

面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述

江锦成

引用本文:

江锦成. 面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1498–1518.

JIANG Jincheng. A Review on Emergency Evacuation Methods for Major Sudden Disasters and Accidents[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1498–1518.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1441–1449 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210465>

面向重大公共卫生事件的位置服务技术——以COVID-19疫情为例

Location-Based Service Technologies for Major Public Health Events: Illustrated by the Cases of COVID-19 Epidemic

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 150–158 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200560>

经济空间场与ESDA结合的公共卫生事件应急策略制定

Development of Public Health Emergency Response Strategies Based on Economic Space Field Theory and ESDA

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 159–166,220 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200408>

可持续城市化与国土空间优化

Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 1–11 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200365>

川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

DOI:10.13203/j.whugis20200522



文章编号:1671-8860(2021)10-1498-21

面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述

江锦成¹

1 中国科学院深圳先进技术研究院,广东 深圳,518055

摘要:重大突发灾害事故时有发生,给人民的生命财产安全带来了严重的威胁。应急疏散作为灾后应急响应的重要环节,对减少人员伤亡有着重要意义。经过长期发展,研究人员利用多种方式观察到了许多具有重要价值的疏散规律,也提出了多个优秀的模型方法。然而,应急疏散涉及到的灾害事故类型、受灾人群和应急场景等多样复杂,导致应急疏散模型的侧重点和方法论等各有不同,加大了读者对应急疏散研究现状的全局理解难度。从应急疏散行为分析、模拟仿真、策略优化、预案实施等多个角度对现有重大突发灾害事故下的应急疏散研究现状进行梳理、归纳与总结,旨在厘清一条清晰的应急疏散研究脉络。在此基础上,进一步提炼出当前面临的主要难题与解决思路,服务于应急疏散的下一步发展。

关键词:应急疏散;重大突发灾害事故;路径规划;时空优化;行为建模

中图分类号:P208 **文献标志码:**A

频发的自然灾害和人为事故给世界各地的人民带来了巨大的生命财产损失,是威胁城市安全的重要来源之一,每年因各类重大突发灾害或事件造成的非正常死亡人员数以万计。为最大程度减少危害,灾害事故发生后的首要任务是要在第一时间紧急撤离危险区域的人员^[1]。而应急疏散的目的是以最安全有效的方式将灾害事故现场的受灾人员撤离到安全区域。它是灾后减少伤亡损失最直接有效的方式,也是灾害事故应急响应的一个重要环节,其作用不可或缺。重大突发灾害事故下的应急疏散成为社会各界关注的焦点^[2-4],是应急管理部门制定应急响应预案极其重要的环节,对保障城市安全有着积极意义。

重大突发灾害事故主要包括重大自然灾害、人为事故和公共卫生突发事件,具有突发性和高危险性。根据造成的危险程度、波及范围、影响力、人员伤亡的不同,可将突发灾害事件划分为不同的等级(《中华人民共和国突发事件应对法》)。本文讨论的重大突发灾害事故主要针对能在灾害事故发生后的短时间内直接造成人员伤亡的自然灾害(如地震、台风、洪涝、滑坡等)和人为事故(如火灾、有毒气体泄漏、爆炸事件、

聚集性事件、安全生产事故、恐怖袭击事件等)。此类重大突发灾害事故下的应急疏散具有自身的特点,使应急疏散面临着巨大挑战:(1)紧急。灾害事故的突发性和危害性要求在第一时间尽快疏散人员。(2)被疏散人员多、密度高。城市人口密度高,受灾人员往往可达数万人^[5]。(3)影响范围广泛。由于大规模人群聚集,交通拥堵蔓延,影响范围从几平方千米到数十平方千米^[6],疏散距离通常达到数千米。(4)应急场景复杂。在某些灾害事故中,建筑物内部和外部都是危险区域,人群需在复杂的室内多场景(如房间、过道、楼梯)、室外多场景(如人行道、人行天桥),以及室内外转换场景(如建筑物出口)中进行长距离逃离。(5)疏散方式多样。大范围的应急疏散会采用步行、公交、轨道交通、私家车等多种交通工具。同时,在应急情景下,常规交通规则往往不再适用,如人群占用车道。(6)疏散状态动态多变。疏散是个复杂的动态过程,会遇到很多意想不到的状况。(7)被疏散人群结构复杂。受灾人群不仅有常规成年健康人群,还有老幼孕残等行动或视听觉不便的弱势人群,需要特殊照顾,给应急疏散增加了难度。

正是由于这些特点,使得面向重大突发灾害

收稿日期:2021-03-05

项目资助:国家自然科学基金(42071367, 41701452);广东省自然科学基金(2019A1515011501);深圳市可持续发展科技专项(KCXFZ20201221173613035);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19030301)。

第一作者:江锦成,博士,副研究员,主要从事一体化综合防灾减灾研究。jc.jiang@siat.ac.cn

事故的应急疏散极具挑战性。为全面了解当前应急疏散理论与方法的发展现状,本文从疏散行为特征分析、疏散模拟仿真、疏散策略优化、疏散预案实施等几个方面,对当前研究进行系统的梳理、总结与分析。

1 应急疏散行为特征分析

1.1 常规人群的疏散行为特征

受灾场环境、灾害类型与规模、受灾人群的年龄、性别、疏散经验、身体状况、文化差异^[7]等多方面因素的影响,人群表现出的应急疏散行为差异很大。大量研究通过实证或模型仿真等手段观察到一些一般性规律与现象,对指导应急疏散有着重要意义。

1) 逃离速度: 人群的逃离速度直接影响疏散效率,而逃离速度又受到人群密度的影响。一般而言,人群逃离速度跟密度呈反比例关系。当人群密度 $\rho < 1.0$ 人/ m^2 时,人群流动呈自由状态,相应的水平移动速度约为 $V = 1.3$ m/s;当人群密度 $\rho \approx 2.0$ 人/ m^2 时,人群流动开始呈现滞留状态,相应的水平移动速度约为 $V = 0.7$ m/s;当人群密度 $\rho > 5.38$ 人/ m^2 时,人群流动完全处于停滞状态^[8]。更多有关疏散速度-密度间的关系,可参考文献^[9]。

2) 竞争行为: 被疏散人员由于自身心理的恐惧和求生本能一起涌向逃生出口、楼梯、通道等安全地区,出现相互竞争、相互推挤的现象,以争抢有限的逃生资源和逃生机会^[10]。在疏散过程中,约有2.5%的人会让自身快速疏散而主动推挤他人: 年龄越小,越容易推挤他人;男性比女性更容易推挤他人^[11]。

3) 帮扶合作行为^[12]: 在疏散过程中,人群不仅努力使自己能够逃离灾害区域,同时也关心其他人员的命运,注重合作^[13]。合作行为往往有利于加快逃离。

4) 折返行为: 灾场有亲人、贵重物品或其他原因,导致人员在疏散过程中折返回灾害现场,形成与疏散方向相反的行走路径。据调查,年龄对折返行为的影响并不明显;女性比男性更容易出现返回行为^[11]。

5) 路径选择行为: 人群逃生时一般采用路径最短原则,即根据经验规划一条最短的逃生路径,以期以最快的方式逃离危险区域。同时也会规避拥挤和障碍物,即当被疏散人群在遭遇拥挤时会改变原逃生路径,选择绕行或超越去往人员

密度较小的空间,这样更有利于疏散^[12];而避绕障碍物是在紧急疏散过程中,人群会潜意识地避开障碍物前进,形成多个方向的人流运动^[10]。

6) 出口选择行为: 行人在疏散时不仅会采取“就近原则”尽量选择离自己最近的出口,也会在人群密度足够高的情况下,为更快撤离而选择较远的出口^[14]。此外,当行人非常接近出口或者在压力大的情况下,不太可能为了避免出口的拥堵而改变初始的选择^[15]。实际上,被疏散人员的出口选择受到诸多因素的影响,如信息的可用性、对信息的处理时间等^[16]。有研究表明行人会选择较近的出口而较少选择熟悉的出口、工作人员指示的出口或跟随他人^[17];也有研究表明,选择熟悉出口的人群占19.5%,最近出口的占50.1%,工作人员指示出口的占25.2%,跟随他人或他人指示出口的占5.2%^[15],有时也并没有那么直接地表现出最近或最优出口原则^[18]。

7) 惯性行为: 出于寻求安全保险的心理,即使存在多个可用的逃生通道,被疏散人员在紧急情况下往往会选择比较熟悉的道路、环境和路径进行逃生^[19]。在对环境不熟悉的情况下,倾向于跟随熟人,或跟随大众(也称为社会影响)^[20-21],或选择主要通道^[22]。

8) 恐慌行为: 由于害怕而引起不合常理的逃生行为。因受恐慌情绪下的盲目从众行为影响,恐慌人群经过逃生通道瓶颈时的竞争变得极为不协调,在出口处易出现拥挤,将出口堵塞,而另外的出口却几乎无人通过^[23];相比于常规状态,应急状态下的反应时间、离开人数的均值和方差都有所增加^[24];恐慌情绪随着离事故点的距离增加而减弱,呈负相关^[25];过度的恐慌会降低人群逃生的可能性,而适度的恐慌则可以提高反应和行动能力^[26]。

9) 自组织行为: 在不受外界交通信号灯、指挥员行为约束的情况下,在个体或群体层面上,被疏散行人自发地呈现出一定规律的行为。

(1) 统一的行走路径: 混乱的人群会逐渐地形成统一的行走路径。这种自组织现象能减少相向运动行人间的交互,提升行人的疏散速度^[27]。

(2) 成拱现象: 行人聚集在瓶颈处,尤其是出口处,产生拱形排队拥挤的现象。队伍中的行人受到持续的作用力,易导致恶性踩踏事件发生,应适当增加瓶颈处的宽度,以提升疏散效率^[28-30]。

(3) 排队和拉链现象: 大规模人群在通过通

道或狭窄空间时会出现明显的分层现象。由于宽度的变窄,行人不得不交替交叉前进,相互占用对方行人层的空间,即产生拉链效应。分层排队可以最大程度地和前方人员保持节奏一致,减少碰撞,提升通行效率^[31]。

(4)小团体行为:具有血缘关系的家庭成员、或拥有某些社会关系、或同年龄段同性别的小团体往往更易聚集在一起。在一定范围内,小团体数量的增加对疏散结果的影响较低,疏散时间和疏散步数的变化不大^[32];而当疏散过程存在大量聚集的小团体时,将会对人群疏散产生阻碍作用,增加人群疏散时间,降低疏散效率^[33]。

(5)从众行为(羊群效应):当遇到紧急情况时,受灾人员会因为生命受到威胁而紧张,导致心理恐慌,往往会失去判断能力,而选择与大多数人相一致的行为,因而出现盲目跟随他人逃生的现象^[33]。在应急疏散的路径选择中,从众行为非常常见。17~29岁比30岁以上的人员在疏散过程中更容易出现从众行为;女性在疏散过程中更易服从管理、引导,而男性则更容易选择一些非常规的疏散手段^[11-12, 34];对环境熟悉程度不高,或紧急情况下,在对环境的判断能力降低时,适当的从众心理有利于最优疏散信息的传递,可以帮助人们找到最佳疏散路径;但从众心理过于严重则容易因盲从造成出口利用率降低或利用不平衡,引起拥堵,降低疏散效率^[35]。因此,利用从众行为,可以根据视野半径的大小和环境熟悉程度制定跟随策略来引导应急疏散^[36],恰当的引导对疏散有着积极意义^[14]。

(6)群聚行为:被疏散行人自发地聚集在一起,形成没有规律、短暂性的一个集体。在疏散过程中,人群会向同一个方向甚至在同一路径中移动,导致某些通道、个别出入口的人流产生聚集,堵塞逃生通道或者出入口^[10]。

(7)“快即是慢”现象:当大量被疏散个体的期望速度都增加时,短时间内群体的疏散效率会快速增加,但后期随着出口处人数的不断增加,产生拥挤,进而降低群体的疏散效率。此时,被疏散个体倾向表现自私行为。在实际疏散工作中,不应盲目提高行人的移动速度,而更应该稳定人群情绪,提高疏散过程的有序度^[37]。

有研究表明:约8%的人员表现出明显的从众行为;当火灾现场存在家人时,约84%的人员会折返;而约75%的人员不会因贵重物品折返;约69%的人员会表现出明显的竞争行为;约

62%的人员能表现出避让行为;约85%的人员对是否冒险有着良好的认知心理;约90%的人员会表现出明显的恐慌心理;而约71%的人员表示不一定会帮助他人^[38]。

1.2 弱势人群的疏散行为特征

1.2.1 面向应急疏散的弱势人群分类

相比于正常健康人群,弱势人群存在某些疏散能力不足的问题,导致其疏散行为特征有所差别。根据对灾害事故环境的应急反应能力不同,可将疏散弱势人群分为以下几类:

1)视觉障碍人群。视力的不便导致该类人群在疏散时没有方向感,不能正确找到疏散路线到达安全区域,同时也影响其他人的撤离,造成疏散通道堵塞。眼睛有残疾的人士可通过听觉感知警报,若广播系统正常,可以和正常人几乎同时知道危险信息。但他们看不到危险来自什么方向,也无法借助疏散指示标志撤离危险区域,必须有他人的协助才可安全疏散。

2)听觉障碍人群。其行动能力是正常的,在安全疏散过程中可以保持和正常人一样的行动能力。虽然听觉障碍人群不能识别应急广播,但他们四肢、视力健全,可以跟随正常人进行安全疏散。听觉上有残疾的人士听不见喊声、应急广播播报的内容,只能通过视觉感知危险。因此,视觉障碍人群会比正常人感知警报的时间要久,但可以自行疏散。

3)肢体障碍人群。他们行动能力差,在走道疏散时更有可能造成通道阻塞。腿、脚残疾需坐轮椅的人士可以和正常人一样感知危险,却无法自行通过楼梯,就算是有正常人的协助,疏散也相当困难。约3%的人员无法随其他人群沿楼梯向下疏散,少于1%的人必须依靠器械行走。

4)言语障碍人群。可以自我识别危险,正常接收警报信号,能够进行自我正常疏散,疏散能力正常。

5)脑力障碍人群。有正常的疏散能力和感知能力,但是他们不能做出正确判断,需要有人帮助才能进行正常疏散^[39-40]。

老、病、童、孕等弱势人群可以认为是上述某一/某几类功能障碍的弱势人群,如老人可认为是视觉和肢体存在部分障碍的人群。

1.2.2 弱势人群的疏散行为特征

在面向重大突发灾害事故时,弱势人群的自我疏散时间比正常人群长,而且需要他人的帮助以越过楼梯或障碍物^[41-42],同时由于其行动速度

慢和占据空间大等原因也可能对其他人群的疏散造成阻碍^[43]。相较于正常人群,弱势群体更易受周边环境的影响,例如在面对台风、泥石流时,个人特征、灾害风险认知、避难考量、避难地点等因素对弱势人群的疏散避难行为决策有着巨大影响^[44]。通常,环境的复杂程度与疏散速度成反比,即环境越复杂,疏散速度越慢^[45]。反过来,弱势群体在生理和心理上对疏散环境都有着特殊的需求^[46]。因此,深入了解弱势群体在灾害事故发生后的心理变化和疏散行为特点是采取安全疏散方法的前提保证^[39, 47]。在心理上,弱势人群的应急行为更易表现为恐慌、盲从、随从、顺从、识别能力减弱、逃生信心减弱,更易产生极端心理活动^[48]。在生理上,弱势人群的自我疏散能力降低,下楼速度比上楼速度更慢,重病患者(或孕妇和产妇)不能承受人群的挤压,易出现拥挤等现象。

逃离速度直接影响整个应急疏散系统的效率,而弱势人群的步行逃离速度与正常人群存在很大差异^[49-51],即便是在畅通环境下,也不能达到正常人的疏散速度^[52-54]。例如,在水平路上,视觉障碍人群在没有帮助的情况下的行走速度约为0.8 m/s,而正常人的速度约为1.25 m/s^[55];在下坡时,残疾人的速度会稍微快一点,若是阶梯路面,残疾人下台阶时的移动速度会比上台阶时的移动速度更慢^[39];在需要帮助的情况下,残疾人的平均行走速度约为0.57 m/s;在不需要帮助的情况下,速度约为0.95 m/s;使用电动轮椅的平均速度为0.89 m/s;使用手动轮椅的平均速度为0.69 m/s^[56-57]。一般而言,老年人和残疾人下楼梯的速度约为0.11~0.29 m/s^[58]。实际上,不同类型的弱势群体,在不同国家和文化背景、不同地理或建成环境、不同人群密度下,其疏散能力存在很大差异。相关研究从未中断,详情可参考文献[15, 20, 52, 59-61],其中阿尔斯特大学的研究结果^[62]较为经典,被许多疏散模型直接或间接引用。

不仅如此,弱势群体在疏散过程中对其他人员也是有影响的,易造成拥堵,显著减缓疏散进程^[43]。高密度人群下,行动不便者所占比例增大会显著降低混合人群的疏散效率,且易受到伤害^[53-54]。帮扶概率对混合人群疏散效率有较大影响^[58];低人群密度时,结伴概率对混合人群的疏散效率影响较小;随着密度的增加,结伴概率显著提升混合人群的疏散效率。在行人密度 $\rho >$

0.8 人/m²时,结伴概率与盲人所占比例对疏散效率的影响微乎其微^[53]。而在高比例弱势人群的地区(如医院),有必要将弱势群体根据行动能力的不同分成多个组,实行分组疏散^[63]。

此外,弱势人群的其他行动能力也有很大不同:难以通过具有闭门力的各种门;阅读和确定出口指示标志所需要的距离有很大差别;视觉和听觉障碍人群接收报警信号的能力也相对较弱^[55]。由此可见,在大规模应急疏散中,由于弱势群体身体条件限制,逃离能力和获得紧急救助的能力不足,弱势群体很容易受不利因素的影响^[64],需顾及多特征人群(特别是弱势群体)的行为特征和需求,给弱势群体提供更多的信息^[65],采取相应的措施以处理不同的需求^[66],这对提升整个疏散系统的效率和安全性是极有必要的。

尽管弱势群体在应急疏散中存在诸多不利因素,但并不意味着弱势群体的存在总是极大地降低整体疏散效率。在条件相同的情况下,视觉障碍者和听觉障碍者的疏散速度并没有想象中的比正常人明显低很多^[59, 62];视觉障碍人群的移动速度并不会像健康人群那样受人群密度的高度影响,在下楼梯时能与健康人群保持相近的逃离速度^[67];有指导技术和无指导技术对于视觉障碍者步行速度的影响没有明显差距^[56]。

2 应急疏散模拟仿真

应急疏散模拟仿真采用计算机仿真的手段,一方面可以将个体疏散行为反映到群体疏散状态中,实现个体-群体的融合;另一方面也可以对疏散方案进行效果评价分析,发现不足之处,便于改进。它具有连接疏散行为和疏散方案的作用,在应急疏散理论与方法体系中占有重要位置。根据疏散方式的不同,应急疏散模拟仿真模型分为人群疏散、车辆疏散以及人-车混合疏散模拟仿真3大类。

2.1 人群应急疏散模拟仿真

经过多年的发展,研究人员已设计出多种有效的人群应急疏散模拟仿真模型,如社会力模型、元胞自动机(cellular automata, CA)模型、格子气模型、智能体技术、动物实验、引导员模型、博弈论等,并进一步基于这些模型开发出多款软件,如 Bgraf、E-Gress、Exiitt、Vegas、Pathfinder、Escape、Evacsim、Paxport、Exit89、Magnetmoodel、Exodus、Simulex、Steps、Hazard、Evacnet4、Fiera、Firewind。

限于文章篇幅,本文着重阐述社会力模型、CA模型、多智能体模型等最具代表性且应用广泛的典型模型。

1)社会力模型。个体与个体、个体与环境间的非线性作用称为社会力。社会力模型认为生理和心理作用共同影响着被疏散者的行为,通过连续的加速方程描述个体与个体、个体与环境间的非线性作用(即社会力),并主导着每个行人的移动。其优势在于能够较好地描述个体间复杂的交互、个体的移动方向,以及模拟拥堵现象^[68],劣势在于模型参数难以自适应调整^[69],而且计算复杂度较高^[70]。

2)CA模型。不同于其他动态模型使用固定的物理方程或公式,CA模型在离散的元胞空间上定义确定的局部规则,并根据自身和相邻元胞的状态不断地进行演化,可用于模拟复杂系统的时空演化过程。CA模型主要包括元胞、元胞空间、元胞状态、元胞状态进化规则。其时间、空间和状态都是离散的;空间交互和时间因果都是局部的。将CA模型用于应急疏散时的基本原理:先将时间和空间进行离散化,每个离散化的元胞空间或被疏散个体/障碍物占据,或为空,每个时间步长内,疏散个体最多只能移动一步^[71]。CA模型建模应急疏散的关键是设置空间离散化原则、时间离散化原则,以及局部状态更新原则^[72]。其中,局部状态更新原则对CA应急疏散模型来说至关重要,它包括影响因素选择和耦合机制设置两个部分,依此可进一步细分为格子气模型^[73]、地场模型^[74]、势场模型^[75]、静电感应势场模型^[76]、代价势场模型^[77]等。

3)智能体模型。一个虚拟的或实体的智能体能够感知环境,自主行动,可与其他智能体交流,学习经验,并对周边环境刺激做出灵活的反应,从而适应环境^[78-79]。当智能体模型用于应急疏散模拟仿真时,将每个智能体看作实际疏散实体,从个体出发,融合拥挤和恐慌、路径选择、环境熟悉程度、疏散个体差异等因素,模拟疏散个体间、个体与环境、个体与灾害间的相互作用,进而研究群体动态,其中如何定义智能体的行为规则是智能体模型的核心^[80-82]。

基于这些理论方法,不少团队研发出具有针对性的应急疏散软件。例如,Mott Mac Donald的Steps(瞬态疏散和步行者移动模拟),澳大利亚的Firewind、Egresspro(基于人工智能的模型),加拿大的Fiera System,英国的Crisp Exodus(基于

行为准则的模型)、Simulex(复杂行为模型),日本的Evacs,美国的Evacnet4(无行为准则模型)、EXIT89(复杂行为模型)、Hazard等。各类模型各具特色,适用于特定的场景。

2.2 车辆应急疏散模拟仿真

在车辆应急疏散中,交通状态和车辆行为如同人群疏散中的人群动态和个体行为一样,对应急疏散效率有着直接的影响。车辆应急疏散模拟仿真可评估交通状态,力求逼真地模拟路网中的各种实际交通行为。

根据尺度的不同,车辆应急疏散模拟仿真模型可分为微观、宏观和中观模型3大类^[83]。微观模型刻画个体车辆在道路网络上的详细移动,细致而又真实地反映车辆的跟车、超车及车道变化等微观行为,使之沿着它们自己的路径或在一定诱导策略下从疏散区域行驶至安全目的地^[84]。其优势在于可以了解个体的行为细节,以及受拥堵、政策干预、车辆故障等因素的影响;劣势是其计算复杂度高。

宏观模型并不描述个体车辆的跟随或变道等细节过程,而是建立车辆流量、密度、速度、排队长度或其他宏观交通变量间的关系,能够整合路口控制和车道管理等策略模拟疏散过程,分析一段道路的平均状态。

中观模型是微观和宏观模型的一种折中,通常以一组车辆为模拟单元,描述队列在路段和节点处的流入/流出行为。一方面,可继续追踪车辆行为,另一方面也可减少计算负担。

常见的车辆疏散软件有NetSim、Paramics、DynaSmart-P、CorSim、VisSim等;一些特定用途的车辆疏散软件包括NetVac1、MassVac、Orems、Dynev、Clear、DyMod、SNEM、ETIS。

2.3 人-车混合应急疏散模拟仿真

重大突发灾害事故下的应急疏散往往会同时涉及到大量的行人和车辆。在室外环境中,人群疏散常伴随车辆疏散,极易出现人车混行、左右穿插的混乱局面,单一的步行或车辆疏散无法满足突增的应急疏散需求。而人-车混合疏散是个复杂的动态过程,由于被疏散对象具有不同的行为特点,以及各对象间的交互行为复杂,导致混合疏散交通流不断发生变化,对其过程的理解变得尤为困难^[85]。

在人-车混合交通流的疏散行为特征分析方面,受到路口宽度、信号灯定时和人/车流量的影响,行人过马路的行为特征动态多变^[86],对人-车

混合疏散有着直接的影响;文献[87-88]假设车辆流和行人流的移动方向不变,通过格子气模型研究狭窄道路上人-车混合疏散的行为特征;文献[89]利用 VISSIM 软件在潜在的交通冲突区域,模拟人群和车辆在信号灯疏导下的混合疏散特征。

在人-车交互与冲突研究方面,文献[90-91]提出了混合 CA 模型,引入路口红绿灯、路口竞争力来模拟疏散过程中的行人、车辆的运动,以及人-车之间的冲突;行人在逃离过程中将车辆视为障碍物,并发生冲突,文献[92]通过模拟行人横穿马路时的行为动态提出“停留点”的概念来处理交通障碍和冲突问题。

在不同比例人-车混合下的疏散效率评估方面,文献[93]分析了不同交通模式对疏散时间的影响,通过模拟仿真发现多种交通方式的混合疏散能提高疏散效率,即步行和机动车或步行和自行车的组合疏散会比单一方式疏散更有利;而当路面上的机动车比例超过一定值时,自行车的混入将增加疏散时间;文献[94]基于智能体模型提出了一个混合疏散模型,可模拟疏散时的人-车交

互,模拟结果发现人-车比例越高,越容易拥堵;文献[95]利用 CA 模型分析人-车混合疏散,发现最优的人-车混合疏散比例在 60%~70% 波动,具体值受实际路网、设施状况和路口疏导等因素的综合影响。

3 应急疏散优化模型

3.1 面向不同灾害事故的应急疏散需求

不同类型的灾害事故在影响范围、突发性和紧急性上存在着很大的差异,具体分类可见表 1。如台风、洪涝等灾害是大规模区域性灾害,影响范围广,但因先进的气象卫星监测和预报系统,能提前数天预知灾害发生的时间和强度,使得受灾人群有较长的时间撤离至安全区域^[96-98];又如地震,突发性强、影响范围大,需要在最短的时间内将灾害区域的大量人群疏散至避难所^[99];相较于台风、洪涝和地震而言,有毒气体泄漏的影响区域相对要小一些,但依然是区域性的,而且其要求疏散的紧迫程度极高^[100];建筑物内的火灾突发性强,需要在第一时间内紧急撤离,但影响范围相对较小,通常仅局限在建筑物内部^[101-102]。

表 1 不同类型灾害特点

Tab. 2 Characteristics of Diverse Disasters

灾害类型	典型自然灾害与人为事故	影响区域	突发性	疏散紧急性
1	台风/洪涝/聚集性事件	大	低	中
2	地震/特大爆炸事件/安全生产事故/恐怖袭击事件	大	高	强
3	有毒气体泄漏/滑坡	中	高	强
4	建筑火灾	小	高	强

面向不同类型的重大突发灾害事故,首先需要对灾害事故本身进行快速监测,并预测其发展趋势,评估其影响范围和强度,如台风^[103]、洪涝^[104]、地震^[105]、有毒气体泄漏^[106]、火灾^[107];随后,针对动态变化的灾情,对受灾人群的行为进行监测与模拟,并对其进行疏散。不同类型的灾害事故具有不同的特点,应急疏散需求也有所不同。

1) 针对小区域、强紧急性的灾害(如建筑火灾),需为受灾人员找到最短、最安全的逃离路径^[108]。由于人群的心理活动^[109]、对环境的熟悉程度^[110]、灾害事故的动态风险^[111]、疏散资源^[112]、拥挤程度^[113]等对人群的疏散行为都会产生一定影响,导致该类灾害事故的疏散需求特点为:特别紧急,需要在最短时间内逃离^[114];在微观层面上,要精准地规避灾害、环境或疏散过程造成的风险^[115];微观个体行为特征和宏观群体动态都需

要被顾及^[116]。

2) 针对中/大区域、强紧急性的灾害事故(如地震、特大爆炸事件、有毒气体泄漏等),其疏散特点不仅包括小区域、强紧急性灾害的疏散特点,还因其影响范围广,产生了新的疏散需求,如室内和室外都是危险区域,受灾人群需在复杂的室内场景(如房间、过道、楼梯等)、室外场景(如人行道、人行天桥等),以及室内外转换场景中(如建筑物出口等)进行一体化的长距离逃离^[117-119];大范围的疏散会使用到步行、公交、地铁、出租车、私家车等多种交通方式;应急情景下,人群占用车道,常规交通规则不再适用,人群和车辆混合交错的局面会极大地降低应急疏散效率,增加风险,有必要提升各交通模式间的时空协同能力,实现多模式交通联合疏散^[85, 120-121]。此外,面向中/大区域、强紧急灾害的应急疏散应

同时从微观和宏观层面,不仅要顾及个体的暴露风险,还需最优化群体的时空疏散路径、交通方式及避难所选择等^[99]。

3)针对大区域、中紧急性的灾害(如台风/洪涝),应急响应更加侧重宏观视角下的动态灾害风险评估^[122-123]、预警^[124]、避难所选址^[125]、避难所对人群的分配^[126]等与人员撤离相关的研究和响应措施。面向大区域、中紧急性的灾害,应急疏散需求^[127]往往具有以下特点:影响范围广、人员众多,该类灾害事故的影响范围往往是城市级别的大尺度,受灾人口往往可达数万人以上^[128];疏散时间往往相对较长,从数分钟到数个小时,甚至数天不等^[129];步行疏散和车辆疏散结合,而且疏散人员往往以家庭为基本单元^[130-131]。

不同类型的灾害事故具有不同的特点,应急响应关注的侧重点和对应急疏散的要求也有所不同。针对特定灾害事故的多样应急疏散需求,利用多学科交叉知识制定有针对性的应急疏散方案具有重要意义。

3.2 应急疏散策略优化模型

应急疏散优化模型多基于运筹优化理论,通常以最大化疏散效率为主要目标,构建场景环境约束下的最优疏散策略,直接制定应急疏散响应预案^[132]。

3.2.1 人群疏散优化模型

人群应急疏散优化模型可用于处理多种应急疏散问题(如面向疏散的建筑设计、应急管理),其中最重要的用途是直接制定疏散计划^[132]。优化目标函数通常是 minimized 平均疏散时间、最长疏散时间、灾场滞留人数、疏散时的拥挤概率,或最大化特定时间内疏散至安全地区的人数等。

优化的约束条件主要来自灾害本身(如危险区域范围、紧迫程度等)、应急环境(如道路容量、道路长度、楼梯坡度、建筑出口宽度等)和人群疏散行为(如步行速度、移动速度和人群密度之间的非线性关系、路径选择、人流量守恒等)。在应急过程中,人群疏散行为无疑受到应急环境和灾害的影响;与此同时,应急环境的动态属性也会随着人群行为的变化而变化。例如,人群动态行为使得道路容量和通行时间都是动态变化的,极大地增加了优化求解难度。更多优化疏散模型相关内容可参考文献^[132]。

优化模型的求解方法主要包括数学规划(如动态规划、最短路径、网络流、转运算法、整型规划、机会约束规划等)和启发式算法(如模拟退

火、遗传算法等)。两者的使用取决于所构建优化模型的复杂程度,即数学规划面向求解具有精确解的疏散优化问题,而启发式算法倾向于求解较为复杂的非线性优化问题^[133]。根据求解的动态人流量分配最(次)优解,可进一步提取相应的疏散策略,包括路径选择、分阶段的疏散、通用指导方案、最佳医务人员分配、准入控制策略等。常见的求解软件包括 Evac-Net 和 Takahashi's Models 等。

3.2.2 车辆疏散优化模型

车辆应急疏散优化模型多通过优化理论来实现车辆流量分配与路径规划^[134],涉及优化目标和约束条件:(1)优化目标主要包括最小化总疏散时间、最小化平均疏散时间、最小化清空时间、最小化最大延迟、最大化特定时间窗口内的逃离人数。其中,清空时间是疏散网络中所有车辆完成疏散的时间;最大延迟是指车辆完成总行程的最大值;总疏散时间是指所有车辆待在风险区域的时间总和。更多的优化目标还包括最小化特定比例人群抵达目的地的时间、最大化特定时间窗口内的疏散人群数量、最小化时空风险暴露等^[135]。(2)所受的约束主要来自疏散网络(即道路资源配置,如通行量和通行时间)、疏散任务(即需要被疏散的车辆)、避难所或安全区域的位置或容量等^[136]。

面向车辆应急疏散规划与管理,车辆应急疏散优化模型大部分可通过交通分配模型来求解,通常基于用户均衡或系统最优原则,为每辆车分配合适的路径。其中,在用户均衡或最邻近分配原则中,每个被疏散车辆都尽量使自己的逃离时间最短;系统最优原则试图通过所有车辆的协同使全局疏散时间最少^[137];而带约束的系统最优模型则是系统最优原则和用户均衡原则的一种折中^[138]。根据网络配置的不同,交通分配模型可分为静态模型和动态模型:(1)在静态模型中,道路网络的服务水平是恒定不变的。而实际上,疏散是动态过程,交通状态也是动态变化的,静态模型无法有效描述拥堵产生和扩散的过程,导致其制定的疏散策略无法达到最优,从而限制了其应用价值。(2)动态模型。通过数学规划、优化控制、差分不等式或仿真手段分析道路的动态交通状态,结合疏散任务量和目的地信息,将时空车辆流量分配到每条道路上^[139],常与动态交通流分配(dynamic traffic assignment, DTA)技术相关联,输出结果是每个时间窗口内道路的动态流入

和流出车流量。动态交通流模型(如元胞传输模型)能有效评估道路网络车辆的动态行驶时间和拥堵传播^[140-141]。融合动态交通流模型^[141-142]与 DTA 能有效处理交通流的高动态特征^[143],如队列的生成、en-route 转换^[144]。虽然动态模型能顾及动态交通状态,但其计算量大,难以处理大规模网络疏散策略的实时制定。目前,已有大量交通分配工具被提出,详情可参考文献[82,145]。无论静态还是动态模型,交通分配模型都存在的一个缺陷是:必须提前指定疏散行为规则,而这在应急情景下是难以被证实的^[145]。

除交通分配模型外,动态网络流模型将疏散人群建模为道路网络上的线性动态流,进而将道路车辆疏散问题转换为动态最大流、最早抵达流、最快传输流、动态最小费用流等网络优化问题^[146]。动态网络流模型已顾及优化目标,如最早抵达流问题最大化单位时间窗口内抵达安全区域的疏散人群数量;又如最快传输问题最小化疏散清空时间。因此,动态网络流模型可直接获取疏散方案。

3.2.3 人-车混合疏散优化模型

面向大规模区域性的应急疏散需求,已有研究表明人-车混合应急疏散能有效提升疏散效率。例如,文献[147-148]的研究显示步行和公交相结合的疏散方式可有效提升疏散效率;文献[149]以总疏散时间和道路利用率为目标建立人-车混合疏散优化模型,结果表明建立统一的交通管理可提升 87.3% 的疏散能力。

人-车混合疏散优化模型利用优化理论,以最小化总疏散时间、最小化平均疏散时间、最小化清空时间等为目标,或设定多目标^[150],一般通过以下手段直接制定疏散方案,以达到提升疏散效率的目的,为应急疏散提供时空决策支持。

1)人-车流量分配方面,文献[151]以总疏散时间和路网的混合通行强度为评价指标,建立双目标的粒子群优化模型,分析不同人-车配比对这两个指标的影响,实验结果发现:当行人所占比例为 50%~80% 时,人-车混合疏散效果较好。

2)在人-车路径规划与信号灯优化方面,文献[152-153]先通过协同进化的多粒子群方法模拟行人和车辆疏散的演化、交互及合作过程;然后,顾及疏散时间和密集度,对人-车混合疏散进行建模,获取最优疏散规划,能有效适应复杂环境和多种交通模式。文献[154]在一个双层网络上设计了一个人-车混合应急疏散优化模型,其中上层

网络用于路径搜索和诱导;下层网络用于刻画行人和车辆的移动动态和冲突。文献[155]先利用动态 CA 模型模拟人-车混合流,然后顾及系统均衡原则,提出了一个加权的道路占用反馈策略来诱导车辆和行人路径,以消除交通拥堵,可有效达到系统均衡和稳定。文献[91,156]顾及拥挤车辆和行人流间的冲突,提出了面向多交通模式疏散的整型线性模型,同时优化疏散路径和信号定时配置,制定大规模人-车混合疏散方案。文献[157]利用 Wardrop 用户均衡模型为人-车混合疏散提供个性化的路径规划。

3)在减少交叉路口的人-车冲突方面,文献[151]顾及拥堵和人-车交互,构建混合疏散模型,研究人-车配比、各自的路径规划、时空冲突的消除、拥挤度、疏散效率等。文献[158]基于路口车辆和行人轨迹提出了一种时空利用率模型,并通过双层混合多目标优化算法来规划车辆和行人的转弯方向。

4)在区域疏散中,合理地利用好行人疏散和车辆疏散对大区域疏散有着重要意义。例如,文献[159]针对远距离海啸的区域疏散展开研究,依疏散区域位置决定步行或者车辆疏散,建议在标准疏散区域执行步行疏散,可减少车辆的使用,避免拥堵。

4 应急疏散预案实施与组织管理

4.1 人-车疏散预案的实施

利用上述疏散优化模型,可以得到当前应急环境下最优人-车流量分配与路径规划预案。因此,一方面,在日常应急疏散演练实习中,可让被疏散人员按照最佳预案进行演习,使之能在实际应急情景下接近最佳疏散效果;另一方面,可在每个路口设置引导员,控制每个路口人-车流量的动态分配,指导被疏散人员或车辆的疏散路径,以此实施最佳疏散预案。

此外,还可以对不同区域分时间段地制定最优疏散预案,进行分阶段疏散。也就是说,对不同位置的人-车构建最佳的疏散顺序,各位置的人-车有序地、分阶段地疏散,从而提升疏散系统的有序性,避免造成拥挤和效率的降低。分阶段疏散已被很多研究证实为一种有效的疏散方案^[160]。

除了最佳人-车流量分配与路径规划外,还可以从应急组织管理上实施硬软件操作(包括管理人员引导、等待救援、禁止通行等),提升人群(特

别是弱势群体)和车辆的疏散效率。

4.2 面向弱势群体疏散的应急管理 with 组织

弱势群体应急反应能力不足,在灾害事故的应急疏散中常常处于劣势,容易遭遇不公平^[64],需要得到特殊的关注与帮助^[161]。面向弱势群体的特殊应急疏散需求,亟需利用软硬件结合的疏散方法,才能达到最佳效果^[162]。

1) 硬件方面,设计兼顾弱势群体疏散的无障碍楼梯^[163]、避难区域(areas of refuges, AORS)、特殊报警系统^[164]、面向残疾人使用的公共建筑无障碍设计^[165];也可利用建筑内部的辅助功能和设施最大可能地挖掘视觉障碍者的潜力,以提升外在环境的空间导向系统对视力受损者的引导等^[166]。

固有思维认为火灾紧急情况下应尽量避免使用电梯,但楼梯疏散特别不适合残疾人(尤其是腿、脚残疾需坐轮椅的人士)。有研究建议,针对不是发生在电梯井或电梯前室的火灾,利用消防电梯作为残疾人士竖向疏散的通道^[40-41, 167-169];让坐轮椅的人(特别是高楼层)使用电梯,不仅可以避免可能的瓶颈和伤害,而且可以让其他人群以最快的速度进行疏散^[112, 170]。但只有确保电梯的控制系统、电力系统、火或烟的保护功能正常运行时,才能使用电梯进行应急疏散^[42]。

2) 软操作方面,在对弱势群体(包括位置、数量、个人特征)进行有效监测和识别的基础上^[171-172],常用的疏散预案包括:分开处理弱势群体和健康人群,避免混合疏散过程中造成拥挤和伤害;将弱势群体置于建筑物的特殊位置等待救援,与常规行人分开,能减少总体疏散时间^[164];帮扶疏散,即健康人群扮演积极的引导员角色^[173],效果优于让残疾人在特定区域等待救援^[162],而且采用单引导员集中疏散视觉障碍人群,其效率显著高于无引导和一对一引导模式^[174]。这些软操作对于多特征群体的应急疏散有着积极的意义。

4.3 面向车辆疏散的应急管理 with 组织

车辆应急疏散优化模型是在当前环境下,制定最优的车辆流量分配与路径规划。除此之外,在应急疏散预案具体实施过程中,还可以从以下两个方面提升疏散效率。

1) 增加疏散道路资源供应。(1)设计反向车道。疏散往往具有明确的方向性,即从灾害事故现场向外围安全区域逃离。反向车道就是将疏散方向相反的闲置车道更改行驶方向使之与疏散方向一致^[175-176]。该操作能极大地增加疏散

道路资源,具有及时、廉价、操作方便、仅在局部调整等优势。(2)消除交叉行驶。十字路口是引发交通拥堵的一个主要原因,在路口处消除特定的转弯或横穿马路,从而减少车辆冲突,有利于疏散方向上的车辆行驶^[177]。(3)使用应急车道。在应急疏散情景中,有效使用应急车道可增加额外的道路资源,提升道路通行量。但需要避免造成拥堵,确保在突发状况下,救护车辆的畅通。

2) 减少应急疏散需求。(1)减少阴影疏散。疏散效果很大程度上受不安全感的影响,通过通讯或教育,使受灾人群保持冷静,平复其情绪,避免因恐慌、焦虑等导致不理性的无效疏散。(2)减少背景疏散。将即将发生的应急疏散(如聚集事件)消息提前通知灾区周边区域的人群,减少非疏散人群的非必要出行,以将更多的疏散资源留给被疏散人群。(3)就近避难。对于类似龙卷风这样的灾害,提前通知民众并让其选择就近的避难所,可以减少疏散距离和任务,能有效缩短疏散时间。

5 当前应急疏散存在的瓶颈与发展方向

5.1 疏散行为精准建模

1) 存在的问题。无论个体还是群体疏散行为都会同时受人群本身、疏散状态、应急环境、灾害类型与规模等多方面因素的影响,导致行为动态多变^[178],难以使用统一的定量化手段对疏散行为进行精准建模,给高效应急疏散带来挑战。由于疏散方案需要顾及疏散行为特征,才能确保其高效性和可实施性。亟需一套有效的方法对特定灾害事故的应急疏散行为进行精准建模,为应急疏散方案的制定提供较为精确的信息支撑。

2) 解决思路。近些年,对人观测技术和深度学习算法得到了快速发展,为疏散行为的建模提供了数据基础和技术手段。首先,监控视频的广泛布设和视频分析等对人观测技术为监测真实灾害事故场景下人群疏散行为信息的采集提供了条件,可收集真实应急疏散行为数据;其次,深度学习算法能有效刻画数据丰富的内在信息,实现特征的自动提取^[179-180],能很好地识别人体/人群行为,包括姿态、个体动作、交互动作和团体活动^[181-182]。基于这两种技术手段,有望为大量不同灾害情景下的应急疏散行为构建知识库,推动疏散行为的精准建模。

5.2 多模式交通协同疏散

重大突发灾害事故下,大量人群需进行长距离的撤离,通常会使用到多种交通工具,步行与多模式交通协同疏散就成为一种必然选择。

1)存在的问题。现有人-车混合疏散模型多分析局部区域的微观特征,对于整个疏散系统而言,缺乏宏观视角,仍需提升步行和多种类车辆交通间的时空协同能力,主要体现在:(1)难以实现人-车交通流转换。车辆疏散速度快、易服从统一指挥,但其占用道路资源多,适用于长距离疏散;而人群疏散的道路资源使用率高,但其逃离速度慢,适用于短距离疏散。亟需制定有效的人-车交通流转换策略,发挥各自优势;(2)难以适应动态的疏散任务。进入应急疏散网络中的人群和车辆动态变化,需科学合理地分配步行疏散和车辆疏散任务,既要保证疏散效率,又要保证疏散过程中的安全性。

2)解决思路。一方面,交通大数据能实时监测各交通工具的运营状态和道路拥堵状态;另一方面,视频监控等对人观测技术能实时了解受灾人群的数量、位置和动态。在车辆、人群动态和应急环境等近乎全信息的支持下,从宏观优化的角度研究多模式交通下的协同疏散策略和路径规划,提升多交通工具间的时空协同能力,同时实施各交通模式下的流量动态分配与路径规划、道路资源分配、人-车交通流之间的转换,以及交叉路口的疏导等多个策略,才能从全局角度实现统筹规划,保证整个应急疏散系统的高效、有序、安全运行。

5.3 多特征人群混合疏散

在重大突发灾害事件的受灾人群中,不乏老弱病残孕童等弱势群体。弱势群体和常规人群混合情景下的多特征人群疏散需“以人为本”,定制化应急疏散方案。

1)存在的问题。若将所有人员视为同等能力,混合在一起进行疏散,则会导致弱势群体因其行动/视觉/听觉等能力不足,降低整体疏散效率,甚至引发踩踏等事故。虽然目前已有预案分别从硬件和软件操作两个方面保护弱势群体,但现有设施和方案依然无法满足重大突发灾害事故下弱势群体的应急疏散需求,表现在:(1)尽管现有建筑物(地铁、大型商场、写字楼、住宅楼等)都设有应急通道,然而,除地铁的升降电梯优先供弱势群体使用外,很少有专门为弱势群体设置的优先通道。而在室外,这种优先通道/设施更

是少之又少。(2)连贯性不足。即便设有少量的应急优先通道,其位置和针对性仅仅是小范围、短距离的。优先通道的外部依然属于受灾区域,仍需与其他人群进行混合疏散,不能全程、全方位地保障弱势群体的疏散安全。(3)保护弱势群体的意识不足。整个疏散过程所涉及的人群可分为被疏散弱势群体、应急管理人员和普通被疏散人群,其保护弱势群体的意识依次减弱。普通被疏散人群占据绝大多数,其保护弱势群体的意识不足,在灾害应急情况下,此情况更加严重,自我保护意识远强于保护弱势群体。

2)解决思路。顾及弱势群体的应急疏散极具挑战性,可从以下3个方面做出相应的努力:(1)在硬件方面,建立更全面的弱势群体专用通道;(2)在应急疏散过程中,在条件允许的情况下,充分发挥电梯等设备的作用,辅助弱势群体疏散;(3)在预案制定方面,既要将被疏散人群与健康人群分流,又要确保弱势群体能够得到帮扶协助;在常规疏散演练中,有意地培训保护弱势群体的意识。

5.4 室内外多场景一体化疏散

1)存在的问题。重大突发灾害事故往往会造成大面积的影响,室内和室外空间都属于危险区域,需要将大量人群进行长距离的疏散。面向重大突发灾害事故,将室内和室外场景整合起来进行一体化的应急疏散,能有效提升疏散效率^[183],这已成为当前应急管理领域的共识和发展趋势。然而,在室内和室外不同的应急场所中,因受障碍物、可视范围、恐慌心理等因素的干扰,人群的地理知识和空间场所认知都会有所不同^[184-185],室内外一体化疏散极具挑战。

目前,将室内和室外疏散联合起来的研究严重欠缺,极少数的探索性工作^[186-189]在场景融合及模型方法统一方面,依然不足以支撑实际的应用需求。

2)解决思路。近年来,建筑物信息模型(building information modeling, BIM)-地理信息系统(geographic information system, GIS)集成技术快速发展,为室内外一体化三维疏散场景建模创造了条件。其中, BIM是完备的建筑物信息模型,主要用于室内建模,侧重于单体建筑的精细表达^[190]; GIS的主要功能也是创建空间信息模型^[191-192],但侧重于宏观室外信息的表达,强调全局整体的数据管理^[193-194]。两者的融合能实现建筑构件、单栋建筑、小区、街道、整个城市等多尺

度一体化的城市三维模型,可直观地显示和分析室内外疏散导航路径、疏散行为模拟、疏散效果评估等,为城市大区域精准化灾害应急管理提供数据基础^[190, 195-196]。例如,通过整合BIM和GIS数据模型,能有效协助个体找到合适的疏散出口^[197],也能有效提升应急人员的情景感知和疏散导航效率^[198]。

因此,BIM-GIS集成技术提供的室内和室外场景信息是完整的、三维的、准确的,在疏散行为模拟、路径规划、疏散策略评价等方面更接近事实。

6 结 语

应急疏散是个非常复杂的问题,涉及到的影响因素众多,面向的对象和追求的目标也不尽相同,形成了庞大的研究体系。本文以疏散行为特征分析→疏散模拟仿真→疏散策略优化→疏散预案实施→当前研究存在的瓶颈与发展方向为主线,系统地总结、归纳当前应急疏散理论与方法的研究现状与存在的问题,在每个技术方法体系下又进一步细化,讨论了具体的人群、交通方式、灾害类型等众多因素的影响方式。实际的应急疏散是分类体系下多类特点的组合,使得实际应用需要从不同的视角下顾及多个因素,综合制定有针对性的疏散方案。

尽管应急疏散问题被研究了很多年,但依然有很多难点尚未突破,如疏散行为精准建模、多交通模式联合应急疏散、多特征人群混合疏散、室内外一体化疏散等。幸运的是,近些年蓬勃发展的新兴技术给这些问题的解决带来了新的思路。例如,GIS与BIM技术的融合给室内外一体化应急疏散提供了全信息的底层数据支撑;大数据和人工智能算法使得高精度挖掘人群疏散行为特征、真实应急情景下的个体和群体动态特征成为可能。

目前有关应急疏散的研究丰富多样,都有各自的特色。随着新技术的融入,特定的难点问题有望得到有效解决,但依然尚未形成统一的模型框架。应急疏散研究之路充满艰辛与挑战,但也充满机遇。

参 考 文 献

- [1] Goodchild M. Data Modeling for Emergencies [M]//Cutter S L, Richardson D B, Wilbanks T J. Geographical Dimensions of Terrorism. New York: Routledge, 2003
- [2] Shekhar S, Yang K, Gunturi V M, et al. Experiences with Evacuation Route Planning Algorithms[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(12): 2 253-2 265
- [3] Wang Jinghong. Research on the Uncertainties of Large-Scale Crowd Evacuation Under Unconventional Emergencies[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 (王静虹. 非常规突发情况下大规模人群疏散的不确定性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013)
- [4] Du Lei. The Research of a Computational Model for Large-Scale Open Space Emergency Evacuation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012 (杜磊. 大规模开放空间应急疏散计算模型研究[D]. 天津:天津大学, 2012)
- [5] Yuan Qianli. Research on the Causes and Emergency Response of Crowd Stampede-Reflection on Stampede at the Shanghai Bund in the New Year's Eve[J]. *China Emergency Rescue*, 2015(2): 13-16 (袁千里. 人群拥挤踩踏事件原因与应急处置探究: 上海外滩迎新踩踏事件的反思[J]. 中国应急救援, 2015(2):13-16)
- [6] Lin Yuming, Li Jin. Disaster Prevention and Mitigation Since the Founding of the People's Republic of China for 70 Years: Review and Interpretation[J]. *Social Security Studies*, 2019, 12(6): 27-43 (林毓铭, 李瑾. 中国防灾减灾70年:回顾与诠释[J]. 社会保障研究, 2019, 12(6):27-43)
- [7] He X, Tiefenbacher J, Samson E L. Hurricane Evacuation Behavior in Domestic and International College Students: The Influences of Environmental Familiarity, Expressed Hurricane Evacuation, and Personal Experience [J]. *Journal of Emergency Management*, 2007, 5(6): 61-69
- [8] Chen Xi. A Review on Evacuation Speed Models [J]. *Safety and Security Technology*, 2010 (3): 46-48(陈曦. 人员疏散速度模型综述[J]. 安防科技, 2010(3):46-48)
- [9] Bernardini G, Quagliarini E, D' Orazio M. Towards Creating a Combined Database for Earthquake Pedestrians' Evacuation Models[J]. *Safety Science*, 2016, 82: 77-94
- [10] Li Zheng. Analysis of Emergency Evacuation of Passengers in Subway Stations [J]. *China New Telecommunications*, 2018, 20(14): 157-158 (李铮. 地铁站紧急疏散客流行为的分析[J]. 中国新通信, 2018, 20(14):157-158)
- [11] Wei Xing. On Behavior Patterns of Human Evacuation in an Earthquake[J]. *Journal of the Armed Po-*

- lice Academy*, 2016, 32(10): 56-60 (魏星. 地震中人员疏散行为规律调查研究[J]. 武警学院学报, 2016, 32(10): 56-60)
- [12] He Yijing, Zeng Jian, Wang Zihan, et al. Numerical Simulation of High-Rise Dormitory and the Psychological Behavior During the Fire Evacuation[J]. *Fire Science and Technology*, 2013, 32(1): 15-18 (何怡婧, 曾坚, 王子寒, 等. 高层学生宿舍火灾疏散模拟与逃生行为研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(1): 15-18)
- [13] Cocking C, Drury J, Reicher S. The Psychology of Crowd Behaviour in Emergency Evacuations: Results from Two Interview Studies and Implications for the Fire and Rescue Services[J]. *The Irish Journal of Psychology*, 2009, 30: 59-74
- [14] Fang J, El-Tawil S, Aguirre B. Leader-Follower Model for Agent Based Simulation of Social Collective Behavior During Egress [J]. *Safety Science*, 2016, 83: 40-47
- [15] Shi L, Xie Q, Cheng X, et al. Developing a Database for Emergency Evacuation Model[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(8): 1724-1729
- [16] 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
- [17] Shields T J, Boyce K E, Silcock G W H. Facilities Management Disability and Emergency Evacuation [J]. *Facilities*, 1999, 17(9/10): 345-351
- [18] Ehtamo H, Heliövaara S, Hostikka S, et al. Modeling Evacuees' Exit Selection with Best Response Dynamics [M]//Klingsch W, Rogsch C, Schadschneider A, et al. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [19] Kinatader M, Comunale B, Warren W H. Exit Choice in an Emergency Evacuation Scenario is Influenced by Exit Familiarity and Neighbor Behavior [J]. *Safety Science*, 2018, 106: 170-175
- [20] Proulx G. Evacuation Planning for Occupants with Disability[R]. Fire Risk Management Program, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2002
- [21] Kinatader M, Warren W H. Social Influence on Evacuation Behavior in Real and Virtual Environments [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016(3): 43
- [22] Kobes M, Helsloot I, De Vries B, et al. Building Safety and Human Behaviour in Fire: A literature Review[J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(1): 1-11
- [23] Wang Binghong, Zhou Tao, Shi Dongmei. The Significance and Progress of the Study on the Emergency Evacuation Dynamics [J]. *Modern Physics*, 2016, 28(2): 50-56 (汪秉宏, 周涛, 史冬梅. 应急疏散动力学研究的意义与进展[J]. 现代物理知识, 2016, 28(2): 50-56)
- [24] Gu Z, Liu Z, Shiwakoti N, et al. Video-Based Analysis of School Students' Emergency Evacuation Behavior in Earthquakes [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 18: 1-11
- [25] Hou Tuanzeng. Study on Emergency Evacuation Behaviors of Passengers in a Subway Station (2): Behavior Analysis [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(4): 128-134 (侯团增. 某地铁站突发事件乘客疏散行为分析研究(2): 行为分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 128-134)
- [26] Li Jun, Wu Ximeng. Human Behavior and Modeling Simulation Under Emergency Evacuation [J]. *Safety and Security*, 2015, 36(8): 13-16 (李军, 吴茜蒙. 紧急疏散下的人员行为及建模仿真[J]. 安全, 2015, 36(8): 13-16)
- [27] Helbing D, Molnar P. Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds [J]. *Understanding Complex System*, 1998(1): 569-577
- [28] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282
- [29] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490
- [30] Helbing D, Isobe M, Nagatani T, et al. Lattice Gas Simulation of Experimentally Studied Evacuation Dynamics [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(6): 067101
- [31] Hoogendoorn S P, Daamen W. Pedestrian Behavior at Bottlenecks [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(2): 147-159
- [32] Li Nan, Wang Jinhuan, Wang Yang, et al. Small Group Behaviors in Emergency Evacuation of Multi-Exits Stadium [J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(6): 402-406 (李楠, 王金环, 汪洋, 等. 事故中多出口场馆人员小团体行为疏散研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 402-406)
- [33] Zheng Meirong. Simulation of Personnel Evacuation Based on Cellular Automaton Model [J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 32(2): 39-44 (郑美容. 基于元胞自动机的人员疏散行为模拟研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2016, 32(2): 39-44)
- [34] Wu Xiumin, Jian Zhaogang, Tang Zhiwei, et al. Statistics Analysis of Occupancy Behaviors Based on

- Video from a Real Fire Incident[J]. *Fire Safety Science*, 2013, 22(1):10-16 (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(1):10-16)
- [35] Guo LiangJie, Zhao Yunsheng. Simulation on Personnel Evacuation Behavior Based on Cellular Automata Model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, 21(4):101-106 (郭良杰, 赵云胜. 基于元胞自动机模型的人员疏散行为模拟[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4):101-106)
- [36] Yang Can, Chen Qun, Chen Lu. Modeling and Simulation of Following Behaviors of Pedestrians Under Limited Visibility [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(24):87-101 (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)
- [37] Parisi D R, Dorso C O. Morphological and Dynamical Aspects of the Room Evacuation Process [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 385: 343-355
- [38] Chen Changkun, Qin Wenlong, Tong Yunhe, et al. Investigation and Analysis on Evacuation Psychology and Behavior of Personnel Under Sudden Fire [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(8):35-40 (陈长坤, 秦文龙, 童蕴贺, 等. 突发火灾下人员疏散心理及行为的调查与分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8):35-40)
- [39] Yu Shuijun, Xie Gaochao, Pan Rongkun, et al. Study on the Safe Evacuation of Disabled Persons in Building Fire[J]. *Education Teaching Forum*, 2020(4):141-143 (于水军, 谢高超, 潘荣锟, 等. 建筑火灾中残疾人安全疏散问题研究[J]. 教育教学论坛, 2020(4):141-143)
- [40] Xia Yang. Research on Disabled Evacuation in High-Rise Building for Fire Disasters[J]. *Fire Technique and Products Information*, 2009(4):66-67 (夏杨. 高层建筑火灾残疾人疏散分析研究[J]. 消防技术与产品信息, 2009(4):66-67)
- [41] Aloi S, Rogers J. Evacuation and Life Safety Strategies for Super High Rise Buildings[J]. *Building for the 21st Century: Technology, Livability, Productivity*, 2001(1):429-436
- [42] Xiong B, Luh P B, Chang S C. Group Elevator Scheduling with Advanced Traffic Information for Normal Operations and Coordinated Emergency Evacuation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005
- [43] Koo J, Kim Y S, Kim B I. Estimating the Impact of Residents with Disabilities on the Evacuation in a High-Rise Building: A Simulation Study[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 24: 71-83
- [44] Pan Anping. Analysis of Factors on Decision-Making Behavior of Evacuation for Vulnerable Groups under Typhoon-Mud Flow Disaster[J]. *Innovation Science and Technology*, 2015(2):76-78 (潘安平. 台风泥石流受灾区行动弱势群体疏散避难行为决策因素分析[J]. 创新科技, 2015(2):76-78)
- [45] Clark-Carter D D, Heyes A D, Howarth C I. The Efficiency and Walking Speed of Visually Impaired People[J]. *Ergonomics*, 1986, 29(6):779-789
- [46] Sun Xiaoli, Zhang Yuming. Humanized Design Research in Retail Space: To the Needs of the Disadvantaged as an Example[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2007 (孙晓丽, 张玉明. 商业购物空间人性化设计研究:以生理弱势群体需求为例[D]. 济南:山东建筑大学, 2007)
- [47] Bendel J, Klüpfel H. Accessibility and Evacuation Planning: Similarities and Differences[M]//Peacock R, Kuligowski E, Averill J. Pedestrian and Evacuation Dynamics. Boston, MA: Springer, 2011
- [48] Qian Hongwei, Yin Xiangju, Jin Yingshu. Study on the Management Technical System of Aid of Vulnerable Groups in Earthquake Emergency Shelters During the Disaster[J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(2):164-170 (钱洪伟, 尹香菊, 金英淑. 地震应急避难所灾时运营中弱势群体救助管理技术体系研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2):164-170)
- [49] Jiang Zemin. Study on Safe Evacuation in Large Hospital Fires[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (姜泽民. 大型医院火灾状况下安全疏散的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011)
- [50] Christensen K, Sasaki Y. Agent-Based Emergency Evacuation Simulation with Individuals with Disabilities in the Population[J]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2008, 11(3):9-21
- [51] Manley M, Kim Y S, Christensen K, et al. Modeling Emergency Evacuation of Individuals with Disabilities in a Densely Populated Airport[J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2206(1):32-38
- [52] Jiang C S, Zheng S Z, Yuan F, et al. Experimental Assessment on the Moving Capabilities of Mobility-Impaired Disabled [J]. *Safety Science*, 2012, 50(4):974-985
- [53] Bai Xuecen, Geng Zhongfei, Li Xingli. Simulation of Special Population Evacuation Based on Cellular Automata[C]//The 17th Academic Conference of Mechanical Society in 7 Northern Provinces, Jiaozuo, Henan, China, 2018 (白雪岑, 耿中飞, 李兴莉. 基于元胞自动机的特殊人群疏散仿真研究

- [C]//第十七届北方七省市力学学会学术会议, 河南, 焦作, 2018)
- [54] Li Shengli, Wei Dong, Liang Qiang. Evacuation of Subway Based on Numerical Simulations [J]. *Fire Science and Technology*, 2012, 31(2): 149-152 (李胜利, 魏东, 梁强. 基于数值仿真的地铁战人员疏散 [J]. 消防科学与技术, 2012, 31(2): 149-152)
- [55] Tian Yumin. Study on Safe Evacuation of Special Population in High-Rise Buildings [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2009(9): 45-49 (田玉敏. 高层建筑中特殊人群安全疏散问题的研究 [J]. 消防技术与产品信息, 2009(9): 45-49)
- [56] Soong G P, Lovie-Kitchin J E, Brown B. Preferred Walking Speed for Assessment of Mobility Performance: Sighted Guide Versus Non-sighted Guide Techniques [J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2000, 83(5): 279-282
- [57] Kuyk T, Elliott J L, Fuhr P S. Visual Correlates of Mobility in Real World Settings in Older Adults with Low Vision [J]. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 1998, 75(7): 538-547
- [58] Kuligowski E, Peacock R, Wiess E, et al. Stair Evacuation of People with Mobility Impairments [J]. *Fire and Materials*, 2015, 39(4): 371-384
- [59] Shields T J. Fire and Disabled People in Buildings [J]. *Journal of the Royal Society of Health*, 1994, 114(6): 304-308
- [60] Rubadiri L, Ndumu D T, Roberts J P. Predicting the Evacuation Capability of Mobility-Impaired Occupants [J]. *Fire Technology*, 1997, 33(1): 32-53
- [61] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M. Experiments of Evacuation Speed in Smoke-Filled Tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 53: 61-67
- [62] Boyce K E, Shields T J, Silcock G W H. Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an Incline [J]. *Fire Technology*, 1999, 35(1): 51-67
- [63] Samoshin D A, Istratov R N. The Parameters of Pedestrian Flows in Hospital During Fire Evacuation [C]//The 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Nr Windsor, UK, 2013
- [64] Hemingway L, Priestley M. Natural Hazards, Human Vulnerability and Disabling Societies: A Disaster for Disabled People? [J]. *Review of Disability Studies: An International Journal*, 2006, 2(3): 57-67
- [65] Spence P R, Lachlan K, Burke J M, et al. Media Use and Information Needs of the Disabled During a Natural Disaster [J]. *Journal of Health Care for the Poor and Underserved*, 2007, 18(2): 394-404
- [66] Lena K, Kristin A, Staffan B, et al. How do People with Disabilities Consider Fire Safety and Evacuation Possibilities in Historical Buildings? A Swedish Case Study [J]. *Fire Technology*, 2012, 48(1): 27-41
- [67] Sørensen J G, Dederichs A S. Evacuation Characteristics of Visually Impaired People: A Qualitative and Quantitative Study [J]. *Fire and Materials*, 2015, 39(4): 385-395
- [68] Hou L, Liu J G, Pan X, et al. A Social Force Evacuation Model with the Leadership Effect [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 400: 93-99
- [69] Xu M, Wu Y, Lv P, et al. miSFM: On Combination of Mutual Information and Social Force Model Towards Simulating Crowd Evacuation [J]. *Neurocomputing*, 2015, 168: 529-537
- [70] Liu Q. A Social Force Model for the Crowd Evacuation in a Terrorist Attack [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 502: 315-330
- [71] Zhang Xinlong, Chen Xiuwan, Li Huaiyu, et al. An Improved Cellular Automata Model for Simulating Pedestrian Evacuation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1 330-1 336 (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(9): 1 330-1 336)
- [72] Li Y, Chen M, Dou Z, et al. A Review of Cellular Automata Models for Crowd Evacuation [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 526: 120752
- [73] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming Transition in Pedestrian Counter Flow [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1999, 267(3/4): 487-498
- [74] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of Evacuation Processes Using a Bionics-Inspired Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, 312(1/2): 260-276
- [75] Guo R Y, Huang H J. Route Choice in Pedestrian Evacuation: Formulated Using a Potential Field [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011(4): P04018
- [76] Georgoudas I G, Kyriakos P, Sirakoulis G C, et al. An FPGA Implemented Cellular Automaton Crowd Evacuation Model Inspired by the Electrostatic-Induced Potential Fields [J]. *Microprocessors and Mi-*

- croSystems*, 2010, 34(7/8): 285-300
- [77] Zhang P, Jian X X, Wong S C, et al. Potential Field Cellular Automata Model for Pedestrian Flow [J]. *Physical Review E*, 2012, 85(2): 021119
- [78] Kasereka S, Kasoro N, Kyamakya K, et al. Agent-Based Modelling and Simulation for Evacuation of People from a Building in Case of Fire [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 130: 10-17
- [79] Tan L, Hu M, Lin H. Agent-Based Simulation of Building Evacuation: Combining Human Behavior with Predictable Spatial Accessibility in a Fire Emergency [J]. *Information Sciences*, 2015, 295: 53-66
- [80] Jiang Yuyan, Liu Jun. Review on the Group Evacuation Research in Sudden Fire [J]. *Journal of NanYang Institute of Technology*, 2017, 9(6): 24-29 (江雨燕, 刘军. 突发火灾环境的群体疏散问题研究综述 [J]. 南阳理工学院学报, 2017, 9(6): 24-29)
- [81] Shi J, Ren A, Chen C. Agent-Based Evacuation Model of Large Public Buildings Under Fire Conditions [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(3): 338-347
- [82] Chen Peng, Wang Xiaoxuan, Liu Miaolong. A Simulation Method for Sports Grounds Evacuation Based on Integration of Multi-Agent System and GIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 133-139 (陈鹏, 王晓璇, 刘妙龙. 基于多智能体与GIS集成的体育场人群疏散模拟方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 133-139)
- [83] Wei Ming, Yang Fangting, Cao Zhengqing. A Review of Development and Study on the Traffic Simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2003(8): 1 179-1 183 (魏明, 杨方廷, 曹正清. 交通仿真的发展及研究现状 [J]. 系统仿真学报, 2003(8): 1 179-1 183)
- [84] Alsnih R, Stopher P R. Review of Procedures Associated with Devising Emergency Evacuation Plans [J]. *Transportation Research Record*, 2004, 1 865(1): 89-97
- [85] Zong Xinlu, Xiong Shengwu, Fang Zhixiang. Optimization and Proportion Analysis of Pedestrian-Vehicle Mixed Evacuation Based on Ant Colony Algorithm [J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2012, 32(7): 1 610-1 617 (宗欣露, 熊盛武, 方志祥. 基于蚁群算法的人车混合疏散优化及混合比例分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1 610-1 617)
- [86] Ren G, Zhou Z, Wang W, et al. Crossing Behaviors of Pedestrians at Signalized Intersections: Observational Study and Survey in China [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2 264(1): 65-73
- [87] Jiang R, Wu Q S. Interaction Between Vehicle and Pedestrians in a Narrow Channel [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 368(1): 239-246
- [88] Jiang R, Wu Q S. Pedestrian Behaviors in a Lattice Gas Model with Large Maximum Velocity [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 373: 683-693
- [89] Ishaque M M, Noland R B. Trade-Offs Between Vehicular and Pedestrian Traffic Using Micro-simulation Methods [J]. *Transport Policy*, 2007, 14(2): 124-138
- [90] Zhang X, Chang G L. Optimal Control Strategies for Massive Vehicular-Pedestrian Mixed Flows in the Evacuation Zone [C]//The 89th Transportation Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, 2010
- [91] Zhang X, Chang G L. Cellular Automata-Based Model for Simulating Vehicular-Pedestrian Mixed Flows in a Congested Network [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2 234(1): 116-124
- [92] Zhang J, Wang H, Li P. Cellular Automata Modeling of Pedestrian's Crossing Dynamics [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2004, 5(7): 835-840
- [93] Jin Meilian. Mixed Traffic Flow Evacuation in City Emergency [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008 (金美莲. 城市突发公共事件下混合流疏散问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008)
- [94] Di Mauro M, Lees M, Megawati K, et al. Pedestrian-Vehicles Interaction During Evacuation: Agent-Based Hybrid Evacuation Modelling of Southeast Asian Cities [M]//Weidmann U, Kirsch U, Schreckenberg M. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012. Cham: Springer, 2014
- [95] Chen Wenxiao. The Research on Modeling and Simulation of Pedestrian-Vehicle Mixed Evacuation Based on Cellular Automata [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016 (陈文晓. 基于元胞自动机的人车混合疏散建模与仿真研究 [D]. 福州: 福州大学, 2016)
- [96] Esteban M, Valenzuela V P, Yun N Y, et al. Typhoon Haiyan 2013 Evacuation Preparations and Awareness [J]. *International Journal of Sustainable Future for Human Security*, 2015, 3(1): 37-45
- [97] Zhang J, Zhou C, Xu K, et al. Flood Disaster Monitoring and Evaluation in China [J]. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2002, 4(2): 33-43
- [98] Zhang Mingjie, Zhang Jinghong, Zhang Yajie, et al. Assessment of Typhoon Disaster in Hainan

- Based on Extension Theory: A Case Study of the Typhoon 1816 "Bebinca" [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2019, 37(3): 239-246 (张明洁, 张京红, 张亚杰, 等. 海南台风灾害实时评估分析: 以 1816 号台风“贝碧嘉”为例 [J]. 海南大学学报自然科学版, 2019, 37(3): 239-246)
- [99] D'Orazio M, Spalazzi L, Quagliarini E, et al. Agent-Based Model for Earthquake Pedestrians' Evacuation in Urban Outdoor Scenarios: Behavioural Patterns Definition and Evacuation Paths Choice [J]. *Safety Science*, 2014, 62: 450-465
- [100] Li J, Zhang B, Liu W, et al. Research on OREMS-Based Large-Scale Emergency Evacuation Using Vehicles [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2011, 89(5): 300-309
- [101] Tang Fei, He Qing, Zhu Kongjin, et al. Simulated Study on the Emergency Evacuation Control Features of the Massive Crowd in Some Subway Transfer Station [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(4): 1 419-1 426 (唐飞, 何清, 朱孔金, 等. 火灾情况下某城市地铁换乘站内大规模人群疏散特征研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1 419-1 426)
- [102] Cuesta A, Abreu O, Balboa A, et al. Real-Time Evacuation Route Selection Methodology for Complex Buildings [J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 947-954
- [103] Kim J M, Son K, Kim Y J. Assessing Regional Typhoon Risk of Disaster Management by Clustering Typhoon Paths [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(5): 2 083-2 096
- [104] Xu H, Ma C, Lian J, et al. Urban Flooding Risk Assessment Based on an Integrated k -means Cluster Algorithm and Improved Entropy Weight Method in the Region of Haikou, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 975-986
- [105] Erdik M. Earthquake Risk Assessment [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15(12): 5 055-5 092
- [106] Wu Y J, Tian H, Si Q M, et al. Uncertainty Analysis on Parameters for Risk of Toxic Gas Leakage and Diffusion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(4): 138-142
- [107] Watts J M, Hall J R. Introduction to Fire Risk Analysis [M] // Hurley M J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York: Springer, 2016
- [108] Choi M, Chi S. Optimal Route Selection Model for Fire Evacuations Based on Hazard Prediction Data [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, 94: 321-333
- [109] Wang J, Zhang L, Shi Q, et al. Modeling and Simulating for Congestion Pedestrian Evacuation with Panic [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 428: 396-409
- [110] Richardson O, Jalba A, Muntean A. Effects of Environment Knowledge in Evacuation Scenarios Involving Fire and Smoke: A Multiscale Modelling and Simulation Approach [J]. *Fire Technology*, 2019, 55(2): 415-436
- [111] Choi M, Park M, Lee H S, et al. Understanding the Role of Dynamic Risk Perception During Fire Evacuations Using Agent-Based Modeling [C] // Construction Research Congress 2016, San Juan, Puerto Rico, USA, 2016
- [112] Bukowski R W. Emergency Egress Strategies for Buildings [C] // The 11th Interflam, London, England, 2007
- [113] Choi J, Hwang H, Hong W. Predicting the Probability of Evacuation Congestion Occurrence Relating to Elapsed Time and Vertical Section in a High-Rise Building [M] // Peacock R, Kuligowski E, Averill J. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Boston, MA: Springer, 2011
- [114] Chen P H, Feng F. A Fast Flow Control Algorithm for Real-Time Emergency Evacuation in Large Indoor Areas [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(5): 732-740
- [115] Li J, Zhu H. A Risk-Based Model of Evacuation Route Optimization Under Fire [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 365-371
- [116] Li D, Han B. Behavioral Effect on Pedestrian Evacuation Simulation Using Cellular Automata [J]. *Safety Science*, 2015, 80: 41-55
- [117] Hartama D, Mawengkang H, Zarlis M, et al. A Research Framework of Disaster Traffic Management to Smart City [C] // The Second International Conference on Informatics and Computing, Jayapura, Indonesia, 2017
- [118] Mohamed R E, Kosba E, Mahar K, et al. A Framework for Emergency-Evacuation Planning Using GIS and DSS [M] // Popovich V, Schrenk M, Thill J C, et al. *Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems*. Cham: Springer, 2018
- [119] Kim K, Pant P, Yamashita E. Integrating Travel Demand Modeling and Flood Hazard Risk Analysis for Evacuation and Sheltering [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 1 177-1 186
- [120] Murray-Tuite P, Wolshon B. Evacuation Transportation Modeling: An Overview of Research, Development, and Practice [J]. *Transportation Research Part*

- C: Emerging Technologies*, 2013, 27: 25-45
- [121] Jiang J, Yue Y, He S. Multimodal-Transport Collaborative Evacuation Strategies for Urban Serious Emergency Incidents Based on Multi-Sources Spatio-temporal Data[C]//The 10th International Conference on Geographic Information Science, Melbourne, Australia, 2018
- [122] Wang Z, Lai C, Chen X, et al. Flood Hazard Risk Assessment Model Based on Random Forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1 130-1 141
- [123] Song Chengcheng, Li Mengya, Wang Jun, et al. Simulation of Typhoon Storm Surge Impacts in Shanghai Based on Storm Surge Scenarios and Disaster Prevention Measures [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(12): 1 692-1 703 (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): 1 692-1 703)
- [124] Sene K. Flood Warning, Forecasting and Emergency Response[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Science and Business Media, 2008
- [125] Stephenson V, Finlayson A, Morel L M. A Risk-Based Approach to Shelter Resilience Following Flood and Typhoon Damage in Rural Philippines [J]. *Geosciences*, 2018, 8(2): 76
- [126] Sherali H D, Carter T B, Hobeika A G. A Location-Allocation Model and Algorithm for Evacuation Planning Under Hurricane/Flood Conditions [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991, 25(6): 439-452
- [127] Gudishala R, Wilmot C. Comparison of Time-Dependent Sequential Logit and Nested Logit for Modeling Hurricane Evacuation Demand [J]. *Transportation Research Record*, 2012, 2 312(1): 134-140
- [128] Zhang Zhao. Application of Traffic Simulation for Mega Region Evacuation Traffic Analysis Under Predictable Emergency [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013 (张钊. 可预知灾难性事件下城市群应急交通疏散模型及分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013)
- [129] Shen Hang, Li Mengya, Wang Jun. Emergency Evacuation Method for Strom Surge Floods: A Case Study in Yuhuan, Zhejiang [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(1): 122-127 (沈航, 李梦雅, 王军. 风暴洪水灾害应急疏散方法研究: 以浙江省玉环县为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(1): 122-127)
- [130] Southworth F. Regional Evacuation Modeling: A State of the Art Reviewing [J]. *Oak Ridge National Labs*, 1991, 11(5): 511-521
- [131] Lim H R, Lim M B B, Piantanakulchai M. Determinants of Household Flood Evacuation Mode Choice in a Developing Country [J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(1): 507-532
- [132] Vermuyten H, Beliën J, De Boeck L, et al. A Review of Optimisation Models for Pedestrian Evacuation and Design Problems [J]. *Safety Science*, 2016, 87: 167-178
- [133] Goerigk M, Deghdak K, Heßler P. A Comprehensive Evacuation Planning Model and Genetic Solution Algorithm [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 71: 82-97
- [134] Parr S A, Kaiser E. Critical Intersection Signal Optimization During Urban Evacuation Utilizing Dynamic Programming [J]. *Journal of Transportation Safety and Security*, 2011, 3(1): 59-76
- [135] Han L D, Yuan F, Urbanik T. What is an Effective Evacuation Operation? [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2007, 133(1): 3-8
- [136] Meng Yongchang, Yang Saini, Shi Peijun. Multi-objective Optimization of Emergency Evacuation Using Improved Genetic Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 201-205 (孟永昌, 杨赛霓, 史培军. 基于改进遗传算法的路网应急疏散多目标优化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(2): 201-205)
- [137] Sheffi Y. Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1985
- [138] Bayram V, Tansel B Ç, Yaman H. Compromising System and User Interests in Shelter Location and Evacuation Planning [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 72: 146-163
- [139] Andem S K. A Comparative Analysis of Hurricane Evacuation Traffic Conditions Using Static and Dynamic Traffic Assignments [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2006
- [140] Daganzo C. The Cell Transmission Model Part I: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1994, 28(4): 269-287
- [141] Daganzo C F. The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995, 29(2): 79-93
- [142] Jiang J, Dellaert N, van Woensel T, et al. Modelling Traffic Flows and Estimating Road Travel Times in Transportation Network Under Dynamic Disturbances [J]. *Transportation*, 2020, 47: 2 951-2 980
- [143] Barrett B, Ran B, Pillai R. Developing a Dynamic Traffic Management Modeling Framework for Hurri-

- cane Evacuation [J]. *Transportation Research Record*, 2000, 1 733(1): 115-121
- [144] Pel A J, Hoogendoorn S P, Bliemer M C. Impact of Variations in Travel Demand and Network Supply Factors for Evacuation Studies [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2 196(1): 45-55
- [145] Pel A J, Bliemer M C J, Hoogendoorn S P. A Review on Travel Behaviour Modeling in Dynamic Traffic Simulation Models for Evacuations [J]. *Transportation*, 2012, 39(1): 97-123
- [146] Jiang J, Wu L. A New Dynamic Network Flow Algorithm Using Base State Amendment Model for Emergency Response [J]. *Transactions in GIS*, 2017, 21(6): 1 179-1 203
- [147] Pan Shuliang, Yu Jie, Liu Yue. Integrated Optimization Model of Pedestrian-Public Transit Emergency Evacuation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(3): 79-86 (潘述亮, 俞洁, 刘玥. 行人-公交紧急疏散集成优化模型 [J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 79-86)
- [148] Liu Xiaoming, Hu Hong. Research Status and Prospect of Emergency Transportation Evacuation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008(3): 108-115 (刘小明, 胡红. 应急交通疏散研究现状与展望 [J]. 交通运输工程学报, 2008(3): 108-115)
- [149] Li Sihuan, Chen Gangtie. Study on Large-Scale Mixed Emergency Evacuation After Disaster [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(12): 133-137 (李思寰, 陈钢铁. 灾害大规模混合应急疏散研究 [J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(12): 133-137)
- [150] Zong X, Xiong S, Fang Z. A Conflict-Congestion Model for Pedestrian-Vehicle Mixed Evacuation Based on Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Computers and Operations Research*, 2014, 44: 1-12
- [151] Zong Xinlu. Research on Multi-objective Spatial-temporal Evacuation Model of Pedestrian-Vehicle Mixed Traffic Flow [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011 (宗欣露. 多目标人车混合时空疏散模型研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011)
- [152] Zong X, Jiang Y. Pedestrian-Vehicle Mixed Evacuation Model Based on Multi-Particle Swarm Optimization [C]//The 11th International Conference on Computer Science and Education, Nagoya, Japan, 2016
- [153] Zong X, Wang C, Chen H. An Evacuation Model Based on Co-Evolutionary Multi-particle Swarms Optimization for Pedestrian-Vehicle Mixed Traffic Flow [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2017, 28(12): 1750142
- [154] Li Q, Fang Z, Li Q. Ant Colony Based Evacuation Route Optimization Model for Mixed Pedestrian-Vehicle Flows [C]//The Sixth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Zurich, Switzerland, 2012
- [155] Liu M, Xiong S, Li B. Dynamic Route Guidance Strategy in a Two-Route Pedestrian-Vehicle Mixed Traffic Flow System [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2016, 27(9): 1650099
- [156] Zhang X, Chang G L. An Optimization Model for Guiding Pedestrian-Vehicle Mixed Flows During an Emergency Evacuation [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2014, 18(3): 273-285
- [157] Duan P, Xiong S, Yang C, et al. Personalized Route Planning System Based on Wardrop Equilibrium Model for Pedestrian-Vehicle Mixed Evacuation in Campus [J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2016, 31: 14-22
- [158] Fang Z, Li Q, Li Q, et al. A Space-Time Efficiency Model for Optimizing Intra-Intersection Vehicle-Pedestrian Evacuation Movements [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 31: 112-130
- [159] Wood N, Jones J, Peters J, et al. Pedestrian Evacuation Modeling to Reduce Vehicle Use for Distant Tsunami Evacuations in Hawaii [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28: 271-283
- [160] Villalobos J, Chiu Y C, Zheng H, et al. Modeling and Solving Optimal Evacuation Destination-Route-Flow-Staging Problem for No-notice Extreme Events [C]//Transportation Research Board 85th Annual Meeting, Washington DC, USA, 2006
- [161] Parr A R. Disasters and Disabled Persons: An Examination of the Safety Needs of a Neglected Minority [J]. *Disasters*, 1987, 11(2): 148-159
- [162] Manley M, Kim Y S. Modeling Emergency Evacuation of Individuals with Disabilities (Exitus): An Agent-Based Public Decision Support System [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(9): 8 300-8 311
- [163] Xing Yejiang, Wan Jie. Study on Barrier-Free Design of Stairwell Paying Attention to Evacuation of Vulnerable Groups [J]. *Housing Science*, 2017(11): 21-24 (邢烨炯, 万杰. 兼顾弱势群体疏散的楼梯间无障碍设计研究 [J]. 住宅科技, 2017(11): 21-24)
- [164] Tian Yumin. Study on Evacuation Behaviors of the Special Group and the Evacuation Design for Them [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(3): 91-94 (田玉敏. 特殊人群疏散行为及疏散设计的研

- 究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 91-94)
- [165] Li Xin. The Research on the Barrier-Free Design for the Disabled in Public Buildings[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007 (李鑫. 面向残疾人使用的公共建筑无障碍设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007)
- [166] Robertson B S, Dunne C. Wayfinding for Visually Impaired Users of Public Buildings[J]. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 1998, 92(5): 349-354
- [167] Luo M, Wong K H L. Evacuation Strategy for Super Highrise Building[C]. The 5th Annual Seminar on Tall Building Construction and Maintenance, Hong Kong, China, 2006
- [168] Proulx G, Heyes E, Hedman G, et al. The Use of ELEVATORS for Egress[C]. The 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, UK, 2009
- [169] Williamson B J, Demirbilek N. Use of Lifts and Refuge Floors for Fire Evacuation in High Rise Apartment Buildings[C]//The 44th Annual Conference of the Australian and New Zealand Architectural Science Association, Auckland, New Zealand, 2010
- [170] Koo J, Kim Y S, Kim B I, et al. A Comparative Study of Evacuation Strategies for People with Disabilities in High-Rise Building Evacuation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(2): 408-417
- [171] McGuire L C, Ford E S, Okoro C A. Natural Disasters and Older US Adults with Disabilities: Implications for Evacuation[J]. *Disasters*, 2007, 31(1): 49-56
- [172] Arai K. Rescue System with Vital Sign, Location and Attitude Sensing Together with Traffic Condition, Readiness of Helper Monitoring in Particular for Disabled and Elderly Persons[C]//The 11th International Conference on Information Technology: New Generations, Las Vegas, Nevada, USA, 2014
- [173] Arai K, Sang T, Uyen N. Task Allocation Model for Rescue Disabled Persons in Disaster Area with Help of Volunteers[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2012, 3(7): 96-101
- [174] Zhang Sen, Zeng Jian, Liu Xiaoyang, et al. A Research on Emergency Evacuation Mode of Visually Impaired People[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(3): 69-73 (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)
- [175] Li Q, Zhong S, Fang Z, et al. Optimizing Mixed Pedestrian-Vehicle Evacuation via Adaptive Network Reconfiguration[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(3): 1 023-1 033
- [176] Li Qiuping, Luan Xuechen, Zhou Suhong, et al. Evacuation Network Optimization Based on Contraflow and Conflict Elimination for Pedestrian-Vehicle Mixed Flows[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 349-355 (李秋萍, 栾学晨, 周素红, 等. 利用反向流和冲突消除进行人车混行疏散路网优化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(3): 349-355)
- [177] Xie C, Waller S T, Kockelman K M. Intersection Origin-Destination Flow Optimization Problem for Evacuation Network Design[J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2 234(1): 105-115
- [178] Thompson R R, Garfin D R, Silver R C. Evacuation from Natural Disasters: A Systematic Review of the Literature[J]. *Risk Analysis*, 2017, 37(4): 812-839
- [179] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep Learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7 553): 436-444
- [180] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep learning[M]. Cambridge: MIT press, 2016
- [181] Aggarwal J K, Ryoo M S. Human Activity Analysis: A Review[J]. *ACM Computing Surveys*, 2011, 43(3): 1-43
- [182] Cai Qiang, Deng Yibiao, Li Haisheng, et al. Survey on Human Action Recognition Based on Deep Learning[J]. *Computer Science*, 2020, 47(4): 85-93 (蔡强, 邓毅彪, 李海生, 等. 基于深度学习的人体行为识别方法综述[J]. 计算机科学, 2020, 47(4): 85-93)
- [183] Shi J, Liu P. An Agent-Based Evacuation Model to Support Fire Safety Design Based on an Integrated 3D GIS and BIM Platform[C]//Computing in Civil and Building Engineering, Orlando, America, 2014
- [184] Lin Hui, Zhang Chunxiao, Chen Min, et al. On Virtual Geographic Environments for Geographic Knowledge Representation and Sharing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1 290-1 298 (林珩, 张春晓, 陈旻, 等. 论虚拟地理环境对地理知识的表达与共享[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1 290-1 298)
- [185] Shen Shen, Gong Jianhua, Li Wenhong, et al. A Comparative Experiment on Spatial Cognition Based on Virtual Travel Behavior[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1 732-1 738 (申申, 龚建华, 李文航, 等. 基于虚拟亲历行为的空间场所认知对比实验研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1 732-1 738)
- [186] Vanclooster A, van de Weghe N, de Maeyer P. In-

- tegrating Indoor and Outdoor Spaces for Pedestrian Navigation Guidance: A Review [J]. *Transactions in GIS*, 2016, 20(4): 491-525
- [187] Atyabi S, Moghaddam M K, Rajabifard A. Optimization of Emergency Evacuation in Fire Building by Integrated BIM and GIS [J]. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 42: 131-139
- [188] Xie Jun. Emergency Evacuation Algorithms for Environment Integrating Indoor and Outdoor Space [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014(谢君, 室内外一体化应急疏散方法的研究与实现[D]. 上海: 华东师范大学, 2014)
- [189] Zhang Lin, Huang Xiaoxia, Li Hongga. Indoor-Outdoor Emergency Evacuation Model Based Fire Scene Simulation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018(张琳, 黄晓霞, 李红春. 基于火灾场景仿真的室内外应急疏散模型[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018)
- [190] Zhu Qing, Hu Mingyuan, Xu Weiping, et al. 3D Building Information Model for Facilitating Dynamic Analysis of Indoor Fire Emergency [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(7): 762-766(朱庆, 胡明远, 许伟平, 等. 面向火灾动态疏散的三维建筑信息模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(7): 762-766)
- [191] Ning Zhenwei, Zhu Qing, Xia Yuping. Technology and Practice of 3D Modeling [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2013(宁振伟, 朱庆, 夏玉平. 数字城市三维建模技术与实践[M]. 北京: 中国测绘出版社, 2013)
- [192] Lü Guonian, Yu Zhaoyuan, Yuan Linwang, et al. Is the Future of Cartography the Scenario Science? [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(1): 1-6(闰国年, 俞肇元, 袁林旺, 等. 地图学的未来是场景学吗?[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 1-6)
- [193] Chen Yonghong, Gao Zhili, Gao Xiong. Overview of BIM-based Emergency Management [J]. *Journal of Kunming Metallurgy College*, 2017, 33(3): 71-76(陈永鸿, 高志利, 高雄. 基于BIM的应急管理研究综述[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2017, 33(3): 71-76)
- [194] Wu Pengfei, Liu Yushen, Tan Yi, et al. Advances and Trends of Integration Between GIS and BIM [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2019, 42(1): 1-6(武鹏飞, 刘玉身, 谭毅, 等. GIS与BIM融合的研究进展与发展趋势[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(1): 1-6)
- [195] Amirebrahimi S, Rajabifard A, Mendis P, et al. A Data Model for Integrating GIS and BIM for Assessment and 3D Visualisation of Flood Damage to Building [J]. *Locate*, 2015, 15: 10-12
- [196] Varduhn V, Mundani R P, Rank E. Multi-resolution Models: Recent Progress in Coupling 3D Geometry to Environmental Numerical Simulation [M]. New York: Springer, 2015
- [197] Boguslawski P, Mahdjoubi L, Zverovich V, et al. BIM-GIS Modelling in Support of Emergency Response Applications [J]. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations*, 2015, 149: 381-392
- [198] Tashakkori H, Rajabifard A, Kalantari M. A New 3D Indoor/Outdoor Spatial Model for Indoor Emergency Response Facilitation [J]. *Building and Environment*, 2015, 89: 170-182

A Review on Emergency Evacuation Methods for Major Sudden Disasters and Accidents

JIANG Jincheng¹

¹ Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China

Abstract: Objectives: Major disasters and accidents happened from time to time, posing serious threats to the people's lives, property, and sustainable developments of human social economy. As an important part of post-disaster emergency response, emergency evacuation makes great contributions to reducing casualties. With massive efforts of researchers from various domains for decades, many valuable patterns of evacuation were observed and excellent models have been proposed to develop the emergency evacuation theory and methodology. However, the disaster and accident types, affected people, and emergency scenarios em-

bedded into emergency evacuations for major disasters and accidents are very complicated and diverse. As a result, the focuses and methodologies of emergency evacuation models are widely different, greatly increasing the difficulty of understanding its research status from a global perspective. **Methods:** In order to solve this issue, we review and briefly criticize the literatures of emergency evacuation models from multiple perspectives, including emergency evacuation behavioral modeling, evacuation simulation, evacuation strategy optimization, implementation of emergency preparedness plans, and so on. By collecting, classifying, and summarizing current research status, a clear clue of emergency evacuation researches is presented. **Results:** Within this classification system, the evacuation requirements of major disasters and accidents, evacuation behavioral characteristics, functions and application scenarios of evacuation models, advantages and disadvantages of evacuation models would be easily captured. Furthermore, the bottlenecks of current unsettled challenges, burgeoning high technology, and future directions are presented from the author's opinion for the next developments of emergency evacuation researches. **Conclusions:** With these systematic and methodical introductions, readers can easily understand the evacuation models and their applicable scenarios from both global and local perspectives.

Key words: emergency evacuation; sudden major disasters and accidents; route planning; spatial-temporal optimization; behavioral modeling

First author: JIANG Jincheng, PhD, associate professor, specializes in integrated disaster risk reduction. E-mail: jc.jiang@siat.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42071367, 41701452); the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2019A1515011501); Shenzhen Foundation for Sustainable Development (KCXFZ20201221173613035); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19030301).

引文格式: JIANG Jincheng. A Review on Emergency Evacuation Methods for Major Sudden Disasters and Accidents[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10):1498-1518. DOI:10.13203/j.whugis20200522(江锦成. 面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10):1498-1518. DOI:10.13203/j.whugis20200522)