

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.053>



2022 年芦山 $M_s6.1$ 地震应力触发及地震危险性分析

肖 阳, 单 斌*, 刘成利, 周万里

中国地质大学地球物理与空间信息学院地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

摘 要: 2022 年 6 月 1 日, 四川芦山县地区发生了 $M_s6.1$ 地震, 造成 4 死 14 伤以及周围地区多县经济损失。考虑到地区丰富的断层背景、历史地震以及地震空区, 对该地区重要历史地震序列的回溯研究以及未来危险性评估对防震御灾具有重要意义。基于弹性位错理论以及地区岩石圈分层模型, 计算了 $M_w7.9$ 汶川地震以及 $M_s7.0$ 芦山地震对本次地震在不同深度上的同震及震后粘弹松弛效应影响, 讨论历史地震对本次地震发生的影响。同时, 对未来十年该地区及周边活跃断层的应力积累进行计算, 圈定未来地震危险性较高的区域。结果表明: (1) $M_w7.9$ 汶川地震导致 2022 年 $M_s6.1$ 芦山地震震中的同震应力增量为 0.014 MPa, 可能有效的促进了芦山地震的发生, 而 $M_s7.0$ 芦山地震的发生导致其应力释放 0.174 MPa, 起到抑制作用。考虑到震后粘弹松弛的影响, 本次地震震中发震前应力积累为 0.086 MPa, 已恢复到较高应力水平, 具备发震背景; (2) 大邑地震空区中段、抚边河断裂带未来库仑应力增量进一步提升, 地震危险性较强。

关键词: 芦山地震; 汶川地震; 地震应力触发; 地震危险性; 库仑应力; 地震学。

中图分类号: P315.5

文章编号: 1000-2383(2024)08-2979-13

收稿日期: 2023-01-02

Stress Triggering and Seismic Hazard Assessment of the 2022 Lushan $M_s6.1$ Earthquake

Xiao Yang, Shan Bin*, Liu Chengli, Zhou Wanli

Hubei Subsurface Multi-Scale Imaging Key Laboratory, Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: On June 1, 2022, an earthquake of magnitude 6.1 occurred in Lushan, Sichuan, causing 4 deaths, 14 injuries and economic losses in many surrounding counties. This region is characterized by a dense fault system and intense historical earthquakes, as well as a seismic gap that receives much attention, so a retrospective study of major historical earthquake sequences and their impacts on seismic risks in the region is of great significance for seismic hazard mitigations in the future. Based on the elastic dislocation theory and the regional lithosphere layered model, this paper calculates the co-seismic and post-earthquake viscoelastic relaxation effects of the $M_w7.9$ Wenchuan earthquake and the $M_s7.0$ Lushan earthquake on the epicenter of the 2022 earthquake at different depths, and discusses the impacts of historical earthquakes on the occurrence of this earthquake. Moreover, stress accumulation on active faults in the area and surrounding areas in the next ten years is calculated to delineate areas with high seismic risk in the future. The results show that: (1) The $M_w7.9$ Wenchuan earthquake resulted in a stress increment of 0.014 MPa at the epicenter of the 2022 $M_s6.1$ Lushan earthquake, which may have effectively promoted the occurrence of this earthquake, while the $M_s7.0$ Lushan earthquake caused a stress release of 0.174 MPa, which delays the occurrence of the 2022 earthquake. Considering the influence of viscoelastic relaxation after the 2008 and 2013 earthquakes, stress

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC1500302); 国家自然科学基金 (No. 41674106)。

作者简介: 肖阳 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事群震震害机制、地震危险性研究。ORCID: 0000-0001-7341-5854。E-mail: 1353373281@qq.com

* **通讯作者:** 单斌, E-mail: binshan@cug.edu.cn

引用格式: 肖阳, 单斌, 刘成利, 周万里, 2024. 2022 年芦山 $M_s6.1$ 地震应力触发及地震危险性分析. 地球科学, 49(8): 2979–2991.

Citation: Xiao Yang, Shan Bin, Liu Chengli, Zhou Wanli, 2024. Stress Triggering and Seismic Hazard Assessment of the 2022 Lushan $M_s6.1$ Earthquake. *Earth Science*, 49(8): 2979–2991.

increment of the epicenter is 0.086 MPa, which has already recovered to a higher stress level before its occurrence. (2) The Coulomb stress increment in the middle section of the Dayi seismic gap and the Fubianhe fault zone will further increase in the future, and so does the seismic risk.

Key words: Lushan earthquake; Wenchuan earthquake; stress triggering; seismic hazard; Coulomb stress; seismology.

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2022 年 6 月 1 日 17 时 0 分 08 秒,四川雅安市芦山县(102.94°E, 30.37°N)发生 $M_s6.1$ 地震,震源深度 17 km(<https://news.ceic.ac.cn/>),周围芦山县、宝兴县人口相对比较密集,截止 2022 年 6 月 3 日共造成 4 死 42 伤. 发震区域及周边断层系统较多且分布复杂(图 1)(邓起东等, 2003; 许才军等, 2009; 单斌等, 2013),历史上发生了 2008 年汶川 $M_w7.9$ 、2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震等破坏性大地震,前人研究认为 2008 年汶川地震对 2013 年芦山地震存在有效促进作用(单斌等, 2013),而本次地震发震断层与 2013 年芦山地震发震断层距离上十分接近,可能具有相似的孕震背景(图 1),但二者之间存在长达 9 年的时间差,因此研究 2008 年汶川地震、2013 年芦山地震对本次地震的影响对了解本次地震孕育发生的物理学机制具有重要的科学意义. 同时,此次地震震中位于两处历史地震空区中间,有关空区断层地震危险性的研究

一直存在争议(Pei *et al.*, 2014; 王健等, 2018; Liu *et al.*, 2020; 李兵等, 2022),虽然此次地震并未导致整个空区断层破裂,但是研究本次地震和历史地震对该空区及周边重要断层应力积累的影响对区域地震危险性评估、国家地震安全等问题具有重要参考价值.

红色沙滩球为 2022 年芦山地震震源机制解,白色五角星表示 2008 年汶川地震以及 2013 年芦山地震,灰色矩形及圆点对应其各自的地震破裂面(单斌等, 2009, 2013)和余震分布(郑勇等, 2009; Wu *et al.*, 2017),绿色正方形表示周边重要城市,红色圆圈表示历史地震(王晓山等, 2015),黑色圆框圈闭的区域为历史地震空区,其中地震空区 A 为大邑地震空区

研究表明,地震之间通过应力传输作用,存在相互影响、相互触发的关系(King *et al.*, 1994; Toda *et al.*, 2005; Jia *et al.*, 2014; 单斌等, 2017; Jia *et al.*, 2018; 靳志同等, 2019). 地震位错导致的应力变化会改变震区周边应力场分布(Jia *et al.*, 2012),局部

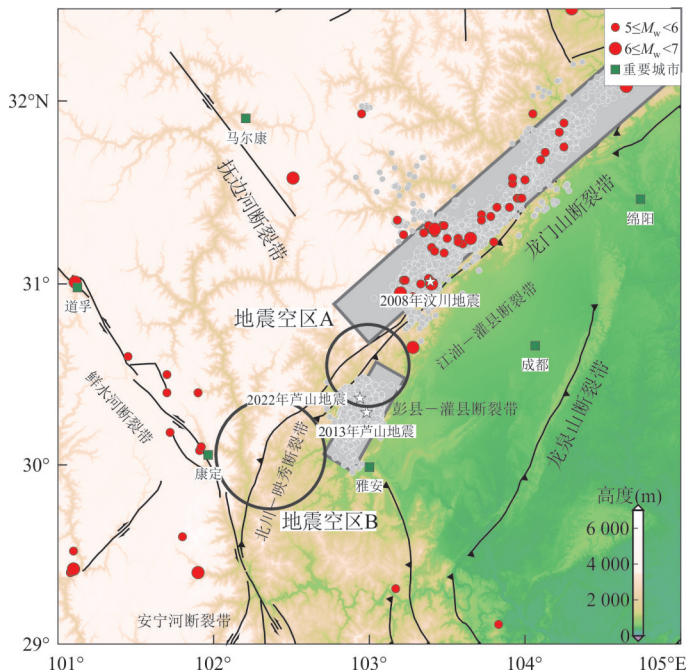


图 1 2022 年芦山地震及周边历史地震、地区构造背景图

Fig. 1 2022 Lushan earthquake and historical earthquakes, regional tectonic background map in the surroundings

表 1 地震位错模型										
Table 1 Seismic dislocation model										
发震时间	震级(M)	纬度($^{\circ}\text{N}$)	经度($^{\circ}\text{E}$)	Stirke/dip/rake/ $^{\circ}$	深度(km)	长(km)	宽(km)	走向滑 动(m)	倾向滑 动(m)	参考文献
2008/5/12	$M_w7.9$	31.013	103.392	Wang <i>et al.</i> (2011)	8.2	—	—	—	—	Wang <i>et al.</i> (2011)
2013/4/20	$M_s7.0$	30.291	102.983	214/38/102	17.6	43.652	18.197	-0.137	0.646	房立华等(2013) 徐锡伟等(2013)
2022/6/1	$M_w6.0$	30.370	102.940	211/39/98	17.0	11.482	7.079	-0.076	0.544	

表 2 岩石圈分层模型					
Table 2 Lithospheric layering model					
	深度(km)	P波波速(km/s)	S波波速(km/s)	密度(kg/m^3)	粘滞系数($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
1	0~1	2.5	1.2	2.10	-
2	1~2	4.0	2.1	2.40	-
3	2~22	6.1	3.5	2.75	-
4	22~42	6.3	3.6	2.80	4.0×10^{18}
5	42~46	7.2	4.0	3.10	2.0×10^{18}

的应力增强会促进后续地震的发生,反之应力下降会抑制地震的发生.目前,应力触发的研究广泛地运用于强震间的触发关系(单斌等,2017)、主震对周围地区余震发生的影响(King *et al.*,1994;靳志同等,2019;李平恩等,2022)、地震危险性(周仕勇等2008;王永革等,2009;邵志刚等,2010;邵延秀等,2021)、地震活动性以及迁移性(Xiong *et al.*,2010;Pope and Mooney,2020)等研究中.而应力触发的研究机制包括同震静态应力触发、震后粘弹松弛(余滑、孔隙回弹)应力触发、动态应力触发以及考虑深部滑移(deepslip)的震间构造应力积累等.汶川地震的发生距今已有14年,因此本文库仑应力模拟计算中主要考虑同震静态应力传输和震后粘弹松弛效应的影响.

本文利用弹性位错理论以及岩石圈分层模型(郑勇等,2009),考虑此次地震震源深度不确定性,计算2008年汶川地震、2013年芦山地震在不同深度上引起的同震及震后粘弹松弛应力变化,进一步分析2008年汶川地震、2013年芦山地震与本次地震之间的触发关系,讨论两次芦山地震的差异性,以及这三次地震对周边主要活动断层未来十年应力积累的共同影响,明确应力增强的区域,判断历史地震空区及其它活动断层的地震危险性,为该地区未来圈定地震危险区以及地震研究提供参考依据.

1 方法和数据

本文研究区域为 $101^{\circ}\text{E}\sim105^{\circ}\text{E}$, $29^{\circ}\text{N}\sim32^{\circ}\text{N}$.我们将研究区域分成了 100×100 的网格,基于断层破裂模型和岩石圈分层模型,计算每个网格点上的库仑应力变化,并对历史地震触发关系以及未来地震危险性进行评估.

1.1 方法及同震破裂模型

基于地区库仑应力变化(ΔCFS)(Scholz *et al.*,1990)的计算公式:

$$\Delta\text{CFS}=\Delta\tau_s+\mu'\Delta\sigma_n,$$

式中: τ_s 表示断层面的剪应力; μ' 为等效摩擦系数; σ_n 表示断面上的正应力.等效摩擦系数 μ' 一般取0.2~0.8(Stein,1999),根据经验一般取中间值,即 $\mu'=0.4$ (King *et al.*,2001;单斌等,2013),但对于逆冲型地震取值偏低(Xiong *et al.*,2010),本文也选取其他摩擦系数检验参数设置对计算结果的影响.本研究根据地震位错模型计算经验公式(Wells and Coppersmith,1994)以及历史地震参数(房立华等,2013;徐锡伟等,2013;宫猛等,2020)计算相关历史地震破裂模型(表1),对于复杂的汶川地震引入Wang *et al.*(2011)的破裂模型,然后应用PSGRN/PSCMP(Wang *et al.*,2006)库仑应力计算软件进行计算.

从本次芦山地震的余震的精定位结果来看(<https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/279025.html>),发震断层的倾向为东南方向.结合余震分布(刘成利,

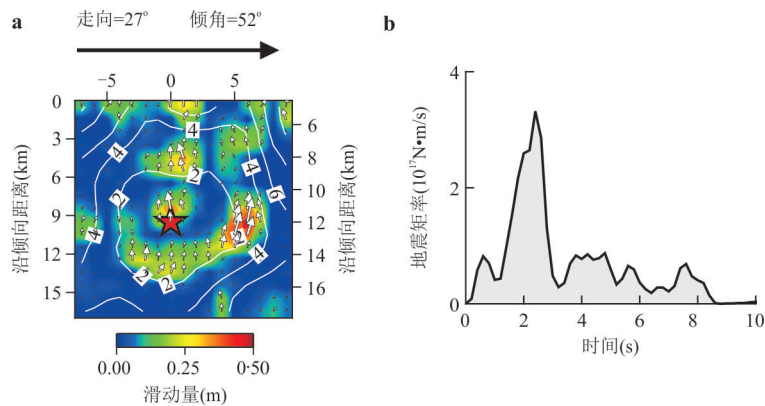


图 2 本次芦山地震同震破裂模型

Fig. 2 The coseismic rupture model of the Lushan earthquake

a. 芦山 $M_s6.1$ 地震的破裂模型, 箭头标示破裂滑移方向和大小, 白色等值线为破裂开始时间; b. 震源时间函数.

表 3 主要断层参数

Table 3 Major fault parameters

断层名称	起点	终点	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)	滑移速率(mm/a)
1 鲜水河 A	100.534°E 31.448°N	101.933°E 30.038°N	142.0~159.5	90	0~45	15±5
2 鲜水河 B	101.966°E 30.010°N	102.336°E 29.029°N	142.0~159.5	90	0~45	15±5
3 抚边河	101.720°E 32.267°N	102.526°E 31.371°N	160~205	>70	135	6.7±2.3
4 岷江	103.679°E 32.133°N	103.646°E 31.752°N	180	45~56	45	<1
5 彭县—灌县 A	102.728°E 30.010°N	102.806°E 30.248°N	200~207	44	94	<1
6 彭县—灌县 B	102.806°E 30.286°N	103.657°E 30.971°N	200~207	44	94	<1
7 北川—映秀 A	102.257°E 29.714°N	102.403°E 30.171°N	205	33	142	0.07·0.5
8 北川—映秀 B	102.425°E 30.190°N	103.019°E 30.629°N	205	33	142	0.07·0.5
9 江油—灌县	103.668°E 30.971°N	104.731°E 31.762°N	220	23	100	0.6
10 江油—广元	104.743°E 31.771°N	105.403°E 32.229°N	225	50	104	<1
11 龙泉山 A	103.914°E 29.667°N	104.194°E 30.162°N	30	50	90	—
12 龙泉山 B	104.060°E 30.171°N	104.474°E 30.857°N	30	50	90	—

个人通讯)构建了发震断层模型(走向 27°, 倾角 52°, 滑动角 98°), 通过联合反演近、远场体波数据获取了此次芦山地震的同震破裂模型(如图 2 所示). 结果显示, 地震破裂主要以逆冲为主, 以震源为中心, 呈现明显的非均匀破裂. 破裂主要集中在 6~16 km 范围内, 最大滑动量约 0.5 m.

1.2 岩石圈分层模型、主要断层参数

对于震区岩石圈分层模型, 郑勇等(2009)结合人工地震和多种地震模型的研究结果与前人结合人工地震剖面 and 广角反射数据得到的青藏高原东边缘地壳速度结构(王椿镛等, 2003)、Li *et al.* (2012)的研究结果均吻合, 因此本文选取了郑勇等(2009)的平均速度模型(表 2), 此外还收集了各层的粘滞系数(张晁军等, 2008; Shao *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014; 黄禄渊等, 2019), 同时基于前人研究中该地区的活跃断层数据(单斌等, 2009), 我

们收集了 101°E~105°E, 29°N~32°N 范围内的活跃断层参数(表 3).

2 数值结果

2.1 历史地震对 2022 年芦山地震的影响

根据 Wang *et al.* (2011) 的汶川地震破裂模型、刘成利等(2013)的芦山地震破裂模型、本次地震的同震破裂模型(图 2)以及岩石圈分层模型、和本次芦山地震接收断层参数, 我们利用 PSGRN/PSC-MP 软件计算得到了 2008 年汶川地震、2013 年芦山地震在本次地震震中位置导致的库仑应力分布(同震+震后库仑应力)(图 3), 为了更好地了解 2008 年汶川地震、2013 年芦山地震分别对本次芦山地震的同震影响, 分别计算了这两个地震对本次地震震中的同震库仑应力影响(图 4).

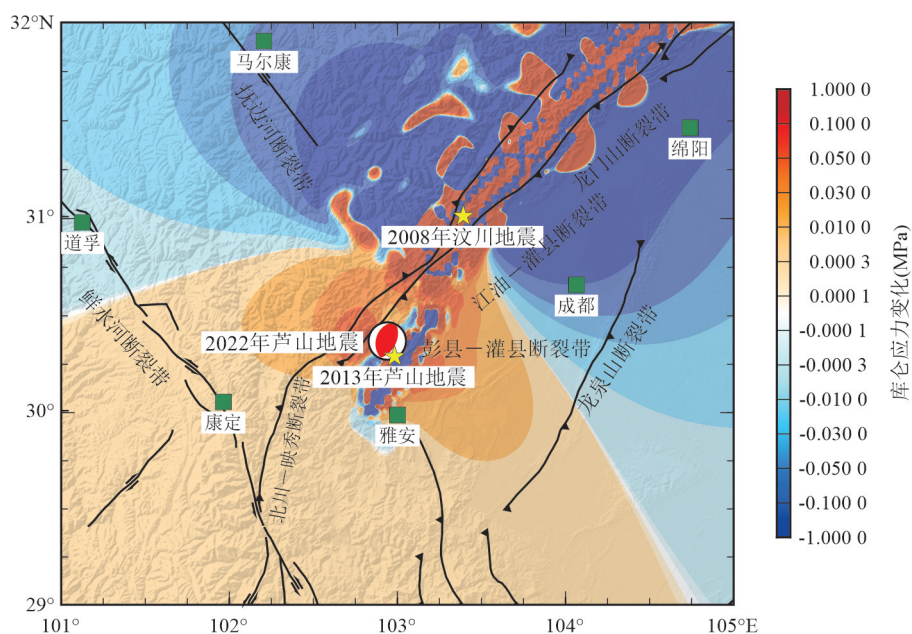


图 3 2008 年汶川 $M_w7.9$ 地震和 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震对 2022 年芦山地震的库仑应力影响

Fig. 3 Influence of Coulomb stress accumulated from 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake and 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake on the 2022 Lushan earthquake

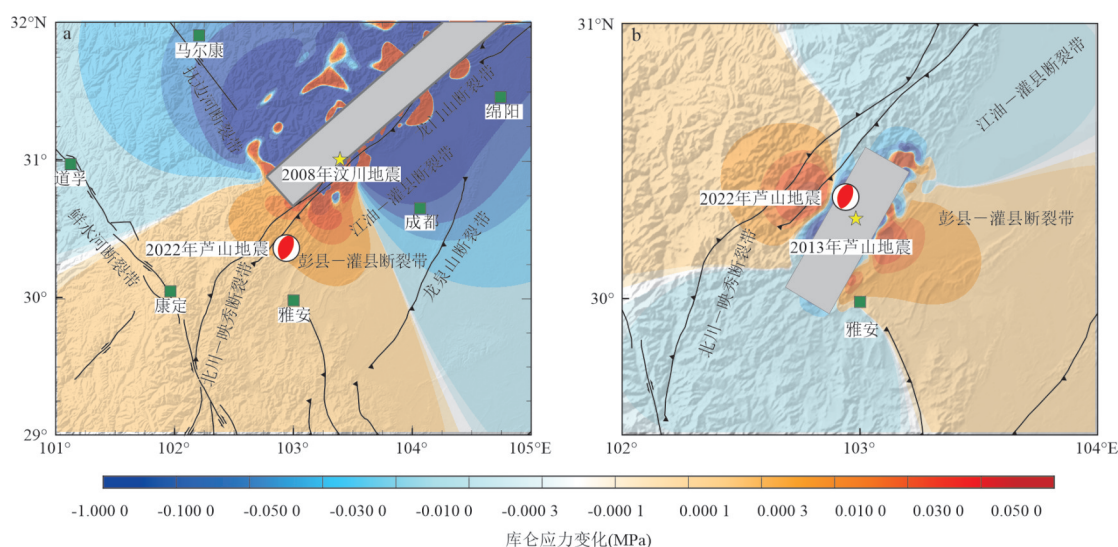


图 4 2008 年汶川 $M_w7.9$ 地震和 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震对 2022 年芦山地震的同震库仑应力影响

Fig. 4 Coseismic Coulomb stress changes caused by 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake and 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake on the 2022 Lushan earthquake

a. 2008 年汶川地震对本次地震的同震库仑应力影响; b. 2013 年芦山地震对本次地震的同震库仑应力影响. 计算选取的参数同图 3

计算结果深度为 10 km, 考虑到逆冲型为主的地震有效摩擦系数取值为 0.2, 地壳粘滞系数取值为 1×10^{20} Pa·s, 地幔粘滞系数取值为 1×10^{19} Pa·s.

结果显示, 2008 年汶川地震对本次地震的同震库仑应力影响为 +0.014 MPa, 达到了地震触发的阈值 (Harris *et al.*, 1998; 万永革等, 2009; 单斌等, 2013), 而 2013 年芦山地震对本次地震的同震库仑

应力的影响为 -0.174 MPa, 因此我们认为汶川地震的发生有利于本次芦山地震的发生, 而 2013 年芦山地震的发生, 导致了本次地震震中位置的应力释放, 且要大于汶川地震导致的应力积累, 但该计算结果的深度在 10 km, 考虑到本次芦山地震为逆冲型地震, 且余震分布在 0~20 km 深度, 因此, 我们对其选取了其他深度进行计算 (图 5, 图 6).

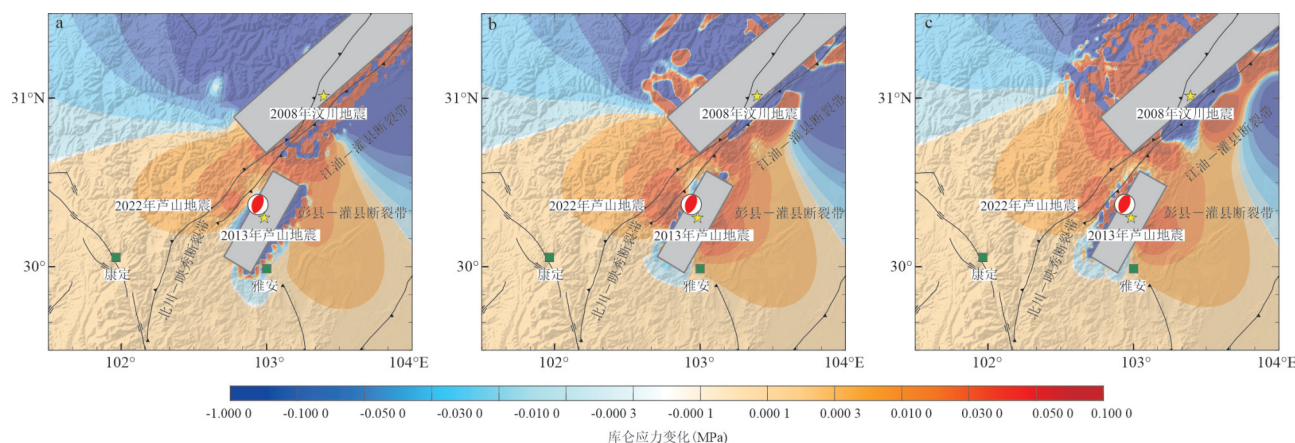


图 5 不同深度 2008 年汶川 $M_w7.9$ 地震和 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震对 2022 年芦山地震的库仑应力影响

Fig. 5 Accumulated Coulomb stress changes caused by 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake and 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake at different depths on the 2022 Lushan earthquake

a、b、c 分别表示 5 km、15 km、20 km 深度的结果示意图

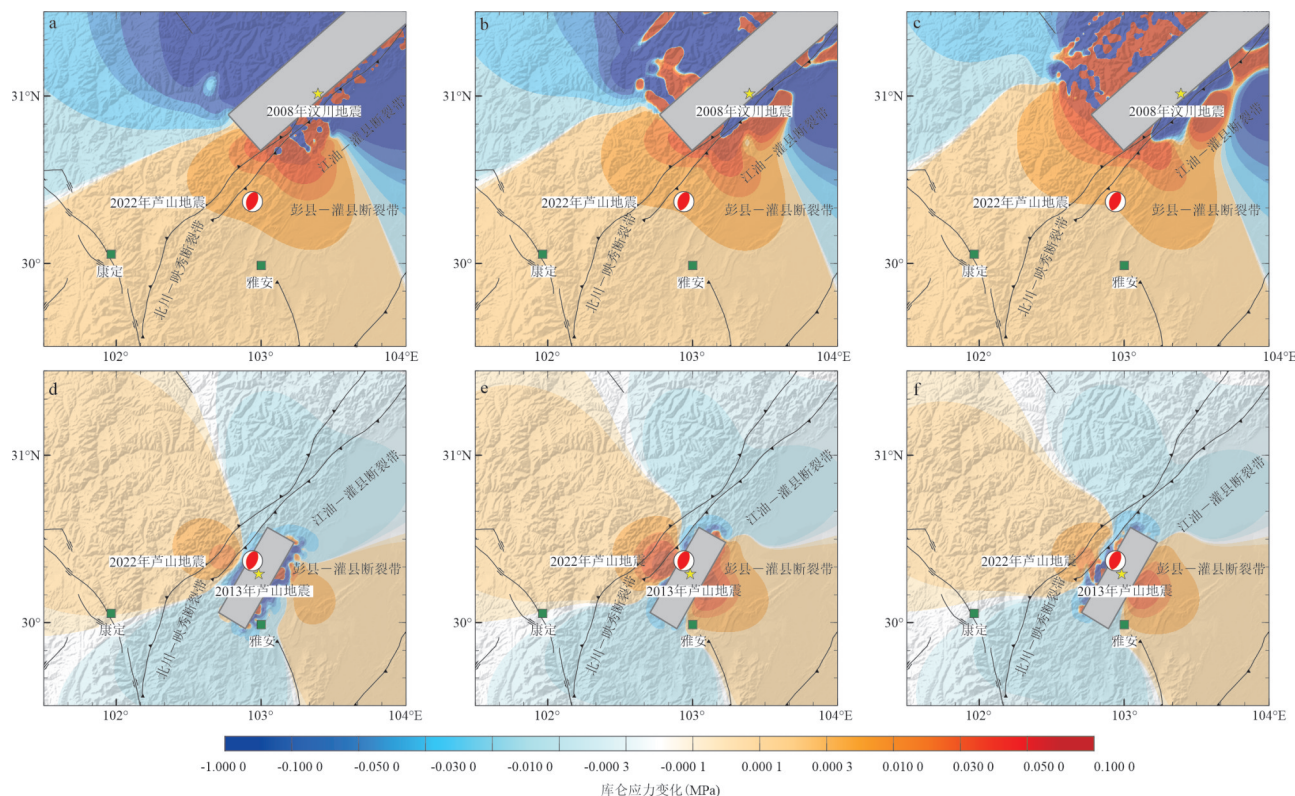


图 6 不同深度 2008 年汶川 $M_w7.9$ 地震和 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震对 2022 年芦山地震的同震库仑应力影响

Fig. 6 Respective coseismic Coulomb stress changes caused by 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake and 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake at different depths on 2022 Lushan earthquake

a、b、c 分别表示汶川地震对本次地震在 5 km、15 km、20 km 深度的同震影响；d、e、f 分别表示 2013 年芦山地震对本次地震在 5 km、15 km、20 km 深度的同震影响

计算结果显示,在各个深度上,2008 年汶川地震对本次地震震中处的同震库仑应力的影响均为正. 在 5 km 和 20 km 深度,2013 年芦山地震对本次地震震中处应力的影响均为负,历史地震对本次地震震中的同震、震后库仑应力之和也均为负. 而对于 15 km 的分布,处于应力积累与影区交界处,所以我们对震中进行单独计算,得到在 15 km 深度,2013 年芦山地震对本次地震的同震影响为 -0.108

MPa, 而历史地震对其同震及震后库仑应力为 -0.076 MPa. 因此在不同深度的结果均与 10 km 深度的计算结果相吻合, 深度的改变对结果不存在影响, 我们认为汶川地震的有效的促进了 2022 年芦山地震的发生, 而 2013 年芦山地震的发生对其有抑制作用.

2.2 不确定性分析

考虑到 ΔCFS 的计算结果可能受到接受断层的有效摩擦系数、地层粘滞系数以及断层模型的选取存在不确定性的影响, 因此我们对计算结果进行了不同参数取值下的结果校验, 以确定计算结果的准确性.

基于前人研究的结果显示, 有效摩擦系数的取值对于逆冲型地震偏低, 对于走滑型地震偏高 (Xiong *et al.*, 2010; 冯雅彬等, 2022), 而在前面的计算过程中只选取 $\mu'=0.2$ 的取值, 因此本文分别选取 $\mu'=0.0$ 、 $\mu'=0.4$ 、 $\mu'=0.6$ 和 $\mu'=0.8$ 进行讨论. 同时, 参考前人的研究 (单斌等, 2013), 考虑芦山地区地下粘滞系数对结果的影响, 选取了 3 种模型情况进行讨论, 其中 η_c 和 η_m 分别表示下地壳和上地幔的粘滞系数, 计算深度为 10 km 深度, 得到了结果汇总 (表 4, 表 5).

对于本次芦山地震的库仑应力计算结果, 摩擦系数 μ' 取值变化时, 地震震源处同震应力及库仑应力之和的大小均发生了变化, 但并不改变其位置处应力的积累趋势 (表 4), 考虑到本次地震以逆冲型为主, 因此我们选取较小的摩擦系数 0.2 对后面结果计算. 对于不同粘滞系数取值计算时, 模型 III、IV 的结果显示粘滞系数的选取对于该地区应力计算存在较大影响, 考虑到该地区前人 GPS 数据以及震

后形变数据的研究 (张晁军等, 2008; Shao *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014; 黄禄渊等, 2019), 该地区的粘滞系数取值在 $10^{17} \sim 10^{19}$ Pa·s 之间, 且以 10^{17} Pa·s 为主, 因此模型 IV 的结果较为可靠, 所以本次芦山地震震中在发震前应力已经恢复到 $+0.086$ MPa.

考虑到接收断层参数对计算结果存在较大影响, 因此在不改变摩擦系数和粘滞系数取值的情况下, 我们对比了鲁人齐等 (2022)、雷兴林 (个人通讯) 以及中国地震台网中心提供的相关震源机制解对本次计算结果的影响 (表 6). 结果显示不同的接收断层参数选取仅改变计算结果数值的大小, 但对其变化趋势不造成影响, 因此本文依旧选取刘成利 (个人通讯) 的结果进行分析.

根据上文的讨论确定了 $10^{17} \sim 10^{19}$ Pa·s 的粘滞系数取值范围, 并在摩擦系数取 0.2 的基础上计算了 2022 年芦山地震震中自 2008 年 5 月 12 日以来的库仑应力变化 (图 7). 结果显示 2022 年芦山地震受到汶川地震的同震触发作用, 同时 2008 年到 2013 年间的震后粘弹松弛效应使得本次地震震中库仑应力得到释放, 在 2013 年芦山地震发震前达到 -0.001 MPa 左右. 2013 年芦山地震发生后, 本次地震震中能量得到较大的释放, 而此后至本次地震发震前的震后粘弹松弛效应使得应力在本次地震震中库仑应力积累为 0.086 MPa.

2.3 芦山地震周边地区断层未来十年的地震活动性

考虑到本次芦山地震距离 2008 年汶川地震已有 14 年, 芦山及周边地区的活跃断层的应力状态受到粘弹松弛效应的影响会存在改变 (单斌等, 2013), 同时本次地震对周边地区也存在同震库仑

表 4 不同有效摩擦系数选取的影响					
Table 4 Influence of different effective friction coefficients					
历史地震导致的 2022 年芦山地震震中库仑应力变化 (MPa)					
	$\mu'=0.0$	$\mu'=0.2$	$\mu'=0.4$	$\mu'=0.6$	$\mu'=0.8$
同震	-0.120	-0.156	-0.191	-0.227	-0.263
同震+震后	-0.110	-0.141	-0.173	-0.204	-0.235

表 5 不同粘滞系数模型选取的影响				
Table 5 Influence of different viscosity coefficients				
历史地震导致的 2022 年芦山地震震中库仑应力变化 (MPa)				
	模型 I $\eta_c/10^{21}$ Pa·s	模型 II $\eta_c/10^{20}$ Pa·s	模型 III $\eta_c/10^{19}$ Pa·s	模型 IV $\eta_c/10^{18}$ Pa·s
	$\eta_m/10^{20}$ Pa·s	$\eta_m/10^{19}$ Pa·s	$\eta_m/10^{18}$ Pa·s	$\eta_m/10^{17}$ Pa·s
同震+震后	-0.154	-0.141	-0.027	$+0.086$

表 6 不同接收断层参数选取的影响				
Table 6 Influence of different Receiving fault parameters				
选取不同接收断层参数时 2022 年芦山地震震中库仑应力变化 (MPa)				
	鲁人齐等 (2022)		中国地震台网中心	
同震	-0.156	-0.125	-0.135	-0.085
同震+震后	$+0.086$	$+0.104$	$+0.111$	$+0.070$

应力的影响,而且 Liu *et al.* (2020) 的研究表明,芦山地区周边存在两个地震空区,历史上未发生过大地震,其中大邑地震空区的应力积累状态一直存在争议(陈运泰等, 2013; Pei *et al.*, 2014; 梁春涛等, 2018), Pei *et al.* (2014) 基于地震波反演的研究认为大邑地震空区下方不利于应变能积累, 因此孕育大地震的可能性较小. 但李兵等(2022)在大邑地震空区的应力测量结果认为, 大邑地震空区断层内摩擦系数 μ_w 取 0.6 时通过最大剪应力面摩擦滑动线的斜

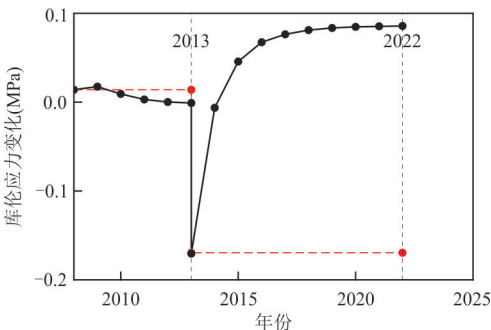


图 7 2022 年芦山地震震中 10 km 深度库仑应力变化
Fig. 7 Variation of Coulomb stress at 10 km depth from the epicenter of the 2022 Lushan earthquake
黑色实线表示 2008 年汶川地震和 2013 年芦山地震对同震及震后库仑应力之和, 红色虚线表示这两个地震各自造成的同震库仑应力变化

率 μ_m 的值为 0.51, 并且其深部具备应力积累的温度条件, 与前人的结果相吻合(Luo *et al.*, 2019). 因此, 我们对芦山地区及周边重要断层上未来十年的应力状态以及各历史地震对其影响进行了计算(图 8).

基于结果, 我们圈定了未来应力积累严重的几个地区, 即抚边河断裂带、大邑地震空区以及彭县—灌县断裂带南端. 这些地区地震危险性相对较高, 2022 年 6 月 10 日马尔康群震的发生和本次计算结果相吻合, 也证明了我们计算结果的准确性. 而地震空区 B 内应力积累量较小, 地震危险性较低. 同时, 李兵等(2022)的应力测量结果认为大邑地震空区南端存在较大应力积累, 虽然我们的计算结果显示本次地震的发生释放了附近断层的能量, 但我们仍需关注大邑地震空区中部断层的应力积累状况.

白色五角星表示 2008 年汶川、2013 年芦山、2022 年芦山地震, 绿色正方形表示重要城市, 黑色圆框圈闭的区域为历史地震空区, 其中地震空区 A 为大邑地震空区

除此之外, 我们还分别计算了这 3 个地震对周围重要断层的影响(图 9), 结果显示, 2008 年汶川地震同震和震后粘弹松弛效应的影响, 导致抚边河断

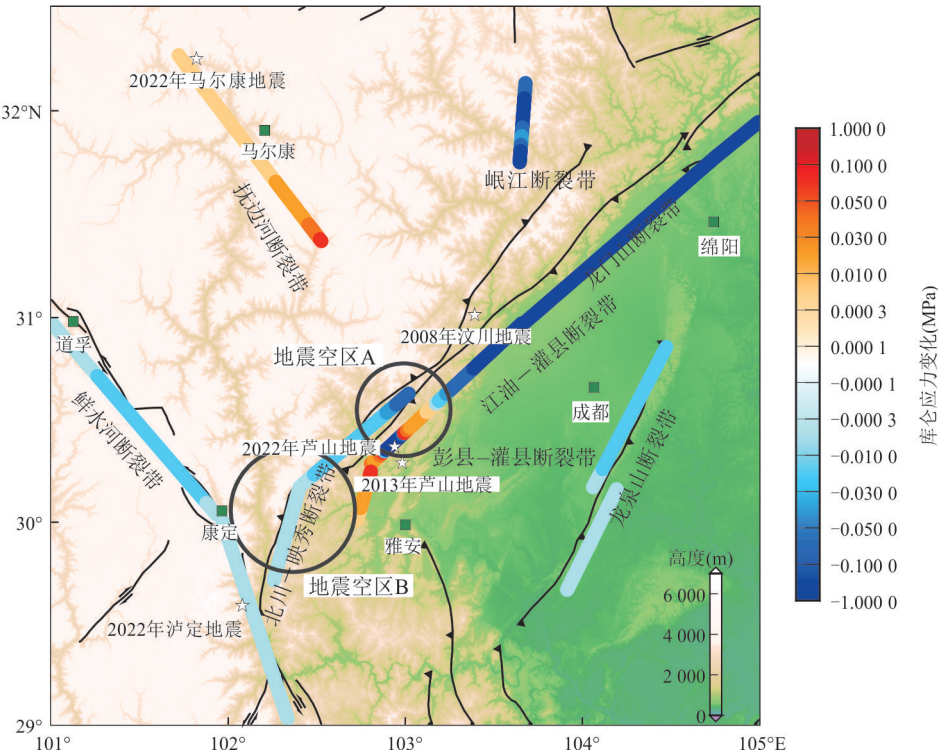


图 8 未来十年芦山地区周边断层地震危险性
Fig. 8 Earthquake hazard on surrounding faults in the Lushan area in the next decade

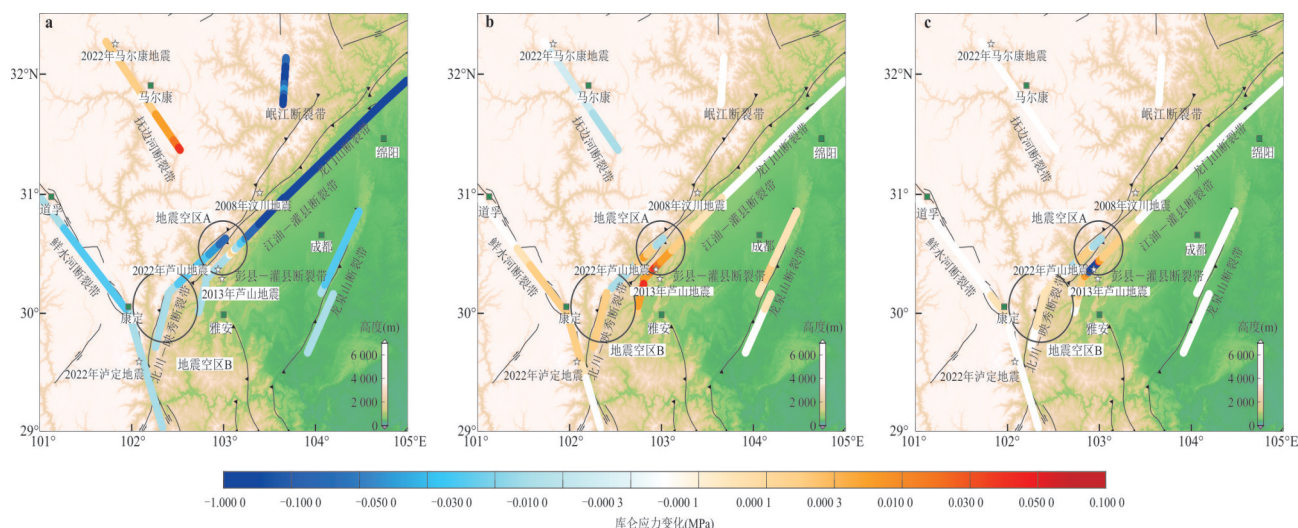


图9 各历史地震对周边断层的影响

Fig. 9 Influence of historical earthquakes on surrounding faults

a、b、c分别表示2008年汶川地震、2013年芦山地震、2022年芦山地震对周围断层未来的影响。白色五角星表示2008年汶川、2013年芦山、2022年芦山地震、2022年泸定地震,绿色正方形表示重要城市,黑色圆框圈闭的区域为历史地震空区,其中地震空区A为大邑地震空区

裂应力积累较大,但变化量在 $0.0003\sim0.01$ MPa之间,所以2008年汶川地震对2022年6月10日马尔康群震的发生存在一定作用,但不是其发生的决定性因素(图9a)。结合图8,图9,鲜水河断裂带受2008年汶川地震的影响应力得到释放,又受2013年芦山地震的影响发生一定的应力积累,但断裂总体的库仑应力得到释放,而库仑应力的释放仅代表该处发生地震的可能性下降或者迟滞地震的发生,并不意味着该地区今后不会发生地震。同时由于其库仑应力释放的量级本身较小,而鲜水河断裂约为 15 ± 5 mm/a(Allen *et al.*, 1991),构造应力积累速度较大,因此受周边地震释放的库仑应力要远小于其本身断层构造应力的积累,其断层的闭锁状态和断层两侧较大的滑动速率才是其发生的原因。

3 结论

基于以上结果,我们对2022年芦山地震以及相关问题进行讨论。

3.1 2022年芦山地震的孕震机制

相关学者通过余震定位初步判断为2013年芦山地震“y”型断层系统中的反冲断层发生了活动(<https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/279024.html>),我们的计算结果表明汶川地震对此次地震震中位置的同震应力加载为 0.014 MPa,而2013年芦山地震导致其释放了 0.174 MPa,表明本次地震受到了汶川地震的促进作用,受到芦山地震的抑制作用。虽

然历史地震的影响导致了本次地震震中的应力释放,但考虑发震区地下粘滞系数的取值(张晔军等, 2008; Shao *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014; 黄禄渊等, 2019),我们计算得到本次地震发震前震中处应力为 $+0.086$ MPa,结合前人的研究(单斌等, 2013),我们认为2008年汶川地震导致了2022年芦山地震震中较大的应力积累,而2008年至2013年间的震后粘弹松弛效应、2013年芦山地震的发生均释放了本次震中的应力积累,因此导致了本次芦山地震的延迟。而2013年芦山地震发震后的粘弹松弛效应的影响使本次芦山地震发震断层的应力重新积累到较高水平,从而发生了本次地震。

3.2 历史地震空区和周边断层的地震危险性

对于大邑地震空区的应力积累问题,近期的钻孔测量结果也表明其南端存在较高应力积累(李兵等, 2022),赵静等(2013, 2018)认为大邑地震空区的最大水平应力值要明显高于上次芦山地震前,而本次地震的震中距离空区断层十分近,本文结果显示本次地震发生导致地震空区断层南端的应力得到了释放,但未来在其中部会存在较大的应力积累,地震危险性较高。对于北川—映秀断裂带附近的地震空区B,其应力变化为负,因此危险性较低。除此之外,抚边河断裂带的地震危险性较高,该断裂应力积累情况较严重,发生地震的可能性较大,因此后续我们仍需要关注此断裂的危险性。

致谢:本文震中及相关数据参考自中国地震台

网中心 (<https://news.ceic.ac.cn/>) 和张喆等 (<https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/279024.html>); 相关图件采用 GMT 画图软件绘制 (Wessel and Smith, 1998), 同时感谢编委会和评审专家对本文的修改意见, 在此一并表示非常感谢。

References

- Allen, C. R., Luo, Z. L., Qian, H., et al., 1991. Field Study of a Highly Active Fault Zone: The Xianshuihe Fault of Southwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 103(9): 1178–1199. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<1178:fsoaha>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<1178:fsoaha>2.3.co;2)
- Chen, Y. T., Yang, Z. X., Zhang, Y., et al., 2013. From 2008 Wenchuan Earthquake to 2013 Lushan Earthquake. *Scientia Sinica Terrae*, 43(6): 1064–1072 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Zhang, P. Z., Ran, Y. K., et al., 2003. Active Tectonics and Seismicity in China. *Earth Science Frontiers*, 10: 66–73 (in Chinese with English abstract).
- Fang, L. H., Wu, J. P., Wang, W. L., et al., 2013. Relocation of the Mainshock and Aftershock Sequences of M 7.0 Sichuan Lushan Earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 58(28/29): 3451–3459 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. S., Xiong, X., Shan, B., et al., 2022. Coulomb Stress Changes Due to the 2021 MS7.4 Maduo Earthquake and Expected Seismicity Rate Changes in the Surroundings. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 675–686 (in Chinese with English abstract).
- Gong, M., Xu, X. W., Li, K., 2020. Fault Geometry Responsible for the Initial Rupture Process of Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1224–1234 (in Chinese with English abstract).
- Harris, R. A., Simpson, R. W., 1998. Suppression of Large Earthquakes by Stress Shadows: A Comparison of Coulomb and Rate-and-State Failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24439–24451. <https://doi.org/10.1029/98jb00793>
- Huang, L. Y., Cheng, H. H., Zhang, H., et al., 2019. Co-seismic and Postseismic Stress Evolution Caused by the 2008 Wenchuan Earthquake and Its Effects on the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou Earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 62(4): 1268–1281 (in Chinese with English abstract).
- Huang, M. H., Bürgmann, R., Freed, A. M., 2014. Probing the Lithospheric Rheology across the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 396(8): 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.003>
- Jia, K., Zhou, S., Wang, R., 2012. Stress Interactions within the Strong Earthquake Sequence from 2001 to 2010 in the Bayankala Block of Eastern Tibet. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(5): 2157–2164. <https://doi.org/10.1785/0120110333>
- Jia, K., Zhou, S. Y., Zhuang, J. C., et al., 2018. Did the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Trigger the Occurrence of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan, China?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(4): 2965–2983. <https://doi.org/10.1002/2017jb015165>
- Jia, K., Zhou, S., Zhuang, J., et al., 2014. Possibility of the Independence between the 2013 Lushan Earthquake and the 2008 Wenchuan Earthquake on Longmen Shan Fault, Sichuan, China. *Seismological Research Letters*, 85(1): 60–67. <https://doi.org/10.1785/0220130115>
- Jin, Z. T., Wan, Y. G., Liu, Z. C., et al., 2019. The Static Stress Triggering Influences of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou Earthquake on Neighboring Areas. *Chinese J. Geophys.*, 62(4): 1282–1299 (in Chinese with English abstract).
- King, G. C. P., Hubert-Ferrari, A., Nalbant, S. S., et al., 2001. Coulomb Interactions and the 17 August 1999 Izmit, Turkey Earthquake. *Comptes Rendus de l'Académie des Science-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 333(9): 557–569. [https://doi.org/10.1016/s1251-8050\(01\)01676-7](https://doi.org/10.1016/s1251-8050(01)01676-7)
- King, G. C. P., Stein, R. S., Lin, J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935–953. 160 (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Xie, F. R., Huang, J. S., et al., 2022. In Situ Stress State and Seismic Hazard in the Dayi Seismic Gap of the Longmenshan Thrust Belt. *Science China Earth Sciences*, 65(7): 1388–1398 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. E., Liao, L., Feng, J. Z., 2022. Relationship between Stress Evolution and Aftershocks after Changning M 6.0 Earthquake in Sichuan on 17 June, 2019. *Earth Science*, 47(6): 2149–2164 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. W., Ni, S. D., Hao, T. Y., et al., 2012. Uppermost Mantle Structure of the Eastern Margin of the Tibetan Plateau from Interstation Pn Traveltime Difference Tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 335–336(3): 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.005>
- Liang, C. T., Huang, Y. L., Wang, C. L., et al., 2018. Progress in the Studies of the Seismic Gap between the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan Earthquakes. *Chinese J. Geophys.*, 61(5): 1996–2010 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Zhu, B. J., Shi, Y. L., 2020. Do the Two Seismic Gaps in the Southwestern Section of the Longmen Shan

- Fault Present the Same Seismic Hazard?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(3): 1—15. <https://doi.org/10.1029/2019jb018160>
- Liu, C. L., Zheng, Y., Ge, C., et al., 2013. Rupture Process of the M 7.0 Lushan Earthquake, 2013. *Science China Earth Sciences*, 56(7): 1187—1192(in Chinese with English abstract).
- Lu, R. Q., Fang, L. H., Guo, Z., et al., 2022. Detailed Structural Characteristics of the 1 June 2022 $M_s6.1$ Sichuan Lushan Strong Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(11): 4299—4310(in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., Zhao, L., Tian, J. H., 2019. Spatial and Temporal Variations of Stress Field in the Longmenshan Fault Zone after the 2008 Wenchuan, China Earthquake. *Tectonophysics*, 767(2): 228172. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228172>
- Pei, S. P., Zhang, H. J., Su, J. R., et al., 2014. Ductile Gap between the Wenchuan and Lushan Earthquakes Revealed from the Two-Dimensional Pg Seismic Tomography. *Scientific Reports*, 4(1): 1—15. <https://doi.org/10.1038/srep06489>
- Pope, N., Mooney, W. D., 2020. Coulomb Stress Models for the 2019 Ridgecrest, California Earthquake Sequence. *Tectonophysics*, 791: 228555. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228555>
- 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. *Nature Geoscience*, 4(9): 634—640. <https://doi.org/10.1038/ngeo1210>
- Scholz, C. H., Cowie, P. A., 1990. Determination of Total Strain from Faulting Using Slip Measurements. *Nature*, 346(6287): 837—839. <https://doi.org/10.1038/346837a0>
- Shan, B., Xiong, X., Zheng, Y., et al., 2008. Stress Changes on Major Faults Caused by M 7.9 Wenchuan Earthquake, may 12, 2008. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(5): 593—601(in Chinese with English abstract).
- Shan, B., Xiong, X., Zheng, Y., et al., 2013. Stress Changes on Major Faults Caused by 2013 Lushan Earthquake and its Relationship with 2008 Wenchuan Earthquake. *Science China Earth Sciences*, 56(7): 1169—1176. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4642-1>
- Shan, B., Zheng, Y., Liu, C. L., et al., 2017. Coseismic Coulomb Failure Stress Changes Caused by the 2017 M7.0 Jiuzhaigou Earthquake, and its Relationship with the 2008 Wenchuan Earthquake. *Science China Earth Sciences*, 60(12): 2181—2189(in Chinese with English abstract).
- Shao, Y. X., Zou, X. B., Yuan, D. Y., et al., 2021. Late Quaternary Slip along Yangguan Fault at Northeastern Section of Altyn Tagh Fault and Implications for Seismic Risk. *Earth Science*, 46(2): 683—696(in Chinese with English abstract).
- Shao, Z. G., Wang, R. J., Wu, Y. Q., et al., 2011. Rapid Afterslip and Short-Term Viscoelastic Relaxation Following the 2008 MW7.9 Wenchuan Earthquake. *Earthquake Science*, 24(2): 163—175. <https://doi.org/10.1007/s11589-010-0781-z>
- Shao, Z. G., Zhou, L. Q., Jiang, C. S., et al., 2010. The Impact of Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake on the Seismic Activity of Surrounding Faults. *Chinese J. Geophys.*, 53(8): 1784—1795(in Chinese with English abstract).
- Stein, R. S., 1999. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence. *Nature*, 402(6762): 605—609. <https://doi.org/10.1038/45144>
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B5):1—15. <https://doi.org/10.1029/2004jb003415>
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Sheng, Z. S., et al., 2009. The Influence of 2008 Wenchuan Earthquake on Surrounding Faults. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 128—139(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Han, W. B., Wu, J. P., et al., 2003. Crustal Structure beneath the Songpan: Garze Orogenic Belt. *Acta Seismologica Sinica*, 16(3): 237—250(in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhang, G. W., Li, C. F., et al., 2018. Correlating Seismicity to Curie-Point Depths in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 61(5): 1840—1852(in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., 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. *Computers & Geosciences*, 32(4): 527—541. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.08.006>
- Wang, X. S., Lu, J., Xie, Z. J., et al., 2015. Focal Mechanisms and Tectonic Stress Field in the North-South Seismic Belt of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(11): 4149—4162(in Chinese with English abstract).
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974—1002. <https://doi.org/10.1785/bssa0840040974>
- Wessel, P., Smith, W. H. F., 1998. New, Improved Version

- of Generic Mapping Tools Released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47): 579–579. <https://doi.org/10.1029/98eo00426>
- Wu, J., Yao, D. D., Meng, X. F., et al., 2017. Spatial-temporal Evolutions of Early Aftershocks Following the 2013 M_w 6.6 Lushan Earthquake in Sichuan, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4): 2873–2889. <https://doi.org/10.1002/2016jb013706>
- Xiong, X., Shan, B., Zheng, Y., et al., 2010. Stress Transfer and Its Implication for Earthquake Hazard on the Kunlun Fault, Tibet. *Tectonophysics*, 482
- Xu, C. J., Liu, Y., Wen, Y. M., 2009. Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(3): 195–201(in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Han, Z. J., et al., 2013. Lushan M 7.0 Earthquake: A Blind Reserve-Fault Event. *Chinese Science Bulletin*, 58(28/29): 3437–3443(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. J., Cao, J. L., Shi, Y. L., 2009. Studying the Viscosity of Lower Crust of Qinghai-Tibet Plateau According to Post-Seismic Deformation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(3): 411–419(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Ren, J. W., Jiang, Z. S., et al., 2018. Fault Locking and Deformation Characteristics in Southwestern Segment of the Longmenshan Fault. *J. Seismol. Res.*, 41: 216–225 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Wu, Y. Q., Jiang, Z. S., et al., 2013. Fault Locking and Dynamic Deformation of the Longmenshan Fault Zone before the 2013 Lushan M_s 7.0 Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 681–691(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Ma, H. S., Lü, J., et al., 2009. Source Mechanism of Strong Aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan Earthquake and the Implication for Seismotectonics. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(6): 739–753. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0074-3>
- Zhou, S. Y., 2008. Seismicity Simulation in Western Sichuan of China Based on the Fault Interaction and Its Implication on the Estimation of the Regional Earthquake Risk. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(1): 165–174(in Chinese with English abstract).
- 中文参考文献**
- 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等, 2013. 从汶川地震到芦山地震. *中国科学: 地球科学*, 43(6): 1064–1072.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2003. 中国活动构造与地震活动. *地质学前沿*, 10: 66–73
- 房立华, 吴建平, 王未来, 等, 2013. 四川芦山 M_s 7.0 级地震及其余震序列重定位. *科学通报*, 58(20): 1901–1909.
- 冯雅杉, 熊熊, 单斌, 等, 2022. 2021 年玛多 M_s 7.4 地震导致的周边地区库仑应力加载及地震活动性变化. *中国科学: 地球科学*, 52(6): 1100–1112.
- 宫猛, 徐锡伟, 李康, 2020. 汶川 M_w 7.9 地震起始破裂断层几何结构. *地球物理学报*, 63(3): 1224–1234.
- 黄禄渊, 程惠红, 张怀, 等, 2019. 2008 年汶川地震同震—震后应力演化及其对 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震的影响. *地球物理学报*, 62(4): 1268–1281.
- 靳志同, 万永革, 刘兆才, 等, 2019. 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震对周围地区的静态应力影响. *地球物理学报*, 62(4): 1282–1299.
- 李兵, 谢富仁, 黄金水, 等, 2022. 龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性. *中国科学: 地球科学*, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0280>
- 李平恩, 廖力, 奉建州, 2022. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 6.0 级地震震后应力演化与余震关系. *地球科学*, 47(6): 2149–2164.
- 梁春涛, 黄焱羚, 王朝亮, 等, 2018. 汶川和芦山地震之间地震空区综合研究进展. *地球物理学报*, 61(5): 1996–2010.
- 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. *中国科学: 地球科学*, 43(06): 1020–1026.
- 鲁人齐, 房立华, 郭志, 等, 2022. 2022 年 6 月 1 日四川芦山 M_s 6.1 强震构造精细特征. *地球物理学报*, 65(11): 4299–4310.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等, 2009. 2008 年 5 月 12 日 M_w 7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化. *中国科学: D 辑*, (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. *中国科学: 地球科学*, 43(6): 1002–1009.
- 单斌, 郑勇, 刘成利, 等, 2017. 2017 年 M 7.0 级九寨沟地震同震库仑应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系. *中国科学: 地球科学*, 47(11): 1329–1338.
- 邵延秀, 邹小波, 袁道阳, 等, 2021. 阿尔金断裂东北段敦煌阳关断裂晚第四纪活动性及其强震危险性影响分析. *地球科学*, 46(2): 683–696.
- 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. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1784–1795.
- 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.
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 等, 2003. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构. *地震学报*, 25(3): 229–241.
- 王健, 张广伟, 李春峰, 等, 2018. 青藏高原东缘地震活动与居里点深度之间的相关性. *地球物理学报*, 61(5): 1840–1852.
- 王晓山, 吕坚, 谢祖军, 等, 2015. 南北地震带震源机制解与构

造应力场特征. 地球物理学报, 58(11): 4149—4162.

许才军, 刘洋, 温扬茂, 2009. 利用 GPS 资料反演汶川 $M_w7.9$ 级地震滑动分布. 测绘学报, 38(3).

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. 科学通报, 58(20): 1887—1893.

张晁军, 曹建玲, 石耀霖, 2008. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数. 中国科学: D 辑, 38(10): 1250—1257.

赵静, 任金卫, 江在森, 等, 2018. 龙门山断裂带西南段闭锁与

变形特征. 地震研究, 41(2): 216—225.

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. 地震学报, 35(5): 681—691.

郑勇, 马宏生, 吕坚, 等, 2009. 汶川地震强余震 ($M_s \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学: D 辑, (4): 413—426.

周仕勇, 2008. 川西及邻近地区地震活动性模拟和断层间相互作用研究. 地球物理学报, 51(1): 165—174.

《地球科学》

2024 年 9 月 第 49 卷 第 9 期 要目预告

采用模糊聚类算法确定 2021 年玛多地震序列的断层结构	李佺洪等
珠江口盆地开平凹陷核杂岩拆离结构及其动力学成因	彭光荣等
华南板块东南部南华纪-震旦纪沉积地层区域对比、物源特征及构造演化	宋 芳等
晚更新世北极楚克奇陆架边缘有机碳的差异埋藏	宋 赛等
华北克拉通东缘新元古代早期基性岩床的时代及其地质意义: 来自锆石学的证据	孙 逊等
神农架大九湖泥炭孔隙水中微生物的碳代谢特征	田 文等
广西运动在华南板块北缘的构造响应: 来自生物地层学方面的证据	王 欣等
(U-Th)/He 定年及影响因素研究进展	杨 莉等
华南埃迪卡拉纪晚期深水相氮循环过程重建	叶凯云等