

# 小学生教学楼紧急疏散模拟与优化策略研究

温莎莎, 郑杰, 马闪闪, 李兴莉\*

太原科技大学, 应用科学学院, 山西 太原

收稿日期: 2022年1月9日; 录用日期: 2022年2月9日; 发布日期: 2022年2月21日

## 摘要

心理学研究表明, 紧急情况下个体心理恐慌程度的不同会引起个体行为的差异。本文基于正常情况下教学楼内小学生群体疏散模型, 考虑紧急情况下小学生心理恐慌程度的不同对群体运动特征、行走速度的影响及疏散路径的选择, 建立了模拟紧急情况下教学楼内小学生群体疏散的模型。仿真结果表明: 在紧急疏散情况下, 小学生群体的适度恐慌可以提高整体疏散效率; 及时在疏散过程中增加教师引导有助于疏散安全有序进行; 当教学楼内不同年级的小学生心理恐慌程度处于不同值时, 1~2年级学生心理处于极度恐慌状态时, 整体疏散效率最高。

## 关键词

小学生群体, 教学楼, Anylogic, 紧急疏散, 恐慌因子, 策略优化

# Simulation and Optimization Strategy of Emergency Evacuation in Primary School Teaching Building

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

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

Received: Jan. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Feb. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Psychological research shows that the difference of individual psychological panic degrees will cause the difference of individual behavior in an emergency situation. Based on the group evacuation model of primary school students in the teaching building under normal conditions, a new

\*通讯作者。

model to simulate the group evacuation of primary school students in the teaching building under emergency conditions is established, in which the influence of different psychological panic degrees of primary school students on group movement characteristics, walking speed and the choice of evacuation path are considered. The simulation results show that in the case of an emergency evacuation, moderate panic for the pupils can improve the overall evacuation efficiency. Adding teachers' guidance in the evacuation process in time is helpful for the evacuation to be carried out safely and orderly. When the psychological panic degree of students of different grades in the teaching building is at different values, and the students of grades 1~2 were in a state of extreme psychological fear, the overall evacuation efficiency is the highest.

## Keywords

Elementary School Group, Teaching Building, Anylogic, Emergency Evacuation, Panic Factor, Scheme Optimization

Copyright © 2022 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

近些年来, 紧急情况下大型公共场所内人员的安全疏散问题日益得到重视。据《中国教育在线》统计, 全国发生的各类踩踏事故中, 校园事故占 66.7%。其中, 由于中小学生对突发事件的感知能力相对较弱, 容易出现恐慌, 盲从等行为, 故成为校园踩踏事故的高发群体。针对人群紧急疏散问题, 国内外学者均做了一定研究。李建霖[1]等利用 FDS 及 Pathfinder 对高层住宅内人员遭遇火灾时的安全疏散进行研究。狄月[2]等考虑恐慌影响对地铁站台应急疏散问题进行研究。王文玉[3]等从建模的宏观角度对紧急情况下如何快速高效地将人员安全有序疏散的问题进行研究。Shiwakoti [4]等探讨了列车乘客在紧急疏散中可能存在的行为, 并对人员疏散的反应行为等四个关键理论问题进行研究。可以看出, 大多数关于紧急疏散方面的研究主要集中在大型公共场所的普通人群, 很少涉及小学生教学楼内的小学生群体。小学教学楼作为小学生聚集场所, 人群密度大, 疏散空间小, 导致在疏散过程中存在较大的风险。在多层建筑疏散中, 人员对疏散出口[5] [6] [7] [8]、疏散路径的选择[9] [10] [11]以及疏散楼梯宽度[12] [13] [14] [15]等因素都会影响人员疏散的效率。

本文考虑小学生群体在紧急情况下特有的心理行为特征, 基于正常情况下教学楼内小学生群体疏散模型引入恐慌因子, 建立紧急情况下教学楼内小学生群体疏散模型, 探讨不同疏散总人数和不同疏散策略下不同心理恐慌程度以及不同年级的小学生群体处于不同恐慌程度对疏散效率的影响。

## 2. 社会力模型及其修正

### 2.1. 社会力模型分析

Helbing 教授于 1995 年以牛顿第二定律和社会物理学为理论基础提出了社会力模型的概念[16], 并于 2000 年对其进行归纳与完善。社会力模型(Social Force Model)是目前行人交通仿真领域应用较为广泛的微观连续性模型。该模型将每个行人均视为一个具有独立主观意识的个体, 其运动规律受自身的主观意识、周围行人以及环境的影响。根据牛顿第二定律, 社会力模型可以表示为:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = m_p \frac{v_p^o(t)\vec{e}_p^o(t) - \vec{v}_p(t)}{\tau_p} + \sum_{q(\neq p)} \vec{f}_{pq} + \sum_{w(\neq p)} \vec{f}_{pw} \quad (1)$$

其中,  $m_p$  表示行人  $p$  的质量;  $v_p^o(t)$  表示行人  $p$  的期望速度;  $\vec{e}_p^o(t)$  为行人  $p$  的期望方向;  $\vec{v}_p(t)$  表示行人  $p$  的实际速度;  $\tau_p$  表示行人  $p$  加速到  $v_p^o(t)$  所需要的时间;  $\sum_{q(\neq p)} \vec{f}_{pq}$  表示其他行人对行人  $p$  的作用力之和;  $\sum_{w(\neq p)} \vec{f}_{pw}$  表示行人  $p$  与障碍物(边界)之间存在的的作用力的总和。

社会力模型是一种非常适用于行人流仿真领域的基础模型, 它具备以下优点:

- 1) 社会力模型建立在空间及时间相对连续的基础上, 更加贴近现实生活中个体的移动规律, 并以此为基础对教学楼内小学生群体的疏散仿真提供理论支持。
- 2) 该模型对影响行人疏散的因素考虑得比较充分, 将个体与个体间的相互作用力、个体与所处环境间的相互作用都用数学模型表达出来, 能够较为真实地体现行人在疏散过程中的个体行为。
- 3) 社会力模型可以很好地体现个体与个体间的碰撞拥挤现象。

## 2.2. 社会力模型的修正

### 2.2.1. 初始社会力模型的不足

尽管初始社会力模型能够在很大程度上模拟大规模人群行为, 但是该模型还是存在以下几点不足。

- 1) 社会力模型需要考虑的参数较多, 比如吸引力或排斥力的取值范围、取值大小等。在描述人与人之间的作用力时, 没有考虑个体间的差异性, 将所有人对行人  $m$  的作用力变化规律视作相同。而实际上, 不同行人对同一行人  $m$  的作用力影响往往是不同的, 关系亲近的两人之间的吸引力会远大于彼此陌生的两人。
- 2) 初始社会力中社会排斥力的大小仅与两行人的半径和及两行人的距离有关, 并没有考虑两行人朝向问题, 当两个人距离较近但反向行走时, 两人之间的吸引力可忽略不记。
- 3) 初始社会力模型中行人的期望速度是不会受外界条件影响而改变的, 始终是一个定值; 而现实中, 行人的期望速度是随时发生改变的。
- 4) 初始社会力模型是建立在正常情况下行人走行状态下的, 并未考虑突发事件行人疏散的心理行为状态。

基于上述分析, 本文认为初始社会力模型对紧急情况下大规模人群疏散行为的模拟还不够真实, 不足以反映真实的疏散过程。当遭遇突发事件时, 行人存在的恐慌心理等因素对行人疏散的影响不容小觑。由于小学生的身体和心理都处于生长发育初期, 在突发情况下紧急疏散时恐慌心理对小学生行走行为影响愈发不容忽略。本文引进恐慌因子, 对初始社会力模型进行修正, 考虑小学生特有的心理行为特征, 最终形成改进的社会力模型适应于紧急情况下小学生群体疏散。

### 2.2.2. 初始社会力模型修正

人员在紧急情况下或多或少都会产生恐慌、紧张心理。在紧急疏散环境下, 行人的恐慌心理会在一定程度上对其行走行为产生影响, 在路径及出口选择上由于行人受到这些负面情绪的作用会产生盲从, 改变行人的行走速度等行为。通常情况下, 行人的恐慌程度越大, 其慌乱程度越明显, 更容易表现出停滞不前或单纯增加逃生速度等行为。本文主要考虑恐慌心理对行人行走速度的影响, 引入“恐慌因子”来反映人员心理的恐慌程度, 尽可能还原真实疏散过程。恐慌因子  $g$  反映在行人疏散速度的变化上, 定义恐慌心理影响条件下的速度函数为:

$$v_s(t) \in (v_{s\min}(t) - g * v_{\Delta}(t) + 2 * g * v_{\Delta}(t)) \quad (2)$$

式中,  $v_s(t)$  为修正后的实际速度,  $v_{s,\min}(t), v_{s,\max}(t)$  为行人舒适速度的最小值及最大值,  $v_\Delta(t)$  为速度单位(m/s),  $g$  为恐慌因子。

在疏散过程中, 在  $t$  时刻恐慌因子  $g$  的大小可以定量描述为:

$$g(t) = \frac{v_0(t) - v_0(0)}{v_{\max}(t) - v_0(0)} \quad (3)$$

其中,  $v_0(t)$  为恐慌发生时行人的速度大小,  $v_0(0)$  为正常情况下行人的舒适速度大小,  $v_{\max}(t)$  为  $t$  时刻行人的最大期望速度。当恐慌程度值大于行人所能承受的临界值时, 行人行为将会被当时的恐慌心理所左右, 造成一些行为偏差, 行人此时的心理将由“正常”状态转换为“恐慌”状态, 行人的行为也将由“合理”转换为“不合理”。

### 3. 紧急状况下小学生群体的心理行为特征分析

小学低年级同学具体形象思维起着主导作用, 小学高年级同学抽象逻辑思维起着主导作用。小学阶段的同学一般没有自己的观点, 非常相信老师的观点, 听老师的指挥。小学生的心理正处于从不成熟走向成熟的阶段, 心理还不够成熟, 所以在紧急疏散过程中, 小学生收到外界干扰比较大, 经常会出现以下行为特征及心理活动。

**恐慌:** 在遭遇紧急情况时, 小学生会在某个时刻产生恐慌心理, 在这一时刻表现出停滞不前或增加行走速度的行为。

**盲从:** 在比较紧急的情况下, 小学生由于心理尚未成熟, 处理突发事件的经验不够丰富, 会出现大脑一片空白的现象, 从而放弃自己的意见和想法, 采取与大多数人一致的行为。

**就近选择:** 在恐慌心理影响下, 放弃老师事先制定好的疏散策略, 选择就近进出口进行疏散。

**超越他人:** 在紧急情况下, 由于个体本能的逃生欲望, 尽可能提高自己的疏散速度, 超越他人, 无序的在人群中穿行。

**智能选择:** 个体冷静下来后, 放弃当前过度拥挤的出口, 选择疏散人数较少的出口进行疏散。

## 4. 实例仿真分析

### 4.1. 正常情况下教学楼内小学生群体疏散模型建立

Anylogic 软件是一款混合建模仿真软件, 以最新的复杂系统设计理论与方法为基础, 同时支持离散建模和连续建模。Anylogic 软件基于社会力模型建模, 其中行人仿真主要依托行人库实现, 可以较为真实地反映行人运动时行人之间的相互影响以及影响行人运动的各种因素。本文利用 Anylogic 软件中的行人库和流程图对行人建模, 模拟多层小学教学楼内人员疏散过程。

#### 4.1.1. 多层教学楼内人员疏散场景构建

根据某小学教学楼具体建筑结构及尺寸, 构建小学教学楼内人员疏散场景。

选取某小学的四层主教学楼作为研究对象。一层由 10 间教师办公室及一个活动区组成; 二、三层分布有 12 个教室, 2 间教师休息室, 1 间合班教室; 四层分布有 12 个教室。每间教师办公室可容纳 20 个教职工, 每间教室容纳 40~50 名学生。该栋楼有 5 个可供疏散的楼梯, 平面示意图分别如图 1 所示。

#### 4.1.2. 参数设置

在本例中, 行人分为教师和学生两大类, 其中, 学生又细分为 1~2 年级学生, 3~4 年级学生, 5~6 年级学生三大类。模拟场景中设定教师和学生的男女比例均为 1:1, 根据《中国成年人人体尺寸》的统计, 其中 26~35 岁成年男女最大肩宽 50%分位数的值分别为 0.376 m 和 0.350 m [17], 因而在模拟中设定男教

师肩宽为 0.376 m，女教师肩宽为 0.350 m。根据《中国未成年人人体尺寸》(GB/T 26158-2010)的统计，7~10岁未成年男女生最大肩宽 50%分位数的值分别为 0.326 m 和 0.319 m，11~12 岁分别为 0.362 m 和 0.358 m [18]，因而在模拟时，选用 0.326 m 和 0.319 m 分别为一至四年级男生和女生的肩宽值，选用 0.362 m 和 0.358 m 分别为五至六年级男生和女生的肩宽值。通过相关资料的查阅与总结整理得到了符合我国小学生实际的参数值(见表 1)。

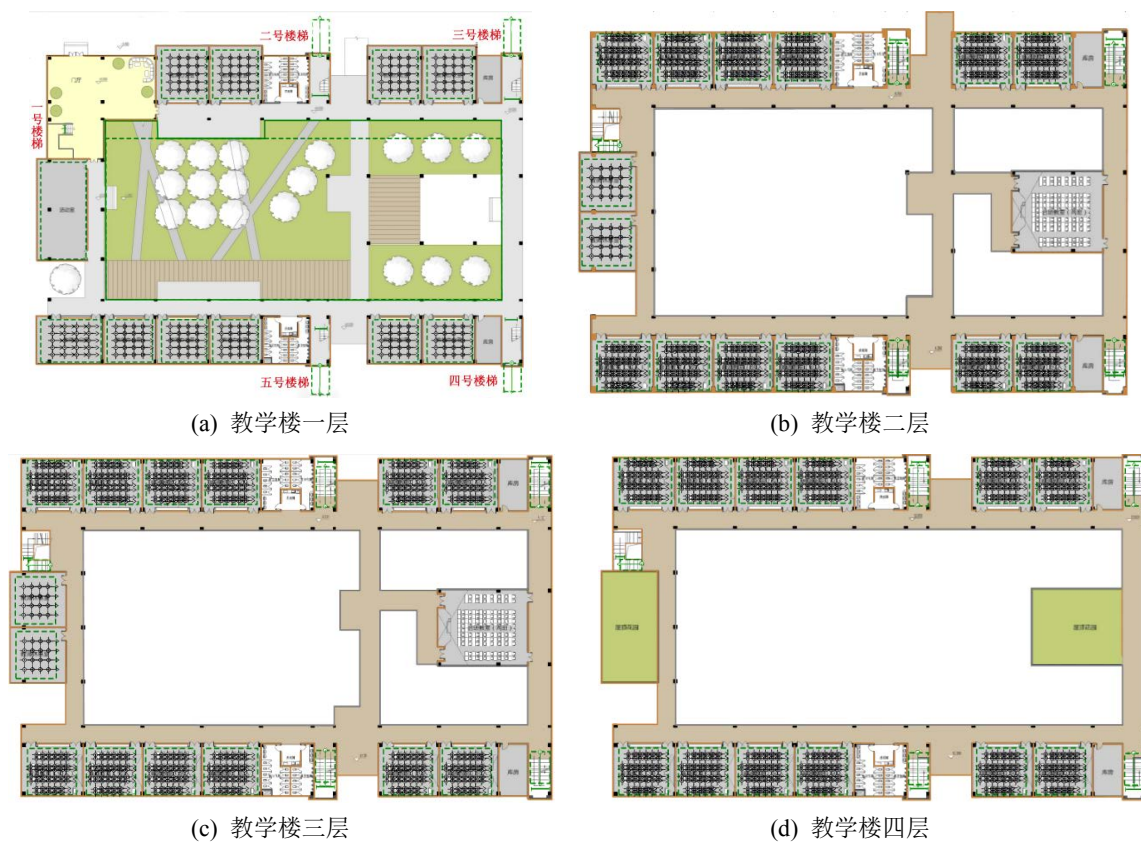


Figure 1. Plan sketch of teaching building  
图 1. 教学楼平面示意图

Table 1. Evacuation parameters of primary school students  
表 1. 小学生疏散参数

性别	年级	肩宽(m)	疏散速度(m/s)
男	1~2 年级	0.326	0.94~1.2
	3~4 年级	0.326	1.06~1.34
	5~6 年级	0.362	1.18~1.47
女	1~2 年级	0.319	0.87~1.17
	3~4 年级	0.319	1.01~1.31
	5~6 年级	0.358	1.16~1.45

#### 4.2. 修正后的社会力模型验证

小学生群体的行人速度区间为(0.94, 1.45)，带入(2)式得出不同恐慌因子影响条件下的速度函数为

$$v_s(t) \in (0.94 - g * v_\Delta(t), 1.45 + 2 * g * v_\Delta(t)) \quad (4)$$

在正常情况下教学楼小学生群体疏散模型的基础上通过智能体中的“变量”功能以及控件中的“单选按钮”对人员添加恐慌因子，并通过代码将恐慌因子与疏散速度关联，其行动函数如图 2 所示。

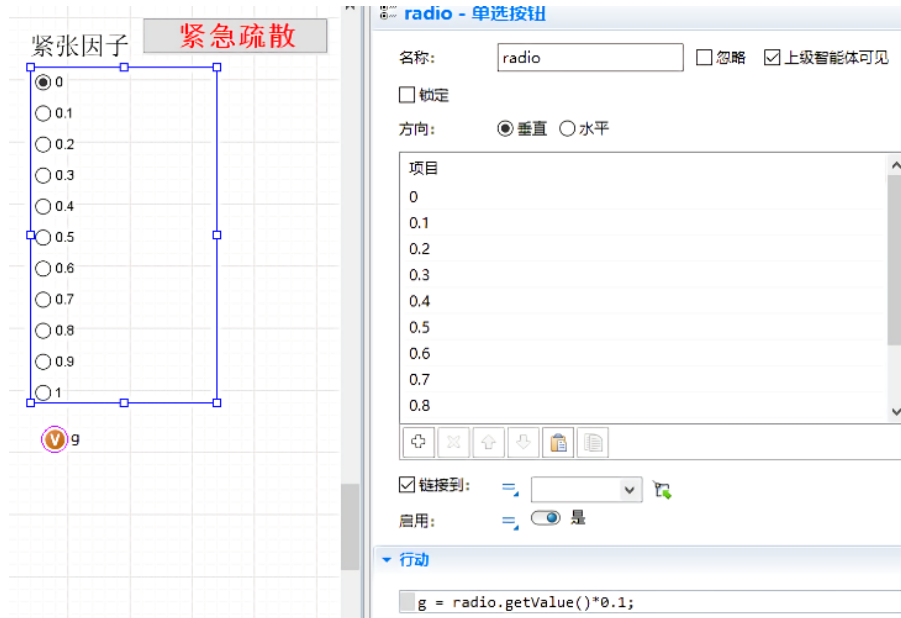


Figure 2. Partial action function of panic factor  
图 2. 恐慌因子的部分行动函数

当行人的心理恐慌程度处于  $g \leq 0.6$  时，小学生群体受恐慌情绪的影响，行为出现波动，疏散速度发生相应的变化，部分人员会考虑优于他人先走，但由于教学楼内疏散行人密度大，故此时只考虑紧张程度对人员疏散速度的影响。

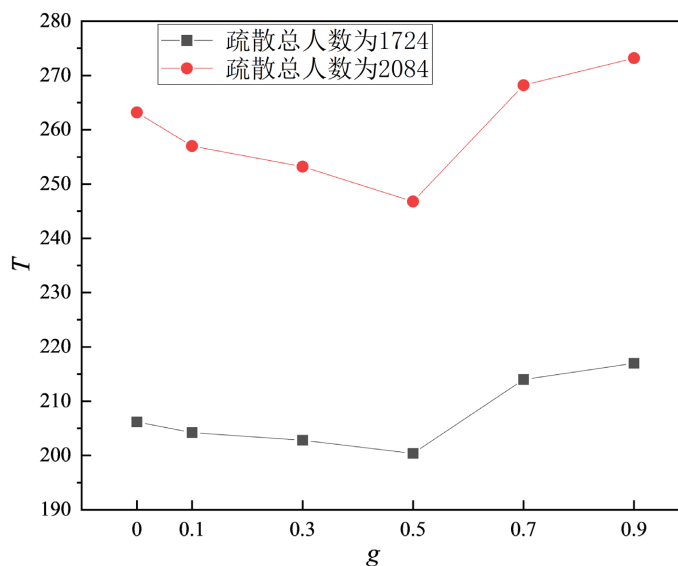
当行人的心理恐慌程度处于  $g > 0.6$  时，恐慌程度超过心理所能承受的临界值时，人员的行为就会表现出盲从，“不合理”。部分学生在恐慌情绪的驱使下不再遵循固定的疏散策略，选择就近楼梯进行疏散。

### 4.3. 仿真结果分析

#### 4.3.1. 不同疏散人数下恐慌因子对疏散时间的影响

为研究紧急状况下教学楼内小学生群体疏散过程中恐慌心理对疏散效率的影响，本文分别对普通教室人数均为 40 人和 50 人的两种不同行人密度的场景进行仿真模拟。在数值模拟过程中，为了增加结果的稳定性，对每组仿真重复均重复 10 次，并取其平均值作为依据。

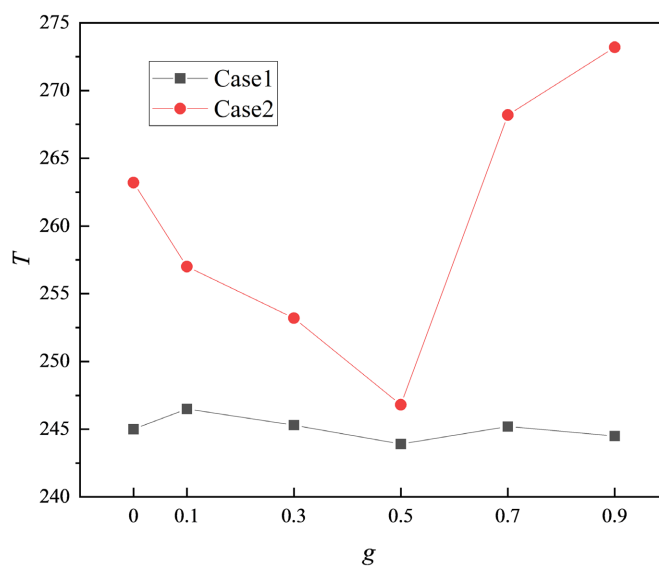
图 3 给出了当恐慌因子  $g = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  时，普通教室人数均为 40 及 50 人，整个教学楼疏散总人数为 1724 及 2084 人时，疏散时间随恐慌因子的变化关系图。可以看出，在两种不同疏散人数，不同行人流密度下，恐慌心理对疏散时间的影响并不都是消极的，当恐慌因子  $g \leq 0.6$  时，即人员心理恐慌程度在可承受范围内时，适当的恐慌有利于刺激大脑，提高整体的疏散效率。但当恐慌因子  $g > 0.6$  时，恐慌程度超出心里最大承受能力，尽管人员的疏散速度增加，但由于疏散空间受限，人员行走行为出现“不合理”性，整体疏散时间反而增加，疏散效率降低，出现“快即是慢”现象。通过对比两种不同疏散人数下恐慌因子对疏散时间的影响，发现当疏散人流密度处于高密度，疏散人数越多，恐慌因子对疏散时间的影响越大。



**Figure 3.** The change of evacuation time with panic factor under two kinds of total evacuation numbers  
**图 3.** 两种疏散总人数下疏散时间随恐慌因子的变化

#### 4.3.2. 改进疏散策略下恐慌因子对疏散时间的影响

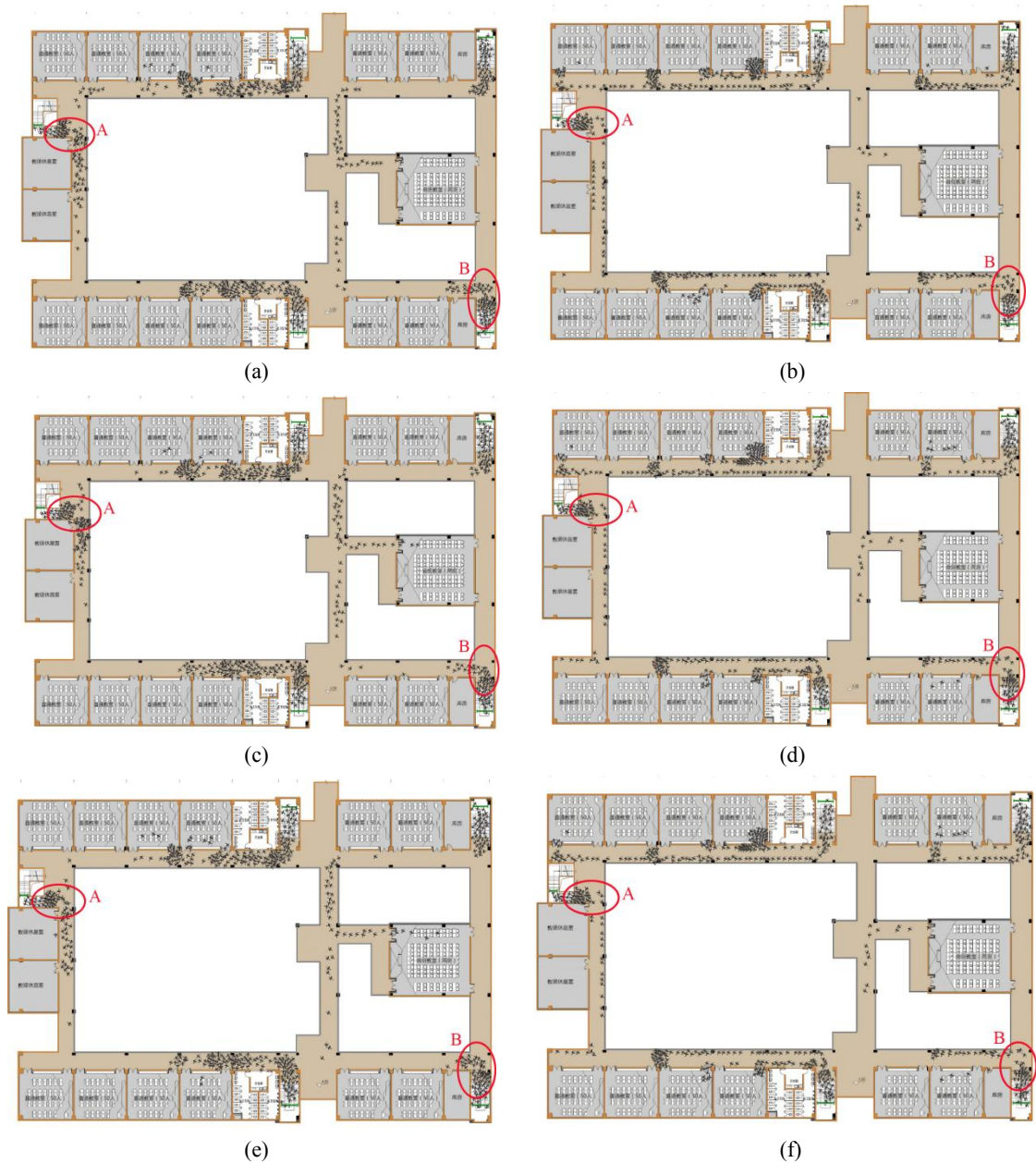
在不同疏散人数下恐慌因子对疏散时间的影响的模拟结果中发现，当疏散人员数量较多时，恐慌因子的大小对紧急疏散的效率影响较大，在教学楼瓶颈处容易出现拥堵现象。为了有效降低紧急疏散过程中教学楼瓶颈处的人群密度，减小因恐慌情绪导致发生踩踏事故的可能性，提出紧急情况下增加教师引导，帮助学生有序疏散的疏散策略进而降低教学楼瓶颈处的人员密度，在保证学生疏散有序进行的同时降低教学楼内踩踏事故发生的可能性，保障学生群体的安全。



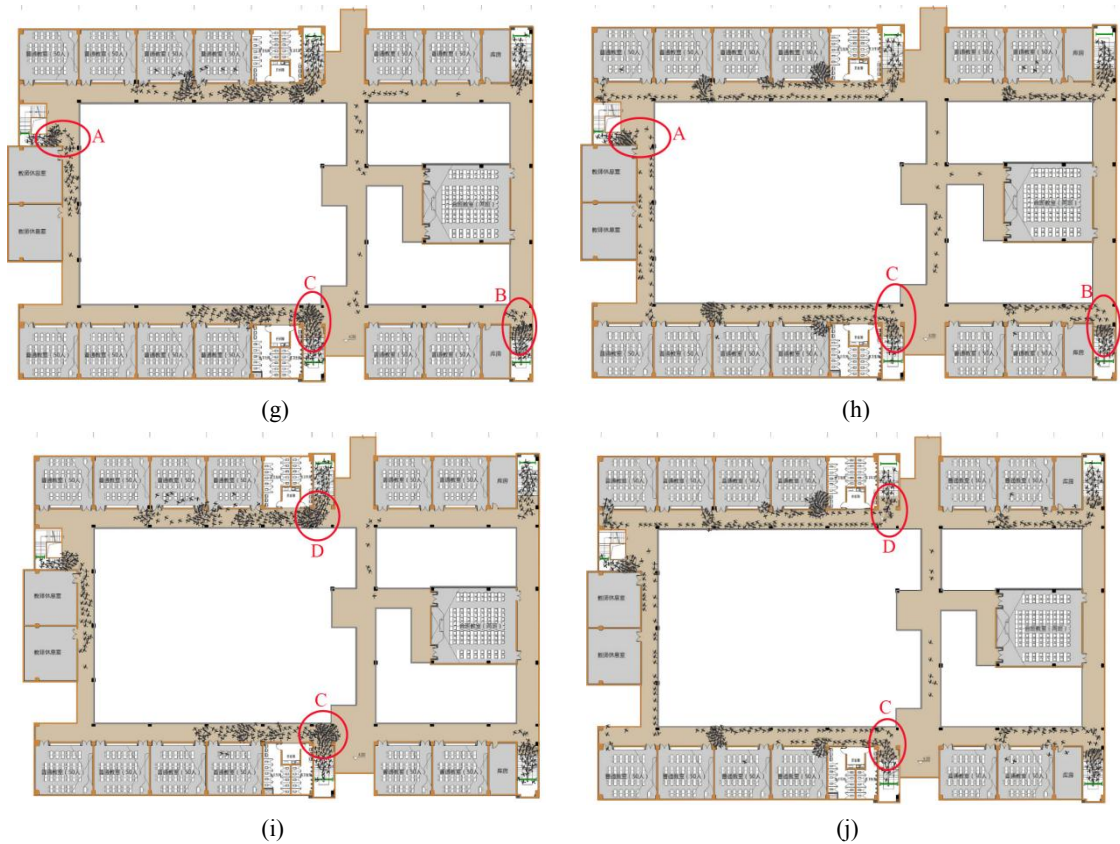
**Figure 4.** The change of evacuation time  $T$  with panic factor  $g$  when the total number of evacuees is 2084  
**图 4.** 疏散总人数为 2084 时疏散时间  $T$  随恐慌因子  $g$  的变化

为便于分析不同疏散策略下恐慌程度对疏散过程的影响，将教学楼内普通教室人数均设为 50 人，整个教学楼疏散总人数为 2084 人。两种疏散策略均是在小学生群体正常疏散方案的基础上，引入恐慌因子，

其中, Case1 没有教师引导, Case2 增加疏散过程中的教师引导。图 4 分别给出了 Case1, Case2 两种疏散策略下恐慌因子取  $g = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  时疏散时间随恐慌因子的变化。可以看出, 加入教师引导后整体疏散时间明显缩短, 尤其是当恐慌因子  $g = 0.9$ , 学生心理恐慌程度达到最大时, 两种疏散方案下整体疏散时间的对比最明显, 且加入教师引导后, 整体疏散时间受人员心理恐慌程度的影响变小。图 5 给出了 Case1、Case2 两种疏散策略下  $T = 50$  s 时学生群体处于不同恐慌程度的教学楼二层的行人疏散仿真图。可以看出, 在 Case1 疏散策略下, 当  $g > 0.6$  时, 开始疏散 50 s 后疏散楼梯口 C、D 区域的人群密度增大, 出现瓶颈处拥堵现象, 且随着恐慌程度的增加, 拥堵现象愈发明显。在 Case2 疏散策略下, 并没有因为学生紧急疏散过程中心理恐慌程度的增加而出现楼梯口瓶颈处拥堵现象, 疏散过程在教师引导下有序进行。因而, 为保障学生群体的生命安全, 保证整体疏散效率, 在紧急疏散时要及时安排教师进行疏散引导, 帮助学生有序进行疏散。







Case1: (a)  $g = 0.1$ ; (c)  $g = 0.3$ ; (e)  $g = 0.5$ ; (g)  $g = 0.7$ ; (i)  $g = 0.9$  Case2: (b)  $g = 0.1$ ; (d)  $g = 0.3$ ; (f)  $g = 0.5$ ; (h)  $g = 0.7$ ; (j)  $g = 0.9$ .

Figure 5.  $T = 50s$ , simulation diagram of pedestrian evacuation on the second floor of teaching building

图 5.  $T = 50s$ , 教学楼二层的行人疏散仿真图

### 4.3.3. 不同年级的学生处于不同恐慌因子影响条件下对疏散时间的影响

在上述模拟中，我们所做的假设均为所有学生的恐慌程度是一样的，众所周知，在现实生活中，当面对紧急事件时，由于小学生群体自身对事件的理解能力的不同，往往处于不同的恐慌程度。接下来我们研究不同年级的学生处于不同恐慌因子影响条件下对疏散时间的影响，表 2 列出了 6 种不同年级的学生处于不同恐慌因子影响条件下的仿真场景，我们称一种仿真场景为一个 Scenario。图 6 给出了疏散总人数为 2084 及 1724 时，不同 Scenario 与疏散时间  $T$  的关系图。由图 6 可知：

1) 疏散总人数为 1724 时，曲线的变化程度较大，人员整体疏散时间受恐慌因子的影响较大。可见，当疏散人群密度处于高密度时，疏散人数越少，人员心理恐慌对疏散效率的影响越大。

2) 两种情况下的曲线变化趋势基本一致，学生心理恐慌程度处于 Scenario 5 时，疏散所需时间最长，疏散效率最差。当 1~2 年级学生心理恐慌因子  $g$  取 0.9 时，整体疏散效率最低，当 3~4 年级学生心理恐慌因子  $g$  取 0.9 时，整体疏散效率最高。

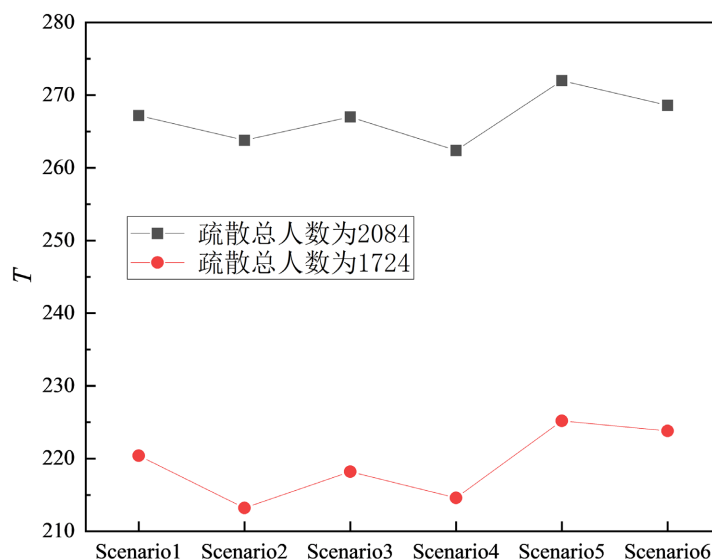
Table 2. Six simulation scenarios of different grades under different panic factors

表 2. 6 种不同年级处于不同恐慌因子影响条件下的仿真场景

仿真场景	1~2 年级	3~4 年级	5~6 年级
Scenario1	0.3	0.6	0.9

Continued

Scenario2	0.3	0.9	0.6
Scenario3	0.6	0.3	0.9
Scenario4	0.6	0.9	0.3
Scenario5	0.9	0.3	0.6
Scenario6	0.9	0.6	0.3



**Figure 6.** The relationship diagram between different scenarios and evacuation time  $T$  when the total number of evacuation is 2084 and 1724

**图 6.** 疏散总人数为 2084 及 1724 时, 不同 Scenario 与疏散时间  $T$  的关系图

## 5. 结论

本文基于正常情况下的教学楼内小学生疏散仿真模型, 考虑紧急疏散情况下小学生群体心理恐慌程度对行为特征的影响, 引入恐慌因子  $g$ , 建立了紧急情况下的教学楼内小学生疏散仿真模型。探讨不同疏散人数下心理恐慌程度以及不同疏散策略下心理恐慌程度对疏散时间的影响, 得到以下结论:

1) 在紧急疏散情况下, 疏散过程中小学生心理的恐慌程度并不一定会降低整体疏散效率, 当恐慌程度在可控范围内时, 适当的恐慌可以提高整体疏散效率, 但当恐慌程度超出心里最大承受能力, 人员的疏散速度增加, 出现“快即是慢”现象, 整体疏散时间增加, 疏散效率降低。

2) 在紧急疏散情况下, 及时增加教师引导可以在一定程度上避免因学生的恐慌情绪造成的“不合理”行为, 保障疏散有序进行, 减少拥堵挤压现象的发生。

3) 在紧急疏散情况下, 当疏散教学楼内不同年级的小学生心理恐慌程度处于不同值时, 3~4 年级学生心理处于极度恐慌状态时, 整体疏散效率最高; 1~2 年级学生心理处于极度恐慌状态时, 整体疏散效率最低。

## 基金项目

本论文获山西省自然科学基金(201901D111255)、面向低行动力人群多模式交通组织与路径规划优化研究, 山西省基础研究计划(20210302124455)资助。

## 参考文献

- [1] 李建霖, 傅丽碧, 施永乾. 高层住宅安全疏散设计与优化[J]. 福州大学学报, 2021, 49(1): 115-120.
- [2] 狄月. 考虑恐慌影响的地铁站台应急疏散模型研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [3] 王文玉, 王希良, 李为民. 行人紧急疏散仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 2130-2136.
- [4] Shiwakoti, N., Tay, R. and Stasinopoulos, P. (2017) Likely Behaviours of Passengers under Emergency Evacuation in Train Station. *Safety Science*, **91**, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.017>
- [5] Delcea, C. and Cotfas, L.-A. (2019) Increasing Awareness in Classroom Evacuation Situations Using Agent-Based Modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **523**, 1400-1418. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.137>
- [6] Fu, L., Luo, J. and Deng, M. (2012) Simulation of Evacuation Processes in a Large Classroom Using an Improved Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics. *Procedia Engineering*, **31**, 1066-1071. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1143>
- [7] Delcea, C., Cotfas, L.-A. and Craciun, L. (2020) An Agent-Based Modeling Approach to Collaborative Classrooms Evacuation Process. *Safety Science*, **121**, 414-429. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.026>
- [8] Tang, T.-Q., Chen, L., Guo, R.-Y. and Shang, H.-Y. (2015) An Evacuation Model Accounting for Elementary Students' Individual Properties. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **440**, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.08.002>
- [9] Chen, L., Tang, T.-Q., Huang, H.-J. and Song, Z.Q. (2018) Elementary Students' Evacuation Route Choice in a Classroom: A Questionnaire-Based Method. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **492**, 1066-1074. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.036>
- [10] Chen, L., Guo, R.-Y. and Ta, N. (2013) Simulation and Experimental Results of Evacuation of Pedestrian Flow in a Classroom with Two Exits. *Acta Physica Sinica*, **62**, Article No. 050516. <https://doi.org/10.7498/aps.62.050506>
- [11] Guo, R.-Y., Huang, H.-J. and Wong, S.C. (2012) Route Choice in Pedestrian Evacuation under Conditions of Good and Zero Visibility: Experimental and Simulation results. *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**, 669-686. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.01.002>
- [12] 谢天光, 路世昌, 黄鑫. 超高层建筑疏散楼梯对疏散效率的影响[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 786-788.
- [13] 孙迪, 周进, 高学英, 矫婷, 赵丽鲜. 地铁站内行人疏散路径选择仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1819-1826.
- [14] Fang, Z.-M., Song, W.-G. and Li, Z.-J. (2012) Experimental Study on Evacuation Process in a Stairwell of a High-Rise Building. *Building and Environment*, **47**, 316-321. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.009>
- [15] Rostami, R. and Alaghmandan, M. (2021) Performance-Based Design in Emergency Evacuation: From Maneuver to Simulation in School Design. *Journal of Building Engineering*, **33**, Article No. 101598. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101598>
- [16] Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. (2000) Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, **407**, 487-490. <https://doi.org/10.1038/35035023>
- [17] 中国标准化与信息分类编码研究所. GB/T 10000-1988. 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 国家技术监督局, 1988.
- [18] 张欣, 冉令华, 刘太杰, 冯士雍, 郑嵘, 肖慧, 等. GB/T 26158-2010. 中国未成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.