

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2016.01.015

城市地震风险精细化评估

——以北京海淀区为例

袁海红^{1,2,3)} 高晓路^{2)*} 戚伟^{2,3)}

1) 宁波大学城市科学系, 宁波 315211

2) 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,
中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3) 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 地震风险评估需充分考虑到地震风险的时空差异, 选择合理的时空间尺度进行研究, 才能给政府防灾减灾规划、政策的落实和应急救援等提供具有可操作性、切实有效的信息。为此, 基于辨识城市地震风险时空格局差异以及抗震救灾组织 2 个方面的综合考虑, 本研究选择在 500m×500m 格网尺度上进行昼夜 2 个不同时段的地震风险评估研究, 建立了昼夜人口分布与土地利用的对应关系, 以及建筑物损毁与人员伤亡之间的关系, 提出了昼夜地震风险精细化评估的方法。并以北京市海淀区为例, 在 500m×500m 格网尺度上进行了地震风险的模拟评估, 估算了海淀区总体及格网在相应的地震烈度下可能的建筑物损毁面积、房屋损失以及人员伤亡数。结果表明, 海淀区年期期望建筑物损毁总面积为 18.5 万 m², 房屋总损失为 3.25 亿元(不包括屋内财产), 白天死亡总人数 3 158 人, 受伤总人数 12 071 人, 夜晚死亡总人数 2 037 人, 受伤总人数 7 790 人; 空间上, 建筑物损毁面积和房屋损失比较大的地区集中在南部城市中心区和东部产业园区, 白天和夜晚伤亡人数自东南向西北呈现出显著的“城市核心区—城市边缘区—城市影响区—乡村腹地”的衰减模式, 白天伤亡人口有几个显著的高值区, 夜晚伤亡人口则分布相对分散。文中的分析结果识别了昼夜精细化尺度地震风险的高值区域, 为进一步确定防震减灾、震后应急救援以及各种救灾物资分配的重点地区提供了决策依据。

关键词 精细化尺度 地震风险评估 建筑物损毁 损失 人员伤亡 海淀区

中图分类号: P315.99

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2016)01-0197-14

0 引言

中国地震危险性大、地震烈度Ⅶ度以上的区域占全国总面积的 40%以上, 有一半以上的大中城市, 包括许多特大城市, 如北京等处于地震烈度Ⅶ度以上地区(徐伟等, 2004)。快速城市化时期, 大城市功能复合性强, 结构高度复杂, 系统安全系数下降, 需要精细化的风险评估和空间管控。减轻地震灾害需要进行灾前地震灾害风险评估和灾后快速震害预测。一个优秀的地震风险评估模型, 一方面能对地震灾害造成的损失提供科学的分析及评估预测, 另一方面

〔收稿日期〕 2015-01-07 收稿, 2015-10-14 改回。

〔基金项目〕 国家自然科学基金(41671138)、宁波市科技计划项目(2015C110001)与宁波大学引进人才专项基金项目(421600440)共同资助。

* 通讯作者: 高晓路, 女, 研究员, 电话: 010-64889075, E-mail: gaoxl@igsr.ac.cn。

能对承灾体风险的空间格局和区域分异规律做出正确的评价(吴凡等, 2012), 准确计算地震损失和伤亡人数, 并辨识出地震损失大和伤亡人数多的重点地区, 是震前建筑物抗震设防加固和帮助政府制定具有针对性的防灾减灾规划和应急对策的重要依据, 也是震后政府快速救援和有效配置救灾资源的重要指导, 从而将地震造成的损失尽可能降低。

建筑物地震风险评估的核心是建筑物易损性评估。若干年来建筑物易损性的研究方法主要分为经验法、解析/力学方法等7类(周奎, 2011)。能力频谱法(吴凡, 2012)等工程力学方法虽然精确性高, 但需要单体建筑物详尽的结构特性参数, 现场调查工作量很大, 计算复杂且耗时, 不适用于大面积的震害或地震风险评估。基于震害资料调查统计的易损性评估方法, 如震害矩阵(尹之潜, 1995, 2004; 胡少卿, 2010)、易损性曲线(Sabetta, 1998; 温增平, 1999; 方伟华等, 2011)快速简捷, 适用于大规模的群体建筑震害估计, 但准确度较工程力学方法低。随着易损性分析的不断深入以及震害资料的不断分类整理, 震害矩阵、易损性曲线得到了不断修正, 例如胡少卿等(2010)根据大样本震害预测数据, 给出了不同易损性影响因素分类下的易损性矩阵。此外, 国内学者也提出了一些能够较为便捷地进行群体震害预测(陈健云, 2009; 马东辉, 2014)和单体震害预测(孙得璋, 2008)的方法。大多震害矩阵和易损性曲线是某类型建筑的平均震害指数, 在具体到单体建筑物时需用震害影响因子来进行修正(张风华, 2004; 孙得璋, 2008)。

震害统计资料表明, 建筑物发生倒塌或严重破坏是造成人员伤亡的主要原因, 国内外地震人员伤亡评估方法主要包括不考虑建筑物易损性、破坏程度/破坏率和考虑易损性、破坏程度/破坏率的方法, 马玉宏等(2000)对人员伤亡的计算方法进行了系统的总结和评价, 指出不考虑建筑物易损性、破坏程度/破坏率的方法多是基于多个实际的震例统计回归, 考虑几个主要影响因素与人员死亡率之间的统计关系, 伤亡估计结果通常有较大的偏差; 陈洪富(2012)综合评估了各种方法的准确性后, 推荐使用尹之潜(1995)、马玉宏等(2000)等提出的方法。以往的研究中, 不考虑建筑物易损性、破坏程度/破坏率的方法使用较多, 而考虑建筑物破坏与人员伤亡之间关系的研究较少(杨杰, 2011)。空间尺度上, 以往的研究基本都是较大尺度的震害或地震风险评估(王晓青等, 2009; 徐国栋等, 2011), 但城市或地区的精细化震害或地震风险评估研究很少, 主要原因是缺乏在精细化尺度进行地震风险评估的科学方法, 另外也存在数据获取方面的一些困难, 例如, 人口数据一般在行政区级尺度进行统计, 建筑物数据不易获取, 一些地下基础设施的数据有保密要求等。另一方面, 已有研究中绝大多数是震后震害预测, 只有少数区域做过大尺度的地震风险评估(方伟华等, 2011)。震害预测对于快速把握地震灾情等非常重要, 灾前地震风险评估对于防震减灾、震后应急救援等也必不可少。总体而言, 县域或者城市大尺度的震害预测及地震风险评估有利于从宏观上认识区域震害和地震风险状况, 却不能反映建筑物破坏或伤亡人员的细化空间分布, 难以为城市的防震减灾、抗震改造、震后应急救援、资源调配等提供有效信息。因此震前风险评估, 包括对建筑物破坏程度及其导致的人员伤亡的空间分布进行精细化的科学评估具有重要意义。

1 地震风险评估的尺度和方法

建筑物地震风险评估目前有确定性法和概率法2种(Lantada *et al.*, 2010)。前者视建筑物的破坏和地震的发生为确定性事件, 按地震强度预测建筑物破坏和损失, 给出的结果不含时间

概念；概率法按某一确定时期预测建筑物的破坏和损失，给出的结果含有时间概念。本文使用概率法。地震风险评估是利用某一地区的地震危险性、承灾体易损性的评价结果，对该地区承灾体在一定年限内可能遭受的地震损失进行评估（方伟华等，2011）。地震风险评估的关键步骤就是确定承灾体数量、空间分布以及承灾体易损性。因此，本文研究的重点就是在合理的时空尺度上估算建筑物损毁与人口分布，建立精细化尺度的地震风险评估模型，据此估算建筑物可能遭受的损失和人口伤亡。

1.1 合理尺度的选择

基本评估单元的大小直接决定了评估结果的空间精度；县域或市域尺度过大，就会忽略城乡之间以及城市内部的差异。袁海红等（2014）对北京市海淀区经济脆弱性的研究表明，乡镇街道尺度、甚至居委会尺度仍不能反应城市内部差异，难以为政府防灾减灾和应急管理的落实提供有效依据。

街区是由城市道路划分的建筑地块，是城市功能、管理、环境和居民生活的基本单元。街区的分析结果对灾害应急救援具有重要意义，但街区大小不一；以北京市海淀区为例，街区从 $8\ 739\text{m}^2$ 到 $1\ 188.39\text{万}\text{m}^2$ 不等，面积相差很大，要在地震损失总量上具有可比性，最好选择面积大小基本相同的评价单元，格网能较好地满足这一要求。如何确定合理的格网大小？如果格网过小，会出现 1 个格网内都是开敞空间导致风险损失估计为 0 或因属于 1 个建筑物而导致风险损失估计过大的情况，这种极值点在城市和地区的整体评价中会构成较大的噪声。如果格网太大则影响评估精度。考虑到应急管理，格网大小应尽量与街区大小保持相近。一般北京城市建成区的道路间隔主要分布在 200~600m 之间，这也决定了街区范围。综合考虑评估精度、绝大部分街区大小以及常用的格网大小，本文选择 $500\text{m}\times 500\text{m}$ 的格网进行地震风险评估。在 ArcGIS 的环境中，生成 $500\text{m}\times 500\text{m}$ 的格网，共计 1 876 个，作为本研究的基本评价单元。

1.2 白天和夜间的人口分布分析

城市人口时空的行为轨迹具有相似性：在工作日白天会产生通勤、通学等多样化行为，在夜晚主要以居家行为为主；在休息日或者节假日，昼夜均以居家行为为主。人们的各种行为与各类城市功能区的联系，可以通过城市土地利用的类型反映出来。因此，对人口分布格局的分析一定要考虑时间、空间和土地利用 3 个方面的因素。基于以上原理，本文确定如下研究方法：

首先，寻找“人口-昼夜-土地利用”的匹配关系，按照行为特征对人口类型进行划分，构建“人口-昼夜”关系模型，分别估算区域白天、夜晚的总人口，并按照人口类型与土地利用类型的匹配关系，分别对白天、夜晚构建人口类型和土地利用类型的关系模型。第 2 步，将人口空间化到单位格网上，以格网作为基本评价单元，能克服土地利用斑块大小不一，有些过于粗糙的问题。第 3 步，将人口数据、土地利用空间数据、建筑物空间数据、格网数据之间通过尺度转换和空间拓扑计算实现多源数据融合。

1.2.1 “人口-昼夜”关系模型

城市人口有大量的输入和流出，内部区间人流通勤更活跃。按照人们日常活动的空间位移规律，本文将人口分为居家人口、钟摆人口、随机人口 3 种类型：1) 居家人口，主要包括老人、婴儿、失业人口等，这类人群的昼夜活动都是在居住地；2) 钟摆人口，是指有规律地往返于工

作地(或学校等)和居住地之间的人口,包括通勤的从业人口、通学的学生等,这类人白天在工作地或者学校,夜晚则在居住地;3)随机人口(Random Population),是指随机地在空间上出现的人,例如白天的门诊和住院人口、旅游休闲人口、购物消费人口,夜晚住院人口、外来住宿人口等。

因此,对任意局域可以建立以下模型:

$$PD = H + L + E + RD = H + W + S + RD \quad (1)$$

$$PN = H + L + O + RN = PR + RN \quad (2)$$

式(1)、(2)中, PD 、 PN 分别表示白天人口数和夜晚人口数, H 表示居家人口数, L 、 O 、 E 分别表示本地钟摆人口、外出钟摆人口、外来钟摆人口, RD 、 RN 分别表示白天随机人口、夜晚随机人口, W 、 S 、 PR 分别表示局域内的从业人口、学生、常住人口。对于城市内部的1个次级行政区或者其他局域单元,人口数量、结构在昼夜这2个时间以及空间上存在很大差异。

1.2.2 “人口-昼夜-土地利用”的关系模型

由于土地利用类型的差异,城市单元可以分为不同的空间块体,对于每类土地利用类型都服从如下的求和模型:

$$PD = \sum_{i=1}^n PD_i = \sum_{i=1}^n (H_i + W_i + S_i + RD_i) \quad (3)$$

$$PN = \sum_{i=1}^n PN_i = \sum_{i=1}^n (PR_i + RN_i) \quad (4)$$

式(3)、(4)中, PD 、 PN 、 H 、 W 、 S 、 PR 、 RD 、 RN 的含义与式(1)、(2)相同, i 表示第*i*类土地利用类型。式(3)、(4)表示不同土地利用类型上各类人口之和分别等于白天、夜晚的总人口。为了辨识城市土地利用的昼夜结构,本研究结合《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011)对全国第2次土地调查中的部分用地进行细化和归并,最终将土地利用类型归并为14种类型(表1):I1至I3为3类产业的通勤用地;I4至I7为通学用地;I9至I11为居住类用地;I12至I13为随机人口高频出现的用地;I14为无人区。根据人们的空间活动,分别提取白天和夜晚各类用地上的居家人口(老人、婴儿、失业人口等)、从业人口、学生、常住人口、随机人口(病人、外来住宿人口、游客等),按照式(3)、(4)求得其组合形式,如表1所示。

1.2.3 基于差异化面积权重的城市人口空间化模型

该模型将表1中的各类人口细化到单元一致的格网中,实现人口数据的尺度收缩。本文在已有研究的基础上,对“面积权重内插法”的“面积”进一步修正完善,采用差异化的面积权重,基本模型如下:

$$P_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ji}^*}{S_i^*} \times P_i \right) \quad (5)$$

式(5)中, P_j 表示第*j*个格网的人口数, P_i 表示第*i*类用地内的总人口数, S_{ji}^* 表示第*j*个网格内的第*i*类用地的面积权重, S_i^* 表示第*i*类用地的总面积权重。将式(5)中的 P_i 替换成表1中对应的 PD_i 或者 PN_i ,即可求得某个网格内白天或者夜晚的人口数。考虑到土地利用性质的差异,对于式(5)中的 S_{ji}^* 、 S_i^* ,本文构建了3种差异化的面积权重:1)土地面积,适用于I1类用地;2)建筑物面积,即建筑基底面积与层数之积,适用于I12至I13类用地;3)经济面积,采用其土地面积与景区等级系数之积,适用于I13类用地,景区等级系数按照《GB/T 17775-2003

表 1 “人口-昼夜-土地利用”关系匹配表

Table 1 The relationship among urban population, time (daytime or nighttime) and types of land-use

土地利用类型 (I)	时间尺度	
	白天 (D)	夜晚 (N)
I1 耕地、园地	PD1 第一产业从业人口	PN1 无
I2 工矿仓储用地	PD2 制造业、采矿业、仓储业从业人口	PN2 无
	PD3 第二、三产业从业人口-制造业、采矿业、仓储业从业人口-高校教职工-医院福利院从业人口-旅游业从业人口-住宿业从业人口	PN3 无
I3 商服用地、公共管理与公共服务用地		
I4 科教用地 (幼儿园)	PD4 幼儿园学生+幼教职工	PN4 无
I5 科教用地 (小学)	PD5 小学生+小学教职工	PN5 无
I6 科教用地 (中学、中职)	PD6 中学中职学生+中学中职教职工	PN6 无
I7 科教用地 (高校科教区)	PD7 高校学生+高校教师	PN7 无
I8 城镇住宅用地	PD8 城镇老人+城镇婴儿+城镇失业人口	PN8 城镇常住人口-高校学生-医院住院人口
I9 农村宅基地	PD9 农村老人+农村婴儿+农村失业人口	PN9 农村常住人口
I10 科教用地 (高校住宿区)	PD10 无	PN10 高校学生
I11 住宿用地	PD11 住宿业从业人口	PN11 住宿人口
I12 医卫慈善用地	PD12 医护人员+门诊病人+住院病人	PN12 住院病人
I13 风景名胜用地	PD13 旅游业从业人口+游客	PN13 无
I14 其他用地	PD14 无	PN14 无

注 I3 不含公园与绿地、医卫慈善用地、风景名胜设施用地、科教用地中的教育用地、餐饮住宿用地中的住宿用地；I8 包含科教用地中的高校家属区；I13 包含风景名胜内的设施用地和林地。

旅游景区质量等级的划分与评定》中规定的不同等级景区基本游客人次确定。

1.3 地震风险评估

根据方伟华等(2011)，年期望地震风险用每年可能遭受的住房经济损失以及人员伤亡数来度量，住房总经济损失的计算公式为

$$R = \sum_{k=1}^{1876} \left(\sum_p C_p \times A_p \times \sum_{j=I-1}^{I+1} \frac{L_{pj}}{Y_j} \right) \quad (6)$$

式(6)中， R 为区域每年可能遭受的住房总经济损失； k 为格网编号； P 为住房类型，不同研究中考虑的建筑物结构类型有所差异，根据海淀区建筑物数据，本文选择了尹之潜(2004)、方伟华等(2011)使用的分类方法，按抗震性能分为A类(钢筋混凝土结构)、B类(砖混结构)、C类(砖木结构)和D类(生土结构和块石干砌结构)； C_p 为 p 类房屋的单位造价(表2)； A_p 为格网内 p 类房屋的面积； I 为设计基本设防烈度， $I-1$ 、 I 、 $I+1$ 分别为小震、中震、大震对应的3个烈度等级； Y_j 为烈度等级 j 的重现期，可根据50a大震($I+1$)、中震(I)、小震($I-1$)的超越概率进行计算^①； L_{pj} 为烈度等级 j 下 p 类住房的损失率，计算公式为

①烈度与地震峰值加速度的转换关系参考了方伟华等(2011)提供的资料数据。

$$L_{pj} = \sum_{d_s=1}^5 P[d_s | j] \times LR(d_s) \times \beta \quad (7)$$

式(7)中, d_s 为房屋破坏等级($d_s=1, 2, 3, 4, 5$ 分别为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏); $LR(d_s)$ 为房屋发生 d_s 级破坏时的损失比; $P[d_s | j]$ 是各类建筑的震害矩阵, 是 j 级烈度下破坏程度为 d_s 的比例, 本文采用尹之潜等(2004)提出的华北地区各类型房屋的震害矩阵; β 为修正因子; 本文根据各栋建筑物的建设年代、层数、用途这些震害影响因子^①来修正平均震害矩阵得到单体建筑的震害指数。孙得璋(2008)比较详细地分析了不同区域各震害影响因子对不同类型建筑抗震性能的影响, 并进行了应用及验证。本文中的修正因子沿用他提出的震害影响因子系数, 计算了每栋建筑物的损毁面积, 并统计到格网尺度以及区域尺度。

不同建筑物类型在不同破坏程度下有相应的损失比, 研究区绝大部分建筑物类型是钢筋混凝土和砌体房屋, 因此采用《地震现场工作第4部分: 灾害直接损失评估》(GB/T18208.4-2011)中钢筋混凝土和砌体房屋的损失比。

表2 不同房屋类型的单位造价成本

Table 2 Construction cost for different building types per m^2

房屋类型	A类	B类	C类	D类
单位造价/元· m^{-2}	2 200	1 600	1 000	600

注 资料来源: 方伟华等, 2011。

表3 房屋不同破坏程度损失比的平均值

Table 3 The mean loss ratio corresponding to different damage levels of buildings

建筑物的破坏程度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
损失比平均值	0.03	0.13	0.31	0.73	0.91

人员伤亡的计算公式为

$$R_1 = \sum_{k=1}^{1876} C \times \sum_{j=I-1}^{I+1} \frac{L_{kj}}{Y_j} \quad (8)$$

式(8)中, R_1 为区域每年可能的(昼夜)人员伤亡总数, C 为格网内(昼夜)总人口, 除 L_{kj} 外其余字母的含义与式(6)相同; L_{kj} 为格网 k 内烈度等级 j 下的人员伤亡率, 计算公式^②为

$$L_{kj} = \frac{\sum_{d_s=1}^5 \sum_p A_p \times P[d_s | j] \times \beta \times DH(d_s)}{A_k} \quad (9)$$

式(9)中, A_k 为格网内建筑物的总面积; $P[d_s | j]$ 、 A_p 、 β 的意义与式(6)、(7)一致; $DH(d_s)$ 为不同破坏状态下的死亡率和受伤率(表4); $\sum_p A_p \times P[d_s | j] \times \beta$ 表示格网内建筑物不同破坏状态的面积; 格网内人员伤亡率等于不同破坏状态的面积比例与相应破坏状态下的伤亡率乘积之和。

①由于本研究中单栋建筑物的属性数据有限, 有些抗震能力影响因子, 如场地类型等暂无法获取, 综合考虑已有相关研究中各震害影响因子的重要程度及数据可得性, 本文选择了以上几个要素。

②本文参考了多个学者的评价, 选择考虑易损性参数、破坏率的评价方法, 主要参照尹之潜(1995)提出的方法, 结合本文计算的昼夜人口分布数据, 加以修改变成了上述表达式。

2 海淀区地震风险评估

2.1 研究区域、数据来源及处理

2012年,北京市常住人口为2 114.8万人,GDP 19 500.6亿元,城市功能核心区以及扩展区都处于地震烈度Ⅶ度以上(图1)。本文选择北京市海淀区作为实例,进行了2010年地震风险损失评估。海淀区地处北京市中心城区和远郊生态涵养区之间,是城市功能拓展区,也是高校和高新产业集聚区。全区土地面积430.8 km²,六普总人口328.1万,城镇化率达97.8%,乡村人口分布在西北山区和农区。

本文使用的数据包括海淀区1:500第2次全国土地调查土地利用数据;1:2 000的建筑物矢量数据(2011年),包含每栋建筑物的结构类型、建造时间、层数、总面积等属性,通过与土地利用的叠加分析得到建筑物的用途;1:10 000的医院和学校矢量数据(2010);常住人口数据来源于《海淀区第6次全国人口普查主要数据公报》及《北京市2010年第6次全国人口普查主要数据资料》。计算2010年从业人口时,假设2008年限额以上企业从业人口与当年经济普查中全区从业人口的比值与2010年的对应比值相等,最后根据2010年限额以上企业从业人口求得全区从业人口。采用的学校、医院、旅游业等相关人口数据来自《北京海淀统计年鉴2011》;部分数据来自《北京统计年鉴2011》、《北京区域统计年鉴2011》。

本文采用格网内该栋建筑的占地面积占此栋建筑(在多个格网内)总占地面积的比例作为格网内该栋建筑物损毁的面积占此栋建筑(在多个格网内)总损毁面积的比例,而每栋建筑物的总损毁面积可以预先求得,据此来计算格网内被分割建筑物的损毁面积。

2.2 海淀区建筑物地震风险评估

海淀区建筑主要是钢筋混凝土结构和砖混结构,其中钢筋混凝土结构所占比例为43.9%(含钢+砼结构3.77%和钢结构0.08%),砖混结构(混合结构)所占比例为49.53%,砖木结构占4.9%,其他结构占1.66%(图2,图中阴影部分为山区)。

根据式(6)、(7)计算了海淀区在不同烈度下建筑物发生地震造成的总损毁面积及房屋损失。其中,海淀区建筑物损毁总面积为18.5万 m²,房屋总损失为3.25亿元(不包括屋内财产)。本文把各建筑物的损毁面积及房屋损失统计到格网尺度,并进行分级展示,单项指标的分级需根据数据的分布特征选择适宜的分级方法(黄会平等,2007)。依据数据分布情况,本文选择自然裂点法,将损毁面积和损失按自然裂点法分为4个等级:低、中、高、很高(图3,4)。表5对建筑物不同等级损毁的面积、损失及相应格网面积所占比例进行了统计,处于低等级、中等级、高等级、很高等级水平格网内的建筑物损毁总面积分别为1.72万 m²、7.07万 m²、8.23万 m²、1.49万 m²;处于高等级、很高等级水平格网面积占海淀区总面积的比例为9.72%。处于低等级、中等级、高等级、很高等级水平格网内的房屋总损失分别为2 088.65万元、6 984.38万元、12 969.95万元、10 451.51万元,由于钢筋混凝土和砖混结构所占的比例较大,两者造价相差较大,所以各等级损失格网的面积比与建筑损毁面积比有所差异,损失较

表4 不同房屋破坏状态下的人员伤亡率

Table 4 The injury and death rates corresponding to different damage levels of buildings

房屋破坏状态	死亡率	受伤率
基本完好	0	0
轻微破坏	0	1/10 000
中等破坏	1/100 000	1/1 000
严重破坏	1/1 000	1/200
毁坏	1/30	1/8

注 资料来源:陈洪富,2012。

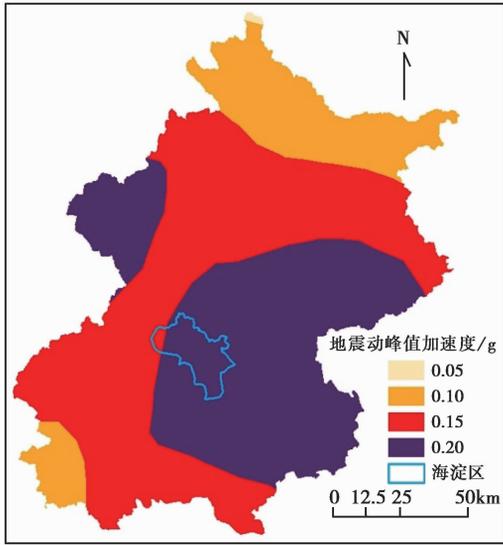


图1 北京地震动峰值加速度分区图

Fig. 1 Peak ground acceleration zoning map of Beijing.

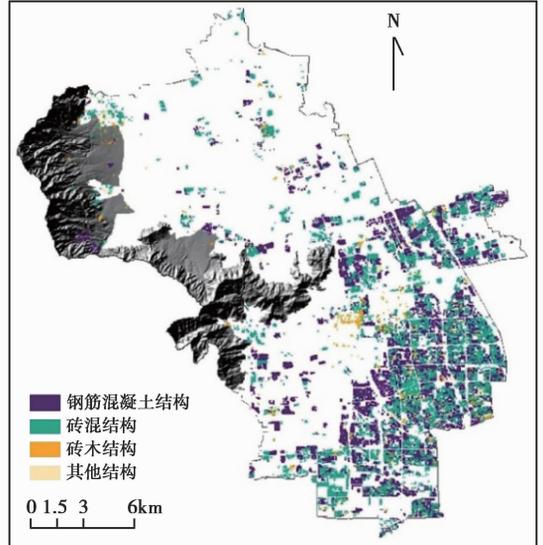


图2 海淀区建筑物类型分布

Fig. 2 Spatial distribution of different building types in Haidian district.

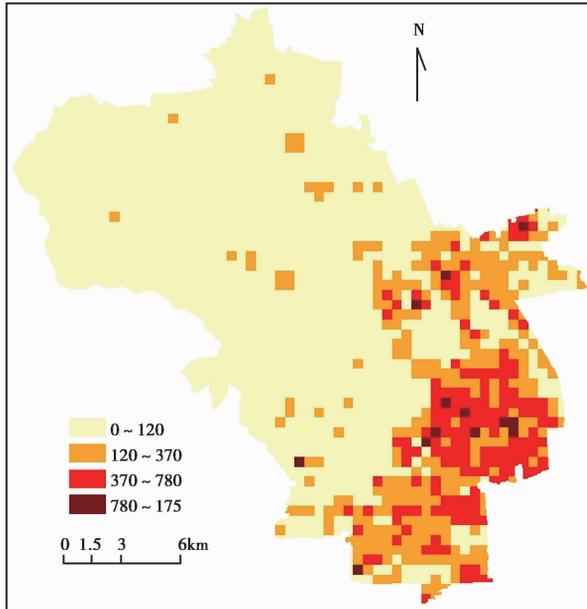


图3 格网建筑物损毁面积(单位: m²)

Fig. 3 Floor area of buildings destroyed(unit: m²).

表5 不同等级建筑物地震损毁/损失统计

Table 5 The floor area of building destroyed and economic loss at different risk levels

风险等级	建筑物损毁/m ²	房屋损失/万元
低	17 197.24(73.5%)	2 088.65(70.54%)
中	70 684.39(16.79%)	6 984.38(12.91%)
高	82 344.69(8.96%)	12 969.95(11.22%)
很高	14 892.21(0.76%)	10 451.51(5.33%)

注 括弧中为对应格网的面积占海淀区总面积的比例。

高的格网占总面积的 16.55%。

如图3和图4所示,总体而言,建筑物损毁面积和房屋损失比较大的是南部城市生活服务区 and 东部高科技园区,原因是这些地区建筑物比较密集。从街道看,房屋损毁面积与房屋损失较大的格网集中分布的街道基本一致,主要集中在海淀、中关村、北太平庄、北下关、甘家口、紫竹院、花园路街道。上地、西三旗等街道存在格网损失极大值。

2.3 海淀区地震人员伤亡风险评估

根据式(8)、(9),本文计算了海淀区总体及格网在不同烈度下的地震人员伤亡数。从总

量上看,白天可能死亡 3 158 人,受伤 12 071 人;夜晚可能死亡人数 2 037 人,受伤 7 790 人,夜晚死亡人数比白天少,主要是因为北京住宅的抗震能力较好。如表 6 所示,海淀区近 94% 的格网内白天和黑夜死亡人数 < 5 人; 1.28% 的格网内白天死亡人数较大,超过 10 人。格网内黑夜死亡人数超过 10 人的数量比例增加到 2.4%,主要原因是夜晚人口居住空间更加集中,一些格网内人口数量增加。93% 左右的格网内白天和黑夜受伤人员 < 20 人,格网内白天受伤人数 > 50 的比例为 1.28%,夜晚格网受伤人数 > 50 人的比例则增加到 2.45%。

如图 5—8 所示,总体而言,海淀区格网和街区昼夜人口伤亡数在空间上自东南向西北呈现出“核心区—边缘区—城市影响区—乡村腹地”的衰减模式,西北部白天和黑夜伤亡人数均较低,主要原因是西北乡镇地区大片区域为山地、农地和风景园林用地,建筑物和人口分布较为稀疏;南部城市生活服务区和东部高科技园区人口伤亡数较多。空间分布上,白天伤亡人数比夜晚伤亡人数分布广泛。白天伤亡人数有几个显著的高值区,如“中关村地区”,它是北京市级乃至华北地区主要的信息产业集聚中心,是高密度的就业中心和商圈。白天伤亡人口的次高值区主要分布在中关村以东和以南,以南主要是一些商贸中心、文体中心(如世纪城、公主坟、五棵松、魏公村等),亦有一些就业中心(如甘家口等);以东主要是海淀的高校密集区,此外,在五环外还有 1 个高值区域,即“上地信息产业园”。

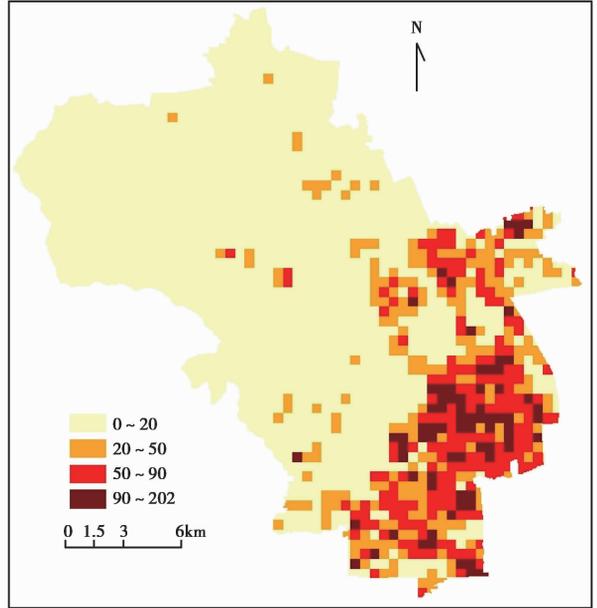


图 4 格网房屋损失(单位:万元)

Fig. 4 Housing loss(unit: ten thousand Yuan).

表 6 格网伤亡人数统计

Table 6 Casualty statistics of grid

死亡人数/人	格网数量比例/%		受伤人数/人	格网数量比例/%	
	白天死亡	黑夜死亡		白天受伤	黑夜受伤
<5	93.55	93.76	<20	93.5	92.75
5~10	5.17	3.84	20~50	5.22	4.8
10~40	1.12	2.19	50~150	1.12	2.24
>40	0.16	0.21	>150	0.16	0.21

与白天伤亡人口布局模式相比,夜晚伤亡人口没有太多的极高值区,高值分布相对较均匀,这与夜晚的人口分布在居住空间密切相关。海淀区住宅空间分布集中,且住宅抗震性能较

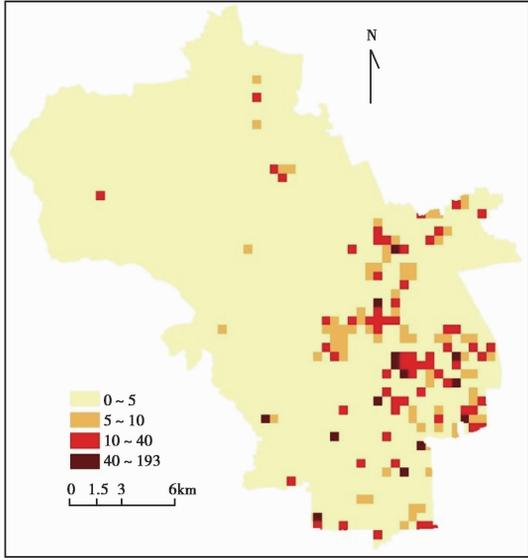


图5 格网白天人口死亡数

Fig. 5 The distribution of deaths at daytime.

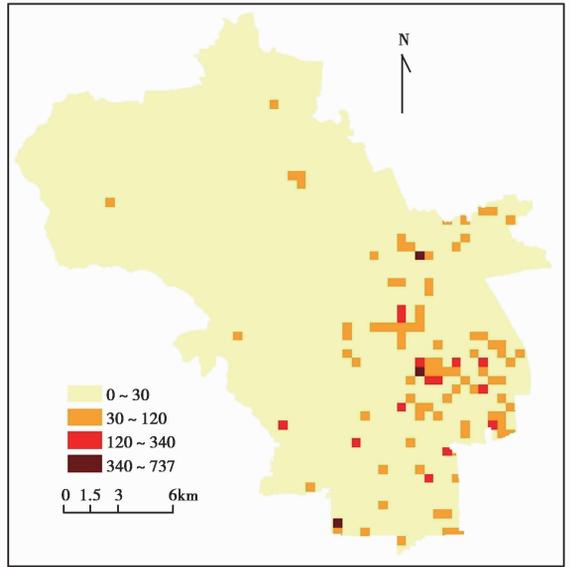


图6 格网白天人口受伤数

Fig. 6 The distribution of the injured at daytime.

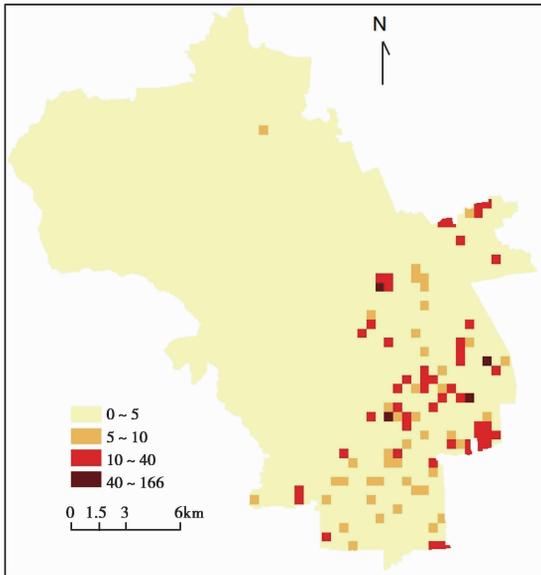


图7 格网黑夜人口死亡数

Fig. 7 The distribution of deaths at night.

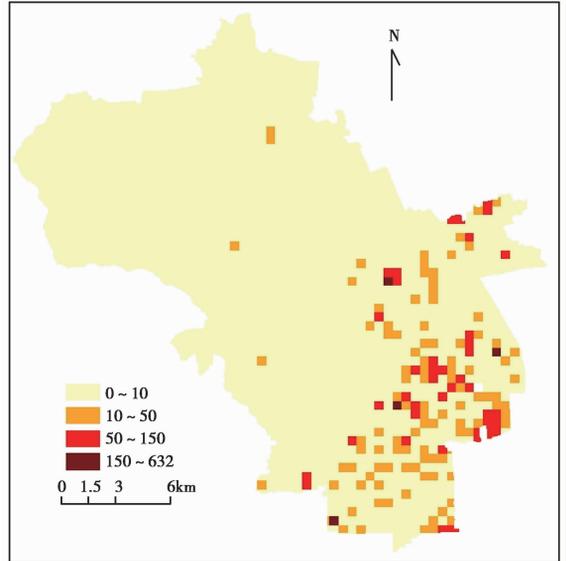


图8 格网黑夜人口受伤数

Fig. 8 The distribution of the injured at night.

好。此外，一些在白天伤亡人口集聚分布的区域亦是夜晚伤亡人口的高值区，这种现象一方面是由于存在大量的高校家属区，另一方面是由于“旧住宅区”的存在。

从街道分布上看，海淀区白天死亡和受伤人数有相同的分布格局，集中的街道主要为海淀、中关村、上地等。黑夜死亡和受伤人口有相同的分布格局，黑夜伤亡人口比较集中的地区

为北太平庄、学院路、中关村、海淀、上地等。白天伤亡人数与黑夜伤亡人数的布局差异主要是由昼夜人口分布格局的差异造成的。

南部城市生活服务区 and 东部高科技园区人口伤亡人数较多、地震房屋损失大，同时这些地区是高科技产业、商业服务、会展服务、医疗服务以及政务服务业的集聚区，一旦发生地震，产生的直接和间接经济损失程度也很高(袁海红, 2014)；海淀区避难场所相关研究(Ji *et al.*, 2012)表明这些地区仍有许多地方是有限疏散时间内的不可达地区，在今后的日常风险管理和应急管理中应该对这些风险高值区给予重点关注。

3 结论与讨论

本文提出了面向城市地震灾害的地震风险精细化评估方法，在更为合理的空间和时间尺度上建立人口和土地利用的对应关系以及建筑物损毁与人员伤亡的关系。与以往研究相比，在以下几个方面取得了改进：1)空间尺度的精细化。基于有效辨识城市地震风险时空格局差异以及抗震救灾的有效组织的综合考虑，本文提出以 500m 单元网格作为地震灾害风险评估的基本单元。细化尺度的地震灾害风险评估在很大程度上受到数据的制约，本文以建筑物数据以及土地利用数据等为基础，构建了细化尺度的人口空间分布模型以及地震风险评估模型，估计了 500m×500m 格网尺度在相应地震烈度下可能的建筑物损毁面积、房屋损失以及人员伤亡，与其他一些大尺度的地震预测以及地震风险评估相比，对抗震减灾规划、应急救援措施的落实具有重要意义。2)时间尺度的细化。过去研究中基本都是分析静态人口分布，没有考虑到人口的流动、昼夜的差别等。但实际上城市人口的活动存在很大的昼夜间差异，而且在不同人群之间也存在显著差别，本研究提出的人口空间化模型为在时间尺度上细化地震风险评估提供了数据支撑。

运用以上理论和模型，本文预测了海淀区地震建筑物损毁、住房经济损失和人员伤亡的重点地区，结果显示：建筑物损毁和房屋损失较大以及人员伤亡较多的地区集中在南部城市生活服务区 and 东部高科技园区，特别是海淀、中关村、北太平庄、学院路等地。这些结果为未来海淀区确定灾前防震减灾、灾后应急救援以及各种物质分配的重点地区提供了依据，如对震害可能非常严重的地区，要提出抗震减灾策略，如抗震设防或加固措施等；对震害较严重的地区要制定中长期抗震减灾规划；对老旧建筑且人密度较大的地区可考虑适当拆迁或适当开发地下空间；在城内伤亡人口集中但应急避难场所相对不足的地区，考虑新建或改建一定数量的防灾和疏散场地。

本研究还存在许多不足和有待深入的地方，如人口分布的时间和空间分异规律需进一步细化。人口空间分布模型中，工作时间和夜晚也不一定都在室内，还有通勤状态未纳入考虑，未来可以根据人口行为轨迹细分为更多时段，如早上(7:00—9:00)是主要的出勤时段等。另外，本文使用的人口空间化模型假设各地区相同类型用地上的人均面积相同来推算人口，在较大尺度上问题不大，但在精细化尺度，同一用地类型人均面积可能有所差别，低档住宅区的人均面积可能会低于高档住宅区，如流动人口集聚的地方，一般人均面积较少，未来参数需要进一步优化，可根据地区的一些其他特性来修正，如结合房价等来调整参数。

本文在研究单体建筑的损毁情况时，整合了单体建筑易损性和群体建筑易损性的一些研究，使得本文能在大范围内进行地震风险评估，未来需要进一步提高模型的精确性。

参 考 文 献

- 陈洪富. 2012. HAZ-China 地震灾害损失评估系统设计及初步实现 [D]:[学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- CHEN Hong-fu. 2012. General development and design of HAZ-China Earthquake Disaster Loss Estimation System [D]. Ph D thesis. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin(in Chinese).
- 陈健云, 毕可为, 温瑞智. 2009. 一种适于震后快速评估的群体易损性分析方法 [J]. 震灾防御技术, 4(2): 174—181.
- CHEN Jian-yun, BI Ke-wei, WEN Rui-zhi. 2009. A fast approach of group vulnerability evaluation for post-earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 4(2): 174—181(in Chinese).
- 方伟华, 王静爱, 史培军, 等. 2011. 综合风险防范: 数据库、风险地图与网络平台 [M]. 北京: 科学出版社.
- FANG Wei-hua, WAGN Jing-ai, SHI Pei-jun, *et al.* 2011. Integrated Risk Governance: Database, Risk Map and Network Platform [M]. Science Press, Beijing(in Chinese).
- 胡少卿, 孙柏涛, 王东明. 2010. 基于建筑物易损性分类的群体震害预测方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, (3): 96—101.
- HU Shao-qing, SUN Bai-tao, WANG Dong-ming. 2010. A method for earthquake damage prediction of building group based on building vulnerability classification [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, (3): 96—101(in Chinese).
- 黄会平, 张岑. 2007. 分类、分级模型与 GIS 集成的探讨 [J]. 华北水利水电学院学报, 28(3): 72—74.
- HUANG Hui-ping, ZHANG Cen. 2007. Study on integration of classification model and GIS [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 28(3): 72—74(in Chinese).
- 黄荣清. 2003. 北京城市的地域构造 [J]. 中国人口科学, (5): 49—55.
- HUANG Rong-qing. 2003. Urban structure of Beijing [J]. Chinese Journal of Population Science, (5): 49—55(in Chinese).
- 匡文慧, 杜国明. 2011. 北京城市人口空间分布特征的 GIS 分析 [J]. 地球信息科学学报, 13(4): 506—512.
- KUANG Wen-hui, DU Guo-ming. 2011. Analyzing urban population spatial distribution in Beijing proper [J]. Journal of Geo-Information Science, 13(4): 506—512(in Chinese).
- 马东辉, 程洋, 王志涛. 2014. 基于群体特性的建筑物震害预测方法 [J]. 北京工业大学学报, 40(5): 720—724.
- MA Dong-hui, CHENG Yang, WANG Zhi-tao. 2014. Method for earthquake damage prediction of buildings based on group characteristics [J]. Journal of Beijing University of Technology, 40(5): 720—724(in Chinese).
- 马玉宏, 谢礼立. 2000. 地震人员伤亡估算方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 20(4): 140—147.
- MA Yu-hong, XIE Li-li. 2000. Methodologies for assessment of earthquake casualty [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 20(4): 140—147(in Chinese).
- 孙得璋. 2008. 建筑物单体震害预测新方法探讨 [D]:[学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- SUN De-zhang. 2008. New method of seismic damage prediction of single building [D]. Ph D thesis. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin(in Chinese).
- 王晓青, 丁香, 王龙, 等. 2009. 四川汶川 8 级大地震灾害损失快速评估研究 [J]. 地震学报, 31(2): 205—211.
- WANG Xiao-qing, DING Xiang, WANG Long, *et al.* 2009. A study on fast earthquake loss assessment and its application to 2008 Wenchuan M8 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 31(2): 205—211(in Chinese).

- 温增平. 1999. 建筑物地震易损性分析研究 [D]:[学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- WENG Zeng-ping. 1999. Seismic vulnerability analysis for building [D]. Ph D thesis. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing(in Chinese).
- 吴凡, 汪明, 刘宁. 2012. 美国地震风险评估中建筑物易损性与损失组合的探讨 [J]. 灾害学, 27(3): 116—121.
- WU Fan, Wang Ming, Liu Ning. 2012. Discussion of Vulnerability of Building Structures and Loss Combinations for Earthquake Risk Assessment [J]. Journal of Catastrophology, 27(3): 116—121(in Chinese).
- 徐伟, 王静爱, 史培军, 等. 2004. 中国城市地震灾害危险度评价 [J]. 自然灾害学报, 13(1): 9—15.
- XU Wei, WANG Jing-ai, SHI Pei-jun, *et al.* 2004. Hazard degree assessment of urban earthquake disaster in China [J]. Journal of Natural Disasters, 13(1): 9—15(in Chinese).
- 杨杰, 刘茂, 徐宁. 2011. 基于能力谱的建筑物震害评估及城市抗震规划 [J]. 中国安全科学学报, 20(11): 18—24.
- YANG Jie, LIU Mao, XU Ning. 2011. Application of capacity spectrum in building damage state assessment and urban earthquake disaster mitigation planning [J]. China Safety Science Journal, 20(11): 18—24(in Chinese).
- 尹之潜. 1995. 地震灾害及损失预测方法 [M]. 北京: 地震出版社.
- YIN Zhi-qian. 1995. Earthquake Disaster and Forecast Methods of Its Loss [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 尹之潜, 杨淑文. 2004. 地震损失分析与设防标准 [M]. 北京: 地震出版社.
- YIN Zhi-qian, YANG Shu-wen. 2004. Earthquake Loss Analysis and Fortification Criteria [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 袁海红, 高晓路. 2014. 城市经济脆弱性评价研究: 以北京海淀区为例 [J]. 自然资源学报, 29(7): 1159—1172.
- YUAN Hai-hong, GAO Xiao-lu. 2014. Assessing the economic vulnerability to disasters of cities: A case study of Haidian District in Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 29(7): 1159—1172(in Chinese).
- 张风华, 谢礼立, 范立础. 2004. 城市建构物地震损失预测研究 [J]. 地震工程与工程振动, 24(3): 12—20.
- ZHANG Feng-hua, XIE Li-li, FAN Li-chu. 2004. A study on disaster loss prediction caused by damaged structures under earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 24(3): 12—20(in Chinese).
- 张子民, 周英, 李琦, 等. 2010. 城市局域动态人口估算方法与模拟应用 [J]. 地球信息科学学报, 12(4): 503—509.
- ZHANG Zi-min, ZHOU Ying, LI Qi, *et al.* 2010. An estimation method of dynamic population within an urban local area [J]. Journal of Geo-Information Science, 12(4): 503—509(in Chinese).
- Ji J, Gao X L, Wang K Y. 2012. Evaluation methods about service quality of emergency shelters for evacuation in cities [C]. In: ISCRAM ASIA 2012 Conference on Information System for Crisis Response and Management, Beijing, China.
- Lantada N, Irizarry J, Barbat A H, *et al.* 2010. Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 8(2): 201—229.
- Sabetta F, Goretti A, Lucantoni A. 1998. Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion [C]. In: Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.

ASSESSING THE SEISMIC RISK OF CITIES AT FINE-SCALE: A CASE STUDY OF HAIDIAN DISTRICT IN BEIJING, CHINA

YUAN Hai-hong^{1,2,3)} GAO Xiao-lu²⁾ QI Wei^{2,3)}

1) *Department of Urban Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China*

2) *Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

3) *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

In order to provide practical and useful information for the disaster prevention and relief actions, it is necessary to take into account spatial differences and temporal changes of seismic risk in evaluating seismic risk at a proper temporal and spatial scale. From the perspectives of identifying spatial difference of seismic risk within the city and performing disaster relief operations, the evaluation of urban seismic risk is done in this paper at the spatial scale of 500m * 500m grids for day time and night time separately. For this purpose, this paper proposes the methods for the assessment of seismic risk, establishing the correspondence relations between the population and land use, and between the floor area of buildings destroyed and casualties at more reasonable spatial and temporal scales. Taking a case study of Haidian District in Beijing using these methods, we estimate the floor area and the value of buildings destroyed and the casualties at daytime and nighttime separately at the 500m grid scale. Results show that: a total of 185, 000m² of areas is expected to be destroyed annually in Haidian District, and the total loss of the houses is 325 million Yuan (excluding properties within the houses). During the day (night) time, 3, 159 (2, 037) victims are expected to be killed and 12, 071 (7, 790) injured. Destruction of buildings and loss of houses is spatially concentrated in the downtowns in the south and the industrial parks in the east. The casualties inflicted during the day and night descend from southeast to northwest, *i.e.* from urban core areas, urban fringes, urban outskirts, to village. Several regions suffer heavy casualties during the day, but nighttime casualties are scattered across different regions. The conclusions in this paper efficiently identify the spatial distribution of areas at the level of high and the very high seismic risk, which provides reliable decision support for identifying priority areas for pre-disaster prevention and mitigation, emergency rescue and the distribution of various relief supplies.

Key words fine-scale, seismic risk assessment, building destroyed, economic loss, casualties, Haidian District

〔作者简介〕 袁海红, 女, 1986年生, 2015年毕业于中国科学院地理科学与资源研究所人文地理专业, 获博士学位, 讲师, 主要从事灾害风险、城市地理方面的研究, 电话: 13958211731, E-mail: haihongyuan321@126.com。