引文格式：霍文怡昕,吴吉东. 考虑抗震设防的房屋建筑暴露度评估方法研究 [J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 5-9. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.06.002

考虑抗震设防的房屋建筑暴露度评估方法研究

霍文怡昕[1]，吴吉东[2,3*]
（1. 北京师范大学 地理科学学部，环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875；
2. 北京师范大学 国家安全与应急管理学院，北京 100875；3. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁 810008）

摘　要：以北京市房山区为例，利用行政单元房屋、人口统计数据和人口密度数据确定房山区房屋建筑面积的地理空间分布，根据计算出的房山区建筑易损性矩阵，分别结合重置成本法和市场价法对房山区房屋的暴露度进行评估。结果表明：①根据重置成本法和市场价法评估的房山房屋建筑价值分别为 1 471.70 亿元和 32 162.90 亿元；②根据重置成本法考虑抗震设防水平和不考虑抗震设防水平评估的地震暴露度分别为 64.50 亿元和 1 027.40 亿元，分别占房山房屋建筑总价值的 4.38%和 69.81%，前者理论上更接近地震灾害可能的损失最大值，对提高地震风险评估结果的准确性有重要的实践价值。

关键词：房屋建筑面积；空间化；暴露度；房山区；抗震设防水平
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0005-05

Building Exposure Evaluation Method Considering Seismic Fortification Level

HUO Wenyixin[1], WU Jidong[2,3]
(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Faculty of Geography Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Taking Fangshan District in Beijing City for example, we used the administrative unit's housing data, population statistics data and population density data to determine the geographical spatial distribution of building area in the district. Then, according to the building earthquake damage matrix, we used the replacement cost method and the market comparison method to evaluate the exposure of Fangshan's buildings. The results indicate that①the values of Fangshan's building construction are 147.17 billion yuan and 3 216.299 billion yuan evaluated by the replacement cost method and market value method, respectively. ②Based on the replacement cost method, the earthquake exposure are 6.45 billion yuan and 102.74 billion yuan evaluated considering seismic fortification level and without seismic fortification level, accounting for 4.38% and 69.81% of the total value of buildings in Fangshan, respectively. The evaluation that considering seismic fortification level may be closer to the maximum possible loss of an earthquake disaster, which improves the accuracy of earthquake risk assessment results and has important practical value.

Key words: building area, spatial distribution, exposure, Fangshan District, seismic fortification level

风险是未来某时期某区域内灾害造成损失的可能性大小[1]。对自然灾害造成的直接经济损失进行评估对于灾后的重建决策具有重要意义[2-3]，而房屋建筑价值底数及暴露度评估是地震灾害损失评估和风险评估的重要组成部分[4]。

从暴露度评估底数来说，高精度房屋建筑价值底数数据的不足，限制了灾害风险评估研究和应用，已有研究结合多源数据探讨了房屋建筑空间化方法，但在中国的适用性受限。Dutta D[5]等使用网格化土地覆盖数据分解建筑面积；Seifert I[6]等利用土地使用数据和建筑密度信息将资产分解为不同的经济部门；Wünsch A[7]等结合土地利用和土地覆盖数据将建筑资产价值分解为更细的分辨率。但由于无法确定房屋空间位置，导致精度有限。

从暴露度评估方法来说，已有地震暴露度评估多从致灾强度入手，未考虑房屋建筑抗震设防水平，评估结果不能反映实际暴露度[8]。王旭[9]等利用人口分布密度数据、人均住房建筑面积等数据，对北京市的房

收稿日期：2023-01-30。
项目来源：高等学校学科创新引智计划资助项目（BP0820003）。
第一作者简介：霍文怡昕（1999 —），硕士研究生，主要从事自然灾害评价工作， E-mail: 202121051163@mail.bnu.edu.cn。
通信作者：吴吉东（1981—），博士，教授，主要从事自然灾害风险管理工作，E-mail: wujidong@bnu.edu.cn。

屋统计数据进行了空间化，对地震的暴露度进行了评估，但未考虑房屋建筑抗震设防水平，暴露度评估结果与可能遭受的损失存在较大差异。考虑不同类型结构建筑的脆弱性，改进地震暴露度评估方法对提高地震风险评估精度具有重要意义[10]。北京处于华北平原地震带和汾渭地震带交汇区，房山区位于北京西南，城区主要聚集在东南部，属于地震灾害的高风险区[11]。本文以房山区为例[11]，利用房屋和人口统计数据，借助人口密度数据进行房屋建筑面积空间化。然后，考虑房屋建筑抗震设防水平，结合易损性矩阵评估建筑易损性，再利用重置成本法和市场价法评估房山区房屋资产价值的暴露度。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用数据主要包括两方面（表1）：一是房山区人口普查数据、房屋建筑年度竣工面积和竣工价值数据、房山区建筑足迹地图、房山区人口密度分布图；二是地震动峰值加速度区划图，用于房屋建筑地震暴露度评估。数据类型如下：

表1 数据来源

年份	数据名称	类型及分辨率	指标	基础数据依据	数据来源
2020	人口普查数据	统计数据，乡镇	人口数量、全区居民人均期末现住房建筑面积	人口普查	房山区统计局[12-13]
2020	房屋建筑统计数据	统计数据，区县	竣工面积、竣工价值	年度统计	房山区统计局[12]
2015	1%人口抽样调查资料	统计数据，区县	房屋建造年代及层数	抽样调查	房山区、天津市、河北省统计局[14-16]
2020	房屋建筑调查数据	调查数据，1 km	房屋面积及房屋层数	实地调查	实地调查
2019	LandScan人口密度数据	栅格，1 km	人口数量	土地利用、灯光等	美国能源部橡树岭国家实验室[17]
2015	地震动峰值加速度区划图	矢量	地震动峰值加速度	–	中国地震局[18]
2011	地震破坏数据	统计数据	房屋建筑不同破坏程度损失比	–	中国地震局[19]
2020	房山区建筑轮廓	矢量		卫星遥感数据	国家青藏高原科学数据中心[20]

1）人口普查数据。根据《北京市房山区第七次全国人口普查公报》和《北京市房山区统计年鉴2020》[12-13]，选取房山区各乡镇（街道）常住人口、全区居民人均期末现住房建筑面积、各乡镇（街道）人口数据等用于计算各乡镇（街道）房屋建筑面积等。

2）房屋建筑数据。包括两类：一类是房屋建筑统计数据，即《北京市房山区统计年鉴2020》中房屋建筑的竣工面积与竣工价值数据以及房山区、天津经济技术开发区、唐山市和邢台市2015年1%抽样调查资料中房屋建筑层数和建造年代比例[14-16]；房山区房屋建筑的城中类型及比例分别为钢及钢筋混凝土占35.96%，混合结构占38.61%，砖木结构占24.80%，其他结构占0.63%。其中，其他结构包括移动式板房、简单的木条承重结构和竹结构等，这些结构相对于前3种结构而言脆弱性更高，因此需要进行特别的考虑；另一类是房屋建筑实地调查数据，包括均匀分布在房山区内的20个1 km×1 km的样本区，调查了各样本区房屋的空间分布占地面积和楼层数，用于检验空间化的结果。

3）LandScan人口密度分布图。该数据集由美国能源部橡树岭国家实验室开发，基于土地利用类型和夜间灯光等信息建立，具有最佳分辨率及分布模型[17]。本文选取2019年房山区LandScan人口密度数据作为指标，应用于建筑面积的展布模拟。

4）地震动峰值加速度区划图。《中国地震动峰值加速度区划图》由中国地震局完成，是城市建设与规划于防灾减灾的重要依据[18]。房山区地震动峰值加速度区间为0.10~0.20 g，与房屋建筑空间分布数据叠加分析，用于房屋的地震暴露度分析。

5）房山区地表建筑轮廓。房山区2020年地表建筑轮廓数据来自南师大智慧城市感知与模拟实验室基于深度学习语义分割模型和1 m分辨率多源遥感影像进行制作。下载自国家青藏高原科学数据中心[20]。数据裁剪仅保留房山区部分。

1.2 研究方法

房山区房屋地震暴露度评估主要包括2个关键部分，如图1所示。

1.2.1 房山区房屋建筑面积空间化方法

本文首先对房山区房屋建筑面积进行空间化，利用估算出的房屋建筑总面积，结合人口密度分布数据和建筑轮廓数据将总房屋建筑数据分解在空间上。

1）房山区房屋建筑总面积（BFA_D）估算。通

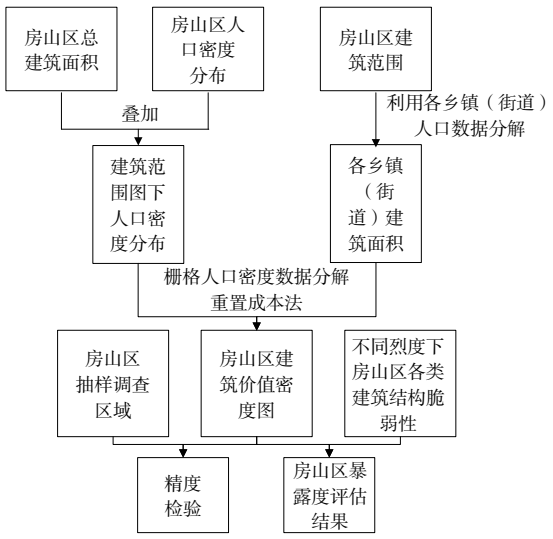


图1　技术路线图

过人口普查数据的人口数量（POP_D）和抽样调查数据中的人均住房面积（A）以及住房建筑面积占所有房屋建筑面积的比例（I）计算房山区总建筑面积：

$$BFA_D = POP_D \times A/I \tag{1}$$

2）房山区各乡镇（街道）房屋建筑面积估计。建筑面积与人口密度密切相关，借助人口统计数据将房山区的总建筑面积分解在各乡镇（街道）：

$$BFA_T = POP_T \times \frac{BFA_D}{POP_D} \tag{2}$$

式中，BFA_T 为各乡镇（街道）总建筑面积；POP_T 为各乡镇（街道）总人口。

3）基于LandScan人口密度的房屋建筑面积密度分布模拟。首先，利用ArcGIS对房山区2020年人口密度进行重采样，利用房屋建筑轮廓数据，提取房屋分布范围内的人口密度。以栅格人口数量占所在乡镇（街道）内建筑范围下人口数量比例作为权重，将房屋建筑面积降尺度至栅格：

$$BFA_{grid} = BFA_T \times \frac{Pop_{grid}}{Pop'_T} \tag{3}$$

式中，BFA_{grid} 为栅格单元中的房屋建筑面积；Pop_{grid} 为建筑足迹范围下重采样后栅格内的人口密度；Pop'_T 为建筑足迹范围下各乡镇（街道）总人口。

1.2.2　房山区房屋建筑价值估计方法

从政府恢复重建与保险赔付需求出发，本文采用重置成本法和市场价法评估房屋建筑价值。房山区房屋的重置价格（C）可通过2020年房山区建筑的竣工价值（P）和竣工面积（S）的比值计算得到，为1 706.8元/m²。房山区房屋建筑市场价格根据城市房产网2020年房山区不同类型房地产平均成交价格获得，为30 300元/m²。由于不同建筑结构建筑物空间分布数据难以获取，文中采用房屋建筑物区域平均造价进行代替。最终通过房屋建筑面积与单位建筑面积价格相乘进行房屋建筑价值估计。

1.2.3　房山区房屋暴露度评估方法

暴露度是指处于危险区域的人、财产、系统或其他的因素受到潜在的损失[21-22]。本文对房山区房屋建筑价值暴露度评估采用2种方法：①不考虑抗震设防水平，参考Wu[22]等采用的方法，暴露度以地震峰值加速度为0.20 g及以上范围内的房屋建筑价值来表征；②考虑抗震设防水平，指遭受当地设防地震动峰值加速度下，考虑分建筑结构类型的建筑易损性可能损失的最大值，包括房屋建筑易损性指数的计算和房屋暴露价值估计2个步骤。

房屋建筑易损性矩阵构建是易损性指数计算的前提，本文利用孙柏涛等提出的方法[23]，根据天津经济技术开发区、唐山市、邢台市已知建筑物的易损性矩阵，按照影响建筑物抗震能力的建筑层数与建造年代指标，得出房山区易损性矩阵与已知易损性矩阵的贴近度进行加权平均[24-28]。房屋的易损性指数（F_v）计算方法为：

$$F_v = \frac{1}{5}\sum_{I=6}^{10}\sum_{j=1}^{5} P(d_j|I)d_j \tag{4}$$

式中，$P(d_j|I)$ 为易损性矩阵中 s 类结构在 I 烈度下发生 j 级破坏的破坏概率值；d_j 为结构发生 j 级破坏的损失比。按照《地震现场工作第4部分：灾害直接经济损失》[19]，将房屋的破坏程度分为5种：基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏，对应的损失比平均值为0、0.15、0.4、0.7和1.0。

房屋建筑暴露价值为：

$$L(I) = \sum_{s=1}^{4}\sum_{i=1}^{5} T_s \times F_v \times C \tag{5}$$

式中，$L(I)$ 为地震烈度为 I 时的房屋建筑价值暴露度；T_s 为 s 类建筑物的建筑面积。

2　结果分析

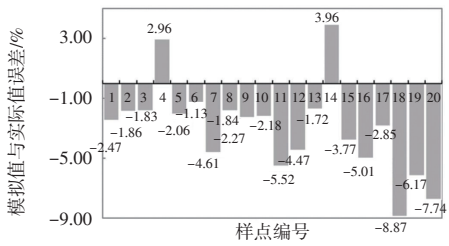
2.1　房山区房屋建筑面积空间分布及误差分析

基于人口普查数据和抽样调查数据，房山区总建筑面积为8 622.56万㎡，主要分布在东侧（图2）。其中：长阳镇、拱辰街道和城关街道房屋建筑面积较大，分别占总建筑面积的18.41%、16.35%和8.24%，蒲洼乡、大安山乡和南窖乡房屋建筑面积较小，分别占总建筑面积的0.16%、0.22%和0.24%。

本文依据房山区的范围有规律地均匀选取的20个



a 4个代表性抽样格网房屋轮廓分布



b 抽样格网络房屋面积横拟值与实际值误差对比/%

图2　房屋建筑重置成本密度空间分布图

1 km×1 km样本格网区，使用误差%公式计算模拟值与实际值之间的差异：（模拟值−实际值）/实际值×100%，结果显示平均误差绝对值仅为3.66%，最大误差绝对值为8.87%，最小误差绝对值为1.13%。模拟值和实际值的差异主要存在于：①人均住房面积乡镇与街道间存在差异；②人口分布数据的不确定性；③部分调查区域内存在例如工厂等非居住房屋（例如样区18号和19号，非住宅面积超过住宅面积）常住人口分布较少，因此模拟的面积值偏小。

随着样本格网区建筑面积的增加，模拟面积与实际面积的偏差有减小的趋势（图2b）。本文在20个样点中选取了4个不同数量级建筑面积的样点进行误差对比（图2a）：①样点a包括大量城镇住宅与城镇非住宅，以及少量农村住宅，房屋大多为10~20层的高层住宅以及部分平层厂房，房屋建筑面积模拟误差为2.47%；②样点b与样点a相似，但该区多为6层以下的居民住宅和少量超过15层的住宅，非住宅建筑主要为1~2层，房屋建筑面积模拟误差为1.83%；③样点c包括集中分布的农村住宅与部分农村非住宅，房屋建筑面积模拟误差为2.27%；④样点d建筑类型主要是农村住宅与农村非住宅，住宅层数多为1~2层，其中样点d误差较其他样点更大，为7.74%。上述具体分析和整体分析表明，随着样区内建筑面积的增加，模拟的准确率呈上升趋势。

2.2　房山区房屋建筑价值暴露度

根据重置成本法和市场价法得到的房山区房屋建筑价值总额分别为1 471.69亿元和32 162.90亿元（表2），空间分布整体呈现东高西低的特征。

表2　2020年各乡镇(街道)房屋价值总额及地震房屋价值暴露度评估结果

地区	重置价值/亿元	重置价值暴露度/亿元	市场价值/亿元	市场价值暴露度/亿元
全区	1 471.70	64.50	32 162.90	1 409.60
长阳镇	270.94	13.92	5 921.23	304.32
拱辰街道	240.60	12.37	5 258.17	270.24
城关街道	135.92	6.99	2 970.45	152.67
窦店镇	107.82	2.84	2 356.34	62.03
阎村镇	87.02	4.47	1 901.77	97.74
西潞街道	85.09	4.37	1 859.59	95.57
琉璃河镇	74.87	1.97	1 636.24	43.08
青龙湖镇	58.65	3.01	1 281.76	65.88
周口店镇	46.94	1.24	1 025.85	27.01
韩村河镇	42.00	1.11	917.88	24.16
迎风街道	38.92	2.00	850.57	43.72
石楼镇	36.02	0.95	787.20	20.72
大石窝镇	34.75	0.91	759.44	19.99
良乡镇	27.26	1.40	595.75	30.62
东风街道	25.29	1.30	552.70	28.41
长沟镇	24.66	0.65	538.93	14.19
星城街道	24.28	1.25	530.62	27.27
向阳街道	21.46	1.10	469.00	24.10
河北镇	21.18	0.56	462.88	12.19
张坊镇	20.51	0.54	448.23	11.80
新镇街道	11.97	0.62	261.60	13.44
十渡镇	10.24	0.27	223.79	5.89
佛子庄乡	6.93	0.18	151.45	3.99
霞云岭乡	5.48	0.14	119.76	3.15
史家营乡	3.77	0.10	82.39	2.17
南窖乡	3.58	0.09	78.24	2.06
大安山乡	3.22	0.08	70.37	1.85
蒲洼乡	2.33	0.06	50.92	1.34

2.2.1　不考虑抗震设防水平的房山区房屋建筑价值

不考虑房山区房屋建筑的抗震设防水平下，暴露在地震动峰值加速度为0.20 g的房屋建筑价值为1 027.40亿元，占房山区房屋建筑价值总额的69.81%。

2.2.2　考虑抗震设防水平的房山区房屋建筑价值

考虑房山区房屋建筑的抗震设防水平下，基于多因素加权方法计算的房山区各建筑结构类型的易损性矩阵如图3所示，易损性指数钢及钢筋混凝土<混合结构<砖木结构<其他结构。

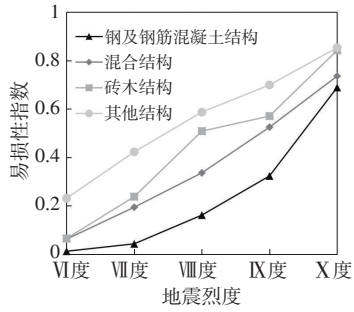


图3　基于房山区各类型建筑易损性矩阵估计的不同烈度下各类型建筑结构脆弱性

总体来看（表3），考虑设防水平下，利用重置成本法和市场价法计算的暴露度差异较大，分别为64.50亿元和1 409.60亿元，后者约为前者的22倍，损失率达4.38%。如图4所示，在地震峰值加速度为0.10、0.15 g和0.20 g时，房山区房屋损失的重置价值分别为0.57、11.12亿元和52.80亿元；市场价值分别为12.55、243.07亿元和1 153.98亿元。

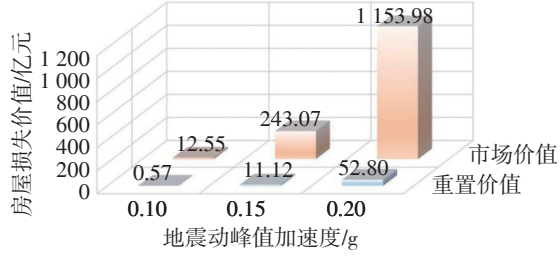


图4　采用重置价格和市场价法的房山区不同地震动峰值加速度下的房屋价值暴露度

从分乡镇评估结果来看：房山区城区集中在东部平原，西部山地房屋较少，且处在地震动峰值加速度为0.10 g的区域，暴露房屋建筑价值占总价值的2.63%。东部的长阳镇、拱辰街道和城关街道地震风险的暴露度最高，暴露的房屋建筑价值占总价值的5.14%。房山区暴露的房屋价值主要集中在地震动峰值加速度为0.20 g的区域，存在较高风险。

3　结　论

本文基于已有易损性矩阵通过多因素加权得出房山区各结构类型建筑的易损性矩阵，考虑建筑自身的脆弱性，对房山区建筑的地震暴露度进行评估。结果表明，考虑设防水平下，房山区房屋建筑的价值暴露度占总额的4.38%，该评估方法的暴露度更接近当地发生475年一遇地震造成的可能损失最大值，有利于提高震后政府及保险公司的应急响应效率和准确性。

重置成本法和市场价法的比较为补偿标准的确定提供了研究思路[29-30]：①房山区房屋建筑根据重置成本法和市场价法得到的建筑价值分别为1 471.70亿元和3 2162.90亿元。在考虑地震后的建筑暴露度时，重置成本法更适合于评估建筑物在地震中受损后的重建成本，而市场价法则更适用于出售或购买房屋时评估建筑物的实际价值；②在暴露度评估方面，考虑抗震设防水平和不考虑抗震设防水平使用重置成本法得到的结果评估分别为64.50亿元和1 027.40亿元，分别占房山房屋建筑总价值的4.38%和69.81%，而按照房山区房屋建筑分布在地震动峰值加速度为0.20 g的区域进行暴露度评估，则该范围内房屋价值占总房屋建筑价值的比值达81.87%。因此，在房屋地震暴露度评估过程中，是否考虑建筑的设防水平对评估的结果影响较大，考虑抗震设防水平理论上与实际损失风险更接近，对风险领域研究中对脆弱性重视不足有重要启示。未来，随着遥感技术和灾害风险普查数据的公开，可以进一步提高地震暴露度评估的可靠性，对于改进地震风险评估和灾后快速损失评估具有重要意义。

参考文献

[1] 史培军. 灾害风险科学[M]. 北京:北京师范大学出版社,2016
[2] 李宁,张正涛,陈曦,等. 论自然灾害经济损失评估研究的重要性[J]. 地理科学进展,2017,36(2):256-263
[3] 汪明. 重大自然灾害损失评估中的若干关键问题探讨[J]. 中国减灾,2022(5):24-27
[4] Bono A D,Mora M G. A Global Exposure Model for Disaster Risk Assessment[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2014(10):442
[5] Dutta D,Herath S,Musiake K. A Mathematical Model for Flood Loss Estimation[J]. Hydrol,2003,277(1-2):24-49
[6] Seifert I,Thieken A H,Merz M,et al. Estimation of Industrial and Commercial Asset Values for Hazard Risk Assessment[J]. Natural Hazards,2010,52(2):453-479
[7] Wünsch A,Herrmann U,Kreibich H,et al. The Role of Disaggregation of Asset Values in Flood Loss Estimation:A Comparison of Different Modeling Approaches at the Mulde River,Germany[J]. Environmental Management,2009,44(3):524-541
[8] 王杭,王建雄,李群. 基于GIS的建筑物抗震预测方法探讨[J]. 地理空间信息,2017,15(1):95-97
[9] 王旭,吴吉东,王菜林,等. 面向自然灾害风险分析的房屋价值空间化研究:以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(4):525-533
[10] 薄景山,王玉婷,薄涛,等. 城市和建筑抗震韧性研究的进展与展望[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(2):13-21

（下转第24页）