

鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义

闻学泽¹⁾ C. R. Allen²⁾ 罗灼礼¹⁾ 钱 洪¹⁾
周华伟²⁾ 黄伟师³⁾

1) 四川省地震局; 2) 美国加州理工学院地震实验室; 3) 国家地震局分析预报中心

摘要

由五条左旋走滑的主要分支断层组成的鲜水河全新世断裂带,以惠远寺拉分区为界,可分为结构特征不同的两段:北西段结构较为简单;南东段则表现了由若干分支断层组成的复杂结构。这种断裂结构的分段性,造成了历史强震活动性的分段差异,同时也可能是断层近代滑动速率空间变化的主要原因。

该断裂带主要的几何特征之一是具有“多重羽列”性质。本文按阶区尺度的相对大小,作了羽列级别划分。其中,A 级羽列不连续区伴有明显的地貌效应,是该断裂带分段的界限,其对历史上 7 级左右地震的破裂具有较明显的终止作用;B, C 两级羽列不连续区也有一定程度的地貌显示,但对历史上大地震的破裂不具有明显的终止作用;更低级别的羽列几何则是在第四纪盖层中发育的地震地裂缝的主要组合型式。

另一种重要的几何特征是断层弯曲。无论沿整个断裂带还是在一些断层段上,均存在着不同程度的走向弯曲。局部弯曲的结果,可能是造成一些大地震时不对称破裂扩展和烈度衰减的重要几何影响因素,同时也可能是大地震或强震原地重复的构造条件之一。文中最后分析和讨论了两次历史大地震发震断层的立体模型。

关键词 分段性;多重羽列;拉分区;断层弯曲;破裂终止

一、引言

川西鲜水河断裂带上除了发育各种类型的近代断错地貌外,自 1700 年以来的若干强震或大震产生的地表破裂也几乎沿全带发育,因此,它是一条名符其实的全新世断裂带。到目前为止,较详细的几何特征及其与地震关系的研究方面,仍然是该带地震地质研究的薄弱环节。然而,几何结构是活动断裂带,尤其是走滑型活动断裂带地震构造研究的重要内容。通过这种研究,可了解活动断裂带中不同尺度或层次的结构特征以及具体结构部

1987 年 9 月 7 日收到本文初稿,1988 年 4 月 26 日决定采用。

位的运动及受力方式,是研究地震发生的构造条件、破裂传播的方向性、破裂起始与终止、地震重复性、滑动速率的空间变化、地震前兆分布等问题的重要基础^[2,6,8,18,21]。同时,这一研究可以提供用于构造物理和数学模拟的、较详细而准确的断裂格局。

本文着重研究鲜水河全新世断裂带中不同尺度或级别的几何形态及其活动构造表现;对整个断裂带进行结构上的分段;并对一些部位几何特征的地震构造意义以及在地震破裂传播中所起的作用作了初步分析。

二、断裂带总体结构与分段性

在鲜水河断裂带中,具有明显全新世或近代活动的主要断层形迹从东谷北西一带开始,延伸至磨西以南,全长300余公里,由鲜水河、雅拉河、色拉哈(亦称康定断层)、折多塘以及磨西五条主要分支断层组成(图1)。在总体展布上,该带自北西朝南东走向方位发生了约40°的顺时针偏转(由北西朝南东观察),显示了一条向北东方向明显弯曲的走滑活动断裂带。

从图1清楚地看到:整个断裂带以惠运寺附近为界,表现出北西和南东两个结构特征不同的段落。

北西段即鲜水河断层,长约200公里,表现出较单一的结构特点,很少有次一级的分叉活动断层相伴生,反映了以左旋水平走滑为主的全新世活动方式^[22]。当然,该段也存在一些局部的羽列不连续以及轻度的走向弯曲,对此,将在下文中论述。

南东段主体由另外四条主要分支断层组成,长约110余公里,每一分支断层均表现了不同程度的走向弯曲;同时,在一些部位还伴有次一级的分支(图1)。在雅拉河、色拉哈以及折多塘三条断层之间,分别夹持有大炮山与折多山两个断块^[1],它们在地貌上均表现为抬升的高山山地,反映了各断块间存在一定的相对垂直运动分量。显然,这与整个断裂带沿走向发生约40°的顺时针偏转弯曲有关:弯曲的结果使得在南东段上遭受来自于左旋运动的水平侧压增加,引起位于雅拉河、色拉哈和折多塘断层之间的两个断块发生向上的“楔进”作用,从而形成抬升的山地。

这种断裂带结构上的分段性,也明显地反映在地震活动的分段差异上(图2):1700年至1987年,北西段共发生 $M \geq 6$ 地震16次,而南东段在相同的时期内仅发生 $M \geq 6$ 地

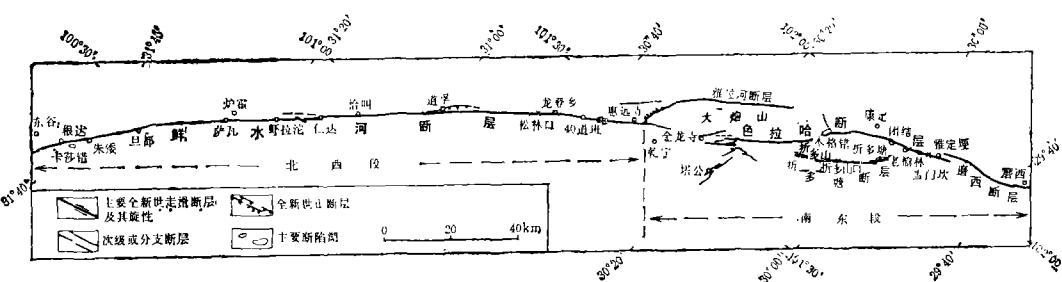


图1 鲜水河全新世断裂带的总体结构与分段

震 6 次；再者，北西段在 1747 年至 1816 年的强地震活跃期之后，经历了约 77 年的平静期，而南东段在 1700 年至 1786 年的活跃期之后，经历了约 170 年的平静期。这说明北西段的强地震活动频度明显高于南东段。

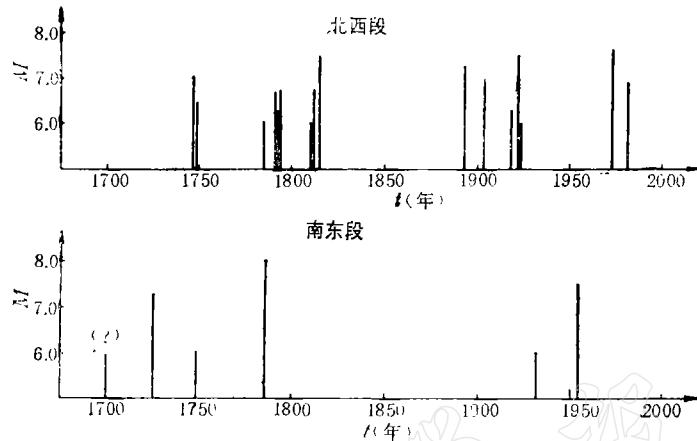


图 2 鲜水河断裂带北西段和南东段历史地震 ($M \geq 6$) 活动的 $M-t$ 图

在我们合作研究取得的另一项成果中，初步给出了该断裂带的近代地质滑动速率。其中，在北西段的近代滑动速率为 $15 \pm 5 \text{ mm/a}$ ；在南东段康定附近的色拉哈断层上为 5 mm/a ，在惠远寺南东的雅拉河断层上约为 1 mm/a ^[12]。尽管目前未获得折多塘断层的滑动速率，但可以推论：作用在南东段上的雅拉河、色拉哈和折多塘三条分支断层上的滑动速率总和，应小于或等于北西段上的 $15 \pm 5 \text{ mm/a}$ 。这是因为：北西段上集中沿单一断层的滑动，到了南东段势必以某种比例非均匀地分配到各分支断层上。因此，断裂带结构的这种分段差异，也可用于对滑动速率的空间变化作初步解释。

以上表明：从结构差异上显示出来的分段性，造成了该断裂带强地震活动性的分段差异，同时也可能是断层滑动速率空间变化的重要原因之一。

三、断裂带的几何特征

(一) 多重羽列特征

呈羽列排列的断层组合，是走滑断裂带最主要的一种几何特征^[13,14]，羽列不连续性与地震的孕育和发生有密切的联系^[8,21]。这里我们将要论述的是：鲜水河全新世断裂带是由不同级别的羽列断层段组成的“多重羽列”^[8]断层系统。下面，我们对该断裂带中，不同尺度的羽列几何结构进行相对级别的划分，并分述各级别羽列不连续区的活动构造效应及其组合图形。这种级别划分的意义主要是：揭示不同尺度或层次的羽列几何特征细节，以利于进一步分析其各自的地震构造意义。为了便于描述，采用定义羽列阶区尺度的两个术语：间距 (separation)——两羽列断层(段)之间沿垂直于走向的间隔距离；叠距 (overlap)——两羽列断层(段)彼此沿走向上的重叠距离^[19]。其中，间距的大小，是我们划分羽列几何不连续相对级别的主要尺度，而叠距的变化往往较大。

1. A 级羽列不连续 从图 1 看到：惠远寺附近存在着一处整个断裂带中规模最大的左阶羽列不连续区，它位于鲜水河与雅拉河两断层之间，距离约 9.5 公里，叠距则很难估计。它也是该断裂带的北西段和南东段的分界。当左旋走滑的雅拉河断层延伸到该左阶区边缘时，逐渐偏转为近东西向，并斜贯阶区，交于鲜水河断层上。该近东西向的断层段在地貌上反映向北陡倾，在惠远寺南侧表现出明显的晚第四纪正断层作用；稍往东，当其切错晚第四纪冰碛物时，垂直位错约 22 米，左旋水平位错约 10 米，表现了平移——正断层作用。这种现象反映了从雅拉河断层到该近东西向断层段上，存在着从左旋走滑作用—左旋正断层作用—正断层作用的转换运动。

呈钝角三角形的惠远寺盆地是一个发育于该 A 级左阶羽列区中的拉分盆地^[1]，主要以前述近东西向断层段和鲜水河断层的最南东段为断陷边界。面向盆地的年青正断层陡坎（照片 1，见图版），沿该盆地的南西边界发育，反映了鲜水河断层在此也发生了从走滑断层作用向正断层倾滑的运动转换。显然，惠远寺 A 级左阶区的存在，对于该断裂带南东段和北西段的左旋走滑运动，具有较明显的调节作用。

2. B 级羽列不连续 航片的判读表明：色拉哈与磨西两断层在雅家埂附近呈现左阶羽列不连续。阶区的最大距离为 1.6 公里，叠距约为 2.5 公里（图 3）。它发育于同一断层段上的不同分支断层之间，故属于整个断裂带中第二级别的羽列不连续，即 B 级。

尽管该左阶区附近地处近代抬升强烈、下切作用十分显著的贡嘎山北东麓，地形起伏很大，但阶区内仍然显示出相对较平坦的地形，并发育一小湖泊，反映了有一定的负地形效应。作为该阶区西侧边界的色拉哈断层最南段，表现了局部的近代断陷作用^[1]。因此，这一左阶区也具有一定程度的拉分构造效应。

3. C 级羽列不连续 C 级羽列不连续发育在同一分支断层的不同段落之间，尺度为：距离数十米至 400 米不等、叠距零至 1 千米不等，少数情况下叠距为负值。这种尺度的断层不连续已难以在图 1 中表示出来。

这一级别的羽列阶区，当处于相对平坦的地形（而不是处于陵削作用强烈的陡坡）条件下，也伴有明显的垂直形变的地貌显示。例如，鲜水河断层在炉霍北西格鲁村附近的一处 C 级右阶区发生了明显的晚第四纪抬升，形成一小丘；而在该抬升的北西侧，晚第四纪阶地坎沿断层被左旋断错了约 138 米（图 4）。

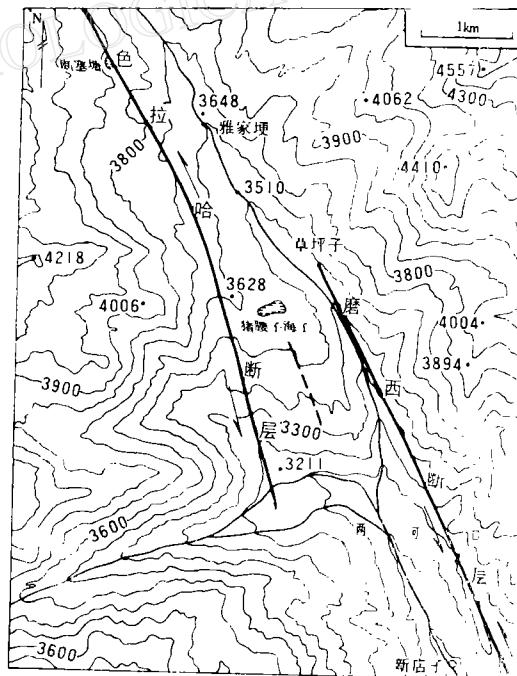


图 3 色拉哈与磨西断层之间的左阶羽列不连续及地貌效应（粗线为断层，细线为等高线）

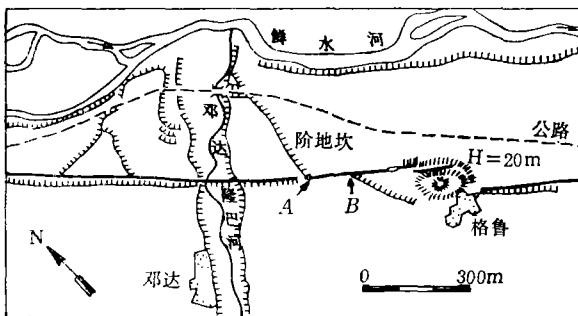


图 4 炉霍北西格鲁附近, 鲜水河断层中的一处右阶羽列不连续及其垂直抬升效应

中 A, B 点之间), 反映了该抬升是断层的左旋走滑运动在此右阶区向垂直运动转换的结果。又如, 鲜水河断层在拉托附近的一处 C 级左阶不连续清楚地反映在 Heim 1930 年针对 1923 年 $7\frac{1}{2}$ 级地震破裂带拍摄的一张照片上(照片 2, 见图版)^[17]: 地表破裂形迹 F_1 和 F_2 呈现左阶羽列, 阶区内部发生较明显下陷, 形成浅的断陷塘。

色拉哈断层在色拉哈垭口北西的一段, 也表现出 C 级右阶羽列排列的几何特点, 这在航片上有十分清楚的显示(照片 3, 见图版)。另外, 总长度仅 30 公里的折多塘断层, 同样也由五段长度不等的 C 级羽列断层段组成(图 7a), 在四处不连续阶区中, 两处为左阶, 另两处为右阶。

4. 更低级别的羽列几何 沿鲜水河全新世断裂带, 近代强震或大地震时产生的地裂缝带(照片 3, 4, 5, 见图版)最普遍而最重要的几何排列方式是“反多字型”^[3], 即由彼此呈右阶的左旋地裂缝和裂缝之间的挤压小隆起组成的一种“逆阶型”(邓起东称为“正错列型”^[6])几何图案。照片 5 即这种几何结构的典型。显然, 这是地震时, 沿基岩中断层主滑面的左旋位移在第四纪盖层中产生次级破裂的结果。这种羽列几何的级别自然低于 C 级。

实际上, 地震地裂缝带, 也是由不同级别的羽列裂缝组成。最好的例子是 1973 年炉霍 7.6 级地震产生的位于震中的地裂缝带, 清楚地反映了右阶的二重羽列性: 较高一级裂缝长度为 30 至 90 米, 与地震断层走向夹角为 $20\text{--}25^\circ$, 羽列不连续部位的间距为 15—20 米; 每一裂缝又由更低一级的、间距为 1—4 米的右阶羽列裂缝组成。较大和较小两种规模的挤压鼓包分别形成于较高和较低级别的右阶裂缝之间。

以上说明: 由不同尺度或级别的羽列断层或地震裂缝组成的“多重羽列”结构, 是鲜水河全新世裂带最主要的几何特征之一。

(二) 弯曲断层段的几何特征

从图 1 看到: 除了整个断裂带沿走向发生约 40° 的顺时针(由北西朝南东观察)弯曲外, 还在一些局部断层段上有不同曲率及形态的弯曲几何特征显示。现择其要者分述如下:

1. 轻度弯曲断层段 King 和 Nabelek (1985) 曾注意到炉霍附近的一段鲜水河断层, 具有弯曲的特点^[18]。据我们的调查, 该断层段走向上发生了 $10\text{--}15^\circ$ 的顺时针偏转,

形成一段轻度弯曲的弧形断裂(图6)。弯曲的弧顶位于且都与炉霍之间。组成该弧形断裂的是若干呈左阶或右阶的C级羽列断层段。

此外，龙登附近的一段鲜水河断层以及折多塘断层也表现了轻度弯曲的特征。

2. 双弯曲断层段 从色拉哈垭口至老榆林长约35公里的一段色拉哈断层，是具有显著双弯曲几何特征的较好例子(图5)。该段断层从北西向南东，首先发生约30°的逆时针弯曲，然后逐渐顺时针弯曲20°。在逆时针弯曲部位，断层伴有明显的局部拉张断陷作用，形成了整个断裂带中最大的断陷湖——木格错。该湖的南岸发育有高大的、向北倾斜的断层崖；在顺时针弯曲部位，断层新活动伴有明显的逆冲分量。图5右上角剖面图示意了在这一部位由断层的逆冲运动分量形成的全新世断层陡坎，其高6.5—7米，南西盘为上升盘，与陡坎大约同时代的左旋水平位错约为25米。另从照片6看到，在该顺时针弯曲段中的一处C级右阶羽列不连续部位附近，由于断层南西盘相对上冲，从而形成阶列的边坡脊(side-hill ridge)地形。

上述双弯曲的色拉哈断层段不同部位的断层新活动特征及其地貌效应，与 Crowell (1974) 总结的双弯曲断层运动的变形模式^[46]是一致的。另外，磨西断层也有轻度双弯曲的趋势(图1)。

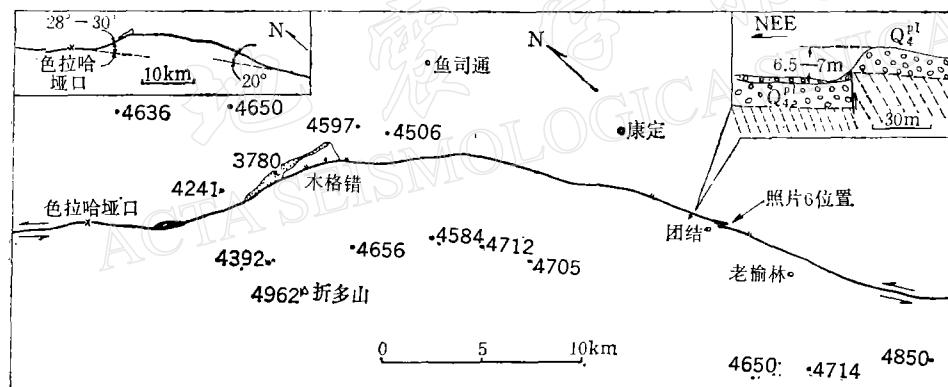


图5 沿色拉哈断层的双弯曲段

(左上角小图示意弯曲几何特征,右上角小图为指示地点的断层新活动剖面,数字为高程)

四、断层几何的地震构造意义

1. 羽列不连续与地震破裂终止的关系

Sibson (1985) 据一些资料推测：走滑断裂的羽列不连续部位在地震发生时起着调节破裂速度、控制破裂起始与终止点、能量辐射与吸收等作用^[21]。这里，我们仅就鲜水河全新世断裂带上A, B, C三级羽列不连续与地震破裂终止的关系作初步分析。

1893年以惠远寺北西侧为震中，发生了一次7级左右地震^[10]，据 Heim 1930年的调查以及我们此次考察的结果，其地表破裂朝北西至少可达松林口附近^[12,17]，朝南东大致延伸到惠远寺南西^[17]，沿鲜水河断层发育。该破裂没有穿过惠远寺A级左阶区向雅拉河断

层上扩展,理由是尽管在该阶区北西侧,至今仍可见到较清楚的破裂痕迹(照片4),但在图1中斜贯阶区的近东西向断层上,并未发育有较新的地震破裂的痕迹。因此,惠远寺A级左阶区,对1893年地震破裂具有较明显的终止作用。

震中位于康定以南的1786年7 $\frac{1}{2}$ 级地震,其破裂带至少南至磨西、北至色拉哈垭口附近,全长约70公里^[4]。另据我们的考察,磨西附近发育有较清楚的近代断错地貌以及小断塞塘,故认为这次地震破裂向南到达磨西以南是有可能的^[22]。这些揭示了1786年地震破裂沿色拉哈、磨西两条断层发育,而雅家埂附近的B级左阶区(图3),并没有阻止该地震破裂的传播。

1955年7 $\frac{1}{2}$ 级地震破裂是沿约30公里长的整体折多塘断层发生的,现在,沿该断层仍可清楚地见到这次地震的破裂带。显然,该断层上的若干C级羽列不连续,并未使此次地震破裂终止。图6所示的1973年炉霍7.6级地震破裂带的主体,也是由长度不等的7段C级羽列段组成,其中6处羽列不连续部位并没有阻止该破裂的扩展。尽管该破裂的南东端终止于仁达附近的C级左阶区边缘,但这可能是远离震中的缘故。实际上,该左阶区并未对震中位于附近的1923年7 $\frac{1}{2}$ 级地震的破裂造成阻止。照片2则直观地显示了拉托附近的另一处C级左阶区未能阻止1923年地震破裂扩展的情形。

以上说明:在鲜水河全新世断裂带中,B,C两级断层羽列阶区对大地震($M \geq 7\frac{1}{2}$)的破裂不具终止作用。特别是在阶区离震中较近的情况下,破裂往往越过阶区而继续扩展。惠远寺A级左阶区虽对1893年7级左右地震的破裂有较明显的终止作用,但对更大地震的破裂是否也造成终止并不清楚。根据对富蕴、海原、当雄等地震断裂带的研究,8级或8级以上特大地震的破裂,往往可越过距离为1—5公里的断层羽列阶区而扩展^[6,7,9]。因此,我们认为:羽列阶区对地震破裂的终止作用是有条件的,即在一定的阶区尺度、一定震级范围、阶区至震中的一定距离以及一定的断层运动学状态下,才有可能回答破裂在某阶区的终止与否的问题。

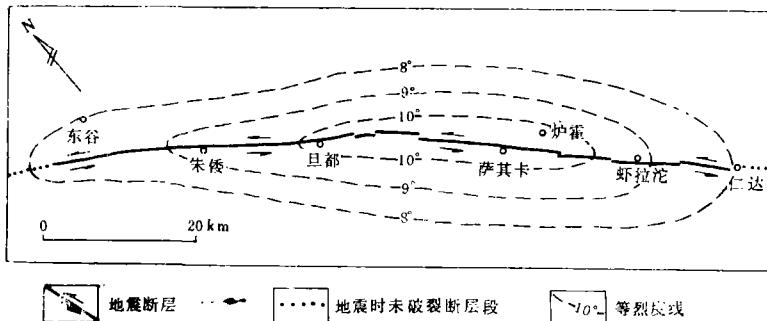


图6 1973年炉霍地震破裂带及等震线

2. 弯曲断层段的地震构造意义

林邦慧等(1986)从地震波反演得到1973年炉霍地震破裂为不对称双侧扩展型,即破裂由震中开始,向北西扩展较长,向南东扩展较短^[3]。等震线反映了烈度沿断层向北西衰减较慢,向南东衰减较快(图6)。我们认为,这种不对称性与发震断层整体发生的、沿走向约10—15°的顺时针弯曲有关:由于断层运动为左旋,顺时针弯曲的结果使得震中南

东断面的正压应力作用增加, 导致那里的摩擦强度在一定程度上提高, 这是应力积累的必要条件; 相反, 震中北西的断面正张应力作用增加, 导致断面强度相对下降, 这是地震断层错动的有利条件; 地震时向南东的破裂扩展因受到的阻碍或摩擦较大, 故衰减较快; 相反, 向北西衰减较慢。因此, 断层弯曲几何特征对于地震破裂传播和烈度衰减的方式也有重要影响。

Segall 和 Pollard (1980) 曾注意到圣安德烈斯断层上一处仅约 5° 的局部走向弯曲, 与帕克菲尔德 (Parkfield) 中强地震原地重复发生的密切关系^[20]。就在与图 6 所示大致相同的断层段上, 在 1973 年 7.6 级地震之前, 曾于 1816 年发生过一次 $7\frac{1}{2}$ 级左右的地震^[10]。这两次地震基本原地重复。这似乎反映了沿此鲜水河断层段的 $10-15^{\circ}$ 的走向变化或弯曲与这里的大地震原地重复有关。这种机制似乎可以解释为: 一定曲率及长度的弯曲断层几何决定了断层运动受阻的程度和能量积累的能力, 当应变速率及断面强度相对固定时, 大小相近的地震便在那里呈准周期性重复。

3. 两次地震发震断层的立体模型

Bakun 等(1980)在对 1973 年 Cienega Road 地震的研究中, 指出了在断层几何、震中位置、破裂定向性以及余震发生之间的密切关系, 这些关系揭示了地表形迹中羽列间距为几百米的几何不连续仅延伸至 5—8 公里的深度^[19]。一些研究者根据两相邻的羽列断层段的端部往往倾向相对的特点, 得到了它们在某一可估计的深度上相交、合并成同一断面的认识^[20]。根据这种认识, 我们可以绘出 1955 年康定 $7\frac{1}{2}$ 级地震和 1786 年康定南 $7\frac{1}{2}$ 级地震发震断层的立体模型(图 7)。

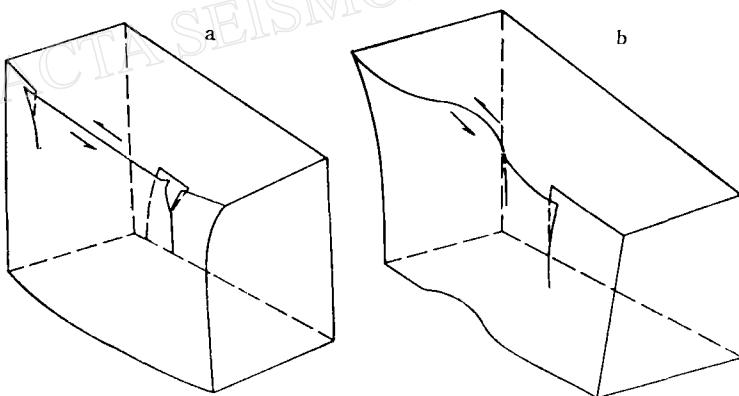


图 7 两次历史地震发震断层的立体模型

a. 1955 年康定 $7\frac{1}{2}$ 级地震断层模型 b. 1786 年康定南 $7\frac{1}{2}$ 级地震断层模型

折多塘断层上的 C 级羽列不连续以及色拉哈和磨西断层之间的 B 级羽列不连续, 平均间距分别为 300 米和 1300 米, 取断面倾角 $60^{\circ}-80^{\circ}$, 则可估算出 C 级和 B 级不连续的可延伸深度分别为 260—850 米和 1100—3700 米, 仅为鲜水河断裂带大震或强震平均震源深度(约 18 公里)的 $1/20-1/5$ 。即这两个级别的羽列不连续仅限于发生在地壳浅部。从而, 由图 7 立体模型得到的重要启示是: 大震时的地表破裂为何能跳过一定尺度的断层羽列阶区而继续扩展, 很可能是因为浅层破裂受到较深部的、相对连续的震源断层面上破

裂的牵动。这两个模型中的弯曲几何特征，因长度较大（30 和 35 公里），故它们完全有可能延伸到震源的深度上，并对地震的孕育和发生起重要的作用。

五、结论与讨论

1. 以惠远寺左阶区为界，可将整个鲜水河全新世断裂带分成北西和南东两个结构特征不同的段落。这种断裂带结构上的分段性，造成了地震活动性的分段差异，同时也可能是断层滑动速率空间变化的主要原因。惠远寺左阶区的拉分构造效应反映了它对北西、南东两断裂段左旋走滑运动的调节作用。

2. 整个断裂带具有“多重”羽列的几何特征，至少可相对地划分出 A, B, C 三个级别的基岩断裂羽列结构。其阶区具有不同程度和性质的垂直形变或地貌效应。A 级左阶区对 7 级左右地震的破裂起着较明显的终止作用。B, C 两级羽列阶区可能由于仅在浅部发育之故，对大地震的破裂没有起到有效的终止作用。更低级别的羽列特征则是地震破裂在第四纪盖层中形成的地裂缝的一种主要组合型式。

3. 长度为数十公里的弯曲断层段是该断裂带上另一种重要的几何结构。它们与强震或大地震的原地重复有密切关系。弯曲的几何形态对地震破裂的扩展方式、地震烈度衰减的方向性等均起十分明显的作用。

4. 鲜水河全新世断裂带整体呈现为一向北东凸出的弧形，这是否意味着它正绕某一轴点作旋转运动？另外，带中不同尺度和性质的羽列阶区在地震孕育和发生过程中各起什么作用，以及具体结构部位的地震前兆观测意义等，都是值得进一步深入研究的课题，尤其应结合具体的几何尺度进行研究。在分析断层几何随深度的变化时，特别需要有高精度震源定位资料的配合。

本文是四川省地震局与美国加州理工学院地震实验室合作研究鲜水河全新世断裂带的成果之一。整个工作得到了国家地震局和丁国瑜的支持；野外考察得到了甘孜州各有关政府部门的大力协助；四川省地震局的李兴海、周兴和、黄圣睦、刘本培、杨兴孝等为野外调查作出了贡献；陈天长与作者进行了有益的讨论。在此，作者向他们深表谢意。

本工作是中国国家地震局与美国地质调查局地震科技合作协定书研究项目之一。

参 考 文 献

- [1] 闻学泽、白兰香, 1985. 鲜水河活动断裂带形变组合与运动特征的研究. 中国地震, 1, 1, 53—59.
- [2] 闻学泽、白兰香, 1985. 鲜水河断裂带北西段的地壳破裂图象及地震构造. 鲜水河断裂带地震学术讨论会文集, 33—40, 地震出版社.
- [3] 唐荣昌、文德华、邓天岗、黄圣睦, 1976. 1973 年炉霍 7.9 级地震的地裂缝特征及地震成因的初步探讨. 地球物理学报, 19, 19—27.
- [4] 赵翔, 1985. 康定断裂的重复错动特征. 鲜水河断裂带地震学术讨论会文集, 41—47, 地震出版社.
- [5] 林邦慧、陈天长、蒲晓虹、刘万琴、彭美煊、张卫平, 1986. 鲜水河断裂带强震的破裂过程与地震活动. 地震学报, 8, 1—20.
- [6] 邓起东, 1985. 富蕴地震断裂带的破裂机制. 富蕴地震断裂带(丁国瑜主编), 105—119, 地震出版社.
- [7] 环文林、葛民、王士平、常向东、张维岐、万自成、柴炽章、焦德成, 1986. 1920 年海原 8.5 级地震的地震断层带及孕震构造考察研究的初步结果. 国际地震动态, 1: 3—7.

- [8] 小出仁、山崎晴雄、加藤磧一,1985. 地震与活断层,(陈宏德、吕越译) 61—65,68—77, 地质出版社。
- [9] 黄圣睦,1986. 1951年西藏当雄8级地震等地震首次现场考察获得重要结果. 国际地震动态, 1: 23.
- [10] 四川地震资料汇编编辑组, 1980. 四川地震资料汇编(第一卷), 154—160, 164—167, 243—247, 四川人民出版社。
- [11] 王新民、裴锡瑜,1988. 对1786年康定-泸定磨西间7 $\frac{1}{2}$ 级地震的新认识. 中国地震, 4,1,108—115.
- [12] Allen, C. R., Luo Zhuoli, Qian Hong, Wen Xueze, Zhou Huawei, and Huang Weishi, Feild study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *Geol. Soc. Amer. Bull.* in press.
- [13] Allen, C. R., 1968. Active faulting in northern Turkey, contrib. 1577 32 pp., *Div. of Geol. Sci.*, Calif. of Technol., Pasadena.
- [14] Allen, C. R., 1975. Geological criteria for evaluating seismicity. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, 1041—1057.
- [15] Bakun, W. H., R. M. Stewart, C. G. Bufe, and S. M. Marks, 1980. Implication of seismicity for failure of a section of the San Andreas fault. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 70, 185—201.
- [16] Crowell, J. C., 1974. Origin of late Cenozoic basins in southern California, In: Tectonics and Sedimentation (Ed. by W. R. Dickinson). *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner. Tulsa*, 22, 190—204.
- [17] Heim, A., 1934. Earthquake region of Taofu. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 45, 1035—1049.
- [18] King, G. and J. Nabelek, 1985. Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture. *Science*, 228, 984—987.
- [19] Rodgers, D. A., 1980. Analysis of pull-apart basin development produced by en echelon strike-slip faults. *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.*, 4, 27—41.
- [20] Segall, P. and D. D. Pollard, 1980. Mechanics of discontinuous faults. *J. Geophys. Res.*, B8, 4337—4350.
- [21] Sibson, R. H., 1985. Stopping of earthquake ruptures at dilatational fault jogs. *Nature*, 316, 248—251.

SEGMENTATION, GEOMETRIC FEATURES, AND THEIR SEISMOTECTONIC IMPLICATIONS FOR THE HOLO- CENE XIANSHUIHE FAULT ZONE

WEN XUEZE¹⁾, C. R. ALLEN²⁾, LUO ZHUOLI¹⁾,
QIAN HONG¹⁾, ZHOU HUAWEI²⁾ and HUANG WEISHU³⁾

1) Seismological Bureau of Sichuan Province.

2) Seismological Laboratory, California Institute of Technology.

3) Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau.

Abstract

The Holocene Xianshuihe fault zone, which consists of five main branches with left-lateral strike-slip, can be divided into two segments of different structural styles, jointing at the pull-apart area of Huiyuan Monastery. The northwestern segment has a relatively simple structure. While the southeastern segment exhibits a complex structure composed of several branches. The segmentation of fault structure is the main cause of the different historic strong-earthquake activity, and perhaps, the spatial variation of recent fault slip-rates in different segments.

The "multiple-order en echelon" pattern is one of the important geometric characteristics of the fault zone. Based on sizes of stepovers, orders of en echelon discontinuities have been relatively classified. Of which, a left-stepping discontinuity in the order A en echelon, which is apparently accompanied with topographic effect of pull-apart structure, has been taken as the dividing point of the segmentation of the fault zone. This discontinuity is also reflected in stopping surficial ruptures during historic earthquakes with approximate magnitude 7. Stepping discontinuities in en echelon faults of the order B and C also have topographic effects to a certain degree, but do not appear to have been significant in stopping large-earthquake ruptures. The earthquake ground-fissures developed within the Quaternary cover are mainly in forms of even lower order of en echelons.

Bending is another important geometric characteristics of the fault zone. Along-strike bends at different degrees occur along the entire fault zone and some parts of faults. Local bends along a fault is the main geometric causes for unsymmetrical rupture-spreading and intensity-attenuating during large earthquakes, and perhaps, one of the tectonic backgrounds for recurrences of large or strong earthquakes at the same localities. Finally, three-dimensional models for the source faults of two large historic earthquakes have been analysed and discussed.