第 39 卷 第 4 期(883~892)	中 国 地 震	Vol. 39 No. 4
2023 年 12 月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Dec. 2023

扈桂让,张广伟,梁姗姗. 2023. 四川长宁地区地震活动空间分布特征研究. 中国地震,39(4):883~892.

四川长宁地区地震活动空间分布特征研究

扈桂让¹⁾ 张广伟²⁾ 梁姗姗³⁾

1) 山西省地震局,太原 030002

2) 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085

3) 中国地震台网中心,北京 100045

摘要 近年来,四川长宁地区地震活动频繁,特别是2019年6月17日发生的长宁 M_s6.0地 震造成长宁及周边地区较为严重的人员伤亡和财产损失,引起社会和科研工作者的广泛关注。 为探究长宁地区地震的发震构造和机理,利用双差定位方法对长宁 M_s6.0 地震前后一年时间段 内的地震进行重定位,并采用波形拟合方法获得了 14 次 M_s>4.0 地震的震源机制解,综合分析 了长宁地区地震活动的空间分布特征,获得以下主要认识:①2019年长宁 M_s6.0 地震的发震构 造为长宁背斜 NW 向的高倾角断层,地震序列的震源深度西深东浅,该地震是位于滑脱面之上 先存断裂活化的构造地震事件;②南部建武向斜地区地震活动频度高,且表现出丛集性的分布 特征,推测与零散分布的页岩气开采活动密切相关;③长宁地区南北2个区域地震活动的差异 性受控于局部应力场方向的变化,北侧历史盐矿开采、南侧页岩气开采以及岩石介质物性的横 向差异直接影响了地震的空间特征。

关键词: 四川长宁地震 双差定位 震源机制 丛集分布

[文章编号] 1001-4683(2023)04-0883-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

СМҮК

长宁地区位于四川盆地的东南缘,是小震活动较为频繁的区域,在其周边发生过 2008 年汶川 M_s 8.0、2013 年芦山 M_s 7.0 以及 2014 年鲁甸 M_s 6.5 地震等(图1(a))。近年来,长 宁地区地震频度明显增强,其中 2019 年连续发生 5 次 $M_s \ge 5.0$ 地震,而 2019 年 6 月 17 日长 宁 M_s 6.0 地震造成长宁县及其周边地区较为严重的人员伤亡和财产损失(易桂喜等,2019; Lei et al,2019;梁姗姗等,2020),引起社会和科研工作者的广泛关注。这些中等地震并未造 成明显的地表破裂,且均远离已知的区域活动断裂(图1(a)),其成因机理受到广泛关注。 另外,长宁地区历史上具有长时间的盐矿开采活动(Sun et al,2017),且近十几年来区域内 开展了密集的页岩气开采(Meng et al,2019;Lei et al,2019)(图1(b)),因此详细分析该区 域地震空间分布特征对于探讨发震构造尤为重要。

[[]收稿日期] 2023-03-31 [修定日期] 2023-09-05

[[]项目类别]中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA2205)、应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业 务专项(ZDJ2020-09)共同资助

[[]作者简介] 扈桂让,男,1985年生,高级工程师,主要从事地震活动研究。E-mail:408937470@qq.com 张广伟,通讯作者,男,1985年生,副研究员,主要从事地震定位研究。E-mail:zhanggw@mail.ustc.edu.cn



注:(a)研究区周边断层及近年来中强地震分布;(b)长宁地区 M_s≥5.0 地震及主要构造分布,其中盐井位 置据 Sun 等(2017),页岩气井位置据 Meng 等(2019);(c)横切建武向斜和长宁背斜的人工地震剖面,其 中红线代表滑脱面,虚线代表断层(据何登发等(2019))。

图1 研究区域构造背景

关于长宁地区地震的发震机制,不同学者开展了大量工作。其中,针对长宁 M_s 6.0 地震序列的精定位结果显示,发震破裂面呈 NW-SE 走向,断层面较为陡立,且震源深度表现出西深东 浅的趋势(易桂喜等,2019; 徐志国等,2020; 郭志等,2020)。震源机制研究结果表明长宁 M_s 6.0 主震为逆断型兼左旋走滑性质(梁姗姗等,2020),震源破裂位置位于长宁背斜上的高倾 角发震断层(图1(b)、1(c))。区域三维速度模型揭示出长宁地区高波速比和低波速比相间存 在的特征,暗示地震触发机制与区域结构和流体注入密切相关(Long et al,2020;Zhang et al, 2020;Anyiam et al,2023)。此外,Lu 等(2021)利用高分辨率的地震反射剖面揭示出长宁地区 断层深部三维几何结构,提出基底先存断层系统为地震的孕育提供了构造条件。

1 资料与方法

1.1 地震重定位

本研究使用 2018 年 12 月 1 日—2019 年 7 月 7 日四川地震台网的观测报告震相到时资料,选择震中距 250km 范围内、至少 8 个到时记录的地震事件(图 2(a)),最终符合条件的地 震共 7430 个,包含 53487 条 P 波和 52527 条 S 波走时数据(图 2(b))。采用双差定位法 (Waldhauser et al,2000)开展重新定位研究,该方法利用台站相对走时残差来修定地震初始 位置,基于相邻 2 个事件传播到台站的射线路径几乎相同,有效降低了速度模型不准确性对 定位结果的影响。在地震重定位过程中,将事件对之间的最大距离设为 4km,构建出 2086259 条 P 波和 1992446 条 S 波走时差数据。初始一维模型参考张广伟等(2014)和 Lei 等(2017)的研究结果(图 2(c))。



注:(a)本研究所使用的地震台站(蓝色三角形)和地震(白色圆圈)分布;(b)P 波和 S 波观测走时曲线; (c)地震定位和震源机制反演采用的一维速度模型。

1.2 震源机制反演

震源机制反演采用近震波形拟合方法 gCAP(Zhu et al,2013),该方法将地震波形分为 Pnl 和 S 波(或面波),并对两部分赋予不同权重,计算理论和实际波形的拟合误差函数。反 演前,首先对原始波形去除仪器响应、去倾斜、去平均值及旋转到大圆弧路径;在反演过程 中,Pnl 和 S 波滤波范围分别为 0.02~0.2Hz 和 0.02~0.1Hz,走向、倾角和滑动角的搜索间隔 为 5°,深度搜索间隔为 1km。格林函数采用频率-波数法(F-K 法)计算(Zhu et al,2002),采 样间隔设为 0.1s,采样点为 1024 个。

图 2 地震定位和震源机制反演资料

2 结果与讨论

2.1 地震空间分布

本研究获得四川长宁地区 7055 个地震事件的重定位结果,其 EW、SN 和垂直方向的平均相对误差分别为 49m、56m 和 114m,较大提高了地震的定位精度。为直观展示震中位置随时间的空间变化,以 2018 年 12 月 1 日为初始时间起点,给出地震的平面分布图,如图 3 所示。由图可以看出,地震活动的初始位置主要集中在建武向斜,该区域正是页岩气开采的主要位置;随着时间的推移,地震活动向南部扩展,至 2019 年 6 月在长宁背斜发生 NW 向的条带状地震活动。



图 3 长宁地区地震事件随时间变化的空间分布

进一步给出重定位后地震平面及深度分布图,如图 4 所示,由图可见地震在空间上呈现 丛集性分布,主要分为 6 个丛集(图 4(a))。其中,丛集 C1 为长宁 M_s6.0 地震的发震区域, 该区位于盐矿开采区,地震序列表现为 NW 向条带状分布,与长宁背斜走向方向相一致,长 度范围约 30km,呈现出北西深、南东浅的趋势,横切剖面显示断层面较为陡立(图 4(b))。 丛集 C2 位于建武向斜,其地震分布的优势方向性并不明显,2018 年 12 月 16 日 M5.7 和 2019 年 1 月 3 日 M5.3 地震均位于该丛集,重定位结果也显示出 2 次地震的深度位于人工反 射剖面揭示的滑脱面上(何登发等,2019),表明向斜构造对地震的发生起到控制作用(图 4 (c))。丛集 C3 地震显示出倾斜的柱状分布特征,并且震源深度较浅,该位置处于页岩气开 采区,推测该区地震活动与开采活动相关(图 4(d))。丛集 C4 地震序列展现出明显的 SN 向条带分布,震源深度由北向南逐渐加深,横切剖面清楚地刻画出陡立的断层面,表明该处 存在一条近 SN 向的隐伏断层(图 4(e))。丛集 C5 显示出一条 NW 向的断层,长度约 30km, 且断层面较为陡立,与其他丛集不同,该丛集震源深度相对较深,达到 15km (图 4(f))。丛 集 C6 地震序列在平面上表现为窝状分布,与丛集 C3 类似,其发震机制可能与页岩气开采活

886

СМҮК

动相关(图4(g))。



注: C1~C6表示 6个地震丛集,不同丛集给出沿矩形框长轴和横切剖面图;图(c)中 C2 剖面的灰色线表示 滑脱面;每个横切剖面的虚线代表可能的断层面,星号代表 M>5.0 地震;剖面纵横坐标比例相等。 图 4 长宁地区重定位地震事件平面和纵剖面分布

2.2 震源机制分布特征

采用近震波形反演 gCAP 方法,获得了 14 次 *M*_s>4.0 地震的震源机制解(表1)。图 5 展示出长宁 *M*_s6.0 地震震源机制反演的理论波形和实际波形拟合图,整体上波形拟合较好,波形相关系数较高,表明反演结果可靠;通过不同深度反演,在矩心深度 3km 处所得到的震源机制最优。最终得到 *M*_s6.0 地震的双力偶机制解节面 I 走向 311°,倾角 65°,滑动角 57°; 节面 II 走向 188°,倾角 41°,滑动角 140°;矩震级为 *M*_w5.7。断层面几何参数显示此次地震

88	38
----	----

衣I

*M*_s>4.0 地震震源机制解

事件号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	矩心深度 /km	矩震级 (<i>M</i> _W)	节面 I /(°)		节面Ⅱ/(°)			
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
Evt1	2018-12-16 T04:46:07	3	5.1	329	64	-50	86	47	-143
Evt2	2019-01-03 T00:48:07	3	4.7	219	79	129	322	40	17
Evt3	2019-01-15 T15:52:23	10	3.6	341	69	151	83	63	24
Evt4	2019-04-26 T17:19:12	5	3.8	333	69	-23	72	68	-158
Evt5	2019-06-17 T14:55:43	3	5.7	311	65	57	188	41	140
Evt6	2019-06-17 T15:36:01	2	5.0	311	63	55	188	43	139
Evt7	2019-06-17 T16:29:07	3	4.1	335	63	107	120	32	60
Evt8	2019-06-17 T16:37:55	2	4.1	165	54	114	309	42	61
Evt9	2019-06-17 T21:03:25	3	4.3	324	53	104	121	39	72
Evt10	2019-06-17 T23:34:33	2	4.8	311	74	81	160	18	117
Evt11	2019-06-22 T14:29:56	5	5.0	320	64	55	198	42	140
Evt12	2019-06-23 T00:28:17	4	4.2	140	82	31	45	59	170
Evt13	2019-07-03 T04:26:53	5	4.4	297	60	74	147	34	116
Evt14	2019-07-04 T02:17:58	8	4.9	319	54	83	150	36	99



注:波形下方数字为各段理论地震波形相对实际观测波形的移动时间,以及波形拟合的相关系数(%);波形图左侧字母 为台站代码,其下方数字分别为台站震中距(km)和理论值与观测值拟合偏移(s)。

图 5 长宁 M_s6.0 地震震源机制解的波形拟合(a)及不同深度震源机制拟合残差(b)

889

为一次逆冲为主、兼少量左旋走滑分量的地震事件,断层面较为陡立,且倾向 NE。结合震源 区构造走向(易桂喜等,2019;何登发等,2019)和余震空间分布特征,推断发震断层面与 NW-SE 向的长宁背斜主轴走向一致,是位于背斜构造上的高倾角断层(Lu et al,2021)。

图 6(a)显示发生在建武向斜的地震事件 Evt1 和 Evt2 表现为正断和走滑性质,这与震源发生的位置处在滑脱层的特殊构造上密切相关(Lu et al,2021)。地震事件 Evt3 为走滑机制,倾角较为陡立,与精定位地震序列显示的近 NS 向断层条带具有较好的一致性,进一步表明该处存在一条隐伏断层。地震事件 Evt4 位于 NW 向的断层上,与地震空间展布方向也较为一致,印证了震源机制解的可靠性。Evt5~Evt14 共 10 个地震事件均位于长宁 M_s6.0 地震序列的长宁背斜上,表明区域地质构造控制了地震展布的方向,褶皱及伴生断层为发震断层(图 6(b));另外,震源破裂机制主要以逆冲挤压型为主,断层面的走向自 SE 至 NW 向存在少许差异,震源机制节面走向的差异暗示此次地震序列受到区域构造应力场的控制,但是存在小尺度的应力方向变化(胡幸平等,2021);同时,三维速度结构也显示出在长宁背斜的NW 向存在一个高速异常体(Zhang et al,2020),断层的 NW 方向可能受到该高速异常体的阻挡,这种结构的横向不均匀性也可能导致应力场方向产生了局部变化,从而造成震源破裂机制的复杂性。



注:图(a)长宁地区 M_s>4.0 地震震源机制解,地震事件号与表 1 一致,其中震源球上灰色区域代表压缩区, 白色代表拉张区,震源球采用下半球投影,震源球上符号"+"表示反演使用台站投影。 图 6 震源机制(a)与区域地质构造简图(b)

反演获得的震源矩心深度均较浅,主要集中在 2~5km 之间(表1),这暗示地震的发生 可能与开采活动密切相关。在研究区的长宁背斜,历史上具有长时间段的盐矿开采(阮祥 等,2008;Sun et al,2017),而在建武向斜区,近十几年来页岩气开采频度显著增加(Meng et al,2019)。大量的研究结果揭示出开采注水活动与地震发生存在密切关系(Lei et al, 2017、2019),本研究获得较浅的地震矩心深度也表明高压注水可能触发了区域浅部先存断 层的活动。同时,矩心深度较浅的地震对地表建筑物破坏性也较大,这从另外一个角度解释 了长宁 *M*_s6.0 地震造成地表灾害严重的重要原因。

4 期

综上,基于精细的地震空间位置和震源破裂机制,并结合人工地震剖面结果(何登发等, 2019;Lu et al,2021),给出长宁地区的发震构造示意图(图7)。整体上,震源区主要受到长 宁背斜和建武向斜的控制,长时间的开采注水活动触发了不同尺度、不同几何产状的先存断 层活动。北部地震活动主要与盐矿开采有关,在背斜核部存在高角度的 NW 向断层,因此地 震的 NW 向条带也较为明显;南部地震活动主要与页岩气开采活动有关,开采井分布较为 零散,因此地震的分布也呈现出多个丛集式的展布。胡幸平等(2021)指出长宁地区地壳应 力场的最大主应力轴在整个区域内基本均处于近水平状态,然而北侧和南侧存在显著差异, 这种局部改变是长宁地区复杂地震活动的必要力学基础。本研究也认为介质岩性的横向差 异和高压流体注入直接影响了长宁地区地震活动的空间分布格局。



图 7 长宁地区地震发震构造示意图

3 结论

本研究利用双差定位方法对 2019 年长宁 *M*_s6.0 地震发生前后一年时间段内的地震进行重定位,并采用波形拟合方法获得了 14 次 *M*_s>4.0 地震的震源机制解,综合分析了长宁地 区地震活动的空间分布特征,获得以下主要认识:

(1)2019年长宁 *M*_s6.0 地震的发震构造为长宁背斜 NW 向高倾角左旋逆冲兼走滑断 层,地震序列的震源深度呈现西深东浅,是 NW 向先存断裂活化的构造地震事件。

(2)南部建武向斜地区地震频度远远高于北部,并且表现出丛集性的分布特征,推测其与页岩气开采活动密切相关。

(3)长宁地区南、北2个区域地震活动的差异性受控于局部应力场方向的变化,而介质 岩性的横向差异和高压流体注入直接影响了地震活动的空间分布特征。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵修改意见;感谢中国地震台网中心国家地震科学数据中心 (https://data.earthquake.cn/)为本研究提供数据。

890

MYK

39 卷

СМҮК

参考文献

郭志,高星,路珍. 2020. 2019 年 6 月 17 日四川长宁地震重定位及震源机制研究. 地震学报,42(3):245~255.

何登发,鲁人齐,黄涵宇,等. 2019. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景. 石油勘探与开发,46(5):993~1006.

胡幸平,崔效锋,张广伟,等. 2021. 长宁地区复杂地震活动的力学成因分析. 地球物理学报,64(1):1~17.

- 梁姗姗,徐志国,盛书中,等. 2020. 2019 年四川长宁 6.0 级地震主震及中强余震(M_s≥4.0)的震源机制及其应力场. 地震 地质,**42**(3):547~561.
- 阮祥,程万正,张永久,等. 2008. 四川长宁盐矿井注水诱发地震研究. 中国地震,24(3):226~234.
- 徐志国,梁姗姗,盛书中,等. 2020. 2019年四川长宁 Ms6.0 地震序列重定位和震源特征分析. 地震学报,42(4):377~391.
- 易桂喜,龙峰,梁明剑,等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 M_s6.0 地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 62(9):3432~3447.
- 张广伟, 雷建设, 梁姗姗, 等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 M_s6.5 地震序列重定位与震源机制研究. 地球物理学报, **57** (9): 3018~3027.

Anyiam U O, Zhang H J, Tan Y Y, et al. 2023. Enhanced 3D velocity structure, seismicity relocation and basement characterization of Changning shale gas and salt mining regions in southern Sichuan Basin. Front Earth Sci, 10:1082122.

- Lei X L, Huang D J, Su J R, et al. 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to $M_{\rm W}4.7$ induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. Sci Rep. 7(1);7971.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R. 2019. The December 2018 M_L 5.7 and January 2019 M_L 5.3 earthquakes in south Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing. Seismol Res Lett, **90**(3):1099-1110.
- Long F, Zhang Z W, Qi Y P, et al. 2020. Three dimensional velocity structure and accurate earthquake location in Changning-Gongxian area of southeast Sichuan. Earth Planet Phys, 4(2):163~177.
- Lu R Q, He D F, Liu J Z, et al. 2021. Seismogenic faults of the Changning earthquake sequence constrained by high-resolution seismic profiles in the southwestern Sichuan Basin, China. Seismol Res Lett., 92(6);3757~3766.
- Meng L Y, Mcgarr A, Zhou L Q, et al. 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network. Bull Seismol Soc Am, 109(1):348~357.
- Sun X L, Yang P T, Zhang Z W. 2017. A study of earthquakes induced by water injection in the Changning salt mine area, SW China. J Asian Earth Sci, 136:102~109.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California. Bull Seismol Soc Am, 90(6):1353~1368.
- Zhang B, Lei J S, Zhang G W. 2020. Seismic evidence for influences of deep fluids on the 2019 Changning M_S6.0 earthquake, Sichuan Basin, SW China. J Asian Earth Sci, **200**:104492.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. Geophys J Int, **194**(2):839~843.
- Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. Geophys J Int, 148(3):619~627.

Study on the Spatial Distribution of Seismic Activity in Changning Area, Sichuan Province

Hu Guirang¹⁾, Zhang Guangwei²⁾, Liang Shanshan³⁾

1) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030002, China

2) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In recent years, seismic activity in Changning area of Sichuan Province has been relatively high, especially for the $M_{\rm s}6.0$ earthquake in June 2019, which has been brought wide attention of society and scientific researchers. In this study, we used the double-difference method to relocate the earthquakes within one year before and after the $M_{\rm s}6.0$ earthquake. Further, we applied the gCAP waveform fitting method to obtain the focal mechanism solution of 14 earthquakes with $M_s>4.0$. The spatial distribution characteristics of seismic activities in Changning area was comprehensively analyzed, and the following main understandings were obtained: 1 The seismogenic structure of the $M_{\rm s}6.0$ earthquake in 2019 was the high-dip thrust fault with NW direction in the Changning anticline, and the focal depth of the seismic sequence was deep in the west and shallow in the east, indicating the reactivation of the pre-existing fault in NW direction. (2) The frequency of seismic activity in the Jianwu anticline area in the south is relatively higher and shows the characteristics of cluster distribution, which is speculated to be closely related to shale gas exploitation activities. 3) The difference of seismic activity between the north and the south of Changning area is controlled by the change of the direction of the local stress field. The historical salt mining in the north and shale gas mining in the south, as well as the horizontal difference of the physical properties of rock medium directly affect the spatial pattern of seismic distribution.

Keywords: The Changning earthquake; Double-difference relocation; Focal mechanism solution; Cluster distribution

892