

元谋断裂带砂脉及其与断裂活动的关系

卢海峰^{1,2,†} 唐永忠³

1. 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 山东东明石化集团有限公司, 菏泽 274500; †E-mail: luhf_0_0@sohu.com

摘要 依据元谋断裂带砂脉发育的层位、成份、形态、围岩变形特征、区域构造背景和古气候环境, 以及断裂带晚第四纪活动特征, 结合释光年代学测试结果, 讨论砂脉的成因机理及其与断裂带的关系。结果表明, 元谋断裂带地表或近地表发育的砂脉较多, 产状近直立, 延伸较长, 沿断裂中-北段构造面平行展布。综合分析砂脉形态、内部结构以及与围岩和断层的空间关系, 揭示砂脉的形成应是断裂带强烈运动或地震活动引起的断层带上、次级断裂面上以及构造面附近局部节理面砂土液化的结果, 或为伸展构造面裂隙充填物, 且可能为同一期地质事件所为, 形成时间约为 7 kaBP。这些砂脉构造对断裂活动的时限具有重要指示意义, 是元谋断裂晚第四纪一次强烈活动的伴生产物。

关键词 元谋断裂带; 砂脉; 断裂活动; 砂土液化; 伴生产物

中图分类号 P542

Sand Veins Grown in Yuanmou Fault and its Implications of Fault Activity

LU Haifeng^{1,2,†}, TANG Yongzhong³

1. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085;
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081; 3. Shandong Dongming Petrochemical Group Co., Ltd, Heze 274500; † E-mail: luhf_0_0@sohu.com

Abstract The sand veins in Yuanmou fault zone have been investigated in the work, and its tectonic implications has been defined. The result shows that the sand veins generally develop in the surface or sub-surface rock stratum in the middle-north segment of Yuanmou fault, and extends parallelly along the fault with larger dip angles. In addition, the patterns and structures of the sand veins and its relationship of the host rocks show that the sand veins were filled with the stretchable fracture from the overlying strata as the result of the sand liquefaction from the main fault plane or secondary fault plane which were connected with Yuanmou fault was intensively active, or due to the strong earthquake. Moreover, the thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) dating show that the sand veins were formed about 7 kaBP, indicating a intensive activity of Yuanmou fault during the Late Quaternary.

Key words Yuanmou fault; sand vein; fault activity; sand liquefaction; accessory

砂脉通常指由细碎屑物质组成的脉络状层带, 常以不同角度切割围岩, 是一种特殊的沉积构造, 表现为扩张性侵入的沉积方式, 形成于砂质层向非渗透层侵入的过程, 包括平行层理面侵入和穿越层理面侵入两种类型。在层面上, 砂脉构造表现为不规则分布的细长砂脊或弯曲的砂质条带; 在垂向上,

砂脉穿越层理, 且多呈近直立或“肠状”弯曲的小型脉状体; 砂脉顶、底端通常有顶起变形的迹象。野外地质调查发现, 砂脉成分相对简单, 砂脉物质多由均一的细粒粉砂级石英颗粒和不同粒径的杂砂组成, 有的含少量围岩细砾石和黏土质等, 可见少量自生矿物(如方解石、黄铁矿等)。

从元古代至现今的地层中均发育砂脉构造^[1],其成因也趋多样化。元古代地层中出露的砂脉曾被认为是“遗迹化石”^[2],或地震振荡形成的“砂质液化脉”^[3],或甲烷气体逃逸后再充填的产物^[4],或是与微生物席有关的沉积构造,即微生物席经暴露、脱水、收缩产生裂隙后被沉积物快速充填的结果^[5-7]。刘贺娟等^[1]认为,在未固结的沉积物中仅靠气体逃逸产生的气压来维持开放的裂隙空间是不够的,何况逃逸的气体除有机质转化的甲烷外,还伴随 CO₂ 和 H₂S 等。李鼎荣^[8]认为,由强震引起的砂脉构造(砂墙、砂脉或砂尖构造等)属于准同生变形构造,而准同生变形构造是由重力、地震动、其他差异负载和沉陷作用等引起的变形。冯先岳^[9]详细论述了地震液化变形机制、形态特征及其与准同生变形构造和融冻变形的区别,认为融冻作用导致的变形应出现在冰川发育的极地或冰缘气候条件下冻土层上限以上的运动层内,分布面积广,有一定的层位和纬度范围限制,其分布与距构造带远近无直接关系。杨承先^[10]给出砂脉的常见形态、物质来源以及与地震活动相关砂脉、砂火山的鉴别标志及成因机理。

综上所述,砂脉主要发育在未固结的沉积层内,其成因多与地震、强烈构造活动或融冻作用引起的砂土液化密切相关。虽然砂脉可以作为鉴别古地震的一种标志,但在分析其成因机制时,需综合考虑包括脉体成分、沉积特点、砂脉形态、伴生变形构造、底基质成分、围岩变形特征以及构造背景和区域古气候环境等在内的诸多因素。

元谋走滑断裂带的总长度约为 270 km,位于中国南北地震带的南西边缘,大致以 S-N 走向、呈舒缓波状展布于米易以西、昔格达、江边、元谋、一平浪、罗川和易门三家厂一带(图 1),南端与楚雄断裂带交汇,北端与磨盘山断裂带衔接,并控制沿线昔格达、江边、元谋、化同、羊街、舍资和罗川等多个盆地的演化^[15-17]。有关该构造带晚第四纪的活动特征,前人进行过深入的探讨^[15-18]。详实的地质调查和相关研究表明,该断裂带常见陡直的断面和近水平的擦痕,晚更新世以来的断裂活动方式表现为左行走滑兼局部挤压或张剪^[11-12,15,17]。沿断裂带地表破裂形迹发育大量砂脉,对这些砂脉的特点、成因及其与断裂带活动性之间的关系,目前尚未取得初步认识。

本文基于前期工作中获得的元谋断裂晚第四纪

活动方式、活动强度及活动时间分段的相关成果^[11],通过分析断裂构造带上昔格达村、下雷弄村和一平浪的地质露头以及江边中学和羊街探槽剖面揭示的砂脉位置、物质组成、结构特点、砂脉形态、围岩变形特征、区域构造背景和古气候环境,探讨砂脉的成因机理。本文样品的光释光(OLS)和热释光(TL)年龄测试均由中国地震局地壳应力研究所释光年代学实验室完成。

1 元谋断裂带的砂脉构造

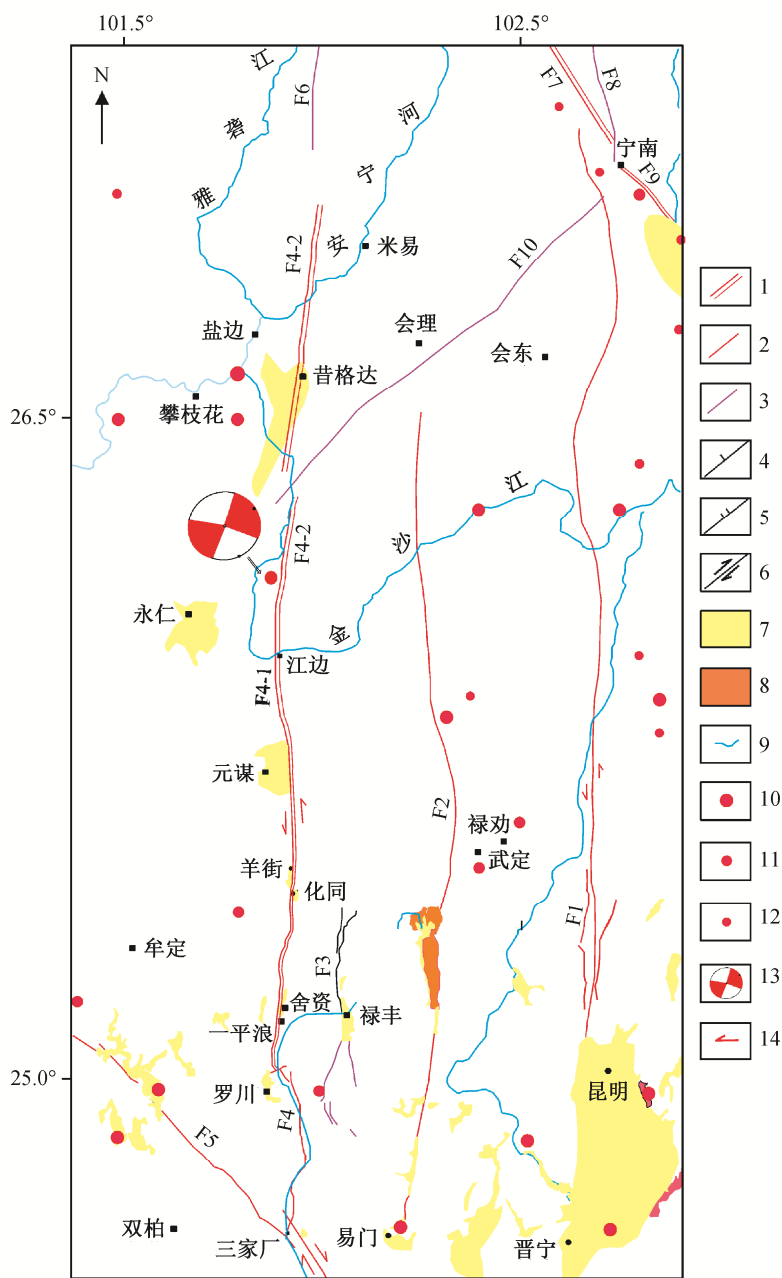
元谋断裂带上的砂脉顺构造带走向平行展布,数量较多,单条砂脉延伸较长,形态多样化。

1.1 昔格达村南剖面砂脉构造

攀枝花市盐边县红格镇昔格达村以南发育一条 NNW-SSE 走向的砂脉构造(图 2),其出露部分以高角度切割碎裂状基岩,垂向厚度约为 2 m,下段略弯曲,宽度略有变化,砂脉内碎屑颗粒排列与脉壁平行,呈现物质顺壁向上流动的状态。砂脉主要由浅黄色粉细砂和细碎屑颗粒组成,内镶少量围岩碎块,砂脉两侧基岩的同期面状构造(黑色虚线)产状存在一些变化,砂脉两侧基岩标志层在砂脉垂向上无明显错移。构成砂脉的细碎屑新鲜、松散,砂脉物质具流动构造迹线,并导致砂脉两侧的基岩变形。上述现象表明该砂脉构造不是断层面,砂脉走向与此处新构造期构造应力场的方向基本上一致^[19-20]。考虑到我国晚更新世晚期以来的古冰缘南界大致为北纬 39°—40°^[21],或北纬 30° 附近^[22],而研究区(北纬 26.6° 以南)早第四纪时期的古纬度在北纬 20°^[8]附近,钱方等^[15]也认为该区最晚的冰碛物形成于晚更新世早期。上述情况都暗示该区晚更新世晚期以来不存在冻土带。被该砂脉切穿的基岩(粉砂质泥岩)遭受严重的风化作用 and 水的溶蚀,局部表现出半胶结状态和细碎裂化,裂隙较发育,并发育与砂脉走向一致的 NNW-SSE 向节理。根据砂脉内物质成分、结构特点、胶结程度以及攀枝花地区近年发生的 6.0 级以上地震烈度和震源机制解^[18],推断该砂脉可能为在新构造期 NNW-SSE 向最大水平主压应力作用下,元谋断裂强构造活动或地震活动引起的节理化裂隙内,风化细碎屑物质在地震引起的挤压作用下液化,并沿节理向上管涌的产物,顶部表现为砂火山形态。

1.2 江边中学南侧探槽剖面砂脉构造

探槽 JBTC-01 位于江边中学南约 200 m 处的



据文献[11-13]修改。1 全新世断裂; 2 晚更新世断裂; 3 早、中更新世断裂; 4 正断裂; 5 逆断裂; 6 走滑断裂; 7 第四系; 8 上第三系; 9 河流; 10 震中 $M_s=6.0\sim 7.0$; 11 震中 $M_s=5.0\sim 6.0$; 12 震中 $M_s=4.0\sim 5.0$; 13 震源机制解^[14]; 14 断盘运动方向。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

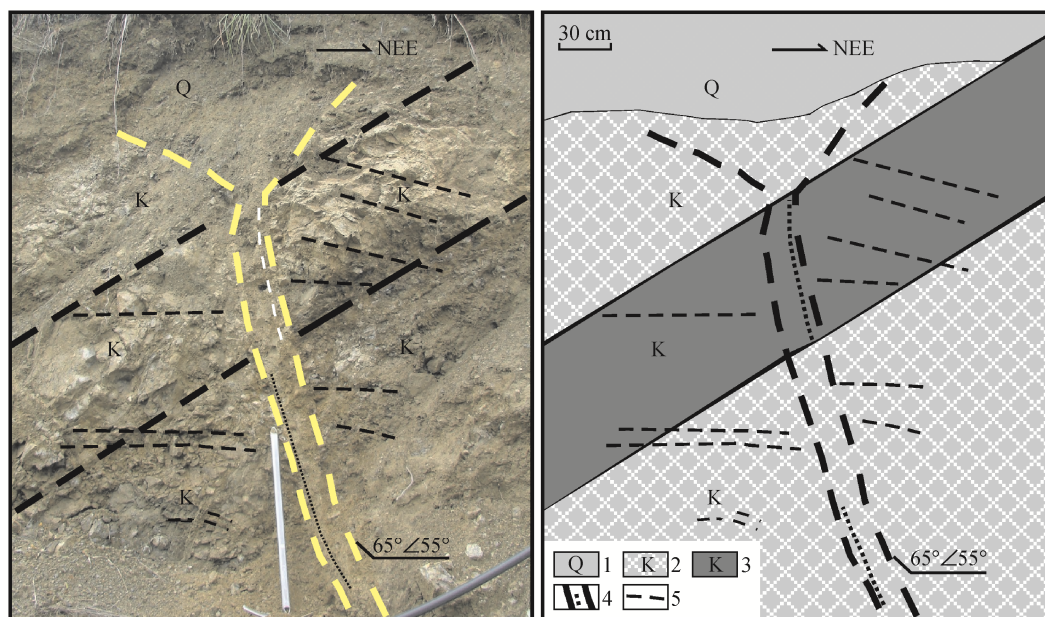
图 1 元谋断裂带区域地质构造

Fig. 1 Regional geological tectonics of Yuanmou fault belt

东西向河道南侧, 横跨近 S-N 走向的断层。探槽为 17 m 长、2.5 m 宽、7 m 深的近似长方体, 其北壁和南壁分别出露大约 7 层和 14 层松散沉积层, 东侧的基岩(花岗岩)与西侧的多层松散沉积层以断面相接触(图 3)。探槽两壁下部为厚层河床相沉积物, 砾石磨圆度较高; 上部表现为因河流改道形成的砾

石层与砂层互层。

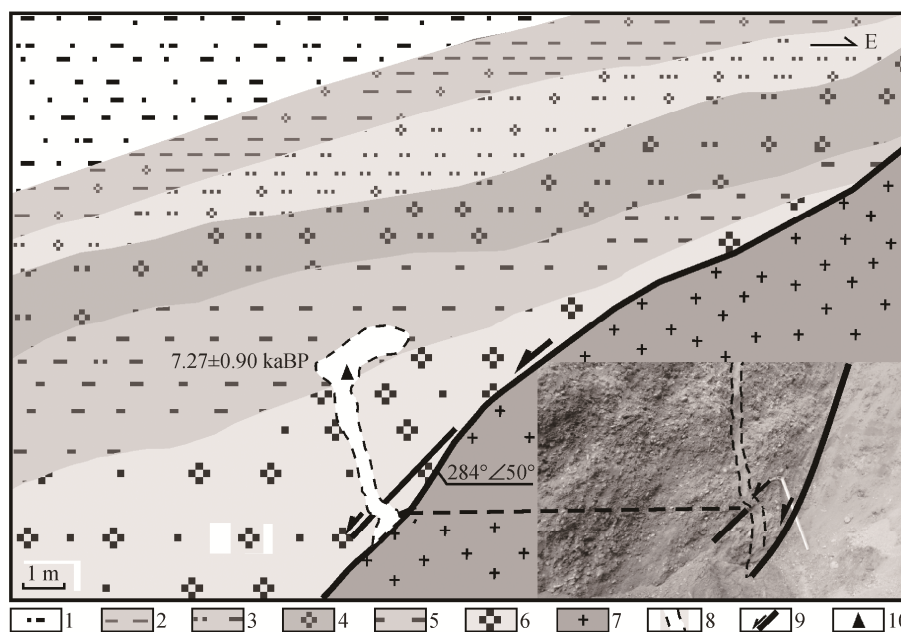
探槽北壁底部厚层河床相砾石层与上覆浅黄色砂层内发育一个以高角度向东倾斜的砂脉构造面, 顺断面走向展布。砂脉横剖面形态似砂火山, 顶端向上顶起, 砂脉上端略宽, 砂脉内物质粒度均匀, 成分单一, 均为浅色粉细砂。可以观察到, 该砂脉



1 砂脉顶部的第四系残坡积物; 2 浅灰黄色碎裂状白垩系粉砂质泥岩; 3 浅灰色块体状白垩系粉砂质泥岩; 4 砂脉, 其内部黑色虚线表示碎屑颗粒流动构造; 5 基岩内的透入性面状构造

图 2 昔格达村南砂脉构造

Fig. 2 Sand vein developed in South Xigeda village



1 坡积物(层 1); 2 褐黄色含砾黏土(层 2); 3 浅黄色含砾砂层(层 3); 4 浅灰色砂砾层(层 4); 5 浅黄色粉细砂层(层 5); 6 厚层砾石堆积(层 6); 7 花岗岩(层 7); 8 砂脉(层 8); 浅黄色粉细砂层; 9 断层及其运动方向; 10 取样位置

图 3 江边中学探槽 JBTC-01 北壁构造剖面

Fig. 3 Structural profile at the north wall of trench JBTC-01 beside Jiangbian middle school

底端向下发散, 近垂向与构造面斜交。砂脉底部主要为松散河床相砂砾石层, 因主断面的伸展活动或强地震活动而发生液化, 液化的细碎屑物质顺竖向

裂隙向上管涌, 并在母质层上覆的浅黄色粉细砂层底部形成砂尖构造。伴随主断面的伸展滑动, 一条次级剪切正向构造在距砂脉根部之上约 1 m 处发

育,并使砂脉下段发生左行扭曲。

探槽南壁多层松散堆积物与基岩之间发育一个倾向西的断面(图 4),近主断面处的下段松散堆积物均发生反牵引构造,揭示断裂带至少发生 1 次伸展性构造事件。对比探槽两壁地层,可知北壁砂脉向上穿透的顶部层位与南壁发育反牵引构造的顶部层位为同一层位,表明砂脉与顶层反牵引构造为同一期构造活动的产物。

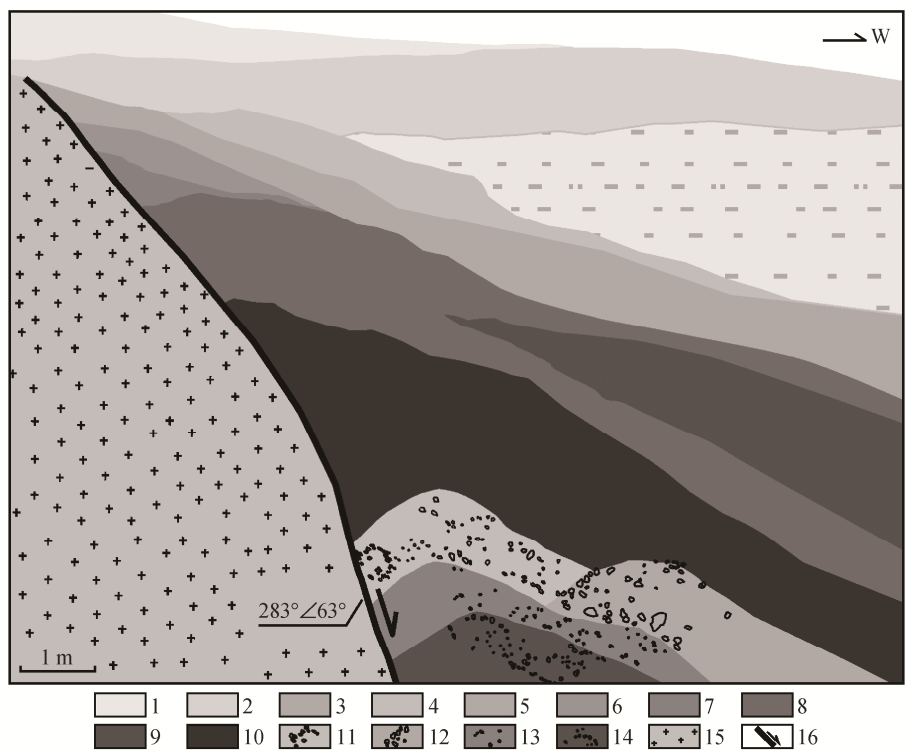
探槽 JBTC-01 挖开不到 1 小时,周缘发生整体性垮塌,因此未能完整地收集其揭示的构造活动信息。我们在探槽 JBTC-01 北侧数米处,同样横切断层,又布设近 E-W 向的长、宽、深分别为 23, 3 和 7.5 m 的探槽 JBTC-02,其南壁揭示花岗岩基岩内发育两组向西倾斜的构造面(图 5)。西构造面将灰绿色早白垩纪泥岩正向错开约 0.45 m,两组断面的上断点覆盖的全新世砂层未明显变形。

在松散堆积物层 5 和层 6 内发育一条高角度向东倾斜的砂脉,呈中段宽、两端略窄的弯曲状狭长

条带,其底端向下的延长线以大角度与断面交汇。砂脉的围岩层 6 为厚层松散河床相砂砾石堆积,磨圆度较好。该砂脉发育的部位及特点与探槽 JBTC-01 内的砂脉极为相似。OSL 测年结果表明,该砂脉细砂的曝光年龄为 7.28 ± 0.82 kaBP,代表构成砂脉的细砂的大致沉积时间。

层 6 与花岗岩体以及灰绿色泥岩的接触处发育楔形体(层 8)。楔形体的底部主要由花岗岩砾石块、灰绿色泥岩块及磨圆度较好的砾石组成(即由层 6, 9 和 10 的物质组成),砾石的扁平面顺断面定向排列,灰绿色泥岩与河床相砾石堆积物之间为灰绿色泥岩组成的断层碎裂岩带,以大约 50° 的倾角向西倾斜,宽度为 15~50 cm,显示层 7 和层 8 构成活动断层构造带,该构造带的最近活动时间应晚于层 5 和层 6 的形成时间,早于层 4 底部的沉积时间,应与砂脉的形成时间大体上一致。

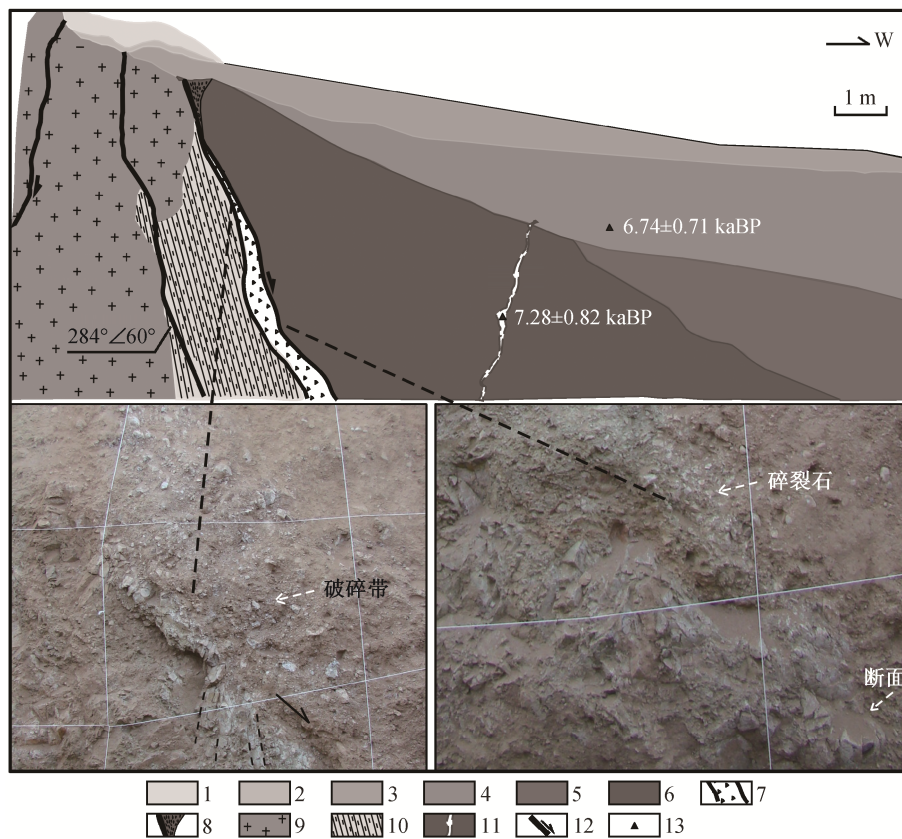
OSL 测年结果表明,层 4 底部细砂的沉积时间约为 6.74 ± 0.71 kaBP。由于砂脉中细砂样品的光释



1 褐黄色含砾黏土(层 1); 2 浅黄色含砾砂层(层 2); 3 浅黄色粉细砂层(层 3); 4 浅灰色砂砾层(层 4), 西侧为浅黄色砂层覆盖; 5 浅灰色砂层(层 5), 砾石成分与层 4 相似; 6 含砾石碎块黏土(层 6); 7 楔型砾石堆积(层 7); 8 砂砾层(层 8); 9 砾石透镜体(层 9); 10 较大的河流相砾石堆积物(层 10), 近断面处里砾石定向排列; 11 浅灰色砂砾层(层 11), 顶部具反牵引构造; 12 砾石层(层 12); 13 砂砾层(层 13), 近断层处地层变形; 14 挤压变形的砾石层(层 14); 15 花岗岩(层 15); 16 断层及其运动方向

图 4 江边中学探槽 JBTC-01 南壁构造剖面

Fig. 4 Structural profile at the south wall of trench JBTC-01 beside Jiangbian middle school



据文献[11]修改。1 褐黄色含砾黏土(层 1); 2 紫色含砾砂层(层 3); 3 浅灰色砂砾层(层 3); 4 浅黄色粉细砂层(层 4); 5 紫红色砾石层(层 5); 6 河床相砾石堆积(层 6), 砾石磨圆度较好; 7 断层碎裂岩带(层 7), 主要由灰绿色泥岩组成; 8 由花岗岩角砾、灰绿色泥岩砾石及磨圆度较好的河流相砾石组成的楔形体(层 8); 9 元古代花岗岩片麻岩(层 9); 10 灰绿色白垩纪泥岩(层 10); 11 砂脉(层 11); 12 正断层; 13 取样位置

图 5 江边中学探槽 JBTC-02 南壁构造剖面

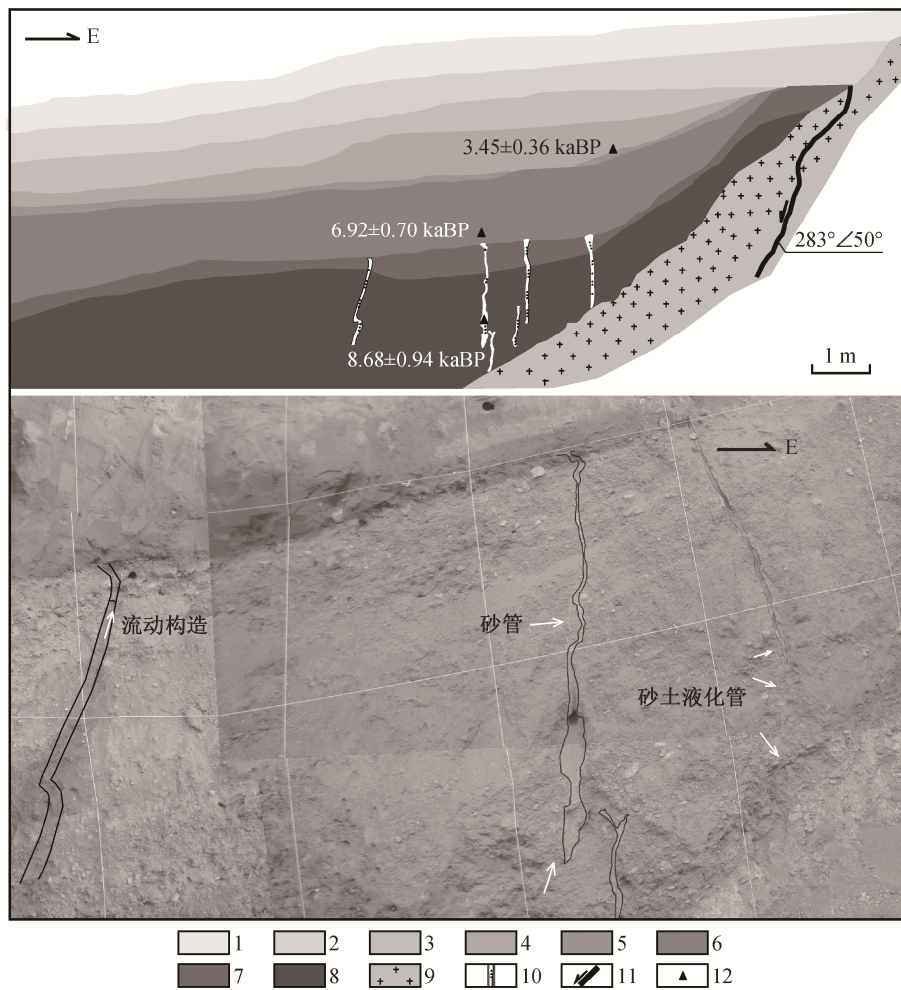
Fig. 5 Structural profile at the south wall of trench JBTC-02 beside Jiangbian middle school

光年龄可能比实际曝光年龄略偏老(与赵俊香博士口头交流), 而砂脉的物质应来自围岩的底部松散母质层, 因此, 据上述测年结果推测, 探槽 JBTC-02 南壁砂脉的形成时间大致在 $6.74\pm 0.71\sim 7.28\pm 0.82$ kaBP 之间。

探槽 JBTC-02 北壁剖面揭示花岗岩基岩内发育一组向西倾斜的断面(图 6), 松散沉积层内发育多条近 S-N 走向、近垂直且略向东倾斜的砂脉, 其形态和宽度与南壁的砂脉相似。不同之处在于, 有的砂脉顶端下伏于层 6 (探槽两壁的不同层号不代表同一地层)砂层的底部, 底端发育在层 8 褐黄色砾石层内或底部; 有的砂脉顶端发育在层 8 褐黄色砾石层内, 底端发育在层 8 褐黄色砾石层底部; 有的砂脉发育在层 8 褐黄色砾石层内, 而砂脉内部呈现物质向上的流动姿态, 细砂管和砂土液化管清晰可辨。这些砂脉的走向具有顺断面展布、远离构造

面消失的特征, 多条砂脉的顶部覆盖在厚层细砂层(层 6)的底部, 下端发育在断层面以上部位, 揭示砂脉的形成时间早于上覆河床相砂层底部的沉积时间, 成因应与构造活动或地震活动有关。OSL 测年结果显示, 砂脉下段细砂的年龄为 8.68 ± 0.94 kaBP, 层 6 底部细砂的曝光年龄为 6.92 ± 0.70 kaBP, 薄层紫色含砾砂层(层 5)的曝光年龄为 3.45 ± 0.36 kaBP, 这些数据较好地约束了砂脉的形成时间, 将探槽 JBTC-02 北壁砂脉的形成时间限制在 6.92 ± 0.70 kaBP 与 8.68 ± 0.94 kaBP 之间。

探槽 JBTC-01 和 JBTC-02 揭示的构造活动信息表明, 砂脉是以上冲方式穿越层理, 以高角度斜交于断面, 平面上顺断层走向发育。探槽 JBTC-02 南壁揭示砂脉和断层碎裂岩带顶部楔形体均被同一层未变形的浅黄色粉细砂层覆盖, 说明砂脉的形成应该与构造活动或地震活动有密切关系。依据砂脉与



据文献[11]修改。1 褐黄色含砾黏土(层 1); 2 褐黄色含砾砂层(层 2); 3 紫色砂砾层(层 3); 4 紫色含砾砂层(层 4); 5 黑色薄层砾石层(层 5); 6 浅黄色粉细砂层(层 6); 7 紫红色砾石层(层 7); 8 褐黄色砾石层(层 8), 砾石磨圆度较好; 9 花岗片麻岩(层 9); 10 砂脉(层 10); 11 断层及其运动方向; 12 取样位置

图 6 江边中学探槽 JB-TC02 北壁构造剖面

Fig. 6 Structural profile at the north wall of trench JBTC-02 beside Jiangbian middle school

各层位的空间位置关系,推断砂脉的形成时间应早于探槽 JBTC-02 南壁层 4 底部的沉积时间。探槽 JBTC-02 北壁取样层位所在的砂脉发育于层 6 与层 7 界线之下,近直立,弯曲状,为下宽上窄的狭长条带,发育细液化管和脉内细砂上冲构造,说明砂脉的物质来自层 8 的褐黄色砾石层中下段。取样位置与层 6 底部的垂向距离超过 1 m,其曝光年龄(8.68±0.94 kaBP)明显地早于层 6 底部的沉积时间(6.92±0.70 kaBP),由此可将砂脉的形成时间进一步控制在 6.92±0.70~7.28±0.82 kaBP 之间,即大约 7 kaBP,为全新世早中期。

1.3 下雷弄村构造剖面

在元谋县黄瓜园镇下雷弄村委会北约数米处由

细砂层、粉细砂层与泥层组成的河湖相地层内,发育数组次级构造面和一条主断面(图 7)。次级构造面倾向 NE 或 SW,倾角较陡,表现为伸展性活动特征,泥质条带和砂层的错距最大为数厘米,露头西侧的南北向主构造面将厚段泥层与泥层和粉砂层互层的层段错开。向下揭露构造面,可见其西侧泥层厚度达 2 m,东侧则未发现该套泥层,表明断层垂向错距大于 2 m。TL 测年结果表明,被断层正向切错的下盘河湖相层上部的形成时间不早于 22.46±1.91 kaBP,揭示断层最新活动时间为全新世,明显晚于 22.46±1.91 kaBP,且垂向滑动速率大于 0.089 mm/a^[11]。需要强调的是,这套河湖相地层中的粉细砂层为沉积地层,因断层活动而发生揉皱变形,

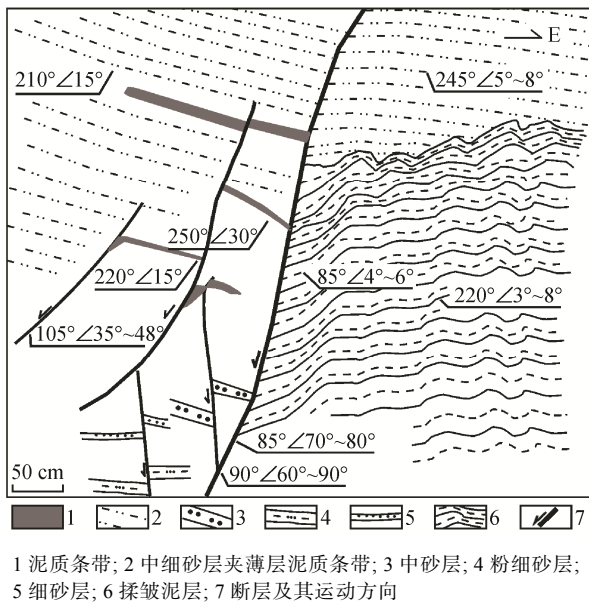


图 7 下雷弄村委会构造剖面(据文献[11]修改)

Fig. 7 Structural profile at Xialeinong village (modified after Ref. [11])

并被次级断层或节理切割, 这些近水平砂层垂向上的互层及切割层位可以有效地约束断层的最新活动时限。

1.4 羊街探槽剖面砂脉构造

羊街探槽位于元谋县羊街镇甸头村东南方向的羊街盆地边缘陡坎部位, 在其北侧约 20 余米处可见一个断面陡立且略向西倾斜的构造露头。断面东侧为灰绿色粉砂层, 西侧为半胶结灰色砂砾层, 断面上的擦痕近水平, 且羊街盆地东侧边缘数条近东

西向的冲沟均在盆地边缘陡坎部位发生左行弯曲, 揭示自晚更新世以来断裂的左行走滑活动。

该探槽走向近东西向, 西端略向 SW 向弯曲, 探槽内可见多条倾角较缓或近水平的砾石透镜体和近竖直的粉细砂砂脉(图 8 和 9)。这些粉细砂砂脉多呈窄长条状, 下部略窄, 上部略宽, 粒度均匀且明显小于近水平方向的砾石透镜体砂粒。近竖直向的裂隙内填充的粉细砂呈黄褐色, 与周围粗碎屑物质的成分及颜色明显有别。探槽两壁剖面沉积层变形, 反映断层的伸展性活动特征。

探槽北壁粉细砂砂脉样品的 OSL 测年结果为 8.18 ± 0.89 kaBP (取样位置见图 8), 反映砂脉的形成时间大致晚于粉细砂脉样品沉积时的曝光年龄。考虑到本区晚更新世晚期以来不存在冻土现象, 该探槽剖面揭示的多条近垂向砂脉的成因应是, 其附近强烈的构造活动或强震导致塑性沉积层变形并产生裂隙, 随着震动加剧和延续, 细碎屑物质液化, 并沿裂隙向上流动。

羊街盆地内多个深孔钻和石油勘探资料显示, 该盆地的基底为第三系, 其上的覆盖物为洪积含砾黏土, 砂脉的围岩层位于该套洪积含砾黏土的顶部, 曝光时间不充分, 表明上述测年结果比实际沉积时间相对偏老。野外调查还发现, 在羊街盆地西南缘, 紫色砂岩夹砂质泥岩层被 NE 走向的正断层错开, 断面倾向 NW。结合盆地边缘和盆内的平面构造几何样式, 可以认为是断层的走滑活动形成羊街盆地拉分区, 也就是说, 羊街盆地是元谋断裂走滑拉分

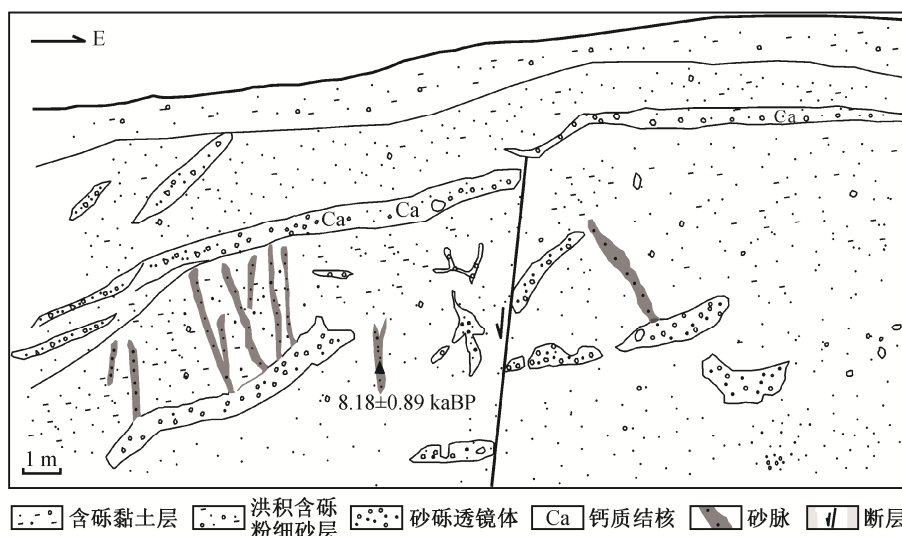


图 8 羊街探槽北壁构造剖面

Fig. 8 Structural profile at the north wall of the trench located at the eastern margin of Yangjie Basin

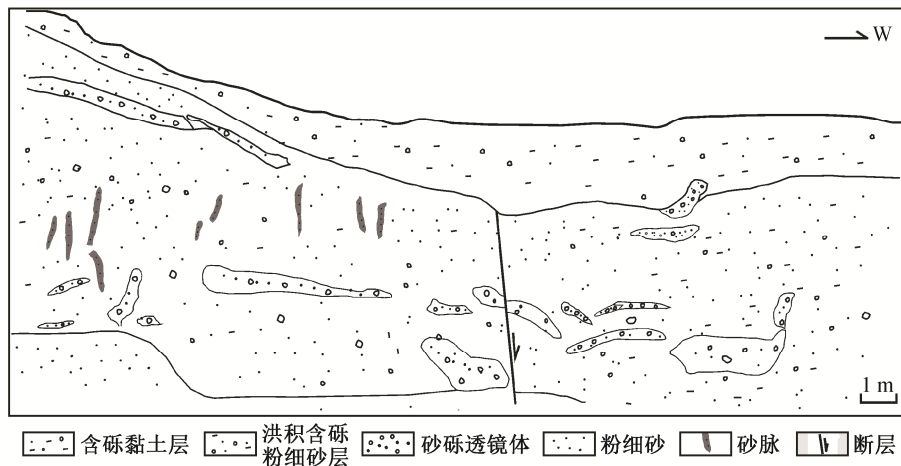


图 9 羊街探槽南壁构造剖面

Fig. 9 Structural profile at the south wall of the trench located at the eastern margin of Yangjie Basin

作用的结果。

1.5 一平浪剖面砂脉构造

在元谋断裂中南段的一平浪镇以北,白垩纪灰色泥质断层碎裂岩带内发育一条顺断层走向、倾向东、倾角陡、出露部分长约 5 m、宽约 10 cm 的脉络状砂脉(图 10)。该砂脉的物质单一,为均匀的浅黄色粉细砂。砂脉的构造面呈高角度,厚度较稳定。

在碎裂较严重的基岩内仅发育一条厚度一致的缓曲面状砂脉,显然不是地震作用下的液化喷出砂,否则,在宽度较大的砂脉附近应沿碎裂裂隙发育多条斜向的液化砂脉或上冲构造。砂脉构造面为断裂破碎带内的张性裂开面,具缓波状。该砂脉两侧的透水性节理面平直、密集,地层产状稳定,属于剪切性构造面理。该砂脉构造面与其周边发育的节理面平行,说明该张性裂开面与同向剪节理面同期形成,然后继续张性裂开,可能与主构造面的活动有关。砂脉正是断层伸展活动产生的节理内充填上覆地层的风化产物形成的,这种伴有明显张开裂缝的破裂在正断层破裂方式里较为普遍^[23]。OSL 测年结果表明,构造裂隙充填粉细砂的曝光年龄为 9.09 ± 1.08 kaBP,反映元谋断裂的一次强构造活动发生在 9.09 ± 1.08 kaBP 之后。

根据 JBTC-01 和 JBTC-02 两个探槽砂脉发育的层位及其与断层面的空间关系、采样位置及测年结果,初步推断江边中学两个探槽揭露的砂脉是同期形成的,时间应为 $6.92 \pm 0.70 \sim 7.28 \pm 0.82$ kaBP,即约 7 kaBP。结合羊街盆地和一平浪砂脉样品的曝光年龄,似乎可以得出与砂脉形成有关的断裂强活动



1 岩层; 2 节理; 3 砂墙; 4 与砂墙平行的节理面; 5 取样位置

图 10 禄丰县一平浪北断层角砾岩内的砂脉墙

Fig. 10 Sand vein developed in the fault breccia at the North Yipinglang of the Lufeng County

复发间隔约为 1 ka 的结论。但是,这一结论显然不合理。根据公元前 26 年至今的历史地震记录,元谋断裂带超过 Ms 6.5 级的强震只有一次(1955 年 Ms 6.8 级地震),中强震集中在断裂带的北段,且规模较大的砂脉也集中分布在断裂带的中北段,在上述探槽内均未发现多期砂脉构造或穿插现象,说明 1955 年的强震未在此造成明显的砂土液化。上述现象表明,此处产生规模较大的砂脉构造需要发生能量较强烈的地震,强震复发间隔应明显大于 1 ka。

综上所述,元谋断裂活动引起的砂土液化现象均发生在 7 kaBP 左右,指示同一期构造或强震活动。一平浪镇以北引起剪节理面张性裂开的断层活

动应与断裂带北段引起砂土液化的构造或强震活动同期。由于测年方法以及组成砂脉的物质曝光时间均存在不可避免的误差,可能导致同一构造事件发生时间的测试结果出现偏差。元谋断裂带发育的顺断层、高角度倾斜的砂脉构造明显有别于传统意义上的白齿构造^[1,10],也不同于甲烷气体逃逸后或微生物席层脱水收缩而产生裂隙后的填充构造,更与融冻变形无关,而是断层或强震活动引起的砂土液化,或强断裂活动引起的节理裂隙填充上覆物质的结果。

2 断裂活动特征

江边中学附近的探槽剖面揭示花岗岩基岩内发育两个向西倾斜的断层面(图 5),西支构造面将灰绿色早白垩世泥岩正向错开约 0.5 m,两个断面的上端点覆盖的第四纪砂层均未明显变形,说明断层碎裂岩带和砂脉构造为同一期构造活动的产物。下雷弄村东西向大冲沟南侧相当于冲沟 T₂ 的阶地面或略早于 T₂ 的洪积台地上发育长约 40 m 的南北向陡坎,倾向西,落差为 0.8~1.2 m,台地后缘发育的两条冲沟在断层通过处均发生左行错距为 10~15 m 或更大的变形,大冲沟南侧跨断层处的 T₁ 阶地面并未变形。野外调查和测年结果表明,龙川江 T₁ 阶地面与该处支流同级阶地的形成时间一致,OSL 测年结果为 7.34±0.75 kaBP。张叶春等^[24]利用 ¹⁴C

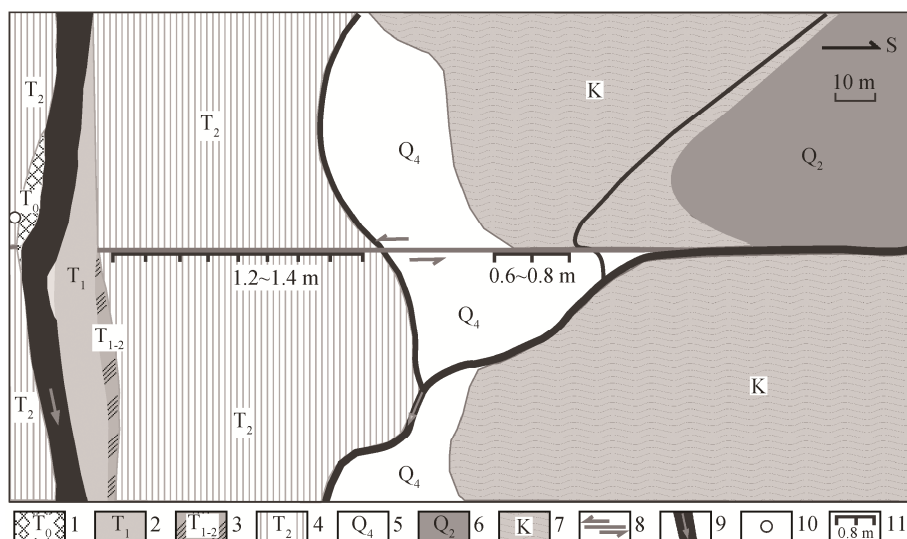
测年,揭示龙川江 T₁ 阶地形成时间为 5.645±0.14 kaBP,说明龙川江及其支流 T₁ 阶地地面的形成时间在 5.645±0.14~7.34±0.75 kaBP 之间。此处 T₁₋₂ 阶地面仅发育在断层西侧(图 11),可能与断层左行走滑活动有关;南北走向陡坎东侧出露的挤压性断层面上切穿 OSL 年龄为 297.47±34.0 kaBP 的冲洪积物(Q₂-Q₃)。中国地震局地壳应力研究所释光年代学实验室赵俊香博士认为,在测试冲洪积物(Q₂-Q₃)样品的过程中,光子计数小,信号弱,年龄结果应偏老。

我们认为,此处向上切穿冲洪积物(Q₂-Q₃)的构造面与下雷弄村委会旁的陡直断面均为元谋断裂带上不同位置的构造活动表现形式,断裂最新强活动时间应晚于中更新世中晚期,在 22.46±1.91 kaBP (TL 年龄)之后,大致发生在 T₁ 阶地面形成之前, T₁₋₂ 阶地面形成之后。

3 结论

本文依据元谋断裂带及其附近的地质露头 and 探槽剖面揭示的砂脉构造,描述了砂脉发育的层位、成份、形态、围岩变形特征、区域构造背景、古气候环境及其所在断裂带的晚第四纪活动特征,并结合前人有关砂脉构造的研究成果,详细论述该断裂带及其附近砂脉的成因机理,得到以下主要结论。

1) 元谋断裂带地表或近地表地层内发育的高角度砂脉构造沿断裂带平行展布,规模较大,数量



1 河漫滩; 2 一级阶地; 3 一、二级阶地间的次级阶地; 4 二级阶地; 5 现代洪积物; 6 中更新世冲洪积物; 7 白垩纪砂岩; 8 断层及运动方式; 9 冲沟及水流方向; 10 下雷弄村位置; 11 陡坎及高差

图 11 下雷弄村南断错地貌素描图

Fig. 11 Construction drawing of the faulted geomorphology developed at the south of Xialeining

较多,发育层位或为河道及其附近的松散堆积层,或为洪积层,或为基岩破碎带,这些砂脉均形成于饱水的沉积环境。

2) 元谋断裂带砂脉构造的成因主要有两种类型:第一种,由元谋断裂全新世早中期强烈活动引起的断面上或构造面附近节理内砂土液化并向上管涌形成;第二种,由于断层带内剪切节理后期张性产生裂隙,然后被上覆风化残留物充填而形成砂脉。这两种成因的砂脉构造都是元谋断裂晚第四纪左行走滑活动或断裂带上强震活动的伴生产物。

3) 元谋断裂带砂脉构造与断裂带的空间关系以及断裂带晚第四纪活动特征表明,这些砂脉为同一期构造事件所为,大致形成于7 kaBP。与地震活动相关的砂土液化对断裂活动有很好的时限约束。

参考文献

- [1] 刘贺娟,孙晓岭,王德海. 对前寒武纪一些沉积构造成因的思考:以天津蓟县剖面为例. 地球科学与环境学报, 2013, 35(3): 44-54
- [2] 宋天锐,高健. 这些是中国发现的最古老的后生物痕迹化石吗?. 科学通报, 1985(12): 926-928
- [3] 乔秀夫,高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理. 古地理学报, 2007, 9(4): 337-352
- [4] 史晓颖,蒋干清,张传恒,等. 华北地台中元古代串岭组页岩中的沙脉构造:17亿年前甲烷气逃逸的沉积标识?. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(5): 577-590
- [5] Gerdes G, Klenke T, Noffke N. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 2000, 47(2): 279-308
- [6] 梅冥相. 陆源碎屑岩中微生物诱发的沉积构造的成因类型及其分类体系. 地质论评, 2011, 57(3): 419-436
- [7] Schieber J, Bobse P K, Epiksson P G, et al. Atlas of microbial mat features preserved within the siliciclastic rock record. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2007
- [8] 李鼎荣. 准同生变形构造与古地震. 地震, 1983(4): 18-22
- [9] 冯先岳. 地震振动液化形变的研究. 内陆地震, 1989, 3(4): 299-307
- [10] 杨承先. 沙脉、沙火山的特征及其地震意义. 西北地震学报, 1985, 7(2): 99-103
- [11] 卢海峰. 元谋-昔格达断裂晚新生代新构造意义. 科学通报, 2014, 5(28/29): 2877-2887
- [12] 卢海峰,姬志杰. 昔格达断裂晚第四纪活动特征及强震复发周期. 现代地质, 2011, 25(3): 440-446
- [13] 卢海峰,何仲太,赵俊香,等. 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, 2008, 33(6): 852-860
- [14] 蒋长胜,郑勇. 中国大陆部分5级以上地震震源机制解 [EB/OL]. (2008-08-30)[2017-09-24]. <http://www.cea-igp.ac.cn/kjgzzy/255733.html>
- [15] 钱方,周国兴. 元谋第四纪地质与古人类. 北京: 科学出版社, 1991
- [16] 李庆辰,蒋复初. 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, 1993, 9(3): 30-36
- [17] 申旭辉,汪一鹏. 云南元谋地区新构造运动基本特征 // 邓起东. 活动断裂研究(8). 北京: 地震出版社, 2001: 131-139
- [18] 姚海涛,邓成龙,吕连清. 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, 2005, 20(2): 518-523
- [19] 王绳祖,张流. 塑性流动网络控制下川滇菱形块体及邻区构造应力场与地震构造. 地震地质, 2002, 24(3): 324-334
- [20] 卢海峰,张路. 元谋断裂带(晚)新生代构造应力场浅析. 震灾防御技术, 2013, 8(2): 125-134
- [21] 崔之久. 试论多年冻土的冰缘标志及冰川与冰缘作用的关系问题. 冰川冻土, 1980, 2(2): 1-6
- [22] 蒲庆余,吴锡浩,钱方. 我国第四纪冰缘地质问题的初步探讨. 地质力学学报, 1982(2): 43-56
- [23] 冉勇康,李彦宝,杜鹏,等. 中国大陆古地震研究的关键技术与案例解析(3)——正断层破裂特征、环境影响与古地震识别. 地震地质, 2014, 36(2): 287-301
- [24] 张叶春,李吉均,朱俊杰,等. 晚新生代元谋盆地演化与河谷发育研究. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(1): 199-205