

2010 年 Mw 6.9 级玉树地震同震 库仑应力变化研究

汪建军^{1,2,3} 许才军^{1,2,3} 申文斌^{1,2,3}

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 武汉大学地球物理大地测量国家测绘地理信息局重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:2010-04-14 我国青海玉树附近发生 Mw 6.9 级地震。具体研究了该地震的前震-主震-余震序列应力触发模式及主震对周边断层的应力扰动。结果表明,大部分余震分布在同震库仑应力正区且余震触发率达 76.4%;Mw 4.9 级前震对 Mw 6.9 级主震的触发作用不甚明显,而后者对 Mw 6.1 级余震有明显触发作用;甘孜-玉树断层几乎都处于同震库仑应力加载状态,该断层上的历史破裂段如 1738 年 M7.5 级地震的当江段、哈秀段以及 1896 年 M7.3 级地震的邓柯段未来更倾向于再次错动,造成强烈地震。

关键词:2010 Mw 6.9 级玉树地震;同震库仑应力;应力触发

中图分类号:P227.1;P315.1

2010-04-14 我国青海省玉树藏族自治州玉树县发生了 Mw 6.9 级强震,该地震造成了大量的财产损失和人员伤亡,伤亡人数达 14 700 人。此次地震是自 2008-05-12 Mw 7.9 级汶川地震以来,在印度板块向北推挤、青藏地块隆升和次级巴彦喀拉活动地块向东挤出的整体构造背景下所发生的又一次灾害性大陆强震^[1];它发震于玉树-甘孜-鲜水河段左旋走滑断裂带,震中位置(96.53°E,33.16°N),震源深度 16 km(USGS),所造成的地表破裂带由 3 条主破裂左阶组成,总体走向 310°~320° 且呈左旋走滑性质,北侧主破裂长约 16 km,中间主破裂长约 9 km,南侧主破裂长约 7 km,总长约 31 km^[2]。该地震断层滑动分布的合成孔径雷达干涉测量(InSAR)及地震波体波数据反演结果表明^[3],2010 年玉树地震破裂断层由近乎直立的西北段和东南段以及中间倾角为 70° 的南西向倾斜的 3 个子断层组成;断层总长约 80 km;断层最大滑动量为 1.5 m 且位于东南段子断层上深度为 4 km 处,近地表滑动量达 1.2 m。长

期地质数据显示该断层的平均滑动速率为 3.1~7.3 mm/a^[4],自 1738 年发生 M7.5 地震以来该断层西北段一直未有大震发生^[5],此次地震是甘孜-玉树断层长期构造应力累积并突破临界状态后释放的结果。

地震库仑应力是研究地震力学驱动机制的重要定量指标。程佳等^[6]利用该指标具体研究了自 1997 年以来巴彦喀拉块体周缘的 1997 年 Mw 7.6 级玛尼地震、2001 年 Mw 7.8 级可可西里地震、2008 年 Mw 7.9 级汶川地震以及 2010 年 Mw 6.9 级玉树地震序列间的黏弹性应力触发模式,表明前三次地震共同对玉树地震的发生有一定的促进作用。文献^[7]分析了本次玉树地震的同震库仑应力变化及地震活动性,未来该地区 10 a 内发生 5 级和 6 级以上地震的概率分别为 79~87% 和 26.7~33.6%。王莹等^[8]考察了 2010 年玉树地震震源参数对地震库仑破裂应力图像及余震空间分布的影响。

以上有关玉树地震库仑应力方面的研究均有

收稿日期:2012-08-22。

项目来源:中国博士后科学基金资助项目(180783);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110141130010,20090141110055);中央高校自主科研基金资助项目(274575,114035);地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目(10020)。

助于深化对本次玉树强震孕育发生的动力学过程的认识,不过这些研究一般采用单一的玉树地震断层滑动分布而没有顾及断层几何参数影响^[6-7],或顾及了不同的玉树地震断层几何参数对库仑应力计算的影响,但没有从地震序列触发的角度进行研究且所选玉树地震断层参数不够丰富^[8]。因此,本文利用更丰富的玉树地震断层参数滑动分布,并顾及断层参数的影响来具体研究玉树地震的前震主震及余震序列的地震应力触发模式以及玉树地震对周边断层的影响。

1 2010年玉树地震同震滑动分布

本文收集到的该地震断层几何参数如表1所示。确定地震断层滑动分布后,结合同震库仑应力模型即可进行库仑应力分析。

2 同震库仑应力模型

同震库仑应力模型用于定量分析地震断层受力状态,其具体模型为^[13]:

$$\begin{aligned} \Delta CFF = & \sin\lambda \left(-\frac{1}{2} \sin^2 A \sin 2\delta \sigma^{11} + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin 2A \sigma^{12} + \cos 2\delta \sin A \sigma^{13} - \frac{1}{2} \sin 2\delta \cos^2 A \sigma^{22} - \cos 2\delta \cos A \sigma^{23} + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \sin 2\delta \sigma^{33} \right) + \cos\lambda \left(-\frac{1}{2} \sin \delta \sin 2A \sigma^{11} + \sin \delta \cos 2A \sigma^{12} + \cos \delta \cos A \sigma^{13} + \frac{1}{2} \sin \delta \sin 2A \sigma^{22} + \cos \delta \sin A \sigma^{23} \right) + \\ & \mu' \left(\sin^2 \delta \sin^2 A \sigma^{11} - \sin^2 \delta \sin 2A \sigma^{12} - \sin 2\delta \sin A \sigma^{13} + \sin^2 \delta \cos^2 A \sigma^{22} + \sin 2\delta \cos A \sigma^{23} + \cos^2 \delta \sigma^{33} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

3 2010年 Mw 6.9 级玉树地震同震库仑应力分析

3.1 2010年玉树地震对余震的触发

表2给出了根据各机构及研究者发布的2010年 Mw 6.9 级玉树地震发震断层模型所计算的余震触发率统计情况。表2表明 Global CMT^[9]和文献[3]的玉树地震发震断层模型对应的余震触发率要高于根据其他模型所计算的结果,即采用这两种发震断层模型均能更好地解释余震的时空分布。由此,采用余震触发率为约束来构建合理的库仑应力图像,可以更好地研判余震趋势。由于文献[3]模型由多种实际观测资料确定,后面的分析都采用其断层滑动分布模型。

图1为2010年 Mw 6.9 级玉树地震同震库仑应力变化。图中圆点表示2010-04-14至2012-04-10余震(数据来自 ANSS),大部分余震在库仑应力正区(包括2010年 Mw 6.1 级余震),表明2010年 Mw 6.9 级主震对这些余震有一定的促进作用。此外,治多、当江、隆宝、玉树、巴塘、称多、洛须也位于库仑应力正区,表明 Mw 6.9 级玉树地震激发的地壳应力场对这些地区的地震活动性也有一定的促进作用。

3.2 2010年玉树地震对周边断层的影响

图2为2010年 Mw 6.9 级玉树地震周边断层如甘孜-玉树断层及玉树南-风火山南麓主断层上的同震库仑应力变化。图中除西北段甘孜-玉树断层的最右端显示同震库仑应力变化为负外,其他整个甘孜-玉树断层的同震库仑应力变化都

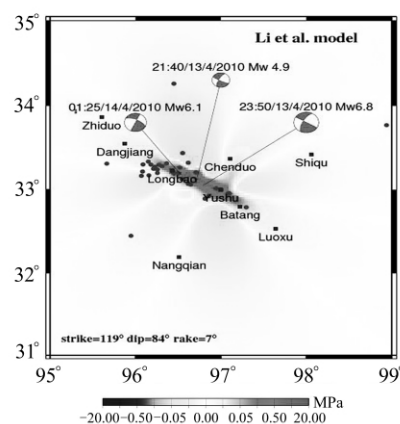


图1 采用文献[3]断层模型计算的同震库仑应力变化
Fig. 1 Coseismic Coulomb Stress Changes Imparted by Li et al. (2011) Fault Model

为正,表明整个甘孜-玉树断层几乎都处于应力扰动的活跃状态。历史地震资料表明,甘孜-玉树断层上分别发生过1738年 M 7.5 级地震(当江-玉树段)、1896年 M 7.3 级地震(邓柯段)、1854年及1320年 M 7.7 级地震(玛尼干戈段)、1866年 M 7.3 级地震(甘孜段)地震,并且2010年 Mw 6.9 级玉树地震是1738年 M 7.5 级地震级联破裂的当江段、哈秀段和玉树段当中的玉树单条次级段再次错动的结果^[14]。玉树单条次级段西起隆宝镇东侧约17 km处(崩荣喀附近),沿南东东向东至桑卡^[2]。因此,1738年 M 7.5 级地震的当江段、哈秀段以及1896年 M 7.3 级地震的邓柯段都因2010年玉树地震同震库仑应力扰动而更倾向于再次错动,是未来地震潜在危险段。

2010年 Mw 6.9 级地震属于前震-主震-余震

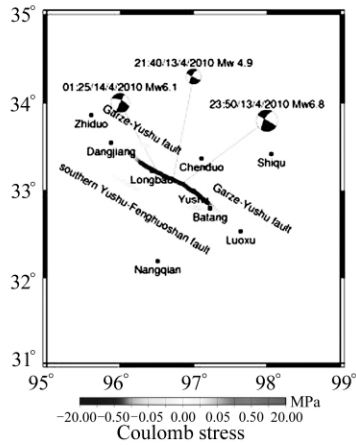


图 2 周边主断层上的同震库仑应力变化
Fig. 2 Coseismic Coulomb Stress Changes on Surrounding Major Faults Induced

型地震^[15]:主震前一天开始有小震活动,前 2 h 左右发生了一次 Mw 4.9 地震,随后地震活动性急剧增强;主震前半小时开始地震活动性趋于平静,直到主震前 2 min 又出现一个小地震,随后主震发生,而后出现余震,最大余震为 Mw 6.1 级。文献[3]通过玉树主震震源时间函数峰值与玉树发震断层滑动分布的 InSAR 数据反演结果的一致性、P 波走时差的差异性以及该最大余震同 3 段子断层模型中西北段子断层矩震级的相等性,

推测 Mw 6.1 级余震对西北段子断层可能有触发作用。在此,我们采用库仑应力指标具体定量分析 Mw 4.9 级前震、Mw 6.9 级主震和 Mw 6.1 级余震间的应力触发过程,以及 Mw 6.1 级余震对文献[3]三段子断层模型中的西北段子断层的应力触发作用。

3.3 2010 年玉树前震-主震-余震序列触发

表 3 为 2010 年玉树前震、主震及余震序列同震库仑应力变化。表中第 1~9 列为根据不同机构及研究者发布的 2010 年玉树主震断层模型(断层几何参数见表 1)计算得到的库仑应力变化,第 10 列为 Mw 6.1 级余震地震断层上的库仑应力变化。另外,表中 ΔCFF_{12} 表示 2010 年 Mw 4.9 级玉树前震(2010-04-13;21:40 UTC)在 2010 年 Mw 6.9 级玉树主震断层(2010-04-13;23:49:37 UTC)上造成的库仑应力变化; ΔCFF_{23} 表示 2010 年玉树主震在其 Mw 6.1 级余震(2010-04-14;01:25 UTC)地震断层面上造成的库仑应力变化; ΔCFF_{13} 表示该前震在 Mw 6.1 级余震断层上造成的库仑应力变化; ΔCFF_{123} 表示 2010 年玉树前震和主震在 Mw 6.1 级余震地震断层面上造成的库仑应力变化; ΔCFF_{37} 表示 2010 年 Mw 6.1 级玉树余震在玉树主震西北子断层面上造成的库仑应力变化。

表 1 不同机构的 2010 年玉树地震断层参数

Tab. 1 Various Geometric Fault Parameter Models of the 2010 Yushu Earthquake

数据来源	纬度/°	经度/°	长度/km	宽度/km	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	滑动量/m	Mo/ 10^{18} Nm	Mw
Main shock 13 April 23:50											
Global CMT ^[9]	96.82	33.10	51.05	12.68	20	120	90	-13	1.21	25	6.9
USGS CMT ^[9]	96.70	33.32	42.76	15.78	10	301	86	32	1.16	25	6.9
UGSG ^[9] WPhase	96.63	33.27	44.26	11.91	15	119	78	3	1.19	20	6.8
USGS ^[9] NEIC BW	96.70	33.32	38.37	11.19	16	298	88	4	0.95	13	6.7
张勇等 ^[10]	96.6	33.20	70.00	30.00	14	119	83	-4	0.48	32	6.9
刘超等 ^[11]	96.70	33.32	58.88	13.49	10	119	83	-2	1.73	44	7.0
Li et al. ^[3]	96.52	33.20	20.2	7.71	4.45	116	87.9	2.7	0.70	3.51	6.30
	96.69	33.16	13.6	12.06	7.25	120.	69.5	-2.6	0.85	4.49	6.37
	96.90	33.03	29.2	9.50	5.25	124	89.4	0.2	1.25	11.17	6.63
After shock 14 April 01:25											
Global CMT ^[12]	96.53	33.18	16.29	7.71	18	296/205	65/89	2/155	0.39	1.58	6.1
Fore shock 13 April 21:40											
Global CMT ^[12]	96.71	33.08	2.94	3.66	27	116/209	81/71	-19/-171	0.09	0.03	4.9

表 3 中 ΔCFF_{12} 除了文献[3]模型的库仑应力均为正外,其他模型的库仑应力均为负,并且正库仑应力均为 0.000 1 MPa 左右,表明即便顾及玉树主震断层几何模型的不确定性,Mw 4.9 级玉树前震对 Mw 6.9 级主震的触发作用仍不甚明显。

表 3 中 ΔCFF_{23} 的结果表明,采用 Global CMT^[9] 模型及文献[3]模型时 Mw 6.9 级玉树主震对 Mw 6.1 级余震有明显的触发作用,而采用

其他模型时则有明显的抑制作用。顾及到 Global CMT^[9] 模型及文献[3]模型能更好地解释余震的时空分布(图 1 和表 2),故这两类模型更为合理,因而 Mw 6.9 级玉树主震对 Mw 6.1 级余震有明显的触发作用,并且文献[3]的 3 段子断层模型的西北段、中间段和东南段对 Mw 6.1 级余震的库仑应力贡献分别为 0.077 83 MPa、0.026 50 MPa 和 0.029 85 MPa。

表2 不同玉树断层模型对2010年Mw 6.9级玉树地震余震触发率统计
Tab.2 Triggering Rate of Aftershocks for the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake

玉树	Global	USGS	UGSG ^[9]	USGS ^[9]	张勇等 ^[10]	刘超等 ^[11]	Li et al ^[3]
断层模型	CMT ^[9]	CMT ^[9]	WPhase	NEIC BW			
余震触发率	76.47%	35.29%	32.35%	32.35%	35.29%	17.65%	76.47%

表3 2010年玉树前震、主震及余震序列同震库仑应力变化/0.1 MPa
Tab.3 Coseismic Coulomb Stress Changes Among Foreshock, Mainshock and Aftershock for the 2010 Yushu Earthquake

	Global CMT ^[9]	USGS CMT ^[9]	UGSG ^[9] WPhase	USGS ^[9] NEIC BW	张勇等 ^[10]	刘超等 ^[11]	Li et al ^[3] 西北段	Li et al. ^[3] 中间段	Li et al. ^[3] 东南段	Global CMT ^[12] Mw 6.1
ΔCFF_{12}	-0.004 6	-0.000 9	-0.000 5	-0.001 3	-0.002 3	-0.000 2	0.001 4	0.002 4	0.001 1	
ΔCFF_{23}	2.277 8	-0.292 0	-2.534 6	-0.127 5	-1.957 8	-1.341 7	0.778 3	0.265 0	0.298 5	
ΔCFF_{13}										0.0033
ΔCFF_{123}	2.281 1	-0.288 7	-2.531 3	-0.124 2	-1.954 5	-1.338 4	0.781 6	0.268 3	0.301 8	
ΔCFF_{37}							0.387 5			

表3中 ΔCFF_{13} 表明,Mw 4.9级玉树前震对Mw 6.1级余震有0.000 33 MPa的微弱促进作用。 ΔCFF_{123} 为Mw 4.9级前震及Mw 6.9级主震造成的Mw 6.1级余震断层上的总库仑应力变化,结果表明,Mw 6.9级主震对Mw 6.1级余震有主要促进作用。 ΔCFF_{37} 表示Mw 6.1级余震在Mw 6.9级主震断层的西北段子断层上造成的库仑应力变化,变化量达0.038 75 MPa,因此,两者有着明显的触发关系。文献[3]认为可用三段子断层中的中间段和东南段表示2010年玉树主震,推测西北段子断层只是Mw 6.1级余震作用的结果。本文的定量结果表明Mw 6.1级余震对西北段子断层的确有明显的触发作用,并且如果仍然认为西北子断层也属于玉树主震子断层,本文的定量结果(0.077 83 MPa,见表3中的 ΔCFF_{23} 中第7列)表明玉树主震对该余震有明显的触发作用。总之,Mw 6.1级余震与玉树西北子断层相互都有着明显的触发关系。

4 结 语

本文采用库仑应力模型具体研究了2010年发生于甘孜-玉树左旋走滑主活动断层上的Mw 6.9级玉树同震库仑应力变化并对地震活动性进行了分析,得到的结论如下。

1) 采用基于地震波及大地测量数据反演的玉树主震滑动分布模型所构制的同震库仑应力图像能很好地解释玉树余震时空分布,余震触发率达76.47%;

2) 在2010年玉树前震-主震-余震地震序列中,Mw 4.9级前震对Mw 6.9级主震的促进作用不甚明显,Mw 6.9级主震对Mw 6.1级余震

有明显的触发作用且该余震对主震西北子断层也有明显的触发作用,它们的同震库仑应力变化分别约为0.056 MPa和0.039 MPa;

3) 2010年Mw 6.9级主震及Mw 6.1级余震对除甘孜-玉树西北子断层最右端外的整个甘孜-玉树断层都有促进作用,历史地震破裂段如1738年M 7.5级地震的当江段、哈秀段以及1896年M 7.3级地震的邓柯段更倾向于再次错动,是未来地震潜在危险段。当江至隆宝段、玉树至巴塘段、巴塘至洛须段也处于同震库仑应力促进区,也是未来地震潜在破裂段。而甘孜-玉树断层南侧的整个玉树南-风火山南麓断层上的地震危险性得以迟滞。

致谢:衷心感谢宁津生院士多年来的教育培养,热烈祝贺宁院士喜迎80寿诞!

参 考 文 献

- [1] 张培震,邓起东,张国民,等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(地球科学), 2003, 33(增刊): 12-20
- [2] 陈立春,王虎,冉永康,等. 玉树Ms 7.1级地震地表破裂与历史大地震[J]. 科学通报, 2010, 55(13): 1200-1205
- [3] Li Zhenhong, Elliott J R, Feng Wanpeng, et al. The 2010 Mw 6.8 Yushu (Qinghai, China) Earthquake: Constraints Provided by InSAR and Body Wave Seismology[J]. J Geophys Res, 2011, 116, B10302, doi:10.1029/2011JB008358
- [4] 闻学泽,徐锡伟,郑荣章,等. 甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂[J]. 中国科学(地球科学), 2003, 33(增刊): 199-208
- [5] Lin Aiming, Rao Gang, Dong Jia, et al. Co-seismic Strike-slip Surface Rupture and Displacement Produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake, Chi-

- na, and Implications for Tibetan Tectonics[J]. *J Geody*, 2011, 52: 249-259
- [6] 程佳, 刘杰, 甘卫军, 等. 1997 年以来巴彦喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 1997-2010
- [7] Shan Bin, Xiong Xiong, Zheng Yong, et al. The Co-seismic Coulomb Stress Change and Expected Seismicity Rate Caused by 14 April 2010 Ms=7.1 Yushu, China. *Earthquake [J]. Tectonophys*, 2011, 510:345-353
- [8] 王莹, 吴小平, 赵韬. 震源参数因素对玉树地震库仑破裂应力图像及其与余震活动统计关系的影响[J]. *地震学报*, 2011, 33(5): 595-604
- [9] USGS. Earthquake[OL]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010vacp/#scitech>, 2012-04-10
- [10] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震破裂过程快速反演[J]. *地震学报*, 2010, 32(3): 361-365
- [11] 刘超, 许力生, 陈运泰. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震快速矩张量解[J]. *地震学报*, 2010, 32(3): 366-368
- [12] Globalcmt. ErikLarson [OL]. www.globalcmt.org/CMTsearch.html, 2010-04-10
- [13] Xu Caijun, Wang Jianjun, Li Zhenhong, et al. Applying the Coulomb Failure Function with an Optimally Oriented Plane to the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Triggering [J]. *Tectonophys*, 2010, 491(1/4): 119-126
- [14] 袁道阳, 雷中生, 何文贵, 等. 1738 年青海玉树地震考证及其与 2010 年玉树 7.1 级地震关系探讨[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(6): 1950-1958
- [15] 倪四道, 王伟涛, 李丽. 2010 年 4 月 14 日玉树地震: 一个有前震的破坏性地震[J]. *中国科学(地球科学)*, 2010, 40(5): 535-537

第一作者简介:汪建军, 博士, 讲师, 研究方向为地震应力触发。
E-mail:jjwang@sgg.whu.edu.cn

The Coseismic Coulomb Stress Changes Induced by the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake, China and Its Implication to Earthquake Hazards

WANG Jianjun^{1,2,3} XU Caijun^{1,2,3} SHEN Wenbin^{1,2,3}

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Key Laboratory of Geodesy, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We here investigate the coseismic Coulomb stress change and seismicity rate induced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake in order to deepen our understanding of the behavior of stress triggering among its foreshock, mainshock and aftershocks and to further make an assessment of the occurrence of potential earthquakes in its surrounding region and on major active faults. Our results show that: 1) the pattern of aftershocks of the Mw 6.9 Yushu earthquake is consistent with the spatial distribution of coseismic Coulomb stress changes with an aftershock triggering rate of 76.47%; 2) For this 2010 Yushu earthquake sequence of foreshock-mainshock-aftershock type, the Mw 4.9 foreshock has little contribution to the occurrence of the Mw 6.9 Yushu mainshock, whilst the triggering causality between the Mw 6.9 Yushu mainshock and the Mw 6.1 aftershock is well pronounced; 3) the Coseismic Coulomb stress changes are loaded on the portions of Ganzi-Yushu fault such as the Dangjiang and Haxiu segments which have been ruptured by the 1738 M 7.5 earthquake and the Dengke segment of the 1896 M 7.3 earthquake as well as the southeastern unruptured extension from the end of the Mw 6.9 earthquake termination, and thus they all pose high earthquake hazards in the near future.

Key words: the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake; coseismic Coulomb stress; stress triggering