

刘方斌、袁道阳、王爱国等, 2015, 滇西南地区双震序列应力触发及地震活动性研究, 中国地震, 31(3), 472~480。

· 研究论文 ·

## 滇西南地区双震序列应力触发 及地震活动性研究

刘方斌<sup>1,2)</sup> 袁道阳<sup>1,3)</sup> 王爱国<sup>1,3)</sup> 庞炜<sup>1)</sup>

1) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州市城关区东岗西路 450 号 730000

2) 山东省地震局, 济南市历下区文化东路 20 号 250014

3) 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 兰州 730000

**摘要** 利用弹性半空间模型和岩石圈介质波速模型, 计算了 1976 年龙陵 7.3、7.4 级地震和 1988 年澜沧-耿马 7.6、7.2 级地震 2 次双震间及对后续地震的应力变化影响, 同时对该区未来地震活动性进行了研究。得到以下结论: ①龙陵双震属共轭型双震活动, 前一次地震的发生对后一次地震有抑制作用; 而澜沧-耿马地震则属于牵动型双震活动, 澜沧 7.6 级地震对其后的耿马 7.2 级地震有一定的触发作用, 其库仑应力变化值为 0.35bar; ②绝大多数后续余震受到了主震的应力触发作用, 其中龙陵双震触发效果较明显; ③根据震后粘弹性松弛应力场变化得出, 现阶段 NW 向的腾冲-龙陵、永德-勐省以及澜沧东南地区, NE 向的瑞丽、镇安、大理、上允、永平等地区地震危险性有所增强, 这与该区地震活动性增强相吻合。

**关键词:** 滇西南地区 龙陵地震 澜沧-耿马地震 应力触发 地震活动性

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0472-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

地震是在一定构造应力作用下断层相对运动的结果, 断层的运动方式与所受构造应力作用有关(庄培仁等, 1996)。一次大地震的同震位错会使周围断裂或邻近区域的应力状态发生改变, 从而引起库仑应力变化(解朝娣等, 2010)。近年来, 地震产生的库仑应力变化与后续地震发生的时空关系引起了国内外地震学家的广泛关注(Harris, 1998; Stein, 1999; Steacy et al, 2005; Gomberg et al, 2008)。研究表明, 很小的库仑应力变化(阈值为 0.1bar)就可能触发地震(Harris, 1998; Stein, 1999), 导致区域未来的地震活动发生改变。因此, 探索库仑应力变化与地震触发的关系, 对研究地震中长期预测和静态应力变化是否触发了后续地

[收稿日期] 2014-06-22; [修定日期] 2014-08-13

[项目类别] 公益性行业科研专项《中国地震活断层探测-南北地震带中南段》(201108001)资助

[作者简介] 刘方斌, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事地球动力学及活动构造学研究。

E-mail: liufangbin8908@163.com

袁道阳, 通讯作者。E-mail: yuandaoyang@163.com

震事件具有重要意义,同时,从动力学机制上也为未来区域地震危险性分析提供了新途径。

滇西南地区地处青藏块体东南缘,东与川滇菱形块体相接,西北与印度板块的东北触角相邻,是我国大陆构造活动强烈且强震频发的地区之一。该区主要分布着 NW 向、NE 向和近 SN 向 3 组活动断裂带(图 1)。龙陵-澜沧新生地震断裂带(F4)就是该区的一条重要的强震频发带,地震活动具有频度高、强度大、周期短的特征(虢顺民等,2002)。自 1521 年至今就发生过 20 多次 6 级以上地震,其中 7 级以上地震 6 次。同一地区在同一年甚至同一天连续发生 2 次强烈地震是滇西南强震活动的一个显著特点(周瑞琦等,1998),以 1976 年 5 月 29 日发生的龙陵 7.3、7.4 级地震和 1988 年 11 月 6 日的澜沧-耿马 7.6、7.2 级地震最为典型。上述 2 次双震型地震均发生在同一天,且发震时间间隔较短,那么前后 2 次强震之间是否存在触发关系? 2 次双震的触发类型是否相同? 它们与后续中强余震活动是否存在应力变化上的关系? 该区的地震活动性又怎样? 澜沧-耿马地震距今已有 27 年,震后的粘弹性松弛效应将进一步改变周边断层上的应力状态,深入分析龙陵-澜沧新生地震断裂带及其周边主要活动断层上的应力积累对于认识和理解滇西南地区的强震活动和判定未来的地震危险性等具有重要意义。

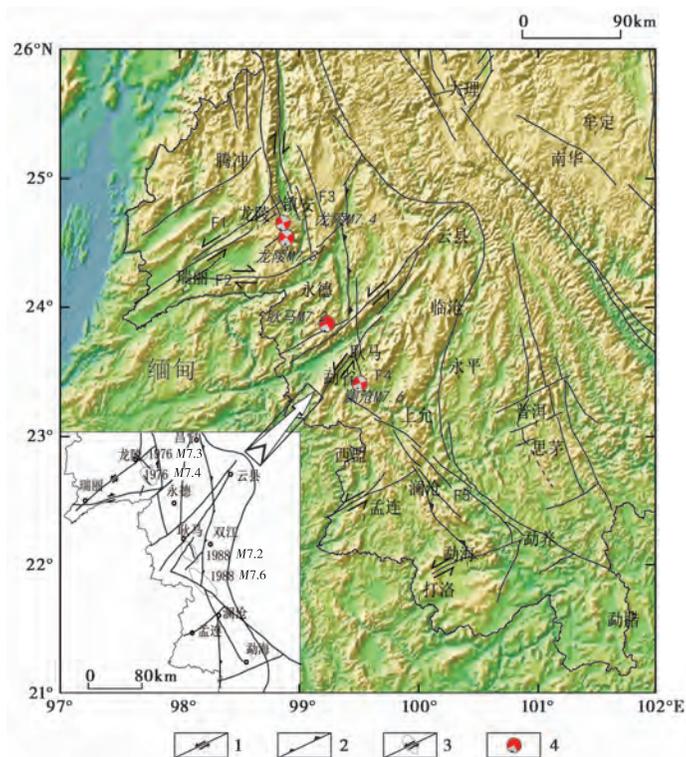


图 1 滇西南地区主要活动断裂分布

1. 走滑断层;2. 逆断层;3. 地震破裂区;4. 震源机制;F1 龙陵-瑞丽断裂;F2 畹町断裂;F3 怒江断裂;F4 龙陵-澜沧断裂;F5 黑河断裂

本文利用弹性半空间模型和岩石圈介质波速模型,计算了滇西南地区 2 次双震之间及对后续地震的应力变化,同时对该区未来的地震活动性也进行了研究,进一步明确了 2 次双

震导致的周边断层的应力状态变化,为圈定未来地震危险区和探究地震相互作用提供了有力证据。

## 1 库仑应力变化计算模型

越来越多的研究表明,大地震后地壳变形过程中岩石圈的粘弹性引起的应力变化不可忽视,粘弹性的影响可以达到同震静态响应的同等量级(Johnson et al, 2007; 雷兴林等, 2013)。因此,本文用静态和粘弹性库仑应力模型计算模拟研究区的应力变化。

### 1.1 岩石圈介质波速模型

本研究中岩石圈介质波速模型的相关参数由 crust2.0 确定(图 2)。如图 2 所示,分层模型各层的厚度以及  $v_p$  和  $v_s$  更加准确地确定了库仑应力变化。由于龙陵双震和澜沧-耿马双震的 2 次主震时间间隔较短,因此采用弹性半空间模型进行计算比较合理,上述 4 次地震分别距今 27、39 年,对于现阶段的应力变化,笔者则采用 Maxwell 粘弹性体模拟下地壳和上地幔的粘弹性松弛效应,计算其对研究区周边地区的库仑应力调整。

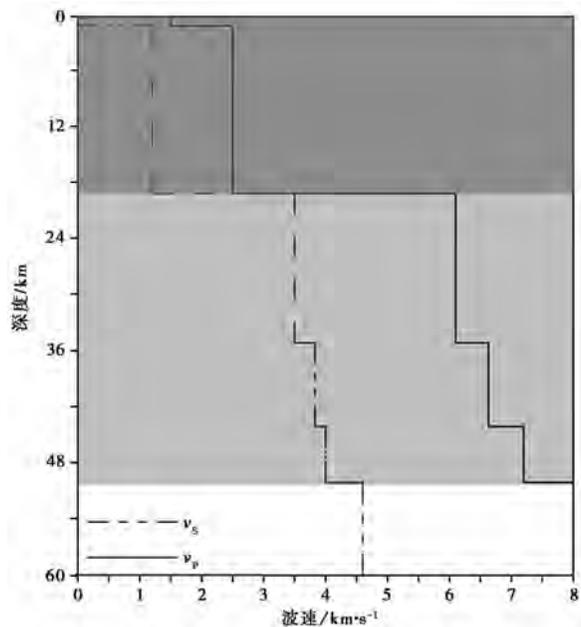


图 2 研究区岩石圈介质波速模型

### 1.2 库仑应力变化定义

根据库仑破裂准则,当断层面上剪应力达到抗剪强度时,岩石将会产生破裂。因此定义库仑应力变化为

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

其中,  $\Delta\tau$  为破裂面上的剪应力变化;  $\mu'$  为内摩擦系数;  $\Delta\sigma$  为正应力变化(张开为正,压缩为负);  $\Delta CFS > 0$  和  $\Delta CFS < 0$  分别表示断面上被加载(应力加大)或被卸载(应力松弛)。本文借鉴前人(Stein et al, 1992; King et al, 1994; 万永革等, 2000; Troise et al, 1998; Astiz et al, 2000)的计算取值,将内摩擦系数定为 0.4。应变场张量可以通过断层位错和格林函数求得。

对于弹性半空间模型,格林函数可以用 Okada(1992)的解析解,但对于岩石圈介质波速模型,笔者则通过 PSGRN 程序得出(Wang et al,2006)。

### 1.3 地震位错模型

基于均匀各向同性的弹性半空间模型和岩石圈介质波速模型,在计算库仑应力变化过程中都必须输入源断层和接收断层的几何特征参数(断层走向、倾角、滑动角)和发震断层的同震位错量(走滑和倾滑分量)。由于不同震源机制的参数选取对应力变化的影响存在差异(王莹,2011),本文主要采用 CMT 和张之立等(1992)所提供的震源机制参数(表 1)。

表 1 龙陵地震和澜沧-耿马地震破裂参数

发震时间 /年-月-日	震级 $M_s$	震中位置/(°)		深度 /km	断层产状/(°)			断层规模/km		位错/m		资料来源
		N	E		走向	倾角	滑动角	长度	宽度	水平	垂直	
1976-05-29	7.3	24.37	98.63	24	323	80	-172	26.2	20	0.79	-0.11	CMT
	7.4	24.55	98.75	20	242	88	0	56.7	20	-0.26	0.00	CMT
1988-11-06	7.6	22.92	99.79	15	333	78	174	35.0	5	1.09	0.11	CMT
	7.2	23.38	99.60	15	331	75	170	24.0	4	0.96	0.50	张之立等,1992

注:水平位错右旋为正,垂直位错逆断层为正;位错为断层面的错动

## 2 龙陵地震和澜沧-耿马地震静态应力触发对比

### 2.1 龙陵地震

龙陵地震区位于龙陵-瑞丽断裂(F1)、畹町断裂(F2)和怒江断裂(F3)所围限的三角地块内(图 1)(周瑞琦等,1998),发震断裂为龙陵-澜沧断裂带(F4)的龙陵-永德段(虢顺民等,2002)。该地震是典型的双震型强震,主震发生前伴有 2 次中强地震,余震丰富,但其分布区并未呼应 2 个大震节面走向相近的优势方向。2 次地震只是造成了几组走向不同的裂缝带,而没有明确的地表破裂(周蕙兰等,1984),每个地震都有长轴方位相互垂直的 2 个极震区。如此强的地震为何没有产生明确的地表破裂? 2 次强震的震中距离极近,那它们是否存在一定的应力触发关系?

由于前人(马宗晋等,1980;王绍晋等,1979)对其震源机制看法不同,而震源机制参数的选取直接影响到库仑应力变化的分布,其中影响最大的是滑动角,其次为倾角和走向(王莹,2011),本文采用 CMT 提供的参数进行计算。图 3(a)给出了龙陵 7.3 级地震库仑应力变化对后续 7.4 级地震的影响,研究区内的主要活动断裂(蓝色线)也呈现图中。图 3(a)显示,7.4 级地震震中位于 7.3 级地震应力影区,对其发生有减缓作用。而事实上,7.3 级地震发生后 1.5 小时该强震随即发生,且震级比主震要大。假设没有先前的地震,后续的地震震级可能更大,发震时间也可能更早。前次地震的发生可能延缓了后面地震的发生时间并降低了震级,这可能是同一断裂上 2 个不同点源先后发生破裂所导致,属于共轭性强震(周瑞琦等,1998)。

为了更好地研究龙陵双震的库仑应力变化对余震的影响,笔者将 2 次主震产生的库仑应力变化进行叠加,结果如图 3(b)所示。图 3(b)显示,龙陵双震的库仑应力变化使得绝大多数后续中强余震位于应力增加区内,即龙陵双震对后续地震的发生具有一定的触发作用。

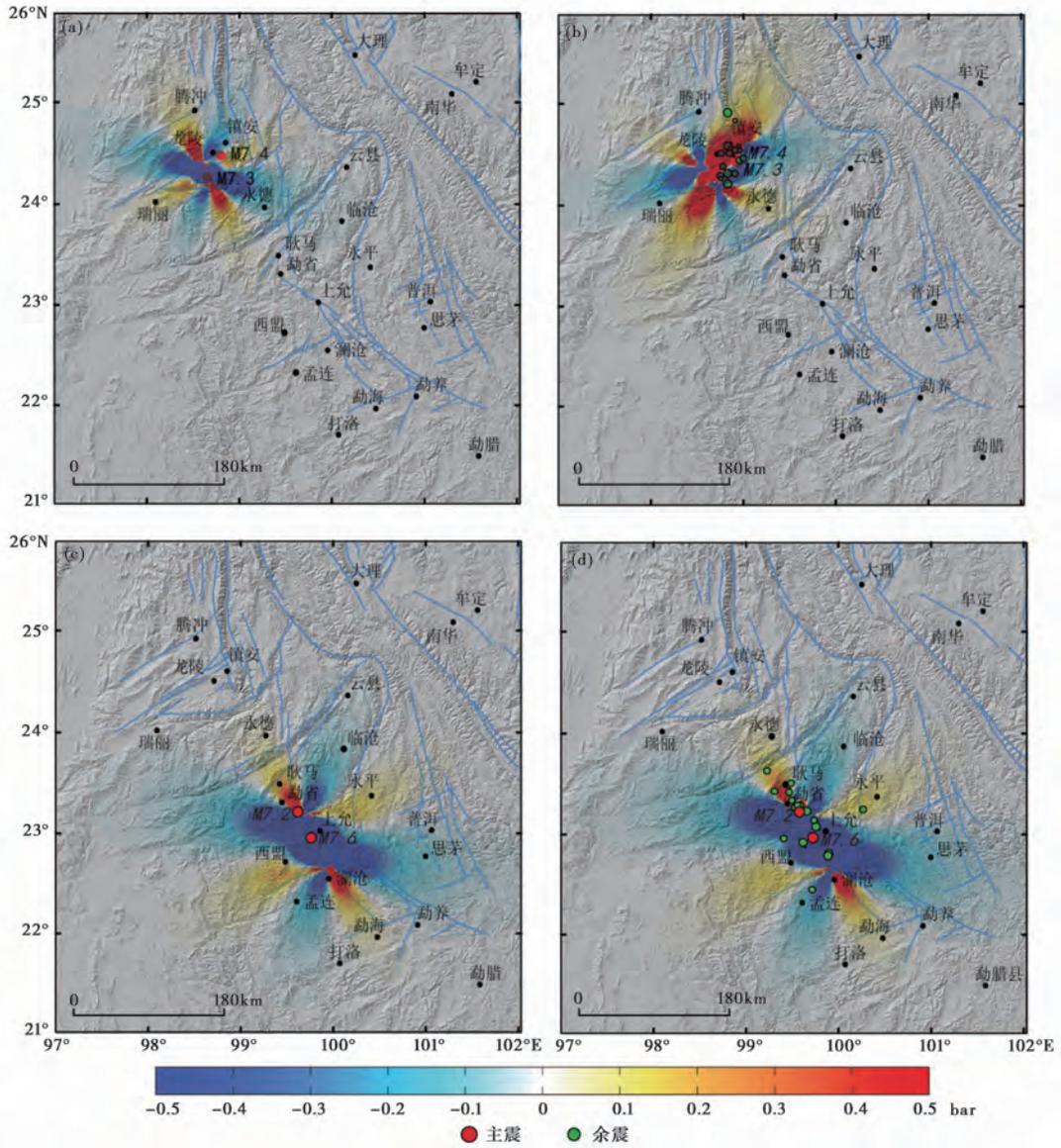


图3 静态库仑应力变化

(a) 龙陵 M7.3 地震库仑应力变化对 M7.4 地震的影响; (b) 龙陵双震库仑应力变化对中强余震的影响; (c) 澜沧 M7.6 地震库仑应力变化对耿马 M7.2 地震的影响; (d) 澜沧-耿马双震对中强余震的库仑应力变化影响

### 2.2 澜沧-耿马地震

1988年11月6日在云南澜沧地区发生了7.6级地震(澜沧地震),13min后发生了耿马7.2级地震(耿马地震),主震后1个月内共发生 $M_s$ 5.0~6.9强余震12次。

澜沧-耿马地震发生在滇西南构造区内的龙陵-澜沧断裂带的汗母坝-澜沧段。根据前人的研究结果(周瑞琦等,1990;俞维贤等,1991a、1991b、1994;王辉等,1991),澜沧断裂(F4)和黑河断裂(F5)的共同作用导致了1988年澜沧地震的发生,并形成了长约35km的地震地表破裂带,而耿马地震的发震断裂为汉母坝断裂(F4次级断裂),形成的地震地表破裂带长约24km。

图 3(c)给出了澜沧地震对耿马地震震源区施加的库仑应力分布,计算可得,耿马地震位于库仑应力变化的增加区,其库仑应力变化值为 0.35bar,说明澜沧地震对耿马地震有触发作用。与龙陵双震不同的是澜沧-耿马地震属于牵动型双震,即 1 次地震发生后,发震构造牵动其他相关构造活动而发生地震(周瑞琦等,1998)。这种地震的特点是发震断层具有足够的能量积累(或应力集中),破坏程度高。同样,笔者对 2 次主震采用叠加的方式对余震产生的库仑应力变化进行了计算(图 3(d)),结果显示,17 次余震中有 10 次位于应力增加区,触发率达 60%,触发效果明显不如龙陵地震。

综上所述,在澜沧-耿马地震中,澜沧地震对耿马地震的应力触发作用是明显的,这与活动断裂的研究结果是一致的(周瑞琦等,1998);绝大多数后续余震受到了主震的应力触发作用,其中龙陵双震触发效果较明显。表明龙陵地震和澜沧-耿马双震活动机制是有差异的。

### 3 研究区地震活动性分析

#### 3.1 粘弹性库仑应力调整

虽然利用弹性半空间模型可以有效地计算较短时间内的库仑应力变化,但在震后的更长时间(数十年~上百年)内,有许多影响震后应力变化的因素,如震后余滑、孔隙效应和粘性松弛等。其中震后介质的粘性松弛效应对震后应力有重大影响(孙玉军等,2013)。上述

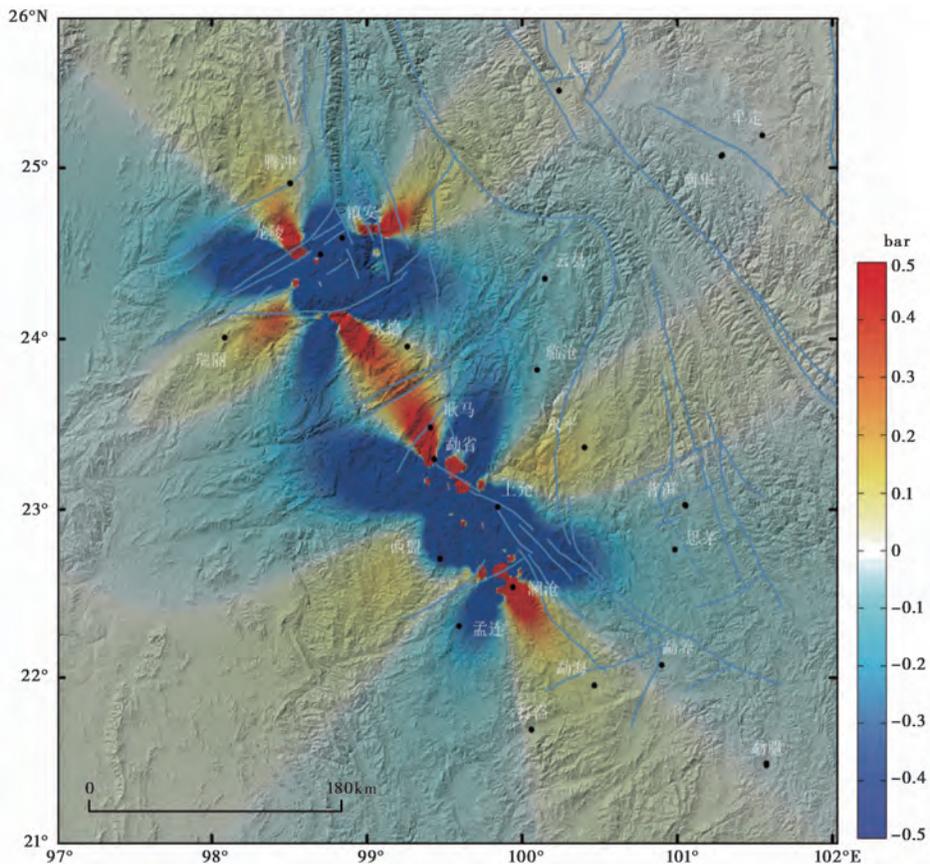


图 4 研究区粘弹性库仑应力场

4次地震分别距今27、39年,因此采用粘弹性岩石圈模型更合理。本文根据图2给出的岩石圈介质波速模型以及表1给出的震源参数模拟下地壳和上地幔的粘弹性松弛效应,计算了研究区内的库仑应力变化(图4)。结果显示,澜沧-耿马地震后近30年的粘弹性松弛应力变化呈双X型展布,其中,NW向的腾冲-龙陵、永德-勐省以及澜沧的东南地区,NE向的瑞丽、镇安、大理、上允、永平等地的库仑应力增加,潜在地震活动性有所增强。

### 3.2 研究区地震活动性

图5为研究区内1970年以来的地震活动性空间分布,图5(a)、(b)、(c)分别给出了 $M \geq 7.0$ 、 $M \geq 5.0$ 、 $M \geq 3.0$ 地震震中分布。如图所示, $M \geq 7.0$ 地震主要集中分布在龙陵、上允、大理等地,呈3地独立状态; $M \geq 5.0$ 地震主要是在 $M \geq 7.0$ 地震分布的基础上类似同心圆式的向外呈辐射状分布,但是3个地区仍呈独立状态;而 $M \geq 3.0$ 地震继续向外辐射使得3地区连成一片。总之,地震分布情况与图4计算的库仑应力增强区相对应,表明库仑应力变化对地震活动的影响。

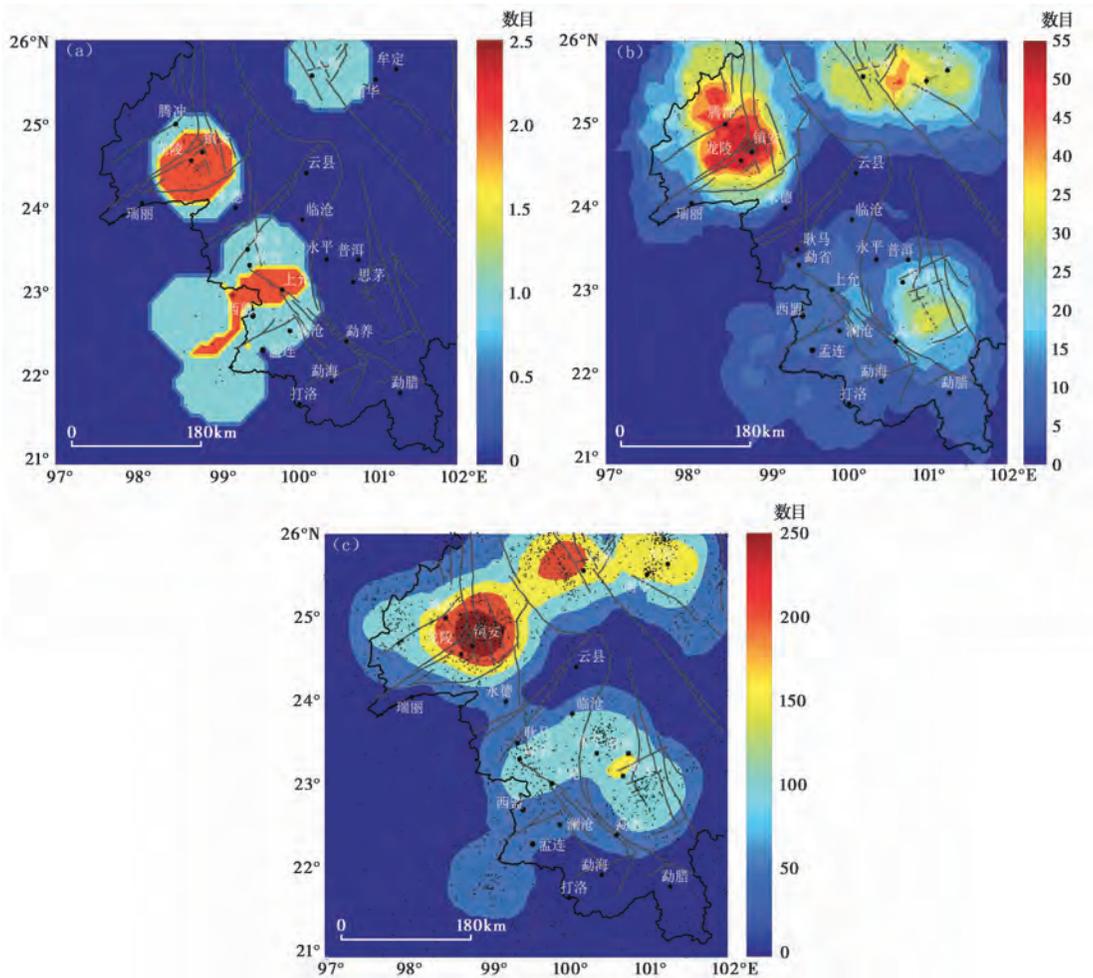


图5 地震活动区域分布  
(a)  $M \geq 7.0$ ; (b)  $M \geq 5.0$ ; (c)  $M \geq 3.0$

## 4 结论与讨论

本文基于均匀各向同性的弹性半空间模型和岩石圈介质波速模型,建立了龙陵地震和澜沧-耿马地震的库仑应力变化模型,一方面分析了双震之间及其对后续地震的静态应力触发作用,另一方面也给出了震后约 30 年的粘弹性库仑应力变化以及地震活动区的分布。所得结论如下:

(1) 龙陵双震和澜沧-耿马双震活动机制存在差异。龙陵双震是同一断裂上 2 个不同的点源先后发生破裂导致,龙陵 7.3 级地震的发生减缓了 7.4 级地震的发生,同时降低了发震震级,属于共轭型双震;相反,澜沧地震对随后的耿马地震有一定的触发作用,致使耿马地震提前发生,属于牵动型双震。

(2) 绝大多数后续余震受到了主震的应力触发作用,其中龙陵双震触发效果较明显。

(3) 根据震后粘弹性松弛应力场变化得出现阶段 NW 向的腾冲-龙陵、永德-勐省以及澜沧以东南地区,NE 向的瑞丽、镇安、大理、上允、永平等地库仑应力变化呈增加趋势,也说明地震危险性有所增强,这与地震活动性增强相吻合。

致谢:感谢匿名审稿专家对本文修改提出的宝贵意见。

## 参考文献

- 虢顺民、徐锡伟、向宏发等,2002,龙陵-澜沧新生断裂带地震破裂分段与地震预测研究,地震地质,24(2),133~144。
- 雷兴林、马胜利、苏金荣等,2013,汶川地震后中下地壳及上地幔的粘弹性效应引起的应力变化与芦山地震的发生机制,地震地质,35(2),411~422。
- 马宗晋、杨懋源,1980,中国近年 9 次强震的构造分类,西北地震学报,2(1),6~17。
- 孙玉军、董树文、范桃园等,2013,从同震和震后形变分析日本东北  $M_w$  9.0 大地震对近场地震活动性的影响,地球物理学进展,28(3),1131~1139。
- 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。
- 王辉、强祖基、袁著忠等,1991,1988 年云南澜沧-耿马的烈度分布及地表破裂,地震学报,13(3),344~353。
- 王绍晋、阚荣举、刘祖荫,1979,龙陵地震序列的空间特征,地震研究,2,21~33。
- 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,硕士学位论文,昆明:云南大学。
- 解朝娣、朱元清、雷兴林等,2010,  $M_s$  8.0 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,中国科学: D 辑,40(6),688~698。
- 俞维贤、柴天俊、侯学英,1991a,澜沧 7.6 级地震形变带,地震地质,13(4),343~352。
- 俞维贤、侯学英、周瑞琦等,1991b,澜沧-耿马地震的地表破裂特征,地震研究,14(3),203~214。
- 俞维贤、周瑞琦、侯学英等,1994,澜沧-耿马地震的成因机制,地震学报,16(2),160~166。
- 张之立、王华强,1992,澜沧-耿马地震序列的非均匀断裂系破裂模式及弹塑性断裂计算方法,地震学报,14(4),463~471。
- 周蕙兰、Kanamori H、Allen C R,1984,复杂大地震分析和龙陵地震震源过程,地球物理学报,27(6),523~536。
- 周瑞琦、俞维贤、谷一山等,1990,云南耿马 7.2 级地震地表破裂带研究,地震地质,12(4),291~301。
- 周瑞琦、虢顺民,1998,龙陵-澜沧断裂带双震型强震活动破裂模型讨论,地震地质,20(3),261~267。
- 庄培仁、常志忠,1996,断裂构造研究,北京:地震出版社。
- Astiz L, Shearer P M, Agnew D, 2000, Precise relocations and stress change calculations for the upland earthquake sequence in southern California, J Geophys Res, 105, 2937~2953。
- Gomberg J, Felzer K, 2008, A model of earthquake triggering probabilities and application to dynamic deformations constrained by ground motion observations, J Geophys Res, 113, B10317, doi: 10.1029/2007JB005184。

- Harris R A, 1998, Introduction to special section; Stress triggers, stress shadows and implications for seismic hazard, *J Geophys Res*, **103**, 24347~24358.
- Johnson K M, Hilley G E, Burgmann R, 2007, Influence of lithosphere viscosity structure on estimates of fault slip rate in the Mojave region of the San Andreas Fault system, *J Geophys Res*, **112**, B07408. doi: 10.1029/2006JB004842.
- King G P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **84**, 935~953.
- Okada Y, 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull Seism Soc Am*, **82**, 1018~1040.
- Stein R S, 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence, *Nature*, **402**, 605~609.
- Stein R S, King G P, Lin J, 1992, Change in failure stress on the southern San Andreas Fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake, *Science*, **258**, 1328~1333.
- Steady S, Gomberg J, Cocco M, 2005, Introduction to special section; Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard, *J Geophys Res*, **110**, B05S01, doi: 10.1029/2005JB003692.
- Troise C, De Natale G, Pingue F, et al, 1998, Evidence for static stress interaction among earthquakes in south-central Apennines (Italy), *Geophys J int*, **134**, 809~817.
- Wang R J, Lorenzo M F, Roth F, 2006, PSGRN/PSCMP, a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers & Geosciences*, **32**, 527~541.

## Comparative analysis on stress triggering of double earthquakes sequence and seismicity in southwest part of Yunnan Province

Liu Fangbin<sup>1,2)</sup> Yuan Daoyang<sup>1,3)</sup> Wang Aiguo<sup>1,3)</sup> Pang Wei<sup>1)</sup>

1) Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

2) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

3) Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, China

**Abstract** The southwest part of Yunnan Province is located in the northeast of Indian plate and Eurasian plate, southeast edge of the Qinghai-Tibetan Plateau, which is one of the strongest tectonic activity areas in China. The Longling and Lancang-Gengma earthquakes are typical double-earthquakes in this area. Based on Okada's elastic half-space model and medium wave velocity model of lithology, we calculated Coulomb stress changes of two between double earthquakes and aftershocks. Meanwhile, we analyzed the seismicity of this area. The results showed that: (1) The Longling earthquakes were conjugate and Lancang-Gengma earthquakes were opposite; they were the affecting type. Due to this result, which made the Gengma earthquake in the area with  $\Delta CFS > 0$ , and the value is 0.35 bar. (2) With double earthquakes triggering subsequent aftershocks, because of the Coulomb stress changes of Longling double earthquakes, which triggered most of all aftershocks. The trigger effect was far greater than Lancang-Gengma earthquakes. (3) Based on the viscoelastic relaxation effects after earthquakes, we concluded that the seismic hazard will be higher in the NW—Tengchong-Longling, Yongde-Mengsheng and the southeast of Lancang, the NE—Ruili, Zhenan, Dali and Yongping areas, which is consistent with the distribution of seismic activity.

**Key words:** Southwest part of Yunnan Longling earthquakes Lancang-Gengma earthquakes Stress triggering Seismicity