

塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制

罗彩明¹, 梁鑫鑫^{2,3}, 黄少英¹, 能源^{2,3}, 张玮¹, 陈石^{2,3}, 曹淑娟¹

[1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000;

2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要:塔中隆起位于塔里木盆地中央隆起带中部,为塔里木盆地油气勘探的重点区块之一。以塔中隆起高品质三维地震资料精细解释为基础,开展塔中隆起走滑断裂的剖面和平面几何学特征、断裂的活动期次和断裂形成机制研究。地震资料显示塔中走滑断裂于石炭纪之前定型,少数走滑断裂的活动持续到了石炭纪之后,断穿基底到志留系和泥盆系,断面直立,但是在不同层位断层的几何特征存在明显差异性,主要分为3层结构:深层中、下寒武统断裂平面上呈线性展布,中、下寒武统在断裂两侧上拱;深部断裂向上继续切穿上寒武统和奥陶系,并在碳酸盐岩顶面发育许多分支断裂,剖面上表现为正花状构造,平面上组合为斜列断裂;浅层走滑断裂发育在上奥陶统-志留系和泥盆系内,剖面上常以负花状构造样式出现,平面上表现为该层特有的北西向雁列断层。这3层断裂在垂向上叠置,形成复杂的空间形态,将塔中隆起走滑断裂的演化阶段划分为3期:中寒武世塔中地区存在构造反转事件,在压扭应力作用下发育规模较小的走滑断裂;晚奥陶世走滑断裂复活,形成正花状构造;志留纪-泥盆纪走滑断裂持续活动。塔中隆起走滑断裂的形成受周缘构造环境控制,在中寒武世局部压扭应力、晚奥陶世压扭环境和志留纪-泥盆纪的压扭环境下形成演化。

关键词:3层结构模型;分层变形;分期活动;形成机制;走滑断裂;塔中隆起;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism

Luo Caiming¹, Liang Xinxin^{2,3}, Huang Shaoying¹, Neng Yuan^{2,3}, Zhang Wei¹, Chen Shi^{2,3}, Cao Shujuan¹

[1. *Petroleum Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;*

2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*

3. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]*

Abstract: The Tazhong uplift located in the central uplift zone of Tarim Basin, is one of the key oil and gas plays in the Tarim Basin. A detailed interpretation of high-quality 3D seismic data, is applied to study the geometry characteristics of the strike-slip faults on both plane and sectional views, active periods of faulting and its formation mechanism in the Tazhong Uplift. Seismological data show that activity of most strike-slip faults in Tazhong uplift finalized before the Carboniferous, and only a few still kept active after the Carboniferous. The strike-slip faults cut through the strata from the basement to the Silurian and Devonian systems with vertical fault planes, which are obviously different from each other in geometry as in a three-layer structure. The fault planes in the deep Middle and Lower Cambrian feature linear distribution, with the strata on both sides of the fault arching. Multiple branch faults are developed on the top surface of carbonate rock after the strike-slip faults growing upward into the Upper Cambrian and Ordovician, as shown in a positive flower-like structure on sectional view, and by a diagonal fault pattern on plane view. While the strike-slip faults in the shallow Upper Ordovician, Silurian and Devonian systems commonly appear as a negative flower-like structure on sectional view, and as NW-trending en-echelon faults on plane view, specific to this layer. These three-layer faults are superimposed vertically in a complex spatial pattern. The evolution of strike-slip faults in the Tazhong

收稿日期:2020-12-11;修订日期:2021-12-03。

第一作者简介:罗彩明(1980—),男,硕士、高级工程师,新区新领域风险勘探。E-mail: luocm-tlm@petrochina.com。

通讯作者简介:陈石(1986—),男,副教授、硕士生导师,含油气盆地分析。E-mail: chenshi4714@163.com。

基金项目:塔里木油田公司科技项目(041018080025)。

Uplift is divided into three stages, that is, the Middle Cambrian when a structural inversion event led to the development of small-scale strike-slip faults under transpressional stress; the Late Ordovician when the strike-slip faults got reactivated to form a positive flower-like structure; and the Silurian and Devonian during which the strike-slip faults kept active. The development of the strike-slip faults in the Tazhong Uplift can be attributed to the control of peripheral tectonic environment and evolution under the local transpressional stress in the Middle Cambrian, the transpressional setting in the Late Ordovician, Silurian and Devonian.

Key words: three-layer structure model, layered deformation, staged activity, formation mechanism, strike-slip fault, Tazhong Uplift, Tarim Basin

引用格式:罗彩明,梁鑫鑫,黄少英,等. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 118-131, 148. DOI: 10. 11743/ogg20220110.

Luo Caiming, Liang Xinxin, Huang Shaoying, et al. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 118-131, 148. DOI: 10. 11743/ogg20220110.

塔里木盆地满加尔坳陷周缘发育塔北和塔中两大古生界古隆起,是塔里木盆地内有利的油气富集区,经过多年勘探已建成塔北和塔中古生界碳酸盐岩两大富油气区带。随着勘探开发工作的不断深入,盆地内发现由大量走滑断裂系统构成的复杂构造体系^[1-2],而围绕着走滑断裂系统部署的井位也获得许多重要的油气发现^[3-6],如塔北哈拉哈塘油田、中国石化顺北油田及塔中Ⅲ区均是位于走滑断裂带附近的高产油气田。塔中隆起位于塔里木盆地中央隆起带中部,是加里东晚期形成的克拉通内古隆起^[1]。塔中地区近年来采集的高品质三维地震资料显示,除了塔中Ⅰ号断裂带和塔中Ⅱ号断裂带等北西向逆断层之外,在塔中隆起区以及塔中北部斜坡区发育一系列NNE和NE向走滑断裂^[7-16]。在勘探开发的过程中在这些走滑断层附近获得了较高的油气产量^[10,13,17],因此走滑断裂的研究在近期得到越来越多的关注。

前人对塔中隆起发育的走滑断裂开展了构造样式、形成期次和发育机制等方面的大量研究工作,普遍认为塔中隆起的走滑断裂剖面上表现为高角度近直立断面,垂向断距较小,切割地层多,从基底至二叠系均见走滑断裂发育。在奥陶系和志留系中发育花状构造,并且表现为上部负花状构造与下部正花状构造垂向叠置。在走滑断裂两侧发育许多伴生构造,在平面上表现为雁列构造、马尾构造和羽状构造等样式。通过地震剖面上断层切割地层关系、地层不整合界面和平面组合规律等研究,大多数学者认为塔中隆起走滑断裂在古生代形成,并且经历两期活动^[14-20],但对于两期活动的具体时间上还存在不一致的看法,一些学者认为是中、晚奥陶世—志留纪和二叠纪^[14-15];还有学者认为第一期志留纪末期—泥盆纪初期,第二期二叠纪晚期^[14,18];另一部分学者认为是中奥陶世和晚志

留世—中泥盆世末两期^[15-17]。还有学者提出塔中走滑断裂主要为志留纪—泥盆纪一期活动^[11]。在断裂的形成机制方面,目前主流认为塔中地区走滑断裂是在NE向基底结构基础上,在先期NW向逆冲断裂(塔中Ⅰ号断层)上发育的左行变换断层,在中奥陶世形成,并在志留纪末—中泥盆世继承性持续活动^[21-23]。后来该模型又细化为走滑断裂在中奥陶世末的压扭性活动叠加中志留世—中泥盆世的张扭性活动^[15-16]。也有学者认为,塔中隆起Ⅰ—Ⅳ号断裂带和走滑断裂共同构成单剪模式下的断裂系统^[9]。

总结目前塔中隆起走滑断裂的相关研究,多基于早期低品质地震资料,对于走滑断裂的几何结构、运动学特征、形成期次和形成机制还存在较大争议。近年来,随着塔中地区高品质三维地震资料的获取,对塔中走滑断裂进行更深入、更准确的解剖成为可能。本研究基于塔中地区最新的三维地震资料,建立了塔中隆起走滑断裂的三层结构模型,并在此基础上分析了走滑断裂的形成期次和形成机制,取得了创新性认识。

1 区域地质背景

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区南部,面积约为 $5\times 10^4\text{ km}^2$,是中国富含油气的大型叠合盆地,盆地从震旦纪到现今经历了多期构造活动,多个原型盆地叠合^[24-25]。该盆地位于哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块、羌塘地块和柴达木板块交汇处^[26],周缘发育多期造山带。

塔中隆起位于塔里木盆地塔克拉玛干沙漠腹地,构造位置上位于塔里木盆地中央隆起带中部,西临巴楚隆起,东接古城墟隆起,北部以斜坡形式连接阿满过渡带,隆起最南边与塘古巴斯坳陷相接(图1a)。塔中

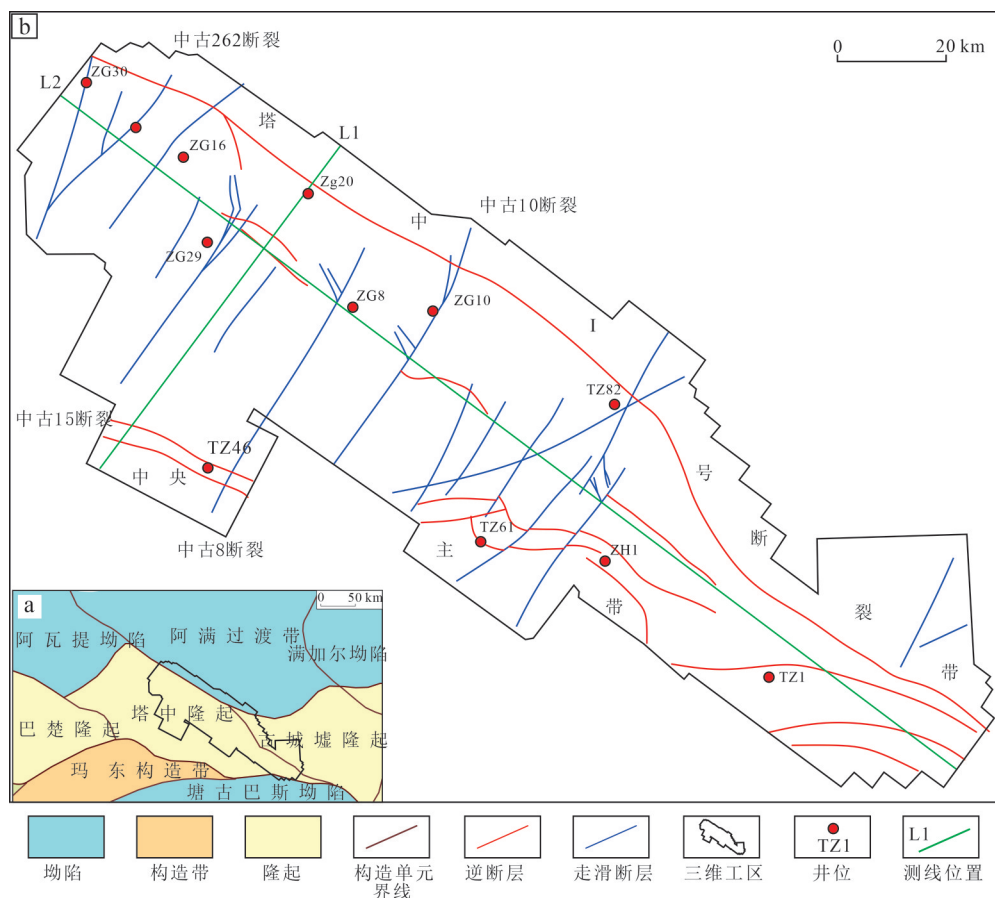


图1 塔里木盆地塔中隆起构造位置(a)及断裂系统分布(b)

Fig. 1 Tectonic position (a) and distribution of fault system (b) of Tazhong Uplift, Tarim Basin

隆起整体呈NW-SE向展布,从北西向南东收敛变窄,整体呈东南高、西北低的构造形态。塔中隆起受北边界塔中I号断裂带和南部边界断裂共同控制(图1b),形成一个大型的复式背斜,在隆起高点处下古生界遭受强烈剥蚀^[27](图2,图3)。

塔里木盆地在漫长地质过程中,经历了多期构造演化。塔中隆起作为盆地中央隆起带的次级构造单元,其形成与发育过程受塔里木盆地的构造演化控制,根据构造特征将塔中隆起的演化过程划分为5个阶段^[28-29]:①孕育期(震旦纪—中奥陶世)。在前寒武纪到早奥陶世,塔里木盆地整体处于伸展的构造背景之下^[6,30-32]。中奥陶世晚期,塔里木盆地南缘发生应力转换进入挤压环境。塔中隆起的NW向挤压构造在此时形成,塔中隆起此时已初具雏形。②形成期(晚奥陶世)。奥陶纪末期,塔中隆起在中奥陶世形成的逆冲断裂持续活动,并且发育新的逆冲构造,巩固了塔中隆起的构造格局。③定型期(志留纪—泥盆纪)。古昆仑洋在晚奥陶世关闭,同时阿尔金造山带开始了强烈的隆升造山作用^[33],北部的南天山洋开始消亡。早泥盆世,塔中地区南部强烈隆升,造成志留系遭受不同程度

的剥蚀。泥盆纪之后,构造活动较弱,塔中隆起在泥盆纪定型。④改造期(石炭纪—二叠纪)。泥盆纪之后塔中地区构造活动整体较弱,逆冲构造在石炭纪之后停止发育^[20],二叠系中可见岩浆岩发育,早期发育的走滑断层受到改造,部分复活切入二叠系。⑤埋藏期(中生代—新生代)。塔中地区进入稳定埋藏期,地层平整,塔中隆起没有经受强烈的构造变形^[23-24]。

2 塔中隆起断裂发育特征

塔中隆起整体上发育两组断裂,分别是NW走向的逆冲断裂体系和NE走向的走滑断裂体系。

2.1 逆冲断裂体系

NW走向的逆冲断裂控制了塔中隆起的宏观构造格局,北部塔中I号断裂带和南部中央主垒带分别向北、向南逆冲,呈背冲式构造型式,作为边界断裂限定了隆起的整体形态(图2)。塔中I号断裂带向南倾斜,为上陡下缓的铲式逆冲断层,除了在西段和东段外,塔中I号断裂带大多未断至基底,在寒武系膏岩层

中滑脱消失,为盖层滑脱型逆冲断层,断层向上终止于志留系底界,标志着塔中 I 号断裂带的峰期活动时限为晚奥陶世。中央断垒带向北倾斜,整体上产状陡立,向下断入基底,为基底卷入型逆冲断层,主断裂和次级断裂夹持紧闭的断展褶皱,断层向上可以影响到志留系和泥盆系。在横切塔中隆起的剖面上,可见受中央主垒带逆冲抬升,塔中隆起向北掀斜,隆起上前志留系被抬升剥蚀,被志留系不整合削截,可见中央主垒带至少存在晚奥陶世和志留纪—泥盆纪两期主要活动。在平面上,塔中 I 号断裂带和中央断垒带在塔中隆起的东端收敛汇聚在一起(图 1b)。

2.2 走滑断裂体系

除了 NW 走向的逆冲断裂,塔中隆起最值得注意

的是发育一系列与逆冲断层大角度相交的走滑断裂,呈 NE, NEE 和 NNE 走向延伸,近年来塔中地区在这些走滑断裂带附近取得了较高的油气产量,使得这套走滑断裂得到广泛关注。这些断裂主要发育在塔中隆起的西北部和中部,东南部走滑断裂发育较少且延伸短。在纵切塔中隆起的地震剖面上可见,塔中隆起的走滑断裂断面普遍为高陡直立,断裂向上发育分支断层,剖面上呈花状构造,分支断裂向下汇聚为一根主干断裂(图 3)。断层普遍可以向下断至基底,大部分走滑断裂向上终止于石炭系底界,部分切穿二叠系及以上地层,表明走滑断裂在石炭系之前已经定型,后期仅少部分活动。在平面上,可见走滑断裂在平面上延伸较远,走滑断层通常切穿逆冲断裂体系,或者发育在逆冲断裂分段和拐弯的部位,部分走滑断裂切穿

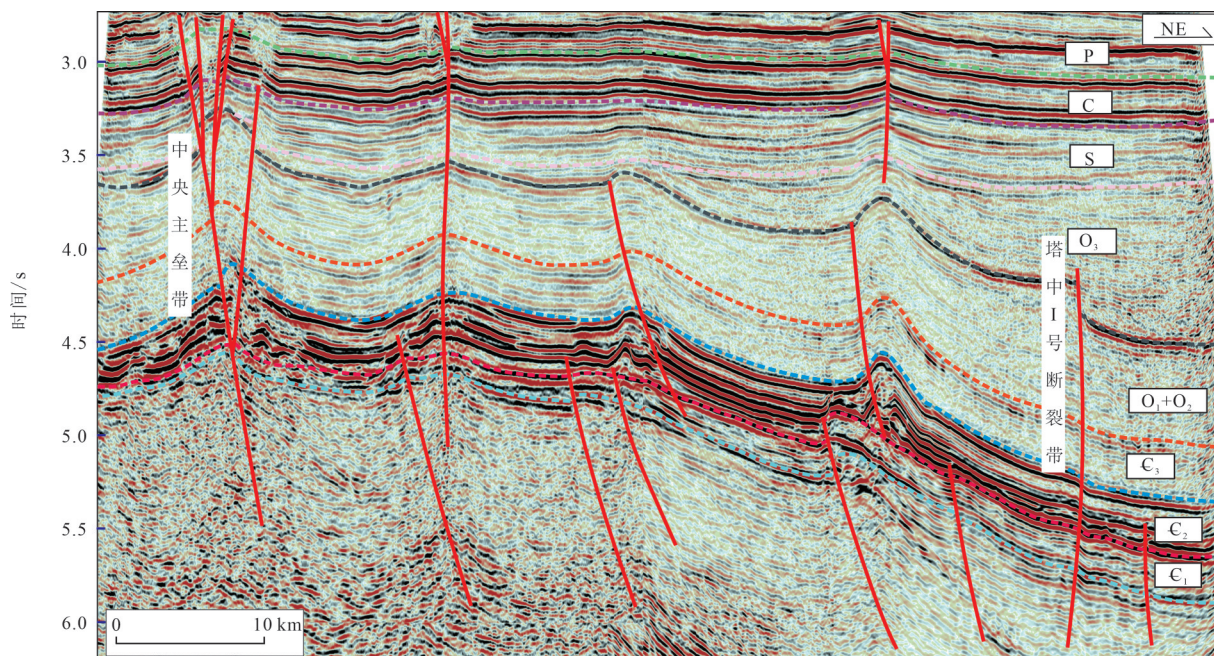


图2 塔里木盆地过塔中隆起北东向地震剖面(图 1b 中 L1)

Fig. 2 NE-striking seismic section across the Tazhong Uplift, Tarim Basin (L1 in Fig. 1b)

C₁. 下寒武统; C₂. 中寒武统; C₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系; C. 石炭系; P. 二叠系

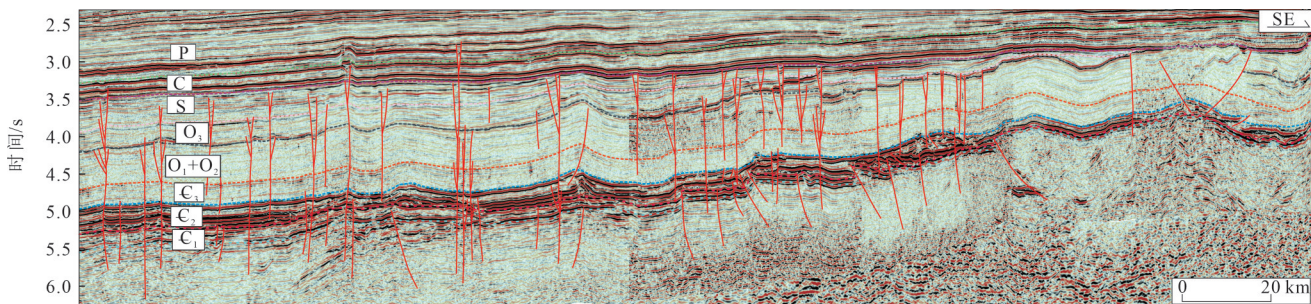


图3 塔里木盆地过塔中隆起北西向地震剖面(图 1b 中 L2)

Fig. 3 NW-striking seismic section across the Tazhong Uplift, Tarim Basin (L2 in Fig. 1b)

C₁. 下寒武统; C₂. 中寒武统; C₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系; C. 石炭系; P. 二叠系

塔中 I 号断裂带向满加尔坳陷内部延伸。通过错开逆冲断裂的相对位移来判断,这套走滑断裂的平面断距不大,指示左行走滑剪切的运动学性质,这也是早期的研究共识^[9,15,34]。

3 走滑断裂三层结构

基于精细的三维地震资料解释发现,塔中隆起走滑断裂与传统的走滑断裂存在显著的差异,具有明显的分层结构。在不同的构造层具有不同的样式和

宽度。

3.1 主要走滑断裂特征

1) 中古 262 断裂 NE 向展布,向北一直延伸至阿满过渡带并和塔中 I 号断裂带相交。该断裂向上在志留系内部尖灭,向下切穿基底。该断裂主断裂直立,在寒武系中发育少量分支断裂,中寒武统在断裂两侧拱起。在上寒武统底面主断裂呈线性展布,少量的分支断裂表现为与主断裂低角度斜交的斜列断层(图 4)。断裂在碳酸盐岩顶面发育若干条分支断裂,从剖面中

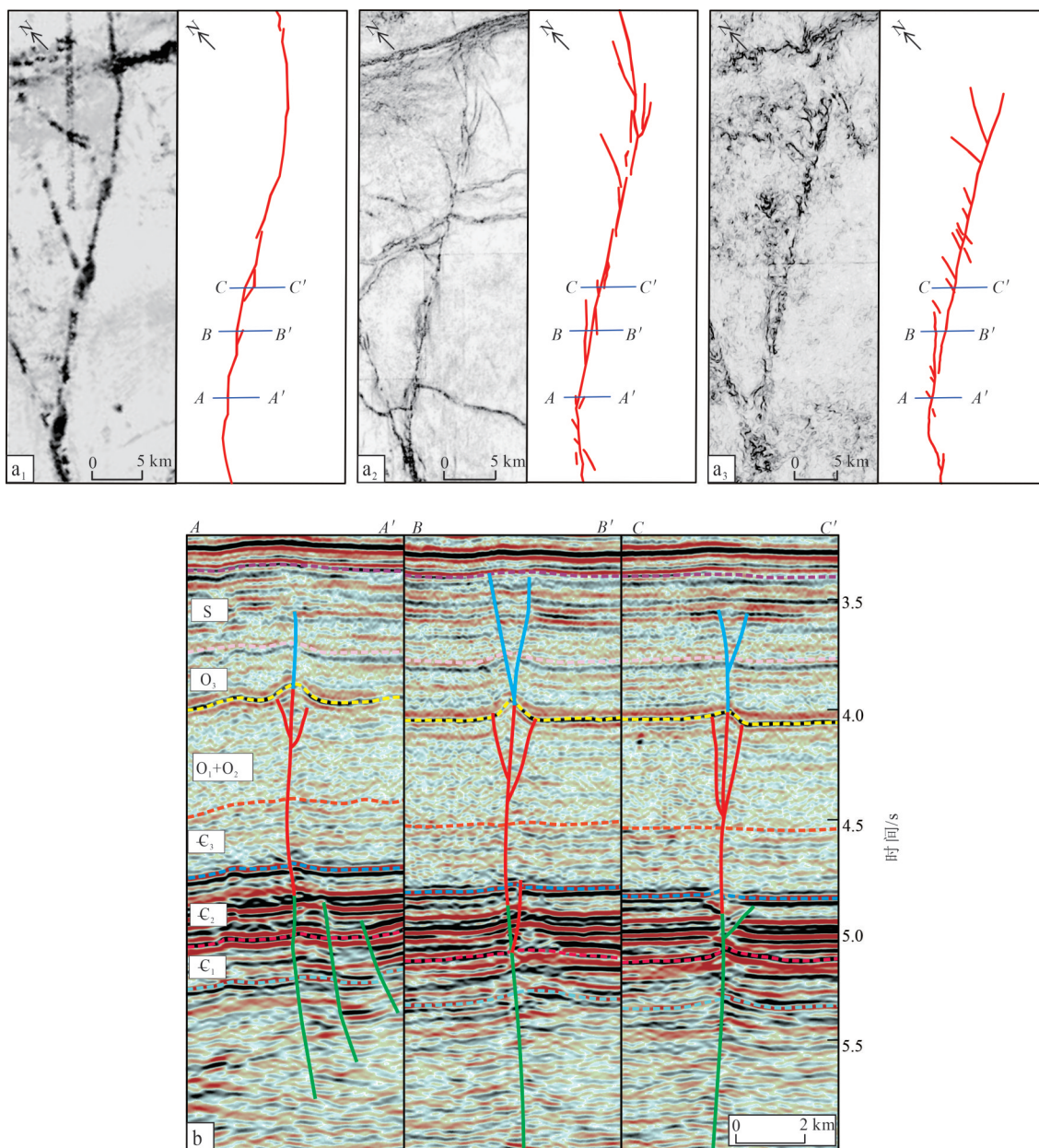


图4 塔里木盆地塔中隆起中古 262 断裂平面及剖面特征

Fig. 4 Plane and sectional views of Zhonggu 262 fault in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

a₁. 上寒武统底界断裂平面特征; a₂. 上奥陶统桑塔木组底界断裂平面特征; a₃. 志留系底界断裂平面特征; b. 断裂剖面特征

C₁. 下寒武统; C₂. 中寒武统; C₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系

不难发现碳酸盐岩顶面发育的正花状构造,平面上较寒武系发育更多的低角度斜交分支断裂。并且可以看出整条断裂南部的活动强度较北部高,断裂所控制的隆起幅度从南到北逐渐降低。中古262断裂在志留系底界发育大量的分支断裂,这些断裂与主位移带夹角大于上奥陶统内分支断裂与主位移带的夹角,平面上呈NW走向平行排列。

2) 中古15断裂位于塔中隆起西北部中段,延伸较长,向南可延伸至塔中Ⅱ号断裂带,北部在靠近Ⅰ号断裂带南部尖灭。该断裂活动时间长,下部寒武系到志留系—泥盆系均被切穿。中古15断裂在中寒武统内主要为单一的断面,局部发育分支断裂(图5),中寒武

统内走滑断裂主要为压扭性质的,断裂两侧地层变为上拱隆起。中古15断裂在碳酸盐岩顶面的分支断裂较少,仅在北部发育规模较大的分支断裂。碳酸盐岩顶面受早期和晚期断裂同时控制,发生压扭变形和张扭变形。志留系中走滑断裂则主要表现为简单的“y”型负花状构造,且规模较大。

3) 中古8断裂位于塔中隆起的中部(图1b),NE向延伸,南部与塔中Ⅱ号断裂带相交,北部在ZG8井附近尖灭。该断裂向下切穿寒武系至基底,在石炭系底界尖灭。主断裂面直立,主断裂断面倾向由南至北不断变换。中古8断裂在寒武系也表现为压扭性质的断裂,上寒武统底界由线性断裂和少量斜列断层构成,断

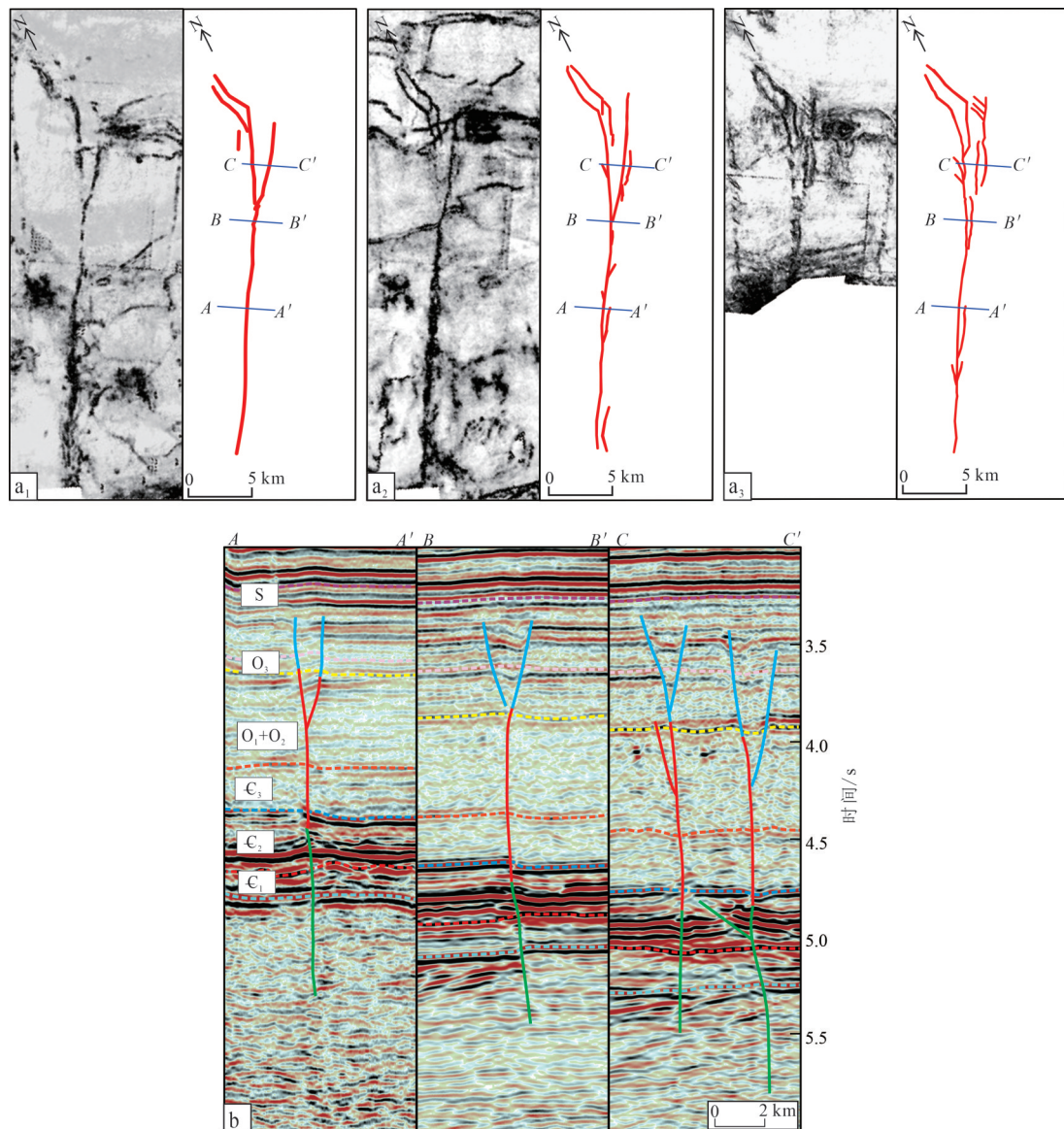


图5 塔里木盆地塔中隆起中古15断裂平面及剖面特征

Fig. 5 Plane and sectional views of Zhonggu 15 fault in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

a₁. 上寒武统底界断裂平面特征; a₂. 上奥陶统桑塔木组底界断裂平面特征; a₃. 志留系底界断裂平面特征; b. 断裂剖面特征

C₁. 下寒武统; C₂. 中寒武统; C₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系

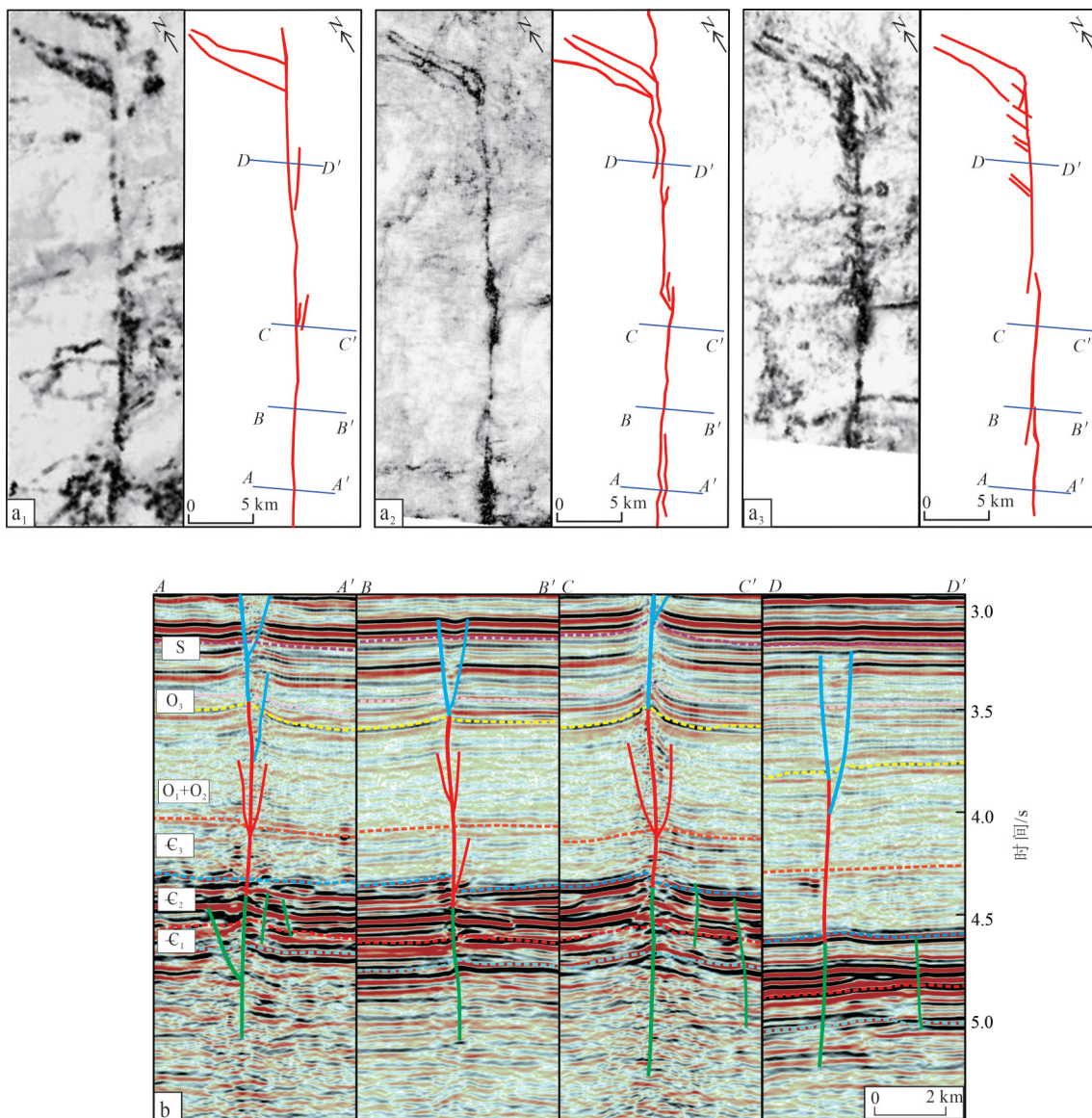


图6 塔里木盆地塔中隆起中古8断裂平面及剖面特征

Fig. 6 Plane and sectional views of Zhonggu 8 fault in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

a₁. 上寒武统底界断裂平面特征; a₂. 上奥陶统桑塔木组底界断裂平面特征; a₃. 志留系底界断裂平面特征; b. 断裂剖面特征

ε₁. 下寒武统; ε₂. 中寒武统; ε₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系

裂南部碳酸盐岩顶面压扭变形明显(图6)。在碳酸盐岩顶面上该断裂由3条左阶排列线性断裂组成,断裂的叠置区域形成拉分地堑。断裂在志留系中表现出和其他断裂基本一致的变形特征,也表现为受分支断裂控制的地层下掉,断裂局部受晚期运动影响持续活动造成志留系的局部隆升,平面上与碳酸盐岩顶面相似,由3条左阶排列的走滑断裂组成,北部浅层分支断裂也表现为雁列排列的一系列NW走向断裂,剖面上构成负花状构造(图6)。

4) 中古10断裂是塔中隆起中部的NE向走滑断裂,贯穿整个三维工区,向北延伸至阿满过渡带内部,向南一直延伸至工区范围边界。主干断裂断面接近垂

直,断层倾向沿走向发生变化。中古10断裂在寒武系中发育正花状构造,上寒武统顶面构造图展示出中古10号断裂带南部发育很多与主断裂锐角相交的分支断裂,断裂中部存在两条斜列断层,形成地堑。断裂北部为走滑断裂尾端特有的马尾状构造。在碳酸盐岩顶面(上奥陶统桑塔木组顶)无明显压扭变形,多为晚期断层控制的地层下掉,碳酸盐岩顶面的分布特征与上寒武统底面基本一致,但是发育更多的与主断裂近平行的小分支断层。志留系断层向下切至奥陶系形成负花状构造,晚奥陶世形成的较大伸展分支断裂持续活动至志留系,平面上则表现为两条平行的走滑断裂并排发育(图7)。

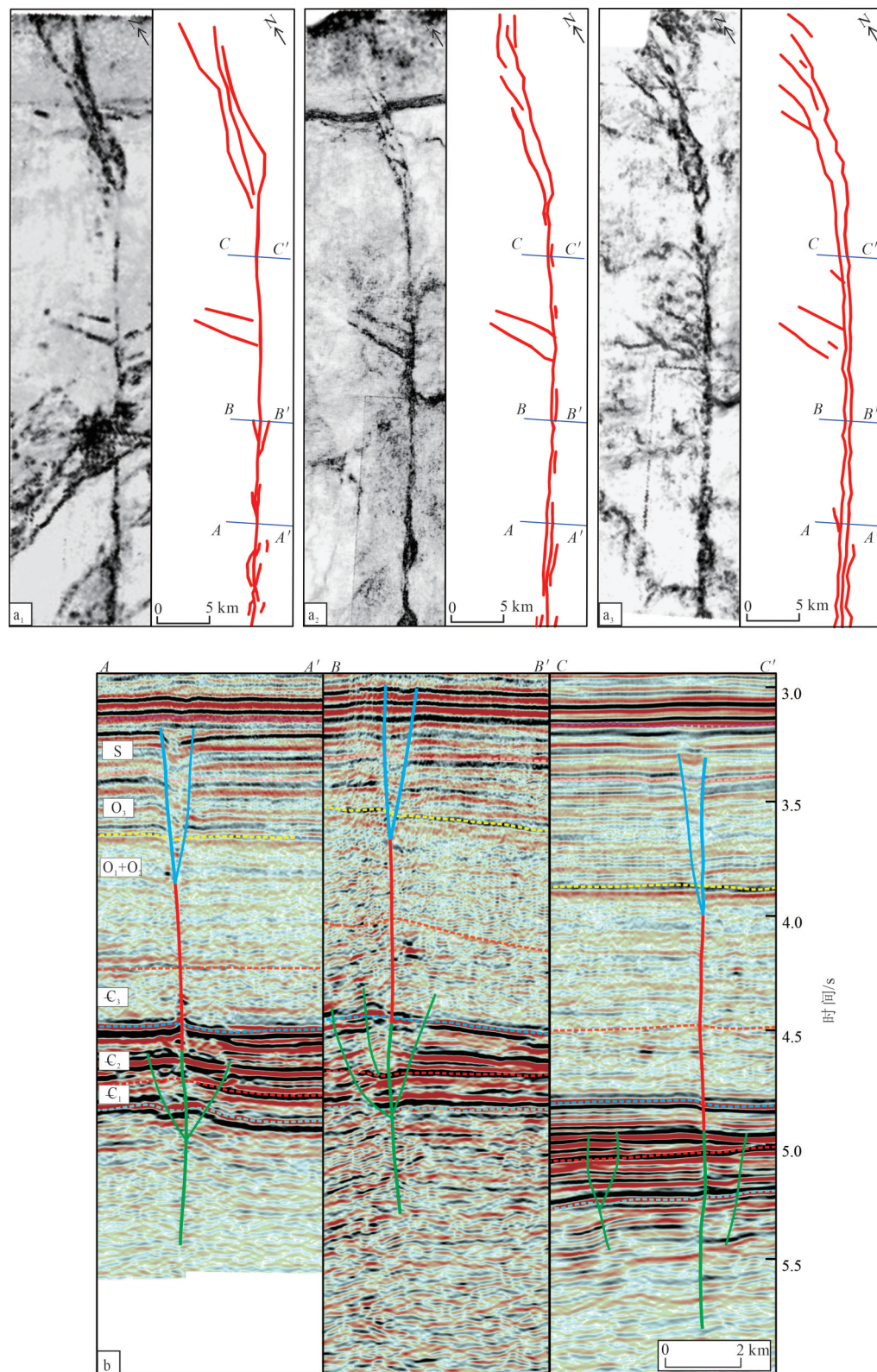


图7 塔里木盆地塔中隆起中古10断裂平面及剖面特征

Fig. 7 Plane and sectional views of Zhonggu 10 fault in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

a₁. 上寒武统底界断裂平面特征; a₂. 上奥陶统桑塔木组底界断裂平面特征; a₃. 志留系底界断裂平面特征; b. 断裂剖面特征

c₁. 下寒武统; c₂. 中寒武统; c₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系

根据以上对塔中隆起区走滑断裂的描述总结出走滑断裂在剖面上有以下特点:断穿基底到志留系和泥

盆系,断面基本上都是直立,但是在不同层位断层的几何特征存在明显差异性,主要分为3层结构(图8)。

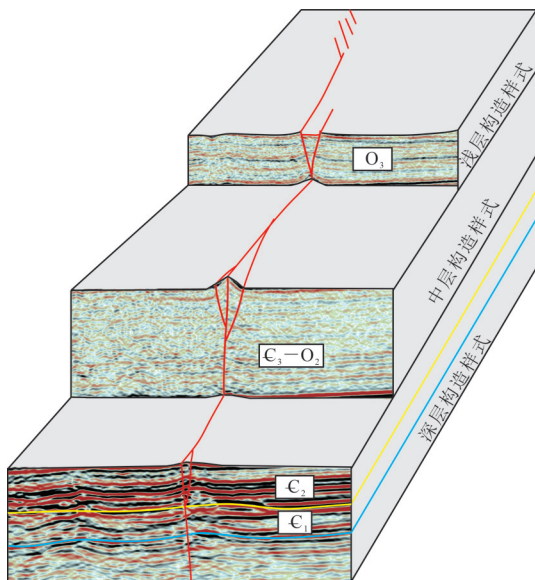


图8 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂三层结构模型

Fig. 8 Schematic diagram showing the three-layer structure of strike-slip faults in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

C_1 : 下寒武统; C_2 : 中寒武统; C_3-O_2 : 上寒武统至中奥陶统;
 O_3 : 上奥陶统

3.2 走滑断裂分层变形特征

图8是塔中隆起典型走滑断裂剖面,剖面中基底至中、下寒武统在断裂两侧有明显的隆起,中、下寒武统中发育的断裂多为直立断层,在平面上寒武系断裂主要以线性构造为主(图9a),部分断裂发育与主干断裂低角度斜交的分支断裂。三维工区寒武系底面断裂系统图揭示,塔中隆起走滑断裂在寒武系中均呈NE向或NNE向的线性展布,沿着主干断裂两侧发育少量的分支断裂。

中层断裂主要发育层位是上寒武统一上奥陶统,走滑断裂在上寒武统一中、下寒武统以直立断层为主,在上奥陶统桑塔木组底面断裂发育分支断裂,上奥陶统受这些压扭性质的分支断裂的控制产生隆起变形,形成正花状构造;局部区域处于叠接拉分段或受上层雁列式断层下切的影响,上奥陶统发育地堑或张扭构造。通过上奥陶统桑塔木组底面的断裂系统图可见中层走滑断裂和深层走滑断裂走向一致,皆为NE或NNE线性展布(图9b),但是中层走滑断裂发育更多的分支断裂,平面上沿主干断裂两侧发育大量的斜列断层。

浅层走滑断裂主要发育的层位是上奥陶统-志留系和泥盆系,这一层断裂在剖面上控制地层下掉形成负花状构造,并且切穿桑塔木组与中层断裂叠置,形成负花状构造和正花状构造的复合花状构造。塔中隆起三维工区的志留系底界断裂系统图揭示出该层断裂总

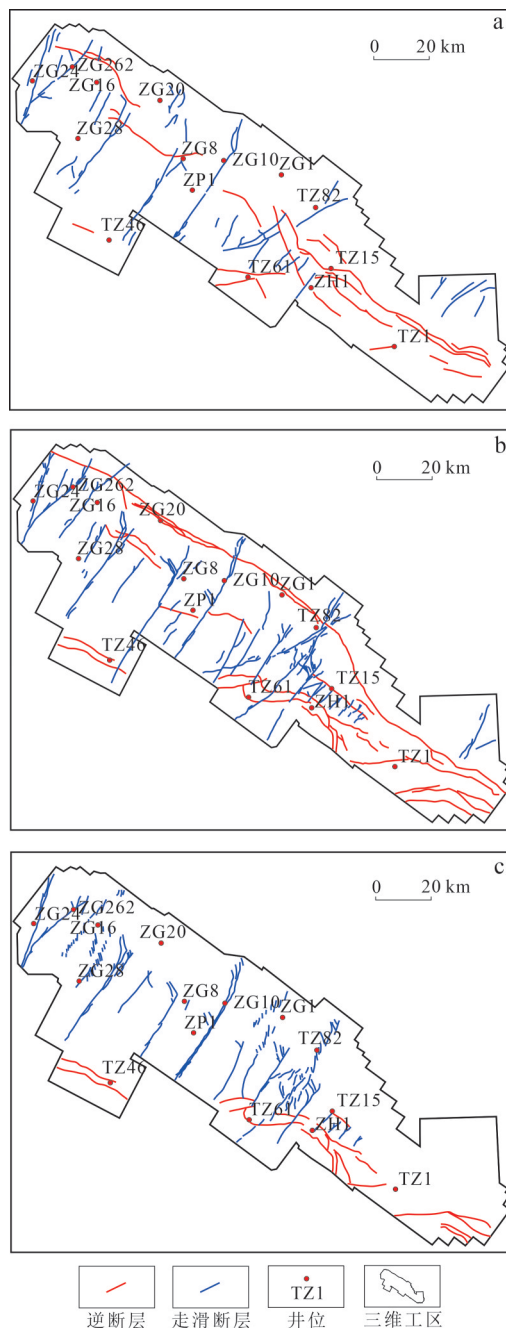


图9 塔里木盆地塔中隆起寒武系底面(a)、桑塔木组底面(b)以及志留系底面(c)断裂系统

Fig. 9 Diagrams showing the fault systems at the bottom of the Cambrian (a), at the bottom of Sangtamu Formation (b), and at the bottom of the Silurian (c) in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

体走向仍然是继承深层断裂的NE和NNE向,但这些断裂平面上不再是单一的线性分布;部分断层在北段呈NW向沿断裂主位移带雁列式排列(图9c)。

塔中隆起走滑断层具有分层差异变形的特点,可分为深层、中层和浅层,各层断裂在剖面特征与平面组合上均存在差异。深层中、下寒武统断裂平面上呈线性展布,剖面上断裂两侧地层发生上拱变形。深部断

裂向上持续发育,切穿上寒武统和奥陶系,并在碳酸盐岩顶面发育许多分支断裂,剖面上表现为正花状构造,平面上表现为线性并发育多条斜列断层。浅层走滑断裂发育在上奥陶统-志留系和泥盆系内,剖面上以负花状构造常见,平面上表现为该层特有的NW向雁列断层。这3层断裂在垂向上叠置,形成复杂的空间形态(图8)。

4 走滑断裂的演化

4.1 走滑断裂活动期次

根据走滑断裂剖面的几何学特征将走滑断裂分为深层、中层和浅层结构。地震剖面上深层和中层的地层变形特征都是以压扭变形为主,从塔中隆起典型的走滑断裂带中可以发现深层寒武系受走滑断裂控制的变形与上奥陶统变形并不协调,上奥陶统的隆升程度要大于寒武系(图8)。由此认为塔中走滑断裂在中晚寒武世已经形成。但是塔里木板块南、北缘在寒武纪一早奥陶世均处于被动大陆边缘,塔里木板块在当时整体处于伸展环境^[24,28,31,35],并没有压扭应力环境背景,所以推测深层的走滑断裂形成时期,塔中地区可能受局部压扭应力作用。晚奥陶系中走滑断裂呈典型的正花状构造样式,且隆升幅度较寒武系大很多,和志留系-泥盆系中负花状构造具有明显差异,因此晚奥陶世应该为走滑断裂发育的一个重要时期。浅层走滑断裂发育一系列NW向雁列正断层,这些正断层沿早期走滑断裂发育,表明这一期断裂受早期走滑断裂控制。由上述分析,结合前人研究成果^[16,20-22,36-41],将塔中隆起走滑断裂发育阶段划分为3期:早期断裂是在中寒武世塔中地区局部压扭应力下发育,断层控制的地层变形为逆断距变形;中期晚奥陶世走滑断裂再次活动,并且活动强度要比早期强;晚期活动使早期走滑断裂复活继续发育,在志留系中形成分支正断层。

4.2 走滑断裂发育时间

许多学者对塔中隆起走滑断裂的发育时间做过大量的研究,但是由于之前的资料限制,加之塔中隆起走滑断裂的断距很小,造成对走滑断裂发育时间研究不能够很精细,所以塔中隆起走滑断裂的发育时间至今没有统一的观点^[14,18-19,30,32]。本研究通过断层和地层切割关系,以及地层不整合关系来厘定早期和晚期断裂的形成时间。

4.2.1 早期活动时间

基于高品质三维地震剖面,通过厘定地层与断层的关系可以确定断裂的发育时间;断层发育的时间晚于被切割地层或与该地层同期发育,并早于未改造地层。塔中隆起早期走滑断裂向下插入基底,但是在中寒武统内可见一期低角度的不整合(图10),不整合以下地层变形基本一致,表现为宽缓的隆起,不整合上覆地层较平缓。深层走滑断裂局部发育分支断裂;分支断裂向上切入中寒武统,与主断裂组合形成正花状构造(图6b)。下构造层中不整合界面和正花状构造的发育表明,塔中隆起早期经历过一期走滑断裂活动,断裂发育时间应该晚于中寒武统沉积时期,早于晚寒武世。

4.2.2 中期活动时间

塔中隆起走滑断裂控制的中期压扭变形向下与早期走滑断裂连接,向上在上奥陶统中消失,从剖面中可以看到走滑断裂两侧的上奥陶统桑塔木组发生明显的隆升,因此走滑断裂早期活动时间晚于晚奥陶世桑塔木组沉积期。发生挤压变形的上奥陶统遭受剥蚀,与上覆志留系之间呈角度不整合(图10),志留系-泥盆系中没有上奥陶统中这么强烈的挤压变形,所以走滑断裂中期活动应该发生于志留纪之前。综上所述,塔中隆起走滑断裂中期发育的时间应该介于晚奥陶世桑塔木组沉积期和志留纪。

4.2.3 晚期活动时间

晚期走滑断裂剖面上表现为正断层,这些断裂向上消失在石炭系底界,向下可切至上奥陶统内部,改造地层早期变形。但是在上奥陶统除了在局部发生地层加厚,例如拉分地堑、斜列断层和马尾断层处,这些构造是和早期断裂同时形成,所以上奥陶统会有加厚现象,与晚期断裂无关。除这些特殊的部位,上奥陶统其他地方没有明显的受断裂控制的地层加厚现象,因此晚期走滑断裂的形成时间晚于奥陶纪。在志留系-泥盆系中,受晚期断裂控制的上盘地层可见地层加厚(图10),断裂在石炭系底界消失,所以晚期走滑断裂的活动时间早于石炭纪。综合以上分析,塔中隆起走滑断裂的第三期活动时间介于志留纪-泥盆纪。

5 塔中隆起走滑断裂形成机制探讨

前人对塔里木盆地磁异常带和现在的盆地断裂带

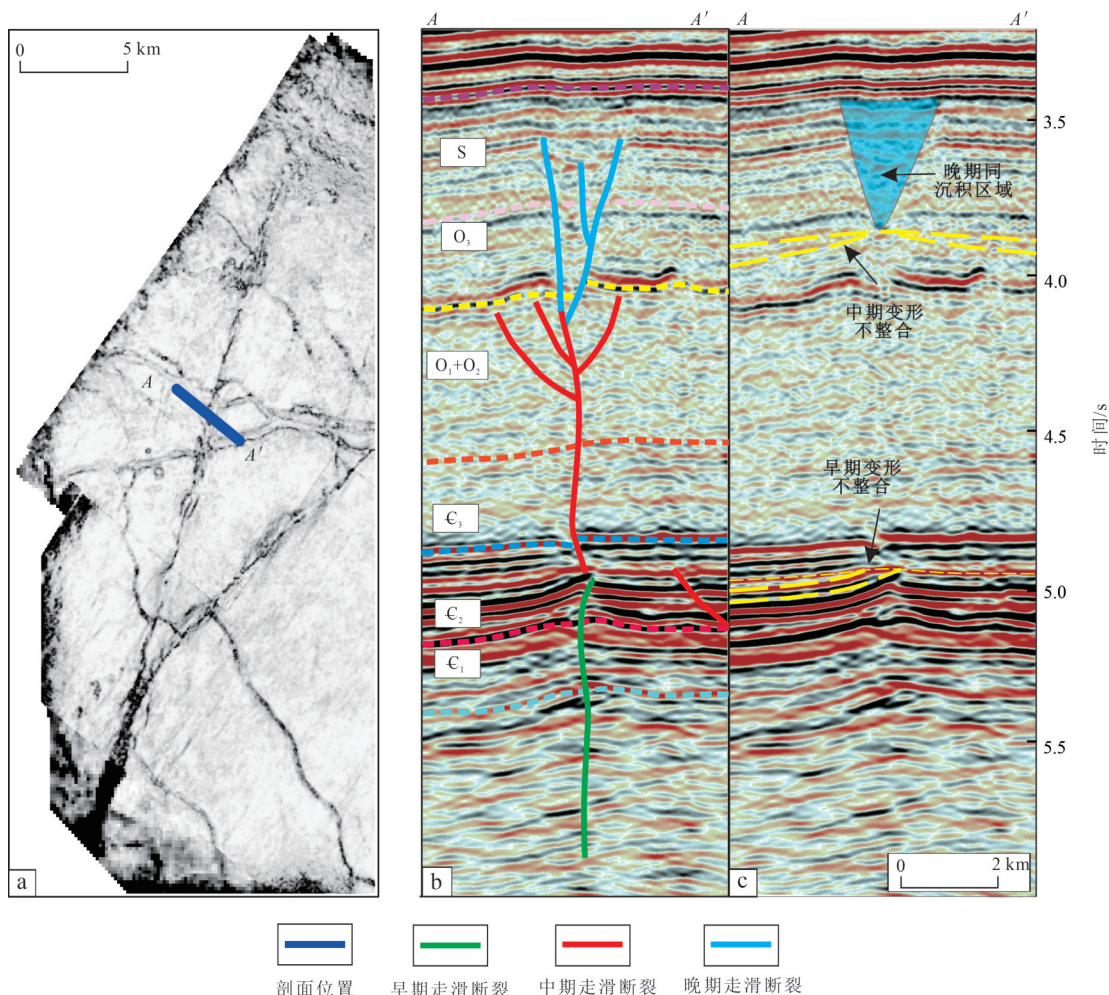


图10 塔里木盆地塔中隆起与走滑断裂相关的地层变形

Fig. 10 Stratum deformation related to strike-slip faults in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

a. 上奥陶统桑塔姆组底面断裂相干平面特征; b. 断裂剖面特征; c. 分期变形标志

ε₁. 下寒武统; ε₂. 中寒武统; ε₃. 上寒武统; O₁+O₂. 下奥陶统与中奥陶统; O₃. 上奥陶统; S. 志留系

进行对比,发现两者分布特征有较高的统一性^[42-44],说明晚期断裂是在基底断裂的基础上发育的。有学者认为在塔里木盆地南部一系列的NE向线性磁异常带是在基底中存在的NE向软弱带^[38-42],这些软弱带为NE向走滑断裂的形成提供了基础,控制了走滑断裂的分布^[9-10,13-18,23,45-48]。

前人研究表明塔里木板块南、北缘在寒武纪—早奥陶世均处于被动大陆边缘,塔里木板块在当时整体处于伸展环境^[24,28,31,35],并没有压扭应力背景。过塔中隆起NE向剖面(图2)可见中寒武统内发育一期低角度逆断层,由此推测在中寒武世塔里木板块整体伸展背景下,塔中地区存在构造反转事件。构造反转造成中寒武统发育低角度逆断层,同时作用于基底软弱带局部发生剪切运动形成早期不连续、规模小的走滑断裂(图11a)。前人研究并未提及塔中地区中寒武世构造反转,塔中地区中寒武世构造反转事件的动力学成

因需要进一步研究。

自早奥陶世末期古昆仑洋开始俯冲,塔里木盆地南缘发生应力场转变,盆地周缘的阿尔金洋和南天山洋也相继开始闭合^[15-16,49-50],造成塔里木板块受到南、北两个方向的挤压力共同作用。在晚奥陶世塔里木板块南缘古昆仑洋俯冲程度加剧,塔中地区受来自西南强烈的挤压应力发生强烈隆升,造成塔中隆起早期形成的NW向挤压构造持续活动,此时基底薄弱带受强烈的挤压应力作用发生强烈断裂活动。阿尔金洋俯冲产生的挤压应力从塔中地区东南缘作用于研究区,斜向作用于基底薄弱带,使基底断裂产生左旋活动。整个盆地在这个时期都处于挤压环境,所以塔中地区处于区域的压扭应力环境,晚奥陶世早期走滑断裂连接形成延伸较长的压扭性质左旋走滑断裂(图11b)。

塔里木板块南缘古昆仑洋在志留纪最终闭合,西昆仑造山带对塔中地区影响很小。东南缘阿尔金构造

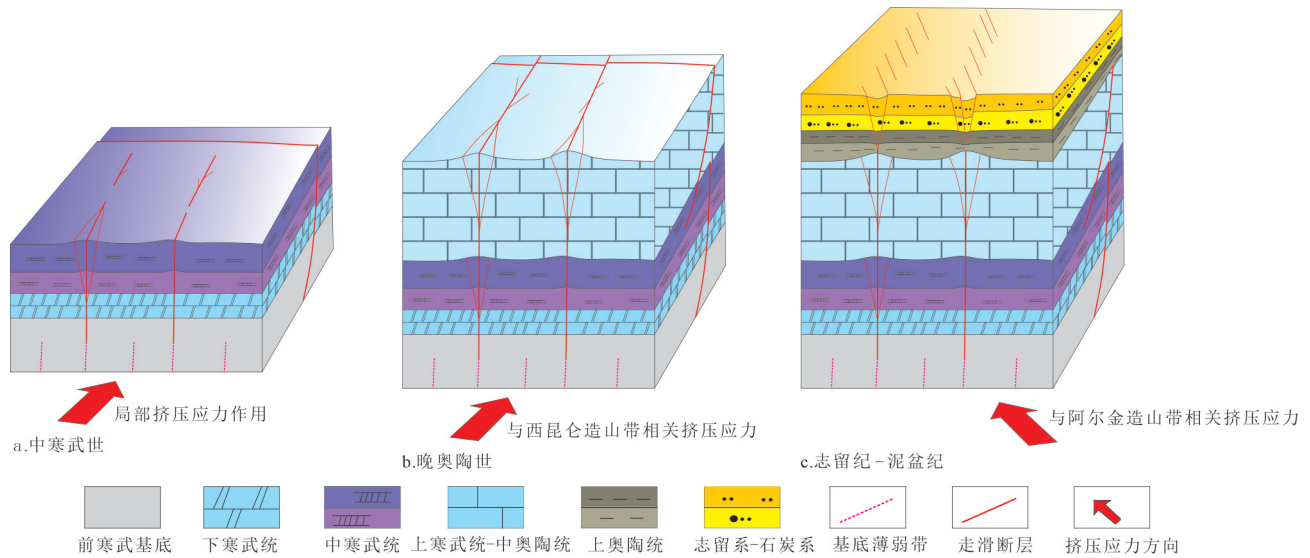


图11 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂形成模式

Fig. 11 Schematic diagrams showing the evolution modes of strike-slip faults in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

域在志留纪一中泥盆世发生强烈造山作用,志留纪一中泥盆纪塔里木南缘仍然处于挤压构造环境,塔中地区近东西向的逆冲断层持续活动。志留纪一中泥盆世时期研究区的深层走滑断裂系统受来自东南方向的挤压力作用活化^[16],发生左旋运动;浅层发育一系列右阶雁列式正断层(图11c),剖面上表现为负花状构造。

6 结论

1) 走滑断裂断穿基底到志留系和泥盆系,断面直立,但是在不同层位断层的几何特征存在明显差异性,主要分为3层结构:深层中、下寒武统断裂平面呈线性展布,剖面上中、下寒武统在断裂两侧上拱,局部发育分支断裂构成正花状构造;深部断裂向上继续切穿上寒武统和奥陶系,并在碳酸盐岩顶面发育许多分支断裂,剖面上表现为正花状构造,平面上为线性并发育许多斜列断层;浅层走滑断裂发育在上奥陶统-志留系和泥盆系内,剖面上以负花状构造常见,平面上表现为该层特有的NW向雁列断层。这3层断裂在垂向上叠置,形成复杂的空间形态。

2) 结合塔中区域构造背景和断裂几何学特征,将塔中隆起走滑断裂的演化阶段划分为3期:中寒武世塔中地区受局部压扭应力作用发育规模较小的走滑断裂;晚奥陶世走滑断裂复活,形成正花状构造;志留纪一中泥盆纪走滑断裂持续活动。

3) 塔中隆起断裂的形成受中寒武世局部压扭应力、晚奥陶世压扭环境和志留纪一中泥盆纪的压扭环境控制,中寒武世塔中地区构造反转事件动力学成因还

需进一步研究。

参考文献

- [1] 何光玉,曹自成,姚泽伟,等. 塔里木盆地古城地区古生界垒-扭叠复合断层-裂缝体模型[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 587-594.
He Guangyu, Cao Zicheng, Yao Zewei, et al. Paleozoic horst-twist superimposed fault-fracture body model in Gucheng area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 587-594.
- [2] 邓尚,李慧莉,韩俊,等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
Deng Shang, Li Huili, Han Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
- [3] 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.
- [4] 韩俊,况安鹏,能源,等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 152-160.
Han Jun, Kuang Anpeng, Neng Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 152-160.
- [5] 吕修祥,陈佩佩,陈坤,等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 957-971.

- Lyu Xiuxiang, Chen Peipei, Chen Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 957-971.
- [6] 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.
- [7] 管树巍, 杨海军, 韩剑发, 等. 塔中低凸起的构造属性和解释方法[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(5): 777-786.
- Guan Shuwei, Yang Haijun, Han Jianfa, et al. Structural properties and interpretation methods of Tazhong low salient[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(5): 777-786.
- [8] Li C, Li B, Wang X. Paleozoic fault systems of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 48-58.
- [9] Lan X, Lü X, Zhu Y, et al. The geometry and origin of strike-slip faults cutting the Tazhong low rise megaanticline (central uplift, Tarim Basin, China) and their control on hydrocarbon distribution in carbonate reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 22: 633-645.
- [10] 郭光辉, 成丽芳, 刘玉魁, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系走滑断裂系统特征及其控油作用[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(3): 239-243.
- Wu Guanghui, Cheng Lifang, Liu Yukui, et al. Strike-slip fault system of the Cambrian-Ordovician and its oil-controlling effect in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(3): 239-243.
- [11] 李传新, 贾承造, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起北斜坡古生代断裂展布与构造演化[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1065-1073.
- Li Chuanxin, Jia Chengzao, Li Benliang, et al. Distribution and tectonic evolution of the Paleozoic fault system, the North Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1065-1073.
- [12] Ning F, Yun J B, Zhang Z P. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of Central Uplift Belt in the Tarim Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(1): 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.10.008>
- [13] 郭光辉, 陈志勇, 曲泰来, 等. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系[J]. *地质学报*, 2012, 86(2): 219-227.
- Wu Guanghui, Chen Zhiyong, Qu Tailai, et al. Characteristics of the strike-slip fault facies in ordovician carbonate in the Tarim Basin, and its relations to hydrocarbon[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 219-227.
- [14] 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(5): 22-26.
- Zhang Chengze, Yu Hongfeng, Zhang Haizu, et al. Characteristic, genesis and geologic meaning of strike-slip fault system in Tazhong Area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2008, 30(5): 22-26.
- [15] 杨勇, 汤良杰, 郭颖, 等. 塔中隆起NNE向走滑断裂特征及形成机制[J]. *中国地质*, 2016, 43(5): 1569-1578.
- Yang Yong, Tang Liangjie, Guo Ying, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of NNE-trending strike-slip faults in Tazhong Uplift [J]. *Geology in China*, 2016, 43(5): 1569-1578.
- [16] Han X, Deng S, Tang L, et al. Geometry, kinematics and displacement characteristics of strike-slip faults in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin: A study based on 3D seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 410-427.
- [17] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 257-267.
- Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(3): 257-267.
- [18] 马庆佑, 沙旭光, 李玉兰, 等. 塔中顺托果勒区块走滑断裂特征及控油作用[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 120-124.
- Ma Qingyou, Sha Xuguang, Li Yulan, et al. Characteristics of strike-slip fault and its controlling on oil in Shuntuoguole region, middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(2): 120-124.
- [19] 李明杰, 胡少华, 王庆果, 等. 塔中地区走滑断裂体系的发现及其地质意义[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(1): 116-122.
- Li Mingjie, Hu Shaohua, Wang Qingguo, et al. Discovery of strike-slip fault system in Tazhong area and geologic meaning [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(1): 116-122.
- [20] 郭光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. *石油勘探与开发*, 2021(1): 1-11.
- Wu Guanghui, Ma Bingshan, Han Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021(1): 1-11.
- [21] 郭光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 793-805.
- Wu Guanghui, Yang Haijun, Qu Tailai, et al. The fault system characteristics and its controlling roles on marine carbonate hydrocarbon in the Central Uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 793-805.
- [22] 李兵, 邓尚, 李王鹏, 等. 塔里木盆地塔河地区走滑断裂体系活动特征与油气地质意义[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(4): 45-51.
- Li Bing, Deng Shang, Li Wangpeng, et al. Strike-slip fault system activity and hydrocarbon geology understanding in Tahe of Tarim Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(4): 45-51.
- [23] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 797-802.

- Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong Paleouplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 797-802.
- [24] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 210-218.
- Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim Basin during the paleozoic major evolutionary stages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 210-218.
- [25] 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 Jianzhong, Tan Yingjia, 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.
- [26] 韩晓影. 塔里木盆地塔中北坡走滑断层形成与演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Han Xiaoying. Formation and evolution of strike-slip faults in the northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [27] 周小军. 塔里木盆地塔中古隆起不整合和构造特征及其演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- Zhou Xiaojun. The major unconformities and structure style and evolution of Tazhong Uplift in Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [28] 李明杰, 郑孟林, 冯朝荣, 等. 塔中低凸起的结构特征及其演化[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 19(4): 43-45.
- Li Mingjie, Zheng Menglin, Feng Chaorong, et al. Structural characteristics and evolution of Tazhong low uplift[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2004, 19 (4) : 43-45.
- [29] 丁长辉, 周红波, 路鹏程, 等. 塔中低凸起古生界构造特征及演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 148-153.
- Ding Zhanghui, Zhou Hongbo, Lu Pengcheng, et al. The paleozoic structural features and its evolution of in the Tazhong low uplift, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33 (1) : 148-153.
- [30] Li C, Wang X, Li B, et al. Paleozoic fault systems of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2013, 39(1): 48-58.
- [31] 李本亮, 管树巍, 李传新, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征[J]. *地质论评*, 2009, 55(4): 521-529.
- Li Benliang, Guan Shuwei, Li Chuanxin, et al. Paleo-tectonic evolution and deformation features of the lower uplift in the Central Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2009, 55(4): 521-529.
- [32] 李传新, 王晓丰, 李本亮. 塔里木盆地塔中低凸起古生代断裂构造样式与成因探讨[J]. *地质学报*, 2010, 84(12): 1727-1734.
- Li Chuanxin, Wang Xiaofeng, Li Benliang. Paleozoic faulting structure styles of the Tazhong Low Uplift, Tarim Basin and its mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12): 1727-1734.
- [33] Liu Y, Neubauer F, Genser J, et al. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn strike-slip fault, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2-3): 243-252.
- [34] 付晨阳. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂横向变形差异及形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Fu Chenyang. Lateral deformation difference and formation mechanism of the strike-slip faults in the northern slope of Tazhong Uplift [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [35] 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.
- [36] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 379-389.
- Huang Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: A case study of Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(3): 379-389.
- [37] 商丰凯. 叠合盆地凸起区多期复杂断裂特征及形成机制——以准噶尔盆地车排子凸起为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 278-283.
- Shang Fengkai. Characteristics and formation mechanism of multi-stage complex fault system of uplift in superimposed basin: A case study of Chepaizi Uplift, Junggar Basin, NW China [J]. *Fault - Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(3): 278-283.
- [38] 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.
- Shang Deng, Huili Li, Zhongpei Zhang, 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.
- [39] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法: 以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(4): 1006-1018.
- Lin Bo, Yun Lu, Zhang Xu, et al. A method for plane segmentation of small-scale intraplate strike-slip faults: A case of the middle-north segment of Shunbei No. 5 fault in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51 (4) : 1006-1018.
- [40] Deng S, Li H, Zhang Z, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 109-137.