

# 上龙王活断层及其史前大地震的初步研究

邢成起

(国家地震局兰州地震研究所)

## 一、断层基本地质概况

上龙王断层沿河西走廊榆木山东麓展布, 总体呈北北西走向。其南起大梁坡山, 向北经上龙王过黑河顺盘道山东麓到达小磁窑口、大磁窑口, 再向北沿走向至敖河山、刀山附近, 可能与北西西向的榆木山北麓断裂交汇(见图1)。

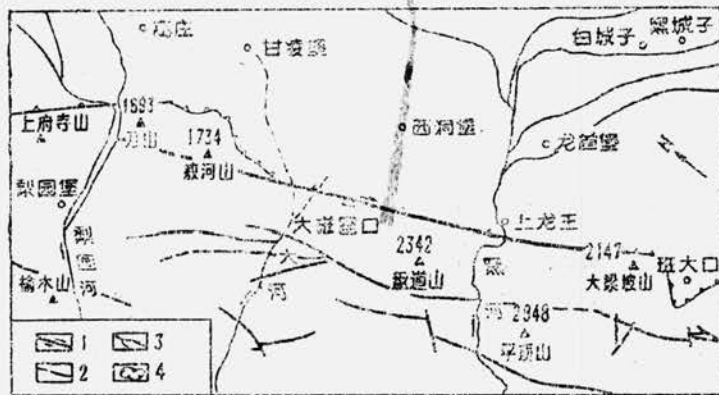


图1 上龙王断层地理位置图

1.上龙王断层 2.其他断层 3.河流 4.盆地

由于该断层主要沿山麓展布, 构成隆起与下降的分界, 再加上它在新构造时期的强烈活动, 其线性特征在航片上较为醒目。

断层的新活动常可导致各种微地貌的变形变位, 从而为活断层研究提供了极为重要的地质依据。沿该断层断错地貌最典型的地点是上龙王。在这里, 黑河横跨断层, 发育有明显的四级阶地(见图2)。断层错断了由Q<sub>3</sub>砾石组成的三级以上阶地, 并且在阶地 面上形成了坡向北东的断层线崖。该断层线崖延长约600米, 4级阶地上断层崖的高度远大于3级阶地上断层崖的高度, 也就是说, 在不同年龄的冲积物或地形面上形成了不同高度的断层崖, 反映出断层多期次活动的特点。

关于上龙王断层的活动类型, 断错地貌和断面特征表明其属挤压—右旋走滑型。在上龙王, 黑河4级阶地被右旋断开8米, 而断崖的存在同时又反映断层还具有垂向运动分量。在开挖探槽揭露的断层上升盘上, 断层擦痕十分清楚, 其倾向均为S30°E, 倾角有18°、21°和36°三组, 这充分显示了断层的右旋走滑兼垂向分量的运动性质。此外, 在剖面上, 断层多

\* 笔者曾两次考察该断层。参加1984年5月和1985年8月野外考察的同志分别还有李玉龙、吕太乙、刘建生和李玉龙、冉勇康。

表现为高倾角的逆断层性质。总之，断层的挤压—右旋走滑活动方式是和主压应力为NE—SW向的区域应力场相吻合的。

### 二、史前大地震的地质和微地貌遗迹

古地震研究是一种“将今论古”的方法。笔者具体应用微地貌法和开挖探槽的方法，在黑河河口发现和揭露了共反映四次古地震活动的证据。这些史前地震的标志可归纳为两种类型：（1）分布在断层上升盘上的多级地震小阶地；（2）断层崖及其崩积楔。

#### 1. 反映两次断错事件的地震小阶地

前已叙及，在上龙王断层错断了黑河3级以上阶地，形成了坡向北东的断层崖。此外，如图2所示，一个颇有趣的现象是，在有断层崖分布的断层上升盘，阶地非常发育，除了在断层下降盘也有对应分布的3级和4级阶地外，在它们之间还多出两级小阶地（由下至上分别命名为 $T_{震}^1$ 和 $T_{震}^2$ ），下面的小阶地 $T_{震}^1$ 的相对高度为2.7米，上面的小阶地 $T_{震}^2$ 的相对高度为3.0米，这两个小阶地仅在断层附近存在，稍远离断层即逐渐消失。在断层下降盘，河流没有形成这样的小阶地，这些特征表明此类小阶地受到断层的严格控制，它的形成与地震事件密切相关，是河流下切断崖的结果。很明显，对于这种阶地，其级数暗示着断层错动的次数，阶地的高度应近似等于断层一次错动的垂直断距。上述 $T_{震}^1$ 和 $T_{震}^2$ 代表两次错动事件，前者代表距今较近的一次地震事件，后者代表 $T_{震}^1$ 之前但靠近它的那次地震事件。为叙述方便，由老到新分别命名为地震A和地震B。

#### 2. 断层崖及其崩积楔

如图2所示，在黑河河口3级阶地面上靠近岸边的地方布设了探槽，图3为探槽南壁实测剖面图。剖面顶面为断崖斜坡面。剖面中地层由老到新可划分出五个单元层。其中单元（4）为断崖崩积楔，主要是砾石杂乱堆积，内含断层上升盘中单元（1）的崩落团块。楔体向上物质逐渐变细，并且由杂乱渐变为略具层理，反映出断崖快速崩落到逐渐趋于稳定剥蚀的演化过程。单元（5）为覆盖在断层上面的坡积黄土堆积，没有受到断层的错动，其厚度变化反映出一个埋藏陡坎的存在。

断层F产状 $240^{\circ}/57^{\circ}$ ，发育在断崖崩积楔与 $O_3$ 之间。崩积楔与断层面呈断层接触，意即在崩积楔形成之后断层又有错动，表现为砾石沿断层面有明显的定向排列。根据被错动地层的情况可以推断，沿该断层的最后这一次错动发生在崩积楔堆积之后，单元（5）开始沉积

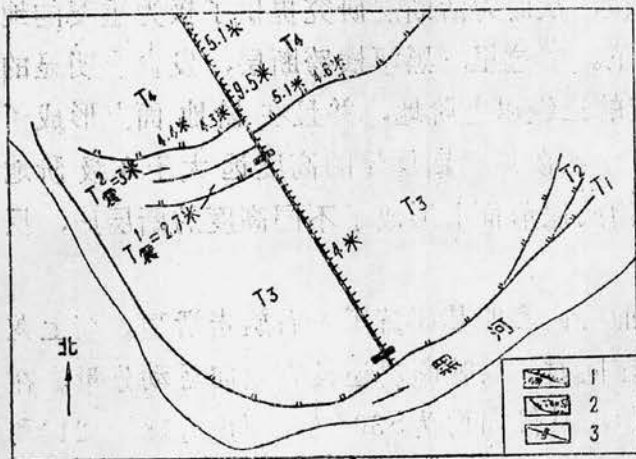


图2 黑河河口断层崖及阶地平面分布图

- 1. 断层崖及断距值，有短线一侧为断层下降盘
- 2. 阶地及其相对高度
- 3. 探槽位置

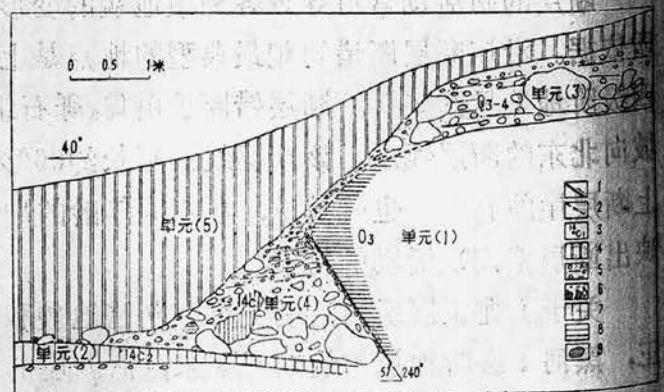


图3 上龙王断层黑河河口古地震剖面实测图

- 1. 断层
- 2. 剥蚀面
- 3. 采样点及编号
- 4. 坡积黄土
- 5. 冲积砾石层
- 6. 断崖崩积楔
- 7. 黄土层
- 8. 安山凝灰岩及硅质岩、板岩
- 9. 崩积楔中 $O_3$ 团块

增刊  
之前。此  
较早的一  
米，可  
得该剖  
量的总  
断崖后  
这与断  
层切割  
综  
D。  
继发生  
和B发  
和 $T_{震}^1$   
地震  
又  
直断  
恰好  
动（  
垂直

的位  
模而  
中  
模，  
地  
级  
错  
和  
河  
沙  
土



之前。此外，由于崩积楔本身还代表着一次错动事件，所以整个剖面共有两次古地震。其中较早的一次发生在单元(2)沉积之后，崩积楔堆积之前。崩积楔靠断面一侧的高度为1.7米，可近似代表该事件的垂直断距。实际上，这次事件的垂直断距可能为2米。因为野外测得该剖面所在的断层崖的总断距为4米，这个数值显然是上面得到的两次古地震事件之断距量的总和。另外，由图3可见，最后一次事件沿断层F形成的断崖自由面已全部被剥蚀掉，断崖后退并盖上了单元(5)，这似乎说明断层自最后一次错动以来已经历了较长的时间，这与断层在地貌上的反映相一致。在地貌上，一些较新的洪积扇(可能为数千年)没有被断层切割，断崖自由面均已消失，且坡度较缓，最大坡角一般仅22°左右。

综上所述，在黑河河口共发现和揭露了距今最近的四次古地震，由老到新依次为A、B、C、D。它们都是在4级阶地被深切至大约4.4米之后即现在断层上升盘4级阶地完成之后相继发生的。由图2可以看出，在4级阶地形成之后河流开始堆积3级阶地之前，首先地震A和B发生，即断层南西盘相继抬升，河流很快下切断崖形成了仅在上升盘分布的小阶地 $T_{震}^2$ 和 $T_{震}^1$ 。接着，沉积并形成3级阶地，此后沿断层又发生了两次突然错动，这就是地震C和地震D，地貌上表现为在3级阶地地面上断距达4米的断层崖。

对4级阶地上的断层崖进行测量，求得其断距为9.5米。前面已分析出地震A和B的垂直断距分别为3米和2.7米，C、D的断距各为2米，这四次地震的垂直断距之和为9.7米，恰好等于4级阶地的断距量。这一事实不仅说明自4级阶地形成以来该断层只发生过四次错动(A、B、C、D)，而且也说明地震小阶地( $T_{震}^1$ 和 $T_{震}^2$ )的高度可以代表相应地震的垂直断距量。

### 三、古地震参数、重复间隔以及断层滑动速率的估算

#### 1. 古地震的震中位置和震级

一般而言，一次地震发生，地震断层上地面形变最强烈的地区即是发生地震的宏观震中的位置。对于上龙王断层，目前保存的古地震产生的地面形变主要类型是断层崖，并且就规模而言，唯黑河河口处最大，因此黑河河口的上龙王一带可能就是地震A、B、C、D的震中位置。

关于各次古地震的震级，从它们的断距量来看，地震A、B、C、D可能具有相似的规模，至多或许是地震A和B的规模比地震C和D略大些。此外，由前述可知，发现的两种古地震遗迹都是断层直接错动的结果，因此它们都应该是大地震的标志。为了较精确地估算震级，首先需要获得古错动资料。垂直断距在上面已经求得。关于水平断距，测得4级阶地被错了8米，该数值显然比实际断错量偏小。由图2可见，在河流堆积3级阶地之前，地震A和地震B相继发生，断层右旋错动将北东盘的4级阶地向当时的河谷推进，因此河流对它的冲刷便必不可免。所以，8米断距并不是四次地震水平断距的总量，它可能只是一个比后两次地震(C和D)的水平断距量之和稍大些的数值。为得到较可靠的水平断距值，采用如下求法：已知四次古地震的垂直断距之和为9.7米；断面上擦痕的仰角为18°、21°和36°，其平均值为25°，如果忽略断层面倾斜的影响(对于高倾角断层误差较小)，可以求得四次地震的水平断距总和为

$$D_{11} = \frac{D_L}{\text{tg}\beta} = \frac{9.7}{\text{tg}25^\circ} = 20.8 \text{ (米)}$$

平均再次地震的水平断距为5.2米，对应于上列各垂直断距为3.0米、2.7米和2.0米的地震的

水平断距分别是6.4米、5.8米和4.3米。该数值和1932年昌马7.5级地震类似。

根据李善邦所著《中国地震》一书中采用的地震位移与震级的经验公式

$$M = 1.7 \log D + 6.9$$

求得这四次古地震的震级为8级左右。

按照以上对比和计算以及考虑到公式本身的误差，再根据我国大陆7级以上地震伴随有地震断层的事实以及西北地区几次大震的断错幅度估计，这四次古地震的震级可能在7—8级之间。

### 2. 古地震的时代、重复间隔以及断层滑动速率。

在古地震研究中，年代学的研究是一个极为重要的内容。目前除了<sup>14</sup>C定年等实验室手段外，许多学者还把注意力放在对地貌演变过程的分析上。本文将尝试采用T·C·Hanks等最新建立的地貌陡坎演化的数学模型来估算古地震的年代。

近几年来，美国学者在研究其西部地震历史时，系统地进行了断层崖年代学的研究[1][2]。1983年，T·C·Hanks、R·C·Bucknam和R·E·Wallace等人合作建立了地貌陡坎演化的数学模型[3][4]。他们认为地貌陡坎的演化可以用扩散方程来表示，该方程的形式是

$$\frac{\partial u}{\partial t} - k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \tag{1}$$

Hanks等用(1)式导出的数学模型研究了美国西部年龄为3—400千年、断距为1—50米范围的陡坎的演化。实践初步证明，该方法优于他们早先建立的关系曲线或统计式。

对于一个断层面直立的单次事件断层崖或者初始为台阶状的陡坎而言，有初始条件

$$\begin{aligned} U &= a \\ x &= 0 \\ t &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

a为断崖的半断距(或为其他地貌陡坎形成时的半高度)。则方程(1)的解是：

$$U(x, t) = a \operatorname{erf}(x/2\sqrt{kt}) + bx \tag{3}$$

这是Hanks等建立的模型之一。式中t是断崖(或陡坎)年龄；k是物质扩散系数，为常数。它只和陡坎本身的性质和气候有关。在美国西部半干旱气候条件下，k为1.1m<sup>2</sup>/ka(千年)；b是原始地面坡度。该模型可以模拟断层面直立的一次地震事件断层崖或阶地陡坎的演化。

利用Hanks等建立的模型计算获得的最终结果是kt值。显然，如已知k值，便可确定t值。反之，如已知t值，也可求得k值。

在黑河河口，断层崖、4级阶地以及两个地震小阶地T<sub>震1</sub>和T<sub>震2</sub>的自由面均已消失，坡面连续，极类似误差函数曲线的形状，采用Bucknam测量方法，对这些断层崖和阶地进行剖面测量，可以获得它们较精确的垂直断距值和高度值(见图2)。用模型(3)对T<sub>震1</sub>和T<sub>震2</sub>的实测数据进行拟合，求得其kt值分别为13.51m<sup>2</sup>和8.41m<sup>2</sup>。由于现在尚无现成的k值，考虑到河西走廊的气候条件类似于美国的西部地区，故取k=1.1m<sup>2</sup>/ka值进行计算，因此得t值分别为12300年和7700年。它们分别代表上升盘4级阶地和T<sub>震2</sub>小阶地的形成年代。另外，由图2可见，地震A是在河流下切4级阶地大约至4.4米(上升盘4级阶地的高度)的时候发生的，即地震A的年代也就是该4级阶地完成的时代，因此所求12300年也即

是地震成的，日

平均

平均

干限

即地

尤其时注

感将用

教

是地震A的发生年代。而代表地震A事件的小阶地T<sub>震</sub><sup>2</sup>是在地震A发生以后河流下切断崖形成的，其形成年代应晚于地震A的年代，该年代值为7700年。

由前述可知，自地震A以来，在上龙王断层上共有四次古地震，因此得7—8级大震的平均重复间隔为 $\frac{12300}{4} \approx 3100$ 年，断层的平均垂直滑动速率为 $\frac{9.7(\text{米})}{12300(\text{年})} \approx 0.8$ 毫米/年，

平均水平滑动速率为 $\frac{20.8(\text{米})}{12300(\text{年})} \approx 1.7$ 毫米/年。

如果采用Wallace提出的公式 $R = \frac{D}{S}$ <sup>[5]</sup>来求地震重复间隔的话，可得

$$R_1 = \frac{D_1}{S} = \frac{3.0(\text{米})}{0.8(\text{毫米/年})} = 3800(\text{年})$$

$$R_2 = \frac{D_2}{S} = \frac{2.0(\text{米})}{0.8(\text{毫米/年})} = 2500(\text{年})$$

即地震A、B、C、D的平均重复间隔在2500—3800年之间。

最后，需要指出的是，上龙王断层是位于民乐—张掖盆地西缘的一条活断层。从地貌上尤其是从坡度已变得较缓的断层崖来看，该断层自最后一次地震D发生以来已经历了较长的时间。因此，今后断层不论什么时候发生错动，都是有可能的。所以，对该区应给予必要的注意和更加深入的研究。

另外，扩散方程是建立在严格的数学计算基础上的，因此它对各种影响因素反映特别敏感。介质条件、气候条件、植被覆盖等因素的微小变化都可能会影响最终的计算结果。本文将该方法用于上龙王地区确定地貌陡坎的年代仅仅是一种初步尝试。有关该方法的普遍应用，计算精度以及k值的选用等问题尚需做更加深入的研究。

感谢李玉龙导师、刘百麓老师以及其他同志给予的指导和帮助，并请各位读者批评指教。

#### 参考文献(略)