于中寒武统滑脱层中,该断层翼间角半角(γ)约为 82.1° ,断层转折角(φ)约为 18° ,其滑移距约为 5.38 km 。断层 F_2 下盘地层仍存在有寒武系底界形态与上覆地层形态不一致的特征,通过对前寒武系中同相轴的识别,可推测前寒武系中断层 F_3 的形态,其仍为主要断开寒武系及前寒武系的断层,断层向下收敛于基底滑脱层之中,向上部仅断开了寒武系底,并断至中寒武统滑脱层中,并导致寒武系之上的各地层发生小幅度抬升及褶皱,而后为断层 F_2 的活动所改造,形成古生界现今构造样式。

剖面 OGS14-40 位于玛扎塔格断裂带中东部,通过层位追踪识别,结合浅表地质剖面,可绘制出浅层地层变形样式如图 6 所示,其为断层 F_1 逆冲至地表所形成的构造,断层 F_1 向上发生多次小幅转折,与剖面 35ALL-ma 相比,该剖面中 F_1 产状更缓,且 F_1 断层在上部产生小幅分支断层,该剖面中断层出露地表的部

分同样遭受风化剥蚀夷平,经解释计算可知该剖面中 F_1 断层所形成褶皱翼间角半角约为(γ)约为 86° ,断层未发生转折时与上盘地层切层角(θ)约为 16° ,断层转折角(φ)约为 10° ,断层转折后与上盘地层夹角(β)约为 -15° ,断层滑移距约为 2.15 km ;古生界的构造样式与上一剖面相比发生了一些变化,由地震剖面可见,断裂带北部地层产状变缓,而断裂带南部地层相对有变陡的趋势,古生界仍发育有北倾断层 F_2 ,断层导致上盘地层发生褶皱隆升,地层隆升幅度相较上一剖面较小,该断层向下部收敛于中寒武统滑脱层之中,在近褶皱向斜处,可见有断层 F_4 发育,断层产状较陡,从解释结果上来看,断层 F_4 的断距要大于 F_2 的断距,推测断层 F_4 可能为早期基底断层向上的延伸部分,而后期为断层 F_2 所错断;该剖面中仍可见由基底断层 F_3 活动所导致的地层褶皱变形。

剖面 MZ98-222 位于玛扎塔格断裂带东部,该剖面南部过玛北 1 井,由玛北 1 井钻井资料可知,剖面南部自上而下可见有第四系、新近系、二叠系、石炭系、下奥陶统等,而由与该剖面相交剖面的投影可知,剖面北部可见上奥陶统。该剖面中部明显发育一背斜隆起,纵向上中部地层反射较为清晰,剖面浅部地层发育有新生界断层 F_1 ,断层以古近系底面为滑脱面,向上逆冲至地表,断层的活动使上盘地层发生翘倾,新生界整体出露地表,遭受剥蚀夷平,上盘仅残余褶皱向斜部分。古生界所形成的背斜褶皱也存在有石炭系之上地

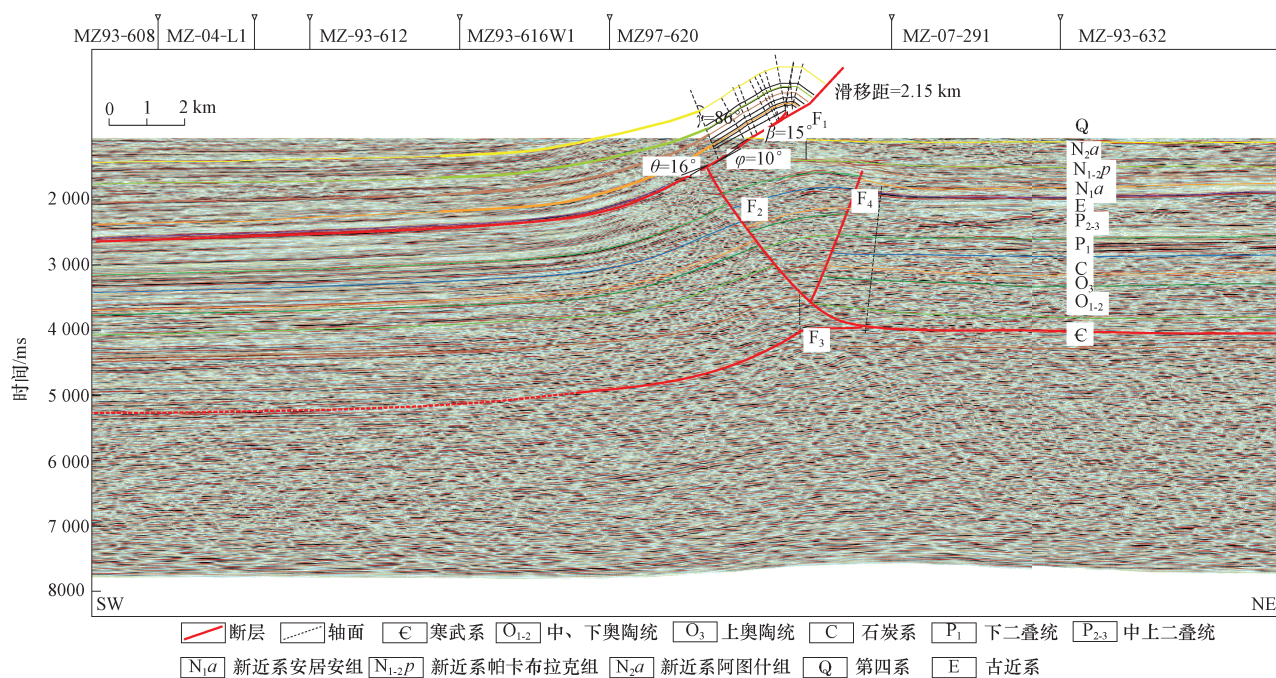


图 6 玛扎塔格断裂带 OGS14-40 地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Seismic interpretation of section OGS14-40 of the Mazartag fault zone (see Fig. 1 for the section location)

层和下伏地层轴面不一致的现象,通过轴面识别可推测出断层 F_2 表现为北倾,其向下收敛于中寒武统滑脱层中,而整体产状均较缓,向上部终止于石炭系底,断层的活动导致上覆地层形成前翼陡短、后翼长缓的背斜褶皱,褶皱表现为断层传播褶皱样式,褶皱后翼向斜翼间角半角约为 84.8° ,断层转折角约为 10.4° ,断层滑移量约为 3.62 km 。新生界的冲断在该断层活动形成的褶皱基础之上沿古近系底部滑脱面滑动而成,与上一剖面相比,该剖面中段裂活动明显减弱,且断层 F_2 未向上突破至古近系底部。寒武系及下伏地层的褶皱变形则是由于断层 F_3 的活动, F_3 断层主要发育在前寒武系中,其下部产状渐缓收敛至基底滑脱层中,前寒武系中仍可见有断层活动所导致的地层倾斜(图7)。

由上述6条地震剖面可以看出,玛扎塔格断裂带主要表现为分层变形特征,断裂带在整体上构造样式较为一致。各剖面差异主要反映在断层活动强度及其在地层中产状(表1)。其中,新生界断层 F_1 由南向北逆冲,以古近系底面为滑脱层,导致上盘地层褶皱变形,形成背斜并逆冲至地表,组成背斜的地层主要为古近系、新近系及第四系,后期遭受剥蚀夷平,仅残余背斜一部分或者完全被剥蚀,由西向东,断层倾角经历陡—缓—陡的过程,通过对各剖面 F_1 断层的滑移量对比来看,其在断裂带中部具有滑移量较大,向两端滑移量较小的特点,滑移量为 $1.7 \sim 2.61\text{ km}$,同时对其断

层转折角进行比较也不难发现其具有东部大($\varphi = 22^\circ$)而向西部减小($\varphi = 10^\circ$)的特征;古生界断裂 F_2 表现为由北向南逆冲,该断层的活动是玛扎塔格断裂带古生界背斜的主要成因,上盘地层在断层活动作用下强烈隆升,并遭受剥蚀,在剖面上,通过对 F_2 断层滑移距的统计可知, F_2 断层在剖面 35ALL-ma 中最大,向两端仅具有减小的趋势,其断层转折角同样具有在西部较大、东部较小的特征。盐下及基底地层倾斜翘升则是基底断层的活动所致,基底之中断层表现为南倾,沿断裂带由西向东,基底断层 F_3 的构造样式较为一致,在断开寒武系底界的同时,导致寒武系及奥陶至二叠系发生一系列翘倾及隆升,由剖面中各地层产状可以推测,该断层的活动可能是多期的。综上可知,玛扎塔格断裂带整体表现为分层变形特征,断层分别以古近系底、中寒武统底为界和基底滑脱面为滑脱层,古生界和新生界的构造变形均受到基底断层活动的影响,断裂在走向上产状较为一致,分布稳定。通过对同一剖面中新生界构造和古生界构造的定量参数特征对比,可以看出,新生界断层和古生界断层所形成褶皱向斜的翼间角基本上都介于 $75^\circ \sim 86^\circ$,断层活动性越弱的剖面其向斜翼间角半角角度越小,符合活动强度弱而褶皱趋于平缓的特征,总体而言,古生界构造活动普遍强于新生界构造活动,其活动强度的差异也在侧面证实了玛扎塔格断裂带分层变形的特征。

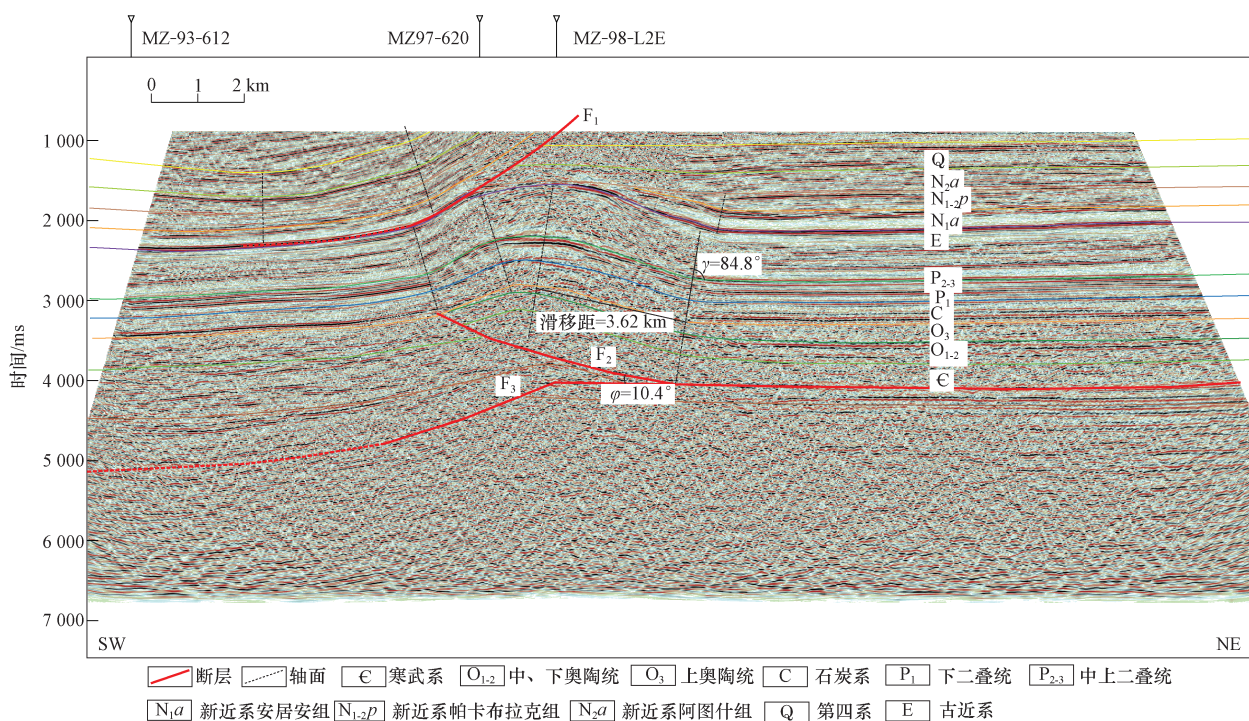


图7 玛扎塔格断裂带 MZ98-222 地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 7 Seismic interpretation of section MZ98-222 of the Mazartag fault zone (see Fig. 1 for the section location)

表 1 玛扎塔格断裂带各剖面断层定量几何学特征统计(剖面位置见图 1)

Table 1 Statistics of quantitative geometric characteristics of faults in various sections of the Mazartag fault zone (see Fig. 1 for the section locations)

编号	剖面名称	构造分层	转折前上盘截层角/(°)	向斜翼间角半角/(°)	断层转折角/(°)	转折后上盘截层角/(°)	新生界断层滑移量/km
1	MZ05-116	新生界	4.7	80.59	22	-5	1.70
		古生界	0	74.70	30	0	2.52
2	OGS14-30	新生界	—	—	—	—	—
		古生界	0	72.56	35	0	3.14
3	HT96-148	新生界	—	—	—	—	—
		古生界	0	75.50	29	0	2.86
4	35ALL-ma	新生界	12.5	80.00	18	-12	2.61
		古生界	0	82.10	18	0	5.38
5	OGS14-40	新生界	16.0	86.00	10	-15	2.15
		古生界	—	—	—	—	—
6	MZ98-222	新生界	—	—	—	—	—
		古生界	0	84.80	10.4	0	3.62

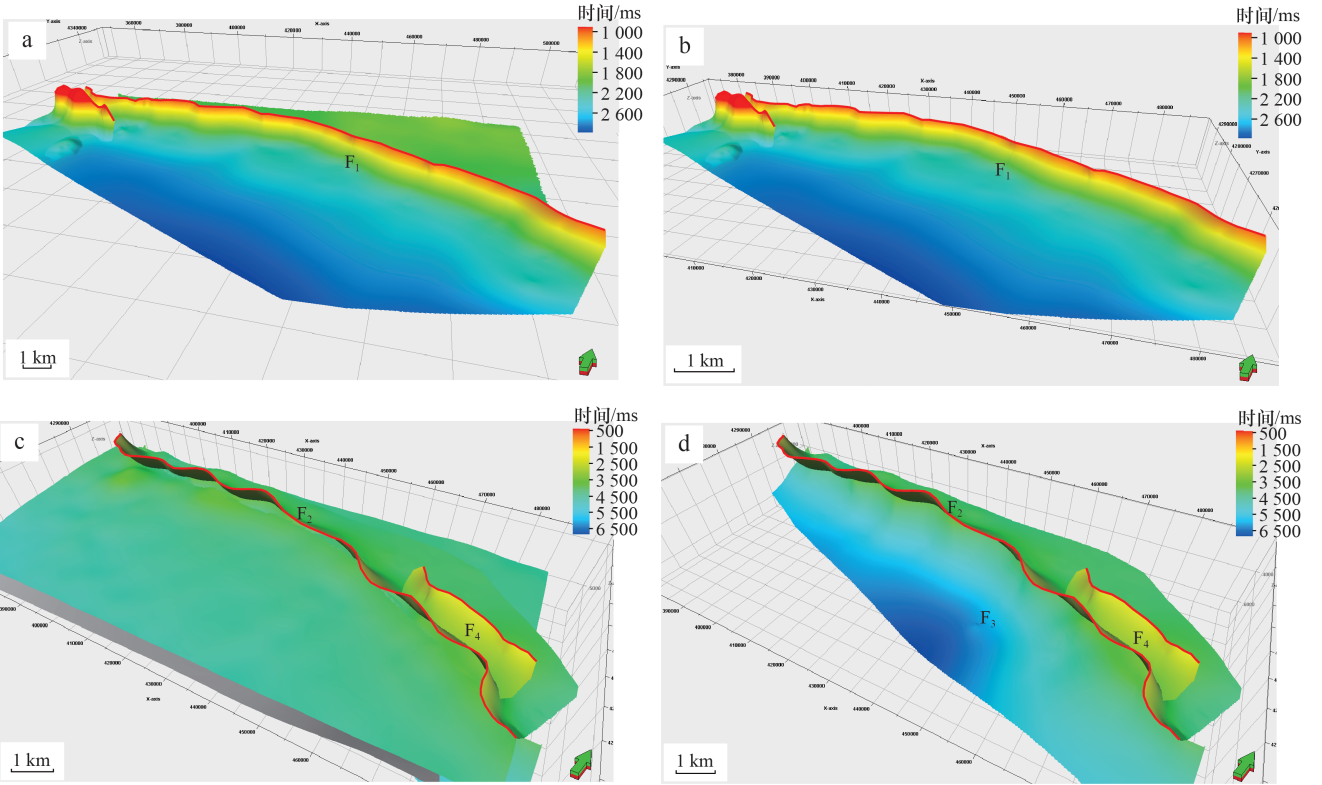


图 8 玛扎塔格断裂带断层三维形态

Fig. 8 3D morphology of the Mazartag fault zone

a. 新生界断层及古近系底面;b. 新生界断层及鸟山断裂新生界断层;c. 古生界断层及寒武系底、基底;
d. 基底断层及古生界断层

2.2 三维几何学特征

上述剖面分别描述了玛扎塔格断裂带在各处的几何学特征,基于上述断裂解释方案,建立了玛扎塔格断裂带的三维形态(图 8),由其三维空间特征可看到玛扎塔格断裂带新生界断层、古生界断层及基底断层在垂向上的叠置样式。新生界断层整体上走向稳定,沿

走向上仅发生小幅转折,其南侧的鸟山断裂的新生界断层与其基本平行,延伸长度较短,在鸟山断裂发育的部位,也恰是玛扎塔格断裂带新生界断层走向发生小幅转折的部位,在过该处的地震剖面中也可见玛扎塔格断裂新生界断层 F₁ 所形成的褶皱后翼发生了褶皱变形,而在其他位置处均未见该现象,据此可推测该处经受了更强的挤压应力,不仅导致了鸟山断裂的形成,也

导致褶皱后翼发生褶皱变形,此外还可见断层 F_1 在沿断层走向在其末端向南发生小幅转折,断面逐渐变窄,表现出断层逐渐消失的趋势;古生界断层及基底断层在三维空间上表现为上下叠置,倾向相反,基底断层收敛于基底滑脱层中,基底滑脱面在断裂带走向上表现为西低东高,基底断面在走向上略有起伏,在断裂带中部略下凹,基底断层在玛扎塔格断裂带多表现为隐伏特征或仅略切穿寒武系底面,其隐伏特征在断裂带西部表现更为显著;古生界断裂在垂向上位于基底断裂之上,其走向基本稳定,断层在鸟山断裂发育处和断裂带东端发生小幅转折,断面在西部产状陡,向东部产状略微变缓,玛扎塔格断裂带的三维特征中可见沿断裂带,寒武系底地层在基底作用下向上隆起变形。此外,在玛扎塔格古生界断层 F_2 的局部位置可见有分支断层 F_4 发育,该断层延伸长度有限,与古生界主断层在空间上表现为交切关系。

3 运动学特征

以上述地震解释结果为基础,通过采用平衡剖面复原方法,对 OGS14-40 剖面进行了构造复原,复原结果如图 9 所示。玛扎塔格断裂带演化分为如下几个过程,寒武系沉积之前,在盆地张性应力背景条件下^[19-21],在玛扎塔格断裂带形成了早期的张性正断层^[22],并导致断层之上地层发生小幅度拗陷,至中晚奥陶世在北昆仑洋向中昆仑地体下的俯冲作用影响下^[23-24],塔里木盆地南部发生碰撞,盆地此时的应力场转为挤压环境,在上奥陶世沉积之前,早期形成的正断层发生反转,断层上盘地层向上运动,断开了寒武系底部的部分地层,并使上覆地层在该断层活动作用下形成低幅隆起,中奥陶统在该期断层的活动作用下可能出露水面遭受剥蚀,导致断裂带内中奥陶统大部缺失,也可见由于该断层形成的低幅隆起,晚奥陶统沉积地层向隆起方向减薄尖灭;至志留纪,塔里木盆地南部仍处于挤压环境,在该应力条件下,中晚奥陶统形成的断层继续活动,但其活动强度较弱,但仍导致上覆地层持续隆升,并形成志留系向南部减薄尖灭的现象;泥盆到石炭纪,塔里木盆地南部表现为张性应力环境,此时稳定沉积了石炭纪地层,至晚二叠纪到三叠纪,古特提斯洋向中昆仑地体的俯冲达到高潮^[25-27],塔里木盆地南部再次遭受碰撞,该期碰撞较为强烈,导致断裂带南侧地层强烈向巴楚楔入,形成了沿中寒武统滑脱层滑脱并由北向南逆冲的断层,该断层的活动导致中寒武统至二叠系发生褶皱变形;古近系沉积后,塔里木盆地

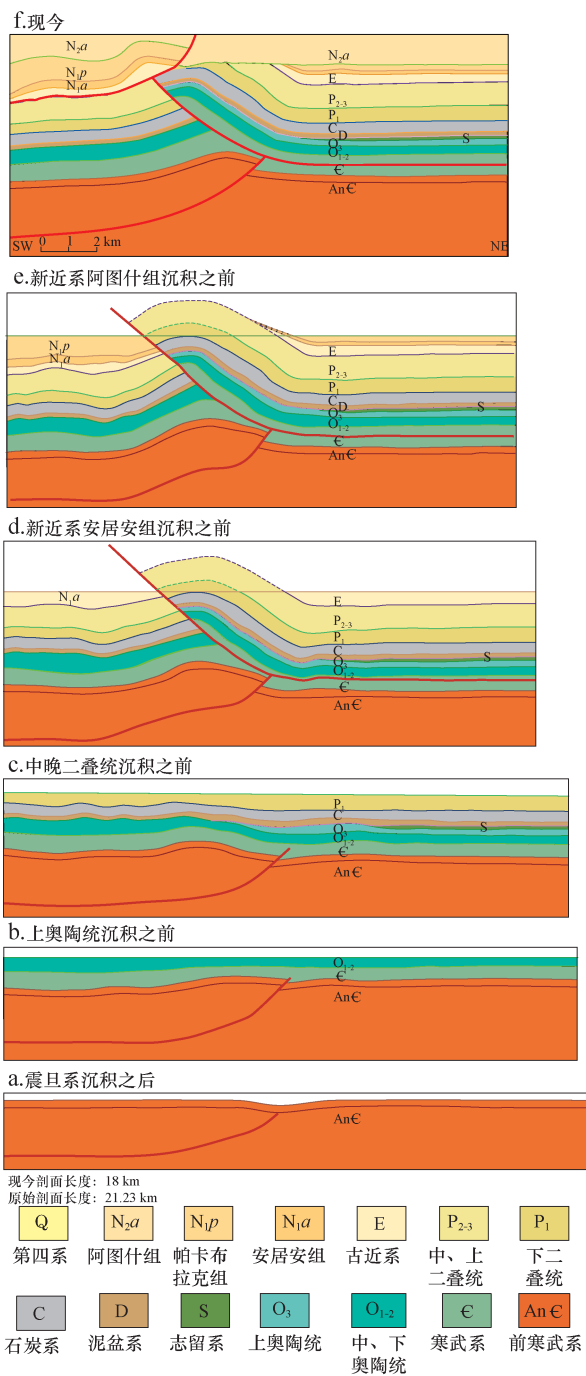


图9 过玛扎塔格断裂带 OGS14-40 剖面演化过程

Fig. 9 Evolution of section OGS14-40 across the Mazartag fault zone

受印度-欧亚板块的碰撞影响,南部遭受挤压,在挤压作用下,北倾断层持续性活动,并导致古近系褶皱变形;新近系阿图什组沉积前,北倾断层再次活化,并导致沉积的新近系安居安组和帕卡布拉克组地层发生褶皱变形,在沉积期间,早期断层活动所形成的褶皱变形出露地表遭受剥蚀夷平;至上新世到第四纪,青藏高原的隆升、中亚地区的强烈挤压及一系列构造事件导致塔西南重新处于挤压环境,此前古近系沉积了一套膏

岩层,在该期强烈挤压作用下,古近系之上地层沿该膏岩层发生滑动,发生突破形成由南向北逆冲的新生界断层,新生界各地层在该断层的活动下向上强烈逆冲,出露地表形成地表的玛扎塔格山,并遭受部分剥蚀,形成现今形态。

4 讨论

4.1 断裂带形成时间及期次及活动强度

关于断裂带的活动时间和期次的研究一直是断裂构造研究的重点,断裂带活动时间和期次的确定是进行断裂成因分析的前提和基础,同时断裂的活动也在很大程度上影响了油气的垂向运移。由上述所描述的玛扎塔格断裂带几何学和运动学特征中可知,玛扎塔格断裂带不仅在纵向上具有显著分层变形特征,各构造层断裂的活动也具有分期性。上文已述新生界断层形成时间约为上新世至第四纪,通过断裂几何学特征的定量解析可知,其断层滑移距为 1.7 ~ 2.61 km,断层的滑移量具有在中间较大,两端较小的特征,其基本上代表了新生界断层的活动强度变化,同时断层在不同部位的转折角也略有差异,但均表现为低角度转折特征;虽然新生界断层所形成的背斜褶皱大部分被剥蚀夷平,但从浅表剖面所补齐的褶皱形态中仍可见从新近系帕卡布拉克组开始就表现为显著的楔状减薄的特征,基本可证明新生界断层开始活动时间约为中新世中晚期。而古生界断裂在新近纪早期发生了强烈的构造活动,该期构造活动反映在断裂带南部古近系至新近系安居安组的结构中,断裂带北侧地层中可识别出多期不整合(图 10)。根据地层接触关系可将其进一步划分为两期,分别对应于古新世末期和中新世

末期,该断层在古新世末期活动强度极大,形成了规模较大的背斜褶皱,在上文中对于该褶皱的定量描述中可知,断层的滑移距多在 2.4 km 以上,在断裂带中部可达 5.15 km,断层在上部地层中角度多为 30° 左右,但在部分剖面中如断裂带中部 35ALL - ma 剖面和断裂带东部 MZ05 - 222 剖面,断层表现为低角度转折特征,断层的转折角基本上控制了古生界褶皱形态,低角度转折的断层所形成的古生界褶皱较为宽缓;在古生界断层形成并活动之前,玛扎塔格断裂带就具有背斜形态,上文的论述中证明,该背斜形态可能形成于志留纪沉积之前,并对应于塔西南中晚奥陶世和田古隆起的形成过程^[15],该期构造活动主要为基底中断层活动的结果,最早可追溯至中晚奥陶世,断层在后期的活动或滑脱至中寒武统底,或突破中寒武统,并为后期断层所改造。

4.2 断裂带成因机制

在前人对于玛扎塔格断裂带成因的讨论中,基本上已经将玛扎塔格显生宙以来的多期构造运动对应于盆地周缘板块的活动,即中晚奥陶世塔里木与中昆仑地体碰撞^[4,28-30]、古新世末期印度与欧亚板块碰撞^[30-32]。玛扎塔格断裂带现今石炭系埋深等值线图^[1]指示了在玛扎塔格断裂带变形过程中最大主应力的方向,基本上指示了其应力来源为塔西南山前。然而,玛扎塔格断裂带位处塔里木盆地腹地,其应表现为克拉通内部较稳定的环境,虽然其具有产生断裂的外部应力条件,但断裂在该处的产生必然有更深层的原因。从塔里木盆地的航磁异常及航磁化极异常图以及接收函数成像图^[33-35]均可见玛扎塔格断裂带表现出深部断裂的特征,前人的研究中也基本认同基底活动断层的存在^[36],

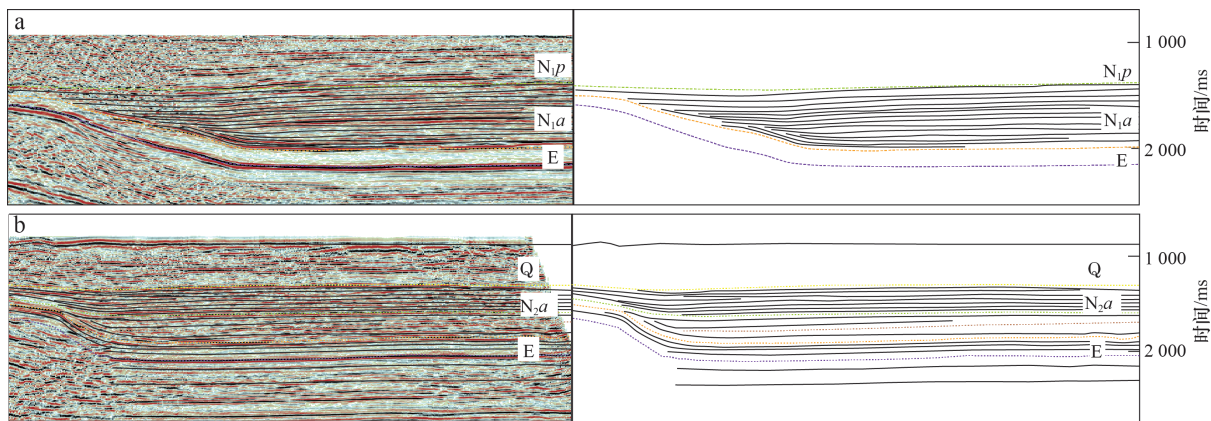


图 10 扎塔格断裂带北侧地层接触关系特征(剖面位置见图 1)

Fig. 10 Unconformity contact features on the north side of the Mazartag fault zone (see Fig. 1 for the section locations)

a. 剖面 MZ98 - 222; b. 剖面 MZ98214

上文中的论述也说明了玛扎塔格断裂带在中-晚奥陶世就表现出逆冲断裂活动的特征,且该期活动对应了基底断层的活动,前寒武纪塔里木盆地处于张性应力背景下,盆地内发育裂谷,玛扎塔格断裂带基底断层也可能为早期张性应力条件下形成的正断层在后期盆地周缘受挤压应力条件下发生反转而形成的,在基底断层活动形成的低缓背斜基础之上,受后期多期挤压应力影响,分别沿中寒武统底界面和古近系底形成了古生界和新生界断裂。

4.3 断裂几何学、运动学特征对油气成藏的影响

随着塔里木盆地勘探进展和深入,塔里木盆地的勘探逐渐由浅层走向中深层,由“岩溶”走向“断控”,顺北油气田的发现推进了以走滑断裂控制的油气成藏类型的勘探和突破^[37-43]。在对盆地内逆冲断裂的研究过程中,学者们也认识到断层活动对于褶皱形成过程和样式的控制,在对褶皱背向斜转折端的认识上,已有学者将其解释为“膝褶带”构造,而非早期所认识的断层^[44],这意味着连续的膝褶地层可能更有利于油气的保存甚至是聚集,目前已有学者指出膝褶带生长过程中有利于储集空间的产生^[45-46],在对于膝褶带的扩容作用研究中,也有学者已总结出膝褶带内地层为扩容或封堵的判别关系^[9]。对于本文所研究的玛扎塔格断裂带,其向斜翼间半角多为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$,膝褶带内夹角 β 多大于 α ,对膝褶带内储集空间的形成是有利的。目前在玛扎塔格断裂带上已发现的油气藏主要储集层为奥陶系和石炭系,其成藏期次主要为加里东晚-海西早期,海西晚期和喜马拉雅期等3个期次,恰对应于断裂带的几个主活动期次。此外,和田河气田其主要以喜马拉雅期气藏为主,对应于早新生代断裂的强烈活动和有利的输导背景,而晚新生代以古近系底面为滑脱层的逆冲构造的形成,则是对下伏残留构造和已形成油气藏的有力保存因素,鉴于巴楚隆起新近纪-第四纪强烈逆冲活动,新生界的滑脱样式的构造利于后期油气的保存。

5 结论

1) 玛扎塔格断裂带在剖面上表现为新生界、古生界及基底的3套构造变形,多滑脱层、多期构造活动、多应力条件是形成断裂带分层变形的原因。

2) 玛扎塔格断裂带总体构造样式在走向上基本一致,但断层的倾角在走向上具有差异,断层产状和滑移量的差异是造成断裂带各剖面断裂带形态差异的原

因,各构造层中断层滑移量的差异性也进一步证明了断裂分层变形特征。

3) 玛扎塔格断裂带为震旦纪早期基底正断层发生反转基础上形成的构造,基底断裂发生反转后在晚奥陶世、志留纪持续活动;古生界断层在中、晚二叠世形成并强烈活动,在古新世、中新世均再次活化并导致地层褶皱变形;新生界断裂形成并活动于上新世至第四纪,并导致新生界发生强烈逆冲变形。新生界逆冲滑脱构造利于早期油气藏的保存。

参 考 文 献

- [1] 周新源,杨海军,李勇,等.中国海相油气田勘探实例之七:塔里木盆地和田河气田的勘探与发现[J].海相油气地质,2006,11(3):55-62.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Li Yong, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part7): Hotanhe gas field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3): 55-62.
- [2] 肖安成,杨树峰,李曰俊,等.塔里木盆地巴楚-柯坪地区新生代断裂系统[J].石油与天然气地质,2005,26(1):78-86.
Xiao Ancheng, Yang Shufeng, Li Yuejun, et al. A studying of Cenozoic fracture systems in Bachu-Kalpin area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 78-86.
- [3] 杨海军,李曰俊,冯晓军,等.塔里木盆地玛扎塔格构造带断裂构造分析[J].地质科学,2007,42(3):506-517.
Yang Haijun, Li Yuejun, Feng Xiaojun, et al. Analysis on thrustings of the Mazhatage structural belt in The Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 506-517.
- [4] 吕海涛,张仲培,邵志兵,等.塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J].石油与天然气地质,2010,31(1):76-82.
Lv Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the early Paleozoic palaeouplifts in Bachu-Maigaiti area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 76-82.
- [5] 何娟,王毅,刘士林,等.塔里木盆地西南坳陷东部构造特征及对油气成藏的控制[J].石油实验地质,2016,38(3):326-332.
He Juan, Wang Yi, Liu Shilin, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbon accumulation in the eastern part of southwestern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 326-332.
- [6] 张强,黄太柱,李慧莉,等.塔里木盆地西部的新生代断裂活动[J].岩石学报,2016,32(3):833-846.
Zhang Qiang, Huang Taizhu, Li Huili, et al. The Cenozoic faults in western Tarim Basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(3): 833-846.
- [7] 胡望水,陈毓遂,肖安成,等.塔里木色力布亚-玛扎塔格断裂系与油气[J].新疆地质,1996,14(1):61-68.
Hu Wangshui, Chen Yუსui, Xiao Ancheng, et al. Deformation of Serikbuya-Mazartag fault system in Tarim and its relation with oil-gas [J]. Xinjiang Geology, 1996, 14(1): 61-68.
- [8] 郭颖,汤良杰,余腾孝,等.塔里木盆地玛扎塔格断裂带构造特征

- 及其油气地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(1): 104–114.
- Guo Ying, Tang Liangjie, Yu Tengxiao, et al. Structural characteristics and petroleum geological significances of Mazhatage fault belt in Tarim Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1): 104–114.
- [9] 王毅, 张仲培, 张波, 等. 塔里盆地巴楚地区大型膝褶带的发现及油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 914–924.
- Wang Yi, Zhang Zhongpei, Zhang Bo, et al. Discovery of large kink-band structures and petroleum exploration implications in Bachu area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 914–924.
- [10] 杨庚. 塔里木盆地玛扎塔格弧形构造及斜向逆冲[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(4): 381–397.
- Yang Geng. Mazatage arcuate structure in map-view and oblique thrust in Tarim Basin, Western China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(4): 381–397.
- [11] 李洪辉, 郭光辉, 王洪江, 等. 塔里木盆地和田河气田周缘构造演化、成藏与勘探领域[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 587–594.
- Li Honghui, Wu Guanghui, Wang Hongjiang, et al. Structural evolution, reservoir forming and exploration field of peripheral area of the Hetianhe gas field in Tarim Basin[J]. Geoscience, 2009, 23(4): 587–594.
- [12] 张洪安, 吴根耀, 李曰俊, 等. 塔里木盆地西部巴楚断隆南界断裂带的主要特征和构造演化[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1547–1556.
- Zhang Hongan, Wu Genyao, Li Yuejun, et al. Main features and structural evolution of southern boundary fractural zone of the Bachu fault-rise in western Tarim Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10): 1547–1556.
- [13] 杨庚, 李伟, 陈竹新, 等. 塔里木盆地和田河气田玛扎塔格滑脱背斜构造特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 563–572.
- Yang Geng, Li Wei, Chen Zhuxin, et al. Mazatage detachment anticline in Hetianhe gas field, Tarim Basin, western China[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 563–572.
- [14] 崔海峰, 田雷, 刘军, 等. 麦盖提斜坡东段断裂活动特征及油气意义[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1241–1250.
- Cui Haifeng, Tian Lei, Liu Jun, et al. Fault activity characteristics in Maigaiti eastern slope and its hydrocarbon significance[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(6): 1241–1250.
- [15] 谢会文, 陈新伟, 朱民, 等. 塔里木盆地玛扎塔格断裂带变形特征、演化及对深层油气成藏的控制[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1578–1589.
- Xie Huiwen, Chen Xinwei, Zhu Min, et al. Deformation characteristics, tectonic evolution and their control on deep petroleum accumulation of Mazhatage fault belt in Tarim Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(9): 1578–1589.
- [16] 李钦, 刘健. 塔里木盆地腹地玛扎塔格地区新近纪砂岩组分和重矿物组合特征及物源分析[J]. 地质力学学报, 2017, 23(4): 306–314.
- Li Qin, Liu Jian. Analysis of detrital composition, heavy mineral combination characteristics and sand provenance of Neogene sandstones, Mazhatage Mountain in the center of Tarim Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2): 306–314.
- [17] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 370.
- Jia Chengzao. Tectonic elements and stratigraphy of Tarim Basin, NW China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 370.
- [18] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding[J]. American Journal of Science, 1983, 283: 684–721.
- [19] 何碧竹, 焦存礼, 黄太柱, 等. 塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(4): 635–655.
- He Bizhu, Jiao Cunli, Huang Taizhu, et al. Structural architecture of Neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(4): 635–655.
- [20] 姜海健, 陈强路, 杨鑫, 等. 塔里木盆地新元古代裂谷盆地层序样式[J]. 地质学报, 2017, 91(3): 588–604.
- Jiang Haijian, Chen Qianglu, Yang Xing, et al. The style of sequence stratigraphy of Neoproterozoic rift Basin in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(3): 588–604.
- [21] 杨鑫, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木新元古代盆地演化与下寒武统烃源岩发育的构造背景[J]. 地质学报, 2017, 91(8): 1706–1719.
- Yang Xin, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Evolution of Neoproterozoic Tarim Basin in Northwestern China and tectonic background of the lower Cambrian hydrocarbon source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(8): 1706–1719.
- [22] 张永, 何登发, 刘长磊, 等. 塔里木盆地巴楚隆起的三维地质结构及成因机制[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 134–148.
- Zhang Yong, He Dengfa, Liu Changlei. Three-dimensional geological structure and genetic mechanism of the Bachu uplift in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 134–148.
- [23] 郑孟林, 王毅, 金之钧, 等. 塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 925–934.
- Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun, et al. Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 925–934.
- [24] 何登发. 塔里木盆地的地层不整合面与油气聚集[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 14–21.
- He Dengfa. Unconformities and oil and gas accumulation in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 16(3): 14–21.
- [25] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64–77.
- He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64–77.
- [26] 丁文龙, 林畅松, 漆立新, 等. 塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 242–252.
- Ding Wenlong, Lin Changsong, Qi Lixin, et al. Structural framework and evolution of Bachu uplift in Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 242–252.
- [27] 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 219–230.
- Ren Jianye, Zhang Junxia, Yang Huaizhong, et al. Analysis of fault systems in the Central uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 219–230.
- [28] 任建业, 阳怀忠, 胡德胜, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂活动及其对海相克拉通解体的作用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(4): 645–653.

- Ren Jianye, Yang Huaizhong, Hu Desheng, et al. Fault activity and its controlling to marine cratonic breakup in Tarim Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(4): 645–653.
- [29] 邹亚锐, 塔吉古丽, 邢作云, 等. 塔里木新元古代—古生代沉积盆地演化[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2014, 39(8): 1200–1216.
- Zou Yarui, Ta Jiguli, Xing Zuoyun, et al. Evolution of sedimentary basins in Tarim during Neoproterozoic-Paleozoic [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(8): 1200–1216.
- [30] 张克信, 王国灿, 季军良, 等. 青藏高原古近纪—新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(12): 1632–1654.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Ji Junliang, et al. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau [J]. *Science China Earth Science*, 2010, 40(12): 1632–1654.
- [31] AD Gibbons, S Zahirovic, RD Müller, et al. A tectonic model reconciling evidence for the collisions between India, Eurasia and intra-oceanic arcs of the central-eastern Tethys [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 451–492.
- [32] 肖安成, 杨树锋, 李曰俊, 等. 塔里木盆地巴楚隆起断裂系统主要形成时代的新认识[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 291–302.
- Xiao Ancheng, Yang Shufeng, Li Yuejun, et al. Main period for creation of fracture system in the Bachu uplift, Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 291–302.
- [33] 李文山, 李江海, 周肖贝, 等. 塔里木盆地中央高磁异常带成因: 来自地震反射剖面的新证据[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(2): 281–287.
- Li Wenshan, Li Jianghai, Zhou Xiaobei, et al. Genesis of high aeromagnetic anomaly zone in Central Tarim Basin; new evidence from seismic Profiles [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(2): 281–287.
- [34] 杨文采, 王家林, 钟慧智, 等. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1278–1287.
- Yang Wencai, Wang Jialin, Zhong Huizhi, et al. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1278–1287.
- [35] 刘因, 付建民, 姜枚, 等. 接收函数方法获得的和田—拜城剖面壳幔图像[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 1066–1070.
- Liu Yin, Fu Jianmin, Jiang Mei, et al. The image of the crust and upper mantle along the Hotan-Baicheng section using the receiver function method [J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 1066–1070.
- [36] 杨庚兄, 尹宏伟, 汪伟, 等. 塔里木盆地玛扎塔格构造带深层构造分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(5): 819–830.
- Yang Gengxiong, Yin Hongwei, Wang Wei, et al. Deep structural analysis of Mazatag tectonic belt in Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(5): 819–830.
- [37] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 878–888.
- Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 878–888.
- [38] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 975–984.
- Cao Zicheng, Lu Qinghua, Gu Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 975–984.
- [39] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 965–974.
- Wang Bin, Zhao Yongqiang, He Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 965–974.
- [40] 王玉伟, 陈红汉, 郭会芳, 等. 塔里木盆地顺1走滑断裂带超深储层油气充注历史[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 972–989.
- Wang Yuwei, Chen Honghan, Guo Huifang, et al. Hydrocarbon charging history of the ultra-deep reservoir in Shun 1 strike-slip fault zone, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 972–989.
- [41] 韩勇, 徐浩. 塔河油田于奇地区断裂体系特征研究[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(3): 7–12.
- Han Yong, Xu Hao. Characteristics of fault system in Yuqi area of Tahe oilfield [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2020, 34(3): 7–12.
- [42] 张秋实. 惠民凹陷扭张断裂与沉积耦合关系的量化表征[J]. *断块油气田*, 2020, 27(5): 556–560.
- Zhang Qiushi. Quantitative characterization of the coupling relationship between transtensional faults and sedimentation in Huimin Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(5): 556–560.
- [43] 张伟忠, 张云银, 查明, 等. 渤海湾盆地东营凹陷扭张断裂成因模式及控藏作用[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 262–270.
- Zhang Weizhong, Zhang Yunyin, Zha Ming, et al. Genetic model of transtensional faults in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, and its controls over hydrocarbon accumulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 262–270.
- [44] 张波, 李生福, 张进江, 等. 膝褶、膝褶带、共轭膝褶带—一种可能的新型油气构造样式[J]. *天然气工业*, 2010, 30(2): 32–39.
- Zhang Bo, Li Shengfu, Zhang Jinjiang, et al. Kink, kink-band and conjugate kink-band: A probably potential new type of structural trap [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(2): 32–39.
- [45] Verbeel E R. Kink bands in the Somport slates, west-central Pyrenees, France and Spain [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1978, 89: 814–824.
- [46] 王招明, 王清华, 赵孟军, 等. 塔里木盆地和田河气田天然气地球化学特征及成藏过程[J]. *中国科学: D辑, 地球科学*, 2007, 37(增2): 69–79.
- Wang Zhaoming, Wang Qinghua, Zhao Mengjun, et al. Natural gas geochemical characteristics and accumulation process of Hetianhe gas field, Tarim Basin [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2007, 37(S2): 69–79.