大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用

陈颢^{1,2*}, 王宝善^{3†}, 姚华建^{4,5}

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210046;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

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

4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理实验室, 合肥 230026;

5. 中国科学技术大学蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 亳州 233527

* 通讯作者, E-mail: yongchen@nju.edu.cn

† 通讯作者, E-mail: wangbs@cea-igp.ac.cn

收稿日期: 2016-11-11; 接受日期: 2017-08-21; 网络版发表日期: 2017-09-18

地震行业专项项目(编号: 201508008)、国家自然科学基金项目(批准号: 41674058、41474048、41474051、41561164018)、云南省陈颢院士工作站项目(编号: 2014IC007)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: WK2080000053)资助

摘要 利用人工震源主动向地下发射地震波可以实现地下结构的高精度探测. 合适的震源是进行主动源探测的关键. 为研究大陆地壳结构及其变化, 我们从爆破、电火花、落锤、偏心振动源、重载列车行驶产生的震动、变频汽车震源(Vibroiseis)、水体中气体激发等多种震源中, 遴选出水体中气体激发的人工震源(以下简称气枪)作为研究大陆地壳结构的震源. 这种气枪震源具有绿色、环保、安全、高效等优点, 是进行大陆地壳结构探测的新型人工震源. 近年来, 利用气枪震源分别在云南宾川、新疆呼图壁和甘肃张掖建成了3个固定式地震信号发射台, 并开展了连续数年的监测. 我们发现了气枪震源产生地震波信号高度重复的特点, 利用这种特点, 新疆人工水体中激发的地震波, 在5000次叠加之后信号则可以追踪到近1300km, 可探测面积为600万km², 深达60km的地下结构. 如果把这种人工主动震源看成是一盏照亮地下结构的明灯的话, 在中国大陆, 建立10个激发地震波的发射台, 可以对中国大陆960万km²的国土进行长时间连续的全覆盖探查, 实现“天上有北斗, 地下有明灯”.

关键词 大陆地壳结构, 气枪震源, 绿色环保, 地下明灯

1 利用人工震源研究地球局部结构的需求

地震波是少数能够穿透整个地球的信号之一, 是研究地球结构的最有效工具. 人们对于地球内部结构、组成、状态和演化的了解几乎都是基于对地震波的分析研究(陈颢和朱日祥, 2005). 在过去的一个多世纪里, 天然地震学在研究地球深部结构方面取得了巨大进

展(例如, Oldham, 1906; Mohorovičić, 1909; Gutenberg, 1914; Lehmann, 1936; Jeffreys和Bullen, 1940; Aki等, 1977; Dziewonski和Anderson, 1981).

天然大地震产生的地震能量强, 但时空分布的局限性和地震数目的有限性导致研究分辨率和精度的不足, 这限制了其在局部性地壳结构探测中的应用. 背景噪声作为一种新近被利用的天然源在地下结构

中文引用格式: 陈颢, 王宝善, 姚华建. 2017. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用. 中国科学: 地球科学, 47: 1153–1165, doi: [10.1360/N072016-00368](https://doi.org/10.1360/N072016-00368)
英文引用格式: Chen Y, Wang B S, Yao H J. 2017. Seismic airgun exploration of continental crust structures. Science China Earth Sciences, 60: 1739–1751, doi: [10.1007/s11430-016-9096-6](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9096-6)

成像(例如, Shapiro等, 2005; Yao等, 2006)和介质变化监测方面应用广泛(例如, Brenguier等, 2008), 但利用背景噪声需要长时间叠加才能得到可靠的信号(王宝善等, 2016). 在地震较少地区的局部性地壳探测研究主要利用人工激发的地震波. 人工震源在激发空间和时间上的优势有望在一定程度上弥补天然地震和背景噪声的不足. 利用高性能人工震源主动向地下发射地震波已成为探测浅部(尤其是区域尺度)地壳结构和进行地壳介质变化监测的重要途径.

如果说20世纪地震学家利用天然大地震得到了地球内部三维结构的整体图像, 那么21世纪地震学家面临的问题之一, 就是要利用人工震源激发的地震波来勾画我们脚下局部性(或者说近地表)地壳结构的精细图像. 由于地缘性的差别, 局部性的结构也是多种多样, 这就形成了共同关注彼此竞争的学术领域. 发挥地缘优势, 成为促进地球科学发展新的生长点.

在利用人工震源进行大陆地区结构探测中, 主要使用炸药震源, 而炸药震源的使用受到越来越多的限制. 但是利用其他震源进行大陆地区地壳结构探测和

监测的工作相对较少. 日本地震学家发明的精密控制人工机械震源是应用范围最广及时间最长的(Yamaoka等, 2008). 但是这样的震源能量转换效率相对较低, 且可能会产生近场破坏, 进而难以进行长期连续监测.

为研究大陆地壳结构及其变化, 我们尝试了炸药爆破、电火花、落锤、重载列车行驶产生的震动、偏心振动源、变频汽车震源(Vibroiseis)、水体中气体激发等多种震源(表1). 这些实验根据时间分段, 前期(2010年之前)主要是探索各种震源的性能, 后期(2010年以后)为实际应用(王宝善等, 2016). 通过大量实验, 我们最终遴选出水体中高压气体激发的人工震源(以下简称气枪)作为研究大陆地壳结构的震源. 气枪震源具有绿色、环保、高效、安全而且经济的优点(陈颢等, 2007a).

2 世界上第一个人工发射地震波的地震台

在确定了震源之后, 我们希望将气枪震源应用于地壳结构的探测和监测中. 在研究区域的选择中我们

表 1 主动源探测大事记

时间	实验内容
1995-05	北京白家疃地震台电火花实验
2002-04	首都圈地区进行6次大当量爆破实验(李娟, 2003)
2003-08	对大秦铁路重载列车进行观测(陈棋福等, 2004)
2003-06	参加奥运公园MINI SOSIE浅层勘探实验(常旭等, 2008)
2004-03	提出华北地震台阵探测计划(陈颢等, 2005)
2004-12	北京延庆铅球实验, 探索震源编码(葛洪魁等, 2006)
2005-04	山东东营不同当量炸药激发, 海上勘探气枪激发实验(李辉等, 2007)
2005-07	天津大港油田, 海上勘探气枪激发实验
2006-01	北京顺义可控源和爆破实验(唐杰等, 2008)
2005-04	云南昆明小哨地震台落锤实验, 观测到波速变化(Wang等, 2008)
2006-07	河北遵化上关湖水库实验, 探索陆地水库进行气枪震源激发(陈颢等, 2007b)
2009-05	北京房山马刨泉气枪实验, 探索在小型水池中进行气枪激发(Wang等, 2010)
2011-04	在云南宾川建成第一个固定地震信号发射台(Wang等, 2012)
2013-05	在新疆呼图壁建成第一个人工水体固定地震信号发射台(魏斌等, 2016)
2014-11	福建尤溪街面水库实验, 探索移动式水库气枪激发
2015-05	甘肃祁连山地震信号发射台在祁连山腹地建成(张元生等, 2016)
2015-06	福建永定棉花滩水库, 武平石黄峰水库实验, 深部探测应用(陈惠芳等, 2016)
2015-10	长江安徽段气枪激发实验(徐逸鹤等, 2016)
2016-06	台湾海峡气枪激发实验和海陆联测

倾向于地震灾害较多的西部地区, 这些地区为我们研究与地震过程相关的地壳介质结构及其变化提供了可能. 我们先后在云南、新疆和甘肃建成了3个固定的气枪信号发射台.

2011年我们在云南省宾川县的大银甸水库(总库容 4000m^3 , 水深 17m)建成了固定式的气枪发射台. 宾川地震信号发射台由4支 2000in^3 的大容量气枪组成, 一次激发产生的地震波能量相当于 $M_L 0.7$ 级天然地震. 这样的地震信号通常可以传播到地下 $10\sim 20\text{km}$ 并被数十千米以内的地震台站记录到. 然而宾川地震信号发射台产生的地震波经过一定叠加之后传播距离超过 200km , 深达Moho面, 可覆盖近 20万km^2 的面积(Chen等, 2008; Wang等, 2012). 发射台激发波形经过5000次叠加处理以后, 可在 350km 距离地震台上被清晰观测到(图1). 现在世界上的地震台成千上万, 都是接收地震波的. 与常规地震台不同, 宾川地震发射台的主要功能不是接收地震波, 而是主动向外发射地震波. 因此, 从这个角度来说, 云南宾川地震信号发射台是全

图1 云南宾川气枪震源发射台地震信号的传播

固定地震台站垂直向记录5000次激发叠加波形, 叠加波形经过 $2\sim 8\text{Hz}$ 带通滤波. 两条直线分别标记了 6 和 3.5km s^{-1} 的视速度. 地震波形根据每一道最大振幅归一化显示, 本文所有地震图均采用同一方式进行归一化

世界第一个发射地震波的新型地震台.

把海洋气枪技术移植到大陆水体不是一件简单的事情. 我们经历了许许多多挫折后认识到不能简单照搬海洋技术到大陆的原因: 海洋可看成无限水体, 而大陆水体是有限的. 通过对源函数的观测与模拟, 加上对不同激发条件(如水体大小、形状、水位高低、激发压力、气枪的沉放深度(唐杰, 2008)、气枪阵列组合(李绪宣等, 2012)等影响的分析, 对激发信号的频率、振幅和相关性等有了系统认识. 并在以上认识的基础上, 建立了一套有限水体激发理论模型与处理技术. 理论分析表明在有限水体中, 水面面积是决定激发效果的主要因素; 实际工作发现激发效果同时还受到枪阵尺寸及沉放深度的影响. 根据理论分析和经验规律优选出最优气枪阵列参数, 使设计参数处于最优工况, 提高气枪激发地震波的效率(夏季等, 2016).

最初的气枪激发都是在水库、养鱼池等已有的水体中进行的, 由于降雨和灌溉等原因, 这些水体的水位涨落很难控制. 2012年, 在中国科学院郑哲敏院士的指导下, 在新疆乌鲁木齐附近的呼图壁开挖了专用于气枪震源的人工水池(图2和3). 由于呼图壁人工水体实现了对激发水体和激发条件的精准控制. 经100次叠加, 呼图壁气枪震源激发的地震波可清晰追踪到 500km 外, 可达哈萨克斯坦境内(图4), 远远超过云南宾川5000次气枪信号叠加后能达到的距离($\sim 350\text{km}$, 图1). 虽然宾川气枪震源的能量略小于呼图壁气枪震源, 但是震源能量的差异不足以引起如此显著的传播距离差异. 我们认为云南地区传播距离短可能主要由于其地壳结构复杂, 存在更强的散射和衰减, 且云南地区人口相对较密集, 噪音水平也相对较高.

几个气枪震源发射台在多年运行中发现, 气枪作为在大陆局部性结构探测方面的新型震源, 具有以下优点:

(1) 环保, 空气激发无污染, 绿色、安全, 从2006年开始以来, 我们在不同区域, 不同水体的水池、河流和海洋中进行几万次激发未见死鱼.

(2) 能量转化效率高, 8000in^3 气枪阵列在 2000psi 的工作压力下释放能量约为 $6.68 \times 10^6\text{J}$ (据Ronen(2002)公式计算), 约相当 2kg 炸药释放的能量, 其产生的地震波却等效于 $M_L 0.7$ 级天然地震的地震波, 用炸药产生 $M_L 0.7$ 级天然地震的地震波, 约需要 28kg 的炸药(根据Gitterman等(1998)、Gitterman和Hofstetter(2000)的公

图2 新疆呼图壁气枪激发池剖面图

直径100m, 深15m, 水池容量约50000m³, 水的补给系统可保证水位的变化少于0.1m

图3 新疆呼图壁气枪激发池

池中心的浮台下方有6条2000in³的Bolt气枪组合, 工作压力为2000Psi. 2013年建成后, 每月激发约200枪. 水池开始使用时, 放入几千尾鱼苗, 几年后, 鱼苗长大成了几斤重的大鱼

式估算). 这表明气枪震源产生地震波的效率约为炸药震源的10倍.

(3) 为检验气枪信号与爆破信号的差异, 我们在距离宾川气枪震源300m的陆地进行了一次900kg的爆破. 实验结果表明, 宾川气枪信号发射台信号经110次叠加比900kg爆破信号探测距离更远, 震相更丰富(图5).

(4) 频率低, 气枪震源激发信号的主要频率在2~8Hz范围, 正好处于广泛使用的现有地震仪器的频带范围内, 无需新购大量的新仪器或做任何改动.

(5) 精确可控, 气枪震源激发的时间可以人为精确控制, 控制精度为毫秒级, 而且有进一步改进的可能性.

这些特点使得气枪震源在地壳三维结构及其变化

的探测和研究中有巨大的潜在优势(王宝善等, 2016).

3 高精度重复地震的产生和利用

大陆气枪激发具有环保和安全等优点, 但单次气枪激发能量不大, 产生的地震波传播不远, 这是它最大的缺点. 从图6可以看出, 气枪信号产生的地表位移在数纳米至数十纳米之间, 在50km处产生的位移振幅约为10nm(徐逸鹤等, 2016). 在100~200km的距离上, 气枪信号引起的地表位移为纳米量级, 这个值接近或者小于一般固定台站的平均噪声水平(多数地震台站在2~8Hz频段的位移噪声在数纳米到数十纳米), 同时也接近宽频带地震仪的测量极限.

图4 新疆呼图壁气枪激发的地震信号经5000次叠加后的传播情况(a)和100次叠加结果(b)

(a) 远达1300km, 深达地壳底部Moho面. 乌鲁木齐附近的呼图壁发射, 哈萨克境内的地震台能收到信号(红色波形); (b) 100次叠加结果中信号能追踪到约700km. 三条直线分别为视速度为7.9、6和3.5 km s⁻¹

图5 宾川水库气枪激发在不同距离产生震动波形(110次叠加)(a)和宾川水库岸边(距离气枪震源约300m)的900kg炸药产生的地震波在不同距离产生震动波形(b)

两张图激发地点相同, 观测系统相同. 气枪信号(a)信噪比更高可以追踪到300km附近, 而爆破信号(b)的可识别距离约为260km. 另外, 气枪信号中震相更丰富, 比如在很多台站记录中可以识别出气枪S波震相(视速度约3.5 km s⁻¹), 而爆破信号中的S波震相很难识别; 在200km以远, 气枪信号中P波段震相比爆破信号更丰富

图6 四支气枪组成的气枪阵列在长江中激发产生的振动(水平向最大振幅)随传播距离的分布图

坐标原点为激发点(徐逸鹤等, 2016)

与炸药震源相比, 气枪震源最突出优点是重复性好。一次气枪激发在某一个地震仪的记录, 与另一次激发的记录, 几乎是不变的。不但如此, 只要激发环境不变, 不同时间气枪激发的信号也是重复的。利用气枪震源在同一地点进行激发就可以制造一些人工重复地震, 这是其他类型的震源很难实现的。

重复地震的概念首先出现在天然地震的研究中, 研究人员通过分析地震波形发现, 天然地震中有很多地震具有相似的波形记录(Nadeau等, 1994; Schaff和Richards, 2004)。重复地震是发生在同一断层位置上的一组地震, 一般具有相似的震级和极为相似的波形和震源机制(Poupinet等, 1984; Nadeau等, 1995)。利用天然重复地震, 研究人员获得了地球内部更丰富的信息, 例如: (1) 通过多个重复地震叠加记录增加信噪比提取一些微弱震相, 可以加强对断层带精细结构的研究(Zhao和Peng, 2008); (2) 利用重复地震产生的相似地震波形可以研究地球内部介质的微弱变化(Song和Richards, 1996; Poupinet等, 1984); (3) 根据重复地震产生机制的假设, 通过对重复地震的研究, 人们可以获得

断层深部的滑动特征(例如, Nadeau和McEvilly, 1999)。

天然地震研究中通常将记录波形之间相关系数0.8及以上的地震对定义为重复地震(例如, Schaff和Richards, 2004)。在新疆呼图壁激发池边约20m处架设了一台地震仪, 这种近场的地震仪记录到的信号可以用于研究气枪震源的特征。图7为激发池岸边的测震仪记录到的气枪信号, 时频分析表明(图7a)信号主频在2~6Hz, 同时600次气枪震源激发信号画在同一坐标系下几乎无法区分(图7b), 这表明震源重复性非常好。图8显示了2013-08~2014-08期间不同激发之间的近场记录信号的相关系数。在一年的气枪震源系统连续运行中, 震源系统经历了气枪机械系统磨损、气枪气室进水维修、激发池表面结冰等实验条件的变化, 这些都可能造成激发信号的细微变化, 但震源相关系数始终大于0.95(魏斌等, 2016), 这远大于天然重复地震中相关系数0.8的要求。

与天然重复地震类似, 我们至少可以在两个不同方面应用高度重复的人工震源研究地壳介质结构及其变化。首先利用震源的重复性, 我们可以将多次激

图7 呼图壁激发池20m处地震仪(参考台)记录到的地震信号及其时频图(a)以及参考台在2013-08~2013-12间参考台接收到的600次气枪震源激发信号重叠在同一坐标系下的结果(b)

(a) 信号的能量主要集中在2~6Hz; (b) 600个波形重叠非常好, 可见震源重复性非常好(垂直向记录, 经过2~6Hz滤波)(魏斌等, 2016)

图8 2013-08~2014-08期间近场台站记录到的2730次激发波形相关系数随时间的变化

气枪震源高度可重复性是炸药等其他震源无法比拟的(魏斌等, 2016)

发的信号视为一次, 通过叠加等处理方法提高接收信号的信噪比. 呼图壁震源激发的信号通过100次叠加后可以在500km附近被检测出; 而在5000次叠加之后信号则可以追踪到近1300km(图4), 这样的记录效果相当于数十吨爆破. 这极大地提升了人工震源的探测能力, 为区域介质精细结构成像提供了观测资料. 同时不同时间激发的重复震源也为我们研究地球介质随时间的微弱变化提供了可能. 气枪震源的高度重复性是一个本质性的特点, 充分利用这一特点, 可以拓宽时间, 扩大空间, 使得人工产生地震波技术获得突破性的进展.

4 地震发生前后物理过程的研究

20世纪70年代, 科学家们就提出了用人工震源探

测地下10~20km深处介质状态的变化, 从而进行地震物理预报的想法. Reasenberg和Aki(1974)认为, 预报地震的关键是要找到一种能够精确的连续向地下发射地震波的震源. 然而, 天然地震位置不易准确确定, 而且重复地震的数目也远远不够; 人工爆破太昂贵, 破坏环境, 重复性差. 没有合适的震源, 就无法对这些想法进行检验.

技术原因使得这方面的探索研究一度停滞. 近来, Niu等(2008)在圣安德烈斯断层的钻井实验时, 观测到了两次小地震(1级和3级)之前存在明显波速变化, 为理解地震孕育和发生过程提供了重要的信息. 与小地震不同, 大陆地区的破坏性中强地震通常发生在地下10~20km. 现在气枪发射台的建立为研究与中下地壳地震相关的介质变化解决了源的问题. 下一步的工作就是如何实现高精度介质变化测量, 并在地震多发区通过对案例研究为理解地震物理过程提供科学依据.

气枪信号发射台与地震台组成的观测系统可以用于研究地壳介质随时间的变化. 这样的观测系统对地壳介质变化的测量精度直接影响对地震过程的研究. 2013年在多地震的甘肃祁连山地区建立了永久性的气枪发射台, 定期向外发射地震波. 该发射场距张掖市中心53km, 激发点水深45~65m(年平均水深约为55m), 发射点于2015年年中投入正式运行. 发射点周边布设的40套短周期地震仪与震源一起形成了一个区域性的监测系统(图9). 2015-10-24~2015-11-01在祁连山气枪发射台进行了连续激发(每小时激发一次). 图10显示了ZDY20台站记录的接收到的地震波走时随时间的变化, 地震波走时存在明显的日变化. 离地

图9 张掖气枪发射台

红方框是气枪发射台, 黑三角是40套短周期地震波接收台(配有编号), 绿三角为ChinArray台站, 红色五角星代表三次地震震中位置(2015-08-02 临泽4.0级, 2015-11-23 祁连5.2级, 2016-01-21 门源6.4级)

图10 2015-10-24~2015-11-01日在祁连山气枪发射台进行了24h连续激发(每小时激发一次)地震波走时变化曲线 红色和蓝色曲线分别为编号距离震源20km的ZDY20台站100和1000Hz采样记录的地震波走时变化曲线; 图中灰线为离地震台42.7km的肃南洞体应变台站记录到的应变曲线

震台42.7km的肃南洞体应变台站测量的应变值也存在每日二高二低的日变化(图10)。地震波走时变化与应变变化存在很好的相关性, 这种相关的变化可能是地球固体潮的作用结果。地球的潮汐现象不仅发生在海洋, 也发生在固体地球中。由于太阳/月亮和地球位置的相对变化, 固体地球会发生周期性的变形, 地球内部的应力状态也会有微弱的变化。图10显示的地震波走时和固体潮变化的同步性, 揭示了用人工震源探

测地球内部微弱应力变化的可能性。

从2015年8月开始, 张掖发射台进入常规运行, 常规运行期间发射台每周进行一组(约30次)激发。传统地震记录的分析方法得到走时变化的测量精度在 10^{-1} s左右。我们利用高精度波形相关技术(例如, Wang等, 2008)分析地震波中的不同震相来研究走时变化。从63005台(图9)观测到的直达P波及反射P波走时变化曲线(图11)中可以看出, 地震波走时存在 10^{-2} s的变化。考虑到直达P波及反射P波的绝对走时分别为10和12s, 对应的相对走时变化 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 。在2015-08~2015-10期间地震波走时比其他时间都小(图11), 在其他台站也观测到类似现象。由于这期间其他地球物理观测未出现明显的变化, 我们推测这可能与2015年11月23日祁连5.2级地震有关。可见主动源在研究地震物理过程方面, 既有广阔的前途, 也面临提高测量精度的挑战。

5 长江深部探测剖面

2015年年底, 在大陆已建成了云南宾川、新疆呼图壁和甘肃张掖等3个固定式的气枪发射地震台。这些发射台特别适用于地球介质中地震波传播速度变

图 11 祁连5.2级地震(38.0°N、100.4°E、 $H=10$ km)前150天, 编号63005地震台(距震中58.6km)记录到的地震波走时变化曲线

灰色为直达P波, 黑色为反射P波. 箭头处为地震发生时刻

化的监测和研究, 是进行4D地震学研究的第一步. 它们的缺点是不能移动, 而利用能够移动的人工震源是研究地壳构造的有力工具(特别是3D地震学). 通过多年努力, 研究人员成功研制了移动式 and 船载式等多种气枪震源系统的技术装备(移动式 and 船载式气枪在近海激发的台湾海峡两岸海陆联测工作另有专文报道).

近年来, 随着“长江经济带”战略构想的提出, 在长江流域资源开发和新型城镇化建设的过程中, 首先就面临着“地下搞清楚”的问题. 长江从宜宾至长江入海口段的航道长度约2800km, 是世界上完全在一个国家境内的最长河流, 大部分航道的水深均达到20m, 是开展人工震源地壳探测的天然试验场. 探测长江流域的地壳结构, 服务于长江经济带的矿产、能源、大地构造演化、交通、水利、考古等领域, 是向科学前沿进军, 向国家战略聚焦的一次大型的科学试验. 2015年10月, 我们利用移动式气枪震源系统沿长江安徽段进行了气枪激发实验.

实验装置主要包括激发和接收两大系统:

(1) 气枪震源船从马鞍山航行至安庆(航道长度约330km), 气枪阵列由4支枪组成, 每支枪容量为2000in³, 气枪阵列水下沉放深度为12m. 激发系统采用流动激发与固定激发相结合的方式. 流动激发指的是船在航行中每隔约200米激发一次. 固定激发是在长约330km的长江航道选择20个地点(图12), 船只抛锚停止不动, 连续激发100~150次, 两种工作模式共激发约5000次;

(2) 接收系统采用固定地震台与流动地震仪相结

合的方式. 该区域 9×10^4 km²内, 布设了1000个流动地震台组成的11条测线(每条长约200km), 参与试验的还有160个固定地震台, 2500个勘探地震台组成的25km长的测线、以及100个流动地震台组成的2个小型观测台阵(图12).

在长江航道中激发气枪震源, 通过周边300km范围以内的固定地震台以及流动观测系统接收人工地震波信号, 进行长江两岸地壳结构探测, 有利于对该区域特殊的构造环境、成矿带的形成机制和巨型走滑断裂的端部效应等相关问题开展研究. 气枪激发产生了高信噪比的波形, 从波形中可以清晰地识别出多组震相(图13a). 所有记录经3~8Hz带通滤波后拾取初至Pg震相并获取震相拾取误差, 得到震相拾取误差均值为100ms. Pg到时可追踪距离为60~85km.

首先我们可以利用Pg波的走时对长江安徽段的浅部地壳速度结构进行成像(图13b). 结果显示, 沿长江从马鞍山至安庆, 上地壳速度结构存在明显横向差异, 沉积盖层厚度和浅表速度在该区呈现明显的隆升和拗陷相间的构造特征, 可能与该区域中生代以来经历的隆升和伴随着岩浆活动的伸展作用有关. 在安徽省也曾做过主动源深地震测深研究(白志明等, 2016), 对比这些工作, 发现图13b的结果与前人结果基本一致. 结果验证了气枪震源可以用来进行区域尺度的地壳结构探测. 安徽实验的更多研究还在进行中, 通过这些研究我们有望获得该地区精细的近地表和地壳三维速度结构.

将被动源(天然地震和背景噪声)数据与主动源数据有机地结合在一起, 开展三维地壳结构的高精度成像是今后的研究重点之一. 此外, 如何将精确的主动源信号用于区域地壳三维速度模型的检验与评价也将会成为本次实验及其他主动源研究的另外一个重要应用.

6 展望-地下明灯计划

从研究尺度(用深度衡量)角度, 利用枪震源对于地球大陆地壳结构探测研究可以分成如下几个层次(图14).

(1) 40km左右: 是大部分大陆地壳和地幔的相互作用深度, 涉及地球动力学的许多问题. 许多地缘性的地质问题都与这一深度的结构有关, 如青藏高原隆起、造山运动、盆地演化、克拉通减薄等.

图 12 安徽实验流动观测系统

共布设平行于长江的横测线9条和近垂直于长江的测线2条(绿色和黄色三角形)。图中红色五角星代表长江航道中固定激发点的位置, 总共20个(最东北角的激发点编号为D01, 最西南角激发点编号则为D20)蓝色和红色倒三角为小型台阵, 黑色倒三角为固定地震台。11条测线中, 沿长江航道附近布设的测线加密布设地震仪, 平均观测点距为2km, 共布设仪器100台。其余测线的观测点距为4~5km

(2) 20km左右: 是地壳中强度最高的层, 涉及到地震的孕育和发生、火山岩浆囊的形成和迁移等问题, 对这个深度的问题开展研究是认识自然灾害机理并减轻灾害的基础。

(3) 5km左右: 目前人类能够开采和利用的能源和资源主要集中在浅部地壳(5km以上)。对这个深度的问题开展研究不仅利于资源开发利用, 同时也为研究人类活动对地球介质的影响提供信息。

(4) 1km左右: 城市化进程对近地表(1km以内)介质精细结构的研究提出了越来越高的要求, 这方面的研究涉及城市的地质稳定、城市地下空间开发、城市地面建筑的减灾和防灾。

气枪震源的激发依赖于水体分布, 目前已经形成的移动式震源系统可以用于水库湖泊等水体。由于气枪震源具有较高地震波激发效率, 这个有助于我们在少量的水体中进行激发开展区域地壳三维结构探测。发展自带水体等移动气枪震源系统实现在陆地进行小容量气枪信号激发, 能够对地壳中浅部结构进行较高精度的探测。

回顾地球科学的发展历史, 技术的进步推动科学进步的例子很多。例如, 高精度测年仪器和测年方法成为地质学研究的优秀工具, 它使岩石学焕发了青春。近两年, 全球高被引频次(中国区)的10大地球科学家中, 至少有8位得益于这种技术的进步。因为有了仪器

图 13 沿江测线记录到D03固定激发点所有激发信号线性叠加剖面图(a)和长江安徽段浅部地壳P波速度结构(b)
(a) 6 km s^{-1} 折合, 剖面上可以清晰地识别出Pg、Pn、PmP等多组震相; (b) 据田晓峰等(2016). D03, 图12中蓝色五角星

图 14 科学导向的4个科研平台及观测系统

和技术, 所以才有了更精确的结果, 从而确定了很多原先存疑的认识。

由于发现和理解了气枪震源的高度重复性特点, 近年来, 大陆气枪激发地震波的技术获得了较大的进展。如果在全国建立10个激发地震波的发射台, 用作

照亮地下的明灯, 可以对中国大陆 960万 km^2 的国土进行长期连续的全覆盖探查。实现“天上有北斗, 地下有明灯”的全面探测, 为中国地学的领先发展, 提供坚实的基础。

致谢 主动源探测工作从开始以来, 给予无私支持和帮助的无数单位和个人我们无法一一列出, 这里向所有关心和支持我们工作的单位和个人表示感谢。审稿人对文章提出了建设性的意见, 田晓峰、苏金波、蒋生淼、张云鹏等同志在文章图件的准备和修改过程中付出了巨大的努力, 一并表示感谢。

参考文献

白志明, 吴庆举, 徐涛, 王晓. 2016. 中国大陆下扬子及邻区地壳结

- 构基本特征: 深地震测深研究综述. 中国地震, 32: 168–179
- 陈惠芳, 林彬华, 金星, 巫立华. 2016. 水库大容量气枪震源激发条件优化实验研究. 中国地震, 32: 241–248
- 陈棋福, 李丽, 李纲, 陈凌, 彭文涛, 汤毅, 陈颢, 王夫运. 2004. 列车振动的地震记录信号特征. 地震学报, 26: 651–659
- 常旭, 李林新, 刘伊克, 王红落. 2008. 北京断陷黄庄-高丽营断层伪随机可控震源地震剖面. 地球物理学报, 51: 1503–1510
- 陈颢, 朱日祥. 2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议. 地球科学进展, 20: 485–489
- 陈颢, 周华伟, 葛洪魁. 2005. 华北地震台阵探测计划. 大地测量与地球动力学, 25: 1–5
- 陈颢, 王宝善, 葛洪魁, 徐平, 张尉. 2007a. 建立地震发射台的建议. 地球科学进展, 22: 441–446
- 陈颢, 张先康, 丘学林, 葛洪魁, 刘宝金, 王宝善. 2007b. 陆地人工激发地震波的一种新方法. 科学通报, 52: 1317–1321
- 葛洪魁, 林建民, 王宝善, 宋丽莉, 罗桂纯, 陈颢. 2006. 编码震源提高地震探测能力的野外实验研究. 地球物理学报, 49: 864–870
- 李辉, 戴旭初, 葛洪魁, 王宝善, 林建民, 陈颢. 2007. 基于互信息量的地震信号检测和初至提取方法. 地球物理学报, 50: 1190–1197
- 李娟. 2003. 首都圈地区Pn和PmP波层析成像研究. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地球物理研究所
- 李绪宣, 王建花, 张金淼, 顾汉明. 2012. 海上气枪震源阵列优化组合设计与应用. 石油学报, 33(增刊1): 142–148
- 唐杰, 王宝善, 葛洪魁, 陈颢. 2008. 小当量激发的远距离信号检测研究. 地球物理学报, 51: 1810–1818
- 唐杰. 2008. 区域尺度深部探测中的人工源震源特性及信号检测研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学
- 田晓峰, 王夫运, 刘宝峰, 杨卓欣, 郑成龙, 高占永. 2016. 马鞍山-铜陵-安庆长江沿线上地壳速度结构成像. 中国地震, 32: 390–396
- 王宝善, 葛洪魁, 王彬, 王海涛, 张元生, 蔡辉腾, 陈颢. 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. 中国地震, 32: 168–179
- 魏斌, 苏金波, 王海涛, 郑黎明, 王琮, 张文来, 袁顺, 魏芸芸, 陈昊. 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: 222–230
- 夏季, 金星, 蔡辉腾, 徐嘉隽. 2016. 大容量气枪震源子波时频特性及其影响因素. 中国地震, 32: 249–260
- 徐逸鹤, 王宝善, 王伟涛. 2016. 利用固定台站分析长江激发气枪信号特征. 中国地震, 32: 282–295
- 张元生, 郭晓, 秦满忠, 刘旭宙, 魏从信, 沈旭章, 颜文华, 邹锐, 尹亮, 王亚红, 孙点峰, 冯红武, 张丽峰, 郭瑛霞. 2016. 甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析. 中国地震, 32: 209–215
- Aki K, Christoffersson A, Husebye E S. 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J Geophys Res*, 82: 277–296
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, Shapiro N M, Nadeau R M, Larose E. 2008. Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations. *Science*, 321: 1478–1481
- Chen Y, Liu L B, Ge H K, Liu B J, Qiu X L. 2008. Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: Experiments and preliminary results. *Geophys Prospect*, 56: 601–612
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model. *Phys Earth Planet Inter*, 25: 297–356
- Gutenberg B. 1914. Ueber Erdbebenwellen. VII A. Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben in Göttingen und Folgerung über die Konstitution des Erdkörpers (mit Tafel). Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 125–176
- Gitterman Y, Pinsky V, Shapira A. 1998. Spectral classification methods in monitoring small local events by the Israel seismic network. *J Seismol*, 2: 237–256
- Gitterman Y, Hofstetter R. 2000. Dynamic features and identification of regional seismic signals from Dead Sea calibration shots. Geophysical Inst of Israel. Contract NO. DSWA01-97-C-0151
- Jeffreys H, Bullen K E. 1940. Seismological Tables. London: British Association for the Advancement of Science
- Lehmann I. 1936. Inner earth. *Bull Cent Seismol Int*, 14: 3–31
- Mohorovičić A. 1909. Das Beben vom 8. x. 1909, Jb Met Obs Zagreb (Agram), 9: 1–63
- Nadeau R M, Antolik M, Johnson P A, Foxall W, McEvilly T V. 1994. Seismological studies at Parkfield III: Microearthquake clusters in the study of fault-zone dynamics. *Bull Seismol Soc Amer*, 84: 247–263
- 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: 503–507
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1999. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes. *Science*, 285: 718–721
- Niu F L, Silver P G, Daley T M, Cheng X, Majer E L. 2008. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site. *Nature*, 454: 204–208
- Oldham R D. 1906. The Constitution of the Interior of the Earth, as Revealed by Earthquakes. *Quat J Geol Soc*, 62: 456–475
- 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: 5719–5731
- Reasenber P, Aki K. 1974. A precise, continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress. *J Geophys Res*, 79: 399–406
- Ronen S. 2002. Psi, pascal, bars, and decibels. *Leading Edge*, 21: 60–61

- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China. [Science](#), 303: 1176–1178
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, Ritzwoller M H. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. [Science](#), 307: 1615–1618
- Song X D, Richards P G. 1996. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core. *Nature*, 382: 221–224
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, Niu F L, Wang B. 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry. [J Geophys Res](#), 113: B12313
- Wang B S, Yang W, Yuan S Y, Guo S J, Ge H K, Xu P, Chen Y. 2010. An experimental study on the excitation of large volume airguns in a small volume body of water. [J Geophys Eng](#), 7: 388–394
- Wang B S, Ge H K, Yang W, Wang W T, Wang B, Wu G H, Su Y J. 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth. [Eos Trans AGU](#), 93: 49–50
- Yamaoka K, Kunitomo T, Miyakawa K, Kobayashi K, Kumazawa M. 2008. A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system. [Island Arc](#), 10: 336–347
- Yao H, van der Hilst R D, de Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis—I. Phase velocity maps. [Geophys J Int](#), 166: 732–744
- Zhao P, Peng Z. 2008. Velocity contrast along the Calaveras fault from analysis of fault zone head waves generated by repeating earthquakes. [Geophys Res Lett](#), 35: L01303