

魏斌、苏金波、王海涛等,2016,新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究,中国地震,32(2),222~230。

# 新疆呼图壁人工水体大容量 气枪信号发射台性能研究

魏斌<sup>1)</sup> 苏金波<sup>1)</sup> 王海涛<sup>1)</sup> 郑黎明<sup>1)</sup> 王琼<sup>1)</sup>  
张文来<sup>1)</sup> 袁顺<sup>1)</sup> 魏芸芸<sup>1)</sup> 陈昊<sup>2)</sup>

1)新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐市新市区科学二街 338 号 830011

2)中国地震局兰州地震研究所,兰州 730000

**摘要** 介绍了新疆呼图壁人工水体大容量气枪震源地震信号发射台的选址、建设过程及震源信号特征。从地质构造、历史地震的角度分析了地震信号发射台选址的合理性、必要性以及气枪激发池设计的合理性。利用激发池岸边的低灵敏地震仪记录到的气枪信号,阐述了气枪震源的高度重复性和人工水体气枪震源信号的稳定性,并对信号进行时频分析后得出,气枪信号的优势频率为 2~6Hz。最后通过叠加的方法提高信噪比,得到呼图壁气枪震源信号的传播距离约为 380km。

**关键词:** 气枪震源 选址 相关系数 频率特征

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0222-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 前言

随着数字地震学和数字信号处理技术的发展,利用地震波对地球内部介质的变化进行监测受到越来越多的关注。目前,监测地下介质的变化主要依赖于重复震源,天然的重复震源主要包括重复地震和背景噪声。但是,利用天然重复震源测量地下介质变化时的精度和分辨率往往受天然事件的时、空分布等因素的影响(王宝善等,2013)。

20 世纪 70 年代起,地震学家们尝试利用人工震源主动产生地震波来研究地下介质随时间的变化,如炸药震源即是使用时间最长、应用最为广泛的人工震源,且至今仍然在使用,其优点是能量大、可探测距离远,主要缺欠是会对环境造成破坏。1974 年,Reasenber 等(1974)利用小型气枪在水坑中激发,测量地下波速的变化,并成功观测到与固体潮相关的波速变化。1987 年 6 月~1996 年 11 月,Karageorgi 等(1992)利用可控震源和井下地震台网,对加州中部帕尔菲德地区的地下波速变化进行了监测。2006 年,Wang 等(2008)利用电动落锤震源和短周期地震仪,在云南小哨地震台附近开展了为期 30 天的连续监测实验。2007 年,陈颢等(2007)在华北上关湖水库等地进行了大容量气枪震源实验。2009 年,杨微等

[收稿日期] 2016-03-30; [修定日期] 2016-06-07

[项目类别] 中国地震局公益性行业科研专项(201508008)、国家自然科学基金(41474051)、新疆维吾尔自治区科研机构创新发展基金(201316)共同资助

[作者简介] 魏斌,男,1969 年生,高级工程师,主要从事地震监测以及人工震源等方面的研究。E-mail:weibinxj@163.com

(2010)利用精密可控震源在四川省绵竹市九龙镇进行了小尺度地下介质波速变化监测实验。2010年,中国地震局地球物理研究所、云南地震局等在宾川县大银甸水库建设了气枪地震信号发射台(王彬等,2015)等。这些实验都取得了非常好的观测效果,对减轻灾害、资源勘探和地下介质环境的监测等有着重要的意义。

地震波信号的信噪比决定着测量地下介质变化时的精度,若要对地球深部介质进行探测和监测,则需要大能量的震源。普通的大能量震源(如炸药震源)会导致震源附近介质发生较大的变化,严重影响测量的精度(Wang et al,2008)。地震学家通过对不同类型震源进行尝试后发现,气枪震源具有能量大、高度重复、节能环保等特点,是进行地球深部介质探测和连续监测的理想震源(陈颢等,2007)。

新疆地处印度洋板块向欧亚板块俯冲的前缘地带,是中国大陆的主要内陆地震活动区,又是强震活动水平最高的地区之一。2013年2月,在中国地震局地球物理研究所、新疆维吾尔自治区地震局和昌吉回族自治州地震局等共同努力下,在距乌鲁木齐80km的北天山北麓的呼图壁县境内的古河滩荒地上建成了世界首个基于人工开挖激发池的大容量气枪震源地震信号发射台(苏金波等,2015)。发射台所处的北天山地区地质结构复杂,强震频发,很多地震学者对该地区的地下介质结构、历史地震、地震活动性等已经开展了比较深入的研究工作,积累了大量的地质、地球物理资料,这为利用大容量气枪震源进行地下介质的主动观测研究打下了良好的研究基础。

## 1 地质构造特征及历史地震活动

呼图壁大容量气枪震源地震信号发射台(以下简称发射台)所处区域位于北天山山前的准格尔盆地南缘西段,北天山区域主要由准噶尔块体的部分区域和天山块体的部分区域组成。该区域由一系列NW向展布的线性断层、断裂以及裂隙组成,其现代构造应力场主体特征为南北两侧沿该断裂面逆冲,主要表现为近SN-NNE向的挤压(赵善坤等,2013)。区域内主要的发震断层包括准噶尔南缘断裂、西山断裂、博格达北缘弧形断裂带等一系列以逆冲为主的断裂(董曼等,2015)。

发射台地处乌鲁木齐山前拗陷,拗陷内部发育着巨厚的中、新生代地层,拗陷内的玛纳斯一带中、新生代最大沉积厚度达12000m。发射台附近主要的活动断裂为霍尔果斯-玛纳斯-吐谷鲁逆断裂-背斜带和哈拉安德-安集海逆断裂-背斜带。其中,吐谷鲁背斜东北分布着呼图壁背斜,是一个最新活动背斜。霍尔果斯-玛纳斯-吐谷鲁逆断裂-背斜长约130km,自西向东依次为霍尔果斯、玛纳斯、吐谷鲁等3个逆断裂-背斜,该构造带最早形成于上新世和早更新世之间,早更新世末、中更新世初期又经历了强烈的活动。吐谷鲁背斜东北端的呼图壁背斜在地表已经表现出了轻微的隆起,地震资料表明,地下7~8km的侏罗纪煤系地层中的滑脱面已经在不断向上扩展,形成了断坡,断坡的顶端正在形成呼图壁背斜。哈拉安德-安集海逆断裂-背斜带长约80km,自西向东分别由独山子、哈拉安德和安集海逆断裂-背斜组成,这些断裂均为活动断裂(邓起东等,1999)。

发射台所处的北天山地震带历史上强震频发,1600年以来共发生8.0~8.9级地震1次,7.0~7.9级地震4次,6.0~6.9级地震18次(图1)。

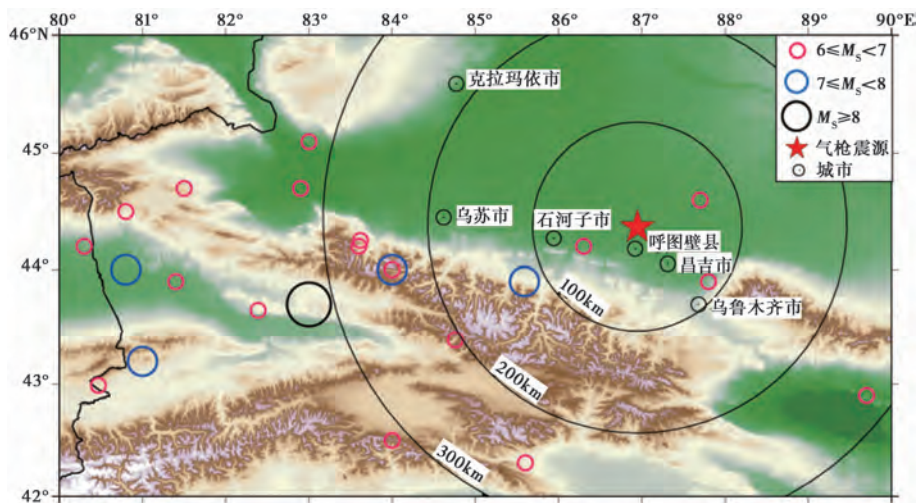


图1 气枪震源发射台区域周边1600年以来历史地震分布

## 2 发射台的建设

对比其他人工震源,气枪震源的优势在于环保高效和高度重复性。其重复性主要与水体的水位变化和形状变化有关,若要得到重复性较高的地震波信号,必须保证水体水位和形体形状的稳定。人工水库需要用水和注水,甚至会出现枯水期,往往无法保证稳定的水位。天然水塘由于池底土质松散,气枪实验时可能造成池壁松散的淤泥坍塌,也无法保证形体形状的稳定。所以,呼图壁气枪震源发射台选择了人工开挖激发池,这样既能保证水位稳定可控,又可以对池壁进行加固处理,从而保证水体形体形状稳定,使气枪震源的重复性保持在较高的水平。

根据以往的经验,气枪震源上覆水体深度约为10m时才能保证震源信号具有较理想的低频成分;同时,气枪震源距水底应不小于5m,以免气枪激发时水底泥沙进入气枪(陈蒙,2014)。通过建立力学模型并考虑施工能力等因素,确定激发池为上表面直径100m、下表面直径15m、水深18m的一个倒圆台型水体(图2)。

受施工条件的影响,激发池最终形状为上表面直径97m、下表面直径15m、深15m的倒圆台型水体。2013年5月,激发池蓄水工作基本完成,为了维持激发池水位的稳定,还配套建设了激发池补水系统(图3)。

目前,发射台主要配备单枪容量为2000 in<sup>3</sup>的Bolt1500LL型大容量气枪6条,气枪通过浮台悬挂在水面下10m处,距离水底约5m。浮台通过绳索固定在激发池中心,以保证气枪激发时浮台的稳定性和震源信号的重复性。

为了配合大容量气枪激发实验,在发射台周围架设了一批流动台站。目前,发射台周围150km范围内共有流动观测台站30个,固定测震台站12个(图4),构成了比较完善的信号接收系统。

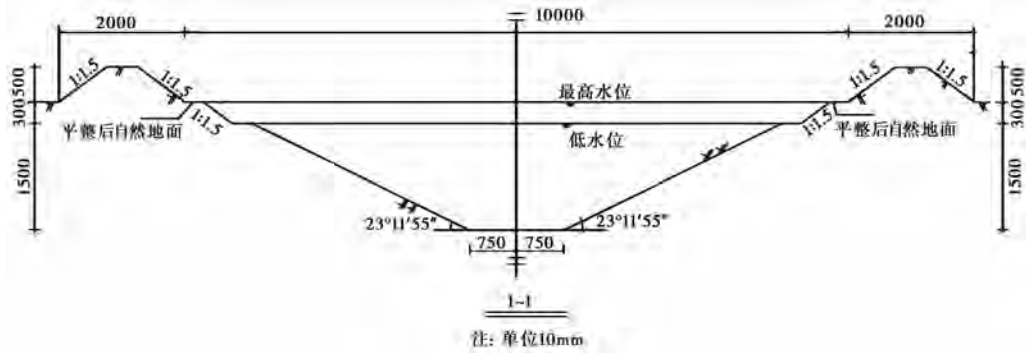


图 2 激发池设计剖面图



图 3 激发池竣工鸟瞰图

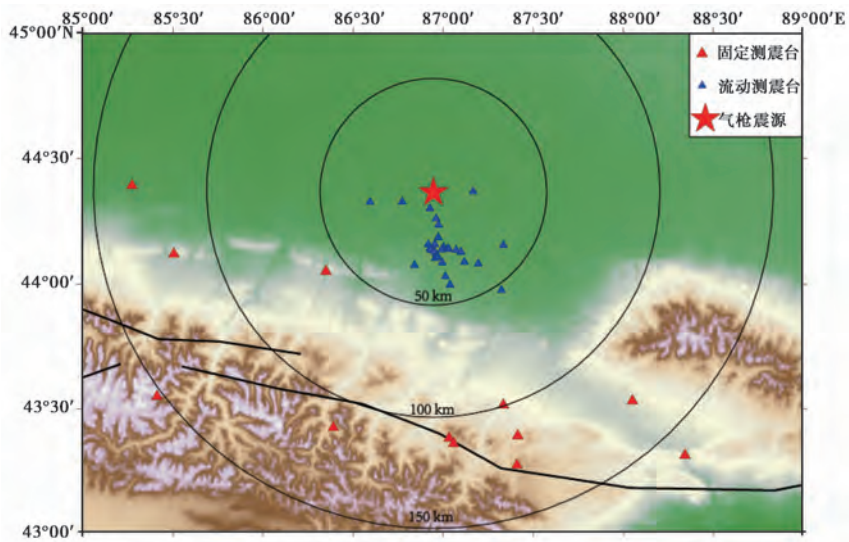


图 4 气枪发射台周围台站分布

### 3 震源信号特征

#### 3.1 震源重复性

重复地震方法在地下介质结构、状态研究领域已得到地震学家广泛的认可,特别是在地下介质物理性质变化的测量(Poupinet et al, 1984)、断层结构研究(Nadeau et al, 1995)、震源物理研究(Schaff et al, 1998)等方面已取得很多成果。人工重复震源的重复性和可控性都大大超过了天然地震,并且能有效减少震源位置的不确定性对研究的影响(林建民等, 2006)。利用人工地震主动向地下发射地震波是探究地下介质结构与状态的新方向(陈颢等, 2007)。由于气枪震源信号具有较高的重复性,因而气枪震源是良好的人工重复震源。前人研究结果显示,激发地点的水位变化是影响气枪震源信号重复性的主要因素之一(陈蒙, 2014)。

我们在激发池边约 20m 处架设了一个测震台,利用测震仪记录到的信号研究震源特征,并利用此信号通过波形互相关的方法获取准确的气枪激发时刻。图 5 为激发池岸边的测震仪记录到的 600 次气枪震源激发信号重叠在同一坐标系下的结果。由图 5 可见,震源的重复性非常好。图 6 为气枪震源在 2013 年 8 月~2014 年 8 月间的相关系数分布。由图 6 可见,呼图壁气枪震源的震源性质稳定,震源波形相关系数始终大于 0.95。这主要是因为人工激发池本身水位就平稳,加之呼图壁气枪震源配套建设了激发池补水系统,更可使水位始终保持稳定。

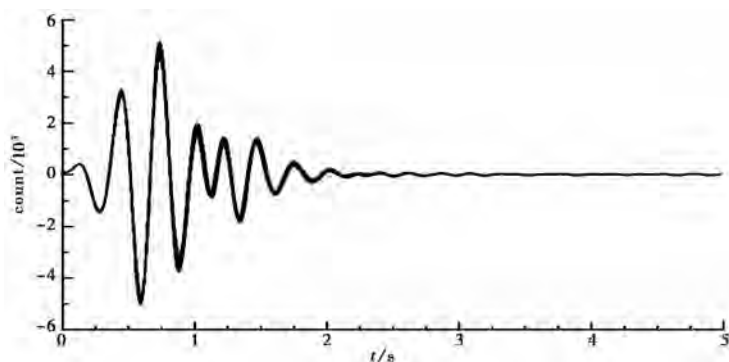


图 5 激发池边 ZD0 台垂直向 600 次记录  
经过 2~6Hz 滤波后信号的重复性示意图

由图 6 可见,虽然震源信号相关系数始终大于 0.95,但 2013 年 8 月~2014 年 8 月,相关系数整体上存在下降趋势。这是因为在互相关计算时,我们首先指定 1 个波形为参考波形,然后用互相关检测的方法分别计算其他波形与该波形的相关系数。随着气枪震源系统的运行,气枪机械系统磨损、气枪气室进水、激发池表面结冰等实验条件的变化,都会造成激发信号的细微变化,用来进行互相关计算的其他波形与第 1 个波形的相关系数会因此降低。但由于相关系数整体上保持较高的水平,因而对后续研究的影响不大。

#### 3.2 震源信号的频率特征

弹性波在介质内传播的过程中,高频成分容易发生散射和衰减,不能传播足够远的水平距离和更大的深度。而低频信号则不同,往往可以在地下介质中传播得更深、更远(杨微等,

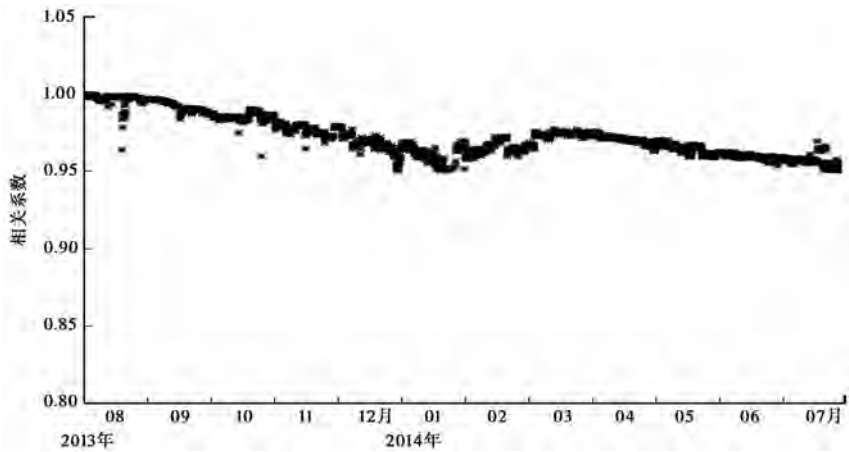


图 6 2013 年 8 月~2014 年 8 月 ZD0 台接收到的气枪震源激发波形重复性分析

2013)。若要对地下介质的变化进行动态监测,则必须要求震源信号具有足够大的能量和丰富的低频成分。气枪震源信号的低频部分主要来自气枪激发后高压气体的瞬间释放,高压气体在气枪周围形成气泡,气泡在水体中来回振荡形成压力波进而产生脉冲(罗桂纯等,2007)。由于气泡在水体中振荡的频率较低,所以压力波形成的脉冲耦合的弹性波频率也较低。这种低频地震波可以在地下介质中传播较远的水平距离和较大的深度,因此,气枪震源非常适合区域性地下结构的探测及地下介质动态变化的监测。

我们对激发池岸边布置的强震台记录到的 1 次 22MPa 压力下激发的信号进行了时频分析(图 7),图 7 所示气枪震源信号波形经过了 10Hz 低通滤波。时频分析结果显示,优势频率集中在 2~6Hz,说明气枪震源信号主要为低频成分,非常适合区域性介质结构探测和介质变化监测。

### 3.3 探测距离

气枪震源是优良的低频震源,可以在地下介质中传播较远的距离。但是,由于信号的衰减作用,在距震源较远的台站的信号中,气枪震源的信号比较微弱,往往淹没在环境噪声之中。我们可以利用波形叠加的方法提高信号的信噪比,这样就可距气枪震源较远的台站提取到气枪信号,进而扩大气枪震源的监测半径。通过 600 次叠加,最终可以在距呼图壁气枪震源 380km 左右的部分台站识别出气枪震源信号(图 8)。由图 8 可见,台站接收到的气枪震源激发信号的走时剖面震相比较丰富,存在着速度约为 6km/s 的 P 波和速度约为 3.5 km/s 的 S 波,S 波是气枪震源在水、陆交界面产生的转换波(杨微等,2013)。这说明呼图壁大容量气枪震源激发的地震信号探测距离远,对地下介质的穿透能力强,可以在岩石圈结构的探测和介质变化的监测研究中有所作为。

## 4 结论

2013 年 6 月~2016 年 5 月,呼图壁大容量气枪震源地震信号发射台已经运行了近 3 年的时间,总体上运行正常。除气枪运维、空压机设备维护、气缆更换等特殊情况下,气枪震源每周进行 1 次连续激发,激发时间选择环境噪声相对较小的夜间,每周可以获得超过 30 次



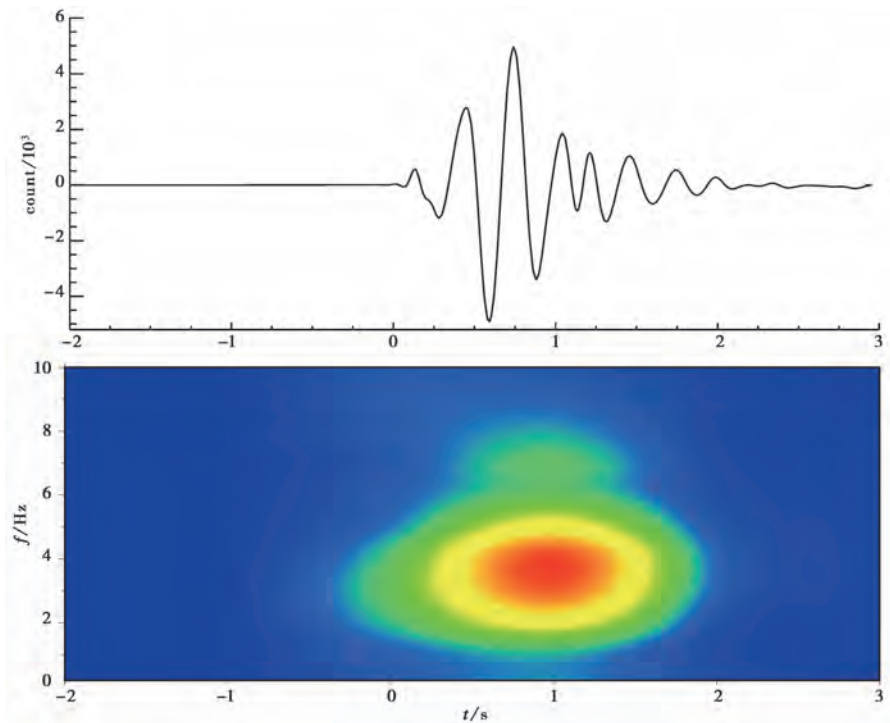


图7 呼图壁气枪震源激发信号的波形和时频分析

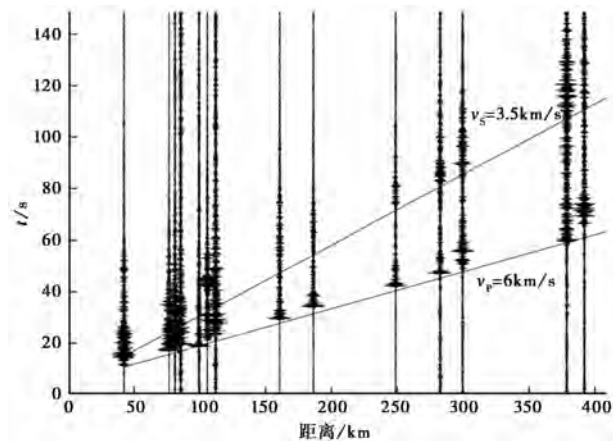


图8 气枪震源 600 次叠加走时剖面

激发的数据。截至 2016 年 5 月底,已累计激发超过 6000 次,获得了大量的宝贵数据。本文通过对呼图壁大容量气枪震源发射台的性能研究,得到以下认识:

(1)呼图壁气枪震源是基于人工水体的大容量气枪震源,具有水位稳定可控、震源重复性高的特点,震源信号相关系数大于 0.95。

(2)呼图壁气枪震源激发信号的频率主要集中在 2~6Hz,具有丰富的低频成分。通过 600 次左右的信号叠加,最远可在距气枪震源 380km 左右的台站识别出气枪震源信号,说明

发射台激发的地震波信号对介质的穿透能力较强。

除此之外,呼图壁气枪震源还具有激发能量大的特点,6条气枪1次同时激发产生的能量相当于1次 $M_L 0.9$ 的天然地震(杨微等,2013)。呼图壁气枪震源的激发不破坏激发场地,绿色环保,成本低,是进行人工地下介质结构探测和地下介质监测的理想震源。

**致谢:** 两位匿名审稿人的宝贵意见对本文的修改提供了巨大帮助。感谢中国地震局地球物理研究所王宝善研究员在程序编译和论文写作中给予的帮助。感谢新疆维吾尔自治区地震局前兆台网中心马世贵高级工程师、翟世龙工程师、周辉生工程师在气枪实验中的大力支持。中国地震局地球物理研究所王芳博士、胡久鹏博士、蒋生森博士、冀战波博士在论文写作中给予作者很多帮助,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 陈蒙,2014,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,博士论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 陈颀、张先康、丘学林等,2007,陆地人工激发地震波的一种新方法,科学通报,52(11),1317~1321。
- 邓起东、冯先岳、张培震等,1999,乌鲁木齐山前拗陷逆断裂-褶皱带及其形成机制,地学前缘,6(4),191~201。
- 董曼、魏文薪,2015,新疆北天山地区盆山交界主要构造带运动特性研究,国际地震动态,(8),27~32。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2006,重复地震及其在人工探测中的潜在应用,中国地震,22(1),1~9。
- 罗桂纯、葛洪魁、王宝善等,2007,气枪震源激发模式及应用,中国地震,23(3),225~232。
- 苏金波、王宝善、王海涛等,2015,利用大容量气枪震源资料研究北天山地区介质衰减特征,地震研究,38(4),598~605。
- 王宝善、杨微、王伟涛等,2013,利用大容量气枪监测北天山地壳介质变化,见:中国地球物理学会,中国地球物理2013——第十二专题论文集,北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社。
- 王彬、吴国华、苏有锦等,2015,宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果,地震研究,38(1),1~6。
- 杨微、葛洪魁、王宝善等,2010,由精密控制人工震源观测到的绵竹5.6级地震前后波速变化,地球物理学报,53(5),1149~1157。
- 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。
- 赵善坤、蔡昌宣、刘震等,2013,北天山矿区地应力分布与区域构造关系研究,地下空间与工程学报,9(增刊I),1599~1603。
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al, 2008, Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry, J Geophys Res, 113(B12), 36~44.
- Schaff D P, Beroza G C, Shaw B E, 1998, Postseismic response of repeating aftershocks, Geophys Res Lett, 25(15), 4549~4552.
- Poupinet G, Ellsworth W L, Frechet J, 1984, Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California, J Geophys Res, 89(B7), 5719~5731.
- Nadeau R M, Foxall W, Mcevilly T V, 1995, Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield, California, Science, 267(5197), 503~507.
- Reasenber P, Aki K, 1974, A precise, continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress, J Geophys Res, 79(2), 399~406.
- Karageorgi E, Clymer R, McEvelly T V, 1992, Seismological studies at Parkfield, II Search for temporal variations in wave propagation using vibroseis//1388~1415.



## Site selection and construction of Hutubi air-gun source signal transmitting seismic station and its characteristic of source

*Wei Bin*<sup>1)</sup> *Su Jinbo*<sup>1)</sup> *Wang Haitao*<sup>1)</sup> *Zheng Liming*<sup>1)</sup> *Wang Qiong*<sup>1)</sup>  
*Zhang Wenlai*<sup>1)</sup> *Yuan Shun*<sup>1)</sup> *Wei Yunyun*<sup>1)</sup> *Chen Hao*<sup>2)</sup>

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

2) Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

**Abstract** The site selection and construction of Hutubi, Xinjiang air-gun source signal transmitting seismic station and its characteristic of source are elaborated. The rationality and necessity of the signal transmitting station location are analyzed from the view of geological structure and historical earthquake. The rationality of pool design is also analyzed on the basis to the air-gun experimental requirements. The air-gun signal recorded by the instrument beside the pool proves that air-gun source is highly reproducible. The signal time-frequency analysis proves that the dominant frequency of the air-gun is 2–6Hz. Finally, the SNR (signal to noise ratio) from superposition shows the propagation distance of Hutubi air-gun is about 380km. This study shows that the Hutubi large volume air-gun source is green, environmentally friendly and efficient and is very suitable for detecting the underground structure and monitoring the changes of the underground medium in regional scale.

**Key words:** Air-gun source; Site selection; Correlation coefficient; Frequency characteristic