

doi:10.3799/dqkx.2013.032

冰岛卡特拉火山未来喷发特征的判定

陈晓雯,魏海泉,周兴志,赵波

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029

摘要:卡特拉火山近期活动频繁,其喷发概率、喷发规模、喷发方式及影响都备受瞩目。通过收集整理若干资料和分析计算,采用“将古论今”的研究方法,初步得到了关于卡特拉火山未来可能的行为方式及影响。根据卡特拉火山喷发的历史规律,估算2013年的喷发概率约为30%。卡特拉火山下次喷发规模可能为4级或5级,其喷发方式有3种:其一是岩浆冲破巨厚冰层发生爆破性喷发;其二是正常的岩浆喷发;其三是夭折的喷发。但根据现有资料分析,卡特拉火山最有可能是以见不到喷发的形式结束这次不稳定性活动。

关键词:卡特拉火山;喷发概率;喷发规模;喷发方式;夭折的喷发。

中图分类号:P588.1

文章编号:1000-2383(2013)02-0329-10

收稿日期:2012-08-11

A Judgement on the Characteristics of Future Eruption from Katla Volcano, Iceland

CHEN Xiao-wen, WEI Hai-quan, ZHOU Xing-zhi, Zhao Bo

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

Abstract: Katla volcano shows an increased level of unrest recently. Therefore people are increasingly more concerned with the probability, scale and pattern of eruption from Katla volcano, and the potential influence as well. We deduce preliminarily the possible behavior pattern and the effect of the Katla volcano for its future eruption according to the speech “the past is a key to the present”, based on collecting some published materials from international journals and internet. According to the eruption history of Katla volcano, a probability of volcanic eruption in 2013 is roughly 30%. The magnitude of next eruption of Katla should be VEI 4, but VEI 5 is also possible. Its eruption pattern has 3 possibilities: the first one is an explosive eruption that breaks through the thick ice cover; the second one is magmatic eruption; the third one is a “failed eruption”. From the available information, it indicates that this unrest will be most likely to end up with no eruption.

Key words: Katla volcano; eruption probability; eruption scale; eruption pattern; failed eruption.

冰岛位于欧亚大陆板块和北美大陆板块的分界线上,是中大西洋海岭的火山聚集区,全岛共有火山200多座,其中活火山有35座,这些活火山平均每5年会喷发一次。

冰岛的火山活动之所以活跃主要有两大原因:一是由于冰岛位于大西洋洋中脊北缘,而洋中脊是地球上有利于岩浆上升并导致火山喷发的地质构造;另一原因是在冰岛下存在一个地幔柱,在地幔柱内岩浆得以持续不断地高速上升至地表。由于岩浆的补充速度很快,释放的速度也很快,因此不会有长时间的气体富集的过程,也就不会形成由大量气体

聚集导致的剧烈的爆破性喷发(Olgun *et al.*, 2011)。这也是冰岛历来火山活动虽然频繁但是大多是以比较宁静的溢流式火山活动为主的原因。作为冰岛地幔柱的组成部分,卡特拉火山深部岩浆上升的通道较为畅通,温和的火山喷发也就较为频繁。虽然地壳内不同深度上可以演化出岩浆房,但一般不会聚集超大体积的岩浆,也不会造成超长时间的岩浆气体富集过程。卡特拉火山位于冰岛东部火山区南缘的米达尔斯冰原之下(图1),与北东侧的埃尔加裂隙共同构成了卡特拉火山系统(Söosalu *et al.*, 2006),是冰岛最为活跃的火山之一,在过去的1100

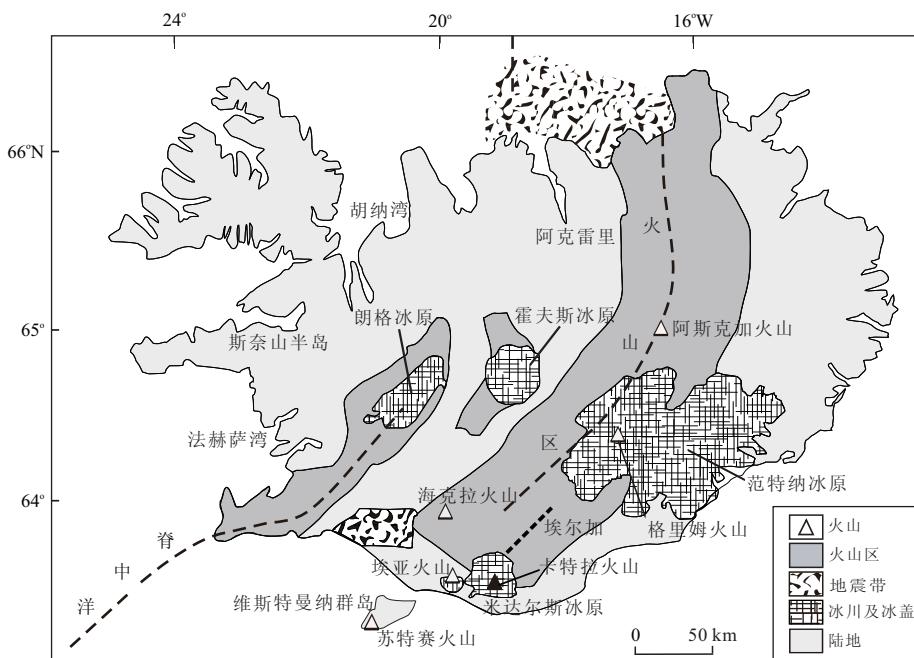


图 1 冰岛主要冰川、火山带与代表性火山的分布图(改自 Hooper *et al.*, 2009)

Fig. 1 Distribution of representative volcanoes and glaciers in Iceland

年的历史中就有过 20 次的喷发。该火山的破火山口为椭圆形,长轴为北西—南东方向,长 14 km,火口缘最高处可达 1 380 m(Björnsson *et al.*, 2000)。卡特拉火山的二维地震剖面在破火山口内部显示走时异常(travel-time anomaly)(Guðmundsson *et al.*, 1994),说明在地下 3 km 深处可能存在一个宽为 5 km 的浅岩浆房(Soosalu *et al.*, 2006)。其喷发物有两种,分别是碱性玄武岩和英安岩,后者的 SiO₂ 含量为 63% ~ 67% (Jakobsson, 1979; Larsen *et al.*, 2001)。

卡特拉火山是冰岛最为活跃且频繁产生破坏性火山冰石流(jökulhlaup, 有时译为融冰)的火山之一。历史上大部分喷发都发生在破火山口的裂隙中,其中埃尔加裂隙系统(图 1)长达 60 km,已经成为全新世喷发的主要通道。最近一次喷发发生在公元 934 年,当时产生的熔岩流多达 18 km³,成为世界上喷发最多的熔岩流之一。另外,卡特拉火山在全新世也发生过多次英安质爆炸性喷发。历史上大的喷发发生的时间间隔约为 50 a,非常有规律。按最近的一次喷发为 1918 年来计算,卡特拉的喷发则已延期许久(Soosalu *et al.*, 2006)。2011 年下半年,常有报道提到卡特拉火山的活动情况。有人预测这座火山在近期将有一次猛烈的喷发,规模为世纪之最,甚至有人称其为超级火山的大喷发。因此,分析卡特拉火山的喷发方式、喷发时间及其规模具有十分重要的

意义。

“将古论今”研究法是研究未来火山灾害的基本方法,即根据某座特定的火山在过去一段时间内的喷发行为,分析其复发规律,预测未来可能的喷发概率和喷发类型等特征。研究时参照的火山过去喷发历史越长,喷发过程越详细,得到的喷发灾害预测就越准确。作为针对国外著名火山未来喷发特性研判的一次具体实践,本文将根据我们近两年收集的冰岛若干冰下火山喷发前人研究成果,特别是卡特拉火山有关成果,结合国际火山专业网站(<http://www.volcano.si.edu/world/>)、冰岛有关政府与科研机构网站(<http://en.vedur.is/>)以及相关媒体的资料,对卡特拉火山未来可能的活动方式及影响做一个简要讨论。由于我国缺少火山喷发的实例,通过结合国外著名火山的喷发历史对其喷发特征进行相应的研究,对我国的火山喷发预测具有一定的指示意义。

1 卡特拉火山近期活动

卡特拉火山自 20 世纪初以来,有过多次活跃期。最新一次喷发活动发生在 1918 年,之后发生过多次密集的火山颤动以及融冰事件。最新一次活跃期开始于 2011 年,但目前的活跃程度保持在一定范围内。卡特拉火山近一个世纪以来的活动规

律总结,可为我们对火山未来灾害评估提供非常重要的基础依据。

1.1 1918年的喷发

卡特拉最近的一次大的喷发发生在1918年10月12日,持续了3个多星期。喷发地位于卡特拉破火山口的东南缘,其上覆盖着将近400 m厚的冰盖。这次喷发是卡特拉火山最近的一次对冰面造成破坏的喷发(Sturkell *et al.*, 2010)。虽然喷发规模较大,但估算的喷发物体积却很少。空降碎屑物的总量约为0.7 km³(Eggertsson, 1919),水体搬运喷发物的体积约为0.7~1.6 km³。

1.2 1955年融冰事件

1955年在卡特拉破火山口的东缘可能发生了一次短暂的冰下喷发,没有火山灰喷入大气层。但在米达尔斯冰原上留下了两个浅的冰川洼地,以及在冰原东侧的冰舌上形成了一次小的火山冰石流。

1.3 1999—2005活动期

1999年7月18日,在一段时间的低频地震颤动之后,卡特拉火山形成了一次融冰(Guðmundsson *et al.*, 2007),也有人认为可能发生了一次爆发。在震群中心部位附近发现一个新形成的地表凹陷

(Sturkell *et al.*, 2010),被认为是小规模的冰下喷发形成的。并且之前形成的几个冰川洼地也变得更深。GPS数据显示从1999年卡特拉火山有所抬升(Sturkell *et al.*, 2003),1999—2002年间,破火山口北东缘的GPS点抬升了7 cm(Soosalu *et al.*, 2006)。2000年底到2005年初,卡特拉火山的破火山口内的地震活动速率有一定的增强,尤其是在卡特拉火山口西侧的Goðabunga地区(Soosalu *et al.*, 2006; Hooper *et al.*, 2009)。其地震活动集中在一个直径3~4 km的浅部小圆形地区,深度主要集中在最上部的2 km。这一不寻常的地震分布模式指示了一个热的酸性地下穹丘的侵入。这个地下穹丘几百年来都是在缓慢上侵的,但它向地表传导速度有时会加快,就像1999年的活动那样,可能是受到了玄武岩浆侵入的影响,但也不排除可能是小规模冰下喷发造成的。在评估卡特拉火山灾害问题时,应该考虑这种在破火山口西部地区富硅质岩浆造穹喷发的可能性(Soosalu *et al.*, 2006)。这次的活动到2005年平息(Hooper *et al.*, 2009)。

1.4 2011—2012的不稳定性

2011年冰岛气象局(IMO)和当地新闻机构报

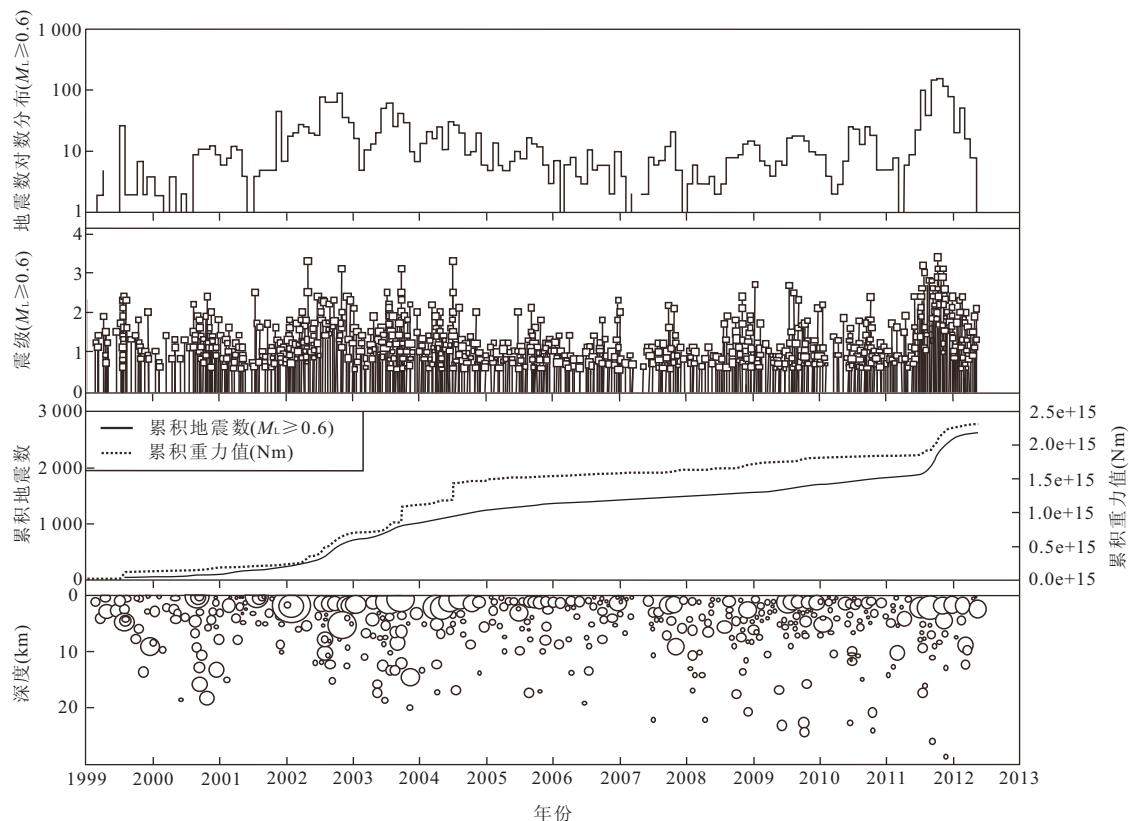


图2 卡特拉火山在2011—2012年与1999、2002—2005年的地震活动不稳定性对比(修改自IMO官网)

Fig. 2 Comparison of seismic activity during 2011—2012, 1999 and 2002—2005 unrest, Katla volcano

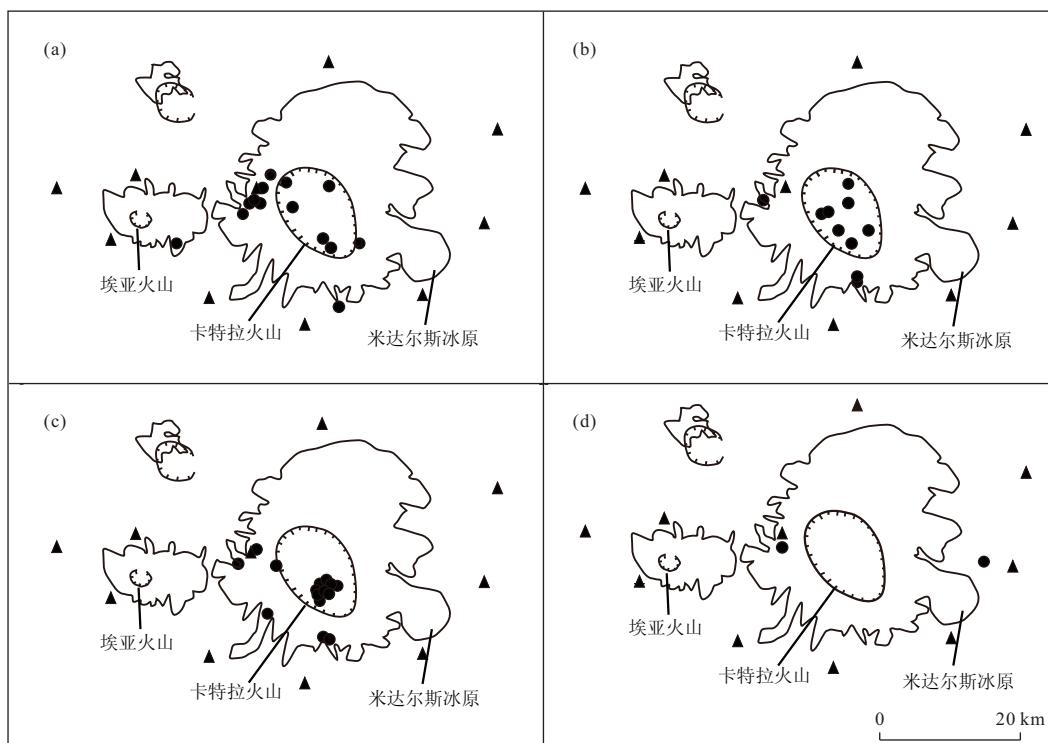


图 3 米达尔斯冰盖及卡特拉火山的地震分布

Fig. 3 The earthquake distribution of Mýrdalsjökull and Katla volcano in December 27–29 (a), 2011 and respectively in March 30–April 1 (b), June 7–9 (c), September 4–6 (d) of 2012

a、b、c、d 分别为 2011 年 12 月 27—29 日, 2012 年 3 月 30 日—4 月 1 日, 2012 年 6 月 7—9 日以及 2012 年 9 月 4—6 日的地震分布;●发生地震的地点;▲附近观测台, 图中所有震级均小于 3 级(修改自 IMO 地震网)

道了 2011 年 7 月 9 日自米达尔斯冰原发生了一次融冰事件, 融冰起源于卡特拉火山破火山口东南部的 3 个冰川洼地。7 月 8 日近傍晚, 在协频火山颤动达到峰值时, 米达尔斯冰原洪水监测系统记录到导电率的增加。有媒体报道形成了一个新的冰川洼地, 与附近冰川中的大裂缝一起, 可能指示了一次小型喷发, 但尚未见到喷发的直接证据。

冰岛大学地球物理学家 Sigmundsson 在接受访问时认为这并不是一次大的喷发, 可能仅仅是一次地热水的活动。但 2011 年 8 月 26 日在冰岛政府环境部举办的针对冰岛火山喷发的灾害评价研讨会上指出, 范特纳冰原(冰岛最大的冰川)之下火山喷发频率和喷发规模随时间在发生变化。最近 15 年便发生了 4 次喷发, 是一个喷发活动周期的开始。同时会议还认为卡特拉火山也可能正进入一个新的喷发活动周期。

由图 2 可以看出, 1999 年 6 月前后, 卡特拉火山的地震活动性有一个明显的增加, 体现在地震数量增多及震级变大。之后在 2002—2005 年间, 地震活动性出现了一个持续较高水平的阶段。而在 2011

年下半年, 地震活动性又出现了明显增强的变化。2011 年 10 月 5 日凌晨, 在卡特拉火山破火山口范围内记录到了一次强烈的震群活动, 最大震级达到 3.7 级, 多数地震活动的震源深度都 $< 5 \text{ km}$ 。浅部地震与地表冰川的构造活动有关, 深部地震才能代表岩浆涌动所引起的火山地震。虽然还没有测量到卡特拉火山即将喷发的迹象, 但根据地震活动特征判断, 火山活动性可能会发生突发性变化。从 2011 年下半年开始为期一年的火山活动性与 2002—2005 年之间活动性相似, 表现在较大的地震增多, 大多分布在近地表, 而且在地下较深部地震数量有增多的趋势。根据图 2 中地震深度分布图显示的 2002—2005 年和 2011—2012 年两个时间段内近地表地震集中分布的特征判断, 2011 年开始的这种不稳定性很可能就像 2002—2005 年一样持续一段时间后又恢复平静。

进入到 2011 年 12 月份, 卡特拉火山显示了火山活动性的进一步的增加。有感地震明显增多(图 3a)。有报道说此时火山的表面已经冒出了蒸汽, 7 月份形成的冰川裂隙也更加明显。但是进入 2012 年

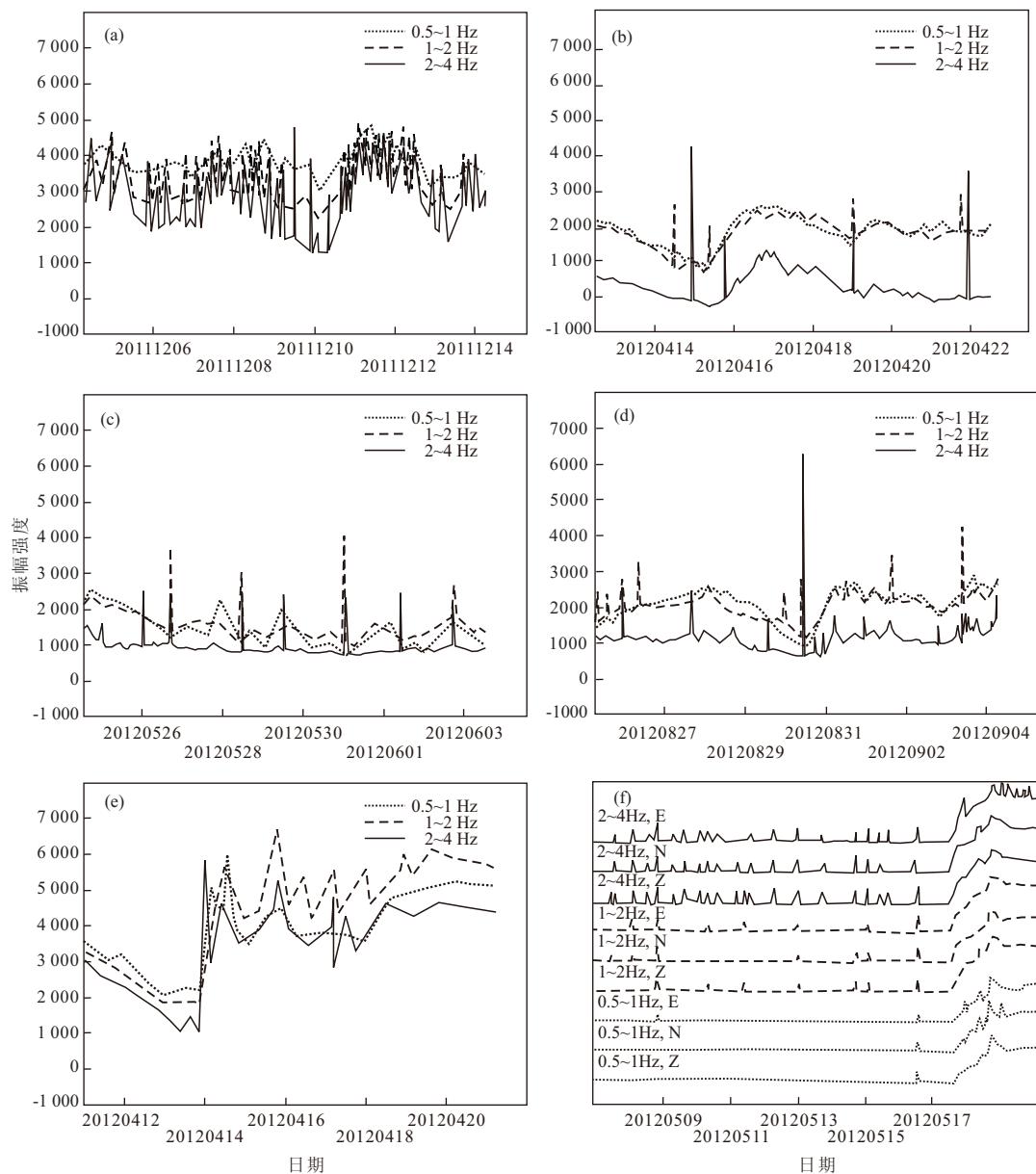


图4 冰岛卡特拉、埃亚、格里姆火山的火山颤动记录

Fig. 4 Volcanic tremor records of Katla in May 5–14/2011 (a) and April 13–22/2012 (b), May 25–June 3(c), August 26–September 4 (d), Eyjafjallajökull in April 11–21/2010 (e) and Grímsvötn in May 7–20/2011 (f)

a~d. 卡特拉火山 2011 年 12 月 5—14 日、2012 年 4 月 13—22 日、2012 年 5 月 25—6 月 3 日和 2012 年 8 月 26—9 月 4 日的颤动记录; e. 埃亚火山 2010 年 4 月 11—21 日的颤动记录; f. 格里姆火山 2011 年 5 月 7—20 日的颤动记录; 横坐标表示日期, 纵坐标表示火山颤动的平均最大振幅强度。f 中的 E,N,Z 分别表示东西、南北以及垂直方向的 3 个分量(修改自 IMO 地震网)

以后,全年的地震的次数及分布位置并不集中。2011年12月27—29日的地震主要分布在破火山口内及破火山口西北侧的北东向带状区(图3a),2012年3月30日—4月1日的地震主要集中在卡特拉火山的破火山口内(图3b),6月7—9日发生的地震则主要集中在破火山口的东南侧(图3c),9月4—6日发生的地震次数已经很少(图3d)。地震的平面分布没有显示出集中迁移的现象,表明地下尚未出现明

显的岩浆迁移过程。

火山颤动的特征同样显示了不稳定性没有大的波动(图4),冰岛火山颤动频率通常分为低频率(0.5~1 Hz, 颤动曲线主要与冰川活动性有关)、中频率(1~2 Hz, 颤动曲线主要与火山喷发活动有关)、高频率(2~4 Hz, 颤动曲线主要与构造作用的岩石破裂有关)3种类型。从a,b,c,d中可以看出卡特拉火山从2011年12月份到2012年9月份其火

山颤动的振幅及波形虽然经常变换,但整体上没有大的起伏,仍维持在一个较为稳定的范围内,尤其相比 a 而言,b、c、d 的相对振幅更要低。振幅强度常伴随有脉冲性增强的特征,周期性好,脉冲之间的时间间隔长短不一。例如,2012 年 6 月末与 8 月末的脉冲周期分别为 1 天半与 2 天左右,而之前的 2011 年 12 月末和 2012 年 3 月末的脉冲周期性并不明显。总体上看,2012 年卡特拉火山的活动性保持在一定的不稳定状态,但未显示出明显的即将喷发的指示。而 2010 年 4 月 14 日埃亚火山(e)和 2011 年 5 月 21 日格里姆火山(f)喷发前后的火山颤动振幅的变化显著。因此虽然卡特拉火山在 2011 年底已经开始较为活跃,但目前活性总体仍维持在一定范围内,没有大的波动,尚未看出在未来一段时间内发生喷发的迹象。

2 卡特拉火山的喷发历史——喷发概率与喷发强度推测的依据

为了对卡特拉火山未来喷发的可能性作出判定,需要详细了解该火山历史上的喷发过程,为此我们把卡特拉火山近 2000 年来的喷发情况总结于表 1。由表 1 可见,卡特拉火山极为活跃,近 2000 年来已经喷发 43 次,平均每 47 年喷发 1 次,最大喷发间隔 150 年,最小喷发间隔仅 10 年。有人认为最近 2 次喷发是在 1999 年和 1955 年,把这两年里突然涌出的洪水归因于小规模冰下喷发,而这种小规模冰下喷发并没有达到冰川表面,所以人们在地表并未见火山喷发。有确切证据的最近一次喷发记录是 1918 年,持续了大约 1 个月,当时的火山冰石流洪峰流量达到了 $300\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Jóhannesdóttir and Gísladóttir, 2010)。卡特拉火山喷发间隔在百年以上的喷发有 5 次,均发生在 1 000 a 以前。20 年间隔的喷发有 9 次,也发生在 1 000 a 以前。这种千年之前喷发间隔较长的喷发,近期重复发生的可能性会小得多。而喷发间隔小的喷发,其重复发生的概率会更大,值得学者与社会公众予以关注。

判断卡特拉火山未来喷发的规模时,同样要以卡特拉火山过去的喷发行为作为参照。如表 1 所示,衡量火山爆发强度的指数(VEI)在卡特拉火山有 4 次达到 VEI 3 级,14 次达到 VEI 4 级,4 次达到 VEI 5 级。可见未来喷发规模的最大可能是 VEI 4 级,但也要考虑 VEI 5 级的可能性。因为 VEI 5 级以上的

喷发均在千年以内,VEI 5 级以上喷发的间隔也在减小(分别为 363 年、96 年、34 年)。需要注意的是,最近的 VEI 5 级喷发是在 1755 年,喷发已经过去了 255 年。

预测卡特拉火山未来喷发概率时,最为重要的是准确恢复其详细的喷发历史(表 1)。若以 1999 年的喷发是最后一次喷发,距今已过去了 13 年,以 47 年为一个平均喷发周期,二者相除则为预测的 2012 年喷发概率,约为 28%,2013 年的喷发概率约为 30%。如果 1918 年的喷发是最后一次喷发的话,现在早已超过了卡特拉火山的喷发周期,未来短期内喷发的可能性很大。但是,目前监测的数据还没有显示出即刻要喷发的迹象。同样,根据以往喷发的规模来判断,下次喷发为 4 级的可能性最大,但 5 级也很有可能。也就是说爆破性喷发抛出的火山灰体积可能达到 10^8 m^3 甚至 10^9 m^3 的等级以上。爆破性喷发持续的时间以 1 个月或数月为最大可能,但猛烈的爆破性喷发高峰期持续时间会短得多。

上述近年火山不稳定性可能导致喷发的概率是 30%,它的地质含义是指这个火山发生喷发的可能性已经非常大了,但是否真的发生喷发,还需要根据详细的火山监测工作加以判断。这种概率统计方法是很简略的,只能相对指示火山的危险性,没有火山真实状态的含义,也没有严格的准确度的概念,但却还是一种很有用的、便捷的判定方法。如前所述,火山的真实状态需要通过系统的火山监测工作来获取,而卡特拉火山的监测资料已经指示了该火山现正处在火山不稳定状态。这种监测手段的指示与我们采用的历史统计概率法得到的结果是一致的。历史上很多火山与地震都预先开展过成灾概率的研究,比如日本 2011 年“311”大地震之前的数年里,随着时间的持续,仙台附近公众都事先得知了该地发生 7 级以上大地震的概率高达 98%~99%。这个概率是根据仙台附近历史大地震的复发频率计算得到的。但是,尽管日本仙台附近也有很密集的监测仪器,对于这种超大规模的地震,还是不能做出准确的预报,不能及时采取足够的减灾措施,所以造成了那么大的灾难。20 世纪 80 年代的美国长谷火山和意大利的坎皮佛里戈利火山以及 1997 年西印度群岛蒙特塞拉特的苏佛里耶火山喷发,都有很好的火山喷发概率计算的实例。

这种根据周期性得到的喷发概率判定,基础是遵循原有路线重复相同事件。但无论是时间还是事

表1 卡特拉火山近2000年来喷发历史及特征

Table 1 The eruptive history and features of Katla volcano in the last 2 000 years

时间(AD)	喷发间隔	VEI	火山灰体积(m^3)	喷发特征
2011		0		冰下喷发? 天折的喷发?
1999	12	0		冰下喷发? 天折的喷发?
1955	44	0		冰下喷发? 天折的喷发?
1918	37	4+	7×10^8	冰下爆破性喷发
1860	58	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1823	37	3?	1×10^8	冰下爆破性喷发
1755	68	5?	1.5×10^9	冰下爆破性、放射状裂隙喷发
1721	34	5?	1.2×10^9	冰下爆破性喷发
1660	61	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1625	35	5	1.5×10^9	冰下爆破性喷发
1612	13	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1580	32	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1550	30	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1500	50	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1450	50			冰下爆破性喷发
1440	10	4	$2? \times 10^8$	冰下爆破性喷发
1416	24	4?	1.5×10^8	冰下爆破性喷发
1357	59	4+	7×10^8	冰下爆破性喷发
1311	46			冰下爆破性喷发
1262	49	5	1.5×10^9	冰下爆破性喷发
1245	17	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
1210	35	4	1×10^8	冰下爆破性喷发
1177	33	3	1×10^7	冰下爆破性喷发
1150	27			冰下爆破性喷发
1000	150			
960	40	3	5×10^7	冰下爆破性喷发
950	10			冰下喷发伴有熔岩流
934	16	4?	5×10^9	裂隙式、冰下爆破性喷发,伴有熔岩流
920	14	4	2×10^8	冰下爆破性喷发
904	16			冰下爆破性喷发
820	84			冰下爆破性喷发
780	40			冰下爆破性喷发
680	100			冰下爆破性喷发
610	70			冰下爆破性喷发
590	20			冰下爆破性喷发
540	50			冰下爆破性喷发
500	40			冰下爆破性喷发
400	100			冰下爆破性喷发
290	110			冰下爆破性喷发
270	20	3	8.5×10^7	中央喷火口、冰下爆破性喷发
260	10			冰下爆破性喷发
200	60			冰下爆破性喷发
130	70			冰下爆破性喷发
30	100			冰下爆破性喷发

数据总结自 <http://www.volcano.si.edu/world/>(空白处表示无资料记载)。

件类型,都会有一定的变化。比如时间段的提前或延后,比如规模的加大或缩小。火山喷发历史恢复得越详细,恢复的历史时间段越长,对未来喷发时间的判断就越准确。

3 卡特拉火山可能的喷发形式

进入21世纪之后人们更加深刻地认识了一种新的火山类型——冰下火山,这与通常了解的陆上火山与海底火山明显不同。2010年埃亚火山喷发和

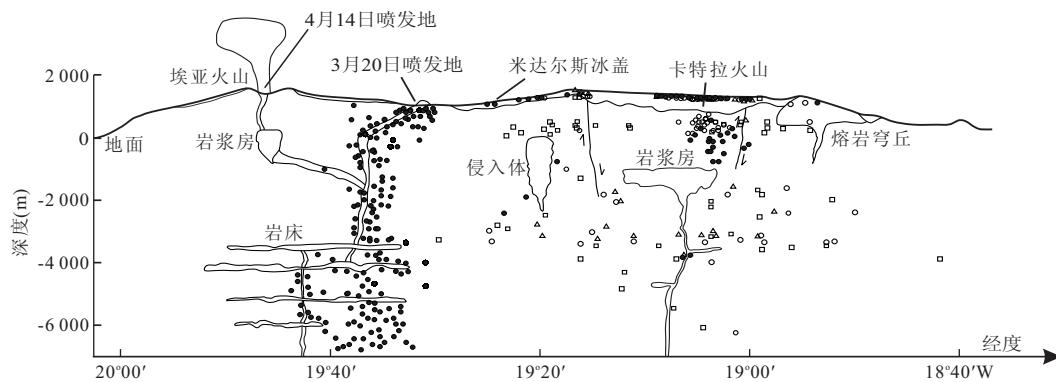


图 5 卡特拉火山及西侧的埃亚火山深部结构与喷发模型

Fig. 5 The deep structure and eruption model of Katla and Eyjafjallajökull volcano

●表示埃亚火山在3月13—21日的地震分布位置;□表示卡特拉火山在4月11—21日期间的地震分布位置;○表示卡特拉火山在6月24—28日期间的地震分布位置;△表示卡特拉火山在7月29日—8月8日期间的地震分布位置

2011年格里姆火山喷发给我们深入了解这种冰下火山的特殊性提供了一次绝好的机会,因为这两次火山喷发过程很好地诠释了冰下火山喷发的特点。它们分别代表了冰下喷发和岩浆喷发两种类型。此外,还有一种“夭折的喷发”(Failed Eruption)类型,即岩浆上侵到火山下部某一个高度时停止了上升,代之以侵入体的形成(Rymer *et al.*, 2010; Sig mundsson *et al.*, 2010a, 2010b),以向地表缓慢放热融冰而中断喷发,这时在地表可能先监测到地震,后见到明显的融冰事件。卡特拉火山此次不稳定性最终应该是以这种形式而告终的。

3.1 冰下火山喷发类型(以2010年埃亚火山为例)

埃亚火山位于卡特拉火山东部,其顶部的火山口宽2.5 km,其火山活动性很弱,在过去1100年间只有两次已知的喷发。埃亚火山的喷发在2010年3月20日晚开始,体现为溢流式喷发,熔岩从裂缝流出,持续三周后突然停止。但在火山里流动的岩浆并没有停,它们在主火山口下面聚积,直到4月14日再次爆发(Matoza *et al.*, 2011),爆发发生在距离原来裂隙8 km的主火山口内冰盖下很深的地方(图5)。喷出的火山灰导致了当时欧洲空中交通的瘫痪。

由于埃亚火山喷发时预先融化大量的冰川,喷发过程中冰川融水的加入又大大地增加了火山的爆破强度,并延长了火山的爆破性喷发时间。这种爆炸性喷发由于岩浆通道里的水体吸收了大量的岩浆热能而汽化,体积剧烈膨胀而爆炸,从而产生了大量被水体淬火、炸碎的淬碎玻璃。强烈的碎屑化作用形成了长时间大量的火山灰。从而使得喷发柱上冲高度比纯的岩浆挥发分形成的喷发柱高度小得多。如果没有大量的冰川融水的长时间加入,按照2010年4

月14日喷发的岩浆成分与火山爆发指数(VEI 4)判断,不会有这么长时间高强度的火山灰释放过程。

3.2 岩浆喷发类型(以2011年格里姆火山为例)

格里姆火山是冰岛历史上最为活跃的火山之一(Larsen *et al.*, 1998),它位于冰岛地幔柱核心之上的东部火山区内(Alfaro *et al.*, 2007)。破火山口大小为6 km×8 km,其上覆盖了240~260 m厚的冰架(Alfaro *et al.*, 2007),只在南部出露部分火口缘。自公元1200年以来,格林姆火山比冰岛上其他的火山系统的喷发频率都要高,在1934—2004年间就有5次喷发(Larsen *et al.*, 1998; Vogfjörð *et al.*, 2005)。2011年5月21日,在上次2004年11月份喷发位置的附近,格里姆火山开始了喷发,开始时属于冰下喷发,但很快冲破了冰盖,喷发3 h后喷发柱高度升高到20 km。

虽然格里姆火山位于冰岛最大的冰盖—范特纳冰原之下,但由于频繁的火山喷发致使火山之上覆盖的冰层并不厚,喷发时由融冰加入的水量也不大,持续时间也不太久,所以很快就变成了正常的岩浆喷发,不再具备冰下火山的喷发特征了。尽管这次喷发的喷发柱高度很大,但其持续时间很短,火山灰没有对欧洲航空造成冲击。

3.3 夭折的喷发(卡特拉火山这次不稳定性很可能的命运)

由卡特拉火山地下结构图(图5)可见,火山深部的侵入体(岩浆房)也很发育。当地下深处的岩浆不能穿透地表发生喷发时,很多情况下会在地下某一深度(如硅铝层底部)位置停下来。根据近代火山监测的资料统计,这种“夭折的喷发”很可能在数量上比上述两种喷发类型更多一些。统计学上显示

每发生一次火山喷发活动,在地下至少发生过一次岩浆侵入活动。从冰岛火山许多“原因不明的融冰事件”来看(比如卡特拉火山1955年、1999年以及2011年的融冰事件),很可能在地下发生过类似的侵入体事件,我们在这里定义其为夭折的喷发。从表1中可以看出,随着对火山学的深入研究,直到1955年,夭折的喷发这种喷发类型才被人们所认识,在此之前,这种喷发类型很可能也发生过,只是并未被关注。

图5中列出了2010年埃亚火山3月20日喷发前后的地震分布与卡特拉火山内部地震分布对比图,其中,埃亚火山的地震自深向浅是随时间先后分布的,3月13日的地震多发生在地下8~12 km,随后沿着深部的岩床和岩墙地震逐渐向地表迁移,到3月20日火山喷发前,地震大多集中在火山喷发地附近,显示了火山喷发前地震震源深度及平面分布集中迁移的过程。选取2012年几个卡特拉火山具有较多深部地震(>1~2 km,相对于地表地震而言)的时间段,分别是4月11—21日,6月24—28日和7月29日—8月8日进行对比。从这几个时间段的地震分布情况来看,地震分布分散,多分布在冰盖中,在地下深处的分布也很零散,并未显示出在岩墙或者岩浆房附近有较为集中的地震分布,尚看不出即刻发生大喷发的迹象。因此,现在的冰岛卡特拉火山的不稳定性活动,很可能以地表见不到火山喷发的结果而结束。

卡特拉火山作为冰岛地幔柱的东南组成部分,一直在深部与浅部物质与能量迁移过程中起着重要作用。深部起源于核幔边界上的热柱向上运移时总体连续性好,但常常有停滞,这些停滞的位置往往符合中浮面的制约。在那里形成岩浆房或岩浆渊(更深位置,体积更大、形状更远离球形而接近于层状)。冷凝后这些层状侵入体构成了冰岛地幔柱的主体成分,而遇到下部再次上升的岩浆与热物质后,则可发生岩浆混合,并可触导火山喷发。冰岛地幔柱在单位时间能够上传的热量基本上保持不变。在冰岛地幔柱内的卡特拉火山范围内及其附近,这种小尺度的岩浆热上侵速率也可在一段时间内保持稳定。但不一定最终都能上侵到地表,这些深部岩浆上侵与停滞事件在地表就表现为“夭折的喷发”。因此,冰岛地幔柱内的岩浆热传导并不肯定对应着卡特拉火山的喷发。发生的融冰事件,如卡特拉火山在1955、1999、2011年的融冰事件所示,很可能就对应于这些“夭折的喷发”。基于这个原因,我们采用“将古论

今”的方法来判断这次火山不稳定很可能就是一次“夭折的喷发”。

4 结论

(1)卡特拉火山近期地震活动趋于平静,整体地震数目减少,其中浅部地震多,深部地震少,且分布分散,震源深度和平面分布没有显示出喷发前的地震集中并随火山通道上升的趋势。此外,目前的火山颤动比2011年不稳定性期间的振幅明显减小,整体起伏不大,周期性较好。结合卡特拉火山的现状,我们认为,卡特拉火山现在仍处于一个不稳定性起伏不大的状态,最大可能性是以见不到喷发的形式结束这次不稳定性。(2)如果卡特拉火山喷发的话,通过总结卡特拉火山的历史喷发规律,其喷发强度的VEI指数可能达到4级或者5级,爆破性喷发时间能达一个月或者数月,但喷发高峰期持续时间会短得多。(3)下次卡特拉火山的喷发形式有3种可能性:第1种是类似于埃亚火山2010年4月份的喷发,但这种喷发柱高度一般不会超过10 km,对流层内传播的火山灰影响范围也主要限于欧洲;第2种是类似于格里姆火山2011年的喷发,若下一次卡特拉火山喷发的位置在最近融冰地点附近,喷发将很快由冰下喷发转变为纯正的岩浆喷发,此时的喷发柱高度可达到平流层,但喷发持续时间会短很多。第3种可能的形式是“夭折的喷发”(可能性更大),岩浆只能上侵到火山下部某一个高度,最终以形成火山深部的侵入体而告结束。

致谢:论文资料获取过程中得到了中国地震局监测预报司熊道慧、梁毅强等领导的支持与帮助,在此一并表示诚挚的谢意。

References

- Alfaro, R., Brandsdóttir, B., Rowlands, D. P., et al., 2007. Structure of the Grímsvötn Central Volcano under the Vatnajökull Icecap, Iceland. *Geophysical Journal International*, 168 (2): 863—876. doi: 10.1111/j.1365—246X.2006.03238.x
- Björnsson, H., Pálsson, F., Gudmundsson, M. T., 2000. Surface and Bedrock Topography of Myrdalsjökull, South Iceland: The Katla Caldera, Eruption Sites and Routes of Jökulhlaups. *Jökull*, 49: 29—46.
- Eggertsson, S., 1919. Ymislegt Smávegis Vidvíkjandi Kötlugosinu 1918. *Eimreidin*, 25: 212—222.
- Guðmundsson, M. T., Högnadóttir, Þ., Kristinsson, A. B., et

- al., 2007. Geothermal Activity in the Subglacial Katla Caldera, Iceland, 1999–2005, Studied with Radar Altimetry. *Annals of Glaciology*, 45: 66–72. doi: 10.3189/172756407782282444
- Guðmundsson, Ó., Brändsdóttir, B., Menke, W., et al., 1994. The Crustal Magma Chamber of the Katla Volcano in South Iceland Revealed by 2-D Seismic Under-shooting. *Geophysical Journal International*, 119(1): 277–296. doi: 10.1111/j.1365-246X.1994.tb00928.x
- Hooper, A., Pedersen, R., Sigmundsson, F., 2009. Constraints on Magma Intrusion at Eyjafjallajökull and Katla Volcanoes in Iceland, from Time Series SAR Interferometry. Volume Project Consortium, Dublin.
- Jakobsson, S. P., 1979. Petrology of Recent Basalts of the Eastern Volcanic Zone, Iceland. Icelandic Museum of Natural History, Reykjavik, 1–103.
- Jóhannesdóttir, G., Gísladóttir, G., 2010. People Living under Threat of Volcanic Hazard in Southern Iceland: Vulnerability and Risk Perception. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2): 407–420.
- Larsen, G., Gudmundsson, M. T., Björnsson, H., 1998. Eight Centuries of Periodic Volcanism at the Center of the Iceland Hotspot Revealed by Glacier Tephrostratigraphy. *Geology*, 26(10): 943–946. doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<0943:ECOPVA>2.3.CO;2
- Larsen, G., Newton, A. J., Dugmore, A. J., et al., 2001. Geochemistry, Dispersal, Volumes and Chronology of Holocene Siliic Tephra Layers from the Katla Volcanic System, Iceland. *J. Quatern. Sci.*, 16(2): 119–132.
- Mattoza, R. S., Vergoz, J., Pichon, A. L., et al., 2011. Long-Range Acoustic Observations of the Eyjafjallajökull Eruption, Iceland, April–May 2010. *Geophysical Research Letters*, 38 (L06308): 1–5. doi: 10.1029/2011GL047019
- Olgun, N., Duggen, S., Croot, P. L., et al., 2011. Surface Ocean Iron Fertilization: The Role of Airborne Volcanic Ash from Subduction Zone and Hot Spot Volcanoes and Related Iron Fluxes into the Pacific Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(GB4001): 1–15. doi: 10.1029/2009GB003761
- Rymer, H., Locke, C., Ofeigsson, B. G., et al., 2010. New Mass Increase Beneath Askja Volcano, Iceland—A Precursor to Renewed Activity? *Terra Nova*, 22(4): 309–313. doi: 10.1111/j.1365-3121.2010.00948
- Sigmundsson, F., Pinel, V., Lund, B., et al., 2010a. Climate Effects on Volcanism: Influence on Magmatic Systems of Loading and Unloading from Ice Mass Variations, with Examples from Iceland. *Philosophical Transactions of the royal society A*, 368(1919): 2519–2534. doi: 10.1098/rsta.2010.0042
- Sigmundsson, F., Hreinsdóttir, S., Hooper, A., et al., 2010b. Intrusion Triggering of the 2010 Eyjafjallajökull Explosive Eruption. *Nature*, 468: 426–430. doi: 10.1038/nature09558
- Soosalu, H., Jónsdóttir, K., Einarsson, P., 2006. Seismicity Crisis at the Katla Volcano, Iceland—Signs of a Cryptodome? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 153(3–4): 177–186. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.10.013
- Sturkell, E., Sigmundsson, F., Einarsson, P., 2003. Recent Unrest and Magma Movements at Eyjafjallajökull and Katla Volcanoes, Iceland. *Journal of Geophysical Research*, 108(B8): 2369. doi: 10.1029/2001JB000917
- Sturkell, E., Einarsson, P., Sigmundsson, F., et al., 2010. Katla and Eyjafjallajökull Volcanoes. *Developments in Quaternary Sciences*, 13: 5–21. doi: 10.1016/S1571-0866(09)01302-5
- Vogfjörð, K. S., Jakobsdóttir, S. S., Gudmundsson, G. B., et al., 2005. Forecasting and Monitoring a Subglacial Eruption in Iceland. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 86 (26): 245–248. doi: 10.1029/2005EO260001