

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,中国地震,32(2),168~179。

·综述·

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

王宝善¹⁾ 葛洪魁²⁾ 王彬³⁾ 王海涛⁴⁾
张元生⁵⁾ 蔡辉腾⁶⁾ 陈颀¹⁾

- 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),
北京市海淀区民族大学南路5号 100081
- 2) 中国石油大学(北京),北京 102249
- 3) 云南省地震局,昆明 650224
- 4) 新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011
- 5) 中国地震局兰州地震研究所,兰州 730000
- 6) 福建省地震局,福州 350003

摘要 在自然和人类活动的作用下,地球内部的介质会产生变化。通过分析来自重复地震、背景噪音和重复性人工震源等的地震波,进而研究地球介质的变化,是近年来地震学研究的一个热点方向。这些研究为人类认识地震、火山等灾害的物理过程提供了重要的手段。本文介绍了过去 10 余年中我们在利用人工震源(尤其是大容量气枪震源)探究地下介质结构及其变化方面的研究进展,以期在今后类似的研究提供参考。本文首先介绍了在不同类型震源的性能、数据处理方法等方面的研究进展和主要认识,最后也给出了关于下一步人工震源研究方向的一些思考。

关键词: 人工重复震源 大容量气枪 地下介质变化

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0168-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近年来,利用地震学方法研究地下介质的变化已引起越来越多的关注。利用地震波研究地球内部介质变化依赖于重复性震源。随着地震台站数量的增加和观测资料的累积,利用重复地震等天然重复震源研究地球介质变化取得了重要进展。

[收稿日期] 2016-03-15; [修定日期] 2016-05-14

[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(41474048、41474051、41561164018)、云南省陈颀院士工作站专项经费联合资助

[作者简介] 王宝善,男,1976年生,研究员,主要从事主动源探测方面的研究工作。E-mail:wangbs@cea-igp.ac.cn

天然地震是研究区域介质结构的重要信号来源。在天然地震中有不少是发生在同一个地区,有类似的震源机制并产生相似的地震波形(Schaff et al, 2004),这些地震被称为相似地震或重复地震。利用相似地震,Poupinet 等(1984)研究了美国加州地区 Calaveras 断层带波速变化,Song 等(1996)观测到地球内核具有更快的转动速度。

近年来,随着地震背景噪声成像技术的发展(Bensen et al, 2007; Shapiro et al, 2005; Yao et al, 2006),地震背景噪声也被作为重复震源用于地下介质变化的监测研究中。如利用背景噪声,研究人员观测到火山喷发之前地震波速会发生明显变化(Brenguier et al, 2008),地下介质波速也会因季节变化或大地震的发生而产生明显变化(Cheng et al, 2010; Chen et al, 2010; Hillers et al, 2015)。

天然地震能量大,但其时空分布相对受限,利用数量有限的相似地震或重复地震测量地下介质变化的时间、空间域分辨率皆较低。而无处不在的地震背景噪声则可以弥补天然地震时空分布的局限性,但是一方面这通常需要叠加数月的噪声数据才能得到可靠的信号,另一方面地震背景噪声源等因素的变化也可能影响对介质变化的测量(Zhan et al, 2013)。总之,利用天然重复震源进行介质变化测量的时间、空间分辨率及精度都受到一定程度的限制。

利用人工震源主动向地下发射地震波是进行地下介质变化监测的另一种手段,该手段在某种程度上克服了天然震源的不足。监测储层介质变化为油气工业提供了重要的信息,而在此基础上发展起来的四维地震学(也叫时延地震学)亦取得了长足的进展(Lumley, 2004)。很长时间以来,研究人员也尝试利用人工震源监测与地震等天然加载相关的地壳介质变化(Reasenberget al, 1974; Leary et al, 1982; Yamaoka et al, 2001; Alekseev et al, 2005)。近来,Niu 等(2008)在圣安德烈斯断层的钻井内开展的地震波速测量中发现 2 次小地震之前波速有明显变化,该研究为理解地震的孕育和发生过程提供了重要的信息。

前人开展的大部分人工震源监测研究主要集中于浅层地壳,为更好地理解中、强地震的物理过程,需要对下地壳介质进行监测研究。在过去的十几年中,我国学者开展了大量的野外实验(表 1),以探索利用人工震源监测地下介质的变化。为了对今后进一步研究提供借鉴和参考,本文主要从以下几个方面对相关研究进行了系统回顾:①各种震源性能的分析研究;②数据处理方法;③主要科学认识;④下一步研究计划。

1 人工爆破震源

人工爆破震源是利用化学爆炸产生地震波的。因其操作相对方便且当量易于控制,人工爆破被广泛应用于获取地震反射和折射剖面。2001 年前后,首都圈地区数字化地震监测台网逐步建设完成,为检验该台网的地震监测能力,我们于 2002 年 4 月在首都圈地区进行了 6 次吨级人工爆破实验,爆破产生的地震波可以被 200km 外的台站记录到。利用地震台网记录的爆破产生的 P_n、P_mP 等震相,李娟(2003)得到了首都圈地区上地幔顶部 P 波速度及其各向异性结构。

化学爆破特别是大吨位爆破在产生地震波的同时会严重破坏地表并产生相应的环境问题。为探索利用小当量爆破实现远距离探测的可能,我们于 2005 年开展了 2 次不同当量爆破激发对比实验。第 1 次于 2005 年 5 月在山东东营,实验中进行了 1 次 100kg 爆破和 35 组

表 1 过去 20 年中开展的主要探索研究

时间	实验内容
1995 年 5 月	北京白家疃地震台电火花实验
2002 年 4 月	首都圈地区进行的 6 次大当量爆破
2003 年 8 月	对大秦铁路重载列车进行观测
2003 年 6 月	参加奥运公园 MINI SOSIE 浅层勘探实验
2004 年 3 月	提出华北地震台阵探测计划
2004 年 12 月	北京延庆铅球实验,探索震源编码
2005 年 4 月	山东东营不同当量炸药激发,海上勘探气枪激发实验
2005 年 7 月	天津大港油田海上勘探气枪激发实验
2006 年 1 月	北京顺义可控源和爆破实验
2005 年 4 月	云南昆明小哨地震台落锤实验,观测到波速变化
2006 年 7 月	河北遵化上关湖水库实验,探索在陆地水库进行气枪震源激发
2009 年 5 月	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
2011 年 4 月	在云南宾川建成第 1 个固定地震信号发射台
2013 年 5 月	在新疆呼图壁建成第 1 个人工水体固定地震信号发射台
2014 年 11 月	福建尤溪街面水库实验,探索移动式水库气枪性能
2015 年 5 月	甘肃张掖地震信号发射台在祁连山腹地建成
2015 年 6 月	福建永定棉花滩水库、武平石黄峰水库实验,深部探测应用
2015 年 10 月	长江安徽段,移动气枪激发实验,深部结构探测

4kg 爆破(李辉等,2007)。第 2 次于 2005 年 12 月在北京市顺义区高丽营,实验中进行了 1 次大当量(1345kg)爆破和 16 次当量 10~25kg 不等的小爆破(唐杰等,2008)。实验结果表明,不同当量的爆破信号具有较高的相关性,数十千克的爆破信号可在距爆破点 200km 左右的台站中被识别到,且利用波形的重复性,通过一定的数据处理,能有效提高信噪比。

2 连续震源

除了在可控的时间、地点产生 1 个短时间振动信号的脉冲型人工震源外,一些人为的和天然的持续振动也可做为震源来研究地下介质结构。背景噪声成像技术就是利用天然持续振动做为震源研究地下介质结构的成功案例(Shapiro et al,2005)。

为探索人工持续振动在地下结构探测中应用的可能性,2003 年 8 月,我们在大(同)-秦(皇岛)铁路怀柔段对重载列车进行了观测。初步结果表明,列车振动信号重复性好,主要频率在 0.05~20.00Hz,可以在 2~3km 的距离上被流动地震台站观测到。该研究为进行结构探测提供了一种持续震源(陈棋福等,2004;李丽等,2004)。

近年来,利用随机冲击夯进行浅层结构探测的方法得到广泛应用,如常旭等(2008)于 2003 年在奥林匹克公园内利用 Minisose 震源对黄庄-高丽营断裂进行了成像研究。受相关数据处理方法(常旭等,2008)的启示,葛洪魁等(2006)于 2004 年 12 月底在延庆张庄地震台

利用铅球进行了编码震源的原理性实验。实验中,利用大小不同的铅球以随机的时间间隔从不同高度落下形成冲击振动。实验结果表明,可以将多次激发的连续信号作为 1 次激发信号得到记录剖面,从而进行介质结构探测(葛洪魁等,2006)。

借鉴雷达等相关技术,大约在 50 年前 ConocoPhillips 公司发明了 Vibroseis 震源。Vibroseis 震源可以产生具有固定强度的变频信号,被广泛应用于陆上石油勘探。但是 Vibroseis 震源的运行、维护成本相对较高,且激发信号频率偏高,因而在大尺度结构探测中的应用相对较少。另一种连续机械震源是日本学者于 20 世纪末、21 世纪初发明的电驱动精密控制震源(Yamaoka et al,2001)。之后,我国学者对这种震源进行改进,使得人工震源产生垂直向合力(王洪体等,2009)。杨微等(2010)利用该震源开展了汶川地震断层带结构的监测研究。

3 气枪震源

前述的震源多为陆地使用震源,为了获得更好的探测效果,这些震源常需要特殊的地基,而且上述震源在工作时会对近源场地产生一定的破坏,从而影响震源的重复性(Yamaoka et al,2001),因此无法满足长时间连续监测的需求。在水中激发的震源可以在一定程度上规避以上震源的不足,因此我们尝试使用了海洋石油勘探中广泛应用的气枪震源。

气枪震源是美国 BOLT 公司于 1964 年发明的,它通过在水下瞬间释放高压空气而激发地震波。随着技术的逐渐成熟以及专利保护的失效,气枪震源已经逐渐成为海洋石油勘探和海洋结构探测中不可或缺的震源(丘学林等,2007;祁江豪等,2015)。大量研究表明,由于在水中激发气枪震源具有对近场破坏小和重复性高的优点,气枪震源已成为进行地下介质监测的理想震源(Chen et al,2008;Reasenberget al,1974)。

考虑到中国处于大陆地区且陆上地震又最受关注,我们用了数年时间探索将在海洋石油勘探中使用的气枪震源引入内陆使用。2005 年在大港油田和胜利油田的协助下,我们利用海洋石油勘探气枪震源进行了海中激发陆地接收实验。实验期间分别采取了总容量为 2000、4000 in^3 的气枪阵列进行定点激发和移动激发。通过对流动、固定地震台站观测到的资料分析可知,石油勘探用气枪阵列传播距离较近,很难实现远距离探测。究其原因在于,石油勘探主要关注数千米以内储层的精细结构,所使用的震源是由多支小容量气枪组成的阵列。这些小容量气枪阵列具有较高的主频,可以实现高分辨率储层勘探,但其高频信号因衰减较快而很难传播到远距离。

虽然海中气枪激发实验效果不甚理想,但是相对于勘探用小容量气枪阵列,大容量气枪则会产生低频信号,有可能会达到较好的记录效果。以下将介绍过去若干年内利用大容量气枪震源开展的 7 次主要实验研究(图 1)。

3.1 河北遵化实验

为了测试大容量气枪的激发效果并探索气枪震源在陆地水体激发的可行性,我们于 2006 年在陆地水库进行了大容量气枪阵列激发实验(Chen et al,2008;陈颀等,2007)。为开展实验,首先进行了水体的勘选。水体的选择过程中主要有以下几方面考虑:①水深一般要求大于 10m;②水面面积足够大以便于施工;③备选点与水库大坝、居民点之间有一定距离(一般要求 500m 以上),以减少生产、生活对其的影响。经过多次实地调查,最终选定河北

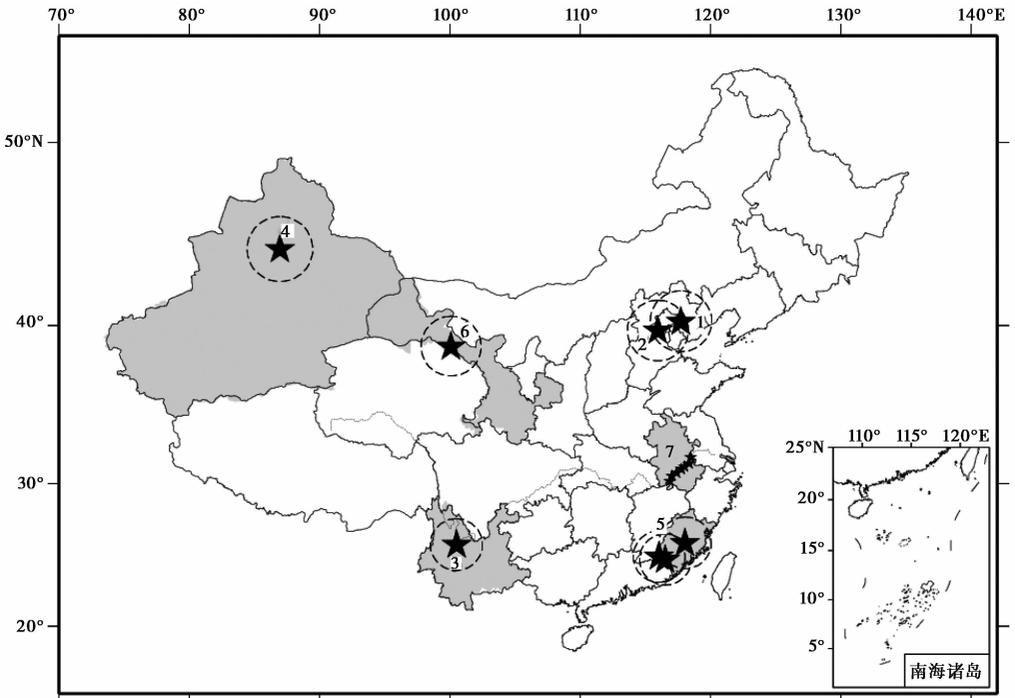


图1 在中国大陆地区开展的大容量气枪实验

1. 河北遵化实验; 2. 北京房山实验; 3. 云南宾川实验; 4. 新疆呼图壁实验;
5. 福建移动实验; 6. 甘肃张掖实验; 7. 长江马鞍山-安庆段激发实验

省遵化市上关湖水库为实验点。实验期间,我们使用了中国科学院南海海洋研究所提供的4支 BOLT Long life 1500 型气枪,单支气枪容量为 1500 in^3 (约合 24.6 L)。为使气枪震源适用于陆地水库,设计了专用枪架、浮台和升降装置等(陈颢等,2007)。为检测激发信号,在水库周边布置了强震仪和1条 180 km 长的短周期流动地震台测线。实验取得了较好的效果,气枪单次激发的信号可以追踪到 100 km 左右,经过100次叠加后信号可以在整条测线上被检测出。

之后,我们于2007年利用同一套激发装置在上关湖进行了更大容量气枪的激发实验。实验中使用了4支容量为 2000 in^3 的气枪。通过此次实验进一步验证了2006年实验的主要结论,并对陆地水库激发大容量气枪的技术系统进行了完善。

3.2 北京房山实验

上关湖实验结果表明,在较大水体中激发大容量气枪震源可以得到比较理想的效果。然而大水体的分布范围有限,这在一定程度上限制了气枪震源的使用。为测试大容量气枪在相对较小的水体中的激发效果,Wang等(2010)于2009年在北京市房山区马刨泉进行了气枪激发实验。实验中利用普通汽车吊车将气枪震源悬挂于水中进行激发,并利用周边的固定、流动地震台站记录了气枪激发信号。马刨泉水池是一个直径约 30 m 、深 17 m 的倒锥形水体。实验期间,分别测试了单支和两支 2000 in^3 的 Bolt Long life 气枪,气枪沉放于水下 12 m 。实验结果表明,在水池中激发信号的主频偏高。距离震源 100 m 以内的强震仪记录显

示,气枪震源产生了强烈的近场加速度(图 2),信号主频在 20Hz 附近。信号的优势频率随传播距离的增加而迅速降低,距震源 900m 的固定台记录信号主频在 5Hz 附近(主频也与当地浅层结构有关)。由于信号频率偏高导致传播距离不远,200 次叠加之后信号的追踪距离仅为 50km。本次实验中还进行了气枪激发对水中鱼类影响的测试,结果表明,上百次激发未对震源附近(数米)的鱼类产生可观测的损伤(Wang et al,2010)。

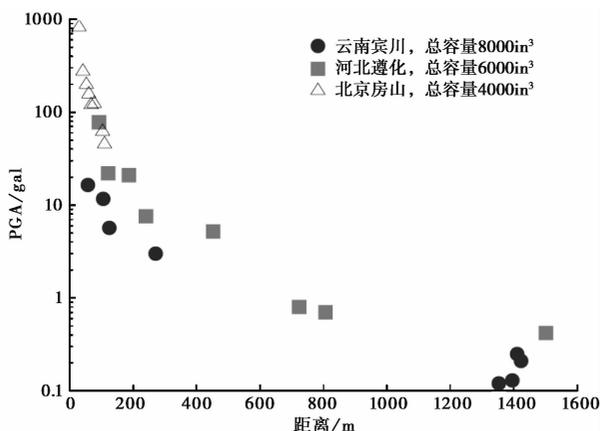


图 2 几次实验期间气枪震源引起的近场峰值加速度(PGA)随距离的变化

3.3 云南宾川地震信号发射台

经过前期多次野外实验,我们已经成功地掌握了在陆地水体中激发大容量气枪震源的各项技术(杨微等,2013a)。为了将相关技术应用于地球科学研究并服务于防震减灾,我们开始考虑建设一个以大容量气枪为核心的固定的地震信号发射台。在地震多发的云南、四川等地进行了多次勘选后,台址最终于 2009 年选定在云南省大理州宾川县大银甸水库(王彬等,2015)。随后,在经过多方面协调并办理各项必备手续之后,宾川地震信号发射台于 2010 年开始建设。2011 年 4 月发射台主体建成并进行了试激发,发射台的震源由 4 支 2000 in³ Bolt 气枪组成。试激发之后,我们搜集了发射台周边 40 个流动地震台、云南省近 50 个固定地震台及四川台网部分固定台站数据,进而对激发效果进行了评估。结果显示,发射台激发时近场振动小(图 2),振动信号主频为 3~5Hz,单次激发的信号可以在距震源 112km 的固定台站的原始数据中被识别出,100 次叠加的信号可以追踪到近 300km(Wang et al,2012)。

2011 年试激发之后,云南宾川地震信号发射台进入后期建设和功能完善阶段。2012 年 9 月,发射台进入常规运行。常规运行期间,在水位条件许可的情况下,每周激发 1 组(每组激发约 20 次),从 2014 年 9 月开始,激发加密至每周 3 次。由于大银甸水库是灌溉水源,其水位季节性变化非常明显,每年 5~9 月为枯水期,因而无法进行实验。为了积累足够的资料,除了常规激发观测外,我们还进行了多次加密激发实验。从发射台建成以来,在以发射台为中心的 100km 范围内发生了多次中强地震,这为我们研究地震过程中的介质变化提供了独一无二的资料。相关研究还在进行中,研究过程中最大的困难来自实验期间水位持续变化。通过搜集足够多的数据,我们可以归纳出水位变化对测量结果的影响,从而可以更好地研究地下介质的速度变化。

3.4 新疆呼图壁地震信号发射台

在宾川信号发射台取得初步成功之后,我们希望在更多地方和更多领域开展应用探索。新疆是我国另一个地震多发区,同时,新疆拥有丰富的油气资源。为此,我们选择距乌鲁木齐 70km 的呼图壁县建立了另一个地震信号发射台——呼图壁地震信号发射台。考虑到新疆水资源分布的特点,在建设呼图壁地震信号发射台时采用了人工水体。在中国科学院力学研究所的协助下,我们设计和开挖了 1 个直径 100m、深 16m 的漏斗形水池。因人工水体水位可保持恒定不变,从而避免了由于水位变化所造成的激发信号的变化,这为研究地下介质的变化提供了更好的保障。为了加大震源的能量,在呼图壁震源中采用了 6 支 2000 in³ 的大容量气枪(王宝善等,2013)。

呼图壁地震信号发射台于 2013 年 5 月初步建成并试运行。试运行期间我们进行了 3 个夜间激发,每个夜间激发约 30 次,共计 98 次。通过分析发现:①与宾川震源类似,呼图壁震源的优势频率集中于 3~5Hz。由于总容量更大,呼图壁震源 1 次激发相当于 0.9 级地震,比宾川震源的 0.7 级略大;②信号检测距离更远,90 次叠加信号可以在约 380km 远的固定台站观测到;③与其他实验结果一样,气枪信号具有极高的重复性(王宝善等,2013)。

在呼图壁地震信号发射台建成后,为了将其应用于油气资源领域,我们与中国石油天然气总公司的相关部门取得联系,了解呼图壁周边油气生产情况,并获悉在距呼图壁震源 30km 的地方建成了当时全国最大的地下储气库——呼图壁地下储气库。随后,我们针对地下储气库开展了深入的研究。通过过去数年的数据积累,我们下一步将深入系统地研究地下储气库注、采过程中伴随的介质波速变化。目前,呼图壁储气库已经成为一个天然实验场,在这里我们开展了多学科综合研究,以求更好地探究人类活动对地球介质的影响。

3.5 福建移动式气枪震源系统

前文介绍的固定式地震信号发射台皆可用于区域介质变化的监测。为扩大气枪震源的应用范围,福建省地震局结合福建-台湾海峡深部结构探测的需求,建立了由 4 支 2000 in³ 的大容量气枪组成的移动式气枪震源系统(专利号:ZL 2015 2 0105395.1),并于 2014 年 11 月在福建尤溪街面水库进行实验测试。测试结果表明,移动式震源系统具有良好的稳定性和重复性,近岸首台信号相似性大于 95%;与固定发射台类似,气枪激发信号优势频率为 4~6Hz;据福建及周边固定台网的数据分析,单次激发所产生的地震波信号能够传播 193km,1024 次叠加后可传播至 500km 左右;经水库沿 NE 向布设了一条北段长 310km、南段长 250km 的短周期流动地震台测线,分析其数据发现,经 250 次叠加后全线均接收到水库气枪信号。实验证明了移动式气枪震源系统在深部探测中可部分替代爆破的可行性。随后,福建省地震局于 2015 年 6 月利用该套移动震源系统分别在福建永定棉花滩水库和武平石黄峰水库进行了激发实验,并将其应用于区域速度结构探测中(陈惠芳等,2016)。

3.6 甘肃张掖地震信号发射台

分别于 2011、2013 年建成的宾川、呼图壁地震信号发射台,现在已经作为研究地震过程和人类活动对地球介质影响的实验场。前期实验结果都表明,气枪震源产生的信号能穿透整个地壳到达上地幔顶部。这样的震源为研究其他区域性地球动力学问题提供了可使用的重复信号。青藏高原是在我国大陆地区研究地球动力学问题的重要试验场,而青藏高原东北缘也是研究青藏高原物质运移及其与周边块体相互作用的理想场所。为此,我们于 2013

年开始在青藏高原东北缘寻找适合进行人工震源探测的场所。经过多次调研和实地考察,最终选定在甘肃省张掖市祁连山内建设第 3 个地震信号发射台。与云南宾川地震信号发射台一样,甘肃张掖地震信号发射台由 4 支 2000 in³ 的大容量气枪组成。发射台于 2014 年 12 月进行了试激发,激发结果表明,发射台产生的地震信号能有效传播,可以在距发射台 300km 的台站被记录到。在进一步完善功能后,发射台于 2015 年 8 月进入常规运行。关于张掖震源的具体情况请参阅张元生等(2016)。

3.7 长江安徽段气枪激发实验

上述开展的人工震源研究多以监测地下介质变化为目标。气枪震源在探测区域地下结构方面也具有一定的优势,并被应用于海陆联合地壳结构探测中(丘学林等,2007)。为探索移动气枪震源在内陆河流进行百千米尺度地壳结构探测中应用的可能性,2015 年 10 月,我们利用“延平 2 号”气枪震源船在长江芜湖-安庆段进行了流动气枪震源实验。实验期间一共进行了 4000 多次激发,这些激发信号被周边上千个固定和流动地震台站(阵)所记录。这些观测为研究该区域地球科学问题提供了丰富的观测资料(张云鹏等,2016;田晓峰等,2016;徐逸鹤等,2016;徐嘉隽等,2016)。

4 人工震源数据处理方法

由于人工震源探测的数据处理方法、思路与传统天然震源探测的研究略有不同,在探索各种震源性能的同时,我们也对数据处理方法进行了探索。

2006 年为探索利用人工震源研究地下介质的变化,我们在云南昆明小哨地震台开展了为期 1 个月的连续实验。实验中我们使用了电动落锤作为震源,并且布置了 5 个流动地震台和 1 条浅层勘探剖面。2006 年 4 月 7 日~5 月 8 日间,每天进行 6 组激发(分别在 00:30、01:30、06:30、07:30、22:30 和 23:30)。每组激发中我们在 12min 内完成 30 次锤击。为减少地震仪时钟漂移对测量结果的影响,在数据处理中采用了尾波干涉技术来测量介质的波速变化。利用尾波干涉技术,实现了 10^{-4} 相对波速变化的测量(Wang et al,2008)。

尾波虽然能实现高精度的波速变化测量,但是很难直接给出波速变化发生的位置。因此,我们采用了基于高精度波形互相关的波速变化测量方法进行不同震源的走时变化测量。分别将该方法应用于在陕西宁强开展的落锤震源监测(王伟涛等,2009)和在龙门山山前断裂进行的 ACROSS 连续监测(杨微等,2010)。为更好地处理 ACROSS 震源的信号,我们还比较了不同处理方法对最终结果的影响(杨微等,2013b)。

以上的波速变化测量工作都是基于中小尺度数据(数百米至数千米),而气枪震源提供的重复信号为我们进行中等尺度的研究(上百千米)提供了可能。但是气枪震源的信号会受到水位、工作压力等因素的影响(Chen et al,2014)。为减少震源变化对测量结果的影响,我们将近场记录的气枪震源所激发的震动信号近似作为震源时间函数,再通过反卷积的方法将远场记录波形中的震源特性扣除,从而得到近似由震源到台站的近似格林函数(王宝善等,2012;翟秋实等,2016)。对于近似格林函数,我们再采用波形互相关的方法得到不同震相的高精度走时变化(王宝善等,2015)。

利用地震波研究地下结构及其变化的精度受限于地震记录的信噪比。在开展以上各项研究的同时,我们也一直致力于寻找和发展提高信号信噪比的方法。葛洪魁等(2006)探索

了利用波形互相关技术对多次连续激发的信号进行编码压缩并提高信噪比的方法。李辉等(2007)引入互信息量并对地震信号进行检测和初至拾取。郑成龙等(2015)发展了利用高信噪比信号为模板进行S变换滤波的方法来提高单次激发信号的信噪比。我们也在尝试利用相位加权叠加(Zeng et al, 2016)等方法对信号进行分析处理。

5 取得的科学成果和认识

通过大量野外实验,我们得到了以下主要认识(Chen et al, 2008):①大容量气枪阵列能够成功地在陆地水库中激发(杨微等, 2013);②陆地水库激发的气枪震源重复性高,对近场影响小,对水库鱼类影响小(Wang et al, 2010),是一种对环境友好的绿色震源;③由于使用了大容量气枪阵列,震源激发信号的主频为3~5Hz,非常有利于信号的远距离传播和地震台站的接收;④气枪震源不仅可以产生纵波也可以产生横波;⑤在已经开展的实验中,总容量为6000~12000 in³的气枪阵列在水库中激发的信号相当于0.5~0.9级的小地震;⑥气枪信号追踪距离可以达到上百千米,并随着叠加次数的增加而增加(林建民等, 2008);⑦气枪震源产生的信号具有极高的重复性。相同工作条件下,气枪阵列产生的信号的相关系数通常大于0.99(Wang et al, 2012)。

与人工爆破类似,气枪震源激发的信号可以用于地壳结构的探测。我们利用2006年河北上关湖实验期间流动地震测线记录的数据,采用波形拟合的方法对燕山隆起带南部地壳的P波、S波速度及泊松比结构进行了研究,结果证实了该地区上、下地壳中各存在一个明显的低速层(陈蒙等, 2013;陈剑雄等, 2011)。结合该地区其他的地球物理和地质资料推测,上、下地壳的低速层可能由不同的原因所致(陈蒙等, 2013)。

利用不同类型的人工震源,我们在不同地区开展了地壳介质变化监测研究。在2006年云南昆明小哨地震台实验中,我们发现地震波的波速存在显著的日变化,且与附近井水水位有很好的相关性。通过与多种地球物理参数进行对比分析,我们推测大气压变化是导致波速变化的主要原因之一(Wang et al, 2008)。在陕西宁强、四川绵竹的实验中,我们都观测到由于当地的地震引起的波速变化。随后,Yang等(2014)通过正演的方法探讨了同震波速变化的机理,结果显示,地震导致的断层带应力释放可能是波速变化的主因。对于云南宾川地震信号发射台,我们利用同样的处理方法观测到波速存在明显的日变化;利用呼图壁震源,我们观测到波速变化与地下储气库注气压力之间存在一定的相关性(相关结果都将另文陈述)。

地下介质应力状态的变化不仅会改变经过其中的地震波的速度,同时也引起地震波的偏振变化。通过观测地震波偏振特征等也能推测地下介质应力状态的变化。相对波速变化的测量、地震波偏振的测量对地震仪器的时间服务精度要求较低。通过实验室实验我们发现,面波的偏振率与岩石受到的应力间存在明显相关性,且面波的偏振性比波速具有更高的敏感性(辛维等, 2011)。由于气枪震源能产生丰富的震相(林建民等, 2008,张尉等, 2009),我们也尝试对气枪震源信号进行横波分裂的研究,结果表明,S波的快波偏振方向存在明显的日变化,这可能与周期性固体潮加载有关(赵雯佳, 2013)。

6 对下一步研究的思考

通过10多年的探索(表1),我们逐渐建成了独特的观测系统。目前,我们在全国很多

地方开展了人工气枪震源探测研究工作(图1),并得到如下一些主要认识和成果:①气枪震源性能优越,是进行地下介质变化监测的理想震源;②地下介质会因为各种天然和人为加载而发生变化。

今后,我们计划将相关工作分为如下几个方面来开展深入研究:①发展小规模流动人工震源,进行地表以下数百米范围内精细结构成像工作,以服务于我国城市化战略的需求;②以呼图壁储气库为试验场,深入研究人类活动对地下介质变化的影响;③利用各种人工震源,研究区域性(百千米)地球动力学问题;④持续在云南、新疆和甘肃等地开展观测研究,分析地下介质时空演化与地震活动间的关系,促进对地震孕育和发生过程的认识;⑤发展信号处理技术依然是更有效地开展以上研究的核心问题,通过学科交叉和技术借鉴等方法探索新的人工震源信号处理方法。

致谢:在过去20年的探索研究中,我们得到中国地震局地球物理勘探中心、北京市地震局、河北省地震局、福建省地震局、中国科学院力学研究所、中国科学技术大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院测量与地球物理研究所、中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司等单位的大力支持,大量研究生和技术人员在野外实验中付出了巨大的努力,在此一并感谢。感谢两位审稿人对本文提出的修改意见。

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,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,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,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,地球物理学进展,28(1),102~110。
- 陈棋福、李丽、李纲等,2004,列车振动的地震记录信号特征,地震学报,26(6),651~659。
- 陈颢、王宝善、葛洪魁等,2007,建立地震发射台的建议,地球科学进展,22(5),441~446。
- 葛洪魁、林建民、王宝善等,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(3),864~870。
- 李辉、戴旭初、葛洪魁等,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(4),1190~1197。
- 李娟,2003,首都圈地区Pn和PmP波层析成像研究,博士论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 李丽、彭文涛、李纲等,2004,可作为新震源的列车振动及实验研究,地球物理学报,47(4),680~684。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2008,大容量气枪震源特征及深部介质中传播的震相分析,地球物理学报,51(1),206~212。
- 祁江豪、张训华、吴志强等,2015,南海海 OBS2013 海陆联合深地震探测初步成果,热带海洋学报,34(2),76~84。
- 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,科学通报,52(4),463~469。
- 唐杰、王宝善、葛洪魁等,2008,小当量激发的远距离信号检测研究,地球物理学报,51(6),1810~1818。
- 田晓峰、王夫运、刘保峰等,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(2),390~396。
- 王宝善、杨微、王伟涛等,2012,利用反褶积消除激发环境对水库大容量气枪信号的影响,见:中国地球物理学会,中国地球物理第二十八年年会摘要文集,北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社。
- 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,中国地球物理第二十九年年会摘要文集,北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社。
- 王宝善、杨微、王伟涛等,2015,由大容量气枪重复震源获得的地下介质波速变化及其意义,见:中国地球物理学会,中国地球物理第三十一年会摘要文集,北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社。
- 王彬、吴国华、苏有锦,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。
- 王洪体、庄灿涛、薛兵等,2009,精密主动地震监测,地球物理学报,52(7),1808~1805。
- 王伟涛、王宝善、葛洪魁等,2009,利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化,中国地震,25(3),223~233。
- 辛维、王宝善、郭志伟等,2011,单轴加载条件下瑞利波偏振和不同震相波速对应力敏感性的实验研究,中国地震,27(1),

39~48。

- 徐嘉隽、蔡辉腾、金星等,2016,大容量气枪震源长江定点击发信号检测,中国地震,32(2),379~389。
- 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(2),282~295。
- 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,2013a,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。
- 杨微、王宝善、葛洪魁等,2013b,精密控制机械震源特征及信号检测方法,中国石油大学学报(自然科学版),37(1),50~55。
- 张尉、戴恒昌、李向阳等,2009,水库气枪震源产生的 S 波及其分裂,地震地质,31(1),22~33。
- 张元生、郭晓、秦满忠等,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(2),209~215。
- 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,中国地震,32(2),331~342。
- 翟秋实、姚华建、王宝善,2016,气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究,中国地震,32(2),295~304。
- 赵雯佳,2013,基于水库气枪震源的剪切波分裂初步研究,硕士论文,兰州:中国地震局兰州地震研究所。
- 郑成龙、王宝善,2015,S 变换在地震资料处理中的应用及展望,地球物理学进展,30(4),1580~1591。
- Alekseev A S, Chichinin I S, Korneev V A, 2005, Powerful low-frequency vibrators for active seismology, Bull Seism Soc Am, 95, 1~17.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al, 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, Geophys J Int, 169(3), 1239~1260.
- Brenguier F, Shapiro N M, Campillo M, et al, 2008, Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, Nature Geoscience, 1, 126~130.
- Chen J H, Froment B, Liu Q Y, et al, 2010, Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, Geophys Res Lett, 37, L18302. doi:10.1029/2010GL044582.
- 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, Liu L B, Ge H K, et al, 2008, Using an airgun array in a land reservoir as the seismic source for seismotectonic studies in northern China: experiments and preliminary results, Geophysical Prospecting, 56(4), 601~612.
- Cheng X, Niu F, Wang B S, 2010, Coseismic velocity change in the rupture zone of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake observed from ambient seismic noise, Bull Seism Soc Am, 100(5B), 2539~2550.
- Hilliers G, Ben-Zion Y, Campillo M, et al, 2015, Seasonal variations of seismic velocities in the San Jacinto Fault area observed with ambient seismic noise, Geophys J Int, 202(2), 920~932.
- Leary P C, Malin P E, 1982, Millisecond accurate monitoring of seismic travel times over 13- and 18-kilometer baselines, J Geophys Res, 87(B8), 6919~6930.
- Lumley D E, 2004, Business and technology challenges for 4D seismic reservoir monitoring, The Leading Edge, 23(11), 1166~1168.
- 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, 204~208.
- 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(2), 399~406.
- 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.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al, 2005, High-resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, Science, 307, 1615~1617.
- Song X, Richards P G, 1996, Seismological evidence for differential rotation of the earth's inner core, Nature, 382, 221~224.
- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al, 2012, Transmitting seismic station monitors fault zone at depth, 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, *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.
- Yamaoka K, Kunitomo T, Miyakawa K, et al, 2001, A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system, *The Island Arc*, **10**, 336~347.
- Yang W, Ge H K, Wang B S, et al, 2014, Active source monitoring at the Wenchuan fault zone: coseismic velocity change associated with aftershock event and its implication, *Earthquake Science*, **27**(6), 599~606.
- Yao H, Vander Hilst R D, De Hoop M D, 2006, Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-I. Phase velocity maps, *Geophys J Int*, **166**(2), 732~744.
- Zeng X, Thurber C H, 2016, A graphics processing unit implementation for time-frequency phase-weighted stacking, *Seism Res Lett*, **87**(2A), 358~362.
- Zhan Z, Tsai V C, Clayton R W, 2013, Spurious velocity changes caused by temporal variations in ambient noise frequency content, *Geophys J Int*, **194**(3), 1574~1581.

Practices and advances in exploring the subsurface structure and its temporal evolution with repeatable artificial sources

Wang Baoshan¹⁾ Ge Hongkui²⁾ Wang Bin³⁾ Wang Haitao⁴⁾ Zhang Yuansheng⁵⁾
Cai Huiteng⁶⁾ Chen Yong¹⁾

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

2) China Petroleum University (Beijing), Beijing 102249, China

3) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

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

5) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

6) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

Abstract The Earth's structure may change with time under the natural or anthropogenic loading. Monitoring the subtle changes of the subsurface structure with repeatable seismic sources as repeating earthquake, ambient seismic noise, and artificial sources has become one of the hot topics in seismological research. Those studies provide important clues in understanding the physical process of hazardous events such as earthquakes and volcanic eruptions. In this review we introduce the practices and advances in exploring and monitoring the subsurface structure with artificial seismic sources. This review is organized as following. First of all, we describe the studies on the characteristics of different types of seismic source (especially the air-gun source). Then the advances on data processing and mechanical understanding are depicted. At the end of this review, we reveal the prospect of future study of exploring and monitoring the subsurface structure and its temporal variations using active source.

Key words: Artificial source; Large volume air-gun; Subsurface changes