

火山成因的海啸触发机制分析

张坎¹, 李琳琳^{1,2*}, 胡桂¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

摘要 2022年汤加火山爆发, 引发了全球范围内的海啸, 使火山海啸这一非典型性海啸受到学界的广泛关注。整理了全球历史火山海啸事件相关数据, 分析了火山地震、火山结构失稳、水下爆炸、火山碎屑流、气压波这5种触发海啸的机制, 介绍了2022年汤加火山海啸事件触发机制。指出未来火山海啸的研究方向为: 从地质构造角度分析潜在海啸灾害的时空分布规律; 以气象海啸和水下爆炸为重点, 发展完善火山海啸各机制及传播理论; 从技术角度解决火山海啸的相关预警问题。

关键词 火山海啸; 触发机制; 汤加火山

海啸是一种能危及人类生命、财产安全的海洋地质灾害。引发海啸的成因有很多, 如海域地震、滑坡、火山活动、陨石坠落等。其中, 地震成因的海啸是目前该领域研究的主要对象。随着海洋探测技术的发展, 非典型海啸源也受到更多关注^[1], 以海底滑坡海啸为之最。而本文所关注的火山海啸因其发生频次较低, 受关注程度不高, 为当前海啸灾害研究中的盲区^[2]。2022年1月15日, 汤加洪阿-汤加-洪阿哈派(Hunga Tonga-Hunga Ha'apai)火山(以下称“汤加火山”)剧烈喷发, 其规模之大、波及范围之广、破坏力之强, 形成了21世纪以来最大规模的火山爆发, 而且触发的海啸因其稀有性受到学术界的关注^[3-11]。

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)海啸事件数据库^[12]中收录了全球自公元前2100年至今的2768次海啸事件, 其中171起与火山活动相关。空间上, 全球火山海啸事件主要集中分布在环太平洋板块边缘、巽他火山带、地中海区域、大西洋洋中脊以及一些分散的地幔柱热点火山(图1)。但在NOAA重大火山爆发事件数据库^[13]中收录了公元前4360年至今867起重大火山爆发事件, 换言之, 约20%的大型火山爆发事件会伴随海啸发生。火山海啸发生频率不高但其危害程度不容小觑, 1883年喀拉喀托火山剧烈喷发并发生大规模火山体垮塌和碎屑流, 造成了近场地区巽他海峡的巨大海

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976197); 海南省重点研发项目(ZDYF2020209)

作者简介: 张坎, 硕士研究生, 研究方向为海洋地质灾害, 电子信箱: Zhangk293@mail2.sysu.edu.cn; 李琳琳(通信作者), 教授, 研究方向为海洋地质灾害, 电子信箱: lilinlin3@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 张坎, 李琳琳, 胡桂. 火山成因的海啸触发机制分析[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 35-43; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.004

啸, 沿岸地区近3万人死亡^[14]。然而在距离火山几千公里外的檀香山、旧金山、科特迪瓦等地区意外观测到海面扰动并且比传统海啸波到时更早, 对此学界提出了大气海洋耦合共振机制的气象海啸机制来解释相关现象^[15-17]。但目前学界对火山海啸

的触发机制研究仍在初步阶段, 针对火山海啸这一非典型性海啸, 本文通过NOAA重大火山爆发事件与海啸事件资料库数据分析, 阐述和介绍火山海啸的成因机制和相关重大事件, 并结合已有资料分析2022年1月15日汤加火山事件的海啸触发机制。

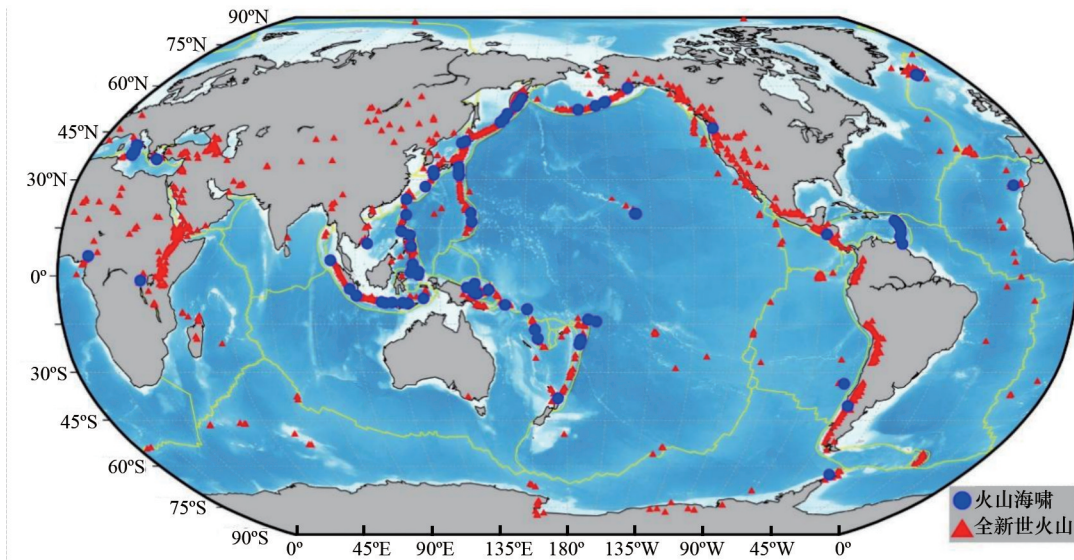


图1 全球历史火山海啸事件分布
(数据来自NOAA海啸事件数据库和重大火山事件数据库)

1 火山成因的海啸触发机制类型

火山海啸的概念最早由Latter^[18]在1981年提出, 是指在时空上均与火山爆发有着关联的海啸。随后有学者也使用火山成因海啸、火山诱发海啸等词汇来描述火山爆发过程中的火山岩浆、结构等进入水体形成海啸^[19]; 也有观点认为无论火山是否爆发, 只要海啸的产生涉及火山均属于火山海啸^[20]。后者较于前者的定义更为广泛, 将火山未爆发时的滑坡、火山口塌陷等成因的海啸也定义为火山海啸, 但在物理机制上, 此种类型的海啸与滑坡海啸更为贴近。本文关于火山海啸的定义沿用后者。目前对于火山活动触发海啸的机制, Latter等^[18]和Paris等^[14]做了相关梳理。前者以1883年喀拉喀托火山喷发为例, 讨论了火山活动中地震、水下爆炸、空气冲击波、滑坡等10种产生海啸的因素。后者

基于东南亚区域火山海啸的研究提出了6种可能机制, 分别是火山地震、边坡失稳、火山碎屑流、水下爆炸、冲击波以及火山口塌陷。本文认为可以从水体的初始位移场形成机制再次将以上6种机制划分为5种: 火山地震(图2(a))、火山结构失稳(图2(b))、水下爆炸(图2(c))、火山碎屑流(图2(d))、气压波(图2(e))。分别对这5种成因机制做进一步的解释。

1.1 火山地震

火山地震是与火山活动有着密切联系的一种区别于构造地震的特殊地震, 其往往伴随火山爆发过程前后, 可以由岩浆活动、火山口塌陷、内部气体等因素触发^[21]。火山地震还具有震级小、震源浅等特点, 相比于构造地震直接产生较大的水体位移场从而触发海啸, 火山地震一般与滑坡等其他机制共同作用触发海啸。火山地震造成的海啸约占火山

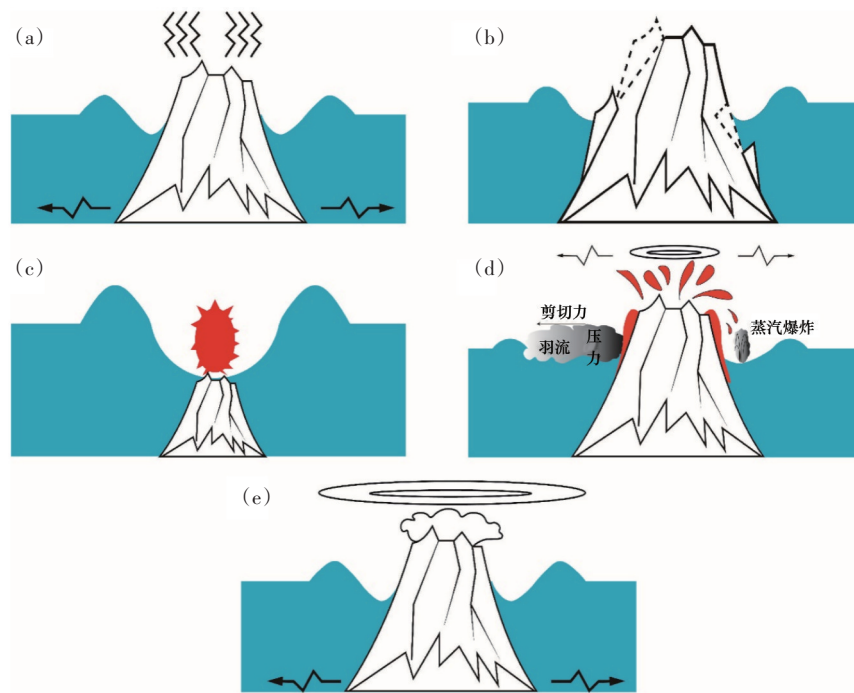


图2 火山海啸机制

海啸事件的20%^[18]。全球范围内有32座火山通过地震方式触发了海啸事件共41次,约占火山海啸的23.9%^[12],主要分布在板块边界处。事实上,在海啸事件的成因上很难区分火山地震和构造地震,是因为触发海啸事件的火山往往位于各板块间的火山带上,而这些火山带也恰恰与大多数地震带重合,区域内的火山喷发和地震事件互相影响^[22]。加之历史数据的缺乏和模糊性,也很难从历史资料中区别这些地震的机制。

1.2 火山结构失稳

火山结构失稳造成海啸的机制与滑坡类似,由于火山活动或者海水侵蚀等内部或外界条件的影响导致火山口或者火山侧翼等结构被破坏,在重力的作用下进入水体,从而造成海啸。Keating等^[23]将火山结构失稳划分成内因和外因2个方面,共介绍了23种不同原因的火山失稳机制并列了相关的事件。火山结构失稳触发海啸的规模(如滑坡海啸)也受滑动体积、滑动速度、滑动过程等多种因素控制,此类海啸波相比于地震海啸波往往波长较短,在传播的过程中频散作用影响较大,因此一般对近场区域影响较大,很难传播到远处。然而在火

山爆发过程中近场地区一般地形较为复杂,可能还伴随着地震、岩浆遇水爆炸等过程,因此从较多的海啸波数据中梳理海啸源出来十分困难。2002年12月意大利Stromboli火山喷发出的火山熔岩等在侧翼失稳,先后发生了2次垮塌,引发了附近海岸一场最大上升幅度为8 m的当地海啸^[24],不过通过观测发现,在超过200 km距离之外的地区影响就相当有限^[25]。相对简单的则是发生在火山休眠期间的结构失稳触发的海啸,历史上位于非洲西北部海域的Canary火山群岛就在非活动期间发生多次火山侧翼坍塌造成了局部海啸^[26](图3),具有历史意义的滑坡规模从0.02~4 km³不等,部分水下沉积体积在100~350 km³之间^[27]。

1.3 水下爆炸

全球火山计划(Global Volcanism Program)^[28]中已探明的全新世以来(约1万年)活动火山有1350座,根据数据库中高程属性进行筛选,发现其中有110座是完全浸没于水下。这110座火山并不包含像汤加洪阿-汤加-洪阿哈派火山这样部分出露海水的火山。随着海底观测技术的发展和海洋考察计划的增多,未来探知到的海底火山数量可能远远

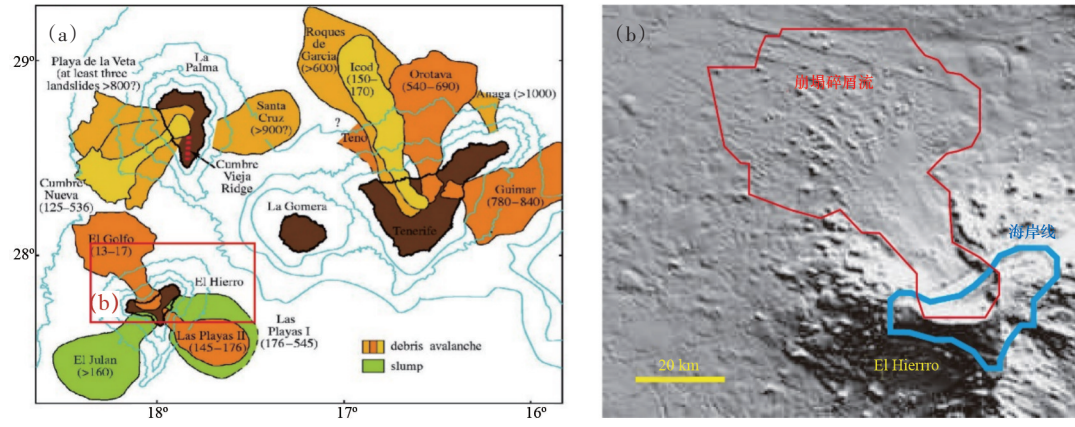


图3 非洲西北部海域Canary群岛滑坡(改自文献[26])

多出预期。火山爆发引起的海啸事件中有29%与水下爆炸有关^[29],说明水下爆炸在火山成因海啸中占据重要地位,同时也是区别于地震成因海啸和滑坡成因海啸之外的特殊机制之一,当海底火山爆发或者火山口爆发陷落入水后,高温的岩浆和气体与水发生反应,迅速膨胀或爆炸从而对水体产生扰动形成海啸。水下爆炸触发海啸的机制(图4)可以用Le Méhauté的爆炸水波理论来进行数值量化^[30],该理论提出了通过2个经验公式(1)和(2)建立水下爆炸的水体初始场模型。

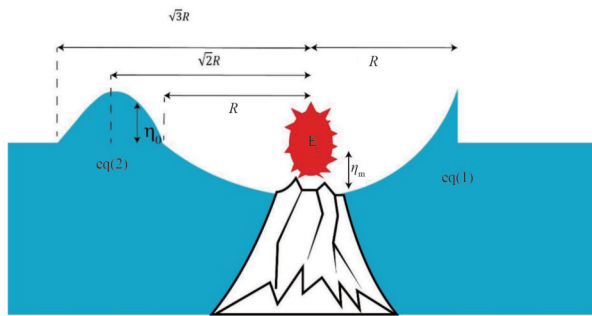


图4 水下爆炸触发海啸机制(修改自文献[31])

$$\eta_0(r) = \begin{cases} \eta_m \left[2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right], & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (1)$$

$$\eta_0(r) = \begin{cases} \eta_m \left[-\frac{1}{3} \left(\frac{r}{R} \right)^4 + \frac{4}{3} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right], & r \leq \sqrt{2} R \\ 0, & r > \sqrt{3} R \end{cases} \quad (2)$$

式中, η_m 是以米为单位的垂直最大扰动深度, E 是以焦耳为单位的爆炸能量, r 表示距离爆炸中心的距离, R 表示爆炸空腔半径。

通过公式(1)或(2),可以得到爆炸初始场各处的水面初始位移 η_0 。Le Méhauté等^[32]进一步提出经验公式,将爆炸产生的最大扰动深度估计为该处爆炸能量的函数:

$$\eta_m = \alpha E^{0.24} \quad (3)$$

其中 α 是根据深度和爆炸能量决定的一个常数。

以上是一套完整的水下爆炸机制的火山海啸的理论模型。对于爆炸能量,Sato等^[33]根据火山口直径 D 和火山喷出体积 V 这两个参数提出了不同的经验公式(4)和(5)来估算水下爆炸能量。水下爆炸产生的海啸波周期较短,易频散,故主要对近场区域产生较大破坏。1996年,Karymskoye湖中发生由火山活动引起的连续爆炸,在最大一次爆炸的同时产生了一个近轴对称的130 m高海啸波,并以20~40 m/s的速度传播^[29]。此次巨大的火山湖海啸观测数据众多,也有力地说明了水下爆炸确实能引起局地海啸。

$$E = 4.45 \times 10^6 D^{3.05} \quad (4)$$

$$E = 4.055 \times 10^6 V^{1.1} \quad (5)$$

1.4 火山碎屑流

伴随火山喷发喷出的大量火山岩、气体、火山灰和碎片等物质可以非常迅速地随侧翼山坡流下,形成火山碎屑流(pyroclastic flows),当火山碎屑流进入海洋就可能触发海啸灾害。不同于一般的滑

坡海啸,火山碎屑流的运动是一个高度动态的过程,由于其成分繁多,特征差异极大,所以其进入海洋产生海啸的机制十分复杂。当火山碎屑流入海水中后,根据其密度不同,会分成2个部分:密度较大的部分形成火山碎屑密度流(底流),类似于泥石流,进入水中后仍能以该形式大规模移动,密度较小的部分(火山灰和气体部分)形成火山羽流^[34]。而这2个部分能够通过蒸汽爆炸、碎屑流、羽流压力、羽流剪切和压力脉冲波等5种可能的机制产生具有巨大破坏力的海啸(图2(d),图5),所以一次火山碎屑流产生海啸的过程中可能已经包含除火山地震以外的所有火山源海啸机制。火山碎屑流产生的海啸最容易引起学界关注,1883年的印尼喀拉喀托火山海啸开启了相关研究^[34-39]。2000年,McCooy等^[36]通过对在爱琴海的火山碎屑流沉积的考察,推测出一场在青铜时代晚期(LBA)Thera火山爆发产生了浪高1.9 m,沿岸爬升7~12 m的海啸,并推测此次海啸可能摧毁了地中海文明之一的Thera文明。虽然火山碎屑流的海啸容易观察,但是火山碎屑流进入水体中的相互作用机制和产生海啸的条件仍然是一个模糊的问题。不仅是因为在实验室中模拟该过程或者在理论上推演十分困难,就连火山爆发时观测记录碎屑流物质进入海洋的过程都是个难题,具体火山碎屑流机制海啸模型仍值得探索。

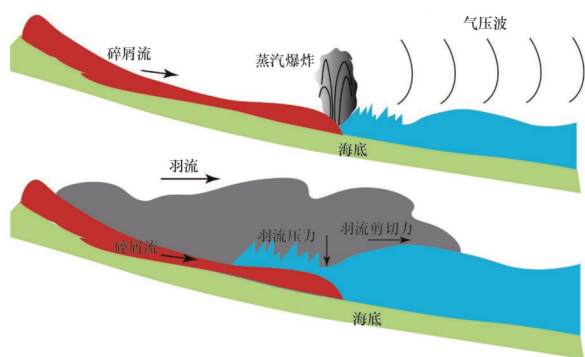


图5 火山碎屑流海啸机制(改自文献[34])

1.5 气压波

火山气压波触发的海啸也被称为气象海啸(meteotsunami)^[40],当火山爆发时释放足够的能量激发大气,从而产生重力波、兰姆波(Lamb)等一系

列大气波。这些波可以直接越过陆地、岛屿等“障碍”,向远场传播,再通过和气-水耦合,将能量释放到水中,从而影响到一般海啸波看似不能直接到达的远场地区^[16]。气象海啸的机制最早由Ewing等^[15]在分析历史数据时提出。他们发现在远场地区的台站潮汐计扰动与到达台站的第一波大气扰动在时间上有一定关联,随后提出了基于大气海洋耦合体系产生海平面扰动的假说。Harkrider等^[16]通过分析频散曲线、引入激发函数等新兴数学方法,将大气波和海啸长波进行相位耦合(速度匹配),解释了1883年喀拉喀托火山海啸到达北美地区的时间相对比按传统浅水波方程传播的预测时间更快的原因。Yokoyama^[17]通过模拟计算1883年喀拉喀托火山的爆发以及海啸的产生,提出气象海啸产生的3个条件:(1) 海域平均深度在5 km以上且火山爆发在大气中激发冲击波;(2) 海域必须有一定面积;(3) 火山爆发的能量需达到一定数量级。

2 汤加火山事件的海啸触发机制分析

汤加火山(175°23.6'W, 20°32.7'S)是西南太平洋岛国汤加境内的一座活跃的活火山,位于太平洋板块向澳大利亚板块俯冲而形成的Tonga-Kermadec火山弧上(图6)^[41-43]。活跃的地质环境使得汤加火山的活动频繁,2014—2015年火山活动将两座岛连接成一个约5 km宽的岛屿^[44],直到2022年1月14日汤加火山再次开始喷发,当地时间1月15日17:00左右发生最大爆发并伴随有Ms 5.8级的火山地震发生。爆发后火山岛大部分消失,全球各地气压计均记录到2 hPa(1 hPa=100 Pa)的气压扰动^[45],环太平洋地区绝大多数潮位站和深海浮标均监测到海啸波(图6)。近场地区可观测到最高15 m海啸波,附近国家港口也监测到0.2~1.2 m海啸波,海底电缆也遭到破坏;在西北太平洋日本多处观测到海啸波,大量渔船受到袭击而沉没;而东太平洋的秘鲁和智利海岸发生海啸致死事件^[2]。一系列的观测数据说明此次火山爆发过程至少发生

了火山地震、水下火山爆炸、火山结构失稳、气压扰动等过程,因此笔者认为本次事件的海啸机制有:
(1) 火山爆发引起的气象海啸;(2) 火山口塌陷或

侧翼坍塌造成的滑坡海啸;(3) 岩浆在水中引发爆炸造成的爆炸海啸。

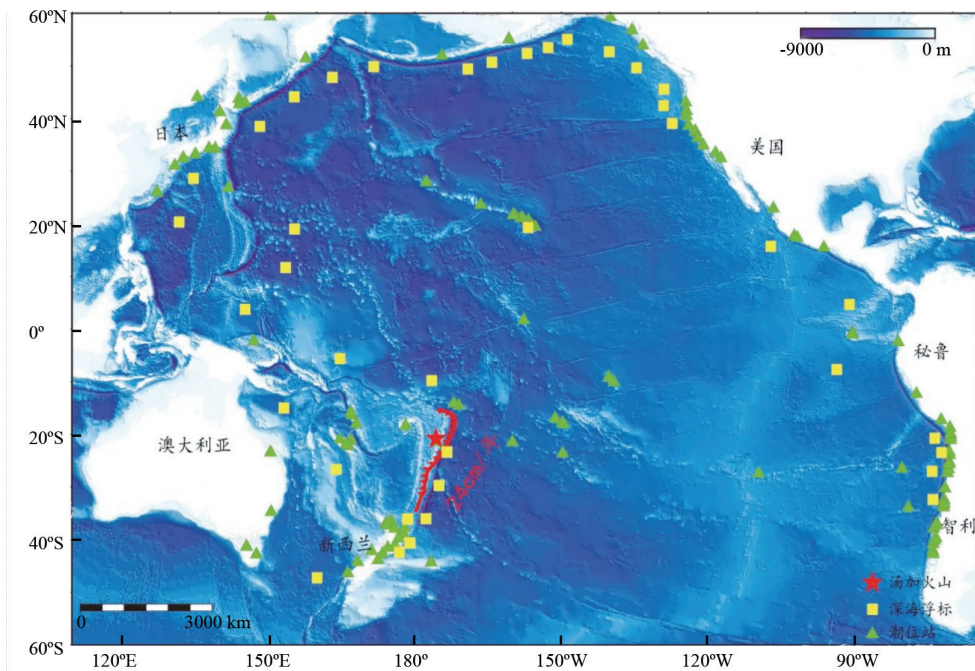


图6 汤加火山的位置和太平洋海域记录到海啸波的站点分布
(数据源自文献[46]~[48])

目前,已有不少学者从多类型数据观测、理论分析、数值模拟等方面做出了相关探索,通过卫星^[49]或各地监测台站数据^[3]清晰地证明了火山爆发引起了全球性的气压扰动,各类气压波绕地球多次传播且在远场地区引发了气象海啸^[50]。Matoza等^[3]通过各类仪器数据分析介绍了本次事件中的气压波——兰姆波波环绕地球4次并推测其形成了远场地区海啸前导波,Carvajal等^[5]通过分析589个潮位站的数据,认为全球海啸的前导波(307 m/s)是由火山爆发的气压波造成,然而在环太平洋区域海域(如日本、智利)发现后续的最大波浪(198 m/s)是由近场地区其他机制产生的海啸波。Hu等^[51]则通过116个潮位站和38个深海海啸浮标的海啸波频谱分析确定了4种不同周期的海啸波,分别可能由大气重力波、兰姆波、火山口塌陷等因素产生。Kubotal等^[52]发现在兰姆波引发的海啸波频散后会使得海啸波持续时间延长,而爆发产生的各种类型的

大气波又会使海啸传播速度比预期快,从而大大增加预警难度。Tanioka等^[53]通过日本海沟的S-NET传感器网络记录的汤加火山海啸数据对海啸气-水耦合过程进行模拟,发现气象海啸在特殊地形下对大气波的波长十分敏感。

3 结论

火山海啸相比于地震海啸发生频率较低,但对人类生命财产安全的威胁很大,目前研究仍处于初步阶段。开展火山海啸研究存在多个难点:(1) 火山海啸过程复杂,机制繁多,影响空间范围宽广,涉及大气、海洋水体和海底地质过程的耦合,各种机制之间往往相互作用使研究难度大大提高,需要开展地质、地球物理、流体力学等多门学科交叉研究。(2) 由于其特殊的地理位置,对海域/海底火山调查、探测和监测的难度都很大,获取一手资料的成

本高。(3) 火山海啸事件的历史资料较少,且记录不全,难以开展概率性灾害评估,减灾主要需要依靠预警手段,而火山事件发生过程中的多种不确定性对预警技术提出了极大的挑战。

为解决以上难点,火山海啸未来研究可在以下3个方向展开:(1) 从地质构造角度分析潜在火山海啸灾害的时空分布规律。(2) 以气象海啸和 underwater explosion 为重点,发展完善火山海啸各机制及传播理论。(3) 从技术角度解决火山海啸的相关预警问题。

参考文献(References)

- [1] 李琳琳, 邱强, 李志刚, 等. 南海海啸灾害研究进展及展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(5): 803-831.
- [2] Terry J P, Goff J, Winspear N, et al. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: Globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau[J]. *Geoscience Letters*, 2022, 9(1): 1-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, et al. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(6): e2022GL098153.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Heki K. Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan[J]. *Earth, Planets, and Space*, 2022, 74(1): 1-12.
- [9] Kulichkov S N, Chunchuzov I P, Popov O E, et al. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, 179(5): 1533-1548.
- [10] 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.
- [11] Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere[J]. *Nature*, 2022, 601(7894): 497.
- [12] National Geophysical Data Center. World data service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database[EB/OL]. (2021-07-07)[2022-09-23]. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>. doi: 10.7289/V5PN93H7.
- [13] National Geophysical Data Center. World data service (NGDC/WDS): NCEI/WDS Global Significant Volcanic Eruptions Database[EB/OL]. (2021-07-08)[2022-9-23]. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/volcano/event-search>.
- [14] Paris R. Source mechanisms of volcanic tsunamis[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2053): 20140380.
- [15] Ewing M, Press F. Tide-gage disturbances from the great eruption of Krakatoa[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1955, 36(1): 53-60.
- [16] Harkrider D, Press F. The Krakatoa air-sea waves—an example of pulse propagation in coupled systems[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1967, 13(1/2/3): 149-159.
- [17] Yokoyama I. A scenario of the 1883 Krakatau tsunami[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1987, 34(1): 123-132.
- [18] Latter J. Tsunamis of volcanic origin: Summary of causes, with particular reference to Krakatoa, 1883[J]. *Bulletin volcanologique*, 1981, 44(3): 467-490.
- [19] Nomanbhoy N, Satake K. Generation mechanism of tsunamis from the 1883 Krakatau eruption[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(4): 509-512.
- [20] Paris R, Switzer A D, Belousova M, et al. Volcanic tsunami: A review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea)[J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(1): 447-470.

- [21] 任锦章, 赵谊. 火山地震的概念和一般特征——国外火山监测研究的进展(一)[J]. 东北地震研究, 1990(1): 95–100.
- [22] Walter T R, Amelung F. Volcanic eruptions following $M > \text{or} = 9$ megathrust earthquakes: Implications for the Sumatra–Andaman volcanoes[J]. *Geology (Boulder)*, 2007, 35(6): 539–542.
- [23] Keating B H, McGuire W J. Island edifice failures and associated tsunami hazards[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(6): 899–955.
- [24] Bonaccorso A, Calvari S, Garfi G, et al. Dynamics of the December 2002 flank failure and tsunami at Stromboli volcano inferred by volcanological and geophysical observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18), doi: 10.1029/2003GL017702.
- [25] Maramai A, Graziani L, Alessio G, et al. Near- and far-field survey report of the 30 December 2002 Stromboli (Southern Italy) tsunami[J]. *Marine Geology*, 2005, 215(1/2): 93–106.
- [26] Masson D G, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: Processes, triggers and hazard prediction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1845): 2009–2039.
- [27] Ward S N, Day S. Cumbre Vieja volcano: Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands[J]. *Geophysical research letters*, 2001, 28(17): 3397–3400.
- [28] Venzke, E. Global Volcanism Program, 2013. *Volcanoes of the World*, v. 4.11.2[Z/OL]. Washington, D. C. : Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- [29] Belousov A, Voight B, Belousova M, et al. Tsunamis generated by subaquatic volcanic explosions: Unique data from 1996 eruption in Karymskoye Lake, Kamchatka, Russia[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(6): 1135–1143.
- [30] Le Méhauté B. Theory of explosion-generated water waves[J]. *Advanced Hydroscience*, 1971, 7: 1–79.
- [31] Hayward M W, Whittaker C N, Lane E M, et al. Multi-layer modelling of waves generated by explosive subaqueous volcanism[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(2): 617–637.
- [32] Le Méhauté B, Wang S. *Water waves generated by underwater explosion*[M]. Singapore: World Scientific, 1996.
- [33] Sato H, Taniguchi H. Relationship between crater size and ejecta volume of recent magmatic and phreato-magmatic eruptions: Implications for energy partitioning[J]. *Geophysical research letters*, 1997, 24(3): 205–208.
- [34] Watts P, Waythomas C F. Theoretical analysis of tsunami generation by pyroclastic flows[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B12): 2563.
- [35] Cas R A F, Wright J V. Subaqueous pyroclastic flows and ignimbrites: An assessment[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1991, 53(5): 357–380.
- [36] McCoy F W, Heiken G. Tsunami generated by the Late Bronze Age eruption of Thera (Santorini), Greece[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(6/7/8): 1227–1256.
- [37] Freundt A. Entrance of hot pyroclastic flows into the sea: experimental observations[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2003, 65(2/3): 144–164.
- [38] Kelfoun K, Samaniego P, Palacios P, et al. Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador)[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2009, 71(9): 1057–1075.
- [39] Maeno F, Imamura F. Tsunami generation by a rapid entrance of pyroclastic flow into the sea during the 1883 Krakatau eruption, Indonesia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B9): 205.
- [40] Monserrat S, Vilibic I, Rabinovich A B. Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band[J]. *Natural hazards and earth system sciences*, 2006, 6(6): 1035–1051.
- [41] Schellart W P, Lister G S, Toy V G. A Late Cretaceous and Cenozoic reconstruction of the Southwest Pacific region: Tectonics controlled by subduction and slab roll-back processes[J]. *Earth–Science Reviews*, 2006, 76(3/4): 191–233.
- [42] 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.
- [43] Brenna M, Cronin S J, Smith I E M, et al. Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific[J]. *Lithos*, 2022, 412–413: 106614.
- [44] Wunderman, R. Global Volcanism Program. Report on Hunga Tonga–Hunga Ha’apai (Tonga) bulletin of the Global Volcanism Network 40: 1[R/OL]. Washington,

- DC: Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201501-243040>.
- [45] Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022[J]. *Weather*, 2022, 77(3): 76-81.
- [46] National Oceanic and Atmospheric Administration. Deep-ocean assessment and reporting of Tsunamis (DART(R)) [EB/OL]. (2022-02-15)[2022-03-10]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc:G10068>.
- [47] GNS Science. NZ Deep-ocean assessment and reporting of Tsunami (DART) data set[EB/OL]. (2022-02-15)[2022-03-10]. <https://doi.org/10.21420/8TCZ-TV02>.
- [48] Flanders Marine Institute (VLIZ). Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) (2022): Sea level station monitoring facility[EB/OL]. (2022-02-15)[2022-03-10]. <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org>.
- [49] Otsuka S. Visualizing Lamb Waves from a volcanic eruption using Meteorological Satellite Himawari-8[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL098324.
- [50] 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.
- [51] Hu G, Li L, Ren Z, et al. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean [J/OL]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2022: 1-30. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-200>, preprint.
- [52] 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.
- [53] Tanioka Y, Yamanaka Y, Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption[J]. *Earth, Planets and Space*, 2022, 74(1): 1-7.

Analysis on the triggering mechanism of volcanic tsunamis

ZHANG Kan¹, LI Linlin^{1,2*}, HU Gui¹

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Zhuhai 519082, China

Abstract In 2022, the Tonga volcanic eruption triggered a global tsunami. The widely observed volcanic tsunami attracts wide attention to such an atypical tsunami source in the academic world. In this paper, we review the historical records of volcanic tsunamis and summarize the triggering mechanisms into five categories: volcanic earthquake, volcanic structure instability, underwater explosion, pyroclastic flow and atmospheric pressure wave. We also briefly discuss the triggering mechanism of the 2022 Tonga volcanic tsunami event. It is pointed out that the future research directions of volcanic tsunamis are as follows: analyzing the temporal and spatial distribution of potential volcanic tsunamis from tectonics; Developing and perfecting the mechanism and propagation theory of potential volcanic tsunami with the emphasis on meteorological tsunami and underwater explosion; Solving the volcanic tsunami warning problems from the technical point.

Keywords volcanic tsunami; triggering mechanism; Tonga Volcano ●



(责任编辑 王志敏)