基于海啸感应电磁场的海啸监测 研究与应用现状

方浩源,吴招才*

(自然资源部 第二海洋研究所,浙江 杭州 310012)

摘 要:早期的海啸监测系统主要依赖地震监测网或海底压力计阵列网,但都存在诸如建设和维护成本高、监测范 围有限等问题。对海啸的实际观测和模拟发现,广泛分布的海底电缆能够反映海啸运动产生的感应电磁场,由此 发展出了更为便捷和经济的海啸感应电磁场监测方法。本文介绍了海啸感应电磁场的理论推导过程、不同海啸速 度模型,以及对不同海底地形类型的海啸感应电磁场解析解的研究进展。对比分析海啸感应电磁场的电压、扰动 磁场、矢量电磁场三种海啸电磁监测方法的优缺点后认为,矢量电磁场监测具有测量海啸传播方向的优势,利用矢 量电磁测量结合现有的海啸监测系统能更快更准更实时地预警海啸。

关键词:海啸电磁监测系统;海啸感应电磁场;磁异常测量;海底电压测量;海底矢量电磁观测

中图分类号: P731.25 文献标志码: A 文章编号: 1002-3682(2022)03-0187-11 doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20211207001

引用格式:方浩源,吴招才.基于海啸感应电磁场的海啸监测研究与应用现状[J].海岸工程,2022,41(3):187-197. FANG H Y, WU Z C. Research and application status of tsunami monitoring based on tsunami induced electromagnetic field[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(3): 187-197.

20世纪以来,世界上共发生过7次大海啸,其中以2004年印尼苏门答腊地震引发的海啸最为严重,给海 啸波及国家带来了巨大的人员伤亡与财产损失。海啸主要是海底地层发生断裂造成的海水波动,属于特长 的长波能量传递,海啸波的特点是波速快、波长大及周期长。海啸波进入大陆架时,由于海水深度急剧变浅, 波速越来越小,波高骤增,使得海水像堵水墙一样拍向陆地从而带来毁灭性危害。对海啸这种具有突发性、 影响距离远、危害大特点的海洋灾害,人类目前只能通过监测、预警来减少它们带来的损失。

为减少海啸带来的破坏,美国国家海洋和大气局自1965年开始启动建设了国际海啸预警系统,由地震与海啸监测、海啸预警中心和信息发布等构成。1995年,美国国家海洋和大气管理局太平洋海洋环境实验室(NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, PMEL)开发并测试了海啸深海评估与报告(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, DART)网络系统。该系统是将压力计和声波传感器放置于海底,利用压电现象压力计产生与其所受到的压力成正比的电流,通过声波传感器将电流信号上传到海面浮标,然后通过卫星传输、到地面观测站,以此来实时监测与海啸相关的海平面高程变化^[1]。该网络是目前太平洋区域正在运行的海啸预警的主要系统,共6个站点,包括阿留申群岛以南的3个DART站、美国俄勒冈州和华盛顿外海的2个DART站和1个赤道站。

这种基于海底压力计的海平面高程变化测量来进行海啸预警有几点不足之处:①需要一定密度的传感 器网络分布,图1显示了DART目前部署的海啸监测浮标分布,这对于区域和局部海啸事件的预测来说远远 不够,印度洋地区甚至还没有完整的深海压力传感器网络;②该传感器阵列需要较高成本来安装与维护,有 些国家与地区无法负担这笔高额费用;③由于海啸监测浮标的技术限制,只适合为远距离地震产生的长时海 啸提供早期预警,但对人类造成重大危害的一般都是离岸距离近、传播速度快的海啸灾害^[2]。

收稿日期:2021-12-07

作者简介:方浩源(1997—), 男, 硕士, 主要从事海洋地球物理和三维磁力反演方面研究. E-mail: fanghy@sio.org.cn

*通信作者: 吴招才(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海洋地球物理方面研究. E-mail: wuzc@sio.org.cn

(王佳实 编辑)



图 1 当前各国部署的 DART 系统位置 Fig. 1 The locations of the currently deployed DART

因此,针对目前基于海底压力计测量海平面高程变化的海啸监测系统所面临的问题,利用新技术发展和 改进已有的监测系统被广泛重视。最佳的系统应该是实现对重点海啸风险区域的精细预警能力提升,包括 尽可能提高海啸预报的准确度、延长预警提前时间、降低预警系统的建设和维护成本等。

长波长、高波速的海啸在开阔海域与普通海浪并无明显差异,但海啸携带的巨量高盐度海水在地球磁场中运动时会产生次生电磁场,被称为海啸的"运动感应"(Motional Induction)电磁场,简称海啸感应电磁场, 所产生的磁场扰动(磁异常)可以被安装在近地卫星或者高空气球上的磁传感器捕捉,所产生的变化电场引起的电压变化可以被安装在海底的通信光纤电缆等探测到^[3]。安装在海底的高精度电磁计也能够同时探测 到海啸感应电磁场产生的磁异常和电压变化^[4]。通过海底电磁探测方法来监测海啸具有分辨率高、能够反 映海啸传播的矢量信息、能够实时监测等优点,许多地区的海底观测网都布设了电磁计,增加了海底地磁观 测站的研究部署计划。例如利用安装在法属波利尼西亚地区的长期海底地球物理观测网(在 2009 年 2 月至 2010 年 12 月运行期间)中电磁计就探测到海啸引起的海底电磁场变化^[5]。

在海啸电磁监测方面,我国不论是从台站建设等硬件基础条件,还是从相应理论方法研究和应用探讨方 面都与国际上存在差距。传统的地震探测与验潮站测量方法最大的局限性在于它们无法连续跟踪海啸波在 大洋中的传播,但是海啸感应电磁场可以做到。从原理上来说,从地磁信号中计算海啸波面非常便捷,若付 诸实际应用,可以大大改善现有的海啸预警系统⁶⁰。海啸电磁监测可以连续动态监测海啸传播,可以较海啸 到达提前 T/4(T 为波动周期)时间监测到异常信号,还可以判断海啸类型。故为进一步完善我国重点风险区 域海啸预警系统的监测能力,在南海海域布设包括岛礁台站和海底台站在内的海洋电磁观测台网是十分必 要的。本文主要为了解海啸电磁场监测预警海啸的理论与实际应用方向,结合我国南海海啸预警系统发展 现状提供补充电磁监测能力的建议。首先,讨论了海啸感应电磁场的监测原理,即海啸感应电磁场的解析解 的推导过程,总结了海啸感应电磁场中的电压变化和磁场扰动与海面高程变化的响应关系;其次,分析基于 此原理得出的海底电压测量、海面磁场测量以及海底矢量电磁观测三种海啸监测方法的特征与应用,比较了 三者的应用特点和现状,根据归纳比较结果指出了海底矢量电磁观测在海啸监测方面的应用优势;最后,讨 论了南海重点海啸区域未来布设电磁海啸监测台网的必要性。

1 海啸感应电磁场的原理

通过麦克斯韦方程组和一定的边界条件,可以定量地求出海啸感应电磁场的磁场垂直分量,以及海啸感

应电磁场中的电场在海底的电压变化与海面高程变化的响应关系^[7-8]。理论上,根据这两种关系,通过相应的 观测手段就可以实现海啸监测。

相比数值模拟方法需要对海啸进行实际模拟从而对磁场进行数值建模这种成本高、计算时间久的方法, 将观测和模拟中最容易得到的海面高程变化作为海啸运动特征参数,通过星载磁力计或者海底地磁站测量 得到的海啸运动感应产生的磁场,使用一些流动约束条件来推导海平面的海啸感应磁场与海面高程变化之 间的响应关系(式(1))更为高效。

Larsen^[9]推导了海洋中长波和中波(如海啸)产生的电磁场的理论解析解,该求解在几十到数百 km 的深度内规定了一层导电地幔,在有限海洋深度中研究电磁场的自感效应和互感效应。Chave 和 Alan^[10]利用格林函数也推导出了相应的海啸感应电磁场表达式。针对与海啸有关的海流, Tyler^[7]将 Larsen^[9]的通用公式简化为:

$$\frac{b_z}{\eta} = \left(\frac{F_z c}{h c_s}\right) e^{-\kappa_z},\tag{1}$$

式中: b_z 为海啸感应电磁场的垂直分量; η 为海面高程; F_z 为地球主磁场的垂直分量;h为海洋层厚度,也称为深度;c为波速, $c = (gh)^{1/2}$,其中g为重力加速度; c_s 为由 Tyler^[7]提出的一个缩放速度, $c_s = c + ic_d$,其中 $c_d = 2K/h$,为横向扩散速度;K为描述波数水平变化的矢量。借助该转换公式,可以由海面高程(η)估计海啸产生的垂直磁场分量(b_z),反之亦然。其最大的简化在于式(1)中括号内的项仅取决于环境参数,不依赖于特定的波参数,与具体的波数k和角频率 ω 无关。因此该转换公式在实际应用中也最为常见。

Tyler^[7]和 Sugioka 等^[11]都利用全球地磁模型和水深模型研究了该转换公式的振幅和相位的响应关系。 从振幅看,对于 0.5 m 波高的海啸,峰值磁异常可达 20 nT 左右,但仅限于磁极附近的深水区。物理上相位 (Phase)表示该过程是否属于扩散状态(Diffusive Regime)(phase≈90°)或通量冻结状态(Frozen-Flux Regime) (phase≈0°)。当 phase≈0 时,式(1)可简化为 $b_z/F_z = \eta/h$ (即由流动汇聚引起的深度的微小变化均与垂直磁场的 微小变化有关);在其他相位下,单位海平面高度变化引起的磁场振幅总是小于通量冻结区域,并且 b_z 与 η 异相^[7]。

在 2004 年印度洋苏门答腊特大海啸发生以前,对海啸感应电磁场的研究主要集中在不同海啸速度模型 和海底地形模型下的理论解析解推导。Tyler^[7]提出了理论解析解最简单的表达式,Larsen^[9]与 Shimizu 和 Utada^[12]给出了最全面的表达式,其他几种表达式^[11,13-14]则介于两者之间。总结这些解析解决方案的相关信 息和特点如表 1 所示。其后的研究则主要集中于基于海啸电磁场的具体监测方法,以及如何综合应用传统 压力式浮标、GPS 式浮标与电磁监测站等监测手段,建设更准确、更快的海啸监测系统。

Table 1 The characteristics of analytical solutions of the tsunami-induced electromagnetic field ^[3]						
作者	海啸速度模型	海底地形类型	主磁场	特点		
Larsen ^[9]	线性色散波	三层地球模型	$F_{\rm H}$ 和 F_z	为研究浅部和深部地幔的模型		
Tyler ^[7]	线性长波	半空间绝缘体	F_z	与频率无关		
Ichihara 等 ^[14] 和 Sugioka 等 ^[11]	线性长波	均匀半空间	F_z	为均匀导电地球模型		
Minami 等 ^[13]	线性色散波	均匀半空间	F_z	考虑动能守恒		
Shimizu 和 Utada ^[12]	线性色散波	任意一维地球	$F_{\rm H}$ 和 F_z	是Larsen ^[7] 的一般形式		

表 1 各种海啸电磁场解析解相关信息和特点^[3]

2 基于海啸感应电磁场的监测方法研究进展

2.1 海底电压测量监测方法与应用

全世界范围内,通过海底电缆测量海啸感应电磁场产生的电压变化来监测海啸运动特征方面的研究为

数并不多。在此之前, Lilley 等^[15]和 Meinen 等^[16]利用海底电压测量监测水流的方法, 认识到海底电压数据与 水流通量之间的线性关系, 该方法也常用于海峡水流传输的监控与水流通量估算^[17-20]。而 Thomson 等^[21]首 次在海底电缆中检测到海啸产生的电位, 利用海洋长电缆获得的大尺度位势资料研究了电位势对门多西诺 角海啸运动诱发电磁场的响应关系。

Flosadottir 等^[22]和 Sigray 等^[23]探讨了海底光缆系统测量海底电场变化的多种方法,提出用静电计阵列 (Electrometers)测量海底电场也可以探测到海啸引起的电场变化。但是静电计测量阵列的局限性在于其需要 部署在一个有利的位置,且需要有足够的空间密度,才能监测海啸引起的电场变化。北印度洋等地存在多个 为监测海底而建立的大型海底电缆系统,这些电缆穿越整个洋底的断裂系统、俯冲带等构造活动带,可以大 面积地探测海啸流引起的电场变化,一定程度上弥补了静电计测量阵列的不足。因此在北印度洋等地利用 现有和退役的海底电缆系统测量海底电压变化来监测海啸是十分有意义的^[8]。

由于地磁主场径向分量的振幅随纬度增加而增大,电磁感应的显著响应关系也可以在更高的纬度存在⁷⁷, 这意味着海底电缆电压测量可以监测世界更多地区的海洋运动。所以利用现有的海底电缆网络系统,可以 在诸如北太平洋与印度洋等地区监测海啸引起的电压变化。例如 Fujii^[24]研究了太平洋4条海底电缆在几秒 至直流电周期内观测到的行星尺度的电势变化。

在实际海啸监测效果上, Manoj 等^[8] 调查了印度洋海底电缆是否能够通过海啸产生的电压变化来监测 2004 年苏门答腊海啸产生的电场,发现在海底电缆的两端之间感应到了高达 0.5 V 的可观测电压,并使用正 压模型基于浅水方程模拟了 2004 年 12 月 26 日印度洋海啸的传播,绘制了整个模拟期间由海啸引起的海洋 中水平电场强度变化范围,如图 2a 和图 2b 所示,其中,南向电场强度分量和东向电场强度分量均为 0~10 mV/km, 且沿主流区及海岸和岛屿附近有较强的信号。大洋-大陆边界电场的增强主要是由横向电导率对比度大^[23] 所致。在开阔海域,电场强度在±2 mV/km 以内。电场的空间分布由流速和地磁主场径向分量 *B*"控制^[8]。

从 SAFE、SEA-ME-WE 和 TATA 三条印度洋地区的海底通信电缆网络中分别选择对应的部分电缆共3条(A-B、C-D和E-D),由上述3条选定电缆的模拟电压时间序列(图 2d)中可见,海底电缆的电压幅度在±500 mV 范围内,电压变化的主要周期约为20 min,与 Titov 等^[26]报道的印度洋海啸15~60 min 的周期大致一致,平行于地磁赤道的电缆(C-D和E-D)的电压变化幅度低于平行于主波运动方向的电缆(A-B)。由此验证了海底电缆电压测量监测海啸运动的可行性,且得到电缆放置位置的选择会影响海啸监测质量的结论,可以用于进一步优化监测布设方案。

利用海底电缆电压测量监测海啸的关键是从测得的电缆数据中提取出海啸引起的电信号,其中有2个问题值得注意:其一是电缆-海洋接触处的电化学过程引起的电压偏差^[23]会给数据增加噪声,但通过选择正确的接触位置和高质量的电极将电缆-海洋接触中的不稳定性降低后,可以达到1mV的测量精度^[27-28];其二是电缆数据中还囊括了外部(电离层和磁层)源和其他类型海流(海洋环流或潮汐流等),它们通过运动感应也产生电场干扰^[29]。对于潮汐变化引起的干扰,可以通过可用的数值计算方案来估计和消除^[7,25],其引起的与海啸相关的电压变化具有明显的周期性,通过与不发生运动感应的地磁数据进行比较,可将它们与外部源产生的电场噪声分开,这一处理方法可参考Larsen^[30]。

在现代海啸监测系统中,目前主要依靠带有可靠遥测系统的海底压力传感器阵列来探测海水运动,如前 文提到的美国 DART 系统^[1]。由于海啸传播速度很快,为提早发布海啸预警,以赢得更长的灾害防御时间,海 啸监测仪需布放在深海区的海啸传播路径上(就我国而言,可能引起地震海啸的震源区距离大陆很远)。在 这些区域,海水受海啸波影响而起伏,水面距海底高度随之变化,这种变化虽然不大,但可由放置于海底的高 精度压力传感器测得。这首先是因为海啸波具有长波(水深相对波长很小,也称为浅水波)属性。低频海啸 波可以到达深海海底而高频风生波无法到达,这种现象使深海成为一个理想的低通滤波器,便于在海底进行 海啸波测量^[31]。但是这种压力传感器阵列预警方式存在受限于传感器分辨率与精度以及成本维护等问题。

归纳上述关于海底电压测量监测方法的研究与应用情况,我们认为,用海底电缆电压测量来监测海啸运

动的优点在于几乎所有的海洋都有海底电缆,而且海底电缆的电压测量成本很低;缺点在于缺乏海啸沿着电缆移动的位置信息^[8]。综合来看,在没有或者缺少海底压力原位测量的海洋中使用海底电缆进行电压测量作为海啸监测替代方法具有很大的应用前景。并且在可预见的未来,由于全球互联网信号传播的广泛使用,利用海底电缆测量海啸的电磁场信号将进入定量化时代,海水中的带电粒子与地球磁场相互作用,在传送互联网信号的电缆中可以产生高达 500 mV 的电压。所以,利用海底电缆的电压测量这一技术相对简单的监测方法,可以形成定量且低成本的海啸预警系统,可以为负担不起其他类型大型传感器阵列的国家服务。







2.2 磁场扰动测量监测方法与应用

根据海啸感应电磁场的解析解,在考虑到环境参数代入的情况下,可以结合海啸实例验证观测到的磁场

191

扰动与实际海平面高程变化之间的响应。以卫星观 测到的与 2004 年 12 月 26 日印度洋海啸相关的海平 面变化为例,由图 3 可见海啸开始 2 h 后,沿 Jason 1 卫 星轨迹从 (82°E, 10°S) 延伸至 (93°E, 20°N) 的海面高度 异常η与在海面测得的相应垂直磁场分量b_z进行比较 的结果^[7]。

从图 3 可以看出,海面测得的垂直磁场分量b₂与 海啸产生的海面高程变化趋势具有一致性,且磁场变 化比高程变化幅度大,验证了磁场扰动监测海啸的可 行性。轨道卫星除了具有测高功能以外,还可以通过 星载磁力计同时直接测量区域海面的磁场异常,但其 存在由于电离层扰动影响、探测高度和探测分辨率等 会产生数据异常。其中关于卫星探测高度问题,在典 型的卫星高度约 400 km 处,不太可能探测到海啸产生 的磁场,因为海啸的水平尺度(×10² km)比海浪的



注:蓝线代表海面高程变化;绿线代表海平面测得的垂直磁场分量;此图来源于文献[7]。



(×10³ km)小得多。因此只有近地卫星和高空气球可以测量到海啸引起的磁场扰动^[7]。

前文提到监测海啸运动的主流方法是通过测量海底压力变化来反映水深变化,而 Suetsugu 等^[5]在对 2010年2月27日智利地震的研究分析中,发现了磁场扰动和海底压力变化之间的明显相关性,两者都与海 啸海面高程变化成正比。分析海底地震发生时 SOC8 站记录的海啸到来时的电磁信号和压力信号,发现海底 地震出现后海啸压力信号与磁场的垂直分量响应一致,这充分证实在反映海啸产生的海面高程方面,磁场垂 直分量扰动与海底压力变化的响应效果是一致的。也就是说,海底的磁场测量可以应用于海啸运动监测。

此外, Titov 等^[26] 通过模拟海啸得到的最大海平面 高度预测了其引起的磁场扰动的最大振幅(图 4),再 将预期值与海啸发生期间磁场实测值进行比较,验证 了响应关系的准确性。如图 4 所示,根据对 2004 年 12 月 26 日印度洋海啸模拟得到的最大海面高度来算 得的海啸流产生的垂直磁场分量的最大振幅。可知 模拟得到的振幅约为 3 nT,与图 3 的海面观测结果一 致,但是磁赤道附近(8°~9°N 区域)的振幅很小。因 此认为利用磁场振幅对海啸进行估计在这 2 个区域是 无效的:①靠近磁赤道,这里的磁场无论如何都很小; ②靠近海岸线(约 300 km)^[7]。

实际海啸引起的磁场扰动信号分别与卫星测高数据、海底压力数据、海啸模拟数据三方面得到的海啸高度进行比较验证,结果都证实了海啸引起的磁场扰动与海啸海面高程变化的响应关系^[3]。当然响应关系







随着海水深度不同,其表达式也会有所不同,Sugioka等^[11]就研究了在不同海域深度下的磁场响应函数,未来 在不同深度海域都能精确监测到海啸的运动将成为可能。

在实际应用方面,磁场扰动测量的监测方法一般可以通过近地卫星测得磁数据,然而卫星观测监测范围 大,在靠近磁赤道和海岸线区域该方法监测效果却不佳。结合以上特点,可以认为磁场扰动测量监测方法更 适用于监测在具有极低波高的大洋中的海啸,用于监测系统早期锁定可疑海啸并及时分析其对陆地的危 害性。

2.3 海底矢量电磁观测监测方法与应用

过去15a中,随着技术的发展和其他相关应用需求的增加,更多先进电磁仪被布设到海底。在太阳活动 相对平静期发生的大海啸(如2006—2007年的千岛地震、2010年智利地震和2011年的东北地震分别造成的 千岛海啸、智利海啸和东北海啸)所引发的感应电磁场观测记录也逐渐增多,这为用海底电磁仪组成阵列全 天候、全天时精确监测海啸运动提供了硬件基础。

相关研究方面, Toh 等^[4]利用西北太平洋的一个海底地磁观测站监测到的千岛海沟两次地震引起的海啸 磁场分量信息发表了第一份详细的海啸感应电磁场的研究报告, 得到单点海底电磁传感器既可以监测海啸 传播方向, 也可以监测海啸波高的结论。在监测效果方面, Schnepf等^[32]利用一种新的交叉小波分析方法处 理磁信号, 通过参考点的水平磁场降低了噪声, 突出海啸磁信号。应用该方法处理 2007 年千岛海啸、2010 年 智利海啸和 2011 年东北海啸以及萨摩亚海啸期间获得的磁性数据, 成功提取出了海啸磁信号的时频特征。 目前该方法的唯一缺点是去噪后不能通过交叉小波分析再现时间序列, 导致原始时间序列中的相位信息丢 失^[3,32]。在布设监测网络、综合应用于海啸监测系统方面, Suetsugu 等^[5]和 Sugioka 等^[11]首次报道了 2010 年智 利海啸期间处于运行状态的 TIARES(The network for Tomographic Investigation by seafloor Array Experiment for the Society hotspot, 面向社会热点的海底阵列层析成像探测网络)的海底水压和电磁信号观测结果。由于高频 率的外部信号不能传播到海底, 因此海底仪器测得的电磁信号大都是清晰的, 这对实时推断海啸传播的动态 特性很有帮助^[3]。例如 Zhang 等^[33,34]报道的正常大洋地幔(Normal Oceanic Mantle)项目在北太平洋安装了一 系列海底仪器形成监测网^[35], 能够准确确定该地区的海啸传播方向。

Toh 等^[4]利用 2006 年和 2007 年两次千岛地震海啸实测数据研究了海底矢量电磁监测能力,图 5 和图 6 分别显示了 2 次海啸抵达时间区间内垂直向下地磁分量(*b_z*)和 2 个水平地磁分量(*b_x*, *b_y*),以及由粒子速度估 计叠加的预测海啸高度。因此认为:①可以通过一个地磁监测站单点监测海啸传播方向;②可以通过观测总 是在实际海啸到达前出现的磁场垂直分量双极峰预警海啸,理论上可以提前 *T*/4 的时间;③可以通过水平电 磁分量波峰的正负来判断海啸类型。

上述是单点电磁观测,在实际监测系统中一般都是通过完整的电磁观测阵列来监测海啸运动有效信息的。Sugioka等^[11]利用安装在法属波利尼西亚地区的长期海底地球物理观测网的电磁计和压力计监测到了海啸引起的海底电磁场和水深扰动,并根据到达各观测站的时间推断出每隔10min的海啸波阵面,结果表明2010年智利地震海啸向约44°NW的方向以约210m/s的速度传播。利用2个水平磁分量以及所有台站的1个水平电分量和垂直磁分量的2对波形等电磁数据推断出的传播矢量与上述波阵面估计结果一致。

基于海啸电磁感应场理论的3种海啸监测方法给当前主流的基于压力变化的海啸监测方法提供了有效 补充。对实际应用过程中电场、磁场和矢量电磁监测优劣点进行了分析,结果如表2所示。

在电磁测量仪器方面,海底电磁计的分辨率极限为 0.01 nT, 在除赤道线 (从理论上考虑) 以外地区足以分 辨对应于 B_z/g > 1的厘米级高度的海啸^[11]。在先进电磁仪不断布设的基础上, 归纳 2 次千岛地震海啸中矢量 电磁观测监测方法表现出的优点有:能有效预测最大海啸波到来(垂直分量的双极峰),能判断海啸类型(水 平分量波峰), 且矢量电磁观测网还可以实时监测海啸运动方向。所以现阶段应加快海底电磁监测网络的布 设与研究, 将其整合到现有的单一压力浮标监测系统中, 形成海啸电磁监测系统, 将能大幅提高海啸预警系 统的监测能力。

海啸电磁监测系统每个单元主要由3种传感器构成,分别是测量海底磁场分量的海底电磁仪、测量海面高程变化的压力计和传输信号的传输器。日本海洋地球科学技术局(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)开发了一种名为 Vector TsunaMeter(VTM)的海底电磁仪器,并将其应用于海啸预警系统^[36-37]。VTM包括用于磁场3分量测量的磁通门磁力计、海底压力测量的差压计(Differential Pressure Gauge,

DPG)和将数据传输到海面的声学调制解调器。因此,该仪器在通过 DPG 检测海面高程变化的同时,可以利用矢量磁观测监测海啸的传播方向。VTM 还可以与位于海面的自主波浪滑翔机进行通信,并通过卫星将实时数据传输到陆地站。Hamano 等^[38-39]报道了 2013 年 2 月 6 日所罗门群岛海啸(Mw 8.0 地震引发)发生时,安装在菲律宾海中的 VTM 成功检测到了海啸电磁信号。



注:实心垂直箭头表示水平地磁分量的峰值与 Boussinesq 近似预测 的海啸高度和粒子速度的最大值重合,虚线箭头表示向下地磁分 量的峰值总是在最大海啸高度之前,彩色方形符号表示西太平洋 (NorthWest Pacific, NWP)站观测到的地磁场值。

图 5 2006 年千岛地震海啸引起的磁场 3 部分分量变化^[4] Fig. 5 The variations of three-part components of the magnetic field induced by a seismic tsunami at Qiandao Island in 2006^[4]



注:实心垂直箭头表示水平地磁分量的峰值与 Boussinesq 近似预测 的海啸高度和粒子速度的最大值重合,虚线箭头表示向下地磁分 量的峰值总是在最大海啸高度之前,彩色方形符号表示西太平洋 (NorthWest Pacific, NWP)站观测到的地磁场值。

图 6 2007 年千岛地震海啸引起的磁场 3 部分分量变化^[4] Fig. 6 The variations of three-part components of the magnetic field induced by a seismic tsunami at Qiandao Island in 2007^[4]

表 2 3 种海啸电磁监测方法的对比

Table 2	Comparison of th	e three methods	for monitoring t	he tsunami-induced	d electromagnetic field
	1		0		0

监测方式	优点	缺点
海底电缆电压测量	目前海底电缆分布范围广; 电压测量成本低	缺少海啸沿电缆移动的位置信息
磁场扰动测量	卫星观测磁场范围大且能实时观测	存在电离层扰动影响以及探测高度和分辨率问题; 在靠近磁赤道和海岸线(~300 km)区域无效
海底矢量电磁观测	能准确确定海啸传播方向;海底电磁信号干扰少; 可提前预测最大海啸波到来;可判断海啸类型	成本高;单一观测台站效果一般,需要一定密度的联合观测阵列

3 我国南海海啸电磁监测系统的发展

我国南海地处环太平洋地震带和喜马拉雅地震带的多地震区环绕下,海底地震有发展成为海啸危害的可能。南海尤其是马尼拉海沟是可能的海啸危险区,在开展相应的海啸风险区域分析后,在重点区域建立完整的海啸预警机制是十分必要的。国际上主要的海啸监测手段有验潮站、压力式浮标、GPS 浮标和卫星监测。而我国目前仅能通过验潮站和地震台网来监测海啸,相应海啸预警的准确度和及时性都与国际水平存在差距^[40]。目前南海地震海啸预警监测系统由地震与海啸监测系统、海啸数值模拟计算系统、预警信息服务系统组成^[41]。

南海海啸预警系统中电磁监测站的设置几乎为空白,主要依靠偏理论的数值模拟计算系统,主要是因为 有关南海海啸预警国内学者在数值模拟方面研究较多,大多基于海洋动力学原理,在有效结合海水运动的感 应电磁场监测方面存在空白。建设海洋电磁观测台网不仅可以有效提升我国海啸预警监测实力,还可以满 足地球科学研究的需要、填补相关空白和维护国家海洋权益以及更好地履行国际责任。在海洋电磁观测台 网方面,我国基础设施建设薄弱。日本分别于2001年8月和2006年6月,在西太平洋水深5580m处和西菲 律宾盆地(West Philippine Basin, WPB)水深5690m处布设了2个海底地磁非实时观测站^[42]。我国目前在海洋 地磁探测网的建设上与国外有较大差距。

4 结 论

本文介绍了海啸感应电磁场监测海啸的原理,即其解析解的推导,以及基于这一原理的3种海啸监测方法(海底电压测量、磁场扰动测量、海底矢量电磁测量)的研究进展与相关应用,总结了三者各自的特点及应 用现状和完整的海啸电磁监测网络的应用优势。最后简要介绍了在我国南海海啸风险区域布设海底电磁观 测台网,利用矢量电磁观测手段补强我国海啸监测预警能力的必要性。得到以下主要结论。

 海啸作为一种海水运动切割地磁场产生的感应电磁场,与相应的海面高程变化具有响应关系,通过分 析海啸感应电磁场的解析解可以获得这一关系。

2)利用海啸产生的磁场扰动与电压变化都可以预测海啸的运动特征,利用海底电缆监测海啸电磁场信号进而预警海啸运动具有可行性。

3)海底矢量电磁观测可以同时观测磁场分量和电场分量,并且具有矢量测量海啸传播方向的能力,因此 电磁分量测量可以补充由海底压力计单一推断的海面变化数据。就海啸预报的准确性而言,将矢量电磁观 测整合到现代标量观测系统中,将代表海啸预警系统性能的大幅提高。

4) 在我国目前海洋地磁测量发展水平下, 在南海等重点区域建设符合实际情况的海底矢量地磁观测网 络十分有必要, 也是未来技术发展的趋势。

参考文献 (References):

- [1] GONZALEZ F I, MILBURN H M, BERNARD E N, et al. Deep-ocean assessment and reporting of tsunamis (DART): brief overview and status report[C]//National Oceanic and Atmospheric Administration. Proceedings of the international workshop on tsunami disaster mitigation. Tokyo, Japan, 1998.
- [2] FRY B, MCCURRACH S J, GLEDHILL K, et al. Sensor network warns of stealth tsunamis[EB/OL]. (2020-05-26)[2021-12-07]. https://eos.org/science-updates/sensor-network-warns-of-stealth-tsunamis.
- [3] MINAMI T. Motional induction by tsunamis and ocean tides: 10 years of progress[J]. Surveys in Geophysics, 2017, 38(5): 1097-1132.
- [4] TOH H, SATAKE K, HAMANO Y, et al. Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(B2): 1-10.
- [5] SUETSUGU D, SHIOBARA H, SUGIOKA H, et al. TIARES Project-tomographic investigation by seafloor array experiment for the society

hotspot[J]. Earth, Planets and Space, 2012, 64(4): i-iv.

- [6] 刘桦, 赵曦, 王本龙, 等. 海啸数值模拟与南海海啸预警方法[J]. 力学季刊, 2015, 36(3): 351-369. LIU H, ZHAO X, WANG B L, et al. Numerical simulation of tsunami and tsunami warning methods for South China Sea Region[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(3): 351-369.
- [7] TYLER R. A simple formula for estimating the magnetic fields generated by tsunami flow[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 320: L09608.
- [8] MANOJ C, KUVSHINOV A, NEETU S, et al. Can undersea voltage measurements detect tsunamis?[J]. Earth, Planets and Space, 2010, 62(3): 353-358.
- [9] LARSEN J C. The electromagnetic fields of long and intermediate waves[J]. Journal of Marine Research, 1971, 29: 28-45.
- [10] CHAVE, ALAN D. On the theory of electromagnetic induction in the earth by ocean currents[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88: 3531-3542.
- [11] SUGIOKA H, HAMANO Y, BABA K, et al. Tsunami: ocean dynamo generator[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 3596.
- [12] SHIMIZU H, UTADA H. Motional magnetotellurics by long oceanic waves[J]. Geophysical Journal International, 2015, 201(1): 390-405.
- [13] MINAMI T, TOH H, TYLER R H. Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: classification based on the ocean depth[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(7): 2171-2178.
- [14] ICHIHARA H, HAMANO Y, BABA K, et al. Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 382: 117-124.
- [15] LILLEY F, FILLOUX J H, BINDOFF N L, et al. Barotropic flow of a warm-core ring from seafloor electric measurements[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 1986, 911(C11): 12979-12984.
- [16] MEINEN C S, LUTHER D S, WATTS D R, et al. Combining inverted echo sounder and horizontal electric field recorder measurements to obtain absolute velocity profiles[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(10): 1653-1664.
- [17] LARSEN J C, SANFORD T B. Florida Current volume transports from voltage measurements[J]. Science, 1985, 227(4684): 302-304.
- [18] BARINGER M O, LARSEN J C. Sixteen years of Florida Current transport at 27° N[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(16): 3179-3182.
- [19] KIM K, LYU S J, KIM Y, et al. Monitoring volume transport through measurement of cable voltage across the Korea Strait[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(4): 671-682.
- [20] NILSSON J A, SIGRAY P, TYLER R H. Geoelectric monitoring of wind-driven barotropic transports in the Baltic Sea[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 24(9): 1655-1664.
- [21] THOMSON D J, LANZEROTTI L J, MACLENNAN C G, et al. Ocean cable measurements of the tsunami signal from the 1992 Cape Mendocino earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 144(3-4): 427-440.
- [22] FLOSADOTTIR A H, LARSEN J C, SMITH J T. The relation of seafloor voltages to ocean transports in North Atlantic circulation models: model results and practical considerations for transport monitoring[J]. Journal of Physical Oceanography, 1997, 27(8): 1547-1565.
- [23] SIGRAY P, LUNDBERG P, DÖÖS K. Observations of transport variability in the Baltic Sea by parasitic use of a fiber-optic cable[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(7): 1112-1120.
- [24] FUJII I UTADA H. On geoelectric potential variations over a planetary scale[J]. Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory, 2000, 29: 1-81.
- [25] KUVSHINOV A, JUNGE A, UTADA H. 3-D modelling the electric field due to ocean tidal flow and comparison with observations[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(6): 1-5.
- [26] TITOV V, RABINOVICH A B, MOFJELD H O, et al. The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami[J]. Science, 2005, 309(5743): 2045-2048.
- [27] FILLOUX J H. Instrumentation and experimental methods for oceanic studies[J]. Geomagnetism, 1987, 3: 143-247.
- [28] LARSEN J C. Transport measurements from in-service undersea telephone cables[J]. IEEE journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4): 313-318.
- [29] LARSEN J C. Electromagnetic response functions from interrupted and noisy data[J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1980, 32(Suppl.1): 89-103.
- [30] LARSEN J C. Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismic-induced signals[J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1997, 49(11-12): 1257-1265.
- [31] 贾立双,任炜,李家军,等. 基于海底压力测量的海啸预警方法研究[J]. 海洋技术, 2017(3): 108-111. JIA L S, REN W, LI J J, et al. Research on the method of tsunami pre-warning based on deep-sea pressure measurement[J]. Journal of Ocean Technology, 2017(3): 108-111.
- [32] SCHNEPF N R, MANOJ C, AN C, et al. Time-frequency characteristics of tsunami magnetic signals from four Pacific Ocean events[J].
 Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(12): 3935-3953.

- [33] ZHANG L, UTADA H, SHIMIZU H, et al. Three-dimensional simulation of the electromagnetic fields induced by the 2011 Tohoku tsunami[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2014, 119(1): 150-168.
- [34] ZHANG L, BABA K, LIANG P, et al. The 2011 Tohoku Tsunami observed by an array of ocean bottom electro-magnetometers[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(14): 4937-4944.
- [35] KAWAKATSU H, BABA K, TAKEO A, et al. In-situ characterization of the lithosphere/asthenosphere system of the 'normal oceanic mantle' via ocean bottom geophysical observations: first results of the NOMan project (Invited) [C]//American Geophysical Union. Fall meeting, 2013: DI31B-06.
- [36] SUGIOKA H, HAMANO Y. Real-time ocean bottom tsunami monitoring system using Vector TsunaMeter successfully completes trial observation[EB/OL]. (2014-04-04)[2021-12-07]. http://www.jamstec.go.jp/e/about/ press_release/20140404/.
- [37] MARINETECHNOLOGY. Realtime tsunami monitoring in Japan[EB/OL]. (2014-11-06)[2021-12-07]. https://www. Marinetech-nologynews.com/news/realtime-tsunami-monitoring-japan-503402#.
- [38] HAMANO Y, SUGIOKA H, TOH H. Long-term deployment of Wave Glider for a real-time tsunami monitoring system using the Vector Tsunameter[EB/OL]. Japan Geoscience Union. Japan geoscience union meeting. Kanagawa: Pacifico YOKOHAMA, 2014. https://www2. jpgu.org/meeting/2014/session/PDF/H-DS27/HDS27-08_e.pdf.
- [39] HAMANO Y, SUGIOKA H, TADA N, et al. First seafloor observation of Vector Tsunameter[C]//Japan Geoscience Uninon. Japan geoscience uninon, 2013. https://www2.jpgu.org/meeting/2013/session/PDF_all/S-EM37/ SEM37_all.pdf.
- [40] 叶琳, 于福江, 吴玮. 我国海啸灾害及预警现状与建议[J]. 海洋预报, 2005, 22(增刊1): 147-157. YE L, YU F, WU W. The disaster and warning of tsunami in China and the suggestion in future[J]. Marine Forecasts, 2005, 22(Suppl.1): 147-157.
- [41] 陈建涛,叶春明. 建立南海地震海啸监测预警系统的构思[J]. 华南地震, 2010, 30(增刊1): 145-152. CHEN J T, YE C M. Discussion on the construction of the tsunami monitoring and warning system in the South China Sea[J]. South China Journal of Seismology, 2010, 30(Suppl.1): 145-152.
- [42] 魏巍, 马媛, 汤民强, 等. 南海海洋地磁固定观测站建设初步研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(5): 93-97. WEI W, MA Y, TANG M, et al. Preliminary study on the construction of the fixed geomagnetic observatory station in the South China Sea[J]. Ocean Technology, 2019, 38(5): 93-97.

Research and Application Status of Tsunami Monitoring Based on Tsunami Induced Electromagnetic Field

FANG Hao-yuan, WU Zhao-cai

(Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The early tsunami monitoring system relies mainly on seismic monitoring network or subsea manometer array network. However, these methods all have the problems such as high cost of construction and maintenance and limited monitoring scope, and so on. From actual observations and numerical simulations of tsunami, it has been found that the widely distributed subsea cables can reflect the induction electromagnetic field produced by the movement of tsunami, from which more convenient and economical methods for monitoring the tsunami-induced electromagnetic field (TIEF) are developed. The theoretical derivation process of the TIEF is introduced and the analytical solutions of the TIEF under the cases of different tsunami velocity models and seafloor topographical types are studied. By comparing the merits and faults of monitoring the voltage, disturbance magnetic field and vector electromagnetic field of TIEF, it is found that the monitoring of the vector electromagnetic field has the advantage of measuring the propagation direction of tsunami and the application of the vector electromagnetic field monitoring together with the existing tsunami monitoring system can make the warning of tsunami faster, more accurate and more real time.

Key words: tsunami-induced electromagnetic monitoring system; tsunami-induced electromagnetic field; magnetic anomaly measurement; seafloor voltage measurement; seafloor vector electromagnetic observation **Received:** December 7, 2021