

基于AHP-EWM多目标决策模型的 北京应急避难场所承载力评价

尤笛^{1,2}, 王世新^{1,2}, 王福涛^{1,2}, 闫珺¹, 王振庆^{1,2}, 刘文亮¹,
朱金峰¹, 王丽涛^{1,2}, 侯艳芳¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 应急避难场所可以在灾害发生后供居民紧急避难、救援和疏散, 是国家公共安全和应急管理的重要组成部分。评价应急避难场所的承载力, 对于推进韧性城市建设、促进城市可持续发展具有重要意义。北京市是世界上仅有的3个位于设防烈度为Ⅷ度区域的首都之一, 也是中国最早建设应急避难场所的城市, 在应急避难方面具有典型性和代表性。本文采用遥感影像、POI等多源数据, 构建基于AHP-EWM多目标决策的城市应急避难场所承载力评价模型, 并以人口分布比较集中的北京市五环内为例进行分析评价和情景模拟。首先, 从安全性、可达性、有效性和保障性4个方面构建应急避难场所承载力评价指标体系; 其次, 采用层次分析法(AHP)、熵权法(EWM)主客观赋权, 并用最大离差平方和理论求解权重系数; 然后, 构建多目标决策评价模型, 对应急避难场所承载力进行评价; 最后, 考虑灾害发生后的复杂性, 对不同避难情景下的承载力进行模拟分析。结果表明, 北京五环内的应急避难场所承载力整体较好, 但二—三环承载力为优的区域占地面积为0, 存在环域间的不均衡性。本研究可为城市应急避难场所承载力评价提供定性和定量的依据, 也可为应急避难场所的规划布局和资源高效配置提供决策支持。

关键词: 遥感, 应急避难场所, 层析分析法(AHP), 熵权法(EWM), 组合赋权, 承载力评价, 多目标决策法, 情景模拟, 北京

中图分类号: P2

引用格式: 尤笛, 王世新, 王福涛, 闫珺, 王振庆, 刘文亮, 朱金峰, 王丽涛, 侯艳芳. 2024. 基于AHP-EWM多目标决策模型的北京应急避难场所承载力评价. 遥感学报, 28(9): 2276–2292

You D, Wang S X, Wang F T, Yan J, Wang Z Q, Liu W L, Zhu J F, Wang L T and Hou Y F. 2024. Carrying capacity evaluation of Beijing emergency shelters based on AHP-EWM multi-objective decision modeling. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2276–2292 [DOI: 10.11834/jrs.20244025]

1 引言

应急避难场所是灾害来临时, 供居民紧急避难、救援、疏散的重要场所, 一般由公园、绿地、广场、体育场等改建而成(Yin等, 2023)。随着城市人口变迁, 人口在数量和空间分布上存在差异, 现有的应急避难场所能否满足避难需求, 是防灾减灾整体防御的重要问题(Beatini等, 2023)。通过对应急避难场所承载力进行评价, 可及时发现应急避难场所承载力薄弱之处, 以便相关部门

对其进行合理规划与布局, 提高城市应急避难场所的救援能力、服务效能和建设水平, 促进韧性城市的建设和可持续发展(Bera等, 2023)。

承载力源于工程地质领域, 用以表示地基对建筑物的承重能力, 现在常用来描述对发展的限制程度(王淦, 2022)。Holling最早将其引入生态学领域, 提出生态承载力概念(孔子强, 2022), 随后又被应用于资源环境、社会经济等领域。对于避难场所来说, 应急避难场所承载力是指某个地区突发灾害时, 应急避难所在一定的服务范

收稿日期: 2024-01-18; 预印本: 2024-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2021YFB3901201, 2022YFC3006402, 2022YFC3006403)

第一作者简介: 尤笛, 研究方向为灾害与环境遥感。E-mail: youdi@aircas.ac.cn

通信作者简介: 王福涛, 研究方向为重大灾害应急监测、风险评估与海洋可持续发展。E-mail: wangft@aircas.ac.cn

围内, 确保空间资源达到最优配置和支撑人类各种社会经济活动的条件下, 可供居民疏散、避难、救援的综合避难能力(张海波等, 2019)。

现有对应急避难场所的评价, 主要聚焦于评价应急避难场所选址是否合适、空间布局是否合理以及避难场所的适宜性等, 而对应急避难场所承载力的评价鲜有研究。目前, 通过建立应急避难场所评价指标体系, 构建数学评价模型, 利用 GIS 将结果可视化展示, 是常采用的一种应急避难场所评价方法。在应急避难场所评价指标的选择上, 主要以安全性、可达性和有效性准则为依据, 并在此基础上扩展其他评价指标。蒋柱等(2020)采用指标统计法选取服务面积比、服务人口比、服务重叠率、人均可达面积、人口配置缺口, 对应急避难场所进行服务能力评价。Si 等(2023)考虑避难场所的可达性和距离, 选择人口密度、交通条件、高程作为评价指标, 用于评价应急避难场所的选址和空间布局。Şenik 和 Uzun(2021)根据规模、可达性、位置, 构建了包括距医疗机构距离、距道路距离、坡度、城市开放绿地、距洪水距离、距当前建筑距离、距加油站距离 8 个指标的选址适宜性标准, 对土耳其 Düzce 市 56 个应急避难场所进行评估。Ommi 和 Janalipour(2022)除了考虑坡度、高程、应急避难场所面积、距河流距离等环境因素外, 还考虑了发生重大余震或其他大地震的可能性, 对伊朗 Sarpol-e Zahab 应急避难场所选址进行评估。张培(2016)选取应急避难场所出入口数量、服务范围、应急广播等评价指标, 从社区尺度对应急避难场所的选址进行优化。以上研究主要以应急避难场所的选址、空间布局、适宜性等为研究目标选取的评价指标, 不能够针对性地反映应急避难场所承载力情况。有效避难面积是应急避难场所评价的关键指标(You 等, 2023), 目前主要通过官方公布的统计数据来获取。随着遥感影像空间分辨率的提高以及人工智能技术的飞速发展, 利用遥感技术可快速、准确、智能提取相关要素信息, 更好地提高应急避难场所有效避难面积的监测效率。

在应急避难场所评价方法上, 现有研究主要通过构建数学模型和利用 GIS 空间分析技术, 对其进行评价和分析。常用的评价方法有层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process)、模糊综合评价法、灰色关联分析法 GRA (Grey Relation Analysis)、

逼近理想解排序法 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)、多目标决策法、两步移动搜索法等。李文倩等(2023)采用 AHP 法对评价指标赋权、德尔菲法邀请专家对评价指标分级打分, 综合指数法对公园型应急避难场所的安全性进行评价。张海波等(2019)采用 AHP 构建承载力评价模型, 结合人口、避难设施等并利用 GIS 空间分析功能, 对南京市中长期应急避难场所承载力进行评价。Alawi 等(2023)利用 GIS 技术, 将 AHP 和加权叠加分析相结合, 评估重庆市 3 个不同地区的应急避难场所对地震的有效响应。Yao 等(2021)基于 GIS 技术, 采用 TOPSIS 模型对维多利亚州应急避难场所的安全性、可达性、可用性进行评估。苏建锋和张庆斌(2021)采用熵值法确定权重, 联合灰色关联分析法和 GIS 技术, 对天津中心城区的应急避难场所适宜性进行评价。以上研究在构建应急避难场所评价模型过程中, 评价指标的权重主要采用 AHP 方法进行赋权或者主客观各占 50% 的比例进行简单赋权, 导致结果过于主观、合理性有待提高。此外, 实际灾害发生具有复杂性, 往往会有不同应急避难情景发生, 而现有研究大部分只针对单一情景进行评价, 考虑不够全面。

针对上述问题, 在充分借鉴前人研究经验的基础上, 本文拟从安全性、可达性、有效性和保障性 4 个维度更加全面地构建针对应急避难场所承载力评价的指标体系, 并采用多源数据对各指标进行定性和定量处理。以北京市人口较集中的五环内为例, 构建多目标决策评价模型, 采用最大离差平方和理论对组合赋权(主观+客观)的权重系数进行求解, 进一步优化应急避难场所承载力评价模型; 同时, 考虑灾时的复杂情况, 对疏散人口进行多情景模拟分析, 以期为城市应急和规划提供有效的决策支持。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

北京市是中国的首都, 在国际国内具有较高的影响力。北京市占地面积 16.4 km², 2020 年的常住人口 2189.3 万, 是典型的超大型城市。北京市在历史上发生过 >4 级的地震近 200 次, 甚至还遭受过 8 级地震(You 等, 2022)。为应对突发灾害,

中国于2003年建立第一个应急避难场所,即北京元大都城垣遗址公园,可见北京在应急避难方面具有典型性和代表性。根据北京市应急管理局2022年公布的应急避难场所名单,截至2022年,北京一共建设应急避难场所175所,分布在北京市各个辖区。考虑北京五环内建筑密度大、人口集中,发生灾害带来的人员、经济损失远大于其他地区,并且应急避难场所主要分布于五环内区域(周爱华等,2021)。所以本文选择北京五环内的室外应急避难场所为研究对象,具体包括公园型、绿地型、体育场型3种类型,共计59所。北京五环内应急避难场所分布如图1所示。

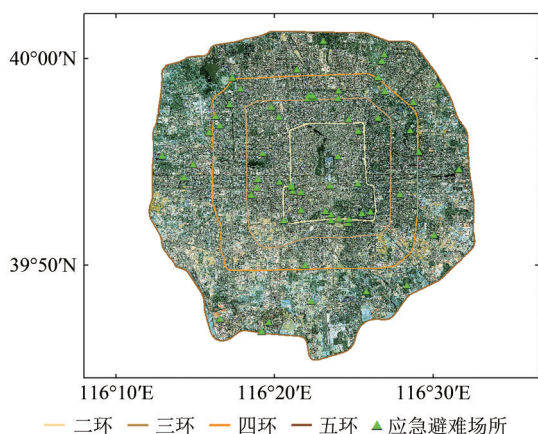


图1 北京五环内应急避难场所空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of emergency shelters within the Fifth Ring Road of Beijing

2.2 数据及预处理

本文研究数据主要来源于规划文本、遥感影像、电子地图等。其中,应急避难场所边界范围是根据北京市应急管理局2022年公布的应急避难场所名单,通过网络抽取、配准、遥感解译获得。根据北京市POI数据,可获取医疗机构、公安局、消防站的点位,以及应急避难场所出入口信息。基于Google影像(空间分辨率0.23 m),通过人机交互解译,生成应急避难场所内的建筑物数据集,同时利用开源数据集WHU航空建筑物数据集(空间分辨率0.3 m),提取应急避难场所内不能避难的建筑物。对GF-2遥感影像进行辐射定标、大气校正、融合等预处理,使得影像空间分辨率达1 m,利于应急避难场所内水体的提取(崔宾阁等,2023)。基于融合后GF-2影像提取获得北京市绿地数据集,该数据集将绿地分为常绿、落叶和草地3种,为便

于提取中下层植物密集区,只保留绿地数据集中的常绿和落叶用于后续的分析评价。DEM影像源于ALOS PALSAR产品,空间分辨率12.5 m,可用于提取应急避难场所内的坡度,同时结合北京市断裂带分布,可分析其地势条件。人口数据来源于第七次全国人口普查公报,为便于承载力分析,人口数据通过ArcGIS平台矢量化处理。北京市路网数据来源于2022电子地图数据,包括城市快速路、高速、国道、九级路、省道、一级道路、县道、人行道路、其他道路等。本文研究具体使用的数据名称、来源以及用途如表1所示。

3 研究方法

本文利用遥感、GIS及统计学方法,提出应急避难场所承载力评价模型,主要包括多源数据获取及预处理、评价指标体系构建和量化、指标权重计算、评价分值计算以及情景模拟几个部分,技术路线如图2所示。

3.1 应急避难场所承载力评价指标体系构建

3.1.1 指标体系内涵

应急避难场所承载力是受多种指标综合影响的复杂系统。为了构建全面、科学、合理的承载力评价指标体系,在筛选指标时候需要遵循综合性和系统性、普遍性和典型性、科学性和可行性原则(张培,2016;张海波等,2019)。根据《北京中心城地震及应急避难场所(室外)规划纲要》、《地震应急避难场所场地及配套设施》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2008)、应急避难场所现有研究,本文从安全性、可达性、有效性、保障性4个方面选取评价指标,并邀请灾害评价方面相关专家根据重要性、相关性等筛选出14个指标,构成应急避难场所承载力评价指标体系(图3)。

(1) 安全性。安全性指的是应急避难场所本身和周边环境是否安全(Wang, 2019),包括距断裂带距离、周围是否有高层建筑、坡度。1) 距断裂带距离。应急避难场所应远离断裂带,距离断裂带越远越好,以免灾害发生时其功能受到影响或引发次生灾害。根据北京市地震断裂带分布,采用缓冲区分析法,对断裂带分别缓冲1000 m、2000 m、3000 m、>3000 m。2) 周围是否有高层建筑。高层建筑容易引起高空坠落物,所以,应

急避难场所周围楼层越矮, 安全性越高。本文根据电子地图, 搜索应急避难场所 200 m 范围内是否有高层建筑。3) 坡度。如果应急避难场所坡度过陡, 不仅容易发生滑坡等次生灾害, 还不利于搭

建帐篷临时安置。所以坡度越小, 安全性越高。本文根据 DEM 影像数据, 利用 ArcGIS 表面分析功能生成坡度, 并将坡度按照 0—3°、3°—5°、5°—7°、>7° 分成 4 个等级。

表 1 本文研究所需数据
Table 1 Data required for the study in this paper

序号	名称	来源	用途
1	应急避难场所信息	北京市应急管理局官网 (http://yjglj.beijing.gov.cn)	应急避难场所名单、应急避难场所级别
2	北京市行政区划	国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn/ngcc/)	北京五环范围
3	POI	在线地图服务平台高德地图 (http://lbs.amap.com/)	医疗机构、公安局、消防站
4	GF-2 遥感影像	中国资源卫星中心数据查询平台 (https://data.cresda.cn/#/2dMap)	提取水体
5	DEM 影像	ALOS PALSAR 产品 (https://search.asf.alaska.edu/)	提取坡度
6	Google 影像	谷歌地图 (https://www.91weitu.com/)	提取建筑物
7	WHU 建筑物数据集	http://study.rsgis.whu.edu.cn/pages/download/	提取建筑物
8	人口	第七次全国人口普查公报 (https://www.stats.gov.cn/sj/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/)	计算人均可达有效避难面积、计算人口配置缺口
9	北京市路网	2022 电子地图数据	北京五环环路、计算道路密度
10	断裂带	国家地震科学数据中心 (https://data.earthquake.cn/)	计算距断裂带距离
11	GF-2 北京市绿地数据集	Xu 等(2020), 徐知宇等(2021)	提取中下层植物密集区

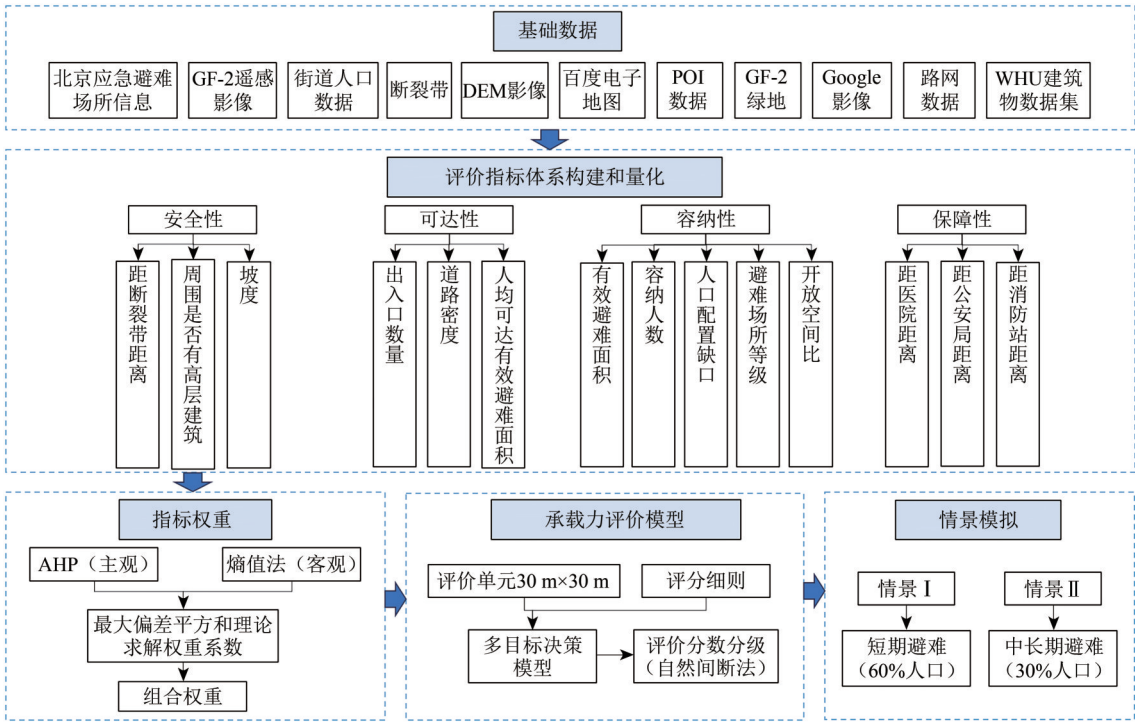


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

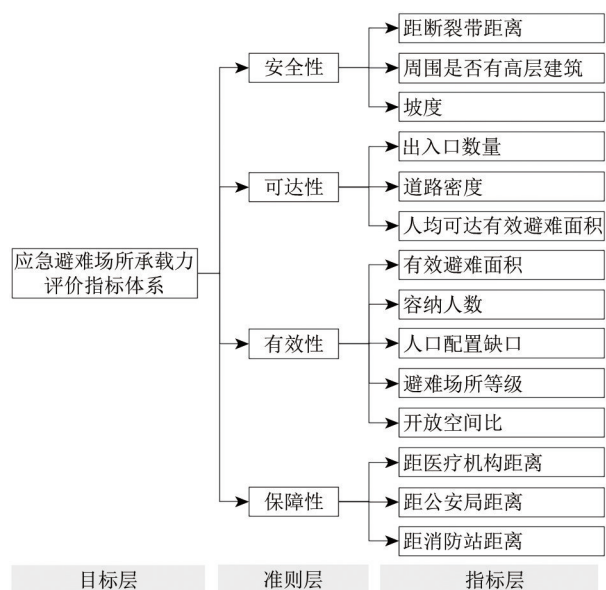


图3 应急避难场所承载力评价指标体系

Fig. 3 Evaluation indicator system for carrying capacity of emergency shelters

(2) 可达性。可达性指的是从应急避难场所周围的任意地方克服空间阻碍到达避难场所的难易程度 (Yu 等, 2018), 包括出入口数量、道路密度、人均可达有效避难面积。1) 出入口数量。应急避难场所出入口数量越多, 灾害发生时疏散速度越快。本文根据电子地图, 获取各应急避难场所的出入口数量。2) 道路密度。道路密度指的是避难场所服务范围内道路长度与服务面积的比值。道路密度越大, 说明道路建设整体水平较好, 有利于居民快速逃生。应急避难场所服务范围指的是避难场所可提供的避难人员的范围 (Singh 等, 2018)。为真实反映从居民需求点到避难点之间的距离, 本文采用网络分析法 (Ma 等, 2022), 以道路的实际长度, 按照避难场所等级设置阻抗, 即 I 类 3000 m, II 类 2000 m, III 类 500 m, 来计算服务范围。3) 人均可达有效避难面积。人均可达有效避难面积指的是研究区内人均可达的有效避难场所面积, 反映避难场所空间分布的公平度 (You 等, 2023)。人均可达有效避难面积越大, 表明避难人员在距离和空间上到达避难场所越有优势, 避难场所的服务水平越高。其中, 避难场所服务范围内总人数, 通过街道人口与服务范围叠加得到。人均可达有效避难面积 F 具体计算公式如下:

$$F = S_e / S_T \quad (1)$$

式中, S_e 为有效避难面积, S_T 为服务范围内的总人口数。

(3) 有效性。有效性体现避难场所灾时的供给能力, 这就要求避难场所要有一定的空间满足避难需求 (Wang, 2019), 包括有效避难面积、容纳人数、人口配置缺口、避难场所等级、开放空间比。1) 有效避难面积。综合《北京中心城地震及应急避难场所 (室外) 规划纲要》、DB11/T794—2011《北京市地方标准: 公园绿地应急避难功能设计规范》, 应急避难场所的有效避难面积为: 总面积除去场地内水域占地面积、建筑占地面积、中下层植物密集区、大于 7° 的陡坡占地面积、预计建筑物倒塌影响的面积。本文基于 Google 影像、WHU 航空建筑物数据集、GF-2 遥感影像、DEM 影像、GF-2 绿地数据集等多源数据, 采用深度学习、机器学习等方法 (王振庆 等, 2021) 提取应急避难场所内不能避难的建筑物及倒塌、水体、中下层植物密集区和坡度, 剩余的可用于避难的区域即为有效避难面积 S_e (You 等, 2023)。计算公式如下:

$$S_e = S_E - S_b - S_w - S_g - S_s \quad (2)$$

式中, S_e 为有效避难面积, S_E 为应急避难场所占地面积, S_b 为建筑物及其倒塌面积, S_w 为水体面积, S_g 为中下层植物密集区占地面积, S_s 为坡度 $> 7^\circ$ 的面积。

2) 容纳人数。容纳人数指的是避难场所有效避难面积与人均最小避难面积之比 (Trivedi 和 Singh, 2017)。参考国内外避难场所规划设计标准, 本文 I 类避难场所人均最小避难面积为 2 m^2 , II 类避难场所的人均最小避难面积为 1.5 m^2 , III 类避难场所的人均最小避难面积为 1 m^2 。

$$V = S_e / S_{ave} \quad (3)$$

式中, V 为容纳人数, S_e 为有效避难面积, S_{ave} 为人均最小避难面积。

3) 人口配置缺口。人口配置缺口为一定服务半径下, 需要避难的人口总数与可容纳人口总数之差, 一定程度反映避难场所存在的盲区 (魏本勇 等, 2019)。

$$S_G = S_D - \sum S_p (d_{ij} \leq r) \quad (4)$$

式中, S_G 为人口配置缺口, S_D 为研究区需要避难的总人口, $\sum S_p$ 为避难场所可供避难的总人口, r 为服务半径。当 $S_G = 0$ 或 < 0 时, 表示不存在人口配置缺口, 现有避难场所能够容纳需要避难的居民。

4) 避难场所等级。中国将应急避难场所分为

I 类、II 类、III 类, 具体详见北京市应急管理局官网 (<http://yjglj.beijing.gov.cn>[2024-01-18]), 其中 I 类避难场所等级最高。避难场所等级越高, 说明配备的基础条件及物资、设施越齐全, 避难人员越愿意选择这样的避难场所避难。

5) 开放空间比。开放空间比指的是应急避难场所有效避难面积与占地面积之比。开放空间比越大, 说明可利用的区域越多(刘少丽, 2012)。

$$a = S_e/S_E \cdot 100\% \quad (5)$$

式中, a 为开放空间比, S_e 为有效避难面积, S_E 为有场所占地面积。

(4) 保障性。保障性指的是应急避难场所周围可利用的设施是否有保障(Ma 等, 2022), 包括距医疗机构距离、距公安局距离、距消防站距离。1) 距医疗机构距离。应急避难场所距离医疗机构越近, 越有利于获取医疗物资和设备, 便于快速开展救援工作。根据 POI 数据, 对北京市五环内的

医院点位进行 500 m、1000 m、1500 m 及 >1500 m 缓冲区分析。2) 距公安局距离。应急避难场所距离公安局距离越近, 越有利于及时控制现场, 确保避难人员有序疏散。根据 POI 数据, 对北京五环内的公安局点位进行缓冲区分析, 缓冲范围分别为 1000 m、2000 m、3000 m 及 >3000 m。3) 距消防站距离。应急避难场所距离消防站越近, 越有利于及时开展救助, 充分发挥避难场所的减灾效能。根据 POI 数据, 对北京五环内的消防站点进行缓冲区分析, 缓冲范围分别为 1000 m、2000 m、3000 m 及 >3000 m。

3.1.2 评价指标量化分级

本文采用定量和定性相结合的综合评价方法, 参考应急避难场所相关规范标准和相关文献(马运佳 等, 2014; 魏本勇 等, 2022; 周玉科 等, 2018), 并邀请灾害领域专家对各评价指标进行分级量化, 具体分级标准如表 2 所示。

表 2 应急避难场所承载力评价指标量化分级标准

Table 2 Quantitative grading criteria for carrying capacity evaluation indicators of emergency shelters

评价指标	评价细则	分值
距断裂带距离/m	>3000, 2000—3000, 1000—2000, 1000	7, 5, 3, 1
周围是否有高层建筑	有, 无	1, 5
坡度/(°)	>7, 5—7, 3—5, 0—3	1, 3, 5, 7
出入口数量/个	>4, 4, 3, 1—2	7, 5, 3, 1
道路密度/(km/km ²)	0—10, 10—20, 20—30, >30	1, 3, 5, 7
人均可达有效避难面积/m ²	0—2, 2—5, 5—10, >10	1, 3, 5, 7
有效避难面积/m ²	10000, 30000, 50000, >50000	1, 3, 5, 7
容纳人数/人	10000, 30000, 50000, >50000	1, 3, 5, 7
人口配置缺口/人	0, 10000, 30000, >30000	7, 5, 3, 1
避难场所等级	I, II, III	7, 5, 3
开放空间比/%	30, 50, 70, >70	1, 3, 5, 7
距医院距离/m	>1500, 1000—1500, 500—1000, 500	1, 3, 5, 7
距公安局距离/m	1000, 1000—2000, 2000—3000, >3000	7, 5, 3, 1
距消防站距离/m	1000, 1000—2000, 2000—3000, >3000	7, 5, 3, 1

3.1.3 指标标准化处理

有些评价指标的数据是连续的, 有些是分散的, 同时各评价指标之间的量纲不同, 以及数据大小的尺度不一致, 所以要对各评价指标进行标准化处理。本文采用极差法对评价指标进行标准化处理, 公式如下(Wang 等, 2023):

当评价指标正相关时:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

当评价指标负相关时:

$$x'_{ij} = (\max x_{ij} - x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

式中, x'_{ij} 为标准化后的数据, x_{ij} 为评价指标的数值, $\min x_{ij}$ 为评价指标的最小值, $\max x_{ij}$ 为评价指标的最大值。其中, 定量指标按照式(6)、(7)

计算进行标准化, 定性指标如周围是否有高层建筑, 参考表2中的分值, 再根据式(6)、(7)标准化。通过标准化处理, 使得各评价指标的数值转化为0—1, 且与原始数据 x_{ij} 分布相同。应急避难场所承载力评价指标相关性如表3所示。

表3 应急避难场所承载力评价指标相关性
Table 3 Relevance of indicators for evaluating the carrying capacity of emergency shelters

评价指标	相关性
距断裂带距离/m	正
周围是否有高层建筑	负
坡度/(°)	负
出入口数量/个	正
道路密度/(km/km ²)	正
人均可达有效避难面积/m ²	正
容纳人数/人	正
人口配置缺口/人	负
开放空间比	正
有效避难面积/m ²	正
避难场所等级	负
距医院距离/m	负
距公安局距离/m	负
距消防站距离/m	负

3.2 AHP-EWM组合赋权

主观赋权法主要依赖专家对指标重要性的主观判断, 该方法脱离数据本身, 容易出现权重与客观实际情况不符。客观赋权法主要通过数据进行赋权, 对数据的质量和完整性依赖较大, 权重结果容易脱离实际情况。为尽量确保评价指标的权重真实、客观, 本文采用主客观赋权方法确定权重, 以弥补单一权重的不足, 主观赋权采用层析分析法AHP, 客观赋权采用熵权法EWM。常用的权重组合方式是主观权重和客观权重取平均, 也就是主客观权重的系数均为0.5(丁赞和沈铭, 2019), 而本文采用最大离差平方和理论求解组合赋权的最优权重系数。

3.2.1 AHP

层析分析法AHP是一种主观赋权方法, 常用于解决多目标决策问题。该方法将多层次、多准则的复杂问题转化为有条理的有序层次, 邀请专家两两比较各指标在该层次中的相对重要程度, 通过构建判别矩阵、对判别矩阵的一致性检验(C.R.<0.10), 得到各指标权重, 该方法融入专家经

验的同时具有严谨的逻辑性(Rana和Suryanarayana, 2020)。

3.2.2 EWM

熵权法EWM(Entropy Weight Method)是一种客观赋权方法, 它根据评价指标数值相对变化程度大小来决定权重(陈绮桦, 2014)。熵值是不确定性的一种度量, 当各指标数值差异越大, 不确定性越大, 熵值越大; 当各指标数值差异越小, 不确定性越小, 熵值越小。所以, 采用熵值可判断指标的离散程度, 熵值越小, 离散程度越大, 说明该指标对承载力评价的影响越大。具体步骤为:

(1) 计算信息熵

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot \ln y_{ij} \quad (8)$$

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}, k = \frac{1}{\ln(n)}$$

式中, e_j 为第 j 项指标的信息熵。其中, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; $k > 0$, $0 \leq e_j < 1$ 。

(2) 计算权重

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m e_j} \quad (9)$$

3.2.3 组合权重

组合赋权法是将多种单一赋权方法计算的权重通过某种理论方法进行组合得到权重系数, 使得权重占比更加合理。该方法不仅可以克服单一权重存在的缺陷, 又可以同时兼顾主观信息和客观信息。本文采用最大离差平方和理论求解组合权重的最优权重系数(王信祥, 2022)。构建的最大离差平方和目标决策函数为

$$T(L) = W^T Y' W = L^T W_{A-E}^T Y' W_{A-E} L = L^T W_{A-E}^T (y'_{ij})_{n \times n} W_{A-E} L \quad (18)$$

$$y'_{ij} = \sum_{k_1=1}^m \sum_{k_2=1}^m (y_{k_1 i} - y_{k_2 i})(y_{k_1 j} - y_{k_2 j})$$

式中, $T(L)$ 为目标决策函数, W 为组合权重矩阵, W_j 为第 j 项指标的组合权重, W_{A-E} 为主、客观权重分块矩阵, L 为主客观权重系数, 且 $\sum_{i=1}^2 l_i^2 = 1$ 。 Y' 为 $n \times n$ 阶的对称非负定离差平方和矩阵, y'_{ij} 为目标 i 与目标 j 的离差平方和。

根据最大离差平方和目标决策函数建立最优

组合权重模型，再将求得的单位化特征向量 L' 归一化处理，即可得到组合权重的最优权重系数。

$$\max F(L) = \frac{T(L)}{L^T L} \tag{10}$$
$$l_k = \frac{l'_k}{\sum_{k=1}^2 l'_k}$$

式中， l'_k 为 L' 中第 k 项的值。

3.3 多目标决策模型

将多目标转化为单一目标，可在决策过程中实现多个目标的折中解决方案。多标准目标决策 MCDM 是帮助决策者在复杂情况下做出适当决策的方法（Prabhuram 等，2020；Zhong 等，2023）。本文以 30 m×30 m 的栅格作为评价单元，采用多目标线性加权方法来计算应急避难场所承载力评价分值。评价模型为

$$S = \sum_{j=1}^m W_j P_j \tag{11}$$

式中， S 为承载力评价分值， W_j 为指标权重， P_j 为评价指标量化分值。

4 结果与分析

4.1 评价指标权重

本文采用 AHP 方法构建判断矩阵并对其进行一致性检验，得到各指标的主观权重；采用 EWM 法，通过计算信息熵，得到各指标的客观权重；通过建立相对隶属度矩阵，构建最大离差平方和目标决策函数，基于最大离差平方和理论求解最优权重系数为 0.59 和 0.41，从而确定各指标的组合权重，结果如表 4 所示。可见，应急避难场所评价指标的权重具有差异性，有效性和可达性维度的指标权重较高。其中，人均可达有效避难面积的权重最高，其次是避难场所等级、有效避难面积和容纳人数。

表 4 应急避难场所承载力评价指标权重

Table 4 Weighting of indicators for evaluating the carrying capacity of emergency shelters

目标层	准则层	权重	指标层	AHP 权重	EWM 权重	组合权重
应急避难场所承载力	安全性	0.1645	距断裂带距离/m	0.0577	0.1419	0.0925
			周围是否有高层建筑	0.0915	0.0094	0.0576
			坡度/(°)	0.0242	0.0004	0.0144
	可达性	0.2815	出入口数量/个	0.0477	0.0250	0.0383
			道路密度/(km/km ²)	0.0866	0.0211	0.0596
			人均可达有效避难面积/(m ²)	0.1574	0.2207	0.1836
	有效性	0.4740	容纳人数/人	0.1233	0.0910	0.1100
			人口配置缺口/人	0.0266	0.0673	0.0434
			开放空间比/%	0.0483	0.0073	0.0314
			有效避难面积/(m ²)	0.1701	0.1034	0.1425
			避难场所等级	0.0882	0.2298	0.1467
	保障性	0.0800	距医院距离/m	0.0233	0.0060	0.0161
			距公安局距离/m	0.0128	0.0674	0.0353
			距消防站距离/m	0.0423	0.0093	0.0286

4.2 承载力评价结果

根据应急避难场所评价指标量化分级标准及各指标权重，采用多目标线性加权法，基于 GIS 空间分析功能，得到北京五环内应急避难场所承载力评价结果（图 4）。承载力评价结果分值范围为 2.1342—6.3358，分值越高，说明承载力越好。采

用自然间断法（Yao 等，2021），对承载力评价结果进行分级，分值为 5.5082—6.3358，承载力为优；分值为 4.7910—5.5082，承载力为良；分值为 3.8072—4.7910，承载力为中；分值为 2.1342—3.8072，承载力为差。对各应急避难场所承载力评价结果的优、良、中、差所占的面积进行统计，结果如图 5 所示。

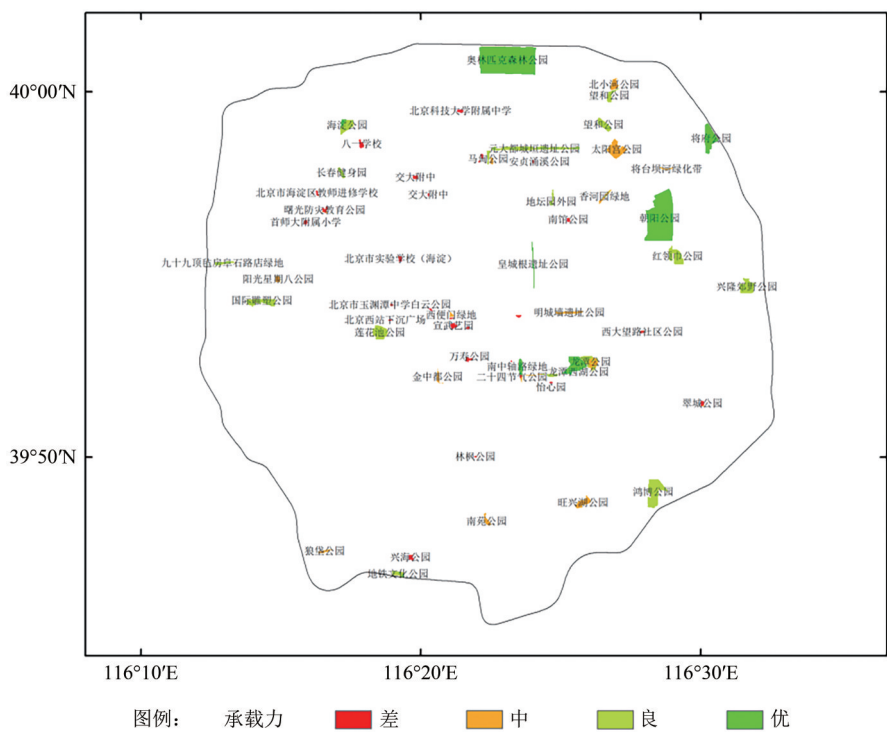


图4 北京市五环内应急避难场所承载力评价结果

Fig. 4 Evaluation results of the carrying capacity of emergency shelters within the Fifth Ring Road of Beijing

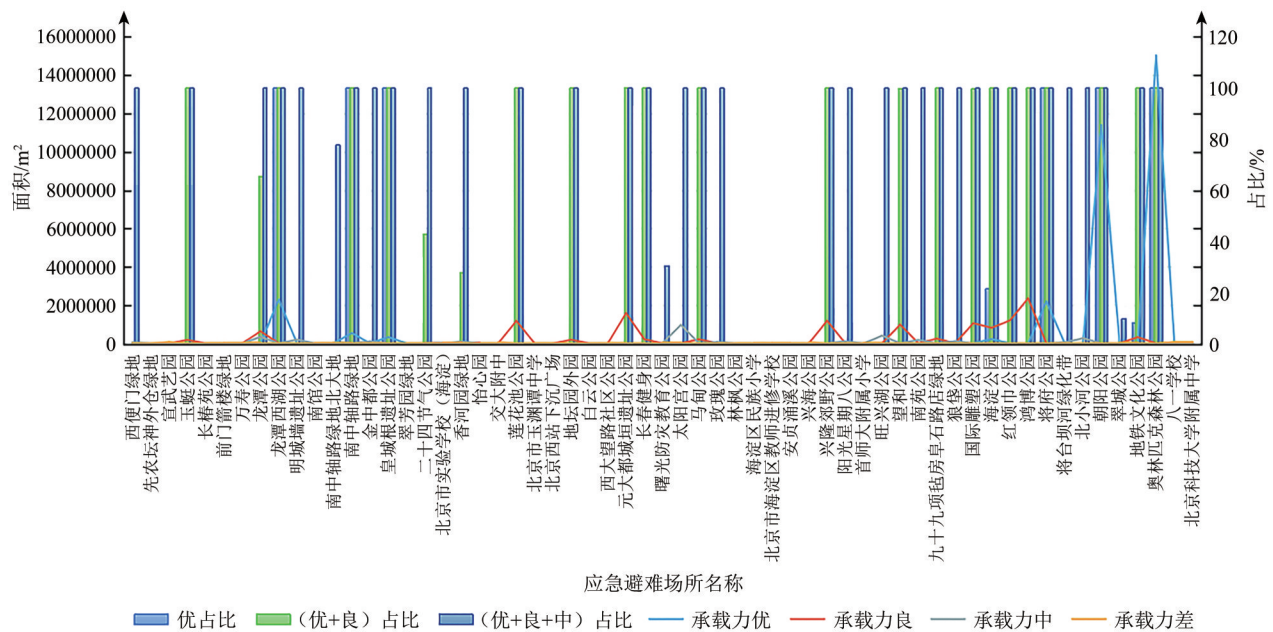


图5 北京市五环内各应急避难场所承载力评价结果的优、良、中、差及占比

Fig. 5 Excellent, good, medium, poor and percentage of carrying capacity evaluation results of emergency shelters within the Fifth Ring Road in Beijing

4.3 承载力评价结果及分析

(1) 从单个应急避难场所来看，承载力优占比超过90%的避难场所有6个：龙潭西湖公园、南中轴路绿地、皇城根遗址公园、将府公园、朝阳公园、奥林匹克森林公园。承载力（优+良）占比

超过90%的避难场所有18个。承载力优占地面积较大的避难场所有奥林匹克森林公园、朝阳公园。承载力评价结果中，承载力只有差级别的避难场所有22个。结合承载力评价指标可以看出，承载力优、良区域的应急避难场所等级较高，有效避

难面积大, 能够容纳人数相对较多, 且距离主干路较近, 交通发达, 远离易发生灾害的危险源。承载力差的区域有效避难面积相对较小, 周围人口较多, 存在在有限时间内, 居民不能尽快到达

避难场所避难。
(2) 从环域角度来看, 北京市各个环域的应急避难场所承载力评价结果如图 6 和表 5 所示。

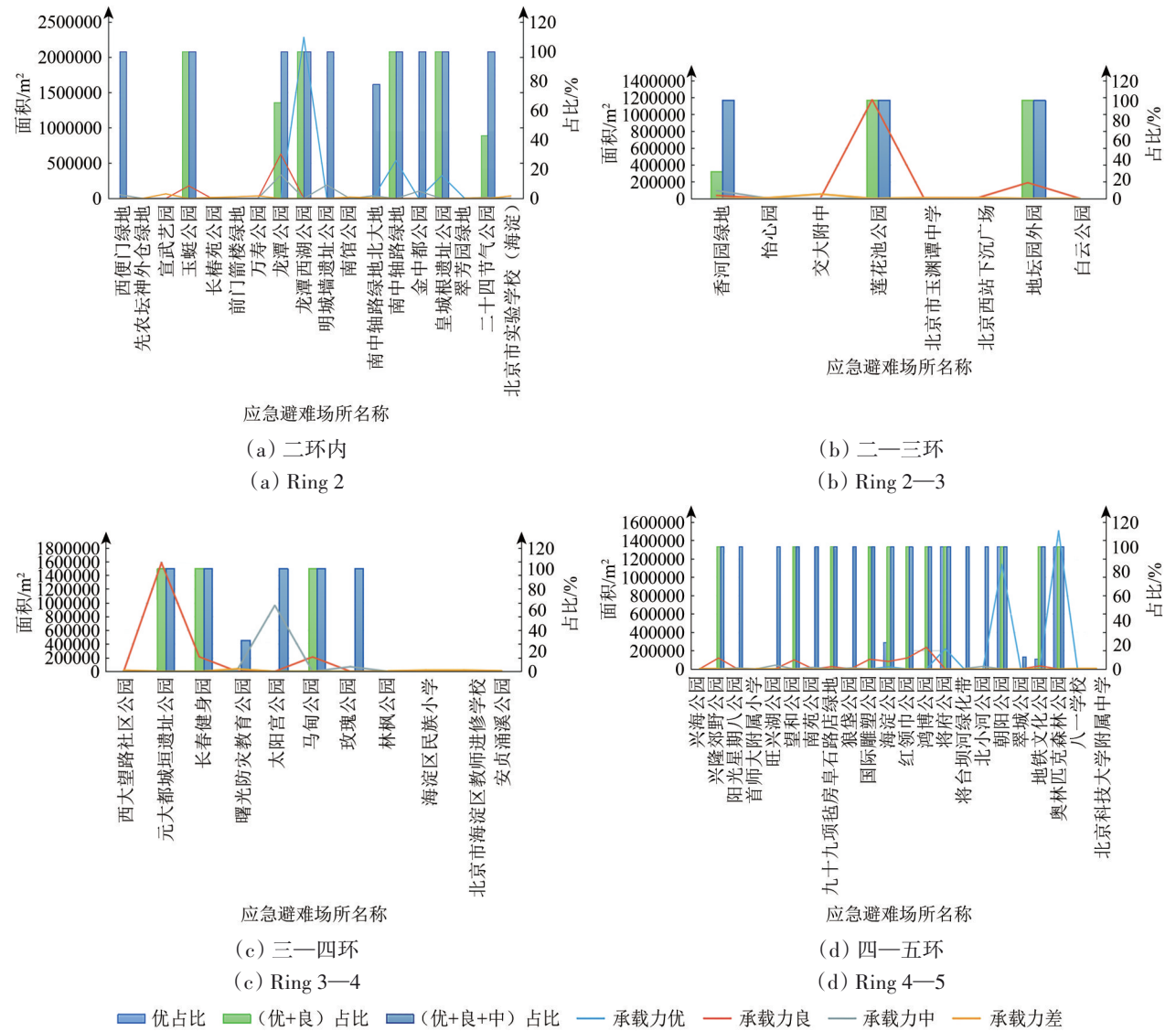


图6 北京市各个环域的应急避难场所承载力评价结果

Fig. 6 Evaluation results of the carrying capacity of emergency shelters in each ring area of Beijing

表5 北京市五环应急避难场所环域承载力评价结果统计分析

Table 5 Statistical analysis of the emergency shelters carrying capacity evaluation results of the ring within the Fifth Ring of Beijing								
环域	优/m ²	良/m ²	中/m ²	差/m ²	优占比/%	(优+良)占比/%	(优+良+中)占比/%	差占比/%
二环	803700	279900	387900	194400	48.24	65.05	88.33	11.67
二—三环	0	484200	80100	132300	0	69.51	81.01	18.99
三—四环	2880000	849600	545400	185400	64.57	83.62	95.84	4.16
四—五环	8088300	4302000	1622700	666900	55.10	84.40	95.46	4.54

1) 二环内应急避难场所有 18 个。单个应急避难场所中, 承载力评价为优占比超过 90% 的避难场所有 3 个, 即龙潭西湖公园、南中轴路绿地、

皇城根遗址公园; 承载力评价为 (优+良) 占比超 90% 的避难场所有 4 个, 分别是玉蜓公园、龙潭西湖公园、南中轴路绿地、皇城根遗址公园。综合

来看,二环内应急避难场所承载力优所占面积较少。2)二—三环内应急避难场所所有8个。单个应急避难场所中,承载力评价为(优+良)占比超过90%的避难场所有2个,分别是莲花池公园、地坛园外园。综合来看,二—三环内应急避难场所没有承载力优占比>90%的,说明其承载力较差。3)三—四环内应急避难场所有11个。单个应急避难场所中,承载力评价为(优+良)占比超过90%的避难场所有3个,分别是元大都城垣遗址公园、长春健身园、马甸公园。综合来看,三—四环应急避难场所承载力优面积占64.57%,(优+良+中)面积占95.84%,说明其承载力优占比最大。4)四—五环应急避难场所有22个。单个应急避难场所中,承载力评价为优占比超过90%的避难场所有3个,即朝阳公园、将府公园、奥林匹克森林公园;承载力评价为(优+良)占比超过90%的避难场所有11个。综合来看,四—五环应急避难场所承载力优面积占55.10%,良占29.3%,中占11.06%,说明其承载力整体较好,但是承载力优的部分还需加强。综上,承载力最好的是三—四环,其次是四—五环、二环内,承载力最差的是二—三环。从应急避难场所承载力评价指标可以看出,三—四环、四—五环区域避难场所数量较多,避难场所有效避难面积较大,在安全性、可达性、有效性和保障性各方面均较好,所以整体承载力较好;二—三环人口集中应急避难场所数

量相对较少,有效避难面积不足。

(3)整体来看,北京五环内承载力优面积11772000 m²,占比54.75%;良5915700 m²,占比27.51%;中2636100 m²,占比12.26%;差1179000 m²,占比5.48%。承载力整体较好,局部需要提高改善。

5 情景模拟及建议

上述研究是假设灾害来临时所有人全部避难的情景下,对应急避难场所的承载力进行评价。考虑人的主观意识以及对灾情的防备能力,灾难来临时并不是所有居民100%都会离开住所到应急避难场所进行避难(Wang等,2022),实际灾害发生时会有多种情景发生。根据GB50413—2012《城市抗震防灾规划标准》(吕伟等,2022)、《城市抗震防灾规划标准》(初建宇,2014)等相关规范标准,考虑房屋破坏度和潜在次生灾害影响,短期避难需求按照常住人口的50%—70%计算,中长期避难需求按照常住人口的30%—40%计算。所以,本文对短期避难、中长期避难两种情景下,模拟分析北京五环内应急避难场所的承载力。

5.1 情景模拟 I :短期避难60%

本文将常住人口的60%作为避难需求,采用本文构建的应急避难场所承载力评价模型进行评价,并对各应急避难场所承载力评价结果的优、良、中、差进行面积统计,结果如图7所示。

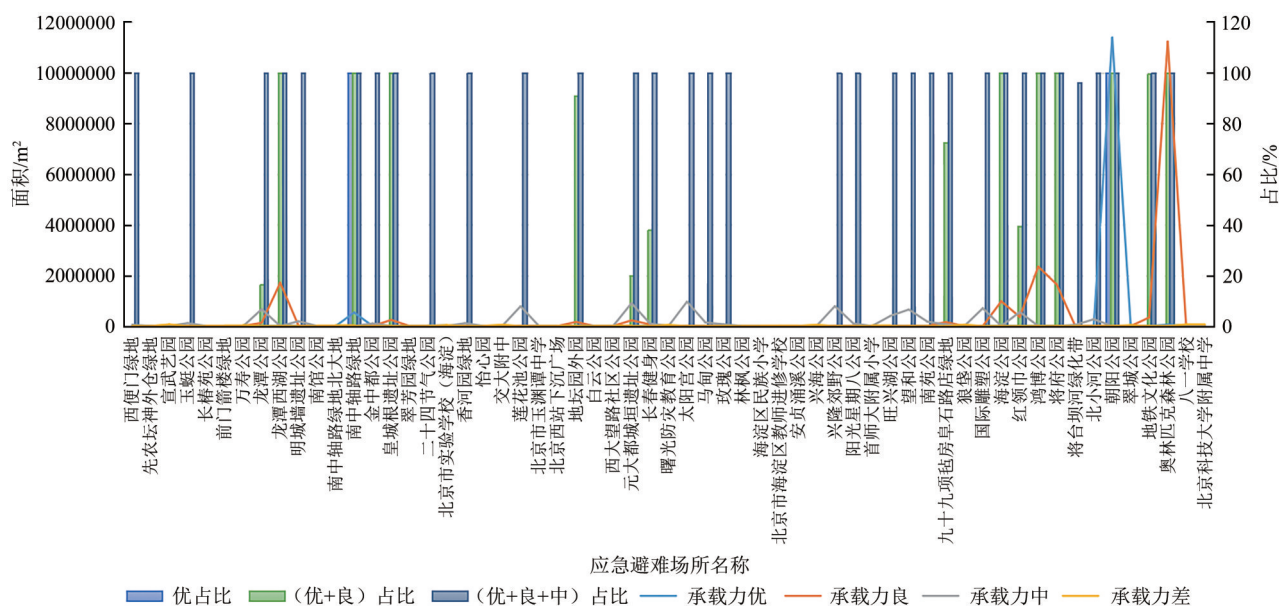


图7 短期避难情景下承载力优、良、中、差面积统计

Fig. 7 Statistics on areas with excellent, good, medium and poor carrying capacity under short-term shelter scenarios

(1) 从单个应急避难场所来看, 承载力优占比超过 90% 的避难场所有朝阳公园、南中轴路绿地。承载力 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 10 个。(2) 从环域角度来看, 北京五环内应急避难场所承载力评价结果统计如表 6。1) 二环内, 承载力评价为优占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即南中轴路绿地; 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 3 个, 分别是龙潭西湖公园、南中轴绿地、皇城根遗址公园。综合来看, 二环内应急避难场所承载力优面积占比很少, 承载力良、中较多。2) 二—三环, 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即地坛园外园; 承载力评价 (优+良+中) 占比超过 90% 的避难场所有两个, 分别是莲花池公园、地坛园外园。综合来看, 二—三环应急避难场所承载力中面积占比较多, 承载力优基本没有, 说明应急避难场所局部需要规划调整。3) 三—四环, 承载力评价为 (优+良+中) 占比超过 90% 的避难场所有 5 个,

分别是元大都城垣遗址公园、长春健身园、太阳宫公园、马甸公园、玫瑰公园。综合来看, 三—四环应急避难场所承载力优面积占比较多, 说明承载力整体较好。4) 四—五环, 承载力评价为优占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即朝阳公园; 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 6 个。综合来看, 四—五环应急避难场所承载力优、良、中面积最大, 但是承载力优占比不多。(3) 整体来看, 北京五环承载力优面积 6047100 m², 占比 28.12%; 良 7559100 m², 占比 35.15%; 中 6586200 m², 占比 30.63%; 差 1310400 m², 占比 6.09%。

5.2 情景模拟 II : 中长期避难 30%

本文将常住人口的 30% 作为避难需求, 采用本文构建的应急避难场所承载力评价模型进行评价, 并对各避难场所承载力评价结果的优、良、中、差进行面积统计, 结果如图 8。

表 6 北京市五环范围内环域承载力评价结果统计分析

Table 6 Statistical analysis of the emergency shelters carrying capacity evaluation results of the ring within the Fifth Ring of Beijing

环域	优/m ²	良/m ²	中/m ²	差/m ²	优占比/%	(优+良)占比/%	(优+良+中)占比/%	差占比/%
二环	135900	711000	621900	197100	8.16	50.84	88.17	11.83
二—三环	0	58500	487800	150300	0	8.40	78.42	21.58
三—四环	2880000	146700	1237500	196200	64.57	67.86	95.60	4.40
四—五环	3031200	6642900	4239000	766800	20.65	65.90	94.78	5.22

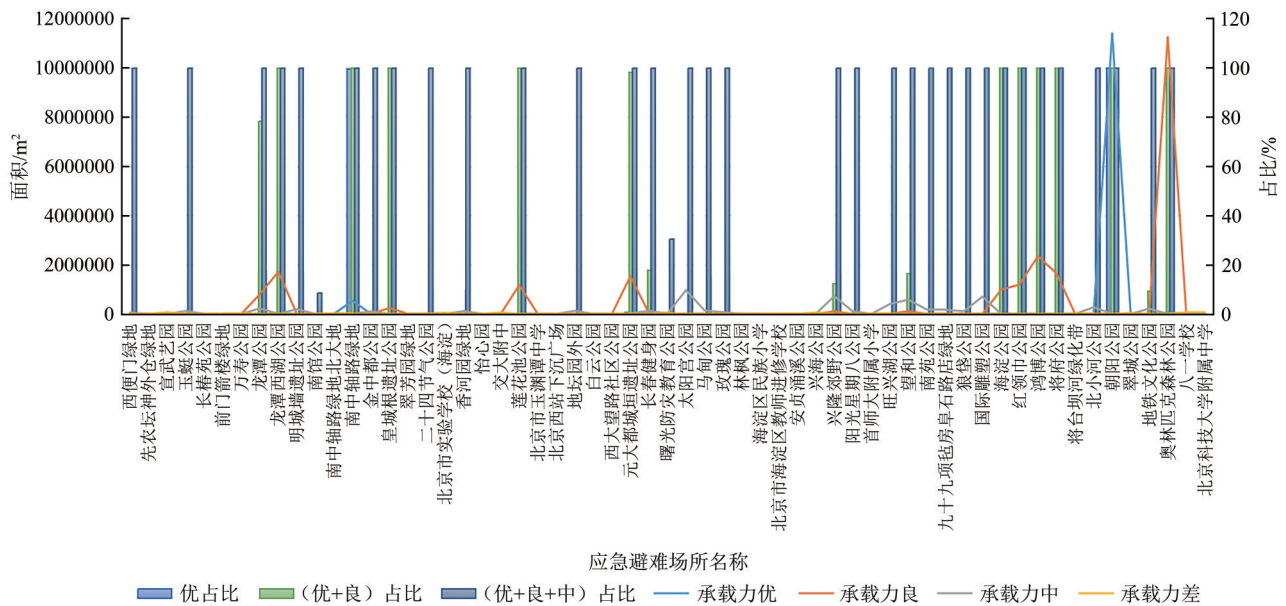


图 8 中长期避难情景下承载力优、良、中、差面积统计

Fig. 8 Statistics on areas with excellent, good, medium and poor carrying capacity under the medium- and long-term refuge scenarios

(1) 从单个应急避难场所来看, 承载力优占比超过 90% 的避难场所有: 南中轴绿地、朝阳公园。承载力 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 11 个。(2) 从环域角度来看, 北京市五环内应急避难场所承载力评价结果统计如表 7 所示。可见: 1) 二环内, 承载力评价为优占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即南中轴路绿地; 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 3 个, 分别是龙潭西湖公园、南中轴绿地、皇城根遗址公园。综合来看, 二环内应急避难场所承载力优面积很少, 但是承载力 (优+良+中) 的占地面积近 90%。建议从有效性、可达性维度, 提高承载力优占比; 2) 二一三环, 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即莲花池公园; 承载力评价为 (优+良+中) 占比超过 90% 的避难场所有 2 个, 分别是莲花池公园、地坛园外园。综合来看, 二一三环应急避难场所承载力良面积占比较多, 承载力优几乎没有。建议增加避难场所数量, 挖潜可利用的土地资源, 或者疏解部分人口外迁。

避难场所类型多元化, 如学校、体育场、停车场、小广场; 3) 三一四环, 承载力为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即元大都城垣遗址公园; 评价为 (优+良+中) 占比超过 90% 的避难场所有 5 个, 分别是元大都城垣遗址公园、长春健身园、太阳宫公园、马甸公园、玫瑰公园。综合来看, 三一四环应急避难场所承载力优面积占比最多, 承载力 (优+良+中) 面积占比 95.84%, 承载力整体较好。4) 四一五环, 承载力评价为优占比超过 90% 的避难场所有 1 个, 即朝阳公园; 承载力评价为 (优+良) 占比超过 90% 的避难场所有 6 个。综合来看, 四一五环应急避难场所承载力 (优+良+中) 占比 95.06%, 但是承载力优占比较少。建议改善避难场所场地改造、调整布局、适当增加出入口数量或者扩宽出入口。(3) 整体来看, 北京五环应急避难场所承载力优面积 6049800 m², 占比 28.13%; 良 9894600 m², 占比 46.02%; 中 4302000 m², 占比 20.01%; 差 1256400 m², 占比 5.84%。

表 7 北京市五环范围内环域承载力评价结果统计分析

Table 7 Statistical analysis of the emergency shelters carrying capacity evaluation results of the ring within the Fifth Ring of Beijing

环域	优/m ²	良/m ²	中/m ²	差/m ²	优占比/%	(优+良)占比/%	(优+良+中)占比/%	差占比/%
二环	135000	945000	389700	196200	8.10	64.83	88.22	11.78
二一三环	0	399600	146700	150300	0	57.36	78.42	21.58
三一四环	2882700	685800	706500	185400	64.63	80.00	95.84	4.16
四一五环	3032100	7864200	3059100	724500	20.65	74.23	95.06	4.94

5.3 建议措施

(1) 虽然各应急避难场所的承载力优、良、中、差占地面积不同, 但是都对居民具有避难、疏散、救援的作用。从单个应急避难场所来看, 北京五环内部分应急避难场所承载力评价结果为优的占地面积占相应的应急避难场所面积较少。针对这种类型的应急避难场所, 可从安全性、可达性、有效性、保障性这 4 个准则下的 14 个评价指标进行调整, 如坡度较大, 可适当进行地貌改造; 如出入口数量较少, 可适当增加出入口。针对承载力优占地面积和占比均较大的应急避难场所, 要谨慎开发, 充分发挥平灾结合的功能, 进行有效利用。

(2) 针对应急避难场所数量较少, 人口又比

较密集的区域, 决策者需重点关注。从环域的应急避难场所来看, 当避难人数是常住人口 30% 情景下, 各环域应急避难场所承载力 (优+良+中) 占比均达到 80%, 说明此种情境下, 北京五环内应急避难场所基本可满足避难需求。但是通过不同情景模拟发现, 各环域之间承载力优占比有所差别, 其中二一三环内承载力为优、良占比均较少, 可考虑增加或开发新的避难场所, 如将社区公园、绿地、企事业单位的空地等进行合理规划和配置, 或者根据城市功能分区, 疏解部分人口外迁。

(3) 由于灾后居民避难的复杂性, 决策者应综合考虑不同灾害情境下可能出现的问题, 提出多种应对方案, 提前规划好人群疏散, 充分利用现有的应急避难场所, 并定期开展灾后培训演练,

提升居民抗灾能力。同时从法律法规层面落实推进, 出台相关政策性文件, 加强应急避难场所管理。

6 结 论

本文以应急避难场所为研究对象, 利用 GF-2 遥感影像、DEM、POI 数据、Google 影像等多源数据, 针对城市应急避难场所承载力评价, 构建承载力评价指标体系, 采用主客观赋权的方法, 运用多目标决策评价模型, 对北京市五环内的应急避难场所承载力进行评价, 从单个应急避难场所、环域、整体 3 个维度进行分析, 并针对灾害的复杂性进行情景模拟。主要结论如下:

(1) 从安全性、可达性、有效性和保障性等方面, 构建针对城市应急避难场所承载力评价的指标体系。其中, 对于关键指标“有效避难面积”的提取尺度比较精细, 针对建筑物、水体、中下层植物密集区、坡度等不能避难的地物类型特点, 采用深度学习、机器学习等方法进行智能提取, 为承载力评价的准确性奠定基础。

(2) 采用 AHP 和 EWM 对评价指标进行主客观赋权, 并运用最大离差平方和理论优化组合权重系数, 相比只采用主观评价或者只采用客观评价或者主客观取平均, 更加合理。结果表明, 人均可达有效避难面积的权重最高, 其次是避难场所等级、有效避难面积、容纳人数。

(3) 构建多目标决策评价模型, 并对北京五环内应急避难场所的承载力进行评价。考虑灾害的复杂性, 对不同避难情况下的承载力进行模拟分析。结果表明, 北京市五环应急避难场所承载力整体较好, 但二—三环承载力优占地面积为 0, 存在环域间的不均衡性。

由于数据获取有限, 在选取评价指标时候没有考虑应急避难场所内部配套设施, 如指示牌、应急厕所等。另外, 本文主要针对地震这单一灾种场景下进行承载力评价, 没有考虑洪水等多灾种, 且本文研究的只是室外应急避难场所, 没有考虑地下空间, 如防空洞等。后续, 将考虑内部配套设施等评价指标, 建立更加全面的应急避难场所承载力评价指标体系; 考虑多灾种、地下应急避难场所, 进一步优化应急避难场所承载力评价模型, 为城市应急减灾提供决策支持。

参考文献 (References)

- Alawi M, Chu D Z and Hammad S. 2023. Resilience of public open spaces to earthquakes: a case study of Chongqing, China. *Sustainability*, 15(2): 1092 [DOI: 10.3390/su15021092]
- Beatini V, Rajanayagam H and Poologanathan K. 2023. Structural and spatial minimal requirement efficacy of emergency shelters for different emergencies. *Buildings*, 13(1): 32 [DOI: 10.3390/buildings13010032]
- Bera S, Gnyawali K, Dahal K, Melo R, Miao L J, Guru B, Ramana G V. 2023. Assessment of shelter location-allocation for multi-hazard emergency evacuation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84: 103435 [DOI: 10.1016/j.ijdr.2022.103435]
- Chen J, Xia M, Wang D H and Lin H F. 2023. Double branch parallel network for segmentation of buildings and waters in remote sensing images. *Remote Sensing*, 15(6): 1536 [DOI: 10.3390/rs15061536]
- Chen Q H. 2014. Land-use suitability evaluation on emergency shelters-A case study of Guangzhou. *Territory and Natural Resources Study*, (6): 12-17 (陈绮桦). 2014. 城市应急避难场所用地适宜性评价——以广州市为例. *国土与自然资源研究*, (6): 12-17 [DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2014.06.001]
- Chu J Y. 2014. Research on the Methods for Planning of Emergency Shelter and its Application. Tianjin: Tianjin University (初建宇). 2014. 防灾避难场所规划方法及其应用研究. 天津: 天津大学
- Cui B G, Wu J, Li X H, Ren G B and Lu Y. 2023. Combination of deep learning and vegetation index for coastal wetland mapping using GF-2 remote sensing images. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1376-1386 (崔宾阁, 吴景, 李心慧, 任广波, 路燕). 2023. 结合深度学习和植被指数的滨海湿地高分二号遥感影像信息提取. *遥感学报*, 27(6): 1376-1386 [DOI: 10.11834/jrs.20221658]
- Ding Z and Shen M. 2019. Study on the bearing capacity of geological environment in Huanggang city based on analytic hierarchy process and variation coefficient method. *Resources Environment and Engineering*, 33(S1): 70-74 (丁赞, 沈铭). 2019. 基于层次分析法和变异系数法的黄冈市地质环境承载力研究. *资源环境与工程*, 33(S1): 70-74 [DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2019.S1.014]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization administration. 2008. GB 21734-2008 Emergency shelter for earthquake disasters-site and its facilities. Beijing: Standards Press of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会). 2008. GB 21734-2008 地震应急避难场所场址及配套设施. 北京: 中国标准出版社)
- Ji W J, Wang J P, Song S S and Xue M M. 2023. Development planning of urban emergency shelters based on ANP-SWOT model: a case study of Lanzhou City. *China Earthquake Engineering Journal*, 45(2): 431-440 (季婉婧, 王金平, 宋姗姗, 薛明媚). 2023. 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. *地震工程学报*, 45(2): 431-440 [DOI: 10.20000/j.1000-

- 0844.20211026002]
- Jiang Z, Qi Z Y and Xiao J N. 2020. Service capacity evaluation and planning response of urban shelters based on multi-source data. *Chinese and Overseas Architecture*, (1): 53-57 (蒋柱, 戚智勇, 肖淦楠. 2020. 基于多源数据的城市避难场所服务能力评价与规划应对. *中外建筑*, (1): 53-57) [DOI: 10.19940/j.cnki.1008-0422.2020.01.016]
- Kong Z Q. 2022. Analysis of the Land Use Degree and Ecological Carrying Capacity Study of Zhalong Wetland. Harbin: Harbin Normal University (孔子强. 2022. 扎龙湿地土地利用程度分析及生态承载力研究. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学) [DOI: 10.27064/d.cnki.ghasu.2022.001020]
- Li P, Ji Y, Wu Z and Qu S J. 2020. A new multi-attribute emergency decision-making algorithm based on intuitionistic fuzzy cross-entropy and comprehensive grey correlation analysis. *Entropy*, 22(7): 768 [DOI: 10.3390/e22070768]
- Li W Q, Sun J Y and Zhou D Y. 2023. Research on safety evaluation of earthquake emergency shelters considering the characteristics of urban parks. *South China Journal of Seismology*, 43(2): 104-114 (李文倩, 孙婧芸, 周到洋. 2023. 考虑城市公园特征的地震应急避难场所安全评价研究. *华南地震*, 43(2): 104-114) [DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.12]
- Liu S L. 2012. Location Selection and Spatial Layout of Urban Emergency Shelters--Taking Nanjing As An Example. Nanjing: Nanjing Normal University (刘少丽. 2012. 城市应急避难场所区位选择与空间布局——以南京市为例. 南京: 南京师范大学)
- Lü W, Li C X and Ma Y P. 2022. Division of responsibility areas for urban emergency shelters based on a GIS location-allocation analysis. *J Tsinghua Univ (Sci and Technol)*, 62(6): 1102-1109 (吕伟, 李承旭, 马亚萍. 2022. 基于GIS位置分配的城市应急避难场所责任区划分. *清华大学学报(自然科学版)*, 62(6): 1102-1109) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdx.2022.22.032]
- Ma Y J, Liu B Y, Zhang K W and Yang Y M. 2022. Incorporating multi-criteria suitability evaluation into multi-objective location-allocation optimization comparison for earthquake emergency shelters. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1): 2333-2355 [DOI: 10.1080/19475705.2022.2118623]
- Ma Y J, Xu W and Zhao X J. 2014. Assessment of allocation of residents to emergency shelters under different earthquake damage scenarios--Case study on central area of Beijing. *China Safety Science Journal*, 24(12): 137-143 (马运佳, 徐伟, 赵秀娟. 2014. 不同地震破坏情景下应急避难所责任区评价研究——以北京市中心城区为例. *中国安全科学学报*, 24(12): 137-143) [DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.12.001]
- Ma Z M, Xia M, Weng L G and Lin H F. 2023. Local feature search network for building and water segmentation of remote sensing image. *Sustainability*, 15(4): 3034 [DOI: 10.3390/su15043034]
- Omni S and Janalipour M. 2022. Selection of shelters after earthquake using probabilistic seismic aftershock hazard analysis and remote sensing. *Natural Hazards*, 113(1): 345-363 [DOI: 10.1007/s11069-022-05303-0]
- Prabhuram T, Rajmohan M, Tan Y C and Johnson R R. 2020. Performance evaluation of Omni channel distribution network configurations using multi criteria decision making techniques. *Annals of Operations Research*, 288(1): 435-456 [DOI: 10.1007/s10479-020-03533-8]
- Rana V K and Suryanarayana T M V. 2020. GIS-based multi criteria decision making method to identify potential runoff storage zones within watershed. *Annals of GIS*, 26(2): 149-168 [DOI: 10.1080/19475683.2020.1733083]
- Şenik B and Uzun O. 2021. An assessment on size and site selection of emergency assembly points and temporary shelter areas in Düzce. *Natural Hazards*, 105(2): 1587-1602 [DOI: 10.1007/s11069-020-04367-0]
- Si Y R, Li J L and Si Y B. 2023. Urban flood loss estimation and evacuation design based on a 500-year extreme flood event in Syracuse city. *Water*, 15(1): 3 [DOI: 10.3390/w15010003]
- Singh P, Sinha V S P, Vijhania A and Pahuja N. 2018. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28: 237-250 [DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.03.017]
- Su J F and Zhang Q B. 2021. Suitability evaluation of urban earthquake emergency shelter—a case study of the central city of Tianjin. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 16(2): 414-420 (苏建锋, 张庆斌. 2021. 城市地震应急避难场所适宜性评价——以天津市中心城区为例. *震灾防御技术*, 16(2): 414-420) [DOI: 10.11899/zzfy20210221]
- Tehrani N A, Shafri H Z M, Salehi S, Chanussot J and Janalipour M. 2022. Remotely-Sensed Ecosystem Health Assessment (RSEHA) model for assessing the changes of ecosystem health of Lake Urmia Basin. *International Journal of Image and Data Fusion*, 13(2): 180-205 [DOI: 10.1080/19479832.2021.1924880]
- Trivedi A and Singh A. 2017. Prioritizing emergency shelter areas using hybrid multi-criteria decision approach: a case study. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 24(3/4): 133-145 [DOI: 10.1002/mcda.1611]
- Tsioulou A, Walker J F, Lo D S and Yore R. 2021. A method for determining the suitability of schools as evacuation shelters and aid distribution hubs following disasters: case study from Cagayan de Oro, Philippines. *Natural Hazards*, 105(2): 1835-1859 [DOI: 10.1007/s11069-020-04380-3]
- United Nations. 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development[EB/OL]. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf?ref> (联合国. 2015. 改变我们的世界: 2030年可持续发展议程[EB/OL]. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf?ref>)
- Wang C Y, Wang L X, Gu T T, Yin J Y and Hao E Y. 2023. CRITIC-TOPSIS-Based evaluation of smart community safety: a case study of Shenzhen, China. *Buildings*, 13(2): 476 [DOI: 10.3390/buildings13020476]
- Wang L. 2022. Study on Soil Ecological Carrying Capacity of Dry and Barren Mountains in the Yimeng Mountainous Area. Taian: Shandong Agricultural University. (王录. 2022. 沂蒙山区干旱瘠薄山地土壤生态承载力研究. 泰安: 山东农业大学) [DOI: 10.2727/

- d.cnki.gsdnu.2022.000072]
- Wang X F. 2019. Research on the suitability of the emergency shelter in Tianjin//Proceedings of the 5th Annual International Conference on Social Science and Contemporary Humanity Development (SSCHD 2019). Wuhan: Atlantis Press: 225-230
- Wang X F. 2019. Research on the suitability of the emergency shelter in Tianjin//Proceedings of the 5th Annual International Conference on Social Science and Contemporary Humanity Development (SSCHD 2019). Wuhan: Atlantis Press: 121-126.
- Wang X X. 2022. Evaluation and Planning of Geospatial Distribution of Emergency Shelters in Mega Cities. Lianyungang: Jiangsu Ocean University (王信祥. 2022. 超大型城市应急避难场所地理空间布局评价及规划研究. 连云港: 江苏海洋大学) [DOI: 10.44354/d.cnki.gjsuy.2022.000161]
- Wang Z Q, Zhou Y, Wang S X, Wang F T and Xu Z Y. 2021. House building extraction from high-resolution remote sensing images based on IEU-Net. National Remote Sensing Bulletin, 25(11): 2245-2254 (王振庆, 周艺, 王世新, 福涛, 徐知宇. 2021. IEU-Net 高分辨率遥感影像房屋建筑物提取. 遥感学报, 25(11): 2245-2254) [DOI: 10.11834/jrs.20210042]
- Wei B Y, Dong X, Tan Q Q, Qi W H and Guo X X. 2022. Analysis of the earthquake emergency evacuation route based on the capacity of shelters. Journal of Seismological Research, 45(1): 141-149 (魏本勇, 董翔, 谭庆全, 齐文华, 郭欣欣. 2022. 基于避难场所容量限制的地震应急疏散路径分析. 地震研究, 45(1): 141-149) [DOI: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0015]
- Wei B Y, Tan Q Q and Li X L. 2019. Assessment on spatial distribution and service efficiency of emergency shelters in Beijing. Journal of Seismological Research, 42(2):295-303 (魏本勇, 谭庆全, 李晓丽. 2019. 北京市应急避难场所的空间布局与服务效能评估. 地震研究, 42(2): 295-303) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2019.02.019]
- Xu Z Y, Zhou Y, Wang S X, Wang L T, Li F, Wang S C and Wang Z Q. 2020. A novel intelligent classification method for urban green space based on high-resolution remote sensing images. Remote Sensing, 12(22): 3845 [DOI: 10.3390/rs12223845]
- Xu Z Y, Zhou Y, Wang S X, Wang L T and Wang Z Q. 2021. U-Net for urban green space classification in Gaofen-2 remote sensing images. Journal of Image and Graphics, 26(3): 700-713 (徐知宇, 周艺, 王世新, 王丽涛, 王振庆. 2021. 面向 GF-2 遥感影像的 U-Net 城市绿地分类. 中国图象图形学报, 26(3): 700-713) [DOI: 10.11834/jig.200052]
- Yao Y B, Zhang Y Y, Yao T Y, Wong K, Tsou J Y and Zhang Y Z. 2021. A GIS-based system for spatial-temporal availability evaluation of the open spaces used as emergency shelters: the case of Victoria, British Columbia, Canada. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(2): 63 [DOI: 10.3390/ijgi10020063]
- Yin Y, Zhao X C and Lv W. 2023. Emergency shelter allocation planning technology for large-scale evacuation based on quantum genetic algorithm. Frontiers in Public Health, 10: 1098675 [DOI: 10.3389/fpubh.2022.1098675]
- You D, Wang S X, Wang F T, Zhou Y, Wang Z Q, Wang Y C, Wang J M, Xiong Y B and Ji J W. 2023. Monitoring and analyzing the effectiveness of the effective refuge area of emergency shelters by using remote sensing: a case study of Beijing's fifth ring road. Remote Sensing, 15(14): 3646 [DOI: 10.3390/rs15143646]
- You D, Wang S X, Wang F T, Zhou Y, Wang Z Q, Wang J M and Xiong Y B. 2022. EfficientUNet⁺: a building extraction method for emergency shelters based on deep learning. Remote Sensing, 14(9): 2207 [DOI: 10.3390/rs14092207]
- Yu J, Zhang C R, Wen J H, Li W D, Liu R and Xu H. 2018. Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. International Journal of Geographical Information Science, 32(9): 1884-1910 [DOI: 10.1080/13658816.2018.1463442]
- Zabihi H, Alizadeh M, Langat P K, Karami M, Shahabi H, Ahmad A, Said M N and Lee S. 2019. GIS multi-criteria analysis by Ordered Weighted Averaging (OWA): toward an integrated citrus management strategy. Sustainability, 11(4): 1009 [DOI: 10.3390/su11041009]
- Zhang H B, Zhong F and Shi Y. 2019. Evaluation of carrying capacity of urban emergency shelters based on AHP and GIS: taking Nanjing City as an example. Journal of Institute of Disaster Prevention, 21(3): 39-47 (张海波, 衷菲, 石媛. 2019. 基于 AHP 和 GIS 的城市应急避难场所承载力评价——以南京市为例. 防灾科技学院学报, 21(3): 39-47)
- Zhang P. 2016. Study of Community Emergency Shelters Carrying Capacity based on the Theory of L-A Model. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture (张培. 2016. 基于 L-A 模型理论的社区应急避难场所承载能力研究. 北京: 北京建筑大学)
- Zhong G C, Lu Y W, Chen W and Zhai G F. 2023. Multi-objective optimization approach of shelter location with maximum equity: an empirical study in Xin Jiekou district of Nanjing, China. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 14(1): 2165973 [DOI: 10.1080/19475705.2023.2165973]
- Zhong G C, Zhai G F and Chen W. 2022. Optimization on spatial distribution of shelter through dynamic evacuation simulation of high density urban area-Xinjiekou case. KSCE Journal of Civil Engineering, 16(11): 4760-4776 [DOI: 10.1007/s12205-022-0533-3]
- Zhou A H, Chen L, Zhu H Y and Chen S Y. 2021. Reasonability of spatial distribution for urban emergency shelter in central district of Beijing at community scale. Journal of Safety and Environment, 21(4): 1662-1669 (周爱华, 谌丽, 朱海勇, 陈思宇. 2021. 社区尺度的北京中心城区应急避难场所布局合理性研究. 安全与环境学报, 21(4): 1662-1669) [DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0832]
- Zhou Y K, Liu J W and Liang J Z. 2018. Comprehensive suitability evaluation for emergency shelters based on improved gray relational analysis method in Fuzhou. Geography and Geo-Information Science, 34(6): 63-70 (周玉科, 刘建文, 梁娟珠. 2018. 基于改进灰色关联的福州市避难所适宜性综合评价. 地理与地理信息科学, 34(6): 63-70) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2018.06.010]

Carrying capacity evaluation of Beijing emergency shelters based on AHP–EWM multi-objective decision modeling

YOU Di^{1,2}, WANG Shixin^{1,2}, WANG Futao^{1,2}, YAN Jun¹, WANG Zhenqing^{1,2}, LIU Wenliang¹,
ZHU Jinfeng¹, WANG Litao^{1,2}, HOU Yanfeng¹

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Emergency shelters can be used for sheltering, rescue, and evacuation of residents after a disaster. These structures are an important part of national public security and emergency management. Evaluating the carrying capacity of emergency shelters is important in promoting the construction of resilient cities and the sustainable development of cities. Beijing is one of only three capital cities in the world that are located in a zone of VIII degree of intensity. It is also the earliest city in China to build emergency shelters, and thus, it is typical and representative in terms of emergency evacuation. In this study, we use remote sensing images, POI, and other multi-source data to construct an evaluation model of the carrying capacity of urban emergency shelters based on multi-objective decision making, and take the Fifth Ring Area of Beijing, where the population distribution is relatively concentrated, as an example.

First, according to the principle of establishing evaluation indexes, evaluation indexes are selected from four aspects: safety, accessibility, effectiveness and security, and relevant experts in disaster evaluation are invited to screen out 14 indexes according to their importance and relevance, constituting a system of evaluation indexes for the carrying capacity of emergency shelters.

Second, subjective and objective weighting methods are used to determine the weights to make up for the lack of single weights. Subjective assignment adopts Analytic Hierarchy Process (AHP), and objective assignment adopts Entropy Weighting Method (EWM). Commonly used weight combination is the average of subjective and objective weights, while this study adopts maximum sum of squares of deviations theory to solve the optimal weight coefficients of the combination of assignments.

Then, based on the multi-objective decision-making model, a 30 m×30 m grid was used as the evaluation unit, and a multi-objective linear weighting method was used to calculate the evaluation scores of the carrying capacity of the emergency shelter. And the natural discontinuity method was used to grade the carrying capacity.

Finally, considering the complexity of the disaster after the occurrence of the disaster, including the degree of damage to the building and the potential secondary disaster impact, and referring to the relevant norms and standards, the evacuation scenarios are categorized into short-term evacuation and medium- and long-term evacuation scenarios according to the number of evacuees. The carrying capacity of different evacuation scenarios is simulated and analyzed using the method of this paper.

Results show that the carrying capacity of the Fifth Ring Area of Beijing is good, but the carrying capacity of the second and third rings is zero, and an imbalance exists between the rings. This study provides qualitative and quantitative basis for the evaluation of the carrying capacity of urban emergency shelters. It also provides decision support for the planning and layout of emergency shelters and the efficient allocation of resources.

Key words: remote sensing, emergency shelter, Analytical Hierarchy Process (AHP), Entropy Weighting Method (EWM), combined empowerment, carrying capacity evaluation, multi objective decision making method, scenario simulation, Beijing

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3901201, 2022YFC3006402, 2022YFC3006403)