

# 利用气枪震源信号研究 2016 年云龙 $M_s 5.0$ 地震前后波速变化特征\*

陈佳, 叶泵, 高琼, 王军, 李孝宾, 杨军

(中国地震局滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000)

**摘要:** 以 2016 年 5 月 18 日云南云龙  $M_s 5.0$  地震为例, 选取距震中较近的 3 个台站和较远的 5 个台站记录的 2016 年 1—9 月的气枪震源信号, 使用互相关检测技术得到地震前后这 8 个台站各自稳定震相走时变化特征。结果表明: 云龙地震前, 各台均存在不同程度的走时异常变化。离震中较近的 3 个台站中, 震中西侧和东侧台站走时变化有一定差别, 但都在地震前的 3、4 月变化较大; 而离地震较远的 5 个台站则变化趋势特征一致, 幅度略有差别; 离地震较近台站走时变化幅度明显大于离地震较远台站; 地震前小于 0.7 m 的水位变化并未对各台走时变化产生实质性影响。同时对比了云龙台 FSQ 水管倾斜的形变观测数据, 监测到同一时段地下应力发生变化。

**关键词:** 气枪震源; 互相关检测技术; 走时变化; 云龙  $M_s 5.0$  地震

**中图分类号:** P315.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0550-07

## 0 引言

地震波在地球介质中传播, 带来了丰富的介质信息, 为探索地球介质的动态变化提供了天然条件。在地震孕育的过程中, 伴随着介质的应力改变, 由于很难直接测量地球应力变化, 很多地球物理学家通过监测地震波速的改变来研究地球介质的变化 (Birch, 1960, 1961; Aggarwal *et al.*, 1973; Reasenber, Aki, 1974)。Li 等 (2007) 采用重复地震和爆破记录分析了圣安德列斯断层在 2004 年帕克菲尔德 6 级地震前后地震波波速变化, 发现宽 200 m、深 6 km 的断层带内地震波速降低达 2.5%。王伟涛等 (2009) 利用电动落锤作为主动源, 监测汶川地震余震时 2 次面波波速异常变化, 变化幅度最高达到 2%。魏芸芸等 (2016) 利用气枪震源波形, 得到新疆 2 次中强地震前相对走时变化幅度约为 0.1% ~ 0.26%。杨微等 (2010) 等对精密控制的人工震源进行连续试验, 在棉竹  $M5.6$  地震前后观测到 5 ~ 9 ms 的地下介质波速的微弱变化。可见跟踪分析地下

介质波速变化对地震监测研究及减轻地震灾害有重要的意义。

气枪震源最初被应用于海洋石油勘探和海洋结构探测 (丘学林等, 2007)。经过大量专家学者在中国大陆开展了多次试验 (陈颙, 朱日祥, 2007; Chen *et al.*, 2008; Wang, 2010), 陈颙院士将气枪震源从海中借鉴到内陆湖来使用, 至此大容量气枪震源已经在中国大陆南北开始了大量的试验, 并取得了很多卓有成效的结果。宾川的大容量气枪发射台是“云南省陈颙院士工作站”在国内最早投入运行的发射台, 这一固定气枪震源的建设及激发, 为连续跟踪地下介质变化提供了可靠的数据来源。

云南宾川气枪主动源自 2012 年年底开始持续激发信号, 目前已运行 4 年多, 本文以 2016 年 5 月 18 日云龙  $M_s 5.0$  地震 (26.1°N, 99.53°E) 为样本, 主要截取离云龙地震较近的和较远的 8 个台站接收到的气枪激发信号, 选择各台站的稳定震相进行走时的初步分析, 得到各个震相在云龙地震前后的走时变化特征, 从而分析地下介质应力状态的时空演变。

\* 收稿日期: 2017-04-11.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (41474048)、云南省青年基金科学项目 (201506)、2017 年度震情跟踪定向工作任务 (2017010309) 及云南省陈颙院士工作站专项经费共同资助。

## 1 云南宾川气枪发射台及观测情况

云南宾川大容量气枪发射台始建于 2011 年, 2012 年正式投入运行, 其位于 20 世纪 70 年代末至 80 年初建成的滇西地震预报实验场内, 大容量气枪发射台在此处建立与当时建场的科学思路不谋而合, 即为了集中各种观测手段, 进行地震学基础理论和地震前兆机制研究。从区域构造上讲, 此发射台位于著名的红河断裂带和程海断裂带交汇区域, 属于地震重点监视防御区内。

宾川大容量气枪激发水体为当地大银甸水库, 位于宾川县牛井镇西南 8 km 处, 是一座中型水库, 属金沙江水系, 海拔 1 488 m。水体下的发射气枪组由 4 支单枪容量为 2 000 in<sup>3</sup> 的 Bolt Longlife 型气枪组成, 4 支气枪的工作深度为浮台下 10 m 左右。

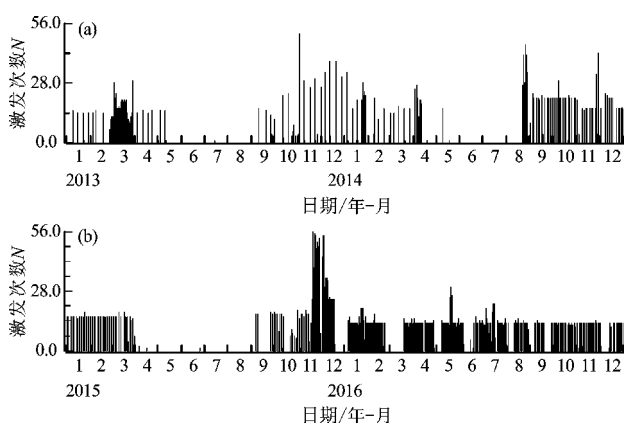


图 1 2013—2014 年 (a)、2015—2016 (b)

宾川主动源激发日频次图

Fig. 1 Transmitting daily frequency of airgun of Binchuan active seismic station from 2013 to 2014 (a), and 2015 to 2016 (b)

云南宾川主动源激发基地, 在建台之初是以达到常规观测为目的。气枪激发信号的日常主要观测系统由滇西实验场区原有 5 个台站、云南测震台网 46 个台站和 40 个流动台组成, 固定台站地震计以 BBVS-60 和 KS 2000 为主, 数据采集器为 EDAS-24IP。流动台地震计为 Guralp-40T, 数据采集器为 Reftek130B, 每个台每日的观测数据约为 24 M。在这 4 年的观测当中, 夏季为枯水期, 不适宜激发实验, 其他时段除了仪器检修都开展激发实验。图 1 给出了 2013—2016 年每日激发情况。

2013—2015 年由于水库在每年 5—8 月经历旱季枯水期, 不符合激发条件。2016 年水库在枯水期仍然有 15 m 以上的水位, 故除了在仪器保养维护期间, 都能获得激发数据, 整个 2016 年, 每天激发次数都保持在 13 枪左右, 因此本文选取了 2016 年 1—9 月共 8 个台站的数据, 激发数据基本连续, 为分析云龙地震前后各台站震相走时变化提供了稳定的数据资料。

## 2 数据处理方法

气枪在水中激发, 其激发波形不但携带了有用的地下介质信息, 还携带了水体、水位、激发条件等信息。要得到真实的地下介质信息, 必须消除水体、激发条件不同等因素的影响。Wang 等 (2008) 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 (王宝善等, 2012; 翟秋实等, 2016)。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。由于每个台站信噪比不同, 在得到每个台站的走时变化前, 需要用不同叠加的方法来增加信号的信噪比。

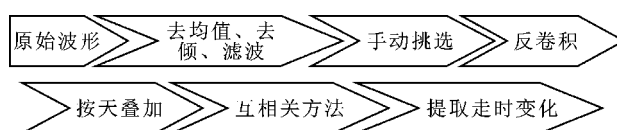


图 2 数据处理流程图

Fig. 2 Flow chart of data processing

本文数据处理流程如图 2 所示。每个台站气枪激发波形会携带仪器零漂、台基不稳等一些信息。因此, 在做相关干涉之前, 首先要对波形去均值、去趋势、去倾斜, 及滤波分析; 第二步, 手动挑选波形。在日常分析主动源数据工作中, 可以手动去除一些干扰较大数据, 这样可以提高数据的信噪比; 在气枪源 50 m 附近架设了一个参考台, 可以近似为源的信息, 上文中提到通过对此参考台进行反卷积可以得到源到台站之间路径上的格林函数, 在做反卷积之前对波形进行 2

~5 Hz 的滤波, 因为气枪主频集中在 2 ~ 5 Hz (陈佳等, 2016)。通过滤波及反卷积之后的波形, 震相更清晰, 有利于相关干涉来提取震相走时变化; 考虑到距离较远台站一枪的数据不能清楚地看到震相, 在分析时, 将一天激发约 13 次的波形叠加作为每一个单点来分析走时变化; 第三步进行波形互相关计算精确走时变化时, 需要一个对比的参考模板, 将 2015 年后半年的数据进行叠加, 作为对比的参考模板, 如何得到要对比的每日波形与参考模板之间的时间延迟结果, 刘自凤等 (2015) 给出了比较细致的讲解, 这里不再赘述。

### 3 云龙 $M_s5.0$ 地震前后走时变化特征及影响因素分析

#### 3.1 各台站走时变化特征分析

2016 年 5 月 18 日在大理白族自治州云龙县发生  $M_s5.0$  地震, 震源深度 15 km, 该地震震中位置距离主动源激发源 102 km。本文共选取了 8 个台站来分析云龙地震前后各震相走时变化。从图 3 可以看出, 距离云龙地震较近台有云龙台 (YuL)、洱源台 (ErY), EY16 台。其中洱源台距离云

$M_s5.0$  地震震中最近, 为 7 km, 云龙台、洱源台为固定台站, 分别距离震中 8 km、41 km。离震中较远的 5 个台站为主动源台, 分别为 53254、53258、53266、53268 和 53272 台, 震中距在 90 ~ 129 km 之间。

通过波形互相关干涉法得到这 8 个台站的走时变化, 每个台站都选取了相关系数最大的时间窗。图 4、5 分别给出了离云龙地震较近的 3 个台站及较远的 5 个台站在 2016 年 1—9 月走时变化曲线。从图 4、5 看出, 走时变化幅度为  $10^{-5} \sim 10^{-2}$ , 精度达到  $10^{-4}$ 。

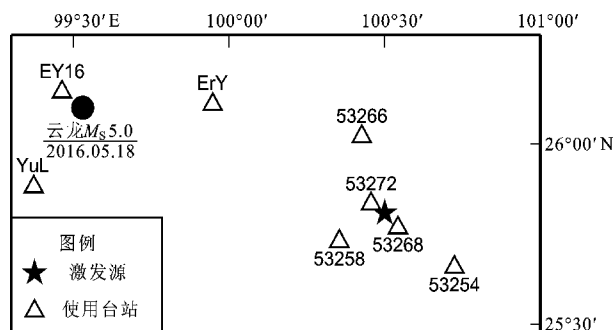


图 3 云龙地震及本文所使用台站分布情况

Fig. 3 Sketch diagram of station distribution used in this paper and the Yunlongearthquake

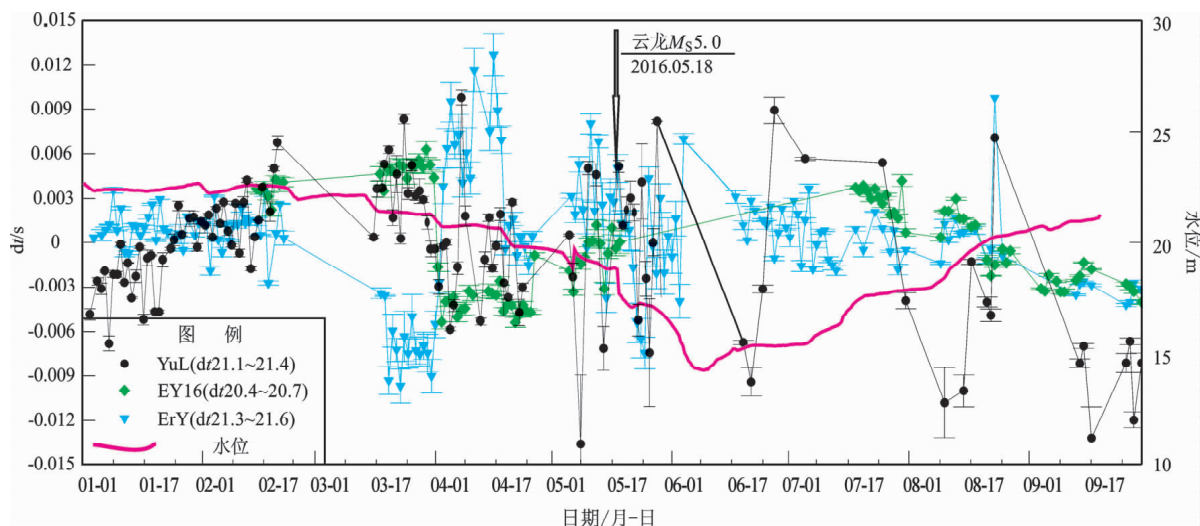


图 4 2016 年 1—9 月云龙台 (YuL)、EY16 台和洱源台 (ErY) 走时变化曲线及同一时段内水位图

Fig. 4 Travel time variation curves of YuL, EY16 and ErY stations and the water level from Jan. to Sep, 2016

图 4 给出 2016 年 1—9 月距离震中较近的云龙、EY16 和洱源 3 个台站各自稳定震相走时变化曲线, 这 3 个台站距离宾川气枪源大于 60 km。从

走时变化趋势图上看, EY16 台和云龙台在地震前变化趋势一致, 而洱源台则相反, 这和 EY16 台位于震中西侧、洱源台位于震中东侧有关。我们对 5

月 18 日云龙  $M_s5.0$  地震前走时变化情况, 分 3 个时段进行分析: 第一时段: 1—2 月, 云龙台走时变化有一抬升过程, 变化幅度为  $0.01\text{ s}$ ; 洱源台则相对较平稳; EY16 是临时台站, 架设在 2 月, 刚开始有记录。第二时段: 3 月 10 日—4 月 25 日, 这一时段这 3 个台站走时均出现剧烈变化, 特别是在 4 月 3—18 日之间, 水位相对一致情况下, 云龙和洱源台波速变化剧烈。整个时段内云龙和 EY16 台变化一致, 这是因为这 2 个台站离震中最近, 同在震中西侧, 应力场相对一致, 变化趋势则一致。在这一时段内, EY16 台走时相对变化达  $8.84 \times 10^{-3}\text{ s}$ , 云龙台为  $6.24 \times 10^{-3}\text{ s}$ , 洱源台为  $1.14 \times 10^{-2}\text{ s}$ 。在第二时段中共有 2 次水位下降变化, 3

月 31 日—4 月 3 日下降  $0.56\text{ m}$ , 4 月 18—20 日下降  $0.68\text{ m}$ , 虽然这 2 个时间段的水位下降深度相差不大, 但波速变化相差很大, 4 月 18—20 日水位下降更多, 但走时变化却相对没有那么大, 可见在水位变化不大时, 并不能对走时变化产生影响。第三时段: 5 月 3—17 日, 各台相对走时变化相比于第二个时段, 变化幅度略小, 而比第一个时段变化幅度要大。在接近地震发生的过程中, 越接近发震时间, 地下应力变化越复杂。云龙地震后, 洱源台和 EY16 台波速变化仍然剧烈, 说明地震后地下应力需要一个调整过程, 一直到 6 月底 7 月初, 走时变化才趋于稳定。由于云龙台波形数据较少, 误差较大, 本文不做分析。

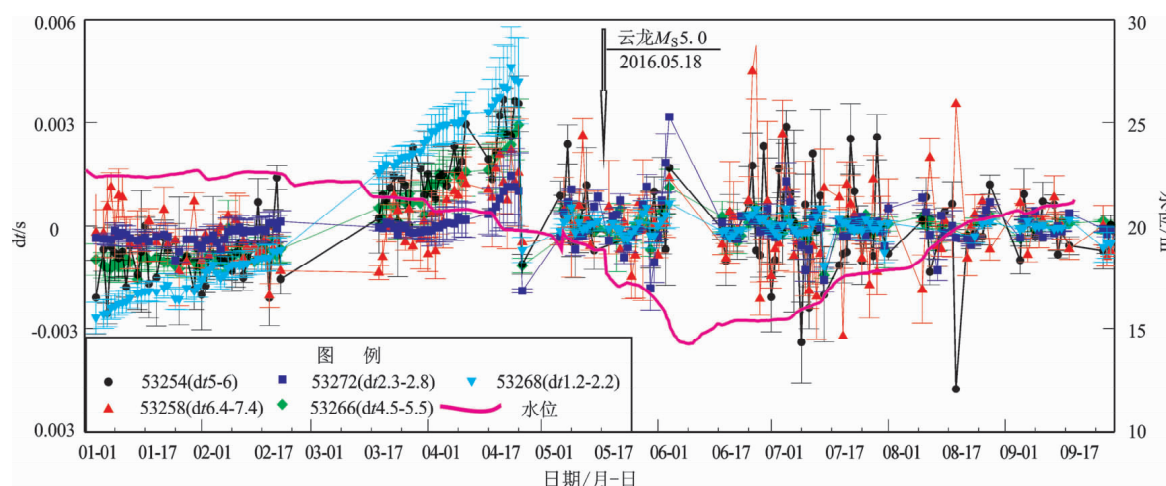


图 5 2016 年 1—9 月 53254 台、53258 台、53272 台、53266 台和 53268 台走时变化及同一时段内水位曲线  
Fig. 5 Travel time variation curves of 53254, 53258, 53272, 53266 and 532568 stations and the water level from Jan. to Sep, 2016

图 5 为 2016 年 1—9 月 53266、53258、53272、53268、53254 台共 5 个离震中较远台站初至波的走时变化曲线, 这 5 个台分布在宾川气枪激发源的不同方位, 且距离云龙地震震中从近到远分别为 90、92、97、97、129 km, 且除 53254 台离宾川气枪源较远, 超过 30 km, 其他 4 个台站均在离气枪源 30 km 范围内, 这 5 个台站记录激发波形清楚, 信噪比高。对在云龙  $M_s5.0$  地震前各台站走时变化情况, 同样分 3 个时段进行分析: 第一时段为 1 月—2 月 22 日, 5 个台走时变化较为平稳, 除了 53268 台有一抬升过程, 其余 4 个台走时变化差别不大, 53268 台可能对地壳应力改变响应更明显。第二阶段为 3 月 17 日—4 月 26 日, 各台站走时变

化趋势一致, 但变化幅度不同, 53272 台走时变化幅度最小, 为  $1.13 \times 10^{-3}\text{ s}$ , 53268 台走时变化幅度最大, 为  $5.16 \times 10^{-3}\text{ s}$ 。在这一时间段, 各台站走时变化一致性较好, 分析其原因可能和区域应力场应力加载有关。从变化幅度上看, 离震中较近台站为走时变化达  $6.24 \times 10^{-3} \sim 1.14 \times 10^{-2}\text{ s}$ , 变化幅度较大的 53268 台走时变化幅度明显小于离震中较近台站。第三时段: 5 月 1—17 日, 相比于第一个时段, 这个时段各台站走时变化波动较大, 地下应力场较第二个时段已经发生改变。这 3 个时段内, 相对水位基本一致, 1 月 31 日—2 月 2 日, 水位从 22.66 m 变化为 22.25 m, 下降  $0.41\text{ m}$ 。3 月 31 日—4 月 3 日, 水位从 21.27 m 下降到 20.71

m, 下降 0.56 m。5 月 4—7 日有一水位突升和突降过程, 从 19.54 m 降到 18.85 m 再升至 19.7 m。这 3 个时段中, 无论是水位 3~4 天的缓慢下降还是突然的下降上升, 并未引起每个台站一致的走时变化或者很大波动, 而且这 5 个台离激发水库较近, 可见不到 1 m 的水位上升或下降并未对走时变化产生很大的影响, 反而地震之前区域应力场的变化可能成为走时变化一致性的主导。

从 5 月 18 日地震发生后走时变化的情况看, 离地震震中较近的台站如洱源台受地壳应力改变的影响较大, 5 月底其走时变化波动仍较大, 到 7 月才恢复至平稳变化。离震中较远台站, 由于离宾川激发源较近, 这时地震已经发生, 应力得到释放, 而水库水位也发生了相对于地震前较大的变化, 从 5 月 26 日的 17.17 m 下降到 6 月 9 日的 14.25 m 再上升至 8 月 24 日的 20.26 m, 最大变化幅度达 6 m, 之后比较平稳。地震后水位变化剧烈, 再加上震后区域应力场调整, 引起了走时变化相对较大的波动, 但是并未出现震前多个台走时变化趋势一致情况。可见这一时间走时变化可能是由区域应力场和水库水位双重作用的结果。

### 3.2 主动源激发波形一致性分析

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。本文使用的气枪震源前人已经做过很多一致性分析 (林建民等, 2008; 张元生, 2016), 已经被证实为是可重复性好、可控性强的、性能卓越的人工震源。因为它主要受激发水体的影响, 气枪激发对水体及周围环境几乎没有影响, 气枪震源在同一地点进行多次重复激发时产生的信号波形具有高度可重复性。

洱源台离宾川气枪源 64 km, 我们以此台为例, 说明主动源激发波形的重复性。图 6 给出了洱源台主动源激发波形单天事件叠加和模板相关性分析图。图 6a 为 2016 年 7 月 8 日 13 枪数据叠加波形, 图 6b 是对比模板, 图 6c 为单天叠加数据和模板波形相关性分析的相关系数。从图中可看出, 整个波形从始至终相关系数都在 1.0 附近, 我们选择 20.4~20.7 之间的稳定震相, 把每天的叠加波形与模版进行相关性分析, 且相关系数大于 0.9 的波形进行最终走时计算。其余各台站在计算走时变化前, 我们都会参照这个参数来对数据进行取舍, 这样可以保证结果的准确性。

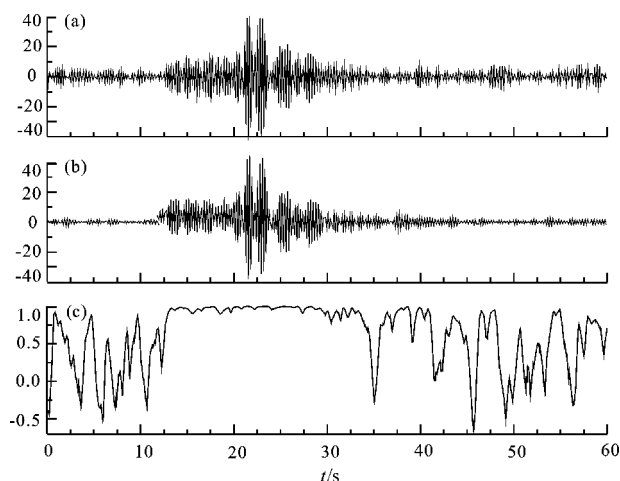


图 6 洱源台主动源激发波形单天事件叠加 (a) 和模板 (b) 及相关性 (c) 分析图

Fig. 6 Stacked excitation waveform of every day in Eryuan station (a), template (b) and correlation analysis diagram (c)

### 3.3 水位对走时影响

地震发生前的 2016 年 1 月至 5 月 18 日时间段内, 水库水位总体呈下降趋势, 8 个台站走时变化并未像预期的那样, 朝一定趋势性方向发展。特别是 5 月 1—17 日, 水位相对一致, 而各台走时变化波动很大, 这主要与震前地壳介质应力变化有关, 可见与水位对走时变化影响相比, 各台走时变化更易响应地壳介质应力变化。5 月 19 日—9 月 17 日, 水位先下降后上升, 特别是水位从 6 月 9 日的 14.25 m 上升至 8 月 24 日的 20.26 m, 之后才趋于稳定, 这一时间段内, 水位下降上升幅度明显比震前大, 但各台走时并未表现出一致性趋势, 可见水库水位变化对走时变化影响还需要进行更深入的研究。

## 4 云龙台形变资料分析

云龙地震台位于大理州云龙县城石门南山, 海拔 1 710 m, 1970 年建台, 属国家级形变台站。台基岩性为侏罗纪细砂岩, 岩性完整而且比较坚硬。地震台有 300 m 的仪器观测洞室, 1987 年 12 月架设高精度 FSQ 自记水管倾斜仪。此地震台观测洞室深、覆盖层较厚、干扰源少、仪器观测精度高、故其资料可信度高。图 7 给出了 2013 年至 2017 年 3 月初的云龙台水管倾斜日均值走势图。



从图7a来看,2014、2015年水管倾斜NS分量有明显的年变趋势,而从2016年年初开始,年变趋势改变,一路向下,一直持续到5月18日发生了云龙地震。而图5也显示3、4月走时变化呈现明显上升趋势,可见地下应力场的改变影响水管NS分量变化。从图7b可以看出,从2013年年底开始,其表现为向西倾斜,2016年年初则表现为相对平稳趋势,之后发生云龙地震。即云龙台水管倾斜2个分量变化趋势在云龙地震之前有明显改变,可以与走时变化相互印证。

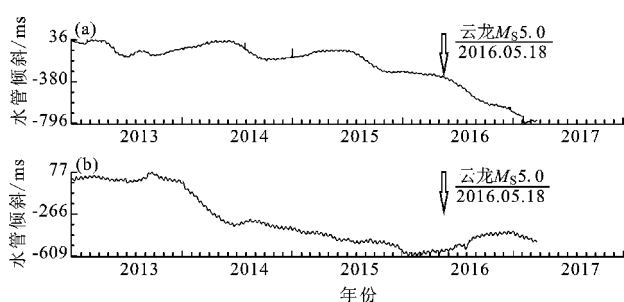


图7 云龙台南北分量(a)、东西分量(b)  
水管倾斜日均值观测图

Fig. 7 The curves of daily average value of the water pipe tilt in NS (a) and EW (b) recorded by the Yunlong seismic station

## 5 讨论与结论

本文将2016年1—9月气枪激发信号去均值、去趋势、滤波并剔除质量差波形,通过对参考台作反卷积来消除震源影响,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。通过分析2016年5月18日云龙 $M_s5.0$ 地震前后走时变化特征,得到以下结论:

(1) 本文使用的气枪震源,可控性强,从离激发源64 km的洱源台单天13枪叠加波形和2015年后半年叠加模板相关性分析看,激发波形重复性高,为我们监测地下介质波速变化提供了可能。

(2) 不论是离地震震中较近还是较远的台站,在地震发生前,都存在不同程度的走时变化。3个距离地震较近的台站走时变化最大,达 $(0.624 \sim 1.14) \times 10^{-2}$  s,另外5个距离较远台站最大的走时变化为 $(1.13 \sim 5.16) \times 10^{-3}$  s。可见距离地震较近的台走时异常变化幅度大于较远台站。

(3) 云龙地震台水管倾斜走势图分析显示,NS向分量在地震前有破年变现象,EW向分量从2014年开始产生西倾,于2016年初出现转折,均指示这一地区地壳应力变化。从时间上看,2016年1—5月开始水管倾斜NS和EW向分量有大的变化;对于走时变化,2016年1—2月部分台站出现走时的明显变化,一直到3—4月多数台站走时明显变化。可见不论是水管倾斜记录变化还是走时变化均与此次地震应力积累相关。

(4) 在地震前应力积累过程中,有短期2~3 d的水位变化,但水位变化并未对走时变化产生实质性影响,一是本文中数据处理已经利用对参考台的反褶积消除激发震源影响;二是在地震前每次水位变化不足0.7 m;三是对比了多次水位变化,并未同时影响多个台站产生一致的走时变化,相比于水位下降较小的时间段,水位下降较大的那一时间段,走时变化反而更小。

本文互相关时延计算程序由中国地震局地球物理研究所王宝善研究员提供,在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- 陈佳,李孝宾,杨军,等. 2016. 云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析[J]. 中国地震,32(2):216-221.
- 陈颢,朱日祥. 2007. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展,22(5):441-446.
- 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[J]. 地球物理学报,51(1):206-212.
- 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:南海北部实验结果分析[J]. 科学通报,52(4):463-469.
- 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[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理第二十八年会议摘要文集. 北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社.
- 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[J]. 中国地震,25(3):223-233.
- 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[J]. 中国地震,32(2):270-281.
- 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[J]. 地球物理学报,53(5):1149-1157,doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.016.
- 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[J]. 地震研究,38(4):591-597.

- 翟秋实,姚华建,王宝善,等. 2016. 气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究[J]. 中国地震,32(2):295–304.
- AGGARWAL Y P, SYKES L R, ARMBRUSTER J, *et al.* 1973. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes[J]. *Nature*, 241:101–104.
- BIRCH F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 1[J]. *J Geophys Res*, 65:1083–1102.
- BIRCH F. 1961. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2[J]. *J Geophys Res*, 66:2199–2224.
- 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[J]. *Geophysical Prospecting*, 56(4):601–612.
- LI Y G, CHEN P, COCHRAN E S, *et al.* 2007. Seismic velocity variations on the San Andreas fault caused by the 2004  $M_6$  Parkfield Earthquake and their implications[J]. *Earth Planets and Space*, 59(1):21–31.
- REASENBERG P, AKI K. 1974. A precise continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress[J]. *J Geophys Res*, 79(2):399–406.
- 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[J]. *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]. *J Geophys Res*, 113(B12):36–44, doi:10.1029/2007JB005023.

## Study on Travel Time Variation of the Wave from Large Volume Air – gun Source before and after the 2016 Yunlong $M_5.0$ Earthquake

CHEN Jia, YE Beng, GAO Qiong, WANG Jun, LI Xiaobin, YANG Jun

(Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China Earthquake Administration, Dali 671000, Yunnan, China)

### Abstract

Taken the Yunnan Yunlong  $M_5.0$  earthquake as an example, we chose the airgun signal data recorded by three seismic stations near the epicenter of the Yunlong earthquake and five seismic stations which is a bit further from the epicenter between January and September 2016. We studied travel time variety characteristics of the eight seismic stations by using cross – correlation time delay measurement technology. The results show that the travel time of every station had abnormal variation before the earthquake. For the three near stations, the travel time from the eastern and western of the earthquake was different, but they all had larger changes in March and April. For the five further stations, the trend characteristics were consistent, but the range was different. The change of the travel time from the near seismic stations is more larger than the far seismic stations. Before the earthquake, less than 0.7 m of water level change can't make a substantial change on travel time. Compared with the crustal deformation observation data of the FSQ water pipe tilt in Yunlong seismic station, we observed stress changes occurred in the same period of time.

**Keywords:** airgun seismic source; cross correlation delay technique; travel time variations; Yunlong  $M_5.0$  earthquake