

# 巴颜喀拉块体东-南边界强震序列 库仑应力触发过程\*

屈勇, 朱航

(四川省地震局, 四川 成都 610041)

**摘要:** 计算和研究了1973—2014年发生在巴颜喀拉块体东-南边界断裂带上的、由9次 $M_s \geq 6.3$ 地震组成的强震序列引起的库仑静应力变化图像, 分析序列中先发地震破裂对后发地震的应力触发作用。结果表明: (1) 1973—1976年在巴颜喀拉块体东边界的虎牙断裂带上发生的4次强震存在着显著的应力触发关系, 同时改变了龙门山断裂带中南段及周围区域的应力状态, 相继触发了汶川 $M_s 8.0$ 地震和芦山 $M_s 7.0$ 地震; (2) 南边界鲜水河断裂带自1973年以来发生的3次强震同样存在应力触发关系, 2014年康定 $M_s 6.3$ 地震是巴颜喀拉块体东、南边界强震活动导致的库仑应力变化共同触发的结果; (3) 序列中9次地震共同产生的库仑应力变化图像显示: 龙门山断裂带南段的汶川地震至芦山地震破裂段之间的空区, 鲜水河断裂带南段的道孚地震至康定地震破裂段之间的空区以及鲜水河断裂带、安宁河断裂带、龙门山断裂带交汇的三岔口地区均在库仑应力增加区的覆盖范围之内, 需要重点关注。

**关键词:** 巴颜喀拉块体; 库仑应力变化; 静应力触发; 强震序列

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)02-0216-10

## 0 前言

巴颜喀拉块体位于青藏活动地块区中北部, 其北、南边界分别被具有左旋走滑性质的东昆仑断裂带、甘孜-玉树断裂带和鲜水河断裂带包围, 东边界则由龙门山断裂带和西北侧的岷江-虎牙断裂带共同构成(张培震等, 2003)。

自1973年以来, 巴颜喀拉块体南边界和东边界上发生多次 $M_s \geq 6.3$ 地震, 如1973年2月6日在鲜水河断裂带北西段发生的炉霍 $M_s 7.6$ 地震; 1981年1月24日在鲜水河断裂带中段发生的道孚 $M_s 6.9$ 地震; 2014年11月22日在鲜水河断裂带南段发生的康定 $M_s 6.3$ 地震, 这3次地震在空间上沿巴颜喀拉块体南边界由西向东分布。1973年8月11日在虎牙断裂带北段发生了松潘黄龙 $M_s 6.3$ 地震; 1976年8月16~23日在虎牙断裂带中-南段的松潘-平武交界地区发生了 $M_s 7.2$ ,  $M_s 6.7$ ,  $M_s 7.2$ 地震; 2008年5月12日和2013年4月20日在龙门山断裂带的中-北段和南段分别发生了汶川 $M_s 8.0$ 和芦山 $M_s 7.0$ 强震, 这6次强震沿巴

颜喀拉块体的东边界从北向南依次分布。上述地震共同构成了本文所称的“巴颜喀拉块体东-南边界强震序列”。

我们的关注点在于: 沿巴颜喀拉块体边界断裂带由北向南, 由西向东依次发生的地震是否属于应力触发的结果? 这一强震序列的发生对周边地区的中、强地震活动有何影响? 康定 $M_s 6.3$ 地震发生之后, 巴颜喀拉块体东-南边界断层带的应力积累变化情况如何? 这些问题都需要我们从力学机制上探讨应力变化与后续强震的触发关系。

有关应力变化与地震关系的研究早在20世纪60年代就已兴起, 并于90年代达到一个相对成熟的阶段(Scholz, 1990; Deng, Sykes, 1997)。Smith和William(1969)通过观察南加州圣安德烈斯断层带上的应变调整, 分析和探讨了应力应变与强震之间的关系; King等(1994)最早将静态库仑应力变化应用在了地震触发和余震分布的研究中, 其结果表明: 大地震引起静态库仑应力变化会对周边断层上的强震起到触发作用, 1992年6月28日发生的Big Bear $M_w 6.5$ 地震就是受到3h以前的Landers $M_w 7.3$ 地震同震

\* 收稿日期: 2016-08-26.

基金项目: 四川省地震局地震科技专项计划(LY1602)资助.

库仑应力的触发；Stein 等（1997）和 Nalbant 等（1998）计算了伊兹米特-爱琴海地区的地震序列库仑应力变化，得出地震发生概率与库仑破裂应力变化存在正相关关系的结论，并成功预测了1999年伊兹米特地震；Papadimitriou 等（2004）在考虑同震位错及震间构造应力加载的情况下，研究了自1893年以来鲜水河及附近断裂带的库仑应力演化与地震触发关系，发现  $M_s \geq 6.5$  强震均发生在库仑应力增加的断层段。

沈正康等（2003）采用广义反射/透射矩阵方法研究了东昆仑活动断裂带库仑应力演化与强震间关系，发现该断裂带自1937年以来发生的4次  $M_s \geq 7$  地震均造成2001年昆仑山口西8.1级地震断层面上库仑破裂应力增加；吴小平等（2007）研究了1988年11月6日云南澜沧-耿马  $M_s 7.6$ 、 $7.2$  级地震产生的完全库仑破裂应力变化的时-空演化图像，证实第1次主震触发了第2次主震；朱航和闻学泽（2009，2012）分别对1973—1976年间四川松潘4次强震序列和1733—1850年间小江—则木河断裂带上4次  $M_s \geq 7.0$  地震序列引起的库仑应力变化及其余震分布的关系进行了研究，结果表明：后发强震破裂均发生在先发强震破裂引起的库仑应力显著增加区内，相互连接的各断裂带之间和断裂带内部各段之间均存在显著的、力学上的相互作用；徐晶等（2013）基于负位错理论，计算了鲜水河断裂带10个断层段的震间长期构造加载作用引起的断层上的应力积累，讨论了同震、震后、震间效应引起的累积库仑应力变化与区域强震活动的关系，得到了鲜水河断裂带上1893年以来发生的7次强震均是在之前一系列强震及构造应力加载驱使下发生的结论；盛书中等（2015）及万永革等（2015）针对尼泊尔  $M_s 8.1$  强震对中国大陆的静态应力触发影响和水平应力变化进行了研究，认为此次地震及后续两次强余震对中国大陆产生的应力变化量值很小，其应力加载主要集中在邻近的西藏和新疆地区的部分断层上，其余地区的断层则主要受到了应力卸载作用。

因此，特定区域的强震成因可以由库仑应力变化来进行合理解释，进而帮助判定潜在的强震危险性（解朝娣等，2014）。本文拟采用库仑破裂应力原理和方法对巴颜喀拉块体东-南边界的强震触发机理及地震序列时空演化规律展开研究。

## 1 计算原理和方法

库仑破裂应力是指断层面上存在着一定程度的应力积累，当积累应力大小超过断层面的滑动阻抗强度时，断层面将会滑动和破裂。假设地球是一个半无限空间且各向同性的介质球体，根据库仑定理，断层面的静态库仑破裂应力  $\Delta\sigma_f$  表达式为：

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu * (\Delta\sigma_n + \Delta p) \quad (1)$$

式中： $\Delta\tau_s$  为断层面剪切应力变化（沿滑动方向为正）； $\Delta\sigma_n$  为断层面的正应力（张应力为正）； $\Delta p$  为断层面孔隙压力变化（压应力为正）； $\mu$  为断层面的摩擦系数（Stein, 1999）。如果  $\Delta\sigma_f$  为正，破裂被激发，反之则受阻，剪切应力的增加及断层的受张都加速破裂。 $\Delta\sigma_n$  被  $\Delta p$  抵消作用后的效果，可用折合有效摩擦系数  $\mu'$  体现，因此库仑破裂应力  $\Delta\sigma_f$  的表达式可简化为：

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu' * \Delta\sigma_n \quad (2)$$

释放应力的地震和破裂面被称为“源地震”和“源断层”，其它先存断层面被称为“接受断层”。接受断层上的库仑应力变化取决于自身几何特征与摩擦系数以及源断层产状和源地震的同震位错。当“接受断层”的应力变化为负值时，该断层区被称为应力影区，断层面发生滑动和破裂的可能性减小；当“接受断层”上的库仑应力变化为正值时，该断层区就被称为应力触发区，断层面发生滑动和破裂的可能性增大。当变化幅度达到甚至超过该断层面的临界失稳条件时，就很可能触发另一次地震（Okada, 1992）。本文基于上述原理，采用远田晋次（Shinji Toda）等开发的 Coulomb3.3 软件分别计算1973—2014年间巴颜喀拉东边界和南边界强震序列引起的静态库仑应力变化，分析可能存在的触发作用，并进一步研究该强震序列对周边地区中、强地震活动的影响。

## 2 发震断层与位错模型

受印度洋板块北向推挤作用的影响，青藏活动地块区整体朝 S-SE 方向运动，位于其中的巴颜喀拉块体受周边块体挤压和华南克拉通地块阻挡，在边界带上产生了强烈的构造运动和变形。

本文研究的 1973—2014 年强震序列分别发生在巴颜喀拉块体东边界近 NS 向虎牙断裂带、NE 向龙门山断裂及南边界 NW—SE 向鲜水河断裂带上。已有地质资料（张培震等，2003；闻学泽等，2011）表明：东边界的虎牙断裂带北段为 NW 走向，以左旋走滑运动为主；中、南段为 NNW—近 NS 向，表现为左旋走滑兼逆冲为主的运动方式。向南延伸逐渐过渡到龙门山逆冲推覆断裂带，共由 3 条主干断裂组成：东边灌县—江油前山断裂带，中间北川—映秀中央断裂带和西边汶川—茂县后山断裂带。汶川地震主要发生在龙门山中央断裂带上，其地表破裂是从映秀附近向北东方向单侧破裂，从断层破裂方式上看，从开始逆冲逐

渐过渡到右旋走滑；而南边界 NW 向的鲜水河断裂带是一条自晚第四纪以来具有强烈左旋特性的大型走滑断裂带，北接甘孜—玉树断裂带，南与安宁河—则木河断裂带相交，是中国大陆地壳运动变形最强烈的断裂带之一。

为了获取计算所需各次地震事件的震中位置、发震断层产状及同震位错量，我们在综合多种资料的基础上，构建 Coulomb3.3 软件计算所需的断层模型。其中 1973 年 2 月 6 日炉霍  $M_s7.6$  地震和 1973 年 8 月 11 日黄龙  $M_s6.5$  地震的震中位置、发震断层产状源自成尔林等（1981，1983）的研究结果，1976—2014 年巴颜喀拉块体东—南边界强震序列 7 次事件的震中位置及发震断层产状数据来源于中国地震台网中心（<http://www.cenc.ac.cn/AdvsearchHandler>）；同震位错方面，1976 年 8 月 3 次地震事件的平均位错取自 Jones 等（1984）由地震矩和破裂面积的估计结果；2008 年汶川  $M_s8.0$  地震、2013 年芦山  $M_s7.0$  地震和 2014 年康定  $M_s6.3$  地震的同震位错量则分别取自王卫民等（2008）、刘成利等（2013）和易桂喜等（2015）的震源破裂模型；其它 3 次地震事件的同震位错量由闻学泽（1995）建立的走滑型地震断层的经验公式估计得出：

$$\ln(u * l) = 2.33M_s - 5.3 \quad (3)$$

式中： $M_s$  是面波震级； $u * l$  是同震平均位错  $u$  与破裂长度  $l$  的乘积。巴颜喀拉块体东—南边界 9 次地震的震源机制解参见图 1b。

### 3 计算结果及分析

为了研究表 1 中巴颜喀拉块体东—南边界强震序列的静应力触发过程，本文以龙门山断裂带、鲜水河断裂带和安宁河—则木河断裂带交界处的三岔口地区为中心，取（99.5°~106°E，29°~33.5°N）的矩形范围作为研究区。计算之前，将 1973 年以前研究区内的库仑应力变化量归零。在计算过程中，参数的选取遵循如下规则：计算深度为地下 10 km，剪切模量取  $3.3 \times 10^{10}$  Pa，泊松比取 0.25，有效摩擦系数  $\mu'$  取 0.4，这套取值是 King 等（1994）根据不同地区计算的库仑应力变化得出的经验值。下面分别对巴颜喀拉块体东、南边界地震的库仑应力触发图像进行分析。

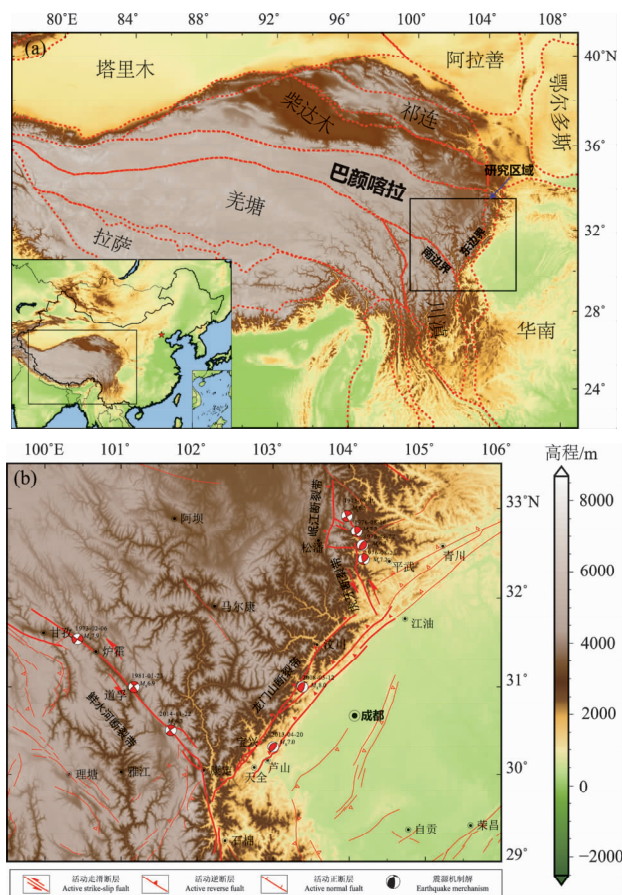


图 1 巴颜喀拉块体区域位置 (a) 及 1973—2014 年在其东—南边界发生 9 次强震序列的震源机制解及区域活动构造环境 (b)

Fig. 1 The regional location of Bayan Har block (a) and a map of the focal mechanism solutions of 9 major earthquake sequence from 1973 to 2014 and regional active tectonic environment in Bayan Har block's eastern and southern boundaries (b)

表 1 1976—2014 年巴颜喀拉块体东—南边界强震序列发震断层产状及同震位错参数  
Tab. 1 Seismogenic fault attitudes and coseismic slips of 9 major events in Bayan Har block's eastern  
and southern boundaries from 1976 to 2014

地震事件			震中位置	发震断层产状/(°)	破裂长度/	走滑分量/	倾滑分量/
边界位置	发震时间/年-月-日	震级 $M_s$	( $\varphi_N, \lambda_E$ )	走向/倾角/滑动角	m	m	m
东边界	1973-08-11 <sup>⑥</sup>	6.5 <sup>⑥</sup>	(32°56′, 103°54′) <sup>⑥</sup>	(153.5/81/5) <sup>⑥</sup>	15 <sup>⑦</sup>	1 <sup>⑦</sup>	0.1 <sup>⑦</sup>
	1976-08-16 <sup>①</sup>	7.2 <sup>①</sup>	(32°43′, 104°05′) <sup>①</sup>	(165/63/40) <sup>①</sup>	30 <sup>②</sup>	1.1 <sup>②</sup>	0.9 <sup>②</sup>
	1976-08-22 <sup>①</sup>	6.7 <sup>①</sup>	(32°37′, 104°09′) <sup>①</sup>	(215/60/90) <sup>①</sup>	12 <sup>②</sup>	0 <sup>②</sup>	1.2 <sup>②</sup>
	1976-08-23 <sup>①</sup>	7.2 <sup>①</sup>	(32°29′, 104°05′) <sup>①</sup>	(165/65/40) <sup>①</sup>	22 <sup>②</sup>	1.1 <sup>②</sup>	0.9 <sup>②</sup>
	2008-05-12 <sup>①</sup>	8.0 <sup>①</sup>	(31°00′, 103°24′) <sup>①</sup>	(229/33/120) <sup>①</sup>	318 <sup>③</sup>	2.5 <sup>③</sup>	5.5 <sup>③</sup>
	2013-04-20 <sup>①</sup>	7.0 <sup>①</sup>	(30°24′, 103°02′) <sup>①</sup>	(220/35/95) <sup>①</sup>	28 <sup>④</sup>	0 <sup>④</sup>	1.2 <sup>④</sup>
南边界	1973-02-06 <sup>⑥</sup>	7.6 <sup>⑥</sup>	(31°30′, 100°24′) <sup>⑥</sup>	(125/87/0) <sup>⑥</sup>	81 <sup>⑦</sup>	4 <sup>⑦</sup>	0 <sup>⑦</sup>
	1981-01-24 <sup>①</sup>	6.9 <sup>①</sup>	(31°00′, 101°10′) <sup>①</sup>	(322/85/13) <sup>①</sup>	29 <sup>⑦</sup>	0.5 <sup>⑦</sup>	0 <sup>⑦</sup>
	2014-11-22 <sup>①</sup>	6.3 <sup>①</sup>	(30°30′, 101°70′) <sup>①</sup>	(234/81/-172) <sup>①</sup>	13 <sup>⑤</sup>	0.9 <sup>⑤</sup>	0.1 <sup>⑤</sup>

注：①中国地震台网中心结果，<http://www.cenc.ac.cn/AdvsearchHandler>；②Jones 等（1984）结果；③王为民等（2008）结果；④刘成利等（2013）结果；⑤易桂喜等（2015）结果；⑥成尔林（1981）结果；⑦由式（3）估计得出结果。

3.1 东边界库仑应力图像及分析

对于巴颜喀拉块体东边界区域，将研究区限定在（101.5°~106°E，29°~33.5°N）的矩形范围内。图 2 为东边界强震序列库仑破裂应力变化图像。

图 2a 是以 1973 年 8 月 11 日松潘黄龙  $M_s6.5$  地震为源地震，以 1976 年 8 月 16 日松潘  $M_s7.2$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像。从结果可以看出，源断层的北西和南东端均存在库仑应力变化的高值区，但发震断裂在北西端终止，因此未触发强震。而南东端的库仑应力变化量在虎牙断裂带中段表现为高值，并随距离的增大而减小。

图 2b 是以 1973 年 8 月 11 日  $M_s6.5$  地震和 1976 年 8 月 16 日  $M_s7.2$  地震共同施加，以 1976 年 8 月 22 日松潘  $M_s6.7$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像。结果显示库仑破裂应力增加的高值区在以 1976 年 8 月 16 日松潘  $M_s7.2$  地震破裂段为源断层的南端，而这个位置是 1976 年 8 月 22 日松潘  $M_s6.7$  地震的发震断裂的所在地。

图 2c 是以 1976 年 8 月 22 日及其之前 2 次地震共同施加，以 1976 年 8 月 23 日松潘  $M_s7.2$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像。结果表明：前 3 次地震破裂所引起的库仑应力增加区已扩展至 1976 年 8 月 23 日  $M_s7.2$  地震的发震断层段。

图 2d 是以 1976 年 8 月 23 日及其之前 3 次地震共同施加、以 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像，2008 年

汶川  $M_s8.0$  地震的破裂起始点及断层地表破裂带都在前 4 次地震的远场库仑应力触发区内。总体来说，汶川  $M_s8.0$  地震的主要能量来自于龙门山断裂带长期闭锁积累，而 1973—1976 年松潘震群产生的静态库仑应力对其具有触发作用。

图 2e 是以 2008 年 5 月 12 日及其之前 4 次地震共同施加、以 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s7.0$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像，芦山地震震中位于应力触发区内。分析认为，由于汶川  $M_s8.0$  地震向北东方向单侧破裂，龙门山断裂带南段积累的能量没有释放，前面 5 次地震的发生，使龙门山断裂带南段的库仑破裂应力明显增加，进而触发了芦山  $M_s7.0$  地震。这与单斌等（2013）的研究结果类似。

2014 年 11 月 22 日发生了康定  $M_s6.3$  地震，震中位于巴颜喀拉块体南、东边界交汇处的鲜水河断裂南段。图 2f 是以 2013 年 4 月 20 日及其之前 5 次地震共同施加、以 2014 年康定  $M_s6.3$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像，结果显示位于巴颜喀拉块体南边界的 2014 年康定  $M_s6.3$  地震的发震断层也处于库仑应力增加区内。

本小节的计算与分析结果表明：巴颜喀拉块体东边界上 1973—1976 年的 4 次强震间存在显著的库仑破裂应力触发关系，1973 年沿虎牙断裂带北西段发生的  $M_s6.5$  地震使得断裂带中段和南东段的库仑应力的显著增加促使了 1976 年的 4 次强震发生，同时改变了龙门山中南段及周围区域的



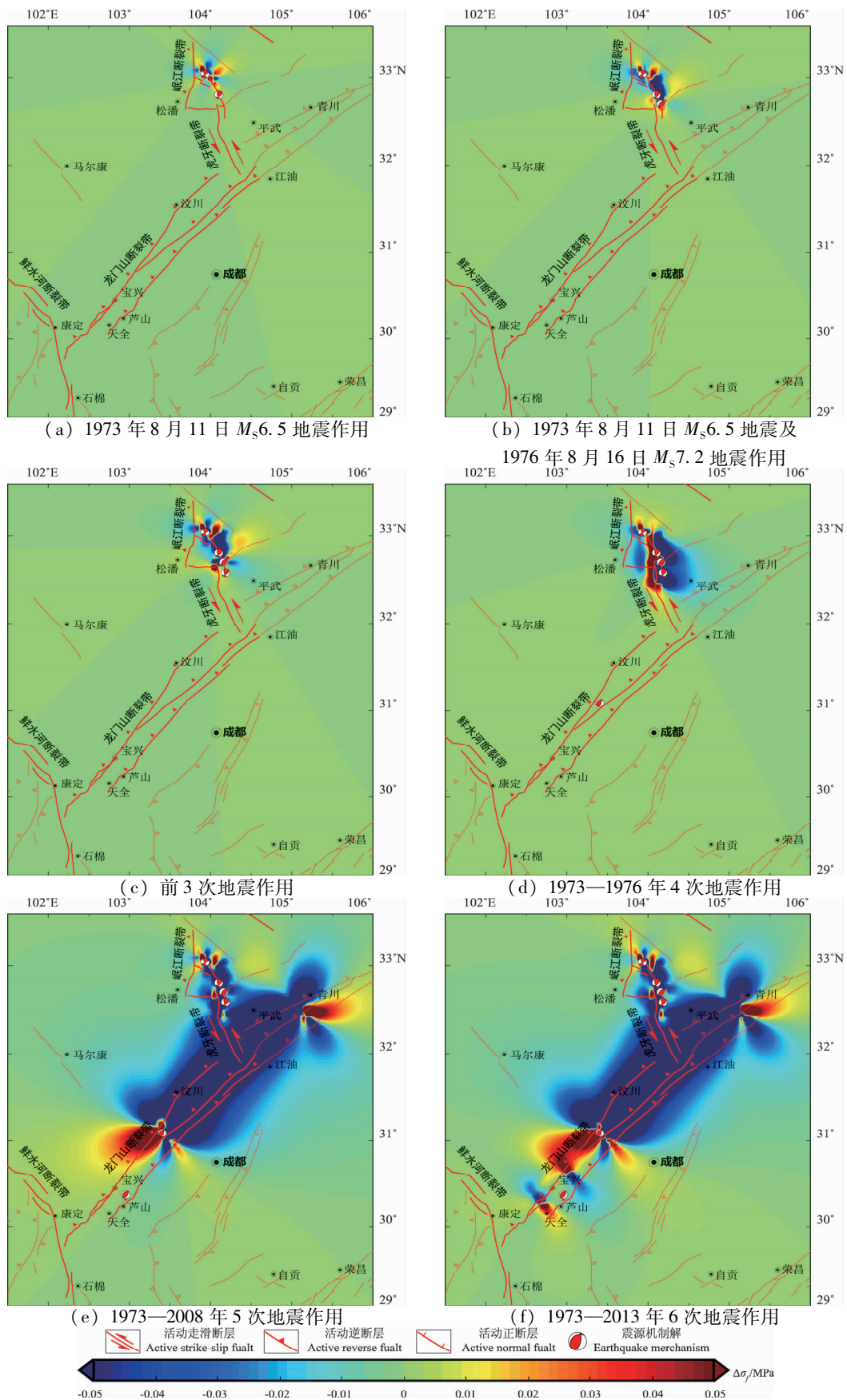


Fig. 2 Maps of Coulomb stress changes induced by major earthquakes in Bayan Har block's eastern boundary

应力状态,相继触发了汶川  $M_s8.0$  地震和芦山  $M_s7.0$  地震;这6次强震的发生也增加了巴颜喀拉块体南边界鲜水河断裂带南段的库仑破裂应力,一定程度上触发了2014年康定  $M_s6.3$  地震。

### 3.2 南边界库仑应力图像及分析

对于巴颜喀拉块体南边界区域,将研究区限定在( $99.5^\circ \sim 102.5^\circ \text{E}$ ,  $29^\circ \sim 33.5^\circ \text{N}$ )的矩形范围内。图3为南边界强震序列库仑破裂应力变化图像。

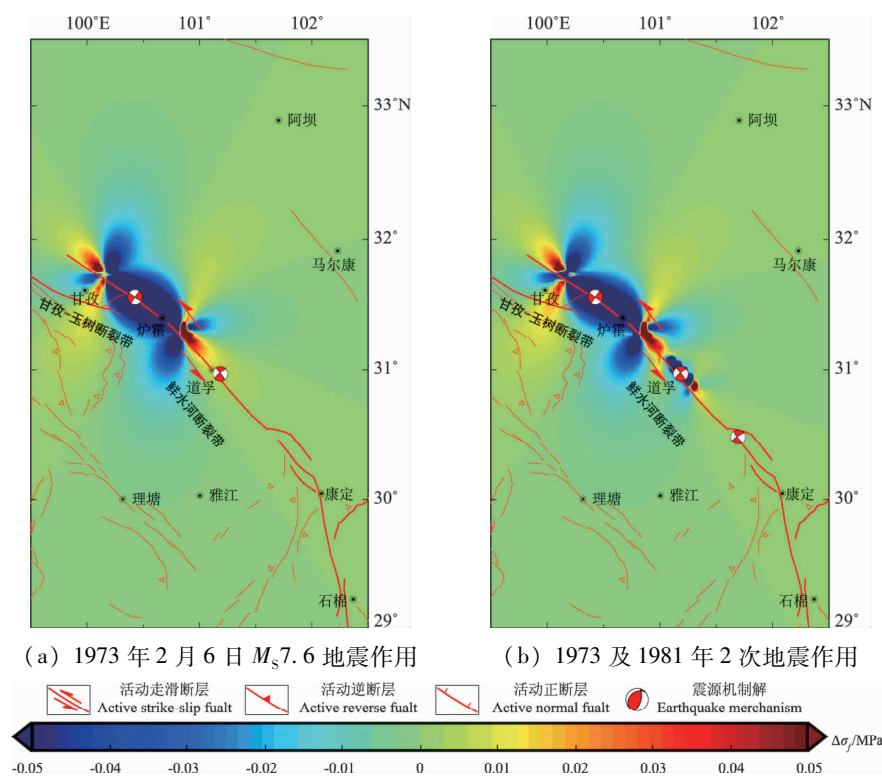


图3 巴颜喀拉块体南边界强震序列库仑破裂应力变化图像

Fig. 3 Maps of Coulomb stress changes induced by major earthquakes in Bayan Har block's southern boundary

图3a是以1973年2月6日炉霍  $M_s7.6$  地震为源地震,以1981年1月24日道孚  $M_s6.9$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化。结果显示鲜水河断裂带北西段的源断层两端均存在库仑破裂应力变化高值区,但北西端应力增长高值区终止于甘孜-玉树断裂带与鲜水河断裂带之间的左旋左阶拉分区,故未触发强震。而南东端库仑破裂应力增加区覆盖1981年道孚  $M_s6.9$  地震的发震断层位置。

图3b是前两次地震共同施加的、以2014年11月22日康定  $M_s6.3$  地震破裂段为接受断层的库仑应力变化图像,可以看出康定  $M_s6.3$  地震位于库仑破裂应力的远场触发区;图2f显示巴颜喀拉块体东边界发生的地震也对康定  $M_s6.3$  地震具有触发作用,因此认为巴颜喀拉块体东、南边界强震活动导致的库仑应力变化共同触发了康定  $M_s6.3$  地震。

图4为1973—2014年巴颜喀拉块体东—南边界9次地震共同产生的库仑应力变化图。计算结果表明:无论是以东边界还是以南边界作为接受断层,9次地震中有8次均发生在前面地震所加载的库仑破裂应力为正的近场区,而汶川  $M_s8.0$  地震的震中位置和发震断层则在前4次地震的正应力远场区,地震的触发一方面源于龙门山断裂带长期闭锁造成的应力积累,另一方面则源于1973—1976年松平震群4次地震后长达30余年的库仑应力加载。因此,我们认为地震的发生位置与积累库仑破裂应力有很强的相关关系。这与万永革等(2007)的计算结果和观点相一致。且9次地震发生之后,龙门山断裂带南段的汶川地震至芦山地震破裂段之间的空区,鲜水河断裂带南段的道孚地震至康定地震破裂段之间的空区以及鲜水河断裂、安宁河断裂带、龙门山断裂带交汇的三岔口地区均在库仑应力增加区的覆盖范围之内,根据

本研究前面得到认识和经验可以推测,上述3个位于库仑应力增加区内的区域或断层段存在触发强

震的可能,因此未来一段时间应特别关注这3个区段发生强震的危险性。

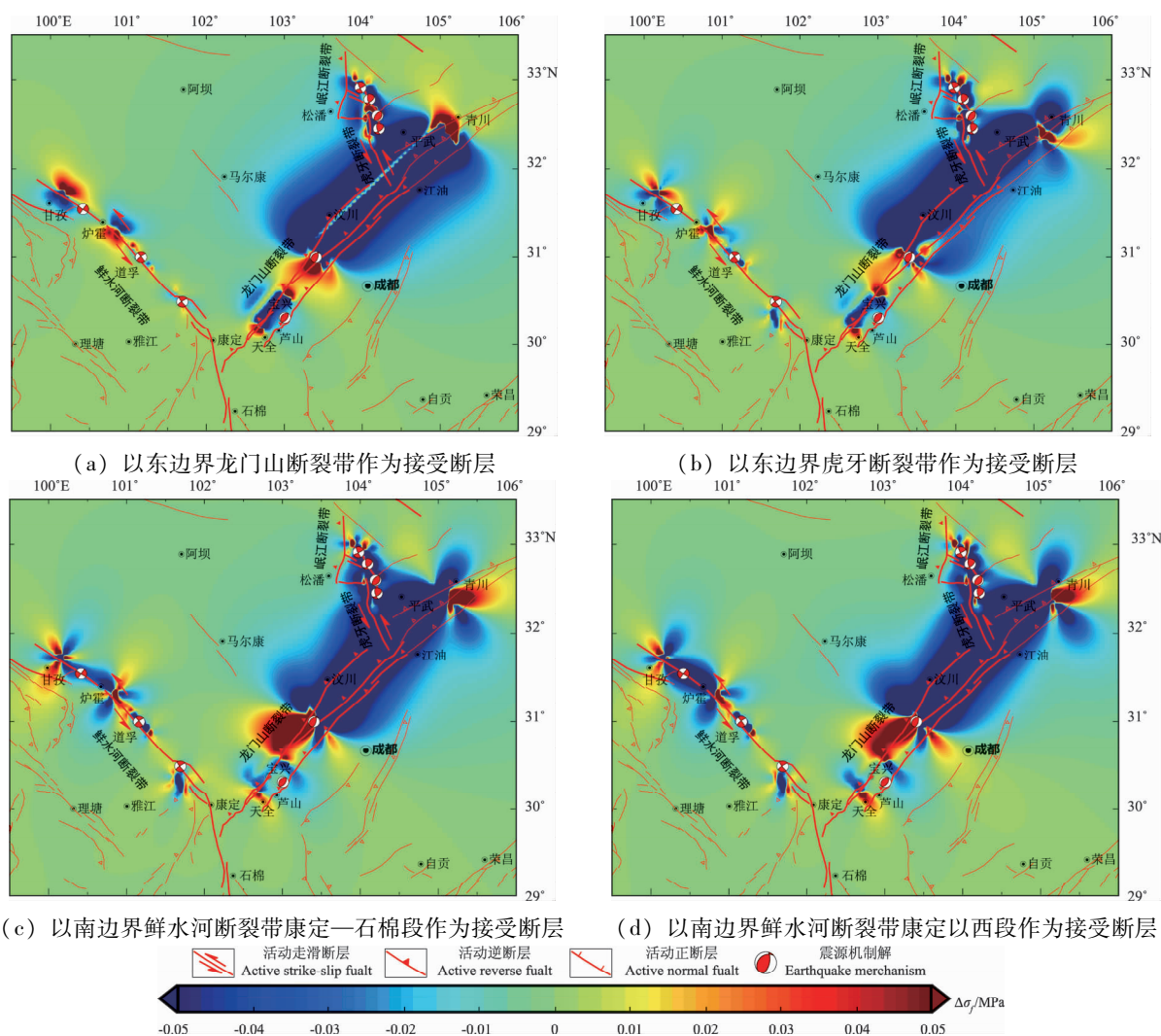


图4 1973年—2014年巴颜喀拉块体东—南边界9次强震序列库仑破裂应力变化图

Fig. 4 Maps of Coulomb stress changes induced by major earthquake sequence in Bayan Har block's eastern and southern boundaries

### 3.3 参数敏感性分析

由于库仑破裂应力变化的计算受各种参数的影响。因此,我们以南边界鲜水河断裂带康定以西段作为接受断层的库仑应力变化图像为例,分析和比较了不同有效摩擦系数、计算深度和泊松比对计算结果的影响,如图5~7所示。

图5是确定计算深度为10 km,泊松比0.25,分别选取有效摩擦系数为0.2、0.4、0.8的计算结果。从图中可以看出:有效摩擦系数主要改变源断层破裂面两侧及两端的库仑应力变化扇形区的面积和形态,随着有效摩擦系数的增大,源断层两端应力变化的扇形区面积也随之变大,对远

场作用也开始增强,而源断层两侧的应力变化区面积变小,对称性变差,对远场作用也越弱。

图6是确定有效摩擦系数为0.4,泊松比0.25,分别选取计算深度为5 km、10 km、15 km的计算结果。对比发现:不同深度的库仑应力变化不大,原因在于走滑型地震导致的库仑应力变化受深度影响较小,本次研究的地震序列除龙门山断裂带的汶川地震和芦山地震为纯逆冲性质外,其余地震均有走滑特性,特别是鲜水河断裂带上的3次地震以左旋走滑特性为主。因此结果显示除汶川地震和芦山地震的源断层两端扇形区面积有小的变化外,其余变化差距非常细微。



图7是确定有效摩擦系数为0.4, 计算深度10 km, 选取泊松比为0.1, 0.25和0.6计算结果。结果表明: 不同泊松比的取值对源断层两侧及两端的

库仑应力变化面积有一定影响, 对于应力变化区的形态影响不大, 泊松比越小, 库仑应力变化区面积越大, 应力随距离衰减的程度也越快。

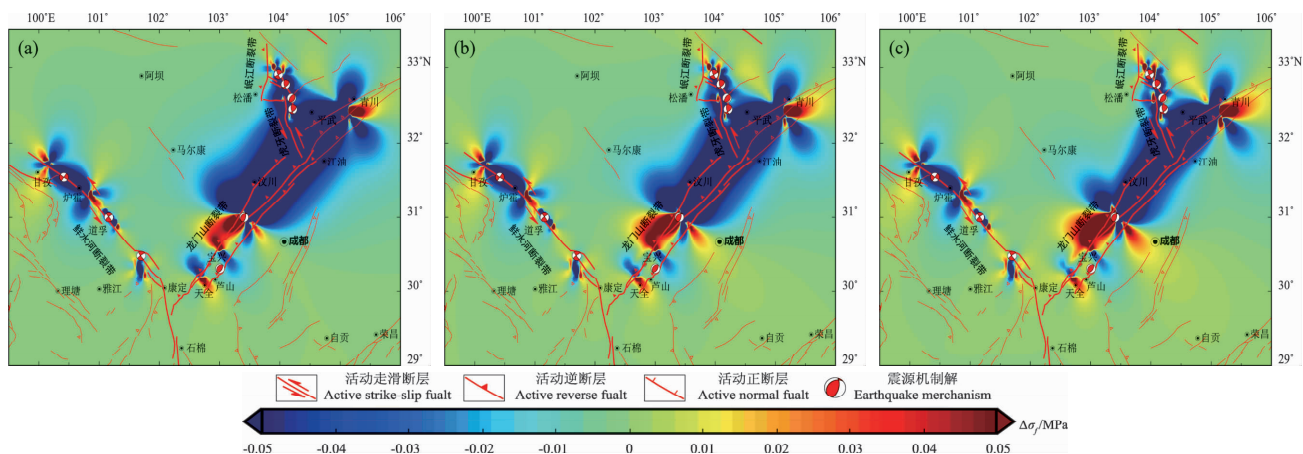


图5 有效摩擦系数 $\mu'$ 为0.2 (a)、0.4 (b)、0.8 (c) 对库仑应力变化的影响

Fig. 5 The Coulomb stress changes based on different effective coefficient of friction of 0.2 (a), 0.4 (b) and 0.8 (c)

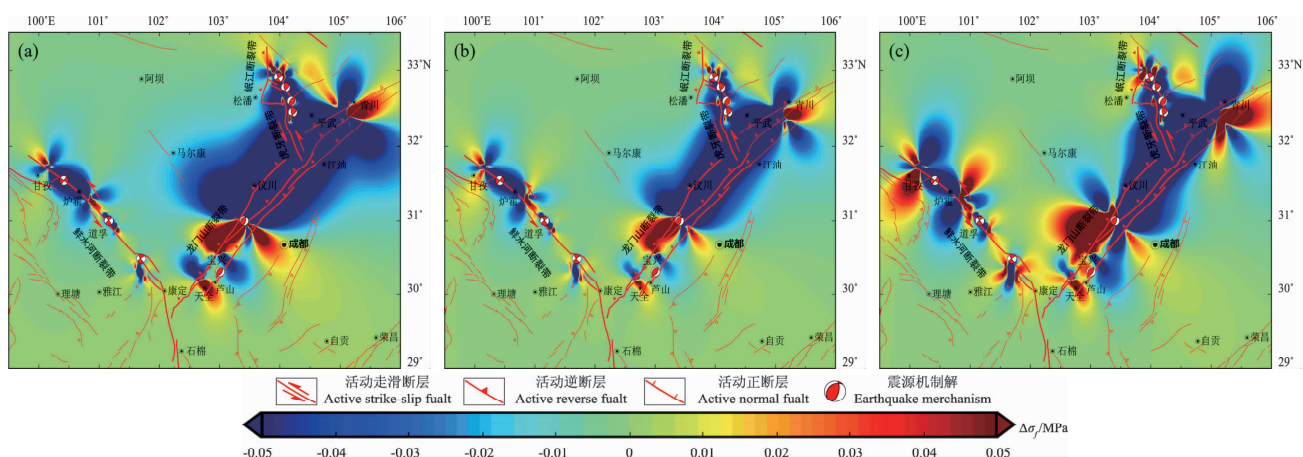


图6 计算深度为5 km (a)、10 km (b)、15 km (c) 对同震库仑应力变化的影响

Fig. 6 The Coulomb stress changes based on different calculated depth of 5 km (a), 10 km (b) and 15 km (c)

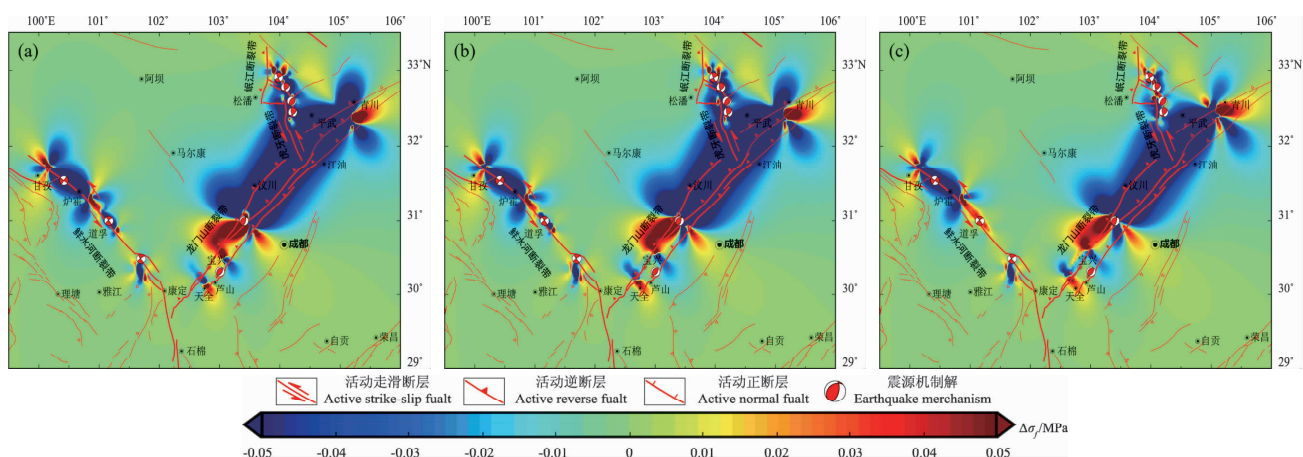


图7 泊松比为0.1 (a)、0.25 (b)、0.6 (c) 对同震库仑应力变化的影响

Fig. 7 The Coulomb stress changes based on different Poisson ratio of 0.1 (a), 0.25 (b) and 0.6 (c)



## 4 结论与讨论

巴颜喀拉块体是我国现今地震活动最强烈的地区之一,本文利用静态库仑应力变化的理论及方法,计算和分析了1973年以来巴颜喀拉块体东-南边界 $M_s \geq 6.3$ 地震序列引起的同震库仑应力变化与强震触发过程。结果显示:巴颜喀拉块体东边界的虎牙断裂带1973—1976年发生的4次强震存在着显著的应力触发关系,即1973年8月11日的黄龙 $M_s 6.5$ 地震对1976年松潘震群的发震断层施加了正的库仑应力,促使虎牙断裂带中-南段断层达到失稳状态,从而相继触发了1976年8月16日、8月22日和8月23日的 $M_s 7.2$ ,  $M_s 6.7$ 和 $M_s 7.2$ 地震,同时改变了龙门山中南段及周围区域的应力状态,又相继触发了汶川 $M_s 8.0$ 地震和芦山 $M_s 7.0$ 地震;南边界的鲜水河断裂带1973年以来发生的3次强震同样存在应力触发关系,其中2014年康定 $M_s 6.3$ 地震是巴颜喀拉块体东、南边界强震活动导致的库仑应力变化共同触发的结果;由此,本文从应力触发的角度解释了强震沿巴颜喀拉块体边界断裂带由北向南、由西向东有序发生的现象。

1973—2014年发生在巴颜喀拉块体东-南边界的9次地震共同产生的库仑应力变化图像显示,无论是以东边界还是以南边界作为接受断层,龙门山断裂带南段的汶川地震至芦山地震破裂段之间的空区,鲜水河断裂带南段的道孚地震至康定地震破裂段之间的空区以及鲜水河断裂带、安宁河断裂带、龙门山断裂带交汇的三岔口地区均在库仑应力增加区的覆盖范围之内,未来一段时间应特别关注这3个区段发生强震的危险性。

从本文叙述的事实还可以推断,巴颜喀拉块体东-南边界强震序列释放的能量来自巴颜喀拉块体整体朝S-SE方向运动,在强震相对平静时段在块体东、南边界积蓄的大量应变能;一次强震发生之后将导致相邻断层库仑应力明显增强,有可能触发下一次强震,形成强震活跃时段。强震引起的库仑应力增强是一个触发因素,它是否会触发地震、以及发震时间和震级大小,也取决于断层的构造应力积累情况。

## 参考文献:

- 成尔林,林邦慧,庞明虎,等.1983.1981年1月24日道孚6.9级地震的震源参数[J].地球物理学报,26(2):140-148.
- 成尔林.1981.四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征[J].地震学报,3(3):231-241.
- 单斌,熊熊,郑勇,等.2013.2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J].中国科学:地球科学,39(6):1002-1009.
- 解朝娣,雷兴林,吴小平,等.2014. $M_s 8.0$ 汶川地震对 $M_s 7.0$ 芦山地震成核失稳的影响[J].地球物理学报,40(6):1825-1835.
- 刘成利,郑勇,葛粲,等.2013.2013年芦山7.0级地震的动态破裂过程[J].中国科学:地球科学,43(6):1020-1026.
- 沈正康,万永革,甘卫军,等.2003.东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究[J].地球物理学报,46(6):786-795.
- 盛书中,万永革,蒋长胜,等.2015.2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 强震对中国大陆静态应力触发影响的初探[J].地球物理学报,58(5):1834-1842.
- 万永革,沈正康,曾跃华,等.2007.青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响[J].地震学报,29(2):115-129.
- 万永革,盛书中,李祥,等.2015.2015年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响[J].地球物理学报,58(11):4277-4286.
- 王卫民,赵连锋,李娟,等.2008.四川汶川8.0级地震震源过程[J].地球物理学报,51(5):1403-1410.
- 闻学泽,杜方,张培震,等.2011.巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与中国2008年汶川地震[J].地球物理学报,54(3):706-716.
- 闻学泽.1995.活动断裂地震潜势的定量评估[M].北京:地震出版社,150-152.
- 吴小平,虎雄林,MICHEL B,等.2007.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[J].中国科学:地球科学,37(6):746-752.
- 徐晶,邵志刚,马宏生,等.2013.鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系[J].地球物理学报,56(4):1146-1158.
- 易桂喜,龙锋,闻学泽,等.2015.2014年11月22日康定 $M_6.3$ 级地震序列发震构造分析[J].地球物理学报,58(4):1205-1219.
- 张培震,邓起东,张国民,等.2003.中国大陆的强震活动与活动地块[J].中国科学:地球科学,33(增刊1):12-20.
- 朱航,闻学泽.2009.1973~1976年四川松潘强震序列的应力触发过程[J].地球物理学报,52(4):994-1003.
- 朱航,闻学泽.2012.小江-则木河断裂带大地震序列的静应力触发作用[J].地球科学(中国地质大学学报),37(1):199-206.
- DENG J, SYKES L R. 1997. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 102(B5):9859-9886.
- JONES L M, HAN W, ZHANG Y, et al. 1984. Focal mechanism and after-shock locations of the Songpan earthquake of August 1976 in Sichuan China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 89(NB9):7697-7708.
- KING G C P, STEIN R S, LIN J. 1994. Static stress changes and the trig-

- gering of earthquakes [J]. Bull Seismol Soc Amer, 84 (3): 935 – 953.
- NALBANT S S, HUBERT A, KING G C P. 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 103 (B10): 24469 – 24486.
- OKADA Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile fault in a half space [J]. Bull Seismol Soc Amer, 92 (2): 1018 – 1040.
- PAPADIMITRIOU E, WEN X, KARAKOSTAS V, *et al.* 2004. Earthquake Triggering along the Xianshuihe Fault Zone of Western Sichuan, China [J]. Pure & Applied Geophysics, 161 (8): 1683 – 1707.
- SCHOLZ C H. 1990. Earthquakes. Book Reviews: The Mechanics of Earthquakes and Faulting [J]. Science, (250): 1758 – 1759.
- SMITH S W, WILLIAM V D L. 1969. Strain adjustments associated with earthquakes in Southern California [J]. Bull Seismol Soc Amer, 59 (4): 1569 – 1589.
- STEIN R S, BARKA A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering [J]. Geophysical Journal International, 128 (3): 594 – 604.
- STEIN R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. Nature, 402 (6762): 605 – 609.

## Coulomb Stress Triggering Process of Major Earthquake Sequence in the Eastern and Southern Boundaries of the Bayan Har Block

QU Yong, ZHU Hang

(Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China)

### Abstract

In this paper, we calculate and map the patterns of Coulomb static stress changes induced by a major earthquake sequence of 9  $M_s \geq 6.3$  events in the eastern and southern boundary fault zones of the Bayan Har block from 1973 to 2014, and analyze the effects of stress triggering induced by the preceding events to the following events. The results show that, firstly, there is a significant stress triggering relationship in the 4 major earthquakes occurred on Huya fault zone in the eastern boundary of the Bayan Har block from 1973 to 1976, besides, it changed the stress state of the middle – south segment of Longmenshan fault zone as well as surrounding areas, and triggered Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake and Lushan  $M_s 7.0$  earthquake one after another; Secondly, there is also coulomb stress triggering relationship existed in the 3 major earthquakes occurred on Xianshuihe fault zone in the southern boundary of Bayan Har block since 1973, and 2014 Kangding  $M_s 6.3$  earthquake is a common triggering result of coulomb stress change induced by strong earthquake activities in both Bayan Har block's eastern and southern boundaries; Thirdly, the patterns of coulomb stress change caused by the 9 earthquake in the sequence show that, the seismic gap between Wenchuan earthquake and Lushan earthquake in south segment of Longmenshan fault zone, the seismic gap between Daofu earthquake and Kangding earthquake in Xianshuihe fault zone, and the junction region of Xianshuihe – Anninghe – Longmenshan fault zones are all in the increased zone of Coulomb stress changes, thus their future earthquake risks are worth concern.

**Keywords:** Bayan Har block; coulomb stress change; static stress triggering; major earthquake sequence