



引文格式:马升龙,周宇,沈旭章.利用Sentinel-1卫星数据和地形数据分析法国Le Teil地震与采石活动关系[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(7):1190-1200.DOI:10.13203/j.whugis20210248

Citation: MA Shenglong, ZHOU Yu, SHEN Xuzhang. Analysis of Le Teil Earthquake in France and Its Correlation with Le Teil Quarry Extraction Using Sentinel-1 and Topographic Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(7):1190-1200. DOI:10.13203/j.whugis20210248

利用 Sentinel-1 卫星数据和地形数据分析法国 Le Teil 地震与采石活动关系

马升龙¹ 周宇¹ 沈旭章¹

¹ 中山大学地球科学与工程学院广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海, 519000

摘要:2019年11月11日的Mw 4.9 Le Teil地震是法国东南部罗纳河谷地区历史上破坏性最大的地震。基于哨兵1号卫星数据,利用GAMMA软件提取了该地震同震形变场。根据同震形变场,采用贝叶斯算法和最速下降法分别反演了断层几何参数和断层滑动分布。利用2000年和2006—2011年的两期数字高程模型数据估算了断层附近采石场开采量,并根据三维均匀弹性半空间的Boussinesq解求得由采石活动所造成的断层面上的库仑应力变化。结果表明,升降轨卫星视线向最大垂直位移分别为14.9 cm和8.6 cm。Le Teil地震是倾角72°、走向54°、平均滑动角约108°的高角度逆冲型地震;地震破裂到地表,破裂面积约3 413 m×1 358 m,最大破裂深度约为1.472 km;断层最大滑动量0.2 m,主滑动量(> 0.15 m)集中于0~0.75 km深度范围内;反演得到的矩震级为Mw 4.79。断层面上的库仑应力变化显示库仑应力在2000年以后的6~11年内增加了0.024 MPa。Le Teil采石场在1833—2019年被持续开采,且2007年以来,采石速率迅速增大。若考虑整个采石周期,则库仑应力变化可达0.1 MPa,远大于该地区的构造加载速率,表明2019年Le Teil地震与采石活动密切相关。

关键词:Le Teil地震;哨兵1号;滑动分布反演;采石活动;库仑应力变化;地震触发

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-12-21

DOI:10.13203/j.whugis20210248

文章编号:1671-8860(2024)07-1190-11

Analysis of Le Teil Earthquake in France and Its Correlation with Le Teil Quarry Extraction Using Sentinel-1 and Topographic Data

MA Shenglong¹ ZHOU Yu¹ SHEN Xuzhang¹

¹ Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China

Abstract: Objectives: The Mw 4.9 Le Teil earthquake that occurred on November 11, 2019 is the most destructive earthquake recorded in the Rhône River Valley of France. **Methods:** We first used Sentinel-1 data to calculate the coseismic displacement field of the Le Teil earthquake with the GAMMA software package. We then obtained fault geometric parameters and coseismic displacement fields based on Bayesian inversion and the steepest descent method (SDM). We last quantified the effects of quarry extraction activity on fault by using the digital elevation model (DEM) data acquired in 2000 and 2006—2011. We calculated the extraction volume and the Coulomb stress change on the fault plane based on the Boussinesq solution of three dimension homogeneous and elastic half-space. **Results:** The coseismic displacement field show that the largest displacements in the line of sight of the ascending and descending orbits are 14.9 cm and 8.6 cm, respectively. We find that the seismogenic fault has a southeast dip angle of 72°, a strike of 54° and an average

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0901);国家自然科学基金(41874020);广东省引进人才创新创业团队(2016ZT06N331)。

第一作者:马升龙,硕士,研究方向为地球物理学。mashlong@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:周宇,博士,教授。zhouyu36@mail.sysu.edu.cn

rake of 108° ; the earthquake rupture reached the surface, with a rupture area of about $3\,413\text{ m} \times 1\,358\text{ m}$, and a depth of about 1.472 km . The slip is over 0.15 m and is concentrated at a depth of $0 - 0.75\text{ km}$ with a peak slip of 0.2 m . We calculated the geodetic magnitude to be $M_w 4.79$. The Coulomb stress change on the fault plane is 0.024 MPa in $6 - 11$ years after 2000. **Conclusions:** The rock extraction of the Le Teil quarry had been active during 1833—2019, and the extraction is even more intense after 2007. The Coulomb stress change on the fault plane could reach up to 0.1 MPa , which is much larger than the local tectonic loading rate, suggesting that the Le Teil earthquake is strongly related to rock extraction activities.

Key words: Le Teil earthquake; Sentinel-1; slip distribution inversion; rock extraction activity; coulomb stress change; earthquake triggering

2019 年 11 月 11 日,法国蒙特利马尔西部约 10 km 的 Le Teil 小镇发生了 $M_w 4.9$ 地震,地震造成 4 人受伤以及 900 多栋建筑严重受损^[1]。Le Teil 小镇及其所在的罗纳河谷地区历史地震活动性很弱,有过记录的历史最大震级为 $ML 3 \sim 4$, 2019 年的 Le Teil 地震是该地区破坏性最大的历史地震^[1-3]。罗纳河谷地区人口密集,工业设施繁多,对该地震开展震源机制以及发震机理研究能够更好地服务于该地区的地震危险性评估。

2019 年 Le Teil 地震震源位于走向北东、倾向南东的 LRF (St. Thomé-La Rouvière Fault) 断层带附近 (图 1)。不同研究机构给定的震源机制解存在较大差别 (表 1), Ritz 等^[2] 利用宽频带数据反演震源机制解,结果显示 Le Teil 地震的最佳走向、倾角、滑动角和震源深度分别为 50° 、 45° 、 89° 和 1 km , 合成孔径雷达干涉测量 (interferometric

synthetic aperture radar, InSAR) 同震形变场显示断层南东盘最大垂直位移约 15 cm , 北西盘最大沉降量约 10 cm , 地表不连续破裂迹线约 $5\,160\text{ m}$, 震源具有浅源、逆断性质。Novellis 等^[1] 利用哨兵 1 号 (Sentinel-1) 卫星数据获取了 Le Teil 地震同震形变场,结果显示地表断层迹线大致沿着 LRF 断层走向延伸约 $5\,000\text{ m}$, 整个形变区面积约 12 km^2 , 断层上盘垂直抬升约 11 cm , 下盘沉降约 4 cm , 基于同震形变场的滑动分布反演结果表明同震破裂到地表, 最大滑动量 0.29 m , 倾向深度约 0.7 km , 整个断层滑动分布在倾向深度 1 km 的范围内, 具有显著的浅源特征。已有的研究结果表明 Le Teil 地震震源深度不超过 1 km , 地表破裂迹线约 $5\,000\text{ m}$, 且部分断层在浅地表存在闭锁, 整个断层以逆断滑动为主, 具有较小的右旋走滑分量。

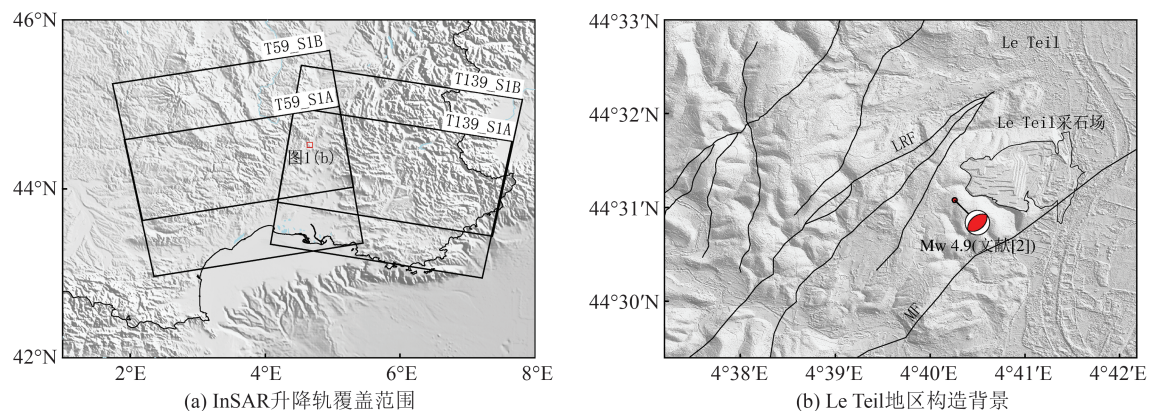


图 1 Le Teil 地震构造背景

Fig. 1 Tectonic Background of the Le Teil Earthquake

在大陆内部,脆韧性转换带通常控制着地震震源深度^[4-6],中等震级地震的震源深度往往大于 5 km ^[7-10],而浅源 ($< 5\text{ km}$) 地震多与人类活动密切相关^[11-12],如 Grigoli 等^[13] 结合地震波形数据和大地测量数据定量分析了 2017 年 11 月 15 日发生在韩国的 $M_w 5.5$ Pohang 地震,结果显示 Pohang 地震的震源深度为 $4 \sim 5\text{ km}$,震源深度约等于地

热井深度,作者认为 Pohang 地震与持续的流体注射密切相关;目前观测到的最大采矿诱发地震为 2013 年的 $M_w 6.1$ Bachatsky 地震,震源深度 4 km ,且该矿区台网检测到的中小地震震源深度分布在 $3 \sim 4\text{ km}$ ^[14-15],均是浅源地震。中国四川盆地自 2008 年开始页岩气开采实验以来,该地区地震发生频率显著上升^[16-19],Meng 等^[20] 处理了该地

表1 Le Teil地震震源参数
Tab. 1 Source Parameters for the Le Teil Earthquake

研究来源	长度/m	宽度/m	矩震级	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	最大滑动量/ m	备注
USGS ¹			4.8	10	53	57	99		
LDG/CEA ²			4.8	2	62	59	107		
Ritz等 ^[2]			4.9	1	50	45	89		
	5 000	1 900		1.6	50	62.3	116.5	0.26	单一断层
Novellis等 ^[1]	3 500	1 900		1.4	43.2	52.2	98	0.29	断层F1
	1 600	1 900		1.5	25.4	62.0	93.4	0.21	断层F2
本文	5 400	1 600	4.79	1.6	54	72	108	0.2	

注：USGS¹：<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us60006a6i/executive>；LDG/CEA²：http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2019-11-11/index.html。

区长宁和昭通两个移动地震台网2015—2017年的数据,5 345个 $ML>1.0$ 地震重定位结果显示地震空间分布与水力压裂活动高度相关,地震震源深度分布在1~5 km;易桂喜等^[21]利用该地区宽频带地震数据反演了荣县-威远-资中地区2016年以来的26个 $Ms>3.0$ 地震的震源机制解,结果显示所有地震的矩心深度分布在1.5~5 km之间。Le Teil地震具有明显的浅源特征,且Le Teil采石场距离LRF断裂约1 km,在约200 a内被持续开采,因此有必要探讨Le Teil地震与Le Teil采石活动之间的关系。

采石活动直接造成地表物质亏损,在上地壳产生应力扰动,因此可通过定量计算物质的质量变化在断层面上的应力扰动来探讨采石和地震之间的关系。2015年1月12日,美国新泽西州Wauregan采石场东部约500 m发生了Mb 3.3 Plainfield地震,基于地震波数据的震源机制解显示震源深度小于1.7 km,Kondas等^[22]利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据求得采石场的采石体积,通过建立三维模型并利用三维边界元程序计算了发震断层周围的库仑应力变化,结果表明地表最大库仑应力变化可达0.8 MPa,结合重力等其他数据的结果,作者认为采石活动所产生的应力扰动足以触发Plainfield地震。2016年8月11日,中国四川盆地东南部的垫江县发生了Mw 4.1地震,基于地震波数据的震源机制解显示震源深度仅1 km,而震中区域的汽车试验场在建设过程中有平均约10 m厚的地表岩石被清除,Qian等^[23]基于岩石开采体积和三维均匀弹性半空间的Boussinesq解计算得到发震断层面上的库仑应力变化,结果显示最大库仑应力变化为0.11 MPa,作者认为采石活动在区域构造应力加载背景下触发了垫江地震。对于Le Teil

地震,Novellis等^[1]利用不同时期的点云数据计算了Le Teil采石场在1833—2011年因采石活动引起的断层面上库仑应力变化,结果显示最大库仑应力变化可达0.19 MPa,作者认为采石活动触发了Le Teil地震,并使发震时间提前25 000 a。因此,本文期望在Novellis等^[1]的研究基础上,通过增加两期DEM数据来定量计算断层面上的库仑应力变化,进而分析Le Teil采石活动与地震之间的关系,并对Novellis等^[1]的研究结果进行补充验证。

本文首先基于Sentinel-1 A/B卫星数据,使用GAMMA软件^[24]获取Le Teil地震同震形变场,并分析了地表破裂特征;然后基于均匀采样的同震形变场,采用贝叶斯算法非线性反演断层几何参数;接着采用最速下降法^[25](steepest descent method, SDM)线性反演断层滑动分布;最后基于采石场不同时期DEM获取了采石所造成的地表高程变化,并根据三维均匀弹性半空间的Boussinesq解^[26]计算得到断层面上的库仑应力变化,进而分析了采石活动和地震之间的关系。

1 InSAR数据处理与断层滑动分布反演

1.1 InSAR数据处理

本文基于Sentinel-1 A/B卫星数据(表2),利用GAMMA软件的二轨差分干涉处理方法获取了Le Teil地震同震形变场。Sentinel-1卫星是欧洲空间局在2014年后发射的新一代卫星,卫星雷达向地表发射C波段信号(波长5.6 cm)并接收地表反射信号,通过前后两次相位差获取地表形变。本文使用的卫星数据为干涉宽幅(interferometric wide swath, IW)模式下的单视复数(single

look complex, SLC)数据,它包含有相位和幅度信息。在数据处理过程中,本文利用精密轨道数据降低轨道误差影响;为了降低地形相位误差,采用了法国国家地理和林业信息研究所提供的分辨率为 1 m 的 DEM 数据;相位解缠采用适用于低相干区相位解缠的最小费用流算法(minimum cost flow, MCF);为提高形变场质量,对相干系数低于 0.35(升轨)和 0.4(降轨)的区域进行掩膜处理。

图 2 是获取的升降轨同震形变场。升降轨同震形变场表明地表形变大致沿着 LRF 断层北东-南西向展布约 5 000 m,断层的南东盘抬升,北西盘下降,降轨 InSAR 数据由于时间基线较长,失相干严重,这些同震形变场特征与 Novellis 等^[1]

和 Ritz 等^[2]的结果比较吻合。此外,本文升轨卫星视线向(line of sight, LOS)最大抬升位移和沉降位移分别为 8.5 cm 和 6.4 cm,降轨 LOS 最大抬升位移和沉降位移分别为 5.6 cm 和 3.0 cm,且本文利用 Ritz 等^[2]的方法计算得到升轨垂向最大抬升位移和沉降位移分别约为 11.6 cm 和 8.8 cm,这与 Ritz 等^[2]的结果有相对较好的一致性,但沉降位移与 Novellis 等^[1]的结果差别较大。

表 2 Le Teil 地震干涉数据信息

Tab. 2 InSAR Data for the Le Teil Earthquake

传感器	主影像	从影像	轨道类型	垂直基线/m	轨道
Sentinel-1	20191106	20191112	升轨	-15.2	T59
	20191031	20191112	降轨	-75.7	T139

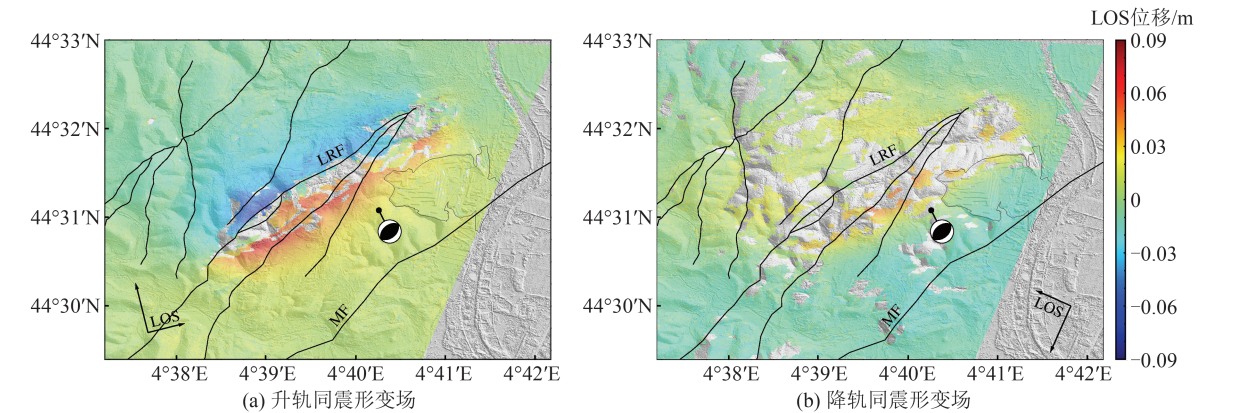


图 2 Le Teil 地震 InSAR 同震形变场

Fig. 2 Coseismic Displacement Fields of the Le Teil Earthquake

1.2 断层滑动分布反演

假设震源是有限矩形位错模型,本文采用 Okada 弹性半空间模型^[27]反演断层滑动分布。对于复杂的地球物理反演问题,两步式反演是比较成熟的反演方法^[28]。该方法首先基于单一均匀滑动的断层模型非线性反演最优断层几何参数,然后再线性反演断层面上的滑动分布^[28-30]。

首先利用 GBIS 软件^[31]的贝叶斯算法进行非线性反演,获取断层的最优模型参数。因原始 InSAR 数据点较多,反演计算量大,本文对原始数据进行均匀降采样,得到升降轨数据点分别为 3 556 个和 3 207 个。参考 Novellis 等^[1]的结果和已经公布的震源机制解,本文用于反演的模型参数搜索范围和最优模型参数如表 3 所示。

表 3 最优模型参数

Tab. 3 Optimal Model Parameters

名称	断层长度/m	断层宽度/m	断层深度/m	倾角/(°)	走向角/(°)	走滑量/m	倾滑量/m
下界	3 000	1 000	0	30	30	-0.5	-0.5
上界	5 500	3 000	3 000	80	70	0.5	0.5
最优	3 413.2	1 357.9	1 471.7	72.13	53.93	-0.106 7	0.109 8
2.50%	3 338.7	1 199.2	1 332.6	69.63	53.58	-0.120 6	0.102 7
97.50%	3 497.3	1 480.9	1 583.2	74.68	54.16	-0.094 1	0.118 7

表 3 中的最优模型参数表明发震断层是南西-北东走向、倾向东南、倾角约 72°的高角度逆断层。断层的破裂面积约为 3 413 m×1 358 m,最

大破裂深度约 1.472 km,断层面上均一滑动量约 0.153 m。非线性反演结果(图 3)显示均一滑动模型能够相对较好地拟合观测结果。升降轨残

差的标准差分别为 0.75 cm 和 0.88 cm。

根据表 3 中的最优模型参数线性反演断层滑动分布。在反演之前,为了避免断层的边缘效应,先将断层长宽拓展到 5 400 m×1 600 m,并按

照 100 m×100 m 网格化断层,升降轨数据设置相同的权重,根据已经发表的结果限定滑动角范围为 80°~110°。然后利用 SDM 程序反演滑动分布。

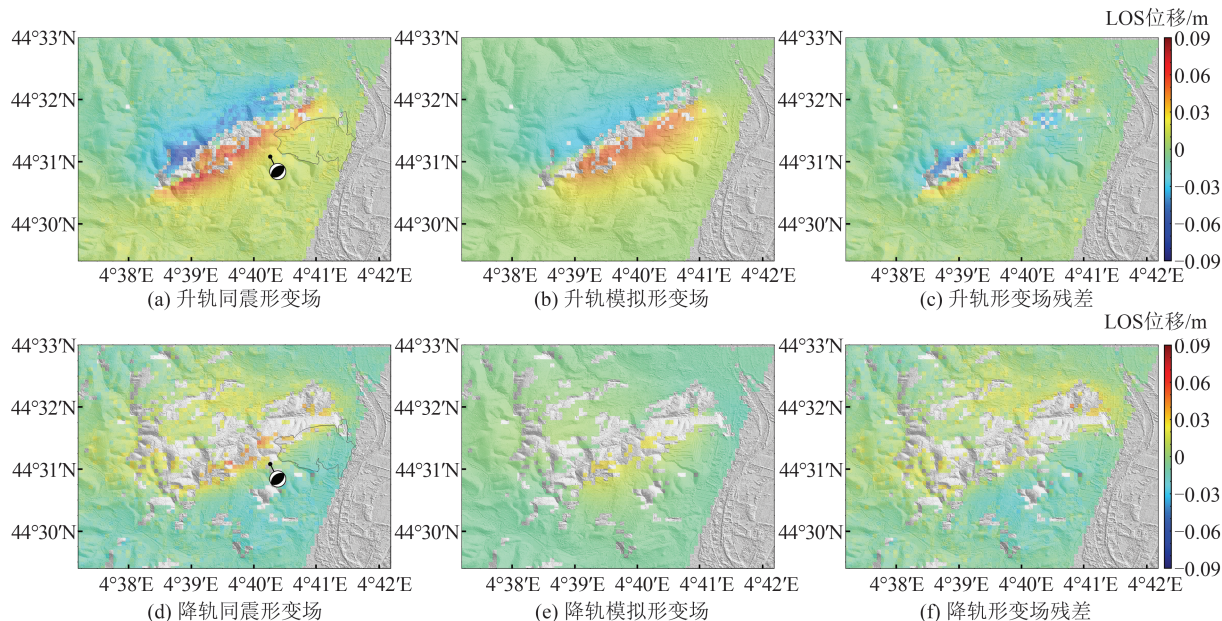


图3 均一滑动模型下的观测、模拟、残差图

Fig. 3 Coseismic Displacement Field, Model Prediction and Residual from the Uniform Fault Model

Jónsson 等^[30]研究表明,平滑因子存在一个有效范围,当平滑因子过小时,滑动分布是高度粗糙的,而当平滑因子过大时,滑动分布又是过度平滑的,两者都难以反映真实滑动情况。因此,在实际选择平滑因子时,应兼顾实际数据和模拟数据之间的偏离度 m 以及子滑块之间的粗糙程度 r 进行综合选择。本文对平滑因子在 0~1 范围内,以 0.02 为步长进行反演,最终根据粗糙度和偏离度之间的折中曲线(图 4)并以最小 $\sqrt{r^2 + m^2}$ 确定平滑因子 $f=0.4$ 。

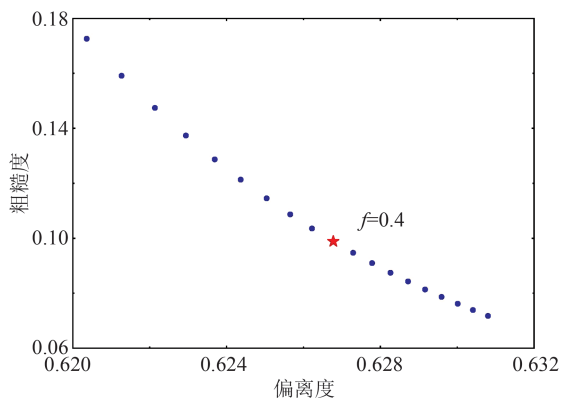


图4 偏离度和粗糙度之间的折中曲线

Fig. 4 Trade-off Curve Between Misfit and Roughness

断层滑动分布如图 5 所示。图 5 表明地震破裂到地表,最大滑动量约为 0.2 m,主滑动量 (>0.15 m)集中于 0~0.75 km 的深度范围内。BC 段结合部位的滑动量小于两侧滑动量,断层滑动分布在整体上呈现 AB 段和 C 段两个滑动中心。断层破裂滑动以倾滑为主,兼具微小右旋走滑分量。本文基于 InSAR 数据反演得到的矩震级为 Mw 4.79,略小于 Ritz 等^[2]利用地震波形数据反演得到的结果(Mw 4.9),但在其基于激光雷达数据进行矩震级估算的区间内。

以非均匀滑动分布模拟的形变场(图 6)显示非均匀滑动模型比均一滑动模型更能在整体上拟合 InSAR 形变场,升降轨残差的标准差分别为 0.73 cm 和 0.77 cm,均优于均一滑动模型。综合分析表明本文的非均匀断层滑动分布模型能够较好地拟合观测数据。

2 采石活动引起的库仑应力变化

Le Teil 采石场位于 LRF 断裂正东方向约 1 km(图 1),其约 200 a 的开采活动会在 LRF 断层面上产生应力扰动,此外,滑动分布结果(图 5)显示 Le Teil 地震震源很浅,而且该区域历史地震活动性很弱,因此,本文期望通过定量计算 2000 年

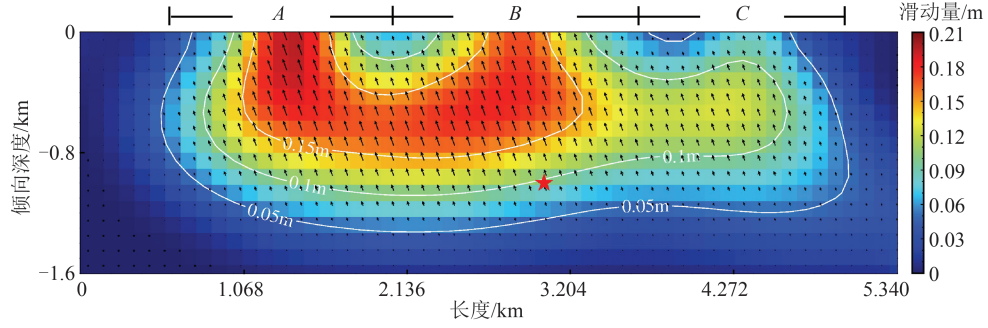


图 5 断层滑动分布

Fig. 5 Fault Slip Distribution

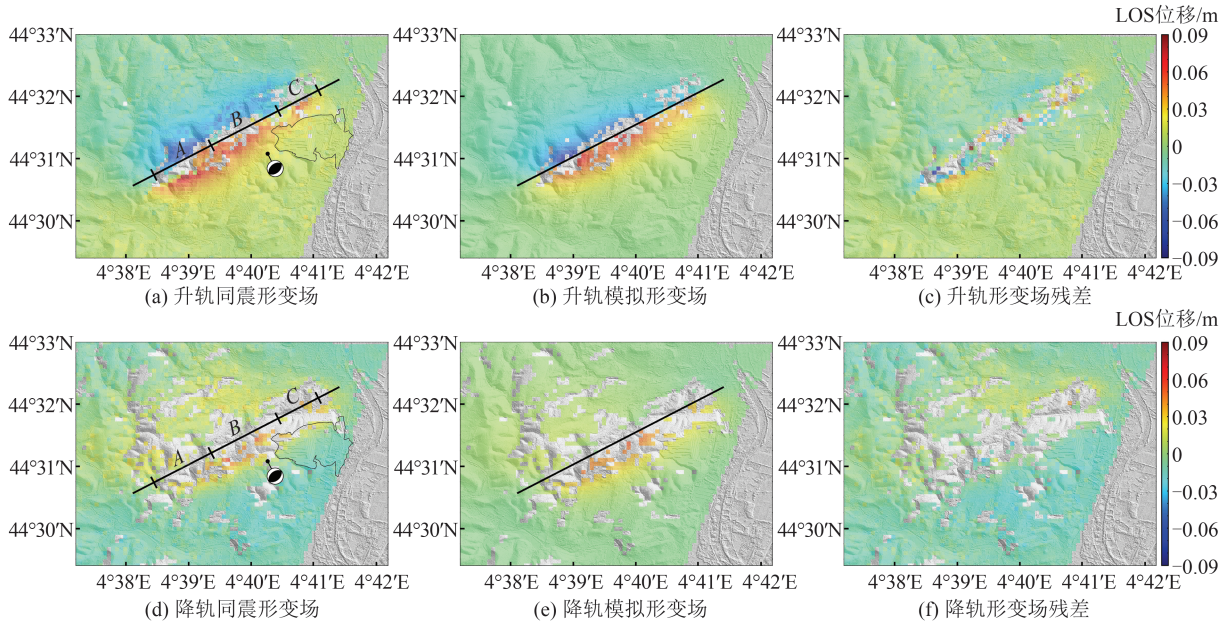


图 6 分布式模型下的观测-模拟-残差图

Fig. 6 Coseismic Displacement Field, Model Prediction and Residual from the Nonuniform Fault Model

以后约 6~11 a 的采石卸载在断层面的库仑应力扰动来分析 Le Teil 地震和采石活动之间的关系。

对于加载于三维均匀弹性半空间表面的垂直载荷,法国 Boussinesq 在 1985 年提出了由垂直载荷在半空间内任意点处所引起的应力和位移的弹性理论解,即 Boussinesq 解^[26]。假设各向同性的弹性介质,剪切模量为 μ ,泊松比为 ν ,在三维笛卡尔坐标系中,对于垂向加载 $P_0(x_{01}, x_{02}, 0)$,其在空间中任意一点 (x_1, x_2, x_3) 位移 u_1, u_2, u_3 的表达式为:

$$u_1 = \frac{P_0}{4\pi\mu} \frac{x_1 - x_{01}}{R} \left[\frac{x_3}{R^2} - (1 - 2\nu) \frac{1}{R + x_3} \right] \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{P_0}{4\pi\mu} \frac{x_2 - x_{02}}{R} \left[\frac{x_3}{R^2} - (1 - 2\nu) \frac{1}{R + x_3} \right] \quad (2)$$

$$u_3 = \frac{P_0}{4\pi\mu} \frac{x_3}{R} \left[\frac{x_3}{R^2} - 2(1 - \nu) \right] \quad (3)$$

式中, $R = \sqrt{(x_1 - x_{01})^2 + (x_2 - x_{02})^2 + x_3^2}$,表示加载点与待求点之间的空间距离。在均匀各向同性完全弹性介质中,应变和应力满足如下关系:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ 为第二拉梅常数; δ_{ij} 为克罗内克函数。联立式(1)~(6),则任意一点的应力张量表达式为:

$$\sigma_{11} = -\frac{P_0}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3(x_1 - x_{01})^2 x_3}{R^3} - (1 - 2\nu) \left[\frac{x_3}{R} - \frac{R}{R + x_3} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{(x_1 - x_{01})^2(2R + x_3)}{R(R + x_3)^2} \right\} \quad (7)$$

$$\sigma_{22} = -\frac{P_0}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3(x_2 - x_{02})^2 x_3}{R^3} - (1 - 2\nu) \left[\frac{x_3}{R} - \frac{R}{R + x_3} + \frac{(x_2 - x_{02})^2(2R + x_3)}{R(R + x_3)^2} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\sigma_{12} = -\frac{P_0}{2\pi R^2} (x_1 - x_{01})(x_2 - x_{02}) \left[\frac{3x_3}{R^3} - (1 - 2\nu) \frac{(2R + x_3)}{R(R + x_3)^2} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{13} = -\frac{3P_0}{2\pi R^5} (x_1 - x_{01}) x_3^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{23} = -\frac{3P_0}{2\pi R^5} (x_2 - x_{02}) x_3^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{33} = -\frac{3P_0}{2\pi R^5} x_3^3 \quad (12)$$

假设断层面的单位法向量为 $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ n_3]$, 断层面上任意一点的单位滑动矢量为 $\mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ d_3]$, 则断层面上任意一点的应力矢量 $\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ T_3]$, 正应力 $\Delta\sigma_n$ 、剪应力 $\Delta\tau$ 和库仑应力变化 ΔC 为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Delta\sigma_n = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \quad (14)$$

$$\Delta\tau = \mathbf{T} \cdot \mathbf{d} \quad (15)$$

$$\Delta C = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n \quad (16)$$

式中, μ' 为断层面上任意一点的有效摩擦系数。

为了定量计算采石产生的质量亏损并与前人研究结果作对比, 本文假设一系列垂直加载 $P_0 = h d A \rho g$, 其中 dA 为立方体微元面积, ρ 为采石密度 ($\rho = 2\ 300 \text{ kg/m}^3$), g 为当地重力加速度 ($g = 9.806 \text{ m/s}^2$), h 为立方体微元所代表的地表高程变化。取泊松比 $\nu = 0.25$ 、有效摩擦系数 $\mu' = 0.4$ 计算 ΔC 。

本文基于 SRTM (shuttle radar topography mission) DEM (30 m 分辨率, 2000 年获取) 和 AW3D30 (ALOS World 3D-30 m) DEM (30 m 分辨率, 原数据获取时间为 2006—2011 年) 计算了研究区内采石造成的地表高程变化 (图 7), 结果

显示在约 6~11 a 采石期间, 地表最大采石深度约 30 m, 总采石体积约为 $3\ 995\ 482.2 \text{ m}^3$ 。图 8 显示断层面的库仑应力变化以同心圆的形式沿着断层面从中心向四周逐渐降低; 主库仑应力变化 ($>0.1 \text{ MPa}$) 集中于 B 段中段与 C 段中段之间, 而 A 段库仑应力变化约为零; 最大库仑应力变化约 0.024 MPa , 位于 BC 段结合部位, 其倾向深度约 0.7 km。最大正应力和剪应力变化量分别约 0.027 MPa 和 0.014 MPa 。结合图 8 与 Novellis 等^[1]的库仑应力变化分布可知, 断面上的主库仑应力变化均位于两滑动中心的结合部位, 且从结合部位的中心向四周降低。

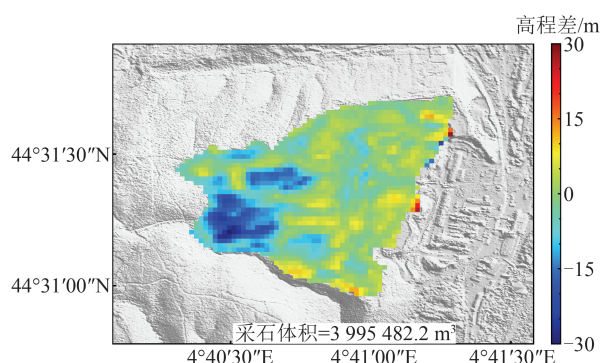


图 7 6~11 a 间的采石场高程变化

Fig. 7 Elevation Differences of the Le Teil Quarry in 6-11 Years

3 讨论

本文与 Novellis 等^[1]都按照两步式方法来反演断层滑动分布, 但 Novellis 等^[1]使用 Levenberg-Marquardt 最小二乘算法非线性搜索断层最优参数, 而本文则采用贝叶斯算法, 该算法会考虑原始数据误差和断层模型参数的先验信息进行非线性搜索, 因此该算法在理论上非线性搜索断层最优几何参数时也更具优势。另外, Novellis 等^[1]根据 InSAR 同震形变场特征并结合该地区构造背景把同震断层分成两段, 而本文考虑到此次地震的地表破裂尺度有限, 因此本文仅采用单一断层模型进行反演, Novellis 等^[1]也做过基于单一断层模型进行反演的研究。无论发震断层如何划分, 两种结果 (表 1) 均表明发震断层是高角度逆断层, 地表破裂长度约 5 000 m, 震源深度不超过 1.6 km, 断层滑动分布在整体上呈现两个滑动中心, 两滑动段结合部位的滑动量小于两侧滑动量, 最大滑动量均位于两滑动段结合部位的南西段, 且该结合部位与最大库仑应力变化的空间位置一致, 但本文的最大滑动量略小于 Novellis

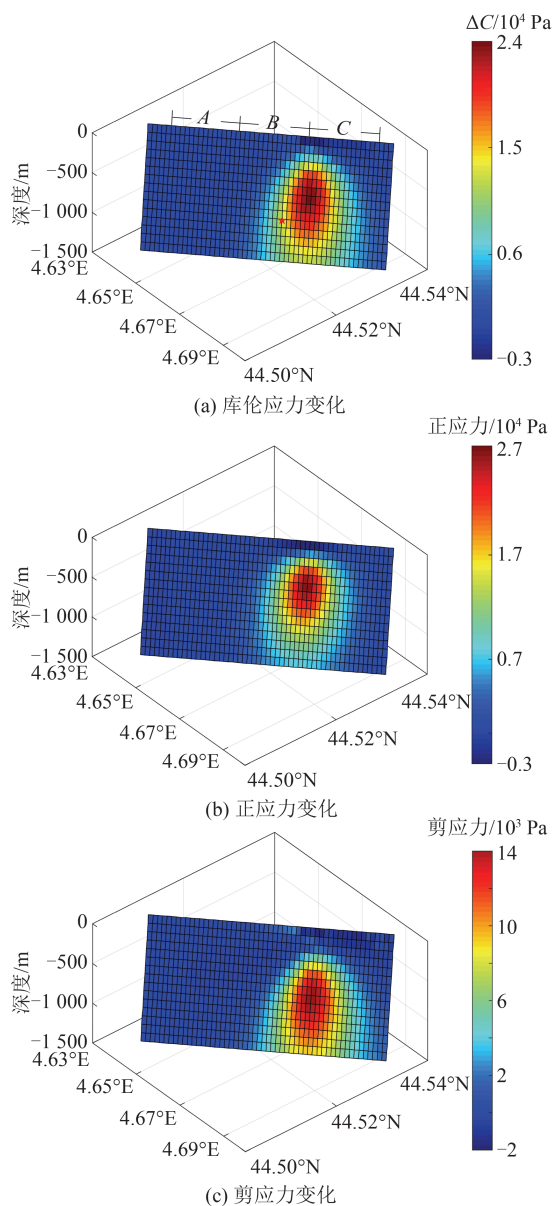


图 8 断层面上应力变化

Fig. 8 Stress Changes on the Fault Plane

等^[1]的结果,这与断层反演参数有关。此外,Novellis等^[1]通过分析震区 16 个台站波形的频率-方位谱认为发震断层是双向破裂的,而破裂起始点位于两个子断层约 1 km 深的结合部位。Causse 等^[3]同样利用地震波形数据反演了 Le Teil 地震的破裂过程,结果表明地震在两个滑动中心的结合部位成核并以约 1.8 km/s 的破裂速度向四周传播。本文采用贝叶斯算法进行滑动分布反演的结果对 Novellis 等^[1]双滑动中心的观点和 Le Teil 地震的浅源特征进行了较好的补充验证,表明 Causse 等^[3]地震波形数据反演的可靠性。

本文基于 SRTM DEM 和 AW3D30 DEM 计算得到的采石体积和库仑应力变化分别为 3 995 482.2 m³和 0.024 MPa(见表 4),其中,本文

单位体积的库仑应力变化约等于 Novellis 等^[1]1979—2007 年时间段内的结果。由于 Le Teil 采石场 2007 年后的开采速率迅速增大,本文 6~11 a 的开采量与 Novellis 等^[1]2007—2011 年 4 a 的开采量相当,同时该时间段内 Novellis 等^[1]的库仑应力变化也略大于本文结果。本文在 Novellis 等^[1]研究的基础上,增加两期 DEM 计算得到的采石体积和库仑应力变化都对 Novellis 等^[1]的结果进行了较好的补充验证。

Novellis 等^[1]同样计算了发震断层面 1833—2011 年累积的库仑应力变化,结果显示最大库仑应力变化、正应力和剪应力分别为 0.19 MPa、0.21 MPa 和 0.11 MPa,而 Ampuero 等^[32]计算得到 1946—2019 年内的累积最大库仑应力变化为 0.15 MPa,两者都说明 Le Teil 采石场的持续开采在断层面的库仑应力扰动可达 0.1 MPa 的量级,远大于地震最低触发阈值(0.01 MPa)^[33-35],这表明岩石开采活动很可能在图 8 所示的库仑应力变化正值区域触发了 Le Teil 地震。另外,Le Teil 地区的水平构造应力加载速率约为 15 Pa/a^[1],投影到发震断面上的正应力和剪应力分别约为 13 Pa/a 和 6 Pa/a,而且野外地质数据表明 LRF 断裂在数十万年内不曾有过活动^[2],则断面上的剪应力在数十万年内至少已累积 0.6 MPa,在区域构造应力加载和采石活动产生的应力扰动作用下,断层克服摩擦强度并滑动产生地震。而且,Le Teil 采石场 2007 年以来的开采速率迅速增大,断层更加快速趋向失稳滑动。Novellis 等^[1]认为约 200 a 的 Le Teil 采石活动使 Le Teil 地震发震时间提前约 25 000 a,若考虑相同的构造应力加载速率,则本文 6~11 a 的库仑应力扰动则使发震时间提前约 2 300 a。考虑到 Le Teil 地震具有显著的浅源特征,并综合以上分析,本文认为 Le Teil 采石场持续近 200 a 的采石活动很可能在沿着 LRF 断裂的浅地表处触发了 Le Teil 地震,或者说人类采石活动影响到了 Le Teil 地震的发震进程。

4 结 语

本文利用 Sentinel-1 卫星轨道数据获取了 2019 年法国 Le Teil 地震的同震形变场,分别采用 GBIS 和 SDM 程序反演得到地震断层几何参数和滑动分布。在 Novellis 等^[1]的研究基础上,本文通过增加 SRTM DEM 和 AW3D30 DEM 数据,估算了 Le Teil 采石活动在 2000 年至 2006—

表 4 采石体积与库仑应力变化

Tab. 4 Rock Extraction Volume and Coulomb Stress Change

时间段	采石体积/m ³	平均开采量/(m ³ ·a ⁻¹)	库仑应力变化/MPa	单位体积的库仑应力变化/(10 ⁻⁹ MPa·m ⁻³)	来源
1979—2007	18 511 103	661 111	0.11	5.942	Novellis 等 ^[1]
2007—2011	4 139 120	1 034 780	0.03	7.248	Novellis 等 ^[1]
1833—2011	42 276 334	237 508	0.19	4.494	Novellis 等 ^[1]
2000—(2006—2011)	3 995 482.2	363 226~665 914	0.024	6.007	本文
1946—2019			0.15		Ampuero 等 ^[32]

2011 年间的采石量,并根据三维均匀弹性半空间的 Boussinesq 解计算了断层面的库仑应力变化,进而分析讨论了采石活动与 Le Teil 地震之间的关系,总结出以下几点认识:

1)断层东南盘抬升,西北盘沉降;升轨 LOS 最大抬升量和沉降量分别约为 8.5 cm 和 6.4 cm,降轨 LOS 最大抬升量和沉降量分别约为 5.6 cm 和 3.0 cm。

2)发震断层几何参数:长和宽分别约为 5 400 m 和 1 600 m,走向、倾角和平均滑动角分别为 54°、72°和 108°。

3)Le Teil 地震震源深度小于 1.5 km;断层最大滑动量 0.2 m,主滑动量(>0.15 m)集中于 0~0.75 km 的深度范围内。

4)断面上的库仑应力在 2000—(2006—2011 年)时间段内最大增加约 0.024 MPa,较好地补充并验证了 Novellis 等^[1]的研究结果。Le Teil 采石场近 200 a 的采石活动影响到了 Le Teil 地震的发震进程,Le Teil 地震与采石活动密切相关。

致谢:感谢欧洲空间局提供的 Sentinel-1 卫星数据(<https://scihub.copernicus.eu/>),法国国家地理和林业信息研究所提供的高精度地形数据(<https://portal.opentopography.org/dataspace/dataset?opentopoID=OTDS.112019.32631.1>),美国国家航空航天局提供的 SRTM DEM 下载(<https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1N.003>),日本航空航天局提供的 AW3D30 DEM 下载(<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>),德国地学研究中心汪荣江老师提供的 SDM 程序(<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/turk/wang/>),英国 COMET 提供的 GBIS 软件(<https://comet.nerc.ac.uk/gbis/>)。文中的图件大部分利用 GMT 软件绘制(<http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>)。

参 考 文 献

[1] De Novellis V, Convertito V, Valkaniotis S, et al. Author Correction: Coincident Locations of Rupture Nucleation During the 2019 Le Teil Earthquake, France and Maximum Stress Change from Local Cement Quarrying[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-6.

[2] Ritz J F, Baize S, Ferry M, et al. Surface Rupture and Shallow Fault Reactivation During the 2019 Mw 4.9 Le Teil Earthquake, France [J]. *Communications Earth & Environment*, 2020, 1(1): 1-11.

[3] Causse M, Cornou C, Maufroy E, et al. Exceptional Ground Motion During the Shallow Mw 4.9 2019 Le Teil Earthquake, France [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-9.

[4] Sibson R H. Fault Zone Models, Heat Flow, and the Depth Distribution of Earthquakes in the Continental Crust of the United States[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72(1): 151-163.

[5] Zhang Guomin, Li Li. Rheology of Crustal Media and a Related Seismogenic Model[J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(1): 1-10. (张国民, 李丽. 地壳介质的流变性与孕震模型[J]. *地震地质*, 2003, 25(1): 1-10.)

[6] Zheng Yong, Xie Zujun. Present Status and Prospect of Earthquake Focal Depth Locating[J]. *Journal of Seismological Research*, 2017, 40(2): 167-175. (郑勇, 谢祖军. 地震震源深度定位研究的现状与展望[J]. *地震研究*, 2017, 40(2): 167-175.)

[7] Klose C D, Seeber L. Shallow Seismicity in Stable Continental Regions [J]. *Seismological Research Letters*, 2007, 78(5): 554-562.

[8] Wen Yangmao, Xu Caijun. Ms 7.9 Manyi Earthquake Slip Distribution Inversion by a Sensitivity-Based Iterative Fitting Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34

- (6): 732-735. (温扬茂, 许才军. 基于敏感度的迭代拟合法反演玛尼 Ms 7.9 级地震滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(6): 732-735.)
- [9] Li Zhenhong, Han Bingquan, Liu Zhenjiang, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 887-897. (李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR 数据约束下的 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 887-897.)
- [10] Zhang Guomin, Li Li, Ma Hongsheng, et al. Focal Depth Research of Earthquakes in Mainland China: Implication for Tectonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002(9): 969-974. (张国民, 李丽, 马宏生, 等. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. 科学通报, 2002(9): 969-974.)
- [11] Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al. Global Review of Human-Induced Earthquakes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 178: 438-514.
- [12] Xu Caijun, Wang Jianjun, Xiong Wei. Retrospection and Perspective for Earthquake Stress Triggering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2085-2092. (许才军, 汪建军, 熊维. 地震应力触发回顾与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2085-2092.)
- [13] Grigoli F, Cesca S, Rinaldi A P, et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang Earthquake: A Possible Case of Induced Seismicity in the Republic Korea [J]. *Science*, 2018, 360(6392): 1003-1006.
- [14] Emanov A F, Emanov A A, Fateev A V, et al. Mining-Induced Seismicity at Open Pit Mines in Kuzbass (Bachatsky Earthquake on June 18, 2013) [J]. *Journal of Mining Science*, 2014, 50(2): 224-228.
- [15] Yakovlev D V, Lazarevich T I. Natural and Induced Seismic Activity in Kuzbass [J]. *Journal of Mining Science*, 2013, 49(6): 862-872.
- [16] He Dengfa, Lu Renqi, Huang Hanyu, et al. Tectonic and Geological Background of the Earthquake Hazards in Changning Shale Gas Development Zone, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 993-1006. (何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 993-1006.)
- [17] Lei X, Huang D, Su J, et al. Fault Reactivation and Earthquakes with Magnitudes of up to Mw 4.7 Induced by Shale-Gas Hydraulic Fracturing in Sichuan Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [18] Lei X, Wang Z, Su J. The December 2018 ML 5.7 and January 2019 ML 5.3 Earthquakes in South Sichuan Basin Induced by Shale Gas Hydraulic Fracturing [J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(3): 1099-1110.
- [19] Lei Xinglin, Su Jinrong, Wang Zhiwei. Growing Seismicity in the Sichuan Basin and Its Association with Industrial Activities [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 50(11): 1505-1532. (雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(11): 1505-1532.)
- [20] Meng L, McGarr A, Zhou L, et al. An Investigation of Seismicity Induced by Hydraulic Fracturing in the Sichuan Basin of China Based on Data from a Temporary Seismic Network Investigation of Seismicity Induced by Hydraulic Fracturing in the Sichuan Basin [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(1): 348-357.
- [21] Yi Guixi, Long Feng, Liang Mingjian, et al. Geometry and Tectonic Deformation of Seismogenic Structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong Region, Sichuan Basin: Insights from Focal Mechanism Solutions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3275-3291. (易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 四川盆地荣县-威远-资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3275-3291.)
- [22] Kondas S M. Crustal Unloading as a Source of Induced Seismicity in Plainfield, Connecticut [D]. Boston: Boston College, 2020.
- [23] Qian Y, Chen X, Luo H, et al. An Extremely Shallow Mw 4.1 Thrust Earthquake in the Eastern Sichuan Basin (China) Likely Triggered by Unloading During Infrastructure Construction [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(23): 13775-13784.
- [24] Wegnüller U, Werner C, Strozzi T, et al. Sentinel-1 Support in the Gamma Software [J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1305-1312.
- [25] Tu Hongwei, Wang Rongjiang, Diao Faqi, et al. Slip Model of the 2001 Kunlun Mountain Ms 8.1 Earthquake by SDM: Joint Inversion from GPS and InSAR Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(6): 2103-2112. (屠泓为, 汪荣江, 刁法启, 等. 运用 SDM 方法研究 2001 年昆仑山口西 MS8.1 地震破裂分布: GPS 和 InSAR 联合反演的

- 结果[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2103-2112.)
- [26] Hetnarski R B, Ignaczak J. Mathematical Theory of Elasticity[M]. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.
- [27] Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.
- [28] He P, Wen Y, Ding K, et al. Normal Faulting in the 2020 Mw 6.2 Yutian Event: Implications for Ongoing E-W Thinning in Northern Tibet[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3012.
- [29] He P, Wang Q, Ding K, et al. Source Model of the 2015 Mw 6.4 Pishan Earthquake Constrained by Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS: Insight into Blind Rupture in the Western Kunlun Shan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(4): 1511-1519.
- [30] Jónsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1377-1389.
- [31] Bagnardi M, Hooper A. Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2194-2211.
- [32] Ampuero J P, Billant J, Brenguier F, et al. The November 11 2019 Le Teil, France M 5 Earthquake: A Triggered Event in Nuclear Country [C]//EGU General Assembly Conference, Online, 2020.
- [33] McGarr A, Simpson D, Seeber L. 40 Case Histories of Induced and Triggered Seismicity[J]. *International Geophysics*, 2002, 81(A): 647-661.
- [34] Perfettini H, Stein R S, Simpson R, et al. Stress Transfer by the 1988-1989 M=5.3 and 5.4 Lake Elsmar Foreshocks to the Loma Prieta Fault: Unclamping at the Site of Peak Mainshock Slip [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B9): 20169-20182.
- [35] Reasenberg P A, Simpson R W. Response of Regional Seismicity to the Static Stress Change Produced by the Loma Prieta Earthquake[J]. *Science*, 1992, 255(5052): 1687-1690.