

考虑救援行为的地铁水灾行人疏散建模与仿真

马敏敏, 李兴莉*, 王田楠, 朱子琳, 郭庆华

太原科技大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月14日

摘要

地铁水灾人员疏散与救援问题是城市公共安全管理中的重要研究方向。本文以太原市辑虎营地铁站为研究对象, 基于AnyLogic仿真平台, 考虑了洪水蔓延过程、异质行人特性、生存质量变化机制及救援人员的响应行为, 构建了一个多因素耦合的地铁水灾疏散与救援仿真模型。模型中提出“生存质量值”, 用于动态刻画个体在水深变化过程中的状态演化, 设置了行人从行走、爬行到完全失去行动能力的状态转变逻辑; 同时设计了多救援者协同机制, 通过任务分配互斥策略提升资源调度效率。模拟分析了救援人数、进场时间、行人密度等因素对疏散效率与生存率的影响。结果表明, 针对短时强降水情境下雨水倒灌地铁站场景, 救援人员的数量与到达时间是影响个体生存率和整体疏散效率的关键因素; 适度密度有助于行人逃生, 而过高密度则加剧拥堵, 增加个体在水灾中的滞留时间, 提高救援难度; 老年人因初始生存质量值较低, 更易进入行动受限状态, 需被优先纳入救援对象。本文研究结果为地铁水灾情境下的应急响应优化提供了理论依据, 也为灾害环境下异质个体行为建模与智能体交互研究提供了新思路。

关键词

地铁水灾, AnyLogic, 多智能体救援, 疏散仿真

Pedestrian Evacuation Modeling and Simulation in Subway Flooding Considering Rescue Behavior

Minmin Ma, Xingli Li*, Tiannan Wang, Zilin Zhu, Qinghua Guo

School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 马敏敏, 李兴莉, 王田楠, 朱子琳, 郭庆华. 考虑救援行为的地铁水灾行人疏散建模与仿真[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 110-122. DOI: 10.12677/mos.2025.148552

Abstract

Evacuation and rescue in subway flooding scenarios have become key concerns in the field of urban public safety management. This study is based on the AnyLogic simulation platform and takes the Jihuying subway station in Taiyuan as a case study. Considering the spread of flooding, heterogeneous pedestrian characteristics, survivability dynamics, and the response behavior of rescuers, a multi-factor coupled simulation model for flood evacuation and rescue in subway environments is developed. Numerical simulations are conducted to analyze the impact of rescuers' arrival time, number of rescues and pedestrian density on evacuation efficiency and individual survivability. Results indicate that, under heavy rainfall leading to rapid subway flooding, the number and timely arrival of rescuers are critical to improving individual survival and overall evacuation performance. Furthermore, while moderate pedestrian density facilitates orderly evacuation, excessive density tends to cause congestion, prolong evacuation time, and increase the difficulty of rescue operations. Elderly individuals, due to their lower initial survivability quality value, are more likely to enter a state of limited mobility and therefore should be prioritized as rescue targets. The research results will provide theoretical guidance for optimizing emergency response strategies, and offer new insights into heterogeneous agent behavior modeling and multi-agent interactions in disaster environments.

Keywords

Subway Flooding, AnyLogic, Multi-Agent Rescue, Evacuation Simulation

Copyright © 2025 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

随着全球气候变化加剧，极端天气事件频繁发生，特别是暴雨和洪水灾害对城市地下空间的安全构成了严重威胁。地铁作为城市重要的交通枢纽，承载着大量的客流，在满足城市快速发展的交通需求的同时，也面临着洪水等自然灾害的潜在风险。近年来，全球多个城市发生了由极端降雨引发的地铁洪水事件，造成了严重的人员伤亡和经济损失。例如，2020年7月郑州地铁水灾事件导致了大规模的地铁内涝，约有数百人被困地铁站内，人员的疏散和救援过程面临巨大的挑战[1]。此外，2012年6月，英国伦敦地铁遭遇暴雨淹没，数百名乘客被迫沿铁轨疏散，暴露出地铁系统在极端水灾条件下的脆弱性。类似地，2020年5月，广州地铁13号线官湖站发生雨水倒灌，站内被迫启动应急预案疏散乘客，这些事件都突显了地铁系统在面对极端水灾时的应急反应能力和疏散效率面临的巨大挑战。

地铁站的封闭性和复杂的地下结构使其在洪水发生时极易被淹没，水流的迅速蔓延不仅会导致车站的功能瘫痪，还可能限制疏散通道，增加人员的疏散难度，并引发踩踏和恐慌等灾难性后果[2]。研究表明，地铁系统中的人员疏散效率在洪水发生时受多个因素的影响，包括水灾的入侵速度、洪水深度、人员密度以及应急救援的及时性[3]。因此，建立有效的洪水救援机制，研究地铁站内的人员疏散行为，制定科学合理的应急预案，已成为提高地铁系统韧性和减少灾害损失的关键。

目前，地铁洪水救援和人员疏散的研究主要分为两类：一类是基于水灾入侵过程的宏观模拟，另一类则是基于个体行为的微观模拟。Lyu等[4]通过结合GIS和SWMM模型，研究了上海地铁的水灾模拟，

分析了洪水对地铁系统的影响,并提出了应急疏散策略。Zheng 等[5]则使用元胞自动机模型,模拟了地铁站内的水灾蔓延过程,并分析了不同水灾情境下的人员疏散路径。黄聪等[6]通过元胞自动机模拟极端降雨下的洪水入侵过程,探讨了进水流量和进水口位置等因素对地铁站人员疏散效率的影响。梁本部等[7]结合洪水数值模拟技术,设定不同水灾场景,对洪水作用下楼梯区域的人员疏散风险进行了量化分析,为评估垂直通行路径的安全性提供了依据。然而,大多数现有的研究主要侧重于水灾蔓延和洪水深度的分析,较少考虑在实际救援过程中,救援者的参与、疏散路径优化和人员行为模式的动态变化。

综上,本文基于 AnyLogic 仿真平台,构建了一个综合考虑异质行人、水灾环境与救援者行为的多因素仿真模型,系统模拟了地铁站在水灾情境下的人员疏散与救援过程。并探究疏散救援过程中各因素的影响大小,并提出优化疏散救援策略。

2. 模型

2.1. 水灾救援模型搭建

本研究聚焦于短时间内突发性强降雨带来的影响。以山西省太原市为例,城市呈“两山夹一川”的地貌格局,城市建设沿东西山向汾河谷地延伸,部分地铁站点处于地势低洼区域,在遭遇强降雨时更易发生雨水倒灌现象。尽管当前科学预警系统在降雨预报方面已取得显著进展,但在实际城市运行中,面对突发天气仍存在响应时间短、不确定性强等问题。因此,本文以突发情境为前提,模拟极端降雨下雨水短时大量涌入地铁站的倒灌风险,以期对地铁系统应急响应和救援策略提供数据支撑。

Anylogic 中提供的行人库基于社会力模型,能够模拟仿真行人流。本文重点以太原市 2 号线辑虎营地铁站为案例,构建在短时强降雨情境下雨水倒灌地铁站的应急疏散模拟模型。该站位于市中心,工作日客流高度集中于早晚高峰(尤其 7:00~9:00,以通勤为主);周末客流则相对分散、平稳,以休闲出行乘客为主。车站设计具备应对大规模人流的能力,地铁站共设有 A、B、C、D 四个出入口,分别设置上行到 B1 层与下行到 B2 层的两个扶梯,10 台自动购票机,4 台进站安检机,以及若干进站与出站闸机。图 1 为该地铁车站示意图。

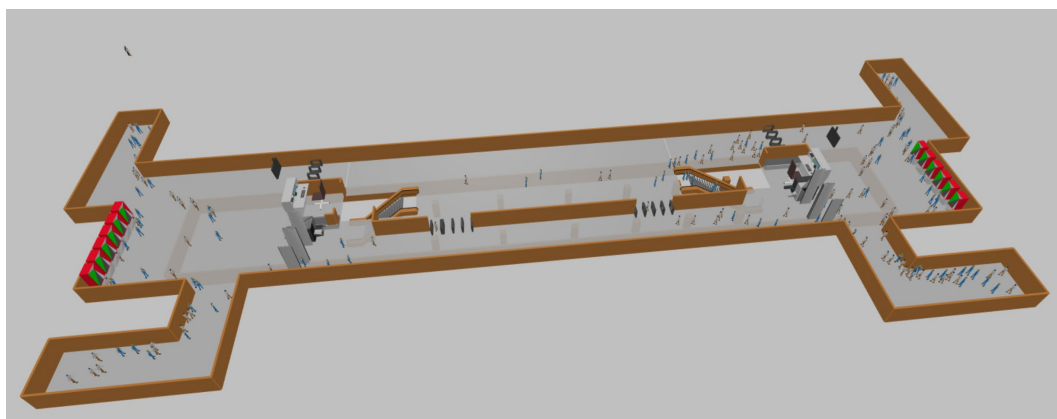


Figure 1. 3D visualization of the subway station

图 1. 地铁 3D 图

基于地铁站台运作流程的基本逻辑,模拟了 B1 层乘客由 A/B/C/D 口进入,经购票安检、过闸机后,乘电梯下至 B2 层乘车;B2 层下车乘客乘电梯升至 B1 层,过闸机后选口出站,图 2 为站厅层行人流线图。在水灾发生之后,乘客停止一切乘车行为离开地铁站,系统启动救援模式,图 3 为救援仿真演化图。救援者从站台出口处进入,参与救援任务直至所有需救援个体完成转移。为识别是否需要外部救援,模

型中设置了生存质量值 $S_c(t)$ ，用于动态描述个体在水灾环境下的生存状态。当某一时刻，个体 i 的生存质量 $S_c(t)$ 降低至初始值的四分之一以下(即 $0 < S_c(t) < 0.25 \times S_c(t)$)，则需标记为“待救援”个体。救援者优先施救此类个体，按生存质量值从低到高进行排序，优先救助最危急者。

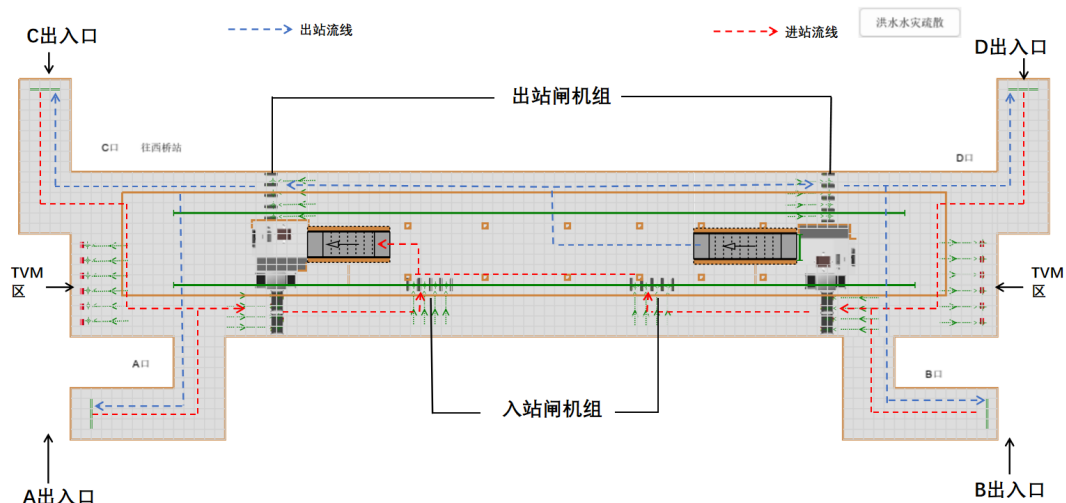


Figure 2. Pedestrian flow paths on the concourse level of the subway station

图 2. 站厅层行人流线图



Figure 3. Rescue simulation evolutionary pattern, where fallen pedestrians represent individuals requiring assistance and black-colored agents carrying others represent active rescuers

图 3. 救援仿真演化图，其中倒地行人为需要救援的行人，黑色背负行人代表正在救援

本论文对水灾入侵的仿真过程以及救援过程进行了研究，为了避免对模拟结果造成影响，结合地铁站的特点，现作以下基本条件的假设：

- (1) 假定水灾入侵不受外部环境因素影响，如温度、湿度、风速等。
- (2) 假设水灾模拟为短时强降水影响产生的雨水倒灌。水流为从 A、C 两口灌入，水流自由扩散，靠近楼梯的地方水位较浅，在灌入过程中不考虑泄水、漏水等因素。
- (3) 水灾疏散救援开始后，地铁站所有出入口闸门处于打开状态，电梯暂停使用。

(4) 因国内地铁防洪设计侧重于防止水灾对地铁设施的影响，并不广泛采用专门避难所，因此本模型不考虑高建筑物式的避难所设计。

图 4 展示了仿真模型的整体流程图。

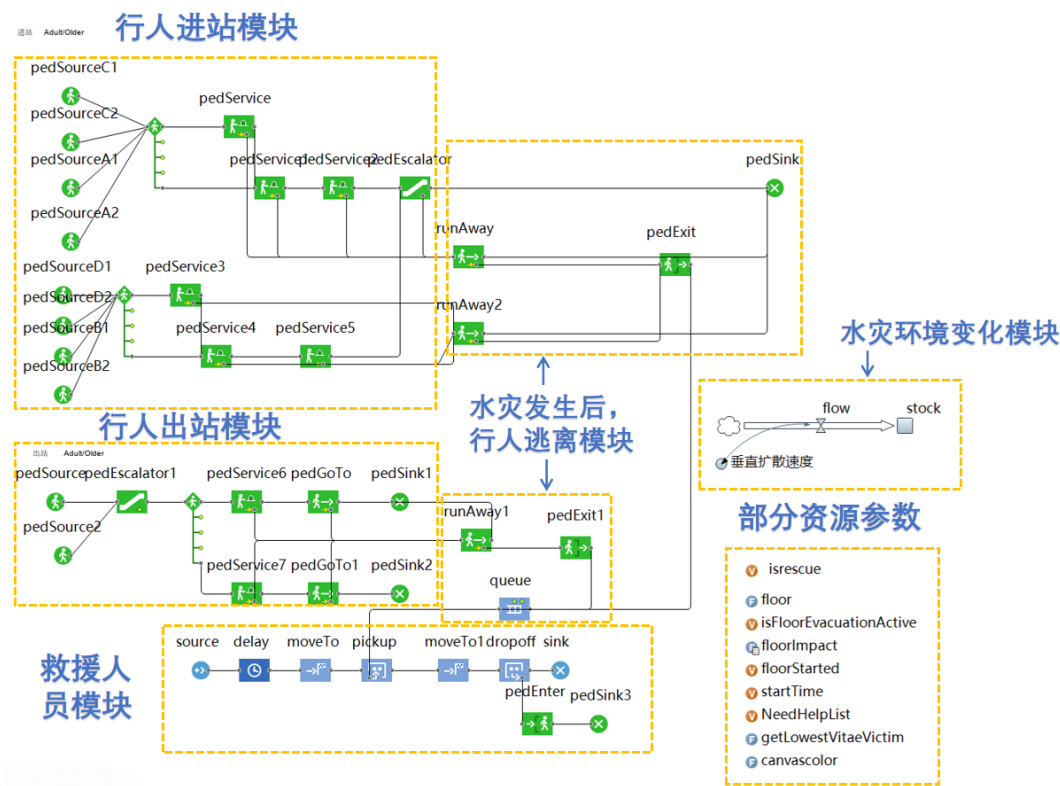


Figure 4. Simulation model flow char
图 4. 仿真模型的整体流程图

2.2. Agent 模型

为了更真实地还原地铁水灾中的个体行为响应与多角色协作机制，本文在建模过程中引入了多智能体交互模型。模型中包括多类智能体：异质行人(成年人与老年人)、水灾环境系统与救援人员，各智能体具有独立的属性状态与决策逻辑。

(1) 异质行人

Table 1. Parameter values for pedestrians
表 1. 行人参数取值

行人类型	初始速度	水灾中的速度	生存质量初始值 S_0
正常成年人	[1.15, 1.34] [9]	[0.3, 0.9] [3]	8 [11]
正常老年人	[0.8, 0.94] [10]	[0.1, 0.3] [3]	4 [11]

为了更真实地反映水灾灾害情况下行人的疏散模式，基于行人的生理差异，在地铁水灾救援疏散模型中，考虑到不同类型行人的行为差异，本文将行人细分为老年人和成年人两类，考虑其在生理特征、生存质量、疏散速度等方面的差异。通过构建状态图模拟其在水位变化下从正常行走、爬行、失去行动能力到死亡的动态演化过程，体现出异质行人的行为响应机制。Campanella 等人[8]认为，行人异质性主

要体现在期望速度的差异上，因此本文为每类行人设置不同的疏散速度。老年人在灾害中的疏散能力通常较弱，水灾中初始行走速度设为 $[0.1, 0.3]$ [3]，成年人在灾害中通常具有较强的生理素质和较快的反应能力，成年人群体的疏散速度较快，水灾中初始速度设为 $[0.3, 0.9]$ [3]，表 1 为行人具体的参数，图 5 为行人状态图。

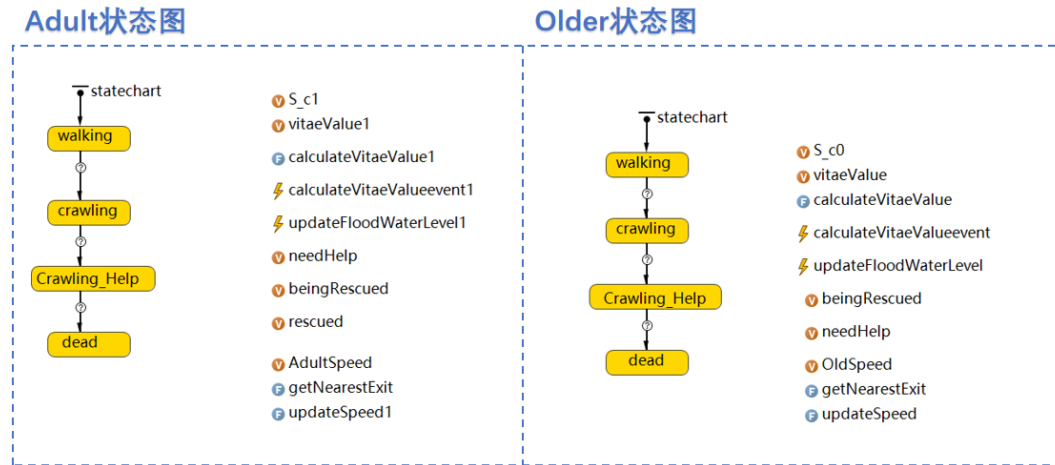


Figure 5. Pedestrian state chart

图 5. 行人状态图

(2) 救援人员

救援人员模型具备识别需救援个体、优先选择低生存质量者等功能。救援人员从地铁出入口进入站内，依据视野范围主动搜索受困行人，并结合行人生存质量值进行动态优先排序，优先前往生存质量最低、最亟需救援的个体位置展开施救。为避免救援人员对同一目标产生重复分配与资源冲突，模型引入任务分配互斥机制：待救援个体通过状态变量(isCarrying)标记是否已被救援人员锁定；一旦被某名救援人员选中，其状态将设为“已分配”，其他救援者将跳过该目标，任务完成后状态重置释放目标。

图 6 为救援人员状态图，其状态包括“待命”、“搬运”的状态，确保在资源有限下实现高效协同、优先救援的策略。模型支持多名救援者的并行部署，并考虑任务冲突的解决机制。

 isCarrying

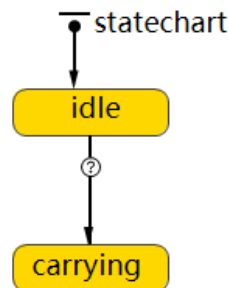


Figure 6. Rescuer state chart

图 6. 救援人员状态图

(3) 水灾环境系统

水灾环境如图 7 所示，以系统动力学方式实现洪水水位的全局匀速上升，影响范围逐步扩大。环境系统将动态影响行人的生存质量值计算和速度调整。本模型以可视化方式呈现洪水深度对各行区域的影响，并将行人状态变化与环境因素结合起来。

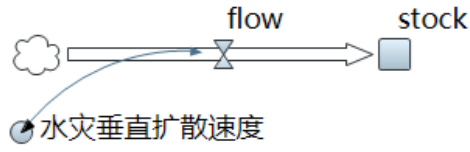


Figure 7. Flood system dynamics diagram
图 7. 水灾系统动力学图

2.3. 水灾蔓延对行人行为的影响

地铁站水灾蔓延对行人行为影响主要分为主观影响与客观影响。客观影响主要体现在水灾深度对行人生存质量值的动态变化作用上，主观影响体现在水灾环境下行人的心理恐慌状态。

2.3.1. 水灾深度与生产质量值的联动

本文充分考虑水灾动态扩散对行人生存状态的累积性影响，并引入个体差异性与生存质量在动态环境中的衰减过程，将生存质量值视为受水灾持续作用下的连续动态衰减变量，更真实地模拟行人在无法及时撤离情境下的状态演化过程。具体而言，模型引入水灾扩散速度参数，体现了水灾情境下生存质量值的动态变化情况；同时，设置危险水平折减率，综合考虑水深与扩散速率对行人生存质量值的联合作用。此外，本文通过生存质量值的变化过程，揭示出不同阶段行人的状态特征，包括直立行走、爬行及死亡。随着行人在水灾危险源中停留时间的延长，水灾深度不断增加，生存质量值逐渐减小，直至为 0，行人失去行动能力。公式 1 表示时间间隔 t 处行人生存质量计算方法，假设水灾以匀速扩散，其水灾深度随时间变化公式如公式 2 所示。

$$S_c(t) = S_c(t-1) - k \times H(t) \quad (1)$$

$$H(t) = v \times t \quad (2)$$

其中， $H(t)$ 为水灾深度； v 为水灾扩散速度； t 为时间； $S_c(t-1)$ 为上一秒生存质量值，初始值为 S_{c0} ； k 为危险水平的折减率，取值为 0.1 [11]。

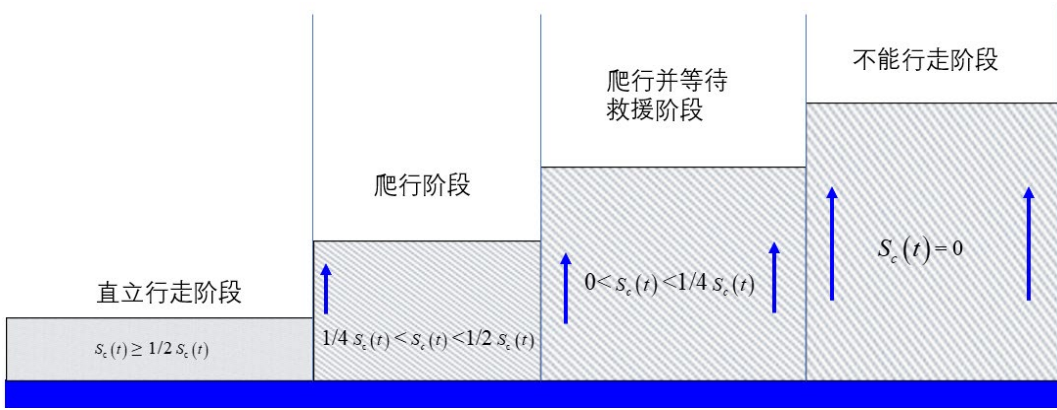


Figure 8. Diagram of pedestrian states classified by survivability values
图 8. 不同生存质量值对应的行人状态划分图

在本文中,随着时间推移将行人生存质量 $S_c(t)$ 划分为四阶段,如图 8 所示。第一阶段为直立行走阶段(生存质量 $S_c(t) \geq 1/2 S_c(t)$): 此阶段行人具备较高的活动能力,能够以正常步态行走并进行自救。第二阶段为爬行阶段($1/4 S_c(t) < S_c(t) < 1/2 S_c(t)$): 此阶段行人因体力和健康状况的下降,能够以较低效率自主爬行完成部分疏散过程。在此阶段,成年人爬行速度为 0.73 m/s [12]。相同密度下,老年人的通行能力通常低于成年人约 25% [13],因此老年人的爬行速度则降低至 0.54 m/s。第三阶段为爬行等待救援阶段($0 < S_c(t) < 1/4 S_c(t)$): 此阶段行人活动能力进一步下降,虽仍具微弱生理机能,但已无法有效移动,必须依赖外部救援完成疏散。第四阶段为死亡阶段($S_c(t) = 0$): 此阶段行人因生存质量耗尽而失去行动能力。

2.3.2. 恐慌驱动下的行人心理与行为

此外,除了客观因素对行人生存质量的直接影响,水灾环境下行人的主观心理状态也对其行为产生了重要作用。研究表明,突发的水灾灾害往往会引发行人的恐慌情绪,这种心理状态会进一步加剧疏散行为的复杂性和不可预测性。相比于生存质量的逐渐衰减,恐慌情绪可能导致行人做出不理性的决策,降低疏散效率,甚至引发群体性的混乱。

$$T = \frac{1}{1 + e^{-\alpha((h_{\max} - h)/h_{\max} - \beta)}} \quad (3)$$

其中, α 为行人恐慌激增系数,值为 0.556 [14]。 $h_{\max}$ 为行人无法行走的临界阈值,取值为 70 [15]; β 为恐慌边界约束值,为保证 $T(0) \rightarrow 0$ 取值为 7.5 [16]。恐慌因素下行人速度动态变化公式为:

$$V_q = (1 - K \cdot T) V_m \quad (4)$$

式中, k 为恐慌下降梯度,取值为 10 [17]。 V_m 为水灾中行人初始速度,取值为[0.3, 0.9]。

3. 模拟仿真与分析

本文设置工况为地铁站 A、C 两口灌入,水流自由扩散,根据入侵安全逃生的临界单宽流量[18]与地铁站占地尺寸进行计算,设初始流量为 0.28 cm/s。本研究采用控制变量法分别分析不同因素对疏散救援结果的影响。

3.1. 有无救援行为对比分析

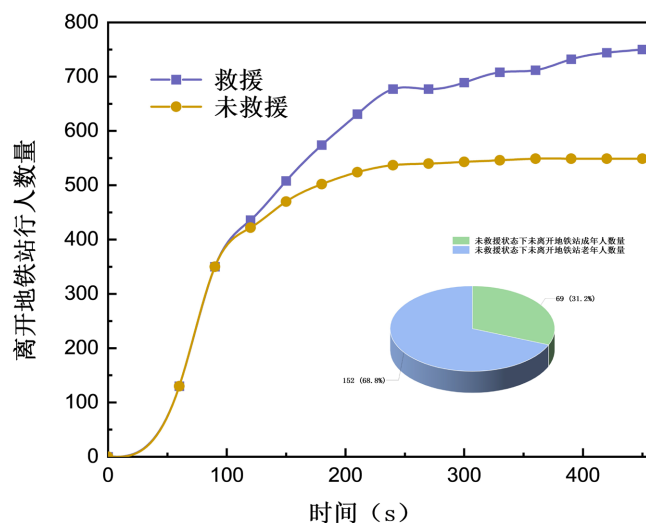


Figure 9. Changing curve of evacuated pedestrian quantities over time under rescue and no-rescue scenarios

图 9. 救援与未救援情况下, 离开地铁站行人数量随时间变化曲线

图9为在有无救援行为情境下,行人离开地铁站人数随时间的变化曲线(设定总人数 $N = 750$,成年人占比70%、老年人占比30%,水灾发生时间为90 s,水灾流量 $V_f = 0.28 \text{ cm/s}$,救援人员数量 $N_f = 10$)。从图中可以看出,在水灾发生之前(0~90 s),两种情景下的疏散曲线基本一致,均表现为常规进站出站阶段的平稳增长趋势。在无救援情境下,随着洪水蔓延及环境恶化,自我疏散人数增长速率逐渐减缓,最终仍有201名行人无法自主离开地铁站。而在有救援情境下,救援人员在水灾初期及时介入,逐步转移滞留人员,有效提升了疏散效率。最终,行人全部顺利离开地铁站。此外,曲线在230 s~270 s时间段内,出现一个相对平缓的区域,这是由于此时洪水深度已达到42 cm~50 cm,行人行动严重受限。在无救援行为的情景下,仅有少数身体状况较好的个体能够勉强逃离。此时,疏散效率大幅下降,曲线增长速率显著趋缓。相反,在有救援人员介入的情景中,虽然该阶段环境压力同样很大,但得益于救援人员的救援行为,最终行人全部离开地铁站。这一段差异进一步体现了救援行为在水灾发生过程中的关键作用。

3.2. 行人密度影响分析

在地铁水灾疏散情境中,密度较低时,行人之间具有足够的可移动空间,而在高密度情境下,极易造成局部拥堵、跌倒甚至踩踏,图10显示了水灾疏散情境下地铁中行人总人数分别为 $N = 400$ (低密度)、 $N = 750$ (中密度)与 $N = 1500$ (高密度)三种情景下的行人疏散曲线(参数分别为水灾流量 $V_f = 0.28 \text{ cm/s}$,救援人员数量 $N_f = 25$,成年人占比70%、老年人占比30%)。这里疏散救援行人比例是指自主疏散与被救援行人所占疏散总人数的百分比。90 s水灾发生后,疏散救援行人的比例都会随着时间的推移而增加。随着行人密度升高,整体疏散效率逐步下降,低密度场景下疏散速度快,可全部撤离;而在高密度场景下,行人移动空间减小,局部发生拥堵甚至瘫痪,外加水灾水位不断升高,环境压力上升,即使在救援人员帮助下,还有部分生存质量值低的行人出现死亡,不能离开地铁站。

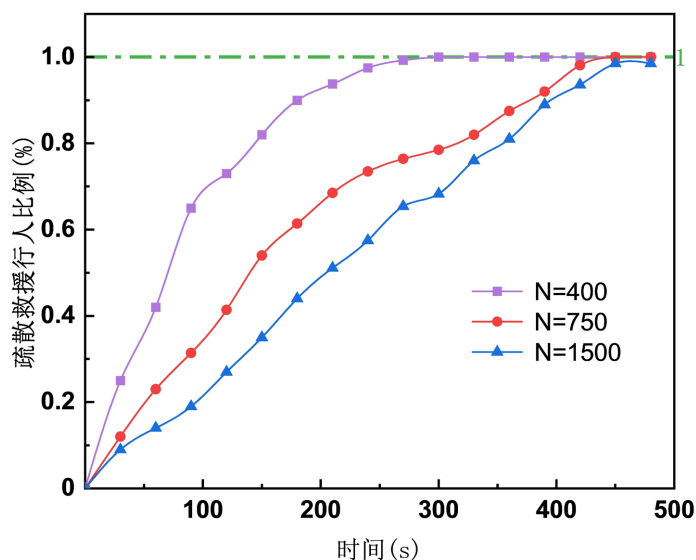


Figure 10. Changing curves of the percentage of evacuated and rescued pedestrians over time under different pedestrian densities

图10. 不同行人密度下,疏散救援行人数量百分比随时间变化曲线

进一步地,在中密度情景($N = 750$)下,为探讨异质行人结构对疏散效率的影响,设定三组不同的成年人与老年人比例进行对比实验,分别为:情景A(成年人90%,老年人10%),情景B(成年人70%,老年人30%),情景C(成年人50%,老年人50%)。图11为三组结构下未疏散救援人数及老年人与成年人

生存质量值随时间的变化情况。从图中柱状图可见,前 90 s 正常行人进站出站,在水灾疏散开始后,整体疏散救援人数增长速率逐渐趋缓。主要原因是,初始阶段行人反应迅速,自主疏散能力较强;但随着环境压力增大与人群密集程度的增加,疏散效率明显变低。在此阶段,救援效率也受到影响。最终,情景 A 行人全部离开地铁站,而情景 C 由于老年人占比的增加显著提升了对外部救援的依赖度,造成 12 名低生存质量的行人未离开地铁站。折线图显示了成年人与老年人的平均生存质量值随时间的变化情况。在水灾发生后,随着水位不断上升,老年人的生存能力曲线更早到达 0。在大概 180 s 之后老年人进入原地停留状态,急需外界救援人员的帮助;而此时成年人仍具备一定移动能力,能够继续完成自我疏散。

为更直观对比三种人群结构对疏散绩效的影响,表 2 汇总了三种方案下的关键指标,包括总死亡率、平均延误时间与疏散救援效率。从表中可以看出,随着老年人比例的提升,疏散延误时间逐渐增加,救援效率略有下降,且情景 C 出现了死亡个体,死亡率达 1.6%。相比之下,情景 A 中由于老年人比例较低,整体疏散更为迅速与顺畅,效率最高,且无死亡个体。这进一步说明高比例老年人群体对救援资源依赖显著,救援将面临更大压力。

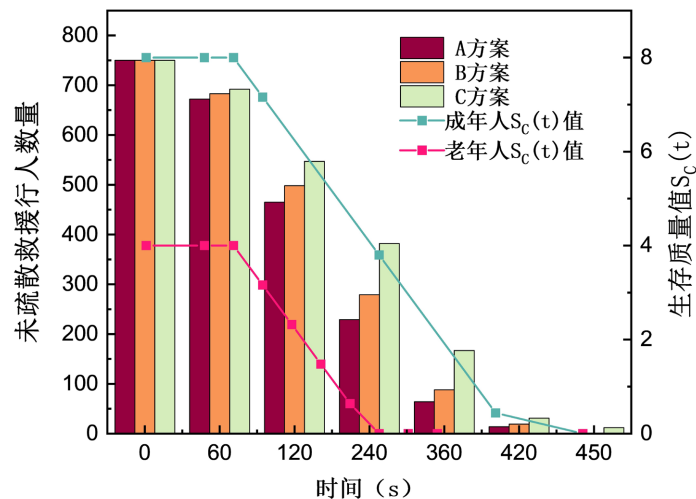


Figure 11. Changing curves of unrescued pedestrians and survivability values of elderly and adult pedestrians over time under different scenarios

图 11. 不同方案下,未疏散救援人数及老年人与成年人生存质量值随时间变化曲线

Table 2. Quantitative comparison of evacuation and rescue performance across scenarios with varying adult-elderly ratios

表 2. 不同人群结构下关键疏散救援绩效指标对比

方案	成年人占比	老年人占比	总死亡率	平均延误时间(s)	疏散救援效率
A	90%	10%	0	117	100
B	70%	30%	0	131	100
C	50%	50%	1.6	145	98.4

3.3. 救援人员数量分析

图 12 显示了不同救援者数量设定下,需要救援的行人数量随时间的变化曲线(参数为总人数 $N=750$, 水灾流量 $V_f=0.28 \text{ cm/s}$, 成年人占比 70%、老年人占比 30%)。90 s 时水灾触发,行人开始向地铁站出口方向逃离,之后救援人员开始介入。随着时间的推移,行人所受环境压力不断增大,水位变高、行人生存质量值持续下降,逐渐在远离水灾灌入口的一侧聚集。本文选取 260 s 时的状态进行分析,此时地铁站

中共有 164 名行人进入需救援状态。从图中可以看到, 在无救援者参与的情况下, 部分行人仍能缓慢撤离, 整体来看, 大多数受困行人未能撤离。随着救援者数量的增加, 未被救援的行人显著减少。然而, 疏散效率与救援人员数量不是一定呈正相关。当救援人数超过 30 人时, 会产生人群聚集现场, 增加阻力, 反而影响疏散效率。

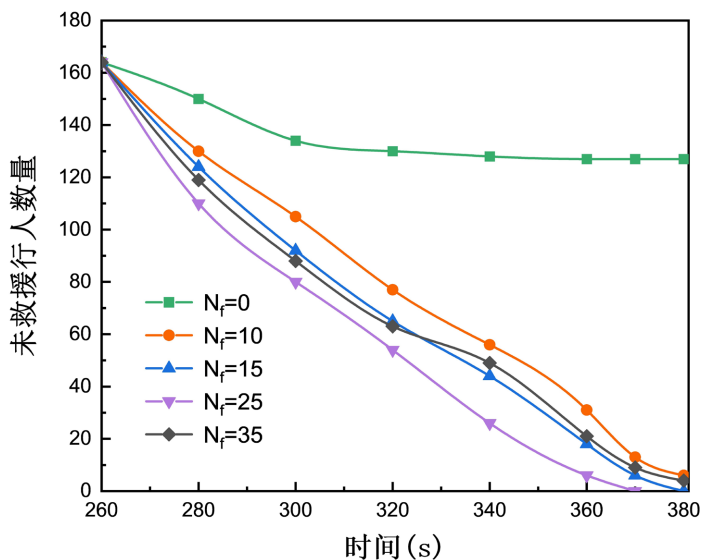


Figure 12. Changing curve of unrescued individuals over time under different numbers of rescuers

图 12. 救援人数不同的情况下, 未救援行人数量随时间变化曲线

3.4. 救援人员到达时间分析

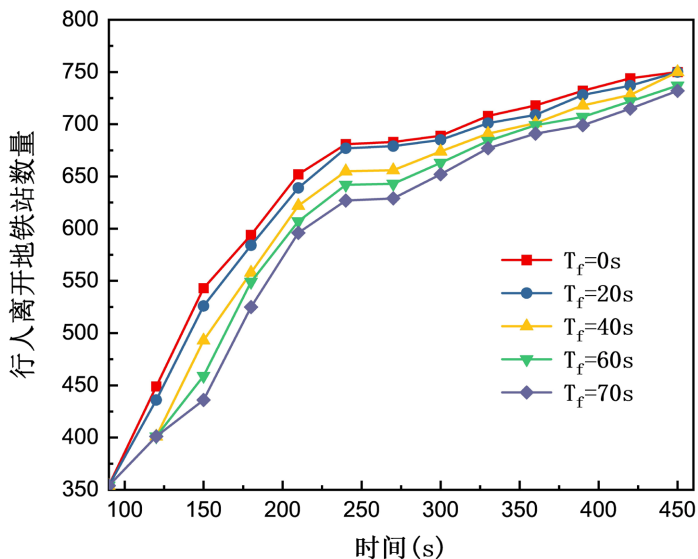


Figure 13. Changing curve of the number of pedestrians exiting the subway station over time at different arrival times of rescuers

图 13. 救援人员不同到达时间下, 离开地铁站行人数量随时间变化曲线

图 13 显示了在救援人员不同到达时间设定下, 行人离开地铁站人数随时间的变化曲线(设定行人数量

量 $N=750$ ，成年人占比 70%、老年人占比 30%，救援人数固定为 25 人，水灾发生时间为 90 s)。共设置五组救援人员介入时间，分别为：0 s、20 s、40 s、60 s 与 70 s，分析其对整体疏散效率的影响。从图中可以看出，当救援人员较早介入(如 0~40 s)时，能够及时给行人提供帮助，有效减少滞留人数，提高整体疏散速率。然而，当救援人员介入时间推迟至 60 s 甚至 70 s 时，由于部分行人长时间未能获得救援帮助，其生存状态持续恶化，在 450 s 时仍存在未成功撤离的行人。此外，还可以看到，曲线在 225 s~275 s 之间有一个相对平缓的区域，原因是此时洪水深度已达到 41 cm~50 cm，行人行动严重受限，特别是老年人和体能较差个体在此时自主疏散能力较差，主要依靠救援人员完成撤离。

4. 结论

本文基于 AnyLogic，以太原市辑虎营地铁站为例，构建了一个集异质行人建模、生存质量动态演化、洪水蔓延模拟与多智能体交互于一体的地铁水灾疏散与救援行为仿真模型。通过对救援人数、救援人员到达时间、行人密度等关键因素的模拟分析，深入探讨了水灾情境下人员疏散与救援效率的影响机制。

研究表明，在短时强降水情境下雨水倒灌地铁站场景中，救援人员的数量与到达时间对整体疏散效率与个体生存率具有决定性影响。适度的人群密度有助于维持逃生秩序，提升疏散速度；而过高密度则易造成局部拥堵，延长个体在洪水中的滞留时间，显著增加救援压力。老年人因其初始生存质量值较低，行动能力有限，更容易在水灾过程中进入爬行或失去行动能力状态，需作为优先救援对象。本文所构建的仿真模型不仅为地铁水灾情境下的应急响应提供了策略参考，也为异质个体行为建模与灾害情境下的智能体交互研究提供了新的思路，后续研究将进一步考虑非匀速洪水扩散、个体间协作行为等因素影响下的疏散救援模型。

基金项目

本论文获国家自然科学基金(52208408)、山西省回国留学人员科研教研资助项目(2022-159, 2023-149)资助。

参考文献

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[EB/OL]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsqdcgb/202201/P020220121639049697767.pdf>, 2025-06-25.
- [2] 王家海. 水灾工况下地铁区间疏散设计存在的问题及优化建议[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 106-110.
- [3] 乔耀民. 考虑异质个体的地铁站水灾应急疏散优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [4] Lyu, H., Shen, S., Yang, J. and Yin, Z. (2019) Inundation Analysis of Metro Systems with the Storm Water Management Model Incorporated into a Geographical Information System: A Case Study in Shanghai. *Hydrology and Earth System Sciences*, **23**, 4293-4307. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4293-2019>
- [5] Zheng, Y., Li, X., Jia, B. and Jiang, R. (2019) Simulation of Pedestrians' Evacuation Dynamics with Underground Flood Spreading Based on Cellular Automaton. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **94**, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.001>
- [6] 黄聪, 苏栋, 杨磊, 等. 考虑洪水漫延过程的地铁车站人员疏散研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(11): 2865-2872.
- [7] 梁本部, 何平, 陈云, 等. 考虑洪水入侵的地铁站楼梯疏散风险研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(6): 219-224.
- [8] Campanella, M., Hoogendoorn, S.P. and Daamen, W. (2009) Effects of Heterogeneity on Self-Organized Pedestrian Flows. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2124**, 148-156. <https://doi.org/10.3141/2124-14>
- [9] 陈雷钰, 张汝华, 马明迪. 基于 AnyLogic 的轨道交通车站大客流瓶颈识别与疏散组织优化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2023, 29(4): 694-704.
- [10] 蔡佳良. 多层建筑特殊人群疏散时间及疏散特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.

-
- [11] Nicolas, A. and Hassan, F.H. (2021) Social Groups in Pedestrian Crowds: Review of Their Influence on the Dynamics and Their Modelling. *Transportmetrica A: Transport Science*, **19**, Article ID: 1970651. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1970651>
 - [12] 杨立兵, 陈建宏, 周汉陵. 走廊弯腰疏散行为试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(1): 34-38.
 - [13] 任祥霞. 典型场景内老年人多模式疏散特性实验和模型研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
 - [14] Kholshevnikov, V.V., Shields, T.J., Boyce, K.E. and Samoshin, D.A. (2008) Recent Developments in Pedestrian Flow Theory and Research in Russia. *Fire Safety Journal*, **43**, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.05.005>
 - [15] Higo, E., Okada, N., Hipel, K.W. and Fang, L. (2017) Cooperative Survival Principles for Underground Flooding: Vitae System Based Multi-Agent Simulation. *Expert Systems with Applications*, **83**, 379-395. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.034>
 - [16] 李芳. 基于多智能体的地铁站台乘客紧急疏散模型[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
 - [17] 张雪. 地铁车站火灾时人员行为特征及应急疏散仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2023.
 - [18] Inoue, K., Toda, K. and Nakai, T. (2003) Simulation on the Inundation Process in the Underground Space. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, **46**, 263-273.