

# 丽江 $M_{7.0}$ 地震动态库仑破裂应力变化 及余震活动性研究<sup>\*</sup>

虎雄林, 卢吉高, 李正光

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 通过国内许多学者研究丽江  $M_{7.0}$  地震震源过程及云南地区地壳结构的结果, 运用离散波数法, 计算了丽江地震产生的动态库仑破裂应力变化, 并研究了其与后续余震活动的关系。结果表明, 丽江主震产生的动态库仑破裂应力场瞬态的正区与稳态的正区对余震的发生促进作用十分明显。

关键词: 丽江地震; 动态应力; 库仑破裂应力变化; 应力触发

中图分类号: P315.3<sup>+</sup>3 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0590-05

## 0 引言

主震后对余震影响的应力有静态应力和动态应力两类, 由这两类应力引起的触发问题一直是国内外诸多地震学者研究的焦点之一。在国外, 一些学者证实了静态和动态应力触发现象的存在, 并展开了一系列研究。如 Kill 等 (2000) 研究了美国 Landers 地震在近场产生的动态库仑破裂应力变化值与震后地震的活动性, 发现 Landers 地震产生的动态库仑应力变化峰值与静态库仑应力变化在空间延伸方向上是一致的, 动态库仑应力变化峰值由于具有非对称性而能更好地解释地震之后地震活动性的变化, 如余震活动和远程的区域性中小地震活动变化。Cottor 等 (1997) 计算了类似于 Landers 地震模型产生的库仑破裂应力变化, 对动态与静态应力变化进行了比较, 发现在远场范围内, 动态应力变化大大超过静态应力变化, 但是在近场, 两者几乎相近。

国内目前从静态应力角度开展的研究较多, 但对动态应力和完全库仑破裂应力研究很少 (万永革等, 2000; 2002; 石耀霖, 2001; 郑文衡等, 2005; 陆明勇等, 2006); 对于具体的震例而言, 近年郝平等 (2006) 研究了印尼 8.7 级地震对中国大陆 3 次后续中强地震的动应力触发作用; 吴小平等 (2007) 计算了 1988 年云南澜沧—耿马  $M_{7.6}$  地震、1995 年云南武定  $M_{6.5}$  地震的动态应力, 研究了其对后

续地震的动态应力触发作用。这些研究表明地震静态和动态应力触发对后续地震活动性都有很大的影响, 然而静态应力与动态应力之间由于方向和大小的不同, 也是相互影响的。

1996 年 2 月 3 日在滇西北丽江发生了  $M_{7.0}$  地震。据云南遥测地震台网测定, 截止到 1996 年 12 月 31 日记录到 1.0 级以上余震 5 528 次, 其中 2.0 级以上 3 390 次, 3.0 级以上 263 次, 4.0 级以上 47 次, 5.0 级以上 8 次, 6.0 级以上 1 次, 最大强余震是发生在 2 月 5 日的  $M_{6.0}$  地震。对于丽江地震近场范围对余震的影响问题, 本文计算动态库仑破裂应力变化场, 考虑动态库仑破裂应力对后续地震的作用, 并研究其与后续余震的关系。这对揭示丽江主震与余震活动性的内在联系有重要意义。

## 1 计算原理

### 1.1 DWN 方法原理

DWN 方法 (Bouchon, 2003) 把单一源的问题用复合源代替。任何类型的弹性震源都可以用一组点源的组合来代替。地震学中的点源通常用它的矩张量  $m$  表示, 其中,  $m_{xx}$ ,  $m_{yy}$ ,  $m_{zz}$  表示沿笛卡尔坐标轴方向的 3 个力偶极子强度,  $m_{xy} = m_{yx}$ ,  $m_{xz} = m_{zx}$ ,  $m_{yz} = m_{zy}$  是双力偶中每个力偶的强度 (矩)。

设有一剪切断层, 用  $(\xi, \eta, \zeta)$  表示沿断层滑动方向的单位矢量, 用  $(n, x, y)$  表示断

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-10-20.

层面法线方向单位矢量, 相应的矩张量分量为

$$m_{ij}=-\mu \operatorname{slip}(\omega) \Delta S\left(\xi_i \eta_j+\xi_j \eta_i\right) . \quad(1)$$

其中,  $\mu$ 是刚度,  $\Delta S$ 是发生剪切滑动的断层面的面积元,  $\operatorname{slip}(\omega)$ 是滑动矢量。将地震断层面离散成小面元上位错点源组成的二维阵列, 在频率一波数域内对所有点源的贡献进行求和, 最后将在频率域中解决的复合源问题恢复到单一源问题。

1.2 震源参数和地壳结构模型

本次计算的区域是以震中  $\left(27.3^{\circ} \mathrm{N} \quad 100.22^{\circ} \mathrm{E}\right)$  为中心的  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的区域 研究区域如图 1 (a) 所示。图中 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>和 S<sub>3</sub>是位于地震断层不同方向处的 3 个接收点, 粗实线是地震断层在地表处的投影。

据昆明地震台网测定, 丽江 M<sub>s</sub>7.0主震震中位于  $27.3^{\circ} \mathrm{N} \quad 100.22^{\circ} \mathrm{E}$  震源深度 10 km 表 1 给出了丽江地震的断层参数, 根据苏有锦等 (1997) 的研究结果, 得出丽江 M<sub>s</sub>7.0地震主震为两次破裂事件, 第一次破裂走向 N15°W, 矩释放  $2.12 \times 10^{18} \mathrm{~N} \cdot \mathrm{m}$  由  $M=\mu D A$  关系式, 取  $\mu=3 \times 10^{11} \mathrm{dyn} / \mathrm{cm}^2$  时, 求得的平均位错为 0.34 m; 第二次破裂走向为 N46°E 矩释放  $3.38 \times 10^{18} \mathrm{~N} \cdot \mathrm{m}$  同样可得平均位错为 0.35 m 根据秦嘉政等 (1997) 的研究结果, 第一次破裂时间为 5.4 s 破裂长度 13 km, 宽 16 km 第二次破裂时间为 8.4 s 破裂长度 20 km, 宽 16 km (图 1 b)。根据王绍晋等 (1997) 的研究结果, 第一次断层倾角为 44°, 滑动角为 -68°, 第二次倾角为 64°, 滑动角为 -68°。根据破裂速度与 S 波速度的关系式  $V=0.68 V_s \sim 0.8 V_s$  之间, 破裂速度 V 取  $2.91 \mathrm{~km} / \mathrm{s}$

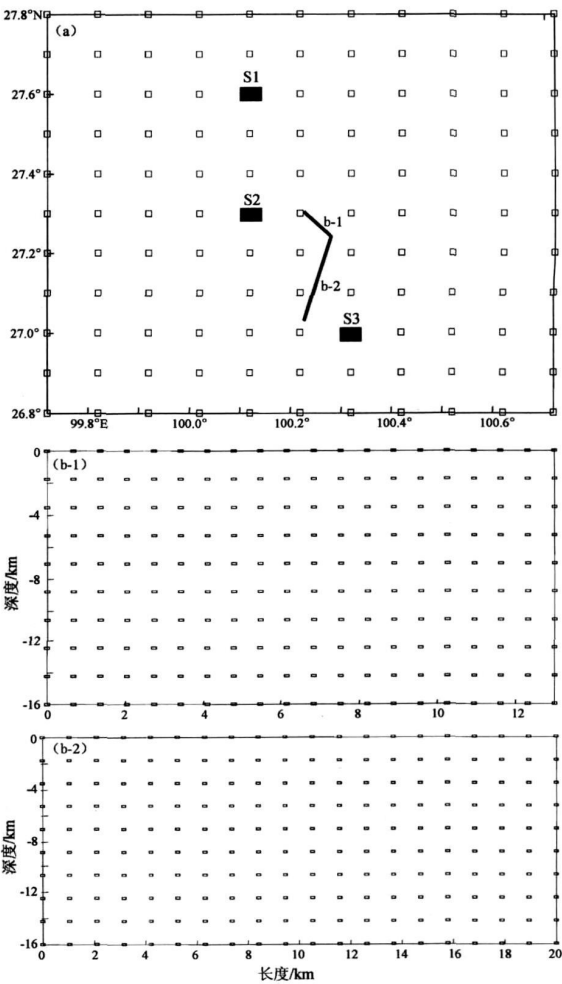


图 1 丽江主震研究区域 (a) 和  
丽江地震断层剖面图 (b)  
(b-1) 图 (a) 中 b-1 断层段的剖面图  
(b-2) 图 (a) 中 b-2 断层段的剖面图

表 1 丽江主震断层参数

断层	断层面上沿深度 /km	断层下沿深度 /km	震源深度 /km	走向 /(°)	断层倾角 /(°)	滑动角 /(°)	断层长度 /km	断层宽度 /km
1	2.0	18.0	10.0	345°	44°	-68°	13	16
2	2.0	18.0	10.0	46°	64°	-68°	20	16

丽江地区的地壳模型见表 2 该模型参考了国家地震局 82 测深工程有关资料和近年来有关云南地壳结构研究的文章 (胡鸿翔等, 1986 王椿镛等, 2002 吴建平等, 2001; 胡家富等, 2003), 并在上部增设了一个弹性半空间, 表 2 中 S 波速度 V<sub>s</sub> 由经验关系式 V<sub>p</sub>=1.73 V<sub>s</sub> 确定, 密度由周真恒等 (2001) 对云南地壳和上地幔的岩石学结构研究给出。

表 2 丽江地区的地壳模型

层数	层厚 /km	P 波速度 /km s <sup>-1</sup>	S 波速度 /km s <sup>-1</sup>	密度 mg m <sup>-3</sup>
1	0.7	4.6	2.66	2.73
2	15.3	6.19	3.58	2.78
3	10.0	6.46	3.73	2.83
4	16.0	6.32	3.65	2.96
5	12.0	6.92	4.0	3.06
6	0.0	7.80	4.51	3.40

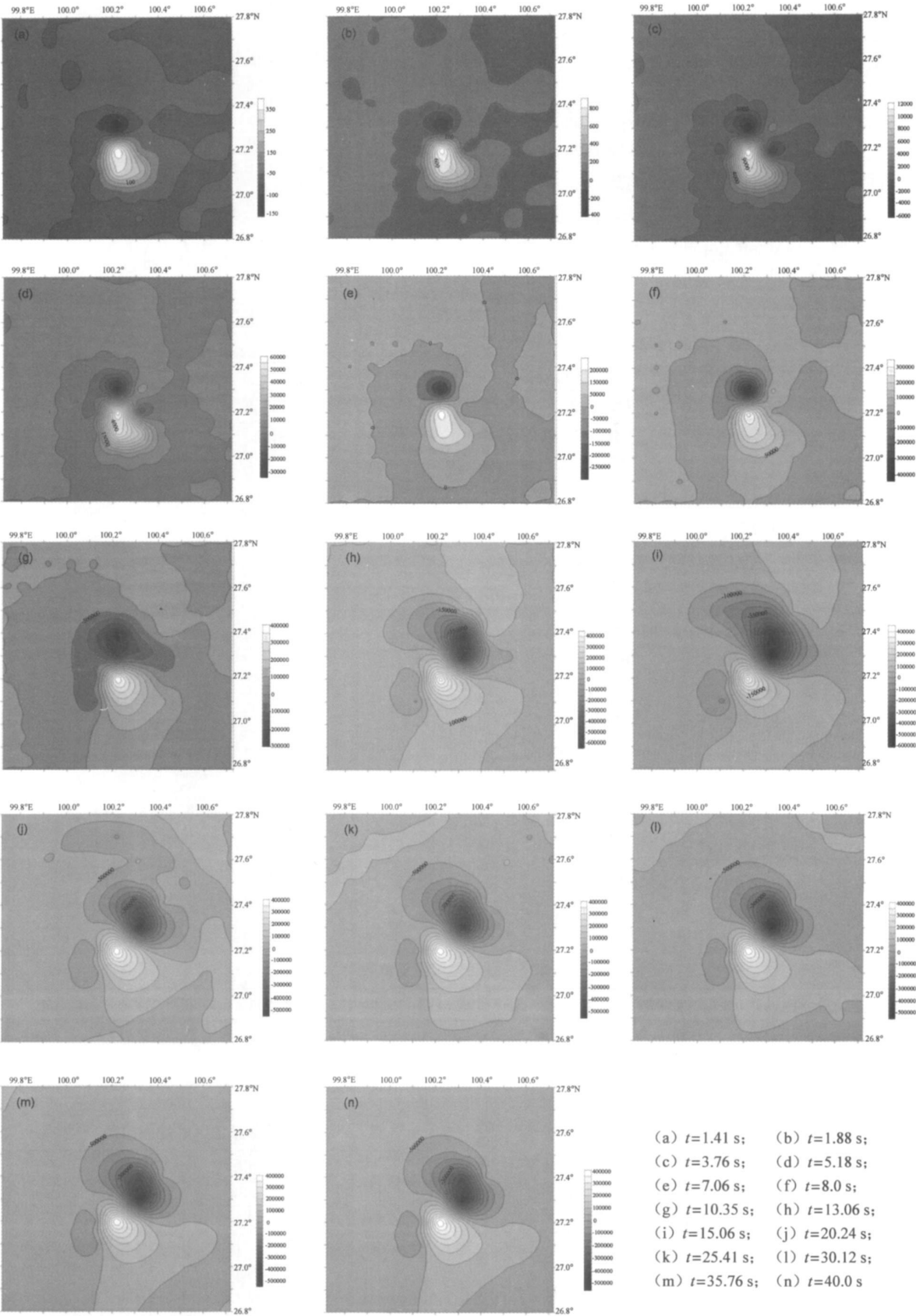


图2 丽江主震产生的动态库仑破裂应力场  $\Delta CFS(r, t)$

## 2 动态库仑破裂应力变化场 $\Delta CFS(r, t)$

通过以上方法计算出丽江主震在余震平均分布深度 10 km 处的平面上产生的动态库仑破裂应力变化场, 如图 2 其中  $t=1.41 \text{ s} \sim 1.88 \text{ s} \sim 3.76 \text{ s} \sim 5.18 \text{ s} \sim 7.06 \text{ s} \sim 8.0 \text{ s} \sim 10.35 \text{ s} \sim 13.06 \text{ s} \sim 15.06 \text{ s} \sim 20.24 \text{ s} \sim 25.41 \text{ s} \sim 30.12 \text{ s}$  时丽江主震在此平面上产生的动态库仑破裂应力变化场。从图中可看出, 动态库仑破裂应力应化为正的区域 (图中浅色区域, 以下简称正区) 极值变化较大的时间为  $3.76 \text{ s}$ , 此时正区的极值为  $0.011 \text{ MPa}$ ;  $t=13.06 \text{ s}$  时正区的极值达到最大, 为  $4.0 \text{ MPa}$ , 此时场正区主要分布在震中南偏东方向, 展布范围

为东南方向约  $50 \text{ km}$  南西方向约  $25 \text{ km}$ 。图 3 是动态库仑破裂应力变化正区极值最大时的场与  $M \geq 2.0$  余震震中分布图; 图 4 是丽江主震产生的动态库仑破裂应力变化场 (稳态)  $\Delta CFS(r, t)$  及  $M \geq 2.0$  余震分布图。

## 3 讨论与结论

由图 2 可知  $t=20.24 \text{ s}$  时动态库仑破裂应力变化场开始趋于稳态, 此时正区的极值为  $3.5 \text{ MPa}$ , 正区分布也在震中南偏东方向, 展布范围东南方向约  $50 \text{ km}$  南西方向约  $25 \text{ km}$ 。动态库仑破裂应力变化场正区分布随时间变化不大, 但正区极值不断增大。这种分布可能是由丽江地震断层特性决定, 丽江地震以正倾滑为主, 兼具有左旋剪切错动, 因此它的分布特征是单侧强度大的非对称分布。动态库仑破裂应力变化场瞬态的正区的最大极值比稳态的正区的极值大  $0.5 \text{ MPa}$ 。

此次地震发生的  $M \geq 2.0$  余震达 3 192 多个, 由图 3 可知有 3 165 个落入正区, 15 个落入负区, 12 个落入正区与负区的交界处。上述数据显示, 90% 以上的余震分布在最大极值的动态库仑破裂应力场正区, 说明主震产生的动态库仑破裂应力变化场的正区对余震的发生促进作用比较大。由图 4 可见  $M \geq 2.0$  的 3 192 个余震有 3 130 多个落入正区, 有 30 多个落入负区, 20 个落正区与负区的交界处, 落入动态库仑破裂应力变化场稳态正区的余震数略小于落入最大极值的正区的余震数。表明动态库仑破裂应力场瞬态的正区与稳态的正区同样促进余震的发生。

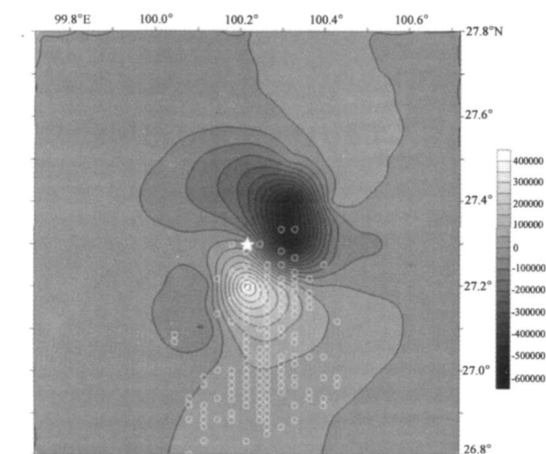


图 3 丽江  $t=13.18 \text{ s}$  时主震产生的动态库仑破裂应力变化场  $\Delta CFS(r, t)$  及  $M \geq 2.0$  余震分布

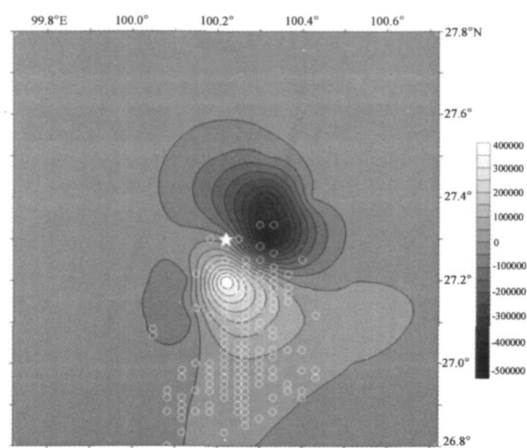


图 4 丽江主震产生的动态库仑破裂应力变化场 (稳态时)  $\Delta CFS(r, t)$  及  $M \geq 2.0$  余震分布

## 参考文献:

- 郝平, 刘杰, 韩竹军, 等. 2006. 印尼  $M_{\text{s}} 8.7$  地震对中国大陆 3 次后续中强地震的动应力触发研究 [J]. 地震, 26 (3): 26—36.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究 [J]. 地球物理学报, 29 (2): 33—144.
- 胡家富, 苏有锦, 朱雄关, 等. 2003. 云南的地壳 S 波速度与泊松比结构及其意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (8): 714—712.
- 虎雄林, 吴小平, 杨润海, 等. 2008. 云南武定  $M_{\text{L}} 6.5$  地震动态库仑破裂应力变化的数值模拟计算及其与余震活动的关系 [J]. 地震学报, (1): 26—35, 105.
- 刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政, 等. 2002. 20 世纪云南地震活动 [M]. 北京: 地震出版社.
- 陆明勇, 郑文衡, 胡志奇. 2006. 动态应力作用与地震机制的初步

研究 [ J ]. 地球物理学报, 49 (1): 170—179.

秦嘉政, 刘祖荫, 张俊伟, 等 . 1997. 用地震标定律研究丽江 7.0 级地震的破裂过程 [ J ]. 地震研究, 20 (1): 47—57.

石耀霖 . 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考 [ J ]. 地震, 21 (3): 1—7.

苏有锦, 刘祖荫 . 1997. 丽江 7.0 级地震震源环境及其破裂过程讨论 [ J ]. 地震研究, 20 (1): 66—71.

万永革, 吴忠良, 周公威, 等 . 2000. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题 [ J ]. 地震学报, 22 (6): 568—576.

万永革, 吴忠良, 周公威, 等 . 2002. 地震应力触发研究 [ J ]. 地震学报, 24 (5): 533—551.

王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 等 . 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究 [ J ]. 地震学报, 24 (1): 1—16.

王绍晋, 胡克坚 . 1989. 云贵地区现代构造应力场空间分布与地震危险区划 [ Q ]. 闵子群主编. 云贵地区地震危险性研究文集 . 昆明: 云南科技出版社 .

王绍晋, 龙晓帆, 罗淑进, 等 . 1997. 丽江地震序列的震源机制、发震应力场和破裂特征 [ J ]. 地震研究, 20 (1): 26—34.

吴建平, 明跃红, 刘一鸣, 等 . 2001. 云南数字地震台下方的 S 波速度结构研究 [ J ]. 地球物理学报, 44 (2): 228—237.

吴小平, 虎雄林, Michel Bouchon 等 . 2007. 云南澜沧—耿马 M<sub>S</sub>7.0 地震的完全库仑破裂应力变化与后续地震的动态、静态应力触发 [ J ]. 中国科学 D 辑 (地球科学), 37 (6): 746—752.

张建国, 周瑞琦, 吴伯黔, 等 . 1997. 丽江 7.0 级地震地表破裂与形变特征 [ J ]. 地震研究, 20 (1): 58—65.

郑文衡, 陆明勇 . 2005. 地震动态触发机制的初步研究 [ J ]. 地球物理学报, 48 (1): 116—123.

周真恒, 向才英, 杨昆杰 . 2001. 云南地区地壳和上地幔的岩石学结构 [ J ]. 地震地质, 21 (1): 69—78.

Bouchon M. 2003. A Review of the Discrete Wavenumber Method [ J ]. Pure appl geophys, 160 (3): 445—465.

Cotton F, Cougnet Q. 1997. Dynamic stress variations due to shear faulting in a Plane-layered medium [ J ]. Geophys J Int, 128: 676—668.

Kilb D, Gombert J, Bodin P. 2000. Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses [ J ]. Nature, 408: 570—574.

Dynamic Coulomb Rupture Stress Changes Caused by the Lijiang M7.0 Earthquake and Its Triggering Effect on Aftershocks

HU Xiong-lin, LU Ji-gao, LI Zheng-guang  
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Based on the research on the focal process of the Lijiang M7.0 earthquake and on the crustal structure of Yunnan, we use discrete wavenumber method to calculate the dynamic Coulomb rupture stress changes caused by the Lijiang earthquake and study its relationship with the aftershocks. The results show that the positive peak value regions of dynamic and static Coulomb rupture stress changes caused by the Lijiang mainshock are helpful for the occurrence of the aftershocks.

Key words: Lijiang earthquake; dynamic stress; Coulomb rupture stress change; stress triggering