

郭雨帆, 罗丽, 查小惠, 等. 运用尾波干涉技术监测2005年江西九江—瑞昌 $M_s5.7$ 地震后地壳介质变化[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 1-9. [GUO Yufan, LUO Li, ZHA Xiaohui, et al. Monitoring Variations of Crustal Media after the Jiujiang-Ruichang  $M_s5.7$  Earthquake in Jiangxi Province in 2005 by Coda Wave Interferometry [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 1-9]

## 运用尾波干涉技术监测2005年江西九江—瑞昌 $M_s5.7$ 地震后地壳介质变化

郭雨帆, 罗丽, 查小惠, 董非非, 吕坚, 汤兰荣

(江西省地震局, 南昌 330039)

**摘要:** 基于2005年江西九江—瑞昌 $M_s5.7$ 地震序列事件波形及其观测报告, 采用双差重定位法、波形互相关法和尾波干涉法, 筛选出了同时被范镇台和九江台记录且波形互相关系数 $\geq 0.940$ 的两组重复地震对: D1(2005-11-29 09:13 $M_L2.0$ 和2005-12-02 04:54 $M_L1.9$ )和D2(2005-12-02 23:49 $M_L2.2$ 、2005-12-06 16:58 $M_L1.7$ 和2006-03-24 06:24 $M_L2.4$ )。发现 $M_s5.7$ 地震后短期内(2005-11-29—2005-12-02)S波早期尾波波速增加; 而 $M_s5.7$ 地震后几个月时间内(2005-12-02—2006-03-24)S波早期尾波波速减小。

**关键词:** 九江—瑞昌5.7级地震; 重复地震; 尾波干涉法; 地壳介质变化

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0001-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.01

## Monitoring Variations of Crustal Media after the Jiujiang-Ruichang $M_s5.7$ Earthquake in Jiangxi Province in 2005 by Coda Wave Interferometry

GUO Yufan, LUO Li, ZHA Xiaohui, DONG Feifei, LYU Jian, TANG Lanrong  
(Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330039, China)

**Abstract:** Based on the event waveform data and its observation report of the Jiujiang-Ruichang  $M_s5.7$  earthquake sequence in Jiangxi in 2005, by using the double-difference method, waveform cross-correlation and coda wave interferometry, two groups of repeated earthquakes ( $cc \geq 0.940$ , recorded by Fanzhen station and Jiujiang station) can be obtained: D1 (2005-11-29 09:13  $M_L2.0$  and 2005-12-02 04:54  $M_L1.9$ ) and D2 (2005-12-02 23:49  $M_L2.2$ , 2005-12-06 16:58  $M_L1.7$  and 2006-03-24 06:24  $M_L2.4$ ). It is found that the velocity of early coda wave of S wave increases in the early short period (from 2005-11-29 to 2005-12-02) after the  $M_s5.7$  earthquake and decreases within a few months after the  $M_s5.7$  earthquake (2005-12-02-2006-03-24)

**Keywords:** Jiujiang-Ruichang  $M_s5.7$  earthquake; Repeated earthquakes; Coda wave interferometry; Variations of crustal media

收稿日期: 2021-10-17

基金项目: 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心开放基金项目(SDGD202013); 地震预测开放基金项目(XH22027D); 地震科技星火计划项目(XH20032); 江西省自然科学基金项目(20202BABL203035)联合资助。

作者简介: 郭雨帆(1992-), 女, 工程师, 现主要从事地震监测预报方面工作与研究。

E-mail: guoyufan\_ouc@126.com

## 0 引言

江西九江—瑞昌地区位于赣皖鄂三省交界处,断裂和水体较为发育(图1):其东北为郟城—庐江断裂带,西北为襄樊—广济断裂,两条断裂向南延伸,它们的隐伏断裂可能经过九江—瑞昌地区;其北临中国第一大河流——长江、南接中国第一大淡水湖——鄱阳湖,区域内水资源丰富。2005年11月26日8时49分在江西九江—瑞昌发生了 $M_s5.7$ 地震,造成13人死亡、65万人受灾和超过30亿元的国民经济损失,成为中国大陆中东部地区进入21世纪以来震级最高、灾害最严重、损失最大的地震。之后九江—瑞昌及邻区地震活动依旧较活跃:2011年9月10日和2015年6月17日,依次发生了江西瑞昌—阳新 $M_s4.6$ 地震和江西九江 $M_s3.7$ 地震。吕坚等<sup>[1]</sup>认为赣北及邻区5级以上地震存在时间上的成组活动特点。目前江西九江—瑞昌 $M_s5.7$ 地震(简称 $M_s5.7$ 地震)的成组地震尚未出现,应引起高度重视。

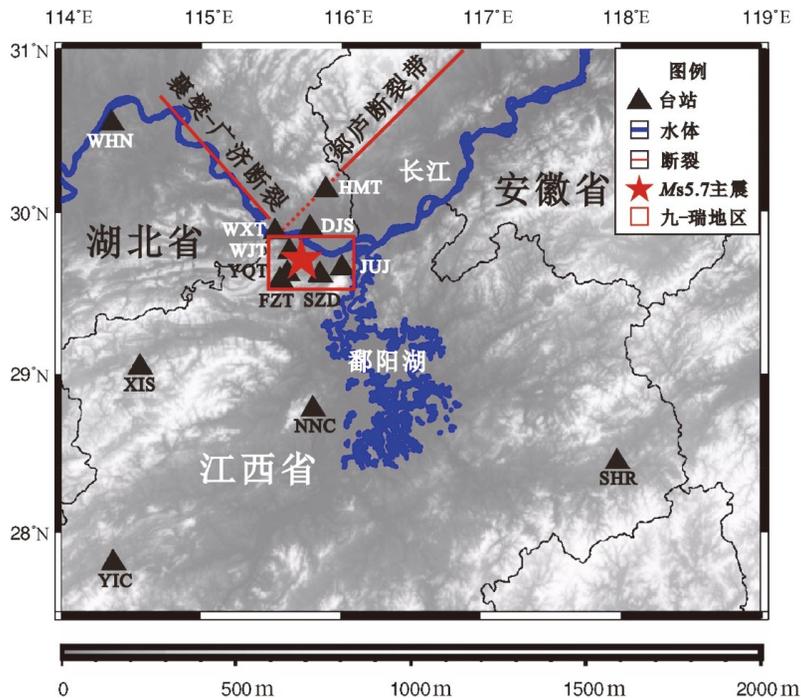
研究 $M_s5.7$ 地震后的地壳介质变化具有重要意义,前人利用尾波干涉技术在监测震后地壳介质动态变化方面已有一定探索。Pandolfi等<sup>[2]</sup>应用尾

波干涉技术监测波速变化与1999年维苏威火山 $M3.6$ 地震的关系;肖卓<sup>[3]</sup>利用重复地震和尾波干涉技术监测青藏高原东北缘和2014年云南盈江双震期间的地壳介质动态变化,发现震前、震后以及不同季节地壳介质变化规律相异;汪建等<sup>[4]</sup>运用尾波干涉技术研究2017年重庆武隆 $M_s5.0$ 地震后震源区地壳介质动态变化,认为S波早期尾波段走时延迟随流逝时间呈线性变化。总体来说,前人关于使用尾波干涉技术研究震后地壳介质变化的成果较缺乏。本文利用双差重定位法对 $M_s5.7$ 地震序列进行重定位,采用波形互相关法识别地震序列中的重复地震对,在此基础上,运用尾波干涉技术监测 $M_s5.7$ 地震后地壳介质动态变化。本次研究将有助于震情研判,进而为年度危险区确定和中强地震预测提供科学依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

江西和湖北地震台网为本次研究提供地震波形数据和观测报告,九江地震监测中心站为本次研究提供降雨量及气压数据。



(WHN:武汉台;HMT:黄梅台;WXT:武穴台;DJS:丁家山台;WJT:武蛟台;YQT:涌泉台;JJJ:九江台;FZT:范镇台;SZD:狮子洞台;XIS:修水台;NNC:南昌台;SHR:上饶台;YIC:宜春台)

图1 研究区地形、台站位置、水体分布、断裂展布及 $M_s5.7$ 主震震中平面图

Fig.1 The distribution map of regional topography, seismic stations, waters, fractures and the  $M_s5.7$  earthquake

$M_s5.7$ 地震序列中,同时满足以下三个条件的地震共计228个:①发震时间:2005-11-26—2006-06-30;②震级大小: $M_L \geq 1.0$ ;③记录台站数 $\geq 4$ 个,整理它们的事件波形数据及观测报告,其中涉及十三个台站,其中六个固定台站:武汉台(WHN)、九江台(JUJ)、修水台(XIS)、南昌台(NNC)、上饶台(SHR)和宜春台(YIC),以及七个流动台:黄梅台(HMT)、武穴台(WXT)、丁家山台(DJS)、武蛟台(WJT)、涌泉台(YQT)、范镇台(FZT)和狮子洞台(SZD)。

## 1.2 HypoDD 双差重定位法

HypoDD双差重定位法由Waldhauser等<sup>[5]</sup>提出,目前广泛应用于地震重定位领域。地震事件 $i$ 和 $j$ 对于接收点 $k$ 的到时残差之差,即双差,表示为:

$$r_k^i - r_k^j = (t_k^i - t_k^j)_{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)_{\text{cal}} \quad (1)$$

式(1)中的 $r_k^i$ 和 $t_k^i$ 分别为地震事件 $i$ 和 $j$ 到接收点 $k$ 的到时残差, $(t_k^i - t_k^j)_{\text{obs}}$ 为走时差的观测值,而 $(t_k^i - t_k^j)_{\text{cal}}$ 则为走时差的理论值。

本次双差重定位使用的地壳速度结构模型见表1。

表1 区域地壳速度模型<sup>[6-7]</sup>

Table 1 Regional crustal velocity model<sup>[6-7]</sup>

层数	深度/km	速度( $V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	波速比( $V_p/V_s$ )
1	0~3	4.80	
2	3~10	5.80	
3	10~18	6.15	
4	18~26	6.40	1.71
5	26~35	6.80	
6	35+	8.00	

## 1.3 利用波形互相关法挑选重复地震

波形互相关技术用于识别天然重复地震已有较长历史。尽管重复地震具有不同的定义,但不同定义的基本特点就是波形具有高度相似性,因此主要通过计算波形互相关系数(Cross-correlation,简称cc)来识别重复地震<sup>[8]</sup>:

$$\gamma = \frac{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(t)}][f_2(t) - \overline{f_2(t)}]}{\sqrt{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(t)}]^2 + \sum [f_2(t) - \overline{f_2(t)}]^2}} \quad (2)$$

式(2)中, $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别为用于计算的同一台站记录的两个地震事件选定波列, $\overline{f_1(t)}$ 和 $\overline{f_2(t)}$ 分别是其相应的平均值。

## 1.4 尾波干涉法

尾波传播路径长,在放大、叠加等作用下,能对地下介质微小变化产生反应。Snieder等<sup>[9]</sup>在前人研究的基础上,系统提出并阐释了尾波干涉法。Snieder等<sup>[10]</sup>研究发现:假设地下介质是均匀的,若地震波速随着时间流逝而上升或下降,则走时延迟也会随着时间流逝而线性下降或上升。

设原始波速为 $v$ ,波速变化为 $\delta v$ ,则走时偏移 $\tau$ 与 $\delta v$ 的关系如下式<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\tau}{t} = \frac{\delta v}{v} \quad (3)$$

走时偏移 $\tau$ 误差下限 $\sigma_\tau$ 由Cramer-Rao Lower Bound法则<sup>[12-13]</sup>计算:

$$\sigma_\tau \geq \sqrt{\frac{3}{2f_0^3 \pi T (B^3 + 12B)}} \left[ \frac{1}{\rho^2} \left( 1 + \frac{1}{\text{SNR}} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

式(4)中, $f_0$ 为信号主频, $B$ 为信号的频宽与主频之比, $T$ 为窗口长度, $\rho$ 为波形互相关系数,SNR为信噪比。

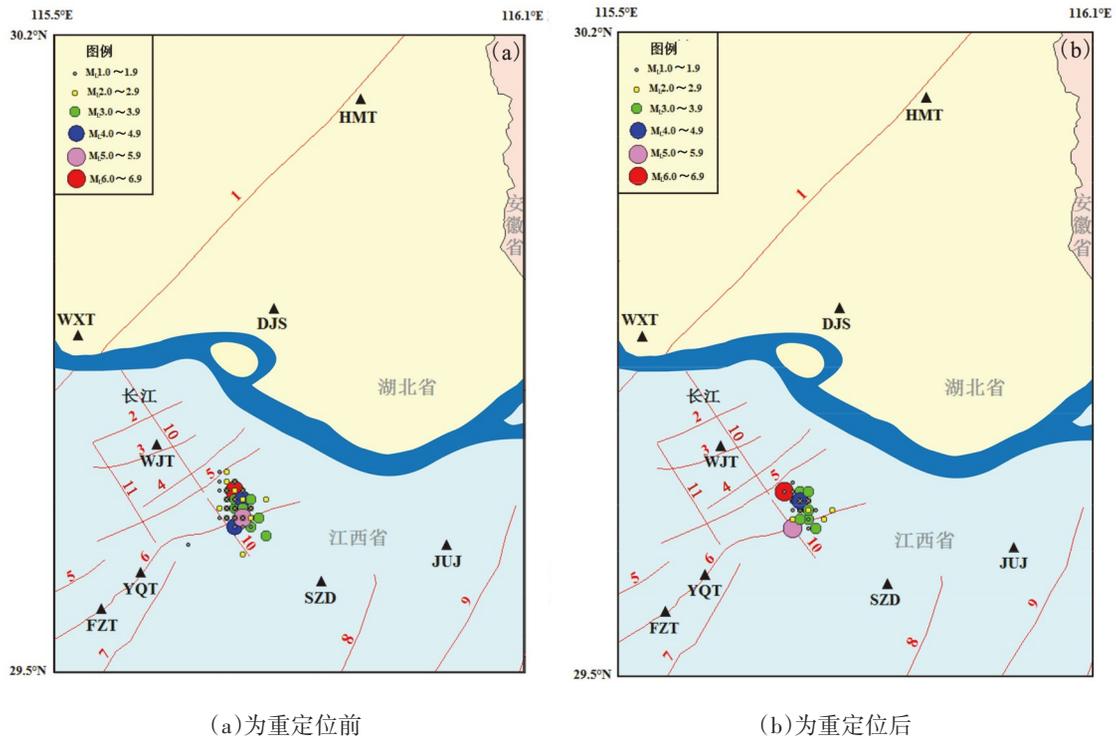
## 2 结果及其初步分析

### 2.1 HypoDD 双差重定位结果

双差重定位前后震中位置平面和深度对比依次见图2、表2。如图2b,重定位后的224个地震大多呈NW向展布,少数呈NE向展布,它们的平面分布位置较重定位前更集中、震间距变小。据罗丽等<sup>[14]</sup>, $M_s5.7$ 主震的发震构造可能是NW向的洋鸡山—武山—通江岭断裂、 $M_s4.8$ 最大余震的发震构造可能是NEE向的刘家—范家铺—城门山断裂。由表2,重定位后震源深度依旧以10~12 km为主(45.98%),92.85%的地震集中在8~14 km深度。

### 2.2 重复地震挑选结果

重复地震挑选具体步骤:①将地震事件波形数据由EVT格式转换为SAC格式;②使用0.5~10 Hz带通滤波进行预处理<sup>[15]</sup>;③利用波形互相关技术,设置计算长度为四倍 $S_g$ 和 $P_g$ 到时差<sup>[15-16]</sup>,找出同时被范镇台(FZT)和九江台(JUJ)记录且 $cc \geq 0.940$ 的地震对,作为相似地震对<sup>[3-4]</sup>;④使用经过HypoDD双差重定位后的震源信息,筛选出组间距 $\leq 0.5$  km的相似地震对作为重复地震对<sup>[17]</sup>。

图2  $M_s5.7$ 地震序列重定位前后震中位置平面对比图Fig.2 The comparison map of the epicenter location before and after the  $M_s5.7$  earthquake sequence relocation表2  $M_s5.7$ 地震序列重定位前后震源深度对比Table 2 The comparison of focal depth before and after the  $M_s5.7$  earthquake sequence relocation

深度/km	HypoDD 双差重定位前		HypoDD 双差重定位后	
	地震数量/个	所占比例/(%)	地震数量/个	所占比例/(%)
0~6	3	1.32	0	0
6~8	6	2.63	6	2.68
8~10	37	16.23	47	20.98
10~12	124	54.38	103	45.98
12~14	51	22.37	58	25.89
14~16	6	2.63	9	4.02
16~18	1	0.44	1	0.45
总计	228	100	224	100

本次研究最终筛选出两组重复地震对(图3、表3): 两重地震对D1(2005-11-29 09:13  $M_L1.9$ 和2005-12-02 04:54  $M_L1.9$ )和三重地震对D2(2005-12-02 23:49  $M_L2.2$ 、2005-12-06 16:58  $M_L1.7$ 和2006-03-24 06:24  $M_L2.4$ )。为了方便后续研究,将D2拆分为两组两重地震对: D2-1(2005-12-02 23:49  $M_L2.2$ 和2006-03-24 06:24  $M_L2.4$ )和D2-2(2005-12-06 16:58  $M_L1.7$ 和2006-03-24 06:24  $M_L2.4$ )。

### 2.3 尾波干涉结果

结合前人经验<sup>[15-16]</sup>,选取四倍 $S_g$ 与 $P_g$ 到时差作为尾波干涉测量窗长,移动窗长为1s,移动步长为0.05s。

由于范镇台(FZT)和九江台(JUJ)与 $M_s5.7$ 主震相距较近、记录的地震波形数据质量好且观测时间长,因此将重复地震对D1、D2-1和D2-2分别

在这两个台站记录到的波形数据按照上述参数进行设置以进行尾波干涉处理, 计算误差均在允许范围内, 结果及初步分析如图4~6。

2.3.1 重复地震对D1尾波干涉结果及其初步分析

(1)如图4a, 范镇台(FZT)记录到的P波尾波

部分(1.00~2.90 s)走时延迟较为平缓, 波速无明显变化; S波振幅较大部分(2.90~4.85 s)走时延迟呈下降趋势, 表明波速有所增加; S波早期尾波部分(4.85~5.95 s)走时延迟线性下降趋势更加明显, 挑选此时段计算相对波速变化, 为4.28‰。

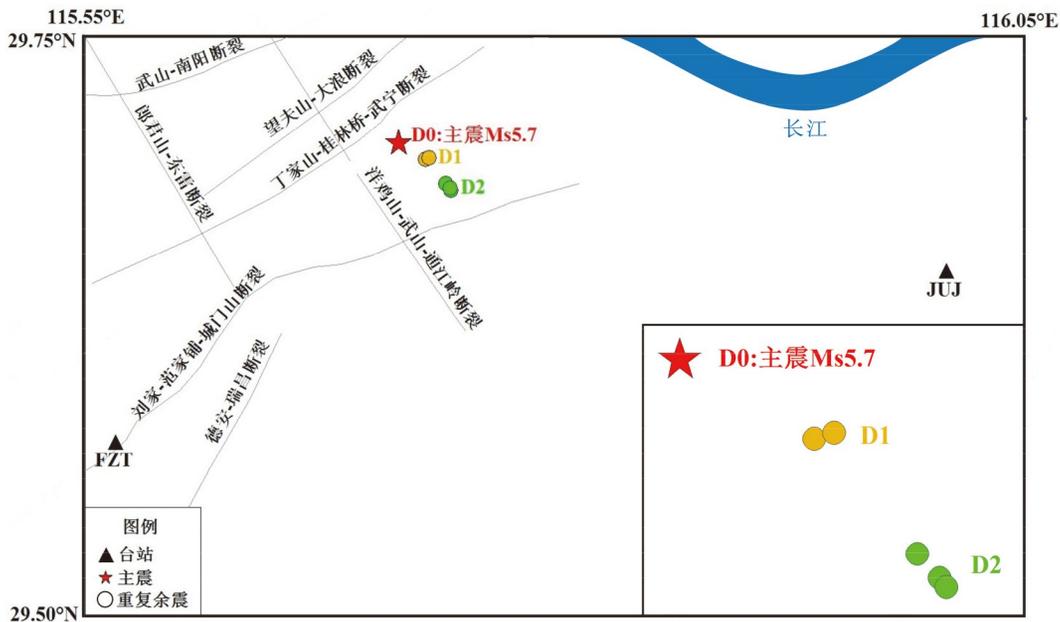


图3  $M_s5.7$ 地震及双台记录重复地震对位置图

Fig.3 The location map of the  $M_s5.7$  earthquake and repeated earthquakes recorded by 2 stations

表3  $M_s5.7$ 地震及双台记录重复地震对信息统计表

Table 3 Statistics of the  $M_s5.7$  earthquake and repeated earthquakes recorded by 2 stations

序号	发震时间	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级	时间间隔/d	组间距/km
D0	2005-11-26 08:49	29.705 035	115.716 665	11.5	$M_s5.7$	-	-
D1	2005-11-29 09:13	29.697 690	115.730 856	12.2	$M_L2.0$	3	0.23
	2005-12-02 04:54	29.698 237	115.732 914	11.1	$M_L1.9$		
D2-1	2005-12-02 23:49	29.685 051	115.744 035	9.5	$M_L2.2$	112	0.28
	2006-03-24 06:24	29.687 217	115.741 678	11.1	$M_L2.4$		
D2-2	2005-12-06 16:58	29.684 212	115.744 752	9.8	$M_L1.7$	108	0.37
	2006-03-24 06:24	29.687 217	115.741 678	11.1	$M_L2.4$		

(2)如图4b, 九江台(JUJ)记录到的P波尾波部分(1.00~3.55 s)走时延迟平缓, 波速无明显变化; S波振幅较大部分(3.55~6.60 s)走时延迟有降低的趋势, 表明波速小幅增加; S波早期尾波部分(6.60~7.75 s)走时延迟线性下降, 走时延迟降至-0.011 s, 此时段相对波速增加6.48‰。这两条事件波形曲线中P波振幅比S波明显, 这与利用波形互相关技术处理波形数据时选取了垂向计算有关。

2.3.2 重复地震对D2-1尾波干涉结果及其初步分析

(1)如图5a, 范镇台(FZT)记录到的P波尾波部分(1.00~2.80 s)走时延迟基本无变化, 波速变化不明显; S波振幅较大部分(2.80~5.95 s)走时延迟有抬头的趋势, 波速小幅降低; S波早期尾波部分(5.95~6.15 s)走时延迟迅速增至0.0087 s, 相对波速降幅达39.60‰, 但此时段内有效值较少, 且不相关系数升高, 因此该结果可信度较低, 后续讨论中不使用此结果作为支撑结论的依据。

(2)如图5b,九江台(JUJ)记录到的P波尾波部分(1.00~3.40 s)走时延迟变化较为复杂,总体呈下降趋势,表明波速有所增加;S波振幅较大部分(3.40~6.30 s)走时延迟降低,表明波速增加;S波

早期尾波部分(6.30~7.95 s)走时延迟线性上升,最大走时延迟可达0.0312 s,表明波速下降,选取该时段计算相对波速变化,降幅为5.08‰。

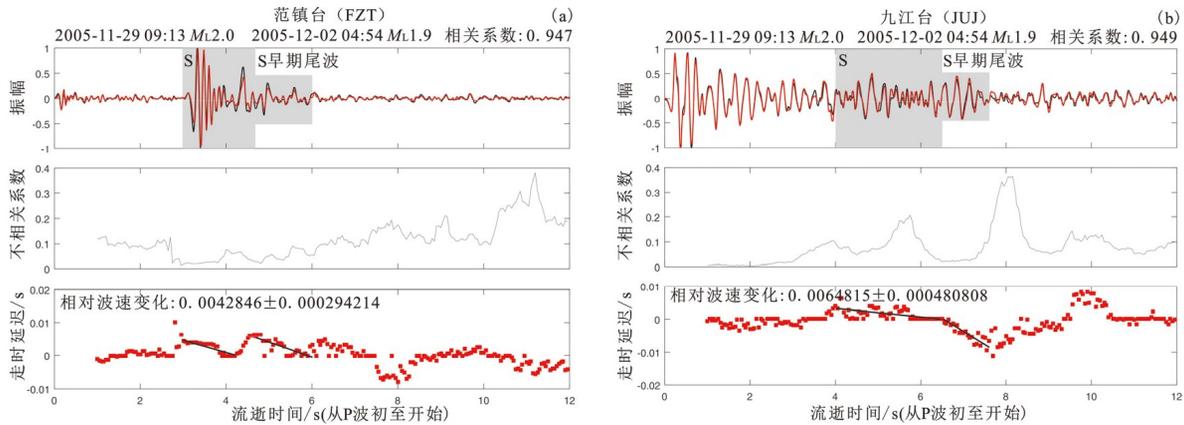


图4 范镇台(a)和九江台(b)D1波形记录、不相关系数及走时延迟随时间变化图

Fig.4 The waveform records, de-correlation coefficient and travel time delay of repeated earthquake D1 recorded by FZT(a) and JUJ(b) changing with time

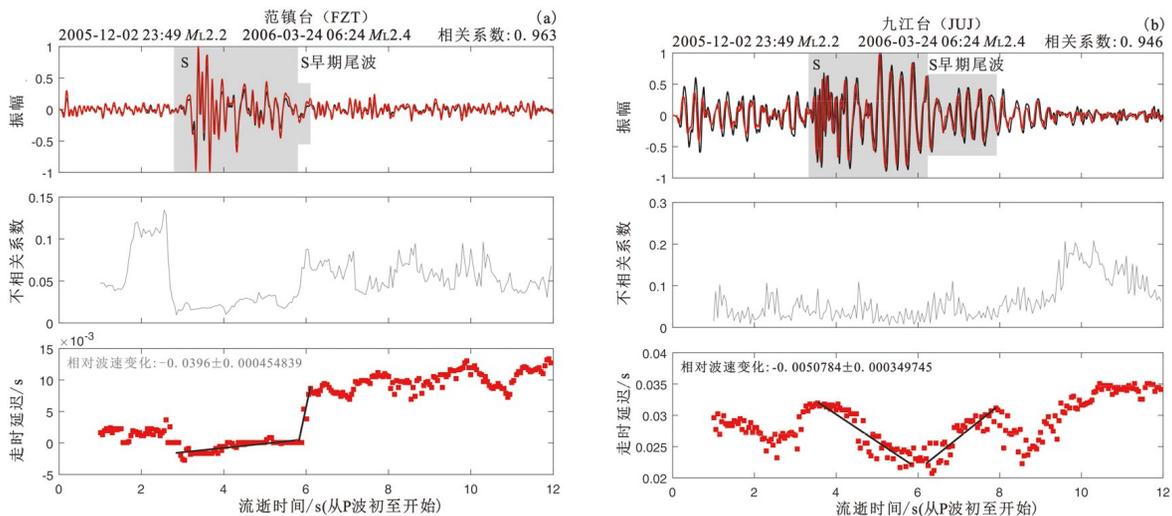


图5 范镇台(a)和九江台(b)D2-1波形记录、不相关系数及走时延迟随时间变化图

Fig.5 The waveform records, de-correlation coefficient and travel time delay of repeated earthquake D2-1 recorded by FZT(a) and JUJ(b) changing with time

### 2.3.3 重复地震对D2-2尾波干涉结果及其初步分析

(1)如图6a,范镇台(FZT)记录到的P波尾波部分(1.00~2.80 s)走时延迟有轻微上升的趋势,即波速略微下降;S波振幅较大部分(2.80~5.40 s)走时延迟有上升趋势,表明波速可能下降;S波早期尾波部分(5.40~6.50 s)走时延迟线性上升趋势显著,最大走时延迟达0.012 s,该时段内相对波速降幅为8.26‰,波速降幅较大。

(2)如图6b,九江台(JUJ)记录到的P波尾波部分(1.00~3.40 s)走时延迟总体呈下降趋势,表明波速增大;S波振幅较大部分(3.40~6.20 s)走时延迟变化较复杂:早期为上升、后期为下降,表明波速可能先降低后升高;S波早期尾波部分(6.20~7.75 s)走时延迟上升,波速降低,其相对波速降幅为2.91‰。

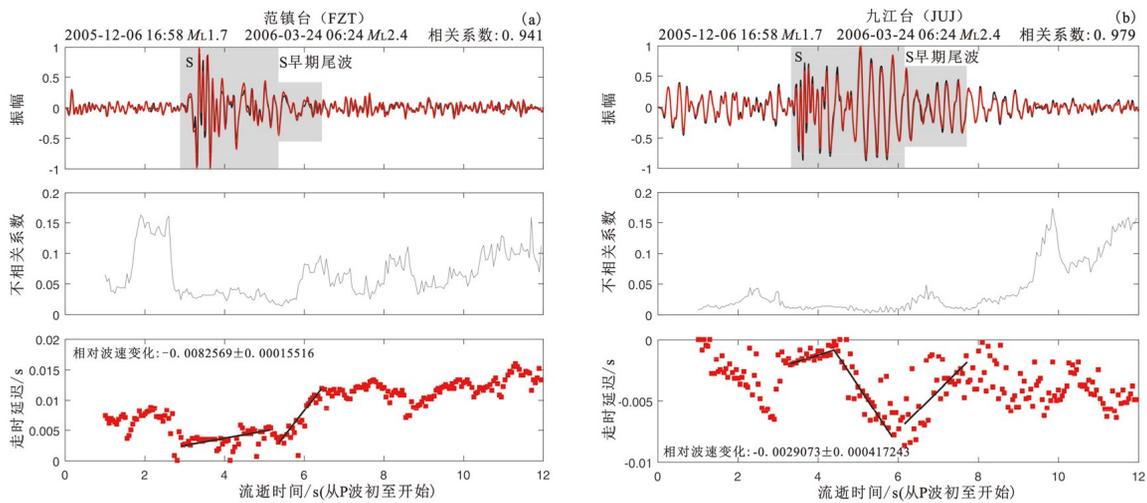


图6 范镇台(a)和九江台(b)D2-2波形记录、不相关系数及走时延迟随时间变化图

Fig. 6 The waveform records, de-correlation coefficient and travel time delay of repeated earthquake D2-2 recorded by FZT(a) and JUJ(b) changing with time

### 3 地壳介质变化讨论

据图4~6,可知S波及其早期尾波段走时延迟随流逝时间呈线性变化。选取S波早期尾波段,总结该时间段内相对波速变化特征(表4、图7)。

据表4和图7,在 $M_s5.7$ 主震发生后,2005年11月29日至12月2日,S波早期尾波相对波速均为正值(D1重复地震对相对波速变化:FZT为 $4.28 \pm 0.29\%$ 、JUJ为 $6.48 \pm 0.48\%$ ),意味着波速增加。据刘志坤<sup>[18]</sup>,孔隙弹性回弹是影响震后断层区地壳介质波速的主要因素之一,波速在震后几十天内呈现快速恢复的态势。本次研究中S波早期尾波波速在震后第三至第六天增加与前人研究结果相吻合,表明本次研究结果可靠。

据表4和图7,在 $M_s5.7$ 主震发生后,不管是从2005年12月2日(冬季)至2006年3月24日(春季),还是从2005年12月6日(冬季)至2006年3月24日(春季),S波早期尾波相对波速均为负值(D2-1重复地震对相对波速变化:JUJ为 $-5.08 \pm 0.35\%$ ,D2-2重复地震对相对波速变化:FZT为 $-8.26 \pm 0.16\%$ 、JUJ为 $-2.91 \pm 0.42\%$ ),意味着波速减小。研究区北临长江、南依鄱阳湖,水资源丰富,需特别关注降雨和气压对波速变化的影响。九江台自2008年开始正式产出降雨量和气压数据,通过整理九江台2008年12月至2013年3月降雨量和气压数据、计算它们的多年日平均值(表5),以推

测2005年11月26日九江—瑞昌5.7级地震后、2005年12月至2006年3月降雨量和气压数据变化趋势。据表5,发现12月至来年3月,降雨量日平均值先减小后升高,总体呈增加趋势。Xie等<sup>[19]</sup>和刘志坤<sup>[18]</sup>认为水体对波速变化在震后影响更显著,原因是震后断裂更加发育、裂隙更大,岩石渗透性和水的流动性显著增强。Martini等<sup>[20]</sup>和肖卓<sup>[3]</sup>发现波速和降雨量、水体水位季节变化有密切联系,从冬季到春季S波早期尾波波速会随着降雨量增大、水体水位升高而降低;如表5, $M_s5.7$ 主震后气压日平均值从12月至第二年3月先升高后降低,总体呈降低趋势。据前人经验<sup>[21]</sup>,震后波速变化与气压变化呈正相关。因此可以推断:在 $M_s5.7$ 地震后,震区S波早期尾波波速从2005年12月2日(冬季)至2006年3月24日(春季)减小的主要原因与该地区震后裂隙发育更好,且从冬季到春季降雨增多、长江水位上升、鄱阳湖蓄水量增大及气压降低有关。

### 4 结论

本文基于 $M_s5.7$ 地震序列228个事件波形数据及其观测报告、水体分布、降雨量和气压等资料,采用双差重定位法获得224个地震重定位结果,使用波形互相关技术挑选出符合要求的重复地震对,利用尾波干涉技术分析重复地震对的走时延迟变化,最终可以得到以下几点收获:

表4 范镇台和九江台记录的重复地震对S波早期尾波相对波速变化

Table 4 The variation of the relative velocity of the early coda wave of S wave after repeated earthquakes recorded by FZT and JUJ

台站	序号	事件1	事件2	相对波速变化
-	D0	2005-11-26 08:49	-	-
范镇台(FZT)	D1	2005-11-29 09:13	2005-12-02 04:54	$4.2846 \pm 0.294214\%$
	D2-1	2005-12-02 23:49	2006-03-24 06:24	$-39.600 \pm 0.454839\%$
	D2-2	2005-12-06 16:58	2006-03-24 06:24	$-8.2569 \pm 0.15516\%$
九江台(JUJ)	D1	2005-11-29 09:13	2005-12-02 04:54	$6.4815 \pm 0.480808\%$
	D2-1	2005-12-02 23:49	2006-03-24 06:24	$-5.0784 \pm 0.349745\%$
	D2-2	2005-12-06 16:58	2006-03-24 06:24	$-2.9073 \pm 0.417243\%$

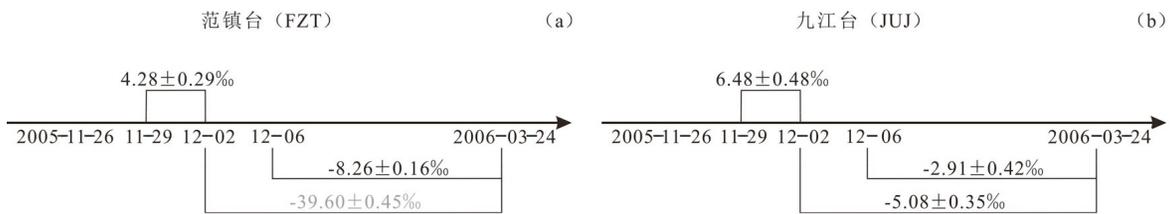


图7 范镇台(a)和九江台(b)记录的重复地震对S波早期尾波相对波速变化

Fig. 7 Early S coda's relative wave velocity variation of repeating earthquakes at FZT(a) and JUJ(b)

表5 九江台(JUJ)降雨量和气压统计

Table 5 Statistics of rainfall and pressure at JUJ

日期/年	12月		1月		2月		3月	
	降雨量/mm	气压/hPa	降雨量/mm	气压/hPa	降雨量/mm	气压/hPa	降雨量/mm	气压/hPa
2008—2009	0.00	1013.13	0.01	1014.23	8.03	1006.42	5.82	1007.03
2009—2010	-	1013.06	1.73	1014.59	5.95	1009.61	8.13	1010.71
2010—2011	3.71	1011.42	0.48	1019.00	0.62	1011.32	2.38	1014.90
2011—2012	0.94	1020.01	2.99	1016.61	4.33	1013.30	9.98	1011.21
2012—2013	3.55	1016.41	0.95	1016.83	4.55	1014.68	4.93	1010.95
日平均值	2.05	1014.81	1.23	1016.25	4.70	1011.07	6.25	1010.96

筛选出了两组重复地震对。这两组重复地震对同时被范镇台(FZT)和九江台(JUJ)记录、波形互相关系数 $\geq 0.940$ 且组间距 $\leq 0.5$  km, 分别为: 两重地震对D1(2005-11-29 09:13  $M_L 2.0$ 和2005-12-02 04:54  $M_L 1.9$ )和三重地震对D2(2005-12-02 23:49  $M_L 2.2$ 、2005-12-06 16:58  $M_L 1.7$ 和2006-03-24 06:24  $M_L 2.4$ )。

$M_S 5.7$ 地震后短期内(2005年11月29日至12月2日)S波早期尾波波速呈增加的态势。D1重复地震对: 范镇台(FZT)相对波速变化为 $4.28 \pm 0.29\%$ 、九江台(JUJ)相对波速变化为 $6.48 \pm 0.48\%$ , 可能与孔隙弹性回弹有关。

$M_S 5.7$ 地震后几个月时间内(2005年12月2日至2006年3月24日)S波早期尾波波速呈减小的趋势。D2-1重复地震对: 九江台(JUJ)相对波速变化为 $-5.08 \pm 0.35\%$ , D2-2重复地震对: 范镇台(FZT)相对波速变化为 $-8.26 \pm 0.16\%$ 、九江台(JUJ)相对波速变化为 $-2.91 \pm 0.42\%$ , 可能与震后裂隙发育程度变高, 且从冬季(2005年12月2日)至春季(2006年3月24日)该地区降雨量升高、长江水位上升、鄱阳湖蓄水量增大及气压降低有关。

致谢: 感谢重庆市地震局汪建工程师和江西省地震局陈浩高级工程师的倾情指导和热情帮助, 感谢匿名审稿专家们提供的宝贵修改意见!

## 参考文献:

- [1] 吕坚,曾文敬,谢祖军,等. 2011年9月10日瑞昌—阳新4.6级地震的震源破裂特征与区域强震危险性[J]. 地球物理学报,2012,55(11):3625-3633.
- [2] Pandolfi D, Bean C J, Saccorotti G. Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999  $M=3.6$  event at Mt. Vesuvius[J]. *Geophysical Research Letters*,2006,33(6):272-288.
- [3] 肖卓. 利用重复地震和尾波干涉技术监测地壳介质动态变化[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所,2014.
- [4] 汪建,向涯,杨亚运,等. 尾波干涉技术在2017年重庆武隆 $M_s5.0$ 地震后震源区地壳介质变化的应用[J]. 地震地磁观测与研究,2021,42(3):64-73.
- [5] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*,2000,90(6):1353-1368.
- [6] 王椿镛,丁志峰,宋建立,等. 大别造山带地壳S波速度结构[J]. 地球物理学报,1997,40(3):337-346.
- [7] 王椿镛,张先康,陈步云,等. 大别造山带的地壳结构研究[J]. 中国科学(D辑),1997,27(3):221-226.
- [8] 蒋长胜,吴忠良,李宇彤. 首都圈地区“重复地震”及其在区域地震台网定位精度评价中的应用[J]. 地球物理学报,2008,61(03):817-827.
- [9] Snieder R. Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media[J]. *Physical Review E*,2002,66(4):046615.
- [10] Snieder R. The theory of coda wave interferometry[J]. *Pure & Applied Geophysics*,2006,163(2-3):455-473.
- [11] Payan C, Garnier V, Moysan J. Determination of nonlinear elastic constants and stress monitoring in concrete by coda waves analysis[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*,2011,15(4):519-531.
- [12] Quazi A. An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*,1981,29(3):527-533.
- [13] Carter G C. Coherence and time delay estimation[J]. *Proceedings of the IEEE*,2005,75(2):236-255.
- [14] 罗丽,吕坚,曾文敬,等. 江西九江—瑞昌地震序列震源位置和发震构造再研究[J]. 地震地质,2016,38(2):342-351.
- [15] 汪建,王同军,杨亚运,等. 利用重复地震观测重庆巫山地区地壳介质变化[J]. 地震地磁观测与研究,2018,39(6):16-22.
- [16] 马晓静,吕作勇. 广东地区重复地震识别及其在台网定位评价中的应用[J]. 华南地震,2017,37(1):22-28.
- [17] 肖卓,高原. 运用尾波干涉技术监测2014年盈江双震期间地壳介质状态的变化[J]. 地球物理学进展,2016,31(6):2421-2428.
- [18] 刘志坤. 基于背景噪声的地下结构随时间变化监测和成像研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.
- [19] Xie J, Ritzwoller M H, Shen W, et al. Crustal radial anisotropy across Eastern Tibet and the Western Yangtze Craton[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*,2013,118(8):4226-4252.
- [20] Martini F, Bean C J, Saccorotti G, et al. Seasonal cycles of seismic velocity variations detected using coda wave interferometry at Fogo volcano, So Miguel, Azores, during 2003-2004[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*,2009,181(3-4):231-246.
- [21] 徐亚飞. 利用气枪震源信号和背景噪声研究2016年呼图壁6.2级地震前后波速变化特征[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2019.