

酒西盆地内部两条断裂晚第四纪滑动速率研究^{*}

刘兴旺^{1,2}, 袁道阳¹, 苏琦³, 吴赵¹, 柳煜¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;
3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 通过卫星影像解译、差分 GPS 测量和地貌年代学样品采集, 对位于酒西盆地内部的阴洼山断裂和新民堡断裂晚第四纪滑动速率进行了研究。阴洼山断裂发育于阴洼山东侧, 总体走向 315° , 长约 25 km; 新民堡断裂整体走向 300° , 长约 20 km, 二者皆为全新世活动的逆断层。通过野外考察, 选择典型断错地貌进行断层陡坎测量, 结合所获相应地貌面的年代数据, 得到阴洼山断裂和新民堡断裂晚第四纪垂直滑动速率分别为 (0.08 ± 0.02) mm/a 和 (0.11 ± 0.02) mm/a。结合断裂倾角及前人研究资料, 得到垂直祁连山方向酒西盆地内部断裂的地壳缩短速率约为 1 mm/a, 整个盆地地壳缩短速率约为 2.4 mm/a。

关键词: 酒西盆地; 阴洼山断裂; 新民堡断裂; 滑动速率

中图分类号: P315.242

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0112-08

0 引言

阿尔金断裂是青藏高原北缘一条重要边界断裂, 其形成演化与青藏高原的隆升扩展有着密切的联系, 该断裂的形成时间、滑动速率及东延问题一直是国内外地学界研究的热点问题 (Molnar, Tapponnier, 1975; Tapponnier, Molnar, 1976; Tapponnier *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2013)。对于阿尔金断裂的东延, 不同学者持不同观点: 一种观点认为阿尔金断裂终止于宽滩山—酒西盆地一带, 根据阿尔金断裂东段滑动速率衰减特征, 其尾端走滑量已被盆地内部逆断层及褶皱产生的地壳缩短完全吸收 (Zhang *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2013); 另一种观点认为阿尔金断裂切过宽滩山后继续向东延伸至阿拉善块体南缘, 最终消失于巴丹吉林沙漠之中 (Tapponnier *et al.*, 2001; Darby *et al.*, 2005; 陈文彬等, 2006); 还有一种观点认为阿尔金断裂延伸到了蒙古东部的鄂霍茨克海地区 (Yue, Liou, 1999)。对于阿尔金断裂尾端走滑量转换为盆地内部逆冲缩短量的观点, 需要较为可靠的酒西盆地活动断裂滑动速率的支持。

对于酒西盆地内部的阴洼山断裂和新民堡断

裂, 前人曾开展过滑动速率的研究, 闵伟等 (2002) 根据地层断距及古地震年代事件热释光测年数据, 确定这两条断裂的滑动速率分别为 0.18 mm/a 和 0.24 mm/a; 陈柏林等 (2006) 根据断层陡坎高度和断错地层年代, 估算新民堡断裂的滑动速率为 0.25 ~ 0.50 mm/a。前人的研究都是基于断错地层年代进行的计算, 并未对断错地貌面开展年代学研究, 测年方法均采用热释光测年, 不确定性较大。在本文的研究中, 我们利用差分 GPS 测量了断层陡坎高度, 对断错地貌面采取宇宙成因核素暴露测年, 详细厘定了酒西盆地内部的阴洼山和新民堡断裂的滑动速率, 并在此基础上讨论了酒西盆地地壳缩短速率。

1 构造背景

阿尔金断裂是青藏高原北部边界, 在高原新生代构造变形中起着重要的作用, 但对其滑动速率的研究一直存在着高和低的争议 (Tapponnier *et al.*, 1982; Mériaux *et al.*, 2004, 2005; 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组, 1992; 徐锡伟等, 2003; Zhang *et al.*, 2007; Cowgill, 2007)。Zhang 等 (2007) 通过对河流阶地遭受位错后的保存及

^{*} 收稿日期: 2017-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (41402186) 与甘肃省科技计划 (1606RJZA093) 联合资助.

侵蚀条件分析,认为在肃北以西,阿尔金断裂滑动速率约为 10 mm/a,向东逐渐衰减,到酒西盆地一带逐渐变为 0~2 mm/a。阿尔金断裂速率衰减的原因是从党河南山开始,出现一系列向祁连山内部分离的活动断裂,这些断裂将阿尔金断裂走滑速率的衰减量转换为祁连山内部活动逆断层引起的地壳缩短及山脉的隆升,形成了党河南山、大雪山及北祁连山等一系列 NW 向条带状山脉。最终,至酒西盆地宽滩山一带,阿尔金滑动速率趋于零,其尾端的滑动速率被酒西盆地的逆冲断裂及褶皱逐渐吸收 (Zheng *et al.*, 2013)。因此,定量研究酒西盆地断裂滑动速率对认识阿尔金断裂应变分配具有重要的意义。

酒西盆地位于河西走廊最西端,在新生代祁连山隆升和向 NE 扩展的背景下,经历了复杂的构造活动,盆地边缘及内部形成了多条晚第四纪活动断裂 (图 1b) (陈文彬等, 1999; 闵伟等, 2002; 陈柏林等, 2005, 2006; 郑文俊, 2009; 刘兴旺等, 2016)。对于盆地周缘断裂,近些年来的

研究已经获得了关于断裂滑动速率的定量数据 (Zheng *et al.*, 2013; 张宁等, 2016; Liu *et al.*, 2017), 而对于盆地内部断裂的研究则相对较少。酒西盆地内部主要发育 3 条全新世活动断裂: 阴洼山断裂、新民堡断裂和白杨河断裂 (图 1a)。横跨酒西盆地的石油地质剖面揭示这些断裂向下收敛于同一滑脱面 (闵伟等, 2002)。其中阴洼山断裂和新民堡断裂断面南倾、向北逆冲,白杨河断裂则为北倾的反向逆冲断裂 (陈杰等, 1998; 闵伟等, 2002)。白杨河断裂位于酒西盆地中部,前人研究认为其是一条隐伏断裂,其活动造成了上覆白杨河阶地的形成和褶皱变形。根据阶地变形量和热释光测年,陈杰等 (1998) 推断白杨河断裂垂直滑动速率为 0.32 ~ 0.58 mm/a; Hetzel 等 (2002) 通过褶皱陡坎测量和地貌面宇宙成因核素暴露测年,得到白杨河断裂垂直滑动速率约为 0.35 mm/a。相较于白杨河断裂,对于阴洼山断裂和新民堡断裂滑动速率的研究则存在一定的不足 (闵伟等, 2002; 陈柏林等, 2006)。

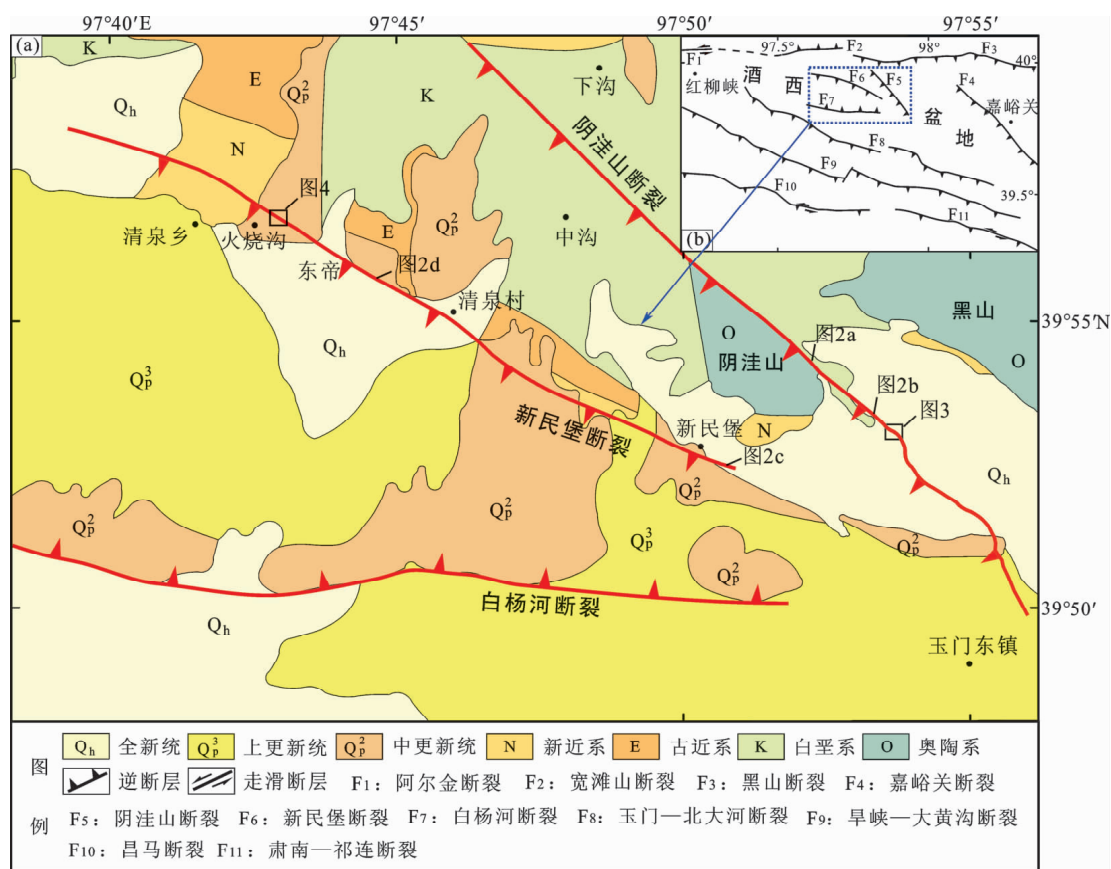


图 1 酒西盆地内部断裂地质构造简图 (a) 及索引图 (b)

Fig. 1 Geological structure map of the faults within the Jiuxi Basin (a) and index map (b)

2 断裂概述及断错地貌特征

阴洼山断裂发育于阴洼山东侧, 阴洼山为酒西盆地内部一个次级隆起山体, 主峰高约 2 195 m。阴洼山断裂不仅分布于山体东侧, 还向 SE, NW 向延伸。向 SE 方向延伸到玉门东镇附近, 向 NW 延伸到下沟村以南, 总体走向 315°, 长约 25 km (图 1a)。在 NW 方向, 断裂发育于白垩系组成的侵蚀台地中, 新活动特征难以判定。在中段, 断裂构

成阴洼山山体和山前洪积扇的分界线, 奥陶系灰绿色浅变质碎屑岩逆冲于紫红色白垩系泥岩或第四系洪积砾石层之上 (图 2a)。断层剖面显示断裂倾向 SW, 倾角约 55°, 断裂断错晚更新世砾石层, 被全新世地层覆盖 (陈柏林等, 2005)。在 SE 方向, 断裂则发育于黑山南麓的洪积扇上, 地表形成连续分布的断层陡坎, 陡坎坡向与地形方向相反, 为坡向 NE 的反向陡坎 (图 2b)。断层断错多期洪积扇面, 形成高度不等的陡坎, 反映了断裂长期持续活动。



图 2 阴洼山断裂和新民堡断裂断错地貌 (箭头为断层位置)

Fig. 2 Fault landforms of the Yinwashan and Xinminpu faults (the arrows show the location of the fault)

新民堡断裂位于酒西盆地内部, 东起新民堡以东, 向西经清泉村、东帝、火烧沟至清泉乡一带, 长约 20 km, 整体走向 300°, 倾角约 30°, 倾向 SW, 为一条逆掩断层 (图 1b)。地貌上表现为一系列南高北低的断层陡坎, 断层露头可看到断层直通地表, 形成前缘翘起的陡坎, 表明断层活动时代较新。在新民堡西侧, 断裂最东端出露断层剖面, 为一低角度逆冲断层 (图 2c), 倾角约 30°, 断层上盘为新近系砖红色泥岩、砂岩, 下盘主要为晚更新世青灰色砾石层, 在近断层处砾石层发生牵引转向, 并有明显定向排列特征, 地表

形成高约 2~3 m 的断层陡坎。在清泉村西侧, 较老地貌面上形成的断层陡坎高约 18 m, 老陡坎前侧叠加新的小陡坎, 高 1 m 左右 (图 2d)。局部小陡坎前侧保留新鲜的陡坎自由面, 推测可能为 1785 年新民堡 6 $\frac{3}{4}$ 级地震形成的地表破裂带 (何文贵等, 2010)。

3 地貌面年代学研究

沿阴洼山断裂和新民堡断裂均发育多级断错地貌 (闵伟等, 2002; 陈柏林等, 2005, 2006),

这些地貌面及保存完整的断层陡坎为研究断层滑动速率提供了良好的条件。在室内影像解译和野外踏勘的基础上，分别在阴洼山断裂东南段洪积扇及新民堡断裂火烧沟附近选取研究点进行了断裂滑动速率的研究（图 3，4）。这 2 处断错地貌明显，断层陡坎保存较为完整，地貌表面无植被或黄土覆盖并广泛分布富含石英的砾石及卵石，适合宇宙成因核素¹⁰Be 年代样品的采集。在野外样品的采集中，各级地貌每个样品至少采集直径为 2 ~ 3 cm，富含石英的 50 块以上砾石块，同时在现今河道内采集一个样品用于计算继承浓度。送实验室之前，先对样品粉碎、筛选，得到 250 ~ 500 μm

粒径颗粒，其后的前期化学处理在中国地震局地质研究所国家动力学重点实验室完成。首先，利用化学蚀刻方法分离出石英颗粒（Kohl, Nishiizumi, 1992；那春光等，2006），之后用 HF 溶解石英颗粒，并加入 0.3 mg 的⁹Be 载体，用阴阳离子交换层析法得到 BeCl₂，加入氨水中和，得到 Be(OH)₂，最后高温加热得到 BeO，制成样品测试靶样。¹⁰Be/⁹Be 比值测试在法国地球科学与环境研究与教育欧洲中心宇宙成因核素实验室完成。最终，利用原子生成率及年龄计算工具，得到了样品的年代（Lal, 1991；Granger *et al*, 2013；Vermeesch, 2007），主要样品参数及年代结果见表 1。

表 1 宇宙成因核素测试结果
Tab. 1 Results of Cosmogenetic nuclide dating

样品编号	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	海拔/m	产率/ (atoms · g ⁻¹ a ⁻¹)	¹⁰ Be 浓度/ (10 ⁵ atoms · g ⁻¹)	校正 ¹⁰ Be 浓度/ (10 ⁵ atoms · g ⁻¹)	年代/ka
YWS-1	97.893 81	39.885 23	1 943	—	4.91 ± 0.16	—	—
YWS-2	97.893 13	39.884 96	1 945	18.87	9.55 ± 0.26	4.65 ± 0.42	24.6 ± 2.2
YWS-3	97.892 49	39.885 43	1 946	18.89	14.5 ± 0.38	9.64 ± 0.54	51.0 ± 2.9
YWS-4	97.894 19	39.884 18	1 948	18.91	15.1 ± 0.50	10.2 ± 0.67	54.0 ± 3.5
XMP-1	97.719 04	39.942 95	1 767	16.67	33.6 ± 0.58	6.13 ± 0.40	36.3 ± 2.4
XMP-2	97.718 01	39.943 49	1 769	16.69	22.0 ± 0.42	17.1 ± 0.58	102.3 ± 3.5
XMP-3	97.716 71	39.945 49	1 772	16.73	11.0 ± 0.23	28.6 ± 0.75	171.8 ± 4.5

4 断裂滑动速率厘定

4.1 阴洼山断裂

在阴洼山东南侧的洪积扇上，断裂在影像上线性特征明显，表现为连续分布的断层陡坎，断层断错除现今河道外的各级地貌面（图 3a）。经卫星影像解译与实地考察，区分了高度不等的三级阶地（图 3b）。T₃ 阶地为该处最老的地貌面，经后期侵蚀，地貌面保存不完整，阶地面顶部为厚约几十厘米的砾石层，下伏砖红色白垩系砂泥岩。T₃ 阶地前缘形成的断层陡坎高度最大（图 3c），经差分 GPS 剖面（P₃）测量（位置如图 3b 所示），陡坎高度为（5.2 ± 0.3）m（图 3e）。T₂ 阶地在断层上盘延伸不远，遭受了后期流水的侵蚀，呈孤立的舌状分布于断层上盘（图 3d），经差分 GPS 剖面（P₂）测量（位置如图 3b 所示），断层陡坎高度为（3.0 ± 0.2）m（图 3e）。T₁ 阶地分布较为广泛，并不只局限于断层沿线，经差分 GPS 剖面

（P₁）测量（位置如图 3b 所示），T₁ 阶地断层陡坎高度为（2.1 ± 0.1）m（图 3e）。

野外实地考察也对各级阶地采集了¹⁰Be 年代样品（位置及编号如图 4b 所示），在河道内也采集了一个样品 YWS-1，用于计算继承浓度。经后期处理、测试，得到 T₁ ~ T₃ 阶地样品年代分别为：（24.6 ± 2.2）ka，（51 ± 2.9）ka，（54 ± 3.5）ka（表 1）。根据 T₁ ~ T₃ 阶地陡坎高度（2.1 ± 0.1）m，（3.0 ± 0.2）m 和（5.2 ± 0.3）m，及其对应的年代，得到断裂滑动速率分别为（0.09 ± 0.01）mm/a，（0.06 ± 0.01）mm/a 和（0.1 ± 0.01）mm/a，阻洼山断裂平均滑动速率为（0.08 ± 0.02）mm/a。

4.2 新民堡断裂

新民堡断裂活动最明显的段落位于火烧沟至清泉村段，主要表现为老陡坎前叠加新陡坎，新陡坎最低仅 0.5 m（图 4c），大部分段落保留新鲜的自由面。在火烧沟村东侧，断层陡坎卫星影像清晰（图 4a），根据卫星影像解译和实地考察，此

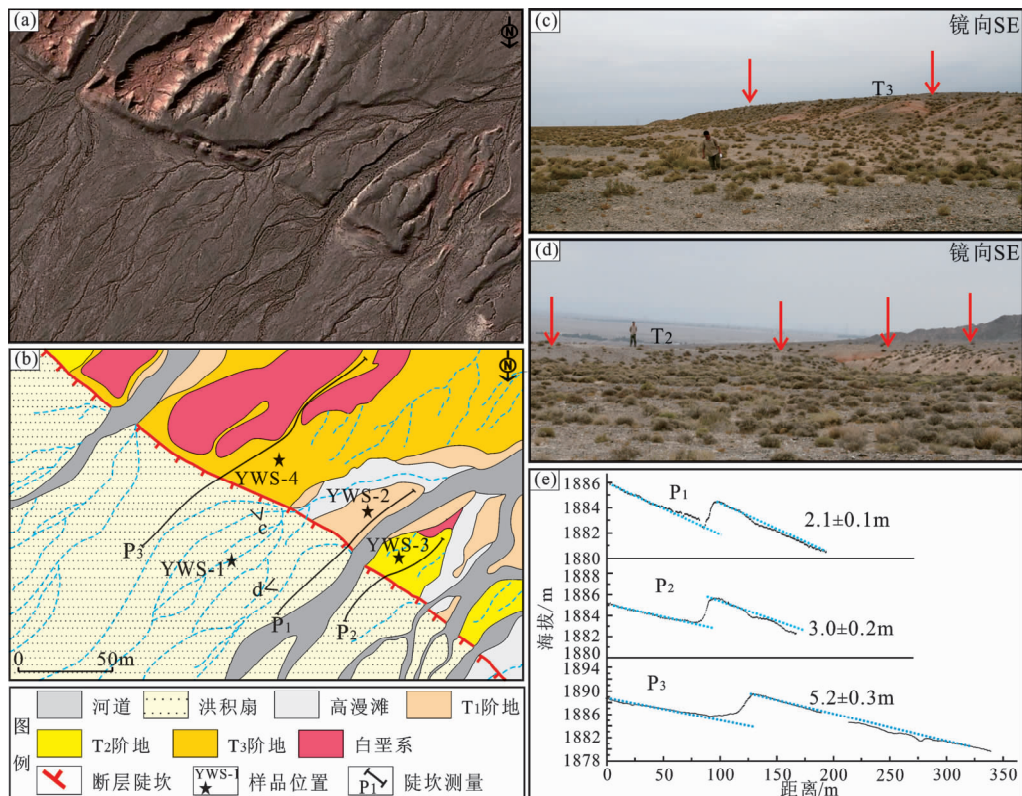


图3 阴洼山断裂卫星影像 (a), 断错地貌解译 (b), T_3 (c) 和 T_2 (d) 阶地断层陡坎, 以及测量剖面 (e)

Fig. 3 Satellite image of the Yinwushan fault (a), geomorphic interpretation of the fault landform (b), fault scarps of the T_3 (c) and T_2 terraces (d) and measurement profiles (e)

处地貌面主要可分为4级(图4b),最新地貌面为广泛分布的最新一期洪积扇, T_1 阶地上覆厚约1m的黄土,现在农田主要分布在此级地貌面上,经差分GPS剖面(P_1)测量(位置如图4b所示),陡坎高度为 (3.1 ± 0.4) m(图4d)。 T_2 阶地可分为 T_{2a} 和 T_{2b} 两级副阶地,阶地前缘陡坎经后期侵蚀已严重后退,经差分GPS剖面(P_2 , P_3)测量(位置如图4b所示),陡坎高度分别为 (11 ± 0.5) m和 (12.6 ± 0.6) m(图4d)。 T_3 阶地经后期侵蚀,表现为沿断层上盘孤丘状分布的小山包,下伏新近系地层,顶部为厚1~2m的中更新统砾石层,经差分GPS剖面(P_4)测量,陡坎高度为 (17.7 ± 0.6) m(图4d)。

野外实地考察在 T_{2a} , T_{2b} 和 T_3 阶地面采集了 ^{10}Be 样品,采样位置及编号如图4b所示,经过测试及计算(表1), T_{2a} , T_{2b} , T_3 阶地的年代分别为: (36.6 ± 2.4) ka, (102.3 ± 3.5) ka 和 (171.8 ± 4.5) ka。由断层陡坎高度和年代数据获

得的 T_{2a} , T_{2ab} 和 T_3 阶地的断错滑动速率分别为: (0.3 ± 0.04) mm/a, (0.11 ± 0.02) mm/a 和 (0.1 ± 0.01) mm/a。由样品年代判断, T_{2a} 的年代明显偏年轻,而 T_{2b} 和 T_3 获得的滑动速率相对稳定,因此在断裂长期滑动速率的估算中,只用了 T_{2b} 和 T_3 阶地获得的滑动速率值,其平均值为 (0.11 ± 0.02) mm/a。

5 结论与讨论

阴洼山断裂和新民堡断裂同为酒西盆地内部全新世活动的逆断裂,通过卫星影像解译和野外实地调查,选择典型断错地貌单元进行了断层陡坎差分GPS测量和地貌面宇宙成因核素测年,得到了断裂晚第四纪滑动速率。阴洼山断裂和新民堡断裂晚第四纪垂直滑动速率分别为 (0.08 ± 0.02) mm/a 和 (0.11 ± 0.02) mm/a。

酒西盆地是一个被活动断裂围限的盆地(图1a),对于其它断裂的滑动速率,前人也曾开展过

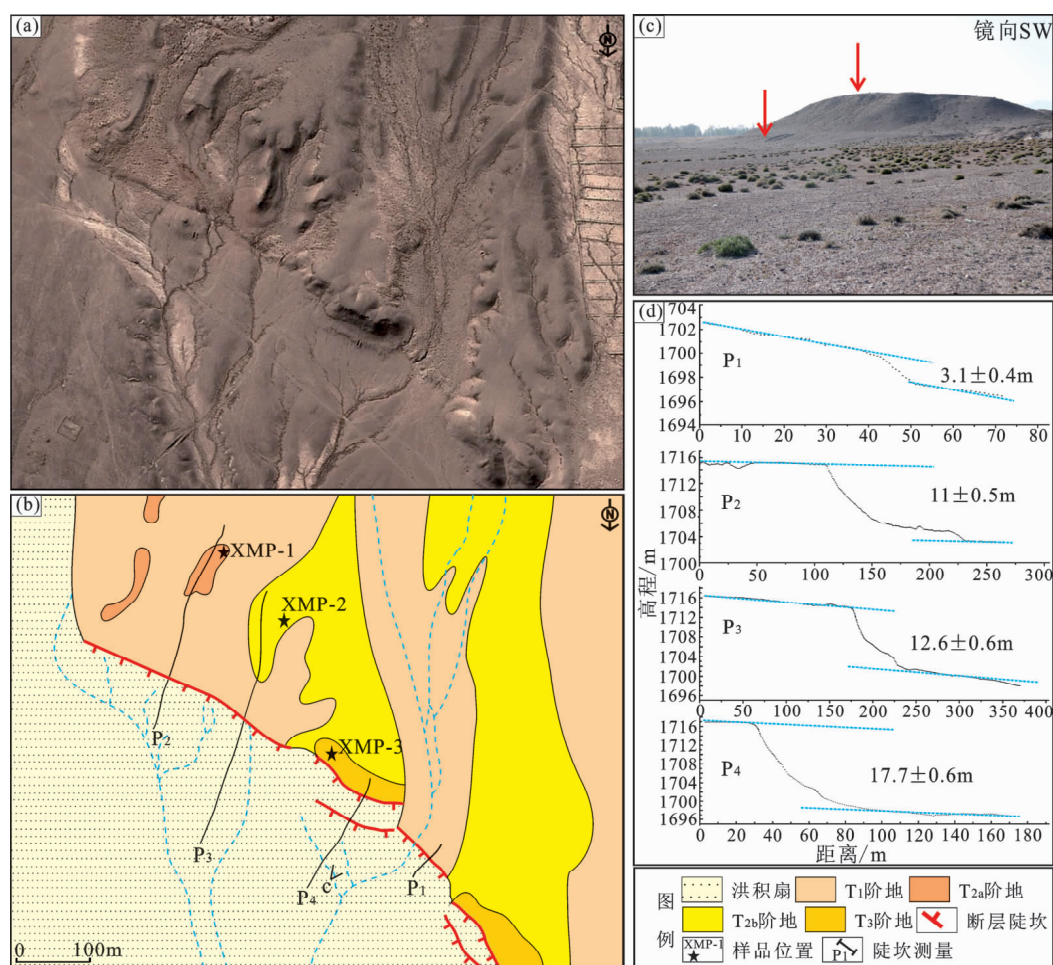


图4 新民堡断裂火烧沟卫星影像 (a), 断错地貌解译 (b), 断层陡坎 (c) 及测量剖面 (d)

Fig. 4 Satellite image at Huoshagou site of the Xinminpu fault (a), geomorphic interpretation of the fault landforms (b), fault scarps (c) and measurement profiles (d)

大量研究。嘉峪关断裂是酒西盆地东侧边界断裂, 断裂新活动形成醒目的断层陡坎 (郑文俊, 2009), 根据断层陡坎测量和宇宙成因核素测年, Zheng 等 (2013) 得到其垂直滑动速率为 $(0.22 \pm 0.03) \text{ mm/a}$ 。黑山断裂是酒西盆地北边界断裂, 为一条高角度逆断层, 断层断错洪积扇形成 $2 \sim 3 \text{ m}$ 的断层陡坎, 根据光释光测年和断层陡坎测量, 得到断裂垂直滑动速率为 $(0.26 \pm 0.06) \text{ mm/a}$ (张宁等, 2016)。黑山断裂东侧金塔南山断裂的滑动速率约为 $(0.11 \pm 0.03) \text{ mm/a}$ (Zheng *et al*, 2013)。在酒西盆地内部, 白杨河断裂垂直滑动速率为 0.35 mm/a (Hetzel *et al*, 2002)。这些断裂均以较低的滑动速率为特征, 表现出了区域上断裂活动的协调性和一致性。盆地南侧祁连山北缘断裂带滑动速率一般为 $0.5 \sim 1 \text{ mm/a}$ (Hetzel *et al*, 2004; Palumbo *et al*, 2009;

Liu *et al*, 2017; Xiong *et al*, 2017), 略高于盆地内部及北侧活动断裂带。

酒西盆地内断裂构造变形以逆冲为主要特征, 并伴生大量褶皱。逆断层的垂直活动会引起地壳的缩短, 地壳的缩短速率与断层滑动速率密切相关, 但不能简单将二者等同起来。断层地表及深部的倾角不是一成不变的, 一般来讲, 造山带前缘逆断层出露地表的倾角都较缓, 深部逐渐变陡, 到滑脱面时又逐渐变缓并近水平。Thompson 等 (2002) 根据前人的研究 (Narr, Suppe, 1994), 建立了地壳缩短速率与逆断层滑动速率的关系式, 在已知断层在地表的倾角 α 的情况下, 则断层引起的地壳缩短率: $V_s = V_v / \tan \alpha$, 其中 V_s 为地壳缩短速率; V_v 为断层垂直滑动速率; α 为断层倾角。

白杨河断裂滑动速率为 0.35 mm/a (Hetzel *et*

al, 2002), 探槽揭露断裂倾角约为 25° (刘兴旺, 2017), 地壳缩短速率约为 0.75 mm/a 。本次研究得到的新民堡断裂和阴洼山断裂的滑动速率分别为 $(0.11 \pm 0.02) \text{ mm/a}$ 和 $(0.08 \pm 0.02) \text{ mm/a}$, 探槽揭露的断裂倾角分别约为 30° 和 55° (刘兴旺, 2017), 则其缩短速率分别约为 0.18 mm/a 和 0.07 mm/a , 综合考虑, 得到酒西盆地内部断裂垂直祁连山方向上的地壳缩短速率约为 1 mm/a 。酒西盆地南缘玉门—北大河断裂的垂直滑动速率为 $(0.73 \pm 0.09) \text{ mm/a}$ (刘兴旺, 2017), 以断裂倾角 30° 估计 (刘兴旺等, 2016), 地壳缩短速率约为 1.3 mm/a 。酒西盆地北缘黑山断裂的滑动速率为 $(0.26 \pm 0.06) \text{ mm/a}$, 根据断裂倾角约为 70° (张宁, 2016), 计算得到其缩短速率约为 $0.07 \sim 0.12 \text{ mm/a}$ 。综合考虑, 得到酒西盆地垂直祁连山方向上的缩短速率约为 2.4 mm/a , 平行阿尔金断裂方向的缩短率约为 2 mm/a , 这与阿尔金断裂东端的走滑速率相近 (徐锡伟等, 2003; Zhang *et al*, 2007; 张宁, 2016), 表明阿尔金断裂尾端的走滑量已被酒西盆地的逆断层褶皱所转化吸收, 本文的研究结果支持了阿尔金断裂终止于酒西盆地一带的观点。

参考文献:

- 陈柏林, 刘建民, 刘建生, 等. 2005. 阴洼山断裂全新世活动特征与年代学研究[J]. 地震地质, 27(2): 243–251.
- 陈柏林, 王春宇, 刘建民, 等. 2006. 新民堡断裂新构造活动特征[J]. 地球学报, 27(6): 515–524.
- 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜. 1998. 祁连山西段酒西盆地地区阶地变形的研究[J]. 西北地震学报, 20(1): 28–36.
- 陈文彬, 刘百篪, 徐锡伟, 等. 2006. 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, 28(2): 319–324.
- 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组. 1992. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社.
- 何文贵, 雷中生, 袁道阳, 等. 2010. 1785年玉门惠回堡地震的震灾特点与发震构造[J]. 西北地震学报, 32(1): 47–53.
- 刘兴旺, 袁道阳, 邵延秀, 等. 2016. 祁连山北缘玉门—北大河断裂晚第四纪活动特征[J]. 地震工程学报, 38(6): 948–954.
- 刘兴旺. 2017. 祁连山西段酒西盆地活动构造特征及构造变形模式[D]. 兰州: 兰州大学.
- 闵伟, 张培震, 何文贵, 等. 2002. 酒西盆地断层活动特征及古地震研究[J]. 地震地质, 24(1): 35–44.
- 那春光, 孔屏, 黄费新, 等. 2006. 原地生成宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 样品采集及处理[J]. 岩矿测试, 25(2): 101–106.
- 徐锡伟, Tapponnier P, Van D W J, 等. 2003. 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: 地球科学, 33(10): 967–974.
- 张宁, 郑文俊, 刘兴旺, 等. 2016. 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[J]. 地球科学与环境学报, 38(2): 245–257.
- 张宁. 2016. 阿尔金断裂东端部的几何结构与运动特征[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 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.
- Cowgill E. 2007. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: Revisiting the Cheerchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 254(3): 239–255.
- Darby B J, Ritts B D, Yue Y J, *et al*. 2005. Did the Altyn Tagh fault extend beyond the Tibetan Plateau[J]. Earth Planetary Science Letters, 240(2): 425–435.
- Granger D E, Lifton N A, Willenbring J K. 2013. A cosmic trip: 25 years of cosmogenic nuclides in geology[J]. Geological Society of America Bulletin, 125(9–10): 1379–1402.
- Hetzl R, Niedermann S, Tao M X, *et al*. 2002. Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in Central Asia[J]. Nature, 417(6887): 428–432.
- Hetzl R, Tao M X, Stokes S, *et al*. 2004. 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.
- Kohl C P, Nishiizumi K. 1992. Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 56(9): 3583–3587.
- Lal D. 1991. Cosmic-ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclides production rates and erosion models[J]. Earth and Planetary Science Letters, 104(91): 424–439.
- Liu X W, Yuan D Y, Su Q. 2017. Late Pleistocene slip rate of the northern Qilian Shan frontal thrust, western Hexi Corridor, China[J]. Terra Nova, 29(4): 238–244.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India–Eurasia collision[J]. Science, 189(4201): 419–426.
- Mériaux A S, Ryerson F J, Tapponnier P, *et al*. 2004. Rapid slip along the central Altyn Tagh fault: morphochronologic evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh[J]. Journal of Geophysical Research, 109(B6): 611–616.
- Mériaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, *et al*. 2005. The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate[J]. Journal of Geophysical Research, 110(B4): 229–246.
- Narr W, Suppe J. 1994. Kinematics of basement-involved compressive structures[J]. American Journal of Science, 294(7): 802–860.
- Palumbo L, Hetzel R, Tao M, *et al*. 2009. Deciphering the rate of mountain growth during topographic presteady state: An example from the NE

- margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics* 28(4):TC4017.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip – line field theory and large – scale continental tectonics[J]. *Nature*, 264(5584):319 – 324.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from 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(5574):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):7 – 32.
- Vermeesch P. 2007. CosmoCalc: an Excel add – in for cosmogenic nuclide calculations[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 80(8):119 – 120.
- Xiong J G, Li Y L, Zhong Y Z, *et al.* 2017. Latest Pleistocene to Holocene thrusting recorded by a flight of strath terraces in the eastern Qilian Shan, NE Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 36(12):2972 – 2986.
- Yue Y, Liou J G. 1999. Two – stage evolution model for the Altyn Tagh fault, China[J]. *Geology*, 27(3):227 – 230.
- Zhang P Z, Molnar P, Xu X W. 2007. Late Quaternary and present – day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 26(5):1 – 24.
- Zheng W J, Zhang H P, Zhang P Z, *et al.* 2013. 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.

Study on Late Quaternary Slip Rates of Two Faults within Jiuxi Basin

LIU Xingwang^{1,2}, YUAN Daoyang¹, SU Qi³, WU Zhao¹, LIU Yu¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(3. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract

Based on satellite image interpretation, differential GPS measurement and geomorphologic chronology sampling, we carried out a detail study on the Late Quaternary slip rates of the Yinwashan and Xinminpu faults located in the Jiuxi basin. The Yinwashan fault is located at the eastern side of the Yinwashan with an overall strike of 315° and a length of about 25 km. The Xinminpu fault strikes 300° with a length of 20 km. Both of the two faults are Holocene active reverse faults. Through the detailed field investigation, we measured the fault scarps at the typical fault landform site. Combining the chronological date of the corresponding surface, we got the vertical slip rates for the tow faults in the Late Quaternary are (0.08 ± 0.02) mm/a and (0.11 ± 0.02) mm/a, respectively. Combined with the fault dip and previous research data, it is found that the crustal shortening rate of the internal faults in the Jiuxi basin is about 1 mm/a, and the shortening rate of the crust in the Jiuxi basin is about 2.4 mm/a.

Keywords: Jiuxi basin; Yinwashan fault; Xinminpu fault; slip rate