

柳存喜,黎莎,刘冠男.2020年龙泉山断裂带 $M_s5.1$ 地震成因综合分析[J].地震工程学报,2021,43(2):306-315.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.306

LIU Cunxi,LI Sha,LIU Guannan.Comprehensive Analysis of Seismogenesis of the 2020 $M_s5.1$ Earthquake on the Longquanshan Fault Zone, SW China[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(2):306-315.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.306

2020年龙泉山断裂带 $M_s5.1$ 地震成因综合分析

柳存喜¹,黎莎²,刘冠男^{3,4}

- (1. 雅砻江流域水电开发有限公司,四川成都 610051;
2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州贵阳 550081;
3. 成都理工大学地球物理学院,四川成都 610059;
4. 数学地质四川省重点实验室(成都理工大学),四川成都 610059)

摘要: 2020年2月3日四川省成都市青白江区发生 $M_s5.1$ 地震,震中烈度为Ⅵ度。该地震事件震中位于龙泉山断裂带上,距离成都市中心 38 km,是龙泉山断裂带历史上非常罕见的 5.0 级以上地震事件。针对该事件成因进行了综合分析与研究,具体内容包括:(1)通过收集历史地震资料讨论龙泉山断裂带的地震活动性;(2)利用高质量的波形数据对主震位置进行重定位;(3)根据地震层析成像获得的三维 v_p 、 v_s 以及泊松比(σ)模型分析了孕震构造和流体影响,以及(4)利用固体潮理论模型分析了固体潮与地震触发的相关性。结果表明,本次 $M_s5.1$ 地震发生在龙泉山断裂带北段,震中坐标为(30.732°N,104.529°E),震源深度为 15.12 km;震源位于高-低泊松比过渡带附近,并伴随着大范围的低速异常,初步推断与深部流体有关;同时,固体潮在断层面上产生的剪切应力变化,也可能与本次地震的触发密切相关,暗示着在地震发生前龙泉山北段的地震危险性已经达到了较高水平。因此深部流体侵入作用、强震同震效应以及特定孕震构造环境的综合影响可能是导致本次地震触发的主要因素。

关键词: 龙泉山断裂带;地震成因;地震层析成像

中图分类号: P319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)02-0306-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.306

Comprehensive Analysis of Seismogenesis of the 2020 $M_s5.1$ Earthquake on the Longquanshan Fault Zone, SW China

LIU Cunxi¹, LI Sha², LIU Guannan^{3,4}

- (1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China;
2. Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guiyang 550081, Guizhou, China;
3. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
4. Geomatics Key Laboratory of Sichuan Province (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: On Feb 3, 2020, an $M_s5.1$ earthquake occurred in Chengdu, Sichuan Province. The ep-

收稿日期:2020-07-22

基金项目:数学地质四川省重点实验室开放基金资助课题(scsxdz2020yb03);雅砻江流域水库地震监测专项(YLDC-DBA-2020003)

第一作者简介:柳存喜,工程师,从事地震监测及安全监测工作。E-mail:cx.liu@live.cn。

通信作者:刘冠男,在读博士研究生,主要从事青藏高及其周缘的地震层析成像研究。E-mail:liuguannan@stu.cdut.edu.cn。

icenter of the earthquake event is located on the Longquanshan fault zone, 38 km away from the center of Chengdu. As a rare earthquake event with $M \geq 5.0$ in the history of Longquanshan fault zone, a comprehensive analysis was carried out on the seismogenesis of this event: (1) The seismicity along the Longquanshan fault zone was discussed by collecting historical seismic data; (2) the location of main earthquake was relocated by using high-quality waveform data; (3) the seismogenic structure and fluid influence were analyzed through seismic tomography; (4) the relationship between the earth tide and the earthquake was analyzed by using the theoretical model of earth tide. The results showed that the $M_s5.1$ earthquake occurred in the northern part of Longquanshan fault zone with epicenter coordinate of (30.732°N, 104.529°E) and focal depth of 15.12 km. The source is located near the transition zone of high-low Poisson's ratio, accompanied by a wide range of low velocity anomalies. Furthermore, the change of shear stress caused by the earth tide on the fault plane is also considered to be closely related to the triggering of the earthquake, which indicates that the seismic risk of the northern part of Longquanshan fault zone has reached a high level before the earthquake. This study suggests that the deep fluid intrusion, the coseismic effect of strong earthquakes, and the comprehensive influence of specific seismogenic and tectonic environment may be the main factors leading to the triggering of this earthquake.

Keywords: Longquanshan fault zone; seismogenesis; seismic tomography

0 引言

根据中国地震台网正式测定结果,北京时间2020年2月3日凌晨0时5分41秒,四川省成都市青白江区发生了 $M_s5.1$ 地震,震中烈度达到Ⅵ度。本次 $M_s5.1$ 地震为近100多年来震中最靠近成都市主城区的一次。该事件震中位置距成都市中心大约38 km,震中附近还包括了人口稠密的金堂县(距离14 km)、青白江区(距离30 km)和广汉市(距离31 km),这些区域有强烈震感。

龙泉山断裂带位于残留四川前陆盆地、龙门山断裂带东侧。印度和欧亚两大板块的持续碰撞与汇聚,迫使巴颜喀拉地块向东移动并遇到上扬子板块的阻挡,因此产生的强烈逆冲作用造就了青藏高原地区海拔梯度最大的区域—龙门山断裂带(图1)。龙泉山断裂带是龙门山造山带的伴生物^[3-4]。但与龙门山断裂带的情况相反,龙泉山断裂带总体走向为 20° 至 30° N,长约200 km,断层深度主要发育于上地壳^[5-7],以孕育中小地震为主。从历史地震记录来看,5.0级及以上地震事件在该区域非常罕见。曾有一些学者利用不同的资料和方法评价了龙泉山断裂带上强震触发的危险性以及可能发生的最大级别地震事件。黄祖智和唐荣昌^[8]利用不同的活动断层长度-最大可能震级公式,并考虑到历史事件的震级,计算出未来地震事件的最大可能震级为 5.5 ± 0.5 级。唐荣昌等^[9]通过分析断层活动强度和已发

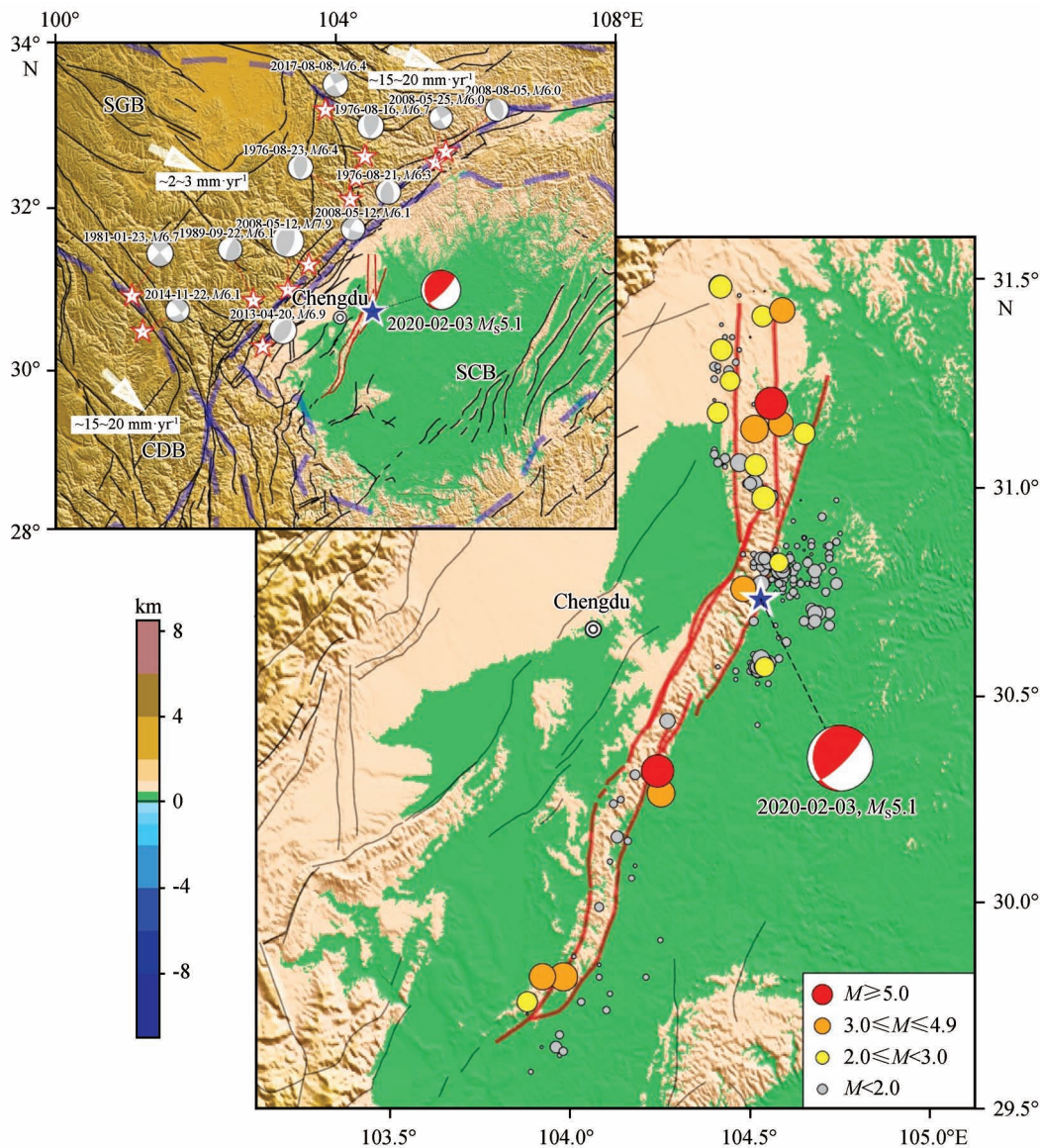
生地震的震级判断认为,蒲江—新津—成都—德阳断裂与龙泉山西坡断裂上的潜在地震震级为5.5级左右。徐水森等^[10]绘制了龙泉山断裂带的蠕变曲线,结果显示龙泉山断裂带的能量积累过程缓慢且能量释放水平较低,并据此推断该断裂带孕震周期较长,未来地震事件的震级较低。王伟涛等^[5]认为龙泉山断裂带上绝大部分的滑动量都被褶皱运动吸收,因此不具备孕育强震的条件。然而,黄伟等^[11]提出的另一种观点,认为这种褶皱结构能否孕育强震需要根据更多的地学资料来判断。此外,黄伟等^[11]研究认为,依据目前中国大陆地震地表破裂和震级的关系而言,该断裂曾发生的强震震级应大于6.5级,强震危险性的判断不能过分依赖于历史地震事件的情况。

刘雅丽^[12]通过物理实验模拟了龙泉山断裂带的发育演化过程,并指出潜在发震能力为5.5级,最大不超过6.5级。尽管在龙泉山断裂带上潜在的地震震级和强震危险性的判断仍不明了,但是,按照前人学者的研究推测,在龙泉山断裂带存在发生5.5~6.5级地震的可能性。假如一个6.0级或者6.5级地震的发生在较浅的深度(≤ 10 km),它对人口密度如此之大的区域所造成的破坏也可能是巨大的。

本研究结合龙泉山断裂带的地震活动性、龙泉地震及震源区域的高分辨率三维速度(v_p 、 v_s)和泊松比(σ)参数模型^[13-16]、固体潮应力,对本次 $M_s5.1$

地震的震源发震深度、孕震构造、固体潮应力变化对地震触发的影响以及地震成因开展了综合分析,旨在进一步了解本次地震事件的成因及龙泉山断

裂带的深部结构与地震活动性、认识龙泉山断裂带孕震机制,为震源区及周边防震减灾工作提供参考依据。



黑色细实线,活动断层;浅蓝色虚线,主要构造边界^[1];灰色震源球,龙门山断裂带及周边地区历史强震的震源机制^[2]。红色细实线,龙泉山断裂带;白色尖头,构造地块的运动方向;蓝色五角星,本次 $M_s 5.1$ 级地震定位后的震中;红色震源球,本次 $M_s 5.1$ 级地震震源机制解(USGS);不同颜色的圆形符号,龙泉山断裂带上的历史地震事件;SCB,四川盆地;SGB,松潘—甘孜(巴颜喀拉)地块;CDB,川滇菱形块体

图1 龙泉山断裂带及周边区域构造及地震活动

Fig.1 A schematic map of topography, tectonic settings and seismicity in LQSF and its adjacent areas

1 龙泉山断裂带的地震活动性

为了解龙泉山断裂带的地震活动性,我们收集了1900年至今(截止到北京时间2020年2月22日)地震事件数据(图1)。其中,1900—2008年的数据来自国际地震中心的地震事件报告(ISC Bulle-

tin),2009年至今的数据来自中国地震台网正式目录。资料显示,自1967年以来龙泉山断裂带共发生地震266次(图1),地震事件震级普遍偏小。如表1所列,震级 ≥ 3.0 级的事件22次,占事件总数的8.3%;震级 ≥ 4.0 级的事件10次,占事件总数的3.8%;震级 ≥ 5.0 级的事件仅有3次,占事件总数的

1.2%。相反地,震级 <2.0 的事件数量达到 211 次,裂带在过去 50 多年里主要以中小地震(震级 <5.5)占事件总数的比例约 80%。该分析表明龙泉山断为主,这与前人的推断和解释一致^[5,8,10]。

表 1 龙泉山断裂带地震($M \geq 3.0$)事件目录。

Table 1 Earthquake catalog ($M \geq 3.0$) occurred in the Longquanshan fault zone

序号	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	震级	发震时刻(北京时间)	数据来源
1*	104.242 6	30.319	20	5.3	1967-01-24 22:45:17.15	ISC
2	103.980 4	29.820 7	35	4.6	1980-01-06 12:30:48.57	ISC
3	103.922 1	29.821 1	35	4.3	1980-01-23 13:53:30.15	ISC
4	104.534 2	31.410 2	9	3.4	1981-03-21 06:09:52.54	ISC
5	104.512 1	31.140 3	35	4.5	1993-09-30 16:04:52.45	ISC
6	104.515 1	31.054 2	14	3.6	1996-10-18 20:28:50.51	ISC
7	104.42	31.33	18	3.5	1998-09-22 22:47:04.6	ISC
8	104.41	31.18	16	3.4	1999-03-23 10:47:58	ISC
9	104.65	31.13	22	3.5	1999-06-16 09:48:34	ISC
10	104.251 8	30.265 1	35	4.5	2002-05-31 11:53:04.85	ISC
11	103.88	29.76	18	3.3	2007-08-10 09:39:06	ISC
12*	104.558 2	31.202	10	5.3	2008-05-12 14:43:57.39	ISC
13	104.538 1	30.9753	35	3.9	2008-05-12 15:19:36.26	ISC
14	104.584 9	31.153	35	4.0	2008-05-12 15:57:16.63	ISC
15	104.589 3	31.424 3	9	4.1	2008-05-12 17:03:36.67	ISC
16	104.481	30.757 5	35	4.1	2008-05-13 23:30:40.68	ISC
17	104.415 6	31.482 1	9	3.6	2008-05-13 13:15:37.93	ISC
18	104.417 5	31.480 5	9	3.7	2008-06-10 12:58:29.49	ISC
19	104.444	31.255 6	9	3.2	2008-09-23 19:48:24.95	ISC
20	104.58	30.82	24	3.0	2010-02-16 04:34:01	中国地震台网
21	104.54	30.57	25	3.2	2010-07-11 13:24:34	中国地震台网
	104.46	30.74	21	5.1	2020-02-03 00:05:41	中国地震台网
22	104.536	30.756	10	5.2	2020-02-03 00:05:42	USGS/ISC
	104.529	30.732	15.12	-	2020-02-03 00:05:40.906	本研究

此外,表 1 和图 2 显示在 22 次震级 ≥ 3.0 级的地震事件中,有 6 次发生在 2008 年 5 月 12 日 $M_w7.9$ 汶川地震之后的 24 小时内,且事件震级普遍偏大。其中,有 1 次震级超过 5.0 级的地震事件仅发生在汶川地震之后的十余秒。此后在 2008 年 6 月和 9 月,又各有 1 次 3.0 级以上的地震事件发生。初步分析,该现象表明汶川地震引起的持续破裂和强烈冲击很可能对龙泉山断裂带的地震活动性产生

了显著的同震效应。张国宏等^[17]通过研究发现,汶川地震发生后龙泉山断裂带上的库伦应力增加了 0.1 bar。而钱琦和韩竹君^[18]则认为汶川地震发生后龙泉山断裂带上的库伦应力变化自北向南逐渐减弱,其中北段的库伦应力变化达到 0.46~0.58 bar,中段的库伦应力变化为 0.12~0.17 bar。而本次地震刚好发生在龙泉山断裂带的北段(图 1),这暗示了本次事件可能与汶川地震引起的四川前陆盆地地

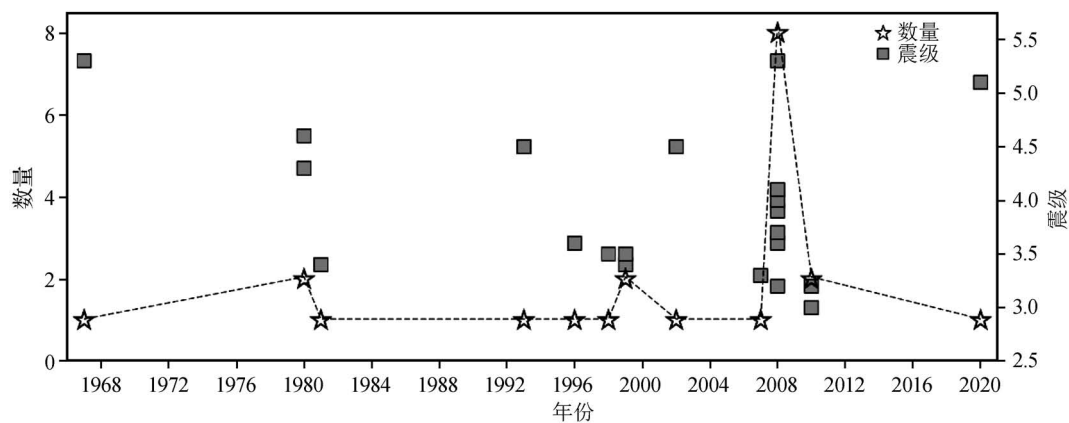


图 2 龙泉山断裂带地震事件频次及震级分布图

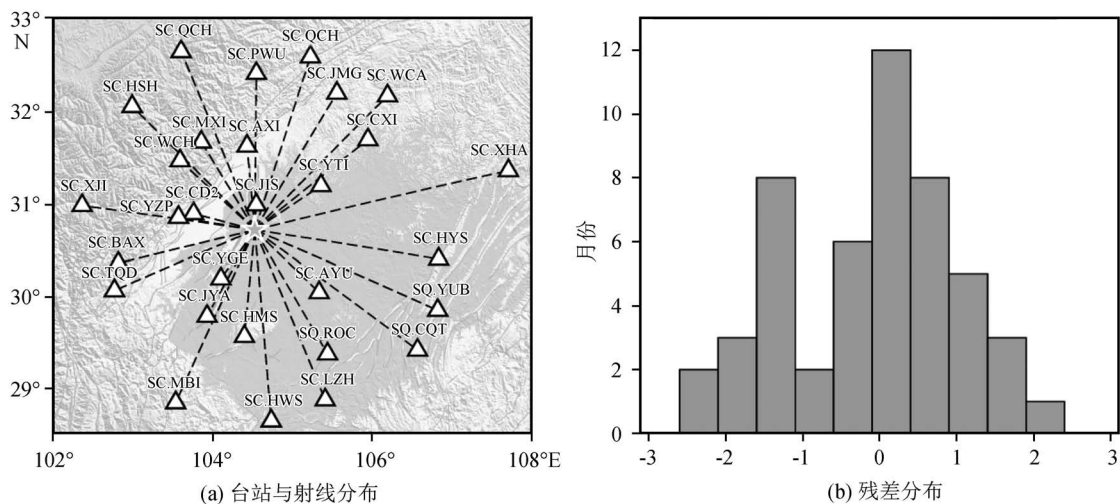
Fig.2 Frequency and magnitude distribution of earthquakes along the Longquanshan fault zone

壳应力的重新分配有关。特别值得注意的是,钱琦和韩竹君^[18]利用前人的方法^[19-20]计算了汶川地震前以及震后十年内,在本次 $M_s5.1$ 地震震中周边区域内发生 $5.0 < M_s < 6.0$ 地震事件的概率。结果显示, $5.0 < M_s < 6.0$ 地震事件在汶川地震前的发生概率仅为18%~32%,但是在汶川地震后激增为63%~77%。除库伦应力的同震变化外,龙泉山断裂带上最近十年内地震事件的发生,也可能与2008年 $M_w7.9$ 汶川和2013年 $M_s7.0$ 芦山地震引起的龙门山断裂带及其周边区域的地壳应力重新分配和调整有关^[21]。值得一提的是,在本次 $M_s5.1$ 地震发生之前,2019年6月17日在龙泉山断裂带南边四川长宁县发生了 $M_s6.1$ 地震。该地震事件的余震活动频繁,持续时间较长。在本次地震事件发生前后不久,各有一次3.0级以上长宁地震的余震事件发生(2020年1月30日、2020年2月3日)。虽然在本研究中我们未能利用现有的资料给出长宁地震序列与本次地震事件的相关性,但存在同震效应的可能性不能被排除。

2 震源重定位

地震发生后,中国地震台网在第一时间给出了本次 $M_s5.1$ 地震事件的震源参数。结果显示本次

地震发生于2020年2月3日00:05:41(UTC+8),震中位于(30.74°N,104.46°E),震源深度为21 km。另一方面,美国地质调查局(USGS)也针对本次地震事件给出了事件报告:发震时刻为2020年2月3日00:05:42(UTC+8),震源位置为(30.774°N,104.539°E),震源深度为10 km。震源机制解显示,本次地震事件是一次伴随着左旋走滑的逆冲滑动(图1)。值得注意的是,USGS给出的震源深度与中国地震台网给出的震源深度相差11 km。当震源深度相差如此之大时,所对应的孕震构造极有可能完全不同。为了准确地判断本次地震的孕震构造,我们利用基于经典Geiger方法的HYPOINVERSE2000单事件定位程序^[22]以及川滇三维速度模型^[23]对龙泉地震进行了重定位。为保证定位结果的准确性,我们仅采用了震中距小于3°、震相清楚、方位覆盖较好的30个地震台站[图3(a)]记录的50条Pg、Sg震相到时资料进行了重定位,其中,参与定位的震相残差介于-2.5~2.5 s之间[图3(b)]。定位结果显示,本次地震的发震时间为2020年2月3日00:05:40.906(UTC+8),震中位置为(30.732°N,104.529°E),震源深度为15.12 km。其中,平均定位残差为0.886 s,水平定位误差为1.334 km,垂直定位误差为2.868 km。



其中,三角形符号代表台站,上方标注了台网和台站的名称;五角星符号代表定位后的震中

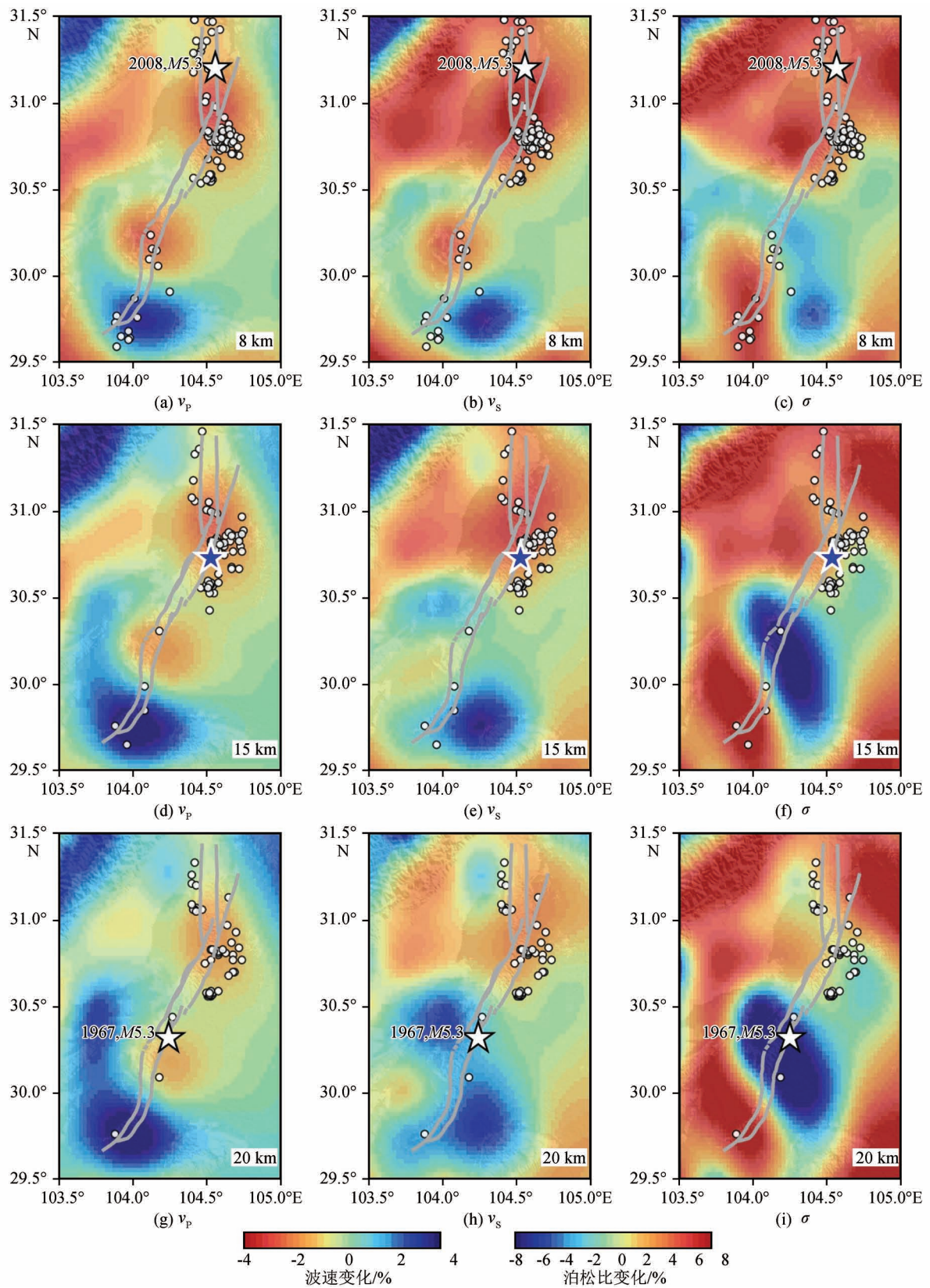
图3 震源位置重定位所涉及的台站与射线分布以及残差分布

Fig.3 Stations and raypaths and the distribution of residuals that involved in hypocenter relocation

3 孕震构造及地震成因

WANG等在2008年汶川地震发生后通过收集龙门山断裂带及四川盆地的大量的固定和临时台网资料反演了龙门山及周边地区的 v_p 、 v_s 三维精细速

度结构模型,并计算了震源区泊松比(σ)结构模型^[13-16]。在本研究中,我们采用上述速度模型对本次地震的孕震构造进行分析。如图4所示,我们展示了8 km、15 km以及20 km三个深度上的水平切片。三维图像显示,2020年龙泉地震的震源位于



灰色实线,龙门山断裂带;蓝色五角星,本次 $M_s5.1$ 地震的震中;白色五角星,龙泉山断裂带历史上 $M \geq 5.0$ 地震的震源位置;
圆形符号,龙泉山断裂带历史上 $M < 5.0$ 地震的震源位置

图 4 不同深度的纵、横波速度和泊松比图像的水平切片,引自该区域前期速度结构研究^[13-16]

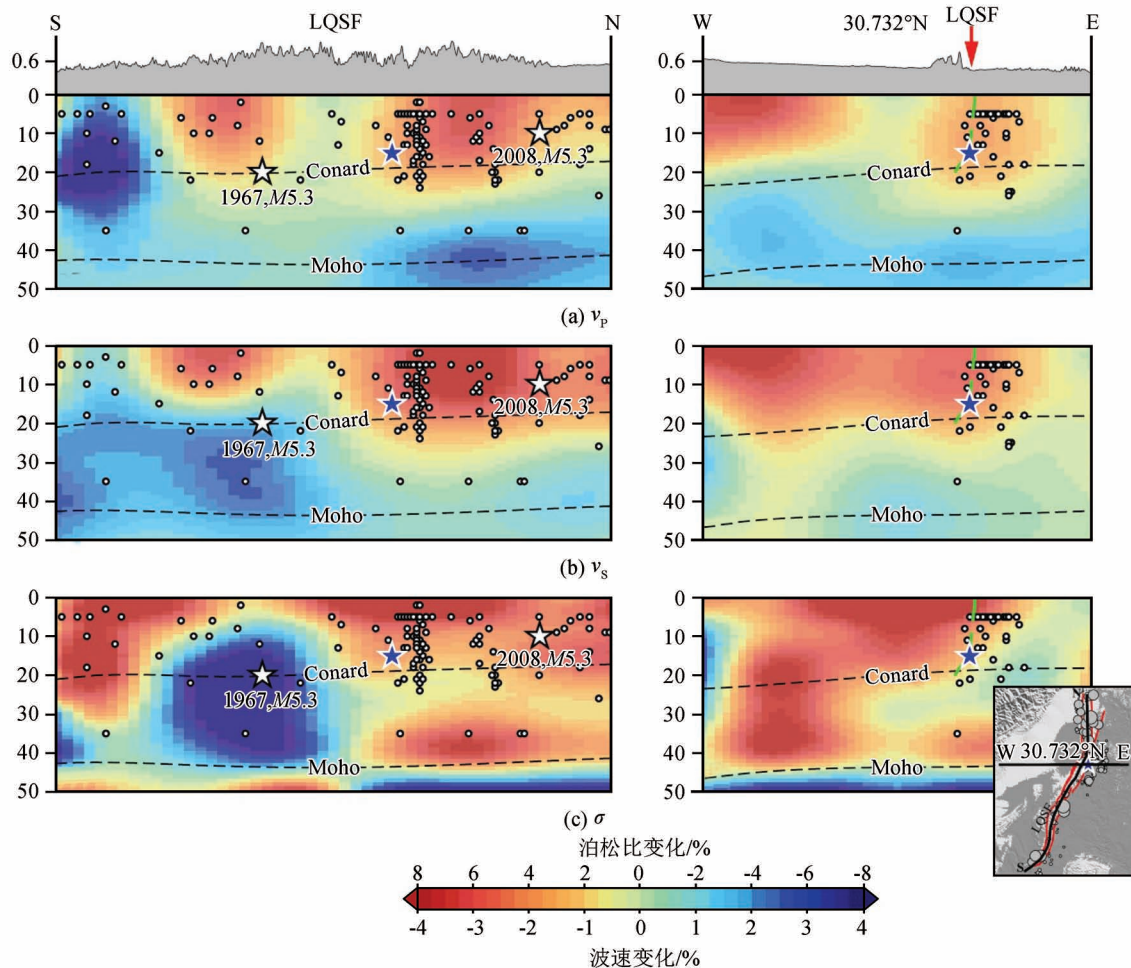
Fig.4 Horizontal slice of P-wave, S-wave velocity and Poisson's ratio image at different depths

(from previous studies of velocity structure in this area)^[13-16]

高-低 σ 变化的边界附近,且周围分布着大范围的低速异常。在弹性参数相差很大的两种地质体相互碰撞、挤压的过程中,接触面上会产生额外的位移,导致高-低 σ 变化边界很可能成为一种地震易发的构造^[24]。此外,流体对地震触发也具有非常显著的影响,主要体现在两个方面:(1)增加孔隙中的流体压力并降低岩石的力学强度,导致岩石更容易发生破裂;(2)大幅度削减断层面上的静摩擦力,导致断层面更容易发生滑动。我们注意到,在龙泉山断裂带上,绝大多数历史中小地震事件位于低速异常区域以及高 σ 或高-低 σ 转换带区域内。这不仅暗示着高-低转换带是一种具有较高地震危险性的构造,同时也说明了流体对地震的触发具有不可忽视的贡献。特别需要说明的是,四川盆地浅层(≤ 10 km)的低速、高 σ 异常通常被解释为较厚的古生代与中

生代沉积层。理论上,这种构造不利于应变能量的积累,因而不易发生地震,尤其是中强震。然而,在2008年5月12日,曾有一次5.3级地震事件发生在龙泉山北段的低速、高 σ 异常分布的区域。这一事实说明,即便在地震危险性较低的区域仍有可能触发较强的地震。如前文所述,考虑到该地震事件发生在汶川地震之后,我们认为汶川地震的同震效应可能是在龙泉山断裂带这种特殊孕震构造环境中触发中强地震的重要因素之一。

图5展示了穿过本次地震事件震中的两个剖面。剖面SN是沿着龙泉山断裂带的折线,剖面WE是穿过本次 $M_s 5.1$ 地震震中的一条东西向剖面。剖面上的速度和 σ 异常分布显示,在本次 $M_s 5.1$ 地震以及2008年的 $M_s 5.3$ 地震震源下方,都有来自四川前陆盆地(龙门山断裂带东侧)深部的低



蓝色五角星,本次5.1级地震的震中;白色五角星,龙泉山断裂带历史上 $M \geq 5.0$ 地震的震源位置;圆形符号,龙泉山断裂带历史上 $M < 5.0$ 地震的震源位置。黑色虚线,速度间断面,引自Crust 1.0模型^[27];红色箭头表示龙泉山断裂带位置,绿色的虚线为龙泉山断裂带圆形符号,龙泉山断裂带历史上 $M < 5.0$ 地震的震源位置

图5 纵、横波速度和泊松比图像垂直剖面,剖面位置在右下角子图中给出(黑色实线)

Fig.5 Vertical section of P-wave, S-wave velocity and Poisson's ratio image (black solid lines)

速、高泊松比异常体向上延伸至震源区。该速度和泊松比异常特征与穿过龙门山断裂带的大地电磁探测结果具有较好的一致性^[25-26]。这些深部低速异常主要集中在震源的西北边靠近龙门山断裂带区域,这种异常可以解释为深部流体的上涌。虽然四川盆地的浅层覆盖着较厚的沉积层不利于浅源地震(上地壳)的触发,但流体的存在提高了地壳中地震的发震几率。由此可见,发生在龙泉山北段的本次 $M_S5.1$ 和 2008 年 $M5.3$ 地震并不是偶然现象,深部流体作用、强震同震效应以及特定孕震构造在该断裂带的地震诱发及成因中发挥了重要作用。

4 潮汐应力对地震触发的影响

关于地球固体潮与地震的发生之间是否存在相关性的问题一直存在着争议。根据 Scholz^[28] 的观点,地震是在断层面上的应力超过某个临界值的瞬间触发的。在此前提下,如果处于临界状态的断层面上增加额外应力变化,那么就可能触发地震。但是有学者认为,固体潮所能够产生的最大应力仅为 10^3 Pa 的量级,而触发地震的应力降需要达到 $10^5 \sim 10^7$ Pa 的量级^[29],因此无法成为触发地震的因素^[30]。然而,有学者通过研究发现虽然固体潮所产生的应力强度无法与触发地震所需的应力降相比,但是它的变化频率($\sim 10^4$ Pa/6 h)却远远大于构造应力的变化频率,这种高频的周期性应力变化对临界断层的影响较为明显,完全能够成为触发地震的因素^[31-32]。地震触发与固体潮相关的观点在特定情况下已被证实,如特定的研究区域^[34-36]、特定的震源机制类型^[37-38],或者特定的震级范围^[34,36,39]。对于这一现象,我们认为固体潮与地震触发的相关性应该与具体的孕震条件、构造以及环

境密切相关,而不能一概而论。Tanaka et al^[40] 指出,固体潮与地震触发的相关性应该与特定的区域构造一同讨论。刘冠男等^[41] 前期研究也得出了相似的结论。

Schuster 测试^[42] 是用来检验固体潮与地震触发相关性的最常用方法之一,但该方法仅适用于地震簇群。在本研究中,我们根据骆鸣津等^[43] 的描述以及 Coulomb 3 软件^[44] 的应力计算方法建立了固体潮理论模型,并分析了本次 $M_S5.1$ 龙泉山地震发生前后 48 小时内的固体潮应力变化(图 6)。其中,我们援引了 USGS 公布的震源机制解。考虑到震源区域的周边构造并参考现有的断层数据,我们选择节面 I 作为断层面。结果显示,在地震发生时刻,固体潮产生的库伦应力(CFS)为正,接近并趋向于局部极大值,说明本次地震的触发与固体潮之间可能具有较高的相关性。固体潮所产生的正应力变化在地震发生前经历了一次高峰,并且在地震发生时刻趋近于平衡位置。相比之下,剪切应力在地震发生前 3 至 4 小时开始上升,在地震发生时刻表现出正值并趋近于局部最大值。这一现象说明,本次地震事件的发生可能与固体潮所产生的剪切应力变化密切相关,与正应力的变化几乎无关。根据 Scholz^[28] 的观点,以及固体潮应力变化的速率远远大于构造应力的事实,在大多数情况下地震的触发应当与固体潮密切相关。然而,如前文所述,这种相关的结论仅在特定情况下成立。我们认为,固体潮与地震触发的相关度在某种程度上可能与地震事件的易发程度有一定的关系。所以,这种相关性很可能暗示,本次 $M_S5.1$ 级地震的震中区域(也就是龙泉山断裂带北段)的地震危险性在发震前已经达到了较高水平。

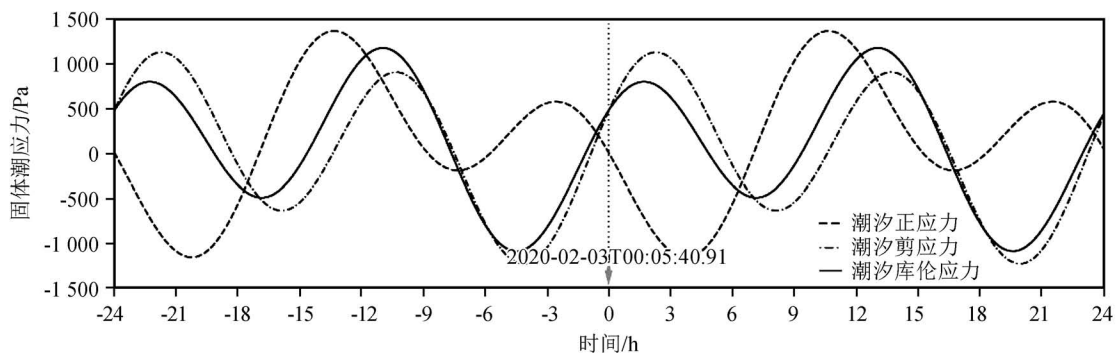


图 6 龙泉山 $M_S5.1$ 地震发生前后 48 h 内的理论固体潮应力变化曲线

Fig.6 Theoretical curves of tidal stress changes within 48 hours before and after the Longquanshan $M_S5.1$ Longquanshan earthquake

5 结论

本研究针对2020年2月3日凌晨0时5分41秒发生在龙泉山断裂带北段的 $M_s5.1$ 地震事件进行地震重定位,同时结合震源区地震活动性、三维速度和泊松比结构及潮汐应力的变化分析本次 $M_s5.1$ 地震的孕震构造和地震成因。结果表明,本次 $M_s5.1$ 地震是龙泉山断裂带历史上非常罕见的5.0级以上地震事件,地震的震源位于高-低 σ 异常体的过渡带附近,这种构造是地震易发的构造。此外,在震源区下方存在着大量的低速异常体,本研究认为该低速异常体是四川前陆盆地(龙门山断裂带东侧)深部涌入地壳的流体,与前人大地电磁探测研究的结果有较好的一致性,上涌流体作用是龙泉山断裂带深部孕震的主要环境。地震活动性表明,2008年汶川地震对龙泉山断裂带上地震可能具有同震效应;同时,固体潮理论模型显示,本次 $M_s5.1$ 地震事件与固体潮在断层面上产生的剪切应力变化密切相关,表明本次地震发生前龙泉山断裂带北段的地震危险性已经达到了较高水平,因此认为龙泉山 $M_s5.1$ 地震是深部流体侵入作用、强震同震效应以及特定孕震构造环境的综合作用的结果。这一点间接证明,褶皱构造是否能够孕育强震需要根据具体的情况来判断^[11]。虽然四川盆地浅层分布着大范围较厚的古生代和中生代沉积物,并且龙泉山断裂带上绝大部分的滑动量都被褶皱运动吸收^[5],但是深部流体的侵入作用、强震的同震效应以及特定的孕震构造综合作用仍可能为强震的触发创造条件。

致谢:本研究受数学地质四川省重点实验室开放基金资助课题(scsxdz2020yb03),以及雅砻江流域水库地震监测专项(YLDC-DBA-2020003)联合资助。地震目录等数据源于国际地震中心(ISC)和国家地震科学数据中心(<http://data3.earthquake.cn/data/index.jsp>)。文中的图件是利用GMT(Generic Mapping Tools)软件绘制。

参考文献(References)

- [1] 邓起东,张培震,冉勇康等.中国活动构造基本特征[J].中国科学D辑,2002,32(12):1020-1030.
DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang et al. Basic Characteristics of Active Tectonics of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [2] LENTAS KONSTANTINOS, GIACOMO DOMENICO DI, HARRIS James, et al. The ISC Bulletin as a Comprehensive Source of Earthquake Source Mechanisms[J]. Earth System
- [3] 陈社发,邓起东,赵小麟等.龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(二)[J].地震地质,1994,16(4):413-421.
CHEN Shefa, DENG Qidong, ZHAO Xiaolin, et al. Deformational Characteristics, Evolutionary History, and Deformation Mechanism of the Middle Longmenshan Thrust-nappes and Related Tectonics[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 413-421.
- [4] 刘树根,罗志立,赵锡奎,等.龙门山造山带-川西前陆盆地系统形成的动力学模式及模拟研究[J].石油实验地质,2003,25(5):432-438.
LIU Shugen, LUO Zhili, ZHAO Xikui, et al. Study on the Dynamic Mode and Its Simulation in the Formation of Longmen mountain-West Sichuan Foreland Basin System, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(5): 432-438.
- [5] 王伟涛,贾东,李传友,等.四川龙泉山断裂带变形特征及其活动性初步研究[J].地震地质,2008,30(4):968-979.
WANG Weitao, JIA Dong, LI Chuanyou, et al. Preliminary Investigation on Deformation Characteristics and Activity of Longquanshan Fault Belt in Sichuan[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 968-979.
- [6] 于佳男,李忠权,曾庆,等.龙泉山构造带构造特征及扭动形迹成因探讨[J].天然气勘探与开发,2013,36(3):1-3,7.
YU Jianan, LI Zhongquan, ZENG Qing, et al. Structural Characteristics and Origin of Twisted Traces in Longquanshan Tectonic Belt[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(3): 1-3, 7.
- [7] LIZ G, JIA D, CHEN W. Structural Geometry and Deformation Mechanism of the Longquan Anticline in the Longmen Shan Fold-and-Thrust Belt, Eastern Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 64: 223-234.
- [8] 黄祖智,唐荣昌.龙泉山活动断裂带及其潜在地震能力的探讨[J].四川地震,1995(1):18-23.
HUANG Zuzhi, TANG Rongchang. The Longquanshan Fault Zone and Exploration of Potential Earthquake Ability [J]. Earthquake Research in Sichuan, 1995(1): 18-23.
- [9] 唐荣昌,黄祖智,钱洪,等.成都断陷区活动断裂带基本特征及其潜在地震能力的判定[J].中国地震,1996,12(3):285-293.
TANG Rongchang, HUANG Zuzhi, QIAN Hong, et al. Main Features and Potential Seismic Capability of Active Fault Belts in Chengdu Depression [J]. Earthquake Research in China, 1996, 12(3): 285-293.
- [10] 徐水森,任寰,宋杰.龙泉山断裂带地震活动性浅析[J].四川地震,2006(2):21-27.
XU SHuisen, REN Huan, SONG Jie. Primary Study on the Seismicity along the Faults of Longquanshan [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2006(2): 21-27.
- [11] 黄伟,江娃利.四川龙泉山断裂带及其活动性与潜在地震危险性讨论[J].西北地震学报,2012,34(1):50-56.
HUANG Wei, JIANG Wali. Discussion on the Late Quaternary Activity and Earthquake Risk Potential of Longquanshan

- Fault in Sichuan [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(1): 50-56.
- [12] 刘雅丽. 川西地区龙泉山断裂特征及活动性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- LIU Yali. Structural Feature and Activity Evaluation of Longquanshan Fault Belt in West of Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [13] WANG Z, FUKAO Y, PEI S P. Structural Control of Rupturing of the $M_w7.9$ 2008 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279(1-2): 131-138.
- [14] WANG Z, HUANG R Q, PEI S P. Crustal Deformation along the Longmen-Shan Fault Zone and Its Implications for Seismogenesis [J]. *Tectonophysics*, 2014, 610: 128-137.
- [15] WANG Z, SU J R, LIU C X, et al. New Insights into the Generation of the 2013 Lushan Earthquake ($M_s7.0$), China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(5): 3507-3526.
- [16] 王志, 王绪本, 黄润秋, 等. 龙门山断裂带多参数深部结构成像与地震成因研究 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(6): 2068-2079.
- WANG Zhi, WANG Xuben, HUANG Runqiu, et al. Deep Structure Imaging of Multi-Geophysical Parameters and Seismogenesis in the Longmenshan Fault Zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2068-2079.
- [17] 张国宏, 单新建, 李卫东. 汶川 $M_s8.0$ 地震库仑破裂应力变化及断层危险性初步研究 [J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 935-944.
- ZHANG Guohong, SHAN Xinjian, LI Weidong. The Coulomb Failure Stress Change Associated with the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake and the Risk Prediction of Its Surrounding Faults [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 935-944.
- [18] 钱琦, 韩竹军. 汶川地震对龙泉山断裂地震发生概率的影响研究 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 489-497.
- QIAN Qi, HAN Zhujun. The Research in the Change of the Earthquake Occurrence Probability in Longquan Shan Fault after the Wenchuan Earthquake [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 489-497.
- [19] TODAS, STEIN R S, RICHARDS-DINGER K, et al. Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B5): B05S16.
- [20] TODA S, LIN J, MEGHRAOUI M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, Earthquake Calculated to Increase Failure Stress and Seismicity Rate on Three Major Fault Systems [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17): L17305.
- [21] PEIS P, NIU F L, BEN-ZION Y, et al. Seismic Velocity Reduction and Accelerated Recovery Due to Earthquakes on the Longmenshan Fault [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 387-392.
- [22] KLEIN FRED W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes, Version 1.4. Menlo Park; United States Department of the Interior Geological Survey, 2014, 1-145.
- [23] 吴建平, 黄媛, 张天中, 等. 汶川 $M_s8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 320-328.
- WU Jianping, HUANG Yuan, ZHANG Tianzhong, et al. Aftershock Distribution of the $M_s8.0$ Wenchuan Earthquake and Three Dimensional P-Wave Velocity Structure in and around Source Region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 320-328.
- [24] WANG Z, FUKAO Y, MIYAKAWA A, et al. Crustal Extension and Graben Formation by Fault Slip-Associated Pore Opening, Kyushu, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(5): 4879-4894.
- [25] ZHAO G, UNSWORTH M J, ZHAN Y, et al. Crustal Structure and Rheology of the Longmenshan and Wenchuan $M_w7.9$ Earthquake Epicentral Area from Magnetotelluric Data [J]. *Geology*, 2012, 40(12): 1139-1142.
- [26] ZHANY, ZHAO G Z, UNSWORTH M, et al. Deep Structure beneath the Southwestern Section of the Longmenshan Fault Zone and Seimogenetic Context of the 4.20 Lushan $M_s7.0$ Earthquake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(28-29): 3467-3474.
- [27] LASKE G, MASTERS G, MA Z T, et al. Update on CRUST1.0-a 1-Degree Global Model of Earth's Crust [EB/OL]. 2013
- [28] SCHOLZ CHRISTOPHER H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge Univ. Press, New York, 1990.
- [29] HEATON T H. Tidal Triggering of Earthquakes [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1975, 43(2): 307-326.
- [30] KANAMORI HIROO, ANDERSON Don L. Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1975, 65(5): 1073-1095.
- [31] AKIK. Some Problems in Statistical Seismology [J]. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan 2nd Ser)*, 1956, 8(4): 205-228.
- [32] LOCKNERD A, BEEELER N M. Premonitory Slip and Tidal Triggering of Earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B9): 20133-20151.
- [33] SOURIAN MARC, SOURIAU ANNIE, GAGNEPAIN JAN-NINE. Modeling and Detecting Interactions Between Earth Tides and Earthquakes with Application to an Aftershock Sequence in the Pyrenees [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72(1): 165-180.
- [34] WILCOCKW S D. Tidal Triggering of Microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(20): 3999-4002.
- [35] TOLSTOYM, VERNON F L, ORCUTT J A, et al. Breathing of the Seafloor: Tidal Correlations of Seismicity at Axial Volcano [J]. *Geology*, 2002, 30(6): 503.
- [36] KASAHARAJ. GEOPHYSICS: Tides, Earthquakes, and Volcanoes [J]. *Science*, 2002, 297(5580): 348-349.

- [21] HENNENFENT G, HERRMANN F J. Simply Denoise: Wavefield Reconstruction Via Jittered Undersampling[J]. *Geophysics*, 2008, 73(3): V19-V28.
- [22] 唐刚, 杨慧珠. 基于泊松碟采样的地震数据压缩重建[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2181-2188.
TANG Gang, YANG Huizhu. Seismic Data Compression and Reconstruction Based on Poisson Disk sampling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(9): 2181-2188.
- [22] 唐刚, 杨慧珠. 基于泊松碟采样的地震数据压缩重建[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(9): 2181-2188.
TANG Gang, YANG Huizhu. Seismic Data Compression and Reconstruction Based on Poisson Disk Sampling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(9): 2181-2188.
- [23] HALE E T, YIN W T, ZHANG Y. Fixed-Point Continuation for ℓ_1 -Minimization: Methodology and Convergence[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2008, 19(3): 1107-1130.
- [24] MA S Q, GOLDFARB D, CHEN L F. Fixed Point and Bregman Iterative Methods for Matrix Rank Minimization[J]. *Mathematical Programming*, 2011, 128(1-2): 321-353.
- [25] LIU J, WANG H, YI D, et al. Sparsity and Continuity-promoting Seismic Image Recovery Based on Split Bregman Method[M]. 2012.

(上接第 316 页)

- [37] TSURUOKAH, OHTAKE M, SATO H. Statistical Test of the Tidal Triggering of Earthquakes: Contribution of the Ocean Tide Loading Effect[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 183-194.
- [38] COCHRANE S, VIDALE J E, TANAKA S. Earth Tides can Trigger Shallow Thrust Fault Earthquakes[J]. *Science*, 2004, 306(5699): 1164-1166.
- [39] TANAKAS, OHTAKE M, SATO H. Evidence for Tidal Triggering of Earthquakes as Revealed from Statistical Analysis of Global Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B10): ESE1-1-ESE1-11.
- [40] TANAKAS, OHTAKE M, SATO H. Tidal Triggering of Earthquakes in Japan Related to the Regional Tectonic Stress[J]. *Earth, Planets and Space*, 2004, 56(5): 511-515.
- [41] 刘冠男, 王志. 鲜水河—安宁河断裂带深部构造特征、固体潮应力变化与地震触发相关性研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(3): 928-943.
- LIU Guannan, WANG Zhi. Correlations of the Deep Structural Characteristics, Tidal Stress Variation and Earthquake Initiation along the Xianshuihe-Anninghe Fault Zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(3): 928-943.
- [42] SCHUSTER Arthur. On Lunar and Solar Periodicities of Earthquakes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London (1854-1905)*, 1897, 61(-1): 455 - 465.
- [43] 骆鸣津, 顾梦林, 睢建设, 等. 固体潮应变理论值的计算[J]. *地球物理学报*, 1986, 29(2): 157-165.
LUO Mingjin, GU Menglin, SUI Jianshe, et al. Calculation of the Theoretical Values of the Strain Tide[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1986, 29(2): 157-165.
- [44] LIN J, STEIN R S. Stress Triggering in Thrust and Subduction Earthquakes and Stress Interaction between the Southern San Andreas and nearby Thrust and Strike-Slip Faults[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B2): B02303.