

杨建文、何应文、张鹏映等, 2019, 2017年3月27日漾濞5.1级地震前后气枪震源观测走时数据的变化, 中国地震, 35(4), 676~684.

2017年3月27日漾濞5.1级地震前后 气枪震源观测走时数据的变化

杨建文¹⁾ 何应文²⁾ 张鹏映³⁾ 叶泵¹⁾ 邓嘉美¹⁾ 赵家本¹⁾

1) 中国地震局滇西地震预报实验场办公室, 云南大理 671000

2) 云南省地震局云县地震台, 云南临沧 675803

3) 大理海东开发市政建设有限公司, 云南大理 671006

摘要 以2017年3月27日漾濞5.1级地震为例, 根据区域特性和信噪比要求, 选取数据较为完整的6个台站记录的2017年1月1日~6月6日期间的宾川地震信号发射台气枪震源波形资料, 采用互相关检测技术提取6个台站各自稳定震相的走时数据, 并对漾濞5.1级地震前后走时数据的变化情况进行分析。结果表明, 漾濞5.1级地震前后6个台站各自稳定震相存在较为明显的走时变化, 且短期内走时变化具有较好的同步性, 相关台站异常幅度大小和异常出现时间存在细小差异。地震发生前, 6个台站走时低值异常过程明显, 以YUL台最为显著。地震发生前后走时变化形态特征为双“V”型, 漾濞5.1级地震发生在第1个“V”型末端。地震发生后, 不同方位相关台站受地震的影响程度不同, 走时波动大小存在差异。

关键词: 漾濞5.1级地震 气枪震源 走时变化

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0676-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

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重要手段(王宝善等, 2016; Wang et al, 2018a, 2019)。人工震源因具有激发位置已知、激发可控、可重复性好和探测精度高等特点(魏芸芸等, 2016), 可克服天然震源在时间和空间分布上的不足, 变被动监测为主动探测。大容量气枪具有绿色环保、重复性好、激发能量大、能量转换效率高等特点(陈颢等, 2007a, 2007b; 王彬等, 2015; Wang et al, 2018b), 可拾取到高精度的震相到时, 得到区域内高精度波速变化, 在开展地下介质性质随时间变化的研究中具有重要的应用。近年来, 在“地下明灯计划”(陈颢等, 2005; Chen et al, 2019)的推动下, 相继于2011年4月、2013年5月和2015年5月在云南宾川(第1个固定地震信号发射台)、新疆呼图壁(第1个人工水体固定地震信号发射台)、甘肃张掖建成地震信号发射台(王宝善等, 2016; Wei et al,

[收稿日期] 2019-05-27; [修定日期] 2019-6-27

[项目类别] 云南省青年地震科学基金(2018k08)、云南省陈颢院士工作站(2014IC007)、国家自然科学基金(41574059、41474048)和云南省地震局科技专项基金(ZX2015-01、2018ZX04)共同资助

[作者简介] 杨建文, 男, 1989年生, 硕士, 工程师, 主要从事气枪震源数据处理与分析工作。E-mail: 928547602@qq.com

2018), 并开展常规监测。

对中强地震前后气枪震源观测走时数据的变化开展研究, 利用波形资料探索地下介质波速变化与地震发生的时空关系具有重要的意义 (Yang et al, 2018)。魏芸芸等 (2016) 以新疆沙湾 2015 年 2 月 22 日 M_s 5.0 和 12 月 6 日 M_s 4.8 地震为样本, 选取距离震中约 80 km 范围内的 3 个台站记录的新疆呼图壁气枪震源发射台 2013 年 8 月~2016 年 2 月的数据, 依据反射波震相, 采用互相关检测技术等, 研究地震前走时变化特征。结果表明, 2 次 5 级左右地震前, 3 个台站记录的 PmP 走时变化均出现 4 个月和 2 个月左右不同程度的低值异常过程, 相对走时变化幅度约为 0.1%~0.26%, 震前走时异常变化时间和幅度均存在差异, 且距震中较近台站的异常特征显著于较远台站。张元生等 (2017) 利用祁连山主动源连续激发 2015 年 7 月 9 日~2016 年 10 月 31 日期间的台站记录资料, 通过不同时间段的多次激发数据叠加处理, 获取相关地震台的 Pg 和 Sg 震相走时变化数据, 对震相走时变化数据分析发现, 在 2015 年 11 月 23 日祁连 5.3 级和 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震发生前后, 震源区附近台站 Pg 和 Sg 震相走时变化形态特征为“V”型或双“V”型, 地震发生在第 2 个“V”的形成过程或结束时段。

2017 年 3 月 27 日, 在滇西地震预报实验场区发生了漾濞 5.1 级地震 (25.89°N, 99.80°E), 震源深度 12 km, 云南地震应急保障中心调查结果显示有感范围约 12845 km², 震中距离宾川地震信号发射台约 70 km。漾濞 5.1 级地震位于接收台站覆盖范围内, 且在时间域上位于连续激发时段, 地震前后可获取相关台站气枪震源波形资料。本文基于 2017 年 1 月 1 日~6 月 6 日漾濞 5.1 级地震震中附近 6 个接收台站记录的气枪震源信号, 采用互相关检测技术提取各自稳定震相走时变化特征, 并对地震前后的变化情况进行分析。

1 数据收集整理

宾川地震信号发射台由 4 支单枪容量为 2000 in³ 的 Bolt Longlife 型气枪、1 台大功率空气压缩机、储气瓶组和气源、气枪控制系统等组成 (王宝善等, 2011; 王彬等, 2016)。气枪沉放深度为浮台下 10 m 左右, 4 支气枪激发 1 次约产生 8.91×10^6 J 能量, 相当于 1 次 M_L 0.7 天然地震 (刘自凤等, 2015), 日常激发压力和气枪沉放深度基本不变。由于地震信号发射台的激发水体为当地的大银甸水库, 属灌溉水源, 受季节影响较大, 夏季为枯水期, 不宜进行激发实验。2017 年 6 月 6 日起受水位的影响, 停止激发实验, 9 月底恢复激发。气枪激发信号的日常观测系统由滇西地震预报实验场区原有的 5 个地震台站、云南测震台网的相关台站 (二者统称为固定台, 地震计以 BBVS-60、KS2000 为主, 数采以北京港震公司的 EDAS-24 IP 为主), 以及 40 个主动源接收台站 (主要使用 Reftek130B 和 GuralpCMG-40T, 采样率 100 Hz) 组成 (王彬等, 2016)。根据区域特性和信噪比要求, 挑选出信噪比较高且数据较为完整的 6 个台站 (其中固定台 2 个 (云南测震台网), 主动源台站 4 个), 所选台站、激发源和漾濞 5.1 级地震震中分布情况见图 1, 各台站与激发源及地震震中的距离见表 1。对 2017 年 1 月 1 日~6 月 6 日期间的相关台站记录资料进行收集、整理 (本文采用的数据集集中在较短的时间内, GPS 授时稳定), 发现由于气枪保养维护及故障、接收台站仪器故障等原因, 存在数据缺失等现象, 其中 1 月 16 日~2 月 10 日、2 月 22 日~3 月 13 日 2 个时段的数据缺失情况较为严重, 其它大部分时间日均激发次数保持在 13 枪左右。53036 台由于仪器故障, 3 月 25 日以后数

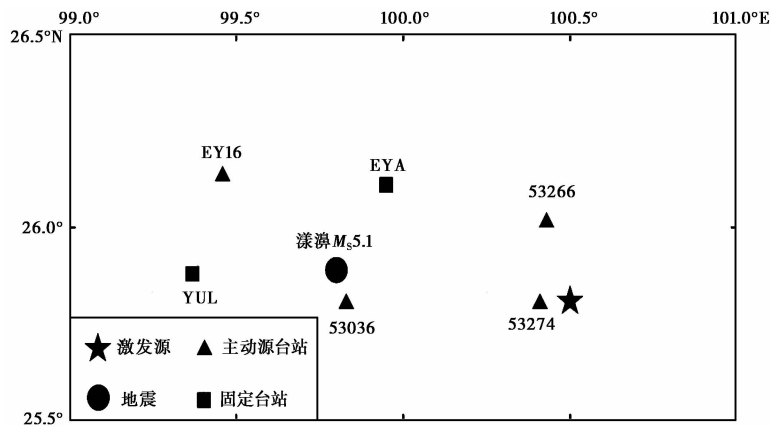


图 1 所选台站、激发源和漾濞 5.1 级地震震中分布

表 1 台站与激发源、地震震中的距离

台站	与激发源的距离/km	与漾濞 5.1 级地震震中的距离/km	台站类型
53274	9	62	主动源台
53266	24	65	主动源台
EYA	64	29	固定台(云南测震台网)
53036	68	10	主动源台
EY16	110	44	主动源台
YUL	113	43	固定台(云南测震台网)

注:距离均为近似值,精确到 1km。

据缺失。

2 资料处理

2.1 记录波形处理

以激发源附近的 CKT0(图 1 中五角星的位置,距离气枪激发源约 50m)为参考台,近似为源的信息,截取某次激发记录波形信号为原始信号模板,对参考台的每次激发记录波形进行互相关处理,获得相对的气枪激发时刻(张元生等,2017)。在此基础上,以获取的激发时刻为准,对挑选出的 6 个台站进行时长为 100s 的记录波形数据截取,对参考台 CKT0 进行时长为 5s 的波形截取。对截取的波形资料进行去均值、去倾、去直流量处理,并进行 3~5Hz 的 Butterworth 带通滤波,降低噪声干扰,对畸变记录波形进行人工删除。随后,分别将同一枪的各台站数据与参考台数据作反卷积处理,对齐到时并去除震源影响,得到台站到参考台的格林函数,进而采用压缩感知、多尺度几何分析、数据稀疏性处理等综合去噪方法对格林函数进行去噪处理,以提高信噪比。对每个台站的所有格林函数进行叠加,将叠加结果作为各自台站的参考波形模板,同时对每个台站的格林函数按天叠加。最后,将每天的叠加结果与参考模板作互相关计算,互相关系数最大时,所对应的时间延迟则为这 2 段相似波形窗口的走时,为了提高精度,对计算结果余弦插值后提取更高精度的走时变化(刘自凤等,2015)。

2.2 震相走时变化量提取

周青云(2018)利用 2017 年 2 月宾川地震信号发射台集中激发的数据,对不同激发压力、沉放深度和水平位移条件下气枪信号的走时变化特征进行了系统研究。结果表明,由于气枪信号不同时窗走时变化不尽相同,技术手段难以消除压力的影响,建议未来气枪激发时,固定激发条件,利用已有资料对走时变化进行研究时选用振幅相近的数据(周青云, 2018)。因此,本文在激发压力及沉放深度固定的情况下,取相关系数最大且最大震幅处的相近震相提取走时(图 2 虚线框所示),时间窗长度以能完整表现 1 个震相为原则,取值在 0.5~1s 之间,不同台站取值存在较小差异(Yang et al, 2019)。图 2 为 EYA 台计算震相走时结果。

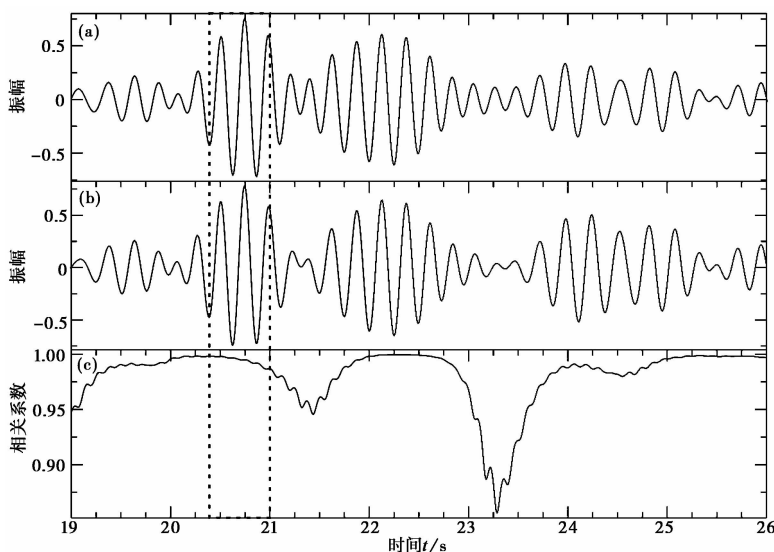


图 2 EYA 台计算震相走时

(a) 参考波形模板; (b) 单天 13 枪叠加波形; (c) 单天叠加波形与参考模板进行互相关计算的相关系数

3 结果分析

采用上述方法对 6 个台站记录波形资料进行处理,分别提取各自稳定震相的相关系数变化、走时变化曲线,如图 3、图 4 所示。由图 3 可知,6 个台站不同时间的相关系数均在 0.9 以上。

图 4 为各台站走时及水位变化曲线(纵坐标的统一有利于相关台站间的对比分析),其中 YUL 台(图 4(f))的走时差变化相对较大,上限为 0.01s、下限为 -0.02s,其余台站的上限均为 0.01s、下限均为 -0.01s。结合图 1 和表 1 可知,53274、53266 台站距漾濞 5.1 级地震震中的距离为 62km、65km,距激发源的距离为 9km、24km,前者距离相当,后者存在差距。EYA、53036 台站距漾濞 5.1 级地震震中的距离为 29km、10km,距激发源的距离为 64km、68km,前者存在差距,但均小于 30km,后者距离相当。EY16、YUL 台站距漾濞 5.1 级地震震中的距离为 44km、43km,距激发源的距离为 110km、113km,前后距离均相当。从 SN 向来看,53266、EYA、EY16 位于漾濞 5.1 级地震震中北侧,53274、53036、YUL 位于南侧。从 EW 向来看,

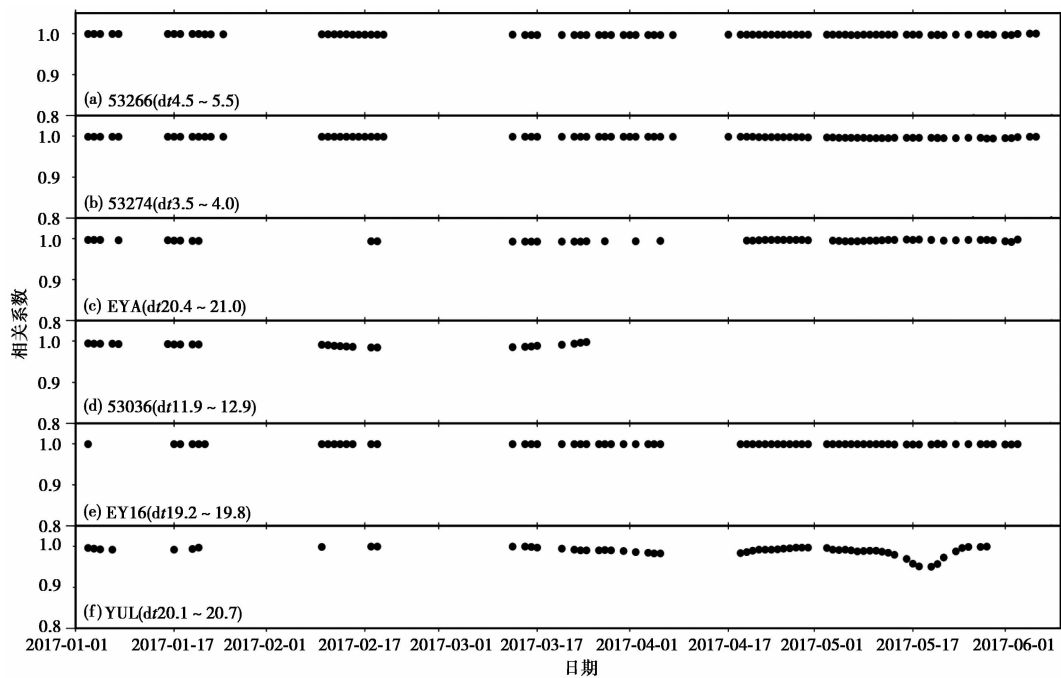


图3 各台站相关系数变化

53266、53274、EYA、53036 均位于漾濞 5.1 级地震震中以东,但 EYA 和 53036 距离震中较近, EY16 和 YUL 位于震中以西。

通过水位资料计算,得到 2017 年 1 月 1 日~2 月 20 日水库水位下降 1.68m。53266 台(图 4(a))、53274 台(图 4(b))和 EY16 台(图 4(e))走时变化平稳,EYA 台(图 4(c))和 YUL 台(图 4(f))走时波动较大,53036 台(图 4(d))存在较为明显的下降趋势,此时段内数据缺失较为严重,不做重点讨论。自 3 月 13 日起,除 53036 台外,其余台站数据较为完整,故本文主要对 3 月 13 日~6 月 6 日的走时变化情况进行分析。

自 3 月 17 日左右起,6 个台站的走时开始下降,于 3 月 24 日左右达到低值,随后开始回升,于 3 月 28 日左右达到高值(53036 台自 3 月 26 日开始数据缺失),在回升过程中,于 3 月 27 日发生了漾濞 5.1 级地震。此后走时平静至 4 月 5 日左右再次下降,并于 4 月 8 日左右达到低值后再次回升,于 4 月 17 日左右达到高值。整个过程中,6 个台站的走时变化具有较好的同步性,相关台站异常幅度大小和异常出现时间存在细小差异。震相走时呈双“V”型变化结构,第 1 个“V”形成时长约为 12 天左右,第 2 个“V”形成时长约为 13 天左右,由于数据缺失,第 2 个“V”可信度不高。漾濞 5.1 级地震发生在第 1 个“V”型末端,该结果与张元生等(2017)利用祁连山主动源连续激发台站记录资料,研究 2015 年 11 月 23 日祁连 5.3 级和 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震发生前后震源区附近台站走时变化特征相似。有所不同的是,祁连 5.3 级和门源 6.4 级发生在第 2 个“V”的形成过程或结束时段,这可能与地震震级大小、震中位置、震源区大小、源区硬化程度以及台站的观测环境有关,具体原因有待更多震例进一步验证。值得注意的是,在漾濞 5.1 级地震发生前,6 个台站的走时存在较为明显的低值异常过程(第 1 个“V”前端),该时段内 6 个台站走时下降情况见表 2,其中,YUL 台走

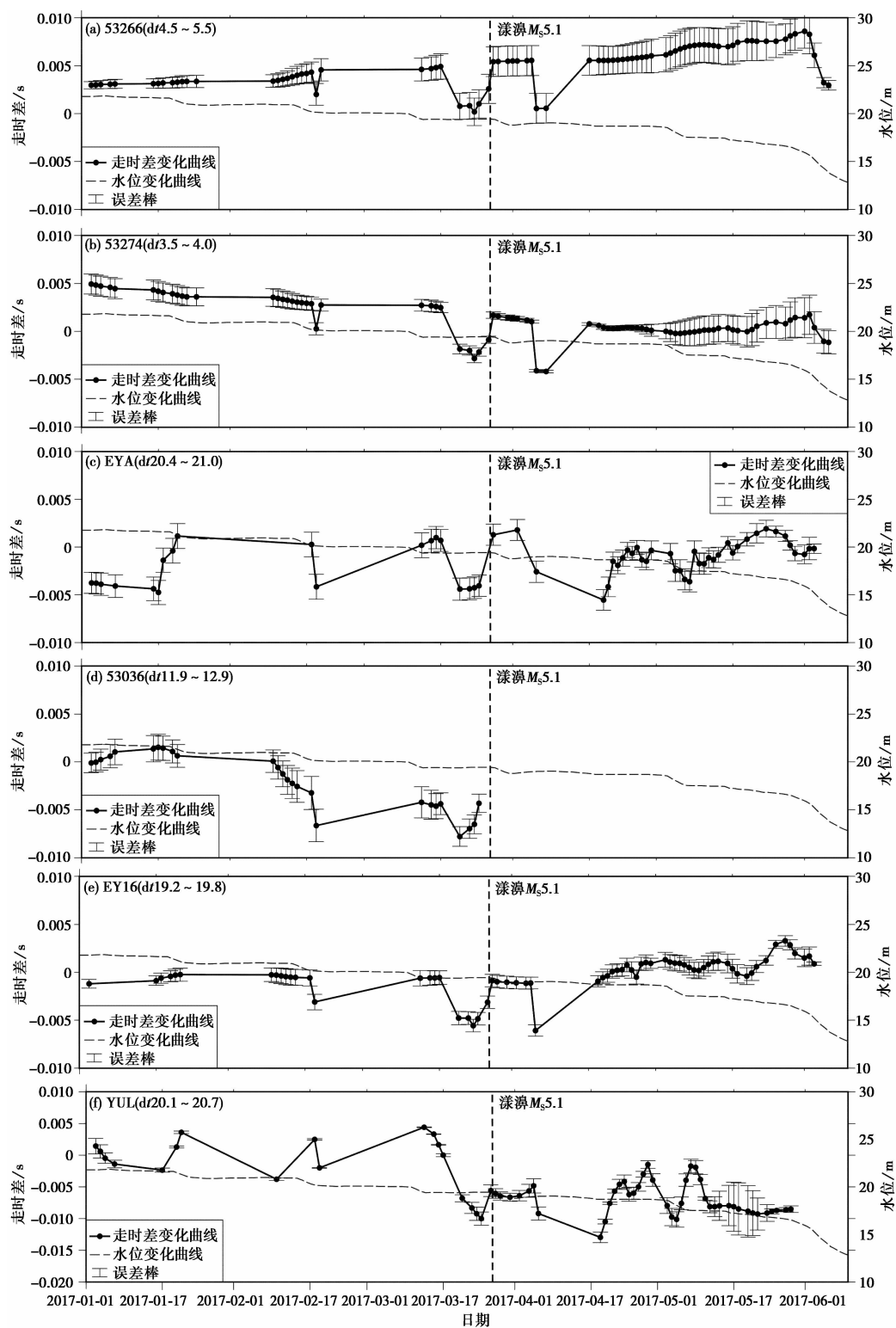


图 4 各台站走时及水位变化曲线

表 2 各台站第 1 个“V”型前端的走时下降情况

台站	开始下降点		最低点		变化量/s
	日期(年-月-日)	走时差/s	日期(年-月-日)	走时差/s	
53266	2017-03-17	0.0049	2017-03-24	0.0002	-0.0047
53274	2017-03-17	0.0024	2017-03-24	-0.0028	-0.0052
EYA	2017-03-17	0.0007	2017-03-21	-0.0044	-0.0051
53036	2017-03-17	-0.0044	2017-03-21	-0.0078	-0.0034
EY16	2017-03-17	-0.0006	2017-03-24	-0.0056	-0.0050
YUL	2017-03-13	0.0044	2017-03-25	-0.0100	-0.0144

时下降最为明显,约 0.0144s,这与张元生等(2017)的研究结果以及魏芸芸等(2016)研究的新疆 2 次 5 级左右地震前气枪震源 PmP 波走时变化低值异常过程相似。“震源硬化模型”指出岩石在受力过程中,在其失稳源区存在“硬化”现象,硬化过程中其介质的刚度会增加,而刚度增加可能导致速度增加,从而使走时缩短(张元生等,2017;陈立德等,2003)。自 3 月 17 日~4 月 17 日,水库水位下降 0.62m,1 个月内不足 1m 的水位变化对各台站走时变化的影响不明显。

自 4 月 17 日左右开始,至 6 月 6 日,水库水位下降 5.04m。位于震中东侧的 53266 台(图 4(a))和 53274 台(图 4(b))的走时变化较为平稳(2 个台站距离激发源较近,距离漾濞 5.1 级地震震中达 60km 以上),且 4 月 17 日~6 月 3 日(水位下降 3.71m),2 个台站的走时变化与水位变化呈现一定的负相关性,6 月 3 日~6 月 6 日,水位变化剧烈(下降 1.33m),负相关性被打破,且走时变化与水位变化呈现同步下降趋势。位于震中附近的 EYA 台(图 4(c))和震中西侧的 EY16(图 4(e))、YUL 台(图 4(f))走时变化波动明显(3 个台距离激发源 60km 以上,距离震中小于 45km),其中 YUL 台最为明显。这可能是漾濞地震发生后,受震源区应力调整过程的影响,气枪信号在传播过程中,从不同方位穿越了震源区,致使相关台站记录的波形资料走时变化发生不同程度的波动。YUL 台、地震震中及激发源大致在 1 条直线上,气枪信号可能穿越了震中附近振动最剧烈、破坏比也最严重的极震区,导致 YUL 台走时波动最为明显。该时段内,3 个台站的走时变化与水位变化的对应关系不明显,相比于水库水位变化,震后区域应力调整更易对相关台站的走时变化产生实质性的影响。

4 结论

通过对 6 个台站记录的漾濞 5.1 级地震前后气枪震源波形资料进行处理,获取了各自稳定震相的走时数据,并对走时数据变化情况进行分析。结果表明,漾濞 5.1 级地震前后,6 个台站各自稳定震相存在较为明显的走时变化,且短期内走时变化具有较好的同步性,相关台站异常幅度大小和异常出现时间存在细小差异。地震发生前,6 个台站走时低值异常过程明显,以 YUL 台最为显著。地震发生前后走时变化形态特征为双“V”型,漾濞 5.1 级地震发生在第 1 个“V”型末端。地震发生后,不同方位相关台站受地震的影响程度不同,走时波动大小存在差异。

致谢: 互相关时延计算程序由中国科学技术大学王宝善教授提供,审稿专家提出了宝贵的修改意见,

在此表示衷心感谢。

参考文献

- 陈立德、付虹, 2003, 地震预报基础与实践, 北京: 地震出版社.
- 陈颢、王宝善、葛洪魁等, 2007a, 建立地震发射台的建议, 地球科学进展, **22**(5), 441~446.
- 陈颢、张先康、丘学林等, 2007b, 陆地人工激发地震波的一种新方法, 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, 地球科学进展, **20**(5), 485~489.
- 刘自凤、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.
- 王宝善、杨微、王伟涛等, 2011, 宾川气枪信号发射台性能分析, 见: 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 长沙: 中国地球物理学会.
- 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.
- 魏芸芸、王海涛、苏金波等, 2016, 新疆 2 次中强地震前气枪震源反射波震相走时异常变化初步研究, 中国地震, **32**(2), 270~281.
- 张元生、王宝善、陈颢等, 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.
- 周青云, 2018, 宾川地震信号发射台气枪震源能量激发方向性初步研究, 大地测量与地球动力学, **38**(7), 754~759.
- Chen Y, Xu Y H, Cai H T, et al, 2019, Some thoughts on the earthquake science experimental site—the underground cloud map, Earthquake Research in China, **33**(1), 1~8.
- Wang B S, Tian X F, Zhang Y P, et al, 2018a, Seismic signature of an untuned large-volume airgun array fired in a water reservoir, Seismological Research Letters, **89**(3), 983~991.
- Wang B S, Chen Y, 2019, Preface to the Special Issue on Active Source Research, Earthquake Research in China, **33**(2), 171~173+166~167.
- Wang W T, Wang B S, Jiang S M, et al, 2018b, Regional scale seismological investigation on the continent crust using airgun sources—a perspective review, Earthquake Research in China, **32**(3), 315~329.
- Wei C X, Qin M Z, Zhang Y S, et al, 2018, Airgun excitation experiments at different placement depths in the Qilian mountain of Gansu Province, China, Seismological Research Letters, **89**(3), 974~982.
- Yang J W, Li L, Zhang P Y, et al, 2019, Using Airgun Source Signals to Study Regional Wave Velocity Changes before and after the Yunlong $M_s 5.0$ and Yangbi $M_s 5.1$ Earthquakes, Earthquake Research in China, **33**(2), 320~335.
- Yang W, Wang B S, Yuan S Y, et al, 2018, Temporal variation of seismic-wave velocity associated with groundwater level observed by a downhole airgun near the Xiaojiang fault zone, Seismological Research Letters, **89**(3), 1014~1022.

Travel-time Variations before and after the Yangbi $M_s5.1$ Earthquake on March 27, 2017 from the Airgun Source Seismic Data

Yang Jianwen¹⁾ He Yingwen²⁾ Zhang Pengying³⁾ Ye Beng¹⁾ Deng Jiamei¹⁾
Zhao Jiaben¹⁾

1) Office of the Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China Earthquake Administration, Dali 671000, Yunnan, China

2) Yuxian Seismic Station of Yunnan Earthquake Agency, Lincang 675803, Yunnan, China

3) Dali Haidong Development Municipal Construction Co., Ltd., Dali 671006, Yunnan, China

Abstract Taking the Yangbi $M_s5.1$ earthquake on March 27, 2017 as an example, according to the regional characteristics and signal-to-noise ratio requirements, the data from 1 January to 6 June, 2017 recorded by 6 stations with relatively complete recording were selected. The source waveform data of the airguns of the Binchuan earthquake signal launching platform were used to extract the travel time data of the stable seismic phases of the six stations, and to analyze the changes of the travel-time data before and after the Yangbi $M_s5.1$ earthquake. The results show that there are obvious time-varying changes in the stable seismic facies of the 6 stations before and after the Yangbi $M_s5.1$ earthquake, and the short-term transit time has good synchronization. There are small differences between the abnormal amplitude of the relevant stations and the abnormal time. The low-value anomaly process of the 6 stations before the earthquake was obvious, and the YUL station was the most significant. The morphological characteristics of the travel time before and after the earthquake are “double V”, and the Yangbi $M_s5.1$ earthquake occurs at the end of the first “V” shape. After the earthquake, different stations with different orientations are affected by the earthquake, and there are differences in the fluctuations of travel time.

Key words: The Yangbi $M_s5.1$ earthquake; Airgun source; Travel-time change