

温燕林, 赵文舟, 李伟, 薛艳, 于海英. 2014. 日本南海海槽发生罕遇地震情况下我国华东沿海的海啸危险性研究. 地震学报, 36(4): 651–661. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.011.

Wen Y L, Zhao W Z, Li W, Xue Y, Yu H Y. 2014. Research on the potential tsunami hazard in East China Coast under rare earthquake occurred in Nankai Trough, Japan. *Acta Seismologica Sinica*, 36(4): 651–661. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.011.

# 日本南海海槽发生罕遇地震情况下 我国华东沿海的海啸危险性研究<sup>\*</sup>

温燕林<sup>1,†</sup> 赵文舟<sup>1</sup> 李伟<sup>1</sup> 薛艳<sup>2</sup> 于海英<sup>1</sup>

1) 中国上海 200062 上海市地震局

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

**摘要** 基于日本南海海槽地震活动性和历史海啸事件记载的分析, 本文对日本南海海槽发生  $M_w 9.1$  罕遇地震情况下的海啸进行了数值模拟研究。结果表明: 该地震可引发初始波幅约 10 m 的海啸, 6 小时后传至浙江沿海, 近岸各处波幅为 1—2 m; 8 小时后靠近上海海岸线, 最大波幅约 2 m, 受地形影响局部爬高至近 3 m; 11 小时后抵达苏北黄海沿岸, 预计波幅普遍在 1 m 左右。海啸的上岸高度与海岸附近的海深和海岸线的形态密切相关。我国近岸海域地形变化复杂, 海湾众多, 对海啸波有放大作用, 该模拟结果可能比实际传播到近岸时偏小, 因此综合评估日本海啸影响我国华东地区的规模  $m$  可达 1—2 级左右。一旦日本南海发生罕遇地震对我国的影响不容忽视, 尤其遇上风暴潮与天文大潮叠加, 则可能会造成一定程度的海啸灾害。

**关键词** 日本南海海槽 罕遇地震 华东沿海海啸危险性

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.04.011 中图分类号: P315.3<sup>+</sup>2 文献标志码: A

## Research on the potential tsunami hazard in East China Coast under rare earthquake occurred in Nankai Trough, Japan

Wen Yanlin<sup>1,†</sup> Zhao Wenzhou<sup>1</sup> Li Wei<sup>1</sup> Xue Yan<sup>2</sup> Yu Haiying<sup>1</sup>

1) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract:** Based on the analysis of seismicity in Nankai Trough and historical tsunami records, rare earthquake with  $M_w 9.1$  and induced tsunami were studied by numerical simulation. The results show that, the earthquake may cause 10 m tsunami wave initially, and then it propagates to Zhejiang offshore after 6 hours with the wave amplitude getting to 1—2 m; 8 hours later the tsunami is near the coastline of Shanghai with the maximum wave amplitude about 2 m; the tsunami propagates to northern Jiangsu coast after 11 hours, and the wave amplitude

\* 基金项目 国家自然科学基金(41372222)和上海市地震局科技专项(2012 专 10)共同资助。

收稿日期 2013-07-25 收到初稿, 2013-12-15 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: wenzhengyi@sina.com

generally is expected to 1 m. In fact, the tsunami height near the coast is closely related to the shoreline and the local bathymetry. Because China has many complex gulfs which can amplify the tsunami waves, our simulating data may less than the real amplitudes of tsunami propagating to the local coast. Therefore our comprehensive assessment of tsunami hazard scale is  $m=1\text{--}2$  in East China Coast. Once in the Nankai Trough giant earthquake occurred, induced-tsunami effect can not be ignored in China. Especially if the tsunami combines with a storm tide, it may cause tsunami disaster in East China Coast.

**Key words:** Nankai Trough; rare earthquake; tsunami hazard in East China Coast

## 引言

2011年3月11日日本东北地区太平洋沿岸的日本海沟发生  $M_w9.0$  地震，该地震引发巨大海啸，造成日本重大的人员伤亡与经济损失。由于海啸设防不足，还导致了福岛核电站损坏、放射性物质外泄的严重次生灾害。这次巨大地震是日本海沟俯冲带上发生的前所未有的超级地震，十分罕见，震后启示日本地震学界重新评价他们一直所关注的西南日本太平洋海域的地震海啸危险性。该海域存在着所谓的“南海海槽”俯冲构造带，历史上8级左右地震反复发生，此前日本一直预报但迟迟未发生的震级可达8级的“东海地震”就位于该构造带东北段。经过对发震能力的重新评价，日本地震调查研究推进本部认为南海海槽如果全部发生联动性破裂，则具备发生罕遇超9级地震的能力，而不仅仅是此前认为的单次地震只会发生部分破裂，即只有8级左右的发震强度，从而修订了其原先的地震海啸危险性评价结果(地震調査研究推進本部事務局, 2013)。2012年日本内阁府首次向社会公开发布新的研究结果，日本沿海地区政府和企业表示将以此为依据提高防灾等级，重新进行地震海啸设防，制定相应防御对策。日本的研究结果经媒体、网络传播后，其对我国沿海地区可能产生的影响引起我国民众强烈关注，甚至造成恐慌(人民网, 2012)。据我国古籍记载，历史上日本南海海槽发生的巨大地震海啸对我国都有不同程度的影响，因而我们需要运用现代科学知识评价日本南海罕遇地震海啸对我国沿海造成的危险性。

本文在历史地震海啸影响评估和基于地震构造的罕遇海啸模拟法评估的基础上，综合评估潜在的日本南海海槽地震海啸对我国华东沿海地区的影响程度，并初步进行了其总体影响规模评级。一旦发生这种情况，可以为政府部门应急提供科学依据，为民众提供科学的地震海啸咨询服务。

## 1 基于历史记载评估日本南海海槽地震海啸对我国的影响

地震导致海底变形，从海底到海面的海水整体受到扰动以波的形式传播出去即形成海啸。海啸的大小多以海啸规模表示。最常用的表示方法是今村-饭田海啸规模分级表(Iida, 1963)(表1)。该表根据海啸到岸波高将海啸大小分为6级，规模级别以“ $m$ ”表示。2011年3月11日日本海沟发生  $M_w9.0$  地震引发的巨大海啸，传到我国大陆沿岸时各海洋站监测到的海啸波幅多数在50 cm以下。其中江苏、上海沿海海洋站监测到约30 cm的海啸波，最大分别为浙江沈家门和石浦海洋站监测到的55 cm和52 cm的海啸波(国家海洋环境预报中心, 2011)。其对我国无灾害影响，在我国的海啸规模  $m$  为-1级(表1)。

表 1 今村-饭田海啸规模分级表

Table 1 Imamura-Iida intensity scale of tsunami

海啸规模 $m$	说 明	海啸能量/J
-1	海啸波高 50 cm 以下, 验潮站方能观测到海啸痕迹, 通常无灾害	$2.5 \times 10^{18}$
0	波高 1 m 左右, 渔船、水产设施有损坏; 100 km 长海岸范围内波高 50—80 cm. 可能造成小灾害	$1.3 \times 10^{19}$
1	波高 2—3 m, 海滨低地房屋有损坏, 船舶流失; 200 km 长海岸范围内波高约 1 m	$6.4 \times 10^{19}$
2	波高 4—6 m, 多数房屋浸水、流失, 人畜溺死; 300 km 长海岸范围内波高约 1.5 m	$3.2 \times 10^{20}$
3	波高 10 m 左右, 局部达到 20 m; 破坏区长达 400 km, 波高约 2.5 m. 造成显著破坏	$1.6 \times 10^{21}$
4	波高 20 m 左右, 局部超过 30 m; 500 km 海岸范围内波高约 4 m. 造成巨大破坏和灾害损失	$8.0 \times 10^{21}$

据统计, 日本南海海槽每隔 100—150 年左右就会发生 8 级以上巨大地震, 每次地震都引发大海啸, 而且影响到我国沿海。我国地方古籍中对此多有记载。1498 年 7 月 9 日, 日本发生大地震(震中推测在日本南海,  $M \geq 8.0$ ), 广大地区有感, 京都、三河、熊野最为强烈, 同日我国江浙多处发生水溢。嘉定六月十一日申刻, 邑中河渠池泽以及井泉悉皆震荡, 涌高数丈(疑应为尺), 良久乃定(正德《练川备记》卷十); 金山六月十一日江海泖湖水溢(乾隆《金山县志》卷十八); 松江六月十一日海水溢(乾隆《娄县志》卷十五); 上海六月十一日海溢(同治《上海县志》卷三十); 崇明河水高涌数尺, 凡城乡池沼、沟浍皆然, 良久乃定(光绪《崇明县志》卷 5); 常熟水溢池沼, 涌起三四尺(崇祯《海虞别乘》册二); 桐乡水溢时无风雨, 河水忽涌三尺, 池沼亦然(康熙《桐乡县志》卷二)。同时记载的尚有苏州、太仓、震泽、宝山、川沙、青浦、嘉兴、石门等十余处(卢振恒, 1991; 王锋等, 2005; 刘昌森等, 2010)。是时各处无风雨, 排除了气象原因的可能性, 均未构成海啸危害, 总体上评估其影响江浙沪的海啸规模  $m \leq 0$ 。

1707 年 10 月 28 日日本南海发生 8.4 级地震(震后 49 天富士山火山大规模喷发), 自伊豆半岛至九州太平洋沿岸, 包括大波湾、播磨、伊予、防长、八丈岛等地均遭海啸袭击, 仅土佐一处就漂没房屋 11170 栋, 溺毙 1844 人, 失踪 926 人, 破损、漂失船舶 768 艘, 最大浪高 25.7 m, 海啸规模  $m$  为 3.5 级(卢振恒, 1991)。同日浙江吴兴县双林地震水涌; 乌青镇河水暴涨; 海盐县(治今盐官镇)地震水沸(误记十月十四日); 安徽巢县无风河塘忽然水起大浪, 水面宽处波高丈余, 窄处亦有三尺(雍正《巢县志》卷二十一); 无为河水斗, 无风波浪自起(乾隆《无为州志》卷二); 贵池水沸逾时(康熙《池州府志》卷二十九)。上海各县虽无记录亦当受影响之列。不仅地震波及浙江, 钱塘江口亦有海啸反映, 强度甚低, 海啸规模  $m$  为 -1 级(谢毓寿, 1987)。

1854 年 12 月 23 日和 24 日, 日本东海、南海先后发生两次 8.4 级地震, 引发东京以东的房总半岛至九州太平洋沿岸海啸, 久礼波高 16.1 m, 串本 15 m, 种崎 11 m, 古座、牟岐、阿波 9 m, 伊予西海岸 3—4 m, 室户 3.3 m, 共漂没房屋 15000 余栋, 损坏船舶 800 余艘, 溺毙 3000 余人, 经济损失惨重, 海啸规模  $m$  为 3—4 级。海啸甚至波及北美沿岸, 对我国也造成一些灾害。例如, 江苏如皋海啸, 淹毙多人; 上海黄浦水沸, 有高二三尺者, 南至嘉定, 北至苏州皆同(同治《上海县志》卷三十); 松江十一月初四日午后, 水忽涌起二尺者三次, 船之泊者知之, 木牌震响有声, 禾郡更甚(1962 年重印《葵丑纪闻录》页 60); 吴兴双林河水忽涨一二尺, 动荡不定, 沟池皆然, 周围数百里皆同(民国《双林镇志》卷九); 海

宁河水无风自涌，如潮涨落，池沼皆然；慈溪河水骤腾三四尺；鄞县河水骤涨三四尺，城中湖无风而起巨浪，观者如堵（咸丰《鄞县志》卷九）；镇海河水骤涨三四尺，状如沸汤（光绪《镇海县志》卷三十七）；临海海潮泛滥，城乡沟池积潦，同时俱沸，历二时止，沿海庐舍多被淹没（咸丰《临海县志稿》卷三十八）（王锋等，2005；刘昌森等，2010）。这次日本地震海啸对我国华东区域的影响最为明显，陆上河湖水涌振荡，沿海海溢，应是地震与海啸先后作用的结果，总体上看海啸规模  $m$  可达 1 级。从有详细记载的上述 3 次历史海啸事件的分析，初步认为发生在日本南海海槽的巨大地震海啸影响我国华东沿海区域的最大规模  $m$  不超过 1 级。

## 2 基于构造环境与地震活动性的罕遇地震震级的判定

日本是环太平洋火山地震带上典型的“沟-弧-盆”构造体系，列岛东侧有很深的日本海沟，南侧有南海海槽、相模海槽，北、西侧有边缘海（日本海、中国东海）。日本列岛被太平洋板块、菲律宾海板块和欧亚板块包围，处于三大板块衔接处，太平洋板块和菲律宾海板块正向日本列岛下面俯冲。日本列岛存在两条长的构造线，即大地沟带和中央构造线。大地沟带自日本海（ $138^{\circ}\text{E}$  处）以南北方向横穿本州岛至太平洋，大地沟带以东地区称东北日本，以西地区称西南日本。中央构造线（ $33^{\circ}\text{--}35^{\circ}\text{N}$ ）以南西西—北东东方向穿过西南日本。因此日本列岛及其周围构造复杂，地震多发，地震数目约占世界地震总数的  $1/10$ 。根据历史资料统计，该地区 8 级以上地震平均 15 年发生 1 次，7—8 级地震平均每年发生 1—2 次，6—7 级地震每年发生 15 次左右。日本历史地震资料表明，很多大震发生在日本列岛靠太平洋的海底构造——日本海沟和南海海槽上（冈本舜三，1984）。

日本南海海槽是从日本静冈县骏河湾至九州以东海面约  $700 \text{ km}^2$ 、水深 4 km 以下 的海槽，位于菲律宾海板块与亚欧板块交接处，处于该海槽沿线的日本东海—南海地区为地震多发区。南海海槽发生的地震深度大多在 30 km 以内，大地震每 30—50 年一次，特征地震为 8 级，重现期约为 90—150 年。从地震活动图像看，目前日本南海海槽地区东北段（即 Tokai ——“东海地区”）是个地震空区（图 1）。从特征地震复发间隔来看，南海海槽地区已进入了危险期。目前日本海洋研究机构已在南海海槽布设海底观测网并开展综合大洋钻探进行“南海海槽发震带试验”研究（Nakano *et al*., 2013）。

日本地震调查研究推进本部对南海海槽的活动性进行了分段，将其分为东海、东南海和南海等 3 段，西南日本海域历史上大地震都是由该海槽部分段落破裂产生的。日本研究人员根据历史记载和海啸沉积物推断了历次地震事件的时间、强度和位置。结果表明，1498 年发生的 M8.6 地震破裂在东南海—东海段、1605 年发生的 M7.9 地震在南海—东南海段，1707 年发生的 M8.4 地震使得南海海槽 3 段大部分破裂，1854 年东海—东南海段和南海段相隔一日破裂先后发生两次 8.4 级地震，1944 年和 1946 年在东南海段和南海段上分别发生 8.0 级和 8.1 级地震<sup>①</sup>（卢振恒，1991）。如果仅根据历史最大地震震级去判定南海海槽地震的潜在最大震级，将会低估其发震强度。依据地震构造规模和活动性类比原则，南海海槽具备与日本海沟和印尼巽他海沟相似的发震能力。若在一次地震中 3 段全部联合

<sup>①</sup> Koizumi N, Matsumoto N, Itaba S. 2007. Integrated observation well network of Geological Survey of Japan, AIST for study of Tonankai and Nankai earthquakes (ppt). Tokyo: Geological Survey of Japan, AIST.

而发生一次性破裂，其强度将可达到罕遇的 9.1 级规模（地震調查研究推進本部事務局，2013）。

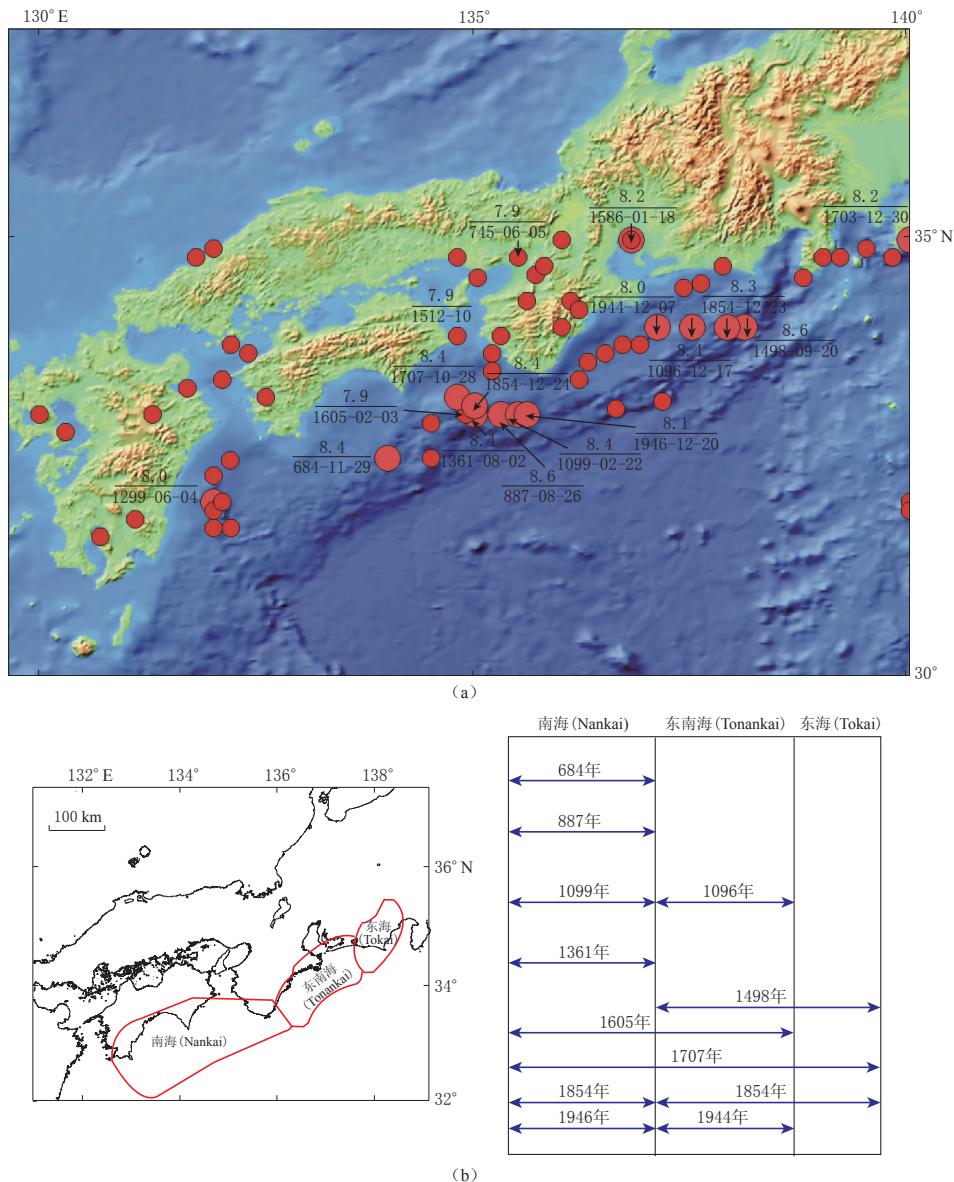


图 1 (a) 日本西南地区  $M \geq 7.0$  地震震中分布图(引自宋治平等, 2011); (b) 日本南海海槽分段和各段上历史大震年代及破裂范围示意图<sup>①</sup>. 历史记载的地震震级为  $M7.9$ — $8.4$ , 自 1605 年后以 90—150 年间隔复发

Fig. 1 (a) Distribution of  $M \geq 7.0$  earthquakes in southwestern of Japan (after Song *et al.*, 2011);  
 (b) Sketch of segments of Nankai Trough and corresponding rupture ranges of historical events<sup>①</sup>. The historical earthquakes are of  $M7.9$ — $8.4$  with the recurrence interval of 90—150 years after the year 1605

<sup>①</sup> Koizumi N, Matsumoto N, Itaba S. 2007. Integrated observation well network of Geological Survey of Japan, AIST for study of Tonankai and Nankai earthquakes (ppt). Tokyo: Geological Survey of Japan, AIST.

### 3 设定日本南海海槽发生罕遇地震时的海啸模拟

沿日本南海海槽的特大地震的震源机制为低角度逆断层，均由菲律宾海板块向日本岛弧下俯冲引起的。这些反复发生的地震中，对于 1944 年东南海地震和 1946 年南海道地震，Kato 和 Ando(1997)已求出其震源机制解。这两次地震的发震断层长度分别为 100 km 以上，为低角度逆断层。又根据海沟俯冲板片模型<sup>①</sup>，设定海啸模拟时发震断层倾角为 25°。根据 Yao 等(2013)的研究，认为浅部地壳(深度 15 km 以上)的地震变形才能产生海啸，中深部的滑动位错不会产生海啸。因此设定震源深度平均为 10 km。考虑 2011 年日本海沟  $M_w 9.0$  地震反演的断层面滑动量大小分布不均匀，不同研究人员得到的最大滑动量从 30—60 m 不等(Grilli *et al.*, 2012; Kozdon, Dunham, 2013; Maeda *et al.*, 2013)。为简化计算，我们假定计算时地震破裂面上各处滑动量大小相等，均取为 30 m。为便于计算罕遇情况下  $M_w 9.1$  地震同震破裂引起的海底变形，将整个南海海槽沿走向分成 6 个接续的破裂子段(从东北到西南依次为破裂段 1—6，图 2a)。具体设定的震源破裂参数见表 2。

表 2 设定地震的发震断层破裂参数

Table 2 Rupture parameters of seismogenic fault for the scenario earthquake

破裂子段	深度/km	破裂长度/km	破裂宽度/km	走向/°	倾角/°	滑动角/°	滑动量/m
1	10	50	150	45	25	70	30
2	10	70	150	25	25	70	30
3	10	80	150	48	25	70	30
4	10	150	150	60	25	70	30
5	10	150	150	70	25	70	30
6	10	200	150	65	25	70	30

海啸是一种海洋浅水波。本文采用康奈尔大学 Wang 和 Liu(2006)基于非线性浅水波方程开发的 COMCOT 数值模式进行海啸模拟。国内外研究人员用该模式多次模拟的实际海啸的结果与实测数据都较吻合，证明该模式是一个有效的海啸计算模式。刘双庆等(2012)采用 COMCOT 模拟 2011 年日本东北太平洋海域地震海啸传播情况，其计算的海啸传到我国沿海的波高结果与我国东南沿海 7 个验潮站监测到的波高数据相符。

本文研究区域为 25°—36°N, 119°—141°E，空间网格尺度采用规则的 1 分弧度网格，网格数为  $1321 \times 661$ ，时间步长为 1 s。计算区域水深及陆地地形数据引自美国国家地球物理数据中心的 ETOPO1 数据库。该数值模式在陆地边界采用反射边界条件计算，其它在水区的边界采用辐射开边界条件以“透浪”消波。本文模拟了罕遇情况下产生的  $M_w 9.1$  地震海啸在我国海域及邻区传播的过程，海啸波场如图 2 所示。

### 4 华东沿海可能遭受的海啸危险性评价

我们在江浙沪沿海设置 10 个虚拟海啸监测站(编号及分布见图 2a 中三角形所示)。图 3 给出了 10 个虚拟监测站记录的本次模拟的  $M_w 9.1$  地震海啸时程曲线，各台站时程曲线记录了海啸到达各地的时间和波高变化信息。

<sup>①</sup> Slab models for subduction zones. <http://earthquake.usgs.gov/data/slab/>. 查询日期：2014-03-10.

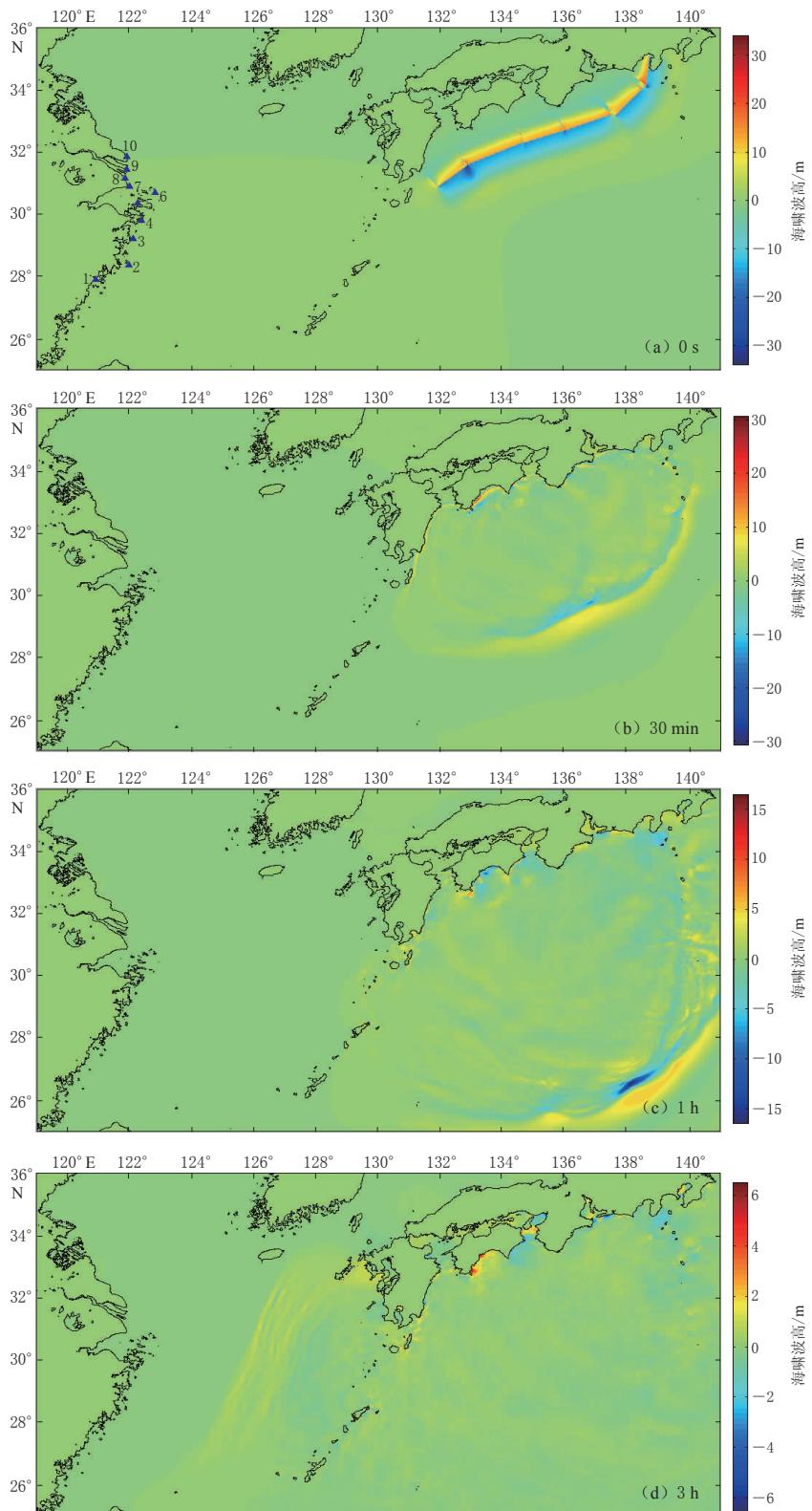


图 2 模拟的日本南海海啸传播过程不同时刻示意图

Fig. 2 Snapshots of simulated tsunami propagation in Nankai Trough, Japan

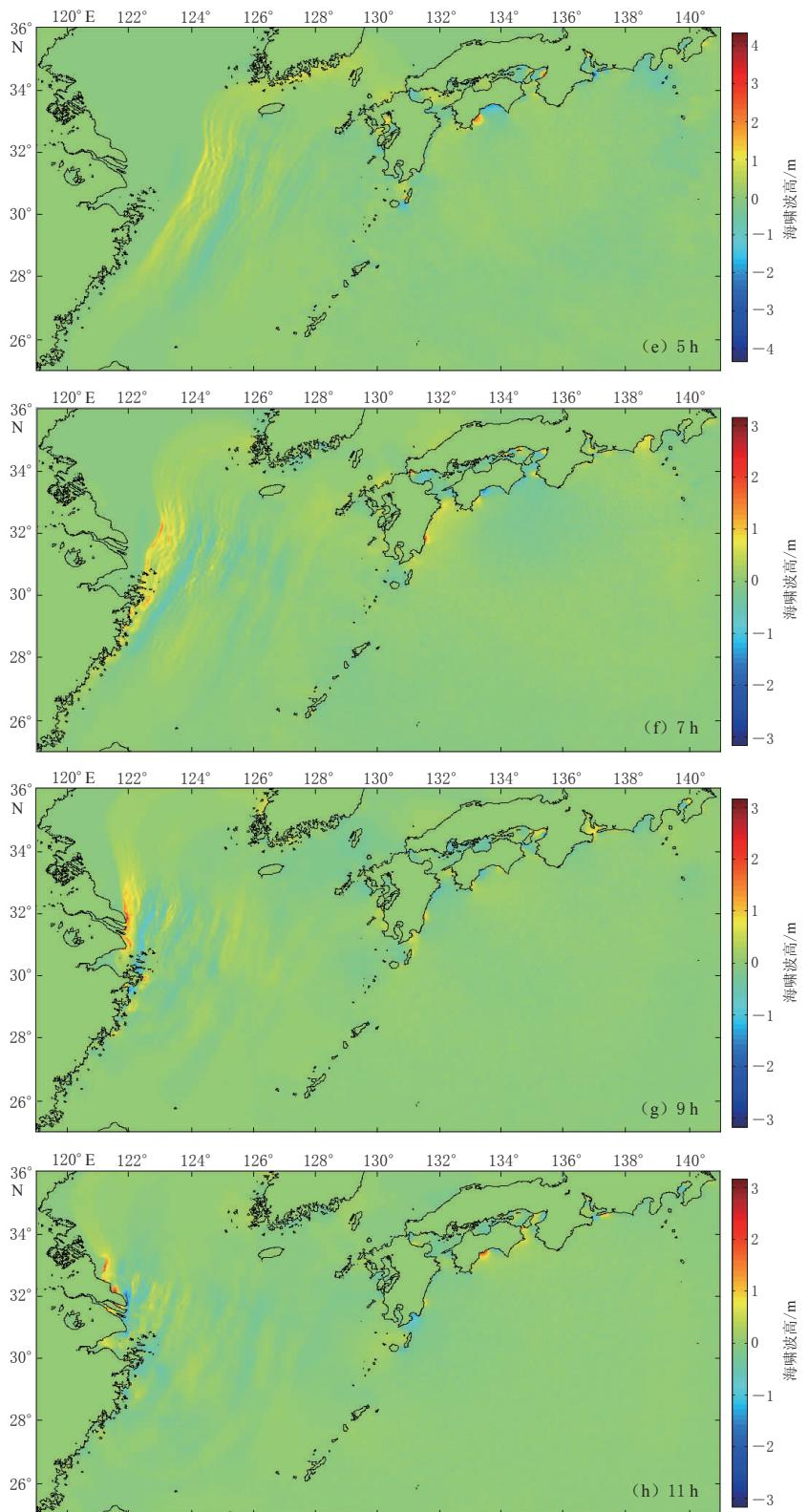


图 2 模拟的日本南海海啸传播过程不同时刻示意图

Fig. 2 Snapshots of simulated tsunami propagation in Nankai Trough, Japan

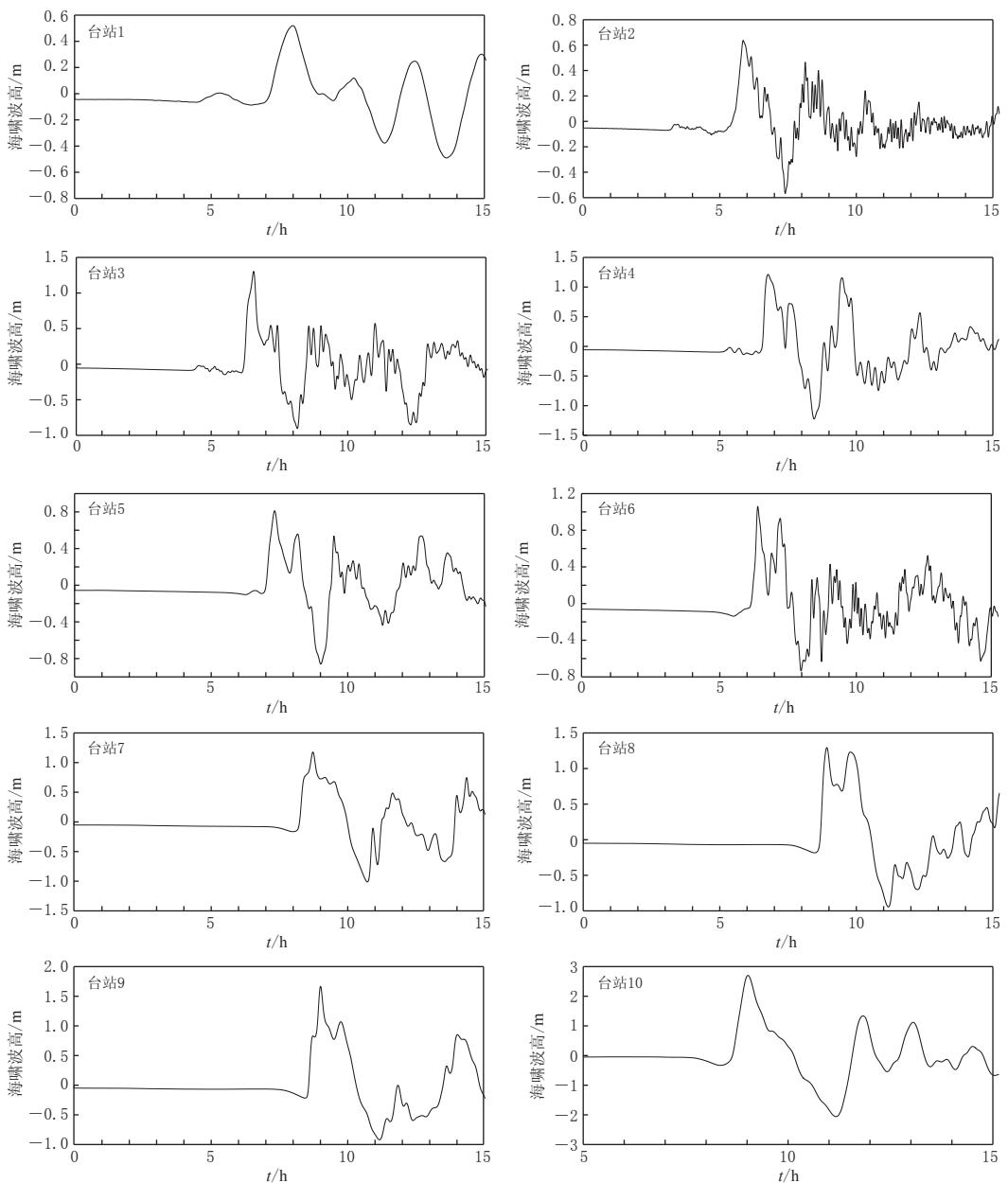


图 3 10 个虚拟监测站记录的模拟海啸时程曲线

Fig. 3 Curves of simulated travel time of tsunami in ten virtual tidal stations

由海啸传播过程图和虚拟监测站数据可以看出,  $M_w 9.1$  地震可产生初始波幅约 10 m 的海啸, 向日本和太平洋两个方向传播, 西南日本沿岸各地在 10 分钟后将陆续受到海啸冲击。据日本内阁府最新公布的南海巨大地震海啸模拟结果, 日本沿岸到岸波幅最大可达 30 多米(内閣府政策統括官(防災担当), 2012), 海啸规模  $m$  达到 4 级。我们计算的海啸传到本州、四国、九州沿岸最大波幅数据与上述结果相符。1 小时后海啸全面穿越琉球群岛, 2 小时后抵达东海大陆架边缘。由于海啸传播速度只与海水深度有关, 到大陆架后随着水深

变浅，传播速度变缓。在宽广平缓的东海大陆架上，海啸传播速度比在太平洋深海中明显变缓，传播 6 小时后海啸才抵达浙江近海；7 小时左右浙江沿岸普遍遭到海啸袭击，波幅大约为 2—3 m；8 小时后海啸逼近上海沿岸；9 小时后海啸进入杭州湾和长江口传播，波幅达 2 m 左右，受地形影响局部地方波高会爬高至近 3 m；11 小时后海啸邻近苏北黄海沿岸，波幅已普遍在 1 m 左右。由于海啸的爬高与海岸附近的水深密切相关，且近岸传播时受浅水作用、港湾效应的强烈影响，因此海啸进入华东沿海各河口海湾内部后波幅会增大。考虑到近岸水深数据的分辨率不够及其计算误差，预计罕遇地震情况下实际传到华东海岸的海啸局地最大波幅可达 3 m 以上。因此综合考虑近岸各影响因素后认为，华东沿海区域的海啸危险性规模  $m$  为 1—2 级。

## 5 结论

日本南海海槽每隔 100—150 年左右就会发生 8 级以上巨大地震，每次地震都会引发大海啸，而且影响到我国沿海。根据历史记载评估，日本南海海槽的地震海啸事件对我国江浙沪地区的影响规模  $m$  最大可达 1 级。数值模拟研究表明，日本南海海槽发生罕遇  $M_w 9.1$  地震情况下，波源区长度可达 500 km 以上，西南日本沿岸将遭受大规模海啸袭击。我国华东沿海即使有东海浅水大陆架摩擦衰减，大部分沿岸地区可能遭受的海啸仍接近 2 m。若考虑部分地区的地形影响，则局地最大海啸可达 3 m 以上。综合评估认为，罕遇地震情况下我国华东沿海区域的海啸危险性规模  $m$  可达 1—2 级。更精确的评价结果有待详细考虑近岸传播的非线性效应，以及使用更精细的水深数据进行嵌套网格精细化模拟研究。此外，如果遇上天文高潮位与风暴潮叠加，可能会造成一定程度的海啸灾害。需要指出的是，本文模拟的南海海槽达到发生 9 级以上地震的可能性很小，但是今后一旦日本南海海域发生 8 级左右大地震，有关部门则可参考本文结果对海啸影响程度作出迅速估算，为应急提供科学依据。

感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

## 参 考 文 献

- 冈本舜三(著). 1984. 李裕澈等(译). 1989. 地震工程学导论[M]. 北京: 学术书刊出版社: 38—43.
- Shunzo O. 1984. Li Y C et al (trans). 1989. *Introduction to Earthquake Engineering* [M]. Beijing: Academic Book Press: 38—43 (in Chinese).
- 国家海洋环境预报中心. 2011. 我国如何应对 2011 年日本地震海啸? [EB/OL]. [2013-05-10]. <http://www.nmefc.gov.cn/nr/cont.aspx?itemid=301&.id=1632>.
- National Marine Environmental Forecasting Center. 2011. How to deal with the 2011 Japan earthquake induced-tsunami for Chinese government? [EB/OL]. [2013-05-10]. <http://www.nmefc.gov.cn/nr/cont.aspx?itemid=301&.id=1632> (in Chinese).
- 刘昌森, 姚保华, 章振铨, 黄佩, 火恩杰. 2010. 上海自然灾害史[M]. 上海: 同济大学出版社: 26—28, 444—445.
- Liu C S, Yao B H, Zhang Z Q, Huang P, Huo E J. 2010. *Natural Disasters of Shanghai District* [M]. Shanghai: Tongji University Press: 26—28, 444—445 (in Chinese).
- 刘双庆, 朱元清, 梁明剑, 董非非. 2012. 冲绳海槽地区地震潜在海啸对中国东南沿海的影响研究[J]. 地震学报, 34(3): 283—295.
- Liu S Q, Zhu Y Q, Liang M J, Dong F F. 2012. Impact of potential tsunami induced by Okinawa Trough earthquakes on

- southeastern seaboard of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(3): 283–295 (in Chinese).
- 卢振恒. 1991. 日本破坏地震概观[M]. 北京: 地震出版社: 19–32.
- Lu Z H. 1991. *An Introduction to Damaged Earthquakes in Japan*[M]. Beijing: Seismological Press: 19–32 (in Chinese).
- 人民网. 2012. 日本专家预测南海海槽大地震达 9.1 级, 或致 32 万人死亡[EB/OL]. [2012-08-30]. <http://japan.people.com.cn/35465/7929788.html>.
- People.cn. 2012. Japanese experts predict that  $M_w 9.1$  earthquake will occur in Nankai Trough and 320 000 people will die in the earthquake[EB/OL]. [2012-08-30]. <http://japan.people.com.cn/35465/7929788.html> (in Chinese).
- 宋治平, 张国民, 刘杰, 尹继尧, 薛艳, 宋先月. 2011. 全球地震目录[M]. 北京: 地震出版社: 441–448.
- Song Z P, Zhang G M, Liu J, Yin J Y, Xue Y, Song X Y. 2011. *Global Earthquakes Catalog*[M]. Beijing: Seismological Press: 441–448 (in Chinese).
- 王锋, 刘昌森, 章振铨. 2005. 中国古籍中的地震海啸记录[J]. 中国地震, **21**(3): 437–443.
- Wang F, Liu C S, Zhang Z Q. 2005. Earthquake tsunami records in Chinese ancient books[J]. *Earthquake Research in China*, **21**(3): 437–443 (in Chinese).
- 谢毓寿, 蔡美彪. 1987. 中国地震历史资料汇编(第三卷上)[M]. 北京: 科学出版社: 430.
- Xie Y S, Cai M B. 1987. *Collection of Historical Documents Related to Chinese Earthquakes (Vol. 3, Part 1)*[M]. Beijing: Science Press: 430 (in Chinese).
- 地震調査研究推進本部事務局. 2013. 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)概要資料[EB/OL]. [2013-05-24]. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may\\_nankai/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm).
- The Headquarters for Earthquake Research Promotion, Japan. 2013. Summary of long-term assessment of seismicity in Nankai Trough (second edition)[EB/OL]. [2013-05-24]. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13\\_may\\_nankai/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13_may_nankai/index.htm) (in Japanese).
- 内閣府政策統括官(防災担当). 2012. 南海トラフ巨大地震の震度分布、津波高等及び被害想定について[EB/OL]. [2012-09-05]. [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html).
- Director General for Disaster Management, Cabinet Office, Government of Japan. 2012. Intensity, tsunami heights and disaster prediction in case of the great Nankai Trough earthquake occurred[EB/OL]. [2012-09-05]. [http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html) (in Japanese).
- Grilli S T, Harris J C, Tayebeh T, Kirby J T, Shi F Y, Masterlark T L, Kyriakopoulos C. 2012. Numerical simulation of the 2011 Tohoku tsunami: Comparison with field observations and sensitivity to model parameters[C]// *Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*. Rodos, Greece, June 17–22, 2012.
- Iida K. 1963. Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of earthquakes associated with tsunamis[J]. *International Union of Geodesy and Geophysics Monograph*, **24**: 7–18.
- Kato T, Ando M. 1997. Source mechanisms of the 1944 Tonankai and 1946 Nankaido earthquakes: Spatial heterogeneity of rise times[J]. *Geophys Res Lett*, **24**(16): 2055–2058.
- Kozdon J E, Dunham E M. 2013. Rupture to the trench: Dynamic rupture simulations of the 11 March 2011 Tohoku earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(2B): 1275–1289.
- Maeda T, Furumura T, Noguchi S, Takemura S, Sakai S, Shinohara M, Iwai K, Lee S J. 2013. Seismic- and tsunami-wave propagation of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite-difference simulation[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(2B): 1456–1472.
- Nakano M, Nakamura T, Kamiya S, Ohori M, Kaneda Y. 2013. Intensive seismic activity around the Nankai Trough revealed by DONET ocean-floor seismic observations[J]. *Earth Planets Space*, **65**(1): 5–15.
- Wang X M, Liu P L F. 2006. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami [J]. *J Hydraul Res*, **44**(2): 147–154.
- Yao H J, Shearer P M, Gerstoft P. 2013. Compressive sensing of frequency-dependent seismic radiation from subduction zone megathrust ruptures[J]. *PNAS*, **110**(12): 4512–4517.