

叶泵,陈佳,杨建文,等,2021. 断裂带对气枪震源信号传播路径及波速变化规律的影响. 中国地震,37(4):888~897.

断裂带对气枪震源信号传播路径 及波速变化规律的影响

叶泵^{1,2)} 陈佳²⁾ 杨建文¹⁾ 霍远航²⁾ 王军²⁾ 李孝宾²⁾

1) 中国科学技术大学,地球物理和空间科学学院,合肥 230026

2) 云南省地震局滇西地震预报实验场办公室,云南大理 671000

摘要 通过研究地表各向异性在气枪震源波速变化测量中的影响,探讨相邻台站同一时期介质波速变化的测量结果不一致的原因。研究表明:①震源所在水库的形状为非规则形状,这种横向的非均匀性对分布在水库周边台站测量的波速变化影响较小;②断裂带对于地震波传播有明显的影响,相邻台站因断裂带的存在导致震相射线的路径不同,进而会影响波速变化的测量;③相邻台站的高程不同可能导致各台震相射线的路径不一致,但对波速变化测量结果影响较小。

关键词: 气枪主动源 各向异性 波速变化

[文章编号] 1001-4683(2021)04-0888-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

利用重复地震研究地壳介质变化一直是地球科学中一种重要的方法,此前的难点在于很难获得一种廉价、高精度的重复震源,近年兴起的气枪主动源则较好地解决了该问题。根据前人的研究,近点台站记录的气枪震源事件相关系数在 0.985 以上,此外,气枪震源还具有绿色环保、实验成本低、波形传播范围广等优点(杨微等,2013;王彬等,2016;周青云等,2018a)。因此,利用气枪震源制造高重复性的信号,可以计算出穿过源与接收台间区域的地震波的高精度速度变化,进而利用波速变化来衡量地壳介质的变化(徐荟等,2015),进行地震预测,这一思路在近年的研究中得到广泛应用。

通常测量得到的波速变化是多种因素造成的。气枪震源是一个高压气体爆炸的过程,由于气枪的悬挂方式、气枪气体出口朝向、枪阵组合形状、枪阵所在的水底地形起伏、枪阵所在的水体形状及处于的水下深度等环境因素的变化,使得每次激发均有一定程度的差异;接收台站射线传播经过区域的温度、降雨、固体潮、应力等变化也会将扰动带入测量中(周青云等,2018a);此外,震相射线经过的区域介质各向异性使得相邻台站的震相射线路径并不一致,会影响气枪信号的震相形状及到时,从而使得波速变化更为复杂。因此,即使观测到

[收稿日期] 2020-06-28 [修定日期] 2020-10-10

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB21Z02)、云南省青年基金(2017K01)、云南省陈颢院士工作站项目共同资助

[作者简介] 叶泵,男,1984年生,工程师,主要从事数字地震学及气枪主动源研究工作。E-mail: yebeng@mail.ustc.edu.cn

大震前后的波速变化异常,也难以确定该异常是否为孕震过程中介质变化引起的,这在利用主动源测得的 2015 年 11 月 23 日祁连 5.2 级、2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震前后的波速变化中得到了证明(张元生等,2017)。

利用主动源测量的波速变化找出地震前兆异常并进行地震预测时,需先对波速变化的干扰因素进行排除。从理论上分析,利用气枪震源测量的波速变化主要包括 4 类可能的因素,即气枪震源测量系统的微小变化、区域地表环境变化、浅地表介质各向异性和区域介质变化,其中区域介质变化是最重要的因素,因为地震的孕育过程与区域介质变化密切相关(Crampin et al,2004)。前人对气枪测速受区域环境的影响进行了深入研究(向涯等,2020),且气枪源系统的变化对波速变化的影响较小(周青云等,2018b),区域环境变化是不可控的,但在做预测分析时,可以先对数据进行选择,以避开区域环境变化的影响,从而解决上述问题。因此,本文主要分析不同方位、时间、地点的台站波速变化测量结果,进而研究小区域浅地表各向异性对气枪震源波速变化的影响,并对相关影响原因进行解释。

1 实验概况

1.1 宾川气枪信号发射台

宾川气枪信号发射台于 2011 年建成,该台位于云南省宾川县城以西的大银甸水库区(图 1)。气枪源系统包括空气压缩机、气瓶组、配气台、4 支容量为 2000 in³ 的 Bolt Longlife 型气枪、浮台等,该系统主要利用电力转化为震源信号,通过调整气枪内的气体压力、气枪在水下的沉放深度等手段控制信号的一致性;气枪信号观测系统由 40 个 Reftek 130B 数据采集器和 Guralp CMG-40T 短周期地震仪组成,频带响应范围为 2s~100Hz。观测系统记录的数据为连续波形,采样率为 100Hz(杨微等,2013;王彬等,2016)。宾川气枪信号发射台多年

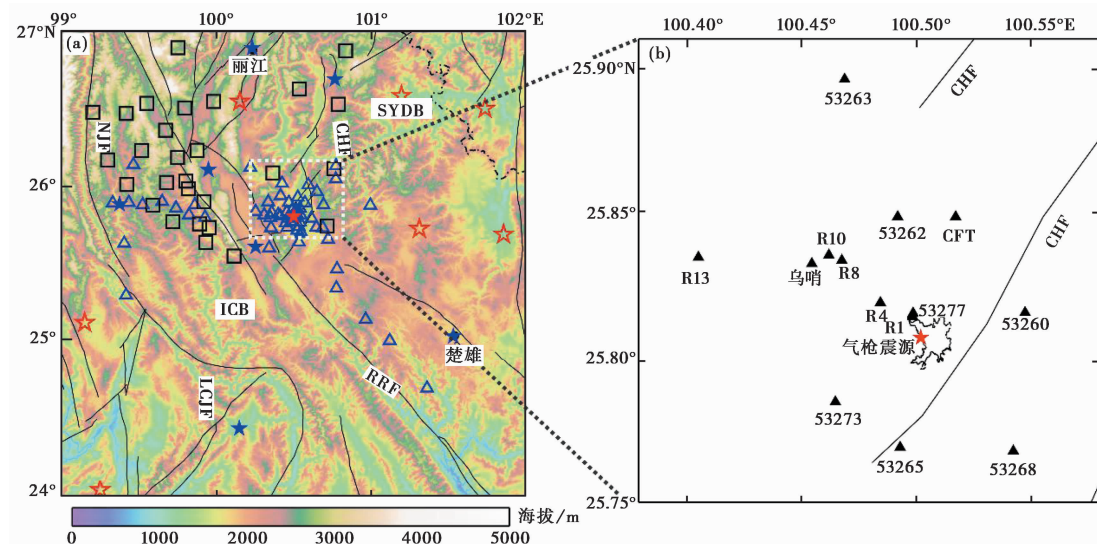


图 1 台站、大银甸水库及云南宾川地区断裂分布

(a) 红色五角星为气枪信号发射台;蓝色五角星为云南台网台站;蓝色三角形为主动源台站;CHF、NJF、LCJF、RRF 标示的曲线分别表示程海断裂、怒江断裂、澜沧江断裂、红河断裂;(b) 红色五角星外不规则的多边形表示水库的形状

来运行平稳,积累了大量的实验数据。

1.2 宾川盆地

宾川盆地位于红河断裂带与程海断裂带之间,该地区地震活动频繁,2010年以来多次发生 $M3.0$ 以上地震,是理想的天然地震实验场。长期以来,前人在该地区开展了大量的研究工作(陈思文等,2016;孙楠等,2021),进行了较为深入的地质、地震等地震孕育背景研究,为进一步深入研究该地区的孕震机理提供了良好的条件,吸引了多学科的观测项目在此展开,宾川主动源项目便是其中之一。

1.3 气枪震源实验

由于孕震过程中地下介质会发生变化,因此,通过监测介质的变化来预测地震是一种可行的思路。气枪震源成本较其他主动震源(如炸药震源等)低很多,其为连续观测宾川地区地下介质提供了一种可行方法。除每年5月至9月水库枯水期外,气枪震源每3天激发数十次,以监测宾川及邻近地区的介质变化。为保证信号的一致性和传播距离要求,以及系统设备的保养需求,规定常规激发压力为15MPa,4支气枪呈正方形分布,首尾相连,气枪距水面为10m。截至2020年,气枪震源共激发10000余次。

2 资料选取及处理

2.1 数据的选取

气枪震源主要在海上进行应用,在陆地上进行实验是一种新的尝试。在开展陆地实验以来,完成了多次新技术新方法的探索实验,积累了大量数据。本文对稳定的台站数据进行收集,考虑计算要求,选择大银甸水库水位稳定、当地气温气压变化较小时段的实验数据,最终选取了2015年12月、2019年4月气枪连续激发实验的数据。在数据整理时,去除授时有故障及背景噪声干扰较大的台站数据。为了保证检测震相清晰稳定可靠,进一步选择了激发场地为中心、20km以内的15个台站(图1)。

2.2 计算原理

由于天然地震的发生有很大的不确定性,测量波速变化存在问题,如测量区域位置、测量精度等。近年来,利用重复性人工震源来测量波速变化成为了可能,其中以圣安德烈斯断层深部探测计划中的测量最为著名(钮凤林等,2009)。气枪震源激发环境复杂,得到的震相也较为复杂,计算波速变化时,一般采用的一种基于互相关的测量技术,即测量某一震相在多次经过固定路径的延迟时间,通过插值拟合,测量精度可以高于采样精度(王宝善等,2011),其原理如下。

对于同一个地点2次重复的主动源激发信号,其波形信息相关函数表示为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) y^*(t - \tau) dt \right) \quad (1)$$

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y(t) x^*(t - \tau) dt \right) \quad (2)$$

其中, $R_{xy}(\tau)$ 、 $R_{yx}(\tau)$ 表示2次主动源激发信号的功率,2个实数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示2次主动源激发信号的波形, $x^*(t - \tau)$ 、 $y^*(t - \tau)$ 为2次主动源激发信号的时间函数。地震波形记录往往是功率有限信号,他们之间相差1个时延 τ , 于是有

$$R_{xy}(\tau_s) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) y^*(t + \tau_s) dt \right) \quad (3)$$

对于同一台站 2 次接收到的气枪主动源信号, 实数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 所代表的波形高度相似, 只是时间上存在延迟。即当相关系数取得最大值时, 对应的 τ_s 即为 2 个信号的时延。 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关系数可以定义为

$$R_{xy}(\tau_s) = \frac{\int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} x(t) y(t - \tau_s) dt}{\sqrt{\int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} x^2(t) dt \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} y^2(t) dt}} \quad (4)$$

在分析时, 选取某一次实验信号为标准值, 其余激发信号与标准信号的时延, 即表示这 2 次激发事件中的相对走时差, 对于同一震相而言, 从源至台的过程中路径是固定的, 走时差与波速变化呈负相关, 下文中均以时延变化表示波速的相对变化。

3 浅地表各向异性对波速变化的影响

利用气枪震源监测地下介质的波速变化并进行地震预测时, 一个难以解释的现象是相邻的台站测量的波速变化趋势并不一致(陈佳等, 2017)。单个台站测量的波速变化反映的是该台站震相射线经过区域的介质变化, 而孕震过程中介质变化在空间上是不均匀的, 因此, 判断一个波速变化异常是否为地震的前兆是一个难题。通过对相邻台站测量结果进行比较, 找出浅地表各向异性对波速变化干扰的规律, 可为前兆分析提供参考。

3.1 同台数据的波速变化测量

2019 年 4 月 25 日 19 时至 2019 年 4 月 29 日 11 时, 对气枪主动源进行了为期 5 天的实验, 在此期间, 气枪主动源以每小时 1 次的频率进行激发, 共连续激发了 88 次。距气枪震源 4.6km 处的 CFT 台站摆放的 2 组地震仪记录了这些事件, 其中一组为 Reftek-130B 数据采集器配 Guralp-40T 短周期地震仪, 频带范围 2s~100Hz; 另一组地震仪采用的是北京港震公司的 EDAS-24GN 数据采集器和 BBVS-60 宽频带地震仪, 频带范围 60s~50Hz, 记录的事件波形见图 2。

从数据库截取 2 组事件数据后, 进行去均值、去倾、滤波, 采用上述计算原理, 计算这一段时间内波速变化, 选取振幅最大且最清晰的震相(图 2 中填充红色部分)作为窗口, 窗口的到时为 2.1~2.5s。2 组数据的标准模板为分组叠加后取平均值, 计算结果如图 3。

由图 3 可见, 2 组数据计算的波速变化的绝对值略有差异, 在 4 月 25 日 22 时相差最大, 但其波速相对变化趋势完全一致, 说明本文计算方法可靠。若处理方法合适, 短周期与宽频带地震仪记录的数据, 其测量的波速变化趋势完全一致。此外, 若射线经过的路径完全一致, 波速变化也是一致的。

3.2 相同震中距台站测量的波速变化

2015 年 12 月 14 日气枪主动源进行了连续激发实验。在实验中, 保持气枪压力等震源系统参数不变, 且当地无降雨、降温等现象, 气压变化较小。选取震中距相近 4 个台站(53260、53262、53265、53273)记录的事件进行分析, 4 个台站的具体位置如表 1 所示。实验期间, 气枪主动源每小时激发 1 次, 共制造 24 个事件, 对数据进行质量检查后, 将每个台站

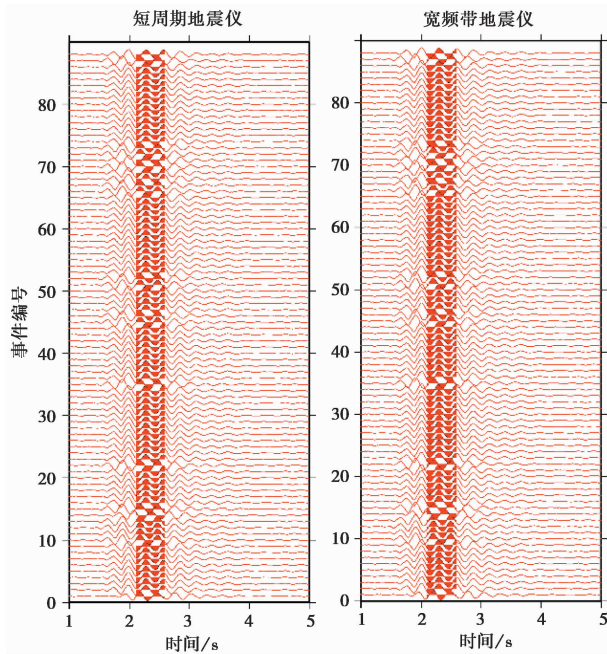


图2 同台不同地震仪记录的事件波形

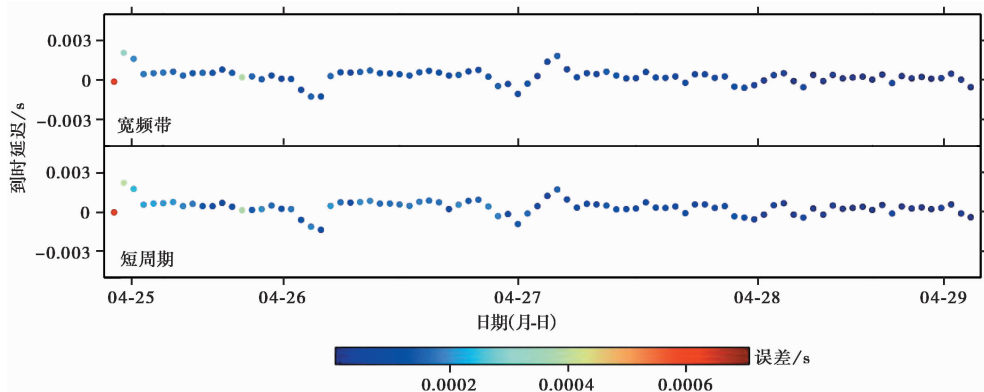


图3 同台不同仪器记录数据测量的波速变化

记录的 24 个事件叠加后取平均,得到模板事件,然后计算每个台站的其他事件对模板事件的到时延迟,其结果见图 4。

由图 4 可见,由于时间较短、地表环境变化较小及震源系统较稳定,小区域震中距相似的台站所测量的区域介质速度变化绝对值有极大的不同,但其变化趋势一致。由于震源所在的水库是不规则的,53260 台射线经过的水体路径较大(图 1),而计算结果中无明显反映。53265 台在 9 时和 11 时测量的相对波速变化结果与其他三台完全相反,在进行数据检查时,发现 2 次事件中 53265 台在该段时间无较强的背景噪声干扰,推测 53265 台的 2 次测量结果可能与其位于程海断裂带附近有关。为了验证程海断裂对信号传播的影响,对比了震中距几乎相同的三台记录的气枪信号首个波峰到达时间(图 5),位于程海断裂附近的 53265 台首个波峰到达时间较 53260、53262 台早,而如果忽略测量误差,53265 台震中距比 53262 台

表 1 源及台站位置的相关参数

台站编号	经度/(°E)	纬度/(°N)	高程/m	震中距/km
震源	100.50	25.80	1560	0
53260	100.54	25.81	1476	4.67
53262	100.49	25.84	1570	4.46
53265	100.49	25.77	1707	4.52
53273	100.46	25.79	1663	4.52
53277	100.50	25.81	1647	0.72
53268	100.54	25.77	1596	6.17
53263	100.47	25.90	1631	10.14
R1	100.50	25.81	1558	0.59
R4	100.48	25.82	1687	1.97
R8	100.47	25.83	1879	4.28
R10	100.46	25.84	1833	4.84
R13	100.41	25.83	1939	9.95
CFT	100.52	25.83	1551	4.65
乌哨	100.45	25.83	1881	5.32

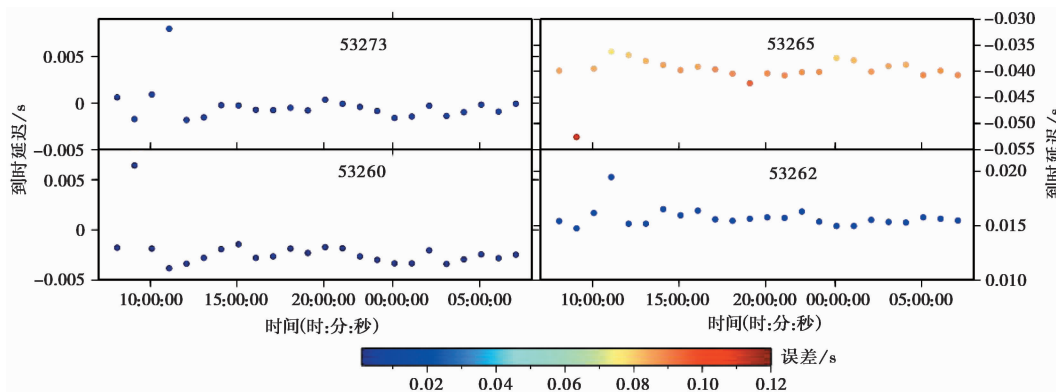


图 4 相同震中距台站测量的波速变化

大,这种情况的发生极有可能是程海断裂影响了 53265 台射线传播路径,首个波峰极有可能是从震源传至最近的程海断裂,然后通过断裂到达 53265 台,而不在断裂附近的台站则未受到上述影响。然而,最新研究表明程海断裂由地表至 1.5km 存在一个低速区,该低速度宽度达 3.4km,其 S 波的波速相较于异常区外低 40%~60% (Yang et al, 2020),如果这一研究结果可靠,53260 台未出现 53265 台的上述现象,可能是由于 53260 台离程海断裂较 53265 台远,导致其首个波峰穿越了整个低速区。由此可见,小区域内震中距相同的台站,如无其他干扰,其测量得到的波速变化应当一致。

3.3 相邻台站测量的波速变化

2019 年 4 月 25 日至 29 日气枪震源连续激发 88 次,对气枪震源所在水库水位、当地气温、气压及降雨等进行分析,从而排除区域环境变化对波速变化测量的干扰,波速变化测量结果如图 6 所示。

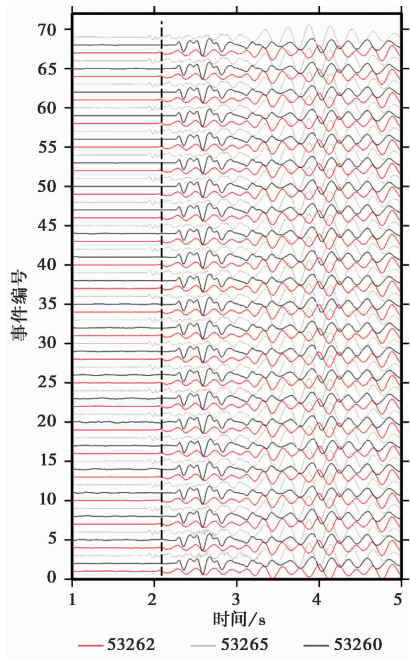


图5 相同震中距首个波峰到达时间差异

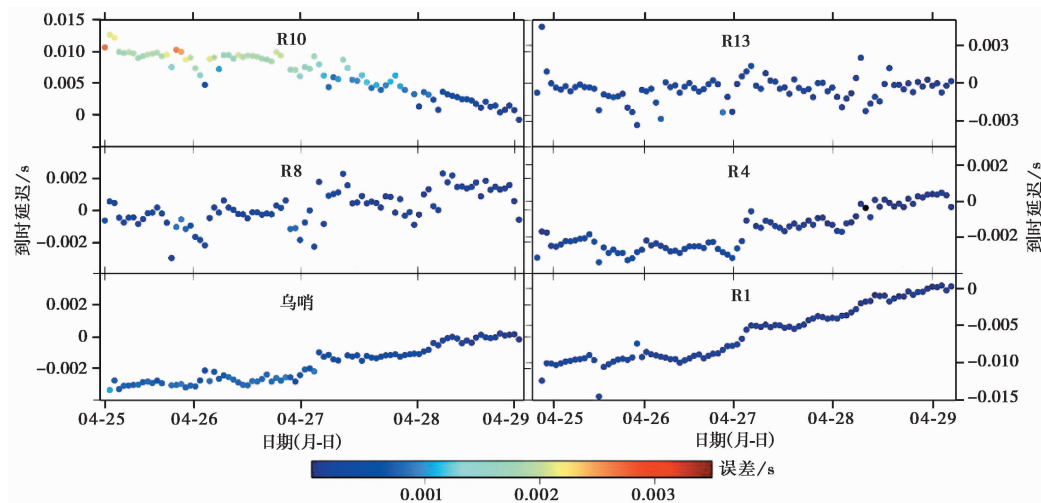


图6 相邻台站测量的波速变化

其中,台站 R10、乌哨、R8 相邻,台间距直线距离小于 200m(表 1、图 1)。在本次实验中,去除测量结果的长基线变化趋势,乌哨台与邻近 R8、R10 台的测量结果变化趋势相反,由表 1 可知,这 3 个台站的高程相差不超过 60m,考虑到 GPS 垂直向定位的误差,可以排除台站高程的影响。如果将邻近台站的范围放大,加入 R13、R4、R1 台一起分析,可以发现乌哨台测量的波速变化趋势与 R1、R4 台类似,而 R13 台测量的波速变化趋势类似 R8、R10 台。从震中距来看,这 2 组分类并不与震中距完全相关,这种现象可能与地下介质结构的不均匀性和各向异性有关。

因此,相邻台站所计算的波速变化并不能视为该区域的介质波速变化。在小区域波速变化分析中,尤其是在接收台站高程相差较大的情况下,尽管处于同一片小区域,仍应考虑台站的气枪信号传入路径,故其测量的波速变化并不能视为该区域大部分介质的变化。

3.4 线性排列的台站波速变化

2015年12月1日至19日水库水位稳定、震源所在区域环境变化较小,期间进行了连续535次气枪激发实验,每次气枪激发间隔1h。选取了4个与源记录台近似为一条直线的台站(53268、53262、53277、53263)作为分析对象,震中距由大到小依次为53277台、53262台、53268台、53263台,其中53268台在断层东侧,其余三台在断层西侧,测量的波速变化如图7所示。

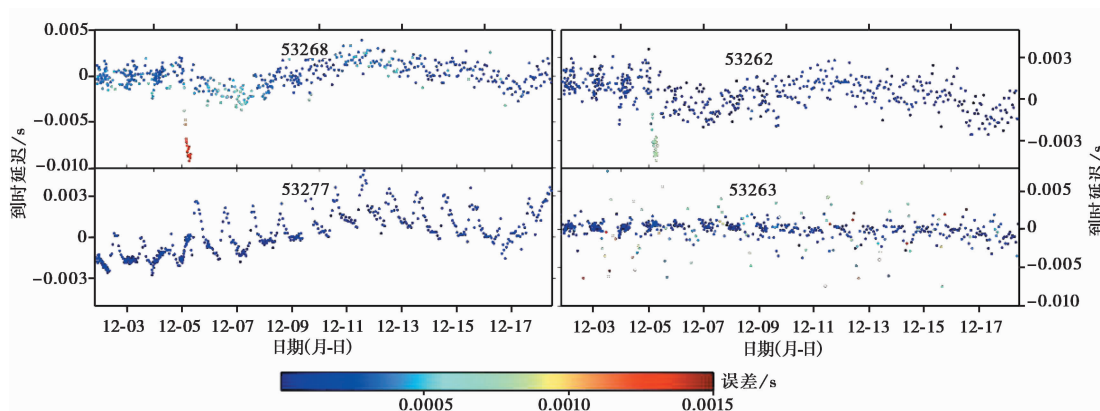


图7 线性排列的台站波速变化

由图7可见,53277台测量结果呈现明显的日变化,其可能为固体潮的作用(赵雯佳等,2013),而对于震中距较远的3个台站,固体潮对波速变化的影响逐渐消失。研究表明,浅层地壳中测量得到的波速变化与大气压及空气温度强相关,因而震中距越大,固体潮的影响应该越明显(Wang et al,2020),该结论与本文的计算结果并不相符,可能与该地区复杂的地壳结构有关。根据前人研究(翟秋实,2017),气枪信号在传播过程中,由于受到地壳不均匀性的影响,其传播方向有可能与直线传播存在 90° 偏转角。气枪信号在传播至53262、53268台的过程中,有可能先抵达程海断裂带再传播至台站,其与直线传播的部分在到达台站时重合,导致接收到的P波成分复杂,从而干扰了波速测量结果。这可能是震中距最近的53277台日变化清晰、最远的53263台日变化不清晰但相对明显、53262台与53268台日变化极不明显但变化趋势相似的原因。12月5日波速变化的测量出现较大的异常,53268、53262、53277台较为明显,而53263台无明显响应,这可能与该台震中距较大、信噪比较低有关。但53268、53262台的异常与53277台的异常相反,一种可能的解释是53277台测出的异常与另外两台并非同一个,53277台震中距仅0.72km,并不足以造成该异常的出现。

4 讨论与结论

本文讨论了地表及地壳浅部介质的各向异性对于使用气枪震源测量的波速变化的影响。首先,采用同台不同频带地震仪记录的数据对计算方法进行检验,在确认计算方法可靠

之后,选取2015年12月、2019年4月等多组实验数据,对气枪激发信号去均值、去趋势、滤波并剔除质量差、时间服务有误的波形,利用参考台作反卷积消除震源影响,采用互相关干涉法得到多台的高精度走时变化。对各台高精度走时变化进行分组对照分析,得到以下认识:

(1) 水库的形状对近台测量的短期波速变化表现出较小的影响。

(2) 断裂带对于地震波传播有明显的干扰,相邻台站因断裂干扰而导致射线的路径不同,测量的波速变化趋势受到了较大影响。

(3) 高程的不同可能导致相邻台站的射线路径不一致,但其对测量的波速变化影响较小。

参考文献

- 陈佳,叶泵,高琼,等,2017. 利用气枪震源信号研究2016年云龙 $M_s5.0$ 地震前后波速变化特征. 地震研究, **40**(4): 550~556.
- 陈思文,王宝善,田晓峰,等,2016. 滇西北地区云县-宁蒗宽角反射/折射剖面结果. 地震地质, **38**(1): 91~106.
- 钮凤林,保罗·西弗,托马斯·德利,等,2009. “帕克菲尔德圣安德烈斯断层深部探测计划”——井下主动源监测中观测到的震前波速变化. 国际地震动态, (6): 1~7.
- 孙楠,潘磊,王伟涛,等,2021. 多尺度阵列嵌套组合反演宾川气枪震源区横波速度结构. 地球物理学报, **64**(11): 4012~4021.
- 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.
- 王宝善,王伟涛,葛洪魁,等,2011. 人工震源地下介质变化动态监测. 地球科学进展, **26**(3): 249~256.
- 向涯,杨润海,谭俊卿,等,2020. 气枪震源信号波速变化计算中的水位影响及消除. 地球物理学进展, 1~9.
- 徐荟,刘学军,王彬,等,2015. 利用主动震源直达波互相关时延检测技术监测小江断裂带浅层地震波波速变化. 地震研究, **38**(1): 7~15.
- 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实验研究. 中国地震, **29**(4): 399~410.
- 张元生,王宝善,陈颀,等,2017. 两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化. 地球物理学报, **60**(10): 3815~3822.
- 赵雯佳,王宝善,徐平,2013. 利用水库气枪震源研究剪切波分裂随时间的变化. 中国地球物理学会第二十九年大会. 昆明, 421~424.
- 翟秋实,2017. 基于被动源和主动源方法的云南大理地区速度结构及其变化研究. 硕士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 周青云,陈俊磊,2018a. 气枪震源激发条件对走时变化观测结果的影响. 地震研究, **41**(2): 264~272.
- 周青云,刘自凤,贺素歌,2018b. 气枪震源地震波走时变化影响因素分析及地震相关的走时变化. 地震, **38**(3): 144~157.
- Crampin S, Peacock S, Gao Y, et al, 2004. The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes. *Geophys J Int*, **156**(1): 39~44.
- Wang B S, Yang W, Wang W T, et al, 2020. Diurnal and semidiurnal *P*-and *S*-wave velocity changes measured using an airgun source. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(1): e2019JB018218.
- Yang H F, Duan Y H, Song J H, et al, 2020. Fine structure of the Chenghai Fault Zone, Yunnan, China, constrained from teleseismic travel time and ambient noise tomography. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(7): e2020JB019565.

The Influence of Fault Zone on Propagation and Wave Velocity Variation of Signal Originated from Air Gun Source

Ye Beng^{1,2)} Chen Jia²⁾ Yang Jianwen¹⁾ Huo Yuanhang²⁾ Wang Jun²⁾
Li Xiaobin²⁾

1) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2) Office of the Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, CEA, Dali 671000, Yunnan, China

Abstract This paper summarizes the reason why adjacent station have different wave velocity variation which measurement by air gun source in the same period. The results show that: ①The shape of the reservoir where the source located is irregular, and this lateral heterogeneity has little effect on wave velocity variation which measured by stations distributed around the reservoir; ②Fault zone has obvious influence on seismic wave propagation. Phase rays of adjacent stations have different paths when there exist fault zones. As the result, this will effect on the measurement results of wave velocity variation; ③Adjacent stations at different elevations may lead to seismic phase ray paths changed, but have little impact on the measurement results of wave velocity variation.

Keywords: Air gun active source; Seismic anisotropy; Wave velocity variation