

吴小平,付虹,Michel Bouchon 等. 完全库仑破裂应力变化与云南龙陵震群序列的应力触发. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1111~ 1122

Wu X P, Fu H, Michel Bouchon, et al. Complete Coulomb failure stress changes and stress triggering of Yunnan Longling earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(4): 1111~ 1122

完全库仑破裂应力变化与云南龙陵震群序列的应力触发

吴小平¹, 付虹², Michel Bouchon³, 胡家富¹, 胡毅力¹, 黄雍², 虎雄林², 解朝娣¹

1 云南大学地球物理系, 昆明 650091

2 云南省地震局, 昆明 650041

3 Université Joseph Fourier, F38041 Grenoble France

摘 要 计算和研究了 1976 年云南龙陵 $M_s7.3$ 、 $M_s7.4$ 双主震产生的完全库仑破裂应力变化及其对后续震群序列的动态和静态应力触发作用. 结果显示, 龙陵第 2 主震受到了第 1 主震的动态和静态库仑破裂应力的触发作用. 龙陵双主震的 13 个后续强余震中, 发生在龙陵三角形块体内部的强余震, 90% 都受到了第 1 或第 2 主震的动态库仑破裂应力触发或静态库仑破裂应力触发作用, 发生在三角形块体外部的强余震, $2/3$ 受到了第 2 主震的动态库仑破裂应力触发作用. 从触发作用的强度和范围上看, 第 2 主震的动态和静态库仑破裂应力触发作用都大于第 1 主震. 就近场而言, 受到龙陵双主震的动态和静态库仑破裂应力触发作用的余震数目相当, 但动态库仑破裂应力的触发作用范围大于静态库仑破裂应力.

关键词 完全库仑破裂应力变化, 动态和静态库仑破裂应力触发, 云南地震

文章编号 0001-5733(2007)04-1111-12 中图分类号 P315 收稿日期 2006-12-05, 2007-04-16 收修定稿

Complete Coulomb failure stress changes and stress triggering of Yunnan Longling earthquake sequence

WU Xiaoping¹, FU Hong², Michel Bouchon³, HU Jiā Fu¹, HU Yī-Li¹,
HUANG Yong², HU Xiong Lin², XIE Chaodi¹

1 Geophysics Department of Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China

3 Université Joseph Fourier, F38041 Grenoble France

Abstract The complete Coulomb failure stress changes caused by the 1976 $M_s7.3$, $M_s7.4$ Yunnan Longling double main earthquakes are calculated. And dynamic and static stress triggering effects on the after earthquake sequence are studied. The results show that the second main earthquake is subjected to the triggering effect of dynamic and static Coulomb stresses induced by the first main earthquake. Among the thirteen strong aftershocks of the double main earthquakes, 90% of the aftershocks occurred inside the triangle block are subjected to the triggering effect of dynamic and static Coulomb stresses induced by the first or the second main earthquakes. And $2/3$ of the aftershocks occurred outside the triangle block are subjected to the triggering effect of dynamic and static Coulomb stresses induced by the second main earthquakes. The dynamic and static stresses triggering effects

of the second main earthquake are stronger than the first main earthquake both in intensity and in extent. In near field the numbers of aftershocks triggered by dynamic and static Coulomb stress are about equal. However the range of triggering effect of dynamic Coulomb stress is larger than that of static Coulomb stress.

Keywords Complete Coulomb failure stress changes, Dynamic and static stress triggering, Earthquakes in Yunnan

1 引言

1976年5月29日在云南龙陵连续发生了 $M_s7.3$ 、 $M_s7.4$ 地震,它们分别为第1和第2主震.主震后截止7月21日,共发生了后续强余震13个,其中 $M6.0\sim 6.5$ 的强余震5个、 $M5.0\sim 5.6$ 的强余震8个.并不象一般的震群序列那样,龙陵震群序列中,第1和第2主震震源机制分别是右旋走滑和左旋走滑断层,是一对强度基本相同、破裂方向彼此正交、旋性相反的共轭地震.后续强余震震源机制与主震不尽一致,各强余震的震源深度差异也较大^[1~3].本文目的主要研究龙陵双主震产生的完全库仑破裂应力变化及其对后续强余震的动态和静态应力触发作用及特征,同时也研究某些强余震对其附近余震产生的完全库仑破裂应力变化的作用性质.

目前关于地震应力触发的研究一般分为静态应力触发^[4~9]和动态应力触发^[10~16],前者研究的是地震的断层位错产生的静态应力变化对后续地震的触发作用,后者研究的是地震破裂扩展与地震波通过时产生的动态应力变化对后续地震的触发作用.比较两者的触发性质,静态应力是通过持久性地改变施加在断层上的应力来触发地震,而动态应力是通过较强的瞬态应力振荡来触发地震.从动态应力触发现象看,有直接触发(几秒或几分钟内触发)和延迟触发(数天内触发),关于延迟触发的机理已有其合理解释^[15~17].国内对地震的静态应力触发已有不少研究^[18~21],但动态应力触发方面的研究尚未开展.国外一些研究^[10~12]表明,动态应力不仅有远场触发作用,而且有近场触发作用.实际上对于近场而言,静态和动态应力的作用是分不开的.

Kilb et al.^[22]提出了包含动态和静态库仑破裂应力的完全库仑破裂应力概念,并强调了动态库仑破裂应力的触发作用.对于龙陵地震近场范围的应力触发问题,本文将通过计算完全库仑破裂应力变化,来综合考虑动态和静态库仑破裂应力对后续地震的触发作用.离散波数(DWN)法^[21]的一个重要特点是可以计算全波场,包括动态(瞬态)和静态(稳态)的贡献,

本文将采用DWN法计算地震破裂扩展在近场产生的位移,继而求得应变、应力,最后计算出后续地震断层面上的完全库仑破裂应力变化,包括动态库仑破裂应力变化和静态库仑破裂应力变化.

以往的研究通过采用震源断层平均几何参数投影来计算某深度平面上的库仑破裂应力分布、分析余震分布位置与库仑破裂应力的非应力影区的关系或与动态库仑破裂应力正区的关系来讨论触发问题.针对龙陵震群序列的复杂特点,本文试图对龙陵第1和第2主震的后续强余震逐个计算其断层面上的完全库仑破裂应力变化的时程曲线,然后逐个分析这些后续强余震所受到的库仑破裂应力变化的作用性质及有关触发特征.另外还计算和分析了某些强余震对其相邻余震的库仑破裂应力变化作用性质及触发特征.

2 资料

2.1 构造背景

资料表明^[1],龙陵震区是北东、北东东向构造与南北—北北西向构造带的交汇区.在震区南部,东侧是南北—北北西向的怒江断裂,西侧是北东向的瑞丽龙陵断裂,南侧是北东东向畹町断裂,三条断裂围成了如图1所示的三角形块体,龙陵震群序列发生在这个块体的内外.在区域北部,有北北西—南北向的腾冲第四纪火山及火山岩带.

2.2 基本参数和断层面参数

关于第1、第2主震的断层面参数,本文选取哈佛大学矩心矩张量解给出的震源机制参数(见表1),国内不同作者给出的震源机制结果之间存在差别,文献[2]给出的主震震源机制与哈佛大学矩心矩张量解结果比较接近.关于后续强余震的断层面参数,本文选取了文献[2]的龙陵地震序列震源机制研究结果(见表1).在确定节面A和节面B哪一个为地震断层面时,选取与震中所在地震活动分布条带走向基本一致的节面为断层面^[11].

根据滑动角定义、滑动角与断层错动力轴方位、力轴仰角以及所在断层面走向之间的关系,可计算

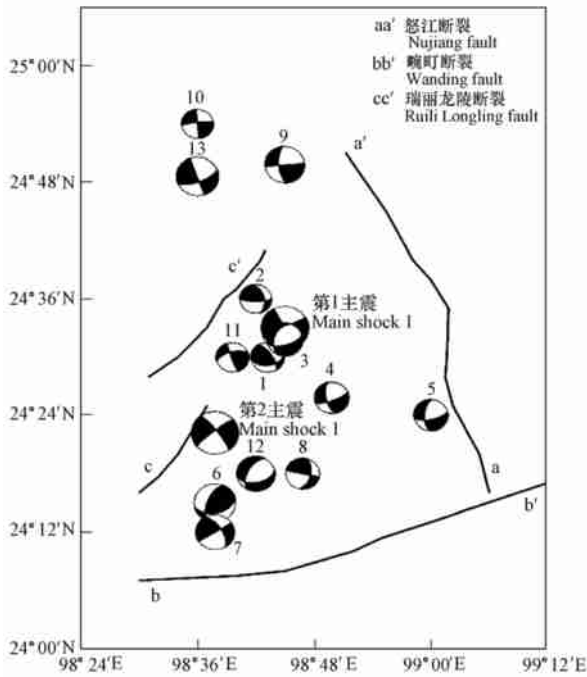


图1 第1、第2主震和 $M_s \geq 5.0$ 强余震震源机制及震中位置分布图

Fig. 1 Distribution of epicenters and focal mechanisms of the main shock 1 and 2 and strong aftershocks

出滑动角 λ . 关于 λ 的正负及其所在象限范围, 可由断层的滑动性质而定, 由文献[2]给出的断层错动力轴方位、力轴仰角、断层面走向和断层滑动性质确定出的龙陵强余震滑动角 λ 列于表1中.

图1为1976年5月29日龙陵第1、第2主震和主震后截止1976年7月21日发生的13个 $M_s \geq 5.0$ 强余震的震源机制及震中位置分布图.

表1 主震与强余震参数

Table 1 Parameters of main and after shocks

事件序号	发震时间(北京时间)	纬度(°N)	经度(°E)	深度(km)	震级 M_s	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)
第1主震	1976-05-29 20:23:18	24.37	98.63	24	7.3	323	80	-172
第2主震	1976-05-29 22:00:19	24.55	98.75	20	7.4	242	88	0
强余震1	1976-05-29 22:31:42	24.50	98.72	33	5.2	82	45	34
强余震2	1976-05-30 01:08:53	24.60	98.70	33	5.0	90	75	46
强余震3	1976-05-30 03:36:51	24.53	98.75	31	5.6	74	64	-60
强余震4	1976-05-30 12:18:38	24.43	98.83	28	5.4	69	75	-28
强余震5	1976-05-31 06:31:31	24.40	99.00	33	5.3	78	66	-35
强余震6	1976-05-31 13:08:28	24.25	98.63	16	6.5	77	45	135
强余震7	1976-06-01 02:34:59	24.20	98.63	14	6.0	238	90	-30
强余震8	1976-06-09 07:14:27	24.30	98.78	5	5.3	103	90	40
强余震9	1976-06-09 08:20:35	24.83	98.75	10	6.2	175	65	180
强余震10	1976-06-10 01:40:25	24.90	98.60	30	5.0	174	90	170
强余震11	1976-06-20 10:33:05	24.50	98.66	5	5.1	254	60	6
强余震12	1976-07-04 00:33:17	24.30	98.66	5	6.0	79	48	-51
强余震13	1976-07-21 23:10:47	24.81	98.60	5	6.6	160	88	-157

3 完全库仑破裂应力变化的计算

3.1 DWN 方法原理

以二维情况说明 DWN 方法的原理^[23]. 无限均匀介质中一个线源的稳态辐射, 可以用柱状波表示, 也等价于均匀与非均匀平面波的连续叠加. 设 x 表示水平坐标轴, z 表示垂直坐标轴, 则位移或应力可以表示为

$$F(x, z; \omega) = e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{-ikx} dk, \quad (1)$$

其中 ω 是频率, k 是水平波数. 当介质有限或垂直方向不均匀时, 积分存在奇点, 因此对水平波数的积分变得复杂而困难. DWN 法首先用复合源问题代替上述单一源问题, 则(1)式变为

$$G(x, z; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k, z) e^{-ikx} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{imL} dk, \quad (2)$$

其中 L 是周期源的间隔. (2)式进一步化为

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(k_n, z) e^{-ik_n x}, \quad (3)$$

式中 $k_n = \frac{2\pi n}{L}$.

如果上式中的序列收敛, 则可以表示为有限求和形式

$$G(x, z; \omega) = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-N}^N f(k_n, z) e^{-ik_n x}. \quad (4)$$

DWN 法的下一步是将已在频率域中解决的复合源问题恢复到单一源问题. 如果能计算函数 G 的连续傅里叶变换, 问题将变得较直接, 但实际上仅能

对某些频率计算出函数 G , 并使用离散傅里叶变换得到时间域的解. 因此, 一方面, 要处理一个含无限时间响应的单一源问题, 另一方面, 要使用离散傅里叶变换得到有限持续时间为 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 的信号. 这些可通过在复频率域中作傅里叶变换式(5)实现.

$$g(x, z; t) = \int_{-\infty - i\omega_1}^{\infty + i\omega_2} G(x, z; \omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

其中 ω 表示频率的虚部, 且要满足

$$e^{\omega T} \ll 1. \quad (6)$$

(6) 式保证了在时间窗 T 的衰减. 因此, 如果选择 L 足够大, 以至在时间窗 T 内没有从最邻近的源到达接收点 (x, z) 的干扰, 时间域的单源的解 $f(x, z; t)$ 便可以从频率域的复合源的解 $G(x, z; \omega)$ 恢复得到

$$f(x, z; t) = e^{-\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, z; \omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (7)$$

任何类型的弹性震源可以用一组点源的组合来代替. 地震学中最感兴趣的是剪切位错产生的辐射场, 而一个双力偶震源就相当于一个弹性剪切位错源. 设有一剪切断层, 用 (s_x, s_y, s_z) 表示沿断层滑动方向的单位矢量, 用 (n_x, n_y, n_z) 表示断层面法线方向单位矢, 相应的矩张量分量为

$$m_{ij} = -\mu \text{slip}(\omega) \Delta S (s_i n_j + s_j n_i), \quad (8)$$

其中, ΔS 是发生滑动的断层平面的面积元, $\text{slip}(\omega)$ 是滑动矢量. 将地震断层离散成小单元上位错点源组成的二维阵列, 每个小单元面上的位错产生的位移场等价于在小单元面处双力偶点源所产生的位移场. 每个点源以 $e^{-i\omega t}$ 的相位延迟辐射, 其中 t_r 表示破裂从小点源传播到断层某个确定位置所需要的时间, 对所有小点源贡献的求和是在频率-波数域内进行.

3.2 简单问题的模型计算

3.2.1 简单问题的模型

图 2a 为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的模型研究范围, 地壳介质分层均匀. 用小圆点表示接收点的位置, 共 144 个, 图中的粗实线表示震源断层的位置及走向. 设震源模型为一个以有限速度扩展的双侧破裂直立的走向滑动断层, 长宽分别为 16 km 和 6 km, 断层上沿埋深 5 km, 下沿埋深 11 km, 破裂传播速度为 2.8 km/s. 根据 DWN 方法, 将震源断层分解成网格小单元面(图 2b), 沿断层走向 16 个, 沿断层倾向 5 个, 共 $5 \times 16 = 80$ 个小单元面, 相当于 80 个双力偶点源. 根据 DWN 法, 断层分解成点源的空间间距遵循以下原则^[23], 两相邻点源之间的间距应具有相同的间隔和确定的

时间延迟相, 间距小于最小波长, 但也不能太小, 以避免从最邻近的源到达接收点的干扰.

3.2.2 完全库仑破裂应力变化计算步骤

首先应用 Bouchon 的离散波数法合成位移理论地震图计算程序, 对上述模型计算震源断层在任一接收点处及其邻近 3 个点处产生的地震波位移 $u_i(\mathbf{x}, t)$, 计算中, 理论地震图波形的点数必须为 2 的整数次幂, 时间步长按小于 1/2 最小周期的原则取. 然后应用差分法原理由位移计算出应变变化分量 $\Delta \epsilon_{ij}(\mathbf{x}, t)$, 关于应变变化分量 $\Delta \epsilon_{ij}(\mathbf{x}, t)$ 的计算及结果参见文献[24]. 再根据虎克定律将应变转换成应力, 可得到震源断层在接收点处产生的应力变化分量 $\Delta \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t)$.

设接收断层面的法向单位矢为 $\mathbf{n}(n_1, n_2, n_3)$, 滑动方向单位矢为 $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_3)$, 由柯西公式可得接收点处断面上的动态应力变化矢量:

$$\Delta \mathbf{T}_i(\mathbf{x}, t) = \Delta \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) n_j. \quad (9)$$

将应力矢量分别投影到接收断层面的法线方向和滑动方向上, 可得到正应力变化 $\Delta \sigma(\mathbf{x}, t)$ 和切应力变化 $\Delta \tau(\mathbf{x}, t)$:

$$\Delta \sigma(\mathbf{x}, t) = \Delta \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) n_j n_i, \quad (10)$$

$$\Delta \tau(\mathbf{x}, t) = \Delta \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) n_j s_i. \quad (11)$$

根据定义^[22], 可得到完全库仑破裂应力变化:

$$\Delta \text{CFS}(\mathbf{x}, t) = \Delta \tau(\mathbf{x}, t) + \mu' \Delta \sigma(\mathbf{x}, t) \quad (12)$$

其中, μ' 为接收点处断层面介质的视摩擦系数, 一般取 0.2~0.8. 断层面上的正应力变化 $\Delta \sigma(\mathbf{x}, t)$, 拉张为正, 压为负.

因为离散波数(DWN)法的一个重要特点是可以计算全波场, 包括动态和静态的贡献^[23], 例如, 计算一个接收点处的完全库仑破裂应力变化, 可以同时得到动态库仑破裂应力变化和静态库仑破裂应力变化, 在完全库仑破裂应力变化时程曲线中, 前面起伏部分代表动态库仑破裂应力变化, 后面的稳定部分代表静态库仑破裂应力变化^[16]. 以下表述中, 动态库仑破裂应力变化采用符号 $\Delta \text{CFS}(t)$ 表示, 静态库仑破裂应力变化采用符号 ΔCFS 表示.

3.2.3 简单问题的模型计算结果

图 2c 中的曲线为通过上述模型计算得到的震源断层在接收点 S 处产生的完全库仑破裂应力变化 $\Delta \text{CFS}(t)$ 时程曲线. 图中可看到, 完全库仑破裂应力变化的时程曲线由两部分组成, 起伏部分是动态库仑破裂应力变化 $\Delta \text{CFS}(t)$, 稳定部分是静态库仑破裂应力变化 ΔCFS .

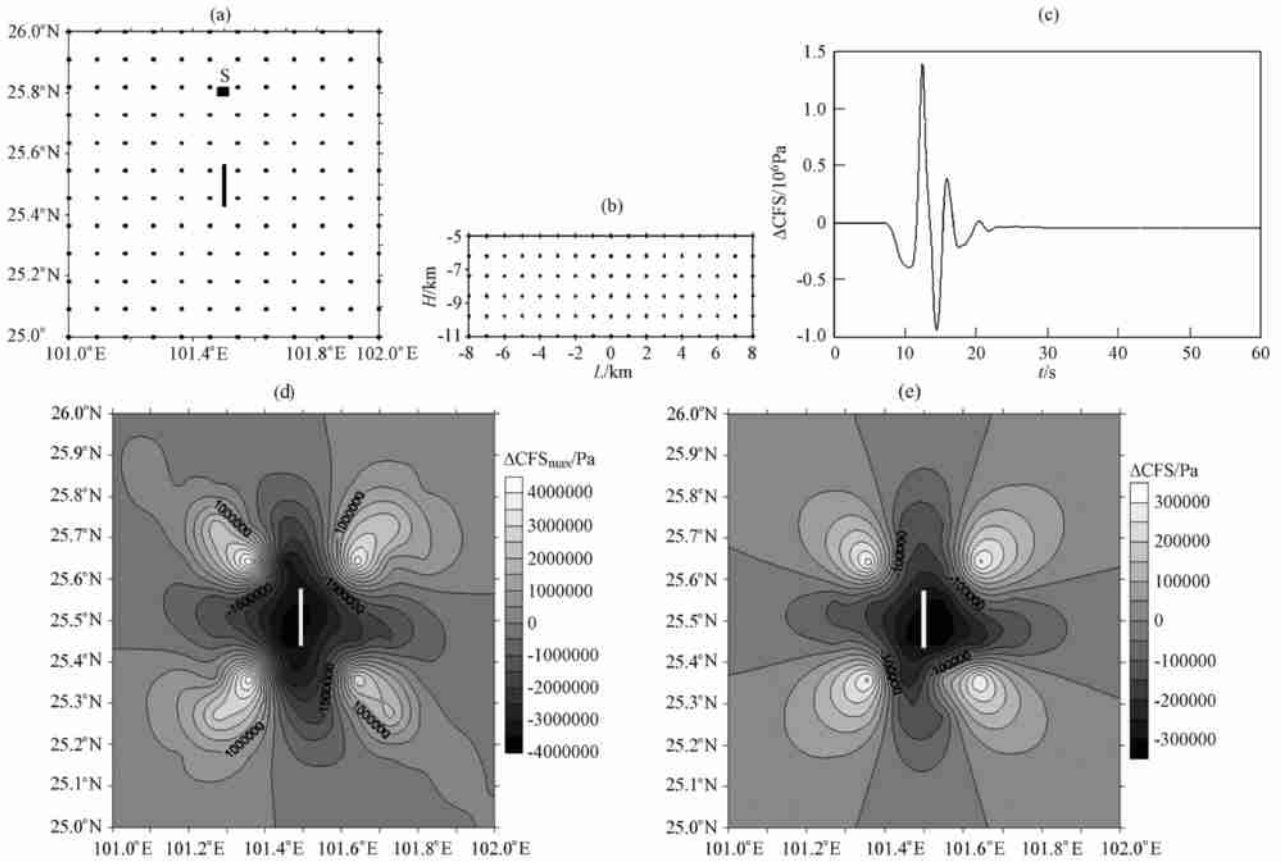


图 2 简单问题的模型及计算结果

(a) 模型研究范围、接收点和震源断层位置; (b) 震源断层分解成 5×16 个小单元面; (c) 震源断层在接收点 S 处产生的完全库仑破裂应力变化时程曲线 ΔCFS(t); (d) 峰值动态库仑破裂应力变化的空间分布图; (e) 静态库仑破裂应力变化的空间分布图。

Fig. 2 Calculating results for simple model

(a) Study area, receiver points and fault location; (b) Fault plane is divided into 5×16 small fault elements; (c) Time histories of complete Coulomb failure stress change ΔCFS(t) at receiver points S; (d) Spatial patterns of peak dynamic Coulomb stress change; (e) Spatial patterns of static Coulomb stress change.

当计算出所有接收点(144个)处的完全库仑破裂应力变化后,则可得到完全库仑破裂应力变化的空间分布.图2d是通过上述模型和方法计算得到的峰值动态库仑破裂应力变化的空间分布,与 Kilb D^[22]的结果比较,峰值动态库仑破裂应力变化的量级和分布的图式基本一致.图2e是计算得到静态库仑破裂应力变化的空间分布图,其结果与 Stein R S^[7]的弹性半空间解以及傅征祥、刘桂萍^[21]采用 Okata 的半无限空间解所得静态库仑破裂应力变化的分布图案和量级接近,与 Kilb D^[22]的分层解得到的静态库仑破裂应力变化的量级和分布图式一致.

4 龙陵地震在后续地震断层上产生的完全库仑破裂应力变化计算结果

4.1 震源及介质参数

根据文献[2]和哈佛大学矩张量解数据,龙陵地

震的震源模型及其参数归纳如下:第1和第2主震的破裂模式均为单侧破裂矩形断层,第1主震的断层长度和宽度分别为 26.2 km^[2]、20 km^[2],破裂传播方向为南东,破裂速度 3.4 km/s^[2],滑动振幅 0.5 m^[2],上升时间为 1.06 s;第2主震断层长宽分别为 56.7 km^[2]、20 km^[2],破裂传播方向为南西,破裂速度 3.8 km/s^[2],滑动振幅 1.56 m^[2],上升时间为 1.08 s.其中,上升时间的数据是根据哈佛大学矩张量解的破裂持续时间:第1主震 10.6 s 和第2主震 10.8 s,然后按照 Heaton 的方法^[29],上升时间约为破裂持续时间的 1/10,得到第1、2主震上升时间分别为 1.06 s 和 1.08 s.破裂速度一般是剪切波速的 80%,但也有超剪破裂的情况,龙陵地震应属于超剪破裂,还有 1999 年的 Izmit 地震,其断层向东的破裂速度达 4.7 km/s^[26].

由云南地区地壳及上地幔波速结构的一些反演结果^[27-33],并通过拟合龙陵临时强震台的强余震波

形记录^[30]来约束模型参数,采用了如表 2 所示的层状半空间介质模型及其速度参数.

表 2 介质波速

Table 2 Wave velocities of media

分层序号	深度范围 (km)	$V_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_s / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0~ 2	4. 15	2. 40
2	2~ 15	5. 44	3. 15
3	15~ 20	6. 28	3. 63
4	20~ 26	5. 88	3. 40
5	26~ 40	6. 67	3. 86
6	40~ ∞	7. 78	4. 50

根据分离波数法相关理论,将震源断层面分解成小单元面,每个小单元面上的位错产生的位移场等价于小单元面处双力偶点源所产生的位移场.将第 1 主震震源断层面分解成 26×20 个小单元面,将第 2 主震震源断层面分解成 56×20 个小单元面,此时震源断层相当于这些小单元面处双力偶点源的组合.

4.2 完全库仑破裂应力变化时程曲线 $\Delta\text{CFS}(t)$ 计算结果

计算了 $M_s7.3$ 第 1 主震在 $M_s7.4$ 第 2 主震断层面上产生完全库仑破裂应力变化 $\Delta\text{CFS}(t)$ 时程曲线;还分别计算了第 1 主震和第 2 主震在其后续地

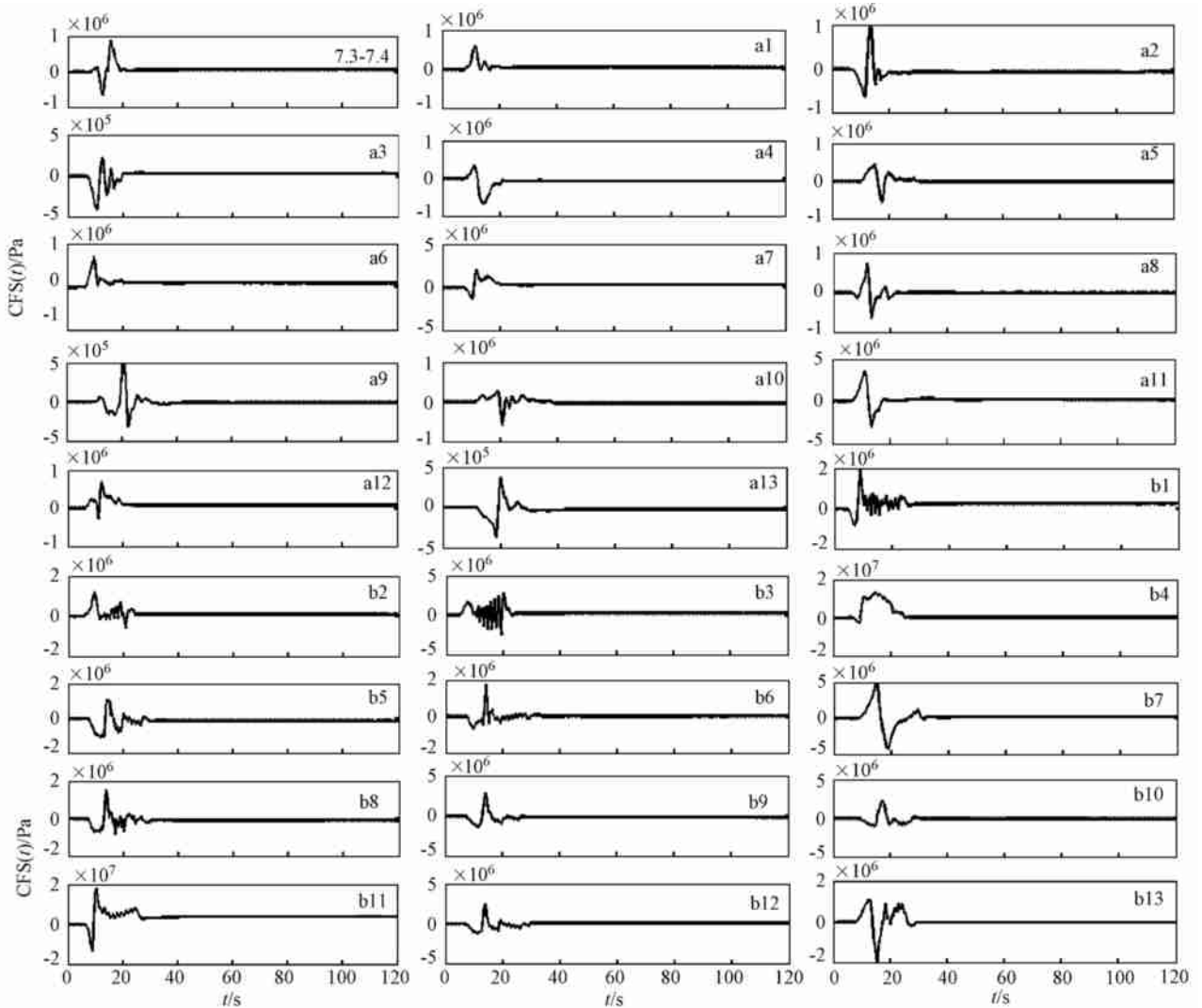


图 3 第 1 条曲线 7.3-7.4 为 $M7.3$ 第 1 主震在 $M7.4$ 第 2 主震断层面上产生完全库仑破裂应力变化 $\Delta\text{CFS}(t)$ 时程曲线; (a1, a2, a3, ..., a13) 为 $M7.3$ 第 1 主震分别在序号为 1, 2, 3, ..., 13 的后续强余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化 $\Delta\text{CFS}(t)$ 时程曲线; (b1, b2, b3, ..., b13) 为第 2 主震分别在序号为 1, 2, 3, ..., 13 的后续强余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化 $\Delta\text{CFS}(t)$ 时程曲线

Fig. 3 The curve 7.3-7.4 is the time history of complete Coulomb failure stress change induced by $M7.3$ earthquake at the fault plane of $M7.4$ earthquake; (a1, a2, a3, ..., a13) are time histories of complete Coulomb failure stress changes induced by $M7.3$ earthquake at the fault planes of aftershocks No. 1, 2, 3, ..., 13, respectively. (b1, b2, b3, ..., b13) are time histories of complete Coulomb failure stress changes induced by $M7.4$ earthquake at the fault planes of aftershocks No. 1, 2, 3, ..., 13, respectively.

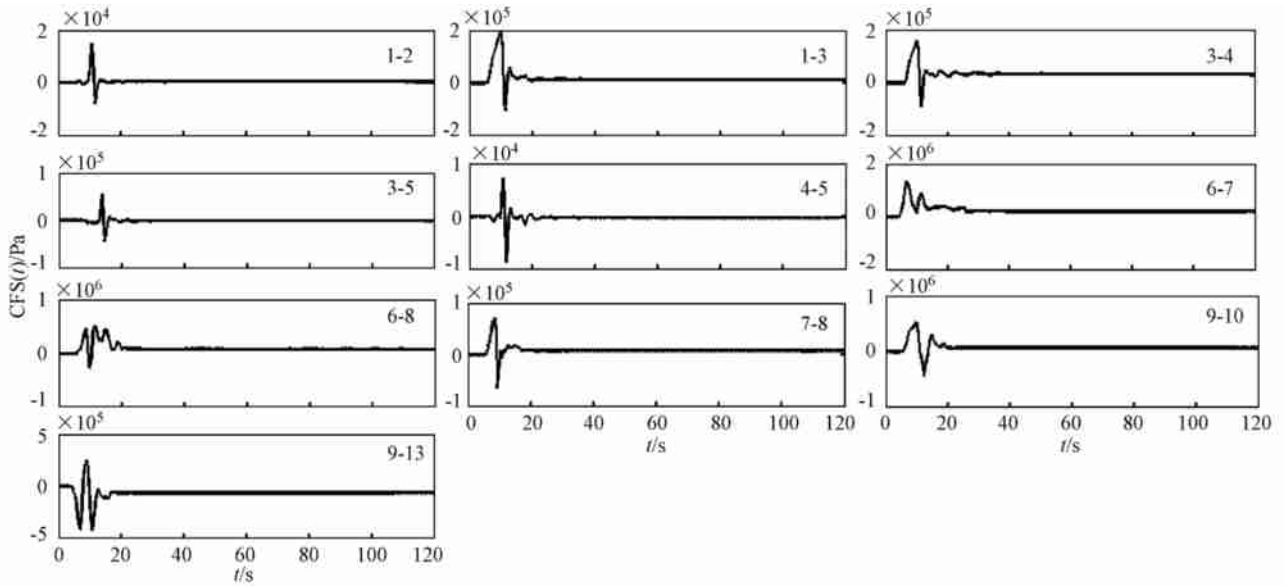


图4 某些强余震(1, 3, 4, 6, 7, 9号)在其相邻的后续余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化 $\Delta CFS(t)$ 时程曲线, 例如, 标有1-2的曲线表示序号为1的余震在序号为2的余震断层面上产生的 t 时程曲线

Fig. 4 Time histories of complete Coulomb failure stress changes induced by some strong aftershocks at adjacent aftershocks' fault planes, e. g. the curve '1-2' is the time history of complete Coulomb failure stress change induced by No.1 aftershock at the fault plane of No.2 aftershock

震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化时程曲线; 也计算了某些强余震对相邻的后续余震产生的完全库仑破裂应力变化曲线, 结果见图3和图4。

图3中, 标有'7.3-7.4'的曲线为 $M_s 7.3$ 第1主震在 $M_s 7.4$ 第2主震断层面上产生完全库仑破裂应力变化 $\Delta CFS(t)$ 时程曲线; 标有 a1, a2, ..., a13 的曲线为第1主震分别在序号为1, 2, ..., 13的余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化时程曲线 $\Delta CFS(t)$ 。

图3中, 标有 b1, b2, ..., b13 的曲线为第2主震分别在序号为1, 2, ..., 13的余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化的时程曲线 $\Delta CFS(t)$ 。

图4为某些强余震(序号1, 3, 4, 6, 7, 9)在其相邻的后续余震断层面上产生的完全库仑破裂应力变化 $\Delta CFS(t)$ 时程曲线, 例如, 标有1-2的曲线表示序号为1的余震在序号为2的余震断层面上产生的 $\Delta CFS(t)$ 时程曲线。

4.3 动态库仑破裂应力变化峰值的误差

考虑龙陵地震断层破裂宽度、破裂传播方向、上升时间、滑动振幅、走向、倾角、滑动角、等参数的误差, 也同时考虑余震震源参数包括走向、倾角、滑动角、经度、纬度、深度的误差, 具体而言, 根据不同作者研究得到的龙陵主震及其余震的震源参数数据, 首先对每个地震分别计算震源的各种参数不同作者结果的算术平均值, 然后求出每个地震的各种震源参数的最大误差, 在此基础上, 根据误差传递公式计

算龙陵主震在每个余震破裂面滑动方向上的动态库仑破裂应力变化峰值的最大误差, 以及余震在余震破裂面滑动方向上的动态库仑破裂应力变化峰值的最大误差。在表3和表4中, 表示出了动态库仑破裂应力变化峰值的误差范围。

5 龙陵双主震对后续强余震的动态和静态库仑破裂应力作用性质

5.1 动态库仑破裂应力和静态库仑破裂应力触发作用判断原则

正的库仑破裂应力变化、无论是动态的还是静态的, 都可能大大改变断层的性质而促进断层破裂滑动。具体而言, 正的静态库仑破裂应力变化对断层有促进滑动的作用, 负的静态库仑破裂应力变化对断层有阻碍或延迟滑动的作用^[15]。对于快速的动态库仑破裂应力震荡, 负的动态应力变化对断层滑动没有大的促进作用, 但也没有阻碍或延迟作用, 或者说, 断层对负的动态应力脉冲不敏感^[15], 正值的动态应力变化比负值的同样大小的动态应力改变对断层的力学作用要大得多^[15]。然而, 断层一旦受到这种力学作用并发生力学性质改变并不代表破裂立即发生或在一定的时间内发生, 这就意味着在触发与被触发的地震之间存在不确定的时间延迟^[16], 被触发地震的时间延迟不能用应力传播来解释, 可以用

与断层摩擦滑动或成核过程相关的岩石本构性质的模式来解释, 由于地震波可以通过改变断层成核区的特征滑动距离来影响滑动速率及状态, 因此对伴随地震波产生的动态库仑破裂应力的延迟触发机理, 能够用速率及状态依赖性摩擦滑动不稳定模式进行充分说明^[15-17].

关于动态应力触发和静态应力触发阈值的问题, 已有研究表明, 有意义的动态应力触发和静态应力触发阈值分别为 0.5 MPa^[16] 和 0.01 MPa^[34,35].

根据上述依据, 本文将主震产生的动态和静态库仑破裂应力变化对后续地震断层的作用分为以下 5 种情况: ① 如果一个后续地震断层上的动态库仑破裂应力变化的最大峰值振幅为正, 并且其数值大于阈值 0.5 MPa, 则认为该后续地震的发生受到了主震的动态库仑破裂应力触发作用(简称动态应力触发作用). ② 如果一个后续地震断层上的动态库仑破裂应力变化的最大峰值振幅为负, 则认为该后续地震的发生既没有受到动态应力的触发作用, 也没有受到延迟作用. ③ 如果一个后续地震断层上的静态库仑破裂应力变化值为正, 并且其数值大于阈值 0.01 MPa, 则认为该后续地震的发生受到了静态库仑破裂应力的触发作用(简称静态应力触发作用).

④ 如果一个后续地震断层上的静态库仑破裂应力变化值为负, 并且其绝对值大于阈值 0.01 MPa, 则认为该后续强余震的发生受到了静态库仑破裂应力的阻碍或延迟作用. ⑤ 如果一个后续地震断层上的动态或静态库仑破裂应力变化的绝对值分别小于阈值 0.5 MPa 和 0.01 MPa, 则认为该后续地震的发生没有受到动态或静态应力的任何作用. 另外, 依据文献[36, 37]所指出的动态应力触发的最大延迟时间为 15 天的论点, 认为延迟时间超过 15 天发生的后续地震受到的动态库仑破裂应力触发作用是无效的.

5.2 龙陵主震对后续强余震的动态和静态库仑破裂应力作用性质

由后续强余震断层面上的完全库仑破裂应力变化计算结果, 将其动态库仑破裂应力变化的峰值最大值 $\Delta CFS(t)_{\max}$ 和静态库仑破裂应力变化的幅值 ΔCFS 列于表 3 中. 为研究两次主震共同产生的库仑破裂应力变化对余震的影响, 应该把两次主震产生的库仑破裂应力变化相叠加, 但考虑到两次主震发震时间有一定的时间差距, 对不是同时产生的动态库仑破裂应力变化不适合叠加, 而对作用时间较长久静态库仑破裂应力变化可以叠加, 叠加后的结果列于表 3. 根据上述 5 种情况的判断原则, 分析第 1

表 3 第 1 和第 2 主震对后续地震产生的动态和静态库仑破裂应力作用性质分析结果

Table 3 Analysis results of dynamic and static Coulomb stress effects on the aftershocks induced by main shock 1 and 2

后续地震和强余震序号	距主震发生的时间(天)	第 1 主震 ($M7.3$) 产生的动态库仑破裂应力变化的最大峰值和静态库仑破裂应力变化的幅值		第 2 主震 ($M7.4$) 产生的动态库仑破裂应力变化的最大峰值和静态库仑破裂应力变化的幅值		第 1 和第 2 主震对后续余震共同产生的静态库仑破裂应力变化的幅值	第 1 主震对后续地震的作用性质	第 2 主震对后续地震的作用性质	第 1 第 2 主震对后续余震的静态综合作用
		$\Delta CFS(t)_{\max} / (10^6 \text{ Pa})$	$\Delta CFS / (10^6 \text{ Pa})$	$\Delta CFS(t)_{\max} / (10^7 \text{ Pa})$	$\Delta CFS / (10^6 \text{ Pa})$				
$M7.4$	0	0.850 ± 0.169	0.559				DT		ST
1	0	0.586 ± 0.093	0.593	0.193 ± 0.051	0.314	0.373	DT**	DT	ST
2	1	0.931 ± 0.155	-0.921	0.120 ± 0.023	0.103	0.011	DT	DT	ST
3	1	-0.393 ± 0.031	0.339	0.272 ± 0.062	0.432	0.466	N	DT	ST
4	1	-0.642 ± 0.102	-0.648	0.201 ± 0.036	0.292	0.227	N	DT	ST
5	2	-0.534 ± 0.106	-0.115	-0.107 ± 0.019	-0.112	-0.124	N	N	R
6	2	0.689 ± 0.171	0.879	0.170 ± 0.033	0.028	0.116	DT	DT	ST
7	3	2.031 ± 0.325	3.595	0.489 ± 0.057	0.252	0.288	DT	DT	ST
8	11	0.726 ± 0.117	0.009	0.150 ± 0.025	-0.020	-0.019	DT	DT	R
9	11	0.481 ± 0.026	-0.042	0.283 ± 0.066	-0.201	-0.204	N**	DT	R
10	12	-0.555 ± 0.143	-0.261	0.219 ± 0.037	-0.041	-0.067	N	DT	R
11	22	3.533 ± 0.727	1.332	1.772 ± 0.358	3.683	3.812	OD	OD	ST
12	36	0.697 ± 0.166	0.868	0.251 ± 0.065	0.093	0.183	OD	OD	ST
13	53	0.359 ± 0.083	-0.206	-0.195 ± 0.045	-0.0012	-0.022	N	N	R

和第 2 主震对 13 个后续强余震产生的动态库仑破裂应力变化的作用性质以及共同产生的静态库仑破裂应力作用性质, 分析结果也列于表 3 中. 其中, ‘DT’ 表示动态应力触发作用, ‘ST’ 表示静态应力触发作用, ‘R’ 表示静态应力的阻碍或延迟作用, ‘N’ 表示既无触发作用也无阻碍作用, ‘OD’ 表示超过最大延迟触发时间的无效动态应力触发作用. ‘DT**’, ‘N**’, 分别表示考虑误差后在误差范围内的动态库仑破裂应力峰值可能不满足动态触发条件和无作用条件而不能明确确定作用性质.

表 4 余震对其相邻的后续余震产生的动态和静态库仑破裂应力作用性质分析结果

Table 4 Analysis results of dynamic and static Coulomb stress effects on the aftershocks induced by adjacent aftershocks

余震序号	后续余震序号	距余震发生的时间(天)	余震对其附近后续余震产生的动态库仑破裂应力变化的最大峰值和静态库仑破裂应力变化的幅值		余震对其附近后续余震的作用性质	
			$\Delta CFS(t)_{\max}/\text{Pa}$	$\Delta CFS/\text{Pa}$	动态	静态
1	2	1	0.147 ± 0.021 (10^5)	0.601 (10^3)	N	N
1	3	1	0.195 ± 0.039 (10^6)	0.129 (10^5)	N	ST
3	4	0	0.159 ± 0.036 (10^6)	0.351 (10^5)	N	ST
3	5	1	0.551 ± 0.138 (10^5)	-0.817 (10^3)	N	N
4	5	1	-0.867 ± 0.204 (10^4)	-0.206 (10^3)	N	N
6	7	1	0.131 ± 0.029 (10^7)	0.208 (10^6)	DT	ST
6	8	9	0.511 ± 0.125 (10^6)	0.790 (10^5)	DT**	ST
7	8	8	0.708 ± 0.183 (10^5)	0.844 (10^4)	N	N
9	10	1	0.526 ± 0.022 (10^6)	0.673 (10^5)	DT	ST
9	13	42	-0.415 ± 0.013 (10^6)	-0.627 (10^5)	N	R

6 讨论与结论

6.1 完全库仑破裂应力变化中的动态和静态库仑破裂应力变化

由图 2 的完全库仑破裂应力变化 $\Delta CFS(t)$ 时程曲线看到, 完全库仑破裂应力变化时程由起伏振荡的部分和基本稳定的部分组成, 它们分别代表了动态库仑破裂应力变化和静态的库仑破裂应力变化. 第 1、第 2 主震在各后续强余震断层面上产生的动态库仑破裂应力变化的持续时间分别为 15 s 和 20 s 左右, 虽然动态库仑破裂应力变化的持续时间不长, 但是其幅值却明显大于相应的静态库仑破裂应力变化的幅值, 尤其是在峰值动态库仑破裂应力时段, 其幅值比相应的静态库仑破裂应力的幅值一般要大一个数量级.

6.2 第 1 主震对第 2 主震的库仑破裂应力触发

从表 3 看到, 第 1 主震在第 2 主震断层面上产生的动态库仑破裂应力最大峰值 $\Delta CFS(t)_{\max}$ 为正值, 并且可以确定此值在误差范围内大于阈值 0.5 MPa, 满足动态应力触发作用的条件, 即 5.1 节中情

5.3 余震对相邻后续余震的动态和静态库仑破裂应力作用性质

由序号为 1, 3, 4, 6, 7, 9 余震在附近的后续余震断层面上产生完全库仑破裂应力变化的计算结果, 将其动态库仑破裂应力变化的峰值最大值 $\Delta CFS(t)_{\max}$ 和静态库仑破裂应力变化的幅值 ΔCFS 列于表 4 中. 根据上述判断原则, 分析这些余震对附近的后续余震产生的动态和静态库仑破裂应力变化的作用性质, 结果列于表 4 中.

况¹, 认为第 1 主震对第 2 主震起到了动态库仑破裂应力的触发作用(DT). 另外从表 3 还看到, 第 1 主震在第 2 主震断层面上产生的静态库仑破裂应力 ΔCFS 也为正值、且大于阈值 0.01 MPa, 属于 5.1 节中的情况[»], 认为第 1 主震对第 2 主震起到了静态应力触发作用(ST).

6.3 主震对后续地震的动态库仑破裂应力触发

表 3 显示, 第 1 主震在序号为 2, 6, 7, 8, 11, 12 的 6 个余震断层面上产生的动态库仑破裂应力最大峰值均为正值 $\Delta CFS(t)_{\max}$, 并且可以确定这些值在误差范围内大于阈值 0.5 MPa, 满足动态应力触发作用的条件, 即 5.1 节中情况¹. 注意到其中 11 和 12 号余震的发震时间距离主震超过 15 天, 认为第 1 主震对 2, 6, 7, 8 这 4 个后续余震起到了动态库仑破裂应力的触发作用, 而对 11, 12 号强余震的动态库仑破裂应力触发作用是无效的. 在误差范围内可以确定 3, 4, 5, 10 号余震断层面上动态库仑破裂应力变化的最大峰值振幅为负, 属于 5.1 节中的情况[°], 13 号强余震断层面上动态库仑破裂应力变化的最大峰值振幅虽然为正, 但其值小于阈值 0.5 MPa, 属于情况^½, 故认为 3, 4, 5, 10, 13 这 5 个余震的发生没有

受到第1主震的动态应力触发作用. 另外, 由于1号和9号余震断层面上动态库仑破裂应力峰值在误差范围内可能不满足动态触发条件和无作用条件, 因此不能明确确定1号和9号余震受到的作用的性质.

表3显示, 在误差范围内可以明确确定, 除5号和13号之外的其余11个余震断层面上第2主震产生的动态库仑破裂应力峰值 $\Delta CFS(t)_{\max}$ 均为正值, 且大于阈值0.5 MPa, 满足动态触发条件即5.1节中情况¹, 但其中11和12号余震的发震时间距离主震超过15天, 动态应力触发作用无效, 故认为第2主震对1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10这9个后续强余震起到了动态库仑破裂应力的触发作用.

6.4 关于动态库仑破裂应力延迟触发

动态库仑破裂应力持续时间短暂, 但其强度和作用范围都远大于静态库仑破裂应力, 动态库仑破裂应力对后续地震的延迟触发一般不能用应力传播来解释, 延迟触发的机理可能主要与后续地震断层及其周围介质的物理性质在受到动态库仑破裂应力之后发生了改变有关, 例如, 视摩擦系数、孔隙压力等的改变, 这些与断层摩擦滑动或成核过程相关的岩石物理性质发生改变并不表示破裂立即发生或在一定的时间内发生, 这就表明, 在动态应力触发与被触发的地震之间存在不确定的时间延迟, 延迟可能是几天或几十天. 有的研究^{36, 37}指出, 动态应力触发的最大延迟时间为15天. 本文也选择了15天作为最大延迟触发时间, 超过最大延迟触发时间的为无效动态应力触发作用.

6.5 两次主震共同产生的静态库仑破裂应力的触发作用

对第1和第2主震共同产生的静态库仑破裂应力变化对余震的作用分析结果(表3第7和第10列)显示, 第1和第2主震在序号为1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 12的8个强余震断层面上共同产生的静态库仑破裂应力均为正值、且大于阈值0.01 MPa, 属于5.1节内容中的情况», 认为第1和第2主震共同产生的静态库仑破裂应力变化对这6个强余震起到了静态应力触发作用. 序号为5, 8, 9, 10, 13的5个强余震断层面上的静态库仑破裂应力为负、且其绝对值大于阈值0.01 MPa, 属于5.1节所述的情况^{1/4}, 认为这5个后续强余震的发生受到了第1和第2主震共同产生的静态库仑破裂应力的阻碍或延迟作用.

6.6 余震对相邻余震的库仑破裂应力触发作用

表4显示, 在误差范围内可以明确确定6号余

震对相邻的7号余震、9号余震对相邻的10号余震产生的动态库仑破裂应力峰值都满足动态触发条件, 即5.1节中情况¹, 起到了动态库仑破裂应力触发作用. 但6号余震在8号余震断层面上动态库仑破裂应力峰值在误差范围内可能不满足动态触发条件, 因此不能明确确定8号余震受到的作用性质. 同时看到, 所考虑的多数余震产生动态库仑破裂应力变化对相邻的后续余震的发生有正作用, 但是没有达到触发阈值, 例如, 1对2(1号余震对2号余震), 1对3, 3对4, 3对5, 7对8. 少数余震产生动态库仑破裂应力变化对后续余震的发生有负作用, 例如, 4对5, 9对13.

从表4看到, 有一半所考虑的余震产生的静态库仑破裂应力变化对附近后续余震起到了静态应力触发作用, 例如, 1对3, 3对4, 6对7, 6对8, 9对10. 同时看到, 1对2, 7对8产生静态库仑破裂应力变化为正, 但是没有达到触发阈值, 属于情况^{1/2}, 无作用. 3对4, 3对5的静态库仑破裂应力变化为负, 但其绝对值小于0.01 MPa, 无作用. 9对13有静态库仑破裂应力阻碍作用.

6.7 应力触发与构造背景

龙陵震区的构造背景是由东侧的怒江断裂、西侧的瑞丽、龙陵断裂和南侧的畹町断裂所包围的三角形块体. 发生在块体内部的10个强余震除5号外均不同程度地受到了第1或第2主震的动态和静态库仑破裂应力的综合触发作用, 而发生在块体外部的3个强余震(9, 10, 13号), 均没有受到第1和第2主震的静态库仑破裂应力触发作用, 其中, 9和10号强余震仅受到了第2主震的动态库仑破裂应力触发作用, 13号强余震没有受到任何触发作用而受到的是第1和第2主震共同静态应力的延迟作用. 这种现象可能表明, 龙陵双主震发生后, 块体内部的应力场主要由主震产生的完全库仑破裂应力来控制或调整, 而块体外部的应力场则主要由区域构造应力来控制或调整.

结果还显示, 与主震或共轭主震震源机制接近的强余震断层面上的动态和静态库仑破裂应力要大于其他强余震, 例如7, 11号强余震, 其断层面上的动态和静态库仑破裂应力比其他强余震要大一个量级. 当然, 影响库仑破裂应力大小的因素还很多, 如余震相对于主震的距离、方位以及震源深度等.

6.8 结论

龙陵第2主震受到了第1主震的动态和静态库仑破裂应力的触发作用. 龙陵双主震的13个后续强

余震中, 发生在三角形块体内部的强余震, 90% 受到了第 1 或第 2 主震的动态库仑破裂应力触发作用或静态库仑破裂应力触发作用, 发生在三角形块体外部的强余震, 2/3 受到了第 2 主震的动态库仑破裂应力触发作用, 但均没有受到第 1 和第 2 主震的静态库仑破裂应力触发作用. 第 2 主震在后续强余震断层面上产生的完全库仑破裂应力大于第 1 主震, 无论从触发强度或触发的后续强余震分布范围上看, 第 2 主震的动态和静态库仑破裂应力触发作用都大于第 1 主震. 余震对其相邻余震的动态和静态库仑破裂应力触发作用是存在的, 但不很普遍. 总的来说, 就近场而言, 受到龙陵双主震动态库仑破裂应力触发作用的强余震数目和受到静态应力库仑破裂触发作用的强余震数目相当, 但动态库仑破裂应力的触发作用范围比静态库仑破裂应力的触发作用范围要大. 龙陵双主震产生的动态库仑破裂应力和静态库仑破裂应力对后续强余震活动都起到了不可忽视的作用.

参考文献(References)

- [1] 张四昌, 刁桂苓, 王绍晋等. 1976 年龙陵震群序列的破裂特征. 中国地震, 1994, **10** (2): 152~ 159
Zhang S C, Diao G L, Wang S J, et al. Rupture characteristics of the 1976 Longling earthquake sequence. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1994, **10** (2): 152~ 159
- [2] 宴凤桐, 宋文, 王兴辉等. 龙陵地震的震源机制. 地震研究, 1978, **1** (1): 1~ 13
Yan F T, Song W, Wang X H, et al. Focal mechanism of Longling earthquakes. *J. Seismol. Research* (in Chinese), 1978, **1** (1): 1~ 13
- [3] 刘正荣, 宴凤桐. 龙陵共轭地震群的特征. 地震研究, 1978, **1** (2): 21~ 29
Liu Z R, Yan F T. The features of Longling conjugated earthquake swam. *J. Seismol. Research* (in Chinese), 1978, **1** (2): 21~ 29
- [4] Perniola B, Bressan G, Pondrelli S. Changes in failure stress and stress transfer during the 1976~ 1977 Friuli earthquake sequence. *Geophys. J. Int.*, 2004, **156** (2): 297~ 306
- [5] Sebastian H. Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159** (3): 1090~ 1096
- [6] Wang W H, Chen C H. Static stress transferred by the 1999 Chi Chi, Taiwan, Earthquake: effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault slip model. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2001, **91**: 1041~ 1052
- [7] Stein R S, King G C P, Lin J. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 *M*7.4 Landers earthquake. *Science*, 1992, **258**: 1328~ 1332
- [8] Harris R A, Simpson R W, Reasenber P A. Influence of static stress changes on earthquake location in southern California. *Nature*, 1995, **375**: 221~ 224
- [9] Harris R A, Simpson R W. Changes in Static stress changes on southern California faults after the 1992 Landers earthquake. *Nature*, 1992, **360**: 251~ 254
- [10] Tibi R, Wliens D A, Inoue H. Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequences. *Nature*, 2003, **424**: 921~ 925
- [11] Antonioli A, Cocco M, Das S, et al. Dynamic stress triggering during the great 25 March 1998 Antarctic plate earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**: 896~ 903
- [12] Belardinelli M E, Bizzari A, Cocco M. Earthquake triggering by static and dynamic stress changes. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (B3): 2135, doi: 10.1029/2002JB001779
- [13] Gomberg J, Reasenber P A, Bodin P, et al. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. *Nature*, 2001, **411**: 462~ 466
- [14] Brodsky E E, Karakostas V, Kanamori H. A new observation of dynamically triggered regional seismicity: Earthquake in Greece following the August, 1999 Izmit Turkey earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 2741~ 2744
- [15] Kilb D, Gomberg J, Bodin P. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses. *Nature*, 2000, **408**: 570~ 574
- [16] Gomberg J, Blanpied M L, Beeler N M. Transient triggering of near and distant earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1997, **87**: 294~ 309
- [17] Parsons T. A hypothesis for delayed dynamic earthquake triggering. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L04302
- [18] 邱泽华, 石耀霖. 地震造成远距离应力阶变的观测实例. 中国科学, 2003, **33** (增刊): 60~ 64
Qiu Z H, Shi Y L. Observations of remote coseismic stress step changes. *Science in China* (in Chinese), 2003, **33** (Suppl.): 60~ 64
- [19] Russell R, Zhou S Y. Stress interactions within the tangshan, China, earthquake sequence of 1976. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2005, **95** (6): 2501~ 2505, Doi: 10.1785/0120050091
- [20] 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. 地球物理学报, 2003, **46** (6): 786~ 795
Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, et al. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the east Kunlun fault system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46** (6): 786~ 795
- [21] 傅征祥, 刘桂萍, 陈棋福. 青藏高原北缘海原、古浪、昌马大地震间相互作用的动力学分析. 地震地质, 2001, **23** (1): 35~ 42
Fu Z X, Liu G P, Chen Q F. Dynamic analysis on interaction between the Haiyuan Gulang Ghangma great earthquake in the north boundary of the Tibetan plateau. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2001, **23** (1): 35~ 42
- [22] Kilb D, Gomberg J, Bodin P. Aftershock triggering by complete Coulomb stress changes. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (B4): 2060, Doi: 10.1029/2001JB000202
- [23] Bouchon M. A review of the discrete wavenumber method. *Pure Appl. Geophys.*, 2003, **160**: 445~ 465

- [24] 解朝焱, 吴小平, 虎雄林. 地震破裂产生的动态应变场的模拟计算研究. 地震研究, 2006, **29**(2): 137~ 142
Xie C D, Wu X P, Hu X L. Simulated calculation research of dynamic strain field caused by seismic rupture. *J. Seismol. Research* (in Chinese), 2006, **29**(2): 137~ 142
- [25] Heaton T H. Evidence for and implications of self healing pulses of slip in earthquake rupture. *Phys. Earth Plan. Int.*, 1990, **64**: 1~ 20
- [26] Tibi R, Bock G, Xia Y M, et al. Rupture processes of the 1999 August 17 Izmit and November 12 D zce (Turkey) earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 2001, **144**(2): Doi:10.1046/j.1365~ 246x
- [27] 胡家富, 苏有锦, 朱雄关等. 云南的地壳 S 波速度与泊松比结构及其意义. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(8): 714~ 722
Hu J F, Su Y J, Zhu X G, et al. S wave velocity and Poisson's ratio structure of crust in Yunnan and it's implication. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**(8): 714~ 722
- [28] 胡家富, 丛连理, 苏有锦等. 云南及周边地区 Lg 尾波 Q 值的分布特征. 地球物理学报, 2003, **46**(6): 809~ 813
Hu J F, Cong L L, Su Y J, et al. Distribution characters of Q value of the Lg code in Yunnan and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6): 809~ 813
- [29] 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 云南数字地震台站下方的 S 波速度结构研究. 地球物理学报, 2001, **44**(2): 228~ 237
Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. The S wave velocity structure beneath digital seismic stations of Yunnan province inferred from teleseismic receiver function modeling. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(2): 228~ 237
- [30] 国家地震局工程力学研究所. 龙陵地震强震记录常规处理报告. 北京: 地震出版社, 1989
The Institute of Engineering Mechanics, State Earthquake Administration. Report of Longling Earthquake Strong Earthquake Records Processing (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1989
- [30] 马宏生, 汪素云, 裴顺平等. 川滇及周边地区地壳横波衰减的成像研究. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 465~ 471
Ma H S, Wang S Y, Pei S P, et al. Q_0 tomography of S wave attenuation in Sichuan-Yunnan and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 465~ 471
- [31] 曹忠权, 张智, 田小波. 青藏高原班公湖-怒江缝合带域岩石密度结构及意义. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 523~ 528
Cao Z Q, Zhang Z, Tian X B. Rock density structure in Bangong-Nujiang suture zone and its significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 523~ 528
- [32] 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 川滇地区速度结构的区域地震波形反演研究. 地球物理学报, 2006, **49**(5): 1369~ 1376
Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. Regional waveform inversion for crustal and upper mantle velocity structure below Chuandian region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(5): 1369~ 1376
- [33] 张智, 赵兵, 张晰等. 云南思茅-中甸地震剖面的地壳结构. 地球物理学报, 2006, **49**(5): 1377~ 1384
Zhang Z, Zhao B, Zhang X, et al. Crustal structure beneath the wide angle seismic profile between Simao and Zhongdian in Yunnan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(5): 1377~ 1384
- [34] Kilb D. A strong correlation between induced peak dynamic Coulomb stress change from the 1992 M7.3 Landers, California, earthquake and the hypocenter of the 1999 M7.1 Hector Mine, California, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B1): 2012, Doi: 10.1029/2001JB000678
- [35] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(B10): 24347~ 24358
- [36] Hill D P, Reasenber P A, Michael A, et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. *Science*, 1993, **260**: 1617~ 1622
- [37] Anderson J G, Brune J N, Louie J N, et al. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California, earthquake, 28 June 1992. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1994, **84**: 863~ 891

(本文编辑 胡素芳)