

# 汤加火山的地震学研究

周鹏程<sup>1,2</sup>, 张江阳<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广州 511458
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

**摘要** 俯冲带的地震监测仍然是一个挑战, 特别是对于人口稠密地区。2022年1月汤加的洪阿汤加—洪阿哈阿帕伊火山的喷发以及引发的地震凸显了这一需求的紧迫性。综合汤加地震学观测, 推测汤加部分火山近期仍有小规模喷发风险。选取2009—2010年覆盖汤加的海底地震仪台阵数据, 应用机器学习算法进行数据处理, 得到汤加火山岛链附近高分辨率的地震目录。

**关键词** 汤加; 火山喷发; 地震监测; 机器学习; 海底地震仪

火山喷发是了解地球内部动力学的关键窗口, 火山作用将地球深部物质运移至地表, 为现代物质文明的发展提供了重要基础。汤加地处西南太平洋板块俯冲边界上, 是环太平洋火山地震带的地壳活动强烈区, 该区域的研究对理解俯冲带地震发生过程和发展板块构造理论均有着重要作用。北京时间2022年1月14—15日, 南太平洋岛国汤加的洪阿汤加—洪阿哈阿帕伊海底火山(Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, 以下简称洪阿火山)发生大规模爆炸式喷发, 引发海啸, 并产生了环绕地球几次的大气冲击波, 受到了全球广泛关注<sup>[1-2]</sup>。火山喷发后其周边4~5级地震异常活跃, 可能表征深部岩浆仍在持续活动。这次火山喷发让全世界认识到海底火山喷发的巨大危害, 也为火山学家和地震学家们

更好地理解这种喷发的机制与影响提供了一个窗口。汤加火山是太平洋板块向澳大利亚板块俯冲作用的结果, 中国长白山天池火山是中国规模最大、最具潜在灾害性喷发危险的活火山, 它是太平洋板块向欧亚板块俯冲作用影响的结果, 二者的火山活动都与板块运动有关。

## 1 汤加火山和地震监测

### 1.1 汤加火山和地震成因

俯冲带是地震高发区域, 据统计, 汤加几乎每年都会至少发生1次7级以上大地震。汤加火山处于太平洋板块和印度—澳大利亚板块的交界位置, 属于典型的岛弧火山。当密度较高的大洋板

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42206071)

作者简介: 周鹏程, 助理研究员, 研究方向为海洋地震学, 电子信箱: zhoupengcheng@sesio.ac.cn

引用格式: 周鹏程, 张江阳. 汤加火山的地震学研究[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 51-55; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.006

块在海沟处向地球深部俯冲时,随着温度和压力的不断升高,在深部,俯冲板片会发生脱水熔融作用,形成的岩浆向上运移至地表后喷发形成岛弧火山(图1)。该过程会促进弧后拉张作用,导致海洋岛弧周边逐渐发展成为弧后盆地,如图1中的劳盆地<sup>[3-4]</sup>。

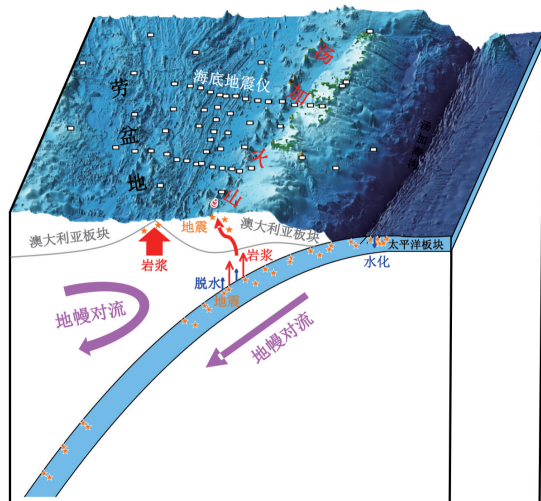
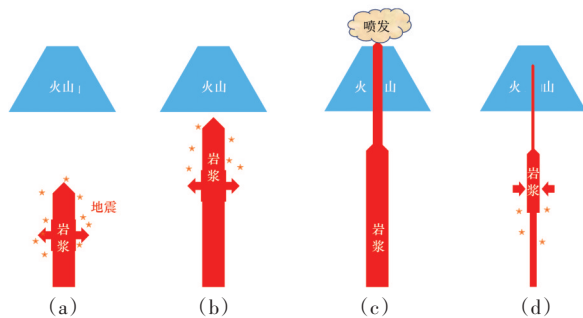


图1 汤加俯冲带地质背景和动力学模型

火山喷发是一个系统性的渐进过程,常伴随地震发生,火山下方的大多数地震都是由岩浆运动引起的(图2)。岩浆运移对围岩施加压力,致使其破裂,随后岩浆喷入裂缝并再次开始产生压力。每当岩石破裂时,都会产生小地震。地震的分布提供了



(a) 火山喷发前,围岩受深部上涌岩浆的应力扰动而破裂,引发地震;(b) 火山喷发前,岩浆继续上涌,应力扰动在浅部围岩产生地震;(c) 火山喷发,由于岩浆和地表连通,对围岩应力扰动微小,地震活动减弱;(d) 火山喷发后,深部岩浆继续活动,因应力调整而产生地震。

图2 火山喷发前后与岩浆活动相关的地震分布的深度剖面示意

有关岩浆路径和火山结构的重要信息(图2),火山和地震的应力作用关系在有观测覆盖的地区被广泛研究<sup>[5-6]</sup>。然而,这些地震通常因为震级太小,无法被远处的地震台站检测和记录到。

## 1.2 汤加的地震监测历史和现状

长期以来,由于缺少地震观测的固定台网(汤加仅有5个固定台站),汤加火山的持续海底观测一直是个空白。一方面是由于国家经济原因;另一方面则是因为汤加大部分活火山都在海底,而火山的海底监测除了花费比陆地监测昂贵得多,技术上也面临很多挑战。在2022年1月的洪阿火山爆发期间,可用的距离最近的台站超过700 km,无法有效地记录到火山喷发前可能的微震活动。2022年4月份开始,澳大利亚地球科学部的专家在汤加陆续布设了8个陆地地震台站,显著增强了汤加的地震监测能力。

2009年11月—2010年11月,美国地震学家布设了49台海底地震仪,覆盖劳盆地和汤加俯冲带<sup>[3-4]</sup>(图1)。这项针对弧后扩张盆地大规模的海底地震实验,由于部分台站靠近汤加的火山岛链,使得它成为研究汤加下方地球结构和俯冲带动力学等科学问题的重要数据来源。基于海陆联测的地震数据,前人对地震台网下方的地震结构以及深部岩浆分布特征进行了深入探讨,研究发现上地幔存在广泛的部分熔融<sup>[9]</sup>,软流圈流速在劳盆地扩张中心和汤加火山下方表现出明显的差异特征<sup>[9]</sup>。然而,由于缺少高精度的地震目录和近震信息,对汤加火山下方50 km以上的浅部结构的成像仍然是一个挑战。

## 2 地震学手段监测火山

### 2.1 火山爆发的强度和危险性

判断一座火山喷发的影响首先要看其强度。然而,世界上大多数火山活动发生在远离大陆的地区,因此,它们中只有少数被持续监测并被广泛研究,手段也仅限于遥感和全球尺度的地球物理观测。火山爆发指数(Volcanic Explosivity Index, VEI)是根据烟羽的高度和喷出的物质数量来衡量

火山爆发的规模,这种评估通常需要几周或几个月的时间<sup>[7]</sup>。为了更加及时地评估火山喷发参数,地震学家提出了一种基于地震数据分析的快速识别方法<sup>[7]</sup>,并将其应用在2022年1月15日的洪阿火山喷发研究,仅需要大约1 h就可以近实时地监测和定位火山爆发,估算出洪阿火山的VEI为6,与传统方法得到的结果一致。

另一个受关注的问题是,火山是否还有潜在喷发的危险。根据美国地质调查局的数据,虽然在2022年1月15日洪阿火山爆发之前没有观察到显著的地震活动,然而洪阿火山喷发后的几个月内,观测到其附近4~5级地震频发,并且全球矩心矩张量(Global Centroid Moment Tensor, GCMT)给出的这些地震的震源机制解无一例外地显示为垂直补偿线性力偶分量(vertical Compensated Linear Vector Dipole, vertical-CLVD)主导(图3),提供了断层与岩浆等流体活动相互作用的证据<sup>[8]</sup>。这些观测表明,火山喷发后,深部岩浆仍在持续活动。未来洪阿火山仍有再次喷发的可能,但其VEI不太可能超过6,因为大规模火山喷发通常会从岩浆房中喷射出大量物质,而重新积累足够的岩浆和能量需要时间(图2)。

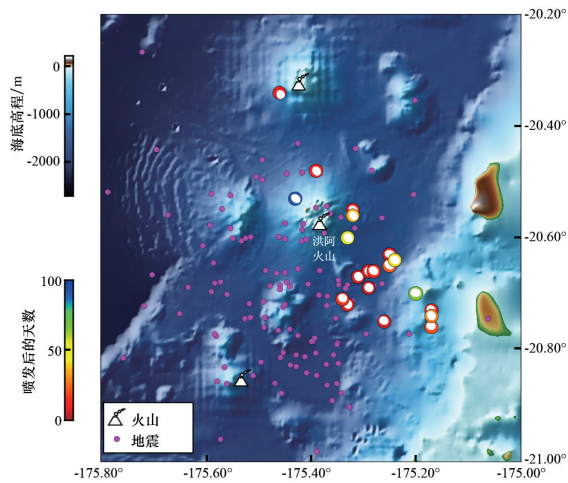


图3 洪阿火山喷发后附近发生的地震分布

## 2.2 火山下方的高分辨率地震监测

在具备良好的近震监测台网覆盖的前提下,利用地震活动性,可为提前预测火山喷发的危险性提

供可能。例如通过火山地震、地面变形和火山气地球化学对中国和朝鲜边境地区的长白山火山进行12年多的持续监测<sup>[9-11]</sup>,在这个“活动期”,与背景“非活动期”相比,火山地震的频率增加了约2个数量级,并检测到了地震群,为2002—2006年长白山火山的岩浆活动提供了新的证据<sup>[9]</sup>。2018年5月,在印度洋的莫桑比克附近的法国马约特岛海岸外开始一连串地震,之后,一个针对火山地震监测的地震台网开始建立<sup>[12]</sup>,对后续地震可以自动检测并发出警报提醒人群快速疏散。随后观测到,在距离海岸50 km的海底开始喷发岩浆,产生了一座新的火山。

## 3 机器学习方法研究汤加火山地震

### 3.1 机器学习识别地震

地震数据的处理速度和精度对火山灾害预警尤为重要<sup>[9,12]</sup>。地震震相的拾取精度直接影响地震定位等震源参数求解的质量。然而,地震观测数据量的高速增长给快速和高质量的地震处理这一目标带来极大挑战,尤其是密集地震台阵的长期观测,人工拾取和传统的自动化方法已经不能满足要求。近年来,大数据驱动下发展的机器学习方法正逐渐被引用到地震学领域,并得到迅速发展和广泛应用<sup>[13]</sup>。

机器学习算法模型识别地震的普适性在火山地震和海洋地震研究中正在不断得到验证。之前研究的模型训练数据均采用陆地地震数据,因此,其对地震和噪声特征的识别能力依赖于训练数据。虽然海底地震仪的数据质量和噪声特征与陆地台站有很大差异,然而,最近已经有研究者将其成功地引入到海洋地震研究领域<sup>[14]</sup>,相比传统算法识别了更多的地震。还有研究者在加州地震数据训练模型的基础上,使用非洲纳布罗火山附近的部分地震观测作为新的训练数据,用得到的新模型实现了火山下方的自动化地震监测,这种迁移学习方法为火山的地震监测提供了新的手段<sup>[15]</sup>。

### 3.2 汤加火山下方的高分辨率地震目录

机器学习算法可以大大提高海洋地震数据的

处理速度和精度。海底地震仪的数据质量和噪声特征与陆地台站有很大差异,尽管之前机器学习模型的训练数据均采用的是陆地地震数据,其在海底地震仪的表现仍然远超传统方法。

目前,研究汤加海底火山的最大局限在于该区域缺乏高分辨率的地震目录。海底地震仪的发展使得直接近距离观测海底火山成为可能。基于在2009年11月—2010年11月在汤加俯冲带和劳盆地布设的49台海底地震仪和同一时期的汤加陆地

台站的连续数据(图4),利用机器学习算法同时拾取地震的P波和S波震相到时,进而结合震相关联和地震定位算法<sup>[14]</sup>,可以建立新的高质量的地震目录(图4),将地震数目提高1个数量级,显著降低了完备震级,这个近震目录为汤加火山下方的速度结构成像提供了数据基础<sup>[16]</sup>。研究结果表明,火山附近的浅源地震成丛分布,可能揭示火山下方的岩浆活动和断层的应力作用。

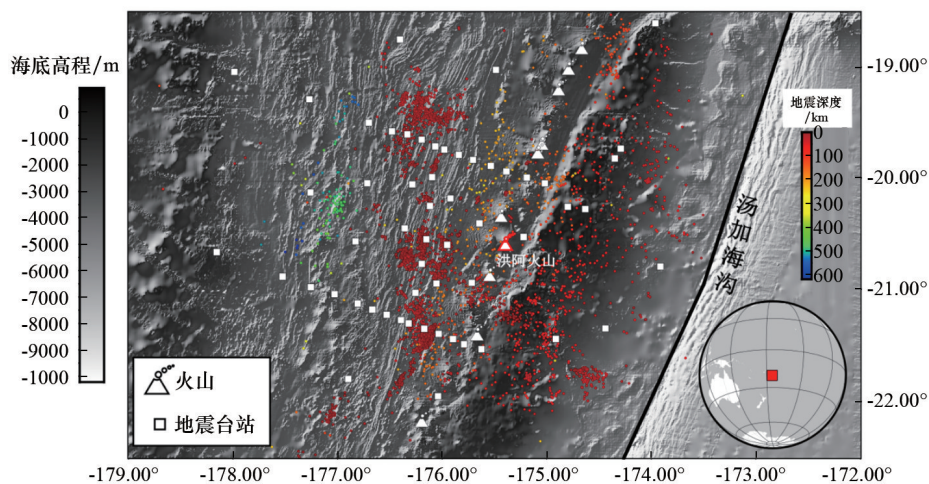


图4 基于机器学习构建的地震目录

## 4 结论

火山喷发预测是一个难题,全球部分陆地活火山的研究表明,长时间的临近火山的监测是行之有效的。汤加洪阿火山的喷发凸显了这些持续观测如何有助于预测未来的火山灾害,特别是对于人口稠密地区。因此,汤加火山的海底地震监测仍然需要全球科学家持续不懈的贡献和努力。鉴于汤加当地的经济状况,为了布设尽可能多的台站、显著提高汤加整个区域的火山和地震监测能力,如何开发低成本的地震仪等监测设备成为未来的挑战。

使用机器学习算法处理海洋地震数据,表现远超传统方法,可极大提高处理速度和精度。因此,将机器学习算法成功应用到海底地震仪数据处理中,会极大推动海洋地震学科的快速发展。高分辨率的地震目录对于认识火山下方的结构和岩浆活

动规律至关重要。

对汤加火山尤其是火山下方地震的相关研究,对中国火山灾害风险预警工作具有重要的借鉴意义,研究结果将极大提高对火山监测重要问题的理解和认识,同时提升中国在火山灾害前沿科学问题研究方向上的国际地位和学术影响力。

## 参考文献 (References)

- [1] Yuen D A, Scruggs M A, Spera F J, et al. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano[J]. Earthquake Research Advances, 2022, 2(3): 100134.
- [2] Zhao W B, Sun C Q, Guo Z F. Reawaking of Tonga volcano[J]. The Innovation, 2022, 3(2): 100218.
- [3] Menke W, Zha Y, Webb S C, et al. Seismic anisotropy in-

- dicates ridge-parallel asthenospheric flow beneath the Eastern Lau Spreading Center[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 120(2): 976–992.
- [4] Wei S S, Zha Y, Shen W S, et al. Upper mantle structure of the Tonga–Lau–Fiji region from Rayleigh wave tomography[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(11): 4705–4724.
- [5] Feuillet N, Cocco M, Musumeci C, et al. Stress interaction between seismic and volcanic activity at Mt Etna[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(3): 697–718.
- [6] Pesicek J D, Ogburn S E, Prejean S G. Indicators of volcanic eruptions revealed by global M4+ earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(3): e2020JB021294.
- [7] Poli P, Shapiro N M. Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha’apai explosion from teleseismic waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL098123.
- [8] Sandanbata O, Kanamori H, Rivera L, et al. Moment tensors of ring-faulting at active volcanoes: Insights into vertical–CLVD earthquakes at the Sierra Negra Caldera, Galápagos Islands[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(6): e2021JB021693.
- [9] 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, 39(16): L16305.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Lemoine A, Briole P, Bertil D, et al. The 2018–2019 seismo–volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: Seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 223(1): 22–44.
- [13] Mousavi S M, Beroza G C. Deep-learning seismology[J]. *Science*, 2022, 377(6607): eabm4470.
- [14] Gong J H, Fan W Y. Seismicity, fault architecture, and slip mode of the westernmost Gofar transform fault[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(11): e2022JB024918.
- [15] Lapins S, Goitom B, Kendall J M, et al. A little data goes a long way: Automating seismic phase arrival picking at nabro volcano with transfer learning[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(7): e2021JB021910.
- [16] Koulakov I, Shapiro N. *Seismic tomography of volcanoes [M]*//*Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2021: 1–18.

## Seismological studies of Tonga volcanoes

ZHOU Pengcheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiangyang<sup>1,2</sup>

1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

**Abstract** The improvement of seismic monitoring in subduction zone remains a challenge, especially for densely populated areas. The eruption of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano in January 2022 and subsequent earthquakes highlighted such urgency. This paper exhibits comprehensive seismological observations in Tonga, implying ongoing hazards in the short future in terms of small-scale volcanic eruptions. There is an urgent need to keep close watch on this very active volcano. Based on ocean bottom seismometer network data between 2009 and 2010 in Tonga, this paper applies novel machine learning algorithms to earthquake detections. The obtained high-resolution earthquake catalog is fundamentally important for a better understanding of the volcano structures and associated magmatic activities.

**Keywords** Tonga; volcanic eruption; seismic monitoring; machine learning; ocean bottom seismometers ●



(责任编辑 王志敏)