

元谋断裂晚第四纪活动性定量分析

卢海峰, 何仲太, 赵俊香, 马保起, 王 瑞

中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要: ETM 影像揭示了元谋断裂以左行剪切走滑为主, 局部张剪或压剪的性质. 利用 1:5 万地形图和影像图内冲沟、山脊等地貌位错估测了元谋断裂—平浪—江边段晚第四纪活动性, 详细调查实测并分析了研究区断错地貌和构造剖面, 获取的该断裂晚第四纪活动性、活动强度, 与估测结果一致. 结果显示, 元谋断裂—平浪—江边(金沙江边)段最新活动时间为晚更新世末期—全新世; 其中—平浪—大龙潭一带, 水平滑动速率约 2.0 mm/a, 垂直滑动速率为 0.07 mm/a; 木莲旧—秧田井一带, 水平滑动速率接近 0.53 mm/a, 垂直滑动速率为 0.06 mm/a; 乐胜古—江边一带, 水平滑动速率接近 1.32 mm/a, 垂直滑动速率为 0.03 mm/a. 综合分析表明, 该段断裂晚第四纪平均水平滑动速率为 1~2.0 mm/a, 以走滑运动为主.

关键词: 元谋断裂; 左行剪切走滑; 滑动速率.

中图分类号: P553

文章编号: 1000-2383(2008)06-0852-09

收稿日期: 2008-04-11

Quantitative Analysis on Activity of the Yuanmou Fault in Late Quaternary

LU Hai-feng, HE Zhong-tai, ZHAO Jun-xiang, MA Bao-qi, WANG Rui

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: ETM data reveal that the Yuanmou fault is mainly characterized by horizontal left-lateral and shear strike-slip, including ringent shear and pressed shear in part. Taking the advantage of the level moving and offset of the gullies and ridges in 1:50000 landform and ETM image, we estimated the activity of Yuanmou fault of Yipinglang-Jiangbian segment in the Late Quaternary, and later the results from field exploration, including the analysis of the profiles of landform offsets such as gullies and fluvial landforms, the sections of the active structures in the studied area and activity and active intensity in the Yuanmou fault is the same as what we presumed before. The result shows that the latest active time of the Yuanmou fault of Yipinglang-Jiangbian segment is from the mid-late of Late Pleistocene to Holocene. During these ages, the level moving velocity of left-lateral strike-slip of Yipinglang-Dalongtan segment is approximately 2.0 mm/a, the velocity of uprightiness strike-slip approximately 0.07 mm/a. While the respective velocity of left-lateral strike-slip and uprightiness strike-slip is approximately 0.53 mm/a and approximately 0.06 mm/a from Yangtianjing to Mulianjiu, the respective velocity of left-lateral strike-slip and uprightiness strike-slip approximately 1.32 mm/a and 0.03 mm/a from Leshenggu to Jiangbian. Comprehensive analysis indicates that the level moving velocity since the Late Quaternary in the studied phase is 1~2.0 mm/a, with a major left-lateral shear strike-slip.

Key words: Yuanmou fault; left-lateral and shear strike-slip; moving velocity.

青藏高原下地幔对流应力场可能是导致高原地壳破裂的主要原因(熊熊等, 2007), 并在高原东部边缘形成多个活动块体和断裂构造带. 位于青藏高原东南隅、由鲜水河—小江断裂带和金沙江—红河断裂带围限的川滇活动块体, 被丽江—小金河断裂分

割成北部的川西北次级块体和南部的滇中次级块体两部分, 元谋断裂是滇中块体内部的分界断裂, 同时也是南北地震带南段的西缘边界断裂(康来迅, 1991)(图 1), 而块体边界活动构造带对历史、现今和未来破坏性地震具有明显的空间限制作用(Nur

et al., 1989). 由于前人对元谋断裂的晚第四纪活动性、活动强度、古地震的复发特征等一系列问题缺乏系统研究,因此本文开展具有边界双重性质的元谋断裂活动性的研究具有明显的理论和实际意义. 本

文以实测断错地貌和构造剖面为基础,详细探讨了断裂的晚第四纪活动性,有助于推进川滇块体运动学的研究,为区域性的强震构造环境研究提供可靠的基础资料.

1 研究背景

元谋断裂位于传统意义上的中国南北地震带的南西缘. 从广义上,张寿庭和徐旃章(1994)称之为元谋—昔格达断裂带或元谋—绿汁江断裂带,北接磨盘山断裂,南端止于楚雄—建水断裂带,展布于米易西、昔格达、元谋、一平浪、罗川附近进入绿汁江河谷,到易门三家厂南被北西和北东向断裂切错,逐渐消失,总长约 270 km. 也有学者将其北段称之为昔格达断裂,平面展布近平直,南段称之为元谋断裂(图 2),平面展布舒缓波状. 元谋断裂总体走向近南北向,平面上呈舒缓波状. 自第四纪以来,该断裂带活动特征明显,并控制了新九、昔格达、红格、龙街、元谋、化同、舍资、罗川等断裂沿线的第四纪断陷盆地的发育. 近年来,地质学家对元谋断裂的活动性开展了一些研究工作,取得了一定的成果. 主要表现在:

(1)采用地球物理学方法揭示出元谋断裂带为重力梯度带和重力异常分界断裂(张寿庭和徐旃章, 1994),沿线地热流值较高(徐锡伟等, 2003),可能存在一定程度的应变积累背景(张希等, 2004). (2)依据断裂带两侧第四纪以来表现出以左旋错动为主,且伴随垂直差异升降运动的活动方式,认为该断裂为历史上发生过 5 次中强地震的发震构造(赵慈平等, 2003). (3)李庆辰等(1993)和姚海涛等(2005)通过深入调查、分析元谋盆地新生代地层的演化模式,发现其与元谋断裂在晚新生代初期复活、中期持续而稳定以及后期强烈活动相对应. (4)中国地震局地壳应力研究所(2005)^①野外调查发现,在昔格达盆地内发育多处断裂错断更新世—全新世地层的迹象. (5)在湾云以南上更新统中、下段的龙街组中,冲沟位移有 100 m 左右,以龙街组上限年龄 3 万年估算,其滑动速率为 3.33 mm/a(申旭辉和汪一鹏, 2001).

已有的研究多以定性分析从宏观上描述断裂的活动性,缺乏对全段较详细的定量参数测量和古地震(包括构造、沉积、古地貌)等识别(邓起东等,

^①中国地震局地壳应力研究所, 2005. 云南省牛栏江天板水电站工程场地地震安全性评价报告.

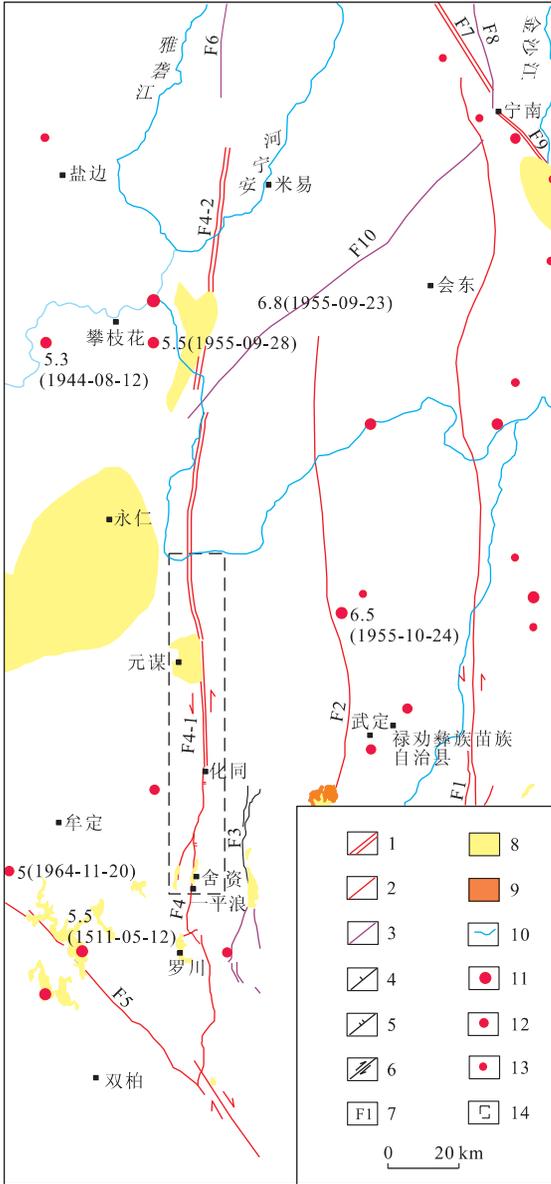


图 1 元谋断裂区域构造环境

Fig. 1 Sketch map showing regional tectonic setting of the Yuanmou fault

1. 全新世断裂; 2. 晚更新世断裂; 3. 早、中更新世断裂; 4. 正断层; 5. 逆断层; 6. 走滑断裂; 7. 断裂名称; 8. 第四系; 9. 上第三系; 10. 河流;
11. 震中 $M=6.0\sim7.0$; 12. 震中 $5.0\sim6.0$; 13. 震中 $4.0\sim5.0$; 14. 重点研究区间. F1. 普渡河—滇池断裂带; F2. 汤郎—易门断裂带; F3. 禄丰断裂带; F4. 元谋—绿汁江断裂带; F4-1. 元谋断裂; F4-2. 昔格达断裂; F5. 楚雄断裂; F6. 磨盘山断裂; F7. 则木河断裂; F8. 越西断裂; F9. 小江断裂; F10. 宁会断裂

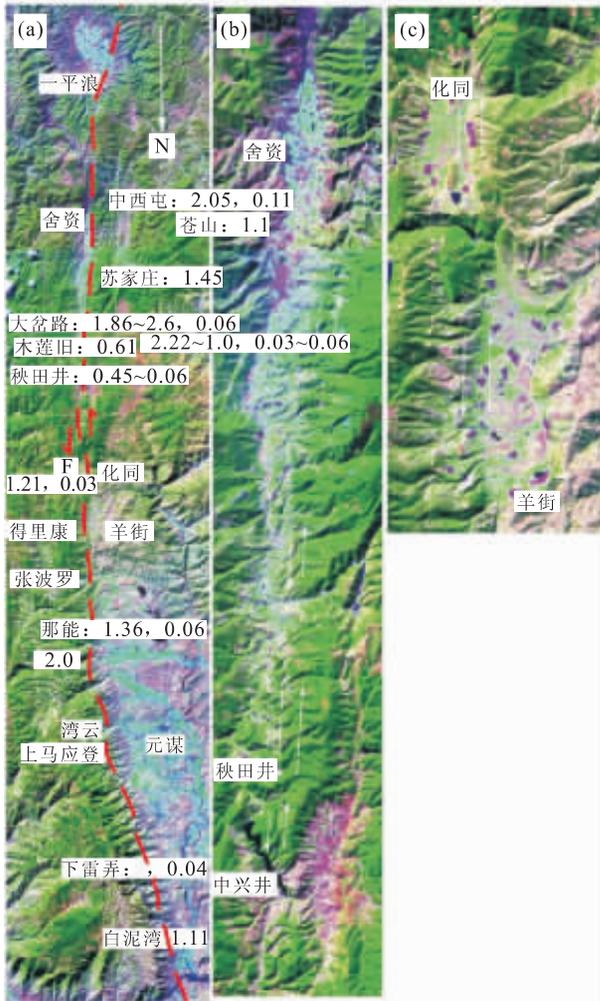


图 2 元谋断裂遥感影像及晚第四纪滑动速率参数分布

Fig. 2 Yuanmou fault remote sensing image and distribution of moving-velocity parameters in Late Quaternary
a. 元谋—一平浪断裂影像; b. 舍资一带断错地貌; c. 羊街—化同—羊街盆地与断错地貌; 逗号前数据为水平速率, 后为垂直速率, 单位 mm/a

1984; 冉勇康和邓起东, 1999), 缺少可靠的年代数据和其他定量参数, 也没有建立起破裂分段的模型(丁国瑜, 1995). 本文正是从年代学、地貌学和构造地质学等基础资料入手, 通过对元谋断裂—一平浪—江边(金沙江边)段晚第四纪活动地貌、活动构造定量分析, 有效获取了该断裂的最新活动时间和活动强度.

2 断裂活动特征的遥感影像分析

ETM 影像资料能清晰地反映构造地貌特征, 揭示最新地表构造展布形态及运动学特点. 研究区 ETM 影像资料清楚地显示了一平浪—元谋县城东一带断层走滑活动构造线. 由一平浪→中兴井段, 多

个联结的反“Z”型冲沟雁列式定向排列构成走向北东 10° 主断层线, 显示了断层以左剪为主, 局部张剪或压剪的性质, 且沿构造线向北方向, 断层错距及横向规模影响带均呈递增趋势, 暗含断层活动存在分段性, 即北强南弱或不同段落活动时间不一致性. 在中兴井附近, 出现了北西走向的张性裂谷, 在中兴井至花同盆地南, 除靠近中兴井附近呈反“Z”冲沟逆时针转向外, 大部分因发生挤压隆升而显得杂乱. 而在化同盆地西, 则表现为南东向强烈挤压而造成的竖直褶皱, 同时在化同盆地北缘和羊街盆地南缘发育一东西向张性裂谷, 以及两盆地西缘均向东呈弧形弯曲, 均暗示了青藏高原隆升引起的浅层物质南东向迁移的结果. 在羊街盆地东缘断层走向南北向, 只是在盆地东北角断层以左行左阶式发育, 且走向略向东偏转, 这与西边的龙川江构造线是一致的. 进入元谋盆地东缘, 地表断层构造线发育明显减弱, 局部显示冲沟左旋走滑, 可能与后期断层南北向走滑及来自北西向的区域物质迁移活动共同作用有关. 值得一提的是, 在花同盆地和羊街盆地南缘附近均有复式地堑发育, 而两盆地均为晚更新世断陷盆地, 表明断层自晚更新世以来呈现出张剪机制下左旋走滑活动的特征.

3 利用冲沟、山脊等地貌位移量估测断裂晚第四纪活动性

地貌特征是地质构造格局的基本反映, 是在新构造运动作用过程中必然的规律分布(李祥根, 2003), 是地质构造长期发展、演化, 尤其是新构造断裂、块体运动和侵蚀风化作用的综合结果(卢海峰等, 2006). 该断裂带不同幅度地错断了第四纪以来不同时期的地貌单元, 是区域现代构造应力场的最终体现(谢富仁等, 1993). 图 3 反映的是舍资盆地西缘冲沟、山脊位错情况. 在上西屯、苍山、塔古蚌、墩头、大岔路等处, 断裂切错山脊、冲沟, 在地貌上表现为顺走向发育的沟槽谷地或山脊垭口. 沿上西屯—大岔路一线, 大小冲沟、山脊一致左旋, 且表现出清晰的两条平行发育的北东向构造线. 依据河流地貌形态, 考虑到星宿江支沟流向东, 而东支断裂线的错距较大, 断裂似为左旋左阶走滑, 在 $350\sim 550\text{ m}$ 之间, 仅有长度较小的冲沟, 错距小, 而西支错距不十分明显, 这可能与东支为主断裂线有关外, 也与因

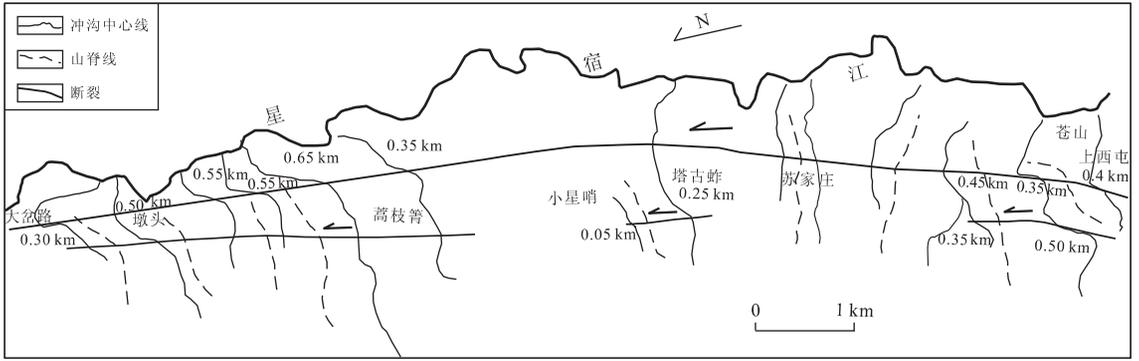


图 3 元谋断裂带舍资盆地西缘山脊及冲沟水平位错

Fig. 3 Level offset of gullies and ridges of the Yuanmou fault among Western margin of the Shezi basin

向源侵蚀作用形成的河流段的时间先后有关,使得较晚且较短的冲沟错距不大.据前人报道,研究区位于滇中地区,不考虑河流的袭夺、改道等过程,长度为 1.5~10 km 的水系形成于中更新世.该图揭示的断裂扭错的冲沟长度均未超过 2 km,推测断裂活动不早于中更新世晚期(200 ka)(本区域河流向源侵蚀速率 1~2 cm/a).据此,初步估算该断裂中更新世晚期以来的左旋平均走滑速率为 1.75~3.25 mm/a.

在木莲旧、大龙潭一带,山脊及大于 1 km 以上的冲沟错距在 83~200 m 之间(图 4),且错距与冲沟长短有正向关系.1 km 左右的冲沟,断裂活动造成的位移量较少,在 25~30 m 之间,据此,断裂自晚更新世以来,仍在活动,且表现出局部水平滑动速率弱化的特征.以最新的冲沟平均错距 25~30 m 为依据,结合木莲旧、大龙潭一带断错地貌和构造剖面所揭示的断层最新活动时间(29.33±2.49)~(61.56±5.23)ka B. P.,粗略估算出断裂的晚第四纪滑动速率为 0.60 mm/a.

化同盆地和羊街盆地是发育在元谋断裂构造线

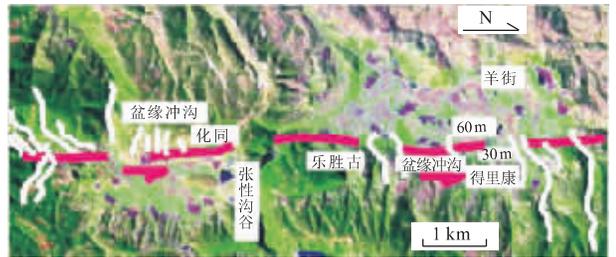


图 5 化同、羊街盆缘断错冲沟影像图

Fig. 5 ETM picture showing gullies offset image of the Yuanmou fault among the margins of Huatong basin and Yangjie basin

上的 2 个微型盆地,羊街盆地长 3.5 km、宽 1.5 km,化同盆地长 2 km、宽 1 km,均以白垩系砂岩为基底,堆积了厚 30 m 的晚更新世晚期—全新世的砂砾石层.羊街盆地的东缘、化同盆地的西缘沿线小冲沟、洪积扇左旋走滑变形清楚(图 5),并保存有完好的地裂缝.断裂控制了盆地的形成和演化,推测断裂活动时间为晚更新世晚期(40~20 ka),并依据影像图显示的冲沟水平位错在 30~60 m,粗略推算出断裂的水平滑动速率为 1.50 mm/a.

4 元谋断裂晚第四纪活动性定量分析

活动构造的定量研究是通过构造活动所造成的空间形变进行矢量化,给出构造在一定时期内的空间活动速率,并以数据形式直观地表现出来,是构造活动精细研究的体现.本文通过对元谋断裂晚第四纪活动性较强的江边——平浪段进行参数提取及科学分析,给出该断裂的晚第四纪活动性定量参数,从而获取元谋断裂晚第四纪以来的活动方式、活动

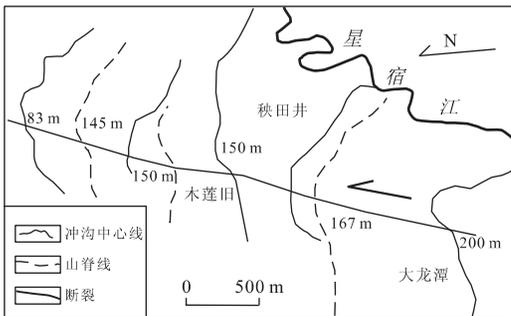


图 4 元谋断裂带山脊及冲沟水平位错

Fig. 4 Level offset of gullies and ridges of the Yuanmou fault

强度.

在上西屯西附近,地貌特征显示河流及断裂两侧山体沿断裂发生左旋走滑 125 m,河流呈反“Z”形,推测断裂活动强度大于河流的侧蚀强度.同时断裂错断了河流侧边的坡洪积扇体(相当于 II 级阶地),在断裂西侧形成高 3~4 m 的陡坎(图 6),在河流拐弯处西侧发育的坡洪积扇体高于东侧沉积物,高差约 5~6 m.在河道拐弯处的南折口的断裂线上,分布散乱的滚石,而在北折口断裂线上,发育破碎带宽约 3~4 m 的断裂,破碎带内为杂乱的粉砂岩、泥岩碎块,或呈块状,见大量压静面,而断裂破碎带上及断裂破碎带两侧的砂岩地层上覆盖着同期且成分一致的粉—泥砂岩风化坡积物,为全新世坡积物.尽管前缘拔河约 2.5 m(宽约 4~20 m)的 I 级堆积阶地有人工的改造,但在断裂两侧基本无明显的落差,且陡坎上下部较缓(坡度约 35°),表明经受一定的侵蚀时间段.取洪积扇底部和 I 级阶地堆积物的热释光样品,测试结果为 (60.87 ± 2.63) ka B. P. 和 (9.26 ± 1.38) ka B. P.,表明此处断层最新活动时间位于 (60.87 ± 2.63) ka B. P. ~ (9.26 ± 1.38) ka B. P. 之间,且断裂最低平均垂直落差速率和水平滑动速率分别约为 0.11 mm/a、2.05 mm/a.上述情况表明,该断裂此处最新活动时间为晚更新世,且早于 I 级阶地形成的时间.

在苍山西,断裂左旋并错断了宽度一致的两块山体,山体形态具有整体的一致性,被错开的山体及冲沟沿断裂方向长约 60 m,发生左旋位移约 95 m.同时,在断裂西侧见小型褶皱发育,褶皱轴面产状 $270^\circ \angle 10^\circ$,表明受断裂左旋活动影响所致,沿断裂发育并错开的长 50~60 m、宽 10~15 m 二期坡洪积物,取洪积扇底部沉积物的热释光样品,测试结果为 (85.99 ± 7.31) ka B. P..由此,可得到断裂最低水平滑动速率约为 1.10 mm/a.

在大岔路,断裂以走向 5° 错断河流以“S”型,错距达 110 m(图 7).河流与断裂交汇处西北侧发育 3 级阶地, I 级阶地拔高 5~10 m(堆积阶地), II 级阶地拔高约 15~20 m(堆积阶地), III 级阶地拔高约 40~45 m(侵蚀阶地).断裂两侧 I 级阶地无明显高差,断裂西侧 II 级阶地拔高约 16 m,东侧约 13 m,且东侧未有 III 级阶地发育.在河流北折处的路边有断裂露头发育,断面发育近水平擦痕,依据擦痕、阶步判断断裂为逆冲左旋运动.分别取河岸 II 级阶地、断裂上断点覆盖物底部的堆积物样品,测试结果分别

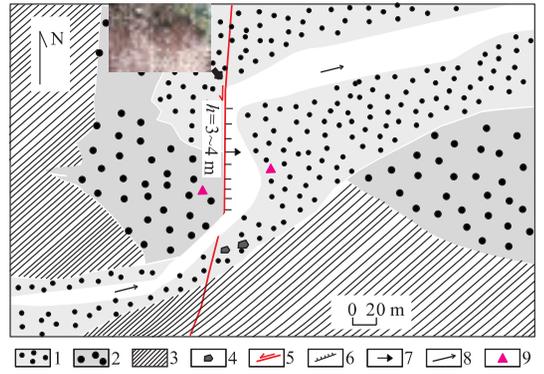


图 6 上中西屯东断裂活动平面图

Fig. 6 Plan map of fault action in eastern Shangzhongxitun
1. 第四纪 I 级阶地冲积物; 2. 第四纪坡洪积物; 3. 前第四纪基岩; 4. 散乱滚石; 5. 断裂及走滑方向; 6. 断裂陡坎; 7. 断裂倾向; 8. 河流方向; 9. 取样点位置

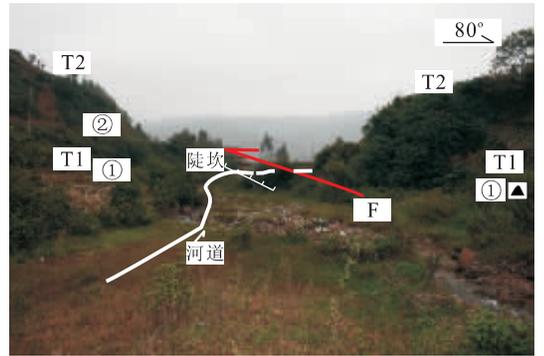


图 7 大岔路西断裂剖面及断裂错断河流阶地示意图

Fig. 7 Map showing fault section and offset fluvial landforms around western Dachalu
T1. I 级阶地; T2. II 级阶地; ①堆积阶地; ②侵蚀、堆积阶地; ▲. 取样位置; F. 断裂

为 (60.59 ± 5.15) ka B. P.、 (41.22 ± 7.75) ka B. P..据此,断裂最新活动时间位于 (60.59 ± 5.15) ka B. P. ~ (41.22 ± 7.75) ka B. P. 之间,且断层左旋水平滑动速率为 1.80~2.60 mm/a.,垂直差异运动速率为 0.05~0.07 mm/a.

在大龙潭一带发育的断裂地貌表现为沟槽洼地及冲沟、台地交错等地貌特征,台地呈右阶式.依据断裂两侧 I 级台地、冲沟的地貌形态(图 8),左旋错距约 65 m,且冲沟呈反“Z”型.东侧台地拔高约 12 m,西侧约 10 m 左右,高差 2 m.同时,在断裂线上发育一次级构造面,断面上擦痕揭示的断裂运动方向与地貌特征一致.分别对断裂上覆盖物底部物质和错断的台地物质上覆盖物底部取样,经热释光测年,结果分别为 (29.33 ± 2.49) ka B. P.、

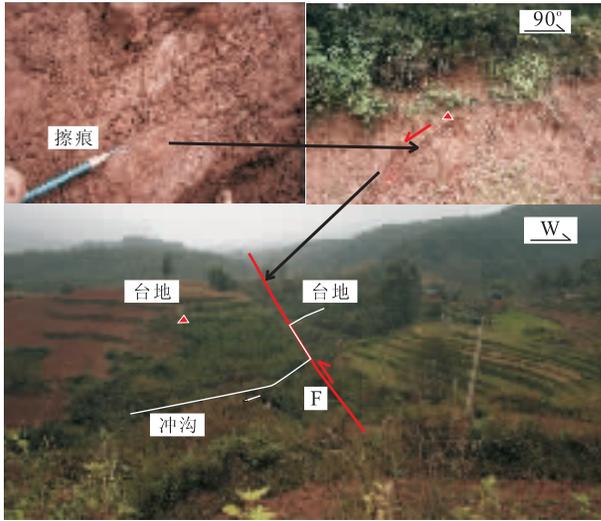


图 8 构造平面图及断面擦痕

Fig. 8 Structural plan map and scrapes on the surface of the fault

(61.56±5.23)ka B. P. 之间. 依据断裂最新活动性与断面上断点覆盖物及与台地的关系, 可获取断裂最新垂直落差速率、水平滑动速率分别位于 0.03~0.06 mm/a 和 2.22~1.05 mm/a 之间, 相应的垂向和水平平均滑动速率分别为 0.045 mm/a、1.635 mm/a, 且断裂最新活动时间为 (29.33±2.49) ka B. P. ~ (61.56±5.23) ka B. P..

在木莲旧附近, 断裂水平左旋错断冲沟约 30 m, 沿断裂线陡坎长 30 m, 宽约 15 m, 位于西盘. 陡坎南部断裂东侧发育向东北弧形弯曲的山脊、冲沟. 断裂线附近见山体滑坡及碎石堆, 或散状. 而断裂通过处的山体上无活动迹象, 且西侧的洪积扇体近线性, 无扭曲变形特征, 表明陡坎为早期活动所致. 取洪积扇底部沉积物的热释光样品, 测试结果为 (49.65±4.22) ka B. P., 表明水平滑动速率约 0.61 mm/a, 为速率的高值. 在发育的断裂面上, 擦痕、阶步发育明显, 擦痕近似水平, 断面略缓, 断裂上断点发育在冲洪积砾石层中, 断裂穿过其底部处略向下凹陷, 冲洪积厚约 50 cm, 上断点距冲洪积上表层厚约 40 cm, 冲洪积上覆盖厚约 50~40 cm 的现代残坡积物, 分别在断裂上断点一侧和上面附近热释光取样, 测试结果分别为 (53.23±5.89) ka B. P.、(50.87±4.32) ka B. P.. 由此可见, 断裂此处最新活动时间早于 (49.65±4.22) ka B. P.、(50.87±4.32) ka B. P., 而晚于 (53.23±5.89) ka B. P..

在秧田坝西, 断裂错断冲沟 16~18 m, 陡坎处

落差 2.5 m, 陡坎面宽约 11 m, 陡坎坡角约 35°. 在冲沟断裂线上发育楔形崩积楔 (图 9), 崩积体为分选、磨圆极差的砾石堆积, 杂乱, 厚约 60 cm; 中部为滑坡堆积体, 厚约 1 m, 上段为含砾坡积土层. 砾石堆积体顶端物质的年龄近似为断层活动的时间, 取砾石堆积体顶端细碎屑物质进行热释光测年, 结果为 (38.34±3.26) ka B. P.. 因此, 断裂晚第四纪以来平均垂直落差速率约为 0.06 mm/a, 水平滑动速率约为 0.45 mm/a.

在乐胜古, 断裂走向 356°, 倾向东, 倾角 85°, 依据断裂擦痕、阶步及标志层, 断裂左旋走滑, 擦痕近似水平, 在断面东侧同一标志层倾向比西侧略向南倾, 表明左旋滑动所致, 断裂破碎带宽约 3~5 m, 仅有断裂泥组成, 两侧均为同一岩性, 即砂泥质板岩. 河流水平位错 I 级阶地 20~30 m, 落差不明显, 阶地遗弃年龄为 (20.83±5.02) ka B. P.. 据此, 断裂水平滑动速率约 1.21 mm/a, 为速率的低值.

在张波罗村东南, 断裂错断了晚更新世冲洪积砾石层, 落差达 80 cm, 砾石磨圆度较好, 自砾石层底部至上, 砾石颗粒渐小, 断裂东盘砾石层厚度约 1.4 m, 西盘厚约 60 cm. 砾石平面倾向范围为 315°~320°, 倾角大小为 20°~40°, 且位于东盘上的砾石倾向、倾角变化均较大. 断裂上断点为 30 cm 厚的含现代植物根系及细碎石土的坡积物. 砾石层底部基岩为白垩系砂岩. 中部的 Q₃ 冲洪积砾石层, 相当于河流的二级阶地面. 在上盘靠近断裂上断点 20 cm 处的冲洪积砾石层内取热释光测年样品, 结果为 (37.22±3.17) ka B. P., 估算垂直差异运动速率不低于 0.02 mm/a.

在元谋县城东南上那蚌村附近, 断裂左旋错断河流 II 级阶地, 错距为 70~80 m, 取阶地砾石层堆

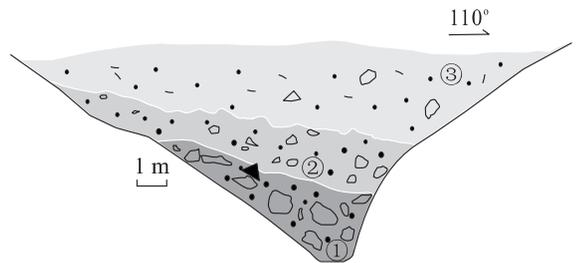


图 9 秧田坝西崩积楔剖面图及断层地貌

Fig. 9 Section of the colluvial wedges and fault landform in western Yangtianba

①分选、磨圆极差的崩积体; ②偶见磨圆度较好的堆积体; ③坡积土层; ▲. 取样位置

积物热释光样品,测年结果为 (38.96 ± 3.31) ka B. P. 据此,断裂平均垂直落差速率不低于 0.03 mm/a,水平滑动速率不低于 2.0 mm/a.

在那能村东,水平左旋错断冲沟约 24.5 m(图 10),并使靠近断裂附近冲沟河床的两侧形成 $1.0 \sim 1.2$ m 的高差(图 10c). 在冲沟折弯处,发育一走向 5° 、倾向北西的断裂(图 10a). 上盘为整体呈北西向的冲洪积扇体,扇根处多发育巨砾,砾石大者为 80×50 cm,磨圆度一般~较好,分选差;扇中至扇端,砾石砾度减小,但磨圆度趋于较好;下盘为风化的紫褐色泥层. 该断裂在两盘接触处形成了清晰的擦痕,且压静面明显发育,软弱层变形强烈. 依据断面擦痕、阶步特征(擦痕倾伏向 330° , 倾伏角 45° , 侧伏向 310° , 侧伏角 50° (图 10b),表明断裂此处发生了左旋逆冲运动. 在上盘靠近断面处取洪积扇砾石层的底部沉积物测年,结果为 (17.92 ± 1.52) ka B. P. 可得断裂最新水平滑动速率约为 1.36 mm/a,垂直滑动速率约为 0.06 mm/a,均为速率的低值. 另外,在该沟南边约 300 m 处发育一条近东西方向的河流,断裂通过处河流呈“S”型(图 11),错距 21 m, II 级阶地错开,形成 $1.00 \sim 1.50$ m 的高差, I 级阶地无明显高差变化,根据样品测年结果,与上述活动时间同期.

在下雷弄北,断裂作用错开了多层晚更新世砂砾层、含砾砂层和砂层(图 12),且造成断层两侧同层段之间存在落差. 依据从上至下的错距分别为 15 cm、 20 cm、 28 cm,并按顺序取热释光样品,测年结果分别为 (37.66 ± 3.20) ka B. P.、 (47.46 ± 4.03) ka B. P.、 (70.39 ± 5.98) ka B. P.,获取断裂

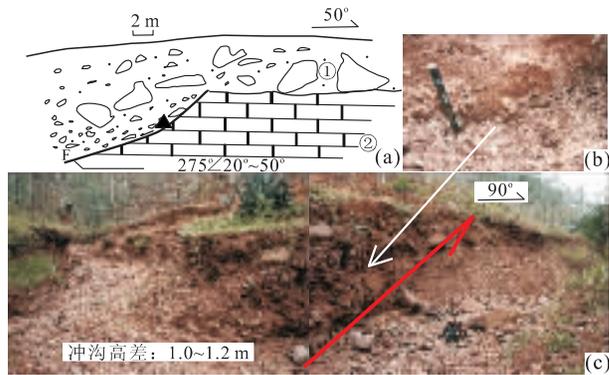


图 10 那能村东断裂及地貌

Fig. 10 The fault and physiognomy in eastern Naneng a. 断裂剖面; b. 擦痕; c. 断裂地貌; ①冲洪积物; ②风化紫褐色泥层; ▲. 采样点

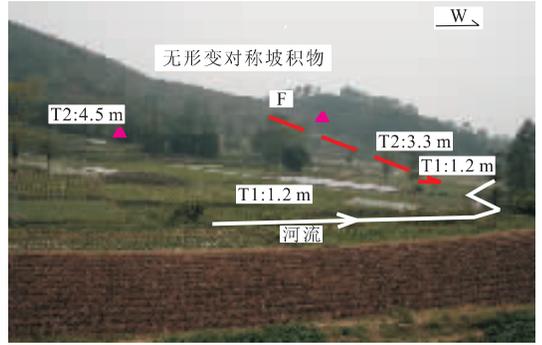


图 11 那能村南河流阶地图

Fig. 11 Map showing fluvial landform around southern Nanengcun

T1. I 级阶地; T2. II 级阶地; ▲. 采样点

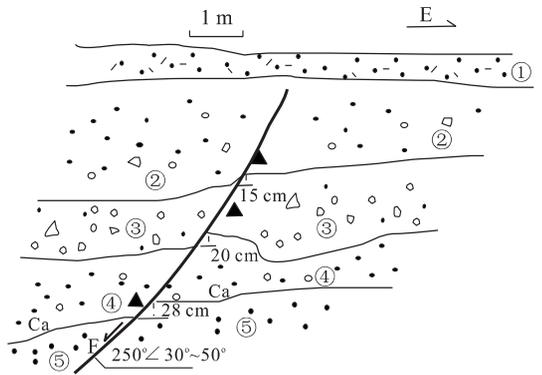


图 12 下雷弄村北断裂剖面

Fig. 12 Yuanmou fault section around northern Xialeining ①含现代根系坡积物; ②含砾砂层; ③砂砾层; ④含砾砂层; ⑤砂层; ▲. 取样点

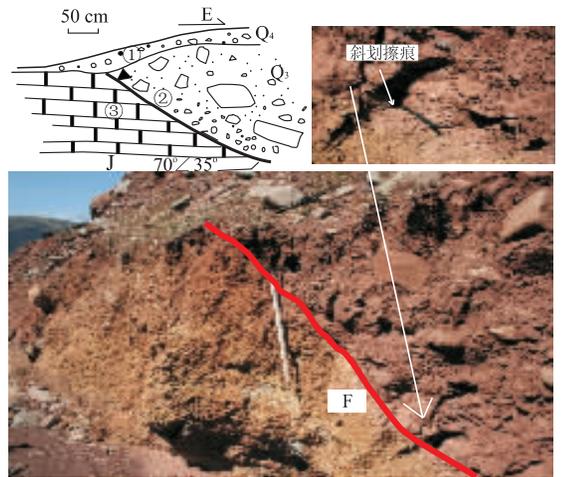


图 13 白泥湾村断裂剖面

Fig. 13 Yuanmou fault section around Bainiwan ①全新世坡积物; ②晚更新世冲洪积物; ③强风化成泥的紫红色侏罗纪砂岩层; ▲. 取样点

表 1 元谋断裂—平浪—金沙江边晚第四纪活动特征

Table 1 Active characteristics of the Yuanmou fault around the phase from Yipinglang to Jiangbian in Late Quaternary

序号	地点	走向及倾向	滑动性质	最新活动时间(ka B. P.)	水平速率(mm/a)	垂直速率(mm/a)
1	中屯东	30°,南东	左旋正断	<60.87±2.63	>2.05	>0.11
2	苍山西	30°,南东	左旋	<85.99±7.31	>1.1	
3	苏家庄	20°,北西	左旋	<80.90±6.23	>1.45	
4	大岔路	10°,北西	左旋正断	(41.22±7.75)~(60.59±5.15)	1.86~2.6	≈0.06
5	大龙潭	10°,北西	左旋正断	(29.33±2.49)~(61.56±5.23)	1.0~2.22	0.03~0.06
6	木莲旧	30°,北西	左旋逆冲	(49.65±4.22)~(53.23±5.89)	<0.61	
7	秧田井	10°,北东	左旋	≥38.34±3.26	≈0.45	≈0.06
8	乐胜古	356°,西	左旋	<20.83±5.02	>1.21	>0.03
9	张波罗	360°,西	左旋	<37.22±3.17		>0.02
10	上那蚌	5°,西	左旋	<38.96±3.31	>2.0	
11	那能村	5°,西	左旋正断	<17.92±1.52	>1.36	>0.06
12	下雷弄	30°,北西	左旋正断	<37.66±3.20		≈0.04
13	白泥湾	340°,东	左旋逆断	<36.46±3.10	>1.11	

垂向滑动速率分别为 0.004 mm/a、0.004 mm/a、0.004 mm/a,表明断裂晚更新世中晚期以来至少存在一期活动。

在白泥湾附近,断层走向 340°,倾向东,倾角 40°,微波状断面,断面擦痕略斜划(图 13),断裂泥宽约 4 mm,断裂上盘为棕色砂砾层,磨圆一般,断裂下盘为强风化成泥的紫红色侏罗纪砂岩层(黄白化斑状)。左旋错断冲沟 40 m,取断层错断的晚更新世冲洪积物顶端堆积物热释光样品,测年结果为 (36.46±3.10)ka B. P.。据此,该处水平运动速率接近 1.11 mm/a,为速率的低值。

5 结论与认识

综合研究结果表明(图 2,表 1),断裂最新活动时间为晚更新世末期—全新世,其性质表现为以左行剪切走滑为主、局部张剪或压剪的特征,其中一平浪—大龙潭一带,自晚更新世以来平均水平滑动速率约为 2.0 mm/a,垂直滑动速率约为 0.07 mm/a;木莲旧—秧田井一带,水平滑动速率为 0.53 mm/a,垂直滑动速率为 0.06 mm/a;乐胜古—江边一带,水平滑动速率为 1.32 mm/a,垂直滑动速率为 0.03 mm/a。

综上所述,元谋断裂晚第四纪以来平均水平滑动速率为 2.0±0.6 mm/a。而申旭辉和汪一鹏(2001)认为,在元谋盆地一带(按龙街组上限年龄 3 万年估算),元谋断裂水平滑动速率为 3.33 mm/a,这种定量差异可能与选取的样品位置及测年数据、

断错地貌位移量有关外,也与所采取样品数量多少有关。另外,前人成果表明安宁河断裂全新世平均水平滑动速率为 6.5±1 mm/a,丽江—小金河断裂全新世平均水平滑动速率为 3.8±0.7 mm/a(徐锡伟等,2003)。相比之下,元谋断裂晚第四纪滑动速率有所减弱,且表现为大致以木莲旧、乐胜古一带为分界点,这可能是因该处受到西北方向来自青藏高原物质南东向侧移的动力作用,导致该断裂带上化同盆地、羊街盆地一带构造性质发生变化;也可能是由于区域构造环境及三断裂带之间的特殊关系造成的,有待进一步探讨。

References

Deng, Q. D., Wang, Y. P., Liao, Y. H., et al., 1984. Colluvial wedges of fault scarp and history of faulting on the Helan Shan piedmont fault. *Chinese Science Bulletin*, 9: 557—560 (in Chinese).

Ding, G. Y., 1995. The segmentation model of active fault. *Earth Science Frontiers*, 2(1—2): 195—202 (in Chinese with English abstract).

Kang, L. X., 1991. Discussion on the basic characteristics and formation mechanism of the south-north seismic zone in China. *Crustal Deformation and Earthquake*, 11(4): 76—85 (in Chinese with English abstract).

Li, Q. C., Jiang, F. C., Qian, F., 1993. Sedimentary facies and environmental evolution of the Yuanmou basin in late Cenozoic. *Geography and Geo-Information Science*, 9(3): 30—36 (in Chinese).

Li, X. G., 2003. Generality on Neotectonic movement of China. Earthquake Publishing House, Beijing, 1—42 (in

- Chinese).
- Lu, H. F., Ma, B. Q., Liu, G. X., 2006. Characteristics of the Neotectonic movement of the NEE-striking fault belt north of Wen County, Gansu. *Journal of Seismological Research*, 29(2): 143–146 (in Chinese with English abstract).
- Nur, A., Ron, H., Scotti, O., 1989. Kinematics and mechanics of tectonic block rotations. *Geophysical Monograph*, 49/IUGG Series, 4: 31–46.
- Ran, Y. K., Deng, Q. D., 1999. History, status and trend of the research of pal-seismology. *Chinese Science Bulletin*, 44(1): 12–20 (in Chinese).
- Shen, X. H., Wang, Y. P., 2001. Pilot study on the basic characteristics of the latest structural deformation in Sichuan-Yunnan area. Earthquake Publishing House, Beijing, 430–439 (in Chinese).
- Xie, F. R., Zhu, J. Z., Liang, H. Q., et al., 1993. Basic characteristics of recent tectonic stress field in Chinese southwestern area. *Acta Seismologica Sinica*, 15(4): 407–417 (in Chinese).
- Xiong, X., Wang, J. Y., Teng, J. W., 2007. Deep mechanical background for the Cenozoic volcanism in the Tibetan plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. The newest way and force source of active block in Sichuan-Yunnan area. *Science in China (Ser. D)*, 33(Suppl.): 151–162 (in Chinese).
- Yao, H. T., Deng, C. L., Lv, L. Q., 2005. A review of magnetostratigraphic studies of the Yuanmou sequences. *Progress in Geophysics*, 20(2): 518–523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. T., Xu, Z. Z., 1994. Relation of the regional structure framework and its evolution law to geologic hot events in Ninglang area. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 21(4): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Jiang, Z. S., Wang, S. X., 2004. Negative dislocation model for synthetic solution of GPS observation of south-north seismic zone during 1999–2001. *Earthquake Research in Plateau*, 16(1): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. P., Cai, J. G., Ling, Y. L., et al., 2003. 6.5 grade earthquake happening in Wuding of Yunnan Province on October, 24th, 1995. In: The Shared Data Centre of National Seismic Science. Earthquake Bureau of Yunnan Province, Kunming.
- ### 附中文参考文献
- 邓起东, 汪一鹏, 廖玉华, 等, 1984. 断层崖崩积楔及贺兰山山前断裂全新世活动历史. *科学通报*, 9: 557–560.
- 丁国瑜, 1995. 活断层的分段模型. *地学前缘*, 2(1–2): 195–202.
- 康来迅, 1991. 中国南北地震带的基本特征及其形成机理之探讨. *地壳形变与地震*, 11(4): 76–85.
- 李庆辰, 蒋复初, 钱方, 1993. 元谋盆地晚新生代沉积相与环境演变. *地理与地理信息科学*, 9(3): 30–36.
- 李祥根, 2003. 中国新构造运动概论. 北京: 地震出版社, 1–42.
- 卢海峰, 马保起, 刘光勋, 2006. 甘肃文县北部北东东向断裂带新构造活动特征. *地震研究*, 29(2): 143–146.
- 冉勇康, 邓起东, 1999. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势. *科学通报*, 44(1): 12–20.
- 申旭辉, 汪一鹏, 2001. 川滇地区最新构造变形基本特征初步研究. 北京: 地震出版社, 430–439.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等, 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征. *地震学报*, 15(4): 407–417.
- 熊熊, 王继业, 滕吉文, 2007. 青藏高原新生代火山活动的深部力学背景. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 1–6.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学(D辑)*, 33(增刊): 151–162.
- 姚海涛, 邓成龙, 吕连清, 2005. 元谋盆地河湖相沉积物磁性地层学研究综述. *地球物理学进展*, 20(2): 518–523.
- 张寿庭, 徐旃章, 1994. 云南宁蒗地区区域构造格局及其演化规律与地质热事件. *成都理工学院学报*, 21(4): 17–21.
- 张希, 江在森, 王双绪, 2004. 1999~2001年南北地震带GPS综合观测解的负位错模型. *高原地震*, 16(1): 26–34.
- 赵慈平, 蔡静观, 李永莉, 等, 2003. 1995年10月24日云南省武定6.5级地震. 见: 国家地震科学数据共享中心. 昆明: 云南省地震局.