

火灾情景下电影院人员疏散模拟与策略优化

何雨洋*, 李御锦, 蔡凯昕

北方工业大学土木工程学院, 北京

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月19日

摘要

文章以北京某影城为研究对象, 利用Pyrosim与Anylogic分别建立火灾烟气模型和精细化疏散模型, 以9号厅机房为起火点, 模拟不同出口场景下的疏散过程, 对比ASET与RSET评估安全性并优化方案。结果表明, 烟气扩散路径特征明显, 能见度最先达危险临界值; Exit 2为高危区域, Exit 1安全性最优, 二者为核心疏散出口; 全出口开放时Exit 2存在隐患, 关闭该出口、仅启用Exit 1与Exit 3可实现安全疏散。研究结果为多厅影院的防火设计、排烟系统布局及应急疏散管理提供了科学依据。

关键词

电影院火灾, 烟气扩散, 人员疏散, 策略优化

Simulation of People Evacuation in a Cinema under Fire Scenarios and Optimization of Strategies

Yuyang He*, Yujin Li, Kaixin Cai

School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing

Received: April 15, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

This study focuses on a cinema in Beijing and utilizes Pyrosim and Anylogic to establish fire smoke and detailed evacuation models, respectively. Using the machine room of Hall 9 as the ignition point, the evacuation process under different exit scenarios was simulated, comparing ASET and RSET to assess safety and optimize plans. The results indicate that the smoke diffusion path characteristics are evident, with visibility reaching hazardous critical values first; Exit 2 is a high-risk area, while

*通讯作者。

Exit 1 is the safest, serving as a core evacuation exit alongside Exit 2. When all exits are open, Exit 2 poses potential hazards; closing this exit and only using Exit 1 and Exit 3 can achieve safe evacuation. These findings provide a scientific basis for fire protection design, smoke exhaust system layout, and emergency evacuation management in multi-hall cinemas.

Keywords

Cinema Fire, Smoke Dispersion, Personnel Evacuation, Strategy Optimization

Copyright © 2026 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

随着中国经济转型与消费结构升级,电影产业持续发展。然而,电影院作为人员密集封闭场所,消防安全风险突出。影院布局复杂、连通性强、可燃装修与高负荷电气设备多,易引发立体燃烧与有毒烟气快速蔓延。历史火灾案例表明,影厅外设备间、走廊、配电箱等起火危害极大,易堵塞疏散通道、造成重大伤亡与财产损失。

国内外在建筑火灾烟气模拟与人员疏散仿真方面已形成较为系统的研究体系。火灾模拟多采用 Pyrosim、FDS 等计算流体动力学软件,研究烟气温度、CO 浓度、能见度等参数的时空演化。Glasa 等利用 FDS 对影院火灾进行模拟,验证了可燃材料防火性能与火灾风险的关联性[1];岳鑫基于 Pyrosim 模拟地下商场不同火源位置的烟气参数变化,提出机械排烟系统优化方案[2];王琰等利用 Pyrosim 建立小型电影院模型,分析了热释放率对烟气蔓延的影响[3]。人员疏散仿真则广泛应用 Pathfinder、Anylogic 等基于社会力模型或多智能体模型的平台,分析人员密度、行为特征、出口配置等对疏散效率的影响。Oikonomou 提出基于烟雾动态的实时疏散路线规划系统 s-ERP,显著降低人员烟雾暴露风险[4];Dang 利用大型语言模型驱动多智能体仿真,实现人员疏散决策的拟人化模拟[5];邢志祥等基于 Pathfinder 软件,优化了大型超市的疏散路径[6];王一诺等基于 BIM 技术构建影院火灾模型,验证了 Pyrosim 模拟的可靠性[7];施照成通过性能化评估方法,分析了地下影院排烟系统对疏散的影响[8];李宏静结合 Pyrosim 与 Pathfinder,研究了影厅火灾的可用疏散时间 ASET 与必需疏散时间 RSET 耦合关系[9]。现有研究多针对影厅内火灾,对影厅外火灾场景研究较少。开展外部火灾疏散研究、优化疏散路线、合理设置出口,可提升影院消防安全水平,降低火灾风险。

本文研究影院火灾烟气扩散与人员疏散特性,建立多参数耦合仿真模型,分析烟气高度、温度、能见度及 CO 浓度变化规律,定量评估疏散时间并提出安全策略,为影院消防设计与应急管理提供依据。

2. Pyrosim 火灾烟气模拟

2.1. 工程概况

本文选取北京市石景山区当代商城中影时光国际影城为研究案例。该影院位于商业综合体四层,总建筑面积约 1550 平方米,内部规划有 9 个独立放映厅,共计观众座位约 625 个。影城采用典型的 T 型疏散路径布局:一条横向主通道(长约 43.6 米,宽约 2.6 米)与一条竖向通道(长约 25.3 米,宽约 3.4 米)相交,形成疏散路径的主要骨架,9 个影厅及放映机房、办公区等附属功能空间沿此骨架两侧分布(图 1)。

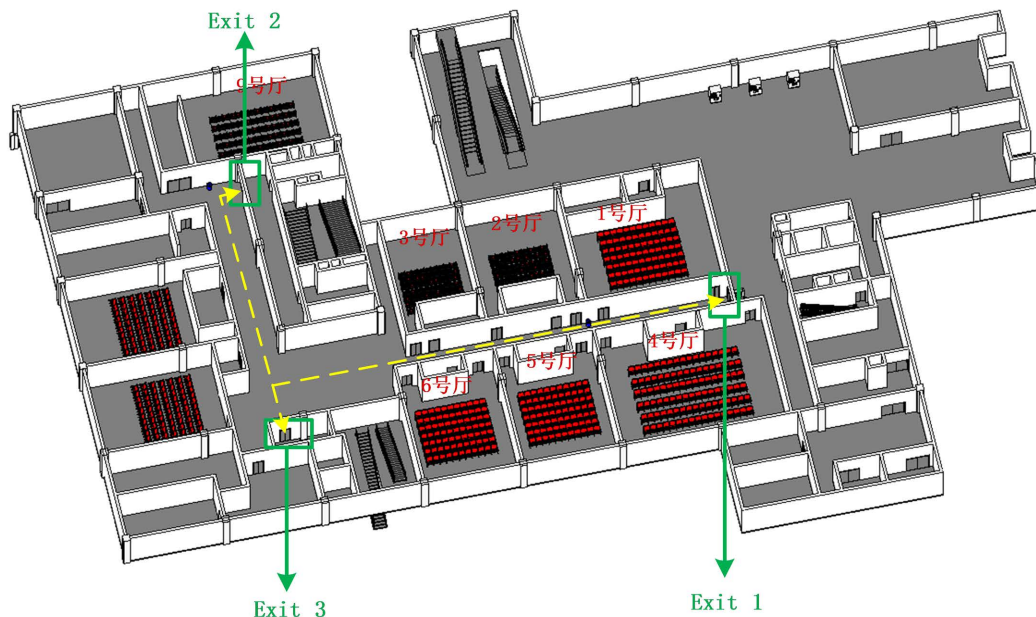


Figure 1. BIM model

图 1. BIM 模型图

影院设有三个安全疏散出口：Exit 1 为日常运营主出入口，位于横向通道最右侧；Exit 2 位于 T 型交叉点，连接横向与竖向通道；Exit 3 位于竖向通道末端。日常仅 Exit 1 保持常开，Exit 2 与 Exit 3 作为消防疏散门常闭。影院建筑耐火等级为一级，装修材料符合《电影院建筑设计规范》(JGJ 58-2008)要求。

2.2. 火灾模型建立

网格尺寸是 FDS 火灾动力学模拟的核心参数，直接决定仿真精度与可靠性。网格越小，火灾解析越精细、结果越准确，但计算量与耗时显著增加。为平衡精度与效率，需采用火源特征直径方程对网格尺寸进行校核，公式如下：

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

式中： D^* 为火源特征直径，单位 m； Q 为火源热释放速率，单位 kW； ρ_{∞} 为环境空气初始密度，单位 kg/m^3 ，取值 $1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ ； c_p 为定压比热容，单位 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，取值 $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； T_{∞} 为内部环境空气温度，单位 K，取值 293.15 K ； g 为重力加速度，单位 m/s^2 ，取值 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

依据美国国家标准与技术研究院研究，火灾模拟网格尺寸需与火源特征直径匹配，网格尺寸 d 与火源特征直径 D 的比值宜取 $1/16 \sim 1/4$ 区间内，可兼顾精度与效率。本研究算得火源特征直径 $D^* \approx 2.2 \text{ m}$ ，对应合理网格范围为 $0.14 \sim 0.55 \text{ m}$ 。综合计算稳定性、精度与资源成本，最终采用 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 网格。

基于实地勘测，使用 Revit 建立影院三维模型并导入 Pyrosim。依据影院可燃物特性设定火灾为快速火，增长系数 $0.044 \text{ kW}/\text{s}^2$ ；模拟排烟与喷淋失效场景，按《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251-2017) 的规定取最大热释放速率 8.0 MW 。初始条件设为：温度 20°C 、风速 $0 \text{ m}/\text{s}$ 、标准大气压，仅考虑烟气、温度、能见度、CO 的水平扩散。起火点设于最内侧 9 号厅放映机房，在机房出口及 3 个疏散出口布设测点，实时监测 2 m 高度处烟气层高度、温度、能见度与 CO 浓度。起火点布置图如图 2 所示。

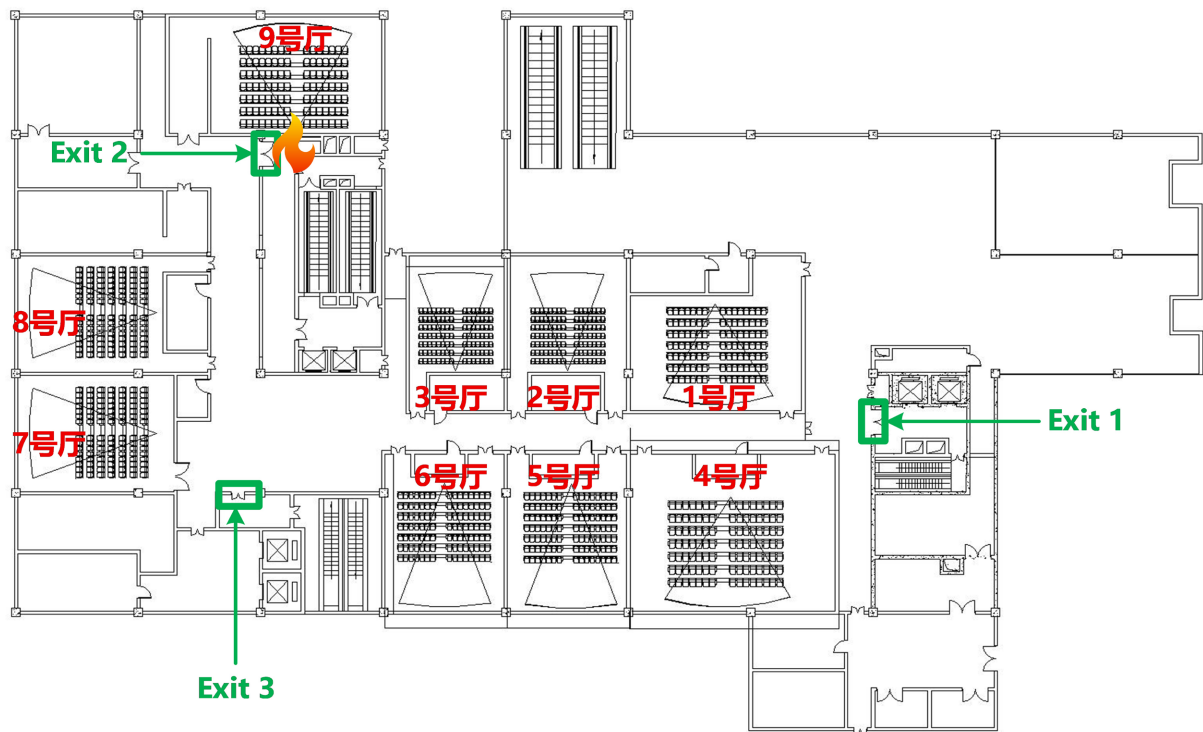


Figure 2. Location of the fire origin
图 2. 起火点布置图

3. 火灾烟气模拟结果分析

9号厅位于电影院最里侧，选取其放映机房作为起火点，可探究火灾发生在建筑边缘纵深区域时，烟气、温度、能见度及CO浓度的变化过程，参考《消防安全工程指南》(GB/T 31540-2015)与ISO 13571:2012标准，设定烟气高度临界值2 m、温度临界值60℃、能见度临界值10 m、CO浓度临界值500 ppm。

3.1. 烟气扩散分析

起火点位于机房内部，48 s后烟气扩散至9号厅放映机房出口，7 s后蔓延至Exit 2区域；134 s时烟气侵入竖向通道，328 s时扩散至最下方的Exit 3；370 s时横竖通道交叉口被烟气充满并向右侧横向通道延伸，417 s时烟气到达最远出口Exit 1，建筑主干通道基本被烟气贯通；948 s时烟气已大面积覆盖多个影厅及公共区域(见表1和图3)。

Table 1. The duration during which each position is covered by the smoke cloud
表 1. 各位置被烟气覆盖时间

位置	被烟气覆盖时间(s)
9号厅放映机房出口	48
Exit 1	417
Exit 2	55
Exit 3	328

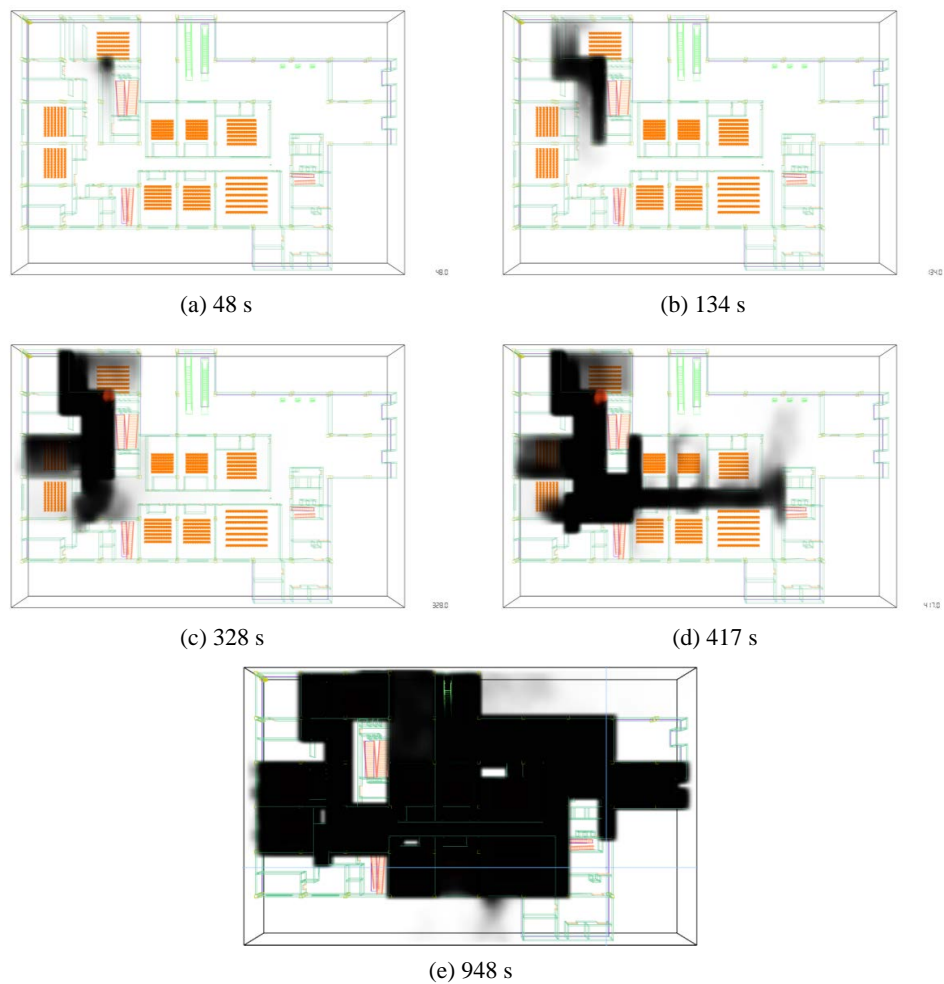


Figure 3. The situation of smoke dispersion
图 3. 烟气扩散情况

3.2. 温度变化分析

火灾初期，高温区域在火源附近形成并快速扩展，190 s 时 9 号厅机房出口温度达人体危险临界值 60℃，270 s 时相邻的 Exit 2 温度也升至 60℃，此阶段高温蔓延路径与烟气扩散路径基本一致，热量随烟气流动传递。而后续高温蔓延未完全沿烟气路径匀速推进。497 s 时高温蔓延至横竖通道交叉口，940 s 时该区域出现温度断档，升温速率明显减缓。主要因交叉口空间开阔，烟气聚集上浮，热量集中于上部，导致 2 m 高度处测得温度暂时偏低(见表 2 和图 4)。

Table 2. The time when the temperatures at each position reach the critical value
表 2. 各位置温度达到临界值时间

位置	温度达到临界值60℃时间(s)
9号厅放映机房出口	190
Exit 1	未达到
Exit 2	270
Exit 3	940

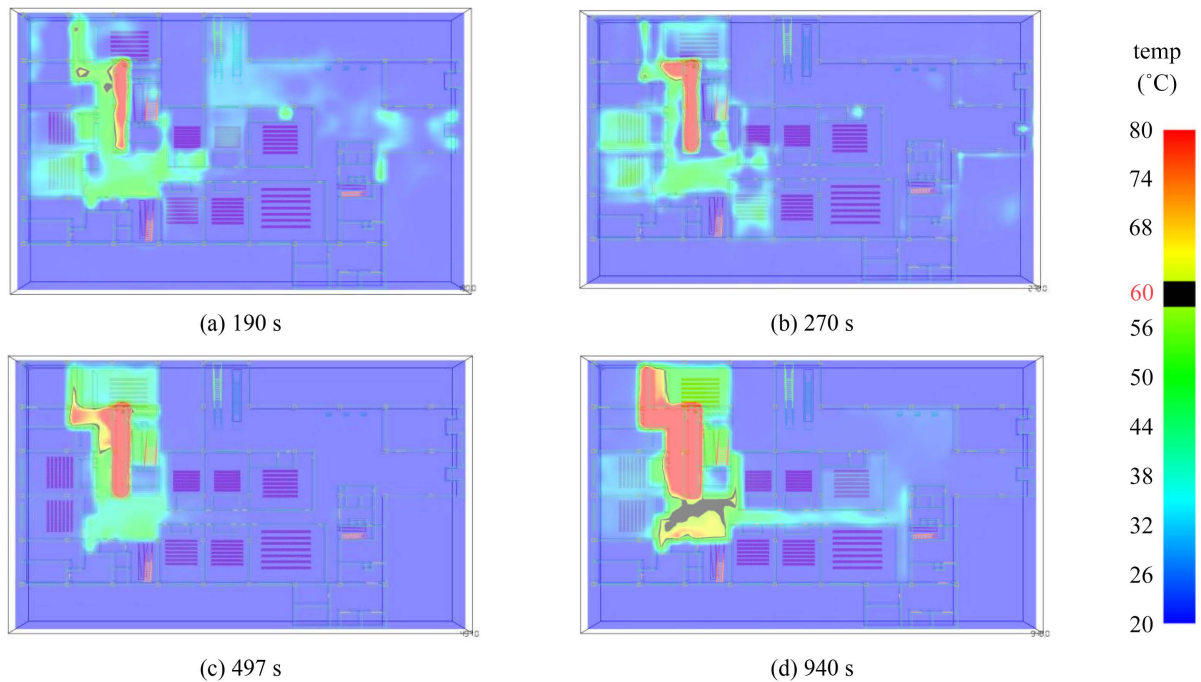


Figure 4. Temperature variation map at a height of 2 meters

图 4. 高度 2 m 处温度变化云图

从图 5 的整体形态来看, 放映机房门口温度呈阶梯式跃升与高位震荡的非稳态变化。初期从初始室温 20℃在 190 s 时缓慢升至 60℃, 随后短时间内由 70℃骤升至近 300℃; 300 s 后在 400℃~600℃区间大幅高频波动。各疏散出口温度差异显著, Exit 2 的温度在 500 s 内骤升至近 300℃, 并持续在 200℃~280℃波动, 风险最高; Exit 1 处全程低于 40℃, 安全性良好; Exit 3 处温度缓慢上升, 后期加快并稳定在 70℃。该差异源于烟气与热流蔓延路径不同, Exit 2 紧邻火源受高温烟气直接冲击; Exit 1 因距离远且防火分隔有效, 热量烟气难以侵入; Exit 3 则受烟气分层积聚与水平蔓延影响, 后期升温加快。

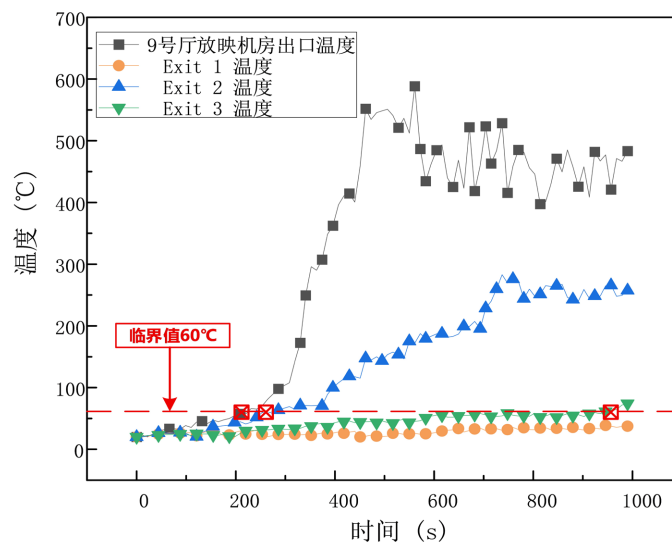


Figure 5. Temperature variation curve at a height of 2 meters

图 5. 高度 2 m 处温度变化曲线图

3.3. 能见度变化分析

火灾早期能见度快速下降, 48 s 时机房出口的能见度已降至 10 m 安全临界值, 54 s 时相邻的 Exit 2 也降至该值, 与烟气初期扩散同步, 烟雾颗粒是能见度降低的主要因素。随后能见度恶化范围持续扩大, 320 s 时 Exit 3 处到达临界值, 414 s 时距离最远的 Exit 1 也降至 10 m, 到 1000 s 时多数公共区域与影厅能见度均大幅降低(见图 6 和表 3)。

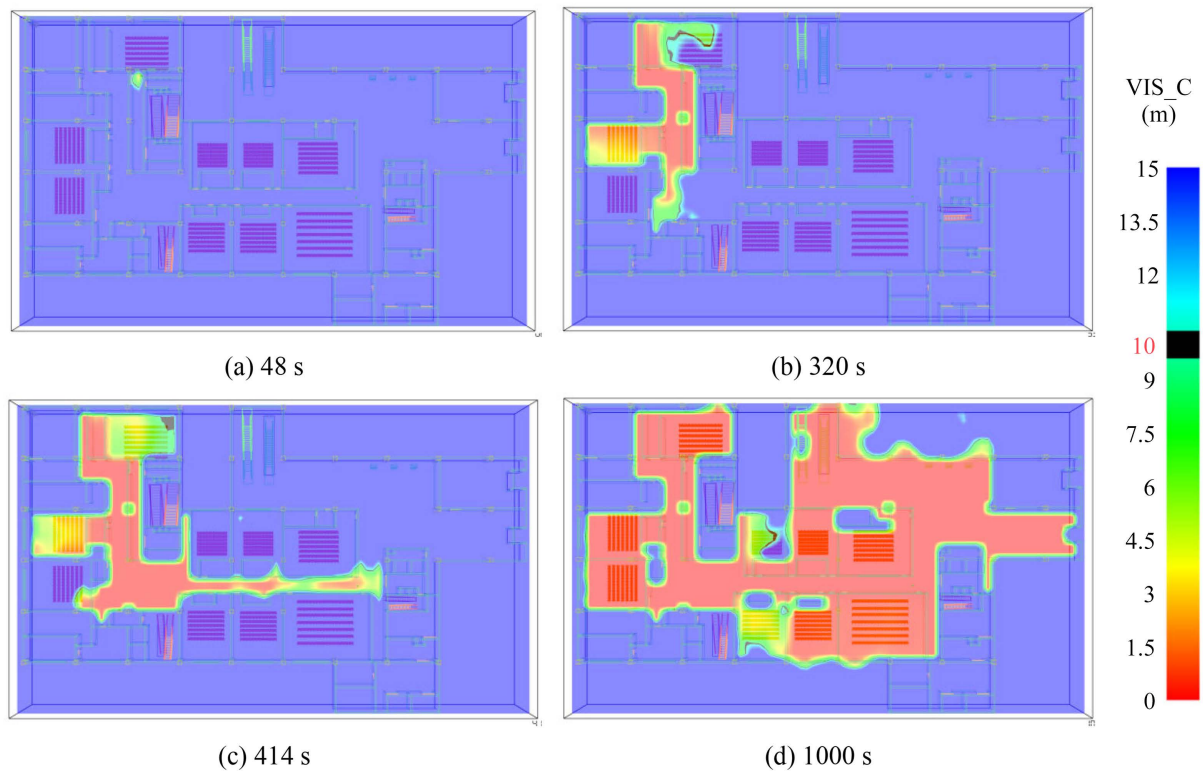


Figure 6. Visibility variation cloud map at a height of 2 meters

图 6. 高度 2 m 处能见度变化云图

Table 3. The time when visibility at each position reaches the critical value

表 3. 各位置能见度达到临界值时间

位置	能见度达到临界值 10 m 时间(s)
9号厅放映机房出口	48
Exit 1	414
Exit 2	54
Exit 3	320

由图 7 可知, 火灾中三个疏散出口的能见度下降时序与程度差异明显, 机房门口处的能见度迅速降至近 0 m, 火源区域被浓烟笼罩; Exit 2 处的能见度在 53 s 时快速下降, 并在 120 s 后长期处于极低水平; Exit 3 处的能见度维持较久, 至 310 s 时才断崖式下跌至危险值; 最外侧的出口 Exit 1 安全性最高, 400 s 后能见度才开始快速下降。

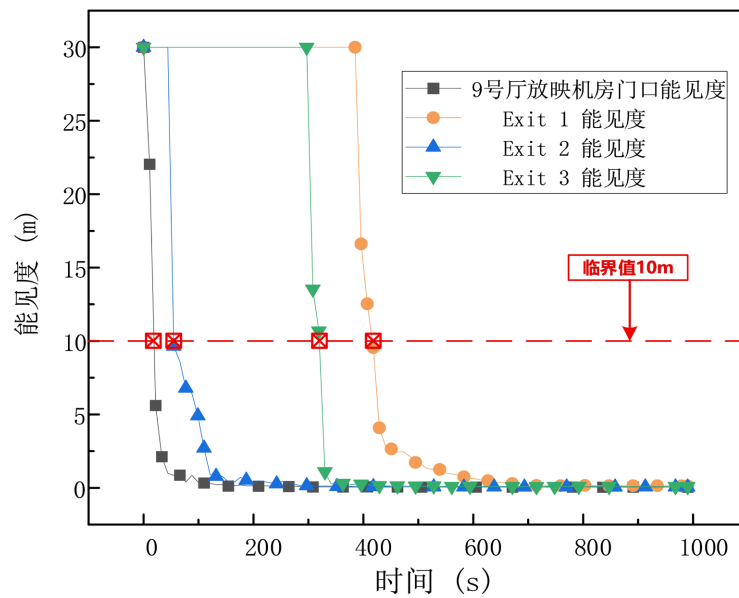


Figure 7. Curve chart of visibility variation at a height of 2 meters
图 7. 高度 2 m 处能见度变化曲线图

3.4. CO 浓度变化分析

CO 的扩散紧随烟气主体，其浓度达标时序与烟气蔓延路径一致，在 148 s 时放映机房出口的 CO 浓度达到 500 ppm 危险临界值，305 s 时 Exit 2 也达到该浓度，465 s 时 Exit 3 处达标，883 s 时最远的 Exit 1 也达到临界值，表明 CO 随烟雾同步在通道内传播(见图 8 和表 4)。

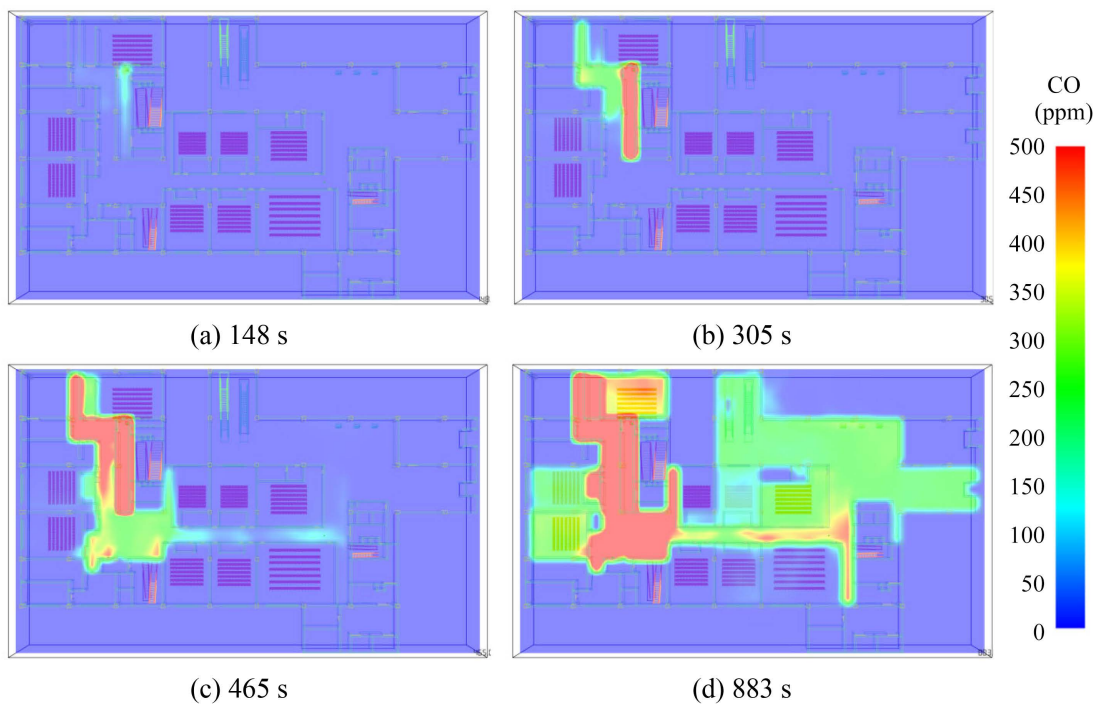


Figure 8. Cloud chart showing the variation of CO concentration at a height of 2 meters
图 8. 高度 2 m 处 CO 浓度变化云图

Table 4. The time when the concentration of CO at each position reaches the critical value

表 4. 各位置 CO 浓度达到临界值时间

位置	CO浓度达到临界值500 ppm时间(s)
9号厅放映机房出口	148
Exit 1	883
Exit 2	305
Exit 3	465

由图 9 可知，三处出口 CO 污染差异显著，与烟气、温度扩散趋势高度相关。机房出口为 CO 核心产生区，浓度陡增；Exit 2 上升快、长期居高，为毒气汇集通道；Exit 3 上升平缓但仍危险；Exit 1 浓度最低、曲线最平缓，安全性最优(临界时间见表 5)。

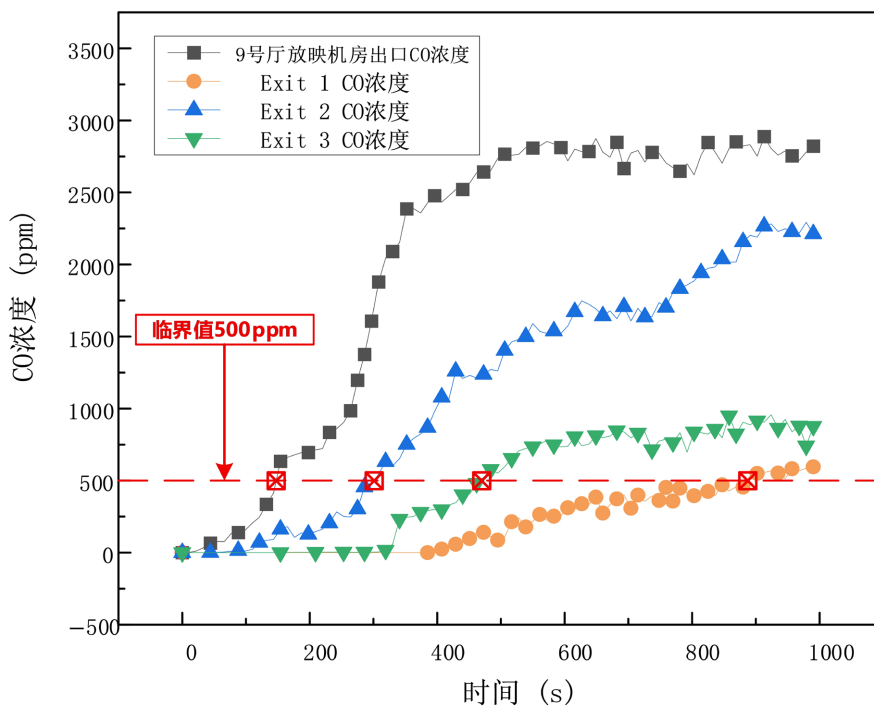


Figure 9. Graph showing the variation of CO concentration at a height of 2 meters

图 9. 高度 2 m 处 CO 浓度变化曲线图

Table 5. All parameters reach the critical schedule

表 5. 临界时间表

火源位置	测点位置	达到临界值的时间(s)				可用疏散时间 (s)	最先达到临界值的环境参数
		烟气	温度	能见度	CO浓度		
	9号厅放映机房出口	48	190	48	148	-	-
9号厅放映机房	Exit 1	417	未达到	414	883	414	能见度
	Exit 2	55	270	54	305	54	能见度
	Exit 3	328	940	320	465	320	能见度

4. Anylogic 人员疏散模拟

4.1. 人员数量

我国现行规范未明确影院疏散人数计算方法, 导致性能化设计参数设定偏理想化、依据不足。经学者实地调研, 可按影厅数量与时段对座位数进行差异化折减, 折算系数见表 6。

Table 6. Personnel quantity conversion coefficient table

表 6. 人员数量折算系数表

折算系数K	周末双休日	法定节假日	
		观影厅数 ≤ 10个	观影厅数 > 10个
	0.8	1.0	0.95

该影城共 9 个影厅, 折算系数取 1.0, 满员人数为 625 人, 1 号厅 93 人, 2 号厅 68 人, 3 号厅 52 人, 4 号厅 91 人, 5 号厅 87 人, 6 号厅 68 人, 7 号厅 64 人, 8 号厅 68 人, 9 号厅 34 人。

4.2. 人员类型组成

人员类型与组成影响疏散能力, 国内研究较少, 多采用国际比例。本研究将人员分为中青年男、女、老人、儿童, 参考商场比例设为 40%、40%、10%、10%。

4.3. 人员运动速度

国外关于公共场所人员行走速度的研究较早, 并获得了部分数据。其中, 得到较广泛认同的是美国消防工程师协会(SFPE)《消防工程手册》给出的人员疏散速度参考值, 见表 7。

Table 7. Reference value for personnel evacuation speed

表 7. 人员疏散速度参考值

人员密度(人/m ²)	<0.54	0.54~1	1~2	2~3	3~3.8
水平疏散速度(m/s)	1.2	1.2~1	1.0~0.66	0.66~0.28	0.28~0
垂直疏散速度(m/s)	0.86	0.86~0.73	0.73~0.47	0.47~0.20	0.20~0

依据爱丁堡大学研究, 老人、儿童、中青年女性速度分别为成年男性的 59%、66%、85%。本影城人员密度约 0.4 人/m², 取男性水平速度 1.2 m/s, 折算得女性 1.02 m/s、儿童 0.79 m/s、老人 0.71 m/s (见表 8)。

Table 8. Different evacuation speeds of different personnel

表 8. 不同人员疏散速度

人员类型	参考值(m/s)	折减系数	疏散速度(m/s)
中青年男士	1.2	100%	1.2
中青年女士	1.2	85%	1.02
儿童	1.2	66%	0.79
老人	1.2	59%	0.71

4.4. 人员疏散模型建立

1) 物理模型

经调研，该影城办公区为内部员工工作及存放物资之用，其功能定位与公共区域有严格区分，且不对观众开放。基于消防安全管理的规范要求与实际运营情况，该区域不作为观众疏散区域。将电影院疏散平面图进行优化，并在 Anylogic 中建立物理模型，如图 10 所示。

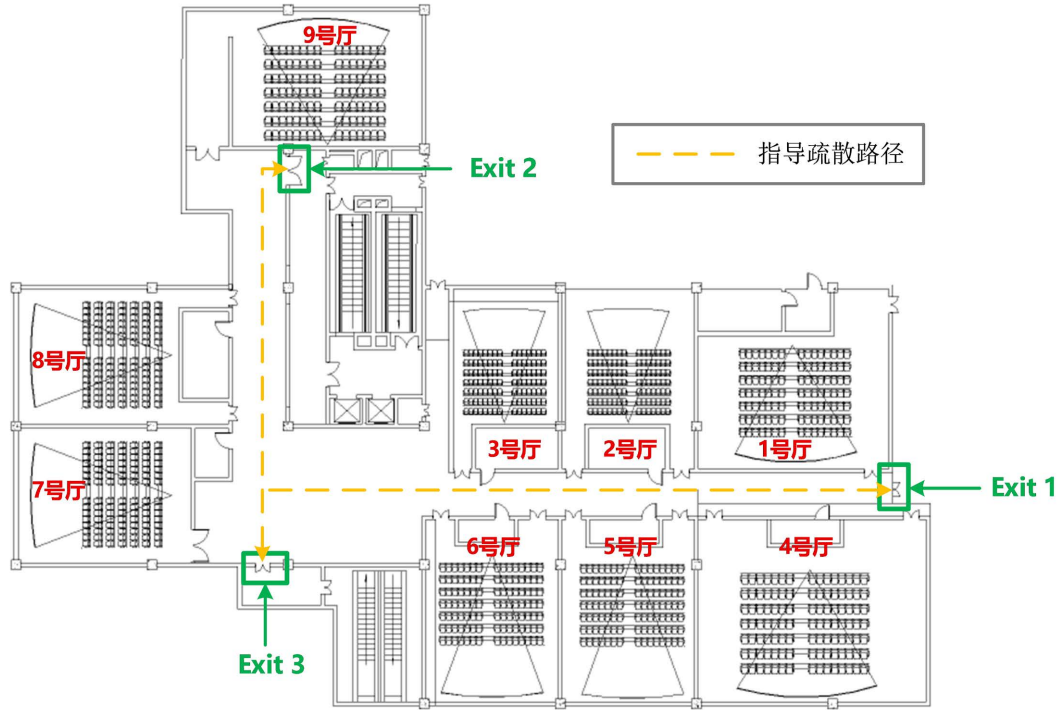


Figure 10. Evacuation physical model diagram
图 10. 疏散物理模型图

2) 疏散逻辑

在空间物理模型的基础上搭建人员疏散逻辑，本文研究范围为火灾发生后，人员从影厅出口处疏散至电影院安全出口的过程。为便于对各影厅人员疏散进行控制，本文对 9 个影厅内和影厅外疏散人员分别建立了疏散逻辑，如图 11 所示。

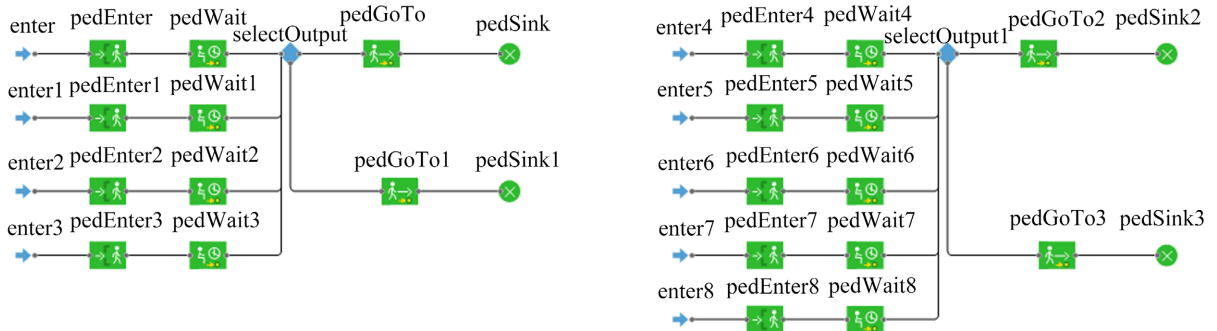


Figure 11. Evacuation logic diagram for personnel
图 11. 人员疏散逻辑图

5. 人员疏散模拟结果分析

本文建立的疏散模型中,影院一共有3个疏散出口,分别为Exit 1、Exit 2、Exit 3。为了探究最不利情况下的疏散情景,考虑上座率为100%时的情况,将这3个疏散出口的开关情况设为变量,设置3组实验:Exit 1和Exit 2开放,Exit 3关闭;Exit 1和Exit 3开放,Exit 2关闭;Exit 1、Exit 2和Exit 3全部开放。

5.1. 实验一

同时开放Exit 1和Exit 2作为疏散出口,Exit 3不开放,进行人员疏散模拟,整体疏散情况如图12所示:

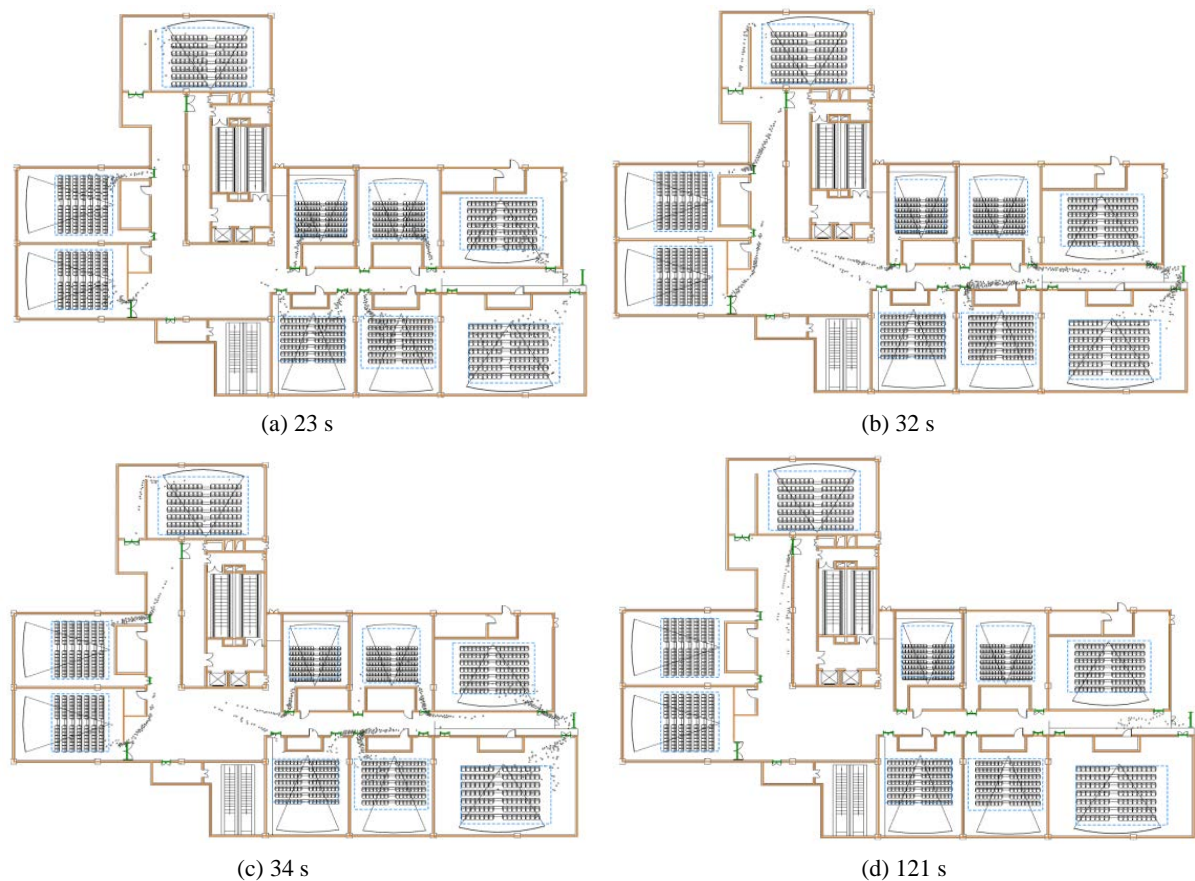


Figure 12. Experiment one: evacuation scenario
图 12. 实验一的疏散情况

疏散指令发出后,23 s 首位观众由Exit 1 疏散,主出口无聚集;32 s 时Exit 1、34 s 时5、6号厅相继拥堵,效率下降;121 s 人员全部撤出影厅。Exit 2 全程无拥堵,172 s 完成疏散。模拟显示,同时启用两个出口可实现有效分流,提升疏散效率。

5.2. 实验二

同时开放Exit 1和Exit 3作为疏散出口,Exit 2不开放,进行人员疏散模拟,整体疏散情况如图13所示:



Figure 13. Experiment two: evacuation scenario
图 13. 实验二的疏散情况

疏散指令发出后，23 s 首位观众从 Exit 1 疏散，主出口无拥堵；36 s 时 Exit 1 人流聚集，69 s 时 Exit 3 出现拥堵；119 s 人员全部撤出影厅，228 s 完成疏散。启用 Exit 1、3 可提升效率，但效果略逊于实验一，说明 Exit 2 具有关键疏散作用。

5.3. 实验三

同时开放 Exit 1、Exit 2 和 Exit 3 作为疏散出口，进行人员疏散模拟，整体疏散情况如图 14 所示：

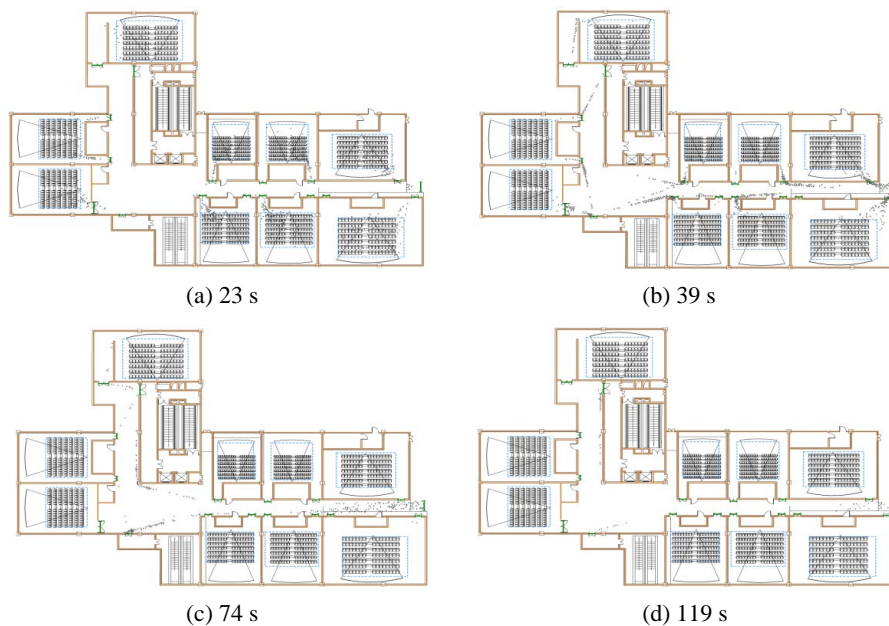


Figure 14. Experiment three: evacuation scenario
图 14. 实验三的疏散情况

疏散后 23 s 首位观众从 Exit 1 撤出, 39 s 时 Exit 1 拥堵、74 s 时 Exit 3 拥堵, 119 s 全员离开影厅, 174 s 完成疏散。三出口全开效率较高, 但与实验一时长接近, 说明 Exit 1 与 Exit 2 是决定疏散效率的关键(表 9)。

Table 9. Analysis of personnel evacuation time

表 9. 人员疏散时间分析

实验场景	总疏散人数	疏散时间(s)
仅开放Exit 1		365
实验一	625	172
实验二		228
实验三		174

6. 火灾烟气模拟与人员疏散模拟结果对比

本研究对比分析 ASET 与 RSET, 以 Pyrosim 模拟的危险临界时间为 ASET、Anylogic 疏散时间为 RSET, 基准场景为满座、三出口全开无引导。模拟显示能见度最先达标, 以能见度 10 m 时间为 ASET 判定安全性, 结果见表 10。

Table 10. Safety assessment of each evacuation exit

表 10. 各疏散出口安全判定

疏散出口	疏散人数(人)	ASET	RSET	未成功疏散人数	安全疏散判定
Exit 1	319	414	153	0	安全
Exit 2	104	54	174	91	不安全
Exit 3	202	320	140	0	安全

结果表明, Exit 1、Exit 3 的 RSET 远小于 ASET, 可安全疏散; Exit 2 的 RSET 远大于 ASET, 致 91 人无法安全疏散。据此提出关闭 Exit 2、仅开放 Exit 1 与 Exit 3 的优化方案, 重新模拟结果见表 11。

Table 11. Safety assessment of each evacuation exit after closing Exit 2

表 11. 关闭 Exit 2 后各疏散出口安全判定

疏散出口	T_{ASET}	T_{RSET}	安全疏散判定
Exit 1	414	189	安全
Exit 2	54	0	安全
Exit 3	320	228	安全

优化后, 原流向 Exit 2 的人员分流至 Exit 1、Exit 3, 两出口 RSET 略有上升但仍远小于 ASET, Exit 2 无人员疏散故无风险。该方案规避高危出口, 实现安全有序疏散, 有效解决了人员滞留问题。

7. 优化疏散策略的可行性分析与配套保障措施

本文提出的火灾时关闭 Exit 2、仅开放 Exit 1 与 Exit 3 的疏散方案, 在消防合规、现场管理、人员行为等方面均具备可行性, 同时需配套措施防控风险。该方案属于火灾应急动态管控, 不减少固定消防设

施与安全出口,符合规范且可通过验收;Exit 2 日常常闭,火灾时禁行,无需改造、成本低、易执行;关闭高危出口可避免观众就近逃生遇险,配合引导措施以减少混乱。

该策略在实施过程中仍存在潜在风险,关闭 Exit 2 可能拉长疏散路径、加剧拥堵,缺乏引导易降低效率、引发混乱。需建立技术、管理、引导一体化保障体系:加装智能疏散系统动态指向安全出口,优化应急广播;定期演练、强化人员管控,在 Exit 2 处设置物理隔离与警示。多措施协同可保障疏散效率,消除高危出口风险,提升方案稳定性与实用性。

8. 结论

本文以北京市石景山区中影时光国际影城为研究对象,用 Pyrosim 建立火灾烟气模型,探究 9 号厅机房起火时烟气相关参数的时空变化,结合 Anylogic 构建疏散模型,设置不同出口场景仿真,通过 ASET 与 RSET 耦合分析评估安全性并优化方案,得出以下结论:

1) 影院火灾烟气扩散具有显著路径与时序特征,走廊等开阔空间烟气蔓延速度远快于影厅等封闭区域,且能见度最先达危险临界值,为主要环境威胁。

2) 各出口火灾风险差异显著。Exit 2 紧邻火源,为高危区域;Exit 1 距火源最远、防火分隔好,安全性最优;Exit 3 风险中等,各参数缓慢恶化但最终超出人体耐受极限。

3) 疏散效率与出口配置密切相关:仅开放 Exit 1 时需 365 s 疏散且拥堵严重;开放 Exit 1 和 Exit 2 时需 172 s 疏散,三出口全开时需 174 s 疏散,效率相近。说明 Exit 1 与 Exit 2 为核心出口,但 9 号厅机房起火时 Exit 2 因烟气危险不可用,Exit 3 可作为辅助分流。

4) 无引导的自然疏散方案存在显著安全隐患,关闭 Exit 2、仅开放 Exit 1 与 Exit 3 的优化疏散方案具备合规性、可操作性与安全性,配合智能疏散指示、应急广播、现场管控及定期演练等配套措施,可有效规避高危出口风险、保障疏散效率,具备实际落地应用价值。

参考文献

- [1] Glasa, J., Valasek, L., Weisenpacher, P. and Halada, L. (2013) Cinema Fire Modelling by FDS. *Journal of Physics: Conference Series*, **410**, Article 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/410/1/012013>
- [2] 岳鑫, 闫欣雨. 地下商场烟气控制模拟研究[C]//中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022). 廊坊: 中国人民警察大学研究生院, 2022: 79-84.
- [3] 王琨, 谢贤平. 基于 Pyrosim 的小型电影院火灾数值模拟分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(8): 39-41.
- [4] Oikonomou, P., Boulougaris, G. and Kolomvatsos, K. (2025) Modeling Smoke-Driven Evacuation Routes during Wildfires: Architecture and Implementation of the S-Erp System. *Environmental Challenges*, **21**, Article 101307. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101307>
- [5] Dang, P., Zhu, J., Li, W. and Lai, J. (2024) A Large Language Model-Based Agent for Wayfinding: Simulation of Spatial Perception and Memory. *Cartography and Geographic Information Science*, **52**, 350-369. <https://doi.org/10.1080/15230406.2024.2405596>
- [6] 邢志祥, 丁芙蓉, 唐亮, 等. 大型超市火灾人员疏散路径优化研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 167-173.
- [7] 王一诺, 张丽丽, 代洪涛, 等. 基于 BIM 的建筑火灾模拟研究——电影院为例[J]. 消防界(电子版), 2023, 9(8): 96-98.
- [8] 施照成, 林育苗. 某地下电影院烟气控制设计的安全性评估[J]. 消防技术与产品信息, 2013(3): 47-50.
- [9] 李宏静. 火灾烟气下多厅影院人员应急疏散管理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.