

基于元胞自动机的盲人疏散行为建模与仿真研究

郑杰, 温莎莎, 马闪闪, 李兴莉*

太原科技大学, 应用科学学院, 山西 太原

Email: *lixingli80@163.com

收稿日期: 2021年8月14日; 录用日期: 2021年9月3日; 发布日期: 2021年9月10日

摘要

为了研究盲人在疏散过程中的疏散特性及规律, 探究盲人对整个疏散效率的影响, 本文基于元胞自动机理论, 以盲人和正常行人作为研究对象, 针对盲人的心理特性和行为特征, 引入多种收益参数, 建立了含有盲人时人群疏散的元胞自动机模型。数值模拟了不同人群密度、盲人所占比例、正常行人对盲人的帮扶概率以及有无引导源等因素对行人疏散过程的影响。研究表明, 与正常人群疏散相比, 混合人群中盲人占比越大, 疏散效率越低; 低密度下, 帮扶行为以及引导源的引导对混合人群疏散的影响较小, 随着行人密度的增加以及盲人占比的增大, 帮扶概率对疏散效率的影响显著提升, 引导源的引导作用对疏散效率的影响也有一定程度的提升。本文研究结果有助于推进盲人聚集场所安全疏散策略的进一步完善。

关键词

盲人, 元胞自动机, 帮扶概率, 引导源, 疏散效率

Modeling and Simulation of Evacuation Behavior for Blind People Based on Cellular Automata

Jie Zheng, Shasha Wen, Shanshan Ma, Xingli Li*

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Email: *lixingli80@163.com

Received: Aug. 14th, 2021; accepted: Sep. 3rd, 2021; published: Sep. 10th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 郑杰, 温莎莎, 马闪闪, 李兴莉. 基于元胞自动机的盲人疏散行为建模与仿真研究[J]. 交通技术, 2021, 10(5): 350-361. DOI: 10.12677/ojtt.2021.105040

Abstract

In order to study the evacuation characteristics and laws of the blind during the evacuation process and explore how the blind influence the overall evacuation efficiency, through analyzing the psychological and behavioral characteristics of the blind, a cellular automaton model is established, in which several kinds of revenue parameters are introduced. The numerical simulations are performed to investigate the influence of factors, such as different population density, the proportion of blind people, the probability of assistance, and the source of guidance on the evacuation process of pedestrians. The simulations show that the greater the proportion of blind people in the mixed population, the lower the evacuation efficiency. At low density, the helping behavior and the guidance source have little impact on the evacuation of mixed people. With the increase of density of pedestrians and the proportion of blind people, the impact of assistance probability and the guiding role of the guidance source are significantly improved. The results will contribute to the further improvement of the safe evacuation strategy for blind gathering places.

Keywords

Blind People, Cellular Automaton, Assistance Probability, Guidance Source, Evacuation Efficiency

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市人口迅速增长,密集人群相互拥挤所诱发的踩踏事故时有发生,给社会带来巨额经济损失的同时也对人们的生命造成严重威胁,人员安全疏散问题成为了公共安全的重要研究领域,得到了国内外专家学者的高度重视。目前,针对人员疏散问题主要采用理论建模和计算机仿真来模拟行人疏散场景并得出相关结论,行人流动力学模型主要分为直观反映行人流整体特性的宏观模型[1]和考虑个体行为的微观模型,微观模型中,社会力模型[2][3]和元胞自动机模型[4][5]的应用最为广泛。

众所周知,老年人、残疾人等特殊人群是构成进出公共场所人群中重要的组成部分。联合国国际减灾战略在日内瓦发布的最新调查数据显示,在突发事件发生时,残疾人的伤亡比例远高于健康人,如何帮助残疾人应对突发事件已成为联合国第三届世界减灾大会上的一个重要议题。通过调研发现,已有研究多是以正常人疏散[6][7][8]为研究重点,侧重于一般正常行人的个体特征(如速度差异、心理因素、行为特性等)、个体间的相互作用、特殊环境(如有烟雾、障碍物等)下的疏散以及行人疏散实验,而针对特殊人群疏散的研究非常有限。汪洋[9]等人研究了正常情形以及恐慌情形下的残障-监护人团体行为并进行仿真分析;姜传胜等人[10]针对残疾人疏散问题,就安全研究现状与发展趋势进行了研究,分别从不同类型残疾、个体疏散能力对群体疏散的影响以及疏散环境三个方面进行了分析;田玉敏[11]在分析特殊人群疏散行为规律方面,按住院楼的标准建模,进行了疏散模拟,并提出需深入研究特殊行人疏散行为规律;白洋[12]等人引入推搡挤压概念描述小学生运动过程中特有的行为特征,进行了小学生群体应急疏散仿真研究;陈晨[13]等人研究了恐慌心理下的老年人群疏散。

综上所述,针对特殊群体的疏散研究主要为特殊群体自身特性分析、特殊群体个体疏散能力的影响、特殊群体心理行为特性分析等,探讨正常人与盲人混合群体对整体疏散效率的影响研究极少,特别是盲

人在正常行人帮扶下的宏观现象和微观行为研究更为滞后，在这种情况下，建立能合理描述盲人群体疏散行为的模型，探讨疏散特性及规律是十分必要的。所以本文以盲人为主要研究对象，建立了考虑盲人心理特性和行为特性的疏散模型，分析了不同行人密度、不同盲人占比对疏散效率的影响，并着重分析了帮扶行为以及引导作用对疏散效率的影响，研究结果为提高疏散效率提供理论依据，对盲人出入较多的公共场所的设计以及流量控制具有重要的实际意义。

2. 疏散模型

2.1. 盲人心理行为特性

2.1.1. 恐慌行为

当发生紧急情况或人群较为拥挤时，十分微小的扰动便会使密集人群变成不稳定状态，且在短时间内不能及时做出调整，从而引发恐慌，盲人由于缺乏视觉感受，且行动不便，会时常处于紧张状态，更容易引发恐慌。

2.1.2. 移动速度慢

一般情况下，视觉障碍人群的平均步行速度比正常人群的平均步行速度慢，例如张森[14]通过实验得到了视觉障碍人群在不同条件下的步行速度，在紧急情况下或者有障碍物的情况下，这种现象会更加显著。

2.2. 模型描述

疏散模型建立在二维元胞网格内，尺寸为 $L \times L$ ，每个网格均代表一个元胞，大小取 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ [15]，元胞可以被行人占据也可以为空地，被占据的元胞与行人是一一对应的关系。系统边界由围墙以及安全出口组成。本文在元胞自动机模型的基础上采用 Moore 型邻域模型，行人在每个时间步内，均可以选择向周围 8 个方向移动或停留在原地，并通过行人移动收益矩阵表示行人可能移动的方向，示意图如图 1 所示。

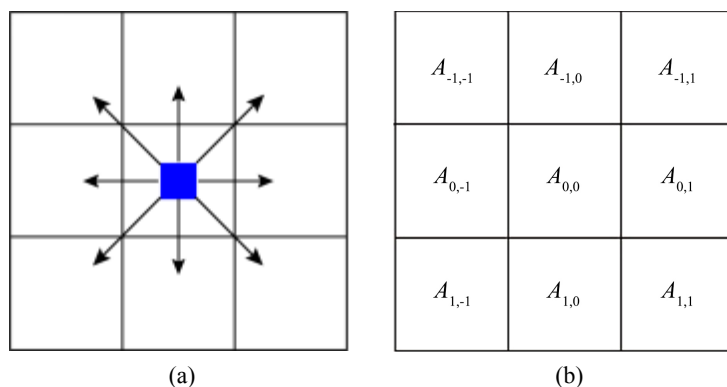


Figure 1. (a) Pedestrian mobility; (b) Pedestrian movement revenue matrix
图 1. (a) 行人移动邻域; (b) 行人移动收益矩阵

疏散模型示意图如图 2 所示，这里设置两类人员：盲人及正常行人。红色圆形表示盲人，蓝色正方形表示正常行人，为使盲人与正常行人加以区分，盲人每三个时间步移动一次，且将疏散空间划分为可扶墙区和运动盲区，可扶墙区是指到墙壁的距离小于或等于可触摸墙壁距离的区域，运动盲区是指疏散区域除去可扶墙区的剩余部分。行人在系统中的初始密度为 ρ ，并设置了盲人占比参数 β ，调节盲人与正常行人的比例关系。行人根据移动规则进行移动，通过安全出口即视为疏散成功。

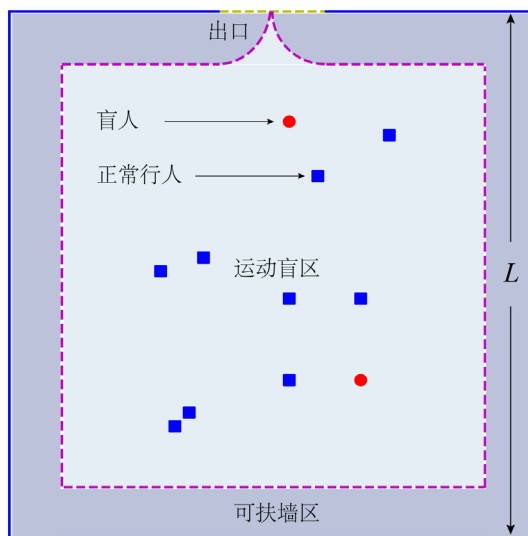


Figure 2. Sketch of evacuation model
图 2. 疏散模型示意图

疏散模型综合考虑出口收益、墙壁收益、默认方向收益、帮扶收益、避让收益以及引导收益，得出行人向相邻元胞转移的收益矩阵 A_{ij} ：

$$A_{ij} = n_{ij} \cdot (1 - m_{ij}) \cdot [k_a \cdot E_{ij} + k_b \cdot W_{ij} + k_c \cdot D_{ij} + k_d \cdot H_{ij} + k_e \cdot B_{ij} + k_f \cdot L_{ij}] \quad (1)$$

式中： n_{ij} 为元胞类型标识因子，若元胞 (i, j) 为障碍物或墙，则 $n_{ij} = 0$ ，否则 $n_{ij} = 1$ ； m_{ij} 为元胞状态标识因子，若元胞 (i, j) 当前时间步有行人占据，则 $m_{ij} = 1$ ，否则 $m_{ij} = 0$ ； E_{ij} 、 W_{ij} 、 D_{ij} 、 H_{ij} 、 B_{ij} 、 L_{ij} 分别表示出口收益、墙壁收益、默认方向收益、帮扶收益、避让收益以及引导收益； k_a 、 k_b 、 k_c 、 k_d 、 k_e 、 k_f 为各收益之间的权重调节参数。

2.2.1. 出口收益

当出口位置位于行人的移动邻域时，该元胞对行人的作用力为正无穷大，使得行人可尽快通过出口，从而完成疏散，所以出口收益 E_{ij} 定义为：

$$E_{ij} = \begin{cases} +\infty & (i, j) \text{ 为出口位置坐标时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.2. 墙壁收益

当墙壁位置位于行人的移动邻域时，该元胞对行人的作用力为负无穷大，使行人转换方向行走，避免模拟中出现行人穿墙现象，墙壁收益 W_{ij} 定义为：

$$W_{ij} = \begin{cases} -\infty & (i, j) \text{ 为墙壁位置坐标时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3. 默认方向收益

当正常行人位于疏散空间中时，按照默认移动方向朝出口运动；位于可扶墙区域的盲人，将沿着平行于墙壁的方向顺时针或逆时针运动，若正前方有行人存在，则向直至到达出口，离开疏散区域；位于运动盲区的盲人由于可感知信息较少，处于无目标状态，故随机选择一个方向移动，移动至可扶墙区域或出口处，然后按照可扶墙区域的移动策略进行移动疏散至安全空间。默认方向收益定义为 D_{ij} ：

$$D_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{符合移动规则的元胞} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.4. 帮扶收益

疏散过程中，考虑正常行人对盲人的帮扶现象，并将帮扶收益定义为 H_{ij} ：

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{符合帮扶规则的元胞} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

模型中设置了帮扶概率 θ ，值得注意的一点是，正常行人会根据周围环境及与盲人之间的相对距离进行运动方向的判断和决策，是否为移动邻域内的盲人提供帮助可依据帮扶概率 θ 设定，要么继续前进，要么向盲人靠近，帮助盲人共同走向出口。出现帮扶行为时，则将该正常行人与被帮助的盲人视为一个整体共同移动，且每两个时间步移动一次，若二者中有一人竞争失败，则均停留在原格点。

2.2.5. 避让收益

关爱弱势群体是社会文明进步的标志，所以本文中设置了避让规则反映弱势群体的优先性，避让收益 B_{ij} 定义为：

$$B_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{符合避让规则的元胞} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

避让规则如图 3 所示，红色圆形表示盲人，蓝色正方形表示正常行人，对于竞争同一元胞的行人，如果行人类型相同，则随机选择一人进入目标格点，未被选择则退回原格点；如果行人类型不同，则盲人具有优先移动权。

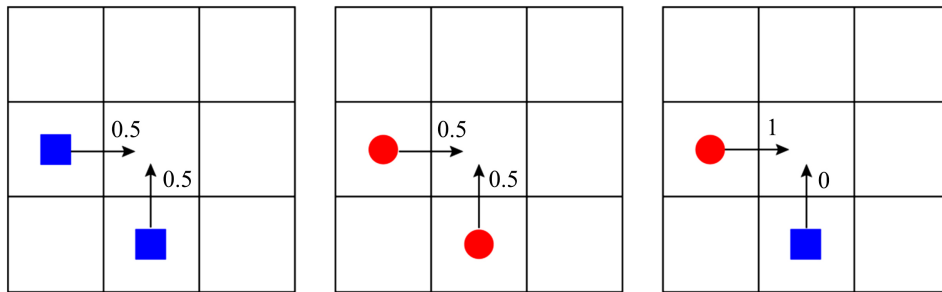


Figure 3. Illustration of pedestrian avoidance rule
图 3. 行人避让规则示意图

2.2.6. 引导收益

疏散过程中，考虑引导信息[16]对正常行人及盲人的影响，并将引导收益定义为 L_{ij} ：

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{引导信息区域内的元胞} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

在模型中出口位置设置了声音引导源，疏散空间内的正常行人及盲人均可通过声音引导源来辨别出口方向，从而径直向出口移动。

2.3. 行人移动更新规则

1) 初始化随机行人，使正常行人及盲人随机的分布在疏散空间内，仿真开始后不再有新的行人进入

疏散空间;

2) 判断行人所处的疏散区域, 并计算该行人的移动收益矩阵, 选择转移收益最大的邻域元胞作为目标位置。当多人同时竞争同一格点时, 如果行人类型相同, 则随机选择一人进入格点, 未被选择则退回原格点; 如果行人类型不同时, 则设置优先级, 规定盲人具有优先移动权。

3) 计算完所有行人的移动收益矩阵后, 同步更新所有行人位置。

4) 当行人到达出口时, 移除该行人。

5) 重复以上步骤直到所有行人离开房间, 仿真结束。

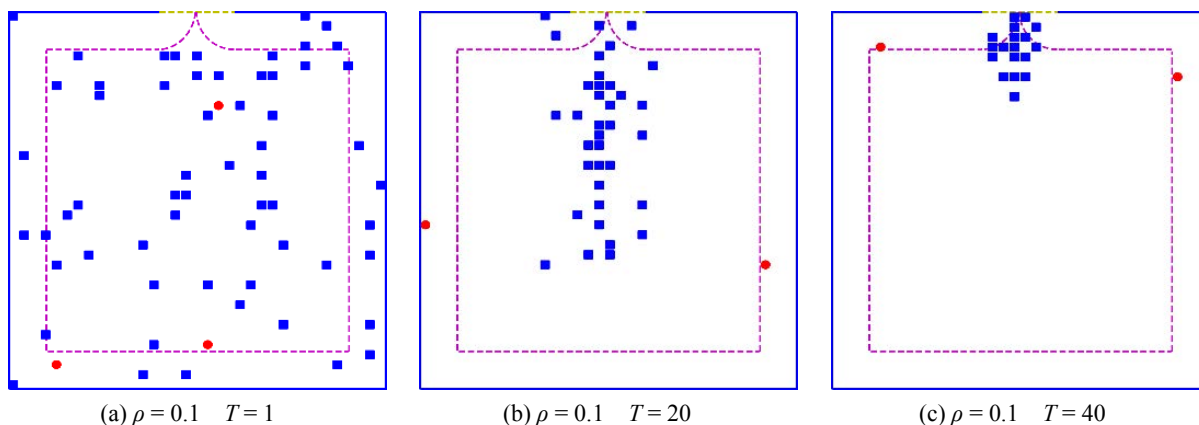
3. 模型仿真分析

为验证本文所提出的元胞自动机模型的有效性, 通过模拟仿真进行应用分析。初始时刻, 行人按密度设置随机分布在疏散空间内, 并采用随机序列串行的方法进行位置更新, 并将行人离开疏散空间所需要的时间步定义为行人疏散时间 T , 模型参数设置如下: $L = 10 \text{ m}$, 出口宽度为 2 m , 若无特殊说明, k_a 、 k_c 、 k_e 均设置为 1。

3.1. 盲人占比、行人密度对疏散效率的影响

为了研究行人密度以及盲人占比对疏散时间的影响, 先忽略帮扶收益及引导收益的影响, 此时 k_d 、 k_f 的取值为 0, k_b 的取值为 1, 初始时刻, 行人依据密度以及盲人占比进行随机分布, 从盲人占比较低时开始仿真, 将 β 设置为定值 0.05, 逐步提升行人密度, 分析其对疏散效率的影响, 并给出了盲人占比 $\beta = 0.05$ 时, 行人密度 ρ 分别为低密度 0.1、中密度 0.5 以及高密度 0.8 时的时空演化状态斑图。

图 4(a)~(o) 分别给出了低、中、高三种行人密度下不同时间步的行人时空演化斑图。初始时刻行人随机分布在疏散空间内, 低密度下, 随机产生 63 位行人, 包含 3 名盲人, 人群整体结构较为稀疏, 正常行人和盲人均按照移动规则逐渐移动到出口从而离开疏散区域; 中高密度下, 随机产生行人数量增多, 随着疏散过程的继续, 出口处的行人呈现出“拱形”结构, 此时行人排队时间增长, 在疏散后期“拱形”结构逐渐变小最终消失, 间接验证了模型的有效性。在仿真过程中, 由于盲人是随机分布在疏散区域内, 随着行人密度的增加, 如果盲人随机分布在出口附近时, 拥堵现象会更早形成, 导致排队等待时间增加, 降低疏散效率; 当盲人随机分布在距出口较远位置时, 仿真初期行人疏散较快。为了更加清晰地研究行人密度以及盲人所占比例对疏散时间的影响, 将盲人占比依次设置为定值 0、0.05、0.1、0.3、0.5、1, 逐渐提升行人密度 ρ , 分别进行 3 次仿真取平均疏散时间, 分析其对疏散效率的影响, 并得出不同盲人占比下混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系, 如图 5 所示。



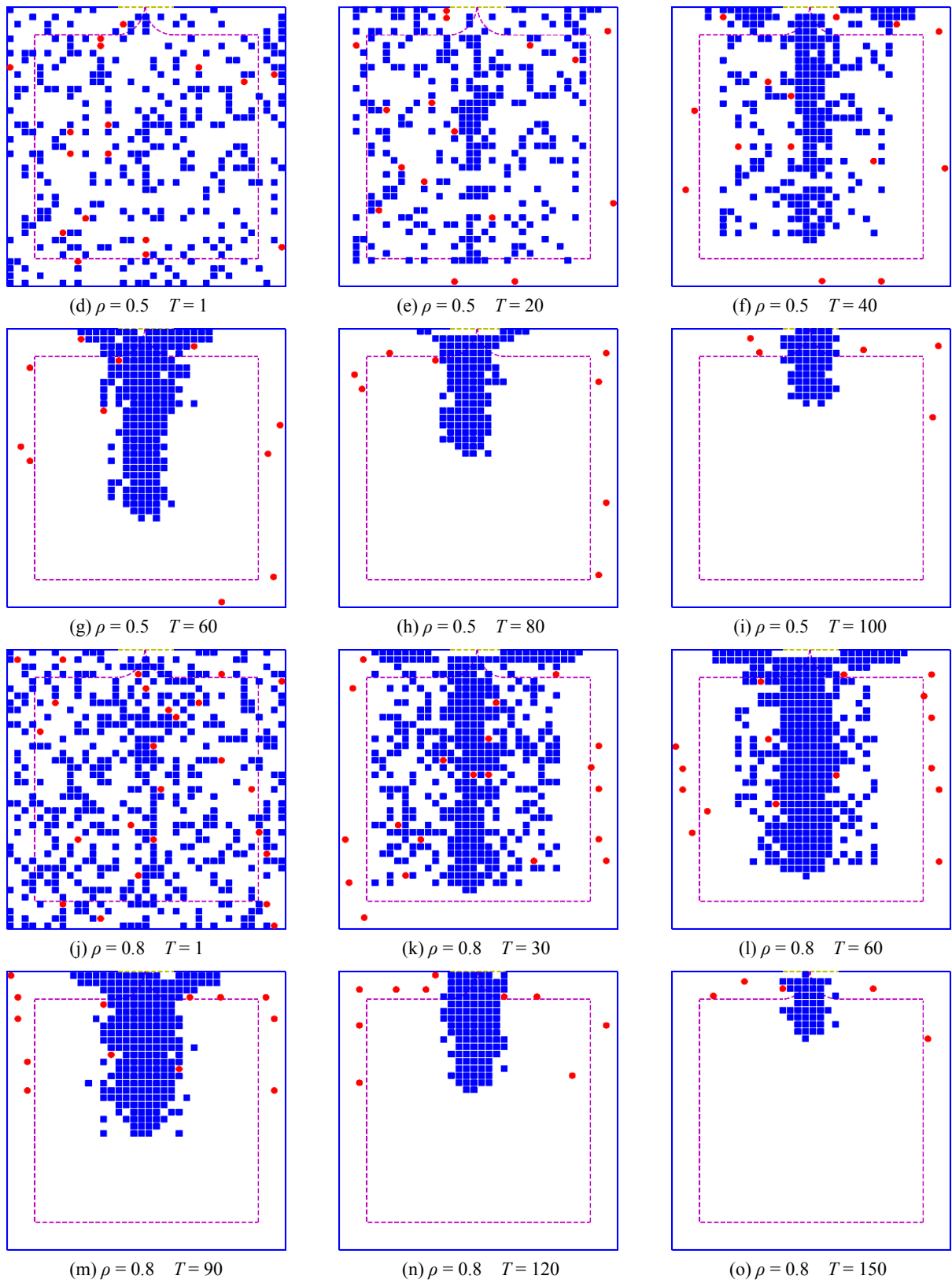


Figure 4. The space-time evolution patterns for different pedestrian density
图 4. 不同行人密度的时空演化斑图

从图 5 中可以很清晰地看出,在不同的密度区间内,盲人所占比例对疏散时间的影响是不同的。当行人密度为低密度时,盲人占比在 0.1 以内时,对整体疏散产生的影响不大,所以进一步增加行人密度来分析盲人不同占比对疏散的影响,发现盲人占比大于 0.1 时,疏散时间明显增加,虽然低密度下行人较为稀疏,但盲人自身存在移动速度慢等特性,离开房间所需时间会有所增加,从而降低了疏散效率;随着行人密度 ρ 的增大,人群整体结构越来越紧密,盲人所占比例的提升对整体疏散的影响越来越大,且疏散空间内的盲人对正常行人而言相当于充当了随机障碍物,尤其是位于出口附近的盲人,由于其自身移动速度慢,且模型中设置了避让规则,故会增加排队等待时间,从而增加了疏散时间。因此,在研究盲人疏散时,盲人占比对整体疏散的影响不容忽视。

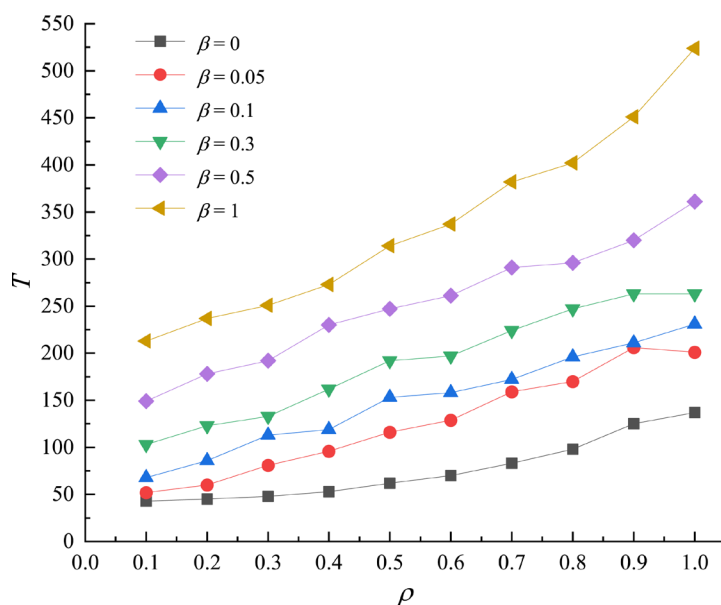


Figure 5. Relationship between evacuation time T and pedestrian density of mixed population ρ under different proportion of blind people
图 5. 不同盲人占比下混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系图

3.2. 帮扶概率、行人密度对疏散效率的影响

考虑到实际疏散过程中正常行人对盲人的帮扶现象,本模型中设置了帮扶概率 θ ,正常行人是否为移动邻域内的盲人提供帮助由帮扶概率 θ 决定,若发生帮扶行为,则向盲人靠近,帮助盲人共同走向出口,帮扶过程中二者视为一个整体,模型中二者被设置为绿色,便于观察,被帮助的盲人无需随机移动至可扶墙区扶墙疏散,从而提高了疏散效率。为了研究帮扶概率对疏散时间的影响,此时先忽略引导收益的影响,即 k_f 的取值为 0, k_b 、 k_d 的取值均为 1,在疏散初始阶段,正常行人及产生帮助行为的结伴行人均向出口位置聚集,在出口处形成拥堵,如图 6 所示,给出了帮扶概率为 0.6、中密度下、盲人占比为 0.05 时行人疏散过程的时空演化斑图。在时间步 $T=60$ 时,大部分行人的疏散已经完成,从仿真结果来看,引导效果有被很好的呈现出来。

对比图 6 和图 4(d)~(i),可以清晰地看出,帮扶现象的存在会有效减少盲人扶墙疏散,加快了“拱形”结构的出现,且被帮助的盲人移动速度比单独行动时快,会在一定程度上减少排队等待时间,加速了出口处“拱形”结构的消失,从而很大程度上提高了疏散效率。为了更加清晰地研究帮扶概率对疏散效果的影响,将盲人占比依次设置为定值 0、0.05、0.1、0.5,并将帮扶概率 θ 依次设置为 0、0.3、0.6、1 等

四种情形，逐步提升行人密度 ρ ，将疏散时间进行对比，得到如图 7 所示的不同帮扶概率、不同盲人占比下混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系对比图，黑色表示盲人占比 $\beta = 0.05$ 时的疏散数据，红色表示盲人占比 $\beta = 0.1$ 时的疏散数据，蓝色表示盲人占比 $\beta = 0.5$ 时的疏散数据。

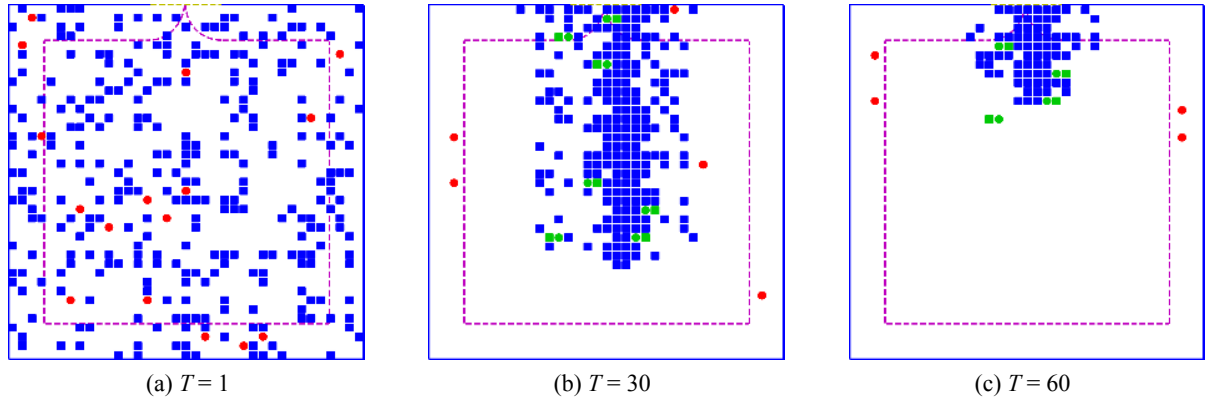


Figure 6. The space-time evolution patterns obtained at $\rho = 0.5, \beta = 0.05, \theta = 0.6$
 图 6. $\rho = 0.5, \beta = 0.05, \theta = 0.6$ 时的时空演化斑图

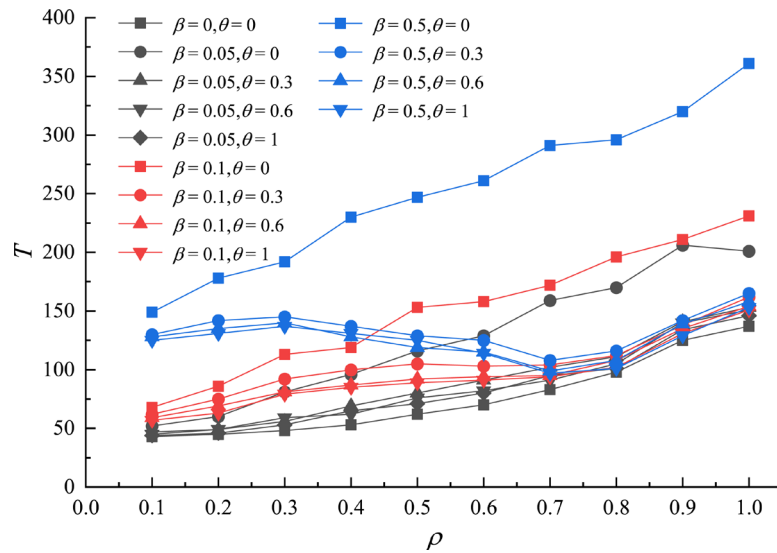


Figure 7. Relationship between evacuation time T and pedestrian density of mixed population ρ under different assistance probability and different proportion of blind people
 图 7. 不同帮扶概率、不同盲人占比下混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系图

从图 7 中可以看到，帮扶现象有利于提高疏散效率，但最终的疏散效果受帮扶概率、行人密度、盲人占比等多种因素影响。当行人密度为低密度时，不同的帮扶概率对整体疏散效率的影响不大，这是因为此时盲人周围的正常行人数量较少，被帮助的可能性较低，但随着行人密度的增大，从图 7 中可以明显观察到存在帮扶行为时与没有帮扶行为时的疏散时间相差较大，疏散时间 T 明显缩短，当人群密度为 0.7 时，帮扶行为的收益最大，最有利于人群疏散；此外，可以观察到随着盲人占比的增加，帮扶现象的作用就会体现的越来越明显，当帮扶概率为 1 时，正常行人与被帮助的盲人被视为一个整体，相较于单

独的两个个体，移动速度均发生变化，相当于消除了盲人对疏散的影响，提高了整体疏散效率。

3.3. 引导源设置对疏散效率的影响

考虑到实际疏散过程中引导源的引导作用会影响行人流的疏散效率，所以本文在出口处设置了引导源，通过声音、警示铃等途径为正常行人及盲人提供相应疏散方向的引导，使运动盲区内的盲人无需随机移动至可扶墙区扶墙疏散，从而大大提高疏散效率。为了研究引导源的有无对疏散时间的影响，此时先忽略帮扶收益的影响，即 k_d 的取值为0， k_b 、 k_f 的取值均为1，在疏散初始阶段，正常行人及盲人随机均匀地分布在疏散空间内，随着出口处引导源的引导，行人开始向出口聚集，如图8所示，给出了有引导源时、中密度下、盲人占比为0.05时行人疏散过程的时空演化斑图。

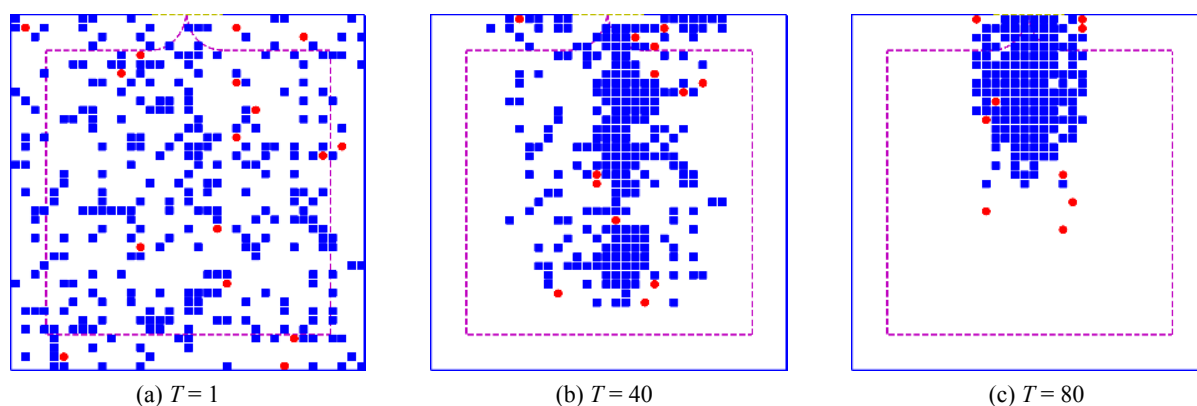


Figure 8. The space-time evolution patterns with guiding source obtained at $\rho = 0.5$
图8. 有引导源并且 $\rho = 0.5$ 时的时空演化斑图

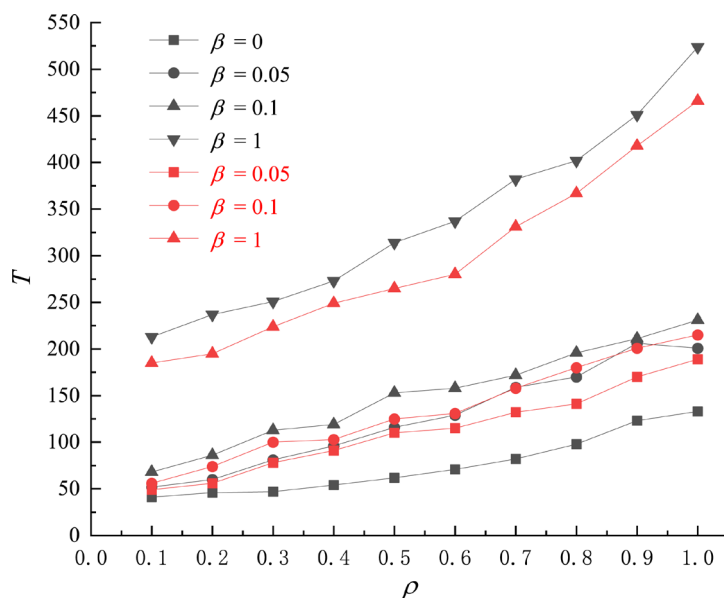


Figure 9. Relationship between evacuation time T and pedestrian density ρ of mixed population ρ under different proportion of blind people with or without guidance source

图9. 有无引导源下不同盲人占比下混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系图

对比图 8 和图 4(d)~(i), 可以清晰地看出, 引导源的存在避免了盲人扶墙疏散, 盲人可以通过听声音等方式有效判断出口位置, 避免了盲目移动现象, 但其移动速度并没有加快, 所以只是在一定程度上提高了疏散效率。为了更加清晰地研究有无引导源对疏散效果的影响, 将盲人占比依次设置为定值 0、0.05、0.1、1, 逐渐提升行人密度 ρ , 并将有无引导源两种情形下的疏散时间进行对比, 得到如图 9 所示的有无引导源下不同盲人占比混合人群疏散时间 T 与行人密度 ρ 的关系对比图, 黑色表示没有引导源引导下的疏散数据, 红色表示有引导源引导下的疏散数据。

从图 9 可以看出不同的密度区间和盲人占比下, 有无引导源对疏散时间的影响是不同的。当行人密度为低密度时, 盲人占比在 0.1 以内时, 有无引导源两种情况下疏散时间 T 的变化不大, 可见此时引导源的设置对整体疏散产生的影响不大, 但随着行人密度的增大以及盲人占比的增加, 有引导源时所需的疏散时间 T 明显缩短。当行人密度较低, 盲人占比较小, 行人滞留的可能性也较小, 无需引导源的引导也可完成疏散, 当行人密度增大时, 行人之间的冲突较为明显, 滞留可能性较大, 加之盲人本身的视觉缺陷, 引导源的设置会进一步缩小疏散过程中盲人所受到的干扰, 从而实现较好的引导效果。

4. 结论

本文在一般元胞自动机的基础上, 考虑了盲人群体的对疏散效率的影响, 引入多种收益, 建立了包含盲人的元胞自动机模型, 数值模拟了诸多因素对疏散过程的影响, 并对其有效性进行了验证。研究结果表明:

1) 当行人密度为低密度时, 盲人占比在 0.1 以内时, 对整体疏散产生的影响不大, 但随着人群密度的增大和盲人占比的增多, 会对整体疏散带来较大影响, 人群过密时, 会增大盲人心理行为特性的影响, 特别是在出口处拥堵时, 盲人会因恐慌等心理特性而停滞不前, 充当随机障碍物的作用, 极大地影响混合人群的疏散效率, 所以盲人活动频率较高的场所应当严格控制行人流量和密度。

2) 疏散过程中存在帮扶行为时有利于混合人群的疏散, 不同密度范围、不同盲人占比、不同帮扶概率的设置对疏散效率的影响不同, 低密度下, 行人稀疏, 盲人移动邻域内的正常行人很少甚至没有, 无法达成帮扶条件, 此时帮扶概率对疏散时间的影响不大, 随着密度的增大和盲人占比的增加, 帮扶行为可以提升疏散效率。

3) 疏散过程中存在引导源时, 疏散人员会逐渐向引导方向聚集, 引导源对行人疏散路径的选择起到了非常好的指导效果, 为混合人群的疏散策略的评估与优化提供了理论支持。

4) 对比帮扶行为以及设置引导源两种疏散策略的疏散数据, 可知帮扶行为可以更好的帮助盲人疏散, 帮扶行为可以很大程度上减少盲人扶墙疏散现象, 并提高了盲人移动速度, 从而提高疏散效率; 设置引导源只是避免了盲人扶墙现象的产生, 并没有提高盲人移动速度, 且汇聚在出口处的盲人还会影响正常行人的疏散, 从而增加排队时间, 相比之下, 帮扶行为更有利于盲人与正常行人混合群体的疏散。

致 谢

本论文获山西省自然科学基金(201901D111255)资助。

参考文献

- [1] Hoogendoorn, S.P. (2015) Continuum Theory for Pedestrian Traffic Flow: Local Mute Choice Modelling and Its Implications. *Transportation Research Part C*, **59**, 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.003>
- [2] Chrbi, M., Seyfried, A. and Schadschneider, A. (2010) Generalized Centrifugal-Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E: Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **82**, Article ID: 046111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.046111>
- [3] Li, Q.R., et al. (2021) The Existence of Cautious Pedestrians Might Facilitate Evacuation Dynamics. *EPL*, **134**, 18003.

- <https://doi.org/10.1209/0295-5075/134/18003>
- [4] Jian, X.X., Wong, S.C., Zhang, P., *et al.* (2014) Perceived Cost Potential Field Cellular Automata Model with an Aggregated Force Field for Pedestrian Dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **42**, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.018>
- [5] Yue, H., *et al.* (2021) Simulation of the Influence of Spatial Obstacles on Evacuation Pedestrian Flow in Walking Facilities. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **571**, Article ID: 125844. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125844>
- [6] 赵道亮. 紧急条件下人员疏散特殊行为的元胞自动机模拟[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [7] 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.
- [8] Han, Y.B. and Liu, H. (2017) Modified Social Force Model Based on Information Transmission toward Crowd Evacuation Simulation. *Physica A*, **469**, 499-509. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.014>
- [9] 汪洋. 大型场馆内残障人员疏散行为研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2018: 25-42.
- [10] 姜传胜, 郑双忠, 袁斐. 残疾人疏散安全研究现状与发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(3): 161.
- [11] 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.
- [12] 白洋. 基于元胞自动机的小学生群体紧急疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2018: 9-22.
- [13] 陈晨, 陆丽丽, 曹祖平. 考虑恐慌特性的老年人疏散仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5): 432-436.
- [14] 张森. 城市视觉障碍人群的行为特征与智慧安全出行策略研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017: 112-114.
- [15] Bursedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., *et al.* (2001) Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, **295**, 507-525. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8)
- [16] 高凤强, 颜逾越, 许策, 林丽霞, 任欢, 裴俊智. 一种考虑引导作用的行人疏散元胞自动机模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 60-66.