

钟光淳, 翟国方, 葛懿夫. 突发灾害事件情境下人群疏散研究进展[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 221–227. [ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang and GE Yifu. Research Progress and Prospects of Crowd Evacuation under Sudden Disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 221–227. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.04.036.]

突发灾害事件情境下人群疏散研究进展*

钟光淳, 翟国方, 葛懿夫

(南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 灾害发生时如何将居民在最短时间内疏散到安全区域, 是城市规划和应急管理面临的重要问题。基于大量国内外文献, 梳理了人群疏散的研究内容、理论、方法及数学模型, 总结了人群疏散时间和效率的影响因素, 比较了疏散研究领域各类方法、模型的优缺点以及应用场景。已有人群疏散研究方法及其研究成果较多, 但在应用尺度上主要聚焦于建筑尺度, 与当前城市防灾规划与应急管理存在一定脱节。此外, 对于多灾种、次生灾害下的疏散研究未能涉及, 在社区尺度疏散研究中未能考虑疏散人群的特异性及灾害的动态影响。未来需进一步探索次生灾害、多灾种下人群疏散研究方法, 将人群疏散研究结果应用于防灾规划及规范制定, 同时关注特殊人群的应急疏散研究。

关键词: 突发灾害; 疏散效率; 疏散实验; 数值模型; 研究进展

中图分类号: X43; X915.5; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)04–0221–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.04.036

城市中心区、地铁、学校等区域往往呈现高密度、高强度、高复杂性的特点, 灾害易损性高, 灾害发生时, 疏散过程中易造成拥堵, 居民难以在最短时间内疏散到安全区域, 严重时甚至发生人群踩踏等公共安全事件。如何在灾害发生时将居民在最短时间内疏散到安全区域, 是城市规划和应急管理面临的重要问题。准确计算居民疏散到避难场所所需时间, 识别拥堵路段, 计算避难场所的空间利用率, 厘清人群疏散效率的影响机制, 可以为优化应急避难场所容量配置、空间布局, 疏散通道优化提供参考。

本研究梳理了人群动态疏散的研究内容、理论与研究方法, 综合对比了典型疏散仿真模型的应用场景、优缺点, 对其应用特点及建模关键技术进行了进一步分析, 总结了人群疏散效率的影响因素, 指出今后人群疏散研究发展方向。

人典型疏散行为决策及心理。其中人群疏散行为决策及运动特性是准确计算疏散时间的基本要素。疏散总时间的影响因素包括行人基本特征、行人疏散行为心理、疏散空间环境以及灾害环境四个方面(图1)。

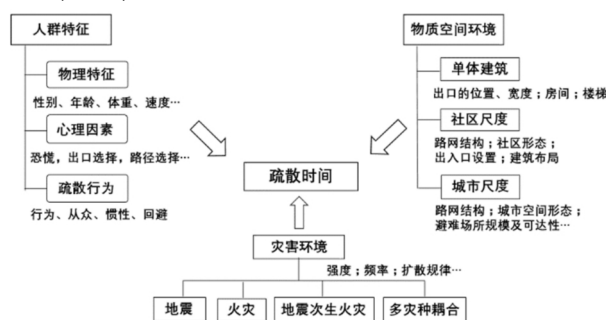


图1 自然灾害下人群疏散时间影响因素

1 人群疏散的主要研究内容

灾时和灾后人群的疏散是一个复杂的过程, 研究难点在于: 行人行为的复杂性、多样性, 疏散空间的连续性、多样性, 灾害环境的不确定性。目前国内外关于人群疏散的研究内容主要包括: ①准确计算特定灾害、特定空间环境下疏散总时间; ②准确获取行人疏散的运动规律; ③分析行

1.1 疏散运动规律

人群疏散过程中的运动规律包括四要素: 速度、流量、密度、基本图(速度–流量关系、速度–密度关系), 通常采用视频观测、行人轨迹采集、疏散演习实验等方式获取。厘清行人运动规律是疏散时间计算和疏散模拟仿真的基础, 也为建筑设计中出口数量、位置和宽度的确定, 以及道路交通规划提供参考。

* 收稿日期: 2021–04–04 修回日期: 2021–06–23

基金项目: 日本学术振兴会项目(18K03022)

第一作者简介: 钟光淳(1994–), 男, 汉族, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要从事城市灾害风险研究、空间规划研究。

E-mail: njupzgc@126.com

通讯作者: 翟国方(1964–), 男, 汉族, 江苏江阴人, 教授, 博士研究生导师, 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研究。E-mail: guofang_zhai@nju.edu.cn

1.2 疏散行为及心理

疏散过程中人的行为和心理会决定其灾时反应时间、疏散出口及路线选择,进而影响整体疏散效率。明确在疏散过程中的疏散者行为特征及影响因素,进而采取有效的、科学的方法对其行为进行定性和定量的分析,能够有效减少突发事件下的人员伤亡,同时也为疏散时间计算和疏散模拟仿真提供了坚实基础。国内外学者通过视频观测、疏散实验、问卷调查等方法发现了人群在疏散过程中所表现出的从众^[1]、惯性^[2]、避让^[3]、跟随行为^[4-5]、羊群行为^[1]、亲缘偏向行为^[6]、不冒险行为^[2]等行为特征,以及恐慌^[7]、疏散环境熟悉度等心理特征。也有学者通过计算机仿真模型,改进传统元胞自动机模型、社会力模型、多智能体模型,模拟疏散过程中人群行为决策。

1.3 疏散时间计算

疏散总时间是评价空间环境疏散能力的关键指标。通过疏散实验、计算机仿真模拟的方法获取特定灾害场景、特定空间环境下人群疏散时间及道路拥堵情况,为避难场所及设施选址、城市空间结构优化、避难疏散通道规划、密集公共场所人流量限制提供依据及基础数据。

2 人群疏散研究理论与方法

人群疏散研究的方法主要包括两大类,分别为疏散实验与调查、计算机仿真模拟。疏散实验与调查是指基于历史疏散视频及疏散演习,直接观测人群疏散过程。计算机仿真模拟是指应用电子计算机设定行为规则,对人群疏散演变过程进行逼真的模仿。国内外学者通过问卷调查^[8]、灾时疏散视频^[1]以及疏散实验^[5]分析人的疏散决策行为,获取疏散速度、运动规律等基本特性,通过疏散实验和计算机仿真模拟^[7]计算得到疏散总时间以及道路拥堵情况。

2.1 疏散实验与调查

2.1.1 基于疏散视频的研究方法

基于疏散视频的研究方法即通过观测疏散视频,分析行人的运动速度、密度、流量和疏散时间等基本信息,以及疏散过程中出口及路径的选择、灾后第一反应。基于疏散视频观测的方法可以分为一般状态下人群行进观测^[9-10]和灾害场景下人群疏散观测。一般状态下人群行进观测是指常态下的人群行进观测。李晓萌^[9]、YANG^[10]通过在地铁、楼梯等关键场景开展行人运动观测,得到人群在无灾害发生时的速度、流量-密度关系,发现了分层现象、带状条纹现象、瓶颈处的振荡等人群自组织现象^[9]。灾后收集现场监控视频,能够直接反映灾时疏散过程,获取真实的路径决策、灾时响应等典型行为特征。吴秀敏等通过分析火灾疏散视频,发现样本人群在疏散响应和路径选择上显著的路径依赖特征、羊群效应特征和从众心理^[1]。YANG^[11]、LI等^[12]、GU^[13]通过汶川地震人员逃生视频,总结了在高度恐慌情况下大规模人群的整体运动特征,获取人群运动速度、密度、流量的变化规律,确定安全人员密度控制标准^[14]。随着计算机分析技术的广泛普及,通过计算机视觉等新技术分析疏散视频成为新的研究趋势,研究人员采用均值滤波算法和

卡尔曼滤波跟踪算法,对视频中的行人进行定位,获取行进路线,统计行人流量^[15]。

2.1.2 基于问卷调查的研究方法

问卷调查是获取人群疏散行为及心理特征最成熟、最直观的研究方法。国内外学者对地铁^[8]、高层建筑^[17]、车站^[18]、体育馆^[19]、机场^[20]等特定建筑尺度场景,公路隧道、城市地下综合体、工业园区或是在城镇片区尺度中的人群开展了关于疏散行为和心理特征的问卷调查。基于不同灾害类别特点,研究人员针对火灾、台风、地震、气象灾害等不同灾害环境开展了疏散行为及安全意识的问卷调查。基于调查结果,研究人员采用皮尔逊卡方检验法分析了与疏散行为存在显著相关性的变量^[9];采用 Logistic 回归分析了性别、年龄、文化程度、性格类型、环境熟悉程度、疏散训练六个因素对疏散效率的影响机制^[19];建立疏散路径选择行为结构方程模型^[21]。但是人在紧急情况下的实际疏散行为反应会与填写问卷的结果不一致,在面临压力时人员的行为可能发生变化^[22]。CAO等^[23]、詹新等^[24]的研究表明人群在问卷中选择跟随他人和帮助行为的比例,与疏散实验中实际出现跟随行为、帮助行为的比例有显著差异;相比于疏散前的问卷调查,疏散演习中的理性选择比例下降了32%。

2.1.3 基于疏散实验的研究方法

疏散演习实验能够较真实地反映出疏散出口及避难路径的选择,获取速度-密度关系等基础行进数据,为建筑标准的制定以及行人交通设施规划提供基础数据,同时也可用于疏散模型参数的校对和模拟结果的验证。国内外学者通过疏散实验研究了人群典型的疏散行为,如从众行为^[25]、自组织^[26]、快即是慢效应^[27]、领导与追随行为^[28]、帮助行为以及寻找依附物行为^[29]。在出口选择方面,行人依据自身到出口的距离以及出口附近人员密度两个因素选择出口,且距离因素的权重大于密度权重^[30]。疏散路径选择方面,在低能见度条件下典型的移动模式是先寻找墙壁,然后沿墙壁走,直到找到出口^[31]。在良好的能见度条件下行人倾向于选择没有他人阻挡的路线^[23];在能见度为零时,选择跟随前面的行人,同时倾向于触摸墙壁和障碍物并沿其移动^[28]。

开展真实灾害下人群疏散实验存在安全问题、道德问题和伦理问题,为了较为逼真地营造灾害场景,国内外学者通过使用不同透明度的眼罩^[32]、“跑步机+头盔”构建虚拟环境平台^[33]等方法构建火灾场景。基于 Lambert Beer 规则^[32],研究人员通过改变眼罩的透明度来调节疏散环境的烟雾密度^[34],记录人群的疏散时间、移动速度和疏散路线,建立了不同能见度下疏散速度与人员密度的函数模型^[29]。实验结果表明在正常能见度条件下,跟随行为对疏散效率有负向影响。而在低能见度条件下,跟随行为有助于提升疏散速度^[31]。

在实际疏散场景中,儿童、老年人、残疾人等特殊群体的疏散速度、灾后反应时间明显慢于青年人,疏散行为及选择也与青年人有较大差异。研究人员在幼儿园开展疏散实验获取了儿童疏散前灾害响应时间^[33],疏散运动速度、密度、流量及三者之间的函数关系,比较了儿童与成人的密度-速度关系曲线。当前视觉障碍人群疏散的实

验研究主要有盲人疏散速度研究^[36]以及疏散模式研究^[37]。张森^[37]等在室内开展视觉障碍者无引导员疏散、每人配置引导员疏散以及单引导员集中疏散三种模式下的疏散实验,发现单引导员集中疏散模式的平均速度最高。

2.2 计算机仿真模拟

召集大量人员在特定区域内开展疏散演习实验,同时对参与人员运动轨迹进行记录追踪是十分困难的。计算机模拟仿真则是通过设定行人的行为规则,模拟疏散演变过程,避免了疏散实验大量人力物力的投入。常见的疏散仿真模型分为微观模型和宏观模型两类。宏观模型^[38]将人群的运动类比为流动,采用流体动力学中偏微分方程来描述人群的速度和密度随时间的变化趋势。宏观模型优点是计算效率高,但是由于人的移动无法同液体或气体一样严格遵守物理规律,模型过于理想化,无法反映个体之间的相互作用和异质性。微观模型将人员视为单独的粒子,考虑个体间的相互影响进而得到群体的行为特征。其优势在于模型参数准确,能够体现个体差异,运动描述更准确、更自然,缺点是计算量较大。微观模型可分为基于力的模型(如社会力模型^[39])、基于网格的模型(如元胞自动机模型^[40])和基于速度的模型(如RVO模型)。

2.2.1 元胞自动机

元胞自动机(CA)模型^[40]是基于相邻元胞的状态在时间维度上不断演化、空间相互作用和时间因果关系局部化的网格动力学模型,具有模拟复杂系统时空演化的能力。CA模型的演化规则包括时间离散规则、空间离散规则、局部状态更新规则三方面(图3)。空间离散规则的重点是确定合理的元胞形状和邻域规则。常用的元胞形状有方形^[40]、六边形^[41]和voronoi图^[42]。邻域规则表示元胞状态更新时,行人下一步移动的目标元胞。常见的邻域规则包括冯·诺伊曼邻域,摩尔邻域^[40],以及扩展的摩尔型邻域(图4)。时间离散规则方面,疏散个体在单位步长内更新位置和状态。更新机制有同步更新^[40]、异步更新^[43]两类。同步更新是指同时更新所有人员的状态,过程中多个个体在同一时间步选择同一个元胞,进而产生冲突。目前解决冲突的方法包括随机法^[42],博弈论方法^[44]以及摩擦参数法^[41]。基于局部状态更新规则的不同,CA模型分为格子气模型、场强模型和其他势场模型。格子气模型^[43]设定行人在每个时刻都有一个偏好方向,通过计算移动概率模拟移动过程。Burstedde^[5]等首先提出了二维CA场强模型,Kirchner等^[45]提出场强模型中静态吸引力和动态吸引力的计算方法,定量表征出口对行人的吸引力以及人与人之间的相互作用。

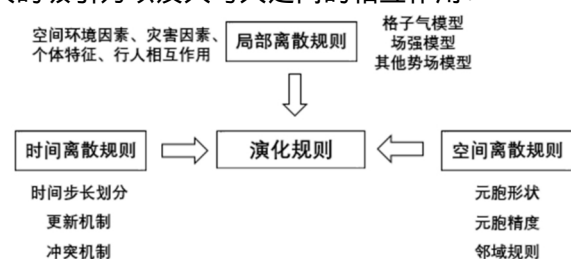


图3 元胞自动机演化规则

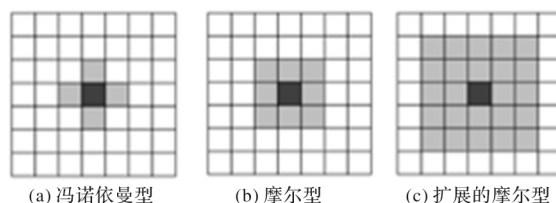


图4 邻域更新规则

传统元胞自动机在模拟人群疏散时有以下不足:疏散速度恒定;未考虑灾害作用;行人轨迹线均沿45°和90°方向,与真实疏散轨迹不符。国内外学者改进传统CA模型演化规则以考虑障碍物和灾害等因素的影响,同时准确模拟典型疏散行为以及疏散过程中速度的变化。研究人员通过优化时间步长划分、更新机制以及冲突机制来描述疏散过程中不同速度的行人。张鑫龙等^[46]将元胞空间划分为更细小网格,令单个行人占据多个网格以便展现行人间微观行为。单位步长内行人移动的元胞数不同,进而表征个体速度的差异。在考虑障碍物影响方面,KIRCHNER提出的原始场强模型采用欧几里得距离计算静态场强^[45],仅适用于具有凸边界且没有障碍物的简单场景。对于内部有障碍物的复杂场景,NISHINARI等^[47]提出改进算法,利用Dijkstra算法计算静态场强,引入墙体排斥场,准确模拟了拐角处的疏散。对于多出口的疏散环境,翟越^[2]等基于元胞到出口的距离和出口附近人群密度建立双因素出口选择模型,也有学者还考虑了出口的尺寸效应提出三因素选择模型^[48],引入对不同出口的熟悉程度^[49],使仿真过程与结果与实际情况更加接近。

疏散仿真还需要充分考虑疏散场景中灾害因素的影响。火灾对行人疏散的影响表现在两方面:火灾对于行人的物理作用,即处于火边界伤害范围内的人员会发生伤亡,火灾烟气自身减光性和毒性降低疏散速度;火源以及火灾烟气带来行人心理变化,如恐慌、逃避等心理,从而加快行进速度。国内外学者改进传统CA模型,引入火灾场强^[50]、火灾排斥力^[51]、火灾危险度^[52],改进转移概率计算公式,模拟行人对火源的规避疏散和恐慌心理。为模拟地震下人群疏散过程,陈杨^[48]提出考虑地震破坏的CA模型,模拟地震逃生中人群对建筑内部发生破坏的结构的规避行为。张艳娟^[53]、彭长佳^[54]等将CA疏散模型与地震下建筑有限元倒塌模拟在时空上耦合,得到真实的地震伤亡人数及危险区域。

改进CA模型中局部状态更新规则,模拟人群疏散特定的行为心理特征,包括避让^[3]、恐慌情绪^[42]、跟随行为^[55]、从众行为^[56]、帮助行为^[57]、惯性行为以及不冒险行为^[2]。总结元胞自动机模拟典型疏散行为(表1)。

2.2.2 社会力模型

1995年,HELBING和MOLNAR^[39]提出了社会力模型,借鉴牛顿力学,从微观角度模拟人群在疏散过程中的行人特征,用直观的数学公式描述人群运动规律。社会力模型的动力学方程为:

$$\begin{aligned} \vec{F}_a(t) = & \vec{F}_a^0(\vec{v}_a^0, \vec{e}_a^0) + \sum_{\beta} \vec{F}_{a\beta}(\vec{e}_a^0, \vec{r}_a, \vec{r}_\beta) + \sum_{B} \vec{F}_{aB}(\vec{e}_a^0, \vec{r}_a - \vec{r}_B) + \sum_i \vec{F}_{ai}(\vec{e}_a^0, \vec{r}_a - \vec{r}_i, t) \end{aligned} \quad (1)$$

表 1 CA 模型模拟典型疏散行为

典型文献	疏散行为	典型文献	疏散行为
YANG L Z 等 ^[6]	亲缘偏向行为	MURAMATSU M 等 ^[43]	从众行为
VARAS A 等 ^[42]	考虑障碍物	翟越等 ^[2]	不冒险，惯性行为
杨灿等 ^[56] ，NISHINARI K 等 ^[58]	跟随行为	KIRCHNER A 等 ^[45]	快即是慢
宋英华等 ^[3]	避让行为	高国平等 ^[58]	帮助行为

表 2 社会力模型模拟典型疏散行为

典型文献	疏散行为	典型文献	疏散行为
ZARBOUTIS N 等 ^[67]	人行道形成，振荡摇摆	李天贝等 ^[7]	恐慌情绪传播
HELBING D 等 ^[66]	拥堵，快即是慢，从众行为	PANX S 等 ^[68]	竞争行为，排队行为，从众行为
YUAN Zhilu 等 ^[69]	右侧运动倾向性	JIA Hongfei 等 ^[70]	跟随行为

表 3 多智能体模型模拟典型疏散行为

典型文献	疏散行为	典型文献	疏散行为
PELECHANO N 等 ^[74]	排队、推搡行为、恐慌	NISHINARI K ^[58]	竞争与协作行为
BRAUN A ^[72]	从众行为，避障行为	YUAN Zhilu 等 ^[69]	竞争行为、排队行为、从众行为

$F_{\alpha}(t)$ 为行人所受到的合力，式(1)右侧分别为驱动力，行人间作用力，行人与边界或障碍物的作用力，吸引力合力。

2000 年，HELBING 等^[59]提出了另一种社会力模型(式(2))。该模型用社会心理力和物理力来描述人类疏散行为，包括在疏散过程中行人分别受到自驱动力 f_d 、行人间互相的作用力 f_{ij} 、以及行人与障碍物之间的作用力 f_{iw} 。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(i \neq j)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (2)$$

式中： f_{ij} 和 f_{iw} 分别代表人群之间相互作用力、人与障碍物之间的相互作用力； m_i 表示行人体重； $v_i^0(t)$ 为期望速度； τ_i 表示加速时间； $v_i(t)$ 表示实际疏散速度。

国内外学者修正传统社会力模型，考虑了地震力的影响^[7 60]，模拟了人群间的碰撞、熟人之间相互吸引力^[63 65]、恐慌心理，修正了期望速度^[7]。肖梅玲等^[7 60 62]推导疏散过程的地震力，加入传统社会力模型中。同时引入恐慌因子和各向异性因子，模拟恐慌心理对其期望速度的影响，以及视野范围内的其他行人和障碍物的作用力。当前地震灾害下的疏散模型多集中于单体建筑内部^[53]，在今后的研究中，需要开展更大尺度的地震疏散研究，结合区域建筑震害数值模拟^[63]，考虑建筑结构倒塌，非结构构件的掉落对疏散通道的阻碍，得到更准确的疏散总时间。

也有学者将社会力模型与其他模型相结合来研究人群疏散问题。LIN 等人^[64]基于社会力量模式提出了一种基于多智能体的紧急情况下人群疏散系统。GUO 等^[65]基于社会力模型提出了一种格子气模型模拟了成拱及阻塞现象。社会力模型具有连续性特征，能够精确描述多层次的作用力，模型中的行人在人流密度大以及处于恐慌状态时能够相互接触，这是 CA 模型不具备的。社会力模型还模拟出了行人的自组织行为^[66]，比如自动渠化、流动条纹^[66]、瓶颈摆动^[67]、从众行为^[68]、快即是慢^[66]效应等自组织现象。梳理总结社会力模型模拟人群疏散典型行为(表 2)。

2.2.3 智能体模型

智能体(Agent - based model) 是指具有智能行为特征的个体。ABM 模型采用自下而上的建模方式，通过微观行为的建模来表现系统宏观的涌现性特征。该模型将每一个疏散者视为一个智能体，能够感知周边环境，并与其它智能体共享信息，通过对单个疏散者的行为建模来表现宏观的人群疏散特征。相比于元胞自动机、社会力模型、流体动力学模型，ABM 模型能够模拟每个行人独特的疏散行为，模拟行人的完全异质性，从而实现更为精确的仿真，使得研究结论更贴近真实疏散场景。ZARBOUTIS 等^[71]采用 ABM 模型模拟隧道火灾下隧道疏散过程，分析个体行为对整体疏散效率的影响。BRAUN 等^[72]提出了基于社会力模型的 ABM 模型，模拟不同楼层和障碍物对智能体的影响，以及在紧急情况下行人之间的相互作用。张学锋等^[73]基于多智能体技术提出多重灾害环境下人员疏散感知模型，将人员仿真与环境灾难建模结合，通过建立灾难数学模型和个体感知模型来驱动人员的决策以及行动。梳理总结多智能体模型对典型疏散行为的仿真模拟(表 3)。

社区及城市尺度的疏散仿真模拟基于多智能体的仿真平台(Anylogic、pathfinder，STEPS)^[75 - 76]来完成疏散过程模拟，分析拥堵位置及原因，厘清路网结构、街坊形态、出入口设置和建筑布局对疏散效果的影响机制^[77 - 78]。基于仿真结果，提出空间层面、灾害救援、应急管理三方面优化策略。目前在社区尺度的疏散研究多注重空间层面，简化了人与灾害环境的互动，较少考虑疏散行为决策以及灾害环境对疏散过程和疏散效率的影响^[79]，在今后的研究中应加强灾害与人群疏散过程的互动研究，将区域建筑震害模拟、火灾蔓延模型、毒气扩散模型、建筑倒塌导致道路通行效率降低等灾害发生、扩散的数值模拟应用到应急疏散过程中，提升大尺度疏散模拟研究的真实性和准确性。

3 总结与展望

已有的人群疏散研究方法案例丰富,国内外学者采用疏散实验、视频观测、问卷调查的方法获取人群运动规律和疏散行为决策规律,采用 CA 模型、社会力模型、多智能体模型等仿真模型模拟人群疏散过程,得到疏散总时间。但在研究尺度上,现有研究多集中在建筑内部疏散,研究成果与当前城市综合防灾规划与管理存在一定脱节。此外,对于多灾种、次生灾害下的疏散研究未能涉及,在社区尺度疏散研究中未能考虑人群与灾害环境的互动,对特殊人群疏散的关注太少。建议从以下方面继续广泛深入地开展灾害情境下应急疏散的研究工作:

(1) 探索次生灾害、多灾种下人群疏散研究方法。当前疏散研究的灾害环境以单灾种为主,现实中通常由多种灾害共同作用,或是由地震引发火灾、毒气泄露、泥石流等次生灾害。不同灾种下,行人视觉、听觉、触觉的响应有显著差异,不同灾害环境下的疏散速度、疏散路径选择、行为决策有较大差异。不同灾害发生概率、危险性,造成承灾体破坏的模式各有特点。未来的研究需建立多重灾害环境下的应急疏散模型,厘清多灾种同时发生时的相互关系,主次灾害之间的相互关系,以及人群面对各类灾害时的响应特征。

(2) 推动适用于城市尺度、社区尺度的人群疏散研究。目前社区尺度、城市尺度的疏散研究较少将疏散行为因素纳入,未能考虑灾害的影响,缺少实际疏散中的物理真实感。在真实的地震中,建筑楼板会不断抖动,人在疏散过程中会有跌倒、停滞的状态,道路两旁的建筑结构倒塌,堵塞疏散通道,降低疏散效率。火灾在室外空间扩散、蔓延,人群会自主避开燃烧区域,改变疏散路径。今后在社区及城市尺度的疏散研究中,需要模拟疏散行为和灾害因素对疏散过程和疏散空间环境带来的不利影响,融合疏散模型与灾害物理模型(城市建筑地震弹塑性分析, FDS 火灾模拟等),对灾害发生和扩展的过程进行物理建模,创造具有物理真实感的疏散情景。

(3) 将人群疏散研究应用于城市防灾规划及规范制定。现阶段城市层面的人群疏散研究较少,在理论框架和方法模型上难以有效衔接城市综合防灾规划和应急管理,影响了疏散研究领域既有成果在城市规划管理领域的应用。相比一般的城市设施配置,在避难场所空间配置时需考虑更多的影响因素,比如避难场所容量、出入条件、疏散时间、疏散过程中是否会有拥挤情况等。将应急疏散仿真应用于避难场所的选址与配置当中,能够直观地发现配置上的不足,更好地指导避难场所的空间选址和容量配置;相比通过路网距离计算疏散时间的传统方法,不仅能更精确的得到每个避难场所接纳居民的时间和总疏散时间,还能可视化地发现疏散道路上的拥挤路段;通过多轮的应急疏散模拟,以总疏散时间和拥堵路段长度为目标函数,完成避难场所空间选址及布局优化。因此,未来研究应更多地面向城市层面的应急疏散,有针对性地研究城市大规模疏散理论、模型,用于避难场所及通道规划,防灾安全空间布局。

(4) 关注特殊人群的应急疏散研究。现有应急疏散模型和运动特征研究多以正常人为研究对象,而残障人群在自身因活动能力较差,反应迟缓,往往成为疏散过程中最大的受害者。当前关于残障人群的疏散研究较少,今后研究中需加强不同残疾类别运动特征研究的系统化,获取不同残疾类别人群的行进速度,占据的空间面积大小,疏散模式,路径选择,建立残障人群运动速度、疏散决策数据库,厘清残疾人与健康人在疏散过程中的相互影响及协助共同疏散行为。

参考文献:

- [1] 吴秀敏, 蹇兆刚, 唐志伟, 等. 基于火灾监控视频的人员疏散行为统计分析[J]. 火灾科学, 2013, 22(2): 10-16.
- [2] 翟越, 薄杰, 侯亚楠, 等. 考虑多因素的元胞自动机室内人员疏散模拟研究[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 72-76.
- [3] 宋英华, 张宇, 霍非舟, 等. 考虑避让行为的人员疏散元胞自动机模型研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(6): 975-981.
- [4] GUO R Y, HUANG H J, WONG S C. Route choice in pedestrian evacuation under conditions of good and zero visibility: Experimental and simulation results [J]. Transportation Research Part B, 2012, 46: 669-686.
- [5] ZHANG Y C, XIE W, CHEN S M, et al. Experimental study on descent speed on stairs of individuals and small groups under different visibility conditions [J]. Fire Technology, 2018, 54: 781-796.
- [6] YANG L Z, ZHAO D L, LI J, et al. Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on cellular automaton [J]. Building and Environment, 2005, 40: 411-425.
- [7] 李天贝, 肖梅玲, 徐子祺, 等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 281-286.
- [8] 刘严萍, 王世通, 赖迪辉. 天津地铁乘客火灾疏散行为特征调查研究[J]. 灾害学, 2017, 32(6): 169-172.
- [9] 李晓萌. 人员疏散行为的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [10] YANG L, RAO P, ZHU K, et al. Observation study of pedestrian flow on staircases with different dimensions under normal and emergency conditions [J]. Safety Science, 2012, 50(5): 1173-1179.
- [11] YANG X L, WU Z L, LI Y C. Difference between real-life escape panic and mimic exercises in simulated situation with implications to the statistical physics models of emergency evacuation: The 2008 Wenchuan earthquake [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(12): 2375-2380.
- [12] LI M F, ZHAO Y X, HEL R. The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China [J]. Safety Science, 2015, 79: 243-253.
- [13] GUZ Y, LIU Y Z, SHIWAKOTI Nirajan. Video-based analysis of school students' emergency evacuation behavior in earthquakes [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 18: 124-135.
- [14] ZHANG X L, WENG W G, YUAN H Y. Empirical study of crowd behavior during a real mass event [J]. Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment, 2012, 8(8): 18-22.
- [15] 杨谱. 基于视频图像处理的地铁站拥挤风险预测与人群疏散[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [16] 何理, 蒋仲安, 穆娜娜. 地铁乘客特性与疏散行为特征相关性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 94-100.
- [17] 袁启萌. 高层建筑火灾情景下人群疏散行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [18] SHIWAKOTI N, TAY R, STASINOPOULOS P, et al. Passengers' awareness and perceptions of way finding tools in a train station [J]. Safety Science, 2016, 87: 179-185.
- [19] 代伟. 群集应急疏散影响因素及时间模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [20] SHIWAKOTI N, WANG H, JIANG H W, et al. A 'role-rule' model to examine passengers' likely behaviour and their perceived ability to evacuate safely from airport in an emergency evacuation [J]. Safety Science, 2020, 124: 104-114.
- [21] 刘毅. 城市地下综合体环境中的疏散行为研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [22] 柯霄, 程五一, 邓云峰, 等. 漳州古雷“406”事故居民疏散

- 行为调查及相关性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 48-54.
- [23] CAO S C, FUL B, WANG P, et al. Experimental and modeling study on evacuation under good and limited visibility in a supermarket [J]. Fire Safety Journal, 2018, 102: 27-36.
- [24] 詹新, 饶平, 朱孔金, 等. 疏散试验前后高校学生疏散行为与心理特征对比分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 255-258.
- [25] SEYFRIED A, PASSON O, STEFFEN B, et al. New insights into pedestrian flow through bottlenecks [J]. Transport. Sci., 2009, 43: 395-406.
- [26] MA J, SONG W G, TIAN W, et al. Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China [J]. Saf. Sci., 2012, 50: 1665-1674.
- [27] LIN P, MA J, LIU T Y, et al. An experimental study of the "faster-is slower" effect using mice under panic [J]. Phys. Stat. Mech. Appl., 2016, 452: 157-166.
- [28] 李丽华. 高层建筑应急疏散中个体与小群体行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [29] XIE W, LEE E W M, CHENG Y, et al. Evacuation performance of individuals and social groups under different visibility conditions: Experiments and surveys [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 47: 527-534.
- [30] FANG Z M, SONG W G, ZHANG J, et al. Experiment and modeling of exit-selecting behaviors during a building evacuation [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Application, 2010, 389: 815-824.
- [31] CAO S C, LIU X D, CHRAIBI M, et al. Characteristics of pedestrian's evacuation in a room under invisible conditions [J]. Int. J. Disaster Risk Reduct., 2019, 41: 101-115.
- [32] JEON G Y, HONG W H. An experimental study on how phosphorescent guidance equipment influences on evacuation in handicapped visibility [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(9): 34-42.
- [33] 徐建, 朱小雷, 王朔. 基于现场眼动实测及虚拟场景的地铁站路径选择实验——以三个广州地铁站为例[J]. 新建筑, 2019(4): 26-32.
- [34] JEON G Y, KIM J Y, HONG W H, et al. Evacuation performance of individuals in different visibility conditions [J]. Building and Environment, 2011, 46: 1094-1103.
- [35] YAO Y S, LU W. Children's evacuation behavioral data of drills and simulation of the horizontal plane in kindergarten [J]. Safety Science, 2021, 133: 105-117.
- [36] KULIGOWSKI E, PEACOCK R, WIESS E, et al. Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments [J]. Fire Safety Journal, 2013, 62: 230-237.
- [37] 张森, 曾坚, 刘晓阳, 等. 视觉障碍人群在紧急状态下的疏散模型研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 69-73.
- [38] HENDERSON L F. On the fluid mechanics of human crowd motion [J]. Transportation Research, 1974, 8(6): 509-515.
- [39] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [40] BURSTEDDE C, KLAUCK K, SCHADSCHNEIDER A, et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton [J]. Physica A, 2001, 295: 507-525.
- [41] BERG J V D, LIN M, MANOCHA D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 1928-1935.
- [42] VARAS A, CORNEJO M, MAINEMER D, et al. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles [J]. Physica A, 2007, 382: 631-642.
- [43] MURAMATSU M, IRIE T, NAGATANI T. Jamming transition in pedestrian counter flow [J]. Physica A, 1999, 267: 487-498.
- [44] ZHENG X P, CHENG Y. Conflict game in evacuation process: A study combining cellular automata model [J]. Physica A, 2011, 390: 1042-1050.
- [45] KIRCHNER A, SCHADSCHNEIDER A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics [J]. Physica A, 2002, 312: 260-276.
- [46] 张鑫龙, 陈秀万, 李怀瑜, 等. 一种改进元胞自动机的人员疏散模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(09): 1330-1336.
- [47] NISHINARI K, KIRCHNER A, et al. Extended floor field CA model for evacuation dynamics [J]. IEICE Trans. Inf. Syst., 2003, 87: 726-732.
- [48] 陈杨. 基于行人行为特征和元胞自动机的地震疏散研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [49] 高国平. 建筑内人员疏散的行为特征与疏散环境研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [50] 金泽人, 阮欣, 李越. 基于元胞自动机的火灾场景行人疏散仿真研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 1026-1034.
- [51] 孟俊仙, 周淑秋, 饶敏. 基于元胞自动机的人员疏散仿真研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(5): 119-125.
- [52] 杨立中, 方伟峰, 黄锐, 等. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J]. 科学通报, 2002, 47(12): 896-892.
- [53] 张艳娟. 基于单体建筑的人员疏散及地震伤亡评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [54] 彭长佳. 基于抗震性能分析的人员避震及疏散评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [55] 杨灿, 陈群, 陈璐. 考虑在能见度受限下行人跟随行为特性的建模与模拟[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 87-101.
- [56] 陈海涛, 刘占, 张立红, 等. 低能见度情况下从众行为对疏散的影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 165-170.
- [57] 高国平, 管昌生. 考虑帮助行为的人员疏散元胞自动机模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 56-61.
- [58] NISHINARI K, SUGAWARA K, KAZAMA T, et al. Modelling of self-driven particles: foraging ants and pedestrians [J]. Physica A, 2006, 372: 132-141.
- [59] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, 407: 487-490.
- [60] 严铭姣, 肖梅玲, 杨旸, 等. 地震人群疏散动力模型及仿真分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 238-244.
- [61] 徐子祺. 昆明凤凰村地震疏散仿真研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [62] XIAO M L, CHEN Y, YAN M J, et al. Simulation of household evacuation in the 2014 Ludian Earthquake [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14: 1757-1769.
- [63] 工程地震灾变模拟: 从高层建筑到城市区域[M]. 北京: 陆新征, 科学出版社, 2015.
- [64] LIN Q Y, JI Q G, GONG S M. A crowd evacuation system in emergency situation based on dynamics model [C]// International Conference on Interactive Technologies & Sociotechnical Systems, 2006, Berlin, 4270: 269-280.
- [65] GUO R Y, HUANG H J. A mobile lattice gas model for simulating pedestrian evacuation [J]. Physica A 2008, 387: 580-586.
- [66] HELBING D, BUZNA L, JOHANSSON A, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions [J]. Transportation Science, 2013, 219(5): 5495-5515.
- [67] ZARBOUTIS N, MARMARAS N. Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire [C]// Cognition, Technology and Work, 2004, 6: 117-126.
- [68] PAN X S, HAN C S, DAUBER K, et al. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations [J]. AI and Society, 2007, 22: 113-132.
- [69] YUAN Zhilu, JIA Hongfei, ZHANG Linfeng, et al. Simulation of Pedestrian Behavior in the Collision-Avoidance Process considering Their Moving Preferences [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2017: 1-11.
- [70] YUAN Zhilu, JIA Hongfei, ZHANG Linfeng, et al. Simulation model of self-organizing pedestrian movement considering following behavior [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18: 1142-1150.
- [71] ZARBOUTIS N, MARMARAS N. Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire [J]. Cognition, Technology and Work, 2004, 6(2): 117-126.
- [72] BRAUN A, BODMANN B E J, MUSSE S R. Simulating virtual crowds in emergency situations [C]// Proceedings of the ACM symposium on virtual reality software and technology, Monterey, CA, USA, 2005: 244-252.
- [73] 张学锋, 张成俊, 白晨曦, 等. 基于智能体技术的多重灾难人员疏散感知模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 534-541.
- [74] PELECHANO N, ALLBECK J M, BADLER N I. Controlling individual agents in high density crowd simulation [C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation, San Diego, CA, USA, 2007: 99-108.
- [75] 朱剡. 基于 STEPS 的历史地段火灾疏散模拟研究[J]. 上海城市规划, 2016(1): 45-50.
- [76] 左进, 史吉康. 基于 Anylogic 仿真模拟的高密度传统街区应急疏散研究——以天津小白楼五号地为例[J]. 南方建筑, 2019(3): 82-88.

- [77] 黄丽蒂, 许欣欣, 刘莹, 等. 东北老龄化社区路网疏散仿真模拟及优化[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 127-132.
- [78] 孙澄, 王燕语, 范乐. 基于疏散模拟的东北地区居住区路网

- 结构优化策略研究[J]. 建筑学报, 2018(2): 38-43.
- [79] 於家, 温家洪, 陈芸, 等. 基于应急疏散智能体模型模拟的城市避难所空间配置——以上海市静安区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(8): 1458-1475.

Research Progress and Prospects of Crowd Evacuation under Sudden Disasters

ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang and GE Yifu

(School of Architecture and Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: How to evacuate residents to safe areas in the shortest time when disasters occur is an important issue for urban planning and emergency management. we sort out the research contents, theories, methods and mathematical models of emergency evacuation, summarize the influencing factors of evacuation time and efficiency, and compare the application scenarios, advantages and disadvantages of various methods and models. Research achievements of methodologies and empirical studies on crowd evacuation are abundant, but the application scale mainly focuses on the architectural scale, which is disconnected with the current urban disaster prevention planning and emergency management. In addition, evacuation research under multi-hazards and secondary disasters are not covered, and evacuation at community scale fails to consider the evacuees specificity and dynamic impact of disasters. In the future, it is necessary to further explore the research methods of crowd evacuation under secondary disasters and multi-hazards. The research results of crowd evacuation are applied to disaster prevention planning and regulation formulation. At the same time, emergency evacuation of vulnerable group should be paid attention.

Key words: sudden-onset disasters; evacuation efficiency; evacuation experiment; numerical model; research progress

(上接第 180 页)

Research on the Spatial Characteristics of Wuhan Epidemic Community and the Epidemic Prevention Circle' Strategy

ZHANG Ke¹, ZHANG Sen¹, ZHANG Meng² and LIU Xiaoyang³

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Urban and Rural Construction Institute, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;

3. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As the COVID-19 epidemic presents the characteristics of frequent occurrence and unpredictability, it is particularly important to formulate reasonable and efficient prevention and control measures for urban communities. Based on the analysis of the spatial characteristics and infection rate of 265 communities with spread of the coronavirus in Wuhan in multiple stepwise regression, we find that the infection rate of the communities has a strong linear relationship with the community's establishment age, scale, and control characteristics. The linear relationship between the surrounding public facilities elements, spatial layout elements, and population elements is weak. A risk evaluation model of community potential spread of the coronavirus is constructed accordingly, and the epidemic prevention circle planning strategy is proposed from three aspects: community risk identification and evaluation, community epidemic prevention circle division, and community epidemic prevention control mechanism. The epidemic prevention circle planning strategy has formed a multi-level shared community-pedestrian scale-city epidemic prevention system to meet the normal life needs of residents who under control, improve the community's resistance to emergencies, and ensure the operation of the city.

Key words: COVID-19 epidemic; community; multiple stepwise regression; risk evaluation; epidemic prevention circle