

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2011.04.002

# 西南天山东柯坪推覆系 古地震初步研究

李安 冉勇康\* 徐良鑫 刘华国 李彦宝

(中国地震局地质研究所, 国家地震活动断层研究中心, 北京 100029)

**摘要** 西南天山柯坪推覆系发育多排逆断裂-褶皱带,各排逆断裂-褶皱带的变形速率并不一致,古地震发生规律也可能具有不同特点。自汶川地震造成龙门山中央和前山两条断裂同时活动之后,对于如何判断多条逆断裂级联破裂的逆断裂古地震事件,是一个值得讨论的问题。文中通过对东柯坪塔格和萨尔干塔格两排逆断裂-褶皱带山前多期地貌面(冲洪积扇面)上发育的不同高度的断层陡坎进行测量和探槽古地震事件分析,通过 $^{10}\text{Be}$ 暴露年龄获得各级地貌面形成时间,利用相邻两级记录了不同次数古地震的地貌面年龄对每次古地震事件的上下限时间进行限制,得到了两排逆断裂-褶皱带山前不同的古地震复发周期、单次古地震垂直位错量和各自的古地震事件发生时间范围。结果表明距今20ka以来,东柯坪塔格山前古地震平均复发周期为 $(6.7 \pm 0.84) \text{ka}$ ,单次事件垂直位错1m左右;萨尔干塔格山前古地震平均复发周期为 $(5.4 \pm 0.50) \text{ka}$ ,单次事件的垂直位错0.8~1.2m,古地震活动强度基本一致,萨尔干塔格的周期略短。根据这些结果对是否发生级联破裂进行了初步探讨,认为探槽揭露出的第2次和第3次古地震事件发生时间范围重合,存在发生级联破裂的可能。

**关键词** 古地震  $^{10}\text{Be}$  暴露年龄 天山 柯坪

**中图分类号**: P315.2

**文献标识码**: A

**文章编号**: 0253-4967(2011)04-0752-13

## 0 引言

由于新生代时期印度板块与亚欧板块碰撞,天山造山带的古生代与中生代构造重新复活,再度隆起,形成了这一世界上最年轻和最宏伟的内陆再生造山带(冯先岳,1985; Avouac *et al.*, 1993; Hendrix *et al.*, 1994; 邓起东等,1999)。在天山南北山前的多个拗陷中均发育了多排逆断裂-褶皱带。从地震剖面资料上看,这些多排逆断裂-褶皱带具有统一的浅层滑脱面。前人对天山地区各条断裂和褶皱带中长期变形速率的研究显示天山地区不仅构造运动强烈而且变形复杂。Stephen等(2002)对纳伦盆地(Naryn Basin)以北的天山山体的活动构造的研究结果认为,东经 $74.5^\circ$ 附近天山三分之二宽度范围内的地壳缩短速率是 $(11 \pm 2/-1) \text{mm/a}$ 。西南天山的柯坪活动逆断裂-褶皱带中,皮羌断裂东西两侧的地壳缩短量分别为40km和45km(杨晓平等,2006; 冉勇康等,2006),南天山库车逆断裂-褶皱带中生代以来的地壳缩短量达27~37km

〔收稿日期〕 2011-09-01 收稿,2011-11-09 改回。

〔基金项目〕 国家自然科学基金(40872130)和财政部重大专项“我国重点监视防御区活动断层地震危险性评价”共同资助。

\* 通讯作者: 冉勇康,研究员, E-mail: ykran@263.net。

(Burchfiel *et al.*, 1999; 杨晓平等, 2001; 汪新等, 2002; 汪新, 2005), 北天山玛纳斯逆断裂-褶皱带石河子一带的地壳缩短量为 8.5 ~ 10.5 km, 最东端吐鲁番盆地中央隆起带的地壳缩短量为 6 ~ 7 km (杨晓平等, 2008)。这 4 个山前活动逆断裂-褶皱带大致代表了中国天山自西向东不同段的最小地壳缩短量, 反映出天山新生代地壳缩短向东减小的构造变形。同时天山地区除了 SN 向地壳缩短形成的天山南北麓和山间的活动逆断裂-褶皱带, 还存在大型的 NW 向右旋走滑断裂, 天山西段地区发育的走向约 340° 的塔拉斯-费尔干纳断裂, 第四纪以来的右旋活动速率达到 10 mm/a 左右 (Burtman *et al.*, 1996), 博阿断裂也是一条 NW 向斜切天山的活动走滑断裂, 西段晚第四纪右旋活动速率为 5 mm/a (杨晓平等, 2000; 沈军等, 2003), 东段活动速率为 1.4 mm/a (沈军等, 2003), 吐鲁番盆地以南部分为晚第四纪不活动的断裂。同时, 天山地区百余年来发生了多次 8 级地震和数十次 7 级以上地震 (陈祥玉等, 1994; 中国地震简目编辑组, 2000)。因此, 研究变形速率快慢与地震强度和周期的关系, 对认识多排逆断裂破裂形式和各排逆断裂之间的活动关系具有一定的意义。在此认识基础上, 通过对东柯坪塔格推覆系前后两排单斜山山前的地貌面变形和形成年龄的分析, 各地貌面形成以来古地震次数和位移量的讨论, 可以得到东柯坪塔格推覆系各排逆断裂的一些活动差异特点和古地震复发规律。

汶川地震作为目前已知惟一的单次地震造成 2 条断裂同时活动的逆断裂型大地震 (xu *et al.*, 2009), 它对活动逆断裂的研究提出了新的科学问题。在龙门山后山、中央和前山断裂中, 认为后山断裂基本不活动, 中央和前山断裂仍活动强烈 (Densmore *et al.*, 2007)。在多排逆断裂推覆系中, 类似于龙门山前、中、后 3 条断裂具有差异活动强度的情况是否具有普遍性? 像汶川地震这种多条逆断裂级联破裂的情况到底是个案还是常态? 柯坪推覆系是典型的多排逆断裂推覆系, 并具有相同的滑脱面 (杨海军等, 2010)。在柯坪推覆系中的各排逆断裂-褶皱带是否存在时间和空间上的变形差异, 是否出现过多条逆断裂级联破裂的古地震事件, 是一个值得研究的问题。

## 1 柯坪推覆系构造背景

柯坪逆冲推覆构造系位于塔里木盆地西北缘, 北以喀拉铁克断裂与南天山晚古生代造山带为界, 南以柯坪塔格南缘逆断裂与塔里木盆地内 NWW 向的塔里木西南坳陷、巴楚断隆和阿瓦提凹陷为界, 西界位于八盘水磨一带, 与阿图什-八盘水磨逆冲构造带相接, 东端位于阿克苏附近, 与库车逆冲构造系呈过渡关系 (贾承造, 1997; 曲国胜等, 2001)。推覆系由多排 NEE 向延伸的弧形逆断裂-褶皱带构成, 被 NWW 向的皮羌断裂分为东、西两段。西段发育 3 排逆断裂-褶皱带; 东段以三岔口为界, 西到皮羌断裂, 表现为 6 排逆断裂-褶皱带, 东到柯坪, 表现为 3 排逆断裂-褶皱带。各排褶皱仅残留背斜北翼, 缺失南翼地层, 主断裂出露地表, 表现为古地震断层陡坎。整个区域古生界发育齐全, 岩性以砂岩和灰岩为主, 中、下寒武统发育较多的膏盐层, 成为该区重要的构造变形控制层。中生代在柯坪逆冲推覆系中仅沉积少量白垩纪地层, 新生代地层发育不全, 厚度不大 (图 1)。

## 2 主要变形形式

从深部地震探测资料上看 (杨海军等, 2010), 柯坪推覆系各排逆断裂-褶皱带由于巨量的剥蚀, 主断裂已经贯通至地表, 与之对应的主山体没有明显的褶皱变形, 主要表现为主断裂错断

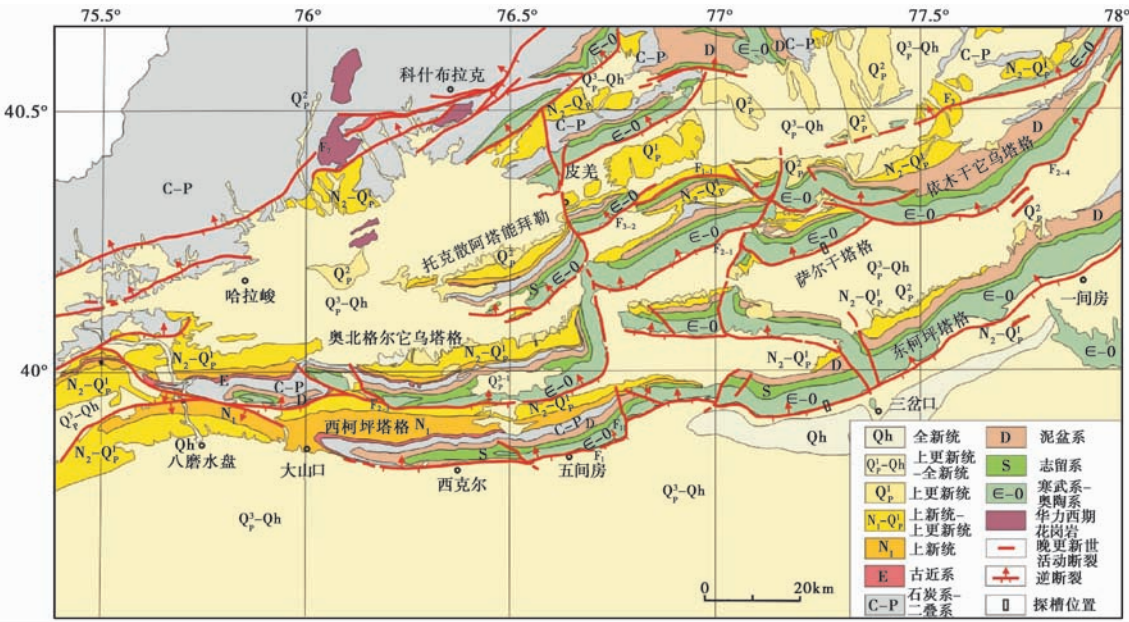


图 1 柯坪逆冲推覆构造地质图

Fig. 1 The geological map of Kalpin nappe structure.

变形为主;在主断裂前的地层中没有断裂发育,以褶皱变形为主。从地表地质地貌上,也显示相同的构造特征。

柯坪推覆系晚第四纪的变形主要表现为 2 种形式。其一,逆断裂-褶皱带山前地貌面(冲洪积扇面)褶皱变形。最为明显的是在柯坪塔格和依木干它乌塔格山前冲洪积扇面上分别发育的新生次级背斜三郎塔格和五郎塔格的隆升,是各排褶皱带最新的褶皱变形。其二,逆断裂-褶皱带山前主逆断裂的断错变形,表现为古地震产生的断层陡坎。山前的多期冲洪积扇面上古地震断层陡坎的高度并不一致,因此各级地貌面形成以来发生的古地震事件次数和位移量存在差异。同时由于古地震造成上盘地貌面抬升,在断裂上盘保留的地貌面级数大于下盘地貌面级数。通过对特征地点各级地貌面上不同高度的地震陡坎的探槽开挖,可以揭示各级地貌面形成以来记录的古地震次数和位移量。结合地貌面形成年龄,可进行山前断层面的断错速率分析。

3 柯坪古地震测年

柯坪地区属于干旱气候区,缺乏<sup>14</sup>C测年样品的物质来源。同时断层陡坎位于高耸的单斜山山前冲洪积扇面上,物质成分多以粗砾石为主,几乎没有释光测年方法所需的粉细砂层。利用粗砾石层砾石间的填充砂所做出的结果可信用度欠佳。

在宇宙成因核素测年方法中,利用<sup>10</sup>Be 元素定年主要用于对地貌面暴露年龄的测定。测年样品成分可以为含石英的小砾石或粗砂,干旱地区地貌面在形成之后表面受水流剥蚀量很小。利用宇宙成因核素测年方法,对柯坪地区地貌面年龄的确定具有较好的可信用度。

本文得到的东柯坪塔格和萨尔干塔格山前冲洪积扇面样品的测年数据,是由法国宇宙成因核素国家实验室(Laboratoire national des nucleides cosmogeniques)测量得出的。根据研究区核

素生成速率和对相应地貌面年龄的初步估计,通过适当增加石英样品用量的方式尽量提高测试靶中  $^{10}\text{Be}$  的含量,使加速器测试的结果有更高的精度。通过 $^{10}\text{Be}$  测年不确定度模型对所得结果的分析(Lal,1991; stone,2000; Balco *et al.*, 2008),认为不确定度可控制在 12.6% 以内。

通过利用各级地貌面年龄、探槽剖面中揭露的古地震次数和单次事件位移量,结合不同级地貌面上陡坎的不同高度,可控制古地震的复发周期和发生时间。对各期地貌面进行测年分析得到的年龄结果见表 1。

4 山前古地震及地貌变形

4.1 东柯坪塔格山前

三岔口加油站北侧东柯坪塔格(第 1 排单斜山)前具有 5 级冲积扇面,多于该地区一般的 3 级地貌面,同时在这些地貌面上发育了多级不同高度的地震陡坎,古地震事件序列最为完整。其中  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  3 级地貌

面上下盘均有保留,上盘拔河高度分别为 1.5m、3.7m 和 8.9m,在  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  3 级地貌面的断层陡坎高度分别为 0.64m、1.33m 和 3.0m。 $T_4$  和  $T_5$  两级地貌面仅保留上盘,与现今冲沟高差分别为 20.8m 和 37.2m(图2,3)。除  $T_1$  外各级地貌面均属基座型地貌面,断层的产状为  $350^\circ \angle 20^\circ$ ,因此, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的水平缩短量分别为: 1.3,2.7,6.1m。在  $T_3$  地貌面的断层陡坎处开挖探槽揭露了 3 次古地震事件(图4)。

在  $T_3$  陡坎位置清理的探槽剖面揭露地层由下至上依次为(图4):

U1 灰白色粗砾石层,仅上盘出露,砾石直径 10~20cm; 由于砾石直径不同而略显层理; 顶部有 1 层厚约 20cm、粒径 5~10cm 的砾石层;

U2 含砂质细砾石层,粒径 3~5cm,层顶部含细砂或粉砂质较高,略有土壤化,盐碱程度较高,可以推测为古地面层;

U3-1 第 1 次古地震事件形成的崩积楔,为砾石混杂堆积;

U3-2 地震后陡坎片流形成的细粒堆积物,与下伏 U3-1 崩积楔混杂堆积有明显分界线;

U4-1 第 2 次古地震事件形成的崩积楔,也具有二元结构,下部混杂砾石较多,上部砂质含量高,但二者为逐渐过渡,无明显界限;

U4-2 含粉砂和细砂质较高的细砾石层,盐碱化程度很高,颜色较 U1 和 U2 层略深,粒径 2~3cm; 为坎前堆积地层;

U5 第 3 次(最新)古地震事件形成的崩积楔或坎前堆积物。

整个探槽剖面中 3 个崩积楔(U3-1、U4-1 和 U5)的变形程度不同,U3-1 崩积楔仅残留下盘部分; U4-1 崩积楔被断层断错; U5 崩积楔为较平缓的顺坡堆积。逐次恢复古地震事件,该探槽揭露出在 U2 古地表层形成以后发生了第 1 次古地震事件,事件造成 1m 左右的位错(U3-1崩积楔粗粒部分高度),上盘 U2 层崩塌到下盘 U2 层上,堆积了 U3-1 崩积楔的砾石混杂堆积物,而其下伏的 U2-1 和 U1 层发生弯曲褶皱变形,使得在断层附近地层加厚。地震之后并

表 1 柯坪推覆系山前地貌面测年结果

Table 1 The age of geomorphic surfaces in front of the Kalpin nappe system

地点	地貌面	陡坎 高度/m	上盘拔河 高度/m	年龄 /ka BP
东柯坪 塔格山前 (三岔口)	$T_1$	0.64	1.5	$4.0 \pm 0.40$
	$T_2$	1.33	3.7	$8.0 \pm 0.75$
	$T_3$	3.0	8.9	$20.2 \pm 1.91$
	$T_4$	/	20.8	$40.9 \pm 3.84$
	$T_5$	/	37.2	$63.7 \pm 5.90$
萨尔木 塔格山前	$T_1$	1.68	3.2	$6.6 \pm 0.61$
	$T_2$	2.8	6.8	$16.1 \pm 1.5$
	$T_5$	/	40.8	$76.1 \pm 7.21$

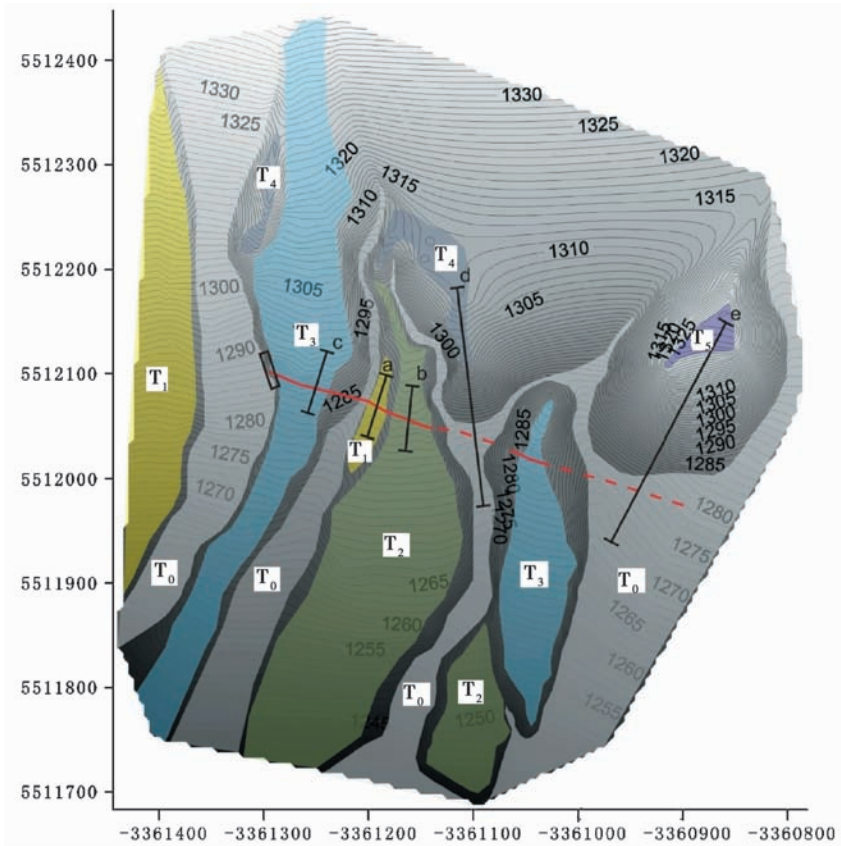


图 2 三岔口实测地形

Fig. 2 The measured topographical map of Sanchakou.

图中 a,b,c,d,e 为实测地形剖面；黑框为探槽位置

未形成一个稳定的沉积层,仅受到地表陡坎上的雨水片流冲刷,在崩积楔上部形成 U3-2 细粒堆积物;第 2 次古地震事件,错断 U3-1 崩积楔并使得上盘 U3-1 崩积楔物质和断层附近的 U2 层一起塌落形成了 U4-1 崩积楔,从 U4-1 崩积楔的高度分析,该次古地震的位错量也在 1m 左右,第 2 次古地震后顺坡堆积了 U4-2 层;第 3 次(最新 1 次)古地震事件,U4-1 崩积楔和 U4-2 层发生变形和断错,在 U4-2 层上形成 U5 崩积楔,并盖住断层面。由于之前的 2 次古地震累计的陡坎高度已经到达 2m 左右,同时陡坎的宽度也已经较宽,所以崩积楔 C 主要堆积在坎下,厚度较小。根据 U2 层积累了 3 次地震的变形,形成 3m 的垂直位错量;U4-2 层积累了一次事件的变形,同时剖面东侧 T<sub>1</sub> 地貌面上残留的陡坎高度为 64cm (图3),考虑地貌面上片流的剥蚀作用,估计最新事件位移量应略大于该陡坎高度,在 1m 左右。因此,前 2 次古地震事件的总垂直位错约 2m,第 3 次事件垂直位移约 1m,单次事件垂直位移为 1m 左右。

三岔口 T<sub>3</sub> 年龄为(20.2±1.91)ka,自 T<sub>3</sub> 形成以来共计发生 3 次古地震事件,平均复发周期为(6.7±0.84)ka。平均垂直位错速率为 0.149mm/a,缩短速率为 0.409mm/a。从 T<sub>2</sub> 复式陡坎 1.33m 的高度看应发生了 2 次事件,与其(8.0±0.75)ka 的年龄相符。T<sub>1</sub> 地貌面 0.64m 的陡坎高度(单次事件垂直位移)和(4.0±0.4)ka 的形成年龄也相符合。若同时满足 T<sub>3</sub> 3 次事件,



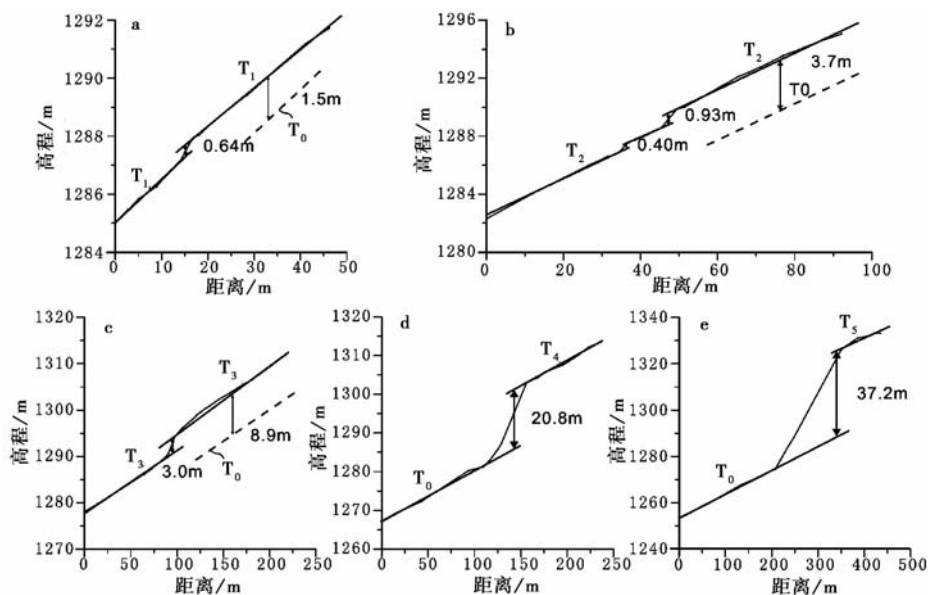
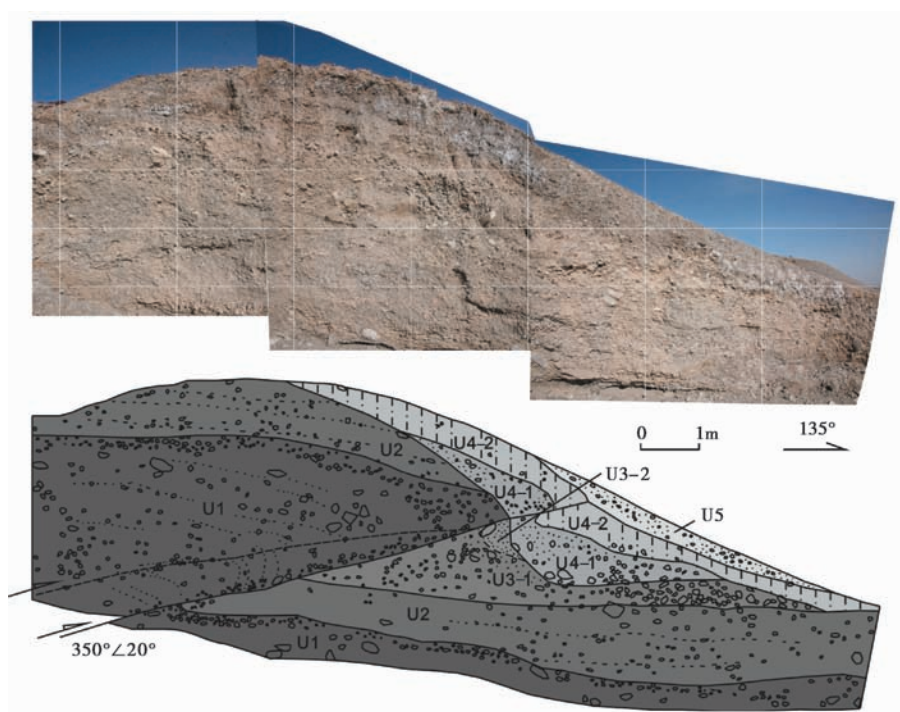


图 3 三岔口实测地形剖面(位置见图 2)

Fig. 3 The measured topographical profile of Sanchakou.

图 4 三岔口  $T_3$  探槽剖面(位置见图 2)Fig. 4 The trench profile of  $T_3$  terrace in Sanchakou.

$T_2$  2 次事件,  $T_1$  1 次事件和  $T_0$  未记录事件的要求, 估计最新一次古地震可能发生在 0 ~ 4ka BP; 第 2 次事件在 6.7 ~ 8.0ka BP; 第 1 次事件在 13.4 ~ 14.7ka BP。再早事件则为 20.1 ~ 21.4ka BP, 超过  $T_3$  地貌面年龄。

4.2 萨尔干塔格山前

萨尔干塔格(第 2 排单斜山)山前(40°13'45.3", 78°15'40.4")也发育了 5 级地貌面。其中  $T_1$  和  $T_2$  两级地貌面上发育断层陡坎, 高度分别为 1.68m 和 2.8m。上盘拔河高度分别为 3.2m 和 6.8m, 是第 2 排单斜山前惟一具有 2 级不同高度地震陡坎的地点。 $T_3$ 、 $T_4$  和  $T_5$  仅残留上盘, 拔河高度分别为 17.7m、26.3m 和 40.8m (图5,6)。断层产状  $N \angle 23^\circ$ 。

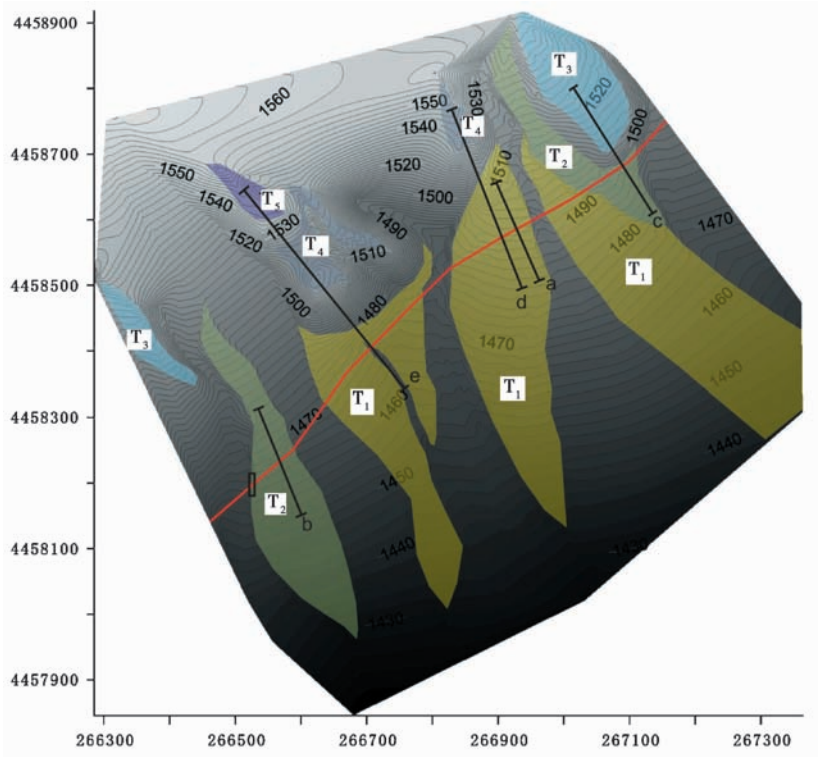


图 5 萨尔干塔格山前的实测地形

Fig. 5 The measured topographical map in front of Saergantage.

图中的 a,b,c,d,e 为地形剖面位置,黑框为探槽位置

在  $T_2$  陡坎处开挖探槽, 揭露了 3 次古地震事件 (图7)。

探槽揭示的地层由下至上分别为:

- U1 灰黄色粗砾石层, 仅上盘外露, 砾石直径 10cm 左右, 近断层位置发生褶皱变形;
- U2 灰黄色粗砾石层, 因盐碱表面发白, 砾石直径 5 ~ 10cm, 个别可达 20cm, 近断层位置发生褶皱变形; 下部胶结较好, 主要以 5cm 左右砾石为主, 含有直径 > 20cm 的大砾石; 上部以 10cm 左右的砾石层为主, 略有层理, 上盘剖面后缘与上覆的 U3 层呈角度不整合;
- U3-1 第 1 次古地震事件形成的崩积楔, 砾石排列杂乱;
- U3-2 灰褐色砾石层, 砾石直径 3 ~ 5cm, 含砂土较多, 与下伏的 U2 呈角度不整合, 为陡坎

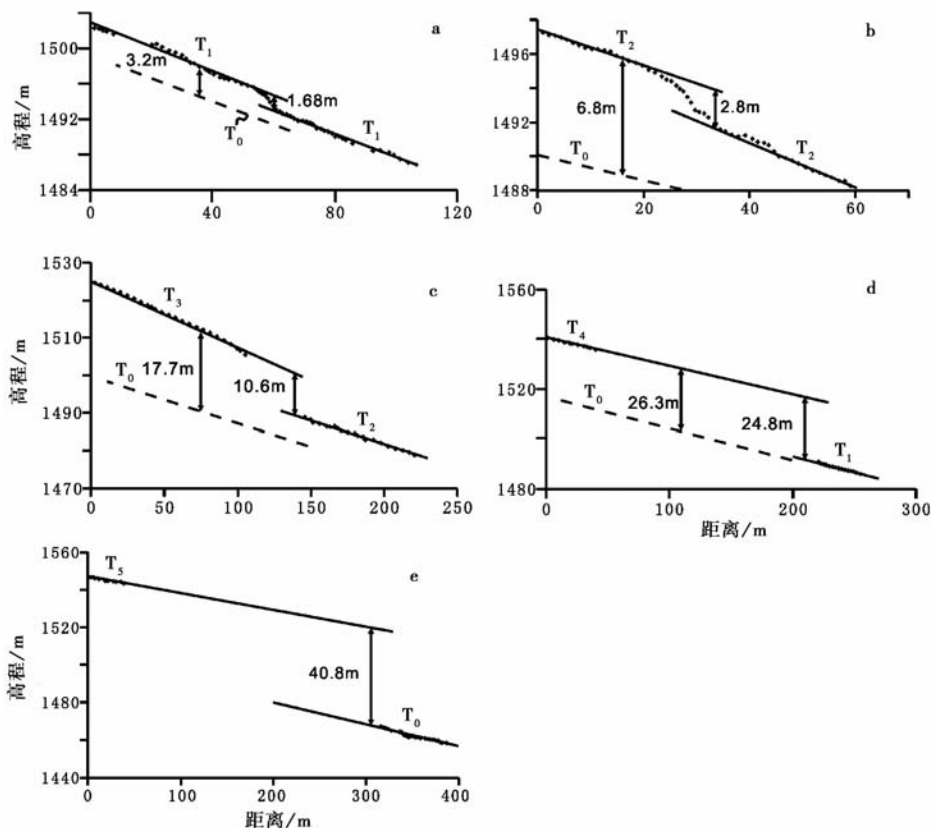


图6 萨尔干塔格山前阶地陡坎实测剖面(位置见图5)

Fig. 6 The measured topographical profile of the terrace in front of Saergantage.

附近顺坡堆积层;

U4-1 为第2次古地震事件形成的崩积楔,崩积楔砾石堆积杂乱,上部细粒物质较下部明显增多,崩积楔内断层位置有砾石定向,显示被断层二次错断;

U4-2 褐黄色含砂质砾石层,砾石直径3cm,略小于U3-2层,填充物以砂质为主,无盐碱化;

U5 第3次(最新)古地震事件形成的崩积楔或坎前堆积。

探槽中可以分辨出3次古地震事件,在U2层形成以后发生了第1次古地震事件,错断了U2层,近断层上盘位置U1和U2层同时发生褶皱变形,并形成U3-1崩积楔;之后顺坡堆积U3-2,为坎前堆积层,向上盘尖灭。第2次古地震事件,错断了U3-1崩积楔和U3-2层并在其上形成了新的U4-1崩积楔,U1、U2层上盘地层弯曲变形加剧,U3-2层也发生弯曲,这次事件后再次出现顺陡坎坡向的堆积,形成U4-2层。第3次古地震事件,U4-1崩积楔被错断,U4-2层近断层附近物质崩落形成U5崩积楔。U5崩积楔完整,没有被错断的痕迹,其形成以后无古地震事件。经历过3次古地震事件的U2层现今垂直位移量约2.8m,经历2次事件的U3-2层垂直位移量约1.6m,经历1次事件的U4-2层垂直位移量 $<1\text{m}$ 。因此,单次事件的垂直位错可能为0.8~1.2m。



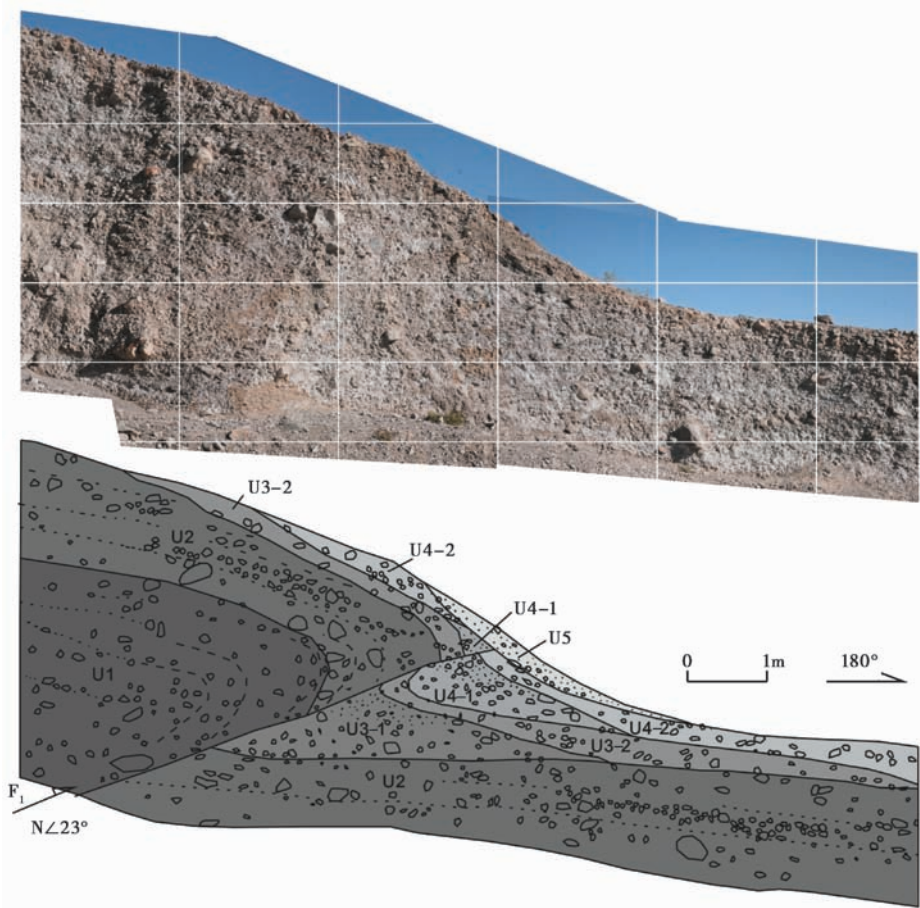


图 7 萨尔干塔格  $T_2$  探槽剖面 (位置见图 5)

Fig. 7 The trench profile of  $T_2$  terrace in front of Saergantage.

萨尔干塔格山前  $T_2$  年龄为  $(16.1 \pm 1.50) \text{ka}$ , 共计发生 3 次古地震事件, 平均复发周期为  $(5.4 \pm 0.50) \text{ka}$ . 平均垂直位错速率为  $0.174 \text{mm/a}$ , 缩短速率为  $0.372 \text{mm/a}$ . 由于  $T_1$  年龄为  $(6.6 \pm 0.61) \text{ka}$  大于平均复发周期, 所以从  $T_1$  地貌面  $1.68 \text{m}$  的陡坎高度和  $(6.6 \pm 0.50) \text{ka}$  的年龄都表明发生过 2 次古地震事件, 2 次事件可能分别发生在  $0 \sim 1200 \text{a BP}$  左右和  $5400 \sim 6600 \text{a BP}$  左右。

5 古地震差异与级联破裂讨论

古地震复发模型主要有准周期和丛集两种。Shimazaki 等 (1980) 提出简单地震复发模型之后, Savage 等 (1987) 通过毕晓普-猛犸湖附近的地震研究提出了地震准周期模型, 即地震在时间上具有一定的周期性, 地震震级具有一定的波动范围。Sieh (1989) 通过圣安德列斯断层古地震高精度年代研究讨论了地震的丛集特征, 地震时间不完全符合周期性, 还存在活跃期和平静期。我们通过各个地貌面上的时间和陡坎高度估计各级地貌面形成以来的地震平均垂直位错速率均在  $0.15 \sim 0.17 \text{mm/a}$ , 仅有萨尔干塔格山前的  $T_1$  面位错速率略大为  $0.25 \text{mm/a}$ , 更符合准周期模型。

从两排单斜山山前的古地震分析, 距今  $20 \text{ka}$  以来, 东柯坪塔格山前古地震平均复发周期为

( $6.7 \pm 0.84$ )ka, 单次事件垂直位错约 1m 左右。平均垂直位错速率为  $0.15\text{mm/a}$ , 缩短速率为  $0.41\text{mm/a}$ ; 萨尔干塔格山前古地震平均复发周期为 ( $5.4 \pm 0.50$ ) ka, 单次事件的垂直位错为  $0.8 \sim 1.2\text{m}$ , 平均垂直位错速率为  $0.17\text{mm/a}$ , 缩短速率为  $0.37\text{mm/a}$ 。古地震活动强度基本一致, 萨尔干塔格复发周期略快(表 1)。

东柯坪塔格山前若同时满足  $T_3$  3 次事件、 $T_2$  2 次事件(复式陡坎)、 $T_1$  1 次事件的要求, 最新一次古地震一定发生在  $T_1$  面形成之后, 在  $0 \sim 4\text{ka BP}$  之间; 按照  $T_2$  面形成以来发生 2 次事件分析, 其中最新事件为  $T_1$  面记录事件, 则前次事件发生在  $6.7 \sim 8\text{ka BP}$  之间; 相同方法估计  $T_3$  记录的最早事件在  $13.4 \sim 14.7\text{ka BP}$ 。若再利用  $T_3$  面求得的周期估算更早事件则为  $20.1 \sim 21.4\text{ka}$ , 超过  $T_3$  地貌面年龄, 证明  $T_3$  面不可能记录到 4 次事件, 此平均复发周期可同时满足各级地貌面年龄和记录事件次数的要求。萨尔干塔格山前  $T_2$  年龄为 ( $16.1 \pm 1.50$ )ka, 共计发生 3 次古地震事件,  $T_1$  年龄 ( $6.6 \pm 0.61$ )ka 大于平均复发周期, 仅从时间上无法限定事件次数, 考虑到  $T_1$  地貌面  $1.68\text{m}$  的陡坎高度和单次事件  $0.8 \sim 1.2\text{m}$  的位错量而按照两次事件分析, 两次事件可能分别发生在  $0 \sim 1.2\text{ka BP}$  和  $5.4 \sim 6.6\text{ka BP}$ 。这样的结果正好可以导致  $T_1$  面平均垂直位错速率  $0.25\text{mm/a}$ , 高于平均垂直位错速率  $0.17\text{mm/a}$ 。 $T_2$  面记录的第 1 次事件发生在  $10.8 \sim 12\text{ka BP}$  之间。以此周期估计, 更早事件发生在  $T_2$  面形成之前(表 3)。

汶川地震造成龙门山逆冲构造中两条断裂同时活动, 分别形成前山和中央两条地表破裂带(XU *et al.*, 2009)。如走滑断裂在发生特大地震时会产生多个阶区级联破裂一样, 对于拥有相同滑脱面的多排逆冲构造系可能由于滑脱面滑移而导致上部多条逆断裂-褶皱带发生地表破裂。目前对于无历史记录的古地震, 仅能利用地震前后形成的地层年代将发生时间控制在一个区间内。但是, 由于各条地表破裂带的地层并不一致, 使得对可能为同一次古地震事件造成的破裂在时间区间上存在一定的差异。如果两排单斜山山前的某次古地震事件发生的时间区间部分重合, 该次地震具有同时破裂的可能性。

从两排单斜山前通过复发周期估计的事件发生时间看(表 3), 各次事件发生时间并不完全一致。但考虑到两排单斜山山前的古地震复发周期都在  $5.4 \sim 6.7\text{ka}$ , 而最新事件时间具有重复区间, 且第 2 次事件时间相差仅  $100\text{a}$ , 此外东柯坪塔格山前  $T_2$  和  $T_3$  地貌面的形成时间与萨尔干塔格山前  $T_1$  和  $T_2$  具备时间上的同期性, 尽管地貌面的形成同时受到气候和构造两方面控制, 但在气候相对稳定时期古地震事件和地貌面形成具有一定的相关性, 因此东柯坪推覆系两排单斜山山前相同时期形成的地貌面反映了近似相同的构造活动强度, 而地貌面上的相似的断层陡坎也有可能为同次级联破裂所致。

表 2 山前地貌面变形速率

Table 2 The deformation rate of geomorphologic surface				
地点	地貌面	陡坎高度/m	地貌面年龄/ka	垂直位错速率/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
东柯坪	$T_1$	0.64	$4.0 \pm 0.40$	$0.16 \pm 0.02$
	$T_2$	1.33	$8.0 \pm 0.75$	$0.17 \pm 0.02$
	$T_3$	3.0	$20.2 \pm 1.91$	$0.15 \pm 0.02$
萨尔干	$T_1$	1.68	$6.6 \pm 0.61$	$0.25 \pm 0.02$
	$T_2$	2.8	$16.1 \pm 1.5$	$0.17 \pm 0.02$

表 3 古地震事件发生的时间范围

Table 3 The time range of paleoearthquakes			
地点	第 1 次	第 2 次	第 3 次
东柯坪塔格	$0 \sim 4\text{ka BP}$	$6.7 \sim 8\text{ka BP}$	$13.4 \sim 14.7\text{ka BP}$
萨尔干塔格	$0 \sim 1.2\text{ka BP}$	$5.4 \sim 6.6\text{ka BP}$	$10.8 \sim 12.0\text{ka BP}$

## 6 结论

通过对西南天山柯坪推覆系皮羌断裂以东各排山前地貌面和古地震规律的分析,可以得到初步结果:距今 20ka 以来,东柯坪推覆系两排单斜山山前古地震更具准周期性,东柯坪塔格山前古地震平均复发周期为 $(6.7 \pm 0.84)$ ka,单次事件垂直位错约 1m 左右。平均垂直位错速率为 $0.149\text{mm/a}$ ,缩短速率为 $0.409\text{mm/a}$ ;萨尔干塔格山前古地震平均复发周期为 $(5.4 \pm 0.50)$ ka,单次事件的垂直位错约 $0.8 \sim 1.2\text{m}$ ,平均垂直位错速率为 $0.174\text{mm/a}$ ,缩短速率为 $0.372\text{mm/a}$ 。古地震活动强度基本一致,萨尔干塔格周期略短。

**致谢** 在野外工作中徐锡伟研究员和陈杰研究员给我们提出了几点建议,在此表示感谢。衷心感谢审稿人的宝贵意见使本文得以完善。

## 参 考 文 献

- 陈祥玉. 1994. 公元 1600—1987 年新疆地震目录 ( $M_s \geq 4.7$ ) [J]. 内陆地震, 2(3): 320—340.
- CHEN Xiang-yu. 1994. Catalogue of  $M_s \geq 4.7$  earthquakes in Xinjiang during 1600—1987 A. D. [J]. Inland Earthquake, 2(3): 320—340 (in Chinese).
- 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 [J]. 地学前缘, 6(4): 191—201.
- DENG Qi-dong, FENG Xian-yue, ZHANG Pei-zhen, *et al.* 1999. Reverse fault and fold zone in the Urumqi range-front depression of the northern Tianshan and its genetic mechanism [J]. Earth Science Frontier, 6(4): 191—201 (in Chinese).
- 冯先岳. 1985. 论新疆地震地质特征 [J]. 地震地质, 7(2): 35—44.
- FENG Xian-yue. 1985. Seismogeological characteristics of the Xinjiang area [J]. Seismology and Geology, 7(2): 35—44 (in Chinese).
- 贾承造主编. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- JIA Cheng-zao (ed). 1997. Structure Character and Oil-gas in Tarim Basin, China [M]. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- 曲国胜, 陈杰, 陈新发, 等. 2001. 阿图什-八盘水磨塔里木盆地反冲构造系统研究 [J]. 地震地质, 23(1): 1—14.
- QU Guo-sheng, CHEN Jie, CHEN Xin-fa, *et al.* 2001. A study on the back-thrusting system at Atushi-Bapanshuimo in Tarim Basin [J]. Seismology and Geology, 23(1): 1—14 (in Chinese).
- 冉勇康, 杨晓平, 徐锡伟, 等. 2006. 西南天山柯坪推覆构造东段晚第四纪变形样式与缩短速率 [J]. 地震地质, 28(2): 179—193.
- RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, XU Xi-wei, *et al.* 2006. Deformation pattern and shortening rates in the east part of Kalpin thrust system in southwest Tianshan during late Quaternary [J]. Seismology and Geology, 28(2): 179—193 (in Chinese).
- 沈军, 汪一鹏, 李莹甄, 等. 2003. 中国新疆天山博阿断裂晚第四纪右旋走滑活动特征 [J]. 地震地质, 25(2): 183—194.
- SHEN Jun, WANG Yi-peng, LI Ying-zhen, *et al.* 2003. Late Quaternary right-lateral strike-slip faulting along the Bolokenu-Aqikekuduke Fault in Chinese Tianshan [J]. Seismology and Geology, 25(2): 183—194 (in Chinese).
- 汪新, 贾承造, 杨树锋, 等. 2002. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学 [J]. 地质科学, 37(3): 372—384.
- WANG Xin, JIA Cheng-zao, YANG Shu-feng, *et al.* 2002. Geometry and kinematics of the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan [J]. Chinese Journal of Geology, 37(3): 372—384 (in Chinese).
- 汪新. 2005. 南天山山前复杂褶皱的构造形态分析: 以库车秋里塔克背斜和柯坪八盘水磨背斜为例 [J]. 高校地

质学报,11(4): 568—576.

- WANG Xin. 2005. Geometry and kinematics of complex folds, illustrated with examples from Quilitake anticline of Kuqa and Bapanshuimo anticline of Keping, southern Tianshan [J]. Geological Journal of China Universities, 11(4): 568—576 (in Chinese).
- 杨晓平, 李安, 黄伟亮. 2011. 天山北麓活动褶皱带晚第四纪时期隆升的差异性 [J]. 中国科学(D 辑) (已接收).
- YANG Xiao-ping, LI An, HUANG Wei-liang. 2001. Uplift differential of active fold zones during the late Quaternary, northern piedmonts of the Tianshan Mountains, China [J]. Science in China Earth Sciences (in press).
- 杨海军, 李曰俊, 师骏, 等. 2010. 南天山晚新生代褶皱-冲断带构造特征 [J]. 第四纪研究, 30(5): 1030—1043.
- YANG Hai-jun, LI Yue-jun, SHI Jun, *et al.* 2010. Tectonic characteristics of the late Cenozoic south Tianshan fold-thrust belt [J]. Quaternary Sciences, 30(5): 1030—1043 (in Chinese).
- 杨晓平, 沈军. 2000. 天山内部博罗可努断裂精河-阿拉山口段晚更新世以来的活动特征 [J]. 地震地质, 22(3): 305—315.
- YANG Xiao-ping, SHEN Jun. 2000. Late Quaternary activity of Jinghe-Alashankou section of the Boluokenu Fault, interior Tianshan [J]. Seismology and Geology, 22(3): 305—315 (in Chinese).
- 杨晓平, 冉勇康, 程建武, 等. 2006. 柯坪推覆构造中的几个新生褶皱带阶地变形测量与地壳缩短 [J]. 中国科学(D 辑), 36(10): 905—913.
- YANG Xiao-ping, RAN Yong-kang, CHENG Jian-wu, *et al.* 2007. Measurement of terrace deformation and crustal shortening of some renascent fold zones within Kalpin nappe structure [J]. Science in China (Ser D), 50(1): 33—42.
- 杨晓平, 周本刚, 李军, 等. 2001. 新疆南天山亚肯背斜晚更新世以来的隆起和缩短 [J]. 地震地质, 23(4): 501—509.
- YANG Xiao-ping, ZHOU Ben-gang, LI Jun, *et al.* 2001. Shortening and uplift of the active Yaken anticline, southern Tianshan, China since late Pleistocene [J]. Seismology and Geology, 23(4): 501—509 (in Chinese).
- 中国地震简目编辑组. 2000. 中国地震简目(公元前 780—公元 1986 年) [M]. 北京: 地震出版社.
- Editorial Board of Brief Catalogue of Chinese Earthquake. 2000. Brief Catalogue of Earthquakes in China from 780 B. C. to 1986 A. D. [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Avouac J P, Tapponnier P T, Bai M, *et al.* 1993. Active thrusting and folding along the northern Tianshan, and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzhungaria and Kazakhstan [J]. Journal of Geophysical Research, 98: 6755—6840.
- Burchfiel B C, Brown E T, Deng Qidong, *et al.* 1999. Crustal shortening on the margins of the Tianshan, Xinjiang, China [J]. International Geological Review, 41: 665—700.
- Burtman V S, Skolelev S F, Molnar P. 1996. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana, the Tianshan, Central Asia [J]. GSA Bulletin, 108(8): 1004—1021.
- Balco G, Stone J O, Lifton N A, *et al.* 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  measurements [J]. Quaternary Geochronology, 3: 174—195.
- Densmore A L, Ellis M A, Li Y, *et al.* 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 26: TC4005.
- Herdrix 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 [J]. Geology, 22: 487—490.
- Lal D. 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: In situ nuclide production rates and erosion models [J]. Earth and Planetary Science Letters, 104: 424—439.
- Savage J C and Cockerham R S. 1987. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978–1986 Bishop-Mammoth Lakes sequence, eastern California [J]. BSSA, 77(4): 1347—1358.
- Shimazaki K and Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes [J]. Geophys Res Lett, 7: 279—282.

- Sieh K. 1989. A more precise chronology of earthquake produced by the San Andreas Fault in southern California [J]. *J Geophy Res*, 94(B1): 603—623.
- Stephen C T, Welson R J, Rubin C M, *et al.* 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tianshan, Kyrgyzstan, central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(B9): 2203.
- Stone J O. 2000. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105: 23, 753—23, 759.
- Tsukuda E, Awata Y, Yamazaki H, *et al.* 1993. Strip map of the Atera fault system [J]. *Geol Surv Jap Tect Map Ser*, 7.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, *et al.* 2009. Coseismic reverse-and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geology*, 37(6): 515—518.

## A PRELIMINARY STUDY ON PALEOEARTHQUAKES IN THE EASTERN KALPIN NAPPE SYSTEM, SOUTHWESTERN TIANSHAN, CHINA

LI An   RAN Yong-kang   XU Liang-xin   LIU Hua-guo   LI Yan-bao

(National Center for Active Fault Studies, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

### Abstract

There are several thrust-fold belts developed in the Kalpin nappe system of the southwestern Tianshan Mountains. Not only deformation rates of these thrust-fold belts are inconsistent, but also the paleoearthquakes recurrence laws on these thrust-fold belts in the nappe system are different. The Beichuan-Yingxiu Fault and the Pengguan Fault ruptured simultaneously in the  $M_w$  7.9 Wenchuan earthquake. Therefore, it is worth discussing the question of how to determine the cascade-rupturing of a paleoearthquake on two or three thrust faults. We measured the scraps of different heights on the geomorphic surfaces (alluvial-proluvial fans) of different stages in eastern Kalpintage and Saergantage and analyzed the paleoearthquake events revealed by trenches in Shanchakou and Saergantage. Using the  $^{10}\text{Be}$  exposure age, we obtained the ages of the geomorphic surfaces. Then we got the upper and lower limit time of each paleoearthquake from the age of adjacent geomorphic surfaces. Finally, we got the recurrence intervals of different paleoearthquakes, the vertical dislocation of a single event, and the time range of the respective events. The results show that since 20ka BP, the average recurrence interval of paleoearthquake in the piedmont of east Kalpintage is  $6.7 \pm 0.84\text{ka}$ , the vertical dislocation of a single event is 1m; the average recurrence interval of paleoearthquake in the piedmont of Saergantage is  $5.4 \pm 0.50\text{ka}$ , and the vertical dislocation of a single event is  $0.8 \sim 1.2\text{m}$ . The intensity of paleoseismicity is basically identical and the recurrence interval in Saergantage is slightly shorter. In the end, we discussed the possibility of cascade-rupturing accompanying these paleoearthquake events and found that the second and the third paleoearthquake events revealed by the trenches overlap in their occurrence time ranges, indicating the possibility of cascade-rupturing during the earthquake.

**Key words** paleoearthquake,  $^{10}\text{Be}$  exposure age, Tianshan Mountains, Kalpin