

2008 年汶川大地震同震、震后形变和应力及 对松坪沟地质灾害的影响

谢世亮, 孙玉军*

中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100094

摘 要: 2017 年在四川茂县松坪沟发生的新磨滑坡造成了重大人员伤亡。除了分析降雨、工程地质等因素外, 前人提出地震对滑坡的形成也起到了重要作用, 然而目前还缺乏详细的定量分析。本研究根据龙门山地区地壳结构和 GPS 观测, 结合美国地质调查局 USGS 反演得出的汶川地震同震破裂模型, 利用粘弹性分层半无限空间模型(PSGRN/PSCMP 程序)计算了汶川地震引起的同震和震后形变及应力场变化, 并详细分析了松坪沟地区的形变和应力。结果表明汶川地震同震破裂造成松坪沟地区发生了明显地表位移, 并且震后的粘弹性松弛效应使得变形在该区持续加强。汶川地震同震破裂在松坪沟地区造成的东向位移为 26.8~42.3 cm, 北向位移为 7.4~8.0 cm, 该区处于垂向位移上升和下降的过渡地带, 变化量为-0.1~1.7 cm; 震后 9 年在同震的基础上东向位移继续增加约 2.5 cm, 北向位移增加约 7.4~8.0 cm, 松坪沟的北西段处于垂向位移持续上升区, 而南东段处于垂向位移下降区, 震后形变造成平均地形梯度增大, 有利于滑坡灾害的发生。鉴于松坪沟断裂性质的不确定, 汶川地震同震和震后引起的库仑应力改变对其活动性会产生不同的影响。

关键词: 龙门山; 汶川地震; 新磨滑坡; 震后形变; 库仑应力

中图分类号: P315.3; P694 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.010401

The Co-seismic and Post-seismic Deformation and Stress of Wenchuan Earthquake in 2008 and Their Influence on the Songpinggou Geohazards

XIE Shi-liang, SUN Yu-jun*

SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094

Abstract: In 2017, the Xinmo landslide in Songpinggou, Maoxian County, Sichuan Province, caused serious casualties. In addition to analyzing factors such as rainfall and engineering geology, previous researchers have proposed that the earthquakes also played an important role in the formation of Xinmo landslides. However, there is still a lack of detailed quantitative analysis. In this study, based on the crustal structure and GPS observations in the Longmen Shan area and combined with the co-seismic rupture model of Wenchuan earthquake obtained by USGS, the authors calculated the co-seismic and post-seismic deformation and stress caused by the Wenchuan earthquake by using a viscoelastic layered semi-infinite space model (PSGRN/PSCMP program). The deformation and stress in Songpinggou were analyzed in detail. The results show that the co-seismic rupture of Wenchuan earthquake caused significant surface displacement in Songpinggou area, and the post-seismic deformation continued to strengthen in this area due to the viscoelastic relaxation effect. The eastward and northward displacements caused by the co-seismic rupture of Wenchuan earthquake in Songpinggou area were 26.8~42.3 cm and 7.4~8.0 cm respectively. This area is in the transition zone of vertical

本文由国家自然科学基金项目“龙门山前缘新生代沉积不均匀性的动力学机制模拟研究”(编号: 41874114)和中国地质科学院基本科研业务费项目“青藏高原东缘地表过程与深部动力作用研究”(编号: YYWF201720)联合资助。

收稿日期: 2020-12-03; 改回日期: 2020-12-31; 网络首发日期: 2021-01-06。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 谢世亮, 男, 1991 年生。硕士研究生。研究方向为地球动力学。通讯地址: 北京市海淀区皇后店东路 1 号中国地质科学院地球深部探测中心。E-mail: 1342195792@qq.com。

*通讯作者: 孙玉军, 男, 1983 年生。博士, 研究员。长期从事地球动力学研究。通讯地址: 北京市海淀区皇后店东路 1 号中国地质科学院地球深部探测中心。E-mail: sunyujunabc@163.com。

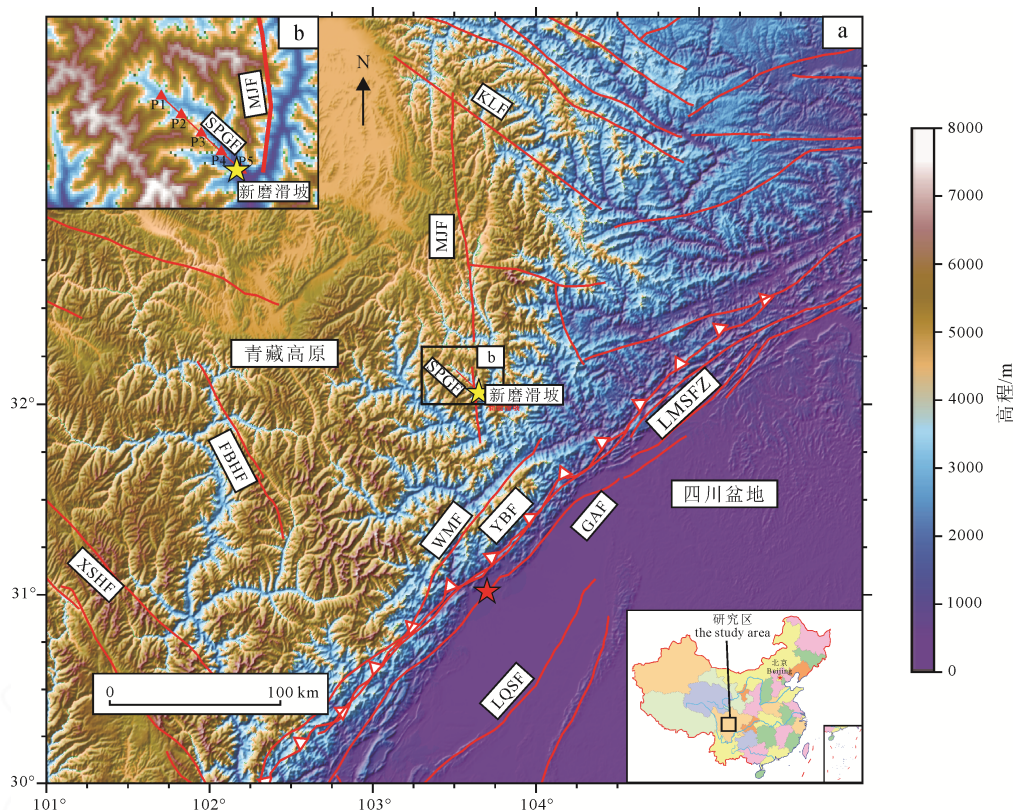
displacement rising or descending, with a change of $-0.1 \sim 1.7$ cm. 9 years after the earthquake, on the basis of the co-seismic results, the eastward displacement continued to increase by about 2.5 cm, and the northward displacement increased by 7.4–8.0 cm. The northwestern section of Songpinggou was in the vertical displacement upward zone, while the southeastern section was in the vertical displacement downward zone. The post-seismic deformation caused the average topographic gradient to increase, which has been conducive to the occurrence of landslide disaster. In view of the uncertain pattern of Songpinggou fault slipping, the coulomb stress changes caused by the Wenchuan earthquake will have different effects on its seismicity.

Key words: Longmen Shan; Wenchuan earthquake; Xinmo landslide; post-seismic deformation; Coulomb stress

2017年6月24日,四川省茂县叠溪镇新磨村发生一起顺层高位滑坡灾害—新磨滑坡,导致83人死亡和失踪(许强等,2017)。新磨滑坡的体积约 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ (许强等,2017),为2008年汶川地震后发生在龙门山地区的规模最大的一次岩质滑坡(邵崇建等,2017),破坏力极强,造成的伤亡极大。许多学者对该滑坡做了大量研究,认为滑坡的形成源于多次强震的作用下导致的山体震裂,并在后期重力、雨水等外动力地质作用下导致滑坡发生(何思明等,2017;邵崇建等,2017;温铭生等,2017;许强等,2017;Zhao et al.,2018)。以往的研究评估地震对滑坡的影响仅限于定性分析,强调地震同震作用下山

体的震裂作用(何思明等,2017;邵崇建等,2017;温铭生等,2017;许强等,2017),而定量分析地震形变特别是震后形变对地质灾害的影响还相对较少。

新磨滑坡的发生地点处于近南北走向的岷江断裂和北西走向的松坪沟断裂的交汇带(见图1)。沿着松坪沟断裂发育有一活动断裂—松坪沟断裂(唐荣昌等,1983;Ren et al.,2018),沿松坪沟底部为岷江一级支流之一的松坪河。松坪沟发育有一系列的堰塞湖,前人研究认为主要为1933年叠溪地震引发的滑坡堵塞松坪河所致(许向宁和王兰生,2002;何思明等,2017;邵崇建等,2017;温铭生等,2017;许强等,2017)。对滑坡区有影响的最近一次强震为



LMSFZ—龙门山断裂带; MJF—岷江断裂; WMF—汶川—茂县断裂(龙门山断裂后山断裂); YBF—映秀—北川断裂(龙门山断裂中央断裂); GAF—灌县—安县断裂(龙门山断裂前山断裂); XSHF—鲜水河断裂; LQSF—龙泉山断裂; FBHF—抚边河断裂; KLF—昆仑断裂; SPGF—松坪沟断裂(在图b中标出); 黄色五角星—新磨滑坡发生点; 红色五角星—汶川地震震中。

LMSFZ—Longmen Shan fault zone; MJF—Minjiang fault; WMF—Wenchuan—Maoxian fault (back mountain fault of Longmen Shan fault); YBF—Yingxiu—Beichuan fault (central part of Longmen Shan fault); GAF—Guanxian—Anxian fault (before Longmen Shan fault); XSHF—Xianshuihe fault; LQSF—Longquan Mountain fault; FBHF—Fubianhe fault; KLF—Kunlun fault; SPGF—Songpinggou fault (shown in Fig.1b); yellow pentagram—the center of Xinmo landslide; red star—Wenchuan earthquake epicenter.

图1 龙门山地区构造地质背景(a)及新磨滑坡发生点位置(b)

Fig. 1 Schematic map of geological structure background (a) and Xinmo landslide location (b) in Longmen Shan area

2008 年汶川地震,在该区的地震烈度为Ⅶ度(张勇等, 2008; 邵崇建等, 2017)。2008 年汶川地震后, GPS 观测得到的同震形变表明汶川地震造成龙门山地区发生了明显的地表形变(国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008), 汶川地震使得龙门山地区应力场发生了改变(Luo et al., 2019), 所产生的库仑应力变化对龙门山地区的主要断层也有重要影响(邵志刚等, 2010), 如岷江断裂带。新磨滑坡发生点距离汶川地震主中央断裂(映秀—北川断裂)的垂直距离约 70 km, 同时发生时间距离汶川地震较晚(震后 9 年), 因此, 汶川地震的震后形变调整是否影响该区, 或者对该区影响多大, 这些问题还缺乏详细的定量计算。同时震后形变调整引起的库仑应力变化对该区断裂带的影响也亟待分析。

汶川地震后, 前人对龙门山地区的地壳/地幔结构、断裂构造及地表 GPS 观测积累了大量的研究(王椿镛等, 2003; 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008; 刘启元等, 2009; 郭飙等, 2009; 孙玉军等, 2013; Zhang et al., 2014), 特别是近期对该区详细的 GPS 震后形变分析(Diao et al., 2018)为开展详细的震后形变计算提供了重要约束。为此, 我们采用德国地学中心汪荣江博士开发的 PSGRN/PSCMP 程序(Wang et al., 2006), 以地表同震和震后 GPS 观测数据为约束, 计算了汶川地震同震和震后形变和应力场。在此基础上, 进一步量化分析了 2008 年汶川大地震同震和震后形变对松坪沟新磨特大滑坡的区域影响, 通过应力场变化计算得到的库仑应力分析了松坪沟断裂的地震活动性。该研究结果有助于更全面认识强震区地质灾害的发生机理。

1 区域背景

1.1 地形地貌

松坪沟地处川西松潘甘孜地块与龙门山断裂过渡区域。沿松坪沟发育有一活动断裂——松坪沟断裂, 并发育有一河流——松坪河。松坪沟断裂处于龙门山断裂带西侧, 呈北西—南东走向, 长约 30 km。沿着松坪河发育有一系列历史滑坡所导致的堰塞湖。古滑坡遗迹主要分布在松坪河北岸, 主要为岩质滑坡, 而 2017 年的新磨大滑坡发生在松坪河下游东南端的富贵山, 靠近松坪沟断裂与岷江断裂带的交汇处。松坪沟地貌属构造侵蚀高山地貌(许向宁和王兰生, 2002), 表现为典型的“V”形峡谷地貌。沿松坪沟发育的松坪河为岷江的一级支流, 延伸长度近 40 km。地面高程从松坪河上游近 3900 m 下降至下游与岷江交汇口近 2200 m, 坡降剧烈。松坪河中下游两岸多为岩质斜坡, 地势陡峭,

北岸主要为顺层斜坡, 南岸主要为切层斜坡, 其中北岸坡脚普遍存在岩质碎屑堆积。

1.2 地层及岩性

松坪沟北西段主要为第四系覆盖层, 南东段变质基岩发育, 广泛出露地表, 主要为新都桥组(T_3x)的千枚岩, 杂谷脑组(T_2z)的变质石英砂岩(唐荣昌等, 1983), 坡体中软弱岩夹层发育, 这些软弱夹层中富含黏土矿物。其中新磨滑坡崩塌区的基岩为中三叠统杂谷脑组(T_2z)的变质砂岩夹板岩(邵崇建等, 2017)。松坪河北岸的顺层斜坡普遍存在千枚岩等软弱岩夹层, 并在露头表现出凹凸不均的差异性风化。

1.3 气候条件

松坪沟处于高原干旱气候带和岷江干热河谷带, 属于高原季风气候区。年降水量平均为 570 mm, 降水量较少, 但是降水量相对集中(邵崇建等, 2017)。其中新磨滑坡发生前 2 个月累计降水 200 多毫米(许强等, 2017)。

1.4 历史地震及滑坡

松坪沟历史上强震频发, 近百年来松坪沟附近发生有 6 次 5.5 级以上大地震, 分别为 1933 年叠溪 $M_s7.5$ 级地震、1934 年叠溪 $M_s5.5$ 级地震、1938 年松潘南部的 $M_s6.0$ 级地震、1952 年叠溪附近的 $M_s5.5$ 级地震、1976 年的 $M_s7.2$ 级松潘—平武地震和 2008 年的 $M_s8.0$ 级汶川地震。其中 1933 年叠溪地震, 1976 年松潘平武地震, 2008 年汶川地震对松坪沟地区均产生了Ⅵ级以上的烈度影响(邵崇建等, 2017)。1933 年叠溪地震在松坪沟区域地震烈度为Ⅹ度(唐荣昌等, 1983; 柴贺军等, 1995; 许向宁和王兰生, 2005; 邵崇建等, 2017), 2008 年汶川地震为Ⅶ度(张勇等, 2008; 邵崇建等, 2017)。历史强震导致震区山坡的岩体破碎。在松坪河沿岸基岩破碎, 节理发育, 在下游的杂谷脑组的地层为甚。在新磨滑坡的滑移面上可见两条明显的节理, 延伸在其西侧。

1933 年叠溪地震导致松坪沟形成了一系列滑坡, 堵塞松坪河, 这些滑坡集中于松坪河的北岸, 形成了一系列堰塞湖(海子), 如公棚海子和白蜡海子(柴贺军等, 1995)。历史强震使得松坪沟南北两侧山体岩体震裂, 这些震裂为山体发生滑坡创造了初始条件, 随着历次强震作用, 以及雨水、冻胀等外动力地质作用, 造成松坪沟震裂岩体损伤进一步积累(何思明等, 2017; 邵崇建等, 2017; 温铭生等, 2017; 许强等, 2017)。

2 汶川地震的震后形变及应力场计算

2.1 研究方法

本文采用德国地学中心(GFZ)汪荣江博士开发

的 PSGRN/PSCMP 程序(Wang et al., 2006)。该程序可基于分层与重力作用下的粘弹性模型计算出断层错动引起的同震和震后形变及应力变化, 为分析大地震引起的震后区域应力-应变变化提供了有力工具。我们首先利用龙门山地区的波速、密度及粘滞性成果资料, 建立了半无限空间垂向均匀分层的粘弹性模型, 该模型假设上地壳为弹性介质, 下地壳和地幔为粘弹性介质。然后结合前人反演出的汶川地震同震破裂模型, 以 GPS 观测资料作为约束, 计算出龙门山地区地表的 3 个位移分量(U_x , U_y , U_z) (即东向, 北向和垂向位移) 及 6 个应力分量(σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz}), 并进一步计算分析了松坪沟区域的地表形变及松坪沟断裂的库仑应力变化。最后综合计算结果探讨了区域地表变形与松坪沟新磨大滑坡孕育、发生的成因联系, 库仑应力变化对松坪沟断裂活动性的影响。

2.2 介质模型与破裂模型

本文计算所采用的半无限空间垂向均匀分层粘弹性模型将中上地壳(45 km 以浅)假设为弹性介质, 下地壳和岩石圈地幔假设为 Maxwell 体粘弹性介质(45 km 以深), 因模型的局限, 未考虑龙门山断裂带两侧松潘甘孜地块与四川盆地的地形和地壳结构差异。

本文建立的半无限空间垂向均匀分层粘弹性速度模型参考了包括人工地震, 天然地震和地震层析等资料的龙门山地区深部地震探测成果。其中地壳和地幔 P 波速度主要参考基于人工地震探测的 P 波速度结构剖面(王椿镛等, 2003), 以及利用地震台站纪录的远震 P 波走时数据和非线性层析成像所得的龙门山地区 400 km 以浅的速度结构剖面(郭飏等, 2009)。S 波速度则主要参考利用宽频带地震台站纪录的数据所反演出的川西地区 201 km 以浅的 S 波速度剖面(刘启元等, 2009)。密度结构参考通过重力观测数据所得到的龙门山地区的密度结构(Zhang et al., 2014)。粘滞性系数参考了基于中国大陆及邻区岩石圈流变结构研究的获得的相关参数(孙玉军等, 2013)。综合以上地球物理研究资料, 所给出的模型具体参数可见表 1。

表 1 半无限空间垂向均匀分层粘弹性模型参数
Table 1 Viscoelastic model parameters of vertical uniform stratification in semi-infinite space

层号 No.	深度 /km	纵波波速 V_p /(km/s)	横波波速 V_s /(km/s)	密度 ρ /(kg/m ³)	粘滞性系数 η /(Pa·s)
1	0~15	5.89	3.45	2 800	/
2	15~45	6.55	3.95	2 950	/
3	45~∞	7.95	4.52	3 250	4×10^{19}

本文采用的地震破裂模型参考了美国地质调查局(USGS)所发布的 2008 年汶川地震破裂模型(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000g650/finite-fault>)。该模型给出的发震断层参数为: 断层走向 229°, 断层倾角 33°, 断层平均滑动角 120°, 断层长度 315 km, 断层宽度 40 km。

2.3 约束条件

本文检验和调整计算模型参数的依据主要是基于龙门山地区所布设的 GPS 站点观测到的汶川地震的同震位移结果(水平位移和垂向位移)(Wang et al., 2011), 以及汶川地震震后龙门山地区部分 GPS 站点观测到的 7 年累积水平位移(Diao et al., 2018)。

2.4 库仑应力计算

同震和震后引起的库仑应力变化量可定义为如下公式(Rice, 1992):

$$\Delta cfs = \Delta \tau - \mu' \Delta \sigma_n$$

其中 Δcfs 为库仑应力变化量, $\Delta \tau$ 为计算断层面上剪应力变化量, $\Delta \sigma_n$ (规定拉伸为正)断面上的正应力变化量, μ' 为断层的视摩擦系数。采用计算出的 6 个应力分量计算出松坪沟断裂的 $\Delta \tau$ 与 $\Delta \sigma_n$, μ' 取典型值 0.4(Knoos et al., 1994; 万永革等, 2002)。若库仑应力为正, 则断层活动的危险性增加, 反之则危险性减小(石耀霖和曹建玲, 2010; 刘方斌等, 2013)。

本文中计算的时间段设定为 2008 年 5 月 12 日—2038 年 5 月 12 日, 主要是计算分析从汶川地震同震发生到震后 30 年间的区域形变及应力变化情况。并通过与 GPS 同震和震后形变的对比来验证计算结果的可靠性。根据计算结果, 再沿松坪沟断裂地表选取 5 个计算点位 P1—P5(如图 1b), 分别计算出东向、北向和垂向三个位移分量的时空变化特征。最后依据松坪沟断裂的几何参数, 计算出该区同震和震后产生的库仑应力变化及对松坪沟断裂的影响, 进而分析其断裂活动性。

3 计算结果

3.1 地表形变

图 2 为模型计算的龙门山地区地表同震位移及震后位移与实际 GPS 观测结果对比图。计算结果表明, 除在断裂带附近与实际观测存在一定的偏差外, 整体上计算出的位移场方向及大小与 GPS 观测结果较为吻合。无论同震还是震后 7 年的位移场, 模型计算的结果能够较好匹配 GPS 观测得到的形变结果。如龙门山断裂带西侧的松潘甘孜地块在汶川地震同震时刻水平向运动表现为逆冲兼具少量

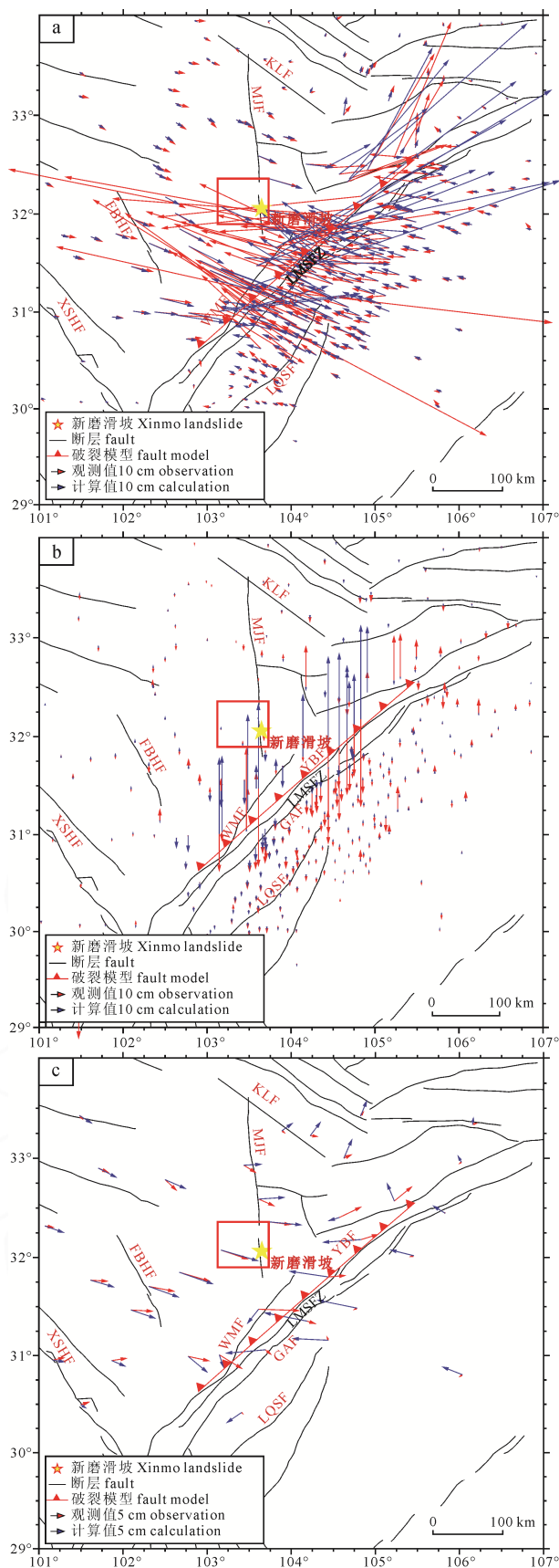


图2 (a)同震地表水平位移;(b)同震地表垂直位移;(c)震后7年地表水平位移(2008—2015)(不包括同震位移)

Fig. 2 (a) Coseismic horizontal displacement of the ground surface; (b) Coseismic vertical displacement of the ground surface; (c) Horizontal displacement of the ground surface 7 years after the Wenchuan earthquake (2008—2015) (excluding coseismic displacement)

走滑,近断层区域垂向表现为抬升运动;四川盆地靠近龙门山区域表现为北西向水平运动,近断层区域表现为下降运动;震后7年松潘甘孜地块持续南东向挤压四川盆地。这些结果与GPS观测的形变特征吻合,反映了模型参数设置的合理性。

图3a-c分别为计算所得的龙门山地区2008年汶川地震同震的地表经向位移(U_x),纬向位移(U_y)及垂向位移(U_z)。结果表明,以龙门山断裂为界,在断层上盘以东向运动为主,最大位移量3.3 m;下盘以西向运动为主,最大位移量达到0.6 m;地表位移量随着远离断层逐渐减小,断层上盘位移幅度整体大于下盘。纬向位移表现为:以龙门山断裂为界,近断层区域,上盘主要表现为北向运动,断裂中段与断裂北段有两个位移较大区域,最大位移分量达到1.85 m;下盘近断层区域在断层南北段存在差异,下盘近断层区域中部表现为北向运动,下盘南部及北部则表现为南向运动,其中南段幅度最大,南向最大位移量可达到0.6 m。近断层区域的纬向位移也表现出上盘大于下盘的特征。垂向位移在断层的上下盘表现出差异性:以龙门山断裂为界,上盘近断层区域表现为向上运动,最大幅度可达2.1 m,随着远离断层,上盘出现以长轴向平行于龙门山断裂的下降区域,幅度最大可达0.6 m,下盘则无明显升降运动。龙门山断裂在汶川地震同震阶段主要表现为逆冲兼具右旋走滑的特征,并且在断裂的南北段体现出差异性。

图4a-c为计算获得的汶川地震震后9年的区域累积形变量(不包括同震位移)。结果显示,断层上盘近断层的断层地表投影区域,经向位移表现为向西运动,位移幅度最大可达2.5 cm。随着远离断层,逐渐转变为向东运动,最大位移可达3.5 cm,断层下盘近断层区域整体表现为西向运动,最大可达3.5 cm。如图4b上盘及下盘近断层区域,纬向位移则表现出南端以南向为主,北端以北向为主,向北最大可达1.8 cm,向南最大可达2 cm。如图4c垂向位移则表现为断层上盘的地面投影区域以下降运动为主,最大幅度可以达到4.2 cm。下盘近断层区域表现为下降运动,随着远离断层,下盘表现为向上运动。断层上盘下降区域大于下盘区域,随着远离断层,逐渐过渡为向上运动。

根据计算获得的汶川地震同震及震后9年的龙门山地区形变时空变化结果,我们选取沿松坪沟地表的5个计算点(位置见图1b),进一步计算出汶川地震同震至震后30年的位移随时间变化结果(如图5所示)。结果表明,汶川地震导致松坪沟地区发生了明显的同震位移。图5a为松坪沟地表各计算点的经向位移随时间的变化曲线,松坪沟地区在汶川

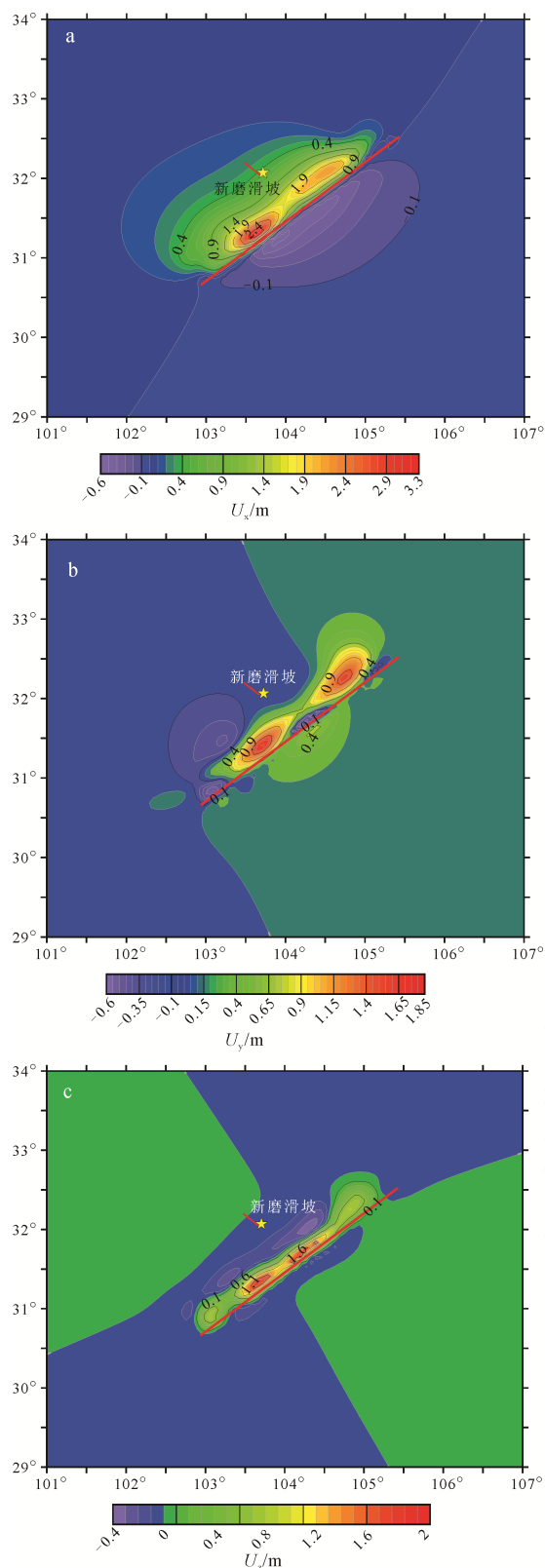


图3 (a)同震地表经向位移 U_x 计算结果, 向东为正;
(b)同震地表纬向位移 U_y 计算结果, 向北为正;
(c)同震地表垂向位移 U_z 计算结果, 向上为正;
红线代表断裂

Fig. 3 (a) Calculated results of coseismic surface meridional displacement U_x (eastward displacement is positive.);
(b) Calculated results of coseismic surface horizontal displacement U_y (northward displacement is positive.);
(c) Calculated results of coseismic surface vertical displacement U_z (upward displacement is positive);
The red line indicates the fault

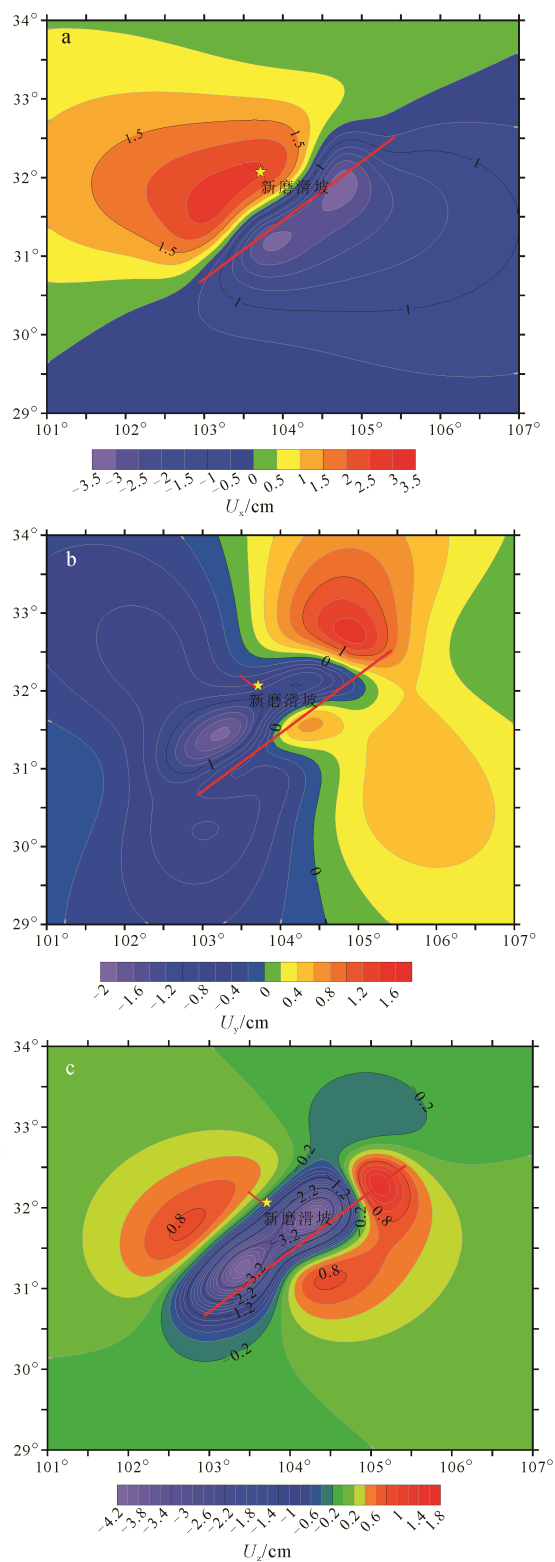


图4 (a)震后9年经向位移计算结果, 向东为正;
(b)震后9年纬向位移计算结果, 向北为正;
(c)震后9年垂向位移计算结果, 向上为正;
红线代表断裂

Fig. 4 (a) Calculated results of surface meridional displacement 9 years after the Wenchuan earthquake U_x (eastward displacement is positive); (b) Calculated results of coseismic surface horizontal displacement 9 years after the Wenchuan earthquake U_y (northward displacement is positive); (c) Calculated results of coseismic surface vertical displacement 9 years after the Wenchuan earthquake U_z (upward displacement is positive);
The red line indicates the fault

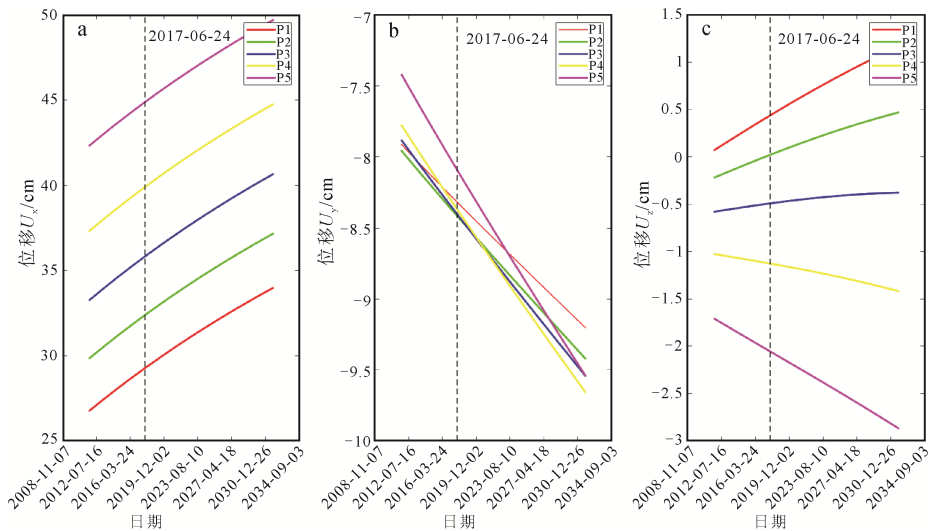


图 5 (a)经向位移时变曲线, 向东为正; (b)纬向位移时变曲线, 向北为正; (c)垂向位移时变曲线, 向上为正; (虚线表示新磨滑坡发生日期)

Fig. 5 (a) The surface meridional displacement varying with time (Eastward displacement is positive); (b) The surface zonal displacement varying with time (Northward displacement is positive); (c) The surface vertical displacement varying with time, upward displacement is positive; The dotted line indicates the occurrence date of the Xinmo landslide

地震同震阶段发生了明显的位移, 松坪沟的经向位移整体表现为向东运动, 最大可达 42.3 cm, 最小可达 26.8 cm, 震后 9 年各点继续增加了约 10 cm。同震阶段, 沿着松坪沟经向位移自西向东逐渐增大。图 5b 表示纬向位移随时间的变化曲线, 同震阶段, 松坪沟各点的纬向位移表现为向南运动, 位移量 7.4~8.0 cm, 震后 9 年各点继续增加了 1~2 cm 不等, 纬向位移沿松坪沟自西向东逐渐增大。图 5c 表示垂向位移随时间的变化特征, 汶川地震同震阶段 P1—P5 的垂向位移表现出差异性: 松坪沟北西段的 P1, P2 和 P3 表现出向上运动; 松坪沟南东段的 P4 和 P5 表现为向下运动, P1—P5 位移量为 -0.1 ~1.7 cm, 震后 9 年, 松坪沟的垂向位移表现为, 北西段继续向上运动, 南东段继续向下运动。

综合来看: 松坪沟地区在汶川地震同震阶段的水平运动整体表现为东偏南, 垂向运动表现为松坪沟的北西段为向上运动, 南东段为向下运动, 这一运动特征在震后 30 年内仍在持续。因此, 汶川地震的同震位移使得松坪沟地区的地形梯度增大, 并且在汶川地震震后形变调整阶段进一步加剧, 这可能是触发该区高陡边坡滑坡灾害的重要区域形变条件。

3.2 库仑应力

本文选取松坪沟断裂地表靠近新磨滑坡的计算点 P5 作为计算库仑应力的参考点, 但目前关于松坪沟断裂的性质仍存在争议, 唐荣昌等(1983)认为松坪沟断裂为逆断层兼具左旋走滑, 是 1933 年叠溪地震的发震断裂。而 Ren et al.(2018)认为松坪沟断裂为正断层。本文考虑该区处于压扭构造环境, 并综合前人研究资料, 考虑松坪沟断裂各段可能存

在运动性质差异, 设定了松坪沟断裂因性质不同而导致滑移角变化的 4 种情形: 逆断层兼具左旋(滑移角为 30°和 60°)、逆断层(滑移角为 90°)、逆断层兼具右旋(滑移角为 120°和 150°)和正断层(滑移角为 -90°)。断层走向和倾角取值一致: 走向 317°, 倾角 60°。计算结果见图 6, 当松坪沟断裂为逆断层兼具左旋走滑时, 库仑应力表现为负, 汶川地震使得松坪沟断裂的断层活动性降低; 当断裂为逆断层, 库仑应力几乎不变, 松坪沟断裂的活动性不受汶川地震影响; 当断裂表现为逆断层兼具右旋走滑时, 库仑应力增加, 则汶川地震会增加松坪沟断裂的活动性, 并且滑移角越大则危险性越高; 当断层为正断层时, 汶川地震使得松坪沟断裂库仑应力增加, 断层活动的可能性增加。

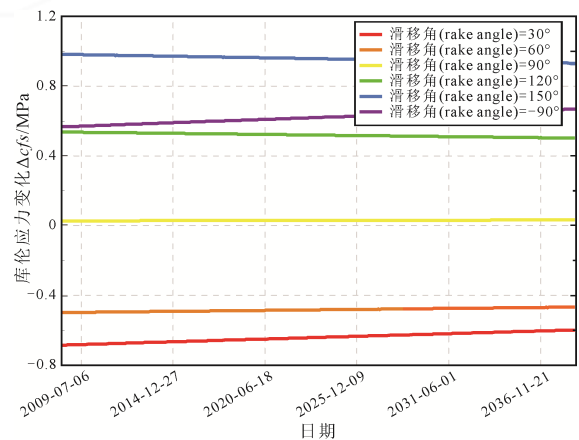


图 6 松坪沟断裂上的地表库仑应力时变曲线 (2008—2038 年)

Fig. 6 The Coulomb stress change (ΔCfs) on Songpinggou fault caused by the Wenchuan earthquake varying with time (2008—2038)

4 讨论

4.1 模型的局限性

本文采用半无限空间垂向均匀分层粘弹性模型计算了汶川地震同震及震后 30 年龙门山地区地表的形变特征,分析了汶川地震造成的区域地表形变对新磨滑坡的影响,以及汶川地震引起的库仑应力变化对松坪沟断裂的影响。本文采用同震和震后 GPS 观测结果来约束模拟结果,计算结果和观测结果整体拟合较好。

2008 年汶川地震发生后,不同学者给出了各自的破裂模型,这些结果存在一定的几何形态差异。根据这些破裂面倾向与倾角有无分段差异,本文分别采用 USGS(2008)的破裂模型(单段)与 Wang et al.(2011)的破裂模型(多段),在相同介质模型情形下,比对了计算结果,两者计算结果皆能较好拟合 2008 年汶川地震同震及震后松潘甘孜地快的地表位移特征,特别是本研究所关注的新磨滑坡区域,两种破裂模型在该区域的形变特别并无太大差异,因此采用了 USGS 的破裂模型来做详细讨论。

本文的介质模型为垂向均匀分层粘弹性模型,通过前人的研究资料,将松潘甘孜地块与四川盆地的地壳结构简化为一致,无法考虑龙门断裂两侧松潘甘孜地块与四川盆地地形和地壳结构的横向差异。但本文主要讨论强震区域性的形变及应力调整对滑坡和活动断裂的影响,并且松坪沟位于龙门山断裂带西缘的松潘甘孜地块一侧。因此,本文重点分析的区域主要集中在松潘甘孜地块一侧,在建模过程中重点考虑了松潘甘孜地块的地壳结构特征及参数,同时在拟合 GPS 观测结果时也重点考虑了松潘甘孜地块一侧的拟合结果。这样的模型造成在四川盆地一侧计算的地表位移结果与实际结果存在一定误差,而松潘甘孜地块一侧误差相对较小,因此对分析松潘甘孜地块一侧的形变影响较小。虽然存在以上局限性,但本文的计算分析结果仍能较好地反应汶川地震的同震与震后形变特征及其对松坪沟滑坡发育的区域形变影响。如果需要考虑其他地区的地质灾害或者更详细的震后形变特征,则需要建立更加合理的数值模型,对地壳不均匀性和地形加以考虑。

4.2 历史地震对松坪沟地质灾害的影响

如前所述,龙门山地区历史强震频发,汶川地震是对该区形变影响的最近一次强震。历史上多次地震可能对该区的形变均有影响。同时,高位岩体会对同震损伤产生放大作用,尤其高位的震裂岩体相对于坡脚的岩体更容易受到同震损伤。强震震后,近断层区域地表的形变调整所导致的地表的不均匀

形变,改变地形梯度和岩体的摩擦应力状态(Lacroix et al., 2015; Albano et al., 2015)。

震区地表的不均匀形变调整则会改变地形梯度,从而改变河流的纵比降,进而影响河流的下切速率。因此地震的形变调整会影响河流对坡脚的下切速率,影响顺层坡的稳定性:若河流比降增大,促进向源侵蚀,朝上游方向下切速率加快。便会促进沿岸坡脚岩体的应力释放,促进潜在滑动面的形成(黄润秋, 2008),这有利于夹杂软弱岩层的顺层坡失稳;若河流比降减小,则相反。因此,同震的不均匀形变会导致震裂山体破裂面及软弱岩夹层面产状发生变化,进而改变震裂山体的应力状态,并影响山体的稳定性。

关于新磨滑坡的研究,前人侧重于分析滑坡的外动力地质作用,对于内动力地质因素仅限于定性分析,鲜有考虑地震的同震与震后效应这一内动力地质作用的影响。本文的计算结果揭示,2008 年汶川地震的震后效应对新磨滑坡的形成存在明显影响。1933 年的叠溪地震使得松坪沟产生大量的震裂山体,为滑坡的发生创造了初始条件。松坪河北岸的顺层坡岩体软弱岩层及裂缝发育。历次强震之后,震区坡体在重力时变作用、雨水和冻胀等外动力作用下,坡体中的裂缝进一步发育。汶川地震同震阶段的震裂作用也有利于坡体裂缝的发育,加剧对震裂山体的破坏。根据本文计算结果,汶川地震的震后区域地表形变调整改变了松坪沟地区的地形梯度,并导致松坪沟震裂山体的摩擦应力状态发生变化。汶川地震后的区域形变调整加大了松坪河的纵比降,有利于松坪河对沿岸斜坡坡脚的下切作用,利于松坪河北岸的顺层坡发生滑坡。因此,汶川地震的区域地表形变调整对新磨滑坡的发生存在重要影响,这表明对于强震区的滑坡孕育与发生,地震的震后形变调整是分析滑坡成因不可忽略的因素。

5 结论

通过以上计算分析,本研究得出如下结论:

(1)汶川地震同震阶段,松坪沟地区地表发生了明显的形变,水平方向表现为南东向运动,垂向方向在松坪沟的北西段表现为向上运动,南东段表现为向下运动。汶川地震同震阶段松坪沟地区的东向位移分量为 26.8~42.3 cm,北向位移分量为 7.4~8.0 cm,垂向位移分量为-0.1~1.7 cm。并且震后 9 年,松坪沟地表的位移调整持续,北向位移分量累计约 2.5 cm,东向位移分量约 7.4~8.0 cm,松坪沟北西段持续抬升,南东段持续下降。

(2)汶川地震造成松坪沟地表的不均匀升降,导致沿松坪沟的地形梯度增大,可能会降低山体发生

滑坡的阈值,有利于滑坡灾害的发生。因此,新磨滑坡是内、外动力地质作用综合作用的结果。地震的震后形变调整是分析强震区地质灾害成因机理不可忽略的因素。

(3)汶川地震引发的松坪沟断裂带上的库仑应力变化表明,若松坪沟断裂为逆断层兼具左旋走滑则松坪沟断裂的活动性降低,若松坪沟断裂为逆断层则活动性不受汶川地震影响,若松坪沟为正断层或者为逆断层兼具右旋走滑断层时,汶川地震会使得断层活动危险性增加。因此,准确限定松坪沟断裂的运动性质是进一步评价汶川地震对其未来活动危险性影响的关键。

致谢:感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41874114), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. YYWF201720).

参考文献:

- 柴贺军,刘汉超,张倬元. 1995. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 6(1): 7-17.
- 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. 2008. GPS测定的2008年汶川Ms8.0级地震的同震位移场[J]. 中国科学(D辑), 38(1): 1195-1206.
- 郭飏,刘启元,陈九辉,刘立申,李顺成,李昱,王峻,齐少华. 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震P波层析成像[J]. 地球物理学报, 52(2): 346-355.
- 何思明,白秀强,欧阳朝军,王东坡. 2017. 四川省茂县叠溪镇新磨村特大滑坡应急科学调查[J]. 山地学报, 35(4): 598-603.
- 黄润秋. 2008. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 27(8): 1525-1544.
- 刘方斌,王爱国,冀战波. 2013. 库仑应力变化及其在地震学中的应用研究进展[J]. 地震工程学报, 35(03): 647-655.
- 刘启元,李昱,陈九辉,郭飏,李顺成,王峻,张绪奇,齐少华. 2009. 汶川Ms8.0地震:地壳上地幔S波速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 309-319.
- 邵崇建,李芑宇,李勇,兰恒星,周荣军,邓涛,颜照坤,闫亮,李立军. 2017. 茂县滑坡的滑动机制与震后滑坡形成的地质条件[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(4): 385-402.
- 邵志刚,周龙泉,蒋长胜,马宏生,张浪平. 2010. 2008年汶川Ms8.0地震对周边断层地震活动的影响[J]. 地球物理学报, 53(08): 1784-1795.
- 石耀霖,曹建玲. 2010. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例[J]. 地球物理学报, 53(1): 102-110.
- 孙玉军,董树文,范桃园,张怀,石耀霖. 2013. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构[J]. 地球物理学报, 56(9): 2936-2946.
- 唐荣昌,蒋能强,刘盛利. 1983. 迭溪7.5级地震的地质构造背景及其对发震构造条件的认识[J]. 地震研究, 6(3): 327-338.
- 王永革,吴忠良,周公威,黄静,秦立新. 2002. 地震应力触发研究[J]. 地震学报, 24(5): 533-551.
- 王椿镛,吴建平,楼海,周民都,白志明. 2003. 川西藏东地区的地壳P波速度结构[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 33(S1): 181-189.
- 温铭生,陈红旗,张鸣之,褚宏亮,王文沛,张楠,黄喆. 2017. 四川茂县“6·24”特大滑坡特征与成因机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 28(3): 1-7.
- 许强,李为乐,董秀军,肖先焯,范宜梅,裴向军. 2017. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 36(11): 2612-2628.
- 许向宁,王兰生. 2002. 岷江上游松坪沟地震山地质灾害与生态环境保护[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(2): 31-35.
- 许向宁,王兰生. 2005. 岷江上游叠溪地震区斜坡变形破坏分区特征及其成因机制分析[J]. 工程地质学报, 13(1): 68-75.
- 张勇,冯万鹏,许力生,周成虎,陈运泰. 2008. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 38(10): 1186-1194.

References:

- ALBANO M, BARBA S, SAROLI M, Moro Marco, Malvarosa Fabio, Costantini Mario, Bignami Christian, Stramondo Salvatore. 2015. Gravity-driven postseismic deformation following the Mw 6.3 2009 L'Aquila (Italy) earthquake[J]. Scientific Reports, 5: 16558.
- CHAI He-jun, LIU Hao-chao, ZHANG Zhuo-yuan. 1995. Landslide dams induced by DIXI earthquake in 1993 and its environmental effect[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 6(1): 7-17(in Chinese with English abstract).
- DIAO Fa-qi, WANG Rong-jiang, WANG Yue-bing, XIONG Xiong, THOMAS R. 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Earth and Planetary Science Letters, 495: 202-212.
- Group of Crustal Movement Observation. 2008. Coseismic displacement field for the 2008 Wenchuan Ms 8.0 earthquake determined by GPS[J]. Science in China (Series D), 38(1): 1195-1206(in Chinese).
- GUO Biao, LIU Qi-yuan, CHEN Jiu-hui, LIU Li-shen, LI Shun-cheng, LI Yu, WANG Jun, QI Shao-hua. 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(2): 346-355(in Chinese with English abstract).
- HE Si-ming, BAI Xiu-qiang, OUYANG Chao-jun, WANG Dong-po. 2017. On the Survey of Giant Landslide at Xinmo Village of Diexi Town, Maoxian Country, Sichuan Province, China[J]. Mountain Research, 35(4): 598-603(in Chinese with English abstract).
- HUANG Run-qiu. 2008. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 201(8): 1525-1544(in Chinese with English abstract).

- REN Jun-jie, XU Xi-wei, ZHANG Shi-min, YEATS R S, CHEN Jia-wei, ZHU Ai-lan, LIU Shao. 2018. Surface rupture of the 1933 M 7.5 Diexi earthquake in eastern Tibet: implications for seismogenic tectonics[J]. *Geophysical Journal International*, 212(3): 1627-1644.
- KOONS P O. 1994. Three-dimensional critical wedges: Tectonics and topography in oblique collisional orogens[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*: 99, Doi. 10.1029/94JB00611.
- LACROIX P, PERFETTINI H, TAIPE E. 2015. Coseismic and postseismic motion of a landslide: Observations, modeling, and analogy with tectonic faults[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(19): 6676-6680.
- LIU Fang-bin, WANG Ai-gui, JI Zhan-bo. 2013. Research on Coulomb Stress Change and Its Application in Seismology[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(3): 647-655(in Chinese with English abstract).
- LIU Qi-yuan, LI Yu, CHEN Jiu-hui, GUO Biao, LI Shun-cheng, WANG Jun, ZHANG Xu-qi, QI Shao-hua. 2009. Wenchuan Ms8.0 earthquake: preliminary study of the S-wave velocity of the crust and upper mantle[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 309-319(in Chinese with English abstract).
- LUO Yan, ZHAO Li, TIAN Jian-hui. 2019. Spatial and temporal variations of stress field in the Longmenshan Fault Zone after the 2008 Wenchuan, China earthquake[J]. *Tectonophysics*, 767: 228172.
- RICE J R. 1992. Fault Stress States, Pore Pressure Distributions, and the Weakness of the San Andreas Fault[A]//Evans B, Wong T F eds. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rock*. London: Academic Press: 475-503.
- SHAO Chong-jian, LI Peng-yu, LI Yong, LAN Heng-xing, ZHOU Rong-jun, DENG Tao, YAN Zhao-kun, YAN Liang, LI Li-jun. 2017. Liding mechanism of Maoxian landslide and geological conditional analysis of formation of post-earthquake landslide[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology edition)*, 44(4): 385-402(in Chinese with English abstract).
- SHAO Zhi-Gang, ZHOU Long-Quan, JIANG Chang-Sheng, MA Hong-Sheng, ZHANG Lang-Ping. 2010. The impact of Wenchuan M(S) 8.0 earthquake on the seismic activity of surrounding faults[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(8): 1784-1795(in Chinese with English abstract).
- SHI Yao-lin, CAO Jian-ling. 2010. Some aspects in static stress change calculation-case study on Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(1): 102-110(in Chinese with English abstract).
- SUN Yu-jun, DONG Shu-wen, FAN Tao-yuan, ZHANG Huai, SHI Yao-lin. 2013. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 56(9): 2936-2946(in Chinese with English abstract).
- TANG Rong-chang, JIANG Neng-qiang, LIU Sheng-li. 1983. Recognition of the geological setting and the seismogenic condition for the DIXI magnitude 7.5 earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 6(3): 327-338(in Chinese with English abstract).
- WAN Yong-ge, WU Zhong-liang, ZHOU Gong-wei, HUANG Jing, QIN Li-xin. 2002. Research on seismic stress triggerin[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(5): 533-551(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-yong, WU Jian-ping, LOU Hai, ZHOU Min-du, BAI Zhi-ming. 2003. P Wave crustal velocity structure in west-ern Sichuan and eastern Tibetan region[J]. *Science in China (Series D)*, 33(Suppl.): 254-265(in Chinese).
- WANG Qi, QIAO Xue-jun, LAN Qi-gui, FREYMUELLER J, YANG Shao-min, XU Cai-jun, YANG Yong-lin, YOU Xin-zhao, TAN Kai, CHEN Gang. 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan[J]. *Nature Geoscience*, 4(9): 634-640.
- WANG R, LORENZO-MARTÍN 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[J]. *Computers & Geosciences*, 32(4): 527-541.
- WEN Ming-sheng, CHEN Hong-qi, ZHANG Ming-zhi, CHU Hong-liang, WANG Wen-pei, ZHANG Nan, HUANG Zhe. 2017. Characteristics and formation mechanism analysis of the “6·24”catastrophic landslide of the June 24 of 2017, at Maoxian, Sichuan[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 28(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- XU Qiang, LI Wei-le, DONG Xiu-jun, XIAO Xian-xuan, FAN Xuan-mei, PEI Xiang-jun. 2017. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(11): 2612-2628(in Chinese with English abstract).
- XU Xiang-ning, WANG Lan-sheng. 2002. Mountain hazard caused by earthquake in Songping River upper Minjiang and its controlling[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(2): 33-37(in Chinese with English abstract).
- XU Xiang-ning, WANG Lan-sheng. 2005. On the Mechanism of Slope Deformation-failures and Their Distribution Characteristics in a High Earthquake-intensity Area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 13(1): 68-75(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Y, TENG J, WANG Q, GUOZE H. 2014. Density structure and isostatic state of the crust in the Longmenshan and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 619-620(6): 51-57.
- ZHAO Si-yuan, MASAHIRO Chigira, WU Xi-yong. 2018. Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China[J]. *Engineering Geology*, 246: 187-197.
- ZHANG Yong, FENG Wan-peng, XU Li-sheng, ZHOU Cheng-hu, CHEN Yun-tai. 2008. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1186-1194(in Chinese).