

灾后交通行为与仿真研究综述

牟玲玲, 齐丹, 周晓冬

(河北工业大学经济管理学院, 天津 300401)

摘要: 城市是人口稠密、经济发达、社会财富高度集中的地区, 同时也是自然灾害社会脆弱性较高的地区。突发事件的不可预测性和随机性对自然灾害下城市应急交通提出了更高要求。为降低自然灾害给城市带来的损失, 有序实施交通管理, 提高应急疏散效率, 对比分析国内外突发事件应急疏散中交通行为与交通仿真技术应用。重点聚焦中国经济发达地区发生的自然灾害以及灾后相关研究, 探寻国外先进研究方法在中国实际环境中的可借鉴之处。

关键词: 智能交通系统; 交通行为与仿真; 文献法; 自然灾害

A Review of Post-Disaster Travel Behaviors and Simulation

Mu Lingling, Qi Dan, Zhou Xiaodong

(School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Cities are not only an area with dense population, advanced economy, and highly concentrated social wealth, but also encounter with a high social vulnerability during natural disasters. The unpredictability and randomness of such the emergency condition always place a huge challenge to cities, especially to its transportation system. To be less affected by nature disasters, better organize transportation, and improve the efficiency of emergency evacuation, this paper unfolds a series of comparisons in terms of travel behaviors and the application of transportation simulation technology during emergency evacuation between China and abroad. Focusing on the studies in relation to evacuation in developed areas in China, the paper summarizes the experience and lessons.

Keywords: intelligent transportation systems; travel behaviors and simulation; literature research; natural disaster

收稿日期: 2016-02-26

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目“高速公路建设项目投资风险评价与控制研究”(Y-2012060)、河北省自然科学基金项目“基于P-SCP范式的住房市场结构、行为和绩效关系研究”(G2015202274)

作者简介: 牟玲玲(1979—), 女, 山东日照人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 房地产市场复杂性、风险管理。E-mail: lingmu1020@163.com

0 引言

随着全球气温逐渐上升, 热带风暴、飓风、地震、海啸、洪水等自然灾害频繁爆发。《亚太统计年鉴》显示, 1994—2013年, 全球自然灾害近40%发生在亚太地区^[1]。联合国国际减灾战略署(United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNISDR)2016年2月11日在日内瓦发布的报告称, 2015年全球发生的各种自然灾害共造成约2.3万人死亡, 近1亿人受到影响^[2]。文献[3]在对全球重大突发事件规律的研究中, 对1900—2013年全球范围内13 445例重大突发事件进行描述

性统计分析, 得出全球重大突发事件主要发生类型为自然灾害。印度洋海啸、美国寒潮暴雪、飓风“艾琳”、日本9.0级地震以及引发的福岛核泄漏事故、“威马逊”超强台风灾害、新疆于田7.3级地震等自然灾害无时无刻不在昭示自然灾害的可怕与不可预见性。这些灾害不仅对经济、产业造成巨大冲击, 更为严重的是造成社会公众的身心伤害。

中国是世界上灾害发生广泛、灾种多样、灾情严重的国家之一。随着城镇化进程的加快, 人口密集、经济发达、社会财富高度集中已经成为现代城市的重要标志, 与此同时, 城市也成为自然灾害社会脆弱性较高

的地区。城市的交通网络四通八达，成为灾后交通疏散的重要通道。合理规划疏散路径、方案以及疏散人员行为方式对降低财产损失及人员伤亡起到重大作用。因此，有必要关注中国城市应急交通的问题。

1 研究方法综述

1.1 交通行为研究

对于交通行为的理论解释，不同学者基于不同角度进行了阐述。文献[4]将行人交通理论解释为：以行人、车辆、道路、场站及行人交通组织管理等为研究对象，通过深入研究行人交通行为及群集规律，反映和预测不同环境下现状及未来行人的宏观和微观发展演变趋势，科学指导行人交通系统中各类设施的规划与设计以及运营组织与管理，从而保证行人交通系统安全、高效运行。文献[5]将行人交通行为定义为：行人在出行过程中，在交通环境、生理和心理因素影响下表现出与交通有关的一系列交通活动。

对行人交通的研究最早可以追溯到20世纪50年代。早期研究主要基于宏观角度，借鉴机动车及道路交通流理论，以实地观测的方式来研究行人交通流特性。第二次世界大战后，英国首先对行人疏散动力学进行研究。随着计算机仿真技术的逐渐成熟，20世纪80年代开始，国外学者对行人交通的研究逐渐趋于微观层面。随着大型活动、自然灾害的增多，以及大众安全意识的提升，以行人为主体的交通研究也逐渐增多。

1.1.1 基于人员心理的交通行为研究

关于行人步行行为的研究主要倾向于社会力对行人的影响、从众行为、聚集行为、结伴行为、自组织现象、超越行为等。文献[6]提出社会力模型(social force model)，用以对行人行为与心理因素之间的联系进行研究，认为行人交通行为受主观意识驱动，这个驱动力称之为社会力。文献[7]利用社会力模型解释疏散过程中人员堵塞现象，模拟出从众行为、快即是慢现象。文献[8]在对人的行为建立的简单模型中，也证明人在做决策时会展现出从众行为，而不会利用自己获得的信息。文献[9]提出应急环境下逃生者的聚集行为理论。文献[10]研究城市环境下行人结伴出行行为特征。文献[11]通过互联网收集和分析5·12汶川地震中人群疏散的监控录像，结果显示学生会选择距自己较近的出口、强震情况下趋于互相扶持、扶墙壁或其

他物体来保持平稳，甚至由于在地震时行为决策受心理及外界环境等因素的影响而出现犹豫不决并来回走动的行为。针对台风灾害，文献[12]在无车群体应急疏散决策行为的研究中发现，无论是车群体还是无车群体，当灾害发生时，自身的恐慌感以及灾害环境造成的压力与威胁是影响被疏散者风险承受能力最为关键的因素。文献[13]应用社会力模型重现2013年中国雅安地震中教室疏散的逃脱恐慌行为，结果显示行人首先倾向于选择通行能力较好以及阻碍较少的通道，其次才会考虑通道的距离。

1.1.2 火灾背景下的交通行为研究

极端天气以及自然灾害往往会引起一系列灾害，火灾就是易发的衍生灾害之一。火灾中人的行为与角色有关，工作人员的行为类型有灭火型、助人型、逃难型、阻止疏散型以及安全意识缺乏型；而顾客的行为有原路脱险型、向光向阔型、盲目随众型、迟滞重返型等^[14]。火灾时人的疏散行为遵循尝试—失误—再尝试的循环认知模式^[15]。在能见度良好的条件下，行人更趋向于选择没有被占用的路线，而当能见度为0时，行人会遵循其所能感觉和触碰到的其他行人，而且更喜欢触摸并沿着墙体边界行走^[16]。

1.1.3 基于大数据的交通行为研究

大数据时代的到来使研究方式发生变革，移动大数据以及互联网大数据等更加丰富的数据资源被应用于灾后人员交通行为的研究中。文献[17]利用探测车以及智能手机GPS数据研究日本大地震后石卷市人员疏散行为，研究发现很多疏散者被疏散后会返回家中，降低疏散效率，因此建议如果仅仅为保障人身安全，可以疏散到较近的高大建筑物中，并不需要疏散到较远地区，以免造成交通拥堵。文献[18]运用来自最大的移动手机公司提供的用户识别卡数据，对海地地震受灾人员灾后移动趋势进行估计，结果显示市民虽然疏散到海地全国各地，但高度集中在城市公共区域、地震受灾区域周边以及城市中心的北部和东北部区域。文献[19]基于手机数据在海地、孟加拉等国家对人群行为进行分析，通过分析海地地震前后近一年的190万移动电话用户数据发现，灾后人的移动模式仍然具有较高的规律性和可预测性，且撤离人群倾向于疏散到他们曾经访问过的地方，例如亲友住址。

1.1.4 数量模型在交通行为研究中的应用

随着建筑的复杂程度及智能化程度的增加，

研究者将数字摄像、虚拟现实等引入到人类行为的研究中,使之更加趋向量化分析^[20-21]。

文献[22]将系统动力学的理论运用到数量化行为的状态变量和速率变量。文献[23]提出运动场馆的人流疏散属于群集行为,观众人群密集且相互干扰,导致行进速度缓慢、拥挤程度增加。这一研究对2008年北京奥运场馆人流疏散工作组织具有一定参考价值。许多学者将元胞自动机理论(Cellular Automata)运用在人员行为微观离散模型中,充分考虑人员受个性、体力、心理等因素影响产生的不同疏散行为,例如出口选择、路径选择、速度调整、动态避碰、绕行、超越等,得到丰富的成果,近几年元胞自动机理论仍活跃在交通行为研究领域^[24-27]。

综上,中国相关研究主要是以建筑物或场馆等为背景,从火灾这类自然灾害衍生灾害、人为灾害的角度进行探讨,而对自然灾害交通行为的研究非常少。而且中国自然灾害以及交通等相关数据获取相对困难,从而使该领域的研究具有一定的局限。而国外对自然灾害的研究成果非常丰富,特别是美国对飓风、日本对地震的研究。

中国是自然灾害频发国家,地震、台风等自然灾害时常给国民带来深重的灾难。基于中国该领域研究现状,未来可以建立研究机构与政府部门的合作机制,获取有效的卫星及交通数据,利用录像、手机定位等渠道获取一手资料,综合开展交通行为的实证研究,探索真实自然灾害场景下的交通行为规律,并关注人员地域特点。

1.2 交通仿真研究

交通仿真是指用系统仿真技术来研究交通行为,它是一门对交通活动随时间和空间的变化进行跟踪描述的技术^[5]。交通仿真技术随着电子计算机和系统仿真技术的发展而发展起来。在国外大体上经历了三个发展阶段:1)20世纪40年代末至60年代初为诞生期,大多讨论如何进行交通流仿真;2)20世纪60年代中期至80年代初为发展期,发表了大量的论文和专著,主要是关于交通流仿真方法及模型建立的内容;3)20世纪80年代至今为成熟期,交通系统仿真技术在美国得到迅速发展和广泛应用。1951年,英国道路研究实验室完成交叉口交通仿真,随着计算机技术和交通仿真技术的发展,交通仿真逐渐发展出PARAMICS, VISSIM, AIMSUN, DYNAMIT, DYNASMART, TJTS, TESS,

DYNACHINA, TRANSCAD等一系列模型。总体而言,交通仿真发展迅速且趋于成熟。

1.2.1 宏观交通仿真研究

宏观交通仿真模型采用聚集度高的流体模型描述交通流的时空变化,模型关注车流整体的移动规律,不涉及单个车辆^[28]。这是早期主要的仿真模型。文献[29]提出一个数学规划模型,奠定了交通分配问题的理论基础。1963年, Gerlough 开发出 TRANS 程序,其作用是评价道路网的信号配置。20世纪70年代,离散交通模型产生,但是其缺陷是以计量经济学为数学技术和理论基础,模型不易理解。文献[30]通过对2010年上海世博会园区客流的特点进行分析,建立宏观交通仿真软件 VISUM 客流需求预测模型。

1.2.2 微观交通仿真研究

微观交通仿真于20世纪60年代得到迅速发展,理论成果丰富,其中典型代表有 CORSIM, TRANSIMS, PARAMICS, VISSIM, MICROSIM, NEMIS, SIMDAC, MELROSE等。

文献[31]运用商业交通仿真软件 PARAMICS, 模拟野火蔓延区域的家庭疏散场景,并估算为家庭疏散提供替代撤退路线的疏散时间和疏散效果。文献[32]构建了2005年卡特里娜飓风下的应急交通仿真模型,利用实际观测数据重现疏散情景。文献[33]利用 NetLogo 软件构建一种海啸淹没和疏散集成模型,将GIS数据作为道路和住房地点的空间输入数据,海啸离开曲线作为模型中智能体决定疏散的开始时间,行人和机动车驾驶人可以选择自己的出行目的地以及合适的路线;该模型被运用于东日本大地震受害最严重的地区之一——若林区荒浜,模型结果与实际情况基本一致。文献[34-35]对受海啸威胁的沿海地区疏散进行研究,强调在海啸来临之前撤离的时间充足与否非常重要,在撤离时间不足的情况下垂直疏散是很有效的方式。

中国微观交通仿真的研究始于20世纪90年代,成果并不丰富。1998年,文献[36]讨论了应用MICROSIM仿真高速公路一般路段所得到的交通流基本关系图式,并考虑了取样时间尺度的影响。文献[37]于1998年初步探索了动态交通微观仿真技术。文献[38-39]结合地理信息技术和计算机技术,定量分析蓄洪区灾民的疏散过程,开发了蓄洪区灾民步行疏散过程动态仿真模型,并利用该模型模拟君山农场灾民疏散过程。对飓风下应急交通微观仿真的研究,文献[40]基

于GIS数据、疏散需求预测模型和交通仿真平台,构建了墨西哥湾城市群疏散模型,通过模拟2005年飓风卡特里娜下的交通疏散过程进行模型参数调整,模拟2008年飓风古斯塔夫袭击下墨西哥湾城市群疏散过程验证模型精确性。该研究还通过提高交通疏散模型精度,使模型适用于不同路网拓扑结构、不同人口密度城市群的交通疏散情形,从而更好地实施飓风下的城市群应急交通疏散管理^[41]。

针对地震灾害,文献[42]设计了有通行能力限制的多出口疏散路径整数规划模型,将汶川地震中四川省大邑县的地震应急疏散图作为案例进行仿真。文献[13]应用社会学模型模拟2013年中国雅安地震中教室疏散的逃脱恐慌行为。文献[43]以元胞传输模型理论为基础,以最小化总行程时间为目标函数,构建应急交通疏散模型,以体育场馆为例,将其中的10万人疏散到附近的5个避难场所,进而对模型进行数值求解和微观仿真,比较分析得出两者具有较好的一致性。

1.2.3 中观交通仿真研究

中观交通仿真模型结合了宏观模型和微观模型的优点。中观交通仿真模型在很大程度上是由于在线仿真的需求而开发的^[28]。20世纪80年代中期M.VanAerde教授开发的INTEGRATION,20世纪90年代初由Mahmssani等学者开发的DYNASMART,以及20世纪90年代初期麻省理工学院Moshe Ben Akiva教授开发的DYNAMIT等,均为近年来比较常用的中观交通仿真模型。

中国从20世纪90年代初开始关注ITS的研究和发展,中观交通流模型能够更好地应用于ITS的研究。文献[44]利用中观交通流模型对城市快速路瞬时交通量进行预测,建立以车辆总行程时间为目标函数的诱导优化模型,并以上海市南北高架南端西线为例建立仿真场景,进行模型的参数标定与校验,经过分析,速度诱导控制对交通流整体速度的降低起到重要作用。

在国外,由飓风、洪水等引发的应急疏散基本以私人小汽车为主导交通方式完成。这与中国人流、自行车流以及机动车流混合疏散交通方式存在较大差异。因此,在借鉴国外疏散成果时应结合中国疏散交通的特点。这与国情有关,也与中国城市道路的现状有关。纵观已有文献,国内外对微观交通仿真研究较宏观、中观仿真研究更多,而微观交通仿真成果适用范围具有局限性,因

此,未来研究可以对中观仿真进行更多探索。

2 大城市交通行为与仿真应用探索

中国正面临城镇化变革,大城市人员密集、经济集中,必然导致自然灾害袭击的后果比欠发达地区更为严重。因此,为减少自然灾害带来的损失、尽可能保障人民财产安全,研究大城市的交通行为以及交通仿真非常必要。

2.1 大城市交通行为与仿真应用的现状及不足

虽然中国交通仿真研究起步较晚,但目前交通仿真技术已经应用于中国道路交通规划和组织优化过程中。北京市2003年成立了交通信息中心,2008年国家立项建成北京奥运会智能交通管理和服务综合系统,其中包含了道路交通仿真评价系统、交通枢纽仿真系统、城市交通应急仿真系统等。2011年,北京市采用Browser/Server模式,以VISSIM为仿真内核建立的道路交通仿真平台应用于北京市330个交叉口的交通组织方案评估工作^[45]。基于持续升温的互联网+,天津市交通运输委员会已与阿里云计算有限公司签订合作协议,双方在云计算、大数据等领域广泛合作,以“互联网+交通”的思路及方式共同建设天津智能交通。

中国引进大量的国外交通仿真软件,包括VISSIM,PARAMICS,TRANSMODELER,COSIM,SUN等微观交通仿真软件,CUBE,TRANSCAD,VISUM等宏观交通仿真软件。这些软件大多数基于所在国家地区交通条件研究开发,有很强的地域特色,因此在应用上并不完全适用于中国。

欧美等发达国家大城市空间密集度低,规划相对匀质,轨道交通发展较早,如纽约的轨道交通系统、世界上网络规模最大的伦敦地铁系统、世界上使用率第一的东京地铁以及第二的莫斯科地铁等。而中国大城市如北京、上海、天津等普遍表现为空间高度密集、土地资源紧缺、土地规划混乱,近年来又面临机动车不断膨胀、轨道交通发展滞后的问题。基于中国交通的复杂特点,国外宏观疏散模型并不完全适用,根据具体道路和区域的交通网络情况建立微观和中观疏散模型更加符合中国国情。

中国对自然灾害发生后的研究多集中于灾后恢复与重建方面,并未对交通行为和仿

真进行详细分析。而美国、日本等国家在交通行为和仿真的研究中,则会结合自然灾害实际情景,进行分析建模和模拟。中国的研究仅仅分析人员交通行为,缺乏针对灾害下人员特定行为的建模模拟研究。

2.2 大城市交通行为及仿真的未来研究方向

未来大城市交通行为及仿真研究可以基于以下4个方向进行探索:

1) 将极端天气模拟以及评估与交通疏散中人员行为及仿真结合,对多种天气状况下交通行为模式进行探索,进而形成及时响应的综合灾害防范交通系统。

2) 将心理学运用到人员交通行为的研究中,在构建模型时,需要考虑从众、聚集行为等多种心理趋势造成的行为差异及相互影响机制,更全面地考虑突发事件对人员交通行为的影响。

3) 在大城市中,人员除聚集在建筑物内,还聚集在街道上。基于这一视角,大城市区别于其他相对欠发达城市,在交通行为及仿真研究中应该加入道路交通场景,细分场景模式。

4) 在仿真软件使用过程中,不能仅从国外引进,更应开发符合中国国情的交通仿真软件。可以借鉴云计算技术,进一步研究大规模、高速计算、性能稳定的仿真软件,使仿真结果更接近实际状况。

3 结语

近年来,中国在灾后交通行为与仿真研究领域取得了一些进步,但绝大多数研究仅针对建筑物内的疏散。未来在交通行为和仿真的研究上,中国应该从本国文化特点以及人员心理的角度加以探索。同时注重创新与互联网思维的运用,基于大数据、云计算等现代科技,结合地理信息系统(GIS)、遥感系统(RS)以及全球卫星定位系统(GPS),建立自然灾害预警系统,为中国复杂的路网设计出属于自己的智能交通体系。

参考文献:

References:

- [1] 世界知识. 全球四成自然灾害发生在亚太区域[J]. 世界知识, 2015(1): 77.
- [2] 刘素云. 联合国减灾报告: 2015年自然灾害共造成2.3万人死亡[EB/OL]. 2016[2016-

02-15]. <http://gz.people.com.cn/n2/2016/0212/c344103-27720098.html>.

- [3] 张霞, 薛耀文. 全球重大突发事件规律研究[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 229-234.
Zhang Xia, Xue Yaowen. Research on Types and Distribution Regions of Global Serious Emergencies[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 229-234.
- [4] 李得伟, 韩宝明. 行人交通[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Li Dewei, Han Baoming. Pedestrian Traffic [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [5] 吴娇蓉, 辛飞飞. 交通系统仿真及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2012.
Wu Jiaorong, Xin Feifei. Traffic System Simulation and Application[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [6] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [7] Helbing D, Schweitzer F, Keltsh J, Molnar P. Active Walker Model for the Formation of Human and Animal Trail Systems[J]. Physical Review E, 1997, 56(3): 2527-2539.
- [8] Banerjee A V. A Simple Model of Herd Behavior[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1992, 107(3): 797-817.
- [9] Fritz C E, Mathewson J H. Convergence Behavior in Disasters: A Problem in Social Control [M]. Washington DC: National Academy of Sciences-National Research Council, 1957.
- [10] Hostetler T R. Controlling Steering Behavior for Small Groups of Pedestrians in Virtual Urban Environments[D]. Iowa City: The University of Iowa, 2008.
- [11] 杨小林, 吴忠良, 李迎春. 真实地震情况下人群疏散特征与模拟演练的差异: 2008年汶川地震监控录像的分析[J]. 中国地震, 2010, 26(2): 242-250.
Yang Xiaolin, Wu Zhongliang, Li Yingchun. Difference Between Real Life Earthquake Escape Panic and Simulated Exercises: Analysis of the Video Recordings of the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2010, 26(2), 242-250.
- [12] 崔娜, 崔建勋, 安实. 台风灾害下无车群体应急疏散决策行为分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 98-104.
Cui Na, Cui Jianxun, An Shi. Analysis of Carless Emergency Evacuation Decision-

- Making Behaviors Under Typhoon Disasters[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 98-104.
- [13] Li Meifang, Zhao Yongxiang, He Lerong, Chen Wenxiao, Xu Xiangfeng. 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.
- [14] 刘久文. 火灾中人的行为及疏散对策[J]. 消防科学与技术, 1995(4): 7-11.
Liu Jiuwen. Human Behavior and Evacuation Countermeasure in Fire[J]. Fire Science and Technology, 1995(4): 7-11.
- [15] 张培红, 陈宝智. 火灾时人员疏散的行为规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 54-56.
Zhang Peihong, Chen Baozhi. Behavior Rules of Human Evacuation in Fire[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2001, 22(1): 54-56.
- [16] Guo Renyong, Huang Haijun, 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(6): 669-686.
- [17] Hara Y, Kuwahara M. Traffic Monitoring Immediately After a Major Natural Disasters as Revealed by Probe Data: A Case in Ishinomaki After the Great East Japan Earthquake [J]. Transportation Research Part A, 2015, 75: 1-15.
- [18] Bengtsson L, Lu X, Thorson A, Garfield R, Schreeb J V. Improved Response to Disasters and Outbreaks by Tracking Population Movements with Mobile Phone Network Data: A Post-Earthquake Geospatial Study in Haiti[J]. PLOS Medicine, 2011, 8(8): 1-9.
- [19] Lyu X, Bengtsson L, Holme P. Predictability of Population Displacement After the 2010 Haiti Earthquake[J]. PNAS, 2012, 109(29): 11576-11581.
- [20] Lo S M, Fang Z. A Spatial-Grid Evacuation Model for Building[J]. Journal of Fire Science, 2000, 18(5): 376-394.
- [21] Lo S M, Fang Z. A Study on the Effect of Corridor Width in Karaoke Establishments [J]. HKIE Transactions, 2000, 7(1): 28-33.
- [22] 肖国清, 王鹏飞, 陈宝智. 建筑物火灾疏散中人的行为的动力学模型[J]. 系统工程理论与实践, 2004(5): 134-139.
Xiao Guoqing, Wang Pengfei, Chen Baozhi. Dynamic Model of Human Behavior in Building Fire Evacuation[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004(5): 134-139.
- [23] 刘强, 杨浩, 陆化普, 石京. 运动场馆人流疏散及其模型探讨[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 92-98.
Liu Qiang, Yang Hao, Lu Huapu, Shi Jing. Study on the Dispersal of People Flow in the Stadium[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 92-98.
- [24] 宋卫国, 于彦飞, 范维澄, 张和平. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型[J]. 中国科学E辑: 工程科学材料科学, 2005, 35(7): 725-736.
- [25] 陆卓谟, 秦文虎. 火灾中基于个体行为的人群疏散仿真[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 1295-1299.
Lu Zhuomo, Qin Wenhui. Simulation of Crowd Evacuation in Fire Based on Agent Behavior[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 1295-1299.
- [26] 赵宜宾, 刘艳艳, 张梅东, 曾文艺. 基于模糊元胞自动机的多出口人员疏散模型[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 13-20.
Zhao Yibin, Liu Yanyan, Zhang Meidong, Zeng Wenyi. A Multi-Exit Occupant Evacuation Model Based on Fuzzy Cellular Automata [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(2): 13-20.
- [27] 刘全平, 梁加红, 李猛, 付跃文. 基于多智能体和元胞自动机人群疏散行为研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 328-332.
Liu Quanping, Liang Jiahong, Li Meng, Fu Yuewen. Study on Crowd Evacuation Behaviors Based on Multi-Agent and Cellular Automata Technology[J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 328-332.
- [28] 邹智军. 新一代交通仿真技术综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2037-2042.
Zou Zhijun. Review on New Generation Traffic Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(9): 2037-2042.
- [29] Beckmann M, Mcguire C B, Winsten C B. Studies in the Economics of Transportation [M]. New Haven: Yale University Press, 1956.
- [30] 尹瑞, 李克平, 俞洁. 2010年上海世博会

- 园区客流交通需求预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(8): 1053-1058.
- Yin Rui, Li Keping, Yu Jie. Traffic Forecast for Visitors in World Expo 2010 Shanghai Arena[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(8): 1053-1058.
- [31] Cova T J, Johnson J P. Microsimulation of Neighborhood Evacuations in the Urban-Wildland Interface[J]. Environment and Planning A, 2002, 34(12): 2211-2229.
- [32] Dixit V, Montz T, Wolshon B. Validation Techniques for Region-Level Microscopic Mass Evacuation Traffic Simulations[J]. Transportation Research Record, 2011, 2229(1): 66-74.
- [33] Mas E, Suppasri A, Imamura F, Koshimura S. Agent-Based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake/Tsunami Evacuation: An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation[J]. Journal of Natural Disaster Science, 2012, 34(1): 41-57.
- [34] Wood N J, Schmidlein M C. Community Variations in Population Exposure to Near-Field Tsunami Hazards as a Function of Pedestrian Travel Time to Safety[J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 1603-1628.
- [35] Wood N J, Schmidlein M C. Anisotropic Path Modeling to Assess Pedestrian-Evacuation Potential from Cascadia-Related Tsunamis in the US Pacific Northwest[J]. Natural Hazards, 2012, 62(2): 275-300.
- [36] 段进宇. 高速公路微观交通仿真[J]. 公路交通科技, 1998, 15(3): 21-24.
- Duan Jinyu. A Microscopic Simulator of Expressway Traffic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1998, 15(3): 21-24.
- [37] 邹智军, 杨东援. 动态交通状态微观仿真技术初探[J]. 同济大学学报, 1999, 27(3): 305-308.
- Zou Zhijun, Yang Dongyuan. Preliminary Study on Dynamic Traffic Microsimulation [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(3): 305-308.
- [38] 万庆, 励惠国. 蓄洪区灾民撤退过程动态模拟(I): 技术与方法研究[J]. 地理学报, 1995, 50(12): 62-68.
- Wan Qing, Li Huiguo. Dynamic Simulation of Victim Evacuation in Detension Basin(I): Technology and Method Research[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(12): 62-68.
- [39] 万庆, 励惠国. 蓄洪区灾民撤退过程动态模拟(II): 君山农场灾民撤退模拟研究[J]. 地理学报, 1995, 50(12): 69-74.
- Wan Qing, Li Huiguo. Dynamic Simulation of Victim Evacuation in Detension Basin(II): Study on Victim in Junshan Farm[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(12): 69-74.
- [40] 张钊, 尹俊淞. 飓风下城市群应急交通疏散建模研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 30-36.
- Zhang Zhao, Yin Junsong. Mega Region Evacuation Traffic Modeling Under Hurricane[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8): 30-36.
- [41] 张钊, 林菁. 飓风下城市群应急交通疏散模拟及验证[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 15-19.
- Zhang Zhao, Lin Jing. Mega Region Evacuation Traffic Simulation and Validation Under Hurricane[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(9): 15-19.
- [42] 马浩博, 季建华, 何冰. 大规模人流多出口应急疏散预案的优化与研究[J]. 系统管理学报, 2011, 20(2): 238-243.
- Ma Haobo, Ji Jianhua, He Bing. Optimization of Large Scale Emergency Evacuation with Multiple Paths and Exits[J]. Journal of Systems & Management, 2011, 20(2): 238-243.
- [43] 周亚飞, 谢天生, 蔡靖, 程霄楠. 基于元胞传输模型的应急交通疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 172-176.
- Zhou Yafei, Xie Tiansheng, Cai Jing, Cheng Xiaonan. Study on Emergency Traffic Evacuation Based on CTM[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(4): 172-176.
- [44] 张丽岩, 马健, 朱丛坤, 李克平. 基于中观仿真的城市快速路速度诱导控制模型研究[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 70-74.
- Zhang Liyan, Ma Jian, Zhu Congkun, Li Keping. A Speed Guidance Model of Urban Expressway Based on Meso-Simulation Model [J]. Highway Engineering, 2013, 38(4): 70-74.
- [45] 王晓峰, 邹平. 北京市道路交通仿真平台建设及应用[J]. 城市交通, 2012, 10(3): 47-53.
- Wang Xiaofeng, Zou Ping. Traffic Simulation Program Development for Beijing[J]. Urban Transport of China, 2012, 10(3): 47-53.