

海原断裂带西端强震危险性分析

刘百箴 袁道阳 何文贵 刘小风

(国家地震局兰州地震研究所)

摘要

本文在对海原断裂带西端的四条断裂基本特性分析的基础上,根据断层几何,历史地震破裂带及古地震资料等对断裂进行了破裂分段研究,进而利用时间可预报模式的指数震级分布和特征地震模型对各断裂段进行了地震危险性分析计算,结果表明:至1992年本区内的毛毛山—金强河断裂段的平均累积地震数接近1,因此今后一定时段内发生特征震级7.7级左右地震的可能性较大,是该引起足够重视的地段。

一、区域概况

该断裂位于北祁连山深大断裂带东段,东起景泰县喜集水东,向西止于门源北冷龙岭主峰,全长约220公里,走向北西70°左右。其东端以喜集水左阶盆地(阶距约4公里)与海原断裂带相搭接,西端在红腰岬与古浪断裂带斜接后直至冷龙岭主峰止,正好处在1927年古浪8级大震与1920年海原8.5级大震之间的断裂空段部位(图1)。

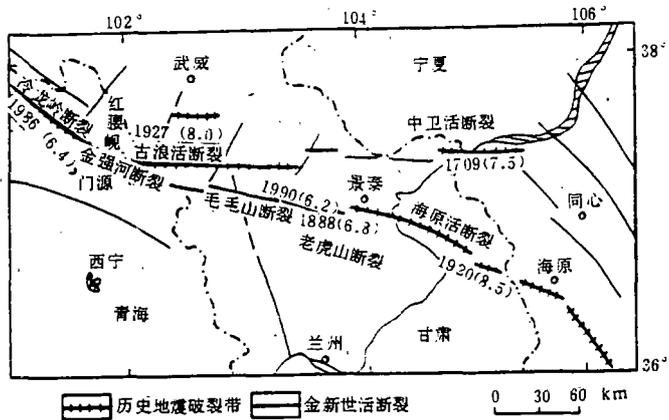


图1 甘肃中部全新世活断裂及历史地震破裂带分布图

大地构造上,该段正好处于北祁连褶皱带与走廊过渡带之间的交接部位。祁连褶皱系是一个复杂的、多期活动的地槽褶皱系,但主要是一个加里东褶皱带,构造线主体为北西西向;走廊过渡带挟持于北祁连褶皱系和中朝准地台的阿拉善台隆之间,它在祁连地槽发育阶段具有过渡性质。由于受两者共同作用的影响,该

区段内断裂具有长期活动的特点。在加里东运动的基础上,其后的印支,燕山,喜山期均有活动,新生代以来的活动有所增强。从构造活动的性质而言,褶皱活动的强度略逊于断裂活动,而这种差异已渐趋明显,构造运动的总趋势是不均衡地上升和走向方向上的滑动。

第三纪末喜玛拉雅运动造就了大地貌分布格局,而第四纪特别是全新世的持续构造活动造成了无数次构造事件。本世纪以来,本区域内前后发生了8.5级,8.0级两次特大地震,以及多次的中强地震,从而引起了国内外学者的高度重视,尤其更关心海原地震断裂西端与古浪地

震断裂之间的断裂段今后一定时期内是否存在发生特大地震的可能性?对于这些问题,前人曾在本区内作过不少基础工作和一些探索性研究,取得了一些有益的成果。

1983年,时振梁、环文林以及刘百箴、周俊喜等曾对老虎山断裂进行过踏勘研究,认为该断裂为一条全新世断裂,且在其上有古地震存在。1986—1987年刘百箴、周俊喜等又对老虎山断裂进行了较详细的野外地质调查,发现了38公里的1888年6.8级地震破裂带,并确定了其全新世以来的滑动速率。近来,袁道阳、刘百箴以及才树华等都作过更深入的研究工作。1988年魏顺民、陈志泰等曾对金强河断裂作过野外调查。

二、断裂带特征

这是一条长约220公里的以左旋走滑运动为主的不连续断裂带,由四大段组成,从东向西分别为:老虎山断裂,毛毛山断裂,金强河断裂,冷龙岭断裂。其中分段的大型阶区为:喜集水拉分盆地,毛毛山挤压区,天祝拉分盆地,冷龙岭挤压区。

这四条断裂均为左旋走滑性质,或兼具逆冲分量,或兼具拉张分量,全新世以来有明显活动。

现将各断裂段的几何学、运动学特征简述如下:

1. 老虎山断裂段:该断裂已进行了简略的1/5万活断裂填图,开挖了六个探槽,查清了现代地震,历史地震和古地震的基本状况,获得了较可靠的断层滑动速率,古地震复发周期,经过时间,及断裂几何特征,因此研究程度较高。结果表明:老虎山活断裂全长60公里,走向北西70°左右,断层的几何形态简单,由8小段不连续次级断层左阶羽列而成,阶距100—300米左右。大约自中更新世以来,其断裂力学性质由压性转变成以左旋走滑为主的压扭性,并沿断裂带形成一系列的断错微地貌。

该断裂大约以老虎沟脑拉分盆地为界分为东西两段,其分段方式符合地震重叠模式。经航片解译及野外实测的断错数据分析表明:东段具有大约30米的可公度值,呈明显的特征地震性质;而西段呈基本上连续增长的特点,其特征震级分别为:全段7.1级,东段6.7级,西段6.2级。全新世以来断层的平均滑动速率约为3mm/yr。该断裂的最新活动造成了东段1888年景泰6.8级和西段1990年天祝—景泰6.2级地震的发生。同时,对断裂带上古断层崖运用扩散方程研究所得年代与探槽开挖所得古地震年龄有相当好的一致性。并由此大致可以确定5次古地震事件,震级为7级左右,并且有约1000年的平均重复间隔。由此推断老虎山断裂的活动方式应以粘滑运动为主。

1888年景泰6.8级地震破裂带位于老虎山断裂带上,经野外实地考察认为:它东起喜集水东煤洼山,西止于阿门岷,全带长约38公里,至今仍有部分地震破裂的痕迹,如地震陡坎,断错微地貌,地震滑坡群,地震鼓包等。经实测得知这次地震水平断距为1.7—3.2米,平均为2米,垂直断距0.2—0.6米,平均值为0.4米,水平断距与垂直断距之比为5:1,宏观震中应在沈家滩一带。根据地震破裂带的特征,认为本次地震震级可能为6.8—7.0级左右,并由此求得相应震级的复发间隔约767年。

而1990年天祝—景泰6.2级地震震中位于老虎山断裂西段的下淌至大圈湾一带,极震区(VⅢ度)等震线长轴方向与老虎山断裂西段相吻合。从以上分析知道,由于1888年6.8级地震已超过东段的特征震级6.7级,而且破裂带已延至西段的一部分,因此可作为整段的应力释放。同时从这次地震之后起,东西两段重新开始累积应变能,孕育新的地震。按指数震级分布

和特征地震模型计算;至 1990 年西段累积地震次数分别为 0.86 和 0.53(平均 0.7)已具备发震的可能性。而东段和全段的累积地震数分别为:0.34 和 0.04。说明在发生了 90 年 6.2 级地震之后,本断层上今后数十年内发生 7 级左右中强震的可能性不大。

老虎山断裂东端以喜集水左阶拉分盆地与海断裂相接,阶距 4 公里,也许正是由于二者之间阶距较大的缘故,1920 年海原 8.5 级大地震才未能穿过此盆地而沿老虎山断裂向西破裂延伸。

老虎山断裂西端止于天祝县松山乡林场检查站西、毛毛山东侧附近,与毛毛山断裂以右阶关系相互搭接,其阶距 500 米,并形成一挤压区(图 2)。由于与老虎山断裂西端搭接过大,所以阶区内独立挤压山不十分明显,而呈长条形高地(该阶区还需进一步分析)。

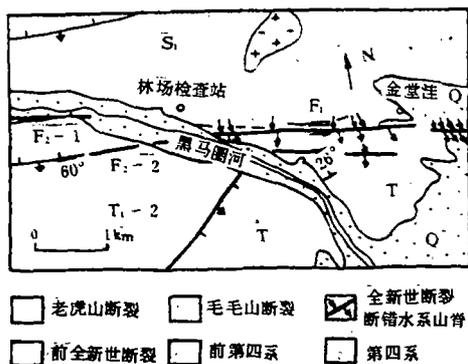


图 2 老虎山断裂与毛毛山断裂关系图

直滑动速率为 1.0mm/yr 左右,水平缩短速率为 0.27—1.0mm/yr。而本断裂西段尚未获得较确切的断裂活动资料,毛毛山断裂现代弱震活动很少(图 3)。

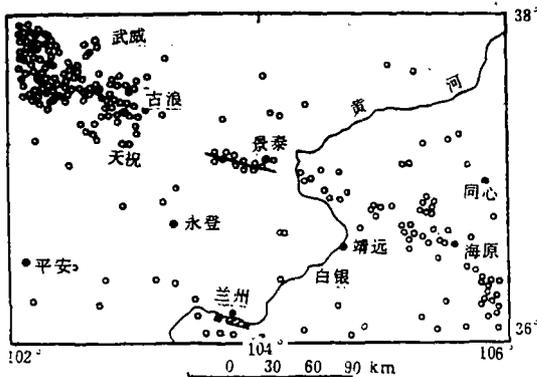


图 3 景泰地区弱震震中分布图

特征,沿断层线看到的微地貌断错现象有:断层崖,断层三角面,断层泉,断层沟等。因该断裂的西边与发生 1927 年古浪地震的活断裂在红腰岘以西相交,所以在该断裂段的西端可以看到较多

2. 毛毛山断裂段:该断裂仍为一全新世活动断裂,走向 NW75°,东起松山乡黑马圈河口,西止于天祝盆地北缘,长约 54 公里,断裂表现为一向南倾斜的逆冲左旋走滑断裂。本段无历史地震记载,才树华(1988)在东段开挖了一个探槽,其中可能包含有三次全新世古地震事件,大地震的平均重复间隔为 3000 年左右。而到目前为止,本断裂段已至少平静了大约 3000 年,因此今后数百年发生大地震的可能比较大。

同时,据才树华告知(1991),沿断裂统计了 29 条沟谷的左旋位移,求得本断裂左旋水平滑动速率为 2.91~3.21mm/yr,垂

毛毛山断裂向西以天祝盆地与金强河断裂左阶搭接,阶距 3.5 公里左右,它位于雷公山和毛毛山之间,平面上似一个菱形,其面积为 24 平方公里,盆地南北两侧被左旋走滑的北西西向压扭性断裂(金强河断裂和毛毛山断裂)所切割。

3. 金强河断裂段:从天祝盆地南缘开始,至红腰岘以西为止,全长 56 公里,该断裂晚第四纪以来的活动状况与毛毛山段较相似,在左旋走滑的同时,表现了明显的垂直升降运动特

的1927年古浪地震时产生的滑坡群。该断裂断错微地貌清晰,全新世有过活动无疑,在三个墩的断层崖,断开了河床及其以上阶地,经过断崖上的砾石黄衣测年表明为2800—3000年前的地震事件。本段无历史地震记载,弱震活动很少。全新世的滑动速率为3.6—4.5mm/yr。

总之,老虎山断裂,毛毛山断裂,金强河断裂晚更新世以来的活动方式及其幅度是有差别的。老虎山断裂带主要以左旋走滑运动为主,微地貌多被左旋断错,而毛毛山断裂,金强河断裂无论在断错微地貌的种类,还是在断错微地貌的幅度上都不能前者相比,水平断距不易量得,反映毛毛山断裂,金强河断裂具较大的垂直升降运动分量。而且老虎山断裂的弱震较密集,而毛毛山,金强河断裂弱震活动很少。因此,应当将它们视为破裂性质有一定差异的,相对独立的断裂段。

4. 冷龙岭断裂段:从红腰峁始,向西至冷龙岭主峰止,全长50公里,走向NW50°—60°,该断裂仍为一条左旋走滑断层。1987年曾进行过野外调查,取得了断裂的全新世滑动速率为3.5mm/yr,断裂带上构造地貌位移清晰,有些较新的现象,有人认为是1927年古浪地震的破裂现象;有人则认为是古地震现象,古浪地震破裂带当在东青顶一带。关于这一点目前尚有分歧。该断裂的现今活动造成了1986年8月26日门源6.4地震的发生。

这次地震的震中、余震分布及最内等震线(VI度)长轴与冷龙岭主山脊断裂展布一致,冷龙岭主峰附近震害最重,震源深度9—14公里。

冷龙岭主峰为一挤压区,再向西即为昌马—俄博断裂。与冷龙岭断裂相比,其活动性质及活动时代均有较大差别,应另当别论。

总之,本区域内,介于古浪地震断层与海原地震断层之间的四条断裂,它们的几何特性及断裂活动性均有一定差异,从地震断层破裂分段的角度可将它们单独划分为独立段,但它们又同为北祁连深大断裂带东段的一部分,有其成因的内在联系,所以又必须将它们作为一整体加以分析。

三、断裂带的分段性

根据前人已取得的资料,现将该断裂带、段的基本参数归纳如表1。

断裂分段的目的旨在研究活断裂的破裂过程,评价活断裂带上替在的最大地震危险程度。它不应仅仅局限在对一条活断裂带不同物理特性或几何特点段落的划分,或仅用地震活动,历史地震的地面破裂长度来划分,而应对断裂的活动习性等特点联系起来加以考虑(丁国瑜,1990)^[1]。按照破裂分段的考虑,可以将断裂带单元断层段划分如表1所示的五段。划分的主要依据有:

- a. 断层不连续段端部的阶区性质及阶距(即障碍体的规模)。
- b. 现代弱震活动分布密度。
- c. 历史大地震破裂的同一性。
- d. 斜向或横向断裂的同一性。
- e. 古地震破裂带的同一性。

而断裂带的破裂滑动行为又可分为单元特征滑动和多重特征滑动。

(1)单元特征滑动:通常情况下,不连续断层的各高层次单独的段,均可以按本段的滑动速率累积的位移应变,重复发生由段长度决定的特征地震,使应变降为零,再重新开始积累。而当累积的应变超过其特定震级的应变却并未发生地震时,则可与相邻段组合成长度更长

的多重段,继续累积应变能,直至发生一个更高特定震级的多重特征地震。

表 1

分段名称	产 状			长度 (km)	运动 性质	最晚地震事件		大震重 现间隔	全新世滑 动速率 mm/a
	走向	倾向	倾 角			位移量(m)	年 代		
老虎山断 裂东段	290°	200°	50°—78°	38	左旋正 走滑	1.7—2.3	1888. A. D	1000	3.0±0.2
老虎山断 裂西段	280°	10°	50°—78°	22	左旋逆 走滑	<0.2	1888. A. D 1990. A. D	1000	3.0±0.2
毛毛山 断裂	285°	195°	45°—75°	54	左旋逆 走滑	—	—	(3000)	2.91—3.21
金强河 断裂	290°	200°	—	56	左旋 走滑	2	2800. B. P	—	3.6—4.5
冷龙岭 断裂	295°	205°	52°	50	左旋逆 走滑	5	1927. A. D 1986. A. D	—	3.5

(2)多重段的组合规则:

- a. 必须是相邻接的单元段。
- b. 单元段之间阶区(障碍物)的阶距小(其量级有待于进一步探讨)。
- c. 各段具有类似的历史地震。
- d. 各段具有类似的弱震活动特征。
- e. 各段最近的古地震具有相近经过时间。

按照这些原则,对前述各段进行分段组合,并利用时间可预报模型建立的一组表达式^[2], 求出各段(组合段)的断层活动参数(表 2)

分 段	断 层 参 数	长度 (km)	T ₀ (年)	弱震活动	特定震 级 M _i	重现间隔 t _i (年)		备注
						速率 推算	古地震 实测	
老虎山断裂东段		38	1888. A. D	密集成带	6.8	266		单元特征地震
老虎山断裂西段		22	1888. A. D 1990. A. D	密集成带	6.2	137		单元特征地震
多重段		60	1888. A. D	密集成带	7.2	462	1000	多重特征地震
毛毛山断裂段		54	3000. B. P	无弱震	7.1	407	3000	单元特征地震
金强河断裂段		56	2800—3000. B. P	无弱震	7.2	425	2800	单元特征地震
多重段		110	2800—3000. B. P	无弱震	7.8	962	2800—3000	多重特征地震
冷龙岭断裂段		50	1927. A. D 1986. A. D	密集成带	7.0	317		单元特征地震

其中:

$$V = D_i / t_i$$

$$\log D_i = 0.48M_i - 1.50$$

$$\log t_i = 1.21 \log L_i - (\log V + 0.01)$$

$$\log L_i = 0.43M_i - 1.33$$

$$T_i = T_0 + t_i$$

式中: D_i 为单个地震的平均位移, V 为断层的平均滑动速率, M_i 特定震级, t_i 地震的重复周期, L_i 破裂的特征长度, T_i 未来可能发生地震的年代, T_0 最近一次历史大地震的年代。

我们知道, 大震的发生是活动断裂长期孕育, 积累应变能而突然释放的结果。本区内的四条断裂可以作为独立的段加以考虑, 即发生单元特征地震。表 2 为据此计算出的各段重现间隔 t_i , 与古地震间隔相比, 目前均已超过了其年限, 按理应有多次单元特征地震发生, 而实际上除在东端的老虎山断裂上分别发生过 1888 年景泰 6.8 级和 1990 年天祝——景泰 6.2 级地震以及西端冷龙岭断裂上发生 1986 年门源 6.4 级地震外, 中间段: 毛毛山, 金强河断裂近 3000 年来没有历史地震记载, 而且其上现代无弱震活动, 这也许意味着在不发生单元特征地震的前提下, 可能孕育更大能量发生多重特征地震, 由于老虎山断裂与冷龙岭断裂已有较大地震发生的历史, 且与毛毛山断裂和金强河断裂活动特性上有差异, 四条断裂同时组合的可能性不太大, 最有可能组合在一起的为毛毛山, 金强河断裂, 二者组合后其特定震级可达 7.8 级, 但是它们之间交接处为阶距 3.5 公里的天祝拉分盆地, 如发生 7.8 级特征地震时贯通该盆地是有可能的, 也许正是因为贯通该盆地不容易, 就需更多时间积累应变能, 因而使这两条断裂上近 3000 年无历史地震甚至连弱震都很少, 却在这种孕育过程中在断裂两端的老虎山断裂和冷龙岭断裂上分别发生过 6.2 级天祝——景泰地震和 6.4 级门源地震, 这是否为中间未贯通的空区段的信号震? 值得注意! 也即是说此盆地为一大障碍体, 而且西端与古浪断裂交汇, 是孕震的有利场所。当然也还有毛毛山——老虎山断裂以及金强河——冷龙岭断裂的二重组合的可能性。

总之, 在海源断裂带西端存在着发生强震(7.8~8 级)的构造环境。

而要判定一个地区的地震危险性, 应对未来地震的时空强特点均作出一定的分析判断。上面已对本区是否存在发生强震的可能性作了分析, 强度也已根据断裂长度作了估计, 而发生地震的时间尺度却是一个比较关键而又棘手的问题, 尤其在各方面资料很不完备的情况下, 就更为困难。我们仅在现有条件下, 加以粗略的、甚至不得不加入某些假设的成份进行分析。

四、地震危险性分析

自 80 年代初期以来, 国际上运用地震地质资料进行长期地震预测的一个新趋势, 就是使得预测的结果定量化。

这里我们采用了指数级分布模型和特征地震模型进行了分析计算, 两个模型的区别在于: 前者认为断裂带上震级—频度关系为线性关系, 而后者认为断裂带上特征地震占优势, 震级—频度为非线性关系。

两模型最终计算表达式为^[3]:

(1) 指数震级分布模型:

$$N(m^1) = \frac{\mu A_f S(c-b)}{bM_0^c} (\exp(\beta(m^1 - m^0)) - 1)$$

(2) 特征地震模型:

$$N(m^0) = \frac{\mu A_r S}{M_0^0 \left[\frac{b \cdot 10^{-\frac{c}{2}}}{c-b} + \frac{b \cdot (1 - 10^{-\frac{c}{2}}) \cdot \exp \beta}{c} \right]} (\exp(\beta(m^* - 0.5 - m^0)) + \frac{b}{2} e^{\beta} \cdot \ln 10 - 1)$$

目前的危险性概率为 $\sum_{T_0}^n (N(m^0))$

这里, μ 为刚性系数, A_r 为震级上限地震断层面积, m^* 为震级上限, m^0 为特定震级, M_0^0 为上限震级的地震矩, b 为震级频度关系常数, β 为经验常数, c, b 均为经验常数。

其中取 $c=1.5, d=16.0, b=0.6$

而计算过程所用特定震级采用式:

$$M = 2.1 \log L + 3.3 \quad (\text{据郭增建等})$$

$$0.43M = \log L - 1.33 \quad (\text{据刘百箴})$$

取其平均值作为特定震级, 而震级上限则采用相应组合段中最大值, 由此对表 2 的单元特征地震及多重特征地震计算了到目前(1992)的地震危险性概率。并将结果列于表 3 中。

前已述及, 本区域内的四条断裂可能的组合关系有:

(1) 老虎山断裂段: 1888 年景泰 6.8 级地震可作为全段应力释放, 至今 103 年, 积累应变不多, 因而将不参与其它段的多重组合, 该断裂西段至 1990 年累积的地震次数为 0.7 次, 发生了 90 年 6.2 级地震后全部释放, 东段和二重组合段, 目前的累积地震次数为 0.34、0.04, 发生震率很小。

(2) 其余三段组合的情况:

a. 单段发震的累积次数分别为: 毛毛山段 2.55, 金强河断裂段 2.2, 冷龙岭断裂 2.9, 均远超过 1, 但历史资料和古地震资料均证明累积的地震并未发生, 说明它们已不可能单段破裂, 因此, 很可能进入组合阶段。

b. 毛毛山—金强河断裂组合, 累积次数为 0.885(7.7 级)。

金强河—冷龙岭断裂组合, 累积次数为 1.03(7.6 级)。

扣除计算中参数选取造成的误差, 说明这种组合发震的可能性很大。但冷龙岭段已发生过 1986 年门源 6.4 级地震及部分参与过 1927 年古浪地震, 金强河—冷龙岭断裂组合的危险性将有所降低。

c. 三重组合。毛毛山—金强河—冷龙岭可组合一个 8.1 级地震, 至目前其累积地震数为 0.13, 发震的可能性不大。

当然, 上述计算关系式是建立在严格的数学基础之上的, 各参数的变化对所求结果非常敏感, 这势必影响计算精度。尽管如此, 我们仍可从表 3 中看出各段地震活动的总趋势。

五、初步的结论

通过上述多方面的分析, 我们可得出如下几点结论:

(1) 海原断裂西端(景泰—冷龙岭之间), 为北祁连深大断裂带的一部分, 该断裂具多期活动的特点, 地震活动强度大, 频度高, 说明本区段具有发生强震的区域构造背景。

表 3

震级上限	特征震级	模 型 断 裂 分 段 地 震 概 率	指数震级分布模型			特征地震模型			平均 累积 次数
			年概率	经过 时间	累积地震数	年概率	经过 时间	累积地震数	
7.2	6.2	老虎山断裂西段	0.0084	103	0.87	0.0052	103	0.53	0.70
	6.7	老虎山断裂东段	0.0028	103	0.29	0.0038	103	0.39	0.34
	7.1	二重组合段	0.00042	103	0.04				0.04
8.2	7.0	毛毛山断裂段	0.0012	3000	3.63	0.0005	3000	1.46	2.55
	7.1	金强河断裂带	0.001	3000	3.05	0.00045	3000	1.35	2.2
	6.9	冷龙岭断裂带	0.0014	3000	4.3	0.00053	3000	1.59	2.9
	8.1	三重组合段	0.00004	3000	0.13				0.13
	7.7	毛一金二重段	0.0003	3000	0.85	0.000306	3000	0.92	0.885
	7.6	金一冷二重段	0.00037	3000	1.10	0.00032	3000	0.97	1.03

(2)该区段的四条断裂均为全新世断裂,其活动性差异不大,两端的老虎山,冷龙岭断裂曾发生过 6.2 级和 6.4 级地震,中间的毛毛山,金强河断裂未有历史地震记载,甚至现代弱震都极少,有可能是一个地震空段。

(3)该区段处于古浪与海原大震之间的交接部位,断裂的不连续扭弯,拐折以及交汇是产生障碍体的主要原因之一。其上有何处尚未为大震沟通,为一空段,这应是未来的应力积累的有利场所,也是大震危险区。

(4)通过对本区段运用多种模型分析表明,除老虎山断裂外,其余三条断裂早已超过了发生单元特征地震的时间,所以很可能发生多重组合的特征地震。按照这种分析,其中的毛毛山一金强河断裂段,累积发生 7.7 级特征地震的可能性很大,同时,金强河,冷龙岭断裂组合段发生 7.6 级特征地震的危险性也应引起足够重视,而三重组合发生大于 8 级以上地震的可能性不太大,但不排除有这种可能性。

总之,本区域断裂段存在着发生 7.5~8 级,尤其是 7.7 级左右强震的危险性是值得人们重视的。

参 考 文 献

- (1)丁国瑜,1990. 全新世层活动的不均匀性,中国地震. Vol. 6. No. 1.
- (2)Liu Baichi. 1989. Characteristic Slip Behavior and Sequence of Moderate and Strong Earthquakes in Active Fault Zone. Earthquake. Research in China. Vol. 3No. 2.
- (3)Robert · R · Youngs et al. 1985. Implication of Fault Slip Rate and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates. B · S · S · A. Vol. 75. No4.