

刘东阳,范昱宏,张宇,等,2020. 长白山天池火山 2002~2005 年火山扰动机制研究. 中国地震,36(3):561~570.

# 长白山天池火山 2002~2005 年 火山扰动机制研究

刘东阳<sup>1)</sup> 范昱宏<sup>1)</sup> 张宇<sup>3)</sup> 李婷<sup>3,6)</sup> 仲广培<sup>2,3,4)</sup>  
刘国明<sup>2,3,4)</sup> 邹凯成<sup>5)</sup> 刘冰冰<sup>3)</sup>

- 1) 中国地质大学(北京),北京 100083
- 2) 吉林长白山火山国家野外科学观测研究站,吉林安图 137000
- 3) 吉林省地震局,长春 130022
- 4) 吉林省长白山天池火山监测站,吉林安图 137000
- 5) 辽宁省地震局葫芦岛地震台,辽宁葫芦岛 110034
- 6) 詹姆斯库克大学,科学与工程学院,澳大利亚凯恩斯 4878

**摘要** 地震、形变、火山气体地球化学等观测结果表明 2002~2005 年长白山天池火山经历了 1 次扰动事件。长白山站地震台(CBS 台)记录到了扰动事件前后连续稳定的宽频带地震观测资料。前人的观测研究结果认为长白山天池火山扰动期间的火山地震类型主要为构造型火山地震,伴随少量的谐频型地震。本文通过匹配滤波技术,对 1999~2007 年扰动事件前后 CBS 台单台三分量地震观测数据进行模板扫描,获得 3763 个清晰的火山地震事件,其中谐频(HS)事件 125 个,构造(VT)事件 3618 个,并发现长周期(LP)事件 20 个。进而将火山扰动期间火山地震事件分为 3 种类型:构造型事件、长周期事件和谐频型事件,并提出 2002~2005 年长白山天池火山扰动机制模型:深源地震-火山能量传递模型,即汪清深源地震能量释放和传递,引发长白山火山区岩石圈应力状态波动。地幔岩浆房受应力干扰后,岩浆通道打开,少量岩浆侵入地壳岩浆房。岩浆混合脱气导致地壳岩浆房升压,引起顶部岩石微破裂,产生构造型火山地震,气体和流体填充这些裂隙,从而产生 LP 和 HS 型火山地震事件。

**关键词:** 长白山火山 火山扰动 火山监测 匹配滤波技术 长周期地震

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0561-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

长白山天池火山位于中朝边境,是中国最具潜在灾害性喷发危险的活火山(刘若新等,1992)。2002~2005 年,天池火山经历了一次火山扰动事件。该事件的主要特征为火山锥体

[收稿日期] 2020-01-07; [修定日期] 2020-04-20

[项目类别] 国家自然科学基金项目(41572319)、地震科技星火计划攻关项目(XH19009)共同资助

[作者简介] 刘东阳,男,1999 年生,本科生,主要从事火山气体地球化学、岩石地球化学和地震学研究。

E-mail: 10011719@cugb.cn

刘国明,通讯作者,男,1971 年生,研究员,主要从事火山地震学和气体地球化学研究。

E-mail: cbslgm@126.com

加速抬升膨胀,火山气体各项指标异常,火山地震活动急剧上升,最大一次地震事件为天池火山口内部的  $M_L$ 3.8 构造型地震(刘国明等,2011;Wei et al,2013;Xu et al,2012;Zhang et al,2018;吴建平等,2005)。

吕政等(2007)研究了长白山天池火山地震与西太平洋板块俯冲带中源(60~300km)地震和深源(>300km)地震的关系,通过比较俯冲带中、深源地震的发生时间和火山地震的年发生率,认为长白山火山区发生的震群活动可能是由俯冲带中、深源地震触发的。Liu 等(2017)研究了长白山火山区微震活动与浅源大地震的触发关系,发现一些大远震(如2004年苏门答腊  $M_w$ 9.2地震和2011年日本  $M_w$ 9.1地震)的大振幅面波动态触发了天池火山区微震活动。

2002~2007年,吴建平等(2003、2005、2007)在长白山天池火山布设了15个流动地震监测子台监测火山地震活动(图1(b)),监测时间段为每年的6~10月。在长白山天池火山扰动期间,记录并定位了大量的VT型火山地震事件,同时还记录到38个HS型火山地震,但在季节性地震观测过程中并未发现LP型火山地震或者火山颤动事件(吴建平等,2005、2007;明跃红等,2007)。通过对火山地震进行精定位,吴建平等(2005、2007)推测在长白山火山锥体下方5km左右处可能存在浅部岩浆房,该结论与层析成像和大地电磁测深等观测结果基本一致(Chen et al,2019;仇根根等,2014;Tian et al,2016;Zhao et al,2009)。

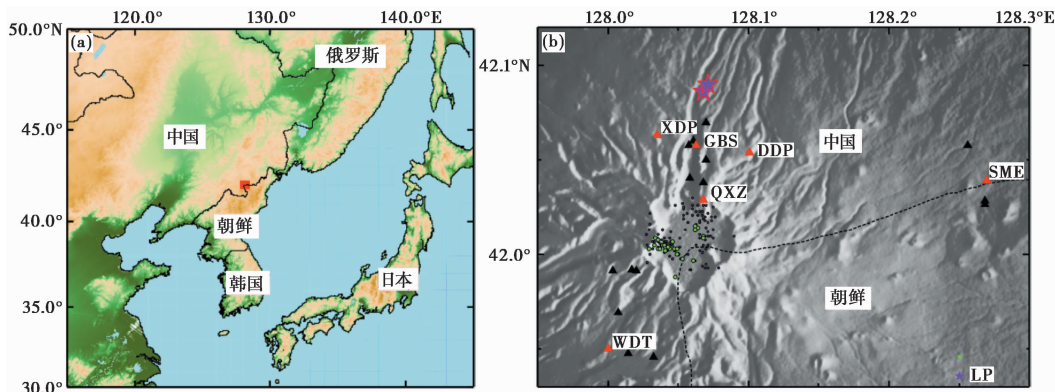


图1 长白山天池火山地理位置(a)及火山地震分布(b)

红色矩形表示长白山天池火山区地理位置;红色三角形表示长白山天池火山监测站(CHVO)布设的固定地震子台;黑色三角形表示吴建平等(2003、2005、2007)布设的流动地震观测台站(Mobile);黑色圆点表示构造型火山地震(VT);绿色圆点表示谱频型火山地震(HS);紫色五角星表示长周期型火山地震(LP)

本文基于模板匹配技术获得了更完整和准确的火山地震目录(Shelly et al,2007;Peng et al,2009),并试图回答与火山扰动有关的2个重要问题,一是2002年汪清深源地震与火山扰动之间是否存在触发关系;二是2002~2005年火山扰动期间数千次VT地震中是否存在LP信号(LP事件或火山震颤)及其可能的机制。

## 1 数据和方法

长白山天池火山监测站(CHVO)于1999年7月建成并投入监测,1999年7月~2007年7月,CHVO共有6个地震台开展连续地震监测(图1(b))。其中长白山站地震台(CBS台)

位于距离火山口 3km 的观测山洞内,使用宽频带地震记录仪,是观测记录连续率最好、数据质量最高的 1 个地震台,完整记录了火山扰动的全过程。其他 5 个地震台由于观测条件欠佳等原因,记录并不完整。吴建平等(2005、2007)利用流动观测获得的波形数据,对 2002~2007 年夏季长白山天池火山附近的地震进行了系统的定位,但由于流动观测时间仅为每年的夏季,其观测结果并不能代表扰动期间完整的地震活动过程。由于 CBS 台记录到了完整连续的火山扰动过程,且距离火山口最近,可以记录到发生在火山口内的微震信号,因此认为以 CBS 单台火山地震记录为参考获得的火山地震目录,能更加真实地反映扰动期间的地震活动,缺点是单台定位的结果误差较大。为了更好地认识扰动事件期间的地震活动性,以吴建平等(2005)流动观测资料获得的部分地震定位结果为模板,同时收集了吉林省地震目录中部分火山地震定位结果,应用匹配滤波技术,对 CBS 台的单台地震连续记录开展了检测和定位工作,结合其他台站的资料对部分地震进行了定位(图 1(b))。然后,以检测和定位结果为依据,分析长白山天池火山岩浆扰动期间的地震活动特征,并对这些火山地震的形成机制进行讨论。

本文地震检测使用的软件为 M&L 地震检测和定位软件(Zhang et al,2015a)。与传统的匹配滤波方法类似,M&L 方法对多个台站分量记录到的模板波形与连续波形进行互相关叠加,并进行微震检测。在互相关叠加前,对模板周围的三维空间进行搜索,计算模板与微震的每个可能位置之间的走时差;然后按照走时差对互相关波形进行走时矫正和叠加;最后,在每个台站分量上,将模板事件的参考震相与连续数据进行滑动互相关。当平均相关系数和信噪比超过阈值时,认为检测到 1 个微震,并且将位置确定在最大相关系数的格点位置。一旦检测到地震事件,根据所有台站分量中参考震相的振幅比中位数确定其震级(Zhang et al,2015a)。与传统的匹配滤波技术(Matched-filter technique)相比,该方法综合了震源扫描叠加和匹配滤波等 2 种方法的优点,地震检测结果不完全依赖于模板事件,具有较高的地震检测效率和地震定位精度。近年来,该方法在地震前震探寻、火山区微地震检测、小当量非天然地震事件检测等方面获得了广泛的应用(Zhang et al,2013、2015a、2015b)。

在本次研究中,我们仅使用 CBS 单台三分量的波形数据,不需要执行 M&L 软件的格点搜索。为了放大火山地震的信号,对模板波形和连续波形均进行了 2~8Hz 带通滤波。在连续扫描过程中,使用互相关系数和信噪比 2 个阈值,当一段连续波形和模板波形之间的互相关系数大于 7.8 且其信噪比大于 10 时,则认为检测到了 1 个火山地震。相关系数和信噪比的阈值选定对于检测结果影响较大,阈值过高有可能导致漏掉一些地震信号;反之,则有可能误检到一些干扰信号。因此,要对照原始波形和检出目录,反复调整阈值参数,最终确定最优的相关系数和信噪比阈值。对于新检出的事件,用模板事件的位置代表检出事件的位置。

本次检测使用自动与手动识别相结合的方式,首先选择 50 个 P 波清晰的事件作为初始检测模板。在连续波形扫描过程中,对比长白山火山站提供的火山地震目录(以下简称旧目录)和检出事件目录,如果检出目录中未包含某个旧目录中的事件,则立即停止扫描程序,人工开始检查该时间的连续波形数据,如果确认其为 1 个火山地震事件,则将其添加至模板目录,并通过新的模板数据集重新开始扫描连续波形;如果其非 1 个火山地震事件,则在人工识别目录中做误识别事件的标记,并继续进行扫描。不断重复上述过程,直到完成全部

检测。

## 2 观测结果

1999~2007年,长白山天池火山监测站提供的人工识别火山地震目录(旧目录)共包含3427个火山地震事件。本次研究共获得了3763个火山地震事件(以下简称新目录)。在制作模板的过程中,我们对旧目录中的地震事件全部进行了重新检查,发现旧目录中存在1661个误识别的非火山地震事件。这些被误识别的事件主要由2类信号组成:爆破信号和干扰信号(图2(a)、2(b))。

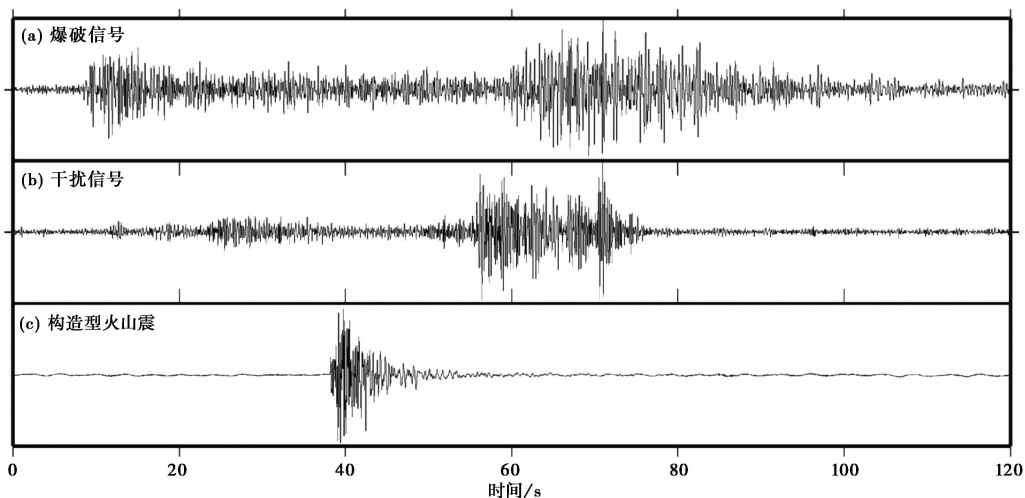


图2 旧地震目录中的典型信号波形

(a) 误识别的爆破信号;(b) 干扰信号;(c) 正确识别的构造型火山地震的信号波形

### 2.1 2002年汪清深震对长白山天池火山的影响

北京时间2002年6月29日01时19分25秒吉林省汪清市发生 $M7.2$ 深源地震,震源深度566km,震中距离长白山天池火山口仅289km。在地震发生前,旧火山地震目录存在多个误识别的地震信号,本次研究对这些识别的信号进行了剔除,并在地震后检测出多个旧目录中并不包含的清晰的地震信号(图3)。2002年7月5日,即地震发生7天后,长白山火山区地震活动明显增加。

### 2.2 长周期事件和谐频事件

我们用CBS台连续地震波形重新检查了明跃红等(2007)在长白山火山扰动期间记录到的谐频事件(HS),并将记录清晰的HS事件制作成模板,进一步在CBS台连续波形上扫描检测HS事件。与明跃红等(2007)的检测结果相比,CBS台记录的连续波形覆盖了全部火山扰动时间段,检测结果更具有代表性。本次工作共检测到125个谐频事件(图4),约为明跃红等(2007)检测出的HS事件数量(38个)的3倍。

在制作模板前,对旧目录中的全部事件进行了重新核实,并发现具有明显低频特征的事件,这些主频处于 $2\sim 3\text{Hz}$ 的事件为长周期火山地震(LP)。之后,将发现的LP事件制作成模板,并重新在连续波形上进行扫描检测,最终得到20个LP事件(图5)。

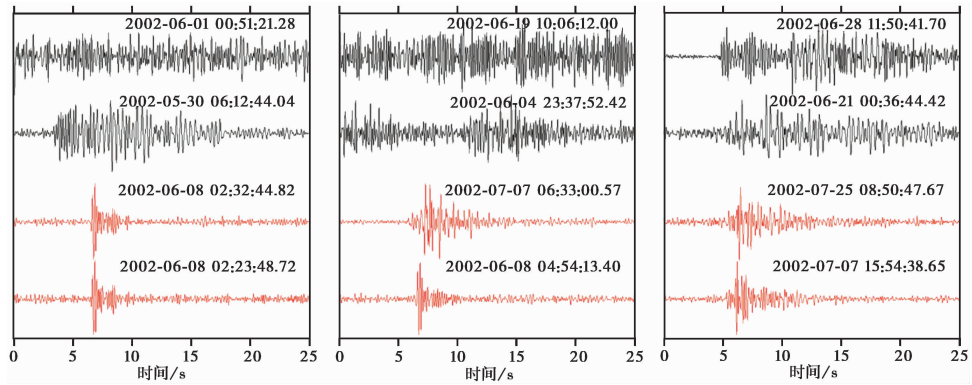


图 3 汪清深源地震前后旧目录中误识别的地震信号和本次工作新检出的地震信号波形对比  
黑色波形为 2002 年汪清地震前旧目录中的误检测波形;红色波形为 2002 年汪清地震后自动检测出的新地震  
波形;波形上方的数字为事件的到时

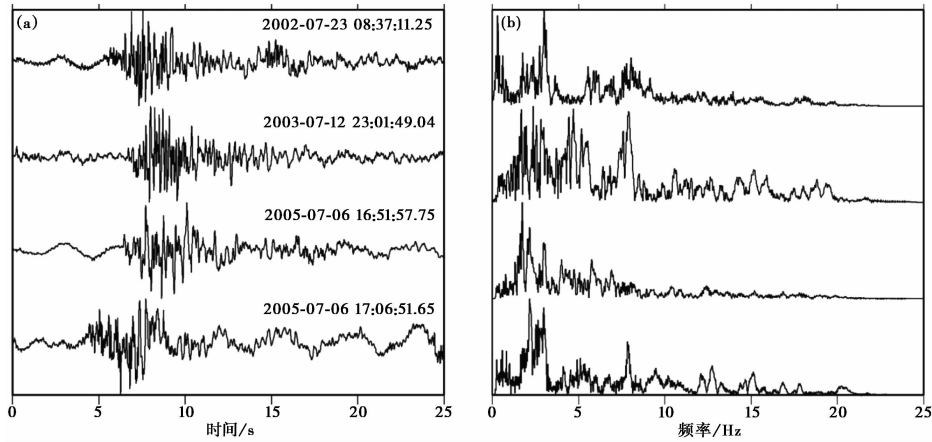


图 4 CBS 台记录的典型 HS 事件 Z 分量波形 (a) 及频谱 (b)

波形上方的数字为 HS 事件的发生时间

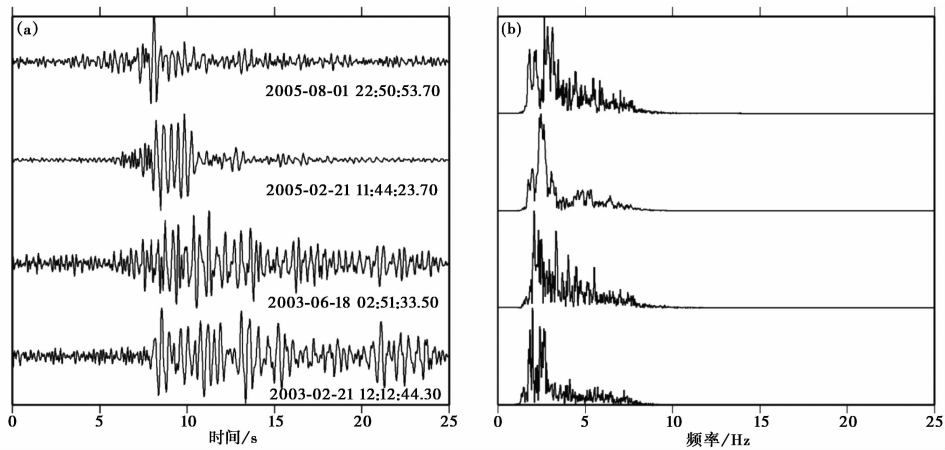


图 5 CBS 台记录的典型 LP 事件 Z 分量波形 (a) 及频谱 (b)

波形上方的数字为 HS 事件的发生时间



### 3 讨论

#### 3.1 汪清深源地震对长白山火山区微震活动可能的触发机制

俯冲带强震触发火山活动的事件已被逐渐接受 (Harris et al, 2007; Farías et al, 2014)。在本次研究时间段内 (1999 年 7 月~2007 年 7 月), 天池周边 500km 范围内共发生深源地震 12 次。对于每个深源地震, 我们首先对  $Z$  分量波形去除了仪器响应, 然后进行 1Hz 低通滤波, 以去除台站附近高频信号和体波信号的干扰, 参照 Liu 等 (2017) 和 Peng 等 (2010) 中计算峰值地动速度 (PGV) 的方法, 计算了每个深源地震的峰值地动速度 (表 1, 图 6)。2002 年 6 月 29 日汪清  $M7.2$  深源地震的 PGV 高达  $14751\mu\text{m}/\text{s}$ , 是其他深源地震的 2~3 倍。

表 1 天池火山口周边 500km 范围内深震参数表

日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒)	深度 /km	$M_s$	与火山口距离 /km	PGV / $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2000-02-13	02:57:08.72	513.6	6.0	302	536
2000-09-08	14:18:20.90	582.3	4.9	234	23
2002-06-28	17:19:30.27	566.0	7.2	289	14751
2002-08-26	18:19:15.84	548.7	4.2	337	12
2002-09-15	08:39:32.70	586.3	6.4	345	413
2002-11-15	14:08:34.56	567.7	4.2	245	12
2002-12-24	21:38:15.54	542.7	4.5	342	28
2003-01-26	07:34:40.53	530.3	4.2	431	62
2003-08-31	23:08:00.26	481.1	6.2	377	384
2004-08-15	15:36:56.84	538.5	4.6	285	28
2006-07-26	20:51:06.74	563.1	4.4	273	57
2007-03-25	13:14:06.28	554.9	4.1	258	29

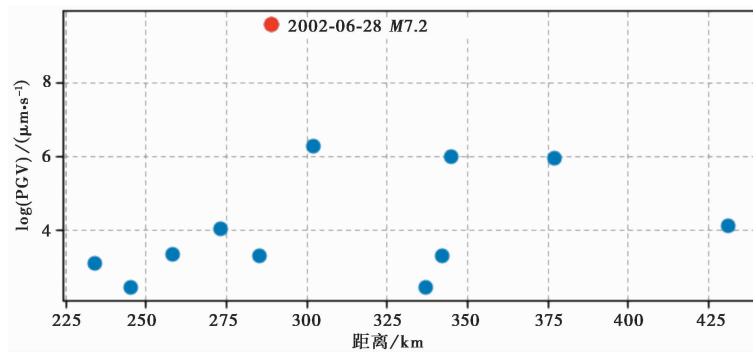


图 6 长白山天池火山周边 500km 内深震峰值地动速度变化

横坐标为深震距天池火山口的距离; 纵坐标为地震峰值地动速度 (PGV) 的自然对数值; 红色圆点为 PGV 最高的汪清深源地震

近年来,  $\beta$  统计值被广泛用于研究 1 个地震事件对另一地区地震活动的触发关系。通常情况下, 如果  $\beta$  统计值大于 1.96, 则认为触发关系具有明显的统计意义,  $\beta$  统计值越大, 触发关系越明显 (Matthews et al, 1988; Gomberg et al, 2001; Hill et al, 2007; Peng et al, 2010; Aron

et al,2009;Liu et al,2017)。计算统计值  $\beta$  的公式如下

$$\beta = \frac{N_a - N(T_a - T)}{\sqrt{N\left(\frac{T_a}{T}\right)\left(1 - \frac{T_a}{T}\right)}} \quad (1)$$

式中,  $T_a$  为触发时间窗的长度,  $T$  为全部时间长度,  $N_a$  和  $N$  分别为触发时间窗内和全部时间段内地震的数量。

通过旧目录和新目录, 分别计算了 2002 年 6 月 29 日汪清  $M7.2$  深源地震在长白山天池火山的  $\beta$  统计值, 全部时间段选择 2 个月, 触发时间窗选择主震发生后 1 个月。旧目录计算的  $\beta$  统计值为 2.36, 新目录计算的  $\beta$  统计值为 7.39 (图 7)。新、旧目录计算出的  $\beta$  统计值均大于 2, 表明 2002 年 6 月 29 日汪清  $M7.2$  深源地震对长白山火山区微震活动存在明显的触发关系。而新目录计算出的  $\beta$  统计值是旧目录的 3 倍以上, 表明本次扫描获得的新目录更全面可靠。新目录计算出的  $\beta$  统计值表明, 此次深源地震对长白山天池火山活动具有明显的触发作用。

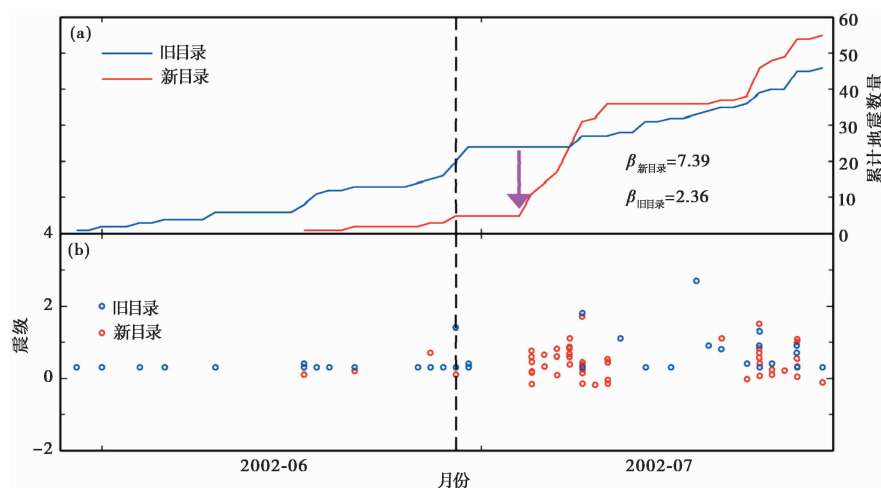


图 7 2002 年汪清深源地震前后一个月新、旧火山地震目录对比

紫色箭头表示地震活动性明显变化的位置; 红色圆圈和蓝色圆圈分别表示深震主震前后一个月新目录和旧目录中包含的火山地震; 黑色虚线表示主震的发震时刻

2002~2005 年长白山火山区应力状态高度集中, 对外部应力波动敏感 (Liu et al, 2017)。通过上述对  $\beta$  统计值的分析, 认为在 2002 年 6 月 29 日  $M7.2$  汪清深源地震发生后的第 7 天, 长白山火山区地震活动性明显加强, 即汪清深源地震延迟 7 天触发了长白山火山区地震活动。

### 3.2 LP 事件和 HS 事件可能的岩浆房位置

典型的 VT 型火山震具有明显的 P 波和 S 波, 主频介于 5~15Hz, 而 LP 事件通常主频介于 0.5~5Hz, 没有明显的 S 波 (Chouet, 1996; McNutt, 2002)。HS 型地震的主要特征是频谱中有 2 个以上明显的简谐波, 同样没有明显的 S 波 (Hough et al, 2000)。LP 事件和 HS 事件的发震机制均与流体运移活动相关, 一些学者也将二者视为同一种类型的火山事件 (Hough

et al,2000;Kumagai et al,2002;Molina et al,2008)。

火山扰动期间发生的 LP 和 HS 型地震的震级较小,且地震监测台网的密度稀疏,因而难以对这些事件实现定位。在 20 个检测到的 LP 型事件中,仅有 2 个 LP 型地震被多台地震仪同时记录到。对地震进行定位后发现(图 1(b)),这 2 个 LP 型地震均发生于天池北侧长白山峡谷附近,震源深度仅 0.5km。以明跃红等(2007)检测到的 38 个 HS 事件为模板,对火山扰动期间 CBS 台的连续记录进行扫描,最终获得了 125 个 HS 事件。检测到事件的震源位置使用模板事件的震源位置,这些 HS 事件全部发生在天池火山口内部,震源深度均小于 5km。

LP 和 HS 型火山地震通常与流体(岩浆或水)运移过程有关,是火山喷发前的重要前兆指示信号。长白山天池火山扰动期间记录到的 LP、HS 及 VT 型地震的震源均发生在距离地表 5km 之内的深度范围,据此推测长白山天池火山上地壳岩浆房顶部深度可能在 5km 左右,这与吴建平等(2005、2007)和明跃红等(2007)等得到的结论一致。

### 3.3 长白山天池火山扰动机制模型

本研究提出“深震-火山能量传递模型”,解释长白山天池火山 2002~2005 年火山扰动事件的动力学机制:2002 年 6 月 29 日汪清  $M7.2$  深源地震导致地幔岩浆房升压,深部岩浆沿着岩浆通道上升到地壳岩浆房(10km 左右深度)。岩浆混合脱气作用释放的火山气体使岩浆房顶部围岩产生压力波动并发生微破裂,随着火山气体的释放,地壳岩浆房中压力逐渐降低,而随着岩浆中微气泡的重新发育,岩浆房的压力会逐渐恢复(Nishimura,2004)。LP 和 HS 事件可能是火山气体和浅层地下水填充岩浆房顶部裂隙并产生共振时激发的信号。这种岩浆注入(升压)—释放气泡产生微破裂(减压)—新气泡发育(升压)的过程往复循环,直至浅部岩浆房达到平衡态,深部岩浆不再有新鲜岩浆注入,火山扰动逐渐结束。

## 4 结论

(1)2002~2005 年,长白山天池火山经历了 1 次火山扰动过程。通过匹配滤波技术,对 1999~2007 年扰动事件前后长白山台单台三分量地震观测数据进行模板扫描,获得 3763 个清晰的火山地震事件,其中 HS 事件 125 个,VT 事件 3618 个,并首次发现 LP 事件 20 个。

(2)2002 年 6 月 29 日汪清  $M7.2$  深源地震对长白山天池火山扰动事件有明显的触发作用。强震导致区域应力场发生变化,地幔岩浆房受到应力干扰,其岩浆侵入至地壳岩浆房,岩浆混合脱气作用造成岩浆房内部及顶部岩层发生应力波动,并引发多种类型的火山地震。提出“深震-火山能量传递模型”解释深源地震引发火山扰动的动力学机制。

### 参考文献

- 刘国明,孙鸿雁,郭峰,2011. 长白山火山最新监测信息. 岩石学报,27(10):2905~2911.
- 刘若新,李继泰,魏海泉,等,1992. 长白山天池火山一座具潜在喷发危险的近代火山. 地球物理学报,35(5):661~665.
- 吕政,洪汉净,魏海泉,2007. 长白山天池火山地震活动机理研究. 东北地震研究,23(1):40~48.
- 明跃红,吴建平,苏伟,等,2007. 长白山天池火山区的谐频事件. 地震地质,29(3):492~501.
- 仇根根,裴发根,方慧,等,2014. 长白山天池火山岩浆系统分析. 地球物理学报,57(10):3466~3477.
- 吴建平,明跃红,刘一鸣,等,2003. 2002 年 8 月 20 日长白山天池火山小震震群研究. 地震地磁观测与研究,24(4):1~8.
- 吴建平,明跃红,张恒荣,等,2005. 2002 年夏季长白山天池火山区的地震活动研究. 地球物理学报,48(3):621~628.



- 吴建平, 明跃红, 张恒荣, 等, 2007. 长白山天池火山区的震群活动研究. 地球物理学报, **50**(4): 1089~1096.
- Aron A, Hardebeck J L, 2009. Seismicity rate changes along the Central California Coast due to stress changes from the 2003  $M_{6.5}$  San Simeon and 2004  $M_{6.0}$  Parkfield earthquakes. Bull Seismol Soc Am, **99**(4): 2280~2292.
- Chen Q F, Ai Y S, Chen Y, 2019. Overview of deep structures under the Changbaishan volcanic area in Northeast China. Sci China Earth Sci, **62**(6): 935~952.
- Chouet B A, 1996. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. Nature, **380**(6572): 309~316.
- Farías C, Lupi M, Fuchs F, et al, 2014. Seismic activity of the Nevados de Chillán volcanic complex after the 2010  $M_{8.8}$  Maule, Chile, earthquake. J Volcanol Geoth Res, **283**: 116~126.
- Gomberg J, Reasenberg P A, Bodin P, et al, 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes. Nature, **411**(6836): 462~466.
- Harris A J L, Ripepe M, 2007. Regional earthquake as a trigger for enhanced volcanic activity: evidence from MODIS thermal data. Geophys Res Lett, **34**(2): L02304.
- Hill D P, Prejean S G, 2007. Dynamic triggering. Treatise Geophys, **4**: 257~291.
- Hough S E, Dollar R S, Johnson P, 2000. The 1998 earthquake sequence south of Long Valley Caldera, California: hints of magmatic involvement. Bull Seismol Soc Am, **90**(3): 752~763.
- Kumagai H, Chouet B A, Nakano M, 2002. Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events. J Geophys Res, **107**(B10): 2236.
- Liu G M, Li C Y, Peng Z G, et al, 2017. Detecting remotely triggered microseismicity around Changbaishan Volcano following nuclear explosions in North Korea and large distant earthquakes around the world. Geophys Res Lett, **44**(10): 4829~4838.
- Matthews M V, Reasenberg P A, 1988. Statistical methods for investigating quiescence and other temporal seismicity patterns. Pure Appl Geophys, **126**(2~4): 357~372.
- McNutt S R, 2002. Volcano seismology and monitoring for eruptions. Int Geophys, **81**: 383~406, cp1.
- Molina I, Kumagai H, García-Aristizábal A, et al, 2008. Source process of very-long-period events accompanying long-period signals at Cotopaxi Volcano, Ecuador. J Volcanol Geoth Res, **176**(1): 119~133.
- Nishimura T, 2004. Pressure recovery in magma due to bubble growth. Geophys Res Lett, **31**(12): L12613.
- Peng Z G, Gomberg J, 2010. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. Nat Geosci, **3**(9): 599~607.
- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. Nat Geosci, **2**(12): 877~881.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. Nature, **446**(7133): 305~307.
- Tian Y, Zhu H X, Zhao D P, et al, 2016. Mantle transition zone structure beneath the Changbai volcano: insight into deep slab dehydration and hot upwelling near the 410km discontinuity. J Geophys Res, **121**(8): 5794~5808.
- Wei H Q, Liu G M, Gill J, 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions. Bull Volcanol, **75**(4): 706.
- Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al, 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: a precursor of a future eruption? Geophys Res Lett, **39**(16): L16305.
- Zhang M, Wen L X, 2015a. An effective method for small event detection; Match and locate (M&L). Geophys J Int, **200**(3): 1523~1537.
- Zhang M, Wen L X, 2015b. Earthquake characteristics before eruptions of Japan's Ontake volcano in 2007 and 2014. Geophys Res Lett, **42**(17): 6982~6988.
- Zhang M, Wen L X, 2013. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test. Geophys Res Lett, **40**(12): 2941~2946.
- Zhang M L, Guo Z F, Liu J Q, et al, 2018. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): a review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards. Earth-Sci Rev, **187**: 19~52.
- Zhao D P, Tian Y, Lei J S, et al, 2009. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. Phys Earth Planet In, **173**(3~4): 197~206.

## Mechanism of the Volcanic Unrest of the Changbaishan Tianchi Volcano from 2002 to 2005

*Liu Dongyang*<sup>1)</sup> *Fan Yuhong*<sup>1)</sup> *Zhang Yu*<sup>3)</sup> *Li Ting*<sup>3,6)</sup> *Zhong Guangpei*<sup>2,3,4)</sup>  
*Liu Guoming*<sup>2,3,4)</sup> *Zou Kaicheng*<sup>5)</sup> *Liu Bingbing*<sup>3)</sup>

1) China University of Geosciences( Beijing ) ,Beijing 100083 ,China

2) National Observation and Research Station of Jilin Changbaishan Volcano, Antu Jilin 137000, China

3) Jilin Earthquake Agency, Changchun 130022, China

4) Changbaishan Volcano Observatory, Antu 137000, Jilin, China

5) Huludao Seismic Station, Liaoning Earthquake Agency, Huludao 110034, Liaoning, China

6) College of Science and Engineering, James Cook University, Cairns 4878, Australia

**Abstract** The observation of earthquake, deformation and volcanic gas geochemistry show that Changbaishan volcano experienced an unrest from 2002 to 2005. Before and after the volcanic unrest, station CBS recorded continuous and stable broadband seismic data. According to the previous observation results, the main type of volcanic earthquake during the Changbaishan volcanic unrest is volcanic tectonic earthquake, accompanied by a small number of harmonic earthquakes. In this paper, based on the matched-filter technique, the three component seismic data before and after the volcanic unrest from 1999 to 2007 from Changbaishan Volcano Observatory were scanned by template, and 3763 clear volcanic seismic events were obtained, including 125 harmonic spectra (HS) events, 3618 volcanic tectonic (VT) events, and 20 long-period(LP) events. The volcanic earthquake events during the volcanic unrest can be divided into three types: volcanic tectonic events, long-period events and harmonic spectra events. A model of “energy transfer between deep earthquakes and volcanoes” is proposed for Changbaishan volcanic unrest mechanism from 2002 to 2005 as follows. First, Wang Qing deep-focus earthquake energy release and transfer, causing the lithospheric stress state fluctuation in Changbaishan volcanic area. Then, after the mantle magma chamber is disturbed by stress, the magma channel opens and a small amount of magma intrudes into the crust magma chamber. Finally, mixed degassing of magma leads to the pressure rise of magma chamber in the crust, which leads to the micro fracture of the top rock, resulting in volcanic tectonic earthquake. When gas and fluid fill these fissures, LP and HS type volcanic earthquake events occur.

**Keywords:** Changbaishan volcano; Volcanic unrest; Volcano monitoring; Matched-filter technique; Long-period earthquake