

盛书中、万永革、黄骥超等,2015,2000 年以来南美板缘强震对 2014 年智利 M_s 8.2 地震触发关系的初步研究,中国地震,31(3),501~509。

2000 年以来南美板缘强震对 2014 年智利 M_s 8.2 地震触发关系的初步研究

盛书中^{1,2)} 万永革^{1,2)} 黄骥超³⁾ 李祥¹⁾ 石砚斌¹⁾

1) 防灾科技学院,河北省三河市燕郊开发区 065201

2) 中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

3) 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000

摘要 计算了 2000 年以来南美板缘强震(先前地震)对 2014 年 4 月 1 日智利北部 M_s 8.2 主震、2014 年 4 月 3 日 M_s 7.6 强余震以及本次主震对其后续余震的应力触发作用,研究表明:先前地震在主震震源机制解 2 个节面上产生的库仑应力变化均为正;采用不同的有效摩擦系数,在主震破裂面上产生的库仑应力变化超过阈值(0.01MPa)的子元最低占 22.2%,库仑应力变化为正子元的比率最低和最高分别为 74.3%、95.5%。先前地震和主震在 4 月 3 日 M_s 7.6 地震震源机制解的 2 个节面上产生的库仑应力变化也均为正,且远大于触发阈值;最低有 58.2%的破裂面子元上库仑应力变化超过触发阈值,最低有 64.0%的破裂面子元上库仑应力变化为正。故先前地震有利于本次主震的发生,先前地震及本次主震又有利于 M_s 7.6 强余震的发生。根据全球 CMT 目录搜索到的 8 次余震震源机制解资料,计算了本次主震在后续余震震源机制解节面上的库仑破裂应力变化,计算结果显示,主震对其后续余震的触发效果不明显,由于余震资料的有限性,主震对余震的触发作用还有待于进一步研究。

关键词: 库仑破裂应力变化 应力触发 震源破裂模型 震源机制解

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0501-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

静态应力触发是研究地震断层面上位错产生的静态应力变化对后续地震的影响(触发或抑制)。目前断层间通过应力转移相互作用的假设已经被大量的地震事件所证实,这些事件包括在短时间尺度内的地震序列及其余震间的相互作用和一个区域里在长时间尺度内发生的大震间的相互作用。一些研究表明,大震后在应力增加区域的余震数目占有绝对优势,即大震触发了其余震的发生(King et al, 1994; Hardebeck et al, 1998; Pauchet et al, 1999; Deng et al, 1997a、1997b; 刘强等, 2007; 周龙泉等, 2008);也有一些研究表明,大震的发生引起

[收稿日期] 2014-05-26; [修定日期] 2015-07-19

[项目类别] 中国地震局教师基金项目(20140102)、中央高校基本科研业务专项资金(创新项目团队资助计划)(ZY20110101)共同资助

[作者简介] 盛书中,男,1982 年生,在读博士研究生,主要从事构造应力场、地震应力触发等方面研究。

E-mail: ssz@cea-igp.ac.cn

周围区域或断层上应力场变化,从而引起震源附近区域地震活动性的变化(Toda et al,1998; Pinar et al,2001;万永革等,2009、2010);一些研究者根据主震震源机制解或破裂模型以及强余震的震源机制解,验证了主震对其强余震存在触发作用(万永革等,2000;刘桂萍等,2002;郝平等,2004;刘强等,2007;周龙泉等,2008);还有一些研究结果表明强震间存在触发作用,即先前发生的大震增加了后续大震的发震风险或使其发震时间被前移(Stein et al,1997;傅征祥等,1999;Papadimitriou et al,2001;万永革,2001;Wan et al,2003、2004)。最近也有研究认为,俯冲带上特大地震静态库仑应力变化对后续余震触发效果不显著(缪森等,2012)。

日本地质调查局的远田晋次(Shinji Toda)、美国地质调查局的 Ross Stein 和 Volkan Sevilgen 以及美国 Woods Hole 海洋学研究所的林间(Jian Lin)等科学家共同编制了用于计算静态库仑应力变化的 Coulomb 软件(Toda et al,2005;Lin et al,2004),目前该软件的最新版本为 Coulomb3.3。Coulomb 3.3 软件可用于计算常见的由地震、火山引起的三维(3D)的地形变、静应力变化及地震触发等问题。除用于研究领域外,该软件也可用来展示由地震、火山引起的应力、应变、地形变矢量、与 GPS 测量比较、三维网格变化等基本概念。Coulomb 软件在国内外均得到了较为广泛的应用(周宇明等,2008;周龙泉等,2008;朱航等,2009;宋金等,2010;钱琦等,2010;盛书中等,2012;Toda et al,2011a、2011b;宋金等,2011;贾若等,2014;宋金等,2014)。

2014年4月1日智利北部发生了 $M_s 8.2$ 强震,随后于4月3日又发生了 $M_s 7.6$ 强震,该地震序列是由智利海岸附近的浅层逆断层所引发的。智利位于南美大陆西缘,濒临太平洋,纳斯卡板块与南美板块在该国西部海域交汇。在南极板块与太平洋板块联合推挤下,纳斯卡板块俯冲到南美板块下方,沿俯冲带形成强震活动带和强烈火山活动带。纳斯卡板块以 80mm/a 速度向南美板块之下俯冲,形成世界上最强地震活动带。在该地震带上发生了一系列大地震,如2010年智利中部莫尔发生的8.8级地震,1960年在智利南部发生的9.5级地震(此次地震是全球有记录以来的最大地震)。该地震带上的强震间是否存在应力触发作用,特别是近年来发生的大震对本次地震序列的影响等是本研究拟解决的问题。本文根据 Hayes 给出的2014年4月1日发生在智利北部的 $M_s 8.2$ 主震及2014年4月3日发生的 $M_s 7.6$ 余震地震断层破裂分布初步模型(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>)以及全球 CMT 目录(<http://www.globalcmt.org/>)提供的震源机制解资料,应用 Coulomb3.3 软件对2000年以来南美板缘强震对本次地震触发作用及本次地震对其后续余震的触发作用进行初步研究。

1 原理及计算程序

地震静态应力触发是指先前地震破裂产生的静态应力变化张量投影到后续地震断层面和滑动方向上,考虑到后续地震断层面上正应力、孔隙压力和摩擦系数等的影响,得到的库仑破裂静应力变化($\Delta\sigma_f$)可由下式表示

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma \quad (1)$$

式中, $\Delta\tau$ 为断层面上滑动方向上的剪切应力变化(当 $\Delta\tau$ 和接收断层的滑动方向一致时为正); $\Delta\sigma$ 为断层面上正应力变化(使接收断层面上正应力减小(或接收断层两盘松开)为正,增大为负);当 $\Delta\sigma_f$ 为正时促进断层的破裂, $\Delta\sigma_f$ 为负时抑制断层的破裂。 μ' 为等效摩擦系数,包含了

孔隙流体和断层面上的介质特性,一般取 0.2~0.8(Harris,1998;Cotton et al,1997)。

依上述静态库仑应力触发原理,本文采用远田晋次(Shinji Toda)等开发的 Coulomb3.3 软件计算库仑应力的变化,其量值和正负号取决于发震断层的几何特征(断层的走向、倾角、滑动角)和断层面上位错分布以及接收断层的几何特征及等效摩擦系数 μ' 。

2 震源破裂模型和余震资料的选取

本研究的目标为:给出 2000 年以来发生在纳斯卡板块与南美板块交界处且矩震级 ≥ 7.5 的地震对本次地震序列的静态应力触发情况。由全球 CMT 目录搜索到符合条件的地震 6 次,具体参数见表 1。我们利用 Coulomb3.3 软件提供的根据震源机制解建立震源破裂模型的方法,建立前 5 次地震的破裂模型并将模型沿走向和倾向分为 4×2 共 8 个子断层。2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震、2014 年 4 月 1 日在智利北部沿岸近海发生的 M_s 8.2 地震和同年 4 月 3 日发生的 M_s 7.6 地震,上述 3 次地震破裂模型均从美国地质调查局(USGS)网站上获取(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2014/>),模型均由美国国家地震中心 Hayes 博士根据全球地震台网宽频带波形数据反演所得(图 1)。2010 年智利 8.8 级地震反演出的断层面最佳模型走向为 17.5° ,倾角为 18° ,释放的地震矩为 $2.39 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$,2014 年 4 月 1 日智利 8.2 级地震走向 358° ,倾角 15° ,释放地震矩为 $2.35 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$,2014 年智利 7.6 级地震走向 375.5° ,倾角 19.5° ,释放的地震矩为 $6.73 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$,后 2 次地震破裂模型为 Hayes 博士给出的快速反演结果(即版本 1),故本研究也因此只能作为对智利地震静态应力触发的初步研究,进一步研究需更精确的地震破裂模型。

为了研究本次主震对其余震的触发作用,选定经度范围为: $-73^\circ \sim -68^\circ$,纬度范围为:

表 1 2000 年以来发生在纳斯卡板块与南美板块交界处 $M_w \geq 7.5$ 地震及本次强余震参数表

序号	时间 /年-月-日	经度 / ($^\circ$)	纬度 / ($^\circ$)	深度 /km	震级		节面 I / ($^\circ$)		节面 II / ($^\circ$)	
					M_s	M_w	走向/倾角/滑动角		走向/倾角/滑动角	
1	2001-06-23	-16.26	-73.64	33.0	8.2	8.4	310/18/63		159/74/98	
2	2001-07-07	-17.54	-72.08	33.0	7.3	7.6	306/14/52		165/79/99	
3	2005-06-13	-19.99	-69.20	115.6	—	7.8	182/23/-81		352/67/-94	
4	2007-08-15	-13.39	-76.60	39.0	8.0	8.0	321/28/63		171/65/104	
5	2007-11-14	-22.25	-69.89	40.0	7.7	7.7	358/20/98		170/71/87	
6	2010-02-27	-35.85	-72.71	44.8	8.3	8.8	19/18/116		172/74/82	
7	2014-04-01	-19.64	-70.82	20.1	8.2	8.1	357/18/109		157/73/84	
8	2014-04-03	-20.40	-70.14	40.0	7.6	7.7	357/18/101		165/73/86	
9	2014-04-03	-20.81	-70.55	24.3	6.2	6.5	359/25/101		166/65/85	
10	2014-04-04	-20.62	-70.74	20.0	6.1	6.3	3/22/115		156/70/80	
11	2014-04-07	-20.22	-70.82	10.0	5.8	5.7	45/33/35		285/72/118	
12	2014-04-08	-20.49	-70.93	7.1	5.7	5.6	4/17/76		198/73/94	
13	2014-04-11	-20.75	-70.72	17.5	6.0	6.2	329/18/47		194/77/103	
14	2014-04-15	-20.16	-70.75	10.4	5.5	5.1	69/39/53		293/60/116	
15	2014-04-19	-20.02	-70.91	9.0	5.8	5.8	335/23/78		168/67/95	

注:矩震级根据 Kanamori(1977)给出的 $M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 16.1)$ 转换得到,其中 M_0 的单位为 $\text{dyn} \cdot \text{cm}$

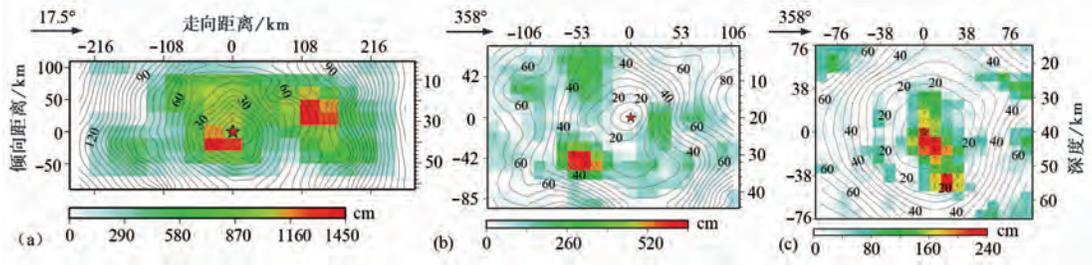


图1 2010年2月27日8.8级地震(a)、2014年4月1日8.2级地震(b)和2014年4月3日7.6级地震(c)的主震断层面上位错分布
 箭头指示断层的方位,五角星表示震源位置。颜色示意断面上的滑动量,
 等值线表示破裂前锋随时间变化(单位:s)

-22°~-17°,在上述经纬度范围内,我们从全球 CMT 目录中搜索到了 8 次强余震(具体参数见表 1)。研究中所用到的地震震源机制解空间分布情况见图 2。

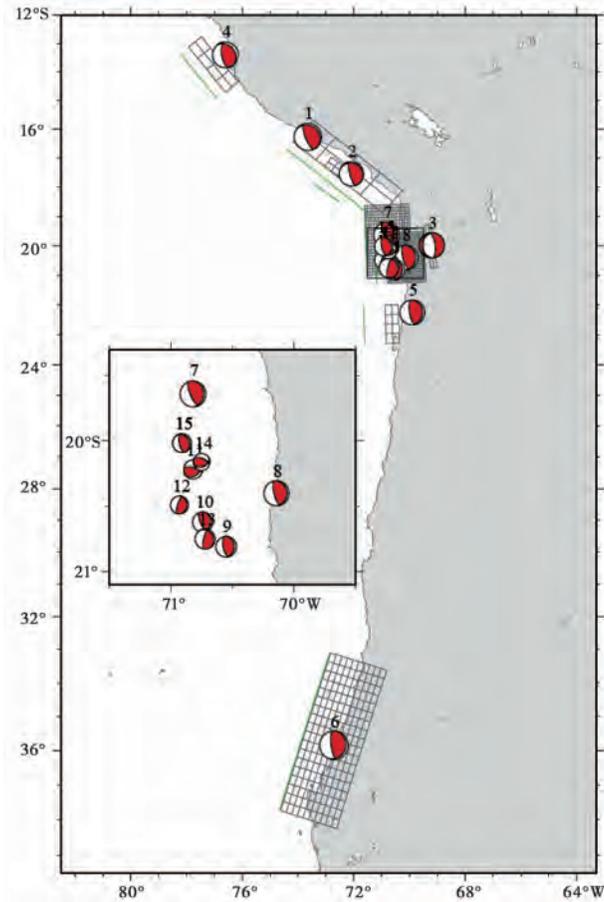


图2 震源机制解及破裂模型空间分布
 震源机制解上方的数字为其在表 1 中的序号,中间的小图为本次余震区放大图,
 网格表示地震破裂区域及其子段层情况

3 库仑应力计算结果及分析

以下计算中,我们均假定剪切模量为 $3.2 \times 10^4 \text{MPa}$,泊松比为 0.25。在没有特别说明的情况下,等效摩擦系数取 0.4。根据上文由 Coulomb3.3 软件所建立的震源破裂模型以及搜集到的震源破裂模型,我们首先计算了 2000 年以来南美板缘强震在 2014 年 4 月 1 日智利 8.2 级地震断层破裂面上产生的库仑应力变化,即表 1 中所列的前 6 次强震对本次 8.2 级地震的影响,所得结果见图 3(a)。由图 3(a)可见,先前地震在本次主震破裂面上产生的库仑破裂应力变化基本上为正,五角星所示的震中位于库仑破裂应力增加区,可见先前地震的发生有利于本次主震初始破裂的发生。由表 2 可见,当取不同的 μ' 时,主震断层面上的库仑应力变化分布的统计结果存在一定差异,若取触发阈值为 0.01MPa 时,被触发的破裂子元比例最低为 22.2%,最高为 24.3%,触发效果不显著;但若统计库仑应力变化为正的破裂子元时,库仑应力变化为正的破裂子元所占比最低为 74.3%,最高达 95.5%,则先前地震产生的库仑破裂应力变化有利于本次主震的发生。当 μ' 为 0.4 时,上述地震在主震震源机制解的第 I 节面

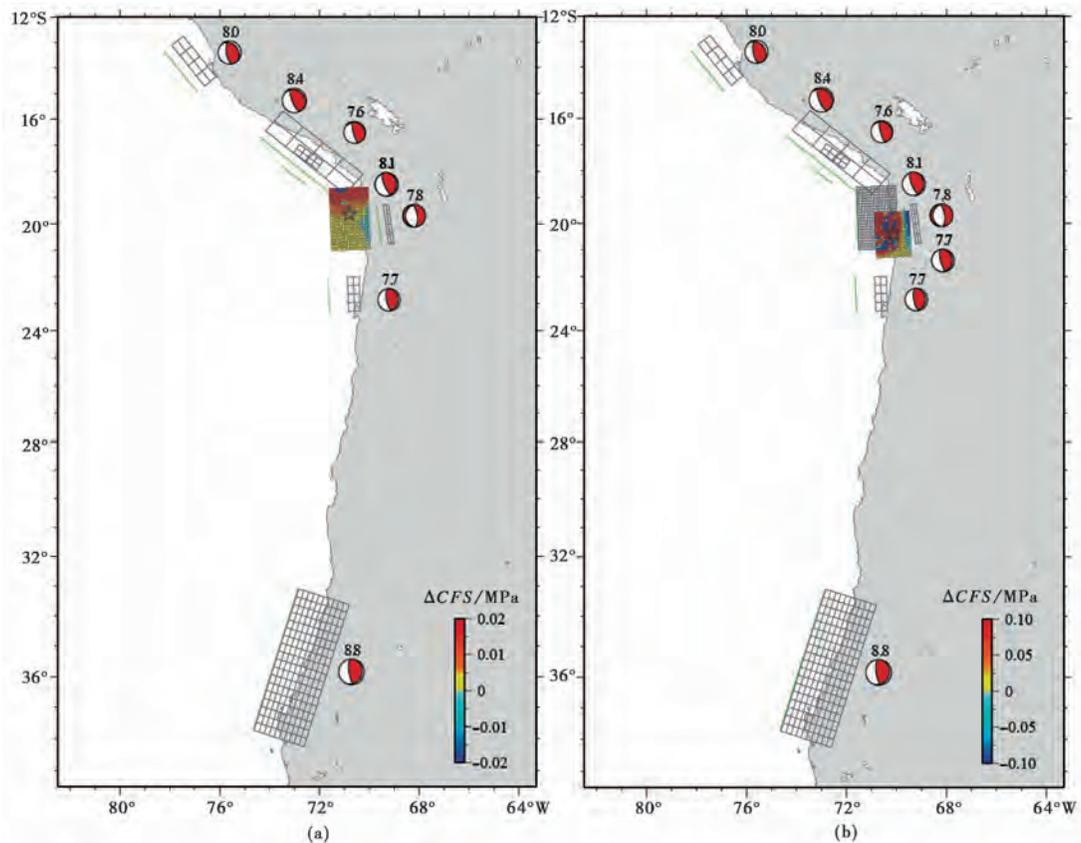


图 3 破裂面上的库仑应力变化分布

图(a)为表 1 中前 6 次地震在 2014 年 4 月 1 日智利 8.2 级地震发震断层面上产生的库仑应力变化分布;图(b)为表 1 中前 7 次地震在 2014 年 4 月 3 日智利 7.6 级地震发震断层面上产生的库仑应力变化分布;图(a)和(b)中发震断层面上的五角星示意 CMT 测定的震中位置,绿线为断层对应的地表迹线,等效摩擦系数为 0.4

表 2 在地震破裂面子元上产生的库仑应力变化统计

发震日期 /年-月-日	μ' 值	触发的子元数目 ($\Delta\sigma_f > 0.01$)	抑制的子元数目 ($\Delta\sigma_f < -0.01$)	不确定的子元数目		触发子元 所占百分比 /%	$\Delta\sigma_f$ 为正子元 所占百分比 /%
				$0 < \Delta\sigma_f < 0.01$	$0 > \Delta\sigma_f > -0.01$		
2014-04-01	0.0	91	13	187	83	24.3	74.3
	0.4	86	8	244	36	23.0	88.2
	0.8	83	7	274	10	22.2	95.5
2014-04-03	0.0	225	102	21	13	62.3	68.1
	0.4	219	110	21	11	60.7	66.5
	0.8	210	123	21	7	58.2	64.0

注:应力单位为 MPa

上产生的库仑应力变化为 0.0065MPa,在第 II 节面上的库仑应力变化为 0.0008MPa。综合上述情况,我们认为先前地震产生的库仑破裂应力变化有利于本次主震的发生。

其次,我们以表 1 中前 6 次强震和本次主震作为发震断层,计算了它们在 2014 年 4 月 3 日 $M_s 7.6$ 地震震源断层面上产生的库仑应力变化分布,所得结果见图 3(b)。由图 3(b)可见,先前地震在本次强余震破裂面上产生的库仑破裂应力变化基本为正,五角星所示的震中的库仑破裂应力也为正,可见先前地震的发生有利于本次 $M_s 7.6$ 地震起始破裂的发生。由表 2 可见,当取不同的 μ' 时,主震断层面上库仑应力变化分布的统计结果存在一定差异,若取触发阈值为 0.01MPa 时,被触发的破裂子元最低为 58.2%,最高为 62.3%;但若统计库仑应力变化为正的破裂子元时,库仑应力变化为正的破裂子元所占比例最低为 64.0%,最高达 68.1%。当 μ' 为 0.4 时,上述地震在本次 $M_s 7.6$ 地震震源机制解第 I 节面上产生的库仑应力变化为 0.232MPa,在第 II 节面上产生的库仑应力变化为 0.247MPa。综合上述情况,我们认为表 1 中前 7 次地震对本次强余震存在触发作用。

由表 1 可见,在本次 8.2 级强震后,在主震震源区附近又发生了 8 次强余震,为分析本次主震对后续强余震的影响,我们分别计算了本次主震在余震震源机制解节面上产生的库仑应力变化,计算结果见表 3。由表 3 可见,不论考虑节面 I 还是节面 II 上的库仑破裂应力变化,最多仅有 50% 的余震节面上的库仑破裂应力变化大于触发阈值,故主震对本次余震序列的触发作用不明显。

表 3 余震震源机制解节面上静态库仑应力变化统计

发震 序号	余震 数目	触发的余震数目 $\Delta\sigma_f > 0.01$		抑制的余震数目 $\Delta\sigma_f < -0.01$		不确定的余震数目				余震触发率 /%	
		节面 I	节面 II	节面 I	节面 II	节面 I	节面 II	节面 I	节面 II	节面 II	节面 II
7	8	4	3	3	5	0	0	1	0	50	37.5

注:应力单位为 MPa

4 讨论和结论

本研究利用全球 CMT 目录和美国地质调查局(USGS)网站上提供的地震破裂模型资

料,计算了 2000 年以来发生在纳斯卡板块与南美板块交界处且 $M_w \geq 7.5$ 的地震对本次地震序列的静态应力触发情况。有关先前强震对本次主震的触发作用,若以 0.01MPa 为静态库仑破裂应力触发的阈值 (Harris, 1998; Kilb et al, 2000) 来看,在等效摩擦系数为 0.8 时,触发率最高为 24.3%;但本次主震破裂面落在库仑应力增加区的子元占有明显优势,在取不同的等效摩擦系数时,最低为 74.3%,最高达 95.5%。且当 μ' 为 0.4 时,主震震源机制解 2 个节面上的库仑应力变化也均为正,且震中位于库仑应力变化为正区域,因此我们认为先前地震的发生有利于本次主震的发生。在取不同的等效摩擦系数时,4 月 3 日发生的 M_s 7.6 地震破裂面有近 6 成以上落在应力触发区或应力增加区;若考虑震中位置的库仑应力变化或是震源机制解节面上的库仑应力变化时,库仑应力变化也均为正,故先前地震和本次主震有利于本次强余震的发生。

由表 3 可见,本次主震对强余震触发效果不明显。此前有关俯冲带上特大地震静态库仑应力变化对后续余震触发效果的研究结果也存在差异,缪森等(2012)就 2011 年日本东北地震对其后续余震的触发研究的计算结果表明,仅有 47% 的后续余震发生在库仑应力增加区域,但他们是取最优破裂面为库仑应力变化投影面,而不是考虑库仑应力变化在余震震源机制解节面上的变化。Toda 等(2011a、2011b)和盛书中等(2012)利用日本 F-net 目录给出的震源机制解和不同的主震破裂模型,计算 2011 年日本东北地震在后续余震震源机制解节面上的库仑应力变化时,所得触发结果均为 60% 左右。缪森等(2012)的研究结果表明,2010 年智利地震和 2004 年苏门答腊地震的静态应力触发效果均不显著。周龙泉等(2008)通过对 2007 年苏门达腊 8.5 级地震的研究,给出了该地震的后续强震都发生在库仑应力显著增加区的结果。上述研究结果表明,在研究余震触发问题时,余震触发率受余震断层参数及滑动角的影响较大,故研究中应尽可能根据可靠的余震参数计算余震触发问题。有关俯冲带上大地震对后续余震的触发问题值得深入研究,本次主震对余震的触发问题计算中,仅使用了几个具有确切震源机制解的余震资料,由于所使用余震资料的局限性,使得本次主震对余震的触发作用的研究还有待深化。

通过上述计算及分析,我们得到以下的初步结论:2000 年以来发生在纳斯卡板块与南美板块交界处且 $M_w \geq 7.5$ 地震产生的库仑应力变化,总体上是有利于本次主震发生的;先前地震及本次主震对 2014 年 4 月 3 日发生的 M_s 7.6 地震触发效果显著;2014 年 4 月 1 日智利 8.2 级地震对其后续强余震的触发效果不显著。

致谢: 本研究用于计算静态库仑应力变化的 Coulomb3.3 软件取自 USGS 网站,特此致谢。

参考文献

- 傅征祥、刘桂萍,1999,海原大地震可能触发古浪大地震的力学机制,见:陈运泰,中国地震学会成立 20 周年纪念文集,234~243。北京:地震出版社。
- 贾若、蒋海昆,2014,基于同震库仑应力变化的汶川地震余震频次研究,中国地震,30(1),74~90。
- 郝平、傅征祥、田勤俭等,2004,昆仑山口西 8.1 级地震强余震库仑破裂应力触发研究,地震学报,26(1),30~37。
- 刘桂萍、傅征祥,2002,1973 年炉霍大地震 ($M_s \geq 7.6$) 最大余震 ($M_s = 6.3$) 的库仑破裂应力触发,中国地震,18(2),175~182。
- 刘强、倪四道、秦嘉政等,2007,2007 年宁洱 6.4 级地震强余震库仑破裂应力触发研究,地震研究,30(4),331~336。
- 缪森、朱守彪,2012,俯冲带上特大地震静态库仑应力变化对后续余震触发效果的研究,地球物理学报,55(9),2982~

- 2993。
- 钱琦、韩竹军,2010,汶川 M_s 8.0 地震断层间相互作用及其对起始破裂段的启示,地学前缘,17(5),084~092。
- 盛书中、万永革、程佳等,2012,2011 年日本 9.0 级大地震的应力触发作用初步研究,地震地质,34(2),325~337。
- 宋金、蒋海昆,2010,台湾强震对福建水口库区的库仓应力触发研究,华南地震,30(1),16~25。
- 宋金、蒋海昆,2011,2010 年 4 月 14 日玉树 M_s 7.1 地震对余震的触发研究,中国地震,27(4),396~402。
- 宋金、周龙泉,2014,2014 年于田 M_s 7.3 地震产生的静态库仓应力变化及对周边断层的影响,中国地震,30(2),168~177。
- 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,地震学报,22(6),568~576。
- 万永革,2001,地震“静态应力触发”问题的研究,学位论文,北京:中国地震局地球物理所。
- 万永革、沈正康、盛书中等,2009,2008 年汶川大地震对周围断层的影响,地震学报,31(2),128~139。
- 万永革、沈正康、盛书中等,2010,2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释,地震物理学报,53(2),280~289。
- 朱航、闻学泽,2009,1973~1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程,地球物理学报,52(4),994~1003。
- 周龙泉、马宏生、夏红等,2008,2007 年苏门达腊 8.5 级、8.3 级地震强余震库仓破裂应力触发研究,地震,28(1),40~46。
- 周宇明、单斌、熊熊,2008,静态应力触发中影响库仓应力变化的参数敏感性分析,大地测量与地球动力学,28(5),21~26。
- Cotton F, Coutant O,1997,Dynamic stress variations due to shear faults in a plane-layered medium,Geophys J Int,128,676~688。
- Deng J,Sykes L R,1997a,Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes, A 200-year perspective,J Geophys Res,102,9859~9886。
- Deng J,Sykes L R,1997b,Stress evolution in southern California and triggering of moderate-,small-,and micro-size earthquakes,J Geophys Res,102,24411~24435。
- Hardebeck J L,Nazareth J J,Hauksson E,1998,The static stress change triggering model,Constraints from two southern California aftershock sequences,J Geophys Res,103,24427~24437。
- Harris R A,1998,Introduction to special section:stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard,J Geophys Res,103,24347~24358。
- Kanamori H,1977,The energy release in great earthquakes,J Geophys Res,82,2981~2987。
- Kilb D,Gomberg J,Bodin P,2000,Triggering of earthquake aftershocks by dynamic stresses,Nature,408,570~574。
- King G C P,Stein R S,Lin J,1994,Static stress changes and the triggering of earthquakes,Bull Seismo Soc Amer,84(3),935~953。
- Lin J,Stein R S,2004,Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults,J Geophys Res,109,B02303,doi,10.1029/2003JB002607。
- Papadimitriou E E,Karakostas V G,Papazachos B C,2001,Rupture zones in the area of the 17,08,99 Izmit (NW Turkey) large earthquake (M_w 7.4) and stress changes caused by its generation,Journal of Seismology,5,269~276。
- Pauchet H,Rigo A,Rivera L, et al,1999,A detailed analysis of the February 1996 aftershock sequence in the eastern Pyrenees, France,Geophys J Int,137,107~127。
- Pinar A,Honkura Y,Kuge K,2001,Seismic activity triggered by the 1999 Izmit earthquake and its implications for the assessment of future seismic risk,Geophys J Int,146,F1~F7。
- Stein R S,Barka A A,Dieterich J H,1997,Progressive failure on the North Anatolian Fault since 1939 by earthquake stress triggering,Geophys J Int,128,594~604。
- Toda S,Stein R S,Reasenber P A, et al,1998,Stress transferred by the 1995 M_w = 6.9 Kobe, Japan, shock, Effect on aftershocks and future earthquake probabilities,J Geophys Res,103,24543~24565。
- Toda S,Stein R S, Richards-dinger K, et al,2005,Forecasting the evolution of seismicity in southern California, Animations built on earthquake stress transfer,J Geophys Res, v, 110, B05S16, doi, 10, 1029/2004JB003415。
- Toda S,Lin J,Stein R,2011a,Using the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought to failure,Earth Planets Space,63,725~730。
- Toda S,Stein R,Lin J,2011b,Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M = 9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer,Geophys Res Lett,38,L00G03,doi,10,1029/2011GL047834。

Wan Y G, Wu Z L, Zhou G W, 2003, Small stress change triggering a big earthquake, A test of the critical point hypothesis for earthquake, *Chin Phys Lett*, **20**(9), 1452~1455.

Wan Y, Wu Z, Zhou G, 2004, Focal mechanism dependence of static stress triggering of earthquakes, *Tectonophysics*, **390**, 235~243.

Primary research on the 2014 M_s 8.2 Chile earthquake triggering by large earthquake occurred on the boundary of south American plate since 2000

Sheng Shuzhong^{1,2)} Wan Yongge^{1,2)} Huang Jichao³⁾ Li Xiang¹⁾ Shi Yanbin¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 100045, China

Abstract We did a primary research on the stress triggering effect on the mainshock of April 1, 2014 M_s 8.2 earthquake in northern Chile and its strong aftershock of April 3, 2014 M_s 7.6 earthquake by large earthquakes occurring on the boundary of south American plate since 2000, and the stress triggering effect on the subsequent aftershocks by the mainshock. The results show that the previous earthquakes are beneficial to the occurrence of the mainshock, and the previous earthquake and the mainshock have triggering effects on the strong aftershock of M_s 7.6 earthquake. The Coulomb stress change on the two nodal plane of the mainshock's focal mechanism is positive, which was caused by the previous earthquake. Using different friction coefficients, the minimum ratio is 22.2% for the fault segment of the mainshock's rupture plane whose Coulomb stress change exceeds the threshold(0.01MPa). The minimum and maximum ratio of the positive Coulomb stress change fault segments are 74.3% and 95.5% respectively. The Coulomb stress change is positive on the two nodal plane of the April 3, 2014 M_s 7.6 earthquake, which was caused by the previous earthquake and the mainshock, and is considerably larger than the stress triggering threshold. The minimum ratio of the fault segment with Coulomb stress change bigger than threshold is 58.2%, and the minimum ratio of the fault segment with positive Coulomb stress change is 64.0%. 8 aftershocks focal mechanism data was collected from Global CMT catalogue, the Coulomb stress change on each aftershock nodal plane was calculated. The study results show that the mainshock's triggering effect on the aftershock is not obvious, and needs further studying, because the limited data of aftershocks were used in this research.

Key words: Coulomb failure stress change Stress triggering Earthquake rupture model
Focal mechanism