

The Simulation of Evacuation Strategies for Elementary School Students' Group Based on Static Field

Yang Bai, Zhongfei Geng, Xuecen Bai, Xingli Li*

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi
Email: *lixingli80@163.com

Received: Aug. 2nd, 2018; accepted: Aug. 17th, 2018; published: Aug. 27th, 2018

Abstract

As for a lecture hall with single exit, a cellular automata model for the elementary school students' group with consideration of different evacuation strategies and static field is set up. The numerical simulation is performed to study the relationship between the number of remaining students, the percentage of moving students, and the outflow at the exit with time step. The results show that to maximize the use of the aisle near the chairs and to avoid the jamming when pedestrians select the shortest route will have a significant influence on improving evacuation efficiency.

Keywords

Pedestrian Flow, Elementary School Students' Group, Static Field, Cellular Automata, Evacuation Strategies

基于静态场的小学生群体疏散策略仿真研究

白 洋, 耿中飞, 白雪岑, 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: 2018年8月2日; 录用日期: 2018年8月17日; 发布日期: 2018年8月27日

摘 要

本文以单出口含障碍物的报告厅为背景, 建立了包含不同静态场和疏散策略的小学生群体紧急疏散元胞

*通讯作者。

自动机模型。数值模拟探讨了在不同疏散策略下剩余学生数量、移动学生所占比例及出口流量与时间的关系，并对典型时空动力学特性进行了讨论。结果表明：最大限度地利用桌椅之间的过道，尽可能避免行人在选择最短路径时产生拥挤，将显著提高疏散效率。

关键词

行人流，小学生群体，静态场，元胞自动机，疏散策略

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近年来，随着社会经济的快速发展，由行人拥堵造成的各种踩踏事故频繁发生，不仅给社会带来巨额的经济损失，而且对人们的生命构成严重威胁，行人的安全疏散问题引起了许多学者的广泛关注。一般情况，行人疏散模型可以分为宏观模型[1] [2]和微观模型[3] [4]，其中微观模型又分为：社会力模型[3] [4] [5]，元胞自动机模型[6] [7] [8] [9]以及格子气模型[10] [11] [12] [13]。元胞自动机可以较好地表现行人的自主性、随机性、且便于计算，可以更直观地模拟行人疏散过程，故元胞自动机被广泛应用于模拟行人流和交通流。

小学生群体，作为各类踩踏事故的高发对象，对其进行疏散策略的探讨至关重要。研究发现，对于小学生群体，不仅具有一般成年人紧急疏散时的行为特点，更具有其特有的心理行为特征。首先，小学生由于年龄小，在应对突发事件时，对事件的处理能力普遍低于正常公众，因此在疏散过程中，小学生更偏向于从众行为以寻求稳妥的疏散方式；其次，学生对老师具有较强的依赖性，老师在疏散过程中扮演着非常重要的角色，其正确信息的诱导会直接影响疏散效率，而一旦没有老师引导，疏散效率将急剧下降；再次，小学生活泼好动，相互挤压推搡现象严重。因此，如何在小学生群体心理行为特性的基础上，探索相对较优的疏散策略至关重要。然而现有大多数行人流元胞自动机模型大部分均为改变行为规则来模拟一种场景，使所有行人遵循一套规则来进行更新至所有人离开系统，例如周金旺[14]考虑了行人在疏散过程中的并排成对、前后成对、混合成对的三种方式对疏散的影响；田西柱[15]在元胞自动机模型基础上，提出了一种基于从众心理的元胞自动机模型。少部分研究将系统内的区域进行划分，不同区域有着不同的行为规则，例如岳昊等[16]根据视野范围划分疏散区域，探究在疏散视野受阻的情况下行人的疏散问题；尹雪清[17]考虑出口区域属性的行人疏散模拟研究；李圣男[18]将空间划分为通道、转弯处、缓冲处、瓶颈区，对大型公共场所进行了疏散通道的设置进行了分析及优化。对疏散策略的研究上开展的相对较少，缺少严格的、合理的、具有普遍性的、量化的模板。本文在考虑小学生推搡挤压特性的基础上，以单出口的报告厅作为背景，在引入“静态场”[19]的概念后，将连贯的行人疏散行为分步骤处理，通过对每步的行人疏散规则进行细化，改变不同步骤的元胞更新规则，模拟出不同的疏散策略，进一步探讨疏散策略对疏散的影响。

2. 模型

模型建立在一个大小为 $M \times M$ 的报告厅，如图 1 所示，将模型内区域平面划分为有限个大小相等的二维正方形网格，且每个网格等价于一个元胞。考虑小学生群体的挤压行为，图中圆点表示行人，不同

的颜色表示不同状态的行人，其中蓝色代表尚未与他人发生挤压的小学生，红色代表已发生挤压的小学生；模型最外侧的黑色边框表示系统边界，即房间墙壁；墙壁所示缺口为房间唯一出口，其宽度为 D ；图中橙色矩形代表室内桌椅。行人只能从唯一的出口离开房间，且在疏散过程中行人不可与障碍物(包括桌子和围墙)重合。本文为了模拟学生在座位上的紧急疏散，将人群初始位置皆设置在桌与桌之间。

本文采用传统的 Moore 型邻域，如图 2 所示。

本文将学生疏散过程中影响疏散的因素收益进行分类：1) 距离收益；2) 墙壁收益；3) 桌椅收益；4) 人与人相互作用收益；5) 静态场收益；6) 疏散策略收益。在单位时间步内，分别计算邻居格点各个因素的收益，将其相加，行人选择总收益值最大的格点进行移动。行人在单位时间步内是静止在原地还是向周围邻居格点进行移动，其关系可用下式(1)表示：

$$\begin{aligned}
 &A + B + C + D + E + F = 1 \\
 &L_p^t = Al_p^t + Bw_p^t + Cd_p^t + Da_p^t + ES_p^t + Fg_p^t \quad (p = 1, 2, \dots, 9) \\
 &L_i = \max(L_p^t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中 l 、 w 、 d 、 a 、 S 、 g 依次表示距离收益、墙壁收益、桌椅收益、行人相互作用收益、静态场收益及疏散策略收益， A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 分别表示各个因素的权重，时间步为 t ，行人为 i ， i 行人在 t 时刻的总收益为 L_i^t 。设行人所在的元胞位置为 S ，其邻居各元胞位置如图 2(a)所示，则 t 时间步 i 行人所在位置邻域

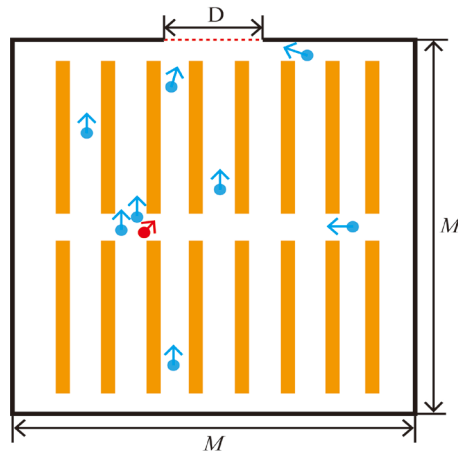


Figure 1. Schematic diagram of a lecture hall with single exit

图 1. 一般单出口报告厅示意图

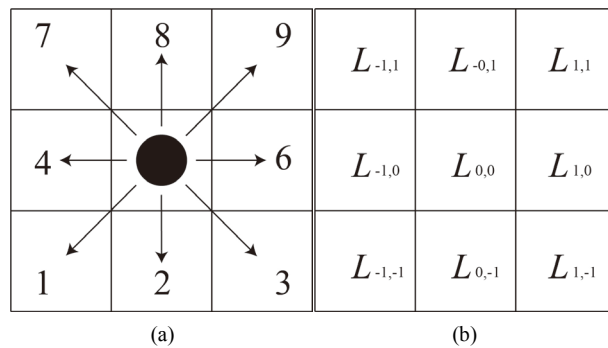


Figure 2. (a) The Moore field; (b) The movement income matrix

图 2. (a) Moore 邻域; (b) 移动收益矩阵

内格点的收益值分别为 $L'_1, L'_2, \dots, L'_8, L'_9$, 行人 i 在此时间步选择收益最大的点进行移动。各因素收益定义如下:

1) 距离收益

因行人在疏散过程中大都遵循“最短时间通过最短距离离开系统”的原则, 故设置距离收益, 距离收益根据距离公式 $l(x, y) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ 计算, 该式为横纵坐标为 (x, y) 的元胞距离出口 (x_0, y_0) 距离, 反映了出口对行人的吸引力。行人在每一时间步内考虑其邻域各点的距离收益, 其中离出口最近的位置距离收益最大。

2) 墙壁收益

考虑到墙壁对小学生在疏散过程中的阻碍主要表现在行人不能穿越或翻越围墙, 因此设置了墙壁收益, 保证学生只能通过墙壁上的唯一出口离开系统。在行人移动到紧挨墙壁的元胞时, 将墙壁所在元胞的收益值负值, 因此在计算最后总收益时, 墙壁位置元胞总收益会很小, 通过这样的规则设置, 可模拟出行人不能与墙壁重合和跨越墙壁的情景。

3) 桌椅收益

桌椅与墙壁都属于障碍物, 所以桌椅的规则同墙壁基本一致, 因此设置桌椅收益, 行人在移动过程中不能因为桌椅在离出口最近的直线距离上就跨越桌椅或与桌椅重合。不同处在于墙壁是系统的边界, 系统外侧紧挨墙壁的元胞不用计算收益值。

4) 行人相互作用收益

由于人与人之间相互作用对疏散的影响, 将空间离散为 0.4×0.4 m 的格点, 发生局部拥挤的元胞会对其周围邻域元胞产生影响, 具体的表现为局部挤压元胞周围的元胞必须等到局部拥挤现象消除才可进行移动。

5) 静态场收益

静态场不随时间的推移而变化, 根据报告厅中各点距出口的距离来进行赋值。将报告厅分为桌椅区(图3中C、G区域)、报告厅前后空地(图3中D、F区域), 桌椅区中间过道(图3中E区域)、报告厅桌椅两侧(图3中B、H区域)以及出口处(图3中A区域)。其中A区静态场值最大, 对行人的吸引能力最大, H区静态场值最小, C区静态场值始终大于G区, D、F两区静态场值相同。

这样, 将报告厅区域的静态场分成小的矩阵, 在相同的区域内, 场强是一致的。本文将静态场设置为两种: 一种侧重于让小学生在桌椅中过道和报告厅前后离开系统, 如图4(a); 另一种倾向让小学生在桌椅中穿过离开系统, 如图4(b)。

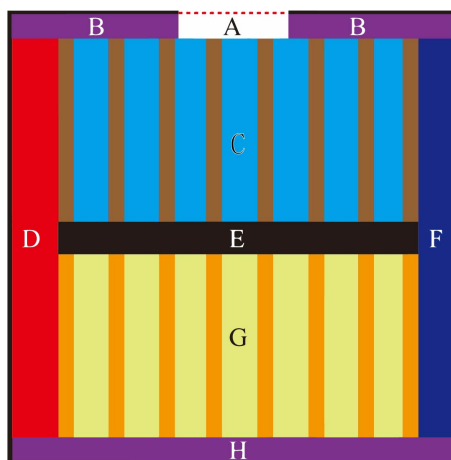


Figure 3. The region diagram of static field
图3. 静态场区域划分示意图

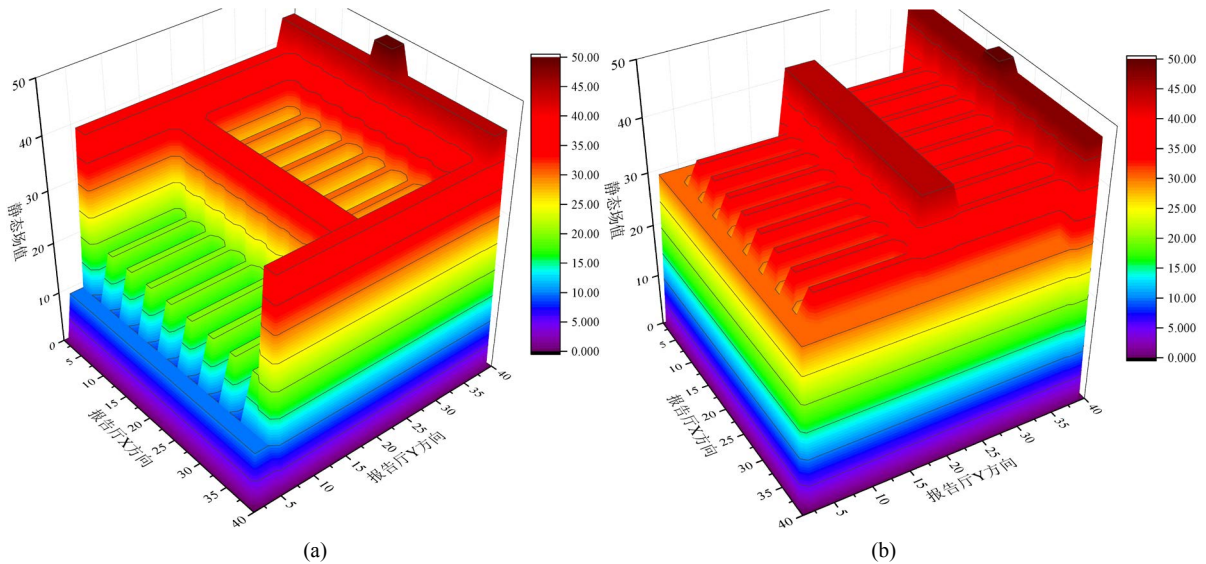


Figure 4. The schematic diagram of static field: (a) static field 1; (b) static field 2

图 4. 静态场示意图: (a) 静态场 1; (b) 静态场 2

6) 疏散策略收益

考虑疏散策略的制定对疏散效率的影响，疏散策略根据报告厅障碍物的布局制定。疏散策略 1 是从始至终都按照式(1)进行行人位置及状态的更新，移动规则同上所述一致；疏散策略 2 则按报告厅行人初始位置一分为二，图 3 中 G 区的学生只可单方向向 C 区一侧移动，出口侧学生按式(1)所指定的规则进行移动。换言之，就是将行人疏散的过程按所在报告厅位置的不同制定不同的移动规则。在选择疏散策略时表现出的收益即为疏散策略收益。

行人位置更新步骤为：①给定区域内行人初始；②确定静态场类型；③确定疏散策略；④计算每一时间步各影响因素收益进行位置更新；⑤重复上述步骤直至行人疏散完毕。

3. 模拟结果与讨论

利用上述模型模拟小学生在报告厅内的疏散过程，更新规则如上所示。模型如图 1 所示，其参数设置为： $M = 40$ ， $D_d = 3$ ， $N = 416$ (根据桌子占地面积设定)，权重设置为 $A = 0.5$ ， $B = 0.05$ ， $C = 0.05$ ， $D = 0.02$ ， $E = 0.08$ ， $F = 0.3$ 。在数值模拟过程中，初始行人，行人与桌子交替分布，且随着疏散时间的推移，采用随机序列并行的方法按上述规则进行位置更新，在数值模拟中，为了消除随机性对其结果的影响，系统均选取 10 个样本取其平均值。

首先，研究疏散过程中报告厅剩余小学生数量 N 和时间步 T 的关系，如图 5 所示。其中 case1 表示在疏散过程中采用静态场 1 和疏散策略 1；case2 表示采用静态场 1 和疏散策略 2；case3 表示采用静态场 2 和疏散策略 1；case4 表示采用静态场 2 和疏散策略 2。可以看出，随着时间步的增加，报告厅内剩余人数逐渐减少，疏散行人离开疏散系统且不会返回系统，不存在疏散过程中锁死现象。疏散的过程大致分为两个阶段：第一个阶段行人快速疏散出系统，系统内人数大幅下降；第二阶段，行人疏散过程变得缓慢，当采用疏散策略 2 时，由于疏散策略不同，行人倾向于桌子之间过道而非通过距离最短的路径离开系统，疏散策略的不同仅对初始位置位于图 3 中 G 区域的学生产生影响，因此在疏散策略 2 的疏散过程中，经过桌椅区域中间过道时避免了很多不必要的拥堵，疏散策略 1 的疏散时间长，而疏散策略 2 的疏散时间大致为疏散效率 1 的一半，因此疏散策略的改变对疏散有着很大的影响，而在相同的疏散策略下，静态场的不同对疏散的影响不明显。

接下来研究移动行人比例 P 对疏散效率的影响, 定义: “移动行人比例 $P = \text{移动的行人数} / \text{房间内剩余行人人数 } N$ ”。移动行人比例的大小可以直观反映出疏散过程中行人拥挤堵塞的程度, 移动行人比例越大, 说明此时间步内移动人数所占房间内剩余人数的比例越大, 拥挤程度越低。图 6 给出了四种情况下 P 与 T 的关系图, 可以看出, 疏散策略不同, 但 P 总体变化趋势一致: 疏散开始时, 移动行人比例最低, 这取决于小学生的初始分布位置, 因初始位置导致了桌子之间的学生不能灵活运动, 因此开始疏散时大部分的学生都为静止状态; 随着时步的增加, 桌子之间紧挨过道位置的学生离开课桌, 桌子之间通道变得畅通, 导致移动行人的比例上升; 而第三阶段移动行人疏散比例的下降是因为在疏散过程中, 学生在选择最短路径时在共同路径上产生了局部的拥挤, 导致了阻塞, 移动行人数量短时间变少, 比例 P 下降, 但采用疏散策略 2 时第三阶段的效果不明显; 第四阶段是由于系统内行人不断减少, 拥挤程度下降, 因此比例 P 不断上升, 直到最后 P 达到 1, 所有人疏散完毕离开系统, P 变为 0。

最后, 研究出口流量与疏散时间的关系, 定义“出口流量 $Q = \text{上一时间步房间剩余人数} - \text{当前时间步房间内剩余人数 } N$ ”。图 7 所示为 case1~4 的四种情况, 可以看出, 疏散初期, 出口流量由 0 开始增

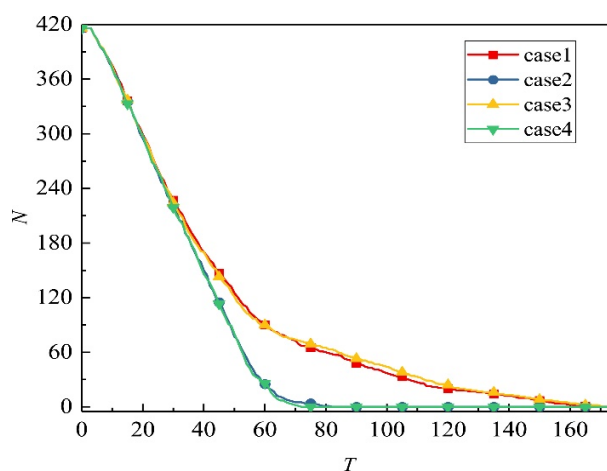


Figure 5. The relationship between the number of remaining pedestrians N and the time step T

图 5. 剩余行人数量 N 和时间步 T 关系图

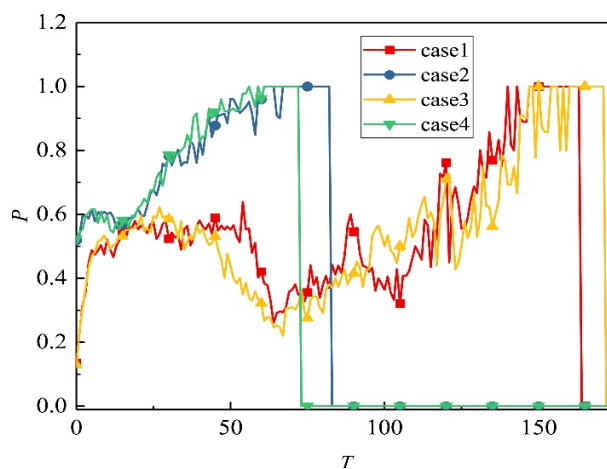


Figure 6. The relationship between the moving pedestrian ratio P and the time step T

图 6. 移动行人比例 P 与疏散时步 T 关系图

加，这是因为靠近出口一侧的学生移动到出口位置并离开系统，导致了出口流量 Q 的增加并开始产生波动；疏散策略 1 时在出口流量达到顶峰之后开始下降，下降是因远离出口一侧的行人离开系统需要穿过靠近出口一侧的桌椅，因此在大量的学生在穿越桌椅区时会产生混乱导致拥堵，因此出口流量 Q 下降，而此时疏散策略 2 时的出口流量一直都维持在较高的区域，直到所有人疏散完毕流量为 0；疏散末期，疏散策略 1 时，由于系统内所剩学生不多，因此在疏散末期出口流量 Q 在 3 以内小幅度波动，直至所有人疏散完毕。

图 8 给出了 case1 和 case2 两种情况下的时空演化斑图，可以看出，在演化的初始阶段，系统内的各位置学生均向出口进行移动，并在出口处聚集，由图 8 中的绿色椭圆可以看出，大部分的局部拥挤发生

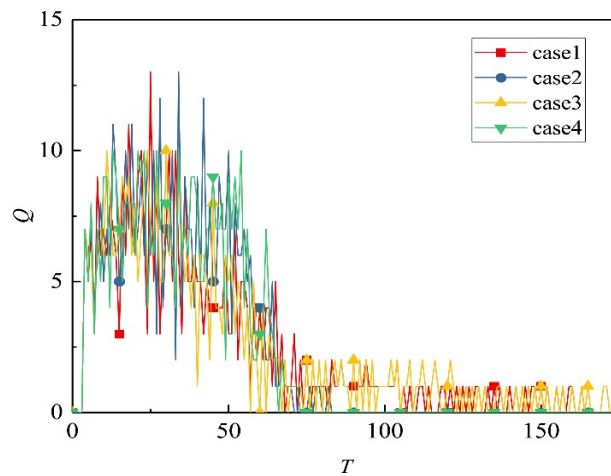


Figure 7. The relationship between the exit flow Q and the time step T

图 7. 出口流量 Q 与疏散时间 T 关系图

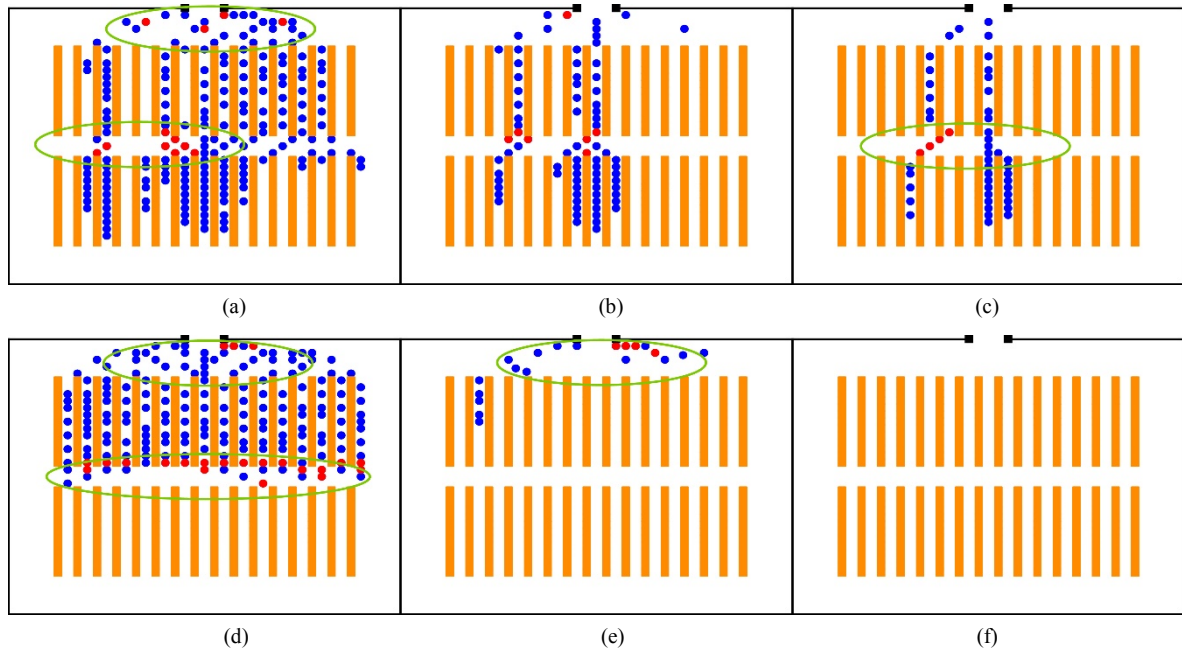


Figure 8. The typical spatiotemporal patterns; case1: (a) $t = 30$, (b) $t = 60$, (c) $t = 90$; case2: (d) $t = 30$, (e) $t = 60$, (f) $t = 90$

图 8. 时空演化斑图 case1: (a) $t = 30$, (b) $t = 60$, (c) $t = 90$; case2: (d) $t = 30$, (e) $t = 60$, (f) $t = 90$

在靠近门口墙壁的过道和报告厅中间过道。报告厅中间过道是初始位置在图 3 中 G 区域学生向出口移动的必经之路,因此此区域的学生在短时间内涌入通道,就会造成局部拥挤,影响小学生疏散整体的效率。区别是,采用疏散策略 1 时如图 8(a)~图 8(c)所示,报告厅中间过道的拥挤主要是由于学生左右移动,所有人皆想选择最短路径,导致局部拥挤,但采用疏散策略 2 时如图 8(d)~图 8(f)所示,虽然此过道产生局部拥挤,但因为学生不会左右移动,因此不会对左右方向的人产生干涉。在疏散过程中,采用疏散策略 2 对桌子之间的利用充分,使学生能够在较短的时间内迅速向出口方向移动,并非所有人都通过最短的路径离开系统,但疏散效率是最高的。反观疏散策略 1,正是人人都想通过最短的路径,导致学生在选取最佳路径时产生拥堵,不但影响了其他学生的疏散,而且有很多路径没有被充分利用,导致在相同的时步下,系统内留有的人数明显多于疏散策略 2,如图 8(b)、图 8(c)所示。

4. 结论

本文考虑小学生的应急疏散策略问题,建立了静态场下的含疏散策略的小学生紧急疏散元胞自动机模型,研究不同的疏散策略下小学生在报告厅内疏散机制。数值模拟表明:若只按最短路径离开系统,会导致局部拥挤现象的增多,导致疏散效率的降低;在紧急疏散过程中,要尽可能多的利用疏散通道,提高通道的利用率。

通过上述模拟研究可以发现疏散策略的改变对疏散效率有着显著的影响,说明了在合适的环境下进行合理制定疏散策略十分必要,对研究具有代表性、合理性的疏散策略行人流模型有着实际意义。

基金项目

本论文获国家自然科学基金(11562020)、山西省自然科学基金(201601D011013)、山西省留学回国人员科技活动择优资助项目资助。

参考文献

- [1] Helbing, D. (2000) Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. *Physics*, **73**, 1067-1141.
- [2] Henderson, L.F. (1971) The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, **229**, 381-383. <https://doi.org/10.1038/229381a0>
- [3] 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>
- [4] Helbing, D. and Molnár, P. (1995) Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics*, **51**, 4282. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
- [5] Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. (2000) Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, **407**, 487-490. <https://doi.org/10.1038/35035023>
- [6] Chraïbi, 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>
- [7] Burstedde, 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)
- [8] Kirchner, A. and Schadschneider, A. (2002) Simulation of Evacuation Processes Using a Bionics-Inspired Cellular Automaton Model for pedestrian Dynamics. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, **312**, 260-276. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00857-9)
- [9] Zhang, P., Jian, X.X., Wong, S.C., et al. (2012) Potential Field Cellular Automata Model for Pedestrian Flow. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **85**, Article ID: 021119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.021119>
- [10] 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>

- [11] Tajima, Y. and Nagatani, T. (2001) Scaling Behavior of Crowd Flow Outside a Hall. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, **292**, 545-554. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(00\)00630-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(00)00630-0)
- [12] Helbing, D., Isobe, M., Nagatani, T., *et al.* (2003) Lattice Gas Simulation of Experimentally Studied Evacuation Dynamics. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, **67**, Article ID: 067101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.067101>
- [13] Kuang, H., Li, X., Song, T., *et al.* (2008) Analysis of Pedestrian Dynamics in Counter Flow via an Extended Lattice Gas Model. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **78**, Article ID: 066117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.066117>
- [14] 周金旺, 邝华, 刘慕仁, 孔令江. 成对行为对行人疏散动力学的影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3001-3007.
- [15] 田西柱. 基于从众心理的元胞自动机模型[J]. 物联网技术, 2014, 4(4): 83+87.
- [16] 岳昊. 基于元胞自动机的行人流仿真模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [17] 尹雪清. 考虑出口区域属性的行人疏散模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [18] 李圣男. 基于区块划分元胞自动机模型的行人疏散建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [19] 菅肖霞. 基于数学和物理机理分析的行人流费用势场元胞自动机模型[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2013.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-8696, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: mos@hanspub.org