

文章编号:1672-6561(2016)02-0245-13

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

河西走廊西端黑山断裂运动学特征 及其在构造转换中的意义

张 宁¹, 郑文俊¹, 刘兴旺^{2,3}, 王伟涛¹, 李新男¹, 何文贵², 雷启云^{1,4}, 邵延秀^{1,2}

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘 要:河西走廊西端北侧的黑山断裂不仅构成了河西走廊重要组成部分——酒西盆地的北部边界,同时也是青藏高原北部边界重要断裂——阿尔金断裂东端构造组成和转换的重要部分。通过对黑山断裂野外调查、典型断错地貌面的测量以及年代测定,获得了黑山断裂晚更新世以来的逆冲滑动速率为每年 (0.26 ± 0.06) mm,同时证实该断裂为一条以高角度逆冲为主要运动特征的断裂,其运动性质与阿尔金断裂存在明显的不同。结合对阿尔金断裂东端部运动学特征的讨论,总结前人在河西走廊西端酒西盆地内 NW 向断裂定量研究成果,得到河西走廊西端这些 NW 向逆冲断裂和褶皱在平行于阿尔金断裂走向上的缩短速率总和为每年 1.4~2.4 mm,这与阿尔金断裂东端部每年 1~2 mm 水平走滑速率相当,由此推断阿尔金断裂东端的左旋走滑被活动的逆冲断裂、第四纪褶皱隆起引起的地壳缩短吸收和转换了,阿尔金断裂在其东端部水平滑动速率逐步降低,断裂终止于河西走廊西端的宽滩山一带,而河西走廊西端酒西盆地北侧的黑山断裂与其走向上相联接的磴磴山断裂、金塔南山断裂可能共同构造了青藏高原朝 NE 向扩展的最前缘。

关键词:活动构造;黑山断裂;断错地貌;逆冲速率;构造转换;变形几何;酒西盆地;阿尔金断裂
中图分类号:P542 **文献标志码:**A

Kinematics Characteristics of Heishan Fault in the Western Hexi Corridor and Its Implications for Regional Tectonic Transformation

ZHANG Ning¹, ZHENG Wen-jun¹, LIU Xing-wang^{2,3}, WANG Wei-tao¹,
LI Xin-nan¹, HE Wen-gui², LEI Qi-yun^{1,4}, SHAO Yan-xiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: Located in the northern of the western Hexi Corridor, Heishan fault is the northern boundary of Jiuxi Basin and an important fault at the eastern end of Altyn Tagh fault. The vertical components of slip rates of (0.26 ± 0.06) mm per year for Heishan fault by topographic profiling and dating age for alluvial fan were determined. Heishan fault is a high-angle reverse

收稿日期:2015-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41172194,41372220,41590861);中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB03020200);中国地震局地质研究所基本科研业务费专项项目(IGCEA1220)

作者简介:张 宁(1987-),男,安徽马鞍山人,理学硕士研究生,E-mail:417055789@qq.com。

通讯作者:郑文俊(1972-),男,甘肃高台人,研究员,理学博士,E-mail:gszhwj@163.com。

fault, which is different from the sense of motion of Altyn Tagh fault. Combined with the previous studies on the NW-striking faults in Jiuxi Basin, the total shortening rate of 1.4-2.4 mm per year along the direction parallel to Altyn Tagh fault in the western Hexi Corridor was constrained, consistent with the strike-slip rates of 1-2 mm per year at the eastern end of Altyn Tagh fault. Thus, it is inferred that the left-lateral strike slip at the eastern end of Altyn Tagh fault has been absorbed by the reverse faulting and folding of Quaternary crust in the western Hexi Corridor. The left-lateral strike-slip rates in Altyn Tagh fault decrease along the northeastern direction and the fault terminated near Kuantanshan in the western Hexi Corridor. Heishan fault, Dengdengshan fault and Jintananshan fault maybe comprise the most northeastern frontier of Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: active tectonic; Heishan fault; offset geomorphology; thrust slip rate; tectonic transformation; deformational geometry; Jiuxi Basin; Altyn Tagh fault

0 引言

位于青藏高原东北缘河西走廊最西端的酒西盆地南边界为祁连山北缘断裂,北至黑山断裂,西接阿尔金断裂带,东抵嘉峪关断裂,总体为一个走向 NWW 的不规则梯形^[1-6],其特殊的构造位置使之成为研究阿尔金断裂东端部的几何结构、变形特征及延伸问题的关键,也是研究青藏高原新生代构造变形和向北推挤的理想地区^[7-12]。

近几十年来,国内外地质科学家的研究往往集中在亚洲大陆构造变形中的一条关键性断裂——阿尔金断裂带,重点开展了断裂的活动特征研究以及其在区域构造变形作用中的讨论^[7,9-11,13-26]。此外,众多学者对酒西盆地内部的次级断裂和隆起(包括阴洼山断裂、新民堡断裂、嘉峪关断裂等)也进行了详细研究^[3,18,27-30],Zheng 等通过总结前人资料,并结合现今 GPS 观测速率的分析,认为酒西盆地内部的这些次级断裂以及位于盆地南、北边缘的断裂分解和转换了阿尔金断裂东端部走滑速率的绝大部分,阿尔金断裂可能终止于酒西盆地西北缘的宽滩山一带^[17]。

在以往的研究中,对酒西盆地北缘的黑山断裂的研究相对较少,仅是定性的描述和影像的解译^[31-33]。朱利东等曾通过对酒泉地区白垩系沉积盆地的岩石学研究和构造分析以及盆地构造热背景的差异研究,认为宽滩山—黑山断裂并不是从属于北祁连北缘断裂的前展逆冲断裂,而是一条与阿尔金断裂相似的岩石圈剪切断裂,不仅具有向北逆冲性质,同时还存在着左行走滑特征^[34]。陈文彬等则认为黑山断裂、金塔南山断裂等均是阿尔金断裂“帚状”尾端的分支,是阿尔金断裂的东延部分^[35],这一

结论同样得到龚建业等的支持^[36]。Darby 等通过对该地区以东的合黎山、阿右旗及雅布赖等地区地层分布及“断层擦痕”的测量统计,认为河西走廊北侧近 EW 向断裂继承了阿尔金断裂的左旋走滑性质,是阿尔金断裂的向东延伸^[13]。Zhang 等对阿尔金断裂的滑动速率进行了重新估算,并结合现今 GPS 观测结果,认为阿尔金断裂向东端部滑动速率逐渐减小,断裂延伸终止于河西走廊西端的宽滩山一带^[16]。郑文俊通过遥感解译和调查,认为河西走廊北侧的黑山断裂以逆冲为主要特征,其运动学性质与阿尔金断裂存在明显不同,同时与宽滩山断裂存在性质和几何结构上的差异,不存在明显的连续性,应该为祁连山向北扩展的前缘,而不是阿尔金断裂的东延^[32]。因此,黑山断裂作为阿尔金断裂东端争议的焦点,其运动学性质的确定和量化就显得十分重要。

本文通过对黑山断裂开展野外地质调查、遥感影像解译、位移测量以及年代学测定等工作,获得了黑山断裂的运动学定性特征和定量结果,结合周边新生代盆地地层分布和变形特征以及前人在该地区开展的断裂活动性、新生代盆地沉积、构造变形等研究结果,分析和讨论了黑山断裂及周边新生代盆地变形在区域构造变形中的作用。

1 区域构造背景

河西走廊位于青藏高原北部的阿拉善隆起区与北祁连加里东褶皱带之间,走向 NWW—SEE,延伸超过 1 000 km,是青藏高原边缘主要的会聚构造带之一,也是研究整个青藏高原地质构造的一个重要窗口^[6,32,37-39]。自古近纪早期开始,印度板块向欧亚板块持续至今的碰撞和向北推挤,导致了青藏高原

堡断裂亦是以逆冲为主的断裂^[3,27-28],盆地中央近EW向展布的玉门断裂以向南的逆冲为主要特征,断裂的最新活动使白杨河多级阶地发生拱曲变形,断裂控制了盆地中央隆起^[41],而盆地南部边缘由两条断裂组成,一条为冰沟口—玉门断裂(也有人称为玉门断裂),属于酒西盆地南缘断裂带的一支,具有典型的逆冲推覆构造特征^[3,30],控制了玉门油田老君庙背斜的形态^[6],其最南侧为祁连山北缘断裂,可见中生代甚至古生代地层直接逆冲到新生代地层之上,为盆地南缘控制盆地形态的主要断裂^[6,18,37]。从区域断裂展布情况来看,盆地内一系列NNW向次级断裂与祁连山北缘断裂走向一致,均为逆冲性质,而黑山断裂走向近EW向,与阿尔金断裂最东端部的宽滩山断裂为小角度斜交,这也是前人认为宽滩山—黑山断裂带是阿尔金断裂带延伸部分的原因之一^[13,35-36]。

2 黑山断裂新活动性及断错地貌特征

黑山断裂展布于嘉峪关北的黑山北麓,东起下滴水沟,向西经半截子沟、西榆树沟、小榆树沟、碱沟到红柳沟,全长约21 km(图2)。在小榆树沟以东,断裂走向NE70°~80°,以西走向为NW60°,断裂地貌特征明显,南侧为海拔约2 200 m的高山,北侧为海拔约1 200 m的花海盆地。断裂基本沿山前坡角发育,陡坎连续,无明显的断层衔接阶区,属高角度逆冲断层。

在断裂最西端的下沟沟口以西见一段断层陡坎,向西再无明显的断层迹象;在下沟沟口以东,断裂沿老洪积扇陡坎发育,形成老陡坎上的新陡坎;冲沟除较低的I级阶地外,均有明显的断层陡坎发育,陡坎高度多为3~5 m,部分较低约2 m,亦有10 m以上的陡坎发育。可在多个冲沟见断层剖面,白垩纪紫红色砂岩、泥岩、砾岩或较老的变质岩直接逆冲于第三纪砂岩、泥岩和早更新世冲积砂砾石层之上,断层带宽3~5 m,夹多层薄的断层泥,断层倾角60°~70°[图3(a)、(b)]。向东到半截子榆树沟一带,陡坎渐趋明显,线性连续,冲沟两侧T₂以上阶地面上均发育有断层陡坎,到半截子榆树沟以东,陡坎多被现代冲沟冲毁,仅保留有断续的陡坎[图3(c)、(d)]。断层陡坎向东延伸过下滴水沟后,多被冲沟季节性洪水冲毁,无明显的陡坎保留;但到泽大坂沟一带,又出现明显的线性陡坎,陡坎高度多在3~5 m[图3(e)、(f)],但从陡坎被夷平的情况分析,该陡坎形成时间相对较早,第四纪晚期无新活动,此段

陡坎延伸约3 km后湮没于风积沙之下。

3 断错地貌面年代确定和断层逆冲滑动速率

3.1 断错地貌面年代确定

为了确定黑山断裂所在地区的冲洪积扇形成时代,在山前冲洪积扇上选择合适地点进行了剖面的清理、采样和测年工作,并结合前人的研究工作,较为准确地限定了被断层错断的较老一期地貌面年龄。

首先,在半截子沟东岸可以观察到发育了3级阶地,断层活动形成了明显的断层陡坎,在该沟西岸II级阶地边缘见一断层剖面[图4(a)、(b)],断裂活动由第三系紫红色砂泥岩挤压逆冲在II级阶地下部砂砾石层之上,但上部被厚约1.0 m的阶地上部砂砾石覆盖,未被断层断错,其中一砂层透镜体的热释光年龄测试结果为 (43.95 ± 3.73) ka,表明断裂没有断错晚更新世晚期形成的洪积物^[42]。另外,在该点以东另一小冲沟的I级阶地沟壁上也见一断层剖面,由下白垩统杂色泥岩逆冲于中上更新统砾石层之上,断层上覆的热释光年龄为 (8.02 ± 0.63) ka的全新世冲积砂砾石未被断层断错,表明断裂在全新世期间已不活动^[42];而向东延伸,断裂断错了不同的早期阶地,但陡坎多被后期新形成的洪积扇切割,说明该断裂在晚第四纪特别是全新世晚期无明显的活动。

其次,在山前发育较为广泛且在断层上、下盘均有较为完整的洪积台面(相当于T₂洪积扇面)上选择一个天然露头进行了剖面的清理、采样和测年工作[图4(c)、(d)]。该剖面主要为冲洪积砂砾石层组成,地层产状近水平,顶部覆盖有一套薄层的次生黄土,同时在冲洪积砂砾石内部还偶尔夹有细粉砂透镜体,对其采样进行光释光测年,结果显示该砂层透镜体的形成年龄为 (27.7 ± 1.5) ka,虽然不能完全代表该洪积扇的形成(废弃)年龄,但可以说明该套冲洪积砂砾石层组成的地貌面形成于晚更新世中晚期。另外,根据前人获得的区域及相邻地区地貌面年龄结果,该地区相对广泛分布的洪积扇及台地面的主要形成时期为晚更新世早期到中期,而较新的洪积扇形成于晚更新世晚期及全新世早期。该特点在河西走廊北部的金塔南山地区^[18]、合黎山地区^[43-44]及河西走廊内部的酒泉盆地地貌面测年结果中均得到了验证^[3,18,32,41],同时该地区地貌面特别是该地区主要河流北大河及石油河阶地的形成时间

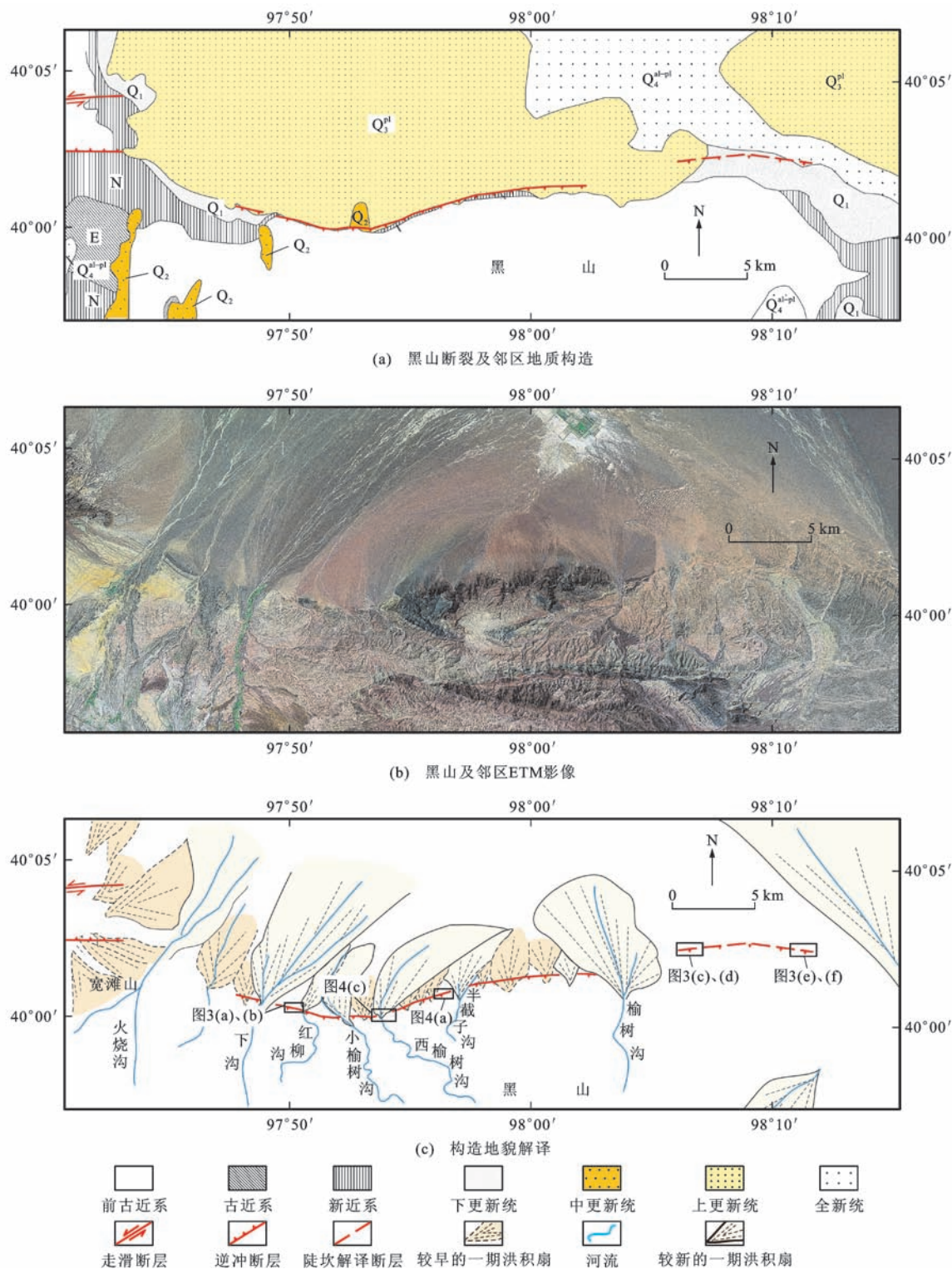


图 2 黑山断裂附近地质构造、ETM 影像和地貌解译

Fig. 2 Geological Schematic Map, ETM Image and Geomorphologic Interpretation Map of Heishan Fault and Its Adjacent Areas

也具有很好的一致性^[45]。因此,可以认为黑山北缘这些洪积扇的形成与区域地貌面形成具有很好的一致性。

另外,从图 2 中洪积扇的期次解译图也可以看出,黑山北侧主要发育有两期洪积扇。距洪积台面

测年较早一期可能为晚更新世时期形成的洪积扇,另一期主要为较新的现代洪积物,二者在影像图上可以明显区分。再者洪积扇大多发生 NE 向偏移和掀斜,说明区域上构造应力有自 SW 向 NE 推挤的迹象。另外,最新洪积扇上无断层陡坎发育,说明断层

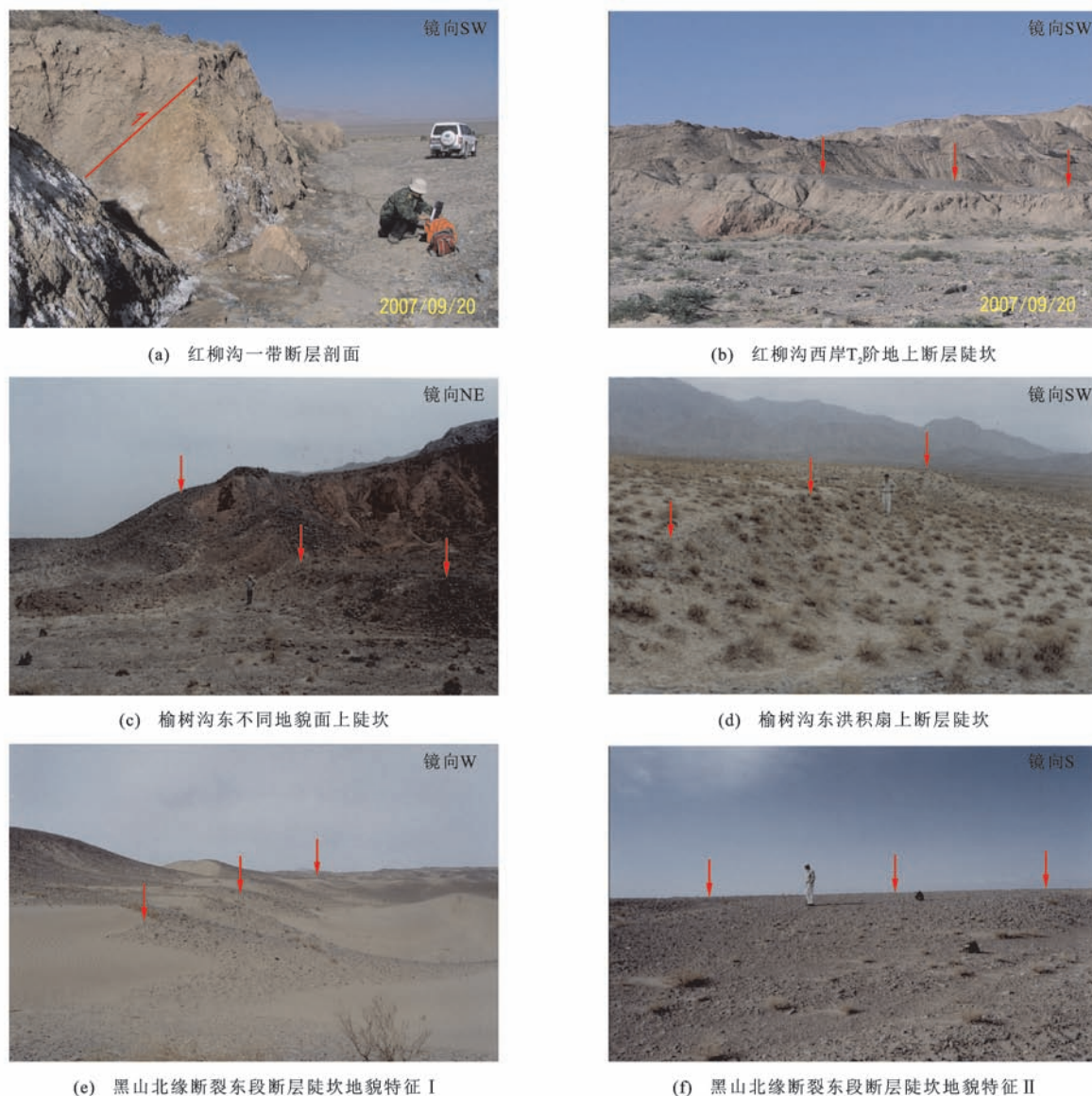


图3 黑山北缘断裂断错地貌特征

Fig. 3 Offset Geomorphic Features on the North Side of Heishan

在晚第四纪特别是全新世中晚期以来无明显活动。

综上所述,嘉峪关黑山断裂属于高角度逆冲断层,断裂在晚更新世有过强烈活动,到全新世特别是全新世晚期活动性减弱或是再无新的活动。

3.2 断层逆冲滑动速率

断层陡坎在卫星影像和航空照片上线性特征明显,多处洪积扇上发育有断层陡坎,但由于距离山边较近,一般上盘洪积台面保留不完整,而下盘多处又被现代冲沟洪积物所加积,不便精确确定洪积扇的垂直位移。经过野外调查和现场对比,本文选择了西榆树沟西侧一处洪积台地进行了陡坎高度测量(图5),该处至少发育有两期洪积台地,洪积高台地仅局部保留,且大多仅保留位于近山边的高洪积台面,而断层陡坎北侧(下盘)无洪积高台地面保留,因

此,在测量时选择发育较为广泛且在断层上、下盘均有较为完整的洪积台面(相当于 T_2 洪积扇面),利用差分 GPS 进行了陡坎高度测量。经 3 个位置的差分 GPS 测量,该处陡坎的高度分别为 (9.1 ± 1.0) 、 (7.3 ± 0.5) 、 (9.6 ± 0.8) m(图5),以此垂直断错位移作为该断层上逆冲位移值。根据洪积扇的测年结果,该期洪积扇的形成时间应该为 $(27.7 \pm 1.5) \sim (43.95 \pm 3.73)$ ka 之间,由此求得黑山断裂晚更新世以来的逆冲滑动速率为每年 (0.26 ± 0.06) mm(图6)。

另外,据现场调查,该处陡坎高度相对较为稳定,也是高度相对较高的一段,可代表该断裂上的最大逆冲滑动速率。其较低的一期洪积扇面上无明显的断层陡坎,而相对较高的洪积扇面上陡坎高度与

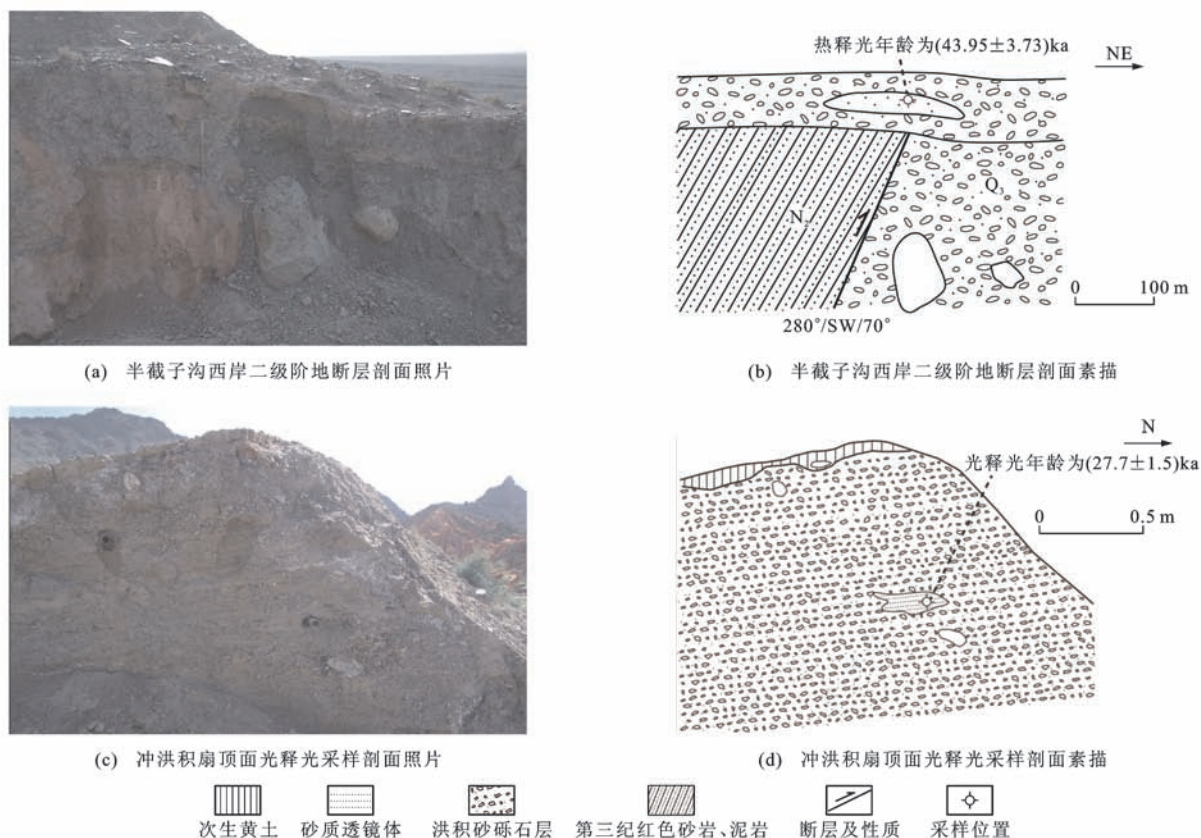


Fig. 4 Photos and Sketches of the Section of Alluvial Fan

此相比虽然略大,但没有明显的倍数增大,仅高出2~3 m或更小,而且其下盘洪积台面侵蚀严重,不便确定其确切的高度。现场地貌调查和航卫片解译没有发现明显的水平断错地貌迹象,断层面也多以高角度向北逆冲为主,第三纪红层直接逆冲于第四纪冲洪积层之上,说明该断层是以逆冲为主要运动特征。

4 黑山断裂在阿尔金断裂东端部构造变形中的作用

4.1 区域断裂运动特征及阿尔金断裂东端部的构造转换

前人对作为青藏高原北部边界的阿尔金断裂带走滑速率进行了大量研究^[11,14,40,46-49],现普遍接受的观点是阿尔金断裂带自西向东走滑速率逐渐降低,自东经90°以西以每年约10 mm走滑速率降至疏勒河以东每年1~2 mm^[16,19],其朝NE向的延伸可能终止于宽滩山附近^[17-18]。因此,其主要问题就是如果阿尔金断裂终止于酒西盆地西北缘的宽滩山附近,那么断裂的左旋走滑位移必定被平行于断裂

的地壳缩短所吸收和转换。

通过对黑山断裂山前冲洪积扇地貌面测年和断错位移的测量,获得了断裂上的逆冲滑动速率为每年 (0.26 ± 0.06) mm。野外勘查与卫星影像解译表明,黑山断裂无明显水平走滑特征,是一条高角度南倾、以向北逆冲运动为主的断裂,与以走滑为主的阿尔金断裂性质存在明显不同,这在一定程度上说明阿尔金断裂沿着黑山断裂继续向东延伸可能性不大,同时也说明黑山断裂在晚更新世之后成为了阿尔金断裂东端部构造转换的最前缘,即阿尔金断裂的左旋走滑在其东端部几乎完全转化为NE向逆冲分量。综合分析认为,黑山断裂可能为青藏高原向NE向扩展的前缘部位,阿尔金断裂的左旋走滑运动并未延伸至黑山断裂,其每年1~2 mm的左旋滑动速率可能被一系列NW—SE向祁连山西段及河西走廊盆地内部的逆冲断裂和褶皱缩短所吸收、转换。

结合前人对酒西盆地内部及其邻区断裂滑动速率的研究^[3,18,32,41],依据断裂走向和倾角,估算了河西走廊西端酒西盆地内各主要断裂在平行于阿尔金断裂走向上的水平缩短速率(图7)。估算结果显

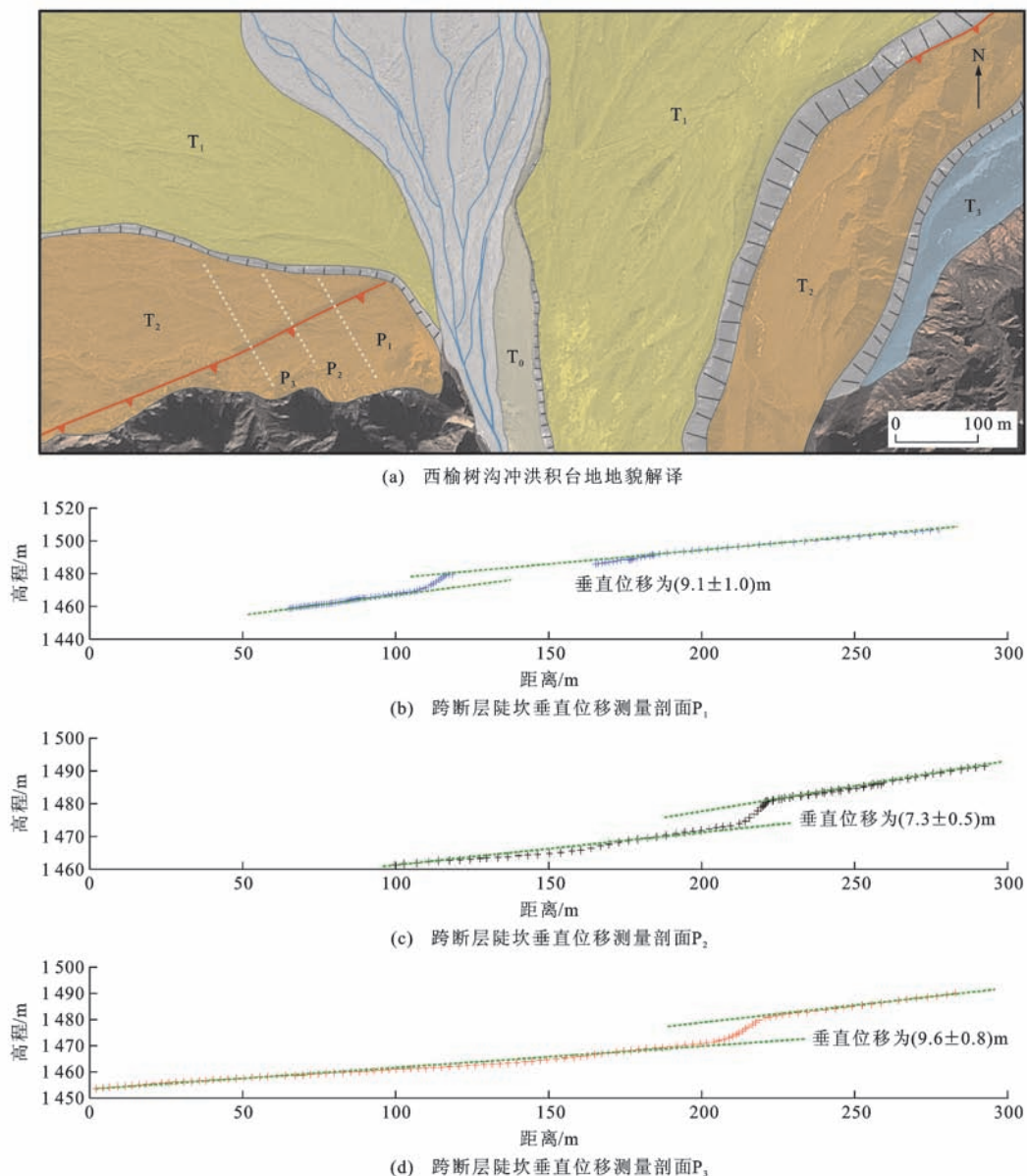


图 5 西榆树沟冲洪积台地地貌解译及跨断层陡坎垂直位移测量剖面

Fig. 5 Interpretation Map of Alluvial Fan and Profiles of Vertical Displacement Across the Fault Scarp on Xiyushugou Site

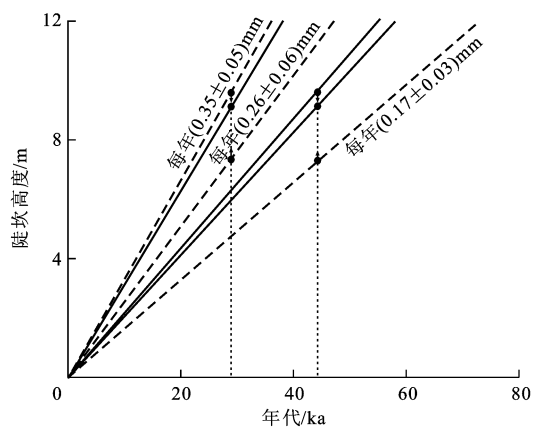


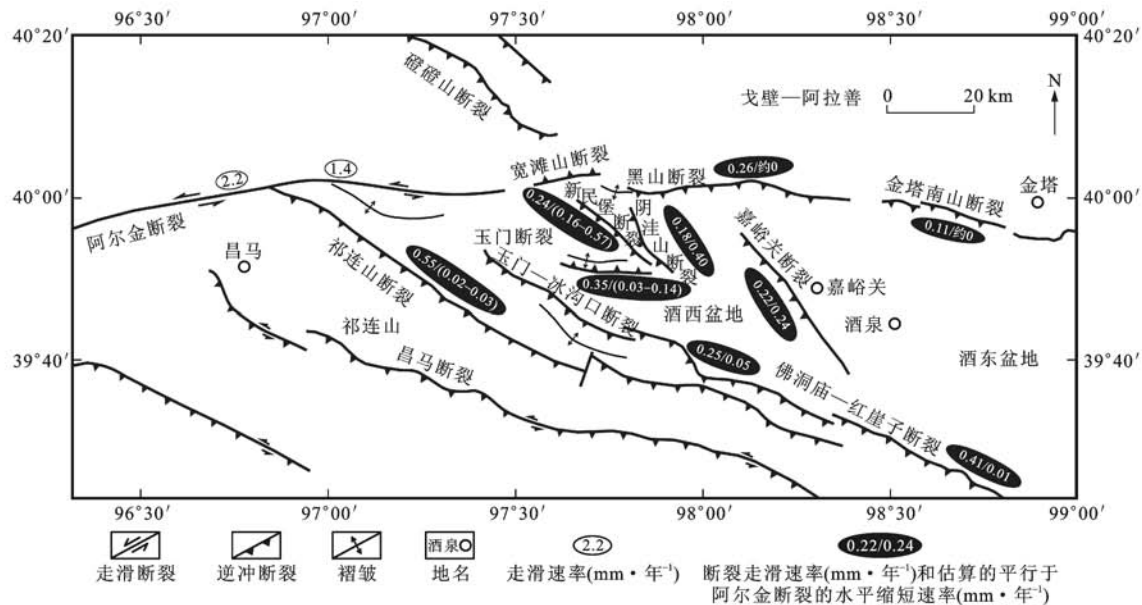
图 6 黑山断裂逆冲滑动速率

Fig. 6 Thrust Slip Rates on Heishan Fault

示,各条断裂在平行于阿尔金断裂方向上的水平缩短速率总和为每年 $0.90 \sim 1.43 \text{ mm}$,这与阿尔金断裂东端部每年 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 左旋走滑速率大小相当,但还不能完全吸收和转换阿尔金断裂东端部的左旋走滑。

4.2 酒西盆地构造变形及其在阿尔金断裂尾端构造转换中的作用

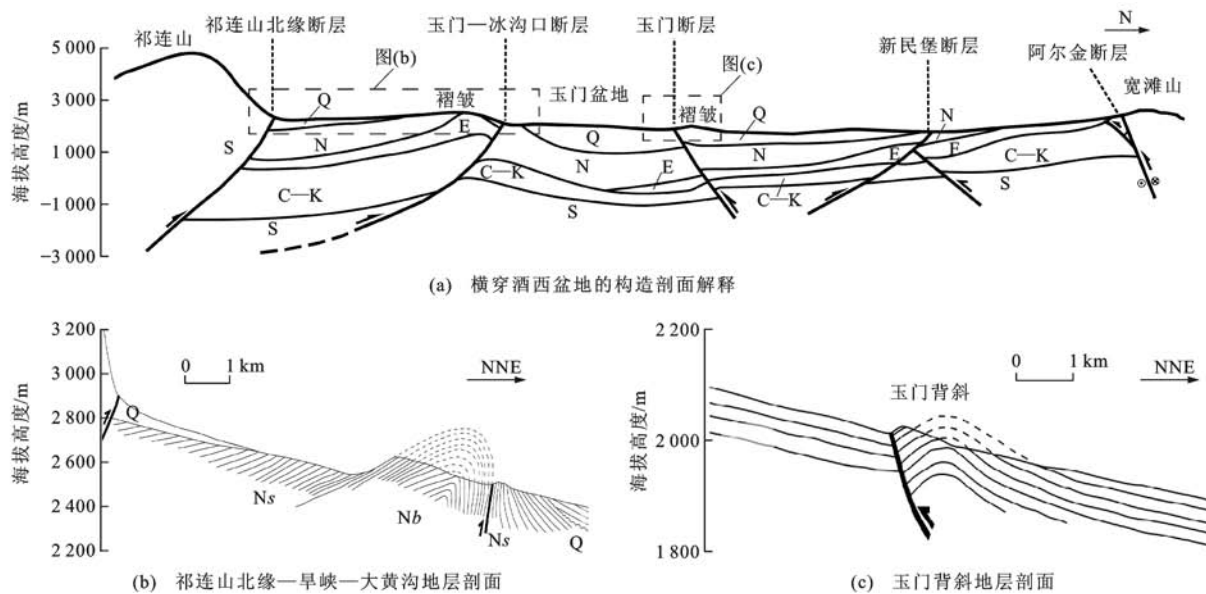
酒西盆地内部存在着多个次级逆冲断裂以及相应的背斜隆起(图 1、8),对于盆地的构造变形特征及变形幅度,前人进行了一系列研究工作,尤其是在盆地西段^[1-2,5-6,38,50]。尽管盆地在其沉积和形成过程中经历过多期强烈的构造变形,但主要以 NNE 向水平挤压及其所形成的 NWW 向逆冲断裂和褶



断裂走滑速率和平行于阿尔金山断裂的水平缩短速率数据分别引自文献[3]、[16]、[18]、[19]、[32]和[41]

图7 河西走廊西段断裂走滑速率和水平缩短速率分布

Fig. 7 Distribution of Strike-slip Rates of NW-striking Fault and Horizontal Shortening Rates in the Western Hexi Corridor



图(a)引自文献[18],并对照文献[51]、[52]进行修正;图(b)中,构造变形以向北的逆冲和褶皱缩短变形为主;图(c)中,构造变形以向南的逆冲和褶皱缩短变形为主;Ns为新近系疏勒河组;Nb为新近系白杨河组

图8 河西走廊西段酒西盆地构造变形剖面

Fig. 8 Tectonic Deformation Section Across Jiuxi Basin at the Western Hexi Corridor

皱变形为特征^[5],表明祁连山中西段晚新生代晚期以来主要经历了一个地壳缩短的过程。

陈杰曾根据地表地质、石油地震反射剖面 and 钻孔等资料,计算得到横跨整个北祁连山西段的石油河—宽滩山地质剖面(NE20°)2.5 Ma以来的地壳总缩短量约为6.4 km^[38],平均缩短率为每年2.56 mm。其中:老君庙背斜2.14 Ma以来的总缩短量为4.0~4.1 km,平均缩短率为每年1.87~1.92 mm,总抬

升量为2 900 m,平均抬升速率为每年1.36 mm,Q₂中晚期以来的抬升量为700 m,平均抬升速率为每年2.8 mm;白杨河背斜Q₂中晚期以来的缩短量为250 m,平均缩短率约为每年1.0 mm。袁道阳利用平衡地质剖面法对老君庙背斜进行了粗略估算^[5],得到Q₁底界的水平缩短量为3.5~3.7 km,与陈杰的研究结果^[38]大体相当,这代表自2.4 Ma该区发育生长褶皱以来的总缩短速率为每年1.46~1.54 mm。

另外,若按赵志军等对第三纪地层的年代确定结果(3.66 Ma)计算^[1],可得到其缩短率为每年 0.96~1.01 mm。Hetzel 等也估算过玉门背斜全新世以来的地壳缩短速率约为每年 2.1 mm^[41]。综上所述,由褶皱缩短变形计算得到的横跨整个北祁连山西段和酒西盆地的地壳平均缩短速率为每年 1~2 mm,投影到平行与阿尔金断裂方向上的水平缩短速率为每年 0.5~1.0 mm。

酒西盆地内部及其邻区各条断裂在平行于阿尔金断裂方向上的水平缩短速率总和为每年 0.90~1.43 mm,可以得到断裂和褶皱共同发生缩短变形在平行于阿尔金断裂方向上的水平缩短速率为每年 1.4~2.4 mm,这与阿尔金断裂东端部每年 1~2 mm 的左旋走滑速率几乎完全一致。因此,可以推测阿尔金断裂走滑位移在黑山断裂以西就已完全被转换、吸收,其转换和吸收方式主要是通过该地区一系列逆冲断裂和褶皱的缩短变形来完成,同时也说明黑山断裂构成了青藏高原朝 NE 向扩展的逆冲前缘,而不是阿尔金断裂左旋走滑的向东延伸。

5 结 语

(1)通过野外地质调查和卫星影像解译,黑山断裂是一条南倾的高角度逆冲断裂,与阿尔金断裂的左旋走滑运动性质存在明显不同。同时,黑山断裂只错断了晚更新世末期形成的较老冲洪积扇面,而全新世以来的 T₁ 阶地和漫滩则未被错断,说明黑山断裂为一条晚更新世的活动断裂,而全新世以来则没有明显的新活动特征。此外,结合地形剖面和地貌面年龄测定,获得了黑山断裂晚更新世以来的逆冲滑动速率为每年(0.26±0.06)mm。

(2)在总结前人研究成果的基础上,将河西走廊西端酒西盆地内各条断裂在平行于阿尔金断裂方向上的水平缩短速率及全新世以来褶皱的缩短速率累加,得到总缩短速率为每年 1.4~2.4 mm,这与阿尔金断裂东端部每年 1~2 mm 的左旋走滑速率几乎完全一致,说明阿尔金断裂东端部的走滑速率到了河西走廊西端的酒西盆地内部已逐步被一系列 NWW 向逆冲断裂和褶皱隆起所吸收和转换,同时也说明阿尔金断裂已逐步终止于河西走廊西端的酒西盆地一带,而河西走廊北侧的黑山断裂与其走向相联接的磴磴山断裂、金塔南山断裂可能共同构成了青藏高原朝 NE 向扩展的逆冲前缘。

样品测试由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成,中国地震局地质研究所张培

震院士在成文中进行了指导,在此谨表谢忱!

参考文献:

References:

- [1] 赵志军,方小敏,李吉均. 祁连山北缘酒东盆地晚新生代磁性地层[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2001, 31(增 1): 195-201.
ZHAO Zhi-jun, FANG Xiao-min, LI Ji-jun, et al. Late Cenozoic Magnetic Polarity Stratigraphy in the Jiudong Basin, Northern Qilian Mountain[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2001, 31(S1): 195-201.
- [2] 宋春晖,方小敏,李吉均,等. 青藏高原北缘酒西盆地 13 Ma 以来沉积演化与构造隆升[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2001, 31(增 1): 155-162.
SONG Chun-hui, FANG Xiao-min, LI Ji-jun, et al. Sedimentations in Jiuxi Basin of Northern Tibetan Plateau Since 13 Ma and Its Implications for Uplifting of the Plateau[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2001, 31(S1): 155-162.
- [3] 闵 伟,张培震,何文贵,等. 酒西盆地断层活动特征及古地震研究[J]. 地震地质, 2002, 24(1): 35-44.
MIN Wei, ZHANG Pei-zhen, HE Wen-gui, et al. Research on the Active Faults and Paleoeearthquakes in the Western Jiuquan Basin[J]. Seismology and Geology, 2002, 24(1): 35-44.
- [4] 袁道阳,张培震,刘百箴,等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 270-278.
YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zhen, LIU Bai-chi, et al. Geometrical Imagery and Tectonic Transformation of Late Quaternary Active Tectonics in Northern Margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 270-278.
- [5] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003.
YUAN Dao-yang. Tectonic Deformation Features and Space-time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau Since the Late Cenozoic Time[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003.
- [6] 方小敏,赵志军,李吉均,等. 祁连山北缘老君庙背斜晚新生代磁性地层与高原北部隆升[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2004, 34(2): 97-106.
FANG Xiao-min, ZHAO Zhi-jun, LI Ji-jun, et al. Magnetostratigraphy of the Late Cenozoic Laojunmiao Anticline in the Northern Qilian Mountains and Its Implications for the Northern Tibetan Plateau Uplift

- [J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2004, 34(2): 97-106.
- [7] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision[J]. Science, 1975, 189: 419-426.
- [8] MOLNAR P, BURCHFIEL B C, LIANG K Y, et al. Geomorphic Evidence for Active Faulting in the Altyn Tagh and Northern Tibet and Qualitative Estimates of Its Contribution to the Convergence of India and Eurasia[J]. Geology, 1987, 15(3): 249-253.
- [9] BURCHFIEL B C, ZHANG P Z, WANG Y P, et al. Geology of the Haiyuan Fault Zone, Ningxia Autonomous Region, China and Its Relation to the Evolution of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 1991, 10: 1091-1110.
- [10] TAPPONNIER P, XU Z Q, FRANCOISE R, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.
- [11] YIN A, RUMELHART P E, BUTLER R, et al. Tectonic History of the Altyn Tagh Fault System in Northern Tibet Inferred from Cenozoic Sedimentation[J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114(10): 1257-1295.
- [12] 胡文瑞, 何 欣, 穆朗枫, 等. 酒西盆地构造变形特征及断层相关褶皱形成机理[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 253-258.
- HU Wen-rui, HE Xin, MU Lang-feng, et al. Tectonic Deformation Characteristics of Jiuxi Basin and Its Formation Mechanism of Fault-related Folds[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(3): 253-258.
- [13] DARBY B J, RITTS B D, YUE Y J, et al. Did the Altyn Tagh Fault Extend Beyond the Tibetan Plateau? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240: 425-435.
- [14] COWGILL E. Impact of Riser Reconstructions on Estimation of Secular Variation in Rates of Strike-slip Faulting: Revisiting the Cherchen River Site Along the Altyn Tagh Fault, NW China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254(3/4): 239-255.
- [15] COWGILL E, GOLD R D, CHEN X H, et al. Low Quaternary Slip Rate Reconciles Geodetic and Geologic Rates Along the Altyn Tagh Fault, Northwestern Tibet[J]. Geology, 2009, 37(7): 647-650.
- [16] ZHANG P Z, MOLNAR P, XU X W. Late Quaternary and Present-day Rates of Slip Along the Altyn Tagh Fault, Northern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26: TC5010.
- [17] ZHENG W J, ZHANG P Z, HE W G, et al. Transformation of Displacement Between Strike-slip and Crustal Shortening in the Northern Margin of the Tibetan Plateau: Evidence from Decadal GPS Measurements and Late Quaternary Slip Rates on Faults[J]. Tectonophysics, 2013, 584: 267-280.
- [18] ZHENG W J, ZHANG H P, ZHANG P Z, et al. Late Quaternary Slip Rates of the Thrust Faults in Western Hexi Corridor (Northern Qilian Shan, China) and Their Implications for Northeastward Growth of the Tibetan Plateau[J]. Geosphere, 2013, 9(2): 342-354.
- [19] 徐锡伟, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, 等. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2003, 33(10): 967-974.
- XU Xi-wei, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, et al. Late Quaternary Sinistral Slip Rate Along the Altyn Tagh Fault and Its Structural Transformation Model[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(10): 967-974.
- [20] 裴军令, 周在征, 李海兵, 等. 中中新世以来阿尔金断裂走滑未造成柴达木盆地整体旋转[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2016, 46(1): 163-174.
- PEI Jun-ling, ZHOU Zai-zheng, LI Hai-bing, et al. Strike-slip of Altyn Tagh Didn't Result in Qaidam Basin Rotation Since Middle Miocene[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2016, 46(1): 163-174.
- [21] 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金—祁连—柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3531-3554.
- ZHANG Jian-xin, YU Sheng-yao, LI Yun-shuai, et al. Subduction, Accretion and Closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic Accretion/Collision Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Orogenic System[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3531-3554.
- [22] 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 等. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3701-3712.
- PAN Jia-wei, LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, et al. Tectonic Responses in the Qaidam Basin Induced by Cenozoic Activities of the Altyn Tagh Fault[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3701-3712.
- [23] 姜夫爵, 高树静, 周 勇, 等. 阿尔金中段—东昆仑西段构造特征浅析[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 24-36.
- JIANG Fu-jue, GAO Shu-jing, ZHOU Yong, et al. The Tectonic Features from the Middle Section of Altyn to the Western Section of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 24-36.
- [24] 孙 岳, 陈正乐, 陈柏林, 等. 阿尔金北缘 EW 向山脉

- 新生代隆升剥露的裂变径迹证据[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 67-75.
- SUN Yue, CHEN Zheng-le, CHEN Bai-lin, et al. Cenozoic Uplift and Denudation of the EW-trending Range of Northern Altun Mountains: Evidence from Apatite Fission Track Data[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(1): 67-75.
- [25] 李 萌, 汤良杰, 邱海峻, 等. 阿尔金断裂带中中新世以来构造变形的电子自旋共振测年证据[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(1): 57-65.
- LI Meng, TANG Liang-jie, QIU Hai-jun, et al. Evidences from ESR Dating for Structural Deformation of Altyn Tagh Fault System Since Middle Miocene [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(1): 57-65.
- [26] 李煜航, 王庆良, 崔笃信, 等. 利用 GPS 数据反演阿尔金断裂现今滑动速率[J]. 地震地质, 2015, 37(3): 869-879.
- LI Yu-hang, WANG Qing-liang, CUI Du-xin, et al. Inversion of Present-day Fault Slip Rate Along Altyn Tagh Fault Constrained by GPS Data[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(3): 869-879.
- [27] 陈柏林, 刘建民, 刘建生, 等. 阴洼山断裂全新世活动特征与年代学研究[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 243-251.
- CHEN Bai-lin, LIU Jian-min, LIU Jian-sheng, et al. Study on the Activity and Chronology of the Yinwushan Fault During Holocene Epoch[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(2): 243-251.
- [28] 陈柏林, 王春宇, 刘建民, 等. 新民堡断裂新构造活动特征[J]. 地球学报, 2006, 27(6): 515-524.
- CHEN Bai-lin, WANG Chun-yu, LIU Jian-min, et al. The Activity of the Xinminbao Fault from the Late Pleistocene to Holocene[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(6): 515-524.
- [29] 陈柏林, 刘建生, 张永双, 等. 嘉峪关断裂晚第四纪新构造活动特征[J]. 地质力学学报, 2007, 13(1): 78-85.
- CHEN Bai-lin, LIU Jian-sheng, ZHANG Yong-shuang, et al. Late Quaternary Neotectonic Movement of the Jiayuguan Fault[J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13(1): 78-85.
- [30] 陈柏林, 王春宇, 宫玉良. 河西走廊盆地西段玉门断裂晚新生代的的活动特征[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1709-1719.
- CHEN Bai-lin, WANG Chun-yu, GONG Yu-liang. Late Cenozoic Activity of the Yumen Fault in the Western Segment of the Hexi Corridor[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1709-1719.
- [31] 许洪泰. 青藏高原东南缘磨西断裂和东北缘塔尔湾—池家刺窝断裂古地震研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2012.
- XU Hong-tai. A Paleoequakes Study on the Moxi Fault and Terwan-Chijiawo Fault at the Margin of the Tibetan Plateau [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2012.
- [32] 郑文俊. 河西走廊及其邻区活动构造图像及青藏高原北部的构造变形模式的讨论[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.
- ZHENG Wen-jun. Geometric Pattern and Active Tectonics of the Hexi Corridor and Its Adjacent Regions [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2009.
- [33] 陈 涛, 刘玉刚, 闵 伟, 等. 塔尔湾断裂活动时代厘定及地貌陡坎成因分析 [J]. 地震地质, 2012, 34(3): 401-414.
- CHEN Tao, LIU Yu-gang, MIN Wei, et al. The Activity Age of Tarwan Fault and Genesis of the Topographic Scarp [J]. Seismology and Geology, 2012, 34(3): 401-414.
- [34] 朱利东, 王成善, 郑荣才, 等. 青藏高原东北缘酒泉盆地的演化特征与宽台山—黑山断裂的性质[J]. 地质通报, 2005, 24(9): 837-840.
- ZHU Li-dong, WANG Cheng-shan, ZHENG Rong-cai, et al. Evolutionary Characteristics of the Jiuquan Basin and Character of the Kuantaishan-Heishan Fault on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(9): 837-840.
- [35] 陈文彬, 徐锡伟. 阿拉善地块南缘的左旋走滑断裂与阿尔金断裂带的东延[J]. 地震地质, 2006, 28(2): 319-324.
- CHEN Wen-bin, XU Xi-wei. Sinistral Strike-slip Faults Along the Southern Alashan Margin and Eastwards Extending of the Altun Fault [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2): 319-324.
- [36] 龚建业, 张志诚, 张 臣, 等. 阿尔金断裂带东端断裂展布型式的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 169-175.
- GONG Jian-ye, ZHANG Zhi-cheng, ZHANG Chen, et al. Study of Distributing Pattern of the Eastern Terminal of the Altyn Tagh Fault Zones [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(2): 169-175.
- [37] 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- Institute of Geology, State Seismological Bureau,

- Lanzhou Institute of Seismology, State Seismological Bureau, The Qilian Mountain-Hexi Corridor Active Fault System[M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [38] 陈 杰. 祁连山西段第四纪构造运动的阶段、性质及其年代研究[D]. 北京: 国家地震局地质研究所, 1995.
- CHEN Jie. Quaternary Tectonic Movement Stage, Characteristic, and Geological Age in the Western Qilian Mountains[D]. Beijing: Institute of Geology, State Seismological Bureau, 1995.
- [39] 陈文彬. 河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2003.
- CHEN Wen-bin. Principal Features of Tectonic Deformation and Their Generation Mechanism in the Hexi Corridor and Its Adjacent Regions Since the Late Quaternary[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003.
- [40] 国家地震局阿尔金活动断裂课题组. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- The Group of the Altyn Tagn Active Fault System, State Seismological Bureau, The Altyn Tagh Active Fault System[M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [41] HETZEL R, NIEDERMANN S, TAO M X, et al. Low Slip Rates and Long-term Preservation of Geomorphic Features in Central Asia[J]. *Nature*, 2002, 417: 428-432.
- [42] 中国地震局地质研究所. 西气东输工程场地地震安全性评价报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2001.
- Institute of Geology, China Earthquake Administration. Report of Seismic Safety Evaluation for the Engineering Site of West-east Gas Pipeline Project[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2001.
- [43] ZHENG W J, ZHANG P Z, GE W P, et al. Late Quaternary Slip Rate of the South Heli Shan Fault (Northern Hexi Corridor, NW China) and Its Implications for Northeastward Growth of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2013, 32(2): 271-293.
- [44] 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. 甘肃高台合黎山南缘发现地震地表破裂带[J]. *地震地质*, 2009, 31(2): 247-255.
- ZHENG Wen-jun, ZHANG Pei-zhen, YUAN Dao-yang, et al. Discovery of Surface Rupture Zone on the South of Helishan Gaotai, Gansu Province[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(2): 247-255.
- [45] 杨景春, 谭利华, 李有利, 等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化[J]. *第四纪研究*, 1998, 18(3): 229-237.
- YANG Jing-chun, TAN Li-hua, LI You-li, et al. River Terraces and Neotectonic Evolution at Northern Margin of the Qilianshan Mountains[J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(3): 229-237.
- [46] BENDICK R, BILHAM R, FREYMUELLER J, et al. Geodetic Evidence for a Low Slip Rate in the Altyn Tagh Fault System[J]. *Nature*, 2000, 404: 69-72.
- [47] MERIAUX A S, TAPPONNIER P, RYERSON F J, et al. The Aksay Segment of the Northern Altyn Tagh Fault: Tectonic Geomorphology, Landscape Evolution, and Holocene Slip Rate[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B04404.
- [48] ELLIOTT R, BIGGS J, PARSONS B, et al. InSAR Slip Rate Determination on the Altyn Tagh Fault, Northern Tibet, in the Presence of Topographically Correlated Atmospheric Delays[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(12): L12309.
- [49] CHEN Y W, LI S H, LI B. Slip Rate of the Aksay Segment of Altyn Tagh Fault Revealed by OSL Dating of River Terraces[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 291-299.
- [50] 陈 杰, WYRWOLL K H, 卢演涛, 等. 祁连山北缘玉门砾岩的磁性地层年代与褶皱过程[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 20-31.
- CHEN Jie, WYRWOLL K H, LU Yan-chou, et al. Magnetochronology of the Yumen Conglomerates and Multi-pulsed Folding and Thrusting in the Northern Qilianshan[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 20-31.
- [51] 高 锐, 李朋武, 李秋生, 等. 青藏高原北缘碰撞变形的深部过程: 深地震探测成果之启示[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2001, 31(增 1): 66-71.
- GAO Rui, LI Peng-wu, LI Qiu-sheng, et al. Deep Process of the Collision and Deformation on the Northern Margin of the Tibetan Plateau: Revelation from Investigation of the Deep Seismic Profiles[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2001, 31(S1): 66-71.
- [52] XIAO Q B, ZHANG J, WANG J J, et al. Electrical Resistivity Structures Between the Northern Qilian Mountains and Beishan Block, NW China, and Tectonic Implications[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200/201: 92-104.