

青岛地区地震灾害和危险性研究

宋 键, 孔祥生*, 张金芝, 刘现彬, 王 晨, 谭 蕾

鲁东大学, 山东 烟台

收稿日期: 2022年9月26日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘 要

地震作为一种突发性的自然灾害, 严重危及人类的生命财产安全。本文结合概率地震危险性分析与确定性灾害分析两种方法, 采用了Composite Source Model模型, 从未来地震发生概率、所受影响范围及地震影响程度上评估青岛地区未来地震灾害。研究表明, 按照目前的地震活动趋势, 青岛地区未来100年发生6.0级地震超越概率为7%, 青岛市区、即墨东部均在0.20 g等震线以内。沧口断裂、马山-王哥庄断裂附近的重点建筑应考虑 ≥ 0.20 g峰值加速度对工程的影响, 在这两条断裂附近的重要建筑应考虑0.20 g作为建筑基本地震工程设防参数。

关键词

青岛, 地震灾害, 危险性评估

Study on Seismic Hazard and Risk in Qingdao Area

Jian Song, Xiangsheng Kong*, Jinzhi Zhang, Xianbin Liu, Chen Wang, Lei Tan

Ludong University, Yantai Shandong

Received: Sep. 26th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

As a kind of sudden natural disaster, earthquake seriously endangers the safety of human life and property. In this paper, the research adopts the Composite Source Model based on the combination of probabilistic seismic hazard analysis and deterministic hazard analysis. The future earthquake disaster in Qingdao area is evaluated from the probability of the future earthquake, the extent of the affected area and the impact of the earthquake in this paper. The study shows that the oc-

*通讯作者。

currence of Ms 6.0 earthquake exceedance probability is 7 percent in the next 100 years in Qingdao area in accordance with the current trend of seismic activity. Qingdao city, east of Jimo city are all within 0.20 g isoseismal. The important constructions near the Cankou fault and Ma-shan-Wanggezhuang fault should consider the influence of ≥ 0.20 g peak acceleration. The 0.20 g peak acceleration should be considered as a basic building seismic fortification parameter in the vicinity of the two faults.

Keywords

Qingdao, Seismic Hazard, Risk Assessment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

地震作为一种突发性的自然灾害, 严重危及着人类的生命财产安全, 在过去的几十年里, 我国经历了数次发生在没有足够重视的“弱震区”的破坏性地震, 在这些地区由于抗震设防水平较低, 地震对建筑和工程设施的破坏造成了更大的人员伤亡和经济损失[1], 因此, 研究晚第四纪构造活动甚弱的“弱震区”的地震危险性成为了不容忽视的问题[2] [3] [4]。历次的震害经验表明, 只有建筑物和工程设施具备适当的抗震能力, 才能有效地减轻地震造成的损害。

目前, 对地震危险性评价主要有两种方法: 概率地震危险性分析(PSHA)和确定性地震灾害分析(DSHA), 这两种方法所使用的地震与地质信息相同, 但表达的方式不同, 概率地震危险性分析以概率方式评价和表达工程场地未来可能遭遇的地震影响[5] [6]; 确定性地震灾害分析通过设定地震来确定地震灾害[7] [8]。青岛地区是晚第四纪构造活动较弱的弱震区, 但近年来两次崂山小震群活动也造成了不小的破坏, 青岛地区人口稠密, 经济发达, 抗震减灾工作不可忽视。本文结合概率地震危险性分析与确定性灾害分析两种方法, 采用了 Composite Source Model 模型, 从未来地震发生概率、所受影响范围及地震影响程度上评估青岛地区未来地震灾害。

2. 地质构造特征

2.1. 区域地质构造演变

青岛地区地处鲁东断块区胶南隆起与胶莱拗陷的分界带, 其结晶基底为元古代变质岩。古生代开始长期构造隆起, 缺失古生界盖层, 中生代中、晚期以来, 构造运动进入了新的发展阶段, 出现了地块的差异升降, 西部形成了胶莱拗陷, 东部出露燕山期花岗岩。

2.2. 现代地貌特征及新构造运动

青岛地区以低山、丘陵和平原为主, 大致以沧口断裂为界划分为西北、东南两个不同的地貌分区, 东南部地区主要为花岗岩组成的低山丘陵区, 崂山山地海拔在 250 m 以上; 西北部地形比较低缓, 沿海多第四系河海堆积港湾、第四系冲洪积与剥蚀平原, 海拔一般在 100 m 以下。

青岛地区新构造运动幅度不大, 以隆升为主, 差异性活动较中生代和早第三纪明显减弱, 第四纪地层发育不良, 许多地区基岩出露或仅覆盖不厚的残坡积物, 部分地区沉积有晚更新世及全新世堆积物,

局部地区发育中更新世沉积物。新构造运动相对比较强烈，表现出继承性特点，形成了唐县和临城两期夷平面，海拔高度分别为 200 m 左右和数十米，唐县期夷平面地貌上表现为较缓且不连续的地形转折，有线性展布的垭口、谷地等，受断裂影响明显。

2.3. 断裂构造

青岛地区发育一系列北东向断裂，并有北西向断裂相切(如图 1)。沧口断裂、劈石口断裂、青岛山断裂、王哥庄 - 山东头断裂等 NE 向断裂纵贯青岛市区，构成了青岛北东向构造框架，这些断裂早期为左旋走滑运动，后期转为右旋走滑运动，断错第四纪地层；北西向断裂形成较晚，规模较小，与北东向断裂形成不对称的共轭构造，其中，最为显著的为马山 - 王哥庄断裂。

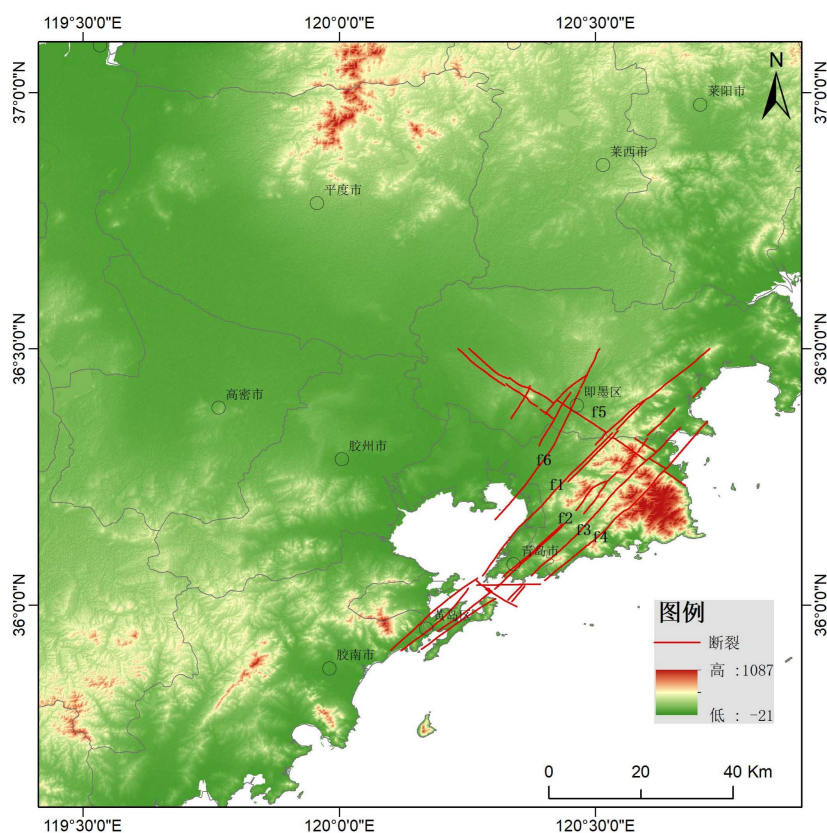


Figure 1. Fault structure diagram in Qingdao area. f1: Cangkou fault; f2: Qingdaoshan fault; f3: Pishikou fault; f4: Wanggezhuang-Shandongtou fault; f5: Mashan-Wanggezhuang fault; f6: Jimo-Tangjiazhuang fault

图 1. 青岛地区断裂构造简图。f1: 沧口断裂；f2: 青岛山断裂；f3: 劈石口断裂；f4: 王哥庄 - 山东头断裂；f5: 马山 - 王哥庄断裂；f6: 即墨 - 唐家庄断裂

1) 沧口断裂

沧口断裂是胶南隆起与胶莱盆地的分界，经历了多期构造变动，走向北东 - 北北东(见图 1)，第四纪晚期是控制青岛地区盆地沉积和山体隆升的主要断裂之一，断裂两侧地形差异明显。郭玉贵等人[9]根据断裂的几何形态、活动时代、活动习性及地貌特征，将沧口断裂分为四段：窑上 - 西南泊段，右旋走滑运动，兼有小量逆冲，晚更新世早期弱活动；松山 - 太平庄段，活动性质为正断右旋走滑，为晚更新世早期弱活动断裂；丹山 - 胶州湾段，活动性质为正断兼右旋走滑，为晚更新世早期活动断裂；黄岛段，

表现为逆冲性质，晚更新世以来不活动。综合考虑，沧口断裂未来潜在震级 6.5 级。

2) 王哥庄 - 山东头断裂

王哥庄断裂北东走向(见图 1)，活动性质为右旋走滑兼逆冲，断裂基本上沿现代河流和冲沟展布，但对现代地形地貌和冲沟水系无明显控制作用，综合研究认为该断裂为中更新世断裂。综合考虑，王哥庄 - 山东头断裂未来潜在震级 5.0 级。

3) 劈石口断裂

劈石口断裂北东走向(见图 1)，以右旋走滑为主，地貌上主要沿现代河流、冲沟分布，部分河段出现明显的左旋扭曲，在劈石口断裂将侵入断裂带内的岩脉右旋断错约 69 m，测年结果表明晚第四纪地层没有变动，综合研究表明，该断裂晚更新世以来不活动。综合考虑，劈石口断裂未来潜在震级 5.0 级。

4) 青岛山断裂

青岛山断裂北东走向(见图 1)，在地貌上没有活动的迹象，对河流水系控制不明显，卫星影像显示断裂形成的沟谷负地形规模也相对较小，断裂带内的构造粉碎岩已经硅化成岩，经 ESR 方法对断裂带内的构造岩物质测年表明，该断裂晚更新世以来没有明显活动。综合考虑，青岛山断裂未来潜在震级 5.0 级。

5) 马山 - 王哥庄断裂

马山 - 王哥庄断裂北西走向(见图 1)，活动性质主要为左旋走滑正断，被沧口断裂分为东西两段，东段(松山 - 仰口段)晚更新世以来不活动，西段(马山 - 大庙段)在晚更新世早期表现为弱活动，断裂运动方式为粘滑兼蠕滑。综合考虑，马山 - 王哥庄断裂未来潜在震级 6.0 级。

6) 即墨 - 唐家庄断裂

即墨 - 唐家庄断裂北西走向(见图 1)，为右旋走滑断裂，该断裂在即墨市区以北段落地貌上略有显示，表现为较缓的且不连续的地形转折。即墨市区往西南，断裂没入第四系之下，地貌上已无任何显示。综合研究表明，该断裂晚更新世以来不活动，其未来潜在震级 5.0 级。

3. 地震活动影响

3.1. 历史地震影响

青岛地区位于鲁东 - 黄海块体内部，邻近的块体西边界为郯庐地震带、北边界为张家口 - 蓬莱地震带，南部还有牟平 - 即墨地震带、南黄海地震带。

张家口 - 蓬莱地震带上发生了 1548 年渤海海峡 7 级地震，1679 年三河 - 平谷 8 级地震，1969 年渤海 7.4 级地震，1976 年唐山 7.8 级地震，虽然活动性较强，但由于距离青岛较远，历史上对青岛的地震影响较小。

据地震史料记载[10]，南黄海地震带自公元前 288 年至今共发生 $M_s \geq 4\frac{3}{4}$ 级地震 50 余次，最大地震为 1846 年 7 级地震(北纬 33.5°，东经 122°)，从地震空间分布来看，地震活动主要分布在南北两个拗陷中，北部拗陷地震活动相对南部拗陷要弱一些，南黄海地震带对青岛的地震影响主要来自北部拗陷，因此，南黄海地震带对青岛的地震影响也不是特别强。

青岛地区所遭受的最大地震影响为郯庐地震带上 1668 年郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震，据资料记载，这次地震胶州：“坏民居，城垛、庙阁、衙舍千余处，城无空垛，衙署倾倒殆尽，压死 90 余人”。灵山卫(胶南)：“城墙垛口荡尽，四门城楼无存，兵丁多伤，兵民房屋十坍八、九”。即墨：“城垣犹天劈地裂，城垛衙宇文庙监仓俱倒，民房倒塌无数，压死数百”。根据前人的研究[11]，灵山卫(胶南)破坏程度达 IX 度，胶州、青岛达 VIII 度，即墨达 VII 度。

牟平 - 即墨地震带是鲁东地块内一条比较重要的地震带，该带由一组北东向(或北北东)断裂组成，如北东向海阳断裂，沧口断裂等，受这些活动断裂控制，历史上发生许多中强地震，该地震带发生 6~6.9

级地震 2 次, 4 $\frac{3}{4}$ ~5.9 级地震 11 次。1506 年即墨 4 $\frac{3}{4}$ 级地震是距青岛市区最近(37 km)的历史破坏性地震。

3.2. 现代地震活动影响

据山东省地震台网测定, 自 1970 年以来青岛市行政区域内(陆域)共记录到 $M_L \geq 2.0$ 级地震 102 次, 其中, $2.0 \leq M_L \leq 2.9$ 级地震 83 次, $3.0 \leq M_L \leq 3.9$ 级地震 16 次, $4.0 \leq M_L \leq 4.9$ 级地震 3 次, 没有 5 级以上地震。近期青岛最大地震为 2003 年 6 月 5 日发生在王哥庄的 M4.2 级地震, 地震震中位于北西向马山 - 王哥庄断裂与北东向王哥庄 - 山东头断裂、劈石口断裂附近, 震源机制显示主要地震破裂面为北西向, 左旋走滑性质[12], 与北西向断裂有关[13]。由于这次地震震中区基岩为坚硬的崂山花岗岩, 震源深度较浅, 因此, 极震区建筑物有一定程度的破坏, 极震区影响面积为 9.0 km^2 , 地震烈度为 V 度强; V 度区为西麦窑 - 北宅 - 惜福镇东侧 - 鳌山卫以东约 430 km^2 的地区, 大多数居民有明显震感并听到象炸雷一样的声音, 该区域震感强烈、有岩石松动、墙皮脱落、不稳定悬挂物掉落、部分砖混结构墙体出现裂缝现象; 旧房屋屋顶塌落, 当地人普遍有感, 并产生一定的恐慌。IV 度影响区北起王村镇, 南至薛家岛镇, 西起即墨市, 东至崂山东侧海域中, 影响面积为 3280 km^2 [14]。

3.3. 地震活动分析

Arthur Frankel 假定 3 级以上地震发生率可以反映未来中等强度地震的发生区域[15], 根据我国的实际情况, 2.0 级以上地震已基本可以反映这一特征[16], 青岛市地震局 2003 年建成了青岛市数字遥测地震台网, 并且共享了山东省地震台网所属的五莲、潍坊、莱阳三个距离青岛较近的地方台, 能够及时地监测青岛市区范围内 $M_L \geq 1.5$ 级地震、行政区域内 $M_L \geq 2.0$ 级地震, 本文中地震数据采用 1970 年以来由仪器测定的 2.0 级以上地震[17], 地震资料是完整可靠的。地震活动在时间上通常是不均匀分布的[18] [19], 通过图 2 地震 M-t 图可以看出, 2.0 级以上地震活动并非均匀分布, 存在相对活跃和平静期, 图 3 为地震活动频度图(10 年为滑动步长), 自 1970 年以来, 似乎存在着 1980~2000 年间 20 年的地震相对弱活动期, 但由于地震记录时间较短, 对于地震活跃期时间暂时还无法完全控制, 如果地震活动由此进入平静期, 似乎意味着青岛地区在积累着发生更大地震的地应力。

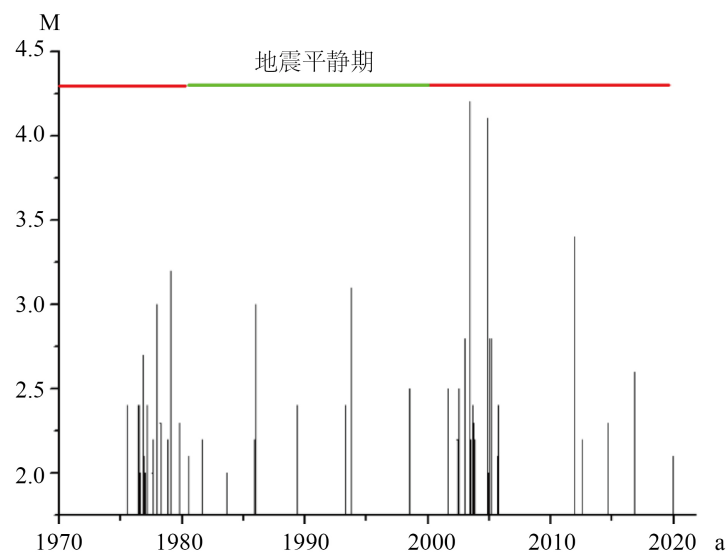


Figure 2. M-t map of earthquake in Qingdao area

图 2. 青岛地区地震 M-t 图

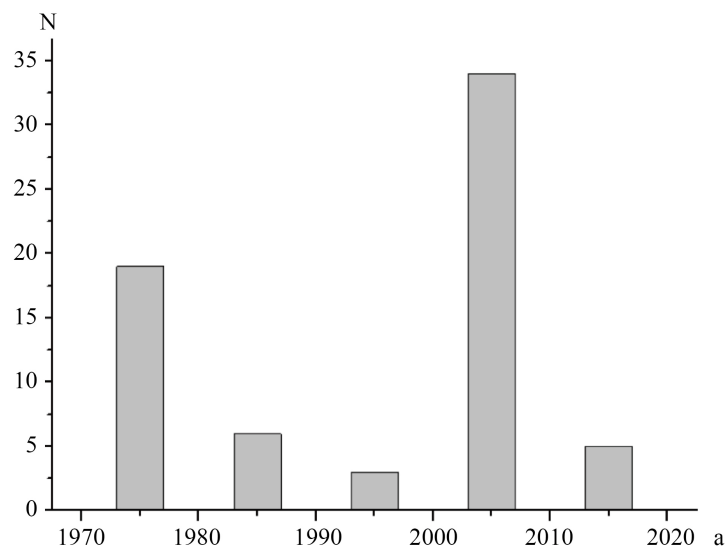


Figure 3. Frequency map of seismic activity in Qingdao area

图 3. 青岛地区地震活动频度图

图 4 是地震频度 - 震级关系曲线($\lg N = a - bM$, N 为 $\geq M$ 的地震数目, a 、 b 为参数, M 为地震震级), 通常认为, 统计区合理, 统计数据足够, 在一定震级区间内的 $\lg N - M$ 呈线性关系, 易桂喜等[20]的研究表明在东部现代地震活动属中 - 低水平地区频度 - 震级参数组合仍然具有可以用来判定潜在强震危险地段。本文对地震数据拟合后得出 $\lg N = 3.5 - 0.5M$ (方差 0.99), 前人研究表明, b 值的大小可以与地震活跃期与平静期对应, 活跃期 b 值相对较小, 平静期相对较大[21] [22], 吴忠良[23]从布朗运动角度认为, $b > 0.75$ 和 $b < 0.75$ 表现出不同的动力学性质, 对中国大陆地震 b 值的研究表明, 0.75 以上表现出明显的平静期特征, 0.75 以下表现出明显的活跃期特征[21]。通过对青岛地区地震资料的统计, b 值为 0.5, 最大潜在地震为 4.5, 但是本区沧口断裂发最大潜在地震为 6.5 级, 这说明经过前期的小震释放, 并未能充分的释放本区积累的地应力, 本区的地应力可能仍然处于积累状态, 未来面临的地震形式不容乐观。

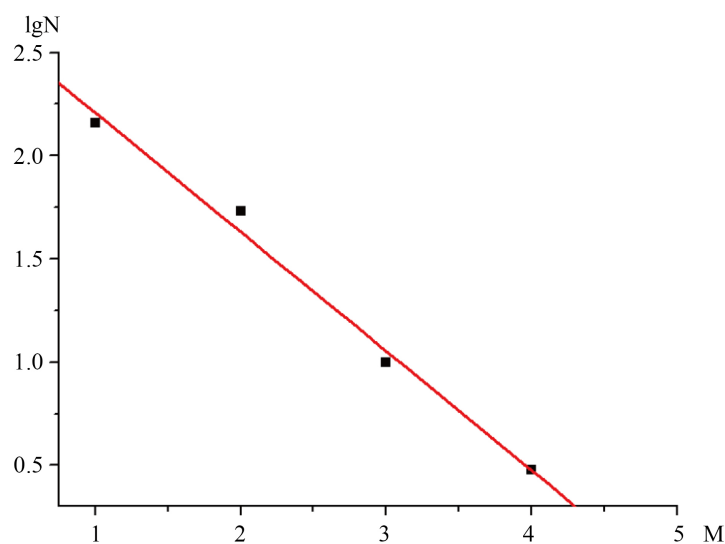


Figure 4. Magnitude-frequency map of seismic activity in Qingdao area

图 4. 青岛地区地震活动震级 - 频度图

3.4. 未来地震发震概率分析

根据《青岛市活断层探测与地震危险性评价项目》研究成果[24], 青岛地区 6.5 级和 6 级的同震平均垂直位错量为 0.40 m 和 0.24 m, 沧口断裂中南段 50~60 ka 以来的最大垂直位移 12~15 m, 全断层段的垂直位移速率采用全时间段平均进行估计, 约为 0.25 mm/a, 并取长期蠕动速率为 0.08 mm/a。断裂最大(特征)地震的平均复发间隔可采用如下公式(1)计算[25]:

$$\bar{T} = \frac{u}{(V-C)} \quad (1)$$

式中, u 为同震平均位错, V 为年平均垂直位移, C 为长期蠕动速率。于是得到沧口断裂中南段发生 6.5 级和 6.0 级地震的平均复发间隔, 具体结果为:

沧口断裂中南段 6.5 级地震的平均复发间隔:

$$\bar{T} = \frac{u}{(V-C)} = \frac{0.40 \times 1000}{0.25 - 0.08} = 2353 \quad (\text{a}) \quad \text{标准差} = 2353 \sqrt{0.145^2 + 0.218^2} = 611 \quad (\text{a})$$

6.0 级地震的平均复发间隔:

$$\bar{T} = \frac{u}{(V-C)} = \frac{0.24 \times 1000}{0.25 - 0.08} = 1412 \quad (\text{a}) \quad \text{标准差} = 1412 \sqrt{0.145^2 + 0.218^2} = 367 \quad (\text{a})$$

年超越概率为 P_1 , t 年内超越概率为 P_t , 地震重现周期为 T , 则三者关系如公式(2)、(3)所示:

$$T = \frac{1}{P_1} \quad (2)$$

$$P_t = 1 - (1 - P_1)^t \quad (3)$$

通过计算可知, 沧口断裂中南段 6.5 级地震 50 年超越概率为 2%, 100 年超越概率为 5%, 6.0 级地震 50 年超越概率为 4%, 100 年超越概率为 7%, 6.0 级地震 100 年超越概率为 7%基本上与 100 年超越概率为 10%相当。

4. 设定地震灾害影响分析

地震危险性评价有确定性地震危险性分析和概率地震危险性分析, 概率地震危险性分析常用于编制基本烈度的地震灾害[6], 在我国地震安全性评价、中国地震动参数区划图、美国国家地震灾害图[26] [27] 中通常采用的是概率地震危险性分析, 但是这种基于数理统计学的方法是在严格的泊松分布假设和简单的点源模型下推导出来的[6], 在应用时也存在一些严重的缺陷[28]。虽然确定性地震灾害分析也被认为忽略了时间特征, 但是确定性地震安全性评价有明确的地震科学基础, 在重大建筑的地震安全性评价中是不可缺少的, 在实际中也得到了很好的检验[29] [30]。本文就是通过确定性地震危险性分析方法给出场地直下型地震的地震参数, 以此给未来重大工程抗震设防提供参考。

对于设定地震灾害影响, 采用了 Composite Source Model [31]模型, 此模型在研究华北地区设定地震灾害影响时取得了较好的拟合效果[32]。模型中所模拟的地震基本上相当于一次 6 级地震。图 5 为北东向沧口断裂上发生一次 6.0 级地震的影响, 可以看出, 青岛市区、黄岛区(包括原黄岛区、原胶南市)、即墨市均在 0.20 g 等震线以内, 图 6 为北西向马山 - 王哥庄断裂上发生一次 6.0 级地震的影响, 可以看出, 青岛市区东部及即墨区东部均在 0.20 g 等震线以内, 按照目前青岛地区的抗震设防水平, 很少关注发生在这两条断裂上的城市直下型地震, 尤其是对于坐落在断层上及其附近的重大建筑, 即使考虑, 提供的参数也仅是 50 年超越概率 10%地表峰值加速度为 0.15 g, 这造成跨断裂或断裂周边地区的重要建筑设防

参数过低，不足以应未来破坏性地震事件。因此，对位于沧口断裂、马山 - 王哥庄断裂上的跨断裂工程及断裂周边可引起次生灾害的重要工程宜考虑 0.20 g 作为基本地震工程设防参数。

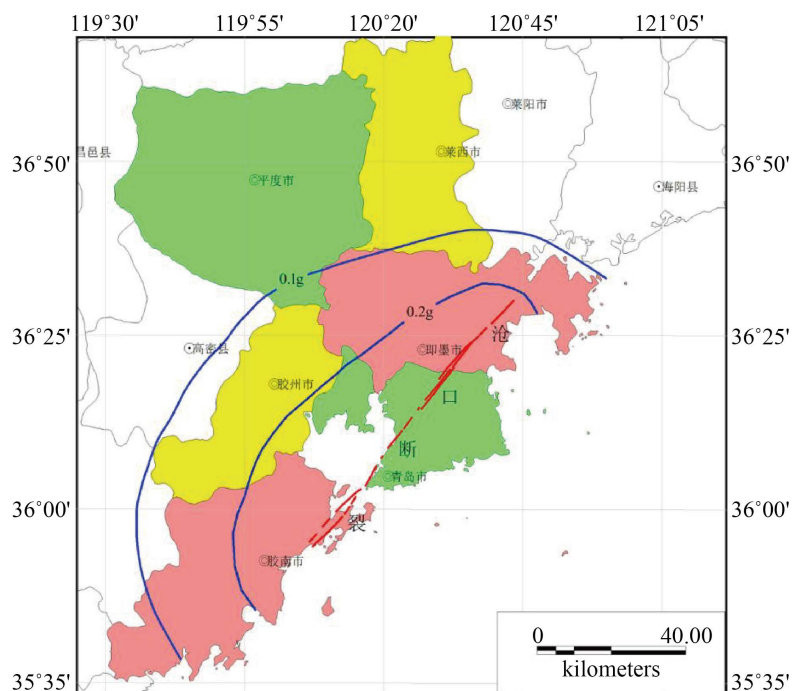


Figure 5. Contour map of peak acceleration of Cangkou fault
图 5. 沧口断裂峰值加速度等值线图

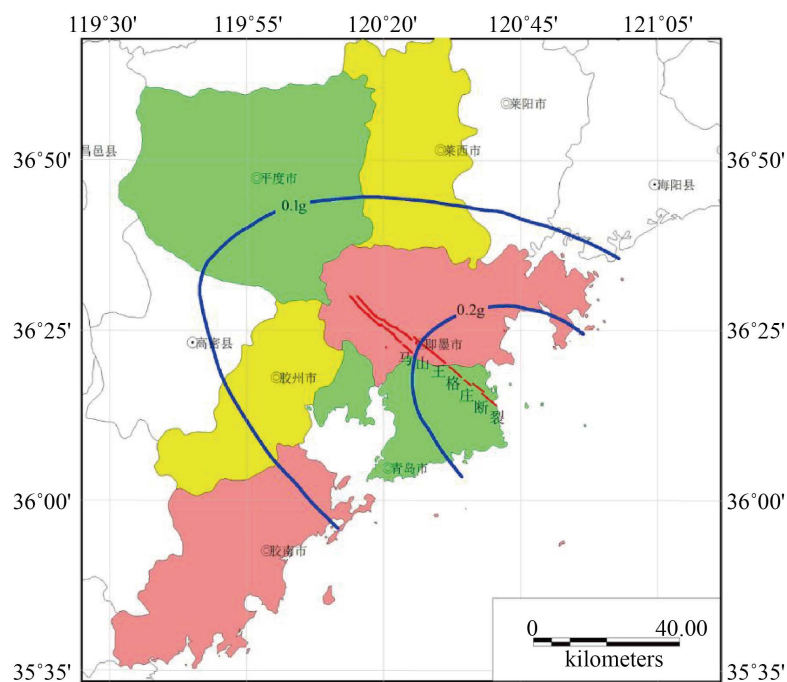


Figure 6. Contour map of peak acceleration of Mashan-Wanggezhuang fault
图 6. 马山 - 王哥庄断裂峰值加速度等值线图

5. 结论

本文通过对青岛地区地震资料及地震地质资料的分析来确定设定地震, 采用 Composite Source Model 模型来模拟强地面运动, 评估青岛地区的地震灾害。从本文的研究结果可以看出, 按照目前的地震活动趋势, 青岛地区未来 100 年发生 6.0 级地震超越概率为 7%, 建议在沧口断裂、马山 - 王哥庄断裂附近的重要建筑应考虑 ≥ 0.20 g 峰值加速度对工程的影响, 在这两条断裂附近的重要建筑应考虑 0.20 g 作为基本地震工程设防参数。

基金项目

获山东省自然科学基金项目(项目编号 ZR2019MD009、ZR2019PD013)和国家自然科学基金(41901102)共同资助。

参考文献

- [1] 刘亢, 玄月, 张媛, 李津津, 张学文, 马春勤. 基于大样本量的地震死亡率与建筑物倒塌率关系研究[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 19-23.
- [2] 陈立春, 梁辉, 冉勇康, 陈玉香. 哈尔滨市主要断裂未来地震危险性评价[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 675-689.
- [3] 周庆, 冉洪流, 吴业彪, 陈连旺, 李红. 广州市主要断层的危险性评价[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(1): 58-68.
- [4] 朱金芳, 黄宗林, 徐锡伟, 等. 福州市活断层探测与地震危险性评价[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 1-16.
- [5] McGuire, R.K. (2004) Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 240 p.
- [6] Cornell, C.A. (1968) Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**, 1583-1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- [7] Krinitzsky, E.L. (1995) Deterministic versus Probabilistic Hazard Analysis for Critical Structures. *Engineering Geology*, **40**, 1-7. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00031-3)
- [8] Krinitzsky, E.L. (2002) How to Obtain Earthquake Ground Motions for Engineering Design. *Engineering Geology*, **65**, 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00098-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00098-9)
- [9] 郭玉贵, 邓志辉, 等. 青岛沧口断裂的地质构造特征与第四纪活动性研究[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(2): 101-115.
- [10] 国家地震局震害防御司, 编. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年) [M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [11] 高维明, 郑郎荪, 李家灵, 林趾祥. 1668 年郟城 8.5 级地震的发震构造[J]. 中国地震, 1988, 4(3): 15-21.
- [12] 山长仑, 孙庆文, 李镇军. 2003 年 6 月青岛震群地震震源机制与震源区应力场特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(5): 12-16.
- [13] 潘元生, 颜景连, 史雯, 卢桦楠, 万连初, 邓向明. 2003 年 6 月 5 日青岛崂山 4.1 级震群概述[J]. 国际地震动态, 2003(11): 19-26.
- [14] 潘元生, 侯海峰, 万连初, 邓向明, 史雯, 周焕鹏. 2003 年 6 月青岛崂山 4 级震群序列初步分析[J]. 内陆地震, 2004, 18(1): 77-83.
- [15] Frankel, A. (1995) Simulating Strong Motions of Large Earthquakes Using Recordings of Small Earthquakes: The Loma Prieta Mainshock as a Test Case. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 1144-1160. <https://doi.org/10.1785/BSSA0850041144>
- [16] 胡聿贤. 《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [17] 王红霞, 郭玉贵. 青岛马山-王哥庄断裂带构造活动性分析[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 630-634.
- [18] 朱红彬, 李红, 邢成起, 韩孔艳. 华北地区第三、四活动期平静幕后期强地震活动与未来强震[J]. 地震, 2010, 30(4): 114-123.
- [19] 朱红彬, 邢成起, 李红, 杨明波, 韩孔艳. 基于应变释放阶段的华北第三、四活动期地震幕划分[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1560-1567.
- [20] 易桂喜, 闻学泽. 多地震活动性参数在断裂带现今活动习性与地震危险性评价中的应用与问题[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 254-271.
- [21] 中国地震局监测预报司. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[R]. 北京: 地震出版社, 2009.

-
- [22] 韩渭滨, 蒋国芳. 大凉山断裂带与安宁河-则木河断裂带的地震活动性分析[J]. 地震研究, 2005, 28(3): 207-212.
- [23] 吴忠良. 关于 b 值应用于地震趋势预测的讨论[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 548-551.
- [24] 中国地震局地质研究所. 青岛市活断层探测与地震危险性评价项目[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2008.
- [25] Wallace, R.E. (1970) Earthquake Recurrence Intervals on the San Andreas Fault. *GSA Bulletin*, **81**, 2875-2890. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[2875:ERIOTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[2875:ERIOTS]2.0.CO;2)
- [26] Frankel, A., Mueller, C. and Barnhard, T. (1996) National Seismic Hazard Maps: Documentation June 1996. Open-File Report, No. 96-532, U.S. Geological Survey, Reston, 110 p. <https://doi.org/10.3133/ofr96532>
- [27] Petersen, M.D., Frankel, A.D. and Harmsen, S.C. (2008) Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. Open File Report, No. 08-1128, U.S. Geological Survey, Reston, 60 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20081128>
- [28] 刘静伟, 王振明, 谢富仁. 京津唐地区地震灾害和危险性评估[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 318-325.
- [29] Ding, Z.F., Romanelli, F. and Chen, Y.T. (2004) Realistic Modeling of Seismic Wave Ground Motion in Beijing City. *Pure and Applied Geophysics*, **161**, 1093-1106. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2498-6>
- [30] 潘波, 许建东, 关口春子, 何宏林. 北京地区近断层强地震动模拟[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 623-634.
- [31] Zeng, Y., Anderson, J.G. and Yu, G. (1994) A Composite Model for Computing Realistic Synthetic Strong Ground Motions. *Geophysical Research Letters*, **21**, 725-728. <https://doi.org/10.1029/94GL00367>
- [32] 杨歧焱, 杨家亮, 王振明, 盛艳蕊, 范强. 河北廊坊地区的设定地震灾害评估[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(3): 285-293.