

◎ 智慧城市研究

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20230518

林天喜, 聂铭希, 赖文波. 滨海城市应急避难场所配置评价与优化研究——以风暴潮灾害影响下厦门市为例[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(5): 125-132.

LIN T X, NIE M X, LAI W B. Evaluation and Optimization of Emergency Shelter Configuration in Coastal Cities: Xiamen City Under the Impact of Storm Surge Disaster[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(5): 125-132.

滨海城市应急避难场所配置评价与优化研究*

——以风暴潮灾害影响下厦门市为例

Evaluation and Optimization of Emergency Shelter Configuration in Coastal Cities: Xiamen City Under the Impact of Storm Surge Disaster

林天喜 聂铭希 赖文波 LIN Tianxi, NIE Mingxi, LAI Wenbo

摘 要: 文章以典型滨海城市厦门市为例, 进行风暴潮灾害情景下的灾害影响分析及应急避难场所分布、可达性、服务性进行评价, 为滨海城市在风暴潮灾害情景下的城市韧性建设提供一定的参考。结果表明在1.08 m及4.92 m海洋增水情况下厦门市将分别有331和632个重要城市基础设施处于灾害风险中。根据应急避难场所可达性及服务评价, 现有的82处大型应急避难场所和234处其他紧急避难场所不能有效覆盖和服务灾害风险区域, 对此提出了一些应急避难场所优化和增设的建议。

关键词: 极端气象灾害; 沿海城市; 风暴潮; 应急避难场所; 厦门

Abstract: The deterioration of the current climate situation has led to frequent occurrences of extreme weather around the world, and typhoons, storm surges and other meteorological and water hazards pose a serious security threat to China's coastal cities. Emergency shelters are an important infrastructure to ensure the safety of cities in disaster scenarios. Therefore, the article takes the typical coastal city of Xiamen as an example to analyze the disaster impacts and evaluate the distribution, accessibility, and serviceability of emergency shelters under storm surge disaster scenarios, to provide certain references for the urban resilience construction of coastal cities under storm surge disaster scenarios.

The first and second chapters of the article are a review of the research on the two keywords of storm surge disaster and emergency shelter, a logical establishment of the simulation scenario of storm surge disaster and the research on the configuration and evaluation of emergency shelters. Starting from Chapter 3 is the design and experimental calculation part of the study, Chapter 3 first assumes a storm surge sea level rise scenario and conducts a questionnaire survey to validate the necessity of the study further, and then conducts a simulation operation of sea level rise and counts the urban infrastructures that may be affected, the result showed Xiamen's 331 and 632 important urban infrastructures will be at risk of sea level rise of 1.08 m and 4.92 m, respectively. Chapter 4 is about the study of emergency shelters, firstly, the number of configurations, distribution density, and crowd carrying capacity were analyzed; then, three evacuation scenarios in disasters were assumed (Scenario A: schools, healthcare facilities, transportation stations, and commercial residences in the affected area as the starting point, and shelters as the endpoint; Scenario B: urban road intersections within the affected area as the starting point, and shelters as the endpoint; Scenario C: other shelters to the fixed emergency shelters) were analyzed for the accessibility of emergency evacuation sites, followed by an analysis of the functional mix of the city which the Shannon Diversity Index reflected, and the service area of the evacuation site. Chapter 5 provides a descriptive evaluation of the distribution and configuration of emergency shelters in Xiamen, and makes recommendations for upgrading the number and increasing the variety of configurations.

Finally, Chapter 6 summarizes the full study and draws the following conclusions. (1) Coastal cities like Xiamen face risks from sea-level rise, including seawater inundation, urban flooding, and storm surges. Although early warnings for such disasters are possibly provided alerts by emergency and meteorological departments, because people may struggle to find refuge due to inadequate shelter distribution or evacuation guidance in disasters involving heavy rainfall and storm surges. (2) Stormwater impact mainly lies in the complex bay area, and the simulation of the potential risk areas in Xiamen City, including the northern part of Xiamen Island, Haicang District and Xiang'an District south of the coastal areas, Haicang North, Jimei South, Tong'an and Xiang'an junction and other inlets or bay terrain. Xiamen City, more than III emergency shelter crowd carrying capacity does not fully match the population distribution, the southern Jimei District and Xiang'an District,

中图分类号 TU 984.11*6

文献标识码 B

文章编号 2095-6304 (2023) 05-18-08

*2021年广州市基础与应用基础研究项目(B3210180)

作者简介

林天喜: 厦门大学创意与创新学院, 副教授

聂铭希: 青岛大学高级科学与工程研究生院, 博士研究生

赖文波 (通讯作者): 华南理工大学建筑学院, 副教授, 123245112@qq.com

lack central Xiamen Island, Xiamen is more perfect but the carrying capacity of the centre compared to the population distribution in the west. As the “new development pole” of Xiamen, Xiang'an District is weak in terms of emergency shelters, the future development should increase the construction layout of transportation, health care, and living supply facilities. transportation, medical and living supply facilities should be increased in the urban construction process. (3) The coverage of evacuation sites in the off-island area is insufficient, which may be because the road network is not as rich and complete as the on-island area and the distribution of evacuation sites is relatively small. After adding hospitals and schools as evacuation sites, the coverage of the service area is significantly improved, and the hospital and school complexes can effectively increase the carrying capacity of evacuation sites, especially for disaster scenarios such as typhoons, storm surges, and torrential rains, in which outdoor evacuation is not possible. (4) The number of facilities that can provide emergency rescue, external transportation and living services in the service area of emergency shelters outside of Xiamen Island, except for the southern part of Jimei District, is on the low side, and the degree of mixing of urban functions is low, so that there may be hidden dangers in guaranteeing rescue, material and transportation services in times of disaster. A greater mix of urban functions would help to improve this and increase people's sense of security.

Keywords: Extreme Weather Hazards; Coastal Cities; Storm Surges; Emergency Shelters; Xiamen

0 引言

2021年,第26届联合国气候变化大会发布全球气候状况报告显示2013—2021年间由于全球变暖平均海平面已上升4.4 mm^[1]。气候形势的恶化导致全球极端气象频发,2021年河南发生持续性特大暴雨灾害,导致292人遇难,47人失踪;水灾导致地铁淹没、交通停运、停工停产、房屋倒塌,人民生命财产安全受到重大威胁。当下随城市建设进程,我国城市面临的威胁和不确定性不断增加;而城市规模越大,面临的不确定性就越多,如极端气候变化和城市高集中性等,应对这种不确定性增加的情况及抵御未来灾害影响的方法就是加强完善韧性城市建设^[2]。城市韧性的提升能加强城市系统消化吸收外界干扰的能力,是城市健康发展的保障之一^[3]。对此我国政府先后提出海绵城市、气候适应性城市等政策以提高气候变化下的城市韧性,对城市应急避难场所的规划设计研究是增加城市韧性、抵御灾害的有效途径^[4]。

改革开放后厦门设立经济特区,城市建设得到大力的发展,聚集了大量的人口、财富^[5]。习近平总书记在党的十九大报告中明确要求“坚持海陆统筹,加快建设海洋强国”,再次吹响了加强滨海地区建设的号角。与此同时滨海地区极端气象灾害的频发对社会经济的发展和人民生命财产安全的威胁也愈发严重^[6-7]。近年我国台风灾害及其产生的风暴潮灾害频次均有上升^[8]。我国滨海城市受台风、风暴潮等气象灾害影响大,台风所致风暴潮灾害会引起突发性海水上涨,对滨海城市造成严重的安全威胁。2020年各类海洋灾害中,造成直接经济损失最严重的是风暴潮灾害,占总直接经济损失的97%(中国海洋灾害公报)。

文章根据台风风暴潮可能带来的海水淹没问题及应急避难场所分布格局等因素对厦门市城市应急避难场所进行配置评价与优化研究。通过灾害情景模拟,滨海城市居民调研,避难场所分布、配置、可达性分析,进行现状评述、提出优化策略。通过此类研究为未来厦门等滨海城市规划提供参考,提高应急避难配置与城市发展拟合度;增加城市韧性,降低灾害风险;促进城市可持续发展,提升城市宜居性。进而补充完善滨海地区安全规划和理论体系,提升人地安全性。

1 风暴潮灾害与应急避难场所研究现状

作为全球气象灾害最严重的国家之一,我国气象灾害种类繁多、分布广、发生率高、灾损率重^[9]。目前我国沿海地区出现的主要气象

灾害包括台风、风暴潮、暴雨以及次生灾害,如洪涝、强潮汐、海水入侵等,风暴潮作为沿海地区的重点气象灾害问题受到许多专家学者的关注^[9-11]。国内有关风暴潮灾害的研究包括频次分析、灾害风险评价、灾害防御与适应性等研究^[12-15];频次分析包括风暴潮历史及未来发生频次的分析预测,总结风暴潮灾害发生的环境、气象特征,杨桂山根据中国沿海风暴潮历史变化和未来趋势总结了我国沿海近50年风暴潮发生频次及增水量变化,提出了海平面上升对主要三角洲地区风暴潮高潮位可能产生的影响^[16];灾害风险评价、灾害防御与适应性的研究主要通过灾害风险区域的人口、经济、城市规划、用地类型等进行灾害敏感性、暴露性及韧性评价,提出灾害情景下的优化策略。灾害风险评价及安全评价主要通过GIS、MATLAB、GDAL等对滨海城市的地理、人口、气象数据进行指标分析^[17-19]。这些研究以灾害发生频次和威胁为基础开展城市安全与灾害情景的关联机制研究,是滨海城市在极端气象灾害下安全和灾害风险的评估研究的理论和数据基础。

我国城市应急避难场所研究始与21世纪,学界关注到应急避难场所的规划布局在灾害情景下的重要作用,关系到应急避难场所本体区位的安全性以及能够保障服务的范围^[20-21]。目前研究主要分为三类:应急避难场所建设规划研究^[21],内部空间设计^[21-24],城市尺度的空间布局研究^[25-26];应急避难场所建设规划研究主要考虑到场所的选址合理性、承载能力等,场所内部空间的设计包含场所功能空间、应急设施等。城市尺度上的空间布局涵盖灾害情景下应急避难场所的服务范围、灾时可达性等。与之关联的研究目的在于对灾害情景下应急避难场所提供的生命保障能力及服务范围。采用的方法研究方法包括使用AHP层次分析法对应急避难场所选址指标进行加权,通过加权Voronoi图法形成应急避难场所服务范围进行规划设计,通过2sFCA两步移动搜寻法等方法分析可达性,使用工具包括ArcGIS、Pathfinder、Anylogic等^[27]。

应急避难场所配置应进行多灾种的风险分析,对疏散人群数量及分布进行评估,确定灾害情景下人均有效避难面积、潜在避难用地资源调查及有效性评价、避难场所服务范围等。当前对风暴潮影响的研究主要集中在自然地理学、水利工程学等领域,而规划设计领域对应急避难场所的研究主要考虑服务设施、承载效能等方面,对不同灾种情景下的影响研究较薄弱,因此文章基于风暴潮中海平面增水及城市内涝等水淹没情景对应急避难场所配置和灾害影响进行补充研究。

2 研究方法

2.1 研究对象与数据

文章研究对象为典型滨海城市厦门, 厦门主要极端气象灾害为台风风暴潮灾害。研究中涉及到的数据包括: 中国行政区划数据(中科院资源环境科学与数据中心)、30 m分辨率数字高程数据(DEM)(地理空间数据云)、厦门道路路网数据、厦门市应急避难场所数据(福建省地震局/高德POI数据)、南安普顿大学世界人口数据(World Pop)影像以及厦门市城市POI数据(高德POI数据)。

2.2 研究方法

2.2.1 灾害情景模拟及影响

现有研究表明台风风暴潮主要危害在于由大风、强降水等导致的海平面短时间内高度上升^[18]。而风暴潮与天文大潮、持续海平面上升、台风、强降雨等结合将产生风暴洪水情景^[28]。部分滨海城市防潮防浪工程能应对普通浪潮和较小程度海水上涨的问题, 但对极端海水上涨情况无法有效抵抗。因此可能存在由海水上涨致产生城市洪涝的风险, 且由于台风影响, 风暴洪水常伴随强降雨, 城市内部排水系统薄弱处同样易现积水内涝情况。文章根据已有对历史风暴潮数值分析和未来风暴潮预测研究数据, 明确厦门市可能面临的风暴潮情景, 通过厦门市数字高程信息(DEM)模拟风暴潮灾害情景下海水上涨淹没区域以及影响的城市重要基础设施(图1)。

文章采用ArcGIS进行海平面上升模拟。实际过程中台风风暴潮以及暴雨所致的水位上涨和内涝导致的淹没情况较为复杂, 设计到防洪设施、城市排水、水运动过程等因素。格什(Gesch)研究表明高程数据对于评估海平面上升(SLR)和沿海洪水暴露至关重要, 可用于预测沿海水位上升的潜在影响, 但高程数据的累积垂直不确定性在很大程度上控制了SLR的最小增量和评估中可有效使用的最小规划范围^[29]。而这种空间分析方法下数字高程模型数据固有的误差会影响到淹没图, 莱昂(Leon)等提出当下的海平面上升模拟都是基于浴缸模拟开展的, 即等高线区分绘制出滨海且低于特定海拔高度的区域作为淹没区域^[30]。因此文章数字高程模型数据首先通过插值优化, 并根据推算的未来海平面值进行海平面上升模拟, 估算在不同海平面状态下厦门市陆地受影响范围, 并基于结果统计受影响重要城市设施。

2.2.2 应急避难场所配置研究

应急避难场所配置研究主要包括分布情况和可达性, 关系到灾害情景下其对疏散人群及区域的覆盖程度, 且分布格局于城市人口密度及城市总体空间格局的均衡关系应为场所分布科学性的评价指标之一。核密度分析可用于计算地图中数据栅格周边点要素分布密度,

概念上将围绕每个点要素构建一个平滑曲面, 点要素所在位置数值最高, 距离越远数值越小。因此可基于应急避难场所进行核密度分析(Kernel Density), 分析厦门市应急避难场所的分布情况, 并与人口分布进行对比。

可达性衡量的是人群从一点到达目的地点的便捷程度, 其空间阻力指标一般使用距离、时间, 可用于评价交通网络结构合理性和完善程度^[30]。城市可达性分析的方法包括: 缓冲分析法、邻近距离法、网络分析法等。缓冲分析法及邻近距离法计算基于点周边直线距离搜索半径中可达目的点数量, 未加入路径因素, 因此文章选用网络分析法, 使用ArcGIS10.8根据厦门市路网构建网络数据集, 通过OD成本矩阵(Origin-Destination)分析从受灾区域城市设施以及道路路口至应急避难场所的可达性。可达性分析的公式表达为:

$$D_{ij} = \frac{d_{ij}}{S} \quad (1)$$

D 为从起点*i*到目的点*j*的可达性, d 为从起点*i*到目的点*j*的实际道路长度, S 为标准人步行疏散速度。可建立不同疏散时间可达的应急避难场所OD成本矩阵。现有研究中行人疏散理想步行平均速度约1.34 m/s, 而城市应急避难场所建设中Ⅲ类及Ⅳ类避难场所的通行时间应为10—15 min, 因此通过属性计算筛选OD成本矩阵中通行长度低于1 206 m的路径组合, 进行线密度分析可视化受影响城市设施、风险区路口至避难场所的可达性。

2.2.3 应急避难场所配置服务评价

现有研究中有将服务面积比用于评价应急避难场所空间配置的合理性。因此文章将服务面积覆盖率作为应急避难场所设置合理性的评价指标之一。根据应急避难场所服务区覆盖情况与城市功能混合度情况体现应急避难场所在灾害情景下提供医疗保障、生活物资保障及对外交通的能力。

3 风暴增水情景模拟分析

3.1 情景设置

3.1.1 海平面上升及风暴增水

厦门是我国滨海城市, 平均每年直接或间接影响到厦门的热带气旋有3.6个, 部分年份会有台风正面袭击厦门。其主要灾害为台风及暴雨、风暴潮等次生灾害。其中风暴潮灾害会形成海水暴涨, 淹没陆地并城市低洼地区涝灾。有研究表明福建中南部沿海台风和风暴潮季节变化显著, 每年7—9月是风暴潮高发月份^[13]。综上, 厦门市的主要极端气象灾害为台风风暴潮, 主要安全威胁为海水淹没风险。

3.1.2 风暴潮影响下应急避难研究情景必要性

为补充滨海城市居民对风暴潮等台风次生灾害的主观感受和实际体验, 文章从5个角度开展了问卷调研, 包括居住城市是否滨海、职业、外出及通勤频率、受风暴潮等台风次生灾害的影响、应急避难情景的经历。问卷回收203份, 厦门等滨海城市受访者115位; 滨海城市受访者中学生占79.13%, 上班族占18.26%; 日常通勤次数每周1~3次者占40%, 每周4~6次者占35.65%, 每周7~9次者占16.52%, 每周10次以上者占7.83%; 115位滨海城市受访者中81.74%在日常通勤中经历过风暴

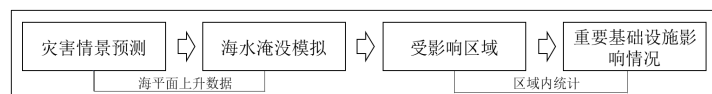


图1 风暴潮灾害影响分析框架

Fig.1 storm surge hazard impact analysis framework

潮、暴雨影响下城市内涝等问题；53.91%经历过在所述情景下前往应急避难场所进行避险（此类情况包括气象预警部门已经提醒有相关气象灾害预警，但受访者未注意到，导致临时需要避险）；36.52%表示在居住或工作的场所附近如遭遇台风风暴潮、洪涝时无法迅速找到应急避难场所。而在应急避难场所环境及服务设置方面90.43%受访者认为避难地点附近的医疗、超市、交通站点等城市服务设施和救援设施重要；93.04%认为生活或工作区域附近的公园、学校、医院增设为应急避难点并配置相应城市服务和救援设施，会使他们在此类灾害影响中更加从容且感觉安全。

基于以上问卷可见，以学生、上班族为主的滨海城市通勤频率较高人群在日常通勤过程中大部分遭遇过风暴潮、暴雨、内涝等台风次生灾害影响，其中一半以上在气象部门风暴潮或台风预警情况下依然存在需要临时避难的需求，部分人群生活工作区域附近无法迅速寻找到避难地点（或有可能因为应急避难公众教育不完全导致对周边应急避难场所不了解）。同时几乎所有受访者均认为医疗、超市、交通等城市生命线基础设施对应急避难情景十分重要。

3.2 灾害模拟

3.2.1 不同海平面增水的淹没范围

采用ArcGIS10.8—空间分析工具—克里金法对将30 m分辨率全国DEM高程数据进行重采样，通过BILINEAR双线性插值将DEM数据像元精度提高至5 m。后导入厦门市及周边海域卫星图（谷歌地图来源），依行政区边界在厦门市周边及内海区域随机采样识别栅格属性25次，估算平均海平面高度为10.6 m，作为海平面上升模拟的基础海平面值。增水数据参考现有研究，袁方超等对福建中南部风暴潮特征研究中厦门站观测的年最大增水平均值为1.08 m。极端海平面高度由平均海平面与风暴潮增水、天文潮潮位和海平面上升高度组成^[32-33]，汪杨骏等以厦门周边海域作为模拟案例进行极端海平面高度预测研究，结论表示2050年厦门遭受百年一遇的极端海平面高度的期望为4.92 m，95%的置信区间为4.40~5.63 m^[34]。因此文章根据现有研究风暴潮增水以及未来极端海平面高度情况（平均海平面+增水高度）对11.68 m、15 m、15.52 m、16.23 m进行海水淹没区域模拟估算。通过ArcGIS-提取分析，自数字高程模型栅格中按条件提取数值低于11.68、15、15.52、16.23的区域作为风险区域（图2）。如图示，厦门市受风暴潮海平面上升潜在淹没风险区域主要为厦门本岛北部以及同安区东南部，翔安区西部、南部，海沧区北部、南部和集美区南部，发生区域主要为复杂海湾地形。

3.2.2 受影响设施

根据城市设施POI数据与淹没风险区域的叠加，通过分析工具—统计工具—交集制表统计海平面上升1.08 m和4.92 m情况下学校、商务住宅、医疗设施以及交通站点受影响情况。结果显示在1.08 m海平面上升时厦门市共有52所学校、75处商务住宅、146个交通站点及58处医疗设施存在被淹没风险，分别占比此类设施的12.71%、8.46%、16.38%、6.59%；在4.92 m海平面上升时有92所学校、148处商务住宅、263个交通站点以及120处医疗设施具有被淹没风险，分别占比22.49%、16.70%、29.51%、13.65%（表1）。

4 应急避难场所分析及评价

4.1 空间分布

根据福建省地震局网站数据以及高德POI数据中紧急避难点进行统计，厦门市固定应急避难场（Ⅲ级及以上）所共82处，其他避难场所等共234处（表2）。

4.1.1 密度分析

批量检索谷歌地球、高德地图应急避难场所点经纬度信息，经空间坐标系校正，导入ArcGIS进行坐标投影变换。通过空间分析工具—密度分析—核密度分析工具，按照1 206 m（参考前文，以标准人出行15 min可行动距离）为搜索半径，分析厦门市固定应急避难场所及其他避难场所核密度分布（图3）。

图3显示厦门市应急避难场所主要集中在厦门岛内，陆地区域仅有集美区沿海密度较高，而前文海水淹没模拟影响区域中有较高风险的海沧南北部、翔安南部等地分布较少，同安南部西柯镇地区几乎没有分布。综上，厦门应急避难场所规模和数量的分布一定程度上受不

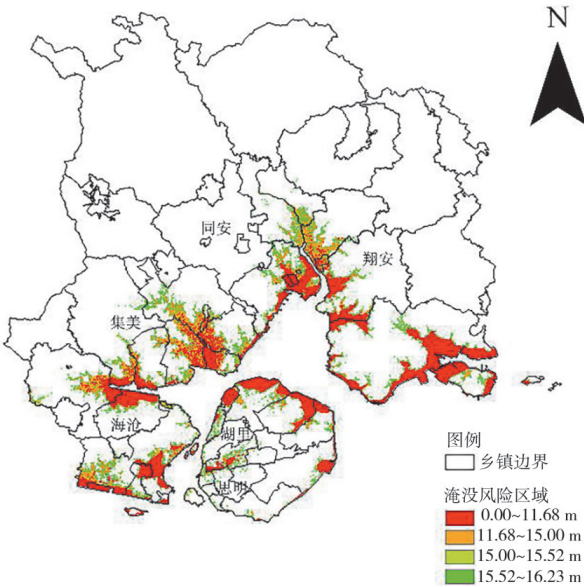


图2 海平面上升至11.68 m、15 m、15.52 m、16.23 m海水淹没风险区域
Fig.2 sea level rise to 11.68 m, 15 m, 15.52 m, and 16.23 m seawater inundation risk areas

表1 海平面上升影响重要城市设施

Tab.1 sea level rise affecting vital urban facilities

上升 水位/m	学校/所	占比/%	商务 住宅/处	占比/%	交通 站点/个	占比/%	医疗 设施/处	占比/%
1.08	52	12.71	75	8.46	146	16.38	58	6.59
4.92	92	22.49	148	16.70	263	29.51	120	13.65

表2 厦门市应急避难场所数量

Tab.2 number of emergency shelters in Xiamen

区域	类型	数量	类型	数量
思明区	固定	21	其他	84
湖里区	固定	16	其他	55
集美区	固定	13	其他	26
同安区	固定	11	其他	2
翔安区	固定	11	其他	61
海沧区	固定	10	其他	6

同区域之间发展程度的左右,但与城市建设情况具有不一致性,在部分城市建设程度高的地方显著高密度分布,而在开发程度低,地形较为复杂区域则分布零散、核密度低;。

4.1.2 场所与人口分布之间的关系

避难场所与人口分布之间的均衡关系会显著影响其工作效能。将应急避难场所的人口承载数量作为密度分析的参考数值载入进行核密度分析可生成应急避难场所人群承载热力图(图4)。人口分布情况的可视化过程为在ArcGIS中加载世界人口数据网站的世界人口栅格数据,并通过厦门市统计局七普公告人口数据进行校正,再通过栅格计算重新赋予到100 m×100 m栅格像元上并进行重分类(图5)。

二图对比可见人口密度较高的集美中南部、海沧北部应急避难场所承载力较弱,岛内承载力中心偏西。同时在承载力的覆盖程度上并未很好的覆盖人口密度较高的区域,在承载力分布上与场所分布类似出现不平衡情况。

4.2 可达性

应急避难场所可达性为人群在户外或城市基础设施周边时,受

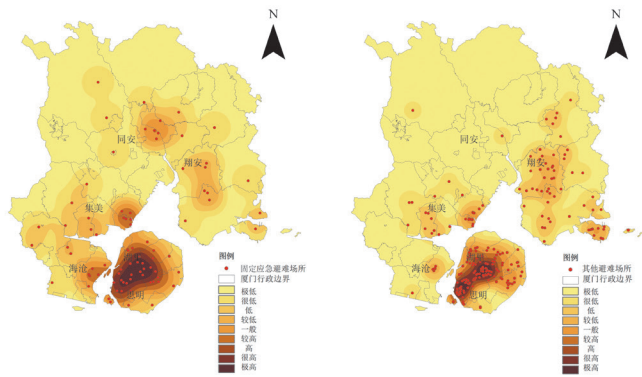


图3 厦门市固定应急避难场所(左)及其他避难场所(右)核密度图
Fig.3 kernel density map of fixed emergency shelters (left) and other shelters (right) in Xiamen

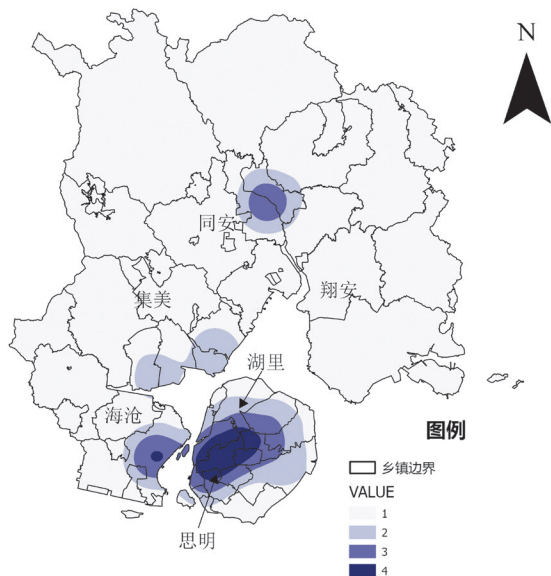


图4 厦门市应急避难场所人群承载热力图
Fig.4 heat map of emergency evacuation sites population carrying capacity of Xiamen

灾害影响需向应急避难场所转移的过程可达性。文章采用ArcGIS-网络分析工具进行可达性分析,通过城市路网构建网络数据集,取海平面上升4.92 m时受影响区域统计其中学校、医疗设施、交通站点以及商业住宅作为情景A的起点,将区域范围内的城市道路路口作为情景B的起点(Origin Point),将固定应急避难场所、其他避难场所作为终点(Destination),进行OD成本矩阵分析;输出疏散路径后进行出行成本筛选。另提出情景C,即极端灾害影响下避难人群需由其他避难场所向固定应急避难场所转移,分别将两类场所作为起终点进行分析,并进行路径线密度分析作为可达性可视化。

4.2.1 情景A可达性

情景A场景描述为在受灾害影响下人群需由城市设施向避难场所转移,通行时间设定为15 min,距离约1 206 m,其可达性分析结果如图6。翔安、同安沿海及海湾部分,海沧、集美中间的浦边地区短时避难可达性不佳。

4.2.2 情景B可达性

情景B场景描述为在受灾害影响下人群需由受影响区域的户外道路向避难场所转移,通行时间设定为15 min,距离约1 206 m,其可达性分析结果如图7。同安南部海湾西柯镇地区、翔安南部沿海、集美东北部短时避难可达性不佳。

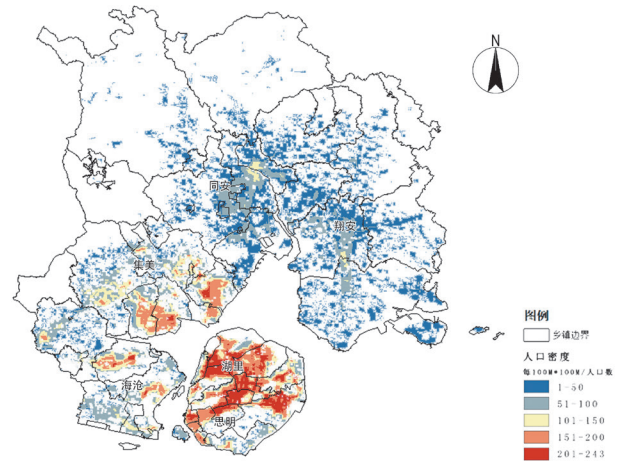


图5 厦门市人口分布密度图
Fig.5 population density map of Xiamen

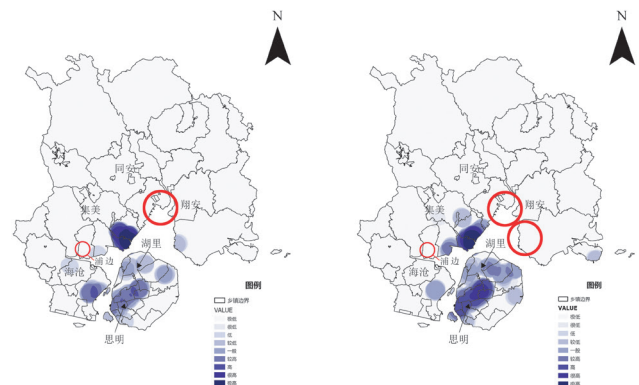


图6 受影响城市基础设施至厦门市固定应急避难场所(左)及其他避难场所(右)可达性分析图
Fig.6 accessibility analysis of affected urban infrastructure to fixed emergency shelters (left) and other shelters (right) in Xiamen

4.2.3 情景C可达性

极端灾害情景下, 在风暴潮以及暴雨、洪涝等其他衍生灾害的复合影响下, 避难人群需从其他避难点向Ⅲ级以上应急避难场所集中转移。此情景下构建其他避难场所向固定应急避难场所的OD矩阵, 并按城市道路车型速度30 km/h计算通行成本筛选后进行线密度可视化(图8)。图示中厦门市其他避难场所至固定应急避难场所可达性较好, 路径线密度覆盖率较高。

综合评价各情景下厦门市在风暴潮灾害及海平面上升导致海水淹没灾害中疏散可达性较高的区域主要在厦门岛内, 而沿海陆地区域的可达性较弱。沿海陆地区域具有淹没风险的区域将会是灾时应急疏散的薄弱环节。

4.3 功能混合度与服务区

4.3.1 场所服务区分析

参考《福建省城市应急避难场所规划设计标准》及《城市抗震防灾规划标准》中应急避难场所服务半径控制要求, 对其他避难场所要求服务半径为0.5 km, 固定避难场所服务范围为2 km进行服务区设定并带路网进行模拟^[35-36]。如图9示, 在带入路网模拟的服务区分析中, 结果呈现应急避难服务分布不平衡, 厦门岛内覆盖率较好达到一半以上, 但沿海区域覆盖率极低; 其他避难场所覆盖率较差。

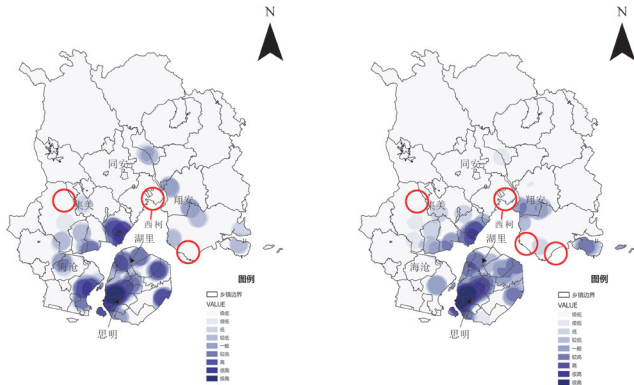


图7 受影响道路路口为起点的厦门市固定应急避难场所(左)及其他避难场所(右)可达性分析图
Fig.7 accessibility analysis of fixed emergency shelters (left) and other shelters (right) in Xiamen starting from the affected road junction

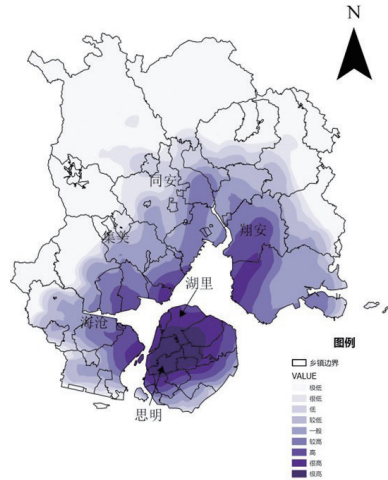


图8 厦门市其他避难场所至固定应急避难场所可达性分析图
Fig.8 accessibility analysis of other places of refuge to fixed emergency shelters in Xiamen

4.3.2 城市功能混合度分析

灾害情景下应急避难场所周边的医疗、生活物资、交通畅通等城市生命线组成部分较为重要, 前期问卷调查结果也显示避难点附近的医疗、超市、交通站点等城市设施重要。由此文章选取基于POI数据的城市功能混合度分析代表不同区域城市设施分布及完备情况, 具体通过香农多样性指数(SHDI)体现。通过ArcGIS平台在厦门市生成100列×100行的渔网图, 通过邻近分析搜索每渔网图像元附近500 m内的城市设施并生成近邻表。通过Excel函数计算每个匹配像元中的SHDI指数, 链接至ArcGIS中进行可视化(图10)。如图示, 厦门市集美区在基于医疗、交通、超市数据的城市功能混合度方面较高, 其次是湖里、思明区; 翔安、海沧区在此方面解释程度较低。

5 应急避难场所配置优化策略

5.1 完善应急避难场所分布

目前厦门市应急避难场所分布与风暴潮情景下水淹没风险区的空间匹配不均衡, 应急避难场所主要设置在厦门岛内及集美区, 但在同安南部、翔安南部及海沧北部风险区的分布较少; 场所人群承载力分布上集美、翔安有所欠缺。从可达性上看, 由受影响的城市设施向避难场所通行可达性较好的区域包括厦门岛内及集美区, 但岛内可达性分布中心

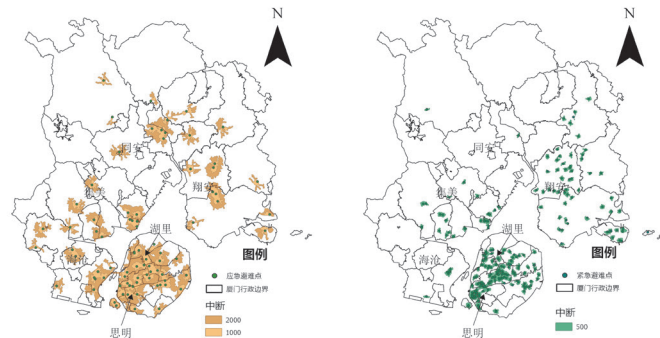


图9 固定应急避难场所2 km服务区(左)及其他避难场所0.5 km服务区(右)
Fig.9 2 km service area for fixed emergency shelters (left) and 0.5 km service area for other shelters (right)

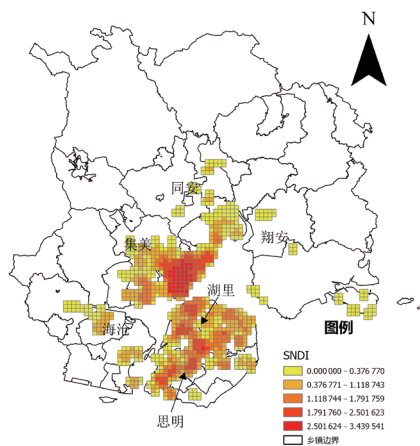


图10 厦门市应急避难场景下城市功能混合度分析(医疗、交通、超市)
Fig.10 analysis of the mix of urban functions in emergency evacuation scenarios in Xiamen (medical, transport, supermarket)

偏西;从受影响区域户外道路向避难场所通行可达性较好的区域与情景A类似,但翔安区和同安区略有提升;极端灾害下需进行紧急避难场所向固定避难场所疏散情景下主要人口分布区域均有较好可达性。总体来看,在分布特点上,厦门市应急避难场所的分布与城市发展方向一致,但在规划进程上并没有和城市发展统一,同时在人口密度相对较低的地方,应急避难场所的设置应适当增加,整体调整应急避难场所的分布密度,使之与逐渐向沿海陆地方向延伸的城市发展相匹配(表3)。

5.2 增加应急避难场所数量

根据现有城市POI数据进行筛选,将综合性医院及急救中心性质的医疗设施点和中等学校、高等学校的学校作为固定应急避难场所(服务半径2 km)进行网络分析得出增加避难场所后的固定应急避难场所服务区(图11),并将全部医疗设施及学校增设为其他避难场所(服务半径0.5 km)进行服务区分析得出其他紧急避难场所服务区(图11)。如图示,将医疗设施及学校增设为其他避难场所,将中高等院校和综合医院、急救中心增设为固定应急避难场所可有效提高应急避难场所的服务面积比与应急避难场所服务覆盖率。使厦门岛内近乎实现全覆盖,在沿海区域海岸带形成其他避难场所及固定应急避难场所服务区链,将风暴潮情境下海水淹没灾害风险区涵盖其中。

5.3 城市服务设施的优化

在城市功能混合度分析中体现了厦门市医疗设施、超市及交通站点设施的分布情况。现有情况与应急避难场所分布类似,厦门岛内

表3 厦门市应急避难场所分布情况及配置策略简述表

Tab.3 summary table of the distribution of emergency shelters and configuration strategies in Xiamen

区域	应急避难场所分布情况	策略
思明区	数量较充足;可达性较好但可达性分布中心偏西	优化东西部区域场所分布均衡性
湖里区	数量较充足;可达性较好但可达性分布中心偏西	优化东西部区域场所分布均衡性
集美区	数量较充足;可达性较好但西部较弱;场所人群承载力欠缺	增加西部浦边地区的场所数量;适当增加和改造场所以提高人群承载力
同安区	南部区域数量较少	增加南部区域场所数量
翔安区	南部区域数量较少;场所人群承载力欠缺	增加南部区域场所数量;适当增加和改造场所以提高人群承载力
海沧区	北部区域数量较少	增加北部区域场所数量

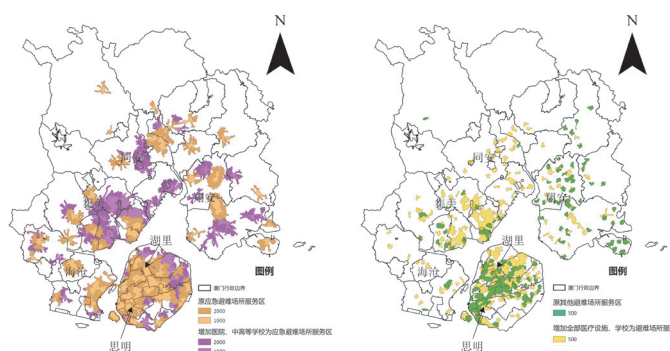


图11 增设固定应急避难场所2 km服务区(左)及增设其他避难场所0.5 km服务区(右)

Fig.11 2 km service area for additional fixed emergency shelters (left) and 0.5 km service area for additional other shelters (right)

城市功能混合度较高,在灾时能够有效的支撑医疗救援、生活物资及对外交通的需求。但海沧、翔安、同安沿海陆地区域及相对更为内陆的区域则分布较少,例如翔安主要的应急避难场所分布区域所形成的服务区内城市功能混合度低,会对灾时生活物资的支持以及外来物资和救援的周转接受造成不便,并影响灾时受影响人群的安全感、安心感。因此对应急避难场所及潜在避难场所周边,应增加大型超市、医疗设施以及交通站点的建设,并调整重要城市基础设施和城市生命线的分布均衡度以增加灾害发生时的城市韧性。

6 结论与不足

6.1 主要结论

全球气候的变化和沿海地区极端气象灾害的影响愈发严重,文章探讨了以厦门为例的滨海城市在风暴潮等灾害下的灾害适应性和韧性问题。从厦门市风暴潮灾害情景下海平面上升对城市区域安全的影响进行了分析,并针对厦门应急避难场所的分布、可达性、服务区及城市功能混合度进行了分析和述评。目前厦门市城市建设已从岛内向沿海陆地区域转移,集美区应急避难场所及相关设施较为完善,但其他海岸带区域还需加强建设,以提高极端气象灾害下的应急避难服务水平。文章期望能为滨海城市极端气象灾害情景下的适灾性建设和应急避难场所规划提供参考。

综合文章研究与分析可得出以下结论。

第一,未来厦门等沿海城市在海平面上升及台风风暴潮等问题的影响下,具有海水倒灌、淹没以及城市洪涝的淹没风险。风暴潮灾害的发生虽然具有预警可能性,并且当前我国应急避难部门和气象部门会针对此类气象灾害进行预警,但实际灾害过程中依然存在由暴雨、风暴潮引发水淹没情景而受影响区域人群需要就近避难或向应急避难场所疏散的情况。疏散人群可能存在无法迅速找到避难场所的问题,一是由于避难场所分布情况所致,二是或由于避难引导标识系统建设不够完善。

第二,风暴增水影响范围主要在于复杂海湾区域,而模拟所得厦门市潜在风险区域包括厦门岛北部、海沧区和翔安区南部的沿海区域及海沧北部、集美南部、同安与翔安交界处等入海口或海湾地形。而厦门市Ⅲ级以上应急避难场所人群承载力不完全吻合人口分布情况,集美区南部以及翔安区中部缺少,厦门岛内较为完善但承载力中心相较人口分布偏西。作为厦门市当下“新发展极”的翔安区,在风暴潮影响下的应急避难场所可达性方面薄弱,应急避难场所及紧急避难场所服务区零散,未形成避难网络;城市功能混合度同样极低,未来发展城市建设过程中应增加交通、医疗以及生活供应设施的建设布局。

第三,通过厦门城市路网进行避难场所服务区计算后,当下岛外区域的避难场所覆盖率不足,其原因可能在于道路网落不如岛内丰富完善,且避难场所分布偏少。增加医院、学校为避难场所后其服务区覆盖显著提高,并且医院学校的建筑群可以有效提升避难场所的承载力,尤其针对台风风暴潮、暴雨等户外无法进行安全避难的灾害情景。

第四,滨海城市的城市功能混合度加强可保障风暴潮灾害影响中的城市生命线供给,提高潜在受灾人群的安全感。厦门岛外除集美区

南部以外的应急避难场所服务区内能够提供灾时应急救援、对外交通和生活服务的设施数量偏少、城市功能混合度低,灾时救援、物资和交通服务保障可能存在隐患。

6.2 不足与展望

文章由于研究区域尺度较大,依然采取的是传统的浴缸模型模拟海平面上升影响,在场所可达性方面未推演淹没风险区域内道路的具体断点情况。另在增设应急避难场所策略由于数据来源为城市POI因此对避难场所筛选的精度有所影响,未实际调研每个增设场所的具体避难效能。文章基于海平面上升情况、应急避难场所、城市路网、城市基础服务设施四种信息构建了针对风暴潮灾害影响(主要是海水淹没问题)的应急避难场所定量分析和定性评述,但对于风暴潮增水情况下的沿海防洪设施因素没有纳入考虑范围。期望后期研究能够更加深入的探索沿海区域风暴潮影响机制与应急规划、城市韧性的关系。并加强对风暴潮灾害影响下人群应急避难行为的研究与疏散避难引导系统的完善。

参考文献:

- [1] WMO. State of the Global Climate 2021: WMO Provisional Report[R]. 2021.
- [2] 仇保兴,姚永玲,刘治彦,等. 构建面向未来的韧性城市[J]. 区域经济评论, 2020(6): 1-11.
- [3] 白立敏,修春亮,冯兴华,等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 77-87.
- [4] 赖文波,谢瑞英,黄永. 城市公园绿地应急避难场所规划利用综述[J]. 中国应急管理科学, 2022(1): 44-55.
- [5] 王振川. 中国改革开放新时期年鉴1985年[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2015: 128.
- [6] 张振克,丁海燕. 近十年来中国大陆沿海地区重大海洋灾害分析[J]. 海洋地质动态, 2004(7): 25-27.
- [7] 国家海洋局. 中国海洋灾害与减灾[J]. 中国减灾, 2000, 10(4): 5.
- [8] 吴吉东,傅宇,张洁,等. 1949—2013年中国气象灾害灾情变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1520-1530.
- [9] 孙健,裴顺强,乔亚茹. 加快完善我国气象灾害防御体系刻不容缓[C]. 第27届中国气象学会年会, 中国北京: 2010.
- [10] 李杨帆,朱晓东,邹欣庆. 我国海岸带环境灾害的基本特征与减灾对策[J]. 灾害学, 2005(1): 66-67.
- [11] 于川江,罗祖德. 我国沿海地区灾害特征与减灾对策[J]. 科学, 2006, 58(4): 47-50.
- [12] 王江波,张凌云,苟爱萍. 超强台风背景下滨海城市海岸线安全防护策略的国际经验与启示[J]. 防灾科技学院学报, 2020, 22(3): 60-68.
- [13] 彭超. 海口市与文昌市热带风暴潮灾害影响区划分析[J]. 台湾农业探索, 2019(1): 56-61.
- [14] 袁方超,吴向荣,卢君峰. 福建中南部沿海风暴潮统计特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 68-75.
- [15] 郑开雄. 应对气候变化的滨海城市空间结构适应模式研究——以厦门为例[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [16] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报, 2000(3): 23-30.
- [17] 张威涛,运迎霞. 滨海城市风暴潮避难所分布的灾害风险适应性研究——以天津滨海新区为例[J]. 规划师, 2020, 36(2): 27-33.
- [18] 肖启华,张建新,黄冬梅. 城市风暴潮灾害快速评估的模糊决策方法——以厦门市为例[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 77-80.
- [19] 李阔,李国胜. 风暴潮风险研究进展[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 104-111.
- [20] 宋城城,李梦雅,王军,等. 基于复合情景的上海台风风暴潮灾害危险性模拟及其空间应对[J]. 地理科学进展, 2014, 33(12): 1692-1703.
- [21] 杨文斌,韩世文,张敬军,等. 地震应急避难场所的规划建设与城市防灾[J]. 自然灾害学报, 2004(1): 126-131.
- [22] 徐敬海,秦骏. 面向城市规划的避难疏散场所选址模型[J]. 测绘通报, 2018(12): 36-40.
- [23] 吉慧,陈柳,王宇飞. 平灾结合视角下的广州南沙体育公园规划设计研究[J]. 城市发展研究, 2018, 25(8): 23-27.
- [24] 赖文波,高金华. 大学校园应急避难场所设计策略研究[J]. 新建筑, 2021(1): 53-57.
- [25] 刘少丽,陆玉麒,顾小平,等. 城市应急避难场所空间布局合理性研究[J]. 城市发展研究, 2012, 19(3): 113-117.
- [26] 周晓猛,刘茂,王阳. 紧急避难场所优化布局理论研究[J]. 安全与环境学报, 2006(S1): 118-121.
- [27] 戴晴,高振记,杨鹤平. 城市应急避难场所研究方法综述[J]. 科技资讯, 2010(6): 250-251.
- [28] 宋城城. 风暴洪水复合情景模拟方法构建与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [29] GESCH D B. Best Practices for Elevation-Based Assessments of Sea-Level Rise and Coastal Flooding Exposure[J]. Frontiers in Earth Science, 2018(6): 230.
- [30] LEON J X, HEUVELINK G B, PHINN S R. Incorporating DEM Uncertainty in Coastal Inundation Mapping[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e108727.
- [31] 朱玮,简单,张乔扬. 融合出行质量的骑行可达性——指标构建及在上海市公园中的应用[J]. 规划师, 2018, 34(2): 108-113.
- [32] YIN J, YIN Z, HU X, *et al.* Multiple Scenario Analyses Forecasting the Confounding Impacts of Sea Level Rise and Tides from Storm Induced Coastal Flooding in the City of Shanghai, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(2): 407-414.
- [33] 陈奇放,翟国方,施益军. 韧性城市视角下海平面上升对沿海城市的影响及对策研究——以厦门市为例[J]. 现代城市研究, 2020(2): 106-116.
- [34] 汪杨骏,侯太平,张初,等. 基于动态极值理论和Copula函数的极端海平面高度预测建模[J]. 海洋工程, 2016, 34(4): 62-70.
- [35] 福建省住房和城乡建设厅. 福建省城市应急避难场所规划设计标准 DBJ/T13-273-2017[S]. 厦门: 鹭江出版社, 2017.
- [36] 中华人民共和国建设部. 城市抗震防灾规划标准 GB50413-2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

图表来源:

图1-11: 作者绘制

表1-3: 作者绘制

收稿日期: 2022-08-23
(编辑: 李方)