

王萍, 侯震霖, 安立强. 设定情景下的地震避难场所需求估算研究——以天津市河东区为例[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1484-1492. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230710002

WANG Ping, HOU Zhenlin, AN Liqiang. Demand estimation of emergency shelters based on setting earthquake scenarios: a case study of Hedong District, Tianjin City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1484-1492. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230710002

设定情景下的地震避难场所需求估算研究

——以天津市河东区为例

王萍¹, 侯震霖², 安立强¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 应急管理部, 北京 100038)

摘要: 地震应急避难场所是提高地震灾害风险防治能力的一个关键环节, 然而, 现有的地震避难场所需求人数估计方法却难以满足当前精细化地震灾害风险防治需要。为此, 以天津市河东区为例, 提出一种基于精细基础数据的地震避难需求分析方法。首先, 根据精细建筑物数据, 进行人口空间化; 然后, 基于单体建筑物数据, 提出三种不同地震强度设定情景下临时和长期避难人数的计算方法; 最后, 在研究区验证所提方法的可行性, 并给出相应场景下避难场所需求能力的估计结果。研究表明, 当遭受相当于设防烈度和罕遇烈度的地震作用时, 研究区内现有的临时避难场所和长期避难场所均无法满足应急避难需求。

关键词: 地震应急; 避难场所; 精细数据; 设定情景

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1484-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230710002

Demand estimation of emergency shelters based on setting earthquake scenarios: a case study of Hedong District, Tianjin City

WANG Ping¹, HOU Zhenlin², AN Liqiang¹

(1. Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China;

2. Ministry of Emergency Management, Beijing 100038, China)

Abstract: Earthquake emergency shelters are crucial for improving the ability to prevent and control earthquake disaster risks. However, existing methods for estimating the demand for these shelters often fall short of addressing the current needs for earthquake disaster risk prevention and control. This study proposes a new method for estimating emergency shelter demand, using the Hedong District of Tianjin City as a case study. The method is based on fine-grained and fundamental data. Initially, the population was spatialized using detailed building data. Subsequently, calculation methods were developed to estimate the number of temporary and long-term evacuees under three earthquake scenarios with different seismic intensities, all based on single build-

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 天津市科技计划项目(23KPHDR00320)

第一作者简介: 王萍(1989-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 灾害应急管理。E-mail: qdbaby1987@126.com。

通信作者: 安立强(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 地震灾害损失评估及地震安全韧性。E-mail: anliqiang@sina.com。

ing data. The feasibility of this method was verified in the study area, and the corresponding estimation results for emergency shelter demand were presented for the three earthquake scenarios. The results show that the existing temporary and long-term shelters in the study area are insufficient to meet the needs in the event of earthquakes with fortification intensity and rare intensity.

Keywords: earthquake emergency; emergency shelter; fine data; setting earthquake scenario

0 引言

地震应急避难场所建设是提高地震灾害风险防治能力的一个关键环节,也是城市地震安全的重要保障。地震应急避难服务能力的提升,可以有效降低灾害带来的人员伤亡和财产损失^[1]。特别是随着我国城市化水平的不断攀升,城市人口和财富聚集加速,地震灾害可能造成的损失不断加剧,对震后应急疏散、避难服务的需求也在不断增加。在这个背景下,近年来应急避难场所的科学规划、规范建设、精细管理等内容一直受到广泛关注。

国务院 1995 年颁布的《破坏性地震应急条例》中提及了避震疏散,1997 年颁布的《中华人民共和国防震减灾法》对城市避难场所设置提出了明确规定,2004 年下发的《关于加强防震减灾工作的通知》中对避难场所及相关设施提出要求。此后近 20 年内,各级应急、地震、建设等部门对应急避难场所的规划、建设、管理等方面开展了大量的实践和探索。《城市抗震防灾规划标准(GB 50413—2007)》^[2]、《地震应急避难场所场址及配套设施(GB 21734—2008)》^[3]、《防灾避难场所设计规范(GB 51143—2015)》^[4]、《城市社区应急避难场所建设标准(建标 180-2017)》^[5]等规范和标准的相继颁布实施,分别对避难场所的设计理念、等级、选址安全与配套设施,以及避难建筑最低抗震设防标准与建设流程等方面进行了规范^[6]。

据统计,截至 2022 年,我国已在 338 座城市中(不含香港、澳门、台湾省)建立了 13 880 处应急避难场所^[7]。然而,出于“平灾结合”原则,在土地资源稀缺的情况下,城市的避难场所往往仅对既有绿地、公园、广场、体育场馆、操场等空间加以改造或“挂牌”,导致避难疏散资源存在一定的空间不均衡以及可靠性不足等问题。因此,为了实现震后高效有序的疏散避险,提高应急避难场所的减灾保障作用,许多学者从应急避难场所服务能力的布局优化^[8-12]、适宜性评价^[13-14]、责任区划分^[15-18]、路径规划^[19-20]等方面开展研究,取得了一定的成果。

根据问题的切入点,可以将上述研究归纳为两类:一类从服务供应入手,以避难场所的空间属性为核心,考虑避难点的覆盖、容量、路径距离等特征维度,进行单目标或多目标求解;另一类是从用户需求的角度分析疏散过程,考虑避难场所服务对象及其避难行为的差异性,模拟避难疏散模型^[8]。

综上可知,目前对地震应急避难需求估计的研究较少。对于地震灾害而言,人口空间分布、建筑结构抗震能力差异,以及地震影响强度的变化均会对人员避难需求带来影响。例如,陈志芬等^[21]在估计应急避难场所规划中的避难人口时,改进了文献^[22]中以震后无家可归人数估计模型为依据的避难需求估计方法,提出了一种基于建筑震害避难率与建筑易损性结构分类面积比的地震灾害长期避难人口比例预测模型。然而,受到数据细致程度的约束,现有研究往往难以捕捉上述三种因素导致的精细化空间差异,无法满足当前精细化地震灾害风险防治工作的需求。一方面,精细化的房屋建筑数及相应的损失评估方法没有得到应用;另一方面,避难需求人口的空间分布精细程度有待提高。尽管在避难人口估计环节,手机信令数据、人口热力数据、手机基于位置的服务(Location Based Service, LBS)等空间大数据以及遥感数据已经得到应用^[8-12],但这类数据通常是栅格形式,其空间化过程相对复杂,在单体建筑粒度中的应用还有待进一步挖掘。

针对上述应急避难场所相关研究在避难需求估计方面存在的不足,本文提出一种基于精细基础数据的地震避难需求估计方法。首先,根据单体建筑物数据进行人口空间化,区分日间和夜间人口分布;然后,基于典型建筑易损性曲线,进行结构破坏估计;最后,提出基于精细化承灾体数据的地震避难场所需求估计方法,并以天津市河东区为研究区验证所提方法的可行性,给出相应的分析结果。

1 研究区和数据

1.1 研究区范围

天津市中心城区建筑密集、人口稠密,同地震

影响下对应急避险资源的需求量可能更高。“十三五”期间,天津市应急避难场所的数量和规模均有大幅增长,应急避难场所数量从2014年的35处增加到2020年的2395处,可容纳避难人口数量从92万人增长至323.63万人,应急疏散避险能力明显提升^[23]。

本文以天津市河东区为研究区。河东区是天津市中心市区之一,位于天津市东部,区域面积39.63 km²,下辖13个街道办事处,164个社区居委会。截至2021年底,河东区有户籍人口77.7万,常住人口84.89万,区域人口密度为2.16万人/km²,是典型的高密度城市中心区^[24]。截至2020年底,天津市河东区共有紧急避难点155个(图1),有效避难面积1.167 km²,可容纳45.4万人;具有配套设施的中长期避难场所面积0.124 km²,可容纳3.4万人。但区域人均有效避难场所面积远低于天津市平均水平^[24],存在应急避难资源不均衡的问题。此外,河东区有老旧小区、高档社区、写字楼、商业中心等,建筑类型丰富,社区差异明显,适合开展研究。

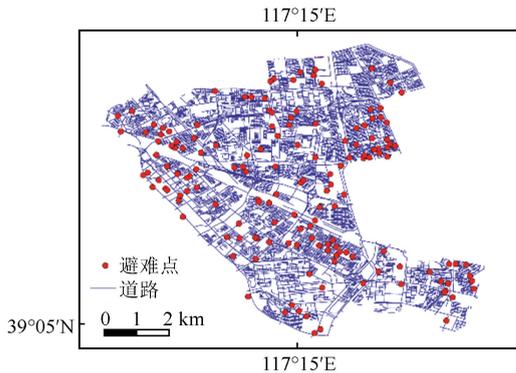


图1 研究区避难点分布

Fig.1 Distribution of shelters in the study area

1.2 数据来源

(1) 单体建筑物数据(包含结构类型、层数、用途等信息)、人口普查数据、统计年鉴数据均来源于天津市地震应急基础数据库;

(2) 兴趣点(Point of Interest, POI)数据和村级行政区划边界数据来源于百度地图;

(3) 应急避难场所数据(包含位置、面积、有效避难面积和有效避难人数等信息)来自于天津市应急管理局(<http://yjgl.tj.gov.cn/>)。

2 研究方法

2.1 总体工作流程

震后的应急避险、避难行为与区域内人员生活、

工作、停留所处建筑物的抗震性能有关。对于某一个建筑物而言,其震后破坏程度和功能保持程度是在室内人员选择疏散行为的基本依据之一。对于某一个区域而言,区域内人员的避难行为一般遵循就近原则,并且受到场所容量限制。为了实现不同地震强度下,特定区域内基于各建筑物在室人口数量和破坏程度的避难需求估计,本文提出如下的研究路线(图2):

- (1) 根据单体建筑物数据进行精细尺度的人口空间化;
- (2) 设定典型地震情景下的人员避难方式;
- (3) 根据设定的地震强度,基于典型建筑易损性模型,计算建筑物的破坏情况和在室人口伤亡情况;
- (4) 根据避灾情景计算社区级避难人口需求。

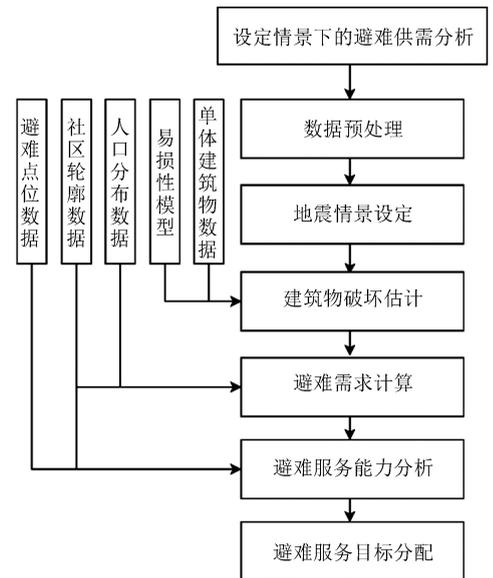


图2 工作流程

Fig.2 Overall workflow

2.2 人口空间化

地震中人员在室内的情况通常由建筑物用途与发震时间决定,而发震时间可以按照季节、气候、节假日、作息时间段等进行细化^[25]。谷国梁等^[26]在分析天津市地震后人员压埋情景时,将社区级人口进行功能区块划分,并提出按8种地块类型对在室情况进行细化。本文仅考虑非休息日的白天和夜间发生地震的情景,根据POI数据获得建筑物使用类型,参考文献^[27],得到办公、工厂、商业、教育、医疗、居住和其他共7种类型建筑物的日、夜人口在室密度,并将其参考取值列于表1。

表 1 各类型建筑物中人员在室密度参考取值 (单位:人/m²)Table 1 Reference value of indoor population density in various types of buildings (Unit: people/m²)

类型	办公	工厂	商业	教育	医疗	居住	其他
白天	0.02	0.01	0.09	0.2	0.1	0.01	0.03
夜晚	0.001	0.001	0.001	0.12	0.08	0.026	0.001

由于本研究未对跨区域的职住行为开展深入分析,将全区常住人口总数减去在室人口总数,以此近似计算未在室人员的数量,并在研究区内按总面积求平均值,以实现未在室人员数量社区单元的再分配。

2.3 地震避难情景设定

按照与研究区可能遭受的多遇地震、设防地震、

罕遇地震相当的地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)水平,设定三种不同强度的地震影响情景(即 50 a 可能遭遇的超越概率为 63%、10%、2% 的地震烈度值)。如图 3 所示,三种不同设定情景下的 PGA 分布分别为 76.4~81.6 gal、196.6~214.8 gal、322.4~362.6 gal。

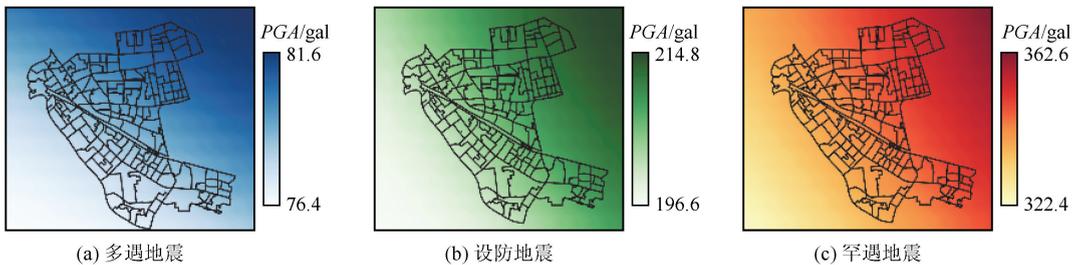


图 3 三种地震影响场景的 PGA 分布

Fig.3 PGA distribution of three earthquake scenarios

由于研究区建筑物年龄跨度大,存在不符合当前地区设防水准的存量建筑,因此建筑震后性能表现存在差异。此外,根据对天津市不同人群开展的地震避险问卷调查统计结果,仅有不足 30% 的民众表示如果灾难来临,首先会考虑去应急避难场所避难,相当数量的居民缺乏对应急避难场所作用机制和应急避难相关知识的了解,表示对应急避难场所的可靠性存疑。

考虑到上述因素,对于震后人员行为进行如下设定:

(1) 假设震后在室人员与非在室人员均有避难需求;

(2) 考虑不同强度地震下震时在室未受重伤人员的避难意愿存在差别,假定上述三种地震影响场景下,震时在室未受重伤人员临时避难比例分别为 40%、80%、100%,震时未在室人员临时避难比例分别为 30%、60%、100%;

(3) 避难场所以就近服务为原则,但可以超限容纳,假定三种地震影响场景下实际容量分别为设计容量的 100%、110%、120%;

(4) 长期避难人员数量按失去住所的人口计算(除去震后死亡和受伤入院部分)。

2.4 地震避难需求人数估计

首先以 D_i 代表建筑物破坏等级,其中 $i=1,2,$

3,4,5,分别对应基本完好、轻度损坏、中度损坏、严重破坏、毁坏和倒塌。马东辉等^[22]提出的震后长期避难人数经验模型以住宅建筑遭受的破坏为基础,采用式(1)计算。

$$M = \frac{1}{a} \left(\frac{2}{3} A_1 + A_2 + \frac{1}{2} A_3 \right) \quad (1)$$

式中: M 代表长期避难需求人数; a 表示人均居住面积; A_1 、 A_2 、 A_3 分别对应破坏等级 D_5 、 D_4 、 D_3 的住宅建筑面积。

《地震现场工作 第 4 部分:灾害直接损失评估 (GB/T 18208.4—2011)》^[28]给出了现场调查工作中失去住所人数 T 的计算公式:

$$T = \frac{b}{a} \left(c + d + \frac{e}{2} \right) - f \quad (2)$$

式中: a 为调查得到的户均住宅建筑面积; b 为调查得到的户均人口数; c 为调查得到的住宅房屋破坏等级 D_5 的建筑面积; d 为调查得到的住宅房屋严重破坏建筑面积; e 为调查得到的住宅房屋中等破坏建筑面积; f 为调查得到的死亡人数。

不难看出,式(2)中的 $\frac{b}{a}$ 等价于式(1)中的 $\frac{1}{a}$ 。

进而可以得出,当死亡人数 f 等于破坏等级 D_5 对应的住宅房屋建筑所容纳人口数的 $1/3$ 时,式(1)、(2)的计算结果相等,但通常式(1)的计算结果小于

式(2)。

对人员伤亡估计,采用考虑房屋破坏等级,但不区分结构类型死伤率差异的方法^[29],按照不同破坏状态下人员死伤率乘以在室人数来计算:

$$N_d = \sum_D A_d RD_d \rho \quad (3)$$

$$N_1 = \sum_D A_d RI_d \rho \quad (4)$$

式中: N_d 为死亡人口数; N_1 为受伤人数,受伤需要住院救治的人数按 $N_1 \times 30\%$ 计算^[30]。 RD_d 、 RI_d 分别表示不同破坏等级下人员死、伤率; A_d 对应各破坏等级下建筑结构面积; ρ 为人员在室密度。表2所列为不同破坏等级对应死伤率取值。

表2 不同破坏等级对应死伤率取值(单位:%)^[29]

Table 2 Mortality and injury rates at different damage levels (Unit:%)^[29]

死伤率	中等破坏	严重破坏	毁坏
死亡	0.001	0.5	3
受伤	10	15	30

在建筑物破坏估计方面,首先假设具有相似结构类型或动力特性的结构易损性一致,根据结构构件或整个结构的损坏情况,建筑物损坏状态五个等级的划分点依次对应结构的4个极限状态,从 LS_1 到 LS_4 逐渐严重^[31]。式(5)表示结构在不同地震下各种极限状态的条件概率。

$$F(x, \mu, \sigma) = P(LS | x) = \Phi \frac{\ln \frac{x}{\mu}}{\sigma} \quad (5)$$

式中: Φ 为标准正态累积分布函数; x 表示地震影响输入,本文取PGA;参数 μ 和 σ 分别表示 $\ln(x)$ 的中位数和标准差。建筑物达到破坏等级的概率按式(6)计算。

$$P(D_i | x) = \begin{cases} 1 - P(LS_1 | x), & i = 1 \\ P(LS_{i-1} | x) - P(LS_i | x), & i = 2, 3, 4 \\ P(LS_4 | x), & i = 5 \end{cases} \quad (6)$$

基于上述方法,提出一组在室人员临时避难和长期避难需求期望值的计算方法:

(1) 在室人员临时避难需求人数期望值 E_{ev} 采用式(7)计算。

$$E_{ev} = R_{wi} \sum_{i=1}^5 P(D_i | PGA) A_i \rho RE_i \quad (7)$$

式中: $i=3, 4, 5$ 时, $P(D_i | PGA)$ 分别表示建筑物达到 D_3 、 D_4 、 D_5 的概率; R_{wi} 为临时避难意愿系数,按照2.3节设定的避难情景计算; A 表示建筑面积;

ρ 表示建筑的人口密度; RE_i 表示疏散率:

$$RE_i = 1 - RD_i - 0.3 \times RI_i \quad (8)$$

式中: RD_i 和 RI_i 分别表示建筑物破坏等级为 D_i 时对应的死亡率和受伤率。根据表2,本文中 RE_3 、 RE_4 、 RE_5 分别取0.97、0.95、0.87。

(2) 长期避难需求期望值 E_{ac} 按式(9)计算。

$$E_{ac} = \sum_{i=3}^5 P(D_i | PGA) T_i A_i \rho RE_i \quad (9)$$

式中: T_i 表示经验系数,本文中 T_3 、 T_4 、 T_5 分别取1、1、0.5;计算长期避难需求时 ρ 取夜晚值。

3 实验结果

3.1 数据处理结果

根据天津市地震应急基础数据库单体建筑物数据以及百度POI数据等,对基础数据进行加工,得到建筑物使用类型分布、结构类型分布、白天和夜间在室人口分布结果(图4)。根据获取的数据,试验区共有建筑18 249栋,其中,住宅类建筑物12 544栋,办公用建筑物2 516栋,其余类型建筑各数百栋。按照典型结构类型划分,砌体建筑15 472栋,一般框架建筑2 311栋,框架剪力墙结构115栋,钢结构351栋。按照本文提出的人口空间化方法,研究区白天在室人口为72.35万,夜间在室人口为84.33万,后者与统计年鉴人口中常住人口数84.89万接近。

3.2 地震避难需求

由于本文采用的方法中,单体建筑数据粒度较精细,可能涉及敏感信息,因此在呈现避难场所需求计算结果时,用天津市宝坻区中心城区同类型建筑结构的易损性模型^[32]来替代,并将基于建筑单体计算的结果按照社区单元进行汇总。

按照2.3节中设置的三种地震影响场景,计算白天、夜晚临时避难以及长期避难需求人数。三种地震影响对应的避难需求计算结果分别如图5~7所示。地震发生在白天和夜晚时:在第一种地震强度设定情景下,研究区内需要临时避难的人数分别约为31.6万和33.2万;第二种地震强度设定情景下,需要临时避难的人数分别约为62.9万和65.8万;第三种地震强度设定情景下,需要临时避难的人数分别约为80.2万和81.1万。三种地震影响下研究区内需要长期避难的总人数分别约为1.9万、19.3万、42.1万。

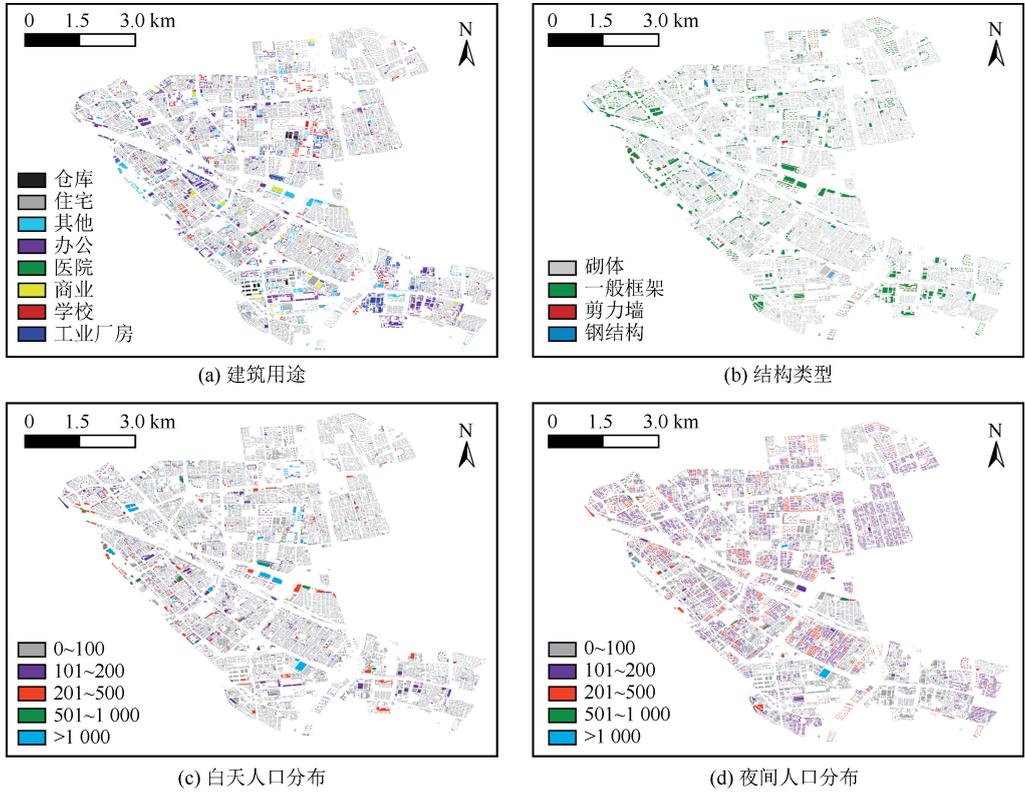


图 4 基础数据处理结果

Fig.4 Processing results of basic data

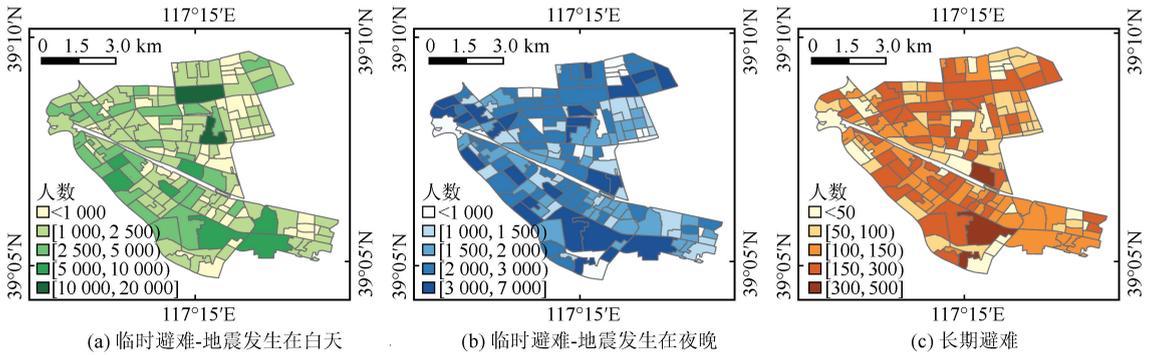


图 5 第一种地震影响对应的避难需求人数

Fig.5 Number of people in need of emergency evacuation for the first earthquake scenario

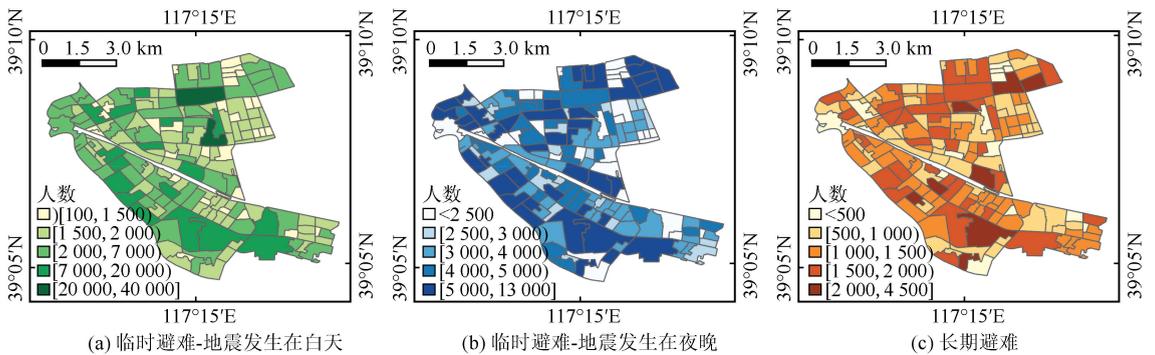


图 6 第二种地震影响对应的避难需求人数

Fig.6 Number of people in need of emergency evacuation for the second earthquake scenario

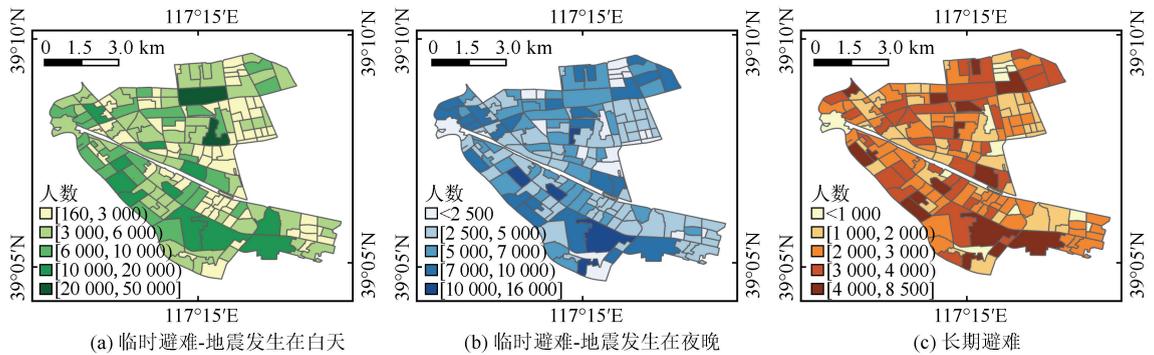


图7 第三种地震影响对应的避难需求人数

Fig.7 Number of people in need of emergency evacuation for the third earthquake scenario

3.3 避难场所供给能力分析

在临时避难阶段,考虑超限容纳以及室内避难点震后可能关闭,研究区临时避难点在三种地震影响下分别可以容纳 45.4 万人、49.94 万人和 53.28 万人;具有配套设施的中长期避难场所可容纳 3.4 万人。不难看出,对于多遇地震水平的地震影响,现有避难场所供给能力可以满足需求,但当遭受相当于设防烈度和罕遇烈度的地震影响时,研究区内现有的临时避难场所和长期避难场所均无法满足应急避难需求。

4 结论和讨论

4.1 结论

本文以天津市河东区为例,对三种不同地震影响强度下震后临时避难和长期避难的需求数量进行估计,并根据研究区现有的疏散避险供给能力给出了供需关系简要分析结果。主要结论如下:

(1) 基于多元空间数据,按照建筑物使用类型对应的在室人口密度,实现了单体建筑级别的细粒度地震承灾体数据加工;

(2) 在精细化数据加工的基础上,提出了根据单体建筑破坏估计计算长期避难需求期望的公式,一定程度上发展并改进了震后长期避难需求的估计方法;

(3) 通过引入地震避险意愿,考虑日、夜在室人口差异以及非在室人口避难需求,提出了一种临时疏散需求的推测方法。

对于本文的研究区,得到如下结论:当前的避难场所在数量上虽然有了很大提升,但遭遇 $PGA \geq 0.2g$ 的地震时,应急避难供给难以满足避难需求。这既是天津市地震灾害风险防治工作中亟需解决的问题,也是人口密集、老旧房屋抗震能力不足的同类型特大城市在遭受超过设防水准地震时可能面临的

问题。

4.2 讨论

本文的研究还有一些方面需要进一步提高,例如:

(1) 通过应用手机信令数据、人口热力数据以及手机 LBS 等空间大数据,获取更真实的人口时空分布信息;

(2) 建筑使用类型的划分还不够细,尚未考虑具有多种使用功能的建筑以及商业、居住等类型的多样化,未考虑火车站等交通枢纽;

(3) 划分的建筑结构类型有限,建筑易损性模型的代表性有待进一步验证;

(4) 未考虑室内避难场所建筑物震后剩余抗震能力以及建筑物修复周期等因素。

希望能在今后对上述问题进行深入研究。

参考文献(References)

- [1] 季婉婧,王金平,宋姗姗,等.基于 ANP-SWOT 模型的城市应急避难场所发展规划:以兰州市为例[J].地震工程学报,2023,45(2):431-440.
JI Wanqing, WANG Jinping, SONG Shanshan, et al. Development planning of urban emergency shelters based on ANP-SWOT model: a case study of Lanzhou City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 431-440.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市抗震防灾规划标准:GB 50413—2007[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for urban planning on earthquake resistance and hazardous prevention: GB 50413—2007 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.地震应急避难场所 场址及配套设施:GB 21734—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Emergency shelter for earthquake disasters: site and its facilities: GB 21734—2008 [S]. Beijing:

Standards Press of China, 2008.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 防灾避难场所设计规范: GB 51143—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of disasters mitigation emergency congregate shelter: GB 51143—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城市社区应急避难场所建设标准: 建标 180-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Engineering construction specification standard: construction standards of emergency shelters in urban communities; JB 180-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [6] 李海君, 张耀文, 杨月巧, 等. 城市应急避难场所建设与管理现状与问题分析[J]. 地震科学进展, 2022, 52(4): 168-175.
LI Haijun, ZHANG Yaowen, YANG Yueqiao, et al. Analysis on the current situation and problems of construction and management of emergency shelter in cities of China[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(4): 168-175.
- [7] 刘伟忠, 陆萌. 城市保护性发展中应急避难场所空间布局优化研究: 以扬州市东关历史文化街区为例[J]. 经营与管理, 2022(8): 151-159.
LIU Weizhong, LU Meng. Study on optimization of spatial layout of emergency shelter in urban protective development: a case study of Dongguan historical and cultural block in Yangzhou City[J]. Management and Administration, 2022(8): 151-159.
- [8] 钟光淳, 翟国方, 陈伟, 等. 基于循环疏散分配的避难场所布局优化研究: 以南京新街口为例[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 204-211.
ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang, CHEN Wei, et al. Optimization of shelter location in high-density urban area based on circular evacuation allocation: a case study in Xin Jiekou District of Nanjing, China[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 204-211.
- [9] 余思汗, 陈文凯, 张楠, 等. 基于时空大数据的城市地震应急避难场所布局研究: 以银川市西夏区为例[J]. 华北地震科学, 2022, 40(3): 8-15.
YU Sihan, CHEN Wenkai, ZHANG Nan, et al. Study on the layout of urban earthquake emergency shelters based on spatiotemporal big data: a case study of Xixia District, Yinchuan City[J]. North China Earthquake Sciences, 2022, 40(3): 8-15.
- [10] 叶翌晖, 苏晓倩. 数据驱动下山地城市避难场所空间布局供需错位研究: 以重庆市渝中区为例[J]. 城市发展研究, 2022, 29(1): 54-59, 33.
YE Kunhui, SU Xiaoqian. Dislocation of supply and demand in the spatial layout of shelters in mountainous cities driven by data: a case study of Yuzhong District, Chongqing[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(1): 54-59, 33.
- [11] 常新. 基于多目标优化的城市地震应急避难场所选址研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
CHANG Xin. Study on site selection of urban earthquake emergency shelter based on multi-objective optimization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [12] 苏浩然, 陈文凯, 王紫荆, 等. 基于改进引力模型的城市应急避难场所空间布局合理性评价[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 259-269.
SU Haoran, CHEN Wenkai, WANG Zijing, et al. Rationality evaluation of spatial layout of urban emergency shelters based on improved gravity model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 259-269.
- [13] 刘冬. 建筑物二次地震震害评估模型及应急避难场所适宜性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.
LIU Dong. The model of the secondary seismic vulnerability of the building and the evaluation method of the emergency shelter's suitability[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015.
- [14] 艾合麦提·那麦提, 曾坚, 蒋飞阳. 基于综合灾害风险的应急避难服务供需评估与规划干预: 以天津市为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 92-100.
AIHEMAITI·Namaiti, ZENG Jian, JIANG Feiyang. Supply-demand analysis and planning intervention of emergency shelter services based on comprehensive disaster risk: a case study in Tianjin[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 92-100.
- [15] 耿雅洁, 林耕, 王滢. 基于 GIS 的历史文化街区避难空间适灾规划研究: 以天津市历史文化街区为例[J]. 地震工程学报, 2021, 43(3): 623-635.
GENG Yajie, LIN Geng, WANG Ying. Planning of shelter space adapting to disasters for historical and cultural districts based on GIS: a case study of Tianjin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 623-635.
- [16] 初建宇. 防灾避难场所规划方法及其应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
CHU Jianyu. Research on the methods for planning of emergency shelter and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [17] 张佳瑜, 白林波, 杨文伟. 基于 GIS 的社区地震应急避难场所配置模型构建: 以银川市育林巷社区为例[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1650-1658.
ZHANG Jiayu, BAI Linbo, YANG Wenwei. Construction of an earthquake emergency shelter allocation model for a community based on GIS: a case study of the Yulin lane community in Yinchuan City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1650-1658.
- [18] 吕伟, 李承旭, 马亚萍. 基于 GIS 位置分配的城市应急避难场所责任区划分[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6): 1102-1109.
Lǚ Wei, LI Chengxu, MA Yaping. Division of responsibility areas for urban emergency shelters based on a GIS location-allocation analysis[J]. Journal of Tsinghua University (Sci-

- ence and Technology), 2022, 62(6): 1102-1109.
- [19] 魏本勇,董翔,谭庆全,等.基于避难场所容量限制的地震应急疏散路径分析[J].地震研究,2022,45(1):141-149.
WEI Benyong, DONG Xiang, TAN Qingquan, et al. Analysis of the earthquake emergency evacuation route based on the capacity of shelters [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(1): 141-149.
- [20] 李文倩,周到洋,郑媛媛.基于 Dijkstra 算法的地震灾害应急避难路径分析[J].地震研究,2022,45(4):653-661.
LI Wenqian, ZHOU Daoyang, ZHENG Yuanyuan. Analysis on emergency evacuation route of the earthquake disaster based on the Dijkstra algorithm [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(4): 653-661.
- [21] 陈志芬,周健,王家卓,等.应急避难场所规划中避难人口预测的简便方法:以地震灾害为例[J].城市规划,2016,40(9):105-112.
CHEN Zhifen, ZHOU Jian, WANG Jiazhao, et al. A simple way to predict the evacuation population in the emergency shelter planning, exemplified by earthquake disasters [J]. City Planning Review, 2016, 40(9): 105-112.
- [22] 马东辉,郭小东,王志涛.城市抗震防灾规划标准实施指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
MA Donghui, GUO Xiaodong, WANG Zhitao. Implementation guide to standard for urban planning on earthquake resistance and hazardous prevention [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [23] 天津市人民政府.天津市人民政府办公厅关于印发天津市应急管理“十四五”规划的通知[EB/OL].(2021-08-16)[2023-06-02]. https://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzfbgt/202108/t20210816_5534668.html.
Tianjin Municipal People's Government. Notice of the General Office of Tianjin Municipal People's Government on printing and distributing the 14th Five-Year Plan for emergency management in Tianjin [EB/OL]. (2021-08-16) [2023-06-02]. https://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzfbgt/202108/t20210816_5534668.html.
- [24] 天津市统计局.天津统计年鉴 2022[EB/OL].(2022-12-02)[2023-08-16]. <https://stats.tj.gov.cn/nianjian/2022nj/zk/indexch.htm>.
Tianjin Municipal Bureau of Statistics. Tianjin statistical year-book 2022 [EB/OL]. (2022-12-02) [2023-08-16]. <https://stats.tj.gov.cn/nianjian/2022nj/zk/indexch.htm>.
- [25] WEI B Y, NIE G Z, SU G W, et al. Risk assessment of people trapped in earthquake based on km grid: a case study of the 2014 Ludian earthquake, China [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017, 8(2): 1-17.
- [26] 谷国梁,安立强,朱宏,等.城市地震压埋人员分布评估研究:以天津市区为例[J].地震工程学报,2021,43(6):1352-1360.
GU Guoliang, AN Liqiang, ZHU Hong, et al. Assessment of seismic buried personnel in urban area: a case study of Tianjin urban area, China [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1352-1360.
- [27] 郑山锁,孙龙飞,龙立,等.城市地震灾害损失评估:理论方法、系统开发与应用[M].北京:科学出版社,2019.
ZHENG Shansuo, SUN Longfei, LONG Li, et al. Urban earthquake disaster loss assessment: theoretical method, system development and application [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.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: Standards Press of China, 2011.
- [29] 尹之潜.地震灾害损失预测研究[J].地震工程与工程振动,1991,11(4):87-96.
YIN Zhiqian. A study for predicting earthquake disaster loss [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(4): 87-96.
- [30] 方智阳,文进,王俊峰,等.地震灾害医疗应急救援推演研究[J].计算机应用研究,2011,28(1):172-174,181.
FANG Zhiyang, WEN Jin, WANG Junfeng, et al. Research on forecast of earthquake medical emergency rescue [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(1): 172-174, 181.
- [31] SHINOZUKA M, FENG M, LEE J, et al. Statistical analysis of fragility curves [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1224-1231.
- [32] 高武平,姚新强,张文朋,等.宝坻建(构)筑物抗震性能调查与评价:天津市地震灾害风险调查与评估试点工作技术报告[R].天津:天津市地震灾害防御中心,2020.
GAO Wuping, YAO Xinqiang, ZHANG Wenpeng, et al. Investigation and assessment on the seismic performance buildings (structures) of Baodi: a report on investigation and evaluation of earthquake risk of Tianjin City [R]. Tianjin: Tianjin Earthquake Disaster Risk Prevention and Control Center, 2020.

(本文编辑:赵乘程)