中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 7 期: 1115 ~ 1122
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

甘孜-玉树断裂带东南段古地震复发规律

李安, 石峰, 杨晓平*, 徐锡伟

中国地震局活动构造与火山重点实验室, 中国地震局地质研究所, 北京 100029
* 联系人, E-mail: yangxiaopingdzs@sina.com

收稿日期: 2012-05-15; 接受日期: 2012-10-22; 网络版发表日期: 2013-06-28
中国地震局玉树地震科学考察项目资助

摘要 在甘孜-玉树断裂带东南段保存了许多地震遗迹, 但对该段的地震复发规律认识并不清楚. 通过对这些地点的地貌调查和探槽开挖可以对该段全新世以来的地震活动进行研究. 在错阿乡 T_3/T_2 阶地边界左旋位错达到 80 m; 仁果乡附近 1.5 m 高的断层陡坎延伸长达 3 km. 在这两个地点开挖的探槽中, 揭示出多次古地震事件. 结合历史地震记录, 甘孜-玉树断裂带东南段 5600 年以来共发生了多达 5~6 次的大地震. 通过对探槽内地层的 ^{14}C 年龄分析, 对古地震事件发生的时间进行限定并讨论地震的发生时间和间隔存在的一些规律. 分析结果表明, 甘孜-玉树断裂东南段地震周期性不明显, 复发更具丛集特点. 5600 年以来存在两个活跃期和一个平静期, 现今正处于第二个活跃期内. 各活跃期内地震复发时间并不一致, 前一活跃期间隔约 1000~1300 年. 现今活跃期中两次历史地震间隔为 534 年.

关键词
甘孜-玉树断裂带
古地震
复发规律
丛集

2010 年 4 月 14 日 7 点 49 分青海省玉树藏族自治州玉树县发生 M_s7.1 级地震. 这是继汶川特大地震之后我国大陆又一次重大的地质灾难. 地震造成 2200 余人遇难, 大量房屋损毁, 是使生命财产都受到巨大损失的强烈地震.

青海 M_s7.1 级玉树地震产生了 31 km 的地表破裂, 最大水平位错约 1.8 m[1], 是近 10 多年来发生在巴颜喀拉块体边界上的又一次 7 级以上地震. 1997 年发生的玛尼 M_s7.5 级地震, 2001 年昆仑山口 M_s8.1 级地震和 2008 年汶川 M_s8.0 级地震都发生在这个块体边界上. 因此对该活动块体边界上还未发生破裂的断层段进行研究显得尤为重要. 根据历史地震记录, 甘孜-玉树断裂东南段洛须至甘孜段在 1854 年曾发生过地震地表破裂, 玛尼干戈附近在 1320 年也有地震记录, 再往前则没有地震记录. 闻学泽等[2]通过断错地貌研究得到甘孜-玉树断裂 5 万年以来平均左旋滑动速率为(12±2) mm/a, 同时在多处发现 1854 年地震遗迹, 且同震左旋位错为 2.5~5.3 m. 同震位错与滑动速率的简单换算, 得到甘孜-玉树断裂东南段大地震复发间隔可能在 200~600 a 左右. 本文通过对甘孜-玉树断裂东南段探槽研究和古地震遗迹分析, 试图运用古地震研究方法了解该段的大地震重复规律, 为甘孜-玉树断裂带地震危险性评价提出新的认识.

1 构造背景

甘孜-玉树断裂是青藏高原内部巴颜喀拉块体的西南边界, 其南侧为羌塘活动块体. 断裂南东起四川

中文引用格式: 李安, 石峰, 杨晓平, 等. 甘孜-玉树断裂带东南段古地震复发规律. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1115–1122
英文引用格式: Li A, Shi F, Yang X P, et al. Recurrence of paleoearthquakes on the southeastern segment of the Ganzi-Yushu Fault, central Tibetan Plateau. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 165–172, doi: 10.1007/s11430-012-4540-y

省甘孜, 向西北延伸经玛尼干戈, 洛须至青海省玉树, 终止于青海省治多县, 全长近 500 km. 断层倾向以北东为主, 倾角 70~85°. 该断裂规模巨大, 其破碎带宽 50 m 至数百米, 主要发育在三叠纪地层中[3]. 断裂带保留大量左旋位错地貌[4], 断裂东侧与鲜水河断裂相连. 张培震等[5]认为中国大陆内部变形以分块运动为主要特征, 进行了主要活动块体边界断裂带的滑动速率研究, 得到鲜水河断裂带的左旋滑动速率为(10±2) mm/a[6,7], 鲜水河断裂于 1973 年发生炉霍 7.6 级地震和 1981 年发生道孚 6.9 级地震. 以往的研究认为, 甘孜-玉树断裂带的平均左旋滑动速率为 10 mm/a 左右[3,4,8,9], GPS 资料得到的走滑速率约为(9±2) mm/a, 并估计其左旋走滑运动开始时间为 8~6 Ma[10,11], 与鲜水河断裂有大致相当的活动速率. 甘孜-玉树断裂分三段: 甘孜-洛须段为甘孜-玉树断裂东南段, 洛须-玉树段为中段, 玉树以西为断裂的西北段(图 1)[12~14]. 2010 年玉树 M_S7.1 级地震发生在断裂中段. 断裂各段落历史地震均有记录, 如西北段 1738 年 6½ 玉树西地震, 中段 1896 年 7 级邓柯地震[2], 东南段 1854 年 7½ 级地震, (1320±65)年竹庆-日阿 8 级地震[15]. 甘孜-玉树断裂具有滑动速率高和地震频繁的特点.

2 古地震遗迹

甘孜-玉树断裂东南段发育多个狭长的小拉分盆地, 其中保留着地震形成的地面鼓包, 冲沟位错和地震断层陡坎.

2.1 错阿乡断错地貌

错阿乡处发育有三级河流阶地, 其中河流西侧完整保留了 T_3 和 T_2, T_3 阶地垂直位错 8 m, T_3/T_2 阶地坎左旋水平位错约 80 m; T_2 阶地面垂直位错 2~3 m, 由于 T_1 被侵蚀没有保留 T_2/T_1 阶地坎的左旋水平位错量, T_2/T_0 阶地坎没有水平位错量(图 2(a)). 在河流西岸出露断层剖面, 断层西南盘为上三叠统灰黑色板岩和变质砂岩, 东北盘为松散的砂砾石堆积, 断层错动致使基岩逆冲到第四纪松散沉积物之上, 断层产

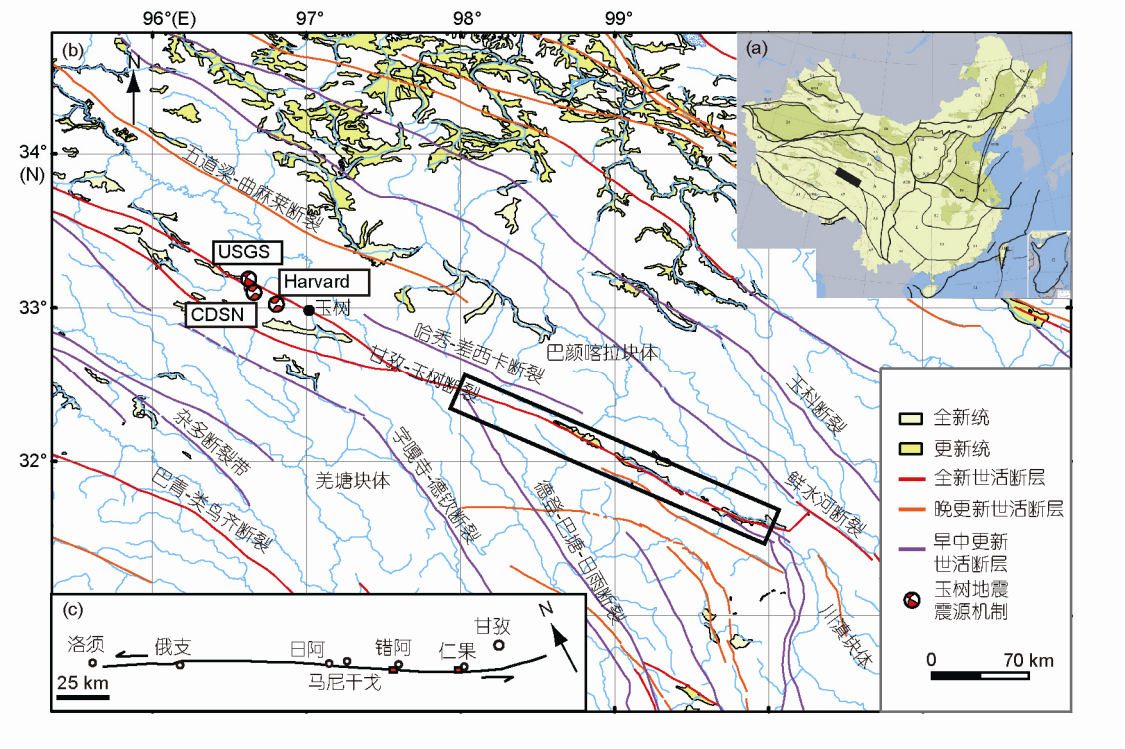


图 1 玉树地震区域地震构造与震中分布图

(a) 地震区域(黑框)位置图; (b) 断裂位置来自中国活动构造图[12], 玉树地震震源机制解来自中国地震台网中心 CDSN[13], 美国 USGS 和 Harvard[14]; (c) 红框为探槽开挖地点

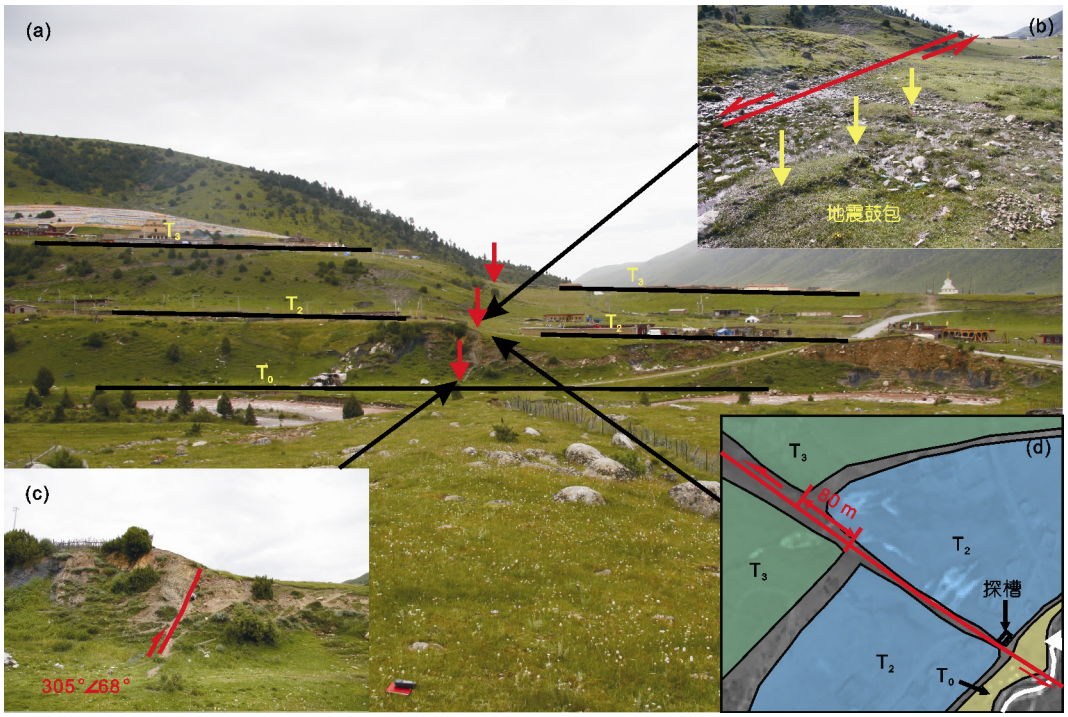


图 2　错阿乡断错地形地貌、断层面和探槽位置

(a) 地貌总图(镜头北西); (b) T_2阶地面上地震鼓包(镜头北西); (c) 断层露头照片(镜头北西); (d) 卫星影像解译和探槽位置

状 305°∠68°(图 2(c)). 在 T_2阶地面上的断层陡坎前残留最新地震事件造成的 10~20 cm 高, 长条状地震鼓包或残留陡坎. 单个鼓包长约 1.2~1.5 m, 宽约 30~40 cm, 沿断层走向方向延伸约 20 m. 在 T_2阶地面上垂直于断层走向开挖探槽(图 2(d)).

2.2　仁果乡断错地貌

在仁果乡西南的山前平缓地带保留了一条走向 300°, 延伸长度 3 km, 人为改造后残留坎高 0.5~1.5 m 的地震断层陡坎(图 3(a), (b)). 陡坎向东南延伸至俄中村, 并错断道路, 现在的道路东边界重新取直, 而西边界还保留有左旋拐弯. 道路修建在山坡上的间歇性冲沟内, 所以在道路上仍保存着原始沟床, 沟床有 3 m 的左旋位错(图 3(c)). 陡坎向西北延伸至卡攻乡, 发育一个长达 200 m 的断塞塘(图 3(d)). 这条陡坎在航空照片上可以清晰辨认. 据仁果四村长介绍, 在图 3(a)位置以前有一个村子并在该区域耕种, 但后来村子消失了, 消失时间在 100 年以前. 探槽中也揭露了该地区地表附近存在古耕作层, 证明了村民言论的正确性. 结合历史地震记录, 该地区在 1854 年发生 7 级以上地震, 地震宏观震中就在大金寺, 仁果乡附近(图 1(c))[13], 地震地表破裂和强震动破坏导致该古村落的消失或迁移.

3　探槽开挖和古地震事件分析

3.1　古地震分析方法

槽探方法研究古地震主要通过在探槽中寻找地层位错, 崩积楔等地震造成的地质现象并分析这些现象与正常沉积过程之间的关系, 讨论和界定古地震的发生时间, 震级和位移量等参数. 槽探方法研究古地震的关键是识别地震变形特征与地层单元之间的关系, 一次古地震事件错断的最新地层和其上覆的未被错断的地层可以分别限定这次古地震事件的下限和上限时间; 被错断层也记录了该次古地震造成的位移量[16].

3.2　错阿探槽

错阿探槽布置在T_2阶地面上(图 2(d)), 开挖处断层陡坎高度约 2 m. 错阿探槽揭示的地层如下(图 4):

U1: 青色上三叠统变质砂岩.

U2: 褐色或红褐色含粘土质的粗砾石层, 粒径

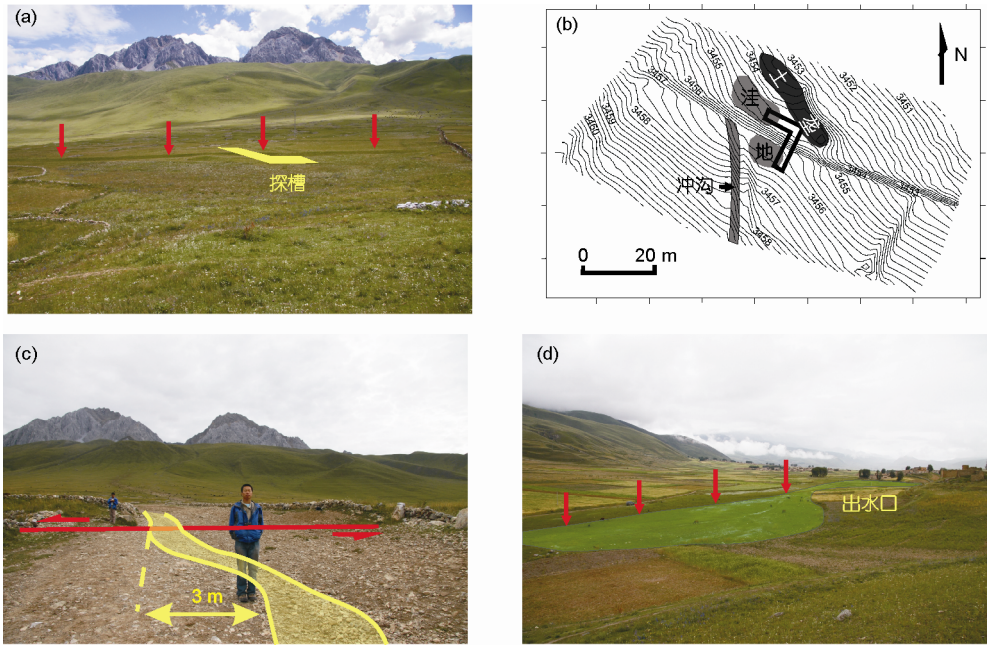


图 3　仁果乡附近多点地貌

(a) 仁果乡地震断层陡坎(镜头向西南); (b) 仁果四村断层陡坎实测地形图(黑框为探槽, 垂直于断层为 RGTC1 探槽, 平行于断层为 RGTC2 探槽); (c) 俄中村道路位错(镜头向西南); (d) 卡攻乡断塞塘(镜头向西)

10~20 cm, 小砾石粒径在 2~5 cm.

U3: 黑色含小砾石粘土层, 砾石直径 2~3 cm, 个别可达到 10 cm, 有云母碎片. ^{14}C 样品测年结果为 5600~5470 cal. a BP (上部) 和 8050~7940 cal. a BP (中部), 所有 ^{14}C 测年样品结果均由美国 BETA 实验室测定, 为 95%置信区间的校准年龄.

A 楔体: 浅黑色含小砾石砂质粘土楔体, 砾石直径 2~3 cm 左右, 顶部有大砾石, 楔体物质来源为 U3 和当时的地表, 测年结果为 4730~4510 cal. a BP.

U4: 褐色粘土层, 几乎不含或含少量砾石, 砾石粒径 1~2 cm, 测年结果为 4160~3970 cal. a BP.

B 楔体: 浅褐色含粘土质小砾石楔体; 砾石直径 3~5 cm, 物质成分与上覆 U5 较接近, 测年结果为 3570~3390 cal. a BP.

U5: 黄褐色含小砾石粘土层 (近地表层), 砾石直径 2~5 cm, 近断层位置物质较杂乱, 测年结果为 800~680 cal. a BP.

错阿探槽揭示的断层面呈现出正花状构造样式, 可以分辨出五条断层. 断层西南上升盘出露基岩地层, 基岩断层面近地表处略向西南倾, 地震断层错动很难造成西南盘基岩的垮塌, 而是在沉积地层和基岩面之间出现三角楔形空间. 在地震时或地震后短时间内, 断层位置的古地表土体会掉入或者陡坎片流冲刷进入楔形空间. 根据楔体和沉积地层切盖关系可以分辨古地震事件发生的先后序列, 错断地层和楔体堆积时间限定古地震时间.

错阿探槽中总共记录了两次古地震事件, 探槽剖面中, 断层形成之前已经堆积的地层为 U1, U2 和 U3 (图 5(a)). 第一次事件形成 F1 和 F2 断层面, 并在 U2, U3 与 U1 之间形成楔形空间, 当时的地表和 U3 物质一起塌落填充形成楔体 A(图 5(b)), 根据 U3 顶部和楔体 A 的 ^{14}C 年龄可以分别控制事件的下限时间为 5600~5470 cal. a BP, 上限时间为 4730~4510 cal. a BP (图 4). 事件之后沉积 U4(图 5(c)). 第二次事件在探槽两壁的表现略有不同, 东壁形成一组切错楔体 A 的 F3 断层面, 且 F2 断面再次活动, 楔体 A 在 F2 和 F4 断面之间向下滑动, 楔体 A 上覆地层 U4 塌落, F4 和 F5 之间空隙中填充楔体 B; 西壁没有形成 F3 断面, F4 断面切错 U4, 与 U1 之间形成 U4 的塌落物和楔体 B(图 5(d)). 地震上限和下限时间分别由楔体 B 的 ^{14}C 年龄 3570~3390 cal. a BP 和 U4 的 4160~3970 cal. a BP 控制(图 4); 之后沉积现今地表 U5, ^{14}C 年龄为 800~600 cal. a BP(图 5(e)).

1320 年的竹庆-日阿 8 级历史地震震中距离错阿探槽不足 20 km, 探槽位置西北约 20 m 处残留的地

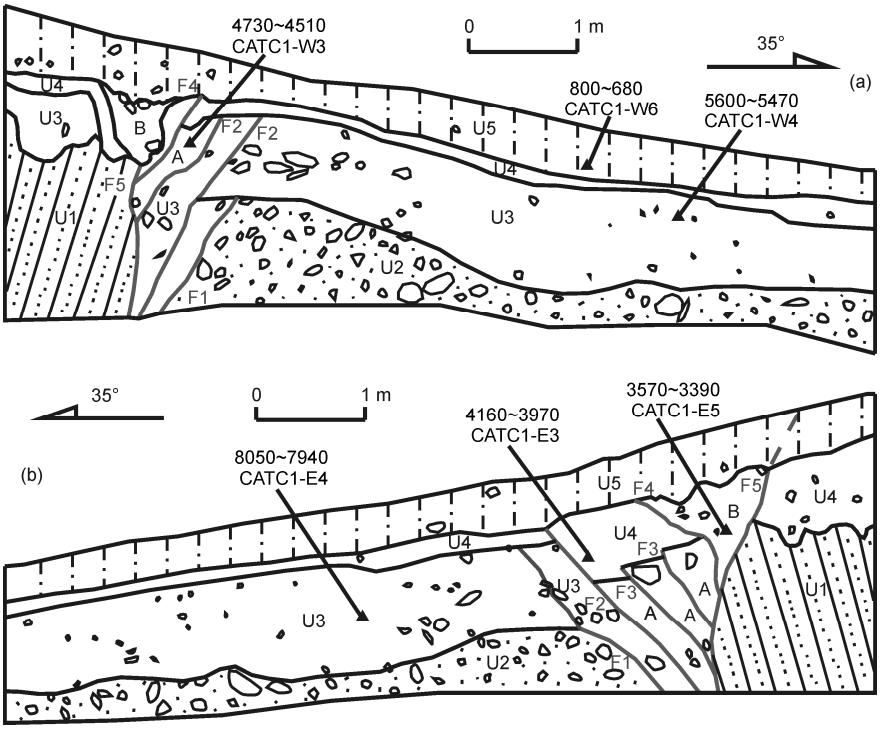


图 4　错阿探槽剖面

(a) CATC1 探槽西壁; (b) CATC1 探槽东壁. 年龄单位为 cal. a BP

震鼓包可能为该次地震造成的地表变形(图 2(b)). 这次地震发生在U5沉积之后, 地表挤压变形只造成U5近断层位置杂乱, 探槽东壁 F5 断面具有一些砾石定向但无明显断错现象(图 4).

3.3　仁果探槽

仁果探槽布置在仁果四村西南山前断层陡坎上(图 3(a)). 微地貌显示, 下盘探槽开挖位置北侧有北西向土垄, 在开挖点形成一小片洼地; 上盘探槽位置与西侧冲沟之间也存在一小块洼地(图 3(b)).

仁果探槽揭示出如下地层, 自下而上分别为(图 6):

U1-1: 灰黄色含粗砂的粗砾石层, 以 5~20 cm 粒径的砾石居多, 少数可超过 20 cm, 分选较差, 略有磨圆. 部分区域颜色偏黑, 晒干后呈灰白色, ^{14}C 年龄测定为样品RCTC1-E16的16040~15750 cal. a BP和样品 RGTC1-E17 的 9460~9260 cal. a BP. RGTC2 探槽中该层顶部测定的两个样品年龄分别为 3880~3690 和 2920~2770 cal. a BP (图 6(c), (d)).

U1-2: 浅黑色含粘土砾石层, 粘土和细砂含量高, 砾石直径 5 cm 左右, 少量超过 10 cm, 该层与 U1-1 为渐变关系, 为同一时期沉积(图 6(b)), 测年结果 6290~6000 cal. a BP.

U2: 黑色含粘土质较高的小砾石层, 颜色比U1-2深, 砾石直径 1~3 cm, 仅在RGTC1探槽西壁出露, 为局部洼地沉积物, 测年结果 5050~4850 cal. a BP.

U3: 浅黑色或褐色小砾石层, 粒径 5 cm 左右, RGTC1 西壁颜色略深, RGTC1 东壁仅在上盘出露, RGTC2探槽中地层向东尖灭, 尖灭位置与RGTC1东壁上盘出露位置具有 8 m 的左旋位错. 测年结果为 2730~2470 cal. a BP. 与在RGTC2探槽南北壁下伏U1的顶部两个测年样品结果 3880~3690 和 2920~2770 cal. a BP基本一致(图6(c), (d)), 证实两个探槽出露的也应为同一地层.

U4-1: 黄色含少量小砾石砂质粘土层, 砾石粒径3 cm左右, 磨圆差, 为古耕作层. 耕作时将大块砾石挑出后堆到了陡坎位置, 细粒物质留下来用于耕种, 在该层中发现大量的炭屑且水平分布, 应该为耕作时焚烧的秸秆. 三个测年样品的结果分别为 1180~1050, 940~800 和 970~900 cal. a BP (图 6(a),(b)).

U4-2: 褐色砂质粘土层, 为现代的地表草皮层,

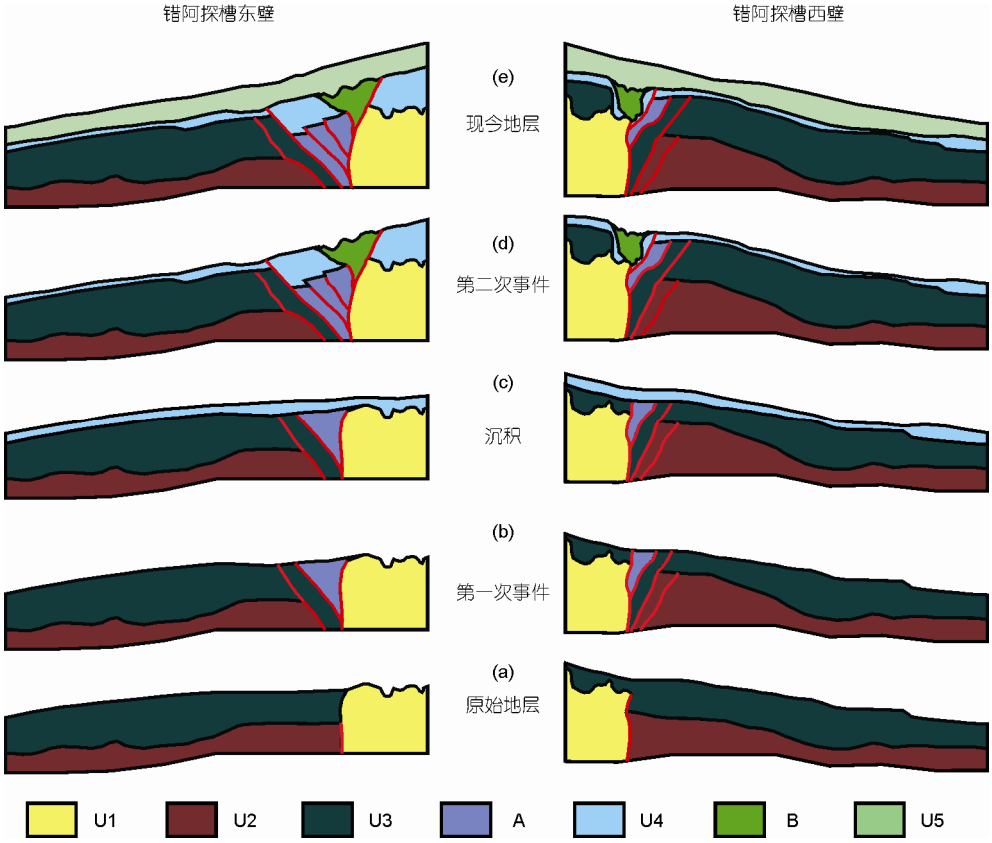


图 5　错阿探槽古地震逐次还原解释图

含 1~3 cm 的小砾石.

A 楔体: 位于 U1-1 之上.

B 楔体: 形成时间与 U4-1 大致相当, 受到人为改造, U4-1 古耕作层中的砾石被堆在断层陡坎处, 该楔体中两个测年样品的结果分别为 1060~930 和 980~910 cal. a BP (图 6(b)).

在探槽剖面中可以辨认出 4 条断层面, 对其分别讨论如下:

F1 断面: 断面顶部终止于 U1-1 层中, 上部未见到楔体或花状构造特征.

F2 断面: 断面顶部有 A 楔体, 之上还存在 B 楔体, 东壁 A 楔体被错断(图 6(b)), 西壁 A 楔体中可见断面(图 6(a)).

F3 断面: 为一条宽约 10~15 cm 的断层带, 上覆 U2 底面受扰动凹凸不平.

F4 断面: 断层带内含一团小砾石, 并错断 U3, 小砾石团块的测年结果为 2890~2760 cal. a BP.

根据断面和地层的切盖关系对形成断面的古地震事件进行界定, 可以明确两次地震事件. 第一次事件发生在 U1 沉积结束, 这次事件形成 F2 和 F3 断面, 在 F2 断面下盘形成楔体 A, 在 F3 断面顶部的 U2 有扰动痕迹, 底部发生波浪状起伏. 事件发生的时间存在两种可能, 一种是地震发生时还未沉积 U2, 地震造成当时的地表(U1 顶部)变形并改变环境沉积黑色细粒的 U2; 另一种是地震发生时 U2 已经开始沉积, 地震后 U2 继续沉积, 这两种情况都可以造成 F2 断面上覆的 U2 地层底面变形而顶面平整, U2 测年样品位置在断层扰动处, 结果为 5050~4850 cal. a BP. 这个年龄可界定地震上限时间或近似于地震时间. 第二次事件发生在 U3 沉积之后, F4 断面错断了该层(西壁), 并挤入小砾石团块(砾石粒径和 U3 相似), 东壁 F4 断面位置不明显, 上覆 U3 未见明显变形但下盘没有 U3 出露. 砾石团块中测年结果为 2890~2760 cal. a BP, 东壁 U3 测年结果为 2730~2470 cal. a BP, 地震事件可以被界定在这两个时间之间. RGTC2 探槽中 U3 向东尖灭, 尖灭点与 RGTC1 探槽东壁有 8 m 左旋位错, 至少包含第二次事件

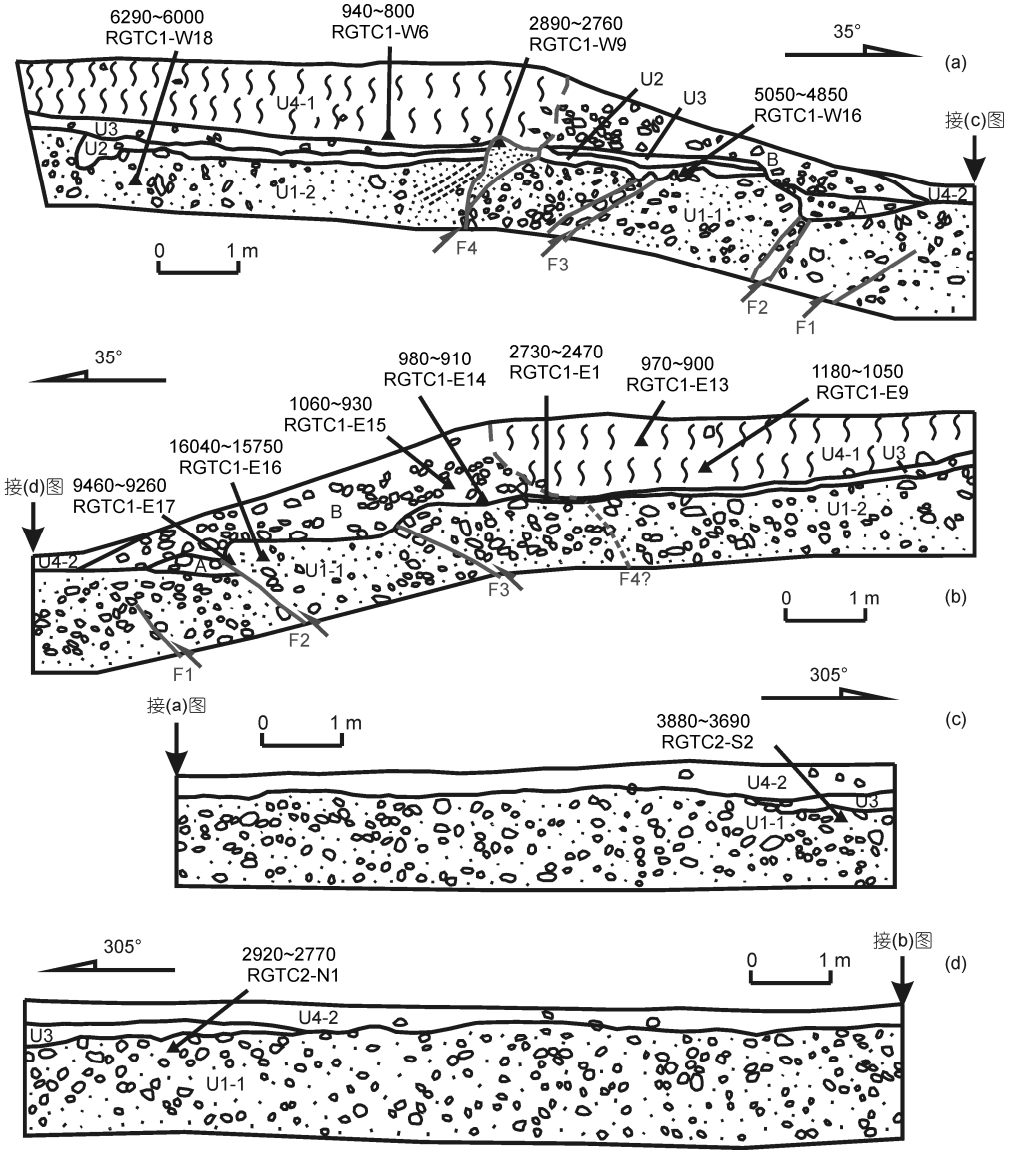


图 6　仁果探槽剖面

(a) RGTC1 探槽西壁; (b) RGTC1 探槽东壁; (c) RGTC2 探槽南壁; (d) RGTC2 探槽北壁. 年龄单位为 cal. a BP

和 1854 年历史地震 3 m 位移量(俄中村道路位错量).

4　古地震时间和间隔

Shimazaki 和 Nakata[17]提出简单地震复发模型之后, Savage 和 Cockerham[18]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[19]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.

两个探槽中一共记录 3~4 次古地震(图 7), 分别发生在(5535±65) cal. a BP(中值+误差, 下同)和(4620±110) cal. a BP 之间, (4950±100) cal. a BP 之前(可能和前次地震为同一事件), (3480±90)~(4065±95) cal. a BP 之间以及(2825±65)~(2600±130) cal. a BP 之间. 历史地震记录又获得了 1320 年左右和 1854 年的两次地震. 探槽地层的测年结果和沉积序列连续, (2600±130)~630 cal. a BP(公元 1320 年)(图 7), 近两千年间没有记录到古地震; (5535±65)~(2600±130) cal. a BP 之间

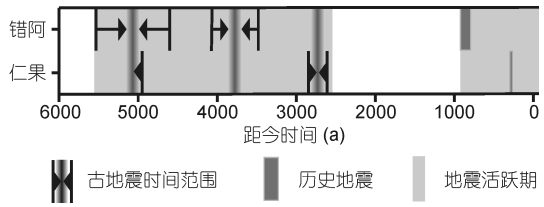


图 7　甘孜-玉树断裂东南段地震破裂时间和活跃期

约三千年间则发生 3~4 次地震; 距今 630 cal. a BP (公元 1320 年)以来已发生两次地震. 说明甘孜-玉树断裂东南段地震具有丛集性, (5535±65)~(2600±130) cal. a BP 是一个地震活跃期, (2600±130)~630 cal. a BP 为地震平静期, 630 cal. a BP (公元 1320 年) 以来进入另一个地震活跃期. 第一个活动期地震间隔(上下限时间中值计算)在 1000~1300 cal. a BP, 第二个活动期两次地震间隔为 534 cal. a BP. 活跃期内地震周期性并不明显.

5　初步认识

甘孜-玉树断裂东南段地震复发更具丛集特点, 5600 a 以来存在两个活跃期和一个平静期, 目前正处第二个活跃期内. 各活跃期内地震复发时间并不一致, 前一活跃期间隔约 1000~1300 a. 现今活跃期中两次历史地震间隔为 534 a.

以往的研究认为甘孜-玉树断裂带的平均左旋滑动速率在 7~10 mm/a 左右[2,3,8], 东南段最大同震左旋位移量为 5.3 m, 多处位移量在 3~5 m, 通过地貌估算的复发间隔 500 a 左右[2], 与本文通过古地震间隔并不十分吻合.

致谢　感谢审稿人给予的宝贵意见.

参考文献

1　陈立春, 王虎, 冉勇康, 等. 玉树 *Ms*7.1 级地震地表破裂与历史大地震. 科学通报, 2010, 55: 1200–1205
2　闻学泽, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 甘孜-玉树断裂带平均滑动速率与近代大地震破裂. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 199–208
3　李闽峰, 邢成起, 蔡长星, 等. 玉树断裂活动性研究. 地震地质, 1995, 17: 218–224
4　闻学泽, 黄圣睦, 江在雄. 甘孜-玉树断裂带的新构造特征与地震危险性估计. 地震地质, 1985, 7: 23–34
5　张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003. 33(增刊): 12–20
6　王敏, 沈正康, 甘卫军, 等. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 575–581
7　王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 582–597
8　周荣军, 马声浩, 蔡长星. 甘孜-玉树断裂带的晚第四纪活动特征. 中国地震, 1996, 12: 250–260
9　彭华, 马秀敏, 白嘉启, 等. 甘孜玉树断裂带第四纪活动特征. 地质力学学报, 2006, 12: 295–304
10　Wang E, Burchfiel B C. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau. Geol Soci Amer Bull, 2000, 112: 413–423
11　付碧宏, 时丕龙, 贾营营. 青藏高原大型走滑断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应. 地质科学, 2009, 44: 1343–1363
12　邓起东. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007
13　陈运泰. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震震源机制和破裂过程快报(第四版). 2010. http://www.csi.ac.cn/manage/html/4028861611c5c2ba0111-c5c558b00001/_content/10_04/17/1271271488288.html
14　USGS, Harvard. Magnitude 6.9 Southern Qinghai, China. 2010. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/us2010vacp.php
15　周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计. 地震地质, 1997, 19: 115–124
16　McCalpin J P. Paleoseismology. London: Academic Press, 1997. 33–82
17　Shimazaki K, Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. Geophys Res Lett, 1980, 7: 279–282
18　Savage J C, Cockerham R S. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978–1986 Bishop-Mammoth Lakes sequence, Eastern California. Bull Seimol Soc Amer, 1987, 77: 1347–1358
19　Sieh K. A more precise chronology of earthquake produced by the San Andreas Fault in southern California. J Geophy Res, 1989, 94: 603–623