

地震的丛集性与断裂间的相互作用： 兼论祁连山东段的地震危险性*

陈文彬¹, 徐锡伟², 刘百箴¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

P315.75

P315.2

摘要:从地震丛集的大量实例出发, 讨论了地震丛集与断裂间相互作用的特点、基本规律、机理问题及对地震预测的意义, 在此基础上对祁连山断裂带东段的地震危险性进行了定性分析, 认为1927年古浪8.0级地震的发生对此区断裂的地震潜势产生深刻影响, 它可能暗示: 此区内的未来大震与1927年古浪地震分属两个地震丛集期; 古浪地震的发生使得作为危险段落的金强河-毛毛山断裂上的挤压应力显著增大, 从而延迟了未来大震的发震时间。

关键词:祁连山; 断裂带; 地震危险性评估; 地震丛集

中图分类号: P315.2; P315.75 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2000)02-0126-08

0 引言

特征地震模型通过特征震级、复发周期等具有物理含义的概念将断裂的长度、滑动速率、同震位移等几何学、运动学参数有机地结合起来, 并以量化的结果运用于地震危险性分析中。而随着研究的深入, 人们发现地震(尤其是板内地震)往往不是完全按照特征地震的模式复发的^[1], 而且大陆上地震的复发周期很长, 一般在数百年至数千年, 使得对小时间尺度上的地震预报难以把握, 这样的结果已不能满足要求。于此同时, 有关地震丛集、地震间的相互作用的研究悄然兴起。90年代起, 国外有关断裂间相互作用的研究逐年加强, 有许多学者通过建立各种模型定量探讨了地震对活断裂地震潜势的影响。1997年3月在美国加州召开了地震触发研究国际会议, 会议论文在GJR杂志上以专辑发表^[2], 这标志着断裂间相互作用已经成为新的研究热点。祁连山东段被许多学者看作为近期强震危险区, 这一结论是特征地震模式下的分析结果, 本文从地震丛集与地震间相互作用的观点出发就此区的强震危险性进行了讨论。

1 地震的丛集

地震在时间和空间上的丛集现象相当普遍, 历史上地震丛集的例子很多。在著名的土耳其北安纳托利亚断裂带上的地震序列中, 地震破裂就如同是倒下的多米诺骨牌, 先是1939、

收稿日期: 1999-12-01

基金项目: 地震科学联合基金项目(198026)和国家重点基础研究发展规划项目(95-13-01-04)

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000025

作者简介: 陈文彬(1965-), 男, 甘肃通渭人, 工程师, 在读博士生, 主要从事新构造、活动构造、工程地震研究。

1942、1943和1944年的4个地震自东向西迁移,使该断裂带725 km长的段落产生破裂,随之破裂又向东西两端延伸.1939~1992年的53 a中共发生了10次 $M \geq 6.7$ 地震,破裂几乎贯通了北安纳托利亚断裂带上长约1 000 km的段落^[3](图1).再如1904~1954年之间发生于美国内华达地震带北部的正断型地震序列.在我国也有不少地震丛集的实例,早在70年代,我国地震学者在地震预报的实践中研究地震活动性时就已经注意和归纳出地震的成带性、迁移性等规律,并与一定的地震构造带相联系.丁国瑜指出的华县—平谷、海原—昌马、甘孜—昭通、邢台—唐山等强震系列^[4]就是中国大陆上强震丛集现象的极好例子.

对地震活动的统计分析结果也揭示出地震呈丛集的特点.Kagan等在统计分析几个仪器地震目录的长期特征时发现,浅层、中层及深层大震主震系列没有呈周期性的证据,甚至没有一次大震后地震活动性降低的证据^[1].相反,时空统计分析表明,地震活动的长期特征之一就是丛集,这种丛集表现在,一次大震后的几十年内大震的数目加

速增多.他们认为地震的时空丛集是一个全球现象,并且呈两种情形:与前震—主震—余震系列有关的短期的“强”丛集和主震之间长期的“弱”丛集.

古地震研究也证实了地震的丛集现象.Shmuel Marco等研究发现,死海地区的地震在约10 ka的时间内出现一次丛集,又以相似的平静期相隔^[5].Pirazzoli等研究发现,地中海的古海岸线成群出现^[6],可能代表了区域上一次丛集地震引起的应力释放,并反映了板块相互作用中的一异常活跃期.闵伟(1998)研究了青藏高原东北缘地区区域古地震复发行,结果表明,该区8 ka以来古地震呈两个丛集期(轮回)^①.

以上数据表明,地震丛集是一个普遍现象,由于地震原地复发的周期很长,一般需要几百年乃至几千年,因此不宜于地震的短期预测,而研究区域复发行则为大大地缩短了地震发生间隔,大大地缩短了时间尺度,因此弄清地震丛集规律对地震预测有现实意义.

1.1 地震丛集的含义

地震丛集主要强调的是地震在时间上的靠近,它们可以是原地复发的地震,也可以是在一条断裂带或一定区域内发生的地震,在实际中更常见的是后一种情况.似乎可以推论,地震在时间上的丛集是以空间上的扩大为前提的,这从地震能量释放的角度来看也更符合物理学原理.因此,地震丛集不是一个原地复发的问題,研究区域上的地震丛集也正是将研究的重点从一条断裂或断裂段上引向一个区域,由此在一个更短的时间尺度上探究地震发生的规律.

一提到地震丛集就容易想到特征地震,在讨论地震丛集时有必要弄清两者的关系.特征地震指的是同一震源区或特定的断裂段上重复发生的主要震级范围内的地震,它包含了以下含义:这些地震在时间上呈周期性或准周期性,空间上为原地复发,而震级(强度)限于较小的范围内.我们不妨将其通俗地理解为特定的地点、特定的时间(周期性或准周期性)和特定的强度

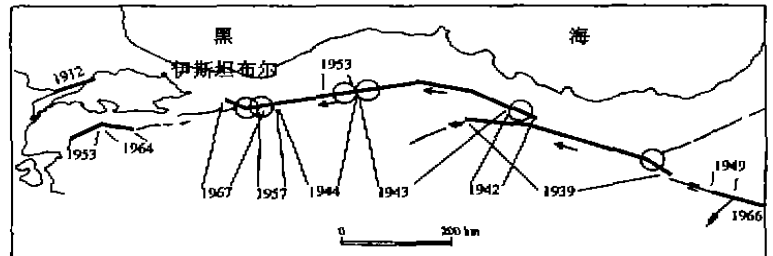


图1 1939~1967年沿土耳其北安纳托利亚断裂带发生的地震序列(据Stein等,1997)

Fig. 1 Earthquake series on the North Anatolia fault zone from 1939 to 1967(after Stein et al., 1997).

① 闵伟.区域古地震研究——以青藏高原东北缘和华北西缘为例.中国地震局地质研究所博士学位论文,1998.

(主要大小的震级). 特征地震与地震丛集之间是一种协同关系: 首先, 特征地震指的是原地复发行, 而地震的丛集现象是区域上的地震行为, 两者之间并不矛盾. Kagan 等通过引入一个变异系数将地震复发模式分为泊松随机复发模式、准周期复发模式和丛集模式等3类, 这种划分事实上将特征地震与地震丛集对立起来, 如果就原地复发的地震而言, 这种划分也无不可, 但它不适用于更为普遍的区域上的地震丛集行为. 其次, 特征地震与地震丛集又是相互影响的. 特征地震描述一条特定断裂或断裂段上的地震复发行, 而地震丛集指区域上的地震行为, 区域上的地震丛集发生完全可能影响特定断裂上的地震周期, 而区域上的地震丛集又受特定断裂上固有周期的制约. 因此, 地震丛集行为研究是对地震原地复发行研究的进一步深化, 特征地震引导对各特定断裂段地震历史的研究, 这也为地震丛集性的研究建立了基础.

1.2 地震丛集的一些特点

地震丛集最突出的特点是地震在时间轴上呈丛集发生与空缺相间的序列, 丛集期间为短间隔的复发样式, 丛集之间为长间隔的复发样式(形成空缺). 比如汾渭活动断裂带自1556年华县8级大地震起至1695年5月18日临汾8级地震止, 相继发生了11次6级以上地震, 平均不到13 a就发生一次地震, 而在此后的300 a间鲜有6级以上地震发生. 再如沿青藏高原北缘断裂带从1920年海原8.5级大震至1954年山丹7¼级地震结束, 其间共发生5次7级以上大震, 还有2次6~7级地震, 平均7 a发生一次7级以上地震, 而历史上与之最近的一次地震为1609年红崖子7¼级地震, 中间的平静期达321 a. 再如长达1600 km的阿尔金断裂带主断裂上尚未记录到7级以上大震, 至少沉寂了100 a. 目前为数不多的区域古地震对比研究也揭示了类似的特点.

丛集地震在空间上一般发生在统一的构造环境中, 且常常具有定向迁移的特点. 如前述的发生在土耳其北安纳托利亚断裂带上的地震序列, 1899~1987年发生于美国圣安德烈斯断裂和圣加辛托断裂上的地震序列, 这一系列的地震大致以1.7 km/a的速度由北西向南东迁移, 距离与时间之间存在着很好的对应关系^[7](图2). 我国大陆上发生的地震也表现出定向迁移的特点^[8].

丛集地震的上述特点有助于判断丛集期内未来地震发生的时间和地点, 但还需解决一个重要的问题, 就是要判定当前处在哪个阶段, 是平静期还是丛集期. 对一个具体区域来说, 如果刚刚经历了一次地震丛集, 就需要判断这一序列是否已经结束; 如果长期处于平静期, 就需判断下一地震丛集何时开始. 相比之下, 前一种情况更为现实, 这里我们提出以下几个方面作为判断丛集期是否结束的标志:

(1) 一系列地震事件以后较长时间内没有大震发生.

(2) 同一构造带内或在一定区域内是否还有危险性较大的重要断裂. 这里所说的一条断裂上强震危险性是指按照地震原地复

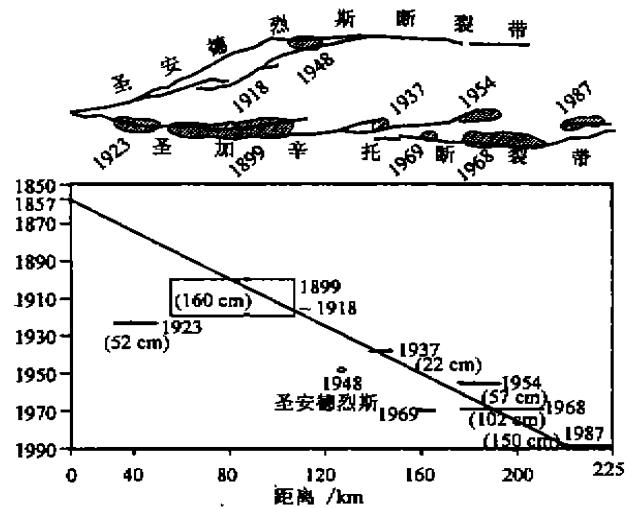


图2 1899~1987年美国圣安德烈斯断裂和圣加辛托断裂上的地震序列(据 Sanders, 1993)

Fig. 2 The earthquake series which occurred on the San Andreas and San Jacinto faults from 1899 to 1987(after Sanders, 1993).

发规律(周期性或准周期性)判定的结果.地震的丛集并不是一个区内的所有断裂在丛集期内都发震,而只是那些危险程度高的断裂才可能发震,当这些断裂都已发生地震后,地震的丛集期就必定结束.

(3) 虽然有危险性较大的断裂存在,但地震间的相互作用使危险断裂上的发震时间得以延迟.

1.3 地震丛集的机理

不管是特征地震还是丛集地震,都包含一个周期性或准周期性问题.特征地震模式表达了原地的、一条断裂或破裂段上地震的循环往复过程,它的立论基础就是弹性回跳理论.丛集地震反映了区域上或一条构造带上地震周期性的成丛发生过程,这种周期性必然反映区域上的某种特点.地震是构造运动中的一种表现形式,而构造运动的一个基本规律就是周期性.从海陆变迁、海进海退到多级夷平面、河流阶地等等地貌面的形成无不体现构造运动的周期性特点,黄汲清教授的多旋回学说就是对构造运动周期性的高度概括.地震丛集现象也正是反映了区域构造活动的脉动性特点,地震丛集发生的时期代表了区域构造活动的高潮期,地震丛集的间隔则代表了构造活动的低潮期.再比如海原—昌马地震系列反映的是青藏块体沿其北界相对于北部块体的向东滑动事件.可以说,地震丛集是构造活动的必然结果.

2 断裂间的相互作用

断裂间的相互作用是指一条断裂上的发震对一定范围内其它断裂应力状态的影响,尤其指对这些断裂的触震或缓震作用,因此也被称为地震间的相互作用.

引起断裂间发生相互作用的因素很多,大体上有以下5种:① 地震后静态应力应变的变化可能引起邻区其它断层的地震活动;② 应力会通过空间扩散在地壳的粘弹性层中聚集;③ 滑脱构造可通过弹性蠕变传递应变;④ 增高的孔隙流体压力能降低断层上的有效压力而促使破裂;⑤ 中地壳塑性层中的应变松弛,一条断层下面的应力会因次震层中的局部松弛和空间上的扩散而触发另一条断裂发震,这种机制可以解释时间上的延迟.这些作用机制都可能发挥作用,由于地区不同,构造、介质、应力场环境的千差万别,断裂间相互作用的主要方式或机制可能不同,但有一点可以肯定,就是断裂间相互作用是客观存在的.

2.1 断裂间相互作用模型

有关断裂间相互作用的研究中,常采用库仑破裂模型.根据库仑破裂准则,可以定义库仑应力 CFS 为

$$CFS = \tau + \mu(\sigma + p) - S \quad (1)$$

式中 τ 为一断层面的剪应力, σ 为正应力, p 为孔隙压力, S 为内聚力, μ 为摩擦系数.当库仑应力 $CFS \geq 0$ 时,该断层面即发生破裂.假定 μ 和 S 不随时间变化, CFS 改变量与剪应力改变量 $\Delta\tau$ 、正应力改变量 $\Delta\sigma$ 和孔隙压力改变量 Δp 之间有以下关系:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma + \Delta p) \quad (2)$$

假定介质均匀且各向同性,(2)式可近似为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma \quad (3)$$

其中 μ' 为视摩擦系数,它实质上包含了对孔隙压力的近似.采用库仑应力增量是由于我们往往不知道其绝对大小,而其增量比较容易求取. $\Delta CFS > 0$ 表示断裂面上加载,产生触震效应; $\Delta CFS < 0$ 则表示断层面上应力松弛,产生缓震效应.

按照弹性回跳理论,在通常情况下,断裂上的库仑应力按一定的速率(长期应力积累速率)

稳定增加, 如果不受断裂间相互作用的影响, 当库仑应力增加到一定程度(大于或等于 0)时, 断裂发生破裂, 能量得以释放, 断裂上又开始新一轮的能量积累, 如此循环往复. 而实际上的断裂都不是孤立的, 周围断层上的发震能引起该断裂上的剪应力、正应力及孔隙压力的增量 $\Delta\tau$ 、 $\Delta\sigma$ 和 Δp , 使库仑应力产生增量 ΔCSF , 从而引起触震(或缓震)作用. 对触震应力, 这里主要考虑静应力和动应力两种, 并依此引入以下两种基本模型:

(1) 同震静应力场改变触震模型. 这一模型的基本含义是: 一次地震后, 其周围一定区域内的静应力场会发生改变, 称之为同震静应力场改变; 区内的有些断裂会因这一改变而获得显著的库仑应力增量 ΔCSF , 这些断裂上的应力因此而突然间更加接近(或远离)破裂应力, 从而加速(或延缓)了断裂发震的进程, 其提前(或推迟)的时间等于断裂上库仑应力的改变量与长期应力积累速率之比(图 3). 需注意, 这一库仑应力的改变量或时间的改变量是作为不变量持之以恒地附加到断裂的背景值之上的, 直至断裂发生破裂.

理论计算表明, 一条断裂发生地震后能使周围一定范围内静态应力发生变化. 现代震例显示, 在 ΔCSF 的正值区发生的余震数远大于负值区, 因此这一模型有一定的依据.

已有计算结果表明, 一次地震引起的库仑应力增量一般约为 1~10 MPa, 对应的提前或推迟的时间为数年至数十年. 与一次大震中所产生的应力降相比, 静态应力改变对地震应力积累的贡献只占很小的份额, 但如果断裂上的应力积累已经接近于临界状态时, 这一很小的静态应力改变足以产生即时的触震作用.

另外, 一次地震后其周围的地震活动水平在短期内大幅度提高, 随后逐步恢复到接近地震前的水平, 这一现象可解释为断裂间相互作用的短期影响(图 3). 这一短期影响的时段约为 5~10 a^[3], 对地震丛集研究来说是一个重要的时间段.

(2) 瞬时触震模型. 这种模型强调动态应力的作用, 指应力在其传播的过程中对途经的断裂产生应力扰动而引起触震作用^[9]. 这种触震作用的影响范围广, 能远距离触震. 这种作用不能持久, 作用过后断裂上的应力又重新恢复到原来的状态, 因此这种作用不产生长期影响, 但是如果受影响断裂上的应力积累接近于临界状态时, 该作用完全可能触震. 因此这一模型对地震丛集研究有特殊意义.

2.2 断裂的方向、方位和性质与触震作用

按照静应力场改变触震模型, 一次地震后所引起的静应力改变是确定的, 这一变化并不是对周围所有断裂都产生触震(或缓震)作用, 这就要看断裂上的库仑应力是否发生大的改变, 这时断裂的方向、方位和性质就成了极重要的因素. 如果其中有些断裂上的库仑应力得以显著增大, 使断裂更趋向于破裂, 则说明这些断裂所处方向有利; 反之, 断裂上的库仑应力减小, 则表明断裂方向不利. 这种方向有利或不利与断裂本身的破裂习性也是相辅相成的, 同样的静应力场改变, 同样的断层方向, 对正断和逆断所产生的作用是完全不同的. 因此断裂的方向、方位和性质共同决定了该断裂是否受触震作用或受触震作用的强弱. 对于走滑断裂, 就要考虑断裂上的剪应力是否得以增加或压应力是否减小. 如果是, 则表明断裂受到触震作用; 如果出现相

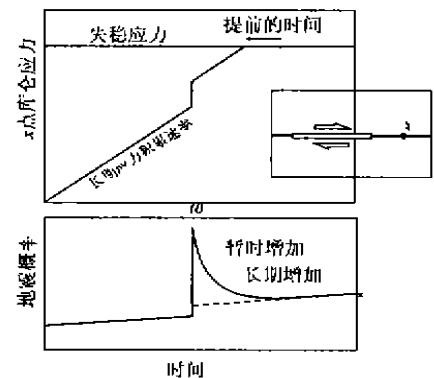


图 3 库仑应力改变引起触震作用及地震概率变化图解(据 Stein 等, 1997)

Fig. 3 Schematic illustration of the earthquake triggering and earthquake probability change caused by the Coulomb stress change(after Stein et al., 1997).

反的情况,则表明断裂被缓震.例如,1944 和 1946 年日本南部的板块边界上发生了两次大地震,这两次地震使一断层上的主压应力减小,从而触发了 1995 年神户地震^[10](图 4).为便于定性分析,我们对一些典型的断裂的触震样式进行了简单归纳(图 5).

3 关于北祁连山东段地震危险性

北祁连山东段活动断裂主要包含两条北西—近东西向断裂带.其一为北祁连主活动断裂带东段,由老虎山断裂、毛毛山断裂、金强河断裂组成,呈向北东突出的弧形,总体走向 340°.其西与冷龙岭断裂相接,东与海原断裂以喜集水拉分盆地搭接,构成区域内大型活动断裂带.中更新世以来,该断裂带进行大规模左旋走滑活动.其二为古浪断裂带,走向近东西,与前者有一不大的夹角,西端为金强河断裂所截,向东可与天景山弧形构造带相连.此外,在山系的北缘有一系列向北部武威盆地逆冲的逆断裂,这些断裂均上陡下缓,在深部收敛于北祁连活动断裂带^[11].上述断裂共同构成了青藏高原东北界的一部分(图 6).这些断裂的基本参数见表 1.

关于此区的强震危险性,许多学者都得出了类似的认识.刘百箴等用确定性方法得出的结论是,毛毛山段和金强河段末次地震离逝时间均已超过其平均复发周期,并且两者组合发生更大地震 ($M_s \approx 7.7$) 的可能性很大^[12].

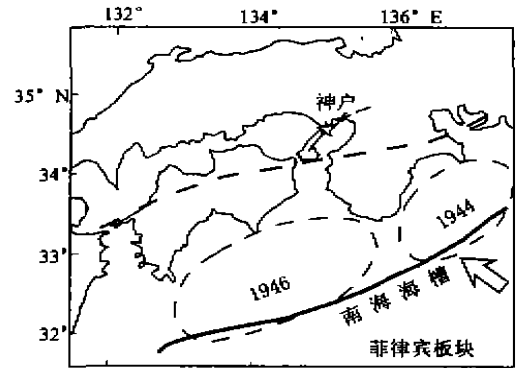


图 4 1995 年日本神户地震与 1944、1945 年两次地震的关系(据 Pollitz 等, 1997)
Fig. 4 The positional connection among the 1995, 1944 and 1945 earthquakes in Japan (after Pollitz et al., 1997).

Gaudemer 等认为天祝盆地的地震形势已经十分紧迫^[11].张培震等(1996)经计算认为,毛毛山断裂和金强河断裂的地震危险性比较大,其地震复发的累计概率分别达到 0.6888 和 0.6884.这些认识是依据特征地震理论得出的结果,因此有必要从地震的丛集性和断裂间相互作用的角度来评价毛毛山断裂和金强河断裂的地震危险性.

祁连山断裂带与海原断裂共同组成青藏高原东北部边界,全长可达 1 000 km.历史地震记录中自公元 180 年以来沿此构造带仅有两次 7 级以上大震,而从 1920 年海原 8.5 级地震开始先后发生了 1927 年古浪 8 级地震、1932 年昌

断裂间的基本空间配置关系		断裂破裂性质		相互作用	说明
平行	——	性质相同	——	触震作用	常见
		性质不同	——	不确定	不多见
		性质相同	——	触震作用	常见
			——	缓震作用	
	——	性质不同	——	触震作用	
			其它组合	不确定	
		性质相同	——	缓震作用	常见
			——	触震作用	
性质不同	——	缓震作用			
	其它组合	不确定			
垂直	—			作用不明显	
斜交	— /			介于平行和垂直两种作用之间	

—— 已发震断裂 —— 待发震断裂

图 5 断裂间相互作用的基本样式
Fig. 5 Main types of fault interaction.

马7.6级地震和1954年山丹7¼级地震。自180年至现在1800多年中共发生6次7级以上大震,而其中4次就发生在1920~1954年短短的34a中,因而是一个典型的丛集事件。如前所述,地震的丛集期之间一般有数百年的间隔,而祁连山断裂带的一个地震丛集序列或轮回结束不到百年。纵观本区的地震历史就不难发现,沿青藏高原东北界,在昌马-海原这一大型构造带上除了海原-昌马地震系列外鲜有7级以上大震发生,也就是说丛集期之间的间隔为几百年。这与冈伟(1998)用古地震资料得出结论相似。由于本区强震系列至今还不足百年,因此,根据特征地震模型所预期的大震可能暂不发生。

本区的另一个特殊情况是,就在毛毛山和金强河断裂的西北部发生了1927年古浪8级地震,其震中距两断裂仅50km左右。毋庸置疑,古浪地震对毛毛山和金强河断裂的地震潜势产生重大影响。那么古浪地震对两断裂产生了什么样的影响呢?研究表明,古浪地震发震的基本构造为一向北逆冲的大型推覆构造^[11],地表破裂主要表现为若干条NWW向逆冲陡坎。显然,地震前该推覆构造所在的区段承受着巨大的挤压应力,而古浪地震则使之大幅度卸解,此段的应力卸解就意味着相邻区段的应力的增强,引起震源体东西两端邻区近南北方向上的挤压应力增强。如果用地表形变范围圈定震源体的大小(图6),不难发现整个毛毛山断裂和金强河断裂的东段恰好处在挤压应力增强的区域。按照静应力改变触震模型,两条断裂上的挤压应力增大了,库仑应力减小了(参见(3)式),从而延迟了既定地震的发生时间。

表1 祁连山东段各断裂段基本参数

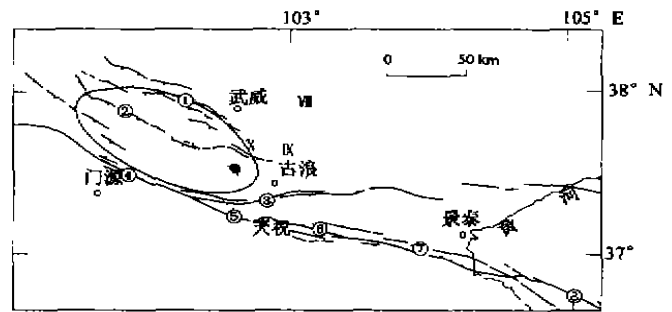
断裂段	运动性质	断裂长度 /km	特定震级 M_s	滑动速率 /($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	重复周期 /a	末次地震高 逝时间/a	资料来源
老虎山断裂	左旋逆走滑			3.0 ± 0.2	1 000	560	刘百巍等(1992)
毛毛山断裂	左旋逆走滑	54	7.1	2.9~3.2	3 000	560	刘百巍等(1992)
金强河断裂	左旋走滑	56	7.2	3.6~4.5	2 800	540	刘百巍等(1992)
冷龙岭断裂	左旋逆走滑	50	7.0	3.4~4.4	1 370	450	何文贵(1998)①

另一方面,根据静态触震具有的短期效应的特点及动态触震模型,古浪地震后有一个高发震概率的时段,而毛毛山和金强河断裂显然经受住了考验,说明该两断裂上的库仑应力还不够高。古浪地震就如同是一块试金石,它似乎告诉我们,毛毛山和金强河断裂的发震尚待时日。

[参考文献]

- [1] Kagan Y Y, Jackson D D. Long-term earthquake clustering[J]. Geophys. J. Int., 1991, 104:117~133.

① 何文贵.冷龙岭活动断裂带的定量化研究.北京大学硕士学位论文,1998.



① 武威盆地南缘断裂;② 双塔-皇城断裂;③ 古浪断裂;
④ 冷龙岭断裂;⑤ 金强河断裂;⑥ 毛毛山断裂;
⑦ 老虎山断裂;⑧ 海原断裂;点线为1927年古浪地震等震线;
粗虚线表示古浪地震震源体范围

图6 祁连山东段的断裂展布

Fig. 6 The distribution of the faults in the eastern Qilian Mountains.

- [2] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B10):24347~24358.
- [3] Stein R S, Barka A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering [J]. *Geophys. J. Int.*, 1997, 128:594~604.
- [4] 丁国瑜. 我国的强震系列与第四纪活动断裂带[A]. 见:第三届全国第四纪学术会议论文集[C]. 北京:科学出版社, 1982. 184~194.
- [5] Shmuel Marco, et al. Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B3):6179~6191.
- [6] Pirazzoli P A, et al. Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B3):6083~6097.
- [7] Christopher O Sanders. Interaction of the San Jacinto and San Andreas fault zones, Southern California: triggered earthquake migration and coupled recurrence intervals[J]. *Science*, 1993, 260(14):973~976.
- [8] 丁国瑜. 第四纪断层面上断裂活动的群集及迁移现象[J]. *第四纪研究*, 1989, (1):36~47.
- [9] Comberg J, Beeler N M, Blanpied M L, Bodin P. Earthquake triggering by transient and static deformations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B10):24411~24426.
- [10] Pollitz F F, Sack I S. The 1995 Kobe, Japan, earthquake: A long-delayed aftershock of the offshore 1944 Tonankai and 1946 Nankaido earthquakes[J]. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 1997, 87:1~10.
- [11] Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, Pelzer G, Guo Shun-min, Chen Zhi-tai, Dai Hua-guang, Cifuentes I. Partitioning of crustal slip between linked active faults in the eastern Qilian Mt., and evidence for a major seismic gap, the "Tianzhu Gap", on the western Haiyuan fault, Gansu (China)[J]. *Geophys. J. Int.*, 1995, 120:599~645.
- [12] 刘百麓, 袁道阳, 何文贵, 刘小凤. 海原断裂带西端强震危险性分析[J]. *西北地震学报*, 1992, 14(增刊):49~56.

EARTHQUAKE CLUSTERING AND FAULT INTERACTIONS; A DISCUSSION ON THE SEISMIC HAZARD IN THE EAST QILIAN MOUNTAINS, CHINA

CHEN Wen-bin¹, XU Xi-wei², LIU Bai-chi¹

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*;

2. *Institute of geology, CSB, Beijing 100029, China*)

Abstract: Proceeding from actual clustering of earthquakes, the primary characteristics, regularities and mechanism of earthquake clustering and fault interactions as well as their implication to earthquake prediction are discussed. Then the seismic hazard in the east Qilian Mountains is analyzed qualitatively. The occurrence of 1927 Gulang M_S 8.0 earthquake deeply affects to the potential of future earthquakes on the faults in this region. It implies that: ① future great earthquakes in the region will probably not occur until next earthquake clustering; ② the occurrence of the Gulang earthquake increases the compressive stress on the Jinqianghe-Maomaoshan fault zone which was believed to be most dangerous, thereby postponing the occurrence of the supposed great earthquake.

Key words: Qilian Mountains; Fracture zone; Seismic risk evaluation; Earthquake clustering