

中文引用格式:崔成博,李若愚,陈娟,等. 烟雾影响下疏散人员路径选择行为虚拟试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 174-180.

英文引用格式:CUI Chengbo, LI Ruoyu, CHEN Juan, et al. Virtual experiment study on route choice behavior under influence of smoke level[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 174-180.

烟雾影响下疏散路径选择行为虚拟试验研究^{*}

崔成博¹, 李若愚¹, 陈娟^{**2}副教授, 王巧¹助教, 马剑¹教授

(1 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2 西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川 成都 610031)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0286

基金项目:国家自然科学基金资助(72104205);国家重点研发计划项目(2022YFC3005205);四川省科技厅创新合作项目(2024YFHZ0345);成都师范学院室内空间布局优化与安全保障四川省高校重点实验室项目(2023SNKJ-10)。

【摘要】 为研究火灾及有毒气体泄漏事故中烟雾环境对人员路径选择行为的影响机制,克服因伦理道德限制难以开展真人实景试验的研究困境,通过搭建虚拟疏散试验平台,设计开展烟雾影响下的路径选择试验,将人员在现实生活中不同烟雾场景下的运动速度引入虚拟环境,研究烟雾水平及路径长度对疏散人员路径选择行为的影响。结果表明:烟雾水平和路径长度对被试的疏散路径选择行为均有显著影响,被试更倾向于选择烟雾水平较低、路径长度较短的路径,由二元 logistic 回归模型结果可知,与路径长度(优势比 $OR=15.516$)相比,烟雾水平($OR=45.475$)对被试路径选择的影响更大,但也出现了极少数被试选择高烟雾水平路径的冒险行为。试验后的问卷调查结果显示被试在虚拟环境中可以比较真实的体验烟雾环境下的疏散过程,研究信效度高。

【关键词】 人员疏散; 虚拟试验; 烟雾水平; 疏散路径选择; 路径长度

Virtual experiment study on route choice behavior under influence of smoke level

CUI Chengbo¹, LI Ruoyu¹, CHEN Juan², WANG Qiao¹, MA Jian¹

(1 School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu

Sichuan 610031, China; 2 Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest

Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: To investigate the influence mechanisms of smoke environments on pedestrian's evacuation route choice behavior during fires and toxic gas leakages, and to overcome the research challenges posed by ethical constraints that make real-life human experiments difficult to conduct, in this paper, a virtual evacuation experiment platform was constructed. In order to study the influence of smoke level and route length on evacuees' route choice behavior, a single-player route choice experiment was designed and carried out under the influence of smoke, taking into account the pedestrian's speed difference under

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)06-0174-07; 收稿日期:2025-02-08; 修稿日期:2025-04-15

^{**} 通信作者:陈娟(1982—),女,四川什邡人,博士,副教授,主要从事人员疏散、火灾风险评估等方面的研究。E-mail: juanchen@swjtu.edu.cn。

different smoke scenes in real life. Results indicate that both smoke level and route length have significant influence on evacuees' evacuation route choice behavior. The evacuees prefer to choose the route with lower smoke levels and shorter length. The results of the binary logistic regression model show that compared with the route length (Odds Ratio, OR = 15.516), the smoke level (OR = 45.475) has a greater influence on the route choice of evacuees. However, a small number of evacuees took a risk, that is, choosing a route with higher smoke levels for evacuation. The post-experiment questionnaire results demonstrated that participants could experience a reasonably authentic evacuation process in smoke-filled environments within the virtual reality scenarios, indicating high levels of validity and reliability for the study.

Keywords: human evacuation; virtual experiment; smoke level; evacuation route choice; route length

0 引 言

公共场所内人员数量多、密度大,紧急状况下,人员易出现紧张心理和应激反应,导致现场混乱、发展态势不稳定^[1],给建筑内部人员快速疏散带来巨大挑战。在诸多突发事件中,火灾是发生频率高、伤亡损失重、社会影响大的一类突发灾害,造成火灾人员伤亡的主要原因是火灾烟雾^[2]。

火灾发生时,能见度有限,人员更倾向于选择较近的出口,尽量减少移动距离以快速疏散^[3]。穿过烟雾弥漫的环境疏散时^[4],人员的速度并不总是降低^[5]。为寻找撤离过程中的最佳路径,钟炜等^[6]提出基于物联网技术的智慧城市火灾实时疏散系统构建思路。江奎东等^[7]通过模拟仿真提出烟雾及人员密度对疏散速度影响的修正函数。由于开展火灾场景下的现场试验受到较多限制,不少专家学者通过控制能见度类比烟雾场景,如采用佩戴眼罩^[8]或塑料眼镜^[3]的方法研究低能见度和良好能见度条件下疏散过程中的路径选择行为。近年来,虚拟现实技术为突发事件下的人员疏散路径选择行为研究提供了新的技术手段。虚拟试验具有较强的可控性和扩展性,这种方式不会造成人身风险,且受天气和地点等外部因素影响较小,因此,可以模拟火灾、地震等危险场景。研究人员发现,虚拟试验能够重现真实世界中人员行为^[9-10]。目前,有关火灾场景下疏散路径选择的虚拟试验研究主要集中在环境因素(如烟雾和障碍物信息^[11]、应急广播^[12])、建筑因素(如建筑视觉通道^[13-14]、建筑元素^[15])、社会因素^[16-18]和个体因素(如空间知识的完整性^[18]、空间探索模式^[19]、文化差异^[13,17])等方面,在涉及烟雾对路径选择影响的研究中,仅考虑烟雾水平这一因素,未涉及路径长度的影响。

为此,笔者拟设计开发虚拟疏散平台,将行人在不同烟雾情况下的运动速度引入虚拟环境,通过开展不同烟雾影响因素下的虚拟试验,挖掘人员疏散过程中的路径选择偏好,为人员疏散安全管理提供建议,减少紧急情况下的人员伤亡。

1 虚拟疏散试验设计与开展

1.1 人员疏散试验被试

被试为来自西南交通大学的本科生和研究生,要求视力正常或矫正为正常,没有色盲,行动能力正常,没有与心脏相关的疾病。共有 96 名被试顺利完成试验,包括 69 名男生和 27 名女生,被试平均年龄为 19.9 岁,标准差为 1.64 岁。所有被试均事先观看试验介绍视频,在熟悉试验流程与操作后,自愿参与试验,并在试验结束后获得第二课堂学时和经济奖励。

1.2 人员疏散试验场景

基于虚幻引擎完成试验平台的搭建与运行。疏散场景为单层建筑,由 1 条 55 m×2.5 m 的通道和 14 个 5 m×5 m 的房间组成,如图 1 所示。被试控制的虚拟人随机在房间 1—房间 8 中的 1 个生成。以房间 1 为例,图 1 中圆圈表示被试的初始位置,其视角正对房间门,门上方设有“安全出口”标识,被试可根据疏散标识指示,疏散出房间门后转向,仔细观察周围环境后选择路径 P_A 或 P_B,路径的两端分别对应出口一和二,出口门的正上方设有应急照明和疏散指示系统。图 1 中,位于绝对坐标西侧的路径为路径 P_A,东侧为路径 P_B。在紧急疏散时,人员可能会根据个人习惯直接选择某条路径。因此,以虚拟人视角为基准,被试左转选择的路径规定为左侧路径,被试右转选择的路径定义为右侧路径。

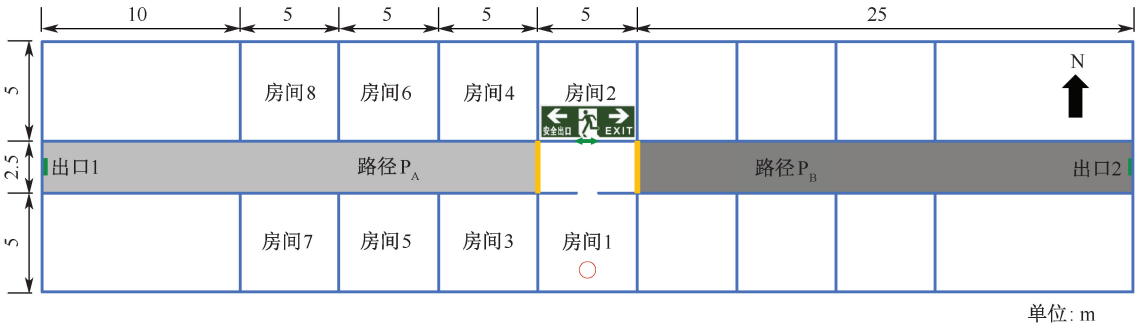


图1 疏散场景平面

Fig. 1 Floor plan of virtual evacuation building

1.3 虚拟试验设计

1.3.1 试验变量

为研究烟雾水平对被试路径选择的影响,将2个路径烟雾分别设置为无烟雾、低水平和高水平3种情况。为更好地还原被试身处烟雾中时的场景,改变虚拟人的初始生成位置,其对应的路径P_A和路径P_B的路径长度也相应变化。根据虚拟人的初始位置,得到路径长度差值Δ*d*分别为0、10、20和30 m,4种Δ*d*与虚拟人初始生成位置的对应关系见表1。

表1 Δ*d*与虚拟人初始生成位置的对应关系

Table 1 Relationship between route length difference and virtual character's initial position

序号	虚拟人初始生成位置	路径长度/m		Δ <i>d</i> /m
		路径P _A	路径P _B	
1	房间1	27.5	27.5	0
2	房间2	27.5	27.5	0
3	房间3	22.5	32.5	10
4	房间4	22.5	32.5	10
5	房间5	17.5	37.5	20
6	房间6	17.5	37.5	20
7	房间7	12.5	42.5	30
8	房间8	12.5	42.5	30

1.3.2 烟雾及人员运动参数设定

当人员处于烟雾弥漫的环境中时,其能见度和运动速度会受到影响^[20-22]。人员在不同烟雾水平下的运动速度可直接用于虚拟环境。

1) 不同烟雾水平下的能见度*D_s*。在试验平台中添加1个充满烟雾的全封闭实体,其透明度由烟雾水平决定,平面场景如图2所示。图2中,圆点为圆柱体的位置,其表面纹理贴图及颜色与烟雾保持一致,圆点对应的线段为虚拟人所在观测点,数字为圆柱体编号,同时表示虚拟人与圆柱体间的距离(m)。从距圆柱体1 m的位置开始,控制虚拟人

视角正对圆柱体,若观察到圆柱体的位置清晰可见,则移动虚拟人依次观察下一个圆柱体,直至无法清楚观察到某个圆柱体的位置。此时,前一个圆柱体的编号数字为当前烟雾水平下的能见度*D_s*。

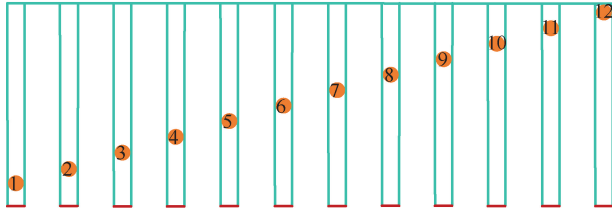


图2 烟雾水平参数标定场景平面

Fig. 2 Floor plan to calibrate smoke level parameters

2) 不同能见度下的烟雾水平。低水平烟雾*D_s*为10 m,高水平烟雾*D_s*为2 m,如图3所示。由消光系数*C_s* = 2/*D_s*可得虚拟人在不同烟雾水平下的速度:

$$D_s = 2/C_s \quad (1)$$

$$V_r = -\ln C_s + 2.3 \quad (0.1 < C_s < 5.6) \quad (2)$$

$$V_w = 0.34D_s + 0.31 \quad (D < 3) \quad (3)$$

式中*V_r*和*V_w*分别为奔跑速度和行走速度,m/s。无烟雾时的行走速度*V_w* = 1.4 m/s^[23]。虚拟人在不同烟雾水平下的*V_r*和*V_w*见表2。

表2 虚拟人物速度值

Table 2 Virtual character speed value

烟雾水平	<i>C_s</i> /m ⁻¹	<i>D_s</i> /m	<i>V_r</i> /(m·s ⁻¹)	<i>V_w</i> /(m·s ⁻¹)
无烟雾	—	—	4.5	1.4
低水平	0.2	10	3.91	1.35
高水平	1	2	2.3	0.99

1.3.3 压力营造机制

给每个被试设置生命值*L*,以营造疏散压力。*L*受到疏散时间、运动速度、烟雾水平和碰撞障碍物4个因素的影响:

$$L = 100 - \alpha \cdot t_1 - \beta \cdot t_2 - \Delta l \cdot n \quad (4)$$

式中:α为时间系数,取0.5/s;*t₁*为被试身处虚拟环

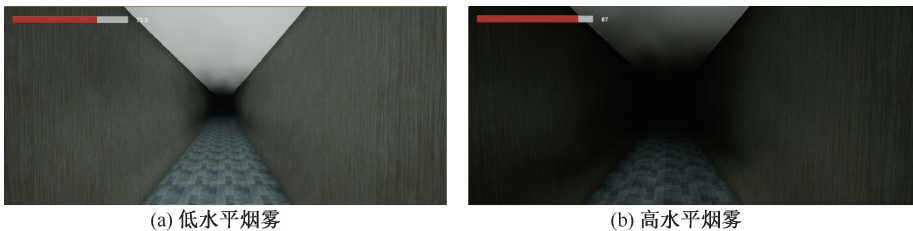


图 3 各烟雾水平效果示意

Fig. 3 Schematic diagram of smoke level effects

境中的时间, s ; β 为不同烟雾水平下以不同速度疏散的生命值减少系数,具体数值见表 3; t_2 为被试身处烟雾中的时间, s ; Δl 为被试与障碍物碰撞后生命值的减少量:步行速度下的减少量为 5/次;奔跑速度下的减少量为 20/次; n 为碰撞障碍物次数。

表 3 虚拟人物生命值减少系数

Table 3 Virtual character health value reduction factor		
速度状况	烟雾水平	减少系数/ s^{-1}
行走	低	1.5
行走	高	2
奔跑	低	2
奔跑	高	3

1.3.4 虚拟运动控制

被试使用鼠标和键盘协同控制虚拟人的运动。通过水平移动鼠标,控制虚拟人的视野朝向和视角

旋转;键盘上的方向键或 W、A、S、D 键用于控制虚拟人在试验场景中的运动,持续按压“W”和“Shift”可以实现加速功能。

1.4 虚拟试验流程

试验流程如图 4 所示。在试验开始前,被试被要求根据调查问卷填报个人基本信息。在填写调查问卷后,被试观看试验介绍视频,熟悉试验场景、流程与操作,然后进入测试场景开始训练。测试场景可帮助被试熟悉虚拟人物控制和试验流程,以便消除设备熟悉程度对研究的影响。在训练过程中,被试被要求沿路径 P_A 或路径 P_B 探索安全出口完成疏散。当被试完成测试场景的训练后,被询问是否熟悉虚拟环境及操作方法。当被试的回答为“否”时,继续进行训练,直到被试的回答为“是”即可完成训练。

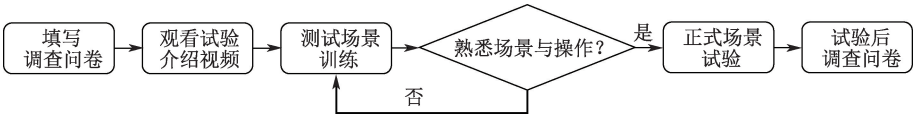


图 4 试验流程

Fig. 4 Experimental procedure

训练完成后,被试进入正式试验场景。正式场景共有 64 个,每个场景开始时,被试的操控的虚拟人物被随机分配在某个房间中。被试操控虚拟人物走出房间门,观察 2 条路径的基本情况后做出选择,并疏散至安全出口,完成本场景的试验。之后,手动选择开始,进入下一个试验场景。

在试验过程,当虚拟任务中被试的生命值减小到 0 时,会出现“失败”的提示,被试确认后也会进入下一场景,无需重复该失败场景。无论被试是否成功完成该试验场景,其路径选择情况与虚拟人物的位置坐标均会保存。为消除试验场景顺序的影响,每个被试会以随机且不重复的顺序完成所有的试验场景。

试验过程中,若被试出现身体不适,则立即停止试验。所有被试按照报名顺序依次进行试验,直到

所有被试按照要求完成全部试验场景。96 名被试均顺利完成试验,共得到 6 912 个可分析的试验数据。试验结束后,被试再次填写调查问卷,采用李克特 7 级量表的形式,评估虚拟试验疏散场景的真实性,并对自身情绪反应和行为想法进行评分。

2 疏散路径选择行为虚拟试验分析

2.1 烟雾水平对路径选择的影响

统计被试在 2 路径长度相同且均为无烟雾、低水平、高水平 3 种情况下的路径选择情况,结果见表 4,可以看出,3 种烟雾水平下被试选择左侧路径的比例为 49.83%,接近 50%,说明烟雾水平对被试选择左右侧路径影响不显著。对表 4 的结果进行卡方检验,得到检验统计量 χ^2 为 1.260,显著性水平 p

为 0.532,证实烟雾水平确实对被试选择左右侧路径的影响无显著差异。

表 4 各烟雾水平下被试的左右侧路径选择情况
Table 4 Left and right route choice of participants under different smoke levels

场景与统计量	无烟雾	低水平烟雾	高水平烟雾	总计
被试选左侧路径次数	93	102	93	288
被试选右侧路径次数	99	90	101	290
被试选左侧路径占比/%	48.44	53.13	47.94	49.83

为进一步分析 2 路径不同烟雾水平对被试路径选择的影响,以路径 P_A 烟雾水平为层变量进行交叉表分析,每种烟雾水平均包含 768 组数据,见表 5,可以看出,烟雾水平显著影响被试的路径选择,被试更倾向于选择烟雾水平相对较低的路径进行疏散,当某路径烟雾水平固定时,选择该路径的比例随着另一路径烟雾水平的提高而增大。当 2 路径烟雾水平一致时,由于路径 P_A 长度小于等于路径 P_B 长度,被试可能更倾向于选择长度相对较短的路径 P_A ,因此,选择路径 P_A 进行疏散的被试比例大于

选择路径 P_B 的被试比例。

表 5 不同烟雾水平下被试选择路径 P_A 占比交叉表分析
Table 5 Crosstab analysis of participants' route P_A choice percentage under different smoke levels

路径 P_A 烟雾水平	路径 P_B 烟雾水平			检验统计量 χ^2	p 值
	无烟雾	低水平	高水平		
无烟雾	79.30	97.66	99.35	261.097	0.000
低水平	35.42	85.55	98.31	863.091	0.000
高水平	10.94	24.61	61.07	472.428	0.000

2.2 疏散路径长度对路径选择的影响

路径 P_A 和路径 P_B 的长度各有 4 种, $\Delta d = 0、10、20$ 和 30 m 时被试的路径选择情况见表 6。可以看出,4 种 Δd 下被试选择左侧路径占比基本保持在 50%左右,不同 Δd 对被试选择左右侧路径的影响无显著差异($\chi^2 = 0.442, p = 0.932$)。

表 7 为不同 Δd 对被试疏散路径选择行为的影响。可以看出, Δd 对被试路径选择的影响具有统计学意义($\chi^2 = 345.993, p = 0.000$)。 $\Delta d = 0$ 时,选择路径 P_A 疏散的被试比例为 51.50%;随着 Δd 的增加,被试选择路径 P_A 的比例逐渐增大。 $\Delta d = 30\text{ m}$ 时,路径 P_B 长度为 42.5 m,路径 P_A 长度仅为 12.5 m,被试更倾向于选择长度较短的路径进行疏散。

表 6 不同 Δd 下被试的左右侧路径选择情况
Table 6 Left and right route choice of participants under different route lengths

场景与统计量	$\Delta d = 0\text{ m}$	$\Delta d = 10\text{ m}$	$\Delta d = 20\text{ m}$	$\Delta d = 30\text{ m}$	总计
被试选左侧路径次数	854	860	864	873	3 451
被试选右侧路径次数	874	868	864	855	3 461
被试选左侧路径占比/%	49.42	49.77	50.00	50.52	49.93

表 7 不同 Δd 下被试的路径选择情况
Table 7 Route choice of participants under different route lengths

场景	$\Delta d = 0\text{ m}$	$\Delta d = 10\text{ m}$	$\Delta d = 20\text{ m}$	$\Delta d = 30\text{ m}$
被试选路径 P_A 次数	890	1 092	1 164	1 403
被试选路径 P_B 次数	838	636	564	325
被试选路径 P_A 占比/%	51.50	63.19	67.36	81.19

为进一步研究不同烟雾水平下 2 条 Δd 对被试路径选择的影响,以烟雾水平为层变量进行交叉表分析,不同烟雾水平下每种 Δd 均包含 192 组数据,结果见表 8。可以看出,当路径 P_A 无烟雾时, Δd 对被试路径选择的影响因路径 P_B 水平而异:当路径 P_B 无烟雾或水平较低时, Δd 对被试路径选择有显著影响;当路径 P_B 为高水平时, Δd 无显著影响,此时被试倾向于选择水平相对较低的路径 P_A 进行疏散。当路径 P_A 为低水平或高水平时,无论路径 P_B

烟雾水平如何, Δd 对被试路径选择的影响均有显著差异,被试选择路径 P_A 的比例随 Δd 的增加而增大;当 $\Delta d = 30\text{ m}$ 时,路径 P_A 长度为 12.5 m,路径 P_B 长度为 42.5 m,被试倾向于选择路径长度较短的路径 P_A 进行疏散。

为更详细地分析数据,使用二元 logistic 回归模型进行数据拟合,通过烟雾水平和 Δd 预测被试的路径选择情况,预测正确率为 84.5%,结果见表 9。

表 8 不同烟雾水平及 Δd 下被试选择路径 P_A 占比交叉表分析

Table 8 Crosstab analysis of effect of smoke levels and route length differences on participants' route P_A choice percentage

路径 P_A	路径 P_B	$\Delta d/m$				χ^2	p 值
		0	10	20	30		
无烟雾	无烟雾	51.56	85.42	88.54	91.67	122.230	0.000
	低水平	93.75	98.44	99.48	98.96	17.522	0.001
	高水平	98.96	100.0	99.48	98.96	2.214	0.529
低水平	无烟雾	9.90	28.13	45.31	58.33	111.438	0.000
	低水平	56.25	92.19	95.83	97.92	180.324	0.000
	高水平	97.40	85.42	99.48	98.44	54.149	0.000
高水平	无烟雾	2.08	4.17	5.73	31.77	115.382	0.000
	低水平	5.21	10.42	16.15	66.67	250.259	0.000
	高水平	48.44	52.08	56.25	87.50	77.698	0.000

表 9 预测路径选择的二元 logistic 回归模型结果

Table 9 Results of binary logistic regression model for predicting route choice

回归模型参数		回归系数 B	标准误差	显著性水平	OR	置信下限	置信上限
常量		0.419	0.101	0.000	1.521	—	—
路径 P_A 烟雾水平	无烟雾	—	—	0.000	—	—	—
	低水平	-2.128	0.109	0.000	0.119	0.096	0.147
	高水平	-4.894	0.131	0.000	0.007	0.006	0.010
路径 P_B 烟雾水平	无烟雾	—	—	0.000	—	—	—
	低水平	2.208	0.096	0.000	9.094	7.537	10.972
	高水平	3.817	0.118	0.000	45.475	36.066	57.339
路径 长度差值	$\Delta d=0$	—	—	0.000	—	—	—
	$\Delta d=10$	0.856	0.100	0.000	2.354	1.937	2.862
	$\Delta d=20$	1.341	0.103	0.000	3.824	3.127	4.676
	$\Delta d=30$	2.742	0.119	0.000	15.516	12.291	19.587

由表 9 可以看出,当路径 P_A 有烟雾时,被试选择路径 P_A 疏散的可能性更小;当路径 P_B 有烟雾时,被试选择路径 P_A 疏散的可能性较大,高水平烟雾场景的优势比(Odds Ratio,OR)比低水平烟雾场景的 OR 大; Δd 对被试选择路径 P_A 疏散有积极影响,且随着 Δd 的增加,这种积极影响不断增强。

2.3 调查问卷结果分析

在试验结束后的调查问卷中,被试从虚拟人物视角、虚拟建筑模型、紧张感 3 方面评估虚拟试验场景的真实性,并对自身情绪反应和行为想法进行了评分。在李克特 7 级量表中,1、2 和 3 分别表示非常不同意、不同意和比较不同意,4、5、6 和 7 分别表示一般、比较同意、同意和非常同意。分值越高,代表被试对虚拟疏散试验平台的满意度及认可度越高。虚拟人物视角和虚拟环境的评分为 5.72 和 5.60 分,标准差(Standard Deviation,SD)分别为 1.30 和 1.15,评分最低的紧张感为 5.35 分(SD =

1.19),表明大多数被试认为本虚拟试验平台是“非常真实”或“比较真实”的。被试在疏散过程中的情绪反应和行为想法得分分别为 6.10 分(SD = 0.81)和 6.23 分(SD = 0.81)。因此,被试在虚拟环境中可以比较真实的体验烟雾环境下的疏散过程,为在虚拟环境中开展试验的信效度提供有力支持。

3 结 论

- 1) 疏散过程中,烟雾水平和路径长度对被试的决策有显著影响,被试倾向于选择烟雾水平较低、路径长度较短的路径。
- 2) 与路径长度相比,烟雾水平对被试路径选择的影响更大。
- 3) 少数被试在疏散过程中会出现冒险行为,即不总是选择烟雾水平较低或路径长度较短的路径进行疏散。

参考文献

- [1] MA Jian, SONG Weiguo, Lo Siuming, et al. New insights into turbulent pedestrian movement pattern in crowd-quakes[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2013; DOI: 10.1088/1742-5468/2013/02/P02028.
- [2] HIETANIEMI J, KALLONEN R, MIKKOLA E. Burning characteristics of selected substances: production of heat, smoke and chemical species[J]. Fire and Materials, 1999, 23(4): 171-185.
- [3] CAO Shuchao, FU Libi, WANG Peng, et al. Experimental and modeling study on evacuation under good and limited visibility in a supermarket[J]. Fire Safety Journal, 2018, 102(12): 27-36.
- [4] CAO Ruifeng, LEE M, XIE Wei, et al. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2023, 4(1): 75-92.
- [5] ZHANG Jingjing, ZHAO Jincheng, SONG Zhensen, et al. Evacuation performance of participants in an offshore platform under smoke situations[J]. Ocean Engineering, 2020, 216(15): DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107739.
- [6] 钟伟, 于佳怡. 智慧城市背景下的火灾实时疏散系统[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 179-184.
- [7] ZHONG Wei, YU Jiayi. Real-time fire evacuation system under smart city background[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 179-184.
- [7] 江奎东, 毛占利, 陈浩楠, 等. 基于蚁群算法的烟气中人员疏散路径选择优化[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 133-137.
- [8] JIANG Kuidong, MAO Zhanli, CHEN Haonan, et al. Optimization of evacuation route selection for personnel in smoke environment based on ant colony algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(11): 133-137.
- [8] GUO Renyong, HUANG Haijun, WONG S C. Route choice in pedestrian evacuation under conditions of good and zero visibility: experimental and simulation results[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(6): 669-686.
- [9] 李若愚, 王雁旭, 陈娟, 等. 疏散人员路径选择行为多人在线式虚拟试验研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1650-1658.
- [9] LI Ruoyu, WANG Yanxu, CHEN Juan, et al. Study on pedestrian route choice behavior in multiplayer online virtual evacuation experiments[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(5): 1650-1658.
- [10] MOUSSAÏD M, SCHINAZI V R, KAPADIA M, et al. Virtual sensing and virtual reality: how new technologies can boost research on crowd dynamics[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2018, 5: DOI:10.3389/frobt.2018.00082.
- [11] TUCKER A, MARSH K, GIFFORD T, et al. The effects of information and hazard on evacuee behavior in virtual reality[J]. Fire Safety Journal, 2018, 99: 1-11.
- [12] XIA Xiaolu, LI Nan, GONZÁLEZ V A. Exploring the influence of emergency broadcasts on human evacuation behavior during building emergencies using virtual reality technology[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021, 35(2): DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000953.
- [13] ZHU Runhe, LIN Jing, BECKER-GERBER B, et al. Influence of architectural visual access on emergency wayfinding: a cross-cultural study in China, United Kingdom and United States[J]. Fire Safety Journal, 2020, 113: DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102963.
- [14] 丁天祺, 汪澍, 魏祎璇, 等. 基于眼动特性的疏散决策和寻路行为研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 174-180.
- [14] DING Tianqi, WANG Shu, WEI Yixuan, et al. Study on evacuation decision and wayfinding behavior based on eye tracking characteristics[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 174-180.
- [15] FENG Yan, DUIVES D C, HOOGENDOORN S P. Using virtual reality to study pedestrian exit choice behaviour during evacuations[J]. Safety Science, 2021, 137: DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105158.
- [16] KINATEDER M, RONCHI E, GROMER D, et al. Social influence on route choice in a virtual reality tunnel fire[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2014, 26: 116-125.
- [17] LIN Jing, ZHU Runhe, LI Nan, et al. Do people follow the crowd in building emergency evacuation? a cross-cultural immersive virtual reality-based study[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 43: DOI: 10.1016/j.aei.2020.101040.
- [18] LIN Jing, CAO Lijun, LI Nan. How the completeness of spatial knowledge influences the evacuation behavior of passengers in metro stations: a VR-based experimental study[J]. Automation in Construction, 2020, 113: DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103136.
- [19] 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.
- [20] FRIDOLF K, ANDRÉE K, NILSSON D, et al. The impact of smoke on walking speed[J]. Fire and Materials, 2014, 38(7): 744-759.
- [21] SEIKE M, KAWABATA N, HASEGAWA M. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 61-67.
- [22] FRIDOLF K, RONCHI E, NILSSON D, et al. The representation of evacuation movement in smoke-filled underground transportation systems[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 28-41.
- [23] WEIDMANN U. Transporttechnik der fussgänger[J]. Strasse und Verkehr, 1992, 78(3): 161-169.

作者简介: 崔成博 (1997—),男,山西晋中人,硕士,主要从事人员疏散、虚拟试验方面的研究。E-mail: cuichengbo@my.swjtu.edu.cn。

