

昌马断裂东段断层年龄的确定和大震复发周期的估计

侯珍清 王华林 康来迅

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文以野外地质调查资料为依据,利用地质的方法,讨论了昌马断裂东段的断层崖特征、断层位移量和沿昌马断裂带的古地震证据,确定了断层崖年龄和断层活动速率,粗略地估算了大震复发周期。研究结果表明自全新世以来北东东向断裂的活动性质由压性变为左旋张扭性;断层崖是断裂左旋张扭性活动的结果。

断层的水平位移具有分级特点,断层崖具有两个明显的坡度中断,其形成年龄分别为12760年和1880年。公元104年前后,沿昌马断裂可能发生过一次7~7.5级地震,大震复发周期为2620年(考虑蠕滑)和1500年(不考虑蠕滑),12760年和1880年以来的断层水平运动速率分别为4.5毫米/年和6.5毫米/年,水平位移与垂直位移之比值为4.7。

近十年来,国内外许多地震学者^[1-6],开始重视断层崖的研究,已获得了不同年龄的断层崖剖面、地貌特征的宝贵资料,并把断层崖的测定发展成为研究活断层的一个方法。将断层崖应用于地震危险性的估计的研究也取得了重要进展。我们运用断层崖形态几何学的研究方法,对昌马断裂东段断层崖进行了研究,初步确定了断层崖的年龄和断层活动速率。在此基础上,把昌马断裂带上的古地震证据与1932年昌马地震形变带的变形作了比较,对昌马断裂的大震复发周期作了粗略估算。

一、依据和方法¹⁾

根据同位素蜕变的原理、测定放射性同位素的年龄是确定断层崖的年龄的一种行之有效的办法。由于西北地区干旱,断层崖上往往缺少可供测定年龄的样品,给断层崖的年龄确定带来了困难。但是,干旱的气候条件可使断层崖得以良好地保存,为运用地质方法确定断

1) 邓起东等,断层崖研究与地震危险性—以贺兰山东麓断层为例,1982,

层崖年龄提供了可能性。

断层崖形成后，要遭受外营力的剥蚀作用，因而不同时代形成的断层崖就会具有不同剥蚀程度和坡度角，它们为确定断层崖的形成时代提供了重要的信息。如果组成断层崖的物质比较均匀，构造活动和外营力条件基本稳定，则断层崖的演化如图 1 a 所示。随着外营力的不断剥蚀，断层崖的脊部消失，自由面后退，剥落的物质在断层崖底部堆积起来形成岩屑坡*。断层崖剖面将由 SF 演化成 II'……直到 RR'。随着断层崖的演化， θ 角越来越小，断层崖越来越缓直至断层崖休止角(α)。因此，在一定时间内，断层崖的坡角大小可以反映断层崖的形成年代。

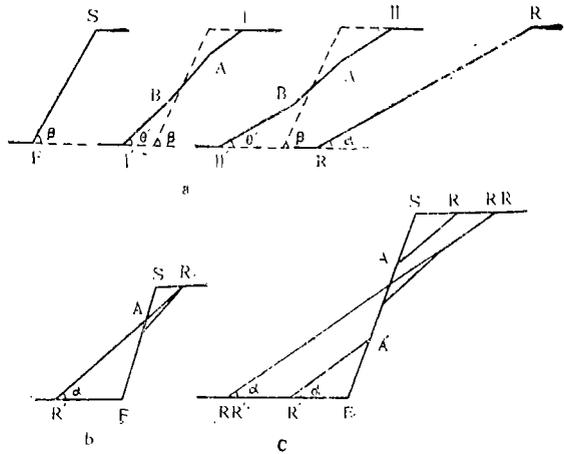


图 1

a. 断层崖演化理想模式图 b. 简单断层崖的演化模式 c. 复合断层崖的演化模式

Fig.1a An ideal evolving process of fault-scarps.

b An evolving of single fault-scarps.

c An evolution of compound fault-scarps.

还应进一步指出的是，在剥蚀过程中，断层崖脊部剥蚀程度和断层崖自由面的剥蚀程度不相同，因而就在断层崖中部出现AB段（图 1 a）。在断层崖的演化过程中，AB段的坡角要比脊部剥蚀后坡角和断层崖底部堆积的岩屑坡坡角要大。AB段的消失主要取决于断层崖的高度，断层崖越高，AB段消失所需要的时间就越长。

R.C,Backnam^[4](1979)等研究美国内华达地区断层崖时，发现断层崖的高度达3米时，断层崖的坡角与其年龄呈负对数相关。统计的经验公式为： $\theta = -8.51\lg T + 52.5$ 。式中 θ 为断层崖坡角（度），T为断层崖年龄（年）。

图 1 a是断层一次错动形成的断层崖演化模式。断层再次活动就形成图 1 c所示的复合断层崖。此时形成的新断层崖AA'将再次遭受如图 1 a所示的演化过程，正个复合断层崖将形成坡角不同的坡度中断段。因此，不同的坡度中断段可以反映断层的多次错动的幅度。地震与断层的快速错动有关，断层错动的幅度和次数可能与地震强度和地震次数相对应。因此，

*自由面、脊部、岩屑坡、上原始面和下原始面等是Wallace^[1](1977)已描述过的断层崖几何要素，本文直接引用了这些术语。

根据不同坡角求得断层崖年龄,就可大致估计一定震级的地震复发周期。

二、断层崖年龄的确定和断层活动速率估计

昌马断裂东段的北东东向断层的走向为北 80° 东,断层面面向南倾。第三纪末,断层显示了挤压活动的特点,断层南盘的前震旦纪地层逆冲到第三纪红色砂岩之上。而断层的近期活动表现为左旋张性活动,断裂南盘沿原压性断层结构面下降,并向北东东方向产生了强烈的水平运动;其北盘相对南盘上升,向南西西方向作水平运动,形成年轻的断层崖。断层崖的形成模式如图2a所示。断层崖的高度(D)是由错开的山脊面的高度(D_s)和断层垂直位移量(D_L)迭加而成,故断层崖的高度不能反映断层的垂直位移量。

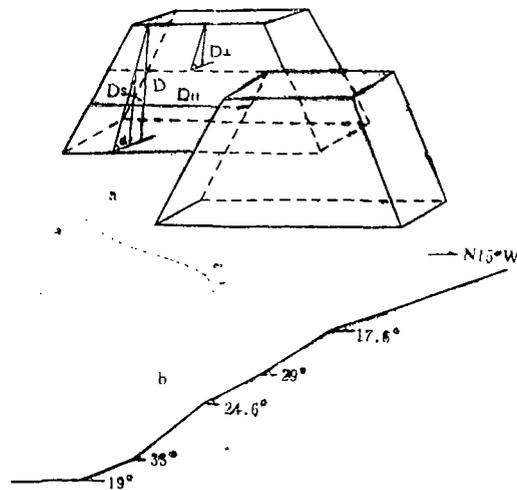


图 2

a. 大泉口—西水峡断层崖形成模式图

b. 大泉口—西水峡断层崖综合剖面图

Fig. 2 a A forming model of Daquankou-Xishuixia ditch fault-scarps.

b A synthetic profile of Daquankou-Xishuixia ditch fault-scarps.

对昌马断层东段6条实测断层崖剖面进行综合分析后(图2b),发现断层崖具有两个明显的坡度中断段。从图2b中可以看出,两个坡度中断段的主坡角*分别为 17.6° 和 24.6° 。第一坡度中断段的 29° 代表了图1a所示的AB段。第二坡度中断段的 33° 代表了断层又一次快速运动形成的断层崖的AB段。将两个坡度中断段的主坡角分别代入公式

$$\theta = -8.51\lg T + 52.5^*$$

则得到两个坡度中断段所对应的断层崖的形成年龄,分别为12760年和1880年。说明昌马断裂在距今12760年和1880年发生过两次快速活动。

断层通过山脊和冲沟时,使其发生了明显的左旋水平错动。测量结果表明(图3),断层的水平错动量可分三级:6条大冲沟和10条山脊反映的一级错动量平均为57米,4条次-

*考虑到该断层崖的形成特点,这里取断层脊部剥蚀后的平均角度。

*该公式使用于断层崖高达3米,半干旱气候条件地区,昌马断裂断层崖高度及气候条件是满足该公式的要求的。

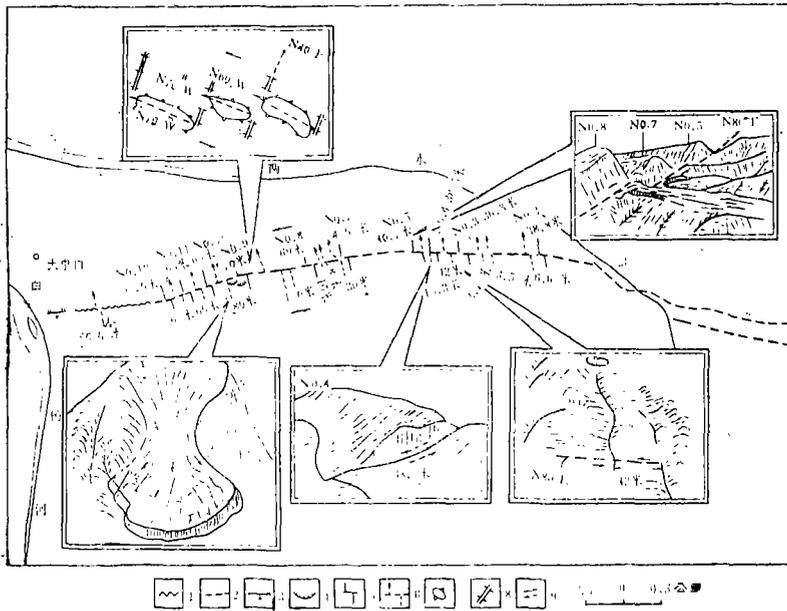


图3 大泉口—西水峡断裂和地震形变带

1. 裂缝 2. 断层线 3. 逆断层 4. 斜坡 5. 山脊错动 6. 冲沟错动 7. 鼓包 8. 张裂缝 9. 力的方向

Fig. 3 Fault zone and earthquake deformation zone of

Daquankou-Xishuixia

级冲沟反映的二级错动量平均为12.3米；跨越昌马地震形变带的7条小冲沟显示了1932年昌马地震产生的4.3米的平均错动量，其最大错距为6.6米。考虑到昌马断裂断层崖的形成特点，测量了8个断层崖的高度，得到断层垂直位移量为12.2米。断层的水平位移与垂直位移之比为4.7。由此求得12.3米和0.9米的水平位移量所对应的垂直位移量分别为2.6米和0.9米。0.9米的垂直位移与1932年昌马地震断裂带在此段的垂直位移（0.5~1米*）大致相当。将57米、12.3米的水平位移量和12.2米、2.4米的垂直位移量分别作为12760年以来和1880年以来断层活动所产生的位移量累加值，由公式 $V = \frac{D}{T}$ ，（V为断层运动速率，D为断层位移量，T为形成D所需的时间）求得12760年以来和1880年以来断层的水平位移速率分别为4.5毫米/年和6.5毫米/年；垂直运动速率分别为1毫米/年和1.4毫米/年。

以上事实说明，自全新世以来北东东向断层的活动性质由压性转变为左旋张扭性，属于以水平运动为主，兼有倾滑分量的走滑断层，其水平位移与垂直位移之比（4.7）是基本稳定的，断层的近期活动有增强的趋势。

三、古地震证据和大震复发周期估计

前面讨论的断层崖分段和水平位移分级可能与古地震事件有关。除此之外，沿昌马断裂

*作者现场实测结果。

发育古滑坡、鼓包、陡坎和第四纪断层。1932年昌马地震时，昌马断裂再次活动，沿断裂出现地震鼓包、陡坎和滑坡。下面对这些古地震遗迹分别进行描述。

1. 古鼓包

1932年昌马地震鼓包按其规模可分三级(表1)。沿昌马断裂在灰条沟、放马坡、大泉口等处发育古鼓包，按其规模可分两级，其大小与昌马1932年地震鼓包的I和II级大致相当。昌马地震鼓包具有椭圆形的完整轮廓，其上发育着张裂缝、鼓包与张裂缝首尾相接呈反“多”字形排列。古鼓包其上野草丛生，见不到张裂缝，也没有与鼓包首尾相接的张裂缝，但仍保留着鼓包的椭圆形形态，其高度为1—2米，小于昌马地震I级鼓包的高度。古鼓包和昌马地震鼓包的长轴方向

表1

级别	长度(米)	宽度(米)	高度(米)
I	20—35	7—9	2—3
II	5—10	2—3	0.5—1
III	1—2	0.5	0.1—0.2

均为北西向，斜列式排列指示了昌马断裂的左旋运动。同一能级的地震，在同一条断裂上形成的地表形变的规模应该是大致相当的，所以可以认为沿昌马断裂发生的古地震的强度约为7—7½级。

2. 古陡坎

沿1932年昌马地震形变带，在灰条沟、安门河坝和雅儿河的山前斜坡地带出现高2—4.5米，南升北降的北西西向地震陡坎，在小口子、红窑子等地出现高1—2米的北北西向陡坎，在月牙达板、大泉口发育1—3米，北升南降的北东东向反向陡坎。除此之外，在香毛山北麓发现高3—4米的北西西向古陡坎，陡坎南升北降；在红窑子发现高达5米的北北西向古陡坎，是1932年昌马地震在此处形成的陡坎的高度的2—3倍；月牙达板出现高8米的北东东向反向陡坎，1932年地震时形成的陡坎恰好迭加在古陡坎之上，从中扣出1932年地震陡坎的高度(3米)，古陡坎的真正高度为5米。古陡坎因长期剥蚀，其脊部已消失，坡角变缓，其上生长野草；1932年昌马地震陡坎的脊部保存完好，自由面新鲜可见，较古陡坎陡立。这一事实说明古陡坎与昌马地震陡坎是同成因的。古陡坎的高度较1932年地震陡坎的高度大的事实说明，沿昌马断裂曾发生过几次古地震事件。

3. 古滑坡

古滑坡和1932年地震滑坡，沿昌马断裂分布，在灰条沟、红窑子，白杨河西和大泉口等地均有发育。二者的规模相当，滑向基本相同，往往在同一地点发育(大泉口，红窑子)。白杨河西，昌马地震滑坡直接盖在古滑坡之上。1932年地震滑坡富含水，航片上表现为影象灰度不同，1932年地震滑坡为灰黑色度，而古滑坡则为灰白色度。同时前者冲破草丛，后缘牵引现象明显，其上裂缝发育，呈放射状。而古滑坡只保存着滑坡体的完整形态。从白杨河西古滑坡的迭覆关系和保存程度分析，古滑坡可分三期。如果每一期滑坡代表一次古地震事件，那么沿昌马断裂可能发生过三次破坏性地震。当然，其它原因也可引起滑坡，但就昌马地震断裂而言，我们认为地震诱发是滑坡形成的直接原因。

4. 第四纪活断层

据前人报导和作者的现场考察，发现硷泉子、香毛山北麓、大泉口、月牙达板和石庄湾子等地发育第四纪断层。以上各处断层的活动性质和特点与该地段昌马地震形变带基本一致。例如，月牙达板和大泉口的第四纪断层为左旋张扭性，显示北升南降的特点，与该处昌马地震

形变带的破裂性质和变形特点完全一致¹⁾。石庄湾子和灰条沟的1932年地震陡坎和隆脊是基底断裂由南向北逆冲的结果,代表压性结构面,石庄湾子第四纪断层^[7]也显示了由南向北逆冲活动特点。硷泉子第四纪正断层和石庄湾子第四纪逆断层均错断了全新世地层。

对这些断层详细观察发现,断层面较平直,断层两侧牵引现象不明显,反映了快速滑动的特点,其破裂应属于粘滑性质,故这些第四纪断层是古地震的产物。

综上所述,昌马断裂是一条活动强烈,强震活动较为频繁的构造带。从已述及的古地震遗迹分析,沿昌马断裂带发生过几次古地震,我们认为距今1880年的断层崖坡度中断段,代表了一次古地震事件,其强度在7-7½级范围内。即公元104年前后,沿昌马断裂发生过一次7-7½级的古地震。它可能和公元180年高台7.5级地震发生在同一地震活跃期内,标志着一个历史时期内的地震活动高潮期。

Wallace^[5](1970)对圣安德烈斯断层的研究发现,利用一次地震形成的错动量和断层的平均滑动速率,可估计与该次地震震级相应的大震复发周期。他的研究表明,断层的蠕变速率越大,大震复发周期越长。公元104年的古地震事件与1932年昌马地震的时间间隔为1828年,由公式 $\Delta T = D / (V - C)$ 〔式中 ΔT 为大震复发周期(1828年), D 为一次地震的最大错动量(6.6米), V 为断层的总滑动速率(6.5毫米/年), C 为断层的蠕变率(毫米/年)〕,求得断层的蠕变速率占断层总滑动速率的44%。假定断层的蠕变速率占总滑动速率的比例是稳定的,则求得距今12760年以来,断层的蠕变速率为1.98毫米/年;将其代入公式 $\Delta T = D / (V - C)$ 〔 $D = 6.6$ 米, $V = 4.5$ 毫米/年〕,求得12760年以来7-7½级地震的复发周期为2620年。如果断层的滑动均是由粘滑所致,则7-7½级地震的复发周期为1500年。昌马断裂东段自全新世以来及1932年昌马地震断裂在此段均以水平错动为主,故大震复发周期以昌马断裂的水平滑动速率和1932年昌马地震断裂在该段的最大水平错动量为依据进行估算。

1932年昌马地震与104年古地震的重复周期为1828年,它恰好落在1500~2620年之间,所以我们认为1500~2620年的地震复发周期基本是可信的。尚需指出的是如果把年龄为12760年的断层崖坡度中断段作为一次古地震考虑,那么它与年龄为1880年断层崖坡度中断段所指示的古地震的间隔为10880年,这一周期显然太长。如前所述,断层的垂直位移为12.2米,据1932年昌马地震在此段形成的断层的垂直位移分析,如此大的垂直位移不可能是三次断层快速运动的结果,但由于断层崖自身形成的特殊性(上文已讨论)和现有观察认识水平还不能识别出距今12760年至1880年间断层每次活动所产生的垂直位移和坡度中断,因此使10880年内的古地震事件被掩盖。

以上是我们将Bocknam和Wallace的断层崖研究方法和大震复发周期估计方法,用于西北地区所作的一次尝试,根据现有资料得到的一些结果有待今后工作的进一步验证和完善。

参 考 文 献

[1] R. E. Wallace, Profiles and age of ground fault scarps, north-central Nevada, B. G. S. A., Vol. 88, 1977.

1) 王华林, 1932年昌马7.5级地震的地震地质特征及地震成因探讨, 1984.

- [2] R. E. Wallace, Time-history analysis of fault scarps and fault-traces, Sixth world Conference on Earthquake Engineering, 1977.
- [3] R. E. Wallace, Patterns of faulting and seismic gaps in the great basin province, U.S. Geol. Surv. Open-file Rept. 78-943, 1978.
- [4] R. C. Bucknam and R. E. Anderson, Estimation of fault-scarp ages from a scarp-height-slopeangle relationship, Geolgy. Vol. 7, 1979.
- [5] R. E. Wallace, Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault, California, B. G. S. A., Vol. 81, 1970.
- [6] 邓起东等, 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, 1984.
- [7] 时振梁等, 1932年昌马地震破裂带及其形成原因的初步探讨, 地球物理学报, Vol. 7, № 4, 1974.

AGE OF FAULT-SCARPS AND EARTHQUAKE RECURRENCE INTERVALS ON CHANGMA FAULT

Hou Zhenqing Wang Hualin Kang Laixun

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau, Lanzhou, China*)

Abstract

Based on authors' field investigations, using geological methods, in the paper we have mainly discussed the fault-scarp features and displacement features in eastern Changma fault zone, some paleoseismic evidences along the fault zone, including the faults formed in Holocene Epoch, ancient slump, drumlin and fault cliff and coarsely ascertained the displacement rates of the NEE fault, the age of the fault-scarps and earthquake recurrence intervals along the fault zone.

The studied results show that the active properties of the NEE fault have transformed themselves from extrusion into left-lateral shear-tension Since Holocene Epoch and the left-lateral shear-tension activity of the fault did form the fault-scarps.

An earthquake ($M_s=7.5$) probably once occurred along Changma fault zone about A. D. 104. The recurrence intervals for magnitude $7-7\frac{1}{2}$ earthquake are 2620 years when creep rate is considered, and 1500 years when creep rate is not considered. The strike displacement rate of the fault is 4.5mm/Yr during 12760 years, and 6.5mm/yr during 1880 years. A ratio of strike displacement to the dip is 4.7.