

临泽断裂新活动特征初步研究*

庞炜¹, 何文贵^{2,3}✉, 张波^{2,3}

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 临泽断裂在地貌上可见3条断层陡坎, 总体走向NNW, 最长约8 km, 东侧和中间陡坎主体倾向E, 西侧陡坎倾向W。①利用差分GPS对3条断层陡坎进行了详细的测量, 发现临泽断层陡坎较低, 局部发育多级断层陡坎, 坡角较缓, 高度几十厘米至1米多; ②在临泽断裂上选取4个探槽剖面进行古地震分析、样品采集和年代测试, 发现东侧和中间的断层陡坎为正断层所控制, 西侧的断层陡坎为逆断层所控制; ③探槽开挖揭露出晚更新世晚期以来, 临泽断裂上发生过4次古地震事件, 时间分别为 $(8\ 895 \pm 125)$ a B. P. 之前、 $(7\ 245 \pm 75)$ a B. P. ~ $(6\ 190 \pm 20)$ a B. P.、 $(5\ 120 \pm 20)$ a B. P. ~ (4.8 ± 0.5) ka 和 $(2\ 550 \pm 50)$ a B. P. ~ $(2\ 326 \pm 64)$ a; ④全新世以来可以确定3次事件, 较早一次事件与榆木山北缘断裂上较早一次古地震事件时间比较吻合, 说明临泽断裂可能是榆木山断裂向河西走廊内部继续活动的延伸; 最后一次古地震事件的离逝时间约为2 500 a, 表明临泽断裂全新世活动一直比较强烈。

关键词: 临泽断裂; 榆木山断裂; 古地震; 陡坎形态; 差分GPS测量

中图分类号: P315.242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2019)01-0120-13

0 引言

榆木山是祁连山主体山系以北、河西走廊中段的一座突出的隆起山系(金卿等, 2011)。沿榆木山造山带, 发育有榆木山北缘断裂和榆木山东缘断裂。Tapponnier等(1990)认为榆木山北缘断裂为全新世活动断裂, 断裂带上的断层陡坎可能是公元180年高台7½级地震造成的; 陈柏林等(2007)确认该断裂在距今13.1~13.3 ka和距今3~5 ka发生过2次明显的新构造活动; 金卿等(2011)通过探槽开挖和样品测年确定出2次古地震事件, 分别为距今 (4.066 ± 0.086) ka和距今 (6.852 ± 0.102) ka ~ (6.107 ± 0.082) ka。榆木山东缘断裂研究程度较榆木山北缘断裂低。李玉龙和邢成起(1988)在黑河口T₃级阶地上发现了断层陡坎, 经探槽开挖证实断裂最新活动为距今13.3 ka左右; 冉勇康等(1988)讨论了黑河口断层晚第四纪以来发生的古地震期次, 认为该断层

晚第四纪以来发生过4次古地震事件, 最早1次发生在距今约25 ka, 另外3次分别发生在距今13、10.5和8.5 ka左右; 李有利等(1995, 1997)研究发现黑河口断层至少有3次活动, 对黑河口地区的阶地断错研究表明榆木山东缘断裂全新世仍比较活跃。

在临泽县梨园河以北、倪家营乡以西的冲洪积扇上, 发现晚更新世—全新世冲洪积扇上发育有局部多级排列的、走向NNW—SSE的多条断层陡坎。该断层陡坎虽然位于榆木山东缘断裂西北端和榆木山北缘断裂南端东部, 在位置和形态上与榆木山东缘断裂或榆木山北缘断裂关系密切, 但是目前还未厘清该断层陡坎与这两条断裂的具体关系, 尚不能作为上述两条断裂的一部分来论述, 本文以临泽断裂称之。地貌上, 临泽断裂形成了一个类似“橄榄球”状的形态, 断层陡坎较低矮, 显示出较新的活动性。仅有少数学者开展过研究工作, Palumbo等(2009)对该断裂进行了简单的地质地貌调查; 金卿(2011)对该断裂进

* 收稿日期: 2018-03-28.

基金项目: 中国地震局地震行业科研专项(201408023)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(2019010212、2018010203)和中国地震局第二监测中心科学技术基金(KJ17010)联合资助。

✉ **通讯作者:** 何文贵(1963-), 正研级高工, 主要从事活动构造等方面的研究. E-mail: hewengui321@163.com.

行了初步的古地震研究，确定了全新世晚期以来的2次古地震事件。本文在这些断层陡坎上布设了多条测线，进行形变测量，厘定其形变特征；并增补了多个探槽，获得了该断裂更加完整的古地震序列，明确了几条断层陡坎的构造关系。

1 构造背景

祁连山—河西走廊构造带位于青藏高原东北缘，阿拉善隆起区与北祁连加里东褶皱带之间，自印度与欧亚板块碰撞之后，正经历着大规模的大陆变形（张培震等，2006；袁道阳等，2004）。该区活动构造密集发育，是高原周边主要的汇聚构造带之一，也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；国家地震局地质研究所，国家地震局兰州地震研究所，1993；Gaudemer *et al.*, 1995；Xu *et al.*, 2010）。

从构造上来看，祁连山—河西走廊构造带总体上被阿尔金断裂、海源断裂和祁连断裂等大型活动断裂带所围限，区域内发育有党河南山断裂、昌马断裂、佛洞庙—红崖子断裂等 NWW 向的活动断裂带（郑文俊等，2016）。从地形来看，河西走廊为新生代形成的压陷性前陆盆地，南侧为祁连山，北侧为龙首山、合黎山等山脉，走廊西起阿尔金断裂北部的宽滩山，向东延伸到景泰县一带，全长 1 000 多千米，宽度近百千米（潘宏勋等，2000；郑文俊，2009）。河西走廊内部有 3 个横向的隆起将其分为一系列小的盆地：大黄山隆起分隔了武威盆地和民乐盆地，榆木山隆起分隔了民乐盆地和酒泉盆地，文殊山隆起分隔了酒泉盆地和酒西盆地。

榆木山位于祁连山北缘，介于酒泉和张掖盆地之间，在新生代青藏高原隆升的过程中，作为祁连山地块的一部分也强烈地隆升。刘栋梁等（2012）认为榆木山变形隆升不晚于 3.58 Ma，之后至少经历两期构造变形隆升；潘宏勋等（2000）认为榆木山可能是祁连山北缘断裂系向北东叠瓦状逆冲作用形成的推覆体；郑文俊（2009）认为榆木山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后期仍继续

以山脉隆升为主。另外榆木山南西侧的新近系地层缓倾，同时侏罗系与白垩系地层的强烈挤压变形说明在新生代中后期榆木山整体隆升过程中将其北侧的地层整体抬升，而榆木山西端的第三纪背斜及其与玉门砾岩间的角度不整合也可以说明，新生代后期是榆木山隆升变形的主要时期。沿着榆木山山脉前缘，主要发育 NW 向的榆木山北缘断裂、榆木山东缘断裂及临泽断裂等活动断裂（图 1）。临泽断裂作为近期发现的榆木山前盆地内的活动断裂，对于讨论榆木山断裂向河西走廊的进一步活动具有重要意义。

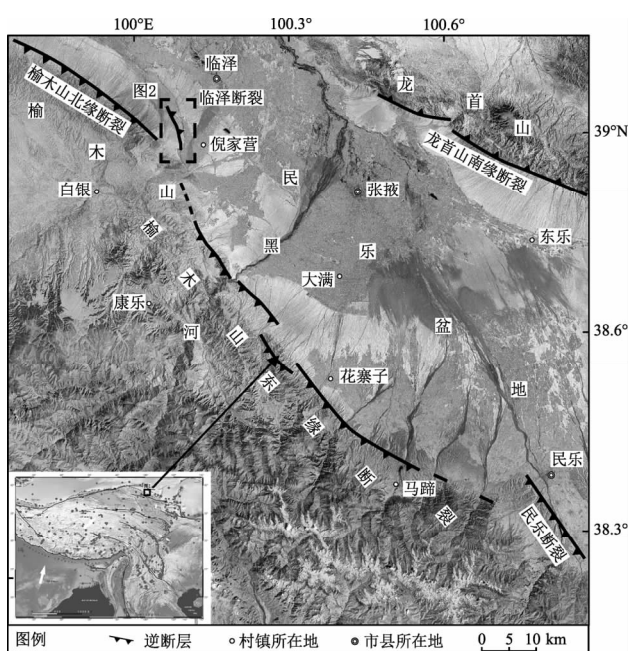


图 1 临泽断裂展布周边构造图（庞炜，2015）
Fig. 1 Map of the distribution of Linze fault zone and tectonic environment in its nearby area

2 差分 GPS 实测形态特征

通过室内卫星影像解译和野外地质调查，发现临泽断裂是由 3 条断层陡坎组成的，由东到西分别命名为 F_1 、 F_2 和 F_3 ，分布在临泽县倪家营乡黄家湾村西侧，发育在晚更新世至全新世洪积扇上，断裂整体走向为 $320^\circ \sim 330^\circ$ （图 2），最长约 7 km。

F_1 是临泽断裂最东侧的一条断层陡坎，长约 4 km，总体走向 340° ，大部分倾向 NE，其北端一段陡坎倾向 SW（图 2），与 F_2 一同构成一个 100

多米宽的地堑。该陡坎从北向南较为连续, 高度有增大之势, 尤其在陡坎中南段, 局部发育有雁列状多级坎。如图 2 所示, 在光伏电站东南角向东约 600 m 处, 地貌清楚, F_1 断层陡坎明显, 细粒物质发育较好 (图 3a, b), 有利于古地震事件的识别和采集测年样品。在此处布设了一个探槽, 同时为了明确该处断层陡坎的具体高度和形态等特征, 布设了 4 条差分 GPS 测线。 F_2 断层陡坎是

中间断层陡坎, 长约 7 km, 总体走向呈向东突出的弧形, 陡坎倾向 NE (图 3c, d)。在断层陡坎中段, 有一条 1 km 多长的小断层陡坎与主断层陡坎平行, 构成双排坎。为了能完全厘定断层变形特征及变形量, 在该区域布设了 9 条测线。 F_3 断层陡坎是西侧断层, 长约 4 km, 总体呈向西突出的弧形, 倾向 W (图 3e, f)。地貌上为比较低矮的断层陡坎, 角度较缓, 尤其在该段南端部分,

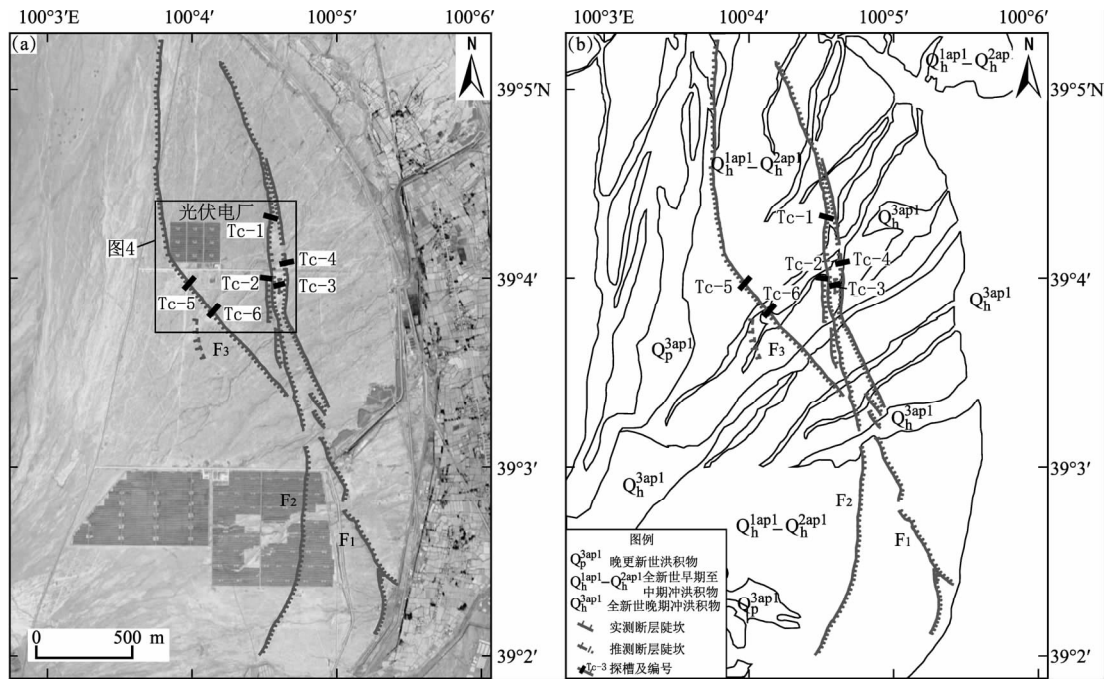


图 2 临泽断裂断层陡坎展布影像 (a) 及其解译 (b)

Fig. 2 Map of distribution of Linze fault scarp (a) and its image interpretation (b)

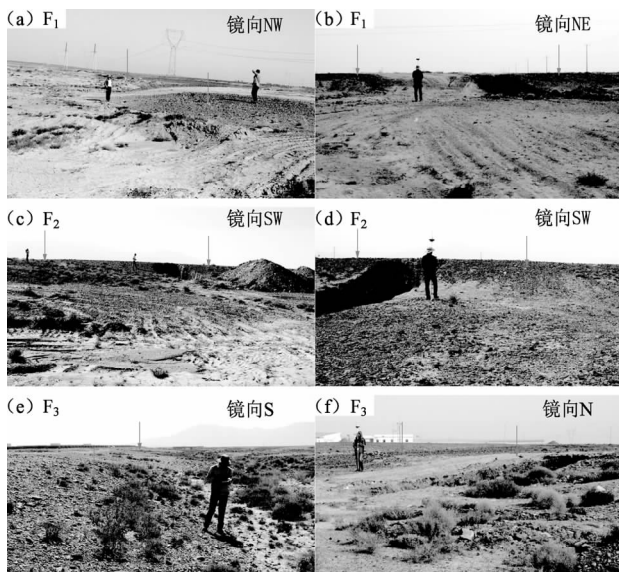


图 3 典型断层陡坎地貌

Fig. 3 Typical landforms of Linze fault scarp

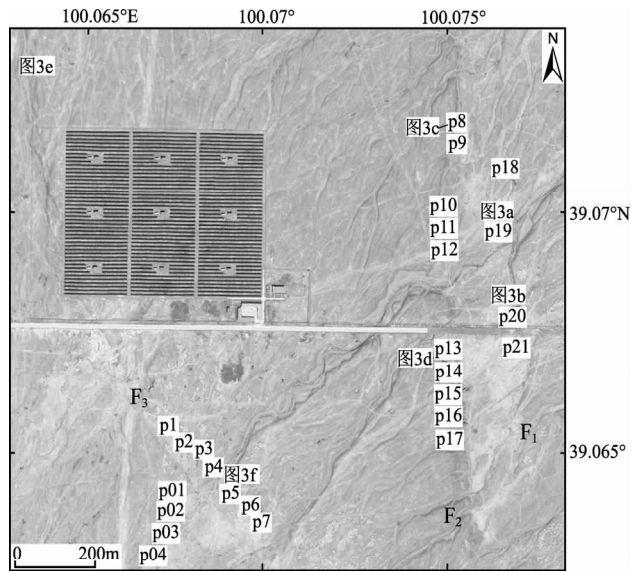


图 4 断层陡坎测线分布图

Fig. 4 Distribution of measuring lines of fault scarp

陡坎下盘发育细粒物质，上盘物质较粗，沿线比较连续，适合开挖探槽，故在此处布设了 7 条测线来厘定断层形变大小和样式。

在 F_1 断层北段共布设 4 条差分 GPS 测线，编号 p18 ~ p21（图 4）。实测结果表明该断层陡坎较

小，平均高度为 0.8 m，除 p21 测线陡坎高 1.4 m 以外，其他 3 条测线的陡坎都未超过 1 m，最低的陡坎只有 0.2 m（图 5，表 1）； F_1 断层陡坎中段不连续，呈右阶雁列排列，两个阶区宽都为 80 m 左右；断层陡坎南段较高，Palumbo 等（2009）在

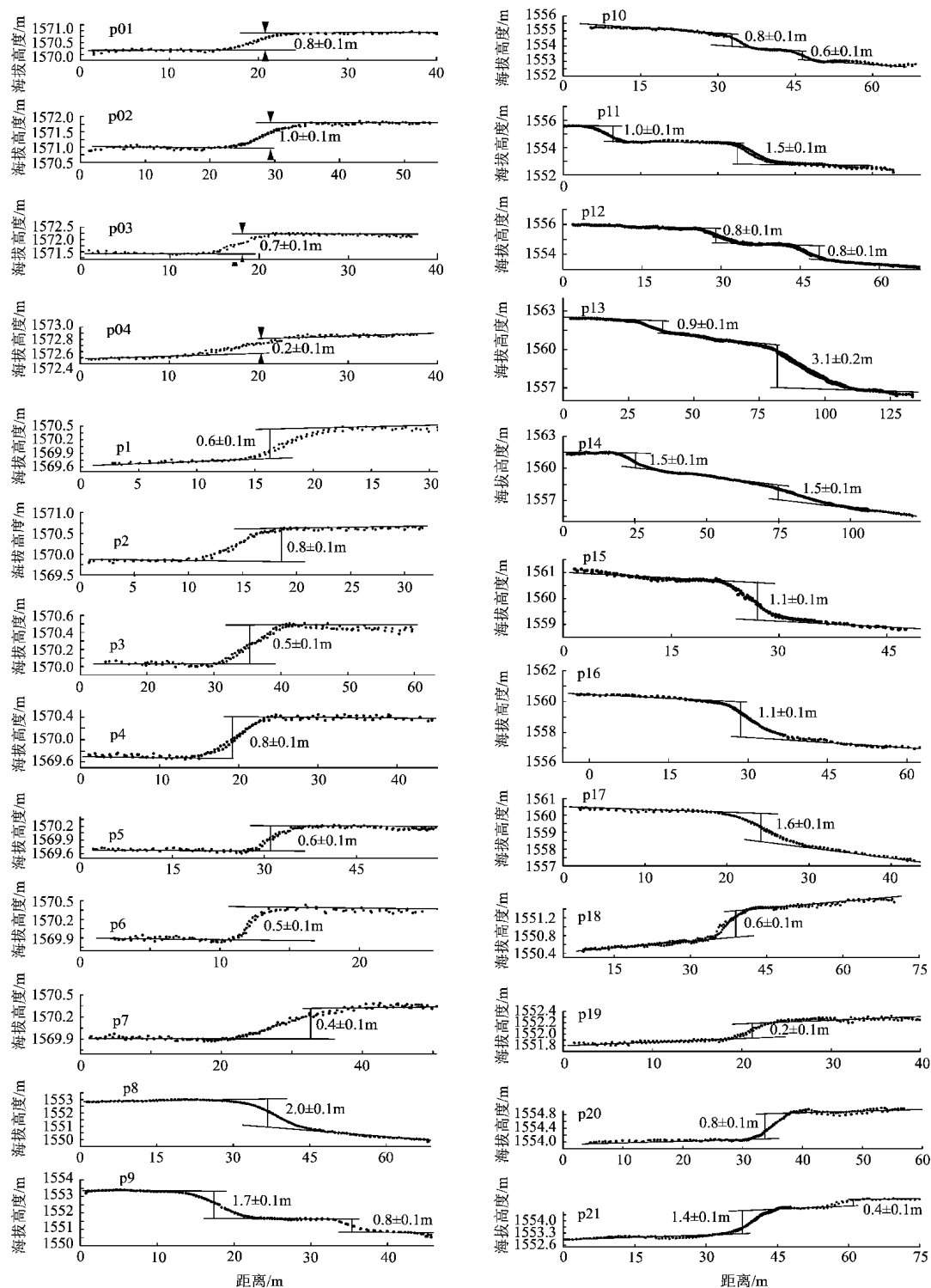


图 5 临泽断裂断层陡坎差分 GPS 实测图

Fig. 5 Differential GPS surveying diagram of Linze fault scarp

此布设了5条测线,测量结果陡坎的平均高度为4.1 m,最高为4.4 m,最低为1.9 m,比北段的陡坎高得多。在 F_2 断层陡坎中段上布设了10条差分GPS测线,编号为p8~p17(图4)。测得主断层陡坎的平均高度为1.4 m,最高陡坎出现在p13测线上,高度为3.1 m,最小的陡坎为0.6 m(图4中p10,图5)。有6条测线(p9~p14)测到了小断层陡坎,其平均高度为1.1 m,最大高度在测线p9上,高度为1.7 m;最小陡坎在p10和p12上,高度为0.8 m(图5,表1)。在 F_3 南段布设了7条差分GPS测线,编号为p1~p7(图4)。该断层陡坎高度较前两条断层小。测得主断层陡坎的平均高度为0.6 m,最高陡坎出现在p2和p4测线上,高度为0.8 m,最小的陡坎为0.4 m(图4中p7)。另外在 F_3 断层的西侧,可见一条长600 m、SN走向的小陡坎(图2),倾向W,陡坎坡角较缓,与 F_3 斜交,视为 F_3 的分支。在其上布设了4条差分GPS测线,编号为p01~p04(图4)。陡坎的平均高度为0.7 m,p02测得最高陡坎高度为1.0 m,p04测得最低陡坎高度只有0.2 m(图5,表1)。

表1 临泽断裂断层陡坎差分GPS测量结果

Tab. 1 Differential GPS surveying results of Linze fault scarp

| 断层 编号 | 长度/ m | 测线布设在 断层的部位 | 陡坎 倾向 | 陡坎高度/m | | |
|----------|----------|----------------|----------|--------|-----|-----|
| | | | | 平均值 | 最高值 | 最低值 |
| F_1 | 3.5 | 北段 | W | 0.8 | 1.4 | 0.2 |
| | | 南段 | E | 4.1 | 4.4 | 1.9 |
| F_2 | 7.0 | 主断层中段 | E | 1.4 | 3.1 | 0.6 |
| | | 次级断层 | E | 1.1 | 1.7 | 0.8 |
| F_3 | 4.0 | 主断层南段 | W | 0.6 | 0.8 | 0.4 |
| | | 分支断层 | W | 0.7 | 1.0 | 0.2 |

注: F_1 南段陡坎数据参考Palumbo等(2009)测量结果。

3 探槽揭示的断层活动及古地震特征

为研究临泽断裂的活动情况和古地震特征,在陡坎上布设了多个探槽。前期在 F_2 断层开挖3个探槽,位置见图2中的Tc-1、Tc-2和Tc-3(金卿,2011)。其中探槽Tc-1和Tc-2布设在主断层陡坎上,探槽剖面揭示出了断层和古地震事件;探槽Tc-3布设在主断层陡坎之下的小陡坎上,剖面上未见断层。由于前期工作所采集的光释光样品测年结果不理想,后期对探槽Tc-1和Tc-2剖面补取了 ^{14}C 样品,并在 F_1 断层和 F_3 断层

又开挖了3个探槽(庞炜,2015)(位置见图2中的Tc-4、Tc-5和Tc-6),在探槽Tc-4和Tc-6中分别取到了 ^{14}C 样品和光释光样品;由于探槽Tc-5剖面上的沉积物颗粒较粗,没有取到测年样品。

3.1 探槽Tc-1

探槽Tc-1位于 F_2 断层北段,地貌上可见晚更新世至全新世洪积扇上发育有近SN向延伸的双级断层陡坎(图2,3c),陡坎倾向E,探槽位于大陡坎上,坎高约1.7 m。在此处开挖了一个长11 m、宽3.5 m、高近3 m的探槽,剖面地层描述如下(图6):①地表黄色粉砂土层,有少量砾石分布,层厚为5~10 cm;②淡红色细粒粉砂夹砾石层,一般粒径3~4 cm,最大粒径可达10 cm,磨圆较好,次圆状,地层最厚约1 m;③红色细粒砂土层,含有砾石,最大粒径可达10 cm,有磨圆,该层只在断层 f_3 上盘发育;④青灰色砂夹小砾石层,砾石粒径2 cm左右,最大可达5 cm,地层厚度约为0.6 m;⑤青灰色砾石层,粒径较大,一般为4~5 cm,最大可超过10 cm,地层厚度约为0.5 m,冲洪积成因;⑥灰黄色砾石层,具韵律,粗砾细砾相间发育,冲洪积成因,未见底。

从图6可见3条正断层倾向皆为E: f_1 断层走向 10° ,倾角 75° ; f_2 断层走向 10° ,倾角 73° ; f_3 断层走向 30° 。断层面上均有砾石定向排列。 f_1 将层⑤断错40 cm,将层④和层②直接断错20 cm,同时还使层④和层②产生了弯曲变形,位移值与层⑤断错的幅度相当,可能是同一次地震造成的,但在该断层附近没有取到测年样品。 f_2 将层⑤、层④和层②都断错10 cm,可能是由于 f_1 由同一次古地震事件造成的。在 f_2 右侧层②底部采集 ^{14}C 样品(编号YMS- ^{14}C -2),测年结果显示为 $(7\,245 \pm 75)$ a. B. P. (表2)。 f_3 将层⑤和层④断错15 cm。在 f_3 东侧层③底部采取 ^{14}C 样品(编号YMS- ^{14}C -1),测年结果为 $(2\,550 \pm 50)$ a. B. P. (表2)。

该剖面共揭露出2次古地震事件:事件1为断层 f_3 断错层③及其以下地层,后在断层上盘之上沉积细粒砂砾层②,从层③底部采集 ^{14}C 测年样品YMS- ^{14}C -1结果显示,此次古地震事件发生在 $(7\,245 \pm 75)$ a. B. P.之后(表2);事件2则为 f_1 和 f_2 断错层②及其以下地层,被层①所覆盖,层②底部测年样品YMS- ^{14}C -2显示此次古地震事件发生在 $(2\,550 \pm 50)$ a. B. P.之后。

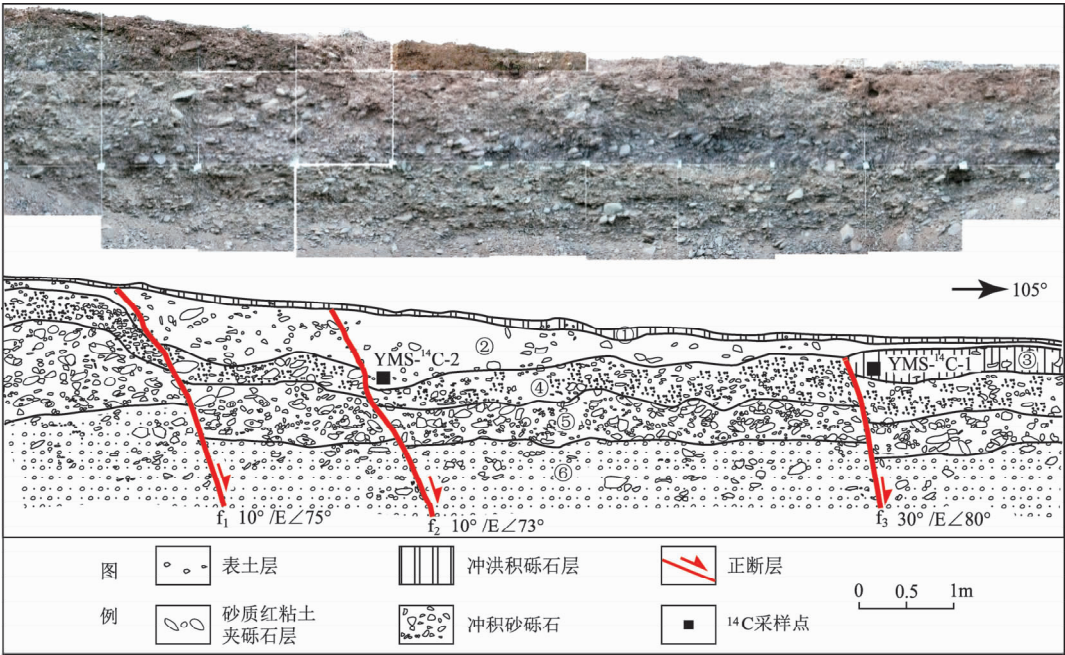


图 6 探槽 Tc - 1 北壁照片及素描图（据金卿，2011 修改）

Fig. 6 Photo-mosaic and interpretation of north wall of trench Tc - 1（modified based on Jin, 2011）

3.2 探槽 Tc - 2

探槽 Tc - 2 布设在 F₂ 中段（位置见图 2b），位于探槽 Tc - 1 南侧 640 m 处，地貌上可见晚更新世至全新世洪积扇发育有近 SN 向延伸的断层陡坎（图 5d），陡坎倾向 E，坎高约 1.2 m。在此处开挖了一个长 10 m、宽 3.5 m、高约 4 m 的探槽。

3.2.1 Tc - 2 南壁

Tc - 2 南壁剖面地层描述如下（图 7）：①地表淡黄色粉砂含黏土层，偶见砾石，层厚为 10 cm 左右，金卿（2011）在该层底部取 ¹⁴C 样品测年结果为（2 326 ± 64）a B. P.；②黄褐色砂质黏土层，上部为黄色，下部逐渐变红，向东西两侧尖灭，应为地震形成的断塞塘沉积，靠近断层 f₁ 处，为半漏斗状充填楔，平均厚度约为 0.5 m；③含土质砂砾石层，砾石粒径 2 ~ 5 cm，次

圆状，断层附近有拖曳现象，内部包裹了一个透镜状白色黏土质砂，覆盖于 f₂ 断层之上，剖面上最厚为 1.5 m，向西逐渐尖灭；④灰黄色青灰色砂砾石层，砾石粒径为 3 ~ 5 cm 左右，最大约 10 cm，磨圆较好，沉积层沿着断层向下拖曳，冲洪积成因，未见底。

根据地层的位错变化、砾石的定向排列等，可从探槽剖面上分析出 4 条断层，均为倾角较陡的正断层。f₁ 走向 350°，倾向 SW，倾角 70°，其他 3 条断层与 f₁ 走向相当，倾向相反，倾角分别为 80°，75°和 66°。层①以下的所有地层都在 f₁ 断面处发生了拖曳现象，使砾石发生定向排列，在断层上部形成充填楔，最新活动断错层③，被层②覆盖。在层②底部靠近 f₁ 上部充填楔的位置采集 ¹⁴C 样品 YMS - ¹⁴C - 5，测得此次古地震事件发生

表 2 临泽断裂探槽¹⁴C测年结果
Tab. 2 ¹⁴C dating results from trenches of Linze fault

| 取样位置 | 样品号 | 实验室编号 | (α/oo) ¹³ C/ ¹² C | ¹⁴ C 年龄/（a B. P. ± v） | 2v 校正年龄/（Cal a B. P.） |
|-----------|---------------------------|--------|---|----------------------------------|-----------------------|
| Tc - 1 北壁 | YMS - ¹⁴ C - 1 | 362601 | -19.6 | 6 330 ± 40 | 7 245 ± 75 |
| | YMS - ¹⁴ C - 2 | 362602 | -19.3 | 2 540 ± 30 | 2 550 ± 50 |
| Tc - 2 南壁 | YMS - ¹⁴ C - 5 | 362605 | -21.1 | 8 030 ± 40 | 8 895 ± 125 |
| Tc - 2 北壁 | YMS - ¹⁴ C - 6 | 362606 | -18.5 | 5 350 ± 30 | 6 190 ± 20 |
| Tc - 4 南壁 | YMS - ¹⁴ C - 3 | 362603 | -21.4 | 4 810 ± 30 | 5 590 ± 10 |
| | YMS - ¹⁴ C - 4 | 362604 | -19.5 | 4 460 ± 30 | 5 120 ± 20 |

注：所采集的¹⁴C样品皆在美国 Beta 放射性碳定年实验室测试，测试样品为含碳土质或砂质土，测试方法为¹⁴C的 AMS 测年。

在 $(8\,895 \pm 125)$ a B. P. 之前 (表 2)。此次事件可能伴随着 f_2 断错至层③的内部, 未断错该层中的细砂透镜体。 f_3 和 f_4 断错最新地层为层③顶部, 被层①所覆盖, 这两条断层可能是同一次古地震事件形成的。由此可见, 该探槽剖面可能揭示有

两次古地震事件, 由于没有取到较为充足的测年样品, 所以无法确定古地震事件发生的确切年代。因此, 在该探槽剖面中, 一次古地震事件发生在 $(8\,895 \pm 125)$ a B. P. 之前, 另一次古地震事件发生在 $(2\,326 \pm 64)$ a 之前。

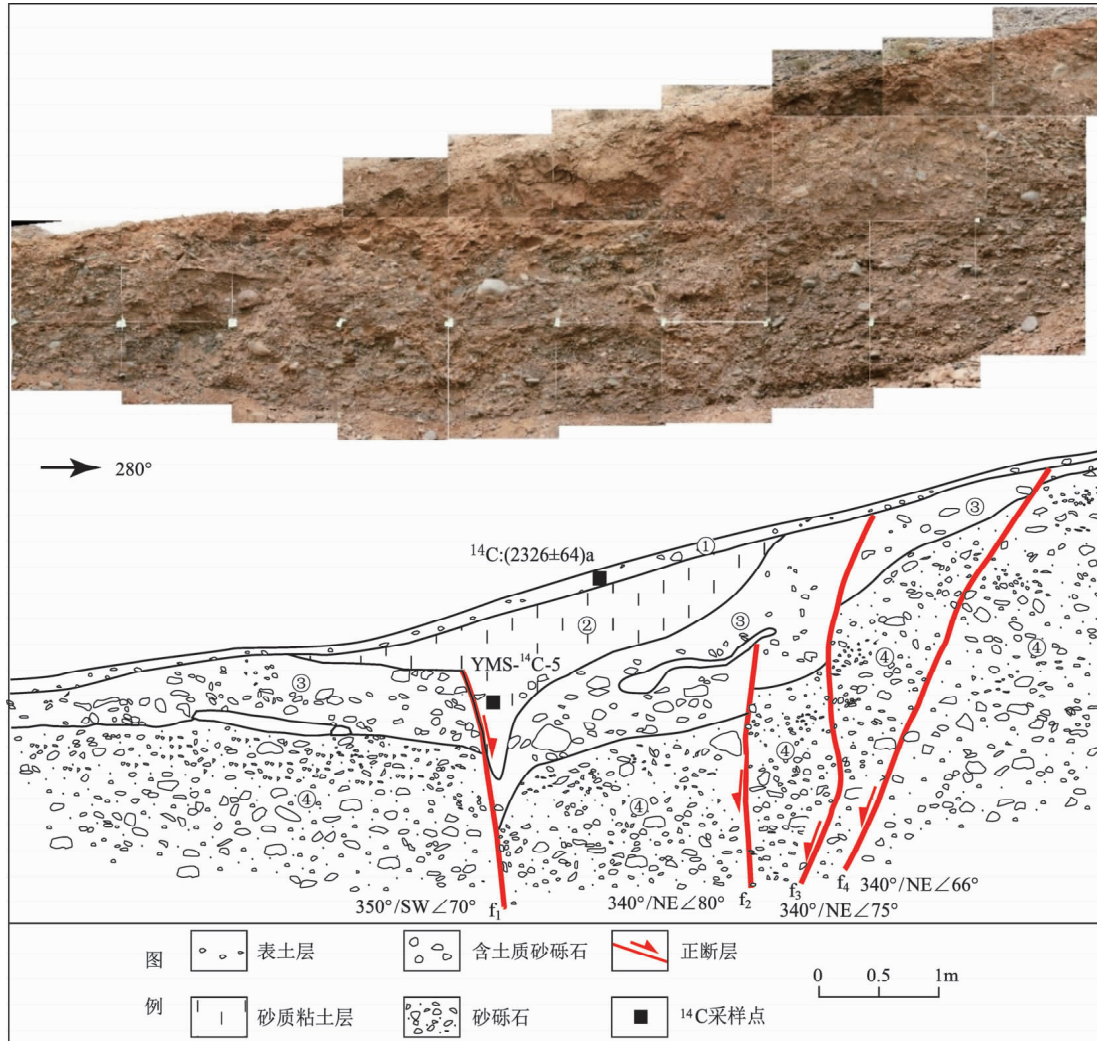


图 7 探槽 Tc-2 南壁照片及素描图 (据金卿, 2011 修改)

Fig. 7 Photo-mosaic and interpretation of south wall of trench Tc-2 (modified based on Jin, 2011)

3.2.2 Tc-2 北壁

地层描述如下 (图 8): ①地表淡黄色粉砂含黏土层, 偶见砾石, 层厚为 10 cm 左右; ②黄褐色砂质黏土层, 上部为黄色, 下部逐渐变红, 在断层 f_1 西侧含较多的砾石, 在断层 f_2 东侧砾石较少, 最大厚度约 0.4 m; ③含土质砂砾石层, 砾石粒径 2~5 cm, 次圆状, 在断层 f_1 西侧含较多的砾石, 在断层 f_2 东侧砾石较少, 向东逐渐尖灭, 厚度约 0.3 m; ④灰黄色青灰色砂砾石层, 冲洪积成因,

砾石粒径为 3~5 cm, 最大 10 cm, 磨圆较好, 剖面上可见到一层厚约 0.3m、粒径较小的冲积砂层, 未见底。

从图 8 可见, f_1 和 f_2 产状为走向 340°, 倾向 NE, 倾角为 80°和 85°; f_3 产状为走向 350°, 倾向 SW, 倾角 75°。从探槽中可以发现两次古地震事件。事件 1 为断层 f_3 断错层③及其以下所有地层; 事件 2 为断层 f_1 和 f_2 断错层①以下所有地层, f_1 与 f_2 之间形成断层带, 宽约 70~80 cm, 带内砾石

排列杂乱。在层③底部采集 ^{14}C 样品 YMS- ^{14}C -6, 测年结果为 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. (表2), 结合该探槽的南壁剖面最顶层的测年结果, 推测较早的

一次古地震事件发生在 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. 之前, 较晚的一次发生在 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. 之后、 $(2\,326 \pm 64)$ a 之前。

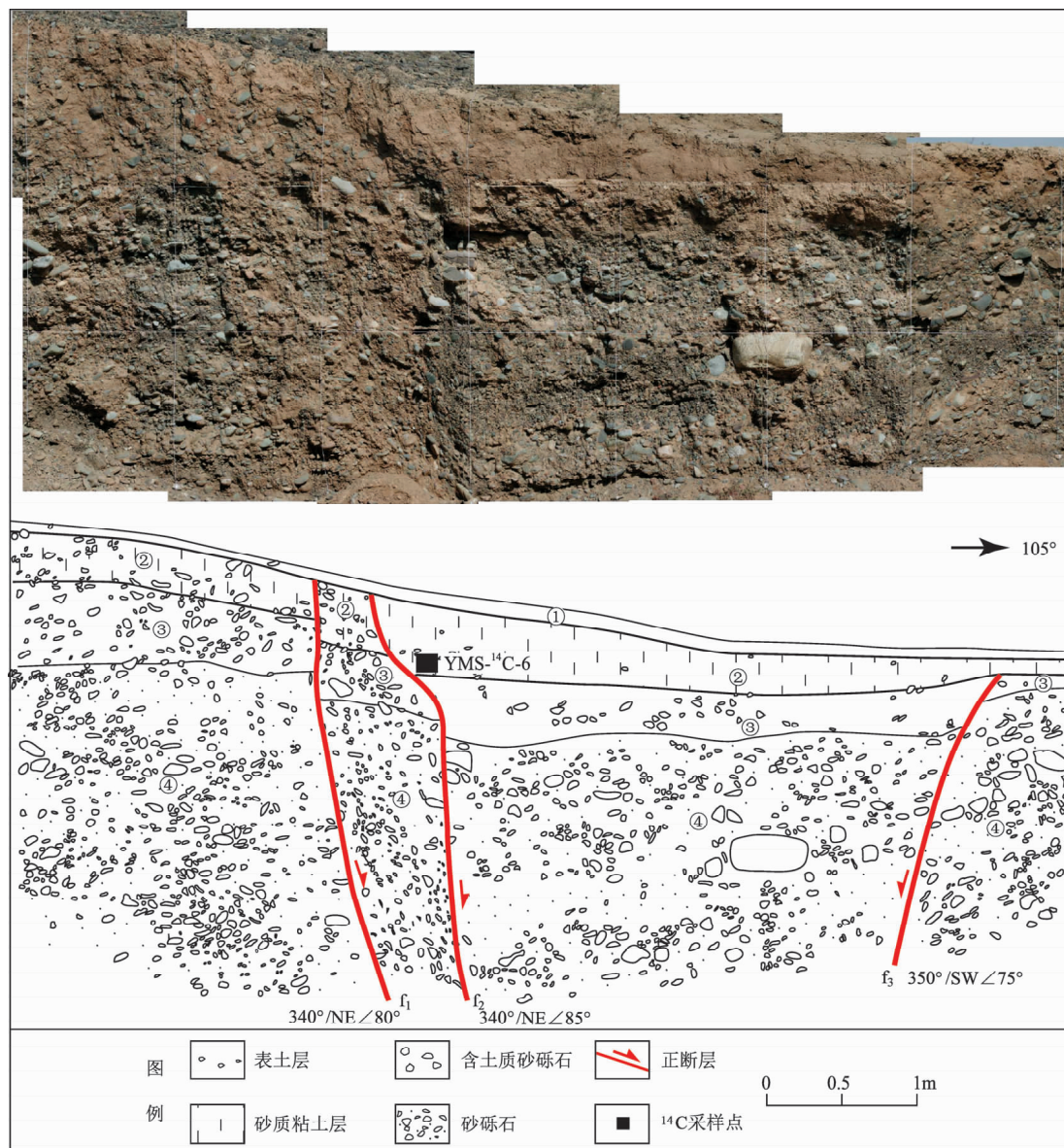


图8 探槽 Tc-2 北壁照片及素描图

Fig. 8 Photo-mosaic and interpretation of north wall of trench Tc-2

3.3 探槽 Tc-4

探槽 Tc-4 布设于 F_1 断层北段上 (位置见图 2b), 地貌上表现为在晚更新世至全新世洪积扇上向西倾的断层陡坎 (图 5b), 坎高约 1 m, 陡坎变形带宽度较小, 在此处利用挖掘机开挖了一个长 10 m、宽 3.5 m、高约 2.5 m 的探槽 (图 9)。地层描述如下: ①表层风成粉砂层, 只在断层 f_1 上盘发育, 层厚约 5 ~ 10 cm; ②黄褐色砂质黏土层,

上部为黄色, 下部逐渐变红, 含砾石, 层厚 50 ~ 70 cm; ③青灰色与土黄色砂砾石互层, 上部含有白色石膏, 砾石磨圆较好, 分选性较差, 粒径一般 3 ~ 5 cm, 最大超过 10 cm, 冲洪积成因, 未见底。

从图 9 可以看出, 剖面上部发育砂泥质细粒物质, 下部几乎全为砂砾石沉积。根据砾石的定向排列可见到 3 条断层, 走向均为 350° , f_1 是一

个断层带, 宽约 20 cm, 倾向 SW, 倾角 73° ; f_2 倾向 SW, 倾角 81° ; f_3 倾向 NE, 倾角 75° , f_2 和 f_3 构成一个小地堑。 f_1 断错层②到达地表, 无层①覆盖; f_2 和 f_3 断错至层②顶部, 被层①覆盖。 f_1 将层②断错的倾滑位移量为 50 cm 左右, f_2 将层②断错的倾滑位移为 25 cm, f_3 将层②断错的倾滑位移为 20 cm。 f_1 的位错量大于 f_2 和 f_3 的位

错, 推断 f_1 可能经历过 2 次地震。在层②中 f_1 和 f_3 西侧分别取了 ^{14}C 测年样品 (编号分别为 YMS- ^{14}C -4 和 YMS- ^{14}C -3), 测试年龄结果分别为 $(5\,120 \pm 20)$ a B. P. 和 $(5\,590 \pm 10)$ a B. P. (表 2), 两个样品测年结果较接近, 只能限定最近一次古地震事件发生在 $(5\,120 \pm 20)$ a B. P. 之后。

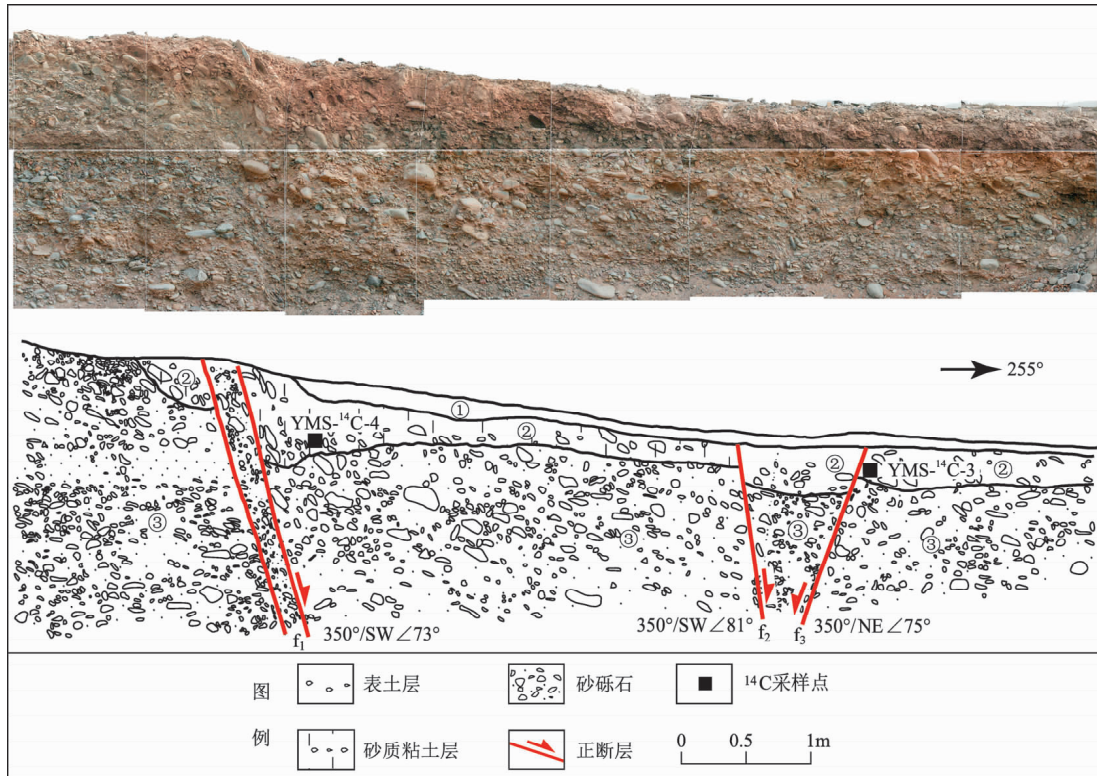


图 9 探槽 Tc-4 南壁照片及素描图

Fig. 9 Photo-mosaic and interpretation of south wall of trench Tc-4

3.4 探槽 Tc-6

在断层陡坎 F_3 中南段上开挖了 2 个探槽 (探槽 Tc-5 和探槽 Tc-6, 图 2b)。探槽 Tc-5 剖面发育 2 条逆断层, 构成断层带, 未能取到测年样品; 探槽 Tc-6 剖面揭示的地层和断层都比较清晰, 并取到了测年样品, 本文选取探槽 Tc-6 加以讨论。探槽 Tc-6 附近地貌上表现为晚更新世至全新世洪积扇上向西倾的断层陡坎 (图 3f), 坎高约 0.7 m, 陡坎变形带宽度较小, 在此处开挖了一个长 10 m, 宽 3.5 m, 高约 3 m 的探槽 (图 10)。

剖面地层描述如下: ①红色黏土夹砾石层, 上部红黏土较多, 下部砾石逐渐变多, 砾石粒径一般为 5 cm, 磨圆较好。由于沉积过程中, 陡坎

前缘不断堆积, 使得断层下盘沉积物厚度要大于上盘; 厚约 20 ~ 30 cm, 冲洪积成因; ②灰白的砾石夹石膏层, 含有细砂层, 砾石粒径 3 ~ 5 cm, 最大 10 cm, 次圆状, 厚约 20 cm, 冲洪积成因; ③灰黄色砾石层, 一般粒径 2 ~ 3 cm, 偶见大者约 10 cm, 次圆状, 分选较好, 层厚约 35 ~ 40 cm; ④土黄色含砂大砾石层, 砾石呈次圆状, 一般粒径约 10 cm, 最大约 25 cm; ⑤砂砾石层, 呈黄褐色, 分选较好, 次磨圆状, 层厚约 50 cm; ⑥砂砾石层, 局部有微弱的层理, 上部以粗砂为主, 灰黄色, 下部以砾石为主, 黄色, 砾石较大, 粒径约 10 cm; ⑦砾石层, 较之上覆层⑥粒径略小, 该层在 f_2 上盘发育微弱的层理, 未见底。

探槽所揭露的地层均发生了不同程度的折曲变形。从剖面来看， f_1 断错层④及其以下所有地层，被断错地层垂直位错量都是比较一致的，古地震事件断错至当时的地表；在断层下盘、层④之上，发育了一个小型的崩积楔，该崩积楔以砾石沉积为主，表明了古地震事件发生之后，地层沉积一直持续。 f_2 也断错至层④及其以下所有地层，被层③所覆盖，断错地层位移量不明显，也能隐约根据地层中的砾石定向看到断层延伸的情况。在断层附近，地层受到断层的逆冲作用，不仅使靠近断层的砾石沿断层面定向排列，而且使

地层产生向上牵引形成“Z”型弯曲变形。根据测量得出， f_1 断错层⑤在两侧的垂直位差为 40 cm，断错层③垂向位差约 35 cm。两个层位断错位移大致相当，可能是同一次古地震事件造成的。 f_2 附近地层的变形幅度比 F_1 附近的地层小，从断层的断错位置和断错形态判断，这 2 条断层可能是同时活动形成。从层②顶部的细砂层中采集到的 OSL 测年样品（编号 YMS - OSL - 3）的测试结果为 (4.8 ± 0.5) ka，将此次古地震事件定在 YMS - OSL - 3 年龄之前，即该次古地震事件年代限定在 (4.8 ± 0.5) ka 之前。

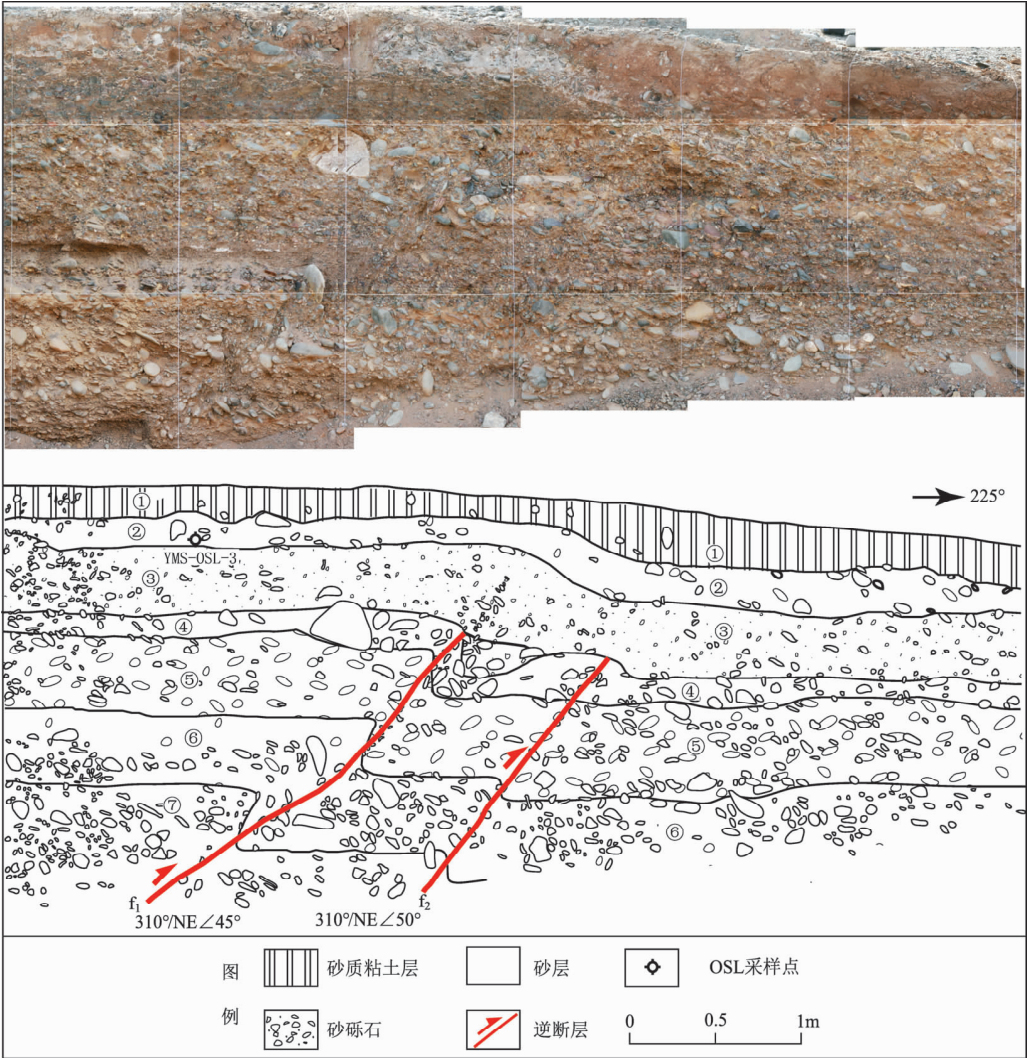


图 10 探槽 Tc - 6 南壁照片及素描图

Fig. 10 Photo-mosaic and interpretation of south wall of trench Tc - 6

3.5 古地震事件的对比分析

为了进一步确定古地震事件的期次，对 4 个探槽所确定的古地震事件进行对比（图 11）。

事件 A：根据探槽 Tc - 2 的南壁古地震事件 1 来判断，由于断层活动形成一个半漏斗状充填楔，如前所述， ^{14}C 样品 YMS - ^{14}C - 5 取在该层底部，更

接近半漏斗状充填楔接受堆积的年代（即古地震发生的年代），故将此次古地震事件采用样品 YMS-¹⁴C-5 测年限定为 $(8\,895 \pm 125)$ a B. P. 之前。

事件 B：根据探槽 Tc-1 中的事件 1 和探槽 2 中北壁古地震事件 1 进行判断。在探槽 1 中，此次事件发生在 YMS-¹⁴C-1 限定的 $(7\,245 \pm 75)$ a B. P. 之后；在探槽 2 北壁中，此次事件发生在 YMS-¹⁴C-6 限定的 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. 之前。因此，该事件发生在 $(7\,245 \pm 75)$ a B. P. 之后至 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. 之前。

事件 C：根据探槽 Tc-2 中北壁古地震事件 2、探槽 Tc-4 中最新一次古地震事件和探槽 Tc-6 中古地震事件来限定。在探槽 Tc-2 北壁上，事件发生在 YMS-¹⁴C-6 限定的 $(6\,190 \pm 20)$ a B. P. 之后， $(2\,326 \pm 64)$ a 之前；在探槽 Tc-4 中，事件发生在 YMS-¹⁴C-4 限定的 $(5\,120 \pm 20)$ a B. P.

之后；在探槽 Tc-6 中，事件发生在 YMS-OSL-3 限定的 (4.8 ± 0.5) ka 之前。因此，该事件发生在 $(5\,120 \pm 20)$ a B. P. 之后、 (4.8 ± 0.5) ka 之前。

事件 D：根据探槽 Tc-1 中古地震事件 2 和探槽 Tc-2 中北壁剖面古地震事件 2 来限定。在探槽 Tc-1 中，该次事件发生在 YMS-¹⁴C-2 限定的 $(2\,550 \pm 50)$ a B. P. 之后；在探槽 Tc-2 北壁上，事件发生在 $(2\,326 \pm 64)$ a 之前（金卿，2011）。因此，该次事件发生在 $(2\,550 \pm 50)$ a B. P. 之后、 $(2\,326 \pm 64)$ a 之前。

根据以上 4 次古地震事件，可以知道该断裂大致的古地震复发规律，虽然周期性不是十分明显，但是大约为 2 000 ~ 2 500 a，而最后一次古地震事件的离逝时间为 2 500 a 左右，显示了较大的危险性。

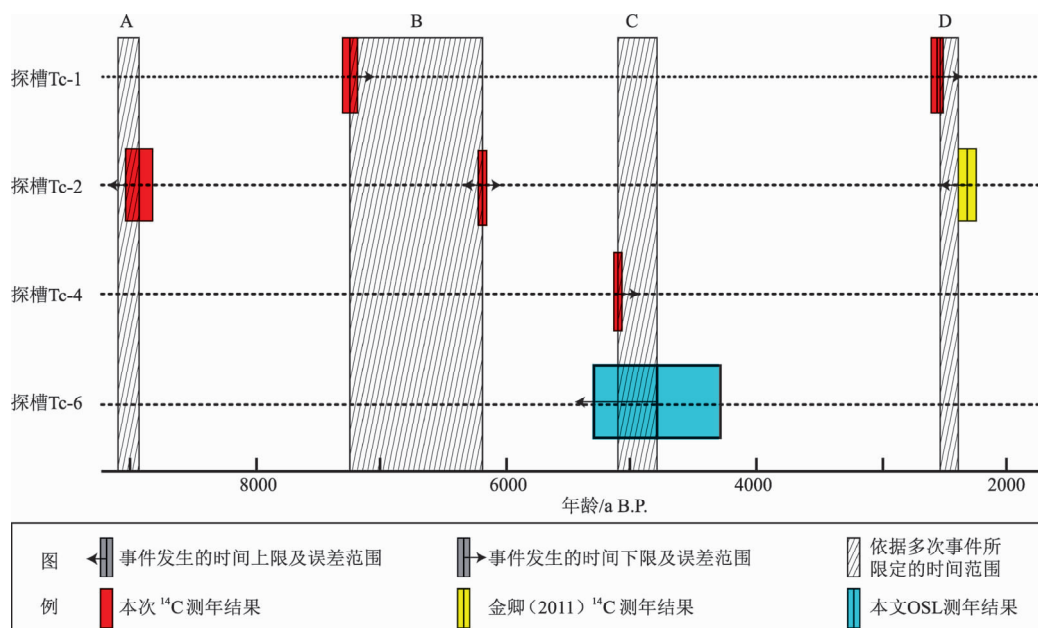


图 11 古地震期次分布图

Fig. 11 Distribution of paleoearthquake event

4 讨论

临泽断裂由 3 条近于平行的断层陡坎组成，总体走向呈 NNW，长约 8 km，位置上处于榆木山东缘断裂北端，但其活动性与榆木山东缘断裂略有差异。榆木山东缘断裂活动以挤压逆冲为主，兼具右旋走滑，断裂最活动的段落是上龙王断裂，

在黑河口 T₃ 级以上阶地存在有较明显的断层陡坎（冉勇康等，1988），未见有断错低阶地的研究，古地震资料更少。而从断层陡坎的规模来看，临泽断裂的断层陡坎整体都较小较新。差分 GPS 测量结果显示，临泽断裂东侧断层陡坎 F₁ 平均高 0.8 m，中间断层陡坎 F₂ 平均高度为 1.4 m，西侧断层陡坎 F₃ 平均高度为 0.6 m。可以看出，除 Palumbo 等（2009）得出东侧断层陡坎 F₁ 南段陡坎较

高外，其他都较低。

临泽断裂结构复杂，探槽开挖结果显示，临泽断裂东侧断层陡坎上探槽 Tc-4、中间陡坎探槽 Tc-1 和探槽 Tc-2 揭露的均为倾角较陡的正断层，只有西侧陡坎上探槽 Tc-6 揭露的是向东倾斜的逆断层，倾角较缓。东侧和中间断层陡坎在探槽 Tc-2 和探槽 Tc-4 之间形成一个由正断层控制的地堑，西侧断层陡坎为逆断层所控制。地貌上，未发现临泽断裂右旋走滑的证据。临泽断裂长度只有 8 km，该断裂的古地震事件可能与榆木山北缘断裂或榆木山东缘断裂的古地震事件相关。从探槽剖面分析确定了临泽断裂在全新世至少发生过 3 次古地震事件，其中较早一次古地震事件与金卿等 (2011) 在榆木山北缘断裂所确定的较早一次古地震事件的时间比较吻合，说明临泽断裂与榆木山断裂在破裂事件上有一定关系。综合认为，临泽断裂主断裂为逆冲断裂，与区域构造一致，而在主断裂的后缘局部张性环境下发育正断层，形成了局部的小型地堑 (图 12)；此外，该断裂可能是榆木山断裂向河西走廊继续活动的延伸，是榆木山断裂活动由山前向河西走廊盆地内的扩展。

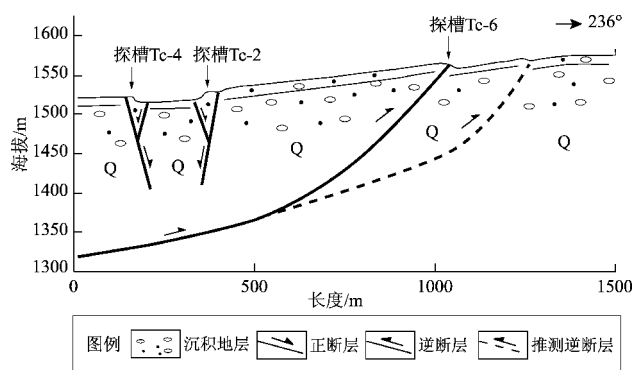


图 12 临泽断裂构造变形模式简图

Fig. 12 Diagram of structural deformation of Linze fault

5 结论

通过对临泽断裂进行室内卫星影像的解译、野外地质调查、探槽开挖及古地震分析，主要获得以下结论：

(1) 临泽断裂在地貌上可见 3 条断层陡坎，总体走向 NNW，最长约 8 km，东侧和中间陡坎主体倾向 E，西侧陡坎倾向 W。单条断层陡坎展布有

不连续现象，出现右阶雁列现象，阶区宽约 60 ~ 80 m。

(2) 对于断层陡坎差分 GPS 实测发现：东侧断层陡坎 F₁ 北段陡坎平均高 0.8 m，中间断层陡坎 F₂ 中段陡坎平均高度为 1.4 m，西侧断层陡坎 F₃ 南段陡坎平均高度为 0.6 m。除 Palumbo 等 (2009) 发现的东侧断层陡坎 F₁ 南段陡坎较高外，其他都较低。

(3) 探槽剖面揭露出临泽断裂晚更新世晚期以来发生过 4 次古地震事件，最早一次发生在 (8 895 ± 125) a B. P. 之前，全新世以来至少发生过 3 次。其中较早一次事件与榆木山北缘断裂上较早一次古地震事件时间较吻合，说明临泽断裂可能是榆木山断裂向河西走廊内部继续活动的延伸；最后一次古地震事件的离逝时间约为 2 500 a，表明临泽断裂全新世活动一直较强烈。

感谢昆明南方地球物理技术开发有限公司金卿同志在前期地质资料收集和分析中的帮助。

参考文献：

- 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.
- 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.
- 金卿,何文贵,史志刚,等. 2011. 榆木山北缘断裂古地震特征研究[J]. 地震地质, 33(2): 347-355.
- 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.
- 李有利,李保俊,杨景春. 1995. 甘肃张掖黑河河口断层晚更新世晚期的活动[J]. 北京大学学报(自然科学版), 31(3): 351-357.
- 李有利,杨景春,李保俊,等. 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.
- 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河口上龙王活断层研究[J]. 西北地震学报, 10(2): 35-47.
- 刘栋梁,宋春晖,方小敏,等. 2012. 榆木山地区玉门砾石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.
- 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.
- 庞炜. 2015. 祁连山前逆冲断裂带古地震识别的关键技术研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 冉永康,李志义,尤惠川,等. 1988. 河西走廊黑河河口断层上的古地震

- 及年代研究[J]. 地震地质, 10(4): 118–126.
- 袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 78(2): 270–278.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 地质通报, 26(1): 5–13.
- 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.
- 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.
- 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.
- Palumbo L, Hetzel R, Tao M X, *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(TC4017): 1–18.
- 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): 382–403.
- Xu X W, Yeats R, Yu G H. 2010. Five short historical earthquake surface ruptures near the Silk Road, Gansu Province China [J]. *Bull Seism Soc Am*, 100(2): 541–561.

Preliminary Study of New Faulting Characteristic of the Linze Fault

PANG Wei¹, HE Wengui^{2,3}, ZHANG Bo^{2,3}

(1. Second Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

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

(3. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

The Linze fault includes three fault scarps, of which the middle and east scarps facing east, while the west scarp facing west, mainly striking NNW direction with the length up to 8 km, have been discovered. ① Three fault scarp are measured in detail by differential GPS. The profiles show that the Linze fault scarps are much lower, and multi-level fault scarp are locally developed, with gentle slope angle and a height from tens of centimeters to one meter. ② Four trench profiles on Linze fault are selected for paleoseismic analysis, sample collection and dating. It is found that the fault scarps in the east and middle are controlled by normal faults, while the fault scarps in the west are controlled by reverse faults. ③ Since late Late Pleistocene, four rupture events happened respectively before $(8\,895 \pm 125)$ a B. P., $(7\,245 \pm 75)$ a B. P. $\sim (6\,190 \pm 20)$ a B. P., $(5\,120 \pm 20)$ a B. P. $\sim (4.8 \pm 0.5)$ ka and $(2\,550 \pm 50)$ a B. P. $\sim (2\,326 \pm 64)$ a. ④ Three events can be identified since Holocene. The earlier one coincides with the earlier paleoearthquake event on the northern margin fault of Yumushan, which indicates that Linze fault may be the extension of Yumushan fault to the Hexi Corridor. The last paleoearthquake event elapsed about 2 500 a, which indicates that the Linze fault is active during Holocene.

Keywords: Linze fault; Yumushan fault zone; paleoearthquake; scarp shape; differential GPS surveying