

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.168>



基于俯冲带动力学参数评估琉球海沟对我国东南沿岸的海啸威胁

李宏伟^{1,2}, 徐志国^{1,2}, 史健宇^{1*}, 王宗辰¹, 杨怀玮¹

1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081

2. 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

摘要: 为了提升我国沿海海啸防灾减灾能力, 加强民众海啸风险防范意识, 系统地分析了琉球海沟俯冲带地震所引发海啸对我国大陆东南沿岸及台湾东部的潜在威胁, 基于逻辑树与蒙特卡洛随机模拟的概率性方法对其海啸风险进行定量评估。考虑到琉球海沟历史地震记录稀少, 基于俯冲带的动力学参数对该区域潜在地震的最大震级进行了修正。与此同时, 结合前人对该区域的古海啸研究成果建立了海啸源参数逻辑树, 分析了评估结果的不确定性。研究表明, 2000 年重现期下台湾东部宜兰县和花莲县周边的最大海啸波幅可以达到 2~3 m; 上海和浙江舟山的最大海啸波幅也能达到 0.6 m 和 0.8 m 左右。由于琉球海沟历史上没有灾害性海啸, 其对东南沿岸和台湾东部的海啸威胁难以量化评估, 模拟结果为今后该地区的海啸防御提供了理论依据。

关键词: 琉球海沟; 地震; 海啸; 动力学参数; 危险性评估。

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2024)02-403-11

收稿日期: 2023-03-05

Tsunami Potential Threat from the Ryukyu Trench on Chinese Coast Based on Subduction Zone Dynamics Parameters

Li Hongwei^{1,2}, Xu Zhiguo^{1,2}, Shi Jianyu^{1*}, Wang Zongchen¹, Yang Huaiwei¹

1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Abstract: In order to improve tsunami mitigation capabilities along the coast of China and to increase public awareness of tsunami hazards, this paper systematically analyses the potential threat of tsunamis caused by earthquakes in the Ryukyu Trench subduction zone off the southeast coast of China and the eastern part of Taiwan Province. We quantitatively assess their tsunami hazard based on a probabilistic approach of logic tree and Monte Carlo simulation. Considering the scarcity of historical earthquake records in the Ryukyu Trench, we determined the maximum magnitude of potential earthquakes in the region based on the dynamic parameters of the subduction zone. At the same time, a logical tree of tsunami source parameters was constructed to analyse the uncertainty of

基金项目: 国家自然科学基金青年基金“基于蒙特卡洛随机模拟的南中国海地区多尺度海啸淹没风险评估体系研究”(No. 41806045); 国家重点研发项目“全方位综合海洋地震和海啸监测预警系统研制与示范”(No. 2022YFC3003800)。

作者简介: 李宏伟(1984—), 男, 副研究员, 主要研究地震海啸预警技术、海啸风险评估等方面研究。ORCID: 0000-0001-5581-5686. E-mail: lihw@nmefc.cn

* 通讯作者: 史健宇, ORCID: 0000-0002-1034-1285. E-mail: shijy@nmefc.cn

引用格式: 李宏伟, 徐志国, 史健宇, 王宗辰, 杨怀玮, 2024. 基于俯冲带动力学参数评估琉球海沟对我国东南沿岸的海啸威胁. 地球科学, 49(2): 403–413.

Citation: Li Hongwei, Xu Zhiguo, Shi Jianyu, Wang Zongchen, Yang Huaiwei, 2024. Tsunami Potential Threat from the Ryukyu Trench on Chinese Coast Based on Subduction Zone Dynamics Parameters. *Earth Science*, 49(2): 403–413.

the assessment results by integrating previous research results on paleotsunamis in the region. The results show that the maximum tsunami wave amplitude can reach 2–3 m around Yilan and Hualien counties in eastern Taiwan Province in the return period of 2000 years; the maximum tsunami wave amplitude can also reach about 0.6 m and 0.8 m in Shanghai and Zhoushan at the same time. Therefore, although there are almost no catastrophic tsunami events in the historical record of the Ryukyu Trench, its tsunami threat to the southeast coast of China, especially the eastern part of Taiwan, cannot be ignored.

Key words: Ryukyu Trench; earthquake; tsunami; dynamics parameters; hazard assessment.

0 引言

二十一世纪以来,全球地震海啸灾害频发,其中 2004 年印尼苏门答腊 9.2 级地震海啸和 2011 年日本东部 9.0 级地震海啸让人们付出惨痛代价,同时也使得人们意识到预先评估海啸风险并做好防灾工作的重要性(崔鹏等, 2022). 由于引发大规模海啸的地震源主要集中在全球重要板块相互作用的海底俯冲带上(肖文交等, 2022), 因此, 海啸灾害风险评估的关键在于潜在影响评估区域的地震源的地震活动性、震级上限及其震级—发生频率的评估.

由于琉球海沟地理位置的特殊性, 其是否能够产生灾害性的海啸一直受到各方学者的关注. 与其他活跃的环太平洋俯冲带相比, 琉球海沟的地震活动性相对较低, 海底强震记录屈指可数, 较弱的地震活动似乎不支持该地区有灾害性海啸事件发生(Fujiwara *et al.*, 2020). 然而, 在印尼苏门答腊—安达曼区域发生 9.2 级地震并引发印度洋海啸之前, 该区域记录到的最大地震震级不超过 7.9 级; 同样的, 在 2011 年日本东北部 9.0 级地震发生之前, 其周边 200 a 内历史记载的地震震级最高不超过 8.2 级. 因此, 单纯地基于现有历史地震事件记录估计地震活动性特征和危险性是远远不够的, 会低估地震源最高震级上限及强震年发生频率(于福江等, 2020). 与此同时, 其他学科的辅助研究结果同样表明琉球海沟的海啸风险不能忽视, 海沟地质调查(Ando *et al.*, 2018)及巨型岩石移动的数值模拟研究(Hisamatsu *et al.*, 2014)表明琉球海沟的南部区域在过去可能有过历史海啸灾害, 区域内甚低频地震分布(Ando *et al.*, 2009)也支持该区域有发生海底强震的潜力.

琉球海沟作为环太平洋俯冲带之一, 与其他俯冲带一样具有发生海底强震的潜力(Kagan and Jackson, 2013). 由于其地理位置临近我国东南沿海及台湾岛海域, 一旦发生灾害性海啸将对我国大

陆东南沿岸及台湾岛周边造成破坏性的影响. 本文基于琉球海沟的动力学参数以及大地测量研究成果, 应用基于逻辑树及蒙特卡洛算法的概率性海啸风险评估方法分析了琉球海沟产生海啸对我国的影响, 并进一步评估了结果的不确定性. 以此来揭示琉球海沟对我国东南沿岸的海啸威胁, 为上述区域海啸防灾减灾工作提供理论支撑.

1 琉球海沟的地质构造及历史海啸记录

琉球海沟位于琉球岛弧东侧, 北起日本九州岛东南, 向南延伸至中国台湾岛东侧, 长度超过 1 000 km. 在亚欧板块、太平洋板块以及菲律宾板块的运动及相互作用下, 走向从南部的东西走向逐渐转变为到北部的北东向. 海沟南段较深, 自琉球到台湾水深超过 6 000 m, 北段琉球到九州水深约 4 000 m. Xie *et al.* (2022) 分析了琉球海沟的历史地震的时空分布并研究了该区域应力分布情况及其与地质构造之间的关系, 结果表明琉球海沟的俯冲深度从北到南逐渐增加. 由于俯冲板块和上覆板块之间的剪切作用造成区域内的逆冲型地震主要沿着琉球岛弧分布. 由于琉球海沟周边 GNSS 观测站的分布较为稀疏, 仅有少量研究分析了琉球海沟的地震耦合程度, 并认为该整个海沟为弱耦合. Ando *et al.* (2018) 通过假设琉球海沟的一次俯冲带强震, 估算了区域的地震耦合系数为 0.2. 琉球海沟与其东部的南海海槽共同组成了菲律宾海的北部边界, 然而这两个俯冲带的历史海啸记录却有着明显的差异. 南海海槽历史地震海啸记录丰富, 已有研究根据其地震海啸记录将其分成 5 个可能产生海啸区域(Ishibashi, 1981). 而琉球海沟则由于历史地震信息稀少, 目前没有类似的研究成果.

琉球海沟的强震海啸记录最早可以追溯到 17 世纪, 区域内发生过的较为可信的地震海啸事件仅仅十余次. 为了更完整的分析琉球海沟历史海啸灾害, 一系列基于海啸沉积物分析的古海啸的研究工作也随之展开. 琉球海沟的古海啸研究起始于 19 世

纪60年代,根据地理分布和古海啸的记录,琉球海沟共可分为3个部分:北部的奄美岛区域、中部的冲绳岛区域及南部的先岛诸岛区域。琉球海沟北部和中部曾经先后发生过两次海底强震,分别为1791年发生在琉球中部的8.0~8.3级地震和1911年发生在琉球北部的7.9级地震。其中,1791年的地震引发了1.5~11 m的海啸波幅,但受限于当时的观测条件,该时期的观测均为目击者的描述,准确性较低。而1911年的强震虽然产生了海啸,但并没有相应的波高记录,可以推断该地震并没有产生大规模的海啸灾害。古海啸研究表明,在过去的几千年,上述两个区域没有发生过大规模的海啸灾害的证据。1771年琉球海沟南部发生的大于8.0级地震引发了区域内有记录的最大规模的海啸。根据目击者的记录,本次海啸灾害的最高海啸波达到60 m。然而需要注意的是,该事件仅仅在先岛诸岛周边有类似的记录,其真实性同样较低。

基于上述历史地震海啸记录,琉球海沟一度被认为没有发生强震和海啸灾害的可能性,直到近期的地震学和历史海啸沉积研究否认了这一论点

(Ando *et al.*, 2009, 2018)。Tadokoro *et al.* (2018) 基于琉球海沟周边海底形变数据反演结果认为琉球海沟中部板块边界浅源存在一个强耦合区域,该耦合的区域可能与1791年的8级地震位置重合。另一方面,Nakamura and Sunagawa (2015)研究了琉球海沟内甚低频地震分布,发现这些甚低频地震主要分布在琉球海沟的北部和中部,而南部较少,因此认为在海沟南部区域更可能孕育强震。Ando *et al.* (2018)开展了一条长度为120 m海沟调查,认为该区域过去2 000 a期间大概每隔600 a会产生一次海啸事件,这个发现与Hisamatsu *et al.* (2014)基于琉球一个巨型岩石移动轨迹的数值模拟所得到的结论一致,他们认为在1771年的大海啸之前2 000 a至少发生过2次同级别或者更大规模的海啸,然而由于其他相关信息有限,上述结论需要进一步进行考证。上述研究表明琉球海沟的总体上虽然处于弱耦合状态,但其耦合状态分布是不均匀的,其南部及中部可能存在耦合较强的区域,如果这些区域破裂并引发较大的地震,同样可能引发海啸灾害。

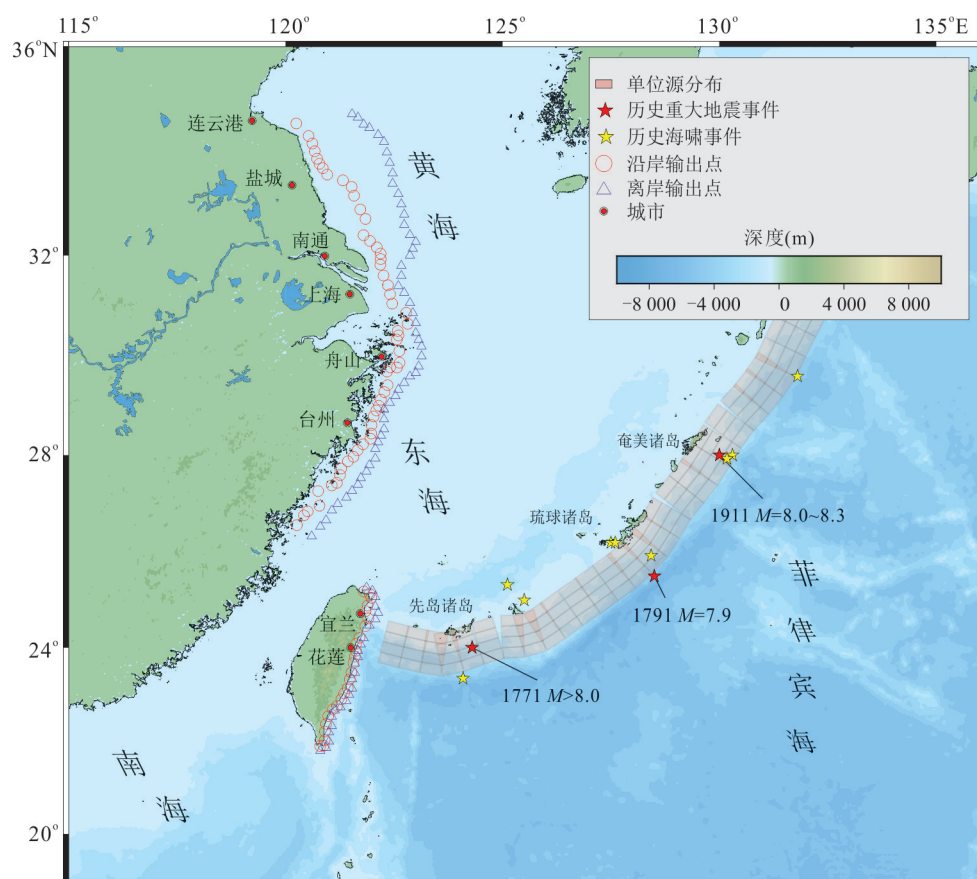


图1 研究区域海底地形以及海啸单位源分布

Fig.1 Bathymetry and tsunami unit source identified in this study

2 基于动力学参数的概率性海啸风险评估方法

目前,国际上普遍采用确定性评估方法和概率性评估方法两种技术路线来评估海啸风险.与单纯依靠极端场景数值模拟的确定性评估方法不同,概率性评估方法能够基于潜在海啸源的震级-频率关系(GR关系)生成一段时间内的假想地震目录,并进一步通过对目录中的地震事件进行海啸数值模拟给出多个重现期的海啸风险,方便决策者针对不同概率水平的海啸风险做出应对策略,因而其评估结果更具实际意义.鉴于上述优点,该方法在日本,美国,东南亚等全球的多个地区得到了广泛应用(Geist and Parsons, 2006; Annaka *et al.*, 2007; Goda and Song, 2016; Li *et al.*, 2016, 2018). 本文所采用的评估方法流程主要可以概括为如下4个步骤(图 2),下面对每个步骤进行详细的说明.

2.1 基于历史地震数据确定 GR 关系并修正

首先,我们要根据历史地震目录统计潜在海啸源区域的 GR 关系.由于琉球海沟历史地震海啸记录较为稀少,该区域还没有一套完备的地震重现期模型,本研究中我们选用锥形震级-频率关系(tapered Gutenberg-Richter relationship, TGR)来表征琉球海沟的震级-频率关系(式 1). 与传统的 GR 关系相比,该关系在物理解释上更加合理(Kagan,

2002a, 2002b).

$$F(M)=\left(\frac{M_t}{M}\right)^{\beta}\cdot\exp\left(\frac{M_t-M}{M_c}\right),$$
$$M=10^{1.5m+C},$$

(1)

(2)

式中: $F(M)$ 为地震矩大于 M 的地震所占的比例,在 M_t 处归一化为 1, β 为 TGR 分布中中小地震部分的斜率, M_t 为整个目录中的最小完整震级对应的地震矩, M_c 为 TGR 分布中重现期开始增大的拐角地震矩,其对应的震级为拐角震级 m_c . 式(1)中地震矩 M 与震级的 m 关系通过公式(2)换算,其中 C 为常数,本文中取值为 9.0.

我们选取了美国地质调查局 1930 年以来的地震目录(Engdahl and Villaseñor, 2002)用于拟合琉球海沟的 TGR 关系,震级下限取 6.5 级. 我们运用最大似然法拟合琉球海沟的 TGR 参数得到 $\beta=0.54$, 拐角震级 $m_c=7.5$. 最大似然法等值线图如图 3a 所示,图中不同的颜色代表了最大似然法所得到的结果,红色代表高值部分,最高值对应的格点即为最优的 β 和 m_c 的组合,零值等值线对应着 95% 的置信区间. 从图中不难看出可以看出零值等值线在 m_c 的正向不闭合,这意味着有限长度的地震目录可能会由于强震缺失而造成拐角震级低估(Li *et al.*, 2018),我们应用地震矩守恒定理(公式 3)(Kagan and Jackson 2013; Rong *et al.*, 2014)来对上面拟合得到的拐角震级进行修正:

$$M_c\approx\left[\frac{\chi\mu W L v(1-\beta)}{a_t M_t^\beta \Gamma(2-\beta)}\right]^{1/(1-\beta)},$$

(3)

上式中: μ 为刚性系数,其对风险评估结果的影响在近年来越来越多的受到人们的关注,已有文献讨论了变化的刚性系数对海啸数值模拟的影响(Scala *et al.*, 2020). 本文为了简化问题,仍然将其看做是一个固定的值. 根据前人的研究结果(Rong *et al.*, 2014),我们将其取值设定为 33 GPa. W 为地震带的俯冲宽度,该值与耦合系数一样难以确定,本文基于 slab2.0 的结果(Hayes *et al.*, 2018)结果,设定俯冲带宽度为 116 km. L 为俯冲带的长度,本研究中基于 Bird and Kagan (2004) 的研究成果取值为 1 126 km; v 是板块平均移动速率,根据大地测量学相关成果,琉球海沟汇聚速率大约为 50~63 mm/a,本文中取该区间的平均值 56 mm/a; β 为 TGR 关系中的斜率参数,本文取最大似然法得到的结果 0.54; 历史地震数据 a_t 为所有大于临界震级地震事件的年发生率,本文中根据历史目录中的地震数量及目录长

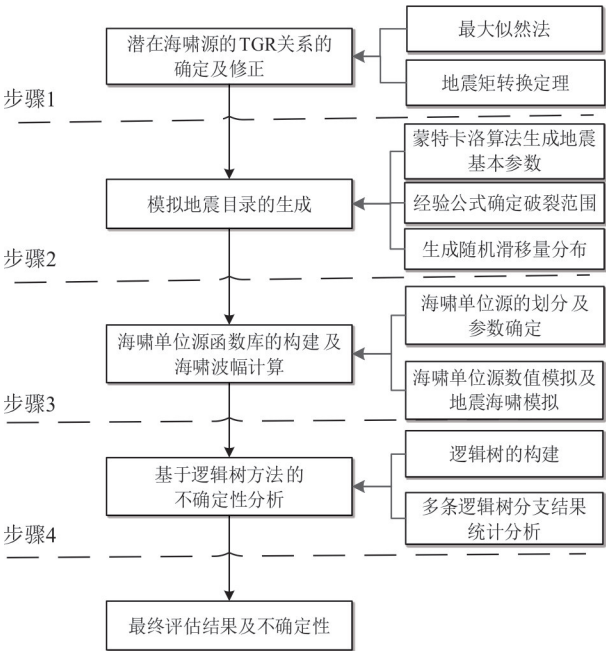


图 2 概率性海啸风险评估流程

Fig.2 Flow chart of probabilistic tsunami hazard assessment

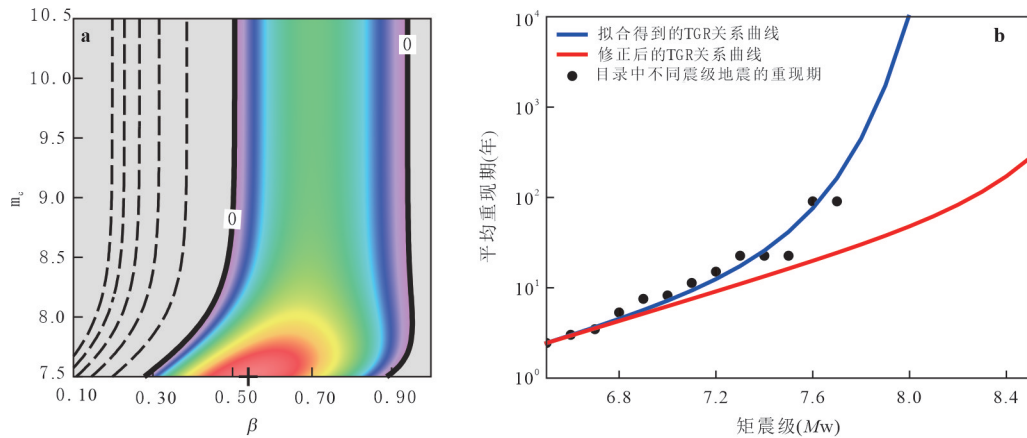


图3 琉球海沟 TGR 参数等值线及拟合曲线

Fig.3 Contours of TGR parameters of Ryukyu Trench and curves of TGR distribution

a. 应用最大似然法获得的 TGR 参数等值线; b. 琉球海沟 TGR 关系曲线及修正拐角震级后的曲线

度取值为 0.41. χ 为地震耦合系数, 表征的是俯冲带通过地震释放的能量与锁定区域板块构造运动的能量的比值, 能产生大地震的区域一般来说耦合系数比较大, 然而一般来说俯冲带不同部分的耦合系数是存在一定差异的, 因此该参数难以确定. 考虑到琉球海沟整体为弱耦合, 本文中我们设定 χ 可能的值为 0.2、0.3 和 0.4, 带入公式(1)可以得到拐角震级的 3 种可能的值分别为 8.3、8.5 和 8.7.

图 3b 展示了通过最大似然法得到的 TGR 关系曲线(蓝线)以及修正后的 TGR 关系曲线(红线, m_c 的取值为 8.5), 根据拟合得到的 TGR 关系曲线, 琉球海沟发生 8.0 级地震的重现期大约为 10 000 a, 而修正后的 TGR 关系则显示 8.0 级地震的重现期为 100 a 左右, 与前文总结的该区域内历史记录中发生 8.0 级以上的地震事件的频率大体一致.

2.2 生成随机地震目录

在确定了潜在海啸源的 TGR 关系后, 我们可以应用蒙特卡洛算法模拟生成一定时间段内的地震目录. 本文中地震目录的长度设定为 100 000 a, 地震目录中每个地震事件都包含震中位置, 震源深度以及震级等信息. 通常来说, 上述地震事件的震中位置是在俯冲带内随机选取的, 也就是均匀分布的. 考虑到琉球海沟的耦合系数分布已经有了一些研究成果, 本文中应用了 3 种地震分布方式, 分别为地震在琉球南部发生概率较高, 地震在琉球海沟中部发生概率较高以及地震在琉球海沟中均匀分布. 每个目录中所有事件的震级满足上面修正的 TGR 关系, 每个目录震级下限设定为 7.0 级.

为了计算上述地震目录中所有事件产生的海

啸波幅, 除了地震事件的基本参数外, 还需要确定每个地震事件的破裂参数(长、宽以及平均滑移量). 这些参数通常是通过经验公式给出的, 前人应用各种数据拟合了多种经验公式(Stirling *et al.*, 2013), 由于这些公式总结过程中所应用的数据源存在差异, 因此, 经验公式的选择也将对风险评估结果产生一定的影响. 本研究中我们选取两种经验公式(Papazachos *et al.*, 2004; Blaser *et al.*, 2010)来估算地震事件的破裂参数, 进而将不同经验公式所产生的不确定性加入到最终结果的不确定性中. 式(4)和(5)分别为本文中所应用的经验公式, 式中 m 为地震事件的矩震级, L 和 W 分别为估算得到的地震破裂的长和宽. 在计算得到地震破裂的长和宽后, 我们应用(6)式来计算地震破裂的平均滑移量 d . 式中 M 为地震矩, 可以通过(2)式计算得到, μ 为刚性系数.

$$\begin{cases} \log(L) = 0.55 * m - 2.19 \\ \log(W) = 0.31 * m - 2.63 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \log(L) = 0.62 * m - 2.81 \\ \log(W) = 0.45 * m - 1.79 \end{cases}, \quad (5)$$

$$M = \mu L W d. \quad (6)$$

在以往的海啸风险评估中, 每个地震事件的滑移量通常都假设是均匀分布的. 然而, 相关结果表明不均匀的滑移量分布能够在海啸源附近产生更大的海啸波幅(Li *et al.*, 2016, Davies and Griffin, 2020). 为了使得到的结果更加合理, 本文中基于 Mai and Beroza(2002)的成果生成随机滑移量分布, 他们基于已公开的有限断层破裂模型发展了地震滑移量分布特征模型, 该模型与冯卡曼自相关函

数最为接近,其相关长度随着源的维度增加而增加.对于生成的地震目录中的每个地震事件,我们在应用经验公式计算出地震破裂的长、宽以及平均滑移量之后,将基于上述算法为该地震事件生成一个随机的滑移量分布.

2.3 建立单位源数据库

由于本研究中需要对海量的地震事件进行海啸数值模拟,为了保证计算效率,我们采用了海啸单位源数据库方法来模拟地震事件所生成的海啸波.海啸单位源的划分主要基于最新的全球俯冲带板片模型 slab2.0(Hayes *et al.*, 2018).该模型是基于历史地震统计分析得到的,模型在每个俯冲带都由若干个格点组成,每个格点包含了板块的走向角、倾角、滑动角和深度等信息.我们基于该模型在琉球海沟的范围将海沟划分为沿俯冲带走向方向 29 行和俯冲带倾向方向 4 列,共计 116 个单位源,每个单位源长宽为 50 km×25 km,走向角与 slab2.0 在相应位置格点的走向角一致,倾角为单位源所覆盖所有格点的倾角的平均值,滑动角则保守的设置 90°,滑移量为 1 m,单位源分布如图 1 所示.

我们共选择了我国大陆东部沿海以及台湾东部距离岸段 50~100 m 的 80 个离岸点作为模型输出点,并应用基于浅水方程的海啸数值模型计算上述海啸单位源在输出点的时间序列.本文中所应用的海啸数值模型是通过对 COMCOT (cornell multi-grid coupled tsunami model)海啸数值模型 GPU 加速改进得到的,其准确性已经在前人的研究中得到了验证(王宗辰等, 2019).地形水深采用了 GEB-CO_14 Grid,部分区域融合了实测水深,空间分辨率为 30 arcsec(约为 0.8 km).考虑到本研究只分析琉球海沟对台湾东部及我国大陆东南部沿岸的影响,数值模拟时间设置为 15 h,模拟时间步长为 30 s.

由于本研究中所采用的海啸模型的为线性模型,当海啸波传播到近岸水域时,其波长变短,线性长波方程不再适用.我们通过经验公式(式 7)将离岸点的海啸波幅 A_0 转换为近岸点的海啸波幅 A_c .通常情况下,(7)式中的系数与离岸点与近岸点的水深有关,即 $k = \left(\frac{H_0}{H_c}\right)^{\frac{1}{4}}$,其中 H_0 为离岸输出点的水深, H_c 为近岸输出点的水深,此时(7)式即为格林公式.然而, Yuan *et al.* (2020) 的研究表明,我国东部宽缓的大陆架导致了格林公式不再适用于该区域

沿岸的波幅,因此对于我国东部沿岸的输出点,(7)式中的 k 值我们应用了 Yuan *et al.* (2020) 通过拟合得到的系数.

$$A_c = A_0 * k, \quad (7)$$

2.4 构建逻辑树及不确定性分析

概率性风险评估是一项不确定性的科学,其不确定性分析是风险评估成功与否的关键所在,评估结果不确定性的区间范围的意义要远远大于“最合理”的海啸评估结果.为了分析风险评估结果的不确定性,我们在海啸源部分的建立了逻辑树如图 4 所示.

整个逻辑树分为 3 个部分,共有 18 个分支,每个分支下方数值为该分支的权重,一条分支的权重为所有经过权重的积.其中权重最大的分支为 0.08,权重最小的分支为 0.02.第一部分反应了整个琉球海沟的平均地震耦合系数,基于不同的耦合系数应用地震矩守恒定理(式 1)可以得到不同的拐角震级,进而影响最终的评估结果,考虑到大部分研究成果都认为琉球海沟的整体地震耦合系数偏低,我们将耦合系数 0.2 和 0.3 的权重设定为 0.4, 0.4 的权重设定为 0.2;逻辑树的第二部分反映了地震可能的分布规律,我们基于已有的研究成果假设了 3 种可能的地震分布:琉球海沟的南部发生地震概率较大,琉球中部发生地震震的概率较大以及地震沿琉球海沟均匀分布;考虑到已有研究成果表明琉球海沟南部和中部发震概率较大,因此地震主要发生在南部和中部的情形的权重设为 0.4,而地震均匀分布的权重为 0.2;第三部分反映了地震几何参数估算过程中所应用不同的经验公式,本研究中主要考虑两种经验公式,应用每种公式的权重为 0.5.

基于上述逻辑树的概率,我们共生成了 50 个地震目录,以此保证每个逻辑树分支都至少有一个地震目录,我们完成了所有目录的计算并对结果进行了统计,从而得到了本次评估的不确定性.

3 风险评估结果及结论

3.1 最大海啸波幅分布

我们计算了上述 50 个地震目录所产生的的海啸对我国大陆东部沿岸及台湾岛东部沿岸的影响.每个输出点在不同重现期均有 50 个最大海啸波幅,这些最大波幅的中值分布如图 5 所示.

图 5 分别展示了在琉球海沟的影响下, 200 a、500 a、1 000 a 和 2 000 a 重现期时我国大陆东部沿

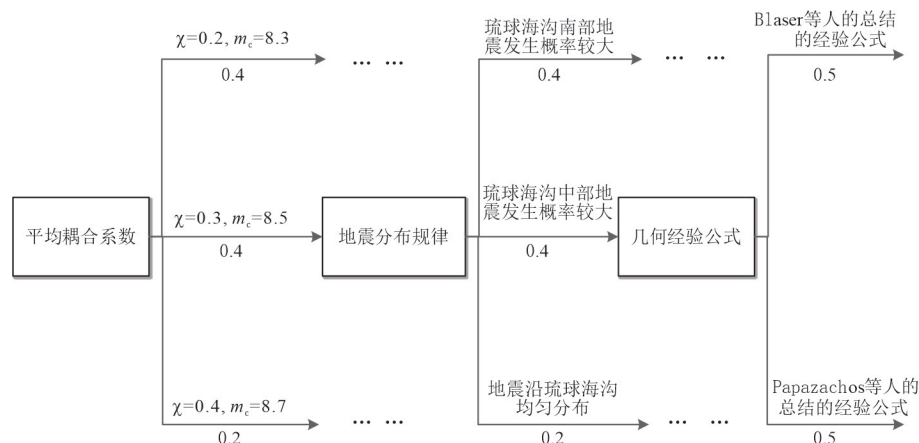


图4 本文中不确定性分析所运用的逻辑树

Fig.4 Logic tree used for uncertainty analysis in this study

岸及台湾东部最大海啸波幅的中值分布.从图中可发现随着重现期的增加,沿岸的海啸波幅明显增加.重现期为200 a时,我国大陆东部沿岸基本没有海啸风险,以上海—舟山一带为界,南部的最大海啸波幅稍大,但仍不超过0.4 m,而北部海啸波幅小于0.2 m.相对而言,台湾东部的海啸风险则明显偏高,整体最大海啸波幅在0.6~1.2 m之间,尤其花莲县周边的海啸波幅最大,达到1.2 m左右.

当重现期达到2 000 a时,我国大陆东部沿岸的海啸风险明显增高,上海,舟山一带最大海啸波幅达到0.8 m左右,而连云港市及盐城市周边的海啸波幅不大,最大值不超过0.4 m,可见该区域受到琉球海沟的海啸威胁较小.浙江台州市周边则成为我国大陆沿岸海啸风险最高的区域,其海啸波幅能够达到1.2 m左右.台湾东部沿岸中部区域的最大海啸波幅整体都在2~3 m左右,北部的基隆市及台东县以南海啸风险相对较低,但最大海啸波幅仍能达到1.8 m左右.

3.2 重点城市的海啸曲线

重现期—海啸波幅曲线描述了某个特定输出点的海啸波幅随重现期的变化关系.为了分析琉球海沟对我国不同地区的影响及结果的不确定性,我们选取了4个主要城市(上海、舟山、宜兰和花莲)海啸波幅曲线分析.4个城市的海啸波幅曲线如图6所示,灰色曲线为模拟上述50个目录得到的50条海啸波曲线,绿色曲线、蓝色曲线以及红色曲线分别对应50条曲线的2.5%分位数、97.5%分位数以及中值.2.5%分位数与97.5%分位数的范围构成95%的置信区间,也就是标准差的2倍.因此,本研究中我们将50条曲线的中值曲线作为该城市最终

的海啸波幅曲线,同时将上述曲线中的2.5%分位数与中值的差和97.5%分位数与中值的差的较大值作为标准差,也就是不确定性结果.

从图中不难看出,上海的重现期—海啸波幅曲线波幅形态与舟山相似,但波幅值略低,当重现期为2 000 a时,上海最大海啸波幅的中位数为0.62 m,而其2.5%分位数及97.5%分位数分别为0.5 m和0.77 m,其标准差为0.15 m.与此同时,舟山的最大海啸波幅在2 000 a重现期时为0.73 m,标准差为0.21 m.因此舟山的评估结果不确定性更大.相对于上海与舟山,相同重现期时台湾东部的花莲和宜兰县的海啸波幅更高,在重现期为2 000 a时,花莲县的最大海啸波幅可以达到2.84 m,标准差为1.06 m,相同重现期下,宜兰县周边的最大海啸波幅也能达到2.44 m,标准差为0.77 m.4个城市中花莲距离琉球海沟最近,因此其海啸波幅最大,但与此同时,其最大海啸波幅受到潜在海啸源的最大震级、地震事件的分布以及破裂参数的影响也更大,因此其评估结果具有较高的不确定性.

3.3 讨论与结论

本文应用概率性海啸风险评估方法评估了琉球海沟对我国东南沿海的海啸威胁,考虑到琉球海沟历史强震较少,我们基于大地测量参数对该区域的最大震级进行了修正,同时基于近期古海啸的相关研究成果,应用逻辑树方法分析了评估结果的不确定性.潜在海啸源的地震活动性参数是海啸风险评估结果的决定性因素之一.对于一些有强震记录的俯冲带,如日本海沟、智利海沟等等,其拐角震级的确定只需要通过历史地震的拟合即可得到较为合理的结果.而对于那些强震记录缺失的俯冲带,

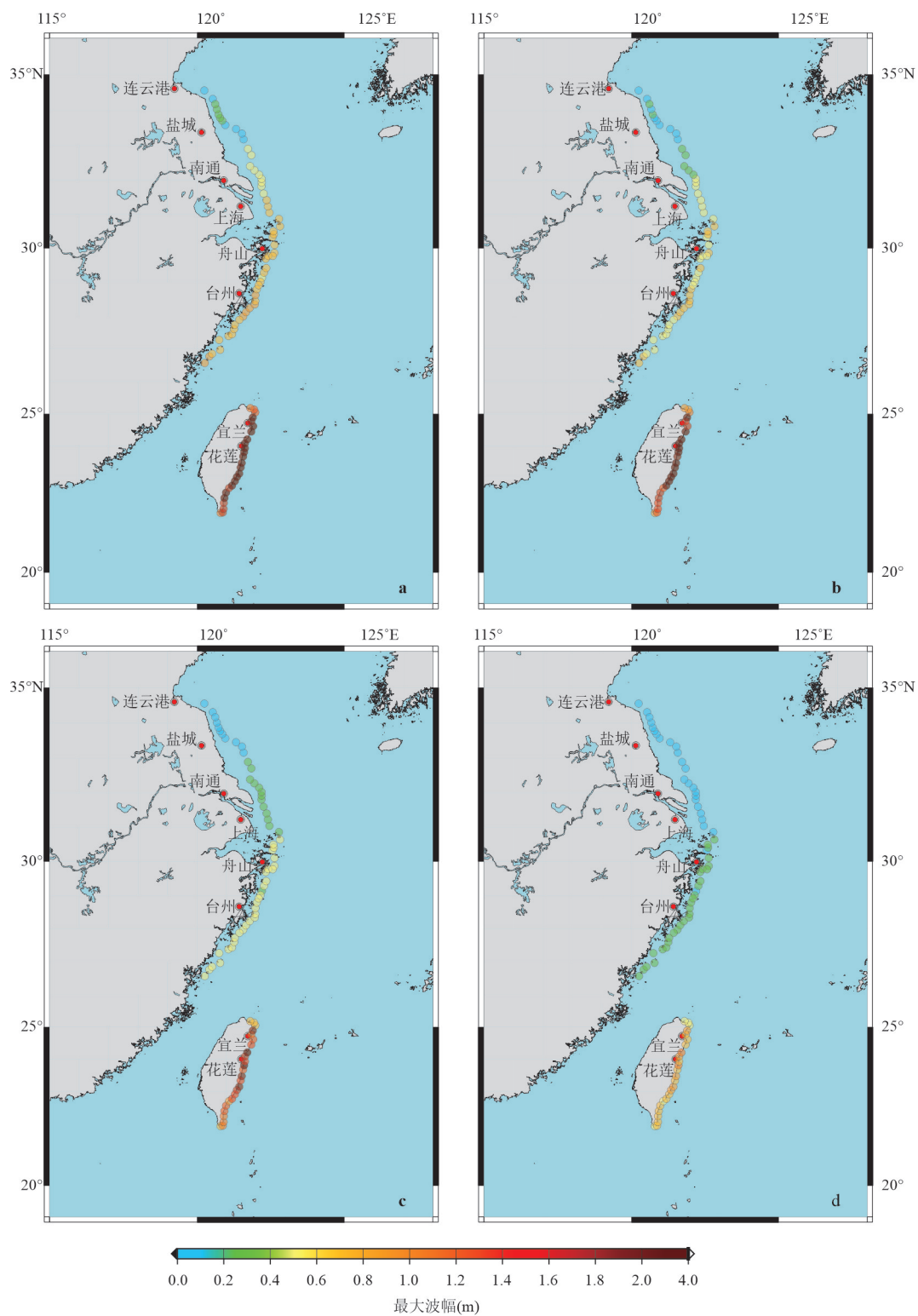


图5 不同重现期沿岸最大海啸波幅的中值分布
Fig.5 Median of coastal maximum wave amplitudes for specified return periods
a. 2 000 a; b. 1 000 a; c. 500 a; d 200 a

单纯通过历史地震拟合得到的拐角震级通常偏低。本文所采用的地震矩守恒定理能够在一定程度上解决一些俯冲带由于强震记录缺失而造成的最大震级低估的问题,然而该方法中一些参数(如耦合系数,俯冲带宽度等)是难以确定的(Rong *et al.*, 2014),这些参数的不确定性将被带入到风险评估

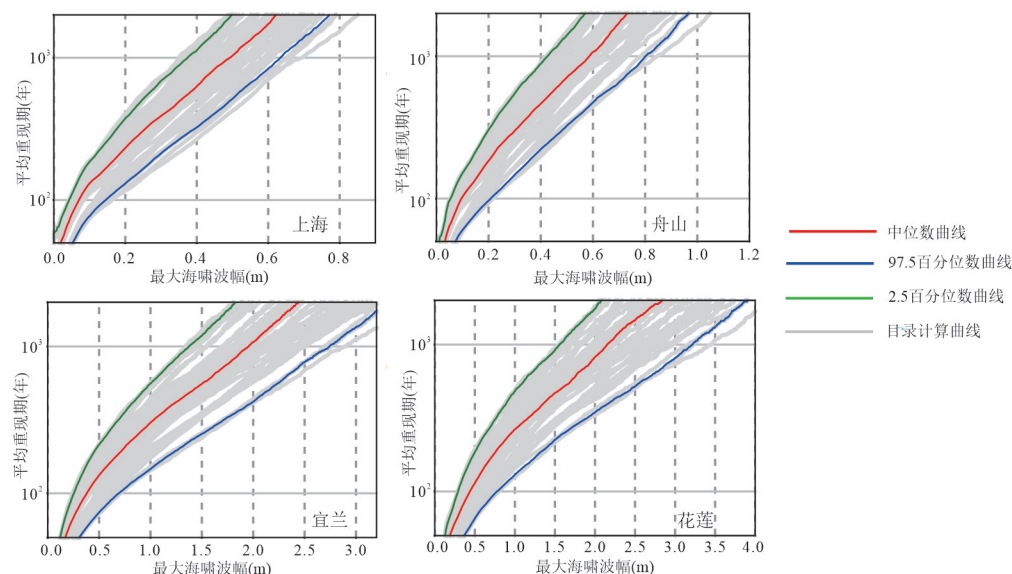


图6 重点城市的波幅曲线

Fig.6 Tsunami hazard curves for 4 coastal cities considering the uncertainties

灰色曲线为50个目录计算得到的海啸波幅曲线,红线为中值曲线,绿色曲线为2.5%的波幅曲线,蓝色为97.5%的波幅曲线

的结果中去.这些参数都会影响俯冲带的拐角震级从而对最终的风险评估结果产生一定的影响,但作为最难以确定的参数之一,地震耦合系数是对整个评估结果影响最大的参数.本文在构建逻辑树的过程中充分参考了前人在该区域地震耦合程度方面的相关研究成果,然而由于琉球海沟周边相关观测数据分布不均匀,前人研究成果同样存在着一定差异,进而导致我们最终的评估结果不确定性偏大.未来如果能在该区域增加相关的观测,将能提高耦合系数的准确性的同时进一步提升评估结果的可信性.

本文的研究结果表明,虽然区域内历史上几乎没有完整记录的破坏性海啸事件,琉球海沟对我国的海啸威胁不可轻视.一旦琉球海沟的南部或者中部发生海底强震,我国大陆东部沿岸及台湾东部将受到灾害性海啸的威胁.本文的评估结果整体趋势基本与Yuan *et al.* (2021)评估全球俯冲带对我国东南沿海的评估结果一致,但由于本文只考虑了琉球海沟的影响,因此评估结果在上海的最大海啸波幅要小于Yuan *et al.* (2021)的结果;而在花莲地区,由于我们的合成目录中有更多的地震靠近台湾东部,且部分地震目录选用了较大的拐角震级,因此我们得到花莲区域的最大海啸波幅与Yuan *et al.* (2021)得到的最大海啸波幅相近.

考虑到运算负载的问题,本文只讨论了近岸输出点的最大海啸波幅,并没有进一步分析海啸波到

近岸后的影响,一旦海啸传播到近岸,海啸爬高将使其致灾能力进一步增强.受我国东部宽广大陆架的影响,琉球海沟对我国大陆东部的影响要小于台湾地区,但其对东南沿岸的影响同样不可忽视.与此同时,琉球海沟与南海海槽共同组成了一连续板块边界,虽然目前的信息表明几千年内没有发生过两个区域同时级联破裂的9级强震,但是我们对这种极端的灾害事件应该时刻保持警惕.

致谢:感谢编辑部老师的辛勤付出和审稿人提出的宝贵意见.本文部分图件通过GMT软件绘制,在此表示衷心感谢!

References

- Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., et al., 2018. Source of High Tsunamis along the Southernmost Ryukyu Trench Inferred from Tsunami Stratigraphy. *Tectonophysics*, 722:265–276. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.007>
- Ando, M., Nakamura, M., Matsumoto, T., et al., 2009. Is the Ryukyu Subduction Zone in Japan Coupled or Decoupled? The Necessity of Seafloor Crustal Deformation Observation. *Earth, Planets and Space*, 61:1031–1039. <https://doi.org/10.1186/Bf03352954>
- Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T., et al., 2007. Logic-Tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and Its Applications to the Japanese Coasts. *Pure and Applied Geophysics*, 164:577–592.
- Bird, P., Kagan, Y. Y., 2004. Plate-Tectonic Analysis of

- Shallow Seismicity: Apparent Boundary Width, Beta, Corner Magnitude, Coupled Lithosphere Thickness, and Coupling in Seven Tectonic Settings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6):2380–2399.
- Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., et al., 2010. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6):2914–2926.
- Cui, P., Wang, J., Wang, H., et al., 2022. How to Scientifically Prevent, Manage and Prewarn Catastrophic Risk? *Earth Science*, 47 (10) : 3897–3899(in Chinese with English abstract).
- 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 and Applied Geophysics*, 177:1521–1548. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02299-w>
- Engdahl, E.R.; Villaseñor, A., 2002. Global Seismicity: 1900–1999. In: Lee, W.H.K., Jennings, P., Kisslinger, C., eds., International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, Amsterdam, The Netherlands; Boston, MA, USA, 2: 665–690.
- Fujiwara, O., Goto, K., Ando, R., et al., 2020. Paleotsunami Research Along the Nankai Trough and Ryukyu Trench Subduction Zones - Current Achievements and Future Challenges. *Earth-Science Reviews*, 210:103333.
- Geist, E. L., Parsons, T., 2006. Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards. *Natural Hazards*, 37: 277–314.
- Goda, K., Song, J., 2016. Uncertainty Modeling and Visualization for Tsunami Hazard and Risk Mapping: a Case Study for the 2011 Tohoku Earthquake. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30:2271–2285.
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., et al., 2018. Slab2, a Comprehensive Subduction Zone Geometry Model. *Science*, 362(6410): 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Hisamatsu, A., Goto, K., Imamura, F., 2014. Local Paleotsunami Size Evaluation Using Numerical Modeling for Boulder Transport at Ishigaki Island, Japan. *Episodes Journal of International Geoscience*, 37(4):265–27.
- Ishibashi, K., 1981. Specification of a Soon-to-Occur Seismic Faulting in the Tokai District, Central Japan, Based upon Seismotectonics. *Earthquake Prediction: an International Review*, 4:297–332.
- Kagan, Y. Y., 2002a. Seismic Moment Distribution Revisited: I. Statistical Results. *Geophysical Journal International*, 148(3): 520–541. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01594.x>
- Kagan, Y. Y., 2002b. Seismic Moment Distribution Revisited: II. Moment Conservation Principle. *Geophysical Journal International*, 149(3): 731–754. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01671.x>
- Kagan, Y. Y., Jackson, D. D., 2013. Tohoku Earthquake: A Surprise?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2B):1181–1194..
- Li, H., Yuan, Y., Xu, Z., et al., 2018. The Dependency of Probabilistic Tsunami Hazard Assessment on Magnitude Limits of Seismic Sources in the South China Sea and Adjoining Basins. *Earthquakes and Multi-Hazards Around the Pacific Rim*, 1:157–176.
- Li, L., Switzer, A. D., Chan, C. H., et al., 2016. How Heterogeneous Coseismic Slip Affects Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment: A Case Study in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8): 6250–6272.
- Mai, P. M., Beroza, G. C., 2002. A Spatial Random Field Model to Characterize Complexity in Earthquake Slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B11): ESE-10.
- Nakamura, M., Sunagawa, N., 2015. Activation of Very Low Frequency Earthquakes by Slow Slip Events in the Ryukyu Trench. *Geophysical Research Letters*, 42(4): 1076–1082 <https://doi.org/10.1002/2014GL062929>
- Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., et al., 2004. Global Relations between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(3): 1482–1489.
- Rong, Y., Jackson, D. D., Magistrale, H., et al., 2014. Magnitude Limits of Subduction Zone Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5): 2359–2377. <https://doi.org/10.1785/0120130287>
- Scala, A., Lorito, S., Romano, F., et al., 2020. Effect of Shallow Slip Amplification Uncertainty on Probabilistic Tsunami Hazard Analysis in Subduction Zones: Use of Long-Term Balanced Stochastic Slip Models. *Pure and Applied Geophysics*, 177(3): 1497–1520.
- Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., et al., 2013. Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6): 2993–3011. <https://doi.org/10.1785/0120130052>
- Tadokoro, K., Nakamura, M., Ando, M., et al., 2018. Interplate Coupling State at the Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench, Japan, Deduced from Seafloor Crustal Deformation Measurements. *Geophysical Research Letters*, 45 (14):6869–6877. <https://doi.org/10.1029/2018GL078655>
- Wang, Z., Yuan, Y., Wang, P., et al., 2019. Development and

- Validation of a Tsunami Amplitude Forecast System Covering the Whole Pacific Ocean. *Haiyang Xuebao*, 41(2): 1–13(in Chinese with English abstract).
- Xiao, W.J., Song, D.F., Zhang, J.E., et al., 2022. Anatomy of the Structure and Evolution of Subduction Zones and Research Prospects. *Earth Science*, 47 (9): 3073–3106(in Chinese with English abstract).
- Xie, Z.; Wang, E.; Lyu, Y., 2022. Seismicity and Stress State in the Ryukyu Islands Subduction Zone. *Sustainability*, 14 (22): 15146. <https://doi.org/10.3390/su142215146>
- Yu, F.J., Yuan, Y., Wang, P.T., et al., 2020. Modern Technologies in Earthquake-Generated Tsunami Early Warning. Science Press, Beijing, 222 (in Chinese).
- Yuan, Y., Li, H., Wei, Y., Shi, F., et al., 2021. Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA) for Southeast Coast of Chinese Mainland and Taiwan Island. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2): e2020JB020344.

附中文参考文献

- 崔鹏,王皎,王昊,等, 2022. 如何科学防控与预警巨灾风险? 地球科学, 47(10):3897–3899.
- 王宗辰, 原野, 王培涛, 等, 2019. 一个覆盖太平洋区域的地震海啸波幅预报系统及检验. 海洋学报, 41(2):1–13.
- 肖文交,宋东方,张继恩,等,2022. 俯冲带结构演变解剖与研究展望. 地球科学, 47(9):3073–3106.
- 于福江,原野,王培涛,等,2020. 现代地震海啸预警技术. 北京: 科学出版社, 222.