

分时票价下 I 型大城市地铁节假日乘客 出行时间选择偏好

杨静, 张玉清, 郭榕洁

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为探究分时票价诱导策略能否引入 I 型大城市地铁运营中用以缓解节假日带来的车站客流严重拥挤, 以南昌地铁受访者调查数据为代表分析 I 型大城市地铁乘客出行时间选择行为。【方法】采用 SP 调查法, 设计场景对受访者在出行时间改变长度、票价与拥挤水平三种方案变量影响下的出行时间选择偏好进行数据收集, 分别用条件 logit 模型和混合 logit 模型对效用函数的变量系数进行估计。【结果】结果表明, 出行时间改变长度对出行时间选择行为的影响显著且存在负效用, 票价水平对出行时间选择行为的影响显著且存在正效用。调查样本无法体现拥挤水平对出行时间选择行为的显著影响。票价较于出行时间改变长度、拥挤水平对出行时间选择行为的影响程度更大, 受访者整体更愿意选择高峰前时段出发。年龄 <35 岁的群体相对于其它年龄组更愿意选择推迟出发, 月收入 <5000 元的群体相对于月收入较高的群体更愿意改变出行时间, 乘坐时间在 16-30 分钟的受访者相对于其他群体更愿意改变出行时间。【结论】因此根据结论科学合理地设计时段票价用于缓解 I 型大城市城市节假日地铁车站严重拥挤是可行的。

关键词: 地铁; 节假日; 分时票价; logit 模型

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

The Travel Time Preference of Metro Passengers on Holidays in Type I Metropolitan Metro under Time-dependent Fare

Yang Jing, Zhang Yuqing, Guo Rongjie

(College of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore whether time-dependent fare strategy can be introduced into the metro operation of Type I big cities to alleviate the severe passenger flow congestion brought by holidays, the survey data of Nanchang metro respondents is used to analyze the travel time choice behavior of subway passengers in Type I big cities. 【Method】 SP survey method was used to collect data on respondents' travel time choice preferences under the influence of three scheme variables: travel time change, fare and congestion level. Conditional logit model and mixed logit model were used to estimate the variable coefficients of utility function. 【Result】 The results show that the change length of travel time has a significant and negative effect on travel time choice behavior, and the fare level has a significant and positive effect on travel time choice behavior. The survey sample could not reflect the significant impact of congestion level on travel time choice behavior. Compared with the change length of travel time and the congestion level, the fare has a greater impact on the travel time choice behavior, and the respondents are more willing to choose the pre-peak period. Compared with other age groups, the group <35 years old is

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ210654)

more willing to delay departure, the group with a monthly income <5000 yuan is more willing to

change the travel time than the group with a higher monthly income, and the respondents with a travel time of 16-30 minutes are more willing to change the travel time than other groups.

【Conclusion】 Therefore, according to the conclusion, it is feasible to design the time fare scientifically and reasonably to alleviate the severe congestion of metro stations on holidays in Type I big cities.

Key words: The subway; Holidays; Time-dependent fare; Logit

【研究意义】城市轨道交通系统以大容量、准点率高、碳排放少等优势，在缓解城市交通拥挤、节能减排中的作用日益显著^[1]。根据国务院《关于调整城市规模划分标准的通知》，城区常住人口 500 万以上的属于特大城市或超大城市，常住人口在 300 万至 500 万属于 I 型大城市，包含南昌、合肥、南宁等 14 个城市，目前 I 型大城市均已拥有成网的地铁系统。I 型大城市由于城区人口规模的相较于超大城市如北京、上海存在量级上的差距，地铁系统在平常日基本不会出现严重的站台拥挤情形。然而，随着近年 I 型大城市节假日活动的增加，尤其五一、十一、元旦等代表性节假日，以南昌、合肥、南宁等为代表的 I 型大城市日均客运量相较于平常日陡增，以南昌地铁为例，2024 年元旦日均客运量为 203.29 万人次，相较于平常日均 100.7 万人次足足翻了一倍，部分车站

如地铁大厦站、八一广场站、八一馆站及秋水广场站等在节假日高峰时段常常处于严重拥挤状态，迫使南昌地铁采用关闭车站进出口等客流控制手段防止大量客流涌入地铁造成安全隐患。如图 1，地铁大厦站工作日呈现早晚两个高峰，而节假日高峰出现在晚 20:00-22:00，且进站客流量剧增。这种节假日地铁客运量剧增导致部分车站严重拥挤的情况在合肥、南宁等 I 型大城市也普遍存在。因此有必要研究如何缓解 I 型大城市节假日地铁车站严重拥挤情况，提高地铁服务水平与安全水平。

【研究进展】缓解城市交通拥挤可采用交通需求管理（Transportation Demand Management, TDM）调整乘客时空需求分布，达到能量时空匹配。如车站客流控制^[2]、弹性工作制^[4]、票价诱导^[5]等策略。

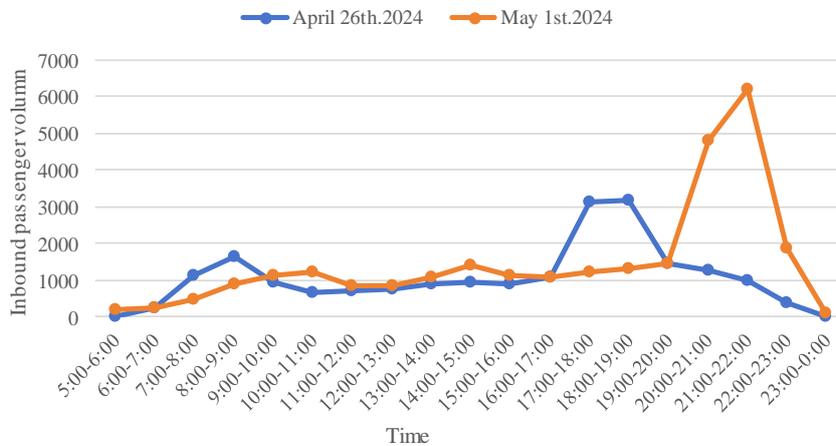


图 1 地铁大厦站工作日与节假日小时进站客流量

Fig.1 Inbound passenger flow on working days and holidays at Metro Building Station

其中分时票价 (Time-dependent fare) 作为一种票价诱导策略, 通过设计工作日出行高峰期与非高峰期的不同票价诱导乘客主动避开高峰期而选择非高峰期出行, 在国内外城市的地铁运营实践中应用较为广泛, 并取得一定成效^[6]。一些城市如北京^[7]、悉尼^[8]、香港^[9]、新加坡、纽约等城市采用“早鸟价”, 即在高峰期出现前乘坐地铁享受票价折扣甚至免费, 引导受访者提前出行。还有城市采用在高峰期提高票价, 取消特殊群体优惠, 引导乘客错峰出行, 如华盛顿、伦敦等城市。

交通选择行为相关研究表明, 选择行为与个人属性 (职业、收入、有无私家车等)^[10]、出行属性 (出行目的、时间限制等)^[12] 及交通方式的属性 (出行时间、出行费用、拥挤程度等)^[13] 有关。以多项 logit 模型^[15]、条件 logit 模型^[16]、巢式 logit 模型^[17]、混合 logit 模型^{[18][19]} 为代表的离散选择模型被广泛应用于选择行为的研究。Li 等通过 SP 调查受访者在北京地铁工作日票价折扣、车内拥挤度及出行时间节省的影响下对出行时间的选择行为, 用修正的混合 logit 模型拟合参数, 得出北京地铁受访者对地铁票价最明显, 其次是出行时间节省与出发时间改变长度^[12]。Huan 等设计 SP 调查问卷对北京地铁受访者在不同票价、拥堵度及出行时间影响下出行时间与交通方式选择行为进行调查, 并用巢式 logit 模型建模, 研究得出分时票价政策在早高峰时期的效果比晚高峰好^[20]。

针对票价制定问题, 姚恩建等基于 Pareto 最优理论, 以公共交通分担率和公共交通票务收入的双提升为目标, 构建变动需求下的北京通勤地铁票价折扣模型^[1]。Tawfik 和 Kamel 利用仿真的方法对加拿大温哥华地区的交通方式分时票价进行优化^[21]。Huan 等将时段划分为高峰期前、高峰期、高峰期后三个时段, 根据优化目标的侧重点与票价组合原则进行时段票价折扣优化设计^[20]。而 Guo 等将一天运营时间划分为若干个时段, 采用微观经济学模型以社会效益为最大化, 优化各时段的票价与列车供给能力^[23]。邹庆茹等建立以运力运量匹配度

最大化为目标的峰前折扣定价方案编制模型, 确定折扣车站、折扣比例及折扣时段^[24]。

【创新特色】以上研究所做调查或研究均以工作日为背景, 其通勤乘客所占比例较大, 相较于非通勤受访者对时间的要求更高, 试图利用票价使通勤乘客改变其原有出行时间习惯难度较大, 尤其在通勤客流巨大的城市工作日采用分时票价诱导的效果往往不够理想^[7]。以非通勤客流为主的节假日, 受访者出行目的多为休闲娱乐, 对出行时间限制要求不高, 通过低票价引导乘客向非高峰时期转移的难度更低。因此以 I 型大城市节假日地铁客流严重拥挤问题为导向, 研究将分时票价诱导策略引入用以诱导乘客非高峰期出行, 缓解拥挤并提高安全水平。**【关键问题】**以南昌地铁为 I 型大城市代表, 设计问卷对受访者在节假日期间南昌地铁票价影响下的出行时间选择行为进行数据搜集, 揭示受访者选择行为偏好, 为 I 型大城市缓解节假日地铁客流拥挤提供决策参考。

2 出行时间选择偏好调查

以南昌为 I 型大城市代表, 采用意向调查 (Stated Preference, SP)^[25] 收集节假日受访者在地铁票价影响下的出行时间选择偏好。问卷共分为两个部分, 一部分为个人属性部分, 采集受访者的性别、年龄、收入、出行时间、平均出行费用及出行目的等个人信息, 其中出行目的调查是由于节假日期间存在部分从事与休闲旅游相关的服务或工作人员, 是节假日地铁客流组成的一部分。第二部分为地铁出行时间选项部分, 通过改变不同时段的票价与拥挤程度, 获取受访者出行时间的选择结果。此调查只考虑票价是否影响受访者的出行时间选择, 暂不考虑由于票价和拥挤带来的出行路径或交通方式改变。

在出行时间选项部分, 每个场景下假定三个出发时间选项, 分别为原定出发时间、提前 M 分钟出发、推后 N 分钟出发。每个出发时间选项下, 给出对应的票价水平与拥挤水平。根据已有研究^[7], 节假日居民出行时间灵活性较大, 相较于工作日通勤乘客通

过低票价诱导节假日乘客提前或推后 60 分钟出发都是可行的, 因此 N、M 最大可取 60 分钟。根据国内外地铁已采用的工作日分时票价政策, 高峰与非高峰票价比最高可达 1.67^[6], 同时结合南昌地铁为了缓解节假日拥挤采用的晚上 10 点后地铁免票政策, 可见节假日地铁非高峰期票价水平可设定得比工作日更低, 同时调查采用阶梯下降的方

式设置票价水平, 即时间离高峰期越远, 票价水平越低。此外, 便于受访者对拥挤水平有直观感知, 调查采用排队等待上车时间表述拥挤水平, 南昌地铁节假日高峰时期乘客排队等待上车时间一般为 30 分钟。表 1 总结了调查场景中涉及的出发时间变化情况、票价水平与拥挤水平的取值。

表 1 调查中的选项与因素水平设计值

Tab.1 Scheme factor level design

Departure time	Fare level	Waiting time for boarding
60min earlier/ later	100% off	0min
40min earlier/ later	80% off	5min
20min earlier/ later	60% off	10min
Usual time	Original fare	30min

按照表 1 中不同因素水平组合出 12 种实验场景, 要求受访者在每个场景下进行三种出行时间行为选择: 选项 1 (提前出发)、选项 2 (原定出发时间)、选项 3 (推迟出发)。

表 2 展示其中三种场景示例。调查时间为 2024 年元旦, 地点为南昌地铁节假日客流较大的车站, 采用无差别形式发放问卷。共得到有效方案选择数据 1592 条。

表 2 方案场景组合示例

Tab.2 Solution scenario combination examples

Examples of scenarios		Fare level	Waiting time for boarding (min)
一	Choice1	20min earlier	60% off
	Choice2	Usual time	Original fare
	Choice3	40min later	80% off
二	Choice1	40min earlier	80% off
	Choice2	Usual time	Original fare
	Choice3	60min later	100% off
三	Choice1	60min earlier	100% off
	Choice2	Usual time	Original fare
	Choice3	20min later	60% off

图 2 展示了个人统计信息, 从性别来看, 节假日男女出行比例分别为 51.62% 和 48.38%, 与南昌市 2022 年人口统计数据中比例基本一致。节假日 35 岁及以下的出行者占近 80%。受访者工资收入水平中, 少于 5000 元的占 72.95%。乘坐地铁在 16~30 分钟的居多, 约占一般比例, 时间过长如大于

50 分钟的出行时间所占比例很少, 呈正态分布, 这与南昌地铁线路长度有关。节假日受访者出行目的以休闲娱乐为主, 约占 70%, 与节假日地铁高峰客流中休闲旅游类占主体的基本情况相符。出行成本大多数需要花费 2~4 元, 占 61.45%。

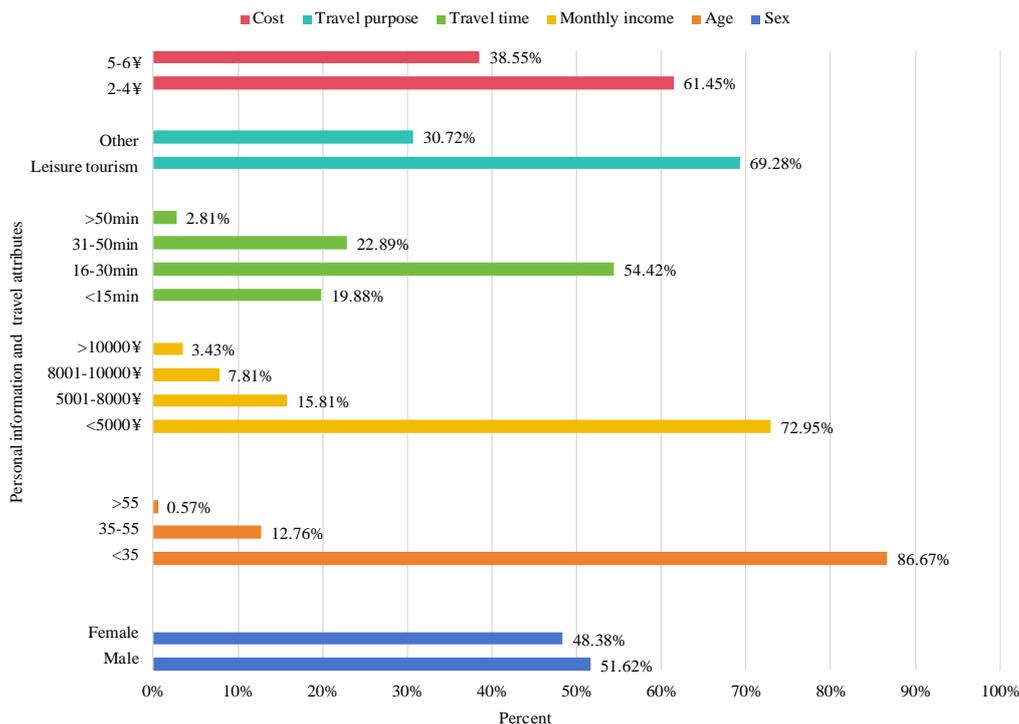


图 2 个人信息与出行特征统计

Fig.2 Socioeconomic and trip characteristics.

图 3 展示了受访者出发时间选项的统计结果,超过一半的受访者选择提前出发,而选择原定时间出发与推迟出发的受访者比例大致相当,略超过 20%。可见,在节假日在低票价诱导下,如果要改变出行时间,相对于推迟出发,人们更愿意选择提前出发。在出行时间变化的影响下,不改变出行时间的受访者仍然是最多的。如图 4,由于改变出行时间使得受访者出行时间成本提高,因此选择原定时间出发的受访者最多,为 371 项。对于票价水平的影响,降低 60%及以上的票价属于可以接受的范围,同时对应较少的出行时间改变,

因此不论对于提前出发还是推迟出发降低 60%的票价均吸引了较多的受访者。

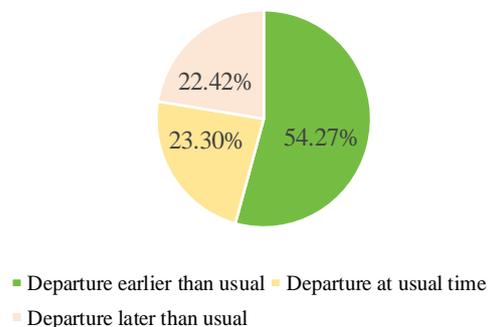


图 3 出发时间选项统计

Fig.3 Distribution of departure time choice.

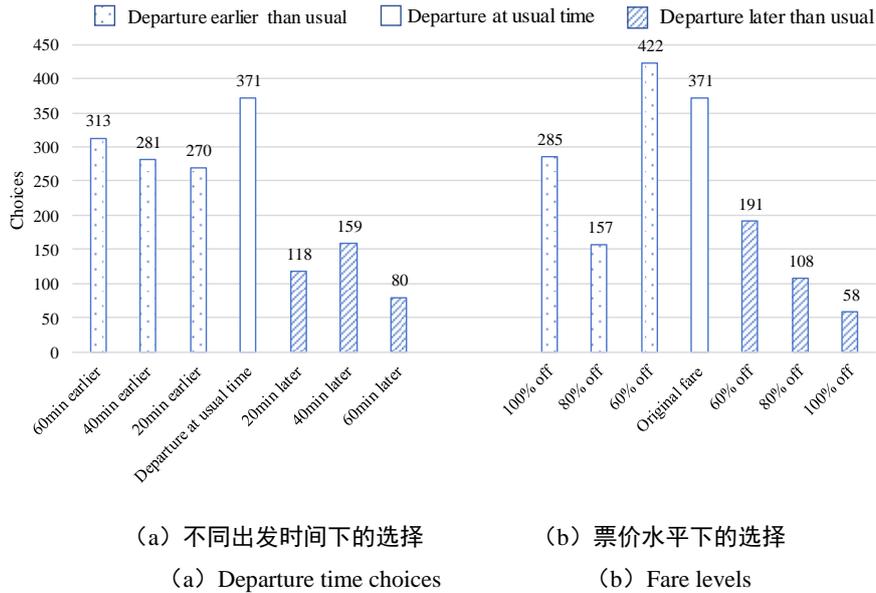


图4 不同出发时间与票价水平下的选项分布

Fig.4 Distribution of choices for various departure time changes and fare levels.

3 建模与分析

当只考虑方案变量时,一般选择条件logit模型建模。当决策者*i*面临*t*场景中的*j*个选择对象时,其对某种选择方案的偏好可以用被选择对象的效用值 U_{ij} 表示,随机效用函数可分为可观测部分 V_{ij} 和不可观测的随机误差部分 ε_{ij} 。

$$U_{ijt} = V_{ijt} + \varepsilon_{ijt} \quad (1)$$

其中,可观测的部分 V_{ijt} 包括选择方案属性变量 X_{ij} 和决策者属性变量 X_{ik} 。当可观测的部分 V_{ijt} 只包含与方案有关的变量 X_{ij} 时,为条件logit模型。若同时包含选择方案属性变量 X_{ij} 和决策者属性变量 X_{ik} ,则为混合logit模型。

3.1 条件logit模型

本文模型中涉及的方案变量 X_{ij} 为出发时间改变长度 C_{ij} ,票价水平 D_{ij} 与排队等待时间 W_{ij} ,则效用函数可观测部分可表达为

$$V_{ijt} = \beta_{iC} C_{ijt} + \beta_{iD} D_{ijt} + \beta_{iW} W_{ijt} + a_{ASC_choicej} \quad (2)$$

式中, β_{iC} , β_{iD} , β_{iW} 为参数系数, $a_{ASC_choicej}$ 为选项*j*的常数项。条件logit模型概率表示式为

$$P_{ijt} = \frac{e^{V_{ijt}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{ijt}}} \quad (3)$$

式中: P_{ijt} 为受访者*i*在*t*场景中选择*j*的概率, J 为三种选择方案集合。条件logit模型通常用最大似然估计法进行系数估计,以选项2(choice2)为基础,估计模型对数似然值为 $\text{Log likelihood} = -1547.1492$,伪 R^2 (Pseudo R^2)=0.1137,模型估计结果见表3。

表 3 条件 logit 模型系数估计

Tab.3 Regression results of conditional Logit model

Variable parameter	Coefficient	Standard deviation	Odds ratio	Z-value	P-value	95% confidence interval
β_{iC}	-0.054	0.015	0.947	-3.54	0.000	[-0.083,-0.023]
β_{iD}	2.777	0.350	16.079	7.92	0.000	[2.080, 3.465]
β_{iW}	-0.098	0.061	0.907	-1.60	0.110	[-0.218,0.022]
$a_{ASC_choice1}$	-1.388	0.912	0.249	-1.52	0.128	[-3.176,0.399]
$a_{ASC_choice3}$	-2.213	0.898	0.109	-2.46	0.014	[-3.975,-0.452]

出发时间改变长度的系数估计值为 -0.054 且显著 (P 值<0.01), 即出发时间改变对于受访者出行时间选择呈负效应, 当要求受访者改变出发时间长度越长, 受访者越不容易选择选项 1 和选项 3, 也就是提前或推迟出发。票价水平系数估计值为 2.777 且显著 (P 值<0.01), 表明其它时间段票价越低, 受访者选择改变出发时间的概率越大。这两个因素对受访者选择行为影响与实际

情况相符。排队等待时间系数估计值为 -0.098, 但不显著 (P 值>0.01), 可以认为此次调查无法体现排队等待时间对受访者出行时间选择存在显著的影响。去掉排队等待时间这一因素后, 重新进行参数估计, 得到对数似然值 Log likelihood = -1548.5693, 伪 R² (Pseudo R²) = 0.1129, 模型估计结果见表 4。

表 4 去掉不显著变量后的条件 logit 模型系数估计

Tab.4 Coefficient estimation of conditional logit model after removing insignificant variables

Variable parameter	Coefficient	Standard deviation	Odds ratio	Z-value	P-value	95% confidence interval
β_{iC}	-0.030	0.004	0.970	-8.54	0.000	[-0.037,-0.023]
β_{iD}	2.915	0.342	18.462	8.53	0.000	[2.245,3.585]
$a_{ASC_choice1}$	0.021	0.211	1.020	0.10	0.922	[-0.393,0.435]
$a_{ASC_choice3}$	-0.826	0.202	0.437	-4.08	0.000	[-1.222,0.435]

由表 4 可知, 出发时间改变时长总体均值系数为负且显著, 票价总体均值为正且显著, 与表 3 参数估计符号一致。从胜率 (odds ratio) 来看, 出发时间改变时长每增加 1 个单位, 受访者选择选项 1 (提前出发) 或选项 3 (推迟出发) 的概率将减少为原来的 0.970, 其它时间段票价水平每降低 1 个单位, 受访者选择选项 1 (提前出发) 或选项

3 (推迟出发) 的概率将增加至原来的 18.462。选项 1 的常数项 $a_{ASC_choice1}$ 均值 0.021 大于选项 3 的常数项 $a_{ASC_choice3}$ 均值 -0.826, 表明受访者选择选项 1 (提前出发) 的概率大于选项 3 (推迟出发), 在同样的出发时间改变长度与票价降低水平下, 受访者更倾向于提前出发。

3.2 混合 logit 模型

为进一步探究受访者个人属性对选择行为的影响,采用混合 logit 模型建模如下,

$$V_{ijt} = \lambda_{i1}S_i + \lambda_{i2}A_i + \lambda_{i3}I_i + \lambda_{i4}T_i + \lambda_{i5}R_i + \lambda_{i6}O_i + \beta_{iC}C_{ijt} + \beta_{iD}D_{ijt} + \beta_{iW}W_{ijt} + a_{ASC} \quad (4)$$

式中, λ_{i1} , λ_{i2} , λ_{i3} , λ_{i4} , λ_{i5} , λ_{i6} 分别为性别 S , 年龄 A , 收入 I , 乘坐时间 T ,

出行目的 R , 出行费用 O 的待估参数, $a_{ASC_choicej}$ 为选项 j 的常数项。经过几轮参数估计, 去除掉不显著的变量后, 模型估计结果见表 5。

表 5 混合 logit 模型系数估计

Tab.5 Coefficient estimation of combined logit model

Variable parameter	Coefficient	Standard deviation	Odds ratio	Z-value	P-value	95% confidence interval
	β_{iC}	-0.032	0.004	-8.89	0.000***	[-0.039,-0.025]
	β_{iD}	2.985	0.348	8.56	0.000***	[2.302,3.668]
	_Iage_1(Age <35)	-0.579	0.211	-2.75	0.006***	[-0.993,-0.166]
Departure earlier (Choice1)	_Iincome_1(Income <5000¥)	0.911	0.174	5.23	0.000***	[0.569,1.253]
	_Itt_2 (Travel time 16-30min)	0.608	0.130	4.65	0.000***	[0.351,0.864]
	$a_{ASC_choice1}$	-0.130	0.280	1.02	0.307	[-0.296, 0.943]
	_Iage_1(Age <35)	0.323	0.316	1.02	0.307	[-0.296,0.943]
Departure later (Choice3)	_Iincome_1 (Income <5000¥)	0.644	0.220	2.92	0.004***	[0.211,1.070]
	_Itt_2(Travel time 16-30min)	0.572	0.156	3.66	0.000***	[0.265, 0.878]
	$a_{ASC_choice3}$	-2.470	.355	-6.94	0.000***	[-3.167, -1.772]

***The coefficients are the ones that are significant at the 99% confidence level.

**The coefficients are the ones that are significant at the 95% confidence level.

*The coefficients are the ones that are significant at the 90% confidence level.

对于方案变量中的出发时间改变长度与票价水平, 混合 logit 模型参数估计结果与条件 logit 模型的影响趋势一致, 分别呈现显著的负效用与正效用, 且票价水平 β_{iD} 的影响比出发时间改变长度 β_{iC} 的影响更大, 表明受访者愿意改变出发时间以换取降低的票价成本的意愿更大。对于个人属性变量而言, 年龄 <35 岁的群体相对于其它年龄组出发时间改变越长, 越不容易选择提前出发, 更愿意选择推迟出发。月收入 <5000 元的群体相对于月收入较高的群体更愿意改变出行时间, 原因在于票价降低水平对于较低收入群体而言更具有吸引力。乘坐时间在

16-30 分钟的受访者相对于其他群体更愿意改变出行时间, 除了与南昌地铁长度有关之外, 还有相对于乘坐时间较短 (<15 分钟) 的群体, 前者通过节省票价换取一定的出发时间变更对其的影响更小。选项 1 (提前出发) 的常数项均值 (-0.130) 大于选项 3 (推迟出发) 的均值 (-2.470), 表明当保持各变量不变时, 受访者最有可能选择选项 1 (提前出发)。

4 结论

利用 SP 调查法对以南昌地铁为代表的 I 型大城市节假日乘客在出发时间改变时长、票价水平与拥挤度水平影响下的出发时

间选择偏好进行搜集,分别用条件 logit 模型和混合 logit 模型进行参数估计,得出以下结论:

1) 当只考虑方案变量时,条件 logit 模型能较好的拟合节假日受访者出行时间选择行为。其中出发时间改变长度与票价水平对受访者选择行为影响均显著。出发时间改变长度呈负效用,即要求受访者改变的出行时间越大,受访者越不容易选择改变原定出发时间。而票价水平对选择行为影响程正效用,即非高峰时间的票价降低比例越大,越容易吸引受访者向非高峰期转移。但调查数据无法反应拥挤水平对受访者选择行为的显著影响,可能在于南昌地铁平时出现严重拥挤的情形较少,对于节假日出现的严重拥挤人们感知不够明显。

2) 进一步结合个人属性进行混合 logit 模型拟合,拟合效果较好。出发时间改变长度、票价水平的影响与条件 logit 模型中的趋势保持一致。对于个人属性而言,年龄<35 岁的群体相对于其它年龄组更愿意选择推迟出发。月收入<5000 元的群体相对于月收入较高的群体更愿意改变出行时间。乘坐时间在 16-30 分钟的受访者相对于其他群体更愿意改变出行时间。

3) 票价水平相较于出发时间改变长度、拥挤水平对 I 型大城市乘客出行时间的影响更为敏感,因此可通过 app 及时发送节假日当天的时段票价优惠信息供乘客提前规划节假日出行时间安排。除此之外,通过 app 获取乘客的年龄与出行时间,针对年龄<35 岁的群体与乘坐时间在 16-30 分钟的乘客,可以单独给予相较于其他乘客更大票价优惠。

4) 整体而言,在相同的出发时间改变长度与票价水平影响下,受访者更倾向于选择提前出发。因此可适当多降低高峰前的非高峰期票价水平,如票价水平可降低至少 50%,诱导更多乘客向高峰前出行转移。同时可将低票价水平时间延长至 60 分钟及以上,以满足节假日乘客出发时间选择的灵活性。

5) I 型大城市除通过降低非高峰期票价以外,也可以采用组合票价(高峰期提高票

价、非高峰期降低票价)提高非高峰期与高峰期的票价水平差距诱导人们节假日错峰出行。

研究存在一定局限性,首先鉴于地铁决策者在初步实施分时票价策略时的易操作性,研究未区分外地游客与本地游客。两类游客对票价的敏感性可能存在差异,在下一步制定精细化客流调控政策时需区分两类游客。其次,问卷发放地点集中在客流量较大的地铁站,未对远离市中心的地铁站进行调查,无法反应不同类型车站乘客在节假日分时票价影响下的选择行为偏好。研究结论是否适用于远离市中心车站的乘客亦待进一步讨论。

参考文献:

- [1] 姚恩建,季钰岷.基于出行行为分析的地铁通勤票价折扣研究[J].北京交通大学学报,2023,47(6):1-9.
YAO E J,JI Y M. Fare discount study for urban rail transit commuting based on travel behavior analysis [J]. Journal of beijing jiaotong university.2023,47(6):1-9.
- [2] Shi, J J, Yang L X, Yang J, Gao Z Y, Service-oriented train timetabling with collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: An integer linear optimization approach. Transportation Research Part B: Methodological 2018.110, 26-59.
- [3] 石俊刚,杨静,杨立兴.以安全为导向的地铁高峰时段多车站客流协同控制模型[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(01):125-131.
Shi, J J, Yang, J, Yang, L X, Safety-oriented Cooperative Passenger Flow Control Model in Peak Hours for a Metro Line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology.2019, 19 (01): 125-131.
- [4] 陈肖,谷人旭.企业员工通勤活动的时间弹性和空间弹性对出发时间选择的影响——以上海市闵行区为例[J].世界地理研究,2020,29(3):579-587.
CHEN X, GU R X.The impact of commuting

- time-space flexibility of employees on the choice of departure time—Evidence from Minhang district of Shanghai[J]. *World Regional Studies*. 2020, 29(3): 579-587.
- [5] HALVORSEN, A., KOUTSOPOULOS, H.N., LAU, S., et al., Reducing subway crowding: Analysis of an off-peak discount experiment in Hong Kong [J]. *Transport Research Record: Transport Research Board* 2544, 38–46.
- [6] 张晓晴. 城市轨道交通分时定价模型研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
ZHANG X Q. Study on the Time Differential Pricing Model of Urban Rail Transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 禹丹丹, 姚向明, 徐会杰等. 峰前折扣票价下轨道交通受访者出发时间弹性[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19 (05): 156-162.
YU D D, YAO X M, XU H J, et al. Departure Time Elasticities of Transit Travelers under Pre-peak Discount Price [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19 (05): 156-162.
- [8] HENN L., DOUGLAS N., SLOAN K. Surveying Sydney rail commuters' willingness to change travel time [C]. 34th Australasian Transport Research Forum (ATRF) Proceedings. 2011, 28 - 30 September.
- [9] GRAHAM, J., DANIEL H, RICHARD A, et al. Quantifying the Ex-Post Causal Impact of Differential Pricing on Commuter Trip Scheduling in Hong Kong [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 141: 16–34.
- [10] JYOTSNA S, GONÇALO H, BERT W et al., Change in departure time for a train trip to avoid crowding during the COVID-19 pandemic: A latent class study in the Netherlands [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 170 (2023) 103628.
- [11] CHENG, Y., Ye, X., FUJIYAMA, T., Identifying Crowding Impact on Departure Time Choice of Commuters in Urban Rail Transit [J]. *Advanced Transportation*. 2020, 1–16.
- [12] LI, H Y, LI, X., XU, X X, et al., Modeling departure time choice of metro passengers with a smart corrected mixed logit model - a case study in Beijing[J]. *Transport Policy*. 2018. 69, 106–121.
- [13] 梁安宁, 黄娜娜, 张兵等. 基于 NL 模型的昌九客运交通方式选择分析[J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37 (01): 54-60.
LIANG A N, HUANG N N, ZHANG B. et al., Analysis of passenger transportation mode selection in Changjiu based on NL model[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2020, 37 (01): 54-60.
- [14] 姬萱. 基于出行链的城际旅客交通方式选择行为研究[D]. 长安大学, 2023.
JI X. Research on Intercity Passenger Travel Mode Selection Based on Travel Chain [D]. Chang'an University. 2023.
- [15] 冯洋, 郑新夷, 杨艳群. 基于多元有序 Logit 模型的电动车骑行者行为危险度分析[J]. *交通工程*, 2023, 23 (02): 1-10+32.
FENG Y, ZHENG X Y, YANG Y Q. A study on the Risky Behaviors of Two Wheeled Electric Vehicles Riders Based on Multivariate Ordered Logistic Regression Model [J]. *Traffic engineering*. 2023, 23 (02): 1-10+32.
- [16] 王恒, 李枫, 江泽浩等. 地铁应急疏散时受访者决策行为偏好的量化方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50 (04): 571-579.
WANG H, LI F, JIANG Z H, et al., A Quantitative Method for Studying Passenger Decision-Making Preference in Subway Emergency Evacuation [J]. *Journal of tongji university (natural science)* 2022, 50 (04): 571-579.
- [17] 董黛悦, 郑炎, 熊志华等. 基于巢式 Logit 的大型赛事观赛人群组合出行决策行为建模[J]. *北京交通大学学报*, 2023.47(6) 1-11.
DONG D Y, ZHENG Y, XIONG Z H. Modeling the combined travel decision-making behavior of spectators attending large-scale events based on nested Logit model [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2023.47(6) 1-11.
- [18] 庄焱, 董春娇, 米雪玉等. 基于随机参数 Logit

- 的中小城市居民出行方式选择建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 1-10.
- ZHUANG Y, DONG C J, MI X Y, et al., Travel mode choice in small and media sized city based on Random parameters logit model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) 2022, 1-10.
- [19] 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, 19 (05): 108-113.
- LIU J R, HAO X N, Travel Mode Choice in City Based on Random Parameters Logit Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2019, 19 (05): 108-113.
- [20] NING H, STEPHANE H, Yao E J et al., Time-dependent pricing strategies for metro lines considering peak avoidance behavior of commuters[J]. Transportmetrica A: Transport Science. 18:3, 1420-1444.
- [21] Tawfik, N.S., From Fare Zones to Fair Zones: The Impact of Differentiated Transit Fares on Metro Vancouver Transit Riders. Master's Thesis. Simon Fraser University, 2014
- [22] Kamel, I., Shalaby, A., Abdulhai, B., A modelling platform for optimizing time-dependent transit fares in large-scale multimodal networks. Transp. Policy 2020, 92, 38-54.
- [23] Guo Q W, Sun Y S, Schonfeld P, et al. Time-dependent transit fare optimization with elastic and spatially distributed demand. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 148 (2021) 353-378.
- [24] 邹庆茹, 姚向明, 赵鹏. 城市轨道交通峰前折扣定价方案编制模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20 (02): 13-19.
- ZOU Q R, YAO X M, ZHAO P. Modelling Pre-peak Discount Price Plan for Urban Rail Transit [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2020, 20 (02): 13-19.
- [25] 张兵, 余凤君, 刘建荣等. 考虑心理变量的老年人错峰出行选择行为分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39 (05): 86-96.
- ZHANG B, YU F J, LIU J R. et al., Analysis on the Choice Behavior of the Elderly Off-Peak Travel Considering Psychological Factors[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39 (05): 86-96.
- [26] 马铭遥. 面向高峰拥挤的城市轨道交通分时定价策略研究[D]. 北京交通大学, 2021.
- MA M Y. Research on Time-sharing Pricing Strategy for Urban Rail Transit Facing Peak-hour Congestion [D]. Beijing Jiaotong University, 2021.



第一作者: 杨静 (1987-), 女, 博士研究生, 研究方向为交通运输系统优化。

E-mail: happyyangjing2023@outlook.com



通信作者: 张玉清 (1964—), 男, 教授, 博士, 硕士生/博士生导师, 研究方向为管理科学与工程、交通运输工程。

E-mail: zhangyuqingboshi@163.com。