

汤加火山的构造背景及其“1·15”大喷发过程的初步观测分析

范兴利

(成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;
成都理工大学地球物理学院, 成都 610059)

摘要: 2022年1月15日南太平洋海域的汤加火山大喷发引起了全球关注。此次喷发事件的火山喷发指数(VEI)预估在5级左右,触发的海啸和释放的火山灰等火山碎屑物质对汤加的其他地区造成了灾难性的破坏,引起的海啸波对环太平洋沿岸地区也造成了不同程度的影响。本文对汤加火山所处的大地构造背景进行了简要概括;结合前人的资料,对汤加火山破火山口的结构进行了详细的描述;基于初步观测数据,对此次火山喷发的量级和对全球气候产生的潜在影响进行了简要分析;最后对我国境内以长白山天池火山为代表的活动火山的分布及其监测情况做了概述性介绍。

关键词: 汤加;火山喷发;海啸;火山爆发指数;火山监测

中图分类号: P317 **文献标识码:** A

TECTONIC BACKGROUND OF TONGA VOLCANIC REGION AND PRELIMINARY ANALYSIS FOR ITS EXPLOSIVE ERUPTION ON JANUARY 15, 2022

FAN Xing-li

(Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques of the China Ministry of Education,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The explosive eruption of Tonga volcano in the South Pacific region on January 15, 2022 attracted global attention. The volcanic explosivity index of this event is estimated to be around level 5. The triggered tsunami, volcanic ash and other pyroclastic materials have caused tremendous damage to the adjacent Tonga area, and the tsunami wave has also resulted in varying degrees of impact on the Pacific Rim. This paper briefly summarizes the tectonic background of Tonga volcano. Combined with the previous data, the structure of Tonga volcanic caldera is presented in detail. Based on the preliminary observation data, the magnitude of this volcanic eruption and its potential impact on the global climate are analyzed. Finally, the distribution and monitoring status of active volcanoes in China such as Changbaishan volcano are briefly introduced.

收稿日期: 2022-01-25 **改回日期:** 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助(42004033);广东省基础与应用基础研究基金资助(2019A1515110307);吉林长白山火山国家野外科学观测研究站资助(NORSCBS20-05)

Key words: Tonga; volcanic eruption; tsunامي; volcanic explosivity index; volcanic monitoring

北京时间 2022 年 1 月 15 日 12 时 27 分,南太平洋汤加地区的洪阿哈阿帕伊岛(Hunga Tonga-Hunga Ha'apai)海底火山(以下简称汤加火山)发生了大规模爆炸式喷发活动。此次火山喷发非常壮观,火山灰柱“直冲云霄”,整个过程被卫星清晰地记录下来(图 1)。火山爆发形成的冲击波在全球范围内传播,世界多个地方都监测到了大气压的异常变化^[1],海底喷发触发的海啸对靠近火山的汤加地区造成了严重破坏,对环太平洋沿岸地区包括斐济、新西兰、澳大利亚、菲律宾、日本、美国西海岸等地也都产生了不同程度的影响。空气中飘散的火山灰/气以及沉降的火山灰等其他火山碎屑物质严重污染了汤加地区的空气和地表水源,直接威胁到附近居民和动植物的生命安全。此次汤加火山之所以发生如此剧烈的喷发活动与它所处的地质构造背景密切相关。



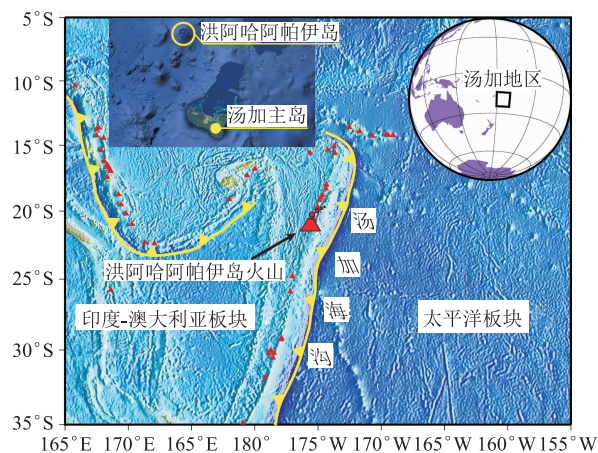
图 1 2022 年 1 月 15 日汤加火山大喷发形成的火山灰柱“蘑菇云”(由 himawari8 卫星观测得到)

1 汤加火山所处大地构造背景

如图 2 所示,此次发生剧烈喷发的汤加火山在地理上位于南太平洋海域(南纬 20.55°,西经 175.39°),南距汤加主岛(汤加塔布岛,汤加王国首都努库阿洛法所在地)65 km,西距斐济 650 km,西距澳大利亚 2 100 km,西南距新西兰 1 770 km。该火山处于太平洋板块和印度-澳大利亚板块交界附近,属于典型的岛弧型火山。东部的太平洋板块在汤加海沟处西向俯冲于印度-澳大利亚板块之下,南北向狭长展布的汤加海沟平均水深 6 000 m,最深处达 10 882 m,是仅次于马里亚纳海沟的全球第二深海沟,也是地球上(深源)地震和火山活动最频发的地带之一^[2]。

图 3 是岛弧火山的形成示意图,当密度较大的大洋板块(例如太平洋板块)在海沟处向地球深部俯

冲时,随着温度和压力的升高,在某一深度位置(100 km 上下),俯冲板片(包含水、沉积物和蚀变洋壳)会发生脱水熔融作用,形成富含挥发分的岩浆向上运移至地表后喷发形成岛弧火山^[3]。此次发生大喷发的洪阿哈阿帕伊岛就位于与汤加海沟近乎平行的火山弧上(图 2)。与地球上其他一些岛弧火山类似,汤加火山一直以来都比较活跃,以近些年为例,汤加火山在 2009 年 3 月份发生过一次较大喷发,喷发的火山柱有 7.6 km 高,对当地的航空运输造成了影响,2014 年和 2015 年也有显著的喷发活动^[4]。2021 年 12 月份汤加火山开始出现相对较小规模喷发,2022 年 1 月 14 日开始大规模喷发,1 月 15 日发生了此次爆炸式剧烈喷发。



黄色锯齿状曲线表示海沟的位置,红色小三角代表岛弧火山,带拖尾的红色火山标志表示洪阿哈阿帕伊火山(汤加火山)。左上角子图(谷歌地图卫星影像数据)给出了发生火山喷发的洪阿哈阿帕伊岛与汤加主岛的位置分布。右上角子图显示了汤加地区在大尺度地图里的地理位置分布。

图 2 汤加火山及其邻区构造背景图

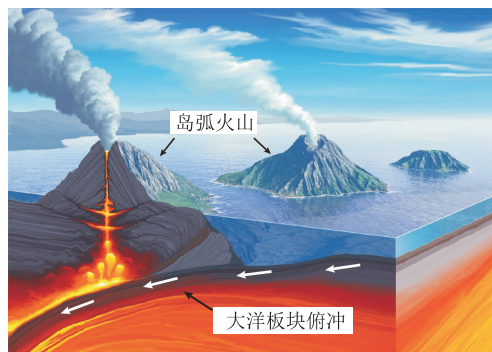
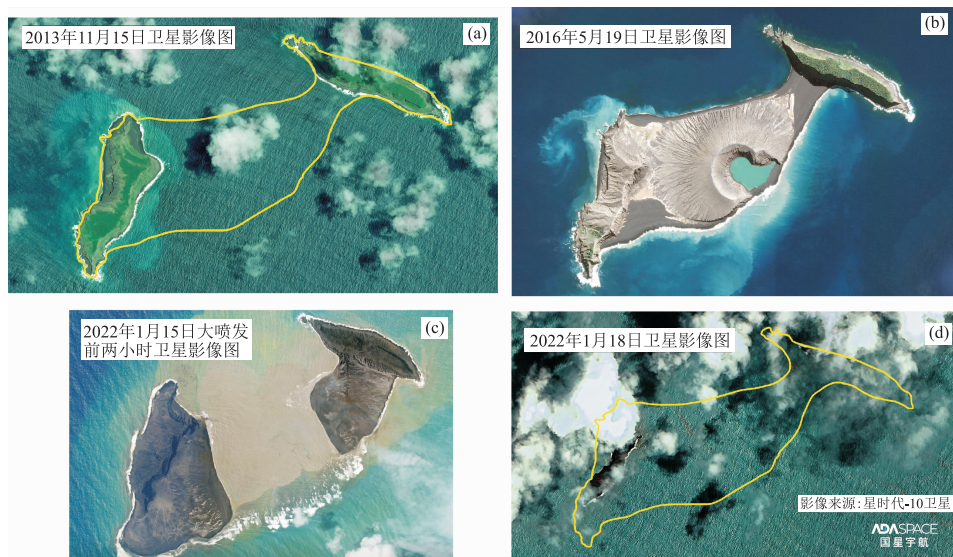


图 3 岛弧火山形成机制示意图
(修改自 <https://worldbuildingschool.com/landscaping-your-world-map/>)

2 汤加火山破火山口结构

组成汤加火山的洪阿哈阿帕伊岛在 2014 年之前实际上是两个相邻但完全孤立的岛,分别被称为洪阿·汤加岛(Hunga Tonga)和洪阿·哈阿帕伊岛(Hunga Ha'apai),在汤加语中,‘Hunga(洪阿)’就是火山喷发的意思。2013 年 11 月 15 日的卫星影像图(图 4a)上可以清晰地看到这两个独立存在的岛,这两个岛屿是 2009 年 3 月的火山活动及其更早期的火山喷发活动形成的,此次大喷发前的卫星影像资料(图 4a 和图 4b)上还能观察到岛上覆盖的植被。2014~2015 年间该地区的火山喷发活动产物直接将原本分离开来的洪阿·汤加岛和洪阿·哈阿帕伊岛连接在了一起(图 4b),从表面上看似火山喷发中心就位于这两座岛屿之间。实则不然,从海

底三维地形图(图 5b)中我们可以清楚看到,这座火山的破火山口主体部分其实隐藏在海水面之下,洪阿·汤加岛和洪阿·哈阿帕伊岛只是它露出水面的边缘部分(图 5a)。尽管这座火山近些年来一直有喷发,但主要是火山口边缘地带小规模火山活动而已。2022 年 1 月 14 日较大规模喷发之后,1 月 15 日大喷发前两小时的卫星影像图(图 4c)表明两座岛屿中间发生了塌陷,这预示着海水可能大量倒灌进入了塌陷区深部,为接下来整个破火山口发生大规模的爆炸式喷发注入了物质和能量。成都国星宇航科技有限公司提供的最新卫星影像资料(图 4d)显示,洪阿·汤加岛、洪阿·哈阿帕伊岛及其中间的连接体在此次大喷发中几乎被完全摧毁了,只剩下最边缘的小部分还零星地出露在海面之上。据此可以表明:整座破火山口已经遭受了严重的破坏,包括可能的下沉塌陷。



(a)和(b)分别是 2013 年 11 月 15 日和 2016 年 5 月 19 日的卫星影像图(来自谷歌地图);(c)是 2022 年 1 月 15 日大喷发前两小时的卫星影像图(来自谷歌地图);(d)是 2022 年 1 月 18 日的卫星影像图(成都国星宇航科技有限公司提供的星时代-10 卫星影像数据)

图 4 洪阿哈阿帕伊岛近年来的时空演变

3 汤加火山大喷发的量级及其对气候的潜在影响

3.1 汤加火山大喷发的量级

在火山学中,火山喷发的强度可以通过“火山喷发指数”(Volcanic Explosivity Index,简称 VEI)来衡量^[6](图 6),衡量指标主要包括喷出物体积和喷发柱高度等方面。指数每增加 1 级表示火山喷发的强度增加 10 倍,历史上最大规模的火山喷发强度定义为 8 级。2010 年冰岛 4 级火山喷发产生的火山

灰曾使欧洲多地航班瘫痪,由此可见 4 级以上火山喷发事件的威力。所幸的是,地球上 5 级及以上规模的火山喷发并不多见,19 世纪以来一共有 11 次(不包括此次)。1815 年印尼的坦博拉火山喷发是 19 世纪以来最强烈的火山喷发事件,火山喷发指数高达 7 级。6 400×10⁴ a 前美国黄石公园火山发生了 8 级(顶级)的超级喷发事件,曾对地球的气候和环境产生了深远的影响。

据初步观测,此次汤加火山的喷发柱高度超过了 30 km,喷发开始后的 30 min 时间内,喷发柱顶

部的“蘑菇云”直径超过 350 km, 喷发柱的快速上升和大规模的横向膨胀表明此次火山喷发释放的能量巨大。初步估计, 此次喷发的 VEI 可能在 5 级左

右, 因此这是 1991 年菲律宾皮纳图博 6 级火山喷发事件以来, 地球上近 30 a 来最强的火山喷发活动记录。

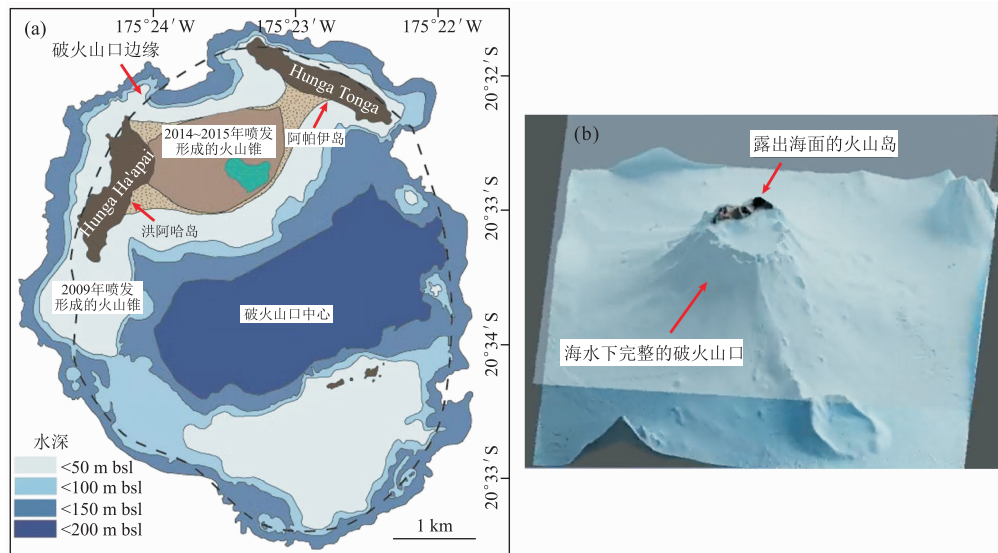
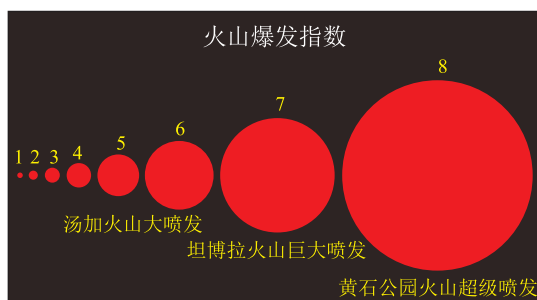


图 5 汤加火山破火山口结构示意图 (a)图(修改自 Cronin 等^[3])中的黑色虚线表示破火山口的范围;(b)图(来自 frederik ruys 制作的三维海底地形模型 <https://twitter.com/fruys/status/1482845290369536000>)中的三维海底地形显示了露出海面的破火山口边缘(火山岛)和隐藏在海水下面的破火山口主体

图 5 汤加火山破火山口结构示意图



图中红色圆圈内的数字表示相应等级下火山喷出物的体积
图 6 汤加大喷发与地质历史上顶级火山喷发事件的强度对比

3.2 汤加火山大喷发对气候的潜在影响

地球表面大气圈中的对流层平均厚度 12 km 左右, 此次汤加火山的喷发柱高度超过了 30 km, 意味着喷发的火山灰有一部分进入了平流层。由于缺乏空气对流环境, 进入平流层的火山灰可能需要几个月甚至数年才能沉降到地面。它们会遮蔽阳光, 好比是在地球头顶上打了一把遮阳伞, 因此会造成气温降低。需要注意的是, 尽管此次汤加火山喷发很剧烈(预估 VEI 5 左右), 但仍然不及 1815 年坦博拉这类超级火山喷发的强度, 因此不太可能输送大量的火山灰进入平流层。另外, 火山喷发释放的二氧化硫气体对气温的潜在影响更大, 因为二氧化

进入平流层后会形成硫酸气溶胶, 在平流层中横向运移输送到全球各个地方, 通过阻挡太阳辐射引起近地表温度降低。但是目前据美国国家航空航天局 (NASA) 卫星初步监测数据 (https://so2.gsfc.nasa.gov/omps_2012_now.html#hunga), 此次汤加火山喷发产生的二氧化硫约为 400 kt, 仅为 1991 年菲律宾皮纳图博火山喷发释放量的 2%, 所以对全球气温的影响应该很小。因此, 本次汤加火山喷发对全球气候的影响, 尤其是对北半球的影响应该比较有限, 不太可能出现诸如 1815 年印尼坦博拉火山喷发时的“无夏之年”现象。

4 中国境内的火山分布及其监测情况

此次汤加火山大喷发也引起了社会大众对我们国家是否存在火山灾害的讨论。中国境内也有活火山存在, 这里活火山指的是近 1×10^4 a 来有过喷发活动的火山(也称全新世火山)。其中, 潜在喷发危险性最强的当属位于中朝边境的长白山天池火山^[7]。长白山天池火山是一座规模巨大的板内层状复式活火山, 地质历史上发生过多次喷发。公元 946 年(后晋时期), 长白山天池火山发生的一次“千年大喷发”被认为是近 2 000 a 来的最大火山喷发事件之一^[8]。此次喷发摧毁了方圆 50 km 半径内的

森林,其飘散的火山灰贯穿了中国东北、俄罗斯远东地区、朝鲜半岛和日本海,甚至在北极格陵兰岛的冰芯中都有记录^[9]。继“千年大喷发”之后,长白山天池火山至少又在 1413 年、1668 年和 1702 年发生过几次小规模喷发活动。2002~2005 年间,增强的火山地震活动、GPS 和水准监测观察到的地表隆起、温泉气体地球化学异常以及卫星热红外遥感监测到的热异常,均表明长白山天池火山有岩浆活动的迹象^[10]。近年来有关长白山天池火山是否存在潜在喷发危险的讨论,也引起了国内外研究学者的广泛关注^[11]。

图 7 是我国境内活火山的监测分布图(来自许建东等^[9]),多种监测手段包括地震、重力、形变、流体等都被用于这些活动火山的实时监测中。目前,以长白山天池火山为代表的 6 处活火山已被纳入中国火山监测台网,它们分别是吉林长白山天池火山、龙岗火山、黑龙江五大连池火山、镜泊湖火山、云南腾冲火山和海南琼北火山。随着国家应急管理事业的推进,我国对火山的监测和研究将持续加强和深入^[9],此次汤加火山大喷发给当地居民造成的灾害性影响也进一步凸显出我国对活动火山开展系统性研究和监测预警工作的必要性和重要性。



图 7 中国境内活动火山监测分布图(来自许建东等^[7])

参考文献

- [1] McCabe K, FRMetS. Tongan eruption sends atmospheric shockwaves around the world. The Royal Meteorological Society, 20 January 2022, <https://www.rmets.org/metmatters/tongan-eruption-sends-atmospheric-shockwaves-around-world>.
- [2] Van der Hilst R. Complex morphology of subducted litho-

sphere in the mantle beneath the Tonga trench[J]. Nature, 1995, 374(6518):154-157.

- [3] Richards J P. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 40(1):1-26.
- [4] Colombier M, Scheu B, Wadsworth F B, et al. Vesiculation and Quenching During Surtseyan Eruptions at Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano, Tonga[J]. Journal of Geophysical Re-

- search; Solid Earth, 2018, 123(5): 3762-3779.
- [5] Cronin S J, Brenna M, Smith I E M, et al. New volcanic island unveils explosive past[J]. Eos, 2017, 98.
- [6] Newhall C G, Self S. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1982, 87 (C2): 1231-1238.
- [7] 刘嘉麒, 陈双双, 郭文峰, 等. 长白山火山研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(4): 710-723.
- [8] Wei H Q, Liu G M, Gill J. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China; implications for possible future eruptions [J]. Bulletin of Volcanology, 2013, 75: 706.
- [9] 许建东. 中国活动火山监测与研究历史回顾[J]. 城市与减灾, 2018, (5): 54-59.
- [10] Xu J D, Liu G M, Wu J P et al. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption? [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 75 (4): L16305.
- [11] Stone, R. Vigil at North Korea's Mount Doom [J]. Science, 2011, 334(6056): 584-588.

作者简介: 范兴利(1992—),男,四川达州人,博士,副教授,主要从事晚新生代板内火山岩石圈精细结构的地震层析成像研究。
E-mail: fanxingli@cdut.edu.cn

《地质灾害与环境保护》征订启事

本刊主管单位:四川省教育厅;主办单位:成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊,季刊。1990年创刊,国内外公开发行。大16开,每期112页,约22万字。欢迎订阅。

定价: 2008~2022年每期定价15元,全年4期,年定价60元;2005~2007年每期定价10元,全年4期,年定价40元;1991~2004年过刊每套定价154元(包括:总第3期~总28,30~53期,计42册);也可分年分期选订:1991~1993年,半年刊,每册定价1.00元;1994~1997年,季刊,每册定价2.00元;1998~1999年,季刊,每册定价3.00元;2000~2001年,季刊,每册定价4.00元;2002~2004年,季刊,每册定价5.00元。

订阅办法

1. 2000年起开始邮发,邮发代号62-140,可在全国各地邮局订阅。
2. 本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”,代号5314号。
3. 向本刊编辑部订阅: 请用邮局汇款。收款单位:《地质灾害与环境保护》编辑部。

地址:成都市成华区二仙桥东三路1号 成都理工大学;邮政编码:610059。

编辑部联系电话:(028)84078481。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2022年3月25日