



2022年1月15日汤加火山海啸对中国沿海的影响分析

王宗辰¹, 徐志国^{1,2*}, 原野^{1,2}, 杨怀玮¹, 孙立宁¹, 王培涛^{1,2}, 范婷婷¹

1. 国家海洋环境预报中心(自然资源部海啸预警中心), 北京 100081;

2. 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

* 通讯作者, E-mail: xuzg@nmefc.cn

收稿日期: 2022-07-26; 收修改稿日期: 2023-02-05; 接受日期: 2023-03-09; 网络版发表日期: 2023-04-13

国家重点研发计划项目(编号: 2022YFC3003800)和亚洲合作基金项目(编号: 99950410)资助

摘要 2022年1月15日12:15(北京时间), 汤加附近的洪阿-汤加-洪阿哈派(Hunga Tonga-Hunga Ha'apai)火山喷发, 造成了剧烈的气压扰动并激发了大气兰姆波, 后者通过海气界面引发了胁振水波. 胁振波与兰姆波以约306m/s的平均速度在洋盆传播, 自由海啸波以速度较慢的重力波速度跟随其后. 中国沿岸26个验潮站水位显示, 台湾岛东部验潮站在15日约20:00记录到了与大气兰姆波几乎同时到达的胁振波; 然而, 大陆验潮站在兰姆波到达至少2h之后, 才监测到海啸波. 理论分析和数值试验表明, 在胁振波从琉球群岛和吕宋海峡外侧入射大陆沿海的过程中, 面对逐渐变浅且宽广的陆架, 胁振波逐渐与兰姆波相位分离, 演变成了浅水重力波. 后续到达的自由海啸波与演变的浅水重力波叠加, 造成中国沿海超过36h的水位波动. 台湾岛东部监测到的最大波幅为乌石站44cm, 大陆东部沿海和华南沿海最大波幅分别为石浦站22cm和珠海站13cm. 采用谱方法对波能进行分析, 结果显示, 影响台湾岛东部的海啸主成分为自由海啸波; 而对大陆沿海而言, 演变的重力波与自由海啸波能量几乎相当, 这是由于前者周期更长, 能量更加不易耗散, 浅水效应也更加显著. 此外, 由于较强背景波动的存在且与海啸波优势周期重合, 共振效应使得乌石和石浦验潮站监测到了各自海域的最大波幅.

关键词 火山海啸, 大气兰姆波, 胁振波, 浅水重力波, 自由海啸波

1 引言

2022年1月15日12:15(北京时间, 后同), 汤加海域洪阿-汤加-洪阿哈派火山剧烈喷发(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000gc8r/executive>), 引发了全球水位震荡(Carvajal等, 2022). 汤加塔布西部

最大海啸爬高约为19m, 诺穆卡伊基岛和托富阿岛均约为20m, 分别位于火山以南和以东方向约65km以及火山以北90km处(Borrero等, 2022). 火山周边国家普遍记录到了接近或超过1m的海啸波(<https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/news.php?p=show&id=8959>). 环太平洋其他国家的验潮站对此次海啸事件均有清晰记

中文引用格式: 王宗辰, 徐志国, 原野, 杨怀玮, 孙立宁, 王培涛, 范婷婷. 2023. 2022年1月15日汤加火山海啸对中国沿海的影响分析. 中国科学: 地球科学, 53(5): 1030–1038, doi: 10.1360/SSTe-2022-0235

英文引用格式: Wang Z, Xu Z, Yuan Y, Yang H, Sun L, Wang P, Fan T. 2023. How did the Tonga volcanic tsunami on January 15, 2022, affect Chinese coasts? Science China Earth Sciences, 66(5): 1038–1046, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1090-9>

录: 新西兰和澳大利亚普遍监测到30~80cm 的海啸波, 奥克兰的大堡礁岛监测到130cm的极值波幅(<https://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Natural-Hazards-and-Risks/Tsunami/2022-Hunga-Tonga-Tsunami>), 俄罗斯、韩国监测到15~50cm的海啸波, 日本、美国、墨西哥、秘鲁和智利的部分地区监测到了超过100cm的海啸波(Manneela和Kumar, 2022). 结合海啸引发的强流, 上述国家的部分港口和港湾受到了不同程度的破坏(Lynett等, 2022). 除了太平洋沿岸, 印度洋、大西洋, 甚至加勒比海和地中海都监测到了海啸波动(Carvajal等, 2022). 据统计, 火山海啸是一种极其低频的海洋灾害, 在所有海啸事件中的比例仅约为5%. 然而, 就在约4年之前, 印度洋巽他海峡的克拉克托之子火山海啸给人类带来的惨痛记忆并未远去(Zengaffinen等, 2020).

Carvajal等(2022)通过分析全球共享验潮站数据发现, 水位波动在海啸理论到时之前就已经出现, 称为“先兆波”(Leading wave). 而且, 相当数量的验潮站在先兆波抵达时刻附近, 也观测到了气压异常, 由此推断, 海啸先兆波由火山导致的气压异常引发. 上述气压异常实际包含了多种复杂的气压波动, Otsuka (2022)从地球静止卫星葵花8 (Himawari-8)中解译出了此次火山喷发在水平方向上最主要的气压异常成分——大气兰姆波(Lamb wave). Amores等(2022)则利用模型计算了此次事件中兰姆波的传播过程, 与观测吻合良好. Kubota等(2022)对此次火山海啸的产生机制给出了解释: 快速传播的大气兰姆波通过海气界面引发了海啸先兆波, 两者均以约300m/s的速度在洋盆传播; 随后的自由海啸波以浅水波速(200~220m/s, 水深4~5km)传播, 推测主要由三种成分构成, 分别是初始时刻补偿兰姆波引发先兆波的负相位, 大气重力波导致的水重力波和地质活动引发的水位异常. 部署在太平洋的海啸浮标记录到了先兆波和自由海啸波(https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/images/tonga_new_inversioDARTSnCircles.png). Hu等(2022)通过分析验潮站和海啸浮标观测指出, 此次火山海啸之所以能长距离传播与大气兰姆波和大气重力波紧密相关.

Tanioka等(2022)在二维水波方程中设定一个简单兰姆波模型, 成功再现了部署在日本离岸(offshore)区域海底观测网(S-net)记录的海啸先兆波信号, 但是, 没

有将模拟结果与验潮站观测进行对比. Sekizawa和Kohyama(2022)分析三个日本验潮站数据发现, 海啸先兆波并没有与气压异常同时出现, 而是落后了约30min; 数值试验结果表明, 先兆波在洋盆传播的过程中会与兰姆波保持同步. 但是, 当先兆波传播至陆架区域便演变成了速度较慢的重力波; 然而, 该研究没能从理论角度给出解释. 此次事件中, 先兆波晚于气压异常的现象在墨西哥沿岸验潮站同样被记录了下来(Herrera等, 2022). 实际上, Saito等(2021)详细推导了移动气压强迫条件下的三维水波方程, 并给出了波动的理论解; 并且讨论了在气压强迫移动速度略超和略慢于重力波速度条件下的海啸波传播特征. 但是, 在此次火山海啸事件中, 兰姆波的传播速度是自由海啸波在洋盆平均传播速度的约1.5倍(Kubota等, 2022), 陆架海域的速度差甚至可达30倍(10m水深条件下). 因此, 有必要对波动理论解进行更深入的讨论.

中国沿岸验潮站同样记录到了此次海啸事件. 这是中国历史上由仪器记录到的第三次越洋海啸, 前两次为2010年智利海啸和2011年日本海啸(Yu等, 2011; 谢燕双等, 2012; 王培涛等, 2012; 潘文亮等, 2014). 与前两次地震海啸不同, 此次海啸由火山滑坡及火山喷发引起的大气激波产生, 复杂程度更高. 另外, 中国台湾岛和大陆验潮站所处海域具备截然不同的水深条件. 台湾岛东侧, 尤其是东南方向海域陆架不发育, 水深梯度极大; 而大陆沿海则拥有宽广的陆架. 不同水深条件的验潮站为解析此次海啸过程对中国沿海的影响提供了更全面的数据支撑. 本文通过利用理论分析、数值实验和谱分析三种方法, 对影响中国大陆和台湾岛的海啸波特征进行解析.

2 一维水波方程

从无旋流体速度势方程出发, 在水深不变的假设条件下, 加入一个匀速移动的气压强迫, 通过拉普拉斯(Laplace)和傅里叶(Fourier)变换能够推导出一维水波方程的理论解, Liu和Higuera(2022)将其解析式表达为

$$\eta(x, t) = \eta_p + \eta_+ + \eta_-, \quad (1)$$

$$\eta_p = \frac{1}{\rho g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{C^2}{C_p^2 - C^2} \right) \hat{P}_a(k) e^{ik(x - C_p t)} dk, \quad (2)$$

$$\eta_+ = \frac{1}{\rho g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{C}{C - C_p} \right) \hat{P}_a(k) e^{ik(x - Ct)} dk, \quad (3)$$

$$\eta_- = \frac{1}{\rho g} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{C}{C + C_p} \right) \hat{P}_a(k) e^{ik(x + Ct)} dk, \quad (4)$$

其中, η 表示总水位波动, η_p 表示与气压强迫移动速度相同的水波, 称为“肋振波”(Locked wave), η_+ 表示与气压强迫同方向传播的自由海啸波, η_- 表示反方向的自由海啸波; ρ 表示水的密度, g 表示重力加速度, C 表示重力波的相速度, C_p 表示气压强迫的移动速度, $\hat{P}_a$ 表示经过傅里叶变换的气压异常, k 表示波数. 当 C_p 大于 C 时, 肋振波为波峰状先兆波; 当 C_p 小于 C 时, 自由海啸波为波峰状先兆波; 当 C_p 等于 C 时, 两种性质波动将产生叠加, 导致波幅变大, 产生所谓的普劳德曼效应(Proudman, 1929; Williams等, 2021). 气压强迫在经过汤加-克马德克海沟时, 海啸波幅的迅速增长再次验证了这一效应(Lynett等, 2022).

如果移动气压强迫的水平尺度很大, 可视长波为波动的最主要成分, 即满足浅水重力波条件, 肋振水波表达式(2)可改写为表达式(5):

$$\begin{aligned} \eta_p &\approx \frac{1}{\rho g} \left(\frac{gh}{C_p^2 - gh} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}_a(k) e^{ik(x - C_p t)} dk \\ &= \left(\frac{1}{F_r^2 - 1} \right) \frac{P_a(x - C_p t)}{\rho g}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\frac{1}{F_r^2 - 1}$ 称为波幅放大系数, $F_r = C_p / \sqrt{gh}$ 称为弗劳德数. 能够发现, 如果 C_p 超过 $\sqrt{gh}$ 的 $\sqrt{2}$ 倍, 那么波幅放大系数将小于1; 如果 C_p 远大于 $\sqrt{gh}$, 也就是说, 随着水深越来越浅, 重力波的波速随着越来越小, 放大系数将趋近于0, 肋振波将消失. 失去气压牵引的水波将演变成浅水重力波.

3 数据和方法

3.1 数据源和质量控制

我们收集整理了2022年1月15日12:00至18日24:00, 中国沿岸26个分钟级验潮站水位数据(站名和位置详见附表1), 大陆沿海范围北起长江口, 经上海、浙江、福建、广东以及港澳地区, 直至海南岛, 共计19个验潮站; 台湾岛主要选取了其东侧面对太平洋的7个

站位. 首先, 对数据进行质量控制, 剔除了异常值; 然后, 采用线性插值算法对少量缺测数据(连续间断不超过5个采样点)进行补齐. 另外, 还收集了大陆沿岸验潮站自动气压计的观测资料.

3.2 分析方法和试验

采用Butter带通滤波方法, 对水位数据进行去潮和滤波, 分别得到周期3~90min(典型海啸波周期)和30~90min(海啸波中的低频成分)的波动信号. 筛选出典型周期波幅大于5cm的海啸序列, 对海啸到时进行人工拾取, 同时计算了基于浅水重力波的海啸理论到时. 另外, 对大陆沿岸验潮站的兰姆波到时进行拾取, 并计算平均波速, 然后, 利用平均波速估算了台湾岛东部验潮站的大气兰姆波到时.

对上述三个到时进行对比分析, 发现中国大陆沿岸海啸先兆波显著晚于大气兰姆波到时, 但早于海啸理论到时, 详见第4节. 因此, 我们通过肋振波理论解和数值试验尝试解释大陆沿海监测到的海啸先兆波. 试验具体设置为: 在海啸传播至中国大陆东部沿海和华南沿海路径上分别选取一个点位, 计算兰姆波到时; 然后, 在各自点位设置一个与兰姆波尺寸相当的“N”型水波作为初始场(Tadepalli和Synolakis, 1994); 最后, 采用非线性二维浅水方程计算其传播过程, 与石浦和盐田两个验潮站的海啸波序列进行对比. 该数值试验的一个基本假定是海啸先兆波在极宽中国大陆架上传播具备自由浅水重力波特性和, 即按照浅水重力波速传播.

除此之外, 还采用Welch功率谱分析和Morlet连续小波变换方法对海啸波的能谱进行分析(Welch, 1967; Torrence和Compo, 1998; Yu等, 2011; Heidarzadeh和Satake, 2015), 阐述了海啸波不同成分对台湾岛和大陆沿海的波能贡献.

4 结果

4.1 海啸到时分析

海啸波自2022年1月15日约20:00开始影响中国, 台湾岛的成功验潮站最先监测到海啸. 随后, 约22:00海啸逐渐自东向西抵达广东沿海以及海南省, 约16日凌晨, 海啸抵达浙江沿海及长江口区域(附表1, <http://earthcn.scichina.com>). 长江口以北的江苏、山东以及福建沿岸均未监测到明显的海啸波动. 结合图1能够直

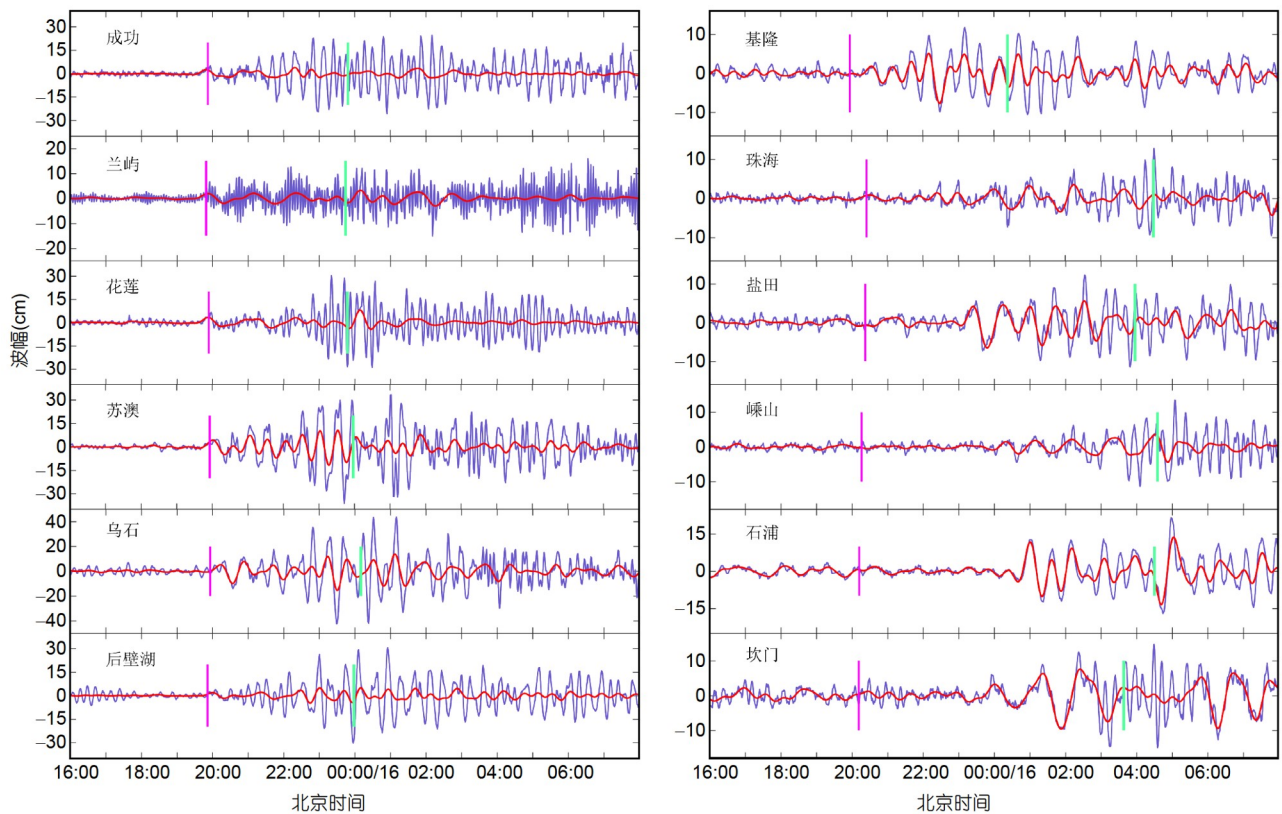


图 1 典型海啸波周期波幅超过10cm的波动时间序列(按海啸观测到时排序)

蓝线曲线表示周期范围2~90min的波动信号, 红线曲线表示周期范围30~120min的波动信号; 粉色竖线表示兰姆波到时, 绿色竖线表示海啸理论到时

观发现, 在火山喷发之后约8h, 海啸先兆波和兰姆波几乎同时到达台湾岛东部, 仅基隆站时差较大约为40min (附图1). 但是, 大陆沿岸验潮站却未能在兰姆波到时附近监测到海啸, 而是经过至少2h之后, 才监测到明显的海啸波初动(珠海). 这表明在进入南中国海和东中国海之前, 海啸波与兰姆波以几乎相同的速度传播. 然而, 随着向中国大陆沿海继续传播, 水深逐渐变浅, 根据表达式(5), 胁振波的波幅放大系数逐渐趋向于0, 即大气扰动已经无法有效产生胁振波, 抵达陆架边缘的大洋胁振波转而以浅水重力波在陆架上传播.

由此, 我们推测图1中晚于兰姆波到时的大陆验潮站(珠海、盐田、崧山、石浦、坎门)海啸先兆波便是演变的重力波. 基隆验潮站位于台湾岛东北部的港池内, 其外海拥有宽度30~50km的陆架, 因此也出现了先兆波到时晚于兰姆波的情况. 另外, 日本验潮站的观测结果同样符合上述推测, Sekizawa和Kohyama (2022) 给出了类似的解释.

为了进一步验证上述推测, 我们将试验点选在海啸波通过琉球群岛和吕宋海峡之前大约2000m水深的海域(图2). 利用非线性方程模拟了“N”型水波自由传播10h的情景, 记录了石浦和盐田两个验潮站的模拟结果, 分别叠加了试验点的兰姆波到时之后, 绘制了模拟波形与监测波形的对比图(图2). 结果显示, 石浦验潮站的海啸模拟到时与监测到时相差约11min, 盐田站的时差约为33min, 较好地支持了我们的推测. 后者更大的到时差异主要是因为海啸在经过吕宋海峡之后, 需要再次经过超过2000m的水深环境, 一定程度上延缓了与兰姆波分离的进程. 与之形成鲜明对比的是, 台湾岛东部沿海沿汤加方向的海底地形坡度极大, 极短的水平距离水深就接近4000m(图2), 兰姆波与胁振波还未来得及分离就几乎同时到达了验潮站, 基隆站除外. 然而, 在南中国海和东中国海路径上, 陆架的存在使得兰姆波与胁振波在传播速度差越来越大的情况下能够显著分离.

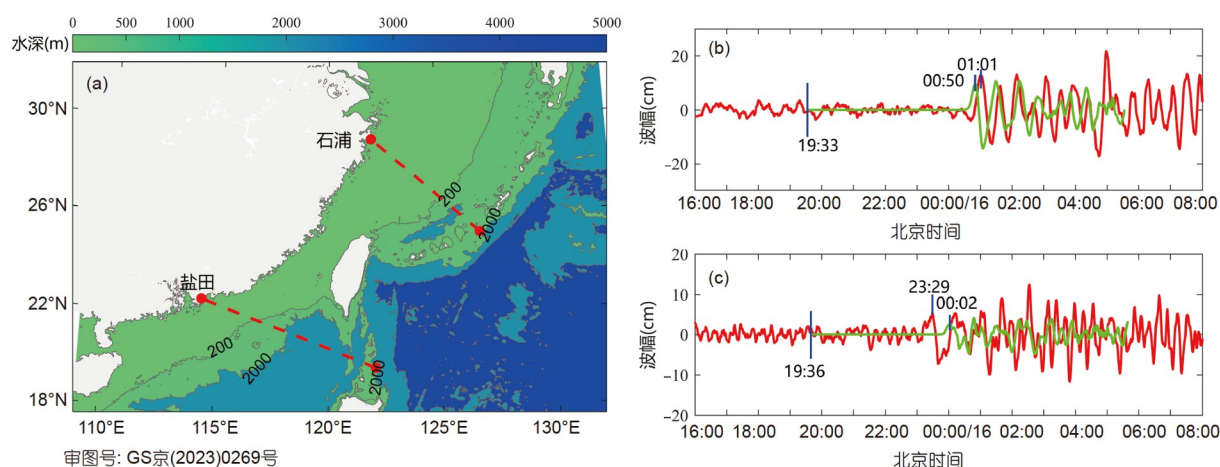


图2 菲律宾海、东中国海和南中国海北部水深和试验点设置(a)以及石浦(b)和盐田(c)站模拟水波与监测波形对比
(b)和(c)中蓝色竖线为兰姆波到达试验点的理论到时, 红色曲线为监测波形, 绿色曲线为模拟水波

4.2 海啸波幅分析

从图3中可以看到, 中国沿海监测到的最大波幅为44cm, 出现在台湾岛宜兰县乌石验潮站; 杭州湾和浙江省沿岸监测到的最大波幅为22cm, 出现在宁波象山县石浦验潮站; 广东沿海监测到的最大波幅为13cm, 位于珠海站。显然, 台湾岛东部因正面太平洋受海啸影响最大。海啸波通过吕宋海峡和琉球群岛分别传入南中国海和东中国海, 得益于岛链的散射效应和中国近海宽广的陆架, 海啸能量耗散较多, 因此在抵达大陆沿海时最大波幅未能超过30cm。然而, 浙江东北部沿海仍需要提高警惕, Yu等(2011)和Yuan等(2021)的研究表明, 海啸会在水深地形作用下汇聚于此。无论是此次火山海啸事件, 还是2010年智利 M_w 8.8以及2011年日本 M_w 9.1地震海啸事件, 都在此处监测到了中国东部沿海的最大海啸波幅(王培涛等, 2012)。

除此之外, 此次海啸事件造成了中国沿海长时间的水位振荡(附图2)。如果将单站监测的海啸波幅衰减2/3作为此次海啸影响显著减弱的条件(即海啸波幅不再超过最大波幅的1/3), 12个站位中的11个(苏奥除外)受海啸显著影响的持续时间超过了36h, 部分站位甚至超过48h, 如成功、基隆、珠海等。全球验潮站普遍存在类似现象, 这与兰姆波绕地球反复震荡有关(Herrera等, 2022)。

4.3 海啸谱分析

4.3.1 功率谱分析结果

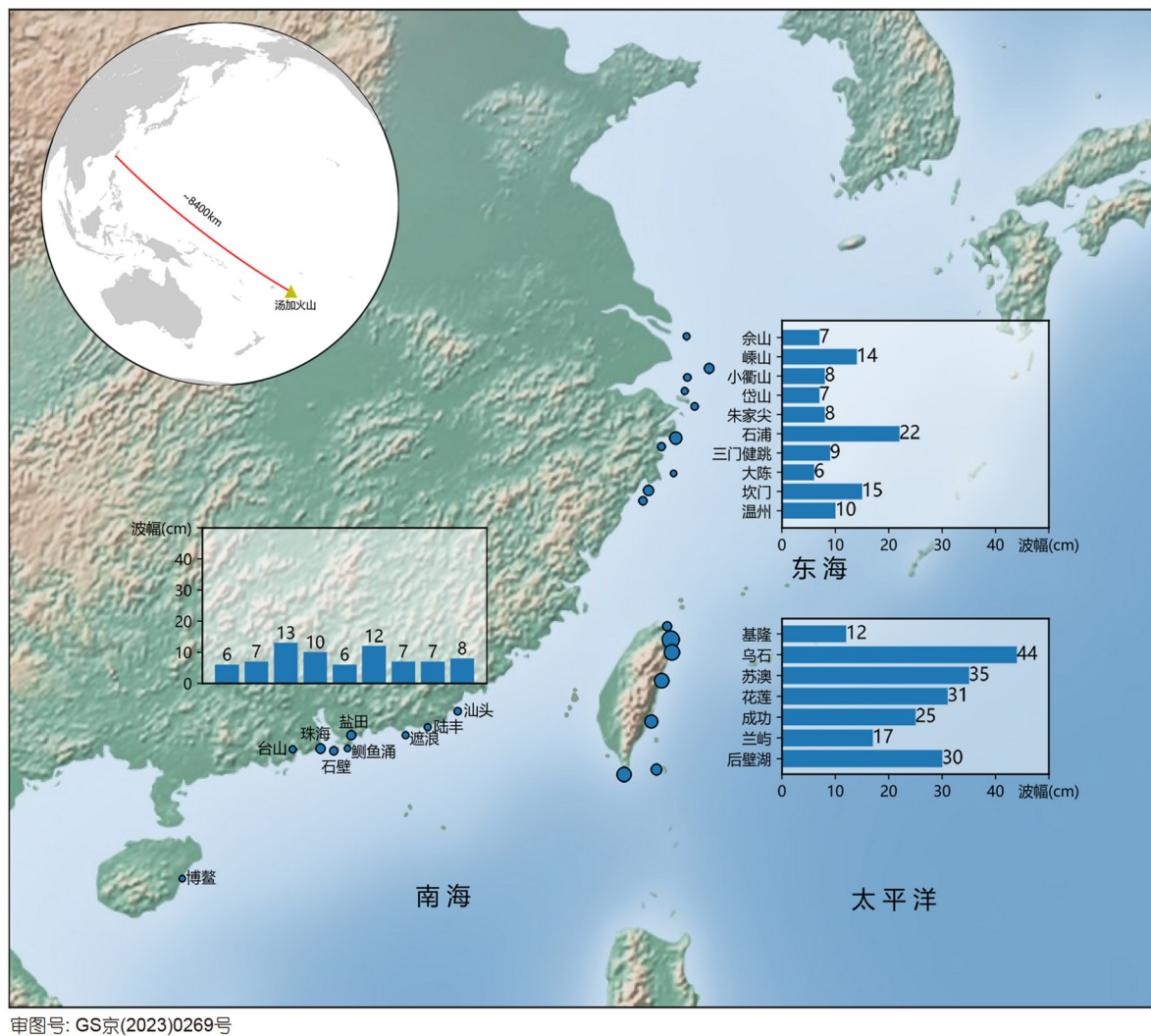
台湾岛东侧直面太平洋, 且海啸的传播路径基本

为大洋水深环境, 海啸波通常能够携带更多海啸源特征。功率谱图4a显示, 除了兰屿, 其他验潮站的主要波动能集中在10~40min。Lynett等(2022)的研究显示沿着汤加-克马德克海沟的深海浮标监测到的海啸波周期跨度为10~40min, 两者基本一致。这表明, 大洋行波较好的保留了海啸源的能量谱特征。兰屿站位于台湾岛东偏南方向的兰屿岛西侧, 海啸波动优势周期约为4min, 显著区别于其他站位, 值得进一步探究。

大陆沿岸波幅超过10cm的5个验潮站海啸波功率谱图4b显示, 5个站位的谱线均存在一个周期16~20min的谱峰。然而, 不同站位的另一谱峰则产生了分化, 周期跨度分布在40~100min。前一个谱峰主要对应后续到达的自由海啸波, 而分化谱峰则对应演变的浅水重力波。从图1中珠海、盐田和坎门等站波形可见, 海啸先兆波(最初的几个海啸波)呈现40~100min的周期特征, 自由海啸波达到之后, 逐步增加了16~20min的高频成分。这表明相较于台湾岛东部观测到的胁振波, 演化的浅水重力波在经过陆架之后周期变得更长。

4.3.2 连续小波变换结果

为了分析海啸波在台湾岛和大陆沿海的演变过程, 对波幅超过10cm的海啸序列进行Morlet连续小波变换, 重点分析台湾岛和大陆监测到最大波幅的乌石和石浦站。结果如图5所示, 海啸先兆波约在2022年1月15日20:00到达乌石站, 起始波动周期为



审图号: GS京(2023)0269号

图 3 中国沿岸验潮站观测到的海啸最大波幅

华南沿海按经度排列显示, 大陆东部沿海和台湾岛的波幅按纬度排列显示

16~100min, 台湾岛其他站位的起始波动周期落在10~80min区间。随着自由海啸波的抵达, 乌石站的波动出现了一个周期为16~40min的小波能谱极值区, 一直持续到16日约1:30。随后, 波能略有减弱, 能谱高值周期维持在16~18min。台湾岛其他站位也都基本维持一个单极值波能高峰区, 周期分布在10min~40min区间。石浦站的小波能量在16日凌晨开始增长, 波动周期为16~100min, 一直持续至上午10:00, 这种大跨度的周期区间在大陆其他验潮站中未能见到。大陆其他4个验潮站普遍对应的起始波动周期集中在40~100min, 而且, 在时间线上均先后存在两个波能高值区, 分别对应40~100min和16~20min两个周期区间。其中, 前者为

由胁振波演变的浅水重力波, 后者为自由海啸波。

结果还显示, 在海啸波抵达乌石和石浦之前, 两个验潮站分别存在一个波能较强的背景波动, 周期分别在16和64min附近, 恰好与海啸波能的优势周期重合, 由此产生的共振效应对波幅产生了正贡献。进一步分析发现, 背景波动在1月15日凌晨起就已经存在。其中一个可能的原因是, 14~15日期间, 一个较弱的高压系统(冷空气团)自西北方向入侵华东上空, 浙江沿海和台湾岛北部出现了4~5级偏北风, 阵风可达6级。上述天气系统激发了类似海啸的轻微水位波动。

综上, 到达台湾岛东部和大陆沿海的海啸先兆波分别为胁振波和演变的浅水重力波, 后者周期更长。

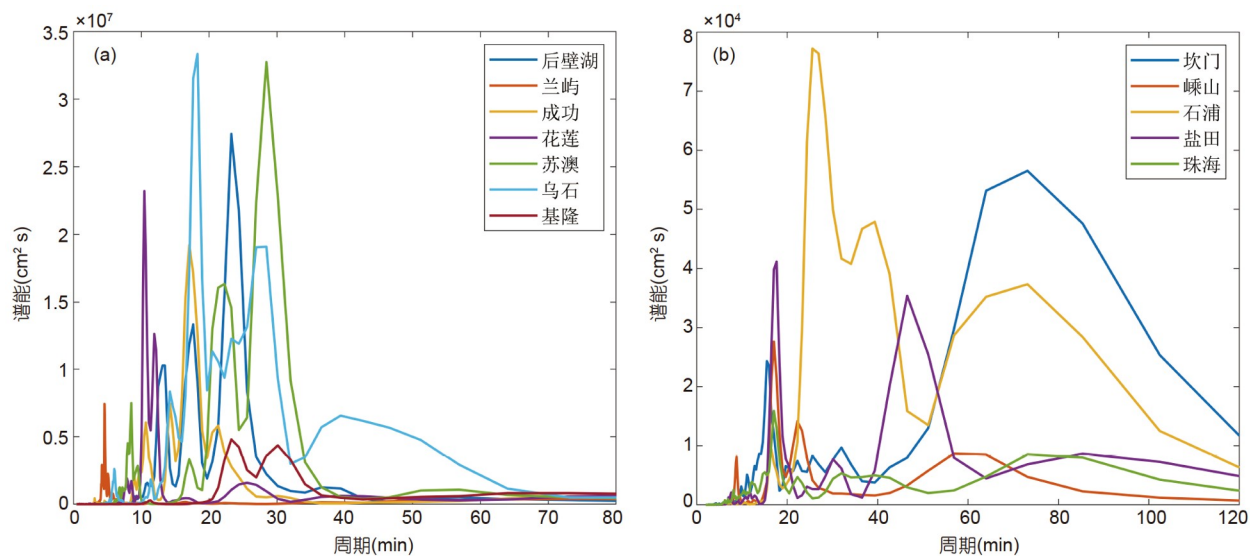


图 4 台湾岛东部沿岸(a)和大陆沿岸(b)验潮站海啸波功率谱图

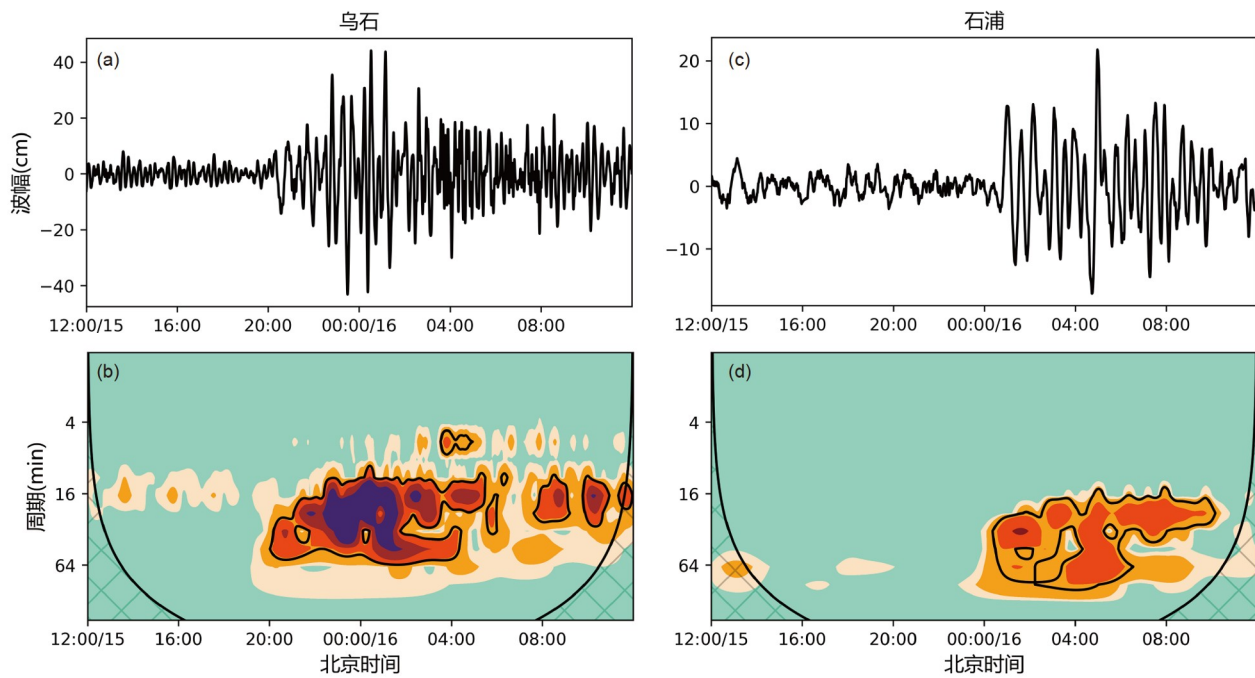


图 5 台湾岛乌石和浙江石浦验潮站海啸波和小波能谱图

后续自由海啸波到达之后,波动的高频成分显著增长.台湾岛东部的海啸波能量以中高频为主,大陆沿岸记录的长周期浅水重力波和自由海啸波能量已经旗鼓相当.除此之外,乌石和石浦两个验潮站的背景波动周期与海啸波重合,产生了共振.

5 结论和建议

洪阿-汤加-洪阿哈派火山在2022年1月15日12:15剧烈爆发,激发了与大气兰姆波同步传播的胁振水波和速度较慢的自由海啸波.约8h之后,胁振波与兰姆

波几乎同时到达台湾岛东部沿海。随后, 在肋振波传向华南沿海和中国东部沿海的过程中, 受逐渐变浅且宽广陆架的影响, 逐渐与兰姆波相位分离演变成浅水重力波, 并于15日约22:00和16日凌晨分别先后到达华南沿岸和华东沿岸。后续到达的自由海啸波与演变的浅水重力波尾波叠加, 造成中国沿岸长达36h, 部分站位甚至超过48h的水位波动。

三个区域的平均波幅大小排序为台湾岛东部沿海、大陆东部沿海和海南沿海, 各区域监测到的最大海啸波幅分别为乌石站44cm、石浦站22cm和珠海站13cm。台湾岛沿海的主要波动成分为自由海啸波, 对大陆沿海而言, 演变的浅水重力波与后续自由海啸波的能量几乎相当。主要是由于演变的浅水重力波周期很长, 能量更加不宜耗散, 在经过陆架时, 浅水效应更加显著。另外, 需要特别警惕台湾岛和浙江沿海的潜在海啸灾害(Yu等, 2011; Yuan等, 2021), 尤其是背景波动较大的港湾和验潮站。

致谢 感谢Wessel Paul领导开发了GEOWARE-TTT (Tsunami Travel Time)软件(<http://www.geoware-online.com>), 本文利用该软件计算海啸理论到达时间。

参考文献

- 潘文亮, 王盛安, 孙璐, 龙小敏. 2014. 2010年智利和2011年日本海啸在华南沿岸的实测海啸波形和特征. *热带海洋学报*, 33: 17–23
- 王培涛, 于福江, 赵联大, 范婷婷, 侯京明. 2012. 2011年3月11日日本地震海啸越洋传播及对中国影响的数值分析. *地球物理学报*, 55: 3088–3096
- 谢燕双, 商少平, 魏艳, 张莉. 2012. 2010年智利强震引发的海啸对台湾周边海域的影响. *厦门大学学报(自然科学版)*, 51: 898–902
- Amores A, Monserrat S, Marcos M, Argüeso D, Villalonga J, Jordà G, Gomis D. 2022. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Geophys Res Lett*, 49: e98240
- Borrero J C, Cronin S J, Latu'ila F H, Tukuafu P, Heni N, Tupou A M, Kula T, Fa'anunu O, Bosserelle C, Lane E, Lynett P, Kong L. 2022. Tsunami runup and inundation in Tonga from the January 2022 eruption of Hunga volcano. *Pure Appl Geophys*, 180: 1–22
- Carvajal M, Sepúlveda I, Gubler A, Garreaud R. 2022. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys Res Lett*, 49: e98153
- Heidarzadeh M, Satake K. 2015. New insights into the source of the Makran tsunami of 27 November 1945 from tsunami waveforms and coastal deformation data. *Pure Appl Geophys*, 172: 621–640
- Herrera M T R, Coca O, Espinosa V V. 2022. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga. *Pure Appl Geophys*, 179: 1117–1137
- Hu G, Li L, Ren Z, Zhang K. 2022. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Nat Hazards Earth Syst Sci Discuss*, 23: 675–691
- Kubota T, Saito T, Nishida K. 2022. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, 377: 91–94
- Liu L, Higuera P. 2022. Water waves generated by moving atmospheric pressure: Theoretical analyses with applications to the 2022 Tonga event. *J Fluid Mech*, 951: A34
- Lynett P, McCann M, Zhou Z, Renteria W, Borrero J, Greer D, Fa'anunu O, Bosserelle C, Jaffé B, La Selle S P, Ritchie A, Snyder A, Nasr B, Bott J, Graehl N, Synolakis C, Ebrahimi B, Cinar G E. 2022. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, 609: 728–733
- Manneela S, Kumar S. 2022. Overview of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption and tsunami. *J Geol Soc India*, 98: 299–304
- Otsuka S. 2022. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys Res Lett*, 49: e98324
- Proudman J. 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophys J Int*, 2: 197–209
- Saito T, Kubota T, Chikasada N Y, Tanaka Y, Sandanbata O. 2021. Meteorological tsunami generation due to sea-surface pressure change: Three-dimensional theory and synthetics of ocean-bottom pressure change. *J Geophys Res Oceans*, 126: e2020JC017011
- Sekizawa S, Kohyama T. 2022. Meteotsunami observed in Japan following the Hunga Tonga eruption in 2022 investigated using a one-dimensional shallow-water model. *SOLA*, 18: 129–134
- Tadepalli S, Synolakis C E. 1994. The run-up of *N*-waves on sloping beaches. *Proc R Soc Lond A*, 445: 99–112
- Tanioka Y, Yamanaka Y, Nakagaki T. 2022. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth Planets Space*, 74: 61
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 79: 61–78
- Welch P. 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans Audio Electroacoust*, 15: 70–73
- Williams D A, Horsburgh K J, Schultz D M, Hughes C W. 2021. Proudman resonance with tides, bathymetry and variable atmospheric forcings. *Nat Hazards*, 106: 1169–1194

- Yu F J, Yuan Y, Zhao L D, Wang P T. 2011. Evaluation of potential hazards from teletsunami in China: Tidal observations of a teletsunami generated by the Chile 8.8 Mw earthquake. *Chin Sci Bull*, 56: 1108–1116
- Yuan Y, Li H, Wei Y, Shi F, Wang Z, Hou J, Wang P, Xu Z. 2021. Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA) for southeast coast of Chinese Mainland and Taiwan Island. *J Geophys Res Solid Earth*, 126: e2020JB020344
- Zengaffinen T, Løvholt F, Pedersen G K, Muhari A. 2020. Modelling 2018 Anak Krakatoa Flank Collapse and Tsunami: Effect of landslide failure mechanism and dynamics on tsunami generation. *Pure Appl Geophys*, 177: 2493–2516

(责任编辑: 王东晓)