

DOI:10.11918/202405060

考虑后悔的需求响应公交选择行为模型

马嘉欣, 陈旭梅, 陈琳, 李培坤, 席殊

(综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要: 准确把握出行者选择偏好, 有助于构建需求响应公交(demand responsive transit, DRT)可持续运营策略, 为此, 结合DRT服务在中国缺乏成熟实践且社会公众尚未完全熟知现状, 关注了出行者在面对复杂不确定出行场景时易存在的损失规避心理, 引入社会经济属性、出行特征属性、方式属性等构建了基于混合效用与后悔的DRT选择行为模型, 并以北京市15 012条样本数据进行了模型标定及验证分析。结果表明:60岁及以上的出行者群体对DRT服务具有最为显著的选择意愿;女性、年龄在25岁及以上、本专科教育水平及以上、月均可支配收入在1 000元及以上、具有2人及以上家庭等因素均对选择DRT服务具有积极影响。为充分发挥DRT服务对于绿色出行的促进作用, 建议10 km以内出行距离下票价不应超过10元, 且车辆绕行时间不宜超过总出行时间的1/4。

关键词: 地面公交; DRT; 出行选择行为; 后悔最小化; 混合效用

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)07-0061-09

Travel choice model for demand responsive transit considering regret

MA Jiixin, CHEN Xumei, CHEN Lin, LI Peikun, XI Shu

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport of Ministry of Transport (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: It is essential to accurately capture traveler preferences for developing sustainable operating strategies with demand-responsive transit (DRT) services. Considering the unmaturred practice of DRT and limited public awareness in China, the loss aversion psychology exhibited by travelers when faced with complex and uncertain travel scenarios is focused. Integrating socioeconomic attributes, travel characteristics, and modal attributes, a mode choice model based on the hybrid utility and regret model is developed and calibrated through a dataset comprising 15 012 observations from Beijing. The results indicate travelers aged 60 and above show the most pronounced preference towards adopting the DRT. Factors such as female, age 25 and above, educational attainment at the associate degree level or higher, monthly disposable income exceeding 1 000 yuan, and household sizes of two or more individuals have a positive influence on the adoption of the DRT. Furthermore, under the travel distance within 10 kilometers, the fare for DRT is suggested to not exceed 10 yuan, and the vehicular detour time is suggested to be limited within one-fourth of the total travel time to fully utilize DRT's potential in augmenting the modal share of sustainable transportation.

Keywords: transit; DRT; travel choice behavior; regret minimization; hybrid utility

得益于车联网、云计算等技术赋能, 地面公交系统正处于转型的关键时刻^[1]。受限于传统地面公交系统的刚性设计与城市发展的不均衡性、居民出行模式的多样化之间的不协调、不兼容现状, 需求响应公交(demand responsive transit, DRT)被迅速认为是一种集成灵活性和适应性的创新出行解决方案。美国交通运输研究委员会编撰的《公共交通通行能力和服务质量手册》(第2版)^[2]定义DRT是一种根据需求提供个性化乘车的公交服务, 其特点在于

没有固定的时刻表、运营线路及停靠站点, 而是通过调度系统来提供从门到门或路边到路边的服务, 并灵活安排车辆行驶路线、站点和运营时刻表。本研究中的DRT沿用上述定义, 即以需求为导向、具有高度灵活运营方案、定制化的城市公共交通服务。

自Daganzo^[3]于1984年验证了在低需求密度区域中DRT的运营效益显著优于传统地面公交系统后, Dessouky等^[4]、Quadrifoglio等^[5]、Qiu等^[6]、郑汉等^[7]进一步结合丰富案例证明DRT具有取代传统

收稿日期: 2024-05-24; 录用日期: 2024-06-11; 网络首发日期: 2025-07-09

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250709.1526.008>

基金项目: 国家自然科学基金(72271020)

作者简介: 马嘉欣(1997—), 女, 博士研究生; 陈旭梅(1974—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈旭梅, xmchen@bjtu.edu.cn

地面公交的运营潜力,并有效提升乘客利益与运营商效益。Finger 等^[8]则深入挖掘确定了自动化趋势下 DRT 出行选择的影响因素。值得注意的是,DRT 服务的实践应用仍需以出行市场为导向逐步推进。在 DRT 具体落地之前把握出行者面对其出行偏好至关重要。已有研究普遍采用基于效用理论的出行选择行为模型^[9-10]。然而,效用理论高度依赖于出行者完全理性、能够准确辨析不同选项的效用且会选择效用最大选项的假设^[11]。在引入包含效用难以明确的新出行方式的场景中出行者倾向于呈现有限理性^[12],仅基于效用理论建模易导致误差增大、出行选择概率预测失准等问题^[13]。同时,受限于 DRT 在中国仍处于渐进融合的运营试点阶段且实践案例有限,社会公众易出现因无法准确判断 DRT 服务优势或出行效用而决策失误的现象,进而在出行过程中体现强烈的损失规避情绪。在面对复杂和不确定出行选择时,关注情感因素并试图最小化出行者因未选择其他可能更好的选项而经历的后悔感将为理解出行决策过程提供一个更为全面且综合的视角^[14]。

本研究重点关注出行者面对具有不确定性的 DRT 选择时的决策损失规避心理构建选择行为模型,有效捕捉了出行者在预测与实际出行体验之间可能出现的认知偏差,识别了社会公众对于 DRT 出行的选择偏好及其影响因素,并立足需求侧明确了 DRT 绕行时间、票价的阈值范围,在 DRT 引入后的出行需求预测、方式分担率分析、DRT 运营策略及定价水平制定中具有实际应用价值。

1 考虑损失规避心理的选择行为建模

1.1 理论基础

随机后悔最小化 (random regret minimization, RRM) 理论重点关注决策过程中的不确定性和随机性^[15],认为个体在面对多个选择时会考虑到每个选择可能导致的损失规避情绪,并试图选择能够最小化预期后悔的选项,特别适用于出行者在处于具有相对陌生选项的场景下的行为模式理解与预测。此外,混合效用与后悔 (hybrid utility and regret, HUR) 模型融合 RRM 理论与效用理论,将影响决策过程中的部分属性经由 RRM 理论处理,而其余属性经由效用理论处理,并基于混合的“效用 + 后悔”值进行决策^[16-17]。本研究基于 HUR 模型分析 DRT 服务选择行为以更好贴合出行者难以准确判断其服务优势而易决策失误、出行后悔的现实。

1.2 模型框架

包括性别、年龄、受教育程度、月均可支配收入等的个体社会经济属性与由出行目的、出行距离等组成的出行特征属性对于出行选择行为存在差异化影响^[18-20]。同时,DRT 服务感知属性在方式选择中的关键作用不容忽视。此外,现有研究表明 DRT 服务在短距离接驳场景中具有显著优势,并有望与城市轨道交通协同打造“门到门”运输解决方案^[21-22]。因此,面向个体日常出行中其余交通方式 (定线定站公交、DRT 服务、私家车、出租车/网约车、自行车/电动自行车方式) 与 DRT 服务之间的方式转移,考虑个体社会经济属性、出行特征属性及 DRT 服务感知属性等,提出包含 DRT 的出行选择行为模型框架,如图 1 所示。

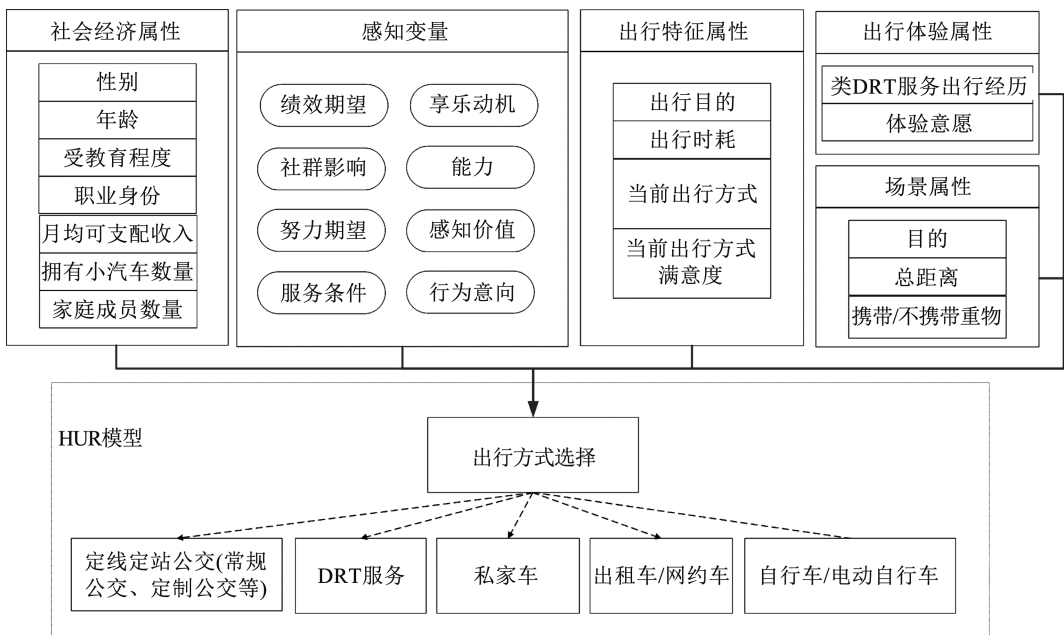


图 1 包含 DRT 的出行选择行为模型框架

Fig. 1 Travel choice behavior model framework of DRT service

1.3 模型构建

后悔心理在出行者未选择可能更好的出行方式时出现^[23]。这种基于方式之间比较的情感与方式自身属性紧密相关,如出行时间与费用;而出行者自身的社会经济属性、出行习惯等短期内并不随方式变化而显著变化,在不同方式之间的比较中无明显

差异。此外,对于随方式变化的属性与不随方式变化的属性以相同决策规则进行选择行为建模易造成模型预测精度低、拟合差等问题^[24]。因此,本文提出考虑后悔的基于 HUR 模型的 DRT 服务选择行为模型,如图 2 所示。

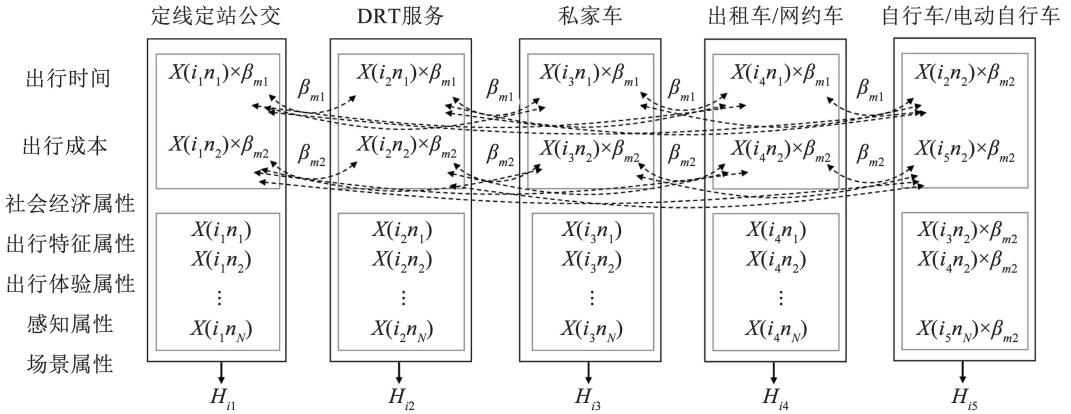


图 2 基于 HUR 模型的出行选择行为模型

Fig. 2 Travel choice behavior model based on HUR model

其中,与方式有关的各属性依托 RRM 理论进行处理,如出行时间、出行费用,而针对社会经济属性、出行特征属性等方式外因素基于效用理论引入模型。值得注意的是,由于基于效用理论的模型的概率计算原则为概率与变量值成正比,但在基于 RRM 理论的决策过程中概率与后悔值成反比。因此,在所有经 RRM 理论处理的属性前均添加负号以统一选择行为模型中的参数意义。对于任一方式 i ,混合的“效用+后悔”值为

$$HUR_i = H_i + \xi_i = \sum_{n=1}^N \beta_n y_{in} - \sum_{i \neq j} \sum_{m=1}^M \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} + \xi_i \quad (1)$$

式中: HUR_i 为混合的“效用+后悔”值, H_i 为方式 i 的混合的“效用+后悔”值, ξ_i 为服从 Gumbel 分布的随机误差项, N 为基于效用理论计算的属性总数量, β_n 为属性 n 的估计参数, y_{in} 为方式 i 在属性 n 的效用值, W 为备选方案总数, M 为基于随机后悔最小化理论计算的属性 m 的总数, β_m 为属性 m 的后悔估计参数, x_{im}, x_{jm} 为方式 i, j 关于属性 m 的效用值。

对于所构建的选择行为模型的各选择枝,其效用函数可表示为

$$HUR_{bus} = \sum_{n=1}^{22} \alpha_n G y_n + \sum_{w=1}^{14} \chi_w T y_w + \sum_{k=1}^6 \delta_k S y_k -$$

$$\sum_{i=bus, i \neq j m=1}^4 \sum_{m=1}^4 \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} \quad (2)$$

$$HUR_{DRT} = \sum_{q=1}^4 \varphi_q D y_q + \sum_{u=1}^8 \gamma_u L y_u - \sum_{i=DRT, i \neq j m=1}^4 \sum_{m=1}^4 \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} + \xi_{DRT} \quad (3)$$

$$HUR_{car} = \sum_{n=1}^{22} \alpha_n G y_n + \sum_{w=1}^{14} \chi_w T y_w + \sum_{k=1}^6 \delta_k S y_k - \sum_{i=car, i \neq j m=1}^4 \sum_{m=1}^4 \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} + \xi_{car} \quad (4)$$

$$HUR_{taxi} = \sum_{n=1}^{22} \alpha_n G y_n + \sum_{w=1}^{14} \chi_w T y_w + \sum_{k=1}^6 \delta_k S y_k - \sum_{i=taxi, i \neq j m=1}^4 \sum_{m=1}^4 \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} + \xi_{taxi} \quad (5)$$

$$HUR_{bike} = \sum_{n=1}^{22} \alpha_n G y_n + \sum_{w=1}^{14} \chi_w T y_w + \sum_{k=1}^6 \delta_k S y_k - \sum_{i=bike, i \neq j m=1}^4 \sum_{m=1}^4 \ln \{ 1 + \exp[\beta_m (x_{im} - x_{jm})] \} + \xi_{bike} \quad (6)$$

对于方式 i ,其被选择的概率 $P_{H(i)}$ 为

$$P_{H(i)} = \text{prob}(HUR_i > HUR_j, \forall i, j \in W \text{ 且 } i \neq j) = \frac{\exp(HUR_i)}{\sum_{j \in W} \exp(HUR_j)} \quad (7)$$

结合 Chorus 等^[14]与关宏志^[25]的研究,选取极大似然法进行各方式属性的参数标定,包括基于后悔理论处理的各属性,即

$$L(\beta) = \prod_z \prod_i P_{H_i}(i | \beta)^{\gamma_{iz}} \quad (8)$$

式中 Z 为进行选择的出行者总数,当出行者 z 选择方式 i 时 γ_{iz} 取值为 1,反之则为 0。

2 SP 调查设计与分析

2.1 问卷设计与实施

为进一步探究 DRT 服务引入后居民的使用意愿及出行选择行为,并以定量结果展示不同因素的影响效应,基于意向调查(stated preference, SP)方法设计 DRT 服务引入后出行选择行为问卷,获得包括个人社会经济属性、出行特征态度信息等数据,结合复合出行场景综合探究出行者选择行为偏好。以北京地区居民为调查对象,借助问卷星、微调查问卷调查平台展开调查。经统计,共回收问卷 1 355 份,样本有效率为 92.4%。

个人社会经济属性围绕性别、年龄、教育水平、职业身份、月均可支配收入、家庭拥有小汽车的数量、家庭成员数量等内容展开;出行特征以出行目的、出行时长、偏好出行方式、当前出行方式满意度等为主,并包含类 DRT 服务的出行经历;基于 5 分制李克特量表法,从出行者在 DRT 服务使用时难易程度、便捷性、高效性、社会满足感、使用 DRT 服务反映出的个人形象等方面获取出行者的态度信息。

设计定线定站公交、DRT 服务、出租车/网约车、私家车、自行车/电动自行车 5 种方式的不同出行场景以切实调查 DRT 复合应用环境下的出行偏好。首先,因 DRT 服务在接驳传统公共交通运输方式中具有显著优势,即主要承担短距离接驳任务,以出行距离为划分依据设计 3 种出行场景进行包含 DRT 服务的出行方式选择调查。其次,引入携带重物变量丰富调研场景。此外,由于不同出行目的对 DRT 服务选择具有显著影响,如在以通勤为主要出行目的时对于时效性要求较高,而对于以休闲为主的出行目的更侧重于舒适性,进一步引入出行目的变量以权衡相关影响。

各方式的出行时间与出行费用是影响选择行为最为关键的要素。基于 DRT 服务特点,出行时间进一步被细分为到达/离开站点所需的时间、站点间行驶时间、候车时间、绕行时间 4 部分。值得注意的是,为平衡运营效益,DRT 往往需要为多位具有相

似时空特征的出行者提供服务,具有较大可能无法保证每位出行者在其指定起讫点之间以最短路线行驶。由此,具有不确定性的绕行时间是 DRT 相比于其他运输方式的重要区别之一,且在复合应用场景的设计中不容忽略。综上,考虑上述 4 部分时间构成及其加和后总出行时间作为方式的时间属性,同时基于票价、燃油费等确定出行费用,形成融合 DRT 服务的 24 种差异化出行场景。

2.2 样本基本特征分析

为验证调查样本的合理性及对北京地区的代表性,将样本性别、年龄与北京市数据^[26]进行控制与对比,如表 1 所示。可以看到,样本比例与北京市常住人口性别、年龄比例均较为接近,误差均低于 $\pm 1\%$ 。此外,样本性别分布较为均衡,年龄群体覆盖除未成年人以外的所有出行群体,具有较强的代表性。

表 1 调查样本与北京市人口对比

Tab. 1 Comparison between the survey sample and the Beijing population

属性	分类	频数	样本占比/%	北京样本占比 ^[26] /%
性别	男	514	50.3	51.0
	女	493	49.7	49.0
年龄	18~24 岁	140	12.0	9.5
	25~29 岁	180	13.2	13.3
	30~39 岁	333	31.3	32.3
	40~49 岁	183	21.5	22.4
	50 岁及以上	171	22.0	22.6

基于问卷调查结果,样本的个人社会经济属性、出行特征属性如表 2、3 所示。可以看到,被调查群体中偏好私家车出行占比为 32.2%,定线定站公交占比为 27.1%,地铁占比为 28.6%,出租车/网约车占比为 8.4%,自行车/电动自行车占比为 3.1%。定线定站公交与地铁累计占比约为 56%,与北京市出行结构基本一致^[26]。单次出行时耗集中于 15~45 min 之间,且超过 80% 的受调查群体单次出行时耗不超过 60 min。

面向 DRT 服务的既有经历与未来体验意愿的分析如图 3 所示。超过 30% 的受调查群体具有类似于 DRT 服务的出行经历。同时,超过 90% 的受调查群体不抗拒或者愿意体验 DRT 服务。这表明尽管 DRT 服务距离完全消除社会公众对其的出行陌生感仍需时间,但已具有较好的引入基础与社会环境。

表 2 个人属性描述性统计

表 3 出行特征属性描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistical of personal attributes

Tab. 3 Descriptive statistical of travel characteristics

分类	描述	频数	样本占比/%
受教育程度	高中及以下	357	28.5
	本专科	807	64.5
	硕士及以上	87	7.0
职业身份	学生	95	7.6
	上班族	843	67.4
	离退休	194	15.5
	待业	56	4.5
	其他	63	5.0
月均可支配收入	1 000 元及以下	19	1.5
	>1 000 ~3 000 元	182	14.5
	>3 000 ~5 000 元	245	19.6
	>5 000 ~8 000 元	310	24.8
	>8 000 ~10 000 元	223	17.8
	>10 000 ~15 000 元	199	15.9
私家车拥有数量	>15 000 元	73	5.8
	0 辆	136	10.9
	1 辆	966	77.2
	2 辆及以上	149	11.9
家庭成员数量	1 人	19	1.5
	2 人	153	12.2
	3 人	606	48.4
	3 人以上	473	37.8

分类	描述	频数	样本占比/%
最频繁出行目的	上下班或上下学	633	50.6
	休闲、娱乐、购物	382	30.5
	就医	71	5.7
	商务出行/业务出行	120	9.6
出行时耗	其他	45	3.6
	15 min 及以下	86	6.9
	>15 ~30 min	442	35.3
	>30 ~45 min	419	33.5
	>45 ~60 min	174	13.9
偏好出行方式	>1.0 ~1.5 h	88	7.0
	>1.5 h	42	3.4
	私家车	403	32.2
	定线定站公交	339	27.1
	地铁	358	28.6
	出租车/网约车	105	8.4
偏好出行方式满意度	自行车/电动自行车	39	3.1
	其他	7	0.6
	很不满意	11	0.9
	不满意	80	6.4
	一般	277	22.1
	较满意	610	48.8
	非常满意	273	21.8

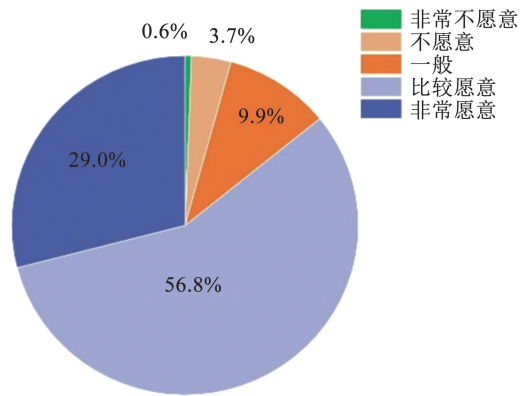
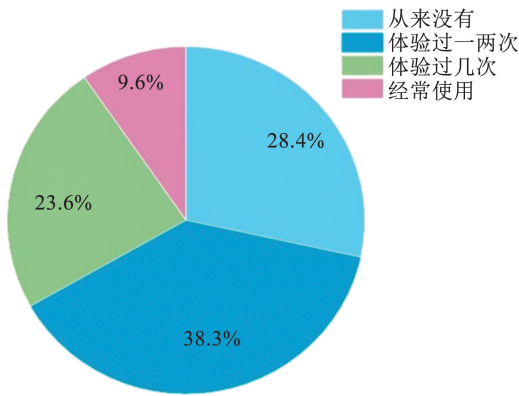


图 3 DRT 出行体验统计性分析

Fig. 3 Descriptive statistical of travel experience with DRT services

3 模型标定

本文基于 python 环境与 Biogeme^[27] 平台编程实现模型求解, 并进行后续各类分析。由于 SP 调查中包含差异化出行距离、出行目的、是否携带重物等多种场景变量, 调查样本可被看作是窄数据集。经过

窄数据集至宽数据集的转化, 15 012 条样本数据被用于模型标定。分别进行 M1 ~ M5 共 5 个模型的标定以验证本文所提出模型的科学与合理性。其中, 基于 MNL 模型 (multinomial logit model) 的 M5 作为对比以进一步验证本文提出模型的科学性。模型估计结果见表 4。

表 4 融合 DRT 服务的出行选择行为模型标定结果

Tab. 4 Calibration results of the travel choice behavior model incorporating DRT services

类别	解释变量	模型标定值				
		M1	M2	M3	M4	M5
常数项	DRT	4.140***	2.160***	2.240***	2.010***	-0.747**
	私家车	1.310***	1.210***	1.120***	1.120***	1.110***
	出租车/网约车	1.570***	1.490***	1.560***	1.550***	1.560***
	自行车/电动自行车	-0.600***	-0.643***	-0.824***	-0.803***	-0.8000***
服务水平属性	费用(元)	-0.921***	-0.921***	-0.933***	-0.865***	-0.022***
	总时间(min)	-0.799***	-0.865***	0.873***	-0.879***	-0.022***
	到达/离开站点时间(min)	-1.860***	-1.830***	-1.99***	-1.900***	-0.154***
	绕行时间(min)	-0.542***	-0.553***	0.565***	-0.557***	-0.003***
社会经济属性	性别:男性	—	0.072**	0.069**	0.071**	0.071**
	年龄:25~29岁	—	-0.107	-0.113	-0.085	-0.085
	年龄:30~39岁	—	-0.270***	-0.267***	-0.224***	-0.224***
	年龄:40~49岁	—	-0.133**	-0.145**	-0.114*	-0.115
	年龄:50~59岁	—	-0.135*	-0.129*	-0.236**	-0.237**
	年龄:60岁及以上	—	-0.285**	-0.303***	-0.463***	-0.464***
	教育水平:本专科	—	-0.183***	-0.163***	-0.162***	-0.161***
	教育水平:硕士及以上	—	-0.128*	-0.120*	-0.086*	-0.085
	月均可支配收入: >1 000~3 000 元	—	-1.130***	-1.020***	-1.070***	-1.060***
	月均可支配收入: >3 000~5 000 元	—	-1.220***	-1.100***	-1.140***	-1.140***
	月均可支配收入: >5 000~8 000 元	—	-1.120***	-1.010***	-1.060***	-1.060***
	月均可支配收入: >8 000~10 000 元	—	-1.140***	-1.050***	-1.100***	-1.100***
	月均可支配收入: >10 000~15 000 元	—	-1.090***	-0.973***	-0.997***	-0.900***
	月均可支配收入: >15 000 元以上	—	-0.958***	-0.858***	-0.903	-0.993***
出行特征属性	私家车拥有数量:1 辆	—	0.699***	0.692***	0.861***	0.861***
	私家车拥有数量:2 辆及以上	—	0.710	0.690	0.844***	0.845***
	家庭成员数量:2 人	—	-0.449***	-0.424***	-0.424***	-0.425**
	家庭成员数量:3 人及以上	—	-0.534***	-0.505	-0.535***	-0.535***
	出行目的:休闲、娱乐、购物	—	-0.150***	-0.126***	-0.423***	-0.423**
	出行目的:就医	—	-0.403***	-0.372***	-0.404***	-0.403***
出行特征属性	出行目的:商务出行/业务出行	—	-0.136	-0.092**	-0.087*	-0.086
	出行目的:其他	—	0.281***	0.313	0.297	0.298
	出行时耗: >15~30 min	—	-0.291***	-0.313***	-0.294***	-0.293***
	出行时耗: >30~45 min	—	-0.414***	-0.427***	-0.381***	-0.380***
	出行时耗: >45~60 min	—	-0.479***	-0.501***	-0.474***	-0.471***
	出行时耗: >1~1.5 h	—	-0.600***	-0.613***	-0.529***	-0.528***
	出行时耗:超过 1.5 h	—	-0.617***	-0.631***	-0.597***	-0.596***
	当前出行方式:定线定站公交	—	-0.626***	-0.607***	-0.550***	-0.549***
	当前出行方式:地铁	—	-0.528***	-0.499***	-0.467***	-0.465***
	当前出行方式:出租车/网约车	—	-0.532***	-0.509***	-0.449***	-0.448***
	当前出行方式:自行车/电动自行车	—	-0.492***	-0.478***	-0.456***	-0.454***
	当前出行方式满意度	—	0.082***	0.068***	0.006*	0.005

表4(续)

类别	解释变量	模型标定值				
		M1	M2	M3	M4	M5
出行体验属性	类 DRT 服务出行经历:体验过一两次	—	0.302***	0.286***	0.278***	-0.278***
	类 DRT 服务出行经历:体验过几次	—	0.474***	0.437	0.450***	-0.450***
	类 DRT 服务出行经历:经常使用	—	0.979***	0.989***	0.960***	-0.957***
	DRT 体验意愿	—	0.049**	0.064***	0.012*	-0.011
场景属性	目的场景:上下班/上下学	—	—	-0.409***	-0.412***	0.412***
	目的场景:休闲、娱乐、购物	—	—	-0.293***	-0.295***	0.295***
	目的场景:就医	—	—	-0.005*	-0.005*	-0.005
	不同距离场景:5 km	—	—	-0.297***	-0.267***	0.257***
	不同距离场景:10 km	—	—	-0.206***	-0.193***	0.186***
	携带重物	—	—	-0.245***	-0.219***	-0.220***
感知属性	绩效期望	—	—	—	0.102***	0.103*
	社群影响	—	—	—	0.067**	0.066
	努力期望	—	—	—	-0.254***	-0.253***
	服务条件	—	—	—	0.164***	0.164***
	享乐动机	—	—	—	0.102**	0.102**
	能力	—	—	—	0.042*	0.042
	感知价值	—	—	—	0.114***	0.114**
	行为意向	—	—	—	0.236***	0.236***
拟合指标	$L(0)$	-34 515.8	-34 515.8	-34 515.8	-34 515.8	-24 160.9
	$L(\hat{\theta})$	-21 869.600	-21 391.000	-21 314.700	-21 258.230	-21 257.039
	待标定参数数量	8	47	53	61	61
	ρ^2	0.366	0.379	0.381	0.382	0.118
	AIC	43 755.204	42 876.350	42 735.385	42 638.460	42 642.078
	BIC	43 816.137	43 234.330	43 139.062	43 103.073	43 100.691

注:***表示 $P < 0.01$, **表示 $0.01 \leq P < 0.05$, *表示 $0.05 \leq P < 0.1$ 。

根据关宏志^[25]、Mcfadden^[28]的研究,在实践中拟合优度比 ρ^2 达到0.2~0.4之间时模型拟合精度较高。可以看到,模型M1~M4的拟合优度比依次增高,且均大于0.2,拟合效果均较好。考虑个人属性将有效提升模型拟合效果,且考虑场景变量、感知变量等对模型拟合效果具有进一步改善效果。此外,考虑损失规避心理后模型的拟合优度比 ρ^2 从0.118提升至0.382,提升超过0.2。这表明所提出模型拟合效果显著提升,更好刻画出行者真实出行选择。以M4模型进行后续参数解读。

相比于男性而言,女性更倾向于选择DRT服务。年龄在25岁及以上、本专科教育水平及以上、月均可支配收入在1000元及以上、且具有2人及以上家庭的出行者均更对DRT服务选择呈现积极的影响,且60岁及以上出行者群体具有最为显著的意愿。随着出行时耗的增加,出行者选择DRT服务的意愿逐渐加强。这主要是由于在时耗较长的出行

中往往无法直达而需要多次换乘,DRT服务提供的个性化出行则具有直达、无需换乘的服务优势。此外,所有依赖传统方式的出行群体均具有普遍的DRT服务出行意愿,且以定线定站公交出行群体的选择倾向最为显著。值得注意的是,当前出行方式满意度估算系数符号为正,即出行者对当前出行方式越满意,选择DRT服务的倾向越小。这也与前述建模过程中考虑的“损失规避心理”具有密切相关性。当出行者对于当前方式较为满意且无动机促使其改变出行方式时,会对因未知而可能引发的后悔进行规避以保持当前出行选择。因此,尽管DRT服务在融入过程中对各方式客流均具有一定的吸引作用,但考虑出行者的心理变化以制定针对性运营策略也至关重要。

此外,方式的所有服务水平变量标定结果均在95%置信区间内显著,表明模型中考虑的各服务水平变量均对出行选择行为产生负向影响。当费用、

总时间、到达/离开站点时间增加时,出行者选择倾向下降。同时,当绕行时间增加时,出行者选择 DRT 服务的可能性变小。当绕行时间增加一倍时,出行者选择 DRT 的概率为选择定线定站公交概率的 $\exp(-0.557) = 0.57$ 倍。

为进一步验证所提出模型合理性,并以现实角度剖析各服务水平的时间价值,引入边际替代率 (marginal rate of substitution, MRS) 进行计算见表 5。

表 5 各服务水平的边际替代率

Tab. 5 Equivalent cost coefficients of service variables

模型	费用 MRS/元	总出行时间 MRS/元	到达/离开站点时间 MRS/元	DRT 服务绕行时间 MRS/元
M4	1.00	60.97	131.79	38.64
M5	1.00	60.00	420.00	8.18

4 方式选择影响分析

所构建模型能够应用于差异化 DRT 服务运营策略下的出行方式选择分析,进而为 DRT 潜在出行需求测算提供支持。由于中国目前尚未形成完善的 DRT 运营策略,故选取票价与绕行时间因素,基于所构建模型探讨相关因素对于包含 DRT 的方式选择概率影响及其变化。值得注意的是,方式选择概率并不等同于调查样本的出行结构。

在 10 km 以内距离的出行场景下,保持其余交通方式属性相对稳定,且 DRT 除票价外的方式属性与既有定线定站公交方式接近情况下,票价变化对方式选择概率的影响如图 4 所示。随着票价的上升,出行者选择 DRT 服务的概率显著下降。当 DRT 服务票价达到 10 元左右时,DRT 选择概率与私家车选择概率的曲线出现交点,DRT 服务的出行吸引力显著降低,即在该票价下 DRT 服务对于出行者由非绿色交通方式转向绿色出行方式的促进作用消失。当票价达到 20 元时,DRT 与定线定站公交的选择概率曲线相交,且定线定站公交的选择概率超过 DRT 选择概率,出行者愿意牺牲 DRT 服务所带来的出行便利而选择定线定站公交,定线定站公交已具有完全替代 DRT 服务的潜力。

在 10 km 以内距离的出行场景下,保持其余交通方式属性相对稳定,且 DRT 方式属性与既有定线定站公交方式接近情况下,绕行时间变化对方式选择概率的影响如图 5 所示。绕行时间与 DRT 出行选择概率之间具有负向作用。当绕行时间超过 15 min 时,存在可观比例的 DRT 服务出行者转向私家车出行。随着绕行时间继续增加至 18 min,定线定站公交相比于此时的 DRT 服务更具出行吸引力。此外,由前述调查结果可知,近 90% 的出行者出行

尽管 M4 与 M5 模型中总出行时间 MRS 均与北京市基本小时工资相符,但基于 M5 模型的到达/离开站点时间与绕行时间 MRS 与现实差别较大。例如,绕行时间 MRS 仅为总出行时间 MRS 的 0.13 倍,这表明绕行时间对出行者感知 DRT 方式效用影响较小且不看重绕行时间,与现实相悖。因此,相比于 MNL 模型,在面向 DRT 进行方式选择建模时考虑损失规避心理更为贴合现实。

时耗集中在 60 min 以内。因此,在 DRT 服务路线规划时需尽可能实现绕行时间不超过总出行时间的 1/4。

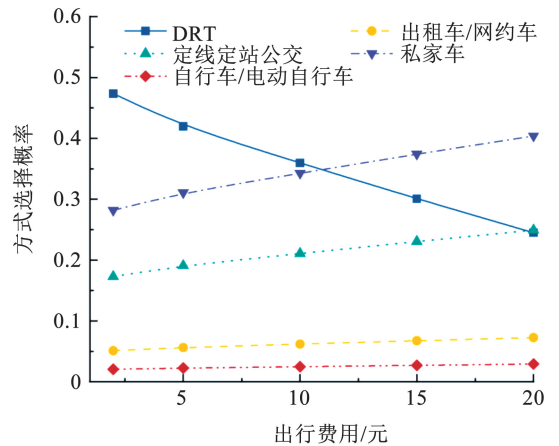


图 4 票价对方式选择概率影响

Fig. 4 The impact of fare on the probability of mode choice

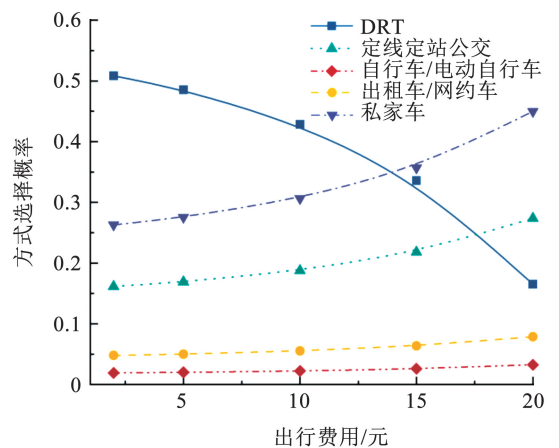


图 5 绕行时间对方式选择概率影响

Fig. 5 The impact of detour time on the probability of mode choice

5 结 论

立足 DRT 理念尚未在中国成熟实践且社会公众对此技术落地应用存在的陌生感现状,本文考虑出行者应对陌生出行方式时存在的损失规避心理,围绕包含 DRT 的出行选择行为展开研究,主要结论如下:

1) 提出考虑损失规避心理的基于 HUR 模型的出行选择行为模型。相比于传统 MNL 模型,所提出模型拟合优度比提升超过 0.2,拟合效果显著提升,且标定获得的总出行时间、到达/离开站点时间与绕行时间 MRS 更为贴合现实。考虑损失规避心理进行出行选择行为建模有助于深入理解复合应用场景下 DRT 服务选择偏好。

2) 女性、年龄在 25 岁及以上、本专科教育水平及以上、月均可支配收入在 1 000 元及以上、具有 2 人及以上家庭的出行者对选择 DRT 服务具有普遍的倾向性。其中,60 岁及以上的出行者群体具有最为显著的选择意愿。

3) 票价与绕行时间上升均会导致出行者选择 DRT 服务的概率显著下降。在 10 km 以内距离的出行场景下,DRT 服务票价不应超过 10 元以充分发挥其对于绿色出行比例的助力作用。此外,因接驳相近起讫点出行者而引发的绕行时间不宜超过总出行时间的 1/4 以保障高质量 DRT 服务。

参 考 文 献

- [1]寇伟彬,陈旭梅. 面向城市布局形态的公交线网设计及其发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 1
KOU Weribin, CHEN Xumei. Transit network design based on the city layout and its development[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 1
- [2]美国交通运输研究委员会. 公共交通通行能力和服务质量手册[M]. 2 版. 杨晓光,滕靖,等译. 北京:中国建筑工业出版社, 2009: 29
Transportation Research Board. Transit capacity and quality of service manual[M]. 2nd ed. YANG Xiaoguang, TENG Jing, et al, translate. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 29
- [3]DAGANZO C F. Checkpoint dial-a-ride systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1984, 18(4/5): 315
- [4]DESSOUKY M, ORDÓÑEZ F, QUADRIFOGLIO L. Productivity and cost-effectiveness of demand responsive transit systems[M]. Berkeley: California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, 2005
- [5]QUADRIFOGLIO L, HALL R W, DESSOUKY M M. Performance and design of mobility allowance shuttle transit services: bounds on the maximum longitudinal velocity[J]. Transportation Science, 2006, 40(3): 351
- [6]QIU F, LI W, HAGHANI A. An exploration of the demand limit for

- flex-route as feeder transit services: a case study in Salt Lake City[J]. Public Transport, 2015, 7: 259
- [7]郑汉,张星臣,王志美. 混合车型需求响应公交服务定制问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 157
ZHENG Han, ZHANG Xingchen, WANG Zhimei. Design of demand-responsive service by mixed-type vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 157. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2018.02.024
- [8]FINGER M, AUDOUIN M. The governance of smart transportation systems[M]. Beilin: Springer, 2019: 1
- [9]SHARIF A, ZEE J, WAGENVOORT M. Choice-driven service network design for an integrated fixed line and demand responsive mobility system[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 166: 557
- [10]KUIJK R, CORREIA G, OORT N, et al. Preferences for first and last mile shared mobility between stops and activity locations: a case study of local public transport users in Utrecht, the Netherlands[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 166: 285
- [11]黄颀昊. 基于出行链的骑行换乘公共交通研究[D]. 北京:清华大学, 2022
HUANG Yonghao. Research on bike and ride mode involved in trip chains[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022
- [12]ELLSBERG D. Risk, ambiguity, and the savage axioms[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1961, 75(4): 643
- [13]王晓玉,王立晓,左志. 后悔理论及其在出行中的应用研究综述[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(2): 231
WANG Xiaoyu, WANG Lixiao, ZUO Zhi. Review of regret theory and the application in travel research[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(2): 231
- [14]CHORUS C G, ARENTZE T A, TIMMERMANS H J P. A random regret-minimization model of travel choice[J]. Transportation Research Part B: Methodologica, 2008, 42(1): 1
- [15]CHORUS C G. A new model of random regret minimization[J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2010, 10(2): 181
- [16]KIM J, RASOULI S, TIMMERMANS H. Satisfaction and uncertainty in car-sharing decisions: an integration of hybrid choice and random regret-based models[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 95: 13
- [17]KEYA N, ANOWAR S, ELURU N. Freight mode choice: a regret minimization and utility maximization based hybrid model[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(9): 107
- [18]何保红,王炜,陈峻. 城市 PR 出行者选择行为模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 243
HE Baohong, WANG Wei, CHEN Jun. A choice model of traveler preference for P&R facilities[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 243
- [19]陈亮,冯柳,李巧茹. 考虑在车感知价值的公交发车间隔计算模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 150