

2016 年新疆阿克陶 M_s 6.7 地震和呼图壁 M_s 6.2 地震的余震触发研究*

王 苏^{1,2}, 李建有^{1,2}, 徐晓雅^{1,2}, 赵淑芳¹, 林凤仙¹, 解朝娣², 李 金³, 刘建明³

(1. 昆明南方地球物理技术开发有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091;
3. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 基于断层位错产生的静态位移计算理论, 首先计算了2016年11月25日新疆阿克陶 M_s 6.7 地震及2016年12月8日新疆呼图壁 M_s 6.2 地震产生的库仑破裂应力变化, 在此基础上, 与余震活动的空间分布进行对比, 分析了这2次主震对余震的应力触发作用。结果表明: 阿克陶 M_s 6.7 地震的余震活动主要发生于主震产生的库仑破裂应力的应力减小区域内, 而呼图壁 M_s 6.2 地震95%以上的余震都发生在震中附近的应力增加区域内。呼图壁 M_s 6.2 地震产生的库仑破裂应力对地震活动有显著的应力触发作用, 而阿克陶 M_s 6.7 地震的对余震的应力触发作用不明显。

关键词: 新疆阿克陶 M_s 6.7 地震; 呼图壁 M_s 6.2 地震; 库仑破裂应力; 地震触发

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)01-0098-06

0 引言

据中国地震台网测定, 2016年11月25日22时24分, 在新疆克孜勒苏柯尔克孜州阿克陶县发生了 M_s 6.7 地震, 震中位置 (39.3°N , 74.0°E)。截至11月27日0时, 共记录到 M_L 5.0~5.9 余震1次, M_L 4.0~4.9 余震5次, 最大余震震级为 M_L 5.3。2016年12月8日13时15分, 新疆昌吉州呼图壁县发生了 M_s 6.2 地震, 震中位置 (43.8°N , 86.3°E)。截至12月11日18时, 记录到的余震总数为1225个, 余震震级最高为 M_L 4.5。这2次地震发生后, 余震活动频繁, 本文拟对这2次地震主震是否产生了应力触发作用以及是否影响了后续地震活动的发生进行研究。

地震应力触发研究始于1992年美国 Landers 地震, King 等 (1994) 计算得到该地震对后续 Big-Bear 6.5 级地震产生的库仑破裂应力增量约 2 bar, 认为 Landers 地震加速了 Big-Bear 地震的发生。此后, 大量的地震实例中都发现存在地震触发作用, 甚至有可能触发中等地震。地震应力触发通常是以 Okada 断层位错产生的静态位移表达式 (Okada,

1985, 1992) 为基础, 通过计算主震产生的库仑破裂应力变化的空间分布, 对比后续余震活动的空间分布, 以此为基础分析地震的应力触发作用 (Hardebeck *et al.*, 1998; Hill *et al.*, 1993; Toda *et al.*, 1998; 刘桂萍, 傅征祥, 2001; 万永革等, 2000; 解朝娣等, 2010)。

本文利用2016年新疆阿克陶地震以及呼图壁地震的余震精定位数据, 以及中国地震局地球物理研究所 (2016) 给出的2次主震的震源破裂过程研究结果, 通过计算主震产生的库仑破裂应力空间分布, 对这2次主震及余震活动分布与库仑破裂应力变化之间的关系进行了探讨, 以此研究地震对余震的应力触发作用。

1 构造背景

陈杰等 (2016) 对阿克陶地区的震后考察, 发现2016年新疆阿克陶 M_s 6.7 地震发震断层处于公格尔拉张系, 而公格尔拉张系属于帕米尔构造结, 位于帕米尔高原东部, 并与西部卡拉库尔地堑的 EW 向拉张作用配合影响帕米尔内部活动变形。公格尔拉张系长约 250 km, 总体走向 NW—SE,

* 收稿日期: 2017-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金 (41574043) 资助.

通讯作者: 解朝娣 (1981-), 副教授, 主要从事地震学研究. E-mail: xiecd@ynu.edu.cn.

倾向 W, 倾角 $20^\circ \sim 45^\circ$ (陈杰等, 2016)。此次地震的发震断层是公格尔拉张系最北段的全新世活动转换断层 NWW 走向的木吉右旋走滑断裂 (图 1)。这一结果与中国地震局地球物理研究所 (2016) 给出的震源破裂过程一致。重新定位的主震位于木吉断裂上, 绝大多数余震主要分布在木吉断裂南侧 1 个走向 NWW、长逾 80 km 的条带内。余震带的北边界上陡下缓, 很好地限制了木吉断裂的铲形深部几何结构。

该区域历史上强震活跃, 震中 100 km 范围内曾记录到 17 次 6 级以上地震, 其中 7 级以上地震 4 次, 距离新疆阿克陶 $M_s 6.7$ 地震震中最近的地震为 1974 年乌恰 7.3 级地震, 震中相距 19 ~ 25 km; 时间相隔最近的地震为 2016 年 6 月 26 日吉尔吉斯斯坦 $M_s 6.7$ 地震, 震中相距约 58 km (陈杰等, 2016)。

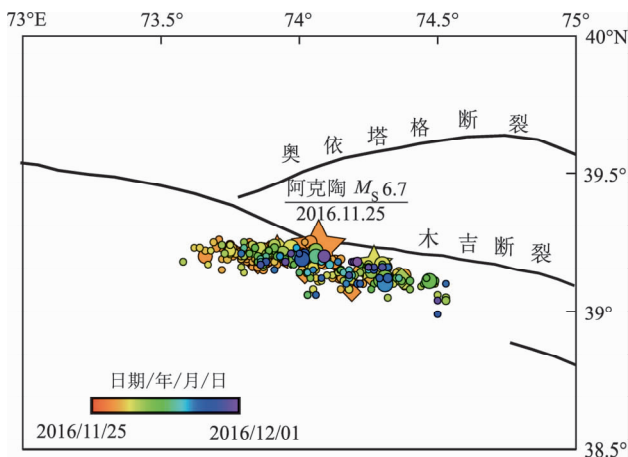


图 1 2016 年新疆阿克陶 $M_s 6.7$ 地震的发震构造与余震分布图

Fig. 1 Map of the seismic tectonics of the 2016 Xinjiang Arketao $M_s 6.7$ earthquake and the distribution of its aftershocks

如图 2 所示, 2016 年新疆呼图壁 $M_s 6.2$ 地震震中位于准格尔南缘断裂带附近, 该断裂是晚更新世有过活动的逆冲断裂 (中国地震局地质研究所, 2016)。呼图壁县隶属昌吉回族自治州, 位于新疆维吾尔自治区中北部, 地处欧亚大陆腹地, 准噶尔盆地南缘, 东距新疆维吾尔自治区首府乌鲁木齐 68 km。该区域由一系列 NWW 向展布的线性断层、断裂组成, 其现代构造应力场主要表现为近 SN—NNE 向的挤压 (赵善坤等, 2013)。区域内主要的活动断层包括: 准格尔南缘断裂、霍尔果斯—玛纳斯—吐谷努断裂、博罗科努—阿其

克库都克断裂等 (董曼, 魏文薪, 2015; 魏斌等, 2016)。该地区历史上地震活动频发, 1600 年以来震中 200 km 范围内曾记录到 8 次 6 级以上地震, 1 次 7 级以上地震。

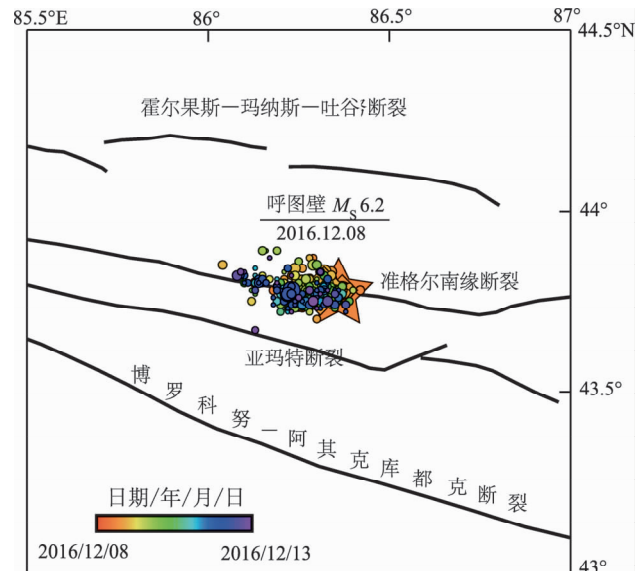


图 2 2016 年新疆呼图壁 $M_s 6.2$ 地震的发震构造与余震分布图

Fig. 2 Map of the seismic tectonics of the 2016 Xinjiang Hutubi $M_s 6.2$ earthquake and the distribution of its aftershocks

2 研究方法原理

首先用 Okada (1985, 1992) 给出的静态位移和应变的解析表达式, 计算震源在后续断层面上产生的应变分量, 再由胡克定律计算出应力分量, 然后由柯西公式可得后续断层面上的应力矢量 T 。设后续断层面的法向和滑动方向单位矢量分别为 $n(n_1, n_2, n_3)$ 和 $s(s_1, s_2, s_3)$, 将应力矢量投影到后续断层面上可得正应力变化与切应力变化为:

$$\Delta\sigma_n = T_i n_i \quad (1)$$

$$\Delta\tau = T_i s_i \quad (2)$$

根据库仑破裂准则, 定义描述物体趋近破裂程度的库仑破裂应力变化为 (Harris, 1998):

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n \quad (3)$$

式中: μ' 为计算点处断层面介质的视摩擦系数, 包括孔隙流体和断层面上的介质特性, 其取值范围一

一般为 $0.2 \sim 0.8$ (Harris, 1998)。将正应力变化 $\Delta\sigma_n$ 和切应力 $\Delta\tau$ 变化代入 (3) 式, 就可计算出震源破裂产生的库仑破裂应力变化 $\Delta\sigma_f$ 。

3 主震震源断层模型

3.1 阿克陶 $M_s6.7$ 地震断层模型

中国地震局地球物理研究所 (2016) 的震源破裂过程反演结果表明, 阿克陶 $M_s6.7$ 地震以单侧破裂为主, 从震中开始向东传播, 在震中以东约 35 km 附近地表破裂最大同震滑动量达 20 ~ 30 cm。阿克陶主震的震源断层走向 107° 、倾角 76° 、滑动角 174° , 主震断层被划分为 19×8 个次一级子断层, 断层面上的滑动位移分布如图 3a 所示, 震源深度为 12 km。

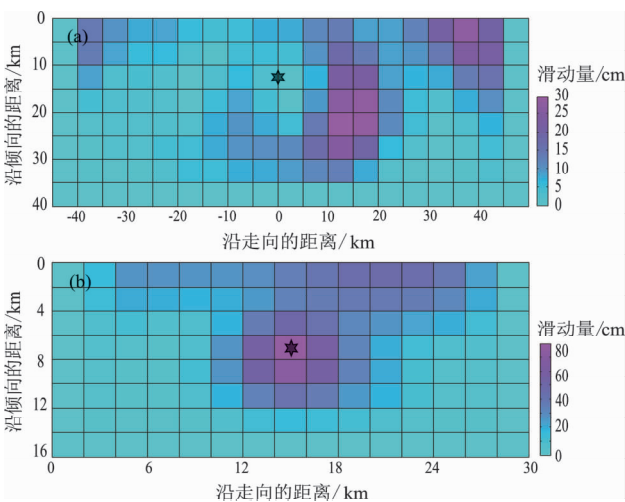


图3 2016年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震 (a) 和呼图壁 $M_s6.2$ 地震 (b) 的震源断层模型图 (★代表震中断层面上的位置)

Fig. 3 Slip distributions of the source fault for the 2016 Xinjiang Arketao $M_s6.7$ earthquake (a) and the Hutubi $M_s6.2$ earthquake (b) (★ represents the location of epicentre at fault surface)

3.2 呼图壁 $M_s6.2$ 地震断层模型

根据中国地震局地震预测研究所 (2016) 的震源机制解结果, 2016 年新疆呼图壁 $M_s6.2$ 地震主震的震源参数断层走向 290.1° 、倾角 71.1° 、滑动角 96.8° 。中国地震局地球物理研究所 (2016) 的震源破裂过程反演结果给出的断层面上的滑动位移分布如图 3b 所示。

4 计算结果分析

根据上述计算原理, 以这 2 个地震的震源模型计算阿克陶 $M_s6.7$ 地震和呼图壁 $M_s6.2$ 地震产生的库仑破裂应力变化的空间分布。地壳的剪切模量取 $3.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 泊松比取为 0.25。余震序列采用新疆地震局提供的震后精定位地震目录作为后续地震活动数据。图 4 和图 5 分别给出了阿克陶 $M_s6.7$ 地震和呼图壁 $M_s6.2$ 地震的余震序列 $M-T$ 图和余震震源深度分布图, 从图中可以看出, 2 个余震序列的多数地震事件分布在 8 km 深度处。

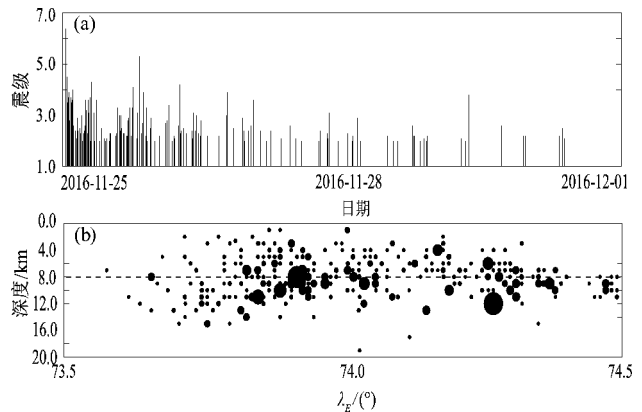


图4 2016年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震序列的 $M-T$ 图 (a) 和余震震源深度分布图 (b)
Fig. 4 Magnitude varying with time (a) and depth distribution of aftershocks (b) of the 2016 Xinjiang Arketao $M_s6.7$ earthquake sequence

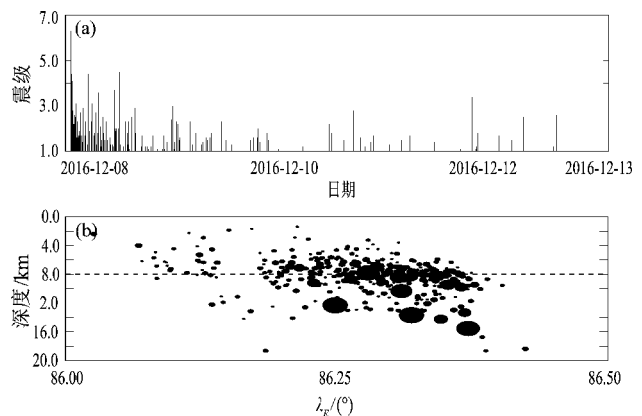


图5 2016年新疆呼图壁 $M_s6.2$ 地震序列的 $M-T$ 图 (a) 和余震震源深度分布图 (b)
Fig. 5 Magnitude varying with time (a) and depth distribution of aftershocks (b) of the 2016 Xinjiang Hutubi $M_s6.2$ earthquake sequence

库仑破裂应力的计算需进行断层面投影, 采用主震断层面的走向、倾角和滑动角作为投影断层面的参数。考虑到大多数余震的震源深度为 8 km, 本文库仑破裂应力变化的计算深度也取为 8 km, 视摩擦系数取为 0.4 (万永革等, 2003)。王莹 (2011) 研究结果也表明: 走滑断层主要沿走向滑动, 其产生的库仑应力分布主要在断层两侧正负相间分布, 而逆断层的两端均有较强的库仑应力增加区, 这与本文结论相符。图 6 给出 2 次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情况。

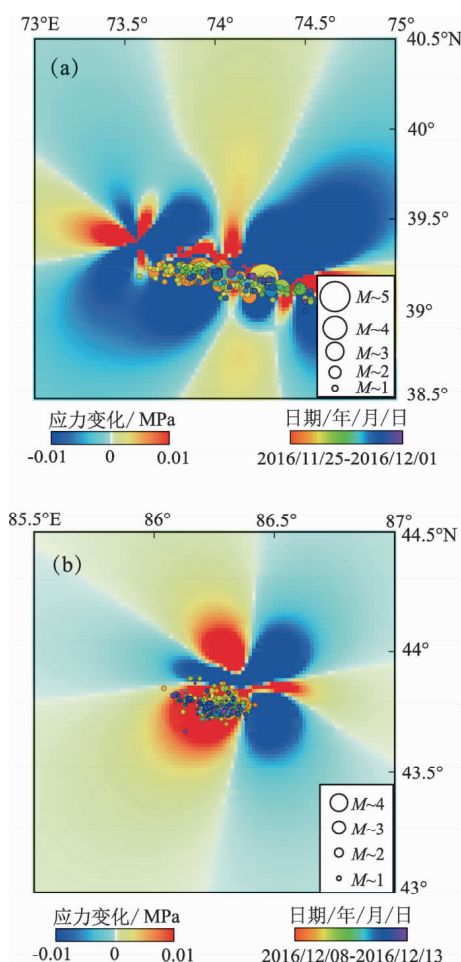


图 6 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震 (a) 和呼图壁 $M_s6.2$ 地震 (b) 产生的库仑应力变化与后续地震活动的空间分布

Fig. 6 Map of the Coulomb failure stress changes and spatial distribution of aftershocks of the 2016 Xinjiang Arketao $M_s6.7$ earthquake (a) and the Hutubi $M_s6.2$ earthquake (b)

图 6a 显示, 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 主震发生后的前几天, 余震活动主要发生在库仑破裂应力减小的区域; 随后, 在主震的东侧应力增加区内发生了数次余震。但总体而言, 这次主震活动对余震的应力触发作用不明显。

由图 6b 给出的呼图壁 $M_s6.2$ 地震产生的余震事件几乎发生在一个较集中的小区域, 95% 以上的余震都发生在震中附近的应力增加区域内。这说明主震产生的库仑破裂应力变化可能起到了应力触发作用, 从而促使了大量余震的发生, 且应力变化的分布是以震中为圆心呈放射状分布, 有优势的应力增加区和减小区存在。

为了分析较大余震对后续地震活动的分布是否也产生了影响, 笔者筛查了 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震和呼图壁 $M_s6.2$ 地震的所有余震事件, 如图 4 和图 5 所示。仅 2016 年的阿克陶 $M_s6.7$ 地震有一个余震事件的震级大于 5 级, 该余震发生于 11 月 26 日 17 时 23 分, 震级为 $M_L5.3$, 震中位置为 (39.17°N , 74.27°E)。由于无法确定该 $M_L5.3$ 余震的震源断层规模, 无法精确计算其产生的库仑破裂应力变化的空间分布。但是依据张旭等 (2017) 给出的该余震事件的震源机制解, 走向基本与主震一致, 倾角也相近, 其产生的应力分布与主震的大体趋势应差别不大, 但量级小很多, 对整个研究区域的应力变化空间分布 (图 7) 的影响应较小, 所以本文主要考虑了 $M_s6.7$ 主震产生的应力变化对后续余震活动的影响。

采用全部精定位余震事件对余震与应力分布的关系进行分析。为了检验序列的完备性对结果是否产生影响, 进一步对地震序列的完备性进行了分析, 结果如图 7 所示。结果显示阿克陶地震序列的最小完备震级 M_c 约为 3.0 级, 呼图壁地震序列的最小完备震级 M_c 约为 2.2 级。

只采用震级大于 M_c 的地震事件, 分析其与库仑破裂应力变化分布的对应关系, 结果如图 8 所示。分别对比图 6a 和图 8a, 6b 和图 8b, 可以发现采用全部地震事件和较完备的地震事件进行分析, 得到的结果差别不大, 但更能突出呼图壁 $M_s6.2$ 地震产生的库仑破裂应力与后续地震活动的对应关系; 这也表明呼图壁 $M_s6.2$ 地震产生的库仑破裂应力对地震活动有显著的应力触发作用, 而阿克陶 $M_s6.7$ 地震的对余震的应力触发作用不明显。

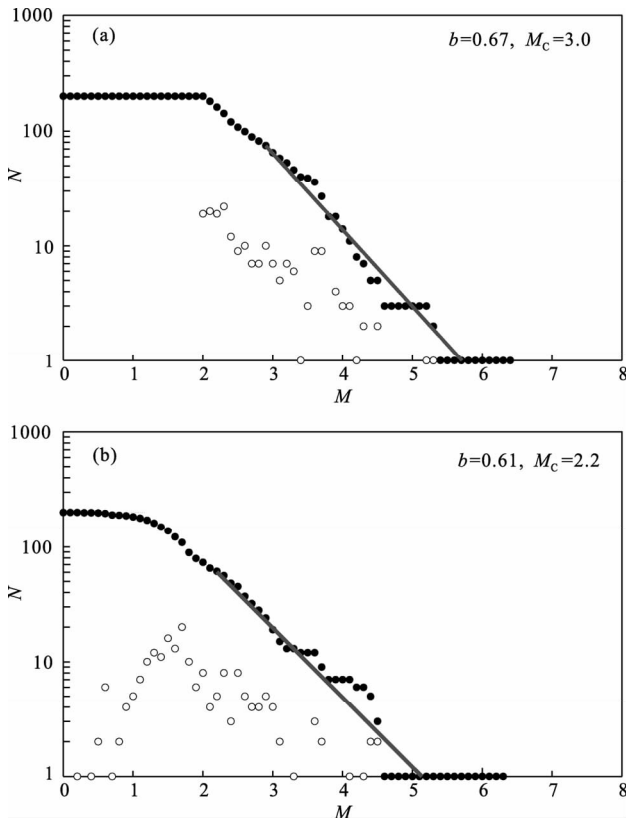


图7 2016年新疆阿克陶地震序列 (a) 和呼图壁地震序列 (b) 的目录完备性分析

Fig. 7 Map of the completeness analysis of the aftershock catalogue for the 2016 Arketao (a) and Hutubi earthquakes (b)

5 结论与讨论

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, 将加速周围断裂或临近区域的应力累积, 使下次地震提前发生, 这种效应即是地震触发作用。本文通过计算 2016 年新疆的 2 次 $M > 6.0$ 地震产生的库仑破裂应力变化, 对余震分布与库仑破裂应力变化之间的关系进行了分析, 以此讨论地震的应力触发作用, 主要得出以下结论:

(1) 2016 年新疆阿克陶 $M_{\text{s}}6.7$ 地震的余震活动发生于主震产生的库仑破裂应力的应力减小区域内, 余震序列的发震原因很有可能是主震断层的后续次生破裂引起的。

(2) 呼图壁 $M_{\text{s}}6.2$ 地震 95% 以上的余震都发生在震中附近的应力增加区域内, 主震产生的库仑破裂应力对地震活动有显著的应力触发作用。此次

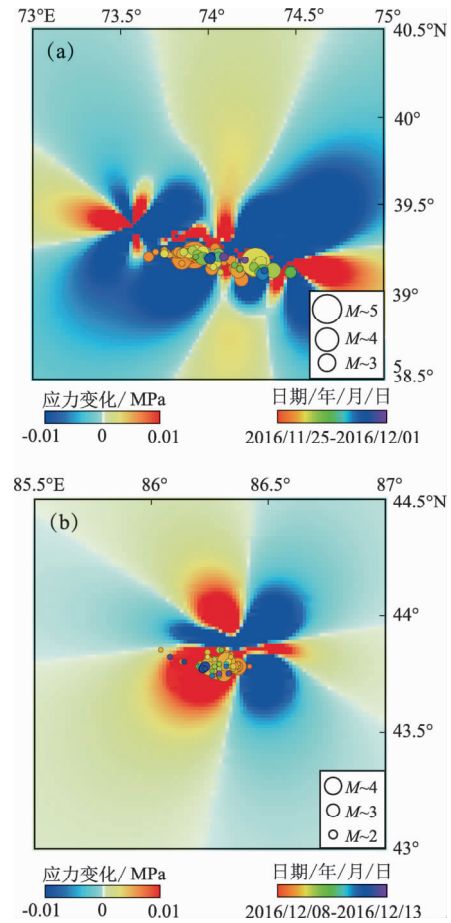


图8 2016年新疆阿克陶 $M_{\text{s}}6.7$ 地震 (a) 和呼图壁 $M_{\text{s}}6.2$ 地震 (b) 产生的库仑应力变化与后续 $M > M_{\text{c}}$ 地震活动的空间分布

Fig. 8 Map of the Coulomb failure stress changes and aftershocks with $M > M_{\text{c}}$ of the 2016 $M_{\text{s}}6.7$ Arketao earthquake (a) and the Hutubi $M_{\text{s}}6.2$ earthquake (b)

地震的后续地震活动还可能持续受到主震的应力触发作用。大地震产生的库仑破裂应力变化主要通过改变周边地区的应力状态, 进而起到地震的触发作用。

(3) 新疆阿克陶 $M_{\text{s}}6.7$ 地震的发震断层是公格尔拉张系最北段的木吉右旋走滑断裂, 此次地震也属于走滑型的, 走滑型断层产生的应力场分布特征一般是应力增加区和减小区相间分布; 而呼图壁 $M_{\text{s}}6.2$ 地震的发震断层是准格尔南缘断裂带, 该断裂是逆冲断裂, 此次地震也属于逆冲型, 因而产生了有优势的应力增加区和减小区, 对后续地震活动的影响也相对集中, 有利于起到应力触发作用。

张勇为本次工作提供的震源断层数据和热心帮助, 新疆地震局李金和刘建明为本次工作提供的余震精定位数据, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 陈杰, 李涛, 孙建宝, 等. 2016. 2016 年 11 月 25 日新疆阿克陶 $M_w6.6$ 地震震构造与地表破裂[J]. 地震地质, 38(4): 1160–1174.
- 董曼, 魏文薪. 2015. 新疆北天山地区盆山交界主要构造带运动特性研究[J]. 国际地震动态, (8): 27–32.
- 解朝娣, 朱元清, 雷兴林, 等. 2010. $M_s8.0$ 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[J]. 中国科学: 地球科学, 40(6): 688–698.
- 刘桂萍, 傅征祥. 2001. 海原大地震对古浪大地震的静应力触发研究[J]. 地球物理学报, 44(S1): 107–115.
- 万永革, 沈正康, 甘卫军, 等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的弹性应力触发研究[J]. 西北地震学报, 25(1): 1–7.
- 万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2000. 几次复杂地震中不同破裂时间之间的“应力触发”问题[J]. 地震学报, 22(6): 568–575.
- 王莹. 2011. 地震断层参数和投影断层参数对库仑破裂应力变化分布的影响[D]. 昆明: 云南大学, 39–41.
- 魏斌, 苏金波, 王海涛, 等. 2016. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究[J]. 中国地震, 32(2): 222–230.
- 张旭, 严川, 许力生, 等. 2017. 2016 年阿克陶 $M_s6.7$ 地震震源复杂性与其烈度[J]. 地球物理学报, 60(4): 1411–1422.
- 赵善坤, 蔡昌宜, 刘震, 等. 2013. 北天山矿区地应力分布与区域构造关系研究[J]. 地下空间与工程学报, 9(S1): 1599–1603.
- 中国地震局地球物理研究所. 2016. 2016 年 11 月 25 日新疆阿克陶 6.7 级地震[EB/OL]. (2016–11–26) [2017–07–27]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/275080.html>.

- 中国地震局地震预测研究所. 2016. 2016 年 12 月 8 日新疆呼图壁 6.2 级地震[EB/OL]. (2016–12–08) [2017–07–27]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/102480/102482/20161209204331644727356/1481287443100.jpg>.
- 中国地震局地质研究所. 2016. 2016 年 12 月 8 日新疆呼图壁 6.2 级地震区域地震构造图[EB/OL]. (2016–12–08) [2017–07–27]. <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2016/12/8142252193.jpg>.
- Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. 1998. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences[J]. J Geophys Res, 103(24): 24347–24358.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. J Geophys Res, 103(B10): 24347–24358.
- Hill D P, Reasenber P A, Michael A, et al. 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake method[J]. Science, 260: 1617–1623.
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquake[J]. Bull Seismol Soc Am, 84(3): 935–953.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space[J]. Bull Seismol Soc Am, 75(4): 1135–1154.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space[J]. Bull Seismol Soc Am, 82(2): 1018–1040.
- Toda S, Stein R S, Reasenber F, et al. 1998. Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities[J]. J Geophys Res, 103(B10): 24543–24565.

Study on Aftershock Triggering of the 2016 Aktao $M_s6.7$ and Hutubi $M_s6.2$ Earthquakes in Xinjiang

WANG Su^{1,2}, LI Jianyou^{1,2}, XU Xiaoya^{1,2}, ZHAO Shufang¹,
LIN Fengxian¹, XIE Chaodi², LI Jin³, LIU Jianming³

(1. Kunming South Geophysical Technology Company, Kunming 650000, Yunnan, China)

(2. School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

(3. Earthquake Agency of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

Based on the theory of static displacement calculation caused by the coseismic fault movement, the Coulomb failure stress induced by the Aktao $M_s6.7$ earthquake in Xinjiang occurred on November 25, 2016 and the Hutubi $M_s6.2$ earthquake occurred on October 8, 2016 were calculated. Furthermore, by comparing the spatial distribution of the aftershock activity, the stress triggering effects of two main shocks on aftershocks were analyzed. The results show that most of the aftershocks of the Aktao $M_s6.7$ earthquake occurred in the area where the Coulomb failure stress reduced by the main shock, and more than 95% of the Hutubi $M_s6.2$ aftershocks were lied in the area of increased stress near to the epicenter area. The Coulomb failure stress caused by the Hutubi $M_s6.2$ earthquake has a significant stress triggering effect on the seismicity, however, the stress triggering effect of the Aktao $M_s6.7$ earthquake is not obvious.

Keywords: Arktao $M_s6.7$ earthquake; Hutubi $M_s6.2$ earthquake; Coulomb failure stress change; earthquake triggering