

基于潮位站水位数据的海啸波特征值拾取与分析研究

吕忻¹, 丁骏², 秦涛²

(1. 自然资源部东海预报减灾中心, 上海 200136; 2. 上海市海洋监测预报中心, 上海 200333)

摘要: 以2022年1月汤加海啸事件为例, 采用高通滤波和最大熵谱分析方法对日本父岛、上海芦潮港潮位站实测水位进行海啸波的特征拾取、分析与比对验证。结果表明: 父岛站海啸波最大波高为0.88 m, 主周期为12.2~20.5 min; 芦潮港站最大波高为0.07 m, 主周期为20.3 min; 由不同采样频率的水位数据计算得到的海啸波不同, 各站首波到形成最大波幅的时长也不一致。

关键词: 海啸; 高通滤波; 最大熵谱分析; 监测预警; 海啸评估

中图分类号: P731.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0044-07

0 引言

过去二十年, 海啸在世界范围内造成的伤亡和损失之和高于其他自然灾害^[1]。2004年印尼苏门答腊岛近海发生了震级(M_w)为9.2级的海底地震并引发强烈海啸, 海啸造成印度洋沿岸12个国家至少22.5万人死亡^[2]; 2011年日本东北太平洋海域发生震级(M_w)为9.0级的地震海啸, 造成14 133人死亡, 13 346人失踪^[3]。海啸通常是由水下地震、火山爆发或水下塌陷和滑坡等激发的长周期小振幅的重力波, 以每小时数百公里的速度传向岸边, 可形成来势凶猛、危害极大的巨浪^[4]。全球约80%的海啸是由俯冲带大型逆冲断层的海底地震引起, 只有5%的海啸是由火山爆发引起的。2022年1月15日, 汤加洪阿哈阿帕伊岛火山爆发引发海啸, 太平洋沿岸的智利、日本和新西兰等国家均监测到明显海啸波, 最大波幅达1.5 m, 我国沿海海域监测到最大海啸波幅约为20 cm^[5]。海啸会对沿海区域构成威胁, 因此加强海啸监测预警和评估对减少人员伤亡和财产损失具有重要作用。

目前, 海啸监测预警和评估的主要数据来自海啸浮标、潮位站、卫星观测和海啸数值模拟计算等。

潮位站是海啸监测预警和评估的关键组成部分, 大多数潮位站每5 min实时收集和传播一次水位信息, 在潮汐、风暴潮、海平面测量等方面发挥了重要作用。如何更好地将潮位站监测的水位数据用于快速监测和确认海啸的存在, 并获取海啸波到达时间、最大波高、持续时长和波周期等信息, 对于及时发布预警信息、防御海啸灾害具有重要意义。采用带通滤波^[6-8]或高通滤波方法^[9]可以从实际观测资料中分离出海啸波形, 但若不能确定好带通滤波截断周期的上限和下限, 会导致结果不准确^[10]。高通滤波能过滤掉低频噪声、保留高频信号, 有助于突显海啸波的特征。另外, 由于潮汐周期会被高通滤波自动去除^[9], 因此高通滤波在提取海啸波前是否去除潮汐, 其结果的差异可以忽略不计。为进一步研究海啸波的周期和频域特征, 寻找海啸波的显著周期, 常采用功率谱或小波分析^[8, 11-12]方法进行。功率谱值随频率的变化一般较平滑, 特别是当序列较短时, 往往会导致谱估计误差和功率谱值偏移。最大熵谱方法能够克服上述缺点, 具有分辨率高、峰值偏离小的优点, 在较短序列的谱估计上优势明显^[13], 其在水啸波周期和频域方面的应用研究还鲜有报道。

收稿日期: 2024-04-23。

基金项目: 上海市海洋灾害风险普查项目(SHXM-00-20211115-1063)。

作者简介: 吕忻(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋水动力研究。E-mail: polaris0926@163.com

通信作者: 丁骏(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋数值预报研究。E-mail: jding@shou.edu.cn

本文基于日本父岛和上海芦潮港潮位站实测水位数据,以2022年1月15日汤加越洋海啸为例,采用高通滤波和最大熵谱分析方法,计算海啸波最大波高、波周期等信息,并开展比对验证与海啸特征分析,以期在海啸监测预警、海啸灾害防御和评估、传播机理研究等提供依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源与监测点位

汤加海啸源位于 $20^{\circ}32'S, 175^{\circ}22'W$,海啸发生于2022年1月15日12:10(北京时,下同)左右。父岛海洋站(Chichi jima station, $27^{\circ}4'N, 142^{\circ}13'E$)位于日本小笠原群岛父岛列岛。芦潮港潮位站位于上海最东南处,东临大海,南濒杭州湾,是钱塘江和长江的交汇处,地理位置重要且独特,是上海防御海洋灾害的“前哨站”。芦潮港等站的具体位置见图1。

父岛站水位监测数据来源于日本气象厅(Japanese Meteorological Agency, JMA),数据时间范围为2022年1月13日23时—16日23时,采样频率为15 s;芦潮港站水位监测数据来自上海市海洋局,数据时间范围为2022年1月15日00时—17日23时,采样频率为300 s。

1.2 高通滤波法

巴特沃斯滤波器(Butterworth Filter)^[14]是1930年由英国工程师斯蒂芬·巴特沃斯提出的一种经典模拟滤波器,可构成低通、高通、带通和带阻4种组态,在自动控制、图像、通信等众多领域得到了广泛应用。巴特沃斯高通滤波器计算公式如下^[15]:

$$|H_n(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (1)$$

式中: H 表示滤波器的频率响应函数; j 是虚数单位; ω 是信号的角频率; ω_c 为截止频率,即振幅下降为-3 dB时的频率; n 为滤波器的阶数,决定了滚降特性的陡峭程度。阶数越高,过渡带越平滑,但也会增加滤波器的复杂性和计算成本。不同阶数 n 的巴特沃斯滤波器特性见图2。当频率低于截止频率时,响应逐渐减小,接近于0;当频率高于截止频率时,响应逐渐增大,趋近于1。

1.3 最大熵谱法

最大熵谱法(Maximum Entropy Spectral Estimation, MESE)是一种基于最大熵原理的非参数谱估计方法,它通过外推自相关函数来估计信号的功

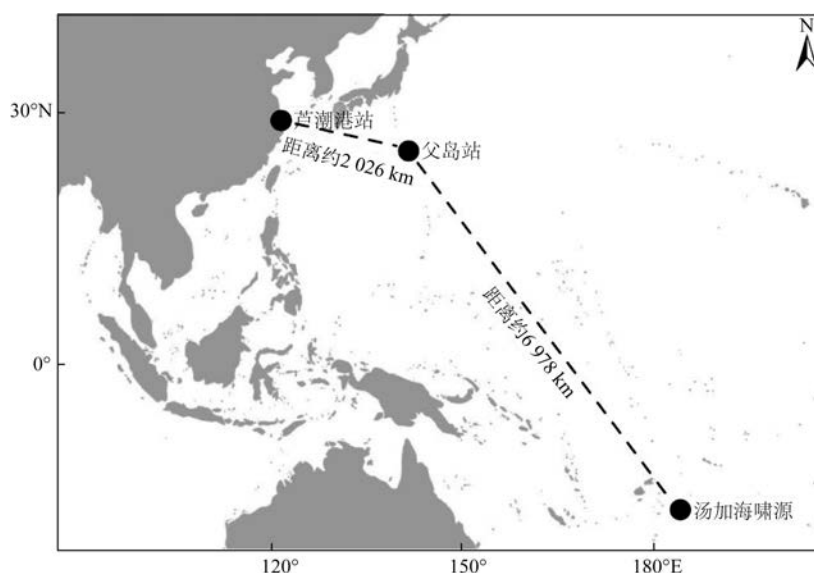


图1 海啸监测点位分布

Fig.1 Distribution of tsunami monitoring locations

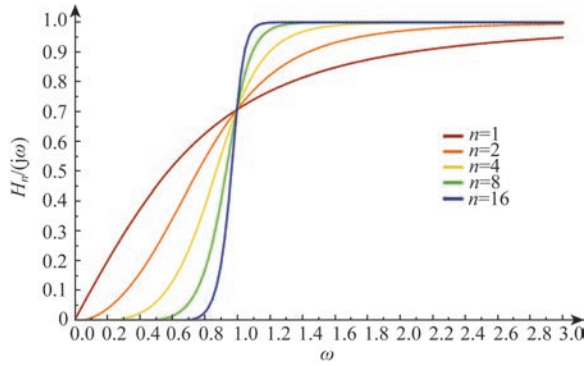
图2 不同阶次 n 的巴特沃斯滤波器^[15]

Fig.2 Butterworth filters with different orders

率谱密度。Burg算法是实现最大熵谱估计的一种有效递推算法,特别适用于样本数量较短的情况,能够提供高分辨率的谱估计。该算法根据自回归(Auto Regression, AR)模型与预测误差滤波器的等价性同时作前向和后向预测,使预测误差滤波器的输出方差最小,递推得出自回归模型参数和自协方差参数。

给定一个时间序列信号 $x(n)$,其中 $n=0,1,2,\dots,N-1$ 。假设信号可以由一个 p 阶自回归过程生成^[16]。计算公式为:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + e(n) \quad (2)$$

式中: a_k 是自回归系数; $e(n)$ 是误差项。通过最小化前向和后向预测误差之和来求解自回归系数 a_k 。计算公式为:

$$\min E\{e(n)^2\} = \min E\left\{\left[x(n) + \sum_{k=1}^p a_k x(n-k)\right]^2\right\} \quad (3)$$

利用Burg递推关系,可以计算出AR模型的参数 a_k 和预测误差 $e(n)$ 。一旦得到AR模型参数,就可以计算信号的功率谱密度。公式为:

$$P(\omega) = \frac{\sigma_e^2}{\left|1 - \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}\right|^2} \quad (4)$$

式中: σ_e^2 是误差项的功率; ω 是角频率。

2 结果与讨论

2.1 海啸波提取

通过对父岛站实测水位进行高通滤波,设置滤

波阶数为7,最大周期为180 min,采样频率为15 s,滤波结果见图3。从图中得到第一个海啸波开始(即偏离正常潮位)时间为1月15日18:59,第一海啸波向下偏离,与正常潮位相比为减水趋势。海啸最大波高(即偏离正常潮位的最高水位)出现时间为15日22:34,最大波幅为0.88 m。以上计算结果与日本气象厅公布的父岛站数据^[17]比对一致,结果表明高通滤波的计算方法可信。

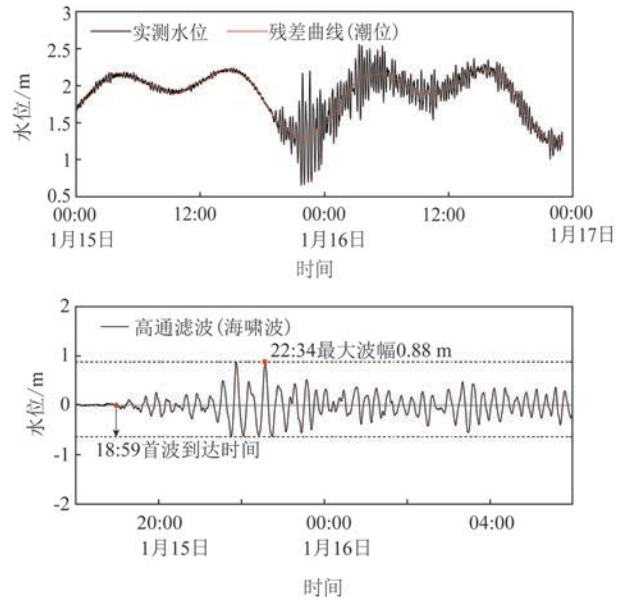


图3 父岛站高通滤波结果

Fig.3 High-pass filtering results of the tsunami wave at the Chichi jima station

受到琉球群岛、第二岛链和西北太平洋其他岛屿的阻碍,以及我国东南沿海宽广大陆架的“保护”,汤加海啸波进入陆架海域后能量大大衰减,对我国产生的影响较小。芦潮港站实测水位高通滤波的采样频率设置为300 s,其他参数与父岛站设置一致。计算结果表明,海啸首波到达时间为1月16日04:17,第一海啸波同样呈减水趋势。海啸最大波高出现时间为16日06:25,最大波高(波幅)为0.07 m。与父岛站实测水位相比,芦潮港站海啸波波幅较小(见图4)。与自然资源部海啸预警中心发布的小瞿山站16日05:12最大波幅0.07 m、余山站16日07:06最大波幅0.05 m的监测结果进行对比,计算出的芦潮港站海啸波的到达时间、海啸波幅均较一致,高通滤波结果可信。

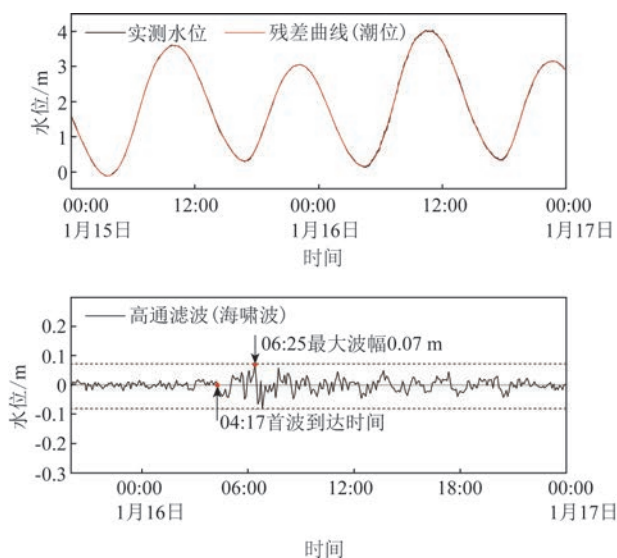


图4 芦潮港站高通滤波结果

Fig.4 High-pass filtering results of the tsunami wave at the Luchaogang station

2.2 海啸波周期分析

对父岛站海啸发生前(1月13日23时—15日11

时)和海啸发生后(1月15日12时—16日23时)的水位进行功率谱分析,计算结果见图5。在海啸发生前,随着频率的增加,水位信号功率谱密度呈逐渐衰减趋势,而在海啸发生后,随着频率的增加,水位功率谱密度在逐步衰减的过程中出现明显的跃迁。通过对比发现,海啸发生前后在 10^{-3} 频率(周期为16.7 min)附近差异明显,该频率的显著变化由海啸波引起。

为进一步分析海啸波的周期特性,通过 MESE 对两站水位数据进行估计,并进行红、白噪声检验。假设总体谱为红噪声过程,计算所有波数谱估计值的显著性临界值,不超过临界值的,可认为在置信度 $\alpha=0.05$ 条件下无显著周期存在;假设总体谱为白噪声过程,由于白噪声谱的显著临界值是一个常数,没有超过这一临界值的,可认为在 $\alpha=0.05$ 下,海啸波的周期振动也没有显著性。父岛站监测到的海啸波主周期为12.2~20.5 min(见图6a),与 SCHNEPF 等^[18]采用交叉小波分析得到的日本父岛站海啸波13~19 min主周期一致;芦潮港站监测到

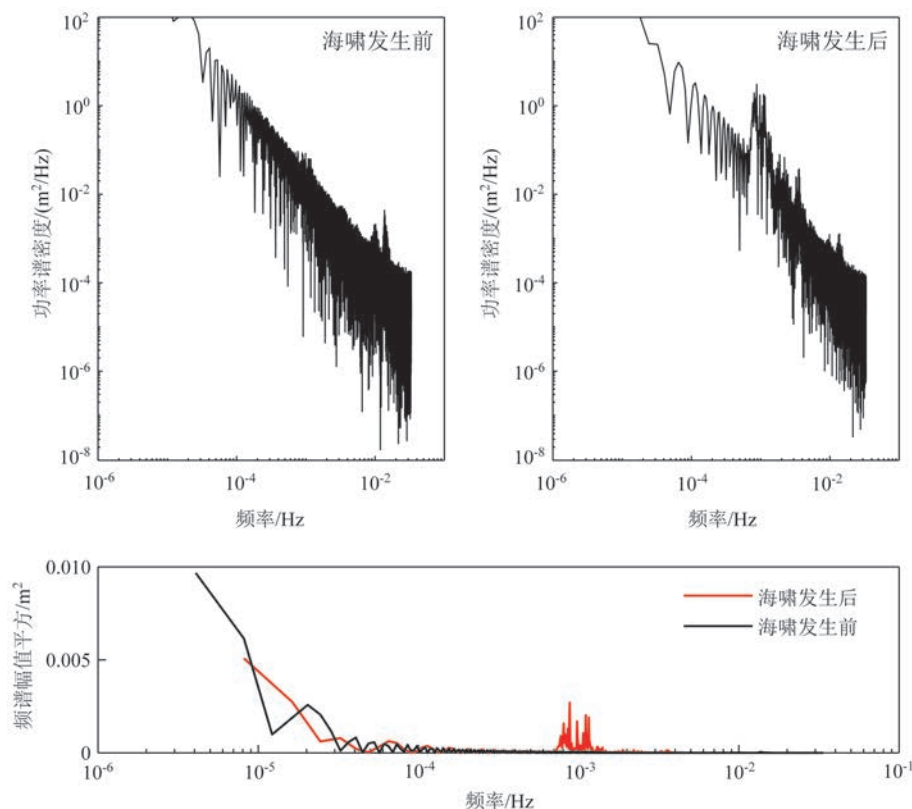


图5 海啸发生前后功率谱对比分析

Fig.5 Comparison of wave power spectrum before and after the tsunami

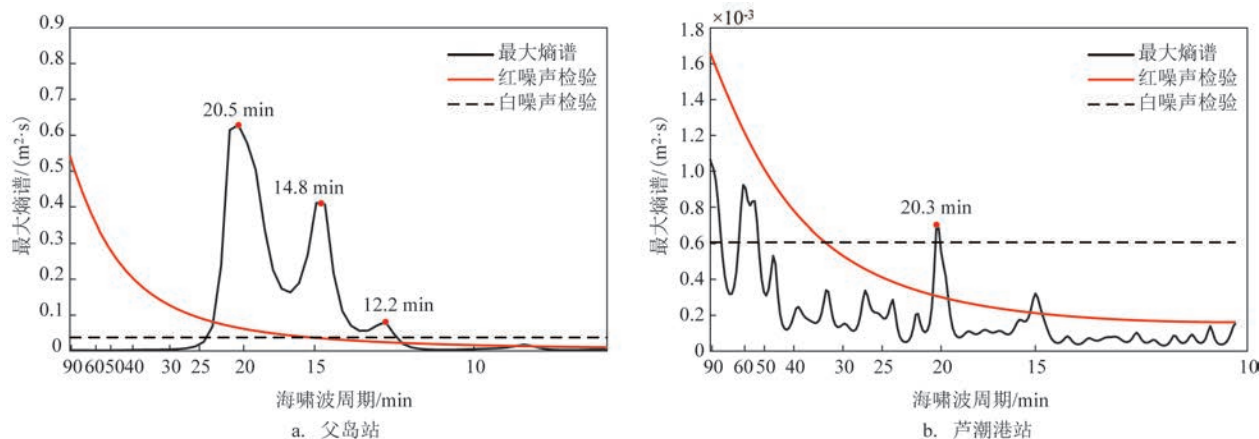


图6 父岛站和芦潮港站最大熵谱估计结果

Fig.6 Maximum entropy spectrum estimations at the Chichi jima and Luchaogang stations

的海啸波主周期为 20.3 min(见图 6b),与王宗辰等^[8]使用功率谱分析得到大陆沿岸 5 个验潮站海啸波周期为 16~20 min 接近。

2.3 分析与讨论

对不同采样频率的水位数据进行高通滤波,提取的海啸波结果存在一定差异。本文选择父岛站 15 s、1 min 和 5 min 不同采样频率下的实测水位进行高通滤波,分析讨论不同采样频率数据对海啸波计算结果的影响。由图 7 可知,由 3 种采样频率计算的海啸波最大波高出现时间、首波到达时间、海啸波周期等基本一致。1 min 采样频率计算的海啸波幅比 15 s 的偏小,但整体相近,平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)为 0.015 m;5 min 采样频率计算的海啸波幅比 15 s 的偏小,相差较为明显,MAE 为 0.087 m。采用 1 min 采样频率的水位数据计算海啸波高能够满足要求,受限于采样设备及网络传输速度,以 5 min 采样频率的芦潮港站水位计算的海啸波高值较实际值可能偏小,但与自然资源部海啸预警中心发布的根据监测结果分析的小瞿山站 0.07 m、余山站 0.05 m 的海啸波幅基本一致。

由于海啸波受传播距离、能量衰减和水深地形等条件的影响,不同潮位站计算出的海啸首波到达时间不同,各站自首波—最大波高出现的时间也不一。火山喷发后,海啸波经过约 6 h 49 min 到达父岛站,约 16 h 7 min 到达芦潮港站;从汤加海啸发生—父岛站出现最大波高的时间约为 10 h 24 min,芦潮港站出现最大波高的时间约为 18 h 15 min。父岛站

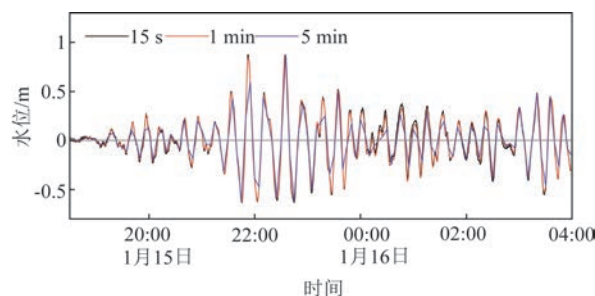


图7 不同采样频率计算的海啸波差异对比

Fig.7 Comparison of tsunami waves calculated from different sampling frequencies

首波—最大波高出现的时间为 3 h 35 min;芦潮港站首波—最大波高出现的时间为 2 h 8 min。周裕成等^[19]计算出汤加海啸波首波峰值到达父岛历时 6 h 56 min,父岛站首波与最大海啸波间隔为 3 h 20 min,与本文计算结果基本一致。在汤加海啸波传播机理研究方面,KUBOTA 等^[20]认为汤加海啸产生的机制为快速传播的大气 Lamb 波通过海气界面引发了海啸先兆波,两者均以约 300 m/s 的速度在洋盆传播,随后自由海啸波以浅水波速(200~220 m/s,水深 4~5 km)传播。汤加—父岛站的海面直线距离约为 6 978 km,气压扰动波速接近声速约为 300 m/s,可估算火山喷发到父岛站海啸首波产生历时 6 h 28 min,与本文计算的历时相近,可证明父岛站海啸波与火山喷发辐射的 Lamb 波有关。汤加与芦潮港站距离约为 8 791 km,经计算首波到达时间为 8 h 8 min,与实际芦潮港站首波 16 h 7 min 相差较大,出现了与父岛站不同的情况,可以认为先兆

波在洋盆传播过程中会与 Lamb 波保持同步,但当先兆波传播至陆架区域便演变成了速度较慢的重力波^[21],这也证实了数值试验的研究结果^[8],可推断上海芦潮港站的主要波动成分为自由海啸波。汤加火山喷发激发了大范围传播的气压扰动和海啸波,造成电离层扰动等,相比于地震海啸,火山喷发海啸产生的机制也更复杂^[22]。

3 结论

本文基于父岛和芦潮港潮位站的实测水位数据,采用高通滤波和最大熵谱分析方法计算 2022 年 1 月汤加海啸波的最大波高、波周期等信息,并对计算结果开展对比验证。结论如下:

①日本父岛站最大波高(波幅)为 0.88 m,出现在 15 日 22:34;上海芦潮港站海啸最大波高出现在 16 日 6:25,最大波高(波幅)为 0.07 m。父岛站监测到的海啸波主周期为 12.2~20.5 min;芦潮港站监测到的海啸波主周期为 20.3 min。

②由不同采样频率的水位数据计算的海啸波结果不同。1 min 采样频率计算的海啸波幅与 15 s 的基本相近,MAE 为 0.015 m;5 min 采样频率计算的海啸波幅比 15 s 的偏小,相差较为明显,MAE 为 0.087 m。采用 1 min 采样频率的水位数据计算海啸波高能够满足要求。

③受传播路径、传播距离、能量衰减和水深地形等条件的影响,不同海洋站计算出的海啸首波到达时间不同,各站首波到最大波高出现的时间也不一,父岛站海啸波与火山喷发辐射的大气波有关,芦潮港站的主要波动成分为自由海啸波,火山喷发海啸传播的机制也更复杂。

综上,高通滤波和最大熵谱分析方法计算的海啸波结果可信,可为海啸监测预警、海啸灾害防御和评估、传播机制研究等提供依据。

参考文献:

- [1] MANNEELA S, KUMAR S. Overview of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption and tsunami[J]. Journal of the Geological Society of India, 2022, 98(3): 299-304.
- [2] 任智源, 原野, 赵联大, 等. 2016 年全球地震海啸监测预警与数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(6): 98-110.
REN Z Y, YUAN Y, ZHAO L D, et al. Monitoring, early warning and numerical study of global tsunamis in 2016[J]. Marine Sciences, 2017, 41(6): 98-110.
- [3] 国家海洋环境预报中心. 日本大地震已确认 14 133 人遇难[EB/OL]. (2011-04-21). https://www.gov.cn/yjgl/2011-04/21/content_1849896.htm.
National Center for Marine Environmental Forecasting. The earthquake and tsunami in Japan have confirmed 14, 133 deaths [EB/OL]. (2011-04-21). https://www.gov.cn/yjgl/2011-04/21/content_1849896.htm.
- [4] 中华人民共和国自然资源部. HY/T 0281-2020 海啸术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. HY/T 0281-2020 Tsunami terminology [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [5] 国家海洋预报台. 汤加火山喷发引发越洋海啸, 对我国沿海有影响吗? 和地震海啸有什么区别?[EB/OL]. (2022-01-17)[2024-04-23]. <https://c.m.163.com/news/a/GTUNPOLB051492EO.html?from=subscribe>.
The National Oceanographic Observatory. Did the eruption of Tonga's volcano, which triggered the trans-oceanic tsunami, affect our coast? What's the difference between an earthquake and a tsunami? [EB/OL]. (2022-01-17) [2024-04-23]. <https://c.m.163.com/news/a/GTUNPOLB051492EO.html?from=subscribe>.
- [6] HEIDARZADEH M, SATAKE K. Waveform and spectral analyses of the 2011 Japan tsunami records on tide gauge and DART stations across the Pacific Ocean[J]. Pure and Applied Geophysics, 2013, 170(6): 1275-1293.
- [7] 于福江, 原野, 赵联大, 等. 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震海啸对我国影响分析[J]. 科学通报, 2011, 56(3): 239-246.
YU F J, YUAN Y, ZHAO L D, et al. Evaluation of potential hazards from teletsunami in China: tidal observations of a teletsunami generated by the Chile 8.8 M_w earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(3): 239-246.
- [8] 王宗辰, 徐志国, 原野, 等. 2022 年 1 月 15 日汤加火山海啸对中国沿海的影响分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(5): 1030-1038.
WANG Z C, XU Z G, YUAN Y, et al. How did the Tonga volcanic tsunami on January 15, 2022, affect Chinese coasts? [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(5): 1030-1038.
- [9] DAVIES G, WILSON K, HAGUE B, et al. Australian atmospheric pressure and sea level data during the 2022 Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano tsunami[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 114.
- [10] 袁春光, 王义刚, 黄惠明, 等. 日本“311”海啸对江苏北部沿海影响分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 68-75.
YUAN C G, WANG Y G, HUANG H M, et al. Impact of "311" Japan tsunami on northern Jiangsu coast[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(6): 68-75.
- [11] REN Z Y, HOU J M, WANG P T, et al. Tsunami resonance and standing waves in Hangzhou Bay[J]. Physics of Fluids, 2021, 33

- (8): 081702.
- [12] 潘文亮, 王盛安, 孙璐, 等. 2010年智利和2011年日本海啸在华南海岸的实测海啸波形和特征[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(6): 17-23.
- PAN W L, WANG S A, SUN L, et al. Observed waveform and characteristics of the 2010 Chile and 2011 Japan tsunamis near the coast of South China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(6): 17-23.
- [13] 胡基福. 气象统计原理与方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1996.
- HU J F. Principles and methods of meteorological statistics[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1996.
- [14] BUTTERWORTH S. On the theory of filter amplifiers[J]. Wireless Engineer, 1930, 7(6): 536-541.
- [15] PIETER P. Butterworth filters[EB/OL]. [2024-04-23]<https://ttapa.github.io/Pages/Mathematics/Systems-and-Control-Theory/Analog-Filters/Butterworth-Filters.html>.
- [16] 王金歌. 基于Burg算法的短序列频谱估计研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
- WANG J G. Research on spectrum estimation of short-term sequence based on Burg algorithm[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [17] 日本气象厅. 令和4年1月地震・火山月报(防灾篇)[EB/OL]. (2022-01-10)[2024-04-23]. <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/monthly/202201/202201monthly.pdf>.
- Japan Meteorological Agency. Monthly report on earthquakes and volcanoes in Japan[EB/OL]. (2022-01-10)[2024-04-23]. <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/monthly/202201/202201monthly.pdf>.
- [18] SCHNEPF N R, MINAMI T, TOH H, et al. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcanic eruption[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(10): e2022GL098454.
- [19] 周裕成, 牛小静, 赵广生, 等. 汤加火山爆发中气压扰动诱发太平洋沿岸海啸的机制分析[C]//第三十三届全国水动力学研讨会论文集. 重庆:《水动力学研究与进展》编委会, 中国力学学会, 中国造船工程学会, 重庆交通大学, 2022: 12.
- ZHOU Y C, NIU X J, ZHAO G S, et al. Analysis of pressure disturbance induced tsunami along the Pacific coast in the volcanic eruption of Tonga[C]//Proceedings of the Thirty-Three TH National Symposium on Hydrodynamics. Chongqing: Editorial Board of Hydrodynamics Research and Progress, Chinese Society of Mechanics, China Shipbuilding Engineering Society, Chongqing Jiaotong University, 2022: 12.
- [20] 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.
- [21] SEKIZAWA S, KOHYAMA T. Meteotsunami observed in Japan following the Hunga Tonga eruption in 2022 investigated using a one-dimensional shallow-water model[J]. SOLA, 2022, 18: 129-134.
- [22] 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.
- ZHENG T T, QIU Q, LIN J. Advanced observations of the 2022 Tonga volcanic eruption and the associated tsunamis[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(2): 44-50.

Investigation on tsunami wave characteristics picking and analyzing technique for water level data from coastal tide gauges

LYU Xin¹, DING Jun², QIN Tao²

(1. East China Sea Forecasting Center, SOA, Shanghai 200136, China; 2. Shanghai Ocean Monitoring and Forecasting Center, Shanghai 200333, China)

Abstract: High-pass filtering and maximum entropy spectrum analysis were used to analyze the water level measured data during Tonga Tsunami of January 2022 from Chichi jima station in Japan and Luchaogang station in Shanghai. The results show that the maximum height of tsunami wave at Chichi jima station is 0.88 m, and its main period is 12.2~20.5 min. The maximum height of tsunami wave at Luchaogang station is 0.07 m, and its main period is 20.3 min. The derived tsunami waves are different when uses different sampling frequencies. The time between the first wave and the maximum wave height also varies at different stations.

Key words: tsunami; high-pass filtering; maximum entropy spectrum analysis; monitoring and warning; tsunami evaluation