

# 基于概率性海啸危险性风险分析理论的 马尼拉海沟区域海啸分析

陈健<sup>1,2</sup>, 黄明汉<sup>1,3,4\*</sup>, 郭立栋<sup>1,2</sup>, 锁旭宏<sup>1,2</sup>, 刘依伦<sup>1,3,4</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交一航局华南工程有限公司, 广东 佛山 528300;  
3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 4. 中交集团海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 为评估历史海啸观测记录匮乏的沿海区域的海啸危险性, 借鉴概率性地震危险性分析的理论框架, 采用概率性海啸危险性分析(PTHA)方法, 以高风险潜在海啸源——马尼拉海沟为研究对象, 利用 COMCOT 海啸数值模型, 通过三层嵌套网格模拟海啸从远海向近岸传播的过程。依据美国地质调查局划分的 6 段断层参数, 设定震级范围为 6.5 级—9.0 级, 共完成 144 组不同震源与震级组合下的海啸数值计算。结果表明: 在指定观测场点(114.667°E, 22.534°N), 当最大海啸波面升高为 3.0 m 时, 其年累积频率为  $8.335 \times 10^{-4}$ , 年超越概率为 0.08%, 50 a 超越概率为 4.08%, 100 a 超越概率为 8.00%, 重现期为 1 200 a; 当最大波面升高为 0.5 m 时, 重现期为 64 a。研究成果可为沿海区域沿海防护工程的抗海啸设计及防灾减灾工作提供科学依据。

**关键词:** 概率性; 海啸; 地震; COMCOT; 超越概率

中图分类号: U6; U652.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)06-0001-06

doi: 10.7640/zggwjs202606001

## Tsunami analysis of the Manila Trench region based on probabilistic tsunami hazard analysis theory

CHEN Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Ming-han<sup>1,3,4\*</sup>, GUO Li-dong<sup>1,2</sup>, SUO Xu-hong<sup>1,2</sup>, LIU Yi-lun<sup>1,3,4</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. South China Engineering Co., Ltd. of CCCCFHEC, Foshan, Guangdong 528300, China; 3. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 4. Key Laboratory of Coastal Engineering Hydrodynamics, CCCC, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To assess tsunami hazards in coastal waters where historical tsunami observation records are scarce, this study adopts the Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (PTHA) framework, which draws on the theoretical basis of probabilistic seismic hazard analysis. The Manila Trench, a high-risk potential tsunami source, is selected as the study object, and the COMCOT tsunami numerical model with a three-level nested grid system is employed to simulate tsunami propagation from the open ocean to the nearshore area. Based on the six fault segments defined by the United States Geological Survey, earthquake magnitudes ranging from 6.5 to 9.0 are considered, and a total of 144 tsunami numerical simulations with different source and magnitude combinations are performed. The results show that at the designated observation point(114.667°E, 22.534°N), when the maximum tsunami wave surface elevation reaches 3.0 m, the annual cumulative frequency is  $8.335 \times 10^{-4}$ , the annual exceedance probability is 0.08%, and the 50-year and 100-year exceedance probabilities are 4.08% and 8.00%, respectively, with a recurrence interval of 1 200 years; when the maximum wave surface elevation reaches 0.5 m, the recurrence interval is 64 years. The findings provide a scientific basis for anti-tsunami design of coastal protection projects and disaster prevention in coastal waters.

**Key words:** probability; tsunami; earthquake; COMCOT; exceeding probability

收稿日期: 2025-12-25 修回日期: 2026-04-05

基金项目: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金资助项目 (LP1409)

作者简介: 陈健 (1978—), 男, 上海市人, 高级工程师, 从事港口、海岸及近海工程、公路工程研究。

\*通讯作者: 黄明汉, E-mail: huangminghan@ccccltd.cn

## 0 引言

自2004年苏门答腊海啸以来,国际社会高度重视海啸灾害研究,众多学者相继投入这一领域并推动了相关研究进展。中国的研究人员们同样关注地震引发海啸的风险,多家高校与研究机构已在此方面取得一系列成果<sup>[1-3]</sup>。海啸对内陆区域的主要破坏形式包括大范围淹没,以及房屋、沿海道路、桥梁、铁路、港口等基础设施的损毁,同时海岸侵蚀作用常导致地形发生显著变化。其中,海啸波引起的水位上升是对内陆地区最直接的威胁之一。水位升高可能致使建筑物及其附属设施被淹没,并受到水流冲击荷载的作用。因此,评估沿海区域可能出现的海啸波水位高程,成为海啸危险性分析中的核心任务。

海啸波属于浅水长波,在近岸区域非线性效应显著增强。本研究采用的COMCOT模型由美国康奈尔大学开发,是能够模拟海啸完整演化过程的数值模型<sup>[4-5]</sup>,涵盖海啸的产生、传播、爬升与淹没全过程。该模型支持多种海啸生成机制,如断层破裂、滑坡及海面扰动,并可在不同区域采用球面或笛卡尔坐标系,选用线性或非线性控制方程进行计算。其多重网格架构允许在开阔海域采用较大网格以提高计算效率,而在近岸区域则可采用细网格以捕捉更精细的水动力过程。本研究通过三层嵌套网格进行数值计算,在保证精度的同时有效提升了计算效率。

近几十年来,随着地震危险性分析方法的日益成熟,海啸危险性评价也逐渐转向基于概率方法的海啸危险性分析(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA)。该方法的主要优点在于能够综合考虑海啸事件在时间上的不确定性及其发生可能性。目前,地震危险性分析已在全球范围内广泛应用,其基本框架源于Cornell于1968年提出的经典模型<sup>[6]</sup>。该模型认为,地震活动在空间上并非随机分布,而是集中在一定的潜在震源区内,未来地震主要发生于这些区域内。潜在震源区内的地震事件满足古登堡-里克特震级-频度关系(G-R关系),在时间上符合泊松分布,且在空间上通常假定为均匀发生。我国现行的地震危险性分析方法由胡聿贤<sup>[7]</sup>在此基础上进行了适应性改进。尽管其思路明确,但由于海啸灾害的物理机制与地震存在本质差异,加之海啸历史资料相对匮乏,因此在具体实施步骤上两者仍有显著区别。

由于PTHA思路来源于PSHA,所以借鉴PSHA的定义,对于某一给定海滨地区,要求PTHA给出将来若干年内一定海啸波面升高值的超越概率 $P(H \geq h)$ :

$$P(H \geq h) = \sum_i P(H \geq h | E_i) \cdot P(E_i) \quad (1)$$

式中: $H$ 为观测场点实际出现的海啸波面升高, $m$ ;  $h$ 为给定的海啸波面升高值, $m$ ;  $i$ 为第 $i$ 个潜在在海啸源区; $E_i$ 为第 $i$ 个潜在在海啸源区内发生海啸地震。 $P(E_i)$ 可以通过对历史海啸地震统计得到, $\sum P(E_i) = 1$ 。

$P(H \geq h | E_i)$ 的求解从广义上可从下述步骤得到:第1步,对震源参数积分;第2步,对震源位置积分;第3步,频率转换成概率,采用泊松概率分布公式,对上述积分得到的频率计算出 $T$ 年内的超越概率( $T$ 为设定的时间期限, $a$ )。具体的实施有多种方法:逻辑树法、蒙特卡罗法、经验数据分析法、特征地震模型法等。

### 1 马尼拉海沟区域概况及震源参数

马尼拉海沟位于南海东部,北起中国台湾西南海域(约 $21^\circ\text{N}$ ),南至菲律宾民都洛岛以西(约 $13^\circ\text{N}$ ),全长约1100 km,是南海板块向菲律宾海板块俯冲形成的汇聚型板块边界。该海沟是南海周边最重要的地震活动带之一,具有发生大规模地震及引发跨洋海啸的潜力。

根据中国国家海洋局的相关资料,在中国有历史记载的29次海啸事件中,有7次发生在南海海域。基于海啸危险性等级划分,南海被列为中国海区中风险最高的区域。2006年,美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)海啸源研究组对太平洋俯冲带潜在地震源的危险性进行了系统评估,综合考虑地形、地质构造及历史地震活动等因素,指出马尼拉海沟是南海海域内风险最为突出的海啸潜在源区,而其他地震带因受岛屿或海脊等地理屏障的阻隔,其危险性相对较低。

## 2 模型构建

### 2.1 概率性海啸危险性分析方法

对于没有足够历史海啸观测记录的地区,只能采用基于数值模拟的分析方法来评价该地区的海啸危险性。基本步骤如下:

第1步,划分潜在在海啸源区。潜在在海啸源区内的地震均具备引发海啸的条件,一般都在6.5级以上,划分好的潜在在海啸源区个数计为 $n$ 。

第2步,统计相关地震参数。根据历史海啸地震记录,统计出每个潜在海啸源区的古登堡-里克特震级-频度关系,得到相关参数 $\beta$ 。然后修正此公式,得到第 $j$ 个潜在海啸源区的震级累积频率分布:

$$F_j(M) = \left(\frac{M}{M_c}\right)^\beta \cdot e^{-\frac{M-M_c}{M_c}} \quad (2)$$

式中: $F_j(M)$ 为第 $j$ 个潜在海啸源区的震级累积频率; $j$ 为潜在海啸源区编号, $j=1, 2, \dots, n$ ;  $M$ 为地震震级; $\beta$ 为古登堡-里克特震级-频度关系参数; $M_c$ 、 $M_l$ 分别为震级上、下限。

第3步,产生地震随机样本。按照式(2),运用蒙特卡罗方法在每个潜在海啸源区内,空间上均匀的产生随机地震,震级范围在 $M_l$ 与 $M_c$ 之间。第 $j$ 个潜在海啸源区样本空间计为 $N$ 。

第4步,数值模拟计算沿岸波面升高。在第 $j$ 个潜在海啸源区内,针对每个地震事件,由经验公式计算破裂面长度 $L$ 、断层面宽 $W$ 、破裂面平均滑移量 $u$ 。其它对计算结果影响较小的断层参数,如走向角 $\theta$ 、断层倾角 $\delta$ 、滑移角 $\lambda$ 等按照震源处的地质构造情况获得。有了这些参数后,接下来对每个地震事件运用海啸数值模式计算沿岸波面升高值。于是对于某一指定场点,将获得 $N$ 个沿岸波面升高值。

第5步,归算单一潜在海啸源区的累积频率贡献。给定波面升高阈值 $H_u$ (即用于统计“波面升高超越”的阈值波面升高),基于第 $j$ 个源区地震事件的数值模拟结果,统计研究场点波面升高超过 $H_u$ 的事件个数 $m$ 。每个有效波面升高对应一次独立地震事件,由此可计算得到该场点以 $H_u$ 为阈值的累积频率,用以表征该源区的贡献强度。

$$\dot{N}(H \geq H_u, zone=j) = \sum_{i=k}^m \frac{1}{N} (F_j(M_k)) \quad (3)$$

式中: $\dot{N}$ 为年超越频率; $zone=j$ 为第 $j$ 个潜在海啸源区; $F_j(M_k)$ 为第 $k$ 个超过 $H_u$ 的波面升高值所对应地震事件的累积频率。

第6步,集成多源区贡献,求解总累积频率与超越概率。通过系统计算所有 $n$ 个潜在海啸源区的影响,分别获取其在指定场点产生的波面升高累积频率。总累积频率由各源区结果线性叠加得到。

$$\dot{N}(H \geq H_u) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \dot{N}(H \geq H_u, zone=j)) \quad (4)$$

指定场点 $T$ 年内的波面升高 $H_u$ 的超越概率可表示为:

$$P(H \geq H_u) = 1 - e^{-\dot{N}(H \geq H_u) \cdot T} \quad (5)$$

那么, $H_u$ 波面升高的重现期 $T_{重}$ 可由式(6)计算:

$$T_{重}(H=H_u) = -\frac{1}{\ln(1-P(H \geq H_u))} \quad (6)$$

## 2.2 计算区域网格剖分

本研究采用三重嵌套网格进行数值模拟,模拟范围示意图及各层网格模型区域及水深分布图见图1—图4,网格设置如表1所示。第1层网格覆盖大范围深水区域,采用球坐标系下的线性控制方程,计算范围涵盖整个海域,网格数为 $1021 \times 1021$ 。该层使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家地理数据中心提供的ETOPO2全球水深数据,其空间分辨率为 $2'$ 。第2层网格对应中等范围的较浅水域,在球坐标系下采用非线性控制方程,网格数为 $45 \times 45$ 。第3层网格针对小范围浅水区域,采用笛卡尔坐标系下的非线性控制方程,网格数为 $99 \times 99$ 。选取跨度充足的大范围计算域,核心目的是将马尼拉海沟关键动力区置于域内中心位置,远离数值边界,抑制边界反射与截断误差,保障模拟物理真实、结果可靠。

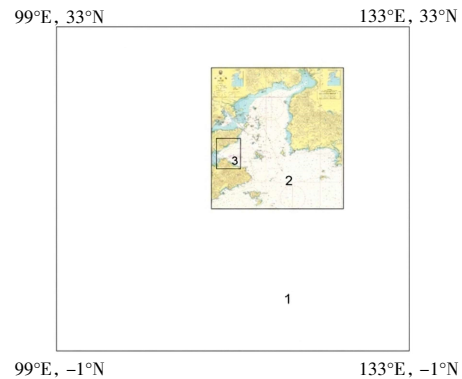


图1 模拟范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the simulation domain

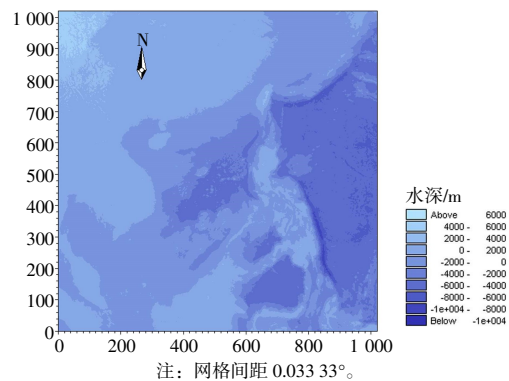


图2 第1层网格模型区域及水深分布图

Fig. 2 Model domain and water depth distribution of the first-layer grid

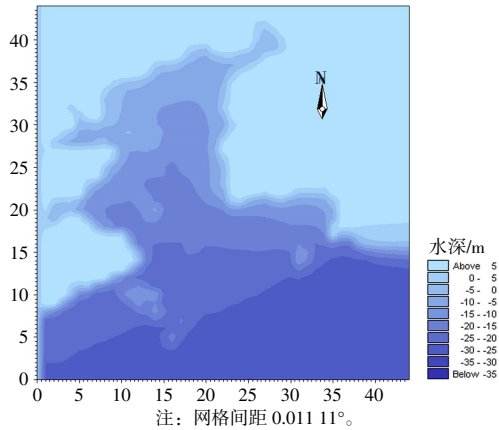


图3 第2层网格模型区域及水深分布图

Fig. 3 Model domain and water depth distribution of the second-layer grid

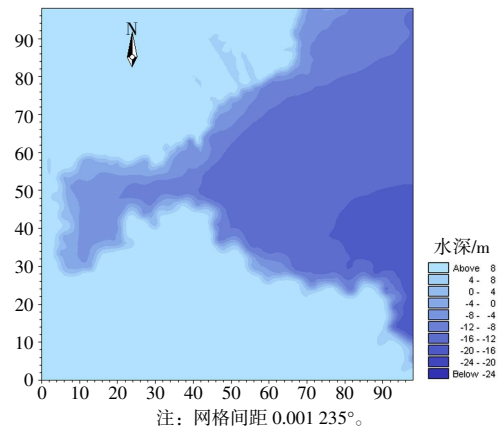


图4 第3层网格模型区域及水深分布图

Fig. 4 Model domain and water depth distribution of the third-layer grid

表1 网格设置

Table 1 Grid settings

网格层	编号	范围	分辨率/(′)	模型设置		
				坐标系	方程类型	底摩擦
第1层	1	99°E—133°E; -1°N—33°N	2	球坐标	线性	无
第2层	2	114.483°E—115.01°E; 22.319°N—22.875°N	0.666 7	球坐标	非线性	0.013
第3层	3	114.646 6°E—114.688 2°E; 22.518 9°N—22.559 5°N	0.074 1	直角坐标	非线性	0.013

### 2.3 模型参数

周本刚等<sup>[8]</sup>基于马尼拉海沟俯冲带的震级上限估计曲线,给出了该区域海啸地震的震源参数,其中马尼拉海沟的震级上限确定为8.8级。然而,结合日本地震海啸的经验教训,并且考虑到历史数据的局限性,单一研究给出的震级上限可能存

在不确定性。此外,马尼拉海沟存在多个断层发生联合破裂的可能性。因此,综合上述因素,本研究将断层联合破裂情形下的震级上限设定为9.0级。根据美国地质调查局(USGS)海啸源研究组的划分,马尼拉海沟被分为6个地震区域<sup>[9]</sup>,各断层参数见表2。

表2 马尼拉海沟断层参数

Table 2 Fault parameters of the Manila Trench

断层	经度/(°)	纬度/(°)	长度/km	宽度/km	走向角/(°)	倾角/(°)	滑移角/(°)	深度/km
E1	120.5	20.2	160	80	10	10	90	15
E2	119.8	18.7	180	90	35	20	90	15
E3	119.3	17.0	240	120	359	28	90	15
E4	119.2	15.1	170	85	3	30	90	15
E5	119.6	13.7	140	70	320	22	90	15
E6	120.5	12.9	100	50	293	26	90	15

在表2中,E1—E6为根据USGS划分的马尼拉海沟6段断层编号,Kirby提供了马尼拉海沟的各段的破裂面长度,通过Papazachos等<sup>[10]</sup>回归公式中长度和宽度的关系给出破裂面宽度。除此之外,还需要破裂面的平均滑移量等资料计算海底

地震所引起的地表变形。因此,本研究根据Geller等<sup>[11]</sup>提出的尺度关系式,即地震矩破裂面面积 $S$ 、破裂面平均滑移量 $u$ 的关系式和地震矩规模与地震矩的关系:

$$M_0 = \mu S u \tag{7}$$

$$\lg M_0 = 1.5M + 16.1 \quad (8)$$

式中:  $M_0$  为地震矩,  $N \cdot m$ ;  $\mu$  为地壳的刚性系数,  $\mu \approx 3 \times 10^{10} N/m^2$ ;  $S$  为断层破裂面面积,  $m^2$ ;  $u$  为破裂面平均滑移量,  $m$ 。

本研究共完成 144 组不同震源与震级组合下的海啸数值计算。计算震级范围设定为 6.5 级—9.0 级, 级距为 0.1 级。潜在震源区内地震活动满足以下统计规律: 震级-频度关系符合古登堡-里克特(G-R)关系, 时间上服从泊松分布, 空间上各点发震概率相等, 即符合均匀分布。

计算方案如下:

1) 震级 6.5 级—8.4 级, 均以单一断层作为震源, 每个震级对应 6 个不同的断层;

2) 震级 8.5 级—9.0 级为高震级段, 考虑到单一断层难以产生如此高震级的地震, 该区间采用组合断层作为震源。组合断层的长度取值介于日本相关规范与 Papazachos 回归公式的计算结果之间。

日本规范<sup>[12]</sup>中震级和破裂面长度的关系式:

$$\lg L = 0.5M - 1.9 \quad (9)$$

Papazachos 回归公式中震级和破裂面长度的关系式:

$$\lg L = 0.55M - 2.19, \quad 6.7 \leq M \leq 9.3 \quad (10)$$

### 3 计算结果及分析

对于式(2)中  $\beta$  取值可根据胡聿贤在《地震工程学》<sup>[7]</sup>中得到的关系:

$$\beta = b \ln 10 \quad (11)$$

式中:  $b$  为古登堡-里克特关系式的斜率参数。 $b$  值参照周本刚等<sup>[8]</sup>通过历史地震回归得到  $b = 0.9653$ , 则可确定  $\beta$  值, 就可以得到不同震级的震级累积频率  $F_j(M)$ 。

本研究结果如图 5 及表 3 所示。

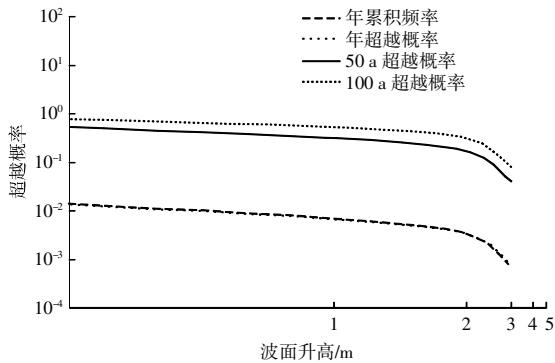


图 5 波面升高和年累积频率与超越概率关系

Fig. 5 Relationship between wave elevation, annual cumulative frequency and exceedance probability

表 3 不同震级的组合断层对应场点的最大海啸波面升高

Table 3 The maximum tsunami wave elevation at field points corresponding to combined faults of different magnitudes

M	断层	L/m	W/m	$\eta/m$
8.5	E1+E2	340 000	170 000	0.72
8.5	E2+E3	420 000	200 000	0.43
8.5	E3+E4	410 000	200 000	0.33
8.5	E4+E5	310 000	155 000	0.31
8.5	E5+E6	240 000	120 000	0.36
8.6	E1+E2	340 000	170 000	0.93
8.6	E2+E3	420 000	200 000	0.66
8.6	E3+E4	410 000	200 000	0.46
8.6	E4+E5	310 000	155 000	0.43
8.6	E5+E6	240 000	120 000	0.51
8.7	E1+E2	340 000	170 000	1.29
8.7	E2+E3	420 000	200 000	1.03
8.7	E3+E4	410 000	200 000	0.65
8.7	E4+E5	310 000	155 000	0.59
8.7	E5+E6	240 000	120 000	0.72
8.8	E1+E2	340 000	170 000	1.86
8.8	E2+E3	420 000	200 000	1.52
8.8	E3+E4	410 000	200 000	0.91
8.8	E4+E5	310 000	155 000	0.82
8.8	E4+E5+E6	240 000	200 000	0.56
8.9	E1+E2	340 000	170 000	2.78
8.9	E2+E3	420 000	200 000	2.00
8.9	E3+E4	410 000	200 000	1.26
8.9	E4+E5+E6	410 000	200 000	0.82
9.0	E1+E2+E3	580 000	200 000	3.02
9.0	E2+E3	420 000	200 000	2.79
9.0	E2+E3+E4	590 000	200 000	2.05

表 3 给出了观测点 (114.667°E, 22.534°N) 在震级 8.5 级以上各断层情景下的最大海啸波面升高, 低于该震级的情形未予列出。表中  $\eta$  为观测场点的最大海啸波面升高。该点海啸波面升高与概率特征的关系如图 5 所示。图 5 中, 年累积频率和年超越概率 2 条线重合。对应的海啸爬高及其概率参数如表 4 所示。

表 4 波面升高对应的年累积频率、超越概率及重现期

Table 4 Annual cumulative frequency, exceedance probability and recurrence interval corresponding to wave elevation

波面升高 $\eta/m$	年累积频率	年超越概率/%	50 a 超越概率/%	100 a 超越概率/%	重现期/a
0.5	$1.558 \times 10^{-2}$	1.55	54.11	78.94	64
1.0	$7.693 \times 10^{-3}$	0.77	31.93	53.67	130
2.0	$3.796 \times 10^{-3}$	0.38	17.29	31.59	263
3.0	$8.335 \times 10^{-4}$	0.08	4.08	8.00	1 200

结果表明,当该点最大波面升高达到3 m时,其年累积频率为 $8.335 \times 10^{-4}$ ,年超越概率为0.08%,50 a超越概率与100 a超越概率分别为4.08%和8.00%,重现期为1 200 a。

#### 4 结语

本研究采用概率方法,通过数值模拟对风险最高的马尼拉海沟潜在地震引发的海啸传播过程进行计算,给出了该海域指定场点的海啸波面升高,以及相应的年累积频率、超越概率和重现期。主要结果归纳如下:

1) 在相同震级下,不同断层组合引起的海啸波面升高存在显著差异。海沟北段(E1+E2组合)因距观测场点较近,引起的波面升高最大;在震级9.0级、E1+E2+E3组合断层情景下,最大海啸波面升高达到3.02 m。

2) 在观测场点( $114.667^\circ\text{E}$ ,  $22.534^\circ\text{N}$ ),波面升高为0.5 m时重现期为64 a,50 a超越概率为54.11%;波面升高为1.0 m时重现期为130 a,50 a超越概率为31.93%;波面升高为3.0 m时重现期为1 200 a,年超越概率为0.08%,表明中等波面升高海啸在工程设计寿命周期内的发生概率不可忽视。

3) 海啸波面升高的超越概率随波面升高增大呈急剧下降趋势,从0.5 m到3.0 m,重现期增幅近19倍。该特征可为沿海防护工程按不同设防标准进行分级设计提供参考。

本研究仅针对风险最高的马尼拉海沟作为指定潜在地震源区,并依据美国地质调查局所划分的断层参数,对该海域开展了概率性海啸危险性分析。建议未来进一步加强对海啸的监测、预警及相关科学研究工作。

#### 参考文献:

[1] 王平,左丽明,孙立宁,等.河北省海啸灾害风险评估和区划研究[J].海洋预报,2024,41(1):50-60.  
WANG Ping, ZUO Li-ming, SUN Li-ning, et al. Risk assessment and zoning on tsunami disaster in Hebei Province[J]. Marine Fore-

casts, 2024, 41(1): 50-60.  
[2] 刘金伟,赵文宇,魏笑然,等.马尼拉俯冲带地震海啸对华南沿海的概率性灾害影响[J].海洋与湖沼,2024,55(4):864-875.  
LIU Jin-wei, ZHAO Wen-yu, WEI Xiao-ran, et al. Probabilistic hazard effects of seismic tsunami in the Manila subduction zone onto South China coast[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2024, 55(4): 864-875.  
[3] 邓志辉,严兴,陈梅花,等.华南沿海地震海啸风险分析[J].地震地磁观测与研究,2023,44(增刊1):131-135.  
DENG Zhi-hui, YAN Xing, CHEN Mei-hua, et al. Study on the earthquake tsunami risk in coastal areas of South China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2023, 44(S1): 131-135.  
[4] LIU P L F, WOO S B, CHO Y S. Computer programs for tsunami propagation and inundation[R]. New York: Cornell University, 1998.  
[5] LYNETT P, LIU P L F. A numerical study of submarine-landslide-generated waves and run-up[J]. Royal Society of London Proceedings Series A[J]. 2002, 458(2028): 2885-2910.  
[6] CORNELL C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.  
[7] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988.  
HU Yu-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1988.  
[8] 周本刚,何宏林,安艳芬.琉球海沟、马尼拉海沟地震构造背景及震源参数评估报告[R].北京:中国地震局地质研究所,2011.  
ZHOU Ben-gang, HE Hong-lin, AN Yan-fen. Assessment report on seismotectonic setting and focal parameters of the Ryukyu Trench and Manila Trench[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2011.  
[9] KIRBY S, GEIST E, LEE WHK, et al. Great earthquake tsunami sources: empiricism and beyond [C]//USGS Tsunami Sources Workshop. Menlo Park, California, USA, 2006.  
[10] PAPAACHOS B C, SCORDILIS E M, PANAGIOTOPOULOS D G, et al. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes[J]. Bulletin of the Geological Society of Greece, 2004, 36(3): 1482-1489.  
[11] GELLER R J. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(5): 1501-1523.  
[12] FURUMOTO A S, TATEHATA H, MORIOKA C. Japanese tsunami warning system[J]. Science of Tsunami Hazards, 1999(2): 85-106.