

魏芸芸, 李金, 王琼, 等, 2020. 2016年11月25日新疆阿克陶6.7级地震序列震源机制特征分析. 中国地震, 36(1): 34~45.

2016年11月25日新疆阿克陶6.7级地震序列震源机制特征分析

魏芸芸¹⁾ 李金¹⁾ 王琼¹⁾ 孙昭杰²⁾

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

2) 喀什基准台, 新疆喀什 844000

摘要 本研究利用新疆区域数字地震台网的波形资料, 采用CAP方法反演了2016年11月25日阿克陶6.7级地震的前震、主震及11次 $M_s \geq 3.6$ 余震序列的最佳双力偶震源机制解, 得到阿克陶6.7级地震最佳双力偶机制解: 节面I走向 20° /倾角 69° /滑动角 -10° ; 节面II走向 114° /倾角 81° /滑动角 -159° , 表明此次阿克陶6.7级地震为一次走滑型地震事件, 结合震源区的地震地质构造及余震序列空间分布等已有研究成果, 判定节面II代表了主震的发震断层。主震最大主压力轴方位为 339° , 与震源区附近历史中强震P轴近NW向的优势方位基本一致。其4.8级前震的震源机制解为走滑型, 与主震震源机制解具有较高的一致性。11次余震中有6次为走滑型地震, 3次为逆断型地震, 1次正断型地震, 1次混合型地震, 且多数地震具有近NW向的P轴方位。此次6.7级地震序列的震源深度分布于6~16km之间, 而大部分地震为9~13km, 与本文计算得到的主震的震源深度10km相差不大。此外, 初步分析了兴都库什-帕米尔地区强震活动与此次阿克陶6.7级地震的关系。

关键词: 阿克陶6.7级地震 震源机制解 CAP方法 兴都库什-帕米尔地区

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0034-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2016年11月25日22时24分在新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县发生6.7级地震(简称阿克陶6.7级地震), 震中位于 39.27°N , 74.04°E 。此次地震距喀什市约169km, 距阿图什市189km, 距塔什库尔干县195km, 与阿克陶县相邻的疏附县、英吉沙县和乌恰县等多地区震感强烈。根据新疆地震台网测定, 截至2017年12月31日, 阿克陶6.7级地震序列共发生 $M_s \geq 3.0$ 地震70次, 其中 $M_s 3.0 \sim 3.9$ 地震64次, $M_s 4.0 \sim 4.9$ 地震4次, $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震1次, $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震1次, 最大余震为 $M_s 5.0$ 。

阿克陶6.7级地震发生在帕米尔内部张性剪切断裂带的北段, 震中位于木吉盆地北缘

[收稿日期] 2019-11-26; [修定日期] 2020-01-29

[项目类别] 地震科技星火计划(XH17041Y)、新疆地震科学基金(201901)和国家重点研发计划课题(2018YFC1503606-06)共同资助

[作者简介] 魏芸芸, 女, 1988年生, 工程师, 主要从事地震学和地震预测等研究工作。E-mail: wyy825115@sina.com

李金, 通讯作者, 男, 1986年生, 高级工程师, 主要从事数字地震及地震预测研究。E-mail: lijn6205@163.com

断裂附近,该断裂是公格尔拉张系最北端的全新世活动转换断层,走向 NWW(陈杰等,2016; 聂晓红等,2017)。兴都库什-帕米尔地区是西昆仑造山带、天山褶皱带和塔里木块体 3 个地质构造单元的交接带,印度板块以约 50mm/a 的速度向北推挤(约 N 23°E),在印度板块和欧亚板块的碰撞和持续汇聚作用下,在兴都库什-帕米尔构造结产生了剧烈变形(Molnar,1988; Burtman et al,1993; Paul et al,2001)。帕米尔构造结构造变形以前缘地壳缩短、两侧走滑、构造结内部拉张为特征,形成一系列向北凸出的弧形活动构造带(陈杰等,2011)。近年来众多学者研究了该区中源地震的空间分布和震源机制解特征(Chatelain et al,1980; 张家声等,2005; 唐兰兰等,2012; 张浪平等,2013; 万秀红等,2019); 同时围绕兴都库什-帕米尔地区俯冲带的几何形态、俯冲角度等开展了一系列工作(Roecker et al,1980; 宁杰远等,1990; Fan et al,1994; Pegler et al,1998; 孙文斌等,2009; 张浪平等,2014)。

阿克陶 6.7 级地震附近区域历史地震活动强烈,1970 年以来震中距 100km 范围内发生过 17 次 6 级以上地震,包含 4 次 7 级以上地震,分别为 1944 年 9 月 28 日乌恰 7.0 级地震、1955 年 4 月 15 日乌恰 7.0 级双震以及 1974 年 8 月 11 日乌恰 7.3 级地震,空间上距离其最近的 7 级地震为 1974 年乌恰 7.3 级地震,震中距约 25km; 时间上最近一次强震为 2016 年 6 月 26 日吉尔吉斯斯坦 6.7 级地震,发震时间间隔为 152 天,与 2016 年阿克陶 6.7 级地震的震中距约 58km。2015 年以来兴都库什-帕米尔地区发生了 5 次 6.7 级以上地震,空间上具有由南向北的迁移活动特征,其中阿克陶 6.7 级地震发生在新疆境内,这些强震是否与本次阿克陶 6.7 级地震有关值得研究。

中等强度地震的震源机制解有助于了解震源区应力状态和发震构造,而余震序列携带着应力在时间和空间上的变化信息。为了深入研究阿克陶 6.7 级地震及其序列的震源机制解和发震深度,以便我们更好地认识其所处地区的应力状态,本文利用新疆区域地震台网数字波形资料,采用 CAP 方法反演计算阿克陶 6.7 级地震的前震、主震及 11 次 $M_s \geq 3.6$ 余震序列的震源机制解,分析讨论余震序列的震源特性,并结合区域地质构造和地震活动背景,进一步探讨阿克陶 6.7 级地震和区域强震活动的关系。

1 方法与资料

1.1 研究方法

阿克陶 6.7 级地震发生在中国边境附近,受其自然地域影响,该区为新疆台网监测能力比较弱的地区,震中周围台站方位覆盖不均匀,因而采用 P 波初动法计算此次地震的震源机制解可靠性不高。本研究利用 CAP 方法反演震源机制解,可在台站数量相对较少的情况下获得较为准确的结果,此外其反演结果对地壳结构的准确性依赖相对较小(吕坚等,2008; 龙锋等,2010; 冉慧敏等,2014; 祁玉萍等,2018; 张志斌等,2019)。CAP 方法利用到了整个近震波形中的体波(Pnl)和面波部分,反演震源机制解和震源深度(Zhao et al,1994; Zhu et al,1996),是一种全波形反演方法。其核心思想是将宽频带数字波形分割为 Pnl 波和面波部分,分别拟合 Pnl 波和面波部分,并分别计算它们的理论地震图和实际观测波形的目标误差函数,在给定参数空间中进行网格搜索,得出最佳矩心深度和震源机制解(韩立波等,2012)。通过网格搜索,可直观反映出震源机制解随深度的变化情况,因而在得到最佳震源机制结果的同时,得到最佳的矩心深度结果(韦生吉等,2009; 韩立波等,2012)。

1.2 数据资料

阿克陶 6.7 级地震距离震中 500km 范围内仅有 15 个台站,最近的吉根台(JIG)震中距约 70km,这些台站大部分位于阿克陶 6.7 级地震的东侧,而西南侧则为境外,没有台站分布(图 1)。在地震发生后,新疆地震局监测中心在震区布设 3 架流动台(L6501、L6502、L6503),流动台站波形数据于 2016 年 11 月 26 日开始陆续汇入区域台网中心,为后续开展的研究工作提供了宝贵的波形资料。由于该地区台站分布稀疏,可参考的研究成果相对较少,因此在研究过程中利用 CRUST 2.0 速度结构模型^①得到本文所用的区域一维速度结构模型(表 1)。

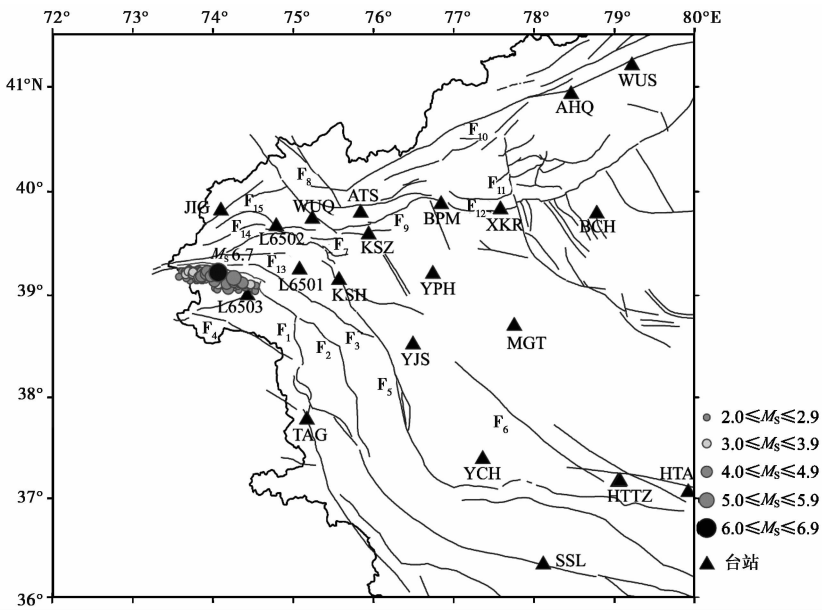


图 1 震中附近台站和地震序列分布

F₁:喀喇昆仑断层;F₂:公格尔断层;F₃:奥依塔克斯断层;F₄:康西瓦断层;F₅:克孜勒陶-库斯拉普断层;F₆:泽普断层;F₇:喀什断裂;F₈:塔拉斯-费尔干纳断层;F₉:阿图什背斜北翼断层;F₁₀:迈丹-沙依拉姆断层;F₁₁:皮羌北断层;F₁₂:柯坪断层;F₁₃:肯别尔特断层;F₁₄:卡兹克阿尔特断层;F₁₅:乌合沙鲁断层

采用 CAP 方法(Zhao et al, 1994; Zhu et al, 1996) 计算了阿克陶 6.7 级地震的前震、主震及 11 次 $M_s \geq 3.6$ 余震的最佳双力偶震源机制解。挑选距震中 500km 范围内的信噪比较高、方位角分布较好的台站波形资料,对挑选出的数据去倾斜、除仪器响应,并将速度记录积分得到位移记录,再旋转至大圆路径得到 Z-R-T 分量,并对 Pnl 波

表 1 地壳速度结构			
序号	深度/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_p/v_s
1	0	4.0	1.75
2	1	6.0	1.75
3	19	6.4	1.75
4	39	7.1	1.75
5	60	8.0	1.75

① <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>

部分和面波部分赋予不同权重。对阿克陶 6.7 级地震波形记录中的 Pnl 波和面波分别进行带通滤波器滤波(Pnl 波频带宽度为 0.02~0.15Hz、面波频带宽度为 0.02~0.1Hz),对于前震及余震序列,依据不同的震级来选择不同滤波频段,例如对于 2016 年 11 月 25 日 22 时 19 分发生的 4.8 级地震,Pnl 波滤波频带宽度为 0.05~0.15Hz,面波为 0.02~0.12Hz;2016 年 11 月 25 日 23 时 26 分发生的 4.0 级地震,Pnl 波部分的滤波频带宽度为 0.04~0.15Hz,面波为 0.02~0.12Hz。而 Pnl 波部分和面波部分的相对权重取为 2:1,部分学者研究结果(吕坚等,2008;韩立波等,2012;曲均浩等,2015;李金等,2016)表明,这样的权重可以较好地兼顾震源深度和震源机制解的约束。相应地,对得到的理论地震图采用相同的滤波参数进行滤波。

2 主震震源机制解

由于震中周围台站分布极不均匀,为了加强对结果的约束,在进行 CAP 反演的同时加入较为清晰的初动极性信息。利用距震中 500km 范围内的 11 个台站的波形资料和 13 个较为清晰的初动信息,计算得到阿克陶 6.7 级主震的震源机制解(图 2)。我们计算了 6~14km 间 9 个震源深度下的各台站的格林函数,破裂时间采用 9s,之后在各深度对震源机制解 3 个参数以 10°为间隔进行搜索,得到了震源机制解误差随深度的变化,深度在 10km 时,与其对应的地震波形拟合相对较好(图 2),拟合误差最小(图 3)。同时计算得到矩震级为 M_w 6.61, P 轴方位 339°,最佳双力偶机制解:节面 I 走向 20°/倾角 69°/滑动角 -10°,节面 II 走向 114°/倾角 81°/滑动角 -159°,震源错动类型表现为走滑的性质。张旭等(2017)采用逆时成像技术对阿克陶 6.7 级地震序列进行了重新定位,得到余震分布的最佳走向 99°。孔祥艳等(2017)采用双差定位法对阿克陶 6.7 级地震序列进行重新定位,结果显示余震分布在主震东西两侧,与木吉盆地北缘断裂的走向基本一致。陈杰等(2016)研究表明阿克陶 6.7 级地震破裂走向 107°、倾角 76°,发震断层是公格尔拉张系最北段的全新世活动转换断层——NWW 走向的木吉走滑断裂,该断裂近似直立,以右旋走滑为主,兼具正断分量。结合前人的余震重新定位和发震构造结果,上述震源机制解中节面 II 的走向、倾角与发震断层较为匹配,因此判定节面 II 代表了主震的发震断层面,即此次地震以右旋走滑为主。

对于阿克陶 6.7 级主震,我们收集到 USGS(美国地质调查局)、Global CMT、中国地震局地球物理研究所等国内外研究机构给出的震源机制解(表 2)。本研究得到的震源机制解与其他几个研究机构给出的结果相差不大,除 Global CMT 给出的震源深度较深以外,本文和其他几家研究机构以及陈杰等(2016)和孔祥艳等(2017)给出的震源深度也较为接近,表明该结果具有一定的可信度。

在主震发生前 5min,在主震西侧约 7km 处发生一次 4.8 级前震,我们使用 CAP 方法计算了这次地震的震源机制解(图 4),其最佳双力偶机制解:节面 I 走向 20°/倾角 90°/滑动角 19°,节面 II 走向 290°/倾角 71°/滑动角 -180°;震源深度 11km, P 轴方位 153°,这与我们得到的 6.7 级主震震源机制解参数相差不大,节面倾角均比较陡。此次前震与主震震源机制解结果基本一致,认为该前震走向 290°的节面 II 为发震断层面。

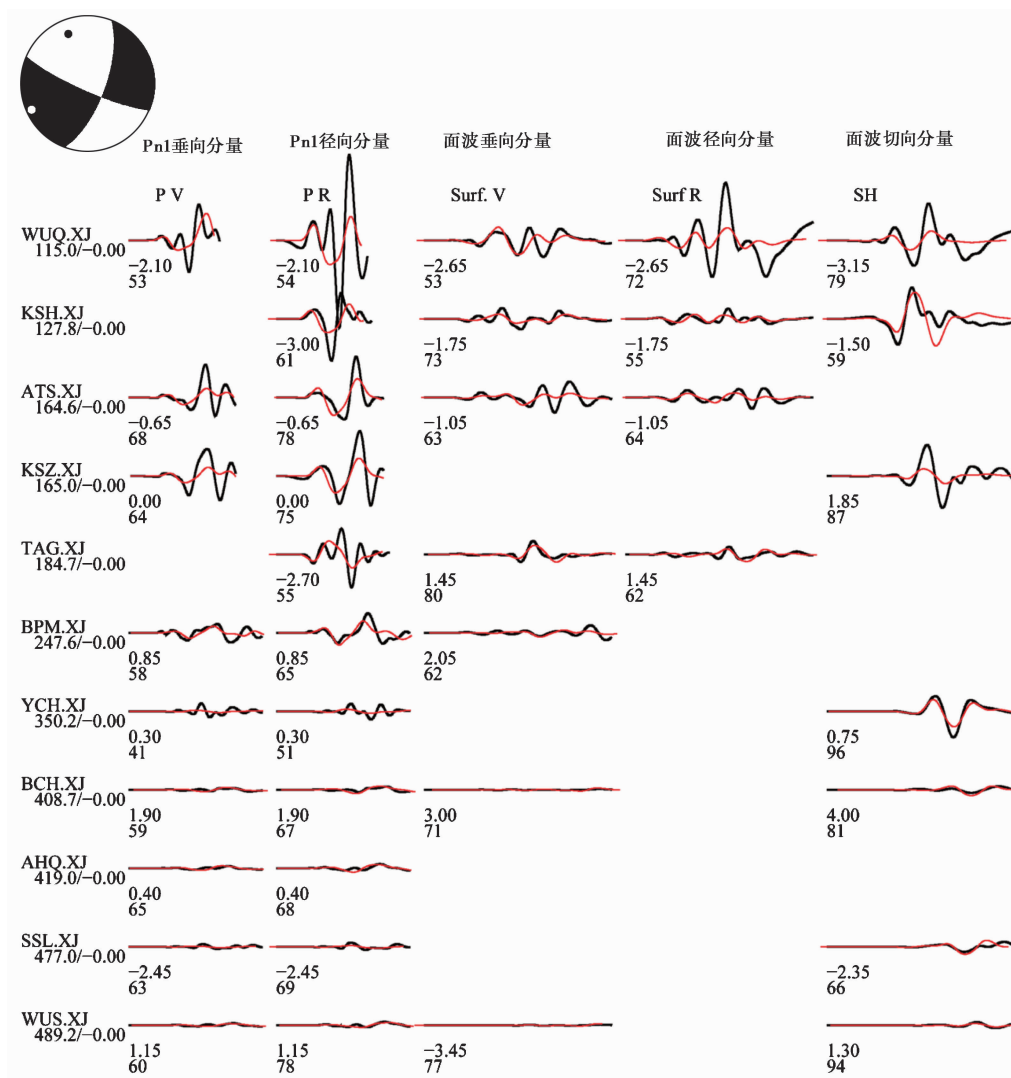


图2 2016年11月25日阿克陶6.7级地震矩张量反演理论地震波形(红色)与实际观测地震波形(黑色)波形图下方第1行数字为各段理论地震波形相对实际观测波形的移动时间(单位:s);正值表示理论观测波形相对观测波形超前;第2行数字为理论波形与观测波形的相关系数(单位:%);波形图左侧字母为台站,其下数字分别为台站震中距(单位:km)以及理论地震图相对实际观测数据整体移动时间;震源球上黑色区域代表压缩区,白色区域代表拉张区;震源球采用下半球投影;图中空白区域为剔除了波形拟合较差的分量

3 余震序列震源机制解

阿克陶6.7级地震发生后,余震序列较为丰富,我们计算了序列中11次 $M_s \geq 3.6$ 余震的震源机制解(表3,图4),按照三角形图解法(Frohlich, 1992; 马文涛等, 2004),得到11次 $M_s \geq 3.6$ 余震中,有6次地震为走滑型地震,3次地震为逆冲型地震,1次地震为正断型地震,1次地震为混合型地震,大部分余震的错动类型与主震及前震相似。根据表1计算得到的 P 轴方位,做出阿克陶6.7级地震序列的主应力方位玫瑰图(图5(a)),可见序列中绝大

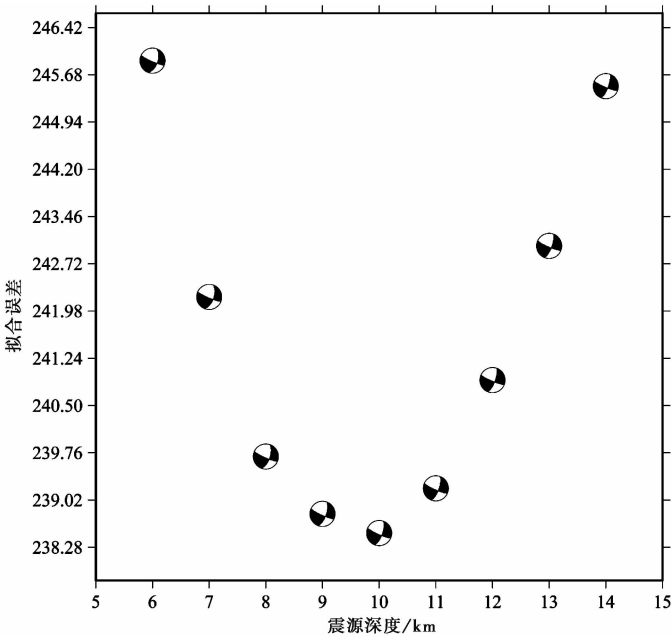


图 3 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震矩张量反演中波形拟合误差随深度的变化

部分地震具有和主震接近的近 NW 向 P 轴方位,仰角主要分布在 30° 以内,表明震源区主要受 NW 向水平挤压应力作用。唐兰兰等(2012)研究了 2008 年新疆乌恰 6.8 级地震序列震源特征及帕米尔东北缘地区 2006~2011 年中等以上地震的应力场,其给出的西区(本次阿克陶 6.7 级地震的震源区附近)主应力场的方位为 144° ,与本次阿克陶 6.7 级地震序列中中等以上地震的 P 轴优势方位基本一致。

CAP 方法在计算震源机制的同时,可以得到地震的矩震级,由表 3 所示 M_s 和 M_w 来看,2 次 $M_s 5.0$ 左右的地震的矩震级 M_w 与 M_s 基本相当,而 $M_s \leq 4.5$ 的地震的 M_w 均大于 M_s ,这一结果基本符合前人对震级的认识,即在绝大多数破坏性地震震级测定中,其矩震级 M_w 与

表 2 不同研究机构给出的 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震震源机制解

研究机构	节面 I / ($^{\circ}$)			节面 II / ($^{\circ}$)			矩震级 M_w	矩心深度 /km
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角		
USGS ^②	199	84	14	107	76	174	6.60	11.5
Global CMT ^③	110	78	-177	19	87	-12	6.60	19.1
中国地震局地球物理研究所 ^④	208	73	-17	303	74	-162	6.46	9.0
中国地震台网中心 ^⑤	16	80	-36	113	54	-168	6.60	11.0
本文	20	69	-10	114	81	-159	6.61	10.0

②<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10007ca5/moment-tensor>

③<https://www.globalcmt.org>

④<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/275080.html>

⑤http://www.cenc.ac.cn/cenc/_300651/2e137ebe-2.html

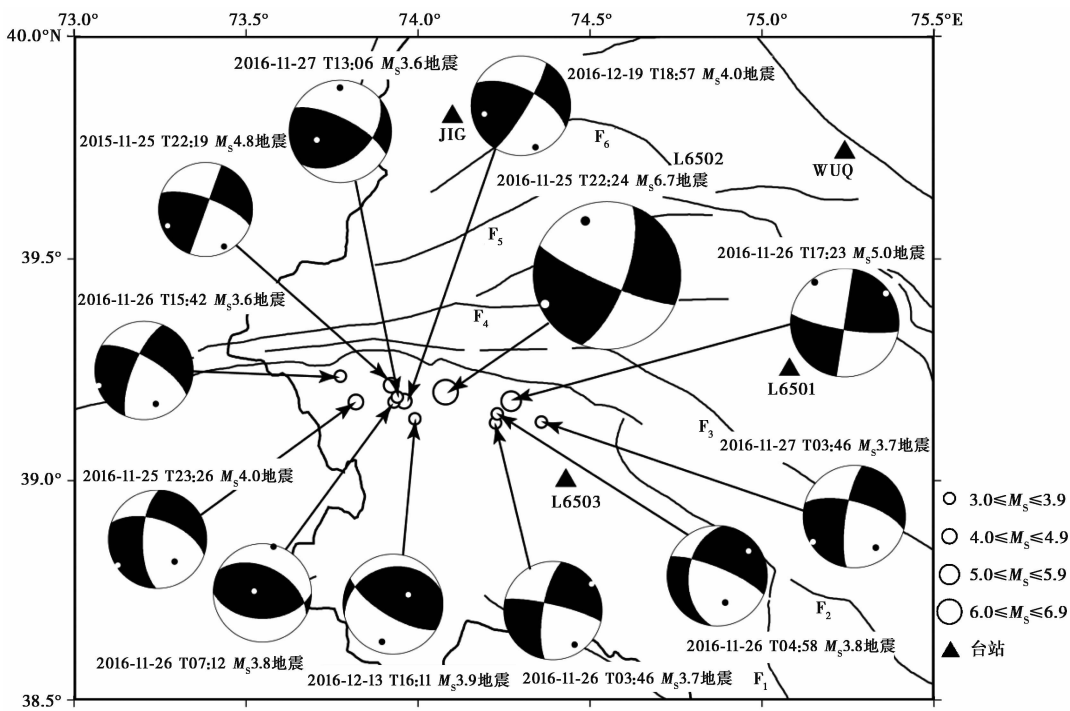


图 4 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震序列震源机制解平面图(余震经纬度数据来自于张旭等(2017))
F₁:喀喇昆仑断层;F₂:公格尔断层;F₃:奥依塔克断层;F₄:肯别尔特断层;F₅:卡兹克阿尔特断层;F₆:乌合沙鲁断层

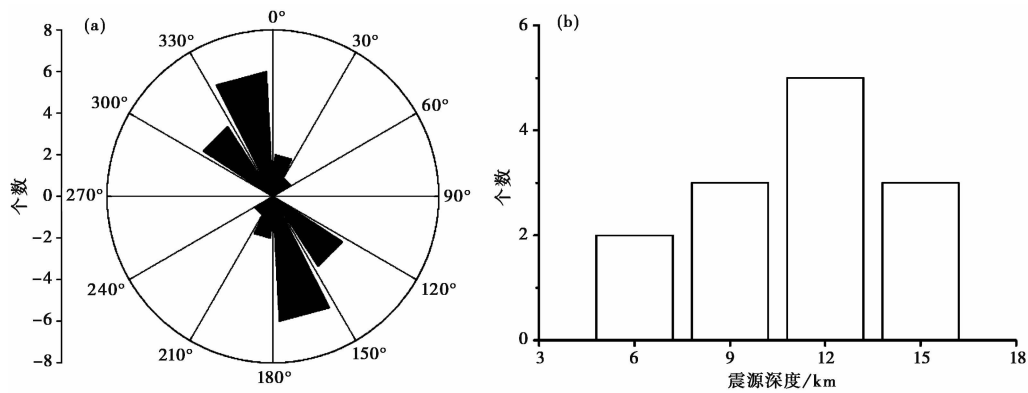


图 5 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震序列震源机制的主压应力方位玫瑰图(a)
和序列的震源深度分布(b)

M_s 相差较小(赵荣国,1994)。表 3 同时给出了利用 CAP 方法解算得到的这些地震的矩心深度以及地震台网目录给出的深度。由结果来看,利用 CAP 方法得到的矩心深度分布于 6~16km 之内(图 5(b)),大部分地震的深度集中于 9~13km 深度范围,与本文计算得到的主震震源深度 10km 相差不大,而区域台网定位深度绝大多数在 10km 以内,且集中在 6~9km 之间,这种情况可能是由于震源区附近台站较为稀少、计算所选地壳速度模型差异、定位方法不同等多方面原因造成的。

表 3 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震主震、前震及 $M_s \geq 3.6$ 余震的震源机制解

序 号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分)	M_s	M_w	定位 深度 /km	CAP 深度 /km	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		B 轴 / (°)	
						走 向	倾 角	滑 动 角	走 向	倾 角	滑 动 角	方 位	仰 角	方 位	仰 角	方 位	仰 角
1	2016-11-25 T22:19	4.8	4.91	6	11	20	90	19	290	71	-180	153	13	247	13	20	71
2	2016-11-25 T22:24	6.7	6.61	8	10	20	69	-10	114	81	-159	339	22	245	7	136	67
3	2016-11-25 T23:26	4.0	4.38	9	9	289	58	-150	182	65	-36	143	42	237	4	332	47
4	2016-11-26 T00:12	3.6	4.21	7	6	212	48	-103	51	44	-76	54	80	311	2	221	10
5	2016-11-26 T03:46	3.7	4.17	10	10	190	73	-10	283	80	-163	147	19	56	5	311	70
6	2016-11-26 T04:58	3.8	4.16	6	16	292	77	-130	187	42	-20	163	43	52	21	303	39
7	2016-11-26 T07:12	3.8	4.20	8	13	297	47	109	91	46	71	14	0	282	76	104	14
8	2016-11-26 T15:42	3.6	4.01	11	7	300	69	-160	203	71	-22	161	29	252	2	345	61
9	2016-11-26 T17:23	5.0	4.86	28	11	99	79	-180	189	90	11	323	8	55	8	189	79
10	2016-11-27 T03:46	3.7	3.99	8	11	285	67	-165	189	76	-24	145	27	238	6	340	62
11	2016-11-27 T13:06	3.6	4.05	7	16	43	49	30	297	70	129	359	16	250	49	102	36
12	2016-12-13 T16:11	3.9	4.28	11	16	256	27	48	121	70	109	197	23	59	60	294	18
13	2016-12-19 T18:57	4.0	4.26	7	12	296	62	170	31	81	28	161	13	257	26	47	61

4 讨论

2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震后,兴都库什-帕米尔地区强震异常活跃(图 6),发生 9 次 6 级以上强震,其中 7 级以上地震 3 次,分别为 2015 年 10 月 26 日阿富汗 7.8 级、2016 年 4 月 10 日阿富汗 7.1 级和 2015 年 12 月 7 日塔吉克斯坦 7.4 级强震。该区域强震频发的动力学原因来自于印度板块与欧亚板块的持续挤压碰撞,这个过程对青藏高原周边的地震活动具有强烈的影响(徐锡伟等,2008、2011;邓起东等,2010;闻学泽等,2011)。兴都库什-帕米尔地区中源地震活动与天山地震带的强震活动在时间上具有同步性,在强度和空间分布上具有一定的相关性(张浪平等,2013)。从 2015 年以来兴都库什-帕米尔地区 6 级以上地震的震源机制解来看,中源地震主要以逆冲型为主,浅源地震以逆冲和走滑型为主,这与兴都库什俯冲区域为逆冲性质、帕米尔西段区域为走滑性质比较一致,空间上 6.5 级以上强震具有由西南向北东迁移的活动特征,其中 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震就发生在新疆境内。中源强震活动的增强,尤其是 7 级以上深震,使得塑性流动变形的下地壳和软流圈受到的扰动加剧,将有利于上部脆性层的应力积累,进而有利于浅源大地震的发生(张浪平等,2013)。张琳琳等(2017)研究表明阿克陶 6.7 地震发生在 2015 年塔吉克斯坦 7.4 级和 2016 年吉尔吉斯斯坦 6.7 级地震的库仑应力增强区内,这 2 次强震活动对阿克陶 6.7 地震的发生起到了触发作用。兴都库什地区发生的 9 次 6 级以上中源强震可能对本次阿克陶 6.7 级地震的发生产生了一定的影响。

5 结论

本文利用新疆地震台网记录的波形资料,采用 CAP 方法反演了 2016 年 12 月 25 日阿克陶 6.7 级主震、前震及 11 次 $M_s \geq 3.6$ 余震的震源机制解,通过分析得到如下结论:

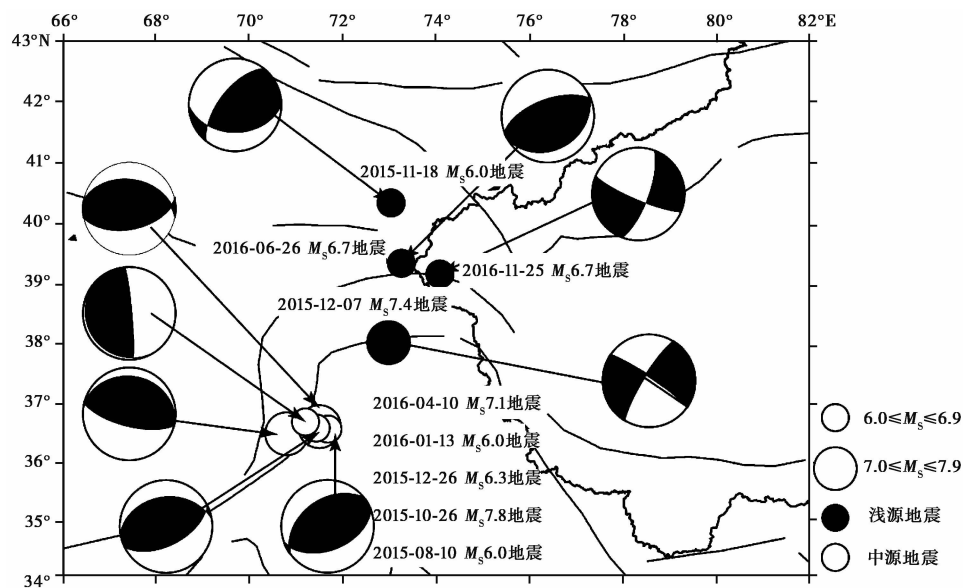


图 6 2015 年 8 月以来兴都库什-帕米尔地区强震及其震源机制

(1) 2016 年 12 月 25 日阿克陶 6.7 级地震的震源机制解: 节面 I 走向 20° /倾角 69° /滑动角 -10° ; 节面 II 走向 114° /倾角 81° /滑动角 -159° , P 轴方位 339° , 最佳矩心深度为 10km, 矩震级为 $M_w 6.61$, 震源错动类型表现为走滑的性质。阿克陶 6.7 级地震发震构造和余震重定位结果(陈杰等, 2016; 张旭等, 2017; 孔祥艳等, 2017)显示, 余震序列展布与木吉盆地北缘断裂的走向基本一致, 初步判定节面 II 代表了主震的发震断层面。

(2) 4.8 级前震的震源机制解与主震具有较好的一致性, 11 次 $M_s \geq 3.6$ 余震中, 6 次地震为走滑型地震, 3 次地震为逆冲型地震, 1 次地震为正断型地震, 1 次地震为混合型地震, 大部分余震的错动类型与主震及前震相似。从主压应力 P 轴方位来看, 序列中大部分地震具有和主震类似的近 NW 向的 P 轴方位, 这与区域构造应力场主压应力方向较为一致。从序列矩心深度来看, 此次阿克陶 6.7 级地震序列矩心深度分布于 6~16km 之间, 与本文得到的主震震源深度 10km 基本接近, 与陈杰等(2016)得到的余震主要分布在 5~13km 之间的结论比较一致。

(3) 印度板块在兴都库什地区自南向北俯冲的过程中产生的地震事件均表现为逆冲性质为主, 表明挤压作用十分强烈(张浪平等, 2014; 万秀红等, 2019; 崔华伟等, 2019), 由 2015 年 8 月~2016 年 4 月发生在该区的 5 次中源地震的震源机制也可以看出这种现象。而在帕米尔弧西段, 历史地震的震源机制主要以走滑型为主, 自西向东走滑型震源机制的优势分布更为明显, 表明在帕米尔西部地区两大板块的动力作用逐渐转为走滑性质(张浪平等, 2014; 崔华伟等, 2019)。近期发生在帕米尔地区的几次 6 级以上地震的震源机制也表现为或逆冲或走滑, 此次阿克陶 6.7 级地震即是发生在帕米尔地区的一次走滑型地震事件。2015 年以来兴都库什-帕米尔地区发生的这组强震活动在时空上可能对阿克陶 6.7 级地震具有一定的影响。

致谢: 新疆地震局监测中心为此次研究提供了波形数据, 中国地震局地球物理研究所房立华研究员、中国地震局地质研究所陈杰研究员和新疆地震局聂晓红高级工程师在本文完成过程提供了帮助, 审稿专家对本文提出了宝贵的修改建议, 本研究部分图件采用 GMT 软件绘制, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈杰, 李涛, 李文巧, 等, 2011. 帕米尔构造结及邻区的晚新生代构造与现今变形. 地震地质, **33**(2): 241~259.
- 陈杰, 李涛, 孙建宝, 等, 2016. 2016 年 11 月 25 日新疆阿克陶 M_w 6.6 地震发震构造与地表破裂. 地震地质, **38**(4): 1160~1174.
- 崔华伟, 万永革, 黄骥超, 等, 2019. 帕米尔-兴都库什地区构造应力场反演及拆离板片应力场因子特征研究. 地球物理学报, **62**(5): 1633~1649.
- 邓起东, 高翔, 陈桂华, 等, 2010. 青藏高原昆仑-汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动. 地学前缘, **17**(5): 163~178.
- 韩立波, 蒋长胜, 包丰, 2012. 2010 年河南太康 M_s 4.6 地震序列震源参数的精确确定. 地球物理学报, **55**(9): 2973~2981.
- 孔祥艳, 陈向军, 钟世军, 等, 2017. 2016 年 11 月 25 日阿克陶 M_s 6.7 地震及其余震序列精定位. 内陆地震, **31**(2): 110~114.
- 李金, 王琼, 吴传勇, 等, 2016. 2015 年 7 月 3 日皮山 6.5 级地震发震构造初步研究. 地球物理学报, **59**(8): 2859~2870.
- 龙锋, 张永久, 闻学泽, 等, 2010. 2008 年 8 月 30 日攀枝花-会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解. 地球物理学报, **53**(12): 2852~2860.
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等, 2008. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 M_s 5.7、 M_s 4.8 地震的震源机制解与发震构造研究. 地球物理学报, **51**(1): 158~164.
- 马文涛, 徐锡伟, 徐平, 等, 2004. 地震三角形分类图解法与华北地区地震成因分析. 地球物理学进展, **19**(2): 379~385.
- 聂晓红, 王琼, 吴传勇, 等, 2017. 2016 年 11 月 25 日阿克陶 M_s 6.7 地震序列特征及后续趋势分析. 内陆地震, **31**(2): 97~109.
- 宁杰远, 臧绍先, 1990. 帕米尔-兴都库什地区地震空间分布特征及应力场特征. 地球物理学报, **33**(6): 657~669.
- 祁玉萍, 龙锋, 肖本夫, 等, 2018. 2017 年九寨沟 7.0 级地震序列震源机制解和构造应力场特征. 地球学报, **39**(5): 622~634.
- 曲均浩, 蒋海昆, 李金, 等, 2015. 2013~2014 年山东乳山地震序列发震构造初探. 地球物理学报, **58**(6): 1954~1962.
- 冉慧敏, 张志斌, 赵庆, 2014. 2012 年 6 月 30 日新疆新源-和静 M_s 6.6 地震序列震源机制解. 中国地震, **30**(3): 432~441.
- 孙文斌, 谭跃时, 常征, 等, 2009. 帕米尔-兴都库什地区板块俯冲及其应力状态. 地震地质, **31**(2): 207~217.
- 唐兰兰, 赵翠萍, 王海涛, 2012. 2008 年新疆乌恰 6.8 级地震序列震源特征及帕米尔东北缘应力场研究. 地球物理学报, **55**(4): 1228~1239.
- 万秀红, 屠泓为, 李智敏, 等, 2019. 兴都库什及邻近区域空间应力场特征及其构造意义. 地球物理学报, **62**(12): 4696~4705.
- 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 等, 2009. 2003 年 8 月 16 日赤峰地震: 一个可能发生在下地壳的地震?. 地球物理学报, **52**(1): 111~119.
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 等, 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震. 地球物理学报, **54**(3): 706~716.
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 等, 2011. 2008 年于田 M_s 7.3 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论. 地震地质, **33**(2): 462~471.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等, 2008. 昆仑山地震 (M_w 7.8) 破裂行为、变形局部化特征及其构造内涵讨论. 中国科学 D 辑: 地球科学, **38**(7): 785~796.
- 张家声, 单新建, 李建华, 等, 2005. 帕米尔地区现今大陆深俯冲-地震构造和动力学解释. 岩石学报, **21**(4): 1215~1227.
- 张浪平, 邵志刚, 2013. 兴都库什-帕米尔地区与天山地震带强震活动关联分析. 中国地震, **29**(1): 1~10.
- 张浪平, 邵志刚, 李志海, 2014. 印度板块与欧亚板块在兴都库什-帕米尔地区相互俯冲的动力作用分析. 地球物理学报, **57**(2): 459~471.
- 张琳琳, 聂晓红, 高朝军, 等, 2017. 2016 年 11 月 25 日阿克陶 M_s 6.7 地震前后库仑应力变化分析. 内陆地震, **31**(2): 115~

121.

- 张旭,严川,许力生,等,2017. 2016 年阿克陶 $M_s6.7$ 地震震源复杂性与烈度. 地球物理学报, **60**(4):1411~1422.
- 张志斌,冉慧敏,金花,2019. 2016 年 12 月 8 日新疆呼图壁 $M_s6.2$ 地震发震构造初步研究. 地震工程学报, **41**(4):962~969.
- 赵荣国,1994. 即将通用的矩震级标准 M_w ——远震震级测定工作综述. 国际地震动态, (12):14~17.
- Burtman V S, Molnar P, 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. Geol Soc Am Spec Pap, **281**, 1~76.
- Chatelain J L, Roecker S W, Hatzfeld D, et al, 1980. Microearthquake seismicity and fault plane solutions in the Hindu Kush region and their tectonic implications. J Geophys Res Solid Earth, **85**(B3):1365~1387.
- Fan G W, Ni J F, Wallace T C, 1994. Active tectonics of the Pamirs and Karakorum. J Geophys Res Solid Earth, **99**(B4):7131~7160.
- Frohlich C, 1992. Triangle diagrams; ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. Phys Earth Planet Interiors, **75**(1~3):193~198.
- Molnar P, 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. Nature, **335**(6186):131~137.
- Paul J, Bürgmann R, Gaur V K, et al, 2001. The motion and active deformation of India. Geophys Res Lett, **28**(4):647~650.
- Pegler G, Das S, 1998. An enhanced image of the Pamir-Hindu Kush seismic zone from relocated earthquake hypocentres. Geophys J Int, **134**(2):573~595.
- Roecker S W, Soboleva O V, Nersesov I L, et al, 1980. Seismicity and fault plane solutions of intermediate depth earthquakes in the Pamir-Hindu Kush region. J Geophys Res Solid Earth, **85**(B3):1358~1364.
- Zhao L S, Helmberger D V, 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. Bull Seismol Soc Am, **84**(1):91~104.
- Zhu L P, Helmberger D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. Bull Seismol Soc Am, **86**(5):1634~1641.

The Characteristics of the Focal Mechanisms of $M_s6.7$ Earthquake Sequence on November 25, 2016 in Aketao, Xinjiang

Wei Yunyun¹⁾ Li Jin¹⁾ Wang Qiong¹⁾ Sun Zhaojie²⁾

1) Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) Kashi Standard Seismic Station of Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region,
Kashi 844000, Xinjiang, China

Abstract Based on the broadband waveforms recorded by Xinjiang Digital Seismic Networks, we inversed the focal mechanism solutions of the Aketao $M_s6.7$ main shock, foreshock and $M_s \geq 3.6$ aftershocks by using CAP method. The results shows that the focal mechanism of the $M_s6.7$ strong earthquake had the nodal plane I with strike 20° /dip 69° /rake -10° and the nodal plane II with strike 114° /dip 81° /rake -159° . Combining with the seismo-tectonic background of the seismic area, nodal plane II was identified to be the seismogenic fault plane of the main shock. The direction of P-axis for the main shock is 339° , which is close to the NW, preferred direction of the P-axis of historical earthquakes in this area. The focal mechanism solution of $M_s4.8$ foreshock is in high consistency with main shock. About six aftershocks are strike-slip type earthquakes, three aftershocks are thrust type earthquakes, one aftershock is normal type earthquake, and one aftershock is hybrid type earthquake. The P-axis of most earthquakes in the sequence yields the NW direction. The focal depth of this $M_s6.7$ earthquake sequence distributed at $6 \sim 16\text{km}$, and most of the earthquakes occurred within the depth range at $9 \sim 13\text{km}$, which is close to the focal depth of 10km of mainshock we calculated. Finally, we conducted a preliminary analysis on the relationship between the strong earthquakes in Hindu Kush Pamir region and this Aketao 6.7 earthquake.

Keywords: Aketao 6.7 earthquake; Focal mechanism; CAP method; Hindu Kush Pamir region