

龙门山断裂带西南段闭锁与变形特征^{*}

赵 静^{1,2}, 任金卫³, 江在森³, 刘晓霞³, 牛安福², 闫 伟², 岳 冲², 苑争一²

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045;
3. 中国地震局地震预测研究所 中国地震局地震预测重点实验室, 北京 100036)

摘要: 为研究龙门山断裂带西南段断层闭锁程度与变形状态, 并分析该区域地震危险性, 利用 1999—2007、2009—2011、2011—2013 和 2013—2015 年共 4 期 GPS 速度场, 采用 DEFNODE 负位错反演程序估算了该断裂的闭锁程度和滑动亏损空间动态分布, 并结合 1990—2017 年跨断层水准资料分析了断层的三维运动变形特征。结果表明: (1) 龙门山断裂带西南段在汶川地震前后一直处于较强的闭锁状态, 且汶川地震使西南段应变积累速度加快, 加速了芦山地震的孕育进程; 芦山地震后西南段闭锁程度并没有明显减弱, 芦山地震对西南段的应变能释放是局部的和有限的。(2) 龙门山断裂带 4 期垂直断层滑动亏损速率均为挤压亏损速率, 汶川地震后西南段亏损速率明显增大, 而后 2 期西南段亏损速率逐渐减小, 目前依然明显高于汶川地震前量值。(3) 汶川地震前跨断层水准结果显示龙门山断裂带西南段处于完全闭锁状态, 汶川地震后多个场地的年均垂直变化速率明显增大, 并随时间呈逐渐衰减状态, 目前已经恢复至汶川地震前正常变化速率, 因此西南段仍然处于闭锁状态。综合 GPS 反演结果和跨断层水准结果分析认为, 目前龙门山断裂带西南段在大部分段落处于强闭锁状态下依然有发生大地震的可能性。

关键词: 龙门山断裂西南段; 断层闭锁; 年均垂直变化速率; 汶川地震; 芦山地震

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)02-0216-10

0 引言

龙门山断裂带西南段即从汶川地震的余震区南端至康定地段, 是在汶川地震时未破裂的、值得警惕的特殊地段 (陈运泰等, 2013), 2013 年 4 月 20 日的四川芦山 7.0 级地震即发生在该段, 这是继 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震后, 龙门山断裂带上发生的又一次强震。汶川地震前整条龙门山断裂带基本完全闭锁, 仅西南段闭锁稍弱; 汶川地震后, 该断裂带中北段基本完全解锁, 而其西南段的应变积累速度进一步加快 (武艳强等, 2013; 赵静等, 2013; 周海涛等, 2017), 其周围库伦应力也有所增加 (单斌等, 2009, 2013; 邵志刚等, 2010); 汶川地震 5 年后, 该断裂带西南段发生的芦山地震就位于应变积累速度加快和库伦应力增加的区域。芦山地震破裂可能发生于龙门山断裂带西南段主干断裂以东的盲断层, 在活

动断层及其临近地段没有发现明显的地震地表破裂带 (徐锡伟等, 2013), GPS 地表位移结果表明该地震虽然导致龙门山断裂带西南段整体应变有一定的释放, 但主干断裂应变释放的尺度有限 (武艳强等, 2013), 且仍存在地震破裂空段。因此, 目前龙门山断裂带西南段的地震危险性仍需持续跟踪研究。

汶川地震和芦山地震的震源机制结果都显示地震以逆冲运动为主, 这 2 次大地震的发生导致巴颜喀拉块体向四川盆地的挤压运动增强, 并使 2 个块体之间的龙门山断裂带未破裂段落的应变能积累速度加快, 因此目前龙门山断裂带西南段尤其是破裂空段附近断层的运动与闭锁特征, 断层周边区域的地壳三维变形特征, 该破裂空段的地震危险性等成为了亟待研究的科学课题。本文所用 GPS 资料包括 1999—2007、2009—2011、2011—2013 和 2013—2015 年 4 期中国大陆 GPS 水平速度场数据, 采用 DEFNODE 负位错程序反演了龙门山断裂带西南段的

^{*} 收稿日期: 2017-10-13.

基金项目: 地震科技星火计划项目 (XH16044)、国家自然科学基金 (11672258) 和 2017 年度震情跟踪专项工作任务 (2017010225) 联合资助。

闭锁程度和滑动亏损动态空间分布情况；利用布设在龙门山断裂带西南段附近的 1990—2017 年跨断层水准资料，采用断层年均变化速率分析了该断裂带垂直运动和变形规律，并结合上述三维结果综合分析讨论了龙门山断裂带西南段的地震危险性。

1 GPS 资料选取与断层模型构建

地壳内部断层闭锁深度、不同位置的闭锁

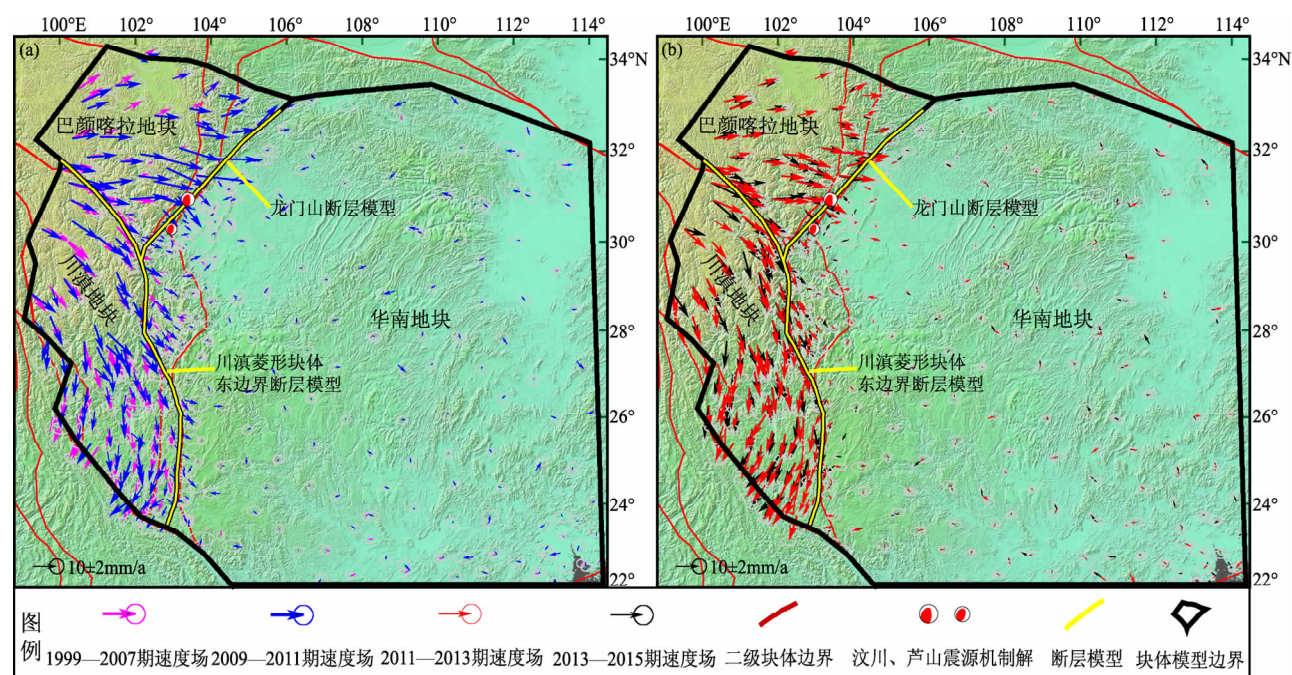


图1 1999—2007 和 2009—2011 年 (a) 及 2011—2013 和 2013—2015 年 (b)

研究区 GPS 速度场结果 (相对于华南地块)

Fig. 1 The GPS velocity fields in study area in 1999—2007 and 2009—2011 (a), 2011—2013 and 2013—2015 (b) (relative to the South China Block)

考虑到龙门山断裂带与鲜水河断裂带、安宁河—则木河—小江断裂带在青藏高原东缘构成了交叉口 (方颖等, 2010), 这 3 条断裂带之间的运动与变形存在相互影响, 因此本研究在建立块体和断层系统模型时同时考虑了上述 3 条断裂带, 将整个研究区域以它们为边界, 划分为川滇地块、巴颜喀拉地块和华南地块 (图 1)。由于川滇菱形块体内部具有相似的运动与变形特征, 因此将其作为一个地块——川滇地块 (申重阳等, 2002; Gan *et al.*, 2007; Thatcher, 2007); 巴颜喀拉地块为鲜水河断裂带、龙门山断裂带和东昆仑断裂带东段所围成的区域 (乔学军等, 2004; Meade, 2007; Hao *et al.*, 2014); 华南地块的边界范围如

程度会对地壳表面变形产生很大影响, 他们是影响发震断裂带应变积累的主要因素, 能在很大程度上反映断裂带的地震危险性, 而通过地表 GPS 速度场结果能够反演断层深部闭锁的相关信息。本文所用 GPS 资料包括 4 期中国大陆 GPS 水平速度场数据 (图 1, 其中包括中国地震局地震预测研究所于汶川地震后在龙门山断裂带西南段和鲜水河—安宁河断裂带附近布设的 14 个 GPS 连续观测站)。

图 1 所示。

数据约束方面, 包括 1999—2007 年 203 个, 2009—2011 年 341 个, 2011—2013 年 361 个以及 2013—2015 年 354 个 GPS 测点参与反演 (图 1), 其中 1999—2007 年结果由王敏研究员提供, 其余 3 期结果由武艳强研究员提供。反演过程中, 沿龙门山断裂走向共设置 7 条等深线, 深度依次为 0.1、6、12、15、18、20 和 22.5 km, 每条等深线上设置 17 个节点, 由于本文重点研究龙门山断裂带西南段, 因此西南段节点较密, 间距为 15.8 ~ 16.7 km, 中北段节点较疏, 间距为 47 ~ 64 km; 根据前人 (王卫民等, 2008; 徐锡伟等, 2008; 张培震等, 2008; 朱介寿, 2008; 杜方等, 2009; Xu *et al.*, 2009;

Wang *et al.*, 2011) 的研究结果, 每 2 排节点之间的断层倾角从地表至深部依次设置为 55° , 50° , 20° , 10° , 7° 和 7° ; 断裂总长度为 479 km, 断层面总宽度为 78 km (图 3、4)。

2 最优模型结果

本文反演采用 DEFNODE 程序 (Savage *et al.*, 2001; McCaffrey *et al.*, 2002, 2007; 赵静等, 2013, 2016), 该程序能够利用 GPS 数据、水准数据、InSAR 数据等反演计算块体旋转、块体内部永久应变、块体边界断层闭锁程度等, 其中断层闭锁程度为断层滑动亏损速率与断层长期滑动速率的比值, 比值为 0 表示断层完全蠕滑, 比值为 1 表示断层完全闭锁, 比值在 0~1 之间, 表示断层只是部分闭锁。

汶川地震前龙门山断裂带处于强闭锁状态, 积累了足够的弹性应变能。为了充分体现断层闭

锁产生的弹性应变能, 在处理 1999—2007 年 GPS 数据时, 认为 3 个地块内只存在整体旋转运动和由于断层闭锁而产生的弹性应变, 不存在内部永久应变。通过大量试算得到了最优模型, 其中 GPS 水平速度场数据误差权重因子 $f=2.5$, $\chi_n^2=1.017$ 。汶川地震后, 龙门山断裂带中北段附近积累的弹性应变能得到释放, 同时震后余滑和粘弹性松弛等作用也表现出来, 所以巴颜喀拉地块内靠近中北段附近的 GPS 测点运动速率明显加快 (图 1), 在地块内部产生拉张应变。因此在处理 2009—2011、2011—2013 和 2013—2015 年 GPS 数据时, 最优模型为巴颜喀拉地块和川滇地块内部存在永久应变, 华南地块内部不存在永久应变。2009—2011 年 GPS 水平速度场数据误差权重因子 $f=2.1$, $\chi_n^2=1.136$; 2011—2013 年 $f=2.7$, $\chi_n^2=0.992$; 2013—2015 年 $f=5.0$, $\chi_n^2=1.027$ 。

为进一步说明模型择优效果, 图 2 主要给出了龙门山断裂带周边区域的 4 期拟合残差分布。

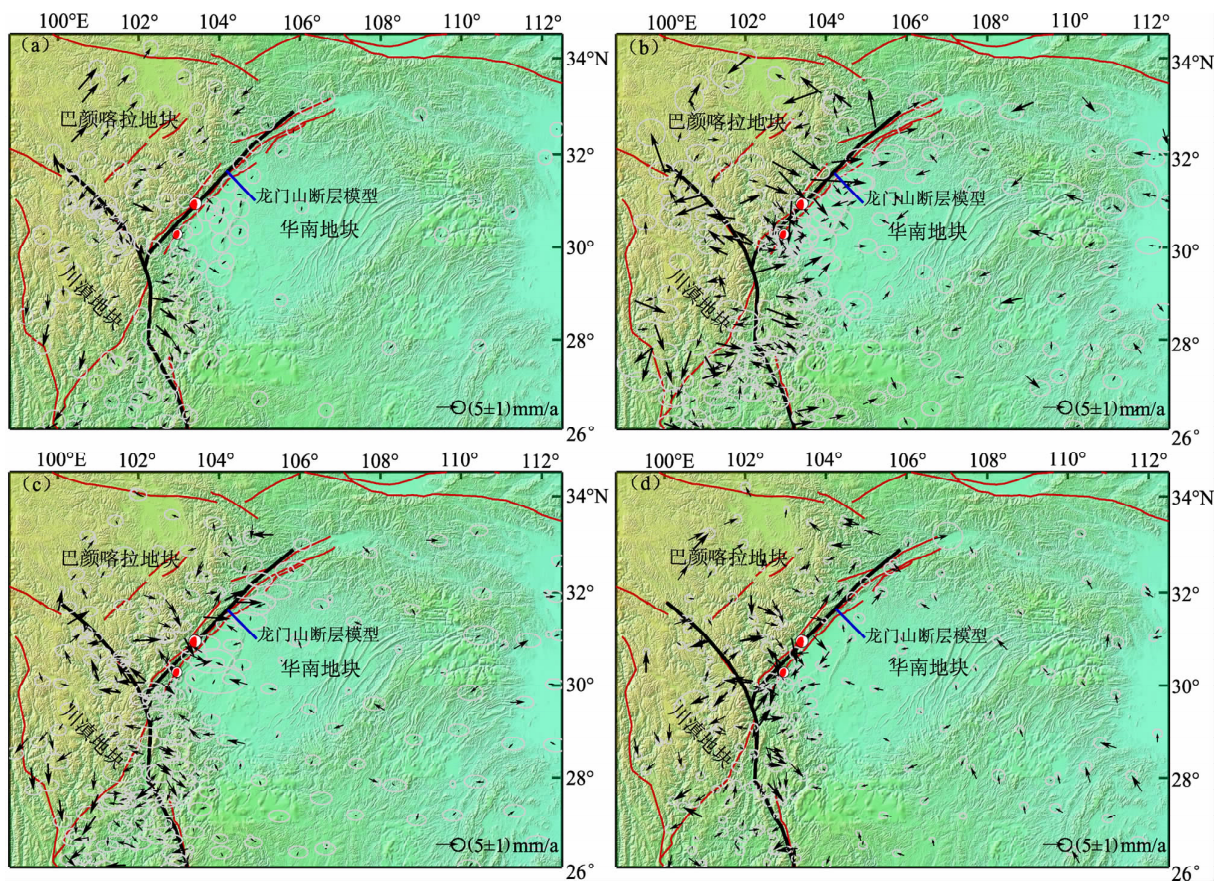


图 2 龙门山断裂带周边区域 1999—2007 年 (a)、2009—2011 年 (b)、2011—2013 年 (c) 和 2013—2015 年 (d) 最优模型速度残差

Fig. 2 Velocity residual of the optimal models of Longmenshan fault and its adjacent area in 1999—2007 (a), 2009—2011 (b), 2011—2013 (c) and 2013—2015 (d)

1999—2007 年残差结果显示模型拟合效果较好,尤其是龙门山断裂带附近拟合残差值很小(图 2a)。2009—2011 年残差结果显示龙门山断裂带和鲜水河断裂带附近拟合残差值较大(图 2b),而 2011—2013 年残差结果显示这 2 条断裂带附近拟合残差值较上一期有所减小(图 2c),2013—2015 年残差结果显示这 2 条断裂带附近拟合残差值进一步减小(图 2d)。另外,就整体拟合效果来看,震后 3 期的拟合结果也是越来越好。

大地震引起的震后变形包括震后余滑和粘弹性松弛等作用,无论是哪种震后形变机制,其根本原因是主震造成了应力扰动,进而发生应力松弛。震后早期的形变可以用发生在断层面的蠕滑加以模拟,而大震之后的粘弹性松弛造成地表位移较小,但衰减速率较慢,震后影响时间长(王丽凤等,2013)。由于研究区 GPS 连续站太少,不能对这一构造介质相对复杂区域的震后应力

松弛作用提供有效约束,且震后应力松弛作用在块体变形上的表现是使块体产生内部应变,因此本文反演过程中将震后余滑和粘弹性松弛等用块体内部永久应变来简单代替,这使得震后数据拟合的残差中应该还包含了部分震后应力松弛作用的影响。从震后 3 期的拟合结果还可以看出,震后应力松弛作用在逐渐减弱,拟合效果越来越好,而由于粘弹性松弛影响范围大、时间长,且震后早期的贡献不如余滑大(谭凯等,2005;王丽凤等,2013;孙赫等,2016),因此减弱的应力松弛作用可能主要是震后余滑。

3 断层闭锁程度与滑动亏损速率动态跟踪结果

3.1 断层闭锁程度

通过多次反演计算,我们得到了最优模型中

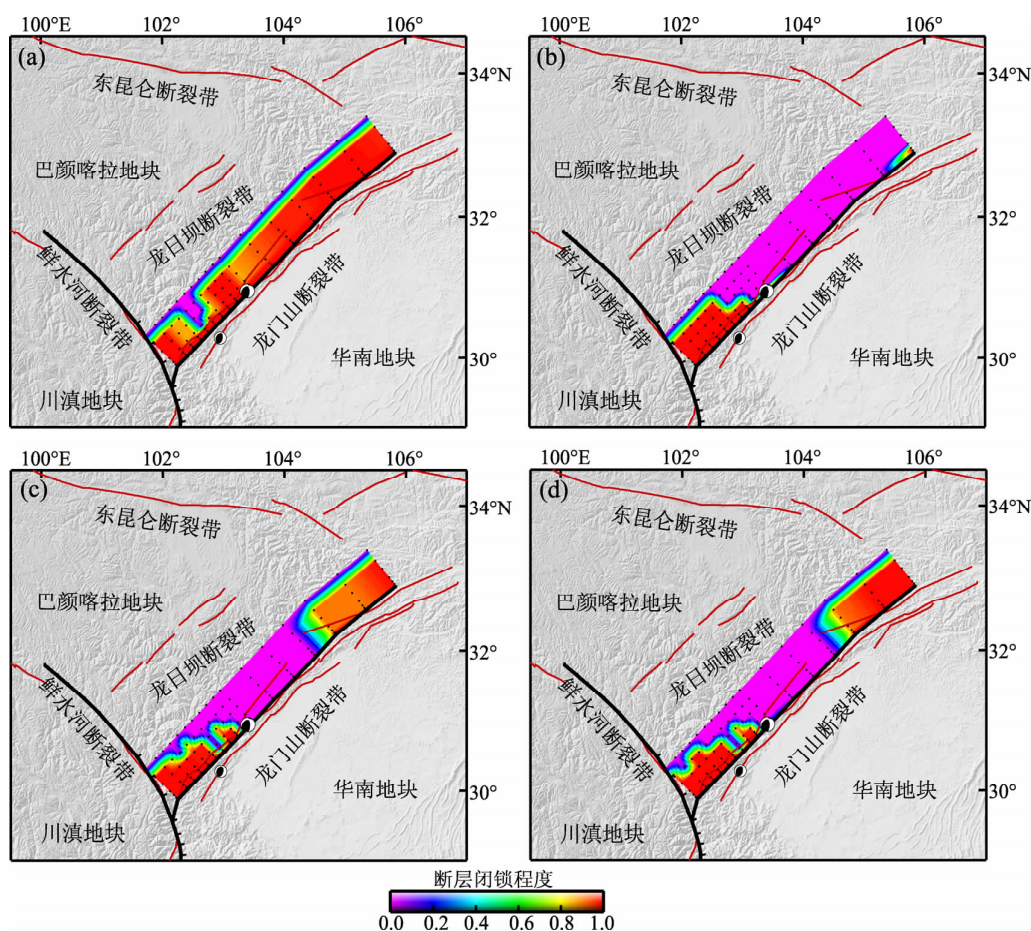


图3 龙门山断裂带 1999—2007 年 (a)、2009—2011 年 (b)、2011—2013 年 (c) 和 2013—2015 年 (d) 断层闭锁动态变化地面投影结果

Fig. 3 Ground projection dynamic characteristics of fault locking in Longmenshan fault in 1999—2007 (a), 2009—2011 (b), 2011—2013 (c) and 2013—2015 (d)

龙门山断裂带 4 期断层闭锁程度的动态变化分布,图 3 为地面投影结果,图 4 为空间分布结果。反演结果表明:1999—2007 年,整条龙门山断裂基本处于强闭锁状态,只有汶川地震的震源位置处,闭锁相对较弱;其西南段有宽度约 20 km 断层在 15 ~ 22.5 km 深度为蠕滑状态,为整条断裂带上唯一不闭锁的位置,而芦山地震则发生在明显不闭锁到强闭锁的过渡部位。2009—2011 年,即汶川地震后,由于汶川地震主要是沿龙门山断裂北东方向破裂,而往西南方向破裂

长度很短,因此破裂的中北段处于震后蠕滑状态,未破裂的西南段依然保持强闭锁状态,且未破裂部分的闭锁程度较汶川震前有所增强。2011—2013 年,由于包含了芦山地震后的结果,龙门山断裂西南段汶川地震和芦山地震之间破裂空段处的闭锁程度有所减弱,尤其是芦山地震的震源附近闭锁程度有所减弱,而由于芦山地震并未破裂到地表,因此浅处的断层闭锁程度并未减弱,且芦山地震震源位置西南方向断层依然处于强闭锁状态,这表明该次地震没有显著释放处于

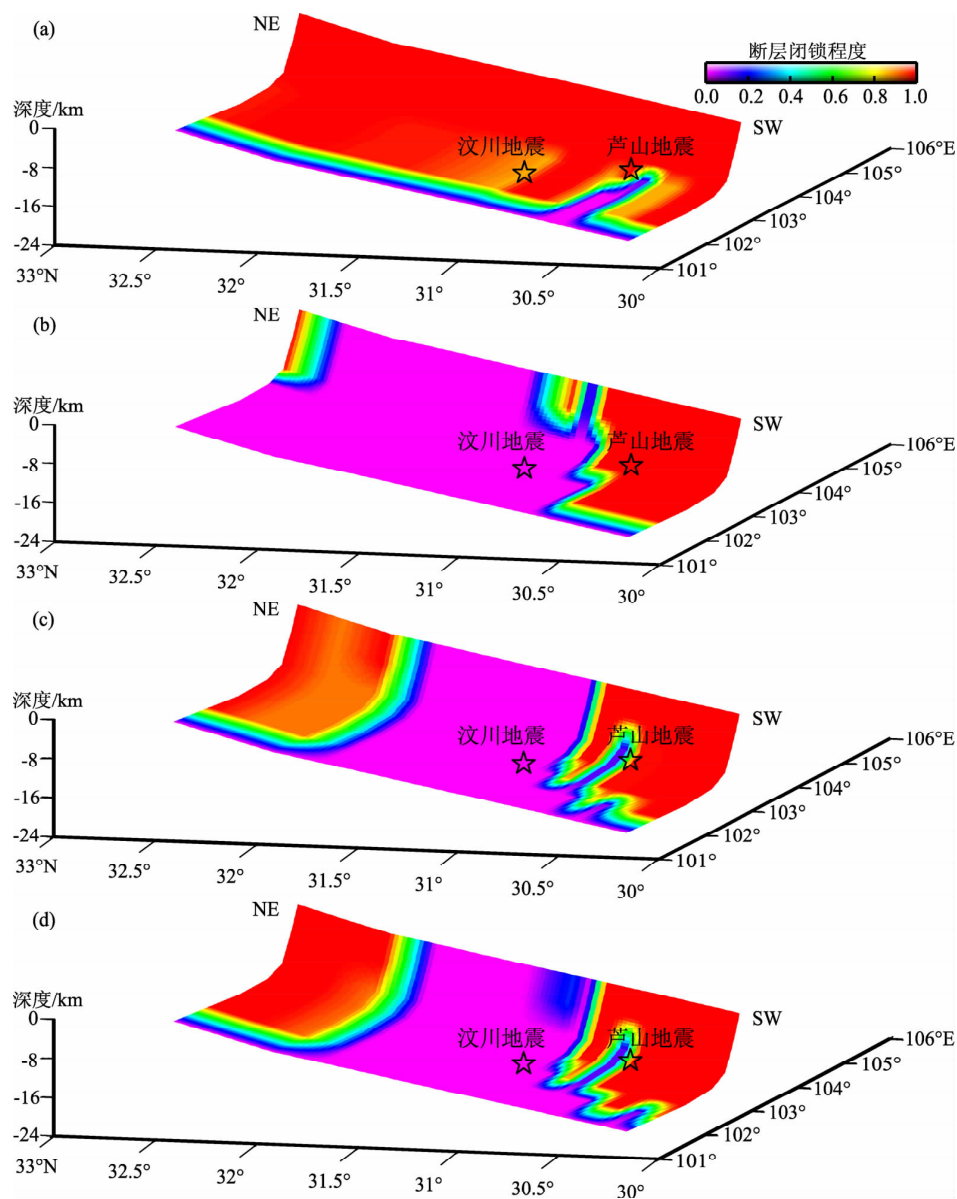


图 4 龙门山断裂带 1999—2007 年 (a)、2009—2011 年 (b)、2011—2013 年 (c) 和 2013—2015 年 (d) 断层闭锁动态变化空间分布

Fig. 4 Spatial dynamic variation characteristics of fault locking in Longmenshan fault in 1999—2007 (a), 2009—2011 (b), 2011—2013 (c) and 2013—2015 (d)

强闭锁状态的西南段所积累的应变能，它对西南段的应变能释放是局部的和有限的。另外，龙门山断裂东北端在经历了汶川震后蠕滑阶段后，逐渐积累应变能，闭锁有所增强。2013—2015 年，即芦山地震后，龙门山断裂东北端的闭锁程度较上期结果进一步增强；西南段的闭锁程度较上期结果基本一致，目前整个龙门山断裂带西南段在大部分段落处于强闭锁的情况下，依然有发生大地震的可能性。

汶川地震震源位于闭锁相对弱的部位，芦山

地震震源更是位于明显不闭锁到强闭锁的过渡部位。2010 年 2 月 27 日智利 M_w 8.8 地震、2014 年 4 月 1 日智利 8.1 级地震震源均位于断层闭锁较弱的部位，随后往强闭锁区域破裂 (Moreno *et al*, 2010; Schurr *et al*, 2014); 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.8 地震及其后发生的 4 次 6 级以上强余震震源位于断层强闭锁到弱闭锁的过渡部位 (赵静等, 2017)。上述这些震例是否说明断层在大范围强闭锁、应变能积累水平很高的情况下，发生强震的起破点可能在闭锁相对较弱、深部应力应变

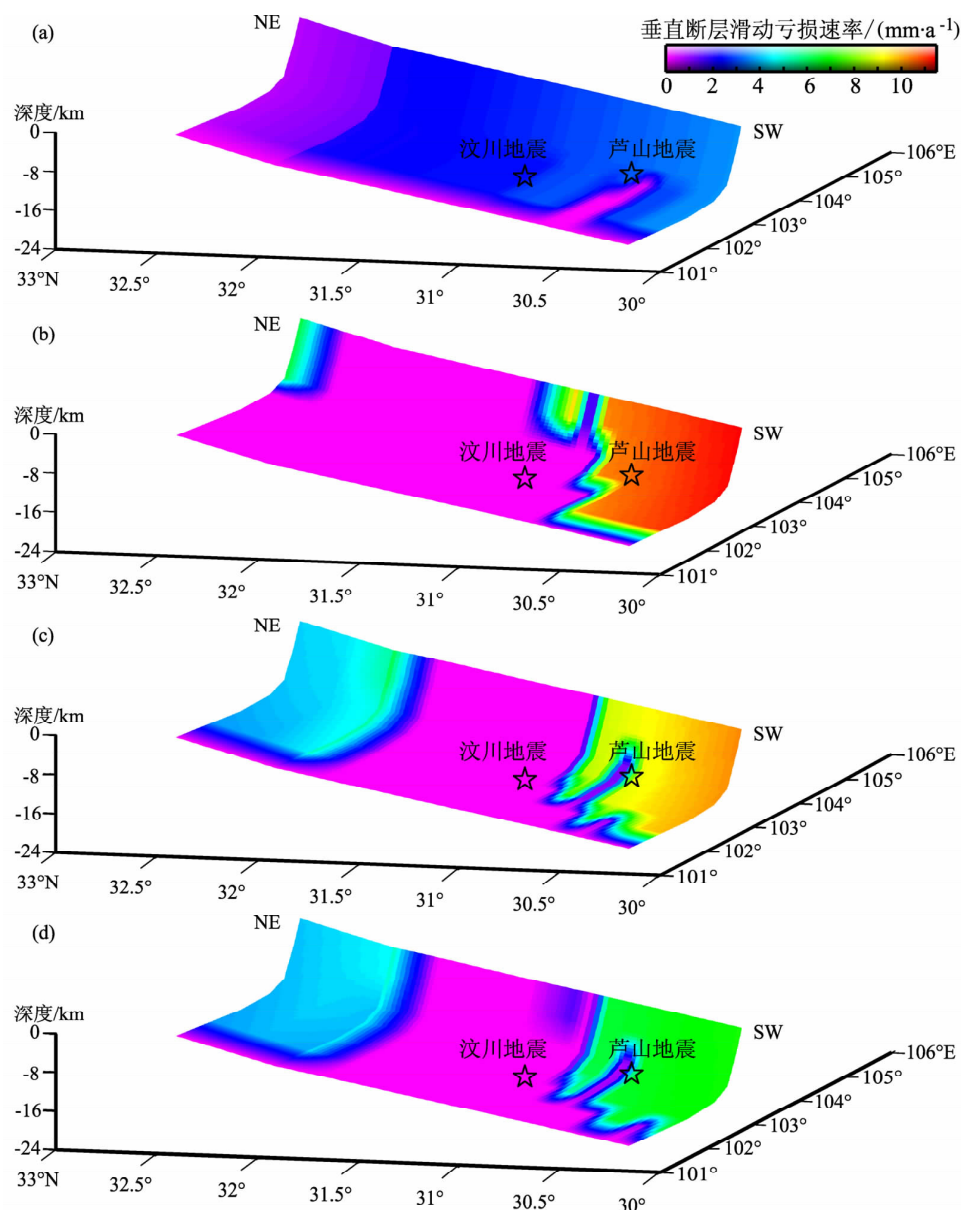


图5 龙门山断裂带 1999—2007 年 (a)、2009—2011 年 (b)、2011—2013 年 (c) 和 2013—2015 年 (d) 垂直断层滑动亏损速率动态变化空间分布

Fig. 5 Spatial dynamic variation characteristics of vertical fault slip deficit in Longmenshan fault in 1999—2007 (a), 2009—2011 (b), 2011—2013 (c) and 2013—2015 (d)

扰动容易达到的部位?若要验证这个认识,还需要大量的研究工作。

3.2 垂直断层滑动亏损速率

龙门山断裂的垂直断层滑动亏损速率均为挤压亏损速率(图5)。1999—2007年,整条龙门山断裂带基本处于强闭锁状态,自东北端至西南端滑动亏损速率由0.7 mm/a逐渐增大至3.6 mm/a。2009—2011年,由于中北段处于震后蠕滑状态,滑动亏损速率基本为0,而未破裂的西南段依然保持强闭锁状态,且滑动亏损速率增大到10.3~11.4 mm/a。2011—2013年,龙门山断裂东北端的闭锁程度有所增强,滑动亏损速率为4.2~6.0 mm/a;西南段完全闭锁段落的滑动亏损速率有所减小,为8.8~10.2 mm/a。2013—2015年,龙门山断裂东北端的滑动亏损速率降低为4.1~5.0 mm/a;西南段完全闭锁段落的滑动亏损速率继续减小,为6.4~7.1 mm/a。

4 龙门山断裂带西南段跨断层水准计算结果

4.1 跨断层水准场地与断层年均变化速率计算原理

本文所用跨断层水准场地沿龙门山断裂带西南段包括灌县、映秀、七盘沟、双河、宝兴、蒲江场地(图6),其中灌县、双河、七盘沟场地水

准数据时间范围为1990—2017年,宝兴场地水准数据时间范围为2009—2017年,蒲江场地水准数据时间范围为2011—2017年,映秀场地水准数据时间范围为2012—2017年。

断层的年均变化速率计算公式为:

$$V_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^t - h_i^{t-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 为一年中所观测的期数; h_i^t 为第 t 年中第 i 个观测值(江在森等, 2001; 李媛等, 2016)。

4.2 水准计算结果

根据式(1)计算龙门山断裂带西南段上6个跨断层场地的年均垂直变化速率,以2008年5月12日汶川地震和2013年4月20日芦山地震的发生为分割点,划分为不同时间段对数据进行计算和展示。图6显示灌县、双河、七盘沟场地在汶川地震前年均垂直变化速率很小,基本在0.5 mm/a以内,表明断层垂向运动很弱,处于强闭锁的状态,这与1999—2007年GPS反演所得断层闭锁程度结果是一致的。汶川地震对这3个场地的影响都很明显,震后它们的年均垂直变化速率明显增大,其中位于龙门山断裂上盘的七盘沟场地速率增大最为显著,达到10.0 mm/a,位于龙门山断裂下盘的灌县场地速率达到7.4 mm/a、双河场地速率达到5.2 mm/a;从2010年开始汶川地震的影响逐渐减弱,速率衰减图像基本符合震后影响随时间呈

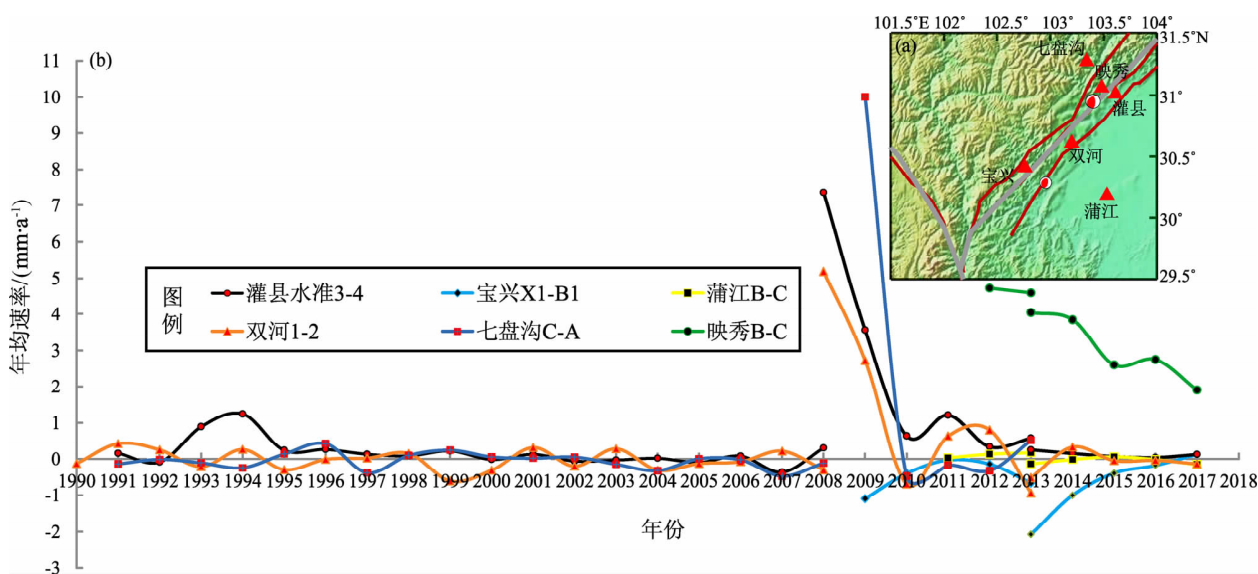


图6 龙门山断裂带西南段跨断层水准场地分布 (a) 与年均垂直变化速率 (b)
Fig. 6 Cross fault leveling field distribution (a) and annual vertical change rate (b)
in the southwestern segment of the Longmenshan fault

幂函数衰减的特征,截至2017年基本恢复正常变化状态(七盘沟场地2013年后停测),这与2009—2011、2011—2013和2013—2015年的3期垂直断层滑动亏损速率与1999—2007年相较先明显增大,然后逐渐减小的结果一致,也表明汶川地震加快了龙门山断裂带西南段的应变积累速度。宝兴和映秀2个场地是在汶川地震后新建设的场地,其中宝兴场地距离芦山地震震中最近,年均垂直变化速率在2009年为1.1 mm/a,之后速率逐渐减小,在芦山地震以前有所调整,并受芦山地震影响较为明显,震后速率由0.7 mm/a增大为2.1 mm/a,随后地震影响逐渐减弱,目前变化速率基本为0,断层又恢复闭锁状态;映秀场地是距离汶川地震震中最近的场地(44 km左右),因此可能受汶川地震的影响更明显,自2012年开始一直处于震后年均垂直运动速率衰减的状态,目前运动速率由4.7 mm/a衰减到1.9 mm/a,而芦山地震对其影响较弱,后续需加强对其跟踪分析。蒲江场地由于受到破坏,在原来场地的延长线上新建了点位,自新建以来速率一直很小,且由于其距离芦山地震震中较远,受芦山地震影响微弱,基本一直处于闭锁状态。

5 结论与讨论

本文利用4期中国大陆GPS水平速度场数据,获得了以多期资料为约束的最优模型结果,包括龙门山断裂西南段的闭锁程度和滑动亏损动态空间分布,并利用布设在附近的跨断层水准资料,采用断层年均变化速率分析了龙门山断裂带西南段附近地壳变形动态演化特征。经过综合分析得出以下结论:

(1) 利用1999—2007年和2009—2011年这2期GPS资料反演时,由于在龙门山断裂西南段设置了比之前的研究(赵静等,2012,2013)更多的节点,反演结果较之前的结果稍有变化,也更能体现断层闭锁程度和滑动亏损等空间分布的差异,因此本文没有直接引用之前的研究成果,而是给出了最新的反演结果。同时,我们经过分析研究得到了一点新的认识:汶川地震前整条龙门山断裂基本处于强闭锁状态,只有汶川地震的震源位置处闭锁相对较弱;西南段有宽约20 km宽断层在15~22.5 km深度为蠕滑状态,为整条断裂带

上唯一不闭锁的区域,而芦山地震则发生在明显不闭锁到强闭锁的过渡部位。汶川8.0级地震、芦山7.0级地震、智利 M_w 8.8和8.1级地震、尼泊尔 M_w 7.8地震等震例能否说明断层在大范围强闭锁、应变能积累水平很高的情况下,发生强震的起破点可能在闭锁相对较弱、深部应力应变扰动容易达到的部位,还值得深入研究。

(2) GPS反演结果显示,汶川地震时龙门山断裂西南段没有发生破裂,一直处于较强的闭锁状态,且汶川地震使龙门山断裂西南段应变积累速度加快,加速了芦山地震的孕育进程;由于芦山地震破裂可能发生于龙门山断裂带西南段主干断裂以东的盲断层,且该段主干断裂所积累应变能并没有被显著释放,因此芦山地震后,西南段闭锁程度并没有明显减弱,目前龙门山断裂带西南段大部分依然处于强闭锁状态。

(3) 龙门山断裂4期垂直断层滑动亏损速率均为挤压亏损速率,汶川地震后西南段亏损速率明显增大,而后2期西南段亏损速率逐渐减小,目前依然明显高于汶川震前亏损速率。这可能反映了汶川地震发生后,造成巴颜喀拉块体边界较大范围断层解锁,使得巴颜喀拉块体东向运动速度加快(图1a),块体对龙门山断裂带西南段的挤压加载效应明显增强,因此汶川地震后亏损速率明显增大;随后由于余滑和粘弹性松弛等震后效应逐渐减弱,巴颜喀拉块体东向运动速度逐渐减缓(图1b),块体对龙门山断裂带西南段的挤压加载效应随时间也有所减缓,因此后2期亏损速率又逐渐减小。

(4) 跨断层水准年均垂直变化速率结果显示,汶川地震前龙门山断裂带西南段处于完全闭锁状态,汶川地震后灌县、双河、七盘沟3个场地的速率明显增大,并随时间呈逐渐衰减状态,目前已经恢复到汶川前震前正常变化速率,因此西南段仍然处于闭锁状态。综合GPS反演结果和跨断层水准结果分析认为,目前龙门山断裂带西南段在大部分段落处于强闭锁状态下依然有发生大地震的可能性。

受到GPS测点密度不足的局限性,可能对反演结果的实际分辨能力和空间变化细节逼近真实程度有一定影响,如可能对强闭锁状态的约束相对有效,而对弱闭锁或不闭锁与强闭锁过渡位置的约束可能不够,这还有待进一步研究。

感谢中国地震局地质研究所王敏研究员和中国地震局第一监测中心武艳强研究员为本研究提供的 GPS 速度场资料;感谢两位审稿专家为本文提出的修改意见和建议。

参考文献:

- 陈运泰,杨智娴,张勇,等. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学:地球科学,43(6):1064-1072.
- 单斌,熊熊,郑勇,等. 2009. 2008 年 5 月 12 日 M_w 7.9 汶川地震导致的周围断层应力变化[J]. 中国科学:地球科学,39(5):537-545.
- 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,43(6):1002-1009.
- 杜方,闻学泽,张培震,等. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变[J]. 地球物理学报,52(11):2729-2738.
- 方颖,江在森,杨永林,等. 2010. 汶川 M_s 8.0 地震前后鲜水河断裂南段的变形特征[J]. 大地测量与地球动力学,30(3):22-26.
- 江在森,丁平,王双绪,等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预报[M]. 北京:地震出版社.
- 李媛,刘峡,刘希康,等. 2016. 2016 年门源 M_s 6.4 地震前祁连山周边断层活动分析[J]. 大地测量与地球动力学,36(4):288-293.
- 乔学军,王琪,杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报,47(5):805-811.
- 邵志刚,周龙泉,蒋长胜,等. 2010. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震对周边断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报,53(8):1784-1795.
- 申重阳,王琪,吴云,等. 2002. 川滇菱形块体主要边界运动模型的 GPS 数据反演分析[J]. 地球物理学报,45(3):352-451.
- 孙赫,季灵运,朱良玉,等. 2016. 新疆于田 M_s 7.3 地震同震与震后形变机制研究[J]. 大地测量与地球动力学,36(12):1052-1055,1068.
- 谭凯,王琪,王晓强,等. 2005. 震后形变的解析模型和时空分布特征[J]. 大地测量与地球动力学,25(4):23-26.
- 王丽凤,刘杰,赵金贵,等. 2013. 2011 年日本 9.0 级地震的同震位错以及震后应力松弛过程对中国大陆的影响[J]. 地震,33(4):238-247.
- 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.
- 武艳强,江在森,王敏,等. 2013. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J]. 科学通报,58(20):1910-1916.
- 徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 2013. 四川芦山 7.0 级强震:一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报,58(20):1887-1893.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 2008. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质,30(3):597-629.
- 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报,51(4):1066-1073.
- 赵静,江在森,牛安福,等. 2017. 喜马拉雅主逆冲断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),42(12):1756-1764.
- 赵静,江在森,武艳强,等. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报,55(9):2963-2972.
- 赵静,牛安福,李强,等. 2016. 陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 地震研究,39(3):351-358.
- 赵静,武艳强,江在森,等. 2013. 芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J]. 地震学报,35(5):681-691.
- 周海涛,陈兆辉,朱爽,等. 2017. 川滇地区部分连续 GPS 测点形变异常分析[J]. 地震研究,40(1):94-100.
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),35(4):348-356.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, *et al.* 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B808416), doi: 10.1029/2005JB004120.
- Hao M, Wang Q L, Shen Z K, *et al.* 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 632:281-292.
- McCaffrey R, Qamar A I, King R W, *et al.* 2007. Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest[J]. *Geophys J Int*, 169: 1315-1340, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03371.x.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotations and plate coupling, in *Plate Boundary Zones*[M]. *Geodynamics Series*, 30:101-122.
- Meade B J. 2007. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone[J]. *Geology*, 35(1):81-84.
- Moreno M, Rosenau M, Oncken O. 2010. 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone[J]. *Nature*, 467(7312):198-202.
- Savage J C, Gan W J, Svarc J L. 2001. Strain accumulation and rotation in the eastern California Shear Zone[J]. *Geophys Res*, 106(B10):21995-22007.
- Schurr B, Asch G, Hainzl S, *et al.* 2014. Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake[J]. *Nature*, 512(7514):299-302.
- Thatcher W. 2007. Microplate model for the present-day deformation of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B1).
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, *et al.* 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan[J]. *Nature Geosci*, 4:634-640, doi:10.1038/NGEO1210.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, *et al.* 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geology*, 37(6):515-518, doi: 10.1130/G25462A.1.

Fault locking and Deformation Characteristics in Southwestern Segment of the Longmenshan Fault

ZHAO Jing^{1,2}, REN Jinwei³, JIANG Zaisen³, LIU Xiaoxia³, NIU Anfu²,
YAN Wei², YUE Chong², YUAN Zhengyi²

(1. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*)

(2. *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*)

(3. *CEA Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science,
China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

Abstract

To study the dynamic characteristics of fault locking and deformation, and seismic risk in southwestern segment of the Longmenshan fault, we selected the negative dislocation model of DEFNODE to invert the spatial fault locking and fault slip deficit variations, by using GPS velocity field data during 1999 – 2007, 2009 – 2011, 2011 – 2013 and 2013 – 2015. and analyzed the 3 – dimensional movement and deformation of the fault combining with the cross fault leveling data during 1990 – 2017. The results show that (1): The Wenchuan earthquake didn't rupture the southwestern segment of the Longmenshan fault, which is always tightly locked. The Wenchuan earthquake accelerated strain accumulation of the southwestern segment and seismogenic process of the Lushan Earthquake. Fault locking of southwestern segment didn't reduce obviously after the Lushan Earthquake. The Lushan earthquake didn't release all the accumulated strain of the southwestern segment which is tightly locked, and the strain releasing was local and limited. (2) The vertical fault slip deficits during four periods are all compressional. Slip deficit of the southwestern segment increased obviously after the Wenchuan earthquake, and then it decreased gradually. Slip deficit at present is much larger than that before the Wenchuan earthquake. (3) Annual vertical change rate reveals the southwestern segment of the Longmenshan fault is tightly locked before the Wenchuan earthquake. Several field rates increased obviously after the Wenchuan earthquake, then gradually decreased, and returned to normal at present. Combining GPS results and cross fault leveling results, we consider it is possible that major earthquakes happen in southwestern segment under the condition of its most segments tightly locked.

Keywords: the southwestern segment of the Longmenshan fault; fault locking; annual vertical change rate; the Wenchuan earthquake; the Lushan earthquake