

栾奕、杨宏峰、王宝善, 2016, 大容量气枪主动源波形资料处理(一): 云南宾川, 中国地震, 32(2), 305~318。

大容量气枪主动源波形资料处理(一): 云南宾川

栾奕¹⁾ 杨宏峰¹⁾ 王宝善²⁾

1) 香港中文大学理学院地球系统科学课程, 香港新界沙田大埔道

2) 中国地震局地球物理研究所(地震观测与地球物理成像重点实验室), 北京 100081

摘要 宾川气枪地震信号发射台以水库大容量非调制气枪阵列为震源, 可以连续不断地激发重复性极高的地震信号。本文利用其 2013 年的数据, 对地下介质进行了观测。由于水库水位的变化对震源波形及远处台站接收到的地震波形会产生影响, 因此, 为了区分介质变化与震源变化, 研究了陆上水库环境下激发气枪震源所产生的地震波形的特征和合适的处理流程。结果表明: ① 水库水位变化较大时, 同一台站记录的地震波形之间的互相关系数过小, 不能直接进行叠加处理, 需进行震源聚类分析, 震源聚类受水位变化量的控制; ② 为消除水位的影响, 进行了反褶积处理, 当震中距小于 10km 时, 对不同水位激发的信号进行叠加再进行反褶积的效果优于直接进行叠加的效果; ③ 通过互相关计算和信噪比分析发现, 4 个台站的波形变化可能是由地下介质变化引起的。

关键词: 大容量气枪 相位加权叠加 互相关 反褶积 地下介质变化

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0305-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震的发生是长期积累的应变在短期快速释放的过程, 其孕育及破裂过程与断层区介质属性密切相关 (Yang et al, 2014; Yang, 2015; Weng et al, 2016)。研究地下介质属性及应力状态变化对深入了解地震的孕育、发生及震后恢复过程有重要作用 (Li et al, 2003)。然而, 在孕震深度上测量应力的变化却十分困难。虽然应力状态可通过研究地震波的衰减、各向异性等获得, 但对地震波速度变化的精确测量则是更为有效的研究方法 (罗桂纯等, 2008)。在地震发生前后, 由于同震破坏和震后愈合效应, 断层区的介质性质会随时间发生变化 (Yang et al, 2010, 2011; Yang, 2015)。而在孕震期间的应力积累及相应的裂隙变化, 也会使断层区介质性质随时间产生变化。大量实验室研究表明, 地壳岩石的地震波速度明显地随应力而变化, 敏感度为 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ (Birch, 1960, 1961)。这种依赖关系是由于作用在裂隙

[收稿日期] 2016-04-08; [修定日期] 2016-06-24

[项目类别] Research Grant Council (grant 2191093)、国家自然科学基金项目 (41561164018)、云南省陈颢院士工作站 (2014IC007) 项目资助

[作者简介] 栾奕, 女, 1990 年生, 主要从事气枪主动源探测、走时变化及背景噪声等方面研究。

E-mail: yluan@link.cuhk.edu.hk

表面的应力变化导致微裂隙的张开/闭合所致(Nur, 1971)。因此,应力的变化可以通过测量地震波速度的变化获得,而精确测量地下介质的波速变化则需要高质量的、可控的重复震源。由于天然地震的发生受地震重复性以及时空分布的制约(Wang et al, 2012),而且不可控制,因此通常使用主动震源来监测地震波速度的变化,以期对孕震深度的岩石应力变化及岩石破裂愈合状态提供信息(Li et al, 2003)。目前,利用重复地震及主动源(压电陶瓷、气枪阵列、可控震源、炸药等)已经进行了许多探测地下速度结构变化的有意义的尝试(Schaffet al, 2004; Chen et al, 2007; Silver et al, 2007; Niu et al, 2008; Wang et al, 2008)。

在所有人工震源中,气枪阵列以其可重复性高、探测距离远、能量高效、环保等优点已经被广泛应用于海洋及陆地的地下结构探测中(Chen et al, 2007; Wang et al, 2010; Xu et al, 2014)。为了对地震频发的滇西地区,特别是对位于其中的红河、程海 2 大断裂带地下的波速变化进行监测,2011 年 4 月在云南省大理州宾川县大银甸水库建立了世界上第 1 个气枪地震信号发射台站(图 1),该台可以连续不断地向地下发射传播距离远、重复性高的地震信号(Wang et al, 2012; Chen et al, 2014; 杨微等, 2013)。

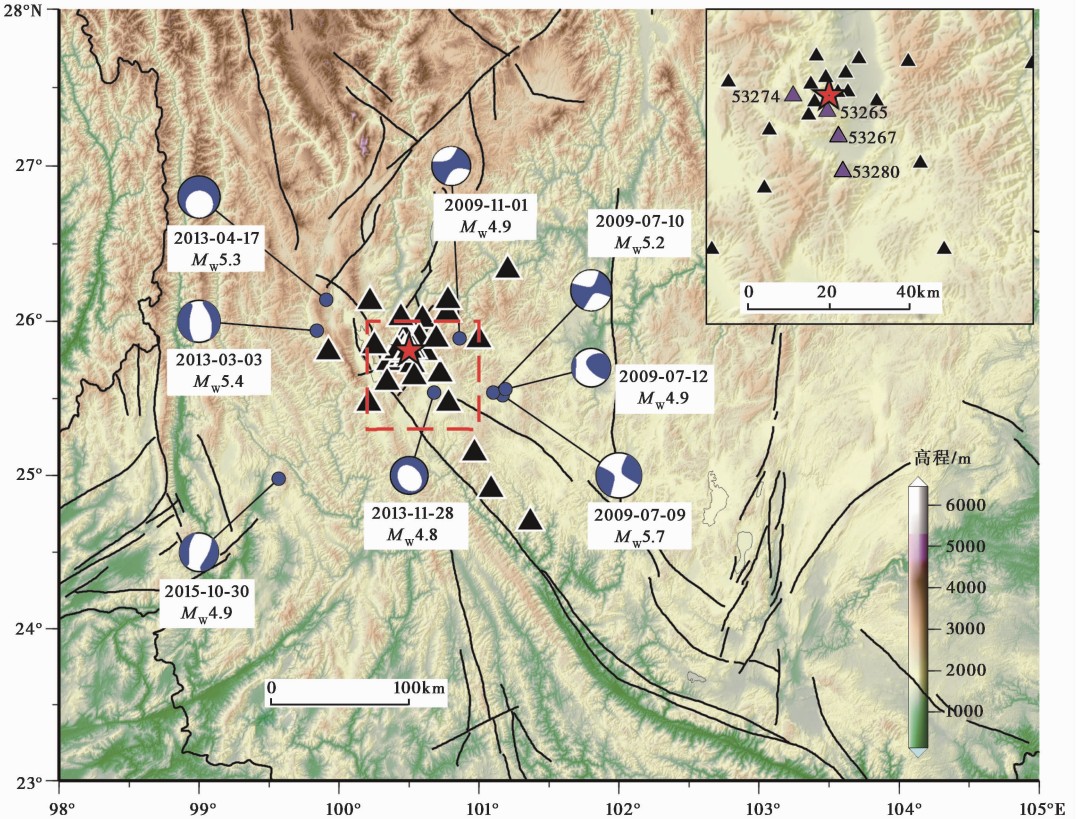


图 1 宾川实验站的位置以及地震台站分布

红色五角星为宾川实验站;黑色三角形为地震台站;黑色实线为云南的主要活动断层;蓝色圆点为天然地震震源位置;震源球为 GCMT 解;右上小方框显示放大后的台站位置,紫色三角形为本文研究认为地下可能存在介质变化的台站

相比于海洋中的气枪信号,陆地水库水深较浅,水域面积有限,且水位随季节变化明显,气枪震源的信号并非完全重复(图2)。因此,直接对各台站记录的气枪信号进行叠加得到的走时变化并不能反映真实的地下介质变化信息(图2)。林建民等(2010)根据陆地水库中水听器记录到的气枪信号,对水库气枪的近场子波特性与沉放深度、工作压力等激发参数之间的关系进行了研究,但是没有给出更远处岸上地震台站记录到的气枪信号与这些激发参数之间的关系(陈蒙,2015)。远处岸上地震台站记录到的气枪信号受震源的影响程度与近场气枪信号受震源的影响间存在一定差别,因而有必要对震源变化的影响范围以及远场气枪信号的影响因素等进行分析,以了解该震源系统的特性。同时,对近场气枪信号与远场气枪信号分别选用合适的处理方法,以使气枪信号能够更准确地提供地下介质变化等信息。

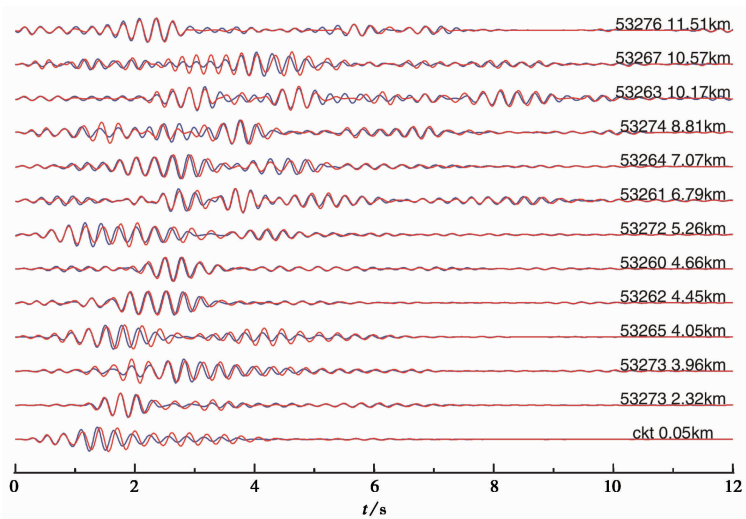


图2 不同台站在第7天(红色)、第80天(蓝色)的气枪地震信号垂直分量波形对比

2013年第1次激发实验于1月7日进行;第7、80天水位分别为17.04、13.98m;气枪信号经3~5Hz滤波处理

1 主动源探测宾川实验站

宾川实验台站位于滇西南,该区域构造结构以印度板块与欧亚板块的碰撞为背景,地质构造十分复杂,是我国大陆内部地震活动最为强烈的地区之一。宾川实验站位于西南红河断裂、北部剑川断裂和东部程海断裂等围成的三角地块之间(24.5°~28.0°N, 98.5°~101.5°E)。地震信号发射台位于距宾川县以西、距其7km的大银甸水库,水库汇水面积407.8km²。水库周围架设了40个流动地震台站(图1),使用了Guralp CMG-40T短周期流动地震计和Reftek 130B数据采集器,采样率为每秒100个数据点。

2013年1~12月间,在宾川气枪地震信号发射台站进行了1077次实验。每次由1个4条气枪组成的气枪阵列进行激发,激发压力为15MPa,枪阵的沉放深度为8m。大部分实验在14~22时进行,平均每天激发15次。由于降雨以及周围居民生活、灌溉用水,大银甸水库的水位会随季节发生明显的变化(>20m)。其中,水位较低的5~8月无法进行激发实验。

我们选用34个流动地震台站的数据进行分析,其中,最近的台站ckt距震源50m,最远的台站距震源151km。单次气枪激发信号记录可在20km的范围内清晰可见,在更远处的台

站由于信噪比的降低则信号难以分辨(图 3(a))。但由于气枪信号重复性好,因此可通过对激发信号进行叠加来提高信噪比。本研究中我们采用了相位加权叠加方法(Schimmelet al, 1997)。相较于线性叠加,相位加权叠加后的波形具有更高的信噪比,1000 次叠加的波形在 150km 范围内非常清晰(图 3(b))。

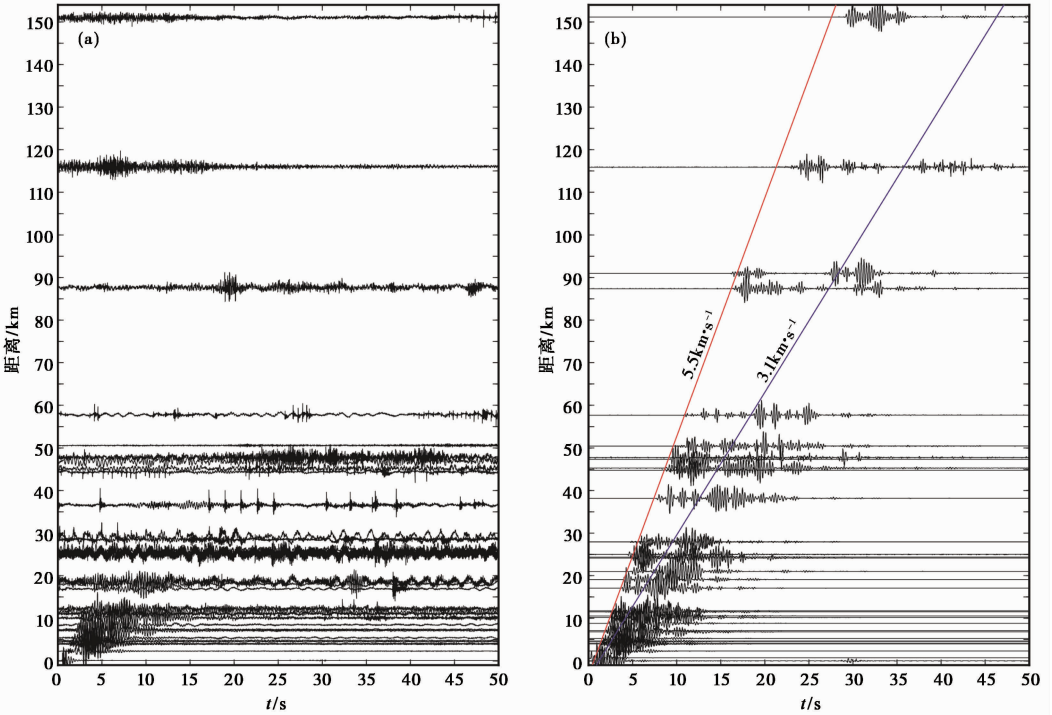


图 3 流动测线记录的第 7 天单次激发信号(a)以及与 1000 次定点激发信号相位加权叠加后的结果(b)
信号均为垂直分量;纵波视速度约为 5.5km/s;横波视速度约为 3.1km/s

2 气枪震源

2.1 气枪信号特征

首先对气枪地震信号进行了去均值、去趋势处理。为了确定气枪信号的有效频率范围,对其信号利用 S 变换进行了时频分析(Stockwell et al, 1996)。信号 $h(t)$ 的 S 变换为

$$S_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

其中, τ 为时移参数; f 为频率;窗函数 $w(t, f)$ 为高斯窗函数,即

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} \quad (2)$$

气枪阵列单次激发(水库水位 12.5m)产生的气枪原始地震信号及其时频图如图 4 所示。首先以参考台为例,距大容量非调制气枪阵列 50m 的参考地震台站 ckt 的原始记录可显示 2~50Hz 的能量,时间集中在 0.5~1.0s,最大振幅约为 12Hz。对于更远处的台站如 53278 台站(距震源 2.3km)的时频分析结果显示,主要能量集中在 2~5Hz, 10~20Hz 的能量幅度较小。

随着震中距的增加,53281 台站记录到的气枪地震信号主频为 3~5Hz,5~10Hz 有较小的 P 波能量。53257 台站由于受不同频率噪声的影响,难以识别清晰震相(图 4(d))。以上分析显示,气枪信号主要能量集中在 3~5Hz,因此,可在此频带采取带通滤波。

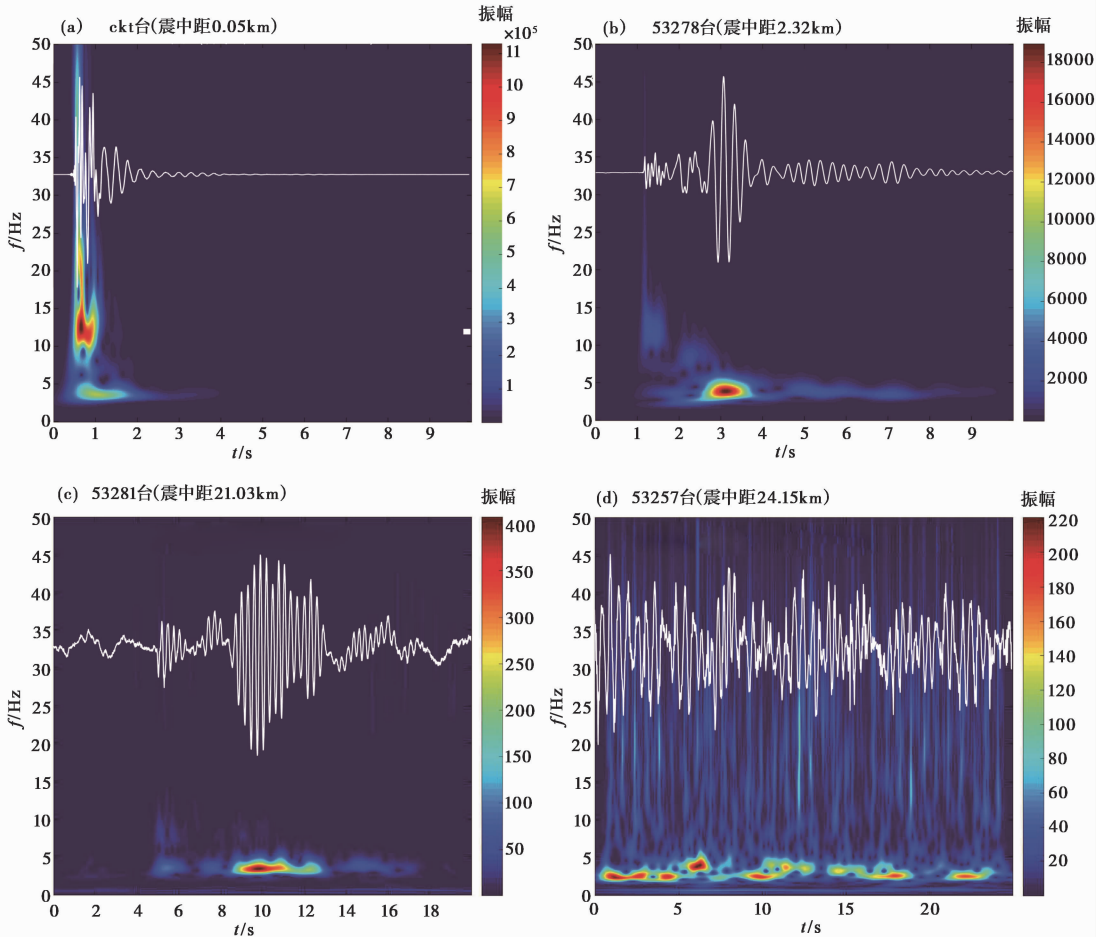


图 4 不同震中距的台站记录到的气枪信号波形及其 S 变换时频图

气枪激发的地震信号主要由 2 部分组成,即高压气体瞬间释放产生的压力脉冲和气泡振荡产生的气泡脉冲(林建民等,2010)。此外,在压力脉冲与气泡脉冲形成的同时,也会产生这些脉冲的虚反射,表现为负脉冲(陈浩林等,2008)。压力脉冲的频率较高,气泡脉冲的频率较低。如在参考台 ckt,其压力脉冲主频为 12Hz,持续约 0.3s;气泡脉冲主频为 4Hz,持续时间约 1s(图 4(a))。在海洋石油勘探中为了提高探测的分辨率,主要使用压力脉冲,气泡脉冲是需要压制的噪声。但对于深部探测,为了提高探测的距离和深度,主要使用低频气泡脉冲。为此,下面我们主要对气枪阵列产生的气泡脉冲进行分析。

2.2 震源聚类与频率域反褶积

大银甸水库的水位由于季节性灌溉而变化,冬季水位可达 20m,而夏季不足 8m(图 5(a))。水位变化会导致气枪震源函数的变化,致使气枪震源波形并非完美重复(图 2、图 5

(c)。我们对所有参考台的波形利用S变换进行时频分析后发现,水位变化会导致信号主频发生变化,随着水库水位的增加,气枪信号的主频也增大(图5(b))。水位的变化也导致震源的波形不重复,其波形变化与水位变化相一致,水位较高时,气泡振荡周期变短;水位较低时,气泡振荡周期变长(图5(c))。

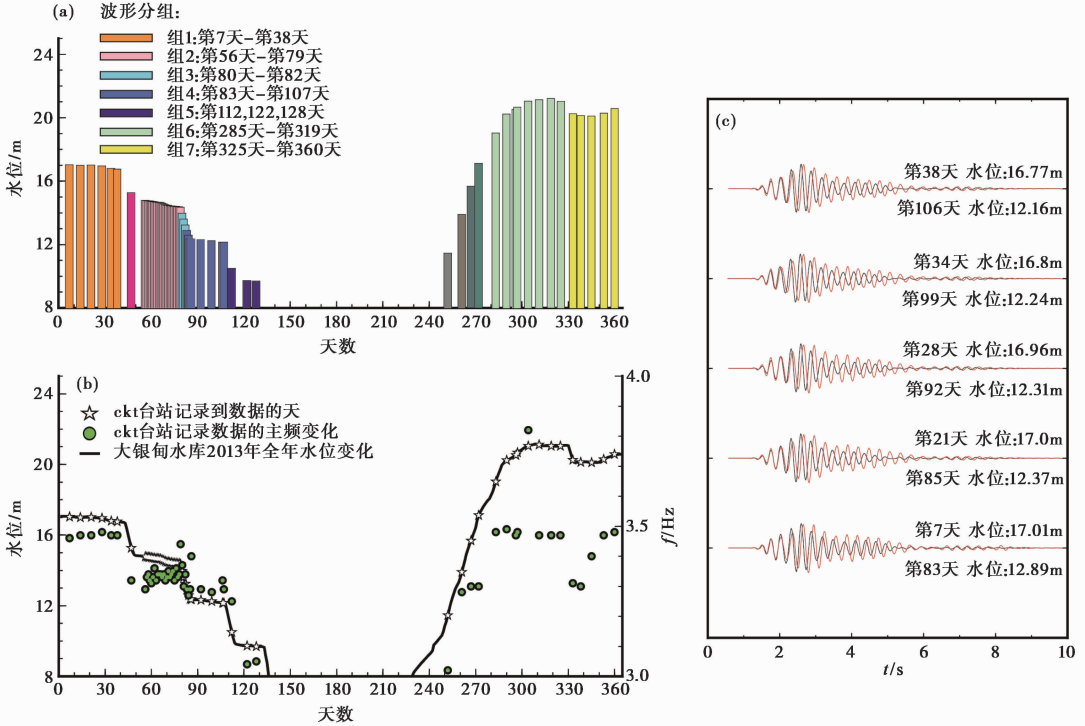


图5 参考台 ckt 的波形聚类及频率变化分析

(a) 2013年不同天接收的气枪信号的波形聚类(相同灰度为同一组波形);(b) 2013年不同天接收的气枪信号的主频变化;(c) 不同天的垂直分量气枪信号波形对比(气枪信号经3~5Hz滤波处理)

为了系统地研究水位变化引起的震源函数的变化,我们对参考台 ckt 的波形利用互相关进行聚类分析(Yang et al, 2009; 王伟涛等, 2012)。在此,未对远处台站进行聚类分析,这是因为由于受信噪比的影响,远处台站单天叠加波形之间的相关系数可能变动很大,而且不同台站之间的相关系数阈值不同,聚类结果也未必一致。而参考台 ckt 距震源很近,可以作为近似源函数,故对波形的聚类分析非常合适。首先,拾取参考台站的初至P波到时 t_0 ,互相关窗口长度为5s,即P波之前0.5s、之后4.5s。将互相关方法应用于参考台站 ckt 在2013年记录到的数据后发现,单天波形的互相关系数大于0.995,因此,仅对每天的单次激发进行相位加权叠加。由于单天实验激发次数最少为14次,故对单天数据进行14次叠加,再对单天叠加数据进行波形互相关,最后根据相关系数将参考台站的波形分为7组(图5(a))。同组波形的互相关系数大于0.99,如第7~38、333~360天。第47、252、261、267、272天由于与其他组的相关系数较低,因此不归为任何一组(图5(a))。不同天之间的相关系数明显受水位变化的影响,但水位变化并非唯一的影响因素。如第1组与第272天,平均水位差为0.09m,相关系数为0.89,小于第272天与第2组的相关系数0.928(平均水位差为2.58m),也小于第

272 天与第 283 天的相关系数 0.973 (平均水位差为 1.89m)。这可能是由于受震源本身的影响, 或季节变化导致水库水位及地下介质变化的结果。

为了研究水位变化引起的波形变化是否仅集中在参考台或某一距离范围内, 我们对所有台站的波形根据参考台聚类结果进行了相位加权叠加, 并对叠加后的波形进行比较。由于第 4 组数据包含第 112、122、128 天共 42 个事件的数据, 因此, 为了保证不同组的叠加次数相同, 对不同台站记录气枪信号的同组波形均进行 42 次叠加。第 6 组数据只被个别台站记录到, 因此, 仅对比其他 6 组波形。对比结果显示, 水位变化不仅影响近场气枪信号, 而且明显影响远场气枪信号(图 6(a))。不同水位下激发的气枪信号初至 P 波到时相互吻合, 但后续震相到时差较大, 因此, 若要利用不同水位下激发信号来探测地下介质变化, 则有必要去除震源变化的影响。

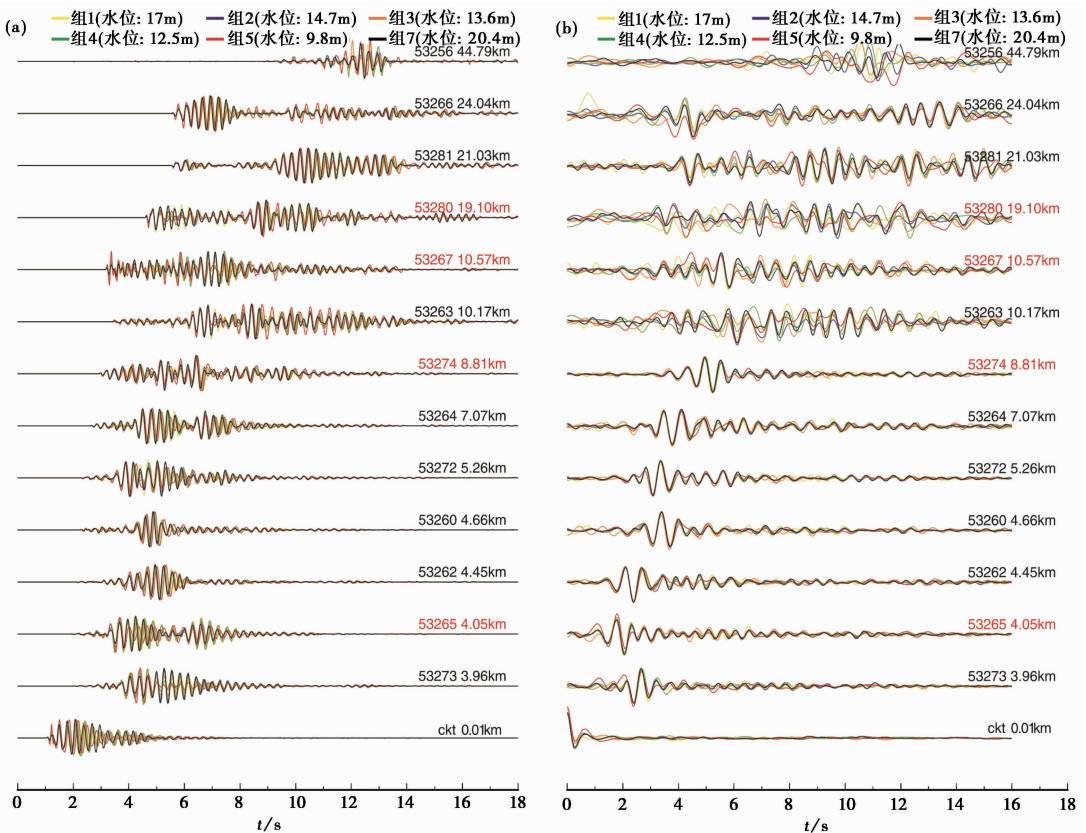


图 6 频率域反褶积前、后的走时剖面(3~5Hz 滤波)

(a) 不同台站记录信号的同组波形进行 42 次相位加权叠加后 6 组波形的对比结果; (b) 对各组波形进行 42 次叠加后分别对不同的震源函数(参考台记录)进行反褶积的结果; 标红的台站可能反映介质的变化

为了去除震源的影响, 我们利用参考台记录的信号来近似震源函数 $s(t)$, 将远台记录 $u(t)$ 与震源函数之间进行频率域水准反褶积(Helmberger et al, 1971)

$$u(t) = s(t) * g(t) \quad (3)$$

$$G(\omega) = \frac{U(\omega)S^*(\omega)}{\{S(\omega)S^*(\omega), \max\{S(\omega)S^*(\omega)\}c\}} \quad (4)$$

其中, * 为褶积算子; $g(t)$ 为震源到台站间的格林函数; $G(\omega)$ 为 $g(t)$ 的频谱; $U(\omega)$ 为 $u(t)$ 的频谱; $S(\omega)$ 为 $s(t)$ 的频谱; $S^*(\omega)$ 为 $S(\omega)$ 的复共轭; c 为水准因子, 用于控制振幅最小值, 以保证反褶积的稳定性。

首先根据聚类结果对各组波形进行 42 次叠加, 然后分别对不同的震源函数(参考台记录)进行反褶积(图 6(b))。选取水准因子 c 为 0.001, 进行反褶积的数据窗口为从 P 波到时至 P 波到时之后 16s。结果发现, 当震中距小于 10km 时, 各组反褶积后的波形互相吻合。当震中距大于 10km 时, 反褶积的结果无法很好匹配。

3 讨论与结论

如上所述, 云南宾川气枪震源信号主频为 3~5Hz, 建议在数据处理中先采用此频段的带通滤波。由于目前利用参考台的记录对远处台站叠加信号进行反褶积无法完全消除震源函数变化的影响, 因此建议, 首先对震源聚类分析, 再基于聚类分析的结果对同一组震源函数的信号在所有台站进行叠加以提高信噪比。

由于每一天的震源重复性很好, 相关系数大于 0.995, 故可对每一天的气枪信号作叠加。以 2013 年第 1 次激发实验(2013 年 1 月 7 日)的叠加信号作为参考波形, 将所有叠加信号对第 7 天进行互相关。若远处台站的后续信号与参考信号的相关系数变化小于参考台 ckt 的相关系数变化, 则由目前的数据和处理手段暂时无法推断远处台站下或射线路径上是否有介质变化; 反之, 则可能存在一定的地下介质变化或者信号接收到其他噪声的干扰。我们首先拾取各台站记录的初至 P 波到时 t_0 , 互相关窗口时长为 5s, 即 P 波到时之前 0.5s 和之后 4.5s, 各台站选取的互相关窗口长度一致, 主要对比 P 波部分。由于第 128~252 天水库水位过低, 无法进行激发实验, 且第 252~360 天的波形只被部分台站记录到, 因此选取第 7~128 天的记录进行分析。

图 7(a) 为不同震中距的台站在不同天记录的波形与第 7 天记录的波形互相关的结果。由图 7(a) 可见, 参考台站 ckt 不同天的波形与第 7 天波形的互相关系数变化与水位变化相一致。第 47 天, 水位下降 1.77m, 互相关系数从 0.999 降至 0.928。从第 56~80 天, 每天都进行激发实验, 数据密集, 互相关系数出现锯齿状起伏, 但由于水位平稳, 互相关系数维持在 0.92 左右。至第 112 天, 水位下降了 7.32m, 互相关系数降至 0.539。从第 128~252 天, 水位过低, 无法进行激发实验。第 272 天, 水位升至与第 7 天水水位差仅为 0.09m, 互相关系数升为 0.900。随着震中距的增加, 波形受水位变化的影响逐渐减小, 互相关系数的变化小于参考台站 ckt。在这些台站下方或者射线路径上即使有地下介质的变化, 目前的数据及叠加方法也无法区分该变化是水位变化所致, 还是真正的地下介质变化。

但是我们发现有 4 个台站(53265、53274、53267、53280)的互相关系数变化大于参考台站(图 7(b))。53265 台站距离气枪震源 4km, 第 7~59 天的波形与第 7 天波形的互相关系数均大于参考台站, 若参考台站的相关系数变化可作为水位影响的基准, 则 53265 台站受水位的影响应小于参考台站, 因此, 互相关系数变化量小于参考台站。第 59~128 天, 53265 台站的互相关系数变化趋势与参考台站的吻合, 但变化量更大, 表明在射线路径, 或该台站附

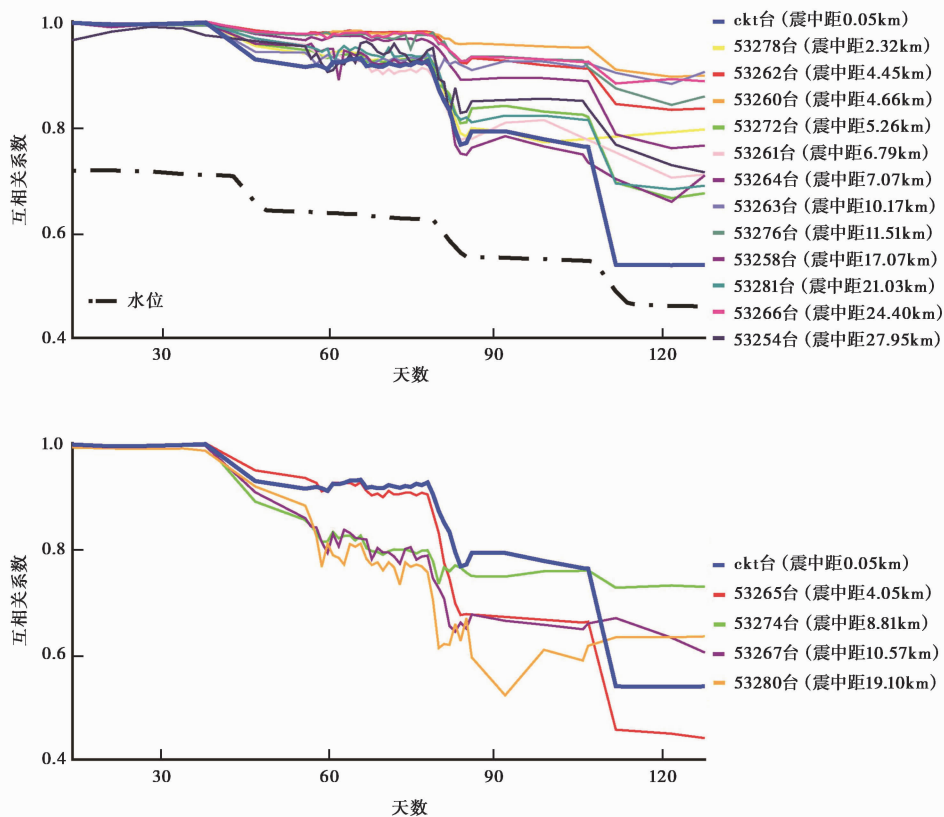


图7 各台站记录的波形互相关对比

(a) 不同天记录的波形与第7天记录波形互相关的结果;(b) 4个台站的互相关系数变化大于参考台站

近可能存在介质变化。另外3个台站,即53274、53267、53280,第7~112天的互相关系数变化量均大于参考台站,表明该时段内这些台站之下可能存在介质变化。

波形互相关系数的变化除了由震源变化、地下介质变化等引起之外,也可能由信噪比引起。为了排除信噪比对波形互相关的影响,我们对上述4个台站(53265、53274、53267、53280)计算了信噪比。首先对信号进行Hilbert变换,基于该变换计算出包络信号,计算信噪比时,取信号的最大值与噪声水平的平均值。由于对数据进行互相关的窗口为P波到时之前0.5s和之后4.5s,因此在计算信噪比时,选取同样窗口的数据,噪声部分选取0s到P波到时之前0.3s。由于已对数据进行了3~5Hz滤波处理及14次相位加权叠加,因此信号的信噪比非常高,以参考台站ckt为例,不同天数据的平均信噪比达65dB。这4个台站中距震源最远的53280台站,不同天数据的平均信噪比也达到37dB。为了分析信噪比对数据互相关的影响,我们对每天波形的信噪比进行归一化,并对这4个台站的互相关系数以及在不同天记录的信噪比(经归一化处理)进行了对比(图8)。第7~128天,归一化后的信噪比变化总体较互相关系数的变化小。第7~65天,53265台站的归一化信噪比小于互相关系数,表明信噪比对互相关系数起主要的影响作用。第65天后,信噪比远小于互相关系数,说明影响互相关结果的因素除了信噪比以外还有地下介质的变化。对于53274、53267、53280台站,信噪比小于互相关系数,说明这3个台站也记录到了地下介质变化的信息。

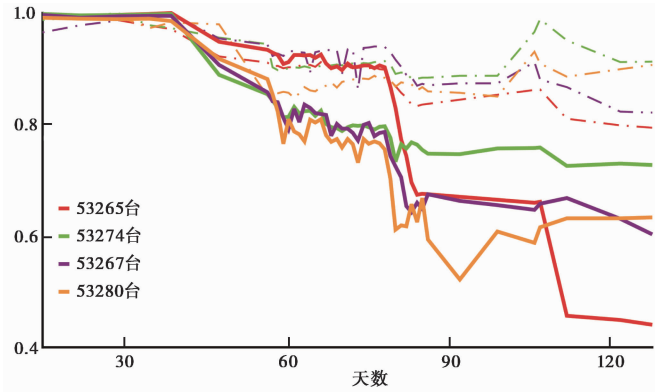


图8 4个台站记录波形的互相关结果与台站记录在不同天信噪比(经归一化)的对比
实线为互相关系数结果;虚线为信噪比结果

值得注意的是,53267、53280台站与53265台站方位角近似,从震源到台站的路径一致(图1),但53267、53280台站从第112天起的互相关系数即大于参考台站,并且大于距离气枪震源更近的53265台站。这表明53265台站下方在第112天起可能存在浅层介质变化,但这种变化可能未被53267、53280台站记录到。第80~112天,这3个台站记录信号的互相关系数相近,但在震源正西方的53274台站信号的互相关系数小于另外3个台站,这可能是由于波形受水位变化的影响小,互相关系数大,无法识别出该时段的地下介质变化。

为了消除气枪震源的影响,通常采用叠加与反褶积的方法。此时叠加与反褶积的顺序就显得尤为重要。先叠加再反褶积基于震源在叠加时段内没有变化的假设,因此,需要保证对互相关系数足够大的波形进行叠加,以减少水位变化对震源的影响。通过对震源聚类分析我们认为,需要对同组波形进行叠加,然后进行反褶积,这样可以在保证信噪比的前提下尽可能少地引入水位的影响。本次研究的实验中,当震中距小于10km时,各组反褶积后的波形互相吻合,说明反褶积方法能有效消除水库水位变化导致的近场气枪子波的变化。但是在震中距大于10km时,由于远场气枪信号受震源的影响较小,且气枪信号除了受震源(主要是水位)的影响,还受地下介质变化及信噪比的影响,先叠加再反褶积的效果不如对相近水位气枪信号直接进行叠加的效果。

通过对云南宾川气枪震源数据的处理研究,我们建议采用如下气枪震源数据的处理流程:①预处理,主要包括去均值,去趋势,进行带通滤波(范围应包含气泡脉冲主频3~5Hz)。对于有时钟误差的台站,需要进行钟差校正。②对震源波形利用互相关进行聚类分析,对同组的地震波形进行相位加权叠加以提高信噪比。

我们对宾川主动源实验场周围不同台站2013年记录的波形进行如上处理,对同组波形进行了叠加,与第1次激发实验(2013年1月7日)记录的叠加波形进行互相关后发现,4个台站(53265、53274、53267、53280)的波形互相关系数变化量大于参考台站。通过计算不同台站的信噪比发现,这4个台站信噪比的变化小于其互相关系数的变化,表明台站下方或由震源至台站的路径上可能存在介质的变化。

参考文献

- 陈浩林、全海燕、於国平等, 2008, 气枪震源理论与技术综述(上), 物探装备, **18**(4), 211~17。
- 陈蒙, 2015, 利用水库大容量非调制气枪阵列进行区域尺度地下结构探测和监测, 国际地震动态, (3), 41~42。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等, 2010, 大容量气枪震源子波激发特性分析, 地球物理学报, **53**(2), 342~49。
- 罗桂纯、葛洪魁、王宝善等, 2008, 利用相关检测进行地震波速变化精确测量研究进展, 地球物理学进展, **23**(1), 56~62。
- 王伟涛、王宝善, 2012, 基于聚类分析的多尺度相似地震快速识别方法及其在汶川地震东北端余震序列分析中的应用, 地球物理学报, **55**(6), 1952~62。
- 杨微、王宝善、葛洪魁等, 2013, 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究, 中国地震, **29**(4), 399~410。
- Birch F, 1960, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1, *J Geophys Res*, **65**(4), 1083~1102。
- Birch F, 1961, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 2, *J Geophys Res*, **66**(7), 2199~2224。
- Chen M, Yang W, Wang W T, et al, 2014, Influencing factors of seismic signals generated by un-tuned large volume airgun array in a land reservoir, *Earthquake Science*, **27**(4), 365~376。
- Chen Y, Zhang X K, Qiu X L, et al, 2007, A new way to generate seismic waves for continental crustal exploration, *Chinese Science Bulletin*, **52**(16), 2264~2268。
- Helmberger D, Wiggins R A, 1971, Upper mantle structure of midwestern United States, *J Geophys Res*, **76**(14), 3229~3245。
- Li Y G, Vidale J E, Day S M, et al, 2003, Postseismic fault healing on the rupture zone of the 1999 *M* 7.1 Hector Mine, California, *Earthquake, Bull Seism Soc Am*, **93**(2), 854~869。
- Nur A, 1971, Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks, *J Geophys Res*, **76**(8), 2022~2234。
- Niu F, Silver P G, Daley T M, et al, 2008, Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, *Nature*, **454**(7201), 204~208。
- Schaff D P, Beroza G C, 2004, Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes, *J Geophys Res*, **109**, B10302, doi:10.1029/2004JB003011。
- Schimmel M, Paulssen H, 1997, Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks, *Geophys J Int*, **130**(2), 497~505。
- Silver P G, Daley T M, Niu F L, et al, 2007, Active source monitoring of cross-well seismic travel time for stress-induced changes, *Bull Seism Soc Am*, **97**(1B), 281~293。
- Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P, 1996, Localization of the complex spectrum; the S transform, signal processing, *IEEE Transactions on*, **44**(4), 998~1001。
- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al, 2012, Transmitting seismic station sonitors fault zone at depth, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **93**(5), 49~50。
- Wang B S, Yang W, Yuan S Y, et al, 2010, An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water, *Journal of Geophysics and Engineering*, **7**(4), 388~394。
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al, 2008, Continuous subsurface velocity measurement with Coda wave interferometry, *J Geophys Res*, **113**(B12), B12313, doi:10.1029/2007JB005023。
- Weng H H, Yang H F, Zhang Z G, et al, 2016, Earthquake rupture extents promoted by damaged fault zones, *J Geophys Res*, under revision。
- Xu M, Canales J P, Carbotte S, et al, 2014, Variations in axial magma lens properties along the East Pacific Rise (9° 30' - 10° 00' N) from swath 3D seismic imaging and 1D waveform inversion, *J Geophys Res*, **119**(4), 2721~2744。
- Yang H F, 2015, Recent advances in imaging crustal fault zones: a review, *Earthquake Science*, **28**(2), 151~162。
- Yang H F, Li Z F, Peng Z G, et al, 2014, Low velocity zones along the San Jacinto Fault, Southern California, from body waves recorded in dense linear arrays, *J Geophys Res*, **119**(12), 8976~8990。
- Yang H F, Zhu L P, 2010, Shallow low-velocity zone of the San Jacinto Fault from local earthquake waveform modeling, *Geophys J Int*, **183**(1), 421~432。
- Yang H F, Zhu L P, Chu R S, 2009, Fault-plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, earthquake by detecting

and relocating aftershocks, *Bull Seism Soc Am*, **99**(6), 3413~3420.

Yang H F, Zhu L P, Cochran E S, 2011, Seismic structures of the Calico fault zone inferred from local earthquake travel time modeling, *Geophys J Int*, **186**(2), 760~770.

Large volume air-gun waveform data processing (I): Binchuan, Yunnan

Luan Yi¹⁾ Yang Hongfeng¹⁾ Wang Baoshan²⁾

1) Earth System Science Programme, Faculty of Science, Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong

2) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract Binchuan Transmitting Seismic Station uses a large-volume air gun array as seismic source, which can continuously activate highly repeatable signal. We analyzed the seismic data collected in 2013 and did observations on the subsurface structure. Due to the influence on the waveform of the source and far-field air-gun signals by the water level change of the reservoir, the characteristics of source signals from an air-gun array in a reservoir and proper data processing flow were studied for the need of differentiating the structure variation and source variation. The results show that: (1) When the reservoir water level variation is large, the cross-correlation coefficient between the seismic waveforms recorded in the same station is too low. Under this condition, we can't do direct stacking to the data, but should do source cluster analysis first. The result of the analysis is governed by the amount of water level change. (2) In order to eliminate the influence of water level change, we conducted a deconvolution process. When the epicentral distance is less than 10km, stack method for multi-shot air-gun data is used to activate in different water levels. Deconvolution has a better result than direct stacking. (3) By cross-correlation and SNR analysis, we found that 4 stations have waveform variations which may be caused by subsurface structure variations.

Key words: Large volume air gun source Phase weighted stacking Cross-correlation Deconvolution Subsurface structure variation

补充资料:

本文提供了对参考台站 ckt 进行聚类分析时对不同天叠加数据的互相关结果, 见附图。

本文进行相位加权叠加、互相关、反褶积处理前的数据挑选:

②53277 台站有很严重的时间零飘, 因此未使用该台站数据。

②2013034163959 噪声很严重, 故删除所有台站的此事件。

③2013086073808、2013086073459、2013086073237 走时存在问题, 可选择删除或校正走时。

④由于从第 325 天开始, 在 21:00 左右将 4 个气枪变为 1 个气枪进行激发, 波形与 4 个

气枪有很大差别,因此将这些使用 1 个气枪激发的事件删除,见下表:

2013325210959	2013338211459	2013345201959	2013353201959	2013360210959
2013325211959	2013338211959	2013345202459	2013353202459	2013360211459
2013325212459	2013338212459	2013345202959	2013353202959	2013360211959
2013325212959	2013338212959	2013345203459	2013353203459	2013360212459
2013325213459	2013338213459	2013345203959	2013353203959	2013360212959
2013325213959	2013338213804	2013345204459	2013353204459	2013360213459
2013325214459	2013338214959	2013345204959	2013353204959	2013360213959
2013325214959	2013338215459	2013345205459	2013353205459	2013360214459
2013325215459	2013338215959	2013345205959	2013353205959	2013360214959
2013325215959	2013338220459	2013345210459	2013353210459	2013360215459
2013325220459	2013338220959	2013345210959	2013353210959	2013360215959
2013325220959	2013338221459	2013345211459	2013353211459	2013360220459
2013325221459	2013338221959	2013345211959	2013353211959	
	2013338222459	2013345212459	2013353212459	
		2013345213459	2013353212959	
		2013345213959	2013353213459	
		2013345214459	2013353213959	
		2013345214959	2013353214459	
		2013345215459	2013353214959	
		2013345215959	2013353215459	
		2013345220459	2013353215959	
		2013345220959	2013353220459	

以参考台站 ckt 为例,第 325、338、345、353、360 天不同时刻事件的波形对比图:

