

河北省海啸灾害风险评估和区划研究

王平¹, 左丽明¹, 孙立宁², 席明硕¹, 王培涛², 赵亚娟¹

(1. 河北省水文工程地质勘察院, 河北 石家庄 050021; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 基于康奈尔多电网耦合海啸模型(COMCOT)数值模式建立研究区海啸数值模型, 利用模型对6个地震海啸源情景场进行模拟计算, 通过对各海啸源下数值模拟结果的综合分析, 确定研究区海啸灾害危险性分布; 根据土地利用类型数据资料确定研究区承灾体脆弱性分布; 通过危险性、脆弱性评估成果, 综合确定研究区海啸灾害风险性评估和区划成果。结果表明: 河北省遭受海啸灾害风险最高等级为Ⅱ级, 主要分布在唐山市和秦皇岛市沿海区域; 沧州市沿海区域海啸灾害风险等级较小, 为Ⅲ级和Ⅳ级。

关键词: COMCOT 数值模式; 海啸灾害; 危险性; 脆弱性; 风险评估; 河北省

中图分类号: P731.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0050-11

0 引言

进入21世纪以来, 全球地震海啸活跃, 海啸灾害频发。2004年印度尼西亚苏门答腊岛海域9.1级地震海啸和2011年日本9.1级地震海啸影响深远, 全球沿海各国都开始重视海啸灾害风险评估和防范工作。从20世纪90年代开始, 美国、欧洲、日本等发达国家已开展区域性、多灾种的自然灾害风险评估, 并将其成果与减灾规划、社会发展相结合, 取得了显著效果。

我国的海啸灾害系统研究工作起步较晚, 自20世纪70年代起, 先后开展了历史海啸灾害分布、中国高精度海啸数值模式、全球海啸传播时间模式等相关研究工作。渤海海域历史上曾多次发生7级以上的大地震, 但仅有部分地震会引发海啸, 且该海域发生的海啸强度相对偏弱, 但由于该区域主要受局地海啸影响, 预警难度大, 造成灾害的可能性仍不可低估。结合历史监测数据资料, 环渤海地区遭受海啸灾害的影响较小, 其中2011年日本9.1级地震海啸^[1-2]、2010年智利8.8级地震海啸均未对该区域造成显著的海啸影响; 大量数值模拟也表明, 相较于局地海啸源, 越洋及区域海啸对研究区域的

影响均较小。

近年来, 随着全球变暖等原因导致海平面不断上升, 沿海地区面临海啸威胁的风险日益加大, 也引起了当地政府和居民的广泛关注。位于我国沿海地区的河北省可能同样存在遭遇海啸灾害的风险, 因此, 前瞻性地开展此方面研究, 对河北省海啸灾害进行风险评估并开展防灾减灾工作, 具有重要的科研价值和社会经济效益。

本文在充分搜集渤海海域全球海洋通用水深数据2020(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO2020)、遥感影像、土地利用、岸线、承载体、历史海啸数据、历史地震数据、河北省沿海海洋站观测潮位等相关资料的基础上, 采用了美国康奈尔大学研制的康奈尔多电网耦合海啸模型(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model, COMCOT)数值模式^[3-4]对河北省开展海啸灾害的数值计算和风险分析工作。

1 海啸数值计算

本次基于COMCOT数值模式及搜集的河北省

收稿日期: 2022-08-26。

基金项目: 河北省海洋灾害风险评估与区划(13000021FA90FAGMVISWR)。

作者简介: 王平(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋地质、水文地质、工程地质、环境地质等方面研究。E-mail: 694532991@qq.com

以及渤海海域0.5 arcmin、15 arcsec分辨率的地形水深数据、渤海湾主要断裂带特征数据等资料,建立了河北省海啸灾害风险评估数值模型,并结合历史真实地震海啸事件对模型精度进行了验证。

1.1 渤海及北黄海地震分析

首先分析渤海、北黄海主要断裂带特征,并针对该海域的地震活动性进行研究,分析其地震特征。

1.1.1 渤海海域主要断裂带特征

渤海海域存在的主要断裂带有NNE向郯庐断裂带、NW向张家口-蓬莱断裂带、NEE—EW向断裂。主要特征如下:

①NNE向郯庐断裂带

郯庐断裂带渤海段是渤海海域中最重要的NNE向断裂带^[5-7],也是渤海湾盆地的东侧边界。前人的研究表明郯庐断裂带并非一条完整连接的断裂,而是由多条次级断裂组成的复杂断裂带,并表现出明显的分段性。郯庐断裂带渤海段在新生代表现为右旋走滑,同时还叠加了明显的拉张裂陷作用,表现出明显的垂向运动特征。

②NW向张家口-蓬莱断裂带

张家口-蓬莱断裂带的影响深度大,控制了海域内次级构造的凸起和凹陷,并在渤海中部切过郯庐断裂带,是由20余条不连续的走向为290°~310°的次级断裂所组成的复杂断裂带^[8-9]。该断裂带海域段显示了走滑断裂的一些特征,断裂带内次级断裂还具有左旋特征;陆域段则主要表现了强烈的垂向运动特征,主要次级断裂都具有正断性质。

③NEE—EW向断裂

该断裂主要分布于凹陷或凸起上,呈现规模相对较小、数目多、密度大的特点。渤海地区新生代的NEE—EW向断裂属于伸展系统,晚第四纪以来主要表现为张性断裂,具有强烈的垂向运动特征。

1.1.2 北黄海海域主要断裂带特征

北黄海区域构造走向为NE、NEE向,在此背景上发育了NW—NWW的优势构造走向。北黄海北缘断裂带分布于北黄海北缘,该断裂带控制了辽东半岛南端海岸线的形态,是分割辽东半岛与北黄海两大构造单元的地壳型深大断裂带。北黄海西缘断裂带分布于北黄海盆地西缘,属于郯庐断裂带的

次级断裂,该断裂带的形成和活动与郯庐断裂带密切相关。刘公岛断裂带位于郯庐断裂带以东,是五莲-青岛-刘公岛-海州断裂带在海域内的部分,大致沿NE向延伸,也是北黄海的南界。北黄海附近还存在着鸭绿江断裂的部分,由多条相同方向(NE向)延伸、成生密切的断裂组成,是辽宁东部规模较大的断裂带,也为著名的郯庐断裂带东侧一条多期活动的重要分支断裂带。

1.1.3 渤海及北黄海海域地震活动性

历史上,渤海和北黄海海域内发生过多次强震,其中渤海地区发生过3次震级超过7级和多次超过6级的地震^[10-12],震中主要集中在在张家口-蓬莱断裂带和郯庐断裂带,北黄海海域历史上发生过1次震级超过7级和数次6级左右的地震,地震活动主要受张家口-蓬莱断裂带和鸭绿江断裂控制(见表1)。

表1 渤海与北黄海地区6级以上地震目录

Tab.1 Earthquakes with $M \geq 6$ in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea

时间/(年-月-日)	纬度/°N	经度/°E	震级	参考地名
1548-9-22	38.000	121.000	7.0	北黄海
1568-5-5	39.000	119.000	6.0	渤海
1597-10-6	38.180	120.000	7.0	渤海
1888-6-13	38.180	119.000	7.5	渤海湾
1922-9-29	39.072	120.180	6.5	渤海
1932-8-22	36.036	121.216	6.25	青岛东
1944-12-19	39.700	124.300	6.75	北黄海
1948-5-23	37.294	121.324	6.0	北黄海
1969-7-18	38.072	119.144	7.4	渤海

结合周边陆地地震,我们发现渤海和北黄海周边地区存在4个地震密集区,分别为1976年唐山大地震区、1975年海城大地震区、1969年渤海大地震区以及山东半岛烟台外侧海域。

1.2 模型设置

1.2.1 震源参数的确定

通过时间相关危险分析的方法^[13],对美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)获取的1900年以来渤海及周边地区5.0级以上地震事件目录进行分析并评估地震活动参数(给定震级的平均重现期、发生大于或等于给定震级的可能性),

每个时窗的地震过程都符合泊松过程。结合历史大地震及 USGS 记录的渤海及周边区域大于 5 级的地震,确定该区内理论震级分布上限值为 8.16。同时,根据已有的研究资料,渤海海域内地震的震源深度优势分布为 6~30 km^[14],本次选取 15 km 用于模拟计算。根据《中国活动构造图》或邻近其他近期地震的震源机制解本次模拟的断层走向;断层倾角为正断层 65°,逆断层 25°,走滑断层 90°,正走滑 75°,逆走滑 35°;走滑角为正断层 270°,逆断层 90°,走滑断层 0°,正走滑 225°,逆走滑 45°。结合已有资料确定渤海及北黄海周边区域 6 个模拟震源地震分布情况(见表 2)。

1.2.2 网格嵌套

根据潜在海啸源的分布位置、河北省所处的地理位置以及数值模型的特点,设定本次海啸的数值模拟采用两层网格嵌套进行计算。

第一层的高程水深数据是 GEBCO 数据和实测数据的结合。GEBCO 是由联合国教科文组织政府间海洋学委员会(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC)国际水道测量组织(International Hydrographic Organization, IHO)联合成立的国际组织。目前,GEBCO 水深数据的分辨率为 0.5 arcmin,但是其大洋数据较准确,近岸数据误差较大,因此,需要用近岸实测数据对 GEBCO 近岸水深数据进行

校正。

第二层的高程水深数据是数字高程模型数据、GEBCO 数据和等深线数据的融合,数据经过统一参考面、插值、卫星影像订正等处理。水陆边界经过了卫星数据的详细刻画,分辨率为 15 arcsec。

1.2.3 主要参数设置

海啸模式采用两层嵌套网格进行计算,具体网格设置见表 3。

根据地震海啸源地与河北省评估区的距离,设置海啸传播时间为 15 h;数值模型均采用球坐标系。第一层网格控制方程采用线性浅水方程。但当海啸传播至近岸时,水深变浅,受地表因素的影响较大,因此线性浅水方程不再适用,因此第二层的控制方程设置为非线性浅水方程。根据河北省沿岸地形特征及沿海城市的分布情况,选取 8 个典型位置作为模型计算结果的输出点。

1.3 模型验证

本次选取 2011 年以来发生的 4 次具有显著影响的海啸事件作为检验个例(见表 4),同时搜集整理了相关事件中的海啸波动观测资料,对波幅超过 5 cm 的浮标资料(21 个)和波幅超过 10 cm 的验潮站资料(41 个)进行了筛选。

以日本东北部 9.0 级地震海啸事件为例,分别

表 2 模拟震源情况

Tab.2 Earthquake sources in numerical simulation

序号	经度/°E	纬度/°N	参考名称	震级	深度/km
1	117.976	39.098	张家口蓬莱断裂-曹妃甸	8.0	15
2	119.000	39.000	乐亭外海	8.1	15
3	119.572	38.310	张家口蓬莱断裂-渤海中部	8.1	15
4	120.180	39.072	郯庐断裂-渤海中部	8.1	15
5	121.196	38.075	张家口蓬莱断裂-北隍城	8.1	15
6	122.051	40.466	郯庐断裂-辽东湾	8.0	15

表 3 网格设置参数情况表

Tab.3 Model grid setting

网格	区域范围	空间网格距	区域内网格数
第一层	32°~42°N, 116°~128°E	30"	1 440×1 200
第二层	38°~40°N, 117°~120°E	15"	671×478

表4 4次海啸事件的地震基本信息

Tab.4 The basic information of earthquakes in 4 tsunamis

序号	事件	日期	时间 (世界时)	震中经度/ °E	震中纬度/ °N	震源深度/ km	震级
1	智利伊基克(Iquique)8.2级地震海啸	2014年4月1日	23:46	-70.769	19.610	25.0	8.2
2	智利伊亚佩尔(illapel)8.3级地震海啸	2015年9月16日	22:54	-71.674	-31.573	22.4	8.3
3	新西兰克马德克群岛8.1级地震海啸	2021年3月4日	19:28	-117.279	-29.723	28.9	8.1
4	美国阿拉斯加海域8.2级地震海啸	2021年7月29日	06:15	157.888	55.364	35.0	8.2

对太平洋区域沿岸和中国海域(浙江沿海)验潮站实际观测的时间序列和模拟结果、海啸最大波幅的模拟与计算结果进行对比,结果见图1—2、表5—6。

从图1和表5中可以明显看出,太平洋区域沿岸浮标海啸波动模拟结果与观测结果的拟合性均

较好。部分站位在模拟地震发生9 h后出现了海啸波幅模拟不足的情况,相位的模拟结果稍有提前,随着首波到时的继续延长,这种相位提前现象更加明显。这是因为海啸波在长距离传播过程中,随着时间步长的迭代,海啸源的误差贡献会被逐渐放

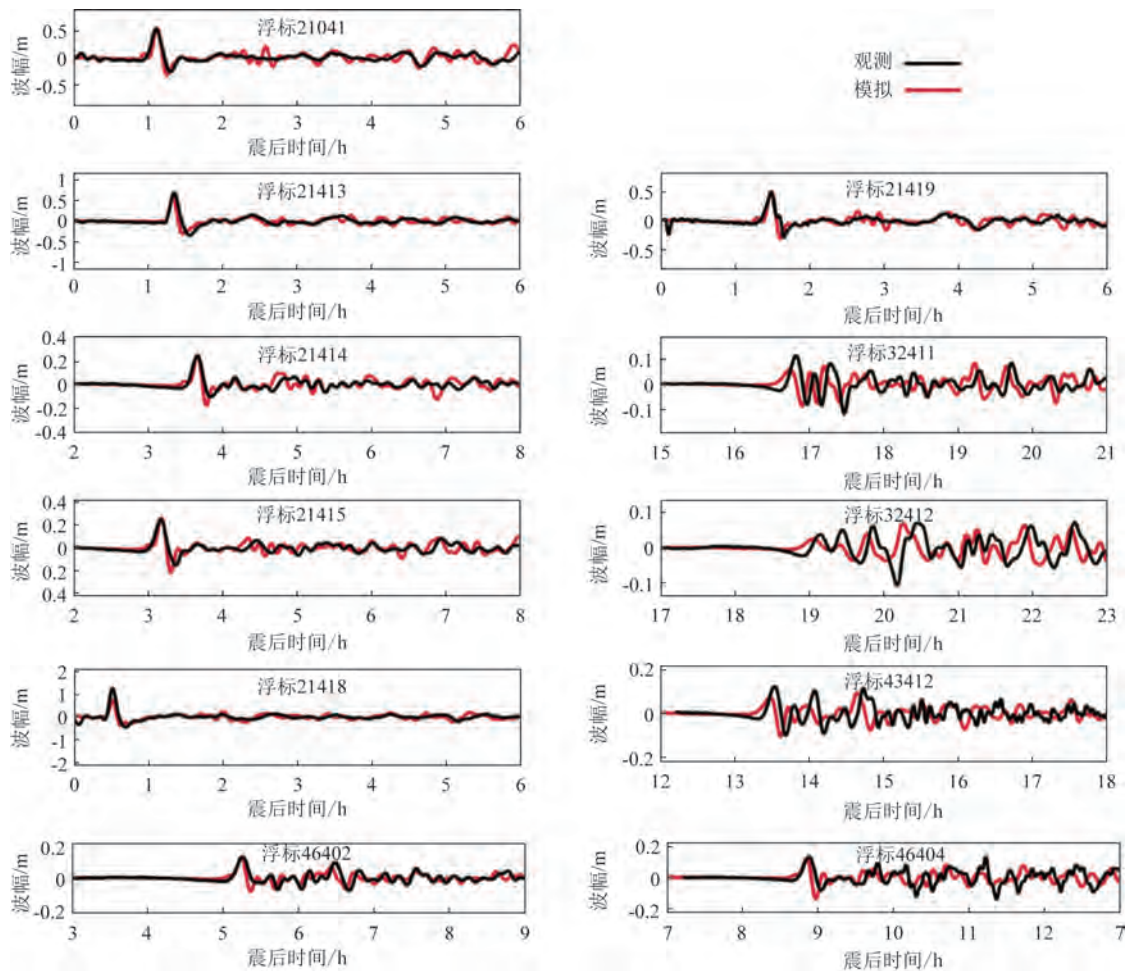


图1 太平洋区域浮标海啸波动模拟结果与观测时间序列

Fig.1 Time series of the observed and modeled wave amplitudes in the Pacific Ocean

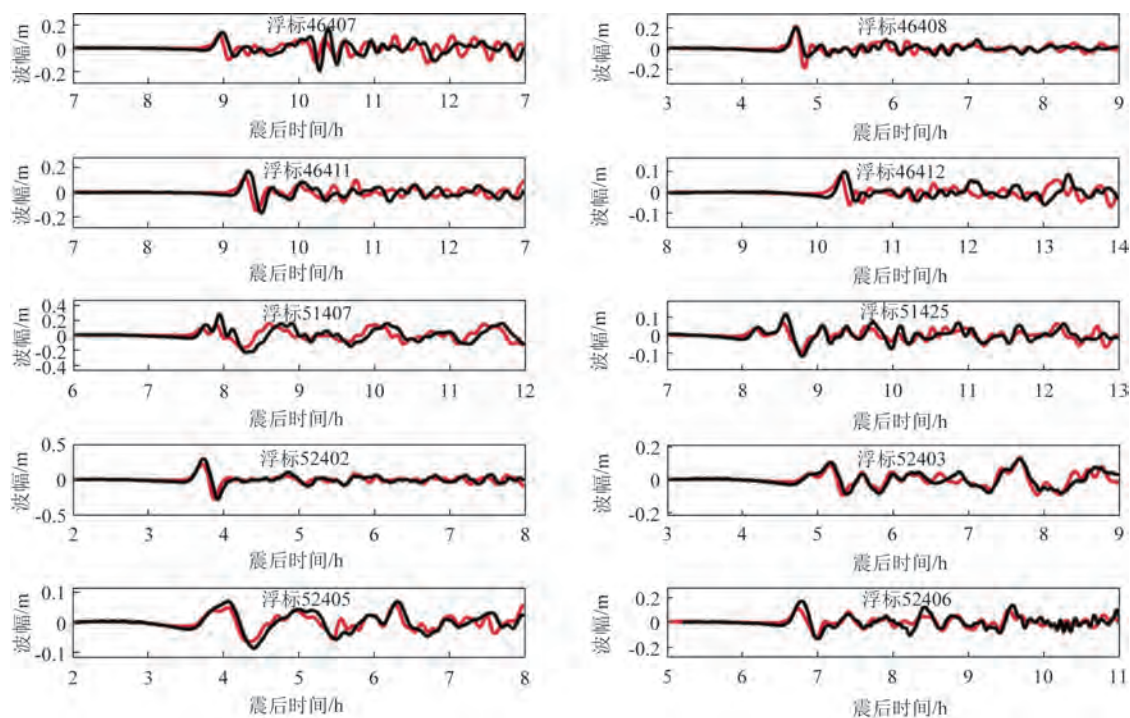


图1 (续)

Fig.1 (Continued)

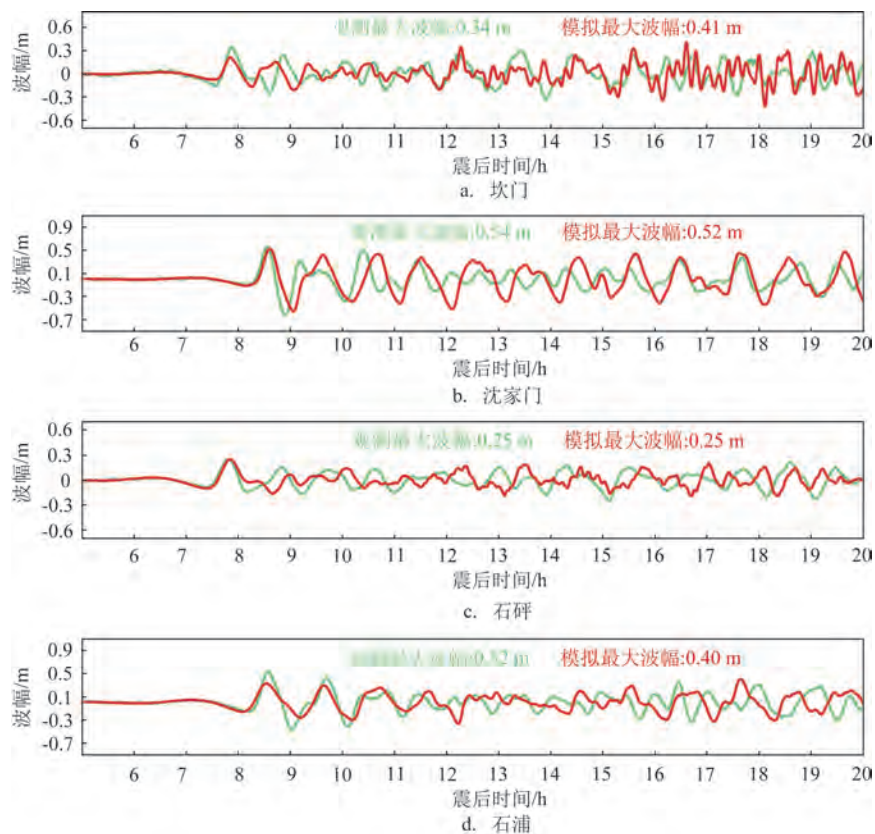


图2 浙江海域4个验潮站海啸波动模拟结果与观测时间序列

Fig.2 Time series of the observed and modeled wave amplitudes in the coastal waters of Zhejiang Province

表5 太平洋区域沿岸21个验潮站海啸最大波幅和计算结果对比

Tab.5 Comparison of maximum amplitude of tsunami between simulation and observations from 21 tide stations in the Pacific Ocean

浮标 编号	纬度/ °N	经度/ °E	观测最大 波幅/m	计算最大 波幅/m	相对 误差/%
21401	42.617	152.583	0.52	0.540	3.8
21413	30.515	152.177	0.68	0.580	14.7
21414	48.938	178.281	0.24	0.250	4.2
21415	50.183	171.849	0.25	0.270	8.0
21418	38.711	148.694	1.68	1.500	10.7
21419	44.455	155.736	0.48	0.510	6.3
32411	4.947	-90.654	0.11	0.060	45.5
32412	-17.975	-86.392	0.07	0.070	0
43412	16.034	-107.001	0.12	0.100	16.7
46402	51.068	-164.020	0.12	0.120	0
46404	45.858	-128.768	0.13	0.120	7.7
46407	42.589	-128.900	0.13	0.110	15.4
46408	49.626	-169.871	0.19	0.210	10.5
46411	39.331	-127.013	0.17	0.120	29.4
46412	32.457	-120.561	0.10	0.090	10.0
51407	19.642	-156.516	0.27	0.190	29.6
51425	-9.493	-176.245	0.11	0.080	27.3
52402	11.883	154.116	0.30	0.220	26.7
52403	4.033	145.597	0.10	0.080	20.0
52405	12.881	132.333	0.07	0.050	28.6
52406	-5.295	165.012	0.16	0.120	25.0

大。模拟计算的最大波幅与观测最大波幅的平均相对误差约为16%,其中最大误差为45.5%(浮标32411)。

从图2和表6可以看出,浙江海域验潮站海啸波动模拟结果与观测结果的拟合性相对较好,模拟计算的最大波幅与观测最大波幅的平均误差为11.8%(其中坎门验潮站相对误差最大,为20.6%)。

通过综合对比分析,以太平洋区域5次由8.0级以上地震引发的海啸事件作为个例,对海啸数值模型的模拟水平进行验证。结果显示,62个站次的海啸波幅模拟结果的平均相对误差为15%(见图3),达到了《海啸灾害风险评估和区划技术规范》中规定的模拟精度,通过检验。

2 综合分析评价

由于可能对河北省造成灾害性影响的地震海啸源主要分布在渤海和北黄海附近海域,因此在对河北省进行海啸风险评估时,将主要考虑渤海黄海局地海啸源的影响,对区域和越洋海啸源不进行具体评估。

2.1 危险性分析

利用海啸数值模型分别对6个不同地震海啸源(张家口-蓬莱断裂8.0级地震海啸、乐亭外海8.1级地震海啸、张家口-蓬莱断裂二8.1级地震海啸、郯庐断裂8.1级地震海啸、张家口-蓬莱断裂三8.1级地震海啸、郯庐断裂二8.0级地震海啸)情景下的最大波幅场进行模拟计算,同时在河北沿海选取8个典型位置用以输出不同地震海啸情景下的海啸波面时空序列结果。在此基础上综合所有海啸源情景的海啸最大波幅数值模拟计算结果,对于同一位置不同海啸源情景下的计算结果取其最严重结果作为该处的最终结果。

2.1.1 张家口-蓬莱断裂8.0级地震海啸

在该地震海啸情景下,由于地震震源位于唐山市近岸海域,因此河北省最大海啸波幅出现在唐山

表6 浙江沿岸4个验潮站海啸最大波幅和计算结果对比

Tab.6 Comparison of maximum amplitude of tsunami between simulation and observations from 4 tide stations in the coastal waters of Zhejiang Province

编号	观测站名	纬度/°N	经度/°E	观测最大波幅/m	计算最大波幅/m	相对误差/%
a	坎门	28.08	121.28	0.34	0.41	20.6
b	沈家门	29.95	122.30	0.54	0.52	3.7
c	石砰	27.40	120.63	0.25	0.25	0
d	石浦	29.20	121.95	0.52	0.40	23.1

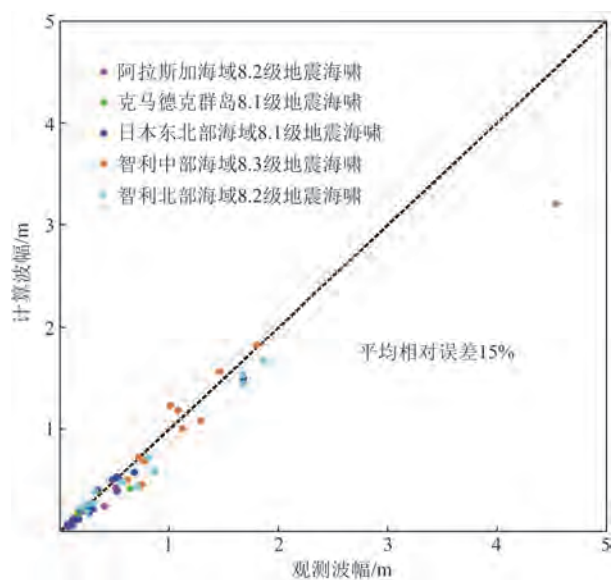


图3 5次海啸事件62个站次海啸波幅计算结果与观测对比结果

Fig.3 Comparison of tsunami amplitude between simulation and observation from 62 stations in 5 tsunamis

市沿岸,最大波幅为1.2~1.5 m;沧州市沿岸、唐山市乐亭县部分岸段最大波幅为0.3~0.5 m;其他地区沿海岸段最大波幅为0.1~0.3 m。

2.1.2 乐亭外海8.1级地震海啸

在该地震海啸情景下,由于地震海啸源地位于曹妃甸、乐亭外海区域,因此河北省最大海啸波幅主要出现在唐山市曹妃甸区东部沿岸,最大波幅为2~3 m;秦皇岛市北戴河区部分岸段波幅同样达到2~3 m;唐山市乐亭县部分岸段最大波幅为1.2~1.5 m;其他地区沿海岸段最大波幅均超过0.5 m,为0.5~1.2 m。

2.1.3 张家口-蓬莱断裂二8.1级地震海啸

在该地震海啸情景下,由于海啸源位于渤海湾外部海域,受地形影响,位于渤海湾内部的沧州市受海啸波影响相对较小,最大波幅为0.1~0.3 m;河北省最大海啸波幅出现在其东部沿岸,唐山市乐亭县、秦皇岛市北戴河区最大波幅为0.9~1.2 m,东部沿海其他区域最大波幅为0.5~0.7 m。

2.1.4 郯庐断裂8.1级地震海啸

在该地震海啸情景下,由于海啸源位于渤海湾外部海域,受地形影响,位于渤海湾内部的沧州市受海啸波影响相对较小,最大波幅为0.3~0.5 m。河北省最大海啸波幅出现在其东部沿岸,唐山市、秦

皇岛市东部沿海大部分岸段最大波幅达到2~3 m;受地形限制,唐山市南部沿海最大波幅较小,为0.1~0.3 m。

2.1.5 张家口-蓬莱断裂三8.1级地震海啸

在该地震海啸情景下,河北省最大海啸波幅出现在其东部沿岸,唐山市乐亭县、秦皇岛市北戴河区部分岸段最大波幅达到0.7~0.9 m,东部沿海其他区域最大波幅为0.5~0.7 m;唐山市曹妃甸区、沧州市沿海岸段最大波幅相对较小,为0.3~0.5 m。

2.1.6 郯庐断裂二8.0级地震海啸

在该地震海啸情景下,河北省最大海啸波幅出现在秦皇岛市昌黎县沿海岸段,最大波幅为0.5~0.7 m;秦皇岛市其他沿海岸段和沧州市沿海岸段最大波幅为0.3~0.5 m;唐山市沿海岸段最大波幅不超过0.3 m。

2.1.7 情景集成

由以上各情景数值模拟计算结果综合分析可知,秦皇岛市、唐山市东部沿海岸段在郯庐断裂8.1级地震海啸情景下,形成的最大波幅较大,为2~3 m;唐山市曹妃甸区部分沿海岸段在乐亭外海8.1级地震海啸情景下,形成的最大波幅较大,为2~3 m;各地震海啸源情景下对唐山市其他沿海岸段和沧州市沿海岸段的影响均较小,最大波幅仅为0.3~0.5 m。

2.1.8 不同地震海啸情景下的海啸波面时空序列

分别根据6个不同地震海啸源情景下8个输出点模拟计算成果,制作了相应海啸波面时空序列分布图。以张家口-蓬莱断裂8.0级地震海啸情景为例(见图4),该地震海啸情景下最早受到影响的区域为唐山市沿海(时间为0.5~2.4 h);最大波幅出现在沧州市沿海,为0.46 m;唐山中南部沿海最大波幅为0.3 m左右,唐山市北部、秦皇岛市最大波幅相对较小,约为0.1 m。

2.2 危险性评估

在以上危险性分析结果基础上,以海啸数值模型的计算结果为依据,参照海啸危险性评估方法^[15],依据海啸波幅将海啸危险等级分为4级(见表7),其中I级为最高,代表该海啸致灾强度最大;IV级为最低,代表海啸致灾强度最小。

以海啸数值模型计算结果为基础,参照危险性等级划分标准,以沿海乡镇(街道)作为基本评估单

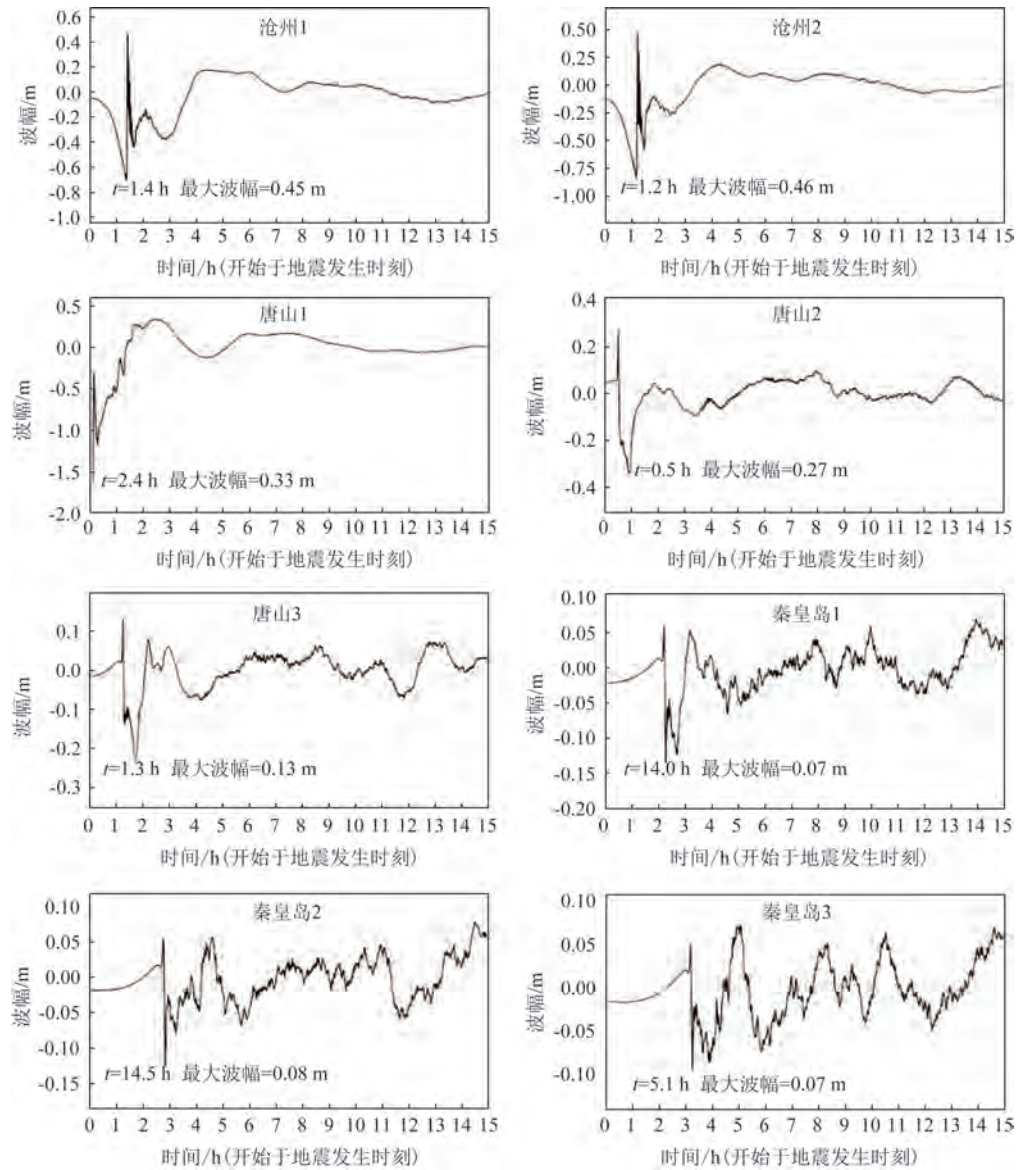


图4 局地海啸源张家口-蓬莱断裂8.0级地震海啸波时间序列图

Fig.4 Time series of tsunami amplitude of the earthquake (magnitude 8.0) caused by Zhangjiakou-Penglai fault zone

表7 海啸灾害危险性等级划分标准

Tab.7 The criteria of risk rank of tsunami

等级	最大波幅 H_{ts}/m
I	$H_{ts} > 3.0$
II	$1.0 < H_{ts} \leq 3.0$
III	$0.3 < H_{ts} \leq 1.0$
IV	$H_{ts} \leq 0.3$

元进行海啸灾害危险性等级评估。结果表明,河北省基本不会遭受危险性等级为I级的海啸灾害影

响;唐山北部和秦皇岛沿海区域(最大海啸波幅为1~3 m)遭受的海啸灾害影响相对较严重,危险性等级为II级;其他区域遭受的海啸灾害影响相对较小,危险性等级为III级或IV级。

2.3 脆弱性评估

以土地利用类型一级分类数据为基础^[15],根据河北沿海土地利用现状及土地利用脆弱性评估标准,确定了研究区承灾体脆弱性等级与脆弱性范围关系(见表8)。借助GIS软件数据管理和可视化功

表 8 脆弱性等级与脆弱性范围关系

Tab.8 The level and range of vulnerability

脆弱性等级	脆弱性范围
IV	0.1~0.3
III	0.4~0.5
II	0.6~0.8
I	0.9~1.0

能,划定各评估单元脆弱性等级分布。

秦皇岛市沿海乡镇(除海港区沿海乡镇脆弱性等级为 I 级)脆弱性等级均为 IV 级;唐山市乐亭县沿海乡镇脆弱性等级为 IV 级,曹妃甸区和滦南县沿海乡镇为 I 级,丰南区为 II 级;沧州市沿海乡镇脆弱性等级均为 II 级。具体等级划分见表 9。

2.4 风险评估

在以上成果基础上开展河北海啸灾害风险评估^[15]。计算公式为:

$$R = H \times V$$

式中: R 代表灾害风险(Risk); H 代表危险性(Hazard)等级; V 代表脆弱性(Vulnerability)等级分布; \times 为风险等级识别矩阵。根据危险性、脆弱性与风险性等级对应关系(见表 10),可综合确定风险等级值 R (取 5 级)。

借助 GIS 软件数据管理和可视化功能,划定各评估单元风险等级分布。结果表明(见表 10),河北省沿海海啸灾害风险等级最高为 II 级,主要位于秦皇岛市沿海区域以及唐山市曹妃甸区、乐亭县部分沿海乡镇区域;唐山市其他沿海乡镇海啸灾害风险等级为 IV 级;沧州市渤海新区沿海乡镇海啸灾害风险等级为 III 级,其他区域均为 IV 级。

3 结论

本文基于 COMCOT 数值模式建立了研究区海啸数值模型,通过 4 次真实地震海啸事件的海啸波动观测资料与模型输出数据的分析与对比,验证了所建模型的合理性、可靠性。在此基础上进行了河北省海啸灾害风险评估和区划研究。结论如下:

①河北省不存在 I 级危险区,唐山北部和秦皇

表 9 河北省沿海乡镇脆弱性等级表

Tab.9 Vulnerability levels of the coastal towns in Hebei

Province			
地级市	县市区	乡镇	脆弱性等级
唐山市	丰南区	黑沿子镇	II
		曹妃甸工业区	I
	滦南县	柳赞镇	I
		沿海岛屿	I
		南堡镇	I
		沿海岛屿	I
	乐亭县	乐亭县国有	IV
		长芦大清河盐场	IV
		王滩镇	IV
		月坨岛	IV
		菩提岛	IV
		马头营镇	IV
		古河乡所有	IV
		姜各庄国有	IV
秦皇岛市	海港区	沿海岛屿	IV
		海港区市区	I
	山海关区	东港镇	I
		山海关区	IV
		石河镇	IV
	北戴河区	北戴河城区	IV
		海滨镇	IV
		牛头崖镇	IV
	抚宁区	渤海林场	IV
		留守营镇	IV
沧州市	昌黎县	团林乡	IV
	海兴县	香坊乡	II
	黄骅市	南排河镇	II
	黄骅市	新村回族乡	II

岛沿海区域危险性等级为 II 级,其他区域为 III 级或 IV 级。

②河北省沿海脆弱性等级分 I 级、II 级和 IV 级,其中以 IV 级为主,主要分布在秦皇岛市大部分沿海乡镇、唐山市乐亭县沿海乡镇;秦皇岛市海港区及唐山市曹妃甸区和滦南县沿海乡镇脆弱性等

表 10 海啸灾害风险等级评估表

Tab.10 Assessment form of tsunami disaster risk level

危险性	脆弱性等级			
	低(Ⅳ级) [0.1, 0.3)	较低(Ⅲ级) [0.3, 0.5)	较高(Ⅱ级) [0.5, 0.8)	高(Ⅰ级) [0.8, 1]
低(Ⅳ级)	低风险(Ⅳ级)	低风险(Ⅳ级)	较低风险(Ⅲ级)	较低风险(Ⅲ级)
较低(Ⅲ级)	低风险(Ⅳ级)	较低风险(Ⅲ级)	较高风险(Ⅱ级)	较高风险(Ⅱ级)
较高(Ⅱ级)	较低风险(Ⅲ级)	较高风险(Ⅱ级)	较高风险(Ⅱ级)	高风险(Ⅰ级)
高(Ⅰ级)	较低风险(Ⅲ级)	较高风险(Ⅱ级)	高风险(Ⅰ级)	高风险(Ⅰ级)

级为Ⅰ级;唐山市丰南区及沧州市沿海乡镇脆弱性等级为Ⅱ级。

③河北省沿海海啸灾害风险等级有Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级,其中Ⅱ级区主要分布于秦皇岛市沿海区域以及唐山市曹妃甸区、乐亭县部分沿海乡镇区域;Ⅳ级区分布于唐山市其他沿海乡镇及沧州市黄骅市、海兴县沿海乡镇;Ⅲ级分布于沧州市渤海新区沿海乡镇。

本文的研究结果对于提升河北省海啸防灾减灾能力具有重要意义。但本文也存在一些不足之处,由于渤海地震海啸发生较少,没有准确的海啸记录,本次模型验证的站点都在渤海外,因此模型在渤海的结果存在一定的不确定性。与前人研究结果对比^[4,16],本次研究在渤海海域采用的潜在海啸震级更高,给出的渤海海域海啸危险性更加保守,这是由于在海啸震级确定时采用了不同的统计方法导致的。

参考文献:

- [1] WANG X M, LIU P L F. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami[J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44(2): 147-154.
- [2] WANG X M, LIU P L F. Numerical simulations of the 2004 Indian Ocean tsunamis-Coastal effects[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(3): 273-297.
- [3] 李宏伟, 王宗辰, 原野, 等. 渤海海域地震海啸灾害概率性风险评估[J]. 海洋学报, 2019, 41(1): 51-57.
LI H W, WANG Z C, YUAN Y, et al. Probabilistic tsunami hazard assessment in the Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(1): 51-57.
- [4] 王培涛, 高义, 于福江, 等. 基于数值模拟的渤海海域地震海啸危险性量化研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(1): 56-64.
WANG P T, GAO Y, YU F J, et al. Quantitative research on earthquake-generated tsunami hazards based on the numerical simulations in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36

(1): 56-64.

- [5] 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 159-168.
WAN T F, ZHU H, ZHAO L, et al. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang fault zone: a review[J]. Geoscience, 1996, 10(2): 159-168.
- [6] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 269-278.
ZHU G, WANG D X, LIU G S, et al. Extensional activities along the Tan-Lu fault zone and its geodynamic setting[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3): 269-278.
- [7] 徐杰, 宋长青, 高战武. 营口潍坊断裂带新生代活动的特征[J]. 地震地质, 1999, 21(4): 289-300.
XU J, SONG C Q, GAO Z W. Active characters of the Yingkou-Weifang fault zone in the Cenozoic era[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(4): 289-300.
- [8] 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 张家口-蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. 地震地质, 1998, 20(2): 146-154.
XU J, SONG C Q, CHU Q Z. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(2): 146-154.
- [9] 高战武, 徐杰, 宋长青, 等. 张家口-蓬莱断裂带的分段特征[J]. 华北地震科学, 2001, 19(1): 35-42.
GAO Z W, XU J, SONG C Q, et al. The segmental character of Zhangjiakou-Penglai fault[J]. North China Earthquake Sciences, 2001, 19(1): 35-42.
- [10] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
Earthquake Disaster Prevention Department of the National Seismological Administration. Catalog of strong earthquakes in Chinese history[M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [11] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录 公元1912年~1990年, Ms≥4.7[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
Seismic Damage Prevention Division of China Earthquake Administration. Catalog of modern earthquakes in China, AD 1912-1990, Ms≥4.7[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999.

- [12] 王健. 渤海海域历史地震和海啸[J]. 地震学报, 2007, 29(5): 549-557.
WANG J. Historical earthquakes and a tsunami in Bohai Sea[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(5): 549-557.
- [13] LEPTOKAROPOULOS K, LASOCKI S. SHAPE: A MATLAB software package for time-dependent seismic hazard analysis[J]. Seismological Research Letters, 2020, 91(3): 1867-1877.
- [14] 谢卓娟, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 渤海海域地震震源深度的分布特征[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(3): 311-320.
XIE Z J, LYU Y J, PENG Y J, et al. Focal depth distribution of earthquakes in Bohai Sea Area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3): 311-320.
- [15] FXPC/ZRZY P-08 第一次全国自然灾害综合风险普查技术规范: 海啸灾害风险评估和区划技术规范[S]. 2021: 7.
FXPC / ZRZY P-08 Technical specifications for the comprehensive risk assessment and zoning of tsunami disasters in the first national survey of comprehensive natural disaster risks: technical specifications for tsunami disaster risk assessment and zoning[S]. 2021: 7.
- [16] FENG X R, YIN B S, GAO S, et al. Assessment of tsunami hazard for coastal areas of Shandong province, China[J]. Applied Ocean Research, 2017, 62: 37-48.

Risk assessment and zoning on tsunami disaster in Hebei Province

WANG Ping¹, ZUO Liming¹, SUN Lining², XI Mingshuo¹, WANG Peitao², ZHAO Yajuan¹

(1. Hebei Hydrological Engineering Geological Exploration Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: A tsunami numerical model has been established based on the Cornell Multi-grid Coupled Tsunami (COMCOT) model, and used in simulating six tsunamis. By analyzing the simulation results, hazard distribution of the tsunamis has been derived. The vulnerability distribution is determined according to the land use types. Utilizing the distributions of hazard and vulnerability, the risk assessment and zoning of tsunami disaster are generated. The results show that the highest level of tsunami disaster in Hebei Province is level II. The coastal risk areas of level II mainly locate in Tangshan and Qinhuangdao. The risk level of tsunami disaster in Cangzhou is relatively low with levels III and IV.

Key words: COMCOT model; tsunami disaster; hazard; vulnerability; risk assessment; Hebei Province