

陈建涛, 苏柱金, 黄腾浪. 基于地震自动速报和 COMCOT 模式的南海地震监测与海啸模拟平台开发[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 55-62.
[CHEN Jiantao, SU Zhujin, HUANG Tenglang. The Development of South China Sea Seismic Monitor and Tsunami Simulate Based on the Automatic Earthquake Location System and COMCOT Mode[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(3): 55-62.]

基于地震自动速报和 COMCOT 模式的南海地震监测与海啸模拟平台开发

陈建涛^{1,2,3}, 苏柱金^{1,2,3}, 黄腾浪^{1,2,3}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070)

摘要: 介绍由广东省地震局开发的南海地震监测与海啸数值模拟平台, 该平台主要由两部分组成: 一是基于国家地震自动速报备份系统的南海地震实时监测平台, 全天候实时监测南海及其周边地区进行地震自动速报, 如果震级达到 6 级以上, 平台发出声音报警, 并预留短信接口, 可发布海啸预警信息; 二是基于 COMCOT 模式的南海地震海啸数值模拟平台, 根据地震三要素、震源参数、断层参数等, 进行数值模拟海啸传播过程, 计算海啸到达海岸线的时间和浪高, 获得海啸传播时程和破坏程度, 用于预判发布海啸预警信息。这两者之间关系密切, 缺一不可, 先有地震, 后才引发海啸, 而海啸预警才是最终目的。

关键词: 地震自动速报; 数值模拟; 地震海啸

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 03-0055-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.03.008

The Development of South China Sea Seismic Monitor and Tsunami Simulate Based on the Automatic Earthquake Location System and COMCOT Mode

CHEN Jiantao^{1,2,3}, SU Zhujin^{1,2,3}, HUANG Tenglang^{1,2,3}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Project, Guangzhou 510070, China)

Abstract: This paper presents a detailed introduction to the South China Sea earthquake monitor and tsunami numerical simulation platforms developed by Guangdong Earthquake Agency. The platform mainly consists of two parts: the South China Sea earthquake real-time monitoring platform based on the national automatic earthquake location system, obtains the earthquake quick report automatic real-time monitoring of the South China Sea and

收稿日期: 2017-02-06

基金项目: 广东省南海地震观测网络及地震海啸监测预警系统建设工程项目

作者简介: 陈建涛 (1982-), 男, 工程师, 主要从事地震观测研究和台站运维工作。

E-mail: 37539836@qq.com.

its surrounding areas, and gives an sound alarm if the magnitude reached 6 above, meanwhile, with setting aside the phone message interface, it can be issued a tsunami warning information; based on COMCOT mode and according to the earthquake three elements, source parameters, and fault parameters, the South China Sea tsunami numerical simulation platform can calculate the numerical simulation of tsunami propagation process, and obtains the tsunami arrival time, wave height of the coastline, the tsunami propagation process and the damage for pre judgment issued a tsunami warning information. The relationship between two platforms above are indispensable, the earthquake first, and then a tsunami, and the tsunami warning is the ultimate goal.

Keyword: Automatic earthquake location system; Numerical simulation; Seismic tsunami

0 引言

海啸是指海洋剧烈扰动产生的波动,它主要由海底地震、海底火山爆发、海岸或海底山体滑坡、小行星或彗星落入海中、海洋中的核爆炸等原因引起^[1],是一种具有强大破坏力的海浪,是地球上最猛烈的海洋自然灾害之一。地球上的太平洋、大西洋和印度洋,多次发生过海啸,都有重大灾难性海啸的记录,2011年3月11号日本9.0级地震,引发了巨大的地震次生灾害海啸,造成了日本极大的破坏和人员伤亡,社会影响极其严重和广泛,甚至影响了全球,并且还出现了严重的核电站事故。

南海是我国大陆最大的边缘海^[2],海域广阔浩瀚,形成了半封闭的边缘海,面积约350万km²。海水较深、地形复杂,南海平均水深1100多米,马尼拉海沟南端的最深处达5300多米,是国际上公认具有发生破坏性地震海啸的条件^[3],而南海沿海国家和地区人口密度大,是集中了工业、农业、旅游业等的重要经济地区,一旦遭受海啸袭击,无疑将威胁海南、广东、福建、台湾沿海。在这样的背景之下,开发南海地震实时监测平台和海啸数值模拟平台^[4],是非常紧迫和必需的,具有十分重要的社会意义和科学意义。根据广东省防震减灾“十一五”南海地震海啸观测网及地震海啸监测预警系统建设工程项目,保障人民生命财产,有效减少地震海啸灾害的目的,落实防震减灾基本政策,本文详细介绍由广东省地震局开发的南海海啸监测与数值模拟平台。

1 南海地震实时监测平台

地震海啸是由地震引发的,因此先有地震,后才引发海啸。获得地震三要素仅需几分钟,而由地震引发的海啸,特别是跨洋海啸需要传播若

干小时才到沿海,使得地震三要素速报具有重大的海啸预警应用意义。利用已有的多年地震监测成果产品,开发能实时侦听地震自动速报信息交互服务器的内核和界面平台,并根据震级、监测位置等策略进行判断和快速反应。

1.1 目标

基于国家地震自动速报备份系统(以下简称地震自动速报系统),开发南海地震实时监测平台(以下简称南海监测平台),专门针对南海海域,组成虚拟地震监测台网,24h不间断、自动、实时的监测南海及其周边的海洋大地震,快速测定地震三要素。如果地震发生在南海划定范围内,震级达到6级或更大,系统发出声音报警;开发预留短信接口,能够根据实际策略进行海啸预警发布,比如震级超过7.5级,向有关部门发布海啸预警信息。

1.2 核心技术

南海监测平台的开发是基于和依赖于国家地震自动速报备份系统进行的,该系统于2009年7月底开始正式运行^[5],接收了国内外1000多个地震台站的实时数据流,其中国内实时数据测震台为800多个,IRIS实时数据服务器上获取的全球地震台站200多个。该系统能比较准确、快速、可靠地自动测定国内M4.0级以上,国外M5.0级以上的地震参数。一般在地震触发后1min给出初步结果,可能只有震中经纬度而没有震级,随着检测到的震相信息越来越多,在地震触发3min后能给出可靠结果,地震触发大于3min后系统能自动不断地修正定位结果,最终给出准确的自动处理结果,为地震海啸监测预警平台提供准确的地震“三要素”结果,作为南海监测平台的结果来源和依赖基础。

使用Java语言进行平台内核开发,后台内核

实时侦听地震自动速报系统的 JBOSS 信息交互服务器^[9]，仅进行侦听信息因此丝毫不影响自动速报系统运行。对南海划定范围内感兴趣的地震进行捕捉、判断、推送等，地震发生在预设划定的南海范围内，震级达到要求(默认 6.0 级以上)，平台

就发出声音报警。如图 1 所示，后台实时监控地震自动速报 JBOSS 服务器，不在感兴趣范围内的地震不进行处理。同时内核还具备短信发送接口和测试功能，主要用于预留发手机短信、演示演练以及测试系统运行是否正常。

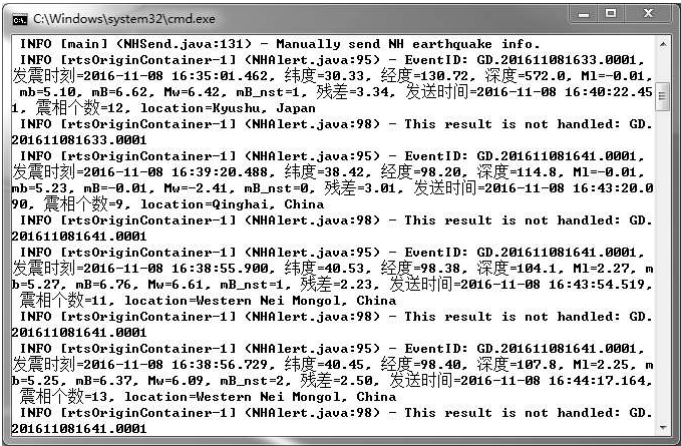


图 1 南海地震实时监测后台运行界面

Fig.1 Real time earthquake monitoring interface of the South China Sea

1.3 界面与功能

监测平台使用 Java 语言进行 GUI 设计，简洁大方，界面包括南海边界图、地震位置图形显示、地震目录列表、地震信息详细文本显示，功能按钮等。主要负责对有可能引发海啸的地震进行速报和报警，此平台是全自动化、全天候实时的，监测速报范围为南海海域 6 级以上海洋地震；具

有声音报警功能，并开发短信发送接口，作为预留功能，在成果推广使用时候，仅需购买短信群发器，在按照国家政策和权限的情况下，就能够实现地震海啸预警信息的发送功能。界面如图 2 所示，左边列表是在此范围内已经发生的历史地震；右边地图是历史地震分布图和南海海域地震监测范围，此外，平台还有高级设置、发送短信、假设地震海啸模拟等功能。



图 2 南海地震实时监测平台界面(粗线为地震监测范围)

Fig.2 Real time earthquake monitoring platform of the South China Sea (Thick line is the range of seismic monitor)

2 南海地震海啸数值模拟平台

由于目前科学技术的发展还不能事先预测海啸的发生,只能依据海底地震记录和监测地震附近的潮位变化来确定是否有海啸发生,一旦确定后可迅速给出海啸源的位置、强度,通过海啸传播数值预报模式计算出海啸到达受影响海域的时间和强度,并估算出它的破坏力,在海啸到达之前告知受影响的国家和地区,做出应对海啸灾害的措施,这就是海啸预警^[7]。

2.1 目标

开发南海地震海啸数值模拟计算平台(以下简称南海模拟平台),通过输入地震三要素和震源机制,主要包括震位置,地震矩震级、震源深度、地震类型、断裂大小、断层滑动位移等参数,使用南海海底地形数据,即南海海洋海水深度精细数据和南海沿海陆地海岸线数据等,通过海啸数值模拟进行计算海啸到达受影响地区海岸的时间和强度,估算出其破坏程度,每个模拟过程都生成数据文件和图件,作为是否发布地震海啸预警信息的预判和研究。

2.2 使用模式

南海模拟平台内核使用海啸数值模式 COMCOT 来模拟海啸传播,COMCOT 全称为 Comell Multigrid Coupled Tsunami model,是康奈尔大学研制的海啸数值模拟软件^[8],采用有限差分数值方法求解浅水方程,能够模拟海啸从产生、传播到海岸爬高的全过程。本平台所采取的 1.6 版本是由 Philip L.-F.Liu 研究小组于 2006 年修改完成,对程序结构作了许多重大改进,采用了 Fortran90 语言。COMCOT 已成功地用于很多历史海啸事件的模拟,包括 1960 年智利海啸、1986 年和 2002 年台湾花莲 2 次海啸、2003 年阿尔及利亚海啸以及 2004 年和 2005 年印度洋海啸等,被证明是有效的数值模式。由于 COMCOT 是很成熟的方法了,在这里就不需要论述和验证该方法的正确性,只需要应用该方法作为南海模拟平台的内核后台进行数值模拟。

2.3 核心技术

(1) 使用 Matlab 语言进行界面设计、计算内核开发、接口开发等;界面设计包括图形展示区、菜单区、功能键区、参数输入界面等。

(2) 选择国际上通用的、经过多次实践的、

成熟的、可靠的 COMCOT 海啸数值模拟模型;使用可靠的分辨率为 2 分的南海海域海水深度(地形)数据库。

(3) 整合多种学科技术,包括地震三要素、震源参数、断层参数、海浪波起始高、爬高、回落、传播、边界条件等海洋流体力学参数。

(4) 多种产出,包括 2D 和 3D 海啸传播过程演示、海啸传播时程、海岸线海啸最大浪高和到时、虚拟浮标浪高时程等。

2.4 界面与功能

南海模拟平台包括海啸的生成模拟,海啸的传播模拟,海啸在海岸的影响破坏模拟等,能满足局地 and 越洋海啸等多种情况下的计算,有海浪波起始高、爬高、回落、底摩擦和移动边界条件等初始输入设定。

(1) 主界面。南海模拟平台主要是对地震海啸进行数值模拟,提供海啸到达沿海边岸的预测时间和预测浪高等地震海啸预警服务。此平台采用国际先进的数值模拟模型和数字化海底地形资料,平台主界面地图为南海海洋地形图,蓝色代表海洋,蓝色越深,代表海洋越深,在马尼拉海沟附近,海水深度可达 4 000 m 以上,完全具备发生大海啸的海洋背景和地质背景。此平台具有地震海啸数值模拟、地震输入、震源机制计算、震源机制显示、2D 和 3D 海啸模拟数字化动画过程、海啸传播时程、整个海域海啸浪高、虚拟浮标时程等地震海啸预警功能。主界面如图 3 所示,本文只对平台界面和功能进行讲解,而不对模拟结果进行描述和解释。

(2) 初始参数。通过模拟平台输入地震位置,地震矩震级、震源深度、地震类型、断裂大小、断层滑动位移等参数,使用南海海域范围分辨率为 2 分的海水深度数据,本文假设(这个假设来源于 Philip L.-F.Liu 对南海地震海啸灾害预测研究的例子,以下所有图例均是于这个假设为基础)在南海马尼拉海沟经纬度为 119.3°E、17.0°N 处发生 8.0 级地震,震源深度 15 km,断层破裂长度 240 km,宽度 35 km,错距 4.45 m。平台具有参数输入界面,如图 4 所示,设置好参数后运行数值模拟,程序立即调用 COMCOT 进行计算和保存结果,平台仅需要运行数值模拟一次。在数值模拟过程中,读入的海底地形数据字节量为 100 多 M,地形越精细和范围越大,其数据字节量越大,计算越慢。模拟平台根据设置的时间间隔,多次渐进

叠加计算整个南海海域的数值模拟情况，直到所设定的模拟时长结束，一次完整模拟过程产出上几百个的数据文件和图形文件，文件总字节量为 1 个多 G。

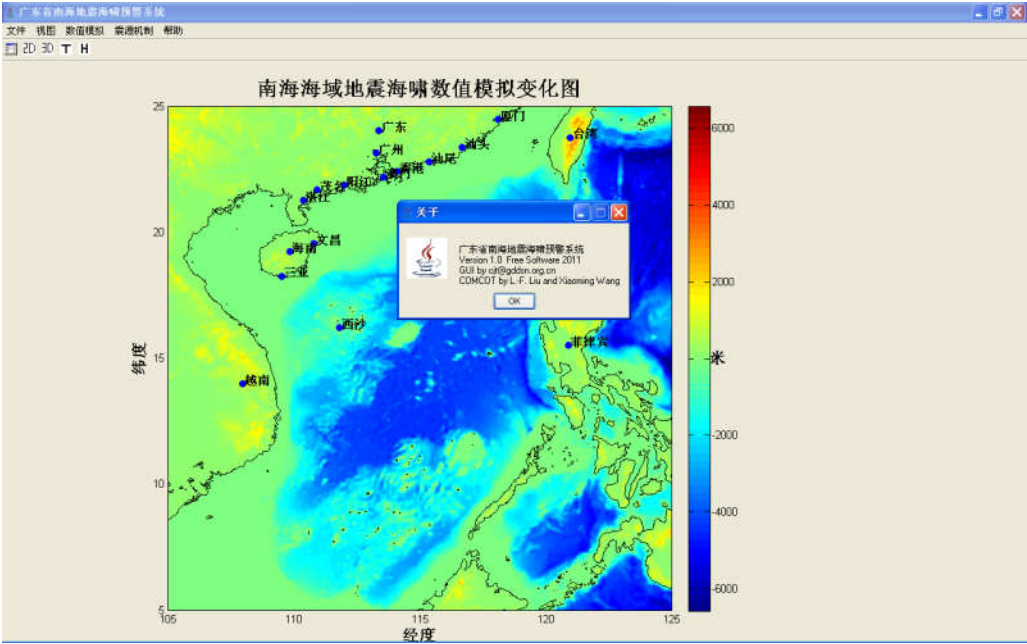


图 3 南海地震海啸数值模拟平台主界面

Fig.3 Main interface of the seismic tsunami numerical simulation for the South China Sea



图 4 数值模拟平台模式参数设置界面

Fig.4 Model parameter setting interface of the simulation platform

(3) 模拟传播过程。根据数值模拟结果，读取结果文件数据信息，动态绘制地震海啸传播过程。平台具有 2D 和 3D 地震海啸模拟传播过程动态演示界面和功能，可以直观的查看整个海啸传播过程，动态界面如图 5 所示。

(4) 海浪理论预测。根据数值模拟结果，提

取和汇总所感兴趣的数据和信息，获得整个南海海域的海啸传播理论定量性质。平台具有海啸到达沿岸时间预测、海啸到达沿岸海浪高度预测、虚拟浮标浪高时程等功能和产出，产出界面如图 6 所示。

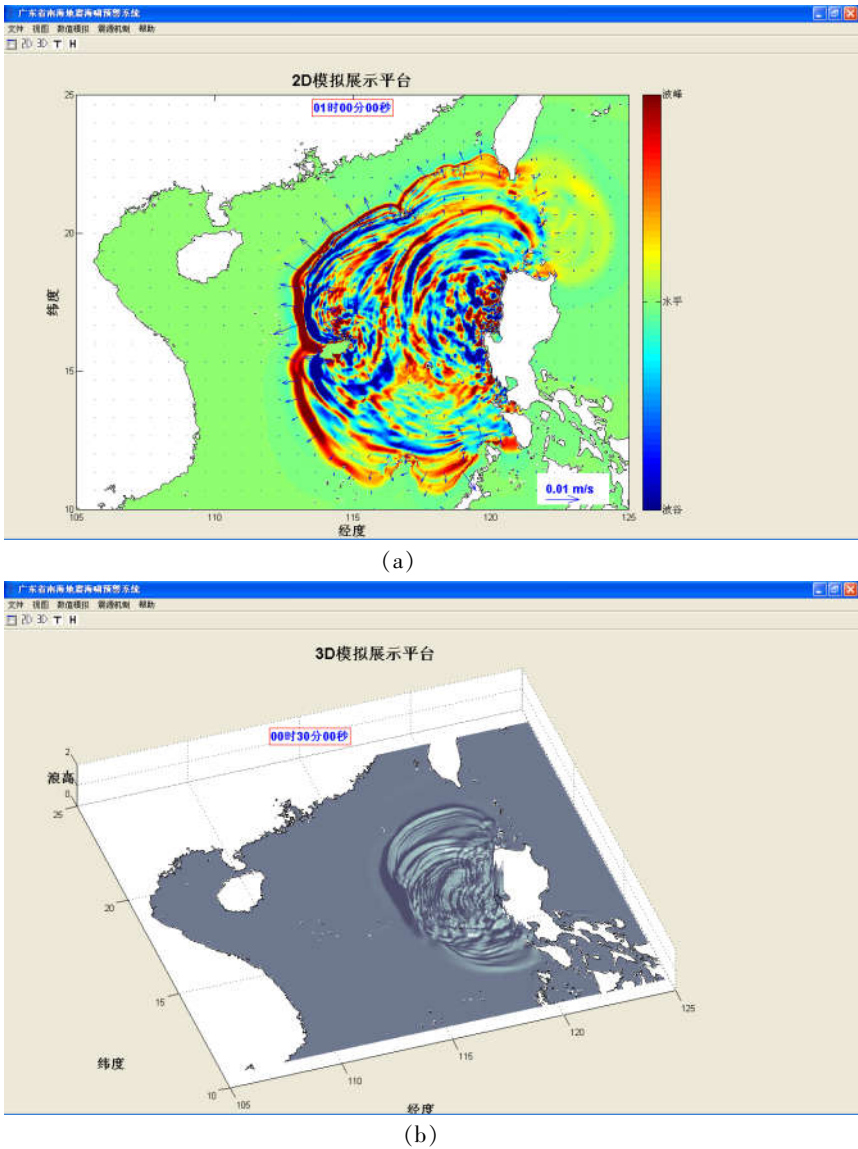


图 5 2D(a)和 3D(b)地震海啸模拟传播过程界面

Fig.5 Interface of the 2D (left) and 3D (right) seismic tsunami propagation process

4 结语

本文详细介绍了所开发的南海地震监测与海啸数值模拟平台，主要由两部分组成：一是基于国家地震自动速报备份系统的南海地震实时监测平台，二是基于 COMCOT 模式的南海地震海啸数值模拟平台。这两者之间关系密切，缺一不可，先有地震，后才引发海啸，而海啸预警才是最终目的。首先要通过南海监测平台进行全天候自动监测地震，监测到南海范围内 6 级以上地震，触发报警，立刻启动南海模拟平台，输入地震三要素和震源参数等，进行数值模拟，根据模拟结果，海啸到达受影响地区海岸的时间和强度，海啸破坏程度等，用来判断是否需要再进行海啸预警。

本研究是在地震监测技术和海啸数值模拟理论现有应用成果的基础上，做出的一些开发和拓展工作，具有一定的亮点和创新点，但同时也有很多不足之处，需要进一步改进和完善，具体如下：

4.1 创新点

- (1) 地震科技界专门针对于南海大地震实时监测和海啸数值模拟平台比较少，属于地震学与海洋学交互融合的创新成果。
- (2) 使用经过多年建设的地震监测成果，即利用已有的比如数据流服务器、自动速报服务器和信息交互服务器等进行南海实时地震监测，开发实时侦听各种服务器信息的内核，根据震级、监测位置等策略进行南海地震监测和报警。

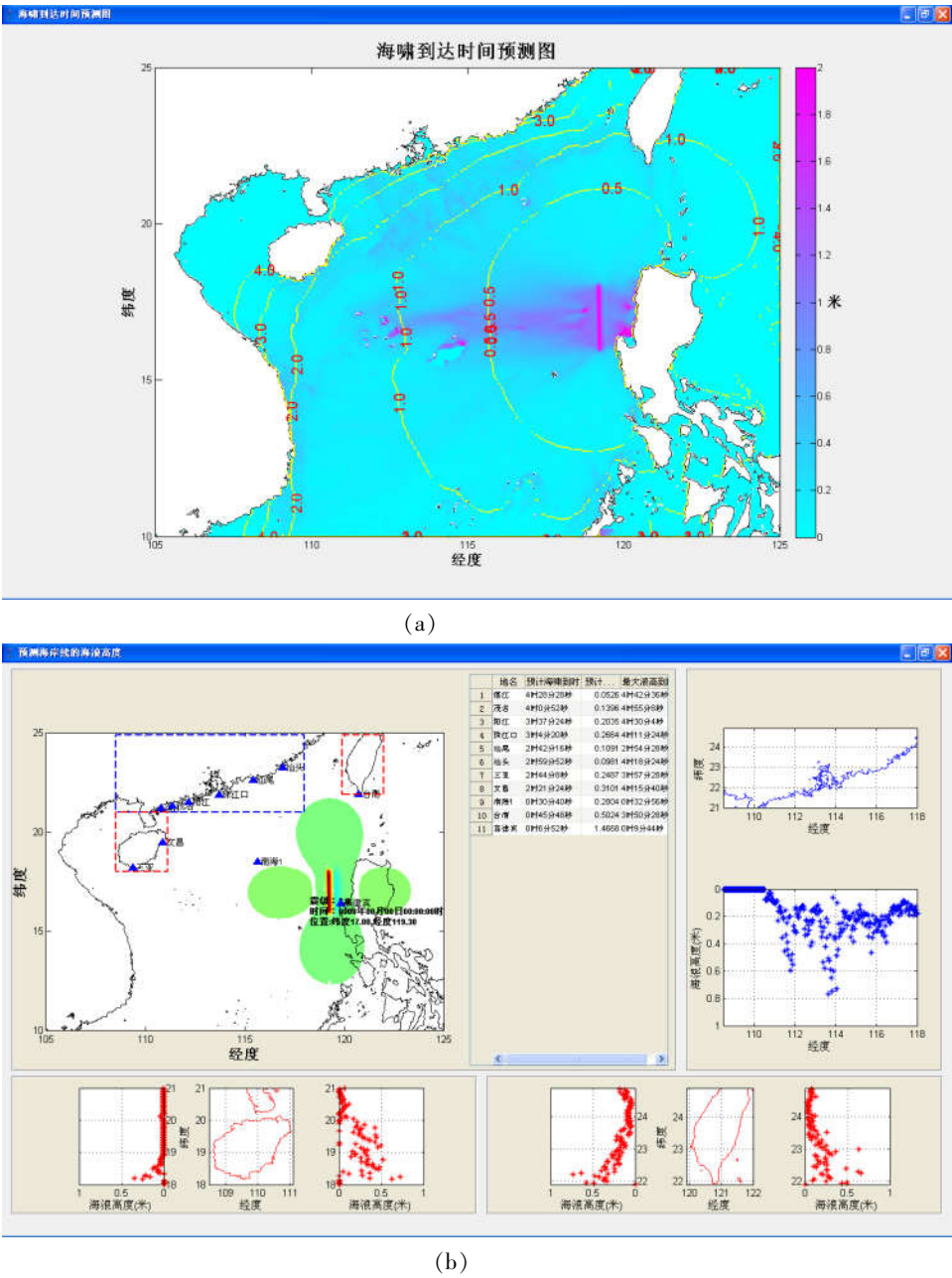


图 6 海啸到达时间预测(a)和海岸线浪高预测(b)界面

Fig.6 Interface of the tsunami arrival time prediction (left) and coastal line wave height prediction (right)

(3) 优化海啸数值模拟能力，整合海啸数值模拟初始条件输入、成熟的模式、海底地形数据等，统一平台输出的数据和图件等，使得地震海啸数值模拟平台具备高效、快速、便捷、操作容易，界面洁净、图件直观、数据集中显示等优点。

4.2 后续工作

(1) 南海海底地形数据的精读还不够高，需要更加精细的地形数据，特别是高精度海岸线的地形数据，至少需要 30 s 级别的精度数据。

(2) 需要预先做好地震海啸数值模拟库，即在南海海域范围内，分割成一定密度的网格状，

在各网格内假设出现不同震级和震源参数的地震，然后进行海啸数值模拟，保存成海啸数值模拟库。发生地震时，仅需要震级和震源参数，就可以提取出海啸数值模拟信息，不需要再次进行数值模拟，节省计算时间，提高海啸预警速度。

(3) 两个平台是使用不同的编程语言实现的，因此两平台之间的相互联系和接口协议需要进一步开发融合。

参考文献:

- [1] 包橙澜. 海啸灾害及其预警系统[J]. 国际地震动态, 2005, 313 (1): 14-18.
- [2] 杨马陵, 魏柏林. 南海海域地震海啸潜在危险的探析[J]. 灾害学, 2005, 20 (3): 41-47.
- [3] Kirby, S. Tsunami Source Characterization for Western Pacific Subduction Zones[M]. 2006USGS Tsunami Source Working Group. 2005.
- [4] 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 (s1): 145-152.
- [5] 吴永权, 黄文辉, 康 英, 等. 国家地震速报备份系统的部署与运行[J]. 国际地震动态, 2011 (12): 21-28.
- [6] 苏柱金, 黄文辉. 基于 JOPENS 系统的地震速报信息聚合与发布系统的设计与实现[J]. 华南地震, 2014, 34 (4): 35-40.
- [7] Titov VV, FI Gonzalez, EN Bernard, et al. Real-time Tsunami Forecasting: Challenges and Solutions[J]. Natural Hazards, 2005, 35 (1): 41-58.
- [8] 潘文亮, 王盛安. COMCOT 数值模式的介绍和应用[J]. 海洋预报, 2009, 26 (3): 45-52.