

程庆乐,许镇,顾栋炼,等.基于城市抗震弹塑性分析的我国主要城市建筑地震风险评估[J].地震工程学报,2019,41(2):299-306.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.299

CHENG Qingle,XU Zhen,GU Donglian,et al.Seismic Risk Assessment of Buildings in Major Chinese Cities Based on the Non-linear Time-history Analysis of Cities[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(2):299-306.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.299

## 基于城市抗震弹塑性分析的我国主要 城市建筑地震风险评估

程庆乐<sup>1</sup>,许 镇<sup>2</sup>,顾栋炼<sup>1</sup>,谢昭波<sup>1</sup>,田 源<sup>1</sup>,陆新征<sup>3</sup>

(1. 清华大学北京市钢与混凝土组合结构工程技术研究中心,北京 100084;

2. 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083;

3. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室,清华大学土木工程系,北京 100084)

**摘要:**全国尺度的城市建筑地震风险评估对城市防震减灾工作有着重要意义。本文根据全国人口普查和城市统计年鉴等给出的宏观指标建立城市建筑数据库,通过 GEAR1 方法(Global earthquake activity rate model 1)和第五代中国地震动参数区划图给出具体场地的地面运动强度,通过地面坡度与剪切波速的对应关系确定的场地类别来考虑地震动输入,采用城市抗震弹塑性分析方法建立建筑分析模型,通过地震经济损失风险指标和建筑严重破坏和倒塌风险作为风险评价指标,给出中国大陆主要城市建筑地震风险分布图。结果分析表明,本文方法可以基于可公开获取的数据预测全国不同城市的建筑震害风险;根据第五代地震动参数区划图给出的地面强度,地震经济损失高风险区主要是设防加速度 0.3g 以上地区;考虑城市人口、GDP 因素后,中、东部城市因人口和财富密度较高,建筑地震风险增加明显;不同地震动选波对经济损失风险影响较小,而对倒塌风险影响较大。本文分析方法可以为城市建筑地震风险分析提供相关参考。

**关键词:**城市抗震弹塑性分析方法;大陆主要城市;城市建筑数据构建;建筑地震风险评估

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0299-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.299

## Seismic Risk Assessment of Buildings in Major Chinese Cities Based on the Nonlinear Time-history Analysis of Cities

CHENG Qingle<sup>1</sup>, XU Zhen<sup>2</sup>, GU Donglian<sup>1</sup>, XIE Zhaobo<sup>1</sup>, TIAN Yuan<sup>1</sup>, LU Xinzhen<sup>3</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center of Steel and Concrete Composite Structures, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** It is of profound significance to assess the national-scale seismic risk of urban buildings

收稿日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金(71741024)

第一作者简介:程庆乐(1994—),男,博士研究生。研究方向:城市区域震害模拟。E-mail:chengql16@mails.tsinghua.edu.cn。

通信作者:许 镇(1986—),男,博士,副教授,研究方向:城市综合防灾、虚拟现实和高性能计算。E-mail:martin31567@163.com。

for seismic disaster prevention and mitigation, the nonlinear time-history analysis of cities, building seismic risk assessment of mainland cities was conducted in this work. First, the urban buildings database was established according to the macroscopic indicators provided by the Nationwide Census and China City Statistical Yearbook. Then, ground motion intensities of the specific sites was obtained from the Global Earthquake Activity Rate Model 1 (GEAR1) method and the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China. Then, site classifications of the cities were obtained using the corresponding relationship between the ground slope and the shear wave velocity, through which the ground motion input could be further determined. Finally, based on the dynamic elastoplastic analysis of urban buildings, the seismic economic loss risk and extensive damage and collapse risk were assessed. Using the methods cited above, a map of building seismic risk of mainland cities is given. The results showed that: (1) the method proposed in this work can assess the building seismic risk of mainland cities based on the publicly available data; (2) high seismic economic loss risk regions are mainly located in areas where the intensity of design-based earthquakes given by the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China is more than  $0.3g$ ; (3) after consideration of urban population and GDP, the building seismic risk of the eastern and central cities will increase significantly due to higher density of population and wealth; (4) differently-selected ground motions have little impact on the seismic economic loss risk but has a greater impact on the extensive damage and collapse risk. The outcomes of this work can provide a useful method for future works on building seismic risk assessment of mainland cities.

**Keywords:** dynamic elastoplastic analysis of urban buildings; major cities in mainland China; construction of urban buildings data; seismic risk assessment of buildings

## 0 引言

全国尺度的城市建筑地震风险分析可以为城市防震减灾工作提供重要参考依据。地震灾害风险评估需要确定三项内容:地震危险性分析、承载体的确定和震害损失的评估<sup>[1]</sup>。现有研究中关于城市地震风险分析的方法主要有三种:(1)基于历史地震统计数据回归得到的宏观经济损失率和人员伤亡率来考虑城市地震风险<sup>[2-3]</sup>;(2)基于建筑易损性清单的地震风险分析方法<sup>[4-6]</sup>;(3)通过定义的风险指标来考虑城市地震风险<sup>[7-13]</sup>。

这三种方法面临的主要问题是对于缺少历史震害数据的地区,或者当前建筑与历史震害建筑差异较大的地区,其应用难度较大。当分析问题的尺度扩展到全国尺度时,该问题暴露得尤为明显;同时,给出的结果是特定烈度下的损失和人员伤亡,不能考虑不同的地震场景,也不能考虑地震动力特性对分析结果的影响<sup>[14]</sup>;此外宏观指标和风险指标的确定具有一定的主观性,会限制此风险分析方法的应用。

针对以上研究方法存在的问题,本文采用城市地震动力弹塑性分析方法<sup>[15-16]</sup>,对大陆主要城市进

行建筑地震风险分析。首先根据人口普查和城市统计年鉴等宏观指标建立城市建筑数据库,通过 GEAR1 方法和第五代地震动参数区划图给出具体场地的地面运动强度;通过地面坡度与剪切波速的对应关系确定的场地类别来确定地震动输入;接着采用城市地震动力弹塑性分析方法建立建筑分析模型,通过地震经济损失风险指标和建筑严重破坏和倒塌作为风险评价指标,给出中国大陆主要城市建筑地震风险分布图,并对结果进行分析,以期防震减灾工作提供参考。

## 1 研究方法

城市区域建筑地震风险分析可以具体分解为以下 5 个问题:

- (1) 场地地震烈度模型;
- (2) 场地信息和地震动输入;
- (3) 城市建筑数据库构建;
- (4) 区域建筑抗震性能分析;
- (5) 风险评价指标。

其中,场地地震烈度模型、场地信息和地震动输

入对应地震灾害风险评估中的第一部分——地震危险性分析;城市建筑数据构建对应承载体的确定;区域建筑抗震性能分析和风险评价指标对应震害损失的评估。

以下将对这 5 个问题分别展开叙述。

1.1 场地地震烈度模型

可以直接通过中国地震局颁布的第五代地震参数区划图(以下简称“五代图方法”)<sup>[17]</sup>得到不同城市可能受到不同超越概率的地震作用(场地烈度)(图 1)。此外,可以参考 Bird 等<sup>[18]</sup>建议的方法(以下简称“GEAR1 方法”),根据历史地震统计数据和板壳运动速率得到地震发生的概率分布。本研究系统收集了中外历史上成灾地震的记录,通过“GEAR1 方法”得到中国及邻近地区的地震风险(图 2)。进而根据 GEAR1 方法给出不同震级发生的概率,结合统计得到的地震动衰减关系<sup>[19]</sup>,可得



图 1 中国第五代地震参数区划图  
Fig.1 The 5th seismic ground motion parameters zonation map of China

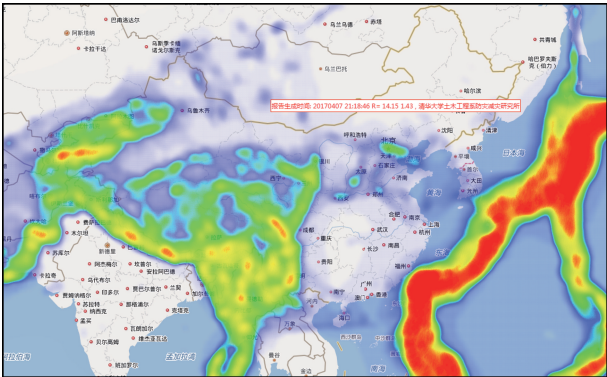


图 2 根据 GEAR1 方法得到的地震概率图  
(5.8 级以上)

Fig.2 Seismic probability map given by the GEAR1 method (Magnitude>5.8)

到具体场地的地面运动强度(烈度)。之所以采用不同方法给出场地烈度模型,主要是因为第五代地震参数区划图与工程建设规范相衔接,其参数是间断的(如设防地震加速度峰值是 0.05g,0.1g,0.2g),这样会导致相邻的不同设防烈度地区的地震风险出现阶跃。而 GEAR1 方法给出的烈度分布是连续变化。另外地震风险分析本身是一个非常困难的问题,采用不同方法进行分析,有助于更加综合地理解分析结果。

1.2 场地信息和地震动输入

地震动的输入对结构弹塑性分析有着重要的影响<sup>[20]</sup>,本文采用以下方法选取输入地震动。

首先,从中国科学院资源环境科学数据中心<sup>[21]</sup>可以获取全国的数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model),根据 DEM 可以确定不同场地的坡度,再根据 Allen 等<sup>[22]</sup>建议的场地坡度和场地类别的转换关系即可以确定该城市 30 m 分辨率的场地类别。如果目标地区已经有可获得的地勘资料工作基础,则采用其地勘数据确定场地类别。根据该城市的设计地震分组和场地类别可以确定该城市的场地反应谱,然后可以从 PEER 数据库<sup>[23]</sup>中选取符合场地反应谱的强震地震动(本文每个场地选取 20 条地震动)作为代表性输入地震动。需要说明的是,现有的区域地震灾害预测研究一般对场地和地震输入问题的考虑都比较粗糙,本研究在场地和地震输入上提供了一个更加准确的方法。

1.3 城市建筑数据构建

对区域建筑进行抗震性能的分析需要建立城市区域建筑分析模型,而建筑基本属性信息数据库是建立分析模型的基础。对于具体城市而言,可以通过实地调查统计建筑的基本属性,构建相应数据库,但目前还没有很好的方法来获取全国主要城市建筑的基本属性信息。本文基于《第六次全国人口普查》及《中国城市统计年鉴》<sup>[24]</sup>等数据,通过线性规划构建了全国主要城市的虚拟建筑模型数据库。

其实现方法是:根据《第六次全国人口普查》获得大陆主要城市建筑中按照层数、承重类型和建造年代分类的各个类别建筑的总数,但这些分类之间是彼此独立的。本文将这些建筑按照层数、承重类型和建造年代一共分成 33 类,比如 1990 年以前,砌体结构,平房;1990 年以前,砌体结构,2~3 层等。求解此问题构成的  $N$  元一次不定方程组即可获得



这 33 类建筑的比例。在获得 33 类建筑的比例之后,将其按照比例分配给不同的建筑,就可以建立各个城市的建筑模型数据库,以服务于后续的城市地震动力弹塑性分析。需要说明的是,如果对象城市或者街区已经有各栋建筑的具体信息,则可以直接采用这些建筑信息进行城市地震动力弹塑性分析,而不必采用上述估算方法确定。

1.4 城市地震动力弹塑性分析方法

对于区域建筑如何进行抗震能力评估是建筑地震风险分析的重要环节。

本文建筑震害分析采用城市地震动力弹塑性分析方法,该方法基于多自由度非线性集中质量层模型,其基本思路是把建筑物简化成不同楼层组成的一系列的“糖葫芦串”,其中单层、多层建筑采用多自由度剪切层模型,高层建筑采用多自由度弯剪耦合层模型(图 3),并建议了如何基于有限的建筑属性信息(结构类型、高度、层数、建造年代及楼层面积)来确定城市内成千上万建筑物的集中质量模型的有关参数。具体的模型说明和参数标定方法可以参考文献[15-16]。

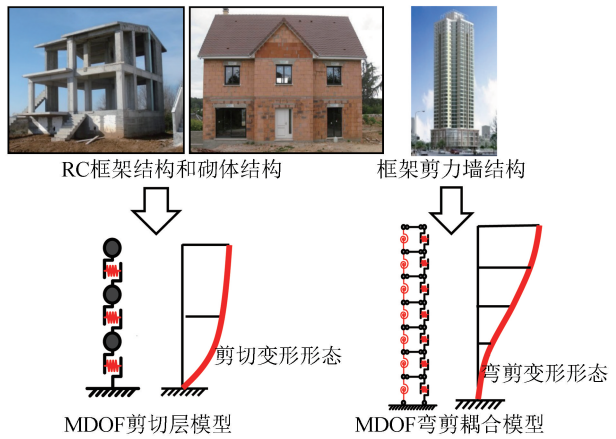


图 3 城市地震动力弹塑性分析中的建筑分析模型  
Fig.3 Building analysis model used in the dynamic elastoplastic analysis of urban earthquake

1.5 风险评价指标

参考 PSHA(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)的框架,根据地震发生概率及建筑震害预测结果确定城市的地震风险。这里参考《地震现场工作 第 4 部分:灾害直接损失评估》GB/T 18208.4-2011<sup>[25]</sup>推荐的经济损失预测方法来计算地震经济损失风险指标,其基本原理如式(1)所示。

$$R_i^1 = \sum_{j=1}^n A_j V_j \iint (DV \mid DS)(DS \mid IM)dP_{IM} \quad (1)$$

其中: $R_i^1$ 为城市*i*的建筑地震经济损失风险; $A_j$ 为*j*类型结构的建筑面积; $V_j$ 为*j*类型结构的重置单价(根据文献<sup>[25]</sup>确定); $n$ 为城市中建筑结构类型总数量; $DV \mid DS$ 为*DS*损伤等级对应的损失比(根据文献<sup>[25]</sup>确定); $DS \mid IM$ 为*IM*烈度下建筑的损伤等级; $dP_{IM}$ 是城市*i*遭遇*IM*烈度的概率。

同时,建筑物严重破坏和倒塌是地震灾害中的重要指标,因此本文整理了不同城市建筑物遭受严重破坏和倒塌的风险,建议严重破坏和倒塌风险的计算方法为:

$$R_i^2 = \int (P_{ED} \mid IM + P_{Co} \mid IM)dP_{IM} \quad (2)$$

式中: $R_i^2$ 为城市*i*的建筑遭遇严重破坏和倒塌的风险; $P_{ED} \mid IM$ 和  $P_{Co} \mid IM$ 是建筑物在*IM*烈度下的严重破坏概率和倒塌概率; $dP_{IM}$ 是城市*i*遭遇*IM*烈度的概率。

对建立的主要城市建筑分析的模型采用城市地震动力弹塑性分析方法,可以得到大陆主要城市的建筑地震风险分布图。

2 风险分析

2.1 不考虑人口、GDP 影响的分析结果

采用上述方法得到中国大陆主要的 320 个城市的地震经济损失风险如图 4 和图 5 所示。图 4 和图 5 的对比中未考虑人口、GDP 影响,仅比较建筑抗震性能的差别。



图 4 根据五代图方法得到的城市地震经济损失风险  $R_i^1$  五代图 (未考虑城市人口数量、GDP 因素)  
Fig.4 The map of urban seismic economic loss risk using the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China (without considering the population and GDP of city)



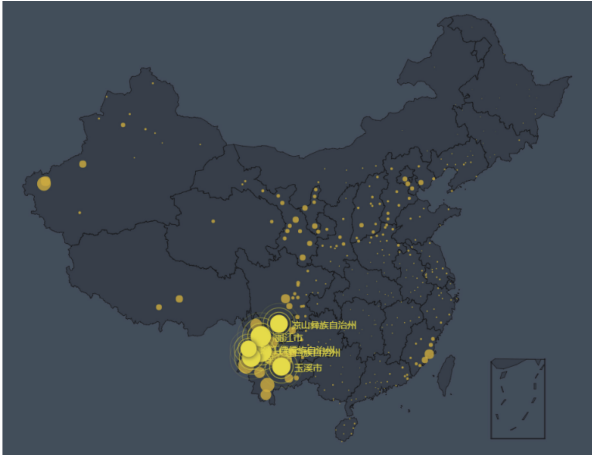


图 5 根据 GEAR1 方法得到的城市地震经济损失风险  $R_{\text{GEAR1}}^1$  (未考虑城市人口数量、GDP 因素)

Fig.5 The map of urban seismic economic loss risk using the GEAR1 method (without considering the population and GDP of city)

从图中可以看出,当采用五代地震参数区划图给出的地震概率时,地震经济损失高风险区主要是设防加速度  $0.3g$  以上地区。因为这些地区推算得到的地面运动强度最高,即使是频遇地震水平,也足以导致未设防结构的大量破坏。而采用图 2 中 GEAR1 方法得到的地震经济损失风险(图 5)总体规律和图 4 相似。西南地区的凉山、丽江等城市风险最高,喀什等城市的风险也比较高,但不同城市之间的差别没有图 4 那么大。其主要原因是 GEAR1 给出的地震风险是连续变化的,而五代图给出的风险是阶跃的,所以二者结果有所不同。

图 6 和图 7 给出了不考虑人口、GDP 因素时不同城市建筑物遭受严重破坏和倒塌的风险。图 6 和图 7 的基本规律和图 4、图 5 基本相同,五代图确定的高烈度区的风险仍然非常高。只是此时 9 度区 ( $0.4g$ ) 的凉山反而不像图 4 中那样突出,丽江 ( $8.5$  度区,  $0.3g$ ) 成为严重破坏和倒塌风险最大的地区。其原因主要是因为:图 4 和图 5 的风险主要计算的是经济损失,而经济损失主要受遭遇 6 度、7 度烈度结果的影响,高烈度区发生 6、7 度烈度的概率非常高,进而导致经济损失也非常大。而倒塌和严重破坏主要受烈度 8 度以上结果的影响,且和建筑的抗震设防水平关系很大。丽江抗震能力不足的建筑比例 (89 年以前的建筑以及砖木建筑) 分别为  $40.2\%$  和  $80.1\%$ ,而凉山对应的比例分别为  $34.2\%$  和  $74.8\%$ ,且凉山  $76.9\%$  的建筑为平房,丽江  $53.3\%$  的

建筑为楼房。因此虽然凉山的地震强度高于丽江,但丽江严重破坏和倒塌风险却更高一点。

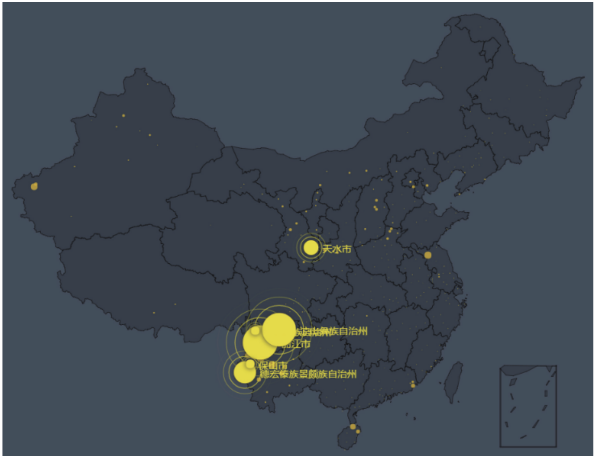


图 6 根据第五代图方法得到的建筑严重破坏和倒塌风险  $R_{\text{五代图}}^2$  (未考虑城市人口数量、GDP 因素)

Fig.6 The map of extensive damage and collapse risk of buildings using the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China (without considering the population and GDP of city)

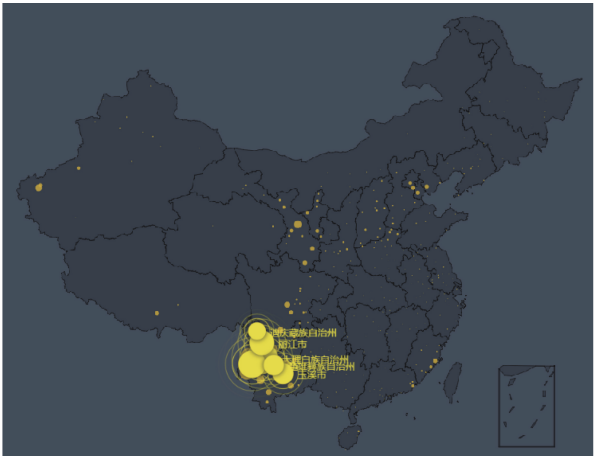


图 7 根据 GEAR1 方法得到的建筑严重破坏和倒塌风险  $R_{\text{GEAR1}}^2$  (未考虑城市人口数量、GDP 因素)

Fig.7 The map of extensive damage and collapse risk of buildings using the GEAR1 method (without considering the population and GDP of city)

2.2 考虑人口、GDP 因素的分析结果

将图 4~图 7 中的风险乘以对应城市的人口或 GDP,则可以得到考虑城市人口、GDP 因素后的风险分布。其中考虑人口因素后城市地震风险如图 8~11 所示,考虑 GDP 因素后城市地震风险如图 12~13 所示。

对比图 4 和图 8、图 6 和图 10 可以发现,考虑人

口因素后,北京、天津等人口众多的城市无论是地震经济损失风险还是严重破坏和倒塌风险都显著提高。从图 12~13 可以看出,考虑 GDP 因素后,上海市的地震经济损失风险显著提高。特别是在图 13 中,北京、天津等城市成为地震经济损失风险最高的区域。

为考虑不同地震动计算结果的差异,图 14 给出了不同地震动下根据第五代地震参数区划图和 GEAR1 方法得到的城市经济损失风险与严重破坏和倒塌风险的变异系数。从图中可以看出,不同地震动对经济损失风险指标的影响小于对严重破坏和倒塌风险的影响。分析其主要原因如下:在 1.2 节

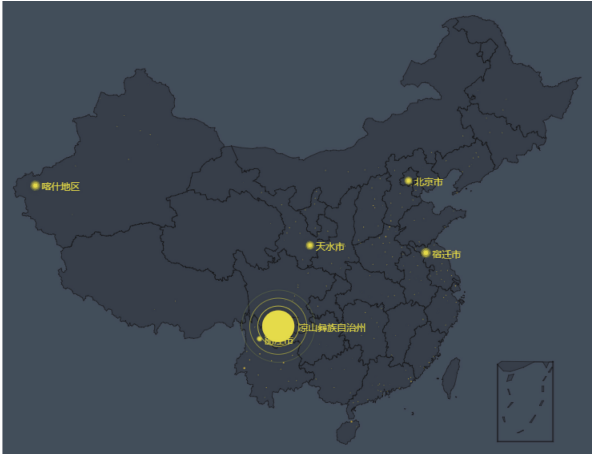


图 8 根据第五代地震参数区划图得到的城市地震经济损失风险  $R_{\text{五代图}}^1$  (考虑城市人口数量因素)

Fig.8 The map of urban seismic economic loss risk using the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China (considering the population of city)

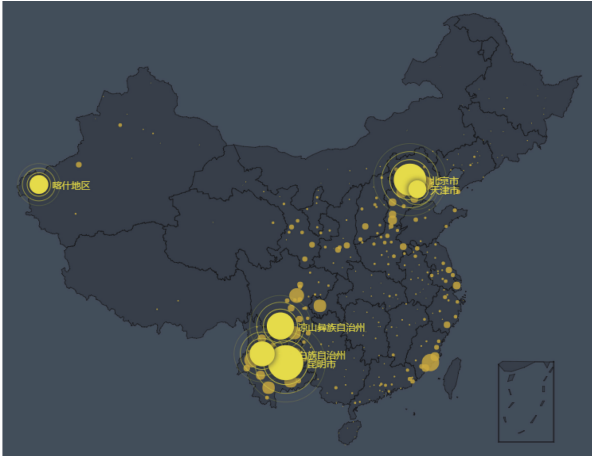


图 9 根据 GEAR1 方法得到的城市地震经济损失风险  $R_{\text{GEAR1}}^1$  (考虑城市人口数量因素)

Fig.9 The map of urban seismic economic loss risk using the GEAR1 method (considering the population of city)

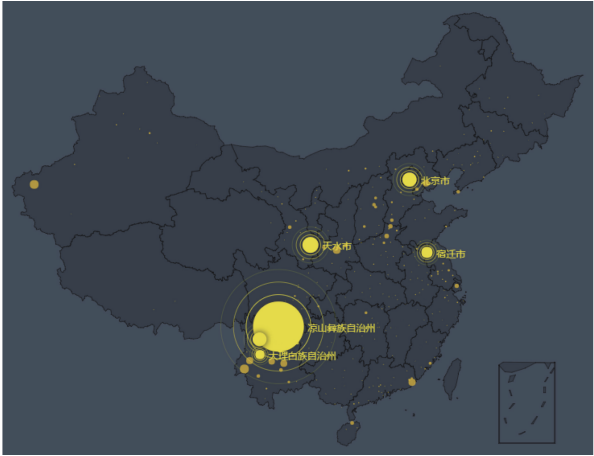


图 10 根据第五代地震参数区划图得到的建筑严重破坏和倒塌风险  $R_{\text{五代图}}^2$  (考虑城市人口数量因素)

Fig.10 The map of extensive damage and collapse risk of buildings using the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China (considering the population of city)

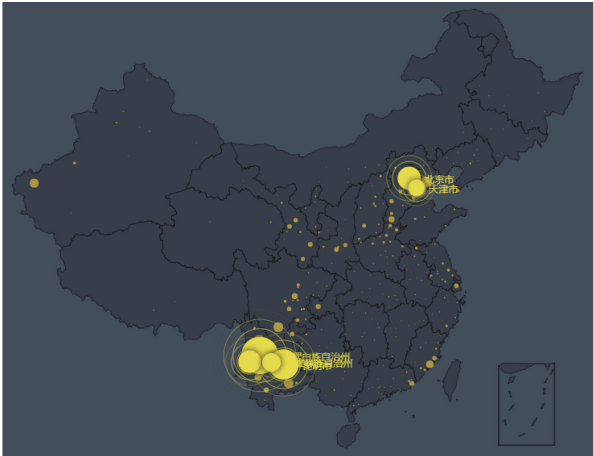


图 11 根据 GEAR1 方法得到的建筑严重破坏和倒塌风险  $R_{\text{GEAR1}}^2$  (考虑城市人口数量因素)

Fig.11 The map of extensive damage and collapse risk of buildings using the GEAR1 method (considering the population of city)

中我们是根据场地的反应谱选取地震动的,经济损失主要受 6、7 度场地烈度计算结果的影响,此时结构进入非线性的程度有限,满足场地反应谱的不同地震动计算结果离散性相对较小;而严重破坏和倒塌阶段结构已经进入强非线性,此时结构响应受到更多因素的影响,而不仅仅和不同地震动的弹性反应谱有关,因此离散性显著增大。不同地震动输入会对计算结果有影响也是城市地震动力弹塑性分析方法的优点之一。

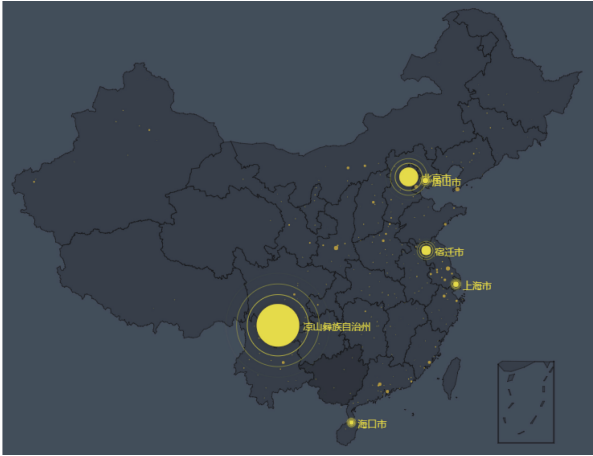


图 12 根据第五代地震参数区划图得到的城市地震经济损失风险  $R_{\text{五代图}}^1$  (考虑城市 GDP 因素)

Fig.12 The map of urban seismic economic loss risk using the 5th seismic ground motion parameters zonation map of China (considering the GDP of city)

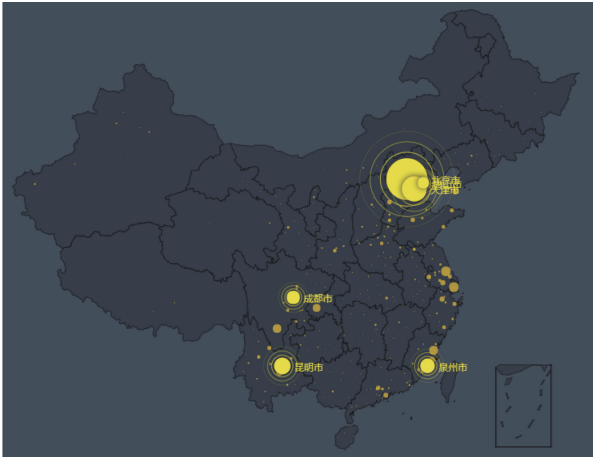


图 13 根据 GEAR1 方法得到的城市地震经济损失风险  $R_{\text{GEAR1}}^1$  (考虑城市 GDP 因素)

Fig.13 The map of urban seismic economic loss risk using the GEAR1 method (considering the GDP of city)

3 结论

全国尺度的城市建筑地震风险分析可以为国家制定城市防震减灾策略提供重要的参考依据,本文基于城市地震动力弹塑性分析方法研究了中国大陆主要城市建筑地震风险,得到如下结论:

- (1) 本文方法可以基于可公开获取的数据预测全国不同城市的建筑震害风险;
- (2) 根据第五代地震参数区划图确定的地震烈度分布,地震经济损失高风险区主要是设防加速度  $0.3g$  以上地区;

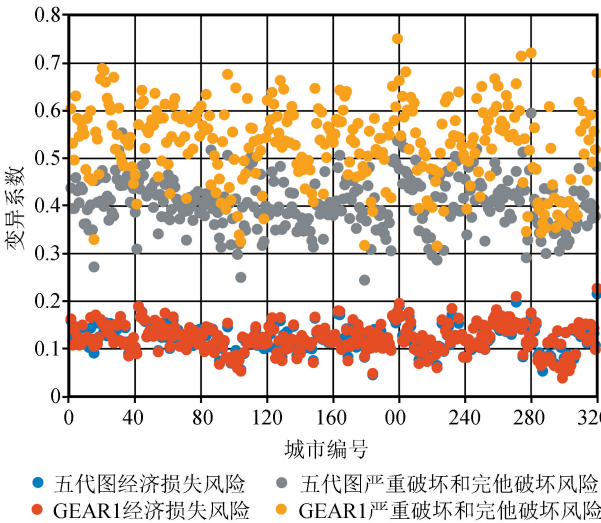


图 14 不同地震动下经济损失风险与严重破坏和倒塌风险变异系数

Fig.14 The coefficient of variation of seismic economic loss risk and vs. extensive damage and collapse risk under different ground motions

- (3) GEAR1 方法给出的不同城市地震经济损失高风险之间的差别没有第五代地震动参数区划图给出的结果那么大;
- (4) 考虑城市人口、GDP 因素后,中、东部城市因人口和财富密度较高,其建筑地震风险增加明显。
- (5) 不同地震动选波对经济损失风险影响较小,而对倒塌风险影响较大。

参考文献(References)

[1] 胡聿贤.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社,1999.  
HU Yuxian.Book for Technology on Seismic Safety Assessment[M].Beijing;Seismological Press,1999.

[2] CHEN Q F,MI H L,HUANG J.A Simplified Approach to Earthquake Risk in Mainland China[J].Pure and Applied Geophysics,2005,162(6):1255-1269.

[3] 刘吉夫,陈颢,史培军,等.中国大陆地震风险分析模型研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2008,44(5):520-523.  
LIU Jifu,CHEN Yong,SHI Peijun,et al.On Seismic Risk Assessment in Mainland China[J].Journal of Beijing Noramal Univeristy (Natural Sciences),2008,44(5):520-523.

[4] SILVA V,CROWLEY H,VARUM H,et al.Seismic Risk Assessment for Mainland Portugal[J].Bulletin of Earthquake Engineering,2015,13(2):429-457.

[5] 刘如山,余世舟,颜冬启,等.地震破坏与经济损失快速评估精细化方法研究[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(5):928-940.  
LIU Rushan,YU Shizhou,YAN Dongqi,et al.Refined Method for Rapid Assessment of Seismic Damage and Economic Loss



- [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(5): 928-940.
- [6] 姚新强. 天津农居易损性与抗震能力分布研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- YAO Xinqiang. Analysis of Tianjin Rural Residential Vulnerability and Seismic Capacity Distribution[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [7] CARREÑO M L, CARDONA O D, BARBAT A H. Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach[J]. Natural Hazards, 2007, 40(1): 137-172.
- [8] 金江军, 潘懋, 徐岳仁. 城市地震灾害风险评价方法研究[J]. 内陆地震, 2007, 21(2): 135-141.
- JIN Jiangjun, PAN Mao, XU Yueren. Research on Assessment Method of Urban Earthquake Disaster Risk[J]. Inland Earthquake, 2007, 21(2): 135-141.
- [9] 许同生, 刘茂, 张秀华, 等. 城市地震风险整体评价方法及其应用[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(4): 189-196.
- XU Tongsheng, LIU Mao, ZHANG Xiuhua, et al. Holistic Evaluation Approach and Application of Urban Seismic Risk[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(4): 189-196.
- [10] CARREÑO M L, CARDONA O D, BARBAT A H. New Methodology for Urban Seismic Risk Assessment from a Holistic Perspective[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2012, 10(2): 547-565.
- [11] MARULANDA M C, CARREÑO M L, CARDONA O D, et al. Probabilistic Earthquake Risk Assessment Using CAPRA: Application to the City of Barcelona, Spain[J]. Natural Hazards, 2013, 69(1): 59-84.
- [12] SALGADO-GÁLVEZ M A, ROMERO D Z, VELÁSQUEZ C A, et al. Urban Seismic Risk Index for Medellín, Colombia, Based on Probabilistic Loss and Casualties Estimations[J]. Natural Hazards, 2016(3): 1-27.
- [13] 李玉森, 张志宏, 常银辉, 等. 辽东半岛地震灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 129-134.
- LI Yusen, ZHANG Zhihong, CHANG Yinui, et al. Earthquake Disaster Risk Assessment of Liaodong Peninsula[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 129-134.
- [14] 陆新征. 工程地震灾变模拟: 从高层建筑到城市区域[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- LU Xinzhen. Earthquake Disaster Simulation of Civil Infrastructures: From Tall Building to Urban Areas[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [15] XIONG C, LU X Z, GUAN H, et al. A Nonlinear Computational Model for Regional Seismic Simulation of Tall Buildings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(4): 1-23.
- [16] XIONG C, LU X Z, LIN X C, et al. Parameter Determination and Damage Assessment for THA-based Regional Seismic Damage Prediction of Multi-Story Buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(3): 461-485.
- [17] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB 18306-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- China Earthquake Administration. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18306-2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [18] BIRD P, JACKSON D D, KAGAN Y Y, et al. GEAR1: A Global Earthquake Activity Rate Model Constructed from Geodetic Strain Rates and Smoothed Seismicity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105, 2538-2554.
- [19] 肖亮. 水平向基岩强地面运动参数衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.
- XIAO Liang. Study on the Attenuations Relationships for Horizontal Ground Motions Parameters Near the Source of Rock Site[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2011.
- [20] MACEDO L, CASTRO D M. SeEQ: An Advanced Ground Motion Record Selection and Scaling Framework[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114: 32-47.
- [21] 中国科学院资源环境科学数据中心. 中国海拔高度(DEM)空间分布数据[DB]. <http://www.resdc.cn>, 2014.
- Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. Spatial Data of Altitude(DEM) in China[DB]. <http://www.resdc.cn>, 2014.
- [22] ALLEN T I, WALD D. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ( $v_{S30}$ ) and Amplification Around the Globe[R]. USGS Open-file Report 2007-1357. USGS: 69.
- [23] ANCHETA T D, DARRAGH R B, STEWART J P, et al. NGA-West2 Database[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 989-1005.
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. 地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估: GB/T 18208.4-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Post-Earthquake Field Works-Part 4 Assessment of Direct Loss: GB/T 18208.4-2011[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.