

基于多源数据的厦门市地震灾害风险评估*

付泽钰, 翟国方*

(南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 引入遥感影像图反演建筑易损性方法, 基于多源数据, 构建城市地震风险精准快速评估指标体系, 并以厦门市93个社区单元为例进行了实证评估, 计算厦门市不同社区的承载体易损性, 同时结合区域响应能力分析厦门市地震灾害风险的空间分布特征。结果表明, 构建的评估指标体系具有较好的可操作性。

关键词: 地震灾害; 风险评估; 多源数据; 厦门

中图分类号: P315.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0441-08

0 引言

地震突发性强、损伤性大, 是对人类社会威胁性最高的自然灾害之一(聂高众等, 2002; 李宏, 2010; 李曼等, 2015)。1991年美国率先在加州地区开展了地震风险评估([美]应用技术委员会, 1991), 随后法国和其它一些国家也在不同空间尺度上开展了地震风险评估和风险管理的研究工作(汤爱平等, 1999; Peek-Asa *et al.*, 2000)。国内学者在研究城市地震风险评估方面, 主要关注历史灾情分析(刁守中等, 2019; 刘静伟等, 2014)、生命线系统(金书森, 2014; 孙路, 2015)、人员伤亡(何萍, 俞岗, 2019; 孙桂臣, 2013)等。李波等(2019)基于层次分析法, 对西安和咸阳两座城市地震风险进行了对比分析; 何晓红等(2017)运用模糊评价法选取6个要素得出耿马县城的地震模糊风险值; 曲国胜(2004)探测了福建4个城市的活断层和场地环境, 结合震害预测信息管理与辅助决策系统判断市区内地震灾害风险区等级; 袁海红等(2016)以500 m × 500 m的格网尺度, 对比分析北京市海淀区的昼夜地震风险高值区域。

现有文献中以单个城市尺度展开的地震风险评估研究较少, 多数评估都避开了地震风险的核心评

估因子——建筑易损性, 现有的研究也多偏向于建筑群的单因子评估(马天恩, 2016), 这主要是由于现有的建筑相关基础资料少, 开展实地调研难度大, 而夜间灯光数据可以帮助解决此类问题。夜间灯光数据通过卫星在夜间检测城镇中的各类光源, 排除云雾、光溢、饱和等影响后, 能够帮助研究人口(杨洋, 梅洁, 2019)或灾害(Tuttle, 2007; 张小咏等, 2018)的空间活动特征, 在经济发展(王昀, 陶建斌, 2019)、城市化及城市群研究(刘修岩等, 2017; 路春燕等, 2019)、建设用地提取方面(苏泳娴等, 2015; 李翔等, 2019)有着广泛应用。夜间灯光数据具有大尺度、高精度、跨度长、易获取等特点, 在地震灾害风险评估中, 能够弥补以往地震灾害风险评估中的资料缺失问题, 十分适合基础调研资料不够完备的城市快速开展评估工作。因此, 本文利用夜间灯光数据的空间分析属性, 在自然灾害风险评估理论上, 建立适用性更强的地震灾害风险评估模型, 为城市的快速地震风险评估提供新思路。

1 地震灾害风险评估体系构建

1.1 地震灾害风险评估方法

“风险”最早出现在经济学领域中, 意为不确定因子使对象产生损失的概率(殷杰等,

* 收稿日期: 2020-03-19.

♣ 通讯作者: 翟国方(1964-), 教授, 博士生导师. 主要从事城市与区域规划、城市灾害风险综合评估、空间规划与城市安全等方面研究工作. E-mail: guofang_zhai@nju.edu.cn.

2009; 苏桂武, 高庆华, 2003)。韦伯字典将“风险”定义为“面临的伤害或损失的可能性”(向喜琼, 黄润秋, 2000)。“风险”概念引入防灾减灾后, 逐渐延伸到灾害风险分析、风险评估及风险管理与决策 3 个方面(吴新燕, 2006), 风险评估是其中的关键一环。传统的自然灾害风险评估理论多用致灾因子与易损性的乘积表示风险, 也有评估模型将暴露度纳入评估(Okada, 2004; Morgan, Henrion, 1990; UNDR0, 1982)。Smith (1996) 和 Crichton (1999) 又将风险同灾害发生的概率划等号, 提出风险是灾害发生概率和造成后果的乘积。世界环境与发展委员会 WCED (1987) 和联合国 UN (2002) 认为灾害风险需要考虑抗灾能力, 灾害风险等于易损性/抗灾能力(韧性)(徐继维等, 2015)。笔者认为地震风险评估综合性较强, 不应只考虑风险一方, 承灾体的响应能力也要纳入评估体系中, 因此, 在参考 WCED 和 UN 风险评估理论的基础上, 本文的地震灾害风险评估模型为:

$$V = \sum W_i Q_i \quad (1)$$

$$C = \sum W_j Q_j \quad (2)$$

$$R = V / C \quad (3)$$

式中: V 为承灾体易损性; C 为区域响应能力; R 为地震灾害风险度; i 和 j 分别代表承灾体易损性和区域响应能力下的各项指标因子; W_i 和 W_j 分别为承灾体易损性和区域响应能力各指标因子经 MAX - MIN 法标准化后的得分总和; Q_i 和 Q_j 分别代表经过德尔菲法确定的各项指标因子的权重值。

1.2 指标体系与权重

地震灾害风险涉及地质、人口、经济、工程等多个方面, 只有将这些因子综合起来, 才能够准确反映地震风险。因此, 本文从载体体易损性和区域响应能力 2 个方面, 共 12 个因子, 构建地震灾害风险评估指标体系(图 1)。一个地区的载体体易损性越大、区域响应能力越弱, 则该地区的地震风险度越高。

载体体对地震风险影响极大, 是否存在承灾体以及承灾体的承受能力决定了风险大小。承灾体由建筑、人和次生灾害共同构成, 承灾体易损性分为建筑易损性、人口密度、次生灾害危险性 3 大类。其中, 建筑易损性分析是预测城市地震灾害规模、衡量城市综合抗震能力的重要内容(何玉林等, 2002), 包括建筑年代和建筑结构 2 个因子。次生灾害危险性包括地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流)、火灾、水灾和危险品及污染源 4 个因子。一个城市的建筑易损性越高、人口密度越大、次生灾害危险性越高, 则城市的载体体易损性越高。

区域响应能力即承灾体恢复性, 是指城市从弥补损失、恢复到正常或更高水平的能力(王静爱等, 2006)。笔者从灾前、灾中、灾后分别选取了经济水平、防御能力、救援能力 3 项指标共 5 个因子。经济水平由地均国内生产总值因子反映; 防御能力是指一个地区在地震灾害发生时, 为居民提供避难场所及配套设施的能力, 主要由应急避难场所密度这一因子反应; 救援能力主要是指在地震灾害发生时的抢救效率及次生灾害的应对效率, 包含千人病床数、千人医师数和消防站责

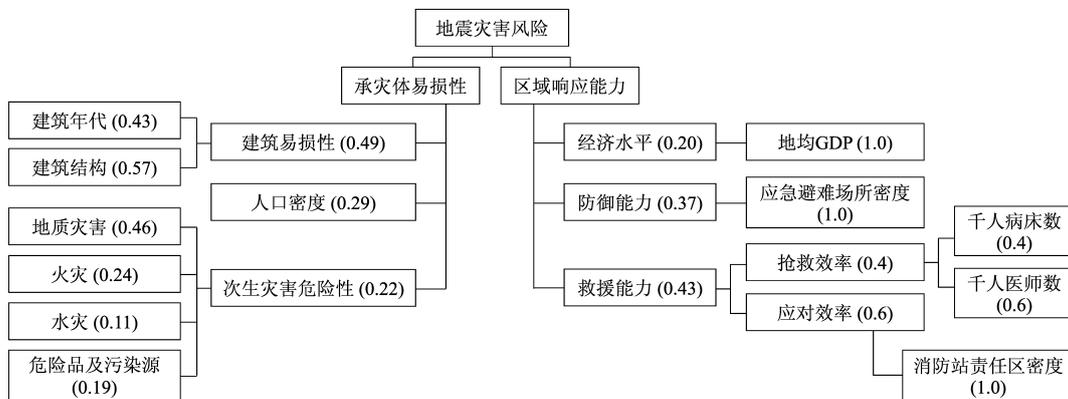


图 1 地震灾害风险评估指标体系及权重框架

Fig. 1 Earthquake disaster risk assessment index system and weight frame diagram

任区密度3个因子。一个城市的经济水平越低、防御能力越差、救援能力越弱，则城市的区域响应能力越低，灾后恢复能力越弱。

为避免主观性对结果的干扰，在德尔菲法、层次分析法、熵值法和模糊聚类分析法等测定评价指标权重方法中，选择层次分析法结合德尔菲法开展评估（王靖，张金锁，2001）。

1.3 数据来源与处理

本文核心数据为从美国国家环境信息中心（NASA）官网下载的夜间灯光数据。夜间灯光数据的预处理如下：首先利用美国国家海洋和大气管理局 NOAA 信息中心平台获取到历年的夜间灯光数据遥感图，利用 ArcGIS 统一处理数据灰度范围，将栅格调整为 1 m × 1 m 的大小，便于后续提

取建筑年代细节。其次，根据城市地理位置将灯光数据地理坐标转化为投影坐标，厦门市的投影坐标为 WGS1984 UTM ZONE 50N。根据城市行政边界进行裁剪图像后，为防止灯光溢出对城市建成区范围造成的影响，需要在灰度范围内逐步筛选出合适的灯光阈值。由于建成区历年面积的具体数据可以通过统计年鉴获取，故选择参考比较法确定灯光数据阈值，并计算建成区历年面积。阈值筛选需要先将剪裁过后的栅格数据转化成面数据以便计算面积。利用 EXCEL 确定不同年份对应灯光值，得到历年的建成区范围，根据建成区历年范围得到不同区域的建筑年代整体情况，用于建筑易损性评估。除此以外，本文选取的 12 个因子也需要做相应处理，见表 1。

表 1 主要数据来源及处理
Tab. 1 Main data sources and processing

数据类型	数据来源	数据处理	数据应用
建筑年代	从 NASA 官网下载 1994, 2000, 2006, 2012, 2018 年共 5 年的夜间灯光遥感数据	根据夜间灯光数据处理得到的建成区历年变化数据落入各个社区单元内，将栅格数据转成面数据计算各单元不同年代建成区面积，根据德尔菲法得到的权重，计算各单元得分	分析当前各单元不同年代的建筑占比情况
建筑结构	《2005—2020 年厦门市建筑抗震易损性评价研究》的抽样调查数据 ^①	根据各单元的建筑结构数据，将建筑结构分为钢筋混凝土、砖混、砖石、其他等 4 类，统计各单元不同的建筑结构比例，根据建筑结构的易损性指标权重，结合烈度差计算各单元得分	分析当前各单元的建筑结构脆弱性情况
常住人口数	规划部门提供的 2018 年各单元人口数据	计算各社区单元常住人口占各社区单元的总建成区面积的比重	精确评估各单元人口密度现状
次生灾害点	规划部门提供矢量数据及《厦门市地质条件与地震次生灾害防治规划专题》 ^②	分别统计不同社区单元内的地质灾害点（崩塌、滑坡、泥石流）、次生火灾源点、次生水灾源点、危险品及污染源的数量和影响范围	次生灾害危险性评估
GDP	2019 年厦门市经济特区统计年鉴 ^③	计算各单元 GDP 和各单元建成区面积的比值	经济能力评估
应急避难场所	规划部门提供矢量数据	除本身为应急疏散功能的场所外，筛选符合应急避难要求的规整公共空间作为备用应急避难场所，计算两者面积占各单元建成区面积的比例	防御能力评估
千人床位	2019 年厦门市经济特区统计年鉴 ^④	利用 GIS 的空间分析功能统计各单元千人床位数	反映灾时的抢救效率，评估救援能力
千人医师数	2019 年厦门市经济特区统计年鉴 ^⑤	利用 GIS 的空间分析功能统计各单元千人医师数	反映灾时的抢救效率，评估救援能力
消防站点等级及责任区数据	《2015—2020 厦门市消防专项规划》 ^⑥	根据每个行政区消防站的管辖责任区面积占该社区单元建成区面积的比重	反映灾后的应对效率，评估救援能力
社区单元边界	规划部门提供矢量数据	将地理坐标调整为投影坐标，根据单元划分在 ArcGIS 中建立属性表	明确评估单元；对夜间灯光数据进行剪裁

注：①厦门市建设与管理局等. 2005. 厦门市城区建筑抗震易损性评价研究；②厦门市建设与管理局等. 2010. 厦门市地质条件与地震次生灾害防治规划专题；③厦门市统计局. 2019. 厦门市经济特区统计年鉴；④厦门市统计局. 2019. 厦门市经济特区统计年鉴；⑤厦门市统计局. 2019. 厦门市经济特区统计年鉴；⑥厦门市规划委员会等. 2015. 2015—2020 厦门市消防专项规划。

2 厦门市地震灾害风险分析

2.1 研究区概况

厦门市由内陆和本岛两部分组成, 下辖思明、湖里、海沧、翔安、集美、同安 6 个行政区, 含 93 个社区单元, 思明区和湖里区所在岛屿为本岛。厦门市地处华南地震区的华南沿海地震带, 属于我国大陆东南沿海地震活动最强的地区 (余双林, 2011), 地震活动呈现出从沿海向内陆、自东南向西北逐渐减弱的趋势。从历史灾情来看, 厦门市共遭遇过 3 次地震烈度超过 VII 度的破坏, 本岛周围 100 km 内共记录到地震烈度 III 度以上的地震 139 次, 发生小震的频率较高。从潜在震源区分析, 厦门市周边能够对厦门市产生影响的潜在震源震级最高可以达到 8 级, 说明厦门市有遭受大震的可能性。1981 年颁布的我国第一代烈度区划图中规定, 厦门市由非抗震设防区转变为抗震设防烈度 VII 度区。2008 版《中国地震动参数区划图》, 将厦门市设计基本加速度由 0.10 g 提高至 0.15 g。但目前厦门市仍有许多地区不满足抗震要求, 存在抗震设防安全隐患。

2.2 承灾体易损性评估

本文分别从承载体易损性和区域响应能力 2 个方面, 对各项指标进行评估, 将各项评估指标都划分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级, 如图 4 ~ 7 所示, 图中色块颜色越深代表该指标等级越高。

2.2.1 建筑易损性

利用厦门市行政边界, 经过如 1.3 节介绍的方法处理得到的厦门市历年建成区变化数据 (图 2) 和夜间灯光数据 (图 3), 绘制建筑易损性指标图 (图 4)。从建筑年代分析 (图 4a) 可以看出,

本岛建筑普遍建造时间较久, 尤其是中部的湖里、后埔、筓筓、嘉莲等地; 翔安区中部、集美区南部和海沧区东部地区的建筑建造时间也相对较长, 如集美学村、大学城、吴冠、海沧新市区等; 同安区北部和翔安区东北部地区多为新建。参考云南 (杨晓鑫等, 2017) 和福建 (危福泉等, 2008) 等地的易损性权重指标, 平行类比厦门市 4 类建筑结构权重, 根据各社区单元不同建筑结构比例, 计算得到厦门市建筑结构易损性 (图 4b)。

由根据专家打分法所得的建筑年代和建筑结构权重计算建筑易损性 (图 4c) 可以看出, 本岛中部地区建筑易损性最高, 内陆地区海沧区东部和翔安区中西部多数地区建筑易损性较高, 而集美区整体和同安区大部分建筑易损性较低。

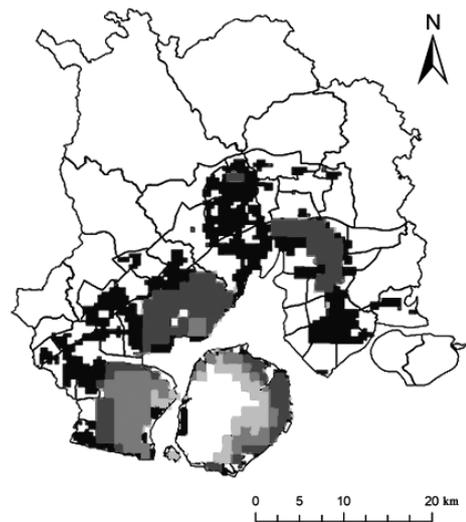


图 2 厦门市历年建成区变化示意图

(图中颜色越深, 代表年代越近)

Fig. 2 Schematic diagram of changes in built-up areas in Xiamen over the years

(the darker the color in the figure, the closer the year is)

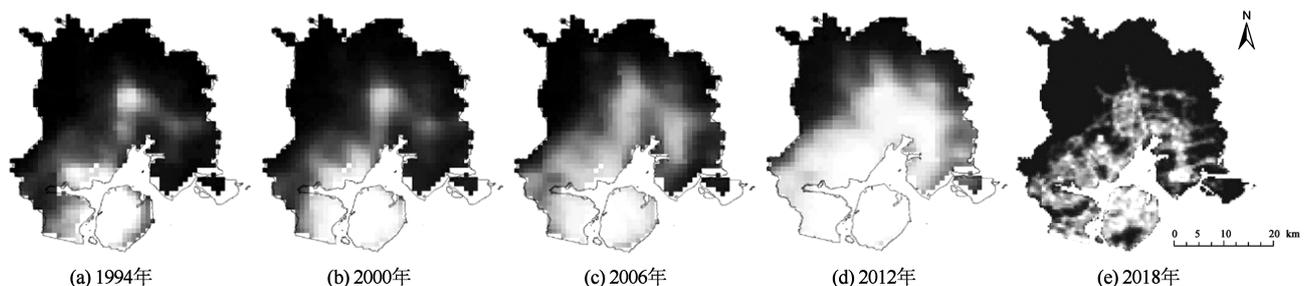


图 3 厦门市夜间灯光数据遥感图

Fig. 3 Remote sensing map of night light data of Xiamen city

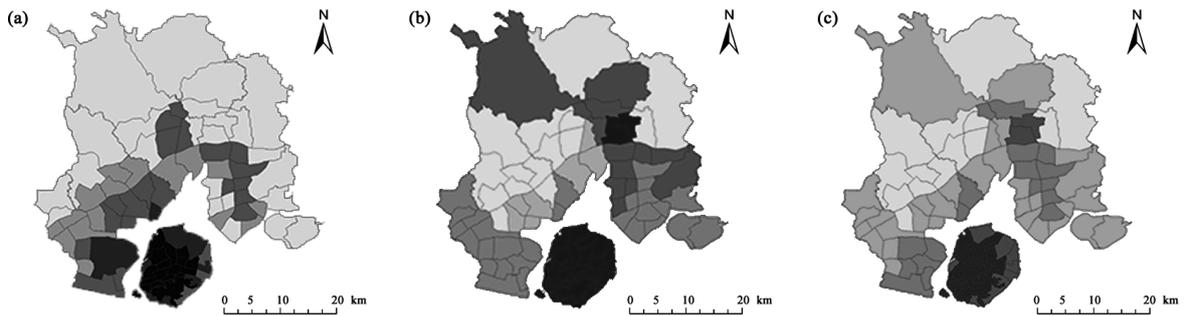


图4 厦门市建筑历经年代 (a)、建筑结构易损性指标 (b) 以及总体建筑易损性指标 (c) 评估图

Fig. 4 Evaluation chart of building through years (a), building structure vulnerability (b) and overall building vulnerability index (c) in Xiamen city

2.2.2 人口密度

图5a为厦门市人口密度指标评估图，人口密度呈现本岛最高、内陆由南向北逐渐降低的趋势。其中，湖里区人口密度最高，达到13 700人/km²，其次是思明区人口密度为11 800人/km²。从社区单元上分析，思明区的中华、湖光、筓筓东、鹭江和万寿，湖里区的后埔、县后等人口密度较高，用地功能多以居住用地、行政用地和教育科研用地为主。同安区的汀溪、竹坝和莲花镇、翔安区的大帽山和香山等海拔较高，多中低山，人口密度较低。

2.2.3 次生灾害危险性

图5b为厦门市次生灾害危险性指标评估结果，次生灾害危险性由东北向西南方向逐渐降低。内陆地区北部、东部的大部分区域都属于高危险性区域，地质灾害点较多，容易发生山体滑坡。一些中小型水库安全性级别较低。集美区沿海部分地区、翔安区西部以及海沧区南部地区化

工厂聚集，油库等地震次生火灾和爆炸的潜在危险源密度高，危险性相对较高。本岛的思明区北部和湖里区的西北部地区有部分工厂等易燃类建筑分布在老旧居民区周边，加上旧城区的建筑密度高，次生灾害危险性同样较高。

2.2.4 厦门市承灾体易损性

根据公式(1)评估厦门市整体的承灾体易损性(图5c)发现，思明区和湖里区的承灾体易损性最高，如思明区的筓筓、湖光和万寿，湖里区的湖里等地区，除了人口密集、建筑年代混杂以外，在大规模的城市建设和公路建设过程中，由于本身地势较低，崩塌滑坡等地质灾害点较多，常引起小范围的地面沉降，强震来临时砂土液化和软土下沉的风险性较高。内陆地区，同安区的莲花镇和汀溪虽然人口密度和建筑密度低，但发生滑坡及泥石流概率极高，对于山脚下的居民点危害较大。集美区、翔安区、海沧区的高易损性区主要集中在城区和工业园区，沿岸小

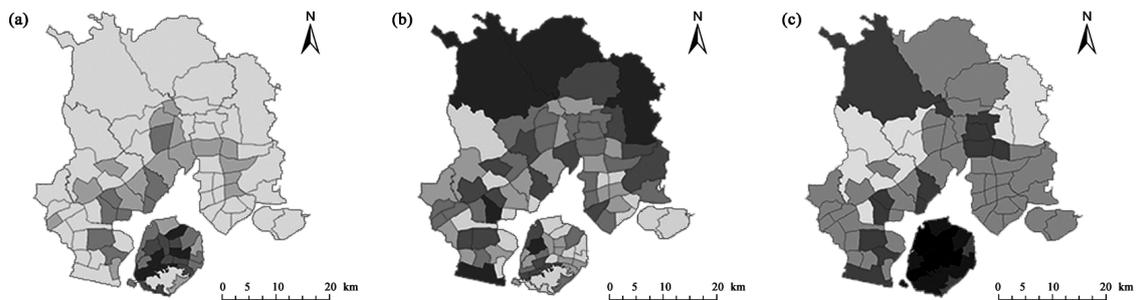


图5 厦门市人口密度 (a)、次生灾害危险性指标 (b) 以及总体承载体易损性 (c) 评估图

Fig. 5 Evaluation chart of population density (a), secondary disaster risk (b) indicators and Xiamen City overall carrier vulnerability disaster (c) in Xiamen city

型水库较多,化工厂和有毒有害仓库也较为密集,且大部分的污染源都位于人口密集区。

2.3 区域响应能力评估

2.3.1 经济水平

本文利用 2018 年厦门市行政区的地均 GDP 进行经济水平评估(图 6a),但数据未细化到社区单元。思明区地均国内生产总值最高,达到 17.26 亿元/ km^2 ;湖里区次之,为 14.03 亿元/ km^2 ;同安区最小,为 0.63 亿元/ km^2 。

2.3.2 防御能力

厦门市内陆沿岸和本岛中部地区的防御能力相对较高(图 6b)。厦门市各类公共空间有效用地面积约为 32.88 km^2 ,湖里区、集美区和海沧区的公共空间有效用地面积更为充足,公共空间密度更高,整体防御能力较强。其中,集美区主要以教育类应急避难场所为主,海沧区主要以体育场类应急避难场所为主,湖里区主要以公园类应急避难场所为主。集美区南部、同安区南部以及翔安区东部大部分区域的防御能力低。

2.3.3 救援能力

救援能力评估分为抢救效率和应对效率两方面,由图 6c 可见,思明区救援能力最强,其次是翔安区和海沧区,湖里区、同安区和集美区救援能力较弱。抢救效率由本岛东部向西逐渐增加,

岛内向岛外逐渐减弱。其中,思明区抢救效率最高,集中了全市 57% 的医疗机构床位数,每千人拥有的医疗卫生机构床位数是其他区的 2~5 倍。湖里区抢救效率最低,千人床位数仅有 1.9 张,每千人拥有执业医师数是 6 个区中最少的。应对效率方面,厦门市现有消防站 21 座。本岛消防站分布较密,岛外各区消防站数量较少,消防力量较为薄弱。

2.3.4 区域响应能力

根据公式(2)计算厦门市区域响应能力指数(图 6d)发现,本岛整体响应能力强于内陆地区,思明区区域响应能力最强,湖里区次之。本岛的经济实力发达,自改革开放以来,有计划地改造了一批批的老旧的街区,建筑建设抗震标准较高。同时政府格外注重消防装备尤其是特勤装备的建设,多个地区被列为重点消防地区,例如湖里工业区、思明北路以西的商业区、鼓浪屿等。岛外,集美区和海沧区响应能力相对较高,在人员密集处设有特勤消防站及战勤保障消防站,兼顾周边农村地区。同安区和翔安区响应能力相对较低,总常住人口占全市总人口数的 22.54%,配备的床位仅占全市床位总量的 14.4%,执业医师数仅占全市总医师数的 20.64%,远未达到 1:1.07 的配置要求,低于全市平均水平。

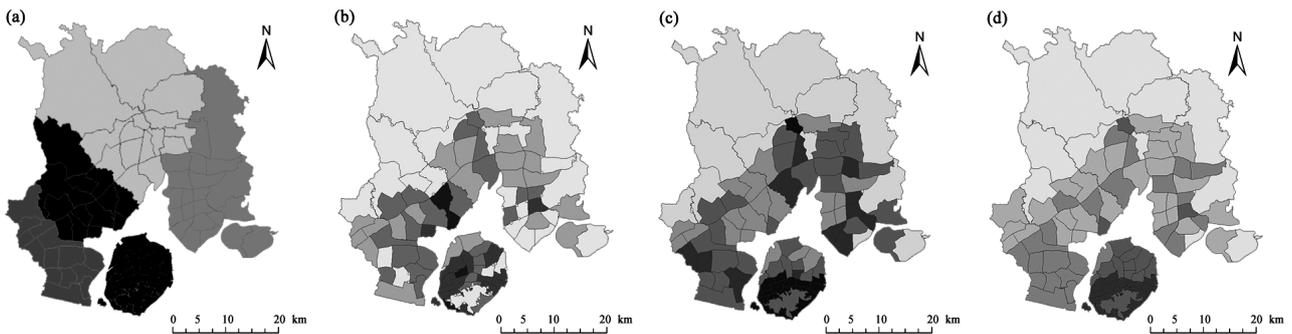


图 6 厦门市地均 GDP (a)、防御能力 (b)、救援能力 (c) 指标评估图以及总体区域响应能力评估图 (d)

Fig. 6 Indicator maps of Xiamen's average GDP (a), defense capability (b), rescue capability (c) and overall regional response capability (d)

2.4 地震灾害风险评估结果

根据公式(3)将风险度 R 值落在 93 个社区单元内,用自然断点法将地震灾害风险区域划分为低、较低、中等、较高、高等 5 个等级区(图 7),对应的风险度区间分别为 0~0.07, 0.07~

0.14, 0.14~0.31, 0.31~0.69 和 0.69~1.0。从空间分布上看,厦门市地震灾害风险度由西南向东北逐渐升高。北部的大多数地区地震灾害风险度均在 0.6 以上,尤其是同安区的莲花镇、汀溪、竹坝,翔安区的大帽山、香山和西溪等。集美区

北部和沿海部分地区,如中亚城、杏林、侨英街道等,以及湖里区的中部如湖里、殿前、东渡等地区,地震灾害风险度较高。思明区大部分区域和海沧区中部地区的地震灾害风险度相对较低,如鼓浪屿、筓筓、曾厝垵、临港新城、马銮湾等。

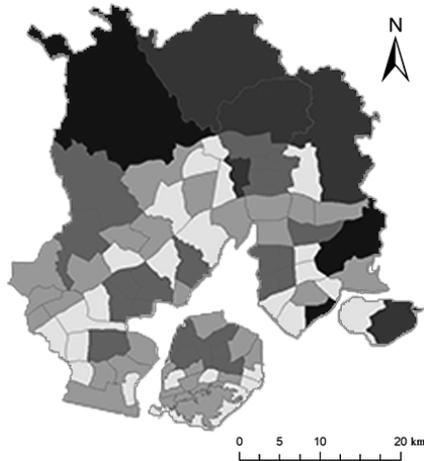


图7 厦门市地震灾害风险评估图

Fig. 7 Earthquake disaster risk assessment map in Xiamen city

3 结论

本文利用遥感影像弥补地震风险评估中建筑年代等核心数据缺失的问题,构建了一个适用于城市或更大尺度上的地震风险评估模型,并以厦门市的93个社区单元为研究对象,结合GIS分析厦门市地震灾害风险的空间特征,得到以下结论:

(1) 厦门市承灾体易损性受建筑易损性影响较大,本岛易损性明显高于内陆地区。其中,湖里区西部、思明区北部、同安区南部易损性较高,内陆地区中部和东部地区易损性较低。

(2) 厦门市区域响应能力同承载体易损性相似,本岛的响应能力高于内陆。区域响应能力较强的地区主要集中在内陆南部地区、本岛中部地区和南部沿海地区。

(3) 厦门市地震风险度整体呈现由西南向东北逐渐增大的趋势。北部和东北部地区风险性较高,思明区北部和海沧区中部为低风险区。

夜间灯光数据可以弥补地震灾害风险评估中建筑类数据缺失的问题,在时间和空间跨度上有独特的优势,有助于后续针对高风险区有目的性

地开展实地调研,减少人力和物力浪费,为地震风险的快速、精准评估提供了部分数据支撑。本文在自然风险评估理论上建立评估体系,所得地震灾害风险度是相对值,能够准确反映厦门市面对强震时的风险趋势和空间分布特点,希望能够对目前和今后厦门市的抗震防灾减灾措施在空间上给出参考。

参考文献:

- 刁守中,刁颀,李霞,等. 2019. 中国陷落地震历史资料整理与研究[J]. 国际地震动态, (6): 3-13.
- 何萍,俞岗. 2019. 基于耦合因子的广东地区地震灾害人员伤亡评估方法[J]. 地震研究, 42(2): 280-287.
- 何晓红,王培茗,钱婷婷. 2017. 基于地震风险评估的山地小城市避灾空间选址研究——以耿马县城为例[J]. 云南地理环境研究, 29(1): 42-50.
- 何玉林,黎大虎,范开红,等. 2002. 四川省房屋建筑易损性研究[J]. 中国地震, 18(1): 52-58.
- 金书森. 2014. 城市供水系统地震灾害风险及恢复力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 李波,朱四虎,路雁霞,等. 2019. 基于层次分析法的城市地震灾害风险评估研究[J]. 四川建筑科学研究, 45(2): 21-27.
- 李宏. 2010. 自然灾害的社会经济因素影响分析[J]. 中国人口资源与环境, 20(11): 136-142.
- 李曼,邹振华,史培军,等. 2015. 世界地震灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 24(5): 1-11.
- 李翔,朱江,尹向东,等. 2019. 基于珞珈一号夜间灯光数据的广州市建设用地识别[J]. 地球信息科学学报, 21(11): 1802-1810.
- 刘静伟,王振明,谢富仁,等. 2014. 大华北地区地震灾害与风险评估[J]. 地震工程学报, 36(1): 134-143.
- 刘修岩,李松林,秦蒙. 2017. 城市空间结构与地区经济效率——兼论中国城镇化发展道路的模式选择[J]. 管理世界, (1): 51-64.
- 路春燕,许燕婷,林晓晴,等. 2019. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的环渤海城市群时空演变研究[J]. 国土资源遥感, 31(4): 218-226.
- 马天恩. 2016. 中小城市建筑地震风险管理及防震减灾设计[D]. 石家庄: 河北科技大学.
- 聂高众,高建国,马宗晋,等. 2002. 中国未来10—15年地震灾害的风险评估[J]. 自然灾害学报, 11(1): 68-73.
- 曲国胜. 2004. 我国城市地震灾害风险评估及其在城市规划与管理中的应用[C]//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 中国灾害防御协会——风险分析专业委员会第一届年会论文集, 50-59.
- 苏桂武,高庆华. 2003. 自然灾害风险的分析要素[J]. 地学前缘, 10(S1): 272-279.
- 苏泳娴,王重洋,张虹鸥,等. 2015. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据提取城镇建设用地的邻域分析法[J]. 热带地理, 35(2): 193-201.

- 孙贵臣. 2013. 基于 GIS 的地震灾害人口伤亡评估系统设计与开发研究[D]. 武汉: 华中科技大学.
- 孙路. 2015. 基于典型生命线工程震害评定地震烈度的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 汤爱平, 董莹, 文爱花, 等. 1993. 国外地震风险评估和风险管理基础研究[J]. 世界地震工程, 15(3): 26-32.
- 王靖, 张金锁. 2001. 综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 30(2): 52-57.
- 王静爱, 施之海, 刘珍, 等. 2006. 中国自然灾害灾后响应能力评价与地域差异[J]. 自然灾害学报, 15(6): 23-27.
- 王昀, 陶建斌. 2019. 基于 DMSP/OLS 夜光数据的中国省域经济发展时空变化[J]. 地理空间信息, 17(11): 75-79, 11.
- 危福泉, 蔡宗文, 焦双健, 等. 2008. 基于人口统计数据区域震害快速评估方法[J]. 地震学报, 30(5): 518-524, 550.
- 吴新燕. 2006. 城市地震灾害风险分析与应急准备能力评价体系的研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 向喜琼, 黄润秋. 2000. 地质灾害风险评估与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 11(1): 38-41.
- 徐继维, 张茂省, 范文. 2015. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 30(4): 130-134.
- 杨晓鑫, 杨建荣, 车文庆, 等. 2017. 云南省不同烈度区内房屋建筑震害易损性对比研究[J]. 价值工程, 36(12): 229-232.
- 杨洋, 梅洁. 2019. 环渤海地区县域土地——人口城镇化水平时空演化与失调发展特征[J]. 经济地理, 39(7): 205-215.
- 殷杰, 尹占娥, 许世远, 等. 2009. 灾害风险理论与风险管理方法研究[J]. 灾害学, 24(2): 7-11.
- 余双琳. 2011. 基于 ARCGIS 厦门及附近区域地震活动与活动断裂关系研究[D]. 太原: 太原理工大学.
- 袁海红, 高晓路, 戚伟. 2016. 城市地震风险精细化评估——以北京海淀区为例[J]. 地震地质, 38(1): 197-210.
- 张小咏, 朱俊杰, 许建华. 2018. 基于灯光遥感图像的地震灾情信息提取[J]. 地震研究, 41(2): 311-318.
- [美]应用技术委员会. 1991. 加利福尼亚未来地震的损失估计[M]. 新玲等, 译. 北京: 地震出版社.
- Crichton D. 1999. Natural disaster Management [M]. London: Tudor Rose, 102-103.
- Morgan M G, Henrion M. 1990. Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 332.
- Okada N. 2004. Urban diagnosis and integrated disaster risk management [J]. Journal of Natural Disaster Science, 26(2): 49-54.
- Peek - Asa C, Ramirez M R, Shoaf K, et al. 2000. GIS Mapping of Earthquake - Related Deaths and Hospital Admissions from the 1994 Northridge, California, Earthquake [J]. Annals of Epidemiology, 10(1): 5-13.
- Smith K. 1996. Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster [M]. London: R outledge, 12-38.
- Tuttle B. 2007. Active Forest Fire Monitoring in Uttaranchal State, India Using Multi - temporal DMSP - OLS and MODIS Data [J]. International Journal of Sensing, 28(10): 2123-2132.
- UNDR0. 1982. Natural Disasters and Vulnerability Analysis [R]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator.
- UN. 2002. Risk awareness and assessment, in living with risk [M]. ISDR, UN, WMO and Asian Disaster Reduction Centre, Geneva, 39-78.
- WCED. 1987. Report of the world commission on environment and development our common future [R]. Oxford: Oxford University Press.

Urban Risk Assessment of Earthquake Disaster in Xiamen Based on Multi-source Data Model

FU Zeyu, ZHAI Guofang

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract

Introducing the method of remote sensing image inversion of building vulnerability, based on multi-source data, we build an accurate and rapid evaluation index system of urban earthquake risk. Taking 93 community units in Xiamen as an example, the assessment was carried out to calculate the vulnerability of carriers in different communities in Xiamen, and the spatial distribution characteristics of earthquake disaster risk in Xiamen were analyzed in conjunction with the regional response capacity. The results show that the constructed evaluation index system has good operability.

Keywords: earthquake disaster; risk assessment; multi - source data; Xiamen