

# 西藏当雄—羊八井盆地的第四纪地质与断裂活动研究

吴中海<sup>1</sup>, 赵希涛<sup>2</sup>, 吴珍汉<sup>1</sup>, 江 万<sup>1</sup>, 胡道功<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 在当雄—羊八井盆地进行的详细地质填图工作表明, 该盆地中堆积了上新世或早更新世以来多套不同成因的沉积物。其中最显著的是形成于约 700 ~ 500kaB.P.、250 ~ 125kaB.P. 和 75 ~ 12kaB.P. 等三个阶段的冰川和冰水沉积物, 它们指示念青唐古拉山地区在中更新世以来曾有过三次冰期。对念青唐古拉山东南麓断裂带的研究表明, 该断裂带包含了三条次级断层带, 它们具有不断向盆地内部迁移和多期活动的特点, 其中中更新世以来的几次重要活动分别发生在 700 ~ 500kaB.P.、350 ~ 220 kaB.P.、140kaB.P. 和 70 ~ 50kaB.P.。断裂带错动中更新世以来地层所形成的断层崖高度随着地层时代的变新发生系统地减小, 指示该断裂的垂直活动速率介于 0.4mm/a ~ 2mm/a 之间, 其中第四纪期间的长期的平均垂直活动速率为  $1.1 \pm 0.3$ mm/a, 而全新世期间的垂直活动速率为  $1.4 \pm 0.6$ mm/a。

**关键词:** 青藏高原; 念青唐古拉山; 南北向地堑; 活动断裂; 第四纪冰川作用

**中图分类号:** P534.63; P542

**文献标识码:** A

印度板块与欧亚板块之间约 50Ma 以来的持续碰撞作用造成了青藏高原及其周边地区强烈的新生代构造变形和山脉隆升, 并对东亚地区的地貌格局和环境演化产生了重要影响<sup>[1-3]</sup>。有关高原隆升及其动力学机制的研究一直受到地质科学界长期的关注, 其中的一个重要内容是确定高原内部南北向裂谷开始拉张的时间以及相关正断层的活动速率, 它对于了解中亚地区晚新生代的应变分布及其动力学机制都是十分关键的<sup>[4-7]</sup>。近年来, 集中在当雄—羊八井盆地及其周缘开展的晚新生代伸展变形和第四纪断裂活动等方面的研究对于解决上述问题起了重要作用<sup>[8-12]</sup>。但遗憾的是, 由于对该区盆地张裂时间、第四纪地层分布和时代等都知之甚少, 前人主要强调了晚更新世以来的断裂活动性, 并且确定的断裂活动速率是在没有对相关地层时代进行系统调查和测年的情况下推测的<sup>[8,11,13]</sup>。其中 Armijo 等根据推断的断层所错动的地貌体时代、盆地裂陷时代和估算的地堑两侧的总垂直错距认为, 当雄—羊八井盆地西侧的主盆地边界断裂—念青唐古拉山东南麓断裂的全新世的平均垂直活动速率约为

收稿日期: 2006-02-27

基金项目: 自然科学基金 (40501006), 中国地质调查局“西藏 1:25 万当雄幅区域地质调查”(编号 DKD9901001) 和“青藏铁路沿线活动断层调查与地应力测量”(编号 1212010340302) 项目资助。

作者简介: 吴中海 (1974-), 男, 副研究员, 博士, 构造地质专业, 主要从事第四纪地质和活动构造研究。

E-mail: wzhy@sina.com。

1.5~2mm/a, 而第四纪的平均垂直活动速率为  $1 \pm 0.6$ mm/a。吴章明等认为该断裂晚更新世以来的垂直活动速率为 1.4~14mm/a。2000~2002 年期间, 笔者在该区进行第四纪地质填图过程中, 初步确定了第四纪地层的分布和时代, 并在此基础上对第四纪断裂活动进行了系统研究。

## 1 第四纪地层的时代和分布

当雄—羊八井盆地总体走向为 NE 30°, 宽 10~25km, 长约 120km。对盆地西侧念青唐古拉山东南麓低角度韧性剪切带的热年代学研究结果表明<sup>[9-10]</sup>, 该盆地是  $8 \pm 3$ Ma 以来区域发生 EW 向伸展变形的产物。自盆地形成以来, 特别是第四纪期间, 在盆地中堆积了不同时代的冲积物、冰川与冰水沉积物、洪积物、泉华沉积和沼泽-泥炭堆积等多种成因的沉积物。其中大面积出露的主要是中更新世以来的冲洪积砾石层和冰川与冰水沉积物 (图 1)。

### 1.1 中更新世之前的老砾石层

根据沉积物所处的地貌部位、构成的地貌形态、岩相特征及其与周围其它沉积物之间的切割关系, 笔者在当雄—羊八井盆地中鉴别出了多套形成于中更新世之前的冲积或冰水砾石层, 其中最老的沉积物至少形成于上新世期间。但由于沉积时代尚难准确厘定, 因此未对其进行进一步细分, 而暂将其中的大部分划归早更新统, 并统称其为“老砾石层”。

其中最老的冰水砾石层 (图 1,  $Q_1^{gl}$ ) 主要分布于在曲才乡东北约 3km 的欠布泉东侧, 该砾石层构成高出周围谷地 120~200m、较为平缓的山前第二级高台地, 表层已风化成棕红色, 向北侧该砾石层被拔河大于 200m 的山前第一级高冰碛台地中更新世早期的被棕黄色冰碛物侵蚀不整合覆盖; 向南侧该砾石层侵蚀不整合覆盖在沙康果和日贡布一带的老砾石层之上。该砾石层呈棕红色, 砾石分选、磨圆差, 砾径为 0.01~2m, 砾石以次棱状-次圆状为主, 风化较深。在该砾石层顶部所采集样品的电子自旋共振 (ESR) 年龄结果为 849~825ka.B.P. (图 1, 位置 8), 表明其形成于早更新世晚期。

早更新世的其它沉积物基本上都是冲积砾石层 (图 1,  $Q_1^d$ ), 局部夹湖相砂、粘土层。它们一般不整合于基岩自上形成高出周围谷地 40~100m 的低缓的丘陵或残山, 顶部常被中更新世早期的冰碛物或冰水沉积物所覆盖。该套砾石层主要出露于羊八井西南约 15km 处、宁中西侧的甲果果与扁梅一带和当雄日贡布等处。砾石层呈灰色或棕黄色, 其中砾石风化很深, 一般为次棱状或次圆状。在日贡布南侧 (图 1, 位置 7), 该砾石层上部砂层的 ESR 年龄为  $2888 \pm 356$ ka.B.P. (表 1), 表明该砾石层至少应形成于早更新世早期, 有可能形成于上新世晚期。

最老的“老砾石层”出露于沙康果东侧 (图 1,  $N_2$ ), 该砾石层为砖红色, 风化很深, 分布于日贡布北侧, 构成高 100~150m 的残山, 其顶部被早更新世冰水沉积物覆盖, 并被日贡布处的早更新世早期砾石层所切割, 表明其至少形成于上新世期间。

### 1.2 中更新世以来的冰川和冰水沉积物

位于盆地西侧的念青唐古拉山在第四纪期间发生过多次冰川作用, 前人对该区的古冰川遗迹进行的初步研究表明, 念青唐古拉山东南麓在更新世时期可能发生过 3~5 次冰期<sup>[14,15]</sup>, 但均未给出相关冰碛物的年龄和在区域内的详细分布。作者<sup>[16-17]</sup>在对该区进行的第四纪冰川作用考察表明, 在念青唐古拉山地区普遍发育了 4 套中更新世以来的冰川和冰水沉积物。

第一套冰碛物和冰水沉积物 ( $Q_2^{gl}$  和  $Q_2^{lg}$ ) 主要分布于念青唐古拉山山麓地带 (图 1)。



表 1 当雄—羊八井盆地更新世第四纪沉积物的年龄测定结果

Table 1 Ages of Pleistocene deposits in the Damxung-Yangbajain basin

样品编号	样品位置	样品性质	测试方法	年龄/ $kaB.P.$
14-16-1	曲才乡东克玛公路边 (图 1, 位置 7)	含钙质砂层	ESR	$2888 \pm 356$
14-8-1-2	当雄电站西北欠布泉砾石层上部 (图 1, 位置 8)	钙质胶结物	ESR	849.80
14-8-1-1	当雄电站西北欠布泉砾石层上部 (图 1, 位置 8)	钙质胶结物	ESR	$825 \pm 74$
23-5	你啊沟西拔河 160~240m 冰水台地 (图 1, 位置 12)	钙壳层	ESR	$678 \pm 307$
23-4	你啊沟东拔河 160~250m 冰水台地 (图 1, 位置 13)	钙壳层	ESR	$593 \pm 260$
22-4	拉尔根拔河 40~60m 冰水台地中上部 (图 1, 位置 14)	钙质胶结物	ESR	$205 \pm 54$
03-5	宁中拉曲拔河 40~80m 的高侧碛上部 (图 1, 位置 6)	钙质胶结物	U 系	$143.4 \pm 16.3$
03-3	羊八井扎日阿白果拔河 25~35m 的冰水台地 (图 1, 位置 5)	钙质胶结物	U 系	$72.1 \pm 6.1$
22-1	江多东南拔河 15~20m 的冰水—洪积扇顶部 (图 1, 位置 10)	细砂层	OSL	$25.4 \pm 0.87$
0311-10	羊八井东南拔河 4m 的 T1 上部 (图 1, 位置 18)	灰黑色泥炭层	14C	$4.26 \pm 0.17$
0311-10	羊八井东南拔河 4m 的 T1 上部 (图 1, 位置 18)	细砂层	TL	$3.7 \pm 0.3$
0311-4	乌马塘东拔河约 6m 的阶地顶部 (图 1, 位置 17)	粉砂质土壤	TL	$3.9 \pm 0.3$

注: U 系样品由中国科学院地质与地球物理研究所马志邦测定; ESR 和 OSL 样品分别由中国地震局地质研究所尹功明, 张克旗和姜泽平测定。

第三套冰碛物和冰水沉积物 ( $Q_3^{st}$  和  $Q_3^{st}$ ), 在念青唐古拉山地区主要分布于冰川槽谷及其出口处。其中冰碛物为灰白色松散砾石层, 其表层常发育 20~40cm 厚的浅棕色现代土壤。其常构成高出河床 15~35m 的低侧碛和残破终碛 (由于分布面积较小, 未在图 1 中表示)。冰碛物的前缘发育拔河 10~35m 的冰水台地, 该套台地切割第二套冰碛物的高侧碛垄或冰水扇。在盆地中南部的古仁曲和扎日阿白果沟口见该套冰水台地可分为两级, 其中高台地拔河 25~35m, 底台地拔河 10~20m。第三套冰碛物在当雄北未见分布, 取而代之的是地貌部位一致、拔河 15~25m 的冰水或洪积台地。在羊八井扎日阿白果拔河 25~35m 的冰水台地的冰水砾石层的钙质胶结物的 U 系年龄为  $72.1 \pm 6.1kaB.P.$  (表 1, 图 1, 位置 5), 指示其为末次冰期早期产物。在江多, 拔河 12~20m 的台地顶部砂层的光释光 (OSL) 测年结果为  $25.4 \pm 8.7kaB.P.$  (表 1, 图 1, 位置 10), 指示其为末次冰期晚期产物。

测年结果表明, 分布于当雄—羊八井盆地中的上述三套冰川沉积物的发育时期, 应分别相当于氧同位素阶段 (MIS) 18~14、MIS8~6 和 MIS4~2 以及青藏高原南部的聂聂雄拉冰期、古乡冰期和白玉冰期<sup>[18,19]</sup>, 而后两次冰期均可能包括了早、晚两个发育阶段, 其中最后一次冰期的两个阶段分别对应于 MIS4 和 MIS2。

第四套冰碛物和冰水沉积物都分布于现代冰川末端, 其常构成多道终碛、侧碛和冰水扇等。在西布冰川末端, 该套冰碛物由 12 道终碛垄及相关侧碛和底碛组成。区域对比表明<sup>[16]</sup>, 它们是新冰期、小冰期和 20 世纪中期冰川前进的产物。

### 1.3 晚更新世以来的冲、洪积物 ( $Q_2^{st}$ 、 $Q_2^{st}$ )

晚更新世以来, 盆地中开始大面积发育冲、洪积砾石层。其中晚更新世的冲、洪积砾石层与盆地中的第三套冰水沉积物同期, 在盆地中主要构成拔河 10~25m 的冲、洪积扇或台地。全新世冲、洪积物则构成现今河流的河漫滩、拔河 2~6m 的阶地或洪积扇, 主要分布于横切念青唐古拉山的河流谷地中和平行盆地发育的河流两侧。在乌马塘东和羊八井西北

(图1, 位置17、18), 分别发育拔河约4m和6m的阶地, 在乌马塘东该阶地还切割了拔河约11m的晚更新世洪积台地, 羊八井处该阶地上部泥炭层和砂层的<sup>14</sup>C和热释光(TL)年龄分别为 $4.26 \pm 0.17\text{kaB.P.}$ 和 $3.7 \pm 0.7\text{kaB.P.}$ (表1), 乌马塘东该阶地顶部粉砂层的TL年龄为 $3.9 \pm 0.3\text{kaB.P.}$ 。表明盆地中拔河4~6m的阶地应形成于全新世中期。

## 2 第四纪断裂活动

晚新生代以来, 特别是第四纪期间青藏高原中南部发生强烈的东西向伸展运动, 在南部形成了多条SN向裂谷系<sup>[8]</sup>。而亚东—谷露裂谷系是其中连贯性最好、规模最大的, 当雄—羊八井盆地即位于该裂谷系的中—北部。该盆地的边界断裂带在第四纪期间的活动非常强烈, 是高原内部一条强烈的地震活动带, 并控制着该盆地中的地热活动。因此, 确定该断裂带的分布和活动速率具有重要的理论和实践意义。

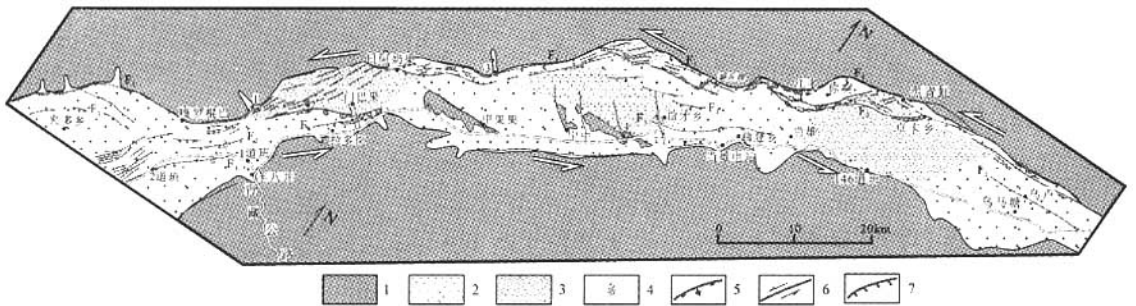


图2 当雄—羊八井盆地活动断裂分布图

Fig.2 Distribution of active faults in the Damxung-Yangbajain basin

1. 基岩; 2. 第四系; 3. 拉分盆地; 4. 温泉; 5. 正断层; 6. 走滑断裂; 7. 断层陡坎

### 2.1 断裂的分布、时代和多期活动

在当雄—羊八井盆地中分布着NNE、NE、NEE和NW等不同走向的多组断裂。根据断裂的规模、分布、走向和运动学关系, 可将其分别划分为念青唐古拉山东南麓断裂带、当雄—羊八井盆地南缘断裂带、宁中NW向断裂带和拉多岗NW向断裂带等4组断裂(图2)。其中的拉多岗NW向断裂和宁中NW向断裂规模较小, 属正倾滑性质, 主要控制盆地中基岩岛山的分布, 并常被念青唐古拉山东南麓断裂带所限制。整体为NE走向的盆地南缘正断层仅在羊八井至乌马塘一带的盆地东南侧断续分布, 沿断裂分布的倾向NW的基岩三角面和断裂南侧山地的强烈侵蚀切割现象表明该断裂在第四纪期间曾有明显的垂直活动。其余的NNE、NE和近EW走向的断层构成了规模最大、以左旋张扭变形为主的念青唐古拉山东南麓断裂带。

**2.1.1 念青唐古拉山东南麓断裂带的几何特征和力学性质** 沿当雄—羊八井盆地西北侧分布的念青唐古拉山东南麓断裂带的走向变化于 $25^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 总体倾向SE, 倾角 $55^\circ \sim 76^\circ$ , 是有正断层和走滑断裂组合而成的典型的张扭性变形带。该断裂带包含了一系列沿念青唐古拉山东南麓断续延伸的呈NNE、NE和NEE走向的正断层和NEE走向的走滑断层。其中从山麓到盆地内部, 根据断裂的平行分布特征可划分出阶梯状分布的 $F_1$ 、 $F_2$ 和 $F_3$ 等三条次级断层带(图2)。其中 $F_1$ 断层为该断裂带的主断层, 其由多条右列斜接的次级断层构成, 并构成了念青唐古拉山基岩山地与盆地第四系堆积区的分界线。沿断裂可观察到高600~1000m

的断层三角面、阶梯状的断层陡坎和基岩断层摩擦面等现象。 $F_2$  也由多条右列分布的次级断层构成, 该断裂错动不同时代的第四纪地层, 是形成山前高冰碛或冰水台地的边界断层, 高 200m 以上的高冰碛或冰水台地就主要分布于该断裂带的上升盘。 $F_3$  则主要分布于盆地中部, 由分布于军马场、拉多岗和曲登乡等处的三条延续性较差断层构成。其常构成盆地中低洼的沼泽湿地的边界, 并和盆地中的 NW 向断裂一起控制了羊八井、拉多岗和宁中等处温泉的分布。

在遥感图上和野外可以清楚地观察到沿断裂带发育的左旋断裂活动和正断层活动现象。其中最突出的走滑特征是断裂带上的菱形左旋拉分盆地和拗陷。拉多岗、宁中和当雄等三个右列分布的菱形次级盆地是该断裂带上最大的拉分盆地, 它们皆分布于断裂带由 NE 或 NNE 走向转为 NEE 走向的部位。在盆地的北西边界, 往往是正断层活动最强烈的地段, 而连接两个拉分盆地的断层段则是走滑断裂出现和走滑现象最丰富的部位。另外, 在次级走滑断裂带的左阶斜接部位也发育小型的左旋拉分盆地, 典型的如分布在宁中北约 12km、躺兵错和江多南侧山麓洪积扇上的菱形洼陷。另外, 基岩断层摩擦面上的擦痕也指示断裂带的左旋正走滑性质。如在嘎罗棍巴西侧和你啊沟口西北侧,  $F_1$  断层错动基岩所形成的断层角砾岩表层的磨擦镜面上产状分别为:  $170^\circ \angle 50^\circ$  和  $135^\circ \angle 66^\circ$  的两组“丁”字头擦痕。其中早期的擦痕较粗、较长, 侧伏角小, 只是一走滑断裂活动为主的断裂性质; 而晚期的擦痕则较短、较细, 侧伏角大, 只是正断层活动为主。另外, 在门巴果西南、江多西南和乌卢西北等处观察到的断裂左旋错动冲沟所形成的断头沟也表明在次级菱形盆地的端部次级走滑断裂的发育。

**2.1.2 念青唐古拉山东南麓断裂带的演化** 念青唐古拉山岩体和山前韧性剪切带的热年代学分析结果<sup>[9,20]</sup>, 断裂带与其所错动的第四纪地层的关系、断层上的最大错距以及断层破裂带上断层角砾岩和断层泥的测年数据等资料表明, 念青唐古拉山东南麓断裂带中的三条次级断裂带是断裂带从山前向盆地方向逐渐迁移过程中形成的。其中  $F_1$  断层带上的垂直断距在所有断层带中是最大的, 该断层错动基岩和不同时代的第四纪地层, 并明显控制了盆地中第四纪地层的分布。沿该断裂分布的基岩断层三角面高 600 ~ 1000m, 而错动中更新世以来地层的错距都小于 300m, 表明该断层带应形成于中更新世之前。念青唐古拉山东南麓出露的伸展型的低角度韧性剪切带和念青唐古拉山岩体的冷却历史的研究<sup>[10,20]</sup>表明, 当雄—羊八井盆地在 8Ma 已开始强烈拉张, 标志着构成盆、山边界的  $F_1$  断层带也同时开始强烈活动。 $F_2$  断层带的最大垂直错距为 200 ~ 300m, 是错动中更新世早期的冰碛物和冰水沉积物所形成的, 而该断层错动中更新世晚期冰碛物的断距则相应的变小。在你啊沟口  $F_2$  断裂由 4 个阶梯状分布的次级断层构成, 从西北向东南, 断层错动的最新地层逐渐变新, 错距逐渐变小, 断层崖的坡角则逐渐增加, 也反映出其不断向东南方向 (即盆地方向) 迁移的特征。表明该断层应是 700 ~ 500kaB.P. 以来形成的。在整个断裂带上,  $F_3$  断层带上的垂直断距是最小的, 在曲登乡断层错动基岩所形成的断层泥的 ESR 年龄 (表 2) 和拉多岗、宁中等地沿断裂出露的泉华的年龄<sup>[21]</sup>表明, 该断裂带形成于约 0.5MaB.P. 之后, 其中大部分可能形成于约 250kaB.P. 以来。因此笔者认为, 念青唐古拉山东南麓断裂带的现今由三条平行分布的断层带所构成的复杂的断裂格局主要形成于约 0.7MaB.P. 以来。

**2.1.3 断裂带的多期活动** 念青唐古拉山东南麓断裂带上的断层三角面和断层崖的结构、断层错动不同时代地层和断层破裂带的叠加关系等都表明了其在第四纪期间经历了多期活动。沿  $F_1$  断层带分布高耸的断层三角面上, 可以观察到一个明显的凸型坡折。在该坡折之

上,三角面处于剥蚀状态,其坡度为 $25 \sim 35^\circ$ ,高度可达 $800 \sim 1000\text{m}$ ;在该坡折之下,三角面被中更新世早期的冰碛物覆盖,其坡角接近断层倾角,为 $45 \sim 60^\circ$ ,高度为 $200 \sim 300\text{m}$ 。该坡折指示 $F_1$ 断裂主要经历了两期活动:第一期发生在中更新世之前,断层活动控制了盆地早期的发育,其形成的断层三角面被抬升剥蚀,坡度变小;第二期发生在中更新世以来,断裂活动控制了盆地中 $Q_2^{1st/2nd}$ 台地的分布,并在断层带两侧形成了断裂破碎带、断层角砾岩和断层泥等指示断裂多期活动的标志物。

表2 当雄—羊八井盆地及邻区断层相关沉积物 ESR 测年结果

Table 1 ESR ages of fault clay and breccia in the Damxung-Yangbajain basin and its adjacent areas

样品编号	采样地点	采样部位和岩性	年龄 (t) ka B.P.
0816-1-1-1	羊八井嘎罗棍巴西侧 (图1, 位置3)	NE向正断层中的断层角砾石	676.32
132	当雄年波村东侧 (在图1之外)	近EW向正断层中断层角砾岩	607.90
0723-1-1	当雄你啊西北侧 (图1, 位置11)	近EW向正断层中断层角砾岩	$518 \pm 173$
115	青藏公路146道班东侧	近EW向正断层中断层泥	484.10
0726-8-1	宁中东北约6km (图2, 位置4)	NW向断层中的钙质断层泥	348.66
* S15	当雄东北约11km	近EW向正断层中充填的方解石脉	306
0817-1-1	中尼公路2道班西南约6km (在图1之外)	NE向正断层中的钙质断层泥	244.29
0726-2-1	当雄曲登乡西北侧 (图1, 位置9)	NE向正断层中的钙质断层泥	227.29
0723-2	当雄你啊西北侧 (图1, 位置11)	基岩与 $Q_2^{1st}$ 接触带上钙质断层泥	$141 \pm 13$
0724-4	当雄卓卡乡东北约4km (图1, 位置15)	近EW向正断层中钙质断层泥	73.89
0816-1-1-2	羊八井嘎罗棍巴西侧 (图1, 位置3)	NE向正断层中的断层膜	$59 \pm 31$
0815-6-1	中尼公路2道班西北约4km (图1, 位置2)	错动 $Q_2^{1st}$ 的正断层中的断层泥	$54 \pm 16$
0723-1-2	当雄你啊西北侧 (图1, 位置11)	近EW向正断层中的断层膜	48.80

注: \*号的样品数据引自吴珍汉等(2001)。

在嘎罗棍巴、你啊和年波等处,可以观察到断层错动基岩所形成的断层角砾岩,其上常叠加了浅灰红色钙质断层泥和薄层的断层膜。对其分别进行ESR测年(表2)可以发现,其中断层角砾岩的ESR年龄集中在 $700 \sim 500\text{kaB.P.}$ ,你啊处断层泥的年龄为 $141 \pm 13\text{kaB.P.}$ ,而断层膜的年龄介于 $60 \sim 50\text{kaB.P.}$ 之间。将沿断裂带上所测试的断层破裂带中的角砾岩、断层泥和断层膜等的ESR年龄按顺序排列可以发现(图3),中更新世以来,断裂带在约

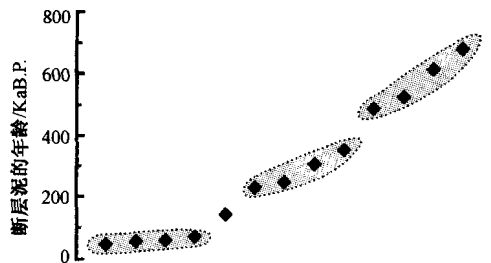


图3 断层泥年龄分布图

Fig.3 Age distribution of fault clay

$700 \sim 500\text{kaB.P.}$ 、 $350 \sim 220\text{kaB.P.}$ 、 $140\text{kaB.P.}$ 左右和 $70 \sim 50\text{kaB.P.}$ 等阶段曾发生多次强烈活动。其中在 $F_2$ 断裂带上,中尼公路2道班西北和卓卡乡东北约4km等处的断层泥的ESR年龄指示,该断裂最近一次的强烈活动发生在 $73 \sim 54\text{kaB.P.}$ 左右。在 $F_3$ 断裂带上,曲登乡附近和中尼公路2道班西南的断层泥的ESR年龄指示,该断裂曾在 $220 \sim 250\text{kaB.P.}$ 之间发生强烈活动。另外,念青唐古拉山断裂带在中更新世以来向盆地内部迁移的过程以及在当雄

北部所观察到的  $F_2$  断裂带在向盆地方向的迁移时所形成的阶梯状断裂结构；在古仁曲、扎日阿白果、日阿奶果、拉曲和江多—卓卡乡一带，断层带切割  $Q_2^{gl}$ 、 $Q_2^{3gl}$ 、 $Q_3^{2gl}$ 、 $Q_3^{3pl}$  和  $Q_4^{pl}$  等不同时代的第四纪地层时，断层崖显示出切割地层越新，高度越低的现象；在军马场西约 10km 的吉康果与当雄东北约 8km 的那根多—扯多一带可以见到， $F_2$  断层错动  $Q_2^{gl}$  所形成的断层崖上发育的 3~4 级“坎中坎”地貌等一系列现象也都指示了断裂带自中更新世以来的多期活动，并且这些现象与断层泥的 ESR 年龄所反映的断层活动阶段之间有密切的联系。

## 2.2 断裂活动速率

念青唐古拉山东南麓断裂带是一条长期活动的断层。断层的强烈活动不仅造成念青唐古拉山晚新生代以来的快速隆升，而且导致了山脉的强烈剥蚀。在山脉南段的古仁曲中，念青唐古拉山岩体的磷灰石裂变径迹年龄为 3.6Ma<sup>[20]</sup>①。如果地温梯度取 30℃/km，由于磷灰石的裂变径迹封闭温度为约 110℃，则表明念青唐古拉山 3.6Ma 以来的剥蚀厚度约为 3.7km。而盆地中第四纪沉积物的厚度约 0.5km，两者之和（~4.2km）可近似代表约 3.6Ma 以来该断裂带上的总垂直断距。其指示该断裂带约 3.6Ma 以来的长期的平均垂直活动速率约为 1.2mm/a。

在念青唐古拉山东南麓可以发现，当断裂带分别垂直错动中更新世以来的  $Q_2^{1gl-fgl}$ 、 $Q_2^{3gl-fgl}$ 、 $Q_3^{2gl-fgl}$ 、 $Q_3^{3gl-pal}$ 、 $Q_4^{1pal}$  和  $Q_4^{2pal}$  等地层时，随着地层时代的变新，错动该地层所形成的断层崖的高度也系统地变低（表 3）。依据前述的中更新世以来各套地层的测年结果（表 1），并考虑到青藏高原的冰川沉积物与冰期-间冰期气候旋回之间的成因关系<sup>[21-22]</sup>，可以认为研究区内的  $Q_2^{1gl-fgl}$ 、 $Q_2^{3gl-fgl}$ 、 $Q_3^{2gl-fgl}$ 、 $Q_3^{3gl-pal}$ 、 $Q_4^{1pal}$  和  $Q_4^{2pal}$  等 6 套地层的堆积时限分别为 700~500kaB.P.、250~125kaB.P.、75~58kaB.P.、32~12kaB.P.、10~4kaB.P. 和约 4kaB.P. 以来。根据地层时代和所测量的错动上述地层的断层崖高度（表 3），可以定量分析断裂带自

表 3 念青唐古拉山东南麓断裂带垂直位移量及其活动速率一览表

Table 3 Vertical displacements of the southeast Nyainqentanglha piedmont fault and its rate of activity

地点	断层崖高度和所错动地层的时代/kaB.P.					
	$Q_2^{1gl}$	$Q_2^{3gl-fgl}$	$Q_3^{2gl-fgl}$	$Q_3^{3gl-pal}$	$Q_4^{1pal}$	$Q_4^{2pal}$
	(700~500)/m	(250~125)/m	(75~58)/m	(32~12)/m	(10~4.0)/m	(~4)/m
古仁曲沟口 (图 2, 位置 1)	220	80	27	12		
扎日阿白果沟口 (图 2, 位置 2)	230	54	37	16		
日阿奶果沟口 (图 2, 位置 3)	240	60		8	3	
拉曲沟口	260	80		9	5	
江多沟口	240			20	5	2.5
你啊沟口西侧	236	91	46	22		
你啊沟口东侧	200	63	23	14		
拉尔根沟口		53		19	7	
卓卡乡东北约 1km				11		
中尼公路 2 道班西北约 4km	226					

① 吴珍汉. 西藏当雄幅 1:25 万区域地质调查报告——区域构造地貌形成演化过程 [R]. 2003.



中更新世以来不同时期的垂直活动速率。考虑到断层崖高度所代表的是在被错动的地层结束沉积之后的断层垂直活动量。虽然很难确定地层被错动具体发生的时间，但根据断层错动不同时代地层的错距和所确定的地层沉积时限可以限定断层的最大和最小垂直活动速率。如错动  $Q_2^{1^{gt-fgl}}$  的、高度为 260m 的断层崖所代表的是约 500 kaB.P. 至今或 250kaB.P. 至今也可能是 500 ~ 250kaB.P. 之间的某个时期距今以来的断裂垂直活动量。虽然无法确定断裂错动  $Q_2^{1^{gt-fgl}}$  具体发生在何时，但可以肯定的是，该断距最早形成于约 500kaB.P. 以来，而最晚形成于约 250kaB.P. 以来。因此该断距所限制的断层带的最大和最小垂直活动速率分别为约 0.5mm/a 和 1mm/a。

根据上述原则，利用在断裂带上不同地点所测量的断层错距及其所对应的最早和最晚的断层活动时间可计算出念青唐古拉山东南麓断裂带中更新世以来的平均垂直活动速率以及不同时期的最大和最小的垂直活动速率（图 4，图 5）。首先断层所错动的相邻两套沉积物的时代，可以限定断层崖的年龄。如前所述，高 200 ~ 260m 断层崖的最大和最小年龄分别为约 500kaB.P. 和 250kaB.P.。然后根据断层崖的最大和最小年龄及其高度之间很好的正相关性就可以限定断裂的最大和最小垂直活动速率（图 4）。在图 4 中，所有数据点都落在斜率为 2mm/a 和 0.4mm/a 的两条直线之间，表明该断裂带中更新世以来的垂直活动速率  $\geq 0.4\text{mm/a}$ ， $\leq 2.0\text{mm/a}$ ，平均垂直活动速率为  $1.2 \pm 0.8\text{mm/a}$ 。如果将不同时间段的断裂活动速率按从老到新的顺序进行排列（图 5），可以发现根据断层错动  $Q_2^{1^{gt-fgl}}$  和  $Q_2^{3^{gt-fgl}}$  所计算的自约 500kaB.P. 和 250kaB.P. 以来的断裂垂直活动速率（分别由图 5 中的圆点和方块所代表）沿断裂带变化不大，最大和最小垂直活动速率分别为 0.8 ~ 1.2mm/a 和 0.4 ~ 0.7mm/a，其平均值分别为  $\sim 0.9\text{mm/a}$  和  $\sim 0.5\text{mm/a}$ 。而根据断层错动  $Q_3^{2^{gt-fgl}}$ 、 $Q_3^{3^{fgl-pal}}$  和  $Q_4^{1^{pal}}$  所计算出的断裂晚更新世和全新世以来的垂直活动速率沿断裂带变化较大（分别由图 5 中的菱形块、三角和梯形块所代表），其最大和最小垂直活动速率分别介于 0.6 ~ 2.0mm/a 和 0.4 ~ 0.8mm/a 之间，其中晚更新世以来平均的最大和最小活动速率分别为 1.1mm/a 和 0.6mm/a，全新世以来的平均的最大活动速率为 1.4mm/a。将上述的断裂活动速率与根据山脉剥蚀所估计的断裂带的长期活动速率进行对比可以发现，依据断裂错动  $Q_2^{1^{gt-fgl}}$ 、 $Q_2^{3^{gt-fgl}}$  和  $Q_3^{2^{gt-fgl}}$  所计算的断裂最大垂直活动速率（ $1.1 \pm 0.3\text{mm/a}$ ）与估算的约 3.6Ma 以来的断裂平均的垂直活动速率是很相近的。因此，可以认为

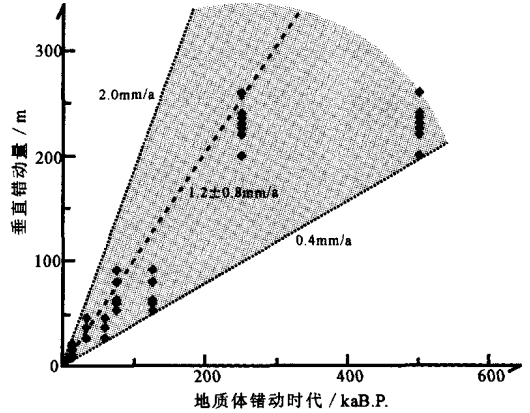


图 4 断层崖高度和年龄曲线  
Fig.4 Plot of scarp ages versus heights

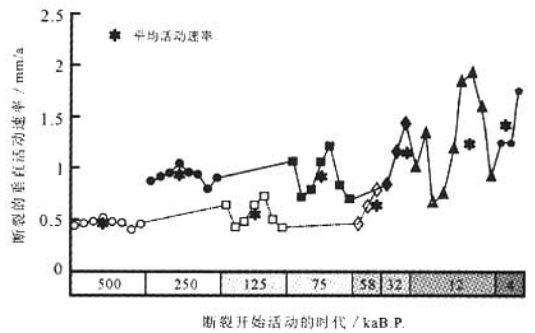


图 5 断裂活动速率分布图  
□最小活动速率；■，▲最大活动速率  
Fig.5 Change in rate of faulting  
(the open and solid symbols represent the minimum and maximum slip rates respectively)

最大和最小垂直活动速率分别介于 0.6 ~ 2.0mm/a 和 0.4 ~ 0.8mm/a 之间，其中晚更新世以来平均的最大和最小活动速率分别为 1.1mm/a 和 0.6mm/a，全新世以来的平均的最大活动速率为 1.4mm/a。将上述的断裂活动速率与根据山脉剥蚀所估计的断裂带的长期活动速率进行对比可以发现，依据断裂错动  $Q_2^{1^{gt-fgl}}$ 、 $Q_2^{3^{gt-fgl}}$  和  $Q_3^{2^{gt-fgl}}$  所计算的断裂最大垂直活动速率（ $1.1 \pm 0.3\text{mm/a}$ ）与估算的约 3.6Ma 以来的断裂平均的垂直活动速率是很相近的。因此，可以认为

念青唐古拉山东南麓断裂带在上新世晚期和第四纪以来的平均的长期垂直活动速率为  $1.1 \pm 0.3\text{mm/a}$ ，而全新世期间的垂直活动速率为  $1.4 \pm 0.6\text{mm/a}$ 。

### 3 讨论与结论

当雄—羊八井盆地的第四纪地质调查表明，该盆地在中新世晚期开始断陷后，可能在上新世期间就已开始接受堆积。早更新世期间，盆地中主要发育冲、洪积物，局部有冰水沉积。在中更新世至晚更新世期间，由于念青唐古拉山脉的多次冰川作用，在该盆地中堆积了分别形成于约 700 ~ 500kaB.P.、250 ~ 125kaB.P. 和 75 ~ 12kaB.P. 等期间的三套冰川和冰水沉积物，其中后两次冰期均可能包含了早、晚两个发育阶段。末次冰期间冰阶以来，伴随冰川的大规模退缩，盆地中发育大量冲、洪积物，形成现今盆地中的大型冲、洪积扇和河流阶地地貌。

断裂研究发现，在第四纪期间，该盆地中发育了多组活动断裂，其中盆地西缘的主边界断裂带—念青唐古拉山东南麓断裂带是规模最大、活动性最强的一条典型的由左旋走滑断裂和正断层所组合而成复合型张扭性断裂带。该断裂在第四纪期间经历了多期活动，其中最显著的变化是发生在中更新世以来的断裂带向盆地方向的迁移过程。在断裂迁移过程中的约 700 ~ 500kaB.P.、350 ~ 220kaB.P.、140kaB.P. 左右和 70 ~ 50kaB.P. 等阶段，伴随该断裂带的多期强烈活动，沿断裂带发育了高度不同的多期断层崖、断层崖上的“坎中坎”、多期泉华台地等一系列密切相关的构造—地貌现象。根据念青唐古拉山东南麓断裂带上的不同时期的断层崖高度判断，其垂直活动速率应介于  $0.4 \sim 2\text{mm/a}$  之间。其中第四纪期间的长期平均垂直活动速率为  $1.1 \pm 0.3\text{mm/a}$ ，而全新世期间的垂直活动速率明显增大为  $1.4 \pm 0.6\text{mm/a}$  (图 4、5)。上述结果与 Armijo 等 (1986) 所确定的该断层带的长期垂直活动速率和全新世的活动速率比较接近<sup>[8]</sup>，表明 Armijo 所估算的在第四纪期间跨过该地塍系和整个藏南地区的 EW 向伸展速率 (分别为  $1.4 \pm 0.8\text{mm/a}$  和  $10.0 \pm 5.6\text{mm/a}$ ) 是比较合理的。但这与 Molnar 等 (1984) 利用地震记录和 Wang 等 (2001) 所获得的藏南地区的 EW 向拉张速率 (为  $18\text{mm/a}$ ) 相差较大<sup>[23-24]</sup>。这可能暗示，在不同时间尺度内，断裂带的活动速率是有变化的。根据第四纪地层错动所估算的断裂活动速率近似代表了断裂的长期活动速率，而根据 GPS 观察和历史地震所估算的结果只能反映断裂带或地块百年的或十年尺度的活动状态。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Dewey JF, Shackleton RM, Chang Chengfa, Sun Yiyin. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau [A]. Phil. Trans. R. Soc. Lond [C]. 1988, A327, 379 ~ 413.
- [ 2 ] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia; effects of a continental collision [J]. Science, 1975, 189 (4201): 419 ~ 426.
- [ 3 ] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg [J]. Nature, 1990, 346 (6279): 29 ~ 34.
- [ 4 ] Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF, Yin A. Raising Tibet [J]. Science, 1992, 255 (5052): 1663 ~ 1670.
- [ 5 ] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum estimate for east-west extension [J]. Nature, 1995, 374: 49 ~ 52.
- [ 6 ] Yin A, Kapp PA, Murphy MA et al. Evidence for significant late Cenozoic east-west extension in north Tibet [J]. Geology, 1999, 27 (9): 787 ~ 790.

- [7] Bulisniuk PM, Bradley RH, Johannes G. et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago [J]. *Nature*, 2001, 412 (6847): 628 ~ 632.
- [8] Armijo R, Tapponnier P, Mercier L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observation and tectonic implication [J]. *JGR*, 1986, 91 (B14), 13803 ~ 13872.
- [9] Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF, et al. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 1995, 14 (3): 658 ~ 676.
- [10] Pan Y, Kidd WSF. Nyainqentanghla shear zone: A late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan Plateau [J]. *Geology*, 1992, 20 (9): 775 ~ 778.
- [11] 吴章明, 曹忠权, 申屠炳明, 等. 西藏中部活动断层. 国家地震局地质研究所. 北京: 地震出版社, 1992. 183 ~ 192.
- [12] Cogan MJ, Nelson KD, Kid WSF, et al. Shallow structure of the Yadong-Gulu rift, southern Tibet, from refraction analysis of Project INDEPTH common midpoint data [J]. *Tectonics*, 1998, 17 (1): 46 ~ 61.
- [13] 吴章明, 曹忠权, 申屠炳明, 等. 念青唐古拉山南东麓断层的初步研究 [J]. *地震研究*, 1990, 13 (1), 40 ~ 50.
- [14] 钱方, 浦庆余, 吴锡浩. 念青唐古拉山东南麓第四纪冰川地质 [C]. 青藏高原地质文集 (4). 北京: 地质出版社, 1982. 34 ~ 50.
- [15] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏冰川 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [16] 吴中海, 赵希涛, 朱大岗, 等. 念青唐古拉山脉西布冰川区的冰碛层 [J]. *地球学报*, 2002, 23 (4): 329 ~ 334.
- [17] 吴中海, 赵希涛, 江万, 等. 念青唐古拉山东南麓更新世冰川沉积物年龄测定 [J]. *冰川冻土*, 2003, 25 (3): 272 ~ 274.
- [18] 赵希涛, 郭旭东, 高福清. 珠穆朗玛峰地区第四纪地质. 见: 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 (1966 ~ 1968) · 第四纪地质, 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 北京: 科学出版社, 1976, 1 ~ 28.
- [19] 郑本兴, 施雅风. 珠穆朗玛峰地区第四纪冰期探讨 [A]. 见: 珠穆朗玛峰地区科学考察报告 1966 ~ 1968, 第四纪地质 [C]. 北京: 科学出版社, 1982. 29 ~ 62.
- [20] 陈文寄, 李齐, 周新华, 等. 西藏高原南部两次快速冷却事件的构造含义 [J]. *地震地质*, 1996, 18 (1): 9 ~ 15.
- [21] 施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的深化及其与全球变化的联系 [J]. *冰川冻土*, 1998, 20 (3): 197 ~ 207.
- [22] 刘东生, 施雅风, 王汝建, 等. 以气候变化为标志的中国第四纪地层对比表 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20 (2): 108 ~ 128.
- [23] Molnar P, Deng Q. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in Asia. *J Geophys Res*, 1984, 89 (7): 6203 ~ 6228.
- [24] Wang Qi, Zheng Pei-zhen, Freymueller J, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 2001, 294 (5542): 574 ~ 577.

## QUATERNARY GEOLOGY AND FAULTING IN THE DAMXUNG-YANGBAJAIN BASIN, SOUTHERN TIBET

WU Zhong-hai<sup>1</sup>, ZHAO Xi-tao<sup>2</sup>, WU Zhen-han<sup>1</sup>, JIANG Wan<sup>1</sup>, HU Dao-gong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** Detailed geological mapping conducted in the Damxung-Yangbajain basin shows that several sequences of deposits of different origins have been accumulated since the Pliocene or early Pleistocene, of which the most prominent are glacial and fluvio-glacial deposits formed in the about 700 ~ 500, 250 ~ 125 and 75 ~ 12 ka intervals, indicating that three glacial periods have occurred in the Nyainqentanghla

Mountains since the middle Pleistocene. Study of a fault zone at the southeastern piedmont of the Nyainqêntanglha Mountains indicates that this fault zone consists of three secondary fault zones, which have the features continuous migration toward the interior of the basin and repeated activities. The several important faultings since the middle Pleistocene occurred about 700 ~ 500, 350 ~ 220, 140 or so and 70 ~ 50 ka. The heights of fault scarps which have offset the sediments formed since the middle Pleistocene decrease with younging stratigraphic ages, suggesting that the rates of vertical movement of the fault change between 0.4 and 2 mm/a, of which the average rate of long-term vertical movement during the Quaternary is  $1.1 \pm 0.3$  mm/a, while that during the Holocene is  $1.4 \pm 0.6$  mm/a.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; Nyainqêntanglha Mountains; Quaternary glaciation; N-S-trending graben; active faults

(上接第 344 页)

## APPLICATION OF THE 3D STRUCTURAL STRESS FIELD ANALYSIS IN THE DEEP GOLD EXPLORATION OF THE CENTRAL SEGMENT OF THE ZHAOYUAN- PINGDU FAULT ZONE, JIAODONG AREA

HAN Shu-qin<sup>1</sup>, DENG Jun<sup>2</sup>, YANG Li-qiang<sup>2</sup>, WANG Jian-ping<sup>2</sup>

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Academy, Beijing 100081;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100081*)

**Abstract:** On the basis of the construction of the rational geological, mechanical and mathematical models, the SuperSAP finite element numerical modeling is used to study the spatial distribution of the syn-mineralization strain energy and fluid migration potential of a gold deposit cluster in the central segment of the Zhaoyuan-Pingdu fault, Jiaodong area. The results show that the area with high strain energy and low fluid migration potential is likely to a favorable structural site for ore deposition. This information has great significance for guiding deep alteration-type gold exploration in the Jiaodong area.

**Key words:** numerical simulation; alteration-type gold deposit; deep gold exploration; Jiaodong area