

陆秋琴, 赵洪艳, 黄光球. 地下商业空间灾害突发期间应急救援仿真模型[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 73-80, 112. [LU Qiuqin, ZHAO Hongyan and HUANG Guangqiu. Emergency rescue simulation model during underground commercial space disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 73-80, 112. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.014.]

## 地下商业空间灾害突发期间应急救援仿真模型\*

陆秋琴, 赵洪艳, 黄光球

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了提高地下商业空间灾害突发期间应急救援效率, 通过对地下商业空间灾害应急救援内涵进行分析, 建立了相应的应急救援仿真系统, 并以此为基础利用系统动力学构建了地下商业空间灾害应急救援仿真模型。以某地下商场为例对该模型进行了真实性和适用性检验和救援人员投入策略的模拟, 结果表明: 该模型能模拟地下1~3层商业空间和自救逃生人员发生踩踏或不发生踩踏的救援情况; 且对时间紧迫的救援任务, 在考虑人力资本与救援效果时, 能找出使救援效率提高更明显的救援人员数量范围。此仿真模型能模拟地下商业空间灾害突发期间的真实应急救援情况。

**关键词:** 地下商业空间; 应急救援; 系统动力学(SD)模型; 模型检验; 策略模拟

**中图分类号:** U231.96; X43; X45; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)04-0073-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.014

地下商业空间通风受限、人员密集、交通与装修材料复杂, 其安全问题严重<sup>[1]</sup>, 近年来以火灾为主的各种灾害频繁突发, 且一旦发生灾害, 瞬间就能造成大量的人员伤亡和经济损失, 为了提高救援效率、减少人财损失, 需对地下商业空间突发灾害的应急救援进行研究。

就地下商业空间灾害应急救援相关模型与仿真而言, 目前国内外学者在如下几个方面进行了研究。在救援安全保障方面: YAN等人<sup>[2]</sup>建立了地铁商业空间火灾风险评估模型; Panagiotis<sup>[3]</sup>、Hitoshi<sup>[4]</sup>、Kallianiotis<sup>[5]</sup>等确定了灾害和事故的原因和风险, 建立了地下空间安全评估模型。在救援相关数值模拟方面: Toda等<sup>[6]</sup>用城区洪水演进的数值模型对日本某地下商城的洪灾进行计算和风险分析, 为地下商业空间的灾害救援提供了数据支撑; Guo<sup>[7]</sup>等人对地下综合体不同斜坡段的火灾进行了数值模拟; Zheng<sup>[8]</sup>等人对行人在地下洪水扩散过程中的疏散动态进行了数值模拟; Huang<sup>[9]</sup>、储志利<sup>[10]</sup>等人模拟了地下商业建筑火灾烟气运动和人员疏散的相关数值。在救援策略方面: Higo等<sup>[11]</sup>用仿真模型对地下空间洪水疏散和救援过程的三种策略进行了模拟和比较; 赵晨惠<sup>[12]</sup>以某地下商场火灾为例, 利用FDS模拟得到了最佳灭火战术方案; 赵阳<sup>[13]</sup>建立了进攻路线的

多指标评价方法模型, 结合内攻灭火法<sup>[14]</sup>的关键环节, 模拟了地下商场灭火救援不同的进攻策略。目前研究存在的问题:

(1)在救援安全保障方面, 缺乏对地下商业空间灾害救援的救援侦查和救援通道的研究。地下商业空间的救援危险度、难度系数均高, 救援侦查和救援通道畅通是其应急救援成功的保障, 目前相关模型大都是灾害原因和风险的评估模型, 对救援侦查和救援通道的研究还有所欠缺。

(2)在救援数值模拟方面, ①缺乏对地下商业空间灾害救援时救援人员从投入到到达灾害现场外, 再从地面到地下灾点, 紧接着投入救援以及在救援过程中受伤这一方面的数值模拟; ②救援人员在救援中因体力不支和地下灾点所在楼层导致其受伤的情况和自救逃生人员发生踩踏事故对待救援人员的影响在救援仿真模型中还很少被考虑到。

(3)在救援策略方面, 缺乏基于以上两点的救援策略的模拟研究。

综上所述, 地下商业空间应急救援的仿真目前还存在一些问题, 而系统动力学的思想与方法能够很好的解决这些问题。本文将地下商业空间突发灾害为例, 分析地下商业空间应急救援的影响因素, 利用系统动力学建立其应急救援仿真模型, 研究其应急救援仿真问题, 以达到提高救

\* 收稿日期: 2019-05-01 修回日期: 2019-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874134); 陕西省社会科学基金项目(2018S49, 2017S035); 陕西省教育厅哲学社会科学重点研究基地项目(18JZ036)

第一作者简介: 陆秋琴(1966-), 女, 广西武鸣人, 教授, 博士, 研究方向为应急管理, 系统仿真。

E-mail: luqiuqin@xauat.edu.cn

通讯作者: 赵洪艳(1994-), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向应急管理, 系统仿真. E-mail: 1521276302@qq.com

援效率的目的。

### 1 地下商业空间灾害应急救援仿真模型构建原理

#### 1.1 地下商业空间灾害应急救援内涵

要构建地下商业空间灾害应急救援模型，就要分析其应急救援内涵，本文将地下商业空间的灾害应急救援内涵分解为同时进行的两个方面(图1)：保障层面和人员层面。其中救援保障层面包括救援侦查和救援通道，人员层面包括救援人员和受困人员。

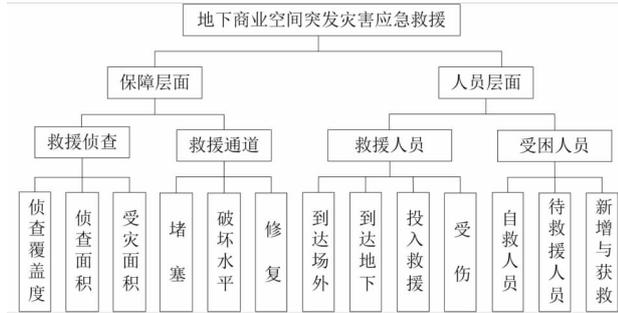


图1 地下商业空间灾害应急救援内涵

(1)救援侦查。地下商业空间不利于救援，发生灾害后对受灾区域进行救援侦查，能更清楚的了解灾害情况，保障救援指挥和受困人员的成功搜救。这里选取侦查覆盖度、侦查面积和受灾面积来描述救援侦查。

(2)救援通道。地下商业空间发生灾害后，救援通道会堵塞而影响救援效率，在救援过程中对阻塞的通道进行修复可以保障救援行动的顺利进行，提高救援效率。在此将堵塞、破坏水平和修复三个指标作为救援通道的衡量标准。

(3)救援人员。救援人员是救援的主体，地下商业空间发生灾害后，主要考虑救援人员从灾害

现场外到达地下灾点再投入救援这个动态的过程，同时还要考虑救援人员在救援过程中出现受伤的情况。

(4)受困人员。受困人员是应急救援的主要对象，用自救人员和待救援人员以及待救援人员的新增与获救来表达，一部分受困人员可以自己逃生，而一部分只能被救援，新增与获救主要针对待救援人员而言。

#### 1.2 地下商业空间灾害应急救援仿真系统

应急救援是各部分协调运行的过程，应急救援内涵不能体现各部分间的联系与运作，而应急救援仿真系统正好弥补了这一缺陷，所以根据地下商业空间灾害应急救援内涵建立了应急救援仿真系统(图2)。

在该系统中，以地下商业空间灾害突发为起点，围绕救援内涵的救援人员、受困人员、救援侦查和救援通道四个部分进行整个仿真系统的构建。地下商业空间灾害突发后要展开应急救援，展开救援首先就要投入救援人员对有待救援的受困人员进行施救，施救时要对受灾面积进行救援侦查，并对灾害所破坏的救援通道进行检修，保障通道的通畅，救援人员救援的最终结果是有待救援的受困人员在救援侦查和救援通道的保障下获救。

地下商业空间灾害应急救援仿真系统的主要思路是使待救援人员获救，这些有待救援的人员最终获救受救援人员、侦查覆盖度和救援通道破坏水平三者的影响：①地下商业空间灾害发生后救援人员及时赶到灾害现场外，然后从场外到达地下灾点，紧接着投入救援，使待救援人员获救；②救援人员中的侦查人员配合侦查机器人对受灾面积进行侦查，侦查的覆盖度影响着人员的获救；③用由原生灾害、次生灾害和以踩踏事故为主的衍生灾害造成的堵塞和救援人员对救援通道的修复来衡量的救援通道破坏水平影响着人员获救。

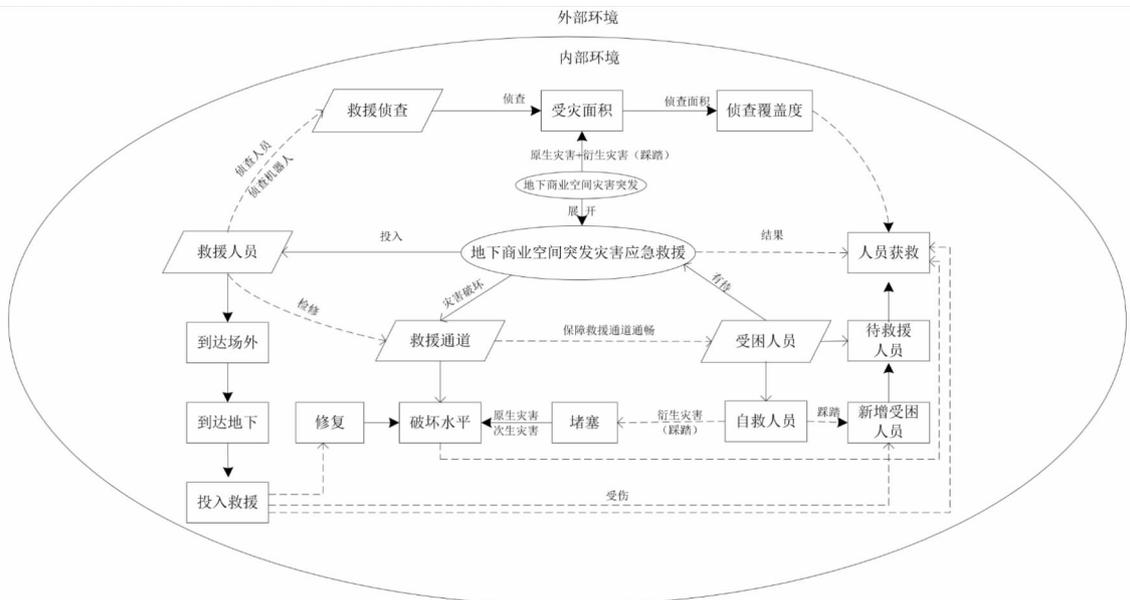


图2 地下商业空间灾害应急救援仿真系统



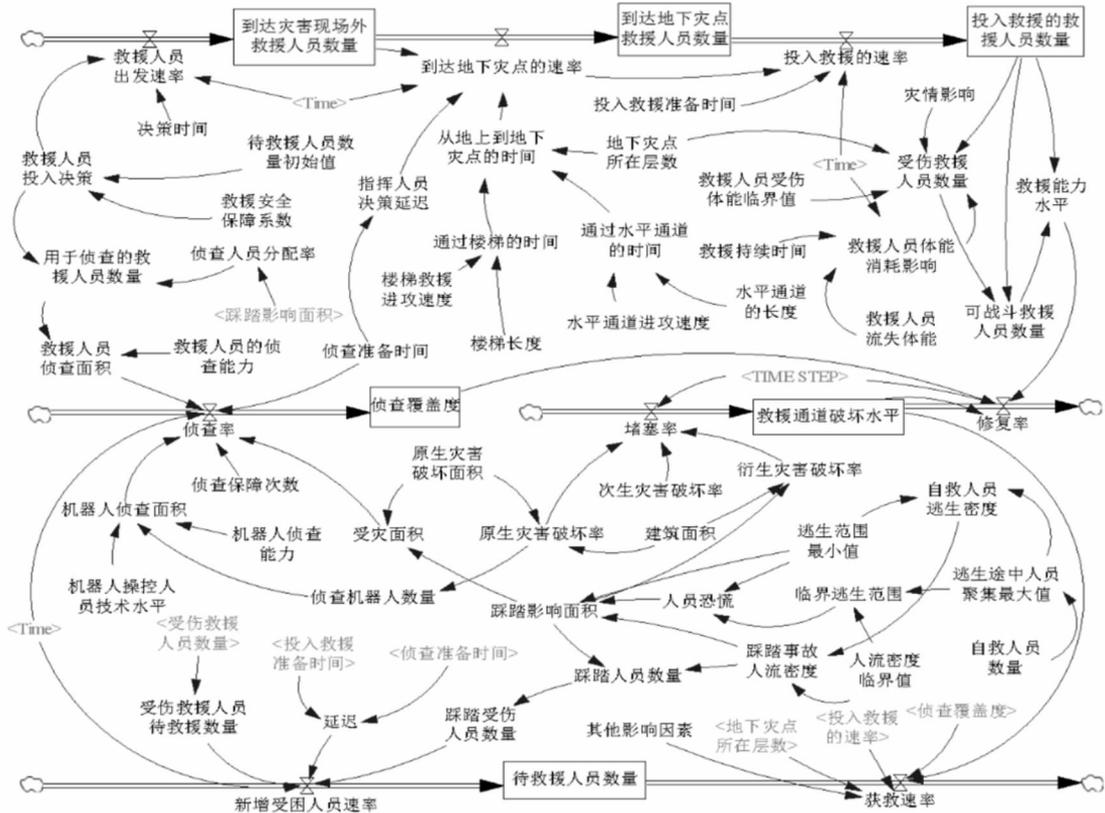


图6 地下商业空间灾害应急救援仿真SD模型

## 2 地下商业空间灾害应急救援仿真模型的构建

### 2.1 地下商业空间灾害应急救援仿真SD模型构建步骤

系统动力学(SD)最大的优点是可以定性与定量相结合建立模型并利用计算机进行模拟与分析系统的动态行为<sup>[15]</sup>。建立模型需要明确建模流程,地下商业空间灾害应急救援仿真模型构建步骤如下。

步骤1: 绘制因果关系图。搜集应急救援的关键影响因素,并根据反馈关系绘制因果图。

步骤2: 建立SD模型。据因果图中各元素之间的关系,编辑数学公式,绘制仿真模型。

步骤3: 检验模型。设置仿真环境和模型参数对所建模型进行真实性检验和适用性检验。

步骤4: 策略模拟。对地下商业空间灾害应急救援关键因素进行动态模拟。

步骤5: 结果分析与建议。对模拟结果进行分析,并提出相应的建议。

### 2.2 因果关系模型

本文将应急救援内涵中的应急救援侦查、应急救援通道、应急救援人员和受困人员四部分内容作为地下商业空间灾害应急救援模型的四个子系统,选取49个关键因素,构建了地下商业空间灾害应急救援子系统主要因果关系图(图4)。

(1)应急救援侦查子系统。在该子系统中,原生灾害破坏面积和衍生灾害影响面积与受灾面积均呈现正相关关系;由机器人侦查能力与侦查机器人数量决定的机器人侦查面积和由救援人员侦查能力与用于侦查的救援人员数量决定的救援人员侦查面积共同增加了侦查面积。侦查覆盖度由受灾面积和侦查面积共同决定,而且侦查面积的增加能提高侦查覆盖度,受灾面积的增加则降低覆盖度。

(2)应急救援通道子系统。在该子系统中,堵塞率越高,救援通道破坏水平越高,而原生灾害破坏率、次生灾害破坏率以及衍生灾害破坏率增加了堵塞率,原生灾害破坏面积越大其破坏率越大,踩踏影响面积越大衍生灾害破坏率越大;救援能力水平越高修复率越高,而修复率越高救援通道的破坏水平自然也就降低。

(3)应急救援人员子系统。在该子系统中,救援人员从投入到受伤一直是正相关的,从地上到达地下灾点的时间与到达地下灾点救援人员数量呈负相关,由楼梯长度和楼梯救援进攻速度决定的通过楼梯的时间和由水平通道长度、水平通道的进攻速度影响的水平通道的时间与从地上到达地下灾点的时间呈正相关,救援人员体能消耗、灾点所在楼层与受伤人员呈正相关。

(4)受困人员子系统。在该子系统中,自救人员越多逃生途中人员聚集最大值越大,自救人员逃生密度也就越大,自救人员逃生密度和人流密度临界值共同决定踩踏人流密度,人流密度值越大,踩踏发生的机率就小,相应密度就小,而自救人员逃

生密度则相反。踩踏人流密度大, 踩踏受伤人员就多, 它和受伤的救援人员共同影响新增被困人员速率, 从而影响待救援人员数量, 待救援人员获救受地下灾点所在层数、投入救援的速率、侦查覆盖度以及救援通道破坏水平的共同影响。

这四个子系统构成了地下商业空间灾害应急救援仿真系统因果关系模型(图5)。

### 2.3 仿真模型流图

通过已建的因果关系模型能构建定量的地下商业空间突发灾害救援仿真 SD 模型。该模型选 6 个水平变量来描述地下商业空间发生灾害时应急救援情况, 用其中 3 个描述救援子系统, 2 个描述待救援人员子系统, 侦查覆盖度子系统和救援通道破坏子系统各用 1 个水平变量表达。此外, 用 9 个速率变量来描述水平变量的变化趋势; 取 50 个辅助变量为系统服务。以上所有变量构成了地下商业空间突发灾害应急救援 SD 模型(图6)。

### 2.4 SD 模型主要变量及表达式

地下商业空间灾害应急救援仿真 SD 模型主要

变量及其性质与表达式如表 1 所示。

## 3 模型检验与策略分析

### 3.1 仿真环境及模型参数的设定

(1) 仿真环境的设定: 本文以建筑面积为 20 000 m<sup>2</sup> 的某大型建筑的地下商场为仿真环境, 该建筑地下有三层属于商业空间的范畴, 每层楼梯长度为 10 m, 救援水平通道为 100 m, 此次灾害原生灾害破坏 1 000 m<sup>2</sup>, 自救逃生范围最小值为 150 m<sup>2</sup>, 灾害发生在地下三层。

(2) 模型参数的设定: 以 min 为单位, 以 1 min 为时间步长进行 120 min 的模型仿真。该模型一些重要变量数值设置如下: 自救人员数量 800 人, 待救援人员数量初值 100 人, 救援人员在场外、灾点以及投入救援三个状态的初值分别为 15 人、10 人和 5 人, 救援安全保障系数 2.5, 侦查保障次数 2, 人流密度临界值 = 1.45 人/m<sup>2</sup>。

表 1 地下商业空间灾害应急救援仿真 SD 模型主要变量与表达式

变量名称	类型	计算公式
到达灾害现场外救援人员数量	状态	INTEG (救援人员出发速率 - 到达地下灾点的速率, 初值)
到达地下灾点救援人员数量	状态	INTEG (到达地下灾点的速率 - 投入救援的速率, 初值)
投入救援的救援人员数量	状态	INTEG (投入救援的速率 - 救援人员受伤率, 初值)
侦查覆盖度	状态	INTEG (侦查率, 初值)
救援通道破坏水平	状态	INTEG (堵塞率 - 修复率, 初值)
待救援人员数量	状态	INTEG (新增被困人员速率 - 获救速率, 初值)
救援人员出发速率	速率	救援人员投入决策 ÷ 决策时间 × IF THEN ELSE (Time ≤ 5, 0, PULSE(5, 5))
到达地下灾点的速率	速率	IF THEN ELSE (Time ≤ 指挥人员决策延迟, 0, 到达灾害现场外救援人员数量 ÷ 从地上到地下灾点的时间 × 2)
投入救援的速率	速率	IF THEN ELSE (Time ≤ 54, SMOOTH (到达地下灾点的速率, 投入救援准备时间), 0.23)
侦查率	速率	IF THEN ELSE (Time ≤ 侦查准备时间, 0, (救援人员侦查面积 + 机器人侦查面积) ÷ (受灾面积 × 侦查保障) ÷ Time)
堵塞率	速率	(原生灾害破坏率 + 次生灾害破坏率 + 衍生灾害破坏率) ÷ TIME STEP
修复率	速率	救援通道破坏水平 ÷ TIME STEP × 侦查覆盖度 × 救援能力水平
新增被困人员速率	速率	IF THEN ELSE (Time ≤ 延迟, 踩踏受伤人员数量 ÷ 延迟, 受伤救援人员待救援数量 ÷ 延迟 × PULSE (延迟, 10) ÷ 3)
获救速率	速率	投入救援的速率 × 其他影响因素 × 侦查覆盖度 ÷ 救援通道破坏水平 ÷ 地下灾点所在层数
从地上到地下灾点的时间	辅助	(通过楼梯的时间 + 通过水平通道的时间) × 地下灾点所在层数
受伤救援人员数量	辅助	IF THEN ELSE (救援人员体能消耗影响 ≤ 救援人员受伤体能临界值, 投入救援的救援人员数量 × 灾情影响, 投入救援的救援人员数量 × (救援人员体能消耗影响 × 0.1 + 灾情影响)) × 地下灾点所在层数
救援人员流失体能	辅助	LOOKUP ([ (0, 0) - (1, 1) ], (0, 0.05), (0.1, 0.1), (0.3, 0.2), (0.5, 0.4), (0.7, 0.7), (0.9, 0.8), (1, 0.9))
人员恐慌	辅助	IF THEN ELSE (临界逃生范围 - 逃生范围最小值 ≥ 0; AND: 临界逃生范围 - 逃生范围最小值 ≤ 50, 0.2, IF THEN ELSE (临界逃生范围 - 逃生范围最小值 > 50; AND: 临界逃生范围 - 逃生范围最小值 ≤ 100, 0.4, 1))
踩踏事人流密度	辅助	IF THEN ELSE (自救人员逃生密度 > 人流密度临界值, 自救人员逃生密度, 0)
救援能力水平	辅助	可战斗救援人员数量 ÷ 投入救援的救援人员数量

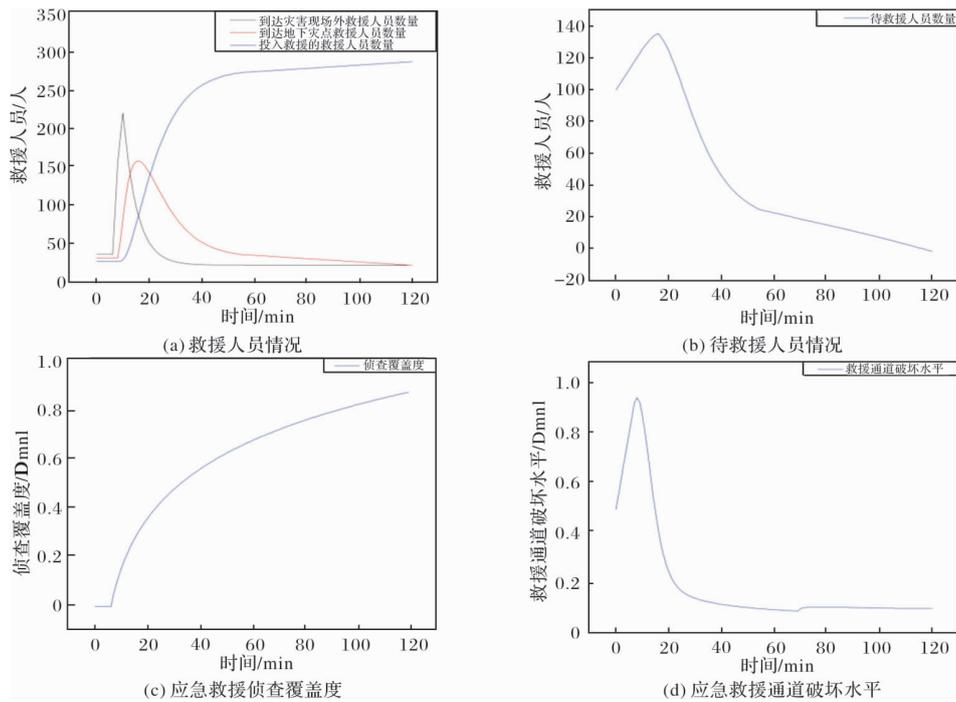


图7 模型真实性检验

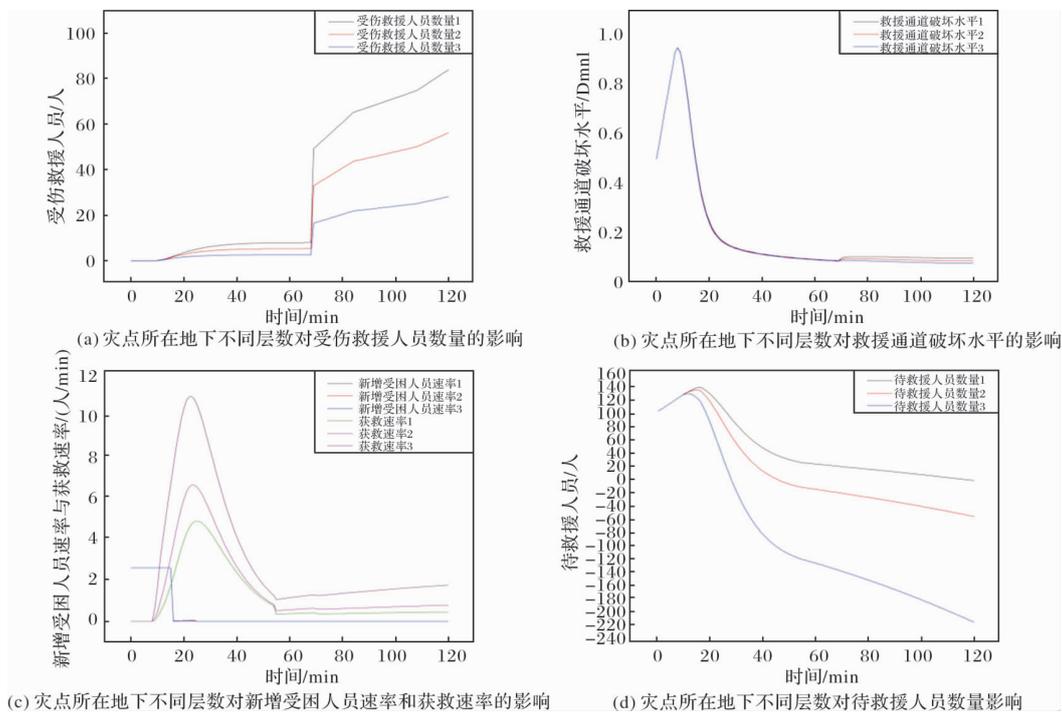


图8 灾点所在地下不同层数的影响

### 3.2 模型真实性检验及适用性检验

#### 3.2.1 模型真实性检验

该检验主要是检验人员情况和保障情况(图7)。检验人员情况主要是检验救援人员在不同阶段是否符合实际救援情况、检验救援人员在受伤和自救人员因踩踏成为待救援人员后的数量变化以及在救援模拟时间内是否救援成功;检验保障情况主要是检验应急救援侦查覆盖度能否在救援投入后持续增加且能否达到0.5以上,以及救援通道破坏水平是否在救援人员投入前增加,且随着救援人员投入救援后减少。

(1)人员情况。①应急救援人员各个状态下的变化情况如图7a所示,由图可知救援人员投入后,到达灾害现场的救援人员在10min内达到峰值,因向地下灾点运输所以峰值下降,到达地下灾点的救援人员在20min内达到峰值,由于救援人员要投入救援,所以该峰值也下降,投入救援的人员增加,因各状态初值不为零,所以投入救援的人员最终高于投入决策;②待救援人员变化情况如图7b所示,由图知待救援人员前期因自救人员的踩踏持续增加,在救援人员投入救援后,待救援人员获救数量下降。

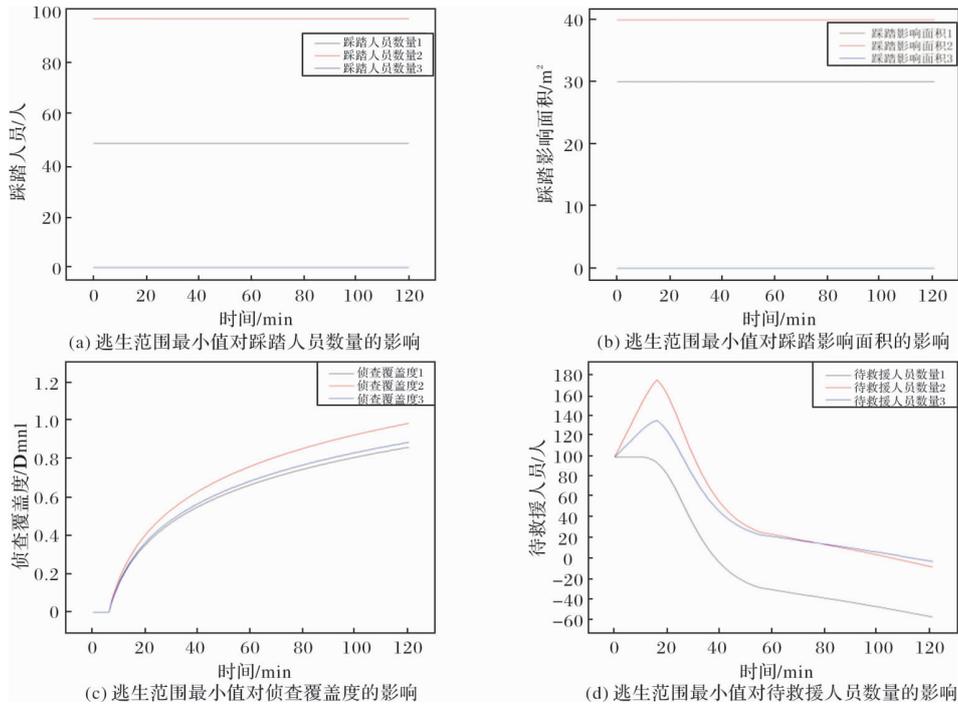


图9 逃生范围最小值的影响

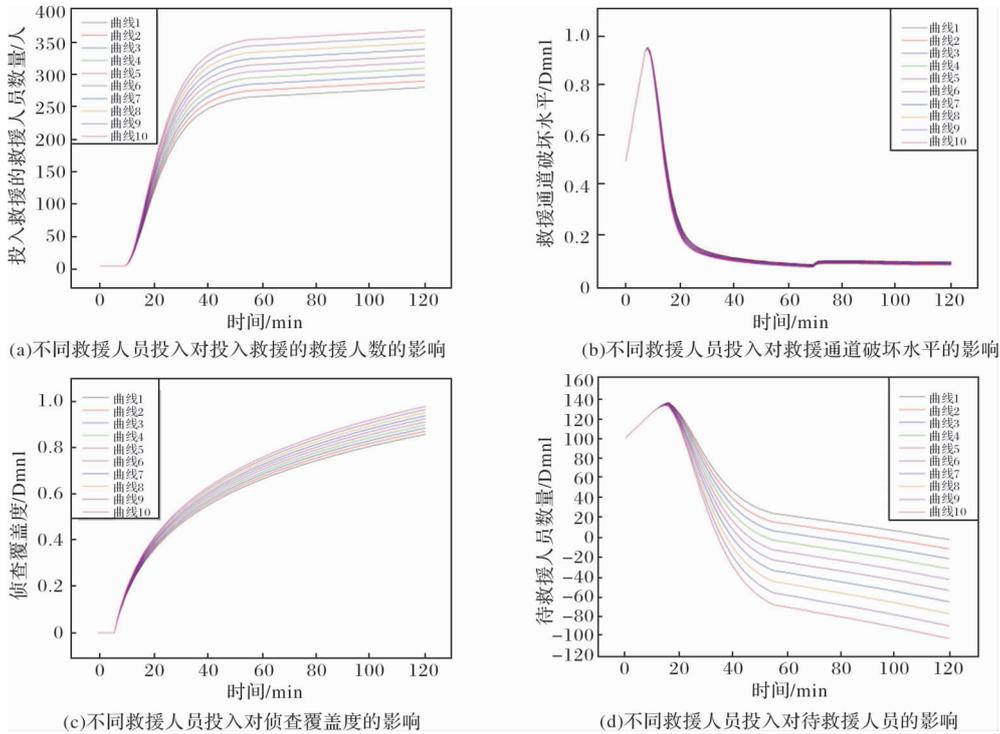


图10 不同的救援人员投入策略

(2)保障情况。①应急救援侦查覆盖度变化情况如图7c所示,由图可知应急救援侦查覆盖度在救援人员未到达时为0,而在救援人员大量到达地下后侦查覆盖度逐渐上升;②应急救援通道破坏程度变化情况如图7d所示,由图可知应急救援通道破坏水平初值就已较高,在应急救援赶赴灾点的过程中呈上升趋势,在救援人员投入救援对堵塞的救援通道进行修复后逐渐降低,后期因救援人员受伤,影响修复,又稍微上升,但此时已基本不影响救援。

结合现实中地下商业空间灾害应急救援,该模型展示的救援人员、待救援人员、救援侦查覆盖度、救援通道破坏水平各时期变化与真实情况较为相符,也验证了该模型的正确性。

### 3.2.2 模型适用性检验

该检验主要通过实验1改变灾点层数和实验2改变逃生范围最小值验证该模型是否适用于灾点在不同地下商业楼层的应急救援及是否适用于发生与不发生踩踏情况下的应急救援。

(1)检验该模型是否适用于灾点在不同地下商

业楼层的应急救援。

实验1 为检验该模型是否适用于灾点在不同地下商业楼层的应急救援,在不改变其他因素的情况下,将灾点所在地下层数3调整为2、1进行模拟,得到仿真曲线1、2、3(图8)。

模拟结果表明,灾害发生地点在地下的深度越深救援人员受伤人数越多,相应的对救援通道的修复能力降低,新增受困人员速率在救援人员投入救援工作后速率越大;灾害发生地点在地下的深度越深,救援难度越大,救援速率越慢,但由于人员获救的速率整体高于新增受困人员速率,所以灾害发生地点在地下的深度越深救援成功所需时间越长,但也能成功救援。该现象很好的反应了该模型适用于灾点在不同地下商业楼层的应急救援。

(2)检验该模型是否适用于自救逃生人员发生踩踏和不发生踩踏情况下的应急救援。

实验2 为检验该模型是否适用于发生与不发生踩踏情况下的应急救援,在不改变其他因素的情况下,将逃生范围最小值150调整为100、200,得到仿真曲线1、2、3(图9)。

模拟结果表明,逃生范围最小值为200时,未发生踩踏,相应的踩踏影响面积为零,逃生范围最小值为100和150时,发生了踩踏事故,且逃生范围最小值越小,发生踩踏人员越多,相应的踩踏影响面积也越大。在救援人员还未投入救援时,待救援人员数量的增加是由于踩踏事故的发生,所以踩踏人员越多,待救援人员数量越多,当救援人员投入救援后,待救援人员数量减少,且逃生范围越小,踩踏受伤人员越多,救援所需时间越长,但也能成功救援。该现象很好的反应了该模型适用于发生踩踏和不发生踩踏情况下的应急救援。

### 3.3 策略模拟与分析

为得出不同的应急救援人员投入对应急救援效果的影响,通过运行 Vensim PLE 软件,对10种不同的应急救援人员投入策略进行模拟与分析。

实验3 为得出不同的应急救援人员策略对应急救援效果的影响,在不改变其他因素的情况下,将原来的救援安全保障系数2.5调整为2.6、2.7、2.8、2.9、3.0、3.1、3.2、3.3、3.4,应急救援人员投入由250人相应变为260、270、280、290、300、310、320、330、340人,得到仿真曲线1、2、3、4、5、6、7、8、9、10(图10)。

模拟结果表明,在救援人员到达地下在灾点后,救援人员数量越多,同一时刻投入救援的救援人员数量越多、最终救援通道的破坏水平越低、侦查覆盖度越接近1、待救援人员在救援人员投入救援后被全部救出所用的时间越短。人员获救的时间点分别为:117、96、72、53、47、43、40、38、36、25min。由此可知,救援人员数量从250人增加30人到280人的过程中救援时间减少64min,而从280人增加60人到340人的过程中救援时间减少了18min,前者的效果更为明显,因此对救援时间紧迫的救援任务在考虑救援成本与救援效果时应适当增加救援人员的数量。

## 4 结语

通过对地下商业空间灾害应急救援相关知识的了解,本文建立了地下商业空间灾害应急救援仿真SD模型,并对模型进行了真实性和适用性检验,对人员因素进行了不同策略的模拟,为地下商业空间突发灾害应急救援奠定了模型基础。以上研究的结论如下:

(1)该模型在救援安全保障层面考虑了救援侦查和救援通道这两个因素,在人员层面考虑了救援人员从投入救援到到达灾害场外,然后下到地下灾点,再投入救援这一过程,还考虑了救援人员在救援过程中因体力、灾情、灾点所在楼层的影响出现受伤情况成为待救援人员和自救人员在逃生过程中因人流密度过大出现踩踏,产生待救援人员的情况;

(2)该模型以某地下商场为仿真环境,在该环境下设置了模型参数对模型的真实性和适用性进行了检验,检验结果表明该模型能模拟出真实的救援情况,并适用于地下1~3层商业空间和自救逃生人员发生踩踏与不发生踩踏的救援情况;

(3)该模型模拟了10种应急救援人员投入决策,模拟结果表明对救援时间紧迫的救援任务,在考虑救援人力资本与救援效果时,适当增加救援人员的数量救援效果更加明显。

## 参考文献:

- [1] YONG Y, ZHANG J, JIA T, et al. Safety problems in crowded underground space in Beijing[J]. Procedia Engineering, 2012, 45(1): 763-767.
- [2] YAN W Y, WANG J H, JIANG J C. Subway fire cause analysis model based on system dynamics: A preliminary model framework[J]. Procedia Engineering, 2016, 135(2): 430-437.
- [3] Panagiotis Ntzeremes, Konstantinos Kirytopoulos. Applying a stochastic-based approach for developing a quantitative risk assessment method on the fire safety of underground road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81(1): 619-631.
- [4] LU S, Hitoshi N, SHU Y. The establishment and application of underground space safety evaluation system in Shanghai[J]. Procedia Engineering, 2016, 165(1): 433-447.
- [5] Kallianiotis A, Papakonstantinou D, Arvelaki V, et al. Evacuation method evaluation in underground metro station[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31(1): 526-534.
- [6] Toda K, Inoue K, Maeda O, et al. Analysis of overland flood flow intrusion into underground space in urban area[J]. Journal of Hydro-Science and Hydraulic Engineering, 2000, 18(2): 43-54.
- [7] GUO X X, PAN X H, YANG J, et al. Numerical simulation of fire smoke in extra-long river-crossing subway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82(1): 82-98.
- [8] ZHENG Y, Li X G, JIA B, et al. Simulation of pedestrians' evacuation dynamics with underground flood spreading based on cellular automaton[J]. Simulation Modelling Practice and Theory Volume, 2019, 94(1): 149-161.
- [9] HUANG L L, ZHU G Q, ZHANG G W, et al. Research the occupants safe egress of underground pedestrian street based on the analysis of fire smoke movement[J]. Procedia Engineering, 2013, 52(1): 158-164.

(下转第112页)