

9-15-2024

## Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings

Qiankun Zhu

*Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*

Jiwu Li

*Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*

Yongfeng Du

*Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings

## Abstract

**Abstract:** In order to improve the emergency evacuation capability of an old school building under fire scenarios, a fire evacuation model of an old school building is developed. The PyroSim software is used to build a fire dispersion model to simulate and analyse the changes of smoke visibility, temperature and CO at the safety exit of the fire floor in the school building under the condition of mechanical smoke exhaust, automatic sprinkler and whether the windows of the fire room are open or not. The simulation of the exit status and evacuation of people has been carried out in conjunction with Pathfinder software to obtain the required safe evacuation time when all the people are evacuated. The case study shows that the evacuation efficiency of the old school building is reduced by 12.1% without sprinklers, and the evacuation of people is in a dangerous state without mechanical smoke extraction, having more exits has less impact on improving the efficiency of evacuating people.

## Keywords

old school building, PyroSim fire simulation, Pathfinder evacuation simulation, evacuation efficiency, safety analysis

## Recommended Citation

Zhu Qiankun, Li Jiwu, Du Yongfeng. Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2043-2053.

# 老旧教学楼火灾场景人员疏散仿真研究

朱前坤, 李继武, 杜永峰

(兰州理工大学 防灾减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为提高老旧教学楼火灾场景下人员应急疏散能力, 建立一个老旧教学楼火灾人员疏散模型。运用 PyroSim 软件建立火灾扩散模型, 模拟分析该教学楼在机械排烟、自动喷淋和着火房间窗户是否开启的情况下, 发生火灾时着火楼层安全出口处的烟气能见度、温度和 CO 的变化规律; 结合 Pathfinder 软件对出口状态、人员疏散进行模拟仿真, 得到人员全部疏散完成时所需安全疏散时间。实验结果表明: 老旧教学楼无喷淋时人员疏散效率降低 12.1%, 无机械排烟时人员疏散处于危险状态, 多设出口对提升人员疏散效率影响较小。

**关键词:** 老旧教学楼; PyroSim 火灾模拟; Pathfinder 疏散模拟; 疏散效率; 安全性分析

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)09-2043-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0546

**引用格式:** 朱前坤, 李继武, 杜永峰. 老旧教学楼火灾场景人员疏散仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2043-2053.

**Reference format:** Zhu Qiankun, Li Jiwu, Du Yongfeng. Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2043-2053.

## Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings

Zhu Qiankun, Li Jiwu, Du Yongfeng

(Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to improve the emergency evacuation capability of an old school building under fire scenarios, a fire evacuation model of an old school building is developed. The PyroSim software is used to build a fire dispersion model to simulate and analyse the changes of smoke visibility, temperature and CO at the safety exit of the fire floor in the school building under the condition of mechanical smoke exhaust, automatic sprinkler and whether the windows of the fire room are open or not. The simulation of the exit status and evacuation of people has been carried out in conjunction with Pathfinder software to obtain the required safe evacuation time when all the people are evacuated. The case study shows that the evacuation efficiency of the old school building is reduced by 12.1% without sprinklers, and the evacuation of people is in a dangerous state without mechanical smoke extraction, having more exits has less impact on improving the efficiency of evacuating people.

**Keywords:** old school building; PyroSim fire simulation; Pathfinder evacuation simulation; evacuation efficiency; safety analysis

收稿日期: 2023-05-10 修回日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(52168041); 甘肃省重点研发计划(22YF11GA301)

第一作者: 朱前坤(1981-), 男, 教授, 博士, 研究方向为计算机视觉识别和结构人致振动舒适度。

## 0 引言

随着高校教学楼的使用年限逐渐增长,建筑结构的老化和失效问题越来越突出。在火灾事故发生时,老旧建筑的火灾安全性能往往无法满足现代消防安全标准。因此,研究老旧建筑的火灾安全性能,提出合理的防灾措施,成为了当前火灾安全领域的重要研究方向。

高校教学楼人员密度大,在突发情况下人员疏散困难,存在疏散通道堵塞、人员踩踏等问题,将人员快速安全地疏散到安全区具有重大的研究意义<sup>[1]</sup>。国内外学者对公共场所的人员疏散进行了大量深入的研究。文献[2]研究了不同通风量下火灾烟气中CO和CO<sub>2</sub>的变化规律;文献[3]验证了固体可燃物热解动力学模型中CO<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>浓度随时间的变化与实验基本一致;文献[4]发现开启机械排烟可有效控制烟气蔓延,大幅降低烟气中有毒有害气体质量分数;文献[5]发现相比顶棚中心排烟,侧向排烟效果更好。但是以上研究都很少考虑机械排烟与自动喷淋结合对有毒有害气体扩散影响。文献[6]发现“障碍物”可以稳定人群流动模式,使其疏散更加流畅;文献[7]等研究了在火势蔓延的影响下行人的动态疏散行为;文献[8]采用数值分析方法对环境能源设施中的电子设备室内部的火灾和疏散进行了评估;文献[9]研究空间探索模式对人们在建筑火灾紧急情况下寻路表现的影响;文献[10]提出了第一个火灾疏散环境,用于训练疏散规划的强化学习代理;文献[11]研究了暴露在火灾中的高层建筑的居住者疏散情景;文献[12]基于RVO(reciprocal velocity obstacles)改进的瓶颈处双向行人流仿真模型能够较真实地模拟地铁站瓶颈处双向行人流的自组织现象;文献[13]开发了一种针对火灾中快速环境变化的路径规划的自适应方法;文献[14]在社会力模型中引入减速避让机制能够更真实地模拟常态行人流;文献[15]将BIM和元胞自动机模型结合建立人员动态疏散系统,使人员疏散时能高效避开障碍物。这些研

究均未考虑人员减速避让身体侧身行走时身体半径变化对周围拥挤人群疏散的影响。文献[16]基于环境、心理、生理因素建立了教学楼疏散的人员视觉感知模型。文献[17]改进了果蝇算法对复杂火灾的人群多目标路径规划进行验证。文献[18]基于改进的蚁群算法对火灾扩散中人群疏散路径进行研究;文献[19]研究了高校学生宿舍楼在发生火灾时安全出口处烟气能见度、顶棚温度和烟气层高度的变化规律。这些研究大多为人员随机分布,未考虑房间属性不同造成的分布密度差异对人员疏散的影响。

综上所述,本文以某高校老旧教学楼为研究对象,运用PyroSim软件建立火灾蔓延模型,对6种危险场景下教学楼不同火灾工况进行研究,分析着火楼层的安全出口处烟气能见度、距地面2 m处温度和CO浓度的变化规律,确定人员疏散可用安全疏散时间;运用Pathfinder对人群疏散进行仿真模拟,计算人员全部疏散完成时所需的安全疏散时间。综合利用人员疏散可用安全疏散时间和人员疏散所需安全疏散时间对人员疏散行为安全性进行评估分析

## 1 数值模型建立

### 1.1 某老旧教学楼概况

某高校老旧教学楼共有5层,1楼有12间教室,其中,4间大教室,8间小教室,2~5楼空间布局相同,各层楼有14间教室,其中4间大教室,10间小教室,整栋楼共有68间教室,每间大教室面积是105.98 m<sup>2</sup>,每间小教室面积是55.55 m<sup>2</sup>,每层楼楼高为3.6 m,总建筑面积为6 292.6 m<sup>2</sup>;每间大教室最多可容纳学生72人,每间小教室最多可容纳学生42人。该教学楼由于修建时间较早,消防设施配备不齐全,消防设施仅有一套老旧的机械排烟系统,无自动喷淋和火灾报警装置。某高校教学楼平面图见图1~2。

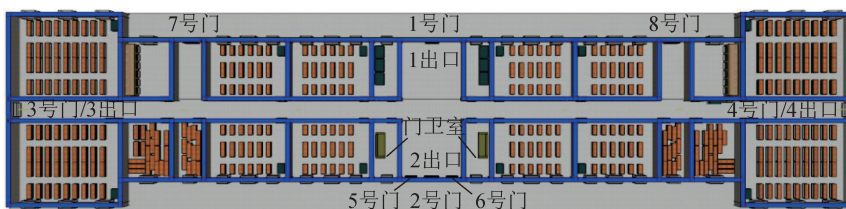


图1 某高校教学楼1层平面图

Fig. 1 Floor plan of the first floor of university academic building

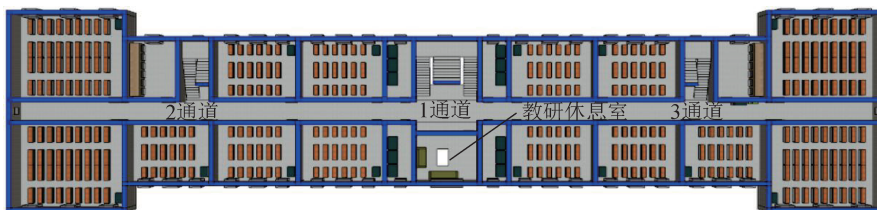


图2 某高校教学楼3层平面图

Fig. 2 Floor plan of the third floor of university academic building

### 1.2 火灾场景设置

教学楼东西两侧各有1个楼梯间, 中庭有2个门卫值班室以及2个设备间, 可燃物多, 发生火灾的概率大, 因此在一楼楼梯间和值班室各设置一处火源; 2~5层平面布局一致, 每层的疏散通道相同, 考虑到中部楼梯间是疏散的主要通道, 烟气通过楼梯间向更高楼层扩散, 火灾发生后产生大量烟气对疏散影响最大, 将火源设置在3层中部教研休息室, 且休息室内沙发、文件、窗帘等可燃物多, 因此, 将火源设置在休息室的沙发上; 休息室内空调、沙发和其他物品中的物质都由聚氨酯构成, 故燃烧材料设为聚氨酯。

本次仿真设置6种火灾场景, 在1F中部值班室、1F东侧楼梯间、3F中部教研休息室分别设置一处火源。利用火灾模拟软件PyroSim进行建模时, 要重点考虑网格的独立性、合理性和模型的

边界条件, 单位面积内网格数目愈多, 计算机的计算时间愈长, 结果愈精确; 反之, 单位面积内网格数目愈少, 计算时间愈短, 计算结果误差愈大。建立PyroSim模型时网格数应该满足 $2^k 3^m 5^n$ , 其中,  $k$ 、 $m$ 、 $n$ 为整数。考虑到计算机计算精度和速度, 模型的网格尺寸设定为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ , 网格个数为319 680个。老旧教学楼火灾热释放速率设为6 MW, 火灾类型为快速火, 火灾增长类型设定为 $t^2$ 增长型, 火灾增长系数 $\alpha$ 为0.048, 火灾模拟时间设置为600 s。

6种火灾场景分别在着火楼层安全出口距地面1.8 m处设置监测面, 监测烟气能见度变化, 并在距离地面2 m处设置监测面, 监测距地面2 m处温度、CO浓度变化。具体火灾场景布置见表1。PyroSim与Pathfinder联合仿真执行程序流程图见图3。

表1 教学楼火灾场景布置  
Table 1 Fire scene setting of a teaching building

火灾场景	火源位置	单位面积热释放/ (kW/m <sup>2</sup> )	着火房间窗 户开启状态	机械排烟 开启状态	自动喷淋灭火 系统开启状态
A1	1F中部门卫值班室	4 000	否	否	否
A2			否	否	是
B1	1F东侧楼梯间拐角	6 000	否	否	否
B2			否	是	否
C1	3F中部教研休息室	4 000	否	否	否
C2			是	否	否

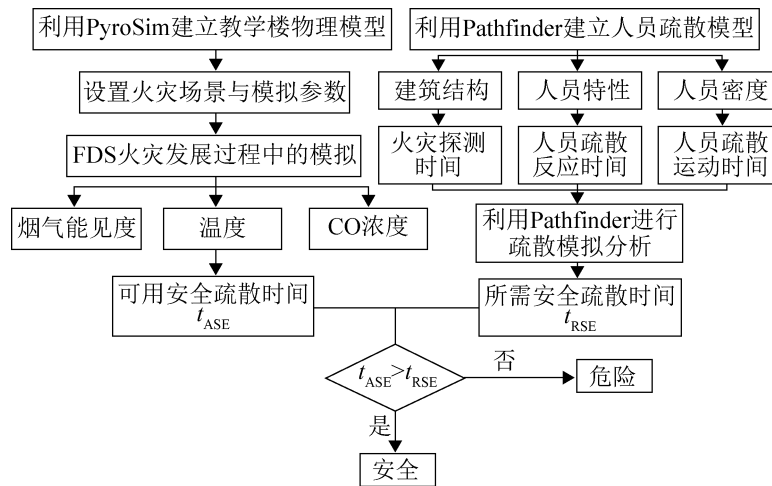


图3 PyroSim与Pathfinder联合仿真执行程序流程图

Fig. 3 Flow chart of PyroSim and Pathfinder co-simulation execution program

## 2 基于PyroSim的火灾仿真分析

利用上述建立的PyroSim仿真模型，模拟老旧教学楼不同火灾场景下的火灾扩散过程，并监测着火楼层安全出口处距地面1.8 m处烟气能见度和距地面2 m处温度、CO浓度随时间的变化过程，为进一步分析人员疏散行为安全性提供数据参考。

### 2.1 着火楼层烟气能见度分析

根据《建筑防烟排烟系统技术标准》GB51251-2017<sup>[20]</sup>和人员对该教学楼的熟悉程度，本次模拟设定该教学楼着火层安全出口处允许的最小烟气能见度为5 m。图4为不同火灾场景下该教学楼着火楼层安全出口或通道处烟气能见度随时间变化曲线图。

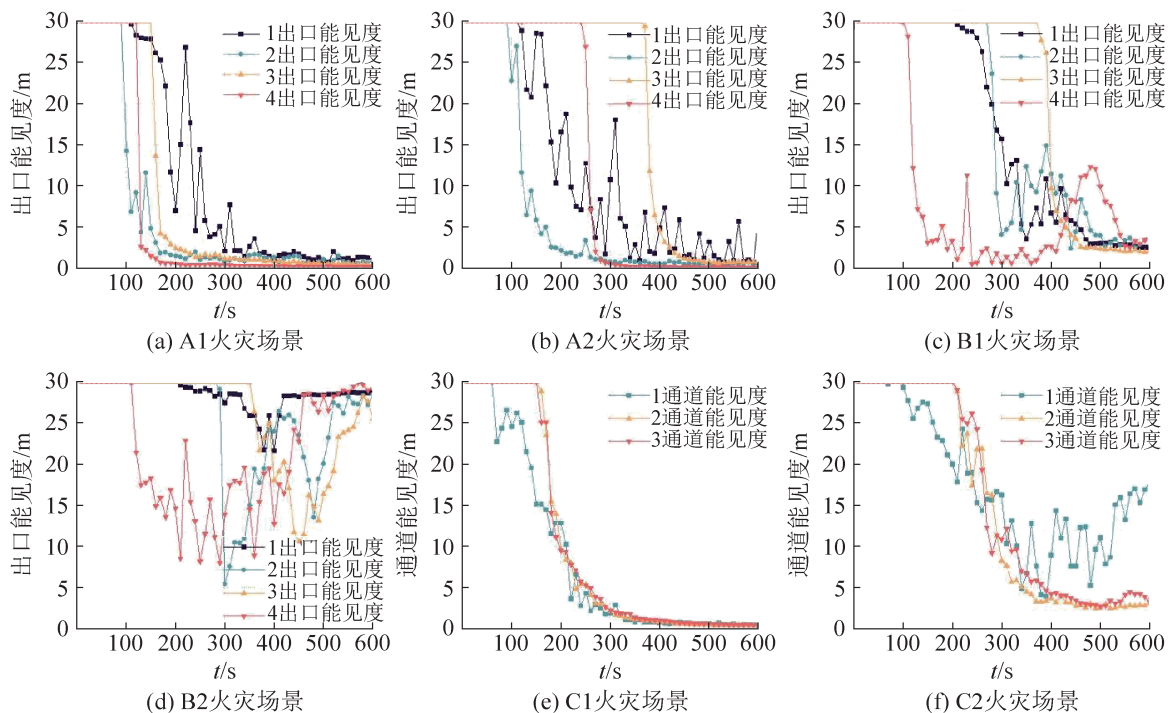


图4 不同火灾场景下某高校教学楼着火层安全出口能见度随时间变化曲线

Fig. 4 Visibility of fire layer safety exit of a university teaching building changes with time under different fire conditions

由图 4 可知, A1、A2、B1、C1 和 C2 火灾场景下该教学楼的着火楼层 4 个出口及 3 个通道处烟气能见度分别在火灾发生 320、400、410.2、260.2、390.4 s 时下降到 5 m, 此时人员的安全疏散达到危险状态, B2 场景下着火楼层的 4 个出口烟气能见度始终大于 5 m, 此时人员安全疏散不受影响。

根据模拟结果分析, 当火灾发生在教学楼中部值班室时, 喷淋系统开启和着火房间窗户打开时出口处烟气能见度下降速率明显减缓, 但喷淋对烟气能见度影响更大; 当火灾发生在教学楼东侧楼梯间时, 此时火源距离机械排烟位置较近, 机械排烟能有效排出烟气, 大幅减缓出口能见度降低的速率。图 5 为有无喷淋该教学楼烟气能见度随时间变化过程。

### 2.2 着火楼层距地面 2m 处温度分析

根据研究表明, 火灾产生的烟气中含有大量的热量, 当烟气温度达到 60°C 时, 人体可短间接接受, 过长时间会对人体造成损害<sup>[9]</sup>, 因此, 本文选择距离地面垂直高度 2 m 处的温度 60°C 作为判

断标准。图 6 为不同火灾场景下, 某高校教学楼着火楼层的不同出口或通道处距地面 2 m 处的温度随时间变化曲线图。

由图 6 可见, 位于西侧的 3 号出口及 2 号通道在各场景中的温度增长速率都低于其他场景, 原因是 3 号出口及 2 号通道在各种场景中都距离火源最远, 温度随烟气在扩散过程中热量损失较大。当火灾发生在中部休息室时, A1、A2 火灾场景下出口处温度有明显差异, 表明自动喷淋能有效降低烟气温度。B1、B2 火灾场景下出口处温度差异较小, 表明机械排烟开启后对出口温度影响较小。C2 场景下, 该教学楼着火楼层安全通道距地面 2 m 处温度从火灾开始到结束都未达到 60°C, 人员安全疏散不受影响。B1、B2、C1 等场景都有出口或通道温度超过 60°C 的现象, 但持续时间较短, 人员的安全疏散不受影响。A1 场景下 2 号出口温度在火灾发生 330.2 s 时达到 60°C, 4 号出口温度在火灾发生 290.1 s 时达到 60°C 并不断上升, 此时人员不能安全疏散。A2 场景下 2 号出口温度在火灾发生 320.1 s 时达到 60°C, 在 380 s 以后始终大于 60°C, 此时人员不能安全疏散。

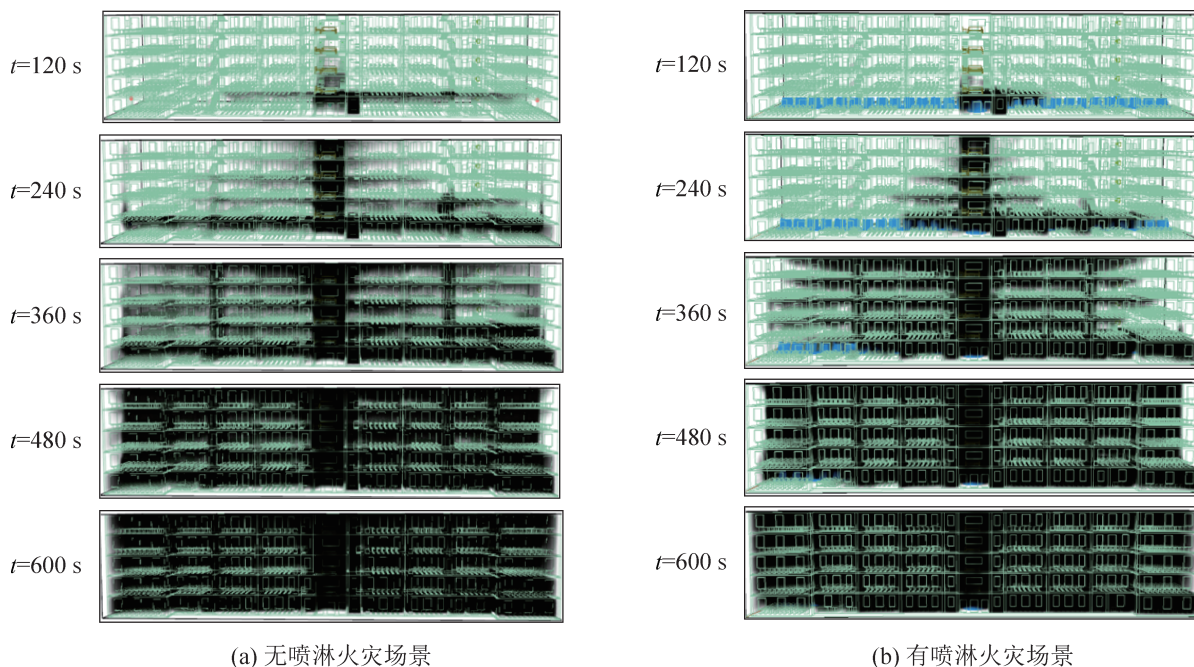


图 5 有无喷淋教学楼烟气能见度随时间变化图  
Fig. 5 Effect of smoke visibility over time in this school building with and without sprinklers

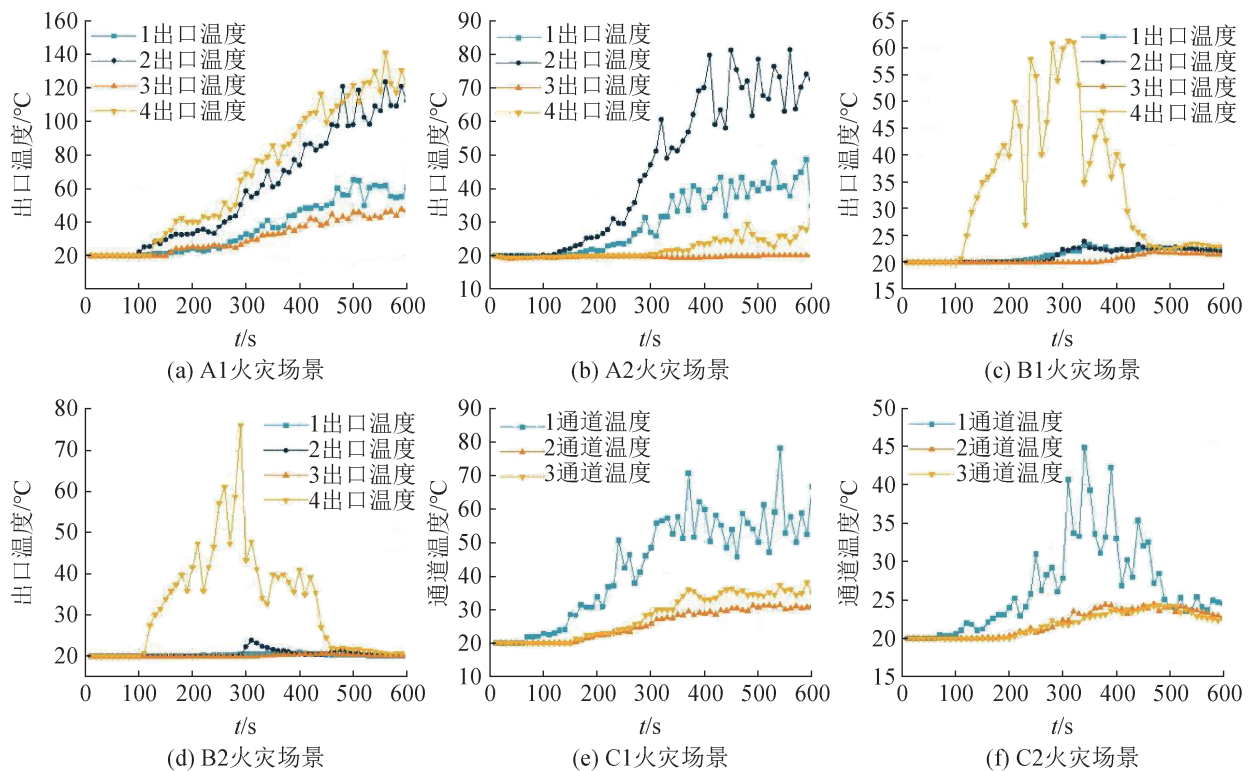


图6 不同火灾场景下某高校教学楼着火层安全出口温度随时间变化曲线

Fig. 6 Temperature change curve of safety outlet of fire layer of a teaching building under different fire conditions

### 2.3 着火楼层距地面2 m处CO浓度分析

根据NFPA(national fire protection association)对有毒有害气体致死人数的统计数据表明,在火灾发生后吸入有毒气体中毒致死的人数约占死亡总人数的一半以上,而烟气中存在的大量CO有毒气体是致死的主要原因。本文选择距离地面垂直高度2 m处的CO体积分数 $500 \times 10^{-6}$  mol作为判断标准<sup>[3]</sup>。图7为不同火灾场景下,该教学楼着火楼层的不同出口或通道处距地面2 m处的CO浓度随时间变化图。

由图7可知,A1、A2场景下CO浓度随时间变化曲线差异较小,表明自动喷淋对CO浓度影响较小。B1、B2场景下1、2、3号出口CO浓度远低于4号出口,因为火源距1、2、3号出口较远,因此CO大量在4号出口汇聚,同时机械排烟开启后1、2、3号出口CO浓度明显降低,但4号出口浓度升高,因为机械排烟开启后楼道CO向机械排烟出口汇集。C1、C2场景对比发现,

着火房间窗户开启时室内CO浓度最少,排出CO效果最好。B1、C2场景下,该教学楼着火楼层安全出口或通道距地2 m处CO浓度从火灾开始到结束都未达到 $500 \times 10^{-6}$  mol,人员的安全疏散不受影响。B2、C1场景皆有出口或通道CO浓度超过 $500 \times 10^{-6}$  mol的现象,但持续时间较短,人员的安全疏散不受影响。A1场景下2号出口CO浓度在火灾发生480.2 s时达到 $500 \times 10^{-6}$  mol,4号出口CO浓度在火灾发生340.2 s时达到 $500 \times 10^{-6}$  mol并不断上升,此时人员无法进行安全疏散;A2场景下4号出口CO浓度在火灾发生330.1 s时达到 $500 \times 10^{-6}$  mol并不断上升,此时人员无法进行安全疏散。

### 2.4 不同场景下人员可用安全疏散时间分析

各场景在烟气能见度下降到5 m、温度达到 $60^\circ\text{C}$ 、CO浓度达到 $500 \times 10^{-6}$  mol等危险值的时间见表2。



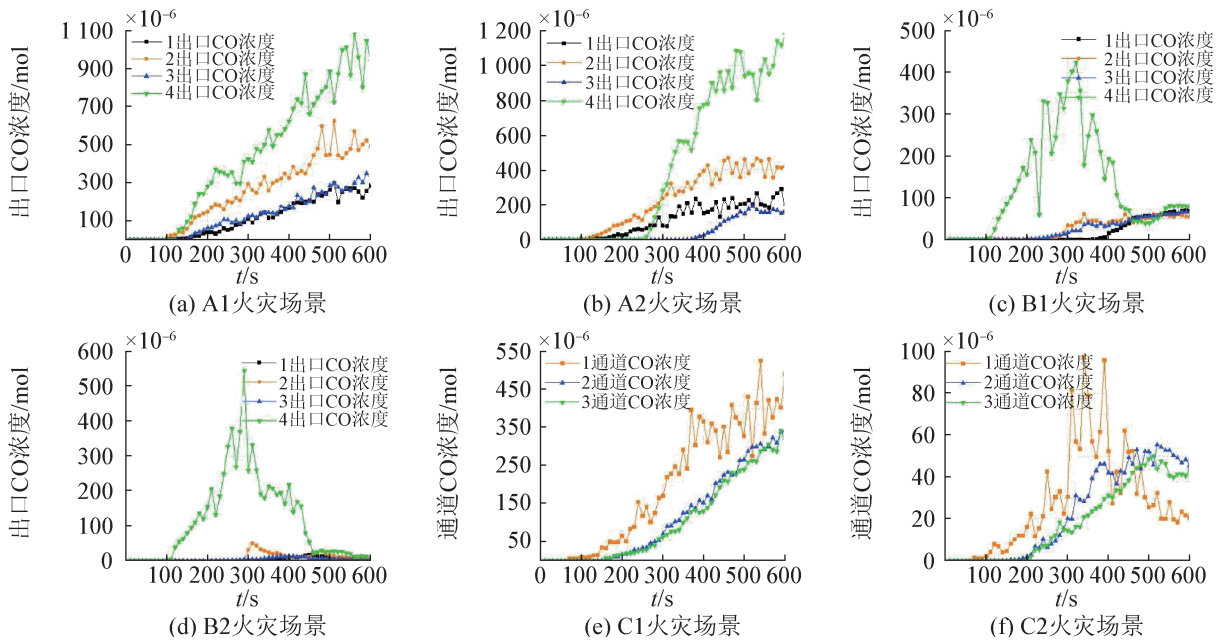


图 7 不同火灾场景下某高校教学楼着火层安全出口 CO 浓度随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curve of CO concentration at safety outlet of fire layer of a university teaching building under different fire conditions

表 2 各场景下不同指标到达危险值时间

Table 2 Time to danger value for each scenario of different indicators

指标	A1	A2	B1	B2	C1	C2
能见度	320.4	400	410.2	无	260.2	390.4
温度	290.1	380	无	无	530.5	无
CO 浓度	340.2	330.1	无	无	无	无

注：“无”表示整个过程未达到或较短时间达到危险值。

因此, 综合考虑, 在 A1、A2、B1、C1 和 C2 火灾场景下整栋楼的人员分别必须在火灾发生后的 290.1、330.1、410.2、260.2、390.4 s 内完成着火楼层疏散, B2 火灾场景下整栋楼的人员可以安全完成疏散。

### 3 基于 Pathfinder 的疏散人员安全性分析

教学楼一旦发生火灾, 人员所需安全疏散时间  $t_{RSE}$  和人员可用安全疏散时间  $t_{ASE}$  是决定能否疏散成功的关键参数。根据人员安全疏散的判定条件, 当  $t_{RSE} < t_{ASE}$  时, 表示教学楼的人员能够安全疏散; 反之表示人员不能安全疏散, 表明教学楼的安全疏散设计未达到规范要求。

### 3.1 人员疏散所需安全疏散时间

假设从火灾发生到人员发现火灾的时间为  $t_1$ , 人员反应的时间为  $t_2$ , 人员疏散到安全区的时间为  $t_3$ , 整个疏散过程所用时间为

$$t_{RSE} = t_1 + t_2 + t_3 \tag{1}$$

使用 Pathfinder 建立该教学楼仿真模型时, 软件默认人员疏散路径为最短疏散路径, 但是, 在实际疏散过程中, 因为人员心理、生理等因素影响, 人员疏散时所需安全疏散时间需要考虑安全放大系数, 根据《防火工程手册》的推荐, 安全系数设为 1.1。

由于该教学楼的结构相对简单, 人员对教学楼比较熟悉, 因此, 将人员察觉到火灾时的时间设定为 60 s, 即  $t_1 = 60$ 。另外, 考虑到教学楼内人员上课聚集的情况, 发生火灾后, 人员会快速做出反应, 因此, 设定人员反应的时间为 30 s, 即  $t_2 = 30$ 。图 8 为该教学楼人员疏散模型, 图 9 为人员疏散过程中 110 s 时人员位置分布图。

Pathfinder 中参数假定: 人员疏散速度符合

高斯分布；男生期望疏散速度 $\mu=1.19$  m/s， $\sigma=0.2$  m/s，平均肩宽45.58 cm；女生期望疏散速度 $\mu$ 为1.12 m/s， $\sigma=0.2$  m/s，平均肩宽38.8 cm，设置人员身体碰撞时身体直径缩减系数0.7，以侧身躲避碰撞。该教学楼设有8个门，日常只打开1~4号门，剩下的5~8号门只有紧急情况才会打开。考虑到火灾发生时最不利情况，所有学生都在教室上课，疏散人数为1 986人。

该教学楼日常只打开4个门，人员从教学楼的4个安全出口进行疏散，但火灾发生一段时间后剩下的门也会被打开，假设5~8号门均在火灾发生后120 s时打开，因此，考虑表3的几种场景，每种场景分别模拟10次取平均值。Pathfinder模拟人员疏散至安全区的时间为302.5 s，因此 $t_3=302.5$ ，计算出整栋楼全部人员完成疏散所需安全疏散时间为

$$t_{RSE} = 60 + 30 + 302.5 \times 1.1 = 422.2 \quad (2)$$

### 3.2 人员疏散安全性分析

通过分析表3中，各场景下人员疏散时间，对比D1、D4疏散场景发现当门全部打开时人员

疏散效率提升仅1.2%。同时，由图9可知该教学楼人员疏散110 s时人员大多集中在1、2、3号通道口，造成通道堵塞，降低了人员疏散效率。

表4为不同火灾场景下的人员疏散行为安全性结果。

由表4可知，在A1场景下290.1 s时该着火楼层的安全出口能见度都低于5 m，部分人员处于危险状态；A2场景下330.1 s时该着火楼层的安全出口距地面2 m处CO浓度大于 $500 \times 10^{-6}$  mol，部分人员处于危险状态；B1场景下410.2 s时该着火楼层的安全出口能见度都低于5 m，部分人员处于危险状态；B2场景下出口处能见度、温度、CO浓度都未达到危险值，人员可进行安全疏散；C1场景下260.2 s时该着火楼层的安全出口能见度都低于5 m，部分人员处于危险状态；C2场景下390.4 s时该着火楼层的安全出口能见度都低于5 m，部分人员处于危险状态。A1、A2火灾场景对比，无自动喷淋时人员疏散效率降低12.1%，B1、B2火灾场景对比，无机械排烟时人员疏散处于危险状态。

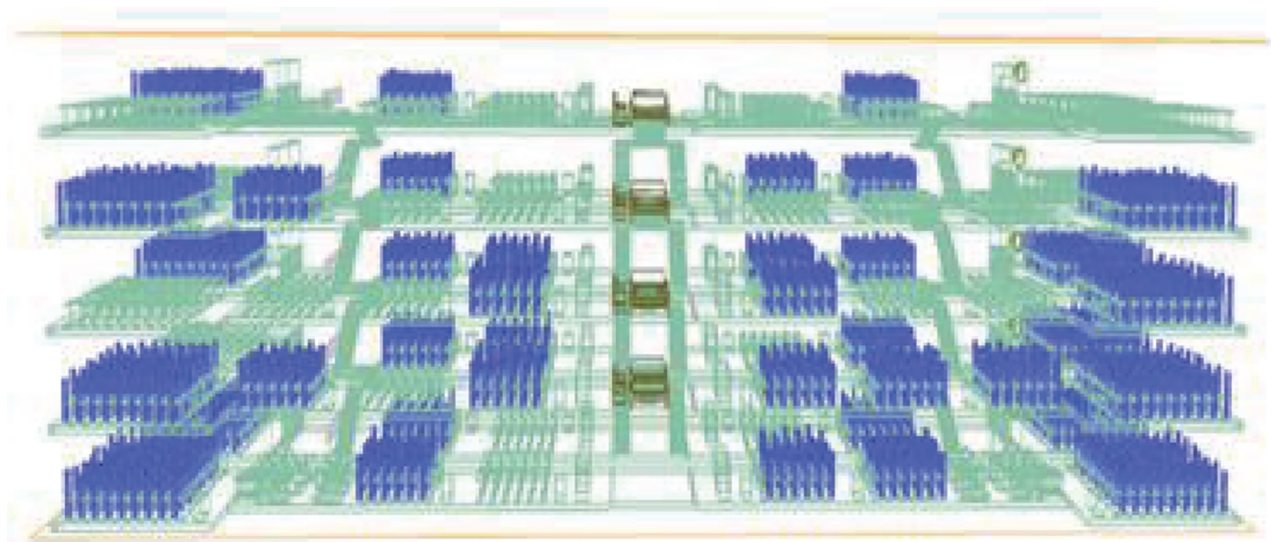


图8 某教学楼人员疏散模型  
Fig. 8 Evacuation model of a teaching building

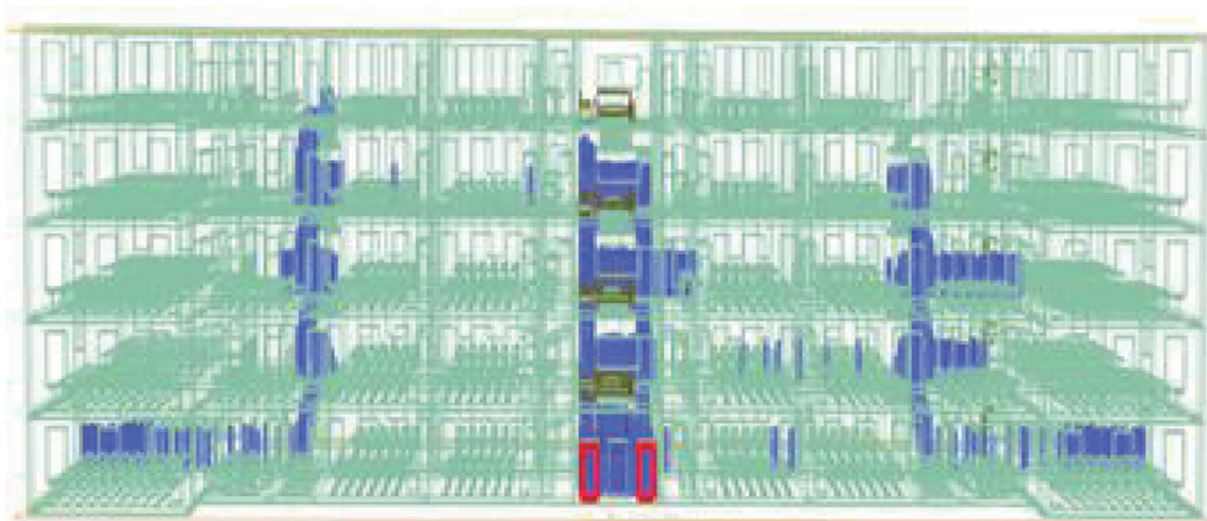


图 9 人员疏散过程中 110 s 时人员位置分布图  
Fig. 9 Location of people at 110 s during evacuation

表 3 各场景下人员疏散时间  
Table 3 Evacuation time of personnel under each working condition

场景	1 号门	2 号门	3 号门	4 号门	5 号门	6 号门	7 号门	8 号门	疏散时间/s
D1	开	开	开	开	关	关	关	关	307.8
D2	开	开	开	开	开	开	关	关	309.0
D3	开	开	开	开	关	关	开	开	298.8
D4	开	开	开	开	开	开	开	开	302.5

表 4 不同火灾场景下的人员疏散行为安全性结果  
Table 4 Safety results for people's evacuation behaviour in different fire scenarios

火灾场景	$t_s/s$	$t_{RSE}/s$	$t_{ASE}/s$	安全性
A1			290.1	危险
A2			330.1	危险
B1	359.8	422.2	410.2	危险
B2			/	安全
C1			260.2	危险
C2			390.4	危险

## 4 结论

本文根据最不利原则设置火灾场景, 通过 PyroSim 模拟分析老旧教学楼火灾发展, 结合 Pathfinder 仿真模拟人员疏散行为, 对典型老旧教学楼火灾疏散安全性分析进行了研究, 给出以下结论和建议, 为高校应急疏散演练、应急预案编制等提供理论依据和参考。

(1) 老旧教学楼机械排烟、喷淋系统和着火房间窗户是否开启对人员疏散安全性有较大影响。

无喷淋时人员疏散效率降低 12.1%, 无机械排烟时人员疏散处于危险状态。因此, 高校应定期检查老旧教学楼内的消防设施, 如火灾报警器、灭火器、机械排烟、喷淋系统等是否正常运行。

(2) 疏散过程中各层楼的通道口处堵塞是影响疏散效率的重要因素。建议高校应定期对学生开展消防知识教育及灾害应急演练, 以提高人们对疏散程序的熟悉度和反应速度, 有效缓解通道口堵塞情况以提高疏散效率。

## 参考文献:

[1] 王芳, 何胜学, 向乐佳. 突发事件下高层建筑楼梯疏散最佳策略分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 88-92.  
Wang Fang, He Shengxue, Xiang Lejia. Optimal Strategy for High-rise Building Evacuation with Stairs Under Emergency[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24 (7): 88-92.

[2] 张慧, 祁海鹰, 吕子安, 等. 通风量对火灾烟气中CO<sub>2</sub>和CO释放的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(8): 1087-1091.

- Zhang Hui, Qi Haiying, Lü Zian, et al. Influence of Ventilation on the Release of CO<sub>2</sub> and CO in Fire Smoke [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2004, 44(8): 1087-1091.
- [3] 袁书生, 张健. 多室内固体可燃物火灾烟气运动的大涡模拟[J]. *工程力学*, 2010, 27(11): 204-212.
- Yuan Shusheng, Zhang Jian. Large Eddy Simulation of the Fire Smoke Flow Induced by Solid Combustibles in a Multi-room[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(11): 204-212.
- [4] 褚燕燕, 张辉, 杨锐, 等. 基于火源和疏散信息的建筑火灾烟气控制策略模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(8): 1158-1162.
- Chu Yanyan, Zhang Hui, Yang Rui, et al. Simulation of Smoke Control Strategy for Building Fire Based on Fire Source and Evacuation Information[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2010, 50(8): 1158-1162.
- [5] 张红虎, 邓茜茜, 刘斌, 等. 剧场观众厅火灾烟气运动特性的仿真分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 72-81.
- Zhang Honghu, Deng Xirui, Liu Bin, et al. Simulation Analysis on Motion Characteristics of Fire Smoke in Audience Hall of Theaters[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 72-81.
- [6] Dirk Helbing, Lubos Buzna, Anders Johansson, et al. Self-organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 1-24.
- [7] Zheng Ying, Jia Bin, Li Xingang, et al. Evacuation Dynamics with Fire Spreading Based on Cellular Automaton[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2011, 390(18/19): 3147-3156.
- [8] Yong Han Jeon, Jong Yoon Kim. Fire and Evacuation Analysis in Environmental Energy Facilities[J]. *Fire Science and Engineering*, 2019, 33(3): 84-90.
- [9] Cao Lijun, Lin Jing, Li Nan. A Virtual Reality Based Study of Indoor Fire Evacuation After Active or Passive Spatial Exploration[J]. *Computers in Human Behavior*, 2019, 90: 37-45.
- [10] Jivitesh Sharma, Per Arne Andersen, Ole Christoffer Granmo, et al. Deep Q-learning with Q-matrix Transfer Learning for Novel Fire Evacuation Environment[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(12): 7363-7381.
- [11] Kodur V K R, Venkatachari S, Naser M Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-rise Buildings[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(5): 2035-2057.
- [12] 李月, 郭仁拥, 陈亮, 等. 穿越瓶颈的双向行人流微观建模及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(4): 1245-1252, 1259.
- Li Yue, Guo Renyong, Chen Liang, et al. Micro Modeling and Simulation of Bi-directional Pedestrian Flows Crossing Bottleneck[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(4): 1245-1252, 1259.
- [13] Cheng C P, Chen Keyu, Peter Kok Yiu Wong, et al. Graph-based Network Generation and CCTV Processing Techniques for Fire Evacuation[J]. *Building Research & Information*, 2021, 49(2): 179-196.
- [14] 李珊珊, 钱大琳, 王九州. 考虑行人减速避让的改进社会力模型[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2012, 42(3): 623-628.
- Li Shanshan, Qian Dalin, Wang Jiuzhou. Improved Social Force Model Considering Pedestrian Deceleration to Avoid Collision[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(3): 623-628.
- [15] 叶继红, 潘俊山. 基于BIM和元胞自动机的建筑火灾救援路径动态规划研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(8): 1-8.
- Ye Jihong, Pan Junshan. Real-time Path Planning for Safe Rescue in Building Fire Based on BIM and Cellular Automata[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(8): 1-8.
- [16] 张学锋, 白晨曦. 双层教学楼人员疏散仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(5): 1070-1076.
- Zhang Xuefeng, Bai Chenxi. Study of Crowd Evacuation in Two-story Teaching Building[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(5): 1070-1076.
- [17] 张丽杰, 刘建昌, 谭树彬. 复杂建筑火灾中的人员疏散路径多目标规划[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 761-766.
- Zhang Lijie, Liu Jianchang, Tan Shubin. Multi-objective Planning of Personnel Evacuation Route in Complex Building Fire[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(6): 761-766.
- [18] 刘毅, 沈斐敏. 考虑灾害实时扩散的室内火灾疏散路径选择模型[J]. *控制与决策*, 2018, 33(9): 1598-1604.
- Liu Yi, Shen Feimin. Route Selection Model in Indoor Evacuation Under Real Effect of Fire Spread[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(9): 1598-1604.
- [19] 邹馨捷, 萨木哈尔·波拉提, 郝明, 等. 基于Pyrosim和Pathfinder的高校学生宿舍火灾人员疏散安全性模拟分析[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(4): 195-200.
- Zou Xinjie, Samuhaer Bolati, Hao Ming, et al. Personnel Evacuation Safety Simulation Analysis of College Student Dormitory Fire Based on Pyrosim and Pathfinder

- [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(4): 195-200.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑防烟排烟系统技术标准: GB 51251-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for Building Smoke Prevention and Exhaust Systems: GB 51251-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.