热烈庆祝中国地质学会
成立100周年
1922～2022
Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

汤加王国洪加火山的前世今生

魏海泉,陈正全
中国地震局地质研究所,吉林长白山火山国家野外科学观测研究站,北京, 100029

内容提要: 洪加(Hunga)火山位于新西兰—克马德克—斐济俯冲带,该火山于 2021 年末又开始活动,并在 2022 年 1 月 14、15 日发生了千年一遇的世纪大喷发。喷发柱穿进平流层,形成了一个最高 30 km、最宽 800 km 的蘑菇云,后期的气体火山灰云团几乎环绕南半球一周。喷发所引起的海啸在太平洋沿岸多地造成了灾害。根据现有的资料分析,洪加火山岩浆成分以安山岩为主,岩浆可能是沿着破火山口边缘由富气岩浆团块的"渗漏"驱动喷发的。这次洪加火山大喷发的一个最重要特征是喷发时产生了极为强烈的大气冲击波,这代表了岩浆内火山气体的极大富集。正是这种"超级富气岩浆"的喷发在喷火口位置形成了远超 0.1 MPa(1 标准大气压)的出口压强,引发了向全球辐射的冲击波和数千千米以外都能听到的喷发声响。本次火山喷发引发海啸的机制,其一是爆炸冲击波,向外扩张的冲击波推动了海面表层海水的向外扩张;其二是苏特塞式(Surtseyan)喷发本身就有向外排走海水的能力。未来洪加火山喷发形式,很可能是沿着破火山口周边断裂或靠近破火山口中央谷地的熔岩穹丘或熔岩流。苏特塞式喷发会比较常见,但喷发规模不会太大。

关键词:海底火山;苏特塞式喷发;破火山口;富气岩浆;未来喷发

1 地质背景

汤加王国洪加哈派—洪加汤加(Hunga Ha'apai—Hunga Tonga, 也有译名洪阿哈阿帕伊)火山是洪加火山的全称。在汤加语中,Hunga 是火山喷发的意思,因此,Hunga Ha'apai—Hunga Tonga 就是指哈派岛和汤加岛的火山喷发。哈派岛和汤加岛是一座巨大的海底破火山口西北侧露出海面的部分(Garvin et al., 2018)。近十年来该火山一直保持着活跃状态,它曾在 2014 年末有过 VEI≈2 的爆炸性喷发;于 2021 年末又发生了举世瞩目的海底火山喷发。经历短暂喷发间歇期后,2022 年 1 月 14 日在新形成的火山岛上又开始了巨大规模的陆上喷发。15 日的世纪大喷发受到世人关注,形成的喷发柱穿入平流层,形成了一个最高 30 km、最宽 800 km 的蘑菇云。汤加王国因为这次喷发成了与世隔绝的孤岛,喷发引发的海啸在太平洋沿岸多地都引发了灾害。

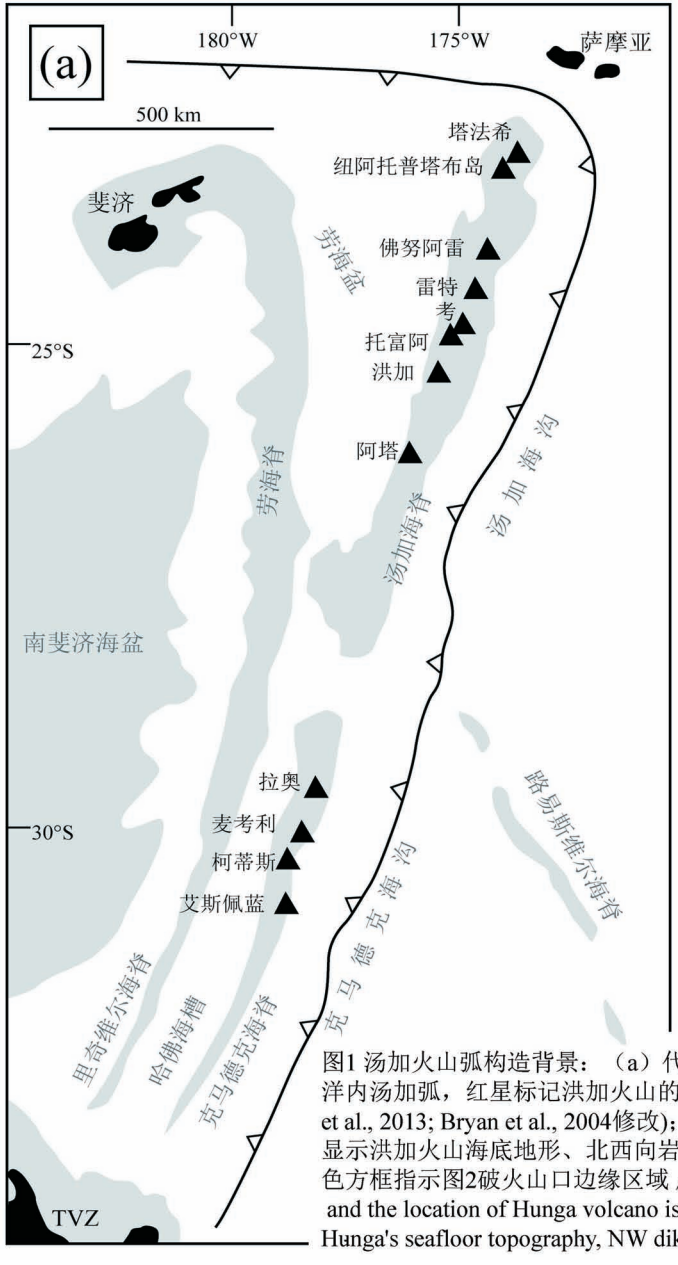
喷发活动已经结束了,但人们还是心有余悸。汤加火山这次世纪大喷发是怎么形成的?为什么这次喷发产生了这么大的气爆声音和海啸?之后是否可能再次发生这样规模的喷发?本文尝试依据洪加火山本身属性来回答人们的这些关切,重点涉及弧火山、海底火山、破火山口、环状断裂、中央通道、火山气体、火山沉陷与再生穹窿等火山作用过程。

1.1 新西兰—克马德克—斐济俯冲带

新西兰北岛的陶波火山带(Taupo Volcanic Zone, TVZ)、克马德克群岛(Kermadec Islands)和汤加群岛(Tonga Islands)由南向北形成了一个长约 2800 km 高度活跃的北北东方向的岛弧(图 1a)。汤加岛弧是一个地震和火山的活动带,其成因与洋壳俯冲到边缘板块之下有关。这个岛弧从更新世到现代均有火山活动,目前最活跃的火山位于汤加国家火山公园,汤加火山为研究环太平洋造山带提供了一个窗口。

测深资料显示在汤加弧段和克马德克弧段的海底地形有明显的差异(Mammerickx et al., 1971)。克马德克山脊有非常规则的轮廓线,火山岛位于山脊的顶部。而汤加的山脊较宽,并有两条岛链发育。另外,在汤加岭海底西侧边缘有非常明显的不规则的等深线,这表明汤加的火山有更大的水下体积,或

注: 本文为国家自然科学基金青年基金项目(编号:41802252)和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(编号:GCEA1703)的成果。
收稿日期:2022-02-20;改回日期:2022-03-28;网络首发:2022-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.05.025
作者简介:魏海泉,男,1958 年生,研究员,主要从事火山学研究; Email: 1375284615@qq.com。



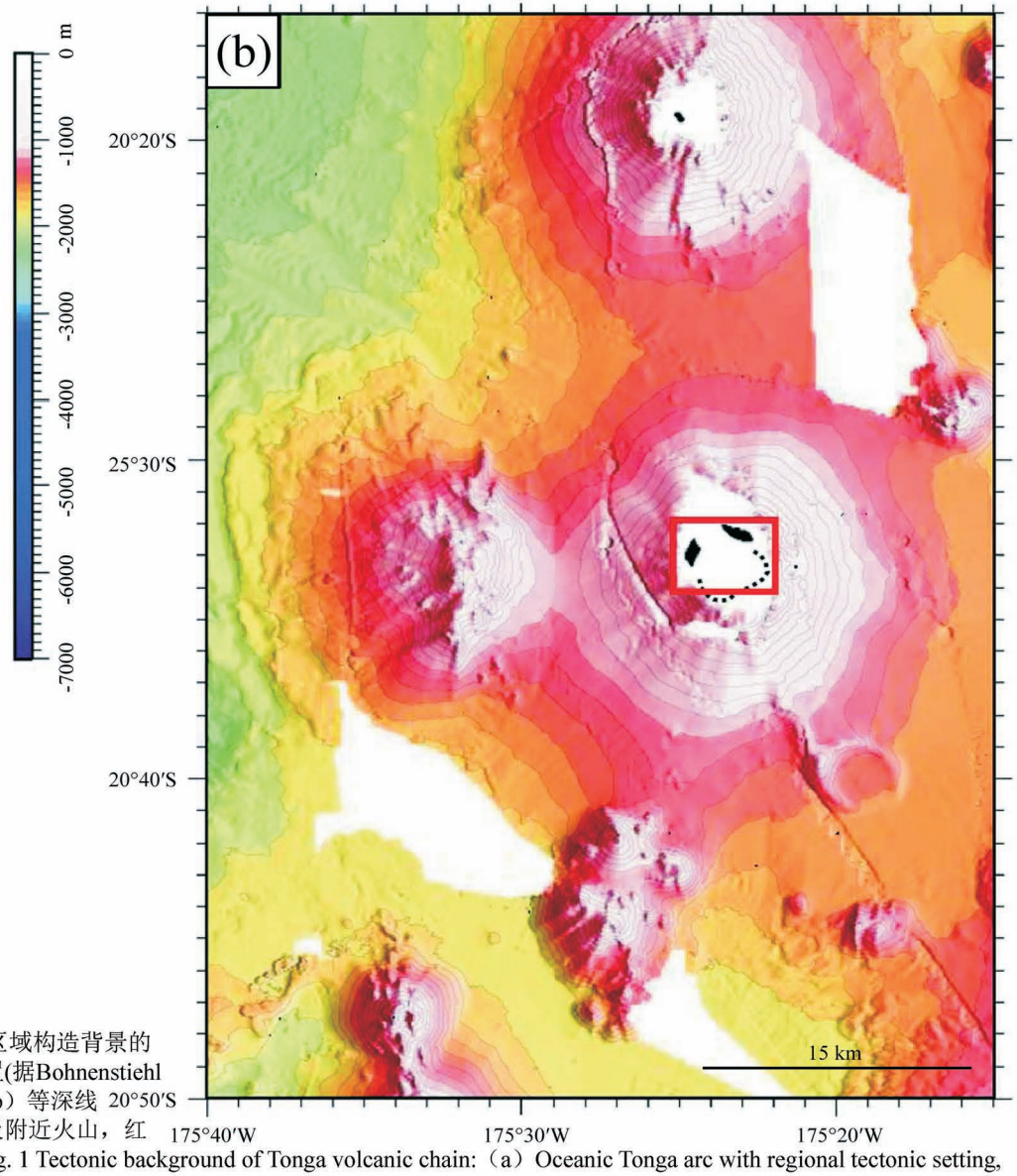


图1 汤加火山弧构造背景：（a）代表区域构造背景的洋内汤加弧，红星标记洪加火山的位置(据Bohnenstiehl et al., 2013; Bryan et al., 2004修改)；（b）等深线显示洪加火山海底地形、北西向岩墙及附近火山，红色方框指示图2破火山口边缘区域 / Fig. 1 Tectonic background of Tonga volcanic chain:（a）Oceanic Tonga arc with regional tectonic setting, and the location of Hunga volcano is marked by a red star (modified from Bohnenstiehl et al., 2013; Bryan et al., 2004). (b)Isobath shows the Hunga's seafloor topography, NW dikes and nearby volcanoes, with red box indicating the caldera rim area in Figure 2.

者暗示汤加的火山喷发比克马德克的火山喷发持续时间更长,汤加火山的岩浆供给率更大。

汤加—克马德克地区是全球大地震和火山高发区域。自 1902 年以来共发生超过 20 次大地震和特大地震,如 1917 年的 M_W8.1 级地震、2006 年的 M_W7.9 级和 2009 年的 M_W8.0 级大地震均发生在汤加地区(Sameshima, 1975)。陶波火山带活火山大致分布于贝尼奥夫带之上 120~150 km,汤加火山深度为 150~180 km,克马德克火山深度为 240~260 km。直接的地震横断面探测(Sykes, 1966)表明的深度更浅一些:汤加约 100 km,克马德克火山约 200~240 km。贝尼奥夫带倾角从汤加约 43°~45°呈系统变化至克马德克的 55°~60°,再到新西兰的 70°。板片下沉速率似乎也有系统性变化(Le Pichon, 1968),汤加弧的下沉速率为 91 mm/a,而南克马德克的下沉速率为 47 mm/a,新西兰之下板片的下沉速率为 32 mm/a。因此,越向北扩张角度越大,且俯冲速率也增加。

1.2　汤加火山弧

沿着汤加—克马德克洋内弧的大倾角汇聚俯冲和板片回撤,在板块边界形成了一个残余火山弧(劳—科威尔岭,Lau—Colville Ridge)、一个弧后盆地(劳洋盆—哈佛海沟,Lau Basin—Havre Trench)和一个活跃的汤加—克马德克火山弧(Ballance et al., 1999; Smith and Price, 2006)(图 1a)。汤加海脊以西包含约 20 个从海底到接近或出于海平面的、巨大的火山(图 1b)。这些火山中至少有 7 座自 1770 年以来有过喷发 (Simkin and Siebert, 1994),它们通常都形成短暂的海拔 140 m 以上的火山岛。汤加海沟的活火山岛由西部岛链组成,这些现代火山活动非常活跃,在 1970 年前的 200 年内就有超过 35 次陆上和海底喷发的记录(Richard,1962; Bryan et al.,1972),还可能有较温和的海底喷发没有引起注意。海底火山和火山岛通常位于岛屿稍往东的雁列式断裂上。岛弧两侧的地壳板块的运动的相对数量和方向控制着火山爆发的频率和强度(Bryan et al., 1972)。年轻的火山地形建造和古地磁资料表明这些火山都具有非常年轻的活动年龄。

新西兰弧段由于发育在大陆壳内,TVZ 区内喷发的岩浆以流纹岩为主,其次为流纹岩—安山岩和罕见的高铝拉斑玄武岩及英安岩。而汤加—克马德克段发育在洋盆内的洋脊体系上,克马德克群岛以拉斑玄武岩和玄武安山岩为主,局部发育安山岩和英安岩。汤加群岛以玄武安山岩为主,也发育安山岩和英安岩。TVZ 安山岩相对于汤加—克马德克安山岩更富集不相容元素,Fe 富集程度较低,但含有更高放射性成因的 Sr 和 Pb。与汤加熔岩相比,克马德克熔岩表现出更大的化学变异,其 Pb 同位素显示出更大的不均一性(Bryan, 1972; Sameshima, 1975)。

汤加火山弧内火山岩矿物成分特征以极富基性斜长石和几乎没有碱性长石为代表,东南侧尤阿岛早于晚始新世的玄武岩和纤闪石化辉长岩可能代表弧前海床的上升。这些岩石不同于大多数环太平洋安山岩—英安岩系(Bryan et al., 1972),它们的碱含量极低,尤其是低 K_2O。汤加弧岩石富含 $A1_2O_3$,中度 Fe 富集,Fe/Mg 比值最高值出现在硅质较高的安山岩和暗色英安岩中。痕量元素丰度相似于其他钙碱性岛弧熔岩,显示分离结晶作用演化机制。布格重力异常自南至北呈递减趋势,从尤阿上的高+243 mgal 到佛奴阿雷上的低+122 mgal。这一重力的减少匹配着熔岩钾碱含量的稍许增加。然而,沿着汤加—克马德克—新西兰火山线最重要的成分变化发生于克马德克和新西兰之间,这可能反映了新西兰北岛之下地壳混染的影响。

2　洪加火山

洪加火山(南纬 20.536°,西经 175.382°,海拔 114 m,本次喷发之后高度已大大降低)位于汤加王国首都西北约 65 km,属于哈派群岛,由洪加汤加岛、洪加哈派岛和 2014~2015 年喷发的南部新岛及 51 个小岛及无数浅滩礁石组成,是汤加火山弧上最为活跃的一个大型海底火山。火山自洋底上升近 2500 m,底部直径近 30 km。山顶破火山口直径约 5 km。洪加汤加和洪加哈派两个岛分别位于破火山口缘北部和西北部,南部新岛位于洪加破火山口中央西北侧,距离北部两岛约 3 km(图 2)。

2.1　火山地质

洪加汤加和洪加哈派两个岛屿代表着至少被两次造破火山口喷发(caldera-forming eruption)毁坏的锥体残余,最近的一次在公元 1040~1180 年间(Cronin et al., 2017)。这两个岛主要由熔岩和岩渣组成,它们被南北走向的玄武安山质和安山质岩墙切割。洪加哈派最顶端熔结和非熔结的浮岩流(ignimbrite,指浮岩富集的火山碎屑流成岩或其堆积物,不表示熔结程度和体积大小,与浮岩流堆积物等效。在火山岩地层中,译为熔结凝灰岩,曾有音译为伊格尼姆岩)层序是由造破火山口喷发形成的。

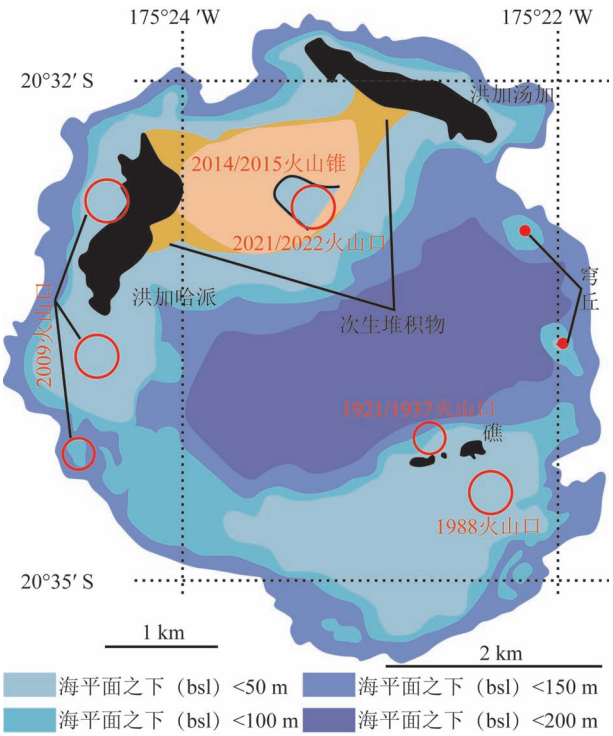


图 2 洪加火山世纪大喷发之前破火山口顶部地形地质图

Fig. 2 Topographic and geological map of the caldera top area before the great centurial eruption of Hunga Volcano

破火山口周边发育西侧 2009 年喷发火山口（多个）、南侧 1988 年火山口、东侧早期熔岩穹丘及中部浅滩 2014～15 年多个喷火口（与 2021～22 年喷发同位置，修改自 Brenna et al.，2022）

Around the caldera rim there are eruption vents 2009 on the west side, vents 1988 on the south side, early lava dome on the east side, and central shoal vents 2014～15 (the same location as the 2021～22 eruption, modified from Brenna et al., 2022)

在熔结和非熔结的伊格尼姆岩之下，至少还有两个更老的喷发序列出现，与伊格尼姆岩之间存在一个古土壤层喷发间断。在造破火山口喷发之后，本火山经历了 1921、1937、1988、2009、2014～15 年等多次火山喷发（图 2）。

2.2 洪加火山岩浆成分

较早熔岩流和岩脉的岩石主要呈斑状结构，不同粒度（0.5～2 mm）斑晶的体积分数从几个百分点上升到 30%～40%。前破火山口（pre-caldera）熔岩无明显的斑晶随时间富集的趋势。斑晶主要为斜长石，也有少量单斜辉石和斜方辉石，通常是单矿物晶体，但也见次辉绿交生现象。

相对于汤加火山弧内其他火山的岩浆成分，洪加火山（陆地部分）的玄武安山岩与安山岩整体显示出一个更窄的低钾亚碱性系列趋势（图 3a）。TiO_2、FeO、MnO、Na_2O、K_2O 和 P_2O_5 与 SiO_2 正相关，Al_2O_3、MgO、CaO 与 SiO_2 负相关。早期熔岩与岩墙的岩浆成分变化区间更大，而年轻的火山碎屑物成分局限于安山岩。所有的 2009 年、2014～2015 年喷发物样品都显示出很小的、约± 0.1% 的主元素成分变化，但是不同时空的样品还是显示出了一定的系统性变化趋势（图 3b）。相对于其它喷出物，同源包体给出了最低的 SiO_2 含量和更大的波动性（特别是 MgO 含量）。

痕量元素与主量元素一致显示出分异趋势，岩浆随着演化而亏损相容元素（Ni、Cr、Sc、V、Sr）并富集不相容元素（Ba、Rb、Zr）。2009 年和 2014～2015 年的喷发产物相比更早的喷发物有相对更多的单斜辉石相容元素（例如 V，贫 Fe—Ti 氧化物时）和相对

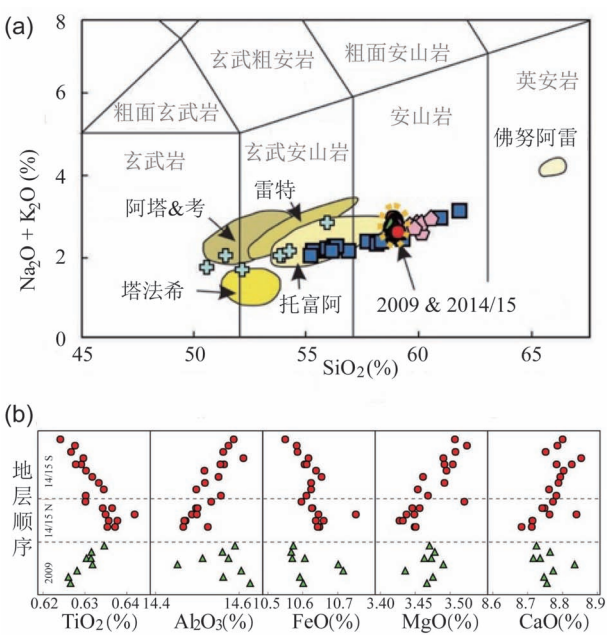


图 3 洪加火山主元素变化

Fig. 3 Variations of major elements inHunga Volcano

（a）TAS 投点图（Le Maitre et al.，2005），并与汤加其他弧火山进行比较；（b）2009 年和 2014～2015 年凝灰岩地层序列全岩化学变化。其中 2014～2015 年样本根据它们在锥体的北部或南部的位置划分为两组，其组成有一定重叠。注意 2009 年和 2014～2015 年所有主要氧化物都在±0.1% 范围内

(a) TAS plots (Le Maitre et al., 2005) and comparison with other Tonga arc volcanoes; (b) Whole-rock chemical changes in stratigraphic sequence in 2009 and 2014～2015. The 2014～2015 samples were divided into two groups based on their position to the north or south of the cone, with some overlap. Note that all the major oxides variation in the 2009 and 2014～2015 samples were limited within arange of ±0.1%

较少的与斜长石相容的元素(如 Sr)。在 SiO_2 较低的熔岩和同源包体里 Eu/Eu * >1,表明有一些斜长石分异。相比近期凝灰岩,造破火山口喷发的公元 1040 ~ 1180 年的火山碎屑具有较弱的 V 富集程度且 Eu/Eu * <1。在原始地幔(McDonough and Sun, 1995)标准化图中,洪加火山岩石有相对 LILE 的富集和 HFSE 的亏损,LREE 相对于 HREE 也是亏损的。

2.3　洪加火山喷发历史

洪加火山海底喷发活动开始于几万年前,主要是大量熔岩的溢出,形成了海底火山的底座。约 1 ka 前和 2 ka 前的两次大规模爆破性喷发形成了山顶破火山口,在此之间发生若干小规模熔岩溢出、熔岩穹丘及爆破性喷发活动,多沿着破火山口环状断裂或谷底断裂发生。

历史记录的洪加火山爆发发生在 1912 年、1937 年、1988 年、2009 年和 2014 年(Siebert et al. , 2010; Cronin et al. , 2017; Colombier et al. ,2018)。前三次都集中在岩石浅滩附近,1988 年火山爆发期间的空中观测显示出三个不同的沿西南方向排列的喷火口。这些历史上的火山爆发只持续了几天,1912 年和 1937 年的活动火山爆发指数 VEI 为 2,1988 年喷发物体积太小,VEI 为 0,没有产生新的陆地(Siebert et al. ,2010; Taylor, 2010)。

早在 2009 年喷发的前 3 周,周围地震的不稳定性就被记录下来了,地震活动表明喷发活动开始时间比第一次视觉报告的时间要早几个小时(Bohnenstiehl et al . , 2013)。当时首先是飞行员和乘客报告了 3 月 17 日 05:05 的喷发(Taylor,2010; Vaughan and Webley,2010)。小船上的乘客报告有两个活跃的喷发区,一个沿着洪加哈派西北海岸线,另一个大约在岛南方 100 m (Smithsonian,2009)。上升的岩浆与海水的相互作用,产生一系列的猛烈爆炸,火山碎屑堆积物分布呈新月形。其中最大的一次爆炸事件将火山灰和蒸汽带到 4~7.6 km 高空(Venzke et al . , 2009),在汤加塔普岛都可见到喷发柱(Vaughan and Webley, 2010)。

喷发最初形成了三个温暖的火山口湖。本次苏特塞式喷发活动的主阶段仅持续了 3 ~ 5 d,蒸汽喷火口脱气作用持续了数周。约 2 个月后,被火山碎屑掩埋的植被开始恢复;约 10 个月后,岛屿面积已经被侵蚀到原来的约两倍,剩下的一个火山口湖温度~68±17 °C。时序图像表明洪加火山的陆地面积在喷发时翻了三倍,在喷发后六个月时被侵蚀了 1/3。在 2015 年 11 月,只有一个北方锥体的残余物还保存在洪加哈派西部海平面以上。结合这些陆地面积和浮岩筏的面积发生的变化,喷发物质的总体积估计为 0.0176 km^3。基于喷发的体积、喷发柱的高度和活动的持续时间,这次喷发被归类为 VEI 2 事件(Bohnenstiehl et al. , 2013)。

2014~2015 年火山喷发始于 2014 年 12 月 19 日(表 1),碎屑物被抛射到几百米高。2015 年 1 月 6 日,在洪加汤加和洪加哈派之间一个新的火山碎屑岛已经高出海面约 70 m。2015 年 1 月 15 日,新锥增长到~ 80m 高度,爆炸性射汽岩浆喷发发生于三个北西—南东向排列的喷火口。喷火口迁移导致了岛的东南边缘部分下切和坍塌。2015 年 1 月 24 日喷发活动停止,留下了一个高约 120 m,宽约 2 km

表 1 2014~2015 年间洪加火山喷发大事记

Table 1 Chronicle of events of Hunga Volcano eruption in 2014~2015

喷发过程	时间	事件特征
开始水下苏特塞式喷发	12 月 19 日	渔民报告火山喷发。
持续陆上喷发	12 月 24~30 日	一直可见蒸汽柱。
造岛喷发	12 月 29 日	岛屿附近白色柱状物和褪色的水域。
	12 月 30 日	有蒸汽柱升起。
火山灰增加	1 月 5 日	火山灰柱上升到海拔 3 km。
	1 月 12 日	黑色火山灰柱上升到 4.9 km。
次布里尼式喷发	1 月 12~13 日	由于持续喷发所产生的火山灰云,汤加的一些国际和国内航班被取消,约 600 名乘客受到影响。一次更大的爆炸,火山灰柱高度 9km,火山喷发周围的水呈血红色。
新岛火山口被改造	1 月 18 日	在一个快速生长的新岛屿上的火山口发生爆炸。
喷发停止	1 月 26 日	洪加火山新形成的火山岛高约 120 m,宽 1.5 km(南北向),长 2 km(东西向)。新岛有一个直径 400~500 m 的火山口。它与洪加哈派在西侧相连,与洪加汤加在北侧有 150~200 m 未连上。火山喷发减弱一周以后, 喷火口不再有气体释放。

的近圆形碎屑锥,并连接到洪加哈派岛。随后火山碎屑堆积物被侵蚀搬运形成了一个连岛沙洲。连岛沙洲在 2015 年 4 月 12 日之前都与洪加汤加相联,并在海浪的侵蚀和搬运下,扩大了范围(Garvin et al.,2018)。这次喷发大事记归纳于表 1,从中可见喷发类型、规模与产物的系统性变化。

3 世纪大喷发

洪加火山 2021 年 12 月至 2022 年 1 月的喷发是该火山千年一遇级别的大喷发,人与火山交互过程可以划分为 4 个阶段:首先是一系列苏特塞式喷发与造岛喷发作为前奏;经过短暂的宁静之后开始了世纪大喷发的主要活动;造成了以火山灰和海啸为主要致灾因素的灾难并引发了人们对全球气候影响的忧虑;而洪加火山喷发却在大喷发之后“悄然无声”地迅速结束了,留给了人们无尽的思考。本文根据全球火山项目(GVP)最新周报的内容,在附录中以火山日记形式,回顾了本次喷发火山与人的互动轨迹。

总结洪加火山本次世纪大喷发过程,在经历整整 6 年的宁静之后,洪加火山于 2021 年年末又重新唤起了人类的关注。12 月 20 日至 30 日的喷发,继承了它的苏特塞式喷发为主的特征,间或有爆炸性强一些的次布里尼式喷发,喷发产物构筑了新的火山碎屑岛,与原已存在的两个主要岛屿连成一片。12 月 31 日至 2022 年 1 月 13 日,总体上可以划分为火山喷发的“宁静期”,这段时间火山活动很少有火山灰降落,而多表现为火山气体与水蒸气的喷发,并且是时断时续的小规模喷发(火山气体为主的喷发柱高度数千米之内,对应着北西向断层控制的火山中心区下沉)。2022 年 1 月 14 日至 1 月 18 日,在经历“比较长的喷发预演”和明显的“能量再储备”之后,洪加火山于 14 日开始了它极为罕见的布里尼式喷发,并于 15 日达到顶峰,构成了千年一遇级别的世纪大喷发。洪加火山本次喷发有三次蘑菇云直径都在平流层内延展了几百千米,前两次分别呈北西向、北东向延长,1 月 15 日的菜花状蘑菇云显示出不同高度上火山灰与大气冲击波的动态向外扩展过程。1 月 19 日至 24 日,重新进入休眠期,似乎是“突然之间”就结束了这次大喷发。应该说,大喷发之前的“预演和停歇”,为管理部门疏散危险区内民众提供了条件。否则,距离火山 5 km 之内居住的 230 位居民,在大喷发时将很难逃厄运。

4 未来趋势讨论

未来火山灾害分析用到的基本原理是将古论今,即根据某座火山过去的喷发历史、喷发行为与过程,结合现在的火山状态来推断未来可能的喷发行为与灾害效应。对于洪加火山未来喷发活动趋势的判断,也离不开对火山本身属性的认定。

4.1 后破火山口喷发活动类型与洪加火山岩浆房的补给

大洋内中性岩浆通常是通过小体积熔岩的逐渐堆积形成海山(Tamura et al., 2019),合适情况下也会形成大型破火山口(Firth et al., 2015; Robin et al., 1995),这时破火山口的形成或改造通常发生在高强度大体积火山喷发(*VEI*>6)情况下(Newhall et al., 2018)。这些事件之间更频繁的火山作用,即所谓的后破火山口(或称间破火山口 post-caldera or intra-caldera)喷发,典型上都是低的喷发体积和强度。在中性破火山口中,后破火山口火山岩的组成范围相比整个火山一般都较窄(玄武岩安山岩/安山岩)。这些成分关系表明洋弧系统中造破火山口的火山作用不一定是由突然的新岩浆的加入引起的,而是跟随着成百上千年的稳定岩浆供应进入火山之下岩浆房和岩浆泄漏引起的。这与通常的大陆模型体系是根本不同的,在大陆模型里构造和岩浆补给、岩浆混合与浮力作用在触发造火山口喷发中发挥着重要作用(Cabaniss et al., 2018; Degruyter et al., 2016; Malfait et al., 2014)。

洪加火山在前破火山口(pre-caldera)、同破火山口(syn-caldera)和后破火山口(post-caldera)喷发的火山碎屑里,结构上简单的斜长石、单斜辉石和斜方辉石斑晶温压计都得到一个深度 5~8 km 的浅层岩浆房(图 4),喷发前岩浆温度多在 966~1096 °C 之间,不同时间喷发的岩浆房内平均水含量多在 4.8%~5.1%(Brenna et al., 2022 表 1)。岩浆房内没有成分分带,不断受到低通量玄武安山岩浆的补给。这个直径超过 5 km 的大型饼状岩浆房内能够迅速地使新输入的岩浆与原有岩浆发生对流式混合形成均匀的岩浆。岩浆房间歇性低强度供给,后破火山口作用具有稳定的安山岩成分,

4.2 海底火山苏特塞式喷发水对岩浆碎屑的淬火与海啸引发机制

海底火山喷发也存在爆破性和溢流式两种形式,除了岩浆中挥发分含量的因素,更主要地取决于喷发位置的海水深度。由于海水对熔岩的冷却效应

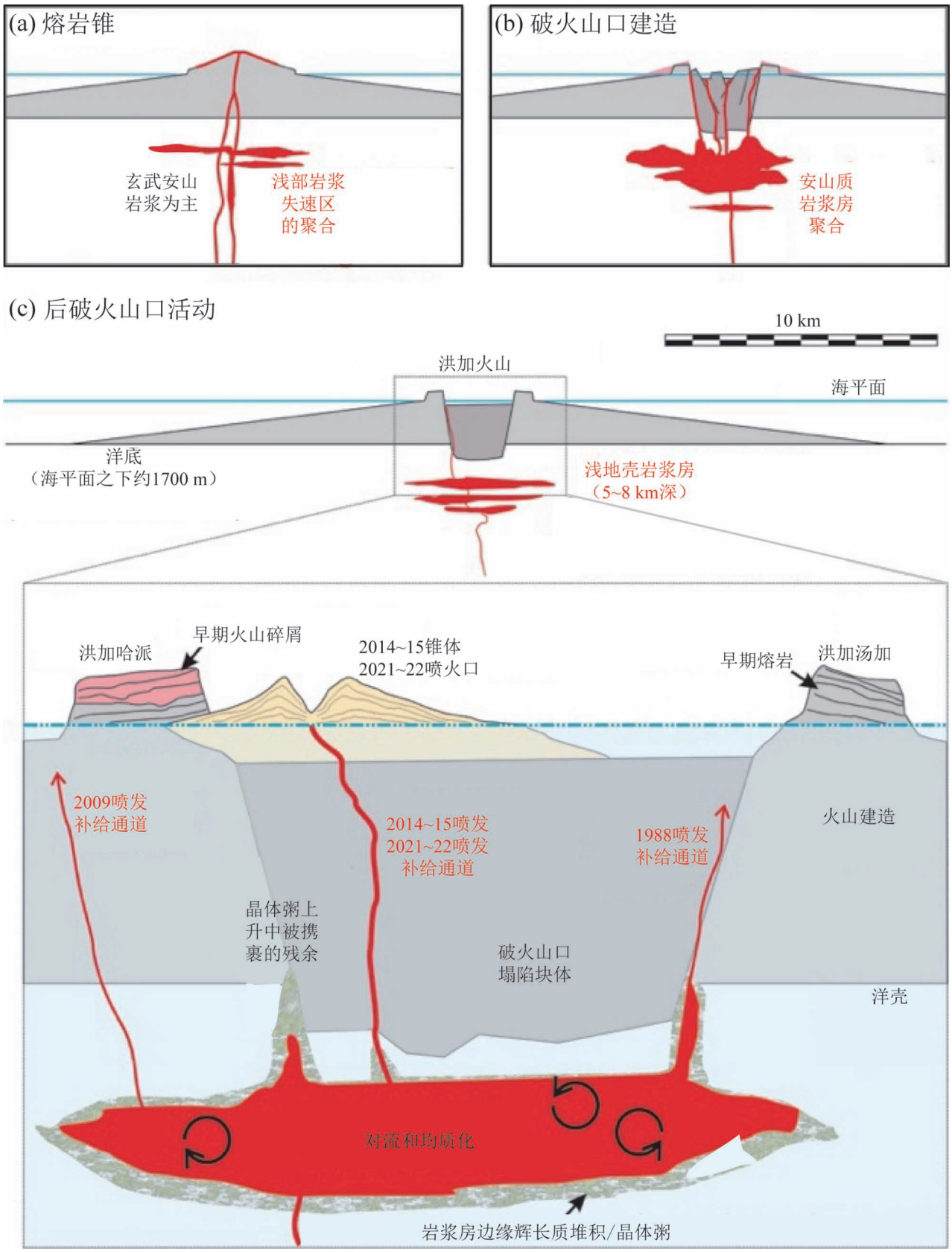


图 4 洪加火山破火山口、岩浆房与火山通道系统(引自 Brenna et al. ,2022)

Fig. 4 Caldera, magma chamber and plumbing system of Hunga Volcano(After Brenna et al. ,2022)

与空气大为不同,使得岩浆与海水接触时的散热过程发生了极大的改变。在深海,岩浆上方水柱压力足够大,岩浆无法炸碎。水对岩浆的淬火作用也十分强烈,所以表现为宁静式溢流,形成枕状熔岩为代表的海底火山岩。有时岩浆未上升到海底,只有渗透性更强的火山气体上升到海底,就表现为经常携带矿物质的海底黑烟囱,如马里亚纳海沟等地所见(Chadwick et al., 2008)。

在个体很大的海底火山顶部或者海水较浅环境的火山,则更可能发生爆破性喷发,通常表现为苏特塞式喷发。苏特塞式喷发是根据冰岛的苏特塞岛1963~64 年喷发而命名的(Thorarinsson, 1967),喷发时具有岩浆遇水爆破式反应的特征(Walker & Croasdale, 1971),其碎屑化和气孔化程度与纯岩浆爆炸有很大不同(Sheridan and Wohletz, 1983)。在深水环境,碎屑化之前的气孔化作用受到水压的阻碍,水对岩浆的高效冷却也阻碍了碎屑化后气泡的生长与聚合,因而产生致密的玻璃质碎屑(LiuYanget al., 2005; Schipper et al., 2011)。而在浅水(水深<200 m)苏特塞式喷发时,火山口上方蒸汽罩(steam cupola)可以使岩浆与海水隔绝。因此,淬火不像在深水情况下那样迅速,对气泡化的影响就可能较小(Kokelaar, 1986)。深海环境喷发时,上覆水柱的压力极大地限制了喷发的爆破性,与海水接触的岩浆表面形成的蒸汽罩被迅速瓦解,使得岩浆与水直接接触,这可以产生极高的冷却速率。从而形成深水环境的片状熔岩玻璃(也称贝蕾藻,Limu o Pelé)。由于洪加火山喷火口水深较浅(远小于 200 m),极易发生苏特塞式喷发。Colombier 等(2018)估计的洪加火山玻璃相转变温度在 535~584°C 之间,碎屑化后浮岩内岩浆水含量为 1.01%。由于喷发物与海水之间厚层蒸汽罩的存在,使得岩浆碎屑可以继续发生气泡化与碎屑化。类似于陆上喷发那样,火山灰伴随着火山气体上冲到平流层内。岩浆与水接触界面上存在稳定的蒸汽膜,并产生莱顿弗罗斯特效应(图 5),促进了岩浆碎屑内部进一步的气孔化,有利于碎屑物上升到更高的高度。

对于这次洪加火山喷发引发海啸的机制,可能性之一是爆炸冲击波,向外扩张的冲击波推动了海面表层海水的向外扩展;可能性之二是浅海环境苏特塞式喷发本身就有向外排走海水的能力,巨大的出口压力使得火山通道顶端喷火口位置产生了极大的水平方向刻蚀力。伴随着低平火山口的形成,海水涌浪向四周扩散,从而形成海啸。

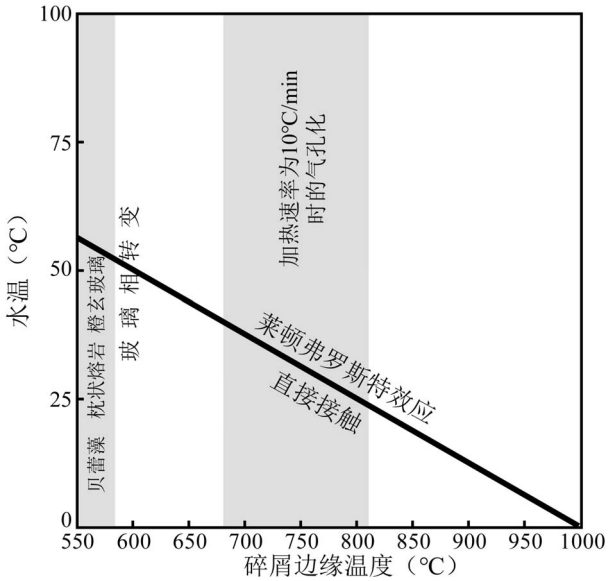


图 5 直接的岩浆—水接触和有稳定蒸汽膜的形成时水和碎屑边缘的温度条件(莱顿弗罗斯特效应;修改自 Dhir & Puhorit, 1978)

Fig. 5 Temperature conditions at the boundary between water and magmatic fragment edges for direct magma—water contacting and the formation of a stable vapor film (modified from Leidenfrost effect; modified from Dhir & Puhorit, 1978)

岩浆与水直接接触时,类似于燃料冷却反应淬火形成玻屑,苏特塞式涌浪由此形成,深水环境形成枕状熔岩橙玄玻璃等;有蒸汽膜存在时,会有更多低密度高温岩浆碎屑(浮岩、火山灰)上升至喷发柱更高位置

When magma is in direct contact with water, similar tothe fuel cooling reaction quenching to form glass shards, Surtseyan surge formed, and pillows or palagonites formed in deep water; in the presence of vapor film, more low-density and high-temperature magmatic fragments (pumice, ash) rises to higher positions in the eruption column

4.3 类比性评判分析

参照类似火山的喷发行为,类比推测目标火山未来的可能行为,也为火山灾害研究提供一个“它山之石”的借鉴。造破火山口喷发之后,后续喷发的时间间隔分两种:一种情况是当后续岩浆补给连续性好且补给的岩浆通量较大时,大喷发之后很快就会发生新的火山喷发,表现为中央穹丘或破火山口边缘断裂控制的熔岩穹丘或熔岩流,就像圣海伦斯火山那样。另一种情况是后续岩浆补给量过小,即使有岩浆上升,通常也只能上侵到浅部形成潜火山岩。地表长时间内见不到火山喷发,火口湖则可能应运而生,就像长白山天池火山和菲律宾皮纳图

博火山表现的那样。对于洪加火山,这次大喷发之后,究竟是紧接着发生后续小规模造穹喷发或熔岩溢出?还是长时间内不见火山喷发?这主要取决于深部岩浆的补给速率,而根据 Brenna 等人(2022)最新研究成果,洪加火山岩浆房下部的岩浆补给速率并不高,有充裕的时间在岩浆房内发生对流扩散等均一化吸收过程。现有监测资料也见不到深部岩浆有运移现象,这也意味着近期不太可能发生后续喷发。虽说目前还没有喷发后岩浆房内空虚情况的资料,但是喷发后火山顶部的整体下沉是肯定的,残余洪加汤加岛、洪加哈派岛数十米的下沉和新建火山岛的重新沉入水下的过程,就表明了这种过程。地震监测资料也指示了破火山口内部块体调整重力负荷的过程,预计稳定一段时间之后,将会再次发生小规模的爆破性或溢流及侵出式喷发。喷发地点不会再局限于破火山口靠西北部位,在破火山口东侧、南侧火口缘及中心位置,都是潜在喷发点,就如图 2 指示的东侧火口缘熔岩穹丘与东南侧的 1921 年和 1937 年喷火口位置所示。具体喷发地点需要届时根据详实的地震、形变等监测资料来判断。未来洪加火山喷发形式,一种可能是沿着破火口周边断裂或近中央地带的熔岩穹丘,这可能伴随着地形抬升而发生;也可能是北西向岩墙补给的熔岩溢出,就如图 1b 海底火山地形显示的北西向岩墙指示的那样;洪加火山目前还保持着浅水环境海下火山的特性,岩浆内挥发分含量也会保持高位,未来喷发时附带次布里尼式喷发的苏特塞式喷发就会比较常见,但是爆炸规模应该不大于 VEI 2 级,因为洪加火山历史上的后破火山口喷发很少有超过 VEI 2 以上的规模。类似于印尼克拉克托火山 2018 年喷发时的情形,大气冲击波、射汽岩浆喷发和火山山体滑坡引起的海啸也是可能的灾害类型(https://www.oysteinlundandersen.com/krakatau-volcano-witnessing-the-eruption-tsunami-22december2018/)。

虽然现在的洪加火山已不再喷发,但是火山本身还是活动的。类似于陆地上造破火山口喷发之后的硫质喷气阶段(Solfatara Stage)火山行为一样,在洪加火山大量的火山脱气过程还会持续一段时间。只不过由于在海平面以下,这些脱气过程不易为世人所常见。脱气成分不以富 S 质为主,而是更富 CO_2 成分。鉴于此,洪加火山及周围海水环境可能会受到影响,海水褪色、海洋叶绿素 a 浓度(OCC)和海洋表面温度(目前可能的拉尼娜现象趋势)都可能发生波动。特别是以束毛藻为主导的海洋叶绿素浓度,很可能由火山灰的海洋施肥作用和海洋表面温度的上升作用而引起,就像附近的礁石之家火山 2006 年 8 月喷发后所表现出来的那样(Mantas et al., 2011)。作为本文的结尾,推测洪加火山未来苏特塞式喷发时,小规模造岛、火山闪电是大概率事件,并且不止一个喷火口同时喷发。

致谢:本文承蒙地质论评编辑部章雨旭副主编约稿,综述资料中除了所列主要参考文献外,也汇集了全球火山项目(GVP)相关网站及 CCTV 电视画面等内容。审稿专家对论文初稿提出了很好的中肯的建设性的修改意见,在此一并感谢。

附录:洪加火山世纪大喷发日记(原始资料主要引自全球火山项目最新周报和 CCTV 报道画面)

2021 年 12 月 20 日 9:35(当地时间,以下同),海底火山喷发开始,富蒸汽和火山灰的烟柱高达 6 km。

9:40,烟柱上升到 16 km 并向北漂移。喷发后 12 h 内整晚都听到爆炸声并可见闪电。喷发所释放的 SO_2 气体约 9 kt。瓦瓦乌岛最初 1~2 h 内每分钟都听到几次爆炸声,之后爆炸声断断续续。

12 月 21 日 02:00 左右,无火山灰释放,之后断断续续的火山灰和闪电持续一天。喷发柱高度 6.1~12.2 km,飘向北和东北方向。

12 月 22~28 日,20 日开始的喷发一直在持续。其中 22~23 日弥散火山灰的连续气体—蒸汽柱高 6.1~12.2 km,飘向东北。

12 月 22 日,苏特塞式喷发,火山灰高 350 m,喷火口与 2014 年喷发同位置(附图 1a)。大量 SO_2 向东北偏北扩散,覆盖了哈派、瓦瓦乌和纽阿托普塔布群岛。

12 月 23 日,SO_2 浓度最高,主要向东北方向扩散。

12 月 24 日,喷发柱断断续续上升到 10.4 km,有时高达 12.2 km。设立警戒带,禁止进入火山口 5 km 以内。

12 月 25 日,岛屿在东侧上升 300~600 m,火山灰落在半径 10 km 的范围内。

12 月 25~28 日,蒸汽和气体柱上升了 9.1~12.2 km,并向北和东北方向漂移,火山灰柱的下部富含火山灰,高达 3 km(附图 1b)。火山灰仅降落火山附近。

12 月 27~28 日,气体和蒸汽云在火山之上海拔 1~18 km 向东漂移。警告居民保护水库,防酸雨。

12 月 28 日,所有航班取消。

12 月 28~29 日,几次苏特塞式涌浪,有的持续半小时。气体、蒸汽与火山灰柱至少升高到 12.2 km,向北飘散,但是喷发柱富灰部分高度要低一些。降灰局限于岛上。

12 月 30 日,海水褪色,浮岩筏见于岛周边(自喷发开始时就已见到)。白天都可见到蒸汽—气体柱,偶尔有碎屑抛

出物。喷发柱升高到 12 km 飘向 NNE。

12 月 31 日上午,间歇性火山灰、蒸汽—气体柱升高到 3 km,但是蒸汽—气体部分升高到 18 km,中午前后开始不见火山灰。

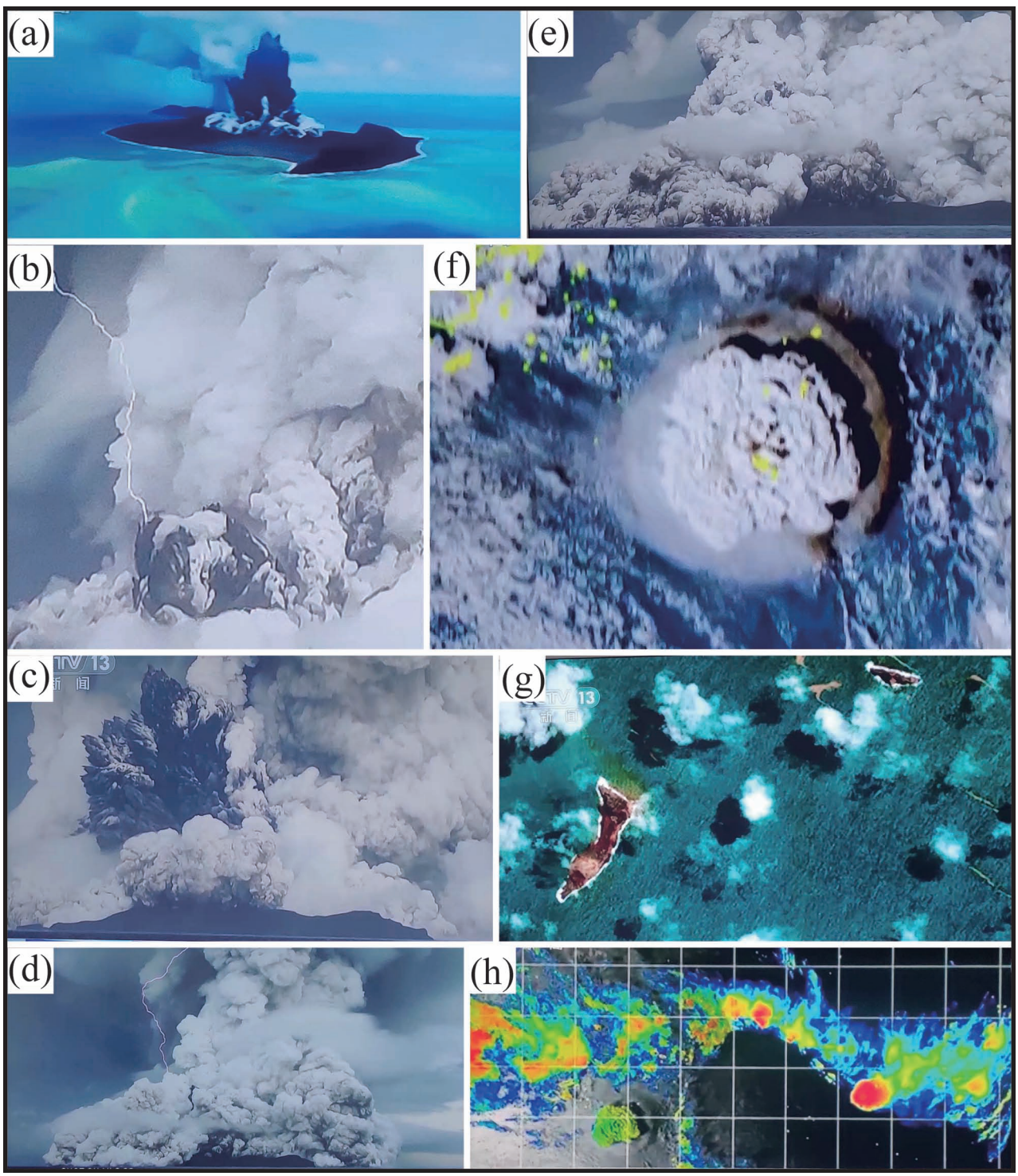
2022 年 1 月 1~2 日,偶尔可见蒸汽气体柱。其中 2 日 22:20~22:30 有一股小型火山灰柱升至 6~7 km,向北漂移 10 km,沿途高度下降。

1 月 3~13 日,大喷发前较为宁静。其中 3 日由于一股气旋而看不清火山。

1 月 14 日 4:20 陆上喷发蘑菇云,灰汽气柱升至 20 km 到达平流层,顶部直径 200 km,造成了显著的区域影响。

17:00~18:30,喷发柱底部约 5 km 宽,苏特塞式鸡尾构造脉冲(附图 1c),海面上扩展火山碎屑流(附图 1d)。SO_2 气体释放 50 kt(5 万吨),首都摩图塔普岛和乌阿岛都有硫磺气味。汤加气象局发布了海啸警报。

20:00 努库阿洛法记录到 20 cm 的海啸。喷发柱漂浮在汤加塔普、尤阿、哈派和瓦瓦乌群岛上空。许多岛屿上都报告降落火山灰。



附图 1 2021~22 年世纪大喷发照片

Appendix Fig. 1 2021~22 centurial eruption photos

(a)洪加哈派岛与洪加汤加岛之间的苏特塞式喷发新生岛屿把三岛连接起来,两个喷火口同时喷发,新喷火口喷出的火山碎屑多而呈黑色;(b)喷发柱不同颜色显示不同火山灰含量,下部火山灰含量高;(c)火山通道加宽或新开火山通道喷出大量火山碎屑而形成极富火山碎屑物的鸡尾构造;(d)喷发柱部分塌陷形成的火山碎屑流越过洪加哈派岛继续在海面上扩展;(e)火山闪电与蒸汽(白色)—气体(浅灰色)—火山灰柱(灰色)分层;(f)喷发柱顶部菜花云,底部气爆冲击波携带少量火山灰辐射全球;(g)大喷发刻蚀岛屿表层岩石和植被,加上喷发后整体下沉致使原 2 km 长的两个岛屿残留长度仅为约 200m 和 700 m,海面上浅黄色条带为浮岩筏;(h)喷发柱顶部在平流层内向西扩散几乎环绕地球,红色指示 SO_2 含量高。

(a) Surtseyan eruptions newborn island between Hunga—Harpai Island and Hunga—Tonga Island connecting the three islands, two vents erupt at the same time, the new vent spewed a lot of black pyroclasts. (b) Different colors of the eruption column show different ash content, and the lower part has high ash content. (c) A large amount of pyroclasts are ejected from the widening or newly opened conduits to form the cocktail structure with highly pyroclastic materials. (d) Pyroclastic flows formed by the partial collapse of the eruption column continue to spread over the sea after passing over Hunga—Harpai Island. (e) Volcanic lightning layered with steam (white) — gas (light grey) — ash column (grey). (f) The cauliflower cloud at the top of the eruption column, and the airburst shock wave at the bottom carrying a small amount of ash radiating around the world. (g) The great eruption etched the surface rocks and vegetation of the island, and combined with the overall subsidence after the eruption, the residual lengths of the two islands with the original length of 2 km were only about 200 m and 700 m respectively. The light yellow bands on the sea surface were pumice rafts. (h) The top of eruption column expands westward in the stratosphere and almost encircles the earth. Red color indicates high SO_2 content

1 月 15 日 00:43~06:04,间歇性喷发,柱体最高 14 km。21 h 之内(14 日 03:34~15 日 1:34)191309 次闪电(附图 1e),多达每小时 30000 次。

7:20,一次持续 10~15 分钟的火山灰柱高达 14 km,向东飘移。

17:00,一次更大的喷发开始了,喷发柱进入平流层,最大高度 30 km 以上。有人根据更低的碎屑物表面温度估计了喷发柱最大高度曾达到了 58 km,但是这个结果很可能受到了所采用的大气模型适用范围的限制,也没有考虑到喷发时不同时间段里大量的冷的围岩碎屑加入的影响,从而导致了过高的高度估计值。喷发前约 2 h,本次喷发新造岛的中间部分沉入海底。喷发时向大气中发送了世界级压力波(附图 1f),引发了横跨太平洋的海啸。努库阿洛法居民听到多次巨大爆炸声并看到大规模喷发柱,火山灰覆盖汤加群岛所有岛屿。地质人员乘军舰观测到海上火山碎屑流。海底电缆断裂。

18:19,烟柱上升到 15.2 km。

19:03,喷发柱顶部直径至少有 600 km 宽。海啸导致秘鲁两名渔民死亡和 6000 桶石油泄漏,美国加州两名渔民受伤。

17:19~23:00,近 40 万次闪电事件,其中 20 万次发生在 18:00~19:00 之间。不列颠哥伦比亚省海岸的海浪高度为 16~29 cm。

1 月 16 日 03:43,惠灵顿火山灰咨询中心估计的烟柱上升到 19.2 km,也有资料表明烟柱可能上升到 30 km。释放 SO_2 质量 400 kt (40 万吨)。灰云随平流层风向西漂移。汤加东部 70~100 km 岛屿火山灰灾害严重,使一些居民呼吸困难。

1 月 17 日,先前合并的岛屿大部分已被摧毁,只留下长 200 m 的洪加汤加岛和长 700 m 的洪加哈派岛(附图 1g)。在阿拉斯加最高海浪高度为 20~100 cm。海啸在秘鲁造成了 2 人死亡。新西兰北岛和查塔姆群岛多艘船只被摧毁。日本数千人撤离,海浪高达 80 cm,扰乱了火车、航班,破坏了港口和船只。火山灰污染了淡水供应,阻碍了海上运输和港口的进出,并导致航班取消。阿塔塔小岛已经完全被淹没。多重冲击波,最大爆炸冲击波传播到整个地球。在斐济、新西兰、阿拉斯加都能听到音爆。加勒比海记录到的气象海啸(meteotsunamis)由压力波造成,太平洋周边几个国家发布海啸预警。与外岛联系已完成,一些偏远岛屿的疏散正在进行。

1 月 18 日,火山灰延误了损失评估和救援工作。报告 2~15 m 的海啸在汤加塔普岛西海岸、尤阿岛、哈派岛发生,导致 3 人死亡,多人受伤。大多数国内和国际通讯都被切断,多地报告了重大损失。飞行考察附近岛屿褐色裸岩,植被和景观被毁。

1 月 19~22 日,烟柱继续在海拔 12.8~19.2 km 的高度上主体向西漂移。SO_2 的信号还很强(附图 1h),但火山灰很分散,很难与气象云层区分。

1 月 19 日 13:00,15 日大爆发后没有其他喷发事件。15 日的喷发云团继续在平流层内向西漂移至澳大利亚。平面展布自 15 日 17:39 的 18000 km^2 到 19 日 13:00 的 1200 万 km^2。

1 月 21 日,海面上浮岩筏阻碍了海上运输。国内航班仍然暂停,但运送救济物资的国际航班能够降落,并对损失进行了空中调查。一艘修复船正在前往受损海底光缆的途中。大喷发停止 5 天后,国际人道主义援助抵达

了这些岛屿。岛屿间和国际通信部分恢复。

1 月 22 日,喷发烟柱的前缘环绕南半球到了非洲的东岸。21:50 已经无法检测到火山灰。

1 月 23 日,居民从皮罗莱乌机场跑道上扫除灰尘。新闻分享幸存见闻,并展示岛屿周围受损的图像。

1 月 24 日,自喷发开始到 1 月 24 日,火山附近发生了数十次 4.5~5 级地震。它们可能代表了火山爆发后沿现有断层的构造移动,而不是地下岩浆的运移。

2 月 3 日,开始修复海底光缆。至 2 月 21 日,海底光缆已修复,22 日互联网连接已恢复,但位于火山附近的一条国内电缆仍可能需要数月才能修复。有研究成果显示:1 月 15 日大喷发时模拟的岩浆源区岩浆体积变化量约在 4.3 km^3 左右。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

Ballance P F, Ablaev A G, Pushchin I K, Pletnev S P, Birylina M G, Itaya T, Follas H A, Gibson G W. 1999. Morphology and history of the Kermadec trench—arc—backarc basin—remnant arc system at 30 to 32 S: geophysical profile, microfossil and K-Ar data. Marine Geology, 159: 35~62.

Bohnenstiehl D R, Dziak R P, Matsumoto H, Lau T-K A. 2013. Underwater acoustic records from the March 2009 eruption of Hunga Ha'apai—Hunga Tonga volcano in the Kingdom of Tonga. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 249: 12~24.

Brenna M, Cronin S J, Smith Ian E M, Pontesilli A, Tost M, Barker S, Tonga'onevai S, Kula T, Vaiomounga R. 2022. Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific. Lithos(in press); https://doi. org/10. 1016/j. epsl. 2004. 08. 009

Bryan W, Stice G, Ewart A. 1972. Geology, petrography, and geochemistry of the volcanic islands of Tonga. Journal of geophysical research, 77: 1566~1585.

Bryan S E, Cook A, Evans J P, Colls P W, Wells M G, Lawrence M G. 2004. Pumice rafting and faunal dispersion during 2001~2002 in the Southwest Pacific: Record of a dacitic submarine explosive eruption from Tonga. Earth and Planetary Science Letters, 227(1~2): 135~154.

Cabaniss H E, Gregg P M, Grosfils E B. 2018. The role of tectonic stress in triggering large silicic caldera eruptions. Geophysical Research Letters, 45: 3889~3895.

Chadwick Jr W W, Cashman K V, Embley R W, Matsumoto H, Dziak R P, de Ronde C E J, Lau T K, Deardorff N D, Merle S G. 2008. Direct video and hydrophone observations of submarine explosive eruptions at NW Rota-1 volcano, Mariana arc. J. Geophys. Res., 113: B08S10.

Colombier M, Scheu B, Wadsworth F, Cronin S, Vasseur J, Dobson K, Hess K U, Tost M, Yilmaz T, Cimarelli C. 2018. Vesiculation and Quenching During Surtseyan Eruptions at Hunga Tonga—Hunga Ha'apai Volcano, Tonga. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123: 3762~3779.

Cronin S, Brenna M, Smith I, Barker S,Tost M, Ford M, Tonga'onevai S, Kula T, Vaiomounga R. 2017. New volcanic island unveils explosive past. Eos, Transactions American Geophysical Union 98: 18~23.

Degruyter W, Huber C, Bachmann O, Cooper K M, Kent A J. 2016. Magma reservoir response to transient recharge events: The case of Santorini volcano (Greece). Geology, 44: 23~26.

Dhir V K, Puhorit G P. 1978. Subcooled film-boiling heat transfer from spheres. Nuclear Engineering and Design, 47(1): 49~66. https://doi. org/10. 1016/0029-5493(78)90004-3

Firth C W, Cronin S J, Turner S P, Handley H K, Gaildry C, Smith I. 2015. Dynamics and preeruptive conditions of catastrophic, ignimbrite producing eruptions from the Yenkahe Caldera, Vanuatu. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 308: 39~60.

Garvin J B, Slayback D A, Ferrini V, Frawley J, Giguere C, Asrar G R, Andersen K. 2018. Monitoring and Modeling the Rapid Evolution of Earth's Newest Volcanic Island: Hunga Tonga Hunga Ha'apai (Tonga) Using High Spatial Resolution Satellite Observations. Geophysical research letters, 45: 3445~3452.

Katz H R. 1974. Margins of the Southwest Pacific. In: Burk CA, Drake CL (Editors). The Geology of Continental Margins. New York: Springer-Verlag, 549~565

Kokelaar P. 1986. Magma—water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanism. Bulletin of Volcanology, 1: 275~289.

LeMaitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas M, Bonin B, Bateman P. 2005. Igneous Rocks: a Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.

LePichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. J. Geophys. Res., 73: 3661~3697

Liu Yang, Zhang Youxue, Behrens Harald. 2005. Solubility of H_2O in rhyolitic melts at low pressures and a new empirical model for mixed H_2O — CO_2 solubility in rhyolitic melts. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 143 (1~3): 219~235. https://doi. org/10. 1016/j. jvolgeores. 2004. 09. 019

Malfait W J, Seifert R, Petitgirard S, Perrillat J-P, Mezouar M, Ota T, Nakamura E, Lerch P, Sanchez-Valle C. 2014. Supervolcano eruptions driven by melt buoyancy in large silicic magma chambers. Nature Geoscien, 7: 122~125.

Mammerickx J, Chase T E, Smith S M and Talor I L. 1971. Bathymetry of the South Pacific. Scripps Institution of Oceanography, University of California.

Mantas V M, Pereira A J S C, Morais P V. 2011. Plumes of discolored water of volcanic origin and possible implications for algal communities. The case of the Home Reef eruption of 2006 (Tonga, Southwest Pacific Ocean). Remote Sensing of Environment, 115: 1341~1352. doi:10. 1016/j. rse. 2011. 01. 014

McDonough W F, Sun S-S. 1995. The composition of the Earth. Chemical geology, 120: 223~253.

Murtagh R M, White J D L. 2013. Pyroclast characteristics of a subaqueous to emergent Surtseyan eruption, Black Point volcano, California. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 267:75~91. https://doi. org/10. 1016/j. jvolgeores. 2013. 08. 015

Newhall C, Self S, Robock A. 2018. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. Geosphere, 14: 572~603.

Richard J J. 1962. Catalogue of the Active Volcanoes of the World Including Solfatara Fields, part 13, Kermadec, Tonga, and Samoa. Rome: International Association of Volcanology.

Robin C,Eissen J P, Monzier M. 1995. Mafic pyroclastic flows at Santa Maria (Gaua) volcano, Vanuatu: the caldera formation problem in mainly mafic island arc volcanoes. Terra Nov 7: 436~443.

Sameshima T. 1975. Silica indices of volcanoes in and around New Zealand with reference to volcanic zones in the North Island. N. Z. J. Geol. Geophys., 18: 523~539

Schipper C I, White J D L, Houghton B F. 2011. Textural, geochemical, and volatile evidence for a Strombolian-like eruption sequence at Lō'ihi Seamount, Hawai'i. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 207(1~2): 16~32. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.08.001

Sheridan M F, Wohletz K H. 1983. Hydrovolcanism: basic considerations and review. Journal of Volcanololgy and Geothermal Research, 17(1): 1~29

Siebert L, Simkin T, Kimberly P. 2010. Volcanoes of theWorld, 3rd edition. Smithsonian Institution, 551.

Simkin T, Siebert L. 1994. Volcanoes of the world—a regional directory, gazeteer and chronology of volcanism during the last 10, 000 years, 2nd eds. Global Volcanism Program. Smithsonian Institution, Washington, DC 348.

Smith I E, Price R C. 2006. The Tonga—Kermadec arc and Havre—Lau back-arc system: their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific. Journal of volcanology and geothermal research, 156: 315~331.

Smithsonian Institution, Global Volcanism Program. 2009. Report on Hunga Taonga—Hunga Haapai (Tonga). Bull. Global Volcanism Network, 34(3): https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200903-243040

Tamura Y, Gill J B, Tollstrup D, Kawabata H, Shukuno H, Chang Q, Miyazaki T, Takahashi T, Hirahara Y, Kodaira S. 2009. Silicic magmas in the Izu—Bonin oceanic arc and implications for crustal evolution. Journal of Petrology, 50: 685~723.

Taylor P. 2010. The March 2009 eruption of the Hunga Tonga and Hunga Ha'apai Volcano, Kingdom of Tonga. SOPAC Report 717b, abstract 2010~46.

Thorarinsson S. 1967. Surtsey. The New Island in the North Atlantic. The Viking Press, New York, pp. 47.

Vaughan R G, Webley P W. 2010. Satellite observations of a surtseyan eruption: Hunga Ha'apai, Tonga. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198: 177~186 http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.08.017.

Venzke E, Sennert S K, Wunderman R. 2009. Reports from the Smithsonian's Global Volcanism Network, February 2009. Bulletin of Volcanology, 71: 713~714.

Walker G P L, Croasdale R. 1971. Characteristics of some basaltic pyroclastics. Bulletin Volcanologique, 35(2): 303~317. https://doi.org/10.1007/BF02596957

The past and present activities of Tonga's Hunga Volcano

WEI Haiquan, CHEN Zhengquan

National Observation and Research Station of Jilin Changbaishan Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029

Abstract: The Hunga volcano, located in the New Zealand—Kermadek—Fiji subduction zone, reactived in late 2021 and had a millennium-scale centurial eruption on January 14 and 15, 2022. The plume penetrated into the stratosphere, forming a plume with 30 km high and 800 km wide at top. The gas—ash cloud circled almost all around the southern hemisphere. The tsunami caused by this eruptive event brought damage in many places around the Pacific coast. According to the existing data the magma composition of Hunga volcano is mainly andesite, and the magma may be driven by the "leakage" of gas-rich magma masses along the edge of the caldera. One of the most important significances of the Hunga eruption is that it produced an extremely strong atmospheric shock wave, which implies a great enrichment of volcanic gases within the magma. It is this eruption of "super-rich gases" that creates an outlet pressure of well over one barometric pressure at the crater, triggering a shock wave that radiates across the globe and an eruptive sound that can be heard thousands of kilometers away. The tsunami was triggered by an outward spreading shock wave in the atmosphere, which pushed the surface water outward. Another mechanism for this tsunami is that Surtseyan eruptions have the ability to expel water outwards. Eruptions of Hunga in future are likely to take the form of lava domes or flows along the perimeter of the caldera rim or near the central depression of the caldera. Surtseyan eruptions are common, but not on a large scale.

Keywords: Marine volcano, Surtseyan eruption, Caldera, Gas-rich magma, future eruption

Acknowledgement: We appreciate Editor ZHANG Yuxu for the invitation and improvement of this paper. This work is supported by the National Science Foundation of China (41802252) and the National Nonprofit Fundamental Research Grant of China, Institute of Geology, China, Earthquake Administration (IGCEA1703)

The author: WEI Haiquan, male, born in 1958, professor, works on volcanology. Email: 1375284615@qq.com

Manuscript received on: 2022-02-20; Accepted on: 2022-03-28; Network published on: 2022-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.05.025 **Edited by**: ZHANG Yuxu