

柯坪冲断带皮羌断裂的新生代构造演化特征

杨 勇^{1,2,3}, 汤良杰^{2,3}, 郭 颖^{2,3}, 谢大庆⁴

- (1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249;
4. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 为了确定皮羌断裂新生代的构造演化特征,在野外地质调查和地震资料解释的基础上,通过对比皮羌断裂和色力布亚断裂的构造变形特征,揭示了皮羌断裂新生代以来的活动特征,确定了其左旋走滑位移形成的原因. 研究结果表明:皮羌断裂新生代以来发生了两期明显的构造变形. 中新世末,该断裂受帕米尔突刺向北楔入在塔里木盆地西部产生的由西向东的挤压应力的影响,发生了一期强烈的、自东向西的逆冲变形,这期逆冲变形导致皮羌断裂东西两侧中寒武统滑脱层的埋深差约 2 km. 上新世以来,伴随着南天山向塔里木盆地内逆冲,柯坪冲断带近东西向的逆冲推覆构造强烈活动. 皮羌断裂东西两侧滑脱层深度的差异导致其两侧形成的逆冲推覆体数量和间距明显不同,这种构造变形的不协调导致皮羌断裂发生明显的左旋走滑位移.

关键词: 柯坪冲断带; 皮羌断裂; 左旋走滑; 构造演化; 形成机制

中图分类号: P 542⁺. 3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2016)06-1204-07

Cenozoic structural evolution characteristics of Piqiang fault, Kalpin thrust belt

YANG Yong^{1,2,3}, TANG Liangjie^{2,3}, GUO Ying^{2,3}, XIE Daqing⁴

- (1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
4. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Based on the field geological survey and interpretation of seismic data, this paper revealed the Cenozoic tectonic activity characteristics of Piqiang fault by comparing the structural deformation features of Piqiang fault and Selibuya fault, and on this basis, the formation mechanism of the sinistral strike-slip displacement of Piqiang fault was determined. The results show that the Piqiang fault has undergone two stages of significant structural deformation since Cenozoic. At the end of Miocene, the Pamir spine wedged from south to north and caused EW-trend compressive stress in the Western Tarim basin, a strong thrust deformation of the Piqiang fault thus occurred from east to west, and led to the depth of middle Cambrian detachment layer in the east 2 km shallower than that in the west. Since Pliocene, with the developing of the south Tianshan thrust toward the interior of the Tarim basin, the near EW-trend thrust-nappe structure of the Kalpin thrust belt was strongly active. Because of the different depth of detachment layers, the number and spacing of thrust nappe formed in the east and

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172125, 41572105); 中国地质调查局地质调查项目(1212011120099)

通信作者: 杨 勇(1986—), 男, 四川省大邑县人, 助理研究员, 博士, 从事含油气盆地构造分析方面的研究.

E-mail: yy349971854@163.com Tel: 15201208480

west of Piqiang fault were significantly different. This inconsistent deformation leads to the sinistral strike-slip displacement of Piqiang fault.

Key words: Kalpin thrust belt; Piqiang fault; sinistral strike-slip; structural evolution; formation mechanism

皮羌断裂位于塔里木盆地西北缘的柯坪冲断带上,是一条现在仍然还在活动的断层,该断裂呈 NNW-SSE 向展布,其向北延伸终止于南天山山前大断裂,向南延伸进入塔里木盆地,与盆地内的色力布亚断裂相接,在柯坪冲断带延伸距离超过 70 km(图 1)。它与柯坪冲断带 NE-SW 或 E-W 向展布的逆冲推覆构造近垂直相交,并将整个柯坪冲断带分割为东西两段。由于皮羌断裂丰富的构造现象和优越的露头条件,一直备受地质学家的关注。前人已经对皮羌断裂的变形特征和活动时代进行过大 量研究,取得了一些认识:1)皮羌断裂具有明显的左旋走滑特征,主要形成于上新世以来,与柯坪冲断带发生强烈的冲断作用密切相关^[1-9];2)皮羌断裂左旋走滑位移与其两侧冲断带缩短量差异导致的撕裂或巴楚隆起对柯坪冲断带逆冲推覆的限制有关^[3,5-6,8,10]。但是由于皮羌断裂带构造变形复杂,仍然存在一些重大问题需要深化认识:1)皮羌断裂新生代是如何演化的?形成机制是什么?2)皮羌断裂的左旋走滑位移是如何产生的?本文将利用野外露头资料和地震资料确定皮羌断裂新生代以来的演化过程,并在此基础上通过平衡地质剖面分析确定其左旋走滑位移的形成机制。

1 区域地质概况

柯坪冲断带位于塔里木盆地西北缘,北以阿合奇断裂与南天山造山带为界,南以柯坪塔格断裂与塔里木盆地内掩伏的北西西向巴楚隆起分界,西界位于八盘水磨一带,与阿图什—八盘水磨逆冲构造带相接,东界位于阿克苏附近的印干断裂,向东经温宿凸起逐渐过渡到库车逆冲构造带^[2-3,10-11]。柯坪冲断带长达 250 km,发育一系列北东-南西向到近东西向的叠瓦状逆冲断层,向南逆冲,并以中寒武统的膏泥盐层为主滑脱面,下寒武统-前寒武系基底岩系基本未卷入冲断变形^[1-2,11-12]。逆冲断层的上盘形成了向南突出的弧形分布的单面山,逆冲断层之间发育宽缓的(10~15 km)背驮式盆地,并有厚度不大的第四系充填,有的盆地内还分布有古近系砂泥岩和新近系阿图什组砂砾岩,它们与二叠系或更老岩层呈角度不整合(图 1)。这些逆冲断层被一些近南北向的走滑断层所分割,皮羌断裂是其

中规模最大的一条,它将整个柯坪冲断带分为东西两部分,其西侧发育 5 排推覆体,东侧发育 7 排推覆体(图 1)。

柯坪冲断带是新生代中晚期形成于南天山造山带南缘的前陆褶皱冲断带^[1-2,13-14]。南天山造山带形成于晚石炭世-早二叠世,是南天山洋闭合之后,塔里木板块与中天山岛弧块碰撞过程中所形成的一条造山带^[15-17]。中生代,塔里木板块南缘先后发生了甜水海-羌塘地体与塔里木板块的陆-陆碰撞、拉萨地块与古亚洲大陆的碰撞等重要的构造事件,天山造山带持续隆升^[18-22]。新生代以来,印度板块和欧亚板块碰撞的远程效应导致南天山造山带发生复活,特别是 20 Ma 以来,南天山开始向盆地内强烈逆冲推覆,在南天山前陆地区形成了柯坪冲断带等一系列褶皱冲断带^[16,23-24]。

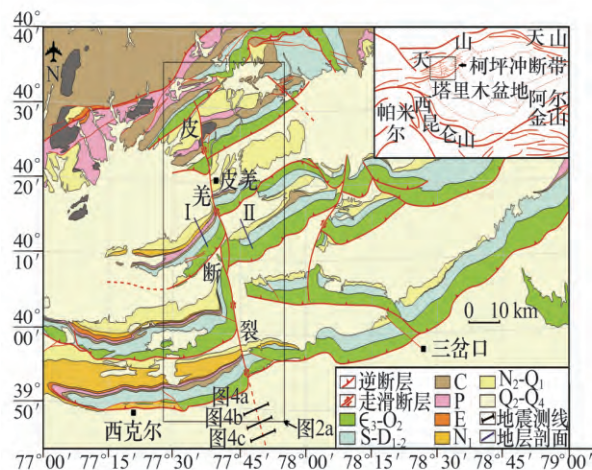


图 1 柯坪冲断带中段地质简图
Fig. 1 Generalized geologic map of the middle segment of the Kalpin thrust belt

2 皮羌断裂新生代以来的活动期次

从卫星遥感影像和地质图上可以看出,皮羌断裂在地表分为断断续续延伸的几段,其两侧古生界发生扭动错断,最大水平位移 5~7 km。根据地表观察,断裂带两侧地层具有明显的水平拖曳现象(图 2a),皮羌断裂带主断面较陡(图 2b),部分段分支断裂发育,呈现出明显的花状变形特征(图 2c),整个断裂看起来像是一条走滑(撕裂)断层。

皮羌断裂两侧的构造变形存在明显的差异。最重要一个不同就是西侧发育的逆冲推覆体要比东

则少,其西侧发育 5 排逆冲推覆体、东侧却发育有 7 排逆冲推覆体. 具体的差异表现为皮羌断裂中段西侧只发育 1 个逆冲推覆体,在东侧却发育有 2 个近似平行的推覆体,这说明皮羌断层不是一条简单的平移断层,形成演化经历了复杂的构造变形过程.

皮羌断裂现今的构造形态与柯坪冲断带由北向南的逆冲推覆作用密切相关,主要表现为左旋走滑的位移特征. 柯坪冲断带作为南天山南缘冲断体系的一部分,其形成和演化与东部的库车冲断带,西部的喀什北缘冲断带具有明显的空间对比性,冲断作用开始的时间为上新世或者更晚^[25-30]. 上新统-第四系明显卷入了柯坪冲断带的褶皱变形也反映了冲断作用发生的时限.

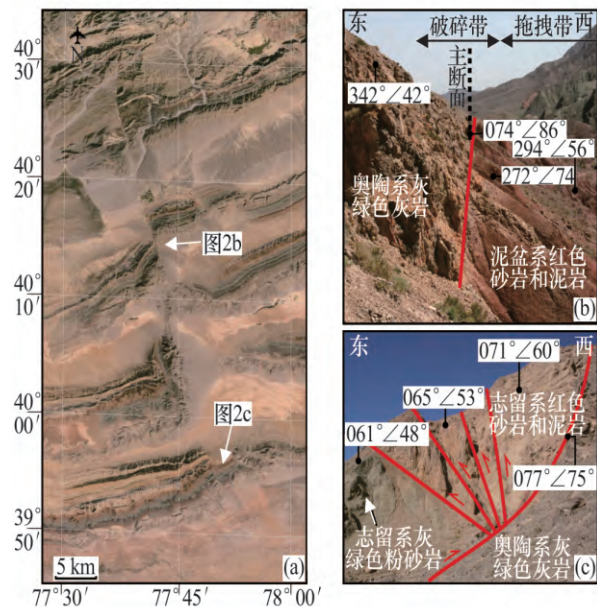


图 2 皮羌断裂带卫星影像和野外照片 (照片 b 来自文献[9])
Fig. 2 Satellite and field photographs of the Piqiang fault zone

皮羌断裂带东西两侧地层分布的也存在明显的差异: 1) 断裂带西侧发育有 400~500 m 厚的石炭系和 500 m 厚的二叠系,在断裂带东部仅仅在局部可以见到厚度约为 100 m 的石炭系,二叠系完全缺失; 2) 断裂带东侧缺失古近系和中新统,断裂带西侧这两套地层却有接近 1 000 m 的厚度(图 3). 之前有学者曾经用晚古生代西倾正断层的模型来解释断裂带两侧石炭系和二叠系厚度的差异^[6,9]. 但是在野外观察到皮羌断裂的主断面是外东倾的(图 2b, c), 并且如果主断面向西倾斜也很难解释断裂带东侧缺失古近系和中新统.

笔者试图到塔里木盆地内去寻找一些解释皮羌断裂两侧地层分布差异的证据. 由于塔里木盆地

内部的色力布亚断裂在空间上与皮羌断裂相接,很多学者都认为两者在柯坪隆起形成之前是同一条断层^[1-2,4,7,19]. 在地震剖面上,色力布亚断裂具有明显的逆冲-走滑变形特征,主断层倾向北东东向,断层倾向角在 70°~80°,向上延伸断至上新统底面,向下断入前寒武系基底. 主断层两侧发育一定数量的次级断层,在剖面上表现出明显的正花状构造特征(图 4). 从地震剖面上可以看出,由南向北,色力布亚断裂的冲断作用逐渐增强,并导致上盘地层发生强烈的剥蚀作用,在靠近柯坪塔格断裂前缘的地震剖面上,断裂上盘构造高部位的二叠系已经被完全剥蚀,上新统-第四系直接覆盖在石炭系甚至志留系、泥盆系之上,两侧地层的分布已经和皮羌断裂几乎一致. 因此,皮羌断裂和色力布亚断裂带在柯坪冲断带形成之前应该具有相同的构造演化过程. 色力布亚断裂上盘上新统-第四系与下伏古生代不同地层之间的角度不整合接触关系说明其在中新世未发生了强烈的冲断作用. 鉴于皮羌断裂和色力布亚断裂是在空间上相连,两者又具有相似的变形特征,且两侧地层分布也极其相似,所以笔者认为皮羌断裂在中新世末也发生了强烈的冲断,正是这次冲断造成其两侧地层的分布具有明显的差异.

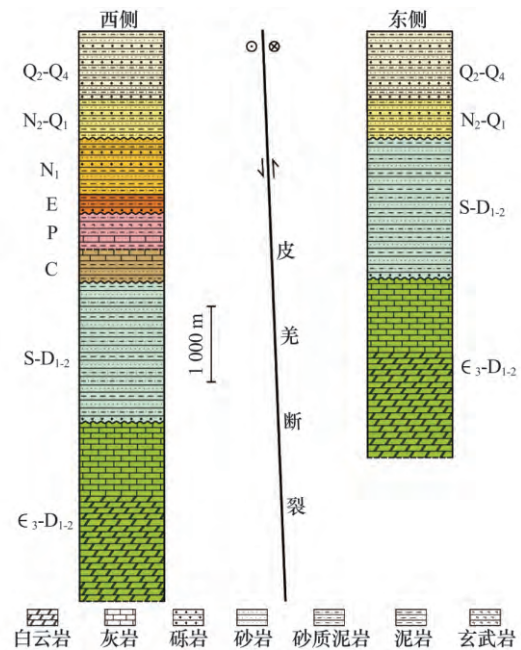


图 3 皮羌断裂中段东西两侧地层地比关系 (东西两侧地层厚度测量位置见图 1 中 I 和 II)
Fig. 3 Stratigraphic correlation across the Piqiang fault

综上所述,通过分析野外资料和地震资料,并对比盆地内色力布亚断裂的构造变形特征,可以发现皮羌断裂在新生代以来主要发生了两期构造变形: 中新世末的冲断和上新世以来的左旋走滑.

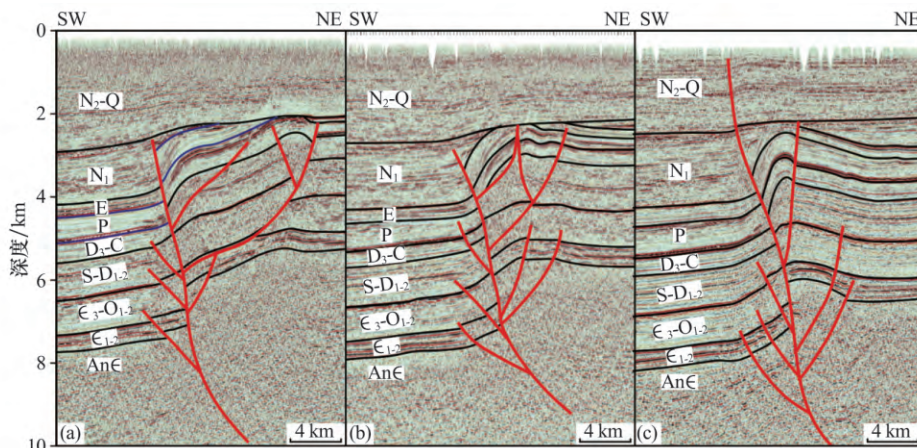


图 4 色力布亚断裂的地震剖面(解释方案据文献[31]修改)
Fig. 4 Seismic profiles of the Selibuya fault

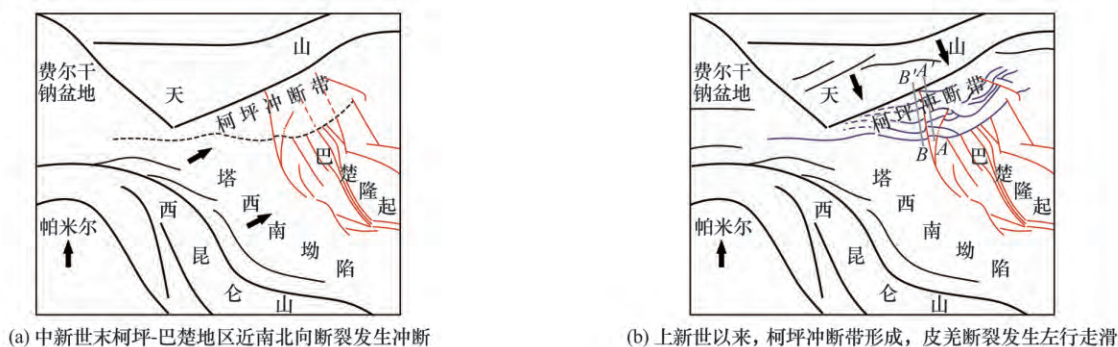
3 皮羌断裂新生代构造演化过程和形成机制

柯坪隆起地处西昆仑造山带与南天山造山带结合部位,新生代以来,受帕米尔突刺向北楔入和印度-欧亚板块碰撞的远程效应的影响,该区新生代构造变形强烈,南北向展布的皮羌断裂上叠加了至少两期构造变形。

渐新世晚期-中新世早期,帕米尔开始向北逐渐突出形成帕米尔突刺,帕米尔突刺相对于塔里木块体向北推挤楔入,并一直持续到上新世晚期^[32-34]。受帕米尔突刺 NE 方向推挤的影响,从中新世末开始,巴楚隆起上的近南北向的断裂系统开始发育^[7,35-38],色力布亚-玛扎塔格、阿恰-吐木休克、乔硝尔盖、三岔口等断裂发生了明显的冲断变形,并且具有右旋走滑分量。当时巴楚-柯坪还是一个整体,没有明显的构造界线,所以这些断裂向北一直延伸到了柯坪地区(图 5a)。皮羌断裂就是色力布亚断裂向北延伸的结果,在中新世末发生了自东向西的冲断,强烈的冲断作用造成断裂上盘石炭系-二叠系和古近系-中新统遭受了强烈剥蚀,导致这些地层在上盘大面积缺失。此外,柯坪隆起的萨

尔干和因干村断裂也都是巴楚断裂体系北延的结果^[4,7]。

从上新世开始,印度板块和欧亚板块碰撞的远程效应导致南天山造山带复活并向塔里木盆地内发生强烈逆冲推覆,由此产生的向南的侧向挤压应力导致在柯坪地区形成了一系列叠瓦状逆冲断层,这些断层呈北东-南西向到近东西向展布,向南逆冲,并以中寒武统的膏泥盐层为主滑脱面。中新世末已经形成的皮羌逆冲断裂走向与柯坪冲断带的逆冲方向近平行,为后期构造变形提供了一个理想的先存软弱带,伴随着柯坪冲断带冲断作用的持续进行,皮羌断裂复活,并发生明显的左旋走滑位移(图 5b)。前人认为左旋走滑位移的发生或许是由于以下 3 种原因造成的:1) NW 向的巴楚隆起对柯坪冲断带向盆地内的逆冲推覆有一定的限制作用,迫使皮羌断裂东侧逆冲推移滞后,西侧相对受阻较小而发生超前推移^[3,5-6,8];2) 柯坪冲断带的逆冲推覆受到皮羌断裂等先存南北向断裂的制约,形成了柯坪地区一种变形样式(推覆)多个有差异区域的格局^[4,7,34];3) 皮羌断裂西侧地壳缩短量和缩短率明显大于东侧^[10]。



(a) 中新世末柯坪-巴楚地区近南北向断裂发生冲断
(b) 上新世以来,柯坪冲断带形成,皮羌断裂发生左行走滑

图 5 皮羌断裂新生代两期构造变形的模式

Fig. 5 Formation models of two stages of Cenozoic structural deformation of the Piqiang fault

由于中新世末皮羌断裂由东向西的逆冲作用,导致皮羌断裂东侧中寒武统滑脱层发生抬升,埋深约为 5.5 km(图 6a),皮羌断裂西侧中寒武统滑脱层的埋深约为 7.5 km(图 6b). 在皮羌断裂东西两侧各完成了一条 97 km 的平衡剖面,以断展褶皱构造模型为指导,恢复到变形前的形态后计算出东侧和西侧剖面的缩短量分别为 63 km 和 65 km,缩短率为 39.4%和 40.1%(图 6a,b). 从卫星影像和地质图上看,在皮羌断裂两侧,柯坪冲断带向盆地内逆冲推覆的距离基本一致,并且东西两侧地层缩短量和缩短率的差异并不能造成 5~7km 的左旋走滑位移,因此前人认为的巴楚隆起的限制及缩短量、缩短率的差异并不能解释皮羌断裂是左旋走滑位移产生的原因.

皮羌断裂上新世以来发生左旋走滑位移可能与断裂带两侧中寒武统滑脱层深度的差异有关. 滑脱层的深度控制了皮羌断裂两侧逆冲推覆构造的变形强度的差异. 文献[39]的物理模拟实验揭示逆冲推覆构造的间距受滑脱层之上逆冲楔形体厚度的控制,滑脱层之上沉积物的厚度越大,形成的逆冲推覆体的间距越大. 皮羌断裂两侧中寒武统滑脱层的埋深相差约 2 km,受上新世以来南天山向南强烈逆冲推覆的影响,在皮羌断裂东侧形成了 7 个逆冲推覆体,在断裂西侧却只有 5 个逆冲推覆体,构造变形的不协调是皮羌断裂在其两侧剖面缩短量和缩短率相差无几的情况下发生明显左旋走滑位移的主要原因,也是导致皮羌断裂走滑位移量沿走向无规律变化的主要原因.

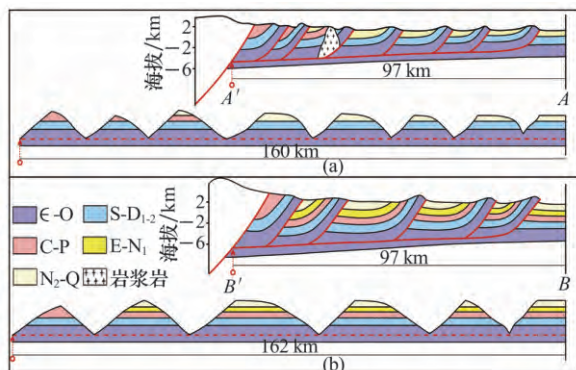


图 6 皮羌断裂东西两侧的平衡地质剖面

Fig. 6 The balanced cross-section in both east and west of the Piqiang fault

4 结 论

1) 皮羌断裂新生代以来主要经历了两期构造变形:中新世末的冲断和上新世以来的左旋走滑. 受帕米尔突刺 NE 方向推挤的影响,NNW 向的皮

羌断裂从中新世早期开始活动,并且在中新世末发生了自东向西的冲断,强烈的冲断作用造成断裂上盘晚古生代和早新生代地层遭受强烈的剥蚀. 同时,NNW 向的皮羌断裂也为后期构造变形提供了一个理想的先存软弱带. 上新世以来,伴随着南天山复活并向塔里木盆地内逆冲推覆,柯坪冲断带近东西向的逆冲推覆构造强烈活动,与柯坪冲断带近直交的皮羌断裂复活,并发生明显的左旋走滑位移.

2) 皮羌断裂左旋走滑位移的产生与其东西两侧滑脱层深度的差异密切相关. 中新世末的冲断作用造成皮羌断裂东西两侧中寒武统滑脱层的埋深相差 2 km,并导致上新世以来在断裂两侧形成的逆冲推覆体数量和间距明显不同,这种构造变形的不协调最终导致皮羌断裂发生明显的左旋走滑位移.

参考文献:

- [1] YIN A, NIE S, CRAIG P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tianshan[J]. *Tectonics*, 1998, 17: 1-27.
- [2] ALLEN M B, VINCENT S J, WHEELER P J. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interactions of the Tien Shan and Tarim basin, northwest China[J]. *Tectonics*, 1999, 18(4): 639-654.
- [3] 何文渊, 李江海, 钱详麟, 等. 塔里木盆地柯坪断隆断裂构造分析[J]. *中国地质*, 2002, 29(1): 37-43.
HE Wenyuan, LI Jianghai, QIAN Xianglin, et al. Analysis of fault structures in the Kalpin fault uplift, Tarim basin[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 37-43.
- [4] 肖安成, 杨树锋, 王清华, 等. 塔里木盆地巴楚—柯坪地区南北向断裂系统的空间对应性研究[J]. *地质科学*, 2002, 37(增刊): 64-72.
XIAO Ancheng, YANG Shufeng, WANG Qinghua, et al. Corresponding relation of S-N-Striking fault systems in the Bachu-Kalpin area, Tarim basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(supp.): 64-72.
- [5] 杨庚, 郭华. 塔里木盆地西北缘柯坪逆冲构造带与巴楚隆起的叠加关系[J]. *铀矿地质*, 2003, 19(1): 1-7.
YANG Geng, GUO Hua. Superposed relationship between Kalping thrust belt and Bachu uplift, northwest Tarim[J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(1): 1-7.
- [6] 何文渊, 杨宪一, 刘胜. 塔里木盆地西北部构造演化特征: 从皮羌断裂发育史想到[J]. *地球学报*, 2003, 24(增刊): 17-21.
HE Wenyuan, YANG Xianyi, LIU Sheng. The evolu-

- tion history of northwest Taim as viewed from the features of Piqiang fault[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(supp.):17-21.
- [7] 肖安成, 杨树锋, 李日俊, 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):78-85.
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):78-85.
- [8] 杨庚, 石昕, 贾承造, 等. 塔里木盆地西北缘柯坪—巴楚地区皮羌断裂与色力布亚断裂空间关系[J]. *铀矿地质*, 2008, 24(4):201-207.
YANG Geng, SHI Xin, JIA Chengzao, et al. Spatial relationship between Piqiang fault and Selibuya fault in Keping-Bachu district, northwest Tarim basin[J]. *Uranium Geology*, 2008, 24(4):201-207.
- [9] TURNER S A, JIAN L G, JOHN C W. Structural evolution of the Piqiang fault zone, NW Tarim basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40:394-402.
- [10] 杨晓平, 冉勇康, 宋方敏. 西南天山柯坪逆冲推覆构造带的地壳缩短分析[J]. *地震地质*, 2006, 28(2):194-204.
YANG Xiaoping, RAN Yongkang, SONG Fangmin, et al. The analysis for crust shortening of Kalpin thrust tectonic zone, south-western Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Seismology and Geology*, 2006, 28(2):194-204.
- [11] 曲国胜, 李亦纲, 陈杰, 等. 柯坪塔格推覆构造几何学、运动学及其构造演化[J]. *地学前缘*, 2003, 10(特刊):142-152.
QU Guosheng, LI Yi gang, CHEN Jie, et al. Geometry, kinematics and tectonic evolution of Kepingtage thrust system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(supp.):142-152.
- [12] 杨海军, 李日俊, 师骏, 等. 南天山晚新生代褶皱冲断带构造特征[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5):1030-1043.
YANG Haijun, LI Yuejun, SHI Jun, et al. Tectonic characteristics of the late Cenozoic south Tianshan fold-thrust belt[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 30(5):1030-1043.
- [13] CHEN J, BURBANK D W, SCHARER K M, et al. Magnetochronology of the Upper Cenozoic strata in the southwestern Chinese Tian Shan; rates of Pleistocene folding and thrusting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195:113-130.
- [14] HEERMANCE R V, CHEN J, BURBANK D W, et al. Chronology and tectonic controls of Late Tertiary deposition in the southwestern Tian Shan foreland, NW China[J]. *Basin Research*, 2007, 19:599-632.
- [15] BURTMAN V S. Structural geology of the Variscan Tien Shan, USSR[J]. *American Journal of Science*, 1975, 275A, 157-186.
- [16] WINDEL B F, ALLEN M B, ZHANG C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan range, central Asia[J]. *Geology*, 1990, 18:128-131.
- [17] CHARVET J, SHU L S, LAURENT-CHARVET S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates[J]. *Episodes*, 2007, 30(3):162-186.
- [18] HENDRIX M S, GRAHAM S A, CARROLL A R, et al. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan; evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, northwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104:53-79.
- [19] 贾承造, 魏国齐, 姚慧君, 等. 塔里木盆地油气勘探丛书: 盆地构造演化与区域构造地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995:1-70.
- [20] 汤良杰. 塔里木盆地演化和构造样式[M]. 北京: 地质出版社, 1996:1-121.
- [21] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28:211-280.
- [22] HENDRIX M S. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, northwest China: a detrital record of the ancestral Tian Shan[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(3):520-532.
- [23] ABDRAKHMATOV K Y, ALDAZHANOV S A, HAGER B H, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates[J]. *Nature*, 1996, 384:450-453.
- [24] SUN J, ZHU R, BOWLER J, et al. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasse deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219:239-253.
- [25] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4):215-220.
LU Huafu, JIA Dong, CHEN Chuming, et al. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures[J].

- Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 215-220.
- [26] 肖安成, 贾承造. 中国南天山西部冲断褶皱系前缘区的运动学特征[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 439-444.
XIAO Ancheng, JIA Chengzao. The kinematics characters of the thrust-fold belts western front regions in Southern Tianshan, China[J]. Acts Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 439-444.
- [27] 陈杰, 卢演侑, 丁国瑜. 塔里木西缘晚新生代造山过程的记录: 磨拉石建造及生长地层和生长不整合[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 528-539.
CHEN Jie, LU Yanchou, DING Guoyu. Records of Late Cenozoic mountain building in western Tarim basin: molasses, growth strata and growth unconformity[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6): 528-539.
- [28] 陈杰, 丁国瑜, BURBANK D W, 等. 中国西南天山山前的晚新生代构造与地震活动[J]. 中国地震, 2001, 17(2): 134-155.
CHEN Jie, DING Guoyu, BURBANK D K, et al. Late Cenozoic tectonics and seismic activity in Chinese southwest Tianshan[J]. Earthquake Research in China, 2001, 17(2): 134-155.
- [29] 汪新, 贾承造, 杨树锋. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 372-384.
WANG Xin, JIA Chengzao, YANG Shufeng. Geometry and kinematics of the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(3): 372-384.
- [30] 李建华, 张家声, 单新建. 西昆仑-西南天山地区断裂活动性研究[J]. 地质学报, 2002, 76(3): 347-353.
LI Jianhua, ZHANG Jiasheng, SHAN Xinjian. Faulting in the western Kunlun-southwestern Tianshan area[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3): 347-353.
- [31] 姚文倩, 汤良杰, 谢大庆, 等. 塔里木盆地色力布亚断裂带变形特征和演化史[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 522-527.
YAO Wenqian, TANG Liangjie, XIE Daqing, et al. Deformation and tectonic evolution of the Selibuya fault zone in Tarimbasin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(4): 522-527.
- [32] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. Geological Society of America, 2007, 119: 882-896.
- [33] COWGILL E. Cenozoic right-slip faulting along the eastern margin of the Pamir salient, northwestern China[J]. GSA Bulletin, 2010, 122(1/2): 145-161.
- [34] SOBEL E R, SCHOENBOHMB L M, CHEN J, et al. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: Implications for Pamir orogenesis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 304: 369-378.
- [35] 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, Tarimbasin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 291-302.
- [36] 杨勇, 汤良杰, 蒋华山, 等. 塔里木盆地巴楚隆起断裂分期差异活动特征及其变形机理[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 275-284.
YANG Yong, TANG Liangjie, JIANG Huashan, et al. Characteristics and deformation mechanism of staging differential fault activities in Bachu uplift, Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 275-284.
- [37] 唐大卿, 陈红汉, 云露, 等. 塔里木盆地巴楚隆起断裂差异活动特征及成因演化[J]. 地质科学, 2014, 49(1): 49-68.
TANG Daqing, CHEN Honghan, YUN Lu, et al. The differential activity characteristics its evolution of the faults in the Bachu uplift, and Tarim basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(1): 49-68.
- [38] 陈刚, 汤良杰, 余腾孝, 等. 塔里木盆地玉北冲断带分期活动特征及其控油气作用[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 870-879.
CHEN Gang, TANG Liangjie, YU Tengxiao, et al. Poly-phase fault activities and the control on hydrocarbon accumulation of Yubei thrust belt, Tarim basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 870-879.
- [39] LIU H, MCCLAY K R, POWELL D. Physical models of thrust wedges[C]//MCCLAY K R. Thrust Tectonics. London: Chapman & Hall, 1992: 71-81.

(责任编辑 姚志昌)