

杨建文,叶泵,高琼,等.2021 年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震前后主动源观测走时数据的变化[J].地震工程学报,2021,43(4):767-776.
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.767
YANG Jianwen, YE Beng, GAO Qiong, et al. Travel-time variations before and after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake in 2021 derived from active-source seismic data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 767-776. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.767

2021 年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震前后主动源 观测走时数据的变化

杨建文^{1,2}, 叶 泵^{1,2}, 高 琼^{1,2}, 张华英^{1,2}, 陈 佳^{1,2}

(1. 中国地震科学实验场大理中心, 云南 大理 671000;

2. 云南大理滇西北地壳构造活动野外科学观测研究站, 云南 大理 671000)

摘要: 基于 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震震中附近 50 km 范围内 15 个地震观测台站记录的 2020 年 11 月 1 日—2021 年 5 月 30 日的气枪震源信号, 采用互相关时延检测技术提取这 15 个台站各自稳定震相(Sg 震相)的走时变化时间序列, 并对漾濞 $M_s6.4$ 地震前后各台站的走时变化特征进行分析。结果表明:(1)漾濞 $M_s6.4$ 地震前 10 天左右, 有 4 个台站走时开始出现异常, 其中, Ey211 和 Ey213 台走时呈“V”型变化结构, Ey210 和 CHT 台走时呈上升趋势。(2)漾濞 $M_s6.4$ 地震后短期内, 大部分台站走时出现了明显的趋势性变化, 以维西—乔后—巍山断裂为界, 断裂带两侧台站走时变化趋势存在明显差异, 断裂以东的 EYA、HDQ、YSW09 台走时呈上升趋势, 变化最为显著的为 HDQ 台, 走时差变化量为 0.067 s; 而断裂带以西的所有台站在漾濞 $M_s6.4$ 地震当天(或震后 1~2 天)开始出现明显趋势性下降, 走时下降持续时间在 4~9 天间, 走时差变化量在 -0.053~-0.201 s 间, 其中走时差下降量最大为 53 285 台, 最小为 CHT 台。

关键词: 漾濞 $M_s6.4$ 地震; 气枪震源信号; 波形互相关; 走时变化

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)04-0767-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.767

Travel-time variations before and after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake in 2021 derived from active-source seismic data

YANG Jianwen^{1,2}, YE Beng^{1,2}, GAO Qiong^{1,2}, ZHANG Huaying^{1,2}, CHEN Jia^{1,2}

(1. Dali Center of China Earthquake Science Experimental Site, Dali 671000, Yunnan, China;

2. Field Scientific Observation and Research Station on Crustal Tectonic Activities in Northwest Yunnan, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract: Based on the air-gun source signals from November 1, 2020 to May 30, 2021, recorded by 15 stations within 50 km of the epicenter of Yangbi $M_s6.4$ earthquake on May 21, 2021, the

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 2021 年云南省地震局地震科技专项基金——漾濞地震专项; 中国地震局 2021 年度震情跟踪定向工作任务(2021010105); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项资助(DQJB21Z02); 中国地震局地震监测、预报、科研三结合课题(3JH-2021045); 国家重点研发计划专题(2018YFC150330303); 云南省地震局科技人员传帮带培养项目(CQ3-2021004); 云南省陈颙院士工作站(2014IC007)

第一作者简介: 杨建文(1989-), 男, 工程师, 主要从事气枪信号和背景噪声波速测量研究。E-mail: 928547602@qq.com。

time series of travel time changes of Sg phase at 15 stations were extracted with the cross-correlation time delay detection technique, and the travel time changes of each station before and after the $M_s6.4$ earthquake were analyzed. The results showed that: (1) About 10 days before the earthquake, the travel time of 4 stations began to appear abnormal. Among them, the travel time of stations Ey211 and Ey213 showed a "V"-shaped structure, and the travel time of stations Ey210 and CHT showed an upward trend. (2) In the short term after the earthquake, the travel time of most stations showed obvious trend change. The change trends of stations on both sides of the Weixi—Qiaohou—Weishan fault were obviously different. The travel time of stations EYA, HDQ, and YSW09 at the east of the fault showed an upward trend, and the most significant change was in the HDQ station, with a travel time difference of 0.067 s. All stations at the west of the fault began to show a significant trend decline on the day of the $M_s6.4$ earthquake (or 1~2 days after the earthquake). The travel time decline lasted 4~9 days, and the travel time difference varied from -0.053 s to -0.201 s. The maximum decrease in travel time showed at 53 285 station, and the minimum decrease was at CHT station.

Keywords: Yangbi $M_s6.4$ earthquake; air-gun source signal; waveform cross-correlation; travel-time change

0 引言

一直以来地震工作者都在努力推进地震预报从经验预报向基于物理的数值预报转向,而基于新观测技术的地震预测预报研究是有益的尝试。地震波作为“照亮地球内部的一盏明灯”是研究地球介质及其应力场和物性变化最有效的手段^[1]。利用气枪震源的高度可重复性来监测地下应力变化的新技术手段,近些年得到了较快发展。

自 2011 年宾川地震信号发射台建立以来,地震工作者在持续开展气枪激发试验的基础上,利用气枪源周围布设的 40 余个主动源流动台、区域固定台及亚失稳台站所获得气枪信号和背景噪声数据,在气枪地震信号分析^[2-3]、气枪震源各向异性^[4]、有限水体介质地震波场数值模拟^[5]、宾川主动源场区地壳结构各向异性^[6]、地震背景噪声成像^[7]、地壳波速变化测量^[8]、同震波速变化^[9-10]及强噪声背景下弱信号提取^[11-13]等方面开展了大量研究工作,部分解决了利用气枪震源激发信号和地震背景噪声测量地下波速变化过程中遇到的一些技术问题,初步探讨了所测量地壳波速变化与地震发生过程的关系,加深了对地震物理过程的认识。

2021 年 5 月 21 日,在气枪震源信号观测台站覆盖区内发生了漾濞 $M_s6.4$ 地震(25.67°N、99.87°E),震源深度 8 km,震中位于漾濞县苍山西镇境内。此次地震发生在维西—乔后—巍山断裂西侧的一条次级断裂带上,震源机制解为右旋走滑兼有少量正断(相关内容来源于 6 月 2 日漾濞 $M_s6.4$ 地震

科考汇报交流会)。从地震序列的类型来看,漾濞地震属于前-主-余型地震,从 2021 年 5 月 18 日 18 时 49 分的 $M_s3.2$ 地震起,截至 5 月 31 日 8 时 0 分,中国地震台网共记录到 $M_s3.0$ 以上地震 46 次,其中 $M_s6.0\sim6.9$ 地震 1 次, $M_s5.0\sim5.9$ 地震 3 次(包括震前的 $M_s5.6$ 和震后的 $M_s5.0$ 、 $M_s5.2$), $M_s4.0\sim4.9$ 地震 13 次, $M_s3.0\sim3.9$ 地震 29 次。此次地震震中位于宾川地震信号发射台西南向,距离约 64 km。漾濞 $M_s6.4$ 地震是宾川地震信号发射台建立以来,继 2013 年洱源 $M_s5.5$ 、 $M_s5.0$, 2016 年云龙 $M_s5.0$, 2017 年漾濞 $M_s5.1$ 以后试验区内发生的又一次 $M_s5.0$ 以上地震。

在严峻的震情形势和地震多发情况下,在地震频发区开展地球物理场观测,并基于现有观测资料,对地震前后的地球物理场变化特征进行回溯性研究,可加深我们对地震孕育机制的认识。漾濞 $M_s6.4$ 地震震级较大且余震丰富,为主动源探测实验的开展提供了很好的震例检验。本文基于 2020 年 11 月 1 日—2021 年 5 月 30 日漾濞 $M_s6.4$ 地震震中附近 50 km 范围内的地震观测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的走时数据,对地震前后的走时变化特征进行分析。

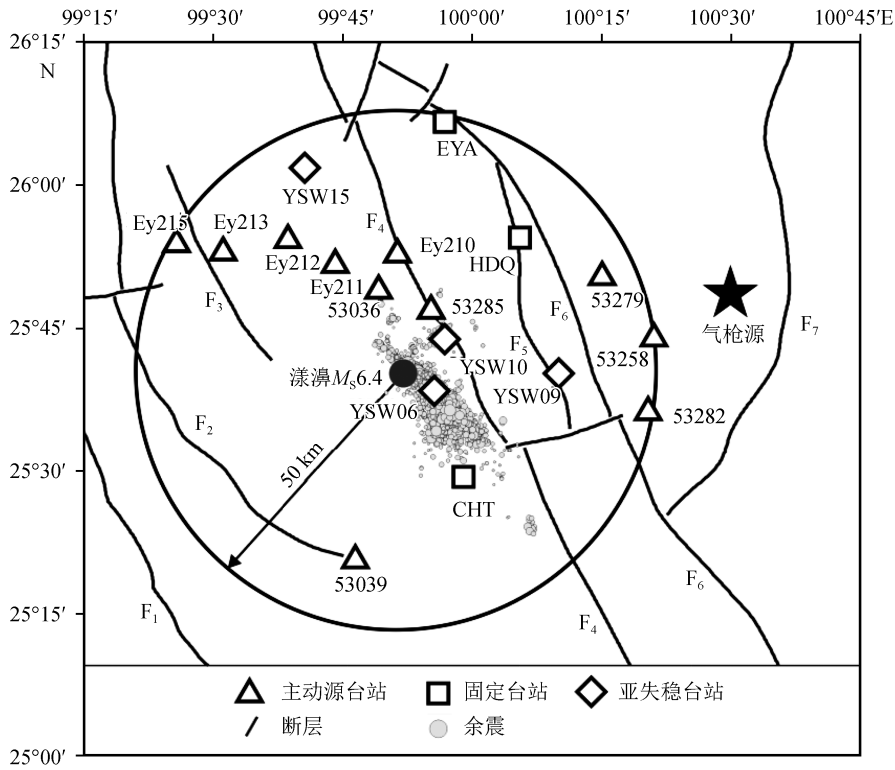
1 数据处理

1.1 数据收集整理

现阶段,漾濞 $M_s6.4$ 地震震中附近 50 km 范围内共有 18 个台站(图 1),其中主动源流动台 11 个

(地震计为 Guralp-40T,数据采集器为 Reftek-130B),区域固定台 3 个(地震计以 BBVS-60 和 KS2000 为主,数据采集器为 EDAS-24IP),亚失稳台 4 个(亚失稳台站来源于国家重点研发计划——地震亚失稳阶段识别的实验、理论与野外观测研究:云南洱源地震危险区的密集台网建设与运维项目,地震计为 CMG-40T,数据采集器为 Reftek-130B)。从台站分布来看,观测台站总体位于地震震中以北和以东区域,震中西南方向台站较少。对 2020 年 11 月 1 日—2021 年 5 月 30 日 18 个台站的观测数

据进行整理,发现 YSW06 台 2021 年 2 月 22 日—5 月 21 日,YSW10 台 2021 年 5 月 20—30 日、2020 年 11 月 1 日—2021 年 1 月 4 日,53258 台 2021 年 5 月 24—30 日由于仪器故障,没有波形记录(因为这 3 个台站观测数据缺失较为严重,因此不参与后面的计算和分析),其余 15 个台站观测数据完整性较好,因此本文选取了观测数据完整性较好的 15 个观测台站进行主动源走时变化研究。图 1 中地震分布为 0 级以上地震精定位结果,地震起止时间为:2021 年 5 月 18 日 18 时 49 分—5 月 29 日 8 时 0 分。



F₁:澜沧江断裂;F₂:兰坪—永平断裂;F₃:顺濞河断裂;F₄:维西—乔后—巍山断裂;F₅:苍山山前断裂;F₆:红河断裂;F₇:程海—宾川断裂

图 1 气枪源、观测台站、漾濞 $M_s6.4$ 地震及余震分布

Fig.1 Distribution of airgun source, observation stations, Yangbi $M_s6.4$ earthquake and aftershocks

1.2 波形数据处理及震相走时提取

以水库岸边距离气枪源约 50 m 的一台站为参考台(图 1 中五角星的位置),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,利用互相关处理技术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^[10,14-15]。在此基础上,以获取的激发时刻为准,对各台站进行时长为 100 s 的记录波形数据截取,对参考台进行时长为 5 s 的波形截取。对截取的波形数据进行去均值、去趋势、去直流量处理,并进行 3~5 Hz 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^[9-10]。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^[15-16],对齐到时并去除震源影响,得到台站到参考台的格林函数。对每一个台站的所有格林函数进行叠加,其叠加结果作为各自台站的参考波形模板[图 2(a)],同时对每个台站的格林函数按天叠加[图 2(b)]。最后将每一天的叠加结果与参考模板作互相关计算,得到互相关系数[图 2(c)],互相关系数最大值所对应的时间延迟就是这两段相似波形窗口的走时差[本文取互相关系数最大,要求互相关系数大于 0.9,且最大振幅处(图 2 中灰色虚线框)的震相提取走时,从波形来

看,所取震相为 S_g 。时间窗长度以能完整表现一个震相为原则,取值在 0.5~1.0 s 间,不同台站取值存

在较小差异]。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^[14]。

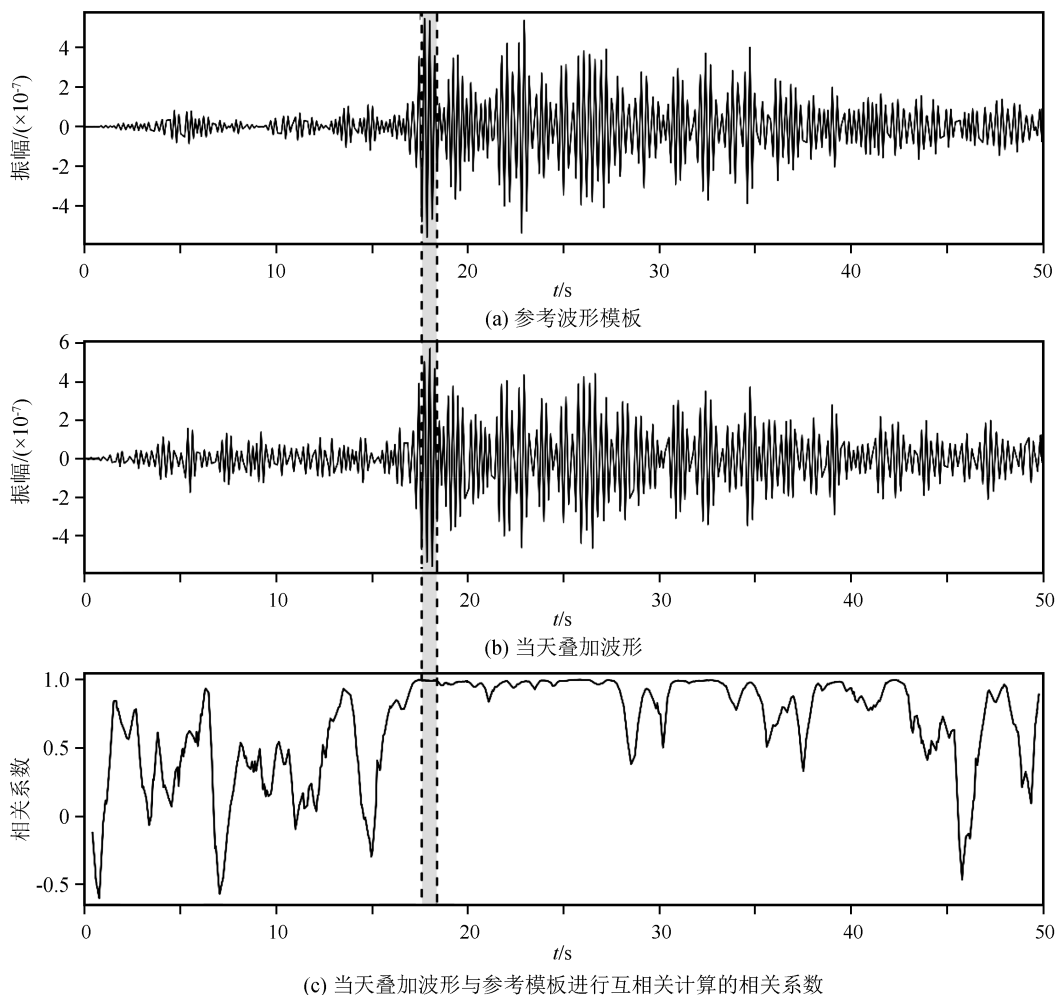


图 2 Ey213 台计算震相走时

Fig.2 Calculated travel-time of seismic phase at Ey213 station

2 结果分析

采用以上方法对主动源监测区内 15 个台站记录的观测波形数据进行处理,分别提取各自稳定震相(S_g 震相)的走时变化曲线(图 3、4),其中图 3 为震后震相走时呈下降趋势的台站,图 4 为震后震相走时呈上升趋势的台站。

2.1 漾濞 $M_s6.4$ 地震前走时变化

对漾濞 $M_s6.4$ 地震前 15 个台站记录的震相走时变化曲线进行分析发现,2020 年 11 月 1 日—2021 年 3 月 17 日,除 53039、53282、HDQ 台的走时变化存在不同程度的波动外,其余 12 个台较为平稳。2021 年 3 月 30 日—4 月 28 日,除 53036、Ey211、Ey213 台走时平稳,EYA 台呈下降趋势外,其余 11 个台走时变化存在较大的波动。2021 年 4

月 29 日—5 月 8 日,由于气枪故障,该时段内没有激发实验。从 2021 年 5 月 9 日起开始恢复激发实验,因此本文重点对 2021 年 5 月 9—30 日间的走时数据进行分析。

2021 年 5 月 9—21 日(震前 12 天),Ey211、Ey213 台走时变化呈“V”型结构(其中从 5 月 9—18 日走时呈下降趋势,变化量分别为: -0.025 s 和 -0.054 s; 5 月 18—21 日走时呈上升趋势,变化量分别为 0.034 s 和 0.040 s),Ey210、CHT 台走时呈上升趋势,变化量分别为: 0.030 s 和 0.047 s,其余台站变化趋势不明显。

2.2 漾濞 $M_s6.4$ 地震后走时变化

对漾濞 $M_s6.4$ 地震后 15 个台站记录的震相走时变化进行统计,相关情况列于表 1。结合表 1 和图 3、4 可知,15 个台的走时在漾濞 $M_s6.4$ 地震当天

(或震后 1~2 天)开始出现大幅的趋势性变化,该过程持续时间在 4~9 天之间,其中 EYA、HDQ 台震后走时变化呈明显的上升趋势,持续时间分别为 8 天和 5 天,走时差变化量分别为 0.021 s 和 0.067 s; YSW09 台震后走时变化存在波动,但总体呈上升趋势; YSW15 台震后走时变化波动较大,总体呈下降趋势。其余 11 个台站震后走时呈明显的下降趋势,

走时下降持续时间在 4~9 天之间,走时差变化量在 $-0.053 \sim -0.201$ s 间,其中走时差下降量最大为 53285 台,最小为 CHT 台。

图 5 为漾濞 $M_s6.4$ 地震后走时异常台站分布。由图 5 可知,漾濞地震后,震中附近 50 km 内台站的走时变化存在明显的区域特性,以维西—乔后—巍山断裂和红河断裂为界,共分为 3 块,其中红河断

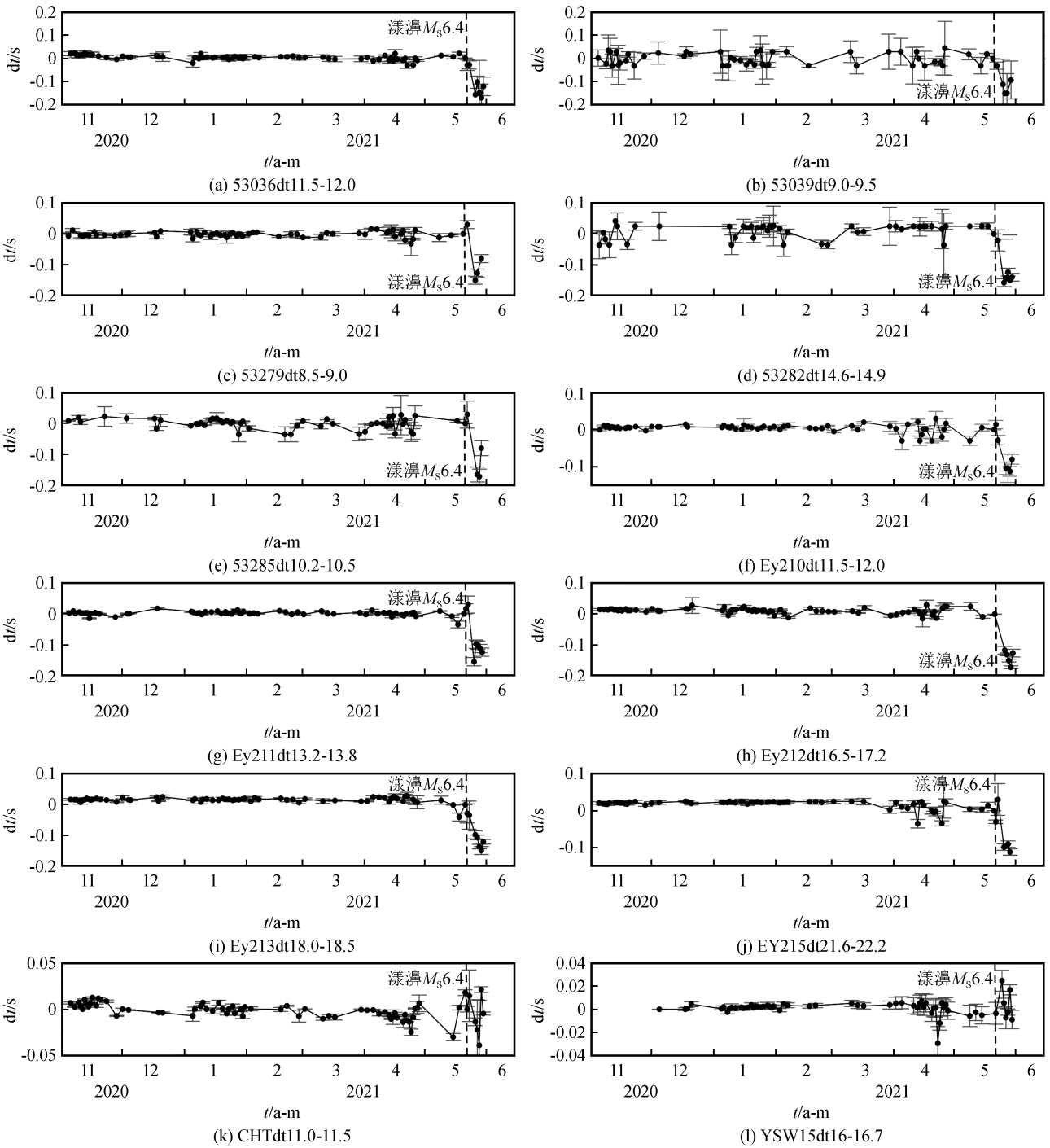


图 3 漾濞 $M_s6.4$ 地震后震相走时呈下降趋势的台站(图中竖虚线表示漾濞 $M_s6.4$ 地震的震发时刻)

Fig.3 Stations with a downward trend in phase travel-time after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake

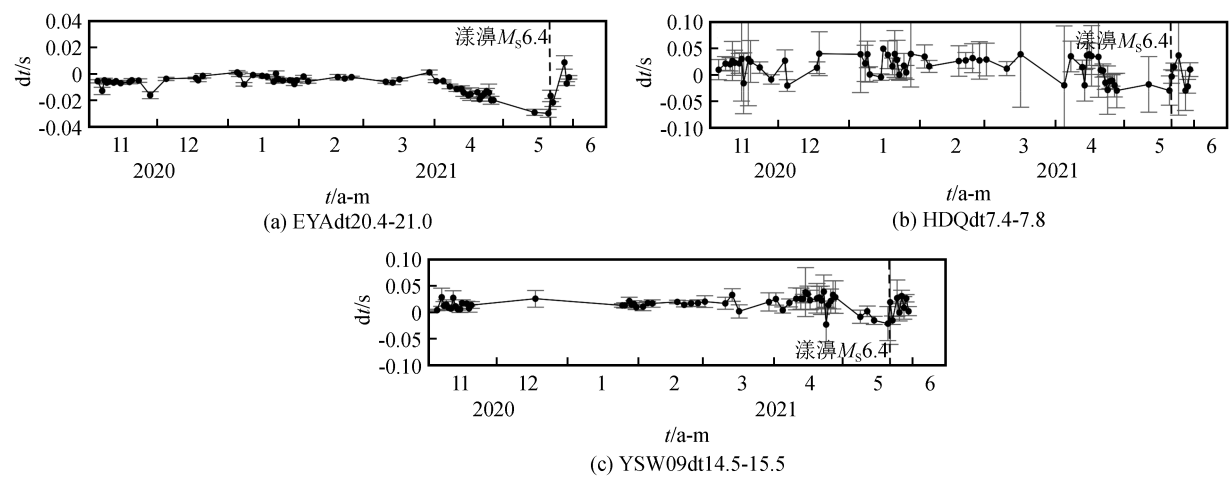


图4 漾濞 $M_s6.4$ 地震后震相走时呈上升趋势的台站(图中竖虚线表示漾濞 $M_s6.4$ 地震的发震时刻)

Fig.4 Stations with an upward trend in seismic phase travel-time after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake

表1 漾濞 $M_s6.4$ 地震后各台站走时变化情况

Table 1 Changes in the travel-time of each station after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake								
序号	台站	起点		终点		持续时间 /d	变化量 /s	备注
		日期	走时差/s	日期	走时差/s			
1	53036	2021-05-21	0.000	2021-05-26	-0.158	6	-0.158	走时下降
2	53039	2021-05-21	0.000	2021-05-27	-0.150	7	-0.150	走时下降
3	53282	2021-05-21	0.000	2021-05-26	-0.158	6	-0.158	走时下降
4	Ey212	2021-05-21	0.000	2021-05-29	-0.171	9	-0.171	走时下降
5	Ey213	2021-05-21	0.000	2021-05-29	-0.148	9	-0.148	走时下降
6	Ey210	2021-05-22	0.014	2021-05-27	-0.104	6	-0.118	走时下降
7	53279	2021-05-23	0.030	2021-05-27	-0.150	5	-0.180	走时下降
8	53285	2021-05-23	0.029	2021-05-29	-0.172	7	-0.201	走时下降
9	Ey211	2021-05-23	0.030	2021-05-26	-0.154	4	-0.184	走时下降
10	Ey215	2021-05-23	0.030	2021-05-26	-0.098	4	-0.128	走时下降
11	CHT	2021-05-23	0.014	2021-05-28	-0.039	6	-0.053	走时下降
12	EYA	2021-05-21	-0.030	2021-05-28	-0.009	8	0.021	走时上升
13	HDQ	2021-05-21	-0.030	2021-05-25	0.037	5	0.067	走时上升
14	YSW09	走时波动较大,总体上升						
15	YSW15	走时波动较大,总体下降						

裂以东的 53279 和 53282 台震后短期内走时呈明显的下降趋势,红河断裂以西,维西—乔后—巍山断裂以东的 EYA、HDQ 和 YSW09 台(其中 HDQ 和 YSW09 台沿苍山山前断裂展布)震后短期内走时呈明显的上升趋势。维西—乔后—巍山断裂以西的台站(10 个台)震后短期内走时均呈明显的下降趋势,且短期内具有较好的同步性。

另外,从震后台站走时的总体形式来看,大多数台站走时在下降(上升)到最低点(最高点)后,短时间内没有恢复到震前的水平,而是在最低点(最高点)附近波动。仅 CHT 台的走时短期内恢复且上下大幅的波动。结合图 5 发现,CHT 台位于漾濞地震的余震区边缘(地震主要破裂方向),推测气枪信号在到达台站的过程中,可能穿越了余震活动区,由

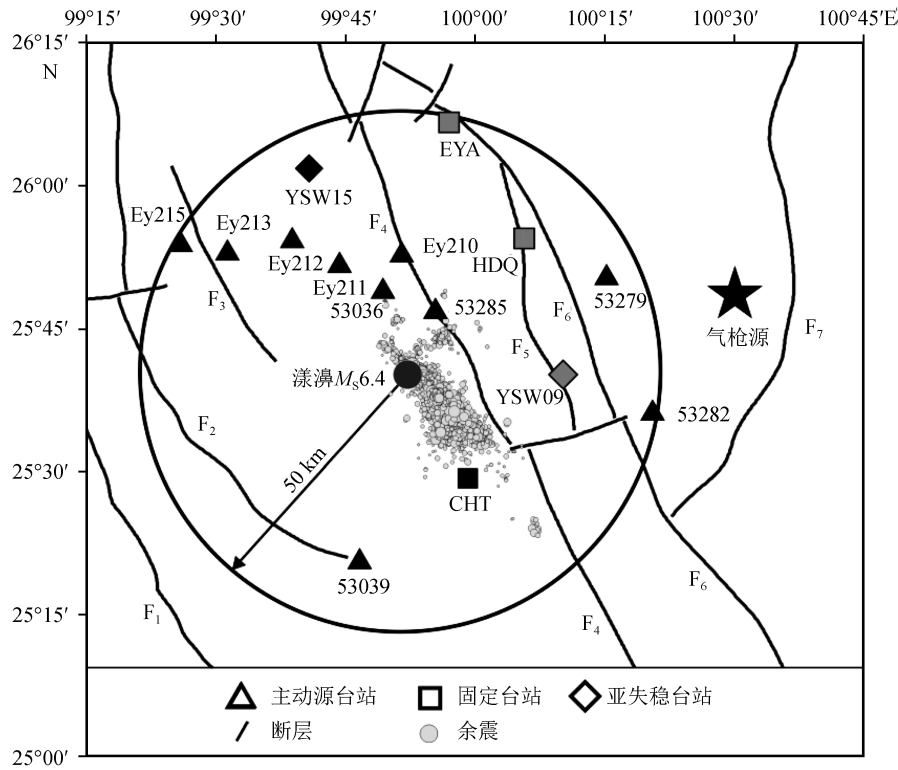
于受地下应力变化的影响,致使记录的气枪信号走时存在较大的波动。

3 讨论

地震在孕育和发生的整个物理过程中会引起介质的应力状态发生变化,改变其弹性性质,进而影响其弹性波速,从而导致多次重复测量得到的地震波走时发生变化^[17]。测量波速的微小变化,要求所选择的震源具有较高的重复性。气枪震源是一种在水下瞬间释放高压气体最终形成地震波的新型震源,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^[18-19]。气枪震源在同一地点进行多次激发所产生的信号波形具有高度可重复性^[2]。Wang 等^[20]探索出了尾波干涉技术来处理气枪震源波,从

而得到介质的波速变化。尾波干涉技术将气枪震源激发的近场记录近似为震源时间函数,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格林函数^[16,21]。对近似格林函数,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。



F_1 : 澜沧江断裂; F_2 : 兰坪—永平断裂; F_3 : 顺濞河断裂; F_4 : 维西—乔后—巍山断裂; F_5 : 苍山山前断裂; F_6 : 红河断裂; F_7 : 程海—宾川断裂
图中黑色为震后走时呈下降趋势的台站, 灰色为震后走时呈上升趋势的台站

图 5 漾濞 $M_s6.4$ 地震后走时异常台站分布

Fig.5 Distribution of stations with abnormal travel-time after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake

在波形数据处理过程中,我们将各台站每日激发的 13 枪波形进行叠加,获得单日的格林函数[图 2(b)],将研究时段内的所有波形叠加,获得参考格林函数[图 2(a)],再将当日格林函数与参考格林函数进行互相关计算,获得互相关系数[图 2(c)]。由图 2(c)可知,大部分时段互相关系数都保持在 1.0 附近。我们以互相关系数为约束(互相关系数要求在 0.9 以上),提取最大振幅处的波形来进行最终走时计算(从波形来看,所取震相为 S_g),这样可以保证结果的准确性。

图 6 为 Ey213 台的参考波形模板(参考格林函数)[图 6(a)]及漾濞 $M_s6.4$ 地震前 2021 年 4 月 4 日[图 6(b)]、5 月 9 日[图 6(c)]和震后 5 月 29 日[图 6(d)]的单日格林函数波形(振幅归一化结果)。对比图 6(b)和(c)可以发现, Ey213 台在 4 月 4 日和 5 月 9 日两个时间点,格林函数形态总体相似,这与图 3(i)中两个时间点的走时差无明显差异相对应。

对比图 6(c)和(d)可以发现漾濞 $M_s6.4$ 地震前后, Ey213 台的单日格林函数存在明显的变化差异。由图 3(i)可知,从 5 月 9—29 日, Ey213 台的走时出现了明显的变化,总体呈下降趋势,这与两个时间点的单日格林函数的形态存在明显的变化差异相对应。

本文是利用单日格林函数与参考格林函数进行互相关计算,所提取的震相走时表示的是单日波形相对于参考波形的走时差,当走时差为正时,表示波速减慢,当走时差为负时,表示波速加快。

在漾濞 $M_s6.4$ 发生前的 4 月份内,大部分台站的走时出现较大波动, EYA 台的走时呈下降趋势。从 2021 年 5 月 9—21 日,有 4 个台站走时出现了明显的异常, Ey211 和 Ey213 台走时呈“V”型变化结构, Ey210 和 CHT 台走时呈上升趋势。震前这 4 个台站走时表现出了不同的变化特征,表明此时地下介质应力状态较为复杂,相关台站走时呈现不同的变化状态可能与区域应力场的调整有关。

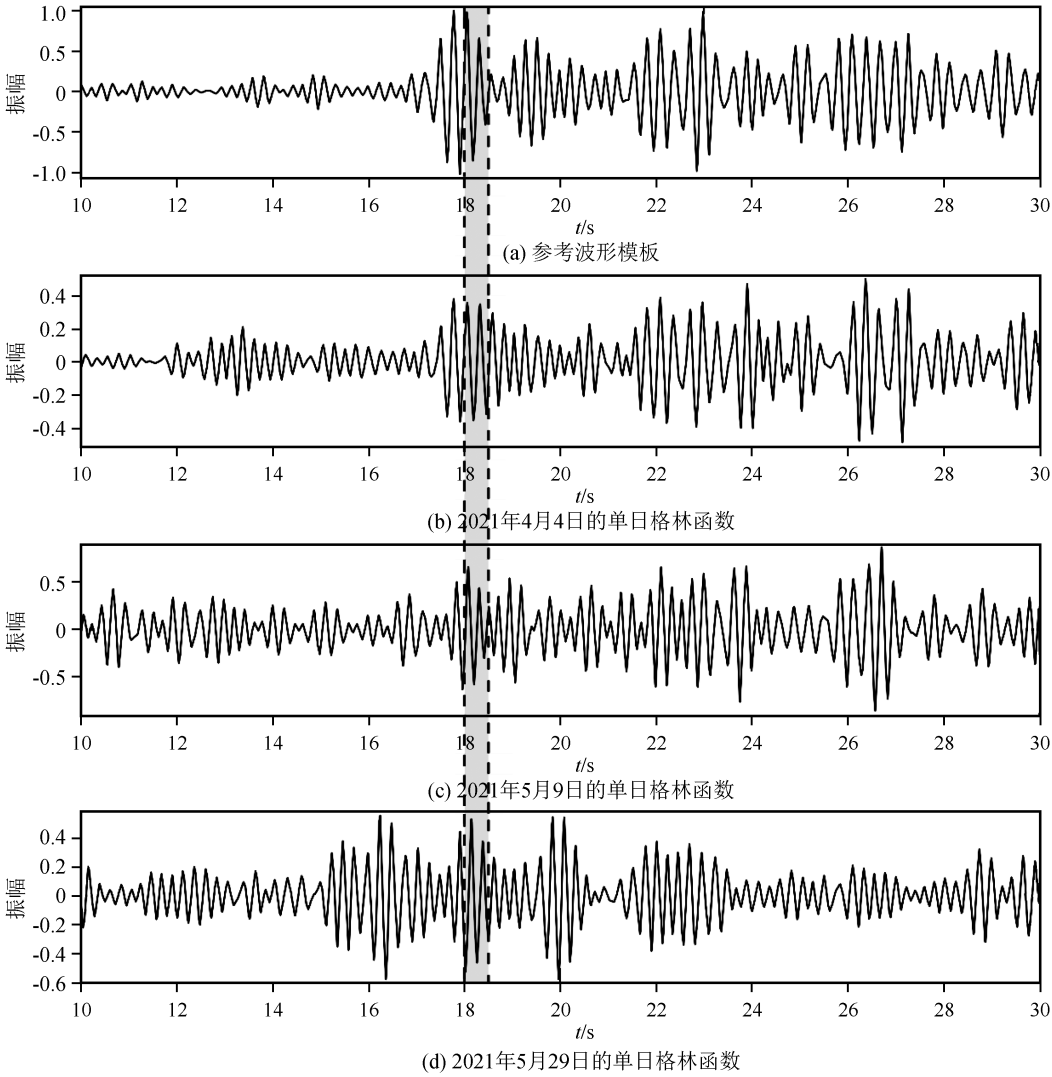


图 6 Ey213 台的参考波形模板及漾濞 $M_s6.4$ 地震前后单日格林函数波形
(图中灰色区域为提取震相走时所用的时间窗,范围为 18~18.5 s)

Fig.6 Reference waveform template of Ey213 station and single-day Green's function waveform before and after the Yangbi $M_s6.4$ earthquake

由图 5 可知,维西—乔后—巍山断裂以西的台站走时在漾濞 $M_s6.4$ 地震后短期内呈同步下降趋势,且下降幅度较大,表明台站记录到的区域波速在加快。结合地震烈度分布图来看,这些台站所处区域的地震烈度都在 VI 度以上,表明相关区域在地震过程中受到了一定程度的影响,地下应力可能发生了变化。陈立德等^[22]提出的“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。刚度增加可能导致速度增加,从而使走时缩短^[15]。另外,这些台站距离气枪源相对较远,台站走时下降可能与气枪信号穿过了地下的失稳源区有关。

地震序列精定位结果显示,漾濞 $M_s6.4$ 地震的余震主要呈北西向分布(图 5),且极少有余震发生

在维西—乔后—巍山断裂以东区域,表明该断裂在漾濞地震破裂过程中起到了很好的边界控制作用。而维西—乔后—巍山断裂以东、红河断裂以西区域内的台站在漾濞地震后走时短期内呈上升趋势(图 4),这表明维西—乔后—巍山断裂两侧的地下介质在漾濞 $M_s6.4$ 地震后处于不同的应力状态。在地震破裂过程中,维西—乔后—巍山断裂扮演着怎样的角色? 断裂带以西台站走时的大幅度下降是否是地下应力调整和断裂带活动双重作用的结果,有待更进一步的研究。

4 结论

本文基于 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震震中附近 50 km 范围内 15 个台站记录的 2020 年 11

月 1 日—2021 年 5 月 30 日的气枪震源信号,采用互相关时延检测技术提取了 15 个台站各自稳定震相(Sg 震相)的走时变化时间序列,并对漾濞 $M_s6.4$ 地震前后各台站的走时变化情况进行分析。得到如下认识:

(1) 2020 年 11 月 1 日—2021 年 3 月 17 日间,大部分台站走时较为平稳,2021 年 4 月大部分台站的走时出现较大波动,从 2021 年 5 月 9 日开始至 21 日(震前 12 天)漾濞 $M_s6.4$ 地震前,有 4 个台站走时出现了明显的异常,其中 Ey211 和 Ey213 台走时呈“V”型变化结构,Ey210 和 CHT 台走时呈上升趋势。

(2) 漾濞 $M_s6.4$ 地震后短期内,震中附近 50 km 范围内的大部分台站走时出现了明显的趋势性变化,且走时变化存在明显的区域特性。以维西—乔后—巍山断裂为界,断裂带两侧台站走时变化趋势存在明显差异,断裂带以东的 EYA、HDQ、YSW09 台走时呈上升趋势,变化最为显著的为 HDQ 台,走时差变化量 0.067 s。维西—乔后—巍山断裂以西的所有台站在漾濞 $M_s6.4$ 地震当天(或震后 1~2 天)开始出现明显趋势性下降,走时下降持续时间在 4~9 天之间,走时差变化量在 -0.053~-0.201 s 之间,其中走时差下降量最大为 53 285 台,最小为 CHT 台。

致谢:本文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,地震精定位目录由云南地震台王光明工程师提供,审稿专家提出了建设性修改意见,在此表示衷心感谢。

参考文献(References)

- [1] 陈颙,朱日祥.设立“地下明灯研究计划”的建议[J].地球科学进展,2005,20(5):485-489.
CHEN Yong, ZHU Rixiang. Proposed project of “Underground Bright Lump”[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 485-489.
- [2] 王宝善,杨微,王伟涛,等.宾川气枪信号发射台性能分析[C]//中国地球物理学会.中国地球物理学会第二十七届年会论文集.北京:中国地球物理学会,2011.
WANG Baoshan, YANG Wei, WANG Weitao, et al. A preliminary study on the performance of the Binchuan airgun seismic source[C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2011.
- [3] 陈佳,李孝宾,杨军,等.云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析[J].中国地震,2016,32(2):216-221.
CHEN Jia, LI Xiaobin, YANG Jun, et al. Large volume air-gun

- source spectrum characteristics of Binchuan, Yunnan [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 216-221.
- [4] 周青云.宾川地震信号发射台气枪震源能量激发方向性初步研究[J].大地测量与地球动力学,2018,38(7):754-759.
ZHOU Qingyun. Preliminary study on directivity of Binchuan air-gun source energy radiation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(7): 754-759.
- [5] 孙楠,孙耀充,庾汕.含有限水体介质中地震波场数值模拟[J].地震研究,2017,40(4):557-564.
SUN Nan, SUN Yaochong, YU Shan. Numerical simulation of seismic wave field in medium with limited water[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 557-564.
- [6] 叶泵,杨军,李孝宾.利用主动源研究宾川地区地壳各向异性[J].地震研究,2017,40(4):565-571.
YE Beng, YANG Jun, LI Xiaobin. Study on crustal anisotropy in Binchuan area by active seismic source data[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 565-571.
- [7] 郑定昌,王俊.基于背景噪声的川滇地区勒夫波层析成像[J].地震学报,2017,39(5):633-647.
ZHENG Dingchang, WANG Jun. Love wave tomography in Sichuan—Yunnan area from ambient noise[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(5): 633-647.
- [8] WANG B S, YANG W, WANG W T, et al. Diurnal and semidiurnal P- and S-wave velocity changes measured using an airgun source[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(1): e2019JB018218.
- [9] 陈佳,叶泵,高琼,等.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[J].地震研究,2017,40(4):550-556,677.
CHEN Jia, YE Beng, GAO Qiong, et al. Study on travel time variation of the wave from large volume air-gun source before and after the 2016 Yunlong $M_s5.0$ earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 550-556, 677.
- [10] YANG J W, LI L, ZHANG P Y, et al. Using airgun source signals to study regional wave velocity changes before and after the Yunlong $M_s5.0$ and Yangbi $M_s5.1$ earthquakes [J]. Earthquake Research in China, 2019, 33(2): 320-335.
- [11] 谭俊卿,杨润海,向涯,等.匹配滤波和曲波去噪相结合的气枪主动源弱信号提取[J].地震研究,2020,43(4):701-710.
TAN Junqing, YANG Runhai, XIANG Ya, et al. Combining MFT and curvelet transform method to extract weak signal in active source of air gun[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(4): 701-710.
- [12] 杨润海,谭俊卿,向涯,等.基于改进的线性调频 Z 变换的高精度地震波速干涉测量[J].地震研究,2020,43(1):1-9.
YANG Runhai, TAN Junqing, XIANG Ya, et al. High precision seismic wave velocity interferometry based on modified chirp Z transform [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(1): 1-9.
- [13] 张帅,杨润海,高尔根.基于压缩感知的信号重建方法及在气枪震源信号处理中的应用[J].地震工程学报,2021,43(2):

- 322-330.
- ZHANG Shuai, YANG Runhai, GAO Ergen. Signal reconstruction method based on compressive sensing and its application in signal processing of air-gun sources[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 322-330.
- [14] 刘自凤, 苏有锦, 王宝善, 等. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究, 2015, 38(4): 591-597.
- LIU Zifeng, SU Youjin, WANG Baoshan, et al. Study on analysis method of travel time variations of seismic wave of active source in Binchuan[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(4): 591-597.
- [15] 张元生, 王宝善, 陈颢, 等. 两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3815-3822.
- ZHANG Yuansheng, WANG Baoshan, CHEN Yong, et al. Travel-time variations before and after two major earthquakes derived from active-source seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3815-3822.
- [16] 王宝善, 杨微, 王伟涛, 等. 利用反褶积消除激发环境对水库大容量气枪信号的影响[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理第二十八届年会摘要文集. 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2012.
- WANG Baoshan, YANG Wei, WANG Weitao, et al. Un-blur the signature of large volume airgun excited in a reservoir with deconvolution[C]//Chinese Geophysical Society. Abstracts of the 28th Annual Conference of China Geophysics. Beijing: China Academic Journal (CD-ROM Edition) Electronic Magazine Press, 2012.
- [17] 王伟涛, 王宝善, 蒋生森, 等. 利用气枪震源探测大陆浅部的地震学研究回顾与展望[J]. 地震研究, 2017, 40(4): 514-524.
- WANG Weitao, WANG Baoshan, JIANG Shengmiao, et al. A perspective review of seismological investigation on the crust at regional scale using the active airgun source[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 514-524.
- [18] 陈颢, 王宝善, 葛洪魁, 等. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 441-446.
- CHEN Yong, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. Proposed of transmitted seismic stations[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(5): 441-446.
- [19] 陈颢, 张先康, 丘学林, 等. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1317-1321.
- CHEN Yong, ZHANG Xiankang, QIU Xuelin, et al. A new method of artificially exciting seismic waves on land[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11): 1317-1321.
- [20] WANG B S, ZHU P, CHEN Y, et al. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113(B12): B12313.
- [21] 翟秋实, 姚华建, 王宝善. 气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究[J]. 中国地震, 2016, 32(2): 295-304.
- ZHAI Qiushi, YAO Huajian, WANG Baoshan. Study on the deconvolution method and processing flow of air-gun source data[J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 295-304.
- [22] 陈立德, 付虹. 地震预报基础与实践[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- CHEN Lide, FU Hong. Basis and practice of earthquake forecast[M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 186-187.