

# 新疆阜康断裂带甘河子段晚第四纪活动特征

吴传勇,陈建波,沈 军,宋和平,吴国栋,罗福忠

新疆维吾尔自治区地震局,新疆乌鲁木齐 830011

**摘要:** 为了解阜康断裂晚第四纪以来的活动特征,准确评价该断裂的大震危险性,在野外地震地质调查的基础上,对变形的微地貌进行了测量,开挖了2个大型古地震探槽,并采集了系列释光年龄样品,对阜康断裂甘河子段进行了细致研究.甘河子断裂段是一条全新世活动断裂,全长约33 km,构成博格达北麓与山前冲洪积扇的界线.该断裂晚第四纪期间活动性较强,运动方式以向盆地方向的逆冲为主,形成了一系列地质地貌现象.晚第四纪晚期以来,断裂的平均垂直滑动速率在0.34~0.43 mm/a.全新世中期以来,断裂有过2次古地震事件,断裂大震(特征地震)的复发周期为2100~3750 a,最新一次古地震事件造成的地表垂直位移量为1.5 m左右,对应的古地震震级在7.2~7.4之间,该次古地震事件离逝时间已达4.11 ka,目前该断裂已经累积了较高能量.

**关键词:** 阜康断裂带;构造地貌;晚第四纪;变形特征;古地震.

**中图分类号:** P315.2

**文章编号:** 1000-2383(2013)03-0632-09

**收稿日期:** 2012-07-15

## Late-Quaternary Activity Characteristics of the Ganhezi Segment of the Fukang Fault Belt, in Xinjiang

WU Chuan-yong, CHEN Jian-bo, SHEN Jun, SONG He-ping, WU Guo-dong, LUO Fu-zhong

*Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China*

**Abstract:** In order to understand the activity characteristics of the Fukang fault in Late-Quaternary, and accurately estimate the seismic hazard of the fault, a geological survey has been conducted along the Fukang fault. By surveying the deformation microtopography, excavating two large paleoearthquake trenches, and dating a series of samples of thermoluminescence, the quantity activity characteristics of the Ganhezi fault segment of the Fukang fault belt are revealed. The Ganhezi fault segment is a Holocene active fault, with a total length about 33 km. The fault activity is obvious, generating a series of apparent geomorphic traces on the surface. Since the Late-Quaternary, the average vertical slip rate of fault is about 0.34–0.43 mm/a. Since the Mid-Holocene, there were two paleoearthquake events; the strong earthquake recurrence period of the fault segment is about 2100–3750 a. The vertical surface displacement is about 1.5 m and the elapsed time is 4.11 ka of the latest paleoearthquake, corresponding to the paleoearthquake magnitude of between Ms7.2–7.4. The fault has accumulated a high energy so far.

**Key words:** Fukang fault belt; tectonic landform; Late-Quaternary; deformation characteristics; paleoearthquake.

## 0 引言

天山是欧亚大陆内部最大的一条造山带(Avouac *et al.*, 1993; Hendrix *et al.*, 1994; 邓起东等, 1999),逆冲推覆是其最主要的构造变形方式之一(邓起东等, 1999, 2000; Allen *et al.*, 1999; Burchfiel *et al.*, 1999).在新疆境内,天山南北两侧主要

发育有4个大的逆冲推覆构造,分别为南天山山前的柯坪推覆构造和库车推覆构造,以及北天山山前的乌鲁木齐山前推覆构造和博格达弧形推覆构造(邓起东等, 2000).这些山前的推覆构造是天山地区中强地震重要的孕育场所,已经发生过多次大震,如柯坪推覆构造内1902年曾发生过7.3级地震,之后在近百年的时间内,又接连发生了8次6级地震;库

车推覆构造内 1949 年曾发生过 7<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 级地震;乌鲁木齐山前推覆构造 1906 年也发生过 7.7 级地震. 相比上述几个推覆构造的地震活动水平而言,博格达推覆构造体内的地震活动明显偏弱,除 1965 年发生的 6.6 级地震外,没有更大的地震发生,而且中小地震活动水平也不高.

博格达弧形推覆构造是北天山东段构造运动最为显著的地区之一,该地区构造变形强烈,地貌反差较大,南北向在 30 km 的范围内,由海拔高度为 5 445 m 的博格达峰降至山前冲洪积平原的 1 000 m 左右,地形高差达 4 000 m 以上,显示出该地区新构造运动的强度. 晚第四纪以来整个构造带仍有较强活动,平均垂直滑动速率在 0.7~0.8 mm/a 以上(汪一鹏和沈军,2000),最新的 GPS 观测资料表明,博格达弧形构造南北向的地壳缩短速率在 3~5 mm/a(李杰等,2006). 博格达弧形推覆构造体系由 3 排构造带组成(伍致中,1989;汪一鹏和沈军,2000). 阜康断裂带是博格达推覆构造体系最前缘的构造带,是博格达推覆构造体系的边界断裂,该断裂带全长 140 km,由多条次级断裂斜列组成(栾超群等,1998a;尤惠川等,2003),晚第四纪以来活动强烈(柏美祥等,1997;栾超群等,1998a,1998b;尤惠川等,2002,2003;罗福忠等,2006;吴传勇等,2010),沿断裂多处分布有清晰的古地震形变带,显示出断裂具备发生强震的能力. 该地区强烈的构造运动与目前的地震活动水平呈现出明显的不协调,博格达地区地震活动偏弱,是否意味着该地区的能量积累已经达到较高的水平? 是否面临较大的地震危险性?

都是亟待解答的问题. 断裂活动段落长度、运动速率、最新活动时代以及累积的位移量等是准确评价活动断裂的重要定量数据(陈桂华等,2006),通过实测断错地貌、详细研究构造剖面 and 测年技术的支撑,能够准确获得断裂的晚第四纪活动特征(卢海峰等,2008). 本文在对阜康断裂带甘河子段进行野外地震地质调查与测量的基础上,开挖了 2 个大型探槽,采集了系列热释光测年样品,对阜康断裂甘河子段的运动特征有了较为清晰的认识,获得断裂的古地震活动的定量数据,为分析判定博格达地区长期地震危险性提供了依据.

### 1 断裂段活动的地质地貌证据

甘河子断裂段位于博格达推覆构造系的弧顶附近,是阜康断裂的主体段落. 甘河子断裂段西起三工河东岸,向东经四工河、五官沟、甘河子、石庄沟,截止于泉水沟一带,地表出露长度约 33 km,总体走向近 EW(图 1),为 S 倾的逆断层,断层倾角一般在 40°以下. 在四工河至黄草沟之间,断裂大致沿山前展布,构成基岩山体与山前冲洪积扇的分界线;黄草沟向东,侏罗纪砂岩沿断裂向北逆冲到中更新世砾石层上,地貌上表现为中更新世砾石丘陵的南界;甘河子以东,断裂再次构成山前冲洪积扇的边界. 全新世以来,甘河子断裂段仍有较强的活动,形成一系列的地质地貌现象.

#### 1.1 断裂活动的地质证据

五官沟是穿越甘河子断裂段的较大河流,该河

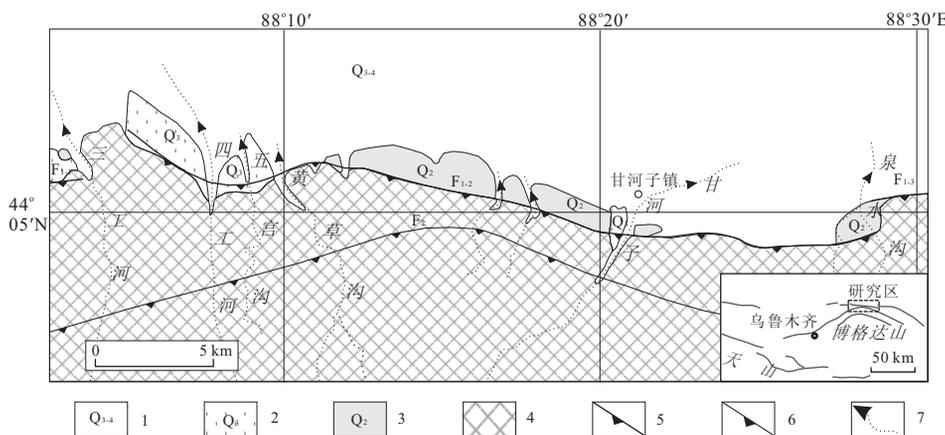


图 1 阜康断裂带甘河子段地质构造

Fig. 1 Structure of the Ganhezi fault segment of the Fukang fault belt

1. 上更新统一全新统; 2. 上更新统; 3. 中更新统; 4. 前新时带基岩; 5. 全新世活动断裂; 6. 晚更新世活动断裂; 7. 河流水系. F<sub>1-1</sub>. 阜康断裂水磨河段; F<sub>1-2</sub>. 阜康断裂甘河子段; F<sub>1-3</sub>. 阜康断裂白杨河段; F<sub>2</sub>. 雅玛里克断裂

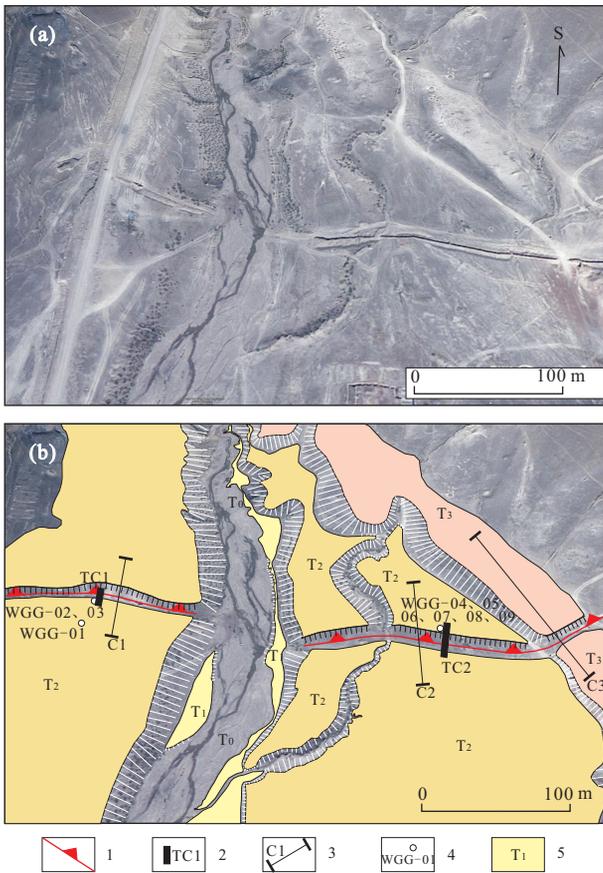


图 2 五官沟口阶地和陡坎分布及解译

Fig. 2 The distribution of terraces and fault scarp near Wugonggou

1. 断层; 2. 探槽及编号; 3. 陡坎测线及编号; 4. TL 样品编号; 5. 阶地及编号

两岸不对称的发育三级阶地(图 2)。其中,  $T_1$  阶地为堆积阶地, 拔河高度 2~3 m;  $T_2$  阶地为基座阶地, 拔河高度为 10~15 m;  $T_3$  阶地为基座阶地, 拔河高度为 25 m 左右。断裂通过之处, 五官沟的  $T_2$ 、 $T_3$  阶地发生了明显的断错变形, 地表形成顺坡向断层陡坎。跨断层陡坎开挖的大型探槽表明, 断裂断错了热释光年龄为  $5.27 \pm 0.45$  ka B. P. 的阶地上覆粉土层(图 3a)。在四工河附近, 断裂也断错了河流的  $T_3$  级阶地砾石层, 表现为侏罗纪砂岩向北逆冲到晚更新世砾石层上(图 3b), 阶地上覆的全新世粉土层也发生了明显的断错变形(尤惠川等, 2003)。

### 1.2 断裂活动的地貌证据

甘河子断裂段晚第四纪以来仍有较强活动, 其新活动形成了一系列的地貌现象, 主要表现为断裂断错山前的冲洪积扇和河流阶地形成断层陡坎。

博格达北麓山前一带地表沉积有厚层的风积黄土层, 冲洪积扇上的断层陡坎大部分被覆盖或改造, 仅在部分河流两岸的阶地上保留有清晰的断层陡坎地貌。在五官沟两岸, 断裂断错了河流的  $T_2$  阶地及山前冲洪积扇, 形成陡坎地貌, 陡坎走向  $60^\circ$ , 延伸长度约为 1 km, 陡坎总体走向  $50^\circ$ , 实测陡坎最大高度达 4.6 m 左右(图 3c, 图 4, 图 5), 陡坎向东高度有所降低, 在五官沟以东实测陡坎高度仅 2.8 m 左右(图 5)。五官沟左岸的  $T_3$  阶地也发生了明显的断错变形, 实测陡坎高度达 8.0 m 左右(图 5)。不同级数

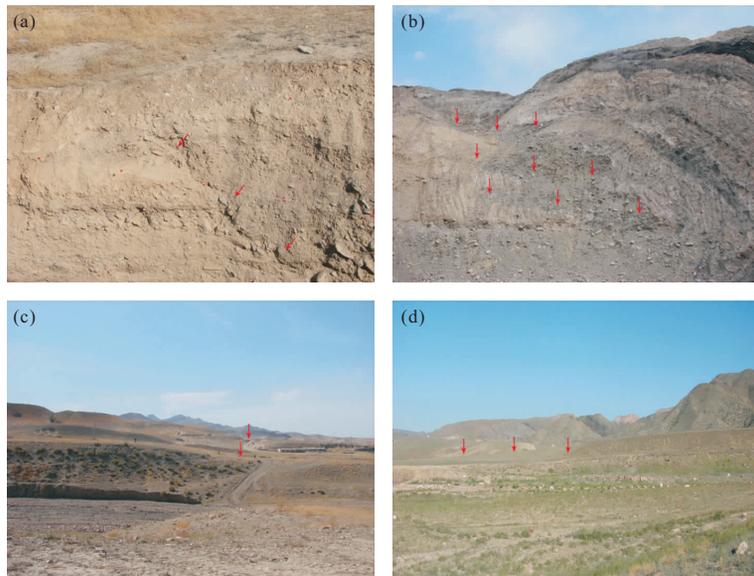


图 3 甘河子断裂段晚第四纪活动地质地貌证据

Fig. 3 Geological and landform photographs of the Late Quaternary activity of the Ganhezi fault

a. 五官沟断层断错  $T_2$  阶地砂砾石层及上覆粉土(镜向 E); b. 四工河断层断错  $T_3$  阶地砂砾石层及上覆粉土(镜向 E); c. 五官沟左岸  $T_2$  阶地上的断层陡坎地貌(镜向 W); d. 红沟右岸  $T_1$ 、 $T_2$  阶地上的断层陡坎地貌(镜向 ES)

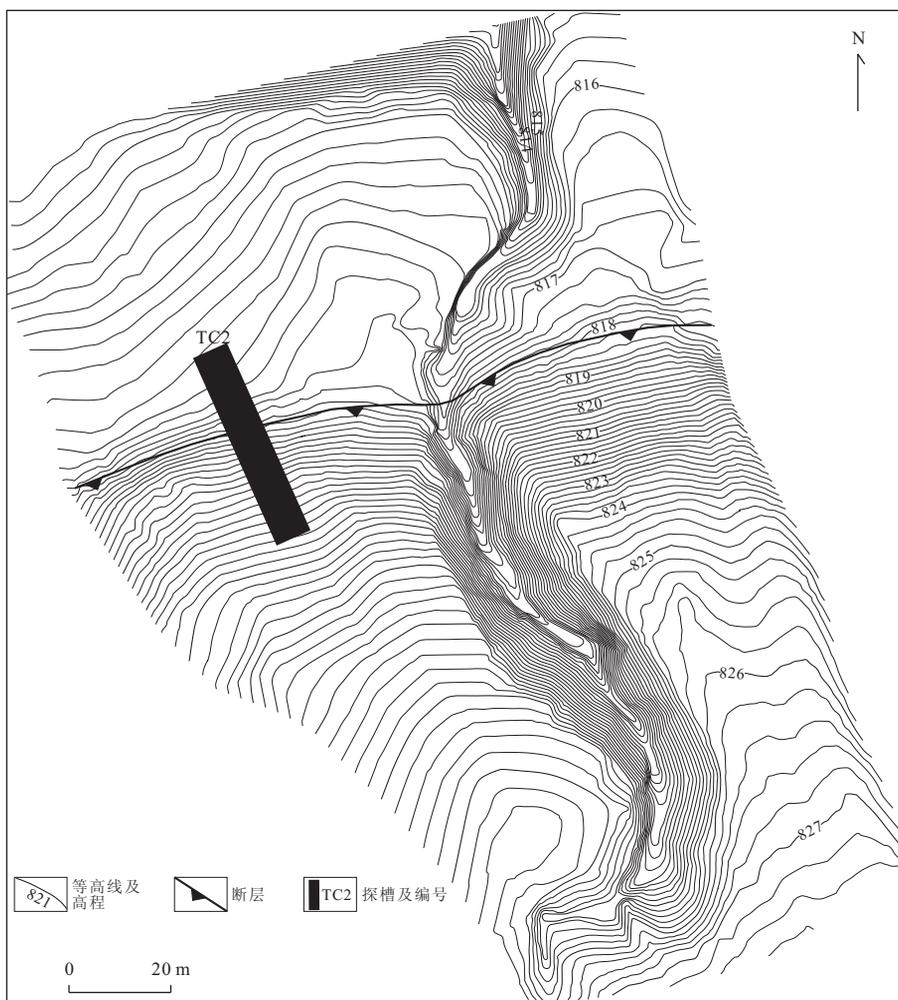


图4 实测五官沟左岸  $T_2$  阶地断错地貌

Fig. 4 Measured fault scarp on the second terrace of the Wugonggou

的阶地的位错量不同,具有形成时代愈老,相应的位错量愈大的现象,表明了断裂位错量随时间积累的过程.在红沟的右岸,可见断裂断错了  $T_1$  和  $T_2$  阶地,  $T_2$  阶地的垂直位错量 4.8 m,  $T_1$  阶地也发生了明显的变形,断裂两侧的垂直高差约为 0.5 m 左右(图 3d).

## 2 断裂段的滑动速率

前已述及甘河子断裂段晚第四纪以来仍具有较强活动性,新活动主要表现为向北的逆冲运动,并在晚第四纪地貌面上形成清晰的变形痕迹.通过测量获得这些地貌面的位移值和沉积物的相应年龄等定量数据,可以较为准确地获得断裂晚第四纪以来的平均滑动速率,从而能够更加准确地了解断裂的活动幅度与运动学特征.

在野外地质地貌调查的基础上,笔者分别采用皮尺和全站仪实测了五官沟的  $T_2$  和  $T_3$  阶地的变形地貌,获得了断裂的位错量(图 4,图 5).并在五官沟的  $T_2$  阶地上采集了一系列的热释光年龄样品,所采集的年龄样品由中国地震局地壳应力研究所测定,测定值见表 1.

在  $T_2$  阶地的沉积层中,采集了热释光年代样品 WGG-01,该样品采集于距地表约 2 m 的砂砾石夹层的细砂透镜体中(图 6),测定的年龄为  $15.02 \pm 1.27$  ka B. P.,在探槽 TC2 中同级阶地采集的细砂测年样品 WGG-09,测定的年龄为  $18.93 \pm 1.61$  ka B. P..关于天山北麓地区晚第四纪气候与阶地、冲洪积扇形成的关系,前人有过一些研究,认为该地区区域性  $T_2$  阶地于 20 ka 之前开始堆积,12~13 ka B. P. 废弃下切(张培震等,1995;邓起东等,2000;吕红华等,2008).同样位于北天山山前的五官沟的阶地形成时间应与此大致吻合,不会相差

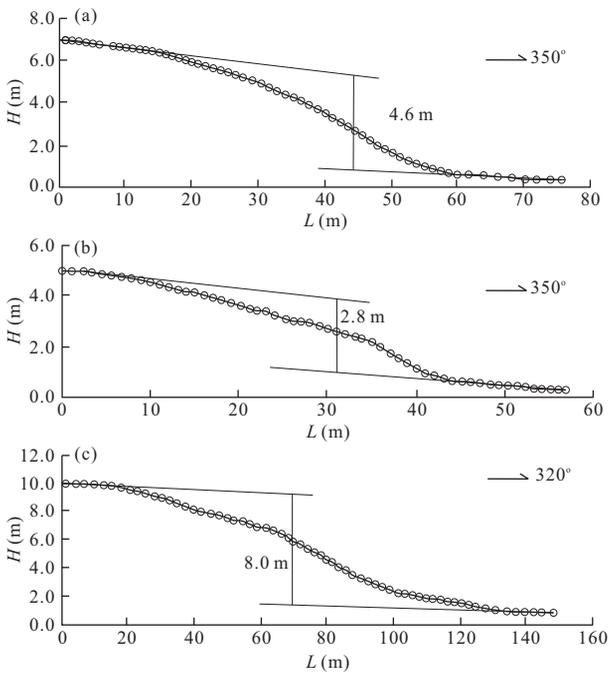


图 5 实测五官沟阶地陡坎剖面

Fig. 5 Surface profile of the fault scarp on terrace of the Wugonggou

a. 五官沟左岸  $T_2$  阶地陡坎剖面; b. 五官沟右岸  $T_2$  阶地陡坎剖面;  
c. 五官沟左岸  $T_3$  阶地陡坎剖面

太大. 结合本次测年结果以及区域性地貌面的研究成果, 综合判定五官沟  $T_2$  阶地地面的年龄介于 15~19 ka B. P. 之间. 在阶地上覆粉土层中采集的测年样品测定结果介于 4~9 ka B. P. 之间, 晚于阶地砾石层的沉积时间, 且测定结果表现为下老上新, 没有出现顺序颠倒的现象, 尤惠川等(2002)在该套粉土层中部测定的年代结果为 6 ka B. P. 左右, 与笔者的测试结果基本相符, 表明本次测定的年代结果是比较真实可靠的.

五官沟  $T_2$  阶地上陡坎最大高度在 4.6 m 左右. 断裂错动地表形成断层陡坎后, 上盘不断遭受剥蚀, 下盘则沉积了细颗粒的粉土层, 一定程度上消减了陡坎的原始高度. 根据探槽开挖揭露的结果可知, 断层下盘厚度达 2 m 左右, 这样, 断层陡坎的真实高度可能在 6.5 m 以上, 由此得出  $T_2$  阶地形成以来断裂的平均垂直滑动速率为 0.34~0.43 mm/a 左右.

### 3 断裂晚第四纪强震破裂特征

#### 3.1 古地震探槽

阜康断裂在五官沟沟口断错了河流阶地, 形成顺坡向的断层陡坎, 在断层下盘, 沉积了厚约 1~

2 m 的粉土层, 在五官沟左、右两岸的  $T_2$  阶地上, 分别开挖了一个探槽(图 2).

**3.1.1 探槽 TC1** 探槽 TC1 位于五官沟右岸的  $T_2$  阶地上, 探槽东壁揭示的地层层序如下(图 3, 图 7):

层①: 土黄色风积粉土层, 较松散, 上部含植物根系;

层②: 土黄色风积粉土层, 松散;

层③: 青灰色砾石层, 具有水平层理, 下部砾石粒径较大, 多在 7~15 cm, 上部砾石较小, 一般在 5 cm 以下, 少量可达 10 cm, 砾石磨圆一般, 次棱角状;

层④: 灰色砾石层, 具有水平层理, 砾石磨圆一般, 次棱角一次圆状, 砾石粒径多在 3 cm 以下, 个别可达 15 cm, 分选差;

层⑤: 灰色卵砾石层, 次棱角状, 具水平层理, 上部砾石粒径较小, 多在 5 cm 以下, 少量可达 15~20 cm, 中下部粒径较大, 多在 10 cm 以上, 最大可达 30 cm 以上, 断层附近牵引变形明显;

层⑥: 崩积楔, 松散, 主要以灰色砾石为主, 杂乱堆积, 无层理, 粉土充填.

由地层岩性和分布特征, 结合断层对地层的切错关系和年代样品分析(图 7, 表 1), 认为该探槽揭露出 2 次古地震事件. 第 1 次古地震发生在层④堆积过程中, 断层发生快速错动, 层④下部的砾石层发生明显的牵引变形, 与该层上部的砾石层形成明显的角度不整合, 由于层④主要由大颗粒的砂砾石组成, 无法采集年代样品, 该次古地震事件的年代未能限定. 第 2 次古地震事件发生在层②堆积后, 断层错动层②, 形成高约 1.5 m 的垂直错距, 并在断层下盘形成崩积楔(层⑥), 在崩积楔上、下的粉土中采集 TL 样品的测年结果分别为  $4.11 \pm 0.35$  ka B. P.、 $5.27 \pm 0.45$  ka B. P., 由此确定该次古地震事件发生在距今  $(4.11 \pm 0.35) \sim (5.27 \pm 0.45)$  ka 之间.

**3.1.2 探槽 TC2** 探槽 TC2 位于五官沟左岸的  $T_2$  阶地上, 探槽西壁揭示的地层层序如下(图 8):

该探槽剖面揭露出一条断层剖面, 断层产状:  $85^\circ/S \angle 25^\circ$ , 由地层岩性和分布特征, 结合断层对地层的切错关系和年代样品分析(表 1, 图 8), 认为该探槽揭露出 2 次古地震事件. 两侧事件先后发生在粉土层沉积的早期和晚期, 并形成 2 个崩积楔层④和层⑤. 在层③顶部和底部以及层⑥底部中取热释光年代样品 WWG-05、WWG-06、WWG-07, 测定的年龄分别为  $4.91 \pm 0.42$  ka B. P.,  $6.44 \pm 0.55$  ka B. P.,  $6.75 \pm 0.57$  ka B. P., 由此确定该探槽揭露的 2 次事件分别发生在距今  $(6.44 \pm 0.55) \sim (6.75 \pm 0.57)$  ka 和  $4.91 \pm 0.42$  ka 之后.

#### 3.2 甘河子断裂段古地震定量参数研究

**3.2.1 古地震法** 古地震探槽资料表明, 甘河子断裂段在全新世期间仍有较强活动, 2 个探槽均揭露

表1 五官沟附近沉积物热释光年龄测定值

Table 1 Thermoluminescence age of the sediment from the Wugonggou

样品序号	采样地点与层位	放射性元素含量			年剂量率	等效剂量	样品年龄(ka)
		U( $10^{-6}$ )	Th( $10^{-6}$ )	K <sub>2</sub> O(%)	G( $10^{-3}$ a)	ED(Gy)	
WGG-01	T <sub>2</sub> 阶地砾石层中上部	2.69	9.02	2.66	1.99	30.0	15.02±1.27
WGG-02	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层下部	3.10	10.6	2.86	2.27	12.0	5.27±0.45
WGG-03	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层上部	3.39	12.0	2.70	2.43	10.0	4.11±0.35
WGG-04	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层底部	2.69	11.9	2.80	2.25	22.0	9.76±0.83
WGG-05	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层顶部	3.20	12.8	2.69	2.44	12.0	4.91±0.42
WGG-06	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层中部	2.84	10.3	2.83	2.12	14.0	6.44±0.55
WGG-07	T <sub>2</sub> 阶地上覆粉土层下部	2.65	9.48	2.91	2.07	14.0	6.75±0.57
WGG-08	T <sub>2</sub> 阶地砾石层顶部	3.34	8.69	2.55	2.13	24.0	11.28±0.96
WGG-09	T <sub>2</sub> 阶地砾石层中上部	2.57	9.02	2.61	1.95	37.0	18.93±1.61

图6 T<sub>2</sub> 阶地样品采集位置

Fig. 6 Location of the TL sample at the second terrace

出2次古地震事件,通过同一段落不同探槽之间事件的逐次限定能够较为准确地得到古地震的时间序列(毛凤英和张培震,1995).利用多探槽逐次限定,得到甘河子断裂段全新世中期以来有过2次古地震事件,分别发生在距今4.11~4.91 ka和6.44~6.75 ka(图9),古地震复发间隔为2.1 ka,最新一次古地震事件造成的同震垂直位移量为1.5 m左右,离逝时间已经达到4.11 ka.

**3.2.2 滑动速率法** 根据地震原地复发的时间可预报模式(Shimazaki and Nakata,1980),一个断裂段的特征地震之间平均时间间隔 $T$ ,可由该断裂段最晚一次地震的同震位错量 $D$ 与断层的平均滑动速率 $v$ 两者的比值估计(闻学泽,1991;Field *et al.*,2009),即:

$$T = D/v, \quad (1)$$

式中: $v$ 为地质学方法得到的较长时间断裂平均滑动速率, $D$ 为断裂一次古地震事件的同震位移量.

野外地质地貌调查发现,甘河子断裂段晚第四纪以来以逆冲运动为主,全新世以来的平均垂直滑动速率为0.34~0.43 mm/a(本文)或0.42 mm/a左右(尤惠川等,2002),这一相对接近的滑动速率表明这一数据是较为可信的.在此,笔者取甘河子断裂段全新世以来的平均垂直滑动速率为0.4 mm/a.前已叙述,甘河子断裂段最新一次古地震事件的垂直位移量为1.5 m左右,由公式(1)得到断裂特征地震的复发周期为3750 a.

## 4 结论与讨论

甘河子断裂段全长约33 km,是一条南倾的低角度逆冲断裂,该断裂全新世以来仍有较强的活动,地表形成一系列的地质地貌现象,晚第四纪晚期以来的平均垂直滑动速率为0.34~0.43 mm/a.

甘河子断裂段全新世中期以来有过2次古地震事件,分别发生在距今(6.44±0.55)~(6.75±0.57)ka和(4.11±0.35)~(4.91±0.42)ka之间,古地震复发周期为2100~3750 a,断裂最新一次事件造成的地表垂直位移量为约1.5 m,该次事件的离逝时间已达4.11 ka.甘河子断裂段最新一次古地震的离逝时间已经超过复发周期,这预示着该断裂的能量积累已经达到较高的水平,未来大震的形势较为严峻.

历史上,阜康断裂带没有发生大震的记录.新疆区域天山和青藏高原北部西昆仑山地区,通常震级 $M_s \geq 7$ 的地震才能产生明显的地震地表破裂带(冯先岳,1997),因此,阜康断裂上的断层陡坎是7级以上地震的产物.对于新疆挤压构造区逆断裂上震级( $M_s$ )与同震位移量( $D$ )的经验关系前人进行过研究,笔者采用经验关系式(2): $M_s = 7.00 + 1.05 \lg D$

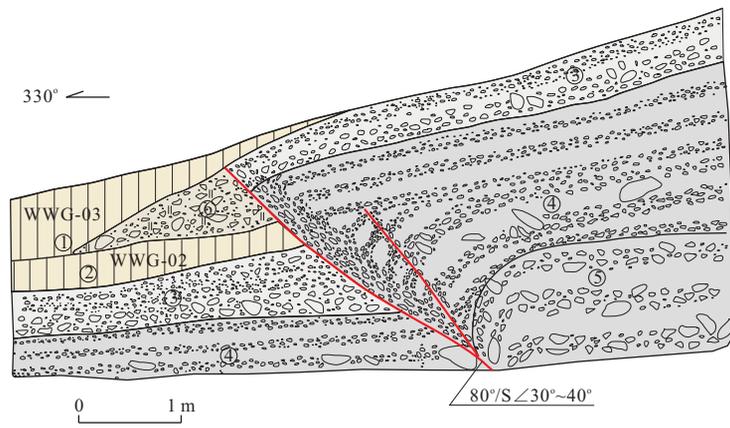


图 7 五宫沟右岸 T<sub>2</sub> 阶地探槽剖面

Fig. 7 Fault profile at the second terrace on the right bank of the Wugonggou

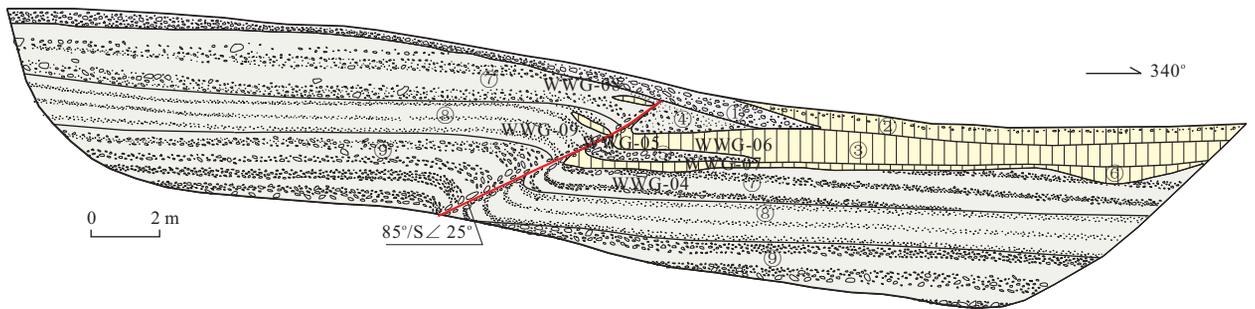


图 8 五宫沟左岸 T<sub>2</sub> 阶地探槽剖面

Fig. 8 Fault profile at the second terrace on the left bank of the Wugonggou

①灰白色砾石层,松散,砾石呈次棱角状,分选一般,无明显层理,粒径一般在 4~10 cm,最大可达 20 cm;②土黄色粉土层,松散,表层植物根系发育,含少量砾石;③土黄色粉土层,松散;④灰色崩积楔体,以砾石为主,下部粒径较上部大,粉土、砂砾充填;⑤灰色崩积楔体,以砾石为主,无层理,杂乱堆积,砂砾充填;⑥土黄色粉土层,稍密,下部含少量砾石,砾石粒径大小不一,分选较差,最大者达 5 cm 左右;⑦灰色砾石层,次棱角状,具水平层理,分选较差,下部普遍粒径较大,上部略有减小,中细砾和粗砂混杂,局部夹有粗砂透镜体;⑧灰色砾石层,次棱角状,具水平层理,分选较好,粒径普遍较小,一般在 2 cm 以下,局部夹有细砂和粉土透镜体;⑨灰色砾石层,次棱角状,具水平层理,分选差,下部砾石粒径较大,多在 5~15 cm,上部砾石砾径相对较小

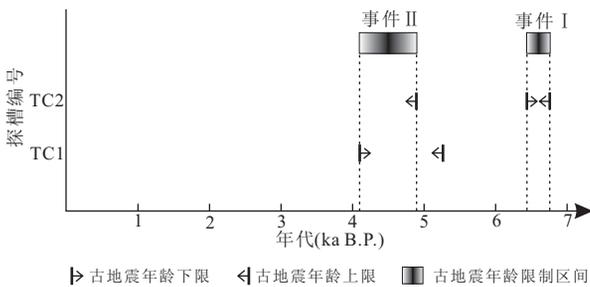


图 9 甘河子断裂段全新世古地震事件分析

Fig. 9 Correlation between paleoearthquakes in Holocene at different trenches on the Ganhezi fault segment

致谢:在野外工作过程中,得到新疆昌吉回族自治州地震局谢宏局长,高定才局长,杨坚科长,以及李翠和朱枫同志的大力支持和帮助,在此深表感谢。感谢中国地震局地壳应力研究所测试了文中的 TL 年代样品,同时也衷心感谢审稿人提出的宝贵修改意见。

References

Allen, M. B., Vencint, S. T., Wheller, P. T., 1999. Late Cenozoic Tectonics of the Keping Thrust Zone: Interactions of the Tien Shan and Tarim Basin, Northwest China. *Tectonics*, 18 (4): 639 - 654. doi: 10. 1029/1999TC900019

Avouac, J. P., Tapponnier, P. T., Bai, M. X., et al., 1993. Active Thrusting and Folding along the Northern Tien-shan, and Late Cenozoic Rotation of the Tarim Relative

(邓起东等, 1992)、公式 (3):  $M_s = 6.972 + 1.177 \lg D$  和公式 (4):  $M_s = 7.205 + 0.974 \lg D$  (冯先岳, 1997), 估算得到断裂上古地震震级在 7.2~7.4 之间。

- to Dzhungaria and Kazakhstan. *J. Geophys. Res.*, 98: 6755—6840.
- Bai, M. X., Fan, F. Q., Wu, X. L., et al., 1997. The Active Tectonics in Northern apron of Bogeda Mountain. *Inland Earthquake*, 11(1): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Burchfiel, B. C., Brown, E. T., Deng, Q. D., et al., 1999. Crustal Shortening on the Margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *International Geology Review*, 41(8): 665—700.
- Chen, G. H., Xu, X. W., Wen, X. Z., et al., 2006. Application of Digital Aerophotogrammetry in Active Tectonics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 405—410 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 1999. Reverse Fault and Fold Zone in the Urumqi Range Front Depression of the Northern Tianshan and Its Genetic Mechanism. *Earth Science Frontier*, 6(4): 191—201 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 2000. Active Tectonics of Tianshan. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Deng, Q. D., Yu, G. H., Ye, W. H., 1992. Study on the Relationship of Earthquake Surface Rupture Parameters and Magnitude. In: Deng, Q. D., ed., Research on Active Faults (2). Seismological Press, Beijing, 247—264 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. Y., 1997. The Paleearthquakes in Xinjiang Region. Sci-Tech and Public Health Press of Xinjiang, Urumqi (in Chinese).
- Field, E. H., Dawson, T. E., Felzer, K. R., et al., 2009. Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2 (UCERF 2). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4): 2053—2107. doi: 10.1785/0120080049
- Hendrix, M. S., Dumitru, T. A., Graham, S. A., 1994. Late Oligocene-Early Miocene Unroofing in the Chinese Tianshan: An Early Effect of the India-Asia Collision. *Geology*, 22(6): 487—490. doi: 10.1130/0091-7613
- Li, J., Wang, X. Q., Fang, W., et al., 2006. Deformation Character of Tectonic Block Motion in Urumqi Region Inverted with GPS Technique. *Inland Earthquake*, 20(2): 143—148 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. F., He, Z. T., Zhao, J. X., et al., 2008. Quantitative Analysis on Activity of the Yuanmou Fault in Late Quaternary. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 852—860 (in Chinese with English abstract).
- Luan, C. Q., Luo, F. Z., Hu, J., et al., 1998a. The Dislocating Activities of Gumudi Fault in Xinjiang in Holocene. *Inland Earthquake*, 12(2): 133—141 (in Chinese with English abstract).
- Luan, C. Q., Luo, F. Z., Hu, J., et al., 1998b. The Structures and Activities in Holocene on the Western Segments of Northern Bogeda Fault in Xinjiang. *Inland Earthquake*, 12(4): 355—361 (in Chinese with English abstract).
- Luo, F. Z., Ruan, C. W., Fang, W., 2006. Modern Tectonic Motion Character on the Northern Verge of Bogurda Mountain, in Xinjiang. *Inland Earthquake*, 20(2): 109—114 (in Chinese with English abstract).
- Lv, H. H., Li, Y. L., Nan, F., et al., 2008. Sequences and Ages of Fluvial Terraces along the Northern Piedmont of the Tianshan Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 63(1): 65—74 (in Chinese with English abstract).
- Mao, F. Y., Zhang, P. Z., 1995. Method for Progressive Constraint of Paleoseismic Events and Paleoseismological Study of Major Fault Zone in Northern Xinjiang. In: Deng, Q. D., ed., Research on Active Faults (4). Seismological Press, Beijing, 153—164 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. P., Shen, J., 2000. Basic Features of Active Structures at the Northern Foothill of Tianshan Mountains, China. *Xinjiang Geology*, 18(3): 203—210 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., 1991. Problem on Quantitative Study of Active Fault and Probabilistic Estimation of Long-Term Seismic Potential. In: Deng, Q. D., ed., Research on Active Faults (1). Seismological Press, Beijing, 174—183 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Y., Shen, J., Shi, J., et al., 2010. Late-Quaternary Activity of the Gumudi Fault of the South Fukang Fault Belt on the North Margin of the Bogda Mountains in the Xinjiang Autonomous Region. *Quaternary Sciences*, 30(5): 1020—1029 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Z., 1989. The Features of Oil and Gas Accumulation and Suggestion for Exploration in East Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 10(4): 15—21 (in Chinese with English abstract).
- Shimazaki, K., Nakata, T., 1980. Time-Predictable Recurrence Model for Large Earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 7(4): 279—282. doi: 10.1029/GL007i004p00279
- You, H. C., Ren, L. S., Chen, G. X., et al., 2002. Activity Forms and Slip Rates of Fukang Fault. *Earthquake Research in China*, 18(3): 239—248 (in Chinese with English abstract).
- You, H. C., Ren, L. S., Zhang Y. M., 2003. Structural Ge-

ometry and Activities of the Fukang-Jimsar Fault Zone, Xinjiang. *Seismology and Geology*, 25(3):375—384 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Yang, X. P., et al., 1995. Glaciofluvial Geomorphology and Neotectonics along the Range-Front of the Northern Tianshan. In: Deng, Q. D., ed., *Research on Active Faults (4)*. Seismological Press, Beijing, 63—78 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

柏美祥, 范芳琴, 吴晓莉, 等, 1997. 博格达山北麓活动构造. *内陆地震*, 11(1):16—21.

陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 等, 2006. 数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3):405—410.

邓起东, 于贵华, 叶文华, 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究. 见: 邓起东编, *活动断裂研究(2)*. 北京: 地震出版社, 247—264.

邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 1999. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂—褶皱带及其形成机制. *地学前缘*, 6(4):191—201.

邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. *天山活动构造*. 北京: 地震出版社.

冯先岳, 1997. *新疆古地震*. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社.

李杰, 王晓强, 方伟, 等, 2006. 应用 GPS 技术反演乌鲁木齐地区构造块体运动变形特征. *内陆地震*, 20(2):143—148.

卢海峰, 何仲太, 赵俊香, 等, 2008. 元谋断裂晚第四纪活动性定量分析. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6):852—860.

栾超群, 罗福忠, 胡军, 等, 1998a. 新疆古牧地断裂全新世的断错活动. *内陆地震*, 12(2):133—141.

栾超群, 罗福忠, 胡军, 等, 1998b. 新疆博格达山北麓山前断裂西段的断裂组成及其在全新世时期的活动. *内陆地震*, 12(4):355—361.

罗福忠, 阮成雯, 方伟, 2006. 新疆博格达山北缘现今构造运动特征. *内陆地震*, 20(2):109—114.

吕红华, 李有利, 南峰, 等, 2008. 天山北麓河流阶地序列及形成年代. *地理学报*, 63(1):65—74.

毛凤英, 张培震, 1995. 古地震研究的逐次限定方法与新疆北部主要断裂带的古地震研究. 见: 邓起东编, *活动断裂研究(4)*. 北京: 地震出版社, 153—164.

汪一鹏, 沈军, 2000. 天山北麓活动构造基本特征. *新疆地质*, 18(3):203—210.

闻学泽, 1991. 活断层的定量研究与长期地震潜势的概率估计问题. 见: 邓起东编, *活动构造研究(1)*. 北京: 地震出版社, 174—183.

吴传勇, 沈军, 史杰, 等, 2010. 新疆博格达北缘阜康南断裂带古牧地段晚第四纪活动特征. *第四纪研究*, 30(5):1020—1029.

伍致中, 1989. 准噶尔盆地东部地区油气聚集特征及勘探建议. *新疆石油地质*, 10(4):15—21.

尤惠川, 任利生, 陈国星, 等, 2002. 东天山阜康断裂的变形方式与全新世滑动速率. *中国地震*, 18(3):239—248.

尤惠川, 任利生, 张玉梅, 2003. 新疆阜康—吉木萨尔断裂带的几何特征与活动性研究. *地震地质*, 25(3):375—384.

张培震, 邓起东, 杨晓平, 等, 1995. 天山北麓的冰水冲洪积地貌与新构造运动. 见: 邓起东编, *活动断裂研究(4)*. 北京: 地震出版社, 63—78.