

1918 年南澳地震海啸影响模拟及其警示*

李琳琳^{1,2}, 李发滢¹, 邱强³, 李志刚^{1,2}, 张冬丽^{1,2}, 惠格格^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301

摘要: 1918年2月13日发生华南沿海南澳岛附近的 M_w 7.5级地震是南海北部少数几个伴有海啸发生的地震之一。历史文献中明确记载了地震发生后在广东和福建沿海出现的一些海啸现象。本研究基于历史文献资料、前人震后调查和对该地震发生区域最新的地球物理探测资料, 约束1918年地震参数(震中、破裂范围、断层几何等), 通过对几组地震参数详细的海啸模拟, 研究该地震事件引发的海啸影响及其特征。模拟结果表明, 该地震事件引发的海啸向西可波及至珠江口海域的澳门、珠海, 东到福建泉州, 影响了直线距离接近800 km的华南沿海, 距离震源最近的南澳岛南部和东部受海啸影响最大, 青澳湾波高可达3~4 m, 其次是福建省东山县(2~3 m)和广东省汕头一带(约1 m)。海啸正波在半小时后即可传播到南澳岛和汕头沿海, 到达泉州和香港、澳门沿海的时间分别为3 h和4~5 h。通过对海啸波传播过程、波高分布和典型站点海啸波时序的波谱分析, 我们指出滨海断裂带地震触发的海啸具有两个特别需要关注的危险性特征: 1) 海啸波在华南沿海陆架区域的超长周期振荡, 南海北部宽阔的陆架和滨海断裂带与海岸线近乎平行的走向极其有效地将海啸波“捕获”在陆架区域, 可产生长达48 h以上的超长时间振荡; 2) 由海水急剧涨落及超长时间振荡引发的海啸强流会对港口、码头、海产养殖等基础设施密集的华南沿海区域造成严重影响。同时, 我们对1918年地震关键参数的敏感性分析也表明海啸的规模和影响范围受控于地震类型和断层几何, 目前我们对滨海断裂带精细几何结构和活动性的认识严重不足, 亟需开展滨海断裂带海底精细几何结构的探测和活动习性研究, 为评价南海北部潜在强震和海啸风险提供科学依据。

关键词: 海域地震; 海啸; 陆架振荡; 滨海断裂带

中图分类号: P731.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 01-0027-12

Tsunami simulation of the 1918 Nan'ao earthquake and its implication

LI Linlin^{1,2}, LI Fating¹, QIU Qiang³, LI Zhigang^{1,2}, ZHANG Dongli^{1,2}, HUI Gege^{1,2}

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: The 1918 M_w 7.5 Nan'ao earthquake is one of the few events which are associated with a tsunami in the coastal region of South China. Historical records provide clear evidence of tsunami phenomena along the coasts of Guangdong and Fujian. Based on the constraint of historical records, post-earthquake survey, and the most updated geophysical data, we propose several synthetic earthquake scenarios with different fault geometries and investigate the corresponding tsunami hydrodynamics in

* 收稿日期: 2021-07-03 录用日期: 2021-08-04 网络首发日期: 2021-09-23

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311021002); 广东省引进人才创新创业团队-环南海地质过程与灾害创新团队项目(2016ZT06N331); 国家自然科学基金(41976197, 41774049, 42076059); 中山大学中央高校基本科研业务费(2021qntd23)

作者简介: 李琳琳(1981年生), 女; **研究方向:** 海洋地质灾害; E-mail: lilinlin3@mail.sysu.edu.cn

detail. Our numerical modelling results suggest that the tsunami generated by this event may have affected a large portion of coastline ranging from Macau to Quanzhou in South China. The most impacted region is the southern and eastern coast of Nan'ao island with the maximum tsunami wave height of 3-4 m in Qing'ao Bay. Followed by the coast of Dongshan County in Fujian (2-3 m), and Shantou in Guangdong (~1 m). The first positive tsunami wave arrives in Nan'ao and Shantou in half an hour and reaches Quanzhou, Hong Kong, and Macau in 3 hours, 4 hours and 5 hours, respectively. Based on the tsunami propagation process, distributions of tsunami wave height, and the analysis of tsunami waveforms in representative locations, we point out that the tsunami generated by earthquakes along the littoral fault possesses two unique features which may cause substantial damage in the future: 1) the long tsunami duration (longer than 48 hours) due to shelf resonance and edge wave trapped in the very broad continental shelf of northern South China Sea; 2) strong tsunami currents induced by rapid change of sea level will pose a significant threat to coastal infrastructures, e. g. ports, wharves, and aquaculture farms in southern China. Our sensitivity tests on earthquake parameters suggest that the tsunamigenic capacity is strongly affected by the source mechanism and fault geometries. Detailed marine geophysical surveys are required to better understand the geometrical characteristics and seismogenic behavior of the littoral fault. Such geophysical data provides the scientific basis for the potential earthquake and tsunami hazard assessment in the coastal region of South China.

Key words: submarine earthquake; tsunami; shelf resonance; littoral fault zone

1 1918年南澳地震海啸事件

1918年2月13日发生在华南沿海南澳岛附近的矩震级为 $M_w 7.5$ 级地震是南海北部少数几个触发海啸的地震之一^[1]。历史文献中明确记载了地震发生后福建和广东沿海出现的一些海啸现象,其中的描述包括“民国七年二月十三日,福建、广东沿海地震。其震中区域在泉州至汕头一带,地裂土崩,海水腾涌,房舍倾覆,死亡者以数百计”^[2]和“1918年2月13日14时07分(民国七年正月初三)广东南澳附近海域(23.60°N, 117.3°E)发生7.3级地震;福建同安地大震,海潮退而复涨,渔船多遭没;广东汕头:当时湾泊在码头的一艘船,其船底竟至与海底接触。”^[3]1918年南澳大地震发生在滨海断裂带地震活动最活跃的闽南-粤东区域^[4]。在该区相同的断层区域历史上曾发生1600年南澳7.0级地震,在其东北方向闽南段和东南方向台湾浅滩区域发生过1604年泉州外海7.5级地震和1994年台湾浅滩7.3级地震。除了闽南-粤东区域,在滨海断裂带西段雷琼区域也曾发生1605年 $M7.5$ 级琼州地震。而目前为止小震和强震空缺的珠江口段被认为是未来潜在的强震震源区^[5]。我国华南沿海的滨海断裂带是南海北部地震活动强度最大、频度最高的地震带,是对华南沿海地震造成威胁最大的发震区域。历史上曾多

次发生强震,未来仍有可能发生强震。那么未来强震如果触发海啸,其影响如何?地震断层参数如何影响其触发海啸的能力?发生在陆架浅水区域的地震所触发的海啸与发生在深海俯冲带区域的地震海啸特点有何不同?在这篇文章中,我们以1918年南澳大地震为例,通过海啸数值模拟的手段来定量地回答上述问题。

2 地震海啸的数值模拟

2.1 地震参数设置及其依据

目前1918年南澳大地震的等级、破裂范围、断层的几何参数并没有统一的想法,在地震参数设定中,我们主要依据近些年较新的地球物理资料信息来进行约束。南澳大地震的震中位置,经过多次调整^[6],广东省地震局在20世纪70~80年代在潮汕地区进行了大量地震灾害调查访问,最终确定在南澎列岛东侧附近^[1]。我们取经度117.3°E,纬度23.2°N为震中位置,这一震中位置处在NEE走向的滨海断裂带和NW走向的黄冈水断裂交叉位置^[7]。根据断层活动的性质,1918年地震发生机制确定为逆冲走滑型地震,文献[7]根据海陆联测的地震剖面指出断层倾向东南,倾角约为72°,走向约为55°^[7]。依据文献[4]通过浅层地震剖面得到发震区域的三维断层结构,得到断层的走向约为70°,倾角约为75°。2021年4~5

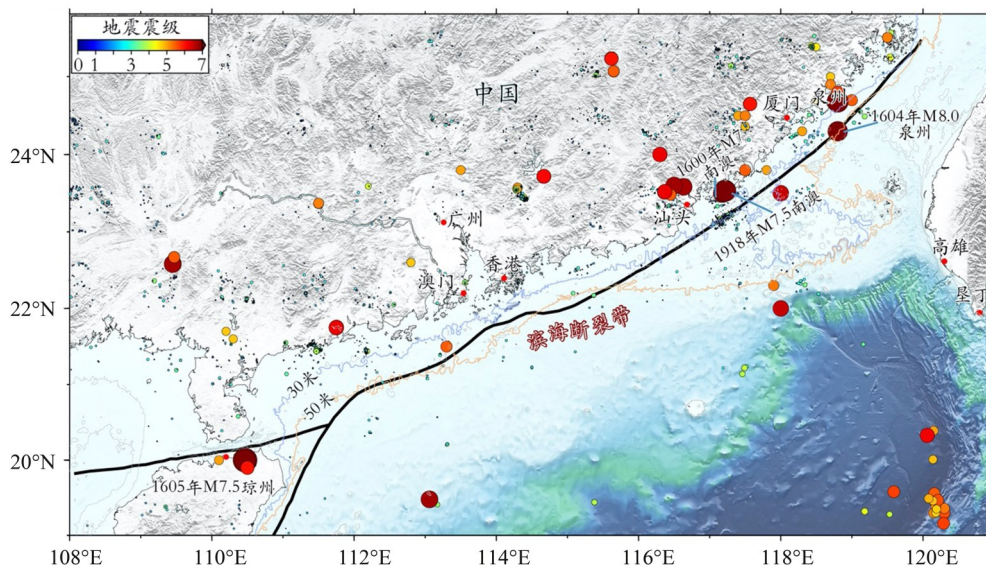


图1 华南沿海滨海断裂带(黑色实线)及历史强震(彩色实心圆)分布

Fig. 1 Historical earthquakes (colored circles) along the littoral fault zone (black solid lines) in South China

月, 中山大学地球科学与工程学院再次组织航次对南澳大地震的发震区域进行了详细的综合地球物理探测, 目前资料仍在处理中, 后续会有更详细的成果呈现。我们根据初步的地球物理资料分析, 得到断层走向约为 $70^{\circ}\sim 75^{\circ}$, 和文献[4]测得的走向基本一致。

根据目前资料, 将地震的矩震级定为 $M_w 7.5$, 按照Blaser et al (2010)^[8]经验关系计算得到不同类型地震长度和宽度。其中走滑断层 $129\text{ km}\times 22\text{ km}$, 长度最大, 宽度最窄; 逆冲断层 $80\text{ km}\times 39\text{ km}$ 宽, 长度最短, 宽度最宽; 正断层 $98\text{ km}\times 32\text{ km}$ 介于两者之间。根据上述信息, 我们首先确定了一组地震断层几何参数: 长 100 km , 宽 22 km , 深度 10 km , 走向(strike angle) 70° , 倾角(dip angle) 75° , 滑移角(rake angle) 95° , 断层面滑移量为均匀的 3 m 。均匀滑移模型虽然与我们观察到实际地震发生时同震滑移的非均匀分布特性并不相符, 但在没有更多观测数据的支持下, 可以作为初步的模型假设。我们首先对这组地震几何参数触发海啸的特征进行详细的分析, 其次再针对断层走向(55° 和 70°)、倾角(45° , 60° , 75° 和 85°)和滑移角(95° 和 150°)分别进行一系列地震参数数值试验和敏感性分析, 定量评估这3个参数对海啸灾害的影响。

2.2 海啸模拟

本研究采用海啸模型COMCOT (cornell multi-grid coupled tsunami) 来模拟海啸从产生、传播到淹没的整个过程。COMCOT模型是美国康奈尔大学开发的一套成熟的浅水长波数值模型, 其控制

方程是基于垂向平均的浅水波方程, 采用蛙跳法有限差分法进行求解^[9]。该模型采用多重网格嵌套技术, 在研究深海区海啸传播时, 控制方程采用线性浅水方程; 当海啸波传至沿海浅水区时, 采用考虑对流项以及海底摩擦的非线性浅水方程, 从而实现高精度和高效率的数值模拟结果。该模型被广泛应用到全球各海域的海啸事件和海啸灾害评估研究中, 如2004年的印度洋海啸灾害评估^[10], 新西兰海啸灾害评估^[11-12]和南海的海啸灾害评估^[13-16]等。

本研究计算区域网格设置如表1所示。计算区域为 $105^{\circ}\sim 127.5^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, 设置4层嵌套网格(Grid 01~Grid 04)。网格分辨率从第1层南海范围的 1943 m 逐渐变化为第4层南澳岛范围的 32 m , 其中第2层是从广东珠江口区域至福建泉州, 是海啸波传播的主要范围; 第3层是广东汕头沿海至福建漳州沿海浅水区, 覆盖滨海断裂带断层范围。地形水深数据主要采用 $15''$ (arc-second)分辨率GEBCO (general bathymetric chart of oceans)数据(<https://www.gebco.net/>)和 $1''$ (arc-second) SRTM (约 30 m 分辨率)数据(<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), 第1~3层均采用GEBCO数据, 第4层采用海域GEBCO和陆上SRTM拼接插值后的数据。模型设置最外两层控制方程为线性浅水波方程, 忽略非线性项, 考虑科氏力; 第3~4层采用非线性浅水波方程, 考虑曼宁系数为 0.013 的底部摩擦效应。

表 1 COMCOT 模型 4 层嵌套网格参数设置
Table 1 Detailed parameters of nested grids in COMCOT

项目	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
经度	105~127.5 °E	113~119.2 °E	116.3~118.0 °E	116.926~117.220 °E
纬度	10~30 °N	18.5~25.5 °N	22.8~24.3 °N	23.375~23.500 °N
网格尺寸/m	1 943	648	162	32
母网格层	Grid 01	Grid 02	Grid 03	Grid 04
子母网格尺寸比率	无	3	4	5
时间步长/s	4.0	1.9	1.9	0.6
坐标系	球坐标系	球坐标系	球坐标系	球坐标系
控制方程类型	线性	线性	非线性	非线性

3 计算结果分析

3.1 海啸波产生和传播特征

根据设定的地震断层参数,采用基于弹性有限断层理论的 Okada 位错模型^[17]生成海啸初始波高(图 2)。在垂直断层方向,靠陆地一侧产生接近 1.0 m 的负波,向海一侧则出现接近 1.5 m 的正波,沿着断层走向,波高均匀分布(图 2)。

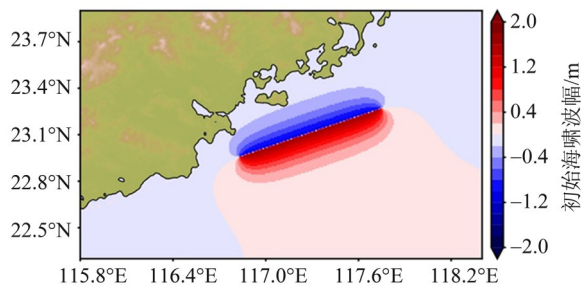


图 2 海啸波初始波高分布

Fig. 2 Spatial distribution of initial surface elevation

海啸波产生后,海啸波能量主要沿垂直断层走向分别往西北方向南澳岛、大陆沿海和东南方向深海传播(图 3a)。由于靠陆地一侧的初始波为负波,南澳岛和近震源的大陆沿海一带在遭遇正向海啸波之前,将会首先观察到急剧的退水现象,正如历史文献所描述“海潮退而复涨”,退水现象将会导致大量渔船触底搁浅。而往陆坡和深海方向,海啸波在往东南方向传播过程中将遭遇台湾浅滩,水深变浅发生水位雍高(图 3b、3c)。当海啸波传播至陆坡处,急剧变化的水深导致海啸波传播速度在深水区和陆架区域产生明显差异(图 3d),部分海啸波在陆架边缘被反射(图 3e),而部分海啸波则“泄露”到深海中。被反射的海啸波在方向改变后,分别继续向西北方向珠江口西

侧大陆沿海和东北方向福建沿海传播,在整个传播过程中,海啸波特性受到复杂地形的强烈影响,发生波浪的反射、绕射(图 3d)和折射(图 3f)。如海啸波传播到东沙岛附近受阻会发生明显绕射现象,在东沙岛东北方向海啸波传播速度减缓,绕过岛在西南方向相撞产生更大波高(图 3d)。折射现象主要发生在靠近海岸的陆架区域,表现为海啸波转播到陆架浅水区后受地形影响波向线逐渐偏转,最终与等深线和海岸线垂直(图 3f)。这个过程有别于深海俯冲带区域产生海啸波的传播过程,产生于陆架区域的海啸波在向深海传播时经历了从深水到浅水传播相反的物理过程:海啸波速度变快,波长变大,波幅迅速减小。

3.2 最大和最小海啸波高分布

根据文中的地震参数设定,1918 年南澳大地震触发的海啸可能波及西至珠海、澳门,东至泉州的华南沿海一带(图 4),但受海啸影响最大的区域主要集中在广东汕头、南澳岛和福建漳州市东山县之间的沿海区域(图 5 和图 6)。距离震源最近且正面迎击海啸的南澳岛南部的海啸波高最大,南澳县、云祥村、云澳镇可能出现 2~3 m 海啸波,而东南部沿海青澳湾的海啸波高可达 3~4 m(图 6a)。除南澳岛外,在近震源的大陆沿海区域,受海啸影响最大的区域是闽西大埕湾和东山县沿海,最大海啸波高可达 2~3 m,其次是汕头沿海,波高约 1 m(图 5a)。而距离震源直线距离超过 150 km 的厦门、泉州、汕尾、澳门沿海会产生 0.5 m 左右的海啸波高(图 4a)。海啸波传播至南澳岛和汕头沿海的时间约 0.5 h; 2 h 左右到达厦门,3 h 传播至泉州,4~5 h 传播至香港和澳门(图 4a)。从海啸波的传播时程图可以明显看出海底地形对海啸传播的决定性影响,如以陆坡为界,深海和陆架

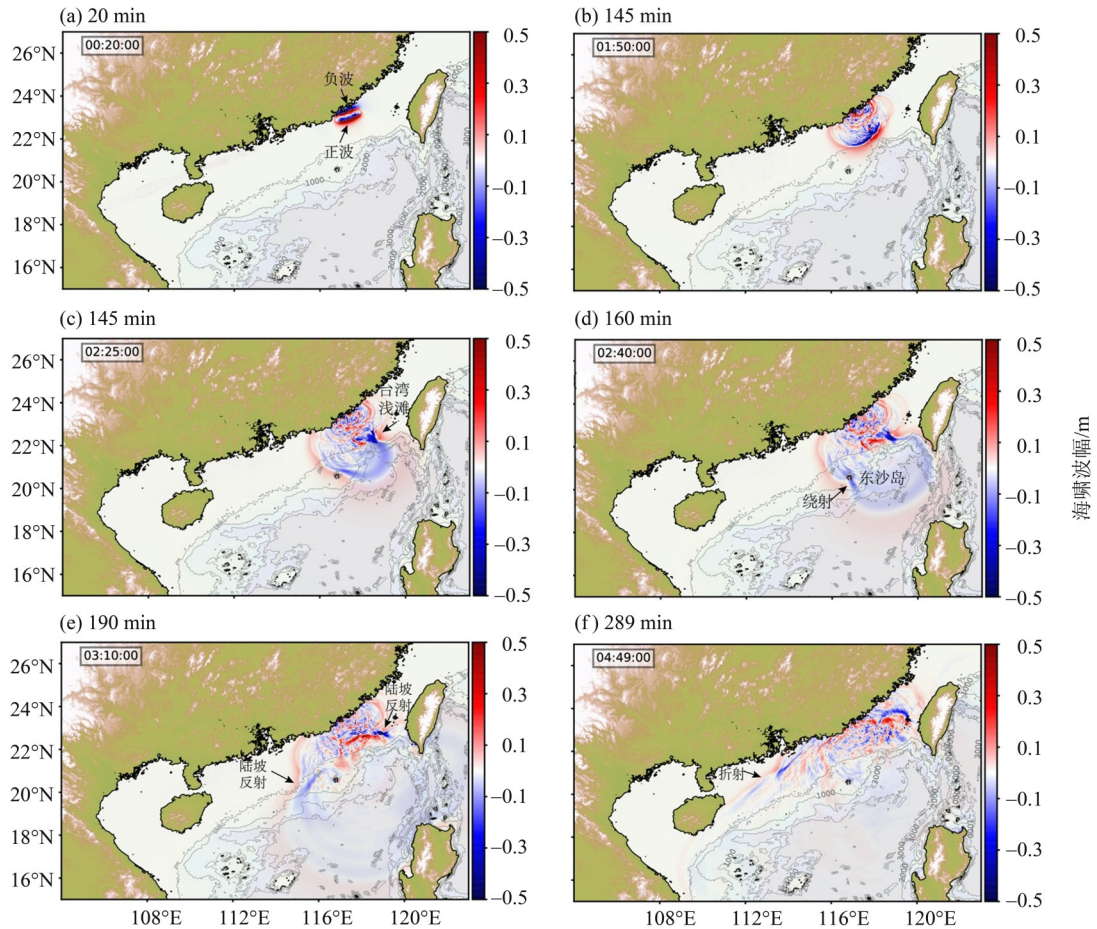


图3 海啸波在震后不同时间的波高分布图

Fig. 3 Spatial distributions of tsunami amplitude at various times after earthquake

区域传播速度的差异使到时线发生转折, 每隔 10 min 显示的到时线在陆架分布密集而深海稀疏 (图 4a)。

对于海啸的灾害性影响, 除了我们通常关注的由正波造成的淹没外, 沿岸海水急剧退却造成的破坏也不可忽视, 尤其是对港口、码头、渔港、海产养殖密集的沿海区域。同最大波高分布类似, 我们同样展示出 1918 年南澳地震可能造成的最小波高分布 (图 4b, 5b, 6b)。相比于海啸正波, 海啸负波的影响更集中于震源附近的汕头、福建东山县和南澳岛区域, 尤其是南澳岛东部和北部各个港湾, 如东北部竹栖湾和南澳县北部, 负波的波幅可达 1.5 m。突然的退水将会导致锚系在码头的船只挣断缆绳、破坏锚桩, 同时水位的快速变化产生的海啸强流也会对近岸工程、海事设施造成严重损害^[18]。由海啸强流造成的灾害破坏在近些年的海啸事件中有明确的报道^[19], 如 2004 年印度洋海啸在阿门塞拉莱港引发海啸强流, 拖动长 200 m 的邮轮漂浮数小时^[20], 2006 年发生在太平洋西

岸的千岛群岛海啸引发远在太平洋东岸美国 Crescent 港高达 5 m/s 的海啸流速, 造成 2 800 万美元的经济损失^[21], 2011 年日本“3·11”地震海啸在美国西海岸、新西兰、澳大利亚东南沿海多个港口引发了强流和持续震荡, 其中美国西海岸几乎全部港口码头均受到影响, Crescent 港和 Santa Cruz 港遭受的损失最为惨重, 经济损失达 9 000 万美元^[22]。这些灾害的共同特征是, 海啸在所影响区域并未造成明显的淹没, 灾害损失主要由海啸诱发的强流导致, 这种类型的灾害在港口密集的华南沿海尤其需要特别关注。

3.3 海啸波在陆架区域的震荡现象

超长时间的海啸波震荡是 1918 年南澳地震海啸一个特别值得关注的特征。为了考虑海啸波在近岸传播的非线性影响, 这一小节展示的结果是基于南海北部海域单层非线性浅水波方程计算得出, 底部摩擦系数为 0.013。我们在沿海选取 4 个代表性站点给出震后 48 h 汕头、泉州、澳门和香港附近海域站点的海啸波时序图 (图 7), 可以看

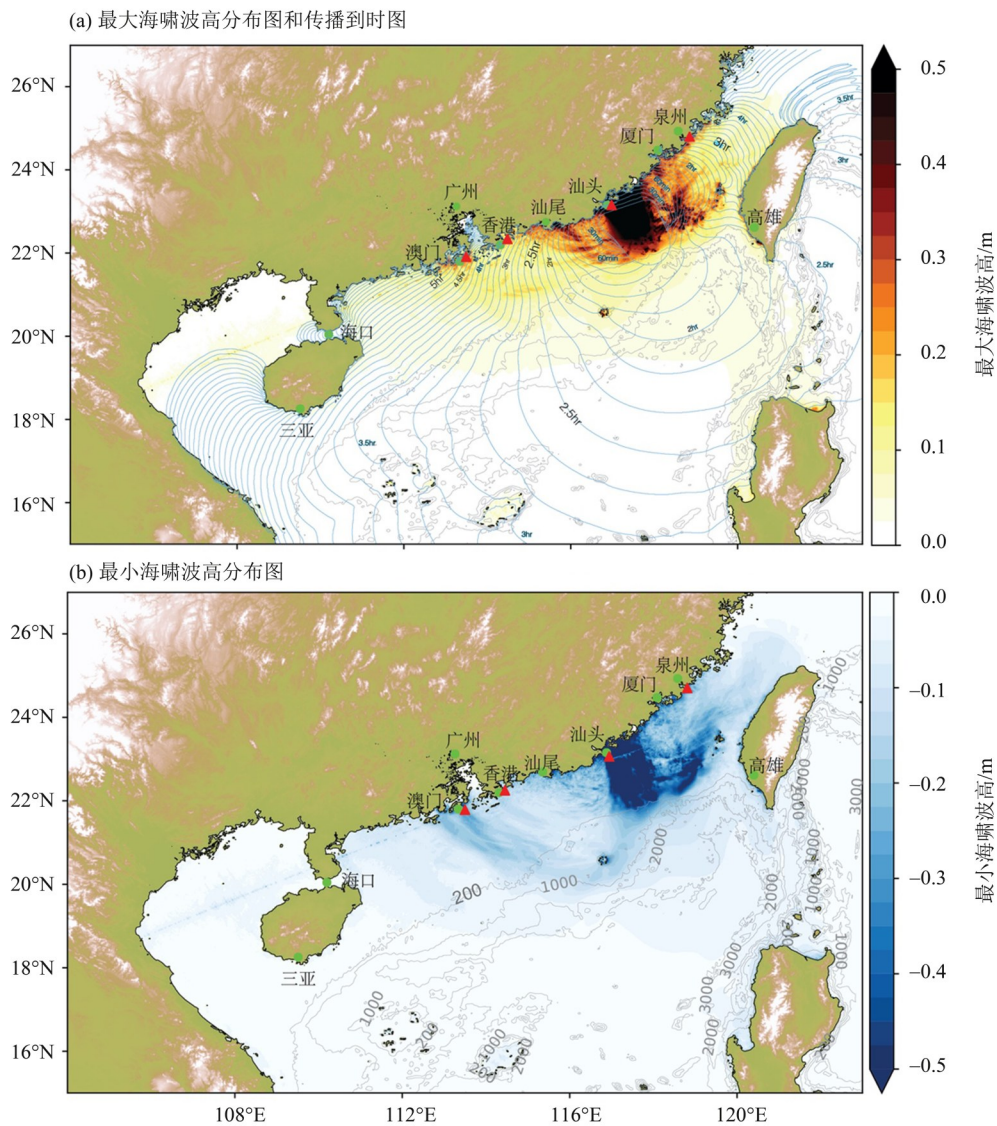


图4 1918年南澳大地震在南海北部产生的 (a) 最大海啸波高分布图和传播到时图, (b) 最小海啸波高分布图

Fig. 4 Spatial distributions of maximum surface elevation and minimum surface elevation in the northern South China Sea

出海啸波在地震发生 48 h 后波幅并未发生明显衰减, 最初到达的海啸波并不一定是最大的。最大海啸波高可能出现在震后 10 h 或者 20 h, 比如泉州和香港的最大海啸波高出现在震后 10 h (图 7b 和 7d), 汕头海域在震后接近 20 h 仍然出现较大波峰。海啸波的超长震荡周期通常由几个典型的贡献因素: 洋盆振荡、陆架振荡、港湾共振等, 几种震荡的典型周期分别在 1~2 d, 数小时和数十分钟^[22]。我们对 4 个典型站点的海啸波时序进行傅里叶波谱分析 (图 8), 发现各站点除了与其各自所在位置地形相关的频率外, 4 个站点均有一个约 220 min 的周期。这一共有的振荡周期是由南海北部陆架振荡引起。类似 1918 年南澳大地震这样发生在陆架区域并引发长周期海啸振荡的事件, 在

全球其他海域也有发生, 其中与 1918 年南澳地震发生环境极其类似的一个海啸事件是 2017 年 9 月 8 日在墨西哥 Tehuantepec 陆架区域发生的 $M_w 8.2$ 高角度正断层地震。该地震发生后, 沿海 4 个潮位站记录到持续时间长达 3 d 海啸波^[24]。Melgar & Ruiz-Angulo^[24] 通过数值模拟和波谱分析揭示引发超长震荡时间的原因主要是陆架边缘反射引发的陆架震荡和地形平坦的陆架有效捕获了边缘波。Tehuantepec 陆架最大宽度 100 km, 振荡周期约 155 min; 相比而言, 南海北部陆架更宽, 达 150~250 km, 具体体现为陆架的震荡周期更长, 约 220~230 min, 接近 4 h。

另外一个对海啸超长持续时间贡献较大的因素是边缘波(edge wave)。边缘波是沿海岸线平行

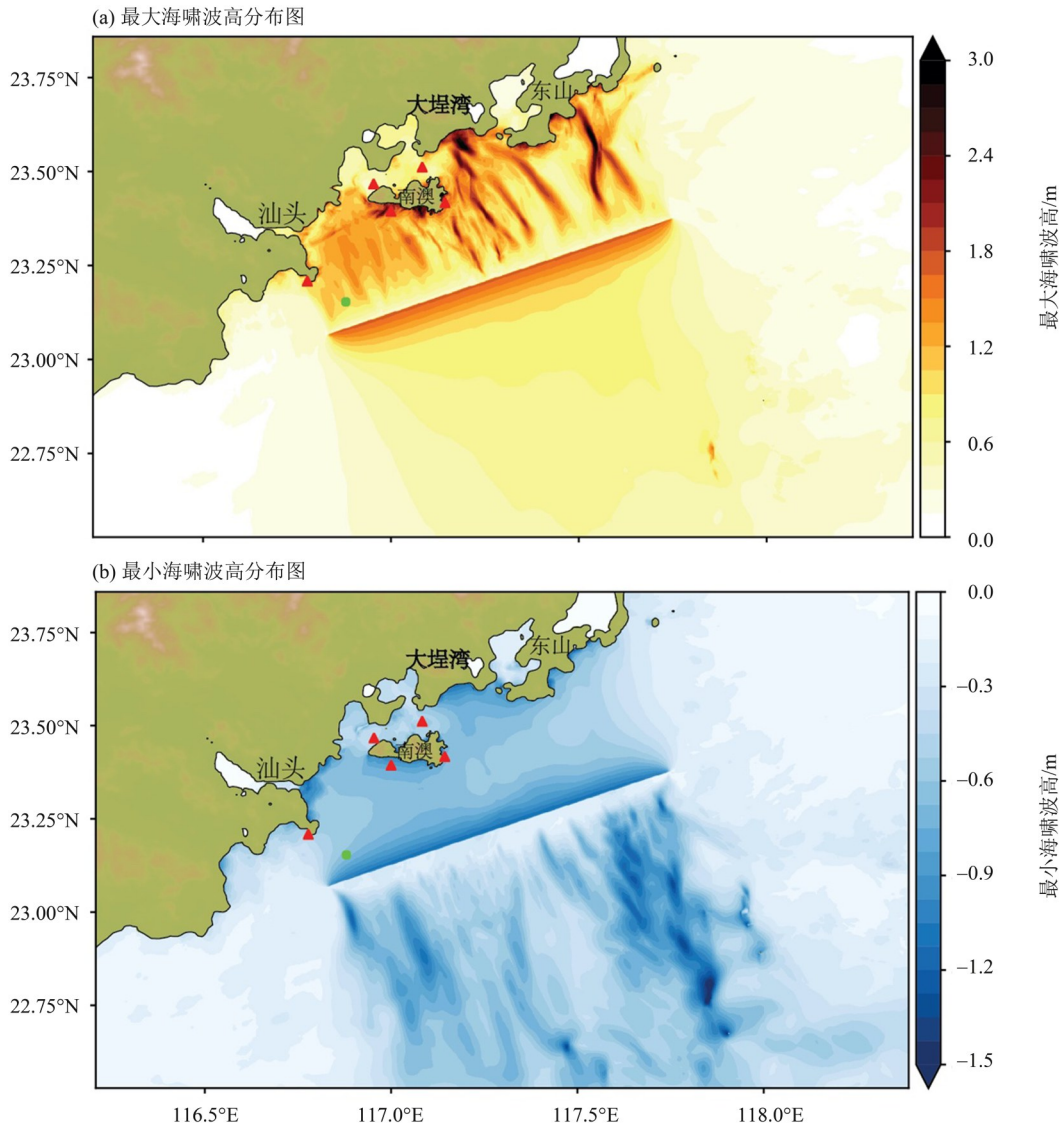


图 5 1918 年南澳大地震在南海北部产生的 (a) 最大海啸波高分布图和 (b) 最小海啸波高分布图

Fig. 5 Spatial distributions of maximum surface elevation and minimum surface elevation in the near field

传播的一种波浪形式, 在近海触发的海啸事件中, 通常由于海啸波传播过程中受地形影响产生折射效应而被海岸线捕捉。由于边缘波沿海岸线的传播速度远小于海啸波的传播速度, 所以常常出人意料地出现在海啸首波到达几个小时后。Kajiura^[25]通过简化地形对发生在沿海陆架区域的地震海啸产生的边缘波和辐射到深海的海啸波能量进行理论推导, 研究表明震源距离海岸线越近或者地震发生位置水深相对于深海区域水深比值越小, 地震触发海啸产生的边缘波被捕获的比例越高。Rabinovich 等^[26]根据折射定律(Snell's law)提出了一个计算陆架区域边缘波的捕获率的公式, 即

$$C = 1 - \frac{2\varphi^{crit}}{\pi},$$

其中临界角 $\varphi^{crit} = \arcsin \varepsilon = \arcsin \left(\sqrt{gh_i} / \sqrt{gH} \right)$, 为海啸波能够沿陆架传播的临界角, 由震源区域和深海区域的海啸波传播速度比来决定, 临界角越小, 代表海啸波越不容易被泄漏到深海。我们取 1918 年南澳地震发震位置平均水深为 40 m, 深海区域水深为 4 000 m, 计算得到临界角为 5.7°, 由此得到南海北部陆架对 1918 年南澳地震海啸产生边缘波的捕获率高达 93.6%。这也就意味着在南海北部宽阔平坦的陆架区域的地震触发的海啸波能量只有极少部分会泄漏到深海, 绝大部分海啸能量将在海岸线和陆架边缘之间不断来回反射, 从而产生持续超长的海啸影响。

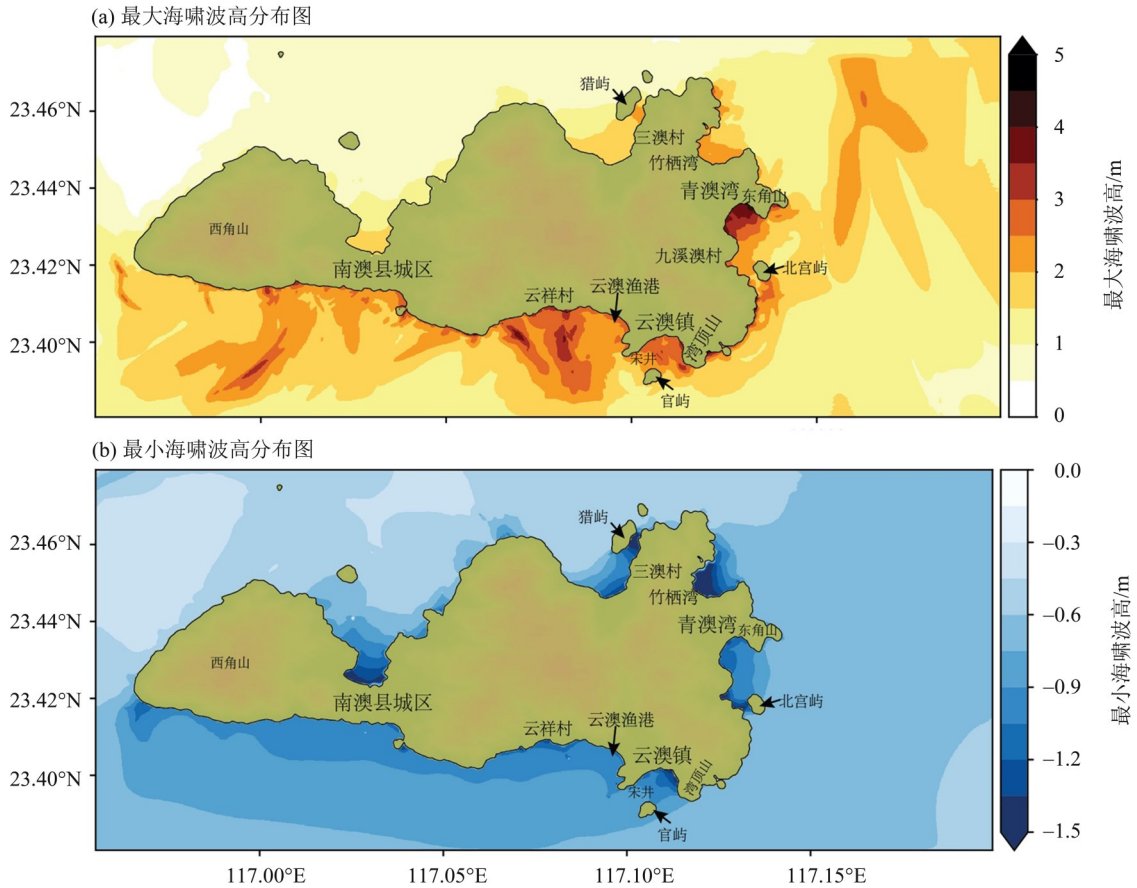


图6 1918年地震在南澳岛周边产生的 (a) 最大海啸波高分布图和 (b) 最小海啸波高分布图

Fig. 6 Spatial distributions of maximum surface elevation and minimum surface elevation near Nan'ao island

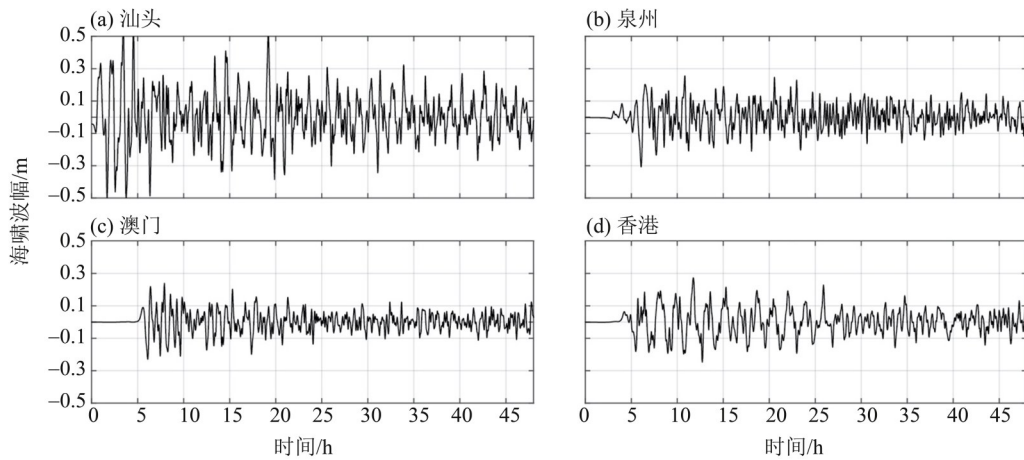


图7 1918年地震触发海啸在华南沿海典型站点的时序图

Fig. 7 Time series of tsunami waveform at selected synthetic gauges along the coast of South China

4 地震关键断层几何参数的影响

在第3部分, 我们详细地展示了一组地震模型参数所产生的海啸影响, 这样的分析可以帮助我们我们对发生在滨海断裂带类似规模和震源机制的地震可能产生的海啸灾害有定量的认知。而事实上,

到目前为止, 1918年南澳大地震的震源参数仍然存在很大的不确定性, 在这一部分, 我们以断层走向、倾角和滑移角这3个参数为例, 定量分析地震关键参数对其产生海啸灾害分布的影响。

4.1 断层走向的影响

除断层走向70°外, 保持其他参数不变的情况

下, 我们设置另外一组断层走向为 55° 的地震参数, 对比两者产生的最大海啸波高分布 (图 9)。我们观察到地震断层走向为 55° 与海岸线的大致走向近乎平行, 由于海啸波传播的方向性使其在沿断层垂直方向的能量最大, 导致能量更集中于距离震源较近的汕头沿海一带, 对台湾浅滩和澎湖地区影响较大; 而当断层走向为 70° 时, 更多的海

啸能量通过陆架边缘的反射被导向震源西侧, 海啸对汕尾、澳门和珠海影响增大。海啸波之所以能够影响华南直线距离 800 km 海岸线, 其主要原因是陆架边缘的强烈反射导致海啸波能量被捕获在陆架区域, 断层走向的改变将改变反射能量的分布。

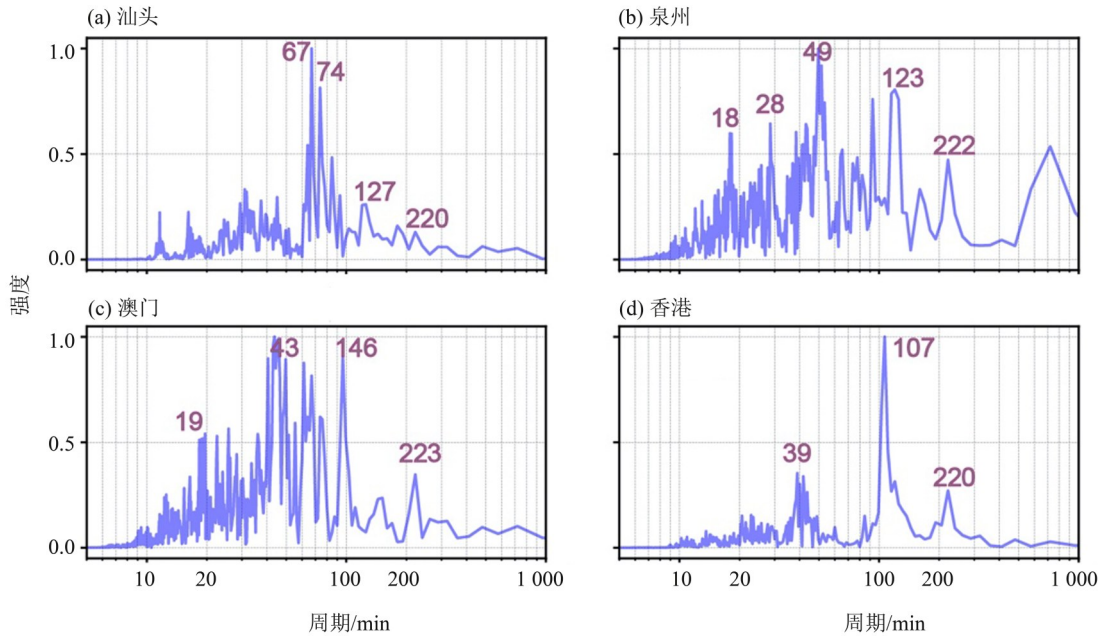


图 8 典型站点的海啸波傅里叶频谱分析

Fig. 8 Fast Fourier Transform of tsunami wave analysis at the selected synthetic gauges along the coast of South China

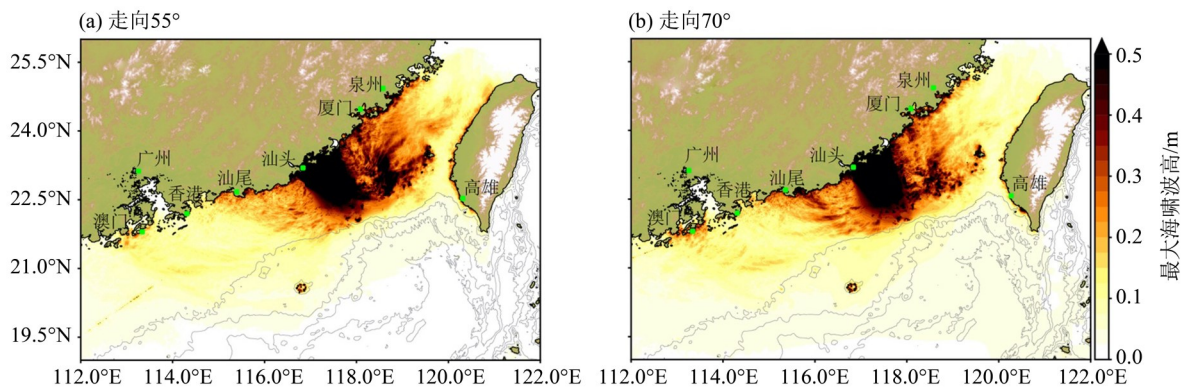


图 9 不同地震断层走向产生的最大海啸波高分布对比

Fig. 9 The effect of strike angle on maximum surface elevation

4.2 断层倾角的影响

我们进行的第二组数值试验是在保持断层走向为 70° 情况下, 分别改变倾角值为 45° 、 60° 和 85° 。初始海啸波高分布图显示当倾角为 45° 时, 初始负波值很小, 仅约 0.2 m (图 10), 随着地震倾角增大, 产生的海啸波初始负波值越大, 正波和

负波的绝对值越接近, 表现为波形更为陡峭, 当倾角达到 85° , 接近垂直时, 海啸波幅接近滑移值 3 m (图 11a)。我们分别对不同倾角地震触发的海啸进行模拟, 受篇幅限制, 本文仅展示倾角 85° 和 45° 两个极端案例情况下最大海啸波差值来说明倾角的影响 (图 11b)。图 11b 显示断层倾角为 85° 的、

地震触发的最大海啸，波幅在垂直于断层走向的陆地和海洋一侧均有减小，其中震源附近的减小幅值更大，但在距离震源较远的西侧和东侧海域最大海啸波幅均有所增大，在厦门、泉州沿海的增幅约 0.1~0.2 m。珠江口西侧澳门附近增幅 0.1

m。这组对比说明地震倾角的改变会影响其触发的海啸波高分布，倾角增大，初始负波幅值增大，近震源区域最大波高有所减小，但对其他远离震源的区域海啸影响增大。

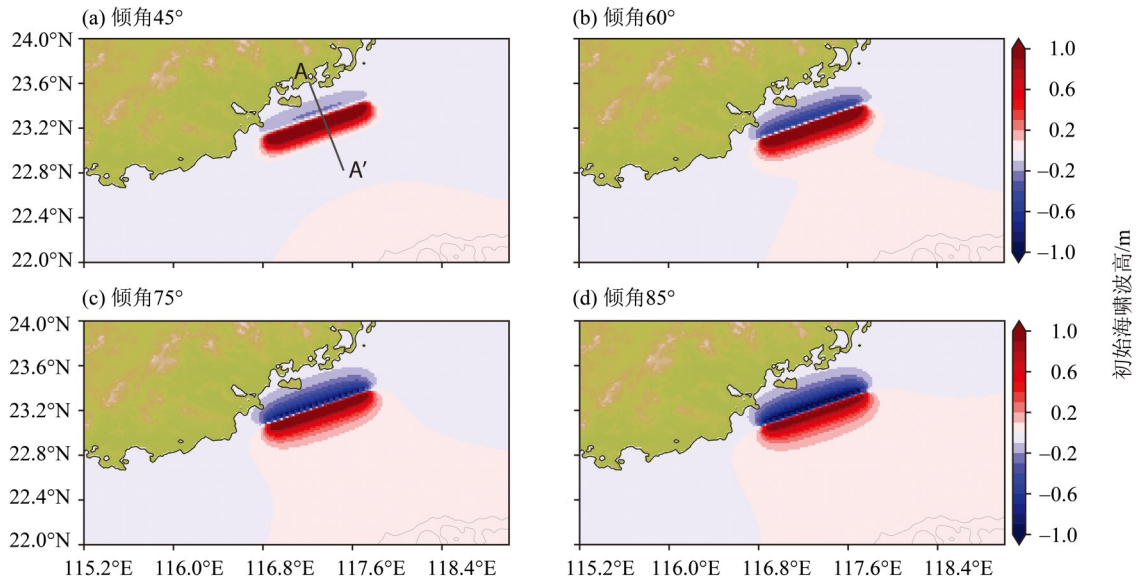


图 10 不同地震断层倾角产生的初始海啸波高对比

Fig. 10 Spatial distributions of initial surface elevation generated by earthquake with different fault dip angles

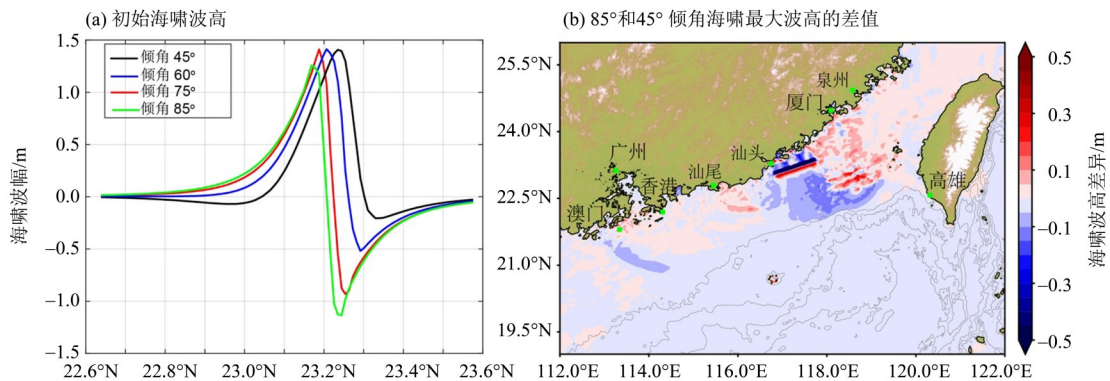


图 11 (a) 不同地震断层倾角沿剖面 A-A' 产生的初始海啸波高对比；(b) 倾角 85° 减去倾角 45° 产生海啸最大波高的差值

Fig. 11 (a) Profiles of initial surface elevation generated by earthquake with different fault dip angles; (b) The difference between initial surface elevation generated by earthquake with dip angle 85° and 45°

4.3 地震滑移角的影响

这里需要指出的是在前两组数值试验中，我们使用的滑移角 (rake angle) 均为 95°，也就是震源机制以逆冲为主，走滑为辅。为了定量展示滑移角影响，我们增大滑移角到 150°，也就是增大地震的走滑成分。从图 12 与走向 70°，滑移角 95° 地震海啸场景的初始波高和最大波高的对比可以看出，地震引起的垂向形变大幅减小，近震源区域的最大海啸波高也随之大幅减小，海啸可波及

的范围也相应减小至震源附近 (图 12)。

总结我们对地震断层走向、倾角和滑移角 3 组参数对地震触发海啸的定量分析，我们发现这些参数的改变均会改变海啸影响的主要范围和严重程度，尤其是地震滑移角的改变，会决定垂向海底形变量，从而决定其触发海啸规模，而断层走向的改变对最终海啸受灾区域影响较大。

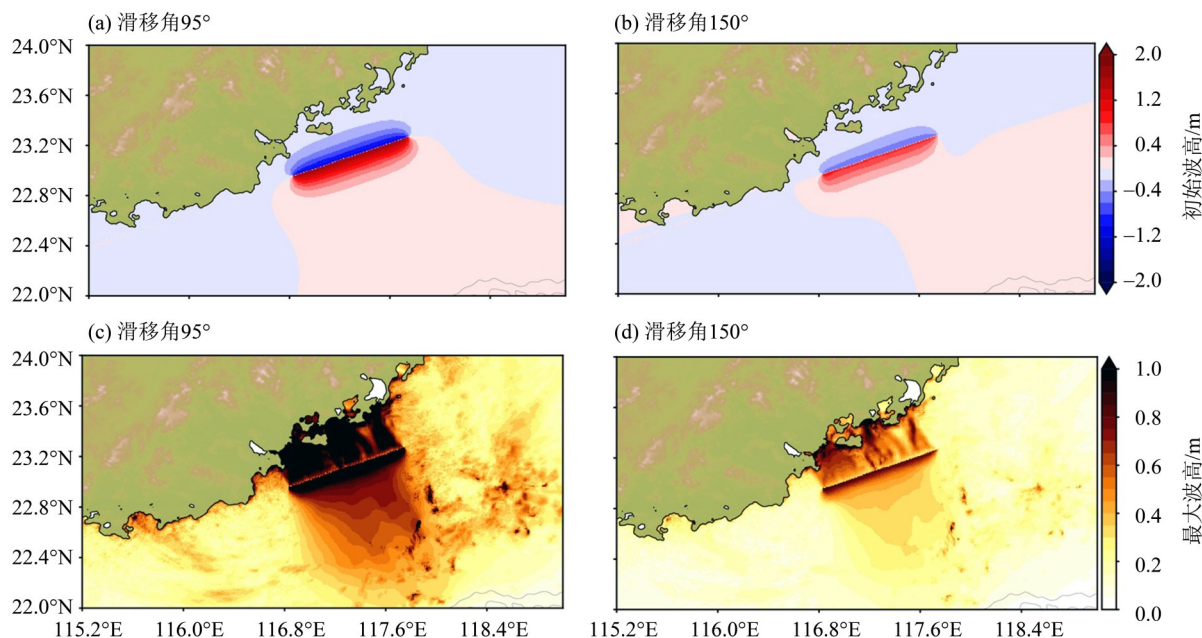


图12 不同地震滑移角产生的初始海啸波高和海啸最大波高对比

Fig. 12 The effect of rake angle on the initial surface elevation and maximum surface elevation

5 结论与启示

本文基于历史文献和地球物理资料所提供的约束,选取一组较为可信的地震参数,对1918年南澳大地震可能产生的海啸影响进行复演,数值模拟结果基本吻合历史文献所描述的海啸影响。通过对海啸波传播过程、波高分布和典型站点海啸波时序的波谱的详细分析,我们揭示发生在滨海断裂带的地震由于发震位置水深较浅,其所触发的海啸一般仅在局地产生较大波幅,但滨海断裂带独特的发震环境使其触发的海啸具有3个危险特征:

1) 滨海断裂带走向大致平行于海岸线和陆架波折带,加上南海北部平坦宽阔的陆架,形成了非常有利的海啸波能捕获环境。海啸波从浅海传播至深海过程中,在陆架边缘区域会发生强烈反射,从而导致绝大部分海啸波被“捕获”在陆架区域,形成边缘波,产生超长时间的震荡。

2) 陆架边缘的反射作用将会“出乎意料”地将海啸波能量导向距离震源较远的区域,例如陆

坡的反射作用会使珠江口西侧沿海遭受的海啸灾害远大于距离震源较近的东侧海岸。

3) 海啸引发的在沿海各地的强烈退水现象和强流会对沿海重要基础设施产生破坏性影响,强烈退水造成的灾害尤其对港口区域影响最大,可以导致渔船搁浅、锚绳断开、破坏码头桩柱等,同时也会对沿海地区的核电站冷却水取水造成不利影响。

相比于1918年的华南沿海,今天的华南沿海已经发生了翻天覆地的变化,经济社会发展程度、人口和基础设置分布和100年前不可同日而语,若类似海啸事件再次发生,造成的经济损失将不可估量。虽然滨海断裂带位于紧邻海岸线的陆架浅水区,但由于海水覆盖,我们对其准确位置、精细几何结构和发震习性认知严重不足,因此亟需针对滨海断裂带开展海洋地球物理调查,获取主要活动段落的断裂精细结构、最新活动性和现代地震活动相关的参数^[27],评估地震和海啸的危险性,并据此制定华南沿海的防灾减灾规划。

参考文献:

- [1] 彭承光,李运贵,吴名彬. 1918年南澳大地震发震构造机制分析[J]. 华南地震, 2017, 37(Suppl 1):1-14.
- [2] 翁文灏. 回忆一些我国地质工作初期情况[J]. 中国科技史料, 2001, 22(3):197-201.
- [3] 谢毓寿,蔡美彪同. 中国地震历史资料汇编[M]. 北京: 科学出版社,1983.
- [4] XIA S H, ZHOU P, ZHAO D, et al. Seismogenic structure in the source zone of the 1918 M7.5 Nanao

- earthquake in the northern South China Sea[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 302: 106472.
- [5] 孙金龙, 徐辉龙, 詹文欢, 等. 南海北部陆缘地震带的活动性与发震机制[J]. *热带海洋学报*, 2012(3): 43-50.
- [6] 潘建雄, 黄日恒. 1918年南澳地震的破坏强度及震中位置[J]. *华南地震*, 1994, 14(2): 17-23.
- [7] XU H, QIU X, ZHAO M, et al. Characteristics of the crustal structure and hypocentral tectonics in the epicentral area of Nan'ao earthquake (M7.5), the northeastern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl 2): 95-106.
- [8] BLASER L, KRUGER F, OHRNBERGER M, et al. Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment [J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2010, 100(6): 2914-2926.
- [9] WANG X M, POWER W. COMCOT : tsunami generation, propagation and run-up model[CP/OL]. 2011. <https://www.scribd.com/document/180207329/COMCOT-User-Manual-v1-7-pdf>.
- [10] WANG X M, LIU P L F. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(2): 147-154.
- [11] MUELLER C, POWER W, FRASER S, et al. Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(1): 488-502.
- [12] POWER W, DOWNES G, STIRLING M. Estimation of tsunami hazard in New Zealand due to South American earthquakes [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(2): 547-564.
- [13] HUANG Z H, WU T S, TAN S K, et al. Tsunami hazard from the subduction Megathrust of the South China Sea: Part II. Hydrodynamic modeling and possible impact on Singapore[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2009, 36(1): 93-97.
- [14] LI L L, SWITZER A D, CHAN C H, et al. How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: A case study in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 6250-6272.
- [15] LI L L, SWITZER A D, WANG Y, et al. A modest 0.5 m rise in sea level will double the tsunami hazard in Macau[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): eaat1180.
- [16] SEPULVEDA I, LIU P L F, GRIGORIU M. Probabilistic tsunami hazard assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(1): 658-688.
- [17] 王培涛, 闪迪, 王岗, 等. 日本东北 M_w 9.0 地震海啸在港池及邻近区域诱发的涡流危险性计算与评估分析[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 4162-4177.
- [18] LYNETT P J, BORRERO J, SON S, et al. Assessment of the tsunami-induced current hazard[J]. *Geophysical of Research Letter*, 2014, 41(6): 2048-2055.
- [19] OKAL E A, FRITZ H M, RAAD P E, et al. Oman field survey after the December 2004 Indian Ocean tsunami[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(Suppl 3): 203-218.
- [20] OKAL E A, FRITZ H M, RAAD P E, et al. Oman field survey after the December 2004 Indian Ocean tsunami [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(S3): S203-S218.
- [21] DENGLER L, USLU B, BARBEROPOULOU A, et al. The vulnerability of Crescent City, California, to tsunamis generated by earthquakes in the Kuril Islands region of the Northwestern Pacific [J]. *Seismological Research Letter*, 2008, 79(5): 608-619.
- [22] ARCOS M E M, LeVEQUE R J. Validating velocities in the GeoClaw tsunami model using observations near Hawaii from the 2011 Tohoku tsunami [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(3/4): 849-867.
- [23] HEIDARZADEH M, SATAKE K. Excitation of basin-wide modes of the Pacific ocean following the March 2011 Tohoku tsunami [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2014, 171(12): 3405-3419.
- [24] MELGAR D, RUIZ-ANGULO A. Long-lived tsunami edge waves and shelf resonance from the M8.2 Tehuantepec earthquake [J]. *Geophysical Research Letter*, 2018, 45(22): 12414-12421.
- [25] KAJIURA K. The directivity of energy radiation of the tsunami generated in the vicinity of a continental shelf [J]. *Journal of Oceanography*, 1972, 28(6): 260-277.
- [26] RABINOVICH A B, STEPHENSON F E, THOMSON R E. The California tsunami of 15 June 2005 along the coast of North America [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2006, 44(4): 415-427.
- [27] 李志刚, 张培震, 惠格格, 等. 南海北部滨海断裂带的深部结构探测现状和展望[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2022, 61(1): 55-62.