

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2017.05.001

榆木山北缘断裂现今构造活动特征 及其对青藏高原北东扩展的构造地貌响应

陈 干¹⁾ 郑文俊^{2)*} 王旭龙³⁾ 张培震^{1,2)} 熊建国²⁾
俞晶星^{1,4)} 刘兴旺⁵⁾ 毕海芸¹⁾ 刘金瑞¹⁾ 艾 明¹⁾

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) 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

3) 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

4) 牛津大学地球科学系, 英国牛津 OX13AN

5) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

摘 要 榆木山北缘断裂位于祁连山逆冲断裂带中部, 是榆木山隆起与河西走廊之间的分界断裂。探究榆木山北缘断裂的构造活动, 有助于进一步了解祁连山向 N 的扩展过程以及青藏高原向 NE 方向推挤的机制。文中主要从断层滑动速率、古地震活动习性和构造变形 3 个方面总结了榆木山地区近 20 多年以来的研究成果。通过遥感影像解译、野外地质调查、断错位移测量及地貌面年龄测定等方法 and 手段, 估算了榆木山北缘断裂典型位错点的逆冲滑动速率为 $(0.55 \pm 0.15) \text{ mm/a}$; 左旋滑动速率为 $(0.95 \pm 0.11) \text{ mm/a}$ 。认为前人提出的“骆驼城陡坎”并非断层活动的产物, 而是古代引水工程或水利灌溉工程的遗迹, 也就是说它不是公元 180 年表氏地震的地表破裂。通过 DEM 剖面所反映的山体形态, 结合断裂各项特征, 认为榆木山隆起是祁连山向 N 推挤的结果, 断裂活动目前仍集中在榆木山北侧, 山体的形态受断层扩展控制, 山脉的扩展是 1 个垂向和侧向的过程, 晚新生代以来榆木山持续隆升。

关键词 断层滑动速率 公元 180 年表氏地震 榆木山北缘断裂 高原扩展 青藏高原东北缘

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)05-0871-18

0 引言

印度板块和欧亚板块的碰撞导致了青藏高原的形成, 高原的隆升造就了欧亚大陆的构造格局 (Molnar *et al.*, 1975, 1993, 2009; Tapponnier *et al.*, 1982, 2001; Harrison *et al.*, 1992; Molnar, 2005; Clark *et al.*, 2010; Clark, 2012; Yuan *et al.*, 2013), 同时对亚洲乃至全球的气候和环境也产生了巨大的影响 (刘东生等, 1998; 安芷生等, 1998; 施雅风等, 1999; An *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2008; Molnar *et al.*, 2010; Miao *et al.*, 2012; 脱世博等, 2013; 张培震等, 2013, 2014; 赵秀丽等, 2015)。祁连山和河西走廊位于青藏高原构造变形和

[收稿日期] 2017-03-23 收稿, 2017-06-18 改回。

[基金项目] 国家自然科学基金 (41590861, 41372220, 41172194) 与公益性行业科研专项经费项目 (201408023) 共同资助。

* 通讯作者: 郑文俊, 男, 教授, E-mail: zhengwenjun@mail.sysu.edu.cn。

向 NE 推挤扩展的最前缘,河西走廊内部及两侧对构造变形和构造活动较为敏感,是现今构造运动和地震活动最为强烈的地区之一(Tapponnier *et al.*, 1990, 2001; 国家地震局地质研究所等, 1993; Gaudemer *et al.*, 1995; Meyer *et al.*, 1998; Hetzel *et al.*, 2004a; Hetzel, 2013; Zheng *et al.*, 2013a, b, c; 张培震等, 2014; 郑文俊等, 2016), 能很好地记录和保存高原扩展和边界构造活动的过程和特征(Palumbo *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2013b, c; 张培震等, 2014; 郑文俊等, 2016; Wang *et al.*, 2016a, b)。因此,河西走廊地区是研究整个青藏高原东北缘构造变形特征的 1 个窗口,对认识青藏高原的构造变形机制有着特别重要的意义。

河西走廊地处青藏高原东北部,位于阿拉善隆起区与北祁连加里东褶皱带之间,走向为 NWW,全长约 1 000 多 km,西起阿尔金断裂北部的宽滩山,向 E 延伸到景泰县(潘宏勋等, 2000; 郑文俊, 2009)(图 1)。由于其特殊的地理位置,走廊内部发育大量晚第四纪活动的逆冲断裂、走滑断裂和活动褶皱(张培震等, 2014; 郑文俊等, 2016)。根据走廊内部的构造变形特征,可以发现整个河西地区都正在遭受地壳缩短和左旋剪切作用(Hetzel *et al.*, 2004a; Palumbo *et al.*, 2010; Hetzel, 2013; Zheng *et al.*, 2013b, c; Wang *et al.*, 2016a, b),并且伴随着大量 7 级以上地震(Tapponnier *et al.*, 1990; 张培震等, 2003; 郑文俊等, 2004, 2016; 曹娜, 2010; 刘兴旺等, 2011)。从断裂构造的分布上看,河西走廊和祁连山总体上被阿尔金断裂和海原-祁连断裂等大型活动断裂带所围限,其间还发育了众多的 NWW 向的活动构造带,包括党河南山断裂,昌马-俄博断裂、祁连山北缘断裂(郑文俊等, 2016)。从地形上看河西走廊是 1 个大的山前压陷性盆地,而盆地内部又被一系列 NNW-NW 向的次级断裂控制的隆起分割成几个小的次级盆地,例如酒泉盆地被文殊山隆起和嘉峪关断裂分割成酒东和酒西 2 个次级盆地,酒东盆地和民乐盆地则被榆木山和榆木山断裂所分割,民乐盆地和武威盆地则又被大黄山分割(国家地震局地质研究所等, 1993)。

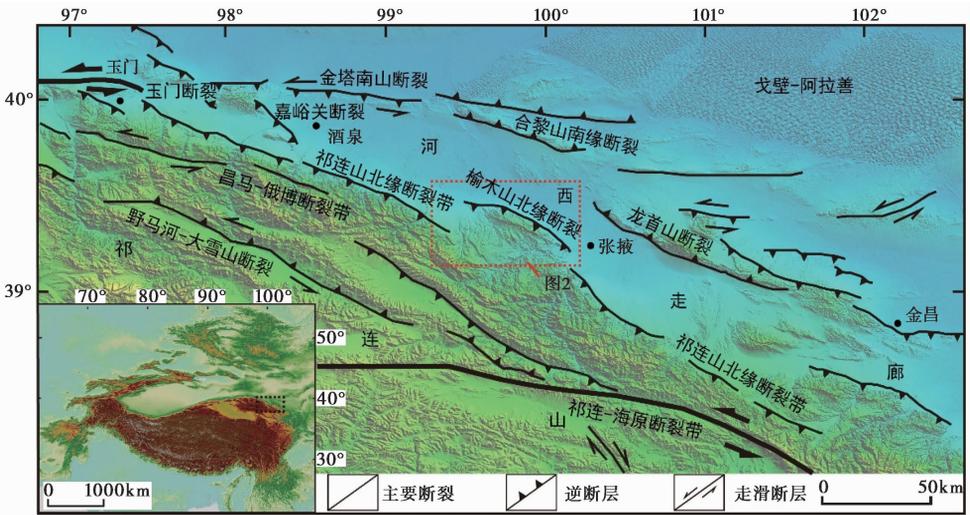


图 1 祁连山及河西走廊活动断裂分布图(断层资料来源于 Yuan *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2013b)

Fig. 1 The distribution of active faults in Qilian Mountain and Hexi Corridor.

以往针对河西走廊南侧祁连山地区的研究主要集中在祁连山北缘断裂上(Tapponnier *et al.*, 1990; 国家地震局地质研究所等, 1993; Meyer *et al.*, 1998; 边庆凯等, 2001; Hetzel *et al.*,

2004b; 郑文俊等, 2004; Fang *et al.*, 2005)。榆木山北缘断裂作为祁连山北缘断裂的重要组成部分, 前人已经开展了许多研究, 但是之前的研究由于技术条件的限制、研究重点的不同等原因, 研究结果存在着不小的分歧, 因而针对榆木山北缘断裂的深入研究, 有助于我们进一步了解祁连山北缘断裂的扩展特征, 也有助于更好地理解青藏高原向 NE 扩展的机制。

本文通过对榆木山北缘断裂开展遥感影像解译、野外地质调查、断错位移测量及地貌面年龄测定, 获取了榆木山北缘断裂典型位错点的水平和垂直滑动速率, 通过野外考察讨论了争议较大的“骆驼城陡坎”及 180 年表氏地震的问题, 利用构造地貌的方法探讨了榆木山构造变形的特征及模式。

1 榆木山北缘断裂的研究现状

榆木山北缘断裂是榆木山隆起与河西走廊拗陷盆地的分界断裂, 它由多条次级断裂组成, 最新的逆冲断层位于榆木山北缘, 全长约 65km(图 2), 总体产状为 $275^{\circ}\sim 300^{\circ}/\text{SW} \angle 43^{\circ}\sim 61^{\circ}$ (国家地震局地质研究所等, 1993; 边庆凯等, 2001; 金卿, 2011), 按断错地貌特征及活动习性可分为 3 段, 由东南向西北分别为梨园口—排路口段(东段)、排路口—芦泉河段(中段)和芦泉河—李家山子段(西段)(边庆凯等, 2001)。前人对于榆木山北缘断裂及周边盆地已经进行了很多细致的工作, 在断层滑动速率、古地震活动习性和构造变形 3 个方面取得了一定进展。

在滑动速率方面, 本文总结了大部分前人的研究结果(表 1)。从表 1 中可以看到榆木山北缘断裂整段的逆冲滑动速率在 $0.3\sim 1.9\text{mm/a}$ 的范围内。东段和西段的滑动速率明显比中段的滑动速率低, 呈现中间高两边低的特点。左旋走滑速率的范围在 $1.11\sim 1.72\text{mm/a}$ 之间。前人的滑动速率定量结果表明, 该断裂具有逆冲兼左旋走滑特征, 反映高原扩展前缘的典型运动学性质。

在古地震的研究上, 则存在着不小的争议, 重点的争议在于榆木山北缘断裂是否与 180 年表氏地震有关。李玉龙等(1988)认为榆木山断裂为逆掩断层, 并判断其最新的古地震事件发生在 $1\sim 2$ 万 a 前, 因而在全新世断层无明显活动。Tapponnier 等(1990)认为榆木山北缘断裂是 180 年表氏地震的发震断裂, 但没有明确的古地震证据和地貌证据。边庆凯等(2001)通过断错地貌调查、探槽古地震等研究认为, 榆木山北缘断裂晚第四纪活动强烈, 在距今 $8\ 000\sim 13\ 000\text{a}$ 间有过 3 次古地震事件, 没有发现 $8\ 000\text{a BP}$ 以来的古地震事件痕迹。陈柏林等(2006)对榆木山北缘断裂北侧约 6km 的高台车站断裂(骆驼城陡坎)进行了研究, 通过热释光的测年结果, 得出 5 次构造事件, 分别是距今 $3.2\sim 4.0\text{ka}$ 、 $6.0\sim 7.0\text{ka}$ 、 $9.5\sim 11.0\text{ka}$ 、 $12.8\sim 14.3\text{ka}$ 、 $18\sim 19\text{ka}$, 认为该断裂的最新 1 次活动对应着 180 年表氏地震。曹娜(2010)对 180 年表氏地震进行了详细的研究, 支持郑文俊(2009)提出的合黎山南缘地表破裂带为 180 年表氏地震发震断层。金卿(2011)通过探槽的开挖确定了榆木山北缘断裂的 4 次古地震事件, 分别为事件 I 距今 $(4.066\pm 0.086)\text{ka}$, 事件 II 距今 $(6.107\pm 0.082)\text{ka}$, 事件 III 距今 $(8.382\pm 0.074)\text{ka}$, 事件 IV 距今 10.29ka 或更早, 指出该地区的古地震间隔时间约为 $2\ 000\text{a}$, 认为该断裂最新活动时间与 180 年表氏地震并不吻合。

对于榆木山地区的构造运动, 前人主要通过榆木山周缘地层间的接触关系、褶皱变形、地形地貌以及周缘沉积盆地的特征开展研究。早期研究认为榆木山是燕山运动时期开始隆升,

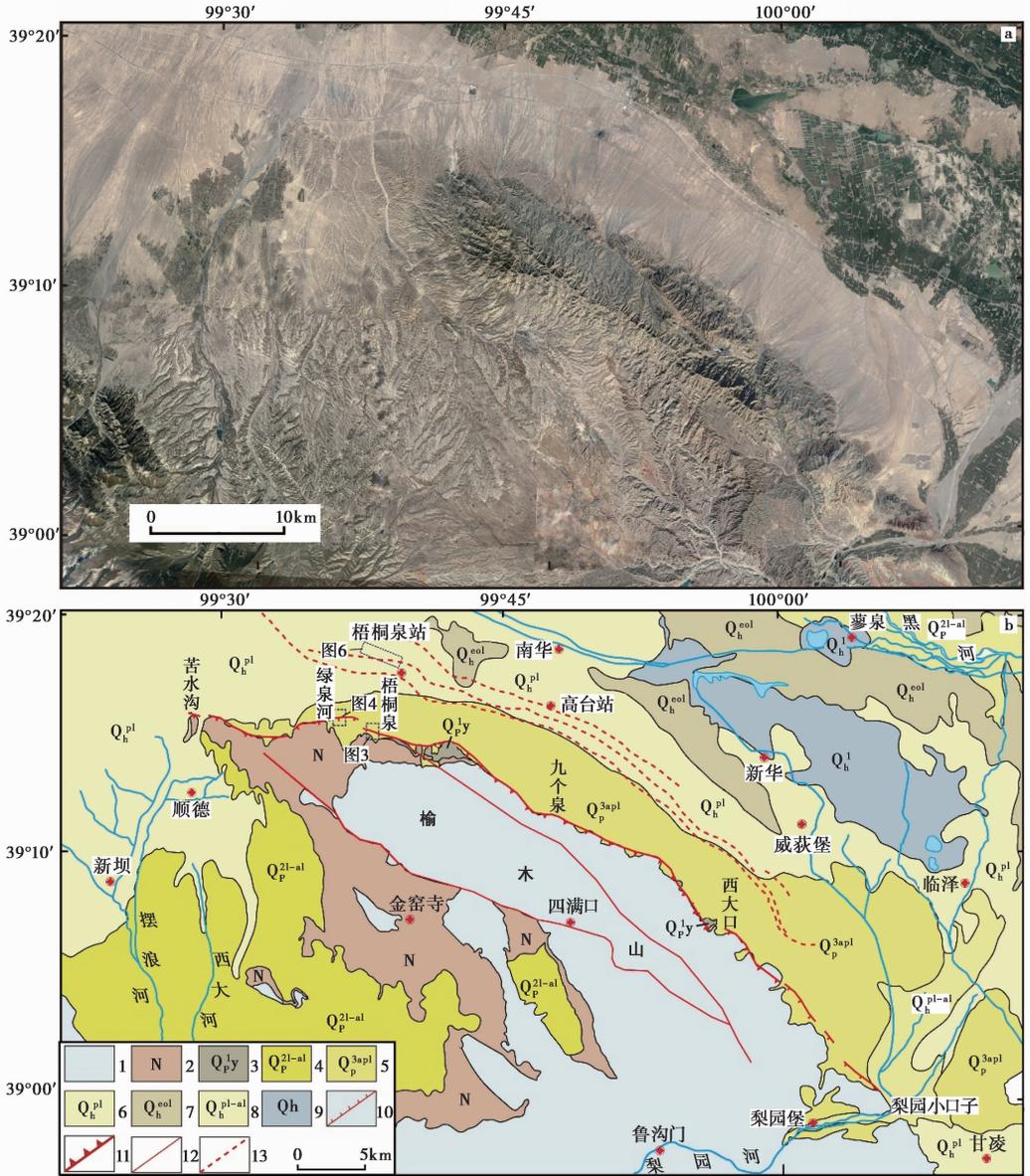


图 2 榆木山北缘断裂展布图

Fig. 2 The distribution of the northern Yumushan active fault.

a 为 Google earth 影像图; b 为地质构造简图(修改自郑文俊,2009): 1 志留系; 2 古近-新近系; 3 下更新统玉门砾岩; 4 中更新统冲洪积砂砾石层; 5 上更新统冲洪积砂砾石层; 6 全新统洪积砂砾石; 7 全新统风积砂; 8 全新统冲积洪积砂砾石; 9 全新统湖积化学沉积层; 10 断层陡坎; 11 逆冲断层; 12 其他断层; 13 前人判定的“断层陡坎”。

b 中的蓝色虚线方框为本次重点研究的区域

逐渐形成了分割酒东盆地和民乐盆地的断隆(王多杰等, 1990), 而李玉龙等(1988)则认为榆木山可能是 1 个向 N 推挤的推覆体。潘宏勋等(2000)同样提出了对榆木山为断隆的质疑, 认为榆木山的周缘被逆冲断层所围限, 断隆的观点难以解释榆木山的隆起。另外其通过沉积盆地

表 1 榆木山北缘断裂滑动速率统计表
Table 1 Slip rates of the northern Yumushan Fault

滑动速率类别	东段	中段	西段	资料来源
		0.4~1.9(总体)		Tapponnier 等, 1990
逆冲滑动速率 /mm·a ⁻¹	0.86	1.41	0.79	边庆凯等, 2001
		(0.8±2.2)		郑文俊, 2009
	0.4	(0.48±0.15)~(0.77±0.10)		Palumbo 等, 2010
	0.28	1.04		金卿, 2011
左旋走滑速率 /mm·a ⁻¹		(1.4±2.2)(总体)		郑文俊, 2009
	1.11	1.72	1.69	金卿, 2011

的分析,认为榆木山是古近-新近纪逆冲推覆到中、新生代盆地之上的 1 个推覆体,形成了如今分割酒东、张掖-民乐盆地的构造格局。而针对榆木山的隆起时间,不同的学者也有着不同看法和认识。Tapponnier 等(2001)提出 1Ma BP 为榆木山的变形隆升时间,这仅是通过估算得到的,没有确切的年龄数据支持。Palumbo 等(2010)利用洪积地貌面的年龄和榆木山的构造地貌特征,估算了山体的隆升速率,并利用残留流域盆地计算剥蚀速率,反推出了榆木山的隆起时间大概在 3.7Ma BP 左右。刘栋梁等(2012)通过磁性地层学的方法,对榆木山北缘的玉门砾岩开展研究,认为榆木山的隆起时间不晚于 3.58Ma BP。可以看到更多的证据证明了榆木山的隆起大概在 3.6~3.8Ma BP 左右,这个观点目前也得到了大部分学者的认同。而对于榆木山北缘断裂的扩展过程不同学者也有不同的认识,边庆凯等(2001)发现榆木山隆起卷入褶皱的地层由东向西越来越新,认为这反映了活动构造由东向西的发展过程。Palumbo 等(2010)根据地形剖面、断层滑动速率、古流域以及风口的研究提出了榆木山的隆升是 1 个侧向和垂向生长的过程。张忱(2012)通过面积高度分析(HI 值)得出榆木山北坡比南坡侵蚀更为强烈,认为这是断裂由南往北逐渐变新且活动性逐渐减弱导致的。陈柏林等(2007)对榆木山北缘断裂的研究表明榆木山在晚更新世以来分别在距今 13.1~13.3ka 和 3~5ka 发生过 2 次新构造运动,但没有给出具体的构造作用模式。

2 榆木山断裂西段典型断错地貌特征和滑动速率

2.1 地貌形态及陡坎的测量

通过野外考察,发现榆木山北缘断裂自西向东错断了多个不同时代的地貌面(图 2),并且陡坎的高度也各不相同,东段陡坎可达 10~15m,在高的洪积扇上陡坎高度可达 10m,而在低的洪积扇上陡坎高度为 2~5m 不等(郑文俊, 2009; Palumbo *et al.*, 2010)。由于山体在第四纪以来的强烈隆升,山前的洪积扇和冲沟切割严重,因此断层陡坎保留不连续。通过野外调查和对比,选取了断层陡坎连续性较好的西段,对梧桐泉—绿泉河一带的断层陡坎高度以及冲沟的水平位移量进行了精确的测量,用以估算断层西段晚第四纪以来的逆冲和滑动速率(图 3, 4)。

借助卫星影像,发现在梧桐泉一带发育了断续约 2km 的断层陡坎(图 3)。其中,梧桐泉西侧,洪积扇保留较完整且断层陡坎连续。利用差分 GPS 测量,陡坎的高度为 8.5~10.9m,但是受构造活动和剥蚀的影响,陡坎基本上被夷平而形成了宽 200~300m 的断层陡坎斜坡

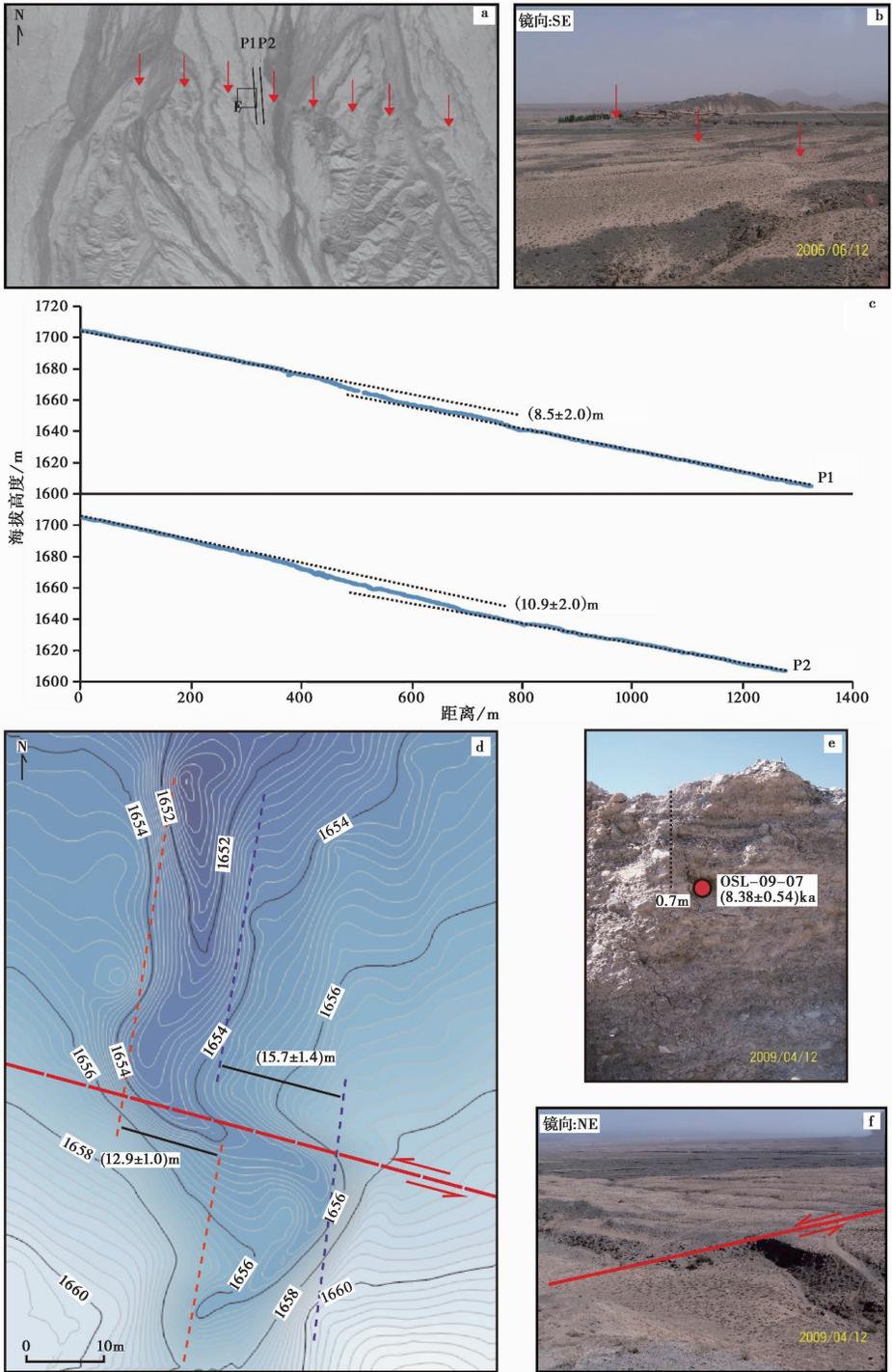


图 3 梧桐泉附近地貌及断层断错

Fig. 3 Landforms, scarp profiles and dislocation of faults at Wutongquan.

- a 黑白航空照片, 红色箭头为陡坎位置, 黑线为测量位置;
- b 宽缓的地貌陡坎;
- c 陡坎剖面;
- d 冲沟左旋平面测量图;
- e 地貌面采样位置;
- f 冲沟位错

(图 3)。在洪积扇的东侧还发现冲沟的左旋水平位错, 并且保留了冲沟迁移的遗迹, 通过测量我们得到冲沟的水平位移量为 12~15m。另外, 在洪积扇剖面上埋深约 0.7m 的位置采集了 1 个光释光样品(OSL-09-07), 用以确定洪积扇的年龄, 结果为 $(8.38 \pm 0.54) \text{ ka}$ 。

在梧桐泉西北处 3km 左右的绿泉河冲沟东岸, 发育了约 1km 长的断层陡坎(图 4), 国家地震局地质研究所等(1993)在此处的探槽揭示了该断裂错断了除去顶部最新沉积以外的全部洪积砾石层, 有全新世活动的特征。通过测量 3 条剖面, 得到此处陡坎的高度为 2~3m。在此处洪积扇剖面上埋深约 0.25m 和 1m 的位置, 采集了 2 个光释光样品(OSL-09-08, OSL-09-09), 用以测定洪积扇的年龄, 其结果分别为 $(3.76 \pm 0.22) \text{ ka}$ 与 $(1.76 \pm 0.13) \text{ ka}$ 。

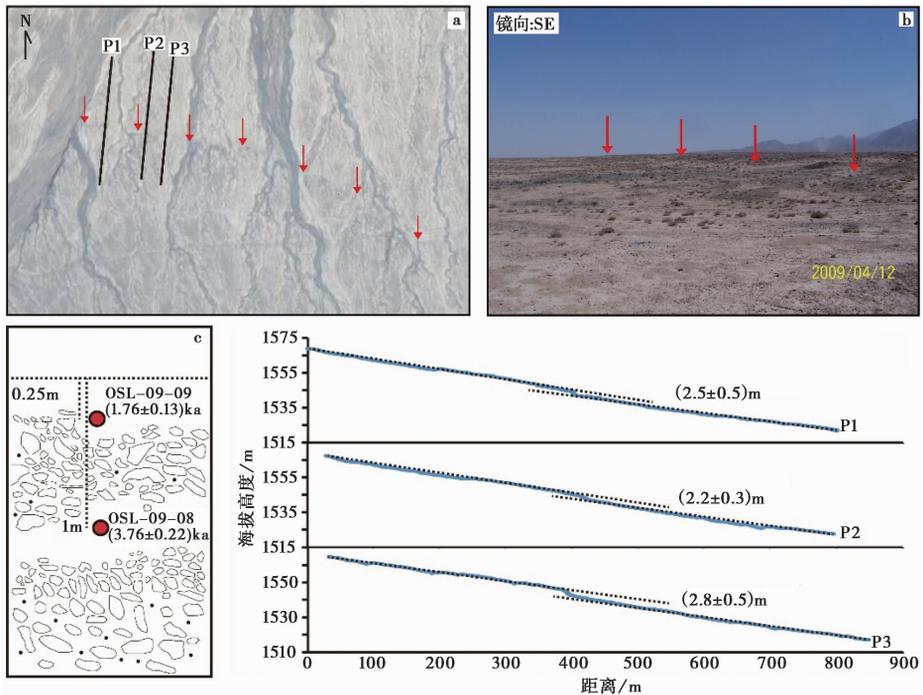


图 4 绿泉河地貌及断层陡坎

Fig. 4 Landforms and scarp profiles at Lvquan River.

a 黑白航空照片, 红色箭头为断层陡坎位置, 黑线为陡坎剖面测量位置;

b 洪积扇上的地貌陡坎; c 洪积扇采样手绘剖面; d 断层陡坎测量剖面

2.2 断层逆冲滑动速率和水平滑动速率的估算

通过对比梧桐泉附近断层陡坎和绿泉河附近断层陡坎的高度和被夷平程度可见, 梧桐泉附近断层陡坎明显较高, 并且被侵蚀夷平的程度也更深, 因此推断梧桐泉断层陡坎的年代应该老于绿泉河断层陡坎的年代。对于这 2 处的地貌面年龄的确定, 主要通过区域对比和前人给出的年龄进行推断。通过对洪积扇顶面砂层的测年结果显示为 $(8.38 \pm 0.54) \text{ ka}$ (OSL-09-07), 考虑到断层陡坎夷平过程中可能存在 2 次堆积, 因此这个年龄可能偏年轻, 不能代表地貌的形成和废弃年龄。Tapponnier 等(1990)根据地貌形态的对比, 认为梧桐泉处洪积地貌面的年龄为 1 万 a 左右, 通过对比断裂东段相同地貌面的年龄, 认为国家地震局地质研究所等(1993)所

给出的 15ka 的年龄更为接近该洪积扇的年龄。另外 Palumbo 等(2010)利用 ^{10}Be 测年方法,给出的该断裂中段的 T_1 地貌面年龄同样为 1.5 万 a,进一步证明了 1.5 万 a 为该处地貌面的年龄的合理性,因此本文也采用该年龄结果进行滑动速率的估算。而对于绿泉河陡坎所错断的洪积扇(相当于绿泉河 T_2 阶地),通过 OSL 测年得到的(OSL-09-08, OSL-09-09)年龄结果为 $(3.76 \pm 0.22)\text{ka}$ 、 $(1.76 \pm 0.13)\text{ka}$,可能是由于洪积扇上部有再次堆积的过程,测试出来年龄偏年轻。因此通过区域对比的方法,估算其形成年龄大约在 8 000a 左右,与边庆凯等(2001)和金卿等(2011)所给出的古地震事件相吻合,因此本文将 8 000a 作为计算滑动速率的上限年龄。综上所述利用陡坎的高度,冲沟水平错段的距离和地貌面的年龄计算出晚更新世以来,榆木山北缘断层西段的平均逆冲速率为 $(0.55 \pm 0.15)\text{mm/a}$; 平均左旋走滑速率为 $(0.95 \pm 0.11)\text{mm/a}$ (图 5)。

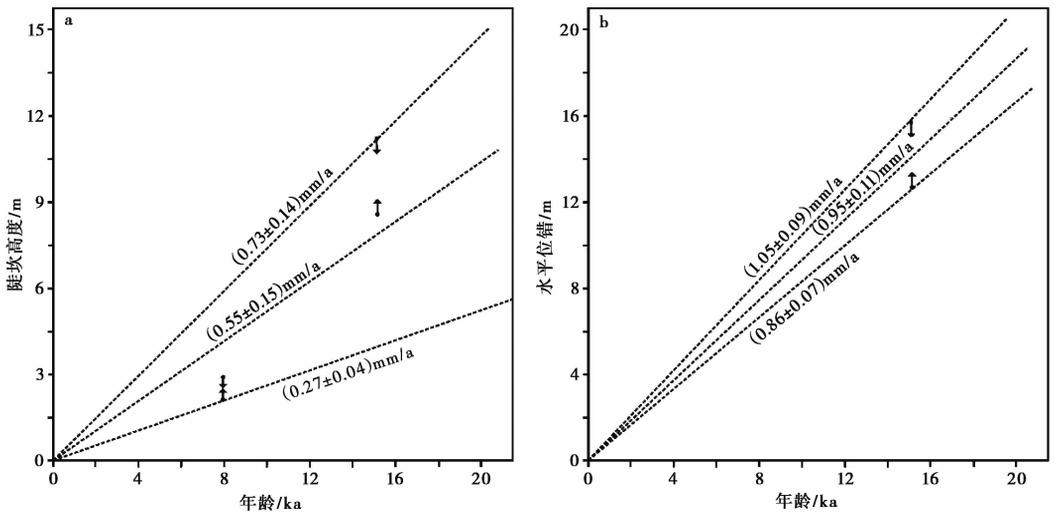


图 5 榆木山北缘断裂滑动速率

Fig. 5 Slip rates of the northern Yumushan active fault.

a 逆冲滑动速率; b 左旋滑动速率

3 “骆驼城陡坎”及公元 180 年表氏地震发震断裂探讨

陈柏林等(2006)将“骆驼城陡坎”命名为高台火车站断裂,列举了一系列“断层剖面”,用以证明榆木山北缘断裂最新活动断层应该位于此处,而且他们认为该断裂最新 1 次活动发生在距今 2.0~3.0ka 之间,与高台公元 180 年地震的发生时间是吻合的。同时 Tapponnier 等(1990)也推测,在盆地内部可能存在 1 条公元 180 年地震的地表变形陡坎,位置大概与“骆驼城陡坎”相吻合。但后期多项目工作成果对“骆驼城陡坎”提出了质疑(郑文俊等, 2009; 金卿, 2011)。

针对该陡坎是否为断层陡坎,一直存在着争议,最早 1:20 万区域地质图将其划为榆木山北缘断裂的最前缘断裂,由 3 条陡坎组成。而之后地震地质的调查结果和李玉龙等(1988)皆认为此处是水利工程的遗迹。Tapponnier 等(1990)对榆木山北缘断裂的研究认为,榆木山的隆起是第四纪以来构造运动的产物,同时认为榆木山北缘断裂的最前缘的“骆驼城陡坎”(断

裂)是公元 180 年表氏地震的发震断层。郑文俊等(2009)研究认为合黎山南缘的地表破裂可能是 180 年表氏地震断裂,榆木山北缘断裂北侧的“骆驼城陡坎”不是断层活动的产物,之后曹娜(2010)针对该地震进行了详细的史料考证并且金卿(2011)在榆木山北缘开挖了探槽,皆认同郑文俊等(2009)所提出的观点。为了验证该陡坎是否为地震陡坎,以及榆木山最新活动断裂带位于何处,对“骆驼城陡坎”开展了详细的野外调查工作。

在卫星影响图上清楚显示了 3 条连续的线性陡坎,而且它们大致平行于榆木山北缘断裂的山前断裂,切过了洪积扇的中部(图 2)。通过对影像的仔细观察可以发现,这 3 条陡坎向 E 延伸最终在榆木山东缘的梨园河口合并在一起,终止于梨园河出山口附近。陡坎越向 W 延伸,3 条陡坎之间的距离越远,在梧桐泉火车站附近陡坎还发生了向 N 的转弯,延伸进入盆地,最后消失在许三湾古城一带(图 2)。

对此我们带着疑惑进行了详细的野外调查。在梧桐泉火车站西边至骆驼城古城一带,发现了 1 条至今还存在的防洪坝,目的是为了防止洪水对农田和住房的破坏。另外,对于陈柏林等(2006)所研究的一些“断层剖面”也进行了详细的剖面调查和解释。图 6 是考察发现的典型剖面,这些剖面清楚地揭示了它们是水利工程的遗迹,而非断层作用产生。图 6(a1, a2)剖面位于梧桐泉火车站附近,其上部地层似乎发生了明显的错断,并且形成多个“崩积楔”,仔细观察后发现,“断层面”附近的砾石没有定向特征,两侧地层有穿插分布的特征,重点是其下部的层位中相当于中更新世的半胶结砂砾石层平整,没有发生断错,上部有“断错”迹象的地层堆叠在这一完整地层之上,“断错面”终止该层位之上,对剖面几个细粒层进行了光释光测年(OSL-09-06, OSL-09-05, OSL-09-04, OSL-09-03),其年龄自上而下分别是(4.63±0.33)ka、(5.48±0.36)ka、(3.84±0.26)ka、(4.38±0.34)ka。年龄杂乱,很可能是人为因素造成的。符合考古结果证实的西汉末年表氏县城引水工程的遗迹(李并成,2006),同时也说明了当时的河西走廊地区环境相对较好,农业较为发达。图 6(b1, b2)剖面可以明显看到防洪堤岸多次加高的遗迹,其下部的层位同样还是完好的。图 6c 的特征与图 a 类似,上部同样发育类似断层面的错断,但是下部的松散洪积砾石层完整连续。图 6d 中可以看到 1 个完整的水渠形态,由于洪水的后期填充,在其间发现沉积了相对细粒的沉积物,水渠下部的地层都很完整,无断错的迹象。

综合卫星影像及野外考察的研究结果认为,所谓的“骆驼城陡坎”并非断层的产物,而是古代引水工程或水利灌溉工程的遗迹,也就是说它不是公元 180 年表氏地震的“发震断层”,而榆木山北缘断裂的古地震研究结果也表明该断裂上不存在表氏地震地表破裂的证据,认同郑文俊等(2009)提出合黎山南缘断裂上的地震破裂遗迹可能是公元 180 年表氏地震产物。

4 基于 DEM 数据的榆木山隆起过程和模式的讨论

在榆木山周缘地貌早期的研究过程中,不同学者利用地层形态、断层陡坎、冲沟错断、构造热模拟等方法来讨论榆木山的隆升(李玉龙等,1988;王多杰等,1990;李有利等,1997;潘宏勋等,2000;边庆凯等,2001)。而随着科学技术的发展,开始有学者利用 DEM 数据来讨论山脉隆起的过程和模式(Meyer *et al.*, 1998; Hetzel *et al.*, 2004b; Palumbo *et al.*, 2010, 2011; Zheng *et al.*, 2013a; 庞建章等,2015)。DEM 剖面可以直观地表征山体的形态,因而可以被用以讨论构造运动对山体隆升的影响。Meyer 等(1998)曾提出不同规模的山脉,有着大致相同

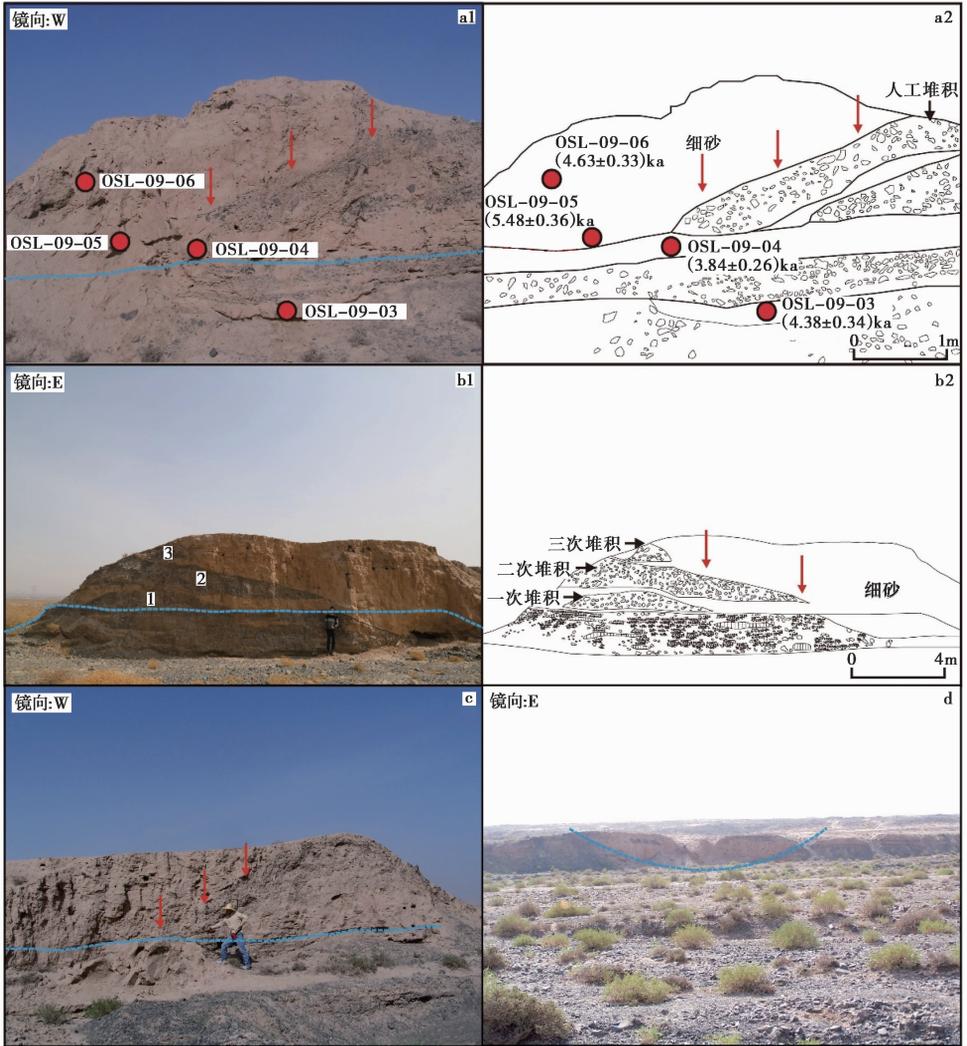


图 6 骆驼城陡坎不是断层陡坎的证据

Fig. 6 The evidence proving that the Camel city scarp is not the fault scarp.

a1 “断层面”两侧地层采集光释光样品, a2 剖面地层单元示意图; b1 古代防洪堤岸加高的证据(至少 3 次), 下部层位连续, b2 剖面地层单元示意图; c 上部表现断层面形态, 下部层位无错动; d 古代水渠的完整形态

的长宽比例。Hetzel 等(2004b)提出了 1 种断层扩展模式, 即在岩性一致的条件下, 逆冲断层的垂向位移 D 和长度 L 的比值 C 应该保持不变。并且他们选取了祁连山北缘 6 个受断层活动控制的山脉位置, 包括合黎山、龙首山、榆木山等进行验证, 并以合黎山为例, 验证了断层扩展主导山脉隆起的理论, 他们认为在祁连山北缘地带这种剥蚀速率小、活动构造发育的条件下隆起的年轻山脉的纵剖面形态与其提出的断层扩展理论有着良好的相关性。Zheng 等(2013a)通过对比合黎山南缘断裂各段的陡坎高度、滑动速率和 DEM 剖面形态, 发现它们之间确实有着很好的一致性, 认为断层的扩展过程主导了合黎山的隆升。

针对榆木山的地形剖面的研究, Palumbo 等 (2010) 对榆木山山脊的 DEM 高程剖面进行了分析, 认为榆木山剖面形态完全符合 Hetzel 等 (2004b) 所提出的断层扩展模式, 并且认为榆木山隆起也受到了逆冲断层活动的控制, 并利用风口、断层陡坎、古流域等一系列证据, 证明了榆木山垂向和侧向的隆升过程。庞建章等 (2015) 通过地形地貌、新生代地层的分布, 认为榆木山可能是由中部向东西两端扩展。前人对于山体隆升的讨论只利用了 1 条 DEM 剖面, 本文为了更加全面地理解榆木山的隆起过程与模式, 利用 SRTM-DEM 剖面, 提取多条不同位置的纵横高程剖面来探讨构造与地貌的关系。

本文共获取了 5 条垂直榆木山走向的 DEM 剖面, 3 条平行榆木山走向的 DEM 剖面。垂直剖面 (图 7b) 反映了山体向盆地内部逆冲的模式, 山体的西南侧为与榆木山海拔差别较小的相对平坦的高原面, 说明榆木山与南侧的祁连山是 1 个整体, 其隆起是祁连山向 N 推挤的结果。北侧海拔的急剧变化是断层调整高原边缘变形的 1 个主要地貌表现形式, 山脉的隆升和山前洪积扇面的平缓下降说明了断裂活动主要集中在榆木山北侧, 还没有向盆地内发生明显的迁移, 特别是山脉中部陡倾和洪积扇的截然分开说明断裂在新生代晚期仍继续以山脉隆升为主。另外结合前人的调查发现, 榆木山西南侧的新近纪地层缓倾, 侏罗纪与白垩纪地层受强烈挤压变形, 并且榆木山西端的古近-新近纪背斜及其与玉门砾岩间的角度不整合 (王多杰等, 1990; 国家地震局地质研究所等, 1993; 高锐等, 1995), 都说明新生代晚期是榆木山隆升变形的主要时期。平行于山脉走向的 3 条剖面 (图 7c) 皆反映出榆木山的地貌特征在沿走向的方向上近

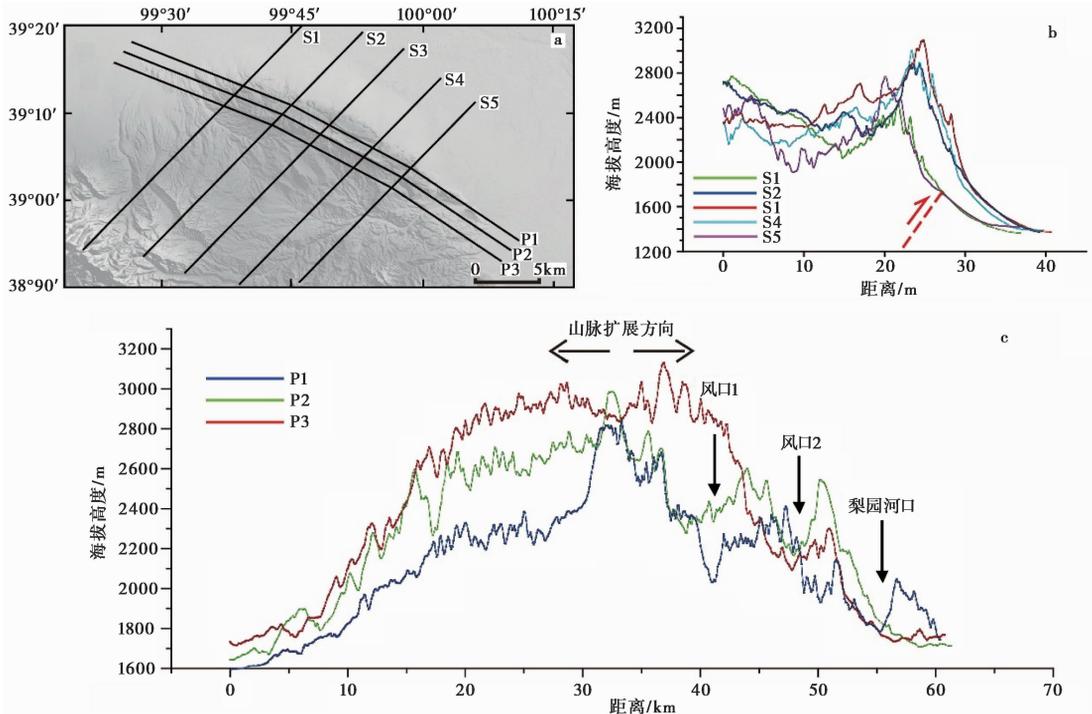


图 7 榆木山及其邻区地貌特征

Fig. 7 Landforms of Yumushan and its adjacent area.

a 榆木山及其邻区地貌图, 黑色线条为 DEM 剖面位置; b 垂直于山脉的 5 条 DEM 剖面, 红色虚线为估计的榆木山北缘断层位置; c 平行山脉的 3 条 DEM 剖面

乎对称,符合 Hetzel 等(2004b)提出的逆冲断层扩展模式,其隆起很可能受到断层作用的主导。结合前人对榆木山北缘断层的研究,发现榆木山北缘断裂的断层陡坎高度在断裂中部基本高于 15m,而到了两侧陡坎高度则逐渐下降到 5m 以下,同样各段的滑动速率也是断裂中段的滑动速率大,两侧的滑动速率小,再对比榆木山中间高两边逐渐降低的地貌形态,推测出断层的扩展过程对榆木山的隆起起到了重要的作用。同时在纵剖面上还可以观测到北侧残留的风口,并且在风口上 Palumbo 等(2010)寻找到了与现代梨园河道相一致的物源,证明榆木山向东南侧的隆起扩展导致了梨园河向 SE 方向的迁移,揭示了榆木山在垂向和侧向上的隆起过程。另外,在纵剖面上测量出梨园河口和榆木山最高峰的高差约为 1 500m,风口 2 和梨园河口的高差约为 100m,表明榆木山在新生代后期发生持续的隆升。根据玉门砾岩形成的最早时期(0.9Ma)(方小敏等,2001;赵志军等,2001;宋春晖等,2002),如果不考虑剥蚀作用的结果,其隆升速率应该为 1.66mm/a,这与 Tapponnier 等(1990)根据洪积扇上的估算年龄得出的全新世以来的抬升速率(0.4~1.6mm/a)是一致的。

5 结语与讨论

综合前人的研究成果,本文认为榆木山北缘断裂在运动方式上以逆冲为主,并伴随一定程度的左旋分量,是青藏高原向 NE 方向逆冲的活动边界,榆木山周围被一系列逆冲断层所围限,山体的隆起是青藏高原向 NE 方向推挤的结果。

通过对榆木山北缘断裂西段的梧桐泉及绿泉河一带断层陡坎高度和冲沟左旋位移的测量,结合前人所测得的中段,以及东段相同地貌面的年龄,估算出该断裂西段晚第四纪以来的逆冲滑动速率为(0.55±0.15)mm/a,左旋滑动速率为(0.95±0.11)mm/a。对比 Palumbo 等(2010)和金卿(2011)给出的该断裂中段及东段的逆冲滑动速率,发现断裂中段的逆冲速率最大,而两侧的逆冲速率则逐渐降低。

针对争议较大的“骆驼城陡坎”以及相关的公元 180 年表氏地震问题,选取了 4 个典型的剖面,发现前人指出的“断层面”并不完全具备断层面的特征,断层面附近砾石没有明显的定向性,并且“断层面”没有断错下部的地层。因此推测为“骆驼城陡坎”是古代水利工程的遗迹,并非断层作用形成,即不是公元 180 年表氏地震的地表破裂。

对 DEM 数据横剖面进行分析后认为,榆木山的隆起是祁连山向 N 推挤的结果,且断裂活动主要集中在榆木山北侧,对比分析纵剖面反映的山脉隆起的形态、断层陡坎高度的分布、和前文总结的滑动速率的分布,发现它们均体现了中间高并向山脉两侧逐渐降低的特征,表明断层的扩展对榆木山的隆升起着重要的控制作用,揭示了榆木山在垂向上和侧向上的隆升过程。结合现代梨园河口与榆木山的最高峰相差约 1 500m,而风口与梨园河口的高差为近 100m 以及横剖面上反映的山前洪积扇的平缓下降等现象,认为在新生代晚期榆木山还在持续隆升。

参 考 文 献

- 安芷生,王苏民,吴锡浩,等. 1998. 中国黄土高原的风积证据;晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动[J]. 中国科学(D辑), 28(6): 481—490.
- AN Zhi-sheng, WANG Su-min, WU Xi-hao, *et al.* 1999. Eolian evidence from the Chinese Loess Plateau: The onset of the late Cenozoic Great Glaciation in the Northern Hemisphere and Qinghai-Xizang Plateau uplift forcing [J].

- Science in China(Ser D), 42(3): 258—271.
- 边庆凯, 张培震, 苏向洲. 2001. 榆木山北缘断裂的构造地貌特征与断层活动性 [J]. 华北地震科学, 19(3): 41—49.
- BIAN Qing-kai, ZHANG Pei-zhen, SU Xiang-zhou. 2001. The tectonic topography feature of the faults in north Yumushan Mountain and its faulting activity [J]. North China Earthquake Sciences, 19(3): 41—49 (in Chinese).
- 曹娜. 2010. 1609 年红崖堡 7¼ 级地震和 180 年表氏 7½ 级地震考证研究 [D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- CAO Na. 2010. Textual research on the Hongyapu M_s 7¼ earthquake in 1609 and Biaoshi M_s 7½ earthquake in 180 [D]. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou (in Chinese).
- 陈柏林, 刘建民, 刘建生, 等. 2006. 高台车站断裂全新世活动特征 [J]. 地质学报, 80(4): 497—507.
- CHEN Bai-lin, LIU Jian-min, LIU Jian-sheng, *et al.* 2006. Study on the activity and chronology of the Gaotai railway station fault during Holocene epoch [J]. Acta Geologica Sinica, 80(4): 497—507 (in Chinese).
- 陈柏林, 王春宇, 宫红良, 等. 2007. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识 [J]. 地质通报, 26(8): 976—983.
- CHEN Bai-lin, WANG Chun-yu, GONG Hong-liang, *et al.* 2007. A new understanding of the characteristics of late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China [J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 976—983 (in Chinese).
- 方小敏, 吕连清, 杨胜利, 等. 2001. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升 [J]. 中国科学(D 辑), 31(3): 177—184.
- FANG Xiao-min, LÜ Lian-qing, YANG Sheng-li, *et al.* 2002. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan plateau uplift in West China [J]. Science in China(Ser D), 45(4): 289—299.
- 高锐, 成湘洲, 丁谦. 1995. 格尔木—额济纳旗地质断面地球动力学模型初探 [J]. 地球物理学报, 38(增刊 2): 3—14.
- GAO Rui, CHENG Xiang-zhou, DING Qian. 1995. Preliminary geodynamic model of Golmud-Ejin Qi geoscience transect [J]. Acta Geophysica Sinica, 38(S2): 3—14 (in Chinese).
- 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 1993. 祁连山—河西走廊活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社: 148—174.
- Institute of Geology, SSB, Lanzhou Institute of Seismology, SSB. 1993. Active Fault System along the Qilianshan-Hexi Corridor [M]. Seismological Press, Beijing. 148—174 (in Chinese).
- 金卿. 2011. 榆木山断裂带晚第四纪构造活动与大震危险性评价 [D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- JIN Qing. 2011. Study on activity in late Quaternary and the earthquake risk assessment of the Yumu Mountain fault zone [D]. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou (in Chinese).
- 李并成. 2006. 甘肃省高台县骆驼城遗址新考 [J]. 中国历史地理论丛, 21(1): 108—112.
- LI Bing-cheng. 2006. A new research on the ruins of Camel city in Gaotai County, Gansu Province [J]. Journal of Chinese Historical Geography, 21(1): 108—112 (in Chinese).
- 李有利, 杨景春. 1997. 河西走廊榆木山边缘断层构造地貌研究 [J]. 地质力学学报, 3(4): 20—26.
- LI You-li, YANG Jing-chun. 1997. On the tectonic landform of the Yumu Mountain, Hexi Corridor, Gansu Province [J]. Journal of Geomechanics, 3(4): 20—26 (in Chinese).
- 李玉龙, 邢成起. 1988. 河西走廊地质构造基本特征以及榆木山北麓与黑河口上龙王活断层研究 [J]. 西北地震学报, 10(2): 35—47.
- LI Yu-long, XING Cheng-qi. 1988. Research on the fundamental characteristics of the geological structures of the Hexi Corridor and the active faults of the northern and eastern flank of the Yumushan Mountain [J]. Northwestern

- Seismological Journal, 10(2): 35—47 (in Chinese).
- 刘栋梁, 宋春晖, 方小敏, 等. 2012. 榆木山地区玉门砾岩磁性地层及其对青藏高原东北部变形隆升意义 [J]. 地质学报, 86(6): 898—905.
- LIU Dong-liang, SONG Chun-hui, FANG Xiao-min, *et al.* 2012. Magnetostratigraphy of Yumen conglomerate in the Yumushan region and its implication for deformation and uplift of the NE Tibetan plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 86(6): 898—905 (in Chinese).
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性 [J]. 第四纪研究, 18(3): 194—204.
- LIU Dong-sheng, ZHENG Mian-ping, GUO Zheng-tang. 1998. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia [J]. Quaternary Sciences, 18(3): 194—204 (in Chinese).
- 刘兴旺, 雷中生, 袁道阳, 等. 2011. 1609年甘肃红崖 7 $\frac{1}{2}$ 级地震考证 [J]. 西北地震学报, 33(2): 143—148.
- LIU Xing-wang, LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, *et al.* 2011. Textual research on the Hongyapu M7.25 earthquake in 1609 [J]. Northwestern Seismological Journal, 33(2): 143—148 (in Chinese).
- 潘宏勋, 葛肖虹, 刘俊来. 2000. 对祁连山北缘榆木山隆起的质疑 [J]. 长春科技大学学报, 30(1): 9—13.
- PAN Hong-xun, GE Xiao-hong, LIU Jun-lai. 2000. Query to the Yumushan uplift on the north margin of Qilian Mountain [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 30(1): 9—13 (in Chinese).
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化 [J]. 地理学报, 54(1): 10—20.
- SHI Ya-feng, LI Ji-jun, LI Bin-yuan, *et al.* 1999. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and east Asia environmental change during Late Cenozoic [J]. Acta Geographica Sinica, 54(1): 10—20 (in Chinese).
- 宋春晖, 孙淑荣, 方小敏, 等. 2002. 酒西盆地晚新生代沉积物重矿物分析与高原北部隆升 [J]. 沉积学报, 20(4): 552—559.
- SONG Chun-hui, SUN Shu-rong, FANG Xiao-min, *et al.* 2002. Analysis of tectonic uplift and heavy minerals of sediments on Jiuxi Basin in the northern margin of Tibetan plateau since the late Cenozoic [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(4): 552—559 (in Chinese).
- 脱世博, 方小敏, 宋春晖, 等. 2013. 青藏高原东北部西宁盆地晚渐新世-早中新世沉积物岩石磁学特征及其古环境意义 [J]. 第四纪研究, 33(5): 829—838.
- TUO Shi-bo, FANG Xiao-min, SONG Chun-hui, *et al.* 2013. Rock magnetic characteristics of the late Oligocene to early Miocene sediments in the Xining Basin, northeastern Tibetan plateau [J]. Quaternary Sciences, 33(5): 829—838 (in Chinese).
- 王多杰, 徐小卫. 1990. 民乐盆地的新构造与地震 [J]. 甘肃地质, (11): 24—35.
- WANG Duo-jie, XU Shan-wei. 1990. Neotectonics and seismicity of Minle Basin in Gansu Province [J]. Gansu Geology, (11): 24—35 (in Chinese).
- 张忱. 2012. 祁连山中段榆木山地区地貌指数分析及其活动构造意义 [D]. 兰州: 兰州大学: 2—54.
- ZHANG Chen. 2012. Geomorphic index analysis along the Yumu Shan and its implications for tectonic activities [D]. Lanzhou University, Lanzhou: 2—54 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学(D辑), 33(S1): 12—20.
- ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Guo-min, *et al.* 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. Science in China (Ser D), 46(S1): 13—24.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. 中国科学(D辑), 43(10): 1607—1620.
- ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Zhu-qi, *et al.* 2013. Active faults, earthquake hazards and associated

- geodynamic processes in continental China [J]. *Scientia Sinica Terrae (Ser D)*, 43 (10): 1607—1620 (in Chinese).
- 张培震, 张会平, 郑文俊, 等. 2014. 东亚大陆新生代构造演化 [J]. *地震地质*, 36(3): 574—585. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.003.
- ZHANG Pei-zhen, ZHANG Hui-ping, ZHENG Wen-jun, *et al.* 2014. Cenozoic tectonic evolution of continental eastern Asia [J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 574—585 (in Chinese).
- 赵秀丽, 张春霞, 吴海斌, 等. 2015. 西宁盆地始新世/渐新世过渡期孢粉植物群特征及其意义 [J]. *第四纪研究*, 35(6): 1489—1499.
- ZHAO Xiu-li, ZHANG Chun-xia, WU Hai-bin, *et al.* 2015. Significance of Eocene-Oligocene transition pollen record from Xining Basin, China [J]. *Quaternary Sciences*, 35(6): 1489—1499 (in Chinese).
- 赵志军, 方小敏, 李吉均, 等. 2001. 酒泉砾石层的古地磁年代与青藏高原隆升 [J]. *科学通报*, 46(14): 1208—1212.
- ZHAO Zhi-jun, FANG Xiao-min, LI Ji-jun, *et al.* 2001. Paleomagnetic dating of the Jiuquan Gravel in the Hexi Corridor: Implication on mid-Pleistocene uplift of the Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (23): 2001—2005.
- 郑文俊. 2009. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 9—140.
- ZHENG Wen-jun. 2009. Geometric pattern and active tectonics of the Hexi Corridor and its adjacent regions [D]. Institute of Geology, CEA, Beijing: 9—140 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 张冬丽, 等. 2004. 1927 年古浪 8 级地震的破裂习性及其破裂机制的数值模拟 [J]. *中国地震*, 20(4): 353—363.
- ZHENG Wen-jun, YUAN Dao-yang, ZHANG Dong-li, *et al.* 2004. Rupture property in the Gulang $M_s 8.0$ earthquake, 1927 and numerical simulation of rupture mechanism [J]. *Earthquake Research in China*, 20(4): 353—363 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 等. 2016. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展 [J]. *第四纪研究*, 36(4): 775—788.
- ZHENG Wen-jun, YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zhen, *et al.* 2016. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern Tibetan plateau and their implications for understanding northeastward growth of the plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 36(4): 775—788 (in Chinese).
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. 2009. 甘肃高台合黎山南缘发现地震地表破裂带 [J]. *地震地质*, 31(2): 247—255. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2009.02.005.
- ZHENG Wen-jun, ZHANG Pei-zhen, YUAN Dao-yang, *et al.* 2009. Discovery of surface rupture zone on the south of Helishan in Gaotai, Gansu Province [J]. *Seismology and Geology*, 31(2): 247—255 (in Chinese).
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, *et al.* 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since late Miocene times [J]. *Nature*, 411(6833): 62—66.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1971. Report on the 1:200,000 regional geological survey and mapping (Su Nan sheet) [R].
- Clark M K. 2012. Continental collision slowing due to viscous mantle lithosphere rather than topography [J]. *Nature*, 483(7387): 74—77.
- Clark M K, Farley K A, Zheng D W, *et al.* 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan plateau margin from apatite (U-Th)/he ages [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1-2): 78—88.
- Fang X M, Zhao Z J, Li J J, *et al.* 2005. 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 (Ser D)*, 48 (7): 1040—1051.

- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, *et al.* 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘Tianzhu gap’, on the western Haiyuan Fault, Gansu(China) [J]. *Geophysical Journal International*, 120(3): 599—645.
- Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, *et al.* 2008. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene [J]. *Climate of the Past*, 4(3): 153—174.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, *et al.* 1992. Raising Tibet [J]. *Science*, 255(5052): 1663—1670.
- Hetzl R. 2013. Active faulting, mountain growth, and erosion at the margins of the Tibetan plateau constrained by *in situ*-produced cosmogenic nuclides [J]. *Tectonophysics*, 582: 1—24.
- Hetzl R, Tao T X, Stokes S, *et al.* 2004a. Late Pleistocene/Holocene slip rate of the Zhangye thrust(Qilian Shan, China) and implications for the active growth of the northeastern Tibetan plateau [J]. *Tectonics*, 23(6): TC6006.
- Hetzl R, Tao M X, Niedermann S, *et al.* 2004b. Implications of the fault scaling law for the growth of topography: Mountain ranges in the broken foreland of north-east Tibet [J]. *Terra Nova*, 16(3): 157—162.
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, *et al.* 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau [J]. *Geophysical Journal International*, 135(1): 1—47.
- Miao Y F, Herrmann M, Wu F L, *et al.* 2012. What controlled mid-late Miocene long-term aridification in Central Asia? —Global cooling or Tibetan plateau uplift: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 112(3-4): 155—172.
- Molnar P. 2005. Mio-pliocene growth of the Tibetan plateau and evolution of East Asian climate [J]. *Palaeontologia Electronica*, 8(1): 1—23.
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan plateau [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38: 77—102.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the Indian Monsoon [J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357—396.
- Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India’s convergence with Eurasia since 20Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics [J]. *Tectonics*, 28(3): TC3001.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 189(4201): 419—426.
- Palumbo L, Hetzel R, Tao M, *et al.* 2010. Topographic and lithologic control on catchment-wide denudation rates derived from cosmogenic ¹⁰Be in two mountain ranges at the margin of NE Tibet [J]. *Geomorphology*, 117(1-2): 130—142.
- Palumbo L, Hetzel R, Tao M X, *et al.* 2011. Catchment-wide denudation rates at the margin of NE Tibet from *in situ*-produced cosmogenic ¹⁰Be [J]. *Terra Nova*, 23(1): 42—48.
- 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, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10(12): 611—616.
- 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.
- Wang W T, Zhang P Z, Pang J Z, *et al.* 2016a. The Cenozoic growth of the Qilian Shan in the northeastern Tibetan plateau: A sedimentary archive from the Jiuxi Basin. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(4): 2235—2257.
- Wang W T, Zhang P Z, Zheng W J, *et al.* 2016b. Uplift-driven sediment redness decrease at ~16.5Ma in the Yumen

- Basin along the northeastern Tibetan plateau [J]. *Scientific Reports*, 6: 29568.
- Yuan D Y, Ge W P, Chen Z W, *et al.* 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies [J]. *Tectonics*, 32(5): 1358—1370.
- Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. 2001. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates [J]. *Nature*, 410(6831): 891—897.
- Zheng W J, Zhang H P, Zhang P Z, *et al.* 2013c. 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*, 9(2): 342—354.
- Zheng W J, Zhang P Z, Ge W P, *et al.* 2013a. 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*, 32(2): 271—293.
- Zheng W J, Zhang P Z, He W G, *et al.* 2013b. 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*, 584: 267—280.

PRESENT KINEMATICS CHARACTERISTICS OF THE NORTHERN YUMUSHAN ACTIVE FAULT AND ITS RESPONSE TO THE NORTHEASTWARD GROWTH OF THE TIBETAN PLATEAU

CHEN Gan¹⁾ ZHENG Wen-jun²⁾ WANG Xu-long³⁾ ZHANG Pei-zhen^{1,2)}
 XIONG Jian-guo²⁾ YU Jin-xing^{1,4)} LIU Xing-wang⁵⁾
 BI Hai-yun¹⁾ LIU Jin-rui¹⁾ AI Ming¹⁾

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

2) *Guangdong Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*

3) *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China*

4) *University of Oxford, Earth Science, England Oxford OX13AN*

5) *Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China*

Abstract

Qilian Shan and Hexi Corridor, located in the north of Tibetan plateau, are the margin of Tibetan plateau's tectonic deformation and pushing. Its internal deformations and activities can greatly conserve the extension process and characteristics of the Plateau. The research of Qilian Shan and Hexi Corridor consequentially plays a significant role in understanding tectonic deformation mechanism of Tibetan plateau. The northern Yumushan Fault, located in the middle of the northern Qilian Shan thrust belt, is a significant component of Qilian Shan thrust belt which divides Yumushan and intramontane basins in Hexi Corridor. Carrying out the research of Yumushan Fault will help explain the kinematics characteristics of the northern Yumushan active fault and its response to the northeastward growth of the Tibetan plateau.

Because of limited technology conditions of the time, different research emphases and some other reasons, previous research results differ dramatically. This paper summarizes the last 20 years researches from the perspectives of fault slip rates, paleo-earthquake characteristics and tectonic deformation. Using aerial-photo morphological analysis, field investigation, optical simulated luminescence(OSL) dating of alluvial surfaces and topographic profiles, we calculate the vertical slip rate and strike-slip rate at the typical site in the northern Yumushan Fault, which is (0.55 ± 0.15) mm/a and (0.95 ± 0.11) , respectively. On the controversial problems, namely “the Luotuo(Camel) city scarp” and the 180 A.D. Biaoshi earthquake, we use aerial-photo analysis, particular field investigation and typical profile dating. We concluded that “Luotuo city scarp” is the ruin of ancient diversion works rather than the fault scarp of the 180 A.D. Biaoshi earthquake. Combining the topographic profiles of the mountain range with fault characteristics, we believe Yumu Shan is a part of Qilian Shan. The uplift of Yumu Shan is the result of Qilian Shan and Yumu Shan itself pushing northwards. Topographic profile along the crest of the Yumu Shan illustrates the decrease from its center to the tips, which is similar to the vertical slip rates and the height of fault scarp. These show that Yumu Shan is controlled by fault extension and grows laterally and vertically. At present, fault activities are still concentrated near the north foot of Yumu Shan, and the mountain ranges continue to rise since late Cenozoic.

Key words fault slip rates, 180 A.D. Biaoshi earthquake, Plateau growth, the northern Yumushan active fault, the northeast margin of Tibetan plateau

[作者简介] 陈干,男,1993年生,2015年于合肥工业大学获资源勘查工程专业学士学位,在读硕士研究生,主要从事活动构造方面的研究工作,E-mail: chengan_93@126.com。