

## 2022年汤加火山喷发的综合遥感快速解译分析

胡羽丰, 李振洪, 王乐, 陈博, 朱武, 张双成, 杜建涛, 张雪松, 杨璟, 周美玲, 刘振江, 王丝丝, 苗晨, 张连翀, 彭建兵

### 引用本文:

胡羽丰, 李振洪, 王乐, 陈博, 朱武, 张双成, 杜建涛, 张雪松, 杨璟, 周美玲, 刘振江, 王丝丝, 苗晨, 张连翀, 彭建兵. 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.

HU Yufeng, LI Zhenhong, WANG Le, CHEN Bo, ZHU Wu, ZHANG Shuangcheng, DU Jiantao, ZHANG Xuesong, YANG Jing, ZHOU Meiling, LIU Zhenjiang, WANG Sisi, MIAO Chen, ZHANG Lianchong, PENG Jianbing. Rapid Interpretation and Analysis of the 2022 Eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Volcano with Integrated Remote Sensing Techniques[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 242–251.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1598–1608 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210113>

#### [多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1441–1449 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210465>

#### [GPS测得的2018年夏威夷6.9级地震与火山喷发地壳运动](#)

Crustal Motions Observed from GPS Observations for the M6.9 Earthquake in Hawaii and the Eruption of the Kilauea Volcano in 2018

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1191–1197,1204 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180463>

#### [西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1569–1578 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210168>

#### [利用GACOS辅助下InSAR Stacking对金沙江流域进行滑坡监测](#)

Landslide Detection of the Jinsha River Region Using GACOS Assisted InSAR Stacking

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1649–1657 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200675>



# 2022 年汤加火山喷发的综合遥感快速解译分析

胡羽丰<sup>1,2,3</sup> 李振洪<sup>1,2,3</sup> 王乐<sup>1,2</sup> 陈博<sup>1,2</sup> 朱武<sup>1,2,3</sup>  
张双成<sup>1,2,3</sup> 杜建涛<sup>1,2</sup> 张雪松<sup>1,2</sup> 杨璟<sup>1,2</sup> 周美玲<sup>1,2</sup>  
刘振江<sup>1,2</sup> 王丝丝<sup>4</sup> 苗晨<sup>4</sup> 张连翀<sup>5</sup> 彭建兵<sup>1,3</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 长安大学地学与卫星大数据研究中心, 陕西 西安, 710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安, 710054

4 科技部国家遥感中心, 北京, 100036

5 中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 100094

**摘要:** 2022 年 1 月 14 日—15 日南太平洋汤加 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) 海底火山发生剧烈喷发并造成海啸, 引起了国际广泛关注。对此次“千年一遇”的汤加 HTHH 火山喷发事件进行应急响应, 首先综合利用国内外多时相卫星光学影像、雷达影像、全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 监测站等数据进行快速解译, 分析此次火山喷发过程及影响, 评估汤加部分地区的受灾情况; 然后提出多源数据获取-地貌演化监测-地表形变监测-环境响应探测-灾害损毁评估-灾后恢复决策一整套综合遥感技术框架。结果显示, 汤加 HTHH 海底火山自 2020-06 以来在卫星视线方向出现明显的地表形变, 累积最大下沉达到 6.0 cm, 并且该火山在 2021-12-22 左右已出现喷发迹象; 火山喷发过程中当地磁场和电离层出现明显异常变化, 汤加地表 GNSS 监测站发生显著位移, 其中地表抬升量达 50.2 cm; 火山喷发的火山灰覆盖了汤加大部分地区, 但汤加首都北部沿海区域无明显海岸线冲断迹象, 主要建筑和道路保持完整。研究展示了如何利用综合遥感技术对海底火山喷发进行快速解译分析, 实现 HTHH 火山地形变化跟踪和灾害评估。该综合遥感技术框架将有助于灾后快速恢复和重建, 也为后续灾害的防治提供支撑。

**关键词:** 汤加海底火山; 多源遥感数据; 灾害响应; 喷发过程监测; 灾害评估

**中图分类号:** P237

**文献标志码:** A

火山喷发是地壳运动的一种表现形式, 也是地球内部能量在地表释放的体现, 而地球全部火山活动的 70% 以上发生在海底<sup>[1]</sup>。监测海底火山活动不仅有利于理解地壳运动和圈层相互影响机制, 同时对火山灾害风险的防控具有重要意义。

2022 年 1 月 14 日、15 日, 南太平洋岛国汤加首都努库阿洛法以北约 65 km 的 Hunga Tonga-Hunga Haapai (HTHH) 海底火山 (175° 23' 58.54" W, 20° 30' 57.78" S) 连续两天发生剧烈火山喷发并引发海啸, 太平洋沿岸澳大利亚、日本、美国、智利

等国家纷纷发布了海啸预警。火山喷发产生的“燃料-冷却剂相互作用”致使大量火山灰、气体与水蒸气进入高空形成巨大云团<sup>[2]</sup>, 喷发至高空 20 km 处。这是 HTHH 火山自公元 1100 年以来最猛烈的一次喷发<sup>[3]</sup>, 引发了全世界广泛关注。HTHH 火山处于西南太平洋板块和澳大利亚板块之间的聚敛边界<sup>[4]</sup>, 而西南太平洋板块是全球移动最快的板块之一<sup>[5-6]</sup>, 其向澳大利亚板块的汇聚俯冲形成了区域内世界第二深的汤加-克马德克海沟。海沟的两侧分布有多个海脊、海槽以及岛弧等高压低温

**收稿日期:** 2022-01-22

**项目资助:** 国家重点研发计划 (2020YFC1512000); 陕西省科技创新团队项目 (2021TD-51); 陕西省自然科学基金计划 (2020JQ-350); 欧洲空间局-科技部国家遥感中心龙计划 5 项目 (59339)。

**第一作者:** 胡羽丰, 博士, 讲师, 主要研究方向为 GNSS 环境监测。yphu@chd.edu.cn

**通讯作者:** 李振洪, 博士, 教授。Zhenhong.Li@chd.edu.cn

变质带,伴随海沟而生的汤加-克马德克群岛火山弧,从新西兰东北向北一直延伸到斐济的俯冲带上<sup>[7-8]</sup>。HTHH火山位于地球上火山、地震最活跃的环太平洋火山带的西侧,属于汤加-克马德克群岛火山弧的一部分,地质活动十分活跃<sup>[9-10]</sup>。20世纪以来,该火山共发生了5次有历史记录的发事件,分别发生在1912年、1937年、1988年、2009年和2014—2015年<sup>[11-13]</sup>。2009年和2014—2015年的两次喷发均形成了火山锥,其中2014—2015年的喷发形成了一个高约120 m、宽约2 km的近圆形火山锥,将Hunga-Tonga和Hunga-Ha'apai岛连接了起来,形成了常态陆地区域。HTHH海底火山2019年高分影像以及汤加在全球火山和板块分布中的位置和地形分布如图1所示。

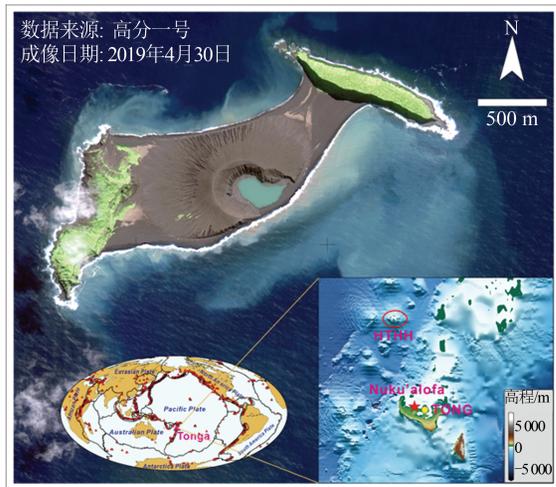


图1 汤加HTHH海底火山以及汤加的位置与地形分布  
Fig.1 The HTHH Underwater Volcano and the Location and Topography of Tonga

目前,HTHH火山的研究主要集中于2009年和2014—2015年的两次喷发。文献[12]利用高空间分辨率的ASTER(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)和高时间分辨率的MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)研究了HTHH火山2009年喷发的位置、持续时间和演化过程,并估计此次火山爆发指数(volcanic explosivity index, VEI)为2。文献[14]利用水听器阵列跟踪了HTHH火山2009年喷发活动,划分了火山喷发的过程阶段。文献[13]采用RADARSAT-2卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像和WorldView影像研究了HTHH火山2014—2015年火山喷发形成的火山锥,发现该火山锥经历着速率约 $0.00256 \text{ km}^3/\text{a}$ 的侵蚀。

针对汤加HTHH火山此次剧烈喷发,本文综合利用多源遥感数据进行了快速分析,所使用的数据集详情见表1。首先,结合卫星光学影像和SAR影像追踪刻画此次喷发的发展过程,在此基础上利用干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术获取了HTHH火山的长时间形变序列;其次,基于地磁和电离层数据、GNSS(global navigation satellite system)观测数据研究火山喷发过程中的环境响应;然后,分析了汤加在火山喷发和海啸下的受灾情况;最后,讨论梳理了本次火山喷发的遥感响应流程框架,总结了主要结果,并对下一步研究进行了展望。

表1 本文所使用的数据集

Tab.1 Datasets Used in This Paper

数据类型	名称	跨度	数量	空间分辨率	时间分辨率	说明
雷达数据	哨兵一号	2019-07-06—2021-12-10	55景	15 m	12 d	历史形变监测、强度时序分析
	海丝一号	2022-01-16	1景	1 m	—	受灾评估
光学影像	哨兵二号	2021-08-05—2022-01-17	11景	10 m	10 d	火山监测、受灾评估
	WorldView 高分一号	2021-12-29, 2022-01-16 2019-04-30, 2022-01-16	2景 2景	0.3 m 2 m	— —	受灾评估 受灾评估
GNSS数据	TONG 站点	2022-01-15	—	—	1 s	地表形变分析
磁场数据	太阳风速	—	—	—	30 min	—
	行星际磁场	—	—	—	30 min	—
	地磁指数 Kp	2022-01-01—2022-01-17	—	—	3 h	磁场变化分析
	地磁指数 Dst	—	—	—	1 h	—
电离层模型	全球电离层模型	2022-01-15	—	2.5°(纬度)×5°(经度)	2 h	电离层变化分析

## 1 HTHH火山喷发发展过程

HTHH火山的剧烈喷发发生于2022年1月14日—15日,本文利用多时相卫星光学影像和SAR影像分析HTHH火山的喷发过程。2021-08-05—2022-01-17期间采集的11景哨兵二号(Sentinel-2)光学影像和1景高分一号(Gaofen-1, GF-1)光学影像(2022-01-16)共12景影像如图2所示,其中红色虚线表示2021-08-05火山未喷发前的轮廓。从图2可以看出,2021-08-05—2021-12-18,

HTHH火山处于稳定状态;2021-12-23,火山南部发生明显变形且上空出现大量浓烟(图2(h)),据此推断,HTHH火山于2021-12-23之前已在喷发,且一直持续至2021-12-28(图2(i));2022-01-02,岛屿东南部已经明显扩大(图2(j));2022-01-02之后,光学卫星影像云层覆盖率达100%,直到2022-01-16(图2(k));云层消失后,HTHH火山已仅剩东西两侧海拔较高的山脊处于海面之上,其他区域均已沉入海中(图2(l))。

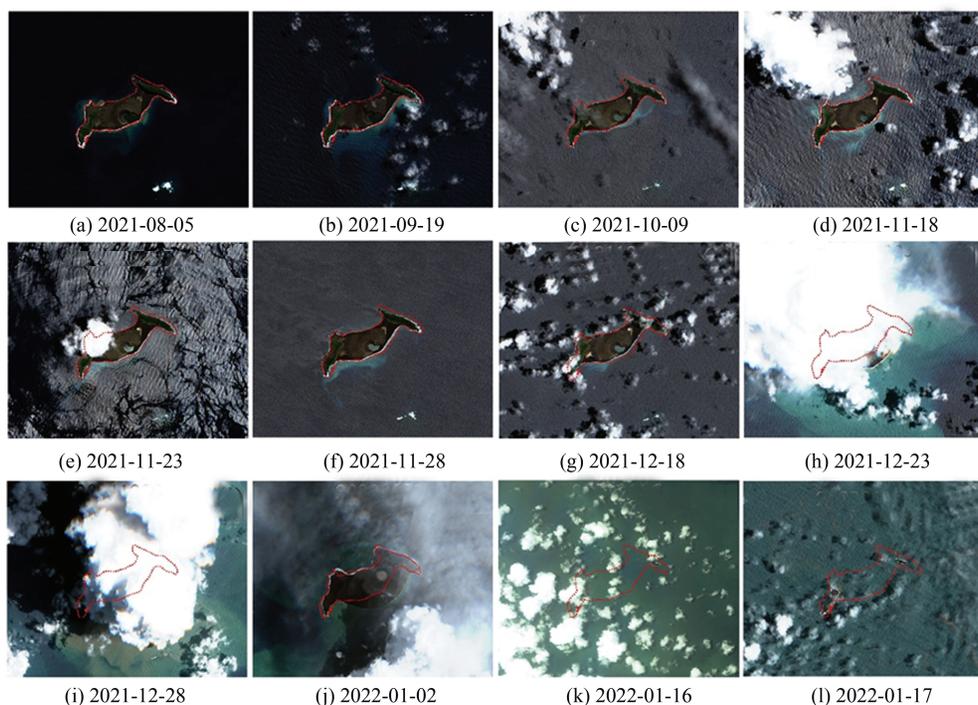


图2 汤加HTHH火山的光学影像

Fig.2 Optical Images of the HTHH Volcano in Tonga

部分光学影像受到云层干扰无法解译,利用2021-08-15—2022-01-15期间哨兵一号(Sentinel-1)的12景SAR影像作为其补充,获得HTHH火山后向散射强度时间序列变化如图3所示,其中红色虚线表示火山未喷发前的轮廓,亮斑表示该处地物具有较高的后向散射强度,通常是裸露的岩石、建筑物等稳定地物。从图3可以看出,在2021-12-10之前,岛屿轮廓清晰,火山无明显变化,火山口和两侧山脊的后向散射强度较高;在2021-12-22(图3(j))和2022-01-03(图3(k)),岛屿面积有明显的扩大,推测可能是火山喷发前地下岩浆囊的膨胀导致地表隆升;2022-01-15(图3(l)),在火山喷发之后,原本明显的火山口已被海水淹没,只剩两侧海拔较高的山脊处在海面之上。

## 2 HTHH火山长时序形变监测

对HTHH火山喷发前的55景Sentinel-1卫星降轨IW(interferometric wide swath)模式数据采用短基线干涉测量(small baseline subset InSAR, SBAS InSAR)技术进行了时序处理,得到了2019-07-06—2021-12-10期间的卫星雷达视线(line of sight, LOS)向平均形变速率和形变时间序列。

图4为汤加HTHH火山InSAR卫星LOS向年平均地表形变速率图,其中红色代表沿LOS向远离卫星,蓝色代表沿LOS向靠近卫星,黑色五角星为形变参考点(reference point, RP)。从图4可以看出,火山有明显的下沉位移,且形变场呈半圆环形状,与火山地表十分吻合。另外,位移速率从火山口向山底逐渐减小。

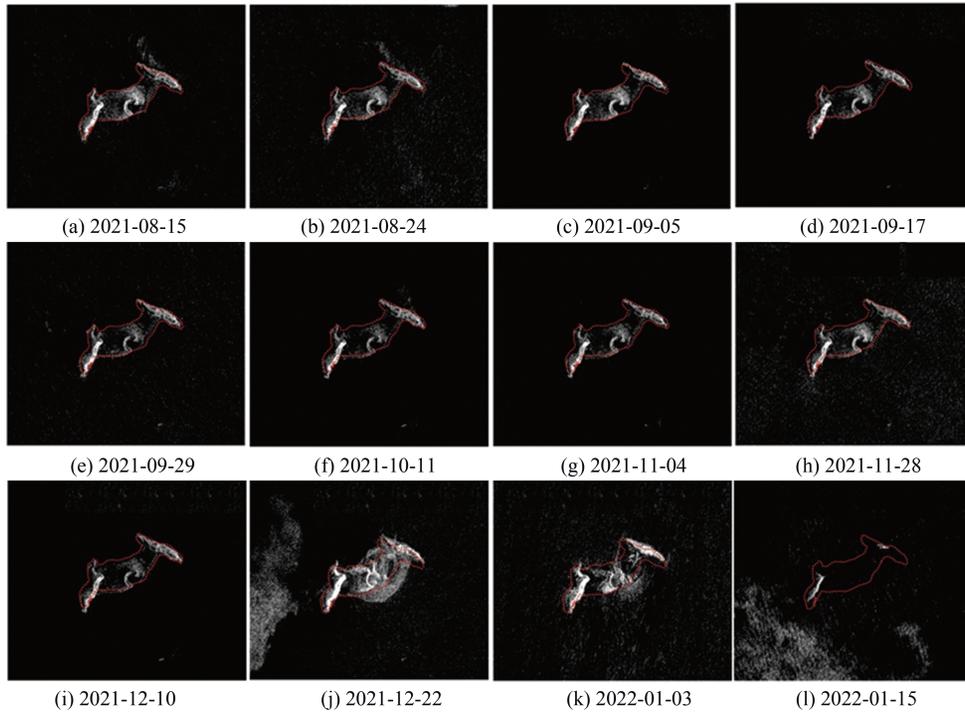


图3 汤加HTHH火山哨兵一号SAR后向散射强度时间序列图

Fig.3 Time Series of Sentinel-1 SAR Backscatter Intensity Diagrams of the HTHH Volcano in Tonga

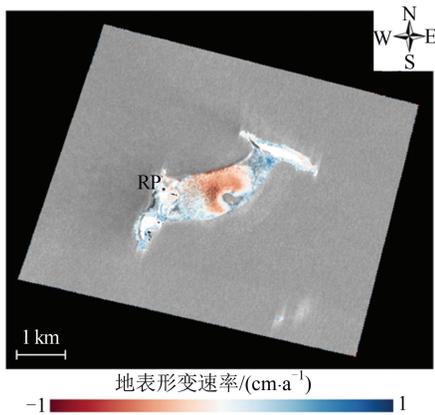


图4 汤加HTHH火山InSAR卫星LOS向年平均地表形变速率图

Fig.4 InSAR Derived Annual Mean Surface Displacement Rate Map in Satellite Radar LOS Direction for the HTHH Volcano in Tonga

HTHH火山2019-07-06—2021-12-10的LOS向累积形变时间序列见图5(a)~5(h);在火山口形变区提取特征点 $P_1$ 和 $P_2$ ,分别绘制两点的形变时间序列,见图5(i)和5(j)。从图5(i)和5(j)可以看出,截至2021-12-10, $P_1$ 的累积位移超过 $-6\text{ cm}$ , $P_2$ 的累积位移约 $-5\text{ cm}$ ;从形变时空演化来看,特征点的形变时序主要分为稳定期和下沉期两个阶段, $P_1$ 和 $P_2$ 分别在2020年6月和8月之后呈现明显

的线性LOS向地表形变,线性拟合结果显示, $P_1$ 的下沉速率达到 $3.1\text{ cm/a}$ , $P_2$ 的下沉速率达到 $2.2\text{ cm/a}$ 。

### 3 汤加HTHH火山喷发的物理环境变化响应

2022年1月14日—15日汤加HTHH火山的剧烈喷发对周边物理环境造成了极大影响,本文利用电离层数据和GNSS数据分析此次火山喷发期间的电离层和地表变化响应。获取世界地磁数据中心发布的磁场数据和美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)发布的全球电离层模型(global ionospheric model, GIM),对汤加火山喷发期间地磁场和电离层的变化进行分析。

在地磁场变化方面,HTHH火山在2022年1月14日和15日喷发时,太阳风速、行星际磁场Bz分量、地磁指数Kp和Dst都有显著的变化(见图6)。行星际磁场Bz分量为存在于太阳系行星际空间的磁场在垂直于黄道方向上的分量;Kp指数和Dst指数均描述的是地磁活动水平,其中Kp指数描述全球地磁活动的总体水平,而不考虑磁扰的具体类型,Dst指数是使用中低纬度测站测量的地磁水平分量的强度变化。从图6

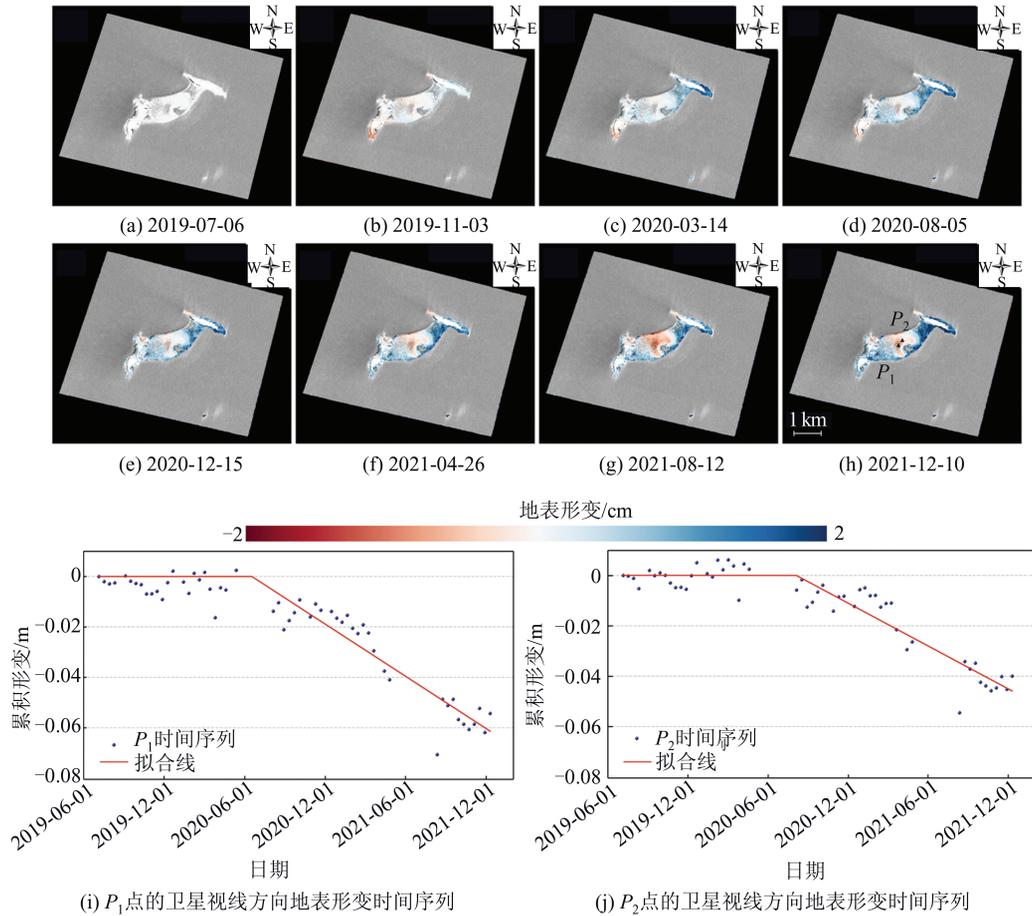


图5 汤加HTHH火山以及特征点InSAR卫星LOS向地表形变时间序列

Fig.5 InSAR Derived Surface Displacement Time Series in Satellite Radar LOS Direction for the HTHH Volcano and the Feature Points in Tonga

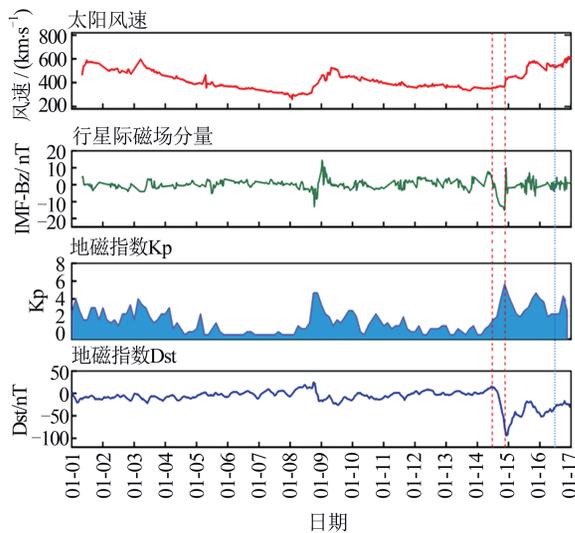


图6 2022年1月1日—16日磁场数据变化

Fig.6 Variations of Magnetic Indices from 1st to 16th January 2022

可见,地磁指数Dst在2022年1月14日12—23时急剧下降94 nT,之后波动上升,1月16日13时后逐渐恢复正常;地磁指数Kp值则在1月14日

0—23时开始急剧上升,之后逐渐下降,至1月15日12时达到最低值;行星际磁场Bz分量与Dst指数具有相似的变化趋势,1月14日23时下降至-20 nT;太阳风速在此期间变化相对平稳。由此可以得出,汤加火山1月14日和15日喷发时,地磁场发生了明显的变化。

在电离层变化方面,图7显示了GIM绘制的2022年1月15日6时和10时的垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)变化。从图7可以看出,在火山爆发期间,火山上空电离层VTEC有着明显的减少,表明火山爆发对电离层有着剧烈影响。

为了探测2022年1月15日汤加火山喷发引发海啸对附近区域的地表影响,收集了距离火山南边约70 km的全球连续运行GNSS跟踪站点TONG站高频观测数据,时间采样间隔为1 s。受火山喷发和当地通讯影响,目前仅能获取到该站在火山喷发后短时间的数据。采用精密单点定位技术获取了该站1月15日的地表三

维形变时间序列(见图8)。由精密定位结果可知,该站点在火山喷发后开始发生显著变化,南北方向最大变化为17.8 cm,东西方向变化最大

为-19.5 cm,高程方向最大值达50.2 cm。时间序列说明该站在火山喷发后发生了较大的地表位移,且高程方向抬升明显。

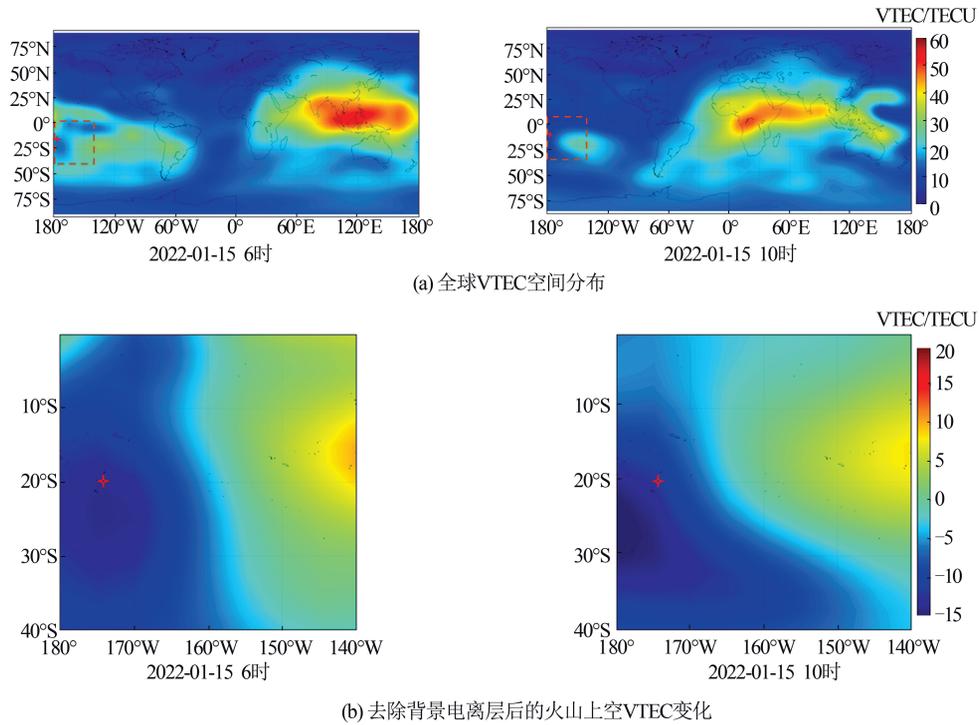


图7 2022年1月15日6时和10时VTEC变化

Fig.7 Changes in VTEC at 6:00 and 10:00 on 15th January 2022

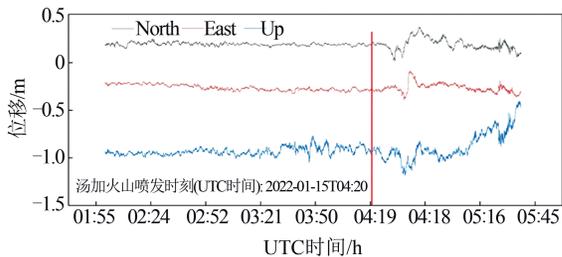


图8 汤加TONG站三维形变时间序列

Fig.8 3D Displacement Time Series of TONG Station in Tonga

#### 4 汤加地区受灾监测

此次火山喷发释放出大量火山灰并引发了海啸,综合利用光学影像和国产SAR影像分析此次汤加受灾情况。汤加主要居住区火山喷发前后光学影像对比如图9所示。首先,对比灾前(2021-12-31、2022-01-14)和灾后(2022-01-17)的Sentinel-2卫星影像发现,汤加主要岛屿地表均被火山灰覆盖,影像颜色明显黯淡。然后,利用海丝一号C波段SAR卫星影像分析评估了火山爆发对汤加首都努库阿洛法城市的影响。基于

海丝一号SAR影像的汤加部分地区建筑及海岸线受损情况评估如图10所示。图10(a)中通过叠加OSM(OpenStreetMap)公开的建筑物轮廓信息可以看出,大范围的房屋倒塌的现象没有出现;仅凭单时相SAR影像的后向散射信息,无法具体判断房屋受损情况。对汤加首都努库阿洛法城市北部海岸线进行识别与提取,显示海岸线清晰可见(图10(b)),与2021年11月获取的Google Earth影像(图10(c))中的海岸线形态相似,火山爆发前后海岸线并无明显变化,表明汤加首都努库阿洛法城市北部海岸线没有明显的海啸冲断迹象。

#### 5 结语

汤加HTHH海底火山喷发因其破坏性、危险性难以采用常规方法近距离观测,卫星遥感技术成为重要的火山喷发观测手段。不同遥感技术的观测方式、时空分辨率和获取的数据类型存在差异性,因此要对火山喷发进行全面刻画和分析,需要合理组合遥感观测技术和制定观测方案,实现不同遥感手段的优势互补以

获取关键灾害数据,为火山喷发灾害评估和灾后恢复提供辅助决策信息。本文综合利用了光学影像、雷达影像、GNSS等数据,充分发挥了国产影像数据的作用,对汤加HTHH火山喷发进行了快速响应。梳理本文的研究思路,提

出构建多源数据获取-地貌演化监测-地表形变监测-环境响应探测-灾害损毁评估-灾后恢复决策一整套火山爆发遥感响应技术框架,汤加HTHH海底火山喷发综合遥感快速响应技术框架具体见图11。

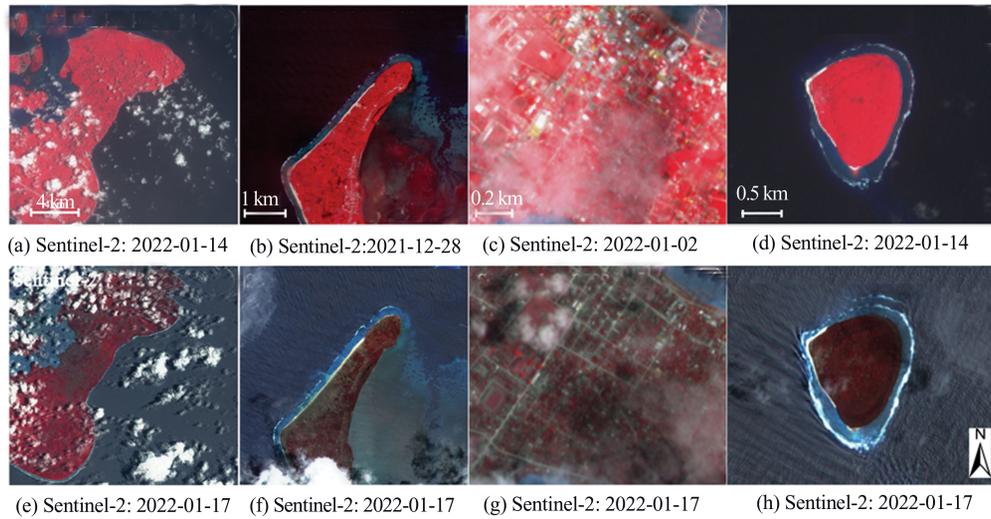


图9 汤加主要居住区火山喷发前后光学影像对比

Fig.9 Comparisons of Optical Images Before and After the Volcanic Eruption in the Main Residential Areas of Tonga

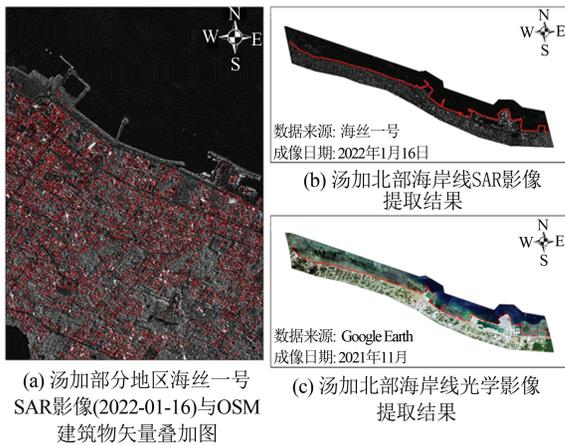


图10 基于海丝一号 SAR 影像的汤加部分地区建筑及海岸线受损情况评估

Fig.10 Damage Assessment of Buildings and Costlines in Part of Tonga Based on Hisea-1 SAR Image

遵循上述技术框架,本文采用多源多时相遥感数据,综合利用多种遥感处理手段,研究了2022年1月14日-15日汤加HTHH火山喷发的发展过程和影响。结果表明,汤加HTHH海底火山自2020-06以来在卫星视线方向出现明显的地表形变,累计下沉可达6.0 cm,2021-12-22左右呈现喷发迹象;火山喷发过程中,当地磁场和电离层出现明显异常变化,火山喷发造成汤加地表GNSS监测站抬升量达50.2 cm;汤加

大部分地区火山灰覆盖情况严重,但汤加首都北部沿海区域受海啸影响较小,无明显海岸线冲断情况。

本文的研究显示了遥感技术在海底火山喷发快速响应方面的独特优势,通过构建合理的遥感手段组合和方案框架(图11),可以实现对火山喷发过程和受灾情况的快速的定性以及定量分析,为探究海底火山喷发物理构造运动和灾害评估以及灾后恢复提供关键数据信息。对于HTHH火山喷发的后续研究,有以下两个方面值得关注:(1)汤加HTHH火山爆发引发了大范围的海啸,研究其诱发机制和海啸强度以及影响范围需要更多的海底和海面观测数据。汤加HTHH火山仍处于喷发活跃期,其喷发运动导致的火山结构崩塌或引发进一步的海啸,仍需要持续地进行监测。(2)作为近30年来最强的火山爆发事件之一,汤加HTHH火山喷发产生了大量的火山灰和二氧化硫(见图12),其是否会影响全球气候需要进一步的评估。

致谢:感谢欧空局提供的 Sentinel 系列雷达数据和光学数据,世界地磁数据中心提供的磁场数据和 JPL 实验室提供的全球电离层模型,以及 IGS 提供的 GNSS 观测数据;感谢国家综合地球观测数据共享平台提供的数据支持。

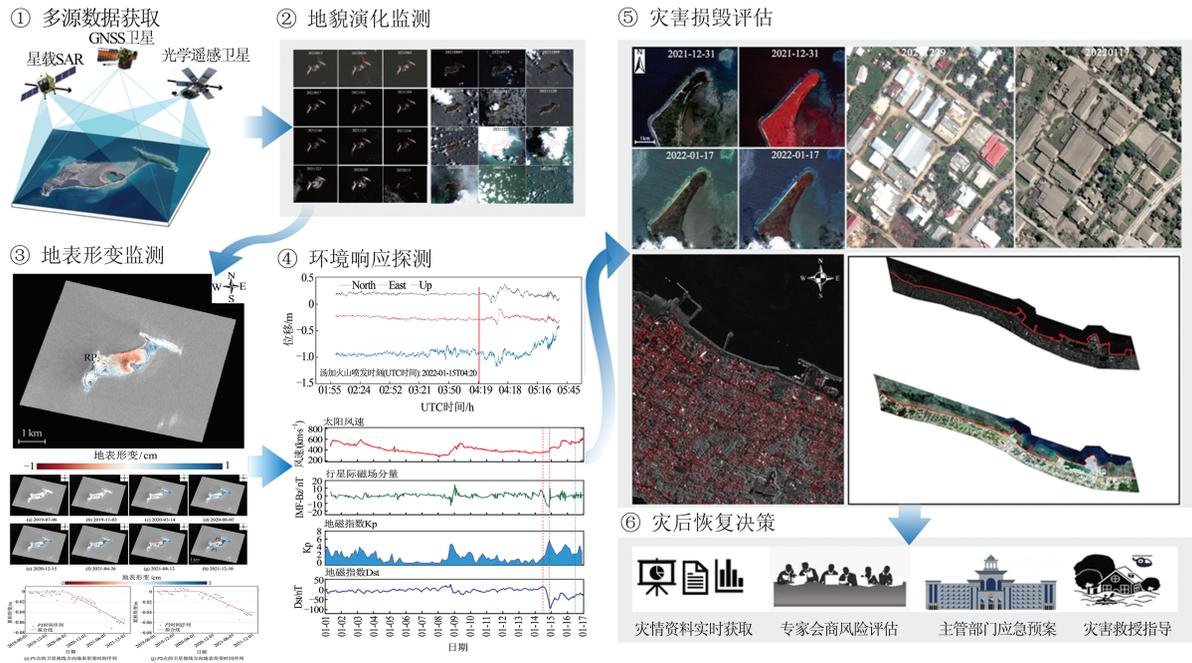


图 11 汤加 HTHH 海底火山喷发综合遥感快速响应技术框架

Fig.11 Remote Sensing Integrated Technical Framework for the Rapid Response to the HTHH Underwater Volcanic Eruption in Tonga

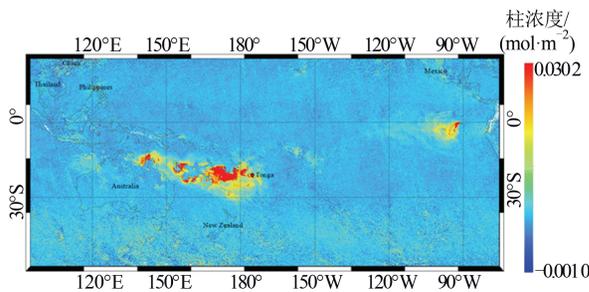


图 12 2022年1月10日—19日汤加及周边地区二氧化硫垂直柱浓度变化图

Fig.12 Changes in Vertical Column Concentration of Sulfur Dioxide in Tonga and Surrounding Areas During the Period from 10th to 19th January 2022

参 考 文 献

[1] Arculus R. Deeply Explosive[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(11): 737-738

[2] Peckover R S, Buchanan D J, Ashby D E T F. Fuel - Coolant Interactions in Submarine Vulcanism[J]. *Nature*, 1973, 245(5424): 307-308

[3] Klein A. Volcano Eruption in Tonga was a Once-in-a-Millennium Event [EB/OL]. [2022-01-17]. <https://www.newscientist.com/article/2304822-volcano-eruption-in-tonga-was-a-once-in-a-millennium-event>

[4] Ewart A, Collerson K D, Regelous M, et al. Geochemical Evolution Within the Tonga-Kermadec-Lau

Arc-Back-Arc Systems: The Role of Varying Mantle Wedge Composition in Space and Time[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(3): 331-368

[5] Bevis M, Taylor F W, Schutz B E, et al. Geodetic Observations of very Rapid Convergence and Back-Arc Extension at the Tonga Arc[J]. *Nature*, 1995, 374 (6519): 249-251

[6] Satake K. Double Trouble at Tonga[J]. *Nature*, 2010, 466(7309): 931-932

[7] Contreras-Reyes E, Grevemeyer I, Watts A B, et al. Deep Seismic Structure of the Tonga Subduction Zone: Implications for Mantle Hydration, Tectonic Erosion, and Arc Magmatism[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B10): B10103

[8] Li Yuanhong, Huang Fang, Yu Huimin, et al. Plagioclase Zoning in Submarine Volcano Kick'em Jenny, Lesser Antilles Arc: Insights into Magma Evolution Processes in Oceanic Arc Magma Chamber[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(2): 605-616 (李原鸿, 黄方, 于慧敏, 等. 加勒比海小安德列斯岛弧 Kick'em Jenny 海底火山岩的斜长石成分环带: 示踪大洋岛弧岩浆房的演化[J]. *岩石学报*, 2016, 32(2): 605-616)

[9] Zhang Yong, Xu Lisheng, Chen Yuntai. Quick Inversion of the Rupture Process of the 2009 March 19 Tonga Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(2): 226-229 (张勇, 许力生, 陈运泰.

- 2009年3月19日汤加地震破裂过程快速反演[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 226-229
- [10] Lu Renqi, Suppe J, He Dengfa, et al. Deep Subducting Slab Reconstruction and Its Geometry, Kinematics: A Case Study for the Tonga-Kermadec Slab from Tomography [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(11): 3837-3845 (鲁人齐, John Suppe, 何登发, 等. 深部俯冲板片三维构造重建及其几何学、运动学研究: 以汤加-克马德克地区俯冲板片为例[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3837-3845)
- [11] 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
- [12] 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(1/2): 177-186
- [13] 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
- [14] 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

## Rapid Interpretation and Analysis of the 2022 Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano with Integrated Remote Sensing Techniques

HU Yufeng<sup>1,2,3</sup> LI Zhenhong<sup>1,2,3</sup> WANG Le<sup>1,2</sup> CHEN Bo<sup>1,2</sup> ZHU Wu<sup>1,2,3</sup>  
 ZHANG Shuangcheng<sup>1,2,3</sup> DU Jiantao<sup>1,2</sup> ZHANG Xuesong<sup>1,2</sup> YANG Jing<sup>1,2</sup>  
 ZHOU Meiling<sup>1,2</sup> LIU Zhenjiang<sup>1,2</sup> WANG Sisi<sup>4</sup> MIAO Chen<sup>4</sup>  
 ZHANG Lianchong<sup>5</sup> PENG Jianbing<sup>1,3</sup>

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

4 National Remote Sensing Center of China, Ministry of Science and Technology, Beijing 100036, China

5 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract: Objectives:** On 14th and 15th January 2022, the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) underwater volcano in Tonga in the South Pacific Ocean violently erupted and caused a tsunami, which has attracted widespread international attention. In this paper, we attempted to rapidly investigate this once-in-a-millennium massive event using integrated remote sensing techniques. **Methods:** We comprehensively used multi-temporal satellite optical images, radar images, global navigation satellite system (GNSS) observations and other datasets to quickly interpret and analyze the volcanic eruption process and its impacts. The damage assessment in parts of Tonga was also performed. Based on the integrated remote sensing techniques, we presented a technical framework for the rapid interpretation and analysis of volcanic eruptions, which comprises of six components, namely multi-source data acquisition, geomorphology monitoring, deformation monitoring, environmental response detection, damage assessment and recovery decision. **Results:** Our results show that the HTHH underwater volcano in Tonga had exhibited obvious surface displacements in the satellite radar line of sight direction with a maximum accumulated displacement of 6.0 cm since June 2020, and erupted since around 22nd December 2021. During the volcanic eruption, the local magnetic field and ionosphere exhibited obvious abnormal signals, and the continuous GNSS data in Tonga suggested clear surface displacements with an uplift up to 50.2 cm. Most areas of Tonga were blanketed in ash, but it appeared that, in northern part of Tonga's capital, little damage was observed in the coastlines and the main buildings and roads remained intact. **Conclusions:** This study

shows how to use integrated remote sensing techniques to quickly respond to underwater volcanic eruptions, including the topography evolution of the HTHH volcano and the damage assessment of its eruption. It is believed that the remote sensing integrated technical framework shall not only contribute to the speedy recovery and reconstruction of the society after the HTHH volcanic eruption, but also to the mitigation of future geohazard events.

**Key words:** Tonga underwater volcano; multi-source remote sensing datasets; hazard response; eruption process monitoring; damage assessment

**First author:** HU Yufeng, PhD, lecturer, specializes in remote sensing of environment with GNSS. E-mail: yfhu@chd.edu.cn

**Corresponding author:** LI Zhenhong, PhD, professor. E-mail: Zhenhong.Li@chd.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2020YFC1512000); Shaanxi Province Science and Technology Innovation Team Program (2021TD-51); the Natural Science Research Project of Shaanxi Province (2020JQ-350); ESA-MOST DRAGON-5 Project(59339).

**引文格式:** HU Yufeng, LI Zhenhong, WANG Le, et al. Rapid Interpretation and Analysis of the 2022 Eruption of Hunga Tonga-Hunga Haapai Volcano with Integrated Remote Sensing Techniques[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 242-251. DOI:10.13203/j.whugis20220050(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. DOI:10.13203/j.whugis20220050)