

利用气枪震源探测大陆浅部的地震学研究回顾与展望^{*}

王伟涛¹, 王宝善¹, 蒋生森¹, 胡久鹏¹, 张元生²

(1. 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;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 气枪震源在大陆浅部探测中的应用日益广泛。首先描述了大容量气枪震源在陆地水体内的激发特征, 分析了其由海洋转入陆内水体激发实现的激发模式、激发环境和探测方法的转变; 然后介绍了气枪震源在探测大陆浅部速度结构及监测弹性波速随时间变化当中的应用; 最后简述了气枪震源在地震学研究中的潜在应用及面临的挑战。实践证明, 陆地水体内激发的气枪震源是一种绿色、环保、高效的人工重复震源, 其激发的信号可用于区域尺度的地壳结构成像, 在一定程度上可替代传统炸药震源。同时, 其激发的高度重复的信号可用于弹性波速随时间变化的监测, 测量精度可达到 10^{-4} 。气枪震源是一种新型的、发展中的震源, 仍需要对其震源特性和信号处理技术开展深入的研究以拓展其在地震学研究中的应用。

关键词: 气枪震源; 浅部探测; 波速变化

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)04-0514-11

0 引言

自地震学诞生以来, 研究人员通过对地震波的产生和传播规律的研究, 获取了地球内部的结构、组成和状态变化的信息。我们对于地球内部的了解, 大部分来源于地震波, 地震波是“照亮地球的一盏明灯”(陈颙, 朱日祥, 2005)。根据产生地震波的震源及研究目标的不同, 地震学逐渐分化为两大主要分支: 天然地震学和勘探地震学。天然地震学以天然地震为主要震源, 利用专业地震台站构成接收系统, 在全球尺度至区域尺度(几十到几百千米)对地下介质进行研究。勘探地震学则主要以人工震源主动发射地震波, 以密集布设的检波器为接收设备, 研究局部尺度(几百米至十几千米)精细的浅层矿产资源分布。在遵循地震波传播规律的基础上, 二者相互借鉴又独立发展。近年来, 在很多领域, 尤其是针对地球浅部的研究中, 二者有逐渐融合的趋势。

地球的浅部, 是相对于地球半径而言, 包含极浅部的近地表沉积层直至地壳和上地幔顶部。地球浅部, 尤其是人类生活的大陆的浅部结构、状态及其变化, 是天然地震学和勘探地震学共同

关心的问题。以资源探查为主要目标的勘探地震学主要研究数米至数千米深度的地下介质。然而, 随着浅层能源日益减少及近年来非常规油气(如页岩气)的发展, 勘探地震学也逐渐关注更加深部的信息。同时, 天然地震学也借鉴勘探地震学的接收系统, 利用大量布设的密集台站, 加强对近地表构造和状态的研究(Schmandt, Clayton, 2013)。两者在大陆浅部具有共同的研究对象, 其融合的关键, 在于寻找到一种合适的震源, 既能满足勘探地震学中对震源位置和时间可控的要求, 又能实现较大范围的探测用于天然地震学的研究。

人工震源是勘探地震学使用的主要震源, 也是天然地震学所利用的震源之一。在传统研究中, 人工震源使用最多的是利用化学爆炸产生地震波的爆破震源。爆破震源可实现几十克到几千千克剂量的爆破, 其激发的地震波可传播几百米至几百千米, 在人工震源发展历史上扮演了重要的角色。然而, 随着整个社会对环境保护的日益重视, 爆破震源的使用受到越来越多的限制。同时, 爆破震源本质上是一种瞬间强脉冲型震源, 爆破往往会给周边造成难以恢复的破坏, 很难用于重复探测。地震学家转而探索利用连续震动作为震源, 促使了 Minisose、Vibrois 及 ACROSS 等震源的产

^{*} 收稿日期: 2017-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金(41374070, 41674061, 41474048)共同资助, 第一作者受云南省陈颙院士工作站(2014IC007)部分资助.

生和发展 (Yamaoka *et al.*, 2001; 常旭等, 2008; 王洪体等, 2009)。这些震源为持续非脉冲型震源, 可通过互相关、卷积等后续处理来获取地下结构对脉冲冲击的响应。然而, 这样的震源能量转化成地震波的效率较低, 并且长期的连续观测也会对震源激发场地造成破坏, 进而影响信号的重复性。

近年来, 我们通过实验研究的方式, 探索人工震源在研究大陆浅部的应用 (Wang *et al.*, 2010, 2012; 王宝善等, 2016)。实验研究表明, 将海洋中的气枪震源在陆地水体中激发, 是研究大陆浅部结构和变化的有效手段。气枪震源是一种在水中激发的震源, 它通过水下瞬间释放高压空气而激发地震波, 在一定程度上可视为脉冲型震源。由于水体的自恢复性, 气枪震源在多次激发中可以产生重复性很高的信号。在多次激发的时间尺度内, 气枪震源等效为一种连续脉冲震源。这种特征, 使得可以通过简单叠加提升信号的传播距离, 同时使得气枪震源在重复探测上具有得天独厚的优势。

自 2011 年在云南宾川建成第一个气枪震源发射台后, 至今在全国范围内已经建立了多个气枪震源发射台, 实现了地震波在陆地水体中的主动发射, 对几十到几百千米范围内的地下介质进行主动的、重复的探测 (王宝善等, 2016)。通过实验研究, 我们分析了气枪震源在陆地水体中激发的特征, 并在探测地壳浅部结构和波速变化方面开展了应用探索。

1 陆地水体中激发的大容量气枪震源特征

气枪震源是海洋勘探中广泛使用的震源, 利用其高频冲击信号可以对较小区域的精细结构进行研究。然而船载激发模式及高频信号的有限传播距离, 限制了其在大陆浅部介质上的应用研究。为克服这种限制, 我们使用了大容量气枪震源在陆地水体进行激发以提升气枪震源的探测范围 (陈颢等, 2007)。在探索将气枪震源从海洋激发转为陆地水体激发的实验研究中, 气枪震源信号的高度重复、绿色环保及平均激发成本低等优势得以保持, 并呈现了新的特征, 更适用于作为一种进行大陆浅部探测的优良震源。

1.1 激发模式的转变

气枪震源在陆地水体中激发, 实现了激发模式的转变。气枪震源是一种瞬时冲击型震源, 其释放的冲击包含高压空气瞬间释放产生的高频冲击, 以及冲击形成的气泡振荡所形成的低频冲击。这些冲击信号的特征由气枪的充气压力、触发时间和气枪容量共同控制。海洋勘探成像主要关注小尺度的精细结构, 因此往往采用不同容量的气枪组成调谐气枪阵列, 通过控制气枪的容量组合和激发时间来突出高频冲击, 压制低频冲击。由此形成的较为高频的地震波有助于高精度的成像结果。在陆地水体中激发时, 高频信号衰减过快、传播距离有限, 不利于进行区域尺度的大陆浅部探测研究。因此在将气枪震源引入陆地水体中激发时, 我们采用了大容量 (单枪气室容量 0.13 m^3) 的气枪震源, 并采用多条气枪使用非调谐模式进行激发, 从而进一步增强其低频冲击信号以实现远距离的探测, 其激发模式的差异如图 1 所示。这一激发模式的转变, 这大大增加了陆地水体中大容量气枪震源激发信号的传播距离。多次的实验结果表明, 采用 4 条 0.13 m^3 大容量气枪在 15 MPa

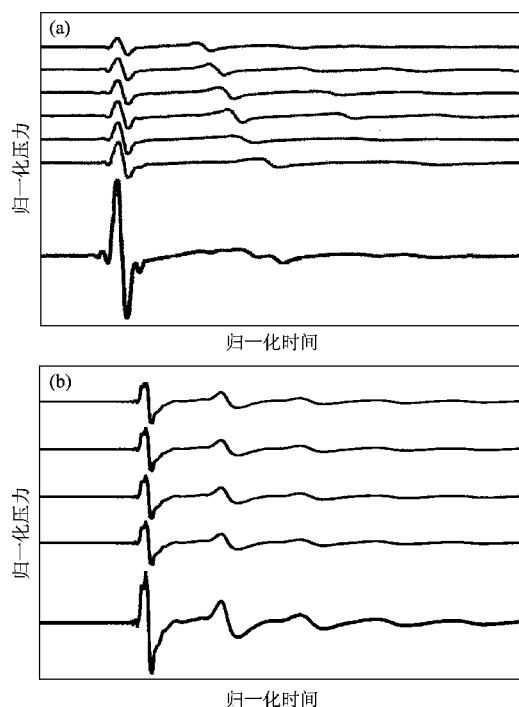


图1 海洋勘探中的气枪阵列 (a) 及陆地水体激发的大容量气枪组合 (b) 激发模式示意图
Fig. 1 Schematic of the operation mode of airgun array used for marine exploration (a) and array of large volume airguns used in reservoirs (b)

压力下激发,其产生的地震波的信号主频为 2~8 Hz。在进行 100 次线性叠加之后,其信号在多个地区均可传播至 300~500 km (王宝善等, 2016)。大容量气枪震源信号的主频范围,使其在保证传播距离的基础上保留了对地下介质相对较高的分辨率,且其主频在专业地震台的通带频率范围内,易于被接收系统记录。这种激发模式的转变,使得气枪在保持其人为可控的主动震源特征下,将其探测范围扩展到了百千米量级,从一种工业勘探设备转化为优良的地震学研究工具。

1.2 激发环境的转变

气枪震源在陆地水体中激发,实现了激发环境从无限水体到有限水体的转变。其激发过程涉及到高压气体、水体和固体地球 3 种相态物质的耦合,由其产生的地震波特征也受到这种复杂耦合过程的影响。由于气枪总是在水面以下特定深度激发,其高压空气冲击所释放的能量主要为 3 个边界所控制:①水面可视为自由边界,传播至水面的能量被完全损耗;②水体底部是主要的能量吸收和转换边界,吸收传播至此的能量并转化为地震波向外传播;③水体的侧面边界也控制着冲击能量到地震波的转化。气枪从海洋中无限水体内的激发转化为陆地有限水体中激发,使得这 3 种边界呈现了不同的特征,从而进一步影响气枪所激发的地震波的特性。

气枪释放能量在水面自由边界会产生损耗,因此气枪的沉放深度影响地震波转化效率。图 2 显示了祁连山气枪发射台在激发点附近 200 m 的地震台记录到的不同沉放深度下单次气枪记录的相对振幅变化。实验结果表明,随着气枪沉放深度的

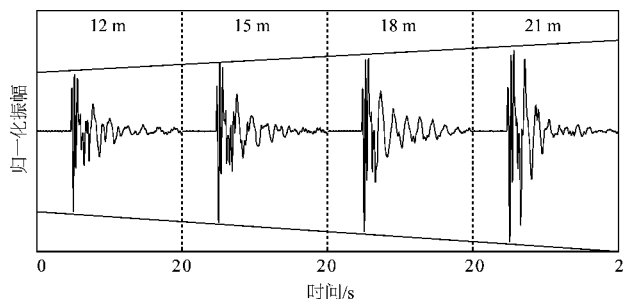


图 2 气枪震源在不同沉放深度下近场台站记录振幅的变化

Fig. 2 The amplitude variation of airgun signal with respect to the different emission depth recored by near field stations

增加,其损耗能量减小,地震波能量的转化效率增加。考虑到实际场地限制,一般建议气枪的沉放深度在水下 15 m 或者更深为佳。

在海洋无限水体中,相对于高压气泡冲击的影响范围,其侧边界和底面边界均可视为无限的边界。而在陆地的有限水体中,这两个边界都是有限的,并且跟水体的总量相关联。图 3 显示了气枪震源在不同容量的水体中激发时,震源附近记录到的地震波波形和能量的时频分布。从图中可见,总量较小的水体(如水井等)往往对应有限的底部和侧面边界,过小的底面边界不利于充分吸收气泡冲击向下的传播能量。而距离高压气体释放点过近的侧面边界会产生较强的反射作用,甚至可能破坏高压气泡的振荡过程,从而不利于较低频信号的产生,在增加波形复杂性的同时造成过多的能量损耗 (Chen *et al*, 2014; 杨微等, 2016)。在总量较多的水体(如水库)中,其底面边界相对较大,可以吸收大部分向下传播的能量。但由于实际实验中,气枪激发装置往往需要固定

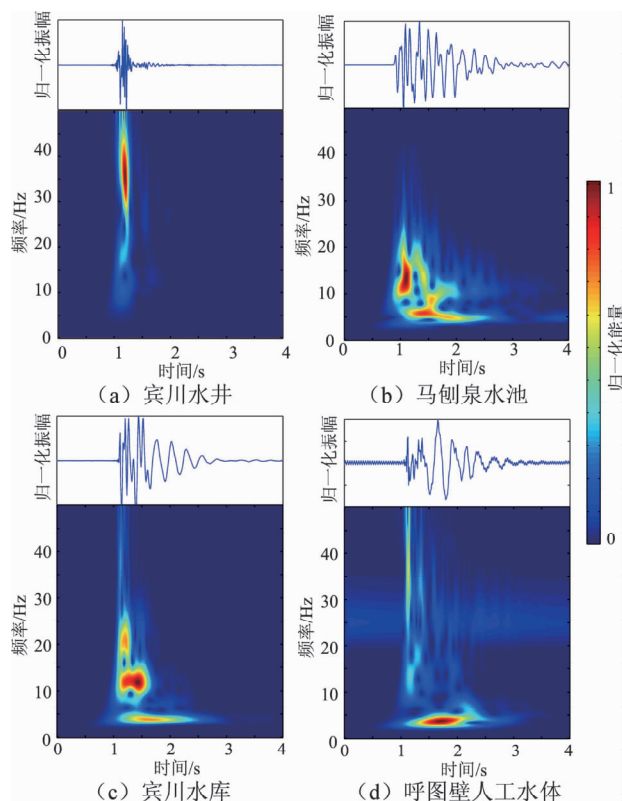


图 3 在不同容量水体中激发的气枪信号波形和频率对比图

Fig. 3 Waveforms and the time – frequency diagrams of airgun shots in different exciting conditions

在距离水体固体边界几百米处以利于工作。当较强的冲击能量传播至固体边界时，会同侧面边界相互作用产生较强的反射和折射作用，从而影响地震波的最终形态。

在分析研究了气枪在有限水体内激发的影响因素后，我们在新疆呼图壁建设了水体总量较大的人工规则水体激发环境，使其底面及侧面边界更易于吸收冲击能量转化为地震波。实验结果表明，对于单次气枪激发，其产生地震波的能量等效于一次 $M_L 0.9$ 地震，略大于相同激发参数下宾川天然水库中的 $M_L 0.7$ 地震（魏斌等，2016）。

1.3 探测方法的转变

气枪震源在陆地水体激发，实现了强震动震源到弱震动震源探测方法的转变。震源所释放出来的信号的强度决定着它能探测的地下介质的范围。一个8级天然地震释放的地震波可以震撼整个地球，提供地球极深部的信息。在人工地震测深研究中，为了获取更清晰的地震波信号，往往使用大当量的爆破作为强震动震源来提升信号强度，其爆破剂量从几百公斤到几吨不等。然而，通过简单提升单次震源强度以提高探测能力的方式越来越受到制约。大当量化学爆破会严重破坏环境，同时大当量爆破震源往往会对爆破点造成强烈破坏，无法进行高重复度的原地测量。以相对较弱的单次激发，通过累加获取较大探测距离的无损探测模式成为新的发展趋势。

气枪具有间隔脉冲源的特征，可以在同一地点产生高度重复的脉冲冲击，从而可以利用单次较弱的能量通过累加获取较强能量。气枪单次激发所释放的能量较弱，对近场场地的影响很小。实验表明，在距离激发震源600 m的位置，气枪单次震动所产生的峰值加速度已经接近背景振动水平，对激发环境而言属于无损激发（刘必灯等，2011）。这使得气枪震源可以用于城市地下结构探测、建筑物无损探测等对无损激发具有严格要求的环境中。同时，得益于气枪的高度重复特征，通过对多次激发进行叠加，在探测范围上可以等效于一次强震动激发。我们在距离宾川气枪震源300 m的陆地进行了一次900 kg炸药爆破，并对比了同一测线上110次气枪信号叠加波形（图4）。结果显示，在同样的测线上，110余次气枪叠加的信号传播距离优于900 kg炸药的激发。就震源而言，通过叠加多次高度重复的激发，提高了震源

的等效强度。同时，在多次叠加，也可以压制不相干的噪声信号，突出由气枪震源发射的相干信号，从而进一步提升了信噪比。

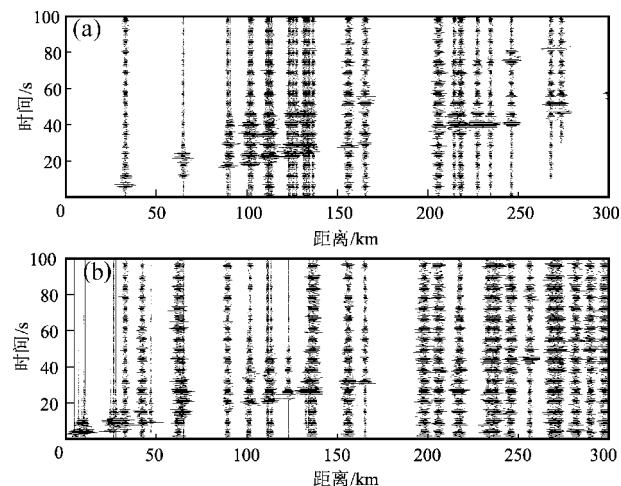


图4 同一测线上气枪震源100次信号叠加(a)及900 kg炸药爆破信号记录对比(b)

Fig. 4 The waveforms comparison along the same profile for (a) stacked 100 times signal of shot airgun (b) 900 kg explosion signal

以弱震动震源通过累加的方式去等效强震动震源，是现代地震学发展的一个重要方向。最近10年来发展的背景噪声互相关方法（Shapiro *et al*, 2005）就是通过相干累加获取高信噪比信号的典型案例，连续激发的Virbroseis、ACROSS震源也属于此范畴。相比于这些震源，气枪的单次激发均为类脉冲冲击，通过简单叠加即可实现震源能量的增强，有利于简化后续分析。同时，气枪激发的信号以体波信号为主，相比噪声互相关方法得到的面波信号，可以提供更深部的地下介质的信息。

气枪震源在陆地水体的激发，为实现强震动震源到弱震动震源探测方法的转变提供了重要的参考。这使得气枪震源在合适的条件下可以代替传统爆破震源，同时又克服了爆破震源使用环境的限制，拓展了气枪震源的应用范围，即可应用于浅部结构的勘探，也可以用于区域尺度大陆浅部的成像研究。

2 气枪震源在探测大陆浅部结构中的应用

在陆地水体内激发的大容量气枪震源的激发

时间和激发条件都人为可控,具有勘探地震学震源的特征。而其所探测的距离和深度又可延伸至天然地震学所关注的区域尺度研究,这使得气枪震源在探测大陆浅部结构中得到了广泛的应用。

大容量气枪在陆地水体中激发的信号经过叠加后可以传播几百千米,同时,其发射的地震波还具有信号重复、震相丰富等特征,在一定程度上可以代替传统爆破震源对大陆浅部结构进行研究。

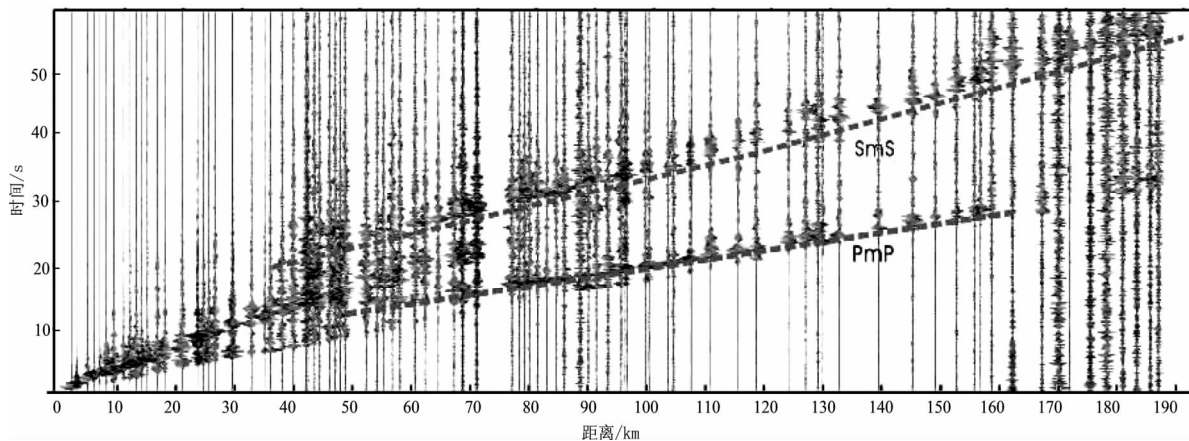


图5 上关湖实验中200次激发信号叠加信号在200 km测线上记录到清晰的P波和S波(林建民等,2008)

Fig. 5 Waveforms of P and S waves from stacked 200 airgun shots recorded along a 200 km line profile (Modified from Lin *et al.*, 2008)

传统的爆破震源主要产生P波信号,而气枪震源信号中除含有P波信号之外,还含有丰富的S波信号,震相相对丰富。因此,在分析反射和折射剖面中,可以对P波和S波信号进行联合分析。利用在燕山隆起南部布设的200 km测线所记录到的气枪信号,我们分析了其震相特征,并对该地区的P波、S波速度结构及地壳泊松比进行了研究,结果表明该地区上、下地壳中各存在一个明显的低速层,且其成因不同(林建民等,2008;陈剑雄等,2011;陈蒙等,2013)。

气枪震源在固定点激发时,其震源位置固定,波形高度重复。这种特性使得我们不仅可以在单一测线上通过叠加获取高信噪比数据,而且可以将震源视为恒定,分期布设多个测线以实现更大范围和更高密度的观测。2015年底,我们在宾川地区 $1\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ 的区域内,利用86台地震计布设了观测系统以记录气枪信号。得益于气枪震源的重复性,实验采用了分期移动布设的方法,最终利用86台三分量数字地震仪获取了543个观测点的数据,观测点平均间距30 m,如图6所示。

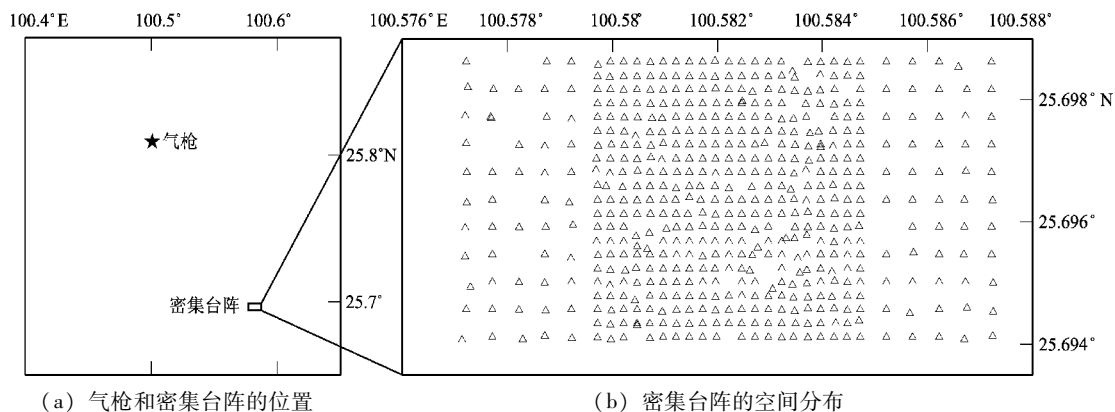


图6 利用86台地震计布设的气枪信号接收系统

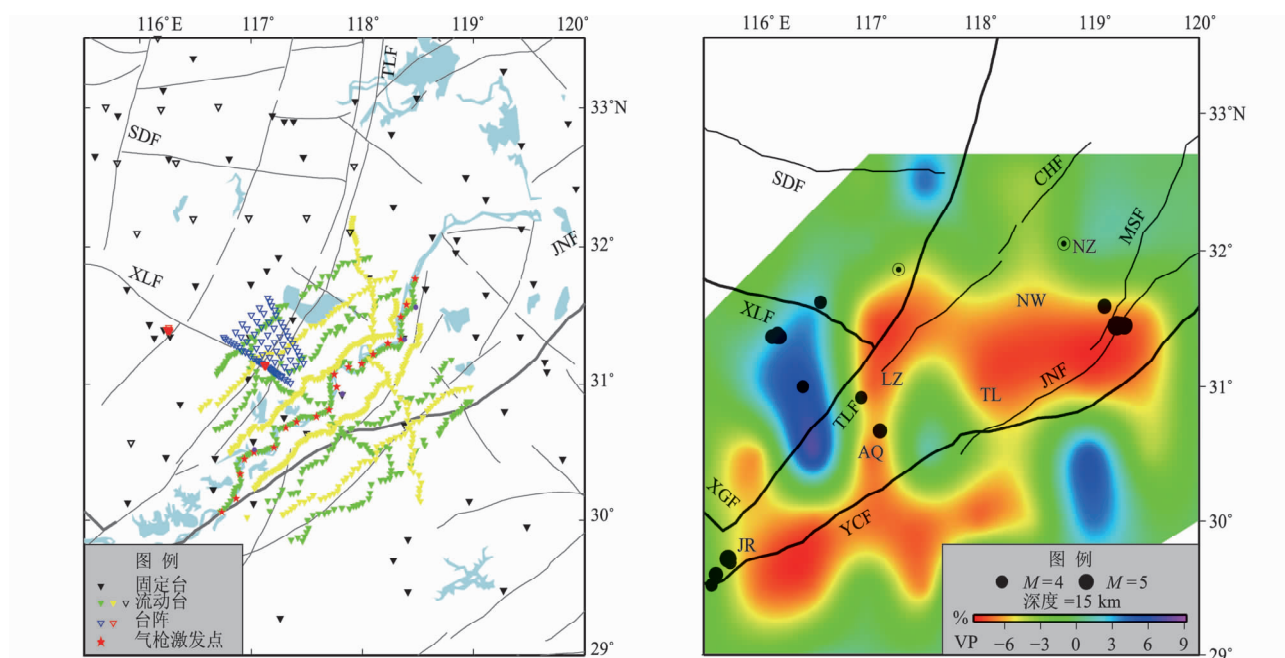
Fig. 6 Deployment of a dense array using 86 seismometers benefit from the repeatability of airgun signals

在福建开展的棉花滩水库气枪激发实验中,利用50台地震计,通过类似方法,获取了台间距为1 km的250 km长度的测线(陈惠芳等,2016)。超密集观测系统一直以来被勘探地震学使用,近年来也被天然地震学研究所采用并催生了一些新的研究方法,获得了较好的结果(Schmandt *et al*, 2013)。利用气枪震源定点激发的重复性,可以利用有限的观测仪器,构建超密集观测系统,这对于获取精细的大陆地壳浅部结构特征大有裨益。

定点激发的气枪震源在测线上的记录可以用于广角反射和折射剖面的研究。而利用多点激发的气枪震源,辅以密集观测,则可为三维体波成像提供必要的的数据支持。气枪震源的多点激发,可以通过在多个陆地水体内同时或分期进行定点激发实现,也可以使用船载气枪震源在陆内河流内进行流动激发获得。2015年10月,我们使用船载气枪震源沿着长江芜湖—安庆段进行了气枪震源的流动激发试验。实验期间,气枪震源在长江中20个固定激发点共激发了4 000多次,其激发点位以图7a中红色五角星表示。实验接收系统采用固定地震台与流动地震仪相结合的方式。图7a中

黄色和绿色三角显示了在观测区域内由1 000个流动地震台组成的11条测线,每条测线长约200 km;为更好的对微弱信号进行监测,我们利用100个流动台站组成的2个小型观测台阵接收气枪信号,用蓝色和红色倒三角表示;同时,该区域内还包含160个连续观测的固定台站,以黑色倒三角表示。实验观测系统记录到了丰富的气枪震源信号,可用于对该区域波速结构的探测研究。张云鹏等(2016)利用固定台站记录到的气枪信号对该区域进行了层析成像,展示了流动气枪源在三维体波成像中的应用,如图7b所示。船载气枪震源在长江流域的激发和观测实验,为研究长江中下游大陆浅部结构、矿产分布及成因等提供了丰富的观测资料。同时,这种实验探索使得我们可以在一些构造稳定、发生天然地震较少的区域,利用气枪震源的多点激发和流动激发,获取丰富的体波走时数据,分析大陆浅部的三维波速结构。

除在陆地水体激发外,利用船载的大容量气枪震源在近海进行流动激发,陆地台站和海底地震仪联合接收的方法,可以对海陆过渡带的地下结构进行精细的研究(丘学林等,2007;徐辉龙



(a) 气枪长江实验中的激发点位和观测系统分布

(b) 利用固定台记录到的气枪P波获得的层析成像结果(张云鹏等,2016)

TLF: 郧庐断裂; SDF: 寿县—定远断裂; CHF: 滁河断裂; MSF: 茅山东断裂; JNF: 江南断裂; YCF: 阳新一常州断裂; XGF: 襄樊—广济断裂; XLF: 信阳—六安断裂; 长江中下游矿集区; JR: 九瑞; AQ: 安庆; LZ: 庐枞; TL: 铜陵; NW: 宁芜; NZ: 宁镇

图7 气枪长江实验中的激发和观测系统及在P波层析成像结果

Fig. 7 The source – receiver configuration of Changjiang Airgun Experiments and preliminary P wave tomography result using permanent stations

等, 2012)。作为一种人工震源, 船载气枪源的激发位置和时间都是人为可控的, 因此可以事先规划观测系统和激发位置, 根据研究目的获取最优化的震源和接收点组合。海域激发的大容量气枪震源可在一定程度上改善海域地震不足、地震位置和时间不可控对成像研究的限制, 对于研究中国海陆构造带结构, 解释其构造历史具有重大的意义。

当对大陆浅部的速度结构进行研究时, 气枪震源可被视为传统的爆破震源。因此, 在勘探地震学和天然地震学发展起来的多种成熟的成像方法均可移植到基于气枪震源的结构成像研究中。同时, 相比天然地震, 气枪震源的激发时刻和位置均可精确测量, 可以减小震源因素在成像结果中引入的误差, 易于实现对地下介质结构的精细化研究。

3 气枪震源在研究大陆浅部物质状态变化中的应用

利用地震学的方法, 监测地下介质的物质组成、结构和状态随时间的变化, 开展包含时变信息的 4D 地震学研究, 是现代地震学发展的重要方向。从地震学的视角, 当地下介质某一区域的物理性质发生变化时, 会导致穿过该区域的地震波特征发生变化。利用相同的震源和观测系统进行重复测量, 就可以通过分析地震波的变化来实现对地下介质的 4D 监测, 绘制“地下云图”。

地震波的波速/走时是易于测量的物理量, 利用测量地震波波速变化来探索地震在孕育和发生过程中伴随的地下介质的状态变化, 一直是地震学研究的重要方向。地震在孕育和发生的整个物理过程中, 会引起介质的应力状态发生变化, 改变其弹性性质, 进而影响其弹性波速, 从而导致多次重复测量得到的地震波走时发生变化。研究表明, 地震孕育过程所引起的波速变化非常小, 其波速/走时的相对变化量在 10^{-4} 量级 (Wang *et al*, 2008)。早在 20 世纪 70 年代初, 地震学家已经尝试利用气枪震源主动向地下发射地震波, 研究地壳浅部 10 ~ 20 km 波速变化 (Reasenber, Aki, 1974)。随着观测仪器记录精度的提升和数据处理方法的发展, 众多研究人员尝试用多种震源来监测与地震过程相关的波速变化。Niu 等

(2008) 利用压电陶瓷震源在圣安德烈斯断层的钻井中开展实验, 发现 2 次小地震之前波速有明显变化。Yamaoka 等 (2001) 利用 ACROSS 震源对地下介质波速变化进行连续监测。杨微等 (2010) 利用 ACROSS 震源开展了汶川地震断裂带波速变化的监测研究。Breguier 等 (2008) 用背景噪声测量了 Parkfield 地区断裂带地震波波速的长期变化, 发现其同大地震的孕育和释放过程紧密联系。

以上研究表明, 通过测量地震波波速/走时的变化可以对地下介质的状态变化进行监测。但由于同地震物理过程相关的波速变化往往很小, 因此高度重复的震源信号是实现精确的 4D 监测的基础。气枪震源对激发环境无损, 激发波形高度重复的特征, 使得它在监测地下介质物质状态变化方面具有先天的优势。

对地下介质微弱波速变化的高精度监测, 得益于观测系统和数据处理方法共同的进步。地震记录仪器的时间服务精度是影响走时变化测量精度的重要因素。早期的波速变化研究, 受观测系统精度限制很大。随着地震观测仪器的发展, 目前地震仪器的时间服务精度可达到微秒量级。图 8 显示了云南宾川气枪参考台站使用的 REFTEK - 130 数采 1 600 次钟差记录的统计特征。REFTEK - 130 每小时生成一次钟差记录, 从图中可以看出, 在 1 600 h 的时长内, 多数时间内钟差保持在 $1 \mu\text{s}$ (10^{-6}s) 以内, 这为后续处理提供了可靠的数据基础。

地震波形中的尾波部分是在介质中经过多重散射的波形, 对介质波速的微小变化更为敏感, 因此被广泛的应用于监测地下介质波速变化中 (Wang *et al*, 2008)。然而, 利用尾波监测走时变化反应的是地下介质波速变化的平均效应, 较难反映波速变化发生的区域。虽然在实验室尺度可以利用尾波对波速变化区域进行定位, 但在实际野外观测中仍较难实现 (Xie *et al*, 2016)。得益于气枪震源的高度重复特征和现代仪器精确的时间服务, 地震波不同震相的绝对走时差也可用于波速变化测量。通过选取不同的地震波震相, 同长时间叠加所得的相应震相进行互相关, 可以获取该震相走时随时间的变化。利用这种方法, 可以根据震相对应路径分析波速变化的可能区域, 并分析不同的震相对波速变化的敏感程度。

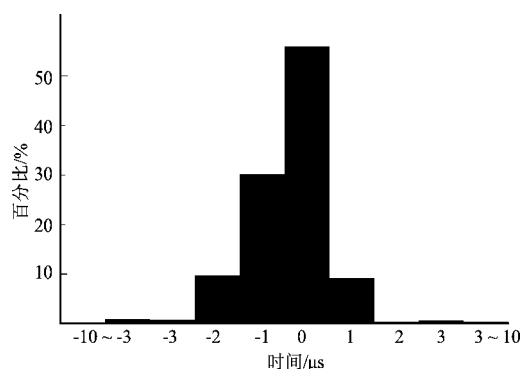


图8 REFTEK - 130 数据采集器

1 600 h 内的钟差分布

Fig. 8 Distribution of clock error for 1 600 h records from REFTEK - 130 seismic recorder

波速变化测量的精度是利用走时变化进行 4D 地震学研究的关键。在地球上周期发生的固体潮现象会引起地下介质微弱的应力变化,对比波速变化测量和固体潮变化的周期性,是对震源-接收系统和测量方法总体精度的一种评估方法。2015 年 10—11 月,我们在祁连山甘肃气枪发射台进行了每小时激发一次的连续激发试验,利用距离发射台 20 km 的地震台站的直达 P 波震相测量了其走时变化,如图 9 中红线所示,灰线显示了距离该地震台 42.7 km 的肃南洞体应变台记录到的应变曲线。从图中可以看出,地震波走时变化与应变变化存在很好的相关性,这揭示了利用高度重复的气枪震源信号探测地球内部微弱应力变化的可能性和有效性。

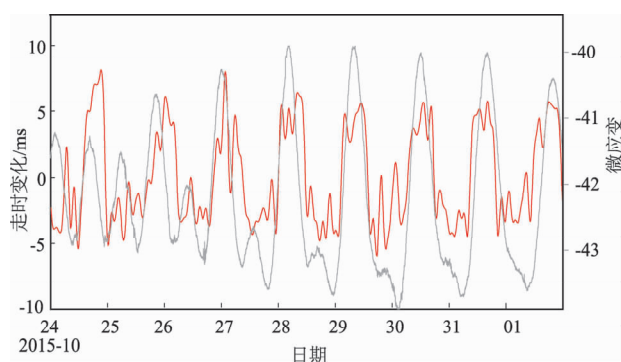


图9 利用气枪震源信号测量的地震波一周内的走时差异(红线)及应变记录(灰线)的相关性

Fig. 9 Comparison of one week travel-time difference of the P wave airgun signal shown as the red curve and the strain variations shown as the gray curve at the same period

地震波波速或者走时的变化是进行 4D 地震学研究中最常用的观测量。地下介质的变化不仅反映在地震波走时的变化,也会引起地震波波形的改变。利用气枪激发信号中的 S 波信号,赵雯佳(2013)研究了横波分裂随时间的变化。结果表明 S 波的快波偏振方向存在明显的日变化,这可能同周期性的固体潮加载有关。

随着 4D 地震学的发展,多种重复震源,如 ACROSS 震源、气枪震源及背景噪声,都被用来监测地震、火山等自然现象相关的波速变化。这些震源特征各异,研究对象也各有侧重。相比其它重复震源,气枪震源的信号重复性高,传播距离远,可以对较深部地下介质的波速变化进行监测。同时,气枪震源的激发时间和地点是人为可控的,这使得我们可以就关注的问题,在特定时间和地点进行密集的观测,改善波速变化监测的时间分辨率。综合利用多种重复震源,可以形成多尺度的,有重点的 4D 监测,其结果对于了解大陆浅部地下介质的动态变化具有重要的意义。

4 利用气枪震源研究大陆浅部的潜在应用与挑战

经过多年的实验探索,我们实现了大容量气枪震源在陆地水体内的激发向外主动发射地震波,并在研究大陆浅部结构和介质变化方面开展了应用研究。作为一种新型的人工震源,气枪震源的激发能量适中,传播距离较远,成为沟通天然地震学和勘探地震学的一种优良震源,在二者的交叉领域具有广阔的发展空间。

气枪震源可主动发射地震波,实现百千米尺度的探测距离,可用于深层矿产的探测。把气枪震源用于大尺度的勘探探测,可以在传统高精度浅层勘探成像的结果上,探查更大范围,更深深度上矿产的分布。这对于研究深层矿产分布,认识矿产资源的成矿环境和成矿机理具有重要意义。

气枪震源是一种连续脉冲震源,单次激发能量小,对环境友好,而叠加能量大,可适用于城市等对无损探测要求较高的地区。对城市这一特定区域进行地震灾害的防范,在中国飞速发展的城市化进程的背景下十分重要(陈颢等,2003)。虽然数字城市的概念已深入人心,但已有对城市的数字化地学信息绝大部分集中在地表以上,对

城市下方地质结构的数字化研究依然很少。充分利用气枪震源环境无损的特征,在无法使用爆破震源的城市地区进行小区域的主动探测,构建城市地下三维地图,是完善数字城市,减轻城市在自然灾害中损失的有效手段。气枪震源对环境无损的特点,对于城市中高层建筑物的无损探伤也具有潜在的应用前景。

气枪震源是适用于 4D 监测的人工震源,可以对地下介质状态变化进行监测。随着人类改造自然能力的增加,人类大规模的工业活动,如大型储气库的建设,二氧化碳的地下存储等都可以引起地下介质的应力状态、物理性质等发生改变。利用主动震源,动态的对这些改变进行监测,对于确保能源储存安全,研究人类工业活动对自然界的改造作用都具有重要意义。

充分发挥气枪震源的特点,配合观测技术和处理技术的进步,可以拓展气枪震源在很多研究领域的应用空间。

同时,作为一种新型的人工震源,自 2011 年云南宾川气枪发射台建成,气枪震源仅经历了 5 年的发展,在激发技术、原理和应用方面还有很多技术和科学问题亟待解决。

从激发技术层面来看,现有气枪激发技术系统均为大型系统,可以实现百千米尺度的探测距离,但其便携性和移动性不足,需要较深的水体才能激发。开发小型的流动气枪激发系统,减小对水体的依赖,实现几千米到几十千米的探测距离,对拓展气枪的应用范围具有重要意义。小型气枪激发系统易于实现气枪震源的流动激发,对于实现气枪低成本多点激发,构建城市地下三维地图具有重要意义。

从信号处理方面,气枪震源遵循的是小能量激发,累加增强的模式。在较远接收距离上,单次激发的信号往往会淹没于噪声之中。如何借鉴 GPS、通讯学科中的信号处理技术,更有效地实现弱信号的检测和提取十分重要。弱信号提取和检测技术的进步,对于扩展气枪信号的探测范围,提升 4D 监测的时间分辨率具有切实的意义。

气枪震源的激发涉及到气体、液体和固体三种相态物质的耦合,结合气泡震荡理论和地震波传播,研究气枪震源产生地震波的详细机制,需要更深入的工作。了解气枪震源激发的物理过程,实现对复杂耦合过程的模拟,对于进一步提高气

枪激发效率和后续信号分析意义重大。对震源激发机理的深入认识,较好的模拟其产生的弹性波,有助于更好的利用气枪信号波形信息开展精细化研究。

从研究思路上,地震学对震源和地下介质结构的了解总是交替进行的。通过布设密集的台阵观测,获取震源激发区的精细速度结构,可以促进对于气枪震源激发地震波的机理研究。此外,如何联合地震学中的其它震源,如背景噪声、天然地震等对大陆浅部的地壳结构和状态变化进行综合的、多尺度的研究,也是未来发展的重要方向。

5 结语

大陆是人类居住与活动的基本场所,如果说 20 世纪地震学家利用天然地震勾勒了地球内部的整体结构,那么 21 世纪地震学家面临的问题就是利用人工激发的地震波来精细的刻画我们脚下大陆的结构和状态变化。在陆地水体内激发的大容量气枪震源,是探测大陆浅部结构和状态变化的重要工具,也是联系勘探地震学和天然地震学的震源媒介。过去十年来,气枪震源研究取得的发展,显示了其多样应用前景,也彰显了亟待解决的问题。利用地震学的方法更好的探测大陆浅部结构,更精确的描述地下介质变化,需要地震学家投身其中,加强学科交叉,促进创新和融合,实现新时期地震学对大陆浅部进行精细描述的宏大梦想。

在本文的撰写过程中,参考了陈颀院士及多位专家的演讲材料,主动源 ET11 小队的翟秋实、张云鹏等多位同学为图件准备提供了帮助,在此一并感谢。

参考文献:

- 常旭,李林新,刘伊克,等. 2008. 北京断陷黄庄—高丽营断层伪随机可控震源地震剖面[J]. 地球物理学报, 51(5): 1503–1510.
- 陈惠芳,林彬华,金星,等. 2016. 水库大容量气枪震源激发条件优化实验研究[J]. 中国地震, 32(2): 241–248.
- 陈剑雄,王宝善,葛洪魁,等. 2011. 气枪探测资料对华北地区地壳低速带的约束[J]. 中国地震, 27(1): 49–55.
- 陈蒙,王宝善,王伟涛,等. 2013. 利用气枪地震资料研究燕山隆起带南部地区地壳 S 波速度及泊松比结构[J]. 地球物理学进展, 28(1): 102–110.

- 陈颢,陈龙生,于晟. 2003. 城市地球物理学发展展望[J]. 大地测量与地球动力学,23(4):1-4.
- 陈颢,张先康,丘学林,等. 2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报,52(11):1317-1321.
- 陈颢,朱日祥. 2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展,20(5):485-489.
- 林建民,王宝善,葛洪魁,等. 2008. 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,51(1):206-212.
- 刘必灯,李小军,周正华,等. 2011. 气枪震源地震效应分析[J]. 地震学报,33(4):539-544.
- 丘学林,陈颢,朱日祥,等. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析[J]. 科学通报,52(4):463-469.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 2016. 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,32(2):168-179.
- 王洪体,庄灿涛,薛兵,等. 2009. 精密主动地震监测[J]. 地球物理学报,52(7):1808-1805.
- 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[J]. 中国地震,32(2):222-230.
- 徐辉龙,夏少红,孙金龙,等. 2012. 南海北部海陆联合深地震探测及其地质学意义[J]. 热带海洋学报,21(3):21-27.
- 杨微,王宝善,刘政一,等. 2016. 不同激发环境下井中气枪震源特征研究[J]. 中国地震,32(2):231-240.
- 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[J]. 地球物理学报,53(5):1149-1157.
- 张云鹏,王宝善,王伟涛,等. 2016. 安徽气枪实验固定台层析成像初步结果[J]. 中国地震,32(2):331-342.
- 赵雯佳. 2013. 基于水库气枪震源的剪切波分裂初步研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- BRENGUIER F, CAMPILLO M, HADZHOANNOU C, *et al.* 2008. Postseismic relaxation along the San Andreas fault at parkfield from continuous seismological observations [J]. Science, 321(5895):1478-1481.
- 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[J]. Earthquake Science, 27(4):365-376.
- 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[J]. Nature, 454:204-208.
- REASENBERG P, AKI K. 1974. A precise continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress[J]. J Geophys Res, 79(2):399-406.
- SCHMANDT B, CLAYTON R W. 2013. Analysis of teleseismic P waves with a 5200 - station array in Long Beach, California: Evidence for an abrupt boundary to Inner Borderland rifting[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 118(10):5320-5338.
- SHAPIRO N M, CAMPILLO M, STEHLI L, *et al.* 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. Science, 307(5715):1615-1618.
- WANG B S, GE H K, YANG W T, *et al.* 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth[J]. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 93(5):49-50.
- WANG B S, YANG W, YUAN S, *et al.* 2010. An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water[J]. 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]. J Geophys Res, 113(B12):B12313, doi:10.1029/2007JB005023.
- XIE F, MOREAU L, ZHANG Y X, *et al.* 2016. A Bayesian approach for high resolution imaging of small changes in multiple scattering media [J]. Ultrasonics, 64:106-114.
- YAMAOKA K, KUNITOMO T, MIYAKAWA K, *et al.* 2001. A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using and ACROSS system[J]. The Island Arc, 10(3-4):336-347.

A Perspective Review of Seismological Investigation on the Crust at Regional Scale Using the Active Airgun Source

WANG Weitao¹, WANG Baoshan¹, JIANG Shengmiao¹, HU Jiupeng¹, ZHANG Yuansheng²

(1. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics,
China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, GanSu, China)

Abstract

The application of airgun source in the shallow exploration of the continent is more and more widely. Firstly, we described the excitation characteristics of large volume airgun source in the land water are, and analyzed the transform of excitation mode, excitation environment and detection method of the excitation from marine airgun source to in on – land water bodies. Secondly, we briefly introduced the application of airgun source in detecting the shallow velocity structure of the continent and monitoring the elastic wave velocity variation with time. Finally, we briefly described the potential applications and challenges of airgun source in seismology are. The practice proves that the airgun source excited in on – land water bodies is a kind of green, environmental protection and efficient artificial repetition source. The excited signal of airgun source can be applied to the regional crustal structural imaging, and can partly replace the traditional explosive source. Meanwhile, the highly repetitive signals exited by it can be used to monitor the elastic wave velocity variation, and the detecting precision reached 10^{-4} . Overall, the airgun source is a new and developing source, and it is necessary to study its source characteristics and signal processing technology to extend its application in seismology.

Keywords: airgun sources; crust velocity structure detection; wave velocity variation