

杨微, 王宝善, 王伟涛, 等. 陆地水体气枪震源重复性的影响因素及控制方法[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 1-9. [YANG Wei, WANG Baoshan, WANG Weitao, et al. Influence Factors and Control Methods for the Repeatability of Air Gun Source in Land Reservoirs [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(4): 1-9]

陆地水体气枪震源重复性的影响因素及控制方法

杨微¹, 王宝善², 王伟涛¹, 胡久鹏¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 近十几年的实验研究表明, 气枪震源是一种较为理想的重复性人工震源, 可监测地下介质波速的微弱变化, 服务于地震物理过程的分析研究。气枪震源信号重复性的进一步提高, 有利于提升波速变化的监测精度。结合陆地水体气枪震源的技术系统和激发环境, 分析了陆地水体气枪震源重复性的影响因素和改善方法。在硬件系统方面, 通过气枪激发间隔选择, 激发延迟监控和反馈补偿, 装置定期维护等方面确保气枪震源的激发同步性, 保持激发系统每次激发的状态一致。在数据分析方面, 采用反褶积方法降低震源环境变化对信号的影响, 一定程度上消除源场信号的差异。通过软硬件的联合改善, 可进一步提升气枪震源的重复性, 为利用陆地水体气枪震源进行地下介质动态变化研究提供技术支撑。

关键词: 气枪震源; 重复性; 影响因素; 控制方法; 反褶积

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)04-001-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.01

Influence Factors and Control Methods for the Repeatability of Air Gun Source in Land Reservoirs

YANG Wei¹, WANG Baoshan², WANG Weitao¹, HU Jiupeng¹

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;*

2. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: The experiments in recent ten years showed that air gun source is an ideal repetitive artificial source which can monitor the weak change of seismic wave velocity in underground medium, and be used for research on the physical process of an earthquake. The higher the repeatability of air gun source signal is, the higher the monitoring accuracy of seismic wave velocity change is. Combined with the technical system and excitation environment of air gun source in land reservoirs, this paper analyzed the influencing factors of the repeatability and improvement methods. On the hardware system, the synchronization and repeatability of air gun source can be ensured through the selection of air gun shooting interval, excitation delay monitoring and feedback compensation, and regular maintenance of the device. On the data analysis, deconvolution method is used to reduce the impact of the signal change caused by source environment, and eliminate the difference of source

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503202); 国家自然科学基金(41974069); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB19B32)和云南省陈颢院士工作站(20041C007)联合资助

作者简介: 杨微(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事主动震源探测及断裂带精细结构方面的研究。

E-mail: weiyang05@163.com

signals to some extent. The repeatability of air gun source can be further improved by the joint improvement of software and hardware, which provides technical support for the study on dynamic change of seismic wave velocity in underground medium by using air gun source in land reservoirs.

Keywords: Air gun; Repeatability; Influence factors; Control methods; Deconvolution

0 引言

大陆内部地震一般发生在地下 10~30 km 深度, 由于地球介质的不可入性, 在地震孕育深度上对应力变化的探测能力有限, 导致对地下介质变化过程的认识和了解相对薄弱, 且通过直接观测的方法获得深部地下介质的动态变化相对困难。而能够“照亮地球内部”的地震波是迄今为止所知唯一能够穿透地球内部的振动, 携带了丰富的地下介质物性信息^[1-2]。利用地震波信息探测地下介质应力场的状态及其变化一直是地震学家长期追求的目标之一。

利用地震波研究地下介质的变化, 能够持续的产生重复性地震波的震源是其首要要求。目前, 国内外相关学者分别利用重复地震、背景噪声和人工震源等开展地震波速度以及速度比的变化分析, 从而研究地下介质的动态变化^[3-22]。天然地震在空间和时间上分布的非均匀性以及震源本身的复杂性, 和噪声源能量弱需要长时间的叠加等特征, 限制了利用天然源测量地下介质变化的时间和空间精度及分辨率^[23]。利用重复性人工震源对地下介质变化进行监测研究的想法, 早在 20 世纪 70 年代就有了^[24-25]。后来, 人们又开展了大量的实验研究^[26-38], 在这些实验中研究人员分别利用不同的人工震源, 观测到由大气压力、固体潮等天然周期性加载和地震事件引起的介质波速变化。

2000 年以来, 中国地震局和中国科学院、中石油、中石化集团公司等多家单位联合对多种人工震源(炸药、落锤、电火花、Vibroseis、ACROSS、气枪等)进行了大量的探索性试验研究, 结果表明与其它类型的震源相比, 大容量气枪震源具有能量大、频率低、可重复、近/源场破坏小等优点, 是一种理想的绿色环保震源^[6]。随着陆地气枪震源技术系统的日益成熟, 气枪震源的应用逐步从海洋无限水体转移到陆地有限水体中^[39], 并利用大容量气枪震源分别在云南、新疆、福建和甘肃等地的水库或人造水

体中建成了向外发射地震波的信号发射台, 其发射的地震波可以在 50 万平方公里范围内被接收到, 为开展地下介质变化监测研究提供了一条技术路线^[40]。

近些年, 随着陆地气枪震源越来越多地被应用到各种实验观测中, 在介质变化监测研究方面取得了一些成果^[12-13, 18-19]。但在实验过程发现陆地水体大多为灌溉性水库, 水位会随季节变化或受到气候影响^[41-44], 进而影响气枪震源激发环境的改变, 导致气枪震源重复性的降低。同时, 气枪震源的激发装置是一套综合的硬件系统, 系统本身性能也对信号的重复性具有一定影响。本文针对气枪震源重复性影响因素进行了分析, 并提出了相应的控制方法, 为利用陆地气枪震源开展地下介质变化监测研究提供技术支撑。

1 高度可重复性是利用人工震源开展波速变化监测研究的关键

利用人工震源开展地下介质的波速变化测量, 主要是通过对震源和台站之间的固定传播路径的地震波波速进行多次测量, 从而获得这一测量基线上的地震波速度和介质应力状态随时间的变化结果。由于地震孕育过程中引起的波速变化往往发生在地球深部, 且这种变化很小, 在地表只能观测到很微弱的变化量, 但引起地震波速度变化的影响因素有很多, 例如构造应力、裂隙密度、流体饱和度、固体潮、大气压力变化等。这就要求探测技术系统具有极高的探测精度, 且对震源的要求具有极高的重复性。

人工震源具有高度的可重复性, 即人工震源每次激发的地震波波形和频谱特征差异很小, 且对震源近/源场破坏小, 可以保证较高的重复性, 从而到达这种高精度探测的要求。同时, 震源的重复性也是影响波速变化监测精度的重要影响因素。目前, 对于同一测量基线上的波

速变化分析，可通过利用相关检测和尾波干涉等方法来获取，但在计算过程中主要采用波形互相关的方法来得到不同时刻的地震波走时变化。波形互相关延时估计的误差不受采样率的影响，而主要取决与信号的特征，包括信号的相似性，信号的信噪比和带宽。互相关延时估计误差的理论下限，通常被称为 Cramer-Rao 下限 (Cramer-Rao Lower Bound) 可以用下式表示^[12, 45]：

$$\sigma_{\tau} \geq \sigma_{\tau}^m = \sqrt{\frac{3}{2\pi^2 T f_0^3 (B^3 + 12B)} (\frac{1}{\rho^2} (1 + \frac{1}{SNR^2})^2 - 1)} \quad (1)$$

其中， f_0 , B , ρ , SNR , T 分别为主频，分数频宽（频宽与主频之比），波形相似性（重复性），信噪比和所用窗口长度。

从公式（1）中可以看出，波形相关时延估计误差与震源子波特征有很大关系，震源子波主频越高，信噪比越高，重复性越好，其时延估计误差越小。对近 / 源场破坏小的人工震源来说，激发产生的信号主频和信噪比不变，计算过程中的分数频宽和窗口长度是固定的，人工震源激发信号的波形相似性越好，即重复性越高，通过波形互相关计算的时延估计误差越小，

人工震源重复探测技术系统的探测精度也就越高。因此，高度可重复性是利用人工震源开展地下介质波速变化监测的关键核心问题。气枪震源是在水里激发，水具有非常好的可恢复性，激发环境不会被破坏，完全具备以上特征。

2 陆地气枪震源重复性的影响因素

气枪震源具有较高的重复性^[6]，主要是由于气枪震源是在水里激发，不会对近 / 源场产生破坏，每次激发的环境都可恢复到之前的状态。通常，分析同一地点激发的气枪信号的重复性，是通过对某一台站接收到的不同时间激发的波形进行互相关分析，分析其获得的互相关系数，可以用于评价气枪信号的重复性。目前，根据现有陆地水体气枪震源激发信号的重复性分析^[46-51]，表明在不同水体里激发的气枪信号的重复性都很高，虽然也存在着一些微弱的差别，但相关系数基本都大于 0.94（见表 1），体现了气枪震源具有较好的重复性。根据近些年的现场连续监测实验研究，发现在陆地水库中进行气枪激发时，气枪信号的重复性受水库水位变化的影响较大^[41-44]。

表 1 陆地水体气枪震源信号重复性统计分析
Table 1 Statistical analysis of the repeatability of air gun source signals in land reservoirs

分析人员	实验地点	水体环境	统计次数	重复性分析
林建民等 (2008)	河北遵化	上关湖水库	295	>0.94
王彬等 (2015)	云南宾川	大营甸水库	111	≥0.99
魏斌等 (2016)	新疆呼图壁	人工水体	600	>0.95
张元生等 (2016)	甘肃张掖	西流水水库	106	>0.975
杨微等 (2016)	云南寻甸	0.2 m 井中	100	≥0.95 的占 64.0%
	云南宾川	5.0 m 井中	100	≥0.95 的占 63.0%
夏季 (2017)	福建尤溪	街面水库	1024	>0.95 的占 93.26%

气枪震源早期用于海上油气和矿产资源探查，由于海洋可近似为无限半空间的水体，在海上激发气枪震源产生的波形，其信号能量和频谱特征的影响因素主要有气枪容量、激发压力、沉放深度、枪阵组合方式等^[39, 46, 51]。陆地

水体气枪激发环境与传统的海洋气枪激发存在着不同，相对于气枪震源产生气泡所排开水的体积，陆地水体的底面及边界可被视为有限边界，水体容量有限，气枪不能视为在无限半空间水体中激发^[52]。所以相对于海洋气枪的激发，

陆地水体中气枪激发的影响因素除了前面阐述的几个因素外,激发环境也存在较大的影响。

在气枪震源的激发过程中,影响气枪信号的因素很多,大致可以总结为两部分。一部分是对气枪震源时间函数的影响因素,例如:气枪容量、激发压力、沉放深度、枪阵组合等因素组成,这部分的影响可以通过对气枪震源硬件技术系统进行设计和控制来降低;另一部分则是水体环境对地震波转化效率的影响,例如:水体的大小、形状和深度等^[53]。对于固定的技术系统在同一地方进行激发,高压空气所释放的能量是一定的。气枪震源在水里激发后,产生的压力通过整个水体在液—固界面处发生透射、反射和折射,从而向外传播转换为地震波。但水体的大小、形状和深度等却对地震波转换波形和能量起到决定性的作用,陆地水体水位深度受季节和气候的变化影响,会改变激发水体的大小、形状和深度,从而影响气枪震源激发信号的可重复性。

3 提高陆地气枪震源重复性的方法

根据前面的分析,对于技术系统固定的陆地气枪震源,其激发信号的重复性主要由震源硬件激发技术系统和陆地水体环境变化共同决定。气枪震源激发系统由空气压缩机、气瓶组、气控系统、气枪、电控系统、激发平台及辅助设备等组成^[39]。随着震源技术系统的改进和完善,可以将气枪震源激发系统的硬件部分按功能进行模块化集成,集成后的技术系统主要由气源系统、电控系统、激发水体和气枪等组成(图1),其中气源系统集成了空气压缩机、气瓶组和气控系统,为气枪激发提供高压空气,在激发过程中主要影响激发时间的间隔(周期)、激发压力的大小及精度等,电控系统同时控制着气枪的激发模式和同步时间精度等,激发水体为气枪震源提供激发环境。

震源硬件技术系统的影响是可以通过硬件技术参数的改进而降低,而陆地水库的水位变化不受人因素控制,但可以在数据分析上做一些处理来降低影响。因此,我们可以从以下两个方面来改善和提高陆地气枪震源的重复性。

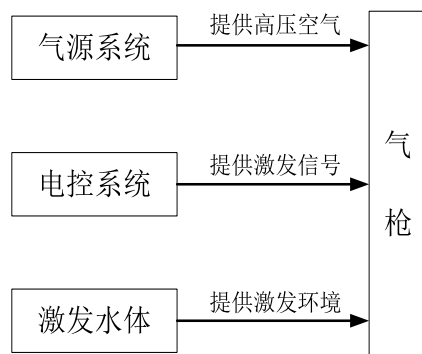


图1 气枪震源激发技术系统功能模块图

Fig.1 Function modules of air gun source excitation technology system

3.1 增强震源技术系统的重复性

根据陆地气枪震源系统各部分的功能和作用,在硬件技术系统方面可以采取以下措施来增强整个气枪震源技术系统的重复性:

(1) 在气源系统方面,提高压力控制精度和优化气枪容量与空气压缩机流量之间的匹配关系。目前,现有陆地气枪震源配置的气源系统的压力控制精度一般为0.1 MPa,可以在技术系统设计时采用具有更高精度的压力控制相关设备,并根据气枪组合容量的大小,设计好空气压缩机的排气量,使得震源激发系统按预设的时间间隔进行连续稳定的自动激发,以保证气源系统的供气周期具有较好的重复性。

(2) 在电控系统方面,增加对气枪震源激发效果进行实时的质量监控和评估。由于气枪震源机械响应的时间精度为ms级,而目前市场上的电控系统通过激发延迟监测和反馈补偿控制,气枪阵激发的同步精度可达到0.1 ms^[54],完全满足气枪激发信号控制的精度。同时需要对激发效果进行质量监控,自动进行快速评估,做出相应的判断进行校正,并对激发质量评价不高的进行剔除。另外,在气枪震源激发周期上,要考虑水体的振荡和恢复时间,让整个水体在下次气枪激发时的状态能恢复到上次激发时的状态。

(3) 在气枪装置方面,定期对机械部件进行维护与保养。气枪震源部件在水中长期连续激发,会发生磨损、腐蚀及产生水垢等其他不利的状况,导致各种故障的发生,例如,气枪密封出现漏气、气枪阵之间同步性差等,从而

引起气枪震源激发的重复性差。定期对气枪震源的机械部件进行周期性的维护和保养，保证气枪震源部件的同步性，可以提高气枪震源激发的同步精度，进一步提高气枪震源激发的重复性。

3.2 反褶积降低水位变化引起的震源差异

气枪震源的可重复性得益于高压空气在水中的释放，在间隔一定时间后，激发水体会恢复到气枪震源激发前的状态。但陆地水体会存在周期性蓄水、放水和水位季节性变化等因素，例如，云南宾川大营甸水库在不同季节的水位相差较大，给气枪震源的重复性造成了较大的影响。由于陆地水库的水位变化不能人为控制，为了降低其对气枪震源信号重复性的影响，我们在数据处理方法上进行了分析。

地震资料处理中常用的方法主要有相关和反褶积，其主要作用是压缩地震反射脉冲的长度，是提高地震勘探分辨率的有效方法，同时也可以去除震源本身特征对地震记录的影响。众所周知，地震记录的褶积模型为

$$x(t) = r(t) * s(t) \quad (2)$$

$x(t)$ 为地震记录， $r(t)$ 为地层响应函数， $*$ 表示褶积算子， $s(t)$ 为震源信号。对地震记录与震源信号做相关处理，公式（2）则可变换为

$$x(t) \otimes s(t) = r(t) * s(t) \otimes s(t) \quad (3)$$

其中 \otimes 表示相关，当震源信号 $s(t)$ 的自相关函数近似为 Klauder 子波，根据式（3），地层响应函数可近似简化为

$$r(t) \approx x(t) \otimes s(t) \quad (4)$$

反褶积与相关一样，基于同样的褶积模型，对式（2）进行傅氏变换，可得：

$$X(\omega) = R(\omega) S(\omega) \quad (5)$$

则地层响应函数在频率域里可表示为

$$R(\omega) = \frac{X(\omega)}{S(\omega)} \quad (6)$$

再通过 IFFT 变换可获得时域地层响应函数 $r(t)$ 。

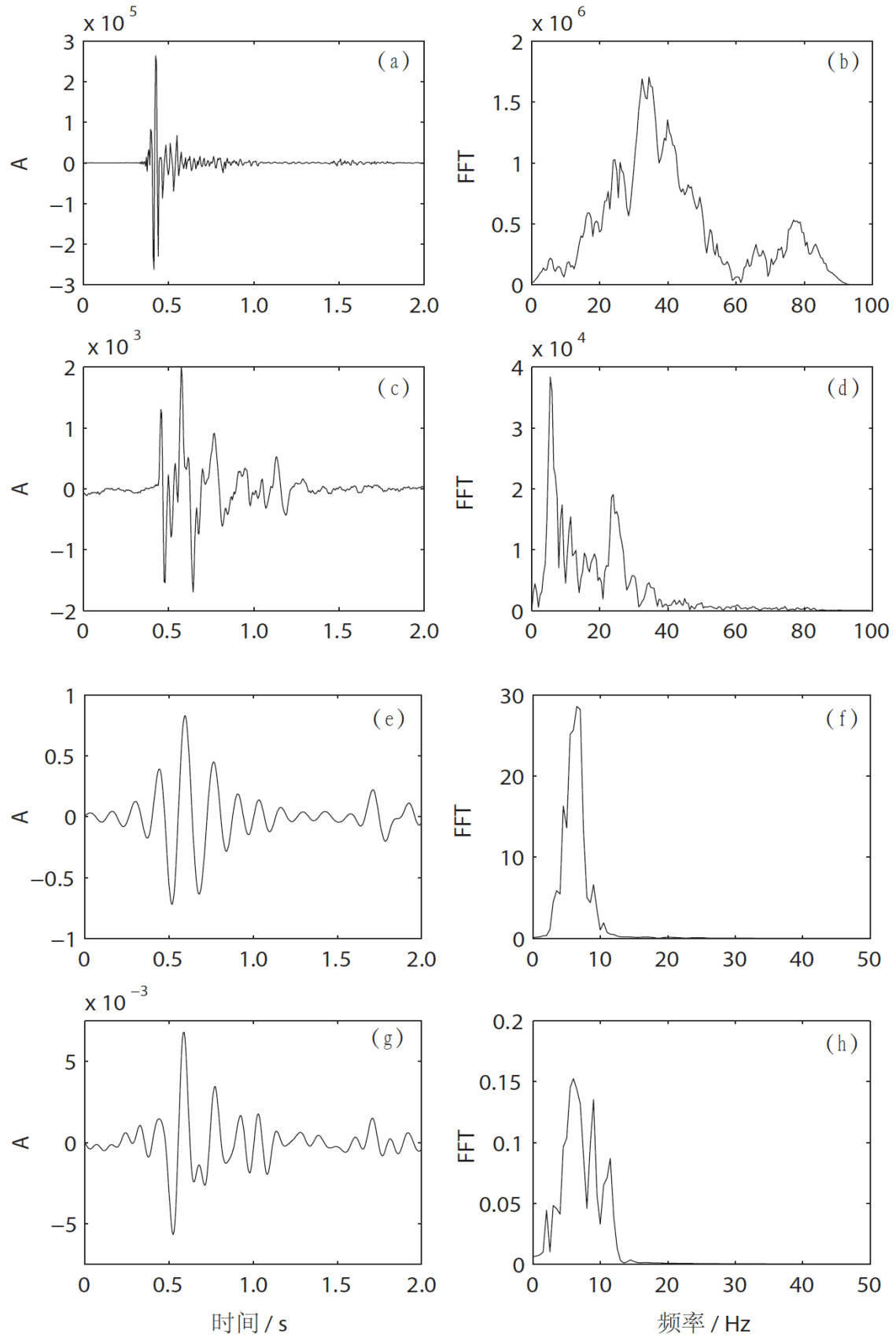
在地震信号处理分析中，信号中的高频成分能缩短子波的周期，而低频成分可以降低子波的旁瓣值。从公式（3）可得出，在对地震记录做互相关处理时，相当于地层响应函数在频

率域里通过了一个震源信号振幅谱二次方特征窗口的自适应滤波。若震源信号能量在频率域里相差较大时，自相关函数波形的主峰值不突出，旁瓣值压制的也不好，互相关处理后的波形就会残留震源高能量部分的特征，而反褶积处理后就不会有震源特征保留下来^[55-56]。

在云南省寻甸县跨小江断裂带东支中段进行了井下气枪激发实验，其中激发井深 50 m，井下气枪激发深度为 40 m，气枪容量 250 in³，激发压力为 10 MPa。图 2 a 和图 2c 分别为井口附近和偏移距为 250 m 的地震台站记录到的井下气枪单次激发的波形，图 2 b 和图 2d 分别为其相应的频谱图。由于井中激发环境空间很小，井口附近台站记录的波形可近似为震源函数，因此在数据处理过程中将井口附近台站的波形可作为参考信号 / 源信号。通过对图 2c 的波形进行互相关和反褶积处理，分别获得互相关和反褶积处理后的波形（见图 2e 和图 2g）。

从频谱图 2 b 中可看出震源信号能量在频率域里相差较大，会导致互相关函数的旁瓣收敛差（见图 2e），造成地震波震相在时间上分辨率不够。通过对比图 2c，图 2e 和 g 的波形，井中气枪震源信号反褶积处理比互相关在震相分辨能力上强。同时，从频谱图 2 d 可看出井中气枪震源传播出去的信号能量在 5~6 Hz 最强，通过互相关处理后 5~6 Hz 信号的能量显得尤为突出（见图 2 f），而反褶积与互相关的处理结果相比在频带上要略宽一些（见图 2h）。因此，在数据处理上采用反褶积方法降低水位变化引起的震源影响，并在井中气枪震源激发实验数据中得到了应用。

在实验期间，2014 年 4 月 24 日至 4 月 28 日的地下水位发生了较大变化，而井下气枪激发的位置一直未变，这样就造成了井下气枪震源沉放深度的改变，导致气枪震源激发产生的波形发生变化，其重复性下降。从图 3（a）中可以看出，地下水位尤其在 4 月 26 日至 4 月 28 日上升加快，两天的时间上升了约 7 m，与之相对应的气枪震源波形重复性下降明显（图 3 b），相关系数从大于 0.95 逐渐变为小于 0.90。但对数据进行反褶积处理后，相关系数一致都大于 0.95（图 3 c），表明通过反褶积处理可以降低井下气枪震源因水位变化引起的震源影响。



(a) 和 (b) 是井口附近台站记录的波形及频谱图; (c) 和 (d) 是偏移距为 250 m 的台站记录的波形及频谱图; (e) 和 (f) 是偏移距为 250 m 的台站记录与井口台站记录做互相关后的波形及频谱图。 (g) 和 (h) 是偏移距为 250 m 的台站记录与井口台站记录做反褶积后的波形及频谱图。

图 2 井中气枪单次激发的垂直分量记录及频谱图

Fig.2 Vertical component record and spectrum of air gun excited in downhole

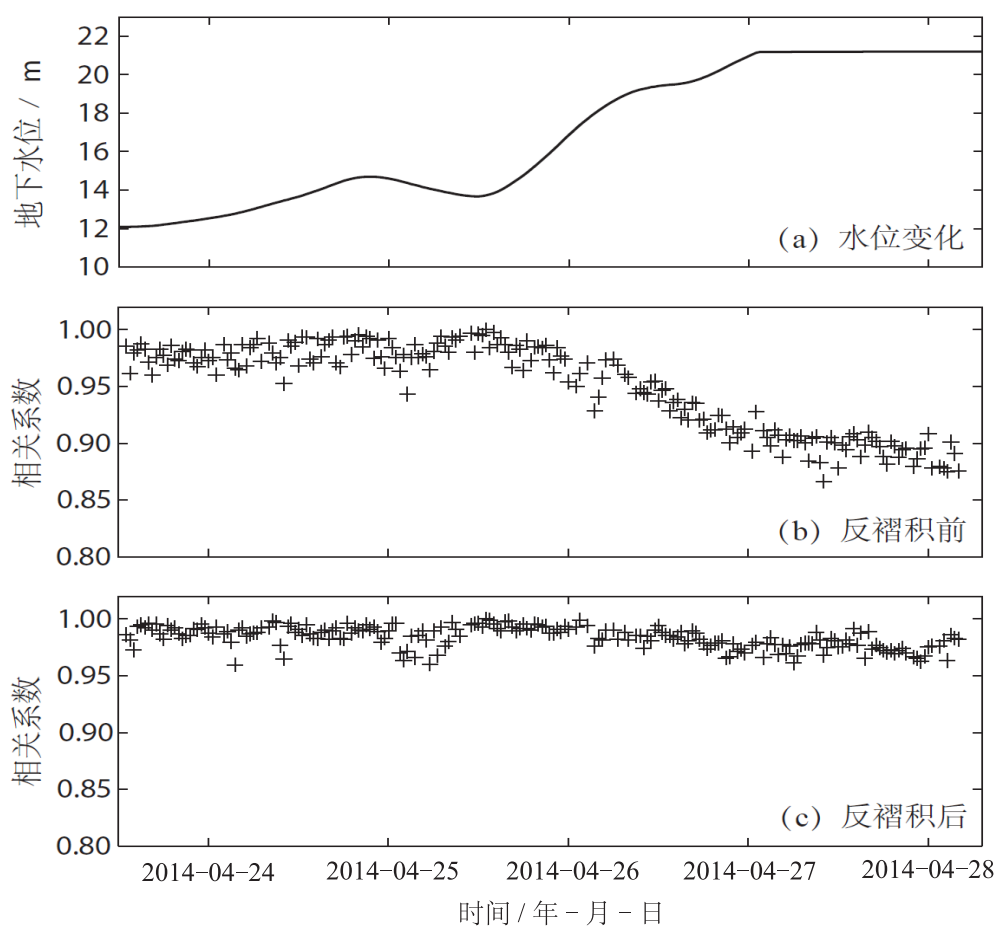


图 3 地下水位随时间的变化 (a) 及台站 (偏移距为 250 m) 记录反褶积前后的相关系数 (b、c)

Fig.3 The groundwater level changes with time (a) and the correlation coefficients of the signals recorded at station with the offset of 250 m before and after deconvolution (b, c)

4 结论

高度可重复性是利用人工震源开展地下介质波速变化监测的关键，本文针对近些年发展起来的陆地气枪震源技术系统，在其激发信号可重复的影响方面进行了分析，并给出了以下提高方法：

(1) 在震源硬件技术系统方面，通过提高激发压力的控制精度和匹配好气枪容量与压缩机流量之间的关系，设计好激发时间间隔，以确保气枪震源每次在激发前所处的压力状态是一样的。同时，对气枪激发效果进行质量监控和快速评估，剔除掉质量评估不满足要求的激发记录。另外，定期对气枪机械部件进行维护和保养，以保证气枪具有较好的稳定性和气枪阵列之间具有较好的一致性。

(2) 在气枪信号数据处理方面，采用反褶积方法降低陆地水体水位变化引起的震源差异，

提高信号的可重复性。

利用人工震源获得地下介质精细结构及其变化特征，是 4D 地震学研究中发展的方向之一，人工震源的高度可重复性是基础和关键。本文通过对陆地气枪震源技术系统和激发环境的分析，提出了进一步提高气枪震源信号可重复性的方法，为利用气枪震源开展地下介质波速随时间的演化特征研究提供技术支撑。

参考文献：

[1] 傅承义，陈运泰，祁贵仲. 地球物理学基础 [M]. 北京：科学出版社，1983.
[2] 陈颢，朱日祥. 设立“地下明灯研究计划”的建议 [J]. 地球科学进展，2005，20(5)：485-489.
[3] Schaff D. P., Beroza G. C. Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes[J]. J Geophys Res, 2004, 109(B10), doi: 10.1029/2004JB003011.
[4] Silver P. G., Daley T. M., Niu F. L., et al. Active source monitoring of cross-well seismic traveltime for stress-induced changes [J]. Bull. Seismol. Soc.

- Am., 2007(97):281–293.
- [5] 陈颢, 王宝善, 葛洪魁, 等. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5):441–446.
- [6] 陈颢, 张先康, 邱学林, 等. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报, 2007, 52(11):1317–1321.
- [7] 陈颢, 王宝善, 姚华建. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2017(10):1153–1165, doi:10.1360/N072016-00368.
- [8] Brenguier F., Campillo M., Hadziioannou C., et al. Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from Continuous Seismological Observations[J]. Science, 2008, 321(5895):1478–1481.
- [9] Niu F. L., Silver P. G., Daley T. M., et al. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site[J]. nature, 2008(454):204–208.
- [10] Chen Y., Liu L. B., Ge H. K., et al. Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results[J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(4):601–612.
- [11] Chen Y., Wang B. S., Yao H. J. Seismic airgun exploration of continental crust structures[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(10):5–17, doi:10.1007/s11430-016-9096-6.
- [12] Wang B. S., Zhu P., Chen Y., et al. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry[J]. J. Geophys. Res., 2008, 113(B12), doi:10.1029/2007JB005023.
- [13] Wang B. S., Yang W., Wang W. T., et al. Diurnal and semidiurnal P- and S-wave velocity changes measured using an airgun source[J]. J. Geophys. Res., 2019, 125, doi:10.1029/2019JB018218.
- [14] 王伟涛, 王宝善, 葛洪魁, 等. 利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化[J]. 中国地震, 2009, 25(3):223–233.
- [15] Cheng X., Niu F. L., Wang B. S. Coseismic velocity change in the rupture zone of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake observed from ambient seismic noise[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2010(100):2539–2550.
- [16] 杨微, 葛洪魁, 王宝善, 等. 由精密控制人工震源监测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5):1149–1157.
- [17] Chen H. C., Ge H. K., Niu F. L. Semiannual velocity variations around the 2008 M_w 7.9 Wenchuan Earthquake fault zone revealed by ambient noise and ACROSS active source data[J]. Earth Sci., 2014(27):529–540, doi:10.1007/s11589-014-0089-5.
- [18] 张元生, 王宝善, 陈颢, 等. 两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10):3815–3822.
- [19] Yang W., Wang B. S., Yuan S. Y., et al. Temporal variation of seismic-wave velocity associated with groundwater level observed by a downhole airgun near the Xiaojiang Fault Zone[J]. Seismol. Res. Lett., 2018, 89(3), doi:10.1785/0220170282.
- [20] Tsuji S., Yamaoka K., Ikuta R., et al. Secular and coseismic changes in Swave velocity detected using ACROSS in the Tokai region[J]. Earth Planets and Space, 2018, 70(1), doi:10.1186/s40623-018-0917-2.
- [21] Pei S. P., Niu F. L., Ben-Zion Y., et al. Seismic velocity reduction and accelerated recovery due to earthquakes on the Longmenshan fault[J]. Nature Geoscience, 2019(12):387–393, doi:10.1038/s41561-019-0347-1.
- [22] Mao S., Campillo M., Hilst V., et al. High temporal resolution monitoring of small variations in crustal strain by dense seismic arrays[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(1):128–137, doi:10.1029/2018GL079944.
- [23] 王宝善, 王伟涛, 葛洪魁, 等. 人工震源地下介质变化动态监测[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3):249–256.
- [24] Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Simpson D. W., et al. Spatial and temporal variations in ts/tp and in P wave residuals at Blue Mountain Lake, New York: Application to earthquake prediction[J]. J. Geophys. Res., 1973(80):718–732.
- [25] Reasenberg P., Aki K. A precise continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress[J]. J. Geophys. Res., 1974(79):399–406.
- [26] De Fazio T. L., Aki K., Alba J. Solid earth tide and observed change in the in-situ seismic velocity[J]. J. Geophys. Res., 1973, 78(8):1319–1322, doi:10.1029/JB078i008p01319.
- [27] Bungum H., Risbo T., Hjorenberg E. Precise continuous monitoring of seismic velocity variations and their possibility connection to solid tides[J]. J. Geophys. Res., 1977, 82(33):5365–5373, doi:10.1029/JB082i033p05365.
- [28] Yukutake H., Nakajima T., Doi K. In situ measurements of elastic wave velocity in a mine, and the effects of water and stress on their variation[J]. Tectonophysics, 1988(149):165–175.
- [29] Karageorgi E., Clymer R., McEvelly T. V. Seismological studies at Parkfield. II. Search for temporal variations in wave propagation using Vibroseis[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1992(82):1388–1415.
- [30] Yamaoka K., Kunitomo T., Miyakawa K., et al. A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system[J]. The Island Arc, 2001(10):336–347.
- [31] Yamamura K., Sano O., Utada H., et al. Long-term observation of in situ seismic velocity and attenuation[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B6), doi:10.1029/2002JB002005.
- [32] Ikuta R., Yamaoka K., Miyakawa K., et al. Continuous monitoring of Propagation velocity of seismic wave using ACROSS[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(13), doi:10.1029/2001GL013974.
- [33] Ikuta R., Yamaoka K. Temporal variation in the shear

- wave anisotropy detected using the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, B09305, doi:10.1029/2003JB002901.
- [34] Alekseev A., Chichinin I., Korneev V. Powerful low-frequency vibrators for active seismology[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2005 (95): 1-17.
- [35] Saiga A., Yamaoka K., Kunitomo T., et al. Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source[J]. *Earth Planets Space*, 2006(58): 993-1005.
- [36] 王宝善, 葛洪魁, 王彬, 等. 利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 168-179.
- [37] Liu Z. F., Ye B., Chen J., et al. Study of the change in wave velocity ratio before and after two strong earthquakes using airgun source data [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 33(2): 305-319, doi: 10.19743/j.cnki.0891-4176.201902012.
- [38] Yang J. W., Li L., Zhang P. Y., et al. Using airgun source signals to study regional wave velocity changes before and after the Yunlong $M_s5.0$ and Yangbi $M_s5.1$ earthquakes [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 33(2): 320-335, doi: 10.19743/j.cnki.0891-4176.201902008.
- [39] 杨微, 王宝善, 葛洪魁, 等. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究[J]. *中国地震*, 2013, 29(4): 399-410.
- [40] Wang B. S., Tian X. F., Li Y. L., et al. Seismic signature of un-tuned large volume airgun array fired in a water reservoir [J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2018, 89(3): 983-991, doi:10.1785/0220180007.
- [41] 栾奕, 杨宏峰, 王宝善. 大容量气枪主动源波形资料处理(一): 云南宾川[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 305-318.
- [42] 周青云, 陈俊磊. 气枪震源激发条件对走时变化观测结果的影响[J]. *地震研究*, 2018, 41(02): 264-272.
- [43] Su J. B., Wang Q., Zhang W. X., et al. The seasonal variation of large volume airgun signals in Hutubi, Xinjiang [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 33(2): 186-194, doi: 10.19743/j.cnki.0891-4176.201902010.
- [44] 向涯, 杨润海, 谭俊卿, 等. 气枪震源信号波速变化计算中的水位影响及消除[J]. *地球物理学进展* (网络首发), 2020, kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20200608.1436.146.html.
- [45] Céspedes I., Huang Y., Ophir J. Methods for estimation of subsample time delays of digitized echo signals[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1995(17): 142-171.
- [46] 林建民, 王宝善, 葛洪魁, 等. 大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(1): 206-212.
- [47] 王彬, 吴国华, 苏有锦, 等. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果[J]. *地震研究*, 2015, 38(1): 1-6.
- [48] 魏斌, 苏金波, 王海涛, 等. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 222-230.
- [49] 张元生, 郭晓, 秦满忠, 等. 甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 209-215.
- [50] 杨微, 王宝善, 刘政一, 等. 不同激发环境下井中气枪震源特征研究[J]. *中国地震*, 2016, 32(2): 231-240.
- [51] 夏季. 大容量气枪震源特性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
- [52] 胡久鹏, 王伟涛, 王宝善, 等. 利用反投影方法计算陆地有限水体气枪震源激发过程[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(3): 1000-1012, doi: 10.6038/cjg2018L0109.
- [53] 胡久鹏, 王宝善, 陈颢, 等. 水体形状对陆地气枪激发信号的影响[J]. *地震研究*, 2017, 40(4): 543-549.
- [54] Yang W., Wang B. S., Luo M. Z., et al. An experimental study on adjusting the characteristics of large volume airgun array signals by asynchronous excitation [J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 33(2): 195-207, doi: 10.19743/j.cnki.0891-4176.201902004.
- [55] Katherine F. B., Laurence R. L., Ayon K. D. Vibroseis deconvolution: a synthetic comparison of cross correlation and frequency domain sweep deconvolution[J]. *Geophysical Prospecting*, 2001(49): 675-686.
- [56] 杨微, 王宝善, 葛洪魁, 等. 精密控制机械震源特征及信号检测方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 50-55.