

李丽、刘剑、吴昊昱等,2015,2015 年 1 月山西介休 M_L 3.3 震群发震原因初步研究,中国地震,31(4),647~655。

2015 年 1 月山西介休 M_L 3.3 震群 发震原因初步研究

李丽^{1,2)} 刘剑³⁾ 吴昊昱^{1,2)} 宋美琴^{1,2)} 吕芳^{1,2)}

1) 山西省地震局,太原市旧晋祠路二段 69 号 030021

2) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站,太原市晋源区太原基准地震台 030025

3) 太原理工大学矿业工程学院,太原 030024

摘要 2015 年 1 月 15~27 日,山西介休发生 M_L 3.3 震群活动。精定位结果显示:震源体很小,震源较浅;根据震源谱拐角频率和视应力特征认为,本次震群活动与水库诱发地震有相似之处。鉴于本次震群孕震过程可能有水等流体的参与,本文综合构造环境、震源参数、介休井水位升降以及不同时段区域应力场分析等,对介休震群发震原因进行了探讨。初步认为介休地区裂隙发育,地下水渗透、扩散使得地壳浅部岩体强度弱化,是山西介休 M_L 3.3 震群发震的主要原因。同时,地下水渗透使得该区地震波高频成分衰减强烈,拐角频率和视应力明显低于山西其它地区同震级地震的水平。

关键词: 震群 拐角频率 视应力 岩体弱化

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0647-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2015 年 1 月 15~27 日山西介休发生了一次 M_L 3.3 震群活动。在此之前,位于介休震群西部 15km 左右的介休井水位从 2013 年底开始出现 3 次下降,累计降幅为 2.92m。2014 年 12 月 12 日介休井水位开始转折上升,2015 年 1 月 15 日 M_L 3.3 震群即开始活动。震群序列中 $M_L \geq 1.0$ 地震震源参数结果显示,拐角频率和视应力明显低于山西其它地区同震级地震的结果。震群重新定位结果显示震源体较小,震源较浅。上述参数有别于其它地震是否说明本次地震成因的特殊性? 介休井水位下降和介休震群的发生仅是巧合,还是存在某种联系? 本文从小震精确定位、应力场、拐角频率和视应力等方面对介休 M_L 3.3 震群特征进行了综合研究,并结合构造环境和已有研究成果对本次震群的成因进行了解释。

1 区域地震构造背景及历史震群活动概况

介休 M_L 3.3 震群发生在太原盆地南端(图 1)。太原盆地是山西断陷带上的一个重要断

[收稿日期] 2015-06-10; [修定日期] 2015-09-08

[项目类别] 地震科技星火计划青年项目(XH14010Y)、山西省地震局青年科研项目(SBK-1412、SBK-1519)和地震行业科研专项经费项目(2014419013)联合资助

[作者简介] 李丽,女,1981 年生,工程师,主要从事地震活动性和数字地震学方面的研究。E-mail:lilitiao@163.com

刘剑,通讯作者。E-mail:5102135@163.com

陷盆地,太谷断裂、交城断裂控制着东西两侧边界,南端以灵石横向隆起与临汾盆地相隔。太原盆地西深东浅,沿西界的交城断裂多分布有深凹陷,汾阳凹陷是最深的凹陷之一,介休地区位于汾阳凹陷的东南边缘。此外,介休地区地质构造环境复杂,其不仅是太原盆地剪切拉张段与灵石隆起挤压段复合部位,又是太原盆地东界的NW向太谷断裂与临汾盆地东界的NNE向霍山断裂交会部位。据物探测深资料可知(武烈等,1997),太原盆地内的隐伏断裂在介休地区尤为发育,其中一组与NE向的太谷断裂平行,一组与NW向的孝义断裂平行。

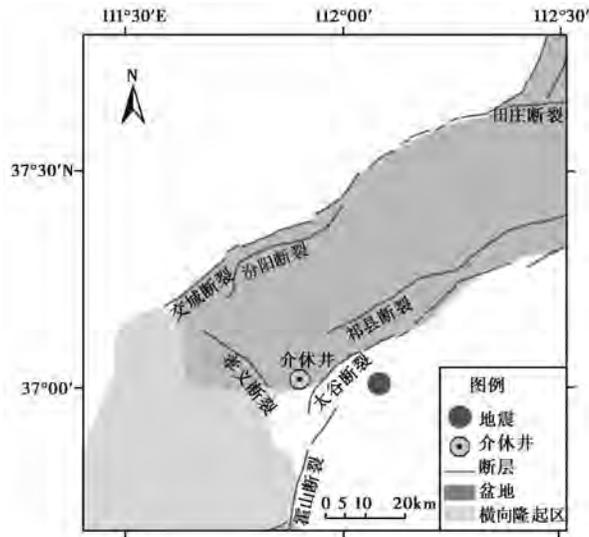


图1 介休及邻区地质构造

有地震台网记录以来,太原盆地的震群活动是山西境内最为活跃的,其中介休地区尤为突出。1970年以来该区的震群活动资料显示,在本次 $M_L 3.3$ 震群震中附近相继发生6次震群活动(1975~1988年)(表1),其中1985~1988年就有5次小震群,其序列参数均具有明显的前兆震群特征,之后不久发生了1989年10月大同-阳高6.1级地震。王振声等(1984)在研究了太原盆地的震群活动后认为,太原盆地小震群多发的力学原因与其内部的裂隙分布有关,小震群活动反映了太原盆地内部裂隙分布较密,裂隙间隔距离较小,在区域应力增强的条件下极易产生连锁反应式的弱震活动,最终形成间歇的小震群。李丽等(2013)分析山西及邻区震群特征后发现,山西震群活动与周边地区中强地震有一定的对应关系。此外,有

表1 1970年以来介休7次震群事件

序号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	北纬	东经	最大震级 M_L	地震次数
1	1975-12-18 T 08:32:00	—	—	2.6	$M_L \geq 0.4$ 地震 92次
2	1985-02-03 T 22:28:00	37°07'	111°57'	2.5	$M_L \geq 0.3$ 地震 73次
3	1987-02-04 T 19:51:00	37°02'	112°05'	1.9	$M_L \geq 0.0$ 地震 59次
4	1987-08-01 T 10:42:00	37°02'	112°05'	1.8	$M_L \geq 0.0$ 地震 42次
5	1987-12-06 T 23:58:00	37°02'	112°05'	2.1	$M_L \geq 0.0$ 地震 42次
6	1988-11-21 T 15:18:00	37°01'	112°05'	1.7	$M_L \geq 0.0$ 地震 43次
7	2015-01-15 T 18:31:07	37°01'	112°05'	3.3	$M_L \geq 0.0$ 地震 52次

学者提出太原盆地的震群活动一定程度上对应了华北地区中强地震活动, 该区域的地震活动不仅反映了其自身的破裂特点, 而且在一定程度上也反映了区域应力场的变化过程与外围强震的发生有某种内在联系(武烈等, 1997)。

2 震群活动特点

2015 年 1 月 15~27 日介休震群活动共被记录到 52 次 $M_L \geq 0.0$ 地震, 其中 0.0~0.9 级地震 37 次, 1.0~1.9 级 12 次, 2.0~2.9 级 2 次, 3.0~3.9 级 1 次。1.0 级以下地震占总数的 71.2%, 故该震群是一次以微震为主的震群活动。 $M-t$ 图显示震群分为 2 个活动时段, 第 1 时段为 15~16 日, 其中 15 日地震的强度、频度最高; 第 2 时段为 18~21 日, 除 18、19 日地震活动较集中以外, 其余时间仅有零星活动(图 2)。

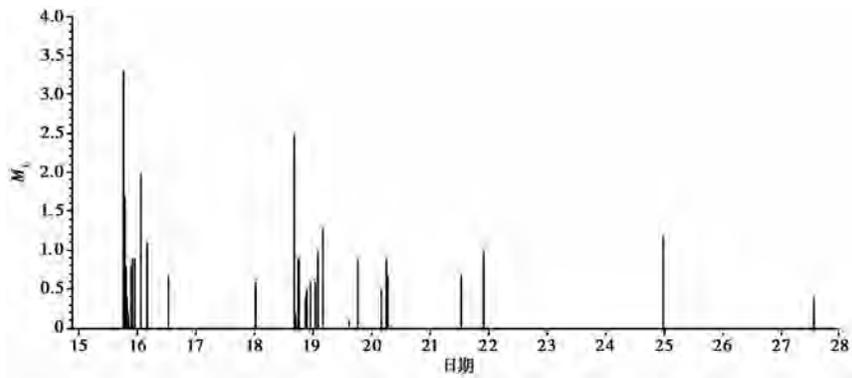


图 2 2015 年 1 月 15~27 日介休 $M_L 3.3$ 震群 $M-t$ 图

本次震群事件中有 9 次是可定位地震, 其余均为介休台单台记录。为了获取高精度的地震震源间相对位置, 本文利用双差定位法(Waldhauser et al, 2000)对可定位事件进行了重新定位。在定位过程中采用的速度模型取自赵金仁等(2006)的研究成果(表 2)。重新定位结果(图 3、表 3)显示震群活动具有 NE 向的优势分布, 震源体基本限定在方圆 2km 左右, 震源深度优势分布为 5~6km, 其中 $M_L 3.3$ 地震的震源深度为 6.285km。震源深度重新定位结果比太原盆地平均 5~25km 的震源深度稍浅(宋美琴等, 2012; 梁向军等, 2014)。一些学者认为水库蓄水诱发地震的震源相对较浅, 发震时间密集, 空间丛集(杨志高等, 2010)。据调查, 介休及其邻区无大型水库, 因此可以判定介休 $M_L 3.3$ 震群活动不是水库蓄水诱发地震, 但介休震群活动特征类似水库诱发地震, 这说明在震群孕震过程中水的参与可能起了重要作用。

表 2 水平层状地壳速度模型(据赵金仁等(2006))

深度/km	0.0	3.0	5.0	9.0	11.0	18.0	27.0	39.0	40.0	48.0
P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.80	5.70	6.00	6.10	6.20	6.40	6.50	7.15	8.00	8.10

注: $v_p/v_s = 1.72$

3 介休井概况及井水位变化

介休井位于太谷断裂与霍山断裂交会处(图 3), 井区内基岩断裂较为发育。主要是 NE

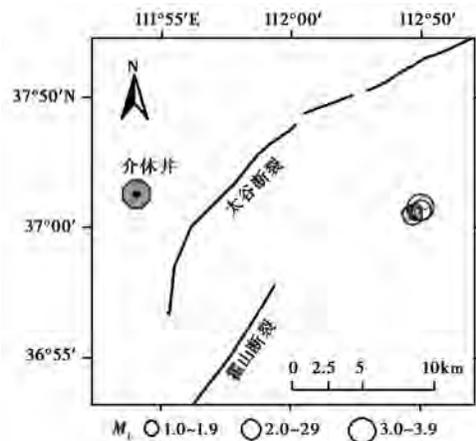


图3 介休井及重定位后介休震群的震中分布

表3 介休 $M_L 3.3$ 震群双差定位结果

序号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	北纬/(°)	东经/(°)	震级 M_L	深度/km
1	2015-01-15 T 18:01:08.90	37.011657	112.082629	3.3	6.285
2	2015-01-15 T 18:04:56.04	37.009873	112.079070	1.9	6.152
3	2015-01-15 T 18:04:22.87	37.007542	112.075518	1.2	4.626
4	2015-01-15 T 19:07:03.69	37.008443	112.077689	1.7	5.733
5	2015-01-16 T 01:06:10.22	37.007108	112.079087	1.5	5.839
6	2015-01-16 T 01:06:51.73	37.009588	112.082757	2.0	5.484
7	2015-01-16 T 04:09:38.81	37.007507	112.074678	1.1	5.404
8	2015-01-18 T 16:00:21.08	37.006483	112.077123	2.5	5.473
9	2015-01-24 T 23:08:15.38	37.014573	112.085548	1.2	5.332

走向的一组隐伏断裂,多为正断层,长几千米至十几千米,倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$,断距几十至几百米;其次为一组 NNW 向断裂。地下水为多层混合水,总的流向为由东南向西北,井区第四系与第三系孔隙水主要受大气降水的渗入补给,在东部的奥陶系凸起部位还受岩溶水垂向顶托补给及其侧向径流补给。

介休井与介休震群相距仅 15km,均位于太谷断裂与霍山断裂交会处,研究区域构造复杂,岩石裂隙发育。介休井水位自 1981 年观测以来曾多次出现下降异常,且下降幅度最大达 3m 多,其下降变化与山西地震带的中强地震活动有很好的对应关系(张淑亮等,2002)。从 2013 年底开始,介休井水位出现 3 次下降(图 4),累计降幅为 2.92m,2014 年 12 月 12 日开始转折上升,2015 年 1 月 15 日发生介休 $M_L 3.3$ 震群,震前井水位下降表明介休井附近应力场可能为拉张状态。在区域应力的持续作用下,岩体体积和含水层岩体孔隙度增大,孔隙压力减小,进而引起井水位下降。

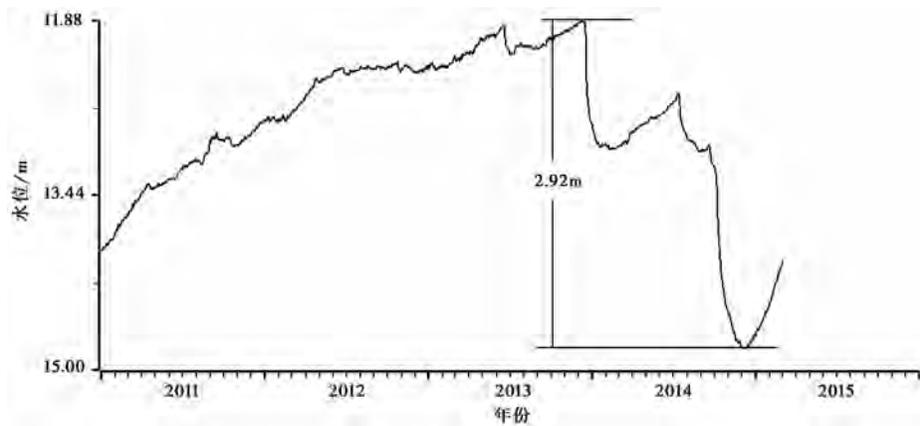


图 4 2011 年以来介休井水位分钟值变化曲线

4 区域应力状态

介休井水位下降表明井孔附近应力场为拉张状态,而区域应力场和介休井反映的应力场状态是否具有 consistency? 本文根据小震震源机制来研究震群附近的应力场变化。首先利用山西数字地震台网记录的地震直达 P、S 波振幅资料求解中小地震震源机制解 (Kisslinger, 1980; Kisslinger et al, 1981; 李幼铭等, 1982; 梁尚鸿等, 1984), 计算得到 2011 年以来介休震群附近 50 多次 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解, 并分别绘制了 2011 年 1 月~2013 年 11 月及 2014 年 1~12 月 2 个时间段的震源球分布及 P 轴空间分布 (图 5)。从图中可以看出, 这 2 个时间段的震源机制解类型和 P 轴分布特征存在显著差异。第 1 个时段的震源机制显示地震为走滑型, P 轴多呈水平分布, 倾角较低, 主压应力方向与山西构造应力场一致; 第 2 阶段明显看出地震类型多为正断型, P 轴较直立, 倾角较高, 表明这一时段区域应力场以拉张状态为主, 这与介休井水位反映的应力状态一致。

介休震群中 3 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解显示: $M_L 3.3$ 、 $M_L 2.5$ 地震震源机制解一致性较好, 主压应力轴方位为 NE 方向, 与山西整体构造应力场一致 (表 4)。 $M_L 3.3$ 地震的破裂方式为正断兼走滑型, 另外 2 次地震破裂方式为逆断或逆冲兼走滑, 反映出震群序列受控于局部应力场。介休 $M_L 3.3$ 震群位置距离太谷断裂和霍山断裂交会处不足 10km, 但震源机制解结果显示的界面解与这 2 条断层产状并不相符, 因此推测本次震群可能为隐伏次级断裂活动的结果。

5 拐角频率与视应力

地震波拐角频率可以反映区域应力场变化特征。同等震级的地震, 如果发生在高应力背景条件下, 地震震源脉冲高而窄, 相应的高频成分多, 拐角频率大; 如果发生在低应力背景条件下, 地震震源脉冲则低而宽, 相应的高频成分少, 拐角频率小 (陈培善等, 1993)。影响拐角频率大小的主要因素为地震波传播速度及岩体破裂速度、尺度等, 而岩体裂隙、孔隙的变化以及岩体的扩容、饱和、浸水弱化等是影响地震波的主要因素, 其中裂隙中的流体饱和度对地震波速影响显著。岩体裂隙浸水等流体后软化, 软介质对地震波的高频成分有较强的

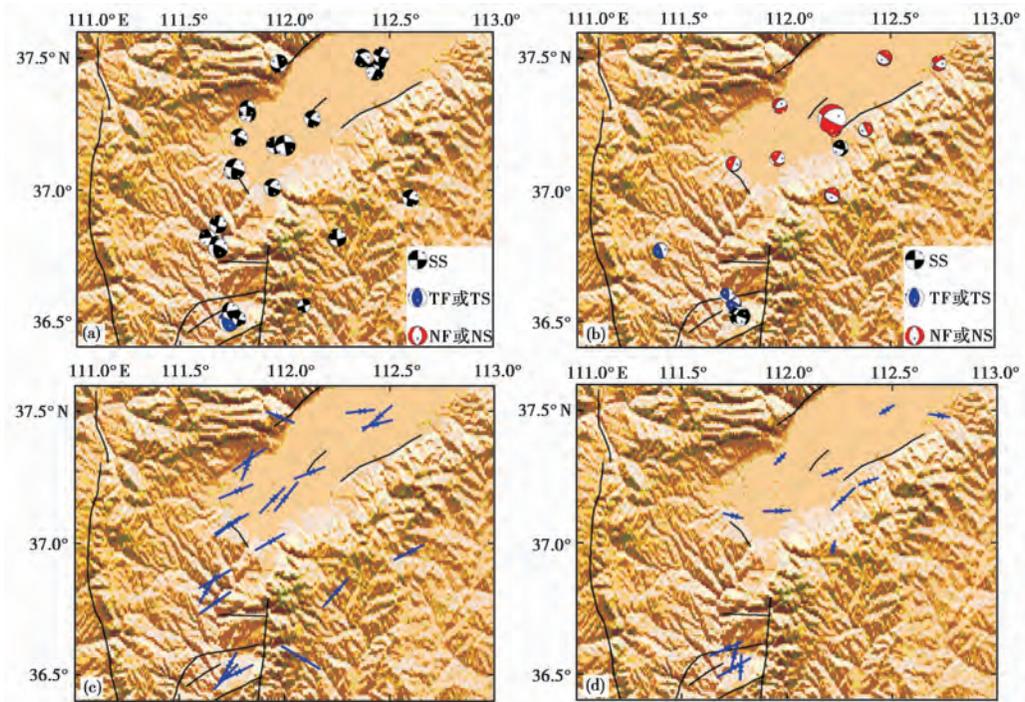


图5 介休震群附近震源机制解分布及P轴空间分布

(a)、(c)2011年1月~2013年11月震源机制解及P轴空间分布;(b)、(d)2014年震源机制解及P轴空间分布
蓝色带箭头线段表示P轴空间分布,线段的方向代表方位角,线段的长短表示倾角大小,越短则倾角越大,越直立;越长表示倾角越小,越水平

表4 介休 $M_L 3.3$ 震群中 3 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解参数

发震日期	震级 M_L	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴		N 轴	
		走向 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)	滑动角 /($^{\circ}$)	走向 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)	滑动角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)	方位 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)
2015-01-15	3.3	304	82	-49	43	41	-168	250	39	4	26	118	40
2015-01-16	2.0	349	64	56	226	41	139	103	13	214	57	6	30
2015-01-18	2.5	133	69	40	26	52	153	256	11	356	43	155	45

吸收作用,震级小的地震拐角频率将会变小。姚立珣等(2004)基于二相介质的地震波理论,解释了岩体裂隙充水后对拐角频率的影响,指出拐角频率偏小可以作为地壳浅部岩体裂隙发育及充水的判断依据。杨志高等(2010)通过对紫坪铺水库 170 个 $M_L \geq 1.0$ 地震震源参数的计算和分析后认为,地震波穿过岩体裂隙充水后介质会有较明显的衰减过程,且拐角频率低于中国大陆其它地区的结果。陈涛等(2012)研究认为地壳流体的孔隙压力作用是触发地震以及影响震群、余震活动的重要因素之一。

目前震源动力学参数的测定方法主要是通过震源谱在 Brune 模型下利用遗传算法拟合出拐角频率和零频极限(陈学忠等,2011)。从地震事件震源谱来看,其高频衰减不仅反映了震源本身的物理过程,也反映了传播介质的非弹性和散射作用的强弱,拐角频率是震源谱低

频和高频的分界点。表 5 给出了介休 $M_L 3.3$ 震群中 $M_L \geq 1.0$ 地震的拐角频率。因有关山西地区拐角频率的研究都是基于 2001~2013 年 $M_L \geq 2.0$ 地震的计算结果,所以表 5 提供了震群中 $M_L \geq 2.0$ 地震的拐角频率及山西地区同震级地震的平均值。一般情况下,对于构造地震而言,震级越小,拐角频率越大;反之,拐角频率则越小。根据这一现象,虽然 $1.0 \leq M_L \leq 2.0$ 地震的拐角频率没有可参考的数据,但是理论上应该比山西其它地区的 $M_L \geq 2.0$ 地震的拐角频率大。从表 5 可以看出, $1.0 \leq M_L \leq 2.0$ 地震的拐角频率明显小于 $M_L 2.0$ 地震的平均结果。震群中 $M_L 3.3$ 、 $M_L 2.5$ 地震相对于同等震级的拐角频率减小 24.6%,该结果与姚立珣等(2004)的研究结果一致;而 $M_L 2.0$ 地震的拐角频率则减小 44.4%,这表明地震波高频衰减程度较大,也进一步说明震源区水等流体的渗入在较大程度上影响了岩石介质的物理性质,使得岩体强度弱化。

表 5 介休 $M_L 3.3$ 震群中 $M_L \geq 1.0$ 地震的拐角频率及视应力

日期 (年-月-日)	震级 M_L	拐角频率/Hz	同等震级平均拐角频率/Hz	视应力/bar	同等震级平均视应力/bar
2015-01-15	3.3	3.71	4.92	1.590	5.150
2015-01-15	1.9	4.29	—	0.110	—
2015-01-15	1.2	4.43	—	0.035	—
2015-01-15	1.7	3.69	—	0.055	—
2015-01-16	1.5	5.21	—	0.062	—
2015-01-16	2.0	3.80	6.83	0.091	0.871
2015-01-16	1.1	3.97	—	0.012	—
2015-01-18	2.5	4.71	6.22	0.465	1.668
2015-01-24	1.2	4.39	—	0.026	—

地震视应力是一个动力学参数,反映了震源物理过程,通常与滑动类型、破裂速度及介质强度等有关(McGarr et al, 2001, 2002)。本研究利用多台联合计算视应力方法,选取 S 波段在 1.0~20.0Hz 范围内的波形进行分析,所用台站个数均大于 15,最后计算了震群中 $M_L \geq 1.0$ 地震的视应力值(表 5)。虽然 $1.0 \leq M_L \leq 2.0$ 地震视应力不能参考有关山西地区的已有研究结果,但是比较 $M_L \geq 2.0$ 地震与山西地区 2001~2013 年多年同震级视应力平均计算结果后发现,这 3 次地震的视应力值明显小于平均视应力水平,降幅最大为 89.6%,最小的也为 69.1%,这一结果与杨志高等(2010)对紫坪铺水库地震视应力的研究结果基本一致。由于小震能量主要集中在震源谱高频部分,如果震源区有流体的渗入,则会使高频成分衰减,视应力计算结果将会明显小于山西其它地区同震级地震的结果。

6 结论与讨论

本文基于小震精确定位、应力场、拐角频率和视应力等结果,研究了介休 $M_L 3.3$ 震群特征和发震原因,得到了如下主要结论:

(1) 震群所在区域构造位置特殊,环境复杂,岩石裂隙发育,在应力增强的条件下,极易产生弱震活动。根据区域应力场分析,在介休井水位上升阶段,小震震源机制表现为主压应力方向受山西构造应力场的控制,破裂方式主要为走滑型;介休井水位下降阶段,小震震源

机制表现为受拉张作用,破裂方式主要为正断型;随着区域应力不断加强,介休井水位转折上升,介休震群中 $M_L \geq 2.0$ 地震震源机制解表现的破裂方式有逆冲成分,反映了应力场的挤压状态,与井水位回升表现的应力场状态一致。因此,介休井水位的升降应能够反映震源区附近应力场状态。

(2)介休震群小震精确定位结果显示,震源体较小,则震源深度较浅。震群中 $M_L \geq 1.0$ 地震拐角频率和视应力计算结果明显低于山西地区同震级地震的水平,对比山西地区2001~2013年 $M_L \geq 2.0$ 地震的平均结果,拐角频率最大降幅为44.4%,视应力最大降幅89.6%,与二相介质的地震波理论解释的水库诱发地震拐角频率和视应力变化特征相吻合。

(3)介休井水位异常变化和介休 $M_L 3.3$ 震群,反映了区域应力场的调整和增强。通过小震精确定位以及对拐角频率和视应力的研究,不排除水等流体在震群孕震过程中发挥主导作用。初步分析本次震群活动的成因为:第1阶段,在区域应力场拉张作用下,裂隙在岩体中扩展,岩体体积有所增大,孔隙压力下降,引起井水位下降;第2阶段,当震源区出现扩容之后,迫使扩容区外围的地下水向该区渗入,一定程度上改变了岩石的物理性质,弱化了岩石强度,岩石更容易破裂,同时流体孔隙压力回升,有效应力降低,抗剪强度减弱,最终岩体错动并触发地震。整个过程与扩容模式描述的孕震不同演化阶段特征基本相同(汪成民等,1988)。由于介休震群震源区裂隙发育和水的渗入作用等,岩体强度弱化,裂隙密度增加,地震波通过震源区时高频成分衰减强烈,从而导致地震的拐角频率和视应力有别于山西地区其它地震。

致谢: 本文在成文过程中得到山西省地震局李自红研究员、张淑亮研究员的指导,两位匿名评审专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献

- 陈培善、Duda S J, 1993, 地震辐射对环境应力的依赖性, 地震学报, **15**(2), 146~152。
- 陈涛、刘耀炜、杨多兴等, 2012, 地震触发、震群与余震活动过程中的空隙压力作用, 地球物理进展, **27**(6), 2407~2417。
- 陈学忠、李艳娥、郭祥云, 2011, 河北文安 $M_S 5.1$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征, 地震, **31**(4), 15~25。
- 李丽、刘素珍、穆慧敏等, 2013, 2013年山西及邻区震群特征分析, 山西地震, (3), 1~5。
- 李幼铭、束沛镒, 1982, 层状介质中地震面波频散函数和体波广义透射系数的计算, 地球物理学报, **25**(2), 130~139。
- 梁尚鸿、李幼铭、束沛镒等, 1984, 利用区域地震台网P、S振幅比资料测定小震震源参数, 地球物理学报, **27**(3), 247~257。
- 梁向军、刘林飞、苏燕等, 2014, 山西地区地震震源深度特征统计分析, 山西地震, (1), 1~4。
- 宋美琴、郑勇、葛黎等, 2012, 山西地震带中小震精确定位及其显示的山西地震构造特征, 地球物理学报, **55**(2), 513~525。
- 汪成民、车用太、董守玉等, 1988, 地下水微动态研究, 48~53, 地震出版社。
- 王振声、肖丽珠, 1984, 山西地震带小震群动力学成因, 山西地震, (4), 11~12。
- 武烈、啜永清、田勇等, 1997, 山西震群, 92~113, 太原:山西科学技术出版社。
- 杨志高、张晓东, 2010, 紫平铺水库地区蓄水前后视应力标度率变化研究, 地球物理学报, **53**(12), 2861~2868。
- 姚立珣、钟羽云、张振峰等, 2004, 岩体裂隙冲水后对拐角频率的影响, 西北地震学报, **26**(4), 315~321。
- 张淑亮、车用太、范雪芳等, 2002, 介休井水位异常的调查与分析, 地震研究, **25**(4), 320~327。
- 赵金仁、张先康、张成科等, 2006, 山西五台山地区地壳深部结构特征研究, 地球物理学报, **49**(1), 123~129。
- Kisslinger C, Bowman J R, Koch K, 1981, Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P) z data, Bull Seism Soc Am, **71**(6), 1719~1729。
- Kisslinger C, 1980, Evaluation of S to P amplitude ratios for determining focal mechanisms from regional network observations, Bull

- Seism Soc Am, **70**(4), 999~1014.
- McGarr A, Fletcher J B, 2002, Mapping apparent stress and energy radiation over fault zones of major earthquakes, Bull Seism Soc Am, **92**, 1633~1646.
- McGarr A, Fletcher J B, 2001, A method for mapping apparent stress and energy radiation applied to the 1944 Northridge earthquake fault zone-revisited, Geophys Res Lett, **28**, 3529~2932.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, Bull Seism Soc Am, **90**, 1353~1368.

Causes for Jiexiu, Shanxi $M_L3.3$ earthquake swarm in January 2015

Li Li^{1,2)} *Liu Jian*³⁾ *Wu Haoyu*^{1,2)} *Song Meiqing*^{1,2)} *Lü Fang*^{1,2)}

1) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

2) National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030025, China

3) College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract From January 15 to January 27 in 2015, a $M_L3.3$ earthquake swarm happened in Jiexiu, Shanxi. The results of accurate location showed that seismic sources were small and the depth of hypocenter was shallow. In terms of the characteristics of corner frequency and apparent stress, the activity of earthquake swarm was similar with reservoir induced earthquakes. Considering water's participation in seismic process, this paper discussed the causes for the Jiexiu earthquake swarm by the analysis of tectonic environment, seismic source parameters, fluctuation of Jiexiu well and the regional stress field in different periods. All the evidences showed that fracture, groundwater infiltration and diffusion which weakened rock mass's strength were the main reasons for Jiexiu, Shanxi $M_L3.3$ earthquake swarm. At the same time, the seepage of groundwater made seismic wave attenuate sharply, and the corner frequency, as well as apparent stress, was lower than other area in Shanxi, which had same magnitude level.

Key words: Swarm Corner frequency Apparent stress Weakness of rock mass