

基于多智能体的高层建筑分阶段火灾疏散仿真及策略研究

黄梓浩, 景奕钦, 朱后壮, 徐晶, 马国丰*

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2024年1月20日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月27日

摘要

随着城市化进程的深入, 高层建筑的数量不断增加。高层建筑在面对火灾时的高风险使得疏散过程也尤为重要。本文将高度作为分类标准, 选取不同楼层作为基准层分别进行分阶段疏散, 同时考虑了火灾对不同高度的影响不同而制定了新的疏散策略。在本研究中, 我们通过改变疏散顺序、延迟比例和延迟时间, 基于智能体模型建立了1种正常疏散场景及30种分阶段疏散场景31种不同疏散场景。案例研究结果表明, 这种分阶段疏散策略对于率先疏散中、高楼层上部位人员离开着火楼层的疏散效率起到促进作用, 且分阶段疏散能够在不同程度上改变人员的疏散速度和建筑内的密度。本研究为人们在面对高层建筑火灾时采用何种疏散方式提供了建议。

关键词

高层建筑, 分阶段疏散, 疏散策略, 智能体模型

Simulation and Strategy for Phased Fire Evacuation of High-Rise Building Based on Multi-Agent

Zihao Huang, Yiqin Jing, Houzhuang Zhu, Jing Xu, Guofeng Ma*

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 20th, 2024; accepted: Mar. 20th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

With the deepening of urbanization, the number of high-rise buildings is increasing rapidly. The

*通讯作者。

文章引用: 黄梓浩, 景奕钦, 朱后壮, 徐晶, 马国丰. 基于多智能体的高层建筑分阶段火灾疏散仿真及策略研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(2): 1592-1603. DOI: 10.12677/mos.2024.132150

high risk of fire in high-rise buildings makes the evacuation process particularly important. We take height as the classification standard, select different floors as datum floors for phased evacuation and formulate a new evacuation strategy. In this study, 1 total evacuation scenario and 30 phased evacuation scenarios based on the agent model are established by changing evacuation sequence, delay ratio, and delay time. The results of the case study show that the phased evacuation strategy improves the evacuation efficiency of people in the middle and upper floors, and it can change the evacuation speed of people and the density within the building to varying degrees. This study provides suggestions on how to evacuate people in fire accident.

Keywords

High-Rise Buildings, Phased Evacuation, Evacuation Strategies, Agent-Based Simulation

Copyright © 2024 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

随着建筑工艺的进步，高层建筑应运而生，同时，城市人口激增带来了高层建筑的大量需求，高层建筑成为了建筑行业中一个快速增长的领域[1]。高层建筑与普通建筑相比具有独特的特点：建筑内空间狭长、垂直疏散距离远大于水平疏散距离，对个人体力要求高；建筑内部人员构成复杂，人员对周围环境的熟悉程度不同，人员分布不均匀，接受的安全教育程度不同；高层建筑功能繁多、可燃材料分布广等[2] [3]。这些因素使得高层建筑在面对火灾这一事故灾难时，显得更加敏感和脆弱，这也让高层建筑的紧急疏散问题成为建筑设计师、建筑居住者以及政府的主要担忧问题之一[4] [5] [6] [7]。

美国国家消防协会(NFPA)的最新统计数据 displays, 美国平均每年发生 14,500 起高层建筑火灾, 造成 40 名平民死亡、520 名平民受伤, 直接财产损失高达 1.54 亿美元[8]。为尽量减少建筑内部火灾发生导致的人员伤亡, 研究人员在改善高层建筑疏散上投入了大量的努力。例如, Soltanzadeh 等人基于人的行为模型, 以 60 层的住宅建筑为案例开发了四种不同垂直通道位置的场景, 研究结果表明垂直通道的位置会影响总疏散时间[9]。Chen 等人研究了成员参数和电梯参数对于高层建筑疏散效率的综合影响, 结果表明, 所有人员使用电梯进行疏散并不是高层建筑最优的疏散方案[10]。Zang 等人研究了高层教学楼疏散的影响因素, 包括疏散顺序、障碍物设置等, 研究表明, 密集且规律地布置障碍物会改变疏散人员的密度分布, 限制不同人员的疏散路径, 进而降低整体疏散时间[11]。除了研究高层建筑的建筑参数及人员参数以期改善疏散效率外, 疏散逃生是整个安全防范过程中非常重要的一环, 这不仅需要在日常生活中加强人们在面临灾难时逃生能力的培养和相关知识的教育, 还应制定更好的疏散演练方案, 实现有序、快速的安全疏散。如 Arewa 等人通过高层建筑火灾案例研究了原地不动策略对于疏散效率的影响, 结果表明, 在轻微火灾时该策略能够有效促进高层建筑居住者的疏散, 但在高层建筑发生全面火灾时原地不动的策略可能会带来不可测量的安全后果[12]。因此, 在高层建筑火灾中采取怎样的疏散方式能够实现更高效的疏散具有十分重要的现实意义, 也是本文将要探讨的核心问题。

本研究提出了一种新的分阶段疏散模型, 考虑火点的不同位置, 将距离火灾最近的楼层设置为基准楼层, 并根据高度不同设置了三种疏散计划。基准层因距离火灾最近率先进行疏散, 在基准层疏散一段时间后, 基准层以上楼层及基准层以下楼层先后进行分阶段疏散。为了比较不同疏散方式之间的疏散效率, 我们还引入了延迟比例和延迟时间两个参数, 按照不同的延迟比例采取分阶段疏散, 同时不断提高

延迟时间, 比较不同延迟时间对于整个疏散过程的影响。此外, 我们使用中国某栋高层建筑作为案例, 以该建筑的内部构造进行建模。建筑内部所有人员特征均以中国官方发布的中国平均生理数据为标准, 共构造 30 个分阶段疏散场景及 1 个正常疏散场景, 并使用 Pathfinder 软件进行疏散模拟。

2. 分阶段疏散策略

2.1. 疏散顺序

由于烟气蔓延和楼层温度变化的特性, 火灾初期主要影响着火房间附近以及着火楼层上方数层, 而其余楼层受到的影响较小[13]。这会对建筑内部人员的疏散路线和疏散时间产生不同影响, 这一点已经得到了一些学者的验证[14]。

为了应对着火点楼层的不确定性, 本文提出了基于着火点楼层不同而采取不同疏散顺序的方法。通常情况下, 着火点会首先威胁到附近区域的人员, 且着火楼层及其上下相邻楼层往往是最先发生危险的楼层, 因此, 在疏散方案中, 我们将着火楼层及其上下相邻两层称作基准层, 所有疏散场景均由基准层人员率先进行疏散。这样可以确保在火灾发生的最初阶段, 着火点附近人员能够尽快远离火灾区域, 提高疏散人员的安全性。此外, 根据火灾发生的楼层高度, 本文考虑了三种情况, 分别是火灾发生在低楼层、中楼层及高楼层, 并据此设置了三种不同的疏散情境, 分别命名为情境 L、情境 M 以及情境 U。情境 L 表示火灾发生在建筑的低楼层, 情境 M 及情境 U 则分别表示火灾发生在建筑的中楼层及高楼层。在以基准层率先疏散的基础上, 我们让剩余待疏散人员按照特定阶段顺序进行疏散。由于火灾大部分情况下首先向上蔓延, 着火层以上的人员面临的威胁大于着火层以下的人员, 因此着火层以上的人员被设定在第二阶段进行疏散。随着时间的推移, 火灾向下蔓延, 因此着火层以下的人员被安排在第三阶段进行疏散。在本研究所选的案例中, 楼层共有 22 层, 为模拟火灾发生在楼层不同部位的情形, 本研究选择火灾发生位置分别在 6 层、12 层及 18 层。除了上述提到的分阶段疏散策略, 本文以正常疏散情景为对照组, 即建筑内所有人员同时立即疏散, 以进行疏散效率的比较。

2.2. 延迟时间和延迟比例

在通常情况下, 当火灾警报响起时, 建筑内所有人员响应疏散信号并前往安全地点, 许多研究也是以全体居住者同时疏散为基础进行疏散模拟。然而, 在实际生活中, 火灾警报响起之前, 意识到火灾发生的人群范围只局限于同一楼层或相邻楼层。火灾现场的人们会对火灾情况进行初步判断, 如果他们意识到火势威胁较大, 才会按下火灾警报。此时, 发生火灾的信息才能够传达给所有楼层的居住者, 而这就导致了一段非人为设定的疏散延迟时间。另外, 对于高层建筑来说, 其内部人员分布复杂、数量较多, 但其建筑设计可能不佳, 例如楼梯或逃生出口过于狭窄, 无法同时容纳大量人员进行疏散。在火势威胁下, 恐慌、急迫的情绪容易激发人们的进攻性, 更易造成人员之间的冲突, 进而导致拥堵、踩踏等事故的发生, 进一步造成更多的人员伤亡。

综上, 为更好地贴合实际生活, 并探究本研究提出的分阶段疏散策略是否能够提高疏散效率, 我们提出了引入延迟比例和延迟时间这两个参数。延迟时间指不同阶段开始疏散的时间差。通过延迟时间的设置, 可以模拟火灾情况下人员分阶段撤离的情况; 延迟比例指第三疏散阶段开始疏散的时间相对于第二阶段的滞后比例, 通过设置延迟比例, 可以控制第三阶段开始疏散的时间相对于第二阶段的延迟程度, 从而模拟不同紧急程度下的疏散需求。通过对延迟比例和延迟时间进行不同的设置, 可以比较不同疏散策略的效果, 并评估其对疏散效率的影响。这种研究方法有助于确定最佳的分阶段疏散策略, 以提高人员疏散的效率和安全性。

具体而言, 以着火层为 n 层, 基准层则为第 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ 层, 延迟时间为 x 秒, 延迟比例为 a ($a >$

1), 则最开始疏散的楼层为第 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ 层。经过 x 秒后, 第 $n+1$ 层以上的人员开始疏散, 在 ax 秒后, 第 $n-1$ 层以下的人员开始疏散。疏散策略的示意图可参考图 1。需要注意的是, 由于本研究的目的是比较预先设定的分阶段延迟疏散场景下的疏散时间, 因此本研究的模拟不包括开始疏散前的时间, 如火灾警报的响起时间和人员反应时间等。

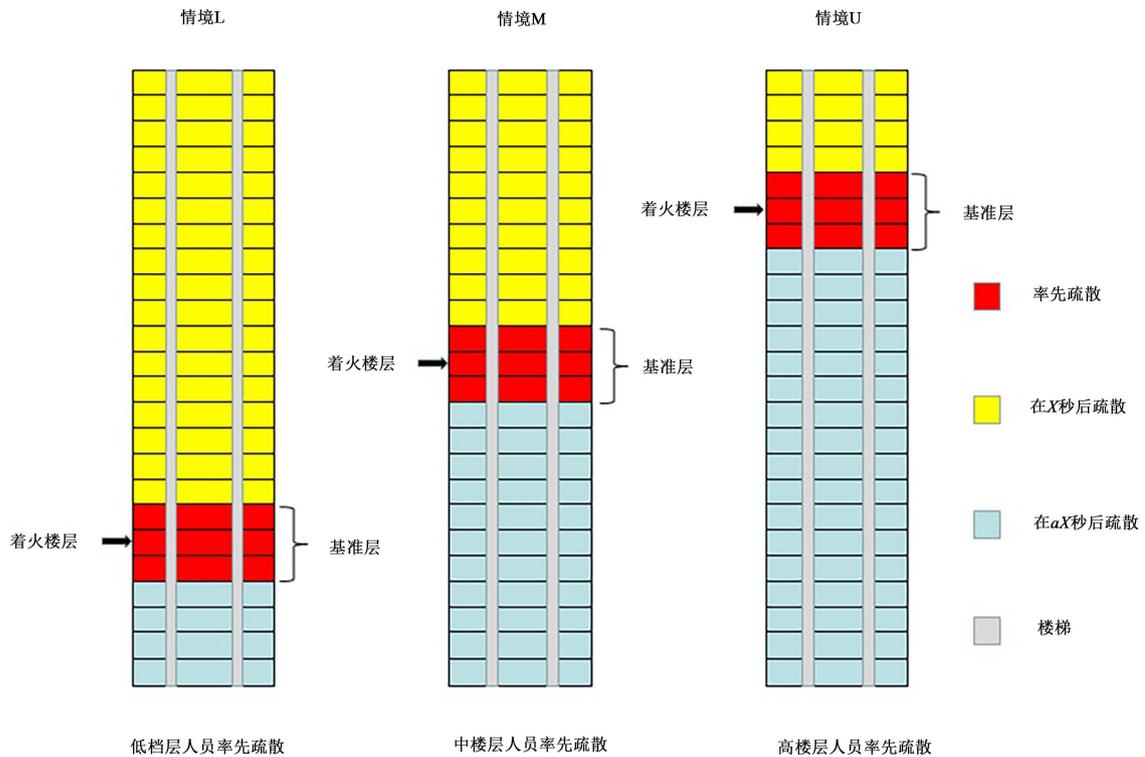


Figure 1. Schematic diagram of phased evacuation

图 1. 分阶段疏散示意图

由于人类行为的复杂性以及危险发生时可能产生的恐慌情绪, 人们在发生火灾时可能不会完全遵守延迟疏散的规则[15]。为了顺利实施分阶段疏散策略, 有两个主要的解决方案: 一是使用能够设置不同时间触发的报警装置, 进行延迟疏散的楼层将会被延后告知危险事件的发生; 二是通过持续的公民培训和疏散演习来改进人们在火灾发生时的疏散方式[2]。本文不对这些解决方案进行具体讨论, 假设建筑内人员均按照既定规则进行疏散。

3. 模型构建

3.1. 案例介绍

本案例为中国某办公楼, 总建筑面积 28,655 平方米, 共 22 层, 1~3 层为裙楼, 主楼高度为 94.95 米, 裙楼为 17.8 米, 本工程为一类工程, 建筑主楼、裙楼耐火等级均为一级。整栋楼共两处消防楼梯, 位于东、西两侧。无避难层, 电梯在火灾时停止使用, 因此人员均从两侧楼梯进行疏散。具体的楼层布置见图 2。

该案例的 3D 模型先通过 Revit 软件建立, 保持其几何结构的准确性, 再导入 Pathfinder 中, 为了便于 Pathfinder 的人员模拟, 需将模型每层构建网格平面, 如图 3 所示。

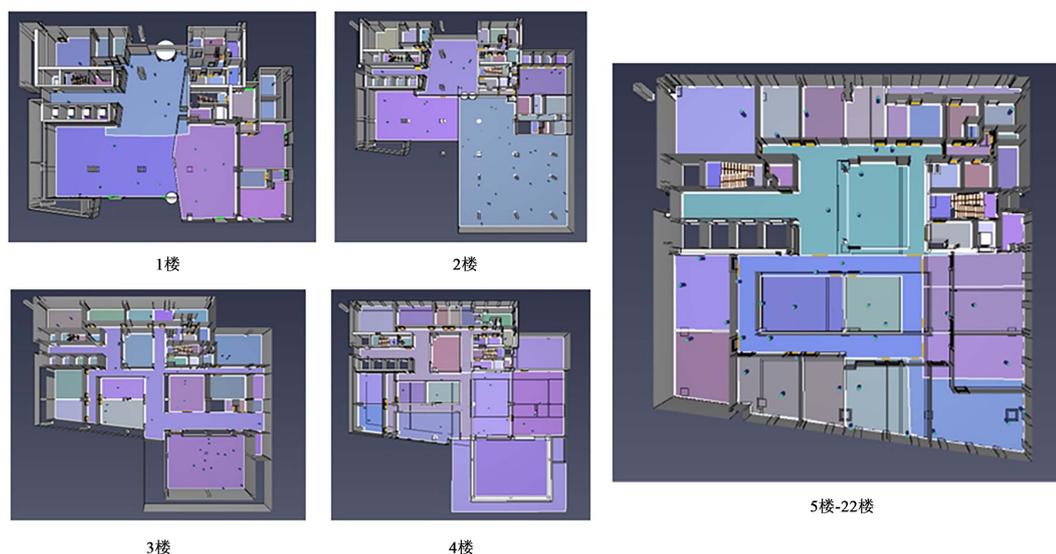


Figure 2. Layout of each floor

图 2. 各楼层布局图

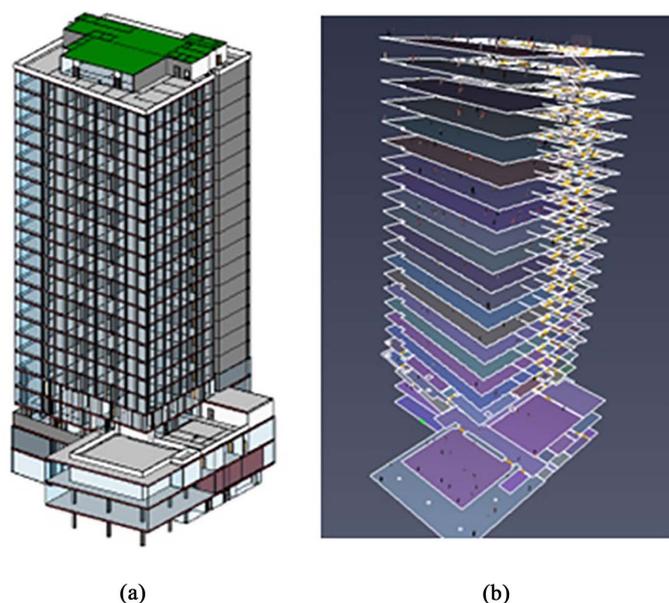


Figure 3. The Revit model (a) and Pathfinder model (b) of the case

图 3. Revit 模型(a)和 Pathfinder 模型(b)

3.2. 参数设置

疏散人员生理属性作为影响整体疏散结果准确性的重要评定因素，是基础性数据，其设定应符合国家现行标准及规范要求。本次疏散人数设定为 600 人，人员年龄按照 20~60 周岁正态分布设置，男女性别比按照 1:1 设置，其人员身高、体质参数按照《中国成年人人体尺寸(GB/T 10000-1988)》与相关文献[16][17]共同确定，疏散个体生理指标量表如下表 1 所示。

结合本案例特征和人员年龄正态分布特征划定人员年龄分布范围，按照 20%、30%、30%、20%的比例对四个年龄阶段人数进行划定，并按公式(1)进行加权平均计算。

Table 1. Evacuated individual physiological index scale
表 1. 疏散个体生理指标量表

性别	年龄/周岁	身高/m	体重/kg	肩宽/cm	行走速度 /m·s ⁻¹	爬行速度 /m·s ⁻¹
男	21~30	1.70	60	40.40	1.35	0.30
	31~40	1.70	60	40.40	1.22	0.27
	41~50	1.69	60.5	40.10	1.10	0.24
	51~60	1.68	61	40.10	1.00	0.22
女	21~30	1.60	52.00	37.20	1.215	0.27
	31~40	1.60	52.00	37.20	1.10	0.24
	41~50	1.60	52.50	37.10	1.00	0.22
	51~60	1.58	53.00	37.10	0.90	0.20

$$\bar{X} = \frac{X_1 f_1 + X_2 f_2 + \dots + X_n f_n}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 f_1 + Y_2 f_2 + \dots + Y_n f_n}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (2)$$

其中 \bar{X} 为人员行走速度的加权平均数, \bar{Y} 为人员肩宽的加权平均数, i 为第 i 个年龄段, X_i 、 Y_i 分别为第 i 个年龄段人员的行走速度与肩宽, f_i 为各年龄段对应人数, 并且将男性与女性人数按照各年龄段人数的 50% 计算。最终, 依据上述生理指标表, 分别取各年龄段男性、女性行走速度和肩宽指标按加权平均处理后, 男性人员行走速度与肩宽分别为 1.17 米/秒和 40.25 厘米, 女性人员行走速度与肩宽分别为 1.05 米/秒和 37.14 厘米。

为了使模拟更加具有真实性, 将人员随机放置于楼层内正常位置, 但该放置仍然存在不确定性, 单次模拟可能会导致特殊情况产生, 因此本文每个场景中的人员均以随机放置的方式进行 10 次模拟, 并对于平均结果进行比较, 以避免特殊情况产生, 确保仿真结果的正确性。

4. 结果和分析

在本节中, 根据第 2 章提到的三个因素, 即疏散顺序、延迟时间和延迟比例, 总共模拟了 31 个场景, 为了符合实际的疏散情况并有效提高疏散效率, 我们将延迟时间设定在 10 秒至 50 秒之间, 并选择延迟比例为 2 和 3。若人员在原地等待的时间过长, 将会导致更多的无效等待时间, 同时也不符合现实情况。因此, 合理地设定延迟时间和延迟比例是至关重要的, 以确保疏散计划的可行性和有效性。这些场景包括正常疏散情形以及分阶段疏散情境(火灾发生在建筑物的下部、中部及上部)、延迟时间(10 秒、20 秒、……、50 秒)和延迟比例(2、3)的所有可能组合。为了清晰地对各场景进行表达, 本节使用 $S_{L/M/U}T_{10/20/30/40/50}R_{2/3}$ 的命名来指代不同场景。其中, 字符 S 、 T 和 R 分别表示疏散情境、延迟时间及延迟比例, 其下标表示场景中的特定设置。例如, 场景 $S_L T_{10} R_2$ 是指火灾发生在低楼层, 延迟时间为 10 秒, 延迟比例为 2 的场景。案例研究的所有结果见表 2。

当延迟比例为 2 时, 随着延迟时间的增加, 各场景的疏散时间均在增加, 且大于正常疏散场景的疏散时间 688s, 如图 4 所示。对于情境 M 和情境 U , 在相同延迟时间下, 二者的疏散时间相差不大, 平均仅相差数秒, 但均大于相同延迟时间下的情境 L 。另外, 随着延迟时间的增加, 率先疏散低楼层场景的疏散时间增长速度最慢, 共增长 4.7%, 而情境 M 、情境 U 增长迅速, 分别增长了 10.2% 及 10.3%。

Table 2. Evacuation time of each scenario
表 2. 各疏散场景的疏散时间

延迟比例	疏散情境	疏散时间(秒)				
2	延迟时间(秒)	10	20	30	40	50
	情境 L	707.06	729.2	734.52	738.81	740.68
	情境 M	718.05	735	753	771	791.25
	情境 U	717.96	736.58	752.71	778.57	792.19
3	延迟时间(秒)	10	20	30	40	50
	情境 L	717.1	732.27	731	733.95	735
	情境 M	722.41	749.65	790.52	816.5	821.1
	情境 U	721.79	752.64	722.52	813.725	844.65

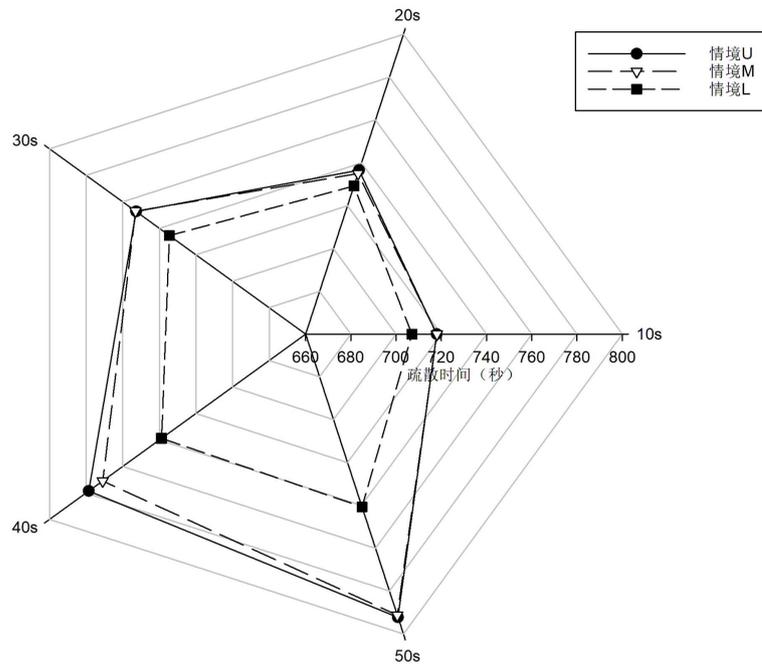


Figure 4. Evacuation time of each scenario when the delay ratio is 2
图 4. 延迟比例为 2 时各场景的疏散时间

以正常疏散场景、 $S_L T_{50} R_2$ 、 $S_M T_{50} R_2$ 以及 $S_U T_{50} R_2$ 场景为例，图 5 为四个场景的疏散过程剩余人员曲线。在分阶段疏散的三个场景中，延迟时间均为 50 秒，延迟比例为 2，区别在于疏散顺序不同。从图中可以看出，三个分阶段疏散场景的疏散曲线相似，但 $S_M T_{50} R_2$ 以及 $S_U T_{50} R_2$ 两个场景疏散时间较长，且曲线近乎重合。在 62 秒时， $S_L T_{50} R_2$ 场景内人员数量已经低于 600，表明已经有人员安全离开了建筑物。而在另两个分阶段疏散场景中，其剩余人员曲线在 105 秒左右开始下降，其原因在于， $S_L T_{50} R_2$ 场景中，最先疏散的 5 楼、6 楼及 7 楼的人员在其下部人员还未开始疏散时已经抵达一楼并安全疏散了，而 $S_M T_{50} R_2$ 以及 $S_U T_{50} R_2$ 场景中最先开始疏散的人员在建筑的中高部，短时间内还无法抵达一楼，直到 100 秒时下部人员开始疏散，靠近出口的人员在 105 秒左右离开了建筑，曲线才开始下降。而在正常疏散场景中，由于没有疏散延迟，其曲线从疏散刚开始时即开始下降，并且曲线下降速度整体保持平稳，最终疏散时间也小于其他三个分阶段疏散场景。

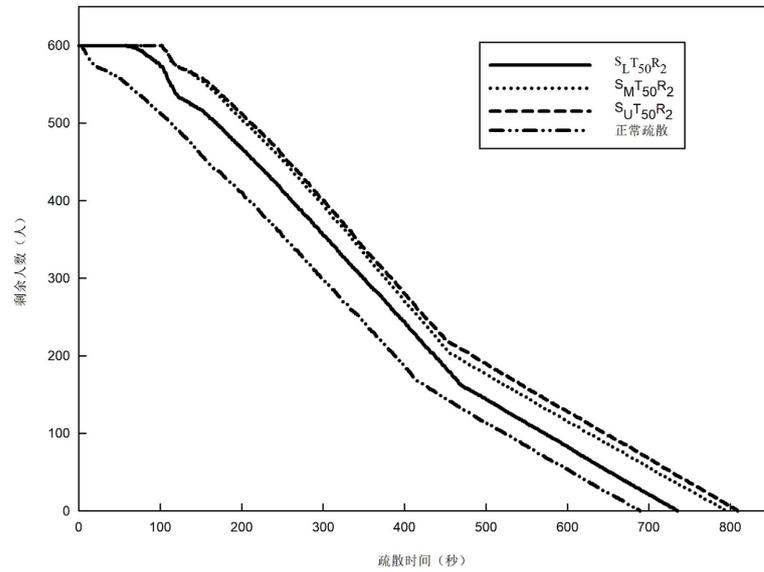


Figure 5. The remaining number of agents in the evacuation process in the scenarios of $S_L T_{50} R_2$, $S_M T_{50} R_2$, $S_U T_{50} R_2$ and the normal evacuation scenario

图 5. 正常疏散场景、 $S_L T_{50} R_2$ 、 $S_M T_{50} R_2$ 以及 $S_U T_{50} R_2$ 场景的剩余人员曲线

另外，当延迟比例为 3 时，疏散顺序以及延迟时间对于疏散时间的影响与延迟比例为 2 时类似，详见图 6。情境 L 所花费的疏散时间最短，且随着延迟时间的增加，这一趋势变得更为显著。情境 M 及情境 U 所花费的时间相差不大，并且随着延迟时间的增加，疏散时间同步增加。具体原因在于，延迟比例为 3，导致下部楼层延迟时间过长，即使上部人员疏散更为顺畅，但总体的疏散时间仍会增加。

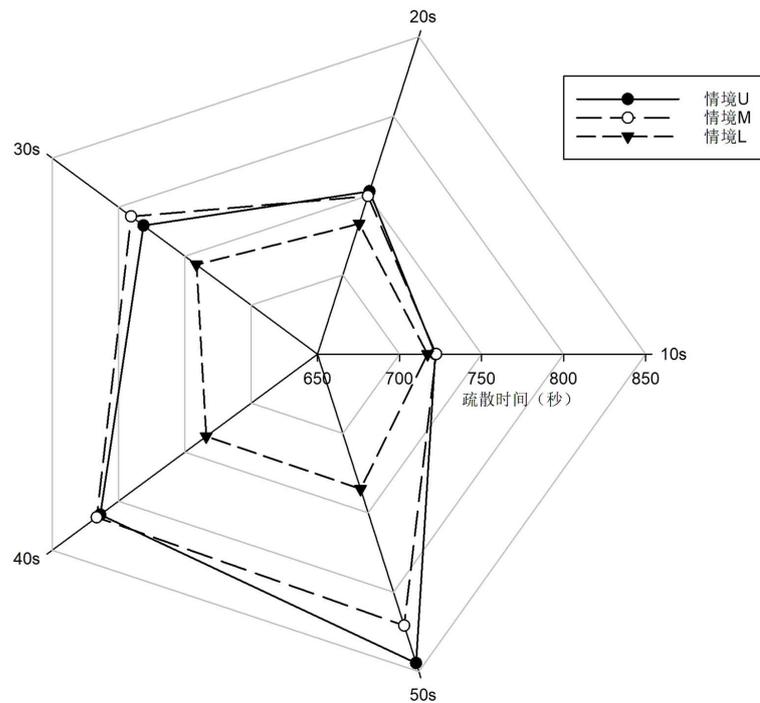


Figure 6. Evacuation time of each scenario when the delay ratio is 3

图 6. 延迟比例为 3 的各场景疏散时间比较

然而，相比于正常疏散，分阶段疏散策略可以提高率先疏散楼层的疏散速度。为了比较这一点，本文计算了着火点附近人员离开基准层的时间。分阶段疏散情景虽有 30 种，但由于有延迟时间的存在，率先疏散的楼层人员基本不会受到其他楼层人员疏散的影响，因此他们离开基准层的时间基本相近。为避免人员所处房间位置不同而引起疏散时间的差别，本文随机改变人员所处位置，每个场景均进行了十次模拟，并取平均值得出最终数据，列于表 3 中。

从表中可以看出，在正常疏散的场景中，5 楼、6 楼及 7 楼的人员离开基准层，也即全部到达 5 楼以下楼层所需的时间为 98 秒，而情境 L 所花时间为 87 秒，时间减少 11.2%，情境 M 通过分阶段疏散的方式也能减少 13.3% 的疏散时间，而情境 U 由于高层人数较少，对于楼梯的使用也未达到饱和，人与人之间的拥挤程度较低(见图 7)，所以正常疏散和分阶段疏散的方式对于高层人员离开基准层的时间并没有显著影响。

Table 3. Comparison of the time required for evacuees to leave the datum floors in the normal and phased evacuation scenarios
表 3. 正常疏散与延迟疏散下疏散人员离开基准层所需时间对比

	正常疏散(秒)	延迟疏散(秒) (率先疏散相应楼层的情景)	时间减少百分比
5、6、7 楼人员	98	87	11.2%
11、12、13 楼人员	75	65	13.3%
17、18、19 楼人员	73	73	0.0%

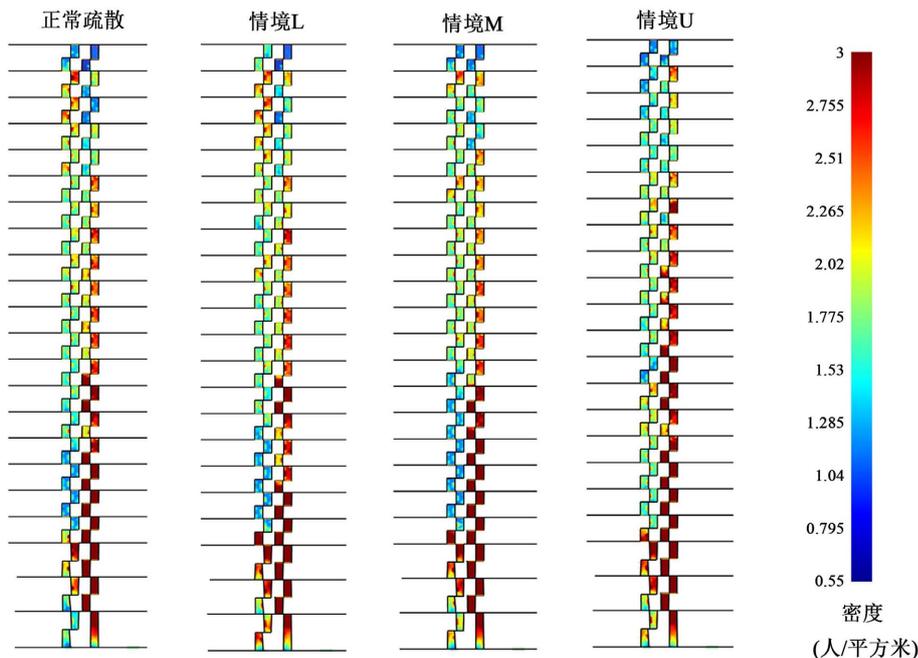


Figure 7. The maximum density of the stairs under different plans
图 7. 各情境下的最大密度热力图

此外，考虑到火灾附近的受伤人员需要迅速获得救助，我们选取了基准层人员最先到达安全出口的时间作为指标，以确保他们能在第一时间离开大楼获取救助，具体数据见表 4。在正常疏散的情况下，5 楼、6 楼和 7 楼的人员最先到达 1 楼安全出口的时间为 92.8 秒，而在延迟疏散(指情境 L)的情况下，这一

时间缩短为 62 秒，减少了 33.2%；为了简洁起见，其余数据均可在表 4 中找到。

从表 4 中可以看出，楼层越高，正常疏散情景和延迟疏散情景之间的时间差越小。这是因为当楼层较低时，率先疏散的人员能够在短时间内到达安全出口，避免了楼梯被其他楼层人员堵塞的情况。而楼层较高时，尽管有延迟疏散的存在，但率先疏散的人员尚未到达安全出口，楼梯就已经被低楼层人员占据，从而降低了率先疏散人员的移动速度。但是，相比于正常疏散，分阶段疏散的情况下人员最先到达安全出口所需的时间仍然更少。

Table 4. The time taken by the first person to reach the safety exit

表 4. 最先到达安全出口时间

	正常疏散(秒)	延迟疏散(秒) (率先疏散相应楼层的情景)	时间 减少百分比
5、6、7 楼人员	92.8	62	33.2%
11、12、13 楼人员	169	125	26.0%
17、18、19 楼人员	281	251	10.7%

不同的延迟时间影响了拥挤程度，进而影响总体疏散时间。整栋建筑最拥挤的部位集中在建筑内部的楼梯处，大量人员涌向楼梯，导致楼梯处的人员移动速度减慢，特别是二楼处的楼梯，因为几乎所有人员都需要通过二楼的楼梯前往出口。而在进行分阶段疏散后，人员改变自己的疏散顺序及疏散路线，可以在一定程度上改变拥挤程度。

以场景 $S_M T_{20} R_2$ 为例，图 8 为该场景和正常疏散情景在建筑二楼东侧楼梯处的人员分布情况。从图中可以看出，由于延迟疏散的缘故，场景 $S_M T_{20} R_2$ 在该楼梯处的人员数量增加滞后于正常疏散场景。在 100 秒前， $S_M T_{20} R_2$ 场景在该楼梯处的人员数量比正常疏散情境少 10 人左右，在 100~200 秒之间两个场景相差 5 人左右。此外，在正常疏散场景下，该楼梯处在 123 秒时达到了最多 20 人，而 $S_M T_{20} R_2$ 场景最多达到 17 人，相比正常疏散场景，分阶段疏散以延长了总体疏散时间为代价，使得人员更为均匀地分散在楼梯处，降低了楼梯的最大拥挤程度。

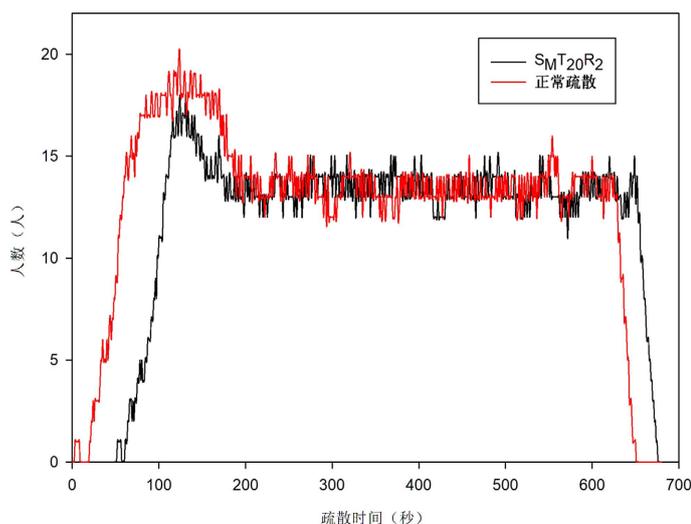


Figure 8. Comparison of the number of agents at the staircase of the second floor on the east side in $S_M T_{20} R_2$ scenario and total evacuation scenario

图 8. $S_M T_{20} R_2$ 场景与正常疏散场景在东侧楼梯处的人员比较

5. 结论和展望

本研究建立了基于多智能体的高层建筑疏散仿真模型, 结合 Pathfinder 软件, 通过改变疏散顺序、延迟比例和延迟时间, 建立了 31 种不同疏散场景, 比较整体疏散和分阶段疏散的仿真过程, 研究了疏散顺序、延迟比例和延迟时间三个重要因素对于疏散过程和疏散结果的影响。案例研究结果表明, 随着延迟时间的增加, 各情境疏散时间增加, 情境 U 花费时间最长, 情境 L 花费时间最短。对于情境 M 和情境 U 而言, 其离开基准层所需时间比正常疏散减少了 13.3% 和 11.2%, 而情境 L 下对应人员最先到达出口时间比正常疏散减少了 33.2%。总之, 相比于正常疏散, 分阶段疏散能够提高局部楼层人员的疏散效率, 减少高层建筑瓶颈处的疏散密度, 降低发生踩踏事件的风险, 促进人员迅速撤离着火楼层。另外, 本文的研究结果也为建筑疏散管理人员提供了一些实际意义。例如, 在火灾疏散时, 可以选择按照本研究所设计的分阶段疏散方式进行疏散, 相比传统的疏散方式能降低火灾对人员的伤害, 提高着火层及着火层以上人员的疏散效率, 对于需要急救的伤员, 使用此方法也可以更快地到达出口获得救助。

基金项目

本论文获教育部人文社会科学项目(21YJAZH059)资助。

参考文献

- [1] Ma, J., Song, W.G., Tian, W., Lo, S.M. and Liao, G.X. (2012) Experimental Study on an Ultra High-Rise Building Evacuation in China. *Safety Science*, **50**, 1665-1674. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.018>
- [2] Rismanian, M. and Zarghami, E. (2022) Evaluation of Crowd Evacuation in High-Rise Residential Buildings with Mixed-Ability Population: Combining an Architectural Solution with Management Strategies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **77**, Article ID: 103068. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103068>
- [3] 陈丽丽. 高层建筑应急疏散及策略研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海应用技术大学, 2020.
- [4] Oven, V.A. and Cakici, N. (2009) Modelling the Evacuation of a High-Rise Office Building in Istanbul. *Fire Safety Journal*, **44**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.02.005>
- [5] Shields, T.J., Boyce, K.E. and McConnell, N. (2009) The Behaviour and Evacuation Experiences of WTC 9/11 Evacuees with Self-Designated Mobility Impairments. *Fire Safety Journal*, **44**, 881-893. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.04.004>
- [6] Pelechano, N. and Malkawi, A. (2008) Evacuation Simulation Models: Challenges in Modeling High Rise Building Evacuation with Cellular Automata Approaches. *Automation in Construction*, **17**, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.06.005>
- [7] McConnell, N.C., Boyce, K.E., Shields, J., Galea, E.R., Day, R.C. and Hulse, L.M. (2010) The UK 9/11 Evacuation Study: Analysis of Survivors' Recognition and Response Phase in WTC1. *Fire Safety Journal*, **45**, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.09.001>
- [8] Ahrens, M. (2016) High-Rise Building Fires. National Fire Protection Association.
- [9] Soltanzadeh, A., Mazaherian, H. and Heidari, S. (2021) Optimal Solutions to Vertical Access Placement Design In residential High-Rise Buildings Based on Human Behavior. *Journal of Building Engineering*, **43**, Article ID: 102856. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102856>
- [10] Chen, J., Ma, J. and Lo, S.M. (2017) Event-Driven Modeling of Elevator Assisted Evacuation in Ultra High-Rise Buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **74**, 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.004>
- [11] Zang, Y., Mei, Q. and Liu, S. (2021) Evacuation Simulation of a High-Rise Teaching Building Considering the Influence of Obstacles. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **112**, Article ID: 102354. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102354>
- [12] Arewa, A.O., Ahmed, A., Edwards, D.J. and Nwankwo, C. (2021) Fire Safety in High-Rise Buildings: Is the Stay-Put Tactic a Misjudgement or Magnificent Strategy? *Buildings*, **11**, 339. <https://doi.org/10.3390/buildings11080339>
- [13] 陈哲. 在建超高层建筑火灾烟气扩散及人员疏散规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [14] Zhang, L., Wu, X., Liu, M., Liu, W. and Ashuri, B. (2019) Discovering Worst Fire Scenarios in Subway Stations: A Simulation Approach. *Automation in Construction*, **99**, 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.007>

-
- [15] Zhou, R., Ou, Y., Tang, W., Wang, Q. and Yu, B. (2020) An Emergency Evacuation Behavior Simulation Method Combines Personality Traits and Emotion Contagion. *IEEE Access*, **8**, 66693-66706. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985987>
- [16] Virkler, M.R. (1998) Prediction and Measurement of Travel Time along Pedestrian Routes. *Transportation Research Record*, **1636**, 37-42. <https://doi.org/10.3141/1636-06>
- [17] 国家技术监督局. GB/T 10000-1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.