

2022年汤加火山喷发与海啸观测

郑婷婷^{1,2,3}, 邱强^{1,2,3}, 林间^{1,2,3,4,5*}

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
3. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 中国科学院-巴基斯坦高等教育委员会, 巴基斯坦伊斯兰堡 45320
4. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055
5. 伍兹霍尔海洋研究所, 美国马萨诸塞州伍兹霍尔 02543

摘要 2022年1月15日世界标准时间4:14, 位于南太平洋汤加俯冲带火山链区域的 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH, 175.39°W, 20.55°S) 火山爆发并激发全球性海啸。聚焦火山喷发和海啸波的观测方法, 介绍了海底传感器、大气波变化卫星图、电离层扰动对火山喷发和海啸的最新监测结果。结合该区域的地质构造与火山喷发历史资料, 综述了2022年汤加 HTHH 火山喷发引起的海啸特征、最新观测手段, 提出了对俯冲带火山海啸等进行详细的海洋地球物理调查、基于观测综合量化研究海底火山大规模喷发对全球气候的潜在影响等建议。

关键词 汤加俯冲带; 汤加 HTHH 火山喷发; 海啸观测; 大气波; 兰姆波; 电离层扰动

俯冲带是火山喷发、地震、大型滑坡等重大自然灾害的频发区域。这些海底构造事件的发生可能引发超大海啸, 给临近沿岸地区造成大量人员伤亡与巨大经济损失。2022年1月14日, 位于南太平洋汤加俯冲带弧后区域的 Hunga Tonga-Hunga

Ha'apai (以下简称 HTHH) 海底火山喷发(图1), 释放里氏震级5.8级的能量, 并引发了全球性海啸, 这次火山喷发及其产生的罕见海啸在10 h内迅速传播到了环太平洋沿岸地区, 导致太平洋沿岸国家相继发布海啸预警; 海啸信号随后到达了大西洋、印

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42006055, 41890813, 92258303); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0205); 中国科学院项目(133244KYSB20180029, Y4SL021001, ISEE2021PY03, 131551KYSB20200021); 同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金项目(MGK202011); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111520001)

作者简介: 郑婷婷, 助理研究员, 研究方向为海洋地质与地球物理, 电子信箱: tzheng@sesio.ac.cn; 林间(通信作者), 教授, 研究方向为海洋地质与地球物理、地球动力学, 电子信箱: jianlin@sesio.ac.cn

引用格式: 郑婷婷, 邱强, 林间. 2022年汤加火山喷发与海啸观测[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 44-50; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.005

度洋、加勒比海和地中海等区域^[1-2]。此外,卫星观测数据显示此次火山喷发羽流高达 58 km,达到了大气中间层,造成了电离层扰动,并从火山喷发区域在大气层以波动的形式向全球范围传播,波动气压的变化被全球气压计网路成功记录(图 1)^[3]。

聚焦此次罕见火山喷发及其引发海啸的最新观测结果,综合整理与分析 2022 年 HTHH 火山喷发前地表的形变特征,喷发后引发的海啸以及大气波、电离层等多种新观测结果,对俯冲带火山海啸等海洋地质灾害的研究提出展望与建议。

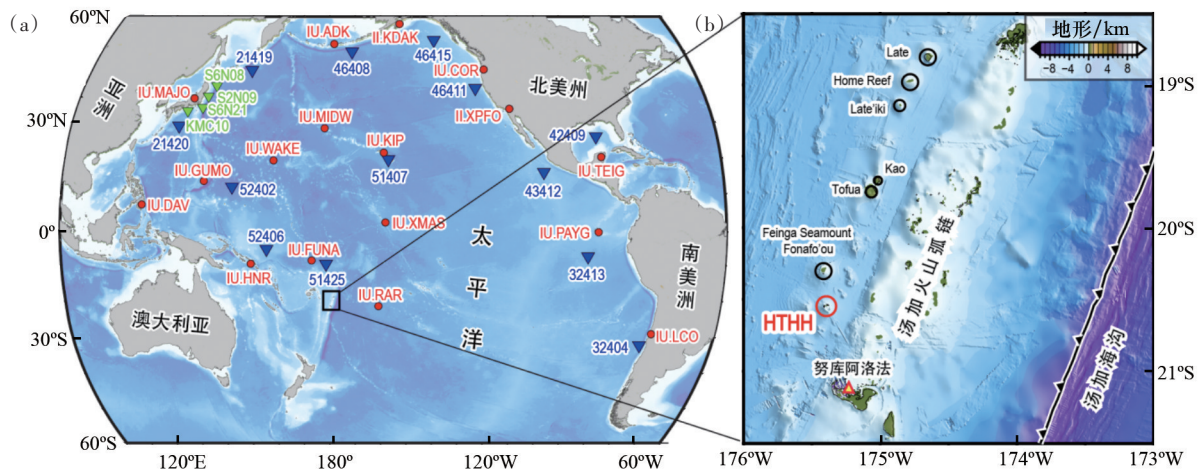


图 1 环太平洋海底压力计(蓝色、绿色倒三角表示)与气压计(红圈)台站分布图(a)与汤加火山区域地质图(b)(台站信息来自文献[3])

1 汤加俯冲带区域构造及 HTHH 火山喷发前的地表形变特征

1.1 构造背景与历史活动

在西南太平洋区域,快速移动的太平洋板块向澳大利亚板块俯冲汇聚,形成了世界上仅次于马里亚纳海沟的第二深汤加-克马德克海沟(图 1)^[4-5]。该俯冲带的汇聚速率约为 20 cm/a,具有非常活跃的弧后扩张和板片后撤等特点。在过去约 45 个百万年内,汤加俯冲带经历了多期次的弧后扩张,并在弧后区域形成汤加火山弧链(图 1(b)),该火山弧跨度很长,从斐济的俯冲带一直延伸到新西兰东北边,其所覆盖的区域构造运动活跃,历史上火山、地震、海啸等地质灾害频发^[4-5]。

此次最新喷发的 HTHH 火山口位于汤加首都努库阿洛法(Nuku'alofa)以北约 68 km 处(图 1(b))。该火山口在 2014—2015 年连续喷发后连接了 2 座无人居住的 Hunga-Ha'apai 和 Hunga-Tonga

小岛。2022 年喷发前的 HTHH 火山最高点海拔约 100 m,火山口处于海水下方,直径约 5 km,整个火山宽约 20 km。至 20 世纪有历史记录以来,HTHH 火山共喷发 6 次,分别为 1912 年、1937 年、1988 年(持续 3 d)、2009 年(持续 1 周)和 2014—2015 年(持续 5 周)^[4-7]。其中 2009 年的火山喷发的火山爆发指数为 2^[6],且被追踪到了火山的喷发阶段^[8];Garvin 等^[7]通过卫星数据分析 2014—2015 年火山喷发形成的火山锥侵蚀速率约为 0.00256 km³/a。以上历史数据显示 HTHH 火山的喷发间隔约为 20~50 a,最新的 2022 年喷发时间间隔仅为 7 a,表明该区域构造与火山活动性明显增加。

1.2 2022 年 HTHH 火山喷发前的地表形变特征

对于 HTHH 火山喷发前的地表形变特征,胡羽丰等^[9]基于 Sentinel-1 卫星数据进行了分析,获取了该火山在喷发前 2019-07-06 至 2021-12-10 期间的卫星雷达视线(LOS)向累积形变时间序列(图 2(a)~(h))^[9]。其中红色为负值,代表沿 LOS 向远离

卫星;蓝色为正值,表示沿LOS向靠近卫星。该结果显示,在火山喷发前的观测时间内,火山体有明显的下沉现象且形变场呈类似于火山地表的半圆环形状,并在火山口向山底方向位移速率逐渐减小。进一步分析火山口形变区2个参考特征点 P_1 和 P_2 的时间序列显示(图2(i)和(j)), P_1 点在观测

期间的累积位移下沉超过6 cm, P_2 点的累积位移下沉约5 cm,其下沉速率也呈阶段性变化,在2020年6月和2020年8月前基本稳定,随后 P_1 、 P_2 点分别以约3.1 cm/a和2.2 cm/a的速度下沉,定量揭示了火山喷发前的地表轻微形变的时空演化特征。

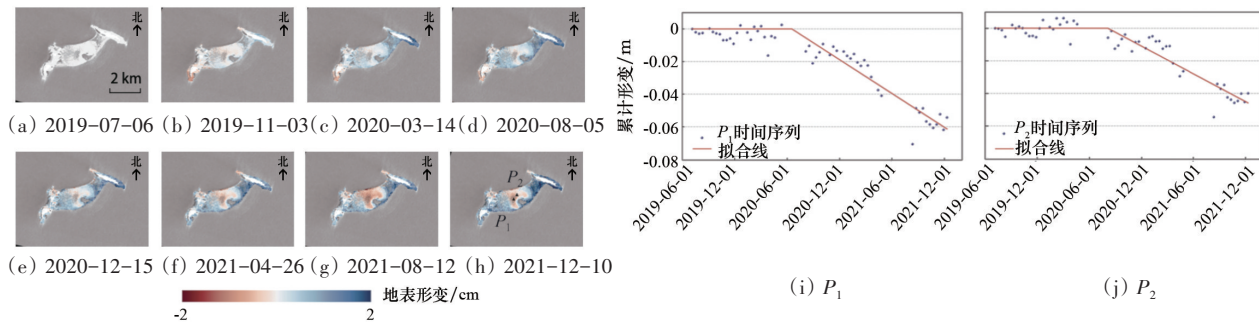


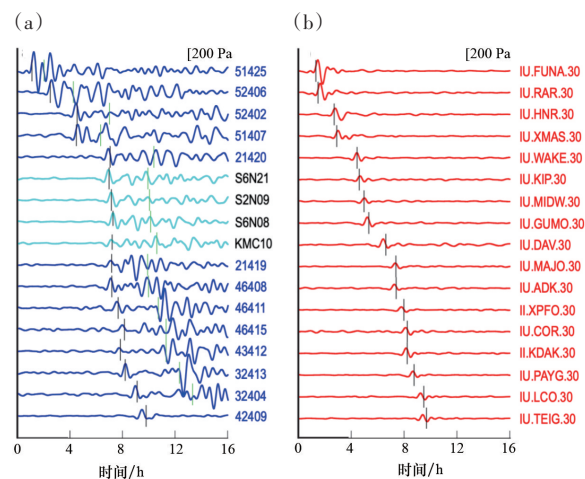
图2 HTHH火山喷发前地表形变记录(图片改自文献[9])

2 2022年HTHH火山喷发

2.1 引发全球性海啸

汤加HTHH火山喷发后引发的海啸在几到数十个小时内迅速扩张至全球^[1,2,10]。全球沿海测潮站网络,在太平洋、大西洋、印度洋以及在加勒比海和地中海等区域广泛观测到了明显的海啸波。Kubota等^[3]对环太平洋海底压力计和气压计记录的海啸信号进行了分析(图3),发现此次海啸的实际到时(图3(a)中的黑线)比理论上常规海底火山喷发引发的海啸到达时间(图3(a)中的绿线)早了2个多小时,传播时间更为迅速;汤加的最新报告显示当地的海啸可能至少达到15 m,海啸波传到日本时高达2.7 m^[11]。值得注意的是,太平洋周边沿海海啸波的特征与世界其他地区明显不同。这些沿岸台站记录显示,在最大的海啸波(高达3 m)达到之前先监测到了振幅较小的先导海啸波;在太平洋之外的海域则主要监测到了这些最初的小波幅海啸。

汤加HTHH火山喷发引发的海啸与常见的俯冲带大地震引发的海啸相比有显著的不同。一般情况下地震引发的海啸会沿着长达数十或上百公里的断层线将海水从海底向上排开,而火山爆发引发的海啸更像一个点源向外扩散。目前用于研



注:绿线标注处为模拟得到的海啸理论到时,黑线为兰姆波的理论到时,记录台站位置如图1(a)所示。

图3 HTHH火山喷发后环太平洋海底压力计信号记录(a)与气压记录(b)(图片改自文献[3])

究的海啸预报模型基本是基于地震触发进行模拟,不太符合火山海啸的情形。此外,这次喷发引起的海底压力变化持续时间更长,海啸的产生机制也更为复杂。最先到达沿岸的海啸波波幅较小且与火山爆发产生快速移动大气压力波的传播速度耦合(约300 m/s),被认为是由大气波传播过程中与海水相互作用的结果^[12]。

2.2 激发大气波

从理论上讲,火山爆发和核试验等大型爆炸将产生不同长度和频率的大气波。在水平方向上的短波长尺度上,可以引发兰姆波(Lamb wave)、声波和重力波^[11, 13-15]。此外,火山可以在最初喷发后通过上升气流与加热羽流对流形成持续的波源。HTHH火山上空羽流持续释放潜热超过12 h,是此次大气波最重要的单个重力波源,激发了横跨整个太平洋的圆形波面,之前从未观测到单一震源产生如此量级的全球范围的响应(图4)^[14-16]。地球同步环境卫星GOES观测显示,在世界标准时间(UTC)04:15左右,开始可以看到火山爆发,形成的羽流在30 min内上升至30 km高,覆盖200 km的宽度。在羽流上升20~30 min后,在10 min分辨率的近红外地球静止图像中可以看到明显的大气波。Wright等^[14]通过地面压力数据的反向投影分析,判断触发源发生在UTC 04:28±0:02,前波面以

(318.2±6) m/s的近地面相速度在地表层传播,并根据信号的高相位速度、大振幅和非色散特性分析,将其识别为兰姆波。理论上兰姆波的能量密度随高度呈指数衰减,观测显示其以(308±5)至(319±4) m/s的相速度在平流层中传播。兰姆波在全球范围内传播,在火山喷发后18.1 h(±7.5 min)经过阿尔及利亚对跖点,接下来的几天里绕地球传播了至少3次。基于大气红外测深仪(AIRS)、交叉航迹红外探测仪(CrIS)、红外大气探测干涉仪(IA-SI)和极轨热红外探测仪(IR)数据,初始重力波在兰姆波之后在全球范围内同样被广泛识别。重力波于1月16日UTC 00:30—02:30(喷发后20~22 h内)首次经过HTHH火山的对跖点,以(238±3)至(269±3) m/s的相速度在平流层中传播。综合观测分析显示,初始的兰姆波和重力波之间的传播距离差随着时间的推移而增大^[14-15]。

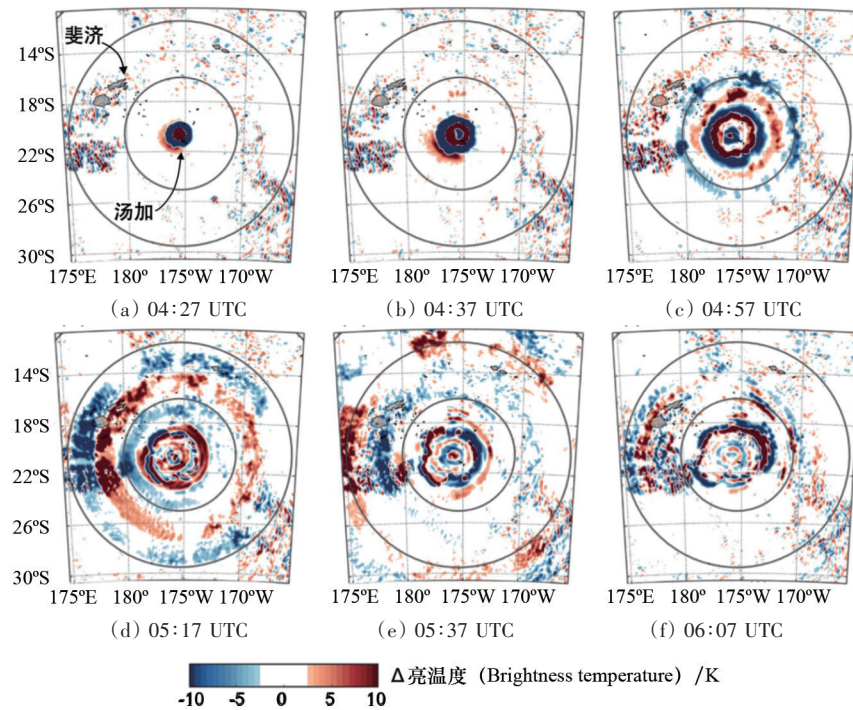


图4 HTHH火山爆发引发的大气波传播(地球同步环境卫星GOES观测,图片改自文献[14])

2.3 引起电离层扰动

地球表面的突然运动引起的大气波会通过大气传播到上层大气,最终引起移动电离层的扰动

(TIDs)^[17-19]。这种变化过去已经在地震、海啸、火山爆发、地下核爆炸等情景下被监测到。HTHH火山喷发后,火山上空电离层的垂直总电子含量(TEC)

明显减少,全球导航卫星系统(GNSS)接收网络在日本上空监测到了电离层扰动的移动轨迹^[18]。Saito^[18]在TEC的扰动中观察到2种不同特征的电离层扰动信号。第一个扰动信号在火山喷发3 h后抵达日本,距离火山口约7800 km,振幅约为 ± 0.5 TECU。第二个扰动信号在火山喷发7 h后抵达日本,振幅约为 ± 1.0 TECU。

除了日本上空,全球的其他区域也监测到了HTHH火山喷发引起的电离层扰动信号。Themens等^[19]使用了全球4735个全球导航卫星系统接收器的测量数据,第一时间跟踪了此次HTHH火山喷发造成相关的电离层扰动的移动信号(图5)。通过

选取全球范围内不同区域的电离层异常信号进行分析(新西兰、澳大利亚、夏威夷、日本、北美东部、南非和北欧,图5(b)~(h)),发现2个不同的大尺度移动电离层扰动和几个随后的中尺度移动电离层扰动,这2个扰动信号都从喷发点向外径向传播。在距离喷发中心3000 km的范围内,最初观测到波长为1600 km的大尺度移动电离层扰动信号分别以约950 m/s和约555 m/s的速度传播,随后显著减缓至约600和约390 m/s。该信号为全球电离层响应的主要信号,与火山喷发相关的大气表面压力扰动一致。中尺度移动电离层扰动信号在火山喷发后6 h内观测到,其速度为200~400 m/s。

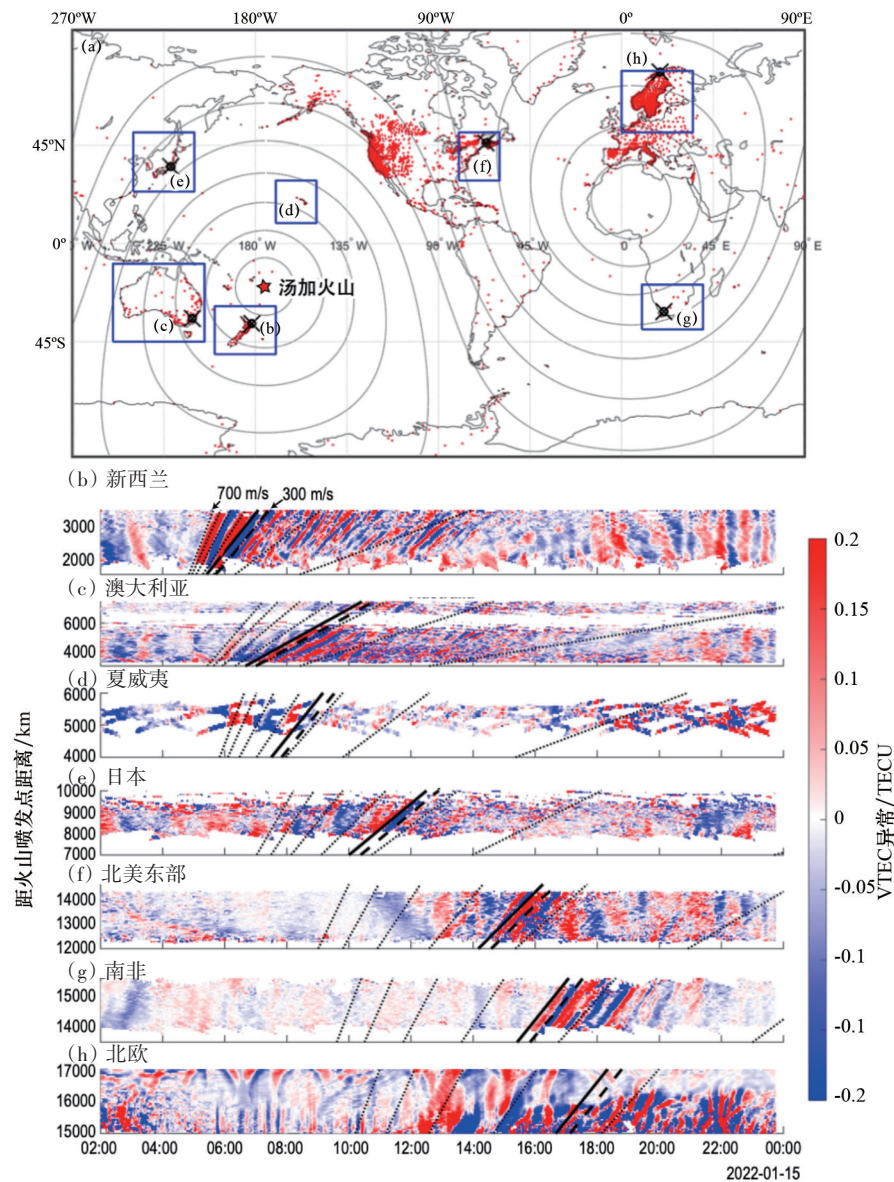


图5 HTHH火山爆发在全球范围内引发的电离层效应观测记录(图片改自文献[19])

3 结论

总结了2022年汤加HTHH火山爆发以来关于喷发和海啸的最新观测与研究。HTHH火山海啸在世界各地引发的不同寻常地球物理场的变化,反映了海底火山爆发时,整个喷发过程与大气层、岩石圈和海洋相互作用的复杂性,及其可能造成的全球范围的海洋地质灾害影响。从这次事件获得的启示和对将来研究建议如下。

1) 此次火山喷发引起的海啸特征复杂,尤其是火山体附近的地质结构变化及其对海啸的贡献尚不清楚,亟需详细的海洋地球物理调查来揭开这个谜团。现有的模型不足以提供准确的海啸模拟,因此需要建立一种新的非地震触发海啸模型,并纳入到全球海啸预警系统,以便及时为具有相似俯冲带地质构造特征的沿岸城市和居民提供相关紧急预警、疏散和救援等措施。

2) 此次火山喷发向大气中释放了大量的能量和不同成分的气体,在全球范围内激发了重力波、大气波,造成电离层扰动等,迫切需要基于这些最新的观测综合量化研究海底火山大规模喷发对全球气候的潜在影响,且跨学科合作探讨海洋地质灾害与大气响应之间的关系,地球不同圈层之间的相互作用等。

3) 利用新观测手段加强海底火山型海啸的观测,建立和完善全球俯冲带沿岸海啸预警与气候监测系统。

4) 巨大型海洋地质灾害是全球范围内的,建议增强国际合作与救援,共同打造一个持续性宜居的家园。

感谢中山大学李琳琳教授,南方科技大学周志远教授,中国科学院南海海洋研究所深海地球动力学学科组成员在本文撰写过程中提供的帮助和建议。

参考文献(References)

- [1] Lynett P, McCann M, Zhou Z, et al. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai eruption[J]. *Nature*, 2022, 609(7928): 728–733.
- [2] Toulkeridis T, Martinez N, Barrantes G, et al. Impact and response in central and south America due to the tsunami generated by the submarine eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano[J]. *Science of Tsunami Hazards*, 2022, 41: 1–38.
- [3] Kubota T, Saito T, Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption[J]. *Science*, 2022, 377(6601): 91–94.
- [4] Bryan W B, Stice G D, Ewart A. Geology, petrography, and geochemistry of the volcanic islands of Tonga[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(8): 1566–1585.
- [5] Billen M I, Gurnis M, Simons M. Multiscale dynamics of the Tonga–Kermadec subduction zone[J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 153(2): 359–388.
- [6] Vaughan R G, Webley P W. Satellite observations of a surtseyan eruption: Hunga Ha’apai, Tonga[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2010, 198(1): 177–186.
- [7] Garvin J B, Slayback D A, Ferrini V, et al. Monitoring and modeling the rapid evolution of Earth’s newest volcanic island: Hunga Tonga Hunga Ha’apai (Tonga) using high spatial resolution satellite observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(8): 3445–3452.
- [8] Bohnenstiehl D R, Dziak R P, Matsumoto H, et al. Underwater acoustic records from the March 2009 eruption of Hunga Ha’apai–Hunga Tonga volcano in the Kingdom of Tonga[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 249: 12–24.
- [9] 胡羽丰, 李振洪, 王乐, 等. 2022年汤加火山喷发的综合遥感快速解译分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(2): 242–251.
- [10] Ramírez-Herrera M T, Coca O, Vargas-Espinosa V. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano eruption, Tonga[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, 179(4): 1117–1137.
- [11] Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL098324.
- [12] Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, et al. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(6): e2022GL098153.
- [13] Amores A, Monserrat S, Marcos M, et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga–Tonga volcanic eruption[J]. *Geophysical*

- Research Letters, 2022, 49(6): e2022GL098240.
- [14] Wright C J, Hindley N P, Alexander M J, et al. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga–Hunga Ha’apai eruption[J]. *Nature*, 2022, 609(7928): 741–746.
- [15] Liu X, Xu J Y, Yue J, et al. Strong gravity waves associated with Tonga volcano eruption revealed by SABER Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10): e2022GL098339.
- [16] Matoza R S, Fee D, Assink J D, et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga[J]. *Science*, 2022, 377(6601): 95–100.
- [17] Zhang S R, Vierinen J, Aa E, et al. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, doi: 10.3389/fspas.2022.871275.
- [18] Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai on 15 January 2022[J]. *Earth, Planets and Space*, 2022, 74(1): 57.
- [19] Themens D R, Watson C, Žagar N, et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(7): e2022GL098158.

Advanced observations of the 2022 Tonga volcanic eruption and the associated tsunamis

ZHENG Tingting^{1,2,3}, QIU Qiang^{1,2,3}, LIN Jian^{1,2,3,4,5*}

1. 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
3. China–Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS–HEC, Islamabad 45320, Pakistan
4. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China
5. Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA

Abstract The Hunga Tonga–Hunga Ha’apai (HTHH, 175.39°W, 20.55°S) volcano, which locates in the region of the volcanic chain of the southern Pacific Tonga subduction region, erupted on 15 January 2022, at 04:14 UTC. In this study, we review the state-of-the-art observations of the volcanic eruption and the triggered tsunami waves associated with the 2022 HTHH event, including submarine sensors, barograms, atmospheric wave observation from varies of satellites, and ionospheric disturbance. Together with the local geological setting and volcanic eruption history, we analyze the characteristics of the volcanic eruption and tsunamis feature of the HTHH event. Finally, we specify the prospects and direction of future research in marine geological hazards of global subduction zones, which includes detailed marine geophysical survey and comprehensive quantitative study of the potential impact of large-scale submarine volcanic eruption on global climate based on the latest observations.

Keywords Tonga subduction zone; Tonga HTHH volcanic eruptions; tsunami observations; atmospheric waves; Lamb wave; ionospheric disturbances ●



(责任编辑 王志敏)