

地铁应急疏散时乘客决策行为偏好的量化方法

王 恒¹, 李 枫¹, 江泽浩², 徐天东^{3,4}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室 上海 201804; 2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国城市规划
设计研究院城市交通研究所 北京 100044; 4. 美国佛罗里达大学 城市规划与建设学院, 盖恩斯维尔 32611-5706)

摘要: 为了研究距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性 4 种因素对地铁站紧急疏散时乘客决策偏好异质性的量化影响, 基于 20 种紧急疏散场景的问卷调查收集数据, 利用条件 Logit 模型和随机参数 Logit 模型标定 4 种影响因素的效用系数, 根据效用系数的边际概率分布分析乘客决策偏好的异质性。结果表明: 距离、出口密度、乘客流向流量呈负效用, 出口可见性呈正效用, 4 种影响因素的系数均为随机变量, 距离显示出最低的异质性水平, 出口密度和乘客流向流量的异质性水平稍高, 出口可见性显示出最高的异质性水平。

关键词: 城市地铁站; 紧急疏散行为; 随机参数 Logit 模型; 偏好异质性

中图分类号: U293.1

文献标志码: A

A Quantitative Method for Studying Passenger Decision-Making Preference in Subway Emergency Evacuation

WANG Heng¹, LI Feng¹, JIANG Zehao², XU Tiandong^{3,4}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Urban Transport Institute, China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China; 4. College of Design, Construction and Planning, University of Florida, Gainesville 32611-5706, USA)

Abstract: This paper aimed to study the influence of distance, density, pedestrian flow, and visibility on the heterogeneity of passenger decision-making preference in emergency evacuation in subway stations. The conditional Logit model and random parameter Logit model were used to quantify the utility coefficients of the four influencing factors based on the data collected from 20 emergency

evacuation scenarios, and the heterogeneity of pedestrian decision preference was quantitatively analyzed according to the marginal probability distribution of the utility coefficients. The results show that the distance, density, and pedestrian flow have negative influences while visibility has a positive utility. The goodness of fit of the random parameter Logit model is higher than that of the conditional Logit model. The coefficients of the four influencing factors are random variables. Distance has the lowest level of heterogeneity while density and pedestrian flow have a slightly higher level of heterogeneity, and visibility has the highest level of heterogeneity.

Key words: urban subway stations; emergency evacuation behavior; random parameters Logit model; preference heterogeneity

随着中国城镇化的不断发展, 地铁作为最主要的大运量公共交通方式之一迎来了快速发展, 截止到 2018 年底, 在中国内地已共有 35 个城市开通城市轨道交通, 全国城轨交通累计投运车站 3 394 座, 全年累计客运量 210.7 亿人次^[1]。地铁车站具有较高的密封性和独立性, 同时由于突发紧急事件的难以预知和不可控制性, 人流较大时极易造成乘客疏散的踩踏伤亡事故, 国内外城市的地铁站所发生的重大紧急事件都曾有过惨痛教训, 因此, 深入研究地铁站紧急疏散环境中乘客的决策偏好的异质性、总结不同因素对不同乘客决策的影响, 是制定符合实际需求的应急预案的基础和前提, 对提高应急疏散预案的有效性和实用性具有重要的理论意义和实践指导作用。

针对地铁站应急疏散影响因素的分析较多, 吴

收稿日期: 2021-05-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71671109); 国家重点研发计划(2020YFB1600500)

第一作者: 王 恒(1989—), 男, 中级工程师, 博士生, 主要研究方向为轨道交通紧急疏散行为。

E-mail: 1811440@tongji.edu.cn

通信作者: 李 枫(1966—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通系统安全与服务质量管理。E-mail: lifeng@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

君子^[2]将火灾条件下影响疏散的因素归纳为管理因素、建筑因素、人员因素及火灾因素。蓝善民^[3]将乘客疏散行为的诱发归结为自身因素和所处环境的因素之间的相互作用。丁玉兰^[4]将影响因素概括为4M问题:即人、机、环境以及管理问题。上述研究更多的是对影响因素的定性分析,对影响因素的定量分析并未做出解答^[5-6]。在定性分析的基础上,乘客疏散的模型应用最广泛的是元胞自动机模型^[7]和社会力模型^[8]。目前,多数商业仿真疏散软件都是以这2个模型为基础进行开发的,模型主要针对主体的运动建立规则,这样会造成疏散主体的同质性较强。近些年,为了加强拥挤的铁路车站和公共交通安全,很多学者在乘客行为的不同方面开展了广泛的研究。Zhong等^[9]针对乘客上下车的行为进行了模拟;Gräble等^[10]通过在不同出口配置条件下进行模拟疏散实验调查乘客和乘务员的疏散行为;Jiang等^[11]以中国的2个地铁站为例进行了案例研究,目的是研究2个特定输入参数(最大楼上速度和楼梯的平均最小宽度),用以反映地铁站客流的特殊性。然而,这些文献研究主要是应用现有商业仿真软件进行模拟,也就说忽略了疏散主体的差异性。同时,不少学者利用基于主体(Agent)^[12]建模的方法进行精细化处理,使得个体之间存在属性差异,但这种模型更多地是针对乘客“运动层面”的建模分析,并未着重考虑紧急疏散的影响因素对于不同乘客的影响效用的区别。在人群紧急疏散出口方向的选择这一特殊问题上,迄今为止的研究中普遍采用了4种主要的方法,这些方法包括博弈论方法、离散选择方法、基于网络的模型和基于元胞自动机的方法。其中离散选择方法包括二项Logit模型、多项Logit模型、条件Logit模型、层式Logit模型、混合Logit模型等^[13-14]。Antonini等^[15]使用交叉Logit模型和巢式Logit模型描述行人对下一步的选择;Lovreglio等^[16]运用混合多项式Logit模型描述人群疏散时出口选择行为;Duives等^[17]将基于显式Logit的决策模型引入到元胞自动机的行走行为模型中。然而,在以前的研究中,紧急疏散出口方向选择问题的一些重要方面往往被认为是理所当然的,例如出口的能见度、其他行人流向(称为“羊群”行为)等因素的影响,并未针对一些重要因素影响对乘客出口决策的影响进行深入量化分析,即乘客做出疏散方向决策时影响因素对乘客产生的影响是否因人而异。

本文利用SP^[18](Stated Preference)调查方法的改进方法即SP-off-RP(Stated Preference-off-

Revealed Preference)^[19]调查方法进行调查,首先根据文献[20]调研总结了影响地铁站乘客疏散的最主要的4种因素(距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性),将4种因素设计成20种地铁站应急疏散场景进行调查,应用条件Logit模型和随机参数Logit模型^[21]确定4种影响因素的系数权重,量化分析乘客疏散决策偏好的异质性,并初步探讨产生异质性的原因。

1 实验设计

为了揭示地铁站乘客在紧急疏散决策层面上的偏好,通过实验调查分析某些因素对乘客疏散的影响,将疏散人员决策时对影响因素产生的偏好异质性进行量化。采用SP-off-RP调查方法收集个体层面的选择数据。SP-off-RP调查方法是基于SP调查进行改进的,SP-off-RP调查是以现实中已发生的类似情景选择为基础进行假设场景的选择调查,这种方法在假设情景中影响因素的属性在必要的方向上改变,以引出偏好揭示,无论被调查者对这些变化做出何种回应,都会获得有关偏好的信息数据。

1.1 问卷场景设计

首先,确定因变量和自变量,由于本次研究主要集中在地铁站厅层紧急疏散时的影响因素,因此因变量是地铁站站厅层乘客疏散时出口的选择。关于自变量,在一项初步研究中,人们对他们在做疏散决策时认为最重要的因素进行了排序,本次研究选择其中最重要的4个影响因素作为自变量,如表1所示。影响出口选择的因素较多,如疏散引导员、逃生指示牌等因素,但由于地铁突发应急事件类型种类较多,具有多样化、不确定性等特点,同时由于问卷调查的限制性,本文只针对最重要的4个影响因素进行深入分析。

其次,以某地铁站站厅层的设计图纸作为基础,设计多种实验场景。地铁站共有4个出口,在每个选择实验中,受访者的假设位置、每个出口点周围的拥挤程度以及向出口点移动的其他行人的数量都被表示出来,并且在不同的场景中有所不同,按照这个规则共设计了20种场景变化,图1—4显示了其中的4种场景。这些场景影响因素属性的变化基本上调查了乘客在何种情况下可能会将其较近的出口选择更改为其他出口选择。同时,问卷调研了参与者的性别、年龄、疏散经历和安全疏散教育情况等。

表1 实验自变量含义

自变量	含义	代码
距离	乘客到地铁站出口的距离	distance
出口密度	地铁出口的人群拥挤度	density
出口可见性	地铁站出口对于乘客是否可见	visibility
乘客流向流量	流向出口进行疏散的乘客流量	pedestrian flow

在调查设计中,同时考虑了现实中出口不在视野范围内的情形,即参与者从当前假设位置无法看见该出口,这时不可见出口点周围的区域被模糊(在每张图片中突出显示),表明乘客无法得知出口周围情况,例如,图1、图3中出口2和出口3对于参与者不可见,图2、图4中出口1和出口4对于参与者不可见。参与者被告知,他们可以在每个场景中选择4个出口中的任何一个,无论该出口是否可见。为了更加接近现实中的应急疏散时的场景,观察在不完全信息掌控下参与者的出口决策选择,在问卷设计时每一种场景参与者只能观察到图中设定位置周边的情况,对于距离较远的情况,问卷中场景并未进行表示。例如图1中参与者所在的假定位置只能观察到视野范围内距离较近的出口1和出口4的出口密度、流向出口1和出口4的乘客流向流量以及部分向出口2和出口3进行疏散的乘客流向流量,对于距离较远的视野范围外的出口2和出口3的周边情况是无法获取的。这样调查得到的数据一定意义上和现实中的应急疏散时乘客能够得到的数据信息是相似的即片面不准确的,参与调查的乘客只能通过这种片面的数据进行判断、选择疏散方案。

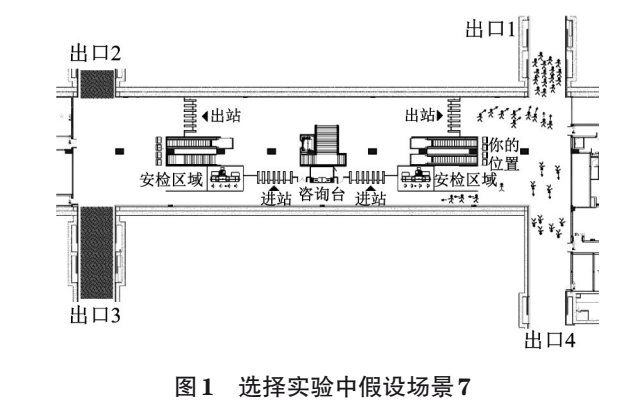


图1 选择实验中假设场景7

1.2 实验组织调查

实验调查是在上海五角场地铁站和江湾体育场地铁站进行,乘客接受采访和进行问卷填写。2个地铁站地处上海商业中心,节假日人流量较大。本研

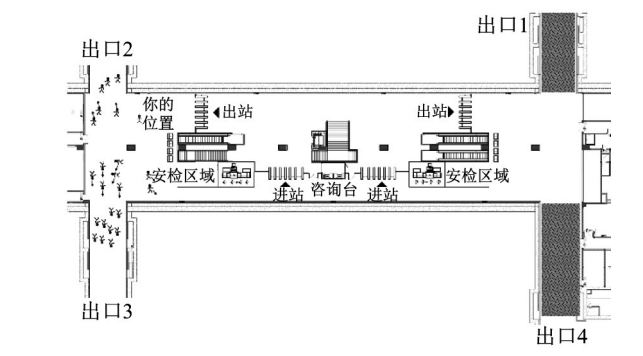


图2 选择实验中假设场景3

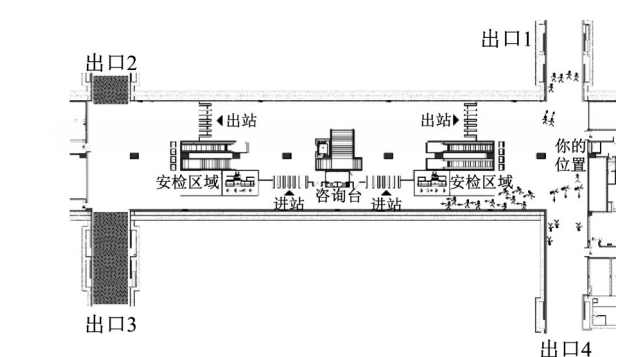


图3 选择实验中假设场景8

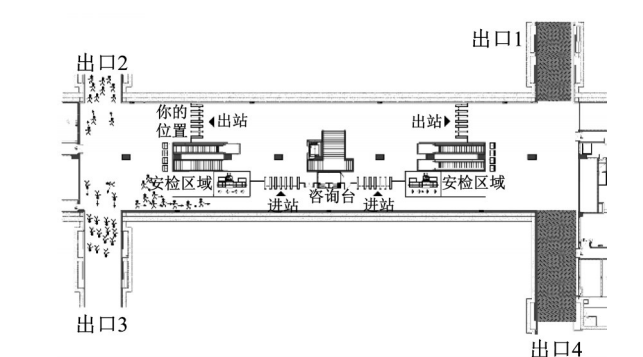


图4 选择实验中假设场景5

究采用的数据收集方法与以往行人疏散领域的一些研究方法基本相似,但这种调研方法在数据收集方面与传统的SP调查的主要区别在于,SP调查是将人们引入纯粹的假设情景中进行选择,而SP-off-RP

调查是将受访者引入最近经历且记忆清晰的相似场景中进行选择。例如,当观察到一个乘客跟随人群较多的人流走向某个出口时,向该位乘客受访者介绍本文设计的场景,以响应其最新的实际出口选择,观察乘客在做场景问卷调查时是否也偏向跟随人群进行选择出口。将假设的情景与人最近的真实选择直接挂钩,将假设的情景与受访者最近的真实经历相互联系,这种方法能够让受访者更真实地将现实与调查情景联系起来,使其更加关注调查情景,从而提供更可靠的数据。这也符合计量经济学文献中新的趋势,即运用陈述选择方法^{[22][23]}来增强假设选择实验的真实性。这种调研方法是基于SP调查进行改进的。在SP-off-RP调查中,影响因素的属性在必要的方向上改变,以引出偏好揭示,无论被调查者对这些变化做出何种回应,都会获得有关偏好的信息数据,通过这样的方法获得的数据也被证明能够更大可能收集到可靠的数据和有效的模型估计结果。

将20种场景分为2组问卷,每组10个场景,受访的乘客被随机分配填写其中一组问卷,参与的乘客被要求将每张图片场景假设为一个紧急情况,并想象如果在现实中遇到这种情况,他们会选择哪个出口进行疏散。最后,收集到符合条件的182名受访者的问卷,共1820个可观测数据。

1.3 样本量的确定

对于Logit模型的最小样本量目前尚未统一规定,文献[24]提到一种被广泛使用的确定样本量的大小方法通过经验准则确定样本量和自变量之间的关系。文献[25]认为Logit回归分析样本量为自变量个数的10~15倍;文献[26]提到通常规定Logit回归分析中样本量应为自变量个数的5~10倍,按照上述规定,本文4个自变量最多需要60个样本。以上文献研究中对于Logit模型样本量最小规模给出了界定,为了充分证明本文样本量能顾满足研究需要,将进一步回顾已有的关于Logit模型样本量的文献研究。文献[27]提到EPV(events per variable)的概念(EPV即每个自变量的事件数,其中事件表示因变量中个数较少的那一类),文献中得出的统计学模拟研究表明,在Logit模型回归中推荐的EPV至少为10,才能保证结果稳健。根据文献中推荐的EPV公式计算本文的EPV为 $328/4=82$ (328代表因变量被选择最少那一个的出口被选择的次数,4代表自变量的个数),从EPV计算结果看本文的Logit模型回归结果是稳健可信的。本文模型的自变量个数为4,样本量为182,共计1820个可观测数据,因此能够满足

要求。实验自变量含义见表1。

2 实证分析与建模

2.1 效用函数的建立

效用函数模型的一般结构由随机误差部分来决定,采用不同的分布形式会得到不同的离散选择模型。效用函数的自变量为距离(distance, d)、出口密度(density, d_E)、乘客流向流量(pedestrian flow, p_F)、出口可见性(visibility, v)。此时,乘客 n 在地铁紧急疏散场景 t 中选出口 i 的效用函数可表征为

$$U_{nit} = V_{nit} + \epsilon_{nit} \quad (1)$$

式中: V_{nit} 为效用函数的可观测部分; ϵ_{nit} 为效用函数的随机误差部分。乘客的效用函数可观测部分可用式(2)表达:

$$V_{nit} = \beta_{1n}d_{nit} + \beta_{2n}d_{E_{nit}} + \beta_{3n}p_{F_{nit}} + \beta_{4n}v_{nit} + a_{ASC} \quad (2)$$

式中: d_{nit} 为实验场景 t 中乘客 n 到出口 i 的距离; $d_{E_{nit}}$ 为实验场景 t 中出口 i 处乘客密度; $p_{F_{nit}}$ 为实验场景 t 中乘客 n 看到的流向出口 i 的乘客流量; v_{nit} 为实验场景 t 中出口 i 对于乘客 n 的可见性,作为二进制0、1变量,当且仅当出口对乘客可见时取1; β_{1n} 、 β_{2n} 、 β_{3n} 、 β_{4n} 为参数系数; a_{ASC} 为常数项。

2.2 条件Logit模型

若随机误差项 ϵ_{nit} 服从Gumble分布,随机误差项的概率密度函数表达式见式(3),条件Logit模型可用式(4)表达:

$$f(\epsilon_{nit}) = e^{-\epsilon_{nit}} e^{-e^{-\epsilon_{nit}}} \quad (3)$$

$$P_{nit} = \frac{e^{v_{nit}}}{\sum_{j=1}^{I_n} e^{v_{nit}}} \quad (4)$$

式中: P_{nit} 为乘客 n 在疏散场景 t 中选择出口 i 的概率; I_n 为地铁出口的集合。条件Logit模型通常采用最大似然法来进行参数估计,模型的对数似然值(Log likelihood)为-1402,伪 R^2 (Pseudo R^2)为0.116,模型估计的结果见表2。

从表2的结果中可以看出,距离、出口密度、乘客流向流量总体均值系数均为负,且显著,即随着出口距离的增加、出口乘客密度增加、乘客流向出口流量增加,效用会降低也就是选择该出口的概率会变小。从胜率(odds ratio)结果中看,乘客距离出口的距离每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.974,出口处的乘客密度每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.891,

表2 条件Logit模型回归结果
Tab. 2 Regression results of conditional Logit model

变量参数	系数	标准差	胜率	z	p	95%置信区间
距离	−0.027	0.041	0.974	−6.43	0	[−0.035, −0.018]
出口可见性	1.296	0.078	3.655	16.53	0	[1.142, 1.450]
出口密度	−0.116	0.012	0.891	−9.79	0	[−0.139, −0.093]
乘客流向流量	−0.037	0.012	0.964	−3.10	0.002	[−0.060, −0.013]

乘客流向出口的流量每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.964。

出口可见性的总体均值系数为正,且显著,即出口对于乘客可见,效用会越高,即选择该出口的概率会变大,这与实际乘客疏散情况相符。从胜率结果中解读,当出口可见时,该出口被选中的概率相比较不可见时增大了3.655倍。

2.3 随机参数Logit模型

Logit模型包括很多种,如条件Logit、巢式Logit模型等,以上Logit模型通常采用最大似然方法来进行参数估计,而最大似然估计法假设事件发生的概率仅由模型中的因素决定,忽略了模型外的因素及不确定因素对事件发生概率的影响。为解决以上Logit模型未能考虑个体差异性与IIA假设^[28]的限制,提出了随机参数Logit模型,其将系数设定为随机,可以很好地捕捉决策者之间的异质性。本实验数据来源于不同的受试者针对不同疏散场景的选择结果,这些因素都可能导致异质性的产生,随机参数Logit模型被证明可以较好地表现这种异质性^[29]。

随机参数Logit模型的随机误差项 ϵ_{nit} 服从

Gumble分布,见式(3),效用系数 β_n 服从正态分布,可以用式(5)表达:

$$\beta_n = \beta + \Gamma \omega_n \tag{5}$$

式中: β 为系数的平均值; ω_n 为独立正态变量向量; Γ 为协方差矩阵的Cholesky因子。随机参数Logit模型可用式(6)表达:

$$P_{nit} = \int_{\omega_n} \prod_{t=1}^T \frac{e^{V_{nit}}}{\sum_{j=1}^{I_n} e^{V_{njt}}} \phi(\omega_n) d\omega_n \tag{6}$$

式中: $\phi(\omega_n)$ 为其概率密度函数。

根据文献[30]中对随机参数Logit模型的研究,按其建议的流程进行数据分析,假定影响效用的距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性4个变量都是随机系数。由以上设定对调查数据进行随机系数Logit模型回归。根据对于随机系数Logit模型的分析,随机系数Logit模型的概率没有闭型,需要通过仿真方式求解,而仿真求解涉及随机抽样。随机抽样中,Halton序列抽样效果较好^[31],因此文中采用Halton序列抽样,抽样次数为1 000,模型的对数似然值为−1 350,伪 R^2 为0.192,模型估计的结果见表3。

表3 随机参数Logit模型回归结果
Tab. 3 Regression results of random parameter Logit model

变量参数	系数	标准差	胜率	z	p	95%置信区间
距离	−0.115	0.013	0.904	−9.89	0	[−0.138, −0.092]
出口可见性	1.548	0.862	19.609	1.80	0.042	[0.667, 5.286]
出口密度	−0.274	0.074	0.643	−7.09	0	[−0.350, −0.198]
乘客流向流量	−0.173	0.116	0.790	−4.03	0	[−0.257, −0.089]

从表3结果中可以看出,4个影响因素总体均值系数均显著。其中,距离、出口密度、乘客流向流量系数值为负,说明它们的值越大,该出口被选中的概率越小;出口可见性系数的值为正,出口可见性的值为1(即出口可见)的时候被选中的概率越大。从胜率结果中解读,乘客与出口的距离每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.904,出口处的乘客密度每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.643,乘客流向出口的流量每增加1个单位,该出口被乘客选择的概率减少为原来的0.790,当出口可见时,该出口被选中的概率相

比较不可见出口增大了19.609倍。

2.4 模型优劣对比

以上研究采用了2种不同的Logit模型进行研究。根据文献[32-33]中的对比方法,采用对数似然值、伪 R^2 、赤池系数(AIC)、贝叶斯系数(BIC)指标对比2种模型拟合优度的差异,具体结果见表4。

从表4中得出,条件Logit模型中对数似然值−1 402、伪 R^2 的值0.116都小于随机系数Logit模型中的值−1 350和0.192,条件Logit模型中赤池系数的值2 818、贝叶斯系数的值2 853都大于随机系数Logit模型中的值2 722和2 778。根据以上几个指

表4 2种Logit模型拟合优度对比

Tab. 4 Comparison of goodness of fit of two Logit models

对比指标	条件Logit模型	随机系数Logit模型
Log likelihood	-1 402	-1 350
Pseudo R^2	0.116	0.192
AIC	2 818	2 722
BIC	2 853	2 778

标结果,本文方法得到的随机系数Logit模型的拟合优度高于传统的条件Logit模型。

2.5 决策偏好异质性的量化分析

图5中显示4个变量的符号和显著性方面在2种模型的集中趋势完全一致,2个模型都得到距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性4个变量对乘客的出口选择行为有显著贡献,距离、出口密度、乘客流向流量对出口效用的影响方向是负的,而出口可见性的效用影响是正的。表5中为影响因素系数的标准偏差, p 值均显著,表明在效用函数中,距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性的系数均为随

机系数,对于不同的乘客,疏散因素对效用的影响不一样,即存在异质性。

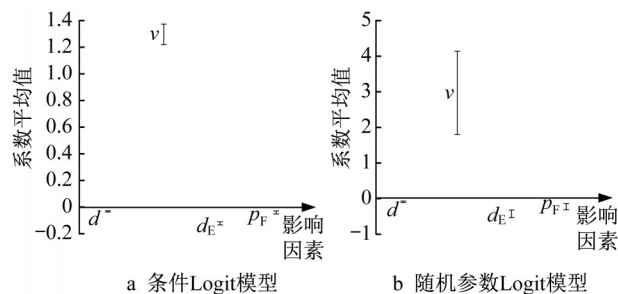


图5 2种模型下效用系数平均值估计可视化比较

Fig. 5 Visual comparison of mean estimation of efficiency coefficient of two models

由以上分析可知,随机参数Logit模型在地铁站乘客疏散决策建模方面具有较好的拟合优度,乘客在地铁站紧急疏散时对影响疏散的因素偏好存在异质性。根据以上估计的随机系数Logit模型,刻画影响因素的系数的边际概率分布函数,用来解释4种因素对乘客决策效用的异质性,见图6~9。

表5 随机参数Logit模型系数的标准偏差回归结果

Tab. 5 Regression results of random parameter Logit model

变量参数的标准偏差	系数	标准差	z	p	95%置信区间
距离	0.109	0.013	8.38	0	[0.087, 0.138]
出口可见性	1.549	0.752	2.06	0.045	[0.168, 54.898]
出口密度	0.246	0.074	3.32	0.	[0.136, 0.445]
乘客流向流量	0.726	0.116	6.26	0	[0.531, 0.992]

从图6影响因素可视化中看出,出口可见性因素变量对疏散场景下人们的选择出口起到了更重要的影响,而距离因素变量对疏散场景下人们的选择出口的影响最小,表明乘客在疏散逃生时,视野范围内能否观察到相应情况是影响疏散决策重要的影响因素。不同的因素对乘客疏散决策的影响效用是不同的,同时相同的影响因素对不同的乘客的影响也是不同的,即4种因素对乘客决策效用存在异质性。

距离系数的边际概率分布服从 $N(-0.115, 0.013)$ 的正态分布,图6显示的分布最为集中,说明距离因素的估计系数显示出最低的异质性水平,绝大多数人都会选择最近出口进行疏散。

出口可见性系数的边际概率分布服从 $N(1.548, 0.752)$ 的正态分布,图7显示的分布最为分散,说明出口可见性因素在估计的系数中显示出最高的异质性水平,即乘客在进行出口选择时,乘客对于可见性因素的偏好要比距离因素偏好的异质性

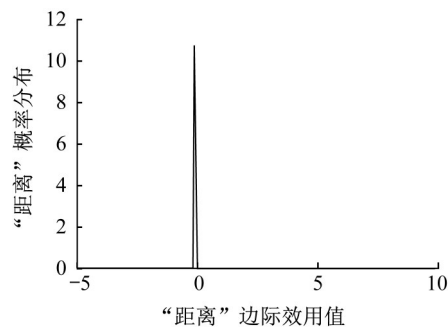


图6 距离估计系数的边际概率分布

Fig. 6 Marginal probability distribution of distance estimation coefficient

更高,对于可见和不可见出口的选择因人而异的概率更大。

出口密度和乘客流向流量的系数的边际概率分布分别服从 $N(-0.274, 0.074)$ 和 $N(-0.173, 0.116)$ 的正态分布,图8、图9相比图6的分布较分散,但相比图7的分布更集中,并且出口密度相比乘客流向流量的系数的边际概率分布更为集中。以上

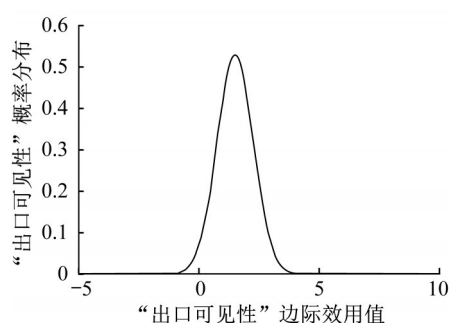


图7 出口可见性估计系数的边际概率分布

Fig.7 Marginal probability distribution of visibility estimation coefficient

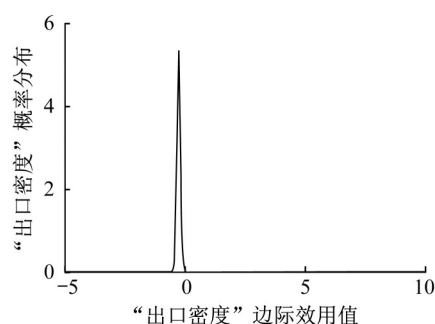


图8 出口密度估计系数的边际概率分布

Fig. 8 Marginal probability distribution of density estimation coefficient

分析说明,出口密度和乘客流向流量的异质性水平要低于出口可见性的异质性水平,高于距离的异质性水平,并且出口密度相比乘客流向流量的异质性水平低。

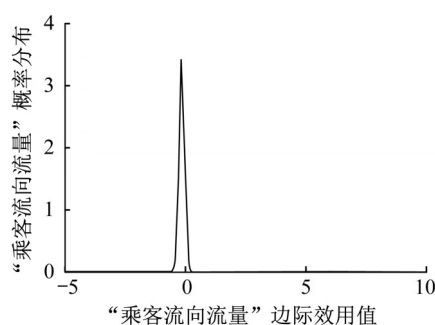


图9 乘客流向流量估计系数的边际概率分布

Fig. 9 Marginal probability distribution of pedestrian flow estimation coefficient

对于产生这种异质性的来源进行了初步探讨。问卷调研除了情景调查外,还设计了参与者的一些基础信息调查,如性别、有无紧急疏散经历、有无安全疏散教育经历等,结合这些基本的统计信息代入模型进行分析,结果如表6,结果显示:性别、紧急疏

散经历、安全疏散教育经历的 p 值均大于0.05,即3种变量参数均不显著,即乘客的性别、有无紧急疏散经历、有无安全疏散教育经历的统计数据不足以解释异质性的来源。

表6 乘客基础信息与偏好异质性的关系

Tab. 6 Relationship between passenger basic information and preference heterogeneity

变量参数	z	p	95%置信区间
性别	0.74	0.456	$[-0.398, 0.886]$
紧急疏散经历	-1.09	0.277	$[-2.303, 0.413]$
安全疏散教育	-0.24	0.809	$[-1.216, 0.949]$

3 结语

利用条件Logit模型和随机系数Logit模型研究距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性4种因素对地铁站乘客紧急疏散出口决策的影响,量化了4种因素对乘客决策偏好异质性的影响,通过研究主要得到以下结论:

(1)条件Logit模型和随机系数Logit模型结果都显示:距离、出口密度、乘客流向流量对于乘客出口决策呈负效用影响,出口可见性对于乘客出口决策呈正效用影响。

(2)随机系数Logit模型比传统的条件Logit模型具有更高的拟合度,更适合用来解释4种影响因素的参数变化。

(3)通过条件Logit模型和随机系数Logit模型优劣对比,在效用函数中,距离、出口密度、乘客流向流量、出口可见性的参数为随机变量更合理,即4种影响因素存在异质性。

(4)距离系数在估计的系数中显示出最低的异质性水平,出口密度和乘客流向流量估计的系数异质性水平稍高,出口可见性系数在估计的系数中显示出最高的异质性水平,表明大多数乘客对于距离的感知较为集中,即会选择距离较近的出口进行逃生;对于出口可见性的感知则较为多元化即更多的乘客会根据自身偏好选择可见或者不可见的出口进行逃生。

研究结果表明,在制定乘客地铁站紧急疏散应急预案时,应该考虑到不同的影响因素对不同人的效用权重的区别,并且这些权重在人群中会有不同的分布,可以为进一步提高地铁站乘客紧急疏散决策预测的准确度提供思路。接下来的研究中将进一步

深入研究乘客的心理特征、人格特质数据等,以期能够解释这种偏好异质性产生的根本原因。

作者贡献声明:

王 恒:研究构思、论文撰写、实施研究。

李 枫:研究指导。

江泽浩:研究构思、研究指导、论文审阅与修改。

徐天东:研究指导。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2018年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2019(4):16.
China Association of Metros. 2018 urban rail transit statistics and analysis report [J]. Urban Rail Transit, 2019(4):16.
- [2] 吴君子. 火灾条件下地铁疏散仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
WU Junzi. Research on emergency metro evacuation simulation in fire [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [3] 蓝善民. 高铁站应急疏散研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
LAN Shanmin. Research on emergency evacuation for high-speed railway station [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [4] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 4版. 北京:北京理工大学出版社, 2011.
DING Yulan. Ergonomics [M]. 4th ed. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2011.
- [5] XU Tiandong. Dynamic travel behavior and active traffic routing and control modeling for regional evacuations [M]. [s.l.]:Independent Press, 2015.
- [6] XU T D, HAO Y, SUN L J. Modeling drivers' en-route diversion behavior under variable message sign messages using real detected traffic data [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2011, 5(4): 294.
- [7] HELBING Dirk, BUZNA Lubos, JOHANSSON Anders, *et al.* Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions[J]. Transportation Science, 2013, 219(5):5495.
- [8] BLUE V, ADLER J. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation [J]. Transportation Research Record, 1998 (1644):29.
- [9] ZHONG M, SHI C, TU X, *et al.* Study of the human evacuation simulation of metro fire safety analysis in China[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21 (3):287.
- [10] GRÄBLE F, KRETZ T. An example of complex pedestrian route choice [J]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2011 (6):767.
- [11] JIANG C S, YUAN F, CHOW W K. Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for subway stations in China[J]. Safety Science, 2010, 48(4):445.
- [12] 吴鹏, 杨爽, 张晶晶, 等. 突发事件网络舆情中网民群体行为演化的Agent建模与仿真研究[J]. 现代图书情报技术, 2015 (Z1):65.
WU Peng, YANG Shuang, ZHANG Jingjing, *et al.* Research on Agent modeling and simulation of netizen group behavior evolution in network public opinion of emergency [J]. New Technology of Library and Information Service, 2015(Z1):65.
- [13] XU Tiandong. Big-data-driven ATMS: Driver behavior and active traffic management[M]. [s.l.]: Independent Press, 2017.
- [14] XU T D, HAO Y, AND SUN L J. Automatic calibration of behavioral parameters for variable message signs-based route guidance consistent with driver behavior [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2321(2321): 55.
- [15] ANTONINI G, BIERLAIRE M, WEBER M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior [J]. Transportation Research Part B, 2006, 40(8):667.
- [16] LOVREGLIO R, BORRI D, OLIO L Dell, *et al.* A discrete choice model based on random utilities for exit choice in emergency evacuations[J]. Safety Science, 2014, 62:418.
- [17] DUIVES D, MAHMASSANI H. Exit choice decisions during pedestrian evacuations of buildings [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2316:84.
- [18] 王方, 陈金川, 张德欣. SP调查在交通方式选择模型中的应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007(5):90.
WANG Fang, CHEN Jinchuan, ZHANG Dexin. The application of stated preference survey on traffic mode split model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007(5):90.
- [19] WILSON T. Monte Carlo analysis of SP-off-RP data [J]. Journal of Choice Modelling, 2009(2):101.
- [20] HAGHANI M, SARVI M. Pedestrian crowd tactical-level decision making during emergency evacuations [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(8):187.
- [21] ANWAR A H M M, TIEU K, GIBSON P, *et al.* Analyzing the heterogeneity of traveller mode choice preference using a random parameter logit model from the perspective of principal-agent theory [J]. International Journal of Logistics Systems & Management, 2014, 17(4):447.
- [22] ROSE J M, HESS S. Dual-response choices in pivoted stated choice experiments [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2135(1):25.
- [23] TRAIN K, WILSON W W. Estimation on stated-preference experiments constructed from revealed-preference choices [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42 (3):191.

- [24] 高永祥, 张晋昕. 回归分析的样本量确定[J]. 循证医学, 2018, 18(2):3.
GAO Yongxiang, ZHANG Jinxin. Determination of sample size for regression analysis [J]. Evidence Based Medicine, 2018, 18 (2): 3
- [25] 方积乾. 卫生统计学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
FANG Jiqian. Health statistics [M]. 6th ed. Peking: People's Health Publishing House, 2008.
- [26] 金丕焕. 医用统计方法[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2003.
JIN Pihuan. Medical statistics [M]. Shaanghai: Fudan University Press, 2003.
- [27] PEDUZZI P, CONCATO J, KEMPER E, *et al.* A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis[J]. Journal of Clinical Epidemiology, 1996, 49 (12): 1373.
- [28] TRAIN M F. Mixed MNL models for discrete response [J]. Journal of Applied Econometrics, 2000, 15(5):447.
- [29] 刘建荣, 郝小妮. 基于随机系数Logit模型的市内出行方式选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019(5):108.
LIU Jianrong, HAO Xiaoni. Travel mode choice in city based on random parameters Logit model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019(5):108.
- [30] HENSHER D A, ROSE J M, GREENE W H. Nlogit for applied choice analysis [M]// DAVID Hensher. Applied Choice Analysis. London:Cambridge University Press, 2015.
- [31] CAO Baogui. A new car-following model considering driver's sensory memory [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2015, 427:218.
- [32] 江泽浩, 杨晓光, 汪涛. 绿灯倒计时影响下机动车微观驾驶行为分析与决策建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2):66.
JIANG Zehao, YANG Xiaoguang, WANG Tao. Analysis of microscopic driving behavior and modeling of decision-making effected by green signal countdown [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2):66.
- [33] 刘建荣, 郝小妮. 基于随机系数Logit模型的地铁拥挤度影响参数研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 391(4):67.
LIU Jianrong, Hao Xiaoni. Evaluation of the metro's in-vehicle congestion parameters based on random parameters Logit model [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 391(4):67.