

# 基于疏散行为的震灾避难场所服务效率评价

季 珏<sup>1</sup>,高晓路<sup>2</sup>,徐匆匆<sup>1</sup>,许士翔<sup>1</sup>,汤 飞<sup>1</sup>

(1. 住房和城乡建设部城乡规划管理中心,北京 100835; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

**摘 要:**科学评估避难场所的服务效率是提高城市应急水平的前提。传统对避难场所服务效率的评估多偏重于避难场所空间布局的合理性,缺少对避难者的空间布局和避难行为等避难需求的考虑,这会使评估结果造成偏差,从而容易引起资源配置的低效率。本文构建了多主体模拟模型,模拟避难者灾后对避难场所的选择、奔跑、安置等关键疏散行为过程,量化评估该地区避难场所服务效率。本文对比了两种量化评估指标在同一案例评估的差异性,一种是传统方法中空间可达性(服务半径覆盖率),一种是利用疏散行为模拟计算出的避难成功率;北京市海淀区的实证研究显示两项指标在同一案例区有巨大差异。这一分析结果显示,传统评估仅利用服务半径覆盖率这一指标来分析避难场所布局现状及规划的合理性存在不足。通过避难疏散行为的模拟发现,以下指标的使用有望辅助提高评估的真实性:①避难场所的利用效率。由于设施的利用效率不均衡,会导致避难场所超容或闲置的情况。在充分考虑避难场所的有效服务面积和服务人口的基础上,设计“人均避难面积”等反应利用效率的指标就显得十分必要。②避难标识系统的连通性。避难模拟的实验显示避难标识系统可能对避难者逃生疏散具有分流和引导作用,据此,避难场所与周边居民区的标识系统的连通性也是评价其服务效率的关键指标。

**关键词:**震灾避难场所;服务效率;疏散行为;空间可达性;多主体模拟

## 1 引言

避难场所在灾害发生后承担着应急避难和救灾疏散等重要功能。从国际国内的经验来看,避难场所能有效地减少人们的生命和财产损失,例如在1923年日本的关东大地震中,城市中的广场、绿地和公园等公共场所为70%的受灾市民提供了避难场所,并对阻止次生灾害的蔓延起到了积极的作用。

正确评估避难场所的服务效率,是实现避难场所合理规划和布局的首要问题,也是提高城市安全和应急水平的关键。目前避难场所服务效率的评价方法主要有:①利用时间或距离表征的空间可达性度量避难场所的服务水平,这也是目前最常用的方法。主要是基于避难场所的空间位置,利用GIS网络分析、缓冲区分析等空间分析方法,测算一定服务半径范围的覆盖率(郑晓红, 2013),优化避难场

所选址(张培等, 2015; 周兆军等, 2016),这种空间可达性的度量方法可直观明确分析出避难场所空间服务的盲区。但该评价方法的前提是不考虑避难者的空间布局 and 个体差异,然而忽略空间需求的资源均等配置势必会造成资源的浪费;此外,对于避难场所合理服务半径的确定也缺乏科学的论证。②结合避难场所的空间位置和城市人口分布的规律,研究避难场所布局的合理性。通常的做法是利用避难场所不同服务范围内的人口比例,来表征避难场所布局的合理性(施小斌, 2006; 谢军飞等, 2007),特别是,学者们运用两步搜寻法来衡量避难场所与人口在空间服务范围上的合理性(魏冶等, 2014; 周爱华等, 2017)。该方法考虑了避难场所空间分布的同时考虑了服务人口,为避难场所服务质量的评估提供了重要参考,然而评价方法仅考虑避难者的空间位置,缺乏对于避难过程中避难行为的关注,评价结果常与实际有较大出入。

收稿日期:2016-10;修订日期:2017-03。

基金项目:住房和城乡建设部科技计划项目(2016-R2-030) [Foundation: Science and Technology Plan Project of Ministry of Housing and Urban-rural Development of People's Republic of China, No.2016-R2-030]。

作者简介:季珏(1985-),女,内蒙古巴彦淖尔市人,副研究员,主要从事城市空间结构研究,E-mail: jitung99@163.com。

引用格式:季珏,高晓路,徐匆匆,等. 2017. 基于疏散行为的震灾避难场所服务效率评价[J]. 地理科学进展, 36(8): 965-973. [Ji J, Gao X L, Xu C C, et al. 2017. Evaluating method on service quality of seismic emergency shelters based on evacuation behaviors[J]. Progress in Geography, 36(8): 965-973.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.08.005

避难过程由于涉及避难个体、行为、环境等复杂因素,导致避难过程难以实现量化和精准评估。近年来,多主体模拟模型的发展为解决这一问题提供了思路。该模型在居住区位选择、居住空间扩张、土地利用演变等领域已得到非常成熟的应用。在避难疏散行为模拟的过程中,也有学者们利用该模型,基于GIS的网络分析模型等来实现个体疏散过程的模拟(周天颖等, 2001; Chen et al, 2012; Manley et al, 2012);近年来,中国学者基于多主体模型模拟了居住小区等小范围区域居民的疏散行为(窦凯丽等, 2016; 杨杰莹等, 2016),但模拟的结果难以和实际的规划需求相结合。

在城市抗震防灾规划标准(中华人民共和国建设部, 2007)中,紧急避难场所是居民在灾害发生后短时间内前往的第一场所,紧急避难场所布局的合理性直接影响到居民的生命和财产安全,本文将重点对该类别的避难场所进行服务效率的评估,利用多主体模型模拟居民疏散逃离的过程,探讨紧急避难场所服务效率与居民避难行为及环境因素的影响机理;并与传统的规划评价方法作对比。本文可为完善避难场所服务效率评价的指标体系,改进传统规划评价方法提供支撑。研究结果对避难场所的优化布局,提升城市防灾应急水平具有参考价值。

## 2 紧急避难场所服务效率的评价方法

紧急震灾避难场所是城市中所有安全的开敞空间,包括公园、绿地、广场、以及楼间空地等,并且位于地震断裂带和危险源的安全距离之外(Chu et al, 2012)。具体的识别模型参考相关成果(季珏等, 2014)。

紧急震灾避难场所的服务效率评估需要科学和量化,以便于结果更好地为避难场所的空间优化提供支撑。本文将采用两种思路设计量化评价的指标,一种是仅考虑空间位置的避难场所的服务覆盖率,这也是目前规划评估采取的主要指标;另一种,结合避难疏散行为的避难成功率。将在居住区实例评价中探讨两者的差异。

### 2.1 避难场所服务覆盖率

避难场所的可达性是指在灾害发生后人们在有限的时间里到达避难场所的方便程度。在评价避难场所的可达性时,根据避难场所的规划标准,

学者们大多采用500 m作为服务半径(约5 min)(王坤鹏, 2011)。但也有学者认为,灾害发生后,大部分避难者的黄金逃生时间仅为12 s(Neo, 2011)。不同的服务半径(时间)可能导致可达性评价的结果有较大差异,本文利用避难场所不同时间的可达范围的覆盖比率来表征紧急避难场所的可达性,公式如下:

$$A_{t_0} = \frac{\sum_i S_{i,t < t_0}}{S} \quad (1)$$

式中: $A_{t_0}$ 为研究区内紧急避难场所在 $t_0$ 时间内的可达性; $S_{i,t < t_0}$ 表示研究内第 $i$ 个避难场所在 $t_0$ 时间内对应的覆盖面积; $S$ 为评价地区的总面积; $t_0$ 分别按照12 s、1 min、5 min选取。

### 2.2 基于个体的避难成功率的计算方法

从居民角度出发,可成功到达震灾紧急避难场所则避难成功。为此,本文设计了避难成功率指标如下:

$$SR_{t_0} = \frac{P'_{t < t_0}}{P} \quad (2)$$

式中: $SR_{t_0}$ 为 $t_0$ 时间内居民的成功避难率; $P'_{t < t_0}$ 是指在 $t_0$ 时间内已成功实现避难的居民数; $P$ 为避难区域避难者的总数。

避难成功率的计算虽能较真实地反映避难场所的真实服务水平,然而该项指标需结合灾害发生后避难者的实际行为进行统计,如何获得先验值进行预评估是该指标计算的难点。多主体模拟模型的建立为模拟避难疏散过程,获取预评估值提供了新思路。

## 3 基于多主体模拟的疏散行为模型设计

本文将以避难者作为主体,避难场所和所在居住区为其主体环境,通过避难过程中对于主体行为规则的设计研究,模拟避难疏散过程中避难场所选择等行为。

### 3.1 主体和环境

#### 3.1.1 避难者

避难者的自身因素影响个体在疏散逃离过程中的行为决策。例如避难者对周边的熟悉程度、避难知识、身体健康状况、年龄等是影响避难疏散过程中关键的因素(Melinek et al, 1975; 洪婷婷, 2009)。这些因素将在个体的避难行为过程中发挥作用,例

如选择避难场所、避难路径、奔跑等行为过程。

特别是, 避难者对周边情况的熟悉程度会影响其对于避难场所的选择情况, 依据避难者对周边的认知能力, 避难者可划分为理性避难者和感性避难者两类。两类避难者在避难场所、避难疏散路径的选择方面有较大不同。

### 3.1.2 环境

环境主要包括影响避难者选择避难场所以及逃生路径过程中的关键地理因素。具体来讲, 居住区的空间结构、路网结构、人口密度等, 以及避难场所的空间位置、面积容量、设施配备等是主要影响因素。

### 3.2 疏散逃离模拟的概念模型

灾害发生后, 避难主体在前往避难场所避难过程中会受到环境因素及其他主体的影响, 主体之间以及主体与环境之间发生相互作用关系, 进而完成避难过程。

本文从避难者灾害发生后的心理和行为决策入手, 模拟其疏散逃离的过程。对于避难者而言, 首先, 需要选择前往避难的震灾避难场所。在选定目标后, 避难者向避难场所疏散逃离; 到达避难场所后, 如果避难场所可接纳避难者, 则其避难成功; 否则, 避难者需要转向周边避难场所。具体模拟流程如图1所示。

### 3.3 避难疏散行为的规则设计

#### 3.3.1 避难场所的选择

避难者对于避难场所的选择因人而异, 对于熟悉周边情况的居民来讲, 避难场所的距离以及避难面积是其选择避难场所的重要影响因素。

本文中, 利用离散选择模型来反映居民对于避难目的地的选择。具体函数如下:

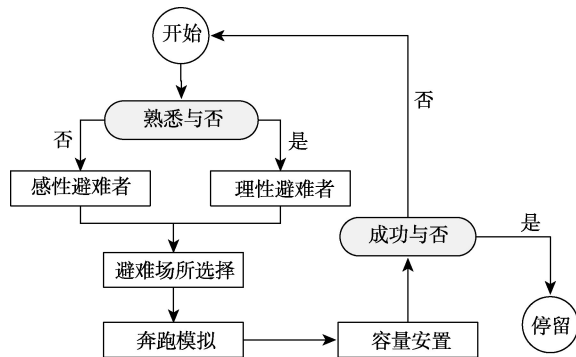


图1 疏散行为过程的决策模型

Fig.1 Decision model for evacuation behavior

$$u_{ij} = \sum_{m=1}^n a_{im} \times x_m$$

$$p_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{j < 3 \text{ km}} u_{ij}} \quad (3)$$

式中:  $u_{ij}$  代表居民  $i$  选择第  $j$  个避难场所的效用;  $x_m$  表示  $m$  个影响因素,  $a_{im}$  为相应的影响系数;  $p_{ij}$  表示居民  $i$  选择第  $j$  个避难场所的概率, 居民  $i$  最终会选择概率最大的一处作为避难场所。特别是, 距离、面积、周边居民的选择概率是关键影响因素, 公式可表达为:

$$u'_{ij} = a' \times d_{ij} + b' \times A_j + c' \times T_{ij} + \zeta \quad (4)$$

$$a' + b' + c' = 1$$

式中:  $u'_{ij}$  表示居民选择避难场所的效用;  $d_{ij}$  表示居民  $i$  到达第  $j$  个避难场所的空间距离;  $\zeta$  为常数;  $A_j$  为第  $j$  个避难场所的避难面积;  $T_{ij}$  为第  $i$  个居民在一定空间范围内选择第  $j$  个避难场所的比例, 这里选取 1 km 作为空间范围的阈值, 主要考虑同一街区居民的相互影响比较显著(主要道路的间距通常在 1 km 以内);  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  为影响系数;

特别是, 理性和感性避难者在选择避难场所的因素权重上存在较大差异。对于熟知周边情况的居民来讲, 通常那些距离较近, 面积较大的避难场所成为其首选, 表现为距离、面积是其选择的主要因素, 而周边居民的选择对其影响较小; 而对于感性避难者而言, 由于缺乏对于周边避难场所的了解, 大多会有从众心理, 周边居民的选择比率是其最重要的参考因素(Manley et al, 2012)。因此, 上述效用模型中, 理性避难者和感性避难者在  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  的参数上会有明显的不同。

#### 3.3.2 疏散逃离过程的模拟

一旦居民确定了避难目的地之后, 便会以最快的速度奔向避难场所。研究发现, 奔跑速度会受到避难者自身条件(例如年龄、健康状况)与道路拥挤程度的影响。学者们通过一系列的行为实验, 对受年龄、身体状况、道路拥挤等影响的奔跑速度系数给予了推定(Melinek et al, 1975; 洪婷婷, 2009)。

#### 3.3.3 避难容量的模拟

当避难者到达避难目的地后, 能否成功避难取决于避难场所的容纳量, 当避难场所当前的承载人数超出避难场所的容纳量时, 居民就需重新选择避难场所; 否则居民则可实现成功避难。避难场所容量的计算公式为:

$$P_j^* = \frac{A_j}{pa} \quad (5)$$



式中: $p_j^*$ 为第 $j$ 个避难场所的容量, $A_j$ 为第 $j$ 个避难场所的面积, $pa$ 为人均有效避难面积。

依据《城市抗震防灾规划标准(GB50413-2007)》,紧急避震疏散场所每位避震人员的平均有效避难面积应不小于 $1\text{ m}^2$ ,但超高层建筑避难层(间)的人均面积不小于 $0.2\text{ m}^2$ 。由于掌握城市超高层建筑避难层(间)的空间数据存在一定难度,本文在室外开敞避难场所的容量估算时,参考学者对于避难行为的研究结论,例如避难个体蹲站( $0.5\text{ m}^2$ )以及躺卧( $1\text{ m}^2$ )的空间需求结果,可采用最低限制 $0.5\text{ m}^2$ 来计算避难场所的最大容量(张丽梅等, 2005)。

### 3.4 模拟平台选择

目前,许多国外研究机构开发了多主体模拟的软件和通用开发平台,如美国华盛顿大学的Urban-sim (<http://www.urbansim.org>),美国西北大学的Netlogo 平台 (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>) 等。其中,Netlogo 软件界面友好,开发语言简捷,与GIS数据的接口较好,本文选用Netlogo 平台实现避难疏散逃离过程的模拟,对上述概念模型进行可视化分析。

## 4 以居住区为实例的避难疏散模拟研究

### 4.1 案例地区及研究数据

本文选取北京市海淀区东南部的一个“居住组团”作为实验区域(图2),对上述评价方法进行实证

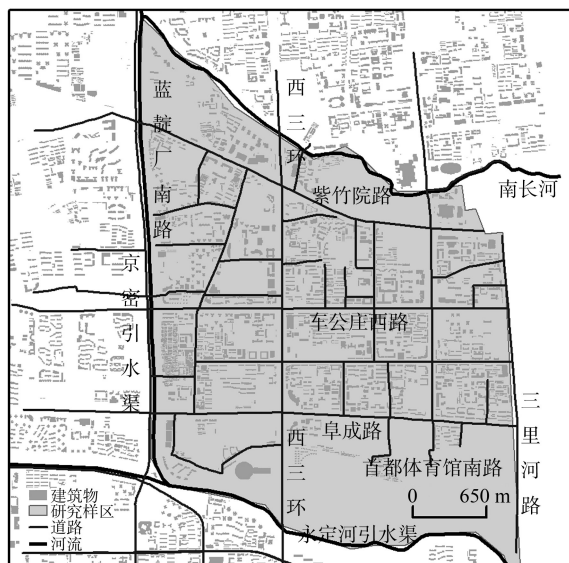


图2 模拟居住样区

Fig.2 Case area

分析。该居住区位于二环到三环之间,由以下几条主要的道路,分别为:蓝靛厂南路—紫竹院路—玉渊潭南路—三里河路和南部的永定河围合而成,面积约为 $10.8\text{ km}^2$ 。该研究区除东部外,其余三面均为河流包围,通过桥与周边区域相连,具有一定独立性。特别是考虑在震灾发生后,有限的桥梁通道对于密集人口的疏散作用有限,由此可假定区域内人口均在本区域内选择避难场所,而外区域的人口也很少来本区域避难。

本项目为国家科技支撑计划项目“城市脆弱性分析与综合风险评估技术与系统”的组成部分,所需的研究数据均来自于课题组。其中建筑物数据来源于北京测绘院1:1000的空间数据。人口数据是参考戚伟等(2013)利用昼夜人口空间化模型,将统计人口数据按照昼夜的时间维度分配到建筑物空间尺度上而得到的。考虑到破坏性震灾在夜间的损失巨大,夜间人口也更接近于常住人口的真实空间布局,主要利用夜间人口进行疏散模拟。在模拟中,参照比例,将人口数据反演到建筑物空间尺度上,变为有独立行为的居民主体。

图3为按照提取模型筛选出的案例区避难场所,可以看出在案例区南部存在较为密集分布的避难场所,而在中部地区,由于建筑物分布密集,避难场所的布局比较松散。

### 4.2 避难疏散模拟及稳定性验证

#### 4.2.1 案例区避难疏散过程的模拟结果

在利用Netlogo 4.3软件中模拟居民避难疏散

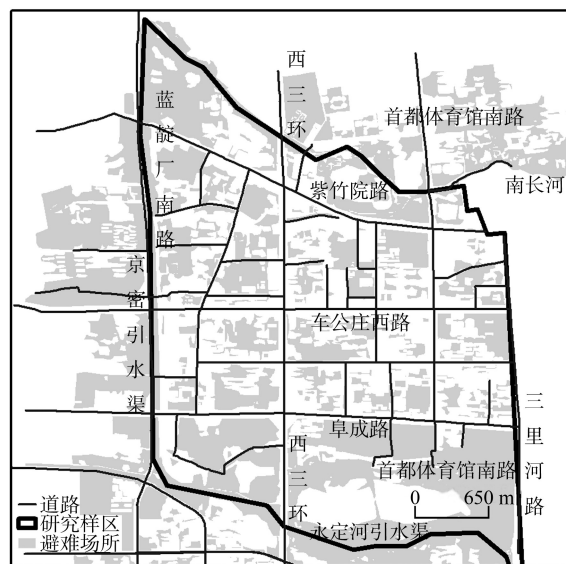


图3 样区震灾紧急避难场所的空间分布

Fig.3 Emergency shelters in the case area

过程中,涉及具体参数设定,例如效用函数计算时,避难场所空间距离、面积、周边居民的选择概率的权重确定,均依据调研结果推算得到(王坤鹏,2011)。需要说明的是,鉴于数据获取的限制,此次模拟实验基于两点基本假设:①假设道路是畅通的,即不考虑道路拥堵对避难者奔跑速度的影响。在这种假设下,道路的修正系数为1,模拟速度大于实际奔跑速度,由此计算的避难成功率较高。②不考虑避难者个体的属性差异,即年龄、身体状况等,因此个人属性对奔跑速度的修正系数也为1。在这两个基本假设下,所模拟的奔跑速度为避难者的最佳状态,避难成功率的计算结果也可能会略高于实际值。

图4为本文在Netlogo软件中设计的基本模拟界面,主要由参数、结果部分和软件可视化窗口三个部分构成。在参数、结果部分,共有以下五个基本的模块:①数据装载模块。主要功能为在Netlogo软件中装载道路、河流、避难场所等地理环境的GIS数据和人口数据。②参数调整模块。对疏散逃离模拟过程中的主要参数进行调整,以观测模型的不同输出情况。参数包括:案例区理性避难者的比例(Rational-rate, RR)(%)、避难场所的面积容量(Compacity)( $\text{m}^2/\text{人}$ )、居民比例尺(Person Scale, PS)(即在软件中1个居民主体代表实际多少个相似的避难者)。③程序执行模块。主要包括避难场所选择和到达模型的模拟运算。④结果显示窗口。包括统计平均避难距离和成功避难率。⑤绘图显示

窗口。包括绘制避难距离—避难成功率的关系图,以及避难场所到访率的累积百分比图。展示窗口部分为在Netlogo软件中的可视化部分,用于显示基本地理数据、实体数据等。

图4展示了避难疏散模拟的结果之一。其中白色链条表示居民群体对避难场所的选择情况。从图中可大致看出,图右下角所示的避难场所是较多居民避难疏散的首选,实际该处为紫竹院公园。从统计结果分析,目前该次模拟中案例区避难场所的服务水平较低,在1 min之内该案例区居民成功避难率仅为11%,5 min时限下居民成功避难率为53.3%。

#### 4.2.2 模型参数的敏感性分析

以上仅为一次模拟所得的评价结果,考虑到模型的稳定性和模拟结果可能受到模型参数的影响,由此计算的避难成功率会有所不同。为提高模拟评价的稳定性和准确性,依次对模型中涉及的两个主要参数进行反复检验。

首先,理性避难者的比例(RR)可能会影响该地区的成功避难率。王坤鹏(2011)对北京市典型居住区调研后发现,这一比例大体为70%,文中采用这一比例作为模拟的默认值。同时,本文对避难者的比例(RR)进行了不同的调整,由图5所示,当RR值逐渐升高时,即居民中理性避难者的比例升高,成功避难率反而降低,但无论RR值如何变动,在1min之内的成功避难率(SR)均低于0.18(图5)。

第二个参数为居民比例尺(PS)。考虑到软件运

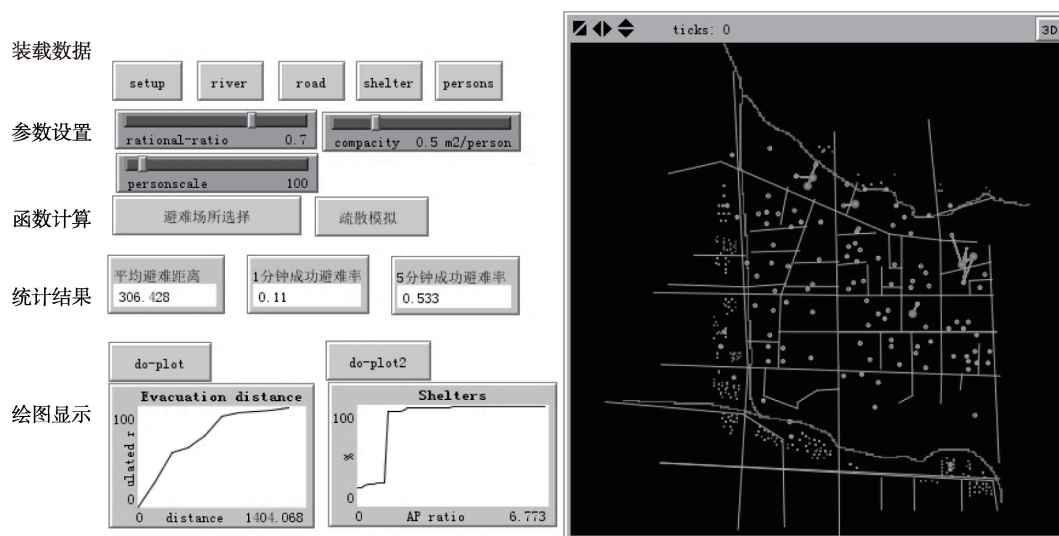


图4 基于个体行为的避难疏散模拟(Netlogo软件平台)

Fig.4 Simulation of emergency evacuation based on the behavior of individual evacuees

算率的限制,居民个体在空间化时不可能以1:1实现,利用居民比例尺可按比例对居民进行空间化。本文调整了居民比例尺以观测成功避难率的变化情况,由图6可见,成功避难率的变化十分平缓,这表明居民比例尺对于避难成功率的影响不显著。

以上参数实验证明,参数的变化对于成功避难率的影响波动较小,表明了模拟模型的稳定性。据此,本文判断从个体行为模拟的角度来看,总体而言,在1 min时限下,该地区居民的成功避难率均在18%以下。

#### 4.3 案例区避难服务效率的提升措施

在既有空间布局下,如何提高避难者的成功避难率是提高避难场所服务质量的突出问题。本文通过分析模拟模型中的变量关系等得出提升避难场所服务效率的政策抓手,例如分析避难成功率与理性避难者比例等相关参数关系、避难场所的利用效率等。结论和相应分析如下:

##### (1) 避难标识系统的完善

耐人寻味的是,经过避难参数实验发现(图6),随着理性避难者比例的上升,避难成功率并没有出现预想的上升,而是呈现了一定的下降趋势。这主要是由于理性避难者选择避难场所时,距离是其考虑的主要因素,由此大多避难者会选择距离最近的避难场所作为避难地。但受到避难容量的限制,部分避难者需要若干次中转才能成功避难,间接拉长了避难距离和避难时间。

在学者调研中发现(王坤鹏, 2011),避难标识系统对于指引避难者路径选择具有极为重要的作用。基于此,本文提出可通过完善避难标识系统来分散避难者的路径选择。此外,与避难相关的教育,例如对于周边避难场所的情况介绍,对于标识

系统的认知培训等,也会间接指引避难者的场所和路径选择,避免过分拥挤的情况出现。

##### (2) 闲置避难场所的有效利用

如前所述,避难中转次数会影响到避难者的避难成功率。模型中(图5)约有2%的避难者需要中转,主要由避难场所的容量限制而导致的。本文设计了到访频率指标( $AP_{ratioj}$ )用于定量的表征避难场所的受访频次,以观测可能发生中转的区域。

$$AP_{ratioj} = \frac{P_{Destinationj}}{P_j^*} \quad (6)$$

式中:如 $AP_{ratioj}$ 等于1,表示所有选择第 $j$ 个避难场所的居民可实现成功避难; $AP_{ratioj}$ 大于1,则表示部分居民可能需要一定的中转才可实现避难。 $P_{Destinationj}$ 表示在避难场所选择时,选择第 $j$ 个避难场所作为首要目的地的居民数量, $P_j^*$ 表示避难场所的容量。

图7中,将模拟模型中到访频率 $AP_{ratioj}$ 可能会大于1的避难场所进行了标识。图中框出的区域,大多数受访超限的避难场所位于案例区东部或东北部地区。对比图7中建筑物的分布可以看出,这些地区建筑物分布比较密集。特别是,在这些超限的避难场所周边,许多避难场所的避难容量仍有闲置,在此情况下,如通过合理的避难场所标识系统,则可有效引导前来避难的居民向周边场所分散,以避免由于中转避难而耽误避难时间。

## 5 结论与讨论

本文运用基于行为的疏散模拟实验去验证传统规划评价方法的不足,并提出相应的规划评价指标;研究结果对完善评价指标体系具有重要作用。

##### (1) 从空间结构的视角,即从避难场所和人口

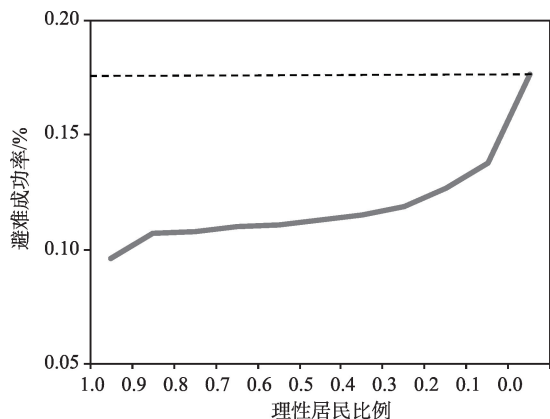


图5 理性居民比例对避难成功率的影响

Fig.5 Parameter sensitivity of successful evacuee ratio

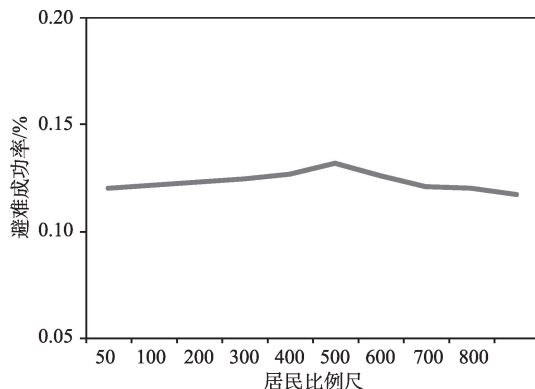


图6 居民比例尺对于避难成功率的影响

Fig.6 Parameter sensitivity of person scale



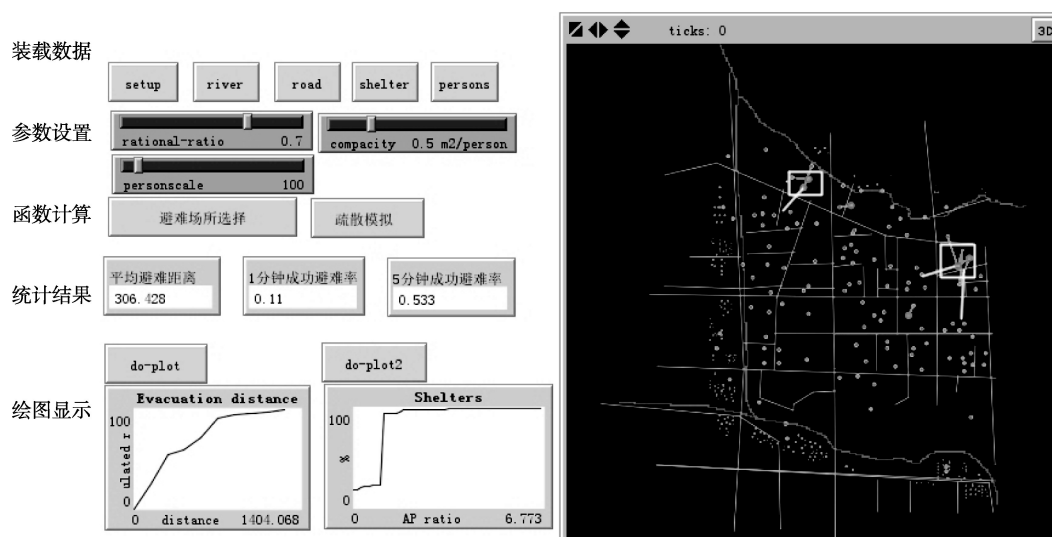


图7 案例区震灾紧急避难场所的受访频率

Fig.7 Shelter visit rate ( $AP_{ratio}$ ) of emergency shelters in the case area

空间匹配的角度考虑紧急避难场所服务质量的测评。其优点是不需要掌握人口属性的分布情况,实际操作强,比较符合中国目前国情,如由于精细尺度的人口分布数据较难获取,统计年鉴又以行政单位作为人口统计的基本单元,空间反演的数据存在数据精度较低的问题等。利用上述评价方法进行紧急避难场所服务质量的评测可从空间上掌握其可达性分布及其与人口匹配的基本情况,对于避难场所的优化有实际意义。但这种方法的缺点是可达性评测的服务范围等阈值的合理性缺乏验证;此外,评测未考虑人口避难疏散的行为,可能会对评价结果产生一定的偏差。

(2) 考虑到避难疏散行为可能会影响到避难者的避难成功率,本文利用多主体模拟方法,模拟个体的疏散逃离过程,进而利用避难成功率指标来评价紧急避难场所的服务质量。实例模拟结果显示,避难成功率除受避难场所空间布局的限制外,还受避难者主观因素的影响,例如避难者受周边熟悉程度等的影响比较显著。据此,本文提出,通过完善避难标识系统,除有效提高避难者的避难意识外,还可有效配置资源,改变部分避难场所闲置的情况。

该评价方法的优点是可从更加精细化的尺度准确地评价避难场所的服务质量。由于考虑了避难疏散过程中的个体行为,例如场所选择、路径选择、逃离奔跑等关键决策过程,评价的结果可更贴近实际疏散过程。但由于模型模拟需要个体准确

的属性信息以及空间区位等信息,在个人数据难以获取的现实情况下,该方法难以在更大的空间范围(如全市)普及。

(3) 通过对比发现,本文采用的两种评价方法在同一案例区应用时存在较大的差异性,例如在居住区尺度上,1 min时限下二者相差约为80%(可达性约为99%,成功避难率的评价结果最高约为18%),由此可见利用常规空间结构评价方法对于避难场所的服务效率进行评价,仍然存在一些不足,利用空间可达性的指标不足以反映一个地区避难场所合理性。科学合理的规划评估指标还应包括:①场所的利用效率。在避难模拟的实验中,由于设施的利用效率不均衡,即有的设施受访容量超限,有的设施存在闲置,可能会导致部分居民由于中转而拉长避难时间。可见,在充分考虑避难场所的有效服务面积和服务人口的基础上,设计场所利用效率的指标就显得十分必要。例如,可用“人均避难面积”指标来辅助衡量。②避难标识系统的连通性。避难模拟实验显示避难场所的利用状况不均导致避难效率下降,这给我们启示:避难标识系统可能对避难者逃生疏散具有分流和引导作用,据此,避难场所与周边居民区的标识系统也是评价其服务效率的关键指标。

此外,由于灾害模拟具有一定的预警和虚拟性,存在大范围实际验证困难等问题。本文特意对各参数的敏感性进行了反复试验,以提高方法的准确性。为进一步提高避难模拟实验的精度,并为防

灾规划提供科学依据,未来本模拟模型还需作以下努力:①通过调研或试验,动态获取行为参数的变动特点,提高模拟模型的估算精度。②本文利用避难疏散的模拟实验,得出了案例区避难者平均避难距离—避难成功的累积百分率的关系图谱。根据这一图谱,可望得出避难场所空间服务的合理阈值。但本文在模型设计时,对于空间距离的测算还存在诸多不足,导致空间阈值无法精确界定,今后继续完善道路距离、避难场所边界等方面的计算,有望使距离的测算更加精准化,提供更具参考性的空间阈值。③避难标识系统对避难场所服务效率的提升会有显著影响,未来还将开展有关避难标识—避难行为的交互模拟实验,为标识系统的设计以及政策的有效性提供依据。此外,建筑密集地区抗震性能较好的建筑及超高层建筑的避难层/间也应成为城市紧急避难场所的有效补充,以提升城市整体的避难服务水平,今后将挖掘这方面数据,继续完善研究结论。

## 参考文献(References)

- 窦凯丽, 陈畅. 2016. 基于NetLogo建模的城市防灾应急疏散模拟研究: 以某大城市校园人群疏散为例[C]//规划60年: 成就与挑战: 2016中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划). 北京: 中国建筑工业出版社. [Dou K L, Chen C. 2016. Study of urban emergency evacuation based on multi-agent simulation with Netlogo: A case study of evacuation in one campus[C]//Planning 60 years: Achievement and challenge: Proceedings of the annual conference on urban planning in China in 2016. Beijing, China: China Architecture Industry Press.]
- 洪婷婷. 2009. 城市绿地防灾避难机能的研究[D]. 福州: 福建农林大学. [Hong T T. 2009. Research on disaster prevention and evacuation function of urban green space[D]. Fuzhou, China: Fujian Agriculture and Forestry University.]
- 季珏, 高晓路. 2014. 紧急避难场所震灾服务效率的评价方法及实证: 以北京市海淀区为例[J]. 地理研究, 33(11): 2105-2114. [Ji J, Gao X L. 2014. Evaluation method and empirical study on service quality of seismic emergency shelters: A case study of Haidian District, Beijing[J]. Geographical Research, 33(11): 2105-2114.]
- Neo. 2011. 地震心理学: 12秒自救机会[J]. 中国减灾, (16): 48-49. [Neo. 2011. Dizhen xinlixue: 12 miao zijiuhui[J]. Disaster Reduction in China, (16): 48-49.]
- 戚伟, 李颖, 刘盛和, 等. 2013. 城市昼夜人口空间分布的估算及其特征: 以北京市海淀区为例[J]. 地理学报, 68(10): 1344-1356. [Qi W, Li Y, Liu S H, et al. 2013. Estimation of urban population at daytime and nighttime and analyses of their spatial pattern: A case study of Haidian District, Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 68(10): 1344-1356.]
- 施小斌. 2006. 城市防灾空间效能分析及优化选址研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学. [Shi X B. 2006. Evaluate the efficacy and optimize addressing option on urban disaster-prevention space[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Architecture and Technology.]
- 王坤鹏. 2011. 北京市防灾空间安全性评价: 避难场所的空间布局及安全性分析[D]. 北京: 中国科学院大学. [Wang K P. 2011. Safety evaluation of disaster prevention space in Beijing: Layout and safety analysis of emergency shelter [D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 魏冶, 修春亮, 高瑞, 等. 2014. 基于高斯两步移动搜索法的沈阳市绿地可达性评价[J]. 地理科学进展, 33(4): 479-487. [Wei Y, Xiu C L, Gao R, et al. 2014. Evaluation of green space accessibility of Shenyang using Gaussian based 2-step floating catchment area method[J]. Progress in Geography, 33(4): 479-487.]
- 谢军飞, 李延明, 李树华. 2007. 北京城市公园绿地应急避险功能布局研究[J]. 中国园林, 23(7): 23-29. [Xie J F, Li Y M, Li S H. 2007. The layout study on the emergency and disaster-prevention functions of the green space of Beijing city park[J]. Chinese Landscape Architecture, 23(7): 23-29.]
- 杨杰莹, 冯瑶, 邵明琦. 2016. 基于虚拟仿真的城市公园的防灾避难服务范围模拟研究[C]//中国园林学会. 中国风景园林学会2016年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社. [Yang J Y, Feng Y, Shao M Q. 2016. Analysis of simulation on evacuation service range of city park based on virtual simulation[C]//Annual conference on Chinese Society of Landscape Architecture in 2016. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 张丽梅, 许倩英, 胡志良. 2005. 天津市避难场所人均用地指标取值研究[J]. 城市, (3): 30-32. [Zhang L M, Xu Q Y, Hu Z L. 2005. Study on average land quota per capita in Tianjin refuge place[J]. City, (3): 30-32.]
- 张培, 张靖岩, 王佳, 等. 2015. 城市社区应急避难场所区位配置模型研究[J]. 中国安全科学学报, 25(6): 172-176. [Zhang P, Zhang J Y, Wang J, et al. 2015. Research on urban community emergency shelter location-allocation model[J]. China Safety Science Journal, 25(6): 172-176.]
- 郑晓红. 2013. 基于GIS的应急避难场所选址与布局研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. [Zheng X H. 2013. Location and layout research of urban emergency shelters based on GIS[D]. Qingdao, China: Ocean University of China.]
- 中华人民共和国建设部. 2007. GB 50413-2007 城市抗震防



- 灾规划标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2007. GB 50413-2007 Standard for urban planning on earthquake resistance and hazardous prevention[S]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 周爱华, 张景秋, 杜姗姗, 等. 2017. 一种北京城区避难场所可达性评价方法[J]. 测绘科学, 42(1): 88-92, 106. [Zhou A H, Zhang J Q, Du S S, et al. 2017. Spatial accessibility of emergency shelters in Beijing based on improved two-step floating catchment area method[J]. Science of Surveying and Mapping, 42(1): 88-92, 106.]
- 周天颖, 简甫任. 2001. 紧急避难场所区位决策支持系统建立之研究[J]. 水土保持研究, 8(1): 17-24. [Zhou T Y, Jian F R. 2001. Study on establishing the supporting system for location of the urgent refuge[J]. Research of Soil and Water Conservation, 8(1): 17-24.]
- 周兆军, 李攀. 2016. 基于GIS的城市应急避难场所布局研究[J]. 科技通报, 32(5): 202-206. [Zhou Z J, Li P. 2016. Study on the layout optimization of the city emergency shelter based on GIS[J]. Bulletin of Science and Technology, 32(5): 202-206.]
- Chen X, Kwan M P, Li Q, et al. 2012. A model for evacuation risk assessment with consideration of pre- and post-disaster factors[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 36(3): 207-217.
- Chu J Y, Su Y P. 2012. The application of TOPSIS method in selecting fixed seismic shelter for evacuation in cities[J]. Systems Engineering Procedia, 3: 391-397.
- Manley M, Kim Y S. 2012. Modeling emergency evacuation of individuals with disabilities (exitus): An agent-based public decision support system[J]. Expert Systems with Applications, 39(9): 8300-8311.
- Melinek S J, Booth S. 1975. An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings[R]. Building Research Establishment Fire Research Station, CP 96/75.

## Evaluating method on service quality of seismic emergency shelters based on evacuation behaviors

Ji Jue<sup>1</sup>, GAO Xiaolu<sup>2</sup>, XU Congcong<sup>1</sup>, XU Shixiang<sup>1</sup>, TANG Fei<sup>1</sup>

(1. The Administration Center of Urban-rural Planning Ministry of Housing & Urban-Rural Development, Beijing 100835, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Service quality of seismic emergency shelters is an important reference of seismic planning. Spatial coverage of seismic shelters has been used for evaluating service quality of seismic emergency shelters. However, population distribution and evacuation behaviors were rarely considered, which rendered the evaluation results inaccurate. Based on a multi-agent simulation model, this study examined earthquake evacuation behaviors, such as choice of destination, routing, and sheltering. Evacuation rate—the rate of evacuees who successfully arrived at seismic shelters to take refuge within a specific time period—was then calculated. Coverage rate of emergency shelters and evacuation rate of residents both were used to indicate the evacuation success rate. A case study was conducted in Haidian district. The evaluation result shows significant difference between the spatial coverage rate of seismic shelters and evacuation rate. It indicates that coverage of emergency shelters alone cannot fully evaluate emergency shelters. Coverage rate of seismic shelters together with use efficiency of emergency shelters and signs for evacuation routes that lead to quick and order evacuation are all crucial indicators for evaluating service quality of seismic shelters.

**Key words:** seismic shelters; service quality; evacuation behaviors; spatial accessibility; multi-agent simulation