

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.02.013

柴达木盆地西南缘油砂山断裂的古地震 和晚第四纪活动速率

许建红^{1,2)} 惠旭辉¹⁾ 程宏宾¹⁾ 张晓亮¹⁾ 尚思歧¹⁾

1) 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

2) 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

摘 要 油砂山断裂位于柴达木盆地西南缘英雄岭背斜南翼, 英雄岭背斜是柴达木盆地内新构造表现最为强烈的地区, 也是柴达木盆地内部褶皱向 S 扩展的最前缘位置。对油砂山断裂的古地震和晚第四纪活动速率研究有助于理解该地区的构造变形方式和评价地震地质灾害。通过对油砂山山前洪积扇上沿断裂带发育的挤压鼓包进行探槽开挖、油砂山西侧盆地内褶皱陡坎进行测量及晚第四纪冲、洪积地层进行光释光测年, 综合分析认为: 1) 油砂山断裂是 1 条全新世活动的逆冲断裂, 盆地内的褶皱陡坎表明至少晚更新世中晚期以来该断裂在同一地表迹线上持续活动。油砂山探槽揭露到的断层面产状为 $N62^{\circ}W/NE \angle 17^{\circ}$ 。探槽揭露到了至少 2 次构造事件, 较新的 1 次事件 II 发生在距今 500a 以来, 垂直断距约 0.25m。目前获得的资料还不能确定它就是 1977 年茫崖西北的 $M6.4$ 地震, 但也不能排除与该地震有关。较老的事件 I 发生在距今 1000~4000a 之间, 垂直断距约 0.55m。事件发生后的侵蚀作用影响了事件 I 年龄的限定和事件 I 确切次数的判定。2) 油砂山断裂晚更新世中晚期以来的垂直活动速率约为 $(0.38 \pm 0.06) \text{mm/a}$ 。与该区 GPS 站点的相对速率相比较表明, 油砂山断裂是该区非常重要的 1 条全新世活动的逆冲断裂, 在调节区域构造变形上起到了重要作用。

关键词 柴达木盆地西南缘 油砂山断裂 古地震 活动速率 褶皱陡坎

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2018)02-0465-15

0 引言

柴达木盆地位于青藏高原北部, 地貌上周围分别被祁连山、东昆仑山和阿尔金山围限; 构造上东北边界为祁连山-南山逆冲断裂带, 南界为东昆仑山逆冲断裂带及其西部的祁漫塔格逆冲断裂带 (Tapponnier *et al.*, 1990), 西北边界为左行走滑的阿尔金断裂带 (Avouac *et al.*, 1993b; Tapponnier *et al.*, 2001; Yin *et al.*, 2002; 李海兵等, 2006) (图 1)。青藏高原北部边界阿尔金断裂在走滑过程中影响了青藏高原北部构造的几何学特征及基本格架 (许志琴等, 2001; 李海兵等, 2006)。青藏高原北部的祁连山、大雪山、党河南山、祁漫塔格山、西昆仑山等主要山脉、褶皱, 尤其是山前逆冲断裂的分布, 是对沿阿尔金断裂滑移速率差异及变化的响应, 是在阿尔金断裂带的统一左行走滑剪切应力场作用下形成的 (李海兵等, 2006)。柴达木盆地内的变形和沉积作用受其影响首先发生在盆地西端, 逐渐向 E 传播 (尹安等, 2007)。这一点也体现在柴达木盆地一级构造特征上, 即柴达木复向斜的褶皱振幅 (西部 > 16km; 东

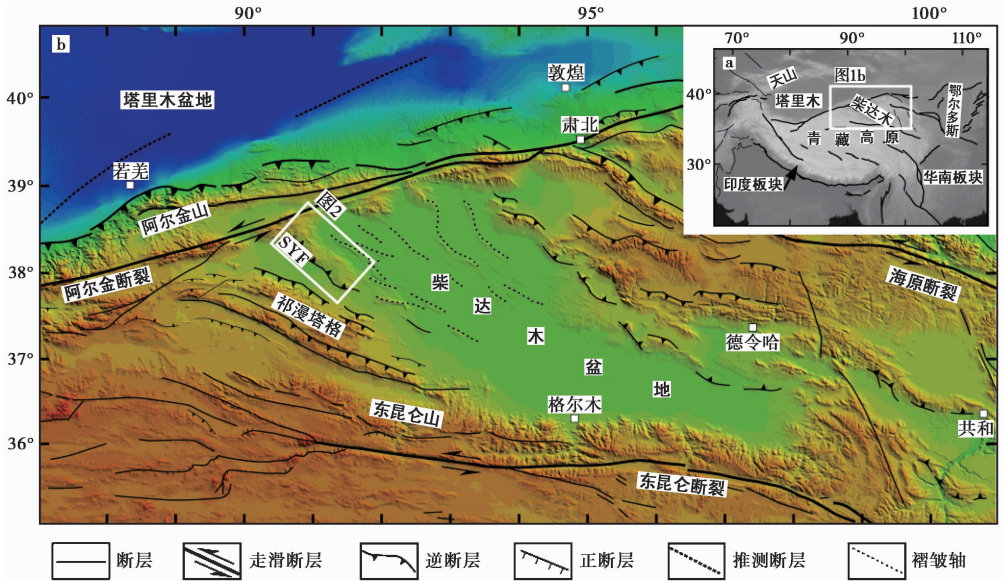


图 1 柴达木盆地及其周缘构造、地貌简图

Fig. 1 Map showing geomorphology and tectonics of the Qaidam Basin and adjacent areas.

a 指示柴达木盆地在青藏高原的位置, 白色矩形框指示图 b 的位置; b 柴达木盆地及其周缘的地貌和构造, 其中 SYF 代表狮子沟-油砂山断裂, 该断裂的空间展布据陈宣华等 (2010), 白色矩形框指示图 2 的位置; 其余断裂的名称和空间展布据潘家伟等 (2015)

部 < 4 km) 及半波长 (西部约 170 km; 东部约 50 km) 均向 E 逐渐减小 (尹安等, 2007)。

位于柴达木复向斜西南缘的英雄岭背斜是柴达木盆地内新构造表现最为强烈的地区 (王桂宏等, 2004), 也是柴达木盆地内部褶皱向 S 扩展的最前缘位置。本文的研究对象油砂山断裂位于英雄岭背斜的南翼, 构成背斜区与尕斯库勒湖盆地区的分界, 是柴达木盆地内部向 S 仰冲的主要断裂之一。前人对该区的研究主要集中在柴达木盆地西部地区构造发育的背景、盆地类型及成因机制, 局部构造类型及发育演化, 构造沉积特征及对阿尔金断裂走滑活动的响应上 (王桂宏等, 2004; 柳祖汉等, 2006; 尹安等, 2007; 于福生等, 2011; 潘家伟等, 2015), 但针对该构造区活动断裂的研究却处于空白, 部分原因可能是构造所处的地理位置偏僻、海拔高、关注度低造成的。但是, 我们野外调查时发现位于花土沟油田联五站以东约 900 m, 油砂山山前冲洪积扇上发育有与基岩山走向一致的挤压鼓包; 在油砂山西侧 G315 公路以南, 盆地地貌分界线往西盆地内的延伸线上, 发育 1 个陡坡带。这 2 处与油砂山断裂相关的地表构造变形为解答该断裂的最新活动及晚第四纪以来的活动速率提供了线索, 也有助于理解该地区的构造变形方式和评价地震地质灾害。

1 地震构造背景

英雄岭所在地区构造变形以上地壳缩短为主 (尹安等, 2007)。狮子沟-油砂山断裂位于英雄岭构造南翼, 断层向 S 仰冲, 断面上陡下缓, 断层向上切过新近系、第四系, 向下滑脱于古近系膏泥岩层内。在断裂的上盘形成了断滑背斜, 走向上自西向东可划分为狮子沟、油砂山、

大乌斯 3 个构造变形段(于福生等, 2011)。其中, 将狮子沟构造变形段对应的山前断裂称为狮子沟断裂, 油砂山和大乌斯构造变形段对应的山前断裂称为油砂山断裂(图 2)。狮子沟-油砂山断裂构成背斜区与尕斯库勒湖盆地区的分界断层。在小比例尺地质构造图上, 也有研究者(陈宣华等, 2010)将狮子沟-油砂山断裂合称为花土沟断裂。在邓起东(2007)主编的 1:400 万中国活动构造图上, 称其为茫崖-油砂山断裂。

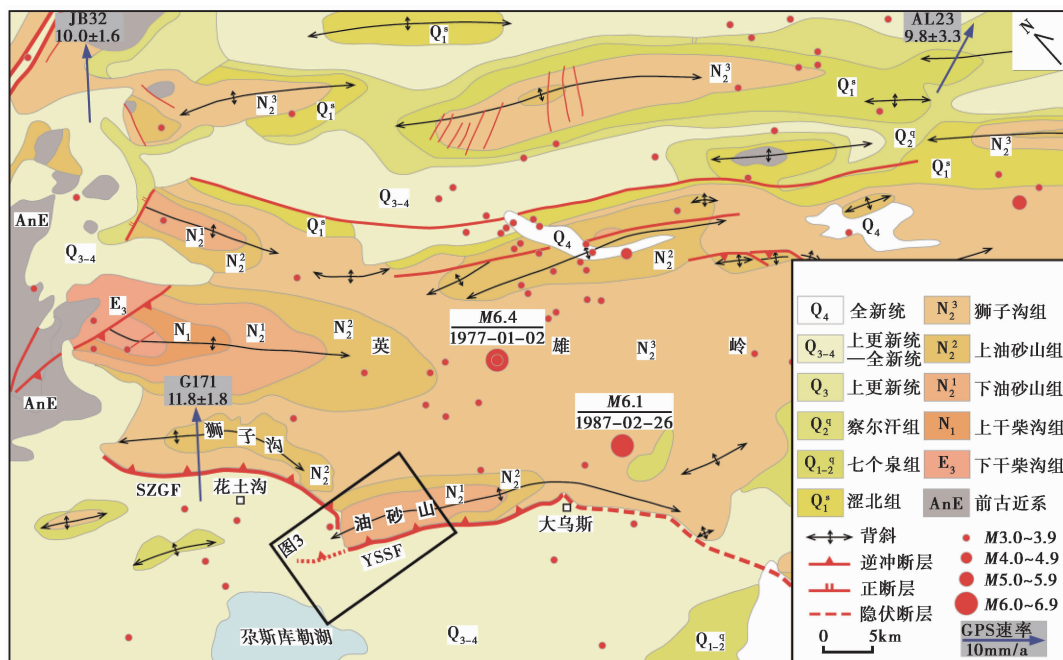


图 2 英雄岭背斜地质构造简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Yingxiongling anticline.

SZGF 狮子沟断层; YSSF 油砂山断层; 断裂的空间展布参考陈宣华等, 2010 及 Google Earth 影像的解译; 地层分布据潘家伟等, 2015

油砂山背斜轴向 NW, 背斜核部出露油砂山组(23.3~5.3Ma)(图 2)。油砂山滑脱构造西端的地形隆起幅度较大, 构造变形强烈, 海拔高度达 3 600m 左右, 高出尕斯库勒湖凹陷约 750m; 往东构造变形减弱, 逐渐倾伏于柴达木盆地。根据位于柴西地区的 2 条区域性地震-地质剖面, 尹安等(2007)认为油砂山背斜是其中 1 个主要的断弯褶皱, 具有断坡背形形态, 而尕斯库勒湖地区构成了油砂山背斜及其下部逆冲断层的前陆盆地。在油砂山背斜的前翼发育了 1 套与逆冲断层有关的生长地层层序, 该生长地层的形成时间开始于渐新世晚期地层上干柴沟组沉积的时候(35.5~23.3Ma), 在第四纪时表现得更为明显(尹安等, 2007)。这说明油砂山背斜的形成开始于渐新世, 并一直持续到现在(尹安等, 2007)。该起始时间与阿尔金断裂自晚渐新世-中新世走滑速率明显增加(吴磊等, 2012; 李林林等, 2015)的时期是一致的。陈宣华等(2010)认为, 油砂山背斜代表了东昆仑山脉向 N 扩展的最年轻阶段, 当向 S 仰冲的逆冲断层继续发展时, 油砂山将最终贴到祁漫塔格山之上。

现今的 GPS 速度(Gan *et al.*, 2007)表明英雄岭构造带在垂直于构造走向的 S38°W 方向上

相对于尕斯库勒湖盆地存在 $1.8\sim 3.5\text{mm/a}$ 的挤压运动(图 2)。从历史地震的分布(图 2)可以看出,大部分地震位于逆冲断裂的上盘基岩山区内,其中包括多次中强历史地震,如 1977 年 $M6.4$ 地震和 1987 年 $M6.1$ 地震,而盆地内只有零星的小震。

2 油砂山断裂的古地震和晚第四纪活动速率

油砂山断裂西起油砂山西侧,沿油砂山南麓向 SE 延伸,至大乌斯、甘森一带,总体呈 NW 向展布。断裂主要由 2 条规模不等的断裂段右阶斜列而成。大乌斯以西断层出露地表,构造地貌表现明显;大乌斯以东断裂逐渐隐伏于盆地内,相应的油砂山背斜幅度也逐渐降低,同时断层走向顺时针偏转约 10° 。因此,可以大体以大乌斯为界将断裂粗略地分为西段和东段



图 3 油砂山断层西端的卫星影像(a)及地质构造解译图(b)

Fig. 3 Satellite image(a) and its geological interpretation(b) of the west end of the Youshashan fault.

N+E 油砂山组及干柴沟组; Q_{3-4}^{al+pl} 晚更新世至全新世冲、洪积地层;

Q_{3-4}^{al} 晚更新世至全新世冲、湖积地层, Q_4^{pl} 全新世洪积地层; 虚线框分别指示图 4a 和图 6a 的位置

(图 2); 西段大体对应油砂山构造变形段, 东段大体对应大乌斯构造变形段(于福生等, 2011)。

本文的研究对象为油砂山断裂西段(油砂山至大乌斯), 走向 $N62^{\circ}W$, 倾向 NE, 长约 30km。该段在卫星影像上线性特征明显, 陡坎北侧为相对抬升的油砂山及山前强烈的冲蚀沟、陡崖地貌; 南侧为尕斯库勒湖盆地区的冲积平原。野外调查发现, 花土沟油田联五站以东的山前洪积扇(图 3a, b)上存在 1 个显著的与断裂走向一致的挤压鼓包; 油砂山以西盆地内发育 1 个北高南低的陡坡带(图 3a, b), 延伸方向与山前断裂一致。为了研究油砂山断裂的古地震及断裂西部盆地内的陡坎性质, 我们在山前冲洪积扇上横跨挤压鼓包开挖 1 个探槽, 并在油砂山西侧盆地内陡坡带上清理 1 个剖面, 详述如下:

2.1 油砂山探槽与古地震事件

油砂山地区花土沟油田联五站以东约 900m 处, 山前发育 1 个扇形洪积扇, 洪积扇往 SW 方向延伸约 800m, NW-SE 向宽约 1 150m(图 3b)。在洪积扇的扇根部位, 地表存在 1 个宽约 15m、最高点约 1.0m 的挤压鼓包(图 4a, b, c)。横跨挤压鼓包布设 1 个探槽。探槽布设方向为 $S60^{\circ}W$, 大体垂直于地表挤压鼓包的延伸方向。探槽长约 27m、深 3m 左右。因开挖时 SE 壁垮塌, 本文仅记录了 NW 壁。根据上下地层之间的接触关系, 探槽中揭露到的地层可以分为 4 套(图 5a, b):

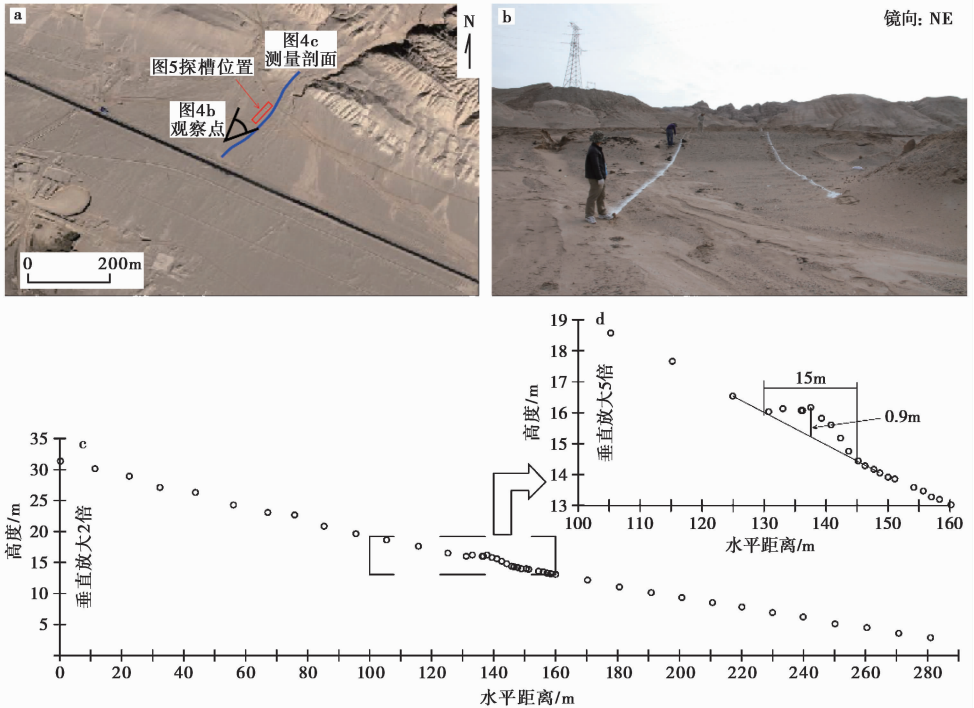


图 4 油砂山探槽开挖处陡坎地貌及测量剖面

Fig. 4 Scarp and measurement profile at the trench site.

a 探槽开挖处的 Google earth 影像图, 位置见图 3; b 探槽开挖处挤压鼓包的野外照片, 白灰线为设计的探槽位置, 白线尽头的陡坎在开挖临时防洪渠时被平整过, 照片右侧的土包即为平整时堆积的砂土, 观察点位置见图 a; c 横跨探槽开挖处的测量剖面, 测量仪器为全站仪; d 鼓包处放大的测量剖面, 剖面位置见图 c 中的虚线矩形框

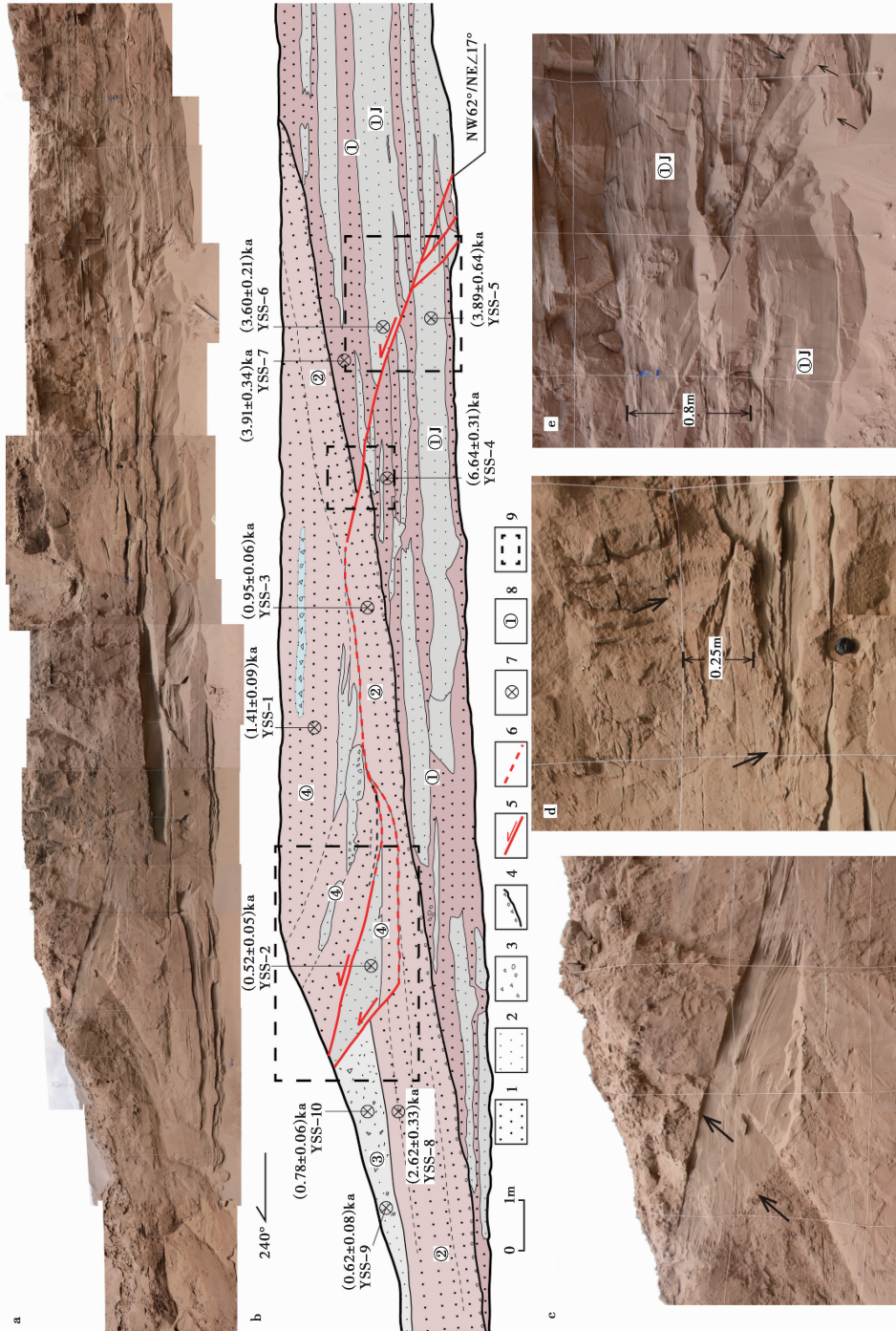


图 5 油砂山探槽剖面

Fig. 5 Cross section of the Youshashan trench.

a 探槽照片拼接图; b 探槽剖面图; 1 粗砂, 2 细砂, 3 零星角砾, 4 侵蚀面, 5 逆断层, 6 推测断层, 7 光释光采样点, 测年详细结果见表 1, 8 地层编号, 9 探槽细节图的位置, 剖面左上、中、右虚线框分别对应细节图 c、d、e; c 层④内近地表的 2 条次级顺层剪切断层, 黑色箭头指示次级断层的位; d 黑色箭头所指为层①和层②之间的侵蚀面, 侵蚀面被断层逆冲错断, 垂直断距约 0.25m, 代表了较新的 1 次构造事件 II; e 探槽揭露的主断层面的分支破裂面, ①J 为层①内部的夹层, 夹层被断层逆冲错断, 垂直断距约 0.8m, 代表了较老的 1 次构造事件 I, 黑色小箭头所指为探槽底部的分支破裂面

地层①为含粉质黏土的红褐色粗砂，略有胶结，层理明显，地层产状近水平。夹层或透镜体①J为纯净松散的灰白色细粉砂，无胶结，斜层理、交错层理发育。地层①的顶部存在1个明显的侵蚀面。在断层面两侧夹层①J中分别取了2个砂样 YSS-5 和 YSS-6，光释光测年结果分别为 (3.89 ± 0.64) ka 和 (3.60 ± 0.21) ka。在断层面两侧地层①的顶部分别取了2个砂样 YSS-4 和 YSS-7，光释光测年结果分别为 (6.64 ± 0.31) ka 和 (3.91 ± 0.34) ka。考虑到该套地层中有3个样品(YSS-5、YSS-6 和 YSS-7)的年龄都接近于4ka，所以我们认为样品 YSS-4 的光释光测年结果 (6.64 ± 0.31) ka 是冲洪积相含黏土的红褐色粗砂在搬运过程中曝光不充分、之前信号有残留的结果。

地层②同样为含粉质黏土的红褐色粗砂，略有胶结，该套地层与地层①的岩性差别不大，只是地层向 SW 方向缓倾，倾角约 10° 。该套地层的底面切过了下伏多个地层的分界面，与下伏地层①角度不整合接触。在断层下盘该地层的下部取砂样 YSS-3，光释光测年结果为 (0.95 ± 0.06) ka；在断层下盘该地层的上部取砂样 YSS-8，光释光测年结果为 (2.62 ± 0.33) ka，2个样品的年龄明显与地层沉积顺序不符。考虑到洪积相的红褐色粗砂在搬运过程中会存在曝光不充分、之前信号有残留的问题；地层②与下伏地层①为角度不整合接触关系，地层年龄出现大的“间断”是可以接受的；取样造成2次曝光的可能性较小，因而趋向于认为较小的年龄 (0.95 ± 0.06) ka 可以代表该套地层的底界年龄。

地层③为细砂及粉质砂土夹零星碎石，层理不明显，在该地层中取了2个粉质砂土样品 YSS-9 和 YSS-10，光释光测年结果分别为 (0.62 ± 0.08) ka 和 (0.78 ± 0.06) ka。

地层④类似于叠瓦状的推覆体，总体岩性上与层①和②差别不大，为含粉质黏土的红褐色粗砂，略有胶结。地层中夹有多个透镜体地层。该套地层下部的透镜体与层①中的透镜体或夹层岩性类似，为纯净松散分选好的灰白色细粉砂，无胶结，斜层理发育。中部的透镜体岩性也为松散的灰白色粉细砂，只是在其底部含有零星碎石。上部地层夹1个薄的线状透镜体，含有大量的碎石，蓝灰色，胶结。在地层下部的透镜体中取粉细砂样品 YSS-2，光释光测年结果为 (0.52 ± 0.05) ka；在地层上部取含黏土的红褐色粗砂样品 YSS-1，光释光测年结果为 (1.41 ± 0.09) ka，该年龄比地层下部透镜体的测年结果老。根据地层的沉积顺序，地层④的年龄应比地层③年轻，YSS-1 样品为冲洪积相略带胶结的含黏土红褐色粗砂，会存在搬运过程曝光不充分、之前信号有残留的可能性，因而认为 YSS-1 不能代表该处地层的年龄。

从剖面图上(图 5a, b)可以看出在探槽的东北段揭露到了清晰的主断层面，使得地层①中的标志层夹层①J发生了错断(图 5e)，主断面产状 $N62^\circ W/NE \angle 17^\circ$ 。探槽上部，2个次级的顺层剪切断层使得近地表的地层弯曲上翘(图 5c)。探槽的底部，可以看到2个小的破裂面会交到主断层面上(图 5e)。在探槽剖面上，存在1个特殊的现象：层①近水平，而上覆的层②、③和④却是向盆地方向明显倾斜。在探槽剖面上除前面所述的断层外没有发现其他的明显构造；从实测剖面可以看出该挤压鼓包两侧约 280m 的范围内无其他明显的地表变形(图 4c)；在测线覆盖的范围之外，野外调查也没有发现其他明显的线性陡坎或鼓包。可以看到的观察事实为：层①和层②之间存在1个明显的侵蚀面；该洪积扇对应的基岩山区存在2条相邻的季节性冲沟，其中西侧的又由2条分支冲沟组成(图 3)。根据这些事实，推断该洪积扇的物质是这2条季节性冲沟从基岩区搬运而来；冲沟因流向、路径等不同，在洪积扇区的堆积物也就表现出不同的坡度。也就是说，层①和层②、③、④很可能分别是2条不同的冲沟从基岩山区携带下

来的物质,但因流向、路径等不同而表现为堆积物的倾角不一致,但由于物源相同导致剖面上的地层岩性接近。

通过以上细致的观察分析认为探槽揭露了至少2次构造事件。较老的事件I使得地层①发生了明显错断,地层①内部各小层顶、底界的位移量均一致,可以作为事件I发生前的标志地层(冉勇康等,2007)。以断层面两侧松散的灰白色细粉砂夹层①J为标志,可以得到事件发生以来总的垂直断距约为0.80m(图5e)。地层①顶部存在1个明显的侵蚀面并被侵蚀面之后的构造事件所错断,垂直断距约0.25m(图5c)。地层①内部的地层和地层①顶部的侵蚀面在断层两盘的垂直断距存在突变(冉勇康等,2007),这说明事件I发生在侵蚀面之前。地层①内部各小层顶、底界的位移量均一致,这说明事件I发生在地层①沉积之后。也就是说,事件I应发生在地层①顶部最年轻地层和地层②底部最老地层年代之间。根据地层②底部YSS-3样品的测年结果(0.95 ± 0.06)ka和地层①内部YSS-6样品的测年结果(3.60 ± 0.21)ka,事件I发生在距今1000~4000a之间。事件II是1次较新的构造事件,事件发生在地层②底部和地层①顶部的侵蚀面形成之后。以侵蚀面为标志层,该事件的垂直断距约为0.25m。该事件使得剖面上部的地层④发生了挤压变形,在剖面的西南段上部形成了2个次级的顺层剪切断层,它们使得地层④弯曲向上翘起,这在地表洪积扇表面相应地表现为1个宽约15m、高约1.0m的挤压鼓包。这次事件的位错量只有0.25m且未错断至地表,其沿断面向上的位移量由层④内部发育的次级断层和弯曲变形所吸收,因而在地表仅表现为挤压鼓包,并未使上盘地层发生明显的抬升(图4c)。根据地层④切割的地层③内的2个光释光样品年龄(0.62 ± 0.08)ka和(0.78 ± 0.06)ka,及地层④中透镜体内的光释光样品YSS-2的测年结果为(0.52 ± 0.05)ka,该事件应在这些年代之后,因此推断事件II应发生在距今约500a以来。

2.2 褶皱陡坎与断层活动速率

沿油砂山山前向西,山前线性地貌与油砂山西侧盆地内坡向SW的陡坎相连(图3a,b)。在Google影像上带状密集的侵蚀纹沟勾勒出了陡坎的展布(图3a)。陡坎长约5km,延伸方向约N65°W,与油砂山断层出露地表段的走向一致(图3a,b)。陡坎在剖面上表现为1个简单的“膝折”形态,坡度仅约为6°,坡肩至坡角的宽度却达到了约320m(图6a,b,c),远大于出露地表断层的地震地表破裂带宽度的平均统计值约30m(徐锡伟等,2002,2016)。

野外调查在G315公路与前进路交叉口向南约500m陡坎的前缘废弃沙坑内发现1个断层剖面,对剖面下部堆积的沙土进行了清理。剖面出露的地层(图6d)根据岩性特征可以分为上、下2部分:下部地层主要由灰色砾石层与红褐色黏土、浅棕色砂层互层组成,地层致密、胶结明显,层厚稳定连续,应为该次级褶皱的1套生长前地层;上部主要为灰黄色、松散的粗砂、砂砾石层,可能混杂了风成的砂土,该套地层向陡坎坡脚方向逐渐加厚,应为该次级褶皱的1套生长地层,剖面上、下部地层并未出现明显的侵蚀间断,说明上部地层是1套与褶皱构造变形同期沉积的生长地层。在该套地层的中下部距地表1.5m处,微层理发育、松散的粗砂地层中取光释光样品YSS2-1,测年结果为(57.87 ± 2.51)ka,该年龄接近于该次级褶皱变形的起始年龄。

通过清理还发现该处的断层实际上是褶皱引起的次级破裂。因为剖面下部地层是连续的,只是发生了“膝折”弯曲;但上部地层却在挤压变形过程中发生了破裂,且越往地表方向破裂两侧的地层错距越大(图6d)。野外沿该陡坡带进行地质调查,发现该陡坡带地层倾斜程度与

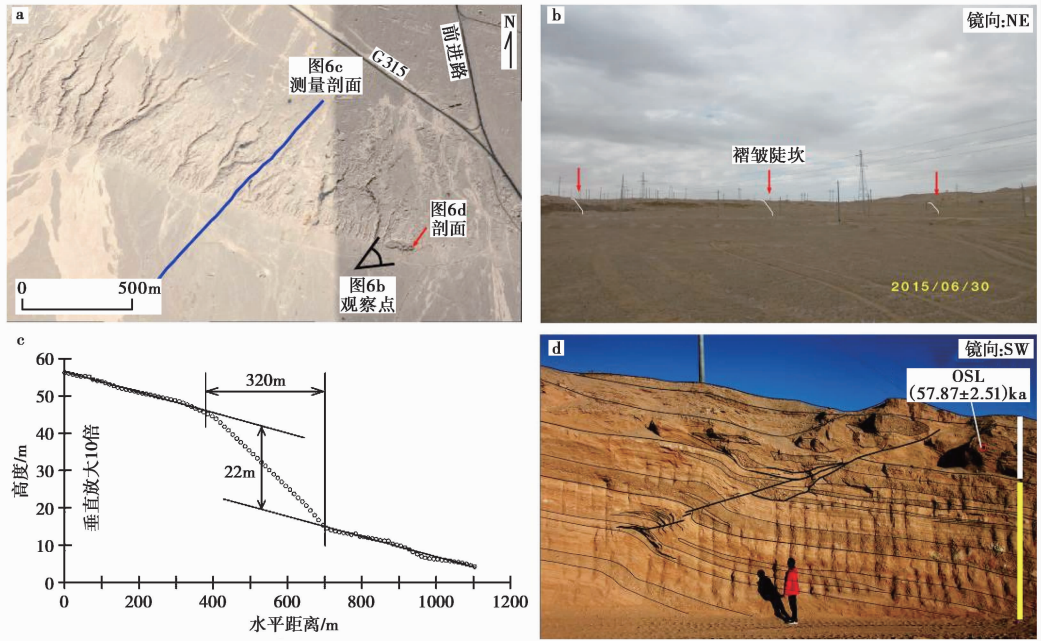


图 6 油砂山西侧盆地内的褶皱陡坎

Fig. 6 Folding scarp in the basin west of Youshashan.

a 油砂山西侧盆地内褶皱陡坎局部的 Google earth 影像图，位置见图 3；b 褶皱陡坎的野外照片，红色箭头指示了陡坎的位置；c 褶皱陡坎的测量剖面；d 陡坎坡脚处褶皱活动引起的次级断层剖面照片，剖面前人的身高约为 1.7m，地层测年的详细结果见表 1，剖面右侧白色粗线段指示了同褶皱变形沉积的生长地层，黄色粗线段指示了生长前地层

地表地形大体一致。沿陡坡带的多个取沙坑内未发现大的断层，地层比较完整连续。陡坡带上也未见明显的断层陡坎。这些表明它可能是 1 个褶皱陡坎 (Chen *et al.*, 2007a) 而非断层陡坎；陡坎又位于油砂山断裂之上，因而该褶皱陡坎应是由隐伏的油砂山断层活动形成的。褶皱陡坎的高度向西逐渐降低，说明隐伏的油砂山断层的倾滑量向西也逐渐减小，这与油砂山断裂向西向盆地内扩展相一致。

隐伏活动逆冲断层向上沿断层面的倾滑位移通常会被断尖之上 1 个三角形区域内地层的褶皱变形所吸收 (Hardy *et al.*, 1994; Chen *et al.*, 2007b)；远离断尖，褶皱变形带逐渐变宽，到地表则表现为一般的陡坎，而变形带之外 (或陡坎上、下盘) 仅发生相对的水平运动，因而可以通过陡坎上、下盘的相对高差和变形的起始年龄来计算下伏断层在垂直方向上的活动速率 (如 Chen *et al.*, 2007b)。本文对陡坎上、下地形面的相对高度数据进行了拟合，结果表明断层上盘和下盘的应变标志面近于相互平行且与水平面之间的夹角仅为 1.55° 。假设地表粗糙度引起的误差为 1.0m 及测量引入的误差占陡坎高度的 10% (Avouac *et al.*, 1993a)，那么上、下应变标志面之间的垂直落差则为 $(22 \pm 3.2) \text{m}$ (图 6c)。根据同褶皱变形沉积地层的光释光测年结果 $(57.87 \pm 2.51) \text{ka}$ ，可求得断层垂直方向上的活动速率约为 $(0.38 \pm 0.06) \text{mm/a}$ 。

表 1 油砂山探槽及剖面光释光样品测年结果

Table 1 OSL dating results of samples from the Youshashan trench

送样号	U	Th	K /%	含水率 /%	剂量率 /Gy·ka ⁻¹	等效剂量 /Gy	年龄 /ka	备注
YSS-1	1.36×10 ⁻⁶	5.18×10 ⁻⁶	2.38	15±5	2.98±0.13	4.20±0.22	1.41±0.09	粗颗粒
YSS-2	1.64×10 ⁻⁶	6.56×10 ⁻⁶	2.14	15±5	2.92±0.11	1.52±0.14	0.52±0.05	粗颗粒
YSS-3	1.64×10 ⁻⁶	6.04×10 ⁻⁶	2.13	15±5	2.88±0.11	2.73±0.15	0.95±0.06	粗颗粒
YSS-4	1.40×10 ⁻⁶	5.67×10 ⁻⁶	2.10	15±5	2.77±0.11	18.41±0.46	6.64±0.31	粗颗粒
YSS-5	1.37×10 ⁻⁶	5.52×10 ⁻⁶	2.10	15±5	2.76±0.11	10.73±1.71	3.89±0.64	粗颗粒
YSS-6	1.66×10 ⁻⁶	6.02×10 ⁻⁶	2.18	15±5	2.92±0.12	10.52±0.44	3.60±0.21	粗颗粒
YSS-7	1.84×10 ⁻⁶	7.98×10 ⁻⁶	2.10	15±5	3.01±0.11	11.78±0.94	3.91±0.34	粗颗粒
YSS-8	2.25×10 ⁻⁶	8.91×10 ⁻⁶	1.72	15±5	2.83±0.10	7.41±0.91	2.62±0.33	粗颗粒
YSS-9	1.61×10 ⁻⁶	6.03×10 ⁻⁶	2.05	15±5	2.80±0.11	1.73±0.23	0.62±0.08	粗颗粒
YSS-10	1.94×10 ⁻⁶	7.09×10 ⁻⁶	2.13	15±5	3.01±0.11	2.34±0.16	0.78±0.06	粗颗粒
YSS2-1	1.53×10 ⁻⁶	6.22×10 ⁻⁶	2.28	15±5	3.00±0.12	173.37±2.91	57.87±2.51	粗颗粒

注 测年由中国科学院地球环境研究所完成。

3 讨论

3.1 关于古地震事件

1977年1月2日老茫崖西北发生过1次M6.4地震,《陕甘宁青四省(区)强地震目录(公元1177年—公元1982年)》(国家地震局兰州地震研究所,1985)、《中国地震目录(公元1970—1979年)》(顾功叙,1984)和《中国近代地震目录(公元1912—1990年, $M_s \geq 4.7$)》(中国地震局震害防御司,1999)对这次地震均有记录,但详略程度不同,以《陕甘宁青四省(区)强地震目录(公元1177年—1982年)》的记录最为详细。记录表明,野外调查震中为(38°06'N, 91°24'E);震中烈度为Ⅷ度;主要包括英雄岭以南及17、18道班之间的地区,长轴呈NW向(与油砂山断裂的走向一致),长约19km,短轴长约7km(图7);但它是不是探槽中揭露的最新1次事件呢?这对探槽的古地震分析会有极大的影响,需要对此进行细致的分析。

根据地震目录的记载,Ⅷ度区砖柱土坯房全塌,Ⅶ度区包括青新公路19道班、油砂山及其附近地区。19道班处的砖柱土坯房部分倒塌;油砂山附近年久失修的砖柱土坯房全倒,但军用检查站的砖结构平房仅有裂缝产生。假设道班的房子结构和质量是相当的,那么19道班及油砂山附近的震动破坏明显比17、18道班附近小,说明该地震烈度的划分是合理的。地震目录还记录到NW走向的油砂山向S推移,将山前砂土推起,形成锯齿状裂缝;该处另1组裂缝为N65°E、宽6.5~15cm的张性裂缝,延伸数m。记录的现象位于探槽附近,而且山前“锯齿状裂缝”的走向与油砂山断层一致,但地震目录没有描述“锯齿状裂缝”和“推起砂土”的规模,暗示“锯齿状裂缝”规模可能小于NE向张性裂缝;另外《中国地震目录(公元1970—1979年)》和《中国近代地震目录(公元1912—1990年, $M_s \geq 4.7$)》对这2个现象都没有记录,所以还不能信心十足地将这些现象与油砂山山前洪积扇根部“醒目的”宽约15m、高约1.0m

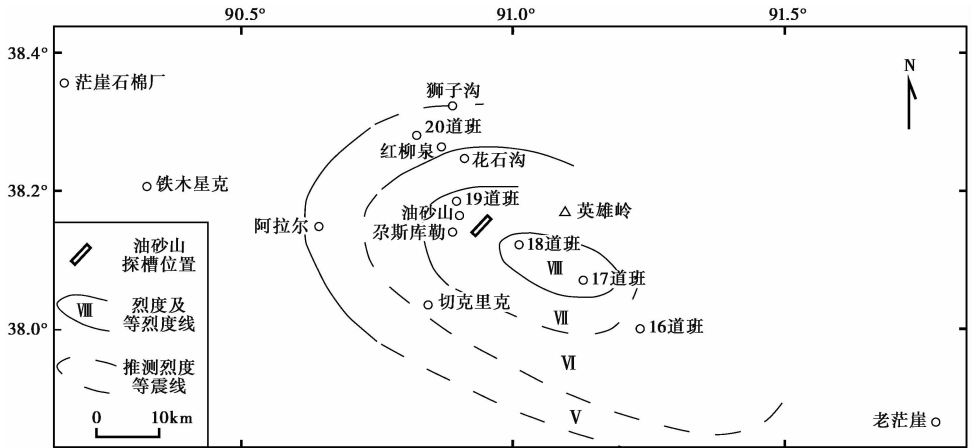


图 7 1977 年芒崖 $M_{6.4}$ 地震烈度等震线图

Fig. 7 Isoseismal map of the 1977 Mangya $M_{6.4}$ earthquake.

烈度等震线及地点据《陕甘宁青四省(区)强地震目录(公元 1177 年—公元 1982 年)》

横切洪积扇的挤压鼓包,及探槽南西部近地表揭露的 2 条次级破裂相关联。NE 向的裂缝可能是地震产生的共轭破裂。由此可见,1977 年 1 月 2 日青海芒崖 $M_{6.4}$ 地震应该是发生在该断裂上,但目前获得的资料还不能确定它就是探槽中揭露到的最新 1 次事件,不过也不能排除与该事件有关。

通过前文的分析可以看出,探槽揭露了至少 2 次构造事件,较新的 1 次事件 II 错断了层②底部的侵蚀面,垂直断距约 0.25m。在近地表形成了 2 个次级的顺层剪切断层,使得地层弯曲上翘,在地表形成了挤压鼓包。事件发生在距今 500a 以来,但这次事件与 1977 年芒崖西北发生的 $M_{6.4}$ 地震之间的联系仍不明确。较老的事件 I 发生在侵蚀面之前,被错断地层之后,距今 1 000~4 000a 之间。地层①发生了明显错断,事件发生以来总的垂直断距约为 0.80m,减去最新 1 次事件 II 的垂直断距约 0.25m,则事件 I 的垂直断距约为 0.55m。地层①顶部的侵蚀面对事件 I 的年龄限定和事件 I 是否包含多次事件的判定有所影响。

3.2 关于晚第四纪活动速率

油砂山断层往西向盆地内扩展尚未出露地表,隐伏活动使得晚第四纪地貌面褶皱变形,在地表形成长约 5.0km、宽约 320m 的陡坡带,同构造沉积地层的年龄 (57.87 ± 2.51) ka 表明至少晚更新世中晚期以来油砂山断层已在该地表迹线上持续活动,同时也暗示在该迹线上开挖的油砂山探槽揭露到了油砂山主断层。

陡坎上、下盘的应变标志面相互平行且近于水平,因而可以忽略因断层上、下盘应变标志面倾斜对垂直活动速率计算的影响 (Thompson *et al.*, 2002)。根据褶皱陡坎的垂直高度 (22 ± 3.2) m 和褶皱陡坎变形的起始年龄 (57.87 ± 2.51) ka,直接求得断层垂直方向上的活动速率为 (0.38 ± 0.06) mm/a。沿油砂山断裂地表迹线距褶皱陡坎剖面约 4.6km 处探槽揭露的断层倾角约为 17° ,而一般大陆内部逆冲断层倾角 $\leq 30^\circ$ (McCalpin, 2009),根据简单的几何关系可知断层的水平缩短速率约为垂直活动速率的 2~3 倍。与该区现今 3 个 GPS 站点的相对速率 1.8~3.5mm/a 相比较表明,油砂山断裂是该区非常重要的 1 条活动的逆冲断裂,在调节区域构造变形上起到了重要的作用。

4 结论

通过以上研究,得到以下结论:

(1)油砂山断裂是1条全新世活动的逆冲断裂,盆地内的褶皱陡坎表明至少晚更新世中晚期以来油砂山断层在同一地表迹线上持续活动。油砂山探槽揭露到的断层面产状为 $N62^{\circ}W/NE\angle 17^{\circ}$ 。探槽揭露到了至少2次构造事件,较新的1次事件II发生在距今500a以来,垂直断距约0.25m,目前获得的资料还不能确定它就是1977年茫崖西北的 $M6.4$ 地震,但也不能排除与该地震有关。较老的事件I发生在距今1000~4000a之间,垂直断距约0.55m。事件发生后的侵蚀作用影响了事件I年龄的限定和事件I确切次数的判定。

(2)油砂山断裂晚更新世中晚期以来的垂直活动速率约为 $(0.38\pm 0.06)\text{mm/a}$,与该区GPS站点的相对速率相比较表明,油砂山断裂是该区非常重要的1条全新世活动的逆冲断裂,在调节区域构造变形上起到了重要作用。

致谢 审稿专家在成文过程中提出了宝贵的建议;野外工作中得到了茫崖行委地震局、海西蒙古族藏族自治州地震局工作人员的帮助;研究工作得到了二测中心王庆良研究员和甘肃省地震局袁道阳研究员的指点;在此一并表示感谢!

附录:

文中数据的误差均为标准差(标准误差);即假设数据的误差符合正态分布,置信区间为 σ 。数据如果是通过四则运算得出的,其误差则是通过误差传播公式计算得到的。

(1)一般形式的误差传播公式:

当原函数 $Z=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 时,假设 x_1, x_2, \dots, x_n 各自独立,其中 x_1, x_2, \dots, x_n 的观测结果和误差表示为

$$x_1 = \bar{x}_1 + \delta_1, x_2 = \bar{x}_2 + \delta_2, \dots, x_n = \bar{x}_n + \delta_n$$

Z 的标准误差公式则为

$$\delta_z = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \delta_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \delta_n^2} \quad (\text{A1})$$

(2)当原函数 $f(x, y) = x/y$ 时,相应的误差公式为

$$\delta_z = \pm \sqrt{\frac{1}{y^2} \delta_x^2 + \frac{x^2}{y^4} \delta_y^2} \quad (\text{A2})$$

参 考 文 献

- 陈宣华,党玉琪,尹安,等. 2010. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化 [M]. 北京:地质出版社: 1—365.
- CHEN Xuan-hua, DANG Yu-qi, YIN An, *et al.* 2010. Basin-Mountain Coupling and Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Adjacent Orogenic Belts [M]. Geological Publishing House, Beijing: 1—365 (in Chinese).
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图 [CM]. 北京:地震出版社.
- DENG Qi-dong. 2007. Map of Active Tectonics in China [CM]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

- 顾功叙. 1984. 中国地震目录(公元 1970—1979 年)[Z]. 北京:地震出版社: 1—344.
- GU Gong-xu. 1984. Catalogue of Chinese Earthquakes(1970—1979 A.D.)[Z]. Seismological Press, Beijing: 1—344 (in Chinese).
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 陕甘宁青四省(区)强地震目录(公元前 1177 年—公元 1982 年)[Z]. 西安: 陕西科学技术出版社: 1—170.
- Earthquake Research Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau. 1985. Catalogue of Strong Earthquakes in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai Province(Zone)(1177 B.C.—1982 A.D.)[Z]. Science and Technology Press of Shaanxi, Xi'an: 1—170(in Chinese).
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. 地学前缘, 13(4): 59—79.
- LI Hai-bing, YANG Jing-sui, XU Zhi-qin, *et al.* 2006. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau [J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 59—79(in Chinese).
- 李林林, 郭召杰, 管树巍, 等. 2015. 柴达木盆地西南缘新生代碎屑重矿物组合特征及其古地理演化[J]. 中国科学(D辑), 45(6): 780—798.
- LI Lin-lin, GUO Zhao-jie, GUAN Shu-wei, *et al.* 2015. Heavy mineral assemblage characteristics and the Cenozoic paleogeographic evolution in southwestern Qaidam Basin [J]. Science China(Ser D), 58(6): 859—875.
- 柳祖汉, 吴根耀, 杨孟达, 等. 2006. 柴达木盆地西部新生代沉积特征及其对阿尔金断裂走滑活动的响应[J]. 地质科学, 41(2): 344—354.
- LIU Zu-han, WU Gen-yao, YANG Meng-da, *et al.* 2006. Sedimentary features of the Cenozoic in the western Qaidam Basin: response to strike-slipping of the Altun fault [J]. Chinese Journal of Geology, 41(2): 344—354(in Chinese).
- 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 等. 2015. 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, 31(12): 3701—3712.
- PAN Jia-wei, LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, *et al.* 2015. Tectonic responses in the Qaidam Basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh Fault [J]. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3701—3712(in Chinese).
- 冉勇康, 陈立春, 沈军, 等. 2007. 乌鲁木齐西山断裂组与地表破裂型逆断层古地震识别标志[J]. 地震地质, 29(2): 218—235.
- RAN Yong-kang, CHEN Li-chun, SHEN Jun, *et al.* 2007. Xishan Fault group near Urumqi City and paleoearthquake identification on reverse fault [J]. Seismology and Geology, 29(2): 218—235(in Chinese).
- 王桂宏, 李永铁, 张敏, 等. 2004. 柴达木盆地英雄岭地区新生代构造演化动力学特征[J]. 地学前缘, 11(4): 417—423.
- WANG Gui-hong, LI Yong-tie, ZHANG Min, *et al.* 2004. Cenozoic dynamics characteristics of tectonic evolution in Yingxiongling(YL)area in Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 11(4): 417—423(in Chinese).
- 吴磊, 肖安成, 汪立群, 等. 2012. 阿尔金断裂中段南侧 EW 向隆起的形成及对阿尔金山新生代隆升机制的启示[J]. 中国科学(D辑), 42(12): 1863—1876.
- WU Lei, XIAO An-cheng, WANG Li-qun, *et al.* 2012. EW-trending uplifts along the southern side of the central segment of the Altyn Tagh Fault, NW China: insight into the rising mechanism of the Altyn Mountain during the Cenozoic [J]. Science China(Ser D), 55(6): 926—939.
- 徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓, 等. 2016. 活动断层避让相关问题的讨论[J]. 地震地质, 38(3): 477—502. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2016.03.001.
- XU Xi-wei, GUO Ting-ting, LIU Shao-zhuo, *et al.* 2016. Discussion on issues associated with setback distance from active fault [J]. Seismology and Geology, 38(3): 477—502(in Chinese).
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. 地震地质, 24

(4): 470—483. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2002.04.001.

- XU Xi-wei, YU Gui-hua, MA Wen-tao, *et al.* 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault [J]. *Seismology and Geology*, 24(4): 470—483 (in Chinese).
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚. 2001. 青藏高原北部的碰撞造山及深部动力学: 中法地学合作研究新进展 [J]. *地球学报*, 22(1): 5—10.
- XU Zhi-qin, Yang Jing-sui, Jiang Mei. 2001. Collision-Orogeny of the northern Qinghai-Tibet Plateau and its deep dynamics [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 5—10(in Chinese).
- 尹安, 党玉琪, 陈宣华, 等. 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建: 基于地震剖面的解释 [J]. *地质力学学报*, 13(3): 193—211.
- YIN An, DANG Yu-qi, CHEN Xuan-hua, *et al.* 2007. Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam Basin: evidence from seismic profiles [J]. *Journal of Geomechanics*, 13(3): 193—211(in Chinese).
- 于福生, 王彦华, 李学良, 等. 2011. 柴达木盆地狮子沟-油砂山构造带变形特征及成因模拟 [J]. *大地构造与成矿学*, 35(2): 207—215.
- YU Fu-sheng, WANG Yan-hua, LI Xue-liang, *et al.* 2011. Deformation characteristics and genesis simulation of the Shizigou-Youshashan Structural Belt in Qaidamu Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 207—215(in Chinese).
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元1912—1990年, $M_s \geq 4.7$) [Z]. 北京: 中国科学技术出版社: 1—637.
- Division of Disaster Mitigation, China Earthquake Administration. 1999. Catalogue of Chinese Present Earthquakes (1912—1990A.D., $M_s \geq 4.7$) [Z]. China Science and Technology Press, Beijing: 1—637(in Chinese).
- Avouac J P, Tapponnier P. 1993b. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 20(10): 895—898.
- Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, *et al.* 1993a. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6755—6804.
- Chen W S, Lee K J, Lee L S, *et al.* 2007b. Paleoseismic evidence for coseismic growth-fold in the 1999 Chichi earthquake and earlier earthquakes, central Taiwan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(3): 204—213.
- Chen Y G, Lai K Y, Lee Y H, *et al.* 2007a. Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(B3): B03S02.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, *et al.* 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan plateau inferred from GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(B8): B08416.
- Hardy S, Ford M. 1997. Numerical modeling of trishear fault propagation folding [J]. *Tectonics*, 16(5): 841—854.
- McCalpin J P. 2009. Paleoseismology [M]. 2nd ed. Academic Press, New York: 1—613.
- Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, *et al.* 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(3-4): 382—383, 387—403.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Science*, 294(5547): 1671—1677.
- Thompson S C, Weldon R J, Rubin C M, *et al.* 2002. Late quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(B9): ETG 7-1—ETG7—32.
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, *et al.* 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257—1295.

PALEOSEISMOLOGY AND LATE QUATERNARY SLIP RATE OF THE YOUSHASHAN FAULT AT SOUTHWESTERN MARGIN OF Q Aidam Basin

XU Jian-hong^{1,2)} HUI Xu-hui¹⁾ CHENG Hong-bin¹⁾
ZHANG Xiao-liang¹⁾ SHANG Si-qi¹⁾

1) *The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xian 710054, Shaanxi, China*

2) *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

Abstract

The Youshashan Fault lies in the south flank of Yingxiongling anticline, southwestern margin of Qaidam Basin. The Yingxiongling anticline is one of the most active neotectonics, situated at the front of folds expanding southward in the Qaidam Basin. Research on the paleoseimology and Late Quaternary slip rate of this fault is important for hazard assessment and understanding tectonic deformation in this area. We excavated a 27-m-long trench across the Youshashan fault where a pressure bridge formed on the Holocene alluvial fans, measured a profile of the fold scarp created by the fault west of the Youshashan mountain, and collected several samples of finer sands for luminescence dating. Analysis of these data shows that (1) The Youshashan Fault is a Holocene active feature. The fold scarp in the basin indicates that this fault has been active along a same surface trace since at least mid-late Pleistocene. At least two paleoseismic events are revealed by trenching, both occurred in Holocene. The latest event II in the trench happened after 500a. The current information fails to confidently support that it is the 1977 Mangya $M6.4$ earthquake, but cannot excludes the possibility of it is related to this earthquake. The other event I occurred about between 1 000a to 4 000a. Erosion after the event I prevents us to constrain the event age and to identify more events further. (2) The vertical slip rate of the Youshashan fault is about (0.38 ± 0.06) mm/a since mid-late Pleistocene. Comparing with relative speeds of GPS sites across the Yingxiongling anticline suggests that the Youshashan fault is an important structure which is accommodating crustal shortening in this region.

Key words southwestern margin of Qaidam Basin, Youshashan fault, paleoseimology, slip rate, folding scarp

[作者简介] 许建红,男,1983年生,2012年于中国地震局地壳应力研究所获固体地球物理学硕士学位,工程师,主要从事活动构造研究、地震安全性评价等工作,电话:18740461518, E-mail: xujianhongmailbox@163.com。