

王彬、李孝宾、刘自凤等, 2016, 宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果, 中国地震, 32(2), 193~201。

·震源研究·

宾川地震信号发射台的 震源系统、观测系统和观测结果

王彬¹⁾ 李孝宾¹⁾ 刘自凤¹⁾ 杨军¹⁾
杨润海¹⁾ 王宝善²⁾ 杨微²⁾

1) 云南省地震局, 昆明市北辰大道 650224

2) 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

摘要 概括总结了宾川地震信号发射台及所处区域地球物理观测的基本情况, 重点介绍了宾川地震信号发射台观测系统的构成以及气枪震源在水库、井中激发的特性和信号的传播距离。对发射台建成以来所开展的工作、取得的观测实验研究结果以及遇到的问题进行了总结和探讨。结合项目的目标提出了今后一段时间主要应开展的研究工作。

关键词: 地震信号发射台 主动源 观测系统

[文章编号] 1001-4683(2016)02-0193-09

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

地震是地壳长期运动使得在局部地区应力积累超过地壳岩石介质强度后突然发生破裂的自然现象。长期以来, 尽管人们为实现对地震的预测进行了很多的探索, 但对地震孕育发生的物理过程仍然知之不多。这主要是由于地震发生在地下深处, 人们很难连续、直接地观测到表征其变化过程的一些特征物理量以定量了解地震孕育发生的过程。

虽然强烈地震是灾难性的, 但由地震激发的穿透地球介质的地震波却是研究地球介质结构、物质组成的重要手段。人们关于地球内部的知识绝大部分来源于对地震波的研究(陈颢等, 2005), 因此, 深化对地震波的运动学、动力学特征研究仍是地震学研究中最为重要的一项工作。天然地震由于存在震源分布不均匀、震源位置难以精确测定和资料积累的长期性等问题, 使得我们在利用其地震波研究相关问题时存在一些不易克服的困难。对此, 研究人员为寻求一种能够产生满足研究区域尺度的地震波的震源进行了很多的探索(陈颢等, 2007a、2007b)。

传统爆炸震源的主要缺点是对环境的破坏和不具有原地的可重复性。很多此类震源由

[收稿日期] 2016-03-29; [修定日期] 2016-06-20

[项目类别] 国家自然科学基金(41474048)、云南省陈颢院士工作站专项经费(2014IC007)联合资助

[作者简介] 王彬, 男, 1964年生, 研究员, 主要从事地震学研究。E-mail: wbin8@163.com

于激发能量小,导致地震波传播距离有限。2006 年我们利用一种冲击震源进行了为期 1 个月的观测研究,其有效观测距离约 2km,利用尾波干涉法(Wang et al,2008)对地震波走时变化(波速)的观测精度达到了 10^{-4} (Wang et al,2008;王彬等,2012)。

近年来,我国科研人员对多种震源进行了大量野外观测实验(葛洪魁等,2006;林建民等,2008)。陈颢等(2007a、2007b)将广泛应用于海洋地球物理勘探的气枪震源移植到陆地水体中,并成功进行了实验(林建民等,2008)。2012 年全球第 1 个陆地气枪激发震源在云南省宾川县建成(王彬等,2015;Wang et al,2012),这标志着气枪主动源探测进入了实际的观测应用研究阶段。

宾川地震信号发射台位于红河断裂带与程海断裂带之间,地处滇西地震预报实验场核心区域。该区地震活动频繁,自发射台建成以来,其周边 150km 内发生数 10 次 $M3.0$ 以上地震;区内不仅建有 40 多个主动源流动地震观测台,还有多个云南专业地震观测台站(图 1)。区域内还开展形变、地下流体、重力、流动地磁、GNSS 等观测,具有较好的地球物理观测基础。而且长期以来,作为地震重点监视防御区,该区域开展了较为深入的地球物理、地震地质、历史地震等的探测研究和总结工作,积累了长期的观测资料,取得了多方面的研究成果(晏凤桐等,1996),这都为主动源的探测研究奠定了较好的观测研究基础。宾川地震信号发射台的建成对区域地球物理观测研究,特别是为地震孕育过程的监测提供了一种全新的方法。主动源探测方法具有震源特性的高度重复性、可定点连续产生地震波、绿色环保、便于开展流动观测等特性,可为利用地震波研究地下介质的结构、物性乃至地下介质的应力场状

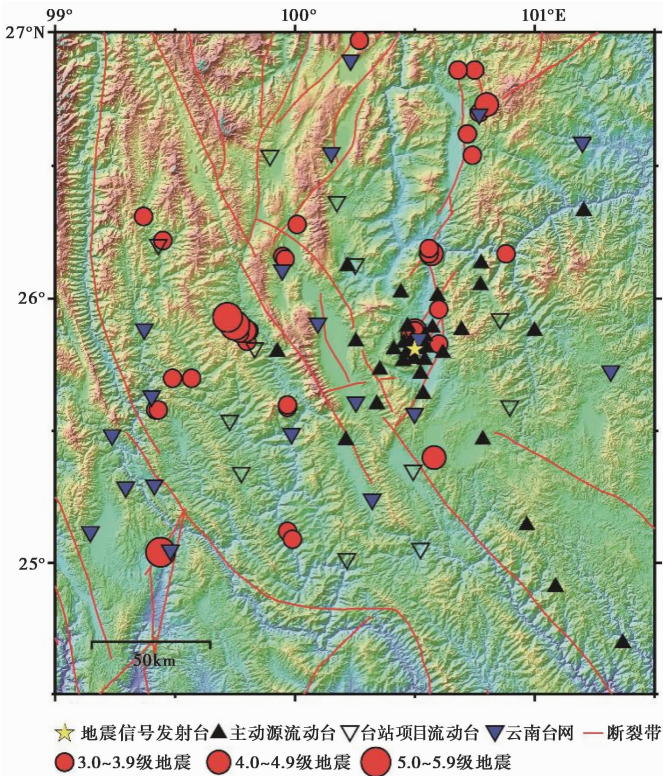


图 1 宾川地震信号发射台周边地震观测台分布以及地震活动情况

态及其变化提供有效的手段。

1 信号发射台建设及观测系统

1.1 地震信号发射台的建设

宾川大银甸水库为一中型水库,主坝高 58m,坝长 144m,库容为 $4.085\times10^5\text{m}^3$,该水库以农业灌溉为主,兼具防洪、为县城供水等功能,最大水深超过 20m。受生活、生产用水变化的影响,水库水位呈季节性显著变化,每年 5~8 月水位最低(图 2)。

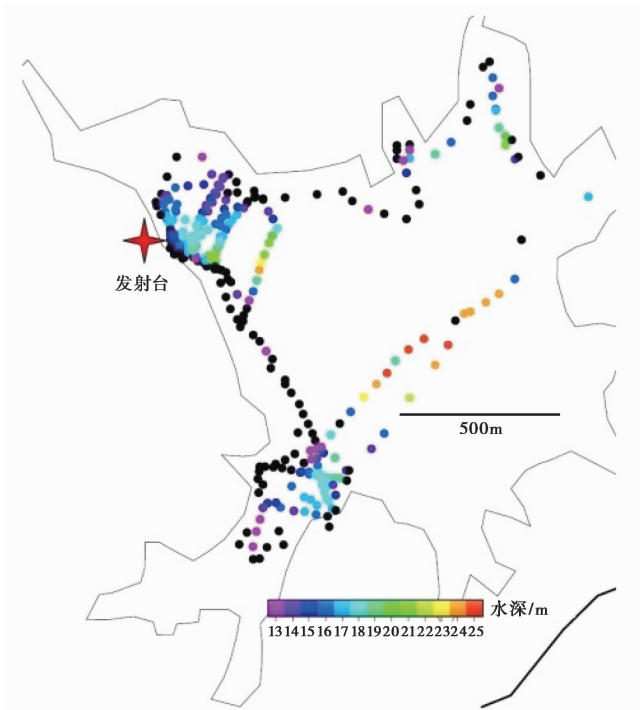


图 2 水库形状及水深分布
水深测量时间为 2010 年 3 月

发射台配有单枪容量为 2000in^3 的 Bolt Longlife 型气枪 4 支、大功率空气压缩机 1 台、储气瓶组和气源、气枪控制系统等。为便于气枪的操作与检修,在基地建有 6013 型塔式起重机。气枪入水工作时,4 支气枪悬挂于浮台下 10m 左右。

为克服每年 5~8 月水库水位较低而无法进行激发实验的不足,我们于 2014 年底在基地内建成了一口深 20m、直径 5m 的气枪激发专用井。由于激发井的尺寸限制,目前井中只能进行单支气枪激发。因此,后期的常规观测实验中,在水库水位满足工作条件时我们优先在水库进行激发。

其他独立的地球物理观测资料可为主动源观测结果的解释提供重要的约束和参考。为了充分利用滇西地震预报实验场区已有的各种地球物理观测资料,我们在距基地 4km 的 1 个测震台处建设了 1 个 GNSS 连续观测站,以便与滇西地区已有的观测站构成一个形变连续观测网络。

地震信号发射台建成后,在距震源最近的岸边、水库大坝等处架设了多台强震仪进行了多次重复观测。结果表明,气枪震源的激发实验,对水库的安全运行没有任何影响,同时经过观察发现,对水库中的鱼类亦无影响(王彬等,2015)。

1.2 观测系统

宾川地震信号发射台的观测系统依托滇西地震预报实验场区原有的 5 个地震台站和云南测震台网的相关台站。喜马拉雅项目实施过程中在云南共架设了 280 个流动地震观测台,其中 40 个台是为宾川地震信号发射台专门建设的,截至目前,这 40 个台一直正常工作,成为最主要的接收台网(图 1)。同时在周边地区,云南省地震局沿金沙江流域建设了一批水库地震监测台网,其中一部分台站也能有效记录到宾川地震信号发射台的信号。固定台网使用的地震计以 BBVS-60、KS2000 为主,数采以北京港震公司的 EDAS-24 IP 为主。40 个流动台主要使用 Reftek130B 和 GuralpCMG-40T,采样率为 100Hz。

根据对台站观测资料的分析,我们先后对一些测震台的观测条件进行了改善,经过对比改善前、后的观测数据发现,质量得到明显提高。同时,为了实现不同的研究目的,专门设计了特殊的观测系统。2015 年 11 月,在基地与 2013 年 3 月 31 日洱源 5.5 级地震震中之间,架设了由 15 个地震台组成的 1 条测线,进行了为期 1 个月的观测实验。

2 气枪震源的震源特性

2.1 气枪震源在水库中的激发特性

气枪在陆地水体中的激发是一种新型震源,了解其震源特性是开展后续研究的基础。陆地水体体积有限,加之水库等水体的形状通常不规则,这都是与气枪在海洋中激发不同的方面。为了研究气枪在水库中的激发特性和多支气枪组合激发的效率,我们开展了相关的工作。在水库中,4 支气枪悬挂的浮台置于靠近库岸处,因此,4 支气枪与不规则库岸间的距离稍有不同(图 3)。我们对 4 支气枪同时激发以及不同位置的气枪单枪激发的情况进行了实验观测研究,对距岸边约 50m 的参考台的记录进行分析。

实验结果表明:①单支气枪激发 100 多次的叠加信号可在 150km 外的地震台被记录

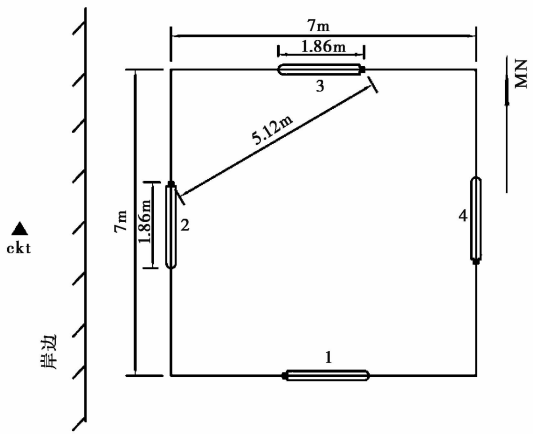


图 3 4 支气枪的编号、布设位置和参考台位置
黑色三角形为参考台

到;②单支气枪激发与 4 支气枪同时激发的信号频率基本相同,且衰减趋势基本一致,但 4 支气枪同时激发的信号的均方根振幅约为单支气枪的 4 倍;③水库气枪激发信号的信噪比达到 25 dB 时,相关系数可以达到 0.99 以上;④4 支气枪同时激发的激发效率是单支气枪的 4 倍。由分析结果可见,宾川地震信号发射台在牺牲一定效率的情况下,单支气枪激发信号可以替代 4 支气枪组合的激发信号(李孝宾等,2016)。此外,4 支悬挂于浮台上不同位置的气枪单独激发信号时也有所差异,估计与离岸距离以及水库岸边不规则的地形有关。

气枪在有限水体中激发的地震信号强度、频率与水体的体积(重量)和形状(边界条件)等有关,因此,在有限的水体中气枪震源其实是一个由气枪和水体共同作用形成的震源体。由实验结果可知,虽然单枪激发能量不如 4 枪同时激发,但经过多次叠加亦可达到与 4 枪激发相同的探测效果。由于单枪具有更为方便轻捷的特点,在今后开展的气枪源流动激发观测中,应对单枪激发进行更为深入的研究。

2.2 气枪震源在井中的激发特性

在井中激发大容量气枪的实验相对罕见,因此对该震源的了解也相对欠缺。为探索井中激发震源的特性,我们于 2014 年 8 月进行了井中激发实验。实验期间水位保持在 15m,我们使用 1 支气枪沉放于水下 13m 处进行了 200 多次激发。

图 4 为参考台(距水库 50m,距井位 20m)记录到的在相同激发压力下单枪水库激发和井中激发的波形及其振幅谱。由图 4 可见,井中激发波形(图 4(b))的最大振幅高出水库中激发波形(图 4(a))1 个数量级,但受限于水体,气泡无法完全振荡开来,水体受到气泡波的冲击在井里快速来回振荡,其波形持续时间比水库中激发的短,而且信号频率主要集中于 20~40Hz(图 4(d))。相比于同一台站记录的水库中单枪信号(图 4(c)),井中激发的气枪信号看不到尾部类似的低频气泡振荡,其主频高于气枪水库中激发所观测到的信号。由于高频信号比低频的衰减快,因此可以推断,井中激发的气枪信号传播距离应该比同支气枪在水库中激发的传播距离短。

2015 年 6 月,我们又使用 250 in^3 的小枪在井中进行实验,采用与大枪井中实验相同的参数(水深、沉放深度、激发压力),气枪的容量却只有大枪的 1/4,激发效果与大枪的对比见图 5。

进一步的分析表明,井中单枪 1 次激发的信号可在相距 7km 的台站分辨出来,而水库单枪激发信号则可在约相距 20km 的台站识别出来。将井中气枪信号进行叠加滤波处理(由于不同激发条件产生信号的主频不同,所以我们采用不同的滤波频段),结果表明,经过 100 次叠加并经过 2~30Hz 带通滤波后,可在相距 27km 的台站看到信号(图 6(b)),同样的激发次数经过 2~8Hz 带通滤波,水库中激发信号传播得更远(图 6(c)),而使用 250 in^3 的小枪在井中激发,信号经过 200 次叠加,使用 2~30Hz 带通滤波后同样可以在相距 27km 的台站检测到(图 6(a))。

3 地震波走时变化监测的初步结果

自 2012 年宾川地震信号发射台投入观测实验后,除因水位较低或设备检修等时段不能进行激发实验外,其他时段都进行了激发观测实验。在这些观测研究中,除了深化对气枪震源特性的研究外,对观测系统的测量精度、影响因素等也进行了较为深入的研究。在此期

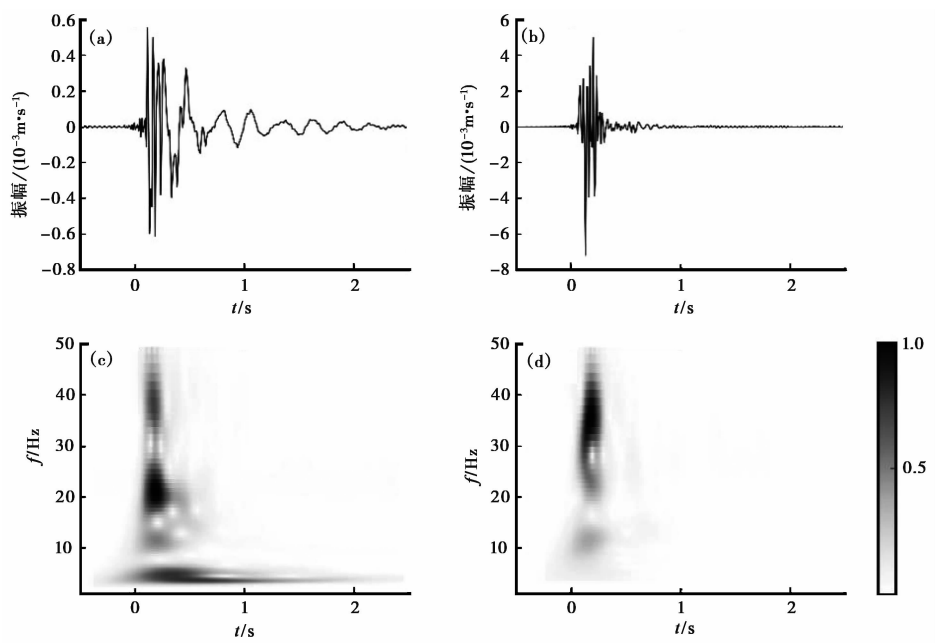


图 4 单支气枪激发参考台垂直分量波形及时频分析
图(a)、(c)为水库;图(b)、(d)为井中

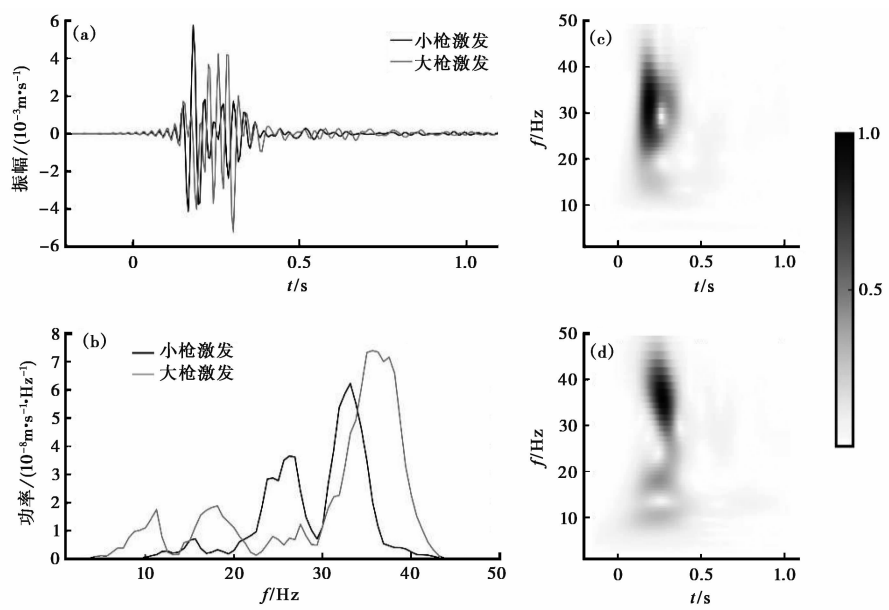


图 5 井中小枪和大枪激发参考台垂直向信号波形对比(a)、功率谱分析(b)
以及小枪的时频分析(c)、大枪的时频分析(d)

间,在发射台周围 100km 范围内,共发生了 14 次 4.0 级以上地震,其中有 2 次 5 级以上地震。因此,宾川地震信号发射台观测实验的重点之一是研究监测区域在地震孕育发生过程中地下介质波速的变化。图 7 为发射台附近部分台站 2013、2014 年在观测实验时段初至波走时

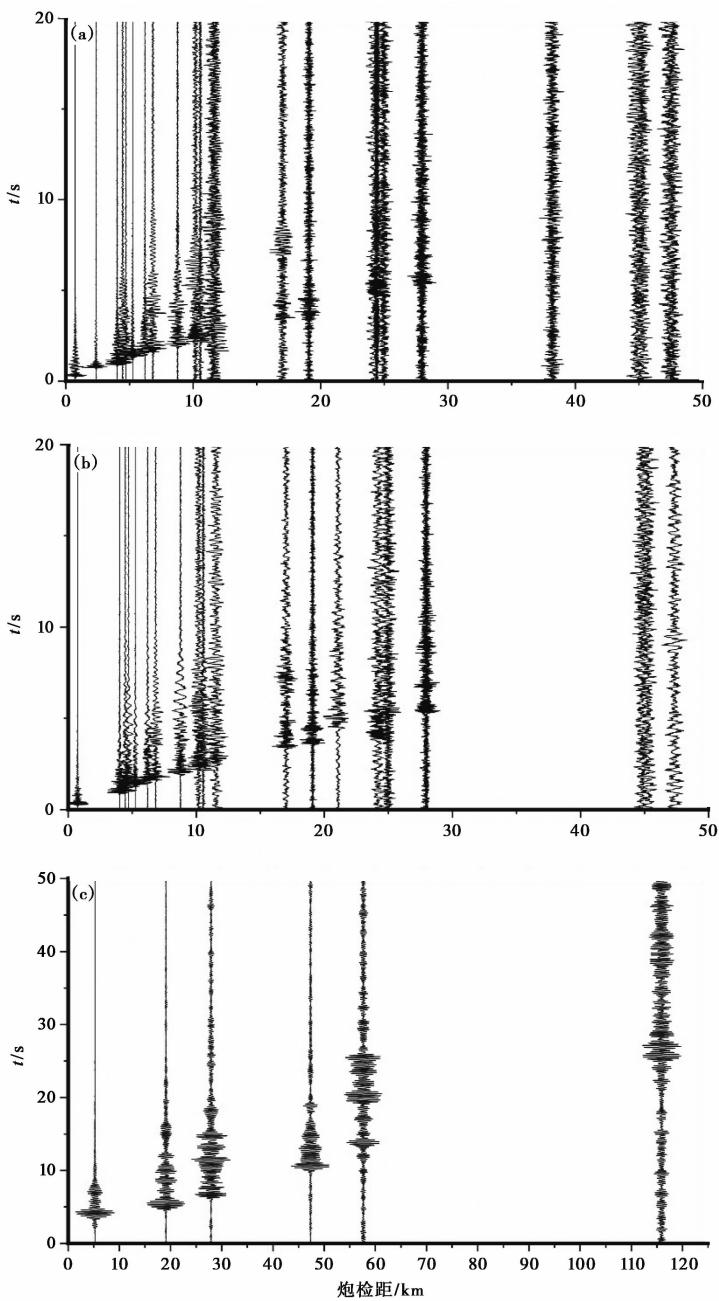


图 6 小枪在井中激发信号叠加 200 次 2~30Hz 带通滤波(a)、大枪在井中激发信号叠加 100 次 2~30Hz 带通滤波(b)以及单支大枪在水库激发叠加 100 次 2~8Hz 带通滤波(c)的信号剖面

的变化曲线。

图 7(a) 显示,6 个台走时变化基本一致,但 53278 台的走时变化幅度比其它 5 个台大一些;图 7(b) 显示,2014 年 9 月以后 6 个台走时变化较为平稳,且变化趋势一致。

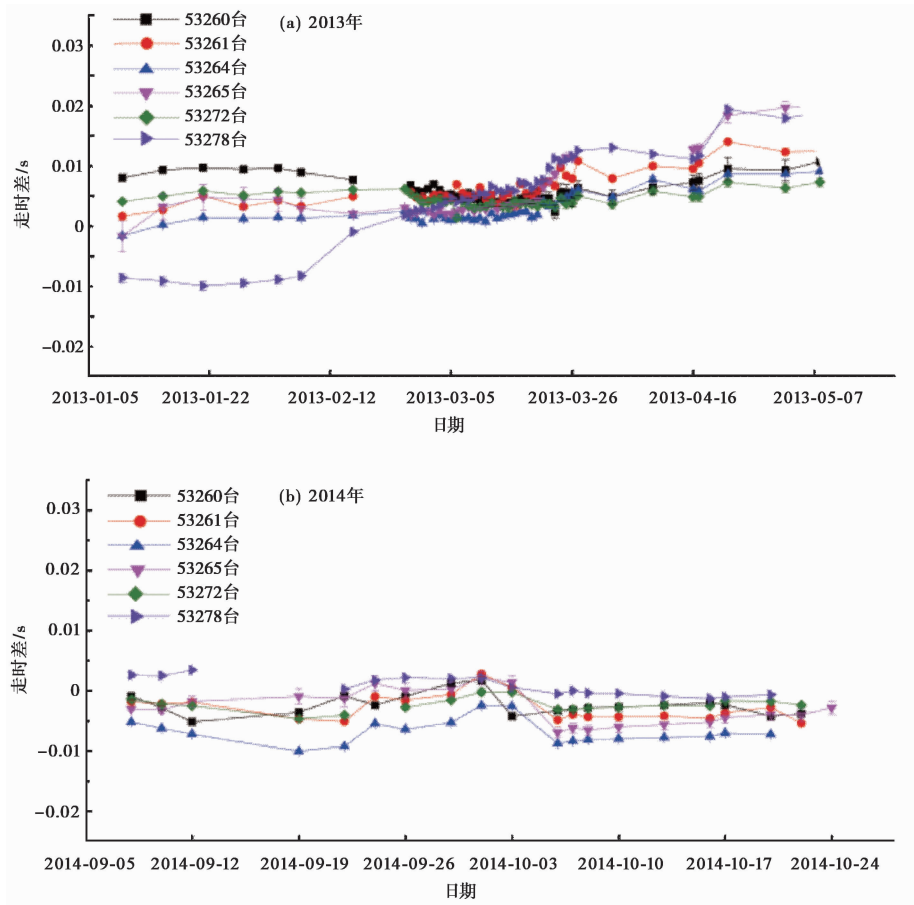


图 7 部分台站不同时段初至波走时变化曲线(据刘自凤等(2015))

2013 年 3 月 3 日洱源县发生 5.5 级地震。洱源地震震中距宾川地震信号发射台约 70km,在距洱源地震震中约 5km 处有 1 台流动地震仪(53036 台),初步分析发现,地震前后地震波走时发生了变化,进一步的研究正在进行中。

4 结论与讨论

宾川地震信号发射台建成以来,已进行了 4 年多的观测实验,其间取得的一些研究成果已在国内外有关刊物上发表。在完善硬件建设的同时,在气枪震源特性及影响因素、系统观测精度、介质波速(走时)变化等方面的研究也取得了一些进展。这些进展和成果显示了主动地震观测在地球科学研究中所具有的独特作用和优势。

由于大银甸水库的功能主要是农业灌溉和县城生活用水,因此每年 5~7 月水位变化很大,有时甚至因水位太低而使实验中断。同时,对整个实验过程的观测资料进行分析处理发现,水库水位变化对地震波走时有着明显的影响。这些都是需要进一步深入研究的问题。

为了充分利用发射台周围密布的观测台网的数据,利用背景噪声和主动源成像方法研究滇西地区地下介质精细的三维结构是下一步工作的重要内容。同时,针对研究区内发生的地震,利用已有的观测资料进行回朔检验,清楚地认识一次地震的物理过程(4D)是实现

本项目最终目标的一个重要方面,而利用背景噪声和主动源信号进行波速变化的连续监测则是实现这一目标的重要方法。此外,利用主动源信号还可对背景噪声的波速变化测量精度进行检验,并在此基础上实现对介质波速变化区域的定位。就目前的研究工作而言,在强噪声背景下有效地提取微弱信号是解决这些问题最为关键的技术,基于此,还需借鉴 GPS 和 B 超等相关技术的方法,以进一步推进地震波主动源探测工作。

致谢: 宾川地震信号发射台的建成是我们与大理州地震局、宾川县地震局共同努力的结果,这项工作得到了中国地震局和大理州政府有关领导的关心和大力支持,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 陈颢、李宜晋,2007a,地震波雷达研究展望:用人工震源探测大陆地壳结构,中国科学技术大学学报,37(8),813~819。
- 陈颢、王宝善、葛洪魁等,2007b,建立地震发射台的建议,地球科学进展,22(5),441~446。
- 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(5),485~489。
- 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试验研究,地球物理学报,49(3),864~870。
- 李孝宾、叶泵、杨军等,2016,水库气枪震源不同组合激发效率的对比研究,地震研究,待刊。
- 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,地球物理学报,51(1),206~212。
- 刘自风、苏有锦、王宝善等,2015,宾川主动源地震波走时变化分析方法研究,地震研究,38(4),591~597。
- 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。
- 王彬、杨润海、王宝善等,2012,地震波走时变化精确测量的实验研究,云南大学学报(自然科学版),34(增刊 II),15~20。
- 晏凤桐、阚荣举、周瑞琦等,1996,滇西实验场及邻区地震构造、应力场及地震活动基本特征,见:国家地震局科技监测司、国家地震局滇西地震预报实验场、滇西地震预报实验研究论文集(1991-1995),北京:地震出版社。
- 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, Zhu P, Chen Y, et al, 2008, Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry, J Geophys Res, 113(B12313), 1~12.

The source and observation system of Binchuan earthquake signal transmitting seismic station and its preliminary observation results

Wang Bin¹⁾ Li Xianbin¹⁾ Liu Zifeng¹⁾ Yang Jun¹⁾ Yang Runhai¹⁾
Wang Baoshan²⁾ Yang Wei²⁾

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

2) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract This paper summarizes the basic situation of the Binchuan Earthquake Transmitting Seismic Station and geophysical observations of its located area, with the focus on the constitution of the seismic signal transmitter and observation system, characteristics and propagation distances of artificial seismic waves excited by air guns in reservoir and in well. The paper also summarizes and discusses about the results of the observations and problems encountered since Transmitting Seismic Station was built up. Finally, this paper proposes the main researches to be carried out on the basis of the project aims.

Key words: Seismic transmitter; Active source; Observation system