论文

$M_s8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响

解朝娣^{①②*}, 朱元清^{①③}, Xinglin LEI^②, 于海英^③, 虎雄林^④

① 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092;

② Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba 305-8567, Japan;

③ 上海市地震局, 上海 200062;

④ 云南省地震局, 昆明 650224

* E-mail: xiechaodi1981@yahoo.cn

收稿日期: 2009-07-13; 接受日期: 2010-02-21

国家自然科学基金(批准号: 40364001)和上海市综合深井地震观测系统建设项目资助

摘要 采用已公布的 5 个震源破裂模型, 计算了 $M_s8.0$ 汶川地震产生的库仑破裂应力变化, 分析了应力变化与后续地震活动空间分布的相关性. 以震源模型引起的不确定性分析为基础, 研究了汶川地震在周边断裂上引起的库仑应力变化, 并重点探讨了应力变化引起的地震活动性随时间的相对变化趋势. 结果表明, 以 Ji 模型和王卫民模型计算出的应力变化空间分布较好地与后续地震活动的空间分布相对应. 最大的应力减小区主要分布于震源断层的东西两侧, 最大的应力增加区分布于震源断层面以及断层面南北两个端部的邻近区域, 此外还有一个北西-南东向的显著增加区位于主震断层面南段附近的汶川-映秀一带, 该区域已发生了较多的余震活动, 且地震活动呈现继续扩散的趋势, 是未来地震危险性较高的地区. 汶川地震引起了周边多数断裂不同程度的地震活动性增强, 活动性增强最显著的是彭县-灌县断裂和青川断裂, 未来 100 年内都维持在震前的 2 倍以上, 地震活动恢复至背景水平所需的时间基本都达到 800~900 年; 西秦岭南缘断裂、龙泉山断裂、鲜水河断裂、玉龙希断裂、安宁河断裂、岷江断裂和阿坝断裂的地震活动性受汶川地震的影响较小, 震后地震活动率与震前相比不足 2 倍, 并且扰动恢复时间较短. 因抚边河断裂和虎牙断裂处于应力减小区域, 未来地震活动性可能会减弱. 受到汶川地震产生的应力变化影响, 青川断裂和彭县-灌县断裂的未来发震危险性较高.

关键词汶川地震
最优取向断层面
库仑应力变化
地震活动率

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分, 四川省汶川县境内(31.0°N , 103.4°E)发生了 $M_s8.0$ 特大地震. 截止 2008 年 7 月 8 日, 四川台网给出的余震序列约 1.6 万次. 此次汶川地震的震源破裂持续时间较长, 研究表

明^[1,2], 龙门山断裂带的映秀-北川断裂是此次地震的主发断裂, 形成的地表破裂带长约 240 km, 灌县-江油断裂也形成了约 72 km 的地表破裂带. 这是一次以逆冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震, 产生的最大

引用格式: Xie C D, Zhu Y Q, Lei X L, et al. Pattern of stress change and its effect on seismicity rate caused by $M_s8.0$ Wenchuan earthquake. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4025-9

垂直位移和最大右旋走滑位移分别为 (6.5 ± 0.5) 和 4.9 m. 余震主要集中在北川-映秀断裂上盘(西侧)一定范围内, 前山灌县-江油断裂沿线都江堰市至安县附近也有少量余震分布^[3-5]. 龙门山断裂带位于青藏高原东缘, 该区域经历了强烈的地壳变形和断裂作用, 不同走向、规模和活动强度的断裂广泛分布^[2,6-8]. 本文感兴趣的是汶川地震在整个邻近区域产生的应力变化具有什么空间展布特征? 应力变化的空间分布是否能解释后续地震活动的空间分布? 以及周边断裂受到应力改变影响后的地震活动率变化情况如何?

地震是应力积累到一定程度, 地壳岩层突然破裂、错动的一种自然现象^[9]. 一次大地震的同震位错会引起附近区域的应力变化, 应力变化将影响断裂的破裂失稳条件, 当应力变化为正值时, 加速了周围断裂或临近区域的应力累积, 使下次地震提前发生, 这种作用即为增震作用, 也称为地震触发效应; 相反, 应力变化为负值时, 周围断裂或临近区域的应力累积进程会被延缓滞后^[10-12]. 关于地震应力触发研究主要是以计算库仑破裂应力变化为基础^[13-29]. 这类研究的广泛开展始于1992年美国 M_w 7.3 Landers地震, King等^[13]计算得到该地震对后续 M 6.5 Big Bear地震产生的库仑破裂应力增量为2 bar左右(1 bar= 10^5 Pa), 认为是 Landers 地震加速了 Big Bear 地震的发生. Jaumé等^[14]进一步用库仑应力变化解释了应力阴影区与地震延迟等现象, 他们通过计算1906年圣安德列斯地震产生的库仑应力变化, 发现这次地震对 Bay 地区的多数断裂带起到了应力释放的作用, 并使下一次大地震推迟数十年. Toda等^[15]对1983年 Coalinga-Nuñez 地震的应力触发效应的研究中, 将库仑应力变化与地震活动率联系起来, 分析了应力变化对断层未来地震活动性和地震复发危险性的影响. 刘桂萍等^[16]较早地研究了海原大地震对古浪大地震的静应力触发作用. 万永革等^[17-19]采用 Okada 公式讨论了中国几次复杂地震中的应力触发问题, 亦对应力触发的黏弹性问题进行了深入研究, 并提出地震产生的库仑破裂应力变化强烈依赖于地震破裂模型, 应采用合适的震源模型模拟地震位错.

目前, 已有关于汶川地震应力触发的相关研究. 例如 Parsons等^[20]对汶川地震产生的应力变化及其对断层的影响做了初步探讨. Toda等^[27]利用几条主要活动断裂插值得到了汶川地震产生的应力变化分布. 万永革等^[28]和单斌等^[29]计算了汶川地震导致的周围

断层应力变化.

本文利用汶川地区构造应力场和发震机理研究的最新进展, 采用已公布的5个震源破裂模型计算应力变化, 弥补了 Toda 研究因地质背景信息和震源模型不足引起结果的不确定性, 而且本文后续地震活动的考察时限更充分, 能更加全面地研究汶川地震的应力触发效应. 在万永革等^[28]和单斌等^[29]研究的基础上, 本文还将探讨汶川地震引起周边断裂应力变化后的地震活动性随时间变化情况.

本文的目的是通过对比分析5个震源模型得出的结果, 得到应力变化空间分布特征. 以此为基础, 给出未来地震危险性较高的区域, 并对因应力扰动引起的地震活动率随时间的变化趋势做出定量研究.

1 资料

1.1 构造背景

资料^[2,6,7,30]表明, M_s 8.0汶川地震发生在青藏高原东缘的龙门山推覆构造带内, 龙门山构造带呈北东-南西向延伸, 主要由龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂和四川盆地内山前隐伏断裂及其相应的推覆体等组成, 断裂带以西为松潘-甘孜褶皱系, 以东为扬子地台. 受印度板块与欧亚板块碰撞及其持续北东向推挤导致的高原物质东移的影响, 龙门山断裂带自新生代以来经历了强烈的地壳变形和断裂作用, 致使该地区不同走向和规模的断裂纵横交错, 西南侧是鲜水河-安宁河断裂带, 东南侧是龙泉山断裂带, 东北侧是西秦岭断裂带, 西北是东昆仑断裂带. 历史上, 这些断裂带的地震活动频度和强度均较高, 其中鲜水河断裂带就曾多次发生7级以上大地震.

1.2 可变滑动震源模型

鉴于汶川地震震源破裂过程的复杂性, 使用具有可变滑动分布的震源模型计算库仑破裂应力变化. 可变滑动震源模型通常可由GPS观测资料、波形记录和地质调查结果等综合得到. 不同学者反演得到了汶川地震的破裂过程和震源断层面的滑动位移分布, 例如美国地质调查局的Ji Chen等(http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html)于震后7 h, 在网上发布了滑动矢量分布结果. 本文计算将采用Ji模型(http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html)、王卫民模

型^[31]、张勇模型^[32]、Sladen模型(http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2008_e_sichuane_sichuan.html)和 Nishimura 模型 (<http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~nishimura/20080512>)共 5 个震源模型. 模型的破裂滑动分布如图 1, 其他相关参数见表 1. 除了王为民模型用 3 个子断层模拟发震破裂外, 其余均用一个断层模拟发震破裂.

2 最优取向断层面投影的库仑破裂应力变化计算

2.1 原理和方法

根据库仑破裂准则, 使岩石破裂失稳的库仑破裂应力^[13]为

$$\sigma_f = \tau_f - \mu(\sigma_\beta - P), \tag{1}$$

其中 σ_β 为断层面的正应力, τ_f 为切应力, P 为孔隙流

体压力, μ 为断层面介质的摩擦系数.

如果断层面与主应力 σ_1 轴的夹角为 β (图 2), 则正应力和切应力可以表示为

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta, \tag{2}$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta, \tag{3}$$

其中 σ_1 是最大主应力, σ_3 是最小主应力. 方程(1)可以变为

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu P. \tag{4}$$

对(4)式求 β 的偏微分, 可以发现当 β 满足 $\cot 2\beta = -1/\mu$ 时, 库仑破裂应力取最大值 $\sigma_f^{\max}$.

图 1 5 个震源模型的滑动量分布
(a)~(e)依次是 Ji, Nishimura, Sladen, 王卫民等^[31]和张勇等^[32]给出的震源模型

表 1 5 个震源模型的主要参数

模型	深度(km)	震中位置		断层产状		断层长度(km)	断层宽度(km)
		纬度(N)	经度(E)	走向(°)	倾角(°)		
Ji	10.0	31.10°	103.30°	229	33	318	22
Nishimura	15.0	31.10°	103.28°	229	33	320	75
Sladen	10.0	31.10°	103.27°	229	33	260	20
王卫民	15.5	30.99°	103.36°	229	32	308	40
张勇	15.0	31.00°	103.40°	225	39	510	50

图 2 最优取向断层面上应力的坐标系示意图

如(1)式所示, 孔隙流体压力 P 调制着断层面的有效正应力, 当岩石应力的改变远远快于岩石中的流体压力扩散, 则流体压力 P 可以通过 Skempton 系数 B 在(1)式中得到反映, 并取视摩擦系数 $\mu' = \mu(1-B)$, 则(1)式变为

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu' \sigma_\beta \quad (5)$$

μ' 包括了孔隙流体和断面上的介质特性, 一般 μ' 取 0.2~0.8. 由于难以对地壳应力值直接进行精确测量, 因此利用库仑破裂应力变化可估计应力的相对变化, 进而(5)式改写为

$$\Delta \sigma_f = \Delta \tau_\beta - \mu' \Delta \sigma_\beta \quad (6)$$

其中, $\Delta \sigma_\beta$ 为断面上的正应力变化, $\Delta \tau_\beta$ 为切应力变化^[11].

库仑破裂应力变化定义于具体的断层面, 所谓最优取向断层面是指计算库仑破裂应力变化时, 某一产状接收断层面上计算得到的库仑应力变化大于同一地点其他产状的接收断层面上得到的应力变化幅值, 这类产状的接收断层即是最优取向断层. 以最优取向断层面投影计算得到的应力变化空间分布, 可以解释余震分布情况, 也可以预测未来后续地震活动的空间分布^[13,15,23,24,27].

要计算最优取向断面上的库仑破裂应力变化, 首先用 Okada^[33] 给出的静态位移和应变的解析表达式, 计算震源断层在接收断层处产生的应变分量, 由胡克定律计算出应力分量 σ_{ij}^q . 然后将已计算出的 σ_{ij}^q 和区域构造应力 σ_{ij}^r 叠加得到总应力 σ_{ij}^t :

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij}^r + \sigma_{ij}^q, \quad (7)$$

可由总应力 σ_{ij}^t 确定主应力轴方向, 如图 2 中坐标系,

θ 为最大主应力轴与 x 轴的夹角, 则 θ 为

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{xy}^t}{\sigma_{xx}^t - \sigma_{yy}^t} \right), \quad (8)$$

此时最优取向断层面的方向 ψ_0 通过 $\theta \pm \beta$ 得以确定.

虽然最优取向断层面的方向性通过总应力确定, 但是该断面上的正应力和切应力变化值却只取决于震源断层产生的应力变化, 因此在最优取向断面上的库仑破裂应力变化^[13]表示为

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^q \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^q \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^q \cos^2 \psi_0, \quad (9)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2} (\sigma_{yy}^q - \sigma_{xx}^q) \sin 2\psi_0 + \tau_{xy}^q \cos 2\psi_0, \quad (10)$$

求得 σ_{33} 和 τ_{13} 的相对变化 $\Delta \sigma_{33}$ 与 $\Delta \tau_{13}$, 进而最优取向投影方向上的库仑破裂应力变化^[13]为

$$\Delta \sigma_f^{opt} = \Delta \tau_{13} - \mu' \Delta \sigma_{33}. \quad (11)$$

2.2 计算步骤

以图 1 所示的 5 个震源模型计算汶川地震产生的库仑破裂应力变化. 鉴于汶川地震的震级较大, 对周边地区的影响持续时间较长, 为充分分析应力变化分布与后续地震分布之间的相关性, 将后续地震活动的考察期限取至 2008 年 10 月 31 日, 同时考虑到应力触发效应的作用时限, 将期限分为两个阶段, 即 2008 年 5 月 12 日~6 月 12 日和 2008 年 6 月 13 日~10 月 31 日, 第一阶段采用黄媛等^[4]提供的余震精定位结果, 第二阶段选用陈九辉等^[3]提供的余震精定位结果. 根据杜义和谢富仁等^[34]给出的汶川震区周围构造应力场量的研究结果(表 2), 区域现代构造应力场以近水平挤压为主, 方位角 287° . 计算中地壳的剪切模量取 3.3×10^{10} Pa, 泊松比取为 0.25.

2.3 库仑破裂应力变化的空间分布

图 3 给出了汶川地震产生的库仑破裂应力变化与后续地震活动的空间分布, 余震主要集中在北川-映秀断裂上盘一定范围内, 前山灌县-江油断裂沿线都江堰市至安县附近也有少量余震分布. 研究区域

表 2 区域构造应力场主要参数

	方位角($^\circ$)	倾角($^\circ$)
最大主应力 σ_1	271	10
中间主应力 σ_2	5	21
最小主应力 σ_3	158	66

图 3 汶川地震产生的库仑应力变化与后续地震活动的空间分布

(a)和(b), Ji 模型计算得到的结果; (c)和(d), Nishimura 模型计算得到的结果; (e)和(f), Sladen 模型计算得到的结果; (g)和(h), 王卫民模型计算得到的结果; (i)和(j), 张勇模型计算得到的结果. 黑色圆点表示地震. XS, 鲜水河断裂; AL, 安宁河断裂; LQ, 龙泉山断裂; QC, 青川断裂; MJ, 岷江断裂; QN, 西秦岭南缘断裂; FB, 抚边河断裂; YL, 玉龙希断裂; HY, 虎牙断裂; AB, 阿坝断裂; BY, 北川-映秀断裂; PG, 彭县-灌县断裂; JG, 江油-灌县断裂; JY, 江油-广元断裂; 下同

图 4 震源断层面的库仑应力变化与余震的空间分布

(a)~(e)依次是 Ji 模型、Nishimura 模型、Sladen 模型、王卫民模型和张勇模型得到的结果. 黑色圆点表示地震

内的主要活动断裂也展示于图中^[6,30,32,35]. 图 4 给出了震源断层剖面上的应力变化与 1 个月内余震的空间分布, 为便于对比分析, 只计算了剖面上 20 km 的深度范围.

从图 3 和 4 考察汶川地震产生的库仑应力变化与余震空间分布之间的关系可以看出: 采用 Ji 模型计算得到的结果中, 一个月的余震活动有 96% 发生在库仑应力增加区, 震源断层剖面上达到 97%; 第二阶段内 96% 的地震事件分布在应力增加区. 采用

Nishimura 模型得到的结果中, 一个月的余震活动有 60% 发生在应力增加区, 震源断层剖面上为 50%; 第二阶段达 60%. 在 Sladen 模型结果中, 一个月内的余震有 50% 发生在库仑应力增加区, 震源断层剖面上达到 98%; 第二阶段达 70%. 用王卫民模型得到的结果中, 一个月内的余震有 90% 发生在库仑应力增加区, 震源断层剖面上为 85%; 第二阶段内 95% 的地震事件也主要分布在应力增加区. 张勇模型结果中, 一个月内的余震有 70% 发生在库仑应力增加区, 震源

断层剖面上为 35%; 第二阶段内 75% 的地震事件也主要分布在应力增加区。

如图 3 所示, 汶川地震对周边断裂的影响存在差异。青川断裂的应力变化范围为 $-0.47 \sim 0.50$ bar, 其南段处于发震破裂的西侧, 应力变化较小, 而北段位于震源破裂滑动的正前端, 受到震源强有力的推挤而使应力显著增加。江油-灌县断裂和江油-广元断裂由于邻近发震破裂, 应力的波动均较强, 前者波动范围为 $-0.50 \sim 0.46$ bar, 后者为 $-0.48 \sim 0.48$ bar。鲜水河断裂大部分处于应力减小区域, 只在最南段有轻微的应力增加, 整个断裂上的应力变化范围为 $-0.05 \sim 0.04$ bar。安宁河断裂和玉龙希断裂整段都处于应力增加区, 两者的应力增加量均较小为 $0.02 \sim 0.03$ bar。北川-映秀断裂和彭县-灌县断裂上的应力明显增加, 其应力增加量前者为 $0.04 \sim 0.45$ bar, 后者为 $0 \sim 0.50$ bar。龙泉山断裂北段应力减小, 南段应力增加, 整个断裂上的应力扰动范围为 $-0.46 \sim 0.12$ bar。阿坝断裂处于应力减小区域, 幅值为 $-0.03 \sim 0.01$ bar。岷江断裂南段邻近主破裂, 应力显著减小, 甚至达到 -0.5 bar, 北段有 0.02 bar 的应力增加。抚边河断裂和虎牙断裂上的应力都减小, 其减小范围前者为 $-0.49 \sim -0.11$ bar, 后者为 $0.30 \sim 0.50$ bar。西秦岭南缘断裂带的应力改变为 $-0.48 \sim 0.15$ bar。

2.4 模型引起的不确定性分析

地震产生的库仑破裂应力变化强烈依赖于震源破裂模型, 分析 5 个震源模型得出的应力分布, 发现 5 个结果之间存在差异, 但又具有一定统一性: 最大的应力增加区分布于震源断层面以及断层面南北两个端部的邻近区域, 最大的应力减小区分布在震源断层的東西两侧, 接近震源断层南端的西侧有一个显著的应力增加区。从对周边断裂的影响看, 5 个结果均显示, 除岷江断裂、西秦岭南缘断裂、虎牙断裂、江油-灌县断裂和江油-广元断裂由于邻近震源断层, 受震源模型的影响较大, 存在一定不确定性, 其他断裂的应力增减趋势基本一致。

如果以应力变化与后续地震活动之间的对应性作为标准, 采用 Ji 模型和王卫民模型计算得到的应力增加区与后续地震活动的空间分布相对应, 较好地说明了应力改变对后续地震活动的影响, 因此关于断裂的库仑应力变化及其与地震活动性关系的讨论, 主要以这两个模型给出的应力分布为依据。

3 周边断裂的库仑应力变化及其对地震活动性的影响

突然的应力扰动会对一个地区的地震活动性产生相应的影响, 应力增加可伴随地震活动性的增强, 然后慢慢回落于背景水平; 应力减小可能使周围地区的应力累积进程延缓滞后。Dieterich^[36]定义应力扰动之后的地震活动率随时间的变化为 $R(t)$, 将其表示为与应力变化 $\Delta\sigma_f$ 相关的函数^[15,36]

$$R(t) = \frac{r}{\left[\exp\left(\frac{-\Delta\sigma_f}{A\sigma}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{-t}{t_a}\right) + 1}, \quad (12)$$

其中 A 是断层结构参数, 实验观测表明 A 通常的变化范围为 $0.005 \sim 0.012$ ^[36], σ 是全部正应力, 实际应用中通常取 $A\sigma$ 为 $0.1 \sim 0.5$ bar^[15,23,27,36], 本文计算取 $A\sigma$ 为 0.25 bar。 r 是背景地震活动率, $\Delta\sigma_f$ 是库仑应力变化。 t_a 是应力扰动的持续时间, 也即应力变化引起了地震活动率改变直到回复背景活动率的时间。

要计算 $R(t)$, 必须先求得库仑破裂应力变化和持续时间 t_a 。研究认为^[15,36], t_a 一般是一个地震周期的 5%~10%。谢富仁等^[37]从地质学、地震学和 GPS 数据三方面估算得到 8.0 级大震的复发周期为 1700~4310 a, 任俊杰等^[38]利用断错地貌、地震矩率和滑动速率 3 种方法, 得出的结果为 3000~6000 a, 取两者研究结果的重叠部分 3000~4310 为汶川 8 级地震的复发周期, 则 t_a 为 150~431 a, 本文计算取 t_a 为中间值 290.5 a。

以 Ji 模型和王卫民模型给出的结果为准, 得到汶川地震在周边断裂上产生的库仑应力变化峰值, 其中鲜水河断裂为 0.04 bar, 安宁河断裂为 0.02 bar, 玉龙希断裂为 0.03 bar, 北川-映秀断裂为 0.45 bar, 龙泉山断裂为 0.12 bar, 阿坝断裂为 0.01 bar, 岷江断裂为 0.02 bar, 抚边河断裂为 -0.49 bar, 虎牙断裂为 -0.50 bar, 彭县-灌县断裂为 0.50 bar, 江油-灌县断裂为 0.46 bar, 江油-广元断裂为 0.48 bar, 青川断裂为 0.50 bar, 西秦岭南缘断裂带为 0.15 bar。由(12)式得到应力扰动之后的地震活动率与背景地震活动率之比 $R(t)/r$ 随时间的变化趋势, 取研究时限为 1000 a, 结果如图 5。

由图 5 可得, 汶川地震产生的应力变化引起的地震活动性增强, 最显著的是彭县-灌县断裂和青川断裂, 其次是江油-广元断裂、江油-灌县断裂和北川-映

图 5 周边断裂上的 $R(t)/r$ 随时间的变化

秀断裂,这几条断裂带的地震活动率在未来 100 a 内都维持在震前的 2 倍以上,地震活动恢复至背景水平所需的时间基本都达到 800~900 a;西秦岭南缘断裂、龙泉山断裂、鲜水河断裂、玉龙希断裂、安宁河断裂、岷江断裂和阿坝断裂的地震活动性受汶川地震的影响较小,震后地震活动率与震前相比不足 2 倍,并且扰动恢复时间较短,均在 600 a 以内.抚边河断裂和虎牙断裂受汶川地震产生的负值应力变化影响,地震活动性呈现减弱特征,这种影响的持续时间长达 1000 a 以上.

4 讨论

(1) 分析 5 个震源模型对应的库仑应力变化分布(图 3),发现不同模型得到的应力变化呈现一定相似的分布规律,即应力变化分布图案均较为复杂,但应力分布整体还是呈现正负相间的特征,最大的应力增加区分布于震源断层面以及断层面南北两个端部的邻近区域,此外还有一个北西-南东向的显著增加区位于主震断层面南段附近的汶川-映秀一带,最大的应力减小区分布于震源断层的東西两侧.应力变化的这种分布特征主要受到震源断层模型的空间展布形态、滑动方向和静态滑动量分布的影响.5 个模型的建立都以震源破裂的调查数据为基础,因此不同模型得到的应力分布呈现一定的相似性,最明显的是 5 个模型均在汶川-映秀附近一带的下方存在一个最大的滑动量集中区,而 5 个结果的该区域基本都对对应应力增加区.不同结果反映的应力分布也有所差异,这主要是由于各模型使用的数据或方法上的差别导致得出的震源断层面上滑动量分布、滑动方向和断层展布形态上存在着差异.

(2) 图 3 和 4 给出了汶川地震产生的库仑应力变化与后续地震活动之间的对应关系,结果表明,采用 Ji 模型和王卫民模型计算得到的应力增加区与后续地震活动的空间分布相对应,较好地说明了汶川地震对后续地震活动的触发效应.对比 2 个研究阶段的应力变化与地震活动的对应性,得出持续近半年的后续地震活动分布于应力增加区的百分比与一个月的百分比相差别不大,这说明汶川地震对研究区域的地震触发作用应该在半年以上,甚至更长的时限,这与汶川地震的巨大震级有直接关系.

总结 5 个震源模型得到的库仑应力变化与余震

空间分布之间的对应情况,认为以最优取向断层面投影计算得到的应力变化空间分布,可以一定程度上预测未来地震活动的空间分布.

(3) 地震引起的应力扰动会对周边断裂的地震活动性产生相应的影响,急剧的应力增加可伴随地震活动性的增强,然后慢慢回落趋于背景水平;而应力减小则可能引起地震活动的延迟或阻滞.由于汶川地震前后研究区域的监测能力和监测手段存在差异,使得地震目录资料不具有-致性,因此无法确定地震活动的绝对变化情况,本文只研究了应力扰动引起的地震活动性相对变化 $R(t)/r$.

有研究^[27]表明,如果一个地区在主震事件发生之前,其背景地震活动性就较频繁,该地区对应力扰动更为敏感,更易受到应力变化的影响.也就是说具有较高背景地震活动性的地区或断裂带,最容易受到主震引起的应力触发作用,这种作用虽然是由主震的同震滑动位错产生,却是一种持久性的作用.如果研究区域内地震前后的地震目录具有一致性,可进行此类研究.

(4) 地震是区域构造应力和局部应力的作用下应变能积累达到临界状态,地壳岩层突然破裂、错动的一种自然现象.一次大地震的同震位错改变了周围断裂或临近区域的应力状态,产生了同震库仑应力变化(又称为应力扰动).根据库仑破裂准则,应力变化将影响断裂的破裂失稳条件,当应力变化为正值时,加速了周围断裂或临近区域的应力累积,使下次地震提前发生,这种作用即是地震触发效应;相反,应力变化为负值时,周围断裂或临近区域的应力累积进程会被延缓滞后.

受到汶川地震产生的应力变化影响,青川断裂和彭县-灌县断裂的未来发震危险性较高,特别是青川断裂,已经发生了几次 $M \geq 5.0$ 的余震事件,最大余震也发生在该断裂带范围内^[39].主震断层南段的西侧存在一个北西-南东向的显著应力增加区(范围: $31^\circ \sim 32^\circ \text{N}$, $103^\circ \sim 104^\circ \text{E}$),该区域也发生了较多的余震活动,并且地震活动呈现继续扩散的趋势,也是未来地震危险性较高的地区.

5 结论

采用 Ji 模型和王卫民模型计算得到的应力变化空间分布较好地与后续地震活动的空间分布相对应,

可一定程度上预测未来地震活动的空间发展趋势. 汶川 8.0 级地震产生的库仑应力变化使青川断裂、彭县-灌县断裂、江油-广元断裂、江油-灌县断裂和北川-映秀断裂的地震活动性呈现较为明显的增强趋势, 地震活动恢复至背景水平所需的时间基本均达到数百年, 这几条断裂未来的发震危险性较高. 抚边河断裂和虎牙断裂地震活动性呈现减弱特征.

本文得到的结果与前人的相关研究结果具有一致性. 例如 Toda 等^[27]利用几条主要活动断裂插值得

到的应力分布结果显示, 在震源断层北部和南部区域, 以及昆仑断裂东部地区都是应力增加区, 本文采用同一震源断层模型得出的结果也存在这个分布特征, 主要差别在于本文结果显示在震源断层南端的西侧存在一个较大的应力增加区. 单斌等^[29]关于汶川地震与周边断层应力变化的研究中, 证实该地区有可能是应力增加区. 本文得出西秦岭南缘断裂带大部分处于应力增加区, 这与万永革等^[28]针对主要活动断裂进行的应力变化计算结果一致.

致谢 许力生、王卫民、陈九辉、黄媛、朱艾澜和张勇为本次工作提供了宝贵数据和热心帮助, 万永革老师对本文修改给予了指导, 两位评审专家为本文的完善提出了重要的修改意见, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Xu X W, Wen X Z, Yu G H. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, 37: 515—518
- 2 徐锡伟, 闻学泽, 于慎鄂, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂的发现及其发震构造讨论. *地震地质*, 2008, 30: 576—595
- 3 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 汶川 M_s 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. *地球物理学报*, 2009, 52: 390—397
- 4 黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1242—1249
- 5 朱艾澜, 徐锡伟, 刁桂苓, 等. 汶川 M_s 8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析. *地震地质*, 2008, 30: 759—767
- 6 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. *地震地质*, 1994, 16: 389—403
- 7 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 等. 龙门山断裂带南段断错晚更新世以来地层的证据. *地震地质*, 1999, 21: 341—345
- 8 李勇, Allen P A, 周荣军, 等. 青藏高原东缘中新世代龙门山前陆盆地动力学及其与大陆碰撞作用的耦合关系. *地质学报*, 2006, 80: 1101—1109
- 9 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究. *地球物理学报*, 2008, 51: 770—781
- 10 张国民, 李丽. 强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究. *地震*, 1997, 17: 221—231
- 11 Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24347—24358
- 12 吴小平, 虎雄林, Michel B, 等. 云南澜沧-耿马 M_s 7.6 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. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 746—752
- 13 King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquake. *Bull Seism Soc Am*, 1994, 84: 935—953
- 14 Jaumé S C, Sykes L R. Evolution of moderate seismicity in the San Francisco Bay region, 1850 to 1993: Seismicity changes related to the occurrence of large and great earthquakes. *J Geophys Res*, 1996, 101: 765—789
- 15 Toda S, Stein R S. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Nuñez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield. *J Geophys Res*, 2002, 107: B6, doi: 10.1029/2001JB000172
- 16 刘桂萍, 傅征祥. 海原大地震对古浪大地震的静应力触发研究. *地球物理学报*, 2001, 44(增刊 I): 107—115
- 17 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 几次复杂地震中不同破裂时间之间的“应力触发”问题. *地震学报*, 2000, 22: 568—575
- 18 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 地震静态应力触发模型的全球检验. *地震学报*, 2002, 24: 301—315
- 19 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 地震应力触发研究. *地震学报*, 2002, 24: 533—551
- 20 Hill D P, Reasenberg P A, Michael A, et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, Earthquake method. *Science*, 1993, 260: 1617—1623
- 21 Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24347—24358
- 22 Mikumo T, Singh S K, Santoyo M A. A possible stress interaction between large thrust and normal faulting earthquakes in the Mexican subduction zone. *Bull Seismol Soc Amer*, 1999, 89: 1418—1427
- 23 Toda S, Stein R S, Reasenberg F, et al. Stress transferred by the 1995 M_w =6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future

- earthquake probabilities. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24543—24565
- 24 Toda S, Stein R S. Did stress triggering cause the large off-fault aftershocks of the 25 March 1998 $M_w = 8.1$ Antarctic plate earthquake. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 2301—2304
- 25 Parsons T, Dreger D S. Static-stress impact of the 1992 Landers earthquake sequence on nucleation and slip at the site of the 1999 $M=7.1$ Hector Mine earthquake, southern California. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 1949—1952
- 26 Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, 454: 509—510
- 27 Toda S, Jian L, Mustapha M, et al. 12 May 2008 $M = 7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L17305
- 28 万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响. *地震学报*, 2009, 31: 128—139
- 29 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008 年 5 月 12 日 $M_w7.9$ 汶川地震导致的周边断层应力变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 537—545
- 30 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 1020—1030
- 31 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. *地球物理学报*, 2008, 51: 1403—1410
- 32 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1186—1194
- 33 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a halfspace. *Bull Seismol Soc Amer*, 1992, 82: 1018—1040
- 34 杜义, 谢富仁, 张效亮, 等. 汶川 $M_s8.0$ 级地震断层滑动机制研究. *地球物理学报*, 2009, 52: 464—473
- 35 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景. *地球物理学报*, 2009, 52: 444—454
- 36 Dieterich J. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J Geophys Res*, 1994, 99: 2601—2618
- 37 谢富仁, 张永庆, 张效亮. 汶川 $M_s8.0$ 级地震发震构造大震复发间隔估算. *震灾防御技术*, 2008, 3: 337—344
- 38 任俊杰, 张世民, 马保起, 等. 龙门山断裂带中北段大震复发特征与复发间隔估计. *地震学报*, 2009, 31: 160—171
- 39 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 413—426