

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.04.010

# 以鲜水河断裂带中-北段为例探讨强震活动 对活动断层大震复发行为的影响

惠春<sup>1)</sup> 潘华<sup>1)</sup> 徐晶<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

**摘要** 确定影响大地震周期性复发的干扰因素和原因对活动断裂强震危险性评价具有非常重要的意义。文中基于弹性回跳理论,介绍了活动断裂上中强地震活动对大震复发的影响,提出了利用地震矩释放率法和库仑应力改变分别来计算同一断层和周边断层上发生的强震扰动对断层大地震复发的影响时间 $\Delta t$ ,并以鲜水河断裂带中-北段为例进行研究。结果表明1904年、1981年道孚段发生的M7.0和M6.9地震导致道孚—乾宁段大地震复发分别延迟约80a和45a;1923年倡促M7.3级和1967年侏倭M6.8级2次强震使得甘孜—炉霍段的大地震复发时间提前约35a。

**关键词** 影响时间 地震矩 库仑应力 鲜水河断裂带

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2018)04-0861-11

## 0 引言

Reid(1910)提出的弹性回跳理论,是当今活动断裂强震危险性评价的重要理论基础。依据该理论,活动断裂在长期活动过程中会周期性重复发生震级相当的大地震,称为“特征地震”(Schwartz *et al.*, 1984)。大量证据证明,特征地震的复发行为是普遍存在的,如中国的海原断裂带、可可托海—二台断裂带、鲜水河断裂带、小江断裂带的古地震和历史地震资料都显示出强震的周期性复发行为(宋方敏等, 1998)。但大多数活动断裂上实际地震的发生并不满足周期性模型(periodic model)的理想化状态,而表现出复发间隔的非周期性甚至随机性。因此,在活动断裂强震危险性分析中,许多学者提出了不同的特征地震复发间隔模型来描述特征地震的活动性,如对数正态分布模型(Nishenko *et al.*, 1987)、正态分布模型(Hebden *et al.*, 2009)、布朗过程时间模型(Matthews *et al.*, 2002)等。其中,引入随机扰动的布朗过程时间(BPT)模型成为当前应用最广泛的模型,Working Group on California Earthquake Probabilities(2003, 2007)就曾运用BPT模型预测美国加利福尼亚州旧金山湾地区的强震危险性。但在一个完整的特征地震的轮回过程中会发生各种随机干扰,导致平稳的应力状态瞬间被加载或卸载而发生改变,下一次大震的发生被提前或延迟,复发间隔也不再具有固定的周期性。这些扰动既可能来自于活动断裂上的中小地震,也可能来自于周边断层发生的中强地震。同一断层上

[收稿日期] 2017-09-18 收稿, 2018-01-04 改回。

[基金项目] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB18B21)与国家科技支撑项目(2012BAK15B01-08)共同资助。

发生的中强地震可能会导致已经积累的能量瞬间释放,从而会导致大震延迟发生;周边断层发生的中强地震可能会使断层的应力累积状态瞬间增大,甚至直至临界状态,导致大震的发生提前。考虑随机扰动的复发间隔模型虽然被大量用于估计活动断裂上强震复发的概率,但这些模型难以解释具体的活动断裂上以往中强地震活动对大震复发的影响,也难以解释周围断裂活动相互影响对未来大震复发行爲的干扰。

近年来,国内外一些学者也对断层间相互作用和地震触发展开了研究(Toda *et al.*, 1998, 2002, 2003, 2005, 2008; Ma *et al.*, 2005; Parsons *et al.*, 2008; 王辉等, 2008; 徐晶等, 2013), 这些研究中断层间相互作用都是以库仑破裂应力变化的研究为基础,通过计算 1 次大地震产生的库仑应力变化定性研究是否触发了周边断层的地震。

本文在弹性回跳的理论基础上,利用描述活动断层状态的物理量——地震矩和应力,研究了强震活动对活动断裂带上大震复发行爲的扰动影响,并以鲜水河断裂带中-北段为例,分析了 1904 年、1981 年道孚段分别发生的  $M7.0$  和  $M6.9$  地震对道孚—乾宁段大地震复发的影响以及 1923 年倡促  $M7.3$  地震和 1967 年侏倭  $M6.8$  地震对甘孜—炉霍段的大地震复发的影响。

## 1 方法与原理

### 1.1 强震对大地震发生时间的影响

假设断层所在区域的长期应力累积率  $\lambda$  不变,同一断层或周边断层在特征大地震循环的某一时刻  $t$  受到强震扰动之后,可能会造成断层上的库仑应力瞬间改变(图 1),增加或缩短断层依靠长期区域构造应力来积累的应变能。如果是加载式扰动(图 1a),可能使断层段的应力提前达到临界状态而触发地震,如果是卸载式扰动(图 1b),会降低断层的应力水平延缓到达使其破裂的临界状态。

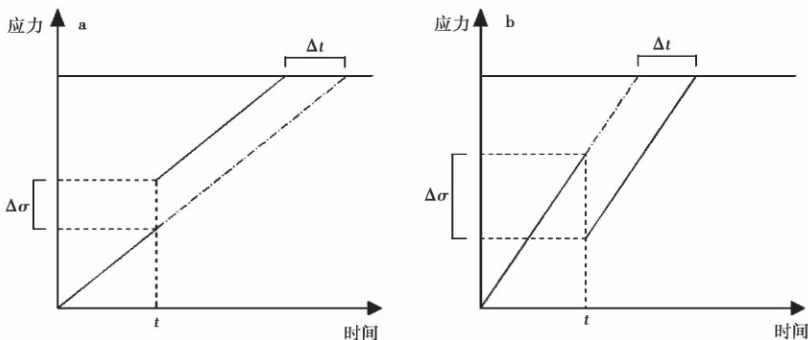


图 1 强震影响大地震示意图

Fig. 1 The influence of strong earthquake to major earthquake.

描述地震状态的物理量不仅限于应力,也可以用地震矩或能量来表示。本文在计算强震扰动对大地震影响时间  $\Delta t$  时,分别利用地震矩和库仑应力变化来计算同一断层和周边断层发生的强震对特征大地震复发周期的影响。

### 1.2 地震矩释放率法(Wesnousky, 1986)

假设某条断层发生 1 次大地震释放的地震矩为  $M$ , 大地震的复发周期为  $T$ , 若同一断层处下一次特征大地震之前发生了 1 次震级相对大地震偏小的强震,释放的地震矩为  $M'$ , 则强震

扰动的扰动参数  $\sigma$  和造成的  $\Delta t$  可表示为

$$\sigma = \frac{M'}{M}, \Delta t = \sigma \cdot T = \frac{M'}{M} T \quad (1)$$

没有测量地震矩的古地震,可以通过震级和地震矩的经验关系得到地震矩(Hanks *et al.*, 1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7 \quad (2)$$

其中,  $M_0$  为地震矩,  $M_w$  为对应的矩震级。

### 1.3 库仑应力变化

岩石实验表明,受压岩石的破裂近似遵守库仑破裂准则(Jaeger *et al.*, 1969)。1次强震之后会引起断层及其周边地区的库仑应力的变化,可以通过分析断层周围发生1次强震造成的应力变化来研究断层间的相互作用。

假设周边断层发生的强震扰动引起断层的应力变化为  $\Delta CFS$ , 大地震的复发周期为  $T$ , 断层处发生1次大地震之后的应力降为  $\Delta\sigma$ , 则强震的扰动参数和造成的影响时间  $\Delta t$  可表示为

$$\sigma = \frac{\Delta CFS}{\Delta\sigma}, \Delta t = \sigma \cdot T = \frac{\Delta CFS}{\Delta\sigma} T \quad (3)$$

运用库仑应力计算公式,断层面上库仑破裂应力变化  $\Delta CFS$  为

$$\Delta CFS = \Delta|\tau| + \mu\Delta|\sigma_n| \quad (4)$$

其中,  $\Delta|\tau|$  为断层上剪应力的变化量,  $\Delta|\sigma_n|$  为断层上正应力的变化量,  $\mu$  为有效摩擦系数(Harris, 1998)。

应力降的计算公式可以由(Knopoff, 1958; Kanamori *et al.*, 1975)给出:

$$\Delta\sigma = C\mu \left( \frac{\bar{D}}{\tilde{l}} \right) \quad (5)$$

其中,  $\mu$  是岩性刚度,  $C$  是无量纲的形状参数,  $\bar{D}/\tilde{l} \equiv \Delta\tilde{\epsilon}$  表示相对应变变化量,  $\bar{D}$  是平均位移量。

## 2 鲜水河断裂带中-北段上几次强震对大地震复发的影响

鲜水河断裂带是位于青藏高原东缘的1条晚第四纪强烈活动的大型左旋走滑断裂,是中国大陆地壳运动变形最强烈的断裂带之一(李珏, 1993)。通常所说的鲜水河断裂带主要是指北起甘孜东谷附近,大体呈NW-SE向展布,经炉霍、道孚、康定延伸至泸定的磨西以南的部分,全长大约350km(罗灼礼等, 1987; 李天昭, 1997)。该断裂带历史上发生多次强震,自1700年以来,经历了1725—1816年及1893—1981年2次地震活跃期,发生6级以上地震22次,7级以上地震8次(王贵宣等, 1995; 王辉等, 2008)。1981年道孚  $M6.9$  地震是距今最近的1次强震,2014年11月22日康定发生了  $M_w 5.9$  地震(易桂喜等, 2015)(图2)。强烈的构造活动使得对鲜水河断裂中长期大地震的危险性评估具有重要意义。

鲜水河断裂带的地震危险性一直备受地震学家的关注,国内外关于鲜水河断裂带的相关研究成果非常丰富(罗灼礼等, 1987; 钱洪等, 1988; 李天昭, 1997; 易桂喜等, 2005)。同时研

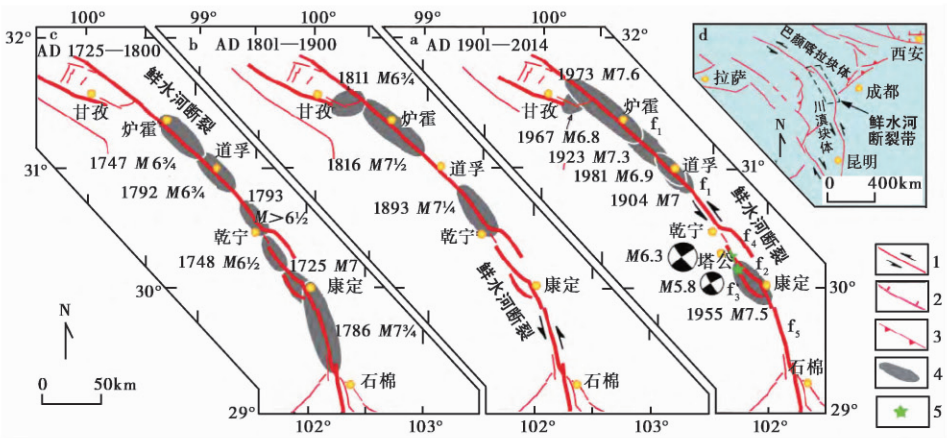


图2 鲜水河断裂带的空间展布和历史地震(据易桂喜等, 2015)

Fig. 2 Tectonics and the historical earthquakes along the Xianshuihe fault zone (after YI Gui-xi et al., 2015).

1 走滑断层, 2 正断层, 3 逆断层, 4 历史震源破裂区, 5 2014年康定 M6.3、M5.8 级地震震中;

$f_1$  鲜水河断裂,  $f_2$  色控哈断裂,  $f_3$  折多塘断裂,  $f_4$  雅拉河断裂,  $f_5$  磨西断裂

究也表明,地震之间存在相互作用。例如,张秋文等(2003)研究了鲜水河断裂带不同的断裂段上连续发生4次M6.0以上的地震,探讨强震发生以后对周围断裂带上库仑应力的影响及对后续地震的触发作用;Shan等(2013)建立了鲜水河-小江断裂及周边区域岩石圈分层结构模型,研究了自1713年以来库仑应力演化情况;王辉等(2008)采用三维有限元模型研究了断裂带上1893年以来6级以上地震的相互作用及其对强震复发的影响;徐晶等(2013)采用分层黏弹介质模型计算了1893年以来鲜水河断裂由同震、震后、震间效应所引起的库仑应力随时间变化,结果表明历史地震均发生在库仑应力明显增强的区域。

本节以鲜水河断裂带中-北段上1904年M7.0级地震、1981年道孚M6.9级地震、1967年侏倭M6.8级地震、1923年倡促M7.3级、地震1973年炉霍M7.6级地震为例,分别以地震矩和库仑应力变化来探讨同一断层和周边断层发生强震扰动事件对大地震周期性复发的影响。

## 2.1 1904年、1981年道孚段分别发生的M7.0级和M6.9级地震对道孚—乾宁段大地震复发的影响

根据历史地震记录,鲜水河断裂带道孚—乾宁段在1893年发生过M7¼级大地震(闻学泽,2000),于1904、1981年分别发生了M7.0级和M6.9级的强震,本文取此段大地震震级上限为7.5级。

根据已有的研究资料,鲜水河断裂带NW段平均滑动速率在 $10\sim 14\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (闻学泽等,1989;周荣军等,2001;方颖等,2015),本文取 $12\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。再结合鲜水河断裂带上大地震滑移量的相关研究可知,鲜水河断裂带上7.5级左右的大地震滑移量为 $2\sim 4\text{m}$ (Zhou et al., 1983a, b),本文取3m。故可推算出道孚—乾宁段发生7.5级大地震的复发周期 $\mu$ 约250a( $3\text{m}/12\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}=250\text{a}$ )。故道孚—乾宁段自1893年以来,下次大地震发生的时间应该大约在2143年( $1893+250$ )左右,但由于在大地震循环过程中存在多种随机干扰因素而导致复发间隔的不确定性,本节只讨论道孚段于1904、1981年分别发生的M7.0和M6.9的2次强震干扰对道孚—乾宁段大地震复发造成的影响。

根据表 1 可知, 1893 年  $M7\frac{1}{4}$ 、1904 年  $M7.0$ 、1981 年  $M6.9$  的地震矩分别为  $3.9 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $1.25 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $0.7 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 结合式 (1) 可分别得到 1904 年  $M7.0$ 、1981 年  $M6.92$  次强震扰动的扰动参数  $\sigma$  为 0.32、0.18, 即道孚—乾宁段大地震复发延迟时间  $\Delta t$  分别约 80a、45a。在影响大地震复发间隔的众多随机干扰因素中, 本节所考虑的道孚—乾宁段 2 次确定性强震干扰会造成大地震复发延迟约 125a。

表 1 1893 年以来鲜水河断裂带  $M6.7$  级以上地震的震源参数 (据 Papadimitriou *et al.*, 2004; Shan *et al.*, 2013)

Table 1 Seismic source parameters of the earthquakes with  $M \geq 6.7$  on the Xianshuihe fault zone since 1893 (after Papadimitriou *et al.*, 2004; Shan *et al.*, 2013)

年份	地名	东经/(°)	北纬/(°)	震级	走向/(°)	倾向/(°)	滑动角/(°)	破裂长度/km	地震矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$
1893	乾宁	101.50	30.60	7.2	322	85	13	50	$3.90 \times 10^{19}$
1904	道孚	101.10	31.00	7.0	322	85	13	50	$1.25 \times 10^{19}$
1923	倡促	100.80	31.30	7.2	116	90	10	60	$5.76 \times 10^{19}$
1967	侏倭	100.23	31.63	6.8	245	45	42	20	$4.1 \times 10^{18}$
1973	炉霍	100.24	31.50	7.6	116	90	10	105	$1.34 \times 10^{20}$
1981	道孚	101.10	31.00	6.9	319	73	-4	44	$0.70 \times 10^{19}$

## 2.2 1923 年倡促 $M7.3$ 地震和 1967 年侏倭 $M6.8$ 地震对甘孜—炉霍段的大地震复发的影响

甘孜—炉霍段曾在 1816 年和 1973 年分别发生了  $M7\frac{1}{2}$  级和  $M7.6$  地震 (图 2), 说明此段有发生  $M \geq 7.5$  级大地震的机制。同时, 炉霍 1973 年地震发生 6a 前, 附近的侏倭发生过 1 次  $M6.8$  地震。在此之前, 倡促段曾在 1923 年发生了  $M7.3$  地震。故本节讨论这 2 次发生在甘孜—炉霍周边断层的强震对该段大地震复发的影响。

同样取滑动速率为  $12 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  (闻学泽等, 1989; 周荣军等, 2001; 方颖等, 2015), 滑移量取 3m (Zhou *et al.*, 1983a, b), 故可推算出甘孜—炉霍段发生 7.5 级大地震的复发周期  $\mu$  约 250a。所以甘孜—炉霍段自 1816 年以来, 下次大地震发生的时间应该大约在 2066 (1816 + 250) 年, 而事实上由于多种随机干扰造成提前了约 93 (2066 - 1973) a。

强震的应力降很少超过 10MPa, 例如实际的地应力测量结果表明, 2001 年昆仑山 8.1 级地震前后的地应力测量值降低, 约为原值的  $\frac{2}{3}$ , 应力降在 4.6~9.4MPa 之间 (Liao *et al.*, 2003; 王辉等, 2008)。数字地震学的结果也表明川滇地区的地震应力降相对较低 (秦嘉政等, 2005; 张永久等, 2006)。再结合对鲜水河断裂带现有的应力降研究资料发现, 7.5 级左右的大地震应力降为 2~5MPa 左右 (Zhou *et al.*, 1983a, b; 刘桂萍等, 2002)。本文综合取平均值可得鲜水河断裂带 7.5 级左右地震的应力降  $\Delta\sigma$  为 3MPa。

同时已有的研究结果 (王辉等, 2008; 徐晶等, 2013; 吴萍萍等, 2014) 显示 1923 年倡促地震和 1967 年侏倭地震使得甘孜—炉霍段的库仑应力上升了约 0.1~0.5MPa。

本文在前人研究的基础上, 采用更符合实际地质结构的分层黏弹介质模型, 使用 Wang 等 (2006) 给出的 PSGRN/PSCMP 的程序来计算侏倭  $M6.8$  级地震和倡促  $M7.3$  级地震造成甘孜—炉霍段的库仑应力变化。计算得到这 2 次强震对周边地区产生的库仑破裂变化分布如图 3 所示。计算深度为 10km, 图 3a 为 1923 年倡促  $M7.3$  级地震和 1967 年侏倭  $M6.8$  级地震引起

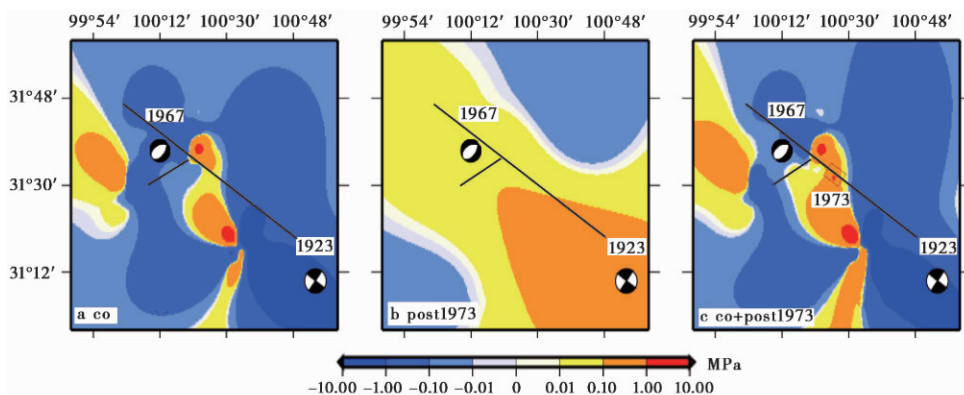


图3 1923年倡促  $M7.3$  级地震和1967年侏倭  $M6.8$  级地震产生的库仑应力变化分布图

Fig. 3 Coulomb stress change distribution after the Changcu  $M7.3$  earthquake in 1923 and the Zhuwo  $M6.8$  earthquake in 1967.

的甘孜—炉霍段断层面上同震库仑应力变化；图3b为1923年倡促  $M7.3$  级地震和1967年侏倭  $M6.8$  级地震震后的黏滞松弛效应在甘孜—炉霍段断层面上产生的库仑应力变化；图3c为1923年倡促  $M7.3$  级地震和1967年侏倭  $M6.8$  级地震（同震+震后）引起的甘孜—炉霍段断层面上的库仑应力变化。鲜水河断裂带断层分段参数参考表1，震源参数参考表2。

表2 鲜水河断裂带分段参数(据 Papadimitriou *et al.*, 2004; 吴萍萍等, 2014)

Table 2 Parameters of major fault segments of Xianshuihe fault zone  
(after Papadimitriou *et al.*, 2004; WU Ping-ping *et al.*, 2014)

名称	断层中心		走向/(°)	倾角/(°)	长度/km	滑动速率/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
	东经/(°)	北纬/(°)				
侏倭	100.2	31.6	240	60	20	4
炉霍	100.42	31.62	305	90	90	13
倡促	100.82	31.225	312	90	31	13
道孚	101.07	31.00	317	90	34	12
乾宁	101.9	30.72	325	80	31	12

结果显示2次强震使得在1973年甘孜—炉霍段  $M7.6$  级地震震中附近处库仑应力（同震+震后）增加约  $0.42\text{MPa}$ 。取  $\lambda = 12\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $\mu = 250\text{a}$ ,  $\sigma = 0.42\text{MPa}/3\text{MPa} = 0.14$ , 带入式(3)中可得到2次强震扰动造成1973年甘孜—炉霍段  $M7.6$  大地震提前时间  $\Delta t$  约  $\sigma \cdot \mu = 35\text{a}$ 。结果表明造成甘孜—炉霍段大震提前93a发生的多种因素中, 仅倡促  $M7.3$  和侏倭  $M6.8$  级2次相邻断层上的强震扰动就占到约37.6%。

### 3 讨论与结论

本文利用地震矩和库仑应力变化对影响大地震周期性复发的干扰因素进行了定量研究, 并以鲜水河断裂带的几次强震为例。研究表明, 1条断层如果发生1次强震可能会让该断层平稳累积的应力部分得到卸载, 从而延缓了该断层大地震复发的时间。本文通过计算道孚—乾宁

段几次强震的地震矩,得到1904年、1981年道孚段分别发生的 $M7.0$ 和 $M6.9$ 级2次强震导致道孚—乾宁段大地震延迟复发约125a。

然而,强震的复发同样可能会让与之相邻的断层平稳累积的应力状态得到加载,甚至直至临界状态,导致大震的发生被提前。本文通过计算侏倭段和倡促段发生的强震对甘孜—炉霍段的应力积累,分析得到1923年倡促 $M7.3$ 地震和1967年侏倭 $M6.8$ 地震使得甘孜—炉霍段的大地震复发被提前了约35a,在造成甘孜—炉霍段大震提前发生的各种随机干扰因素中约占37.6%。

通过计算每次强震扰动对大地震复发的影响时间,可以实时对大地震的应力状态进行监控,更新每次强震扰动之后的大地震可能发生的复发间隔,从而更加准确地对地震危险性进行分析。

### 参 考 文 献

- 方颖,张晶,江在森,等. 2015. 用跨断层形变资料分析鲜水河断裂西北段的运动特征[J]. 地球物理学报, 58(5): 1645—1653.
- FANG Ying, ZHANG Jing, JIANG Zai-sen, *et al.* 2015. Movement characteristics of the northwest segment of the Xianshuihe fault zone derived from cross-fault deformation data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(5): 1645—1653(in Chinese).
- 李坪. 1993. 鲜水河—小江断裂带[M]. 北京:地震出版社:1—259.
- LI Ping. 1993. The Xianshuihe-Xiaojiang Fault Zone [M]. Seismological Press, Beijing: 1—259(in Chinese).
- 李天昭主编. 1997. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估[M]. 成都:成都地图出版社:1—125.
- LI Tian-tiao. 1997. Xianshuihe Active Fault Zone and Evaluation of Risk for Strong Earthquakes [M]. Chengdu Cartographic Publishing House, Chengdu: 1—125(in Chinese).
- 罗灼礼,钱洪,闻学泽. 1987. 鲜水河断裂与圣安德列斯断层的地震地质对比研究[J]. 四川地震, (4): 1—10, 20.
- LUO Zhuo-li, QIAN Hong, WEN Xue-ze. 1987. Comparisons study between the Xianshuihe Fault and San Andreas Fault [J]. Earthquake Research in Sichuan, (4): 1—10, 20(in Chinese).
- 钱洪, Allen C R, 罗灼礼, 等. 1988. 全新世以来鲜水河断裂的活动特征[J]. 中国地震, 4(2): 9—18.
- QIAN Hong, Allen C R, LUO Zhuo-li, *et al.* The active characteristics of Xianshuihe Fault in Holocene [J]. Earthquake research in China, 1988, 4(2): 9—18.
- 秦嘉政,钱晓东,叶建庆. 2005. 2001年施甸 $M_s5.9$ 地震序列的震源参数研究[J]. 地震学报, 27(3): 250—259.
- QIN Jia-zheng, QIAN Xiao-dong, YE Jian-qing. 2005. A study on the focal parameters of Shidian  $M_s=5.9$  earthquake sequences in 2001 [J]. Acta Seismologica Sinica, 27(3): 250—259(in Chinese).
- 刘桂萍,傅征祥. 2002. 1973年炉霍大地震( $M_s=7.6$ )最大余震( $M_s=6.3$ )的库仑破裂应力触发[J]. 中国地震, 2002(2): 57—64.
- LIU Gui-ping, FU Zheng-xiang. 2002. The triggering mechanism of the aftershock( $M_s=6.3$ ) of the 1973 Luhuo great earthquake( $M_s=7.6$ ) [J]. Earthquake Research in China, 2002(2): 57—64.
- 宋方敏,汪一鹏,俞维贤,等. 1998. 小江活动断裂带[M]. 北京:地震出版社.
- SONG Fang-min, WANG Yi-peng, YU Wei-xian, *et al.* 1998. The Active Xiaojiang Fault Zone [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).

- 王贵宣, 郑大林, 张肇诚, 等. 1995. 鲜水河断裂带地震活动特征及强震发生随时间增长概率 [J]. 地震研究, 18(3): 221—226.
- WANG Gui-xuan, ZHENG Da-lin, ZHANG Zhao-cheng, *et al.* 1995. The seismicity features of the Xianshuihe fault zone and increasing probability of strong earthquake occurrence with time [J]. Journal of Seismological Research, 18(3): 221—226(in Chinese).
- 王辉, 刘杰, 石耀霖, 等. 2008. 鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究 [J]. 中国科学(D辑), 38(7): 808—818.
- WANG Hui, LIU Jie, SHI Yao-lin, *et al.* 2008. Dynamic simulation of interactions between major earthquakes on the Xianshuihe fault zone [J]. Science in China(Ser D), 51(10): 1388—1400.
- 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼, 等. 1989. 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 [J]. 地震学报, 11(4): 362—371.
- WEN Xue-ze, Allen C R, LUO Zhuo-li, *et al.* 1989. Segmentation, geometric features and their seismotectonic implications for the Holocene Xianshuihe fault zone [J]. Acta Seismologica Sinica, 11(4): 362—371.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征 [J]. 地震地质, 22(3): 239—249.
- WEN Xue-ze. 2000. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, western Sichuan [J]. Seismology and Geology, 22(3): 239—249(in Chinese).
- 吴萍萍, 李振, 李大虎, 等. 2014. 基于 ANSYS 接触单元模型的鲜水河断裂带库仑应力演化数值模拟 [J]. 地球物理学进展, 29(5): 2084—2091.
- WU Ping-ping, LI Zhen, LI Da-hu, *et al.* 2014. Numerical simulation of stress evolution on Xianshuihe Fault based on contact element model [J]. Progress in Geophysics, 29(5): 2084—2091(in Chinese).
- 徐晶, 邵志刚, 马宏生, 等. 2013. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1146—1158.
- XU Jin, SHAO Zhi-gang, MA Hong-sheng, *et al.* 2013. Evolution of Coulomb stress and stress interaction among strong earthquakes along the Xianshuihe fault zone [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(4): 1146—1158(in Chinese).
- 易桂喜, 范军, 闻学泽. 2005. 由现今地震活动分析鲜水河断裂带中-南段活动习性与强震危险地段 [J]. 地震, 25(1): 58—66.
- YI Gui-xi, FAN Jun, WEN Xue-ze. 2005. Study on faulting behavior and fault-segments for potential strong earthquake risk along the central-southern segment of Xianshuihe fault zone based on current seismicity [J]. Earthquake, 25(1): 58—66(in Chinese).
- 易桂喜, 龙锋, 闻学泽, 等. 2015. 2014年11月22日康定M6.3地震序列发震构造分析 [J]. 地球物理学报, 58(4): 1205—1219.
- YI Gui-xi, LONG Feng, WEN Xue-ze, *et al.* 2015. Seismogenic structure of the M6.3 Kangding earthquake sequence on 22 Nov. 2014, southwestern China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(4): 1205—1219(in Chinese).
- 张秋文, 张培震, 王乘, 等. 2003. 鲜水河断裂带断层间相互作用的触震与缓震效应 [J]. 地震学报, 25(2): 143—153.
- ZHANG Qiu-wen, ZHANG Pei-zhen, WANG Cheng, *et al.* 2003. Earthquake triggering and delaying caused by fault interaction on Xianshuihe fault belt, southwestern China [J]. Acta Seismologica Sinica, 25(2): 143—153(in Chinese).
- 张永久, 彭立国, 程万正. 2006. 马尔康地震序列震源参数研究 [J]. 中国地震, 22(1): 85—93.
- ZHANG Yong-jiu, PENG Li-guo, CHENG Wan-zheng. 2006. Study on source parameters of the Maerkang earthquake



- sequence [J]. *Earthquake Research in China*, 22(1): 85—93 (in Chinese).
- 周荣军, 何玉林, 黄祖智, 等. 2001. 鲜水河断裂带乾宁—康定段的滑动速率与强震复发间隔 [J]. *地震学报*, 23(3): 250—261.
- ZHOU Rong-jun, HE Yu-lin, HUANG Zu-zhi, *et al.* 2001. The slip rate and strong earthquake recurrence interval on the Qianning-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 23(3): 250—261 (in Chinese).
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale [J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5): 2348—2350.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *Journal of Geophysical Research*, 103(B10): 24347—24358.
- Hebden J S, Stein S. 2009. Time-dependent seismic hazard maps for the New Madrid seismic zone and Charleston, South Carolina, areas [J]. *Seismological Research Letters*, 80(1): 12—20.
- Jaeger J C, Cook N G W. 1969. *Fundamentals of Rock Mechanics* [M]. London: Methuen.
- Kanamori H, Anderson D L. 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5): 1073—1095.
- Knopoff L. 1958. Energy release in earthquakes [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1(1): 44—52.
- Liao C T, Zhang C S, Wu M L, *et al.* 2003. Stress change near the Kunlun Fault before and after the  $M_s$  8.1 Kunlun earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2027.
- Ma K F, Chan C F, Stein R S. 2005. Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999  $M_w = 7.6$  Chi-Chi, Taiwan, earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(B5): B05S19.
- Matthews M V, Ellsworth W L, Reasenber P A. 2002. A Brownian model for recurrent earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2233—2250.
- Nishenko S P, Buland R. 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4): 1382—1399.
- Papadimitriou E, Wen X Z, Karakostas V, *et al.* 2004. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 161(8): 1683—1707.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan Basin [J]. *Nature*, 454(7203): 509—510.
- Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquake: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7): 5681—5698.
- Shan B, Xiong X, Wang R J, *et al.* 2013. Coulomb stress evolution along Xianshuihe-Xiaojiang fault system since 1713 and its interaction with Wenchuan earthquake, May 12, 2008 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 377—378: 199—210.
- Toda S, Stein R S, Reasenber P A, *et al.* 1998. Stress transferred by the 1995  $M_w = 6.9$  Kobe, Japan, shock; Effect on aftershocks and future earthquake probabilities [J]. *Journal of Geophysical Research*, 103(10): 24543—24546.
- Toda S, Stein R S. 2002. Response of the San Andreas Fault to the 1983 Coaling-Nuñez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield [J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(B6): ESE -6-1—ESE6—16.
- Toda S, Stein R S. 2003. Toggling of seismicity by the 1997 Kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(B12): 2567.

- Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, *et al.* 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(B5): B05S16.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, *et al.* 2008. 12 May 2008  $M=7.9$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems [J]. *Geophysical Research Letter*, 35: L17305.
- Wang R J, Lorenzo-Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory [J]. *Computer & Geosciences*, 32(4): 527—541.
- Wesnousky S G. 1986. Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazard in California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12): 12587—12631.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 2003. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region, 2002 to 2031 [R]. Open-File Report 2003-214, US: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 2007. The Uniform California earthquake rupture forecast, version 2 [R]. US Geological Survey Open-File Report 2007-1437, US: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Zhou H L, Allen C R, Kanamori H. 1983a. Rupture complexity of the 1970 Tonghai and 1973 Luhuo earthquakes, China, from P-wave inversion, and relationship to surface faulting [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6): 1585—1597.
- Zhou H L, Liu H L, Kanamori H. 1983b. Source processes of large earthquakes along the Xianshuihe Fault in southwestern China [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(2): 537—551.

# STUDY OF THE INFLUENCE OF STRONG EARTHQUAKE ON THE RECURRENCE BEHAVIOR OF MAJOR EARTHQUAKE ON ACTIVE FAULT—TAKING THE MIDDLE-NORTH SECTION OF XIANSUIHE FAULT AS AN EXAMPLE

HUI Chun<sup>1)</sup> PAN Hua<sup>1)</sup> XU Jing<sup>2)</sup>

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China*

## Abstract

It is of great significance to determine the factors and causes that affect the recurrence of major earthquakes. This paper introduces the influence of strong earthquake on the recurrence of major earthquakes according to elastic rebound theory, and then proposes to calculate the impact time  $\Delta t$  respectively from the effect of strong earthquakes on the same and surrounding faults on the major earthquake recurrence by using seismic moment release rate method and Coulomb stress change. In this paper, we studied the change amount of major earthquake recurrence by taking four earthquakes with magnitude greater than 6.5 occurring at different fracture sections of the Xianshuhe fault zone as an example, they occurred on Daofu, Changcu, Zhuwo Fault, respectively. We used seismic moment rate method to calculate the impact time  $\Delta t$  of strong earthquake on the recurrence of major earthquakes on the Daofu-Qianning Fault. We further discussed the effect of the Coulomb stress change due to the interaction between faults on the recurrence of subsequent major earthquakes. The co-seismic and post-seismic Coulomb stress changes caused by strong earthquake on the surrounding faults on the Ganzi-Luhuo Fault are calculated. With the fault interaction considered, the importance of the interaction between faults in the middle-north section of the Xianshuihe fault zone to change the recurrence of large earthquakes is retested and evaluated. The results indicate that the two strong earthquakes occurring along Xianshuihe Fault in 1904 ( $M = 7.0$ ) and 1981 ( $M = 6.9$ ) resulted in a delay of 80 years and 45 years of major earthquake recurrence on the Daofu-Qianning Fault respectively, and the  $M7.3$  earthquake in 1923 and the  $M6.8$  earthquake in 1967 resulted in an advance of 35 years of major earthquake recurrence on the Ganzi-Luhuo Fault.

**Key words** impact time, seismic moment, Coulomb stress, Xianshuihe Fault

〔作者简介〕 惠春,男,1992生,中国地震局地球物理研究所在读硕士研究生,防灾减灾工程与防护工程专业,研究方向为地震危险性分析,电话:13020008755, E-mail: huicccc@sina.com。