南海海啸灾害研究进展及展望

李琳琳^{1,2}, 邱强^{3,4,5*}, 李志刚^{1,2}, 张培震^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082;
3. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州 511458;
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
5. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan

* 通讯作者, E-mail: qiu.qiang@scsio.ac.cn

收稿日期: 2021-08-20; 收修改稿日期: 2021-12-29; 接受日期: 2022-01-25; 网络版发表日期: 2022-01-29

广东省引进人才创新创业团队项目(编号: 2016ZT06N331)、环南海地质过程与灾害创新团队项目、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(编号: 311021002)、海南省重点研发项目(编号: ZDYF2020209)、国家自然科学基金项目(批准号: 41976197、42076059、41774049、41772209)和中山大学中央高校基本科研业务专项项目(编号: 2021qntd23)资助

摘要 南海区域存在马尼拉俯冲带和滨海断裂带的断层活动(地震)、海底滑坡、火山等多种类型潜在海啸源, 这些海啸源对中国人口和基础设施密集的沿海地区、海洋渔业、深海油气和矿产资源开采及岛礁建设造成严重的潜在威胁. 文章对近年来南海海啸灾害研究取得的进展进行综述, 针对南海内部地震和海底滑坡两类海啸源, 介绍当前地震海啸和滑坡海啸基于典型情景的确定性评估和基于大量地震样本的概率性海啸灾害评估方法, 并通过对代表性地震和滑坡海啸模拟分别对马尼拉俯冲带地震、滨海断裂带地震和陆坡巨型滑坡触发海啸的致灾机制和灾害特征进行分析, 最后指出目前南海海啸研究的难点及未来的重点研究方向.

关键词 海啸, 俯冲带地震, 海底滑坡, 滨海断裂带

1 引言

海啸灾害发生频率低但致灾性极强, 是最致命的海洋灾害之一. 常见的海啸触发机制包括海域地震、海底滑坡、火山喷发、陨石坠落等. 世界各地对海啸灾害研究的重视是在2004年 M_w 9.1级苏门答腊-安德曼特大地震之后, 地震引发的越洋大海啸波及全球, 造成印度洋周边国家近23万人死亡, 经济损失达120亿美元(Titov等, 2005); 紧接着2011年 M_w 9.0日本东北大地震在太平洋再次引发越洋大海啸, 即使在地震和海啸研

究处在世界前沿的日本依然造成2.7万人死亡或者失踪, 经济损失达3050亿美元, 更严重的是这次地震事件中福岛核电站核泄漏事故造成的影响至今难以估量(Nanto等, 2011). 两次特大地震的发震位置和震级挑战了科学家们对俯冲带发震机制的传统认知, 受灾区域触目惊心的灾难场面也充分展示了海啸的惊人破坏力. 除了普遍关注的俯冲带地震海啸, 近些年频繁的海啸事件显示了海啸触发机制的多样性和复杂性, 2018年9月印度尼西亚Sulawesi岛 M_w 7.5级走滑地震在帕卢湾引发海啸导致1300余人死亡(Schambach等, 2021),

中文引用格式: 李琳琳, 邱强, 李志刚, 张培震. 2022. 南海海啸灾害研究进展及展望. 中国科学: 地球科学, 52(5): 803–831, doi: 10.1360/SSTe-2021-0262
英文引用格式: Li L, Qiu Q, Li Z, Zhang P. 2022. Tsunami hazard assessment in the South China Sea: A review of recent progress and research gaps. Science China Earth Sciences, 65(5): 783–809, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9893-8>

2018年12月印尼巽他海峡Anak Krakatau火山爆发导致侧翼崩塌 $0.1\sim 0.2\text{km}^3$, 引发致命海啸导致437人死亡(Williams等, 2019; Ye等, 2020), 2020年欧洲东爱琴海 M_w 6.9级Samos岛正断层地震在人口密集地产生了接近4m的海啸波(Dogan等, 2021), 2022年1月15日汤加火山爆发在全球范围引发海啸。这些突如其来的灾害性事件一次次提醒我们“非典型”海啸源的致灾性, 地震的震级、震源机制、滑坡的体积并不是决定其海啸触发能力的唯一参数, 发生在不利位置的走滑型地震、小规模滑坡与中强地震同样有可能触发致灾性海啸, 对沿海地区造成威胁, 使全球绝大多数海岸线都无法免疫于潜在海啸灾害的影响。

相比于全球其他海域, 南海区域的几个特点使其在应对海啸灾害时脆弱性极高: (1) 南海周边大型城市集中, 经济发达, 人口密度世界之最, 包括香港、澳门、珠海、深圳等城市在内的粤港澳大湾区是全中国经济最活跃的地区之一。(2) 包括大型港口、机场、核电站在内的重大基础设施分布密集。以安全级别要求最高的核电站为例, 中国现在正在运营、在建以及正在筹建的核电站, 超过半数分布在广东、广西、福建和海南等南海周边沿海地区。(3) 南海海域内包括石油平台和海底光缆等基础设施日益增多, 海底国际通讯电缆分布密集, 中国连接东南亚乃至全球的通信(电话、互联网、金融市场信息等)几乎全部依靠海底光缆。(4) 南海岛礁周边多分布有大型滑坡体, 由于岛礁平均海拔较低, 往往仅高于平均海平面数米, 又地处深海, 海啸波可以在数分钟或数十分钟内到达。这些现状要求我们必须具备应对突发海啸灾害的应急响应能力和防灾抗灾能力, 关于海啸预警研究的研究进展请参见安超(2021)和于福江等(2020)。

南海的形成和演化受西、南和东部三面超级环状俯冲独特地质构造运动影响, 内部及周缘发育有诸多大型活动断裂带及地质构造单元, 受马尼拉俯冲带、海域活动断层与高沉积速率的影响, 南海海域从大陆架、大陆坡到深海盆均存在不同类型和风险程度的地质灾害, 其中地震、滑坡、浊流等灾害威胁突出。从海啸灾害的角度来看, 以往的研究表明, 南海半封闭的构造环境使海域外部的海啸源难以影响到南海内部(Okai等, 2011; 于福江等, 2020; 安超, 2021), 所以南海的海啸灾害我们需要重点关注的是南海内部的海啸源。南海域内潜在的海啸源有多种类型(图1), 包括马

尼拉俯冲带(Megawati等, 2009; Hsu等, 2016; Qiu等, 2019)、滨海断裂带(Ren等, 2016; Cao等, 2018; Xia等, 2020)、南海北部陆架边缘活动断裂以及陆坡和海盆碳酸盐台地周缘大量规模不等的海底滑坡(Gee等, 2007; Li W等, 2014a; Chen等, 2016; Sun等, 2018b; Wang等, 2018; Wu等, 2018)和南海东侧一系列活火山岛(Terry等, 2017)。

针对南海的这些海啸源, 前人已开展了大量的研究工作。本文将地震和海底滑坡两种重要海啸源所产生的海啸灾害为阐述对象, 系统总结南海地震和滑坡海啸灾害研究所取得的重要进展; 同时, 基于地质结构、地球物理资料和典型海啸模拟案例讨论马尼拉俯冲断层、滨海断裂带的活动特性和发震机制以及陆坡巨型滑坡体的海啸产生机理和灾害特征, 提出目前还存在的研究短板问题和未来研究思路, 为中国南海海啸灾害防灾减灾规划提供科学依据和数据支撑。

2 马尼拉俯冲带地震海啸研究

作为南海内部最有可能产生区域性大海啸的海啸源, 马尼拉俯冲带断层是目前南海海啸灾害研究的主要对象。该俯冲带具有以下三个典型特征: (1) 长期缺失大地震。马尼拉俯冲带虽然地震频繁, 但均为中小地震, 自1560年西班牙殖民有可靠记录之后四百多年间并未记录到震级超过 M_w 7.6级大地震。大地震缺失可能意味着该俯冲区域断层要么以无震慢滑移或者慢地震为主的形式释放能量(Obana和Kodaira, 2009; Wallace等, 2016), 要么断层能量不断累积(Yokota等, 2016), 未来以巨大或特大地震形式释放。(2) 基于菲律宾和中国台湾1998~2015年的GNSS观测, Hsu等(2016)通过块体模型(block model)得出该俯冲区域的耦合率可能为0.48或更高。(3) 俯冲速率高达 $65\sim 100\text{mm a}^{-1}$ (Hsu等, 2012, 2016)。该速率甚至高出全球几个大地震非常活跃的俯冲带, 比如日本海沟 $62\sim 81\text{mm a}^{-1}$ 、苏门答腊俯冲带 $50\sim 60\text{mm a}^{-1}$ (Chamot-Rooke和Le Pichon, 1999)和南美 $58\sim 72\text{mm a}^{-1}$ (McCaffrey, 2008)。综合马尼拉俯冲带上述三个典型特征, 我们不能排除其未来发生巨大或特大地震的风险(McCaffrey, 2008; Schellart和Rawlinson, 2013; Bletery等, 2016)。

针对马尼拉俯冲带海啸灾害评估主要分为两类, 一类是基于单个或少数典型情景的确定性评估(例如,

图1 南海海啸历史记录、地质记录及主要潜在海啸源分布

黄色圆点标注了南海东北部华南沿海和台湾地区海啸记录(Lau等, 2010), 绿色圆点标注了越南沿海的海啸记录(Vu和Nguyen, 2008), 橙色圆点标注了菲律宾火山地震研究所整理的菲律宾1589–2012年间的的海啸记录(Bautista等, 2012), 红色五角星标注了目前发表的海啸沉积/疑似海啸沉积记录; 白云海底滑坡边界取自Sun等(2018a), 琼北和华光滑坡边界取自Wang等(2018), 曾母暗沙滑坡边界取自Gee等(2007). 修改自Qiu等(2019)

Huang等, 2009; Liu等, 2009; Wu和Huang, 2009; Okal等, 2011; Qiu等, 2019; Xie等, 2019), 另一类是基于历史事件或大量假定情景(synthetic scenarios)的地震海啸概率性灾害评估(Seismic Probabilistic tsunami hazard assessment, S-PTHA)(如Liu等, 2007; Thio等, 2007; 温瑞智等, 2011; 任鲁川等, 2014; Li等, 2016; Sepúlveda等, 2019; Yuan等, 2021). 下面我们分别针对这两类评估方法的参数设定、方法本身的优势和不足进行讨论, 并根据其评估结果揭示马尼拉俯冲带地震

海啸灾害的特征及其致灾机制.

2.1 基于典型情景的确定性评估

典型情景的地震参数设定通常考虑最糟糕情景(worst-case scenario)或多个高可信度的断层模型, 模型参数包括地震震级和断层几何参数(破裂长度、宽度、深度、走向、倾角和滑移角)等. 该类断层模型通常是基于地质构造、地球物理探测和大地测量等数据约束下提出, 比如, 较早的最糟糕情景断层模型是

图2 最糟糕情景断层模型滑移分布(a)及其触发的海啸波特征(b)

(a) Megawati等(2009)提出的最糟糕情景断层模型滑移分布; (b) 该地震断层模型触发的最大海啸波高分布和海啸波到时图, 圆点代表沿10m等深线的输出点。地形数据采用15arc-second分辨率General Bathymetric Chart of Oceans (GBECO_2019)

Megawati等(2009)提出的一个震级为 M_w 9.0的马尼拉俯冲带整体破裂模型(图2a), 该模型假定纵贯 $12.5^{\circ}\text{N}\sim 23.5^{\circ}\text{N}$ 的整个马尼拉俯冲带自1560年菲律宾有可靠地震记录以来完全耦合, 根据吕宋岛和吕宋海峡岛屿上多个GNSS台站测得的俯冲速率(Yu等, 1999)计算得到总累积滑移亏损量, 其中最大亏损量出现在俯冲速率最快可达 90mm a^{-1} 的吕宋岛西北部, 其幅值接近40m(图2a)(Megawati等, 2009)。事实上, 马尼拉俯冲带大断层是否会发生整体破裂还存在争议, 原因在于马尼拉俯冲带地质构造具有明显的南北差异(陈传绪等, 2014; 朱俊江等, 2017; 高金尉等, 2018)。俯冲角度南陡北缓, 南部受菲律宾板块俯冲影响形成双向俯冲结构, 北段主要受俯冲增生的控制, 在海沟和弧前盆地之间形成巨大的增生楔构造, 而中段在 16.5°N 沿着北东向分布着黄岩岛海山链(朱俊江等, 2017), 海山链区域复杂粗糙的海底地形是否可以阻断断层破裂并不明确(Wang和Bilek, 2014; Bilek和Lay, 2018)。基于这些考虑, Qiu等(2019)综合考虑马尼拉俯冲带地质构造南北差异、俯冲界面耦合度的空间分布不均匀性以及俯冲带增生楔断层浅层发震机制等重要特征, 提出了新的地震断层模型。新断层模型以中间海山链区段为界, 分为南

段($14^{\circ}\text{N}\sim 16^{\circ}\text{N}$)、中段($16^{\circ}\text{N}\sim 19^{\circ}\text{N}$)和北段($19^{\circ}\text{N}\sim 22^{\circ}\text{N}$), 每段相对应的累积滑移亏损量计算中采用的耦合率和俯冲速率分布来自于Hsu等(2016), 并以1000年为大地震周期, 得到马尼拉俯冲带各段累积的弹性应变均已达到 M_w 8.8~9.0级地震量级。除了上述所谓最糟糕情景断层模型, 更多的断层模型是为了分析不同位置 and 不同震级的俯冲带地震产生的海啸波传播特征和潜在灾害影响, 在不同断层位置和深度假定一些典型情景(例如, Liu等, 2009; Wu和Huang, 2009; Nguyen等, 2014), 如Liu等(2009)沿着俯冲带的反“S”型的断层走向, 将断层划分为6段, 设定震级为 M_w 8.0, 根据地震震级和破裂尺度经验关系(Wells和Coppersmith, 1994)指定断层宽度和平均滑移量。采用类似的方法, Nguyen等(2014)设定了100个震级在 M_w 6.5~9.3、震源深度在15/30/55km的地震断层模型来评估越南沿岸的海啸灾害。

在上述研究基础上我们分别针对Megawati等(2009)和Qiu等(2019)提出的最糟糕情景断层模型进行海啸模拟, 分析马尼拉俯冲带地震产生的海啸在南海的传播特征和灾害影响。我们采用海啸模拟程序COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)

(Liu等, 1998; Wang和Power, 2011), 考虑海啸波在近岸浅水区域的海底摩擦和非线性作用, 利用非线性浅水波方程来计算整个南海海域海啸波特征. 根据图2和图3展示的模型结果, 同时结合现有研究, 以中国华南沿海和域内岛礁为主要关注对象, 总结马尼拉俯冲带地震海啸的几个重要特征: (1) 华南沿海包括广东、福建和海南省沿海地区, 是除了中国台湾南部和菲律宾沿海这些近震源区域外, 受马尼拉俯冲带地震海啸威胁最大的区域(图2). 特别需要指出的是, 根据现有GNSS观测, 吕宋岛西北部是整个俯冲带俯冲速率最大的区段, 从而累积了最大弹性应变能, 而这一区域的断层走向和南海北部海域地形特征导致其产生的海啸波能量正对着广东省沿海, 尤其是粤东沿海, 广东省沿海可能遭遇的最大海啸波高约4~10m(图2b). (2) 分段模型模拟结果显示, 发生在俯冲带南、北、中各段的地震海啸均会对中国华南沿海和南海内部岛礁产生灾害性影响, 尤其是北段和中段的地震产生的海啸波最大能量将集中分布在广东和福建沿海(图3a, 3b), 需要特别关注, 而发生在中段和南段的地震对中沙和西沙群岛的影响更加明显(图3b, 3c). (3) 受南海北部陆架区域局部地形影响, 海啸波在华南沿海多处发生波浪汇聚, 自西向东依次是阳江、珠江口西岸澳门珠海一带、汕尾和漳州沿海, 汇聚效应将导致这些区域遭遇比其他邻近海岸更大的海啸波高, 从而成为风险相对较高的区域(图2b和3). (4) 海啸波传播到中沙和西沙群岛的时间在0.5~1h内, 传播到华南沿海的时间约为2~3h, 因地震位置不同到达时间略有差异; 北段地震产生海啸约两个多小时到达粤东, 早于中段和南段的地震, 而中段和南段的地震海啸到达中沙群岛和西沙群岛时间比北段约早半个小时.

对比21世纪以来另外两次真实发生的由震级 $M_w 9.0$ 以上地震触发的越洋海啸事件(2004年 $M_w 9.1$ 苏门答腊-安德曼地震触发的印度洋特大海啸和2011年 $M_w 9.0$ 日本东北地震触发的太平洋特大海啸), 如果南海域内发生类似规模的地震海啸, 其灾害性后果是无法想象的. 南海的海域面积为350万平方公里, 是印度洋面积(7056万平方公里)的1/20、太平洋面积(18134万平方公里)的1/50, 面积较小而且相对封闭, 意味着一旦发生大规模海啸, 其能量难以泄露到海域以外的邻近海域, 巨大的海啸能量只能在相对狭小的海域传播吸收, 在近震源和海啸波传播的主要方向产生巨大

的波高, 同时海啸波在逐渐衰减过程中会在域内海岸线之间来回反射, 从而造成沿海区域超长时间的水位大幅度波动影响. 类似的事件曾在同样具有半封闭构造环境的日本海发生过, 1983年 $M_w 7.9$ 日本海地震触发的灾害性海啸在日本海内部震荡时间达2天之久(Satake和Shimazaki, 1988). Satake和Shimazaki(1988)通过对潮位站记录的海啸波波谱和数值模拟分析指出, 超长震荡的主要原因是海啸波在封闭的海岸线之间发生多次反射, 从而引发了整个海域的自由震荡. 即使是在太平洋这样具有广袤面积的海域, 2011年日本东北特大海啸也引发了整个太平洋的洋盆震荡(Heidarzadeh和Satake, 2014), 致使海啸波在太平洋沿岸产生的波动持续了4~5天(Saito等, 2013). 由此看来, 对于马尼拉俯冲带地震海啸, 除了其产生的淹没灾害外, 因南海特殊的封闭环境而可能产生的海岸线多次反射和海盆震荡造成的超长时间水位振荡灾害影响也需要特别关注.

2.2 概率性地震海啸灾害评估

由于确定性评估仅提供有限数量的评估结果, 很难给出模拟场景的发生概率, 对沿海土地使用规划和防灾减灾设施建设指导意义有限. 因此, 能够为研究区域提供不同回归周期灾害水平的概率性海啸灾害评估已成为全球海啸研究的热点(Mori等, 2018; Behrens等, 2021). 目前各俯冲带海域均开展了地震海啸的概率评估, 如东北大西洋和地中海区域(Sørensen等, 2012; Gibbons等, 2020; Basili等, 2021)、南海区域(Liu等, 2007; 温瑞智等, 2011; Li等, 2016, 2018; Sepúlveda等, 2021; Yuan等, 2021)、日本(Fukutani等, 2014; Goda等, 2015)、美国(González等, 2009; Park和Cox, 2016)、澳大利亚(Davies和Griffin, 2018)和新西兰(Mueller等, 2015; Power等, 2015).

海啸灾害概率评估(Probabilistic tsunami hazard assessment, PTHA)的基本思路借鉴了地震灾害概率评估方法(Probabilistic seismic hazard assessment, PSHA). 区域性的海啸灾害概率评估通常在近海特定水深(如10/20/50m)等深线设定站点(synthetic gauges), 考虑所有有可能在该点产生海啸的地震作为潜源. 针对潜在发震区域建立Gutenberg-Richter关系, 即地震震级和频率的关系. 由此可以生成多组长周期(比如10万年)的地震目录, 选取地震目录中可能产生海啸的地震

图3 马尼拉俯冲带断层北段(a)、中段(b)和南段(c)地震触发的最大海啸波高分布和海啸传播到时图

基于Qiu等(2019)提出的马尼拉俯冲带断层模型模拟结果, 模型设置同图2. 修改自Qiu等(2019)

($M_w \geq 6.5$)生成地震事件集(如采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法), 通过对大量地震海啸事件(数量通常约 $10^4 \sim 10^6$)的模拟得到每个事件对应的近岸指定点最大海啸波高. 为降低计算量, 通常将震源区离散成单位源, 建立单位源格林函数数据库, 并通过线性叠加的方式得到不同破裂区域和滑移分布对应的地震海啸波

高, 最终基于对所有地震海啸事件在同一指定点产生的最大波高统计, 得到不同回归周期的波高或特定周期内指定波高的发生概率.

区域性的海啸灾害评估可以提供潜在受影响区域近海的海啸灾害水平相对高低, 从而为选定高风险区域, 进而开展更精细的沿海地区淹没灾害评估提供依

据(Li等, 2018). 从以近岸水深点波高为主要输出的区域性海啸灾害评估, 到以海啸波高、淹没水深、流速等为主要输出参数的陆上局地海啸淹没灾害评估, 基于线性浅水波控制方程的单位源格林函数和线性叠加的简化方法将不再适用. 海啸模拟需考虑水深变浅后海啸波与近岸地形的相互作用(如底部摩擦、非线性作用等), 因此需要针对每个潜在可能造成淹没的地震海啸事件, 进行从触发、传播到淹没整个流程不同尺度物理过程的模拟. 同时为保障评估结果的实用性, 陆上地形的网格精度通常需要在1~10m量级, 计算量剧增(例如, Volpe等, 2019; Gibbons等, 2020; Behrens等, 2021).

在概率性地震海啸灾害评估(S-PTHA)的整个流程中, 震源物理特性、海啸传播水动力特征和淹没过程等都存在不同程度的不确定性(Behrens等, 2021). 其中震源物理特性的不确定性最大, 对其进行量化评估是整个评估流程中的重点和难点, 也是研究的热点(Grezio等, 2017; Behrens等, 2021). 对S-PTHA最具影响的震源物理特征主要包括研究区域的最大潜在震级、发震频率、地震破裂区域和同震滑移分布等. 由于历史地震样本不足, 难以确定研究区域的潜在发震震级和地震频率, 这是全球几乎所有区域都面临的共同难题, 尤其是对海啸灾害评估影响较大的大地震和超大地震的潜在规模和周期(Behrens等, 2021). 这不仅仅体现在历史大地震缺失、可靠记录较短的区域, 如马尼拉俯冲带, 也同样体现在大地震频繁、历史记录较完善的区域, 比如日本海沟, 最突出的例子就是2011年日本“3·11”地震, $M_w 9.0$ 的规模大大超出了基于历史地震预测的规模(Mori等, 2018). 当前PTHA的研究综合考虑区域构造特征和其潜在发震机制, 更加关注地震的复杂破裂特性. 比如根据该研究区域地质构造特征和历史地震特点来预测未来的地震破裂形态, 提出更趋近于观测的地震模型(Goda等, 2015; Davies和Griffin, 2018); 或者考虑同震滑移不均匀性(Geist, 2002; Mueller等, 2015; Li等, 2016)、浅部地震的放大效应(Murphy等, 2016)和随深度变化剪切模量(Davies和Griffin, 2020)等. 除了震源特性外, 目前PTHA的研究趋势还包括对海啸波传播和淹没过程更细致的刻画, 如使用高精度近岸水深和陆上地形数据(Goda和Song, 2016), 考虑浅水区域海啸波非线性作用影响(Yuan等, 2021)、海啸发生时天文潮位影响(González

等, 2021)和气候变化引起的海平面上升影响(Li等, 2018; Sepúlveda等, 2021).

对马尼拉俯冲带进行概率性海啸灾害评估的难点在于该区域缺乏确凿的大地震记录($M_w \geq 8$), 同时现代地震记录和GNSS的形变监测数据时长和空间分布均有限, 断层浅部测量数据缺失, 导致我们对该俯冲区域的地震活动性认知不足. 根据上一节我们对马尼拉俯冲带现有地球物理观测资料的分析, 虽然马尼拉俯冲带历史上缺乏大地震, 但高俯冲速率和耦合率说明该区的最大潜在发震等级、频率和破裂范围均存在很大不确定性. 针对以上多种不确定性, Li等(2016)分别采用基于仪器记载的地震记录(1973~2014年)和基于大地测量的数据约束(俯冲速率及耦合率)得到两组地震震级和频率的关系(表1). 可以看到两者计算得到的地震频率差异很大, 以俯冲带北段发生 $M_w 8.0$ 级地震周期为例, 根据地震记录得到的复发周期为1042年, 而大地测量数据给出的周期为232年(表1). 为了综合考虑两种可能性, 对两者计算结果分别给予50%的权重, 得到最终结果. 区别于传统的概率海啸灾害评估方法, Li等(2016)进一步引入地震滑移随机分布的不均匀性及地震破裂区域的随机性, 进而提出更接近真实的地震滑移模型, 从而实现更可靠的海啸灾害评估(图4c~4e). 随后不同学者分别对最大地震等级(Li等, 2017)、地震频率(Sepúlveda等, 2019)和海平面上升影响的不确定性(Sepúlveda等, 2021)对PTHA的影响作出量化评估. 其中Li等(2017)根据历史地震不同准则确定的锥形Gutenberg-Richter关系、断层滑动速率所累积的地震发生率等, 综合对比了地震上限等级对PTHA结果的影响, 指出地震上限的差异会导致海啸灾害评估结果相差2~6倍; Sepúlveda等(2019)针对蒙特卡罗方法需要较大的随机取样量才可以得到较可靠结果的问题, 提出随机降阶模型(Stochastic Reduced Order Model), 可以用较少的不均匀滑移模型体现地震事件滑移分布的不确定性; Sepúlveda等(2021)基于非静态泊松过程考虑气候变化下海平面上升造成的海啸灾害的影响指出, 由海平面上升引起的不确定性和由地震频率引起的不确定性量级相当.

我们接下来基于Li等(2016)的研究来展示马尼拉俯冲带地震对整个南海区域的海啸灾害概率评估结果(图5). 南海10°N~25°N包括菲律宾、中国和越南的海岸线受马尼拉俯冲带地震海啸威胁较大, 其中受灾最

表 1 马尼拉俯冲带地震复发周期^{a)}

M_w	基于历史地震			基于大地测量数据		
	Zone I $a=5.97$ $b=1.20$	Zone II $a=4.96$ $b=0.94$	Zone III $a=6.20$ $b=1.12$	Zone I $a=5.45$ $b=1.0$	Zone II $a=5.74$ $b=1.0$	Zone III $a=5.96$ $b=1.0$
7	467	93	80	75	39	23
7.2	810	143	133	120	61	37
7.4	1406	220	223	190	97	58
7.6	2441	338	372	300	154	93
7.8	4238	521	623	476	244	147
8.0	7357	802	1042	755	387	232
8.2	12772	1235	1743	1196	614	368
8.4	22172	1901	2915	1895	973	584
8.6	—	—	4876	—	—	925
8.8	—	—	8157	—	—	1466
9.0	—	—	13644	—	—	2324

a) Zone I、Zone II、Zone III与图4a和4b的区域分段相对应

严重的除了菲律宾和中国台湾这些近断层区域，还包括华南沿海、尤其是广东省沿海。以广东省沿海为例，500年一遇的最大海啸波高约1~2m，局部海岸受地形影响可达2~3m，千年一遇的海啸波高峰值达到2.5~3.5m，粤东沿海局部地区可达5m左右。值得特别注意的是，这一灾害水平和近断层区域吕宋岛西部几乎相当。广东省沿海之所以受影响较大，在上一节针对典型情景海啸分布特征中已经提到，主要有两点原因：(1) 根据现有GNSS观测，吕宋岛西北部是整个马尼拉俯冲带俯冲速率最大的区段，结合耦合率分布进行计算，可知该段的长期累积滑移亏损量也是最大，而这一区域的断层走向使其产生的海啸波能量正对着广东省沿海，尤其是粤东沿海。(2) 海啸波传播的方向性和南海北部陆架的地形控制了海啸最大能量分布。地震发生后，海啸波沿垂直地震破裂走向传播，在从深海传播到华南沿海过程中，受北部宽阔陆架区域水深逐渐变浅影响发生折射，逐渐转向为垂直于海岸线，直冲广东省沿海。

对比南海周边的人口分布和海啸灾害的评估结果，我们会发现南海海啸风险较高的沿海区域也正是人口分布稠密的区域。海啸作为典型的沿海洪水灾害，和由台风产生的风暴潮一样，受到灾害发生时所在地区的海平面变化影响。华南沿海很多区域地势低洼，容易遭受沿岸洪水灾害，在全球气候变暖、海平面上升的背景下，海啸和风暴潮灾害将逐渐加剧。Li等

(2018)以粤港澳大湾区代表性城市澳门为例，将概率性海啸评估从区域推进到沿海局地，通过对当前海平面以及海平面分别上升0.5、1、1.5m情况下的海啸评估计算，发现0.5m的海平面上升将使澳门半岛内港区域遭受1m海啸波高的回归周期从800年缩短到458年(Li等, 2018)。这也就意味着在气候变化、海平面上升的背景下，如果沿海海岸工程防范设施不跟进，沿海地区未来遭遇相同海啸灾害等级的概率可能会大大提高。

2.3 马尼拉俯冲带地震海啸灾害评估的难点

尽管目前针对马尼拉俯冲带的潜在地震海啸已经进行了一系列基于典型情景和概率性的灾害评估，但我们必须清醒的认识到现有评估结果仍然存在很大的不确定性。其不确定性的主要原因在于该区域缺乏确凿的大地震记录和近海沟的断层活动性观测，导致我们对该区域的地震活动性尤其是最大可能震级及频率、地震特性、破裂位置及形态的认知不足(岳汉等, 2020)。其中对海啸灾害评估影响最大的几个因素包括：

(1) 马尼拉俯冲大断层是否分段及其不确定性。多道反射地震测线、海底地震仪剖面数据和高精度水深资料显示，马尼拉俯冲带地质构造具有明显的南北差异(陈传绪等, 2014; 朱俊江等, 2017; 高金尉等, 2018)。以中间海山链区段为界，马尼拉俯冲带可以分为南、

图4 马尼拉俯冲带分区位置和单位海啸源分布

(a) 马尼拉俯冲带分区; (b) 地震破裂区单元海啸源分布; (c)~(e) 北段 M_w 8.0(c)、中段 M_w 8.2(d)、南段 M_w 8.4(e)地震的非均匀滑移分布示例。图改自Li等(2016, 2018)

北两段: 北段主要受俯冲增生的控制, 在海沟和弧前盆地之间形成巨大的增生楔构造, 南段可能受构造剥蚀或俯冲剥蚀控制。而海山链区段海底地形复杂、粗糙, 在俯冲增生或剥蚀的联合作用下, 形成较小的增生楔结构(Zhu等, 2013; Armada, 2016)。这其中的不确定性

在于海山的具体俯冲位置, 及其是否可以阻断地震沿断层走向的破裂传播还是最终成为断层面的凹凸体(Asperity), 而全球范围内发生的震例显示两者皆有可能(Taylor等, 2008; Meltzner等, 2012; Wang和Bilek, 2014; Philiposian和Meltzner, 2020)。

图5 基于马尼拉俯冲带地震的南海海啸概率评估结果

(a)和(b)分别为500年一遇和1000年一遇的近岸站点(10m等深线)海啸波峰值分布. 改自Li等(2016)

(2) 浅部地震对海啸的放大效应. 近20年来, 全球发生了多次由俯冲带近海沟地震引发的破坏性海啸, 例如2006年 M_w 8.3的Kuril地震(Ammon等, 2008)、2006年 M_w 7.8的Java地震(Fan等, 2017)、2010年苏门达腊岛西侧 M_w 7.8的Mentawai地震(Hill等, 2012)以及2011年日本东北部 M_w 9.0级的“3·11”等大地震. 这些地震分布在全球各俯冲带, 可分为海啸地震和海沟破裂型地震(trench-breaking)(Lay, 2018; Geersen, 2019)两类地震. 这两类地震的能量虽然相差上百倍, 但其共同的特点是都破裂到俯冲断层浅部至海沟位置, 并引发相同量级的最大海啸爬高, 表明共同的浅部破裂区是控制海啸放大效应的源区. 这些地震使我们重新认识到, 以往普遍认为不可能大量积累能量的俯冲带浅部增生沉积楔(accretionary sedimentary wedge)也有可能发生大地震(Moore等, 2007), 而俯冲带浅部的物质较软, 剪切模量低, 相同地震矩情况下可以产生更大的滑移量, 并且更容易发生动态弱化破裂过程, 再次增加滑移量, 从而触发放大的海啸波(Bilek和Lay, 2018; Lay, 2018). 如日本东北大地震在俯冲带近海沟处造成50m左右的滑移量(Lay, 2018), 产生了巨大的海啸波. 此外, 从全球俯冲带观测来看, 外增生楔(outer wedge)发育有诸多高角度逆冲断层与复杂褶皱构造结构, 并且在全球海啸地震和破裂到浅层的大地震实际案例中, 该结构可以高效地把底部大断层的滑移量转移到外增生楔高角度逆冲断层系统, 从而放大海啸波, 产生超出预期的海啸灾害(Moore等, 2007; Hubbard等, 2015; Fan

等, 2017; Hananto等, 2020). 由于浅部增生楔位于深海海沟附近, 陆基观测台站通常很难确定其活动情况, Yokota等(2016)和Gagnon等(2005)通过直接的海底观测, 分别指出日本南开和南美秘鲁-智利俯冲带浅部滑移亏损或断裂耦合程度很高, 强调了俯冲带浅部同样具备产生破坏性海啸的能力. 而马尼拉俯冲带北部的地质构造和断层分布特点与日本南开以及全球已发生特大地震海啸的俯冲带具有极高的相似度(Lin等, 2009; Hubbard等, 2015; Yang等, 2020), 所以其浅部产生大海啸的能力不可忽视.

(3) 马尼拉俯冲带耦合空间分布的不确定性. 俯冲带的耦合率反映了震间断层的能量累积状态, 是评估区域性地震和海啸灾害的重要信息, 然而在马尼拉俯冲带这一信息具有很大不确定性. Hsu等(2016)通过块体模型(block model), 利用菲律宾和中国台湾近20年(1998~2015)的GNSS数据, 给出两个差异明显的马尼拉俯冲带耦合率模型(图6), 两者的本质区别是模型B考虑了巴士海峡海槽处的海底断层North Luzon Trough Fault(NLTF). 两者的差异尤其体现在对海啸产生影响最大的俯冲带浅部 $17^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, 模型A给出了较低的耦合率, 而模型B却显示接近50%的耦合率. 另外受数据空间分布的限制, 模型范围仅包含 $14^{\circ}\text{N}\sim 20.5^{\circ}\text{N}$, 而缺乏南北端的耦合信息, 导致这部分的断层能量累积状态无法估计. 而位于吕宋海峡的俯冲带北部的地震恰恰是对中国华南沿海威胁最大的海啸源区.

上述不确定性不同程度地影响到海啸灾害的评估

图 6 基于Hsu等(2016)给出的两种马尼拉俯冲带耦合率(Coupling ratio)分布

结果, 如马尼拉断层发震区域的构造环境和几何结构决定了地震的孕育机制, 是否分段和分段的位置直接决定其所能产生最大地震的等级, 而耦合率的高低决定地震发生频率, 忽视浅部地震的放大效应将会大大低估潜在海啸灾害, 这些均是影响PTHA结果的关键因素(Li等, 2016; Sepúlveda等, 2019; Yuan等, 2021). 建议可以通过开展以下研究来减小不确定性因素的影响: (1) 从地质学的角度, 在俯冲带北部靠近海沟区域开展大洋钻探, 通过钻孔、取芯和测井, 研究海底断层岩石性质和构造, 并可以通过在钻孔中埋设地震仪和各类传感仪器建立海底深部观测站系统, 对地震活动、孔隙流体压力、温度和岩石摩擦性能进行监测, 从而可以进一步研究俯冲带应力场变化和大震孕育机制的特点(林间等, 2017). (2) 从地震学的角度, 可以通过采用宽频带OBS进行长期的海底天然地震观测, 提高海底地震的定位精度, 从而更好的约束俯冲板片形态(任昱等, 2020), 或采用OBS结合人工震源的方式开展二维/三维深地震探测获取俯冲带高精度的断层结构, 重点探测俯冲带浅部精细构造, 尤其是深度50km

以内可以有效触发海啸的俯冲区域, 为研究断层的发震机制与分段特性提供科学数据约束. (3) 从大地测量学的角度, 在俯冲带北部近海沟区域布设海底高精度相对和绝对GNSS台站或通过海底观测网中观测节点搭设地表形变监测仪器测量断层滑动速率, 从而回答断层的耦合状态, 为将来海啸预警和灾害评估提供重要数据支撑(Yokota等, 2016).

总之, 未来对马尼拉俯冲带地震活动性和海啸灾害的评估工作需要结合不断更新的地球物理资料, 联合包括地震学、大地测量学和大洋钻探等多学科探索手段, 通过海底地壳形变观测、断层地球物理调查等, 研究俯冲带主断层、浅部分支断层的运动性质、滑动速率和孕震耦合状态, 为地震和海啸的灾害评估提供定量参考依据.

3 滨海断裂带地震及其潜在海啸特征

3.1 滨海断裂带构造特征及历史地震

南海在三面超级环形俯冲的复杂应力驱动下, 内

部及周缘发育有不同的构造单元, 其中华南沿岸大陆与南海北部陆架构造结构分区性尤其显著(刘以宣, 1981)。这种构造结构的差异性也明显体现在重力、重磁、卫星影像和地形地貌等观测数据中(钟建强, 1987)。据这些观测资料, 刘以宣(1981)首次将华南沿岸大陆与南海北部陆架构造结构分区定义为滨海断裂带。该断裂带链接东边的牛山岛和西边的北部湾, 途径南日岛、南澎列岛、担杆列岛等岛屿, 大致在水深30~50m陆架海域展布, 走向呈NEE向, 总长达上千公里(刘以宣, 1981, 1985; 赵明辉等, 2003; 徐辉龙等, 2006)。前人研究(徐辉龙等, 2006; 曹敬贺等, 2014)认为断裂带区域的构造应力受控于环形俯冲以及南海海盆本身的形成和消亡过程, 在长期的地质年代表现不同, 其中从中生代过渡到新生代时期, 发生了构造应力的反转, 具体可分为挤压应力、扩张应力、复杂应力调整和挤压收缩等应力过程, 形成了NE、NEE和NW向三组断裂体系(刘以宣, 1985; 姚伯初, 1993; 曹敬贺等, 2014; 熊成等, 2018)。这三组相互交错的断裂系统形成南海北部陆缘独特的构造结构单元, 并形成非常复杂的构造应力场, 控制着该区域的发震机制特点, 尤其是中生代到新生代时期滨海断裂带从拉张到挤压收缩应力的反转, 将直接影响发震机制和产生海啸的能力。

滨海断裂带是南海北部活动强度最大、频率最高的地震带(钟建强, 1987; 徐辉龙等, 2010), 历史上曾发生过6级以上的地震18次、7级以上的强震4次(图7)。

其中震级在7级以上的地震自西向东包括1605年7.5级琼州、1600年7.0级南澳、1918年7.5级南澳与1604年8.0级泉州地震(陈恩民和黄咏茵, 1984; 孙金龙等, 2012)。这些地震的特点是震源浅, 加上陆缘沉积厚的特点, 导致其破坏力极强, 给华南地区带来巨大的人员伤亡和财产损失(徐辉龙等, 2006; 彭承光等, 2017)。其中比较明确伴随有海啸发生的地震为1605琼海大地震(徐起浩, 2007)和1918年南澳大地震(彭承光等, 2017)。从震源特征来看, 滨海断裂带东部比如1604年泉州以及1600、1918年南澳地震区域, 主要以右旋逆冲滑动为主要发震机制(彭承光等, 2017); 而西段比如1605琼海地震, 主要是右旋正断裂滑动为主(陈恩民和黄咏茵, 1989); 然而中段珠江口盆地, 历史上没有发生过震级超过6级以上的地震(孙金龙等, 2012), 2020年1月4日该区域发生了一起 M_w 3.7级的走滑型地震, 断层破裂面走向为78°, 与NEE向的滨海断裂带一致(Chen等, 2021)。以上区域性地震反映的震源机制表明, 滨海断裂带主应力的方向为北西和南东向, 但受临近构造结构以及局部应力的影响而从东向西逐步调整。东部从牛山岛往西到南澎列岛区域, 受东边菲律宾俯冲带的影响, 应力状态为剪切与挤压(徐辉龙等, 2006); 西部雷州-琼海区域, 在北部湾盆地和琼东南盆地受西边红河大断裂的影响下, 应力状态为剪切与拉张(陈恩民和黄咏茵, 1989); 而中部珠江口盆地处于东部菲律宾俯冲带(挤压)和西部红河断裂(拉张)的

图7 华南沿海滨海断裂带及历史强震分布

历史地震位置和等级引自曹敬贺等(2014), F8~F15断层位置引自Ren等(2016)

中间位置(孙金龙等, 2012), 小地震表现为纯走滑型, 正断层和逆冲滑动并不明显(Chen等, 2021). 近些年来南海北部陆缘微小地震活动情况主要可分为4个区域, 其中, 闽南-粤东沿海、阳江、雷琼区域为地震活跃区; 而珠江口盆地异常平静, 微震稀疏(孙金龙等, 2012). 不同于西部和东部, 邻近珠江口担杆列岛的滨海断裂片区长期以来缺失中强震, 历史上也未曾发生过6级的地震, 成为滨海断裂带上一个地震空缺片区(孙金龙等, 2012). 由于该区域处在离东部菲律宾俯冲带的挤压与西部红河大断裂剪切、拉张构造骨架的中间位置, 很可能导致该段断层的能量累积速率相对于东部和西部断裂片区较慢, 因此中强地震周期偏长. 如果该部分断层继续积累能量, 将来很有可能成为潜在的强震源区, 爆发强震的风险较高.

近些年来随着海陆地震联测技术的发展与应用, 实现了断层结构探测从陆地拓展到海域, 进而获得断层结构更准确和完整的认识(赵明辉等, 2003, 2004; 徐辉龙等, 2006; Xia等, 2012; 孙金龙等, 2012). 滨海断裂带的海陆联测研究发现, 在闽南-粤东沿海与珠江口盆地担杆列岛区域, 断裂带表现为一条宽6~10km, 自海底向南东倾的连续低速区, 向下一直延伸到莫霍面. 断裂带西北部为华南亚板块的典型陆壳, 厚约30km, 东南部为南海亚板块减薄型陆壳, 厚约25~28km. 深度约10~18km的下地壳底部存在厚约3~4km的低速层, 该低速层由南海海盆向北部陆架区逐渐减薄, 最后尖灭于滨海断裂带附近(徐辉龙等, 2010; 曹敬贺等, 2014). 进一步的地震和断层结构关系的研究表明, 地震往往发生在低、高速区的边界或过渡区, 并邻近共轭断层的交错位置, 例如1918年7.5级南澳地震(徐辉龙等, 2006; Xia等, 2020)与珠江口滨海断裂带担杆列岛部分的微震(Xia等, 2012). 壳内低速层的形成可能与高温高压环境下的部分熔融有关, 成为链接上下地壳的软弱过渡区(杨晓松, 2003), 起到应力均衡的作用, 扮演着应力导层的角色, 在断裂带和与其共轭的NW向断层传递应力, 并在交切的薄弱带形成应变集中, 导致断层的瞬间错动, 诱发地震(Shelley和Segall, 2000; 曹敬贺等, 2014), 这也很可能是1918年7.5级南澳大地震的破裂机制(徐辉龙等, 2006). 该低速带与滨海断裂共轭断层的复杂衔接构造结构, 被不同学者们认为是南海北部陆缘重要的应力和应变积累区域, 是强震孕育和发生的重要动力来源(徐辉龙等,

2006, 2010; Cao等, 2018).

3.2 滨海断裂带地震海啸灾害特征分析

由于滨海断裂带所处位置水深较浅(约30~50m), 对其灾害的关注重心主要在地震灾害, 而非海啸灾害. 我们在这里列出几个涉及此处海啸灾害评估的代表性研究. Ren等(2014)根据中国地震动参数区划图(GB18306-2015), 结合区域地质构造、地震活动性和应力场等参数划分了滨海断裂带8个潜在海啸源(图7): 自东向西分别为泉州海外断裂(F8)、厦门海外断裂1~3(F9~F11)、滨海断裂南澳段(F12)、台湾浅滩西南断裂(F13)、珠-坳中部断裂和担杆列岛外段(F14、F15), 并设定东部5处断层(F8~F12)的震级上限 M_w 8.0、西部3处断裂(F13~F15)的震级上限为 M_w 7.5, 进行了概率性海啸灾害评估(Ren等, 2016). 研究结果给出百年内香港和澳门遭遇0.5m海啸波的概率为5~10%, 而厦门和泉州高达30~40%, 厦门和泉州出现1m海啸波高的回归周期约为400~600年. 近期Yuan等(2021)将滨海断裂带地震作为重要海啸源考虑到整个中国沿海的概率性海啸灾害评估中. 这里需要指出的是, 现有滨海断裂带研究中仍存在很多未知, 包括潜在在发震区域的准确位置、精细断层几何学结构、最大可能震级和回归周期、震源机制等参数不确定性均很大, 这些参数对评估结果起着决定性的影响. 例如出于偏向安全角度考虑, 目前的模型均相对保守地将震源机制设置为逆冲型地震, 但实际上根据我们前面的分析, 滨海断裂带地震的震源机制自东向西可能存在从逆冲走滑到正断走滑的调整, 不同的震源机制将直接决定其触发海啸的规模和特征, 从而影响其致灾性.

接下来我们以历史资料和研究相对较多的1918年南澳地震为例, 基于李琳琳等(2022)的研究, 探讨滨海断裂带地震海啸的水动力学特征和不同震源机制地震对其触发海啸能力的影响. 在有历史记录滨海断裂带强震中, 1918年2月13日发生在南澳岛附近的 M 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广东和福建省沿海出现的一些海啸现象. 其中在《中国地震历史资料汇编》中提到“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, 鱼船多遭没; 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。”(谢毓寿和蔡美彪, 1983)。“海潮退而复涨”和渔船触底等现象说明在近震源的沿海一侧首先出现的是伴随同震沉降而发生的负波。李琳琳等(2022)基于历史文献资料和最新的地球物理探测, 约束1918年地震参数(震中、破裂范围、断层几何等), 通过对多组地震参数的海啸进行模拟, 揭示该地震事件引发的海啸影响及其特征。指出该地震事件引发的海啸波主要影响范围集中在距离震源最近的南澳岛南部和东部, 南澳青澳湾波高可达3~4m, 其次是福建省东山县和广东省汕头一带(图8)。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3h和4~5h(图8)。受限于发震位置的水深仅有30~50m, 滨海断裂带地震往往仅能触发局地海啸, 但该区域的地震产生的海啸波具有两个需要关注的危险特征: (1) 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的将海啸波“捕获”在陆架区域, 使海啸波在海岸线和陆坡之间的陆架区域来回反射, 产生长达48h以上的超长时间振荡(图9); (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。同时近海强震触发沿海陡峭山体崩塌、滑坡或海底滑坡进而再次触发海啸的灾害链现象也需要特别关注。

李琳琳等(2022)对1918年历史地震关键参数的敏感性分析表明, 海啸的规模和影响范围受控于地震的

发震机制和断层几何特征, 逆冲和正断机制为主的地震触发海啸的能力远大于走滑为主的地震(图10)。目前我们对滨海断裂带精细几何结构和活动习性认识严重不足。不同于陆域的断层活动性研究, 海底深部断层由于海水覆盖, 更增加了探测和研究的难度, 但是海域的连续沉积记录有可能比陆地上更好地保持地震遗迹。根据海域沉积作用与断层位错的关系研究海底断层的活动性, 进而揭示强震的发生规律是值得探索的重要科学问题。以南海北部海域活动断裂, 特别是具有发生强震潜在危险的滨海断裂带和陆坡断裂带等主要地震构造为研究对象开展海洋地球物理调查, 联合三维的高清海陆地震剖面、海底断层形变的测量及地震的观测, 全面获取海域断裂带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, 实现对断层活动性质、分段性和孕震机制更深入的认识, 为评价南海北部潜在强震和海啸风险提供科学依据。

4 海底滑坡及其潜在海啸灾害

4.1 南海海底滑坡分布和历史事件分析

早在2007年, 海底资料仍然比较匮乏时, 陈颢等(2007)便指出南海的大型海底滑坡是南海主要的海啸源之一。近十几年以来, 随着深水调查和油气勘探的逐步深入, 高精度多波束海底地形和高分辨率地震资料

图8 1918年地震触发海啸最大波高分布和传播到时图

图 9 1918 年地震触发海啸在华南沿海典型站点的模拟时序图

改自李琳琳等(2022)

图 10 不同地震滑移角产生的最大海啸波高对比

模型中设置两个地震的走向均为70°, 倾角为75°. 改自李琳琳等(2022)

共同显示, 南海域内分布有大量的海底滑坡(图1), 尤其是在陆坡区域, 南海东、南、西、北陆坡均存在规模和数量不等的海底滑坡体, 并且多数滑坡体所在区域都记录有多期古滑坡(Sun等, 2018a; Wang等, 2018). 已发现的滑坡体中, 以距离中国大陆海岸线较近的南海北部陆坡数量最多、规模最大, 自西向东分布着多个大型海底滑坡体及数以百计的中小规模滑坡体(Wang等, 2018; Wu等, 2018; 吴时国等, 2019), 大型滑坡体包括琼东南盆地内的琼北滑坡(Li W等, 2015)、华光滑坡(Wang等, 2013)、珠江口盆地的白云滑坡(例如, Wu等, 2011; Li W等, 2014a, 2014b; Sun等, 2017, 2018a, 2018b)和台西南盆地的九龙滑坡(Wu等, 2011).

南海北部目前研究较多的中小规模滑坡主要分布在位于陆架波折带和神狐峡谷趾部的神狐滑坡(He等, 2014; Zhou等, 2018; 吴时国等, 2019); 南部发现的大型滑坡位于巴兰三角洲北部和南沙海槽西南部的曾母暗沙巨型滑坡(Gee等, 2007; 任金锋等, 2021). 受构造活动影响, 南海西侧和东侧靠近越南和菲律宾的陆坡比南海北部陆坡更为陡峭, 海底滑坡数量多, 但规模相对较小(Armada, 2016). 除了陆坡区域的滑坡, 南海内部碳酸盐台地周边也有大量滑坡分布(Wang等, 2018), 比较典型的包括西沙永兴岛附近的永兴滑坡(李学杰等, 2017)和中沙群岛的滑坡(Huang等, 2020). 这些已有的大量滑坡数据为我们后续进行滑坡海啸灾害评估

工作积累了丰富的基础资料,同时也说明了开展滑坡相关灾害研究的紧迫性。

海底滑坡的灾害体现在滑坡本身可以直接对深海油气开发平台、输油管道、海底电缆等海底工程设施造成破坏(Fine等, 2005; Hsu等, 2008),同时由滑坡体运动产生的剧烈垂向水位扰动又可能会产生破坏力更大的局地海啸,从而对人口和基础建设密集的沿海地区造成巨大的安全威胁(Løvholt等, 2019; McSaveney等, 2000)。最典型的例子是2006年12月26日,中国台湾南部规模7.0级的屏东地震触发海底滑坡及浊流,导致台湾西南外海高屏峡谷至马尼拉海沟间的近20根海底光缆被高流速浊流($3.7\sim 20\text{ m s}^{-1}$)冲断(Hsu等, 2008; Su等, 2012),严重影响东南亚甚至全球通信(电话、互联网、金融市场信息等)达1个多月之久。这次事件是继1929年11月18日大西洋北部Grand Banks滑坡冲断12根连接北美和欧洲海底电缆事件(Fine等, 2005)之后,又一次导致海底光缆被大规模破坏的经典案例。

从历史时期来看,南海域内可能有海底滑坡贡献的海啸事件包括1992年1月4日在海南岛南端的海啸事件(Ren等, 2019; 于福江等, 2020)和1781年发生在台湾西南部台南和高雄一带台南大海啸事件(Li L等, 2015)。其中,1992年的海啸事件伴随 $M_w 3.7$ 级地震发生,是南海海域内中国首次通过仪器监测到的事件。由于海南榆林站监测到的海啸波幅为78cm(于福江等, 2016),和地震震级极不匹配,推测海啸生成的真实机制是由地震触发了一定规模的海底滑坡,滑坡又触发海啸形成的灾害链生效应(Ren等, 2019)。1781~1782年的台南大海啸是南海域内记录到的伤亡最大的一次海啸事件,发生在18世纪末台湾西南部台南和高雄一带,这次事件分别以英文(Mallet, 1854)、法文(Perrey, 1862)和中文(陈国瑛, 1830)记载于多国的历史文献中。中文文献《台湾采访册》中描述“乾隆四十六年四、五月间,时甚晴霁,忽海水暴吼如雷,巨涌排空,水涨数十丈,近村人居被淹……”说明该事件突发于乾隆年间天气晴朗的日子,排除了该区域最常见的台风和风暴潮的可能性。再根据法文记载,此次事件导致台湾西南部三个重镇和二十余个村庄被毁、上万人死亡(详见Li L等(2015)附件中的中文翻译),说明该事件的影响范围波及台湾整个西南沿海,由于历史文献本身并未提及海啸成因,加上同时期内在华南大陆沿岸和菲律宾等临近海岸并未有海啸记录,导致此次海啸的触

发机制成为未解谜团。Li L等(2015)结合原始文献中描述的受灾规模、俯冲带断层结构和台西南盆地的构造环境,利用数值模拟方法研究了台湾南部海域俯冲带地震、海底滑坡和火山等多种海啸源产生的海啸波特点,指出这次重大历史海啸事件很有可能也是由地震引发的海底滑坡造成(Li L等, 2015)。考虑到台湾南部地处马尼拉俯冲带北端,地震频繁,同时又有陆域大量的泥沙输入到陡峭的陆坡和复杂的峡谷系统中,得出这一结论并不意外。事实上,这类由中小规模地震触发海底滑坡从而产生致命海啸的案例在全球范围内曾多次发生,如1998年7月17日Papua New Guinea (PNG)的海啸事件(Tappin等, 2001; Synolakis等, 2002)和2018年发生在印尼帕卢湾的海啸事件(Liu等, 2020; Schambach等, 2021)。南海北部陆缘发育有上千公里长的滨海断裂带和陆架边缘断裂带等活动断层,同时陆坡发育了大量海底滑坡,需密切关注由断层活动引发的海底滑坡和与之相关的次生灾害的发生。由于滑坡往往分布在距离海岸线更近的陆坡或岛礁周边,一旦触发海啸,其突发性更强,海啸的到时更短,现有海啸预警系统难以有效预警。这使得对这类潜在海啸源提前进行量化灾害评估,确定其产生的海啸波可能的到达时间、波高和淹没范围显得尤为重要。

4.2 海底滑坡灾害评估现状

同地震海啸类似,滑坡海啸灾害的评估也分为基于典型滑坡情景的评估和基于大量滑坡事件的概率性评估。与地震海啸相比,海底滑坡形成海啸的机制更为复杂,其产生灾害性海啸的大小和滑坡体的初始深度(Fine等, 2003; Li等, 2019)、滑动形态(滑动、滑塌、碎屑流、浊流等)(Zengaffinen等, 2020)、滑动速度与加速度(Harbitz等, 2014)、滑坡体材料组成和流变特性等因素紧密相关(Løvholt等, 2015; Løvholt等, 2017; Schambach等, 2018; Kim等, 2019)。对海底滑坡灾害评估主要依赖计算流体力学模拟手段,评估的程序通常首先基于二维/三维地震数据、多波束数据、钻孔等地球物理资料对滑坡体进行三维重构,根据滑坡体不同的组成材料和滑动形态,将滑坡体假定为刚体(Enet和Grilli, 2007)、黏性泥石流(Grilli等, 2017; Ren等, 2019)、颗粒流及多相流(Si等, 2018; Shi等, 2019; Zhang等, 2021a, 2021b)等不同流体力学模型实现滑坡滑塌动态过程复演(Kim等, 2019; Li等, 2019),考虑滑

坡过程与上覆水体的相互作用生成初始海啸波高, 再采用非线性浅水波方程(如COMCOT、GEOCLAW)或 Boussinesq 类型方程(如FUNWAVE、COULWAVE)对海啸波传播及淹没过程进行模拟从而实现海啸灾害评估(Geist和Lynett, 2014; Løvholt等, 2020; Behrens等, 2021).

目前对南海滑坡引发的海啸灾害评估刚刚起步, 现有研究主要针对白云滑坡(Sun和Huang, 2014; Li等, 2019; Ren等, 2019; Sun和Leslie, 2020)、曾母暗沙滑坡(Tan等, 2017; 任智源等, 2018)和台西南滑坡(Li L等, 2015)等滑坡开展了典型情景的灾害评估. 例如针对白云滑坡的海啸灾害评估, 已有研究分别将滑坡体材料假定为刚体(Sun和Huang, 2014; Sun和Leslie, 2020)、黏性泥流(Li等, 2019)和基于Herschel-Bulkley流变模型的泥石流(Ren等, 2019)进行模拟, 尽管不同研究中设定的滑坡材料、滑坡规模和初始分布均有差异, 但这些研究的结果共同揭示了海底滑坡对华南沿海的灾

害性影响不可忽视.

接下来以南海北部珠江口盆地白云滑坡和南部南沙海槽曾母暗沙滑坡两个巨型滑坡为例来展示海底滑坡的潜在灾害影响. 两个滑坡均位于开敞性陆坡: 白云滑坡区和南沙海槽滑坡区, 两处陆坡区域在地质历史上都曾反复发生过巨型滑坡事件(Gee等, 2007; Sun等, 2018b). 非常有趣的是, 通过高精度地震资料和海底地形数据三维重构分析(Gee等, 2007; Sun等, 2018a; 任金锋等, 2021), 两个滑坡区目前重构出的最大滑坡事件具有很强的对比性(图11). 白云滑坡事件和曾母暗沙滑坡事件的体积分别为 1035km^3 (Sun等, 2018a)和 1200km^3 (Gee等, 2007), 而其面积分别为 5500km^2 (Sun等, 2018a)和 $5300\sim 6300\text{km}^2$ (Gee等, 2007; 任金锋等, 2021). 通过三维非静压模型NHWAVE(Ma等, 2012)和基于完全非线性Boussinesq方程开发的FUNWAVE-TVD(Shi等, 2012)数值模型组合, 将滑坡体假定为黏性泥流, 对两个滑坡的运动变形过程和两者产生海啸的

图 11 白云滑坡和曾母暗沙滑坡的初始厚度分布和其剖面坡度图

能力进行描述和评估。我们发现虽然白云滑坡和曾母暗沙滑坡的体积和面积相当, 但曾母暗沙滑坡的海啸触发能力远大于白云滑坡(图12)。这其中最重要的影响因素是滑坡的初始水深分布和地形坡度。白云滑坡的覆盖水深1000~3000m, 平均坡度约为 0.6° ~ 0.7° ; 而曾母暗沙滑坡的覆盖水深为200~2500m, 坡度在滑坡头部区域可达 2.6° , 自上而下逐渐减缓为 1.3° 和 0.4° (图11c和11d)。滑坡源区的坡度决定了滑坡体的初始加速度和滑动速度, 而初始水深决定其是否可以有效扰动水体, 当滑坡体下滑速度和其触发的海啸波传播速度接近时, 产生共振叠加效应, 波高达到峰值(Fine等, 2003; Yavari-Ramshe和Ataie-Ashtiani, 2019)。

研究结果显示海底巨型滑坡事件会引发以下三方面的灾害。(1) 滑坡体高速下滑过程中对滑动区域内海底基础设施的破坏: 滑坡体在陆坡上的覆盖面积大, 达数千平方千米, 滑移速度可达 $20\sim 35\text{ m s}^{-1}$, 足以冲断海底电缆, 并对海洋平台桩基等造成破坏(Li等, 2019)。(2) 滑坡区域上方海域巨浪对附近海洋工程的影响: 滑坡滑动过程中, 会在其上方海域产生高达数十米的海啸波, 如白云滑坡产生最大海啸波高8~15m, 这样的灾害性波高可以出现在几十到上百公里范围的海域, 包含紧邻白云滑坡的神狐峡谷, 会对附近的石油平台和天然气开采设施造成灾害性影响(图12)。(3) 在南海北部, 白云滑坡产生的海啸波将对粤港澳大湾区密集

的人口和基础设施产生重大影响: 在地震海啸传播过程中观察到的粤港澳大湾区前方陆架区的海啸波汇聚现象在白云滑坡触发的海啸传播中有更加明显的体现。这一现象是由海啸传播的方向性和珠江口门前大陆架局部的地形隆起共同影响所致。而南海南部, 一旦发生类似曾母暗沙滑坡规模的事件, 其产生海啸将在半小时到一小时内传播至南沙诸岛, 局部高达10~20m的海啸波将会对南沙群岛有毁灭性影响(图12)。

相对于地震海啸的概率性灾害评估(S-PTHA), 滑坡海啸的概率性灾害评估研究(L-PTHA)进展缓慢, 南海的滑坡海啸概率性评估工作尚未开展。全球范围内, 虽然现有的研究多以典型场景的确定性灾害评估为主(例如, Geist等, 2009; Leslie和Mann, 2016; Grilli等, 2017; Li等, 2019), 但在一些起步早、资料积累较丰富的海域, 也逐渐开展了L-PTHA的相关研究, 如美国东海岸(Grilli等, 2009; Geist和Parsons, 2010; ten Brink等, 2014)、墨西哥湾(Pampell-Manis等, 2016)、加拿大(Leonard等, 2014)、新西兰(Mueller等, 2016; Lane等, 2017)和地中海(Grezio等, 2012, 2020)等。评估的方法通常以蒙特卡罗方法为核心算法, 首先根据相应海域海底滑坡数据库得出该区域不同地质环境的滑坡体数量、面积、体积和深度等主要参数之间的关系(ten Brink等, 2006, 2014; Urgeles和Camerlenghi, 2013), 然

图12 白云滑坡(a)和曾母暗沙滑坡(b)产生的最大海啸波高分布及海啸波到时

后将潜在滑坡区域划分成一定间距的剖面, 并针对每一个剖面采用蒙特卡罗的方法随机选取滑坡体参数, 建立滑坡事件集, 最后通过对滑坡事件集中的事件进行海啸计算得出近岸所研究区域的海啸灾害(Grilli等, 2009; Pampell-Manis等, 2016). 评估过程中每一个环节需进行不同程度的简化假定, 比如将滑坡的重现期转化为其主要触发机制(地震)的回归周期(ten Brink等, 2009), 通过长波理论公式在理想化的大陆坡架地形上的波高估算来代替海啸传播的模拟等(Grilli等, 2009).

L-PTHA主要受两个瓶颈的限制: (1) 海底滑坡时空分布资料匮乏, 尤其是发生频率难以确定, 绝大多数滑坡体缺乏可靠的滑坡发生时间记录(Grezio等, 2017), 大型海底滑坡的重现期可能在几千年甚至几万年(Urgeles和Camerlenghi, 2013; Urlaub等, 2013; Pope等, 2015); (2) 海底滑坡触发海啸的机制复杂多样, 不同类型的滑坡触发海啸的能力差异巨大, 滑坡的体积、初始分布、速度/加速度和流变特性均会对其触发海啸的大小产生不同程度的影响, 产生和传播过程的复杂性使开展海底滑坡的概率性灾害评估具有很大不确定性(Løvholdt等, 2020; Behrens等, 2021). 尽管南海海域内滑坡的时空分布方面已开展大量工作(Wang等, 2018), 但由于南海海域广而且地形多样, 滑坡体在不同的构造环境(峡谷系统、开敞陆坡)具有不同的发育规模以及滑坡体组成(碳酸盐、黏性/非黏性泥沙), 从而导致其触发机制、失稳运动规律和滑动形态多样化, 所以现有资料尚不足以开展南海的滑坡海啸概率性评估. 未来需要更加全面的获取域内海底滑坡的空间分布、发生频率、滑坡体关键特征参数(材料组成、体积、长度、宽度、厚度、分布水深和坡度等), 深入分析滑坡的重要触发机制和潜在滑坡规模的关系, 如南海北部活动断裂带地震产生地震动峰值加速度与滑坡的触发关系, 天然气水合物分解与滑坡失稳规律研究等, 将会是未来的重点研究方向.

5 南海古海啸沉积记录

无论是马尼拉俯冲带、滨海断裂带的地震海啸灾害评估, 还是海底滑坡触发的海啸灾害评估, 面临的最大难题都是需要回答南海过去是否经历过大规模灾害性海啸事件, 以及类似事件的发生频率. 海啸灾害发生的间隔周期较长, 以俯冲带地震为例, 从全球俯冲带的

地震活动性来看, 大地震或特大地震的复发周期往往在几百年甚至上千年(Satake和Atwater, 2007; Sieh等, 2008; Philibosian和Meltzner, 2020), 如此长的周期, 除日本等极少数国家保留有较长的海啸文字纪录外, 大多数沿海地区都面临因历史资料匮乏而无法确定此类极端灾害的发生规律这一共同难题.

从历史记录来看(图1), 南海东北部可能发生不同信度的海啸事件约58次(Lau等, 2010), 菲律宾火山地震研究所官方记录了1589~2012年间41个可信度较高的海啸事件(Bautista等, 2012), 越南沿海5次海啸事件(Vu和Nguyen, 2008), 东南亚区域39条火山海啸记录(Paris等, 2014). 在空间分布上, 这些历史事件主要集中在南海东部中国台湾(Lau等, 2010)和菲律宾周边区域(Bautista等, 2012), 尤其是东部沿海地区, 这些区域自身构造活动比较强烈同时暴露于环太平洋俯冲带地震海啸影响范围内. 相比而言, 南海内部的海啸记录较少, 其中最严重的一次事件发生在1781年5月台湾台南和高雄一带, 海啸波高达“数十丈”, 不同资料来源显示死亡人数可能达到4~5万人. 华南沿海提及海啸现象或可能伴有海啸发生的历史事件包括1076年广东潮州的“海潮涨溢”事件、1604年福建泉州大地震、1605年琼州大地震(徐起浩, 2007)、1918年广东南澳地震(彭承光等, 2017)和1992年南海海啸事件(于福江等, 2016). 吕宋岛西侧马尼拉俯冲带发生过多次中强地震引发的海啸事件(图1), 自北向南包括1983年 $M_s 6.5$ 地震、1934年 $M_s 7.6$ 地震、1924年 $M_s 7.0$ 地震、1999年 $M_s 6.8$ 级地震和1828年 $M_s 6.6$ 级地震, 但这些事件记录到的海啸波高均在1~2m(Bautista等, 2012). 由于历史原因, 越南的历史文献比较稀少, Vu和Nguyen(2008)提到近一百多年内的5次疑似海啸记录分别发生在1877年、1882年、19世纪末至20世纪初、1923年和1978年, 其中对1882年事件发生区域的现场勘察发现当时海啸波可能高达18m. 考虑到历史时期观测手段的局限性和不同国家历史资料的记录标准和保存程度不同, 南海区域的历史海啸记录可信度参差不齐, 可信度相对较高的记录主要集中在1589年(菲律宾)/1604年(中国)之后的四百多年内.

在历史记录之外, 重构更长时间序列海啸记录最有效的手段就是依赖古地震或者古海啸地质记录(邱中炎等, 2009; 杨文卿等, 2021). 海啸波传播至浅水和近岸时, 往往会携带大量海域或沿岸泥沙、砾石、海

洋生物、微型生物等上岸而在沿海地区留下蛛丝马迹,并在有利环境下得以长期保存形成地质记录(Paris等, 2010; Goff等, 2011; Goto等, 2012; Richmond等, 2012). 学者们通过沿岸陆上泥沙沉积、砾石沉积、有孔虫等微型生物壳体、近海沉积、地震触发的深海浊流沉积等识别指标,利用地质学、地球物理学和沉积学等多学科手段重建了印度洋苏门答腊-安德曼俯冲带(Jankaew等, 2008; Meltzner等, 2010; Maselli等, 2020)、北美Cascadia俯冲带(Satake等, 2003; Atwater等, 2005; Kelsey等, 2005)、千岛海沟(Nanayama等, 2003, 2007; Satake等, 2005)和南美智利俯冲带(Cisternas等, 2005)等多个俯冲带的地震和海啸事件. 同时通过对海啸沉积物物理特性、垂向及横向颗粒粒径分布及厚度、覆盖范围等参数的反演分析和泥沙输运正向模拟(Li等, 2012, 2014; Sugawara和Goto, 2012),可以进一步重建海啸波的流速、波高、淹没距离等水动力参数,从而确定海啸的影响范围和破坏程度,揭示海啸发生机制(Dominey-Howes等, 2006; Spiske等, 2010; Srisutam和Wagner, 2010; Jaffe等, 2011; Li等, 2014).

目前南海的古海啸沉积研究还非常有限,一方面是因为南海位于全球台风最活跃的西北太平洋海域,沿海地区极端风暴潮事件频发(Yang等, 2019),这使得如何区分海啸沉积和风暴潮沉积成为研究南海海啸沉积的主要障碍(杨文卿等, 2021);另一方面是因为南海周边沿海地区大多经济发达、人口密集,基础建设、填海造陆、近海养殖等人类活动破坏了沿海低地可能保留的海啸沉积. 目前发现的疑似海啸沉积的记录均在受人类活动干扰较少的海岛上(杨文卿等, 2021),包括西沙群岛东岛(Sun等, 2013)、南澳岛(杨文卿等, 2019)、吕宋岛西部海岛Badoc岛(Ramos等, 2017)和澎湖列岛(Lu等, 2019). 关于沉积记录的详细分析请参见杨文卿等(2021)对南海古海啸重建与海啸沉积研究进展的综述. 值得注意的是,这几处地质记录样品中均包含距今大约1000年左右的沉积,这是否意味着这些沉积记录形成于同一次海啸事件,是需要深入探索的问题. 如果这些沉积记录的确伴随单次海啸事件发生,那么此次海啸事件的规模需足以影响整个南海北部,而能产生如此大规模海啸事件的海啸源,很大可能源自马尼拉俯冲断层大范围的断层破裂(Qiu等, 2019; 杨文卿等, 2021). 在一些保存条件好的区域,海啸沉积记录可以重构全新世时期的海啸事件(Rubin等, 2017;

Nakanishi等, 2020),而目前南海海域尚未发现这样的沉积记录,我们期待未来多学科领域的科学家们通过沉积学、地球化学、地球物理和流体力学模拟等交叉手段在沿海、近海和深海有利的沉积环境中继续发掘出更多古海啸记录,为南海地震和海啸灾害的科学评估提供可靠的数据支撑.

6 总结和展望

本文对南海域内马尼拉俯冲带地震、滨海断裂带地震和海底滑坡等潜在海啸灾害研究进行了综述,并针对一些代表性地震和滑坡进行了详细的案例分析,形成以下几点认识:

(1) 马尼拉俯冲带地震是南海域内最有可能触发区域性大海啸的海啸源,受海啸波传播方向性和海底地形共同影响,包括广东、福建、海南、广西等地的华南沿海、台湾和南海内部各岛礁均将遭受不同程度的灾害性影响,其中广东省沿海是受海啸威胁最严重的区域,而珠江口陆架区域局部地形隆起造成的海啸波汇聚效应又使粤港澳大湾区成为风险更高的区域. 另外,南海封闭式海盆导致海啸波在大陆架区域和海盆内的长时间震荡和能量滞留,给华南沿海带来长周期的海啸灾害影响. 当前我们对马尼拉俯冲带孕震特征、地震活动性、俯冲带浅部近海沟断层耦合度和发震机制认知有限,现有海啸灾害评估结果仍存在很大不确定性,未来需通过海底形变观测、二维/三维深地震探测、大洋钻探等多学科探索手段研究俯冲带主断层/浅部增生楔分支断层的断层结构、运动规律,以及随深度变化的岩石性质和孕震耦合状态.

(2) 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波在从浅海传播至深海过程中,在陆架边缘区域受陡降陆坡的影响会发生强烈反射,从而被“捕获”在陆架区域,产生超长周期的震荡,同时海啸在沿海各地剧烈的水位涨落引发的海啸强流会对沿海重要基础设施、港口、海产养殖区等产生破坏性影响. 虽然南海北部海域活动断裂探测已取得大量研究成果,但海域活动断裂的准确位置、精细构造、发震规律和活动性的认识依然薄弱,因此亟需针对包括滨海断裂带在内的南海北部活动断裂开展综合性海洋地球物理调查,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, 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。

(3) 南海海域海底滑坡分布范围广、规模大、数量多、形成环境多样, 其触发海啸具有突发性强和难以预警的特征, 大规模海底滑坡会对海底光缆、海洋平台、海洋工程等海域基础设施造成严重威胁, 同时其产生的海啸波将在滑坡区上方局部海域达到数十米, 并在靠近滑坡区的沿海地区形成灾害性影响。目前南海海域的滑坡海啸研究仍处在起步阶段, 需进一步通过海底多波束地形测量、三维地震、钻孔取样和原位测量等手段获取海底滑坡的时空分布规律, 建立海底滑坡数据库, 融合深海科考调查、物理模拟和数值模拟技术, 加强对海底滑坡触发机制、失稳规律、发生频率等研究和探测, 揭示海底滑坡的形成机理、运动学特征与灾害效应。

南海海啸灾害研究的难点关键在于其源头——地震和滑坡的发生规律, 同时海啸波在深海和近岸传播过程中的水动力学特征(Ren等, 2015; 刘桦等, 2015; 王培涛等, 2016)、泥沙输运和沉积特征(杨文卿等, 2021)以及淹没过程中对沿海建筑物的破坏作用(沈佳和刘海江, 2018)都是需要深入开展研究的方向。和陆域的同类灾害相比, 发生在海域的地震和滑坡更加频繁、规模更大, 然而受限于探测技术水平和成本, 我们目前对这些灾害的发生规律、致灾机制、时空分布等认知极其有限。虽然海啸发生频率较低, 但与历史时期相比, 中国现今沿海地区人口和基础设施分布更加密集、经济活跃, 很可能会出现小海啸大灾难的情况, 同时深海油气开发、海洋渔业发展和岛礁建设等需求也使海域地震、滑坡和海啸等海洋地质灾害的研究具有十分重要的意义, 有助于提高中国南部沿海及深海岛礁的灾害应急响应和防灾抗灾能力, 减少灾害损失, 是面向国家重大需求和面向人民生命财产安全的重要保障。

致谢 非常感谢责任编辑对本文的认真审查, 感谢两位匿名审稿人提出的建设性意见。

参考文献

安超. 2021. 海啸和海啸预警的研究进展与展望. 中国科学: 地球科学, 51: 1–14

- 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙, 夏少红. 2014. 珠江口海域滨海断裂带的地震学特征. 地球物理学报, 57: 498–508
- 陈传绪, 吴时国, 赵昌奎. 2014. 马尼拉海沟北段俯冲带输入板块的不均一性. 地球物理学报, 57: 4063–4073
- 陈恩民, 黄咏茵. 1984. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述. 华南地震, (4): 14–35
- 陈恩民, 黄咏茵. 1989. 1605年海南岛琼州大地震的震害特征和震害构造研究. 地震学报, 11: 319–331
- 陈国瑛. 1830. 台湾采访册
- 陈颢, 陈棋福, 张尉. 2007. 中国的海啸灾害. 自然灾害学报, 16: 1–6
- 高金尉, 吴时国, 姚永坚, 陈传绪, 宋陶然, 王吉亮, 孙金, 张汉羽, 马本俊, 谢杨冰. 2018. 马尼拉俯冲带北段增生楔前缘构造变形和精细结构. 地球物理学报, 61: 2845–2858
- 李琳琳, 李发淳, 邱强, 李志刚, 张冬丽, 惠格格. 2022. 1918年南澳地震海啸影响模拟及其警示. 中山大学学报(自然科学版), 61: 27–38
- 李学杰, 王大伟, 吴时国, 王微微, 刘刚. 2017. 三沙海底峡谷识别与地貌特征分析. 海洋地质与第四纪地质, 37: 28–36
- 林间, 徐敏, 周志远, 王月. 2017. 全球俯冲带大洋钻探进展与启示. 地球科学进展, 32: 1253–1266
- 刘桦, 赵曦, 王本龙, 任智源. 2015. 海啸数值模拟与南海海啸预警方法. 力学季刊, 36: 351–369
- 刘以宣. 1981. 华南沿海区域断裂构造分析. 华南沿海区域断裂构造分析. 北京: 地震出版社
- 刘以宣. 1985. 华南沿海的活动断裂. 海洋地质与第四纪地质, (3): 13–23
- 彭承光, 李运贵, 吴名彬. 2017. 1918年南澳大地震震害构造机制分析. 华南地震, 37: 1–14
- 邱中炎, 韩喜球, 王叶剑, 陶春辉. 2009. 海啸预警与第四纪古海啸沉积记录研究进展. 海洋学研究, 27: 67–73
- 任金锋, 孙鸣, 韩冰, 任金锋, 孙鸣, 韩冰. 2021. 南海南沙海槽大型海底滑坡的发育特征及成因机制. 地球科学, 46: 1058–1071
- 任鲁川, 霍振香, 洪明理. 2014. 耦合潜源参数不确定性效应的地震海啸危险性分析——原理与方法. 海洋预报, 31: 7–13
- 任昱, 赵明辉, 张佳政, 吕作勇, 庞新明, 丘学林. 2020. 宽频带海底地震仪的地震重定位对马尼拉俯冲板片形态的约束. 地球物理学报, 63: 1927–1937
- 任智源, 赵曦, 刘桦. 2018. 基于流变理论的滑坡海啸数值模拟研究. 力学季刊, 39: 451–464
- 沈佳, 刘海江. 2018. 海啸波与直墙作用过程中波面角与冲击力的关系研究. 杭州: 全国流体力学学术会议
- 孙金龙, 徐辉龙, 詹文欢, 曹敬贺. 2012. 南海北部陆缘地震带的活动性与发震机制. 热带海洋学报, (3): 43–50
- 王培涛, 闪迪, 王岗, 于福江, 侯京明, 赵联大, 原野, 范婷婷, 任智源, 王宗辰. 2016. 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. 地球物理学报, 59: 4162–4177

- 温瑞智, 任叶飞, 李小军, 潘荣. 2011. 我国地震海啸危险性概率分析方法. 华南地震, 31: 1-13
- 吴时国, 孙运宝, 李清平, 王吉亮, 王大伟, 孙启良, 陈传绪, 谢杨冰. 2019. 南海深水地质灾害. 北京: 科学出版社
- 谢毓寿, 蔡美彪. 1983. 中国地震历史资料汇编. 北京: 科学出版社
- 熊成, 曹敬贺, 孙金龙, 夏少红, 万奎元, 范朝焰, 杨碧峰. 2018. 珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征. 地球科学, 43: 352-367
- 徐辉龙, 丘学林, 赵明辉, 孙金龙, 朱俊江. 2006. 南海东北部南澳大地震($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造. 科学通报, 51: 83-91
- 徐辉龙, 叶春明, 丘学林, 孙金龙, 夏少红. 2010. 南海北部滨海断裂带的深部地球物理探测及其发震构造研究. 华南地震, 30: 10-18
- 徐起浩. 2007. 1605年琼州大地震陆陷成海和可能的海啸. 海洋学报(中文版), 29: 146-156
- 杨文卿, 孙立广, 杨仲康, 高抒, 高月嵩, 邵达, 梅衍俊, 臧晶晶, 王玉宏, 谢周清. 2019. 南澳宋城: 被海啸毁灭的古文明遗址. 科学通报, 64: 107-120
- 杨文卿, 谢周清, 孙立广. 2021. 南海古海啸重建与海啸沉积研究进展. 地学前缘, 28: 246-257
- 杨晓松. 2003. 大陆壳内低速层成因综述. 地质科技情报, 22: 35-41
- 姚伯初. 1993. 南海北部陆缘新生代构造运动初探. 南海地质研究, (5): 1-12
- 于福江, 董剑希, 许富祥, 等. 2016. 中国近海海洋——海洋灾害. 北京: 海洋出版社
- 于福江, 原野, 王培涛, 徐志国, 赵联大, 侯京明, 王君成, 李宏伟, 范婷婷, 高义, 任智源, 孙立宁, 王宗辰, 史健宇. 2020. 现代地震海啸预警技术. 北京: 科学出版社
- 岳汉, 张勇, 盖增喜, 王腾, 赵里. 2020. 大地震震源破裂模型: 从快速响应到联合反演的技术进展及展望. 中国科学: 地球科学, 50: 515-537
- 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 叶春明. 2003. 南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望. 华南地震, 23: 20-27
- 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 夏戡原, 黄慈流, 谢剑波, 王平. 2004. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. 地球物理学报, 47: 845-852
- 钟建强. 1987. 滨海断裂带之所在及其活动性初探. 华南地震, 7: 4-10
- 朱俊江, 李三忠, 孙宗勋, 李先鹏, 李健. 2017. 南海东部马尼拉俯冲带的地壳结构和俯冲过程. 地学前缘, 24: 341-351
- Ammon C J, Kanamori H, Lay T. 2008. A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands. *Nature*, 451: 561-565
- Armada L. 2016. Crustal structure and deformation in the Manila subduction zone. *Tectonophysics*, 466: 229-240
- Atwater B F, Musumi-Rokkaku S, Satake K, Tsuji Y, Ueda K, Yamaguchi D. 2005. The orphan tsunami of 1700: Japanese clues to a parent earthquake in North America. *US Geol Surv Prof Paper*, 1707: 3-123
- Basili R, Brizuela B, Herrero A, Iqbal S, Lorito S, Maesano F E, Murphy S, Perfetti P, Romano F, Scala A, Selva J, Taroni M, Tiberti M M, Thio H K, Tonini R, Volpe M, Glimsdal S, Harbitz C B, Løvholt F, Baptista M A, Carrilho F, Matias L M, Omira R, Babeyko A, Hoechner A, Gürbüz M, Pekcan O, Yalçiner A, Canals M, Lastras G, Agalos A, Papadopoulos G, Triantafyllou I, Benckekroun S, Agrebi Jaouadi H, Ben Abdallah S, Bouallegue A, Hamdi H, Oueslati F, Amato A, Armigliato A, Behrens J, Davies G, Di Bucci D, Dolce M, Geist E, Gonzalez Vida J M, González M, Macías Sánchez J, Meletti C, Ozer Sozdinler C, Pagani M, Parsons T, Polet J, Power W, Sørensen M, Zaytsev A. 2021. The making of the NEAM tsunami hazard model 2018 (NEAMTHM18). *Front Earth Sci*, 8: 1
- Bautista M L P, Bartolome C, Bautista, Salcedo J C, Narag I. 2012. Philippine Tsunamis and Seiches. *Philippine Institute of Volcanology and Seismology*
- Behrens J, Løvholt F, Jalayer F, Lorito S, Salgado-Gálvez M A, Sørensen M, Abadie S, Aguirre-Ayerbe I, Aniel-Quiroga I, Babeyko A, Baiguera M, Basili R, Belliazzi S, Grezio A, Johnson K, Murphy S, Paris R, Rafliana I, De Risi R, Rossetto T, Selva J, Taroni M, Del Zoppo M, Armigliato A, Bureš V, Cech P, Cecioni C, Christodoulides P, Davies G, Dias F, Bayraktar H B, González M, Gritsevich M, Guillas S, Harbitz C B, Kânoğlu U, Macías J, Papadopoulos G A, Polet J, Romano F, Salamon A, Scala A, Stepinac M, Tappin D R, Thio H K, Tonini R, Triantafyllou I, Ulrich T, Varini E, Volpe M, Vyhmeister E. 2021. Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Front Earth Sci*, 9: 1
- Bilek S L, Lay T. 2018. Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, 14: 1468-1500
- Bletery Q, Thomas A M, Rempel A W, Karlstrom L, Sladen A, De Barros L. 2016. Mega-earthquakes rupture flat megathrusts. *Science*, 354: 1027-1031
- Cao J, Xia S, Sun J, Zhao F, Wan K, Xu H. 2018. Offshore fault geometries in the Pearl River Estuary, Southeastern China: Evidence from seismic reflection data. *J Ocean Univ China*, 17: 799-810
- Chamot-Rooke N, Le Pichon X. 1999. GPS determined eastward Sundaland motion with respect to Eurasia confirmed by earthquakes slip vectors at Sunda and Philippine trenches. *Earth Planet Sci Lett*, 173: 439-455
- Chen D, Wang X, Völker D, Wu S, Wang L, Li W, Li Q, Zhu Z, Li C, Qin Z, Sun Q. 2016. Three dimensional seismic studies of deep-water hazard-related features on the northern slope of South China Sea. *Mar Pet Geol*, 77: 1125-1139

- Chen H, He X, Yang H, Zhang J. 2021. Fault-plane determination of the 4 January 2020 offshore Pearl River Delta earthquake and its implication for seismic hazard assessment. *Seismol Res Lett*, 92: 1913–1925
- Cisternas M, Atwater B F, Torrejón F, Sawai Y, Machuca G, Lagos M, Eipert A, Youlton C, Salgado I, Kamataki T, Shishikura M, Rajendran C P, Malik J K, Rizal Y, Husni M. 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437: 404–407
- Davies G, Griffin J. 2018. The 2018 Australian probabilistic tsunami hazard assessment: Hazard from earthquake generated tsunamis. *Pure Appl Geophys*, 177: 1–28
- Davies G, Griffin J. 2020. Sensitivity of Probabilistic tsunami hazard assessment to far-field earthquake slip complexity and rigidity depth-dependence: Case study of Australia. *Pure Appl Geophys*, 177: 1521–1548
- Dogan G G, Yalciner A C, Yuksel Y, Ulutaş E, Polat O, Güler I ı, Şahin C, Tarih A, Kânoğlu U. 2021. The 30 October 2020 Aegean Sea tsunami: Post-event field survey along Turkish Coast. *Pure Appl Geophys*, 178: 785–812
- Dominey-Howes D T M, Humphreys G S, Hesse P P. 2006. Tsunami and palaeotsunami depositional signatures and their potential value in understanding the late-Holocene tsunami record. *Holocene*, 16: 1095–1107
- Enet F, Grilli S T. 2007. Experimental study of tsunami generation by three-dimensional rigid underwater landslides. *J Water Port Coast Ocean Eng*, 133: 442–454
- Fan W, Bassett D, Jiang J, Shearer P M, Ji C. 2017. Rupture evolution of the 2006 Java tsunami earthquake and the possible role of splay faults. *Tectonophysics*, 721: 143–150
- Fine I V, Rabinovich A B, Bornhold B D, Thomson R E, Kulikov E A. 2005. The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: Preliminary analysis and numerical modeling. *Mar Geol*, 215: 45–57
- Fine I V, Rabinovich A B, Thomson R E, Kulikov E A. 2003. Numerical modeling of tsunami generation by submarine and subaerial landslides. *Submar Landsl Tsunamis*, 21: 69–88
- Fukutani Y, Suppasri A, Imamura F. 2014. Stochastic analysis and uncertainty assessment of tsunami wave height using a random source parameter model that targets a Tohoku-type earthquake fault. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 29: 1763–1779
- Gagnon K, Chadwell C D, Norabuena E. 2005. Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Nature*, 434: 205–208
- Gee M J R, Uy H S, Warren J, Morley C K, Lambiase J J. 2007. The Brunei slide: A giant submarine landslide on the North West Borneo Margin revealed by 3D seismic data. *Mar Geol*, 246: 9–23
- Geersen J. 2019. Sediment-starved trenches and rough subducting plates are conducive to tsunami earthquakes. *Tectonophysics*, 762: 28–44
- Geist E L, Lynett P J, Chaytor J D. 2009. Hydrodynamic modeling of tsunamis from the Currituck landslide. *Mar Geol*, 264: 41–52
- Geist E, Lynett P. 2014. Source processes for the probabilistic assessment of tsunami hazards. *Oceanography*, 27: 86–93
- Geist E L, Parsons T E. 2010. Estimating the empirical probability of submarine landslide occurrence. *Submar Mass Movement Their Consequences*, 28: 377–386
- Geist E L. 2002. Complex earthquake rupture and local tsunamis. *J Geophys Res*, 107: 2086
- Gibbons S J, Lorito S, Macias J, Løvholt F, Selva J, Volpe M, Sánchez-Linares C, Babeyko A, Brizuela B, Cirella A, Castro M J, de la Asunción M, Lanucara P, Glimsdal S, Lorenzino M C, Nazaria M, Pizzimenti L, Romano F, Scala A, Tonini R, Manuel González Vida J, Vöge M. 2020. Probabilistic tsunami hazard analysis: High performance computing for massive scale inundation simulations. *Front Earth Sci*, 8: 1
- Goda K, Song J. 2016. Uncertainty modeling and visualization for tsunami hazard and risk mapping: A case study for the 2011 Tohoku earthquake. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 30: 2271–2285
- Goda K, Yasuda T, Mori N, Mai P M. 2015. Variability of tsunami inundation footprints considering stochastic scenarios based on a single rupture model: Application to the 2011 Tohoku earthquake. *J Geophys Res-Oceans*, 120: 4552–4575
- Goff J, Chagué-Goff C, Dominey-Howes D, McAdoo B, Cronin S, Bonté-Grapetin M, Nichol S, Horrocks M, Cisternas M, Lamarche G, Pelletier B, Jaffe B, Dudley W. 2011. Palaeotsunamis in the Pacific Islands. *Earth-Sci Rev*, 107: 141–146
- González F I, Geist E L, Jaffe B, Kânoğlu U, Mofjeld H, Synolakis C E, Titov V V, Arcas D, Bellomo D, Carlton D, Horning T, Johnson J, Newman J, Parsons T, Peters R, Peterson C, Priest G, Venturato A, Weber J, Wong F, Yalciner A. 2009. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *J Geophys Res*, 114: C11023
- González M, Álvarez-Gómez J A, Aniel-Quiroga Í, Otero L, Olabarrieta M, Omira R, Luceño A, Jelinek R, Krausmann E, Birkman J, Baptista M A, Miranda M, Aguirre-Ayerbe I. 2021. Probabilistic tsunami hazard assessment in meso and macro tidal areas. Application to the Cádiz Bay, Spain. *Front Earth Sci*, 9: 328
- Goto K, Sugawara D, Ikema S, Miyagi T. 2012. Sedimentary processes associated with sand and boulder deposits formed by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Sabusawa Island, Japan. *Sediment Geol*, 282: 188–198
- Grezio A, Babeyko A, Baptista M A, Behrens J, Costa A, Davies G,

- Geist E L, Glimsdal S, González F I, Griffin J, Harbitz C B, LeVeque R J, Lorito S, Løvholt F, Omira R, Mueller C, Paris R, Parsons T, Polet J, Power W, Selva J, Sørensen M B, Thio H K. 2017. Probabilistic tsunami hazard analysis: Multiple sources and global applications. *Rev Geophys*, 55: 1158–1198
- Grezio A, Cinti F R, Costa A, Faenza L, Perfetti P, Pierdominici S, Pondrelli S, Sandri L, Tierz P, Tonini R, Selva J. 2020. Multisource bayesian probabilistic tsunami hazard analysis for the gulf of Naples (Italy). *J Geophys Res-Oceans*, 125: e2019JC015373
- Grezio A, Sandri L, Marzocchi W, Argnani A, Gasparini P, Selva J. 2012. Probabilistic tsunami hazard assessment for Messina Strait Area (Sicily, Italy). *Nat Hazards*, 64: 329–358
- Grilli S T, Taylor O D S, Baxter C D P, Marezki S. 2009. A probabilistic approach for determining submarine landslide tsunami hazard along the upper east coast of the United States. *Mar Geol*, 264: 74–97
- Grilli S T, Shelby M, Kimmoun O, Dupont G, Nicolsky D, Ma G, Kirby J T, Shi F. 2017. Modeling coastal tsunami hazard from submarine mass failures: Effect of slide rheology, experimental validation, and case studies off the US East Coast. *Nat Hazards*, 86: 353–391
- Hananto N D, Leclerc F, Li L, Etchebes M, Carton H, Tapponnier P, Qin Y, Avianto P, Singh S C, Wei S. 2020. Tsunami earthquakes: Vertical pop-up expulsion at the forefront of subduction megathrust. *Earth Planet Sci Lett*, 538: 116197
- Harbitz C B, Løvholt F, Bungum H. 2014. Submarine landslide tsunamis: How extreme and how likely? *Nat Hazards*, 72: 1341–1374
- He Y, Zhong G, Wang L, Kuang Z. 2014. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea. *Mar Pet Geol*, 57: 546–560
- Heidarzadeh M, Satake K. 2014. Excitation of basin-wide modes of the Pacific Ocean following the March 2011 Tohoku tsunami. *Pure Appl Geophys*, 171: 3405–3419
- Hill E M, Borrero J C, Huang Z, Qiu Q, Banerjee P, Natawidjaja D H, Elosegui P, Fritz H M, Suwargadi B W, Pranantyo I R, Li L L, Macpherson K A, Skanavis V, Synolakis C E, Sieh K. 2012. The 2010 $M_w 7.8$ Mentawai earthquake: Very shallow source of a rare tsunami earthquake determined from tsunami field survey and near-field GPS data. *J Geophys Res*, 117: B06402
- Hsu S K, Kuo J, Yeh Y C, Tsai C H, Doo W, Ku C Y, Sibuet J C. 2008. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung Earthquake off SW Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci*, 19: 767–772
- Hsu Y J, Yu S B, Song T R A, Bacolcol T. 2012. Plate coupling along the Manila subduction zone between Taiwan and northern Luzon. *J Asian Earth Sci*, 51: 98–108
- Hsu Y J, Yu S B, Loveless J P, Bacolcol T, Solidum R, Luis Jr A, Pelicano A, Woessner J. 2016. Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine Fault system. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 7639–7665
- Huang X, Betzler C, Wu S, Bernhardt A, Eagles G, Han X, Hovland M. 2020. First documentation of seismic stratigraphy and depositional signatures of Zhongsha atoll (Macclesfield Bank), South China Sea. *Mar Pet Geol*, 117: 104349
- Huang Z, Wu T R, Tan S K, Megawati K, Shaw F, Liu X, Pan T C. 2009. Tsunami hazard from the subduction Megathrust of the South China Sea: Part II. Hydrodynamic modeling and possible impact on Singapore. *J Asian Earth Sci*, 36: 93–97
- Hubbard J, Barbot S, Hill E M, Tapponnier P. 2015. Coseismic slip on shallow décollement megathrusts: Implications for seismic and tsunami hazard. *Earth-Sci Rev*, 141: 45–55
- Jaffé B, Buckley M, Richmond B, Strotz L, Etienne S, Clark K, Watt S, Gelfenbaum G, Goff J. 2011. Flow speed estimated by inverse modeling of sandy sediment deposited by the 29 September 2009 tsunami near Satitua, east Upolu, Samoa. *Earth-Sci Rev*, 107: 23–37
- Jankaew K, Atwater B F, Sawai Y, Choowong M, Charoentitirat T, Martin M E, Prendergast A. 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455: 1228–1231
- Kelsey H M, Nelson A R, Hemphill-Haley E, Witter R C. 2005. Tsunami history of an Oregon coastal lake reveals a 4600 yr record of great earthquakes on the Cascadia subduction zone. *Geol Soc Am Bull*, 117: 1009–1032
- Kim J, Løvholt F, Issler D, Forsberg C F. 2019. Landslide Material Control on Tsunami Genesis—The Storegga Slide and Tsunami (8,100 Years BP). *J Geophys Res-Oceans*, 124: 3607–3627
- Lane E M, Mountjoy J J, Power W L, Mueller C. 2017. Probabilistic Hazard of Tsunamis Generated by Submarine Landslides in the Cook Strait Canyon (New Zealand). In: Geist E L, Fritz H M, Rabinovich A B, Tanioka Y, eds. *Global Tsunami Science: Past and Future*, Volume I. Cham: Birkhäuser. 3757–3774
- Lau A Y A, Switzer A D, Dominey-Howes D, Aitchison J C, Zong Y. 2010. Written records of historical tsunamis in the northeastern South China Sea—challenges associated with developing a new integrated database. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 10: 1793–1806
- Lay T. 2018. A review of the rupture characteristics of the 2011 Tohoku-oki $M_w 9.1$ earthquake. *Tectonophysics*, 733: 4–36
- Leonard L J, Rogers G C, Mazzotti S. 2014. Tsunami hazard assessment of Canada. *Nat Hazards*, 70: 237–274
- Leslie S C, Mann P. 2016. Giant submarine landslides on the Colombian margin and tsunami risk in the Caribbean Sea. *Earth Planet Sci Lett*, 449: 382–394

- Li H, Yuan Y, Xu Z, Wang Z, Wang J, Wang P, Gao Y, Hou J, Shan D. 2017. The dependency of probabilistic tsunami hazard assessment on magnitude limits of seismic sources in the South China Sea and adjoining basins. *Pure Appl Geophys*, 174: 2351–2370
- Li L, Qiu Q, Huang Z. 2012. Numerical modeling of the morphological change in Lhok Nga, west Banda Aceh, during the 2004 Indian Ocean tsunami: Understanding tsunami deposits using a forward modeling method. *Nat Hazards*, 64: 1549–1574
- Li L, Huang Z, Qiu Q. 2014. Numerical simulation of erosion and deposition at the Thailand Khao Lak coast during the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nat Hazards*, 74: 2251–2277
- Li L, Shi F, Ma G, Qiu Q. 2019. Tsunamigenic potential of the baiyun slide complex in the South China Sea. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 7680–7698
- Li L, Switzer A D, Chan C H, Wang Y, Weiss R, Qiu Q. 2016. How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: A case study in the South China Sea. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 6250–6272
- Li L, Switzer A D, Wang Y, Chan C H, Qiu Q, Weiss R. 2018. A modest 0.5-m rise in sea level will double the tsunami hazard in Macau. *Sci Adv*, 4: eaat1180
- Li L, Switzer A D, Wang Y, Weiss R, Qiu Q, Chan C H, Tapponnier P. 2015. What caused the mysterious eighteenth century tsunami that struck the southwest Taiwan coast? *Geophys Res Lett*, 42: 8498–8506
- Li W, Alves T M, Wu S, Völker D, Zhao F, Mi L, Kopf A. 2015. Recurrent slope failure and submarine channel incision as key factors controlling reservoir potential in the South China Sea (Qiongdongnan Basin, South Hainan Island). *Mar Pet Geol*, 64: 17–30
- Li W, Wu S, Völker D, Zhao F, Mi L, Kopf A. 2014a. Morphology, seismic characterization and sediment dynamics of the Baiyun Slide Complex on the northern South China Sea margin. *J Geol Soc*, 171: 865–877
- Li W, Wu S, Wang X, Zhao F, Wang D, Mi L, Li Q. 2014b. Baiyun slide and its relation to fluid migration in the northern slope of Southern China Sea. In: Krastel S, Behrmann J H, Völker D, Stipp M, Berndt C, Urgeles R, Chaytor J, Huhn K, Strasser M, Harbitz C B, eds. *Submarine Mass Movements and Their Consequences: 6th International Symposium*. Springer International Publishing. 105–115
- Lin A T, Yao B, Hsu S K, Liu C S, Huang C Y. 2009. Tectonic features of the incipient arc-continent collision zone of Taiwan: Implications for seismicity. *Tectonophysics*, 479: 28–42
- Liu P L F, Higuera P, Husrin S, Prasetya G S, Prihantono J, Diastomo H, Pryambodo D G, Susmoro H. 2020. Coastal landslides in Palu Bay during 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Landslides*, 17: 2085–2098
- Liu P L F, Wang X, Salisbury A J. 2009. Tsunami hazard and early warning system in South China Sea. *J Asian Earth Sci*, 36: 2–12
- Liu P L F, Woo S B, Cho Y S. 1998. Computer programs for tsunami propagation and inundation. Technical Report. Cornell University
- Liu Y, Santos A, Wang S M, Shi Y, Liu H, Yuen D A. 2007. Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea. *Phys Earth Planet Inter*, 163: 233–244
- Løvholt F, Bondevik S, Laberg J S, Kim J, Boylan N. 2017. Some giant submarine landslides do not produce large tsunamis. *Geophys Res Lett*, 44: 8463–8472
- Løvholt F, Glimsdal S, Harbitz C B. 2020. On the landslide tsunami uncertainty and hazard. *Landslides*, 17: 2301–2315
- Løvholt F, Pedersen G, Harbitz C B, Glimsdal S, Kim J. 2015. On the characteristics of landslide tsunamis. *Phil Trans R Soc A*, 373: 20140376
- Løvholt F, Schulten I, Mosher D, Harbitz C, Krastel S. 2019. Modelling the 1929 Grand Banks slump and landslide tsunami. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 477: 315–331
- Lu C H, Yen J Y, Chyi S J, Yu N T, Chen J H. 2019. Geological records of South China Sea tsunamis on Penghu Islands, Taiwan. *J Asian Earth Sci*, 177: 263–274
- Ma G, Shi F, Kirby J T. 2012. Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes. *Ocean Model*, 43–44: 22–35
- Mallet R. 1854. Third report of the facts of earthquake phenomena. Catalogue of recorded earthquakes from 1606B.C. to A. D. 1850 (1755–1784). Reports of the British Association Meetings, 22: 1–176 (1852)
- Maselli V, Oppo D, Moore A L, Gusman A R, Mtelega C, Iacopini D, Taviani M, Mjema E, Mulaya E, Che M, Tomioka A L, Mshiu E, Ortiz J D. 2020. A 1000-yr-old tsunami in the Indian Ocean points to greater risk for East Africa. *Geology*, 48: 808–813
- McCaffrey R. 2008. Global frequency of magnitude 9 earthquakes. *Geology*, 36: 263–266
- McSaveney M J, Goff J R, Darby D J, Goldsmith P, Barnett A, Elliott S, Nongkas M. 2000. The 17 July 1998 tsunami, Papua New Guinea: Evidence and initial interpretation. *Mar Geol*, 170: 81–92
- Megawati K, Shaw F, Sieh K, Huang Z, Wu T R, Lin Y, Tan S K, Pan T C. 2009. Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami. *J Asian Earth Sci*, 36: 13–20
- Meltzner A J, Sieh K, Chiang H W, Shen C C, Suwargadi B W, Natawidjaja D H, Philibosian B, Briggs R W. 2012. Persistent termini of 2004- and 2005-like ruptures of the Sunda megathrust. *J Geophys Res*, 117: B04405
- Meltzner A J, Sieh K, Chiang H W, Shen C C, Suwargadi B W,

- Natawidjaja D H, Philibosian B E, Briggs R W, Galetzka J. 2010. Coral evidence for earthquake recurrence and an A.D. 1390–1455 cluster at the south end of the 2004 Aceh-Andaman rupture. *J Geophys Res-Solid Earth*, 115: B10402
- Moore G F, Bangs N L, Taira A, Kuramoto S, Pangborn E, Tobin H J. 2007. Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation. *Science*, 318: 1128–1131
- Mori N, Goda K, Cox D. 2018. Recent process in Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (PTHA) for mega thrust subduction earthquakes. *Adv Nat Technol Hazards Res*, 47: 469–485
- Mueller C, Mountjoy J, Power W, Lane E, Wang X. 2016. Towards a spatial probabilistic submarine landslide hazard model for submarine canyons. In: Lamarche G, Mountjoy J, Bull S, Hubble T, Krastel S, Lane E, Micallef A, Moscardelli L, Mueller C, Pecher I, Woelz S, eds. *Submarine Mass Movements and their Consequences: 7th International Symposium*. Springer International Publishing. 589–597
- Mueller C, Power W, Fraser S, Wang X. 2015. Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 488–502
- Murphy S, Scala A, Herrero A, Lorito S, Festa G, Trasatti E, Tonini R, Romano F, Molinari I, Nielsen S. 2016. Shallow slip amplification and enhanced tsunami hazard unravelled by dynamic simulations of mega-thrust earthquakes. *Sci Rep*, 6: 35007
- Nakanishi R, Okamura S, Yokoyama Y, Miyairi Y, Sagayama T, Ashi J. 2020. Holocene tsunami, storm, and relative sea level records obtained from the southern Hidaka coast, Hokkaido, Japan. *Quat Sci Rev*, 250: 106678
- Nanayama F, Furukawa R, Shigeno K, Makino A, Soeda Y, Igarashi Y. 2007. Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sediment Geol*, 200: 275–294
- Nanayama F, Satake K, Furukawa R, Shimokawa K, Atwater B F, Shigeno K, Yamaki S. 2003. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, 424: 660–663
- Nanto D, Cooper W, Donnelly M, Johnson R. 2011. Japan's 2011 earthquake and tsunami: Economic effects and implications for the United States. DIANE Publishing
- Nguyen P H, Bui Q C, Vu P H, Pham T T. 2014. Scenario-based tsunami hazard assessment for the coast of Vietnam from the Manila Trench source. *Phys Earth Planet Inter*, 236: 95–108
- Obana K, Kodaira S. 2009. Low-frequency tremors associated with reverse faults in a shallow accretionary prism. *Earth Planet Sci Lett*, 287: 168–174
- Okal E A, Synolakis C E, Kalligeris N. 2011. Tsunami simulations for regional sources in the South China and adjoining seas. *Pure Appl Geophys*, 168: 1153–1173
- Pampell-Manis A, Horrillo J, Shighihara Y, Parambath L. 2016. Probabilistic assessment of landslide tsunami hazard for the northern Gulf of Mexico. *J Geophys Res-Oceans*, 121: 1009–1027
- Paris R, Fournier J, Poizot E, Etienne S, Morin J, Lavigne F, Wassmer P. 2010. Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): A coupled offshore-onshore model. *Mar Geol*, 268: 43–54
- Paris R, Switzer A D, Belousova M, Belousov A, Ontowirjo B, Whelley P L, Ulvrova M. 2014. Volcanic tsunami: A review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea). *Nat Hazards*, 70: 447–470
- Park H, Cox D T. 2016. Probabilistic assessment of near-field tsunami hazards: Inundation depth, velocity, momentum flux, arrival time, and duration applied to Seaside, Oregon. *Coast Eng*, 117: 79–96
- Perrey A. 1862. Documents sur les tremblements de terre et les phenomenes volcaniques au Japon (in French)
- Philibosian B, Meltzner A J. 2020. Segmentation and supercycles: A catalog of earthquake rupture patterns from the Sumatran Sunda Megathrust and other well-studied faults worldwide. *Quat Sci Rev*, 241: 106390
- Pope E L, Talling P J, Urlaub M, Hunt J E, Clare M A, Challenor P. 2015. Are large submarine landslides temporally random or do uncertainties in available age constraints make it impossible to tell? *Mar Geol*, 369: 19–33
- Power W, Horspool N, Wang X, Mueller C. 2015. Probabilistic mapping of tsunami hazard and risk for Gisborne city and Wainui beach. GNS Sci Consultancy Report, 219: 79
- Qiu Q, Li L, Hsu Y J, Wang Y, Chan C H, Switzer A D. 2019. Revised earthquake sources along Manila trench for tsunami hazard assessment in the South China Sea. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 19: 1565–1583
- Ramos N T, Maxwell K V, Tsutsumi H, Chou Y C, Duan F, Shen C C, Satake K. 2017. Occurrence of 1 ka-old corals on an uplifted reef terrace in west Luzon, Philippines: Implications for a prehistoric extreme wave event in the South China Sea region. *Geosci Lett*, 4: 12
- Ren Y, Wen R, Song Y. 2014. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China. *Episodes*, 37: 277–283
- Ren Y, Wen R, Zhang P, Yang Z, Pan R, Li X. 2016. Implications of local sources to probabilistic tsunami hazard analysis in South Chinese coastal area. *J Earthquake Tsunami*, 11: 1740001
- Ren Z Y, Zhao X, Liu H. 2015. Dispersion effects on tsunami propagation in south China sea. *J Earthquake Tsunami*, 09: 1540001

- Ren Z, Zhao X, Liu H. 2019. Numerical study of the landslide tsunami in the South China Sea using Herschel-Bulkley rheological theory. *Phys Fluids*, 31: 056601
- Richmond B, Szczuciński W, Chagué-Goff C, Goto K, Sugawara D, Witter R, Tappin D R, Jaffe B, Fujino S, Nishimura Y, Goff J. 2012. Erosion, deposition and landscape change on the Sendai coastal plain, Japan, resulting from the March 11, 2011 Tohoku-oki tsunami. *Sediment Geol*, 282: 27–39
- Rubin C M, Horton B P, Sieh K, Pilarczyk J E, Daly P, Ismail N, Parnell A C. 2017. Highly variable recurrence of tsunamis in the 7,400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nat Commun*, 8: 16019
- Saito T, Inazu D, Tanaka S, Miyoshi T. 2013. Tsunami coda across the Pacific Ocean following the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 103: 1429–1443
- Satake K, Atwater B F. 2007. Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 35: 349–374
- Satake K, Nanayama F, Yamaki S, Tanioka Y, Hirata K. 2005. Variability among tsunami sources in the 17th–21st centuries along the Southern Kuril Trench. In: Satake K, ed. *Tsunamis*. Netherlands: Springer. 157–170
- Satake K, Wang K, Atwater B F. 2003. Fault slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions. *J Geophys Res*, 108: 2535
- Satake K, Shimazaki K. 1988. Free oscillation of the Japan Sea excited by earthquakes—I. Observation and wave-theoretical approach. *Geophys J Int*, 93: 451–456
- Schambach L, Grilli S T, Kirby J T, Shi F. 2018. Landslide tsunami hazard along the upper US East Coast: Effects of slide deformation, bottom friction, and frequency dispersion. *Pure Appl Geophys*, 176: 3059–3098
- Schambach L, Grilli S T, Tappin D R. 2021. New high-resolution modeling of the 2018 Palu tsunami, based on supershear earthquake mechanisms and mapped coastal landslides, supports a dual source. *Front Earth Sci*, 627
- Schellart W P, Rawlinson N. 2013. Global correlations between maximum magnitudes of subduction zone interface thrust earthquakes and physical parameters of subduction zones. *Phys Earth Planet Inter*, 225: 41–67
- Sepúlveda I, Haase J S, Liu P L E, Grigoriu M, Winckler P. 2021. Non-stationary probabilistic tsunami hazard assessments incorporating climate-change-driven sea level rise. *Earths Future*, 9: e02007
- Sepúlveda I, Liu P L E, Grigoriu M. 2019. Probabilistic tsunami hazard assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 658–688
- Shelley K, Segall P. 2000. A mechanical model for intraplate earthquakes: Application to the New Madrid seismic zone. *Science*, 289: 2329–2332
- Shi F, Kirby J T, Harris J C, Geiman J D, Grilli S T. 2012. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Model*, 43–44: 36–51
- Shi H, Si P, Dong P, Yu X. 2019. A two-phase SPH model for massive sediment motion in free surface flows. *Adv Water Resources*, 129: 80–98
- Si P, Shi H, Yu X. 2018. A general numerical model for surface waves generated by granular material intruding into a water body. *Coast Eng*, 142: 42–51
- Sieh K, Natawidjaja D H, Meltzner A J, Shen C C, Cheng H, Li K S, Suwargadi B W, Galetzka J, Philibosian B, Edwards R L. 2008. Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra. *Science*, 322: 1674–1678
- Sørensen M B, Spada M, Babeyko A, Wiemer S, Grünthal G. 2012. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea. *J Geophys Res-Solid Earth*, 117: B01305
- Spiske M, Weiss R, Bahlburg H, Roskosch J, Amijaya H. 2010. The TsuSedMod inversion model applied to the deposits of the 2004 Sumatra and 2006 Java tsunami and implications for estimating flow parameters of palaeo-tsunami. *Sediment Geol*, 224: 29–37
- Srisutarn C, Wagner J F. 2010. Reconstructing tsunami run-up from the characteristics of tsunami deposits on the Thai Andaman Coast. *Coast Eng*, 57: 493–499
- Su C C, Tseng J Y, Hsu H H, Chiang C S, Yu H S, Lin S, Liu J T. 2012. Records of submarine natural hazards off SW Taiwan. *Geol Soc London Spec Publ*, 361: 41–60
- Sugawara D, Goto K. 2012. Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, Japan. *Sediment Geol*, 282: 110–123
- Sun L, Zhou X, Huang W, Liu X, Yan H, Xie Z, Wu Z, Zhao S, Da Shao S, Yang W. 2013. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea. *Sci Rep*, 3: 1655
- Sun Q, Alves T M, Lu X, Chen C, Xie X. 2018a. True volumes of slope failure estimated from a quaternary mass-transport deposit in the Northern South China Sea. *Geophys Res Lett*, 45: 2642–2651
- Sun Q, Cartwright J, Xie X, Lu X, Yuan S, Chen C. 2018b. Reconstruction of repeated Quaternary slope failures in the northern South China Sea. *Mar Geol*, 401: 17–35
- Sun Q, Leslie S. 2020. Tsunamigenic potential of an incipient submarine slope failure in the northern South China Sea. *Mar Pet Geol*, 112: 104111
- Sun Q, Xie X, Piper D J W, Wu J, Wu S. 2017. Three dimensional

- seismic anatomy of multi-stage mass transport deposits in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: Their ages and kinematics. *Mar Geol*, 393: 93–108
- Sun Y, Huang B. 2014. A potential tsunami impact assessment of submarine landslide at Baiyun Depression in Northern South China Sea. *Geoenviron Disasters*, 1: 7
- Synolakis C E, Bardet J P, Borrero J C, Davies H L, Okal E A, Silver E A, Sweet S, Tappin D R. 2002. The slump origin of the 1998 Papua New Guinea tsunami. *Proc R Soc Lond A*, 458: 763–789
- Tan W K, Teh S Y, Koh H L. 2017. Tsunami run-up and inundation along the coast of Sabah and Sarawak, Malaysia due to a potential Brunei submarine mass failure. *Environ Sci Pollut Res*, 24: 15976–15994
- Tappin D R, Watts P, McMurtry G M, Lafoy Y, Matsumoto T. 2001. The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998—Offshore evidence on the source mechanism. *Mar Geol*, 175: 1–23
- Taylor F W, Briggs R W, Frohlich C, Brown A, Hornbach M, Papabatu A K, Meltzner A J, Billy D. 2008. Rupture across arc segment and plate boundaries in the 1 April 2007 Solomons earthquake. *Nat Geosci*, 1: 253–257
- ten Brink U S, Barkan R, Andrews B D, Chaytor J D. 2009. Size distributions and failure initiation of submarine and subaerial landslides. *Earth Planet Sci Lett*, 287: 31–42
- ten Brink U S, Chaytor J D, Geist E L, Brothers D S, Andrews B D. 2014. Assessment of tsunami hazard to the U.S. Atlantic margin. *Mar Geol*, 353: 31–54
- ten Brink U S, Geist E L, Andrews B D. 2006. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico. *Geophys Res Lett*, 33: 2006GL026125
- Terry J P, Winspear N, Goff J, Tan P H H. 2017. Past and potential tsunami sources in the South China Sea: A brief synthesis. *Earth-Sci Rev*, 167: 47–61
- Thio H K, Somerville P, Ichinose G. 2007. Probabilistic analysis of strong ground motion and tsunami hazards in southeast Asia. *J Earthquake Tsunami*, 01: 119–137
- Titov V, Rabinovich A B, Mofjeld H O, Thomson R E, Gonzalez F I. 2005. The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami. *Science*, 309: 2045–2048
- Urgeles R, Camerlenghi A. 2013. Submarine landslides of the Mediterranean Sea: Trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution. *J Geophys Res-Earth Surf*, 118: 2600–2618
- Urlaub M, Talling P J, Masson D G. 2013. Timing and frequency of large submarine landslides: Implications for understanding triggers and future geohazard. *Quat Sci Rev*, 72: 63–82
- Volpe M, Lorito S, Selva J, Tonini R, Romano F, Brizuela B. 2019. From regional to local SPTHA: Efficient computation of probabilistic tsunami inundation maps addressing near-field sources. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 19: 455–469
- Vu T C, Nguyen D X. 2008. Tsunami risk along Vietnamese coast. *J Water Resour Environ Eng*, 23: 24–33
- Wallace L M, Webb S C, Ito Y, Mochizuki K, Hino R, Henrys S, Schwartz S Y, Sheehan A F. 2016. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand. *Science*, 352: 701–704
- Wang D, Wu S, Qin Z, Spence G, Lü F. 2013. Seismic characteristics of the Huaguang mass transport deposits in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: Implications for regional tectonic activity. *Mar Geol*, 346: 165–182
- Wang K, Bilek S L. 2014. Invited review paper: Fault creep caused by subduction of rough seafloor relief. *Tectonophysics*, 610: 1–24
- Wang W, Wang D, Wu S, Völker D, Zeng H, Cai G, Li Q. 2018. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea. *J Ocean Univ China*, 17: 83–100
- Wang X, Power W. 2011. COMCOT: A tsunami generation, propagation and run-up model. GNS Science
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc America*, 84: 974–1002
- Williams R, Rowley P, Garthwaite M C. 2019. Reconstructing the Anak Krakatau flank collapse that caused the December 2018 Indonesian tsunami. *Geology*, 47: 973–976
- Wu S G, Qin Z L, Wang D W, Peng X C, Wang Z J, Yao G S. 2011. Analysis on seismic characteristics and triggering mechanisms of mass transport deposits on the Northern slope of the South China Sea. *Chin J Geophys*, 54: 1056–1068
- Wu S, Wang D, Völker D. 2018. Deep-sea geohazards in the South China Sea. *J Ocean Univ China*, 17: 1–7
- Wu T R, Huang H C. 2009. Modeling tsunami hazards from Manila trench to Taiwan. *J Asian Earth Sci*, 36: 21–28
- Xia S, Qiu X, Tong C H, Xu H, Zhao M. 2012. Three-dimensional tomographic model of the crust beneath the Hong Kong region. *Geology*, 40: 59–62
- Xia S, Zhou P, Zhao D, Cao J. 2020. Seismogenic structure in the source zone of the 1918 M7.5 NanAo earthquake in the northern South China Sea. *Phys Earth Planet Inter*, 302: 106472
- Xie X, Chen C, Li L, Wu S, Yuen D A, Wang D. 2019. Tsunami hazard assessment for atoll islands inside the South China Sea: A case study of the Xisha Archipelago. *Phys Earth Planet Inter*, 290: 20–35
- Yang J, Li L, Zhao K, Wang P, Wang D, Sou I M, Yang Z, Hu J, Tang X, Mok K M, Liu P L F. 2019. A comparative study of Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018)—Their impacts on coastal inundation in Macau. *J Geophys Res-Oceans*, 124: 9590–

9619

- Yang X, Peel F J, McNeill L C, Sanderson D J. 2020. Comparison of fold-thrust belts driven by plate convergence and gravitational failure. *Earth-Sci Rev*, 203: 103136
- Yavari-Ramshe S, Ataie-Ashtiani B. 2019. On the effects of landslide deformability and initial submergence on landslide-generated waves. *Landslides*, 16: 37–53
- Ye L, Kanamori H, Rivera L, Lay T, Zhou Y, Sianipar D, Satake K. 2020. The 22 December 2018 tsunami from flank collapse of Anak Krakatau volcano during eruption. *Sci Adv*, 6: eaaz1377
- Yokota Y, Ishikawa T, Watanabe S I, Tashiro T, Asada A. 2016. Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature*, 534: 374–377
- Yu S B, Kuo L C, Punongbayan R S, Ramos E G. 1999. GPS observation of crustal deformation in the Taiwan-Luzon Region. *Geophys Res Lett*, 26: 923–926
- 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: e20344

- Zengaffinen T, Løvholt F, Pedersen G K, Harbitz C B. 2020. Effects of rotational submarine slump dynamics on tsunami genesis: New insight from idealized models and the 1929 Grand Banks event. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 500: 41–61
- Zhang C, Kirby J T, Shi F, Ma G, Grilli S T. 2021a. A two-layer non-hydrostatic landslide model for tsunami generation on irregular bathymetry. 1. Theoretical basis. *Ocean Model*, 159: 101749
- Zhang C, Kirby J T, Shi F, Ma G, Grilli S T. 2021b. A two-layer non-hydrostatic landslide model for tsunami generation on irregular bathymetry. 2. Numerical discretization and model validation. *Ocean Model*, 160: 101769
- Zhou Q, Li X, Zhou H, Liu L, Xu Y, Gao S, Ma L. 2018. Characteristics and genetic analysis of submarine landslides in the northern slope of the South China Sea. *Mar Geophys Res*, 40: 303–314
- Zhu J, Sun Z, Kopp H, Qiu X, Xu H, Li S, Zhan W. 2013. Segmentation of the Manila subduction system from migrated multichannel seismics and wedge taper analysis. *Mar Geophys Res*, 34: 379–391

(责任编辑: 陈凌)