

宁夏及邻区异常低视应力“地震事件”的发现及研究^{*}

曾宪伟, 罗恒之, 朱鹏涛, 崔 瑾

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 计算宁夏及邻区一些中小“地震事件”视应力, 发现与同震级事件相比, 视应力成倍降低。结合这些异常事件的发生时刻和所在位置等, 初步判定其为疑似爆破事件。进一步利用P波初动方向、波形互相关特征和不同频带能量比值等方法, 发现异常事件P波垂直向初动均向上, 同一台站记录的同一区域的不同异常事件波形相关系数较大, 异常事件波形低频信号比较发育, 应该是爆破事件。

关键词: 视应力; 爆破事件; 波形互相关; 小波包分量比

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0011-09

0 引言

地震学中, 视应力一般可作为应力水平的下限估计(吴忠良等, 2002)。地震视应力的大小可以通过地震波辐射能量和地震矩的测定结果进行估算, 它表示了单位位错辐射的地震波的能量(Wyss, Brune, 1968)。实现地震视应力大小的计算, 使得区域绝对应力水平的间接估计成为可能。国内外很多学者通过视应力开展了区域应力水平估计方面的诸多研究工作(Wyss, 1970; Mayeda, Walter, 1996; Choy, McGarr, 2002; 吴忠良等, 2002; 郑建常等, 2006; 李艳娥等, 2015; 彭关灵等, 2018), 并取得了很多认识。随着数字地震观测时代的到来, 以及越来越多的数字测震台站的架设, 可计算的视应力地震震级越来越小, 一些中小地震视应力的应用研究也得到了进一步拓宽, 比如将视应力应用于震前应力异常研究(陈学忠等, 2007, 2011; 李艳娥等, 2012; 陈丽娟等, 2017)、震后趋势判定(陈学忠等, 2003; 王生文等, 2014; 康建红等, 2016)和地震危险性分析(乔慧珍等, 2006; 阮祥等, 2010; 易桂喜等, 2013)等方面, 都取得了丰硕的成果。

近些年, 宁夏也开展了一些中小地震视应力的计算分析工作。然而, 在计算过程中发现, 有

些事件的视应力值异常低, 较同等震级的其他地震事件成倍降低, 即使改变参与计算的台站波形进行多次计算, 视应力值依然为低值。经初步分析发现, 这些事件的发生时刻基本发生于中午12时左右或下午6时左右, 与爆破事件发生时刻具有一定相关性。如果把爆破作为天然地震进行区域视应力的分析研究工作, 将给区域应力水平的判定带来偏差。因此, 有必要对这些异常低视应力事件(简称异常事件)进行深入分析。本文拟从异常事件的波形特征方面开展研究, 判定事件性质, 分析低视应力产生的原因。

1 数据与方法

1.1 视应力计算方法

地震视应力定义为单位地震矩辐射出的地震波能量与震源区介质的剪切模量的积(Wyss, Brune, 1968):

$$\sigma_{\text{app}} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式中: E_s 为地震辐射能量; M_0 为标量地震矩; μ 为剪切模量; 对于地壳介质, μ 可取 3.0×10^4 MPa (Wyss, Brune, 1968)。 E_s 和 M_0 的计算方法分别参考 Snoke (1987) 和 Jiménez 等 (2005) 的文献。

^{*} 收稿日期: 2018-09-17.

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(NZ14228)、地震科技星火计划项目(XH18053Y)和国家自然科学基金(41604015)联合资助。

1.2 数据选取与处理

本文选取了 2009—2016 年宁夏及邻区发生的 $M_L2.5 \sim 5.0$ 地震事件 (表 1), 截取了震中距小于 100 km 的记录清晰的固定测震台站 (图 1) 的波形数据, 并收集相应台站的仪器响应参数。由于地震能量主要由 S 波携带, 所以本文只处理 S 波段的数据。首先将事件波形数据转换为 SAC (Seismic Analysis Code) 格式数据, 然后进行去倾处理、扣除仪器响应和滤波后, 通过傅式变换得到 S 波段

位移振幅谱, 接着计算震源谱零频极限值、拐角频率、地震辐射能量和标量地震矩, 代入式 (1) 得到视应力。

计算视应力时, 每次事件至少有 5 个台站的波形数据参与计算。为了得到更加可靠的视应力计算结果, 本文对每次事件均通过增减台站波形数据的方式进行多次视应力的计算, 结果显示, 视应力大小并未发生大的改变。

异常事件的震中分布图 (图 1) 显示, 异常事

表 1 疑似爆破与地震事件目录
Tab. 1 Catalogue of suspected blasting and earthquakes

序号	发震日期	发震时刻	震中位置		宏观震中	M_L	记录台站	震中距/ km	视应力/ bar	事件性质
		时:分	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$						
1	2009-11-11	09:23	35.67	106.38	泾源	2.6	GYU	39	0.125	疑爆
2	2010-04-24	19:20	35.72	106.32	泾源	2.5	GYU	39	0.104	疑爆
3	2010-06-07	17:17	37.32	105.63	中宁	2.5	NSS	57	0.283	疑爆
4	2011-02-25	12:10	37.27	105.45	中卫	2.5	NSS	72	0.219	疑爆
5	2011-07-13	19:13	39.10	106.00	石嘴山	2.8	YCH	54	0.128	疑爆
6	2011-09-09	18:58	35.68	106.22	泾源	2.5	GYU	38	0.059	疑爆
7	2011-11-15	12:26	38.00	105.67	阿左旗	2.5	NSS	50	0.081	疑爆
8	2011-11-29	18:11	37.98	105.67	阿左旗	2.6	NSS	48	0.098	疑爆
9	2011-12-19	17:08	35.67	106.35	泾源	2.5	GYU	40	0.066	疑爆
10	2012-02-23	12:31	37.98	105.67	阿左旗	2.5	NSS	48	0.099	疑爆
11	2009-06-16	03:11	38.12	106.17	青铜峡	2.7	NSS	49	0.342	地震
12	2009-07-13	10:27	38.20	106.83	青铜峡	2.9	NSS	60	0.479	地震
13	2009-08-25	13:00	37.22	105.48	中卫	3.0	NSS	72	0.981	地震
14	2010-03-22	07:46	35.88	106.53	彭阳	2.5	GYU	39	0.470	地震
15	2011-04-23	19:20	35.62	106.10	隆德	2.6	GYU	39	0.721	地震
16	2012-09-28	16:53	35.68	106.38	泾源	2.7	GYU	41	0.920	地震
17	2012-12-14	03:34	38.18	106.06	青铜峡	2.6	NSS	54	0.418	地震
18	2013-02-26	23:49	35.73	106.21	泾源	2.6	GYU	38	0.719	地震
19	2013-04-13	19:17	38.14	106.05	青铜峡	2.8	NSS	50	0.430	地震
20	2013-07-04	07:01	37.29	105.67	中宁	2.5	NSS	57	0.401	地震
21	2013-07-05	14:53	37.26	105.65	中宁	2.8	NSS	61	0.560	地震
22	2013-07-23	15:01	38.97	106.42	石嘴山	2.6	YCH	58	0.443	地震
23	2014-01-18	00:29	37.26	105.74	中宁	3.0	NSS	57	0.689	地震
24	2014-05-05	04:21	37.22	105.76	中宁	2.7	NSS	59	0.399	地震
25	2015-05-29	01:37	35.81	106.54	彭阳	3.1	GYU	40	1.297	地震
26	2015-06-23	06:04	35.41	106.20	泾源	2.7	GYU	51	0.561	地震
27	2016-04-27	18:03	35.81	106.51	彭阳	3.4	GYU	40	2.485	地震
28	2016-06-12	06:37	37.31	105.32	中卫	2.9	NSS	75	0.952	地震
29	2016-07-22	01:39	38.84	106.39	石嘴山	3.0	YCH	47	1.794	地震

注: YCH 代表银川台, NSS 代表牛首山台, GYU 代表固原台.

件主要分布在4个区域,由北向南分别称为大峰矿区、新井矿区、中卫—中宁矿区(中卫矿区和中宁矿区的合称)和三关口矿区(田小慧等, 2015),震级主要集中在 $M_L 2.5 \sim 2.8$ (表1中1~10号事件),时间范围为2009—2012年。为了科

学合理地判定这些异常事件的性质,本文选取了以上4个区域及附近地区发生的天然地震(图1中黑色五角星,表1中11~29号事件)与相应区域的异常事件做对比分析,选取的天然地震震级与异常事件相当。

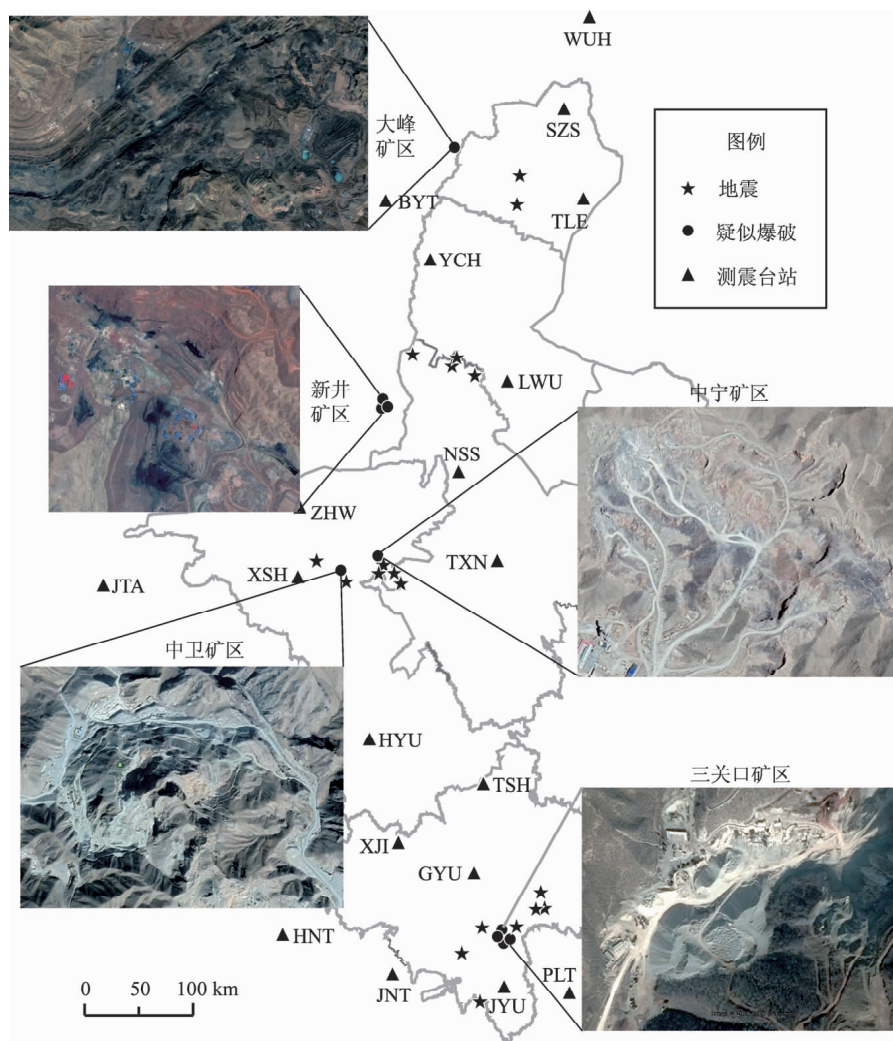


图1 疑似爆破、地震及矿区分布图(矿区影像图来自 GoogleEarth)

Fig. 1 Distribution of suspected blasting events, earthquakes and mining area (images of mining area come from GoogleEarth)

2 计算结果

由表1可见,异常事件的视应力明显偏小,最小值为0.059 bar,最大值为0.283 bar;而地震事件的视应力值明显偏大。绘制4个不同区域的异常事件与地震事件的视应力对比图(图2),结果显示地震事件的视应力值均较异常事件大。由于异常事件的震级为 $M_L 2.5$, $M_L 2.6$ 和 $M_L 2.8$,同样选取这3个

震级的地震事件,求取相同震级的视应力平均值(图3)。由图3可见:①异常事件的视应力与震级无关,数值较小且比较稳定;②地震事件的视应力随着震级增大而增大,与震级之间存在正相关关系,这一点与已有研究一致性较好(Mayeda, Walter, 1996; Izutani, Kanamori, 2001; 陈学忠等, 2011; 李艳娥等, 2015);③随着震级增大,地震事件与异常事件的视应力比值由4倍增加到7倍,显示出异常事件明显的低视应力特征。

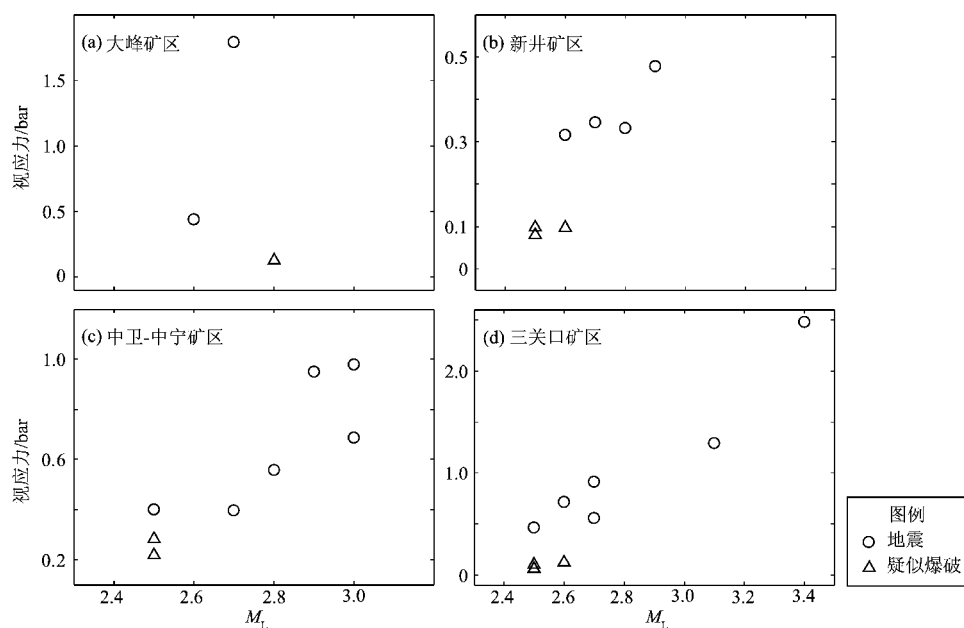


图2 地震事件与疑似爆破的视应力对比图

Fig. 2 Comparison of apparent stress of suspected blasting events and earthquakes

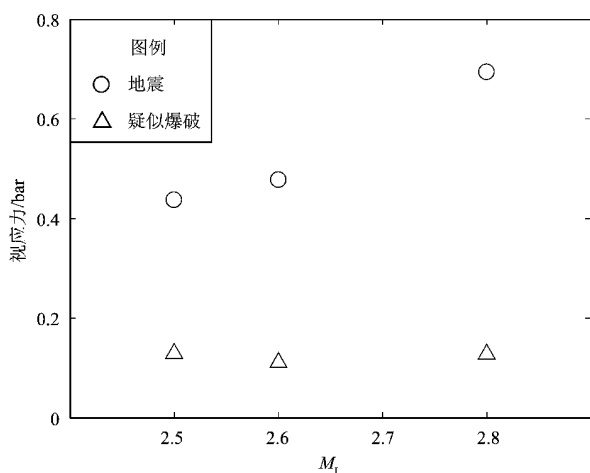


图3 相同震级的地震与疑似爆破的视应力平均值对比图

Fig. 3 Mean value of apparent stress of suspected blasting events and earthquakes with the same magnitude

3 异常事件分析与讨论

3.1 发生时刻与位置

统计发现, 本文异常事件发生时刻较集中, 具有爆破事件发生时间较固定的特点。相反, 地震事件的发生时刻相对分散, 具有明显的随机性。异常事件震中分布图(图1)显示, 不同区域的事件分布均比较集中, 显示出发生地点的固定性特

点。将异常事件震中投影到谷歌地图上, 这些异常事件的震中均位于采煤区或采矿区附近(距离 <5 km), 并且与矿区的距离均在定位误差范围内。由此初步判定异常事件可能为爆破事件。

3.2 P波初动方向

分析异常事件和地震事件的P波垂直分量初动方向, 发现前者的初动方向全部向上, 后者的初动方向有上有下。分析原因如下: 爆破是膨胀源, 产生的压缩波无象限分布, P波垂直分量初动应都为向上; 地震是岩石的破裂或错动, 产生的压缩波有象限分布, P波垂直分量初动方向有向上也有向下(中国科学院地球物理研究所, 1977)。因此, 异常事件的P波垂直分量初动方向一致向上是符合膨胀源爆破特征的。

爆破过程中岩石直接受到的力是正压力, 没有剪切力, 因此爆破直接产生的波只有P波没有S波, 但由于岩石的不均匀性, 破裂过程不能沿着初始力的方向破裂而发生切变, 产生S波, 因此爆破有较强的P波群, S波相对偏弱(赵永等, 1995; 王婷婷, 边银菊, 2011)。本文分析了异常事件的波形特征, 发现多数台站记录波形存在P波相对S波更加发育或发育相当的现象。该现象与爆破产生的波形特征吻合。由于篇幅有限, 仅给出表1中4号异常事件和28号地震事件的NSS(牛首山)台记录的垂直向波形(图4)。图4显示前者P波比较发育, 后者S波比较发育。

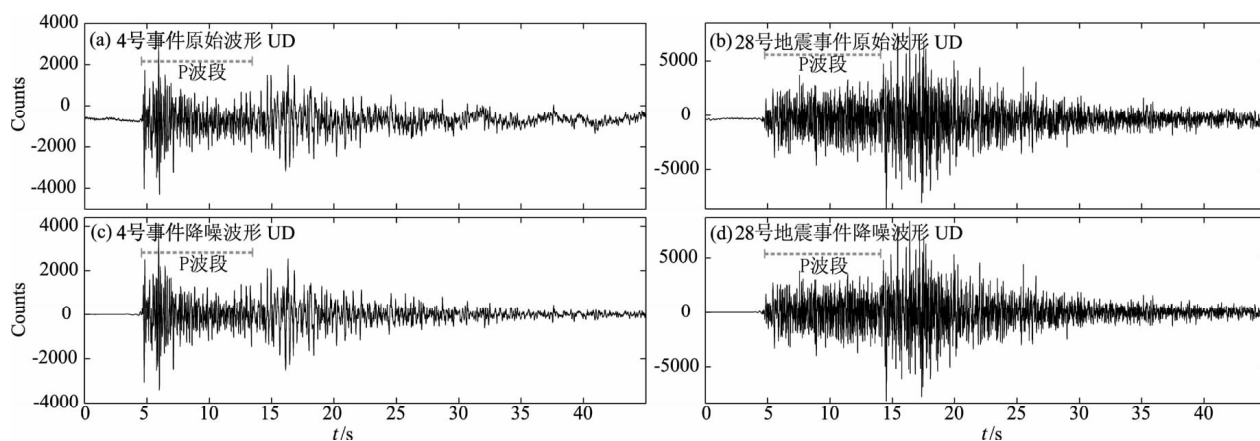


图4 NSS台记录的疑似爆破(a)与地震事件(b)的垂直向原始波形及其相应降噪波形(c, d)

Fig. 4 Vertical original waveforms of suspected blasting event (a) and earthquake (b) recorded by the NSS station and their corresponding noise reduction waveforms (c, d)

3.3 波形互相关

爆破具有发生地点固定的特点, 因此发生于同一矿区的爆破应属于重复记录事件, 同一台站记录的不同事件的波形相似度应该非常高。本文选取了三关口矿区和新井矿区同一台站记录的所有异常事件的P波垂直向波形, 分别计算了同一

矿区不同事件的波形相关系数(图5, 6)。结果表明: ①三关口矿区4次异常事件的波形相关系数最小值为0.3886, 最大值为0.7649, 平均为0.6271(图5c), 表明4次事件波形存在较好的相关性; 如果仅分析其中3次相似度较高的波形事件(图5b), 得到相关系数的最小值和最大值分别

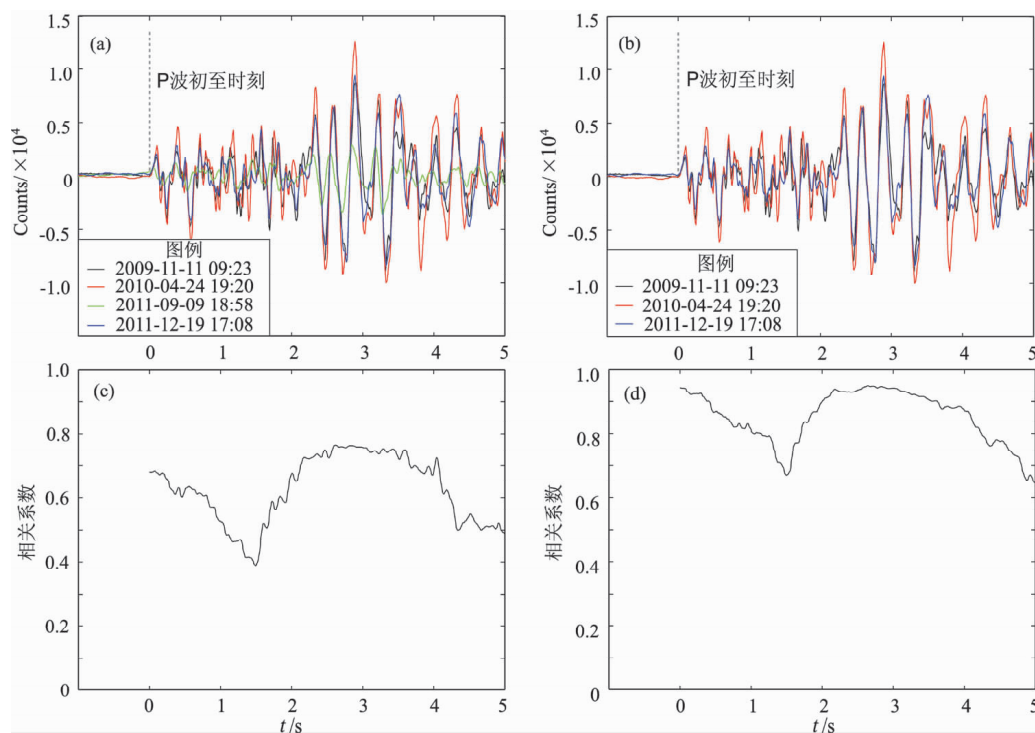


图5 三关口矿区4次疑似爆破事件(a)和3次疑似爆破事件(b)

P波垂直向记录波形及其相关系数(c, d)

Fig. 5 Vertical waveforms of P wave of 4 suspected blasting events (a) and 3 suspected blasting events (b) and their correlation coefficients (c, d) in Sanguankou mining area

为 0.644 6 和 0.949 2, 平均值为 0.852 4, 显示出波形的高度相似性; 分析认为三关口矿区 4 次异常事件中至少 3 次发生于同一个矿区, 另外一次很可能发生于邻近的矿区。②新井矿区 3 次异常事件原始波形 (图 6a) 的相关系数偏小, 并且相关系数随着时间变化逐渐变小 (图 6c); 对 3 次事件的原始波形进行 3 ~ 4 Hz 的带通滤波 (图 6b), 再次计

算其相关系数 (图 6d), 平均值为 0.904 8, 说明波形相似度非常高。因此我们判定新井矿区 3 次异常事件也是发生于同一矿区的。综上所述, 通过波形互相关分析, 充分印证了多次事件发生于同一地点的可能性非常大, 明显符合爆破发生地点固定的特点。虽然重复地震也存在波形相关性较高的可能, 但本文异常事件并不是重复地震。

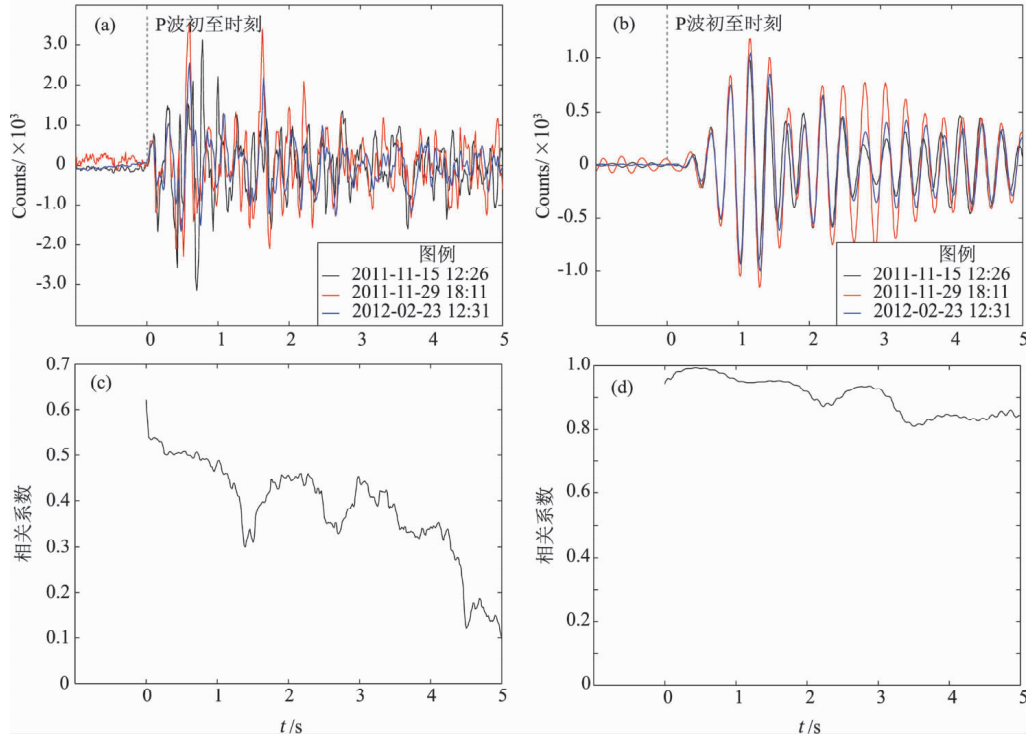


图 6 新井矿区 3 次疑似爆破事件 P 波垂直向记录波形 (a) 和带通滤波 (3 ~ 4 Hz) 后的波形 (b) 及其相关系数 (c, d)

Fig. 6 Vertical waveforms of P wave of 3 suspected blasting events (a), waveforms after bandpass filtering (3 ~ 4 Hz) (b) and their correlation coefficient (c, d) in Xinjing mining area

3.4 小波包分量比

已有研究表明 (杨选辉等, 2005; 曾宪伟等, 2008a, b), 利用小波包分量比方法可以实现地震与爆破的识别。本文选取的事件波形数据采样率为 100 Hz, 根据 Nyquist 采样定理, 可检测信号频带为 0 ~ 50 Hz。选取 P 波垂直向记录的 512 个数据点, 每个事件的记录台站如表 1 所示, 采用 11 阶 Daubechies 小波基对数据段进行尺度 $j=3$ 的小波包分解, 频带 (0 ~ 50 Hz) 被均匀分成 2^3 个, 分别以 E_0 , E_1 , E_2 和 E_3 表示频带 0 ~ 6.25 Hz, 6.25 ~ 12.5 Hz, 12.5 ~ 18.75 Hz 和 18.75 ~ 25 Hz 内的信号能量。根据能量计算公式 (曾宪伟等, 2008a),

可以得到每个事件不同频带内的能量比 E_0/E_1 , E_0/E_2 和 E_0/E_3 。

由图 7 可见: ①异常事件与地震事件的能量比之间存在明显分界线, 前者均大于后者, 说明异常事件很可能是非天然地震事件; ②异常事件的能量比随着频率增加而快速增大, 即异常事件低频端能量较高, 高频端能量较低, 且频率越高能量越低, 说明异常事件波形具有爆破波形低频成分较发育的特征。以上分析结果表明异常事件应为爆破事件。因为爆破往往发生于地表, 波形在传播过程中有较长的路程在浅层, 频率越高衰减越快, 显示出低频成分

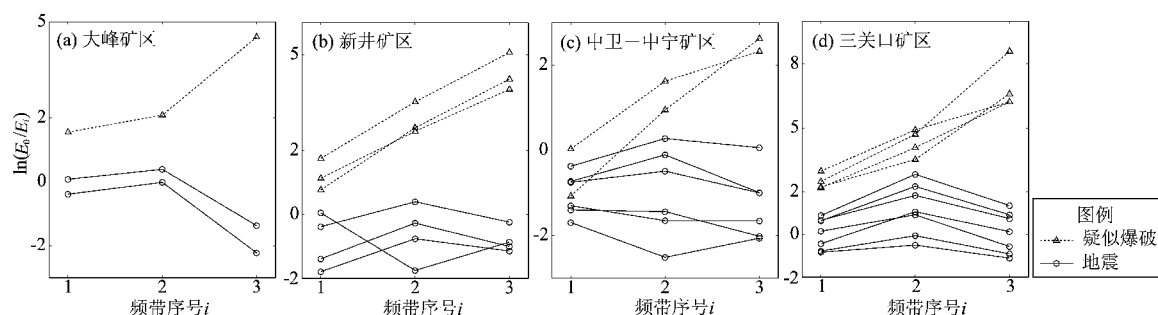


图7 地震事件和疑似爆破事件不同频带能量比值图 [横轴 i ($i=1, 2, 3$) 与纵轴的 E_i 对应, 代表3个不同的频带]

Fig. 7 Energy ratios of earthquakes and blasting events in different frequency bands (the horizontal axis i corresponds to vertical axis E_i ($i=1, 2, 3$) and represents 3 different frequency bands)

较发育的波形特征 (曾宪伟等, 2008a)。

图8为地震事件与落实的爆破事件之间的能量比值图, 显然二者之间的区别与图7的分析结果完全一致, 由此进一步明确了异常事件应为爆破事件。

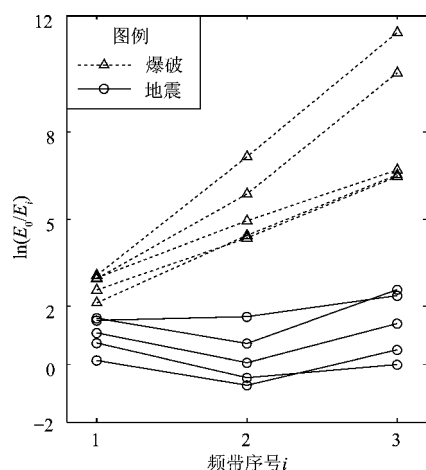


图8 地震事件、落实爆破事件不同频带能量比值图 (改绘自曾宪伟等 (2008), 横轴 i 同图7)

Fig. 8 Energy ratio of earthquakes and blasting events in different frequency bands (modified from Zeng *et al*, 2008, the horizontal axis i is the same as that shown in Fig. 7)

3.5 讨论

地震与爆破发生模式的不同主要是二者在视应力方面存在差异。地震主要受控于区域构造应力的影响, 区域应力积累到一定程度, 达到断层发生错动所需的临界应力值, 积累的应力往往以地震的方式释放出来, 并且很难一次性释放完全, 往往以余震的形式逐步释放掉剩余的应力。而震源区应力释放是否完全可以通过主震与余震

视应力的高低给出估计 (盛书中, 万永革, 2008)。地震的发生是断层错动的结果, 伴随着应力释放往往表现为一个或快或慢的过程; 爆破则是一个爆炸源的瞬时能量释放, 与地震的发生模式显然不同。另外, 地震与爆破的发生深度也存在明显的差异。因此, 地震与爆破的能量释放造成的地面振动势必存在差异, 记录波形高低频成分的差异即是一种表现形式。研究表明 (Zuniga *et al*, 1987; Baltay *et al*, 2011), 视应力高的地震具有相对多的高频能量, 相反, 视应力低的地震则具有相对多的低频能量。由此可以解释低频成分比较发育的爆破事件往往是低视应力事件的原因。

4 结论

本文通过分析宁夏及邻区异常低视应力事件的发生时间和震中位置等, 初步判定异常事件为疑似爆破事件。利用P波初动方向、波形互相关特征和不同频带能量比值等方法分析异常事件的波形特征, 得出主要结论为: 异常事件发生时刻较固定, 发生地点较集中, 并且P波垂直向初动均向上; 同一台站记录的同一区域的不同异常事件波形相关系数较大; 小波包分量比方法表明异常事件波形低频信号比较发育。以上分析结果均表明这些异常低视应力事件应为爆破事件。分析异常事件视应力较低的原因, 认为爆破事件低频成分比较发育, 波形低频能量较高造成了视应力的低值异常。

爆破事件的视应力一般较地震事件低得多,

且与震级大小无关,而地震事件的视应力随着震级增大而增大。因此,视应力作为地震与爆破识别的一项手段或许是可行的。对于视应力值异常低的事件,应首先判定其是否为天然地震事件,不宜直接应用于分析研究工作;如果事件的性质判定有误,把爆破作为天然地震进行区域视应力的分析研究工作,将给区域应力水平的判定带来偏差。本文认为地震与爆破在视应力方面存在差异,但仍需要更加深入的研究分析。一方面,虽然目前视应力计算方法较为成熟,多数研究结果表明天然地震视应力与震级存在一定正相关关系,但视应力计算结果还是受多方面因素影响,部分地震的视应力计算结果存在一定偏差也是十分常见的。另一方面,计算视应力时没有考虑刚度系数 μ 的不同,使用了同一个值,所以视应力更准确的计算需要考虑 μ 的不均匀性(盛书中,万永革,2008)。同时,由于本文计算视应力的样本量有限,视应力计算结果是否可以明确作为地震与爆破的识别手段尚需要根据后续不断积累的大样本计算结果进行更加深入的研究。

中国地震局地球物理研究所李艳娥副研究员提供了视应力计算程序,审稿专家对文章提出了建设性修改意见,在此一并致谢。

参考文献:

- 陈丽娟,陈继锋,龚丽文,等. 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前甘肃南部地区视应力变化[J]. 中国地震, 33(4): 521–531.
- 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[J]. 地震, 31(4): 15–25.
- 陈学忠,李艳娥. 2007. 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s 5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化[J]. 中国地震, 23(4): 327–336.
- 陈学忠,王小平,王林瑛,等. 2003. 地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性[J]. 国际地震动态, 295(7): 1–4.
- 康建红,张洪艳,张宇,等. 2016. 2013 年吉林前郭强震群序列地震视应力变化特征[J]. 地震地磁观测与研究, 37(1): 1–7.
- 李艳娥,陈丽娟,王生文,等. 2015. 山东地区地震视应力时空变化特征研究[J]. 地震, 35(2): 80–90.
- 李艳娥,陈学忠,付虹. 2012. 2007 年云南宁洱 $M_s 6.4$ 地震前滇西南地区震源动力学参数时空变化特征[J]. 地震, 32(1): 28–39.
- 彭关灵,赵小艳,刘自凤,等. 2018. 2018 年云南通海 $M_s 5.0$ 地震前视应力时空特征[J]. 地震研究, 41(4): 487–493.
- 乔慧珍,程万正,陈学忠. 2006. 安宁河—则木河断裂带地震视应力研究[J]. 地震研究, 29(2): 125–130.
- 阮祥,程万正,乔慧珍,等. 2010. 马边—大关构造带震源参数及应力状态研究[J]. 地震研究, 33(4): 294–300.
- 盛书中,万永革. 2008. 地震视应力及其物理意义的探讨[J]. 地震地磁观测与研究, 29(1): 36–43.
- 田小慧,金春华,何秋菊. 2015. 宁夏及周边地区爆破的基本概括[J]. 防灾减灾学报, 31(3): 61–66.
- 王生文,李艳娥,郭祥云,等. 2014. 1999 年 11 月 29 日岫岩 $M_s 5.4$ 地震序列视应力的再研究[J]. 地震, 34(3): 50–61.
- 王婷婷,边银菊. 2011. 识别天然地震和人工爆破的判据选择[J]. 地震地磁观测与研究, 32(6): 62–67.
- 吴忠良,黄静,林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 24(3): 293–301.
- 杨选辉,沈萍,刘希强,等. 2005. 地震与核爆破识别的小波包分量比方法[J]. 地球物理学报, 48(1): 148–156.
- 易桂喜,闻学泽,辛华,等. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 56(4): 1112–1120.
- 曾宪伟,赵卫明,盛菊琴. 2008a. 小波包分解树结点与信号子空间频带的对应关系及其应用[J]. 地震学报, 30(1): 90–96.
- 曾宪伟,赵卫明,盛菊琴,等. 2008b. 应用小波包识别宁夏及邻区的地震和爆破[J]. 地震研究, 31(2): 142–148.
- 赵永,刘卫红,高艳玲. 1995. 北京地区地震、爆破和矿震的记录图识别[J]. 地震地磁观测与研究, 16(4): 48–54.
- 郑建常,张永仙,潘元生,等. 2006. 青岛崂山地区环境应力与视应力变化分析[J]. 地震, 26(3): 123–130.
- 中国科学院地球物理研究所. 1977. 近震分析[M]. 北京:地震出版社.
- Baltay A, Ide S, Prieto G, et al. 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress[J]. Geophysical Research Letters, 38, L06303, doi:10.1029/2011GL046698.
- Choy G L, McGarr A. 2002. Strike-slip earthquake in the oceanic lithosphere: observation of exceptionally high apparent stress[J]. Geophys J Int, 150(2): 506–523.
- Izutani Y, Kanamori H. 2001. Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquake in Japan[J]. Geophysical Research Letters, 28(20): 4007–4010.
- Jiménez A, García J M, Romacho M D. 2005. Simultaneous inversion of source parameters and attenuation factor using genetic algorithms[J]. Bull Seism Soc Amer, 95(4): 1401–1411.
- Mayeda K, Walter W. 1996. Moment, energy, stress drop, and source spectra of western United States earthquake from regional coda envelopes[J]. J Geophys Res, 101(B5): 11195–11208.
- Snoke J A. 1987. Stable determination of (Brune) stress drops[J]. Bull Seism Soc Amer, 77(2): 530–538.
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region[J]. J Geophys Res, 73(14): 4681–4694.
- Wyss M. 1970. Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches[J]. Geophys J R astr Soc, 19: 479–484.
- Zuniga F R, Wyss M, Wilson M E. 1987. Apparent stresses, stress drops, and amplitude ratios of earthquakes preceding and following the 1975 Hawaii $M_s = 7.2$ main shock[J]. Bull Seism Soc Amer, 77(1): 69–96.

Discovery and Research of “Earthquake Events” with Very Low Apparent Stress

ZENG Xianwei, LUO Hengzhi, ZHU Pengtao, CUI Jin

(*Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China*)

Abstract

We calculate the apparent stress of moderate and small earthquakes in Ningxia area and find that the apparent stress values of some events decrease multiply relative to other events of the same magnitude. Combined with the occurrence time and epicenter of the events, we initially identified these abnormal events as doubtful blasting events. Then, by analyzing the P-wave initial moving direction, waveform cross-correlation and energy ratio of different frequency bands etc., we find that these abnormal events have some common features, such as the vertical initial motion of P wave is upward, the correlation coefficients of waveforms in the same region recorded by the same station are larger, and the low frequency signals of waveforms are more developed. Basis on it, we confirm that these abnormal events should be blasting events.

Keywords: apparent stress; blasting events; waveform cross-correlation; spectral component ratio of wavelet-packet