第 37 卷 第 3 期(747~754)	中 国 地 震	Vol. 37 No. 3
2021 年 9 月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Sep. 2021

邓文泽, 孙丽, 2021. 2021 年美国阿拉斯加半岛 Mw 8.2 地震震源特征分析. 中国地震, 37(3): 737~744.

2021 年美国阿拉斯加半岛 M_w 8.2 地震 震源特征分析

邓文泽 孙丽

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 采用远场地震波资料和有限断层反演方法获得 2021 年 7 月 29 日 6 时 15 分(UTC) 美国阿拉斯加州以南海域 M_w8.2 地震的震源破裂过程模型,探讨此次地震发生的动力学背景。 破裂过程反演的结果显示这次地震的滑动量分布比较集中,破裂长度约为 160km,地震主体破裂 发生在 20~40km 深度范围内,破裂由深部向浅部发展,表明此次地震释放了俯冲带浅部的应变 能,破裂持续时间近 120s,破裂面上最大滑移量达 5m。此外,主震破裂区域中的余震分布较小, 大部分余震发生在主震南部,出现这种现象表明震源区的破裂较为彻底并触发了俯冲带浅部位 置的地震,本次地震的有限断层反演结果和余震分布均显示破裂向东发展,但未破裂至震中以 西的舒马金空区,表明舒马金空区东部的地震危险性仍然存在。

关键词: 阿拉斯加地震 破裂过程 俯冲带碰撞 [文章编号] 1001-4683(2021)03-0737-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网正式测定,2021 年 7 月 29 日 6 时 15 分(UTC)美国阿拉斯加州以南海 域(55.40°N,158.0°W)发生 M_s 8.1 (M_w 8.2)地震。地震发生后,太平洋海啸预警中心 (PTWC)向阿拉斯加南部和阿拉斯加半岛发布了海啸预警,2h 后观测到海浪在潮位以上 21 cm 左右,阿拉斯加海岸有 6 个地点发生小型海啸,2h 后海啸警报解除。根据美国地质勘 探局(USGS)公布的地震震中位置(55.33°N,157.84°W),此次地震是继 2020 年 7 月 22 日阿 拉斯加半岛 M_w 7.8(位于本次地震西南方向 62km)和 2020 年 10 月 19 日阿拉斯加半岛 M_w 7.6(位于本次地震西南方向 145km)地震之后,阿留申-阿拉斯加俯冲带发生的又一较大 地震事件(图1)。地震发生后,余震较为活跃,截至 2021 年 8 月 18 日,美国地震信息中心 (NEIC)共记录到 $M_L \ge 2.5$ 余震 469 次,其中 $M_L > 4.0$ 余震 54 次,最大余震为 8 月 14 日 M_w 6.9 地震。

阿留申-阿拉斯加俯冲带从最西部的尼尔群岛延伸3000km,至阿拉斯加湾的米德尔顿岛,沿着俯冲带,太平洋板块以5.4~7.6cm/a的速度向北美板块俯冲,俯冲的变化从东部大致垂直于沟槽至西部逐渐倾斜(DeMets et al,2010)。本次地震震中位于阿留申-阿拉斯加俯

[项目类别] 中国地震局监测预报司经常性项目"大震应急产品产出系统运维"(12150411007)资助

[作者简介] 邓文泽,男,1989 年生,工程师,主要从事地震监测及震源破裂过程研究工作。E-mail:dengwenze@seis.ac.cn

CMYK

[[]收稿日期] 2021-08-20 [修定日期] 2021-09-07





白色实线表示俯冲带;白色箭头表示俯冲速度;俯冲带分段区间用黑色线段标记;黑色虚线包围的区域表示阿 拉斯加半岛历史强震的破裂范围(Li et al,2018; Liu et al, 2020);灰色空心圆圈表示自 1900 年以来 NEIC 产出 的 4.5 级以上地震目录;灰色五角星表示 1938 年 11 月 11 日阿拉斯加半岛 M_w8.2 地震;紫色五角星分别表示 2020 年 7 月 22 日阿拉斯加半岛 M_w7.8 和 2020 年 10 月 19 日阿拉斯加半岛 M_w7.6 地震;紫色实线包围的区域 表示 2020 年 7 月 22 日阿拉斯加半岛 M_w7.8 地震滑动量大于 0.3m(Liu et al,2020);红色五角星表示本次地震 震中;浅蓝色的沙滩球表示本次主震的震源机制解;红色实线表示本次地震滑动位移大于 1m 的等值线

冲大断裂的上倾部分,太平洋板块以大约 6.4cm/a 的速度向北美板块俯冲(Argus et al, 2010)。根据 USGS 的地震目录资料,自 1900 年以来,震中 300km 范围内共发生 7 级以上地 震 13 次,其中最大为 1938 年 11 月 11 日阿拉斯加半岛 M_w8.2 地震,Sykes 等(1971)和Davies 等(1981)根据余震的展布估算了该地震的破裂区域(300km 长),但余震的定位可靠性较低,Freymueller 等(2021)利用海啸数据获得的断层滑动模型表明其实际破裂尺度小于余震的展布长度,主要破裂位于震中的东部。

2021 年 7 月 29 日 *M*_w8.2 地震是塞米迪群岛发生的又一次大地震,本次地震为研究该 区域大地震的活动性提供依据。地震发生后,我们利用远场体波和面波资料在震后 2h 完成 了震源破裂过程的反演,并在中国地震台网中心(CENC)应急工作平台上进行发布和上报, 在波形数据更为完备后重新开展了震源破裂过程反演工作,为大震的灾害评估和孕震机制 等提供一定的科学基础。

1 资料和方法

地震发生后,通过 IRIS 数据中心 Wilber3^①下载全球台网(GSN)远震宽频带数据,选取 其中方位角分布均匀且信噪比较高的 28 个远场垂直向 P 波(30°<震中距<90°)、27 个远场 水平向 SH 波和 55 个远场长周期面波的波形资料(图 2),体波滤波频带为 0.0033~1Hz,面 波滤波频带为 0.004~0.006Hz。基于全球一维模型 AK135(Kennett et al, 1995),采用*F-K*方 法(Zhu et al, 2002)计算格林函数。

738

MYK

37 卷

¹⁾ http://ds.iris.edu/wilber3/find_event



图 2 GSN 台网远场台站分布

本文采用有限断层反演方法反演震源破裂过程(Ji et al,2002a、2002b;Hao et al,2013、2017),有限断层反演方法在小波域实现不同频带的信号分离,采用模拟退火法求解破裂在断层面上的时空分布。该方法在美国地质勘探局已应用多年,并被广泛应用于震源破裂过程反演的研究。

在实现有限断层模型求解前,首先需要震源机制解提供断层面参数。地震发生后,各国际机构迅速给出了各自的反演结果(表1),但地震的初始破裂位置差异性较大,由于阿拉斯加州在该区域台站数较多,地震定位精度较高,因此选取 USGS 发布的地震参数为破裂起始点。各机构产出的震源机制解较为一致^⑤,从震源机制解反演结果可以得到 2 个共轭节面,根据地质构造背景、余震分布可以确定震源破裂面,前人研究表明震中处于低角度逆冲构造

信息求源	北纬 西经	西经	深度	$M_{ m W}$	节面 I /(°)		节面Ⅱ/(°)			
信息术你	/(°)	/(°)	/km		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
USGS ²	55.33	157.84	32	8.2	239	14	95	54	76	89
CENC	55.40	158.00	60	8.1	239	16	88	62	74	91
$GCMT^{(3)}$	55.42	157.32	30.2	8.2	236	10	86	60	80	91
GFZ ⁽⁴⁾	55.51	158.10	34	8.2	233	9	81	61	80	91

美国

美国阿拉斯加 M_w8.2 地震震源机制解

(2) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ak0219 neiszm/moment-tensor

③ https://www.globalcmt.org/

表 1

(4) http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2021jxef

(5) https://mp.weixin.qq.com/s/2FnFufeExXyeeqKlb5T-Mg

3 期

MYK

中	玉	抽	震
		110	<u></u>

37 卷

(Abers,1992; Zheng et al, 1996; Fletcher et al, 2001; Fournier et al, 2007),因此本文采用沿 SW-NE向的断层节面解(239°/14°/95°)构建断层几何模型,选取一个足够大的长 400km、宽 54km 的平面作为破裂面,将其划分为 25×16 共 400 个子断层,快速反演本次地震在破裂面 上的滑动位移的时空分布。

2 反演结果

破裂过程反演的结果见图 3,震源时间函数结果(图 3(a))表明此次地震释放的地震矩 约为 2.98×10²¹N·m,对应的矩震级为 8.25,略高于面波震级;此次地震持续时间约为 120s, 前 10s 的初始破裂释放能量较小,主要能量释放在 10~50s,之后破裂规模开始衰减。同震滑 移分布(图 3(b))表明本次地震主要包含 1 个凹凸体,初始破裂点位于高滑移量区域的边 缘,断层上的滑动分布在 160km×20km 的区域内,最大滑动量为 5m。虽然地震破裂的高滑 动量分布比较集中,但仍呈现出向 NE 方向发展的趋势。



图 3 阿拉斯加州以南海域地震的有限断层反演结果 (a)震源时间函数;(b)断层面上静态滑动位移分布;(c)地震断层滑动分布投影 (b)中黑色实线表示破裂等时线图(单位:s)

利用远场波形进行震源破裂过程反演时,不同类型的波形在反演中的作用不同,P 波周 期短、振幅小,对破裂过程的分辨能力强,但对反演的贡献度低;相反,面波周期长、振幅大, 在联合反演中的作用较大。反演得到的理论波形与观测波形的对比见图 4 和图 5,体波和面 波的波形拟合度均较高,其中体波的平均相关系数达 0.88,反演结果较好地解释了绝大多数 台站的地震波形。

740

MYK



图 4 阿拉斯加地震的体波观测波形与合成波形对比 黑线表示观测波形;红色表示合成波形;每个记录的结果:震相(左上)、台站名(左下)、方位角(中上,单

位:°)、震中距(中下,单位:°)、最大振幅(右上,单位:µm/s)、观测波形与合成波形的相关系数(右下)

3 讨论

2020 年 7 月 22 日阿拉斯加半岛 M_w7.8 地震与本次地震的震中相距仅 54km,均处于俯 冲板块的震间耦合区域。地震间的耦合度是衡量俯冲界面在大地震之间闭锁状态的重要指标,其从东到西大致呈下降的趋势,(Davies et al,1981;Sykes et al,1980;Li et al,2018;周云 等,2021)。在高耦合度地区,板块边界上方 10~30km 的区域不易发生滑动,而深部可以持续滑动,因此造成俯冲带浅部应变能积累,是形成大地震的主要原因,而耦合度较低的区域 主要产生蠕变滑动,以小地震为主。地震发生后,USGS 给出了本次地震震源破裂过程快速 反演的结果,本文反演结果与 USGS 的结果主要特征表现一致,但在破裂尺度上存在明显的 差异,USGS 反演结果显示沿走向的破裂尺度约 110km,本文反演结果显示沿走向的破裂尺度约 160km,本文的反演结果获得破裂的尺度与余震展布的长度基本相等(图 3)。

Herman 等(2021)研究表明 2020 年 7 月 22 日阿拉斯加半岛 *M*_w7.8 地震引起震中南部和 东部的库仑应力增强,并对 2020 年 10 月 19 日阿拉斯加半岛 *M*_w7.6 地震有触发作用,图 1 显示 本次地震位于 2020 年 7 月 22 日阿拉斯加半岛 *M*_w7.8 地震破裂区域的边缘(Freymueller et al,

СМҮК

3 期

741



图 5 阿拉斯加地震的面波观测波形与合成波形对比 黑线表示观测波形;红色表示合成波形;每个记录的结果:震相(左上)、台站名(左下)、方位角(中上,单 位:°)、震中距(中下,单位:°)、最大振幅(右上,单位:µm/s)

2021),处于其东部的应力增大区域,2次地震的破裂区域在震中附近存在交叉,但破裂的发展 方向相反,其对本次地震孕震的影响有待进一步研究。前人研究表明舒马金空区自 1913 年以 来存在较大的应变积累(周云等,2021;Ye et al,2021),而本次地震的有限断层反演结果和余震 分布均显示破裂向东发展,未破裂至震中以西的舒马金空区,与 1938 年 11 月 11 日阿拉斯加半 岛 *M*_w8.2 地震的破裂区域基本一致,说明舒马金空区东部的地震危险性仍然存在。

4 结论

结合远场地震体波和面波数据,采用有限断层反演方法获得 2021 年 7 月 29 日阿拉斯加半岛 M_w8.2 地震的时空破裂过程。结果表明,本次地震释放的地震矩为 2.98×10²¹N·m, 矩震级为 8.25,是一次低角度的逆冲事件。本次地震造成的滑动分布并不复杂,仅涉及到一 个凹凸体的破裂和错动,最大滑动量达 5m。地震的主体破裂深度在 20~40km 之间,破裂由 深部向浅部发展的趋势明显,说明破裂释放了俯冲带浅部的应变能。此外,我们注意到主震 破裂区域中的余震分布较少,大部分余震发生在主震的南部,出现这种现象表明震源区的破 裂较为彻底,并触发了俯冲带浅部位置的地震,本次地震的有限断层反演结果和余震分布均 显示破裂向东发展,但未破裂至震中以西的舒马金空区,表明舒马金空区东部的地震危险性

CMYK

仍然存在。

参考文献

- 周云,李予青,王卫民,等,2021.2020年阿拉斯加 M_w7.8 地震震源特征及邻区地震危险性分析. 地球物理学报,64(2): 498~506.
- AbersG A, 1992. Relationship between shallow- and intermediate-depthseismicity in the eastern Aleutian subduction zone. Geophys Res Lett, $19(20): 2019 \sim 2022$.
- Argus D F, Gordon R G, Heflin M B, et al, 2010. the angular velocities of the plates and the velocity of Earth's Centre from space geodesy. Geophys J Int, 180(3):913~960.
- Davies J, Sykes L, House L, et al, 1981. Shumagin seismic gap, Alaska Peninsula: history of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential. J Geophys Res Solid Earth, **86**(B5): 3821~3855.

DeMets C, Gordon R G, Argus D F, 2010. Geologically current plate motions. Geophys J Int, 181(1):1~80.

Fletcher H J, Beavan J, Freymueller J, et al, 2001. High interseismic coupling of the Alaska subduction zone SW of Kodiak Island inferred from GPS data. Geophys Res Lett, 28(3):443~446.

- Fournier T J, Freymueller J T, 2007. Transition from locked to creeping subduction in the Shumagin region, Alaska. Geophys Res Lett, **34**(6):L06303.
- Freymueller J T, Suleimani E N, Nicolsky D J, 2021. Constraints on the slip distribution of the 1938 $M_{\rm W}$ 8.3 Alaska Peninsula earthquake from tsunami modeling. Geophys Res Lett, **48**(9):e2021GL092812.
- Hao J L, Ji C, Wang W M, et al, 2013. Rupture history of the 2013 $M_W 6.6$ Lushan earthquake constrained with local strong motion and teleseismic body and surface waves. Geophys Res Lett, **40**(20):5371~5376.
- Hao J L, Ji C, Yao Z X, 2017. Slip history of the 2016 M_W 7.0 Kumamoto earthquake: intraplate rupture in complex tectonic environment. Geophys Res Lett, 44(2):743~750.
- HermanM W, Furlong K P, 2021. Triggering an unexpected earthquake in an uncoupled subduction zone. SciAdv, 7(13):eabf7590.
- Ji C, Wald D J, Helmberger D V, 2002a. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: wavelet domain inversion theory and resolution analysis. Bull SeismolSoc Am, 92(4):1192~1207.
- Ji C, Wald D J, Helmberger D V, 2002b. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part II : complexity of slip history. Bull SeismolSoc Am, 92(4): 1208~1226.
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R, 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. Geophys J Int, 122 (1):108~124.
- Li SS, Freymueller J T, 2018. Spatial variation of slip behavior beneath the Alaska Peninsula along Alaska-Aleutian subduction zone. Geophys Res Lett, **45**(8):3453 ~ 3460.
- Liu C L, Lay T, Xiong X, et al, 2020. Rupture of the 2020 $M_{\rm W}7.8$ earthquake in the Shumagin gap inferred from seismic and geodetic observations. Geophys Res Lett, 47(22); e2020GL090806.
- Sykes L R, 1971. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians. J Geophys Res, 76(32):8021~8041.
- Sykes L R, Kisslinger J B, House L, et al, 1980. Rupture zones of great earthquakes in the Alaska-Aleutian arc, 1784 to 1980. Science, **210**(4476):1343~1345.
- Ye LL, Lay T, Kanamori H, et al, 2021. the 22 July 2020 M_W 7.8 Shumagin seismic gap earthquake: partial rupture of a weakly coupled megathrust. Earth Planet SciLett, 562:116879.
- Zheng G T, Dmowska R, Rice J R, 1996. Modeling earthquake cycles in the Shumaginsubduction segment, Alaska, with seismic and geodetic constraints. J Geophys Res Solid Earth, 101 (B4): 8383~8392.
- 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.

3 期

СМҮК

The Source Characteristics of the 2021 Alaska $M_{\rm w}8.2$ Earthquake

Deng Wenze Sun Li

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract On July 29,2021, an earthquake with magnitude 8.2 occurred in the southern part of Alaska Peninsula, USA. In this study, the rupture process of this earthquake is inverted with farfield seismic waveform data for better understanding of the dynamic triggering. the results show that the slip distribution concentrated in adjacent area of the nuclear point, with 160km in length and 20km in depth. the slip model shows a rupture from deep to shallow indicating the stress energy in the shallow subduction zone released in this quake. the rupture process lasts for 120s, the maximum slip achieved 5m. In addition, the aftershock distribution lies in the south of mainshock which implies that rupture in the source region was developed well so as to trigger the earthquakes in the seaward of subduction zone. the distribution of aftershocks and slip displacement was limited in NE direction, not in the SW direction to Shumagin seismic gap, which infers the risk of large earthquake in the east of Shumagin area.

Keywords: Alaska earthquake; Rupture process; Subduction zone collision

CMYK