

全球地震-滑坡-海啸灾害链数据库的建立及链生机制分析

杜朋¹, 李琳琳^{1,2*}, 王大伟^{3*}, 曾信⁴, 施华斌⁵, 陈克杰⁶, 李志刚^{1,2}, 王伟涛^{1,2}, 张培震^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力学与地质灾害重点实验室, 珠海 519080

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

3. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

4. 中山大学海洋科学考察中心, 珠海 519000

5. 澳门大学科技学院, 澳门 999078

6. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

* 联系人, E-mail: lilinlin3@mail.sysu.edu.cn; wangdawei@idsse.ac.cn

2024-09-23 收稿, 2024-10-29 修回, 2024-12-08 接受, 2024-12-20 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFC3008600)、广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09H399)、南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队项目(311023002)和国家自然科学基金(42106077)资助

摘要 地震触发沿岸陆地滑坡和海底滑坡, 继而产生海啸, 是一种典型的海洋链生地质灾害, 对海洋工程和沿海城市构成严重威胁. 近年来, 以2018年印度尼西亚苏拉威西地震-滑坡-海啸为典型代表的多次事件突显了此类灾害的突发性和预警难度, 亟需深入研究. 然而, 不同于陆地链生地质灾害, 受限于数据获取的难度, 海洋链生地质灾害研究程度较低, 对其触发机制和链生效应认知薄弱. 基于系统的文献综述, 本文构建了自1900年以来全球93起地震-滑坡-海啸灾害链事件数据库, 整理并提炼了地震、滑坡和海啸的关键参数信息, 并对其中20个典型的灾害链案例进行了深入分析. 根据滑坡初始位置, 这类灾害链主要分为三类: 沿岸陆地同震滑坡海啸灾害链、近岸海底同震滑坡海啸灾害链以及水深~200 m以下海底同震滑坡海啸灾害链. 目前, 该领域研究的主要挑战包括同震滑坡海啸预警和灾害链危险性评估. 未来研究应重点关注地震、滑坡和海啸之间高度耦合的多物理过程, 开发能够综合评估这些相互作用的多物理过程模型. 同时, 需借助多学科交叉融合的研究思路, 构建综合性的研究框架和方法, 以加深对这一复杂链生灾害的理解并提高应对能力. 结合全球案例的分析, 指出需要特别关注南海北部地区地震-滑坡-海啸链生灾害的风险.

关键词 海洋地质灾害, 灾害链, 同震滑坡, 海啸, 致灾机理

在自然灾害研究中, 链生灾害已成为研究热点. 这一现象指的是初始灾害触发一系列次生灾害的过程, 其中, 灾害间因果关联明显, 一个灾害的结果往往成为其他灾害的触发因素, 导致多个灾害事件短时间内接连发生, 显著加剧灾害的严重性和影响^[1]. 例如, 地震引发滑坡, 滑坡堵塞河流形成滑坡坝, 坝体溃决进而导

致下游地区的灾难性洪水^[2,3]. 链生灾害中, 次生事件通常会成为新的灾害触发源, 破坏程度往往超过原始触发事件^[4]. 在链生灾害中, 滑坡引发海啸这一过程日益受到关注, 尤其是在2018年印度尼西亚苏拉威西地震海啸^[5]和喀拉喀托火山海啸^[6]之后. 这两次事件使学术界意识到, 尽管约80%的海啸事件是由大地震断层面位

引用格式: 杜朋, 李琳琳, 王大伟, 等. 全球地震-滑坡-海啸灾害链数据库的建立及链生机制分析. 科学通报, 2025, 70: 567–584

Du P, Li L, Wang D, et al. Development of a global earthquake-landslide-tsunami cascade database and analysis of cascading mechanisms (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 567–584, doi: 10.1360/TB-2024-0994

移引发, 滑坡海啸仅占约10%^[7], 但滑坡引发的海啸可在局地造成极为严重的破坏和重大人员伤亡^[8]. 引发海啸的滑坡包括海底滑坡^[5,9]、湖泊滑坡^[10]、峡湾滑坡^[11]、河流滑坡^[12]、水库滑坡^[13], 以及火山岛侧翼滑坡^[6]. 多种因素能够触发这些海啸性滑坡, 包括地震^[14]、降雨^[15]、火山活动^[16]、水位上升^[13]、冰川后退^[17]、人类活动^[18]以及尚未明确的触发因素^[19]. 但据统计, 地震是首要的触发因素^[20]. 地震引发滑坡, 继而产生海啸, 是典型的海洋链生地质灾害.

地震-滑坡-海啸灾害链是灾害研究中重要且复杂的领域, 这一灾害链涉及断层破裂、地面震动、斜坡失稳以及海水响应与传播等物理过程. 目前国内外对地震-滑坡-海啸灾害链的研究尚显不足, 以往研究大多关注海域地震、滑坡或海啸单一灾种的机制和风险评估, 忽略孕灾环境中多种复合灾害之间的链式触发作用. 然而, 20世纪和21世纪初的多次地震事件中, 地震触发同震滑坡继而产生海啸, 滑坡和海啸的链生效应共同加剧了灾害的严重性^[21]. 这些同震滑坡海啸事件突显了深入研究其触发机制和链生效应的重要性. 随着人类生存和发展空间不断向沿海、近海及深海地区扩展, 尤其是海洋牧场、海上风电与油气资源开发等领域, 面临较高海啸风险的区域日益增多, 地震-滑坡-海啸灾害链的重要性愈加突出. 为了更好地理解和减轻这一灾害链的影响, 需通过系统的数据收集与案例分析, 深入探讨其触发机制和链生效应.

本研究首先从灾害链视角, 系统地整理了自1900年以来全球地震-滑坡-海啸灾害链事件, 并建立了详细的数据库. 其次, 探讨了20个典型的地震-滑坡-海啸灾害链案例, 通过历史案例, 分析链生灾害的触发机制和灾害影响. 最后, 讨论了地震-滑坡-海啸灾害链研究的主要挑战和未来重点, 包括同震滑坡海啸预警、海啸成因判别、灾害链危险性评估等. 结合全球案例分析, 本研究重点关注了南中国海北部地震-滑坡-海啸链生灾害的风险.

1 全球地震-滑坡-海啸灾害链事件数据库

1.1 数据库中灾害链事件的选择标准

地震引发陆地滑坡并产生海啸通常可以通过卫星影像、航空照片、无人机和实地调查等手段快速确认海啸源. 然而, 同震海底滑坡触发异常海啸因海底滑坡无法直接观测, 通常在事件后短时间内难以确认海啸

源. 此类异常海啸现象包括但不限于: (1) 具有走滑断层机制的地震产生异常大的海啸波. 由于走滑断层以横向运动为主, 区域同震垂直变形小于1 m^[22], 因此, 通常认为其引发海啸的潜力较弱, 如1999年土耳其 M_w 7.4地震^[23], 2010年海地 M_w 7.0地震^[24], 2018年印度尼西亚苏拉威西 M_w 7.5地震^[5]等. (2) 低震级地震($M_w < 6.5$)触发显著的海啸, 如1990年意大利 M_w 5.7地震^[25], 1992年中国海南 M_w 3.7地震^[26]. (3) 发震构造位于陆地的地震引发海啸, 如1954年阿尔及利亚 M_w 6.7地震^[25], 2013年巴基斯坦 M_w 7.7地震^[27]. (4) 当断层模型或同震形变模拟的海啸波形与潮位计记录的数据不匹配, 或无法解释观测到的海啸高度时, 通常需要更合理的海啸源, 如1992年印度尼西亚 M_w 7.8地震^[28]. (5) 地震与随后海啸之间的时间间隔很短, 如日本能登2007年 M_w 6.9^[29]和2024年 M_w 7.5同震滑坡海啸^[30]. (6) 近场波高很高而远离源头迅速衰减的海啸^[31]. 当上述异常海啸现象发生且无法仅通过同震形变解释时, 需要进一步使用海啸反演、数值模拟以及成本高昂的水下调查手段, 才能推断或确认海底滑坡源.

基于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)维护的历史海啸数据库(NGDC/WDS 2018)以及公开发表的学术文献, 本研究系统整理了自1900年以来(即开始有仪器定位地震)全球范围内地震后伴随的异常海啸事件. NOAA数据库包记录了公元前2000年以来约2500起不同成因的历史海啸源事件(<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami>. 最后访问时间: 2024年9月). 其中, 自1900年起有72次海啸被归类为同震滑坡海啸事件, 并提供了这些事件的源地震事件相关信息(如震级、位置等)、海啸参数(如最大波高、海啸强度等)和海啸影响(如死亡、失踪、受伤、损坏等). 需要指出的是, 这72次事件仅限于NOAA数据库中归类为同震滑坡海啸的记录, 并未完全覆盖自1900年以来的所有此类事件. 为了更加系统、全面地收集自1900年以来的同震滑坡海啸案例, 本研究进一步检索公开发表的学术文献, 并采用系统综述的原则和方法, 以确保检索的科学性与全面性^[32]. 检索策略包括以“地震”“滑坡”“海啸”为关键主题词, 采用布尔运算符构建检索式: Topic=(‘Earthquake’AND ‘Landslide’ AND ‘Tsunami’). 该检索式应用于Web of Science数据库, 检索不限制出版物类型, 时间范围覆盖至论文提交日期. 最终, 共检索到1367篇相关文献.

所有检索到的文献都通过标题和摘要进一步筛选,以识别1900年以来的同震滑坡海啸案例。纳入的文献包括与同震滑坡相关海啸的案例调查报告、区域海啸目录、案例研究以及数值模拟研究。筛选中排除的文献包括涉及火山海啸、气象海啸和非地震触发的滑坡海啸等研究。最终通过文献筛选和评估过程,本研究额外识别并汇编了21个同震滑坡海啸案例(表S1和S2)。

1.2 编制地震-滑坡-海啸参数

对于同震滑坡海啸, NOAA数据库缺乏诸如滑坡的地理坐标、滑坡体积、初始水深、坡度和地震参数等关键数据。为弥补上述数据的缺失,本文在汇编地震-滑坡-海啸灾害链清单后,从1.1节筛选出的文献中系统提取了关键参数(表S1和S2)。为确保数据的完整性与科学性,本研究对每篇文章进行了系统性全文审查,以提取滑坡关键特征参数。同震海底滑坡参数包括地理坐标、离海岸的距离、初始水深和平均坡角、滑坡体积以及海底滑坡的推断或者确认方式等。如果原始文献中未提供滑坡初始水深和坡度,本研究通过滑坡位置采用最佳公开可用水深数据进行计算。水深数据主要来自欧洲海洋观测与数据网络(EMODnet)(<http://www.emodnet.eu/geoviewer>)、全球多分辨率地形图(<http://www.marine-geo.org/tools/GMRTMapTool>)、美国国家海洋和大气管理局(<https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>)等开放数据库。当多个研究文献对同一海底滑坡给出不同体积时,优先采用通过地质地球物理方法调查获得的体积。若文献中对滑坡的描述不足以确定体积,则该参数被归类为“未定义”。地震参数-峰值地面加速度(PGA)、烈度(MMI)和震中距主要收集自USGS-ShakeMap。此外,本研究还收集了海啸参数,包括最大海啸高度和最短海啸到时。在有灾后调查的案例中,还收集了实测海啸爬高/淹没高度分布数据。

1.3 地震-滑坡-海啸灾害链全球分布

全球自1900年以来,共记录到93起地震-滑坡-海啸灾害链,其中70起与地震触发的海底滑坡有关,23起与地震触发的沿岸陆地滑坡有关。这93起事件中,有23起发生在地中海-黑海地区,23起在东北太平洋,12起在南中国海及其周边地区,7起在新西兰,7起在日本周围地区,6起在新几内亚岛周围地区,5起在加勒比海,4起在智利,2起在斐济,2起在印度洋,1起在大西洋,1起在红海(图1)。

2 典型地震-滑坡-海啸灾害链历史案例及触发机制分析

根据滑坡的初始位置,触发海啸的同震滑坡可以分为3类:(1)初始位置完全在水面以上的沿岸陆地滑坡;(2)初始位置位于水下的近岸海底滑坡,常见于峡湾、河流入海三角洲等地;(3)初始位置位于水深~200 m以下的海底滑坡,通常发生在大陆边缘和海底峡谷等区域。本节详细回顾分析历史上典型的地震-滑坡-海啸灾害链,系统总结事件的重要致灾过程和特征,包括地震特征、滑坡类型、海啸波高和影响范围等,探讨每类同震滑坡海啸的链生机制。

2.1 沿岸陆地同震滑坡海啸灾害链案例及机制

沿岸陆地同震滑坡海啸灾害链最新典型案例是2007年4月21日智利南部 M_w 6.2地震,发震断裂为一条右旋走滑断裂带^[33]。受断裂长期活动影响,区域广泛发育节理和分支断层,峡湾陡坡上的岩石结构表现出高度敏感性^[34]。地震在峡湾内高度风化破碎的花岗岩质或火山沉积物陡峭斜坡上触发了538处滑坡,滑坡类型包括岩块滑动、坠落和崩塌^[33]。其中3个规模较大的滑坡,体积分别为 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (速度17 m/s)、 $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (速度50 m/s)和 $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ (速度15 m/s)^[33~35],将大量岩石和碎屑带入峡湾水面,产生了局部海啸,波高达数10 m,传播速度为150~200 km/h。海啸导致10人死亡,7人失踪,并摧毁了沿岸的三文鱼养殖场^[36]。

表1列出了包括2007年智利南部 M_w 6.2地震在内的5次沿岸陆地同震滑坡海啸灾害链案例关键参数。各案例的重要特征描述如下:1931年新西兰发生了 M_w 7.8级地震^[37],强烈地震触发了河右岸体积约为 $1.705 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的土质滑坡,滑坡落差120 m,滑入河中,导致新西兰历史上最高的海啸,高达15 m^[12];1946年加拿大温哥华岛发生 M_w 7.5级地震,触发了体积约 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩崩,其中约 $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩崩碎屑继续下滑坠入湖泊,造成湖泊对岸波浪最大高度达51.4 m,对湖周围的森林植被造成严重破坏,滑坡主要发生在坡度达70°,且敏感三叠纪火山碎屑岩层上^[38];1958年美国阿拉斯加东南部发生 M_w 8.1级地震,触发了 $30.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩石滑坡,以110 m/s的速度冲击峡湾水面,产生了现代历史上记录到的最高海啸,高度达524 m,摧毁了路径上的一切物体,并造成两人死亡^[39];2003年新西兰南岛发生 M_w 7.2级地震,触发超过400处滑坡。其中,峡湾一处体积

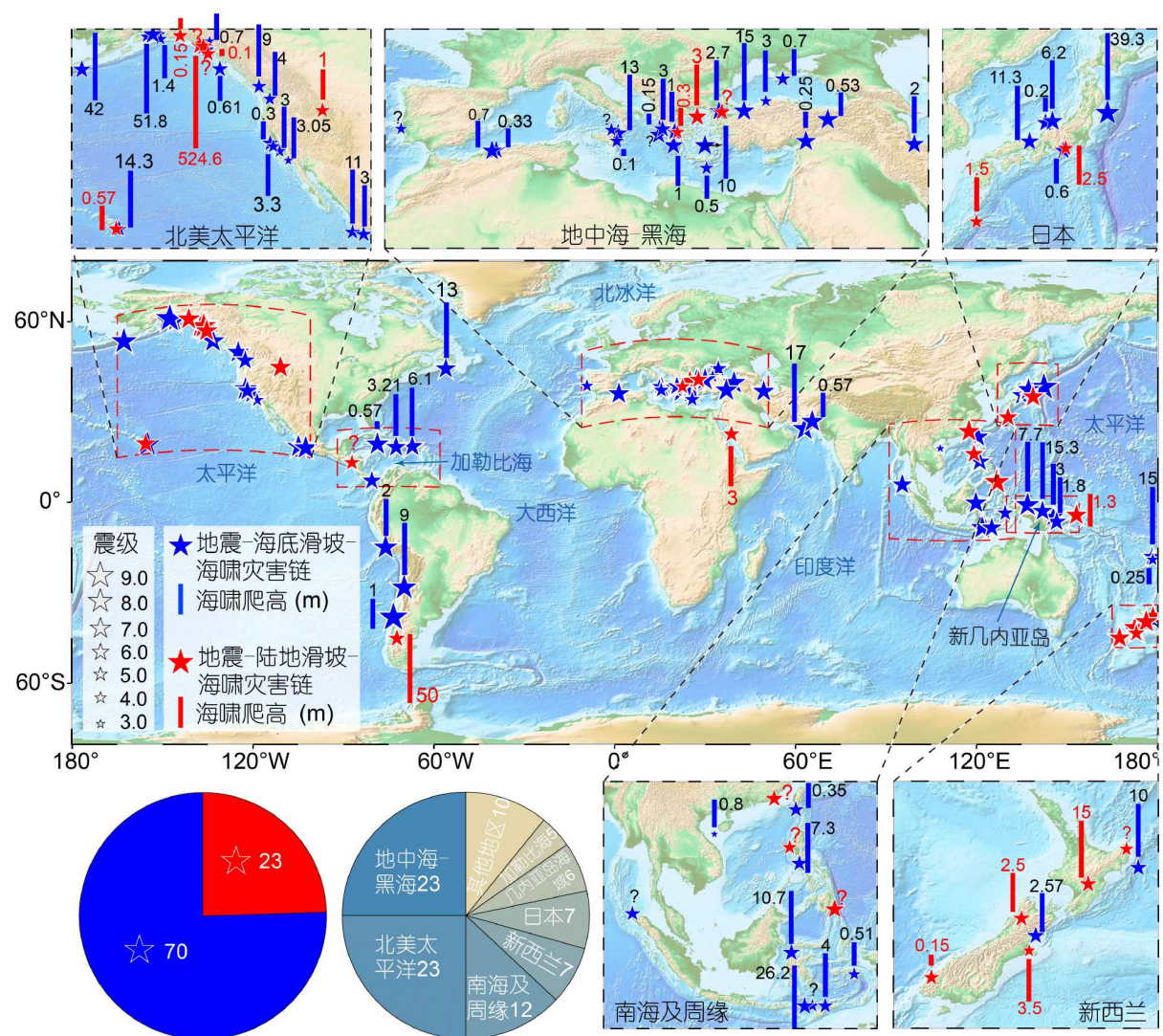


图 1 1900 年以来地震-滑坡-海啸灾害链及其对应海啸高度的全球分布。海啸高度包括爬高，淹没高度以及潮位站记录的波高，图中标注的高度数值为绝对值，垂直柱状图的高度以对数尺度显示

Figure 1 Global distribution of the earthquake-landslide-tsunami cascading hazards and corresponding tsunami heights since 1900. Tsunami heights include run-up heights, inundation heights, and wave heights recorded at tide stations. The values labeled in the figure represent actual tsunami heights, and the vertical bars are displayed on a logarithmic scale

表 1 典型地震-陆地滑坡-海啸灾害链的关键参数统计

Table 1 Summary of key parameters of typical earthquake-induced terrestrial landslide and tsunami cascading hazards

灾害链	环境	体积(10^6 m^3)	滑坡物质	落差(m)	坡度	入水速度(m/s)	海啸高度(m)
1931 M_w 7.8 新西兰 ^[12,37]	河流右岸	1.705	土质	120	35°	/	15
1946 M_w 7.2 加拿大 ^[38]	湖泊	0.7	敏感的火山碎屑岩层	710	70°	/	51.4
1958 M_w 8.1 美国 ^[39,42]	峡湾	30.6	角闪石和黑云母片岩	610	40°	110	524
2003 M_w 7.2 新西兰 ^[40,41]	峡湾	0.2	强烈风化的、叶理和节理发育的片麻岩	350	40°	/	5
2007 M_w 6.2 智利 ^[33-35]	峡湾	12	高度风化破碎的花岗岩质或火山沉积物	750	35°	15	115
	峡湾	1.7		600	/	17	/
	峡湾	7		1000	/	50	/

$0.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的基岩崩塌滑入水中, 形成4~5 m高的局部海啸^[40]。此次崩塌发生在强烈风化且叶理和节理发育的片麻岩中^[41]。

地震触发沿岸陆地滑坡坠入水中引发海啸是冲击性事件, 海啸的产生主要由滑坡冲击特征所主导。其机制主要包括地震引发滑坡、滑坡物质坠入水中的动能形成冲击波和空腔, 以及空腔塌陷产生海啸波三个关键步骤。具体来说, 首先地震引发的强烈震动使得沿岸陡峭且不稳定的山体发生滑坡/崩塌/倾倒。例如上述导致海啸的沿岸陆地滑坡主要发生在岩石结构高度敏感的峡湾陡坡上, 这些坡度通常超过 35° (表1), 其位置和失稳模式受到地质工程和地貌因素等前置条件的控制。启动后的滑坡物质沿着陡坡从高处迅速滑入/坠入水体。由于速度快、质量大, 其动能极高。滑坡物质高速撞击水面, 形成一个巨大的空腔, 导致空腔周围的水向外扩散, 产生冲击波和大量水花。最终, 空腔迅速塌陷, 导致大量水体急剧回填, 形成一系列海啸波, 初始冲击波的能量向外传播, 形成远离冲击点的海啸波^[43]。与海底滑坡相比, 由于峡湾、湖泊或水库沿岸地势高陡, 滑坡或崩塌物质积累了较大的重力势能。当这些物质高速进入较浅水体时, 其速度常常超过水面波的传播速度(即超临界状态), 使得水波无法及时扩散, 从而形成高而陡的破坏性海啸波。并且不同于海底滑坡, 岩崩引发的海啸在初期阶段受到非线性效应的强烈影响^[44]。因此, 即使规模相对较小的岸上滑坡/崩塌, 也可能引发大规模的局部海啸。而海底滑坡, 即使其体积更大, 产生海啸的潜力也要低得多^[45]。另外, 除了岩崩入水时的冲击速度外, 岩崩产生的海啸波还受到岩崩正面面积、渗透性以及水深地形等因素的影响^[44]。

2.2 近岸海底同震滑坡海啸灾害链案例及机制

在近岸海底发生的同震滑坡海啸灾害链中, 2018年印度尼西亚苏拉威西地震无疑是近年来最为典型且研究最为深入的案例。2018年9月28日, 当地时间18:02:45(UTC+8), 印度尼西亚中部苏拉威西的帕卢地区发生了一次 M_w 7.5的强烈地震, 震中位于 0.22°S , 119.85°E , 震源深度~10 km(USGS; 图2(a))。研究表明, 这次地震是一次“超剪切”事件, Palu-Koro左旋走滑断层的破裂范围超过180 km^[46]。地震发生仅2 min后, 帕卢湾沿岸的多个区域即遭受了破坏性的海啸袭击, 最大海啸爬高超过10 m, 共造成了超过2000人遇难^[47]。由

于走滑型地震通常不伴随海啸的发生, 因此海啸的触发机制成为学术界讨论的焦点问题。灾后调查和水下地形测量的证据表明海底滑坡是海啸的主要触发原因^[5]。Sassa和Takagawa^[48]通过震后调查, 确定了帕卢湾沿岸的7个因砂土液化而引发的滑坡区。Liu等人^[5]基于灾后获取的近岸高精度地形数据, 在帕卢湾沿岸识别出14个近岸海底滑坡, 绝大多数位于沉积物厚度较大的河口区域(图2(b))(其中7处滑坡区与Sassa和Takagawa^[48]识别的砂土液化滑坡区位置一致)。海啸模拟结果显示, 多处近岸滑坡的叠加能够很好地匹配潮汐站记录的波高和实地测量数据^[5]。

表S3列出了包括2018年印度尼西亚苏拉威西地震在内的8次近岸海底同震滑坡海啸灾害链案例。各案例的灾害过程和致灾机制分析如下: 1946年温哥华岛 M_w 7.5走滑地震导致了乔治亚海峡的半封闭水道近岸海底斜坡未固结或半固结的厚沉积物层发生液化, 随后发生多处海底滑坡, 切断了海底电缆并引发了高达9 m的破坏性海啸^[54,55]。1964年阿拉斯加 M_w 9.2大地震后伴随严重的局部破坏性海啸和区域性的构造海啸(图3)^[56,57]。震后调查表明最大波高达52 m的局部破坏性海啸波是由阿拉斯加峡湾中的大量海底滑坡触发(图3)^[58]。所有滑坡都起源于峡湾边缘, 主要发生在未固结的剪切强度较低的冰川三角洲沉积物中^[58]。1995年希腊科林斯湾发生了一次 M_w 6.5正断层地震并伴随局地海啸。地震导致峡湾海底浅层(分别厚8、2和4 m)沉积物沿着与海床平行、倾角 $<6^\circ$ 的层面发生滑动, 形成3处近岸海底滑坡, 体积分别为 0.2×10^6 , 0.05×10^6 和 $0.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[59-61]。根据详细的海底地球物理调查, 引起沉积物失稳的主要机制被认为是浅层沉积物液化^[60,61]。液化失稳的沉积物迅速分解并转变为重力流, 引发了局部海啸^[62]。1999年土耳其 M_w 7.4地震由北安纳托利亚断层(WNAF)不同段的右旋走滑破裂引发(图2(d))^[52]。地震产生的高地面加速度导致海岸填方土和河流入海口冲积扇沉积发生液化, 导致伊兹密特湾南岸发生一起近岸海底滑坡(图2(f)), 触发局部海啸, 海啸波高度超过15 m(图2(e, f))^[23]。2010年海地 M_w 7.0走滑地震在戈纳夫湾和海地岛南部沿海产生了高达3 m的海啸(图S1)^[24,63]。戈纳夫湾内异常的海啸主要归因于4个近岸海底滑坡, 这些海底滑坡是由河流三角洲液化引起^[24]。

在近岸浅水区, 例如河流入海三角洲, 沉积物相比深水区通常颗粒较粗, 并且这些沉积物处于饱和状态,

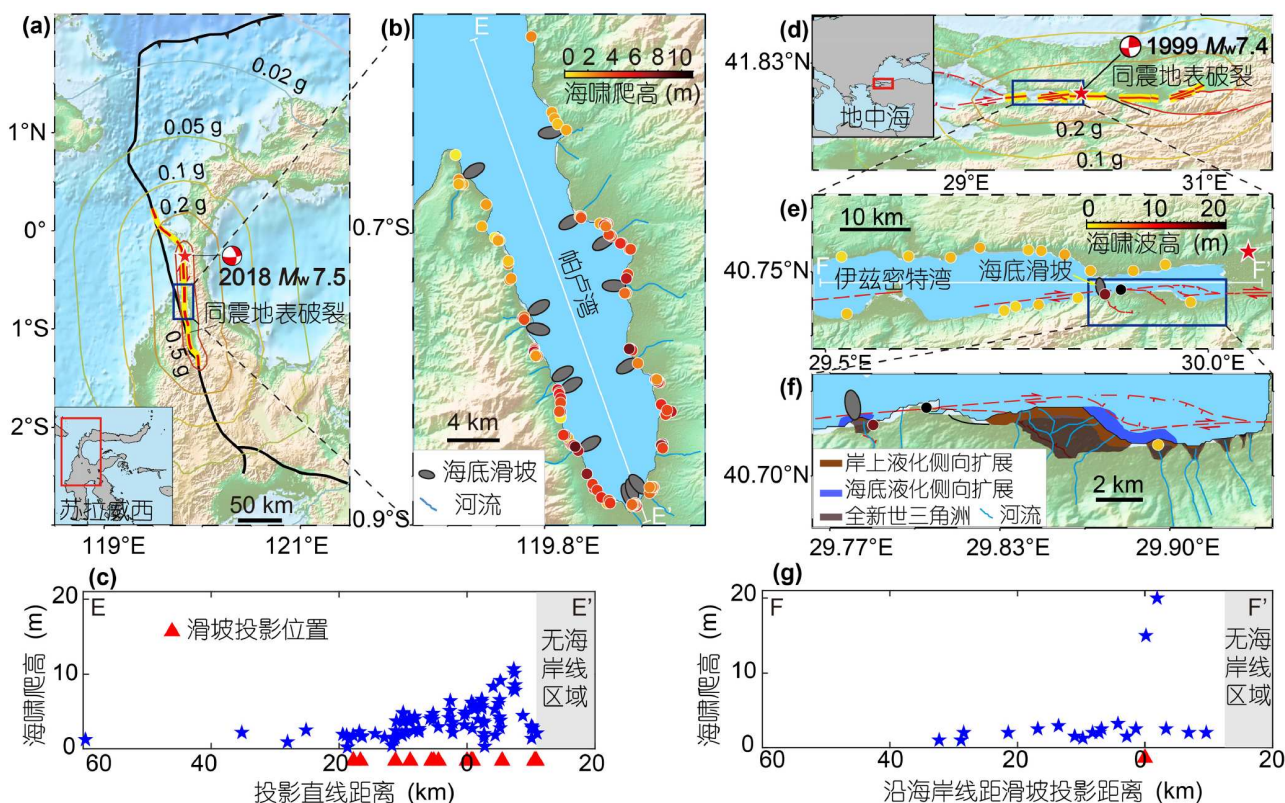


图 2 两起典型走滑地震-沿岸海底滑坡-海啸案例。(a) 2018年印度尼西亚苏拉威西 M_w 7.5事件, 地表破裂引自Socquet等人^[49]; (b) 海底滑坡位置引自Liu等人^[5]; 海啸高度数据引自Mikami等人^[50]和Omira等人^[51]; PGA等值线引自USGS ShakeMap (同图3, 4); (c) 2018年事件沿岸海啸高度分布统计。(d) 1999年土耳其 M_w 7.4事件, 地表破裂引自Barka^[52]; (e) 海底滑坡位置和海啸高度数据引自Tinti等人^[23]; (f) 全新世三角洲范围、液化、侧向扩展等数据引自Sonmez和Ulusay^[53]; (g) 1999年事件沿岸海啸高度分布统计

Figure 2 Two typical cases of strike-slip earthquake-coastal submarine landslide-tsunami cascading hazards. (a) The 2018 Indonesia Sulawesi M_w 7.5 event: surface rupture data from Socquet et al.^[49]; (b) Submarine landslide locations from Liu et al.^[5]; tsunami height data from Mikami et al.^[50] and Omira et al.^[51]; PGA contour lines are sourced from USGS-ShakeMap (also shown in Figures 3, 4). (c) Coastal tsunami height distribution statistics for the 2018 event. (d) The 1999 Turkey M_w 7.4 event: surface rupture data from Barka^[52]. (e) Submarine landslide locations and tsunami height data from Tinti et al.^[23]. (f) Holocene delta extent, liquefaction, and lateral spreading data from Sonmez and Ulusay^[53]. (g) Coastal tsunami height distribution statistics for the 1999 event

在强烈地震作用下易发生液化现象, 且液化区域可能比陆地更大^[64]。液化后的沉积物结构会迅速失去强度和刚度, 在重力作用下向海洋方向流动, 形成液化重力流, 进而在局地产生较大的海水扰动。近岸海底滑坡大多位于沉积物厚、液化潜力高的河口区域^[5]。以上事件还显示(表S3), 海湾区域的走滑地震引发液化并产生海啸这一风险应引起足够重视。

需要注意的是, 地震触发的液化重力流产生海啸, 需要一定的海床坡度, 表S3中8个案例中, 有7个湾区的海底坡度在 $1^\circ \sim 11^\circ$ 。Field等人^[65]利用1980年加利福尼亚走滑地震后立即获取的高分辨率地震反射剖面, 证实坡度为 0.25° 的大陆架上泥质砂和中细砂沉积物发生了大面积的液化, 但没有记录到海啸。

2.3 水深超过~200 m的海底滑坡海啸灾害链案例及机制

相较于前两类灾害链, 地震在水深超过~200 m的陆坡区域触发的海底滑坡更加不易被直接识别和观测, 海底电缆/光缆断裂和异常海啸往往成为判断大规模滑坡是否发生的依据。

1908年意大利南部的墨西拿海峡发生 M_w 7.2海域地震(图4(a)), 伴随最高达12 m的海啸和2条海底电报电缆的断裂^[71]。根据海啸到时数据以及水深、地震剖面 and 地震学数据, 海啸由同震海底位移与地震触发的海底滑坡共同引起, 其中深水400 m处一个体积约 2 km^3 的海底滑坡为主要因素^[72]。最新高精度海底地形分析和海啸模拟也确认了这一点^[68]。1918年波多黎各

西北海岸约15 km处发生 M_w 7.3正断层海域地震^[73], 引发高达6 m的海啸, 造成116人死亡^[74]。地震期间, 波多

黎各西北海岸一系列海底电缆发生断裂, 此处海岸也是观察到最大的海啸波的位置^[75]。高分辨率水深以及

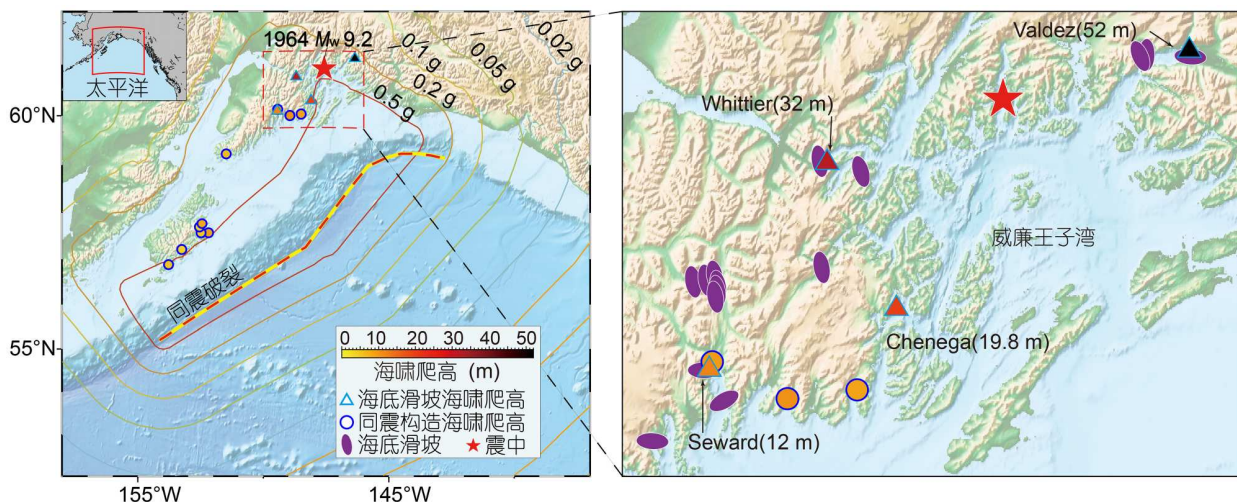


图3 1964阿拉斯加 M_w 9.2事件. 滑坡位置以及海啸高度数据引自文献^[57]

Figure 3 The 1964 Alaska M_w 9.2 event. Landslide locations and tsunami height data are from Ref. ^[57]

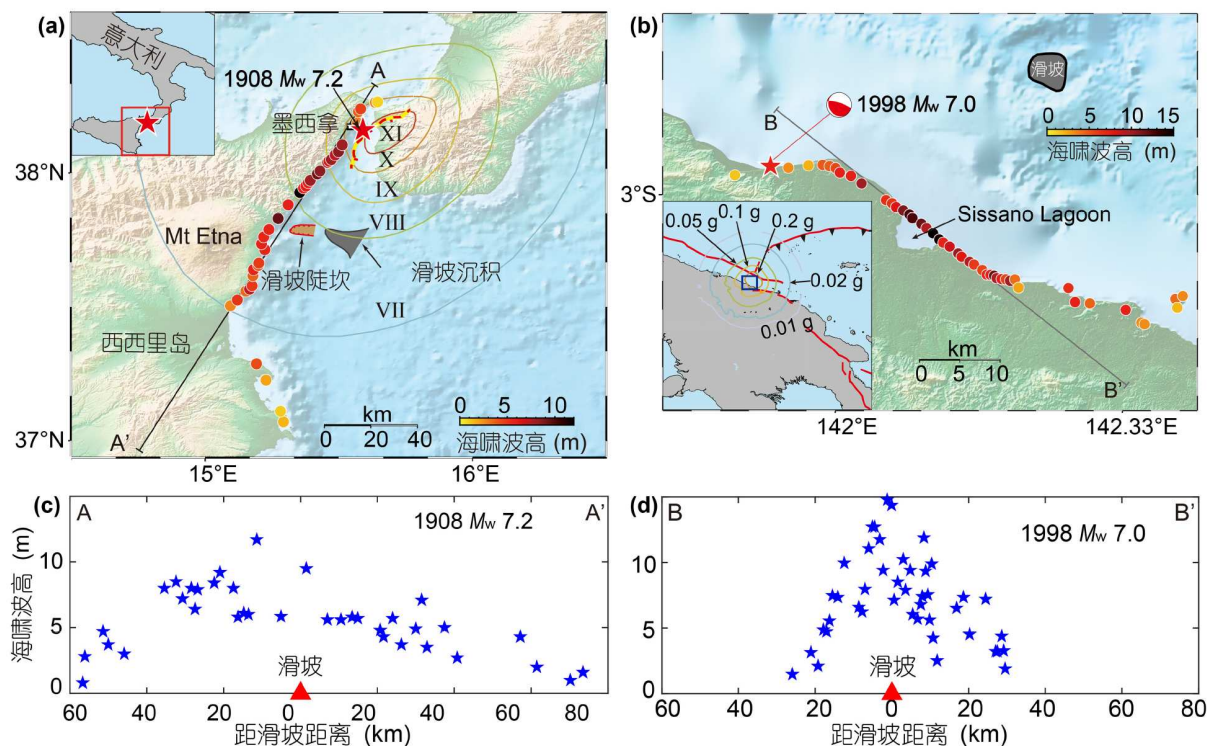


图4 两起典型水深超过~200 m的海底滑坡海啸灾害链案例. (a) 1908年墨西拿海峡 M_w 7.2事件. 等震度线引自Bottari等人^[66]; 滑坡位置引自Billi等人^[67]和Schambach等人^[68]; 海啸高度数据引自Billi等人^[69]; (b) 1998年巴布亚新几内亚 M_w 7.0事件. 滑坡位置引自Tappin^[70]; 海啸数据引自Kawata等人^[8]. (c, d) 1908年墨西拿海峡和1998年巴布亚新几内亚同震海底滑坡海啸沿岸高度分布统计

Figure 4 Two typical cascading hazard cases of tsunami triggered by co-seismic submarine landslides in deeper waters (~200 m or more). (a) The 1908 Messina Strait M_w 7.2 event. Isoseismal lines from Bottari et al. ^[66]; landslide locations from Billi et al. ^[67] and Schambach et al. ^[68]; tsunami height data from Billi et al. ^[69]. (b) The 1998 Papua New Guinea M_w 7.0 event. Landslide locations from Tappin ^[70]; tsunami data from Kawata et al. ^[8]. (c, d) Coastal tsunami height distribution statistics for the 1908 Messina Straits and 1998 Papua New Guinea submarine landslide-induced tsunamis

海啸模拟结果表明,海啸的主要原因是震中附近水深约1200 m处一个长约9 km的海底滑坡^[76]。1929年加拿大纽芬兰大陆架西南部发生 M_w 7.2的海域走滑地震(图S2),引发Grand Banks陆坡区发生海底滑坡^[77]。这次滑坡引发了最大波高达13 m的破坏性海啸,造成28人死亡。同时滑坡本身演变成浊流,破坏了横跨大西洋的12条通讯电缆。超高分辨率地震反射和多波束数据揭示两类主要滑坡:大规模滑塌(厚度约500 m,体积 $>100\text{ km}^3$)和随后广泛地表层沉积物失稳($<25\text{ m}$)^[78]。

1998年巴布亚新几内亚的地震-海底滑坡-海啸灾害链是该类型事件中研究最详实和关键的案例(图4(b))。1998年7月17日深夜,巴布亚新几内亚北部海岸附近发生了震级为 M_w 7.1的逆冲型浅源地震^[79]。地震发生约18 min后,Sissano潟湖周围海岸遭遇了高达15 m的毁灭性海啸,导致超过2200人死亡^[8]。然而,高于5 m的海啸主要集中在约40 km的沿海区域(图4(d))。由于地震规模不足以直接引发如此巨大的海啸,加上震中接近海岸,海啸却在震后约18 min才抵达,研究人员推测是海底滑坡触发了这次灾害^[80]。灾后的5次海洋调查证实,地震引发了一个大规模海底滑坡。滑坡发生在距Sissano潟湖约25 km、水深超过1000 m的海域,滑塌体呈“露天剧场”状,面积约 10 km^2 ,厚度约760 m,滑坡体沿海床下滑了800 m,滑坡物质为黏土^[9,80]。以该滑坡为触发源进行的海啸数值模拟再现了海啸淹没,证实了滑坡是此次海啸的主要成因^[81]。

2013年9月24日,巴基斯坦西南部俾路支省发生了一起 M_w 7.7级内陆走滑地震。尽管同震垂直和水平位移以及余震均分布在内陆,且同震地表破裂的西南端距离海岸约100 km^[82],但震后在印度洋西北部-阿曼湾沿岸观测到了最大1.09 m的海啸^[83]。海啸数值模拟结果认为可能的海啸源为马克兰陆坡的海底滑坡^[27,83]。

对于地震引发的深水海底滑坡,由于调查研究成本高,目前对其机制的理解仍然有限。在少数经过广泛调查的案例中,例如1998年引发致命海啸的巴布亚新几内亚案例,详细的海上调查揭示了一处750 m厚的旋转滑坡,主要发生在由硬质黏土沉积物组成的陆坡上,滑动面位于黏土沉积物与基岩的界面处^[9,80]。细黏土沉积物中流体的排出受限可能导致水力破裂,最终导致坡体失稳^[9]。地震反射数据显示,1929年加拿大纽芬兰破坏性海啸的成因是 M_w 7.2地震在Grand Banks陆坡水深约1000 m处的厚层未固结沉积物中触发了厚约500 m的旋转滑坡,导致海底垂直位移高达100 m^[78,84]。

以及水深大于约650 m的区域广泛分布的厚度小于25 m的海底表层沉积物失稳(后退式平移滑坡)^[78,85]。海啸数值模拟表明,厚层旋转滑塌可以解释近场观测到的破坏性海啸,而广泛的平移式滑坡则是远场海啸的成因^[78,84]。

高渗透层,如火山灰层和脆弱的生物沉积层,夹在低渗透层之间,构成了地震液化引发海底滑坡的另一个重要机制^[86]。具体机制是地震震动导致高渗透弱层中的沉积颗粒重新排列或破碎,造成压缩(体积减小),随后孔隙压力增加。这促进了孔隙流体在高渗透弱层和上覆低渗透黏土层之间界面的快速积累,减少了垂直有效应力,从而破坏了斜坡稳定性^[86]。这一机制已经通过实验室动力变形实验^[87]和钻孔调查^[88]得到证实。

深水海底滑坡主要通过制造正负地形产生海啸,其机制与地震同震断层位移直接导致的海底形态变化产生海啸相似。海底滑坡的类型、滑动的垂直位移、深度^[89]、滑坡的体积^[90]等因素,被认为是控制海啸波幅的主要参数。

2.4 不同类型同震滑坡海啸灾害链特征及触发机制总结

依据以上案例回顾,在地震-滑坡-海啸灾害链中,从初始地震到滑坡再到海啸,各环节的相互作用会显著放大灾害的影响。初始地震产生地面震动导致敏感岩体或沉积物失去稳定性,从而触发滑坡/崩塌等次生灾害。坠入水中的沿岸陆地滑坡、近岸海底滑坡以及深水区海底滑坡会进一步引发海啸,海啸波迅速传播到沿海地区,导致更大范围的破坏和人员伤亡,从而进一步加剧灾害的严重性。

影响同震滑坡海啸生成的关键参数除了滑坡的体积、水深、坡度^[91]、速度、加速度、角动量^[84]滑坡物质的组成和密度等之外,滑坡初始位置和失稳机制/破坏模式直接决定其对水体的扰动方式,因此对海啸特征和规模也具有强大控制作用^[92]。沿岸陆地滑坡位于岸上高处,滑坡物质从高处坠落,具有较高的重力势能和动能,冲击水面形成显著的空腔,引起剧烈的水体扰动(图5(a))。相比之下,近岸水下滑坡和海底滑坡位于水体下方,滑坡物质沿海底滑动/流动,直接引起海底地形变化,动能相对较低(图5(b~d))。此外,沿岸陆地滑坡海啸波能量集中,并且狭窄的海湾或湖泊更容易集中波能,波高可能极大,但传播范围有限;而深水区域的海底滑坡引发的海啸波传播速度和范围较大,但波高通

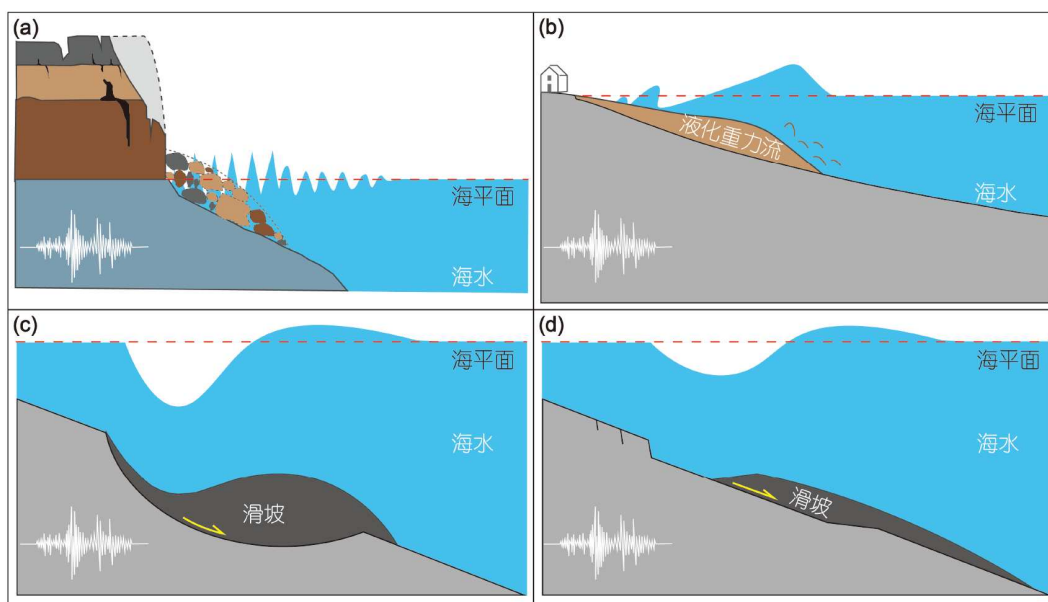


图5 三类同震滑坡海啸灾害链机制。(a) 地震触发沿岸陆地滑坡产生海啸；(b) 地震触发近岸海底滑坡产生海啸；(c, d) 地震触发~200 m水深以下旋转型和平移型海底滑坡产生海啸

Figure 5 Mechanisms of three types of co-seismic landslide-tsunami cascading hazards. (a) Earthquake-triggered terrestrial landslide generating a tsunami. (b) Earthquake-triggered nearshore submarine landslide generating a tsunami. (c, d) Earthquake-triggered rotational and translational submarine landslides at depths ~200 m or more generating a tsunami

常相对较低。

3 我国南海北部地震-滑坡-海啸链生灾害风险

在全球范围内,南海地区的地震-滑坡-海啸链生灾害风险非常突出,其中以1992年海南近海地震和2006年台湾西南部近海屏东地震为典型代表(图6)。

1992年,在无异常天气的情况下,海南岛沿海的5个潮位站记录到了最大波高为78 cm的海啸(图6(b))^[93]。这一特殊事件是南海北部地区首次有仪器记录的海啸事件。海啸事件与海南岛南部近海地区的一次地震群有关,最大震级仅3.7级,是全球范围内记录到的引发海啸的最低震级记录^[26]。距离发震位置不远的琼东南陆坡区域是海底滑坡的高发区域,高精度多波束海底地形和高分辨率地震资料共同揭示,这一区域存在大量的海底滑坡(图6(a))^[94]。并且由于地震震级远小于具备海啸触发能力的震级(M_w 6.5),由此可以推测海啸形成的真正原因很可能是地震在琼东南陆坡区域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^[26]。

2006年12月26日发生在台湾岛西南近海的屏东双震-滑坡-海啸灾害链更加举世瞩目。两次 M_w 7.0左右地

震在8 min内接连发生,相距仅23 km(图6(c))。这次双震事件触发了滑坡/浊流并在台湾岛南部和大陆沿岸引发了局地海啸^[98]。地震引发的海底滑坡和高速浊流(3.7~20 m/s)导致11条跨越高屏峡谷和马尼拉海沟的海底电缆(水深1500~4000 m)在地震后的14 h内依次断裂,严重影响了东南亚甚至全球通信^[97]。依据电缆断裂位置以及地震前后的详细多波束测深数据,地震至少触发了5处海底滑坡(图6(c))。主要发生在高屏峡谷和邻近的方寮峡谷^[97]。

以上两个事件表明,在南海北部区域,地震-滑坡-海啸链生灾害风险不容忽视。南海北部发育两条重要的活动断裂带-滨海断裂带和陆坡断裂带,两者都具有孕育破坏性地震的潜力^[95,96,99~101]。首先,滨海断裂带靠近南海北部沿岸陡峻的海岸地形地貌和泥沙供应充足的河口地区。当这些地震和地形条件结合时,应考虑地震触发沿岸陆地滑坡或近岸海底滑坡并引发海啸的可能。例如1918年南澳 M_w 7.5地震后有“地裂土崩,海水腾涌”等记载^[99],据此推测存在同震崩塌坠入水中触发海啸的可能性。此外,作为西太平洋最大的边缘海,南海捕获了周边不同规模河流输送的大量沉积物^[102]。在南海北部,红河、珠江、海南岛以及台湾岛西南部的水

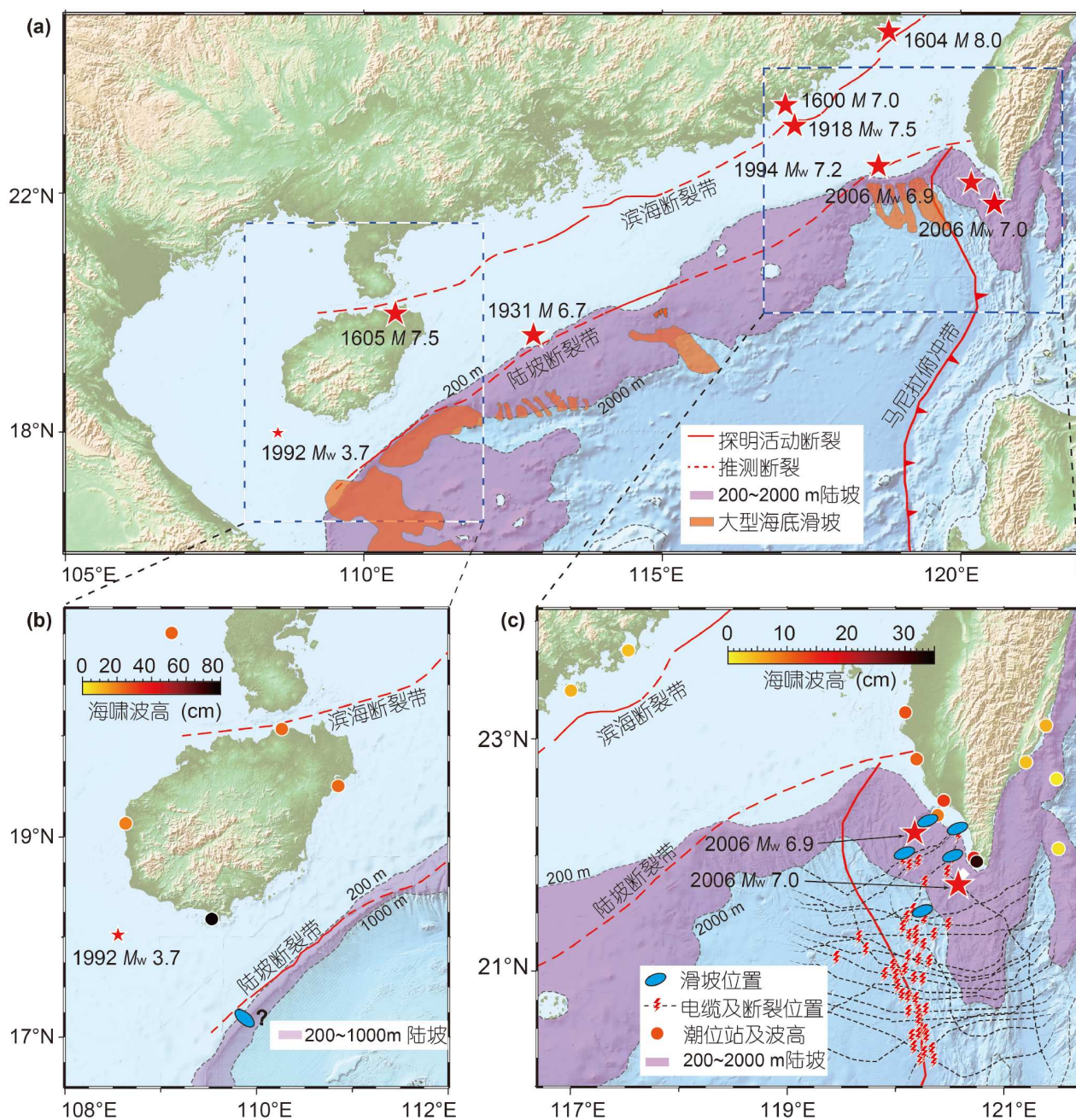


图6 南海北部地震-滑坡-海啸灾害链孕灾环境。(a) 主要发震构造与历史地震, 断裂带引自Lv等人^[95]和Zeng等人^[96]。(b) 1992年地震-滑坡-海啸灾害链。海啸波高数据引自叶琳等人^[93]。(c) 2006年地震-滑坡-海啸灾害链。电缆及电缆断裂位置以及滑坡引自Hsu等人^[97]。海啸波高数据引自Hu等人^[98]

Figure 6 Hazardous environment for earthquake-landslide-tsunami cascading hazards in the northern South China Sea. (a) Main seismogenic structures and historical earthquakes, fault zones are from Lv et al.^[95] and Zeng et al.^[96]. (b) The 1992 earthquake-landslide-tsunami cascading hazard, with tsunami wave height data from Ye et al.^[93]. (c) The 2006 earthquake-landslide-tsunami cascading hazard, with cable and cable break locations and landslide data are from Hsu et al.^[97], and tsunami wave height data from Hu et al.^[98]

系每年将约416 Mt的沉积物汇入南海北部^[103]。这些河流供给的粗颗粒碎屑沉积物通常堆积在南海北部大陆边缘, 形成了较厚的陆缘沉积层^[94,102]。而发育于南海北

部陆架坡折带的陆坡断裂带紧邻南海北部陆坡(图6(a))。这种地震、地形和沉积物的组合增加了南海北部陆坡发生同震海底滑坡并伴随破坏性海啸的危险。虽

然南海北部宽阔的陆架可以起到消减海啸波能量的作用,但其亦能有效捕获海啸波并在沿岸产生超长时间水位振荡^[99,101]。加之,华南沿海地区是我国经济最发达的地区,包含高人口密度的粤港澳大湾区以及海南自贸区和大量关键基础设施。一旦遭受破坏性海啸,后果将不堪设想。虽然目前很难确定南海北部已发现的众多海底滑坡与地震的关系^[104,105],但其足以产生破坏性海啸的潜力警示了南海北部发生地震并导致滑坡海啸灾害链的风险必须引起重视^[106,107]。

4 地震-滑坡-海啸链生灾害研究的挑战

尽管在过去几十年里,对同震滑坡海啸进行了广泛的案例研究,但目前在这一领域仍有许多重要的认知空白。同震滑坡海啸研究中存在的主要挑战如下:

4.1 同震滑坡海啸预警

目前全球各地海啸预警中心可以在地震发生后几分钟内发出可能引发海啸的预警信息。然而,这一预警系统主要针对构造性地震海啸,难以应对由同震滑坡引发的局部海啸,特别是在预警时间方面。因此目前没有针对同震滑坡海啸的预警系统。本研究数据库中海啸性同震滑坡通常发生在靠近海岸的区域(表S1),其海啸波到达时间一般比构造海啸短很多。构造海啸一般在震后数分钟至数小时到达,而同震滑坡海啸可以在地震发生后数秒内到达海岸(图S3)。相比于构造海啸源,滑坡源预留的预警时间更少,这使得预测灾害影响和制定应急管理决策变得更加困难。例如,1964年阿拉斯加 M_w 9.2大地震期间,复活湾的Seward社区同时遭受构造海啸和海底滑坡海啸的影响(图3)^[108]。构造海啸波在地震发生后约30 min才到达,而同震海底滑坡引发的海啸则在地震发生1.5~2 min内就已到达海岸。考虑到地震震动持续了4 min,这意味着在地震震动尚未完全停止时,滑坡海啸便已经到达并影响了海岸^[109]。2007年日本能登半岛 M_w 6.9地震引发的构造海啸在地震发生1 h后才到达富山湾。然而,富山湾内由同震海底滑坡触发的海啸在地震发生3 min后便影响了富山湾沿岸^[29]。

除了同震滑坡之外,某些海底滑坡可能会在地震后的一段时间内发生,且通常没有余震的触发。例如1998新几内亚 M_w 7.0地震触发的海底滑坡延迟了约13 min才发生^[81],2016新西兰 M_w 7.8地震触发的海底滑坡则延迟了10~20 min^[110]。然而,目前缺失实时原位

监测海啸性海底滑坡的方法^[111],这使得沿岸社区及设施可能突然遭遇由滑坡引发的海啸波,造成突发性灾害。

基于当前数据库的初步数据,尽管这些数据尚无法解决所有预警挑战,但它们为优化现有海啸预警系统提供了重要的参考依据。本研究数据库包括触发海啸性滑坡的震级阈值、震级-震中距离上限等关键参数(表S1),这些参数可为海啸预警机构制定更为科学和合理的滑坡海啸预警发布标准提供可能的借鉴。这将有助于明确哪些地震事件应触发滑坡海啸预警,并确定预警发布的地理范围。需要指出的是,在数据库中,约一半的触发海啸性海底滑坡的地震震中位于陆地。因此,海啸预警系统应考虑将位于海岸一定范围内的陆地地震纳入预警评估范围,并结合震中位置和震级,评估其对周边海岸地区的潜在影响,从而及时发布预警信息。对于沿海社区的居民而言,一旦接收到海啸预警或感受到地震震动,应充分利用地震震动与海啸到达之间宝贵的数秒至数分钟时间,立刻采取疏散措施,前往地势较高的安全区域。

4.2 海啸源判别

地震-滑坡-海啸灾害链研究中的另一主要挑战是异常海啸源的判别。首先,当地震和海底滑坡共同引发海啸时,难以确定究竟是哪一种因素在引发海啸中起到了主要作用。对潮位站数据的分析表明,2018印度尼西亚苏拉威西地震海啸仅有16%的海啸振幅可以归因于构造过程,而84%海啸振幅由沿岸海底液化重力流造成^[48]。然而对于更多的历史案例,缺少潮位站数据以供分析海啸成分。因此,在一些海啸事件中,地震断层位移直接导致的海啸与海底滑坡引发的海啸叠加出现时,滑坡海啸往往被忽视。本研究对NOAA海啸数据库中1900年以来被归类为地震构造海啸的最大高度进行了统计分析(震级间隔范围为1个单位)。同时,统计了本研究数据库中70次同震海底滑坡海啸的最大高度(图7)。比较发现,随着震级的增加,两类海啸的最大高度均明显增加。无论中值、上下四分位数范围,同震海底滑坡海啸的最大海啸高度明显大于地震海啸的最大高度。需要注意的是,目前没有充足证据证明本研究数据库中70次海啸的振幅完全由海底滑坡导致。换言之,大多数地震后伴随的异常海啸可能是由双重因素(海底滑坡和断层位移)共同触发的。

其次,尽管在某些案例中,已明确同震地壳变形主要局限于陆地,且无法直接引发海啸,但鉴于异常海啸

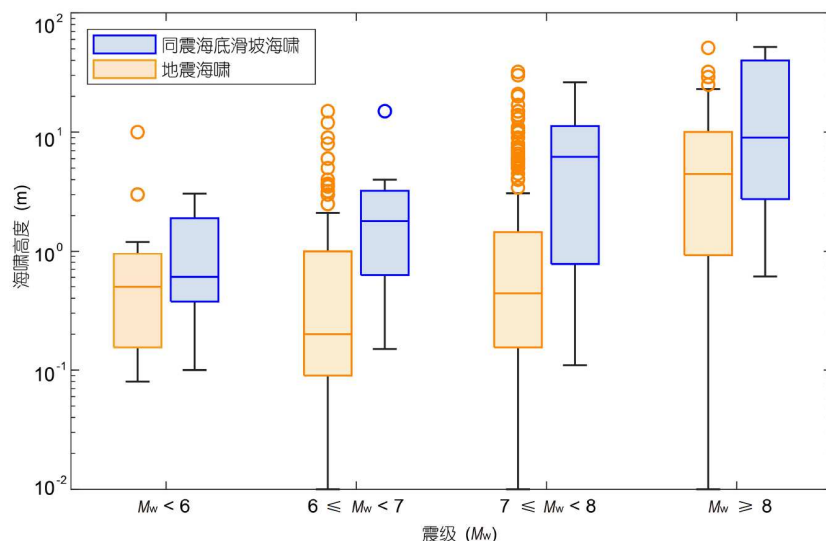


图7 仅地震源与地震-海底滑坡双重源产生的海啸高度对比。箱线图中的直线表示数据的中位数。箱体的上边缘和下边缘分别表示数据的第3四分位数和第1四分位数, 即箱体内包含了50%的数据。圆圈表示异常值

Figure 7 Comparison of tsunami heights generated by earthquake-only sources vs. combined earthquake and submarine landslide sources. The straight line in the box plot represents the median of the data. The top and bottom edges of the box indicate the 3rd and 1st quartiles, respectively, indicating that 50% of the data is contained within the box. Circles represent outliers

的复杂性和多源性, 若缺乏海底观测数据, 海啸源的分析 and 确认仍然存在较大的不确定性。例如, 2023年土耳其-叙利亚 M_w 7.7地震后, 东地中海出现了神秘海啸。Hu等人^[112]和Heidarzadeh等人^[113]分别通过潮位站观测数据的波形分析和反向海啸射线追踪以及正向海啸数值模拟方法, 提出了不同位置和规模的海底滑坡源(图S4)。Heidarzadeh等人^[113]认为是发生在距离Arsuz 50 km外陆坡上的单一海底滑坡源导致了长约16 km、宽约4 km的海底变形, 并通过数值模拟验证了其与其海啸观测结果相符。相反, Hu等人^[112]提出了较为复杂的成因, 推测Iskenderun湾内外可能有两个滑坡源, 湾内滑坡直径约7 km, 且首波为负波。湾外则可能与Antakya沿海全新世三角洲的液化现象有关(图S4), 滑坡直径约6 km, 首波为正波。争议的焦点在于是否为单一海底滑坡源以及滑坡的规模, 并且滑坡诱发机制仍有待进一步探讨。

4.3 灾害链危险性多物理过程评估模型的缺失

地震-滑坡-海啸灾害链是一个涉及断层破裂、地面震动、斜坡失稳以及海水响应的复杂过程, 目前的研究缺少地震-滑坡-海啸灾害链危险性多物理过程评价模型。

首先在地震触发海底滑坡这一关键环节缺少可靠

的评估方法。目前评估地震作用下海底斜坡稳定性常用的方法是伪静力法^[114]。这一方法仅考虑了地震荷载力与抗滑力之间的伪静力平衡, 未充分考虑地震过程中海底斜坡沉积物强度的响应。其次是由于缺乏实时监测技术, 获取海底滑坡和由此引发的海啸数据较为困难。因此, 实际事件的分析 and 验证主要依赖于数值模拟和实验室实验。这种技术短板限制了对海底滑坡及其海啸过程的全面理解, 导致现有的滑坡海啸模拟模型面临描述滑坡体行为和海啸生成过程的精确性问题, 并且现有模型在处理滑坡变形、滑坡在水中的运动方式、剪切行为以及水-滑坡相互作用时存在技术上的不确定性^[14]。滑坡体的物理性质、体积、形态、速度、下滑路径等参数微小变化都会显著影响海啸的生成、传播、规模 and 影响范围, 但如何准确测量 and 应用这些参数仍是一个重要的挑战。并且由于同震海底滑坡的发生频率难以确定, 这导致概率海啸危险评估(PTHA)方法难以有效应用于同震滑坡海啸^[115]。

5 总结与展望

本研究首次汇总 and 建立了1900年以来全球93起同震滑坡海啸灾害链数据库。根据同震滑坡的初始位置, 将事件主要分为沿岸陆地同震滑坡海啸、近岸海底同震滑坡海啸和水深~200 m以下海底同震滑坡海啸三类

并探讨其各自的触发机制。地震触发沿岸陆地滑坡产生海啸的机制是强烈地震动使得沿岸不稳定的山体发生滑坡/崩塌/倾倒, 滑坡物质高速撞击水面, 产生海啸; 地震触发近岸海底滑坡产生海啸的机制是强烈地震作用导致沿岸较粗饱和和沉积物发生液化。液化后的沉积物在重力作用下向海洋方向流动, 形成液化重力流, 产生海啸; 地震触发深水区海底滑坡产生海啸的机制是强烈地震作用导致细粒沉积物发生旋转滑坡/后退式平移滑坡, 制造的正负地形产生海啸。

在全球范围内, 我国南海地区的地震-滑坡-海啸链生灾害风险非常突出。特别是滨海断裂带和陆坡断裂带两条潜在发震构造与区域地形地貌和沉积物条件的不利组合, 显著增加了这一地区发生地震-滑坡-海啸链生灾害的风险。

在过去的十几年中, 链式灾害评估与预警已经成为一个活跃的研究领域。然而, 评估由地震-滑坡-海啸链生灾害引起的风险并进行预警仍然非常具有挑战性,

主要瓶颈在于: (1) 地震、滑坡和海啸之间的相互作用是高度耦合的多物理过程, 且它们之间的相互作用存在很大不确定性。 (2) 地震引发的滑坡海啸可能在地震发生后瞬间或几秒内抵达海岸, 预警时间极为有限。目前需要开发结合地震、滑坡和海啸的多物理过程的评估模型, 这些模型需要处理地震作用下滑坡体的启动、变形、剪切行为以及与水体的相互作用和海啸的水动力传播过程。通过海底观测网、海底GNSS和海啸浮标等观测技术实现海底滑坡原位监测和深海-近海海啸监测系统, 建立基于深海和近浅海海啸监测数据的实时海啸源反演技术和数据同化技术。地震-滑坡-海啸链生灾害评估和预警研究涉及地质学、地震学、力学(土力学和流体力学)、数学与计算科学(数值模拟、人工智能)、信息技术(监测数据的获取和传输)和社会科学(灾害管理和风险传播)等多个学科。因此需要基于多学科交叉融合的研究思路, 提出综合性的研究框架和方法。

参考文献

- Mizrahi S. Cascading disasters, information cascades and continuous time models of domino effects. *Int J Disaster Risk Reduction*, 2020, 49: 101672
- Fan X, Dufresne A, Siva Subramanian S, et al. The formation and impact of landslide dams – state of the art. *Earth-Sci Rev*, 2020, 203: 103116
- Xu C. Landslide seismology geology: a sub-discipline of environmental earth sciences (in Chinese). *J Engin Geol*, 2018, 26: 207–222 [许冲. 环境地球科学之滑坡地震地质学. *工程地质学报*, 2018, 26: 207–222]
- Pescaroli G, Alexander D. Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters. *Nat Hazards*, 2016, 82: 175–192
- Liu P L F, Higuera P, Husrin S, et al. Coastal landslides in Palu Bay during 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Landslides*, 2020, 17: 2085–2098
- Grilli S T, Tappin D R, Carey S, et al. Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Sci Rep*, 2019, 9: 11946
- Gusiakov V K. Global Occurrence of Large Tsunamis and Tsunami-like Waves Within the Last 120 years (1900–2019). *Pure Appl Geophys*, 2020, 177: 1261–1266
- Kawata Y, Benson B C, Borrero J C, et al. Tsunami in Papua New Guinea was as intense as first thought. *EoS Trans*, 1999, 80: 101–105
- Tappin D R, Watts P, McMurtry G M, et al. The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998—offshore evidence on the source mechanism. *Mar Geol*, 2001, 175: 1–23
- Kremer K, Hilbe M, Simpson G, et al. Reconstructing 4000 years of mass movement and tsunami history in a deep peri-Alpine lake (Lake Geneva, France-Switzerland). *Sedimentology*, 2015, 62: 1305–1327
- Glimsdal S, L'Heureux J S, Harbitz C B, et al. The 29th January 2014 submarine landslide at Statland, Norway—landslide dynamics, tsunami generation, and run-up. *Landslides*, 2016, 13: 1435–1444
- Donaldson G, Goff J, Chagué C, et al. The Waikari River tsunami: New Zealand's largest historical tsunami event. *Sediment Geol*, 2019, 383: 148–158
- Yin Y, Huang B, Chen X, et al. Numerical analysis on wave generated by the Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 2015, 12: 355–364
- Sassa S. Landslides and Tsunamis: multi-geohazards. *Landslides*, 2023, 20: 1335–1341
- Aránguiz R, Caamaño D, Espinoza M, et al. Analysis of the cascading rainfall-landslide-tsunami event of June 29th, 2022, Todos Los Santos Lake, Chile. *Landslides*, 2023, 20: 801–811
- Ripepe M, Lacanna G. Volcano generated tsunami recorded in the near source. *Nat Commun*, 2024, 15: 1802

- 17 Dai C, Higman B, Lynett P J, et al. Detection and assessment of a large and potentially tsunamigenic periglacial landslide in Barry Arm, Alaska. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL089800
- 18 Sahal A, Lemahieu A. The 1979 nice airport tsunami: mapping of the flood in Antibes. *Nat Hazards*, 2011, 56: 833–840
- 19 Hébert H, Piatanesi A, Heinrich P, et al. Numerical modeling of the September 13, 1999 landslide and tsunami on Fatu Hiva Island (French Polynesia). *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 122-1–122-4
- 20 Keefer D K. Landslides caused by earthquakes. *Geol Soc Am Bull*, 1984, 95: 406–421
- 21 Tappin D R. Submarine landslides and their Tsunami hazard. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 551–578
- 22 Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Am*, 1994, 84: 974–1002
- 23 Tinti S, Armigliato A, Manucci A, et al. The generating mechanisms of the August 17, 1999 İzmit bay (Turkey) tsunami: regional (tectonic) and local (mass instabilities) causes. *Mar Geol*, 2006, 225: 311–330
- 24 Hornbach M J, Braudy N, Briggs R W, et al. High tsunami frequency as a result of combined strike-slip faulting and coastal landslides. *Nat Geosci*, 2010, 3: 783–788
- 25 Papadopoulos G A, Daskalaki E, Fokaefs A. Tsunamis generated by coastal and submarine landslides in the mediterranean sea. In: Lykousis V, Sakellariou D, Locat J, eds. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 415–422
- 26 Ren Z, Zhao X, Liu H. Numerical study of the landslide tsunami in the South China Sea using Herschel-Bulkley rheological theory. *Phys Fluids*, 2019, 31: 056601
- 27 Hoffmann G, Al-Yahyai S, Naeem G, et al. An Indian Ocean tsunami triggered remotely by an onshore earthquake in Balochistan, Pakistan. *Geology*, 2014, 42: 883–886
- 28 Pranantyo I R, Cummins P, Griffin J, et al. Modelling of historical tsunami in Eastern Indonesia: 1674 Ambon and 1992 Flores case studies. *AIP Conf Proc*, 2017, 090005
- 29 Abe I, Goto K, Imamura F, et al. Numerical simulation of the tsunami generated by the 2007 Noto Hanto Earthquake and implications for unusual tidal surges observed in Toyama Bay. *Earth Planets Space*, 2008, 60: 133–138
- 30 Mulia I E, Heidarzadeh M, Gusman A R, et al. Compounding impacts of the earthquake and submarine landslide on the Toyama Bay tsunami during the January 2024 Noto Peninsula event. *Ocean Eng*, 2024, 310: 118698
- 31 Okal E A, Synolakis C E. Source discriminants for near-field tsunamis. *Geophys J Int*, 2004, 158: 899–912
- 32 Snyder H. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. *J Business Res*, 2019, 104: 333–339
- 33 Naranjo J A, Arenas M, Clavero J, et al. Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aisén (45°25'S), Chile. *Andean Geol*, 2009, 36: 137–145
- 34 Redfield T F, Hermanns R L, Oppikofer T, et al. Analysis of the 2007 earthquake-induced Punta Cola rockslide and tsunami, Aysén Fjord, Patagonia, Chile (45.3°S, 73.0° W). 2011
- 35 Oppikofer T, Hermanns R L, Redfield, T F, et al. Morphologic description of the Punta Cola rock avalanche and associated minor rockslides caused by the 21 April 2007 Aysén earthquake (Patagonia, southern Chile). *Rev Asoc Geológica Argent*, 2012, 69: 339–353
- 36 Lastras G, Amblas D, Calafat A M, et al. Landslides Cause Tsunami waves: insights from Aysén Fjord, Chile. *EoS Trans*, 2013, 94: 297–298
- 37 Dowrick D J. Damage and intensities in the magnitude 7.8 1931 Hawke's bay, New Zealand, earthquake. *Bull N Z Soc Earthq Eng*, 1998, 31: 139–163
- 38 Evans S G. The 1946 Mount Colonel Foster rock avalanche and associated displacement wave, Vancouver Island, British Columbia. *Can Geotech J*, 1989, 26: 447–452
- 39 González-Vida J M, Macías J, Castro M J, et al. The Lituya Bay landslide-generated mega-tsunami – numerical simulation and sensitivity analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2019, 19: 369–388
- 40 Power W, Downes G, Mcsaveney M, et al. The Fiordland Earthquake and Tsunami, New Zealand, 21 August 2003. In: Satake K, ed. *Tsunamis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 31–42
- 41 Hancox G T, Cox S C, Turnbull I M, et al. Reconnaissance studies of landslides and other ground damage caused by the Mw7.2 Fiordland earthquake of 22 August 2003. Institute of Geological & Nuclear Sciences, 2003
- 42 Miller D J. The Alaska earthquake of July 10, 1958: giant wave in Lituya Bay. *Bull Seismol Soc Am*, 1960, 50: 253–266
- 43 Fritz H M, Mohammed F, Yoo J. Lituya bay landslide impact generated mega-Tsunami 50th Anniversary. *Pure Appl Geophys*, 2009, 166: 153–175
- 44 Harbitz C B, Løvholt F, Pedersen G, et al. Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: a short review. *Nor J Geol*, 2006, 86: 255–264
- 45 Watt S F L, Talling P J, Vardy M E, et al. Combinations of volcanic-flank and seafloor-sediment failure offshore Montserrat, and their implications for tsunami generation. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 319-320: 228–240

- 46 Natawidjaja D H, Daryono M R, Prasetya G, et al. The 2018 *Mw* 7.5 Palu “super-shear” earthquake ruptures geological fault’s multi-segment separated by large bends: results from integrating field measurements, LiDAR, swath bathymetry, and seismic-reflection data. *Geophys J Int*, 2020, 224: ggaa498
- 47 Carvajal M, Araya - Cornejo C, Sepúlveda I, et al. Nearly instantaneous Tsunamis following the *Mw* 7.5 2018 Palu earthquake. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 5117–5126
- 48 Sassa S, Takagawa T. Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 2019, 16: 195–200
- 49 Socquet A, Hollingsworth J, Pathier E, et al. Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nat Geosci*, 2019, 12: 192–199
- 50 Mikami T, Shibayama T, Esteban M, et al. Field survey of the 2018 Sulawesi Tsunami: inundation and run-up heights and damage to coastal communities. *Pure Appl Geophys*, 2019, 176: 3291–3304
- 51 Omira R, Dogan G G, Hidayat R, et al. The September 28th, 2018, Tsunami in Palu-Sulawesi, Indonesia: a post-event field survey. *Pure Appl Geophys*, 2019, 176: 1379–1395
- 52 Barka A. The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (*M* 7.4), North Anatolian Fault. *Bull Seismol Soc Am*, 2002, 92: 43–60
- 53 Sonmez B, Ulusay R. Liquefaction potential at Izmit Bay: comparison of predicted and observed soil liquefaction during the Kocaeli earthquake. *Bull Eng Geol Environ*, 2008, 67: 1–9
- 54 Rogers G C. A documentation of soil failure during the British Columbia earthquake of 23 June, 1946. *Can Geotech J*, 1980, 17: 122–127
- 55 Mosher D C, Monahan P A, Barrie J V, et al. Coastal submarine failures in the strait of Georgia, British Columbia: landslides of the 1946 Vancouver Island earthquake. *J Coast Res*, 2004, 201: 277–291
- 56 Suleimani E, Freymueller J T. Near-field modeling of the 1964 Alaska Tsunami: the role of splay faults and horizontal displacements. *J Geophys Res Solid Earth*, 2020, 125: e2020JB019620
- 57 Plafker G, Kachadoorian R, Eckel E B, et al. Effects of the earthquake of March 27, 1964, on various communities: U.S. geological survey professional paper 542–G, 43 p., 2 sheets, scales 1:2, 500, 000 and 1:250, 000. 1969. <https://pubs.usgs.gov/pp/0542g/>
- 58 Haeussler P J, Parsons T, Lee H J, et al. A synthesis of characteristics of submarine landslides generated by the 1964 Great Alaska earthquake in seven Fjords. 2016, 284621
- 59 Ferentinos G, Papatheodorou G, Geraga M, et al. The disappearance of Helike-Classical Greece—New Remote Sensing and geological evidence. *Remote Sens*, 2015, 7: 1263–1278
- 60 Hasiotis T, Papatheodorou G, Bouckovalas G, et al. Earthquake-induced coastal sediment instabilities in the western Gulf of Corinth, Greece. *Mar Geol*, 2002, 186: 319–335
- 61 Papatheodorou G, Ferentinos G. Submarine and coastal sediment failure triggered by the 1995, *M_s* = 6.1 R Aegion earthquake, Gulf of Corinth, Greece. *Mar Geol*, 1997, 137: 287–304
- 62 Maramai A, Brizuela B, Graziani L. The Euro-Mediterranean Tsunami catalogue. *Ann Geophys*, 2014, 57: 4
- 63 Fritz H M, Hillaire J V, Molière E, et al. Twin Tsunamis triggered by the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Pure Appl Geophys*, 2013, 170: 1463–1474
- 64 Huang Y, Han X. Features of earthquake-induced seabed liquefaction and mitigation strategies of novel marine structures. *JMSE*, 2020, 8: 310
- 65 Field M E, Gardner J V, Jennings A E, et al. Earthquake-induced sediment failures on a 0.25° slope, Klamath River delta, California. *Geology*, 1982, 10: 542
- 66 Bottari A, Carapezza E, Carapezza M, et al. The 1908 Messina Strait earthquake in the regional geostructural framework. *J Geodyn*, 1986, 5: 275–302
- 67 Billi A, Funicello R, Minelli L, et al. On the cause of the 1908 Messina tsunami, southern Italy. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 2008GL033251
- 68 Schambach L, Grilli S T, Tappin D R, et al. New simulations and understanding of the 1908 Messina tsunami for a dual seismic and deep submarine mass failure source. *Mar Geol*, 2020, 421: 106093
- 69 Billi A, Minelli L, Orecchio B, et al. Runup distribution for the 1908 Messina Tsunami in Italy: observed data versus expected curves. *Bull Seismol Soc Am*, 2009, 99: 3502–3509
- 70 Tappin D R. Digital elevation models in the marine domain: investigating the offshore tsunami hazard from submarine landslides. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 2010, 345: 81–101
- 71 Carcione J M, Kozák J T. The Messina-Reggio earthquake of December 28, 1908. *Stud Geophys Geod*, 2008, 52: 661–672
- 72 Favalli M, Boschi E, Mazzarini F, et al. Seismic and landslide source of the 1908 Straits of Messina tsunami (Sicily, Italy). *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 2009GL039135
- 73 Mercado A, McCANN W. Numerical simulation of the 1918 Puerto Rico Tsunami. *Nat Hazards*, 1998, 18: 57–76

- 74 Doser D I, Rodriguez C M, Flores C. Historical earthquakes of the Puerto Rico–Virgin Islands region (1915–1963). In: *Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and Offshore Areas*. Geological Society of America, 2005
- 75 Hornbach M J, Mondziel S A, Grindlay N R, et al. Did a submarine slide trigger the 1918 Puerto Rico tsunami? *Sci Tsunami Hazards*, 2008, 27: 22–31
- 76 López-Venegas A M, ten Brink U S, Geist E L. Submarine landslide as the source for the October 11, 1918 Mona Passage tsunami: observations and modeling. *Mar Geol*, 2008, 254: 35–46
- 77 Heezen B C, Ericson D B, Ewing M. Further evidence for a turbidity current following the 1929 Grand Banks earthquake. *Deep Sea Res*, 1953, 1954, 1: 193–202
- 78 Schulten I, Mosher D C, Piper D J W, et al. A massive slump on the St. Pierre Slope, a new perspective on the 1929 grand banks submarine landslide. *JGR Solid Earth*, 2019, 124: 7538–7561
- 79 Kikuchi M, Yamanaka Y, Abe K, et al. Source rupture process of the Papua New Guinea earthquake of July 17, 1998 inferred from teleseismic body waves. *Earth Planets Space*, 1999, 51: 1319–1324
- 80 Tappin D R, Matsumoto T, Watts P, et al. Sediment slump likely caused 1998 Papua New Guinea Tsunami. *EoS Trans*, 1999, 80: 329–340
- 81 Tappin D R, Watts P, Grilli S T. The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: anatomy of a catastrophic event. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2008, 8: 243–266
- 82 Barnhart W D, Hayes G P, Briggs R W, et al. Ball-and-socket tectonic rotation during the 2013 *M*_w 7.7 Balochistan earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 403: 210–216
- 83 Heidarzadeh M, Satake K. Possible sources of the tsunami observed in the northwestern Indian Ocean following the 2013 September 24 *M*_w 7.7 Pakistan inland earthquake. *Geophys J Int*, 2014, 199: 752–766
- 84 Løvholt F, Schulten I, Mosher D, et al. Modelling the 1929 Grand Banks slump and landslide tsunami. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 2019, 477: 315–331
- 85 Piper D J W, Cochonat P, Morrison M L. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar. *Sedimentology*, 1999, 46: 79–97
- 86 Gatter R, Clare M A, Kuhlmann J, et al. Characterisation of weak layers, physical controls on their global distribution and their role in submarine landslide formation. *Earth-Sci Rev*, 2021, 223: 103845
- 87 Roesner A, Wiemer G, Kreiter S, et al. Impact of seismicity on Nice slope stability—Ligurian Basin, SE France: a geotechnical revisit. *Landslides*, 2019, 16: 23–35
- 88 Cukur D, Um I K, Buchs D M, et al. Submarine landslides on the Eastern South Korea Plateau (ESKP)—Do pumice-rich tephra layers control slope stability? *Mar Geol*, 2024, 467: 107205
- 89 Watts P, Grilli S T, Tappin D R, et al. Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies. *J Waterway Port Coast Ocean Eng*, 2005, 131: 298–310
- 90 Murty T S. Tsunami wave height dependence on landslide volume. *Pure Appl Geophys*, 2003, 160: 2147–2153
- 91 Løvholt F, Pedersen G, Harbitz C B, et al. On the characteristics of landslide tsunamis. *Phil Trans R Soc A*, 2015, 373: 20140376
- 92 Løvholt F, Bondevik S, Laberg J S, et al. Some giant submarine landslides do not produce large tsunamis. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 8463–8472
- 93 Ye L, Wang X N, Bao C L. Tsunami in the China Seas and its warning service (in Chinese). *J Nat Disasters (in Chinese)*, 1994, 3: 100–103 [叶琳, 王喜年, 包澄澜. 中国的地震海啸及其预警服务. 自然灾害学报, 1994, 3: 100–103]
- 94 Wang W, Wang D, Wu S, et al. Submarine landslides on the north continental slope of the South China Sea. *J Ocean Univ China*, 2018, 17: 83–100
- 95 Lv L, Li Z, Wang D, et al. The latest activity of the slope fault zone (Pearl River Mouth) in northern South China Sea and implications for earthquake hazard assessments. *Mar Pet Geol*, 2024, 166: 106937
- 96 Zeng F, Wang D, Li Z, et al. The discovery of an active fault in the Qiongdongnan Basin of the northern South China Sea. *Mar Pet Geol*, 2024, 163: 106777
- 97 Hsu S K, Kuo J, Lo C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung Earthquake off SW Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2008, 19: 767
- 98 Hu G, Li L, Satake K, et al. Source characteristics of the 2006 Pingtung earthquake doublet off southern Taiwan and the possible contribution of submarine landslides to the Tsunami. *Earth Planet Sci Lett*, 2024, 643: 118921
- 99 Li L, Qiu Q, Li Z, et al. Tsunami hazard assessment in the South China Sea: a review of recent progress and research gaps. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 783–809 [李琳琳, 邱强, 李志刚, 等. 南海海啸灾害研究进展及展望. 中国科学: 地球科学, 2022, 52: 803–831]
- 100 Yang X D, Zhang J C, Qiu Q, et al. Oceanic drilling into the northern margin of the South Chin Sea: investigating the great marine geohazards along the Littoral Fault Zone. *Acta Geol Sin (in Chinese)*, 2022, 96: 2853–2865 [杨晓东, 张锦昌, 邱强, 等. 滨海断裂带大型海洋地质灾害研究. 地质学报, 2022, 96: 2853–2865]

- 101 Li L L, Hu G, Wang W T, et al. Analysis of recent atypical Tsunami source events worldwide and their implications for tsunami research in the South China Sea (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 2480–2497 [李琳琳, 胡桂, 王伟涛, 等. 全球近期“非典型”海啸源事件机制分析及其对南海海啸研究的启示. *科学通报*, 2024, 69: 2480–2497]
- 102 Cao L, Jiang T, He J. Fingerprinting sand from Asian rivers to the deep central South China Sea since the Late Miocene. *GSA Bull*, 2021, 133: 1964–1978
- 103 Liu Z, Zhao Y, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea. *Earth-Sci Rev*, 2016, 153: 238–273
- 104 Sun Q L, Xie X N, Wu S G. Submarine landslides in the northern South China Sea: characteristics, geohazard evaluation and perspectives (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2021, 28: 258–270 [孙启良, 解习农, 吴时国. 南海北部海底滑坡的特征、灾害评估和研究展望. *地学前缘*, 2021, 28: 258–270]
- 105 Wang D W, Wu S G, Dong D D, et al. Seismic characteristics of Quaternary mass transport deposits in Qiongdongnan Basin (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2009, 29: 69–74 [王大伟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地第四纪块体搬运体系的地震特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29]
- 106 Li L, Shi F, Ma G, et al. Tsunamigenic potential of the Baiyun slide complex in the South China Sea. *JGR Solid Earth*, 2019, 124: 7680–7698
- 107 Ren Z, Liu H, Li L, et al. On the effects of rheological behavior on landslide motion and tsunami hazard for the Baiyun Slide in the South China Sea. *Landslides*, 2023, 20: 1599–1616
- 108 Haeussler P J, Lee H J, Ryan H F, et al. Submarine Slope Failures Near Seward, Alaska, during the M9.2 1964 earthquake. In: Lykousis V, Sakellariou D, Locat J, eds. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. 269–278
- 109 Suleimani E, Nicolisky D J, Haeussler P J, et al. Combined effects of tectonic and landslide-generated Tsunami Runup at Seward, Alaska during the Mw 9.2 1964 earthquake. *Pure Appl Geophys*, 2011, 168: 1053–1074
- 110 Heidarzadeh M, Satake K. Possible dual earthquake–landslide source of the 13 November 2016 Kaikoura, New Zealand Tsunami. *Pure Appl Geophys*, 2017, 174: 3737–3749
- 111 Jia Y G, Chen T, Li P Y, et al. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Control*, 2022, 33: 1–14 [贾永刚, 陈天, 李培英, 等. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33: 1–14]
- 112 Hu G, Satake K, Li L, et al. Origins of the Tsunami following the 2023 Turkey-Syria earthquake. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2023GL103997
- 113 Heidarzadeh M, Gusman A R, Mulia I E. The landslide source of the eastern Mediterranean tsunami on 6 February 2023 following the Mw 7.8 Kahramanmaraş (Türkiye) inland earthquake. *Geosci Lett*, 2023, 10: 50
- 114 Nian T, Guo X, Zheng D, et al. Susceptibility assessment of regional submarine landslides triggered by seismic actions. *Appl Ocean Res*, 2019, 93: 101964
- 115 Harbitz C B, Løvholt F, Bungum H. Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Nat Hazards*, 2014, 72: 1341–1374

补充材料

- 表S1 地震-海底滑坡-海啸灾害链
 表S2 触发沿岸陆地滑坡海啸灾害链的地震案例
 表S3 地震-液化-滑坡-海啸的典型案例
 图S1 2010年海地 M_w 7.0地震灾害链
 图S2 1929加拿大年纽芬兰 M_w 7.2地震灾害链
 图S3 由同震海底滑坡产生海啸的最短到时统计箱线图
 图S4 2023年土耳其-叙利亚地震滑坡海啸灾害链

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “全球地震-滑坡-海啸灾害链数据库的建立及链生机制分析”

Development of a global earthquake-landslide-tsunami cascade database and analysis of cascading mechanisms

Peng Du¹, Linlin Li^{1,2*}, Dawei Wang^{3*}, Xin Zeng⁴, Huabin Shi⁵, Kejie Chen⁶, Zhigang Li^{1,2}, Weitao Wang^{1,2} & Peizhen Zhang^{1,2}

¹ Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, China

² Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

³ Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

⁴ Marine Science Expedition Center, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, China

⁵ Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau 999078, China

⁶ Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

* Corresponding authors, E-mail: lililn3@mail.sysu.edu.cn; wangdawei@idsse.ac.cn

Earthquake-induced landslides, both nearshore terrestrial and submarine, can generate tsunamis, exemplifying a common type of cascading marine geohazards. These events pose significant risks to marine infrastructure such as subsea communication cables, oil and gas platforms, pipelines and rigs, as well as to coastal communities and ecosystems. Recent incidents such as the landslides and tsunamis triggered by the 2018 Sulawesi earthquake in Indonesia highlight the urgency of addressing these hazards. However, compared to terrestrial cascading disasters, research on marine cascading hazards is constrained by data acquisition challenges, limiting insights into their triggers and cascading impacts.

To fill the research gap, this study conducted a systematic literature review and developed a database of 93 global earthquake-landslide-tsunami cascades since 1900. Key parameters of earthquakes, landslides, and tsunamis were compiled and summarized, with detailed analysis of 20 representative cases, focusing on their triggering mechanisms and cascading effects. Based on the initial location of the landslides, we classified cascades into three categories: Nearshore terrestrial cascades: Seismic shaking destabilizes coastal slopes, triggering landslides or rockfalls that displace materials into water at high velocity, generating tsunamis. Nearshore submarine cascades: Seismic shaking induces liquefaction of saturated sediments nearshore marine area, causing liquefied gravity flow and tsunami generation. Submarine cascades in deeper waters (~200 m or more): Seismic shaking triggers translational landslides or slumps of fine-grained sediments, deforming the seafloor and generating tsunamis.

Despite advances in understanding co-seismic landslide-tsunami cascades, significant challenges remain, particularly in early warning and hazard assessment. Current tsunami warning systems primarily target tectonic tsunamis and are not well-equipped to warn localized tsunamis caused by co-seismic landslides. The short lead time, often just seconds to minutes, between an earthquake and the arrival of landslide-induced tsunamis further complicates warnings. Current methods for assessing submarine slope stability during seismic shaking fail to adequately capture the complex responses of slopes to seismic forces. Moreover, the lack of real-time monitoring hinders the accurate collection of data on submarine landslides, thereby restricting the precise assessment of cascading hazards.

This study highlights the importance of future research on the interconnected multi-physical processes between earthquakes, landslides, and tsunamis. Developing integrated multi-physical models to assess these interactions, along with creating comprehensive research frameworks through interdisciplinary collaboration are critical. These efforts will enhance current understanding of cascading marine geohazards and provide new theoretical and technical support for early warning and hazard assessment.

In particular, based on global case studies, this study highlights the critical need to assess the risks of earthquake-landslide-tsunami cascades in the northern South China Sea. The two active fault zones in the region, the Littoral Fault and Continental Slope Fault, both have the potential to generate destructive earthquakes. Coupled with the region's abundant sedimentary deposits, these factors significantly increase the likelihood of cascading hazards along the northern South China Sea continental slope. Furthermore, the South China coastal region is one of China's most economically developed areas, encompassing densely populated regions such as the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and the Hainan Free Trade Zone, along with critical infrastructure. A destructive tsunami in this region could have catastrophic consequences.

In conclusion, the study of earthquake-landslide-tsunami cascades involves multiple disciplines, including seismology, geology, mechanics, fluid dynamics, numerical modeling, artificial intelligence and social sciences. Advancing early warning, assessment and management of these cascading hazards requires interdisciplinary collaboration and the development of comprehensive research frameworks.

marine geohazards, cascading geohazards, co-seismic landslides, tsunamis, cascading hazard mechanisms

doi: [10.1360/TB-2024-0994](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0994)